



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΎΝΤΑΞΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ  
ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Βαρβάρα Λέκκα**

**Επιβλέπων:** Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2021





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΎΝΤΑΞΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ  
ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Βαρβάρα Λέκκα**

**Επιβλέπων:** Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2021





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

**INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES  
IN A POWER SYSTEM**

Diploma Thesis

**Varvara Lekka**

**Supervisor:** Dimitrios Bargiotas

September 2021



Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Δημήτριος Μπαργιώτας**

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

Μέλος **Ασπασία Δασκαλοπούλου**

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

Μέλος **Αθανάσιος Φεύγας**

Μέλος ΕΔΙΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης: 23-9-2021





# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, τον καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα, όχι μόνο για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας, αλλά και για τη συνεργασία μας όλα αυτά χρόνια. Ο κύριος Μπαργιώτας ήταν πάντα διαθέσιμος για μένα και πάντα με οδηγούσε στη σωστή κατεύθυνση. Γι' αυτό, θα ήθελα να του εκφράσω την εκτίμησή μου και τις ευχαριστίες μου.

Τις ευχαριστίες μου επίσης εκφράζω στην κυρία Ασπασία Δασκαλοπούλου και στον κύριο Αθανάσιο Φεύγα, που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.


Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που είχαν καθοριστικό ρόλο σ' αυτό το «ταξίδι», για όλες τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε. Σας ευχαριστώ που ήσασταν πάντα εκεί για μένα!

## ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Η Δηλούσα



Βαρβάρα Λέκα

23-9-2021

# Περίληψη

Η ευρεία κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει αναβαθμίσει το βιοτικό επίπεδο κάθε κοινωνίας. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας και τις προηγούμενες δεκαετίες παραγόταν κυρίως μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα δεν αντιμετωπίζουν μόνο εξάντληση, αλλά έχουν γίνει επίσης πηγή ανησυχίας σχετικά με τις σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων. Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για την ένταξη και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μιας και δεν παράγουν ρύπους και τα αποθέματά τους είναι ανεξάντλητα. Μία από τις πιο ανεπτυγμένες μορφές εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια με την χρήση των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 24 ζυγών κατά την εμφάνιση στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων με το λογισμικό PSS/E της Siemens (Power System Simulator for Engineering). Στις προσομοιώσεις η ενέργεια αρχικά προέρχεται από συμβατικές γεννήτριες και στην συνέχεια από συνδυασμό γεννητριών και ανεμογεννητριών εξετάζοντας την ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια μετά την επίδραση βραχυκυκλωμάτων. Μελετάται επίσης ο χρόνος εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων με την παρουσία ανεμογεννητριών και χωρίς.



# Abstract

The widespread consumption of electricity has upgraded the living standards of every society. In previous decades electricity was produced mainly by fossil fuels combustion. However, fossil fuels are not only depleting but have also become a source of concern due to their serious negative impact on the environment and human health. Thus, the need for integration and utilization of renewable energy sources in electricity systems has become indispensable, since they do not produce pollutants, and their reserves are inexhaustible. One of the most developed forms of alternative energy sources is wind energy with the use of wind turbines and wind farms. For my diploma thesis, I studied the behavior of a 24-bus electrical power system with the occurrence of three-phase solid fault with the help of the PSS / E software (Power System Simulator for Engineering) by Siemens. In the simulations, the energy was produced from conventional generators and afterwards from a combination of generators and wind turbines. These simulations were used to examine the ability of the power grid to maintain its transient stability during the occurrence of three-phase solid fault. In addition, I also tested the Critical Clearing Time (CCT) with and without the presence of wind turbines.



# Πίνακας περιεχομένων

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>ix</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Πίνακας περιεχομένων</b>	<b>xv</b>
<b>Κατάλογος σχημάτων</b>	<b>xix</b>
<b>Κατάλογος πινάκων</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	1
1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα . . . . .	3
1.3 Δομή εργασίας . . . . .	6
<b>2 Ανάλυση ροής φορτίου</b>	<b>7</b>
2.1 Εξισώσεις ροής φορτίου . . . . .	7
2.2 Μέθοδοι ανάλυσης ροής φορτίου: . . . . .	10
2.3 Μέθοδος Gauss-Seidel (G-S) . . . . .	11
2.4 Μέθοδος Newton-Raphson (NR) . . . . .	12
<b>3 Ανάλυση σφαλμάτων</b>	<b>15</b>
3.1 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα . . . . .	17
3.1.1 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα – SCC . . . . .	17
3.1.2 Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκυκλώσεως με το θεώρημα Thevenin	18
3.2 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα . . . . .	19

3.2.1	Συμμετρικές συνιστώσες . . . . .	19
3.2.2	Μελέτη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Ευστάθεια</b>	<b>25</b>
4.1	Μεταβατική Ευστάθεια . . . . .	27
4.2	Εξίσωση Ταλάντωσης . . . . .	28
4.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια . . . . .	30
4.4	Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας . . . . .	31
4.5	Κρίσιμος Χρόνος Εκκαθάρισης . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας</b>	<b>33</b>
5.1	Αιολική Ενέργεια . . . . .	34
5.1.1	Ανεμογεννήτριες . . . . .	37
5.1.2	Τύποι Ανεμογεννητριών . . . . .	38
5.1.3	Κατηγορίες οριζόντιων ανεμογεννητριών . . . . .	41
5.1.4	Αιολικά Πάρκα . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Προσομοίωση</b>	<b>47</b>
6.1	Περιγραφή του προβλήματος . . . . .	47
6.1.1	Μελέτη Μεταβατικής Ευστάθειας . . . . .	51
6.2	Σενάριο προσομοίωσης Α . . . . .	53
6.2.1	ΣΕΝΑΡΙΟ Α1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 . . . . .	53
6.2.2	ΣΕΝΑΡΙΟ Α2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12 . . . . .	57
6.3	Σενάριο Προσομοίωσης Β . . . . .	61
6.3.1	ΣΕΝΑΡΙΟ Β1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 . . . . .	61
6.3.2	ΣΕΝΑΡΙΟ Β2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12 . . . . .	66
6.4	Σενάριο Προσομοίωσης Γ . . . . .	70
6.4.1	ΣΕΝΑΡΙΟ Γ1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 . . . . .	70
6.4.2	ΣΕΝΑΡΙΟ Γ2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12 . . . . .	74
6.5	Σενάριο Προσομοίωσης Δ . . . . .	78
6.5.1	ΣΕΝΑΡΙΟ Δ1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 . . . . .	78
6.5.2	ΣΕΝΑΡΙΟ Δ2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12 . . . . .	83
6.6	Αποτελέσματα . . . . .	87



---

<b>7 Συμπεράσματα</b>	<b>89</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>91</b>



# Κατάλογος σχημάτων

1.1	Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	2
1.2	Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά την περίοδο 2017-2030[1] . . . .	4
2.1	Ζυγός ενός ΣΗΕ . . . . .	7
2.2	Υπολογισμός Ιακωβιανής μήτρας . . . . .	13
3.1	Βραχυκυκλώματα . . . . .	16
3.2	Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin . . . . .	18
3.3	Συμμετρικές συνιστώσες . . . . .	19
3.4	SLG σφάλμα . . . . .	22
3.5	Line to Line σφάλμα . . . . .	22
3.6	DLG σφάλμα . . . . .	23
4.1	Κατηγοριοποίηση μορφών ευστάθειας ΣΗΕ . . . . .	26
4.2	Διάγραμμα προσδιορισμού Κρίσιμου Χρόνου εκκαθάρισης . . . . .	32
5.1	Νέες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στην Ευρώπη το 2020[2] . . . . .	35
5.2	Νέες εγκαταστάσεις αιολικών παάρκων στην Ευρώπη ως το 2025 [2] . . . .	36
5.3	Typical WPP Topology . . . . .	37
5.4	Τύποι Ανεμογεννητριών Κάθετου Άξονα . . . . .	38
5.5	Προσήνεμη / Υπήνεμη Ανεμογεννήτρια . . . . .	39
5.6	Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα . . . . .	40
5.7	Ανεμογεννήτρια τύπου 1 . . . . .	41
5.8	Ανεμογεννήτρια τύπου 2 . . . . .	42
5.9	Ανεμογεννήτρια τύπου 3 . . . . .	43
5.10	Ανεμογεννήτρια τύπου 4 . . . . .	43
5.11	Το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο το οποίο βρίσκεται στην Αγγλία .	45

6.1	Δίκτυο 24 ζυγών της IEEE . . . . .	48
6.2	Generator/Converter Model (WT4G) . . . . .	49
6.3	Electrical Control Model (WT4E) . . . . .	50
6.4	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,3 \text{ sec}$ . . . . .	54
6.5	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3 \text{ sec}$ . . . . .	55
6.6	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3 \text{ sec}$ . . . . .	55
6.7	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3\text{sec}$ . . . . .	56
6.8	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3\text{sec}$ . . . . .	56
6.9	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	57
6.10	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 6,2 \text{ sec}$ . . . . .	58
6.11	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=6,2 \text{ sec}$ . . . . .	59
6.12	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=6,2 \text{ sec}$ . . . . .	59
6.13	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=6,2 \text{ sec}$ . . . . .	60
6.14	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t= 6,2 \text{ sec}$ . . . . .	60
6.15	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 6,25 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	61
6.16	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$ . . . . .	63
6.17	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	63

6.18	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	64
6.19	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$ . . . . .	64
6.20	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	65
6.21	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,4 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	65
6.22	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 4,9 \text{ sec}$ . . . . .	67
6.23	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 4,9 \text{ sec}$ . . . . .	67
6.24	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 4,9 \text{ sec}$ . . . . .	68
6.25	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 4,9 \text{ sec}$ . . . . .	68
6.26	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t= 4,9 \text{ sec}$ . . . . .	69
6.27	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 4,95 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	69
6.28	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$ . . . . .	71
6.29	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	72
6.30	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	72
6.31	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$ . . . . .	73
6.32	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	73
6.33	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,4 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	74

6.34	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,95 \text{ sec}$ . . . . .	75
6.35	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,95 \text{ sec}$ . . . . .	76
6.36	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,95 \text{ sec}$ . . . . .	76
6.37	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,95 \text{ sec}$ . . . . .	77
6.38	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t= 1,95 \text{ sec}$ . . . . .	77
6.39	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 2 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	78
6.40	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$ . . . . .	80
6.41	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	80
6.42	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	81
6.43	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$ . . . . .	81
6.44	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35 \text{ sec}$ . . . . .	82
6.45	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 1,4 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	82
6.46	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 2,95 \text{ sec}$ . . . . .	84
6.47	Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=2,95 \text{ sec}$ . . . . .	84
6.48	Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=2,95 \text{ sec}$ . . . . .	85
6.49	Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=2,95 \text{ sec}$ . . . . .	85

---

6.50	Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 2,95 \text{ sec}$ . . . . .	86
6.51	Καμπύλες των γωνιών $\delta$ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t = 3 \text{ sec}$ που έχει χαθεί η ευστάθεια. . . . .	86





# Κατάλογος πινάκων

1.1	Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή[1]	5
1.2	Εξέλιξη ηλεκτροπαραγωγής από μονάδες ΑΠΕ[1]	5
2.1	Τύποι ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [3]	9
6.1	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7	54
6.2	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12	58
6.3	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7	62
6.4	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12	66
6.5	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7	71
6.6	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12	75
6.7	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7	79
6.8	Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12	83
6.9	Συνολικοί κρίσιμοι χρόνοι	87



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

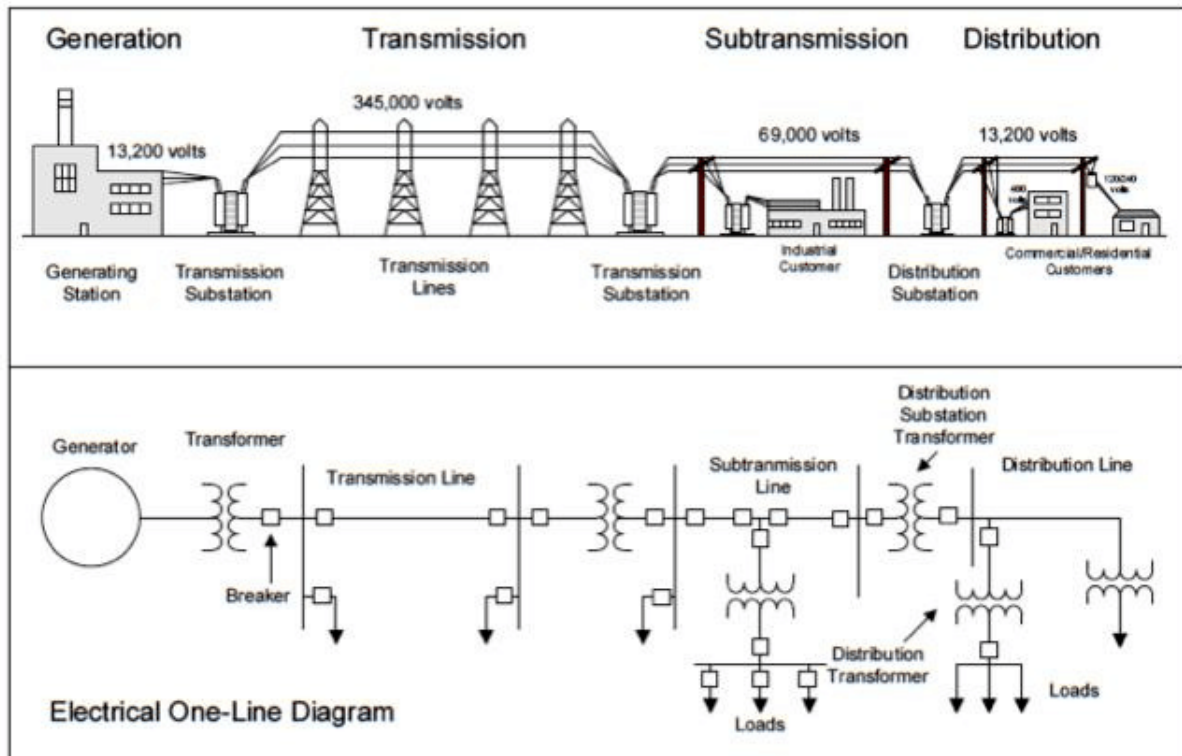
### 1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η βιομηχανική ανάπτυξη και η εξέλιξη του επιπέδου διαβίωσης τις τελευταίες δεκαετίες οφείλεται σε πολύ μεγάλο ποσοστό στην χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία διαθέτει μεγάλη ευελιξία στην μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο εγκαταστάσεων, εξοπλισμού και μέσων που απαιτούνται για να καλύψουν τις ανάγκες των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες δυνατές οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση και αξιοπιστία τροφοδότησης.

Αναλυτικότερα, όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Στους σταθμούς παραγωγής
2. Στα δίκτυα μεταφοράς
3. Στο δίκτυο διανομής

Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μία συνεχή ροή και δεν μπορούν να αποθηκευτούν μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο. Γι' αυτόν τον λόγο, πρέπει να παράγεται την στιγμή ακριβώς που υπάρχει ζήτηση για κατανάλωση. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζονται οι τρεις βασικές λειτουργίες του ΣΗΕ.



Σχήμα 1.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σταθμοί παραγωγής είναι οι εγκαταστάσεις στις οποίες μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Το είδος των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός ΣΗΕ καθορίζεται από το είδος των φυσικών πηγών ενέργειας που έχει κάθε χώρα. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται στις συμβατικές που αποτελούνται από καύσιμα όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης) και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που χρησιμοποιούν ανεξάντλητες πηγές όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό κλπ. Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την τοποθεσία των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο οικονομικός παράγοντας. Γι' αυτόν τον λόγο οι λιγνιτικοί σταθμοί κατασκευάζονται κοντά στο σημείο εξόρυξης του καυσίμου, και ομοίως οι υδροηλεκτρικοί και οι αιολικοί σταθμοί όπου μπορεί να εκμεταλλευτεί το υδραυλικό ή το αιολικό δυναμικό.

Το σύστημα μεταφοράς ενός ΣΗΕ αποτελεί την κύρια διασύνδεση μεταξύ των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού διαφόρων επιπέδων τάσεων.

Στο ελληνικό ΣΗΕ τα δίκτυα μεταφοράς αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης των 400 kV και υψηλής τάσης των 150 kV. Στόχος του συστήματος μεταφοράς είναι η ανύψωση της τάσης από τους σταθμούς παραγωγής. Όταν η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το δίκτυο διανομής αποτελείται από ένα σύνολο υποδομών όπως είναι οι υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής και προστασίας. Στόχος του δικτύου διανομής είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης. Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής. Επίσης, το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (230/400V) μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές. [4, 5]

## 1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια της Μακεδονίας παράγεται περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών όμως σε ένα σημείο της χώρας προκαλεί αυξημένες απώλειες κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην ιδέα να βρίσκονται κοντά σε περιοχές που υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αυτούς τους σταθμούς. Παρ' αυτά, τα τελευταία χρόνια η ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνεχώς ενισχύεται.

Πιο συγκεκριμένα, με την τελευταία ευρωπαϊκή οδηγία, προβλέπεται για την Ελλάδα η ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές να καταλαμβάνει το 35% του συνολικού ενεργειακού μείγματος έως το 2030, ουσιαστικά διπλασιάζοντας το ποσοστό σε μια δεκαετία. Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) αποτελεί ένα αξιοσημείωτο πλάνο για τη χώρα

μας με στόχο την επίτευξη συγκεκριμένων ενεργειακών και κλιματικών στόχων έως και το 2030, λαμβάνοντας υπόψιν τις συστάσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αλλά και τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ.

Ο σημαντικότερος στόχος για το ΕΣΕΚ είναι η δραστική μείωση μεριδίου του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή και μέχρι το 2028 να υπάρξει οριστική απολιγνιτοποίηση. Ο λιγνίτης τότε θα έχει αντικατασταθεί από καθαρές μορφές ενέργειας στο νέο ενεργειακό μείγμα του 21ου αιώνα.

Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι κυριότερες πηγές για τις επόμενες χρονιές που θα συνεισφέρουν στην επίτευξη των στόχων είναι τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά πάρκα, στα οποία έχουν γίνει πολλές μελέτες και θεωρούνται άκρως ανταγωνιστικά με τους κανόνες της αγοράς. Στο Σχήμα 1.2 σημειώνεται η εξέλιξη των εναλλακτικών πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή και εκτιμάται ότι η εγκατεστημένη ισχύς των μη ελεγχόμενων ΑΠΕ σχεδόν τριπλασιάζεται κατά την περίοδο 2017-2030. Επιπλέον, στους Πίνακα 1.1 απεικονίζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή και στον Πίνακα 1.2 απεικονίζεται η εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Επισημαίνεται ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένος χρονοπρογραμματισμός για τα θαλάσσια αιολικά πάρκα, η συμμετοχή τους όμως στο μείγμα για την επίτευξη του στόχου της ηλεκτροπαραγωγής θεωρείται δεδομένη. [1]



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά την περίοδο 2017-2030[1]

Πίνακας 1.1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή[1]

Ηλεκτροπαραγωγή - Εγκατεστημένη Ισχύς [GW]	2020	2025	2030
Ανεμογεννήτριες	3,6	5,2	7,0
Φωτοβολταϊκά	3,0	5,3	7,7
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	3,4	3,8	3,9
Βιομάζα	0,1	0,1	0,3
Γεωθερμία	0,0	0,0	0,1

Πίνακας 1.2: Εξέλιξη ηλεκτροπαραγωγής από μονάδες ΑΠΕ[1]

Ηλεκτροπαραγωγή [TWh]	2020	2025	2030
Ανεμογεννήτριες	7,3	12,6	17,2
Φωτοβολταϊκά	4,5	8,2	11,8
Βιομάζα	0,4	0,8	1,6
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	5,5	5,6	5,6
Γεωθερμία	0,0	0,0	0,6

### 1.3 Δομή εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

1. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής και σε θέματα που αφορούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μία σύντομη ανάλυση της ροής φορτίου και επεξηγούνται δύο επαναληπτικοί αλγόριθμοι επίλυσης μη γραμμικών εξησώσεων.
3. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά σε όλους τους τύπους σφαλμάτων που είναι πιθανό να προκύψουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Στο Κεφάλαιο 4 επεξηγείται η έννοια της ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύεται η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης των σφαλμάτων.
5. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με έμφαση στην αιολική ενέργεια και πιο συγκεκριμένα στις ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα.
6. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με την ικανότητα των ανεμογεννητριών να διατηρήσουν την μεταβατική τους ευστάθεια μετά την εφαρμογή τριφασικού σφάλματος.
7. Στο Κεφάλαιο 7 εξάγονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

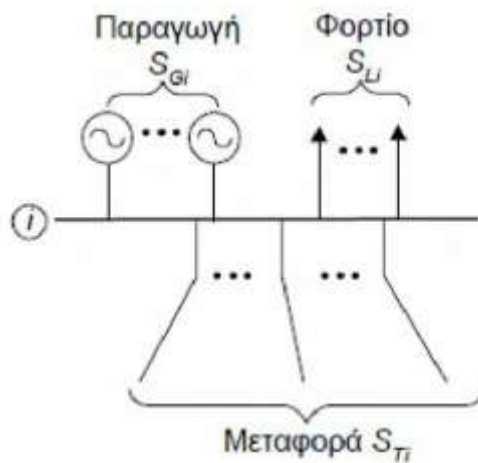


# Κεφάλαιο 2

## Ανάλυση ροής φορτίου

### 2.1 Εξισώσεις ροής φορτίου

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι απαραίτητη για την μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ανάλυση λοιπόν ενός συστήματος, είναι απαραίτητο το μονογραμμικό του διάγραμμα από το οποίο αντλούμε δεδομένα και τα εισάγουμε σε διάφορα λογισμικά, με στόχο να λάβουμε τις τελικές μετρήσεις. Οι ποσότητες που μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση ροής φορτίου είναι οι τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου, οι ροές πραγματικής και άεργης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, καθώς και στους μετασχηματιστές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Η ανάλυση ροής φορτίου είναι ύψιστης σημασίας για τον καθορισμό της βέλτιστης λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.1: Ζυγός ενός ΣΗΕ

Για κάθε ζυγό  $i$  ισχύει ότι η ισχύς της παραγωγής ισούται με το άθροισμα της ισχύος του φορτίου του ζυγού και της ισχύος που απομακρύνεται από τον ζυγό μέσω των γραμμών μεταφοράς. Συγκεκριμένα, για έναν ζυγό  $i$  η ισχύς που παράγεται  $S_{Gi}$  ισούται με την ισχύ που καταναλώνουν τα φορτία στο ζυγό αυτό  $S_{Li}$  και την ισχύ που απομακρύνεται από αυτόν μέσω των γραμμών μεταφοράς,  $S_{Ti}$ . Δηλαδή,

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad (2.1)$$

Με κάθε ζυγό  $n$  ενός δικτύου συσχετίζονται οι παρακάτω μεταβλητές:  $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Li}, Q_{Li}, |V_i|, \delta_i$ . Αυτές οι μεταβλητές μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Μεταβλητές διαταραχής: είναι οι πραγματικές και οι άεργες καταναλώσεις που δεν μπορούμε να ελέγξουμε  $P_{Li}, Q_{Li}$
- Μεταβλητές ελέγχου: είναι οι παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος που μπορούμε να ελέγξουμε  $P_{Gi}, Q_{Gi}$
- Μεταβλητές κατάστασης: είναι τα μέτρα των τάσεων  $|V_i|$  και οι φασικές γωνίες  $\delta_i$ , οι οποίες επηρεάζονται αλλάζοντας τις μεταβλητές ελέγχου  $P_{Li}, Q_{Li}$ . [6]

Από τις παραπάνω ποσότητες οι τιμές από τις πραγματικές και τις άεργες καταναλώσεις  $P_{Li}$  και  $Q_{Li}$  είναι γνωστές. Από τις υπόλοιπες μεταβλητές, οι δύο ποσότητες θα προκαθορίζονται και οι άλλες δύο θα βρεθούν μέσω της επίλυσης των εξισώσεων. Οι ζυγοί διακρίνονται σε τρεις τύπους όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 με κριτήριο ποιες από τις τέσσερις ποσότητες  $P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|, \delta_i$  προκαθορίζονται: [3]

1. Ζυγός αναφοράς (slack bus): είναι ζυγός παραγωγής, είναι μόνο ένας σε κάθε σύστημα και έχει προκαθορισμένο το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης. Θέτουμε το μέτρο της τάσης αυτού του ζυγού ίσο με 1 pu και τη φασική γωνία της τάσης ίση με  $0^\circ$ . Μ'

αυτόν τον τρόπο δηλαδή, μπορώ να υπολογίσω τις φασικές γωνίες των τάσεων των άλλων ζυγών έχοντας ως αναφορά τη φασική γωνία αυτού του ζυγού. Ως ζυγός αναφοράς επιλέγεται συνήθως αυτός με την μεγαλύτερη παραγωγή πραγματικής ισχύος και αριθμείται ως πρώτος μεταξύ των ζυγών με  $|V_1|, \delta_1$ .

2. Ζυγοί με ελεγχόμενη τάση (Generator bus PV): είναι οι ζυγοί στους οποίους τα δεδομένα είναι το μέτρο της τάσης  $|V_i|$  καθώς και η παραγόμενη πραγματική ισχύς του ζυγού  $P_{Gi}$ . Συνήθως είναι ζυγοί που συνδέονται με γεννήτριες και γι' αυτό και λέγονται και ζυγοί παραγωγής. Με την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σ' αυτούς τους ζυγούς υπολογίζεται η άεργος ισχύς  $Q_{Gi}$  και η γωνία φάσης της τάσης  $\delta_i$ .
3. Ζυγοί φορτίου (Load bus PQ): είναι οι ζυγοί στους οποίους δεν υπάρχει παραγωγή, δηλαδή οι τιμές  $P_{Gi}, Q_{Gi}$  είναι μηδέν. Σ' αυτούς τους ζυγούς υπάρχουν μόνο φορτία και είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ζυγών, μιας και αποτελούν το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου. Με την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σ' αυτούς τους ζυγούς υπολογίζω το μέτρο και την φασική γωνία της τάσης  $|V_i|, \delta_i$ . [6]

Πίνακας 2.1: Τύποι ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [3]

No.	Type of Bus	$P_{Gi}$	$Q_{Gi}$	$ V_i $	$\delta_i$
1	Slack Bus	unknown	unknown	known	known
2	Generator Bus (PV)	known	unknown	known	unknown
3	Load Bus (PQ)	known	known	unknown	unknown

## 2.2 Μέθοδοι ανάλυσης ροής φορτίου:

Η αριθμητική ανάλυση που περιλαμβάνει τη λύση αλγεβρικών εξισώσεων αποτελεί τη βάση για την ανάλυση ροής φορτίου. Για την ανάλυση αυτή, είναι απαραίτητος ο σχηματισμός του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών  $Y_{bus}$  χρησιμοποιώντας τις γραμμές μεταφοράς και δεδομένα εισόδου μετασχηματιστή. Ο πίνακας αγωγιμοτήτων  $Y_{bus}$  προέρχεται από την αντιστροφή του πίνακα αντιστάσεων  $Z_{bus}$ . Ο πίνακας αγωγιμοτήτων δηλαδή, θα έχει στην διαγώνια γραμμή (τα στοιχεία  $Y_{ii}$ ) το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που εφάπτονται σε κάθε ζυγό  $i$ . Σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις του πίνακα  $Y_{ij}$ , τα στοιχεία θα έχουν για τιμή την αρνητική αγωγιμότητα μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$ . Γι' αυτό, μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις κόμβων του συστημάτων ως εξής:

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

Για ένα σύστημα  $n$  ζυγών, η εξίσωση μπορεί να γενικευτεί και να γραφτεί ως εξής:

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

Η μιγαδική ισχύς του ζυγού  $i$  περιγράφεται από τη σχέση:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_jS_i = P_i + jQ_i = V_iI_i^* \quad (2.4)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.5)$$

Επιλύοντας ως προς  $I_i$  η εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$I_i = V_i \sum_{j=1}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \text{ για } j \neq i. \quad (2.6)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μη γραμμική εξίσωση και για να επιλυθεί χρησιμοποιούνται υπολογιστικές τεχνικές. Δύο από αυτές είναι η μέθοδος Gauss-Seidel και η μέθοδος Newton-Raphson που επιλύουν τις εξισώσεις με επαναληπτική διαδικασία. [3, 6]

## 2.3 Μέθοδος Gauss-Seidel (G-S)

Πρόκειται για μια επαναληπτική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου. Για την επίλυσή τους με την μέθοδο Gauss-Seidel χρησιμοποιείται η μιγαδική τους μορφή. Αρχικά, όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν τους ζυγούς του συστήματος εκτός αυτής του ζυγού αναφοράς, πρέπει να μετασχηματιστούν στην μορφή της παρακάτω εξίσωσης:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii}V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij}V_j \text{ για } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.7)$$

Συνεπώς:

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij}V_j \right] \text{ για } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.8)$$

Ο αλγόριθμος Gauss-Seidel θα λάβει την παρακάτω μορφή:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij}V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij}V_j^{(v)} \right] \text{ για } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.9)$$

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αντιμετωπίζουμε διαφορετικά τους τρεις ζυγούς.

- Ζυγός αναφοράς: Ισχύει ότι  $V_1 = |Q_i| < \delta_1 = 1 < 0$  pu. Άρα παρακάμπτεται ο πρώτος ζυγός και ξεκινά η επαναληπτική διαδικασία για  $i \neq 1$ .
- Ζυγός φορτίου: Είναι ήδη γνωστές οι τιμές  $P_i$  και  $Q_i$  επομένως ορίζεται το δεύτερο μέλος και υπολογίζω σε κάθε επανάληψη την νέα τιμή για το μέτρο της τάσης και την φασική γωνία.
- Ζυγός με ελεγχόμενη τάση: Η παραγωγή της άεργου ισχύος  $Q_{Gi}$  είναι άγνωστη, δεν μπορώ να υπολογίσω και την ποσότητα  $Q_i$  μιας και ισχύει ότι  $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$ . Γι' αυτόν τον λόγο, θα υπολογίσω το  $Q_i$  έμμεσα από τις τάσεις των ζυγών χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες τιμές τους.

Θα εφαρμόσω την σχέση:

$$Q_i^{(v)} = V_i^{(v)} \sum_{j=1}^n V_j^{(v)} Y_{ij} \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}) \quad (2.10)$$

Όταν θα γνωρίζω την τιμή  $Q_i$  τότε θα μπορώ να υπολογίσω την τιμή  $V_i^{(v+1)}$ . [5]

## 2.4 Μέθοδος Newton-Raphson (NR)

Η μέθοδος Newton - Raphson είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Αποτελείται από τα εξής βήματα: Ορίζουμε τον πίνακα  $Y_{bus}$ , ο οποίος είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου. Σε ένα σύστημα με  $n$  ζυγούς, θα χρειαστώ  $n-1$  εξισώσεις, γιατί θέλω αποτελέσματα για τον ζυγό αναφοράς. Ορίζω αρχικές τιμές για τις τάσεις  $V_i$  καθώς και για τις γωνίες  $\delta_i$  των ζυγών φορτίου και ελέγχου τάσης. Θα υπολογίσω την πραγματική ισχύ  $P_i$  και την άεργο ισχύ  $Q_i$  των ζυγών από τις σχέσεις:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i + \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.11)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i + \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.12)$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσω τις διαφορές πραγματικής και άεργης ισχύος  $\Delta P$  και  $\Delta Q$  αντίστοιχα καθώς και την Ιακωβιανή μήτρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

$$\Delta P_{i(v)} = P_{i,spec} - P_{i(v)} \text{ με } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.13)$$

$$\Delta Q_{i(v)} = Q_{i,spec} - Q_{i(v)} \text{ με } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.14)$$

Οι τιμές  $P_{i,spec}$  και  $Q_{i,spec}$  είναι οι προκαθορισμένες τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος στον ζυγό  $i$ , ενώ οι τιμές  $P_i(v)$ ,  $Q_i(v)$  θα υπολογιστούν μέσα από τις εξισώσεις. [5]

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 2.2: Υπολογισμός Ιακωβιανής μήτρας

Η πιο συνοπτικά :

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

όπου J1, J2, J3, J4 είναι στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας.

Έπειτα, θα υπολογίσω τα  $\Delta P_i$ ,  $\Delta Q_i$  και θα κάνω έλεγχο σύγκλισης της μεθόδου. Αν η μέθοδος δεν συγκλίνει τότε θα επαναλάβω τα βήμα μετατρέποντας το σύστημα εξισώσεων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J3 \\ J2 & J4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix}$$

Η σύγκλιση θα επιτευχθεί όταν για όλους τους ζυγούς του δικτύου θα ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\Delta P_{i(v)} = P_{i,spec} - P_{i(v)} < \epsilon \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_{i(v)} = Q_{i,spec} - Q_{i(v)} < \epsilon \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.16)$$

Τότε θα μπορούν να υπολογιστούν η πραγματική ισχύς P, η άεργος ισχύς Q , οι ροές φορτίου στις γραμμές καθώς και οι απώλειες. [5], [6]

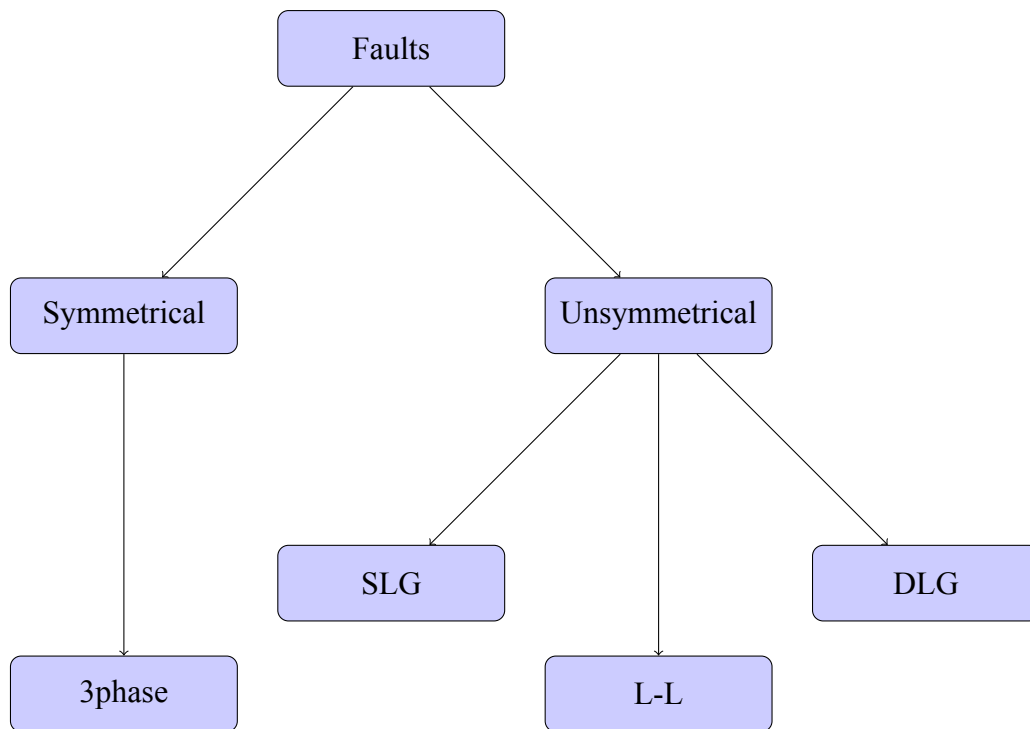


## Κεφάλαιο 3

### Ανάλυση σφαλμάτων

Πολλές φορές είναι εύκολο να προκύψει κάποιο σφάλμα στο δίκτυο και να δημιουργηθούν σοβαρές διαταραχές στα ηλεκτρικά συστήματα. Ενδεικτικά, κάποιοι λόγοι είναι οι πτώσεις κεραυνών, οι πτώσεις δέντρων, οι δυνατοί άνεμοι ή και κάποιο σφάλμα στους χειρισμούς. Όλα αυτά τα σφάλματα, ανεξαρτήτως από την αιτία που προκλήθηκαν, ανήκουν στα μεταβατικά φαινόμενα. Δηλαδή, ένα βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς μπορεί να προκαλέσει μία σειρά καταστροφικών συμβάντων για το δίκτυο. Τέτοια συμβάντα είναι η πιθανή αλλαγή της αρχικής συχνότητας του δικτύου, η υπέρταση στη γραμμή, η υπέρταση στα κοντινότερα «σημεία» του δικτύου ως προς τη γραμμή του βραχυκυκλώματος κ.ά. Όταν διακόπτεται η μόνωση του συστήματος σε κάποιο σημείο, τότε συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα. Με την διακοπή της μόνωσης προκύπτει μια μικρή αντίσταση προς την γη, η οποία επιτρέπει τη ροή μεγάλων ρευμάτων ισχύος από το ΣΗΕ στη γη.

Τα ρεύματα του βραχυκυκλώματος μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ρεύματα ονομαστικής λειτουργίας και ενδέχεται να προκαλέσουν θερμική και μηχανική ζημιά στον εξοπλισμό του συστήματος. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν τα τμήματα του συστήματος στα οποία εμφανίζεται το σφάλμα από το δίκτυο όσο το δυνατόν συντομότερα. Τα βραχυκυκλώματα αναλόγως με την σοβαρότητά τους τα χωρίζουμε στις εξής κατηγορίες (Σχήμα 3.1):



Σχήμα 3.1: Βραχυκυκλώματα

- Μεταλλικό ή στερεό συμμετρικό βραχυκύκλωμα και των τριών φάσεων (3 Phase Fault). Ο χαρακτηρισμός του συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος οφείλεται στις ίσες σύνθετες αντιστάσεις  $Z_f$  μεταξύ των τριών φάσεων και της γης. Πρέπει να ισχύει ότι  $Z_f = 0$ . Αυτά τα βραχυκυκλώματα αποτελούν μόλις το 5% των συνολικών βραχυκυκλωμάτων.
- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη (Single Line to Ground -SLG). Σ' αυτήν την περίπτωση συμμετέχει μόνο μία φάση στο σφάλμα.
- Διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line - LL) Σ' αυτήν την περίπτωση συμμετέχουν στο σφάλμα δύο φάσεις και μια σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης  $Z_f$ . Οι βραχυκυκλωμένες φάσεις μπορούν να είναι ταυτόχρονα γειωμένες ή όχι.
- Διφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη (Double Line to Ground - DLG). Σ' αυτήν την περίπτωση θεωρούμε ένα σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων και τη γης μέσω μιας σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης  $Z_f$ . [6, 7]

### 3.1 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

Στα συμμετρικά σφάλματα, όλες οι φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και συχνά στη γη. Ένα τέτοιο σφάλμα λέγεται και στερεό, μιας και τα συστήματα παραμένουν συμμετρικά, δηλαδή οι γραμμές μετατοπίζονται με ίση γωνία ( $120^\circ$  σε γραμμή τριών φάσεων). Συμμετρικά σφάλματα εμφανίζονται σπάνια, παρόλ' αυτά είναι ο πιο σοβαρός τύπος σφάλματος. Γι' αυτόν τον λόγο, πραγματοποιείται ισορροπημένος υπολογισμός βραχυκυκλώματος για τον προσδιορισμό αυτών των μεγάλων ρευμάτων.

Η ανάλυση ενός συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος απαιτεί τη χρήση μόνο του δικτύου της θετικής ακολουθίας. Όταν συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα με σύνθετη αντίσταση  $Z_f$  στον ζυγό  $i$  ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η τάση του ζυγού θα μηδενισθεί και το υπόλοιπο δίκτυο θα τροφοδοτεί με ρεύματα βραχυκύκλωσης το ζυγό  $i$ .

#### 3.1.1 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα – SCC

Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος οι τάσεις στους ζυγούς μειώνονται και αυτό το γεγονός είναι μια ένδειξη αντοχής στο βραχυκύκλωμα. Για να προσδιορίσουμε λοιπόν καλύτερα το μέτρο της αντοχής και την σοβαρότητα του βραχυκυκλώματος χρησιμοποιούμε την ποσότητα SCC (Short Circuit Capacity). Ορίζουμε δηλαδή ότι σε ένα ζυγό η αντοχή σε βραχυκύκλωμα SCC θα ισούται με το γινόμενο των μέτρων της τάσης του ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα επί το μέτρο του ρεύματος μετά το βραχυκύκλωμα.

Αυτό σημαίνει ότι :

$$|SCC| = |V_{pre\_fault}| |I_{after\_fault}| \text{ pu MVA} \quad (3.1)$$

Σε μονάδες:

$$|SCC| = \sqrt{3} |V_{pre\_fault}| |I_{after\_fault}| \text{ MVA} \quad (3.2)$$

Συνήθως, ισχύει ότι

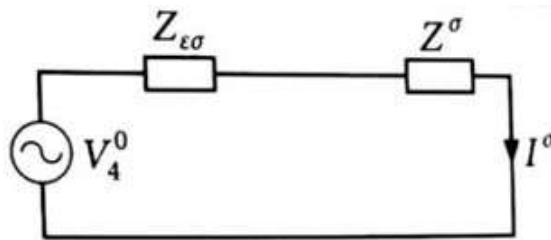
$$|V_{pre\_fault}| = 1 \text{ pu} \quad (3.3)$$

άρα:

$$|SCC| = \sqrt{3} |I_{after\_fault}| \text{ pu MVA} \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Υπολογισμος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως με το θεώρημα Thevenin

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin ισχύει ότι οι μεταβολές που συμβαίνουν στις τάσεις και τα ρεύματα ενός δικτύου κατά την εισαγωγή μια σύνθετης αντίστασης μεταξύ δύο κόμβων ενός δικτύου, είναι ίδιες με τις τάσεις και τα ρεύματα που θα προκαλούνταν από μια πηγή τάσης, με μέτρο και πολικότητα ίσα με εκείνα της προσφαλαμτικής τάσης μεταξύ των δύο κόμβων, τοποθετημένη σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση και την εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος, που έχουμε όταν μηδενιστούν όλες τις πηγές του.



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin

Έστω ότι  $Z_{\epsilon\sigma}$  είναι η εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος,  $Z^{\sigma}$  η σύνθετη αντίσταση μετά το βραχυκύκλωμα,  $I^{\sigma}$  το ρεύμα μετά το βραχυκύκλωμα και  $V_4^0$  η προσφαλαμτική τάση του ζυγού. Τότε θα ισχύει ότι :

$$I^{\sigma} = \frac{V_4^0}{Z^{\sigma} + Z_{\epsilon\sigma}} \quad (3.5)$$

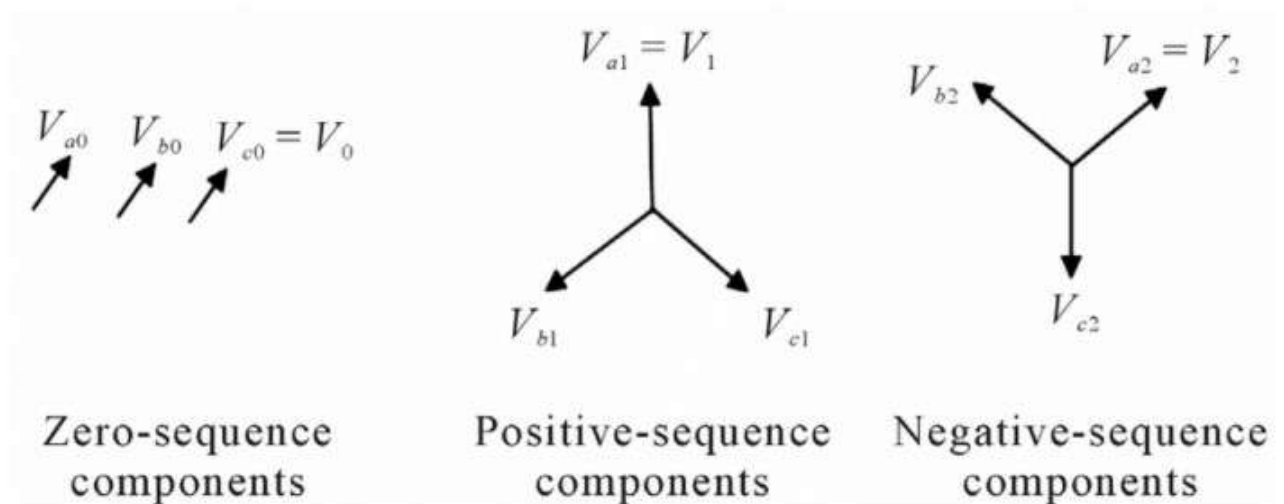
Αναλυτικότερα, στο θεώρημα αναφέρεται πως κάθε μεταβολή στις τάσεις και στα ρεύματα σε ένα δίκτυο με την προσθήκη μιας σύνθετης αντίστασης στο δίκτυο, είναι ίδια με την τάση και το ρεύμα που θα προκαλούνταν από μία πηγή τάσης (με μέτρο και πολικότητα ίσα με εκείνα της προσφαλαμτικής), η οποία ήταν σε σειρά με την συνολική σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος, η οποία λαμβάνεται με το βραχυκύκλωμα των πηγών τάσης και το ανοιχτό κύκλωμα στις πηγές ρεύματος.

## 3.2 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

Στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα ο υπολογισμός των ρευμάτων είναι πιο δύσκολος μιας και δεν υπάρχει τριφασική συμμετρία όπως στα συμμετρικά βραχυκυκλώματα. Γι' αυτόν τον λόγο, δεν μπορούμε να ανάγουμε ένα τριφασικό μη συμμετρικό σύστημα στο ισοδύναμο της μιας φάσης και να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς. Για να επιλύσουμε προβλήματα με ασύμμετρα σφάλματα εφαρμόζουμε τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστώσων. [6, 7]

### 3.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Για την ανάλυση των ασύμμετρων συστημάτων, το 1918 ο Fortescue πρότεινε την μέθοδο των συμμετρικών συνιστώσων αποδεικνύοντας ότι ένα ασύμμετρο σύστημα με  $n$  σχετιζόμενα ασύμμετρα διανύσματα μπορεί να αναλυθεί σε  $n$  συστήματα με  $n$  συμμετρικά διανύσματα, τις συμμετρικές συνιστώσες των αρχικών διανυσμάτων. Τα  $n$  συμμετρικά διανύσματα κάθε συνιστώσας έχουν ίσο μέτρο και οι γωνίες μεταξύ διαδοχικών διανυσμάτων στο ίδιο σύνολο είναι και αυτές ίσες. Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζονται με την σειρά οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας, οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας και οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας.



Σχήμα 3.3: Συμμετρικές συνιστώσες

Ισχύει ότι :

1. Συνιστώσες θετικής ακολουθίας αποτελούνται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου και φασικής μετατόπισης  $120^\circ$ , φασικής ακολουθίας abc και δείκτη το 1 ή (+).
2. Συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας αποτελούνται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου και φασικής μετατόπισης  $120^\circ$ , φασικής ακολουθίας acb και δείκτη το 2 ή (-).
3. Συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας αποτελούνται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου και φασικής μετατόπισης  $0^\circ$ , φασικής ακολουθίας abc και δείκτη το 0.

Οι φασικές τάσεις:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Τα φασικά ρεύματα:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Σε όλη την ανάλυση θεωρούμε ημιτονοειδής μεταβλητές που μας επιτρέπουν τη μιγαδική αναπαράστασή τους. Για χάρην διευκόλυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύνολο  $\alpha$  με την εξής τιμή:

$$\alpha = e^{j120} = \cos(120) + j\sin(120) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0.5 + j0.866 \quad (3.8)$$

Οπότε προκύπτουν τα εξής :

$$\alpha^2 = e^{j240} = e^{-j120} = -0.5 - j0.866 \quad (3.9)$$

$$\alpha^3 = 1 \quad (3.10)$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (3.11)$$

Με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων οι πίνακες θα διαμορφωθούν στους εξής:

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Va1 + Va2 + Va0 \\ a^2Va1 + aVa2 + Va0 \\ aVa1 + a^2Va2 + Va0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va1 \\ Va2 \\ Va0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Δηλαδή, } V_\phi = TV_s \quad (3.12)$$

Για να βρω τις εξισώσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας χρειάζεται να υπολογίσω τον αντίστροφο πίνακα του T. Ισχύει ότι

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

$$\begin{bmatrix} Va1 \\ Va2 \\ Va0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Και για τα ρεύματα:

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ia1 + Ia2 + Ia0 \\ a^2Ia1 + aIa2 + Ia0 \\ aIa1 + a^2Ia2 + Ia0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia1 \\ Ia2 \\ Ia0 \end{bmatrix}$$

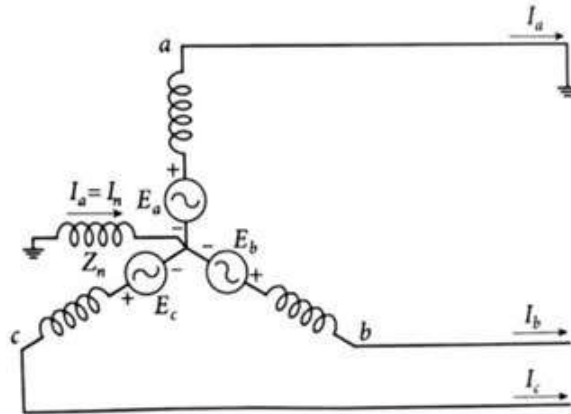
Και ομοίως προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} Ia1 \\ Ia2 \\ Ia0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix}$$

### 3.2.2 Μελέτη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων

- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα (SLG – Single Line to Ground)

Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη το σφάλμα συμβαίνει σε μία από τις τρεις φάσεις του συστήματος και υποθέτουμε ότι συμβαίνει στην φάση α, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4. Επειδή οι φάσεις b,c δεν συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα, ισχύει ότι  $I_b = I_c = 0$  και  $V_a = 0$ .

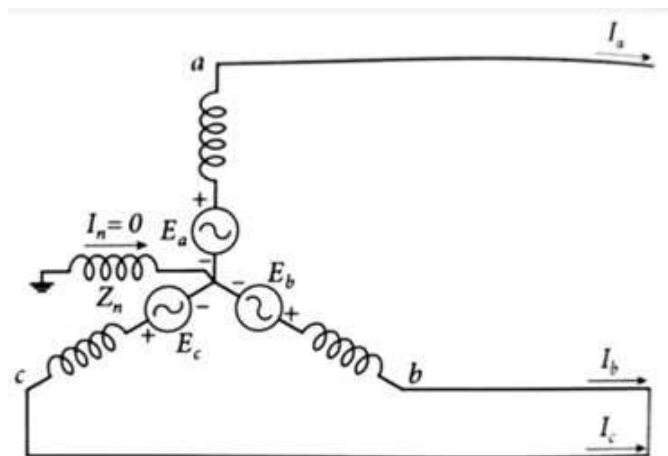


Σχήμα 3.4: SLG σφάλμα

- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (LL – Line to Line)

Το βραχυκύκλωμα δύο φάσεων εμφανίζεται όταν δημιουργηθεί αγωγίμος δρόμος μεταξύ δύο φάσεων και η αναπαράστασή του γίνεται στο Σχήμα 3.5 Υποθέτουμε ότι το βραχυκυκλωμα εφαρμόζεται μεταξύ των φάσεων b,c και ισχύουν τα εξής:

$$V_b = V_c, I_b = I_c, I_a = 0.$$

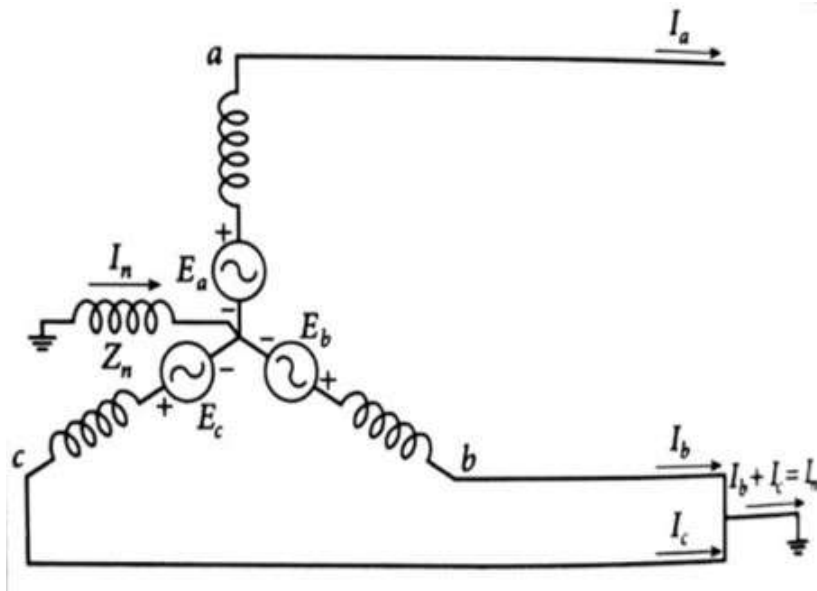


Σχήμα 3.5: Line to Line σφάλμα



- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης (DLG – Double Line to Ground)

Το βραχυκύκλωμα μ δύο φάσεων και γης δημιουργείται στην περίπτωση που δημιουργηθεί αγωγίμος δρόμος μεταξύ δύο φάσεων b,c και γης. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε και από το Σχήμα 3.6. Σ' αυτήν την περίπτωση ισχύουν ότι  $V_b = V_c = 0$ , καθώς και  $I_a = 0$ .



Σχήμα 3.6: DLG σφάλμα



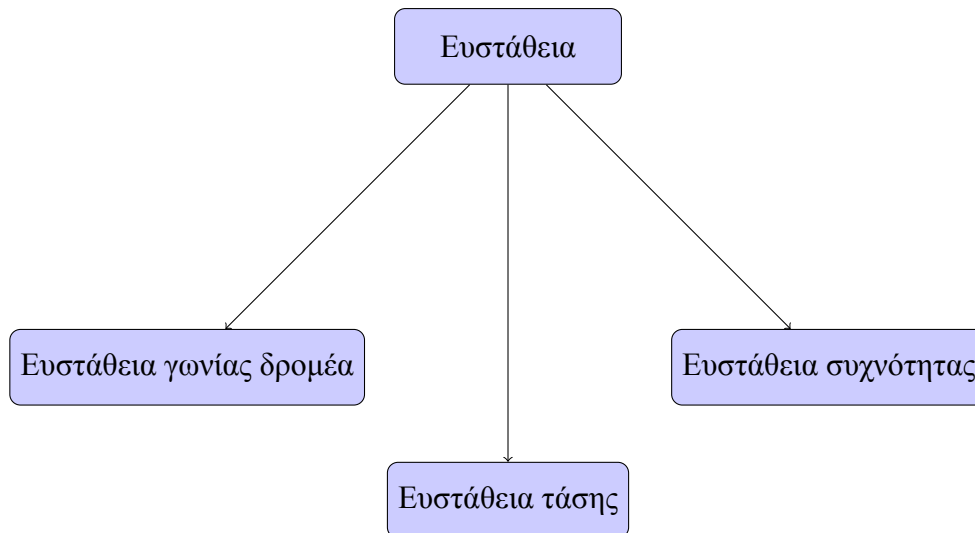
# Κεφάλαιο 4

## Ευστάθεια

Η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητα που έχει ένα σύστημα να παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας κάτω από κανονικές συνθήκες, αλλά και να μπορεί να επανέλθει στις αρχικές του συνθήκες μετά την έκθεσή του σε μικρές ή μεγάλες διαταραχές. Μικρές διαταραχές όπως είναι οι αλλαγές στην ισχύ του φορτίου των καταναλωτών, μπορεί να συμβούν πολλές φορές. Τότε το σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αυτορυθμίζεται στις νέες συνθήκες, για να καλύψει και να τροφοδοτήσει τη ζήτηση των φορτίων. Ακόμα, θα πρέπει να μπορεί να έχει την δυνατότητα να επανέρχεται σε συνθήκες ισορροπίας και σε σοβαρές διαταραχές που ενδέχεται να συμβούν, όπως για παράδειγμα σε μονοφασικά ή τριφασικά βραχυκυκλώματα ή στην απώλεια μιας μεγάλης γεννήτριας του δικτύου.

Έπειτα από μια διαταραχή μικρού ή μεγάλου μεγέθους το σύστημα σε περίπτωση που διατηρήσει την ευστάθειά του θα επέλθει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας και το υπόλοιπο δίκτυο δεν θα επηρεαστεί από την διαταραχή αυτή. Σε περίπτωση όμως που το σύστημα είναι ασταθές, θα έχει ως απόρροια το σύστημα να μην λειτουργεί σωστά ή μπορεί και να καταρρεύσει. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό αυτό, μια συνεχόμενη αύξηση στην συχνότητα του ζυγού της γεννήτριας είναι ικανή να επιφέρει το σύστημα σε αστάθεια και στην συνέχεια να μην λειτουργεί ομαλά το υπόλοιπο σύστημα. [8]

Για την καλύτερη μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τα συστήματα αναλόγως με το στοιχείο στο οποίο υπάρχει πρόβλημα ευστάθειας όπως απεικονίζονται και στο παρακάτω Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση μορφών ευστάθειας ΣΗΕ

- Ευστάθεια γωνίας δρομέα (Rotor Angle Stability):

Πρόκειται για την ικανότητα των μηχανών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από κάποια διαταραχή, δηλαδή να στρέφονται με σταθερή σχετική ταχύτητα μεταξύ τους. Μετά από μια διαταραχή οι ταλαντώσεις της γωνίας του δρομέα μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια συγχρονισμού όλων των γεννητριών του συστήματος. Αναλόγως με την κρισιμότητα των διαταραχών μπορεί να διαχωριστεί σε ευστάθεια μικρών διαταραχών και σε μεταβατική ευστάθεια όταν προκύπτουν σοβαρότερα σφάλματα όπως είναι τα βραχυκυκλώματα.

- Ευστάθεια της τάσης (Voltage Stability) :

Πρόκειται για την ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί τις τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου σταθερές, είτε σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, είτε μετά από την εφαρμογή κάποιου σφάλματος. Σε περίπτωση όμως που έχει συμβεί κάποια διαταραχή στο δίκτυο μπορεί να επέλθει σημαντική πτώση τάσης ή στον αντίποδα μπορεί να συμβεί και αύξηση τάσης αν τα φορτία των ζυγών δεν μπορούν να απορροφήσουν την επιπλέον άεργη ισχύ. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι αστάθεια τάσης εμφανίζεται τις περισσότερες φορές παράλληλα με αστάθεια της αντίστοιχης γωνίας.

- Ευστάθεια της συχνότητας (Frequency Stability):

Πρόκειται για την ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί τη συχνότητα του δικτύου σταθερή μετά από την εφαρμογή κάποιου σφάλματος, το οποίο μπορεί να επιφέρει αξιοσημείωτη ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίων. Η ευστάθεια στην συχνότητα είναι πολύ σημαντική, καθώς παρατεταμένες διακυμάνσεις της τιμής της, οδηγούν στην απώλεια φορτίων.[9]

## 4.1 Μεταβατική Ευστάθεια

Με τον όρο μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αναφερόμαστε στην ικανότητα του συστήματος να φτάσει σε σταθερή κατάσταση ισορροπίας μετά από μια μεγάλη διαταραχή που συμβαίνει στο δίκτυο. Μεγάλες διαταραχές θεωρούνται 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. Μετά την εφαρμογή της διαταραχής είναι αξιοσημείωτο ότι η μεταβολή του συστήματος είναι τέτοια, έτσι ώστε η κατάσταση λειτουργίας μετά τη διαταραχή να διαφέρει από την αντίστοιχη πριν την εμφάνιση του σφάλματος.

Μετά την επίδραση ενός βραχυκυκλώματος το πόσο εύκολα χάνεται η ευστάθεια στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς είναι το σημείο του βραχυκυκλώματος, το είδος, ο χρόνος εκκαθάρισής του. Στην συνέχεια της διπλωματικής πραγματοποιείται αναλυτική μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας για τριφασικά βραχυκυκλωμάτων, που μπορούν να συμβούν σε διάφορα σημεία στο δίκτυο των 24 ζυγών της IEEE.

## 4.2 Εξίσωση Ταλάντωσης

Για την μελέτη της ευστάθειας, είναι απαραίτητο να εκφραστούν η μόνιμη και η μεταβατική κατάσταση σε ένα μαθηματικό μοντέλο σε μία μόνο γεννήτρια. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης και αναπαριστά την κατάσταση που επικρατεί στη γεννήτρια κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος. [7]

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει ότι ασκείται μηχανική ροπή  $T_m$  στον άξονα της γεννήτριας με αποτέλεσμα να περιστρέφεται ο άξονας με ταχύτητα  $\omega$  και η γεννήτρια να παράγει μια ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_e$ . Έτσι προκύπτει ότι η μηχανική ισχύς ισούται από την σχέση  $P_m = T_m\omega$ . Σε περίπτωση που μετά από μια διαταραχή στο δίκτυο, η μηχανική ροπή είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρομαγνητική ροπή, τότε συμπεραίνουμε πως υπάρχει μια επιταχυνόμενη ροπή  $T_a$  που δίνεται από την εξής σχέση:

$$T_a = T_m - T_e \quad (4.1)$$

Η ροπή  $T_a$  μπορεί να προκαλέσει επιτάχυνση, η οποία έχει αδράνεια  $J$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) και εξαρτάται από την συνολική ροπή αδράνειας των μαζών του ρότορα σε  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$  και την γωνιακή επιτάχυνση του αρχικά στρεφόμενου κινητήρα  $\theta_m$  (σε  $\text{rad/s}$ ). Επομένως:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (4.2)$$

Η γωνιακή επιτάχυνση  $\theta_m$  αυξάνεται διαρκώς σε συνάρτηση με το χρόνο ακόμη και με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα. Επειδή μας απασχολεί να μελετήσουμε την ταχύτητα του ρότορα σε συνάρτηση με την σύγχρονη ταχύτητα, μπορεί να υπολογιστεί η γωνιακή θέση του ρότορα σε συνάρτηση με έναν άξονα αναφοράς που περιστρέφεται με μια σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι προκύπτει ότι:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (4.3)$$

Στην εξίσωση 4.3 ο όρος  $\omega_{sm}$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα σε  $\text{rad/sec}$  και  $\delta_m$  είναι η γωνιακή μετατόπιση του ρότορα από τον περιστρεφόμενο άξονα αναφοράς σε  $\text{rad}$ .

Αν παραγωγίσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς τον χρόνο προκύπτει:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (4.4)$$

και

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (4.5)$$

όπου  $\frac{d\delta_m}{dt}$  είναι η απόκλιση της ταχύτητας του ρότορα από τον συγχρονισμό σε rad/sec.

Από τις εξισώσεις 4.1 και 4.5 προκύπτει:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (4.6)$$

Με γωνιακή ταχύτητα του ρότορα  $\omega_m$  προκύπτει:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (4.7)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (4.8)$$

Ο όρος  $J\omega_m$  αποτελεί την γωνιακή ορμή του ρότορα. Αν εφαρμόσω την σύγχρονη ταχύτητα  $\omega_{sm}$  τότε ο παραπάνω όρος συμβολίζεται ως  $M$  και είναι η σταθερά αδράνειας της μηχανής και μετριέται σε  $Jsec/rad$ .

Επομένως, η εξίσωση 4.8 γίνεται:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (4.9)$$

Συνήθως αναπαριστούμε την έκφραση αυτής της εξίσωσης ως προς τη σταθερά αδράνειας  $H$  της μηχανής μετατρέποντας την εξίσωση 4.9 στην παρακάτω μορφή

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_{mach}} (MJ/MVA) \quad (4.10)$$

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς  $M$  και αντικαθιστώντας το στην εξίσωση 4.8 έχουμε:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (4.11)$$

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

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e (pu) \quad (4.12)$$

Η τελική εξίσωση 4.12 ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης (swing equation) μιας και περιγράφει την ταλάντωση της γωνίας  $\delta$  του ρότορα της γεννήτριας (γωνία ισχύος) κατά τη διάρκεια διαταραχών στο σύστημα. Για να διατηρηθεί η ευστάθεια ενός συστήματος, θα πρέπει κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής, η γωνία  $\delta$  του ρότορα να ταλαντεύεται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Σε περίπτωση που γωνία του ρότορα αρχίζει να απομακρύνεται από το σημείο ισορροπίας, τότε η γεννήτρια γίνεται ασταθής, μιας και αυξάνεται συνεχώς η τιμή της και δεν θα φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας. [7]

### 4.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια

Η μεταβατική ευστάθεια μιας γεννήτριας επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Η διατήρηση της ευστάθειας επιτυγχάνεται ευκολότερα, όταν η τιμή της μηχανικής ροπής  $P_m$  είναι μεγαλύτερη.
2. Η αύξηση της τάσης του συστήματος μπορεί να προκαλέσει αύξηση της μηχανικής ροπής και κατ' επέκταση διατήρηση της ευστάθειας.
3. Η μείωση της επαγωγικής αντίστασης μεταφοράς  $X$  μπορεί να προκαλέσει αύξηση στην μηχανική ροπή και κατ' επέκταση διατήρηση της ευστάθειας.
4. Η αδράνεια της γεννήτριας όσο αυξάνεται, τόσο μειώνεται ρυθμός μεταβολής της γωνίας για να επέλθει ευστάθεια.
5. Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η οποία εξαρτάται από το είδος και το σημείο του σφάλματος.
6. Ο χρόνος εκκαθάρισης των σφαλμάτων μιας και μικρός χρόνος εκκαθάρισης συνεπάγεται μεγαλύτερη ευστάθεια στο σύστημα.
7. Τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου με την χρήση θυρίστορ, συμβάλλουν στην μείωση της τάσης του ζυγού της γεννήτριας αυξάνοντας τη ροή διακένου, που επιβραδύνει την κίνηση του δρομέα, βελτιώνοντας τη μεταβατική ευστάθεια.
8. Τα σύγχρονα ηλεκτροϋδραυλικά συστήματα ελέγχου της ισχύος εισόδου του στροβίλου, συμβάλλουν στην μείωση της ισχύος εισόδου και επιφέρουν μεταβατική ευστάθεια.[10]



## 4.4 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας

Για την μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η σχεδίαση της εξίσωσης ταλάντωσης και αναλόγως με την μορφή της συμπεραίνουμε αν οι γωνίες των γεννητριών απομακρύνονται με αποτέλεσμα να επέλθει αστάθεια ή αν ταλαντεύονται και οδηγούνται σταδιακά σε ισορροπία. Σε περίπτωση που η διαταραχή που θα προκληθεί στο σύστημα είναι κάποιο στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα όπως συμβαίνει σε αυτήν την διπλωματική, για την ανάλυση της ευστάθειας χρειαζόμαστε το μονογραμμικό διάγραμμα θετικής ακολουθίας.

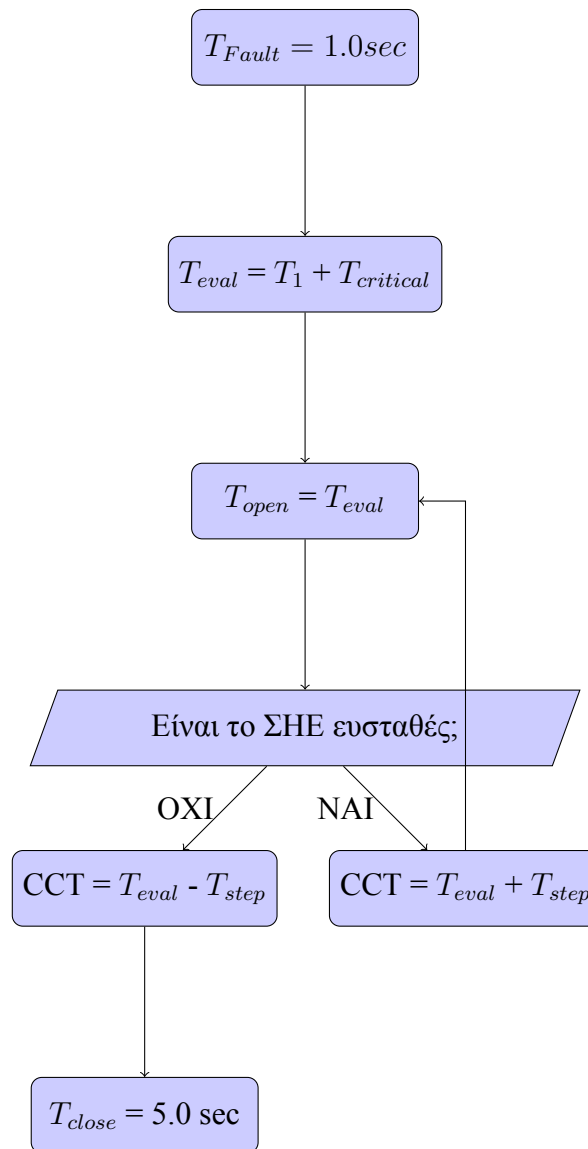
Το μονογραμμικό διάγραμμα που θα μελετήσω σε επόμενο κεφάλαιο είναι του δικτύου των 24 ζυγών της IEEE και αποτελείται από 10 γεννήτριες, 16 φορτία, 5 μετασχηματιστές και 29 γραμμές μεταφοράς. Η προσομοίωση σε συγκεκριμένα λογισμικά διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους μηχανικούς για να εντοπίσουν αν διατηρείται η μεταβατική ευστάθεια. Σε περίπτωση που δεν υπήρχαν τα απαραίτητα λογισμικά προσομοίωσης θα έπρεπε να λυθούν πολύπλοκα μαθηματικά συστήματα και ένας μεγάλος αριθμός διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων όπως είναι οι εξισώσεις ταλάντωσης, αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις των φορτίων, των γεννητριών κ.ά.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μελέτης είναι το PSS/E (Power System Simulator for Engineering) της Siemens. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που μπορεί να λάβει δεδομένα για δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν έως και 50 ζυγούς. Τα βήματα που χρειάστηκαν για την ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος ήταν τα εξής:

- Ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton - Raphson
- Έλεγχος δυναμικών δεδομένων των γεννητριών
- Εφαρμογή σφάλματος σε επιλεγμένους ζυγούς
- Εντοπισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος
- Ανάλυση γραφικών παραστάσεων (από την γραφική παράσταση της γωνίας του ρότορα σε συνάρτηση με τον χρόνο, συμπεραίνω αν το σύστημα είναι ευσταθές)

## 4.5 Κρίσιμος Χρόνος Εκκαθάρισης

Για την μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος μας ενδιαφέρει η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης ενός σφάλματος (CCT). Ο κρίσιμος χρόνος ορίζεται ως η μεγαλύτερη διάρκεια σφάλματος κατά την οποία η γεννήτρια και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχουν αποσυγχρονιστεί και παραμένουν σε ευστάθεια. Το σύστημα γίνεται ασταθές όταν η γωνία του ρότορα  $\delta$  αρχίζει να αυξάνεται και να απομακρύνεται από την κατάσταση της ισορροπίας. Η αύξηση μιας γωνίας έχει την δυνατότητα να επηρεάσει ολόκληρο το σύστημα και να εμποδίσει την ομαλή λειτουργία του. Στο παρακάτω Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος εύρεσης του κρίσιμου χρόνου. [10]



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα προσδιορισμού Κρίσιμου Χρόνου εκκαθάρισης

## Κεφάλαιο 5

# Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ραγδαία ανάπτυξη της παγκόσμιας βιομηχανίας και των επιχειρήσεων έχει προκαλέσει σημαντική έλλειψη διαθέσιμης ενέργειας, εξαιτίας της υπερβολικής χρήσης ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία αποτελούσαν πηγή ενέργειας από τη βιομηχανική επανάσταση, δεν αντιμετωπίζουν μόνο εξάντληση, αλλά έχουν γίνει επίσης πηγή ανησυχίας σχετικά με τις σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων. Γι' αυτόν τον λόγο, οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι πόροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας ξανά και ξανά, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια βιομάζας, η γεωθερμική ενέργεια κλπ. και επίσης συχνά ονομάζονται εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας λοιπόν, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ενεργειακές υπηρεσίες με μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου. Γι' αυτό, η ανάπτυξη πηγών ενέργειας χωρίς να προκαλείται ρύπανση έχει αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό έργο σε διάφορες χώρες στον κόσμο. Πολλές χώρες έχουν επενδύσει σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ως μία από τις προτεραιότητες για τα ενεργειακά τους προγράμματα. Επομένως, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι μια βιώσιμη επιλογή η οποία όχι μόνο θα εκπληρώσει την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και θα φροντίσει περιβάλλον. [11, 12]

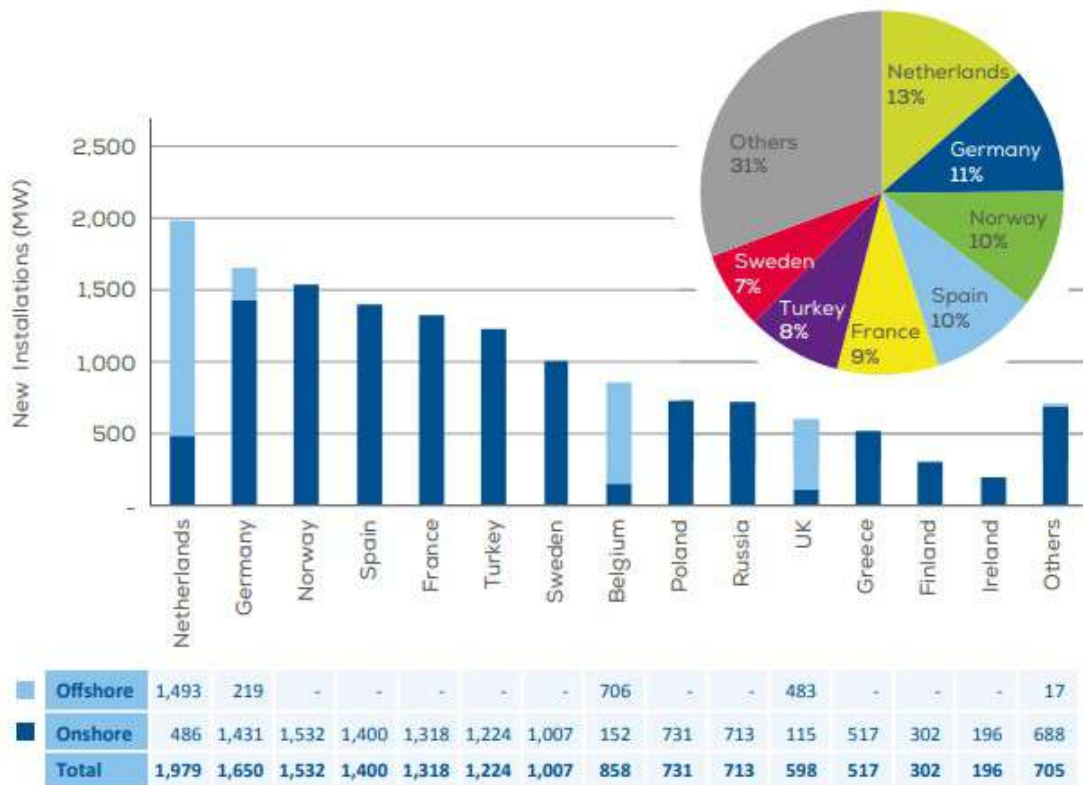
## 5.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και τα τελευταία χρόνια η εκμετάλλευσή της αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Έχει ιστορία άνω των 3000 ετών, και οι άνθρωποι άρχισαν να την χρησιμοποιούν για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια περίπου πριν από 120 χρόνια. Κατά την τελευταία δεκαετία, λόγω νέων πολιτικών σχετικές με την αιολική ενέργεια που έχουν υιοθετήσει πολλές χώρες, η αιολική αγορά αναπτύχθηκε ραγδαία και η τεχνολογία των ανεμογεννητριών έχει βιώσει σημαντική εξέλιξη με την πάροδο του χρόνου. Πέρα από τις χώρες που πρωτοπόρησαν, όπως είναι η Γερμανία, οι ΗΠΑ, η Δανία και η Ισπανία, πλέον χώρες όπως η Κίνα και η Τουρκία κατέβαλαν σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια που χρησιμοποιείται σήμερα προέρχεται κυρίως από χερσαίες ανεμογεννήτριες, όμως υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, μιας και ο άνεμος είναι ισχυρότερος στη θάλασσα παρά στην ξηρά. Οι Ευρωπαϊκές χώρες είναι ηγέτιδες στις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες, και συγκεκριμένα η Δανία ήταν η πρώτη χώρα η οποία χρησιμοποιεί υπεράκτια αιολικά πάρκα για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εδώ και περίπου 20 χρόνια. Σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, ο υπεράκτιος άνεμος έχει τη δυνατότητα να γίνει σημαντική πηγή ενέργειας για οικιακές εφαρμογές.

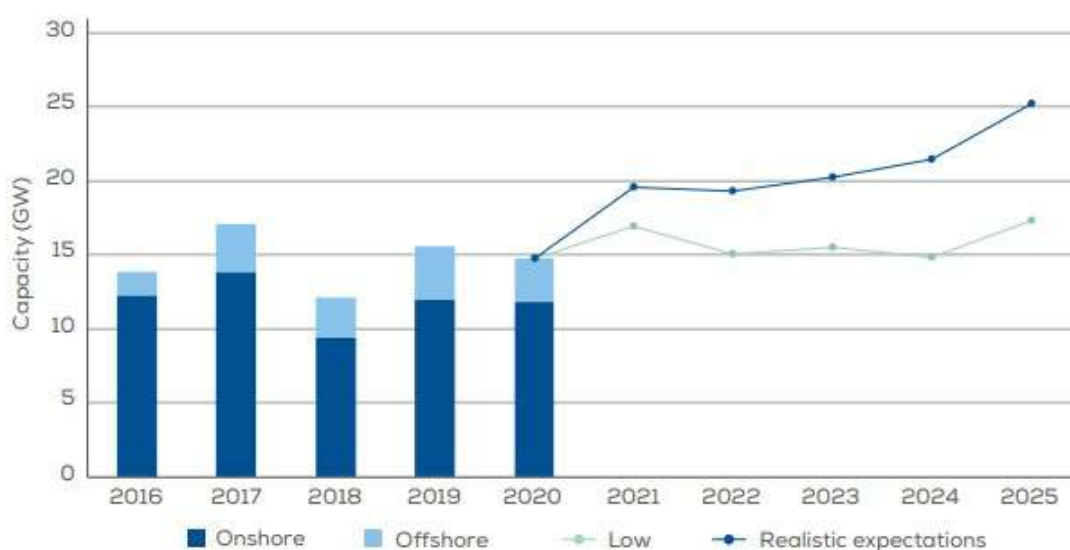
Οι άνθρωποι κάνουν χρήση της αιολικής ενέργειας εδώ και πολλά χρόνια, περισσότερα από όσα χρησιμοποιούν τον άνθρακα και το πετρέλαιο. Το 1941 όμως, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο της σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε αγροκτήματα στα οποία δεν θα μπορούσαν να φτάσουν ηλεκτρικά καλώδια. Ωστόσο, ξεκινώντας η δεκαετία του 1950, με την ευρεία ανάπτυξη των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, η αγορά των ανεμογεννητριών μειώθηκε σταδιακά. Μελετώντας λοιπόν το ιστορικό ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, είναι σαφές ότι η δημοτικότητα της αιολικής ενέργειας επηρεαζόταν πάντα από την τιμή των ορυκτών καυσίμων. Από την κρίση του πετρελαίου στις αρχές της δεκαετία του 1970, η τιμή του πετρελαίου εκτοξεύτηκε στα ύψη, γεγονός που οδήγησε σε εστίαση στην αιολική ενέργεια και σημειώθηκε έκρηξη το 1995. Από τις αρχές του 21ου αιώνα, η αιολική ενέργεια γνώρισε ένα άλμα στη χρήση και η παγκόσμια ικανότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας διπλασιάζεται περίπου κάθε τρία χρόνια.[13]

Το 2020 η Ευρώπη εγκατέστησε νέα αιολική ισχύ 14,7 GW. Αυτό το ποσοστό ήταν 6% λιγότερο από το 2019 και 19% λιγότερο από ό,τι ήταν αναμενόμενο πριν από την πανδημία COVID-19. Το 80% των νέων αιολικών εγκαταστάσεων είναι στην ξηρά. Η αιολική ενέργεια που παράγεται αποτελεί το 16% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε το 2020 στην Ευρώπη και στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η Ευρώπη διαθέτει συνολικά 220 GW αιολικής ισχύος. Ενδεικτικά, η Ολλανδία εγκατέστησε τη μεγαλύτερη αιολική παραγωγή το 2020 με το μεγαλύτερο μέρος της να είναι υπεράκτια αιολικά πάρκα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1. Η Νορβηγία διαθέτει πλέον το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο, με την Ισπανία και τη Γαλλία να μην είναι πολύ πίσω. Επιπλέον, οι νέες εγκαταστάσεις της Γερμανίας ήταν οι χαμηλότερες της από το 2010 και μετά.



Σχήμα 5.1: Νέες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στην Ευρώπη το 2020[2]

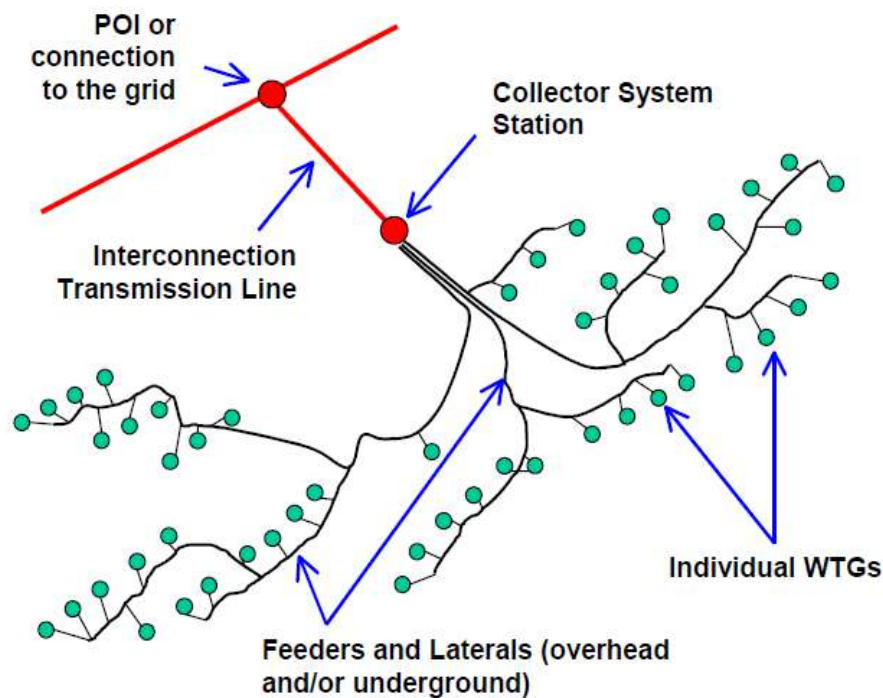
Από το 2021 ως το 2025 αναμένεται στην Ευρώπη να εγκατασταθούν νέα αιολικά πάρκα των 105 GW. Πάνω από το 70% αυτού του ποσοστού θα είναι χερσαία αιολικά πάρκα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2. Αναμέται επίσης ότι το Ηνωμένο Βασίλειο θα εγκαταστήσει ένα νέο αιολικό πάρκο μεταξύ 2021- 2025, το οποίο θα παράγει 18 GW με το μεγαλύτερο μέρος του να είναι στην θάλασσα. Η Γερμανία επίσης αναμένεται να εγκαταστήσει αιολικό πάρκο παρόμοιου ποσού, το μεγαλύτερο μέρος του όμως θα είναι στην ξηρά. Οι χώρες που ακολουθούν με τις αμέσως μεγαλύτερες συνεισφορές είναι η Γαλλία, η Σουηδία και οι Κάτω Χώρες. [2]



Σχήμα 5.2: Νέες εγκαταστάσεις αιολικών παάρκων στην Ευρώπη ως το 2025 [2]

### 5.1.1 Ανεμογεννήτριες

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται μια τυπική διαμόρφωση για έναν σταθμό αιολικής ενέργειας WPP (Wind Power Plant). Τα αιολικά πάρκα διαφέρουν από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής σε αρκετά σημαντικά σημεία. Αποτελούνται από πολλές (συνήθως εκατοντάδες) μικρές ανεμογεννήτριες που εκτείνονται σε μια μεγάλη περιοχή. Η ισχύς κάθε ανεμογεννήτριας κυμαίνεται μεταξύ 1MW έως 5MW, ενώ τα τελευταία χρόνια ολοένα και αυξάνεται.



Σχήμα 5.3: Typical WPP Topology

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών με διάφορους συνδυασμούς διεπαφής δικτύου, καθώς και ηλεκτρικούς και μηχανικούς ελέγχους. Σε αντίθεση με τους περισσότερους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, η πηγή ενέργειας για τους σταθμούς αιολικής ενέργειας είναι μεταβλητή. Για το λόγο αυτό, είναι πιθανή μόνο περιορισμένη δυνατότητα αποστολής και δυνατότητα ελέγχου της πραγματικής ισχύος. Η διαχείριση της άεργης ισχύος γίνεται μέσω συντονισμένου ελέγχου των ανεμογεννητριών. Στο σημείο σύνδεσης, μπορεί να επιτευχθεί άεργη ισχύς παρόμοια με αυτήν των σύγχρονων γεννητριών. [14]

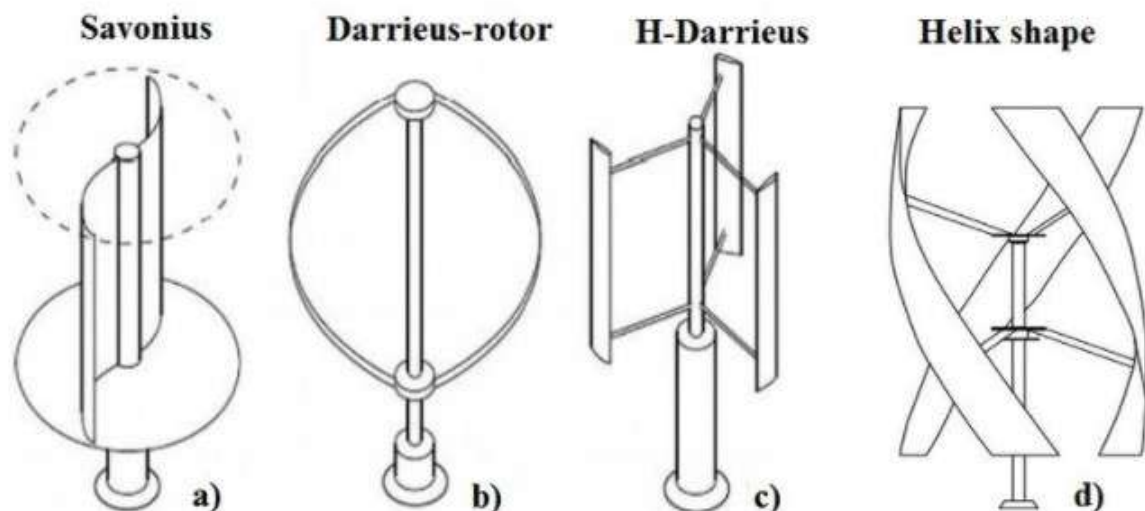
### 5.1.2 Τύποι Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες αναλόγως με τον τρόπο κατασκευής τους:

1. Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα (VAWT)
2. Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα (HAWT)

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα αποτελούν μόλις το 1% των συνολικών ανεμογεννητριών. Η ανάπτυξη ανεμογεννητριών αυτού του τύπου σταμάτησε εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσίαζαν σε σχέση με του οριζόντιου άξονα. Προβλήματα που προέκυπταν ήταν η μεγάλη διακύμανση της ωφέλιμης ροπής σε κάθε περιστροφή ή η μικρή δυνατότητα επιλογών για τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμων. Έτσι, δεν κατάφερε να γίνει ομαλή ενσωμάτωσή τους σε μεγάλα αιολικά πάρκα που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι κατηγορίες όμως των ελάχιστων ανεμογεννητριών κάθετου άξονα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4 και είναι οι εξής:

- Ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus
- Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius
- Υβριδικές ανεμογεννήτριες, δηλαδή τύπου H-Darrieus.
- Ανεμογεννήτριες σε σχήμα έλικα

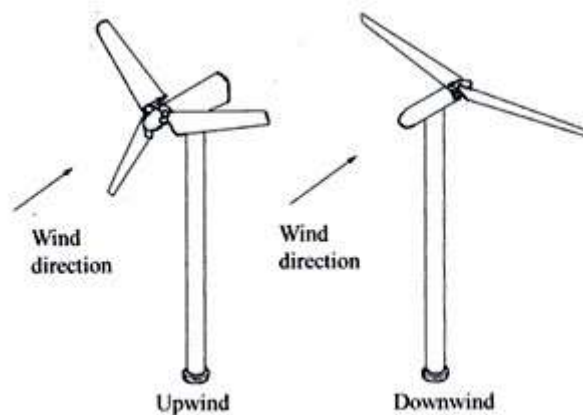


Σχήμα 5.4: Τύποι Ανεμογεννητριών Κάθετου Άξονα



Οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα χρησιμοποιούνται κατά κόρον αποτελώντας το 99% των συνολικών ανεμογεννητριών. Οι περισσότερες διαθέτουν τρία πτερύγια, ενώ κάποιες μόνο δύο. Οι ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια έχει παρατηρηθεί ότι δημιουργούν μεγαλύτερο θόρυβο, μιας και έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής συγκριτικά με τις άλλες.[15] Οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα (Σχήμα 5.5) διακρίνονται σε:

- Προσήνεμες Ανεμογεννήτριες (με προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου)
- Υπήνεμες Ανεμογεννήτριες (με προσανατολισμό αντίθετης κατεύθυνση από αυτής του ανέμου)

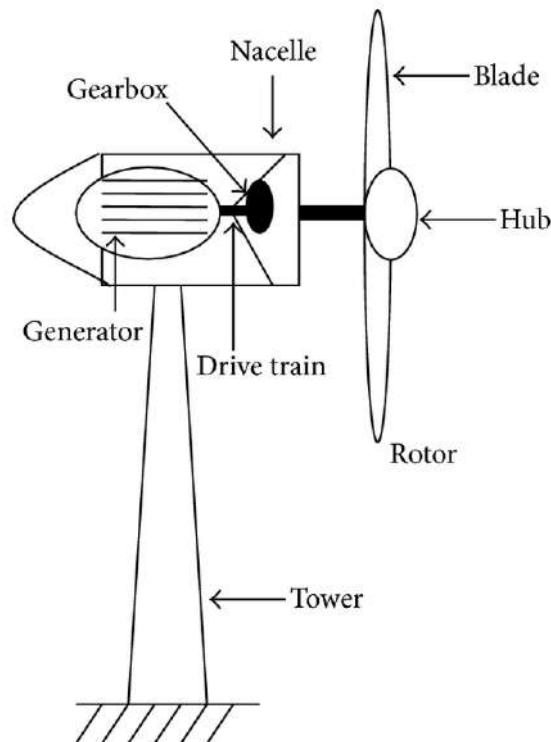


Σχήμα 5.5: Προσήνεμη / Υπήνεμη Ανεμογεννήτρια

#### Λειτουργία ανεμογεννητριών:

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζονται τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Ο ρότορας είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας όπου μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων. Αποτελείται από την κεφαλή του ρότορα και τα πτερύγια. Η κεφαλή του ρότορα περιλαμβάνει έναν μηχανισμό ρύθμισης των πτερυγίων, ο οποίος μετακινεί τα πτερύγια ανάλογα με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση της ανεμογεννήτριας, αλλά και η προστασία της σε περίπτωση μεγάλης ταχύτητας ανέμων. Επειδή η συχνότητα περιστροφής του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την συχνότητα στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια, χρειάζεται το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο συγχρονίζει τις δυο διαφορετικές συχνότητες, για να γίνει ομαλά η μεταφορά της μηχανικής ισχύος από το ρότορα στη

γεννήτρια. Η γεννήτρια είναι αναπόσπαστο μέρος της ανεμογεννήτριας, καθώς μετατρέπει την κινητική ενέργεια της περιστροφής του ρότορα σε ηλεκτρική. Σε μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, ενώ σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο οι γεννήτριες είναι τριφασικές εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτές οι γεννήτριες στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, γι' αυτό ονομάζονται επαγωγικές γεννήτριες. Οι δύο βασικότερες κατηγορίες επαγωγικών γεννητριών είναι οι σύγχρονες γεννήτριες και οι ασύγχρονες γεννήτριες.



Σχήμα 5.6: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

- hub: Κεφαλή ρότορα
- blade: Πτερύγια ρότορα
- rotor: Ρότορας
- drive train: Φρένα δρομέα
- gearbox: Κιβώτιο ταχυτήτων
- generator: Γεννήτρια
- tower: Πύργος

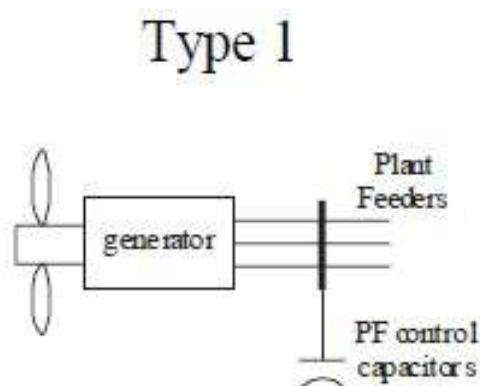
### 5.1.3 Κατηγορίες οριζόντιων ανεμογεννητριών

Από την αρχή της παραγωγής των ανεμογεννητριών, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί πολύ και έχει βελτιώσει την λειτουργία της μεταβλητής ταχύτητας ρότορα. Αναλόγως με τους διαφορετικούς τύπους μηχανών, μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις γενικές τοπολογίες ανεμογεννητριών. Αυτές είναι οι εξής: [16]

1. Τύπος 1: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής
2. Τύπος 2: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβλητή αντίσταση
3. Τύπος 3: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator - DFIG)
4. Τύπος 4: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Full Converter Wind Turbine - FCWT)

#### ΤΥΠΟΣ 1:

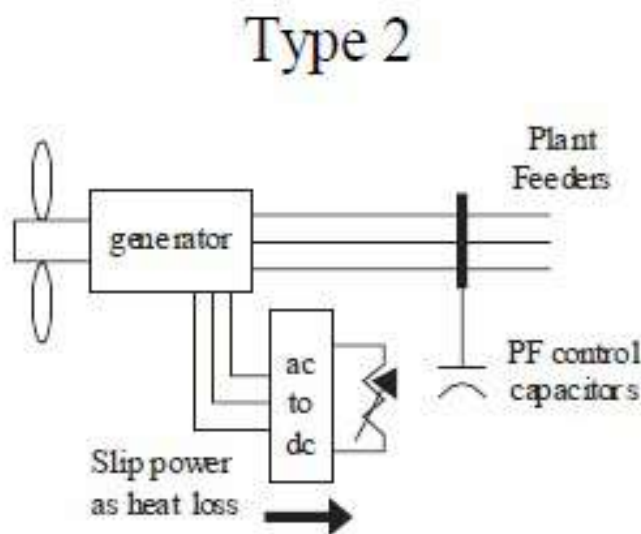
Οι ανεμογεννήτριες τύπου 1 (Σχήμα 5.7) είναι σταθερής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια και συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή. Όμως, οι επαγωγικές γεννήτριες χρειάζονται άεργη ισχύ για την μαγνήτισή τους και γι' αυτό συνδέονται στους ακροδέκτες των πυκνωτών. Εξαιτίας της σταθερής τους ταχύτητας, οι διακυμάνσεις του αέρα προκαλούν μεταβολές στην παραγόμενη ισχύ. Γι' αυτό θα πρέπει να υπάρχει ένα ισχυρό δίκτυο ώστε να αποφευχθούν οι διακυμάνσεις τάσης.



Σχήμα 5.7: Ανεμογεννήτρια τύπου 1

**ΤΥΠΟΣ 2:**

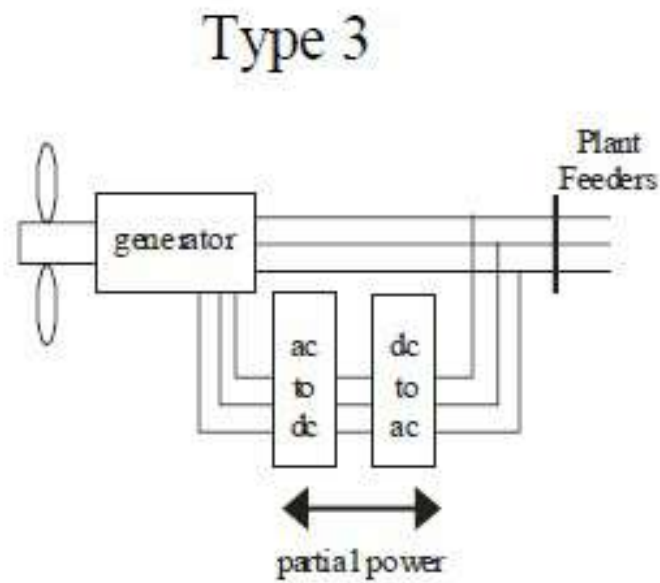
Οι ανεμογεννήτριες τύπου 2 (Σχήμα 5.8) διαθέτουν έλεγχο της ταχύτητας μέσω των αντιστάσεων. Η μεταβολή στην ταχύτητα δεν ξεπερνά το 10%. Ομοίως με τις ανεμογεννήτριες τύπου 1 και αυτές χρειάζονται άεργη ισχύ και γι' αυτό συνδέονται στους ακροδέκτες των πυκνωτών.



Σχήμα 5.8: Ανεμογεννήτρια τύπου 2

**ΤΥΠΟΣ 3:**

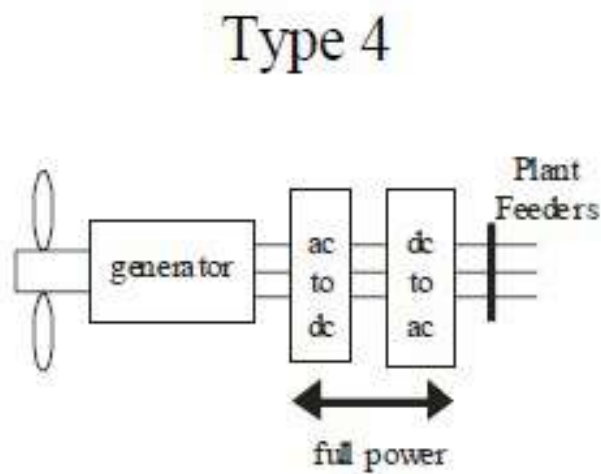
Οι ανεμογεννήτριες τύπου 3 (Σχήμα 5.9) είναι μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator - DFIG) και μπορούν να ελέγξουν την άεργη ισχύ. Δεν είναι αναγκαία η μαγνήτιση από τη ηλεκτρικό δίκτυο, γιατί οι γεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να μαγνητιστούν από το κύκλωμα του ρότορα. Στην περίπτωση ενός αδύναμου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η τάση μπορεί να μείνει σταθερή, οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας μπορούν να προσαρμοστούν έτσι ώστε να παράγουν ή να απορροφούν την άεργη ισχύ προς ή από το δίκτυο, για να επιτευχθεί έλεγχος της τάσης.



Σχήμα 5.9: Ανεμογεννήτρια τύπου 3

**ΤΥΠΟΣ 4:**

Οι ανεμογεννήτριες τύπου 4 (Σχήμα 5.10) είναι μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπέα (Full Converter Wind Turbine - FCWT) και μπορούν να ελέγξουν την άεργη ισχύ μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται στην προσομοίωση στο επόμενο κεφάλαιο μιας και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την διακύμανση της πραγματικής και της άεργου ισχύος.



Σχήμα 5.10: Ανεμογεννήτρια τύπου 4

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι στο επίπεδο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται να γίνει έλεγχος ο οποίος αποσκοπεί κυρίως στην διατήρηση της τάσης εντός συγκεκριμένων ορίων μέσω της ρύθμισης της άεργης ισχύος. Επειδή οι ανεμογεννήτριες τύπου 1 και τύπου 2 όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι επαγωγικές γεννήτριες, θα προστεθούν πυκνωτές στους ακροδέκτες της γεννήτριας για να διορθώσουν τον συντελεστή ισχύος. Επειδή όμως οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες δεν έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την άεργη ισχύ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά κυκλώματα με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος όπως SVC (Static Var Compensators) ή STATCOM, για να επιτευχθεί η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος.

Ανεμογεννήτριες τύπου 3 και τύπου 4 έχουν την δυνατότητα είτε να απορροφήσουν είτε να παράξουν άεργη ισχύ και έτσι κάθε γεννήτρια έχει έναν συντελεστή ισχύος που μπορεί να ρυθμίζεται δυναμικά προκειμένου να επιτευχθεί έλεγχος τάσης και κατ' επέκταση αντιστάθμιση της άεργης ισχύος. Γι' αυτόν τον λόγο αυτοί οι τύποι ανεμογεννητριών είναι και οι πιο διαδεδομένοι. [17]

### 5.1.4 Αιολικά Πάρκα

Τα αιολικά πάρκα είναι συνδεδεμένες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν ως σταθμός ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να έχουν τοποθετηθεί στο έδαφος σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν τις διπλανές τους, αλλά κυρίως τις υπήνεμες ανεμογεννήτριες. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών υπολογίζεται μέσω της διαμέτρου του στροβίλου. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών σε σχέση με την διάμετρο περιστροφής του δρομέα θα πρέπει να είναι περίπου 8 έως 12 φορές μεγαλύτερη κατά την κατεύθυνση του ανέμου και 2 έως 4 φορές εγκάρσια προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Οι στρόβιλοι των αιολικών πάρκων μπορούν να τοποθετηθούν είτε στην ξηρά είτε στην θάλασσα. Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις έχουν υψηλότερο κόστος από τις εγκαταστάσεις στην ξηρά, αλλά αυτό εξισορροπείται μιας και υπάρχει μεγαλύτερη αύξηση στην παραγωγή. Ακόμη, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα χρειάζονται πολλές ανεμογεννήτριες με ισχύ έως 5-6 MW η καθεμία, έτσι ώστε να μπορεί να εξισορροπηθεί το υψηλό κόστος εγκατάστασής του, η σύνδεση του δικτύου με τη γη και ο απομονωμένος έλεγχος.

Οι μονάδες που δεν είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο τροφοδοτούνται εξ' ολοκλήρου από την αιολική ενέργεια και μας απασχολούν ολοένα και περισσότερο, μιας και λόγω των περιβαλλοντικών ζητημάτων η στρόφη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι επιτακτική. Μια καλή ιδέα θα ήταν να ασχοληθούμε με υβριδικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αιολική ενέργεια ή άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας και σε συνδυασμό με τις παραδοσιακές πηγές μπορεί να προκύψει ένα αρκετά οικονομικά αποδοτικό σύστημα σε περίπτωση σύνδεσης με αποκεντρωμένα δίκτυα. [15]



Σχήμα 5.11: Το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο το οποίο βρίσκεται στην Αγγλία





# Κεφάλαιο 6

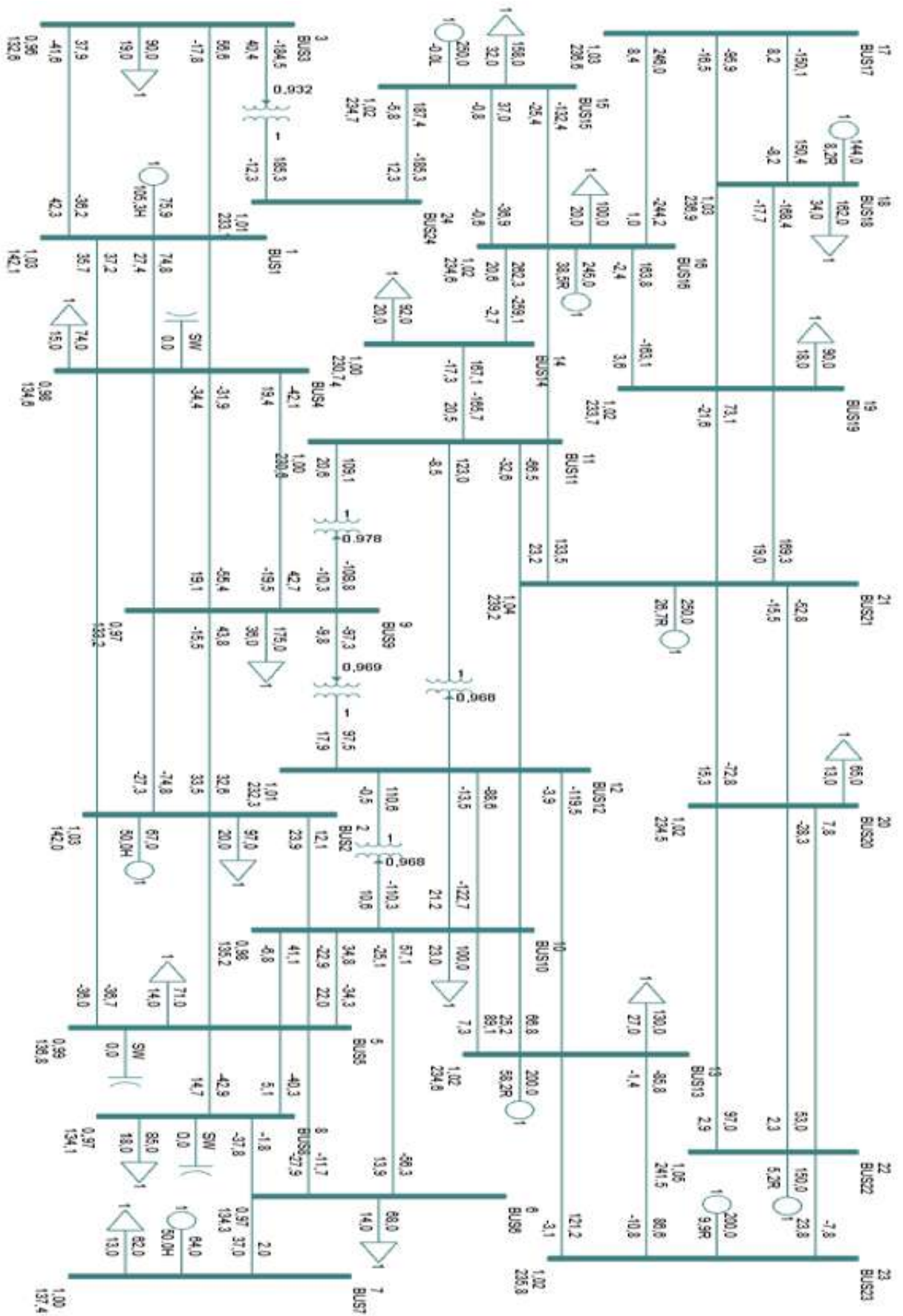
## Προσομοίωση

### 6.1 Περιγραφή του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται η ικανότητα ενός συστήματος 24 ζυγών να διατηρήσει τη μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικών βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο. Επίσης, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος που χρειάζεται για την εκκαθάριση των βραχυκυκλωμάτων (CCT) ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του δικτύου και να αποφευχθεί ο αποσυγχρονισμός κάποιας γεννήτριας. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το δίκτυο των 24 ζυγών της IEEE. Αυτό το δίκτυο αποτελείται από

- 10 συμβατικές γεννήτριες
- 16 φορτία
- 5 μετασχηματιστές

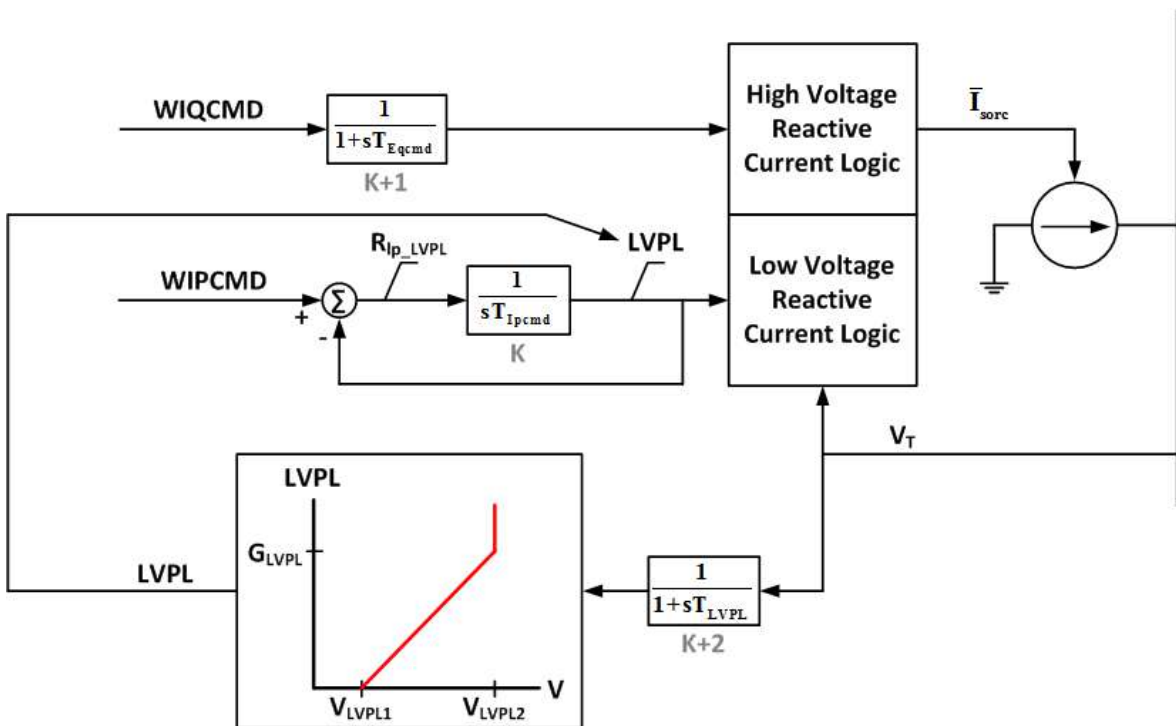
Αναλυτικότερα, σ' αυτήν την διπλωματική μελετάται η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος μετά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές γεννήτριες. Στην συνέχεια, εξετάζεται πως επηρεάζεται η ευστάθεια ενός συστήματος μετά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην εργασία αυτή, για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν μόνο ανεμογεννήτριες που επιφέρουν αλλαγές στην ευστάθεια και στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφαλμάτων του δικτύου.



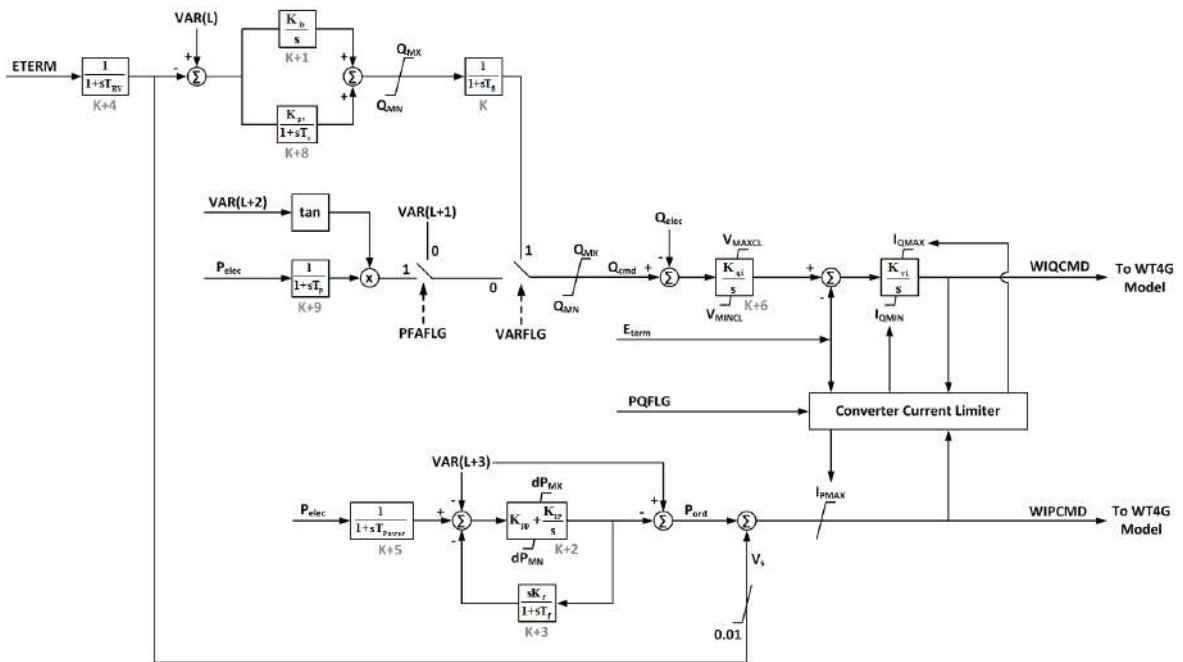
Σχήμα 6.1: Δίκτυο 24 ζυγών της IEEE

Στην αρχή της προσομοίωσης το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει μόνο τις συμβατικές γεννήτριες και στην συνέχεια κάποιες αντικαθίστανται απο ανεμογεννήτριες τύπου 4, γεγονός που επιφέρει διαφοροποιήσεις στην ευστάθεια του δικτύου καθώς επίσης και στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης των σφαλμάτων.

Η εμφάνιση των ανεμογεννητριών στο λογισμικό PSS/ E πραγματοποιείται με την βοήθεια 2 μπλοκ. Τα μπλοκ αυτά είναι το μοντέλο γεννήτριας / μετατροπέα (WT4G - Generator/Converter Model) που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2 και το ηλεκτρικό μοντέλο ελέγχου (WT4E - Electrical Control Model) που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3. Κάθε ένα από αυτά, έχει δικές του παραμέτρους που θα πρέπει να οριστούν πριν την έναρξη της προσομοίωσης για την απεικόνιση της συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών. Οι παράμετροι των μπλοκ τέθηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του Western Electricity Coordinating Council (WECC) για τον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.2: Generator/Converter Model (WT4G)



Σχήμα 6.3: Electrical Control Model (WT4E)

### 6.1.1 Μελέτη Μεταβατικής Ευστάθειας

Σ' αυτήν την εργασία, θα αναλυθεί η διαδικασία της προσομοίωσης με τη βοήθεια του λογισμικού PSS/E της Siemens. Στόχος της μελέτης αυτής είναι να εντοπιστεί αν το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του μετά από την εφαρμογή τριφασικών σφαλμάτων και να εξεταστούν οι κρίσιμοι χρόνοι προκειμένου να γίνει εκκαθάριση κάθε σφάλματος.

Για να γίνει αντιληπτό αν ένα σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του μετά από την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος σε ένα ζυγό του, θα πρέπει να ελεγχθούν οι καμπύλες του δικτύου που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του σφάλματος. Οι καμπύλες που πρέπει να μελετηθούν είναι οι εξής:

1. Η καμπύλη της γωνιάς ισχύος της γεννήτριας δι αναφορικά με την σχετική γωνία της γεννήτριας του ζυγού 1 που αποτελεί ζυγό αναφοράς σε μοίρες σε συνάρτηση με τον χρόνο.
2. Η καμπύλη της πραγματικής ισχύος  $P$  των γεννητριών σε MW σε συνάρτηση με τον χρόνο.
3. Η καμπύλη της άεργης ισχύος  $Q$  των γεννητριών σε MVA<sub>r</sub> σε συνάρτηση με τον χρόνο.
4. Η καμπύλη της συχνότητας  $f$  των γεννητριών του δικτύου σε Hz σε συνάρτηση με τον χρόνο.
5. Η καμπύλη της τάσης  $V$  των ζυγών των γεννητριών σε pu σε συνάρτηση με τον χρόνο.
6. Η καμπύλη της γωνιάς ισχύος της γεννήτριας  $\delta$  σε μοίρες κάποια msec μετά τον κρίσιμο χρόνο για να διαπιστωθεί η αστάθεια.

Για την εύρεση του κρίσιμου χρόνου η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

1. Για χρόνο  $t_0 = 0 \text{ sec}$ , τρέχουμε ροή φορτίου (χωρίς κάποιο σφάλμα) μέχρι την χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ sec}$ .
2. Την χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ sec}$ , εφαρμόζουμε τριφασικό σφάλμα πάνω σε έναν ζυγό και το διατηρούμε μέχρι και την χρονική στιγμή  $t_2 = t_1 + t_{critical}$ , που θα γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος. Η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται αφαιρώντας το σφάλμα και ανοίγοντας ταυτόχρονα μια γραμμή που συνδέεται με τον ζυγό του σφάλματος.

3. Βρίσκουμε τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος  $t_{critical}$ , δηλαδή το χρόνο διάρκειας του σφάλματος ώστε να μην αποσυγχρονιστεί καμία γεννήτρια. Για τον εντοπισμό του  $t_{critical}$  το βήμα εύρεσης είναι 50 msec.
4. Για χρόνο  $t = t_2 + 50$  msec, καταγράφουμε τις καμπύλες των σχετικών γωνιών ισχύος των γεννητριών για να διαπιστώσουμε ότι το σύστημα βρίσκεται πλέον σε αστάθεια.

Τα σενάρια που θα μελετηθούν είναι τα εξής:

- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από συμβατικές γεννήτριες.
- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια εντάσσεται στο ζυγό 15 του συστήματος και πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια τύπου 4, η οποία θα αντικαταστήσει το 100% της παραγωγής της αρχικής γεννήτριας.
- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια εντάσσεται στο ζυγό 21 του συστήματος και πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια τύπου 4, η οποία θα αντικαταστήσει το 100% της παραγωγής της αρχικής γεννήτριας.
- Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών ανεμογεννητριών τύπου 4, οι οποίες συνδέονται στους ζυγούς 15 και 21 του συστήματος και αντικαθιστούν το 100% της παραγωγής της αρχικών γεννητριών.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις θα εφαρμοστούν τα εξής τριφασικά σφάλματα:

1. Σφάλμα στην γραμμή μεταφοράς 7 - 8 πλησίον του ζυγού 7 (σφάλμα πάνω σε ζυγό με γεννήτρια)
2. Σφάλμα στην γραμμή μεταφοράς 12 - 10 πλησίον του ζυγού 12 (σφάλμα απομακρυσμένο από ζυγό με γεννήτρια)

## 6.2 Σενάριο προσομοίωσης A

Στο Σενάριο A γίνεται μελέτη όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξ' ολοκλήρου από συμβατικές γεννήτριες. Εξετάζεται η ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικού βραχυκυκλώματος αρχικά στον ζυγό 7 και έπειτα στον ζυγό 12 υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για το κάθε σφάλμα. Ο ζυγός 7 είναι ζυγός που υπάρχει συνδεδεμένη γεννήτρια, ενώ ο ζυγός 12 είναι απομακρυσμένος από γεννήτριες.

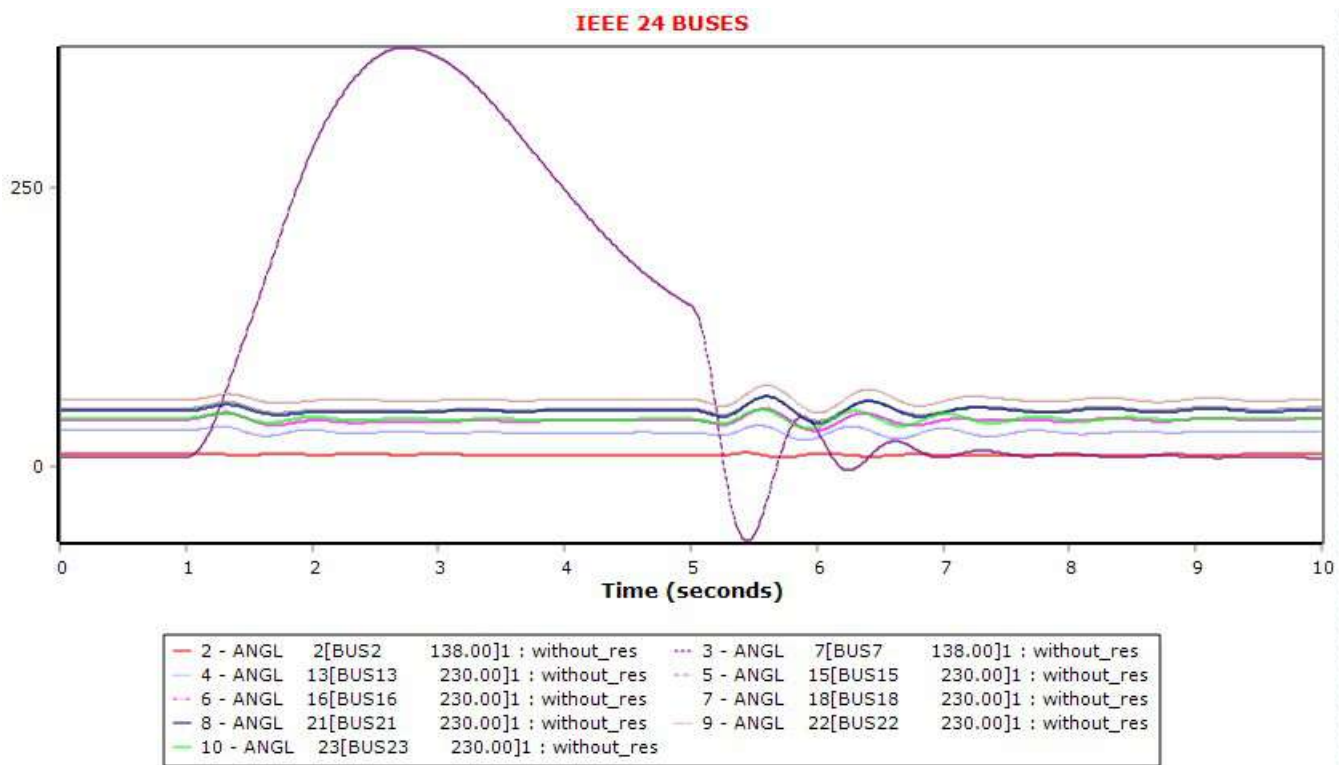
### 6.2.1 ΣΕΝΑΡΙΟ A1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7

Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 7 - 8 πλησίον του ζυγού 7. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t_1 = 1 \text{ sec}$  στον ζυγό 7 ο οποίος είναι συνδεδεμένος και με γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 0,3 \text{ sec}$ , ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = 1,3 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 7 - 8. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 7 - 8 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.5 και 6.6 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.7 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών, ενώ στο Σχήμα 6.8 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.9 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 1.35 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό είναι φανερό μιας και η καμπύλη της γωνίας  $\delta$  που αντιστοιχεί στον ζυγό 7 του συστήματος απομακρύνεται από τις υπόλοιπες γεννήτριες μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

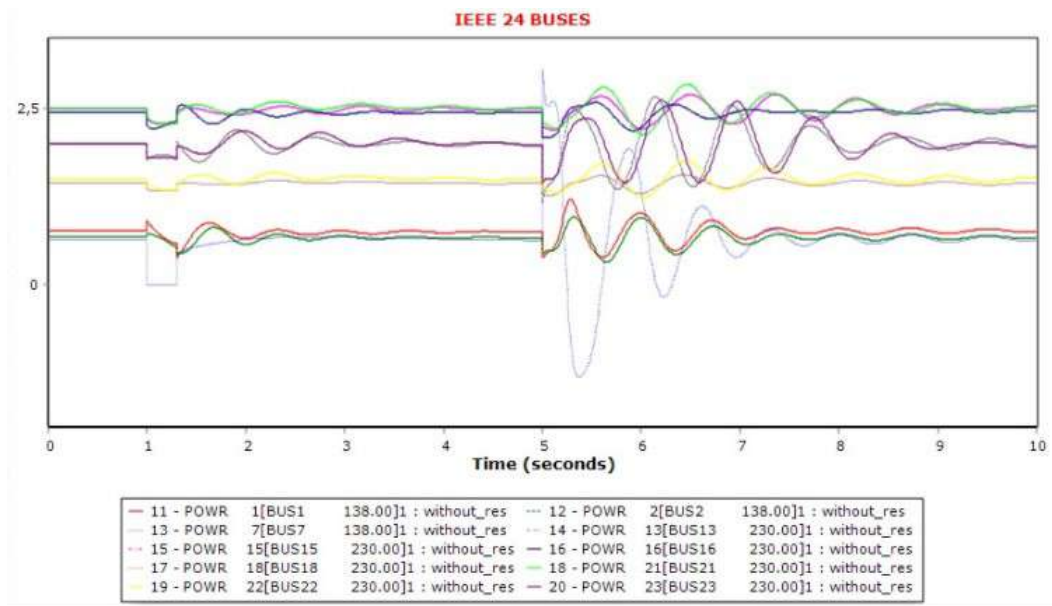
Πίνακας 6.1: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7

Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	t = 1 sec
Clear Fault	t = 1,3 sec
Open Line	t = 1,3 sec
Close Line	t = 5 sec

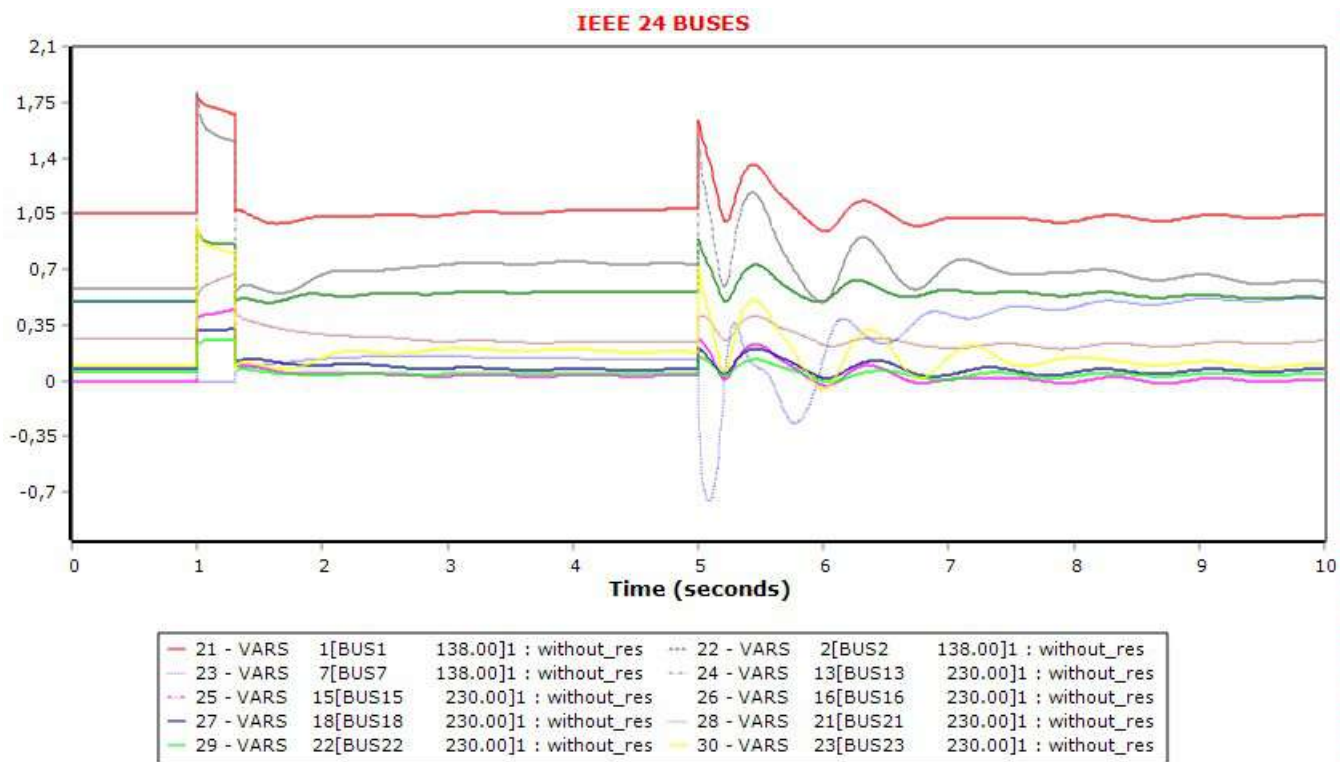


Σχήμα 6.4: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t = 1,3 sec.

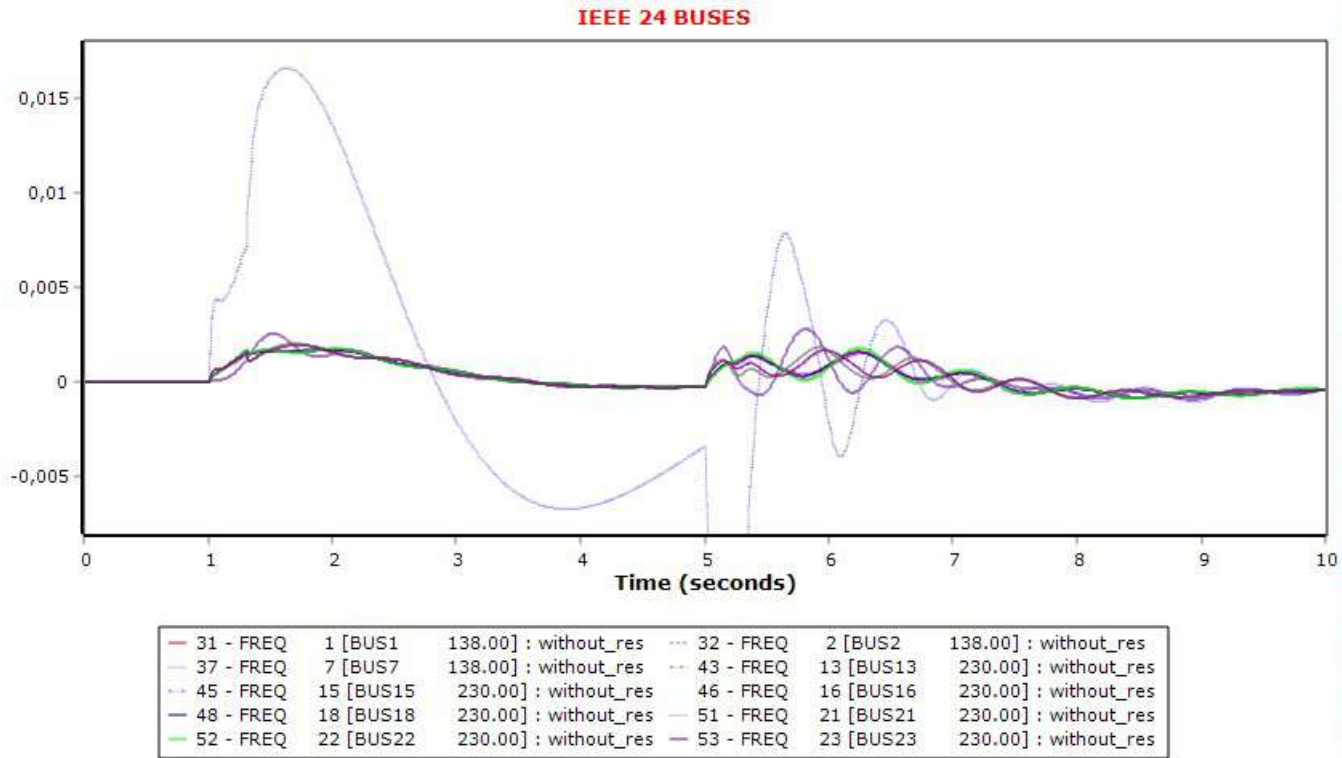




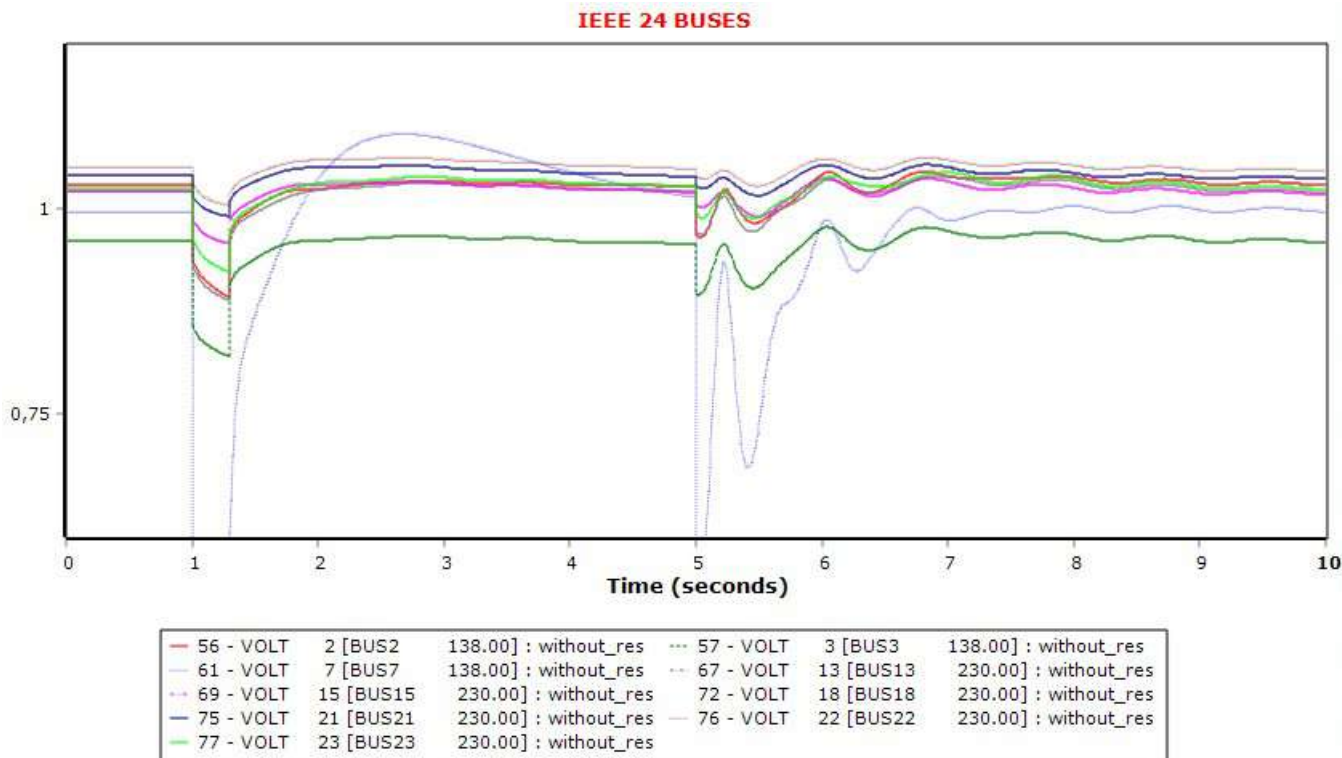
Σχήμα 6.5: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,3$  sec



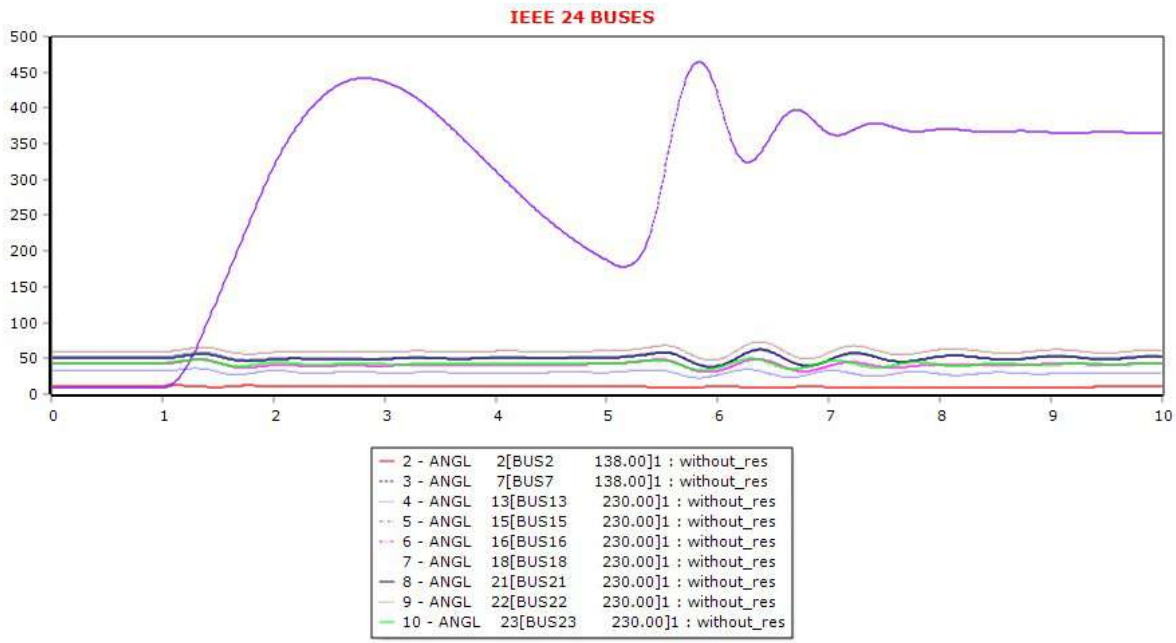
Σχήμα 6.6: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,3$  sec



Σχήμα 6.7: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,3\text{sec}$



Σχήμα 6.8: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,3\text{sec}$



Σχήμα 6.9: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,35$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

### 6.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ A2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12

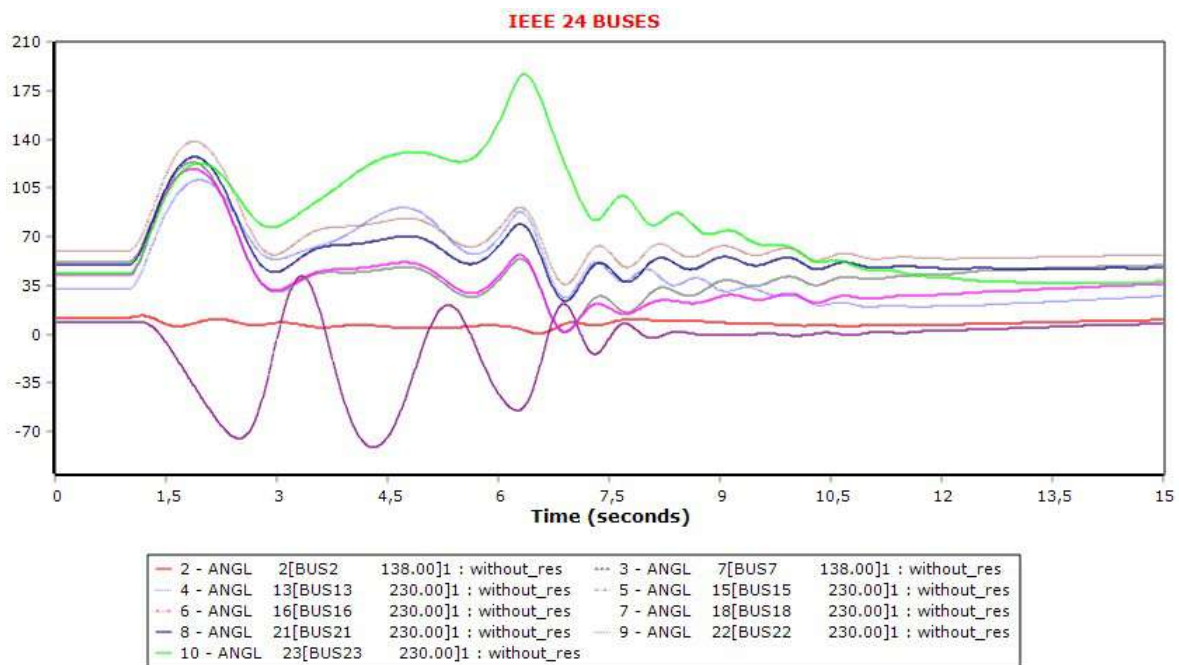
Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 12 - 10 πλησίον του ζυγού 12. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1$  sec στον ζυγό 12 ο οποίος δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 5,2$  sec, ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = 6,2$  sec να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 12 - 10. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 10$  sec, η γραμμή μεταφοράς 12 - 10 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 15$  sec που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.11 και 6.12 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα

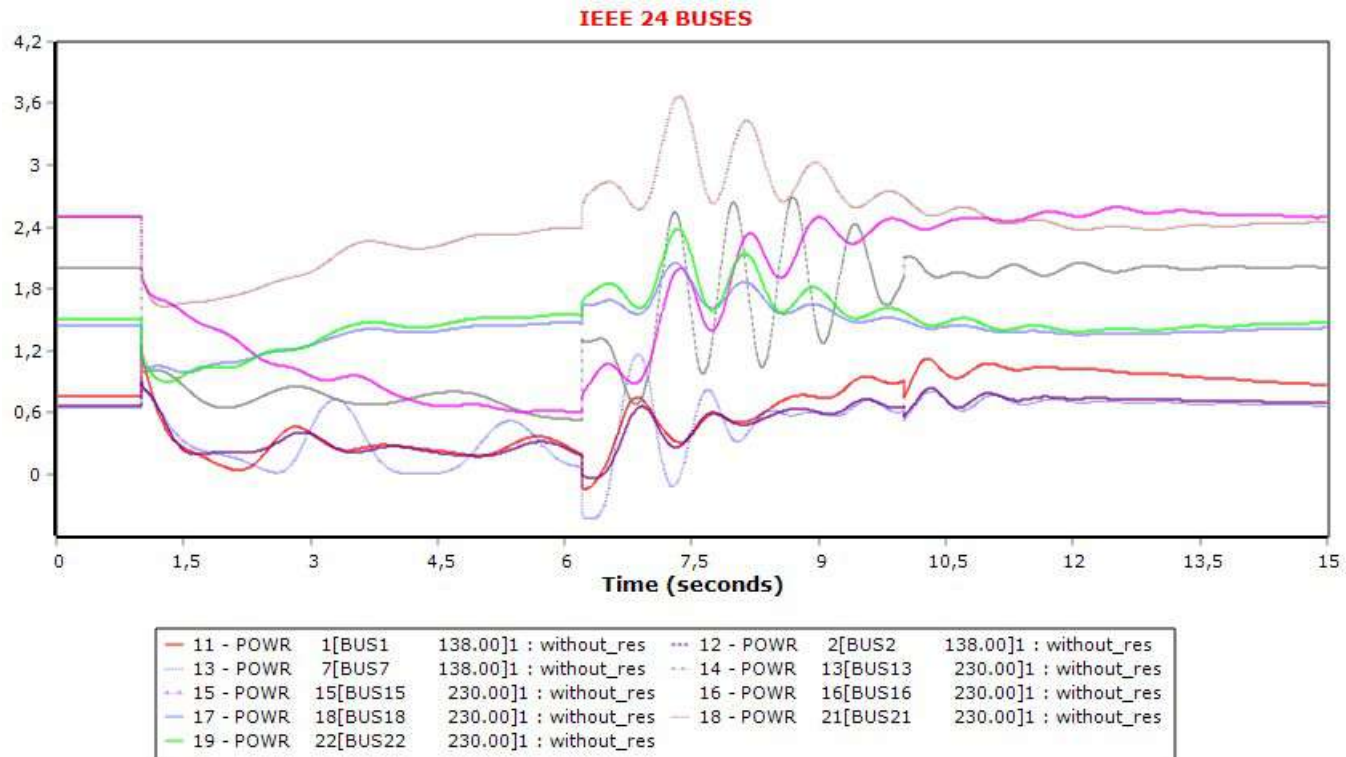
6.7 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνотήτων των ζυγών των γεννητριών οι οποίες συγκλίνουν, ενώ στο Σχήμα 6.13 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.14 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 6,25$  sec, δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό συμβαίνει μιας και δεν επανέρχονται όλες οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος στην αρχική τους θέση μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.2: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12

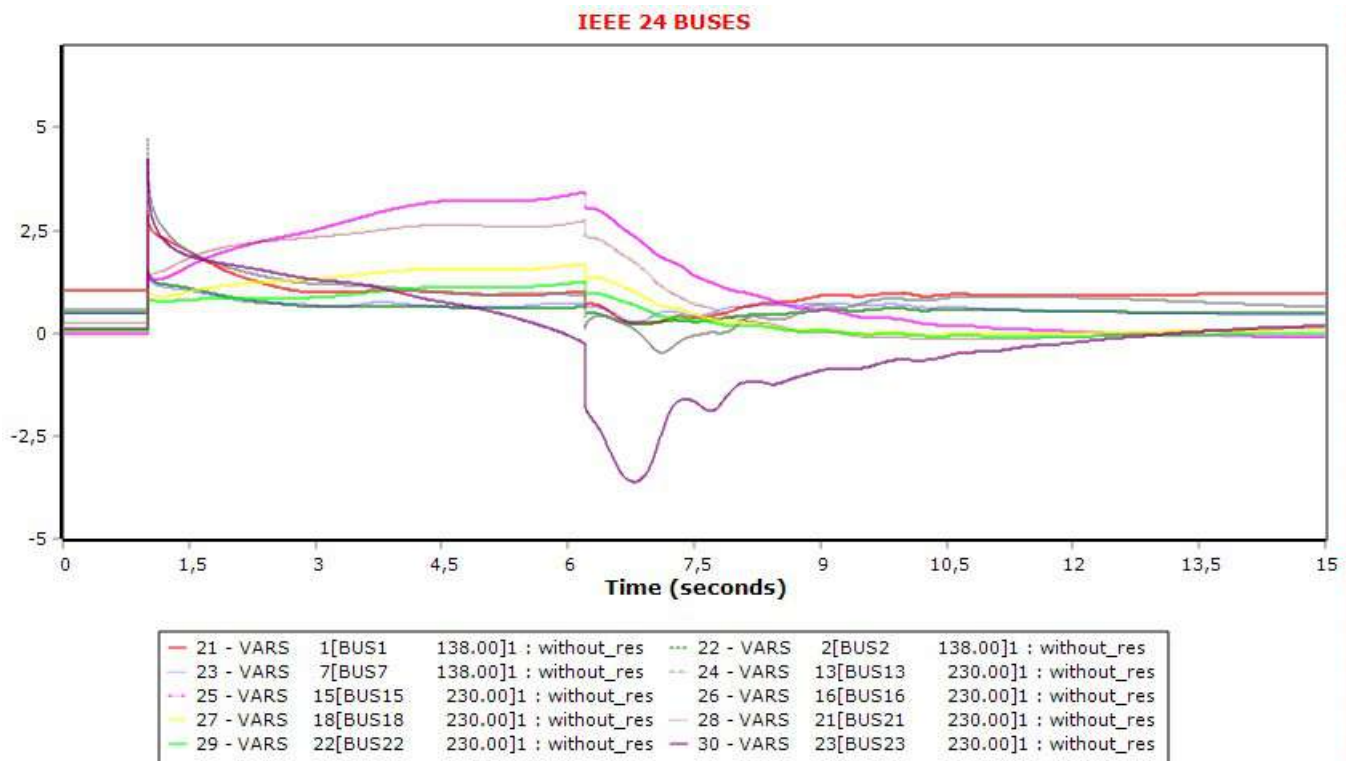
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1$ sec
Clear Fault	$t = 6,2$ sec
Open Line	$t = 6,2$ sec
Close Line	$t = 10$ sec



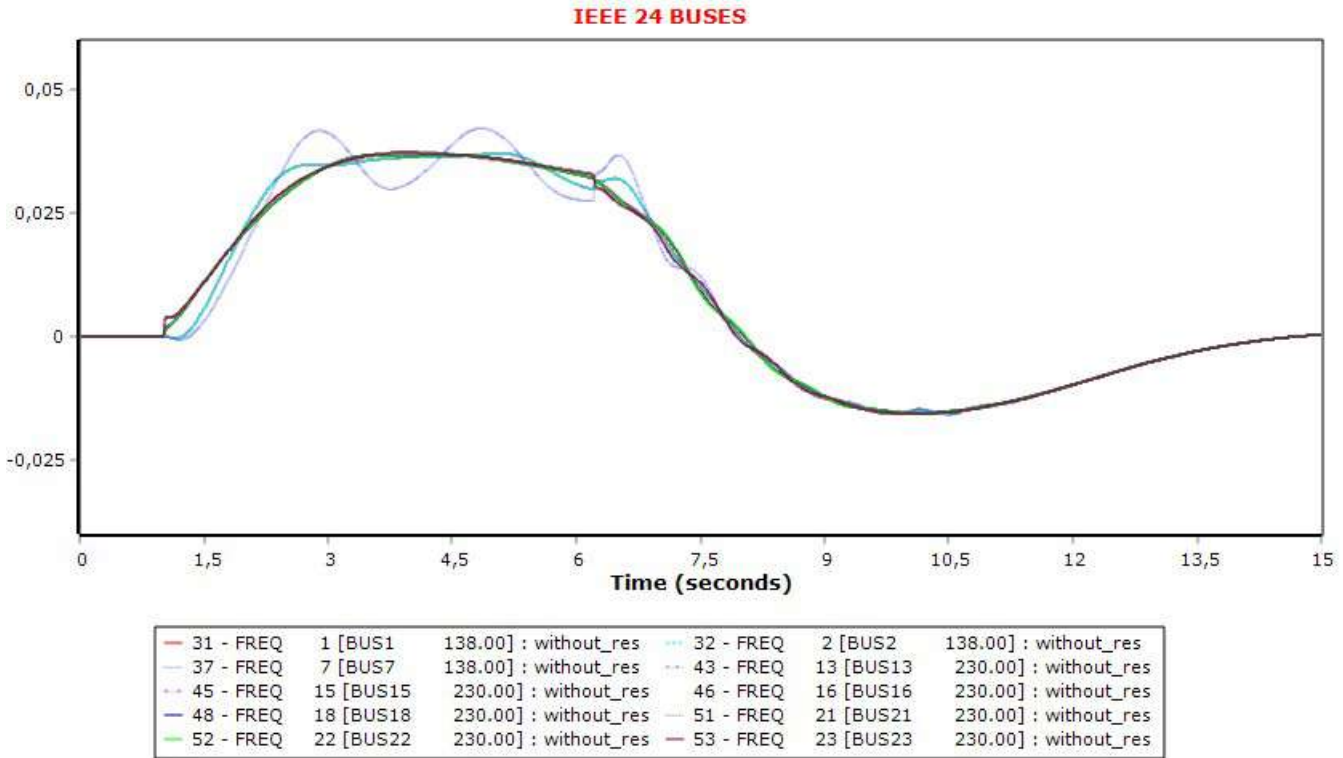
Σχήμα 6.10: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 6,2$  sec.



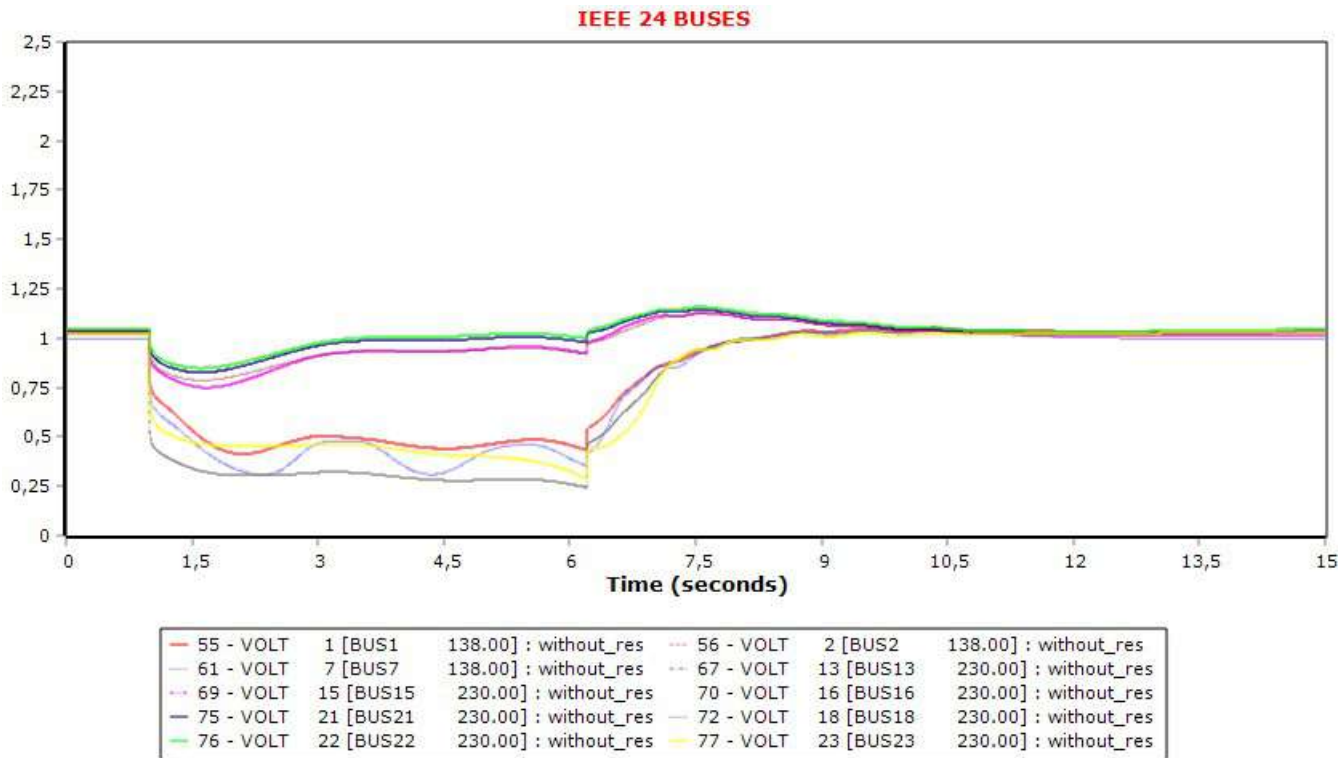
Σχήμα 6.11: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=6,2$  sec



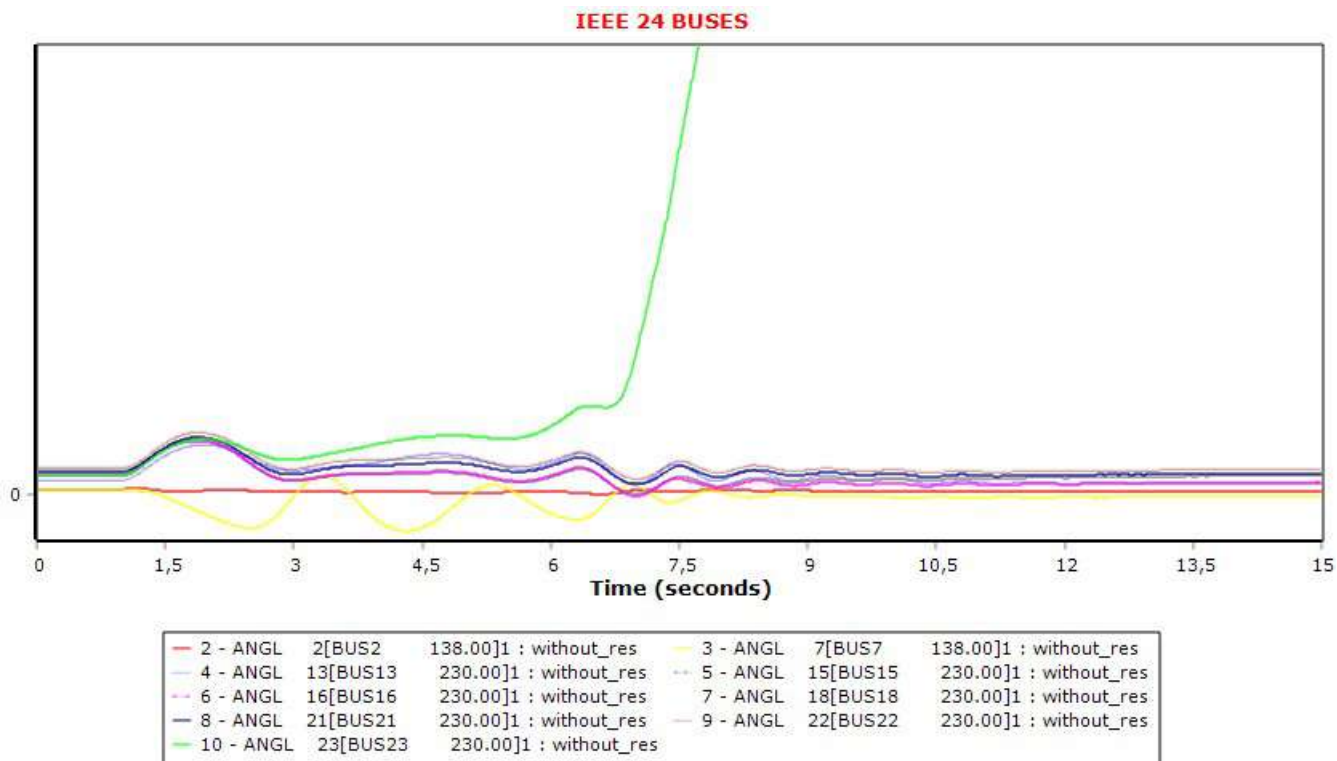
Σχήμα 6.12: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=6,2$  sec



Σχήμα 6.13: Καμπύλες των συχοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=6,2$  sec



Σχήμα 6.14: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t= 6,2$  sec



Σχήμα 6.15: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 6,25$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

## 6.3 Σενάριο Προσομοίωσης B

Στο Σενάριο B γίνεται μελέτη όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανεμογεννήτριας. Στον ζυγό 15 έχει αντικατασταθεί το 100% της παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας από ανεμογεννήτρια τύπου 4. Εξετάζεται η ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικού βραχυκυκλώματος αρχικά στον ζυγό 7 και έπειτα στον ζυγό 12 υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για το κάθε σφάλμα. Ο ζυγός 7 είναι ζυγός που έχει συνδεδεμένη γεννήτρια, ενώ ο ζυγός 12 είναι απομακρυσμένος από γεννήτριες.

### 6.3.1 ΣΕΝΑΡΙΟ B1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7

Στον Πίνακα 6.3 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 7 - 8 πλησίον του ζυγού 7. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1$  sec στον ζυγό 7 ο οποίος είναι συνδεδεμένος και με γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 0,35$  sec, ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος.

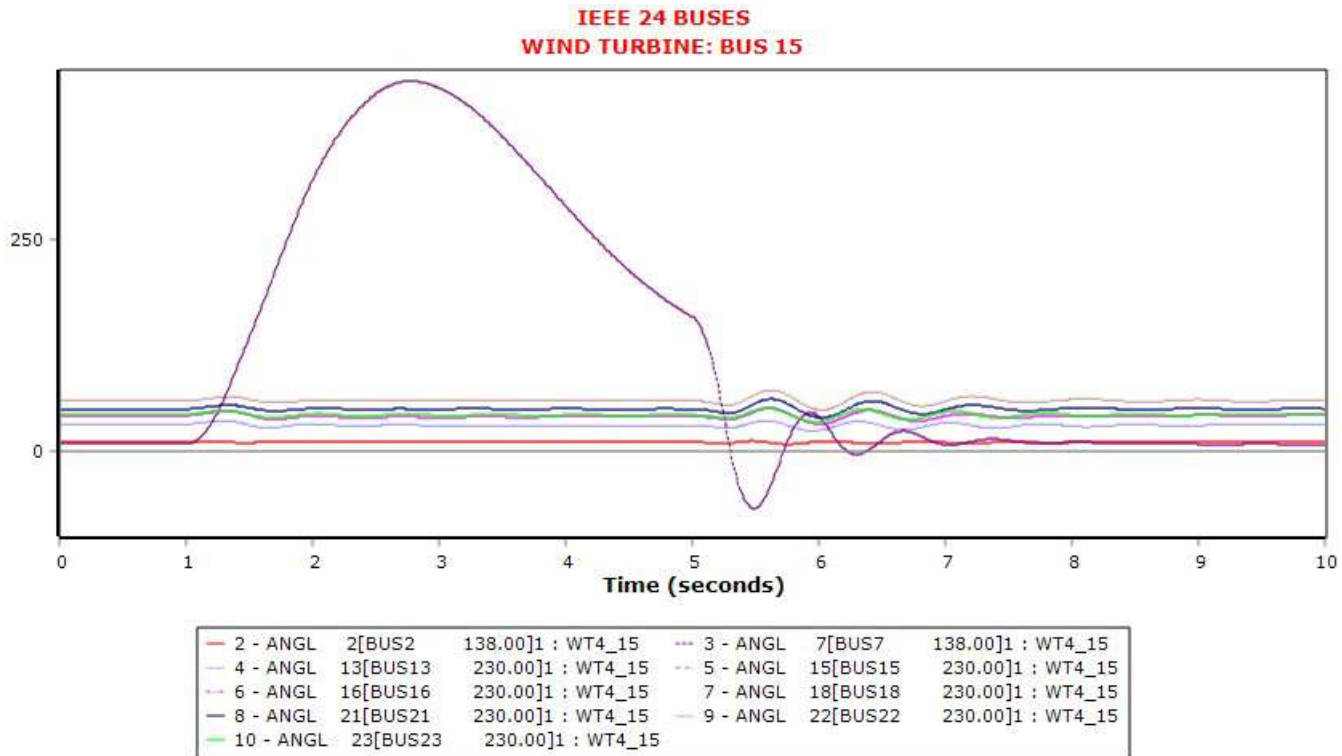
Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = 1,35 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 7 - 8. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 7 - 8 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.17 και 6.18 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών, ενώ στο Σχήμα 6.20 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.21 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 1,4 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό είναι φανερό μιας και η καμπύλη της γωνίας  $\delta$  που αντιστοιχεί στον ζυγό 7 του συστήματος απομακρύνεται από τις υπόλοιπες γεννήτριες μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

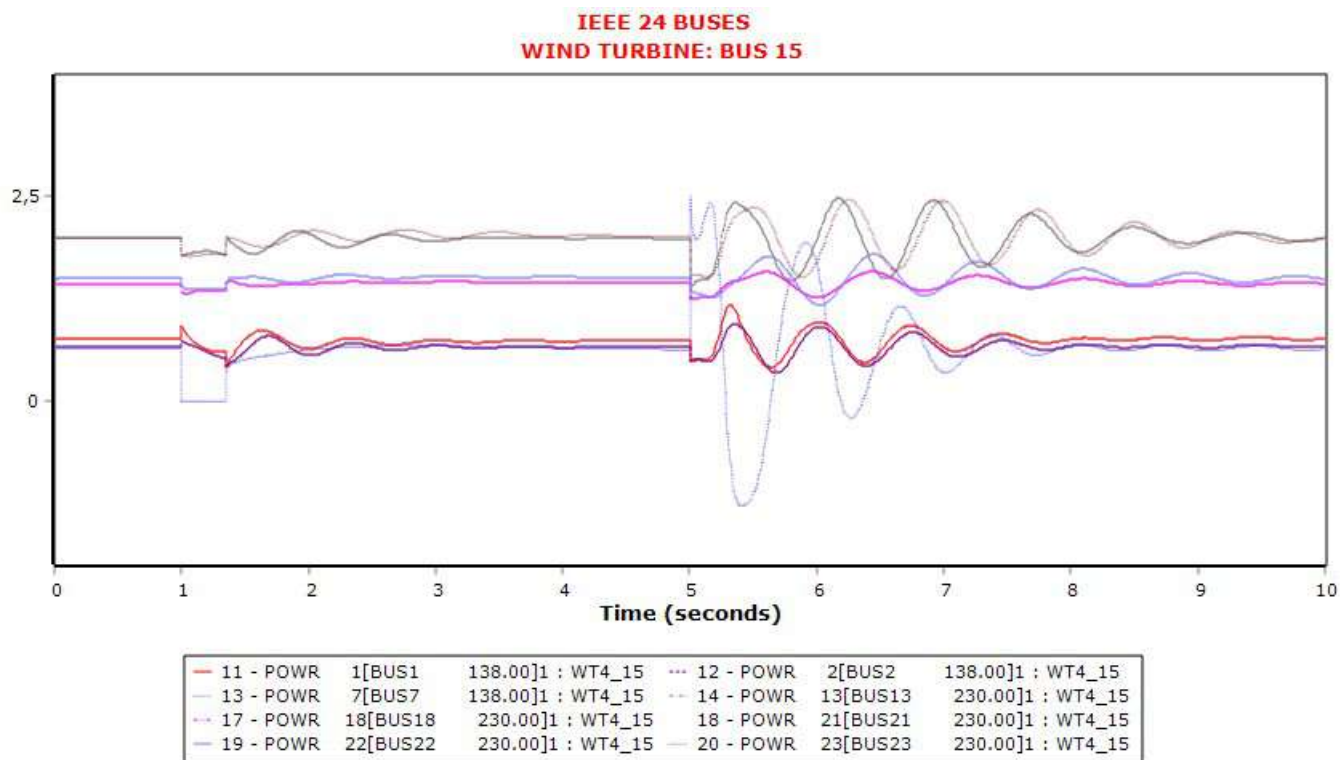
Πίνακας 6.3: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7

Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1 \text{ sec}$
Clear Fault	$t = 1,35 \text{ sec}$
Open Line	$t = 1,35 \text{ sec}$
Close Line	$t = 5 \text{ sec}$

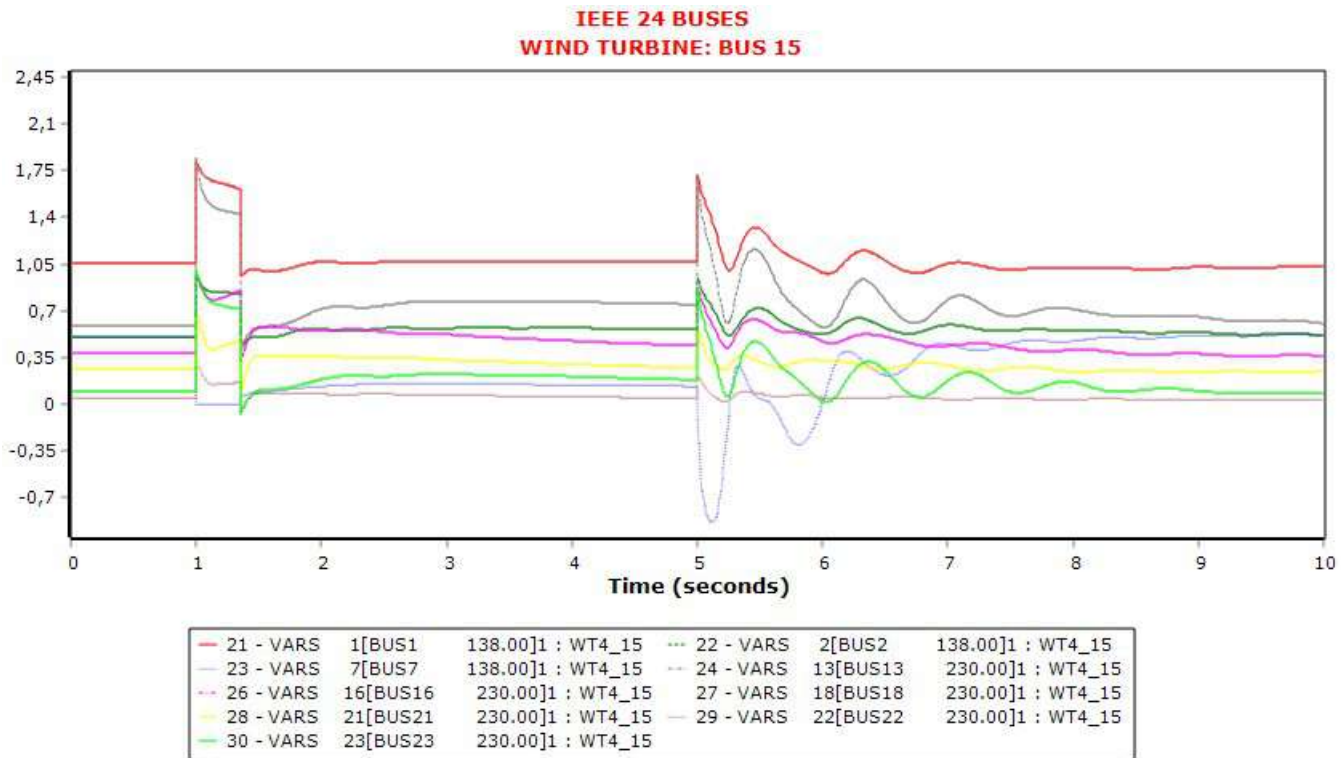




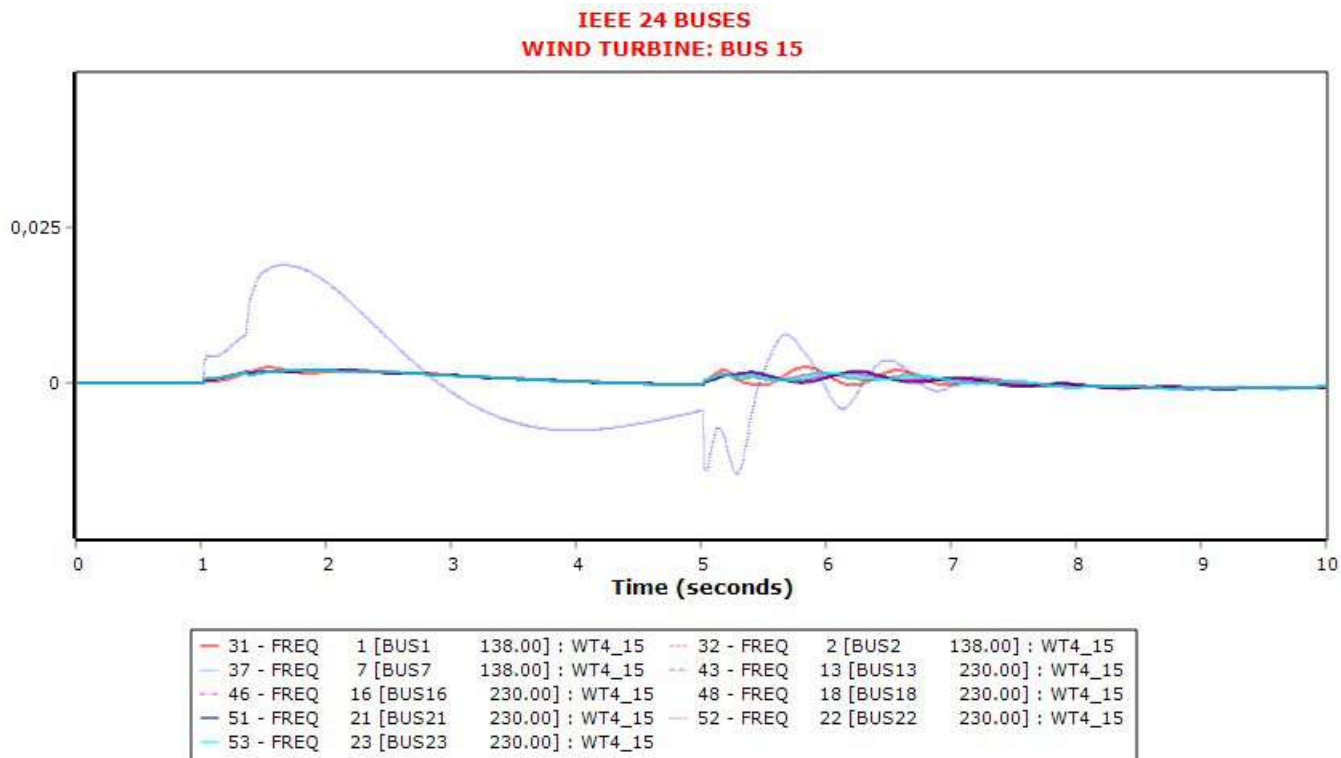
Σχήμα 6.16: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,35$  sec.



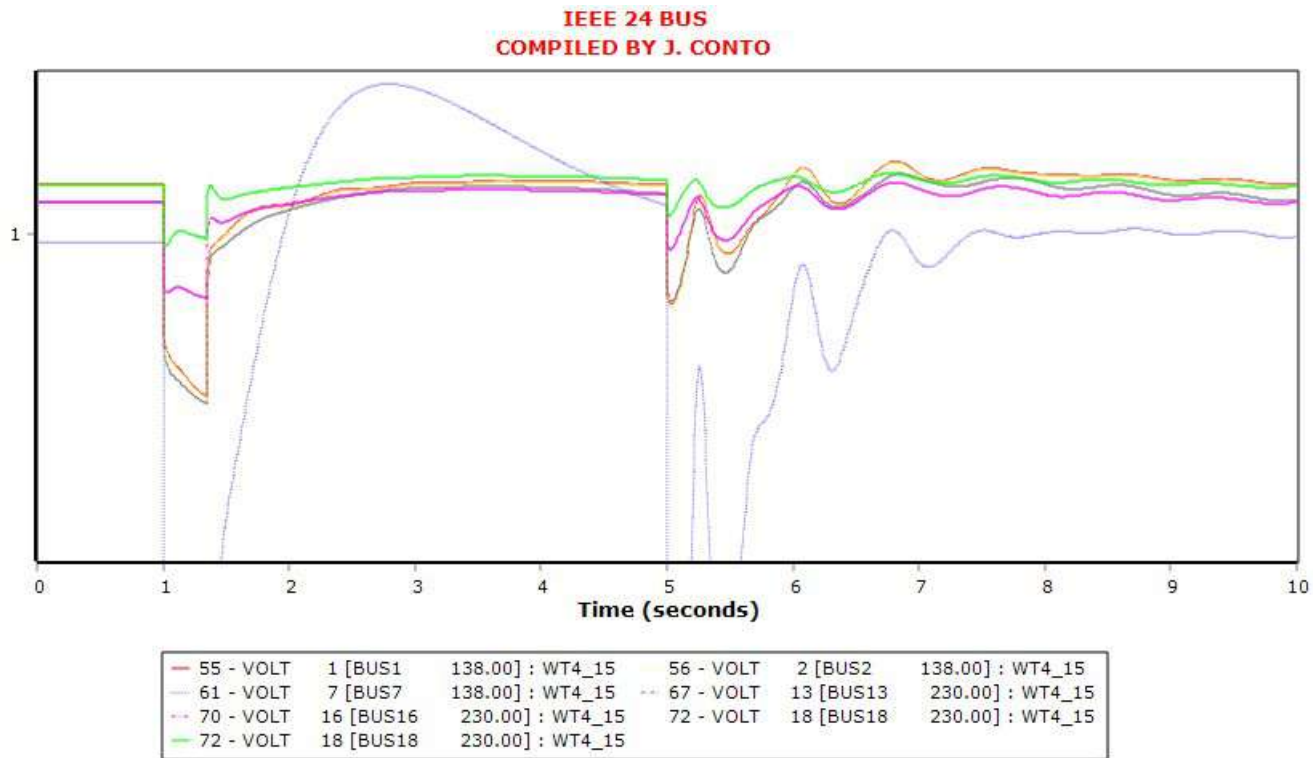
Σχήμα 6.17: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



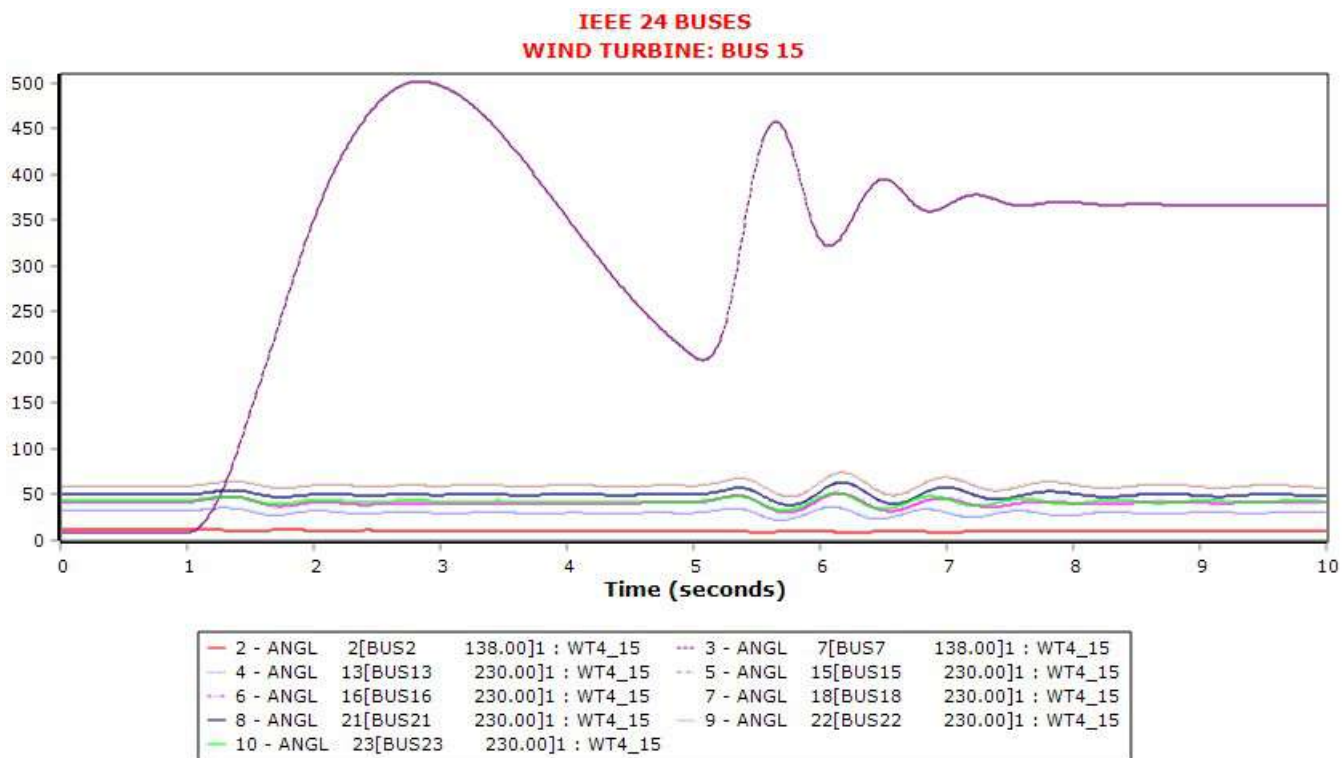
Σχήμα 6.18: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



Σχήμα 6.19: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$ sec



Σχήμα 6.20: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



Σχήμα 6.21: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,4$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

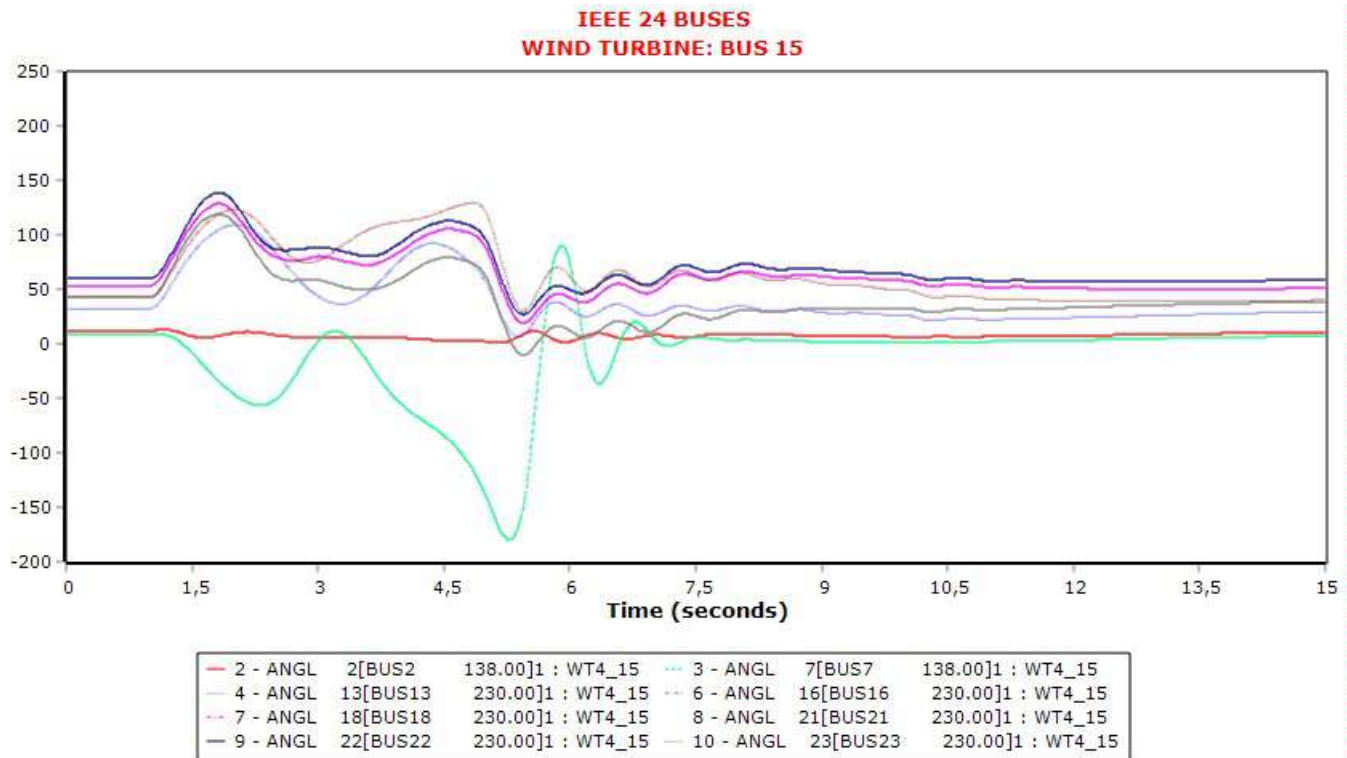
### 6.3.2 ΣΕΝΑΡΙΟ Β2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12

Στον Πίνακα 6.4 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 12 - 10 πλησίον του ζυγού 12. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1 \text{ sec}$  στον ζυγό 12 ο οποίος δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 3,9 \text{ sec}$ , ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = t_1 + t_{critical} = 4,9 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 12 - 10. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 12 - 10 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 15 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

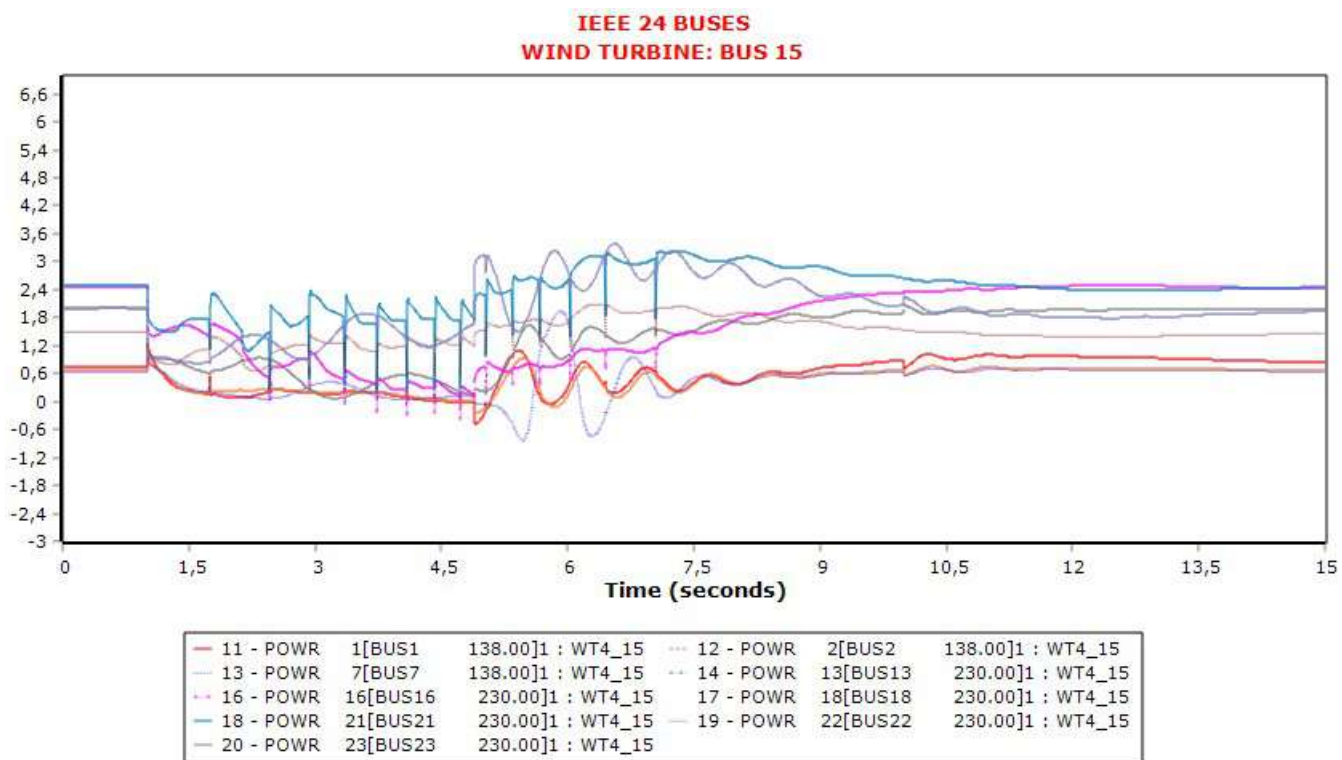
Στο Σχήμα 6.22 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.23 και 6.24 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.25 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών οι οποίες συγκλίνουν, ενώ στο Σχήμα 6.26 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.27 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 4,95 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό συμβαίνει μιας και δεν επανέρχονται όλες οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος στην αρχική τους θέση μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.4: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12

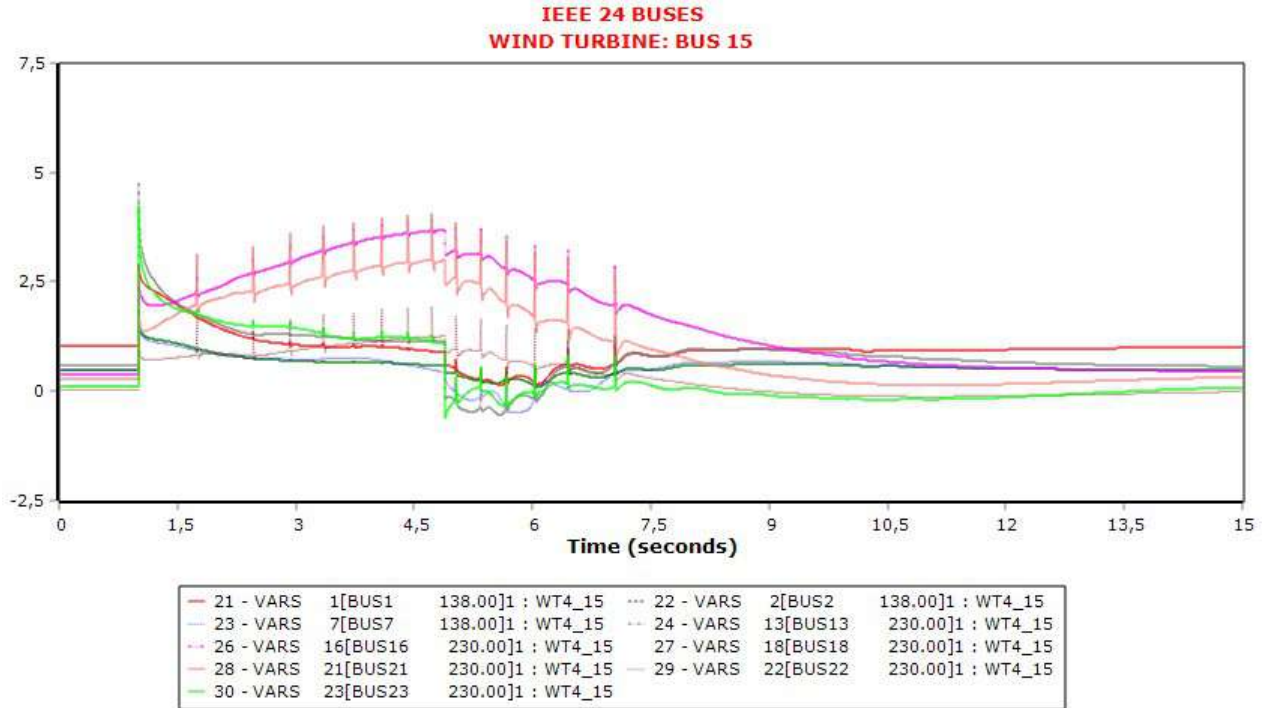
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1 \text{ sec}$
Clear Fault	$t = 4,9 \text{ sec}$
Open Line	$t = 4,9 \text{ sec}$
Close Line	$t = 10 \text{ sec}$



Σχήμα 6.22: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,9$  sec.

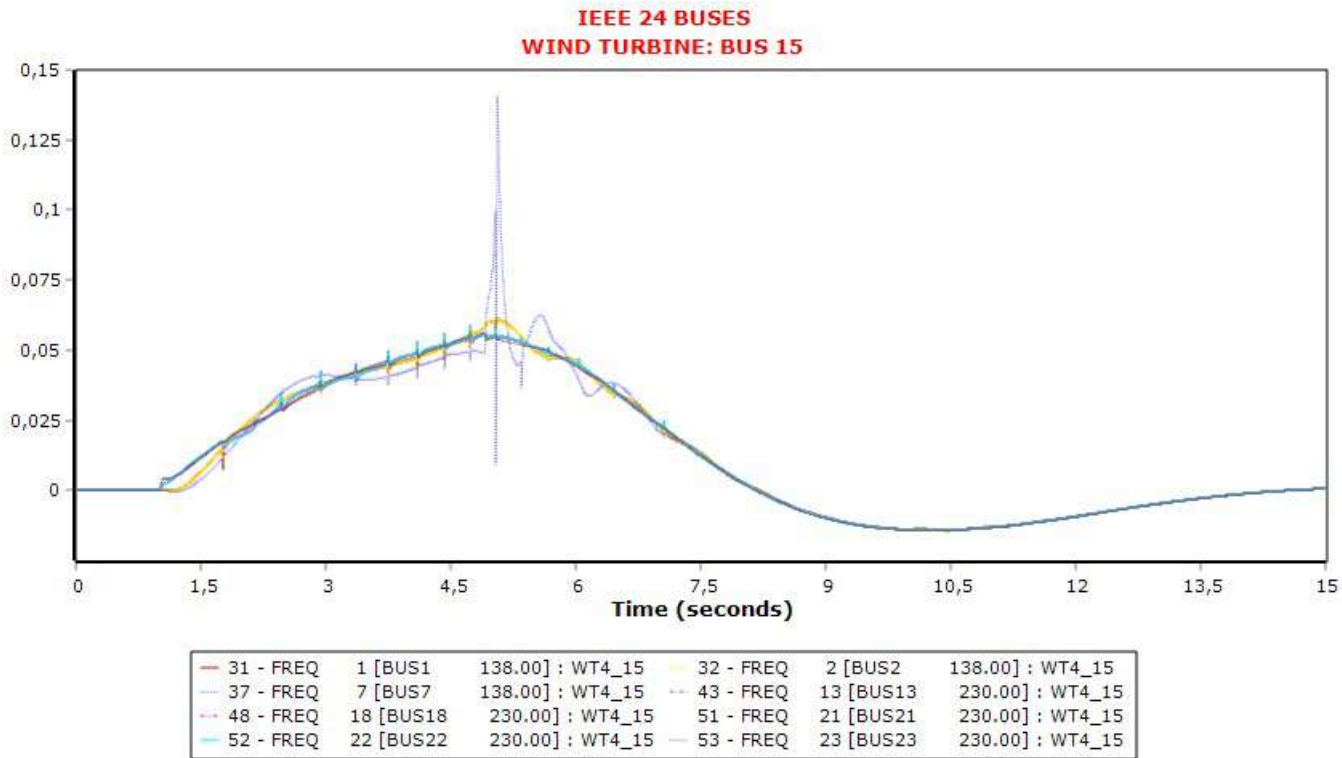


Σχήμα 6.23: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,9$  sec

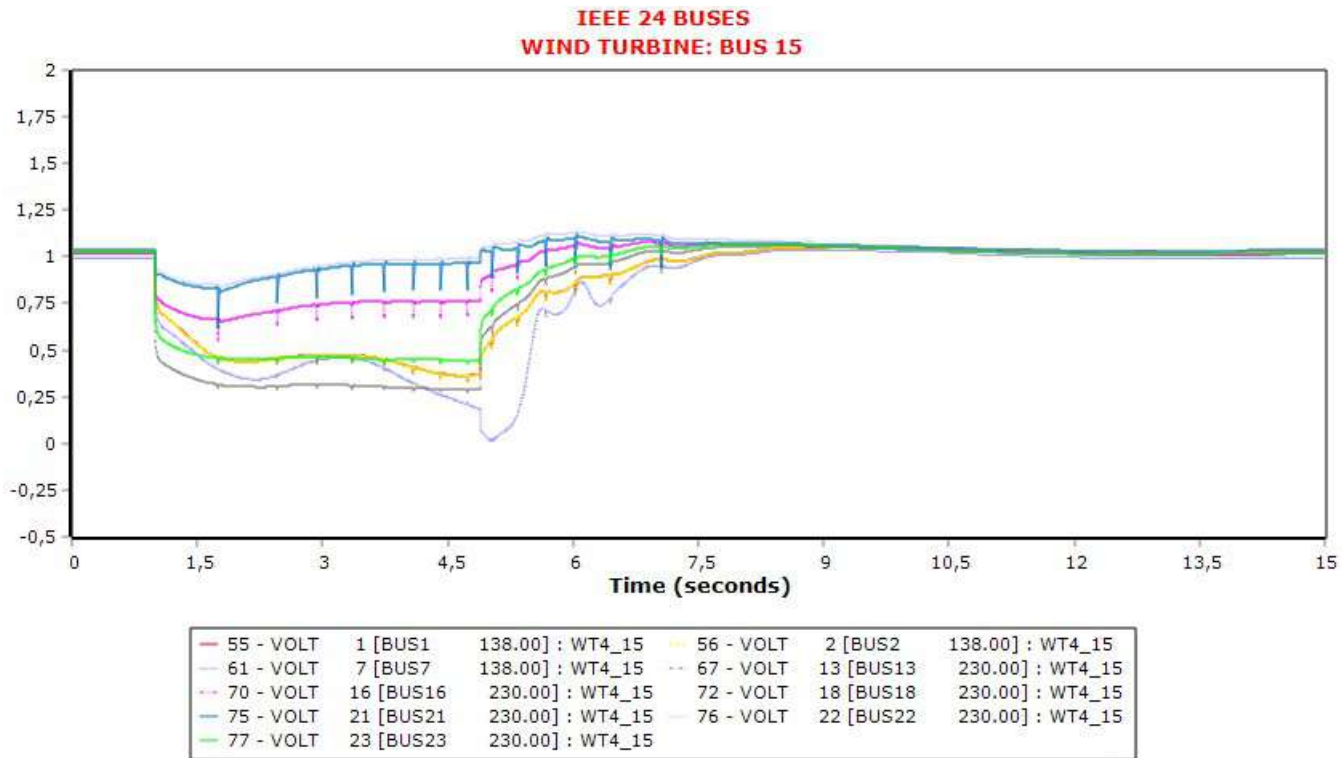


Σχήμα 6.24: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,9$  sec

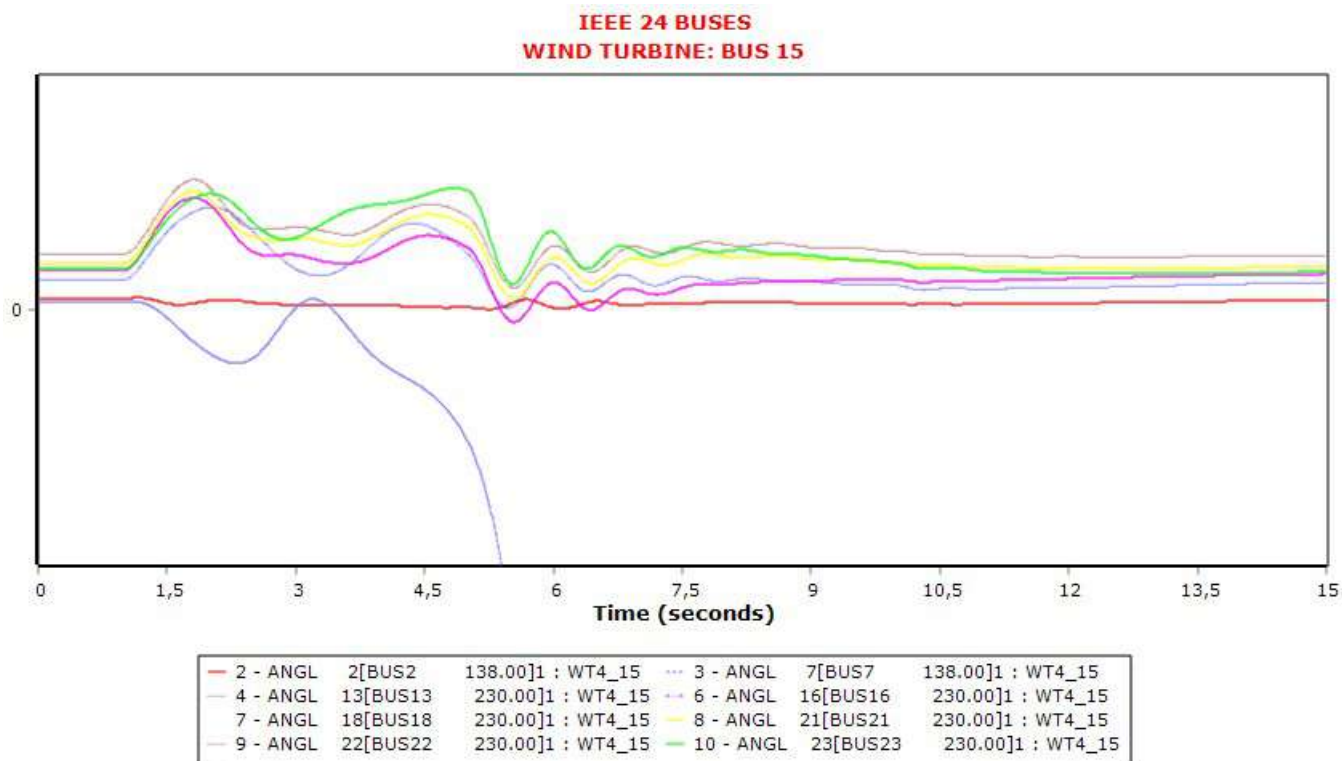
4,95



Σχήμα 6.25: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,9$  sec



Σχήμα 6.26: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,9 \text{ sec}$



Σχήμα 6.27: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 4,95 \text{ sec}$  που έχει χαθεί η ευστάθεια.

## 6.4 Σενάριο Προσομοίωσης Γ

Στο Σενάριο Γ γίνεται μελέτη όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανεμογεννήτριας. Στον ζυγό 21 έχει αντικατασταθεί το 100% της παραγωγής της συμβατικής γεννήτριας από ανεμογεννήτρια τύπου 4. Εξετάζεται η ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικού βραχυκυκλώματος αρχικά στον ζυγό 7 και έπειτα στον ζυγό 12 υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για το κάθε σφάλμα. Ο ζυγός 7 είναι ζυγός που έχει συνδεδεμένη γεννήτρια, ενώ ο ζυγός 12 είναι απομακρυνσμένος από γεννήτριες.

### 6.4.1 ΣΕΝΑΡΙΟ Γ1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7

Στον Πίνακα 6.5 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 7 - 8 πλησίον του ζυγού 7. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1 \text{ sec}$  στον ζυγό 7 ο οποίος είναι συνδεδεμένος και με γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 0,35 \text{ sec}$ , ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = 1,35 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 7 - 8. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 7 - 8 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

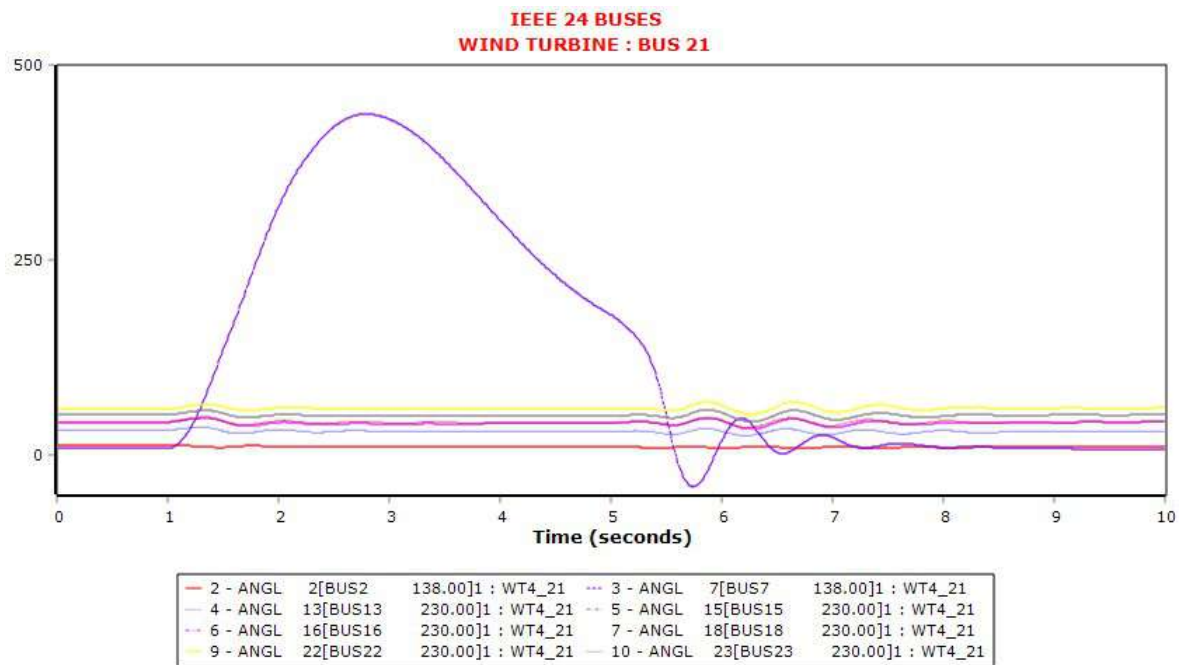
Στο Σχήμα 6.28 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.29 και 6.30 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.31 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών, ενώ στο Σχήμα 6.32 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.33 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 1,4 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό είναι φανερό μιας και η καμπύλη της γωνίας  $\delta$  που αντιστοιχεί στον ζυγό 7 του συστήματος απομακρύνεται



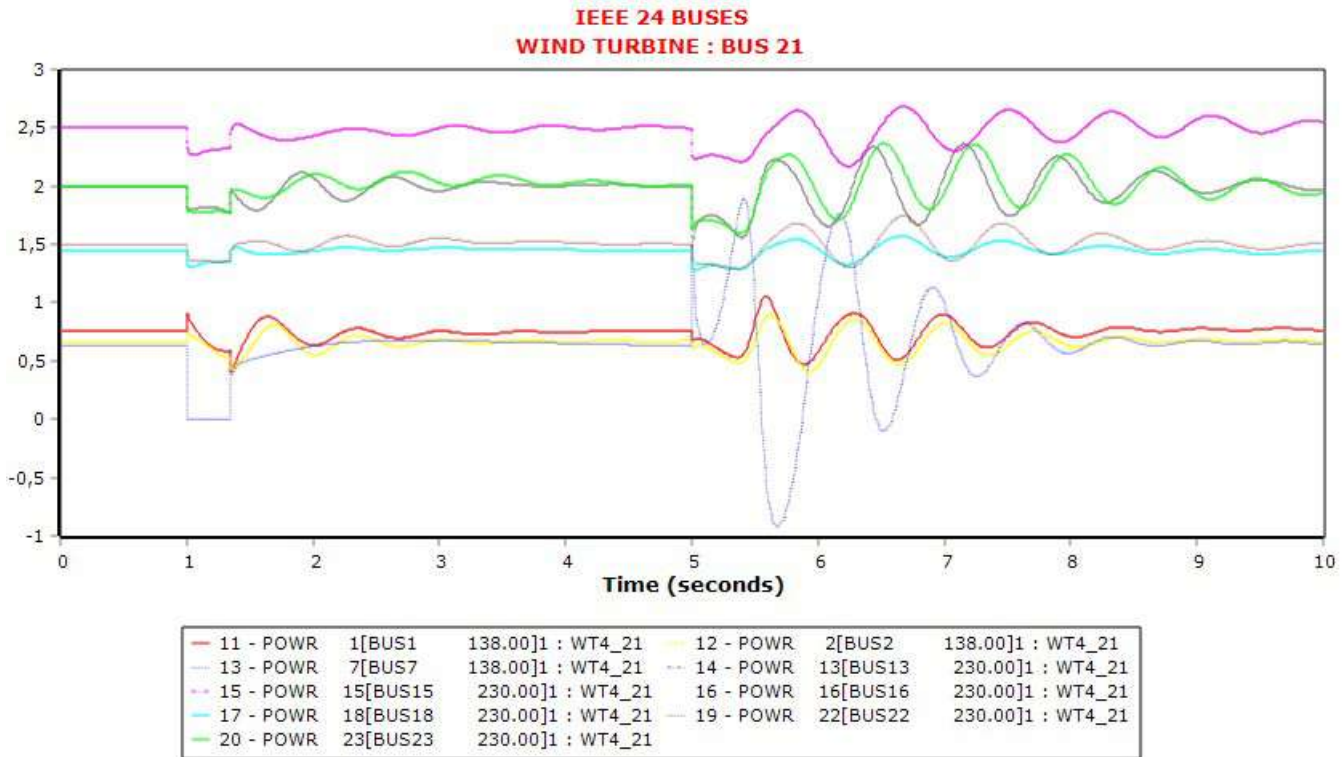
από τις υπόλοιπες γεννήτριες μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.5: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7

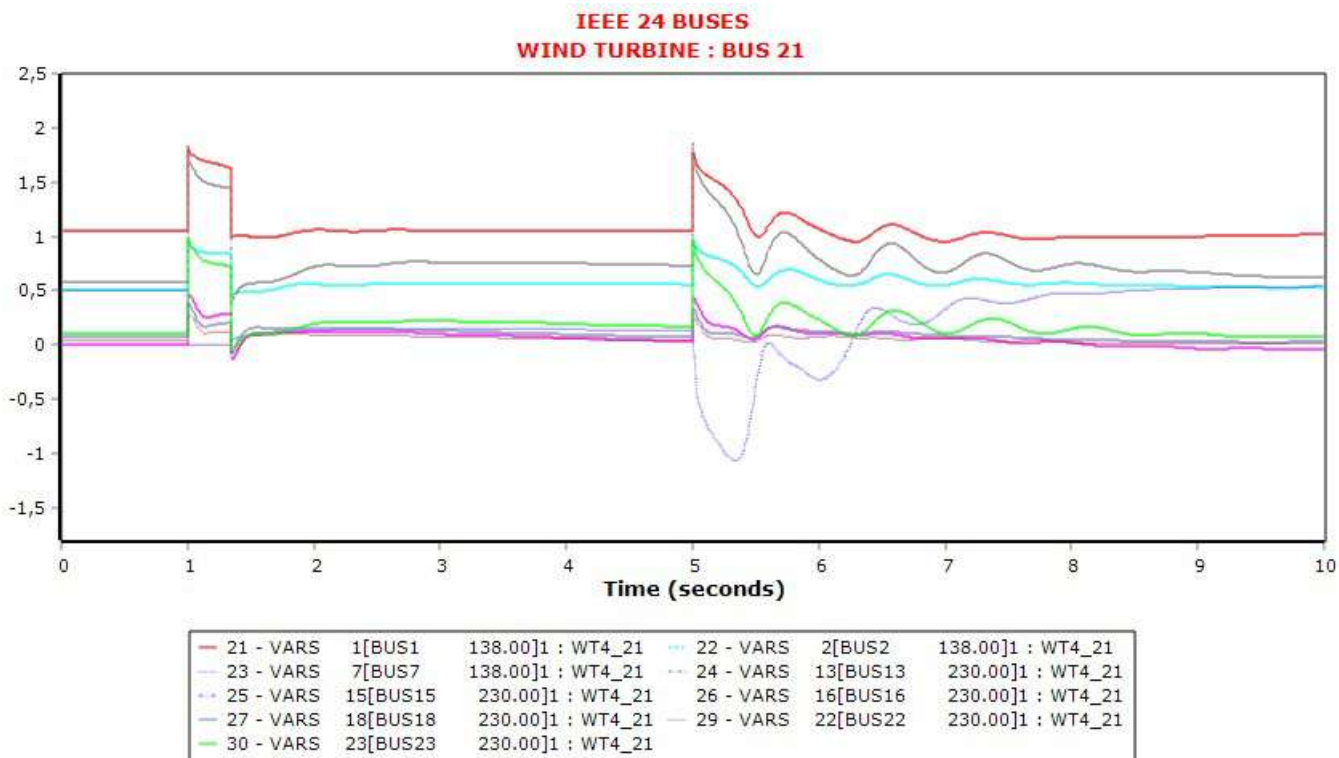
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	t = 1 sec
Clear Fault	t = 1,35 sec
Open Line	t = 1,35 sec
Close Line	t = 5 sec



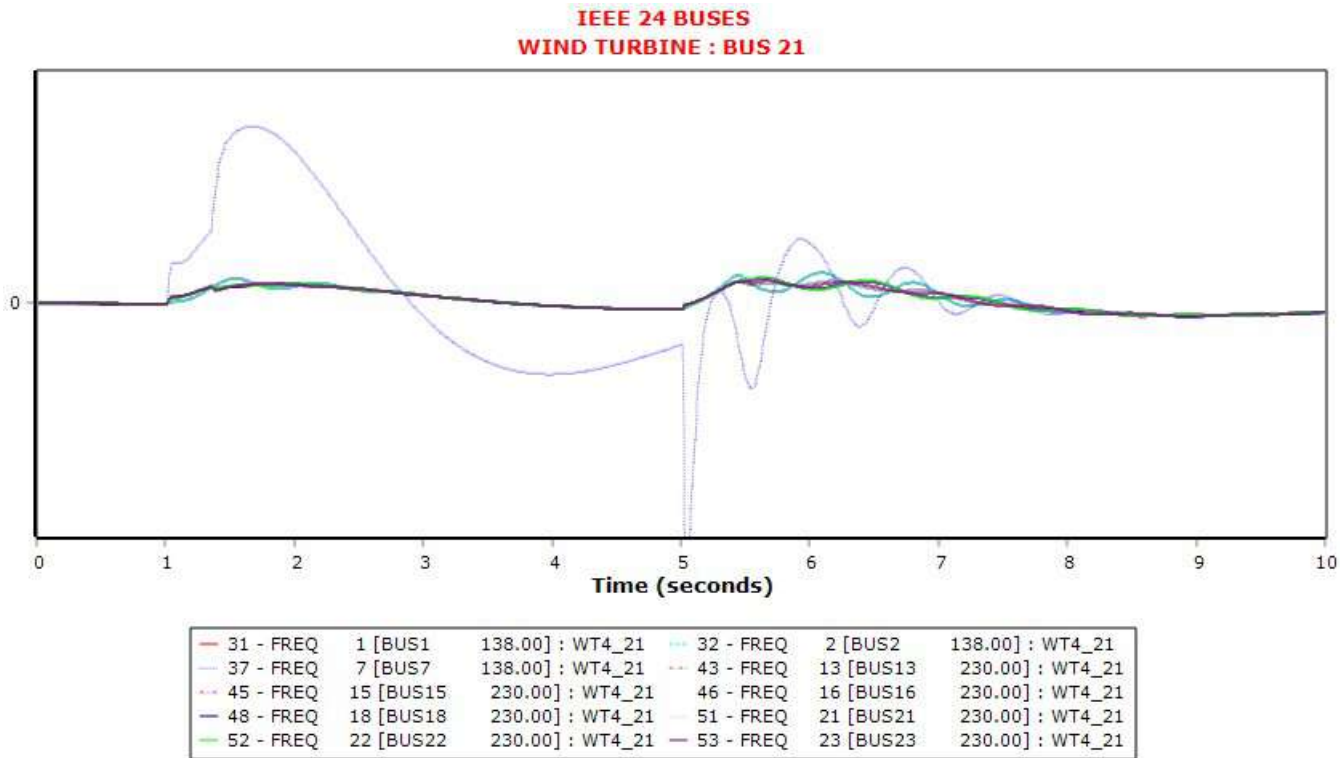
Σχήμα 6.28: Καμπύλες των γωνιών δ των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t = 1,35 sec.



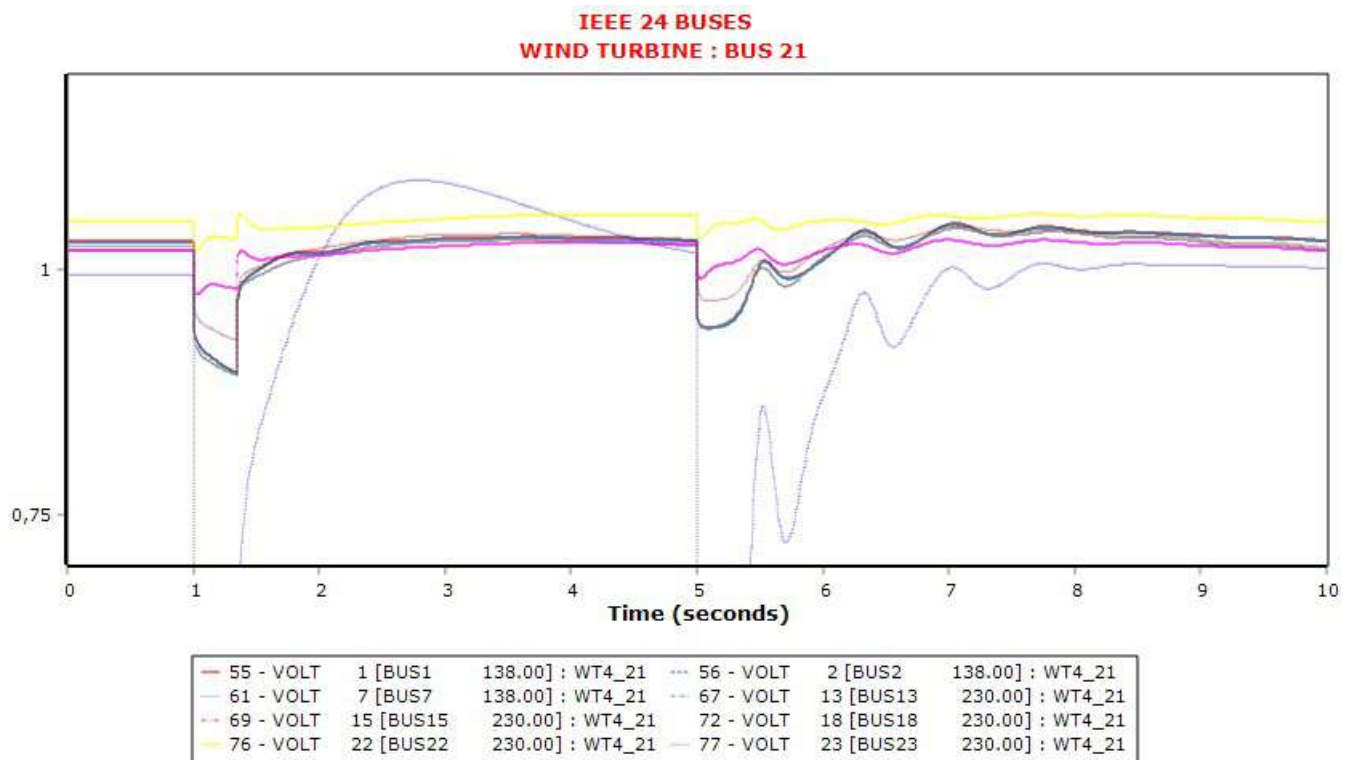
Σχήμα 6.29: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



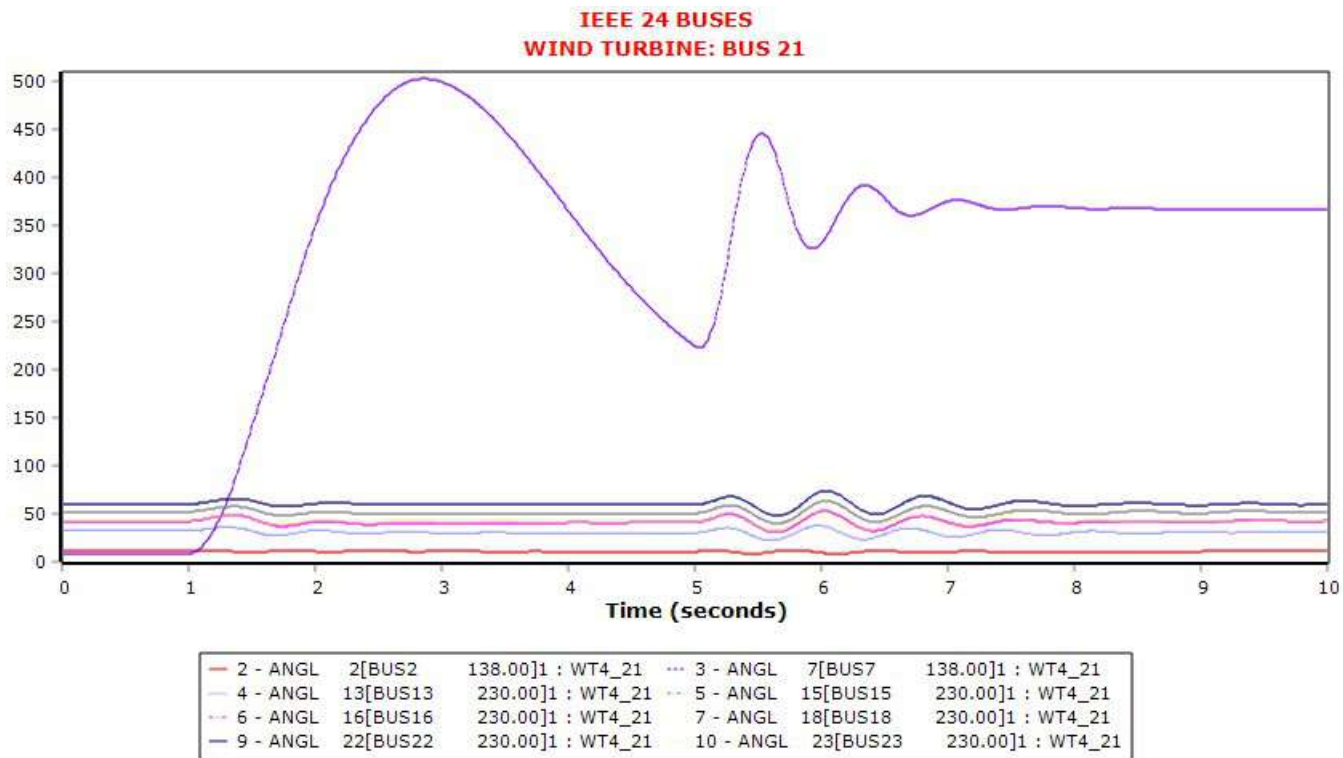
Σχήμα 6.30: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



Σχήμα 6.31: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35\text{sec}$



Σχήμα 6.32: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35\text{ sec}$



Σχήμα 6.33: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,4$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

#### 6.4.2 ΣΕΝΑΡΙΟ Γ2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12

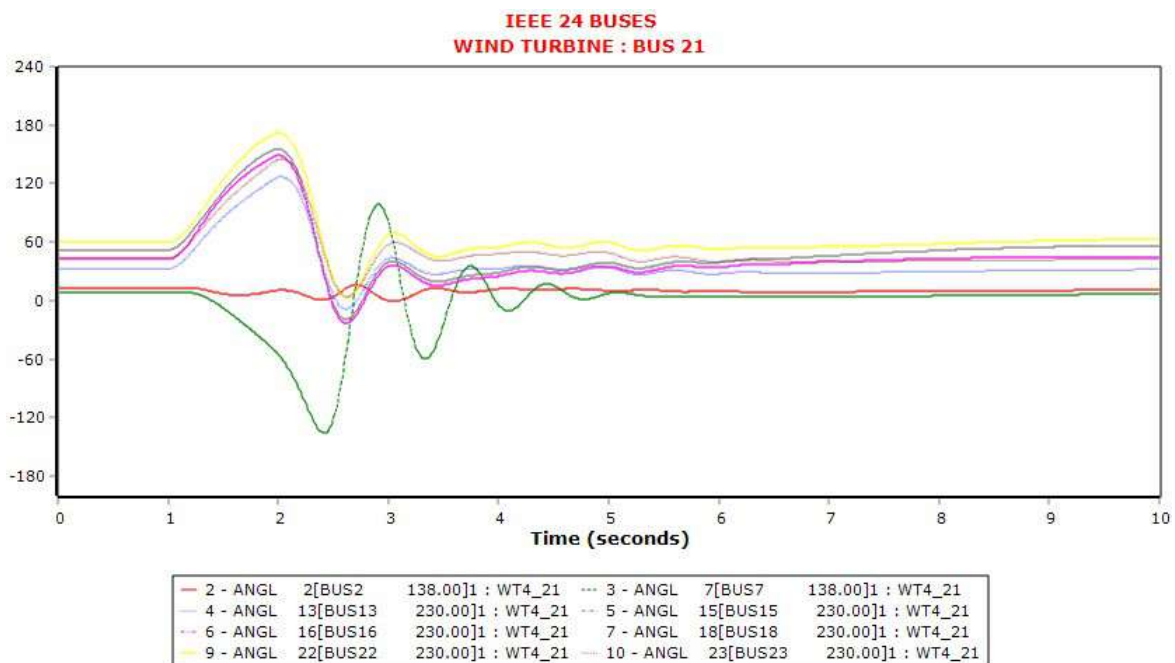
Στον Πίνακα 6.6 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 12 - 10 πλησίον του ζυγού 12. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1$  sec στον ζυγό 12 ο οποίος δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 0,95$  sec, ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = t_1 + t_{critical} = 1,95$  sec να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 12 - 10. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 5$  sec, η γραμμή μεταφοράς 12 - 10 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10$  sec που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

Στο Σχήμα 6.34 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους κατα-

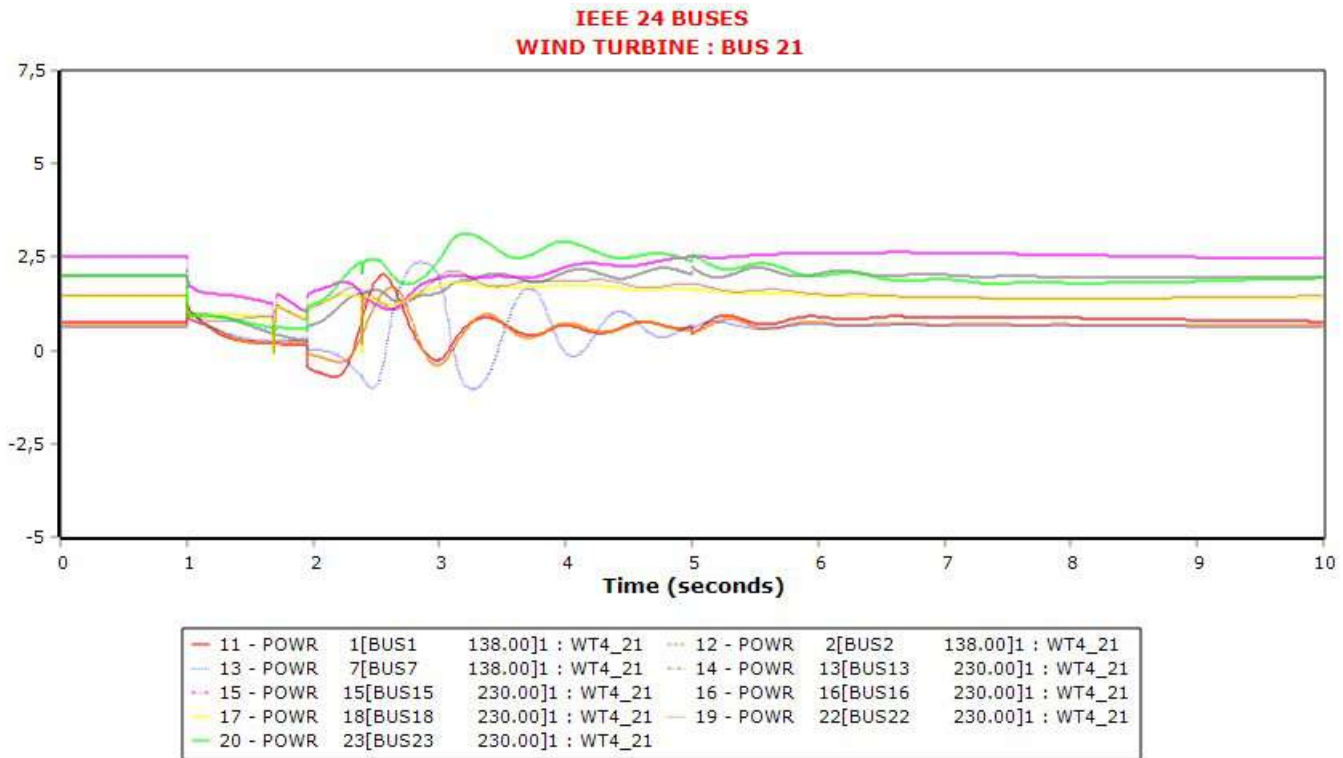
στάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.35 και 6.36 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.37 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών οι οποίες συγκλίνουν, ενώ στο Σχήμα 6.38 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.39 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 2$  sec , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό συμβαίνει μιας και δεν επανέρχονται όλες οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος στην αρχική τους θέση μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.6: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12

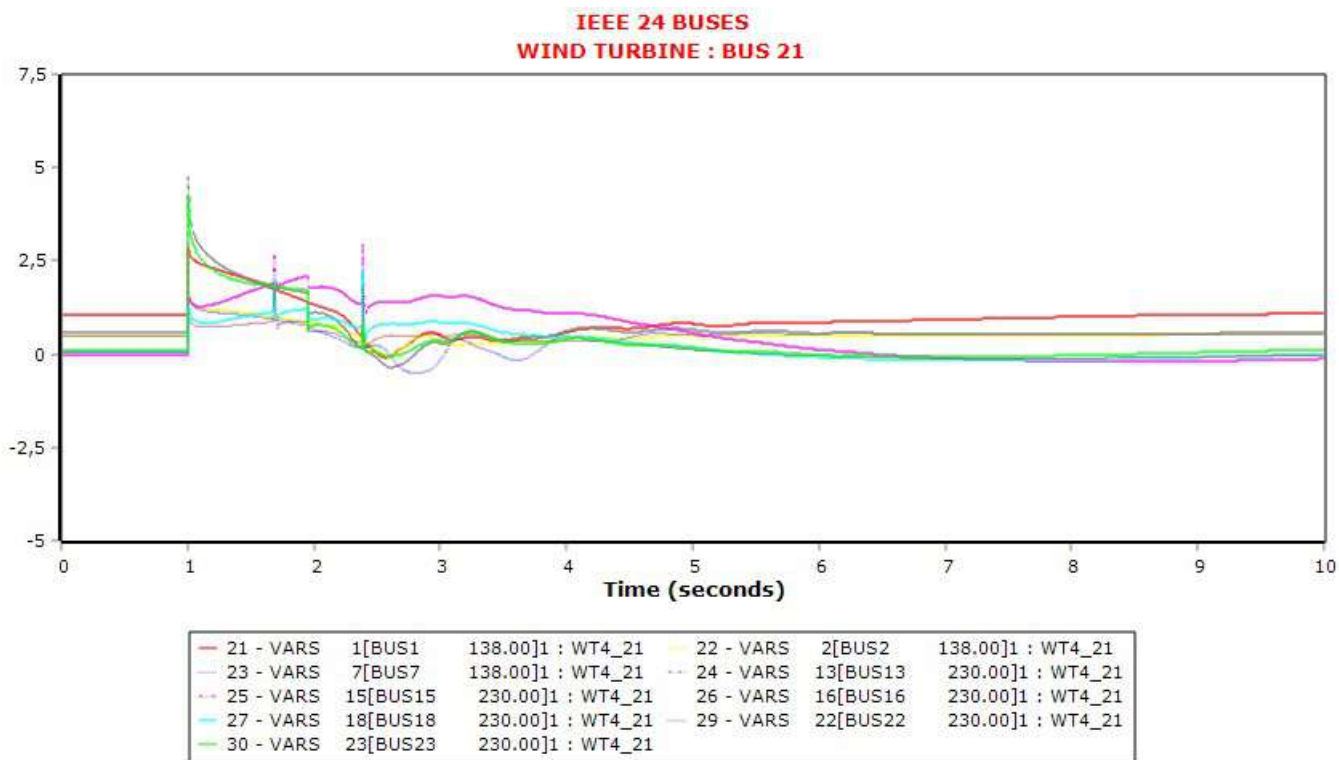
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1$ sec
Clear Fault	$t = 1,95$ sec
Open Line	$t = 1,95$ sec
Close Line	$t = 5$ sec



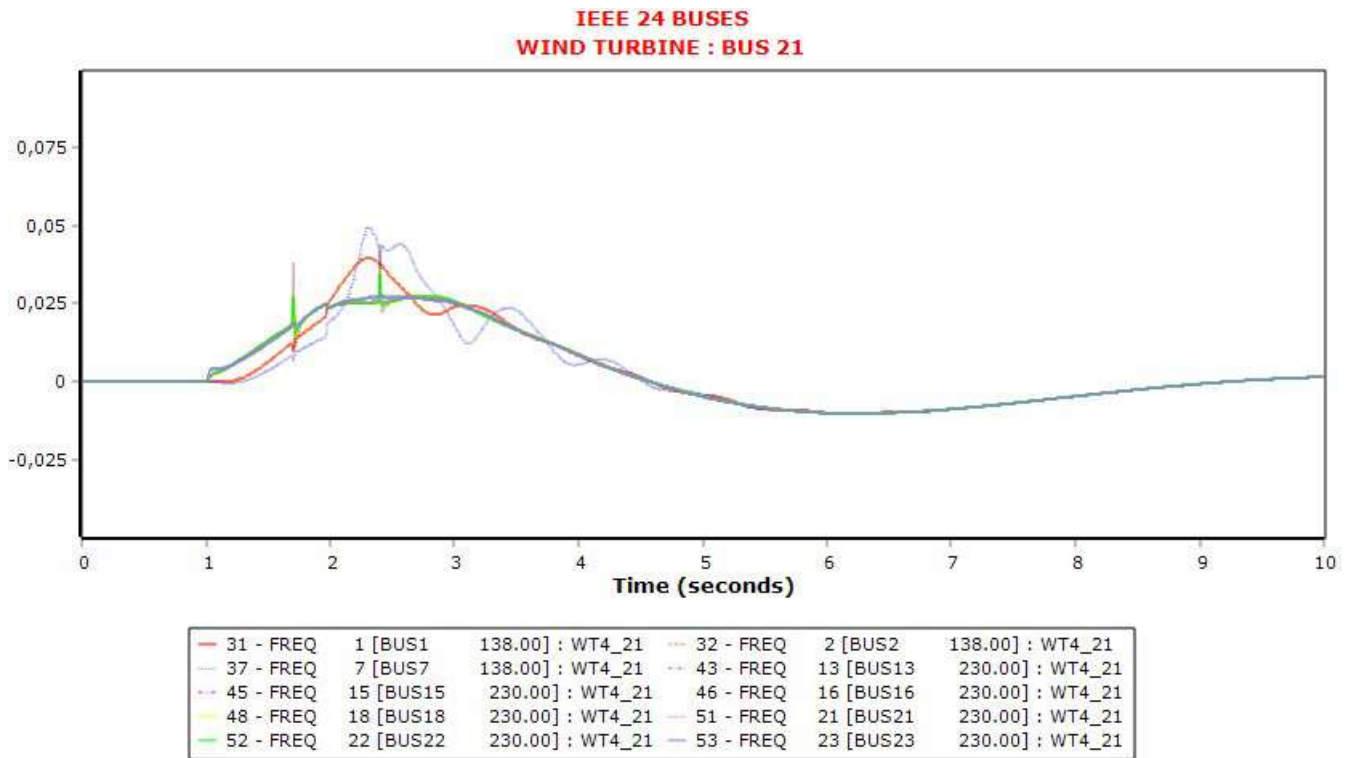
Σχήμα 6.34: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,95$  sec.



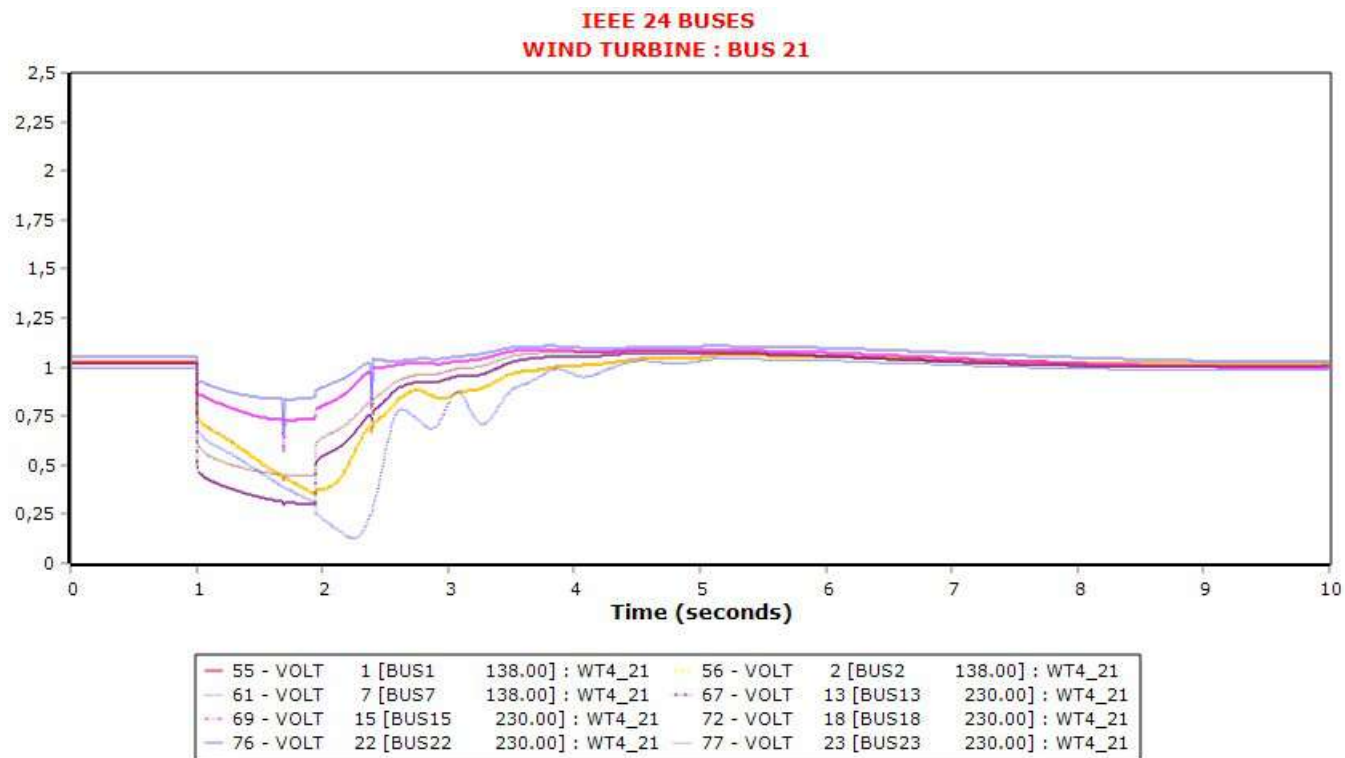
Σχήμα 6.35: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,95 \text{ sec}$



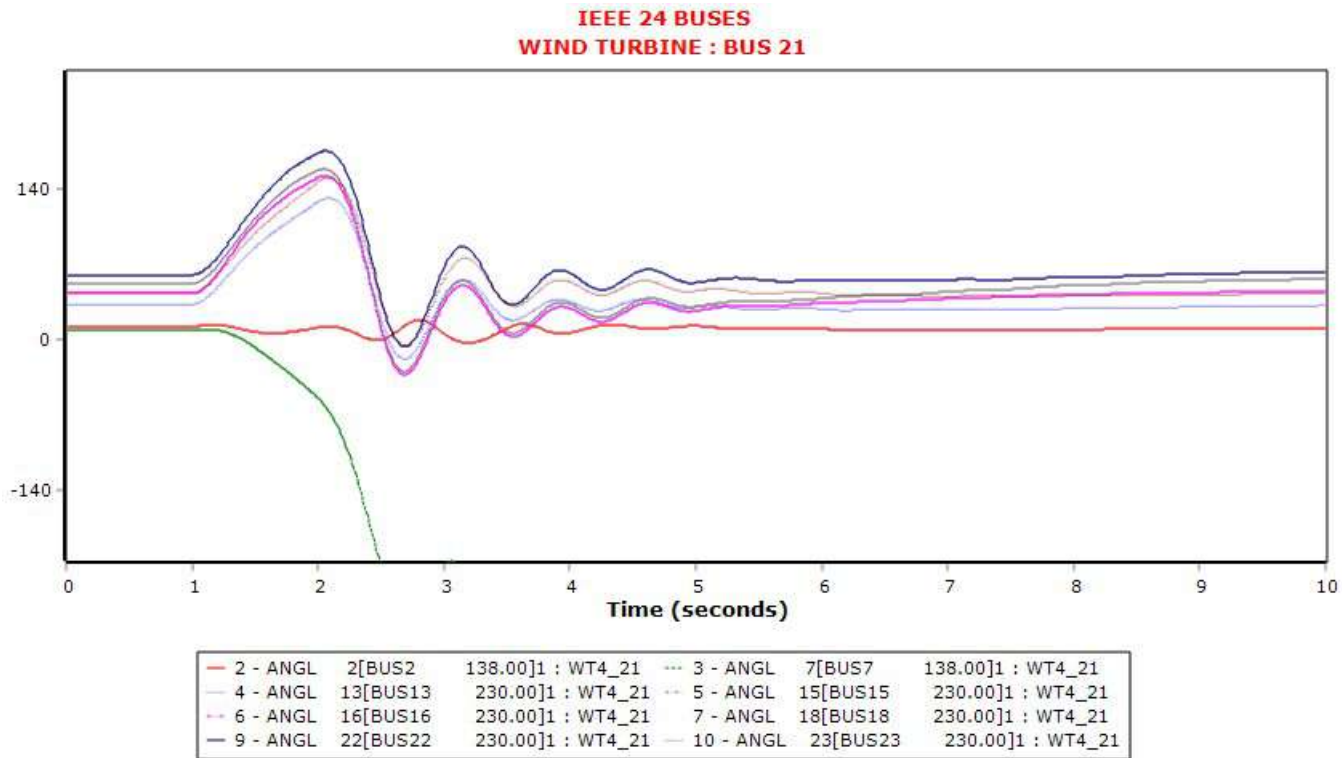
Σχήμα 6.36: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,95 \text{ sec}$



Σχήμα 6.37: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,95$  sec



Σχήμα 6.38: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t= 1,95$  sec



Σχήμα 6.39: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 2$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

## 6.5 Σενάριο Προσομοίωσης Δ

Στο Σενάριο Δ γίνεται μελέτη όταν η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από συνδυασμό συμβατικών γεννητριών και ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα, στους ζυγούς 15 και 21 έχει αντικατασταθεί το 100% της παραγωγής των συμβατικών γεννητριών που υπήρχαν αρχικά από ανεμογεννήτριες τύπου 4. Εξετάζεται η ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την μεταβατική του ευστάθεια κατά την εμφάνιση τριφασικού βραχυκυκλώματος αρχικά στον ζυγό 7 και έπειτα στον ζυγό 12 υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για το κάθε σφάλμα. Ο ζυγός 7 είναι ζυγός που έχει συνδεδεμένη γεννήτρια, ενώ ο ζυγός 12 είναι απομακρυσμένος από γεννήτριες.

### 6.5.1 ΣΕΝΑΡΙΟ Δ1: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 7

Στον Πίνακα 6.7 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 7 - 8 πλησίον του ζυγού 7. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1$  sec στον ζυγό 7 ο οποίος είναι συν-

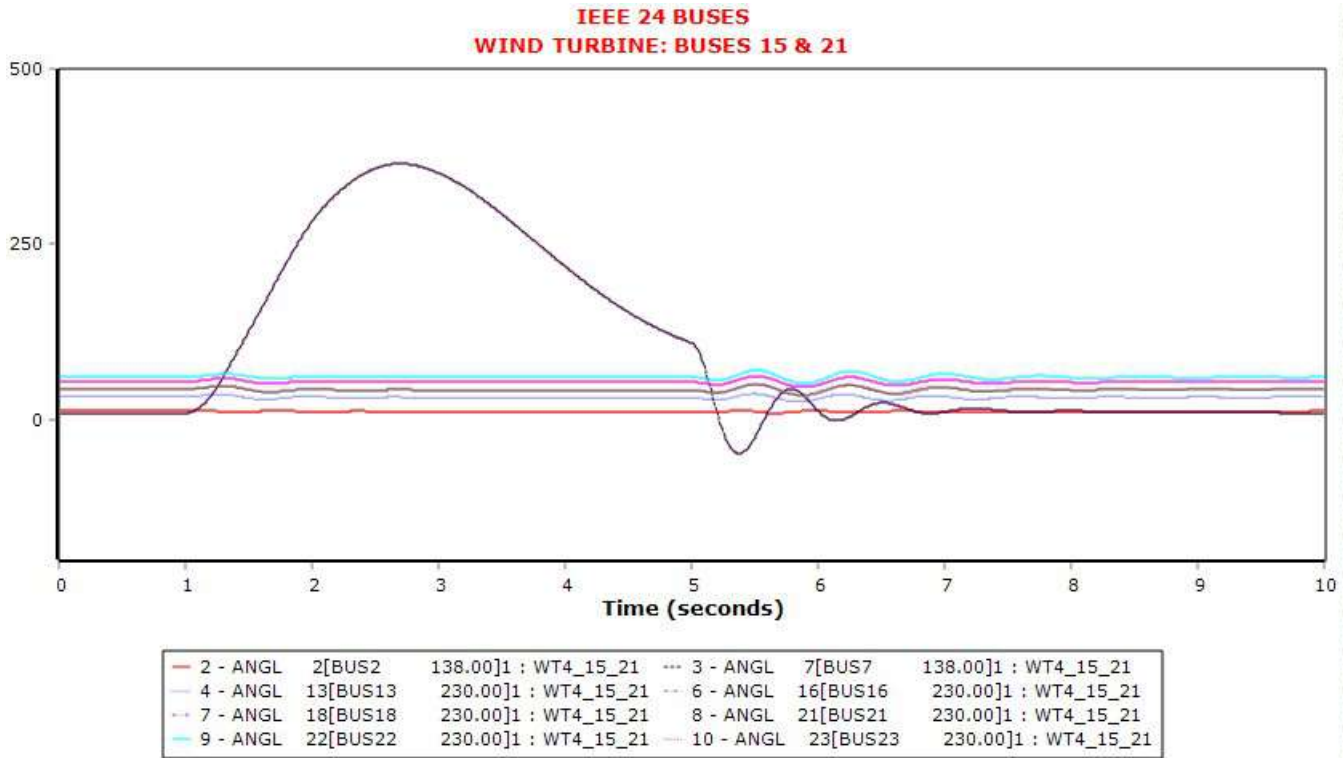


δεδεμένος και με γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 0,35 \text{ sec}$ , ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = 1,35 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 7 - 8. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 5 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 7 - 8 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

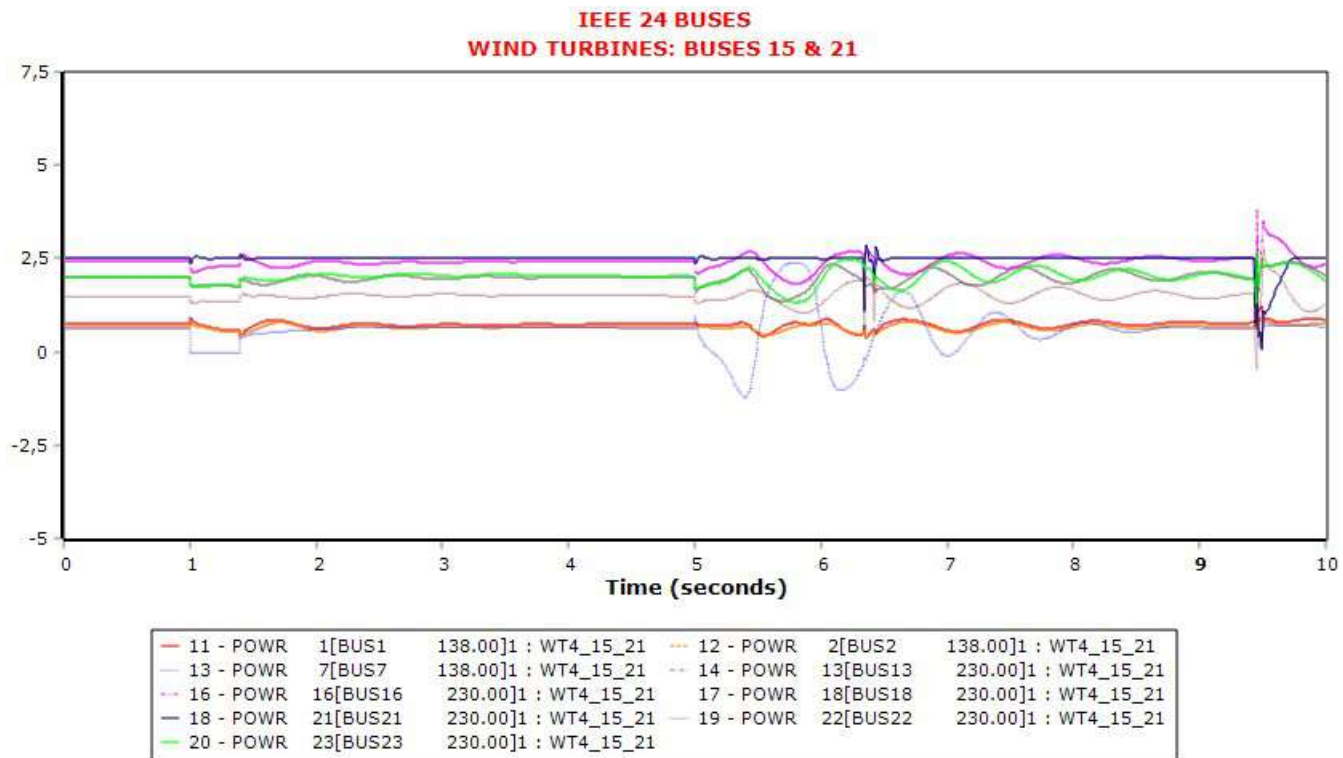
Στο Σχήμα 6.40 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.41 και 6.42 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.43 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών, ενώ στο Σχήμα 6.44 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.45 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 1,4 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό είναι φανερό μιας και η καμπύλη της γωνίας  $\delta$  που αντιστοιχεί στον ζυγό 7 του συστήματος απομακρύνεται από τις υπόλοιπες γεννήτριες μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.7: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 7

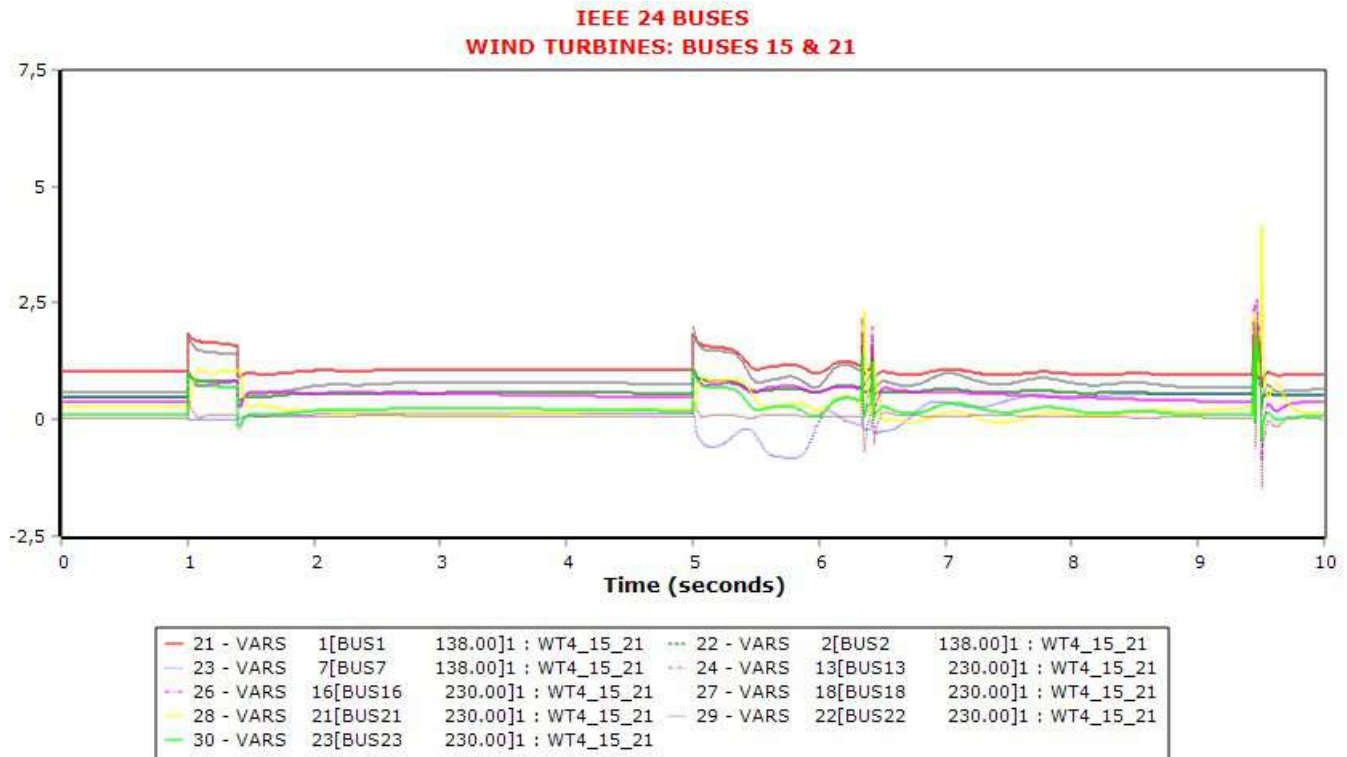
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1 \text{ sec}$
Clear Fault	$t = 1,35 \text{ sec}$
Open Line	$t = 1,35 \text{ sec}$
Close Line	$t = 5 \text{ sec}$



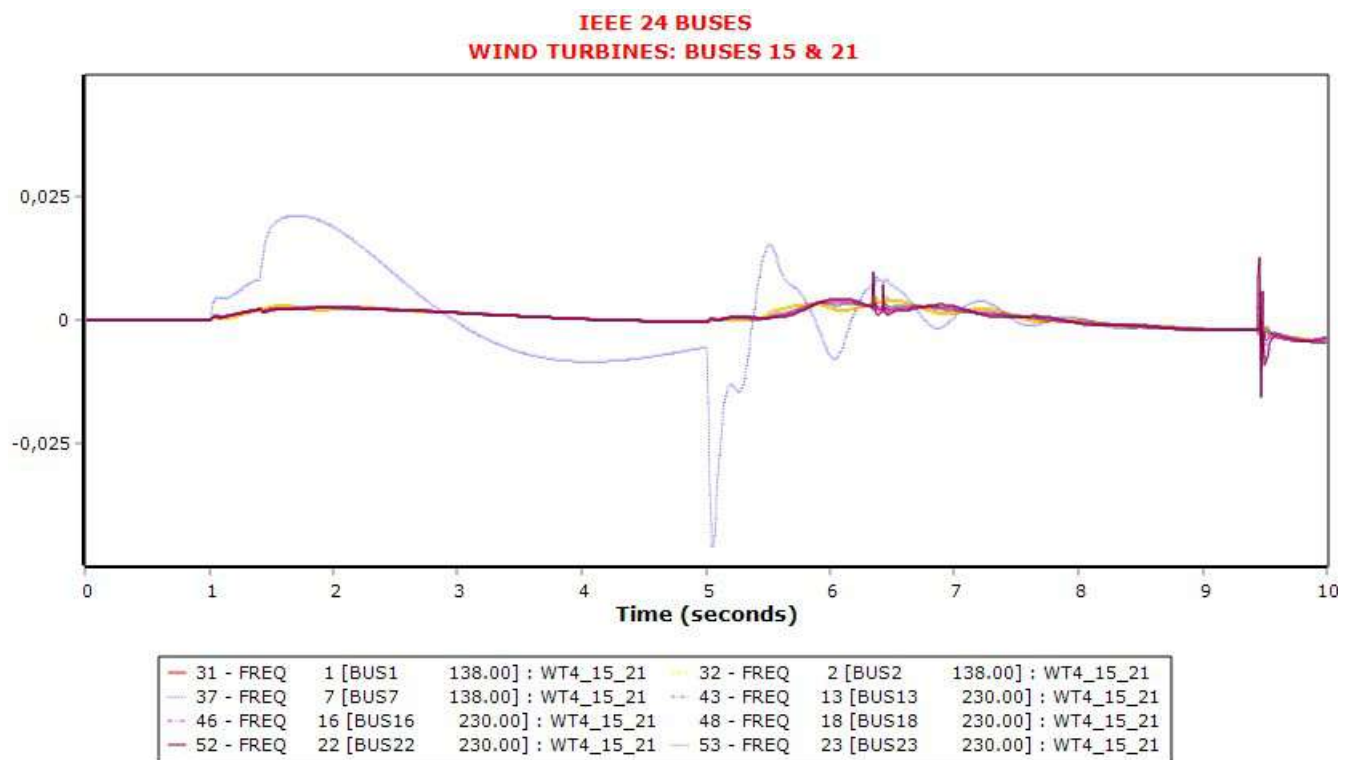
Σχήμα 6.40: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,35$  sec.



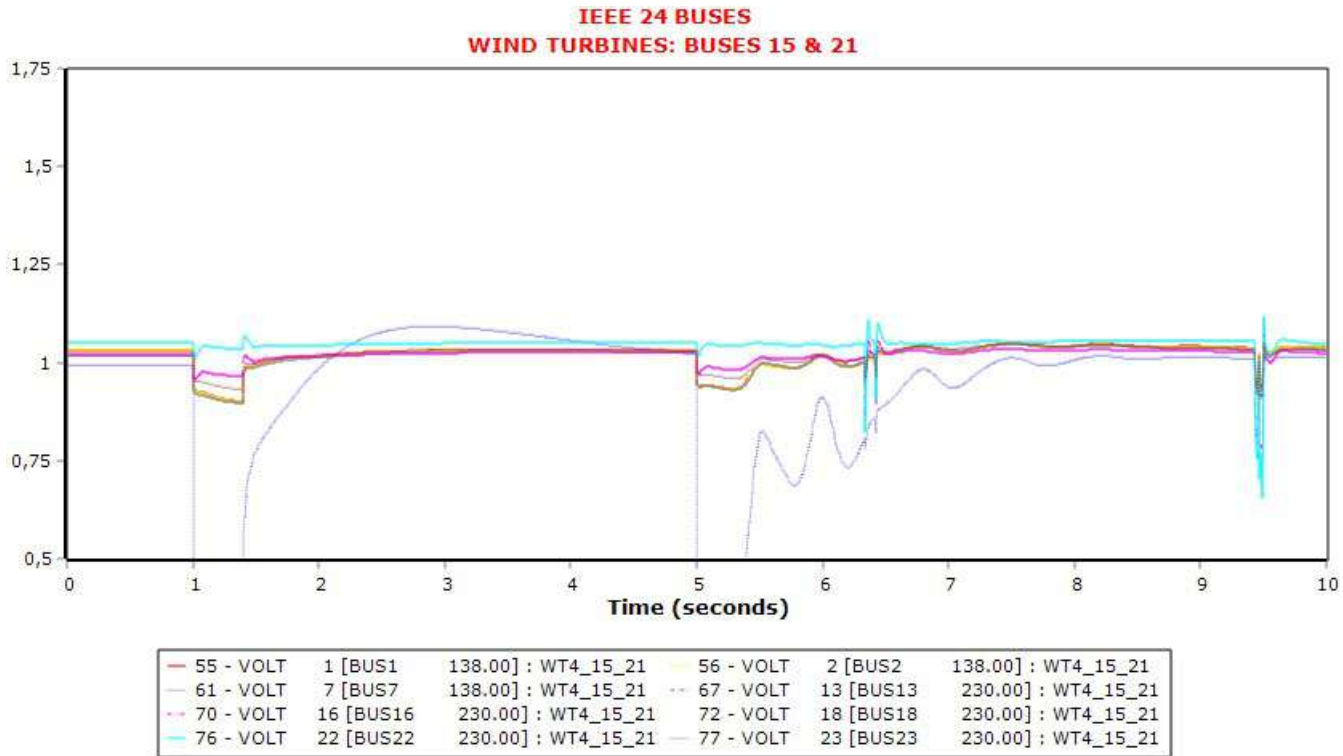
Σχήμα 6.41: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



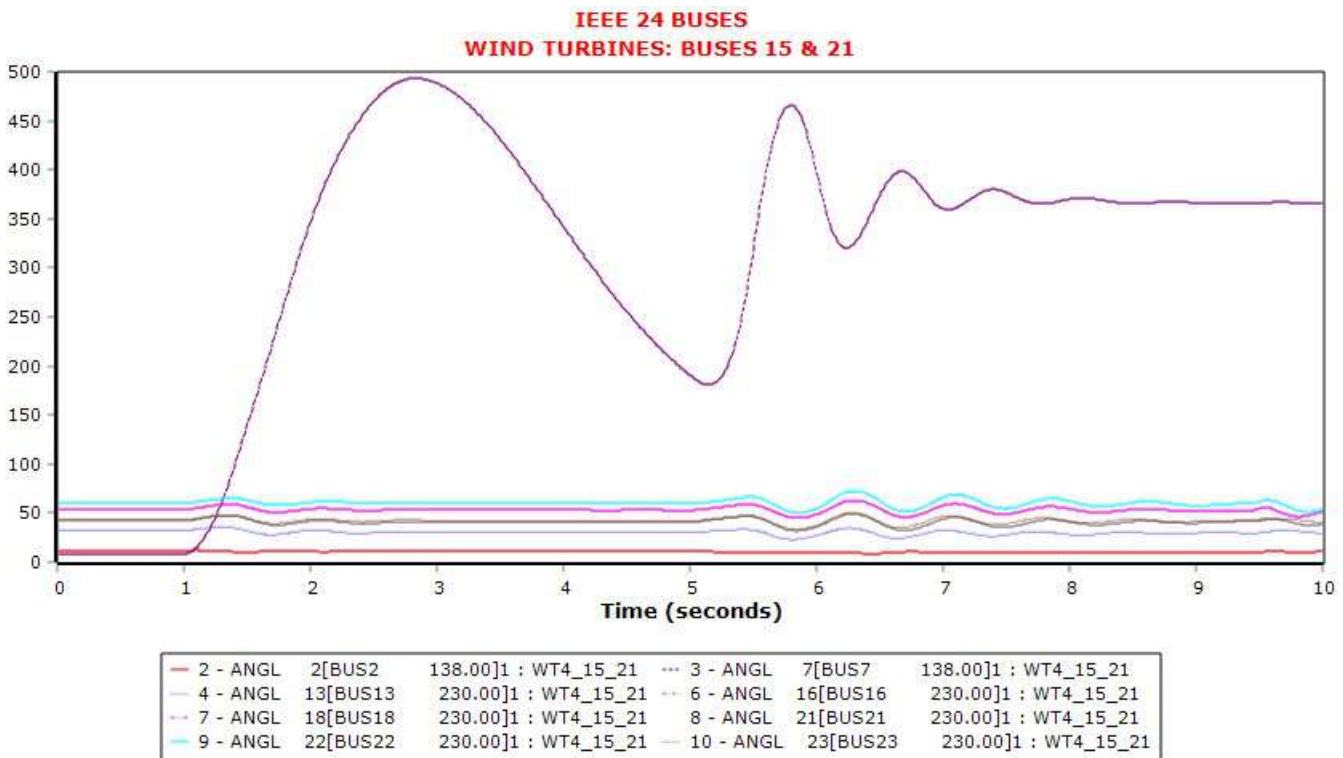
Σχήμα 6.42: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



Σχήμα 6.43: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$ sec



Σχήμα 6.44: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=1,35$  sec



Σχήμα 6.45: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 1,4$  sec που έχει χαθεί η ευστάθεια.

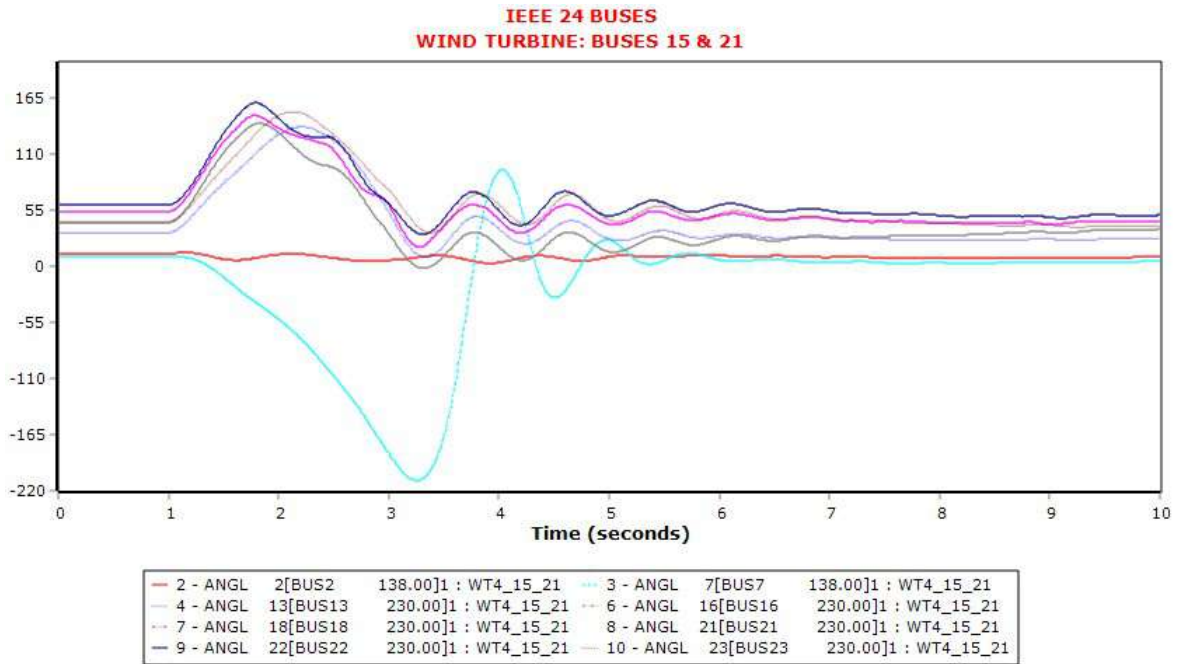
### 6.5.2 ΣΕΝΑΡΙΟ Δ2: Τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 12

Στον Πίνακα 6.8 φαίνεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης μετά την εφαρμογή τριφασικού βραχυκυκλώματος στην γραμμή μεταφοράς 12 - 10 πλησίον του ζυγού 12. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται τριφασικό σφάλμα την χρονική στιγμή  $t = 1 \text{ sec}$  στον ζυγό 12 ο οποίος δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια γεννήτρια. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κρίσιμος χρόνος μετά από μελέτη και προκύπτει ότι  $t_{critical} = 1,95 \text{ sec}$ , ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος. Επόμενο βήμα είναι την χρονική στιγμή  $t = t_1 + t_{critical} = 2,95 \text{ sec}$  να γίνει η εκκαθάριση του σφάλματος ανοίγοντας την γραμμή μεταφοράς 12 - 10. Έπειτα, την χρονική στιγμή  $t = 6 \text{ sec}$ , η γραμμή μεταφοράς 12 - 10 κλείνει, για να συνδεθεί ξανά στο δίκτυο και συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι την χρονική στιγμή  $t = 10 \text{ sec}$  που τελειώνει η προσομοίωση. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος συμβεί μετά τον κρίσιμο χρόνο (για παράδειγμα μετά από 50 msec), τότε η ευστάθεια του συστήματος χάνεται.

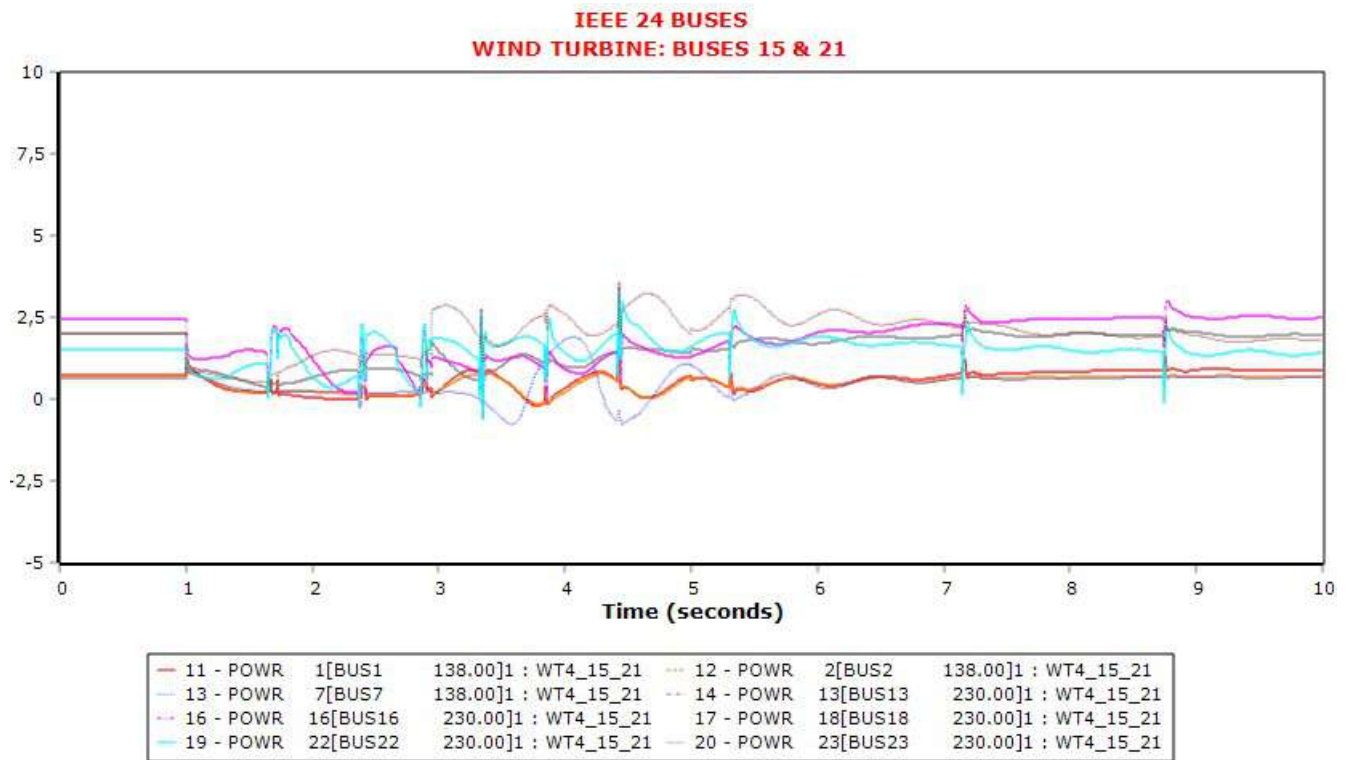
Στο Σχήμα 6.46 απεικονίζονται οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος σε σχέση με το χρόνο και παρατηρείται ότι επανέρχονται στις αρχικές τους καταστάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στα σχήματα 6.47 και 6.48 στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες της πραγματικής και της άεργης ισχύος των γεννητριών του συστήματος αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.49 απεικονίζονται οι καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών οι οποίες συγκλίνουν, ενώ στο Σχήμα 6.50 οι καμπύλες της τάσης των ζυγών των γεννητριών την στιγμή της εκκαθάρισης. Τέλος, το Σχήμα 6.51 καθιστά αντιληπτό ότι για χρόνο  $t = 3 \text{ sec}$ , δηλαδή 50 msec μετά τον χρόνο εκκαθάρισης, η ευστάθεια του συστήματος χάνεται. Αυτό συμβαίνει μιας και δεν επανέρχονται όλες οι καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών του συστήματος στην αρχική τους θέση μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Πίνακας 6.8: Χρόνοι εκκαθάρισης σφάλματος στον ζυγό 12

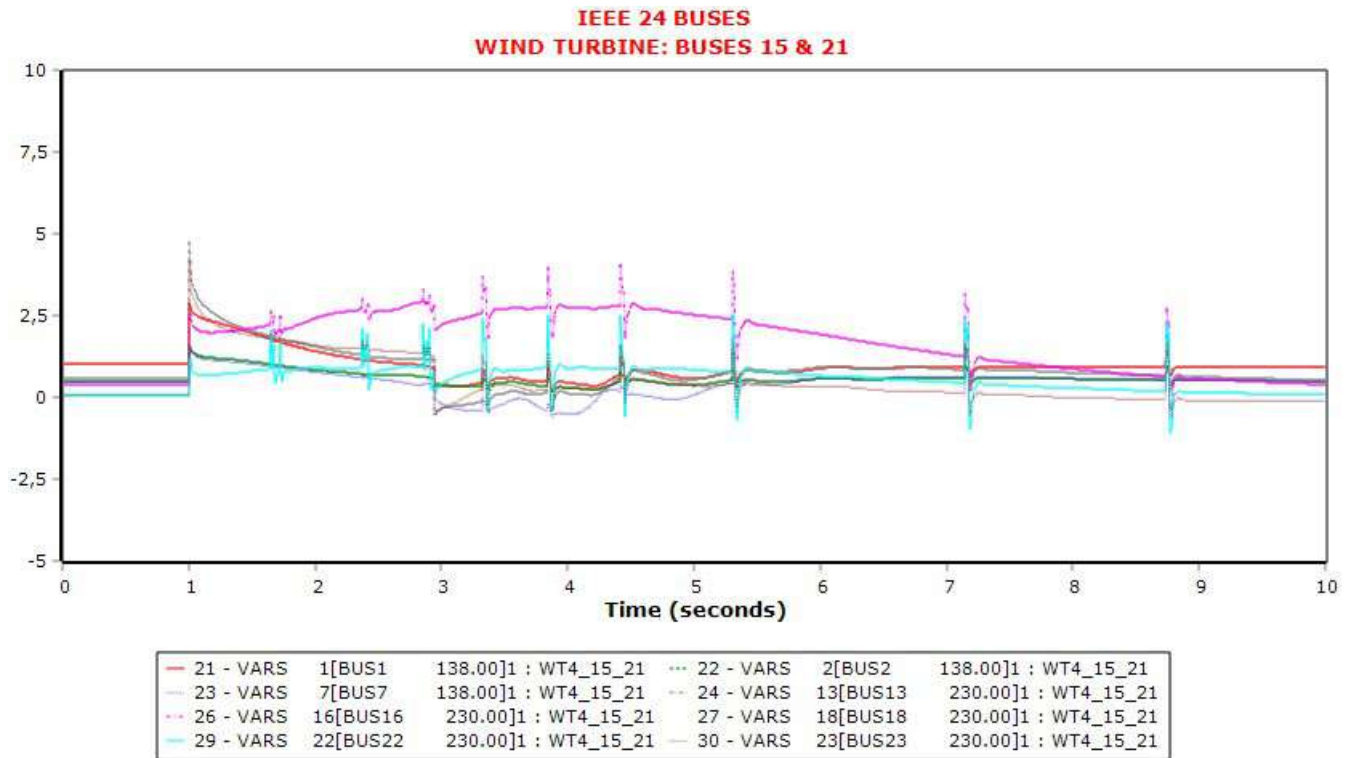
Διαδικασία	Χρονική Στιγμή
Apply Fault	$t = 1 \text{ sec}$
Clear Fault	$t = 2,95 \text{ sec}$
Open Line	$t = 2,95 \text{ sec}$
Close Line	$t = 6 \text{ sec}$



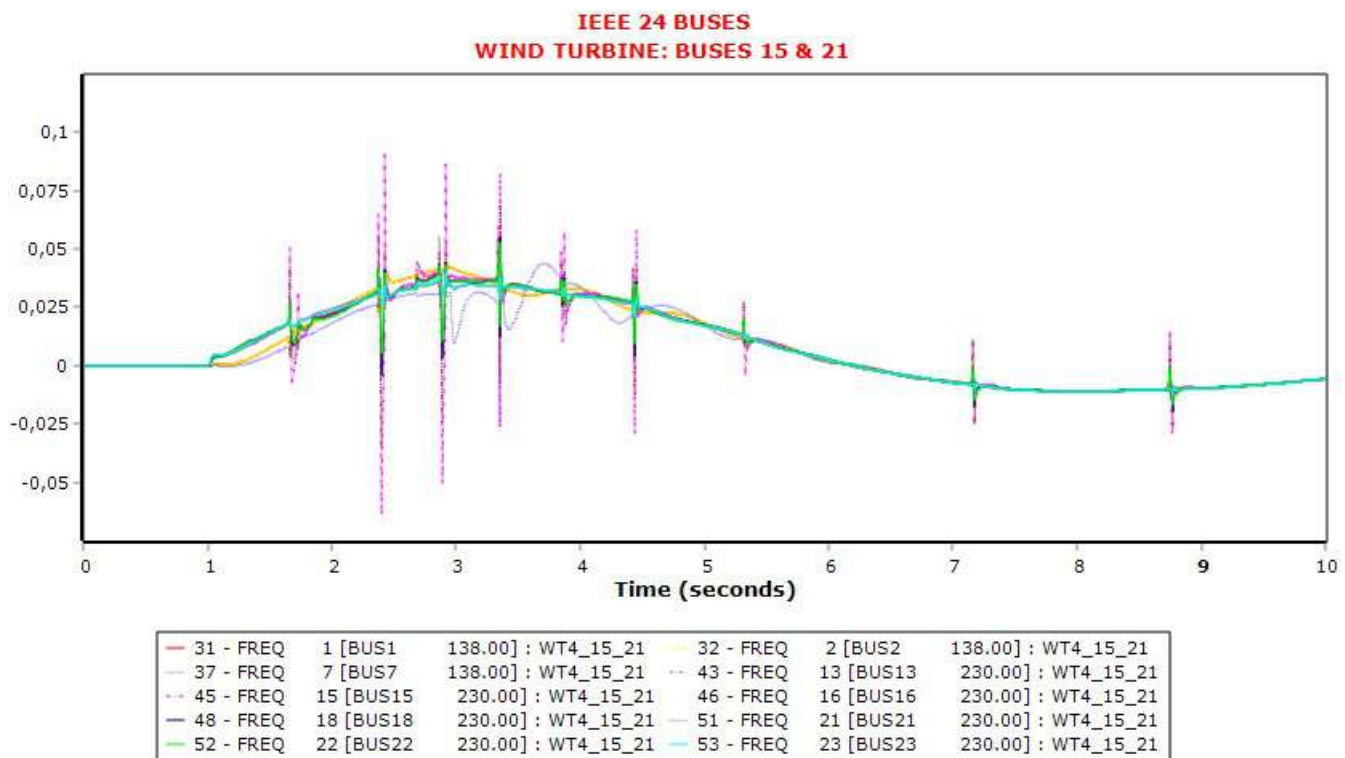
Σχήμα 6.46: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 2,95$  sec.



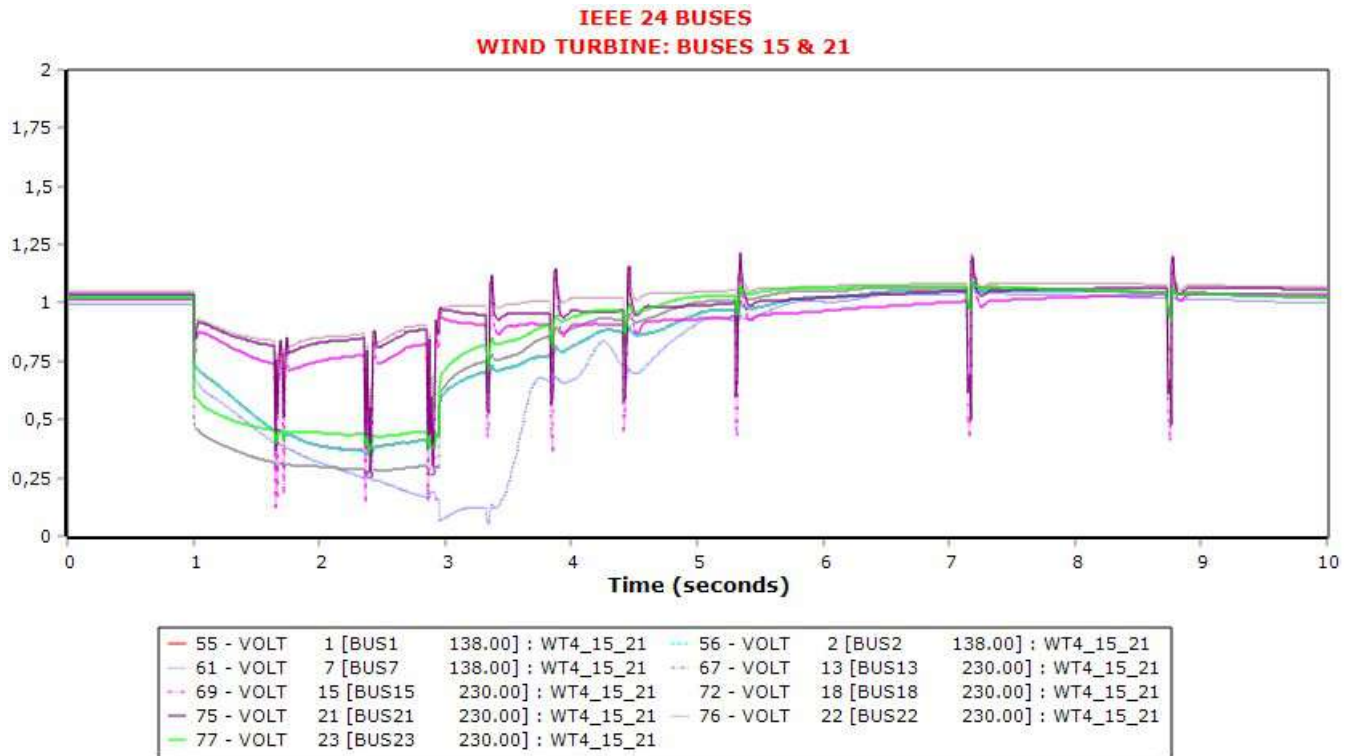
Σχήμα 6.47: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=2,95$  sec



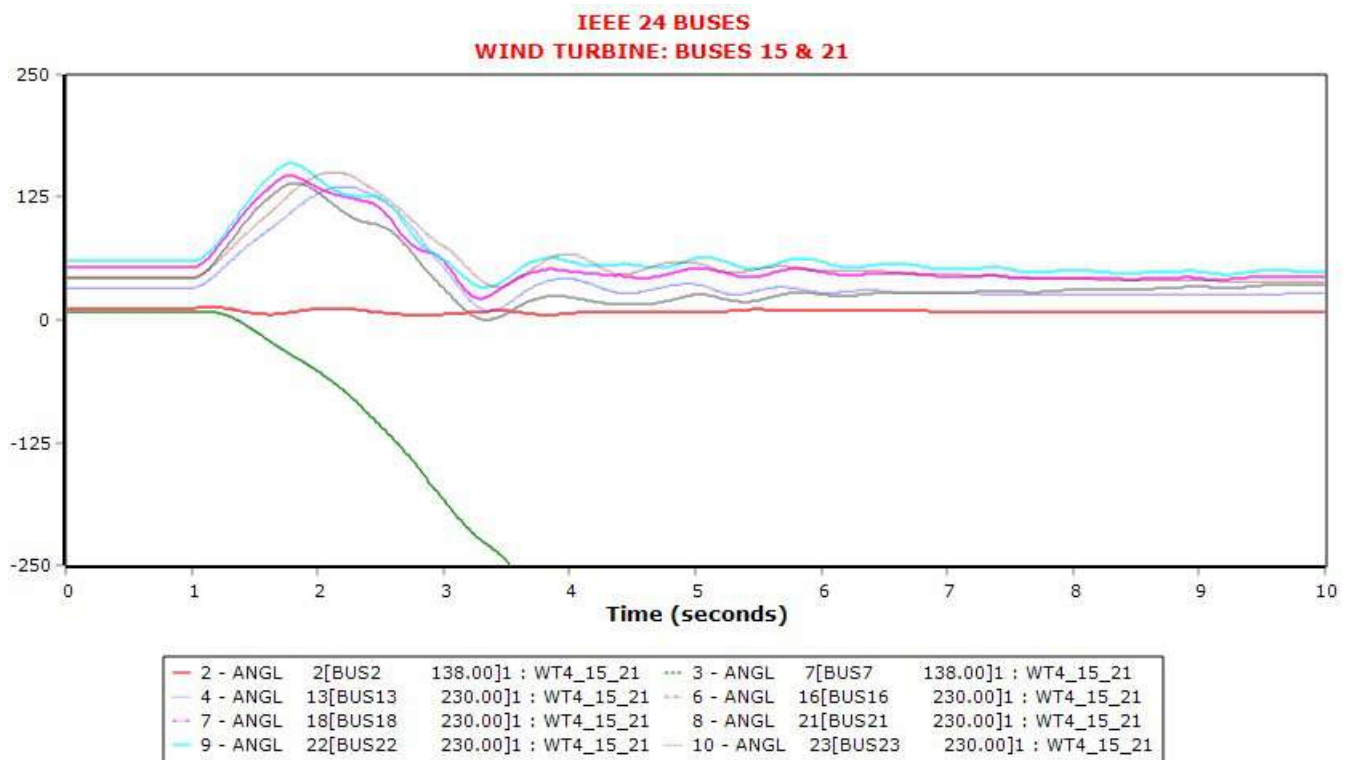
Σχήμα 6.48: Καμπύλες της άεργης ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=2,95$  sec



Σχήμα 6.49: Καμπύλες των συχνοτήτων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t=2,95$  sec



Σχήμα 6.50: Καμπύλες των τάσεων των ζυγών των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 2,95 \text{ sec}$



Σχήμα 6.51: Καμπύλες των γωνιών  $\delta$  των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή  $t = 3 \text{ sec}$  που έχει χαθεί η ευστάθεια.



## 6.6 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 6.9 παραθέτονται όλοι οι κρίσιμοι χρόνοι οι οποίοι έχουν εντοπιστεί από τις παραπάνω μελέτες, έτσι ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρήσει την ευστάθειά του μετά την εφαρμογή στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος.

Σενάρια	Γραμμή 7-8	Γραμμή 12-10
Σενάριο Α	$t = 0,3 \text{ sec}$	$t = 5,2 \text{ sec}$
Σενάριο Β	$t = 0,35 \text{ sec}$	$t = 3,9 \text{ sec}$
Σενάριο Γ	$t = 0,35 \text{ sec}$	$t = 0,95 \text{ sec}$
Σενάριο Δ	$t = 0,35 \text{ sec}$	$t = 1,95 \text{ sec}$

Πίνακας 6.9: Συνολικοί κρίσιμοι χρόνοι

Αυτό που παρατηρούμε είναι πως το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει την δυνατότητα να διατηρήσει την ευστάθειά του και να παραμείνει αξιόπιστο, είτε είναι συνδεδεμένες σ' αυτό αποκλειστικά συμβατικές γεννήτριες, είτε συνδυασμός γεννητριών και ανεμογεννητριών.



## Κεφάλαιο 7

### Συμπεράσματα

Ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν στόχο να διασφαλίζει την απρόσκοπτη και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης. Για να συμβεί αυτό, μετατρέπεται η ενέργεια από τις ήδη υπάρχουσες μορφές της φύσης σε ηλεκτρική. Τις τελευταίες δεκαετίες η ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο. Πολλές χώρες στον κόσμο προγραμματίζουν να καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ που παράγεται αποκλειστικά από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Αυτό το γεγονός έχει αξιοσημείωτο θετικό αντίκτυπο τόσο στο περιβάλλον όσο και στην κοινωνία. Βασικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ότι η χρήση τους είναι φιλικότερη ως προς το περιβάλλον σε σχέση με άλλους σταθμούς που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα και επίσης οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ανεξάντλητες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσομοίωση ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με 24 ζυγούς το οποίο αρχικά λειτουργούσε με συμβατικές γεννήτριες. Στην συνέχεια έγινε συνδυασμός παραγωγής από συμβατικές γεννήτριες και μια ανεμογεννήτρια και το τέλος αντικαταστάθηκε το 30% της συνολικής παραγωγής από δύο ανεμογεννήτριες. Πιο αναλυτικά, εφαρμόντας στερεό τριφασικό σφάλμα σε συγκεκριμένους ζυγούς στο δίκτυο παρατηρήθηκαν αλλαγές στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης των σφαλμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως διατηρήθηκε η μεταβατική ευστάθεια του δικτύου. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως η ένταξη των ανεμογεννητριών επέφερε αλλαγές στην ευστάθεια του δικτύου.

Η ενσωμάτωση λοιπόν των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε ένα δίκτυο δεν επιφέρει κάποια αρνητική συνέπεια στην ευστάθεια του δικτύου όπως φαίνεται και από την παρούσα διπλωματική. Γι' αυτό τον λόγο αναπτύσσεται συνεχώς η αιολική ενέργεια και εντάσσονται ολοένα και περισσότερο ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρολ' αυτά, για να αποτελέσουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποκλειστικό μέσο παραγωγής ενέργειας απαιτούνται πολλές αλλαγές και μετασχηματισμοί στο τρέχον δίκτυο, γεγονός που αποτελεί στόχο πολλών χωρών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ένα σύστημα, τόσο μεγαλύτερα είναι τα ωφέλη ως προς το περιβάλλον.

# Βιβλιογραφία

- [1] Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, «Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)» ΦΕΚ 4893 τεύχος δεύτερο, 31.12.2019.
- [2] Wind europe wind energy in europe statistics 2020, url: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/>.
- [3] Olukayode Afolabi, Warsame Ali, P. Cofie, John Fuller, Pamela Obiomon, and Emmanuel Kolawole. Analysis of the load flow problem in power system planning studies. *Energy and Power Engineering*, 07:509–523, 01 2015.
- [4] Μαλατέστας Παντελής Β. *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [5] Βοβός Νικόλαος Α. Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, 2008.
- [6] Βοβός Νικόλαος Α. Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β. *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008.
- [7] John J. Grainger, William D. Stevenson, and Gary W. Chang. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education, 2016.
- [8] Βοβός Νικόλαος Α. Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β. *Έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη. 2008.
- [9] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal. Definition and classification of power system stability ieeecigre joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3):1387–1401, 2004.

- 
- [10] Kundur Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Inc., 1994.
- [11] Ramazan Bayindir, Sevki Demirbas, Erdal Irmak, Umut Cetinkaya, Ahmet Ova, and Merden Yesil. Effects of renewable energy sources on the power system. pages 388–393, 2016.
- [12] Jozef Dudiak and Michal Kolcun. Integration of renewable energy sources to the power system. pages 148–151, 2014.
- [13] Yuan Yang Dennis Y.C. Leung. Wind energy development and its environmental impact: A review. pages 1031–1039, 2011.
- [14] A. Ellis, E. Muljadi, J. Sanchez-Gasca, and Y. Kazachkov. Generic models for simulation of wind power plants in bulk system planning studies. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–8, 2011.
- [15] *ABB. Technical Application Papers No.13, "Wind power plants". Copyright 2011 ABB.*
- [16] A. Honrubia-Escribano, E. Gómez-Lázaro, J. Fortmann, P. Sørensen, and S. Martinez-Martinez. Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81:1939–1952, 2018.
- [17] Xiaodong Liang. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2):855–866, 2017.