



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με την
Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Σαμαρά Δαυϊδία

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με την
Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Σαμαρά Δαυϊδία

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2021



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Stability of Power Systems with the Integration of
Renewable Sources**

Diploma Thesis

Samara Davidia

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

July 2021

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Μπαργιώτας Δημήτριος**

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Παναπακίδης Ιωάννης**

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου Εργασίας, Δημήτριο Μπαργιώτα για την συνεργασία και την πολύτιμη καθοδήγησή του για την ολοκλήρωσή της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου για την απέραντη στήριξή τους και τους φίλους μου για την συμπαράσταση και τις ωραίες στιγμές που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

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. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. 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».

Η Δηλούσα

Σαμαρά Δαυϊδία

Περίληψη

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας στην σύγχρονη κοινωνία. Στο σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο ο κύριος στόχος είναι η συνεχής και η ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η περιβαλλοντική μόλυνση που απειλεί τον πλανήτη καθιστά αναγκαίες τις ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή ενέργειας. Η αιολική και ηλιακή ενέργεια αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μορφές ενέργειας σήμερα και η χρήση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Καθώς εδραιώνονται όλο και περισσότερο δημιουργούνται ζητήματα αξιοπιστίας και ευστάθειας. Σε αυτή την διπλωματική, αρχικά μελετάται πως μπορεί να επηρεάσει ένα βραχυκύκλωμα την ευστάθεια ενός συστήματος, όπου η ενέργεια παράγεται από γεννήτριες, μέσα από προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στο δίκτυο IEEE 24-ζυγών και με μελέτη των καμπυλών που χαρακτηρίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, ενσωματώνονται ανεμογεννήτριες στο δίκτυο των 24 ζυγών, ώστε να μελετηθεί αν ένα σύστημα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διατηρεί την ευστάθειά του μετά από ένα βραχυκύκλωμα και ελέγχεται η αξιοπιστία ενός τέτοιου συστήματος. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις είναι το PSS/E της Siemens.

Abstract

Electricity is the most widespread form of energy in modern society. In the modern electricity grid the main goal is the continuous and reliability supply of electricity. However, in recent years the environmental pollution that threatens the planet makes renewable sources necessary for energy production. Wind and solar are the most common forms of energy today and the use of wind turbines and photovoltaics to generate electricity has been growing rapidly in recent years. As they become more established, issues of reliability and stability arise. In this Thesis, it is initially studied how a short circuit can affect the stability of a system, where energy is generated by generators, through simulations that happen in the IEEE 24-bus system and by studying the curves that characterize an electrical system. Wind turbines are then integrated into the 24-bus system to study whether a system with renewable energy sources maintains its stability after a short circuit and the reliability of such a system is checked. The software used for the simulations is the PSS/E of Siemens.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xi
Abstract	xiii
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος σχημάτων	xix
Κατάλογος πινάκων	xxv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική εξέλιξη των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	1
1.2 Σύστημα ισχύος: Βασική δομή και λειτουργία	2
1.3 Έλεγχος συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	4
2 Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	7
2.1 Ανάλυση ροής φορτίου	7
2.1.1 Μέθοδος Gauss-Seidel	9
2.1.2 Μέθοδος Newton-Raphson	9
2.2 Βραχυκυκλώματα	10
2.2.1 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών	11
2.2.2 Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα	14
2.2.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα	15
2.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα	16
2.2.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη	17

2.3	Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
2.3.1	Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης	19
2.3.2	Μεταβατική ευστάθεια	20
2.3.3	Εξίσωση ταλάντωσης - Swing equation	21
2.3.4	Μέθοδοι μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας	24
2.3.5	Ανάλυση ευστάθειας μέσω προσομοίωσης	25
2.3.6	Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφαλμάτων	26
2.3.7	Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβατική ευστάθεια	27
3	Ανεμογεννήτριες	29
3.1	Αιολική ενέργεια	29
3.2	Τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανεμογεννητριών	31
3.2.1	Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα - HAWT	32
3.2.2	Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα - VAWT	33
3.3	Τύποι ανεμογεννητριών	34
3.3.1	Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής	35
3.3.2	Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση στρο- φείου	36
3.3.3	Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφο- δοσίας - DFIG	37
3.3.4	Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα - FCWT	39
4	Φωτοβολταϊκά συστήματα	41
4.1	Ηλιακή Ενέργεια	41
4.2	Χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων	42
4.3	MPPT - Maximum Power Point Tracker	44
4.4	Δυναμικό μοντέλο Φ/Β	46
5	Προσομοίωση	49
5.1	Στοιχεία δικτύου και περιγραφή μελέτης	49
5.2	Διαδικασία μελέτης μεταβατικής ευστάθειας	52
5.3	Προσομοίωση για τον υπολογισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης	53
5.4	A) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων στο δίκτυο 24 ζυγών	53

5.4.1	A1: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17	55
5.4.2	A2: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19	59
5.4.3	A3: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12	63
5.4.4	A4: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21	67
5.5	B) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων στο δίκτυο των 24 ζυγών με ενσωματωμένες ανεμογεννήτριες	71
5.5.1	B1: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17	73
5.5.2	B2: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19	76
5.5.3	B3: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12	80
5.5.4	B4: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21	84
5.6	Γ) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων σε δίκτυο των 25 ζυγών με ενσωματωμένες ανεμογεννήτριες	88
5.6.1	Γ1: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17	90
5.6.2	Γ2: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19	94
5.6.3	Γ3: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12	98
5.6.4	Γ4: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21	102
5.7	Αποτελέσματα	106
6	Συμπεράσματα	107
	Βιβλιογραφία	109

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Βασική δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	2
2.1	Γραφική παράσταση συμμετρικών συνιστωσών [1]	11
2.2	Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας.	13
2.3	Ισοδύναμο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας για τις διαφορετικές συνδέσεις μετασχηματιστών [2]	13
2.4	Δίκτυο θετικής ακολουθίας [2]	14
2.5	Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας [2]	14
2.6	Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας [2]	14
2.7	Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα [2]	15
2.8	Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα [2]	16
2.9	Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη [2]	17
2.10	Σύγχρονη μηχανή συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό [3]	19
2.11	Διάγραμμα στρεφόμενων διανυσμάτων [3]	20
2.12	Μηχανική και ηλεκτρική ροπή στον άξονα [3]	22
3.1	Εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας [4]	30
3.2	Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας[5]	31
3.3	Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [6]	33
3.4	Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα [6]	34
3.5	Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας [7]	36
3.6	Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση στροφείου [7]	36
3.7	Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας [7]	37
3.8	Δομή μοντέλου τύπου 3 - WT3 [8]	39

3.9	Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα [7]	40
3.10	Δομή μοντέλου τύπου 4 - WT4 [8]	40
4.1	Εγκατεστημένη παραγωγή ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ[9] .	42
4.2	Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κελιού [10]	42
4.3	I-V χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου	43
4.4	Διάγραμμα της μονάδας PVGU στο PSS/E [11]	47
4.5	Διάγραμμα της μονάδας PVEU στο PSS/E [11]	47
5.1	Δίκτυο IEEE-24 ζυγών	51
5.2	Δίκτυο 24 ζυγών	54
5.3	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3sec$	56
5.4	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3sec$	56
5.5	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3sec$	57
5.6	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3sec$	57
5.7	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3sec$	58
5.8	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,35sec$	58
5.9	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15sec$	60
5.10	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15sec$	60
5.11	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15sec$	61
5.12	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15sec$	61
5.13	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15sec$	62

5.14	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,5\text{sec}$	62
5.15	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$	64
5.16	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$	64
5.17	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$	65
5.18	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$	65
5.19	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$	66
5.20	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,25\text{sec}$	66
5.21	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	68
5.22	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	68
5.23	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	69
5.24	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	69
5.25	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	70
5.26	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$	70
5.27	Δίκτυο 24 ζυγών με ανεμογεννήτρια στον ζυγό 2 και 7	72
5.28	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	73
5.29	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	74

5.30	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	74
5.31	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	75
5.32	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	75
5.33	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,9\text{sec}$	76
5.34	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$	77
5.35	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$	78
5.36	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$	78
5.37	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$	79
5.38	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$	79
5.39	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,05\text{sec}$	80
5.40	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$	81
5.41	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$	82
5.42	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$	82
5.43	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$	83
5.44	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$	83
5.45	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,1\text{sec}$	84

5.46	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	85
5.47	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	86
5.48	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	86
5.49	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	87
5.50	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	87
5.51	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$	88
5.52	Δίκτυο 25 ζυγών	89
5.53	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$	91
5.54	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$	91
5.55	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$	92
5.56	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$	92
5.57	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$	93
5.58	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	93
5.59	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	95
5.60	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	95
5.61	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	96

5.62	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	96
5.63	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$	97
5.64	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$	97
5.65	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$	99
5.66	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$	99
5.67	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$	100
5.68	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$	100
5.69	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$	101
5.70	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,65\text{sec}$	101
5.71	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	103
5.72	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	103
5.73	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	104
5.74	Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	104
5.75	Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$	105
5.76	Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$	105

Κατάλογος πινάκων

5.1	Ενεργός και άεργη ισχύ των γεννητριών του συστήματος	55
5.2	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18	59
5.3	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20	63
5.4	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10	67
5.5	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15	71
5.6	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18	76
5.7	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20	80
5.8	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10	84
5.9	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15	88
5.10	Ενεργός και άεργη ισχύ της ανεμογεννήτριας στον ζυγό 25 του συστήματος	90
5.11	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18	94
5.12	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20	98
5.13	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10	102
5.14	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15	106
5.15	Κρίσιμοι χρόνοι για τα τρία σενάρια	106

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική εξέλιξη των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο ηλεκτρισμός άρχισε το 1870 να χρησιμοποιείται εμπορικά με τη χρήση λαμπτήρων τόξου για φωτισμό οδών, οίκων και φάρων. Ο Tomas Edison κατασκεύασε το πρώτο ολοκληρωμένο ηλεκτρικό σύστημα, αποτελούμενο από γεννήτρια, καλώδιο, ασφάλεια, μετρητή και φορτία, στην Νέα Υόρκη και ήταν ο ιστορικός σταθμός της Pearl Street που τέθηκε σε λειτουργία το 1882. Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος παρήγαγε συνεχές ρεύμα (DC) με μια ατμοηλεκτρική ενέργεια σε μια μόνο τάση 110V. Το φορτίο που αποτελούταν μόνο από λαμπτήρες πυρακτώσεως τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ενέργεια 59 καταναλωτές σε μια ακτίνα 1,5km. Το 1884 ο Frank Sprague με την ανάπτυξη των κινητήρων κατάφερε να προσθέσει φορτία κίνησης στα συστήματα. Έτσι αυτά τα δυο επιτεύγματα αποτέλεσαν την βάση για έναν από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς κλάδους παγκοσμίως.

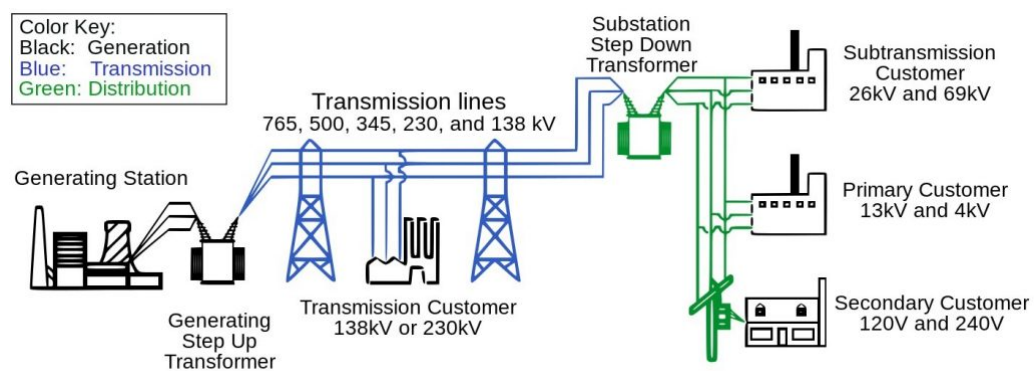
Παρόλο που το συνεχές ρεύμα ήταν πολύ διαδεδομένο άρχισε να αντικαθιστάτε από το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) εξαιτίας του προβλήματος ότι τα συστήματα με συνεχές ρεύμα μπορούσαν να μεταφέρουν ισχύ σε μικρές αποστάσεις από την γεννήτρια. Τότε ανακαλύφθηκε η ανάγκη της χρήσης ενός μετασχηματιστή για να μεταφερόταν η ισχύς σε μεγάλες αποστάσεις υπό υψηλότερη τάση και στη συνέχεια η τάση να μειωνόταν σε χαμηλότερες τιμές στις θέσεις όπου υπήρχαν τα φορτία. Το 1888 ο N. Tesla κατοχυρώνει 7 διπλώματα ευρεσιτεχνίας για εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος κάνοντας το σύστημα AC πιο ελκυστικό. Το 1890 ξεσπά μια έντονη διαμάχη ανάμεσα στο DC και AC ρεύμα για το ποιο θα

επικρατήσει. Με το πέρασμα των χρόνων το AC επικράτησε έναντι του DC, καθώς η μορφή αυτή επέτρεψε την χρήση υψηλότερων τάσεων και την οικονομική μεταφορά της νέας ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Κατά την τελευταία περίοδο του 19ου αιώνα η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας άνθισε και οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας είχαν κατασκευάσει χιλιάδες συστήματα ισχύος στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη. Στην Ελλάδα η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ιδρύθηκε το 1889 στην Αθήνα. [12, 13]

1.2 Σύστημα ισχύος: Βασική δομή και λειτουργία

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού, των μέσων και όλων των υποδομών που χρειάζονται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, γραμμές μεταφοράς και το δίκτυο διανομής όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που βρίσκονται σε ευνοϊκούς χώρους μακριά από τους καταναλωτές. Στη συνέχεια μεταδίδεται σε τεράστιες ποσότητες υπό υψηλή τάση και σε μεγάλες αποστάσεις στα κέντρα κατανάλωσης με τη βοήθεια αγωγών γνωστών ως γραμμών μεταφοράς. Τέλος, η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης μέσω ενός δικτύου διανομής.



Σχήμα 1.1: Βασική δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής όπου διακρίνονται ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν σε ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ) και πυρηνικούς (ΠΣ). Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

αυξάνεται μέσω του μετασχηματιστή και μετά μεταφέρεται μέσω γραμμών μεταφοράς στα κέντρα κατανάλωσης. Η τάση παραγωγής είναι συνήθως 11KV όμως για οικονομικούς λόγους αυξάνεται στα 132KV στους σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών. Η μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος σε υψηλές τάσεις έχει ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση στο υλικό του αγωγού και υψηλή απόδοση μετάδοσης.

Όσο αφορά το δίκτυο μεταφοράς διαχωρίζεται στα ακόλουθα υποσυστήματα:

1. Σύστημα μεταφοράς
2. Σύστημα υπομεταφοράς
3. Σύστημα διανομής

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από ένα δίκτυο τριφασικών γραμμών μεταφοράς και υποσταθμών μεταφοράς μέσω των οποίων μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στα κέντρα κατανάλωσης. Οι τυπικές τάσεις μεταφοράς κυμαίνονται από 230 έως 765 kV. Οι τάσεις των γεννητριών που είναι συνήθως 11 με 35 kV ανυψώνονται στο επίπεδο της τάσης μεταφοράς και η ισχύς μεταφέρεται σε υποσταθμούς μεταφοράς. Οι τάσεις εκεί υποβιβάζονται στο επίπεδο υπομεταφοράς.

Το σύστημα υπομεταφοράς αποτελεί υποσύστημα του συστήματος μεταφοράς και οι τάσεις του κυμαίνονται μεταξύ 69 και 138 kV. Το σύστημα υπομεταφοράς μεταφέρει ισχύ σε μικρότερες ποσότητες και σε μικρότερες αποστάσεις στους υποσταθμούς διαμονής σε σχέση με τους υποσταθμούς μεταφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις το σύστημα υπομεταφοράς μπορεί να τροφοδοτήσει απευθείας ένα πελάτη, όπως μια μεγάλη βιομηχανική μονάδα.

Το σύστημα διανομής αναπαριστά το τελικό στάδιο της μεταφοράς ισχύος προς τους καταναλωτές. Το σύστημα διανομής αποτελείται από υποσταθμούς, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας μέσα από τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης. Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους υποσταθμούς διανομής σε μετρητές στις εγκαταστάσεις των πελατών διακρίνεται σε δυο κατηγορίες:

1. Πρωτεύουσα διανομή: η πρωτεύουσα τάση διανομής βρίσκεται μεταξύ 2,2 έως 46 kV και ονομάζεται μέση τάση. Η πρωτεύουσα διανομή κατανέμει ενέργεια από υποσταθμούς διανομής έως μετασχηματιστές διανομής, όπου η τάση μειώνεται στα επίπεδα αξιοποίησης των πελατών. Με αυτή την ενέργεια τροφοδοτούνται μικροί βιομηχανικοί καταναλωτές.

2. Δευτερεύουσα διανομή: η δευτερεύουσα τάση διανομής βρίσκεται μεταξύ 120 έως 480 V και ονομάζεται χαμηλή τάση. Με αυτή την ενέργεια τροφοδοτούνται οικιακοί και εμπορικοί μονοφασικοί καταναλωτές.

Τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι εναέρια, υπόγεια ή και συνδυασμός αυτών ανάλογα με τη γεωγραφική πυκνότητα φορτίου και το είδος της περιοχής. Στις αστικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου η πυκνότητα φορτίου είναι αρκετά μεγάλη, τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως υπόγεια, ενώ στην επαρχία είναι εναέρια. Στις ημιαστικές περιοχές μπορεί να είναι και τα δυο. Τα δίκτυα συνήθως λειτουργούν όλα ακτινικά και τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο.

1.3 Έλεγχος συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα πολύτιμο και αναγκαίο αγαθό το οποίο χρειάζεται ιδιαίτερη μεταχείριση εξαιτίας δυο λόγων [13]:

1. Η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά σε μεγάλες ποσότητες, πράγμα που σημαίνει ότι η παραγωγή πρέπει να ανταποκρίνεται γρήγορα στην μεταβαλλόμενη ζήτηση.
2. Η παραγόμενη ενέργεια μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος μετάδοσης που έχει περιορισμένη χωρητικότητα και χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες εξαρτήσεις της ροής της διαδρομής μετάδοσης.

Αυτές οι φυσικές ιδιότητες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαδραματίζουν έναν εξέχοντα ρόλο στο σχεδιασμό των αρχιτεκτονικών ελέγχου ενός ΣΗΕ. Έτσι ο έλεγχος ενός ΣΗΕ χωρίζεται σε δύο επίπεδα, έλεγχος στις μονάδες παραγωγής και έλεγχος σε επίπεδο μεταφοράς. [13]

Σε μια μονάδα παραγωγής ενός συστήματος ο κύριος σκοπός είναι η εξισορρόπηση της συνολικής παραγωγής του συστήματος με τα φορτία και τις απώλειες του συστήματος. Στην μονάδα παραγωγής γίνονται δυο ειδών έλεγχοι. Αρχικά πραγματοποιούνται έλεγχοι στην κινητήρια μηχανή για την ρύθμιση της ταχύτητας και για τον έλεγχο των μεταβλητών του συστήματος παροχής ενέργειας (πιέσεις του λέβητα, θερμοκρασίες και ροές). Ακόμα πραγματοποιούνται έλεγχοι στο σύστημα διέγερσης για την ρύθμιση της τάσης και της άεργου ισχύος εξόδου της γεννήτριας.

Στο επίπεδο μεταφοράς γίνονται έλεγχοι για την διατήρηση της τάσης, της συχνότητας και της άεργους ισχύος εντός συγκεκριμένων ορίων κοντά στις ονομαστικές τους τιμές. Οι έλεγχοι αυτοί επιτυγχάνονται μέσα από συσκευές ελέγχου ισχύος και τάσης, όπως οι στρεφόμενοι πυκνωτές, οι διακοπτόμενοι πυκνωτές, τα διακοπτόμενα πηνία, οι μετασχηματιστές μεταγωγής τάσης, οι μετασχηματιστές φάσης και οι έλεγχοι μεταφοράς HVDC.

Ο σύγχρονος έλεγχος συστημάτων ισχύος πραγματοποιείται μέσα από ένα σύστημα διαχείριση ενέργειας EMS. Το EMS είναι ένα σύστημα πακέτων ηλεκτρονικών υπολογιστών που χρησιμοποιούνται από χειριστές δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων παραγωγής και μετάδοσης. Τα πακέτα βελτιστοποίησης είναι ένα σύνολο λειτουργιών ελέγχου και προγραμματισμού παραγωγής. Οι λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου των προαναφερθέντων συστημάτων πληροφοριών είναι γνωστές ως εποπτικός έλεγχος και απόκτηση δεδομένων (SCADA). Το SCADA είναι σε θέση να εκτελεί λειτουργίες σε περιοχές χωρίς παρακολούθηση από έναν παρακολουθούμενο σταθμό ή κέντρο ελέγχου και να δώσει μια σαφή ένδειξη ότι οι λειτουργίες έχουν πραγματοποιηθεί με επιτυχία μέσω του συστήματος scada. Το σύστημα scada παρέχει επίσης σε έναν χειριστή σε απομακρυσμένη τοποθεσία, επαρκείς πληροφορίες για τον προσδιορισμό της κατάστασης ενός συγκεκριμένου εξοπλισμού ή μιας διαδικασίας. Λήψη δεδομένων σημαίνει συλλογή δεδομένων με τη μορφή μετρημένου αναλογικού ρεύματος και τάσης ή την κατάσταση ανοίγματος και κλεισίματος των διακοπών που αποστέλλονται από απομακρυσμένες τερματικές μονάδες. Η επίβλεψη του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από χειριστές και μηχανικούς συντήρησης μέσω αυτών των αποκτηθέντων δεδομένων, ενώ ο έλεγχος αναφέρεται στην αποστολή σημάτων εντολών σε μια συσκευή προς λειτουργία.[2]

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Ανάλυση ροής φορτίου

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι βασικής σημασίας για τον καθορισμό της βέλτιστης λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μελέτες ροής ισχύος παρέχουν μια συστηματική μαθηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των διαφόρων τάσεων όλων των ζυγών, των γωνιών φάσης και της ενεργής και άεργης ισχύς που ρέει μέσω διαφορετικών κλάδων κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης.

Οι ποσότητες που εμπλέκονται στους υπολογισμούς είναι ποσότητες ανά φάση, δηλαδή οι ισχύς είναι μονοφασικές και οι τάσεις φασικές.

Θεωρούμε έναν ζυγό i ενός συστήματος n ζυγών. Σε αυτόν το ζυγό συνδέονται γεννήτριες που τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ, φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ και γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν εκτός του ζυγού μιγαδική ισχύ. Οι σχέσεις αυτές συνδέονται σύμφωνα με την εξίσωση 2.1. [14]

$$S_{G_i} = S_{L_i} + S_{T_i} \quad (2.1)$$

Κάθε ζυγός συσχετίζεται με 4 ποσότητες: την τάση (V), την γωνία φάσης (δ), την ενεργή ισχύς (P) και την άεργη ισχύς (Q). Σε κάθε ζυγό, δύο από αυτές τις μεταβλητές θεωρούνται δεδομένες, ενώ οι άλλες δύο υπολογίζονται από την ανάλυση ροής φορτίου.

Οι ζυγοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [15, 14]:

1. Ζυγός αναφοράς (Slack bus): Χρησιμοποιείται ως ζυγός αναφοράς για την κάλυψη της

κατάστασης ισορροπίας ισχύος. Ο ζυγός αναφοράς είναι συνήθως γεννήτρια που μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να καταλαμβάνει ότι χρειάζεται για να εξασφαλιστεί ισορροπία ισχύος. Έχει συνήθως μέτρο 1 και γωνία 0. Επομένως οι γνωστές μεταβλητές σε αυτό το ζυγό είναι η V και η δ και οι άγνωστες είναι η P και η Q .

2. Ζυγός γεννήτριας (PV bus): Αυτός είναι ένας ζυγός ελέγχου τάσης. Ο ζυγός συνδέεται με μια γεννήτριας στην οποία η ισχύς εξόδου που παράγεται σε αυτόν το ζυγό μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας τον πρώτο κινητήρα και η τάση μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας την διέγερση της γεννήτριας. Οι γνωστές μεταβλητές σε αυτό το λεωφορείο είναι η P και η V και οι άγνωστες είναι η Q και η δ .
3. Ζυγός φορτίου (Load Bus): Αυτός είναι ένας ζυγός χωρίς γεννήτρια. Η πραγματική και άεργη τροφοδοσία σε ένα σύστημα ισχύος ορίζεται ως θετική, ενώ η ισχύς που καταναλώνεται σε ένα σύστημα ισχύος ορίζεται ως αρνητικό. Οι γνωστές μεταβλητές για αυτό το ζυγό είναι η P και η Q και οι άγνωστες μεταβλητές είναι η V και η δ . Οι περισσότεροι ζυγοί ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ανάλυση ροής φορτίου n ζυγών χρησιμοποιούν τη μέθοδο των κόμβων και γράφονται ως εξής [14], [16]:

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.2)$$

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y_{bus} προκύπτει από την αντιστροφή του πίνακα αντιστάσεων Z_{bus} . Για έναν ζυγό i στην διαγώνιο του πίνακα Y_{ii} είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στον ζυγό i και στις άλλες θέσεις του πίνακα Y_{ij} είναι το αρνητικό άθροισμα των αγωγιμοτήτων μεταξύ των ζυγών i και j , με $i \neq j$.

Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί σε γενικευμένη μορφή για ένα σύστημα n ζυγών:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (2.3)$$

για $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Η ισχύς στο ζυγό i είναι:

$$\begin{aligned} P_i + j \cdot Q_i &= V_i \cdot I_i^* \iff \\ I_i &= \frac{P_i - j \cdot Q_i}{V_i^*} \end{aligned} \quad (2.4)$$

με $V_i = |V_i| \angle \delta_i$

Έτσι η σχέση της ισχύς $S_i = V_i \cdot I_i^*$ γίνεται μέσα από την εξίσωση 2.3 και 2.4 ως εξής:

$$P_i - j \cdot Q_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \iff \sum_{j=1}^n |Y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.5)$$

Αν διαχωρίσουμε την εξίσωση 2.5 σε πραγματικά και φανταστικά μέρη προκύπτει:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \cdot \cos (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.6)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \cdot \sin (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.7)$$

2.1.1 Μέθοδος Gauss-Seidel

Η επαναληπτική μέθοδος Gauss-Siedel αποτελεί μια τροποποίηση της επαναληπτικής μεθόδου Gauss, που έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης αυτής. Για ένα σύστημα της μορφής $I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus}$ με την επαναληπτική μέθοδος Gauss-Siedel η εξίσωση 2.5 μπορεί να γραφτεί ως εξής [16] :

$$P_i - j \cdot Q_i = V_i^* \cdot Y_{ii} \cdot V_i + V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (2.8)$$

για $i = 2, 3 \dots n$

ή

$$V_i = \frac{\frac{P_i - j \cdot Q_i}{(V_i^*)^*} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j}{Y_{ii}} \quad (2.9)$$

για $i = 2, 3 \dots n$

Στον αλγόριθμο Gauss-Siedel, η εξίσωση 2.9 χρησιμοποιείται για την εύρεση των τελικών ζυγών τάσεων χρησιμοποιώντας διαδοχικά βήματα επαναλήψεων καταλήγοντας σε αυτή τη μορφή:

$$V_i^{v+1} = \frac{\frac{P_i - j \cdot Q_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \cdot V_j^{v+1} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} \cdot V_j^v}{Y_{ii}} \quad (2.10)$$

2.1.2 Μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος Newton-Raphson είναι μια επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση ενός συνόλου ταυτόχρονων μη γραμμικών εξισώσεων με ίσο αριθμό αγνώστων. Είναι η πιο συχνή

μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη ροή φορτίου επειδή συγκλίνει πιο γρήγορα σε σχέση με την μέθοδο Gauss-Siedel. [15]

Οι εξισώσεις 2.6 και 2.7 αναπτύσσονται στη σειρά Taylor σχετικά με την αρχική εκτίμηση και αμελώντας όλους τους όρους ανωτέρας τάξης λαμβάνεται το ακόλουθο σύνολο γραμμικών εξισώσεων.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

,όπου τα $J1, J2, J3, J4$ είναι τα στοιχεία του πίνακα Jacobian.

Η διαφορά μεταξύ των προκαθορισμένων τιμών και των υπολογισμένων τιμών που είναι γνωστά ως υπολείμματα ισχύος για τους όρους ΔP_i^v και ΔQ_i^v είναι οι εξής:

$$\Delta P_i^v = P_i^{sch} - P_i^v \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_i^v = Q_i^{sch} - Q_i^v \quad (2.12)$$

Οι νέες εκτιμήσεις για την τάση του ζυγού είναι:

$$\delta^{k+1} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad (2.13)$$

2.2 Βραχυκυκλώματα

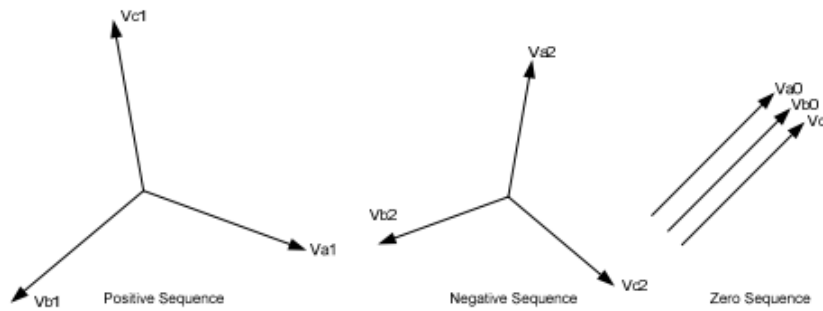
Τα ηλεκτρικά δίκτυα, οι μηχανές και οι εξοπλισμοί υπόκεινται συχνά σε διάφορους τύπους βλαβών ενώ βρίσκονται σε λειτουργία. Βραχυκύκλωμα συμβαίνει όταν διακοπεί η μόνωση του συστήματος σε κάποιο σημείο. Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα είναι αρκετές, όπως κεραυνοί, δυνατοί άνεμοι, πτώσεις δένδρων σε γραμμές κ.λπ. Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [14]:

- Συμμετρικά βραχυκυκλώματα: στα οποία ανήκουν τα στερεά τριφασικά βραχυκυκλώματα (3 Phase Fault)
- Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα: στα οποία 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).

2.2.1 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών

Τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών την πρότεινε ο C.L. Fortescue για την ανάλυση ασύμμετρων συστημάτων. Ο Fortescue απέδειξε ότι ένα σύστημα με n συσχετιζόμενα ασύμμετρα διανύσματα μπορεί να αναλυθεί σε n συστήματα με n συμμετρικά διανύσματα το καθένα και ονομάζονται συμμετρικές συνιστώσες. Οι συμμετρικές συνιστώσες σε ένα τριφασικό κύκλωμα (Σχήμα 2.1) είναι οι εξής:

1. Θετικής ακολουθίας: αποτελείται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασική μετατόπιση 120, φασική ακολουθία abc, δείκτη + ή 1.
2. Αρνητικής ακολουθίας: αποτελείται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασική μετατόπιση 120, φασική ακολουθία acb, δείκτη - ή 2.
3. Μηδενικής ακολουθίας: αποτελείται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασική μετατόπιση μηδενική, δείκτη 0.



Σχήμα 2.1: Γραφική παράσταση συμμετρικών συνιστωσών [1]

Κάθε ένα από αυτά τα αρχικά ασύμμετρα διανύσματα ισούται με το άθροισμα των συνιστωσών του. Επομένως οι φασικές τάσεις είναι:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad (2.14)$$

και τα φασικά ρεύματα είναι αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Χρησιμοποιείται το σύμβολο a για να διευκολυνθούμε στους υπολογισμούς των πράξεων με:

$$a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j \cdot \sin(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 + j \cdot 0.866$$

και:

$$\bullet a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 - j \cdot 0.866 \iff a^2 = a^*$$

$$\bullet a^3 = 1$$

$$\bullet 1 + a + a^2 = 0$$

Έτσι για τον υπολογισμό των ασύμμετρων τριφασικών διανυσμάτων έχουμε:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = T \cdot V_{012}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = T \cdot I_{012}$$

Αντίστοιχα αν γνωρίζουμε τα ασύμμετρα διανύσματα μπορούμε να υπολογίσουμε τις συμμετρικές συνιστώσες με τον αντίστροφο του πίνακα T .

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

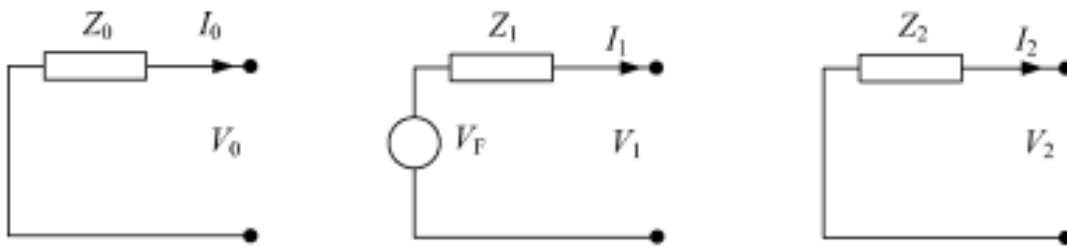
και επομένως έχουμε:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot V_{abc}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot I_{abc}$$

Για την ανάλυση των συμμετρικών και των μη-συμμετρικών σφαλμάτων χρησιμοποιούνται τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα της μηδενικής, της θετικής και της αρνητικής

ακολουθίας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.2.



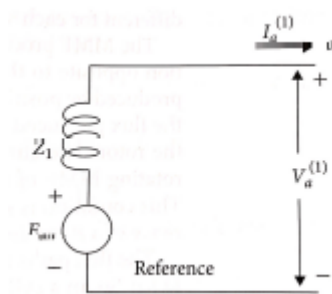
Σχήμα 2.2: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας.

Κάθε ακολουθιακό δίκτυο σχηματίζεται διαφορετικά. Το δίκτυο θετικής ακολουθίας αποτελείται από μια γεννήτρια σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση της θετικής ακολουθίας. Το δίκτυο αρνητικής ακολουθίας δεν περιλαμβάνει γεννήτρια αλλά μόνο τις σύνθετες αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας. Τέλος το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας δεν περιλαμβάνει ούτε αυτό γεννήτρια αλλά τις σύνθετες αντιστάσεις μηδενικής ακολουθίας και την αντίσταση της γείωσης που χρησιμοποιείται η τριπλάσια αυτή αντίσταση στο ισοδύναμο κύκλωμα της μηδενικής ακολουθίας. Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του (Δ ή Y) και από το αν ο ουδέτερος του αστέρα είναι γειωμένος ή όχι όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. [2]

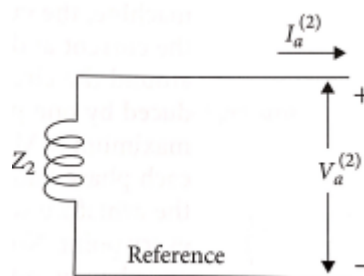
CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Σχήμα 2.3: Ισοδύναμο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας για τις διαφορετικές συνδέσεις μετασχηματιστών [2]

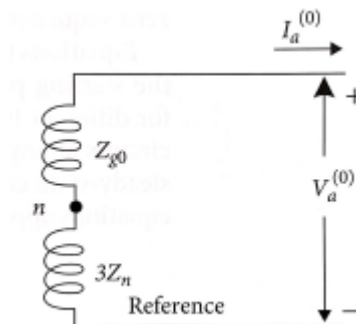
Στην συνέχεια απεικονίζονται τα ακολουθιακά δίκτυα που προκύπτουν της θετικής, της αρνητικής και της μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στα Σχήματα 2.4, 2.5, 2.6:



Σχήμα 2.4: Δίκτυο θετικής ακολουθίας [2]



Σχήμα 2.5: Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας [2]



Σχήμα 2.6: Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας [2]

2.2.2 Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα

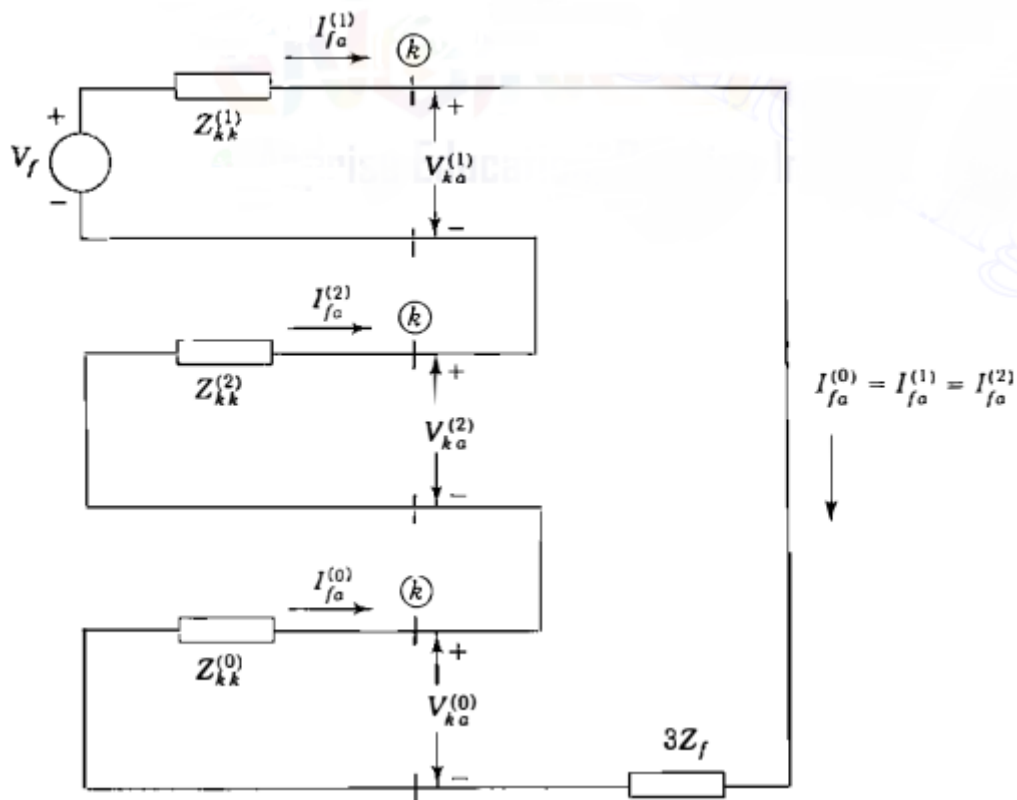
Στο τριφασικό βραχυκύκλωμα συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις και επομένως όλες οι τάσεις και τα ρεύματα έχουν τα ίδια r_u μέτρα σε κάθε φάση. Συμμετέχει μόνο η θετική ακολουθία η οποία αποτελείται από την προσφασματική τάση V^0 του ζυγού (την τάση που έχει ο ζυγός που προέκυψε το βραχυκύκλωμα πριν το σφάλμα), την σύνθετη αντίσταση θετικής

ακολουθίας Z_1 που προκύπτει από το θεώρημα Thevenin και την αντίσταση Z_F μέσω της οποίας γίνεται το βραχυκύκλωμα. Έτσι για να υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_f έχουμε:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_F} \quad (2.16)$$

2.2.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα (Single Line to Ground - SLG) συμβαίνει μεταξύ της φάσης a και της γης. Συμμετέχουν η θετική, η αρνητική και η μηδενική ακολουθία για την εύρεση του ρεύματος βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα [2]

Οι σχέσεις που ισχύουν σε ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα:

$$I_f = I_1 + I_2 + I_0 \quad (2.17)$$

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + 3Z_n} \quad (2.18)$$

$$V_1 = V_f - I_1 \cdot Z_1 \quad (2.19)$$

$$V_2 = I_2 \cdot Z_2 \quad (2.20)$$

$$V_0 = I_0 \cdot Z_0 \quad (2.21)$$

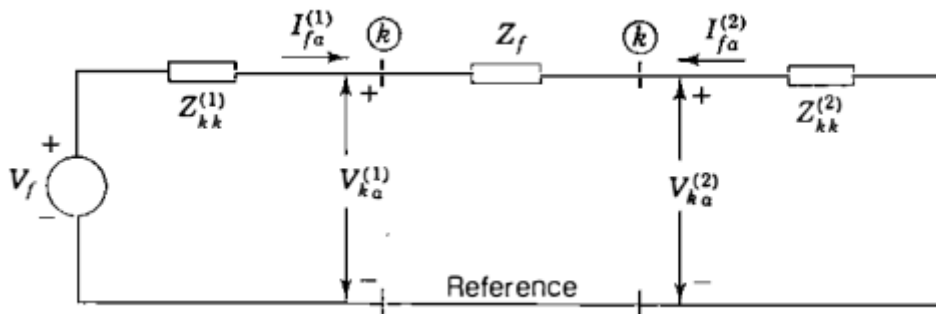
Συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις και από τις σχέσεις για τον υπολογισμό των ασύμμετρων τριφασικών διανυσμάτων προκύπτει:

$$I_a = 3 \cdot I_f, I_b = 0, I_c = 0 \quad (2.22)$$

$$V_a = 0, V_b = V_c \quad (2.23)$$

2.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Το διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line - LL) συμβαίνει μεταξύ της φάσης b και c. Συμμετέχουν η θετική και η αρνητική ακολουθία για την εύρεση του ρεύματος βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα [2]

Οι σχέσεις που ισχύουν σε ένα διφασικό βραχυκύκλωμα:

$$I_f = I_1 = -I_2, I_0 = 0 \quad (2.24)$$

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.25)$$

$$V_1 = V_f - I_1 \cdot Z_1 \quad (2.26)$$

$$V_2 = I_2 \cdot Z_2 \quad (2.27)$$

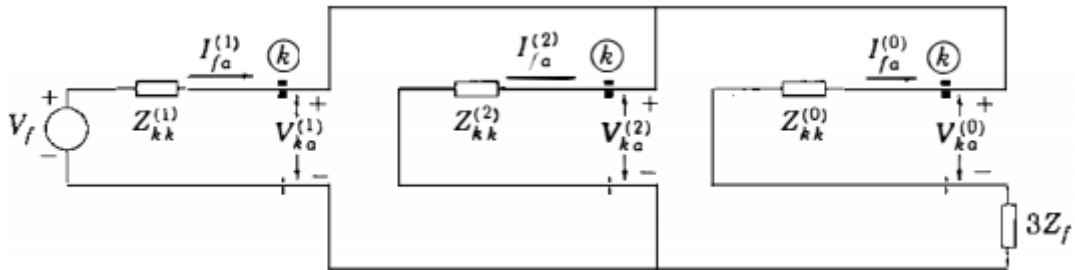
Συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις και από τις σχέσεις για τον υπολογισμό των ασύμμετρων τριφασικών διανυσμάτων προκύπτει:

$$I_a = 0, I_b = -I_c \quad (2.28)$$

$$V_a = 0, V_b - V_c = Z_f \cdot I_f \quad (2.29)$$

2.2.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη

Το διφασικό βραχυκύκλωμα (Double Line to Ground - DLG) με τη γη συμβαίνει μεταξύ της φάσης b, c και γης. Συμμετέχουν η θετική, η αρνητική και η μηδενική ακολουθία για την εύρεση του ρεύματος βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη [2]

Οι σχέσεις που ισχύουν σε ένα διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη:

$$I_1 + I_2 + I_0 = 0 \quad (2.30)$$

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + (Z_2 || (Z_0 + 3Z_f))} \quad (2.31)$$

$$I_2 = -\frac{3Z_1 + Z_0}{Z_2} \cdot I_1 \quad (2.32)$$

$$I_0 = -\frac{Z_2}{3Z_1 + Z_0} \cdot I_1 \quad (2.33)$$

$$V_1 = V_f - I_1 \cdot Z_1 \quad (2.34)$$

$$V_2 = -I_2 \cdot Z_2 \quad (2.35)$$

$$V_0 = -I_0 \cdot Z_0 \quad (2.36)$$

Συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις και από τις σχέσεις για τον υπολογισμό των ασύμμετρων τριφασικών διανυσμάτων προκύπτει:

$$I_a = 0 \quad (2.37)$$

$$V_b = V_c = 0 \quad (2.38)$$

2.3 Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

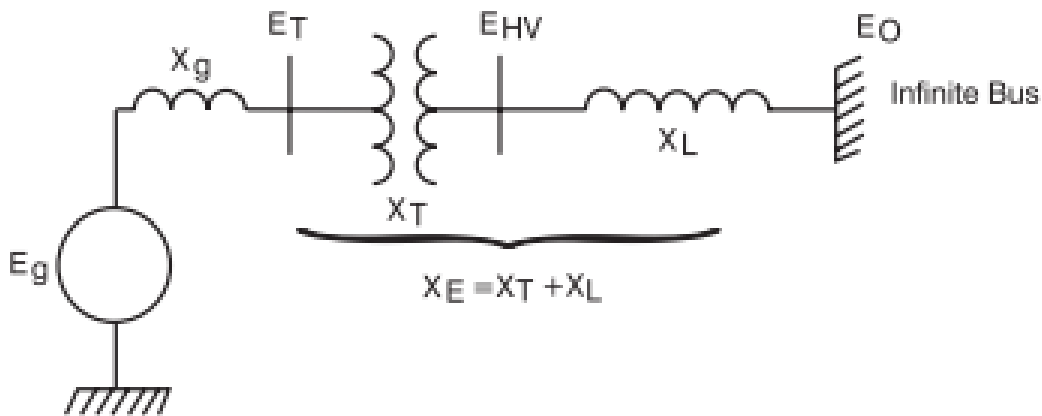
Το σύστημα ισχύος αποτελείται από μερικές σύγχρονες μηχανές που λειτουργούν σε συγχρονισμό. Για τη συνέχεια του συστήματος ισχύος, είναι απαραίτητο να διατηρούν τον τέλειο συγχρονισμό σε όλες τις συνθήκες σταθερής κατάστασης. Ευστάθεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να επιστρέψει στις κανονικές του συνθήκες μετά από μια διαταραχή. Για να κατανοήσουμε καλά την ευστάθεια ενός συστήματος πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη το όριο ευστάθειας του συστήματος. Το όριο ευστάθειας καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ μέσω ενός συγκεκριμένου τμήματος του συστήματος που αν υπερβεί επέρχεται αποσυγχρονισμός του συστήματος και αστάθεια. [13]

Η ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος μπορεί να είναι διαφόρων τύπων ανάλογα με τη φύση της διαταραχής και για επιτυχή ανάλυση, μπορεί να ταξινομηθεί στους ακόλουθους δύο τύπους:

- Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης
- Μεταβατική ευστάθεια

2.3.1 Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης

Η μόνιμη κατάσταση ευστάθειας ενός συστήματος ισχύος ορίζεται ως η ικανότητα του συστήματος να επαναφέρει τη σταθερή του διαμόρφωση μετά από μια μικρή διαταραχή στο δίκτυο, όπως μια αλλαγή στο φορτίο. Σε περίπτωση που η ροή ισχύος μέσω του κυκλώματος υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ, τότε υπάρχει πιθανότητα ένα συγκεκριμένο μηχάνημα ή μια ομάδα μηχανών να σταματήσουν να λειτουργούν συγχρονισμένα και να οδηγήσουν σε ακόμη περισσότερες διαταραχές. Σε μια τέτοια περίπτωση, το όριο ευστάθειας κατάστασης ενός συστήματος δείχνει τη μέγιστη ποσότητα ισχύος που επιτρέπεται μέσω του συστήματος χωρίς να δημιουργηθεί διαταραχή. Το Σχήμα 2.10 είναι μια αναπαράσταση κυκλώματος μιας συγχρονισμένης μηχανής σε έναν άπειρο ζυγό.

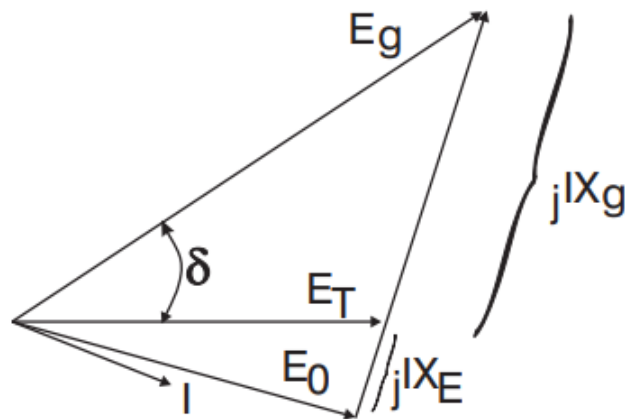


Σχήμα 2.10: Σύγχρονη μηχανή συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό [3]

Η σύγχρονη μηχανή διαμορφώνεται από μια ιδανική πηγή τάσης E_g σε σειρά με μια αντίδραση X_g . Η τερματική τάση του μηχανήματος, E_T αυξάνεται μέσω ενός μετασχηματιστή γεννήτριας Step-Up (GSU), ο οποίος αντιπροσωπεύεται από μια αντίδραση X_T . Η πλευρά υψηλής τάσης του GSU συνδέεται στο άπειρο ζυγό μέσω μιας γραμμής μετάδοσης που αντιπροσωπεύεται από μια αντίδραση X_L . Έτσι με βάση το σχήμα η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια είναι [3]:

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_T}{X_g} \cdot \sin \delta \quad (2.39)$$

όπου δ είναι η γωνία μεταξύ της τάσης E_g και E_T όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα στρεφόμενων διανυσμάτων [3]

Όταν η γωνία δ είναι μηδέν δεν μεταφέρεται ισχύς. Με την αύξηση της γωνίας ισχύος, η μεταφορά ισχύος αυξάνεται και αυτή μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή. Η μέγιστη αυτή τιμή επιτυγχάνεται όταν η γωνία δ γίνει 90° , όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.40. Περαιτέρω αύξηση της γωνίας θα οδηγήσει σε μείωση της μεταφερόμενης ισχύος. [13]

$$P_{e,max} = \frac{E_g \cdot E_T}{X_g} \quad (2.40)$$

2.3.2 Μεταβατική ευστάθεια

Η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να φτάσει σε σταθερή κατάσταση μετά από μια μεγάλη διαταραχή που συμβαίνει στο δίκτυο. Μεγάλη διαταραχή θεωρείται κάθε μεγάλη αλλαγή στο σύστημα όπως τα βραχυκυκλώματα, η απώλεια κάποιας γεννήτριας και η αφαίρεση μεγάλων φορτίων από το δίκτυο. Στην πραγματικότητα ασχολείται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τον συγχρονισμό μετά από μια διαταραχή που υφίσταται για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Η πιθανή απώλεια του συγχρονισμού λόγω της μεταβατικής αστάθειας παρατηρείται συνήθως μέσα στα επόμενα 3 έως 5 δευτερόλεπτα μετά την αρχική διαταραχή.[3, 13]

Η ευστάθεια αποτελεί μια συνθήκη ισορροπίας μεταξύ αντίθετων δυνάμεων. Σκοπός των σύγχρονων διασυνδεδεμένων μηχανών είναι να διατηρούν τον συγχρονισμό μεταξύ τους όταν εμφανίζονται δυνάμεις που τείνουν να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν μια η περισσότερες μηχανές σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ισορροπία μεταξύ της μηχανικής ροπής εισόδου και της ηλεκτρικής ροπής εξόδου κάθε μηχανής. Μια παροδική διαταραχή στο δίκτυο αναμένεται να προκαλέσει μερικές ταλαντώσεις

και έχει μεγάλες διακυμάνσεις στη ισχύ εξόδου της μηχανής.

Η μεταβολή στην ηλεκτρική ροπή μιας σύγχρονης μηχανής μετά από μια διαταραχή μπορεί να διαχωριστεί σε δυο συνιστώσες [3] :

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.41)$$

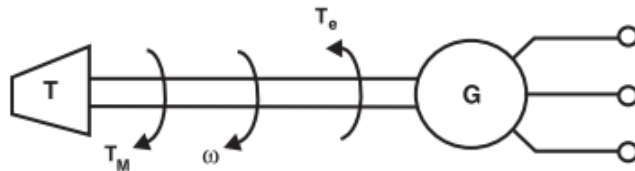
όπου $T_s \Delta \delta$ είναι η συνιστώσα της μεταβολής της ροπής που είναι συγγραμμική με τη μεταβολή της γωνίας $\Delta \delta$ του δρομέα και ονομάζεται συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, ο συντελεστής T_s ονομάζεται συντελεστής ροπής συγχρονισμού και $T_D \Delta \omega$ είναι η συνιστώσα της μεταβολής της ροπής που είναι συγγραμμική με τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας $\Delta \omega$ του δρομέα και ονομάζεται συνιστώσα ροπής απόσβεσης, ο συντελεστής T_D ονομάζεται συντελεστής ροπής απόσβεσης.

Και τα δύο συστατικά της ροπής ενεργούν σε κάθε γεννήτρια του συστήματος. Η έλλειψη επαρκούς ροπής συγχρονισμού θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια συγχρονισμού. Μια τέτοια απώλεια συγχρονισμού μπορεί να αποφευχθεί μόνο εάν μπορεί να αναπτυχθεί επαρκής μαγνητική ροή όταν συμβαίνει μια παροδική αλλαγή στην ηλεκτρική ροπή. Αυτό διευκολύνεται από ένα σύστημα διέγερσης αρχικής απόκρισης που έχει επαρκή ικανότητα εξαναγκασμού και αρκετά γρήγορη απόκριση για να αντιστέκεται στον επιταχυνόμενο ή επιβραδυνόμενο ρότορα. Για να είναι αποτελεσματική τόσο για την επιτάχυνση όσο και για την επιβράδυνση της απόκρισης του ρότορα, ο διεγέρτης πρέπει να είναι ικανός να πιέζει τόσο θετικά όσο και αρνητικά. Όταν ο ρότορας επιταχύνεται σε σχέση με τη ροή του στάτη, η γωνία του ρότορα αυξάνεται λόγω μηχανικής ροπής υψηλότερης από την ηλεκτρική ροπή. Το σύστημα διέγερσης πρέπει να αυξήσει την διέγερση εφαρμόζοντας μια υψηλή θετική τάση στο πεδίο του εναλλάκτη το συντομότερο δυνατό. Αντίθετα, όταν η γωνία του ρότορα μειώνεται λόγω της μηχανικής ροπής που είναι μικρότερη από την ηλεκτρική ροπή, το σύστημα διέγερσης πρέπει να μειώσει την διέγερση εφαρμόζοντας μια υψηλή αρνητική τάση στο πεδίο του εναλλάκτη το συντομότερο δυνατό.

2.3.3 Εξίσωση ταλάντωσης - Swing equation

Οι μελέτες που σχετίζονται με την ευστάθεια ενός συστήματος πραγματοποιούνται σε μια ελάχιστη περίοδο ίση με το χρόνο που απαιτείται για να γίνει μια ταλάντωση. Εάν το σύστημα βρεθεί ότι είναι σταθερό κατά τη διάρκεια αυτής της πρώτης ταλάντωσης η διαταραχή θα μειωθεί και το σύστημα θα ξανά γίνει σταθερό. Για να δούμε εάν ένα σύστημα

είναι σταθερό ή όχι με μαθηματικό τρόπο χρησιμοποιούμε την εξίσωση ταλάντωσης (swing equation). Έτσι θα θεωρήσουμε μια σύγχρονη γεννήτρια σε έναν άξονα στον οποίο ασκείται μηχανική ροπή T_m όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του άξονα με ταχύτητα ω rad/sec και δημιουργεί ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου T_e . Η μηχανική ισχύς στον άξονα δημιουργείται από την ροπή και την ταχύτητα, $P_m = T_m \cdot \omega$. Η μηχανική ροπή είναι προς την κατεύθυνση περιστροφής ενώ η ηλεκτρική ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα από την γεννήτρια έχει αντίθετη φορά περιστροφής. Όταν η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτείται με τροφοδοσία από το ένα άκρο και εφαρμόζεται σταθερό φορτίο στο άλλο, υπάρχει κάποια σχετική γωνιακή μετατόπιση μεταξύ του άξονα του ρότορα και του μαγνητικού πεδίου του στάτη, γνωστή ως γωνία φορτίου δ που είναι ανάλογη προς τη φόρτωση του μηχανήματος. Το μηχάνημα σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση.[3]



Σχήμα 2.12: Μηχανική και ηλεκτρική ροπή στον άξονα [3]

Όταν το σύστημα διαταράσσεται λόγω βλάβης ή το φορτίο αλλάζει γρήγορα, αλλάζει η ηλεκτρική ισχύς του μηχανήματος. Η ηλεκτρική ισχύς του μηχανήματος μπορεί να αλλάξει γρήγορα, αλλά η μηχανική ισχύς στο μηχάνημα είναι σχετικά αργή στην αλλαγή. Λόγω αυτής της διαφοράς στην ταχύτητα απόκρισης, υπάρχει μια προσωρινή διαφορά στην ισορροπία ισχύος. Αυτή η ανισορροπία ισχύος προκαλεί μια διαφορά στη ροπή που ασκείται στον άξονα, η οποία προκαλεί επιτάχυνση ή επιβράδυνση, ανάλογα με την κατεύθυνση της ανισορροπίας. Καθώς ο ρότορας αλλάζει ταχύτητα, η σχετική γωνία του ρότορα αλλάζει. Θα εξετάσουμε την περίπτωση κατά την οποία σε μια σύγχρονη γεννήτρια εφαρμόζεται ξαφνικά μια αυξημένη ποσότητα ηλεκτρομαγνητικού φορτίου, η οποία οδηγεί σε αστάθεια κάνοντας την P_e μικρότερη από τη P_m καθώς ο ρότορας υφίσταται επιβράδυνση [2]. Συνήθως οι περιστρεφόμενες απώλειες αγνοούνται και έτσι η αυξημένη ποσότητα επιταχυνόμενης ισχύος που απαιτείται για την επαναφορά του μηχανήματος σε σταθερή κατάσταση δίνεται από την σχέση:

$$P_a = P_m - P_e \quad (2.42)$$

και κατα συνέπεια έχουμε:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.43)$$

Η εξίσωση για την κίνηση του ρότορα μιας σύγχρονης μηχανής βασίζεται στη στοιχειώδη αρχή της δυναμικής που δείχνει ότι η επιταχυνόμενη ροπή είναι το αποτέλεσμα της ροπής αδράνειας του ρότορα επί την γωνιακή επιτάχυνση του. Έτσι έχουμε:

$$J \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e(N - m) \quad (2.44)$$

,όπου J η συνολική ροπή αδράνειας των μαζών του ρότορα σε $kg - m^2$
 θ_m η γωνιακή μετατόπιση του ρότορα σε σχέση με έναν σταθερό άξονα σε rad

Αφού η θ_m μετριέται σε σχέση με έναν σταθερό άξονα αναφοράς είναι ένα απόλυτο μέτρο της γωνίας του ρότορα. Αυξάνεται συνεχώς με το χρόνο ακόμη και με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα. Δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει η ταχύτητα του ρότορα σε σχέση με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι πιο βολικό να μετρηθεί η γωνιακή θέση του ρότορα σε σχέση με έναν άξονα αναφοράς που περιστρέφεται με μια σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι έχουμε την σχέση:

$$\theta_m = \omega_{sm} \cdot t + \delta_m \quad (2.45)$$

,όπου ω_{sm} είναι η σύγχρονη ταχύτητα σε rad/sec
 δ_m είναι η γωνιακή μετατόπιση του ρότορα από τον συγχρονισμένο περιστρεφόμενο άξονα αναφοράς σε rad

Αν παραγωγίσουμε την εξίσωση 2.46 ως προς τον χρόνο προκύπτει:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.46)$$

και

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.47)$$

,όπου $\frac{d\delta_m}{dt}$ εκφράζει την απόκλιση της ταχύτητας του ρότορα από τον συγχρονισμό σε rad/sec

Από τις εξισώσεις 2.44 και 2.47 προκύπτει:

$$J \cdot \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e(N - m) \quad (2.48)$$

Θεωρούμε γωνιακή ταχύτητα του ρότορα:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.49)$$

Επειδή γνωρίζουμε ότι $P = \omega \cdot T$ καταλήγουμε στην σχέση:

$$J \cdot \omega_m \cdot \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e(W) \quad (2.50)$$

Ο συντελεστής $J \cdot \omega_m$ είναι η γωνιακή ορμή του ρότορα αλλά με την σύγχρονη ταχύτητα ω_{sm} συμβολίζεται ως M και είναι η σταθερά αδράνειας της μηχανής με μονάδα μέτρησης $J \cdot sec/rad$. Οπότε η εξίσωση 2.50 γίνεται:

$$M \cdot \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e(W) \quad (2.51)$$

Μια άλλη σταθερά που σχετίζεται με την αδράνεια είναι η H που είναι η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια σε MJ με σύγχρονη ταχύτητα προς την τριφασική τιμή της μηχανής σε MVA:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega_{sm}}{S_{mach}} (MJ/MVA) \quad (2.52)$$

Λύνοντας ως προς M προκύπτει:

$$M = \frac{2 \cdot H}{\omega_{sm}} \cdot S_{mach} \quad (2.53)$$

και αντικαθιστώντας το M στην εξίσωση 2.51 έχουμε:

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.54)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί και στο ανά μονάδα σύστημα (pu):

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e(pu) \quad (2.55)$$

2.3.4 Μέθοδοι μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, στις άμεσες και στις έμμεσες μεθόδους. [13]

- Άμεσοι μέθοδοι: προσδιορίζουν την ευστάθεια χωρίς την απευθείας επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει ακαδημαϊκό ενδιαφέρον και η πιο γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των ίσων εμβεδών που μπορεί να εξετάσει την ευστάθεια δύο μηχανών ή μιας μηχανής συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό.

- Έμμεσοι μέθοδοι: οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα σύστημα λύνονται μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Τα σύγχρονα προγράμματα υπολογιστών για μελέτες μεταβατικής ευστάθειας έχουν εξελιχθεί από δύο βασικές ανάγκες [2] :

1. την απαίτηση μελέτης πολύ μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων με πολλά μηχανήματα
2. την ανάγκη εκπροσώπησης μηχανών και των σχετικών συστημάτων ελέγχου με πιο λεπτομερή μοντέλα.

Μέσα από την έμμεση μέθοδο εξετάζεται η μορφή που έχει η γραφική παράσταση της ταλάντωσης με σκοπό να εξεταστεί η ευστάθεια του δικτύου. Έτσι στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα PSS/E της SIEMENS για να γίνουν οι προσομοιώσεις και να μελετηθεί η ευστάθεια του συστήματος.

2.3.5 Ανάλυση ευστάθειας μέσω προσομοίωσης

Μέσα από το πρόγραμμα προσομοίωσης επιτυγχάνεται βέλτιστη ροή φορτίου και ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας. Η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιείται όταν το σύστημα είναι σε μόνιμη κατάσταση, ενώ η μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας πραγματοποιείται υπό την δυναμική ευστάθεια. Η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας αποτελείται από τα εξής βήματα [17] :

1. Ανάλυση της ροής φορτίου
2. Επεξεργασία δυναμικών δεδομένων (γεννήτριας, κινητήρα)
3. Ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας
4. Εφαρμογή του σφάλματος που θα προκαλέσει διαταραχή (τριφασικό, μονοφασικό, διφασικό, διφασικό με τη γη βραχυκύκλωμα)
5. Ανάλυση των γραφικών παραστάσεων που προκύπτουν

Η σταθερότητα του συστήματος παρατηρείται με βάση την γωνία του ρότορα της μηχανής, την ταχύτητα της μηχανής, την ηλεκτρική ισχύ εξόδου και την τάση εξόδου.

2.3.6 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφαλμάτων

Στην περίπτωση που ένα στοιχείο έχει υποστεί σφάλμα χρειάζεται να απομακρυνθεί από το σύστημα. Η απομάκρυνση αυτού του στοιχείου για να πραγματοποιηθεί απαιτεί ένα σύστημα ηλεκτρονόμων προστασίας για την ανίχνευση του σφάλματος και την ενεργοποίηση της απόξευξης των διακόπτων ισχύος που θα οδηγήσει στην απομόνωση του στοιχείου από το σύστημα. Ο συνολικός χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος αντιστοιχεί στον χρόνο αντίδρασης των ηλεκτρονόμων και στον χρόνο διακοπής του κυκλώματος από τους διακόπτες ισχύος. Ως χρόνος αντίδρασης των ηλεκτρονόμων ορίζεται ο χρόνος από την έναυση του ρεύματος βραχυκύκλωσης μέχρι την ενεργοποίηση του σήματος απόξευξης προς τον διακόπτη ισχύος και ως χρόνος διακοπής ορίζεται ο χρόνος από την ενεργοποίηση του σήματος απόξευξης μέχρι και την διακοπή του ρεύματος που διαρρέει τον διακόπτη ισχύος. [13]

Εφόσον η μεταβατική ευστάθεια σχετίζεται με την ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρήσει τον συγχρονισμό κατά τη διάρκεια μιας σοβαρής διαταραχής, η ικανοποιητική συμπεριφορά των ηλεκτρονόμων προστασίας θεωρείται κρίσιμη για την διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Αρχικά οι ηλεκτρονόμοι προστασίας αντιλαμβάνονται το σφάλμα και προκαλούν την ενεργοποίηση των κυκλωμάτων διακοπής του διακόπτη ισχύος. Έτσι οι διακόπτες ισχύος ανοίγουν τις επαφές τους και αποσυνδέουν το τμήμα που προέκυψε σφάλμα. Ολόκληρη η διαδικασία από τη στιγμή έναρξης της βλάβης έως την τελική της εκκαθάριση διαρκεί λιγότερο από 100 ms ανάλογα με τον τύπο του προστατευτικού συστήματος που χρησιμοποιείται.

Για καλύτερο εντοπισμό της θέσης του σφάλματος και την έγκυρη απομόνωση του υπάρχον και οι ζώνες προστασίας. Κάθε ζώνη ορίζει ένα τμήμα του συστήματος ισχύος έτσι ώστε για ένα σφάλμα οπουδήποτε μέσα σε αυτήν τη ζώνη το σύστημα προστασίας που είναι υπεύθυνο για τη δράση της ζώνης να απομονώσει τα πάντα εντός αυτής της ζώνης από το υπόλοιπο σύστημα. Δεδομένου ότι η απομόνωση υπό συνθήκες βλάβης πραγματοποιείται από διακόπτες κυκλώματος, σε κάθε σημείο όπου γίνεται σύνδεση μεταξύ του εξοπλισμού εντός της ζώνης και του υπόλοιπου συστήματος ισχύος υπάρχει ένας διακόπτης. Ένα σημαντικό στοιχείο για τις ζώνες προστασίας είναι ότι οι γειτονικές ζώνες αλληλεπικαλύπτονται πάντα. Αυτή η επικάλυψη είναι απαραίτητη, αφού χωρίς αυτό ένα μικρό μέρος του συστήματος που πέφτει μεταξύ των γειτονικών ζωνών δεν θα είχε προστασία. [2]

Στην διατήρηση της ευστάθειας ενός συστήματος μας ενδιαφέρει ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ενός σφάλματος. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (Critical Clearing Time) CCT ενός σφάλματος ορίζεται ως η μεγαλύτερη διάρκεια σφάλματος για την οποία η γεννήτρια

και το σύστημα ισχύος παραμένουν παροδικά σταθερά. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ασταθές όταν η γωνία του ρότορα δ μεγαλώνει. Αυτή η αύξηση επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ισχύ, ώστε από τη γωνία του ρότορα, να προσδιοριστεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Εάν προκύψει διαταραχή και το σύστημα δεν μπορεί να το χειριστεί τότε το σύστημα κηρύσσεται ασταθές. Αυτή η αστάθεια επηρεάζει ολόκληρο το σύστημα. Επομένως, στην διπλωματική αυτή εργασία γίνεται μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος και θα καθοριστεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για να αποφευχθούν τυχόν διαταραχές. [18]

2.3.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την μεταβατική ευστάθεια

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός συστήματος είναι οι εξής [2]:

1. Το φορτίο της γεννήτριας πριν το σφάλμα που καθορίζει τις εσωτερικές τάσεις και την αλλαγή στην έξοδο
2. Ο χρόνος εκκαθάρισης ενός σφάλματος
3. Η αδράνεια H της γεννήτριας που όσο μικρότερη είναι η σταθερά H , τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ταλάντωσης της γωνίας σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα
4. Το μέγεθος της εσωτερικής τάσης E της γεννήτριας που είναι συνάρτηση της διέγερσης πεδίου
5. Η παροδική αντίδραση X της γεννήτριας που καθώς αυξάνεται προκαλεί μείωση στην μέγιστη ισχύ

Κεφάλαιο 3

Ανεμογεννήτριες

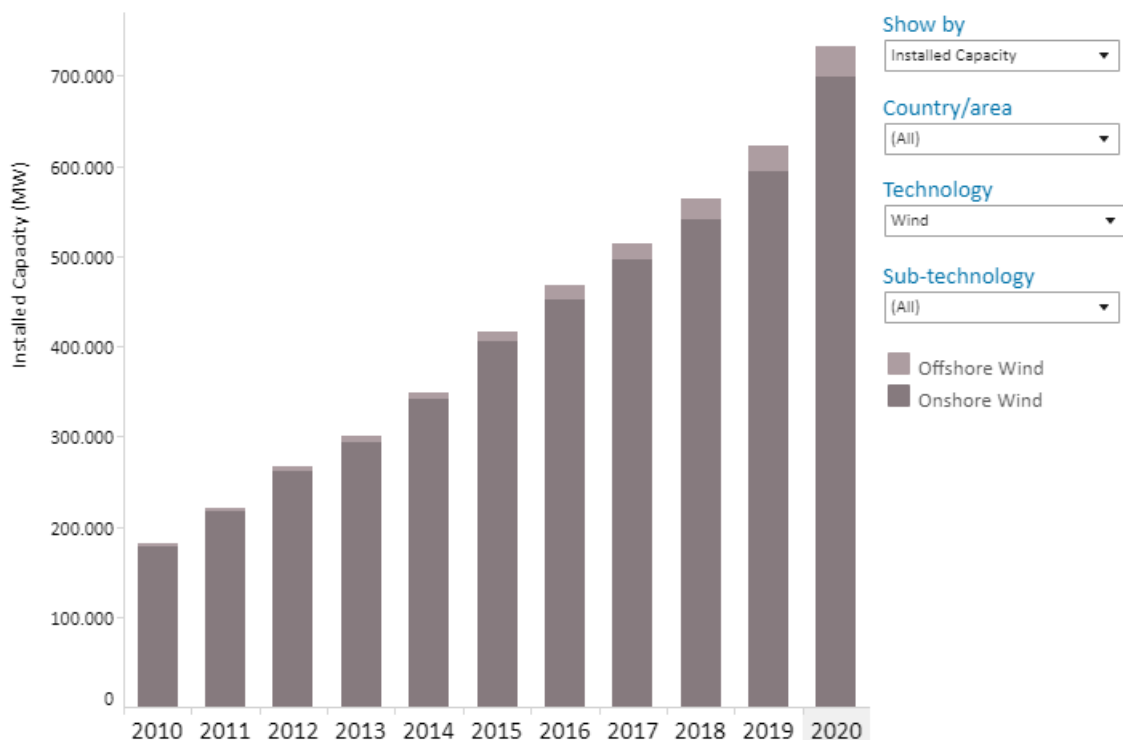
3.1 Αιολική ενέργεια

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αδιαμφισβήτητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους στο μέλλον. Τα κύρια πλεονεκτήματα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η απουσία επιβλαβών εκπομπών και η άπειρη διαθεσιμότητα του πρωταρχικού κινητήρα που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια [19]. Ένας τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η χρήση ανεμογεννητριών που μετατρέπουν την ενέργεια που περιέχεται στον αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σήμερα. Από οικονομική άποψη, το κόστος της αιολικής ενέργειας είναι χαμηλότερο, ενώ το συμβατικό κόστος παραγωγής ενέργειας αυξάνεται περαιτέρω λόγω των απαιτήσεων περιβαλλοντικής προστασίας. Έτσι μαζί με τη βελτίωση της τεχνολογίας, το κόστος της αιολικής ενέργειας φαίνεται πως θα έχει περαιτέρω μείωση στο μέλλον.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο Charles Brush, ανέπτυξε το πρώτο παράδειγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια το 1888 στις Ηνωμένες πολιτείες. Στη συνέχεια ο Marcellus Jacobs δημιούργησε αρκετές μικρές ανεμογεννήτριες με ηλεκτρικές γεννήτριες και πρωτοστάτησε στις σύγχρονες αεροδυναμικές ανεμογεννήτριες. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών του Jacobs ήταν ότι οι ρότορες είχαν τρεις λεπίδες και μοιάζουν με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες και ότι ο στρόβιλος του σχεδιάστηκε με σκοπό να ενσωματωθεί στο οικιακό σύστημα ισχύος και να έχει αποθήκευση μπαταρίας. Στη Δα-

νία το 1891, ο Poul La Cour δημιούργησε περισσότερους από 100 στροβίλους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε εύρος μεγέθους 20-35 KW. Έπειτα από ένα διάστημα δοκιμών σε πειραματικά εργοστάσια ανεμογεννητριών στην Δανία, στην Γερμανία και στις Ηνωμένες πολιτείες την περίοδο 1935-1970 αποδείχθηκε ότι οι ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας θα μπορούσαν να λειτουργήσουν.[20]

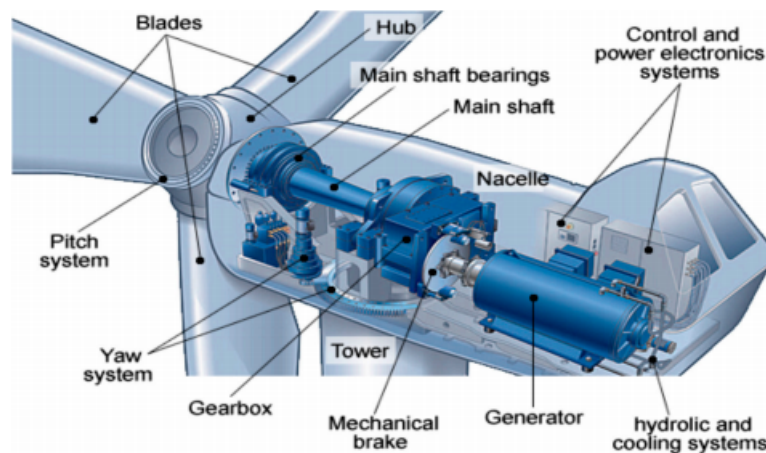
Η παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα αιολικής ενέργειας στην ξηρά και υπεράκτια έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δύο δεκαετίες, από 7,5 GW το 1997 σε 540 GW το 2020, σύμφωνα με τα στοιχεία από το International Renewable Energy Agency (IRENA). Το 2016 η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 16% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πολλά μέρη του κόσμου έχουν ισχυρές ταχύτητες ανέμου, αλλά οι καλύτερες τοποθεσίες για την παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι συνήθως οι πιο απομακρυσμένες. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας τα τελευταία 10 χρόνια σύμφωνα με το IRENA. [4]



Σχήμα 3.1: Εγκατεστημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας [4]

3.2 Τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανεμογεννητριών

Η ανεμογεννήτρια είναι ένα πολύπλοκο ηλεκτρομηχανικό σύστημα που αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα και υποσυστήματα. Τα κύρια συστατικά περιλαμβάνουν τον ρότορα, τον μηχανικό άξονα, το κιβώτιο ταχυτήτων, την γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και ισχύος όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.2 [5]. Πιο συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από ένα σύνολο πτερυγίων που συνδέονται σε ένα κεντρικό σημείο και όλα μαζί σχηματίζουν τον ρότορα. Η ροή του αέρα δημιουργεί μια δύναμη στις λεπίδες και η δύναμη αυτή παράγει μια ροπή στον άξονα προκαλώντας περιστροφή στον ρότορα γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Ο άξονας αυτός συνδέεται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μια γεννήτρια. Όλα αυτά βρίσκονται μέσα σε έναν θάλαμο, ο οποίος βρίσκεται στο πάνω άκρο του πύργου μαζί με πολλά άλλα ηλεκτρικά μέρη. Η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μετακινείται προς τα κάτω από τον πύργο και προς τα έξω σε έναν διαθέσιμο μετασχηματιστή, έτσι ώστε να μπορεί να μετατραπεί από την τάση εξόδου (περίπου 700V) σε κάποια τάση είτε για το δίκτυο της χώρας (33000V) είτε για οποιαδήποτε προσωπική χρήση (240V) [21].



Σχήμα 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας[5]

Η ισχύς που συλλέγεται από τον άνεμο μέσω ενός μετατροπέα αιολικής ενέργειας σε μια περιοχή A_r είναι:

$$P = \frac{1}{2} \cdot P_{air} \cdot C_p \cdot A_r \cdot v_w^3 \quad (3.1)$$

,όπου P_{air} είναι η πυκνότητα μάζας αέρα, v_w είναι η ταχύτητα του ανέμου και C_p είναι ο συντελεστής ισχύος που εξαρτάται από τον ειδικό σχεδιασμό του μετατροπέα ανέμου και τον προσανατολισμό του στην κατεύθυνση του ανέμου [22].

Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα HAWT (horizontal axis wind turbine) και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα VAWT (vertical axis wind turbine). Η ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για οικιακές εφαρμογές όπου ο όγκος παραγωγής είναι χαμηλός και η απόδοση είναι βέλτιστη, ενώ η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα χρησιμοποιείται για μεγαλύτερο όγκο παραγωγής, απαιτεί τεράστιες επενδύσεις και η απόδοση είναι υψηλή.

3.2.1 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα - HAWT

Στις HAWT ο περιστροφικός άξονας είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά συστατικά μιας οριζόντιας ανεμογεννήτριας είναι ο κύριος άξονας του ρότορα, η ηλεκτρική γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων για αύξηση της ταχύτητας περιστροφής των λεπίδων και οι λεπίδες στροβίλου με δυσκαμψία για να αποφευχθεί η επαφή με τον στύλο. Οι HAWT πρέπει πάντα να είναι στραμμένες προς τη σωστή κατεύθυνση (προς τον άνεμο ή μακριά από τον άνεμο με βάση τον τύπο), ώστε να μπορούν να έχουν μέγιστη αποτελεσματικότητα. Στις μεγάλες οριζόντιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται αισθητήρες ανέμου για τον σωστό προσανατολισμό τους. Σε μικρότερες ανεμογεννήτριες, ο ακριβής προσανατολισμός επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός απλού ανεμοδείκτη. Οι μεγάλες τουρμπίνες περιλαμβάνουν κινητήρα εκτροπής και μετρητή εκτροπής. Ο μετρητής εκτροπής παίρνει την ακριβή κατεύθυνση του ανέμου και ο κινητήρας εκτροπής κινεί τον στρόβιλο για να διασφαλίσει ότι είναι πάντα τοποθετημένος στον άνεμο.

Το σχήμα των λεπίδων είναι εξαιρετικά σημαντικό για τον έλεγχο του στροβίλου. Το σχήμα τους πρέπει να έχει σχεδιαστεί για να δίνει ανύψωση έτσι ώστε ο ρότορας να περιστρέφεται σωστά. Έχουν σχήμα αεροτομής (όπως αυτό της πτέρυγας του αεροπλάνου), αλλά για τις μεγάλες ανεμογεννήτριες οι λεπίδες έχουν πάντα τη μορφή στροφής. Από την προοπτική της λεπίδας, ο άνεμος θα έρχεται από μια πολύ πιο απότομη γωνία καθώς κινείται προς τη ρίζα της λεπίδας. Επειδή η λεπίδα θα σταματήσει να δίνει ανύψωση εάν η λεπίδα έλθει σε επαφή με γωνία προσβολής που είναι πολύ απότομη, η λεπίδα του ρότορα πρέπει να περιστρεφεί για να επιτευχθεί η βέλτιστη γωνία προσβολής σε όλο το μήκος της λεπίδας.

Οι HAWT χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο με υψηλές ταχύτητες. Απαιτούν εγκατάσταση μεγάλου πύργου και λεπίδας, καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο σε σχέση με τις VAWT και απαιτούνται άριστα εργαζόμενοι για την εγκατάστασή τους. Είναι κατάλληλες για να εγκατασταθούν στις ακτές θαλασσών και στις κορυφές

λόφων.

Οι οριζόντιες ανεμογεννήτριες είναι οι πιο δημοφιλείς επιλογές ως πηγές ενέργειας σήμερα χάρις στα σημαντικά πλεονεκτήματά τους. Πρώτα απ' όλα, η μεταβλητή κλίση των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται για την οριζόντια ανεμογεννήτρια δίνει τη δυνατότητα να συλλέγει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας από τον άνεμο και επιπλέον η υψηλότερη απόδοση προσφέρεται από μια οριζόντια ανεμογεννήτρια καθώς έχει τις λεπίδες κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου και ως εκ τούτου λαμβάνει περισσότερη ισχύ για περιστροφή [6] [23]. Η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.

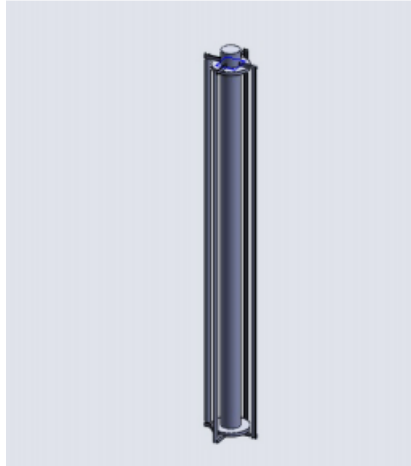


Σχήμα 3.3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [6]

3.2.2 Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα - VAWT

Υπάρχουν δύο βασικά είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, οι Savonius και οι Darrieus. Οι Savonius λειτουργούν όπως ένας τροχός νερού που χρησιμοποιεί δυνάμεις έλξης και οι Darrieus λειτουργούν με λεπίδες όπως οι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα. Στις VAWT ο άξονας είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, παράγουν ενέργεια με χαμηλή ταχύτητα ανέμου και λειτουργούν κοντά στο έδαφος. Η λειτουργία τους κοντά στο έδαφος δίνει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί βαρύς εξοπλισμός, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια, κοντά στο επίπεδο του εδάφους και όχι σε ένα θάλαμο. Επειδή οι άνεμοι είναι χαμηλότεροι κοντά στο έδαφος παράγεται χαμηλότερη ισχύς. Μπορούν να καλύψουν τον άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις και δεν χρειάζεται μηχανισμός εκτροπής. Μέσα σε ένα αιολικό πάρκο μπορούν να κατασκευάζονται κοντά το ένα στο άλλο με αποτέλεσμα να χρειάζονται λιγότερο χώρο εγκατάστασης. Είναι αθόρυβα, έχουν απλό τρόπο εγκατάστασης και επειδή είναι κοντά στο έδαφος ελέγχονται εύκολα και μπορούν να

εφαρμοστούν σε υψηλές κατασκευές. Το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλό και έχουν εύκολη συντήρηση. Ωστόσο έχουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Παράγουν εξαιρετικά χαμηλή ροπή εκκίνησης και έχουν προβλήματα δυναμικής σταθερότητας και επιπλέον οι λεπίδες τους είναι ευάλωτες λόγω της ευρείας διακύμανσης των εφαρμοζόμενων δυνάμεων σε κάθε περιστροφή [6] [23].



Σχήμα 3.4: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα [6]

3.3 Τύποι ανεμογεννητριών

Μέχρι πρόσφατα, η συμβολή της παραγωγής αιολικής ενέργειας στη σταθερότητα του συστήματος θεωρήθηκε μικρή. Ωστόσο, με την αύξηση της χωρητικότητας του αιολικού πάρκου είναι σαφές ότι η αποσύνδεση ενός μεγάλου αιολικού πάρκου θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια μεγάλου μέρους της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, το οποίο μπορεί να επιδεινώσει τα προβλήματα αστάθειας. Λόγω του αυξανόμενου τμήματος της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να συμβάλλουν στην άεργη ισχύ κατά τη διάρκεια σταθερής κατάστασης καθώς και κατά τη διάρκεια παροδικών συνθηκών. Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα PSS/E για προσομοίωση σήμερα [7]:

1. ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής
2. ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση στροφείου
3. ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Doubly-Fed Induction Generator - DFIG)

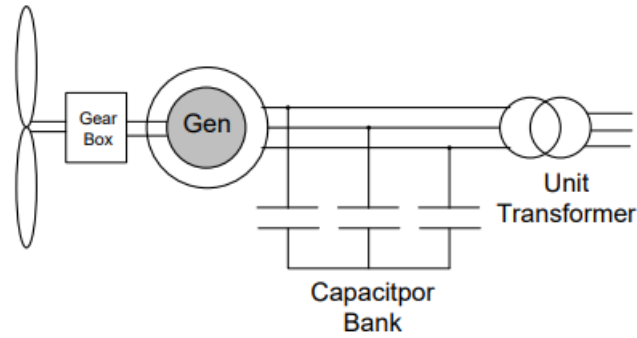
4. ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Full Converter Wind Turbine - FCWT)

Σε ένα σύστημα ισχύος, η σταθερότητα τάσης είναι ένας από τους κύριους δείκτες της σταθερότητας του συστήματος ισχύος. Η διακύμανση της τάσης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που σχετίζεται με την αιολική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες είναι συνήθως γεννήτριες επαγωγής που απορροφούν άεργη ισχύ κατά τη διάρκεια της κανονικής κατάστασης λειτουργίας προκαλώντας συχνά χαμηλή τάση στο σύστημα ισχύος. Ταυτόχρονα αλλάζουν και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος όταν ενσωματώνεται ένα αιολικό πάρκο [24]. Επομένως έχει σημασία ποιος από τους παραπάνω τύπους ανεμογεννητριών χρησιμοποιείται. Οι πιο συχνά εγκαταστημένες τεχνολογίες για νέες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας είναι ο τύπος 3 και 4. Ο τύπος 3 και ο τύπος 4 είναι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας που παρέχουν λύσεις σε προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, όπως οι διακυμάνσεις της τάσης και της ισχύος που παράγεται στο δίκτυο. [25]. Υπάρχει ωστόσο ένας μεγάλος αριθμός μονάδων τύπου 1 και 2 σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο και έτσι η μοντελοποίηση τους είναι επίσης σημαντική.

3.3.1 Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής

Ο τύπος 1 της ανεμογεννήτριας είναι μια συμβατική γεννήτρια επαγωγής σκίουρου που συνδέεται απευθείας με το δίκτυο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Ο ρότορας μιας ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, την αναλογία του γραναζιού και τα ζεύγη πόλων της γεννήτριας. Η γεννήτριας επαγωγής απορροφά άεργη ισχύ από το δίκτυο, οπότε η τράπεζα πυκνωτών είναι απαραίτητη για να παρέχει αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων για τη μετατροπή ισχύος από την τουρμπίνα με χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής στο ρότορα της γεννήτριας με υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

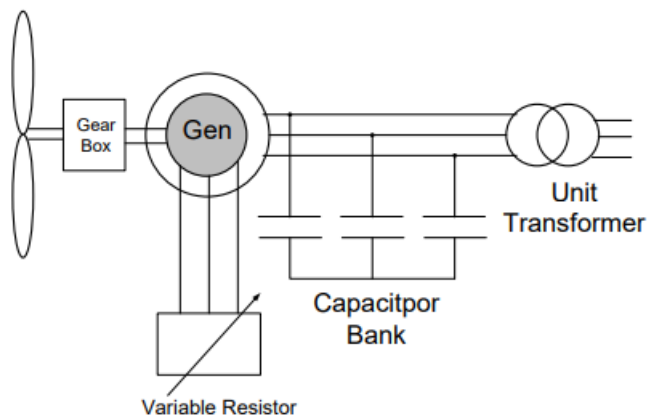
Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας έχει το πλεονέκτημα ότι είναι απλός στη δομή του, στιβαρός και οικονομικά αποδοτικός. Ωστόσο έχει σημαντικά μειονεκτήματα και για αυτό δεν προτιμάται πλέον. Πρώτον η κατανάλωση άεργου ισχύος δεν μπορεί να ελεγχθεί. Ακόμα στις ανεμογεννήτριες με σταθερή ταχύτητα η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου μεταδίδεται στη μηχανική ροπή και τελικά μεταφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ του δικτύου. Έτσι μπορεί να προκληθεί μεγάλη διακύμανση στην τάση μέσα από την διακύμανση της παραδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο. [7]



Σχήμα 3.5: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας [7]

3.3.2 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση στροφείου

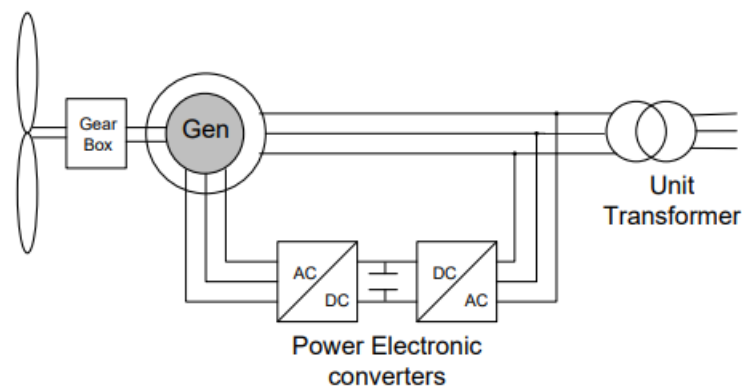
Ο τύπος 2 της ανεμογεννήτριας είναι μια επαγωγική γεννήτρια με ρότορα τραύματος που συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. Και σε αυτό τον τύπο γεννήτριας χρειάζεται μια τράπεζα πυκνωτών, όπως και στον 1 τύπο με σταθερή ταχύτητα, ώστε να παρέχει άεργο ισχύ. Αλλάζοντας το μέγεθος αντίστασης του ρότορα η ταχύτητα του ρότορα μπορεί να ρυθμιστεί σε μικρό εύρος έως και 10 υψηλότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η δομή του τύπου 2 της ανεμογεννήτριας παριστάνεται στο Σχήμα 3.6. [7]



Σχήμα 3.6: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση στροφείου [7]

3.3.3 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG

Σε αυτό τον 3ο τύπο ανεμογεννήτριας (WT3) η μηχανική ισχύς που παράγεται από το ρότορα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ χρησιμοποιώντας επαγωγική γεννήτρια. Ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χρησιμοποιείται στην ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με διπλή τροφοδοσία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Το τύλιγμα του στάτη συνδέεται απευθείας με το δίκτυο και το τύλιγμα του ρότορα συνδέεται με έναν μετατροπέα πηγής τάσης back to back.



Σχήμα 3.7: Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας [7]

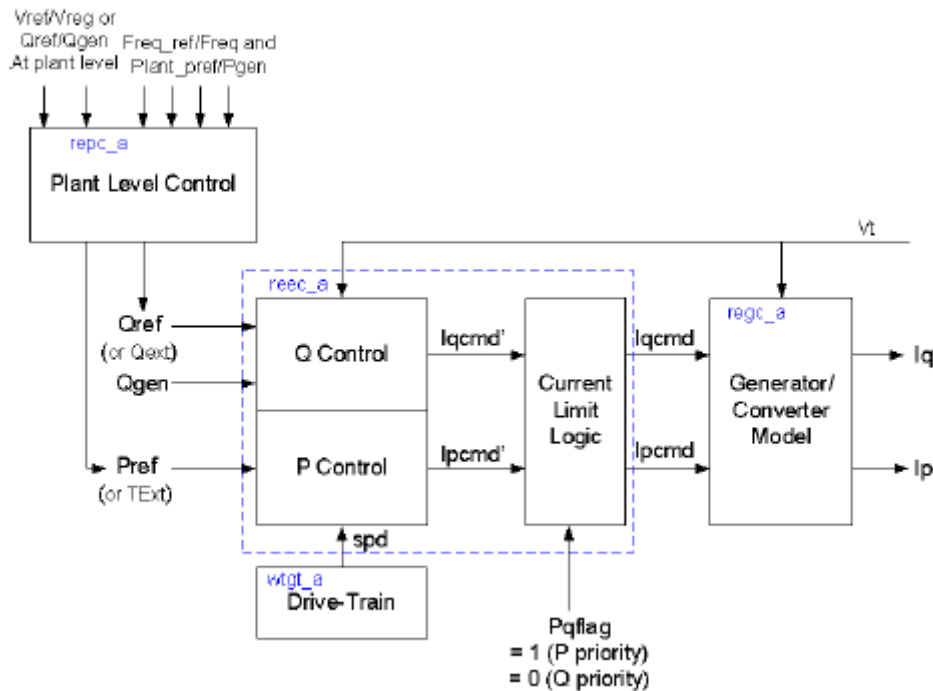
Ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας και για τον έλεγχο της τάσης. Έτσι το σύστημα είναι εξοπλισμένο με τρεις ελεγκτές, ελεγκτή ταχύτητας, γωνίας βήματος και τάσης. Ο ελεγκτής ταχύτητας επηρεάζει την ταχύτητα του ρότορα ελέγχοντας την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας. Ο ελεγκτής δειγματίζει την ταχύτητα της γεννήτριας και το σημείο ρύθμισης της ροπής της γεννήτριας ρυθμίζεται σύμφωνα με το χαρακτηριστικό του ελέγχου ταχύτητας. Ο ελεγκτής γωνίας βήματος ελέγχει επίσης την ταχύτητα του ρότορα. Ωστόσο, ο ελεγκτής γωνίας βήματος τίθεται σε λειτουργία μόνο εάν ο ελεγκτής ταχύτητας δεν μπορεί πλέον να ελέγχει την ταχύτητα του ρότορα, όπως συμβαίνει στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ο έλεγχος της ταχύτητας του ρότορα σε υψηλές ταχύτητες ανέμου αυξάνοντας τη ροπή της γεννήτριας θα οδηγούσε σε υπερφόρτωση του μετατροπέα ρότορα και της γεννήτριας. Υπό αυτές τις συνθήκες, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλη η ενέργεια που παίρνει η ανεμογεννήτρια από τον αέρα. Ο ελεγκτής τάσης υπάρχει μόνο σε ανεμογεννήτριες με DFIG. [26]

Η ανεμογεννήτρια τύπου 3 αποτελείται από μικρότερες μονάδες που μπορούν να χρησι-

μποποιηθούν σε οποιοδήποτε κατάλληλο σύστημα ανανεώσιμης παραγωγής. Σύμφωνα με τις οδηγίες του Western Electricity Coordinating Council (WECC) οι 7 μονάδες που δομούν τις ανεμογεννήτριες τύπου 3 είναι οι εξής [8, 27]:

1. Το μοντέλο γεννήτριας / μετατροπέα ανανεώσιμης ενέργειας $regc_a$ (renewable energy generator / converter model), το οποίο έχει εισόδους πραγματική (Ipcmd) και άεργη (Iqcmd) τρέχουσα εντολή που αποδίδει πραγματική (Ip) και άεργη (Iq) ισχύ ως έξοδο.
2. Το μοντέλο ηλεκτρικών ελέγχων ανανεώσιμης ενέργειας $reec_a$ (renewable energy electrical controls model), το οποίο έχει εισόδους πραγματική ισχύ αναφοράς (Pref) που μπορεί να ελεγχθεί εξωτερικά, άεργη ισχύ αναφοράς (Qref) που μπορεί να ελεγχθεί εξωτερικά και ανάδραση της άεργου ισχύος που παράγεται (Qgen). Οι έξοδοι αυτού του μοντέλου είναι η πραγματική (Ipcmd) και η άεργη (Iqcmd) τρέχουσα εντολή.
3. Η προσομοίωση της αμαξοστοιχίας γεννήτριας ανεμογεννητριών $wtgt_a$ (wind turbine generation driven-train) για προσομοίωση ταλαντώσεων μετάδοσης κίνησης. Η έξοδος αυτού του μοντέλου είναι η ταχύτητα (spd) ως ένα διάνυσμα $spd = [\omega_t \omega_g]$, όπου ω_t είναι η ταχύτητα της τουρμπίνας και ω_g η ταχύτητα της γεννήτριας.
4. Ένα απλό γραμμικό μοντέλο που περιγράφει την αεροδυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας $wtgar_a$ (wind turbine generator aero-dynamics).
5. Το $wtgpt_a$ (wind turbine generator pitch-controller) που είναι υπεύθυνο για την ρύθμιση των λεπίδων της ανεμογεννήτριας. Είναι παρόμοιο με το υπάρχον μοντέλο ελέγχου πίεσης τύπου 3, με την προσθήκη μίας παραμέτρου Kcc.
6. Μια απλή εξομοίωση του ελέγχου ροπής γεννήτριας των ανεμογεννητριών $wtgtrq_a$ (wind turbine generator torque control).
7. Ένας απλός ελεγκτής μονάδας ανανεώσιμης ενέργειας $repc_a$ (renewable energy plant controller), ο οποίος έχει εισόδους είτε Vref και Vreg είτε Qref και Qgen. Η έξοδος του μοντέλου $repc_a$ είναι το Qref, μια εκ των εισόδων του $reec_a$.

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται η συνολική δομή του μοντέλου δεύτερης γενιάς τύπου 3:

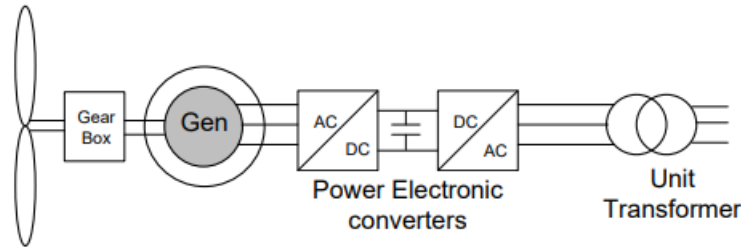


Σχήμα 3.8: Δομή μοντέλου τύπου 3 - WT3 [8]

3.3.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα - FCWT

Στον τύπο 4 της ανεμογεννήτριας (WT4) μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα, η γεννήτρια μπορεί να είναι επαγωγής σκίουρου είτε σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ολόκληρη η έξοδος ισχύος από τη γεννήτρια περνά από τον μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας. Ο μετατροπέας αυτός είναι συνδεδεμένος στον στάτη. Με μεταβλητή τροφοδοσία εισόδου, ο στάτης της γεννήτριας παρέχει τριφασική τάση εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητού μεγέθους που αργότερα διορθώνεται σε τροφοδοσία DC μέσω ανορθωτή γέφυρας 3 φάσεων με βάση διόδου. Στη συνέχεια επιτυγχάνεται ρυθμιζόμενη τροφοδοσία υψηλής τάσης σε πυκνωτή κατάλληλο για αντιστροφή αφού ενισχυθεί μέσω μετατροπέα ενίσχυσης μονών καναλιών DC / DC. Το επίπεδο τάσης και η άεργη ισχύς μπορούν να ρυθμιστούν με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Η δομή του τύπου 4 της ανεμογεννήτριας παριστάνεται στο Σχήμα 3.9.

Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι ότι έχει πιο ευνοϊκή δυναμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια διαταραχών και έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την διακύμανση της ενεργού και άεργου ισχύος. Επομένως αυτός ο τύπος μοντέλου είναι κατάλληλος για ανάλυση βραχυκυκλωμάτων και ηλεκτρομαγνητικές έρευνες.

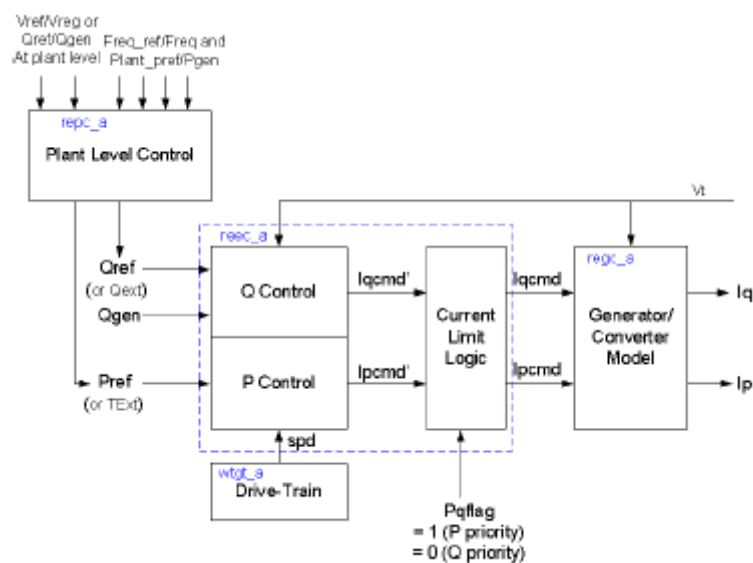


Σχήμα 3.9: Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα [7]

Σύμφωνα με την Western Electricity Coordinating Council ο τύπος 4 των ανεμογεννητριών αποτελείται από 4 επιμέρους μοντέλα:

1. Το μοντέλο γεννήτριας / μετατροπέα ανανεώσιμης ενέργειας $regc_a$ με εισόδους I_{pcmd} , I_{qcmd} και εξόδους I_p και I_q , όπως και ο τύπος 3 της ανεμογεννήτριας.
2. Το μοντέλο ηλεκτρικών ελέγχων ανανεώσιμης ενέργειας $reec_a$ με εισόδους P_{ref} , Q_{ref} , Q_{gen} και εξόδους I_{pcmd} και I_{qcmd} , όπως και ο τύπος 3 της ανεμογεννήτριας.
3. Η προσομοίωση της κίνησης - αμαξοστοιχίας $wtgt_a$ για προσομοίωση ταλαντώσεων μετάδοσης κίνησης.
4. Ένας απλός ελεγκτής μονάδας ανανεώσιμης ενέργειας $repc_a$ με εισόδους V_{ref} και V_{reg} ή Q_{ref} και Q_{gen} και έξοδο Q_{ref} , όπως και ο τύπος 3 της ανεμογεννήτριας.

Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται η συνολική δομή του μοντέλου δεύτερης γενιάς τύπου 4:



Σχήμα 3.10: Δομή μοντέλου τύπου 4 - WT4 [8]

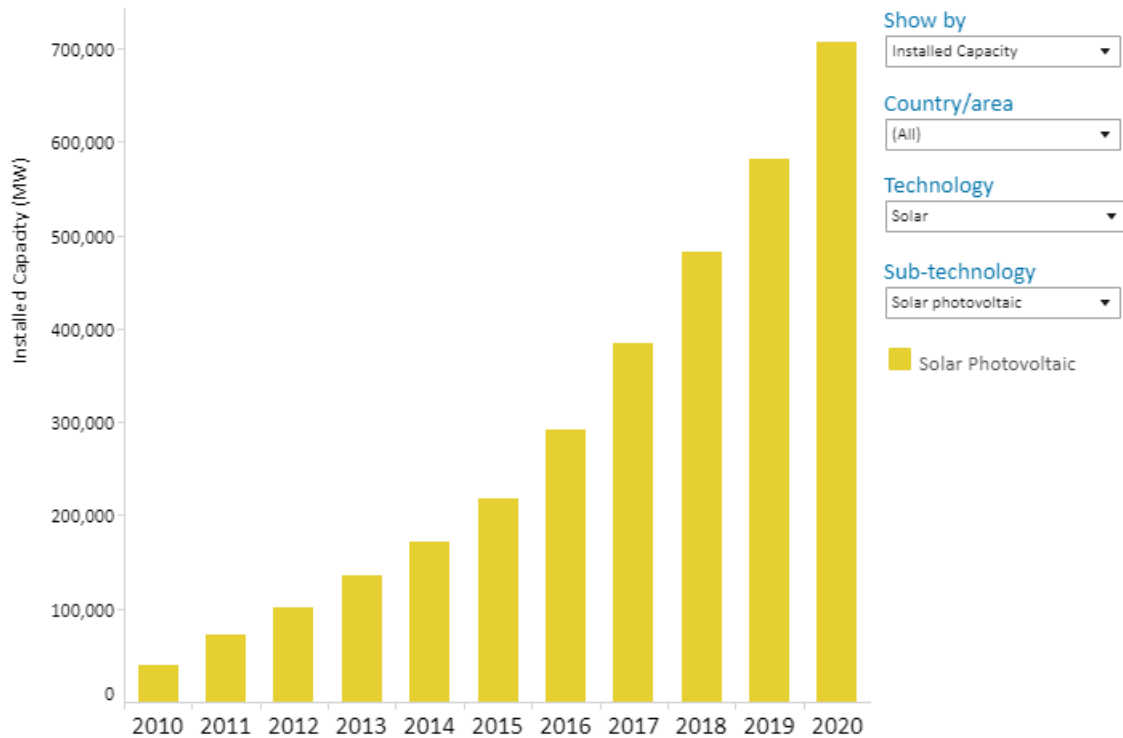
Κεφάλαιο 4

Φωτοβολταϊκά συστήματα

4.1 Ηλιακή Ενέργεια

Μια άλλη μορφή ανανεώσιμων πηγών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα Φ/Β είναι ηλεκτρικές συσκευές που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ιστορία των φωτοβολταϊκών ξεκινά το 1839, όταν ο Alexandre-Edmund Becquerel (φυσικός) παρατήρησε ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα προέκυψαν από ορισμένες χημικές αντιδράσεις που προκαλούνται από το φως. Τα πρώτα Φ/Β εφευρέθηκαν το 1954 στα Bell Telephone Laboratories στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η διάρκεια ζωής των ηλιακών πάνελ είναι περίπου 30 χρόνια και διατίθενται σε διάφορες αποχρώσεις ανάλογα με τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή. Το κόστος των Φ/Β έχει μειωθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία καθώς έχει αυξηθεί η χρήση τους και πλέον θεωρούνται ως η φθηνότερη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας.

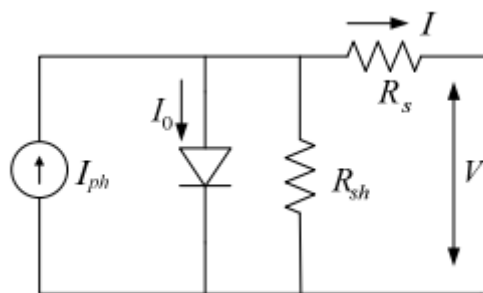
Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β πάνελ έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία, από 40,287MW το 2010 σε 707,494MW το 2020. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται αναλυτικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β πάνελ τα τελευταία 10 χρόνια σύμφωνα με το IRENA. [9]



Σχήμα 4.1: Εγκατεστημένη παραγωγή ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ[9]

4.2 Χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων

Το κλασικό μοντέλο Φ/Β συστημάτων που χρησιμοποιείται ευρέως και αντικατοπτρίζει την λειτουργία ενός Φ/Β κελιού απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Το κελί διαμορφώνεται από μια πηγή ρεύματος I_{ph} , που είναι το παραγόμενο ρεύμα από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και μια δίοδο I_0 , που είναι το ρεύμα κορεσμού, μια αντίσταση σειράς R_s , που είναι η αντίσταση του σώματος του κελιού, η αντίσταση ηλεκτροδίων, η αντίσταση του αγωγού και η αντίσταση στην επιφάνεια και μια παράλληλη αντίσταση R_{sh} , η οποία αντισταθμίζει το επιφανειακό ρεύμα διαρροής κατά μήκος της άκρης του κελιού και το ρεύμα διαρροής κατά μήκος των μικροωγμών και των κόκκων [10].



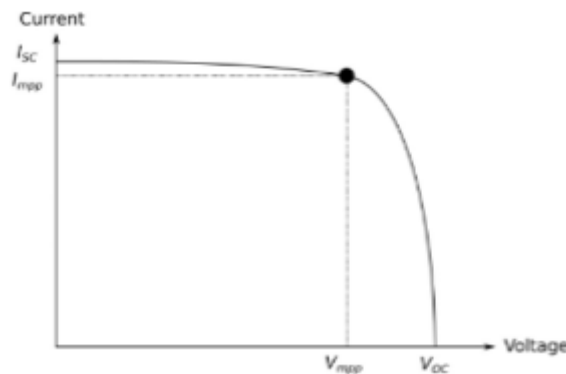
Σχήμα 4.2: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κελιού [10]

Η φυσική σχέση μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τάσης του Φ/B κελιού δίνεται από τη σχέση [10]:

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4.1)$$

,όπου I είναι το ρεύμα εξόδου από το κελί, V είναι η τάση εξόδου του κελιού, I_{ph} είναι το παραγόμενο ρεύμα από την φωτοβολταϊκή δράση, I_o είναι το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού, q είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου, k είναι η σταθερά του Boltzmann, T η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και n είναι ο παράγοντας ιδανικότητας.

Η τάση και το ρεύμα ενός Φ/B στοιχείου εξαρτάται από τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασης φορτίου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Τα Φ/B κελιά παρουσιάζονται ως πηγή ρεύματος της οποίας η τιμή είναι σχεδόν ίση με το ρεύμα βραχυκυκλώματος, αρκεί η αντίσταση φορτίου να είναι μικρή. Καθώς η αντίσταση φορτίου αυξάνεται, η αρχική μεταβολή στο ρεύμα είναι μικρή, ωστόσο, καθώς η αντίσταση φορτίου αυξάνεται περαιτέρω, το κελί αρχίζει να ενεργεί σαν πηγή τάσης με φθίνουσα ένταση όταν η τάση φθάνει στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Όσο αφορά την επίδραση από την ηλιακή ακτινοβολία, όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία το ρεύμα βραχυκυκλώματος του κελιού αυξάνεται ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος αλλάζει πολύ λίγο. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το ρεύμα βραχυκυκλώματος που συνοδεύεται από μικρή μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Έτσι, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παράγουν μέγιστη ισχύ όταν λειτουργούν στο σημείο διασταύρωσης της πηγής ρεύματος και των χαρακτηριστικών της πηγής τάσης [10]. Η τυπική καμπύλη ρεύματος – τάσης που φαίνεται στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζει το εύρος των συνδυασμών ρεύματος και τάσης.



Σχήμα 4.3: I-V χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

4.3 MPPT - Maximum Power Point Tracker

Για να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της ισχύς εξόδου από ένα Φ/Β στοιχείο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Μέγιστης Ισχύος Παρακολούθησης Σημείου MPPT. Οι μέθοδοι MPPT που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του μέγιστου σημείου ισχύος MPP είναι οι εξής [28], [29]:

- Διαταραχής και Παρατήρησης - Peturb and Observe (P&O): Σε αυτή τη μέθοδο εισάγεται μια μικρή διαταραχή στο σύστημα. Αυτή η διαταραχή προκαλεί την αλλαγή της ισχύος της ηλιακής μονάδας. Εάν η ισχύς αυξηθεί λόγω της διαταραχής τότε η διαταραχή συνεχίζεται προς αυτή την κατεύθυνση. Αφού επιτευχθεί η ισχύς αιχμής, η ισχύς την επόμενη στιγμή μειώνεται και συνεπώς μετά από αυτό η διαταραχή αντιστρέφεται. Όταν επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση ο αλγόριθμος κυμαίνεται γύρω από το σημείο αιχμής. Προκειμένου να διατηρηθεί μικρή η διακύμανση ισχύος, το μέγεθος διαταραχής διατηρείται πολύ μικρό. Ο αλγόριθμος αυξάνει ή μειώνει συνεχώς την τάση αναφοράς ή το ρεύμα με βάση την προηγούμενη τιμή ισχύος έως ότου φτάσει στο μέγιστο σημείο ισχύος MPP. Όταν $\frac{dP}{dV} > 0$ η διαταραχή μετακινεί το σημείο λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας προς το MPP και η μέθοδος P&O θα συνεχίσει να διαταράσσει την τάση της Φ/Β συστοιχίας στην ίδια κατεύθυνση. Αντίθετα, όταν $\frac{dP}{dV} < 0$ η διαταραχή μετακινεί το σημείο λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας μακριά από το MPP και η μέθοδος P&O αντιστρέφει την κατεύθυνση της διαταραχής.
- Αύξηση Αγωγιμότητας - Incremental Conductance (IC): Αυτή η μέθοδος μπορεί να καθορίσει ότι το MPPT έχει φτάσει στο MPP και να σταματήσει να διαταράσσει το σημείο λειτουργίας. Οι βασικές εξισώσεις που εφαρμόζονται σε αυτόν τον αλγόριθμο για να καθοριστεί η θέση μετακίνησης είναι οι εξής:

1. $\frac{dP}{dV} = 0$ βρίσκεται στο σημείο MPP
2. $\frac{dP}{dV} > 0$ βρίσκεται αριστερά του MPP
3. $\frac{dP}{dV} < 0$ βρίσκεται δεξιά του MPP

Ακόμα η θέση του MPP καθορίζεται και από την κλίση της καμπύλης ισχύος της Φ/Β μονάδας, όπου η κλίση της καμπύλης ισχύος είναι μηδέν στο MPP, αυξάνεται στην αριστερή πλευρά του MPP και μειώνεται στη δεξιά πλευρά του MPP.

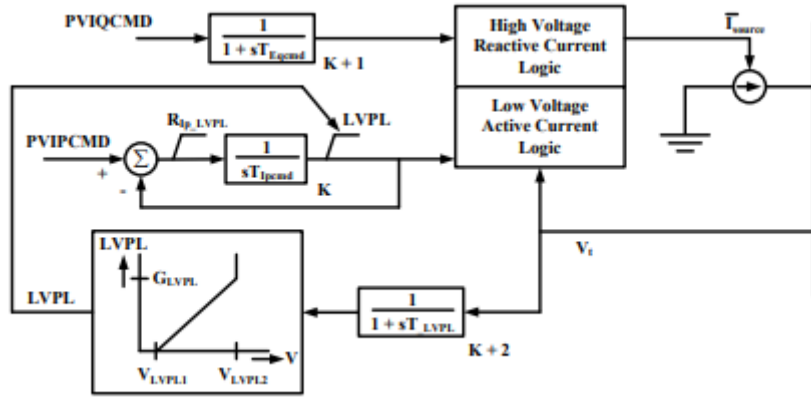
Έτσι αυτή η μέθοδος έχει πλεονέκτημα έναντι της μεθόδου P&O καθώς μπορεί να καθορίσει πότε το MPPT έχει φτάσει στο MPP και να σταματήσει να προκαλεί διαταραχές. Επίσης, η Αυξητική Αγωγιμότητα μπορεί να παρακολουθεί ταχέως αυξανόμενες και μειωμένες συνθήκες ακτινοβολίας με υψηλότερη ακρίβεια από την Διαταραχή και Παρατήρηση. Για αυτούς τους λόγους η μέθοδος Αύξησης Αγωγιμότητας χρησιμοποιείται για δυναμική προσομοίωση [10].

- **Παρασιτική Χωρητικότητα:** Η μέθοδος παρασιτικής χωρητικότητας είναι μια βελτίωση της μεθόδου σταδιακής αγωγιμότητας που λαμβάνει υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητες των ηλιακών κυττάρων στη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η παρασιτική χωρητικότητα χρησιμοποιεί τον κυματισμό εναλλαγής του MPPT για να διαταράξει τη συστοιχία. Για να ληφθεί υπόψη η παρασιτική χωρητικότητα, ο μέσος κυματισμός της ισχύος και της τάσης του πίνακα, που δημιουργείται από τη συχνότητα μεταγωγής, μετριέται χρησιμοποιώντας μια σειρά φίλτρων και πολλαπλασιαστών και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας της συστοιχίας. Ο αλγόριθμος επαυξητικής αγωγιμότητας χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης για την κίνηση του σημείου λειτουργίας του MPPT. Ένα μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι η παρασιτική χωρητικότητα σε κάθε μονάδα είναι πολύ μικρή και θα τεθεί σε λειτουργία μόνο σε μεγάλες φωτοβολταϊκές συστοιχίες όπου συνδέονται παράλληλα πολλές σειρές μονάδων. Επίσης, ο μετατροπέας DC-DC διαθέτει έναν αρκετά μεγάλο πυκνωτή εισόδου που χρησιμοποιείται για να φιλτράρει τον μικρό κυματισμό στην ισχύ της συστοιχίας με αποτέλεσμα ο πυκνωτής να καλύπτει τα συνολικά αποτελέσματα της παρασιτικής χωρητικότητας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- **Ανιχνευτής μέγιστου σημείου ελέγχου τάσης:** Θεωρείται ότι ένα μέγιστο σημείο ισχύος μιας συγκεκριμένης ηλιακής Φ/Β μονάδας βρίσκεται περίπου 0,75 φορές από την τάση ανοιχτού κυκλώματος της μονάδας. Έτσι, με τη μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, μπορεί να δημιουργηθεί τάση αναφοράς και μπορεί να εφαρμοστεί ένα σχέδιο ελέγχου τάσης τροφοδοσίας προς τα εμπρός για να φέρει την τάση της φωτοβολταϊκής μονάδας στο σημείο της μέγιστης ισχύος. Ένα πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος της μονάδας ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Έτσι όταν η θερμοκρασία αυξάνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος της μονάδας αλλάζει.

4.4 Δυναμικό μοντέλο Φ/B

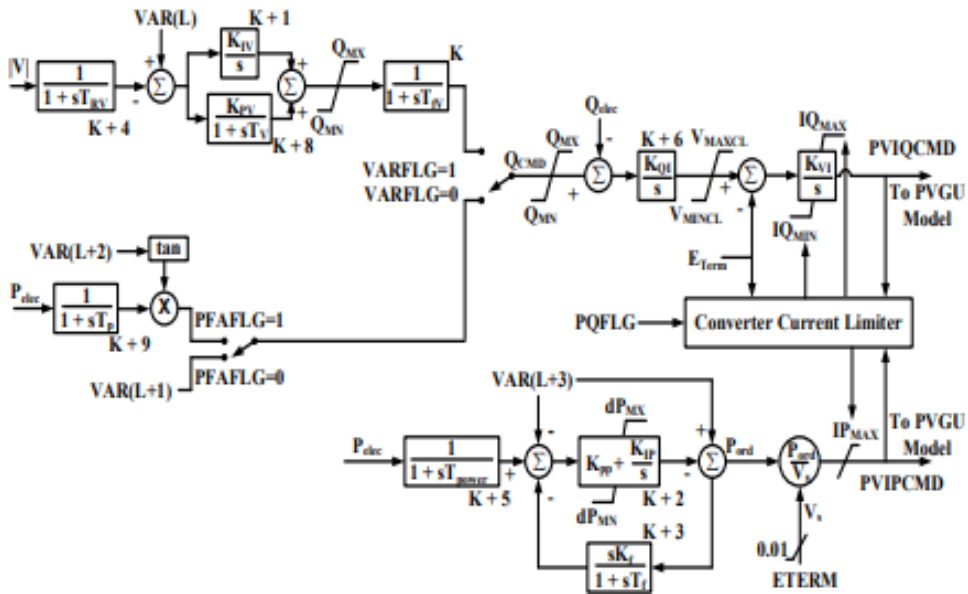
Το δυναμικό μοντέλο των Φ/B συστημάτων που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα PSS/E αναπτύχθηκε για να προσομοιώσει την απόδοση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης συνδεδεμένης στο δίκτυο μέσω ενός συστήματος μετατροπής με βάση τα ηλεκτρονικά ισχύος. Το μοντέλο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο γενικό μοντέλο ανέμου τύπου 4, WT4, με την πρόσθετη ικανότητα προσομοίωσης αλλαγών εξόδου λόγω ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, το μοντέλο ενσωματώνεται με τη μονάδα μετατροπέα ισχύος / γεννήτριας και την ηλεκτρική μονάδα ελέγχου της αιολικής εγκατάστασης τύπου 4. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μοντέλο WT4 είναι ότι οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις συνδέονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία που χρησιμοποιείται από το WT4. Από το σημείο της σύνδεσης DC έως τη σύνδεση δικτύου, τα Φ/B και το μοντέλο WT4 χρησιμοποιούν παρόμοια τεχνολογία ελέγχου και μετατροπέα για την παροχή ισχύος στο δίκτυο.

Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερα εξαρτήματα, μια μονάδα μετατροπέα (power converter/generator module - PVGU), μια ηλεκτρική μονάδα ελέγχου μετατροπέα (electrical control module - PVEU), μια μονάδα πίνακα (panel module - PANEL) και μια μονάδα ακτινοβολίας (irradiance module - IRRAD). Η μονάδα IRRAD παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής προφίλ ακτινοβολίας που περιλαμβάνει έως και δέκα (10) σημεία δεδομένων ως προς τις τιμές χρόνου και ακτινοβολίας. Σε κάθε βήμα προσομοίωσης, το μοντέλο θα υπολογίσει την τιμή της γραμμικοποιημένης ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, η τιμή ακτινοβολίας τροφοδοτείται στη μονάδα PANEL η οποία υπολογίζει την ισχύ DC από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στο αντίστοιχο επίπεδο ακτινοβολίας με βάση τις καμπύλες I-V από κατασκευαστές φωτοβολταϊκών. Η μονάδα μετατροπέα (PVGU) υπολογίζει την τρέχουσα έγχυση στο δίκτυο με βάση τις φιλτραρισμένες εντολές ενεργού και άεργου ισχύος από την ηλεκτρική μονάδα ελέγχου (PVEU). Και τα δύο συστατικά του εγχόμενου ρεύματος υποβάλλονται σε επεξεργασία υπό συνθήκες υψηλής / χαμηλής τάσης μέσω του ειδικού λογικού διαγράμματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 [11], [30].



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα της μονάδας PVGU στο PSS/E [11]

Το βασικό στοιχείο στο σύστημα μετατροπής με βάση τον μετατροπέα είναι το σχετικό σύστημα ελέγχου. Στο PSS/E, η ηλεκτρική μονάδα ελέγχου για το σύστημα παραγωγής φωτοβολταϊκών (PVEU) φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από αποσυνδεδεμένες λογικές ενεργού και άεργου ελέγχου ισχύος για την επίτευξη διαφορετικών στόχων ρύθμισης.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα της μονάδας PVEU στο PSS/E [11]

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση

5.1 Στοιχεία δικτύου και περιγραφή μελέτης

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας χρησιμοποιείται το δίκτυο IEEE-24 ζυγών. Το δίκτυο περιλαμβάνει 10 γεννήτριες, 16 φορτία, 5 μετασχηματιστές και 29 γραμμές μεταφοράς. Το σύστημα αποτελείται από εγκαταστάσεις μεταφοράς στα 230 kV και 138 kV. Στην διπλωματική αυτή ο ζυγός 1 του συστήματος θεωρείται ως Slack bus. Για να μελετηθεί η μεταβατική ευστάθεια σε ένα σύστημα 24 ζυγών εφαρμόζονται τριφασικά βραχυκυκλώματα στο δίκτυο και υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος που χρειάζεται για την εκκαθάριση τους ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του δικτύου και να αποφευχθεί ο αποσυγχρονισμός κάποιας γεννήτριας.

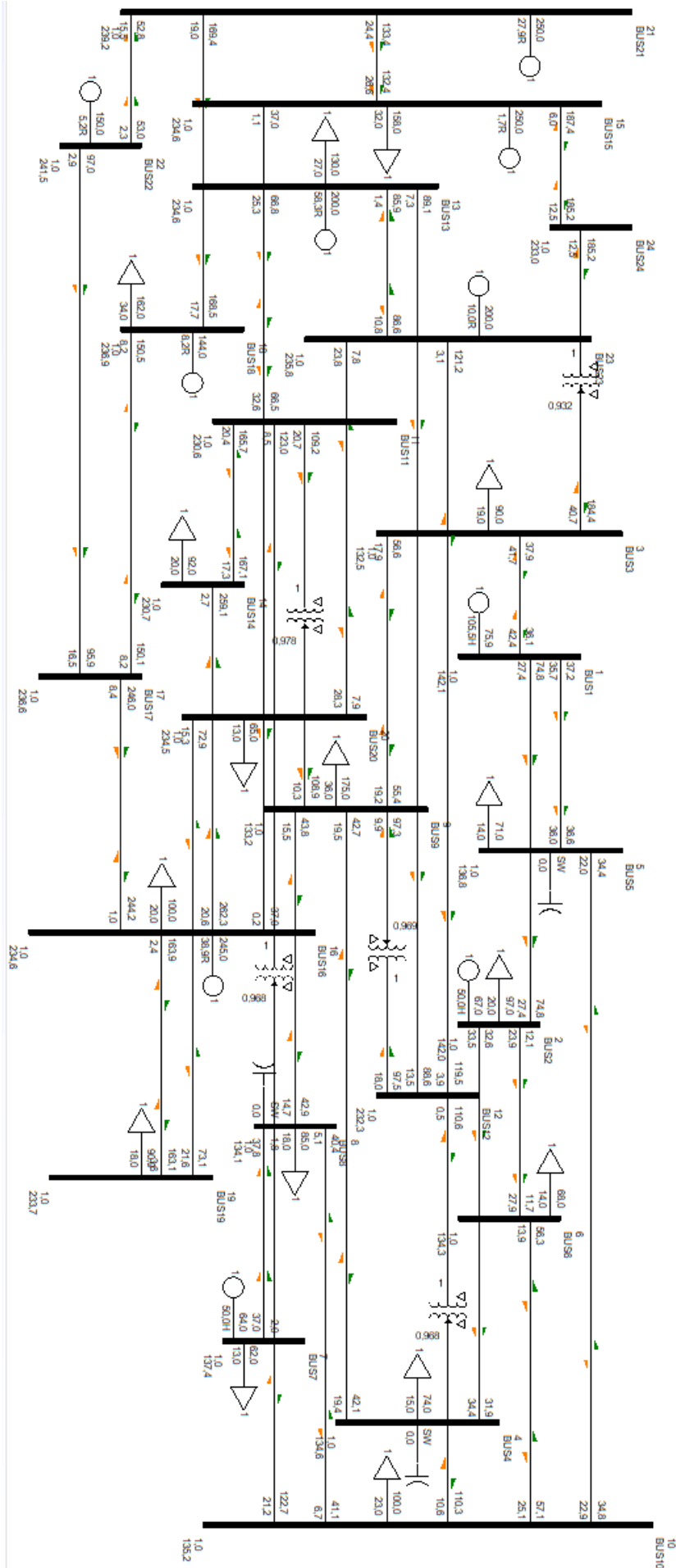
Πιο συγκεκριμένα στην διπλωματική αυτή, πρώτα εξετάζεται πως επηρεάζεται η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος από ένα βραχυκύκλωμα όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από τις υπάρχουσες γεννήτριες. Επιπλέον εξετάζεται πως επηρεάζεται η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος από ένα βραχυκύκλωμα όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό των υπάρχουσών γεννητριών και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Εξετάζεται εάν η εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος σε ένα δίκτυο με ΑΠΕ επηρεάζει την συμπεριφορά του δικτύου ως προς την ευστάθεια. Σε αυτή την διπλωματική θα χρησιμοποιηθούν μόνο ανεμογεννήτριες από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν έχουν δυναμικά στοιχεία και δεν δημιουργούν συνήθως προβλήματα ευστάθειας λόγω της προβλεψιμότητας της λειτουργίας τους.

Στη διπλωματική αυτή εφαρμόζονται 3 σενάρια για την μελέτη της μεταβατικής ευστά-

θειας ενός συστήματος:

- Α) Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από τις υπάρχουσες γεννήτριες στο δίκτυο των 24 ζυγών.
- Β) Οι γεννήτριες του ζυγού 2 και 7 του δικτύου των 24 ζυγών αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες τύπου WT4. Οι ανεμογεννήτριες αντικαθιστούν το 100% της παραγωγής των αρχικών γεννητριών.
- Γ) Οι γεννήτριες του ζυγού 2 και 7 του δικτύου των 24 ζυγών αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες τύπου WT4 και επιπλέον προστίθεται στο δίκτυο μια ανεμογεννήτρια τύπου WT4 50MW. Η ανεμογεννήτρια προστίθεται στο δίκτυο μέσω ενός επιπλέον ζυγού 25, ο οποίος συνδέεται στο δίκτυο με τον ζυγό 8 μέσω μιας γραμμής μεταφοράς.

Στο Σχήμα 5.1 παριστάνεται το δίκτυο IEEE-24 ζυγών που θα χρησιμοποιηθεί στην διπλωματική μέσα από το πρόγραμμα PSS/E της Siemens. Στο Σχήμα αναπαρίστανται στους ζυγούς οι τιμές της τάσης σε kV και pu, στις γεννήτριες οι τιμές της πραγματικής (MW) και άεργης (MVAR) ισχύς, στα φορτία το ποσό που καταναλώνουν σε MW και MVAR, στις γραμμές μεταφοράς το ποσό που κινείται πάνω τους σε MW και MVAR.



Σχήμα 5.1: Δίκτυο IEEE-24 ζυγών

5.2 Διαδικασία μελέτης μεταβατικής ευστάθειας

Για να μελετηθεί η ευστάθεια σε ένα δίκτυο χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Είναι δεδομένο ότι για να είναι ένα σύστημα ευσταθές πρέπει να επιστρέφει στον συγχρονισμό του μετά από ένα βραχυκύκλωμα. Η ευστάθεια ενός συστήματος μελετάται από τις καμπύλες του δικτύου που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία που καταγράφονται με σκοπό να μελετήσουμε την ευστάθεια του συστήματος είναι τα εξής:

- Η σχετική γωνία ισχύος δ κάθε γεννήτριας ως προς την γωνία της γεννήτριας του ζυγού αναφοράς (σε αυτό το δίκτυο την γεννήτρια 1) σε σχέση με τον χρόνο.
- Η πραγματικής ισχύς κάθε γεννήτριας σε σχέση με τον χρόνο.
- Η άεργη ισχύς κάθε γεννήτριας σε σχέση με τον χρόνο.
- Η συχνότητα κάθε γεννήτριας και του ζυγού σφάλματος σε σχέση με τον χρόνο.
- Η τάση του ζυγού κάθε γεννήτριας και του ζυγού σφάλματος σε σχέση με τον χρόνο.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τον υπολογισμό των κρίσιμων χρόνων είναι τα εξής:

1. Εφαρμογή βραχυκυκλώματος σε ένα σημείο του δικτύου την χρονική στιγμή t_0 .
2. Επιλέγεται να ελέγχεται αν το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του με ένα χρονικό βήμα Δt . Αν την χρονική στιγμή $t_1 = t_0 + \Delta t$ το σύστημα διατηρεί την ευστάθεια του ο έλεγχος επαναλαμβάνεται με νέο $t_0 = t_0 + \Delta t$. Αν την χρονική στιγμή t_1 το σύστημα χάνει την ευστάθειά του τότε η εκκαθάριση του σφάλματος πρέπει να γίνει την χρονική στιγμή $t_2 = t_1 - \Delta t$ και ως κρίσιμος χρόνος ορίζεται η χρονική στιγμή $t_{crit} = t_2 - t_0$.
3. Την στιγμή που γίνεται εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγουν οι διακόπτες ισχύος της γραμμής σφάλματος.
4. Η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι κάποια χρονική στιγμή t_3 που κλείνουν οι διακόπτες ισχύος της γραμμής σφάλματος και ξαναμπαίνει σε λειτουργία.

5.3 Προσομοίωση για τον υπολογισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης

Στην διπλωματική αυτή θα εξεταστεί αν το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του και οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης για τα εξής στερεά τριφασικά σφάλματα:

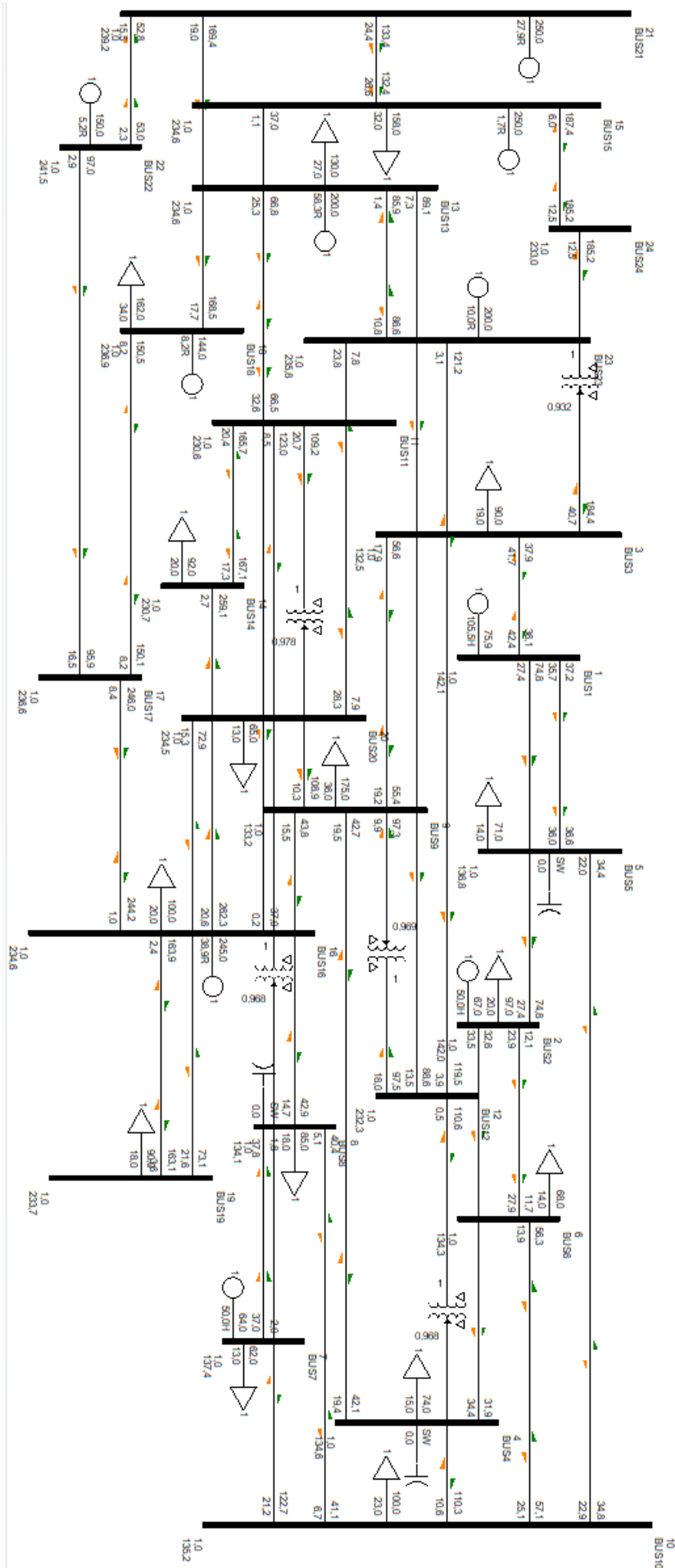
1. Μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17 (σφάλμα κοντά σε γεννήτρια)
2. Μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19 (σφάλμα απομακρυσμένο από γεννήτρια)
3. Μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12 (σφάλμα απομακρυσμένο από γεννήτρια)
4. Μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στο ζυγό 21 (σφάλμα πάνω σε γεννήτρια)

Παρακάτω υπολογίζονται οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης αυτών των σφαλμάτων για τα 3 σενάρια ξεχωριστά.

5.4 Α) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων στο δίκτυο 24 ζυγών

Στο πρώτο σενάριο η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από τις υπάρχουσες γεννήτριες και υπολογίζεται η δυνατότητα αυτού του δικτύου να διατηρήσει την ευστάθειά του μετά από κάποια σοβαρή διαταραχή. Η ενεργός και άεργη ισχύ των γεννητριών του συστήματος φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το δίκτυο των 24 ζυγών που θα χρησιμοποιηθεί στο 1ο σενάριο για να υπολογιστούν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης.



Σχήμα 5.2: Δίκτυο 24 ζυγών

Πίνακας 5.1: Ενεργός και άεργη ισχύ των γεννητριών του συστήματος

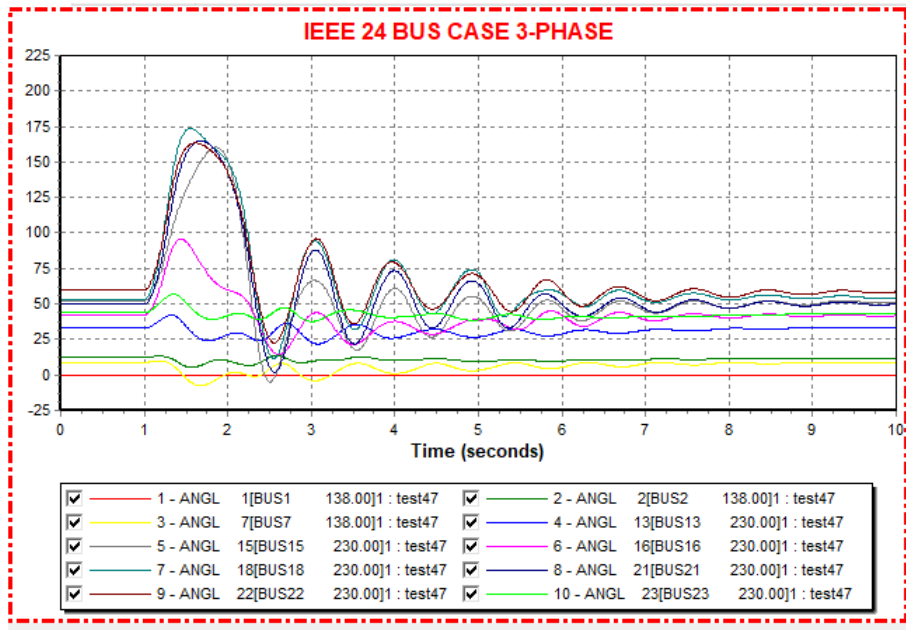
Bus	kV	PGen(MW)	PMax(MW)	PMin (MW)	QGen(MVar)	QMax(MVar)	QMin(MVar)
1	138	75,9163	200	20	105,4843	100	-100
2	138	67,0001	100	10	50	50	-50
7	138	63,999	100	10	50,0003	50	-50
13	230	200	250	25	58,2617	150	-50
15	230	250,0001	300	30	-1,7178	150	-150
16	230	245	300	25	38,9243	150	-150
18	230	144,0001	150	15	8,1551	60	-60
21	230	250	300	30	27,8836	150	-150
22	230	150	180	20	5,1838	150	-150
23	230	200	250	25	9,9562	100	-100

5.4.1 Α1: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17

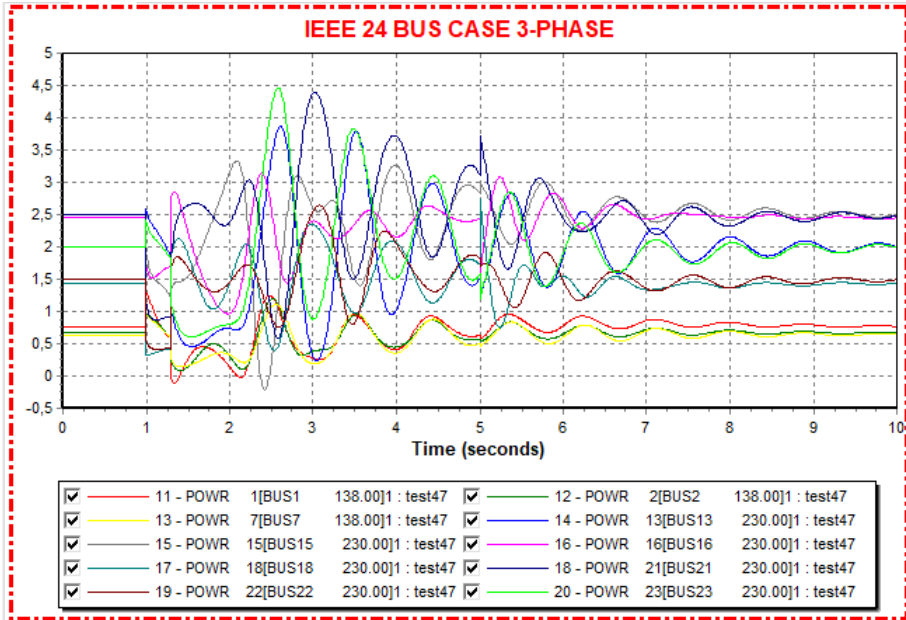
Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1s$ στην γραμμή μεταφοράς 17-18, κοντά στον ζυγό 17 (βραχυκύκλωμα κοντά σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,3sec$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,3sec$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 17-18. Την στιγμή $t=5sec$ η γραμμή μεταφοράς 17-18 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10sec$. Στο Σχήμα 5.3 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.4 και 5.5 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.6 και 5.7 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,35sec$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.8 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.2

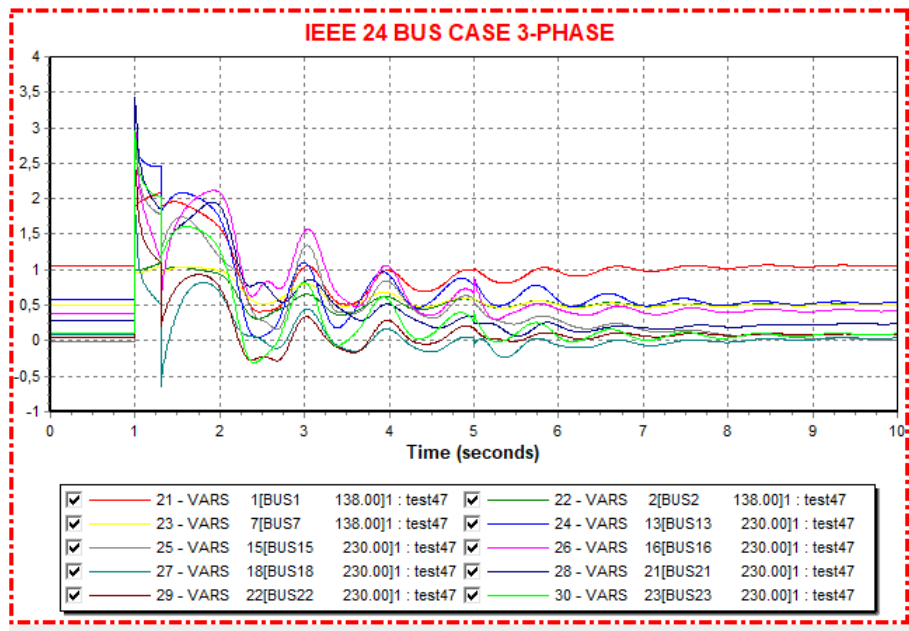
παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



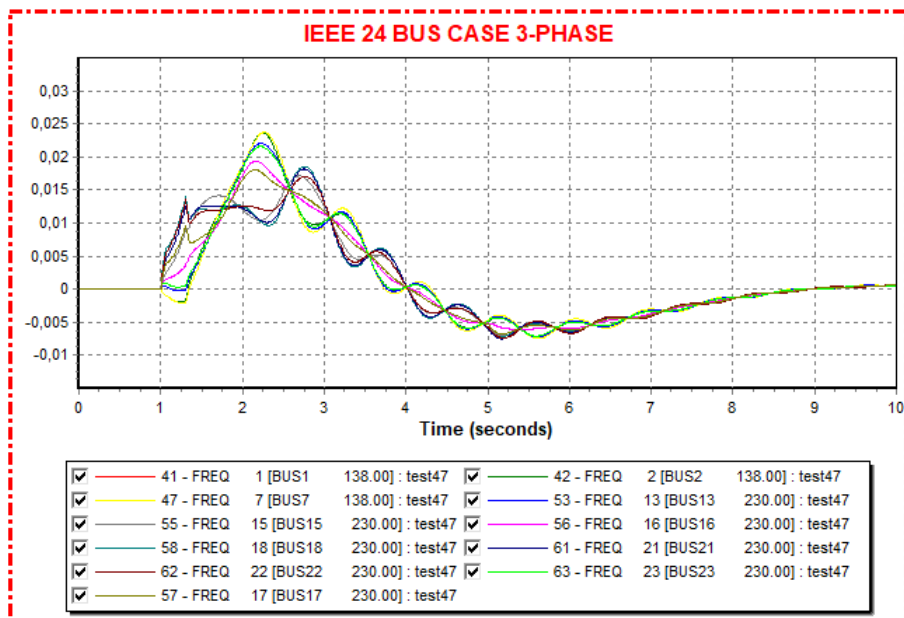
Σχήμα 5.3: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$



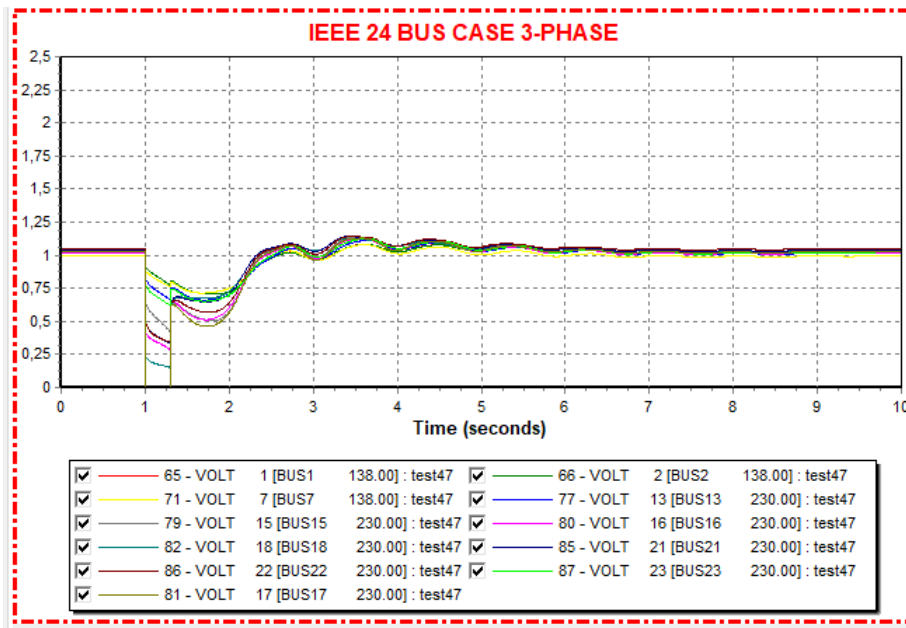
Σχήμα 5.4: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$



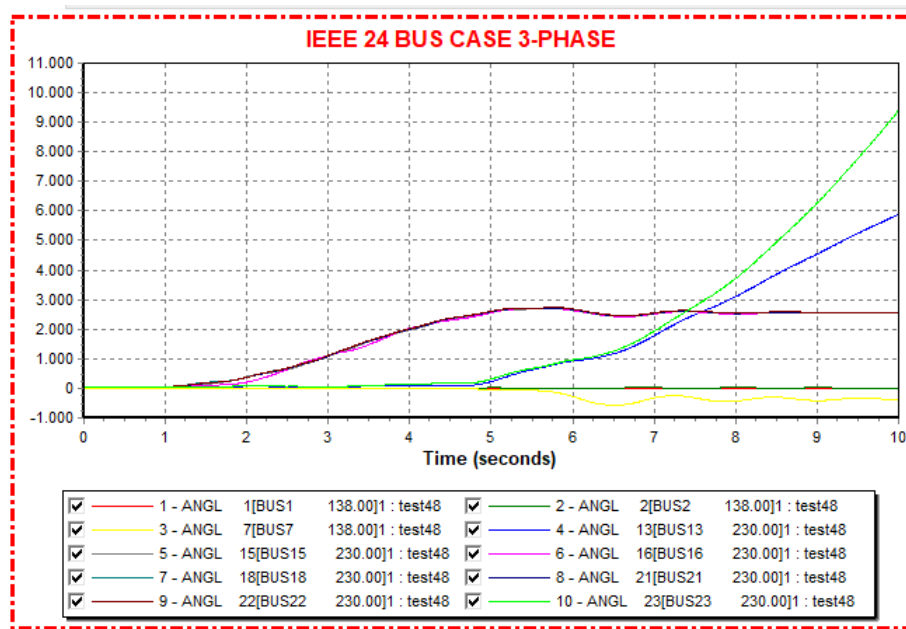
Σχήμα 5.5: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$



Σχήμα 5.6: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$



Σχήμα 5.7: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$



Σχήμα 5.8: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,35\text{sec}$

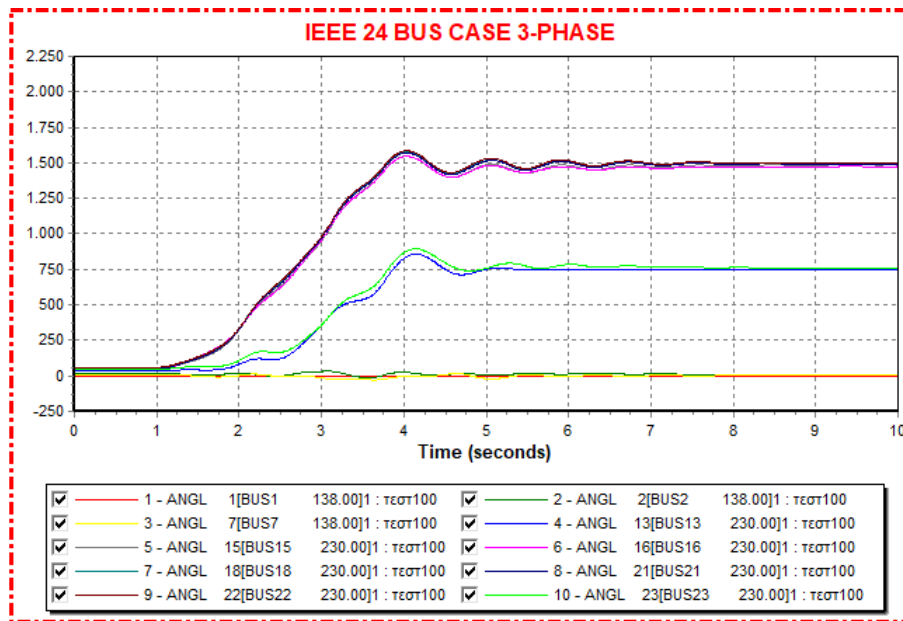
Πίνακας 5.2: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 17-18
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,3\text{sec}$
Open fault	$t=1,3\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,3\text{sec}$

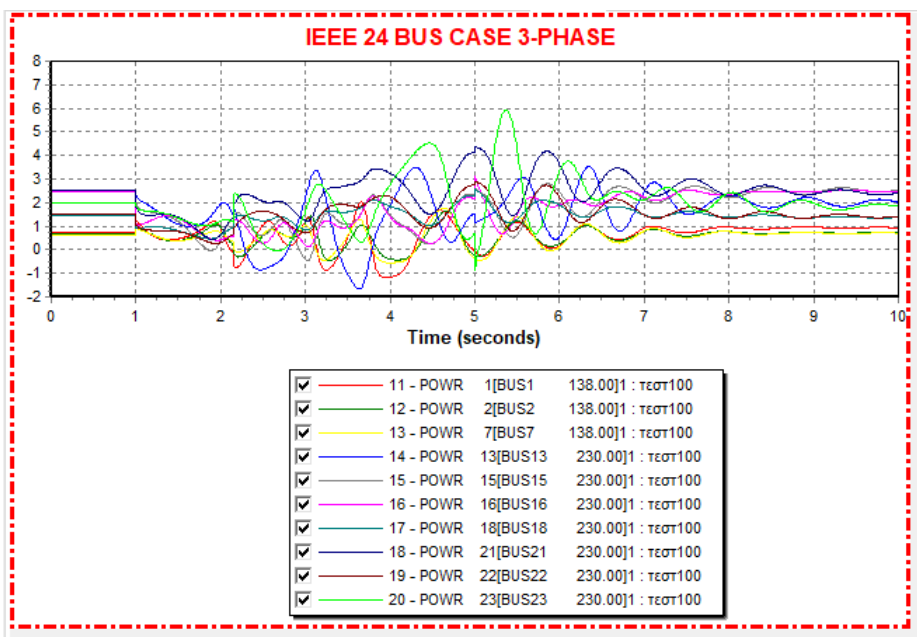
5.4.2 Α2: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 19-20, κοντά στον ζυγό 19 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=1,15\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=2,15\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 19-20. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 19-20 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.9 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.10 και 5.11 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.12 και 5.13 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

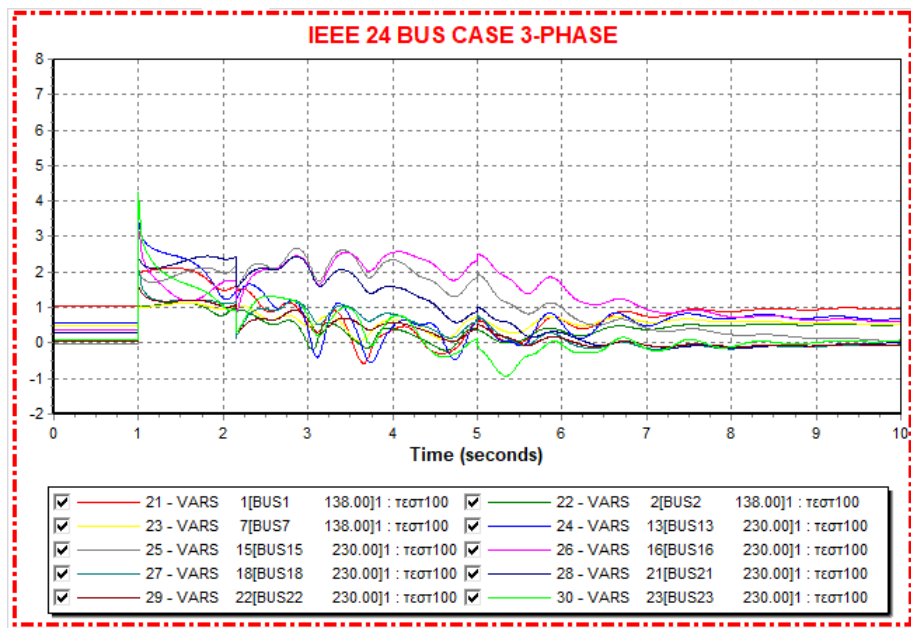
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=2,2\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.14 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



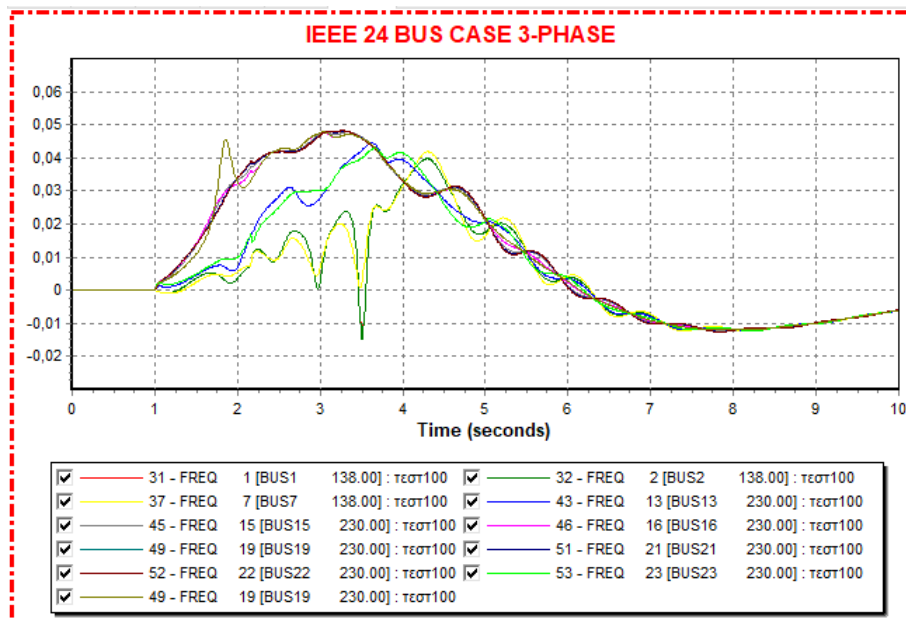
Σχήμα 5.9: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15\text{sec}$



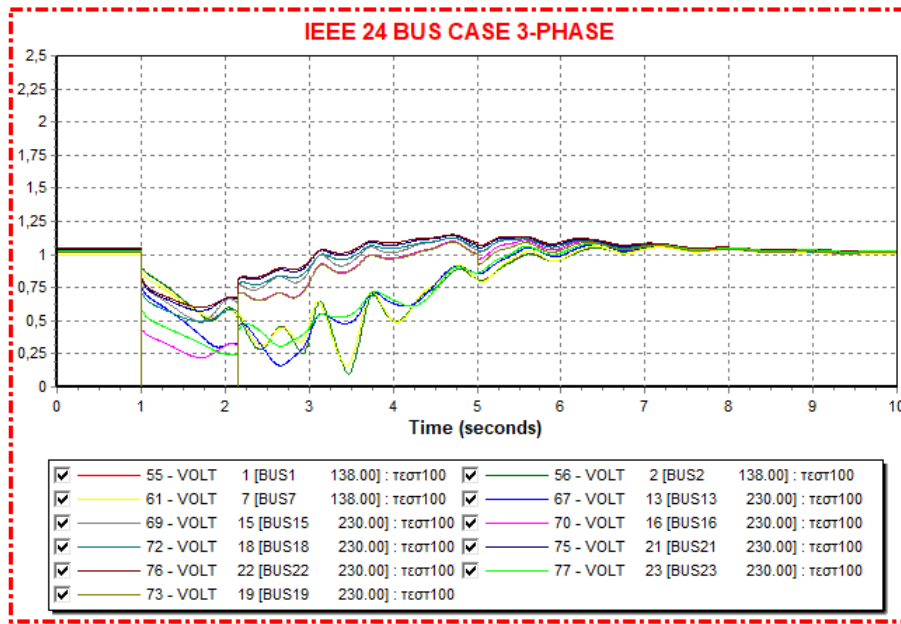
Σχήμα 5.10: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15\text{sec}$



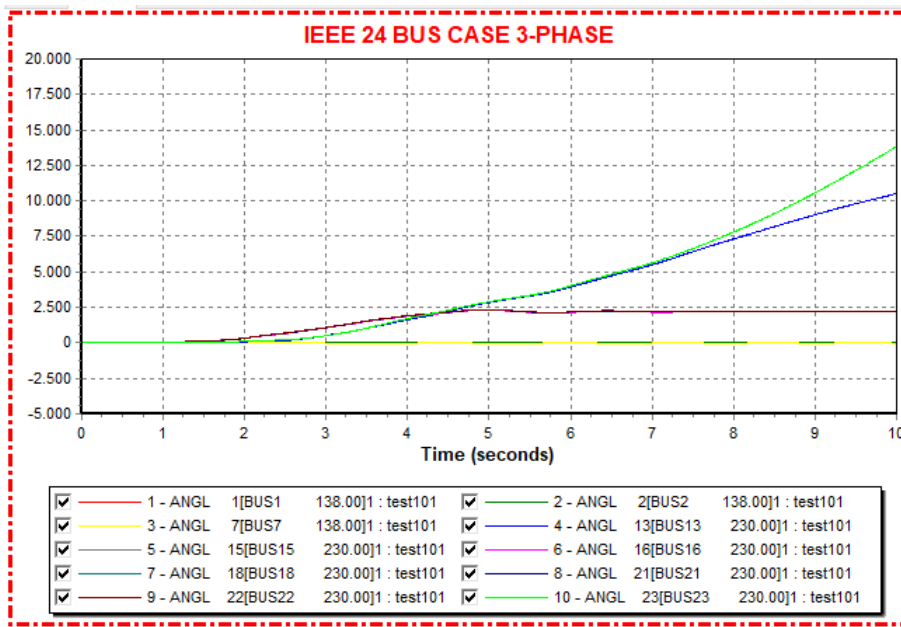
Σχήμα 5.11: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15\text{sec}$



Σχήμα 5.12: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15\text{sec}$



Σχήμα 5.13: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,15\text{sec}$



Σχήμα 5.14: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,5\text{sec}$

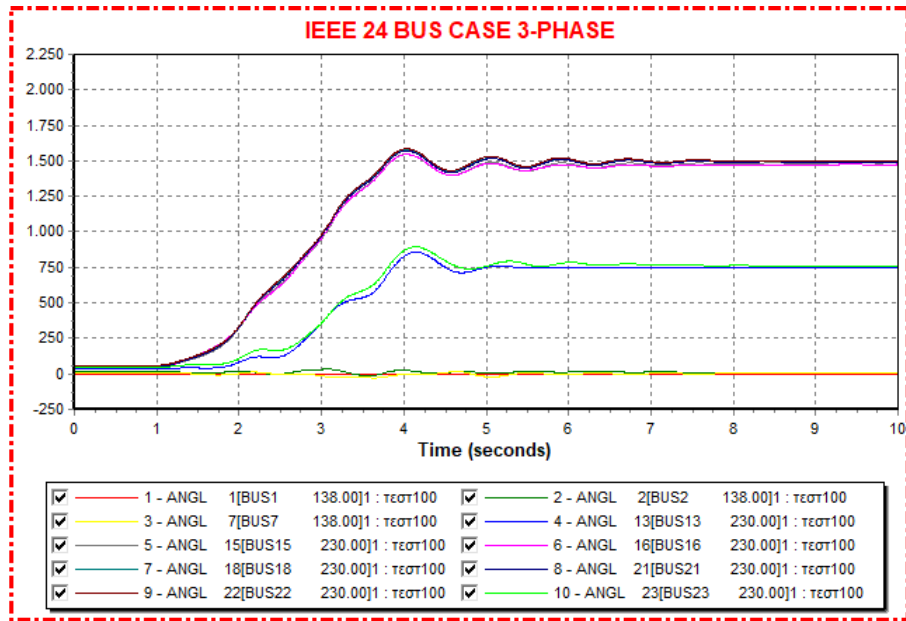
Πίνακας 5.3: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 19-20
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=2,15\text{sec}$
Open fault	$t=2,15\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=1,15\text{sec}$

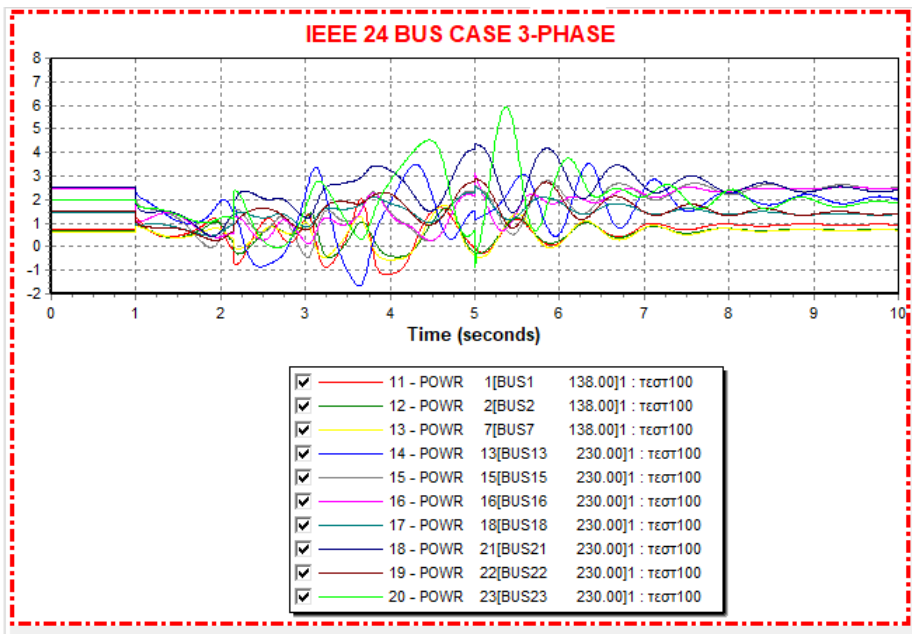
5.4.3 Α3: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 12-10, κοντά στον ζυγό 12 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=5,2\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=6,2\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 12-10. Την στιγμή $t=10\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 12-10 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=15\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.15 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.16 και 5.17 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.18 και 5.19 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

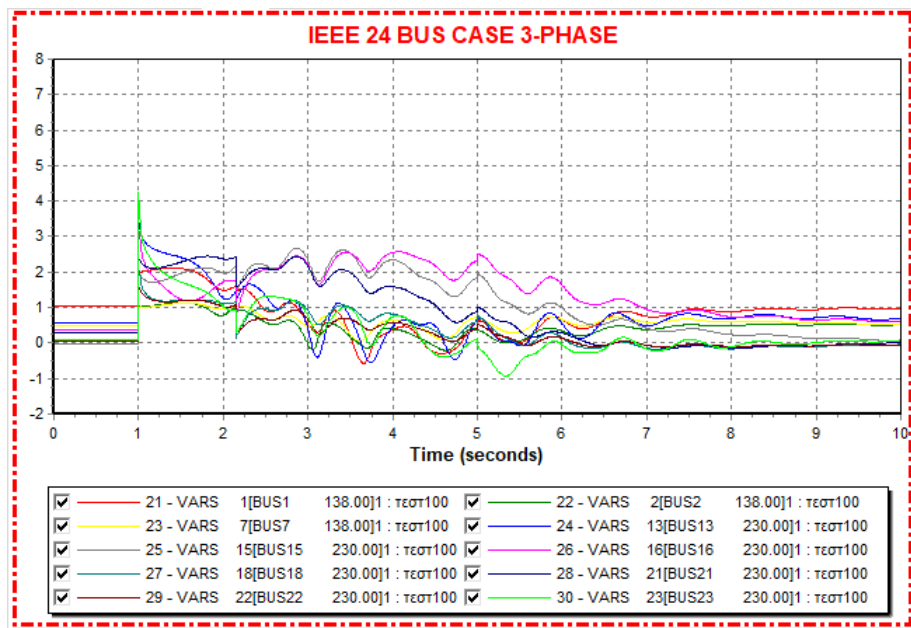
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec , δηλαδή την στιγμή $t=6,25\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.19 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.20 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



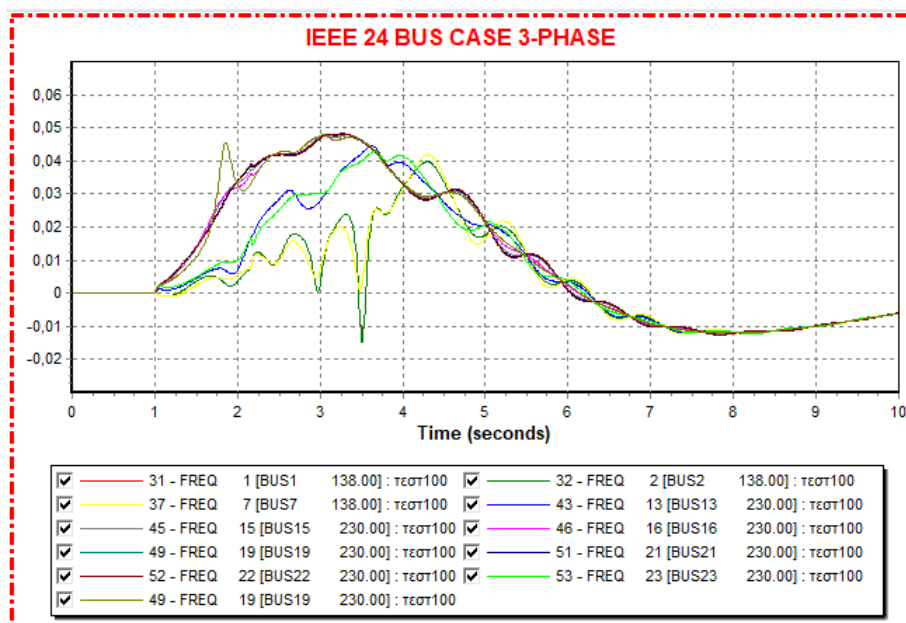
Σχήμα 5.15: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$



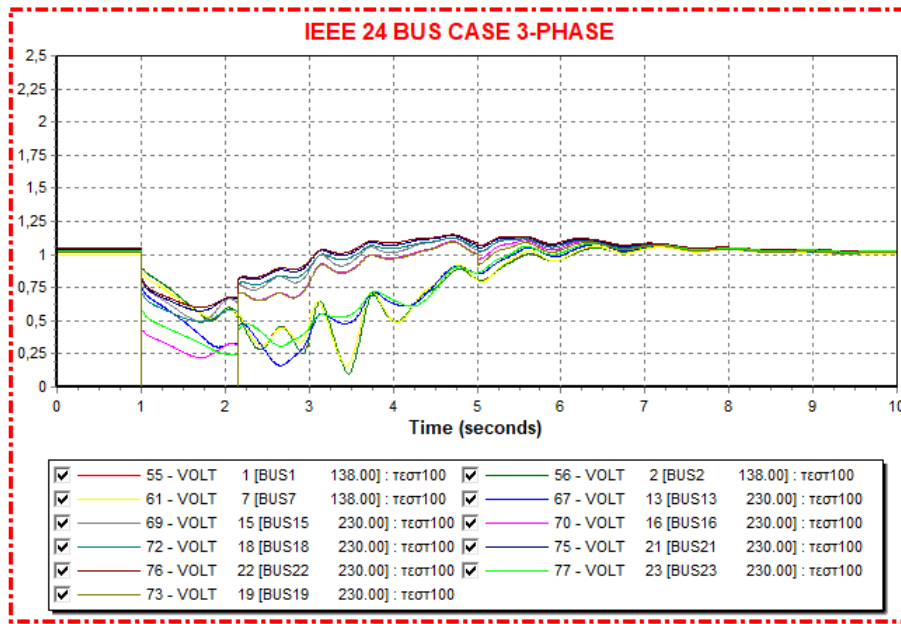
Σχήμα 5.16: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$



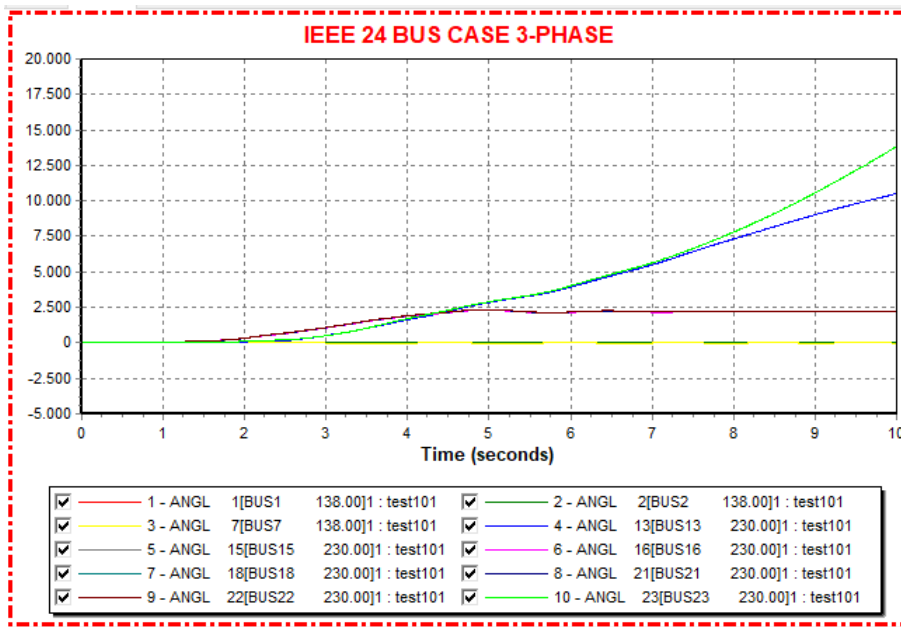
Σχήμα 5.17: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$



Σχήμα 5.18: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$



Σχήμα 5.19: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,2\text{sec}$



Σχήμα 5.20: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=6,25\text{sec}$

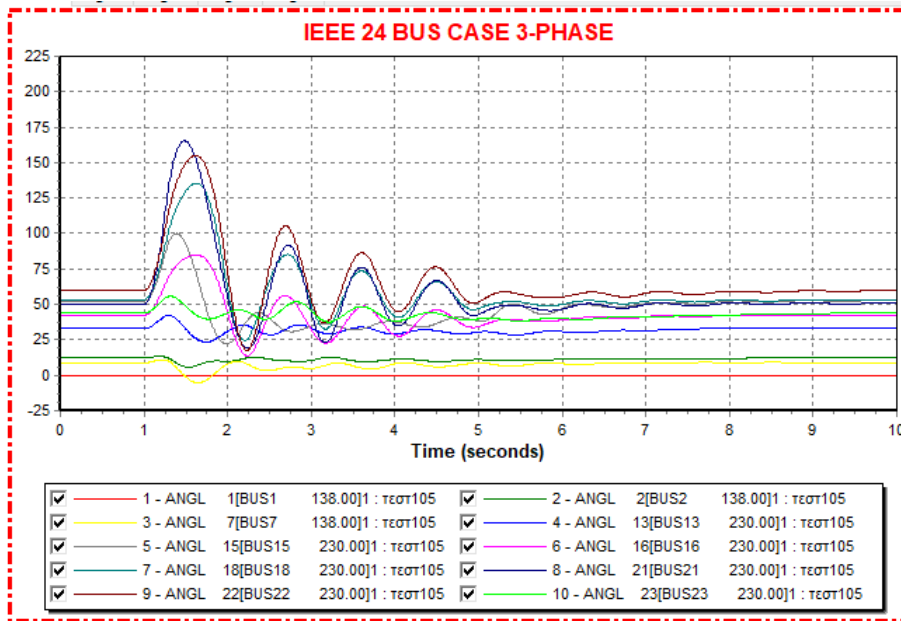
Πίνακας 5.4: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 12-10
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=6,2\text{sec}$
Open fault	$t=6,2\text{sec}$
Close line	$t=10\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=5,2\text{sec}$

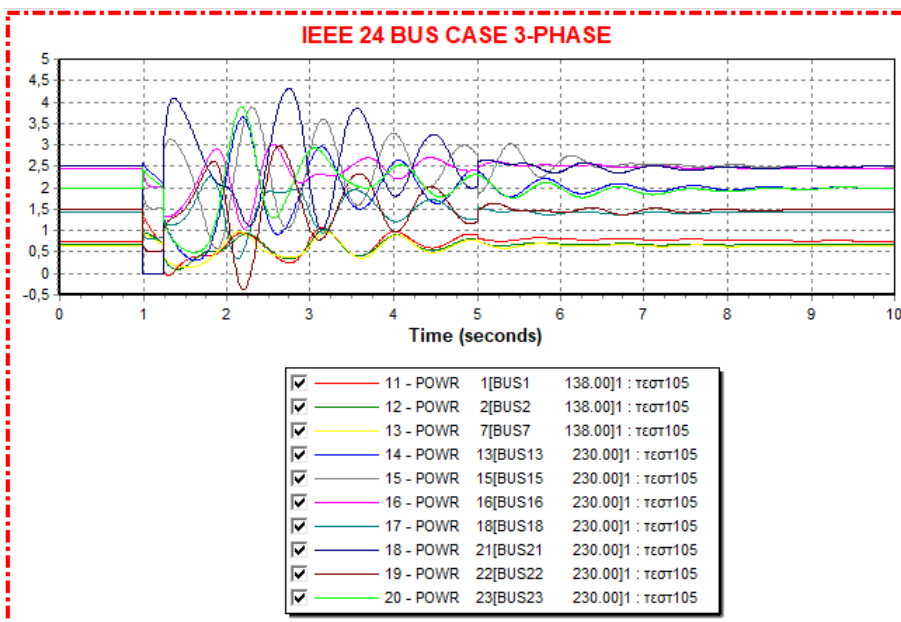
5.4.4 Α4: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 21-15, κοντά στον ζυγό 21 (βραχυκύκλωμα πάνω σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,25\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,25\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 21-15. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 21-15 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.21 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.22 και 5.23 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.24 και 5.25 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

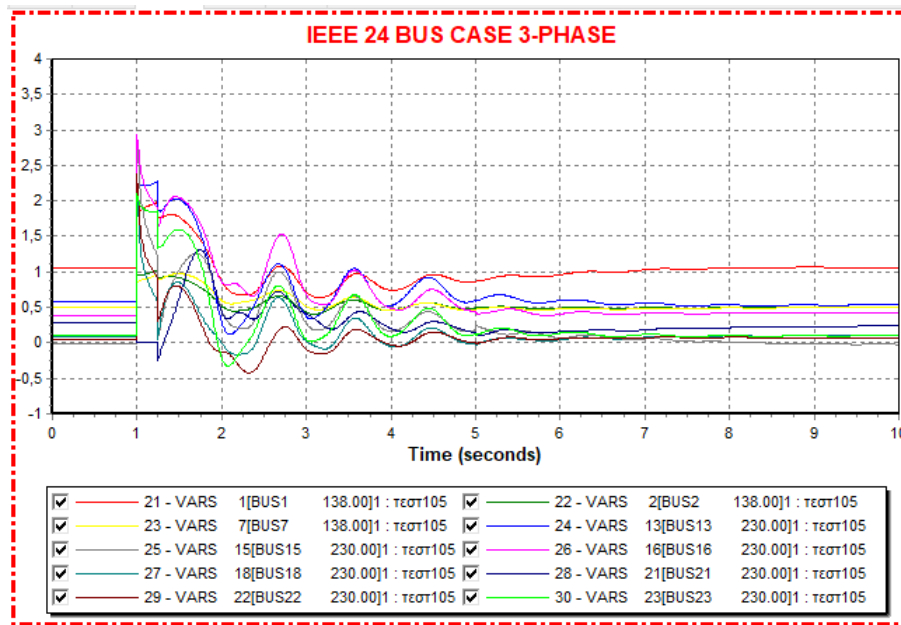
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,3\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.26 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



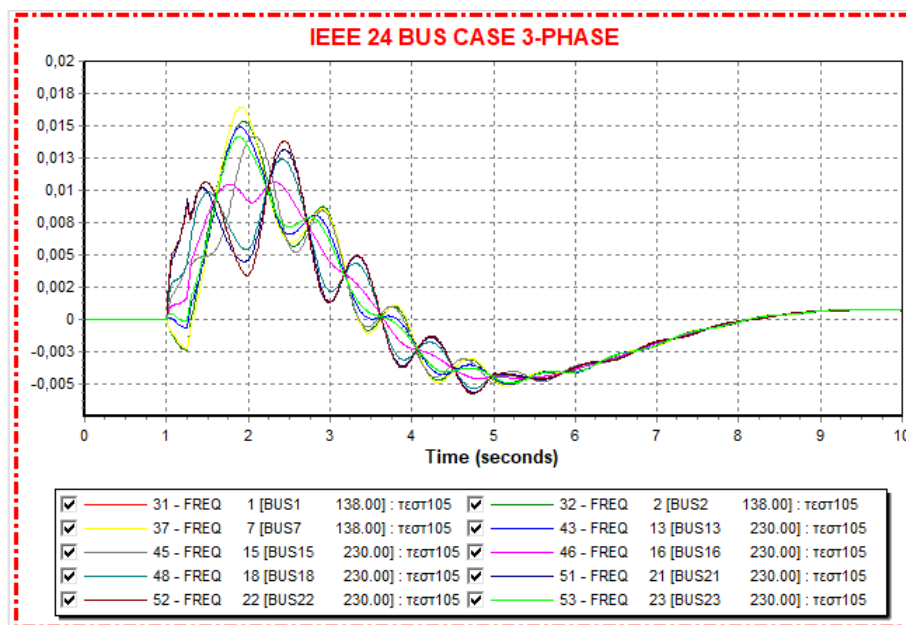
Σχήμα 5.21: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



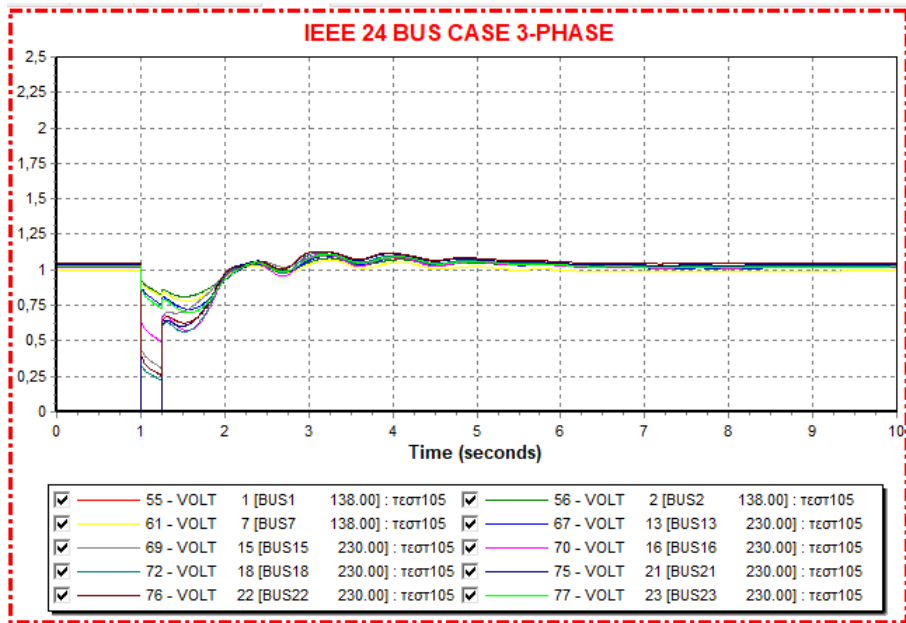
Σχήμα 5.22: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



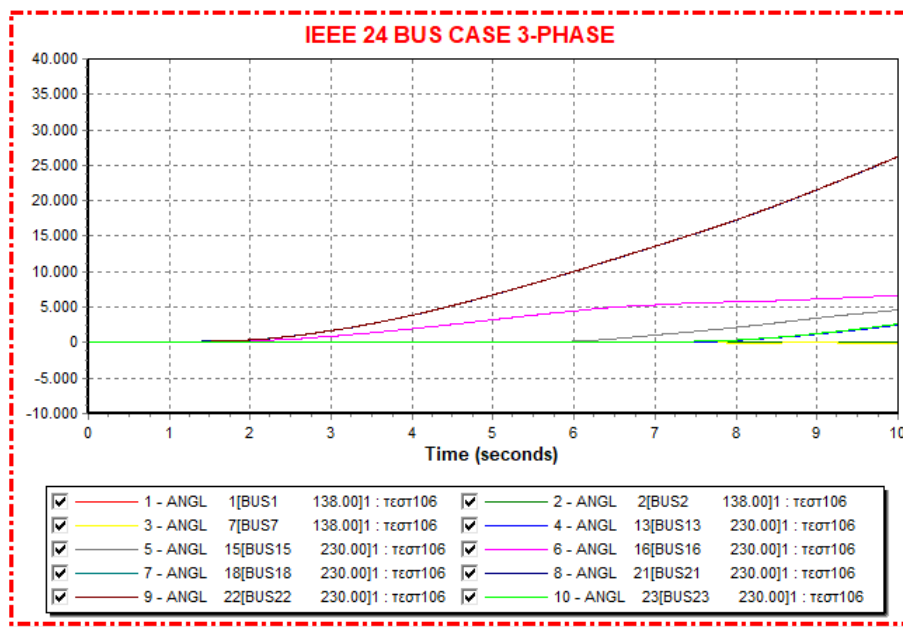
Σχήμα 5.23: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.24: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.25: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.26: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$

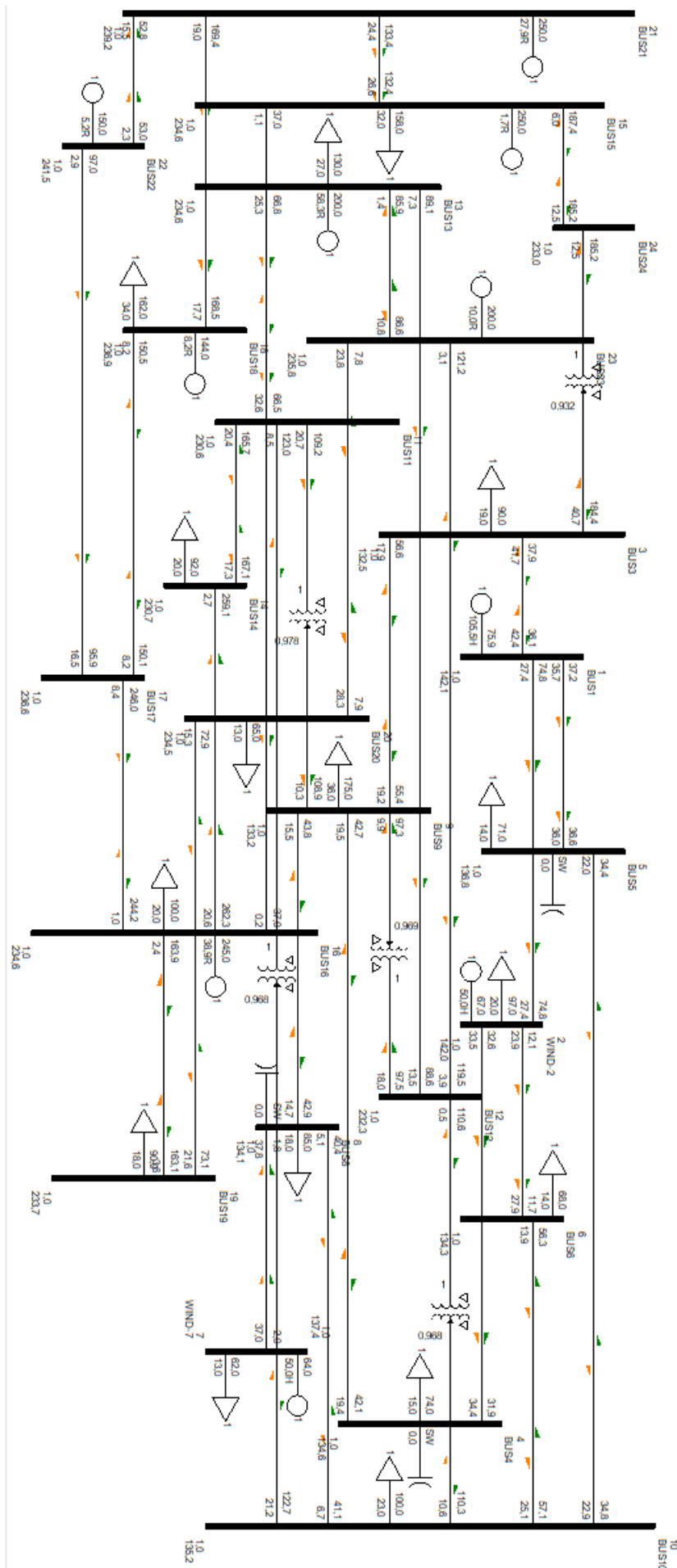
Πίνακας 5.5: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 21-15
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,25\text{sec}$
Open fault	$t=1,25\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,25\text{sec}$

5.5 Β) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων στο δίκτυο των 24 ζυγών με ενσωματωμένες ανεμογεννήτριες

Στο δεύτερο σενάριο δύο γεννήτριες του δικτύου αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες τύπου WT4 σύμφωνα με δεδομένα από το Western Electricity Coordinating Council (WECC) για το μοντέλο γεννήτριας / μετατροπέα (WT4G - Generator/Converter Model) και για το ηλεκτρικό μοντέλο ελέγχου (WT4E - Electrical Control Model). Συγκεκριμένα η γεννήτρια του ζυγού 2 και 7 αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες τύπου WT4. Οι ανεμογεννήτριες αντικαθιστούν το 100% της παραγωγής των αρχικών γεννητριών.

Στο Σχήμα 5.27 απεικονίζεται το δίκτυο των 24 ζυγών με τις δυο ανεμογεννήτριες στους ζυγούς 2 και 7.

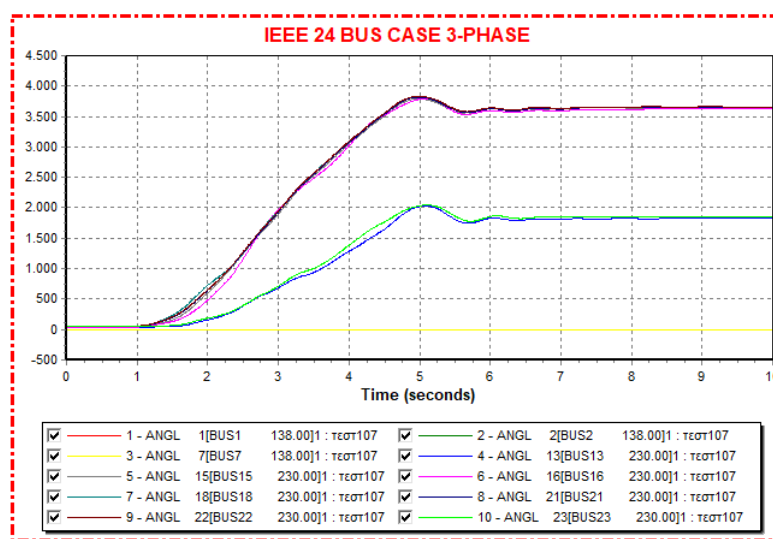


Σχήμα 5.27: Δίκτυο 24 ζυγών με ανεμογεννήτρια στον ζυγό 2 και 7

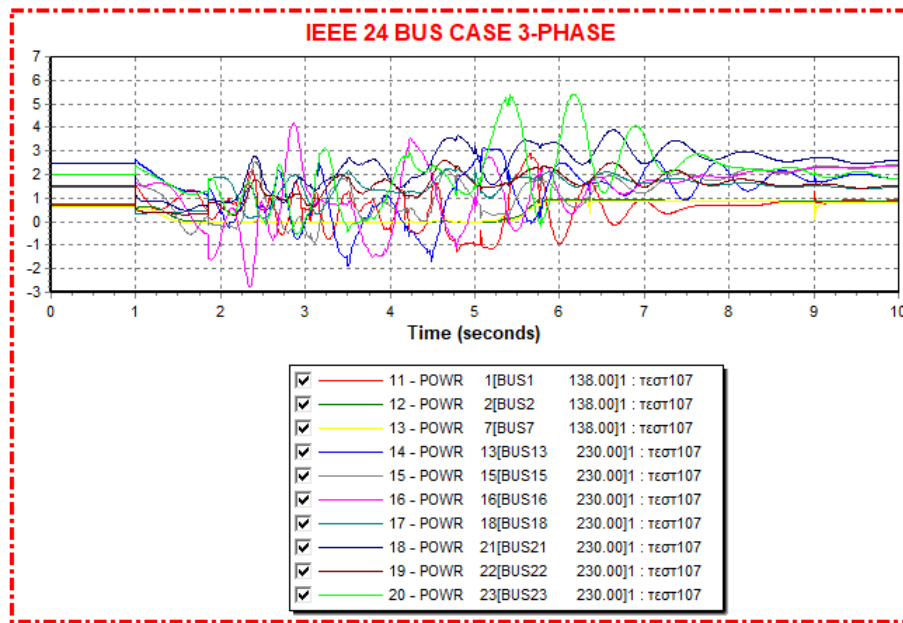
5.5.1 B1: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1s$ στην γραμμή μεταφοράς 17-18, κοντά στον ζυγό 17 (βραχυκύκλωμα κοντά σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,85sec$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,85sec$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 17-18. Την στιγμή $t=5sec$ η γραμμή μεταφοράς 17-18 ξαναπαίει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10sec$. Στο Σχήμα 5.28 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.29 και 5.30 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.31 και 5.32 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

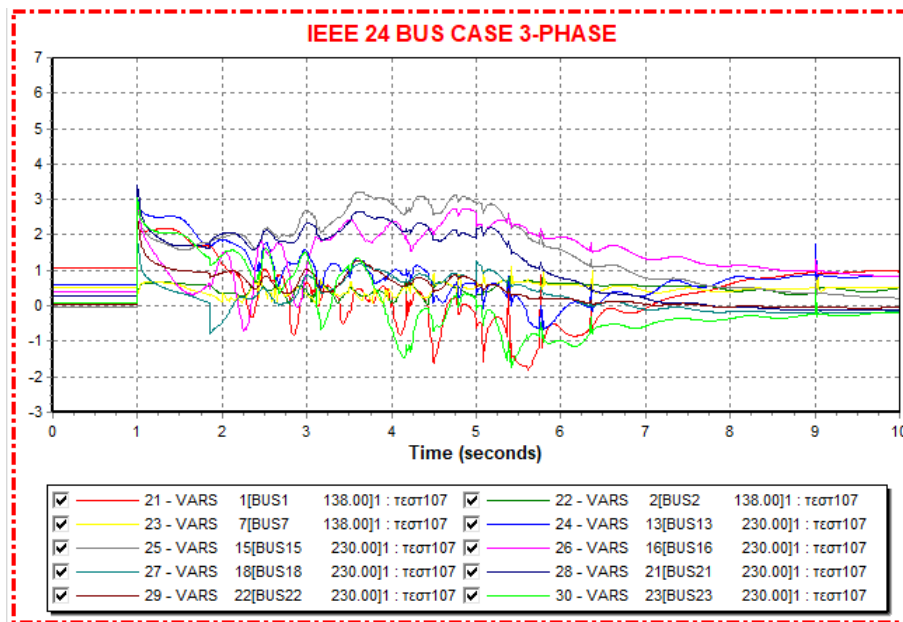
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,9sec$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.33 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



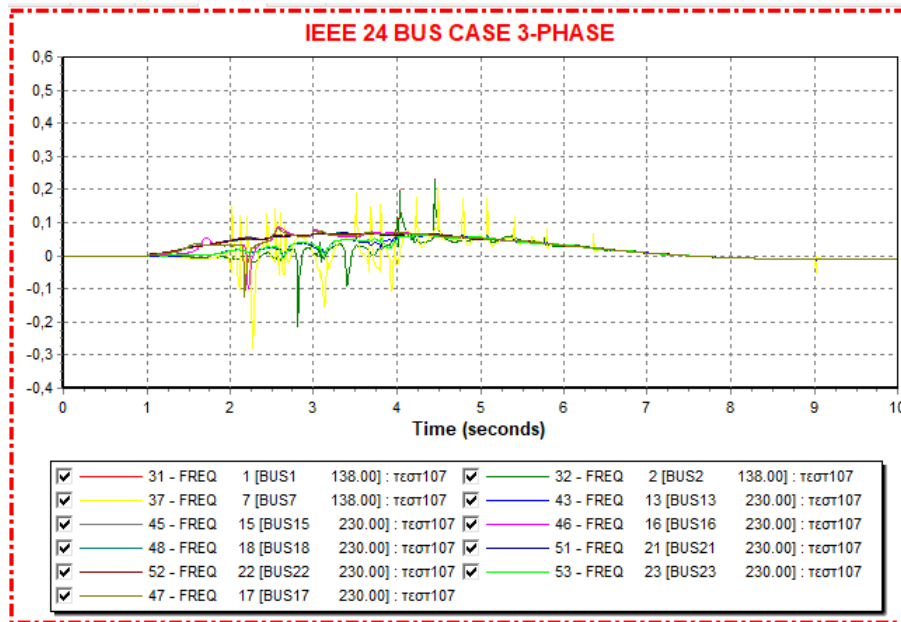
Σχήμα 5.28: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85sec$



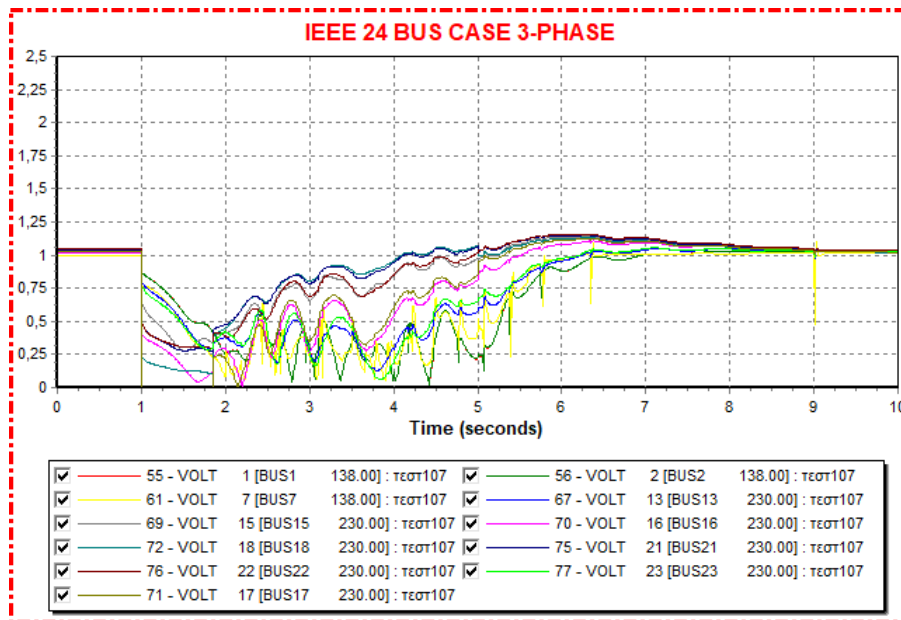
Σχήμα 5.29: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$



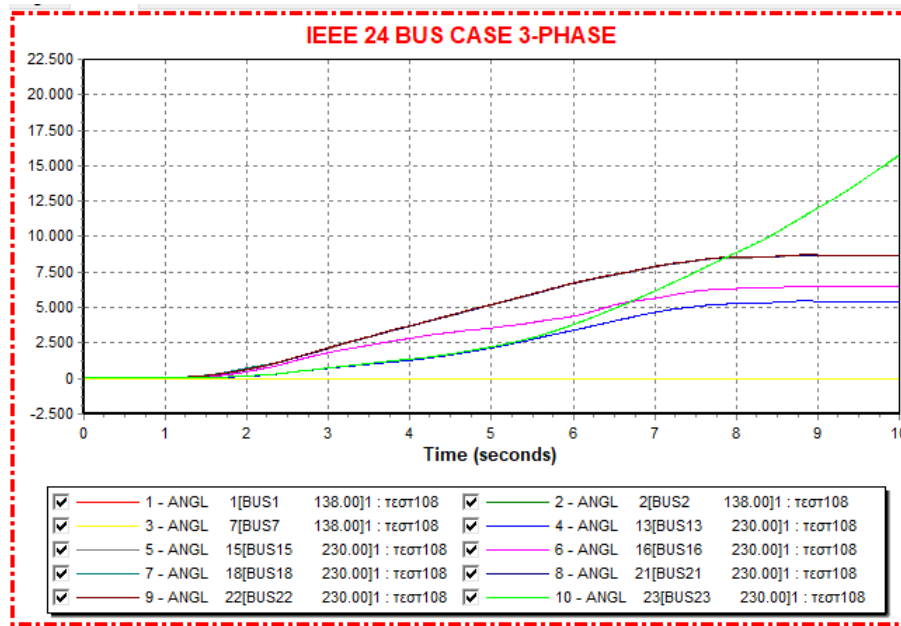
Σχήμα 5.30: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$



Σχήμα 5.31: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$



Σχήμα 5.32: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$



Σχήμα 5.33: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,9\text{sec}$

Πίνακας 5.6: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18

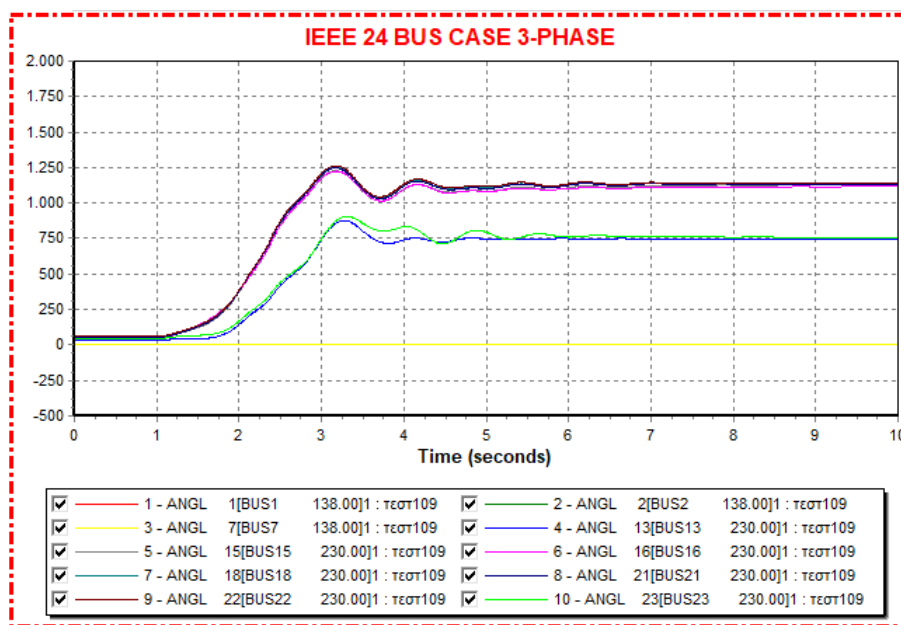
Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 17-18
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,85\text{sec}$
Open fault	$t=1,85\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,85\text{sec}$

5.5.2 B2: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19

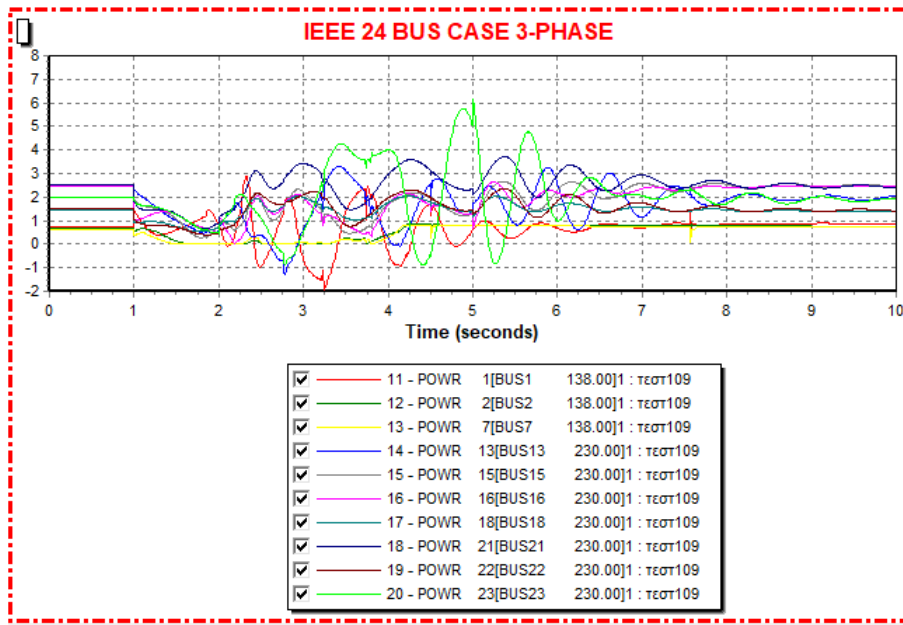
Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 19-20, κοντά στον ζυγό 19 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=1\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=2\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 19-20. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 19-20 ξαναμπαίνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.34 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε

σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.35 και 5.36 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.37 και 5.38 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

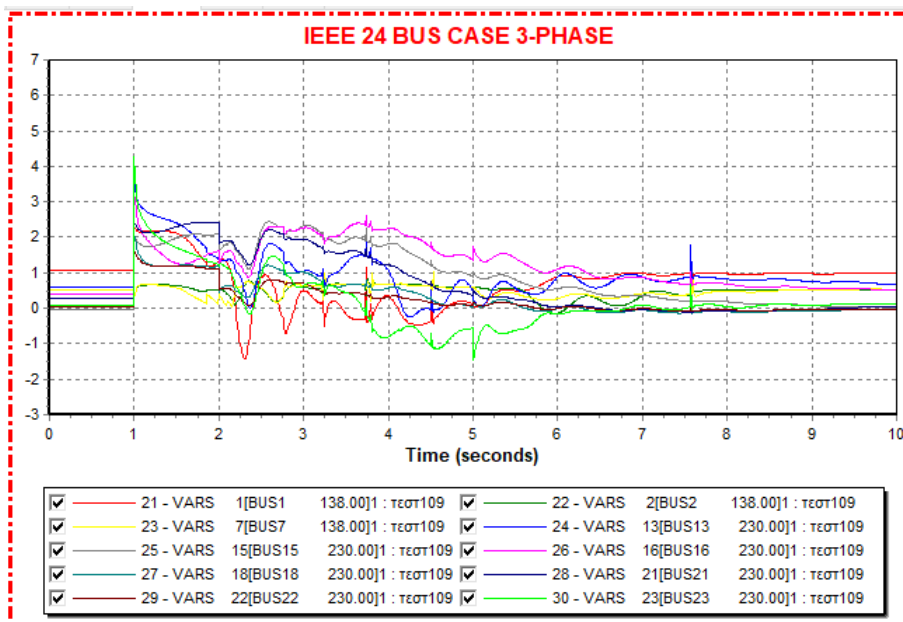
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=2,05\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.39 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



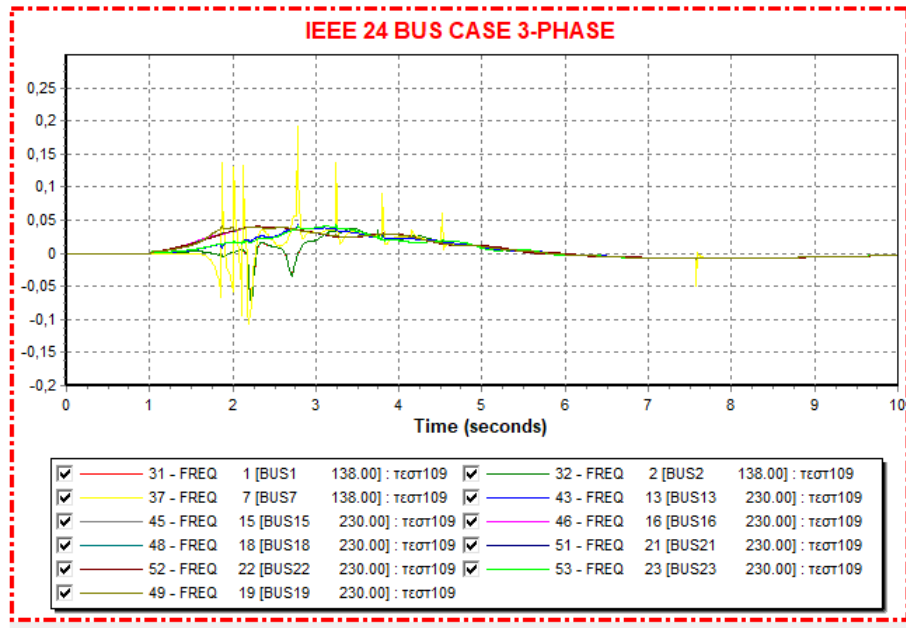
Σχήμα 5.34: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$



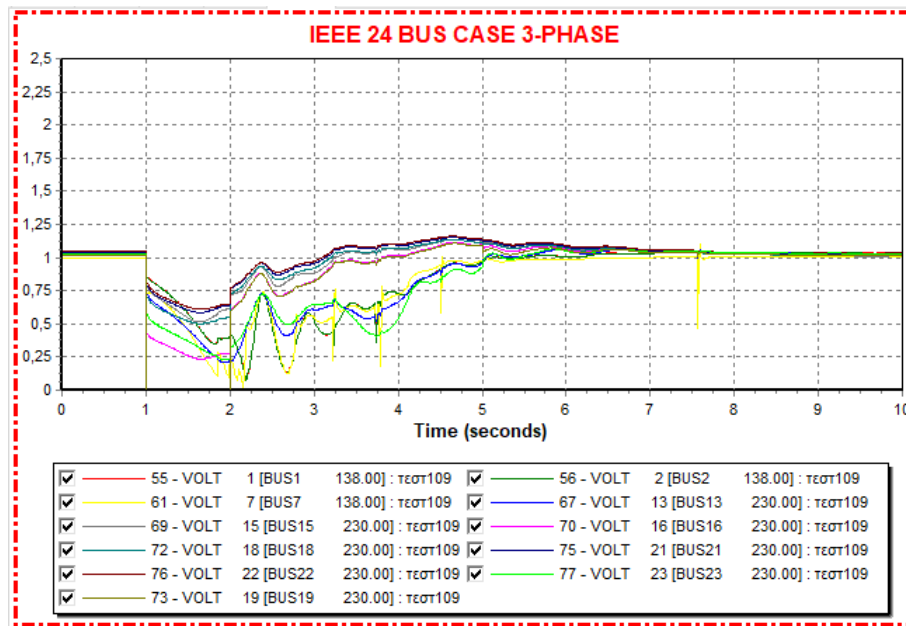
Σχήμα 5.35: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$



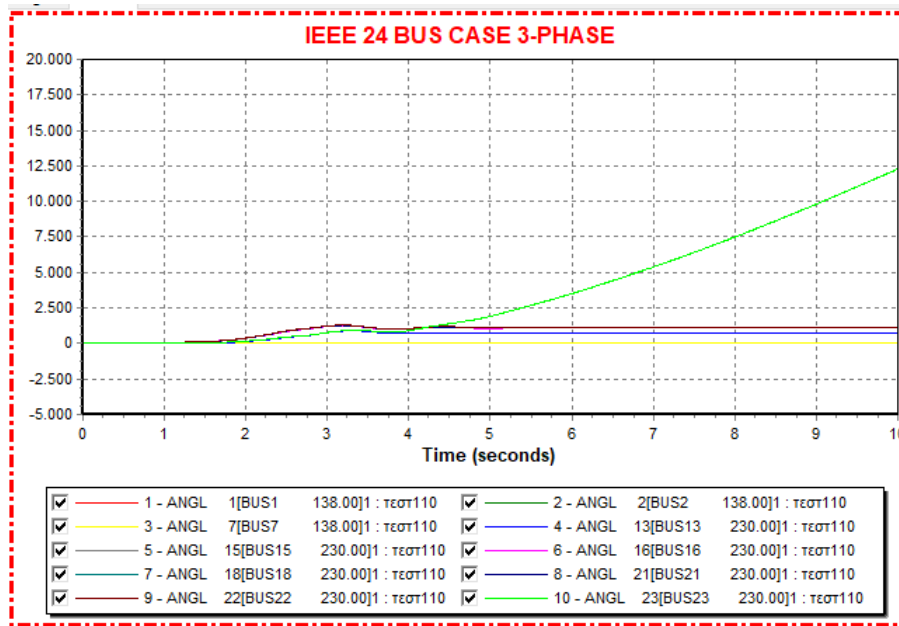
Σχήμα 5.36: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$



Σχήμα 5.37: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$



Σχήμα 5.38: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2\text{sec}$



Σχήμα 5.39: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=2,05\text{sec}$

Πίνακας 5.7: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20

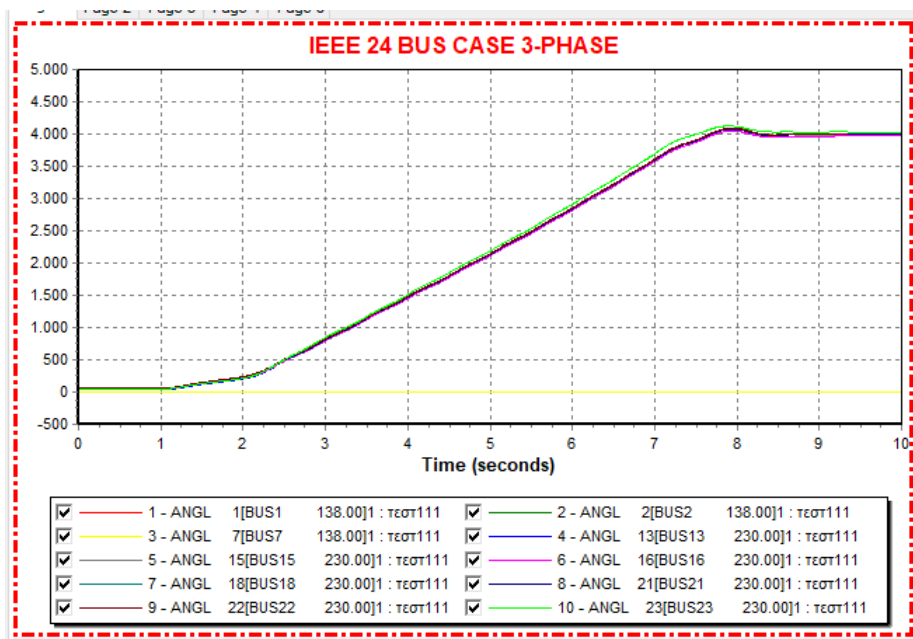
Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 19-20
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=2\text{sec}$
Open fault	$t=2\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=1\text{sec}$

5.5.3 B3: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12

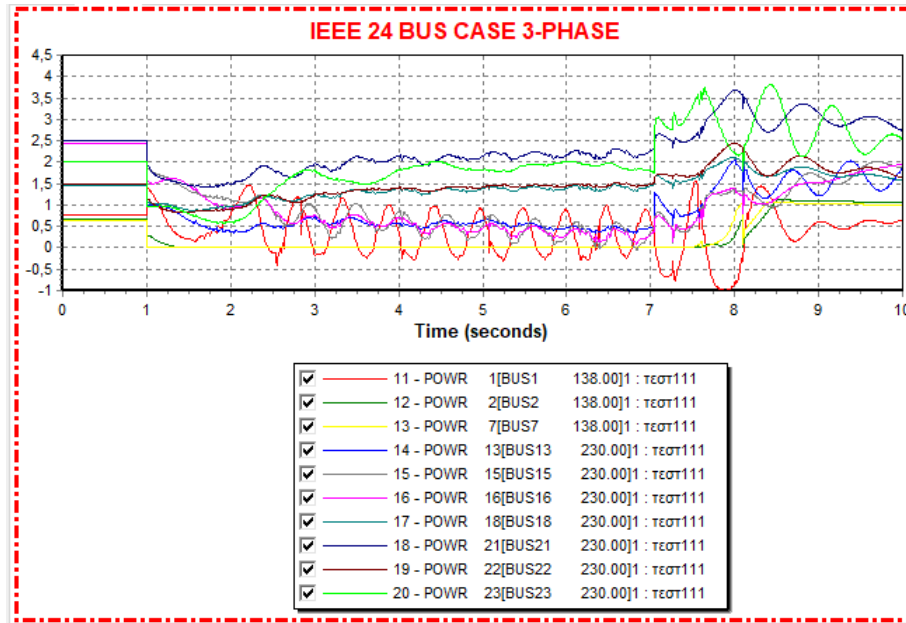
Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 12-10, κοντά στον ζυγό 12 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=6,05\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=7,05\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 12-10. Την στιγμή $t=10\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 12-10 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=15\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.40 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια

1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.41 και 5.42 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.43 και 5.44 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

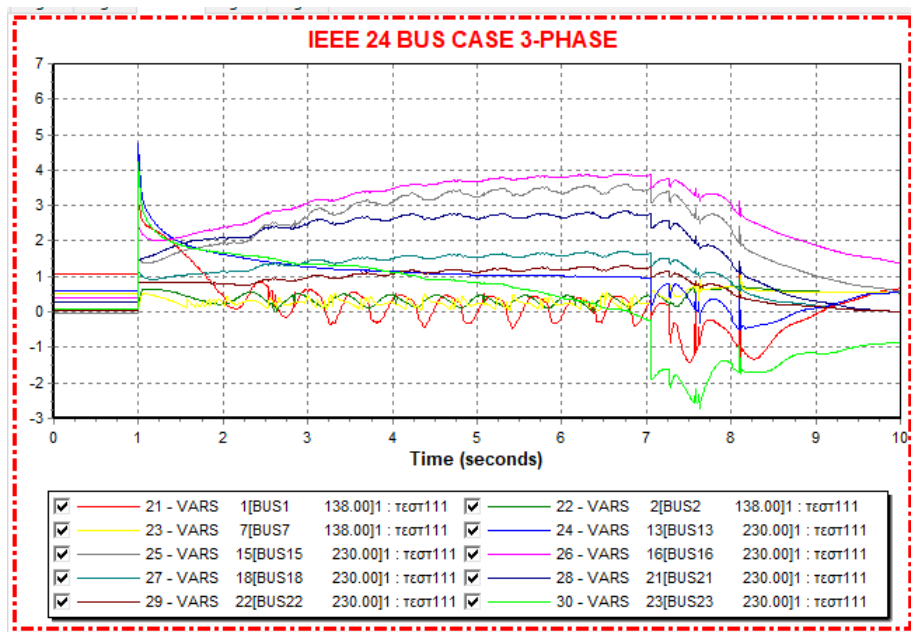
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=7,1\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.45 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



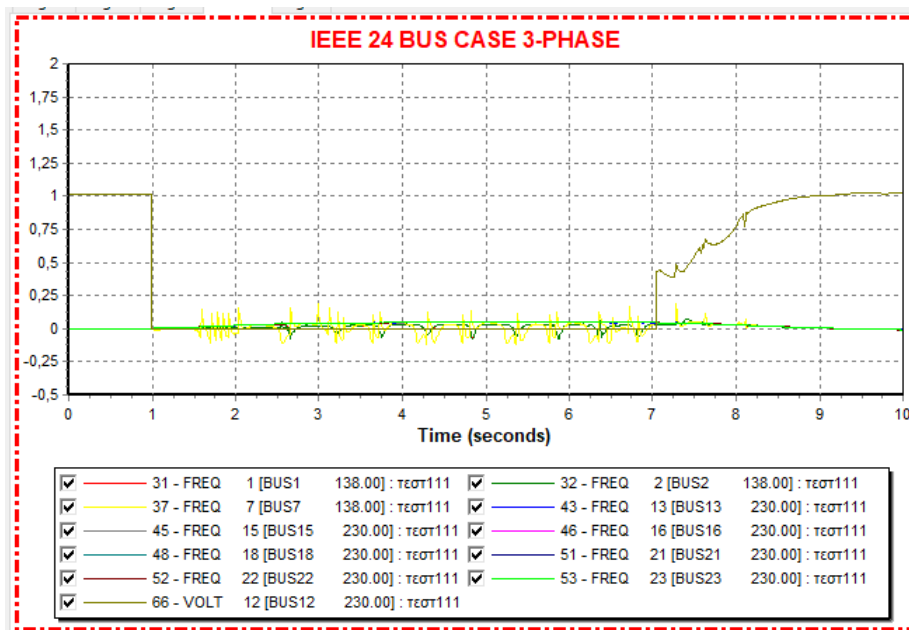
Σχήμα 5.40: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$



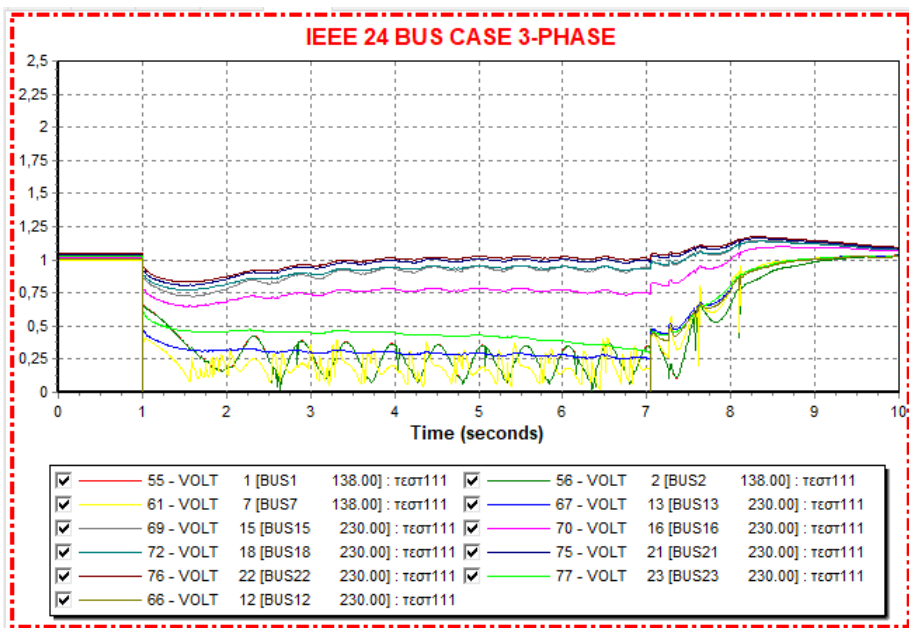
Σχήμα 5.41: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$



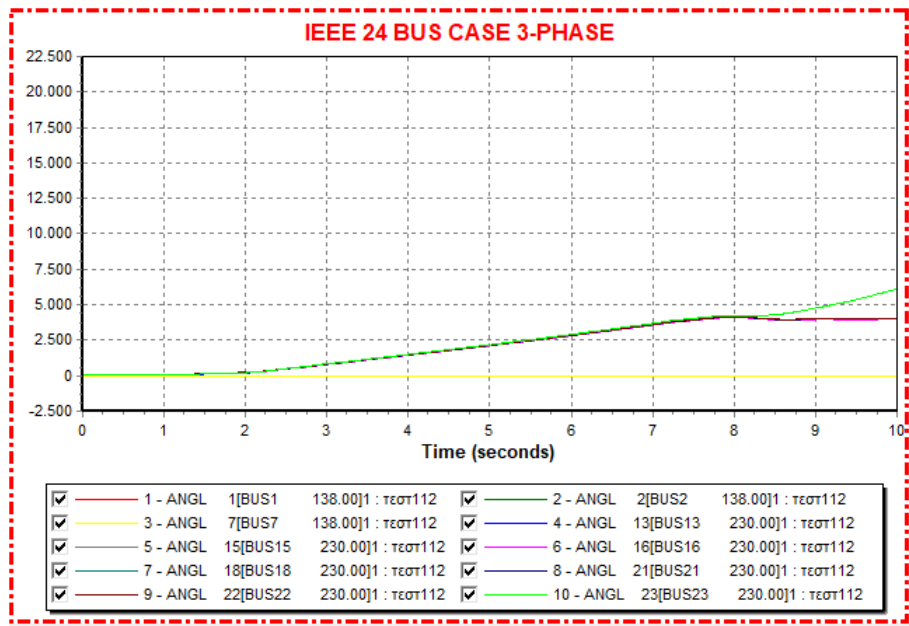
Σχήμα 5.42: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$



Σχήμα 5.43: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$



Σχήμα 5.44: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,05\text{sec}$



Σχήμα 5.45: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,1\text{sec}$

Πίνακας 5.8: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10

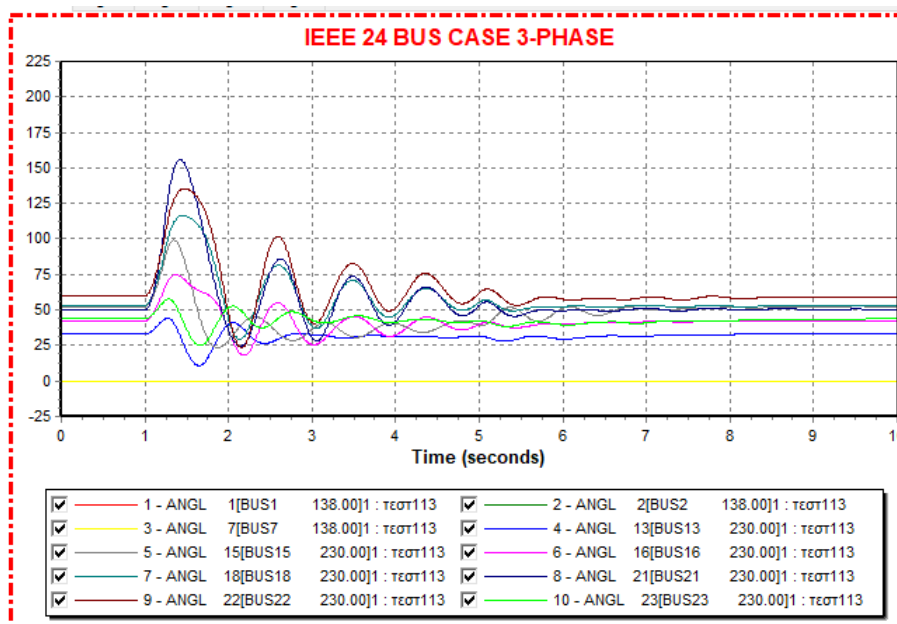
Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 12-10
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=7,05\text{sec}$
Open fault	$t=7,05\text{sec}$
Close line	$t=10\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=6,05\text{sec}$

5.5.4 B4: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21

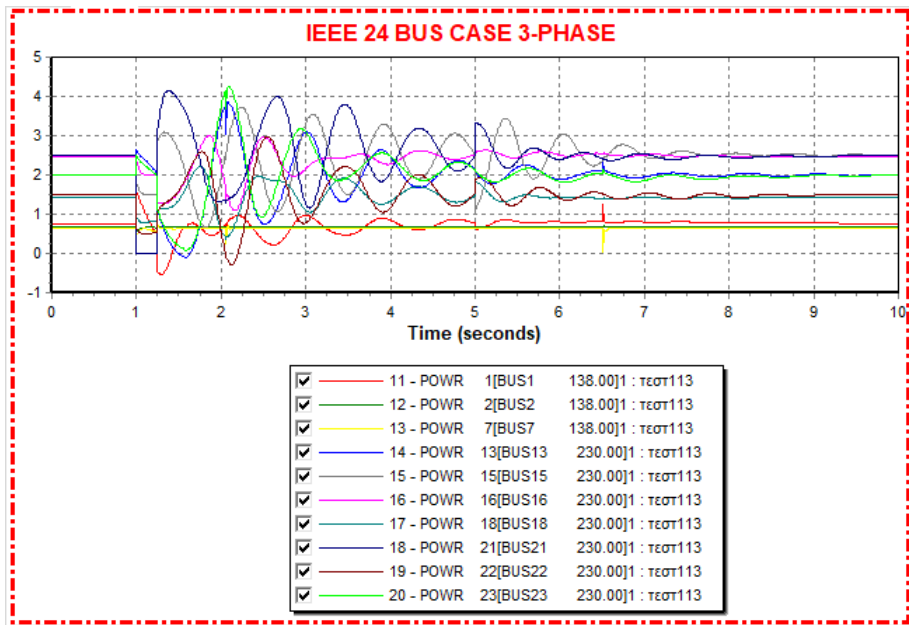
Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 21-15, κοντά στον ζυγό 21 (βραχυκύκλωμα πάνω σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,25\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,25\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 21-15. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 21-15 ξαναπαίει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.46 παρουσιάζονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον

χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.47 και 5.48 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.49 και 5.50 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

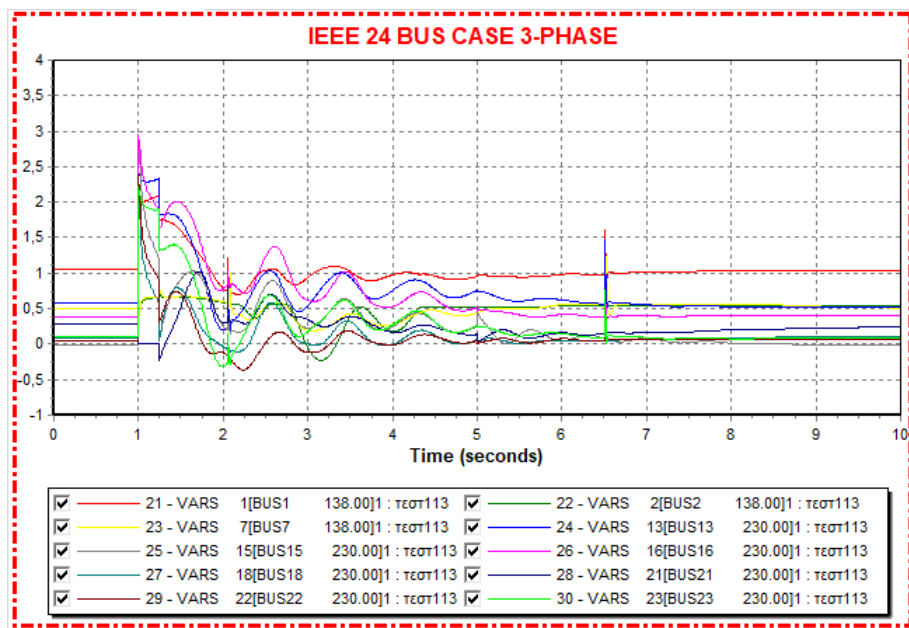
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,3\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.51 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



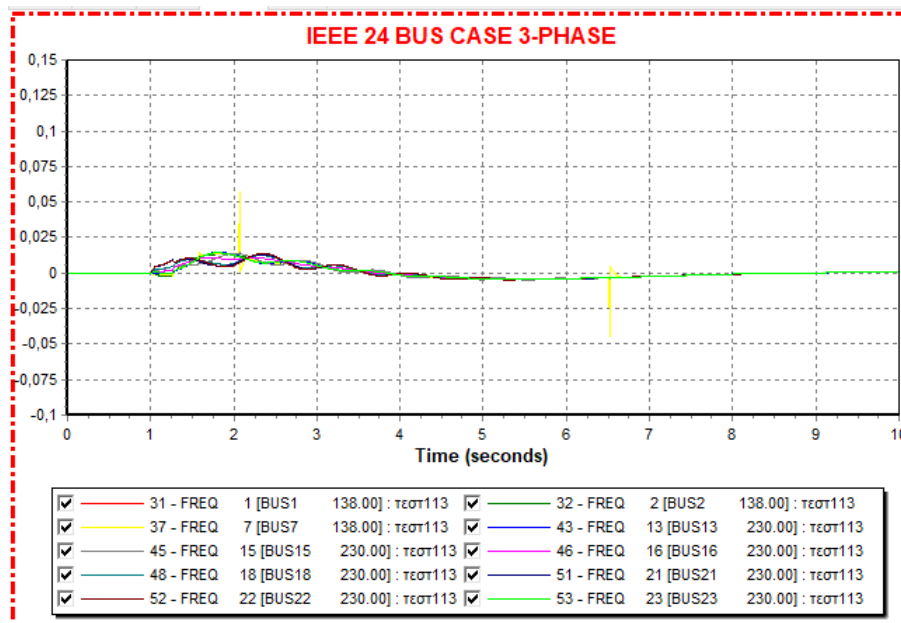
Σχήμα 5.46: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



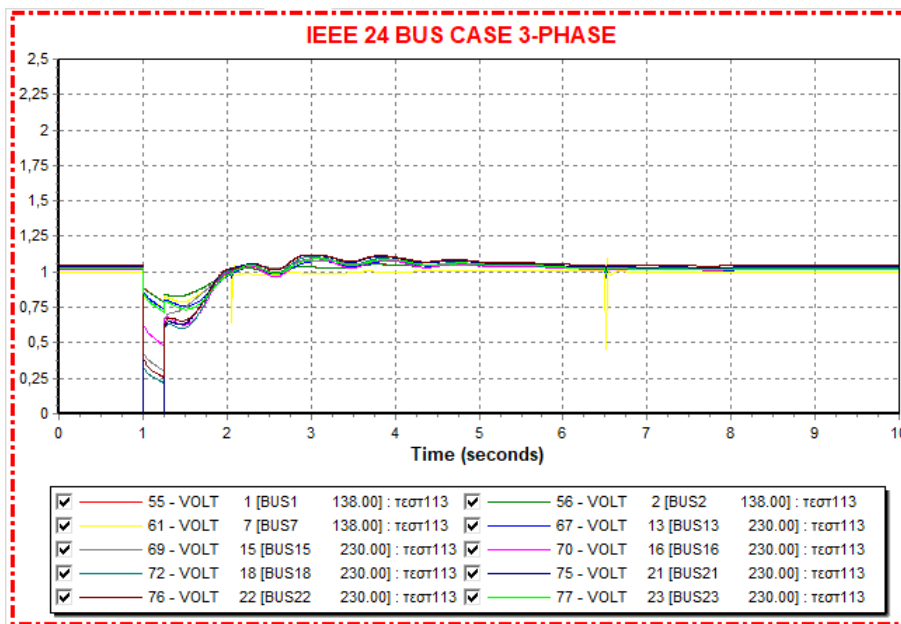
Σχήμα 5.47: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



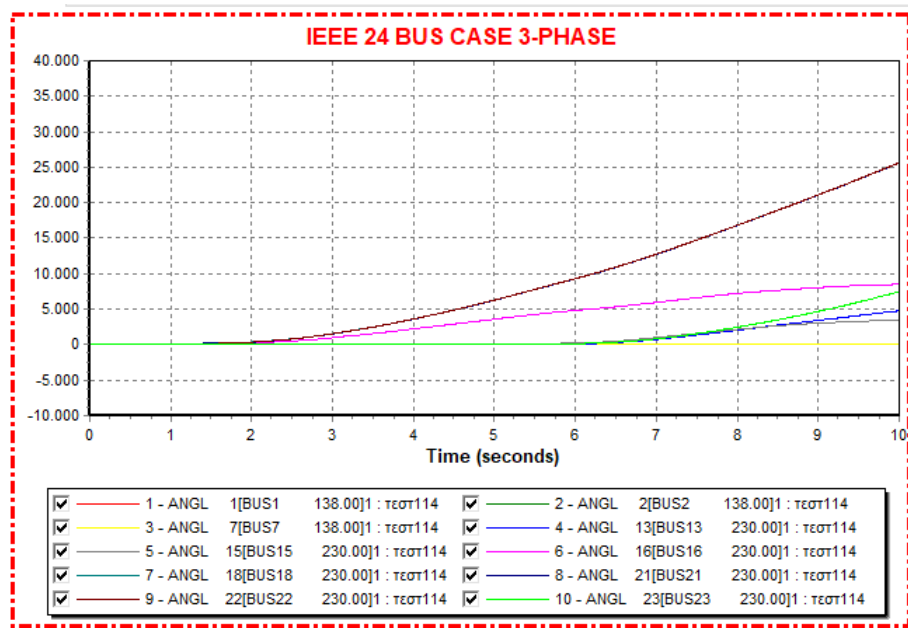
Σχήμα 5.48: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.49: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.50: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.51: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$

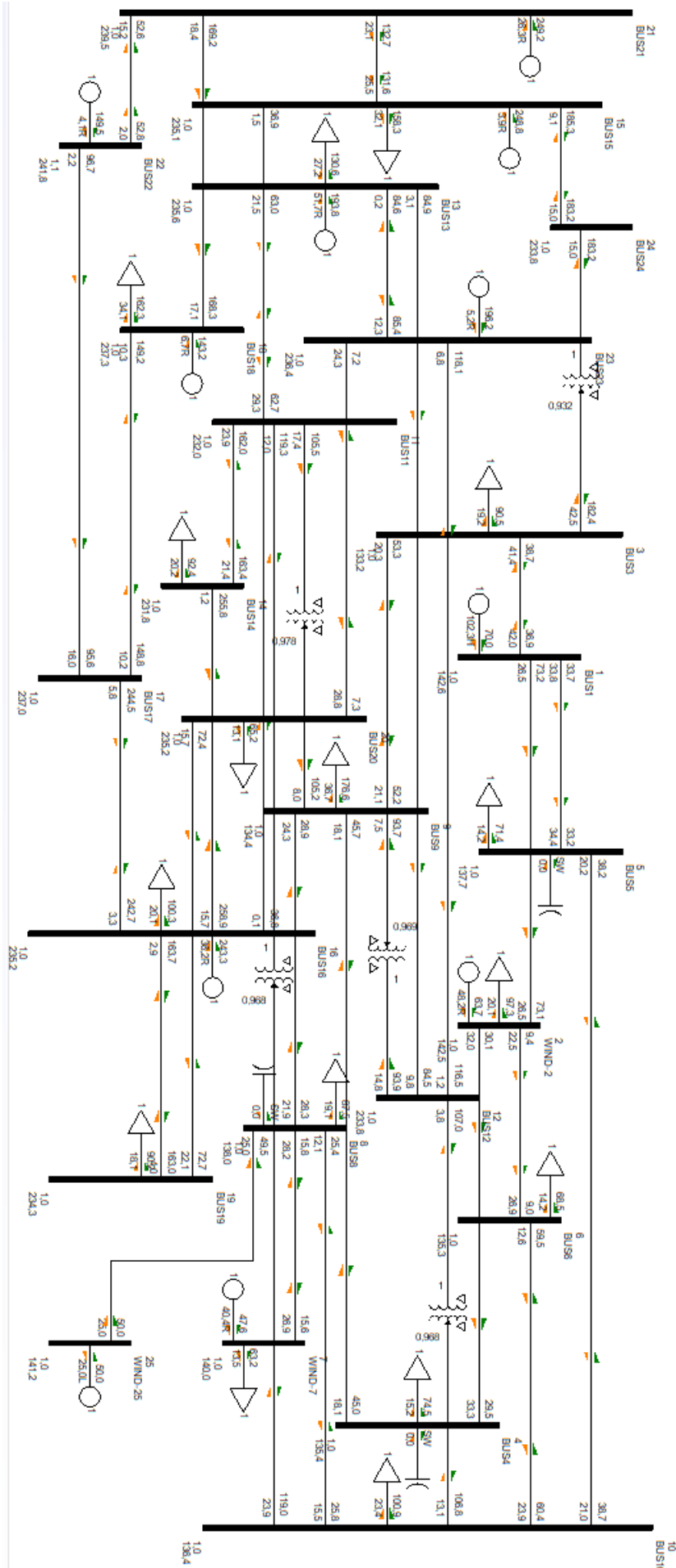
Πίνακας 5.9: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 21-15
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,25\text{sec}$
Open fault	$t=1,25\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,25\text{sec}$

5.6 Γ) Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων σε δίκτυο των 25 ζυγών με ενσωματωμένες ανεμογεννήτριες

Στο τρίτο σενάριο η γεννήτρια του ζυγού 2 και 7 αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες τύπου WT4, όπως και στο 2ο σενάριο και επιπλέον προστίθεται στο δίκτυο μια ανεμογεννήτρια τύπου WT4 50MW. Η ανεμογεννήτρια προστίθεται στο δίκτυο μέσω ενός επιπλέον ζυγού 25, ο οποίος συνδέεται στο δίκτυο με τον ζυγό 8 μέσω μιας γραμμής μεταφοράς. Στον Πίνακα 5.10 φαίνονται τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας που προστίθεται.

Στο Σχήμα 5.52 απεικονίζεται το δίκτυο των 25 ζυγών που θα χρησιμοποιηθεί στο 3ο σενάριο στο πρόγραμμα PSS/E.



Σχήμα 5.52: Δίκτυο 25 ζυγών

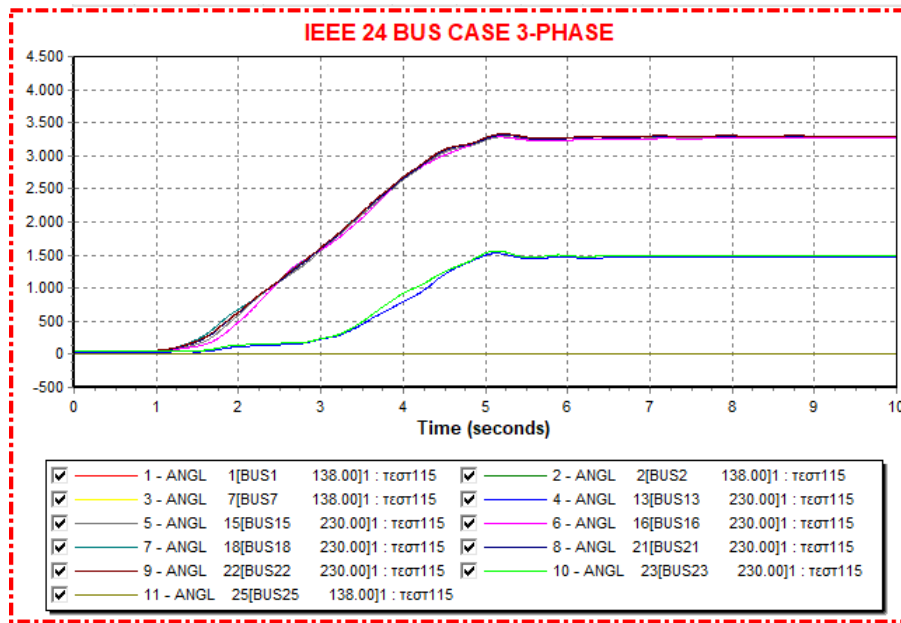
Πίνακας 5.10: Ενεργός και άεργη ισχύ της ανεμογεννήτριας στον ζυγό 25 του συστήματος

Bus	kV	PGen(MW)	PMax(MW)	PMin (MW)	QGen(MVar)	QMax(MVar)	QMin(MVar)
25	138	50	100	10	-25	25	-25

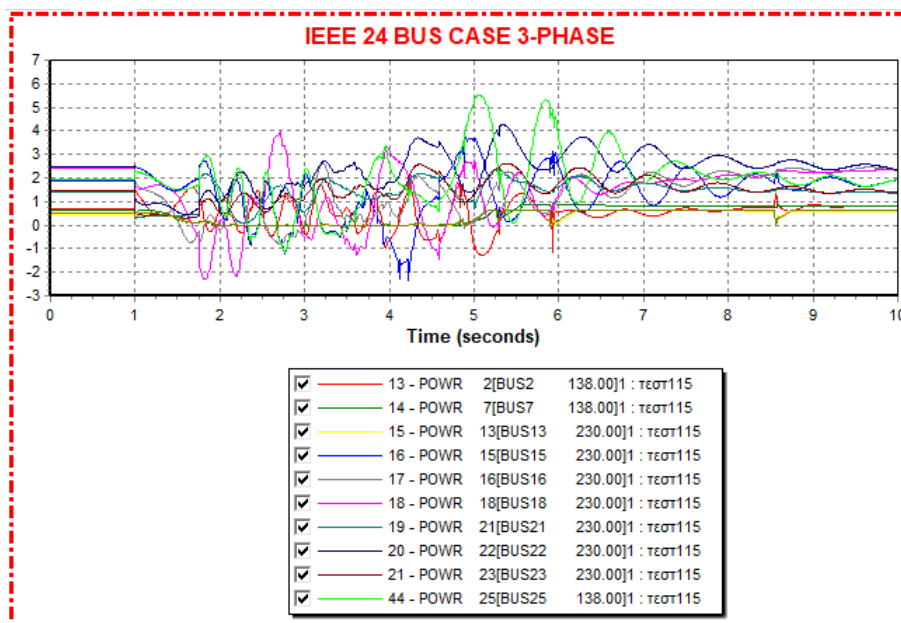
5.6.1 Γ1: 3φασικό σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 17-18 κοντά στον ζυγό 17

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1s$ στην γραμμή μεταφοράς 17-18, κοντά στον ζυγό 17 (βραχυκύκλωμα κοντά σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,75sec$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,75sec$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 17-18. Την στιγμή $t=5sec$ η γραμμή μεταφοράς 17-18 ξαναπαίει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10sec$. Στο Σχήμα 5.53 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.54 και 5.55 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.56 και 5.57 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

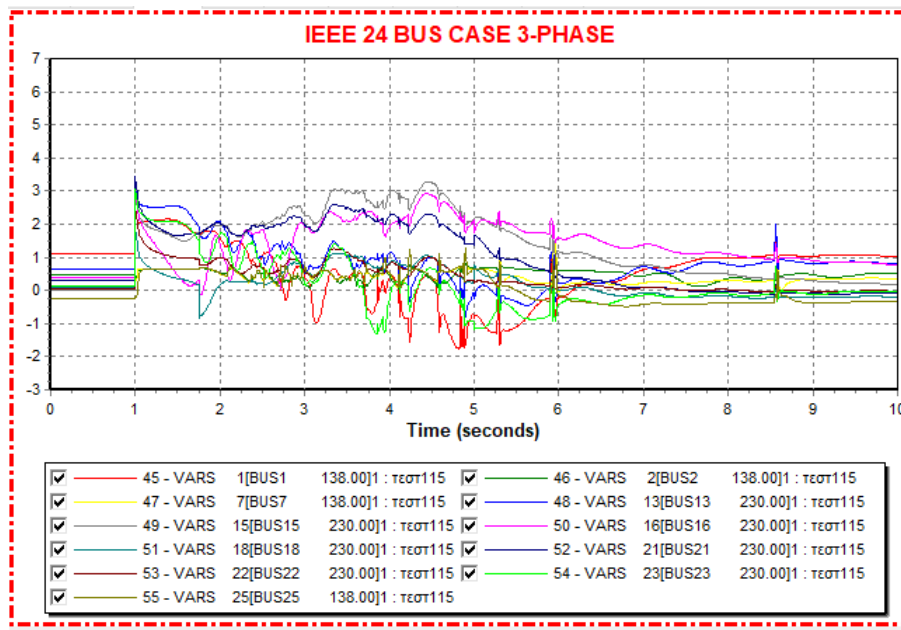
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,8sec$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.58 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



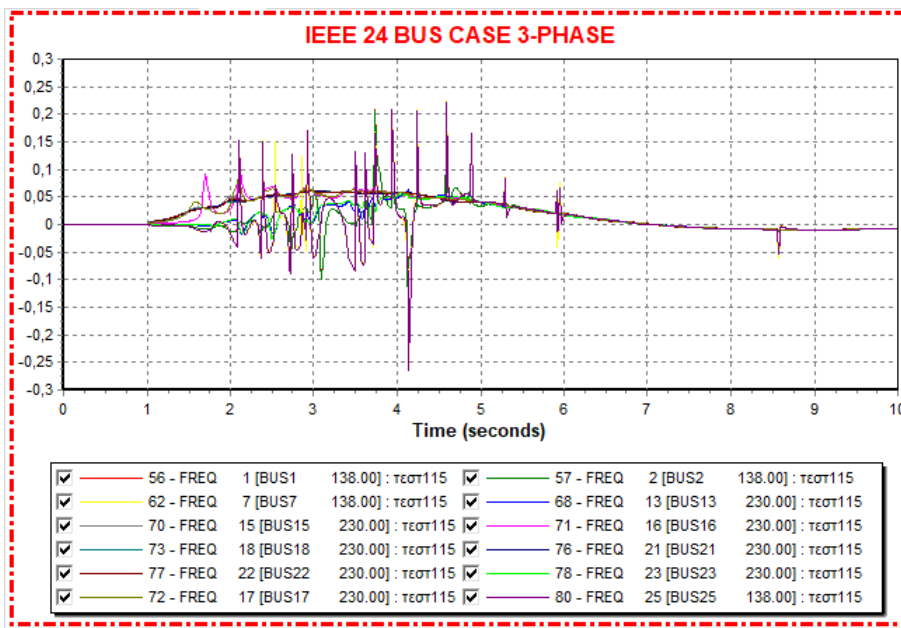
Σχήμα 5.53: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$



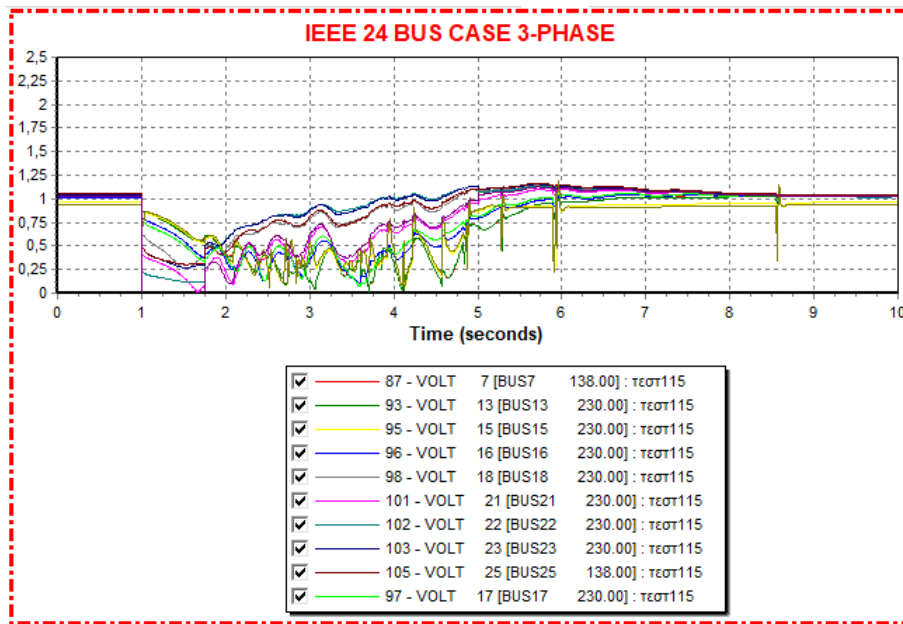
Σχήμα 5.54: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$



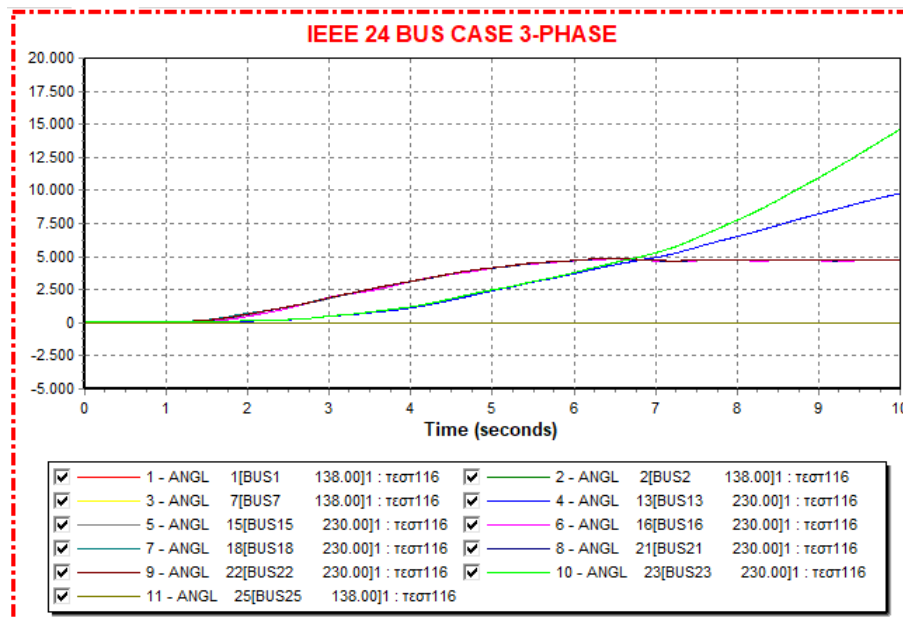
Σχήμα 5.55: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$



Σχήμα 5.56: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$



Σχήμα 5.57: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 17 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,75\text{sec}$



Σχήμα 5.58: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$

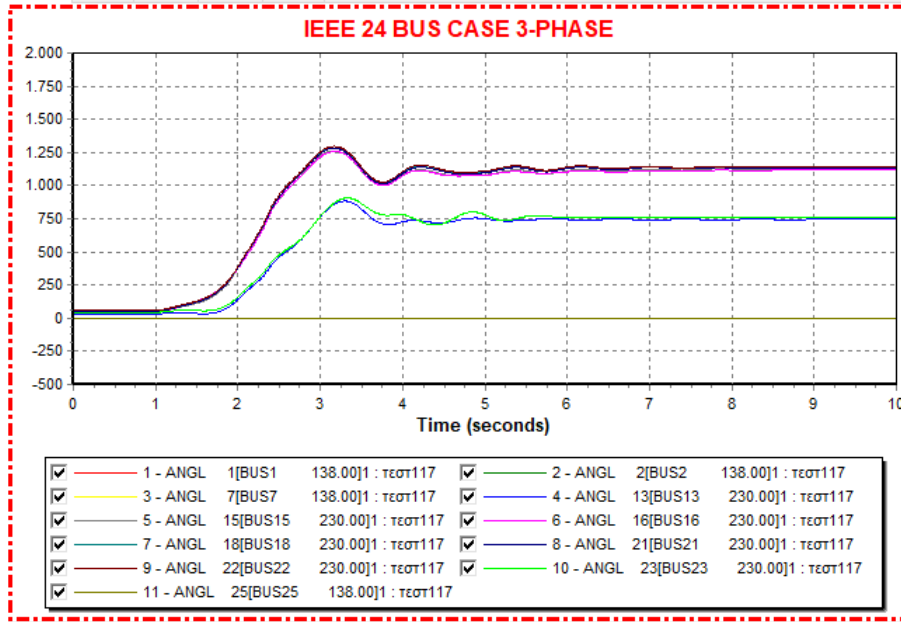
Πίνακας 5.11: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 17-18

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 17-18
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,75\text{sec}$
Open fault	$t=1,75\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,75\text{sec}$

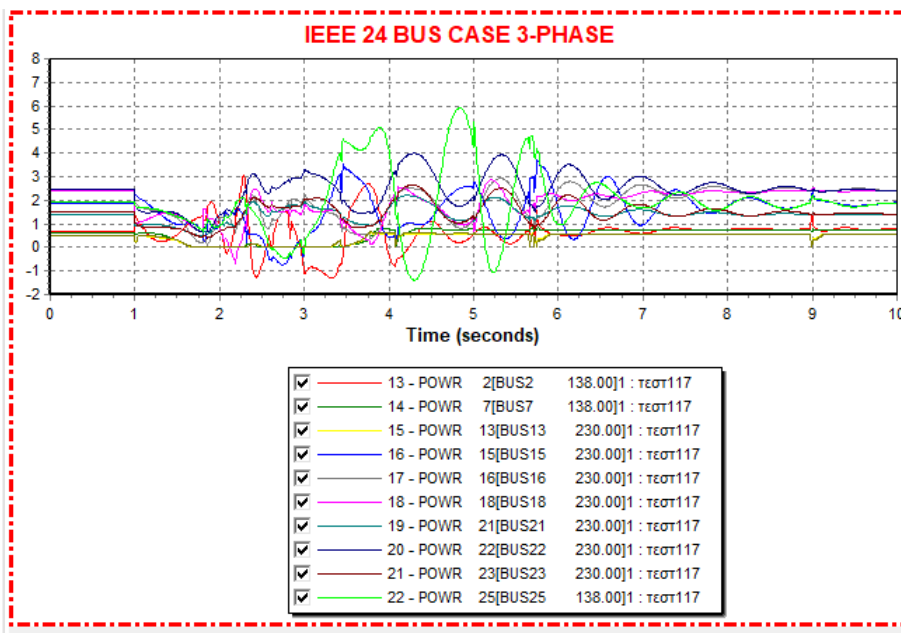
5.6.2 Γ2: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 19-20 κοντά στον ζυγό 19

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 19-20, κοντά στον ζυγό 19 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,8\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,8\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 19-20. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 19-20 ξαναμπαίνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.59 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.60 και 5.61 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.62 και 5.63 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

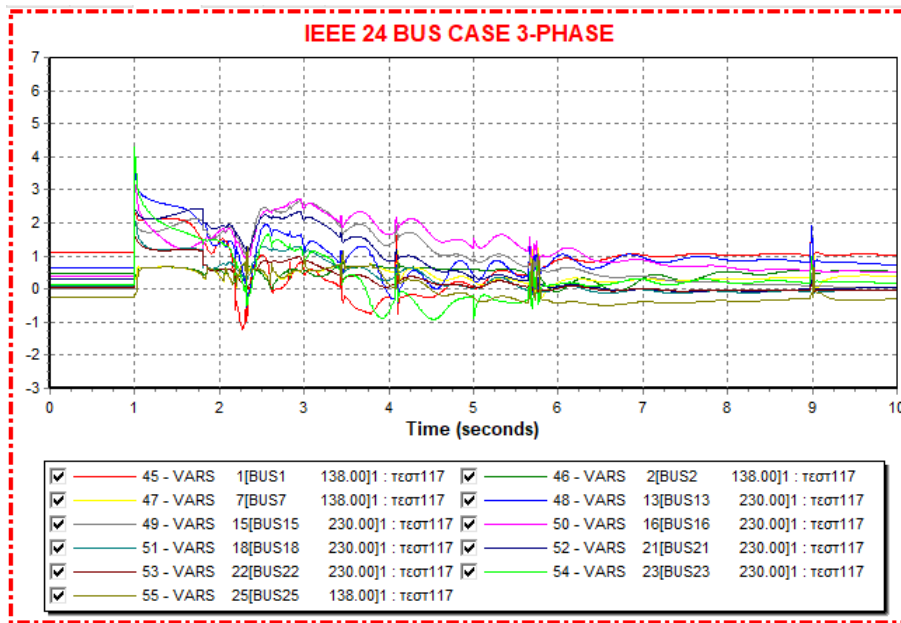
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,85\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.64 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



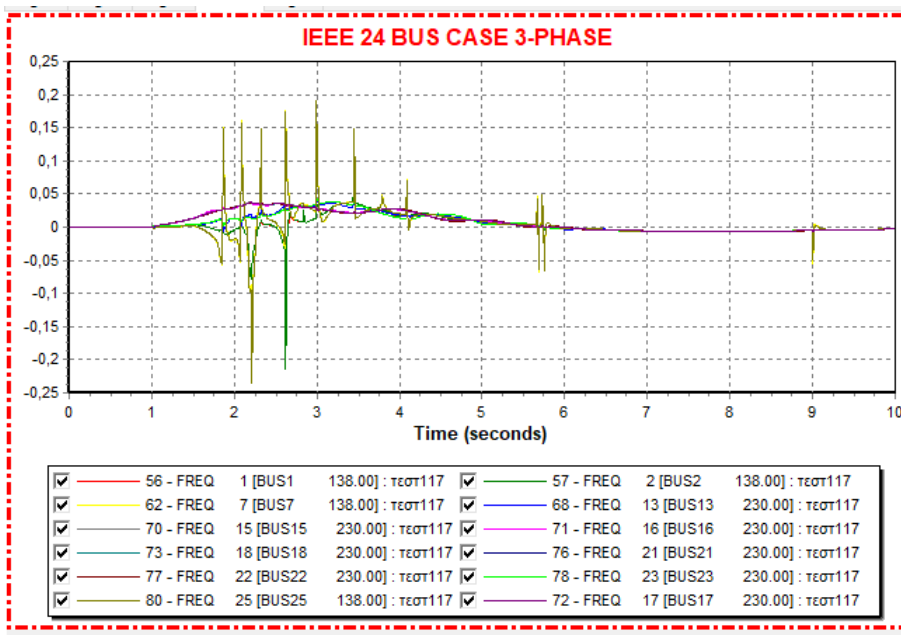
Σχήμα 5.59: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$



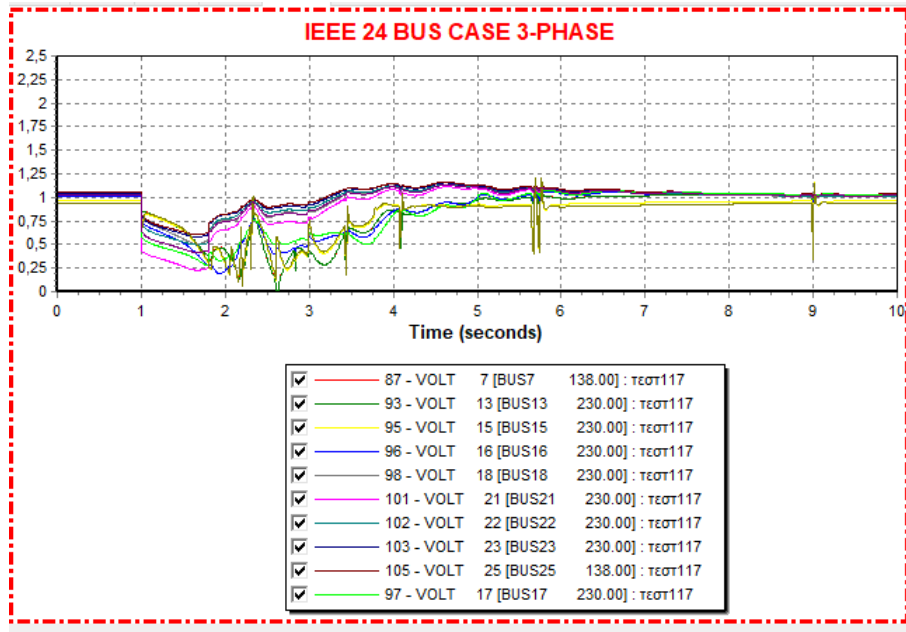
Σχήμα 5.60: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$



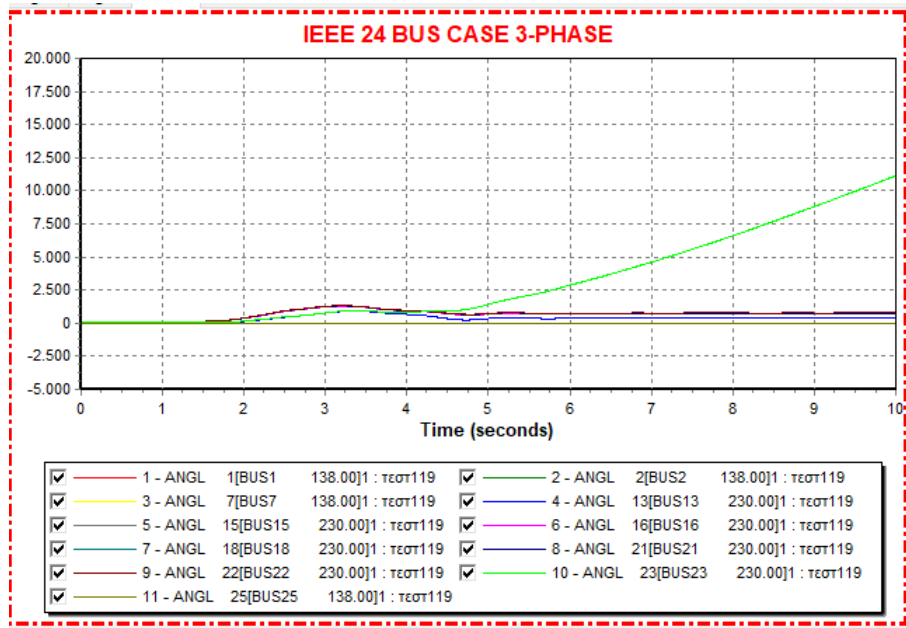
Σχήμα 5.61: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$



Σχήμα 5.62: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$



Σχήμα 5.63: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 19 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,8\text{sec}$



Σχήμα 5.64: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,85\text{sec}$

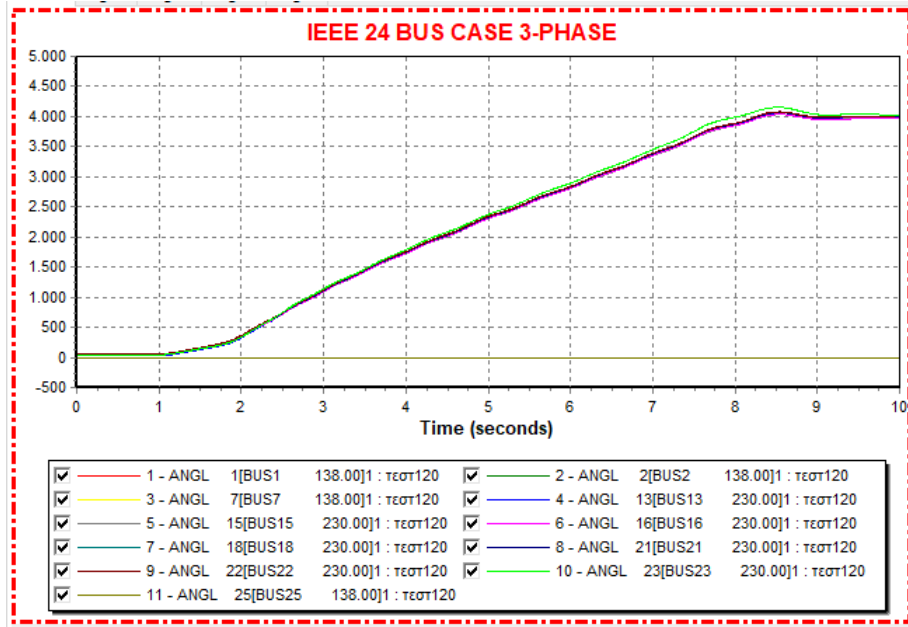
Πίνακας 5.12: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 19-20

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 19-20
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,8\text{sec}$
Open fault	$t=1,8\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,8\text{sec}$

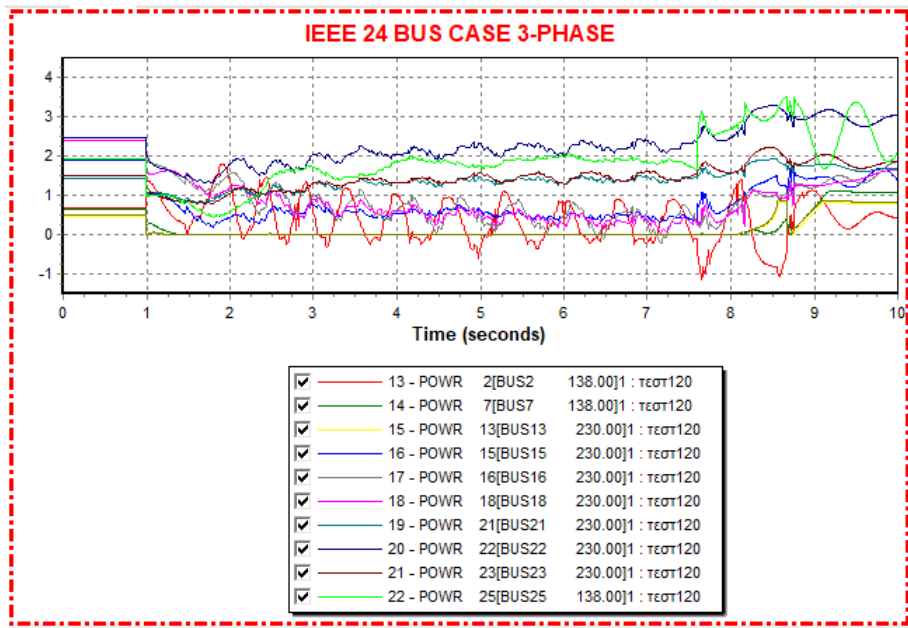
5.6.3 Γ3: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 12-10 κοντά στον ζυγό 12

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 12-10, κοντά στον ζυγό 12 (βραχυκύκλωμα απομακρυσμένο από γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=6,6\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=7,6\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 12-10. Την στιγμή $t=10\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 12-10 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=15\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.65 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.66 και 5.67 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.68 και 5.69 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

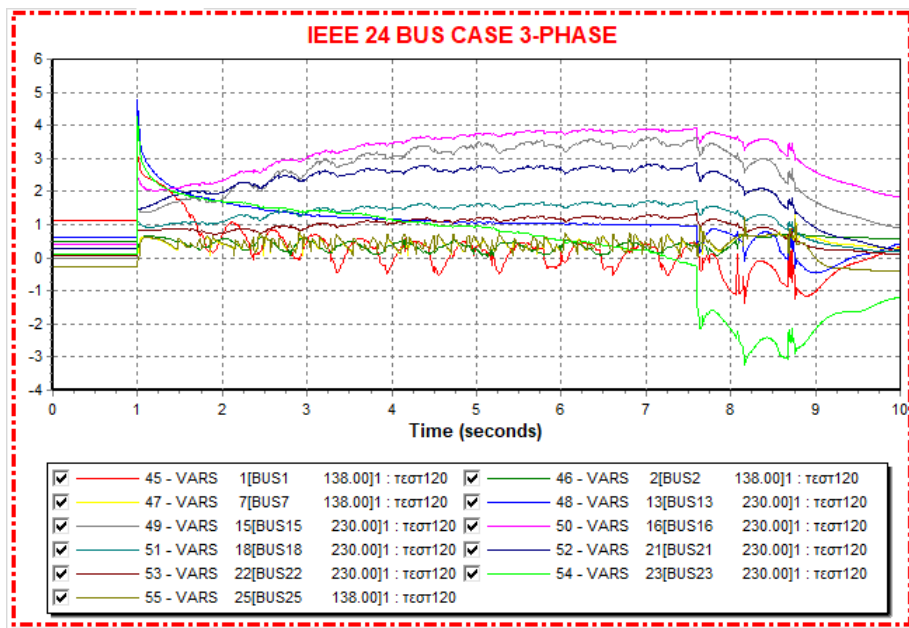
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=7,65\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.70 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



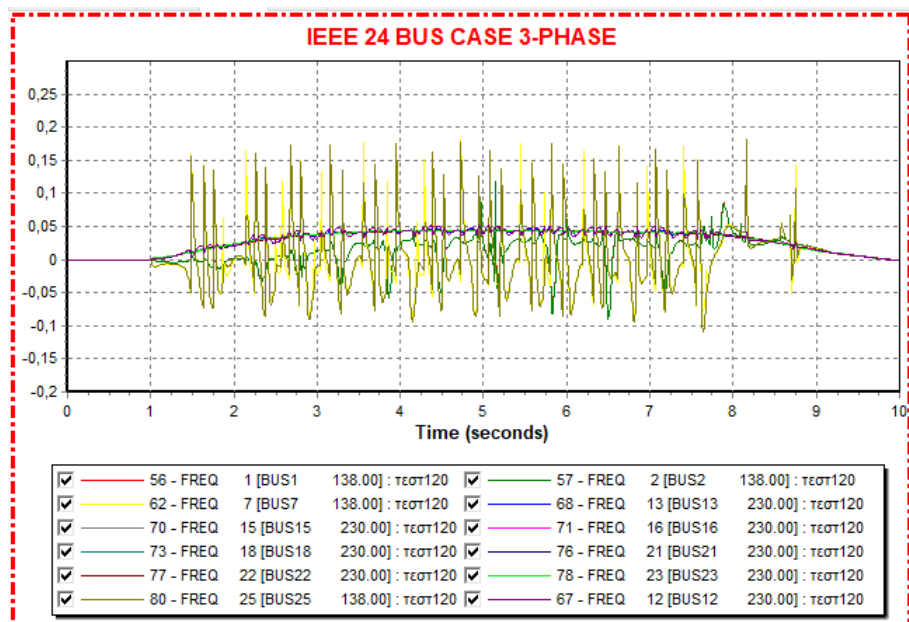
Σχήμα 5.65: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$



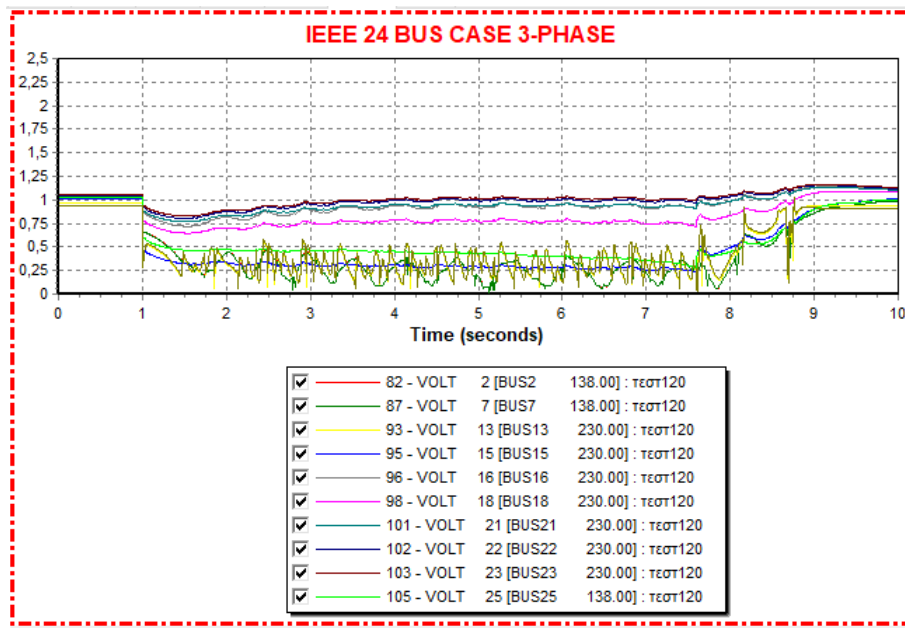
Σχήμα 5.66: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$



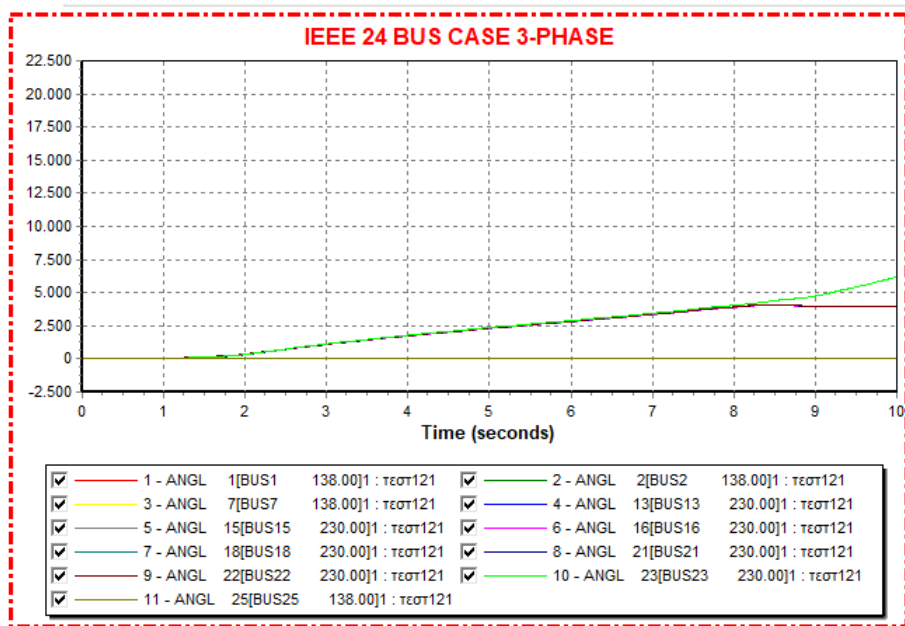
Σχήμα 5.67: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$



Σχήμα 5.68: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$



Σχήμα 5.69: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών και του ζυγού σφάλματος 12 σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,6\text{sec}$



Σχήμα 5.70: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=7,65\text{sec}$

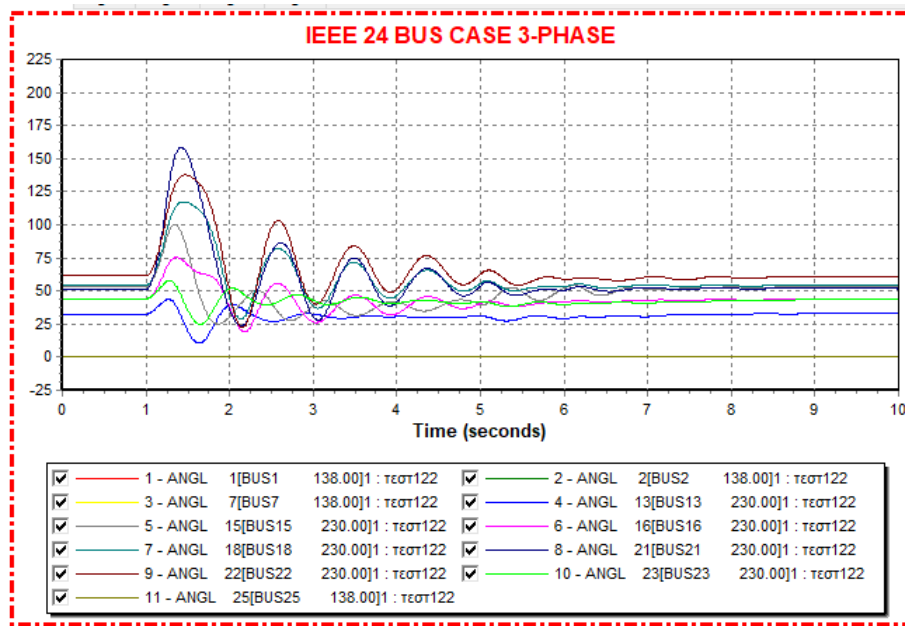
Πίνακας 5.13: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 12-10

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 12-10
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=7,6\text{sec}$
Open fault	$t=7,6\text{sec}$
Close line	$t=10\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=6,6\text{sec}$

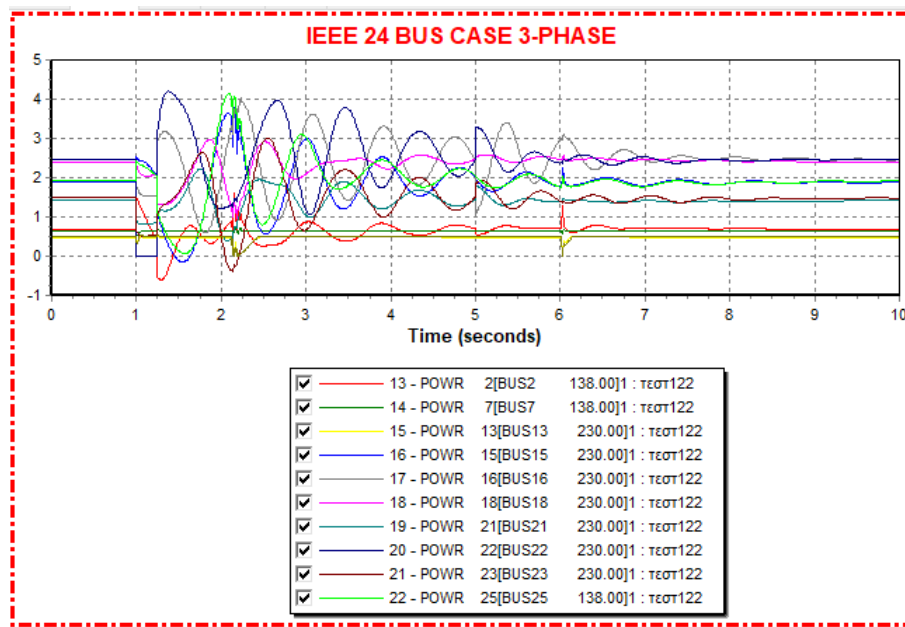
5.6.4 Γ4: 3φασικο σφάλμα μεταξύ της γραμμής μεταφοράς 21-15 κοντά στον ζυγό 21

Εφαρμόζεται 3φασικό στερεό βραχυκύκλωμα την στιγμή $t=1\text{s}$ στην γραμμή μεταφοράς 21-15, κοντά στον ζυγό 21 (βραχυκύκλωμα πάνω σε γεννήτρια). Μετά από μελέτη καθορίζεται ως κρίσιμος χρόνος η στιγμή $t_{crit}=0,25\text{sec}$ μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Άρα την στιγμή $t=1,25\text{sec}$ γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος της γραμμής 21-15. Την στιγμή $t=5\text{sec}$ η γραμμή μεταφοράς 21-15 ξαναπαίρνει σε λειτουργία και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι την στιγμή $t=10\text{sec}$. Στο Σχήμα 5.71 παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών ως προς την γεννήτρια 1 σε σχέση με τον χρόνο που συγκλίνουν. Στο Σχήμα 5.72 και 5.73 παριστάνονται οι καμπύλες της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα της κάθε γεννήτριας και παρατηρείται ότι επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Στο Σχήμα 5.74 και 5.75 παριστάνονται οι καμπύλες της συχνότητας και της τάσης των γεννητριών σε σχέση με τον χρόνο και παρατηρείται ότι συγκλίνουν. Οπότε σύμφωνα με τις καμπύλες το σύστημα παραμένει ευσταθές μετά την διαταραχή.

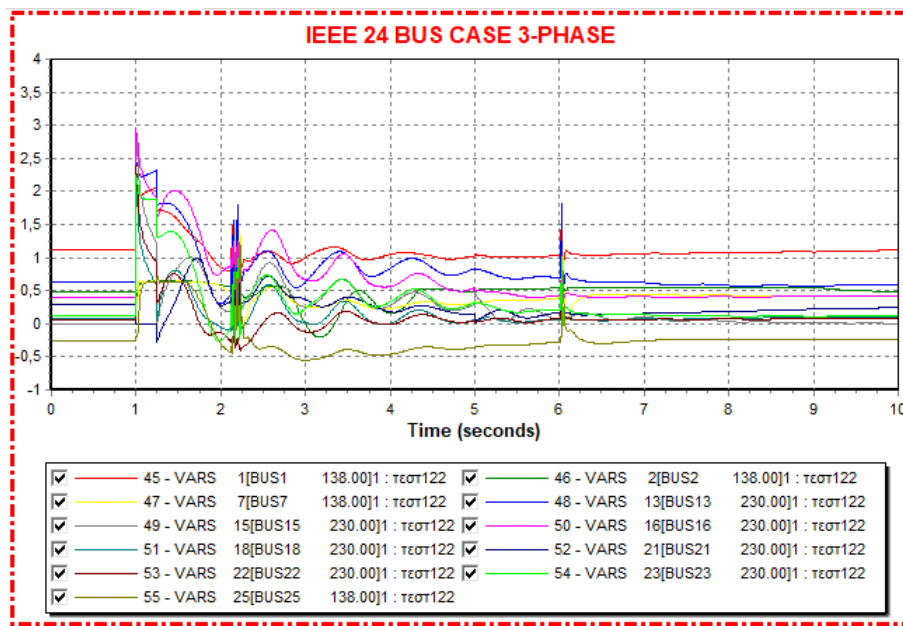
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά από 50msec, δηλαδή την στιγμή $t=1,3\text{sec}$ τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται σύμφωνα με το Σχήμα 5.76 που παριστάνονται οι καμπύλες των γωνιών των γεννητριών που δεν έρχονται σε σύγκλιση. Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος.



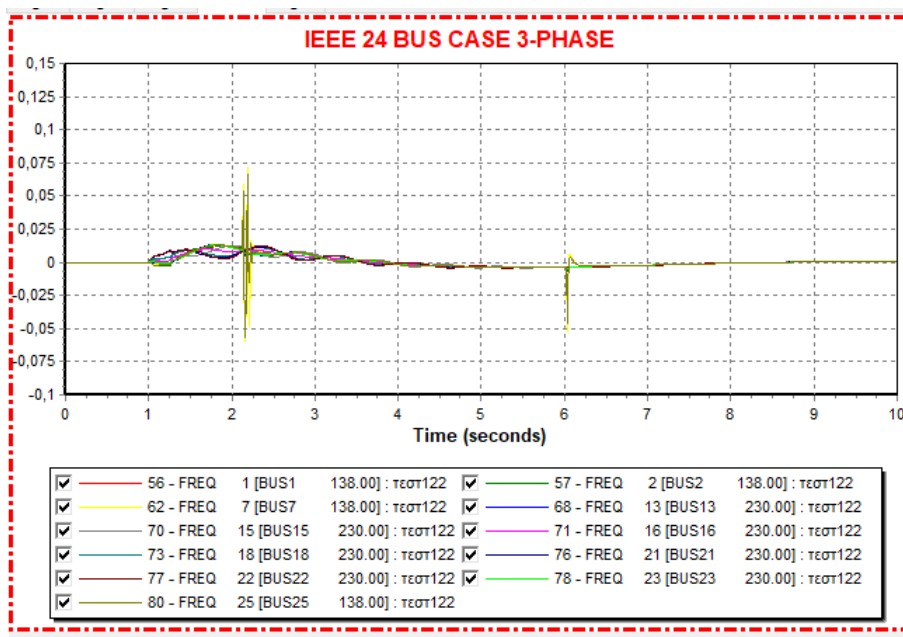
Σχήμα 5.71: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



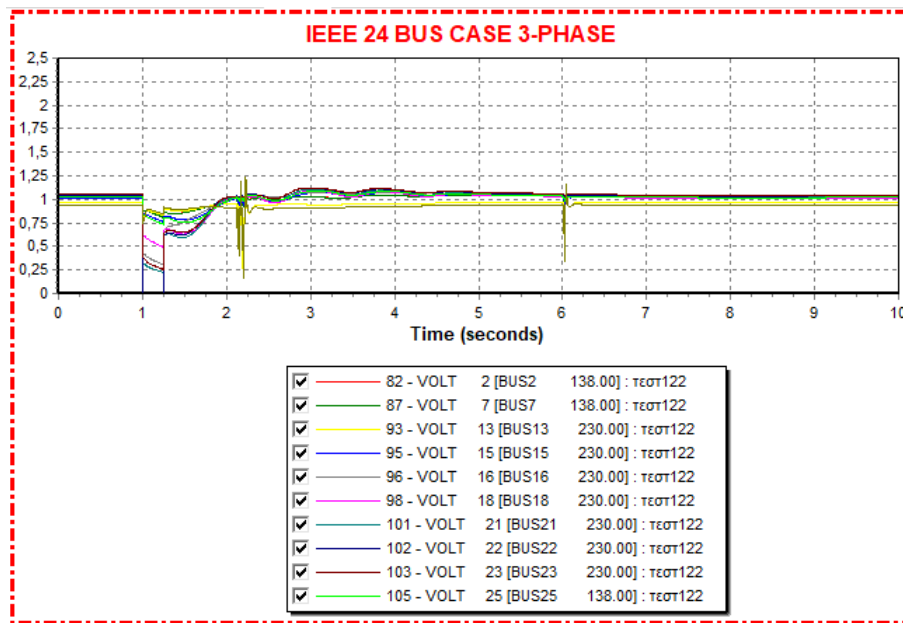
Σχήμα 5.72: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



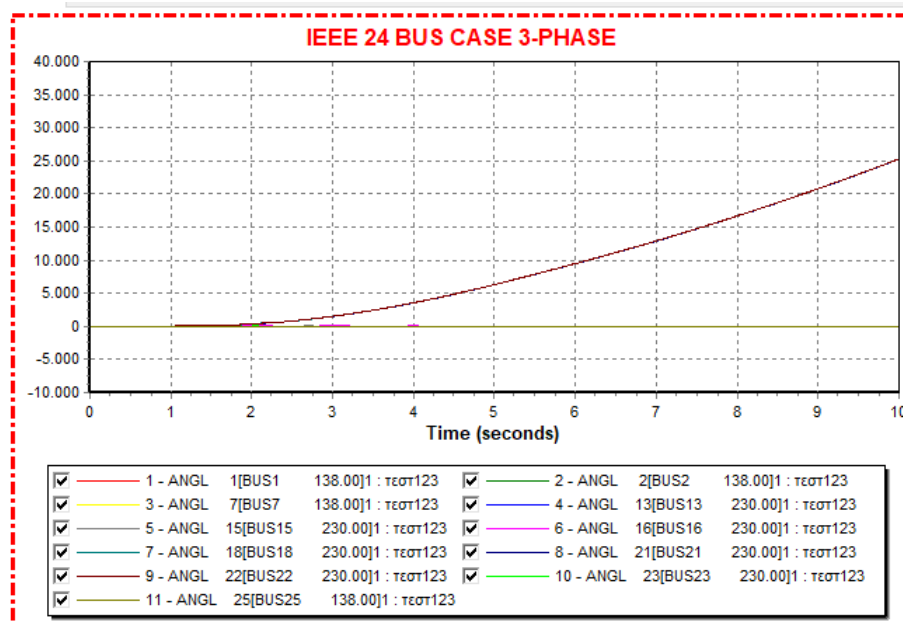
Σχήμα 5.73: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.74: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.75: Καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$



Σχήμα 5.76: Καμπύλες των γωνιών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,3\text{sec}$

Πίνακας 5.14: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στην γραμμή μεταφοράς 21-15

Χρονικές στιγμές	Γραμμή μεταφοράς 21-15
Apply fault	$t=1\text{sec}$
Clear fault	$t=1,25\text{sec}$
Open fault	$t=1,25\text{sec}$
Close line	$t=5\text{sec}$
Critical time	$t_{crit}=0,25\text{sec}$

5.7 Αποτελέσματα

Συνολικά οι κρίσιμοι χρόνοι που προκύπτουν από τις παραπάνω προσομοιώσεις, ώστε ένα σύστημα να παραμείνει ευσταθές μετά από κάποια διαταραχή συνοψίζονται στον Πίνακα 5.15. Στον Πίνακα σημειώνονται οι κρίσιμοι χρόνοι για τα 3 σενάρια για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στα τέσσερα διαφορετικά σημεία του δικτύου.

Πίνακας 5.15: Κρίσιμοι χρόνοι για τα τρία σενάρια

Γραμμές μεταφοράς	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο
17-18	0,3	0,85	0,75
19-20	1,15	1	0,8
12-10	5,2	6,05	6,6
21-15	0,25	0,25	0,25

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Η λειτουργία ενός σύγχρονου ΣΗΕ είναι η μετατροπή ενέργειας από τις διαθέσιμες στην φύση μορφές σε ηλεκτρική μορφή και η μεταφορά αυτής της ενέργεια στα κέντρα κατανάλωσης. Το βασικό πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δυνατότητα μεταφοράς και ελέγχου της με μεγάλο βαθμό απόδοσης και αξιοπιστίας. Τα τελευταία χρόνια εδραιώνεται η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Στο μέλλον αναμένεται η χρήση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας να αυξηθούν σε μεγάλο βαθμό και να αντικαθιστήσουν τις γεννήτριες οδηγώντας σε αλλαγές στα συστήματα ισχύος.

Σε αυτή την διπλωματική πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση στο σύστημα IEEE 24 ζυγών. Σκοπός της διπλωματικής είναι να εξεταστεί αν ένα σύστημα με ενσωμάτωση ανεμογεννητριών επηρεάζεται ως προ την ευστάθειά του. Για αυτό τον σκοπό αρχικά μελετήθηκε η διατήρηση της ευστάθειας στο δίκτυο των 24 ζυγών και υπολογίστηκαν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης ενός τριφασικού σφάλματος σε διάφορες θέσεις του δικτύου. Στη συνέχεια ενσωματώθηκαν ανεμογεννήτριες στο δίκτυο ώστε να εξεταστεί αν μπορεί το σύστημα να παραμείνει ευσταθές μετά από ένα βραχυκύκλωμα και υπολογίστηκαν αντίστοιχα οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης του σφάλματος. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις στα σενάρια 2 και 3 που έχουν ενσωματωθεί ανεμογεννήτριες στο δίκτυο δείχνουν ότι οι ανεμογεννήτριες δεν έχουν αρνητικό αντίκτυπο στη σταθερότητα και τη λειτουργία του δικτύου. Αντιθέτως φαίνεται ότι η διείσδυση της αιολικής ενέργειας σε κάποιες περιπτώσεις έχει θετικό αντίκτυπο και βελτιώνει την συμπεριφορά του συστήματος για τη διατήρηση της μεταβατικής του ευστάθειας. Στον Πίνακα 5.15 συνοψίζονται οι κρίσιμοι χρόνοι για τα 3 σενάρια για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα. Από τον Πίνακα αυτό προκύπτει ότι για βρα-

χυκύκλωμα στην γραμμή μεταφοράς 17-18, κοντά στον ζυγό 17 και στην γραμμή μεταφοράς 12-10, κοντά στον ζυγό 12 οι κρίσιμοι χρόνοι είναι μεγαλύτεροι στα σενάρια 2 και 3 σε σχέση με το σενάριο 1. Αφού οι κρίσιμοι χρόνοι είναι μεγαλύτεροι το σύστημα έχει στη διάθεσή του μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να απαλείψει το σφάλμα. Αποτέλεσμα αυτού είναι να ενισχύεται η αξιοπιστία του δικτύου.

Συνεπώς η αιολική ενέργεια θα συνεχίσει να εξαπλώνεται ταχύτατα σε όλο τον κόσμο και μέσα από τις ανεμογεννήτριες να παράγονται μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτή την διπλωματική θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την μελέτη μεγάλων αιολικών πάρκων.

Βιβλιογραφία

- [1] Shridhar Kulkarni, Ajinkya B. Parit, V R S V Bharath Pulavarthi, and Sagar S. Patil. Comparative analysis of three phase, five phase and six phase symmetrical components with matlab. *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*, October 2017.
- [2] John J. Grainger, William D. Stevenson, and Gary W. Chang. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education, 2016.
- [3] Michael J. Basler and Richard C. Schaefer. Understanding power system stability. *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, May 2005.
- [4] Irena-wind. <https://www.irena.org/wind>. Ημερομηνία πρόσβασης: 30-5-2021.
- [5] Md Liton Hossain, Ahmed Abu-Siada, and S. M. Muyeen. Methods for advanced wind turbine condition monitoring and early diagnosis: A literature review. *Energies*, May 2018.
- [6] C.M.Vivek, P.Gopikrishnan, R.Murugesh, and R. Raja Mohamed. A review on vertical and horizontal axis wind turbine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, April 2017.
- [7] Mohammad Seyedi. Evaluation of the dfig wind turbine built-in model in pss/e. Master of Science Thesis in the Programme of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, June 2009.
- [8] P. Pourbeik, A. Ellis, J. Sanchez-Gasca, Y. Kazachkov, E. Muljadi, J. Senthil, and D. Davies. Generic stability models for type 3 & 4 wind turbine generators for wecc. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 2013.

- [9] Irena-solar. <https://www.irena.org/solar>. Ημερομηνία πρόσβασης: 22-6-2021.
- [10] T. Alquthami, H. Ravindra, M. O. Faruque, M. Steurer, and T. Baldwin. Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of pv arrays integrated with pss/e. *North American Power Symposium 2010*, November 2010.
- [11] Xiaoyu Wang and Meng Yue. Design of energy storage system to improve inertial response for large scale pv generation. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, November 2016.
- [12] PRABHA KUNDUR. *Ευστάθεια και έλεγχος συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας*. TZIOΛΑ, 2019.
- [13] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος και Νικόλαος Α. Βοβός. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. ΖΗΤΗ, 2008.
- [14] Νικόλαος Α. Βοβός και Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος. *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. ΖΗΤΗ, Β' edition, 2011.
- [15] Olukayode A. Afolabi, Warsame H. Ali, Penrose Cofie, John Fuller, Pamela Obiomon, and Emmanuel S. Kolawole. Analysis of the load flow problem in power system planning studies. *Energy and Power Engineering*, pages 509–523, September 2015.
- [16] Sreemoyee Chatterjee and Suprovab Mandal. A novel comparison of gauss–seidel and newton–raphson methods for load flow analysis. *IEEE*, October 2017.
- [17] Arfah Marini Mohamad, Norazlan Hashim, Noraliza Hamzah, Nik Fasdi Nik Ismail, and Mohd Fuad Abdul Latip. Transient stability analysis on sarawak’s grid using power system simulator for engineering (pss/e). *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, September 2011.
- [18] Yurika, Gibson HM Sianipar, Suwarno, and Janson Naiborhu. Determination of critical clearing time in transient stability analysis. *2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)*, 2018.
- [19] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 18, FEBRUARY 2003.

- [20] Hamid Allamehzadeh. Wind energy history, technology and control. *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability*, October 2016.
- [21] Magedi Moh. M. Saad and Norzelawati Asmuin. Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. *IOSR Journal of Engineering*, 04, August 2014.
- [22] Henk Polinder, Sjoerd W. H. de Haan, Maxime R. Dubois, and Johannes G. (Han) Slootweg. Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines. *EPE Journal*, September 2015.
- [23] Magedi Moh. M. Saad and Norzelawati Asmuin. Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. *IOSR Journal of Engineering*, August 2014.
- [24] Erhab Youssef, Rasha M. El Azab, and Amr M. Amin. Comparative study of voltage stability analysis for renewable energy grid-connected systems using pss/e. *IEEE*, April 2015.
- [25] Michail Katsivelakis, Dimitrios Bargiotas, and Aspasia Daskalopulu. Transient stability analysis in power systems integrated with a doubly-fed induction generator wind farm. *2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*, December 2020.
- [26] J.G. Slootweg, H. Polinder, and W.L. Kling. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings*, July 2001.
- [27] Pouyan Pourbeik. Specification of the second generation generic models for wind turbine generators. *Electric Power Research Institute*, January 2014.
- [28] Nidhi Agarwal. Design and simulink of intelligent solar energy improvement with pv module. *International Journal of Information & Computation Technology.*, 2014.
- [29] Hairul Nissah Zainudin and Saad Mekhilef. Comparison study of maximum power point tracker techniques for pv systems. *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference*, December 2010.
- [30] Chia-Yu Hsu, Pei-Hwa Huang, and Kai-Sheng Yang. Dynamic analysis of power system with photovoltaic generation. *MATEC Web of Conferences*, January 2016.