



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Λαμπέρης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Ιούνιος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Λαμπέρης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Ιούνιος 2022



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

**TRANSIENT STABILITY OF POWER ELECTRICAL
SYSTEM WITH THE INTEGRATION OF RENEWABLE
ENERGY SOYRCES**

Diploma Thesis

George Lamperis

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

June 2022

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 Μη-
χανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Σπυρίδων Λουτρίδης**

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα, ως επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας και ακόμα περισσότερο για την συνολική του προσφορά τόσο κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής όσο και κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Μέσα από τις συναντήσεις μας με οδηγούσε πάντα προς την σωστή κατεύθυνση δίνοντας μου συμβουλές και πέραν των διδακτικών σκοπών. Για αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς το πρόσωπό του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά την κυρία Ασπασία Δασκαλοπούλου και τον κύριο Σπυρίδωνα Λουτρίδη που δέκτηκαν, με τα χαράς, να αποτελέσουν τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής για την αξιολόγηση της διπλωματικής μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τον σεβασμό και την ευγνωμοσύνη μου στην οικογενειά μου και στους φίλους μου, για την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Ο Δηλών

Γεώργιος Λαμπέρης

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γεώργιος Λαμπέρης

Περίληψη

Η σπουδαιότητα της ανακάλυψης της ηλεκτρικής ενέργειας αποτέλεσε εναρκτήριο έναυσμα για την ανάπτυξη μιας κοινωνίας και την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου της. Η άμεση παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε είδος καταναλωτή οδήγησε στην βιομηχανική και τεχνολογική επανάσταση σε παγκόσμια κλίμακα. Σε ένα σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο ο στόχος επικεντρώνεται στην ποιοτική, αξιόπιστη και οικονομική παροχή ενέργειας ελαχιστοποιώντας τις απώλειες που μπορεί να εμφανιστούν. Με το πέρας των χρόνων οι επιπτώσεις των συμβατικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο φυσικό περιβάλλον, μέσω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και την παράλληλη αύξηση των τιμών στα καύσιμα, έχει στρέψει το ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές θεωρείται η αιολική ενέργεια. Η άμεση εκμετάλλευσή της μέσω των ανεμογεννητριών και κατά επέκταση των αιολικών πάρκων, ώθησε την επιστημονική κοινότητα και ιδιαίτερα τους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς στην πραγματοποίηση διάφορων μελετών για την ομαλή ένταξή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός δικτύου 39 ζυγών της Νέας Αγγλίας, όταν υπόκειται σε διαταραχές. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας και η αξιοπιστία του συστήματος όταν σε αυτό εμφανίζονται τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω του λογισμικού PowerWorld Simulator. Οι προσομοιώσεις διενεργούνται τόσο όταν η παραγωγή ενέργειας προέρχεται εξ ολοκλήρου από συμβατικές πηγές όσο και όταν ένα μέρος αυτής αντικαθίσταται από χρήση ανεμογεννητριών. Επιπλέον προσδιορίζεται και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης των σφαλμάτων που αποτελεί βασικό κριτήριο ρύθμισης των ηλεκτρονόμων προστασίας. Τέλος, γίνεται συνοπτική περιγραφή των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση των ωφελειών από την ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών.

Diploma Thesis

TRANSIENT STABILITY OF POWER ELECTRICAL SYSTEM WITH THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOYRCES

George Lamperis

Abstract

The importance of the discovery of electricity is a starting point for the development of a society and the improvement of its standard of living. The direct production, transmission and distribution of electricity to every type of consumer led to the industrial and technological revolution on a global scale. In a modern electricity grid, the goal is to provide quality, reliable and economical energy supply, minimizing the losses that may occur. Over the years, the impact of conventional sources of electricity on the natural environment, through the emission of greenhouse gases and the parallel increase in fuel prices, has turned the interest to the use of renewable energy sources. One of the most common forms is considered to be wind energy. Its immediate exploitation through wind turbines and by extension of wind farms pushed the scientific community and especially the Electrical Engineers to carry out various studies for their smooth integration into the electricity network. In this dissertation, the study focuses on the analysis of the behavior of a 39 bus network in England, when subject to disturbances. More specifically, the maintenance of the transient stability and the reliability of the system are studied when three-phase and one-phase short circuits appear in it through the PowerWorld Simulator software. The simulations are performed both when the power generation comes entirely from conventional sources and when part of it is replaced by the use of wind turbines. In addition, the critical clearing time of the faults that is a key criterion for regulating protection relays. Finally, a brief description of the results and evaluation of the benefits from the integration of wind turbines is made.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xii
Abstract	xiv
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος σχημάτων	xix
Κατάλογος πινάκων	xxxii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή	1
1.2 Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	2
1.3 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	5
1.4 Μελλοντικές τάσεις	7
1.5 Οργάνωση του τόμου	8
2 Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	9
2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου	9
2.1.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου	12
2.1.2 Μέθοδος Gauss-Seidel (G-S)	14
2.1.3 Μέθοδος Newton-Raphson (N-R)	15
3 Ανάλυση Σφαλμάτων Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	17
3.1 Τριφασικά συμμετρικά βραχυκυκλώματα	19
3.1.1 Θεώρημα Thevenin και Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)	20

3.2	Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα	21
3.2.1	Συμμετρικές συνιστώσες	21
3.2.2	Μονοφασικό ως προς την γη βραχυκύκλωμα-SLG	26
3.2.3	Διφασικό Βραχυκύκλωμα - LL	27
3.2.4	Διφασικό ως προς τη γη βραχυκύκλωμα - DLG	28
4	Ανάλυση Ευστάθειας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	31
4.1	Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης	33
4.1.1	Εξίσωση ροής ισχύος και γωνίας	33
4.2	Δυναμική ευστάθεια	35
4.3	Ευστάθεια γωνίας δρομέα	35
4.4	Ευστάθεια τάσης	35
4.5	Ευστάθεια συχνότητας	36
4.6	Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης	36
4.6.1	Εξίσωση ταλάντωσης	38
4.7	Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας	40
4.8	Προσομοίωση μελέτης μεταβατικής ευστάθειας	42
4.9	Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης	43
5	Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες	45
5.1	Αιολική Ενέργεια	46
5.1.1	Ιστορική Αναδρομή	47
5.1.2	Σημερινή Κατάσταση	48
5.1.3	Αιολική ενέργεια και μεταβατική ευστάθεια	51
5.1.4	Τεχνητή νοημοσύνη και αιολική ενέργεια	53
5.2	Ανεμογεννήτριες	55
5.2.1	Αιολικά πάρκα	57
5.3	Τύποι Ανεμογεννητριών	58
5.3.1	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα - HAWT	58
5.3.2	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα - VAWT	61
5.3.3	Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας - FSWT	62
5.3.4	Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας - VSWT	63
5.4	Κατηγορίες Ανεμογεννητριών	64

5.4.1	Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα - SCIG	66
5.4.2	Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα - WRIG	67
5.4.3	Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG	68
6	Προσομοίωση μελέτης	71
6.1	Περιγραφή προβλήματος προσομοίωσης	71
6.2	Ενσωμάτωση ανεμογεννητριών	74
6.3	Διαδικασία προσομοίωσης μεταβατικής ευστάθειας	77
6.4	Προσδιορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης	79
6.5	Σενάρια μελέτης ευστάθειας-CCT	80
6.5.1	Σενάριο Α: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα	81
6.5.2	Σενάριο Β: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα	93
6.5.3	Σενάριο Γ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα	106
6.5.4	Σενάριο Δ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα	118
6.5.5	Σενάριο Α: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη	131
6.5.6	Σενάριο Β: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη	143
6.5.7	Σενάριο Γ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη	156
6.5.8	Σενάριο Δ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη	168
6.6	Συνολικά συμπεράσματα	181
7	Συμπεράσματα	183
	Βιβλιογραφία	185
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	187
A	Βασικά δεδομένα και χαρακτηριστικά δικτύου	189

B Διαγράμματα ανεμογεννήτριας τύπου 3 (WT3)**193**

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Μηχανή παραγωγής Συνεχούς Ρεύματος 1882.	2
1.2	Στάδια Λειτουργίας ενός ΣΗΕ.	3
1.3	Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.	5
2.1	Μεταβλητές για κάθε ζυγό (i) ενός δικτύου.	10
2.2	Κατηγοριοποίηση ζυγών και μεταβλητών δικτύου.	11
2.3	Μονογραμμικό διάγραμμα δύο ζυγών.	12
2.4	Υπολογισμός Ιακωβιανής μήτρας.	15
3.1	Κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων.	18
3.2	Τυποί συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων.	19
3.3	Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για τον υπολογισμό ρεύματος βραχυκύκλωσης.	20
3.4	Γραφική ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών.	22
3.5	Συνδέσεις τριφασικών μετασηματιστών για δίκτυα μηδενικής ακολουθίας.	25
3.6	Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων.	25
3.7	Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα.	26
3.8	Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα.	28
3.9	Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γή.	29
4.1	Κατηγορίες ευστάθειας.	33
4.2	Σύστημα γεννήτριας-κινητήρα και διανυσματικό διάγραμμα τάσεων.	34
4.3	Καμπύλη ισχύος-γωνίας.	34
4.4	Διάγραμμα γωνίας ισχύος γεννήτριας (δ_i) συναρτήσει του χρόνου.	37
4.5	Μηχανική και ηλεκτρική ροπή σύγχρονης γεννήτριας.	38
5.1	Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.	46
5.2	Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια.	48

5.3	Στόχοι εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη μέχρι το 2026. [1]	49
5.4	Εγκατεστημένοι αιολική ισχύς Ελλάδος.	50
5.5	Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου [2].	54
5.6	Εξέλιξη διαστάσεων ανεμογεννητριών.	56
5.7	Κατηγορίες οριζόντιου άξονα ανεμογεννητριών.	59
5.8	Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.	60
5.9	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα [3].	61
5.10	Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας -FSWT.	62
5.11	Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας - VSWT.	64
5.12	Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα - SCIG [4].	66
5.13	Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα - WRIG [4].	67
5.14	Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG [4].	69
6.1	Σύστημα 39 ζυγών IEEE.	72
6.2	Ανάλυση ροής φορτίου - σύστημα 39 ζυγών IEEE.	73
6.3	Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG.	74
6.4	Συνολική αρχιτεκτονική ανεμογεννήτριας τύπου 3 (WT3).	76
6.5	Συμπλήρωση στοιχείων χρόνου προσομοίωσης και εμφάνιση σφάλματος στο PowerWorld.	77
6.6	Συμπλήρωση βασικών χαρακτηριστικών σφάλματος στο PowerWorld.	78
6.7	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.	82
6.8	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.	83
6.9	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.	83
6.10	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.	84
6.11	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.	84
6.12	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.	85

6.13	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	86
6.14	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	87
6.15	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	87
6.16	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	88
6.17	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	88
6.18	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	89
6.19	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	90
6.20	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	91
6.21	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	91
6.22	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	92
6.23	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	92
6.24	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	93
6.25	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	95
6.26	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	95
6.27	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	96
6.28	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	96

6.29	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	97
6.30	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	97
6.31	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	99
6.32	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	99
6.33	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	100
6.34	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	100
6.35	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	101
6.36	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3\text{sec}$	101
6.37	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	103
6.38	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	103
6.39	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	104
6.40	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	104
6.41	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	105
6.42	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	105
6.43	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	107
6.44	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	108

6.45	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	108
6.46	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	109
6.47	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	109
6.48	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	110
6.49	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	111
6.50	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	112
6.51	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	112
6.52	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	113
6.53	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	113
6.54	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	114
6.55	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	115
6.56	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	116
6.57	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	116
6.58	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	117
6.59	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$	117
6.60	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	118

6.61	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	120
6.62	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	120
6.63	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	121
6.64	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	121
6.65	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	122
6.66	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	122
6.67	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	124
6.68	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	124
6.69	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	125
6.70	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	125
6.71	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	126
6.72	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	126
6.73	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	128
6.74	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	128
6.75	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	129
6.76	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	129

6.77	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$	130
6.78	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	130
6.79	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$	132
6.80	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$	133
6.81	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$	133
6.82	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$	134
6.83	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$	134
6.84	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,60\text{sec}$	135
6.85	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	136
6.86	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	137
6.87	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	137
6.88	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	138
6.89	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	138
6.90	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	139
6.91	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	140
6.92	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	141

6.93	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	141
6.94	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	142
6.95	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	142
6.96	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	143
6.97	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	145
6.98	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	145
6.99	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	146
6.100	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	146
6.101	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	147
6.102	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	147
6.103	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	149
6.104	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	149
6.105	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	150
6.106	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	150
6.107	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	151
6.108	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	151

6.109	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	153
6.110	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	153
6.111	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	154
6.112	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	154
6.113	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	155
6.114	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	155
6.115	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	157
6.116	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	158
6.117	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	158
6.118	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	159
6.119	Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	159
6.120	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,50\text{sec}$	160
6.121	Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	161
6.122	Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	162
6.123	Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	162
6.124	Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	163

6.125 Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	163
6.126 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	164
6.127 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	165
6.128 Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	166
6.129 Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	166
6.130 Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	167
6.131 Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	167
6.132 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	168
6.133 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	170
6.134 Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	170
6.135 Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	171
6.136 Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	171
6.137 Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	172
6.138 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$	172
6.139 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	174
6.140 Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	174

6.141 Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	175
6.142 Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	175
6.143 Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$	176
6.144 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$	176
6.145 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	178
6.146 Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	178
6.147 Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	179
6.148 Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	179
6.149 Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$	180
6.150 Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$	180
B.1 Renewable energy generator/converter model (regc_a).	193
B.2 Renewable energy electrical controls model (reec_a).	194
B.3 Wind turbine generator driven-train (wtgt_a).	194
B.4 Wind turbine generator aero-dynamics (wtgar_a).	195
B.5 Wind turbine generator pitch controller (wtgpt_a).	195
B.6 Wind turbine generator torque control (wtgrq_a).	196
B.7 Renewable energy power plant controller (repc_a).	196

Κατάλογος πινάκων

6.1	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A1-3phase fault.	82
6.2	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A2-3phase fault.	86
6.3	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A3-3phase fault.	90
6.4	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B1-3phase fault.	94
6.5	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B2-3phase fault.	98
6.6	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B3-3phase fault.	102
6.7	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ1-3phase fault.	107
6.8	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ2-3phase fault.	111
6.9	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ3-3phase fault.	115
6.10	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ1-3phase fault.	119
6.11	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ2-3phase fault.	123
6.12	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ3-3phase fault.	127
6.13	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A1 - SLG fault.	132
6.14	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A2-SLG fault.	136
6.15	Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A3-SLG fault.	140
6.16	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B1-SLG fault.	144
6.17	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B2-SLG fault.	148
6.18	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση B3-SLG fault.	152
6.19	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ1-SLG fault.	157
6.20	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ2-SLG fault.	161
6.21	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Γ3-SLG fault.	165
6.22	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ1-SLG fault.	169
6.23	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ2-SLG fault.	173
6.24	Χρόνοι προσομοίωσης:Περίπτωση Δ3-SLG fault.	177
6.25	Συνολικοί χρόνοι προσομοίωσης για τριφασικό σφάλμα.	181

6.26	Συνολικοί χρόνοι προσομοίωσης για μονοφασικό σφάλμα.	182
A.1	Line and transformer data-Table I.	189
A.2	Line and transformer data-Table II.	190
A.3	Bus data-Table I.	191
A.4	Bus data-Table II.	192

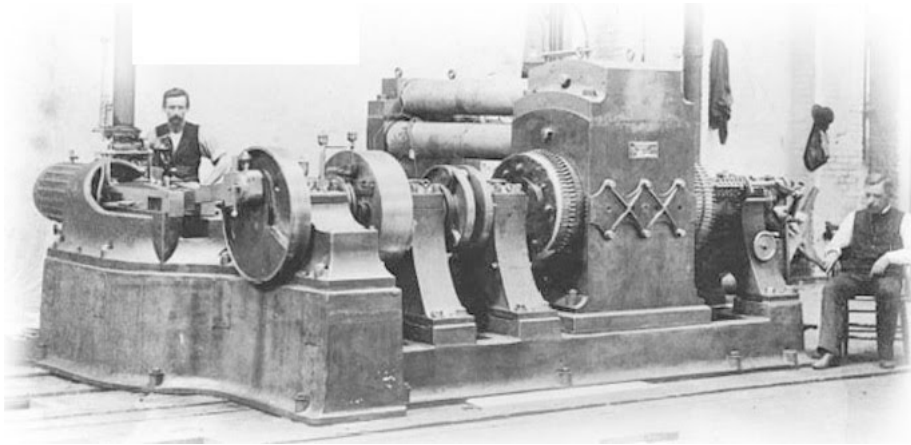
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο όρος ηλεκτρισμός αποτελεί σήμερα έναν «γενικό όρο» ο οποίος σχετίζεται άμεσα με μια ποικιλία από ηλεκτρικά φαινόμενα, τα οποία και αποτέλεσαν την αρχή για την δρομολόγηση της δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης και την ανάπτυξη της μέχρις στιγμής ανάλογης τεχνολογίας. Από την αρχαιότητα κιόλας, όταν μέσα από ένα κομμάτι ήλεκτρου (κεχριμπάρι) που δια μέσου της τριβής με ένα κομμάτι υφάσματος έλκυε μικρά κομμάτια άχυρου, ξεκίνησε η μελέτη του «ηλεκτρισμού» εξ ου και η ονομασία του. Πριν από τον 18ο αιώνα η γνώση γύρω από το συγκεκριμένο αντικείμενο περιοριζόνταν στις μελέτες των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων από όπου και προέκυψε ο όρος στατικός ηλεκτρισμός.

Παρόλο που συνέβησαν σημαντικές νέες ανακαλύψεις τα επόμενα χρόνια, όπως η ανακάλυψη της μπαταρίας ή ηλεκτρική στήλη από ψευδάργυρο και χαλκό το 1800, η δημιουργία του πρώτου ηλεκτρικού κινητήρα το 1821, του πρώτου ηλεκτρικού κυκλώματος το 1827 και άλλα πολλά, προσθέτοντας ολοένα και περισσότερες γνώσεις στο αντικείμενο του ηλεκτρισμού, η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που θα επέφερε ο ηλεκτρισμός εμφανίστηκε πολύ αργότερα. Η πρώτη επίσημη αναφορά στην χρήση του ηλεκτρισμού ως εμπορικό προϊόν έγινε το 1870, όπου και χρησιμοποιήθηκαν οι λαμπτήρες τόξου για φωτισμό κατοικιών και οδικών αρτηριών της εποχής. Ως συνέχεια αυτού του γεγονότος, το 1882 δημιουργήθηκε και το πρώτο πλήρες ηλεκτρικό σύστημα (Σχήμα 1.1) το οποίο αποτελούνταν από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, από ένα υπόγειο καλώδιο, μια ασφάλεια, έναν μετρητή και ως φορτία τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Το παραπάνω σύστημα εγκαταστάθηκε στην Νέα Υόρκη από τον Thomas Edison και τροφοδοτούσε σε απόσταση 1.5 km, 59 καταναλωτές. Αντίστοιχα η



Σχήμα 1.1: Μηχανή παραγωγής Συνεχούς Ρεύματος 1882.

πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμού που ιδρύθηκε στην χώρα μας ήταν το 1889 στην Αθήνα που ηλεκτροφότισε τη Βουλή και το Δημοτικό Θέατρο της εποχής.

Στην συνέχεια το 1900 έχουμε την ανάπτυξη των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος και των αντίστοιχων τριφασικών. Παρά την ευρεία χρήση του συνεχούς ρεύματος (DC) η ανάγκη για άμεση αντικατάστασή του και χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ήταν επιτακτική. Η αιτία που οδήγησε στην χρήση του εναλλασσόμενου ήταν η αδυναμία της μεταφοράς ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλή τάση, για λιγότερες απώλειες, μέσω του συνεχούς ρεύματος. Έτσι οδηγηθήκαμε στην ανάπτυξη μιας συσκευής που θα μετασχημάτιζε σε επιθυμητά επίπεδα τόσο την τάση όσο και το ρεύμα, που λόγω και της ιδιότητας αυτής ονομάστηκε ως μετασχηματιστής. Λίγο αργότερα άρχισε και η ανάπτυξη τοπικών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών σε διάφορα σημεία τα οποία και διασυνδέονταν μεταξύ τους, με σκοπό να ανταλλάσσουν ενέργεια.

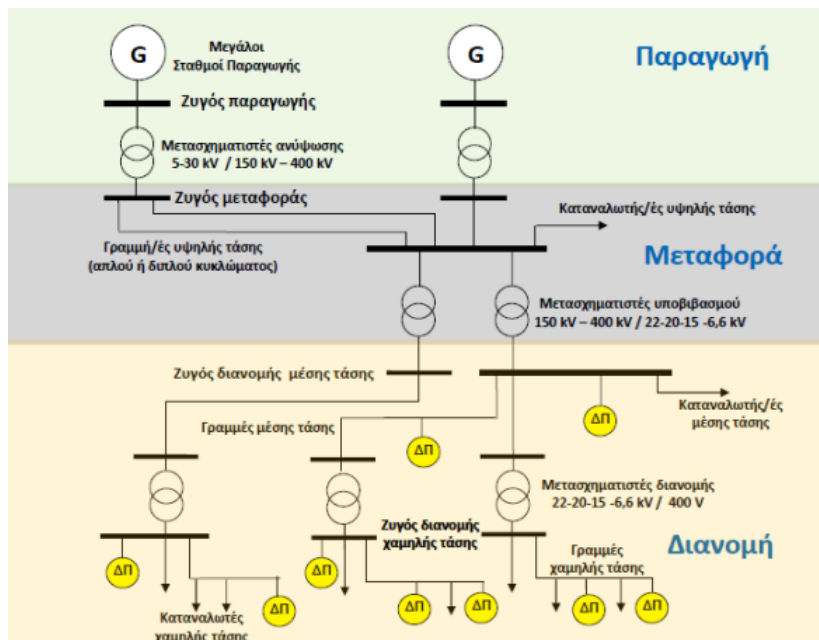
Τέλος, τα τελευταία χρόνια με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας και τις αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει οδηγήσει την βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας την χρησιμοποίηση καινούργιων μεθόδων και τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών και τον περιορισμό των σφαλμάτων που ενδέχεται να προκύψουν [5].

1.2 Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όλα τα παραπάνω αποτέλεσαν και την κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη στον τομέα της ενέργειας που σαν επακόλουθο έφερε και σημαντικές εξελίξεις στον κόσμο ολόκληρης της επιστήμης. Η ανάπτυξη ενός συστήματος το οποίο θα ήταν ικανό να προμηθεύει με ενέργεια

οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή ήταν αναγκαίο. Έτσι δημιουργήθηκε το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) που αποτελείται από ένα σύνολο εγκαταστάσεων και διαθέσιμων μέσων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς όλους τους καταναλωτές. Για να μπορούσε όμως ένα τέτοιο σύστημα να εφαρμοστεί θα έπρεπε να σχεδιαστεί και με τον ανάλογο τρόπο ώστε να είναι ασφαλές, αξιόπιστο ως προς την τροφοδοσία δηλαδή την ποσοτική και ποιοτική κάλυψη των διακυμάνσεων του φορτίου, καθώς και να καλύπτει την ζήτηση, σε οποιοδήποτε σημείο, με το μικρότερο δυνατό οικονομικό κόστος και τηρώντας τα οικολογικά πρότυπα. Δεδομένου όλων των παραπάνω ένα ΣΗΕ διαθέτει τα εξής στάδια που φαίνονται και στο Σχήμα 1.2:

- **Σταθμούς παραγωγής:** Ασχολούνται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εγκατεστημένοι στις πιο πρόσφορες περιοχές.
- **Γραμμές μεταφοράς:** Χρησιμεύουν για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας προς όλα τα κέντρα κατανάλωσης.
- **Δίκτυο Διανομής:** Διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια προς επιμέρους καταναλωτές με σκοπό την άμεση εκμετάλλευσή της σε κάθε μορφή.



Σχήμα 1.2: Στάδια Λειτουργίας ενός ΣΗΕ.

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω, οι σταθμοί παραγωγής σχετίζονται με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από πρωτογενείς πηγές σε μέρη όπου βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες. Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής της ενέργειας μπορούν να διαχωριστούν σε:

- **Ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ):** Σταθμοί που χρησιμοποιούν την καύση ορυκτών αγαθών (κάρβουνο, λιγνίτη, φυσικό αέριο και πετρέλαιο) που διαμέσου της θερμικής ενέργειας και του ατμού, δημιουργούν μηχανική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- **Υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ):** Σε αυτούς χρησιμοποιείται η δυναμική ενέργεια των υδάτων που μέσω των κατάλληλων τεχνολογιών μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- **Πυρηνικούς σταθμούς (ΠΣ):** Σταθμοί που μέσω της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από τον πυρηνικό αντιδραστήρα, δίνεται κίνηση σε ηλεκτρική γεννήτρια ατμού με σκοπό την παραγωγή της ενέργειας.
- **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ):** Πραγματοποιείται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανεξάντλητων πηγών όπως ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό κτλ.

Στη χώρα μας το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς που αποτελείται από τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, προέρχεται από το μεγαλύτερο κέντρο παραγωγής που είναι εγκατεστημένο στην Δυτική Μακεδονία λόγω και της πρόσφορης περιοχής σε κοιτάσματα λιγνίτη. Η εγκατάσταση του σταθμού στην συγκεκριμένη περιοχή εκτός από τα οικονομικά οφέλη που προσφέρει η άμεση αξιοποίηση της πρώτης ύλης, δημιούργησε μεγάλο πρόβλημα στον τομέα της μεταφοράς καθώς το 65% της κατανάλωσης γίνεται από τα αστικά κέντρα της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας. Έτσι θα έπρεπε να σχεδιαστεί ένα σύστημα μεταφοράς με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τάση για μείωση των απωλειών, των σφαλμάτων και διατηρώντας την αξιοπιστία του σε οποιαδήποτε μεταβολή που προέκυπτε.

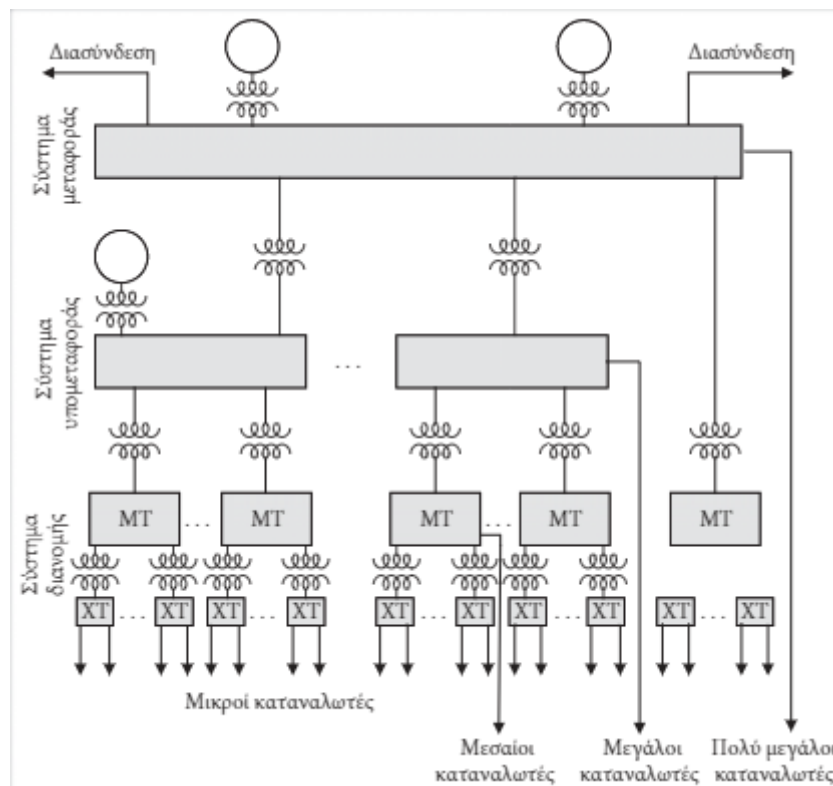
Παρ'όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια με την διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) κυρίως της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, παρατηρείται μια εξισορρόπηση της παραγωγής. Ειδικότερα τα τελευταία δύο χρόνια κατάφεραν να κυριαρχήσουν έναντι των συμβατικών τρόπων παραγωγής ακολουθώντας το μονοπάτι της πράσινης ενέργειας που αποτελεί το άμεσο μέλλον στον συγκεκριμένο τομέα. Το κομμάτι των ΑΠΕ θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα δίνοντας κυρίως έμφαση στην αιολική ενέργεια [5].

1.3 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η δομή ενός συστήματος παραγωγής δεν αποτελεί σταθερό κανόνα. Οι ιδιαιτερότητες που καλείται να εξυπηρετήσει κάθε φορά είναι εκείνες που το καθιστούν ξεχωριστό και πολύπλοκο ως προς τα δομικά χαρακτηριστικά του. Ο παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την δομή του είναι το μέγεθός του, εξαρτώμενο από την γεωγραφική περιοχή που θα χρειαστεί να εξυπηρετήσει. Ωστόσο όλα τα συστήματα, μικρά ή μεγάλα, έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό ότι λειτουργούν σε διάφορα επίπεδα τάσης χωριζόμενα από μετασχηματιστές. Με βάση αυτό το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε τρία υποσυστήματα:

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

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης των τριών συστημάτων για την δόμηση ενός ηλεκτρικού δικτύου.



Σχήμα 1.3: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Το σύστημα διανομής λειτουργεί σε δύο διαφορετικά επίπεδα τάσης, μέσω υπόγειων και εναέριων γραμμών, την πρωτεύουσα τάση (ή τάση τροφοδοσίας) στα 20kV ονομαζόμενη και ως μέση τάση (MT) και τη δευτερεύουσα τάση (ή τάση κατανάλωσης) στα 230V (για μονοφασικούς καταναλωτές) και 400V (για τριφασικούς καταναλωτές) γνωστή ως χαμηλή τάση (XT). Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης καθώς και τους αντίστοιχους μετασχηματιστές, για τον υποβιβασμό της κάθε φορά, αποτελούμενη από διάφορα μέσα προστασίας και διακοπτικών μέσων για τα διάφορα τεχνικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν. Οι υποσταθμοί διανομής είναι υπεύθυνοι για την τροφοδοσία του αντίστοιχου συστήματος, προμηθεύοντας με ηλεκτρική ενέργεια μικρού και μεσαίου μεγέθους καταναλωτές με την χαμηλή και μέση τάση αντίστοιχα. Στην χώρα μας έχουμε συνολικά 241.569 χλμ δικτύου διανομής, σύμφωνα με τις τελευταίες μετρήσεις, από τα οποία τα 113.358 χλμ αφορούν το δίκτυο μέσης τάσης και τα υπόλοιπα 128.211 χλμ αφορούν το δίκτυο χαμηλής τάσης. Υπεύθυνος για το σύστημα διανομής στην Ελλάδα είναι ο Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) Α.Ε. βασισμένος στην ευρωπαϊκή οδηγία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα υπομεταφοράς ευθύνεται για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποιους υποσταθμούς διανομής. Η ενέργεια που φτάνει στο συγκεκριμένο σύστημα προέρχεται είτε από το σύστημα μεταφοράς είτε μέσω υποσταθμών. Τροφοδοτεί απευθείας μεγάλους καταναλωτές που λειτουργούν σε μεγάλα επίπεδα τάσης και ισχύος, όπως βιομηχανίες ή μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Δεν υπάρχει άμεση διάκριση μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς και υπομεταφοράς μιας και τείνουν να έχουν την ίδια λειτουργία.

Το σύστημα μεταφοράς διαφέρει σαν λειτουργία και σαν σκοπό από τα άλλα δύο συστήματα που αναλύθηκαν παραπάνω. Διασυνδέει τα σημεία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας με τα σημεία κατανάλωσης. Λόγω της σύνδεσης του συστήματος παραγωγής με το σύστημα μεταφοράς, μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης, έχει σαν αποτέλεσμα το δεύτερο να περιλαμβάνει στην δομή του τις εναέριες γραμμές μεταφοράς των 66kV, 150kV και 400kV, τις υπόγειες-υποβρύχιες γραμμές των 150kV και 400kV, τους υποσταθμούς ζεύξης και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού σε διάφορα επίπεδα τάσης. Επιπλέον απαιτείται έλεγχος της διατήρησης της τάσης εντός προκαθορισμένων ορίων τόσο στη φάση της μεταφοράς όσο και της διανομής. Ο σχεδιασμός των συστημάτων μεταφοράς είναι μια μεταβλητή διαδικασία που σχετίζεται από διάφορους παράγοντες παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και τα σπουδαιότερα προβλήματα από άποψη μελέτης.

1.4 Μελλοντικές τάσεις

Από την στιγμή που έγιναν αντιληπτές οι σημαντικές δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην καθημερινότητα μας, ξεκίνησε η σταδιακή ανάπτυξη του βασισμένη στην τεχνολογία της κάθε εποχής. Τα τελευταία χρόνια με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας και την ραγδαία αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργηθεί η ανάγκη της δημιουργίας πιο ευέλικτων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Οι επιπτώσεις των συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο φυσικό περιβάλλον αυξάνουν τις προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ. Σύμφωνα με το Εθνικό σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) που δημοσιεύτηκε το 2019 με βάση την ευρωπαϊκή επιτροπή, στοχεύει ως το 2030 το μερίδιο συμμετοχής στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ να είναι κατά ελάχιστον 35%. Τα τελευταία δύο χρόνια η επιθυμία για ταχύτερη μείωση εκπομπών CO₂ μέχρι το 2030 ανέρχεται στο «τουλάχιστον 55%» σε σχέση με το 40% που ήταν μέχρι πρότινος, αυξάνοντας κατά 10% τα ποσοστά εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ πλησιάζοντας την τιμή των 10GW. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην περιορισμένη συμμετοχή των συμβατών τρόπων παραγωγής στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής με ΑΠΕ.

Με την μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ έχει δημιουργηθεί η τάση για την σχεδίαση ενός πιο αυτοματοποιημένου δικτύου που θα μπορεί να ανταποκρίνεται στις νέες ανάγκες. Η υφιστάμενη δομή του συστήματος, δίκτυο μεταφοράς και διανομής, αρχίζει και δοκιμάζεται από συνεχείς αβεβαιότητες τόσο στο κομμάτι της λειτουργίας όσο και της αξιοπιστίας. Με βάση τα παραπάνω φτάσαμε στην έννοια του «έξυπνου δικτύου ή Smart Grids» το οποίο δεν στοχεύει στην δόμηση ενός νέου δικτύου αλλά στον εκσυγχρονισμό του ήδη υπάρχοντος. Κάποια από τα χαρακτηριστικά που το καθιστούν παγκοσμίως την καλύτερη επένδυση στο κομμάτι της ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

- **Αξίопιστο:** Άμεση ανίχνευση σφαλμάτων και αυτοδιόρθωσης χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου δυναμικού.
- **Ανθεκτικό:** Σταθερή λειτουργία μετά από φυσικές καταστροφές και διάφορων μορφών επιθέσεων.
- **Ευέλικτο:** Διπλή κατεύθυνση τροφοδότησης ενέργειας δηλαδή ο καταναλωτής να γίνεται και παραγωγός.

- **Φιλικό:** Στόχος είναι η κατά κύριο λόγο παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ.
- **Αποδοτικό:** Μπορεί να διαχειριστεί την μεταβλητότητα του φορτίου ζήτησης παρέχοντας υψηλή ποιότητα ισχύος χωρίς επιπρόσθετο εξοπλισμό.

Τα παραπάνω αποτελούν μερικά δείγματα για το πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ανάπτυξη της τεχνολογίας στο κομμάτι της ενέργειας δημιουργώντας ψηφιακές κοινωνίες, φιλικές προς το περιβάλλον αλλά και προς τους ίδιους τους ανθρώπους. Επιπλέον η δυνατότητα μελέτης ενός εν δυνάμει νέου προς εγκατάσταση δικτύου, με την χρήση διάφορων λογισμικών προσομοίωσης και μοντέλων πρόβλεψης, διευκολύνει τη μελέτη της ροής φορτίου, σφαλμάτων και μεταβατικών φαινομένων, δημιουργώντας μια νέα οπτική στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το τελευταίο κομμάτι θα αναλυθεί στις παρακάτω ενότητες.

1.5 Οργάνωση του τόμου

Η δομή της διπλωματικής στηρίζεται σε επτά κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή της ανάλυσης ροής φορτίου μέσα από την επεξήγηση των επαναληπτικών αλγορίθμων. Στο επόμενο Κεφάλαιο 3 αναφερόμαστε στις διαταραχές ενός ΣΗΕ και ποιό συγκεκριμένα στα βραχυκυκλώματα. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται επεξήγηση της ευστάθειας και των κατηγοριών της, με το οποίο και θα ασχοληθούμε στο κομμάτι της προσομοίωσης. Ακολουθεί το Κεφάλαιο 5 που γίνεται αναφορά στην αιολική ενέργεια και στις ανεμογεννήτριες, κομμάτι που θα επικεντρωθούμε και στο πρακτικό κομμάτι. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την διατήρηση της ευστάθειας τόσο με την χρήση συμβατικών πηγών όσο και μέσω αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 7 γίνεται σύντομη αναφορά στην συνολική διπλωματική εργασία και εξάγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τέλος, ακολουθούν το Παράρτημα Α στο οποίο δίνονται τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο και το Παράρτημα Β στο οποίο δίνονται τα block diagrams για την αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την συμπεριφορά ενός ΣΗΕ τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε με όσο το δυνατόν πιο αναλυτικό τρόπο την χρησιμότητα αυτών των μελετών, εξηγώντας τις πληροφορίες που αντλούμε από αυτές και πως μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε κατάλληλα για τη σχεδίαση και τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου

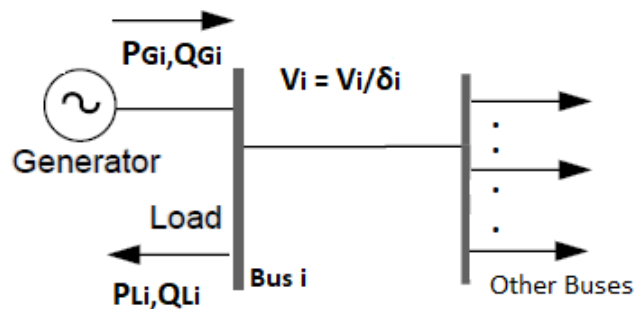
Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί την βασική προϋπόθεση για την βέλτιστη λειτουργία ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αν το θεωρήσουμε ως ένα “μαθηματικό πρόβλημα” τότε αναγκάζομαστε να επικεντρωθούμε στη λύση του, η οποία στοχεύει στον προσδιορισμό των μεταβλητών μόνιμης κατάστασης λειτουργίας. Αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για πολλούς μηχανικούς καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες μέχρι και σήμερα. Μερικές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μελέτη επιπτώσεων στην λειτουργία ενός συστήματος κατά την σχεδίαση διάφορων τροποποιήσεων συστήματος.
- Προσδιορισμός αρχικής κατάστασης λειτουργίας μετά την επίδραση διάφορων διαταραχών

- Διαμοίραση του ημερήσιου φόρτου λειτουργίας λόγω των διάφορων μεταβολών φορτίου που μπορεί να προκύψουν.
- Προσδιορισμός βέλτιστης διαδικασίας λειτουργίας όταν τεθούν εκτός λειτουργίας τυχόν μέρη του δικτύου (μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς).

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω ο καθορισμός των μεταβλητών είναι το κύριο αντικείμενο ενασχόλησης της ανάλυσης ροής φορτίου. Ο αριθμός αυτών δεν είναι σταθερός καθώς εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων (ζυγών) που έχει ένα δίκτυο. Για κάθε ζυγό αντιστοιχούν έξι μεταβλητές όπως αυτές παρουσιάζονται και στο Σχήμα 2.1. Επομένως, για κάθε ζυγό i του συστήματος έχουμε τα ακόλουθα:

- Πραγματική ισχύς παραγωγής P_{Gi} .
- Άεργος ισχύς παραγωγής Q_{Gi} .
- Πραγματική ισχύς κατανάλωσης P_{Li} .
- Άεργος ισχύς κατανάλωσης Q_{Li} .
- Μέτρο τάσης $|V_i|$.
- Φασική γωνία τάσης δ_i .



Σχήμα 2.1: Μεταβλητές για κάθε ζυγό (i) ενός δικτύου.

Για την επίλυση των εξισώσεων δεν απαιτούνται όλες οι μεταβλητές. Οι μεταβλητές P_{Li}, Q_{Li} αποτελούν τις μη ελέγξιμες, αυτές που εξαρτώνται από το φορτίο. Επομένως, για ένα δίκτυο n ζυγών έχουμε συνολικά $4 \cdot n$ μεταβλητές οι οποίες χωρίζονται στις μεταβλητές ελέγχου και κατάστασης. Οι λύσεις που μπορούν να προκύψουν, δηλαδή οι τιμές που μπορούν να πάρουν οι παραπάνω μεταβλητές, είναι άπειρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δύο

από αυτές τις επιλέγουμε αυθαίρετα και οι υπόλοιπες προκύπτουν μέσα από την επίλυση των $2 \cdot n$ εξισώσεων. Αποδεκτές είναι εκείνες που ικανοποιούν όλες τις προδιαγραφές και τους περιορισμούς, τηρώντας και το κριτήριο της βέλτιστης οικονομικής λειτουργίας. Με βάση το τελευταίο οδηγούμαστε σε μια μοναδική λύση, μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας [6].

Ανάλογα ποιες από τις τέσσερις μεταβλητές P_{Gi} , Q_{Gi} , $|V_i|$ και δ_i προκαθοριστούν αυθέρετα από τον μηχανικό, προκύπτουν τρεις κατηγορίες ζυγών όπως φαίνονται και στο Σχήμα 2.2.

1. **Ζυγός αναφοράς (Slack Bus):** Αποτελεί τον κύριο ζυγό του συστήματος. Στην βιβλιογραφία τον συναντάμε και ως ζυγός ταλάντωσης (Swing Bus). Επιπλέον είναι ο ζυγός παραγωγής που στοχεύει στην διατήρηση της ισορροπίας πραγματικής και αέργου ισχύος. Σε αυτόν τον ζυγό πραγματοποιείται ο καθορισμός του μέτρου της τάσης στην τιμή του 1 per unit (pu) και της φασικής γωνίας σε 0° που θεωρείται ως αναφορά για τις υπόλοιπες φασικές γωνίες των ζυγών. Με βάση αυτόν τον ζυγό γίνεται ο υπολογισμός της πραγματικής και αέργου ισχύος του ζυγού [6].
2. **Ζυγοί ελέγχου τάσης (PV Bus):** Είναι οι ζυγοί που συνήθως συνδέονται γεννήτριες και για αυτό είναι γνωστοί και ως ζυγοί παραγωγής. Τα χαρακτηριστικά μιας γεννήτριας που μπορούμε να ελέγξουμε είναι η πραγματική ισχύς P_{Gi} και το μέτρο της τάσης $|V_i|$. Επομένως, έχοντας προκαθορίσει της δύο προηγούμενες μεταβλητές, μπορούμε μέσω της επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου να υπολογίσουμε τις τιμές των Q_{Gi} και δ_i [6].
3. **Ζυγοί φορτίου (Load Bus):** Είναι οι ζυγοί πάνω στους οποίους συνδέουμε φορτία άρα έχουμε κατανάλωση. Οι τιμές των μεταβλητών P_{Gi} και Q_{Gi} είναι γνωστές και έχουν τιμή μηδέν λόγω έλειψης παραγωγής. Αποτελούν το πιο συνηθισμένο τύπο ζυγού σε ένα δίκτυο. Σε αυτή την κατηγορία η επίλυση των εξισώσεων μας επιστρέφουν σαν αποτέλεσμα τις τιμές των μεταβλητών $|V_i|$ και δ_i [6].

Bus Types	Specified Variables	Unspecified variables	Remarks
Slack/ Swing Bus	$ V , \delta$	P_G, Q_G	$ V , \delta$: are assumed if not specified as 1.0 and 0°
Generator/ Machine/ PV Bus	$P_G, V $	Q_G, δ	A generator is present at the machine bus
Load/ PQ Bus	P_G, Q_G	$ V , \delta$	About 80% buses are of PQ type

Σχήμα 2.2: Κατηγοριοποίηση ζυγών και μεταβλητών δικτύου.

2.1.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

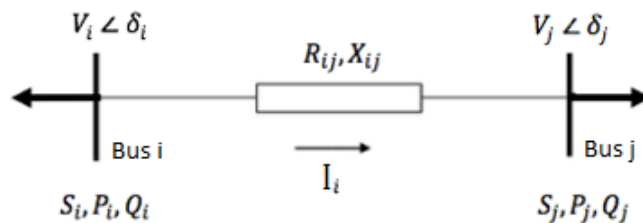
Για τον υπολογισμό ροής φορτίου χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης του δικτύου. Για τον ζυγό i ενός συστήματος n ζυγών θεωρούμε ότι οι γεννήτριες τον τροφοδοτούν με μιγαδική ισχύ S_{Gi} , τα φορτία καταναλώνουν μιγαδική ισχύ S_{Li} και οι γραμμές μεταφοράς προωθούν μιγαδική ισχύ S_{Ti} . Οι παραπάνω ποσότητες συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

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

Αντίστοιχα μπορούμε να ορίσουμε και την μιγαδική ισχύ S_i που φτάνει στον ζυγό i υπολογίζοντας την διαφορά της ισχύς που παράγεται και ταυτόχρονα καταναλώνεται και φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Li} \quad (2.2)$$

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός συστήματος, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται βασίζονται στην μέθοδο των κόμβων. Με βάση αυτό και το μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 2.3 προκύπτουν οι ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:



Σχήμα 2.3: Μονογραμμικό διάγραμμα δύο ζυγών.

Από την μέθοδο των κόμβων έχουμε:

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.3)$$

Το διάνυσμα I_{bus} είναι το διάνυσμα των ρευμάτων που φτάνουν στους ζυγούς, το V_{bus} είναι το διάνυσμα που περιέχει την πληροφορία των τάσεων των ζυγών και το Y_{bus} είναι ο πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων που έχει την πληροφορία των παθητικών στοιχείων του δικτύου. Κάθε διαγώνιο στοιχείο y_{ii} ισούται με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται σε κάποιο κόμβο i . Τα υπόλοιπα στοιχεία y_{ij} ισοδυναμούν με το αρνητικό του παθητικού στοιχείου μεταξύ των κόμβων i και j [6].

Από το Σχήμα 2.3 το ρεύμα που ρέει από τον ζυγό i στο ζυγό j προκύπτει ως:

$$I_i = \frac{V_i \angle \delta_i - V_j \angle \delta_j}{R + jX} \quad (2.4)$$

Η εξίσωση 2.4 μπορεί να γραφτεί και ως:

$$I_i = \frac{V_{ij}}{Z_{ij}} = Y_{ij} \cdot V_{ij} \quad (2.5)$$

όπου $Y_{ij} = (y_{ij} \angle \theta_{ij})$.

Αφού το ρεύμα I_i που εισέρχεται στον ζυγό i εκφράστηκε σε συνάρτηση του πίνακα αγωγιμοτήτων μπορούμε να το αναπτύξουμε στην γενική μορφή ενός συστήματος n ζυγών:

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad \text{για } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.6)$$

Επιπλέον γνωρίζουμε πως η μιγαδική ισχύς του ζυγού i μπορεί να αναλυθεί σε:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \cdot I_i^* \Rightarrow P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (2.7)$$

Όπως αναλύσαμε προηγουμένως η ισχύς που φτάνει στο ζυγό i φαίνεται στην εξίσωση 2.2. Με βάση τις εξισώσεις 2.6 και 2.7 η ισχύς του ζυγού διαμορφώνεται ως εξής:

$$S_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j = \sum_{j=1}^n |y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.8)$$

Διαχωρίζοντας την εξίσωση 2.8 σε πραγματικό και φανταστικό μέρος προκύπτουν οι ακόλουθες δύο εξισώσεις:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n |y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.9)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = - \sum_{j=1}^n |y_{ij} \cdot V_j \cdot V_i| \cdot \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.10)$$

Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω είναι μη γραμμικές με αποτέλεσμα να μην έχουμε αναλυτικές λύσεις. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί αρκετές υπολογιστικές τεχνικές για την επίλυση τέτοιων αλγεβρικών εξισώσεων. Σε αυτή την ενότητα θα επικεντρωθούμε στις δύο πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την επίλυση της ροής φορτίου. Πρόκειται για τις μεθόδους Gauss-Seidel (G-S) και Newton-Raphson (N-R). Οι παραπάνω μέθοδοι θα αναλυθούν στις δύο ενότητες που ακολουθούν [6].

2.1.2 Μέθοδος Gauss-Seidel (G-S)

Όπως αποκαλύπτει και το ίδιο το όνομα της μεθόδου η λογική στην οποία στηρίχθηκε η ανάπτυξη του αλγορίθμου είναι η επαναληπτική μέθοδο Gauss. Το πλεονέκτημα αυτής είναι η αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια επαναληπτική τεχνική για την επίλυση τετραγωνικού συστήματος από n γραμμικές εξισώσεις $A \cdot x = b$. Η λύση της μεθόδου βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \cdot \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \cdot x_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_j^k \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τον παραπάνω τύπο στην επίλυση ροής φορτίου και πιο συγκεκριμένα σε ένα σύστημα n ζυγών που περιγράφεται από την εξίσωση 2.3 θα ακολουθήσουμε την παρακάτω διαδικασία:

Η εξίσωση 2.8 μπορεί να γραφτεί με την εξής μορφή:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii} \cdot V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \cdot V_j, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.12)$$

Λύνοντας ως προς την μεταβλητή V_i έχουμε:

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \cdot V_j \right], \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.13)$$

Ο αλγόριθμος G-S παίρνει την τελική του μορφή με βάση την εξίσωση 2.11 [7]:

$$V_i^{(\nu+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(\nu)})^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{i-1} y_{ij} \cdot V_j^{(\nu+1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij} \cdot V_j^{(\nu)} \right], \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.14)$$

Η μέθοδος αυτή ανάλογα σε ποιον τύπο ζυγού εφαρμοστεί θα έχει και διαφορετικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα έχουμε [6]:

- Ζυγός αναφοράς: Σε αυτόν τον τύπο ζυγού ισχύει ότι $V_1 = |V_1| \angle \delta_1 = 1 \angle 0^\circ$ pu. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η επαναληπτική μέθοδος να εφαρμόζεται για $i \neq 1$.
- Ζυγός φορτίου: Σε αυτούς τους ζυγούς οι τιμές των P_i και Q_i είναι ήδη γνωστές, οπότε κάθε φορά από την εφαρμογή του τύπου 2.14 παίρνουμε τις βελτιωμένες τιμές της τάσης και της φασικής γωνίας.

- Ζυγός ελεγχόμενης τάσης: Λόγω έλλειψης παραγωγής αέργου ισχύος Q_{Gi} οδηγούμαστε στον υπολογισμό του Q_i με έμμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας τις τιμές των τάσεων των ζυγών. Ο τύπος που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζεται παρακάτω:

$$Q_i^{(\nu)} = V_i^{(\nu)} \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j^{(\nu)} \cdot \sin(\delta_j^{(\nu)} - \delta_i^{(\nu)} - \theta_{ij}) \quad (2.15)$$

2.1.3 Μέθοδος Newton-Raphson (N-R)

Η διαφορά των δύο μεθόδων πάνω στην οποία η Newton-Raphson χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι στην ταχύτητα σύγκλισης. Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκλίνει εξίσου γρήγορα τόσο σε μικρά όσο και σε μεγάλα συστήματα σε αντίθεση με την μέθοδο Gauss-Seidel. Ενώ η μέθοδος G-S μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.8, στην περίπτωση της N-R είναι αδύνατο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μερικές παράγωγοι κάποιων μιγαδικών μεταβλητών δεν ορίζονται με συνέπεια να χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις 2.9 και 2.10.

Η N-R είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην σειρά Taylor και στις μερικές παραγώγους. Για την επίλυση των εξισώσεων εκτός από τις εξισώσεις ροής φορτίου 2.9 και 2.10, χρησιμοποιούμε και την βοήθεια του Ιακωβιανού πίνακα που φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Ο πίνακας αυτός περιέχει γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις που αλληλεπιδρούν στη μεταβολή της πραγματικής και αέργου ισχύος [6].

Η εφαρμογή της Ιακωβιανής μήτρας στην επίλυση ροής ισχύος είναι η εξής:

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

Σχήμα 2.4: Υπολογισμός Ιακωβιανής μήτρας.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί πιο συνοπτικά ως:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Λύνοντας την εξίσωση 2.16 ως προς τους αγνώστους έχουμε:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Η γενική μορφή του αλγορίθμου N-R εκφράζεται ως:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

όπου:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1^{(v)} & J2^{(v)} \\ J3^{(v)} & J4^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Η σύγκλιση επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του σφάλματος πραγματικών και αέργων ισχύων. Οι σχέσεις $\Delta P^{(v)}$ και $\Delta Q^{(v)}$ ορίζονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)} \\ \Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)} \end{array} \right\} \quad i = 2,3,\dots,n \quad (2.20)$$

Με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζονται οι άγνωστοι παράμετροι σε ένα σύστημα ροής φορτίου. Η εφαρμογή της μεθόδου σε κάθε τύπο ζυγού είναι η εξής [6]:

- Ζυγός αναφοράς: Όπως και στον G-S έτσι και εδώ, δεν συμμετέχει στην επαναληπτική διαδικασία.
- Ζυγός φορτίου: Γνωρίζοντας τις τιμές της πραγματικής και αέργου ισχύος χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα της εξίσωσης 2.18 για τον υπολογισμό της v+1 τιμής.
- Ζυγός ελεγχόμενης τάσης: Επειδή η τιμή της τάσης $|V_i|$ είναι σταθερή, το σφάλμα $\Delta |V_i|$ μηδενίζεται όποτε μπορεί να απαλειφθεί από τον Ιακωβιανό πίνακα και η άγνωστη ποσότητα να είναι μόνο η φασική γωνία τάσης. Το ίδιο συμβαίνει με την παραγωγή αέργου ισχύος, οπότε κάθε ζυγός μειώνει τις διαστάσεις του πίνακα κατά μια θέση. Σε περίπτωση που το μέτρο της τάσης αλλάξει τιμή τότε στην επόμενη επανάληψη ο ζυγός θα αντιμετωπιστεί σαν ζυγός φορτίου.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Σφαλμάτων Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κάθε αντικείμενο το οποίο υπόκειται σε οποιαδήποτε λειτουργία συχνά έρχεται αντιμέτωπο με διαφόρων ειδών βλάβες. Ένα τέτοιο αντικείμενο είναι και ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν αυτές τις διαταραχές στην λειτουργία ενός ΣΗΕ είναι πολλές. Μερικές από αυτές οφείλονται σε φυσικές αιτίες (πτώσεις κεραυνών, δένδρων, δυνατοί άνεμοι, χιόνι ή πάγο), από διάσπαση της μόνωσης λόγω κυματικών υπερτάσεων, πτώση οχημάτων σε στύλους στήριξης ή ακόμα και από μικρά ζώα και πουλιά σε υποσταθμούς. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στην ανάλυση των διαταραχών και πιο συγκεκριμένα βραχυκυκλωμάτων, που εμφανίζονται στα ηλεκτρικά συστήματα ενέργειας.

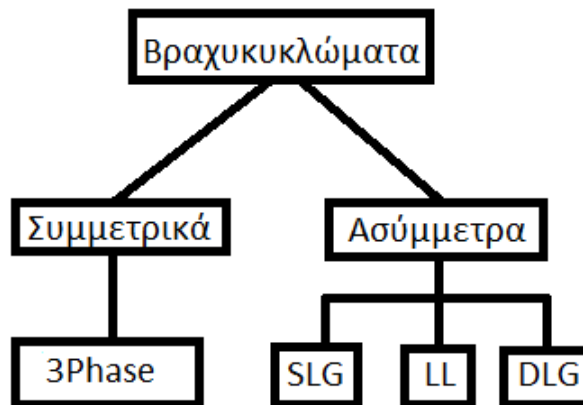
Ως βραχυκύκλωμα ορίζουμε τις απότομες, ανώμαλες, αλλαγές στην δομή του ηλεκτρικού δικτύου που οδηγούν στην άμεση ή μέσω αντίδρασης σύνδεση ενεργού τμήματος του δικτύου με την γη. Η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων παρουσιάζονται στις γραμμές μεταφοράς με την δημιουργία ιονισμένου δρόμου για την ροή ρεύματος ισχύος από τον αγωγό προς την γη. Το 70%-80% των διαταραχών αυτών είναι παροδικού χαρακτήρα με το χρονικό διάστημα της αποκατάστασης της ροής να κυμαίνεται στα 400ms. Τα βραχυκυκλώματα ανάλογα με την σοβαρότητα των επιπτώσεων στην λειτουργία του δικτύου χωρίζονται ως εξής [6]:

1. **Συμμετρικό βραχυκύκλωμα:** Είναι το βραχυκύκλωμα που εφαρμόζεται και στις τρεις φάσεις με αποτέλεσμα την διατήρηση της φασικής του συμμετρίας. Σε αυτό τον τύπο σφάλματος εφαρμόζεται αντίσταση $Z^σ$ μεταξύ των τριών φάσεων και της γης. Όταν

το Z^{σ} έχει τιμή μηδέν τότε το βραχυκύκλωμα ονομάζεται μεταλλικό ή στερεό.

2. **Ασύμμετρο βραχυκύκλωμα:** Σε αυτά τα βραχυκυκλώματα τα ρεύματα και οι τάσεις δεν παρουσιάζουν τριφασική συμμετρία. Οι τρεις τύποι σφαλμάτων που θα συναντήσουμε είναι: α) Μονοφασικό ως προς τη γη βραχυκύκλωμα (Single-Line to Ground-SLG), β) Διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line - LL) και γ) Διφασικό ως προς τη γη βραχυκύκλωμα (Double Line to Ground - DLG). Για την μελέτη των συγκεκριμένων χρησιμοποιούμε τις συμμετρικές συνιστώσες και τα συμμετρικά ακολουθιακά δίκτυα, η ανάλυση των οποίων θα ακολουθήσει σε επόμενες ενότητες.

Τα παραπάνω συνοψίζονται και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.1: Κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων.

Τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα αποκόπτουν τελείως την μεταφορά ισχύος από την γραμμή, ενώ τα υπόλοιπα ελαττώνουν την μεταφορική ικανότητα. Σε κάθε βραχυκύκλωμα παρατηρούνται πτώσεις τάσεις όπου στην περίπτωση γεννητριών οδηγούμαστε σε μηχανικές ταλαντώσεις. Εκτός από τις πτώσεις τάσεις, αναπτύσσονται μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης πριν την ενεργοποίηση των διακοπών ισχύος και την απομόνωση της βραχυκυκλωμένης γραμμής. Η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων γίνεται μέσα από διάφορα προγράμματα προσομοιώσεις όπως το PowerWorld Simulator ή το PSS/E της Siemens (Power System Simulator for Engineering) κ.λπ.

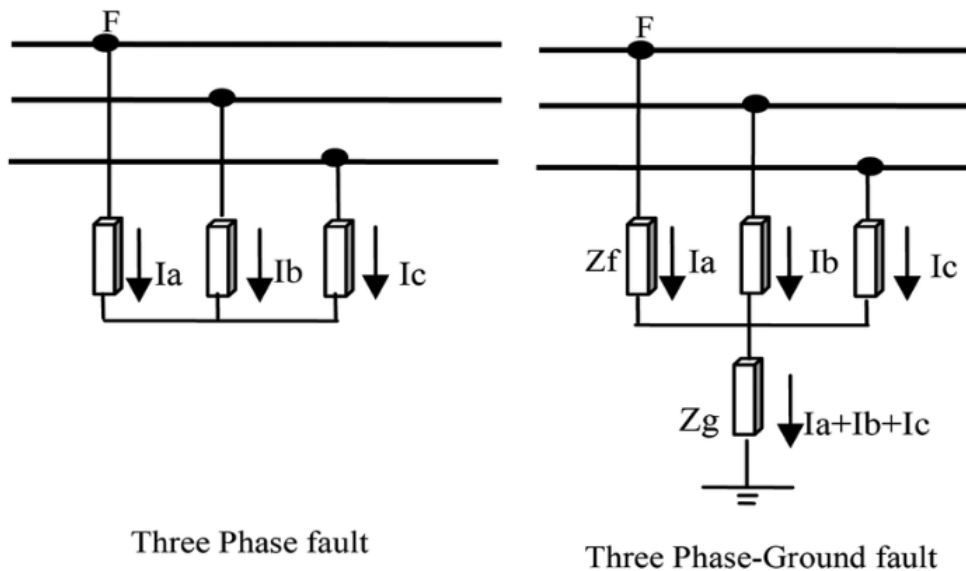
Η ύπαρξη προγραμμάτων προσομοίωσης για την άμεση μελέτη των βραχυκυκλωμάτων στοχεύουν:

- Στη κατάλληλη εφαρμογή συστημάτων προστασίας για την αντιμετώπιση του σφάλματος. Για παράδειγμα, η επιλογή διακοπών ισχύος που επηρεάζονται άμεσα από τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που αναπτύσσονται.

- Στον ορισμό των αρχικών συνθηκών προστασίας που αποφασίζουν για τις συνθήκες βραχυκυκλώματος. Οι παραπάνω συνθήκες εξαρτώνται από τις μεταβλητές ενός ΣΗΕ όπως τάσεις, ρεύματα κ.λπ.

3.1 Τριφασικά συμμετρικά βραχυκυκλώματα

Σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, όπως αναφέρει και το όνομά του, συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις του κυκλώματος. Λόγω της συμμετρίας των γραμμών, τα ρεύματα που θα αναπτυχθούν θα είναι εξίσου συμμετρικά δηλαδή θα παρουσιάζουν ίδια μέτρα r_u με διαφορά φάσης 120° . Τα πιο συχνά ήδη συμμετρικών σφαλμάτων που συναντάμε είναι όταν και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους ή όταν βραχυκυκλώνονται με την γη. Οι παραπάνω δύο τύποι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2 [8, 6].



Σχήμα 3.2: Τυποι συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων.

Στην περίπτωση ενός συστήματος n ζυγών στο οποίο λαμβάνει χώρα ένα τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα με σύνθετη αντίσταση Z_f στον ζυγό i θα ισχύουν τα εξής:

- Η ασφαλιστική τάση του ζυγού θα μηδενιστεί λόγω της γείωσης. Ως ασφαλιστική τάση ζυγού i ορίζουμε την τιμή της τάσης του ζυγού τη χρονική στιγμή πριν την εμφάνιση του σφάλματος. Η τιμή αυτή υπολογίζεται μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου.
- Το υπόλοιπο δίκτυο θα τροφοδοτεί με ρεύματα βραχυκύκλωσης το ζυγό του σφάλματος, τα μέτρα των οποίων υπολογίζονται μέσω της αντοχής (SCC) και των σύνθετων

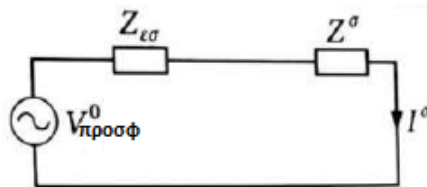
αντιστάσεων των γραμμών.

Πολλές φορές στην ανάλυση των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων σε ένα ΣΗΕ χρησιμοποιείται το θεώρημα Thevenin για τον προσδιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

3.1.1 Θεώρημα Thevenin και Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)

Το θεώρημα Thevenin στοχεύει στον προσδιορισμό των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων που συμβαίνουν σε διάφορα κυκλώματα, όταν σε αυτά προστεθεί μια σύνθετη αντίσταση. Παρόμοια είναι η κατάσταση που παρατηρούμε σε συμμετρικά βραχυκυκλώματα έχοντας έτσι την δυνατότητα χρησιμοποίησης του θεωρήματος.

Πιο συγκεκριμένα για την εφαρμογή του θεωρήματος σε περιπτώσεις σφαλμάτων θα πρέπει να υπερθέσουμε τις μεταβολές στα ρεύματα και στις τάσεις πριν το βραχυκύκλωμα, με σκοπό την εύρεση των αντίστοιχων τιμών μετά το βραχυκύκλωμα. Η προηγούμενη διαδικασία αποτυπώνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.3. Για διευκόλυνση συμβολίζουμε με το δείκτη ($^{\circ}$) τις προσφαλματικές τιμές και αντίστοιχα με το δείκτη ($^{\sigma}$) τις μετασφαλματικές τιμές [6].



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για τον υπολογισμό ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Θεωρούμε την $Z_{\epsilon\sigma}$ την ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση με σημείο αναφοράς το σημείο του σφάλματος, την Z^{σ} την σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος, εφόσον δεν έχουμε στερεό βραχυκύκλωμα και την $V_{\pi\rho\sigma\phi}^{\circ}$ την προσφαλματική τιμή της τάσης. Επομένως, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I^{σ} υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση ως εξής:

$$I^{\sigma} = \frac{V_{\pi\rho\sigma\phi}^{\circ}}{Z_{\epsilon\sigma} + Z^{\sigma}} \quad (3.1)$$

Στην περίπτωση στερεού βραχυκυκλώματος ($Z^{\sigma} = 0$) έχουμε:

$$I^{\sigma} = \frac{V_{\pi\rho\sigma\phi}^{\circ}}{Z_{\epsilon\sigma}} \quad (3.2)$$

Κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος οι τάσεις των ζυγών ελαττώνονται. Οι πτώσεις τάσεις που παρατηρούνται είναι μια ένδειξη της αντοχής του δικτύου. Με τον όρο "αντοχή" σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity - SCC) εκφράζουμε το μέτρο αυτής της αντοχής αλλά και της σοβαρότητας του βραχυκυκλώματος. Επομένως το SCC ορίζεται ως το γινόμενο των μέτρων της τάσης του ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα και του ρεύματος μετά το βραχυκύκλωμα. Αν οριστεί στο ανά μονάδα pu σύστημα τότε θα έχουμε [6]:

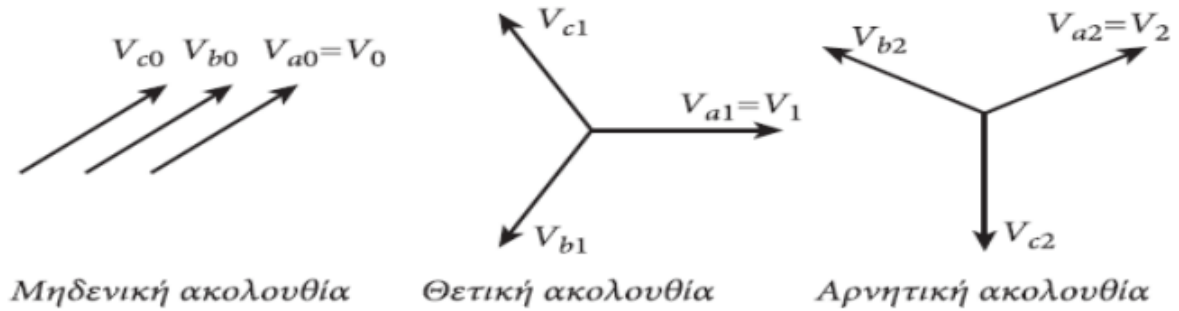
$$|SCC| = |V_{\pi\rho\sigma\phi}^{\circ}| \cdot |I^{\sigma}| \quad (3.3)$$

3.2 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

Η μελέτη της συγκεκριμένης κατηγορίας σφαλμάτων διαφέρει από εκείνη των συμμετρικών. Η μελέτη των βραχυκυκλωμάτων σε όλες τις φάσεις του δικτύου, λόγω έλλειψης συμμετρικότητας, οδήγησε στην εύρεση των συμμετρικών συνιστωσών και των ακολουθιακών δικτύων που θα αναλυθούν παρακάτω. Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου υπάρχουν τρεις κατηγορίες ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες μαζί με τις ανάλογες συνθήκες βραχυκύκλωσης [8, 6].

3.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Η ανάγκη για μελέτη ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων η οποία δεν θα βασίζεται στη μελέτη της μιας μόνο φάσης, ανάγκασε στην εύρεση μιας διαφορετικής μεθόδου ανάλυσης. Έτσι το 1918 ο C.L Fortescue πρότεινε τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών, αποδεικνύοντας ότι ένα σύστημα με n συσχετιζόμενα ασύμμετρα διανύσματα μπορεί να αναλυθεί σε n συστήματα με n συμμετρικά διανύσματα, τις λεγόμενες συμμετρικές συνιστώσες. Τα συστήματα που προέκυπταν ονομάζονταν ακολουθιακά. Με βάση τα παραπάνω προέκυψαν οι συνιστώσες μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Γραφική ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών.

Για τα συμμετρικά σύνολα συνιστωσών γνωρίζουμε ότι:

1. Οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας (Zero Sequence Components), αποτελούνται από τρία ίσα σε μέτρο διανύσματα με μηδενική διαφορά φάσης και δείκτη 0.
2. Οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας (Positive Sequence Components), αποτελούνται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου, με διαφορά φάσης 120° και φασική ακολουθία abc με δείκτη + ή 1.
3. Οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας (Negative Sequence Components), αποτελούνται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου, με διαφορά φάσης 120° και με φασική ακολουθία acb με δείκτη - ή 2

Λόγω συμμετρίας των συμμετρικών συνιστωσών δεν απαιτείται η μελέτη όλων των φάσεων. Επομένως, για την μελέτη και την ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων θα επικεντρωθούμε στη φάση α ενός συστήματος.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η γραφική ανάλυση των ασύμμετρων διανυσμάτων τάσεις, όπου το κάθε διάνυσμα ισούται με το άθροισμα των συνιστωσών του. Επομένως, οι φασικές τάσεις παίρνουν την τελική τιμή που φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται και οι τιμές για τα φασικά ρεύματα.

Σε κάθε ακολουθία τα τρία διανύσματα χαρακτηρίζονται από μια φασική μετατόπιση. Για την διευκόλυνση των πράξεων ορίζουμε την τυχαία μεταβλητή "α" ως τον παραστατικό μιγάδα ο οποίος ισούται με $a = 1 \angle 120^\circ$. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

- $a = e^{j120^\circ} = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ) = -0.5 + j0.866$
- $a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -0.5 - j0.866$
- $a^3 = 1$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις που χρησιμοποιούν το σύμβολο "α" για την μιγαδική αναπαράσταση των φασικών μετατοπίσεων προκύπτει η ακόλουθη ισότητα:

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (3.5)$$

Με την βοήθεια των διανυσμάτων και των πινάκων οι φασικές σχέσεις μπορούν να εκφραστούν σε συνάρτηση των ακολουθιακών. Αρχικά ορίζουμε το διάνυσμα V_{abc} που περιλαμβάνει τις φασικές τάσεις:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Το διάνυσμα V_{012} που περιλαμβάνει τις ακολουθιακές τάσεις:

$$V_{012} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Και τον 3x3 πίνακα μετασχηματισμού T:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η εξίσωση που περιγράφει την σχέση φασικών και ακολουθιακών διανυσμάτων:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 + V_1 + V_2 \\ V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \\ V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ή πιο απλά γράφεται ως $V_{abc} = T \cdot V_{012}$.

Αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε τις ακολουθιακές τάσεις μέσω των φασικών παίρνοντας την εξίσωση 3.9 και λύνοντας ως προς το διάνυσμα V_{012} . Οπότε έχουμε:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Από την εξίσωση 3.10 ορίζουμε τον αντίστροφο πίνακα μετασχηματισμού ως εξής:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Επομένως, οι τελικές τιμές των ακολουθιακών τάσεων που προκύπτουν ισούνται με:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + aV_b + a^2V_c \\ V_a + a^2V_b + aV_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

συνοπτικά η εξίσωση 3.10 προκύπτει ως εξής $V_{012} = T^{-1} \cdot V_{abc}$.

Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φασικών τάσεων διαμέσου των ακολουθιακών εξίσωση 3.9 και αντιστρόφως εξίσωση 3.10. Η ίδια διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα φασικά και ακολουθιακά ρεύματα. Οπότε ορίζουμε το διάνυσμα I_{abc} που περιέχει τα φασικά ρεύματα:

$$I_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Αντίστοιχα ορίζουμε το διάνυσμα I_{012} που περιλαμβάνει τα ακολουθιακά ρεύματα:

$$I_{012} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Με βάση την εξίσωση 3.9 για τις τάσεις, αντίστοιχα ισχύει και για τα ρεύματα:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_1 + I_2 \\ I_0 + a^2I_1 + aI_2 \\ I_0 + aI_1 + a^2I_2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ή πιο απλά γράφεται ως $I_{abc} = T \cdot I_{012}$.

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός ορίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} I_a + I_b + I_c \\ I_a + aI_b + a^2I_c \\ I_a + a^2I_b + aI_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

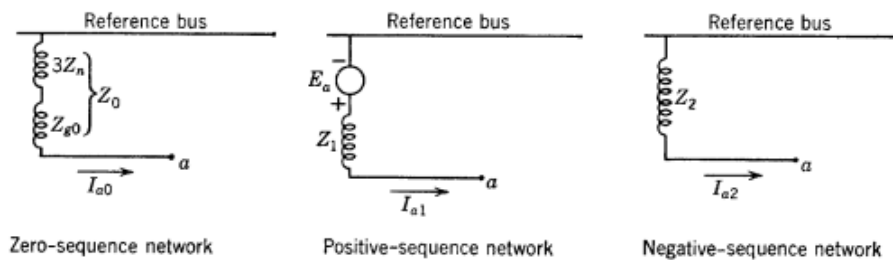
οπότε συνοπτικά η εξίσωση 3.16 ισοδυναμεί με $I_{012} = T^{-1} \cdot I_{abc}$.

Απαραίτητο για την ανάλυση των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων είναι η δημιουργία των δικτύων μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Για κάθε δίκτυο απαιτείται ο ορισμός της σύνθετης αντίστασης για όλα τα παθητικά στοιχεία του δικτύου είτε αυτό είναι ένας μετασχηματιστής είτε κάποια γραμμή μεταφοράς είτε η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας. Στην περίπτωση τριφασικών μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων (Δ ή Y) υπάρχουν πέντε δυνατές συνδέσεις που αφορούν το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας και φαίνονται στο Σχήμα 3.5.

Τύπος	Διάγραμμα Σύνδεσης		Κυκλώμα 0 ακολουθίας
$Y \rightarrow Y$			$P \xrightarrow{Z_0} Q$ Ζυγός αναφοράς
$Y \rightarrow \Delta$			$P \xrightarrow{Z_0} Q$ Ζυγός αναφοράς
$\Delta \rightarrow Y$			$P \xrightarrow{Z_0} Q$ Ζυγός αναφοράς
$\Delta \rightarrow \Delta$			$P \xrightarrow{Z_0} Q$ Ζυγός αναφοράς
$Y \rightarrow \Delta$			$P \xrightarrow{Z_0} Q$ Ζυγός αναφοράς

Σχήμα 3.5: Συνδέσεις τριφασικών μετασχηματιστών για δίκτυα μηδενικής ακολουθίας.

Παρόλα αυτά, και στις δύο κατηγορίες βραχυκυκλωμάτων χρησιμοποιούμε τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα τα οποία αναπαριστώνται στο Σχήμα 3.6.



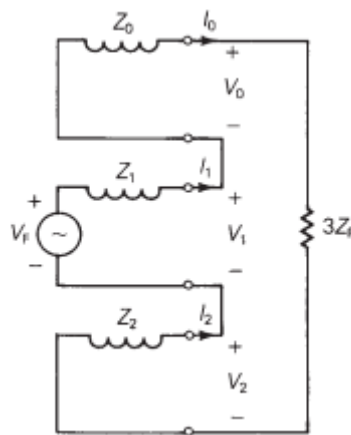
Σχήμα 3.6: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων.

Τα παθητικά στοιχεία Z_0, Z_1 και Z_2 αποτελούν τις ισοδύναμες κατά Thevenin αντιστά-

σεις όπου σε συνδυασμό με το ακολουθιακό ρεύμα κάθε δικτύου προκαλούν πτώση τάσης. Η σύνθετη αντίσταση του δικτύου μηδενικής ακολουθίας αποτελείται από το άθροισμα των αντιστάσεων μηδενικής ακολουθίας Z_{g0} και την επί τρεις φορές τιμή αντίστασης γείωσης Z_n . Όπως γνωρίζουμε η γεννήτρια σε ένα δίκτυο είναι σχεδιασμένη να τροφοδοτεί συμμετρικές τριφασικές τάσεις και επομένως η μόνη πηγή τάσης που παρουσιάζεται στα ακολουθιακά δίκτυα είναι στο δίκτυο θετικής ακολουθίας και ισοδυναμεί με την κατά Thevenin πηγή τάσης. Ανάλογα με το είδος του βραχυκυκλώματος, συμμετρικό ή μη, χρησιμοποιείται και το αντίστοιχο ακολουθιακό δίκτυο ή συνδυασμός ακολουθιακών δικτύων για την αναπαράσταση του μονογραμμικού σχεδίου [6].

3.2.2 Μονοφασικό ως προς την γη βραχυκύκλωμα-SLG

Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη (Single Line to Ground) αποτελεί την πρώτη κατηγορία ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται σε μια από τις τρεις φάσεις του δικτύου με την παρουσία ή μη, αντίστασης βραχυκύκλωσης Z_f . Για την ανάλυση των συνθηκών βραχυκύκλωσης θεωρούμε ότι το σφάλμα παρουσιάζεται στην φάση α του δικτύου. Για την μελέτη του σφάλματος χρειαζόμαστε το μονογραμμικό διάγραμμα από την συνδεσμολογία των τριών ακολουθιακών δικτύων με την αντίσταση Z_f που φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα.

Με βάση τα παραπάνω και το μονογραμμικό διάγραμμα προκύπτει ότι:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f)} \quad (3.17)$$

Τα φασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης που θέλουμε να υπολογίσουμε αναφέρονται μόνο στην φάση α του δικτύου, με αποτέλεσμα οι φάσεις β και γ που δεν είναι βραχυκυκλωμένες να

έχουν μηδενικά ρεύματα βραχυκύκλωσης $I_b = I_c = 0$. Η παραπάνω θεωρία αποδεικνύεται με την βοήθεια των εξισώσεων 3.15 και 3.17 και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Με βάση την εξίσωση 3.18 και της σχέσης 3.5 προκύπτει ότι:

- Το ρεύμα στην φάση α θα ισούται με το άθροισμα των ακολουθιακών ρευμάτων, δηλαδή $I_a = 3I_0$.
- Τα ρεύματα των υπόλοιπων φάσεων θα είναι μηδενικά, $I_b = I_c = 0$.

Από το μονογραμμικό διάγραμμα (Σχήμα 3.7) ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις ακολουθιακές τάσεις:

$$V_1 = V_F - I_1 \cdot Z_1 \quad (3.19)$$

$$V_2 = I_2 \cdot Z_2 \quad (3.20)$$

$$V_0 = I_0 \cdot Z_0 \quad (3.21)$$

$$(V_0 + V_1 + V_2) = (3Z_f) \cdot I_1 \quad (3.22)$$

Με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκαν τα φασικά ρεύματα προκύπτουν και οι φασικές τάσεις, με την βοήθεια της εξίσωσης 3.9, για τις οποίες θα ισχύει:

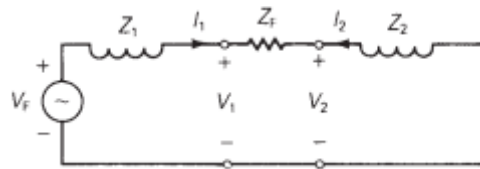
- Η τάση στην φάση α ισούται με μηδέν ($V_a = 0$) λόγω της γείωσης.
- Οι τιμές των δύο φασικών τάσεων V_b και V_c να είναι αντίθετες, δηλαδή $V_b = -V_c$.

3.2.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα - LL

Το διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line), όπως μαρτυρεί και το όνομά του, συμβαίνει μεταξύ δύο φάσεων, της φάσης b και c. Για την μελέτη του συγκεκριμένου τύπου βραχυκυκλώματος, το μονογραμμικό διάγραμμα που θα προκύψει αποτελείται από τα δίκτυα θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδεδεμένα παράλληλα, μαζί με την αντίσταση βραχυκύκλωσης Z_f και φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και το μονογραμμικό διάγραμμα προκύπτει ότι:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_f}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)}, \quad I_0 = 0 \quad (3.23)$$



Σχήμα 3.8: Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα.

Τα φασικά ρεύματα αναφέρονται στις δύο φάσεις του δικτύου που συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα. Με την βοήθεια της εξίσωσης 3.15, της σχέσης 3.5 και των ακολουθιακών τιμών που αναπτύξαμε παραπάνω (σχέση 3.23) προκύπτουν τα εξής:

- Τα φασικά ρεύματα, όπως και τα ακολουθιακά, έχουν ίσα μέτρα και αντίθετες φορές, δηλαδή $I_b = -I_c$.
- Η τιμή του ρεύματος στην φάση a ισούται με το μηδέν, $I_a = 0$.

Από το μονογραμμικό διάγραμμα, (Σχήμα 3.8), ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις ακολουθιακές τάσεις:

$$(V_1 - V_2) = Z_f I_1 \quad (3.24)$$

Στην περίπτωση που δεν είχαμε αντίσταση βραχυκύκλωσης θα ίσχυε $V_1 = V_2$. Για την ακολουθιακή τάση V_1 και V_0 ισχύει:

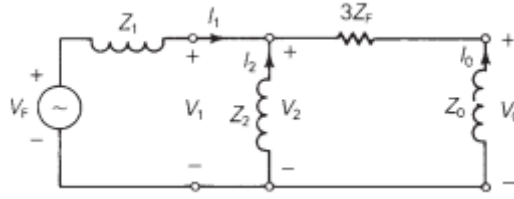
$$V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad \text{και} \quad V_0 = 0 \quad (3.25)$$

Με τον ίδιο τρόπο που προέκυψαν οι φασικές τιμές ρεύματος προκύπτουν και οι αντίστοιχες των τάσεων, με την βοήθεια της εξίσωσης 3.9, όποτε έχουμε:

- Οι φασικές τάσεις που συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα συνδέονται με την σχέση, $V_b - V_c = Z_f I_b$.
- Η τιμή της τάσης στη φάση a ισούται με μηδέν, $V_a = 0$.

3.2.4 Διφασικό ως προς τη γή βραχυκύκλωμα - DLG

Το διφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη (Double Line to Ground) συμβαίνει μεταξύ δύο φάσεων, της φάσης b και c και με τη γη μέσω σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης Z_f . Για την μελέτη του συγκεκριμένου τύπου βραχυκυκλώματος, το μονογραμμικό διάγραμμα που θα προκύψει θα αποτελείται από την παράλληλη σύνδεση των τριών ακολουθιακών δικτύων



Σχήμα 3.9: Συνδεσμολογία ακολουθιακών δικτύων για διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γή.

μαζί με την σύνθετη αντίσταση και φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Με βάση τα παραπάνω και το μονογραμμικό διάγραμμα προκύπτει ότι:

Σύμφωνα με τον νόμο ρεύματων του Kirchhoff ισχύει:

$$I_1 + I_2 + I_0 = 0 \quad (3.26)$$

Με την βοήθεια του διαιρέτη ρεύματος οι τιμές των ακολουθιακών ρευμάτων προκύπτουν ως εξής:

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + (Z_2 || (3Z_f + Z_0))} \quad (3.27)$$

$$I_2 = -\frac{3Z_f + Z_0}{Z_2} \cdot I_1 \quad (3.28)$$

$$I_0 = -\frac{Z_2}{3Z_f + Z_0} \cdot I_1 \quad (3.29)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για τα ακολουθιακά ρεύματα και της εξίσωσης 3.15 μπορούν να προκύψουν και οι αντίστοιχες σχέσεις για τα φασικά ρεύματα:

- Το άθροισμα των δύο φασικών ρευμάτων ισούται με το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, $I_b + I_c = I_f$.
- Το ρεύμα της φάσης α ισούται με μηδέν, $I_a = 0$.

Από το μονογραμμικό διάγραμμα (Σχήμα 3.9) ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις ακολουθιακές τάσεις:

$$V_1 = V_2 \quad (3.30)$$

$$V_0 = V_2 + 3Z_f \cdot I_0 \quad (3.31)$$

Με την βοήθεια των παραπάνω σχέσεων και την εξίσωσης 3.9 προκύπτουν και οι αντίστοιχες τιμές των φασικών τάσεων ως εξής:

- Οι τάσεις μεταξύ των δύο φάσεων είναι ίσες μεταξύ τους και ισούνται με $V_b = V_c = (I_b + I_c)Z_f$.
- Η τιμή της φασικής τάσης V_a ισούται με μηδέν, $V_a = 0$.

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Ευστάθειας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η απαίτηση για αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχει δημιουργήσει την ανάγκη για την σχεδίαση ενός καινούργιου συστήματος με νέες τεχνικές και με την ταυτόχρονη ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δομή αυτού του συστήματος θα πρέπει να βασίζεται στις τρεις αρχές της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της ευστάθειας για να μπορέσει να χαρακτηριστεί επιτυχημένο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στην μια αρχή λειτουργίας και πιο συγκεκριμένα της ευστάθειας συστήματος.

Με τον όρο ευστάθεια συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε την ικανότητα του δικτύου να παραμένει σε λειτουργική ισορροπία, όταν λαμβάνουν χώρα διάφορες διαταραχές που είναι αναπόφευκτες σε οποιοδήποτε δίκτυο που αποτελείται από μονάδες παραγωγής και τα αντίστοιχα τροφοδοτούμενα φορτία. Ο συγκεκριμένος όρος εμφανίζεται στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος και σχετίζεται με την διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ των μηχανών. Σε περίπτωση απώλειας συγχρονισμού τότε το σύστημά μας, χαρακτηρίζεται ως ασταθές και βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Γνωρίζουμε πως η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται από την αρχική κατάσταση λειτουργίας και από την φύση και το μέγεθος της διαταραχής. Οι διαταραχές μπορεί να χαρακτηριστούν μικρού μεγέθους (π.χ. διακυμάνσεις φορτίου ή παραγωγής) και μεγάλου μεγέθους (π.χ. βραχυκυκλώματα ή απώλεια στοιχείου του δικτύου). Και τα δύο είδη διαταραχών είναι ικανά να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στην έρρυθμη λειτουργία του δικτύου, το οποίο σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να παραμένει ανθεκτικό και με κατάλληλους χειρισμούς απομόνωσης και εκκαθάρισης του σφάλματος, να διατηρεί την αξιοπιστία και την ευστάθειά

του τόσο κατά την διάρκεια όσο και το μετά το πέρας του συμβάντος.

Ο όρος ασταθές δίνεται σε ένα δίκτυο όταν μια διαταραχή αποτρέπει την σωστή λειτουργία και το οδηγεί σε κατάρρευση. Για παράδειγμα ένα είδος μικρής διαταραχής που σχετίζεται με την αύξηση του φορτίου, οδηγεί σε αποσυγχρονισμό του κινητήρα και πιθανόν στην διακοπή λειτουργίας του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μηχανική ροπή εισόδου δεν ισούται με την μηχανική ροπή εξόδου ώστε να λειτουργούν σε ίδιες συχνότητες. Έτσι οδηγούμαστε σε ταλαντώσεις του ρότορα και αύξηση της γωνίας μετατόπισης δ . Για αυτό το λόγο έχουμε ορίσει το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης που ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί. Βέβαια σε μια απότομη αύξηση του φορτίου οδηγούμαστε σε αποσυγχρονισμό και χωρίς να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο.

Ο πιο σοβαρός τύπος διαταραχής που μπορεί να εμφανιστεί είναι το βραχυκύκλωμα. Για παράδειγμα, όταν ένα τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα λάβει χώρα διακόπτεται τελείως η ροή ισχύος μεταξύ των μηχανών. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφοροποίηση των γωνιών και των ταχυτήτων που μπορεί να προκύψει πριν γίνει εκκαθάριση του σφάλματος. Αυτό που μας ενδιαφέρει σε κάθε είδος διαταραχή είναι η ροή ισχύος που μεταφέρονταν πριν το σφάλμα ώστε να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε το σύστημα ευσταθές ή όχι. Επομένως, η τιμή της μεταφερόμενης ισχύος, πριν την εμφάνιση του σφάλματος, ορίζεται ως το όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης.

Η μελέτη της ευστάθειας αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των ηλεκτρολόγων μηχανικών. Η πολυπλοκότητα της μελέτης και η ανάγκη για καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος έχει οδηγήσει στο διαχωρισμό της ευστάθειας σε διάφορες κατηγορίες. Διακρίνουμε τρεις τύπους ευσταθούς συμπεριφοράς ενός συστήματος [9]:

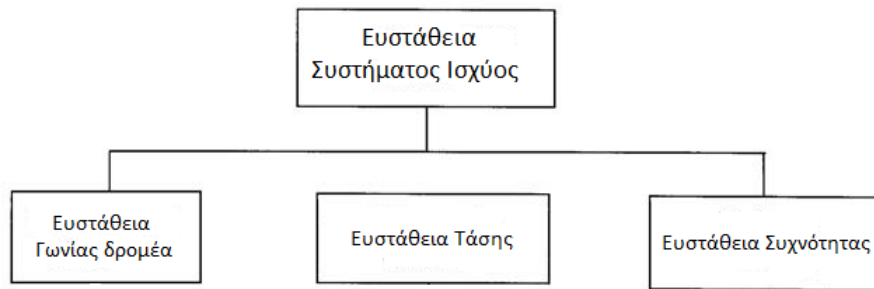
- Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης (Steady-state Stability)
- Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης (Transient Stability)
- Ευστάθεια δυναμική (Dynamic Stability)

Σε πολλές βιβλιογραφίες και μελέτες συναντάμε και ένα άλλο είδος κατηγοριοποίησης το οποίο βασίζεται στα τρία ακόλουθα κριτήρια [10]:

- Στα φυσικά χαρακτηριστικά της αστάθειας όπως προκύπτει μέσα από την κύρια μεταβλητή συστήματος.
- Από το μέγεθος της διαταραχής, το οποίο επηρεάζει την μέθοδο υπολογισμού και πρόβλεψης της ευστάθειας.

- Από την διαδικασία και το χρονικό διάστημα για την αξιολόγηση της ευστάθειας.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι τρεις κατηγορίες ευστάθειας βασισμένες στα πάνω κριτήρια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε κυρίως στην μεταβατική ευστάθεια που θα αναλυθεί σε παρακάτω ενότητα. Θα ακολουθήσει και μια μικρή περιγραφή των υπόλοιπων κατηγοριών ευστάθειας.



Σχήμα 4.1: Κατηγορίες ευστάθειας.

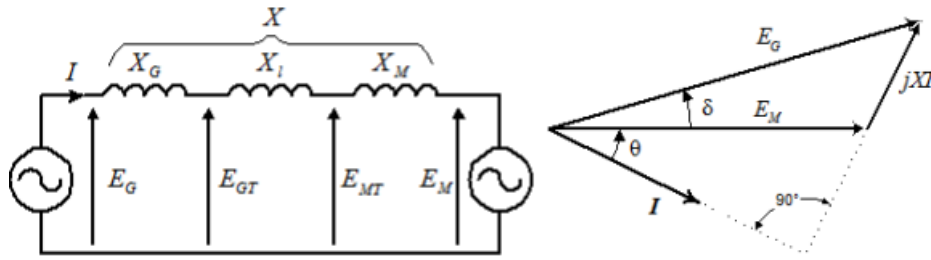
4.1 Ευστάθεια μόνιμης κατάστασης

Η ευστάθεια μόνιμης κατάστασης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να επανακτήσει το συγχρονισμό του (ταχύτητα και συχνότητα) μετά από την εμφάνιση αργών και μικρών διαταραχών που συμβαίνουν λόγω των σταδιακών αλλαγών ισχύος. Η απώλεια του συγχρονισμού στη μόνιμη κατάσταση μπορεί να προκληθεί όταν η γωνιακή διαφορά μεταξύ των μηχανών υπερβεί από 90° . Η διαφορά αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από το μέγεθος του δικτύου που αναφερόμαστε. Πιο συγκεκριμένα σε μεγάλα δίκτυα που οι μηχανές απέχουν πολύ μεταξύ τους, η γωνιακή αυτή διαφορά μπορεί να ξεπεράσει και της 90° χωρίς να προκληθεί αστάθεια. Αντίθετα σε μικρά δίκτυα, αστάθεια μπορεί να εμφανιστεί με μικρότερες διαφορές. Επιπλέον η γωνία δ σχετίζεται και με τη μέγιστη τιμή ροής ισχύος που θα αναλυθεί παρακάτω. Η παραπάνω μορφή αστάθειας αποτελεί απίθανο γεγονός σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γι αυτό και δεν αποτελεί το επίκεντρο της μελέτης [9, 11].

4.1.1 Εξίσωση ροής ισχύος και γωνίας

Για την καλύτερη κατανόηση θα χρησιμοποιήσουμε ένα πιο απλό σύστημα αποτελούμενο από μια γεννήτρια που τροφοδοτεί έναν κινητήρα μέσω μιας γραμμής μεταφοράς. Το σύστημα αυτό αποτελεί σημαντικό εργαλείο μελέτης μιας και μπορεί να αναπαραστήσει ένα

δίκτυο μιας μεσαίας περιοχής. Το μονογραμμικό διάγραμμα με τις επαγωγικές αντιστάσεις και το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων φαίνονται στο Σχήμα 4.2 [9].



Σχήμα 4.2: Σύστημα γεννήτριας-κινητήρα και διανυσματικό διάγραμμα τάσεων.

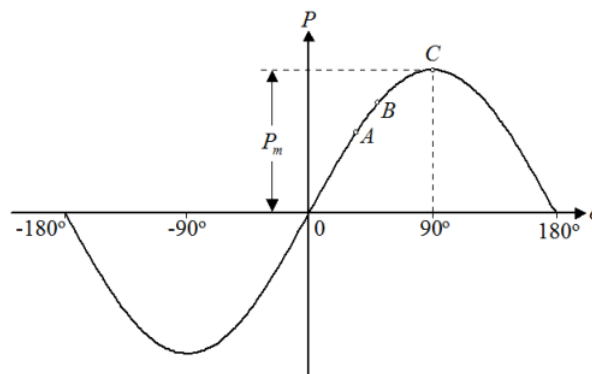
Με βάση το μονογραμμικό διάγραμμα αντιστάσεων και έχοντας ως άνυσμα αναφοράς την τάση E_M θεωρούμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_M = E_M \angle 0 \quad E_G = E_G \angle \delta \quad E_G^* = E_G \angle -\delta \quad (4.1)$$

Θεωρούμε για ευκολία ότι δεν υπάρχουν ωμικές αντιστάσεις και επομένως η ισχύς εξόδου της γεννήτριας που ισοδυναμεί με την ισχύ εισόδου του κινητήρα χωρίς απώλειες, δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P_e = \frac{E_G E_M}{X} \cdot \sin(\delta) \quad , \quad P_{max} = \frac{E_G E_M}{X} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω σχέση 4.2 μας υποδηλώνει ότι η ισχύς P_e εξαρτάται άμεσα από το ημίτονο της γωνιακής διαφοράς μεταξύ των τάσεων. Όσο η γωνία δ αυξάνει παρατηρούμε και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύς η οποία λαμβάνει την μέγιστη τιμή της όταν $\delta = 90^\circ$. Πέρα από αυτό το όριο παρατηρείται μια σταδιακή μείωση μέχρι η γωνία δ πάρει την τιμή 180° και η ισχύς μηδενιστεί. Τα παραπάνω φαίνονται και στη καμπύλη ισχύος-γωνίας του Σχήματος 4.3



Σχήμα 4.3: Καμπύλη ισχύος-γωνίας.

4.2 Δυναμική ευστάθεια

Δυναμική ευστάθεια συστήματος ορίζουμε την ικανότητα του ηλεκτρικού δικτύου να διατηρεί το συγχρονισμό μετά την εμφάνιση της διαταραχής και την εκδήλωση της πρώτης ταλάντωσης. Ταυτόχρονα, υποδηλώνει την ανάγκη του δικτύου να φτάσει στη νέα ισορροπία μόνιμης κατάστασης μετά από μικρές διαταραχές που προκαλούν ταλαντώσεις. Για να παραμείνει το σύστημα δυναμικά ευσταθές θα πρέπει οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις να μην υπερβαίνουν κάποια ορισμένη τιμή πλάτους και να αποσβένουν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εάν δεν υπάρξει νέα κατάσταση ισορροπίας το πλάτος της ταλάντωσης θα αυξηθεί και θα οδηγηθεί το σύστημα σε δυναμική αστάθεια. Τέτοια είδους αστάθειας οφείλεται στα συστήματα ελέγχου συχνότητας και ισχύος και στη διασύνδεση μεταξύ τους [9, 11].

4.3 Ευστάθεια γωνίας δρομέα

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα των σύγχρονων μηχανών να παραμένουν σε συγχρονισμό, είτε σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας είτε μετά από κάποια μικρή διαταραχή. Στόχος είναι η διατήρηση ή αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής κάθε μηχανής που συμμετέχει στο σύστημα. Η αστάθεια που μπορεί να προκύψει εμφανίζεται με την μορφή γωνιακών ταλαντώσεων προκαλώντας απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των υπόλοιπων μηχανών. Για την μελέτη της συγκεκριμένης αστάθειας, οι μη γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν μπορούν να γραμμικοποιηθούν. Ανάλογα με το είδος και το μέγεθος της διαταραχής η παραπάνω μορφή ευστάθειας μπορεί να χωριστεί είτε σε ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών είτε σε μεταβατική ευστάθεια που θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα [10, 8].

4.4 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται όταν το σύστημα μπορεί να διατηρήσει σταθερή την τιμή της τάσης σε όλους τους ζυγούς του δικτύου είτε βρίσκεται στη κατάσταση σταθερής λειτουργίας είτε μετά την εμφάνιση κάποιας διαταραχής. Επιπλέον η τιμή της τάσης αποτελεί παράμετρο που μας ενημερώνει για το εάν υπάρχει ανισορροπία αέργου ισχύος στο δίκτυο. Μια απότομη αύξηση ή πτώση τάσης σε κάποιους ζυγούς μπορεί να οδηγήσει σε κατάρ-

ρευση όλης της τάσης και να οδηγηθεί το σύστημα σε αστάθεια. Δηλαδή όταν η τάση ισορροπίας κοντά σε φορτία δεν είναι σε αποδεκτά όρια οδηγούμαστε σε κατάρρευση. Η χρονική διάρκεια μιας διαταραχής μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα έως δεκάδες λεπτά. Η αστάθεια μπορεί να προκληθεί από απότομη αύξηση του φορτίου σε ένα ήδη επιβαρυσμένο δίκτυο ή όταν τα φορτία των ζυγών δεν μπορούν ανταποκριθούν στην πλεονάζουσα άεργο ισχύ [10, 12].

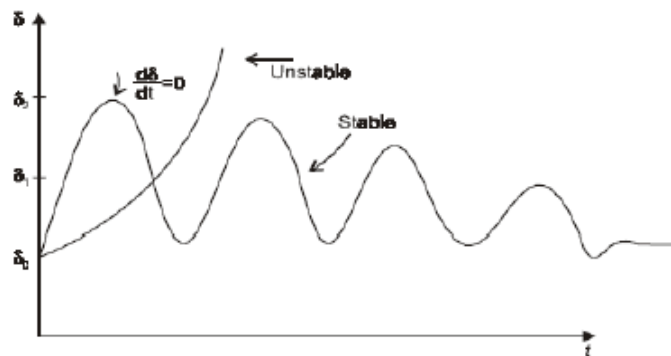
4.5 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει σταθερή την συχνότητά του κοντά στην ονομαστική τιμή λειτουργίας, μετά από την εμφάνιση σοβαρής διαταραχής, η οποία προκάλεσε σημαντική ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Στόχος είναι να διατηρεί σταθερό ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με την μικρότερη δυνατή απόρριψη φορτίου. Επομένως, η συχνότητα είναι η παράμετρος για την ένδειξη ανισορροπίας. Σε περίπτωση που η συχνότητα δεν μπορεί να διατηρηθεί σε ένα επιτρεπτό όριο τιμών κάνοντας χρήση αποθεμάτων ενεργού ισχύος, οδηγούμαστε στη μείωση φορτίου ή στην διακοπή παραγωγής. Η αστάθεια που θα προκληθεί έχει την μορφή παρατεταμένων ταλαντώσεων συχνότητας λόγω αδυναμίας απόκρισης των συστημάτων ελέγχου και προστασίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [10].

4.6 Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης

Ο συγκεκριμένος τύπος ευστάθειας αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής για αυτό και θα αναλυθεί περισσότερο. Η μεταβατική ευστάθεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό με άλλες γεννήτριες μετά από μια μεγάλη διαταραχή, η οποία εξαρτάται από τις προσφαλματικές συνθήκες, την σοβαρότητα του σφάλματος και τον τρόπο εκκαθάρισής του. Αποτελεί έναν διαφορετικό τύπο ευστάθειας της γωνίας του δρομέα. Η απώλεια του συγχρονισμού μετά την εμφάνιση της διαταραχής για πρώτη φορά, μπορεί να συμβεί σε ένα χρονικό διάστημα μεταξύ τριών και πέντε δευτερολέπτων. Όπως σε κάθε αστάθεια το σύστημα προσπαθεί να διατηρήσει ή να δημιουργήσει μια νέα κατάσταση ισορροπίας που διαφέρει από την αρχική.

Κάθε σύστημα μπορεί να επηρεαστεί από μεγάλες διαταραχές. Μερικά είδη τέτοιων διαταραχών είναι τα βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεγάλης ισχύος, η απώλεια φορτισμένης γεννήτριας, οι διακοπτικές λειτουργίες και η ξαφνική αλλαγή φορτίου. Η αστάθεια που προκύπτει μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην ταχύτητα του ρότορα, στις γωνίες και στην μεταφορά ισχύος, μέχρι την ενεργοποίηση των συστημάτων ελέγχου πραγματικής ισχύος. Για την αξιολόγηση της μεταβατικής κατάστασης χρησιμοποιούμε την γωνία και την ταχύτητα (πιο σπάνια) του δρομέα των σύγχρονων μηχανών, οι οποίες σε συνάρτηση με τον χρόνο μας δίνουν την μεταβατική συμπεριφορά μιας μηχανής του δικτύου. Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα γωνίας ισχύος σε συνάρτηση του χρόνου (Σχήμα 4.4), αναπαριστώντας τις μεταβατικές καταστάσεις ευστάθειας και αστάθειας μιας γεννήτριας. Οι δύο μεταβατικές καταστάσεις προκύπτουν όταν μια γεννήτρια υποστεί κάποια συγκεκριμένη διαταραχή, με αποτέλεσμα η γωνία του ρότορα να ταλαντεύεται γύρω από ένα σημείο (ευστάθεια) ή να αυξάνεται απότομα (αστάθεια).



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα γωνίας ισχύος γεννήτριας (δ_i) συναρτήσει του χρόνου.

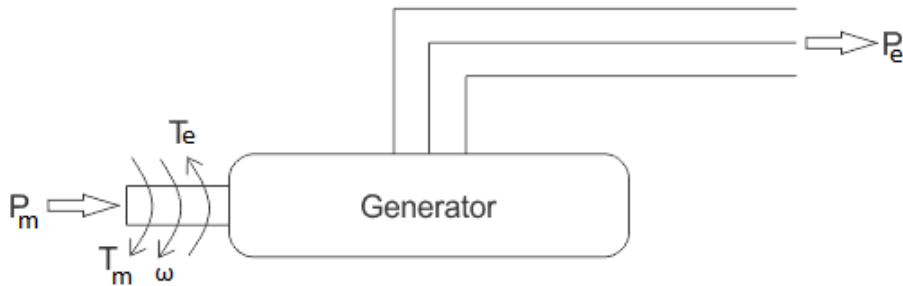
Η μεταβατική ευστάθεια μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε μια περιοχή συνδεδεμένων μηχανών που χάνουν τον συγχρονισμό τους σε σχέση με άλλες αντίστοιχες ομάδες. Η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με την απώλεια συγχρονισμού μιας μεμονωμένης γεννήτριας σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα. Οι μελέτες για την μεταβατική ευστάθεια, και για τις δύο κατηγορίες, γίνονται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα που ισοδυναμεί με τον χρόνο της πρώτης ταλάντωσης της μηχανής, που προσεγγίζει το ένα δευτερόλεπτο. Εάν το σύστημα παραμείνει σταθερό κατά την συγκεκριμένη διάρκεια θεωρούμε πως η διαταραχή καθαρίζει σταδιακά. Για να αποδειχθεί και μαθηματικά πρέπει να προσδιορίσουμε την σχέση ροής ισχύος και γωνίας που αναπτύξαμε στην ενότητα 4.1.1 και την εξίσωση ταλάντωσης που θα αναπτυχθεί στην επόμενη ενότητα. Ένας απλός τρόπος

για την πρόβλεψη και την αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας είναι το κριτήριο ίσων εμβαδών που θα εξηγηθεί παρακάτω.

4.6.1 Εξίσωση ταλάντωσης

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από έναν αριθμό σύγχρονων γεννητριών που λειτουργούν συγχρονισμένα κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας. Κατά την διάρκεια μιας διαταραχής ο ρότορας μιας γεννήτριας είτε επιβραδύνει είτε επιταχύνει ανάλογα με την διεύθυνση της ανισοροπίας, δημιουργώντας μια σχετική κίνηση. Η παραπάνω κίνηση περιγράφεται από μια μαθηματική σχέση γνωστή ως "εξίσωση ταλάντωσης". Η σχέση αυτή είναι μια μη γραμμική διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης που περιγράφει την ταλάντωση του ρότορα βασισμένη στο νόμο περιστροφής του Νεύτωνα.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρούμε μια σύγχρονη γεννήτρια που φαίνεται στο Σχήμα 4.5 στον άξονα της οποίας ασκείται από έναν κινητήρα μια μηχανική ροπή T_m με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e .



Σχήμα 4.5: Μηχανική και ηλεκτρική ροπή σύγχρονης γεννήτριας.

Η σχέση που διέπει την κίνηση του ρότορα δίνεται από την εξίσωση:

$$Ja = T_m - T_e = T_a \quad (4.3)$$

Με βάση την γωνιακή θέση του ρότορα η εξίσωση 4.3 προκύπτει ως εξής:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \quad (4.4)$$

Από την παραπάνω σχέση γνωρίζουμε ότι το J είναι η συνολική ροπή αδράνειας της μάζας του δρομέα σε kg/m^2 και θ_m είναι η γωνιακή θέση του ρότορα σε σχέση με έναν σταθερό άξονα σε rad. Η μηχανική ροπή είναι προσαρμοσμένη στις απώλειες περιστροφής για την συγκεκριμένη μελέτη.

Είναι απαραίτητο να βρούμε μια έκφραση που να παρουσιάζει την γωνιακή μετατόπιση του ρότορα θ_m σε συνάρτηση με τον χρόνο. Επειδή η γωνιακή θέση αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο, είναι προτιμότερο η γωνιακή θέση του ρότορα να εκφραστεί σε σχέση με ένα περιστρεφόμενο διάνυσμα που έχει σαν πλαίσιο αναφοράς σύγχρονη ταχύτητα ω_{sm} . Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (4.5)$$

, όπου δ_m είναι η γωνιακή μετατόπιση του ρότορα σε σχέση με το περιστρεφόμενο άξονα αναφοράς.

Αν την έκφραση 4.5 την παραγωγίσουμε ως προς τον χρόνο θα λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (4.6)$$

και παραγωγίζοντας ξανά την εξίσωση 4.6 προκύπτει:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (4.7)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 4.7 στην εξίσωση 4.4 έχουμε:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \quad (4.8)$$

Η σχέση 4.8 αναφέρεται ως εξίσωση ροπής. Εάν πολλαπλασιάσουμε με την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα αυτομάτως παίρνουμε την εξίσωση ισχύος:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e = \omega_m T_a \quad (4.9)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.9 την ποσότητα $\omega_m T$ με τον όρο P και την ποσότητα $J\omega_m$ με τον όρο σταθερά αδράνειας M ($J \cdot \text{sec}/\text{rad}$), προκύπτει η λεγόμενη εξίσωση ταλάντωσης. Η προκύπτουσα μαθηματική σχέση αναφέρεται στην ταλάντωση ή κίνηση του ρότορα της μηχανής, σε σχέση με το περιστρεφόμενο άξονα αναφοράς παρουσία διαταραχής. Έτσι προκύπτει η εξής σχέση:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (4.10)$$

Επιπλέον χρησιμοποιείται μια ακόμη σταθερά που έχει περιορισμένο εύρος τιμών για συγκεκριμένους τύπους περιστρεφόμενων μηχανών, γνώστη ως σταθερά αδράνειας H, που ορίζεται ως ο λόγος της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας σε σύγχρονη γεννήτρια (MJ)

προς την τριφασική απόδοση της μηχανής (MVA). Η σταθερά H συνδέεται με την σταθερά M ως εξής:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{M\omega_{sm}}{S_{rated}} (MJ/MVA) \quad (4.11)$$

Λύνοντας ως προς M και αντικαθιστώντας στην σχέση 4.10 προκύπτει ότι:

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

Η παραπάνω σχέση 4.12 αποτελεί την τελική έκφραση της εξίσωσης ταλάντωσης η οποία μπορεί να εκφραστεί και στο ανά μονάδα σύστημα (pu) και να λάβει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt} = P_m - P_e = P_a (pu) \quad (4.13)$$

Η εξίσωση ταλάντωσης περιγράφει την συμπεριφορά της γωνίας ισχύος η οποία αποτελεί για πολλούς μηχανικούς το κριτήριο ευστάθειας για μια μηχανή. Όταν η γωνία του ρότορα ταλαντεύεται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας για ικανό χρονικό διάστημα τότε χαρακτηρίζουμε το σύστημα ευσταθές. Στην περίπτωση που η τιμή της γωνίας αυξάνεται τότε απομακρυνόμαστε από την συνθήκη ισορροπίας και οδηγούμαστε σε αστάθεια και έλλειψη συγχρονισμού [13].

4.7 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας

Η μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας παίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε ηλεκτρολόγος μηχανικός κατά τη σχεδίαση ενός δικτύου στοχεύει στη συγκεκριμένη μελέτη καθώς αποσκοπεί στη βέλτιστη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος. Η συγκεκριμένη μελέτη μπορεί να αναλυθεί από διάφορες μεθόδους, έχοντας η κάθε μια τα πλεονεκτήματα κα μειονεκτήματα της.

Ανεξάρτητα από ποια μέθοδο χρησιμοποιηθεί, για τη πραγματοποίηση της μελέτης, ακολουθούμε κάποια συγκεκριμένα στάδια που είναι σε κάθε περίπτωση απαραίτητα. Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται:

- Να υπολογίσουμε όλες τις μεταβλητές του συστήματος πριν τη διαταραχή που τυχόν υπάρξει.
- Να γίνει εισαγωγή της διαταραχής που επιθυμούμε με την κατάλληλη τροποποίηση του μαθηματικού μοντέλου.

- Να εντοπίσουμε και να υπολογίσουμε, μέσω της εξίσωσης ταλάντωσης, τις μηχανικές ταλαντώσεις της γωνίας ισχύος.
- Από την τελευταία ανάλυση ανάλογα με την κατάσταση των ταλαντώσεων, είτε αυτές αποσβένουν είτε παρουσιάζουν μια αυξητική τάση, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το σύστημα είτε ευσταθές είτε ασταθές.

Από τα παραπάνω στάδια γίνεται φανερό ότι το βασικότερο σημείο σε μια μελέτη ευστάθειας είναι η ακρίβεια της πρόβλεψης στην ταλάντωση της γωνίας του δρομέα μετά την εμφάνιση της διαταραχής. Η επιτυχία της ακρίβειας αυτής σχετίζεται άμεσα με το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες [14]:

1. **Μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης:** Οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μελετήσουμε, μπορεί να περιγραφεί από δύο σετ εξισώσεων, αλγεβρικών και διαφορικών. Το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων σχετίζεται με τις γεννήτριες όπως τα κυκλώματα του ρότορα, οι εξισώσεις ταλάντωσης κ.λπ. και το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων με τα υπόλοιπα στοιχεία όπως το δίκτυο μεταφοράς, εξισώσεις φορτίων κ.λπ. Οι παραπάνω μέθοδοι προσφέρουν καλές δυνατότητες μοντελοποίησης.
2. **Άμεσες μέθοδοι:** Σε αυτή την κατηγορία, η μελέτη της ευστάθειας δεν απαιτεί την απευθείας επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Στοχεύει στην αποφυγή τεράστιων υπολογιστικών πράξεων μέσω της συμβατικής μεθόδου του πεδίου χρόνου. Γίνεται μελέτη της τροχιάς του σφάλματος με την παράλληλη εκτίμηση της περιοχής σταθερότητας και το προσδιορισμό του αντίστοιχου ποσοτικού δείκτη.
3. **Υβριδικές μέθοδοι:** Οι υβριδικοί μέθοδοι χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητες των αριθμητικών και άμεσων μεθόδων. Από την πρώτη κατηγορία παίρνουν τις δυνατότητες μοντελοποίησης και από την δεύτερη την ικανότητα γρήγορης ανάλυσης και πρόβλεψης αστάθειας κυρίως για μικρότερα δίκτυα.
4. **Τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης:** Αποτελούν τις μεθόδους νέας γενιάς για την αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας ενός συστήματος. Οι παραπάνω κατηγορίες θεωρούνται ντετερμινιστικές και διαφέρουν αρκετά από τις μεθόδους τεχνητής νοημο-

σύνης που θεωρούνται πιθανολογικές. Για την ευρεία χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων μεθόδων απαιτείται μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων και δεδομένων ώστε να τις θεωρούμε αποτελεσματικές. Παρ' όλα αυτά χαρακτηρίζονται για την γρήγορη ανάλυση που προσφέρουν.

Οι μελέτες στην μεταβατική ευστάθεια, με το πέρασμα των χρόνων, έχουν αναδείξει αρκετούς παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός συστήματος. Πιο συγκεκριμένα ο τρόπος σχεδιασμού της μηχανής επηρεάζει άμεσα καθώς μια μεγάλη μηχανή έχει μεγαλύτερη αδράνεια H και είναι πιο σταθερή. Επιπλέον η αντίδραση του συστήματος, καθώς περιλαμβάνει όλες τις μεταβατικές αντιδράσεις των μηχανών παραγωγής και επηρεάζει τις γωνίες φάσεις και τη ροή ισχύος. Η μορφή της διαταραχής καθώς και σε ποιο σημείο του δικτύου εφαρμόζεται επηρεάζουν άμεσα τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος που αποτελεί μέτρο σταθερότητας για ένα σύστημα.

4.8 Προσομοίωση μελέτης μεταβατικής ευστάθειας

Στην σημερινή εποχή η μελέτη της μεταβατικής κατάστασης ενός δικτύου πραγματοποιείται μέσω των κατάλληλων εργαλείων που προσφέρουν μια σειρά από δυνατότητες μοντελοποίησης. Αν και σε κάθε εργαλείο ο τρόπος προσέγγισης της προσομοίωσης και οι αριθμητικοί μέθοδοι ανάλυσης δεν ταυτίζονται, υπάρχουν κάποιοι βασικοί άξονες και λειτουργίες που παραμένουν ίδιες στη μελέτη ευστάθειας. Τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται είναι τα εξής:

1. Καθορισμός αρχικών συνθηκών λειτουργίας μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου.
2. Ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων του συστήματος όπως γεννήτριες, κινητήρες κ.λπ.
3. Ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας με τον καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί.
4. Εφαρμογή του σφάλματος μέσα από τον καθορισμό του είδους διαταραχής που θα εφαρμοστεί, σε ποιο σημείο του δικτύου και της χρονικής στιγμής που θα εμφανιστεί.
5. Ανάλυση των αποτελεσμάτων μέσω των γραφικών παραστάσεων που θα προκύψουν.

Οι γραφικές παραστάσεις που θα εξαχθούν σχετίζονται με την ταλάντωση της γωνίας του ρότορα δ , της ταχύτητας της μηχανής και της πραγματικής και αέργου ισχύος του δικτύου. Από τις παραπάνω γραφικές για τον προσδιορισμό της ευστάθειας και του κρίσιμου χρόνου χρησιμοποιούμε το διάγραμμα γωνίας ισχύος σε συνάρτηση με τον χρόνο.

4.9 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης

Για την διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας όταν στο δίκτυο εντοπίζεται κάποια διαταραχή, είναι απαραίτητο η πραγματοποίηση γρήγορης εκκαθάρισης ώστε το σφάλμα να είναι παροδικό και να διατηρηθεί το σύστημα εντός ορίου σταθερότητας. Για αυτό το λόγο υπάρχει το σύστημα ηλεκτρονόμων προστασίας με στόχο να εντοπίσει το ταχύτερο δυνατόν το πρόβλημα και να το απομονώσει με το άνοιγμα των διακοπών ισχύος. Με αυτό τον τρόπο προσπαθεί να θέσει εκτός λειτουργίας το τμήμα που εντοπίζεται το σφάλμα με το μικρότερο δυνατό κόστος, επιτρέποντας την ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου. Έτσι επιτυγχάνουμε την ελάχιστη διακοπή των υπηρεσιών και την αποφυγή καταστροφής του εξοπλισμού.

Έχοντας ορίσει την ανάγκη για εκκαθάριση ενός σφάλματος μέσω των συστημάτων προστασίας, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι όλα τα παραπάνω πρέπει να συμβούν σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με βάση αυτό ορίζουμε τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (critical clearing time - CCT) ως το μέγιστο χρόνο παρουσίας ενός σφάλματος στο δίκτυο, ο οποίος εάν ξεπεραστεί δημιουργεί απώλεια συγχρονισμού στις γεννήτριες. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου χρόνου πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης και η σταθερότητα εκτίμησης του CCT αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την διατήρηση της ευστάθειας. Επιπλέον βοηθάει στις μελέτες ευστάθειας ενός δικτύου για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών προστασίας που θα χρησιμοποιηθούν. Η μέση διάρκεια της διαδικασίας υπολογισμού βρίσκεται συνήθως κοντά στα 100ms. Η γρήγορη εκκαθάριση των βλαβών προάγει τη σταθερότητα του συστήματος ισχύος. Επίσης ο CCT θεωρείται ο πιο αποτελεσματικός και οικονομικός τρόπος βελτίωσης της ευστάθειας ενός συστήματος [5].

Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης αποτελείται από δυο χρονικά διαστήματα. Το πρώτο χρονικό διάστημα αντιστοιχεί στο χρόνο εφαρμογής των ηλεκτρονόμων (ρελέ) και ορίζεται ως ο χρόνος από την έναρξη του ρεύματος βραχυκύκλωσης μέχρι ο διακόπτης ισχύος του συστήματος λάβει το απαραίτητο σήμα ενεργοποίησης. Το δεύτερο χρονικό διάστημα ονομάζεται ως χρόνος διακοπής και ορίζεται ως ο χρόνος από την έναρξη του σήματος διακοπής

μέχρι την απομάκρυνση του ρεύματος μέσω του αντίστοιχου διακόπτη. Στην περίπτωση που ένας διακόπτης στο σημείο του σφάλματος αποτύχει να λειτουργήσει σωστά τότε η διακοπή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και κατά επέκταση του συνολικού βραχυκυκλώματος, θα γίνει από παρακείμενους διακόπτες ζώνης που δέχονται τα αντίστοιχα σήματα διακοπής. Με βάση τα παραπάνω καταλαβαίνουμε την σπουδαιότητα του κρίσιμου χρόνου στον προσδιορισμό των διακοπτικών μέσων που θα χρειαστούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα ώστε να απομονώνουν έγκαιρα τα ρεύματα βραχυκύκλωσης και να μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης βλάβης στους αγωγούς και μονωτές των γραμμών μεταφοράς.

Γνωρίζουμε ότι για τον προσδιορισμό της ευστάθειας μπορούμε να χρησιμοποιούμε το διάγραμμα ταλάντωσης της γωνίας του ρότορα δ . Για κάθε γεννήτρια που δουλεύει με ονομαστική ισχύ P_i υπάρχει μια κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης δ_{cr} , όπου θεωρείται η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η γωνία ισχύος. Η χρονική διάρκεια μέχρι η γωνία δ πάρει την κρίσιμη τιμή δ_{cr} , ισοδυναμεί με τον CCT. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο υπολογισμός του CCT γίνεται μέσω αριθμητικών ολοκληρώσεων και πιο συγκεκριμένα της αριθμητικής ολοκλήρωσης της εξίσωσης ταλάντωσης. Ο τελικός τύπος υπολογισμού του CCT φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{2H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\pi f P_i}} \quad (4.14)$$

, όπου δ_0 ορίζεται η γωνία σταθερής κατάστασης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα κάνουμε την μελέτη για τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου για ένα σύστημα 39 ζυγών. Η τελική τιμή του κρίσιμου χρόνου θα προέρχεται από την ανάλυση της καμπύλης της σχετική γωνίας του ρότορα σε συνάρτηση του χρόνου. Η γωνία δ_0 από τον τύπο 4.14 στην δικιά μας περίπτωση, θα θεωρείται η γωνία του ζυγού αναφοράς του συστήματος και η σταθερά αδράνειας H θα παίρνει τιμές ανάλογα από το μοντέλο γεννήτριας που χρησιμοποιεί το σύστημα μας.

Κεφάλαιο 5

Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες

Το ενεργειακό πρόβλημα, της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος, έχει βρεθεί στο επίκεντρο της επιστημονικής κοινότητας και η επίλυση του οποίου αποτελεί επιτακτική ανάγκη σε παγκόσμια κλίμακα. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας παραγόμενη από συμβατικά καύσιμα, λόγω των περιορισμένων αποθεμάτων και την αύξηση του κόστους, με την ταυτόχρονη μείωση παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου, εξαιτίας των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούν. Η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας αποτελεί το επίκεντρο των ερευνών, προσελκύοντας όλο και περισσότερες επενδύσεις στο συγκεκριμένο τομέα. Στόχος είναι η εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς αυτό να συνάδει την υποβάθμιση του βιοτικού μας επιπέδου, αλλά στην ανάπτυξη μιας πιο βιώσιμης λύσης που θα είναι ικανή να μειώσει-αντικαταστήσει την χρησιμοποίηση ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παράλληλα θα συμβάλει στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γνωστές και ως «πράσινη ενέργεια» αναφέρονται στην εκμετάλλευση οποιασδήποτε φυσικής διαδικασίας μπορεί να χρησιμεύσει για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση του ήλιου, του ανέμου, του εδάφους και του νερού αποτελούν τις κύριες πηγές ενέργειας που βρίσκονται σε αφθονία χωρίς την παραμικρή παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή και καύση, στο φυσικό περιβάλλον. Μερικές μορφές ενέργειας αναγνωρισμένες από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ως ανανεώσιμες, θεωρούνται η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική και από βιομάζα. Οι παραπάνω μορφές θεωρούνται «φιλικές» προς το περιβάλλον καθώς δεν ρυπαίνουν με διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά απόβλητα δίνοντας μια άλλη διάσταση στην επίλυση των οικολογικών προβλημάτων. Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στην χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας

σαν εναλλακτική πηγή, με την αντίστοιχη διείσδυση των ανεμογεννητριών στο κομμάτι του δικτύου. Θα ακολουθήσει αναλυτική προσέγγιση της αιολικής ενέργειας αλλά και των ανεμογεννητριών ως το μέσο εκμετάλλευσής της.

5.1 Αιολική Ενέργεια

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η αιολική ενέργεια είναι μια βιώσιμη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που βασίζεται στην εκμετάλλευση μιας «καθαρής» πηγής, του αέρα. Με τον όρο καθαρή τονίζουμε την σπουδαιότητα της κάθε ενέργειας να μην παράγει ρύπους και να μην προκαλεί οποιαδήποτε αλλοίωση στο φυσικό περιβάλλον. Αποτελεί μια σημαντική και γρήγορα αυξανόμενη μορφή ενέργειας και το οποίο αποτυπώνεται μέσα από την εγκατάσταση των χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων που έχουν την τάση να συνδέονται άμεσα στο δίκτυο μεταφοράς, προσφέροντας εκατοντάδες megawatts (MW).

Ο άνεμος είναι μια διακοπτόμενη και μεταβλητή πηγή ενέργειας δυσκολεύοντας την καθολική καθιέρωση του. Η αδυναμία στο κομμάτι της αποθήκευσης της παραγόμενης ισχύς σε ώρες όπου η ταχύτητα του ανέμου αγγίζει τα βέλτιστα επίπεδα, δεν την καθιστά ικανή να τροφοδοτεί ολοκληρωτικά ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί αύξηση των απαιτήσεων για εξασφάλιση αποδοτικής παραγωγής χρησιμοποιώντας νέες μεθόδους που αποσκοπούν στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ανταγωνιστικότητας. Για τους παραπάνω λόγους, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο η αύξηση εγκατεστημένης ισχύος από αιολική ενέργεια ολοένα και μεγαλώνει.



Σχήμα 5.1: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

5.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η αιολική ενέργεια παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχει διαδοθεί περισσότερο στο ευρύ κοινό λόγω της ανάπτυξης των ΑΠΕ και την άμεση εφαρμογή τους, αποτελεί μια αρχαία πηγή ενέργειας που εντοπίζονταν μέσα από διάφορες μορφές. Ήδη μέχρι τον 9ο αιώνα χρησιμοποιούνταν ανεμοκίνητα μηχανήματα για την άλεση σιτηρών, την άντληση νερού και την ανάπτυξη ανεμόμυλων για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

Έτσι φτάσαμε στο 1887 και την ανάπτυξη του πρώτου ανεμόμυλου, ύψους 10 μέτρων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον καθηγητή James Blyth. Ο συγκεκριμένος ανεμόμυλος τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ενέργεια το εξοχικό σπίτι του καθηγητή, αποτελώντας το πρώτο αυτόνομο σπίτι. Συνέχισε με την δημιουργία της πρώτης ανεμογεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά η τεχνολογία της εποχής δεν ήταν οικονομικά βιώσιμη για να μπορέσει να εδραιωθεί.

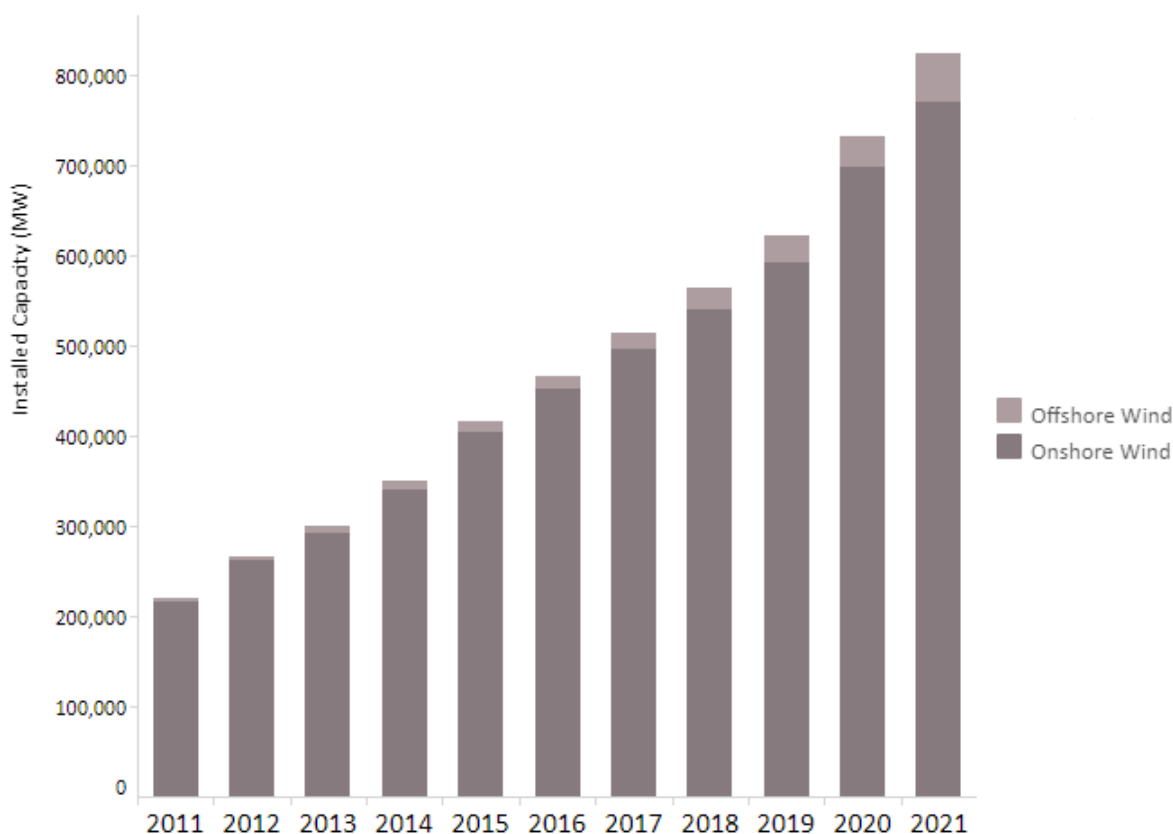
Η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αιολικής με χρήση ανεμογεννήτριας εντοπίζεται στα τέλη του 19ου αιώνα (1887-1888) από τον Charles F. Brush στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε είχε ρότορα διαμέτρου 17 μέτρων και βρισκόταν σε πύργο που άγγιζε τα 18 μέτρα. Στην αρχή χρησιμοποιούνταν για την λειτουργία 100 λαμπτήρων πυρακτώσεως και διάφορων κινητήρων. Στην συνέχεια μετά από μελέτες με τοπικά πανεπιστήμια, κατάφεραν να ηλεκτροδοτήσουν την περιοχή του Κλιβελαντ.

Με τον τερματισμό του 2ου Παγκοσμίου πολέμου η ζήτηση και το ενδιαφέρον για περαιτέρω εξάπλωση της αιολικής ενέργειας μειώθηκε αρκετά. Οι συμβατικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας είχαν εδραιωθεί μειώνοντας την ανάγκη για άλλες μορφές ενέργειας. Η μέχρι τότε εφαρμογή της αιολικής ενέργειας εντοπίζονταν μόνο για το φωτισμό κτηρίων που απείχαν από τα κεντρικά σημεία παραγωγής. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 αναζωπύρωσε τις έρευνες σε Δανία και Ηνωμένες Πολιτείες για την ανάπτυξη μεγαλύτερων ανεμογεννητριών με καλύτερες αποδόσεις ικανές να τροφοδοτούν το ηλεκτρικό δίκτυο.

Φτάνοντας στην δεκαετία του 1980 άρχισαν στο εμπόριο να κυκλοφορούν διάφορων ειδών ανεμογεννήτριες με τους δύο βασικότερους τύπους να είναι εκείνοι του οριζόντιου άξονα με πτερύγια και του κατακόρυφου άξονα. Στις αρχές του 20ου αιώνα μέσα από διάφορα προγράμματα ανάπτυξης και επενδυτικά έργα τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε Παγκόσμιο επίπεδο (π.χ. Ινδία) οδηγηθήκαμε σε αλματώδη αύξηση των αιολικών πάρκων και μεμονωμένων ανεμογεννητριών, φτάνοντας στο σημείο σήμερα τα εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα να τροφοδοτούνται από μεγάλα ποσά ενέργειας της τάξεως των gigawatt (GW) [15].

5.1.2 Σημερινή Κατάσταση

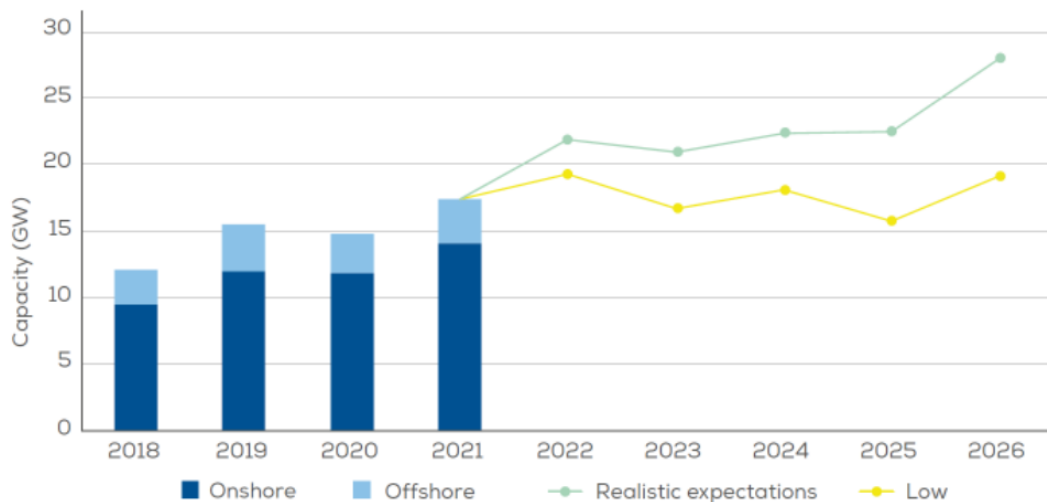
Η ανάγκη για περισσότερη παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ, αυξάνεται ολοένα και πιο πολύ τα τελευταία χρόνια. Η παγκόσμια χωρητικότητα αιολικής ενέργειας αγγίζει συνεχώς και μεγαλύτερα επίπεδα. Η αιολική ενέργεια ως μια από τις πιο ταχύτερες αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στον τομέα των ΑΠΕ και με το κόστος παραγωγής και λειτουργίας να μειώνεται συνεχώς, θεωρείται μια από τις αποδοτικότερες μορφές ενέργειας. Αυτό γίνεται εύκολο αντιληπτό αρκεί να παρατηρήσουμε ότι η εγκαταστημένη ισχύς από χερσαία και υπεράκτια πάρκα, άγγιζε τα 7.5 GW στα τέλη του 1997 και μέχρι το 2018 παρουσίασε μια αύξηση κατά 75 φορές φτάνοντας τα 564 GW. Επιπλέον το 2016 το 16% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ οφείλονταν στην αιολική ενέργεια. Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία του 2021 από το IRENA [16], η συνολική εγκαταστημένη ισχύς παγκοσμίως ξεπέρασε τα 800 GW και η σταδιακή αυτή αύξηση φαίνεται στο Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από αιολική ενέργεια.

Εξίσου σημαντικά βήματα προόδου στις ΑΠΕ παρουσιάζει και η Ευρώπη. Η αύξηση της ενεργειακής κρίσης προκαλούσε και προκαλεί αρκετούς προβληματισμούς στους ιθύνοντες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Τα τελευταία χρόνια η στροφή προς την πράσινη ενέργεια

αποτελούσε μονόδρομο για ένα πιο βιώσιμο μέλλον, στοχεύοντας στην κλιματική ουδετερότητα ως το 2050. Οι παραπάνω προβληματισμοί οδήγησαν την Ευρώπη μέχρι σήμερα να αποτελείται από 236 GW εγκατεστημένη αιολική ισχύ. Το 81% νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύς πέρυσι στην Ευρώπη εντοπίζονταν σε χερσαία αιολικά πάρκα. Χώρες όπως η Σουηδία, η Γερμανία και η Τουρκία επένδυσαν σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις χερσαίων πάρκων για την επίτευξη του στόχου για «καθαρή» ενέργεια. Στο άμεσο μέλλον και πιο συγκεκριμένα μέχρι το 2026, οι προσδοκίες αναφέρουν την ανάπτυξη καινούριων αιολικών πάρκων όπου η ισχύς τους θα αγγίζει τα 116 GW όπου το 75% των οποίων θα αποτελούν χερσαία πάρκα. Ο στόχος του 40% από ανανεώσιμες πηγές είναι πιο εφικτός από ποτέ. Στο Σχήμα 5.3 αναπαριστώνται σε διάγραμμα οι στόχοι της ΕΕ την περίοδο 2022-2026 για αιολική ενέργεια με την απεικόνιση των μέχρι στιγμής επιτευγμάτων [1].



Σχήμα 5.3: Στόχοι εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη μέχρι το 2026. [1]

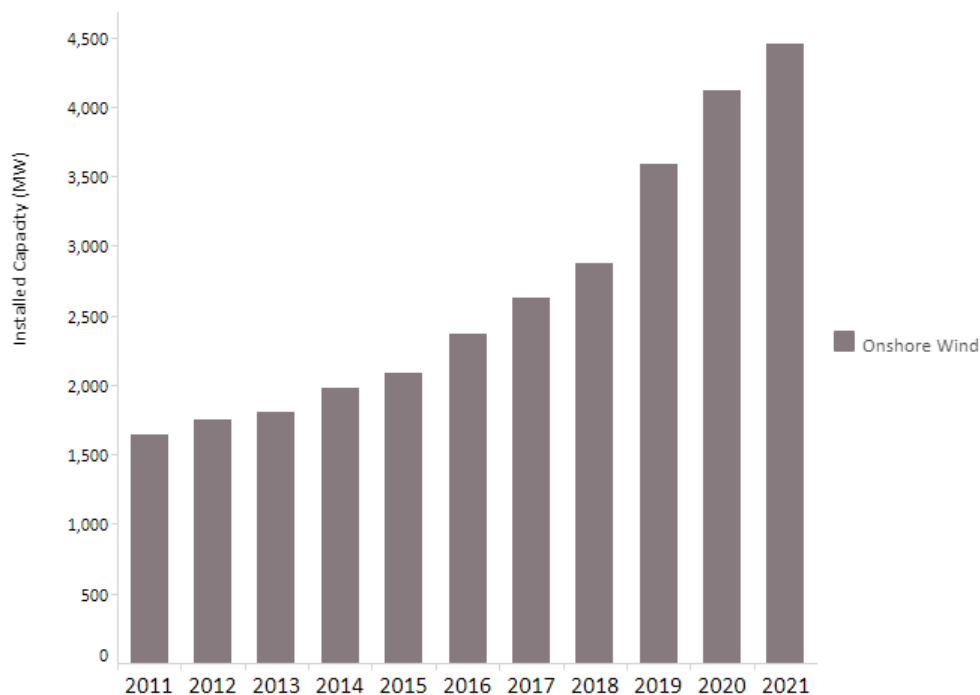
Στην Ευρώπη το 16% της συνολικής ηλεκτρικής ισχύς οφείλεται σε αιολική ενέργεια. Εάν επικεντρωθούμε σε μεμονωμένες χώρες αυτό το ποσοστό αυξάνεται δραματικά με τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα να εντοπίζονται σε χώρες όπως η Δανία όπου το ποσοστό αγγίζει το 48%, την Ιρλανδία 38%, την Γερμανία 27% και την Πορτογαλία με 24%. Η ΕΕ θεωρεί πως η αιολική ενέργεια θα είναι το ήμισυ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας φτάνοντας τα 1300 GW έως το 2050.

Η Ελλάδα σαν μέλος της ΕΕ δεν θα μπορούσε να απέχει από την ανάπτυξη της πράσινης ενέργειας με χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις ΑΠΕ συμβαδίζει με το εθνικό σχέδιο και τους αναπτυξιακούς νόμους για την εγκατάσταση άλλων πηγών ενέργειας πέρα των συμβατικών. Η μεγάλη έκταση ακτογραμμής και η παρουσία

πληθώρα νησιών τόσο στη θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου όσο και του Ιονίου την καθιστά ως περιοχή σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη αιολικής ενέργειας.

Η εδραίωση των ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο και το έντονο αντίκτυπό τους στην ημερήσια κατανάλωση ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2020 και πιο συγκεκριμένα στις 8 Ιουνίου, ημέρα ορόσημο, καθώς δεν καταναλώθηκε καμία κιλοβατώρα από την παραγωγή ενέργειας μέσω λιγνίτη. Ακολούθησε η 14η Σεπτεμβρίου του 2020 όπου η πράσινη ενέργεια μέσα από τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα σε συνδυασμό με τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποτέλεσαν το 57% της ζήτησης ηλεκτροπαραγωγής. Την επόμενη χρονιά σημείο αναφοράς ήταν το πρώτο τρίμηνο του 2021 στο οποίο σημειώθηκε ρεκόρ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο έφτασε στο 49.13%.

Η απότομη αύξηση της αιολικής ενέργειας στην χώρα μας ξεκίνησε από το 2019, όταν περισσότερα νέα αιολικά πάρκα ισχύος 727.5 MW συνδέθηκαν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τετραπλασιάζοντας τον ετήσιο μέσο όρο που βρίσκονταν κοντά στα 185 MW. Η εγκατεστημένη αιολική χωρητικότητα την χρονιά εκείνη κυμαίνονταν στα 3.600 MW. Ακολούθησε το 2020 όπου η ηλεκτρική ισχύς από αέρα έφτασε τα 4.100 MW. Η σταθερή πορεία συνεχίστηκε και το 2021 καθώς η εγκατεστημένη ισχύς σε αιολική ενέργεια πλησίασε τις 4.500 MW. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 5.4 που αποτυπώνει την πρόοδο σε εγκατεστημένη αιολική ισχύ από το 2011-2021 από την IRENA [1].



Σχήμα 5.4: Εγκατεστημένοι αιολική ισχύς Ελλάδος.

Φτάνοντας στο σήμερα και επιλέγοντας μια τυχαία ημέρα παρατηρήσαμε ότι στις 9 Μαΐου του 2022 η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καλύφθηκε στην Ελλάδα από αιολική ενέργεια αποτέλεσε το 28% του συνολικού μείγματος παραγωγής που αντιστοιχεί σε 32.1 GWh. Η συγκεκριμένη παραγωγή προήρθε από χερσαία αιολικά πάρκα και αποτέλεσε την τέταρτη καλύτερη απόδοση από τις χώρες της ΕΕ βρισκόμενη πίσω από το Ηνωμένο Βασίλειο με 38.7%, την Δανία με 38.2% και την Σουηδία με 29.8%.

5.1.3 Αιολική ενέργεια και μεταβατική ευστάθεια

Με τον παγκόσμιο ενεργειακό μετασχηματισμό προς ένα 100% σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε ΑΠΕ, η εγκατεστημένη ισχύς από «πράσινες» πηγές έχει λάβει ραγδαίες επεκτάσεις τα τελευταία 10 χρόνια. Η μεταβατική σταθερότητα και η αβεβαιότητα της παραγωγής ενέργειας ενός συστήματος ισχύος με υψηλή διείσδυση από ΑΠΕ αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις ως προς την σταθερή και ασφαλή λειτουργία. Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας βασισμένη σε νέες τεχνολογίες και η γρήγορη εφαρμογή της στο δίκτυο μεταφοράς, έχει οδηγήσει στην πραγματοποίηση αρκετών ερευνών για την ομαλή ένταξή της και την συνέχιση της αξιόπιστης τροφοδοσίας όπως οι μέχρι στιγμής συμβατικές πηγές. Η ανάπτυξη μεγάλων αιολικών πάρκων με διαφόρων τύπων ανεμογεννήτριας, που θα αναλυθούν παρακάτω, μπορούν άμεσα να επηρεάσουν την μεταβατική σταθερότητα του δικτύου λόγω και της ιδιαιτερότητας της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν.

Ένα μεγάλο ποσοστό από τις ανανεώσιμες πηγές εντοπίζεται στην αιολική ενέργεια. Η ένταξή της σε μεγάλη κλίμακα προκαλεί μείωση στην αδράνεια και στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος προσελκύοντας την προσοχή αρκετών μηχανικών. Η ανάγκη για αποτελεσματική ανάλυση και αξιολόγηση της επίδρασής της στην διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος, είναι απαραίτητη για την βελτιστοποίηση της ασφαλούς λειτουργίας του δικτύου. Η μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη μορφή ενέργειας εντοπίζεται και στις μελέτες ευστάθειας καθώς τόσο η θέση εγκατάστασης αιολικών πάρκων όσο και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζουν άμεσα την συγκεκριμένη μελέτη. Οι συνήθεις τρόποι για την αξιολόγηση της ανάλυσης μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος ισχύος είναι μέσω της προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου και της άμεσης μεθόδου.

Ένα σύστημα ισχύος έρχεται συχνά αντιμέτωπο με μικρές και μεγάλες διαταραχές. Τέτοιων ειδών διαταραχές είναι οι αλλαγές στην ζήτηση του φορτίου, η απώλεια κάποιου στοιχείου όπως γεννήτρια ή γραμμή μεταφοράς και η εμφάνιση βραχυκυκλωμάτων. Στόχος του

συστήματος σε μια διαταραχή είναι η διατήρηση της σταθερότητας και η επίτευξη μιας νέας κατάστασης ισορροπίας με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες. Ανεξαρτήτου δομής δικτύου είτε αυτό αποτελούνταν από συμβατικές πηγές είτε από μια μίξη με ανεμογεννήτριες ο στόχος παραμένει ίδιος. Η μελέτη των επιπτώσεων της διαταραχής στην γωνία του ρότορα μιας γεννήτριας και στις τάσεις των ζυγών κρίνεται αναγκαία πριν την σύνδεση αιολικών πάρκων. Για αυτό το λόγο σημαντικό ρόλο έχει και ο τύπος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται καθώς η κάθε μία με τα χαρακτηριστικά της μπορεί να επηρεάσει αντίστοιχα.

Η ανισορροπία και η ανακατανομή της πραγματικής και αέργου ισχύος μπορεί να οδηγήσει την τάση να κυμανθεί πέρα από τα συνηθισμένα όρια ευστάθειας. Η ύπαρξη περιόδου χαμηλής τάσης μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη απώλεια ισχύος. Όταν παρατηρείται πτώση τάσης του δικτύου, τα διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη των ανεμογεννητριών θα υποβληθούν σε ηλεκτρομαγνητικές μεταβατικές διεργασίες με αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς να μην μπορεί να μεταδοθεί στο δίκτυο προκαλώντας μια σειρά από προβλήματα. Η μη ισορροπημένη ισχύ μεταξύ των μετατροπέων στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας του ρότορα.

Με βάση τα παραπάνω ο έλεγχος αέργου ισχύος και η διατήρηση της τάσης στα αιολικά πάρκα αποτελεί σημαντική πρόκληση για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος που βασίζονταν παλιότερα ήταν στην προσαρμογή της παραγωγής ή στην απορρόφηση αέργου ισχύος των σταθμών παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται τεχνολογίες ώστε οι υπηρεσίες ελέγχου τάσης να υποστηρίζονται από τις ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα. Μπορεί να μην αποτελεί την πιο εφικτή λύση και να απαιτείται μια βελτίωση της στρατηγικής ελέγχου, η οποία να επηρεάζεται από τις δυνατότητες αέργου ισχύος του αιολικού πάρκου, από τους εναλλάκτες φορτίου των μετασχηματιστών και την τοποθέτηση συσκευών αντιστάθμισης. Μια τέτοια συσκευή είναι ο στατικός αντισταθμιστής βολτό-αμπέρ (Static VAR Compensator -SVC) που χρησιμοποιείται για την απόκλιση της τάσης και της αέργου ισχύος [17].

5.1.4 Τεχνητή νοημοσύνη και αιολική ενέργεια

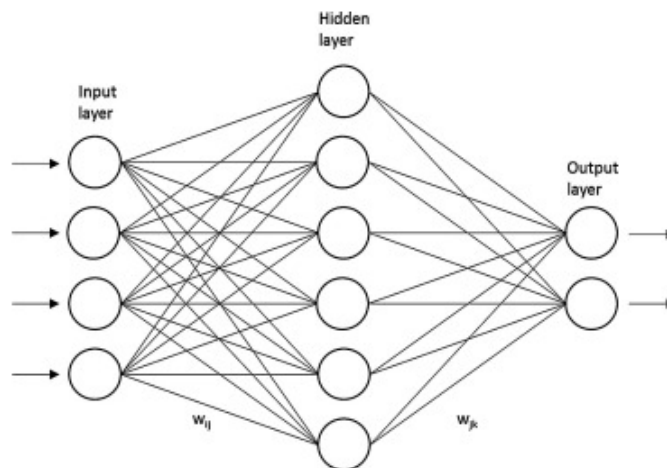
Όπως έχει ήδη επισημανθεί και από τις προηγούμενες ενότητες οι ΑΠΕ αποτελούν το κύριο βήμα για την μετάβαση σε ένα πιο «πράσινο» μέλλον ικανό να καταπολεμήσει την κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις της. Η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει δημιουργήσει πολλές δυνατότητες για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Κάθε μορφή ανανεώσιμης ενέργειας απαιτείται να συμβαδίζει με την πρόοδο της τεχνολογίας. Επομένως, η αιολική ενέργεια σαν μια από της πιο ανεπτυγμένες μορφές ενέργειας, θα πρέπει να πορευτεί και να υιοθετήσει νέες μεθόδους. Τα συστήματα μετατροπής είναι πιο εξελιγμένα και απαιτούνται νέες προσεγγίσεις και προηγμένες αναλύσεις.

Η αιολική ενέργεια υποβάλλεται τα τελευταία χρόνια σε μια διαδικασία εκσυγχρονισμού όπου ο αριθμός των απαιτήσεων έχει αυξηθεί για να διασφαλιστεί η αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Εφαρμόζονται νέοι μέθοδοι για την τεχνική και οικονομική πρόοδο της αιολικής παραγωγής. Από τεχνικής πλευράς οι προσπάθειες προσανατολίζονται στην αξιοποίηση του ανέμου στο μέγιστο επίπεδο μέσα από την:

- Αεροδυναμική βελτιστοποίηση των ανεμογεννητριών.
- Βελτίωση των σχημάτων των πτερυγίων και αυτοματοποίηση τους.
- Μελέτη της καμπύλης ισχύος υπό διαφορετικές συνθήκες
- Μέγιστη αξιοποίηση ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο.

Οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με μεγάλο αριθμό συσκευών και αισθητήρων με σκοπό την απόκτηση δεδομένων προκειμένου να προσδιορίζουν την κατάσταση του συστήματος. Η συλλογή δεδομένων απαιτεί και την ταυτόχρονη ανάπτυξη μεθόδου για την άμεση αξιοποίησή τους προς βελτίωση των συστημάτων. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της ικανότητάς τους να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων. Η ενσωμάτωση των τεχνικών νευρωνικών δικτύων σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής δείχνει και την αξιοπιστία της μεθόδου που χρησιμοποιεί.

Τα τεχνικά νευρωνικά δίκτυα είναι πολύπλοκες δομές που βασίζονται σε βιολογικούς νευρώνες. Παρέχουν λύσεις σε προβλήματα που δεν μπορούν να προσδιοριστούν αναλυτικά. Οι νευρώνες είναι απλές μονάδες επεξεργασίας που συνδέονται μεταξύ τους (Σχήμα 5.5), με μια τέτοια δομή να είναι το πολυστρωματικό perceptron. Κάθε διασύνδεση μεταξύ νευρώνων χαρακτηρίζεται από μια τιμή που ονομάζεται βάρος γραμμής. Το νευρωνικό λαμβάνει το



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα νευρωνικού δικτύου [2].

σύνολο των δεδομένων και ξεκινάει μια διαδικασία εκπαίδευσης για να προσαρμόσει τα βάρη με κατάλληλη τιμή. Το παραπάνω αποτελεί μια τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου για την πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας.

Η πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ενέργειας είναι ένα πολύπλοκο έργο καθώς εξαρτάται άμεσα από προμηθευτές ενέργειας, παράγοντας της αγοράς, ιδιοκτήτες και διαχειριστές αιολικών πάρκων. Έχει αποδειχθεί ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι αποτελεσματικά όταν οι φυσικές διεργασίες δεν είναι κατανοητές και περίπλοκες. Οι κύριες παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τις προβλέψεις είναι η ταχύτητα του ανέμου και η αιολική ισχύς. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι αποτελεσματικά για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, για βελτιστοποιήσεις, για έλεγχο κ.λπ.

Η προσέγγιση για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να καθοριστεί με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες και την χρονική κλίμακα που αντλούνται αυτές. Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη βοηθάει στην ημερήσια αγορά ενέργειας, τον προγραμματισμό διαχείρισης και ελέγχου των συστημάτων. Η μεταβλητότητα του ανέμου τόσο ως προς την ταχύτητα όσο και προς την κατεύθυνση δεν βοηθάει στις μακροπρόθεσμες μελέτες και επικεντρώνεται στις μελέτες των αμέσως επόμενων ωρών για την βέλτιστη πρόβλεψη.

Η γρήγορη εξάπλωση της αιολικής ενέργειας απαιτεί και βελτιστοποίηση των μοντέλων πρόβλεψης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύς. Η ισχύς που προέρχεται μέσω της αιολικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου, με αποτέλεσμα η ακριβής βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη να είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία των συστημάτων. Τα νευρωνικά δίκτυα θεωρούνται από τα πιο δημοφιλή μέσα για την πρόβλεψη τα τελευταία χρόνια καθώς χρησιμοποιούν πληθώρα ιστορικών δεδομένων για την παραγωγή της πρόβλεψης.

Η βελτίωση της απόδοσης πρόβλεψης μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση μετεωρολογικών μεταβλητών και γενικών μεταβλητών που σχετίζονται με την καθημερινότητά μας. Όλα τα μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται στα τεχνικά νευρωνικά δίκτυα, στηρίζονται στο μεγάλο όγκο βάσης δεδομένων για την βέλτιστη λειτουργία τους [2].

5.2 Ανεμογεννήτριες

Η ανεμογεννήτρια αποτελεί την κύρια μηχανή που μέσω του ανέμου και της κινητικής ενέργειας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή της απαρτίζεται από μια κάθετη στήλη προς το έδαφος, στην κορυφή της οποίας βρίσκεται μια τουρμπίνα που περιστρέφεται με την βοήθεια πτερυγίων. Χρησιμοποιούνταν για την φόρτιση μπαταριών και για την τροφοδότηση ενέργειας σε καταναλωτές μικρής ζήτησης. Τα τελευταία χρόνια με την ανάγκη για στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές, οι ανεμογεννήτριες συγκροτούν τα αιολικά πάρκα τα οποία και τροφοδοτούν με μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας τα δίκτυα μεταφοράς.

Η διαδικασία μετατροπής κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική παραμένει ίδια ασχέτου τύπου ανεμογεννήτριας. Με την βοήθεια ενός ανεμοδείκτη, που τοποθετείται στην κορυφή κάθε ανεμογεννήτριας, διαπιστώνουμε την κατεύθυνση του ανέμου. Ο άνεμος περνά πάνω από τα πτερύγια, με αποτέλεσμα την δημιουργία ανύψωσης και μιας δύναμης στρέψης. Τα περιστρεφόμενα πτερύγια περιστρέφουν έναν άξονα στο εσωτερικό της ατράκτου, κατάλληλο για την γεννήτρια, η οποία μέσω των μαγνητικών πεδίων μετατρέπει την περιστροφική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στην συνέχεια, η ισχύς εξόδου πηγαίνει σε έναν μετασχηματιστή μέσω καλωδίων τόσο εντός του πυλώνα όσο και υπογείως, ο οποίος μετατρέπει την παραγόμενη ενέργεια από τη γεννήτρια περίπου στα 700V στην κατάλληλη τάση τροφοδοσίας, συνήθως τα 33kV, ώστε να μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο [18, 19].

Η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράξει μια ανεμογεννήτρια δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από κάποιες συγκεκριμένες παραμέτρους:

- **Ταχύτητα του ανέμου:** Ανάλογα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας συνήθως ισχύει ότι όσο δυνατότεροι άνεμοι πνέουν η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας αυξάνεται. Η αφετηρία για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται κοντά στα 4-25 μέτρα το δευτερόλεπτο.
- **Μήκος πτερυγίων:** Η μεγαλύτερη επιφάνεια σάρωσης από τον αέρα για ένα πτερύγιο

ισοδυναμεί με παράλληλη αύξηση της παραγωγής. Για παράδειγμα σε μερικές περιπτώσεις ο διπλασιασμός του μήκους οδηγεί σε τετραπλασιασμό της παραγωγής.

- **Πυκνότητα αέρα:** Η πυκνότητα του αέρα που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και την πίεση του αέρα επηρεάζει άμεσα την κίνηση των πτερυγίων.

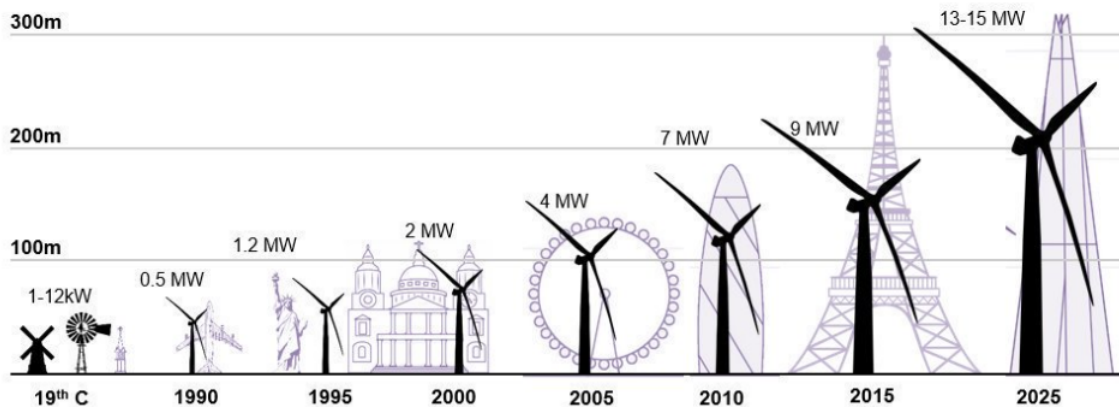
Η ηλεκτρική ισχύς που μπορούν παράξουν οι ανεμογεννήτριες κυμαίνονται από λίγα kW μέχρι και 12MW. Βέβαια τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της μεγαλύτερης ζήτησης αιολικής ενέργειας η παραγόμενη ισχύς ολοένα και αυξάνεται. Βάση της θεωρίας ο τύπος που μας δίνει την τιμή της παραγόμενης ισχύς είναι ο παρακάτω:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5.1)$$

όπου ρ = πυκνότητα του αέρα (προσεγγιστικά ισούται με 1.225 kg m^{-3}), A = η επιφάνεια της περιοχής που βρίσκεται ο ροτορας, m^2 και v = η ταχύτητα του ανέμου, m/s. Πιο συγκεκριμένα η σχέση 5.1 δίνει την διαθέσιμη ισχύ στον άνεμο ενώ η πραγματική ισχύς που μεταφέρεται στο ρότορα της ανεμογεννήτριας μειώνεται κατά το συντελεστή ισχύος C_p . Με βάση τον συγκεκριμένο συντελεστή η σχέση 5.1 μετασχηματίζεται ως εξής [18]:

$$P_{windturbine} = C_p \cdot P_{air} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5.2)$$

Η μέγιστη τιμή του C_p ορίζεται από το όριο Betz, το οποίο αναφέρει πως μια γεννήτρια δεν μπορεί ποτέ να αντλήσει περισσότερο από το 59.3% της ισχύς από ένα ρεύμα αέρα. Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών με τον πέρασμα των χρόνων τόσο σε τεχνολογία όσο και σε δομικά χαρακτηριστικά είχε σαν αποτέλεσμα την σταδιακή αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η ανάπτυξη αυτή αποτυπώνεται και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Εξέλιξη διαστάσεων ανεμογεννητριών.

5.2.1 Αιολικά πάρκα

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν την κύρια πηγή ηλεκτρισμού έχοντας ως κύριο μέσο τον άνεμο. Μπορούν να σταθούν ως μεμονωμένες γεννήτριες τροφοδοτώντας μικρότερα φορτία μικρής κατανάλωσης και ως μια ομάδα ανεμογεννητριών, τα λεγόμενα αιολικά πάρκα. Τα τελευταία χρόνια τα αιολικά πάρκα αποτελούν μια μεγάλη επένδυση στον τομέα της ενέργειας και αποτελούν πλέον μια σταθερή πηγή ενέργειας στο κάθε δίκτυο. Η ανάπτυξη που παρατηρείται στο κομμάτι των ανεμογεννητριών ως προς τον τομέα της παραγωγής, του ελέγχου, της συντήρησης κ.λπ. φέρνει και παράλληλη ανάπτυξη σε κάθε αιολικό πάρκο. Τα αιολικά πάρκα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα χερσαία και τα υπεράκτια πάρκα.

Τα αιολικά πάρκα μεγάλης χωρητικότητας ήταν παραδοσιακά χερσαίες εγκαταστάσεις για διάφορους λόγους. Η εύκολη πρόσβαση στο σημείο εγκατάστασης διευκόλυνε την εφαρμογή των ανεμογεννητριών μειώνοντας τον χρόνο παραλαβής του έργου προς χρήση. Επιπλέον το χαμηλό κόστος συντήρησης και η εγγύτητα σε γραμμές μεταφοράς οδήγησαν τις περισσότερες χώρες στην επένδυση σε χερσαία πάρκα λαμβάνοντας υπόψη και τα αρνητικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα υπεράκτια. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε θαλάσσια ύδατα προμηνύει και αύξηση του κόστους κατά δύομιση φορές λόγω των ακριβών θεμελίων που θα χρειαστούν. Η διαδικασία εγκατάστασης της τουρμπίνας θεωρείται κατά 20% πιο δαπανηρή σε σχέση με μια χερσαία και ταυτόχρονα πιο δύσκολη λόγω της περιορισμένης πρόσβασης που οφείλεται στις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, δυσκολεύοντας και την διαδικασία συντήρησης των συγκεκριμένων πάρκων.

Παρ'όλα αυτά, υπάρχουν χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Δανία, η Ολλανδία και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες που έχουν αναπτύξει υπεράκτια αιολικά πάρκα συνυπολογίζοντας και τα θετικά στοιχεία που μπορεί να προσφέρει η συγκριμένη επένδυση. Οι λόγοι που καθιστούν τα υπεράκτια πάρκα κερδοφόρα ως προς την παραγωγή ενέργειας είναι οι παρακάτω:

- Έλλειψη αιολικών πόρων στην ξηρά λόγω της αύξησης των πυκνοκατοικημένων περιοχών.
- Η ταχύτητα του ανέμου σε υπεράκτιες περιοχές είναι μεγαλύτερη και πιο σταθερή σε βάθος χρόνου.
- Γνωρίζοντας ότι η ενέργεια που λαμβάνεται από μια ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, οδηγεί στην αύξηση της παραγωγής.

- Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος όπως ο ηχητικός θόρυβος, η καταστροφή της βιοποικιλότητας και η αντιαισθητική εικόνα ελαττώνεται σε μεγάλο βαθμό σε θαλάσσιες περιοχές.
- Λιγότερες αναταράξεις που βοηθούν στην αποτελεσματική συλλογή ενέργειας και μείωση των φορτίων κόπωσης στον στρόβιλο.

Οι παραπάνω λόγοι είναι οι κύριοι παράγοντες που ωθούν περισσότερες πλέον χώρες να επενδύσουν σε θαλάσσια αιολικά πάρκα, ειδικά εκείνες που λόγω και της γεωγραφικής τους θέσης ευνοούνται από μια τέτοια επένδυση.

Τα αιολικά πάρκα, ανεξαρτήτως τοποθεσίας, στοχεύουν στην αύξηση της ετήσιας παραγωγής με την χρησιμοποίηση νέων τεχνικών στο κατασκευαστικό κομμάτι και στο κομμάτι της έρευνας. Η υποστήριξη της συνολικής παραγωγής μόνο από αιολική ενέργεια δεν υφίσταται την δεδομένη χρονική στιγμή, καθώς η αδυναμία αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες δεν είναι ικανή. Η ιδανική λύση εντοπίζεται στο υβριδικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί μια μίξη παραγωγής από αιολική ενέργεια ή και άλλων ΑΠΕ με την παράλληλη συμμετοχή συμβατικών παραδοσιακών πηγών (όπως λιγνίτης).

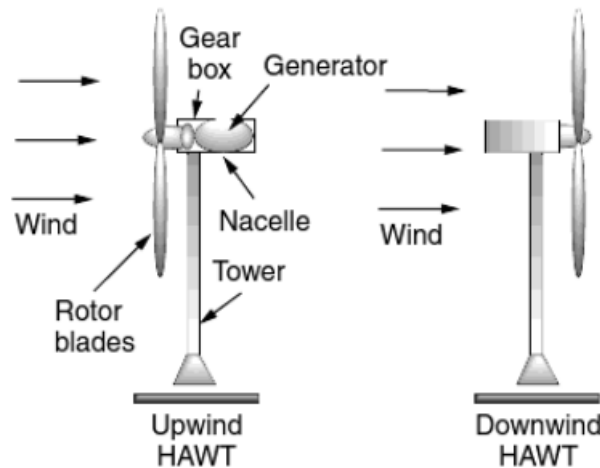
5.3 Τύποι Ανεμογεννητριών

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας στον τομέα των ανεμογεννητριών έχει βοηθήσει στην σχεδίαση διαφορετικών τύπων γεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής τους, σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και κάθετου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι εκείνες του οριζόντιου άξονα καθώς παράγουν μεγαλύτερο όγκο ενέργειας και έχουν καλύτερη απόδοση συγκριτικά με εκείνες του κάθετου άξονα. Επιπλέον, η ταχύτητα περιστροφής αποτελεί ένα είδος κατηγοριοποίησης για αυτό και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν σε σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας.

5.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα - HAWT

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Horizontal-Axis Wind Turbines - HAWT) αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένων ανεμογεννητριών παγκοσμίως. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου, το καθιστούν ως τους κύριους μετατροπής αιολικής

ενέργειας. Τα HAWT χρησιμοποιούν αεροδυναμικά πτερύγια προσαρμοσμένα σε ρότορα τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν είτε προς την κατεύθυνση του ανέμου (downwind) είτε προς την αντίθετη κατεύθυνση (upwind). Οι πιο συχνές μορφές τέτοιων ανεμογεννητριών αποτελούνται συνήθως είτε από δύο είτε από τρεις λεπίδες καθώς μπορούν να λειτουργούν με υψηλές ταχύτητες. Μια αναπαράσταση των συγκεκριμένων κατηγοριών HAWT φαίνονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Κατηγορίες οριζόντιου άξονα ανεμογεννητριών.

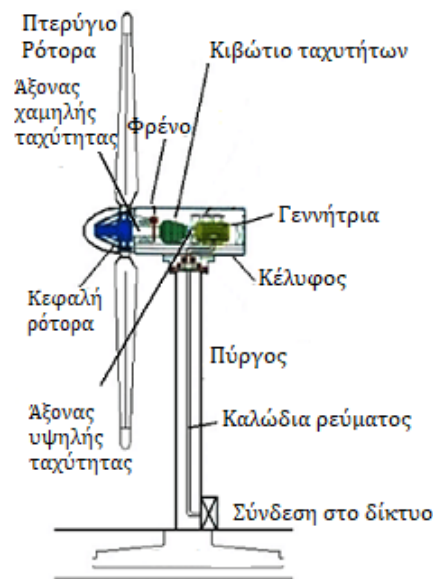
Οι ανεμογεννήτριες αντίθετης κατεύθυνσης εμφανίζουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα καθώς ο άνεμος προσπίπτει κατευθείαν στα πτερύγια, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αεροδυναμική παρέμβαση του πύργου στήριξης. Η απουσία ευθυγράμμισης με την κατεύθυνση του ανέμου απαιτεί την ύπαρξη μηχανισμού εκτροπής που θα βοηθάει στην απόκτηση προσανατολισμού. Θεωρείται ο πιο συνηθισμένος τρόπος λειτουργίας καθώς παράγει λιγότερο θόρυβο και μειώνει την κόπωση του ρότορα.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες που η διαμόρφωση τους βασίζεται στην κατεύθυνση του ανέμου έχουν μειωμένη απόδοση, καθώς ο άνεμος συναντά πρώτα τον πύργο στήριξης και το κέλυφός του, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιόμορφη φόρτιση στα πτερύγια. Δεν απαιτούν επιπρόσθετο μηχανισμό για την εκτροπή των πτερυγίων καθώς διαθέτουν κωνικά πτερύγια που επιτρέπουν τον στρόβιλο να προσανατολίζεται μόνος του.

Οι HAWT επηρεάζονται άμεσα από την κατεύθυνση του ανέμου και αντιμετωπίζουν αρκετές δυσκολίες όταν τοποθετούνται κοντά σε διάφορα αντικείμενα. Η διαφοροποίηση που μπορεί να προκύψει στην κατεύθυνση του ανέμου όταν παρεμβάλλονται διάφορα εμπόδια φέρνουν σε μειονεκτική θέση όλη την γεννήτρια λόγω της δυσκολίας να ευθυγραμμιστεί σωστά και γρήγορα. Στις περιπτώσεις που πρέπει να εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια σε αστικές

περιοχές, γίνονται μελέτες για την τοποθέτησή της σε ψηλά σημεία, απομακρυσμένη από εμπόδια για να μειωθούν οι αναταράξεις.

Και στις δύο κατηγορίες HAWT ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής είναι παράλληλος με το έδαφος. Στην κορυφή του πύργου βρίσκεται το κέλυφος της ατράκτου για να παρέχει επαρκές χώρο για την περιστροφή της λεπίδας του ρότορα και για να φτάσει σε καλύτερες συνθήκες ανέμου. Το κέλυφος υποστηρίζει την πλήμνη του ρότορα που συγκρατεί τα πτερύγια, στεγάζει το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και σε κάποιες περιπτώσεις και τους μετατροπείς ισχύος. Επιπλέον, επειδή οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου μπορεί να προκαλέσουν ζημιά σε ολόκληρο το μηχανισμό, κάθε ανεμογεννήτρια είναι εφοδιασμένη με φρένο για την μείωση της ταχύτητας του ρότορα. Μερικά από τα κύρια μέρη της ανεμογεννήτριας και της ατράκτου φαίνονται στο Σχήμα 5.8. Το κιβώτιο ταχυτήτων συμβάλει στην



Σχήμα 5.8: Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

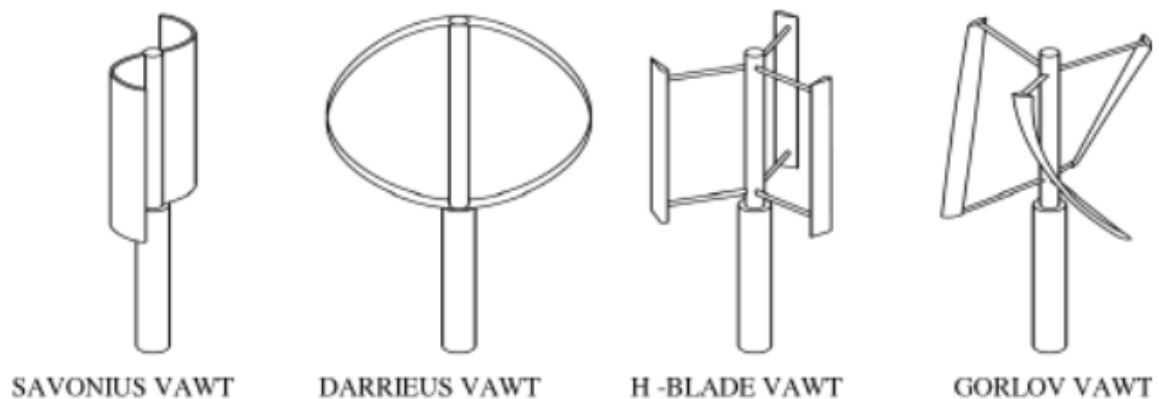
ταχύτερη περιστροφή του ρότορα για την επίτευξη συγχρονισμού μαζί με την γεννήτρια για την ομαλή μεταφορά ισχύος. Οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν την αεροδυναμική ανύψωση για την περιστροφή των λεπίδων του ρότορα με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο που πετάει ένα αεροπλάνο. Η καμπυλότητα των πτερυγίων δημιουργεί μια διαφορά πίεσης στο πάνω και κάτω άκρος του πτερυγίου με σκοπό την γέννηση μιας δύναμης προς την κατεύθυνση της κορυφής του πτερυγίου [18, 19].

5.3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα - VAWT

Στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα περιστροφής (Vertical-Axis Wind Turbine - VAWT) ο προσανατολισμός του άξονα είναι κάθετος στο έδαφος. Σε αντίθεση με τις οριζόντιες ανεμογεννήτριες μπορούν να περιστραφούν σε οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να χρειάζεται να επανατοποθετηθεί ο ρότορας όταν αλλάζει η κατεύθυνση του ανέμου. Ο ρότορας του στροβίλου χρησιμοποιεί κυρτές κατακόρυφα τοποθετημένες αεροτομές. Η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται στην βάση της τουρμπίνας στο έδαφος. Τα πτερύγια του ρότορα που μπορούμε να συναντήσουμε σε τέτοιου είδους ανεμογεννήτριες ποικίλουν σε σχήματα και αριθμό. Μερικά από τα πιο γνωστά είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα που χρησιμοποιούνται είναι:

- Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius
- Ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus
- Ανεμογεννήτριες υβριδικές, τύπου H-Blade
- Ανεμογεννήτριες με ελικοειδή πτερύγια, τύπου Gorlov

Τα παραπάνω φαίνονται και στο ακόλουθο Σχήμα 5.9.



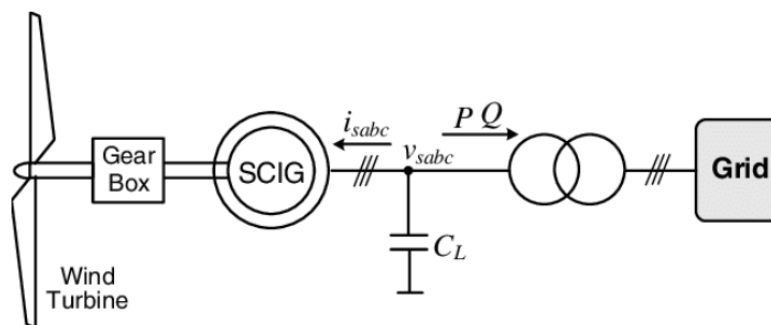
Σχήμα 5.9: Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα [3].

Στον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννητριών υπάρχουν μερικά μειονεκτήματα που δεν βοήθησαν στην περαιτέρω εξάπλωση τους και ευρεία εφαρμογή τους σε μεγάλα αιολικά πάρκα. Η έλλειψη συστήματος αυτόματης εκκίνησης, ο μικρότερος συντελεστής ισχύος, η συχνή διακοπή των περιστροφών λόγω περιοδικών αλλαγών στην δύναμη ανύψωσης και η ρύθμιση για συνεχή παραγωγή ισχύος που δεν είναι ακόμη βέλτιστη, τις κατατάσσουν σε ποσοστό κοντά στο 1% των συνολικών εφαρμοσμένων ανεμογεννητριών [18, 19].

5.3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας - FSWT

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (Fixed-Speed Wind Turbine -FSWT) θεωρούνται από τις πιο απλές και οικονομικές συγκριτικά γεννήτριες. Η ανάπτυξή τους ξεκίνησε στην δεκαετία του 1980-1990 όπου εντοπίζεται και η αρχή της αιολικής βιομηχανικής επανάστασης. Όπως μαρτυρεί και το όνομα του συγκεκριμένου τύπου, αναφερόμαστε σε ανεμογεννήτριες όπου περιστρέφονται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα. Η τιμή αυτή της ταχύτητας καθορίζεται από τον λόγο μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων, τη συχνότητα του δικτύου που την λαμβάνει ως συχνότητα αναφοράς και τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας. Η μέγιστη απόδοση μετατροπής μπορεί να επιτευχθεί κάτω από μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου και ταυτόχρονα υποβαθμίζεται κάτω από άλλες ταχύτητες. Ο στρόβιλος σταθερής ταχύτητας παράγει υψηλές διακυμάνσεις ισχύος εξόδου στο δίκτυο, προκαλώντας σε μεγάλο βαθμό διαταραχές στο δίκτυο.

Αυτός ο τύπος τουρμπίνας απαιτεί στιβαρό μηχανικό σχεδιασμό για την απορρόφηση υψηλών μηχανικών καταπονήσεων. Τα FSWT αποτελούνται από μια ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια (Squirrel Cage Induction Generator - SCIG), και ένα πολλαπλό κιβώτιο ταχυτήτων για την μετατροπή μηχανικής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επιπλέον είναι εξοπλισμένες με έναν εκκινητή (soft starter) και μια συστοιχία πυκνωτών για την μείωση της επίδρασης κατανάλωσης αέργου ισχύος και τα οποία τοποθετούνται στην κορυφή της τουρμπίνας εκτός του κελύφους της ατράκτου. Το κιβώτιο ταχυτήτων δέχεται σαν είσοδο την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και παράγει σαν έξοδο υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια περιστρέφει τον άξονα της γεννήτριας εντός του κελύφους και ο στάτορας συνδέεται άμεσα μέσω μετασχηματιστή στο δίκτυο. Η τουρμπίνα προστατεύεται με αεροδυναμικό έλεγχο των πτερυγίων από πιθανές ζημιές λόγω ισχυρών ανέμων. Η αναπαράσταση μια τέτοιας ανεμογεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 5.10



Σχήμα 5.10: Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας -FSWT.

Οι FSWT είναι σχεδιασμένες για να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απόδοση βασισμένες σε μια οριακή τιμή ταχύτητας, έχοντας χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Τα τελευταία χρόνια έχουν σχεδιαστεί νέα συστήματα που τις επιτρέπουν να διαθέτουν δύο συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής για παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας. Το παραπάνω σχεδιαστικό μοντέλο μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση δύο γεννητριών ή μιας γεννήτριας δύο περιελίξεων στον στάτη. Η γεννήτρια περιελίξεων διαθέτει ένα συγκεκριμένο αριθμό πόλων (συνήθως οκτώ) για χαμηλές ταχύτητες ανέμου και έναν άλλο αριθμό πόλων (τέσσερα έως έξι) για μεσαίες και υψηλές ταχύτητες.

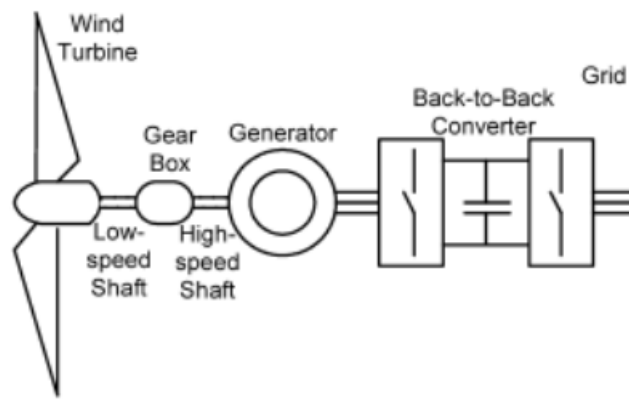
Τα FSWT εκτός από το οικονομικό κόστος συντήρησης, εγκατάστασης και αξιοπιστίας που παρουσιάζουν σε υπεράκτιες περιοχές, όπου οι συνθήκες λειτουργίας είναι πιο σταθερές, δεν εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό. Η υψηλή μηχανική καταπόνηση, οι διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου και κατά συνέπεια στο δίκτυο που συνδέονται, ο επιπρόσθετος εξοπλισμός αντιστάθμισης αέργου ισχύος και η έλλειψη ποιότητας ισχύος τις καθιστούν αποτρεπτικές για την παραγωγή μεγάλης ποσότητας ισχύος.

5.3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας - VSWT

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (Variable-Speed Wind Turbine - VSWT) αποτελούν τις πιο συχνά εμφανιζόμενες γεννήτριες από τις συνολικά εγκατεστημένες που συναντάμε είτε σε μεγάλα αιολικά πάρκα είτε σε μεμονωμένες μικρές ομάδες. Η εφαρμογή τους εντοπίζεται στην δεκαετία 1920-1930 που τροφοδοτούσαν κατοικίες και φόρτιζαν μπαταρίες. Η πρώτη εμπορική φιλοσοφία του συγκεκριμένου τύπου εντοπίζεται το 1980 και μετέπειτα. Είναι ειδικά σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ένα μεγάλο φάσμα ταχυτήτων ανέμου, πετυχαίνοντας μέγιστη απόδοση μετατροπής ενέργειας. Ο στρόβιλος μπορεί να προσαρμόζει συνεχώς τη ταχύτητα περιστροφής του, με σκοπό να «συλλάβει» την μέγιστη αεροδυναμική ισχύ του ανέμου, καθώς τόσο η ταχύτητα όσο και η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλονται συνεχώς.

Στον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας συναντάμε ένα κιβώτιο ταχυτήτων πολλαπλών σταδίων για την ενίσχυση της ταχύτητας περιστροφής έναντι χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση λειτουργίας βασισμένη στην μεταβλητότητα του ανέμου. Ως γεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μια ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Double-Fed Induction Generator - DFIG) και μια γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα. Οι απαιτήσεις σε συγκεκριμένη τιμή συχνότητας του δι-

κτύου, επηρεάζονται από τα ασταθή χαρακτηριστικά της ταχύτητας του ανέμου και χρειάζονται ειδικές ρυθμίσεις με τη μορφή μετατροπέων για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη συχνότητα βασισμένη στις υπάρχουσες απαιτήσεις. Οι μετατροπείς της γεννήτριας μετατρέπουν πρώτα το επερχόμενο σήμα σε DC για την διατήρηση της ροπής και της ταχύτητας υπό έλεγχο μέσω παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος. Στην συνέχεια οι μετατροπείς από την πλευρά του δικτύου μετατρέπουν το σήμα από DC σε AC για έλεγχο της άεργης ισχύος και της επερχόμενης τάσης. Για την επίτευξη των παραπάνω ελέγχων υπάρχουν διάφορες τεχνικές και τοπολογίες. Μια αναπαράσταση του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας - VSWT.

Τα κύρια και πλέον σημαντικά πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας είναι η αυξημένη παραγωγή αιολικής ενέργειας, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος προς το δίκτυο και η μειωμένη μηχανική καταπόνηση. Τα αποτρεπτικά στοιχεία έχουν σχέση με το επιπρόσθετο κόστος κατασκευής, το κόστος των απωλειών από την ύπαρξη των μετατροπέων και από το περίπλοκο σύστημα ελέγχου που διαθέτουν οι γεννήτριες τέτοιας κατηγορίας.

5.4 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Η γεννήτρια και οι μετατροπείς ισχύος ενός συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας, αποτελούν τα κύρια ηλεκτρικά στοιχεία. Διαφορετικοί σχεδιασμοί και συνδυασμοί των δύο αυτών στοιχείων μπορούν να δώσουν και διαφορετικής λειτουργικότητας ανεμογεννήτρια. Υπάρχουν γεννήτριες που είτε παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) είτε συνεχές ρεύμα (DC). Τέτοιες γεννήτριες τριών φάσεων στηρίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα για την παραγωγή τριφασικής ή μονοφασικής τάσης. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες γεννητριών:

- Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος
- Σύγχρονες γεννήτριες
- Ασύγχρονες (ή επαγωγικές) γεννήτριες

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος εντοπίζονται σε ανεμογεννήτριες και συστήματα μικρής χωρητικότητας που δεν συνδέονται στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο επικεντρωθήκαμε στις επόμενες δύο κατηγορίες και κυρίως τις επαγωγικές γεννήτριες που απασχολούν το μεγαλύτερο μέρος των συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας. Για κάθε μια από τις δύο τελευταίες κατηγορίες υπάρχουν και οι αντίστοιχες ανεμογεννήτριες που τις αντιπροσωπεύουν και τις συναντάμε σε διάφορες εγκαταστάσεις. Ανάλογα με κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται στις:

1. Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG).
2. Σύγχρονη γεννήτρια περιέλιξης πεδίου (Field Winding Synchronous Generator - FWSG).

Αντίθετα οι ασύγχρονες γεννήτριες επαγωγικού χαρακτήρα μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

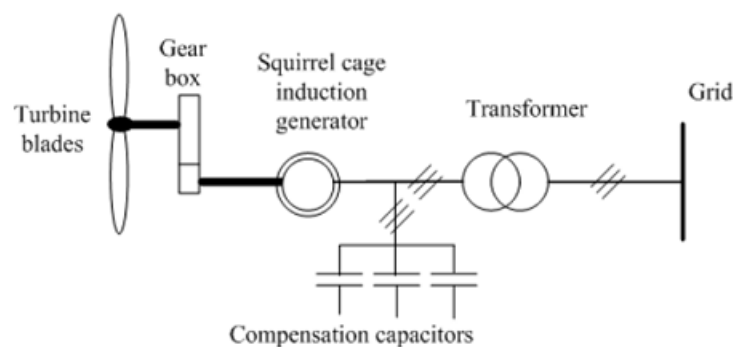
1. Ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα (Squirrel Cage Induction Generator - SCIG).
2. Ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator - WRIG).
3. Ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (Doubly Fed Induction Generator - DFIG).

Οι ασύγχρονες επαγωγικές μηχανές είναι ευρέως γνωστές για την ασύγχρονη φύση που παρουσιάζουν. Σε αυτές τις γεννήτριες απαιτείται ένα εξωτερικό ρεύμα διέγερσης για την ύπαρξη μαγνητισμού. Ο συγκεκριμένος τύπος γεννήτριας εφαρμόζεται κατά κόρο καθώς μπορεί να ανταπεξέλθει στην μεταβλητή φύση του ανέμου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε μόνο σε αυτή την κατηγορία γεννητριών και για αυτό ακολουθεί ανάλυση των τύπων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

5.4.1 Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα - SCIG

Οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα θεωρούνται από τις γεννήτριες που τις συναντάμε συχνά σε αιολικά πάρκα. Κατασκευαστικά θεωρούνται απλές με εξαιρετική απόδοση και χωρίς μεγάλες απαιτήσεις συντήρησης και ελέγχου. Ο όρος βραχυκυκλωμένος δρομέας προέρχεται από το γεγονός ότι τοποθετούνται αγωγίμοι ράβδοι στις σχισμές του ρότορα που μέσω δακτυλίων βραχυκυκλώνουν τα δύο άκρα. Έχουν την ιδιαιτερότητα να συμπεριφέρονται ως γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, πετυχαίνοντας την καλύτερη δυνατή απόδοση, για παραγωγή μικρών ποσοτήτων. Μπορούν επίσης να συμπεριφέρονται και ως γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, εισάγοντας μετατροπέα ισχύος πλήρους ρυθμού μεταξύ του δικτύου και των γεννητριών. Η διάταξη του συγκεκριμένου τύπου φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.12.

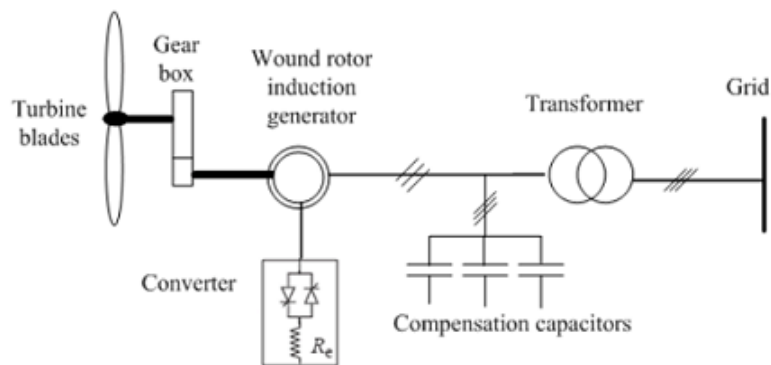
Σημαντικό μειονέκτημα είναι η σχέση που υπάρχει μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της αέργου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, για ανεμογεννήτριες τύπου SCIG, εγκυμονεί φυσιολογική αύξηση της παραγόμενης ποσότητας ενεργού ισχύος και ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος. Για να αντισταθμιστεί το παραπάνω γεγονός απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός όπως ηλεκτρονικά ισχύος ή συστοιχίες πυκνωτών για να μπορούν να καλύψουν την ανεξέλεγκτη ζήτηση αέργου ισχύος όταν παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η συστοιχία πυκνωτών χρησιμοποιείται για αύξηση του συντελεστή ισχύος κοντά στην μονάδα στοχεύοντας την μηδενική παρουσία αέργου ισχύος. Σε περίπτωση όπου αυτή η αντιστάθμιση δεν είναι εφικτή πραγματοποιείται μέσω του δικτύου με αποτέλεσμα να οδηγήσει το συνολικό σύστημα σε αστάθεια. Η σύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο επιτρέπει την ροή μεταβατικών ρευμάτων προς το σύστημα και εξαιτίας των συχνών διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να προκληθεί αστάθεια τάσης και καταστροφή στον εξοπλισμό [4, 20].



Σχήμα 5.12: Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα - SCIG [4].

5.4.2 Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα - WRIG

Αποτελεί ένα είδος ασύγχρονης γεννήτριας που συναντάμε σε μικρότερο βαθμό σε ανεμογεννήτριες σε σχέση με τις SCIG. Διαθέτουν έναν εξωτερικό μηχανισμό για τον έλεγχο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της εξόδου του ρότορα. Οι περιελίξεις που εντοπίζονται στον ρότορα μπορούν να συνδεθούν με ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος ή με δακτύλιους ολίσθησης. Σε πολλές πρακτικές οι δακτύλιοι ολίσθησης μπορούν να αποφευχθούν τοποθετώντας το κύκλωμα αντίστασης στον άξονα του ρότορα. Το παραπάνω μειώνει τις ανάγκες συντήρησης αλλά προσθέτη επιπλέον απαγωγή θερμότητας εντός της γεννήτριας. Η μεταβλητή αντίσταση ρότορα αποτελείται από έναν μετατροπέα σε συνδυασμό με μια γέφυρα διόδου και ενός κόφτη IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Όταν παρατηρείται αλλαγή στις τιμές της συγκεκριμένης αντίστασης αλλάζουν ταυτόχρονα και τα χαρακτηριστικά ταχύτητας της γεννήτριας με αποτέλεσμα να παρέχεται επιτάχυνση. Επιπλέον μπορούν να ελέγξουν γρήγορα την τάση του ρότορα για να διατηρήσουν συνεχή την ισχύ. Παρ' όλα αυτά θεωρούνται δαπανηρές συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες SCIG και ταυτόχρονα η δομή τους χαρακτηρίζεται από έλλειψη στιβαρότητας και απλότητας. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της ανεμογεννήτριας Σχήμα 5.13 [20].



Σχήμα 5.13: Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα - WRIG [4].

5.4.3 Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια τύπου WRIG η οποία δέχεται την μηχανική ισχύς του ρότορα και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Αποτελεί μια από τις κύριες διαμορφώσεις μετατροπέων αιολικής ενέργειας στην σημερινή βιομηχανία. Όπως υποδηλώνει το όνομά της μπορεί να τροφοδοτεί ενέργεια στο δίκτυο και από τα δύο άκρα, δηλαδή και από τον ρότορα και από τον στάτορα. Οι περιελίξεις του στάτη συνδέονται απευθείας με το δίκτυο ενώ από την πλευρά του ρότορα μεσολαβούν μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μειωμένης χωρητικότητας πριν την σύνδεση με το δίκτυο. Η τυπική τιμή τάσης του στάτορα για το εμπορικό DFIG ισούται με 690V και η ονομαστική ισχύς κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες KW έως αρκετά MW.

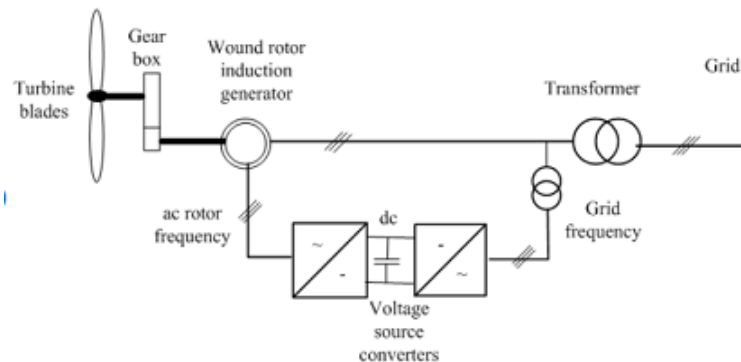
Ο μετατροπέας ισχύος από την πλευρά του ρότορα ελέγχει τη ροπή ή την ενεργό/άεργο ισχύ της γεννήτριας ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση από την DC πλευρά εξασφαλίζοντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και από την AC την άεργη ισχύ. Επειδή το σύστημα διαθέτει την ικανότητα ελέγχου της αέργου ισχύος δεν απαιτείται η ύπαρξη εξωτερικού μηχανισμού για την αντιστάθμισή της. Οι ανεμογεννήτριες DFIG θεωρούνται μεταβλητής ταχύτητας καθώς ο μετατροπέας μπορεί να τροφοδοτεί με διάφορες συχνότητες προκειμένου να αποσυνδέσει τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα από την σύγχρονη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου επιτρέποντας τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, όταν η γεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση υπερ-συγχρονισμού η ισχύς μεταφέρεται από τον ρότορα δια μέσου των μετατροπέων στο δίκτυο ενώ αντίθετα όταν βρίσκεται σε υπο-συγχρονισμό ο ρότορας απορροφά ενέργεια από το δίκτυο μέσω των μετατροπέων [20].

Το εύρος της ταχύτητας που μπορεί να φτάσει ένα σύστημα αιολικής ενέργειας DFIG κυμαίνεται κοντά στο $\pm 30\%$ της ονομαστικής τιμής της σύγχρονης γεννήτριας. Ένα τέτοιο περιθώριο τιμών ταχύτητας μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις συνθήκες ανέμου, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε σε γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Η μέγιστη ισχύς που επεξεργάζεται το κύκλωμα του δρομέα καθορίζεται από την μέγιστη ολίσθηση που θα παρουσιαστεί και αναλογεί στο 30% της ονομαστικής ισχύος. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η ροή ισχύος στο κύκλωμα είναι αμφίδρομη γεγονός που απαιτεί την ύπαρξη μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων. Η χρήση μετατροπέων μειωμένης χωρητικότητας καθορίζει την συμπεριφορά της γεννήτριας μετά από διαταραχές, οδηγεί σε μείωση του κόστους, του βάρους και του μεγέθους της γεννήτριας. Ακολουθεί το Σχήμα 5.14 στο οποίο φαίνεται το διάγραμμα της

ανεμογεννήτριας.

Η συγκεκριμένη τύπου ανεμογεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί υβριδική μηχανή επειδή περιέχει χαρακτηριστικά σύγχρονης επαγωγικής γεννήτριας καθώς διαθέτει έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος. Κάποια από τα θετικά του συγκεκριμένου τύπου είναι:

- Ότι ο ρότορας έχει αντοχή σε υψηλή ταχύτητα.
- Εκμεταλλεύονται το κύκλωμα του ρότορα για να μαγνητιστούν.
- Μπορούν να προσαρμόσουν την λειτουργία τους προς την άεργο ισχύος για να ελέγχουν την τάση.
- Διαθέτουν μόνωση σε μέγιστες τιμές τάσης μετατροπέα.
- Έχουν μεγάλη απόδοση λειτουργίας και μεγιστοποιημένη κερδοφορία.



Σχήμα 5.14: Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG [4].

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση μελέτης

6.1 Περιγραφή προβλήματος προσομοίωσης

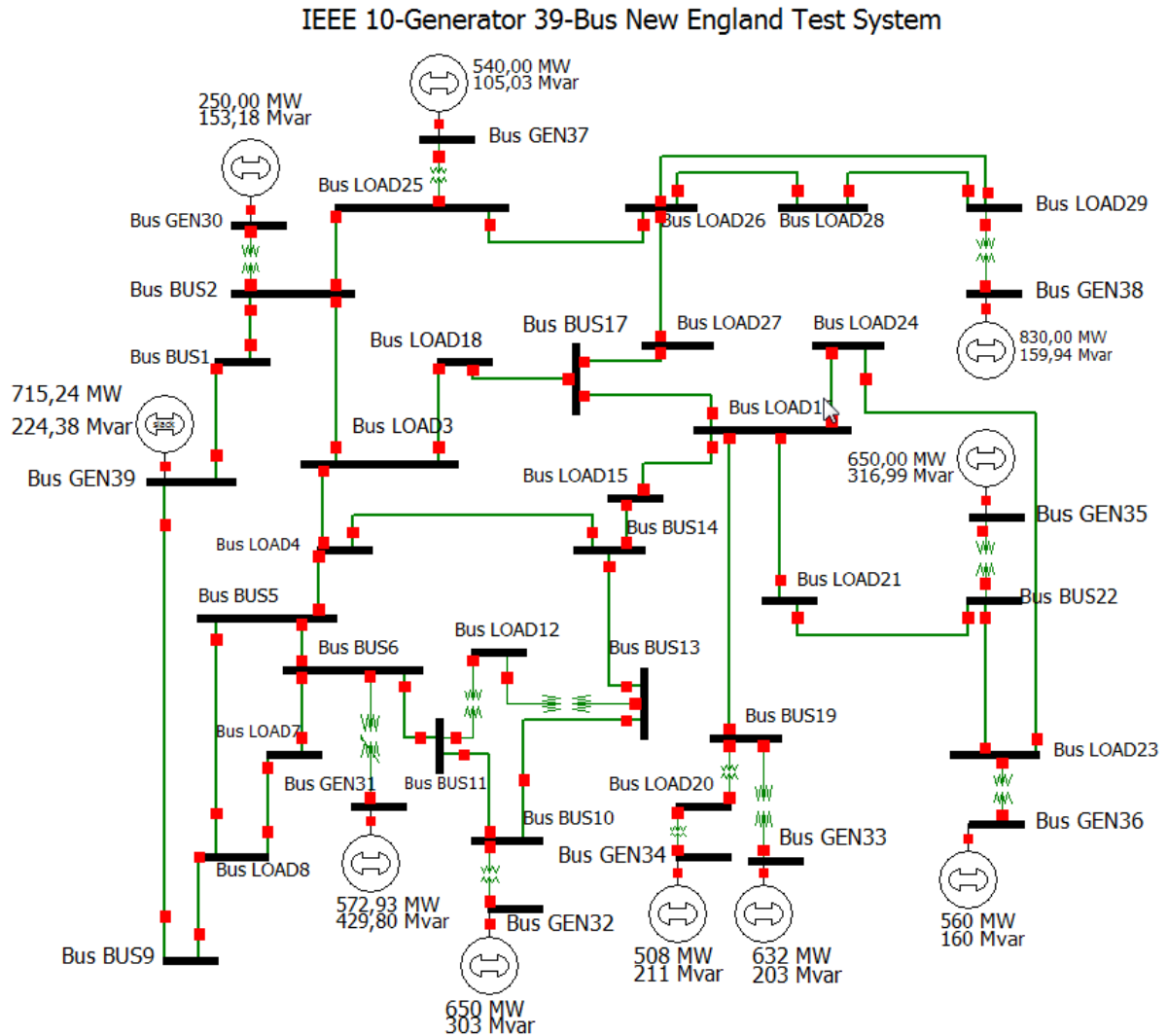
Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας ενός συστήματος 39 ζυγών της IEEE (Σχήμα 6.1) που αναφέρεται στην Νέα Αγγλία (New England). Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από:

- 39 ζυγούς, με τον ζυγό 39 να θεωρείται ζυγός αναφοράς (swing bus),
- 10 συμβατικές γεννήτριες,
- 10 μετασχηματιστές,
- 46 γραμμές μεταφοράς,
- 19 φορτία.

Η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος ισούται με 5908,2 MW και άεργου ισχύος με 2266,3 Mvar. Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο Παράρτημα Α στο τέλος της διπλωματικής.

Σκοπός της μελέτης είναι η διατήρηση της ισορροπίας του δικτύου με την εμφάνιση συγκεκριμένων διαταραχών μέσω της ταχείας εκκαθάρισής τους από το δίκτυο. Επειδή αναφερόμαστε σε μεταβατική ευστάθεια οι διαταραχές στις οποίες επικεντρώνεται η συγκεκριμένη μελέτη αφορά βραχυκυκλώματα (συμμετρικά και ασύμμετρα). Οι δύο πιο συνηθισμένες μορφές βραχυκυκλώματος στις οποίες ένα ηλεκτρικό δίκτυο έρχεται αντιμέτωπο θεωρούνται το τριφασικό συμμετρικό στερεό βραχυκύκλωμα (3phase solid fault) και μονοφασικό με τη γη ασύμμετρο βραχυκύκλωμα (SLG). Με βάση αυτό, τα σφάλματα που θα εφαρμόσουμε και

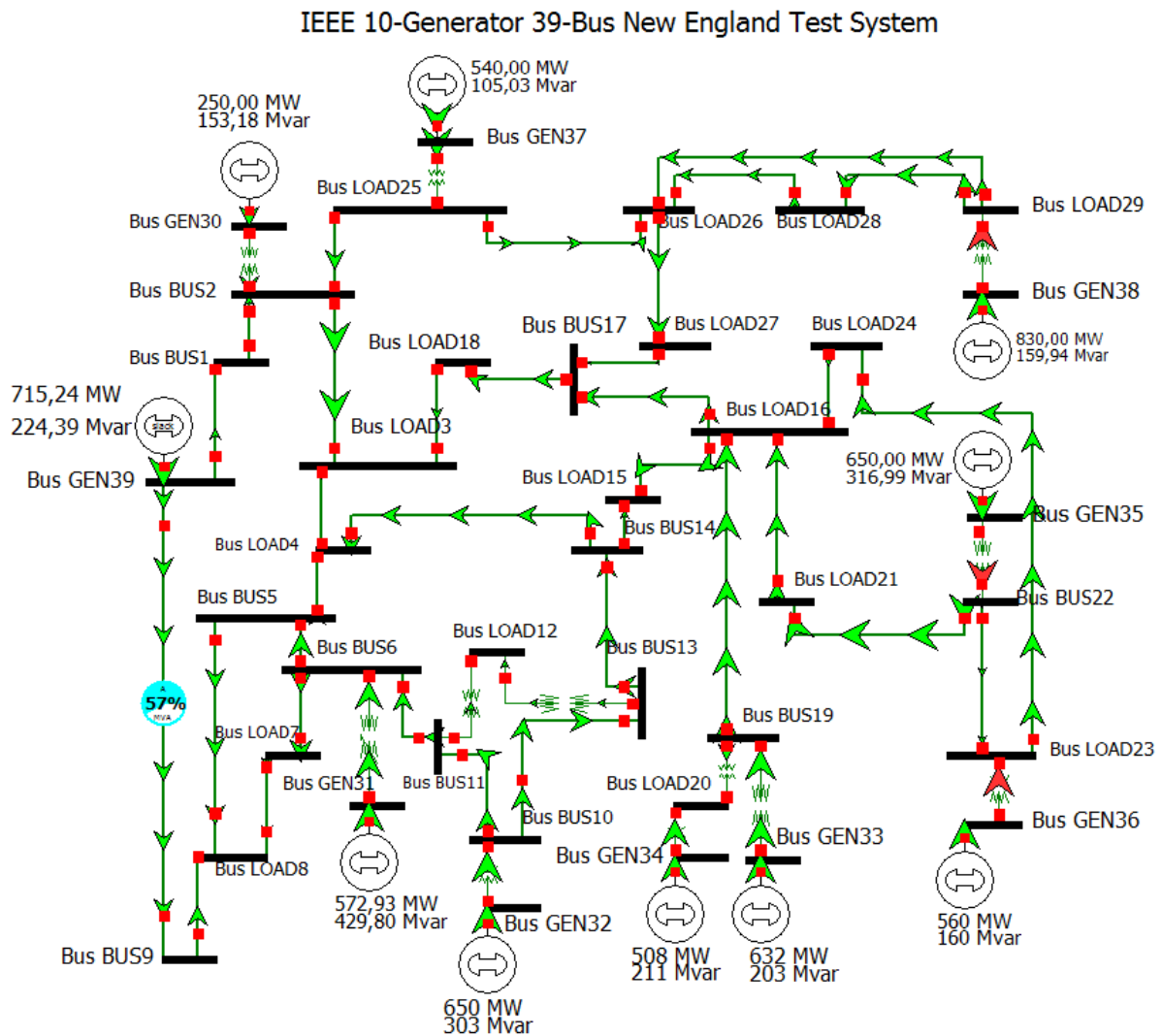
στην δικιά μας προσομοίωση θα αφορούν 3phase fault και SLG κοντά σε κάποιους ζυγούς του συστήματος μας, στους οποίους θα αναφερθούμε παρακάτω. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ο προσδιορισμός του CCT ώστε να μπορέσουμε να το χαρακτηρίσουμε ευσταθές.



Σχήμα 6.1: Σύστημα 39 ζυγών IEEE.

Πιο συγκεκριμένα μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου τόσο όταν η παραγωγή ενέργειας προέρχεται εξ ολοκλήρου από συμβατικές πηγές όσο και όταν υπάρχει αντικατάσταση του 20% και 30% της παραγωγής από ανεμογεννήτριες. Πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τον υπολογισμό των CCT και στις τρεις περιπτώσεις. Το πρόγραμμα πάνω στο οποίο πραγματοποιούμε την μελέτη είναι το PowerWorld Simulator το οποίο καλύπτει τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης παρέχοντας δυνατότητες ανάλυσης, λειτουργίας και οικονομίας του συστήματος.

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.2 φαίνεται η ροή φορτίου όπως εκείνη προκύπτει από τις απαιτήσεις του δικτύου σε ζήτηση ενέργειας. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το PowerWorld βασίζεται στον επαναληπτικό αλγόριθμο Newton Raphson. Ο παραπάνω αλγόριθμος είναι ο πιο διαδομένος για την επίλυση ροής φορτίου λόγω της ταχύτητας της σύγκλισης. Η εκτενής αναφορά στην διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος βρίσκεται στο Κεφάλαιο 2.

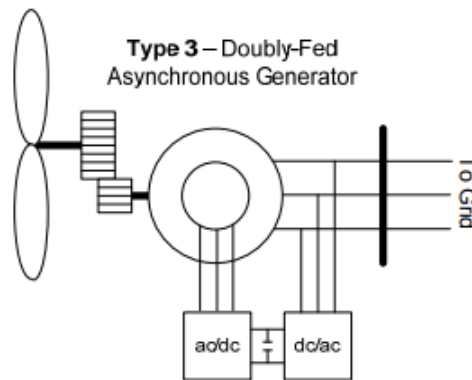


Σχήμα 6.2: Ανάλυση ροής φορτίου - σύστημα 39 ζυγών IEEE.

Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή του τύπου ανεμογεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και στον τρόπο εισαγωγής της στο PowerWorld. Γίνεται ανάλυση της μελέτης ευστάθειας και του κρίσιμου χρόνου βασισμένες στις δυνατότητες του προγράμματος. Στην συνέχεια ακολουθεί αναφορά στα σενάρια προσομοίωσης που θα εφαρμοστούν και παράθεση των αποτελεσμάτων σε επόμενη ενότητα. Τέλος, πραγματοποιείται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

6.2 Ενσωμάτωση ανεμογεννητριών

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η μελέτη της ευστάθειας και εν γένει του δικτύου μας, θα επικεντρωθεί και στην διεξόδηση σταθμών παραγωγής αιολικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα ανεμογεννητριών διπλής τροφοδοσίας (DFIG) καθώς αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο στις μέρες μας. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και το αντίστοιχο διάγραμμα που αναφέρεται στην βιβλιογραφία του προσομοιωτή PowerWorld φαίνεται στο Σχήμα 6.3.

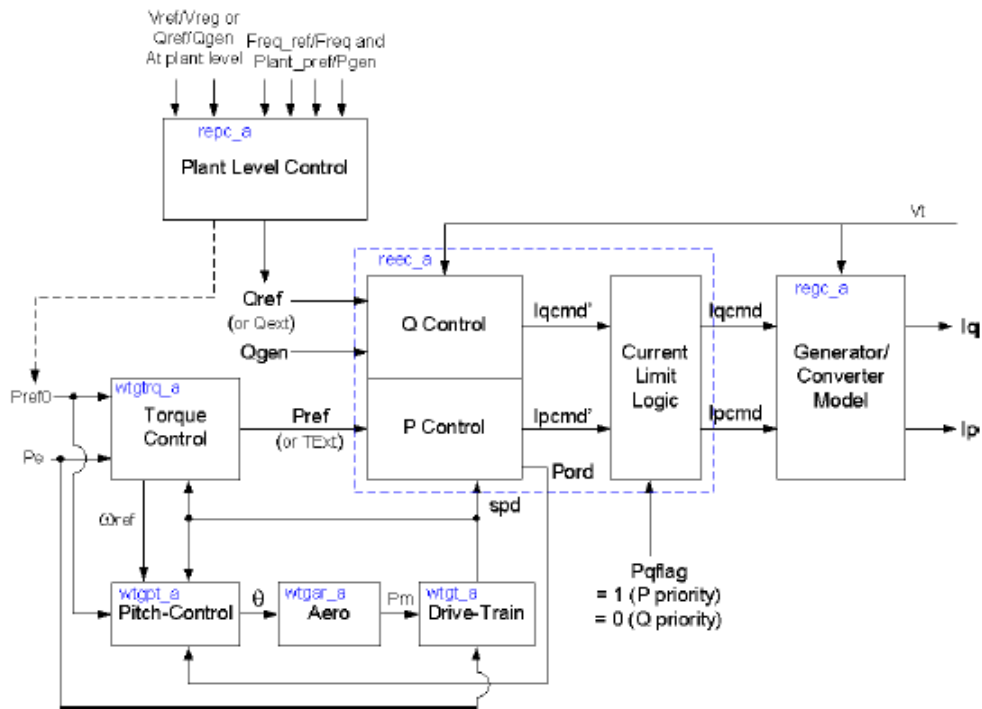


Σχήμα 6.3: Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας - DFIG.

Για την προσομοίωση, όπως έχει αναφερθεί, θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα προσομοίωσης PowerWorld Simulator. Το δίκτυο μας αποτελείται από συμβατικές πηγές και η ένταξη ανεμογεννητριών στο πρόγραμμα γίνεται με διαφορετική διαδικασία λόγω και της ιδιαιτερότητας των συγκεκριμένων τύπων γεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες DFIG θεωρούνται τύπου τρία (Wind Turbine - WT3) και ο τρόπος εισαγωγής στον προσομοιωτή βασίζεται σε 7 μπλοκ που περιγράφουν την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Οι παράμετροι που περιγράφουν κάθε μπλοκ υπολογίστηκαν με βάση τις υποδείξεις του Western Electricity Coordinating Council (WECC). Τα 7 μπλοκ που απαρτίζουν τις ανεμογεννήτριες τύπου 3 με τα αντίστοιχα διαγράμματα τους φαίνονται παρακάτω [21]:

1. Το πρώτο μπλοκ αναφέρεται στο renewable energy generator/converter model (regc_a) (Σχήμα B.1), το οποίο δέχεται σαν είσοδο το πραγματικό και φανταστικό ρεύμα με ονόματα εισόδου I_{pcmd} και I_{qcmd} αντίστοιχα. Οι παράμετροι εξόδου είναι τα I_p και I_q που εισέρχονται στο δίκτυο. Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Machine-Models.
2. Το δεύτερο κατά σειρά μπλοκ αναφέρεται στο renewable energy electrical controls model (reec_a) (Σχήμα B.2), το οποίο έχει σαν στοιχεία εισόδου το P_{ref} , Q_{ref} και το Q_{gen} . Αντίστοιχα οι μεταβλητές εξόδου είναι οι I_{pcmd} και I_{qcmd} . Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Exciters.
3. Το τρίτο μπλοκ αναφέρεται στο wind turbine generator driven-train (wtgt_a) για τις ταλαντώσεις (Σχήμα B.3), με μεταβλητή εξόδου την ταχύτητα (spd), η οποία αναπαριστάται με την μορφή διανύσματος $spd = [\omega_t \ \omega_g]$. Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Governors.
4. Το τέτατο μπλοκ αναφέρεται σε ένα απλό γραμμικό μοντέλο για την αεροδυναμική του συστήματος γνωστό ως wind turbine aero-dynamics (wtgar_a), (Σχήμα B.4). Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Other-Models.
5. Το πέμπτο αναφέρεται στον έλεγχο των ανεμογεννητριών και το οποίο στην βιβλιογραφία το συναντάμε ως wind turbine generator pitch-controller (wtgpt_a), (Σχήμα B.5). Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Stabilizers.
6. Το έκτο μπλοκ αναφέρεται στο wind turbine generator torque control (wtgtrq_a) (Σχήμα B.6), δηλαδή στον έλεγχο της ροπής που αποτελεί και είσοδο του δεύτερου μπλοκ (reec_a). Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Other-Models.
7. Το έβδομο και τελευταίο μπλοκ αναφέρεται στο renewable energy power plant controller (rerc_a) (Σχήμα B.7), το οποίο δέχεται σαν εισόδους την τάση αναφοράς V_{ref} , την μετρούμενη τάση V_{reg} ή αντίστοιχα της αντίστοιχες τιμές αέργου ισχύος Q_{ref} και Q_{gen} . Η μεταβλητή εξόδου που ταυτόχρονα αποτελεί και είσοδο στο reec_a μπλοκ είναι η Q_{ref} . Στο PowerWorld εισάγεται στο πεδίο Other-Models.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται τα μονογραμμικά διαγράμματα των 7 μπλοκ που παρουσιάστηκαν παραπάνω και τα οποία θα εφαρμοστούν κατάλληλα στο PowerWorld για την ένταξη της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.4: Συνολική αρχιτεκτονική ανεμογεννήτριας τύπου 3 (WT3).

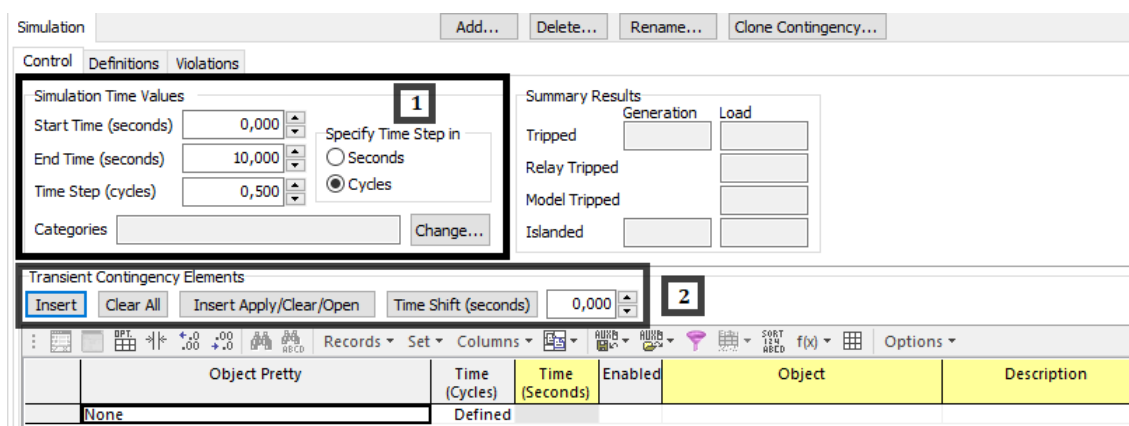
Το παραπάνω Σχήμα 6.4 απεικονίζει την σύνδεση των επτά μπλόκ μεταξύ τους για την σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με τις οδηγίες του WECC.

6.3 Διαδικασία προσομοίωσης μεταβατικής ευστάθειας

Η μεταβατική ευστάθεια ενός συστήματος βασίζεται στην διατήρηση του συγχρονισμού του δικτύου όταν αυτό έρθει αντιμέτωπο με ένα σφάλμα. Κάθε δίκτυο θα πρέπει να επιστρέφει σε μια κατάσταση ισορροπίας για την ομαλή λειτουργία του. Η χρονική διάρκεια παρουσίας του σφάλματος στο δίκτυο καθορίζει τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, που θα αναφερθούμε παρακάτω. Σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι απαραίτητο να λάβουμε τις απαραίτητες γραφικές παραστάσεις για εξαγωγή συμπεράσματος ως προς τη συμπεριφορά του συστήματος όταν το σφάλμα απομακρυνθεί. Οι έξι γραφικές παραστάσεις που θα πρέπει να εξάγουμε κάθε φορά είναι οι ακόλουθες:

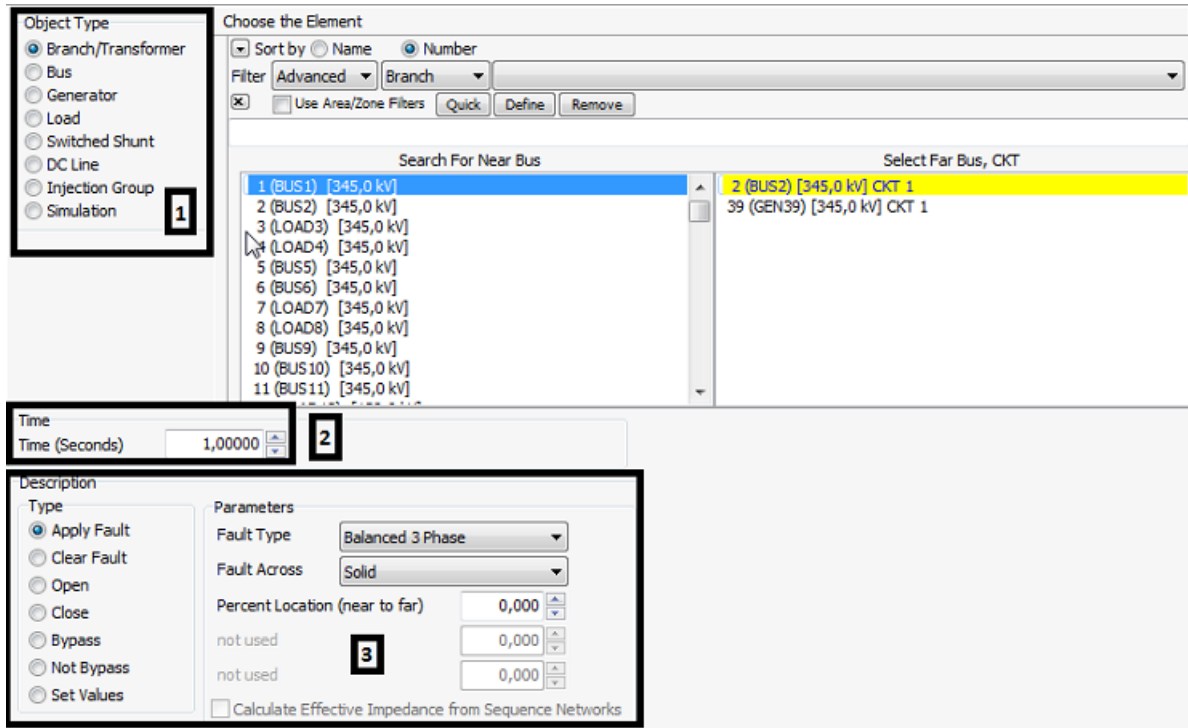
- Η σχετική γωνία ισχύος δ_i (degrees) κάθε γεννήτριας σε συνάρτηση με τον χρόνο σε σχέση με την γωνία δ του ζυγού αναφοράς (slack bus).
- Η τάση V (pu) του ζυγού κάθε γεννήτριας του συστήματος.
- Η συχνότητα f (Hz) κάθε γεννήτριας του δικτύου.
- Η πραγματική ισχύς P (MW) των γεννητριών.
- Η άεργος ισχύς Q (MVar) των γεννητριών.
- Η σχετική γωνία ισχύος δ_i (degrees) της γεννήτριας, 50msec μετά τον CCT, στον οποίο διαπιστώνεται η αστάθεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο αναπαραστάσεις από την διαδικασία συμπλήρωσης των χαρακτηριστικών της προσομοίωσης που επιθυμούμε στο λογισμικό PowerWorld.



Σχήμα 6.5: Συμπλήρωση στοιχείων χρόνου προσομοίωσης και εμφάνισης σφάλματος στο PowerWorld.

Στο παραπάνω Σχήμα 6.5 φαίνονται δύο πλαίσια. Στο Πλαίσιο 1 είναι το σημείο του προγράμματος στο οποίο καθορίζουμε τον χρόνο τρεξίματος της προσομοίωσης με το ανάλογο βήμα που επιθυμούμε. Στο Πλαίσιο 2 φαίνεται ο τρόπος εισαγωγής του κάθε σεναρίου ως προς την παρουσία του σφάλματος στο δίκτυο και την άμεση διαγραφή του στη λήξη της συγκεκριμένης διαδικασίας.



Σχήμα 6.6: Συμπλήρωση βασικών χαρακτηριστικών σφάλματος στο PowerWorld.

Στο Σχήμα 6.6 και συγκεκριμένα στο Πλαίσιο 1 επιλέγουμε σε ποιο σημείο του δικτύου επιθυμούμε την παρουσίαση ενός συμβάντος. Στην περίπτωση μας επιλέγουμε την εμφάνιση σε γραμμή μεταφοράς του δικτύου κοντά στον ζυγό που επιθυμούμε. Στην συνέχεια στο Πλαίσιο 2 καθορίζουμε τον χρόνο εμφάνισης το συμβάντος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Στο Πλαίσιο 3 ορίζουμε το συμβάν είτε αυτό είναι η εφαρμογή σφάλματος, όπου στην συνέχεια συμπληρώνουμε τα χαρακτηριστικά του είτε η εκκαθάριση του σφάλματος είτε το άνοιγμα κάποιου ζυγού ή γραμμής μεταφοράς είτε το κλείσιμο κάποιων γραμμών. Τέλος, ξεκινάει η διαδικασία της προσομοίωσης για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

6.4 Προσδιορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου στόχος είναι ο προσδιορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης των σφαλμάτων που υπόκειται το σύστημά μας, με σκοπό την διατήρηση της ισορροπίας του. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου χρόνου βασίζεται σε μια διαδικασία τεσσάρων βημάτων που παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Το πρώτο βήμα αναφέρεται στον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής εμφάνισης του σφάλματος. Ορίζουμε ως $t_1 = 1.0s$ την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος (3phase ή SLG) στο σημείο που επιθυμούμε (για την προσομοίωση θεωρούμε ως σημείο σφάλματος έναν ζυγό του συστήματος). Το χρονικό διάστημα $\Delta t = 0 - 1s$ θεωρείται ο χρόνος εκτέλεσης της ανάλυσης ροής φορτίου για τον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων(δ , V , f , P , Q) στους ζυγούς που έχουμε επιλέξει.
2. Το δεύτερο βήμα επικεντρώνεται στον προσδιορισμό του διαστήματος εφαρμογής του σφάλματος το οποίο λαμβάνει χώρα μέχρι την χρονική στιγμή $t_2 = t_1 + t_{step}$ όπου και γίνεται η εκκαθάρισή του. Σε αυτό το σημείο θεωρούμε ως χρονικό βήμα $t_{step} = 50ms = 0.05s$ με το οποίο γίνεται η σταδιακή αύξηση του χρόνου του προηγούμενου βήματος. Η εκκαθάριση γίνεται με απομάκρυνση του σφάλματος και ταυτόχρονα άνοιγμα της γραμμής που έγινε το σφάλμα.
3. Στο τρίτο βήμα γίνεται ο έλεγχος των απαραίτητων γραφικών παραστάσεων(δ , V , f , P , Q) που προέκυψαν την χρονική στιγμή t_2 . Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τη γωνία ισχύος των γεννητριών (δ) σε συνάρτηση με τον χρόνο του συστήματος για την διαπίστωση της κατάστασης που βρίσκεται το δίκτυο. Σε περίπτωση που το σύστημα θεωρηθεί ασταθές τότε ορίζουμε $t_{critical} = t_2 - 50ms$ που είναι η χρονική στιγμή πριν χαθεί η ευστάθεια του συστήματος και συνεχίζουμε στο επόμενο και τελευταίο βήμα. Σε περίπτωση που δεν παρατηρηθεί αστάθεια τότε θέτουμε $t_1 = t_2$ και επιστρέφουμε στο βήμα 2. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι τον προσδιορισμό του κρίσιμου χρόνου (CCT).
4. Στο τελευταίο βήμα επαναφέρουμε τον διακόπτη ισχύος που ανοίξαμε για την εκκαθάριση του σφάλματος. Ο χρόνος αυτός βρίσκεται κοντά στα $t_{close} = 2.0s$ ή σε κάποιες περιπτώσεις και παραπάνω. Σε αυτό το σημείο τελειώνει η προσομοίωσή μας.

6.5 Σενάρια μελέτης ευστάθειας-CCT

Όπως έχουμε αναφερθεί και παραπάνω η μελέτη βασίζεται στην περίπτωση όπου η παραγωγή ενέργειας προέρχεται 100% από συμβατικές πηγές και στην περίπτωση που το 20% και 30% της ενέργειας παράγεται από ανεμογεννήτριες και το υπόλοιπο 80% και 70% από συμβατικές πηγές. Η μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας θα πραγματοποιηθεί μέσω της εφαρμογής βραχυκυκλωμάτων (3phase και SLG) σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια για την καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του δικτύου με τα συγκεκριμένα δεδομένα.

Για την επιλογή των ζυγών στους οποίους θα εφαρμοστεί το βραχυκύκλωμα βασιστήκαμε σε τρία κριτήρια:

1. Ζυγοί που βρίσκονται κοντά σε γεννήτριες,
2. Ζυγοί που είναι απομακρυσμένοι από τις μονάδες παραγωγής και
3. Ζυγοί που συνδέονται άμεσα με γεννήτριες.

Τα σενάρια στα οποία έχουμε διαιρέσει την μελέτη του δικτύου μας είναι τα εξής:

- **Σενάριο Α:** Η τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο πραγματοποιείται συνολικά από συμβατικές πηγές ενέργειας σύμφωνα με τα δοθέντα στοιχεία του δικτύου (Πάραρτημα Α).
- **Σενάριο Β:** Πραγματοποιείται παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες σε ποσοστό 20% της συνολικής παραγωγής. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στους ζυγούς 37 και 35, αντικαθιστώντας κατά 100% την παραγωγή ενέργειας των συμβατικών πηγών που προϋπήρχαν.
- **Σενάριο Γ:** Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες των ζυγών 37 και 35 μειώνεται στο 50% σε σχέση με το σενάριο Β. Η υπόλοιπη ενέργεια συνεχίζεται να παρέχεται από συμβατικές πηγές.
- **Σενάριο Δ:** Η παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες θα ανέβει στο 30% της συνολικής παραγωγής. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στους ζυγούς 37,35 (Σενάριο Γ) και 33 δημιουργώντας ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας.

Όπως έχουμε αναφερθεί και προηγουμένως για την μελέτη της ευστάθειας θα εφαρμόσουμε ένα συμμετρικό τριφασικό σφάλμα και ένα ασύμμετρο μονοφασικό. Στις περιπτώσεις

που το σφάλμα και στις δύο κατηγορίες είναι στερεό, τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων και των καμπυλών (δ , f , V , P , Q) ταυτίζονται και παρουσιάζονται παρακάτω μόνο στην περίπτωση του τριφασικού. Γι αυτό το λόγο στην περίπτωση του μονοφασικού επιλέχθηκε η πραγματοποίηση της μελέτης με σχεδόν μηδενική αντίσταση βραχυκύκλωσης λαμβάνοντας την τιμή ($Z_f = 0 + j0.01pu$). Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων από κάθε σενάριο, μέσω της ανάδειξης των καμπυλών που αναφέρθηκαν παραπάνω και των κρίσιμων χρόνων.

6.5.1 Σενάριο A: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Στο Σενάριο A πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν ολόκληρη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από συμβατικές πηγές. Το δίκτυο αποτελείται από 39 ζυγούς. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια, για την εφαρμογή 3phase fault, επιλέγουμε:

- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

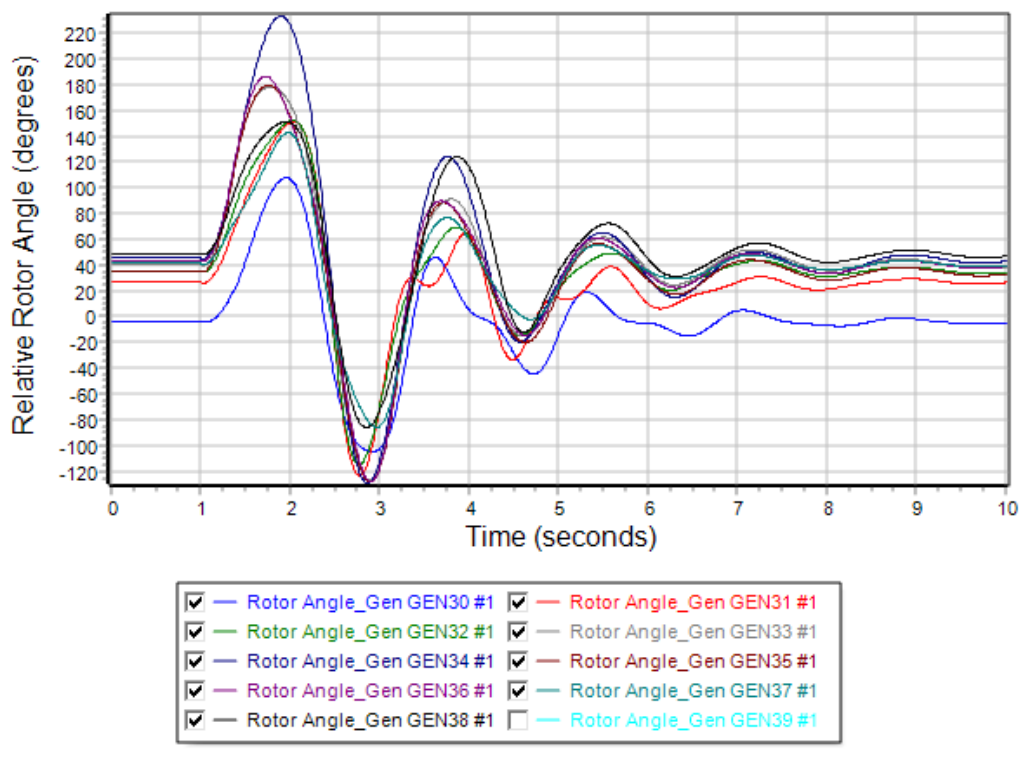
Περίπτωση A1: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 15 του δικτύου

Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.7 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,35sec$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.9 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.10 και 6.11 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο

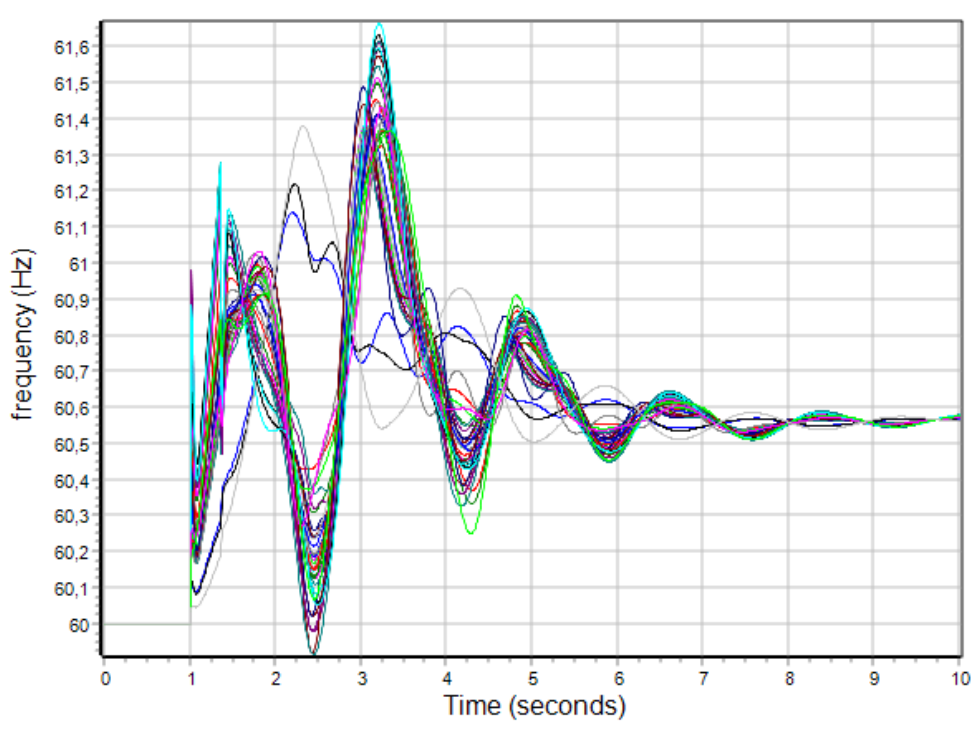
Σχήμα 6.12 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,40\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται $0,35$ δευτερόλεπτα με την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.1: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A1-3phase fault.

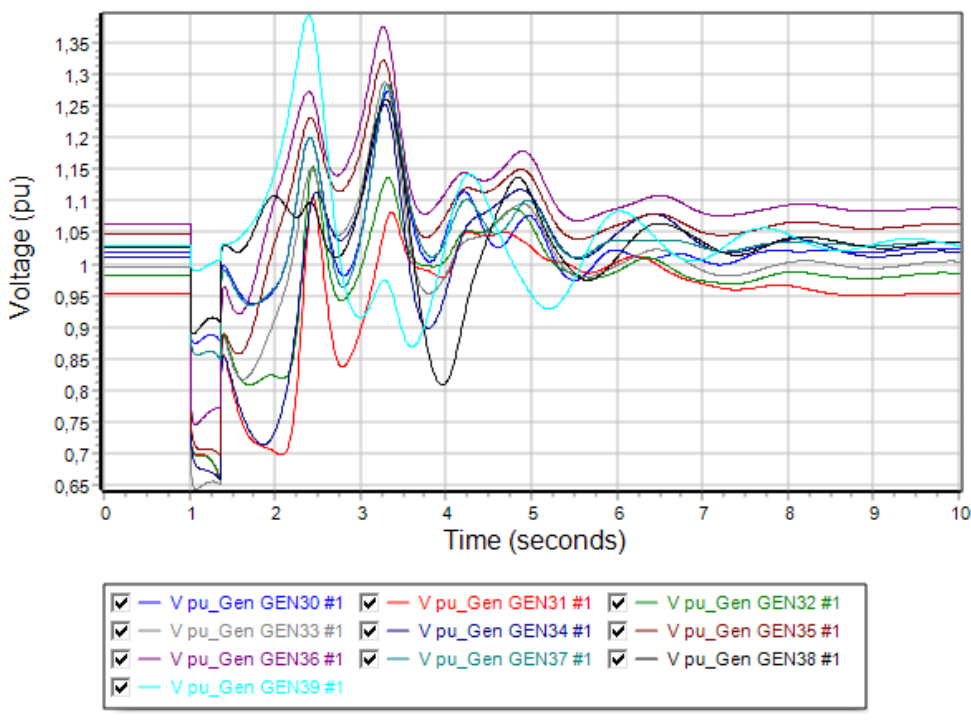
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,35$
Open Line	$t = 1,35$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,35$



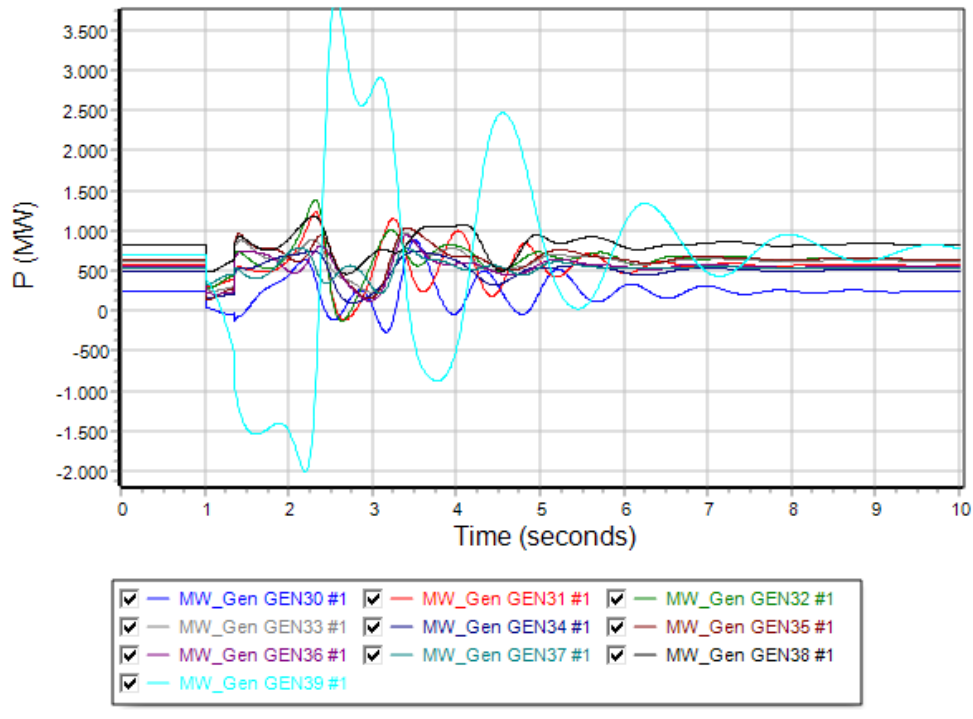
Σχήμα 6.7: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



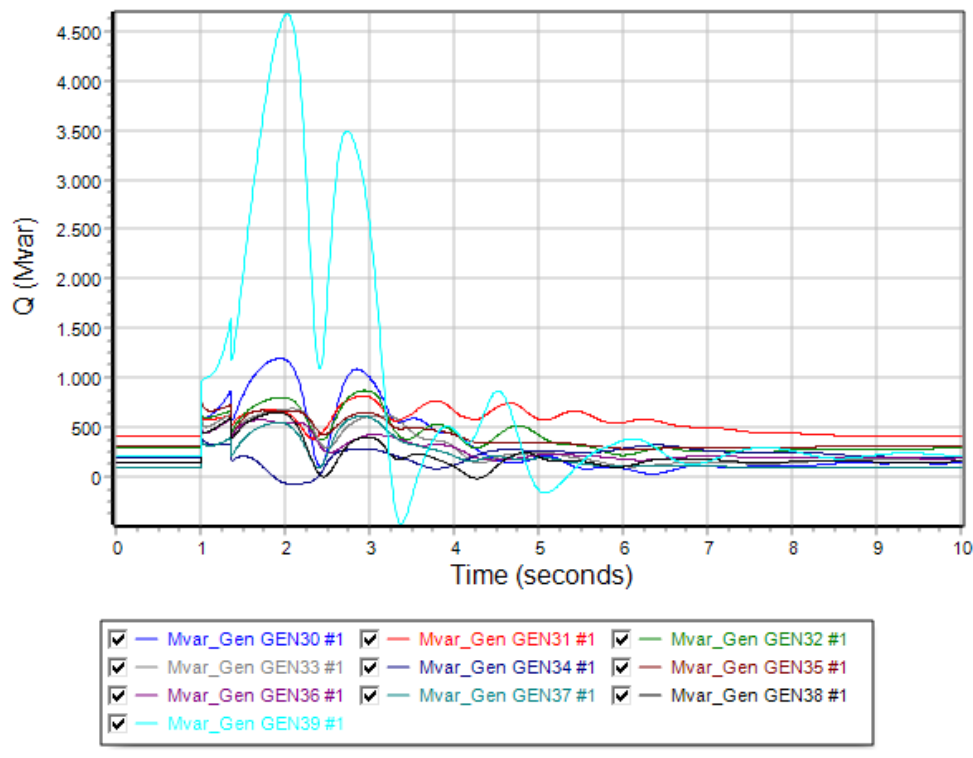
Σχήμα 6.8: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



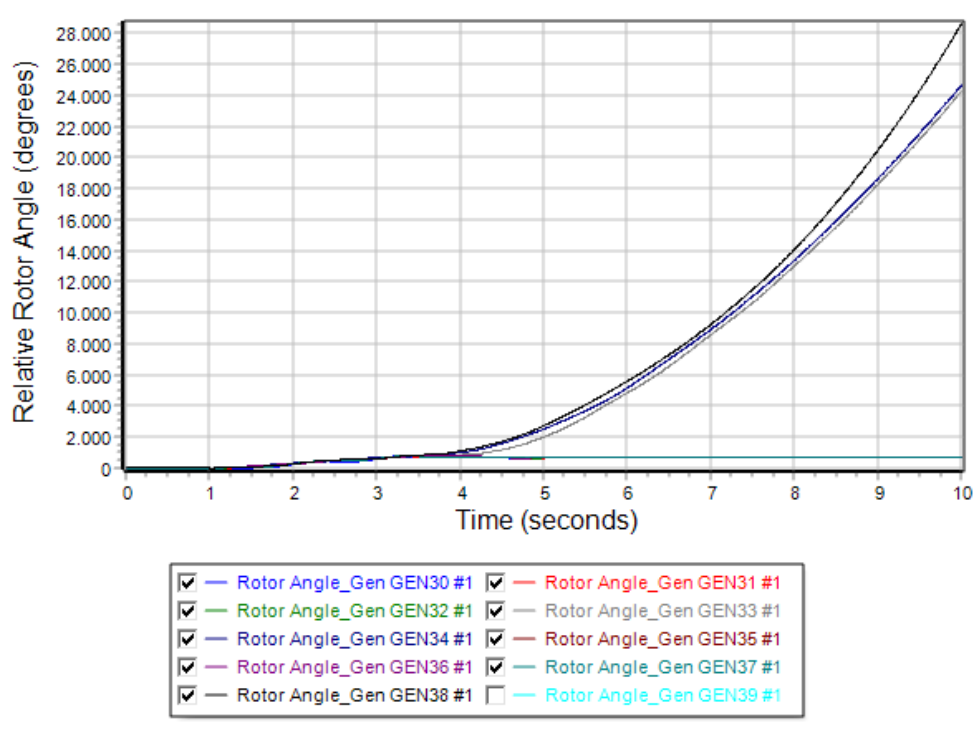
Σχήμα 6.9: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.10: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.11: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



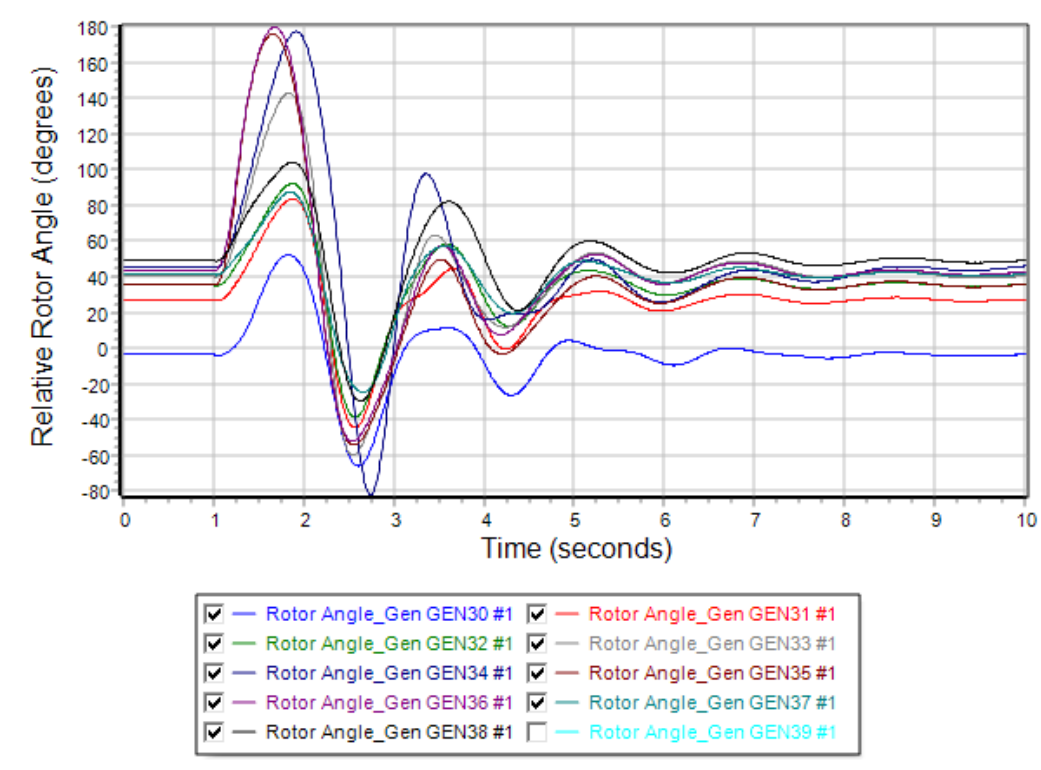
Σχήμα 6.12: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.

Περίπτωση Α2: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 22 του δικτύου

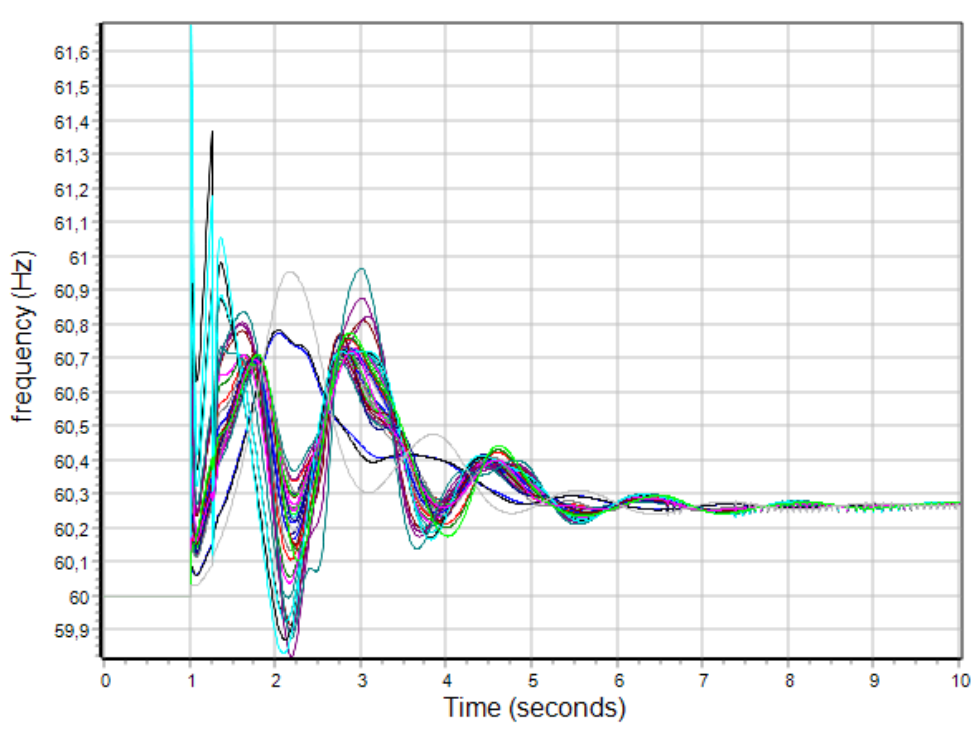
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.13 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.14 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.15 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.16 και 6.17 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.18 αναπαριστούνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.2: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Α2-3phase fault.

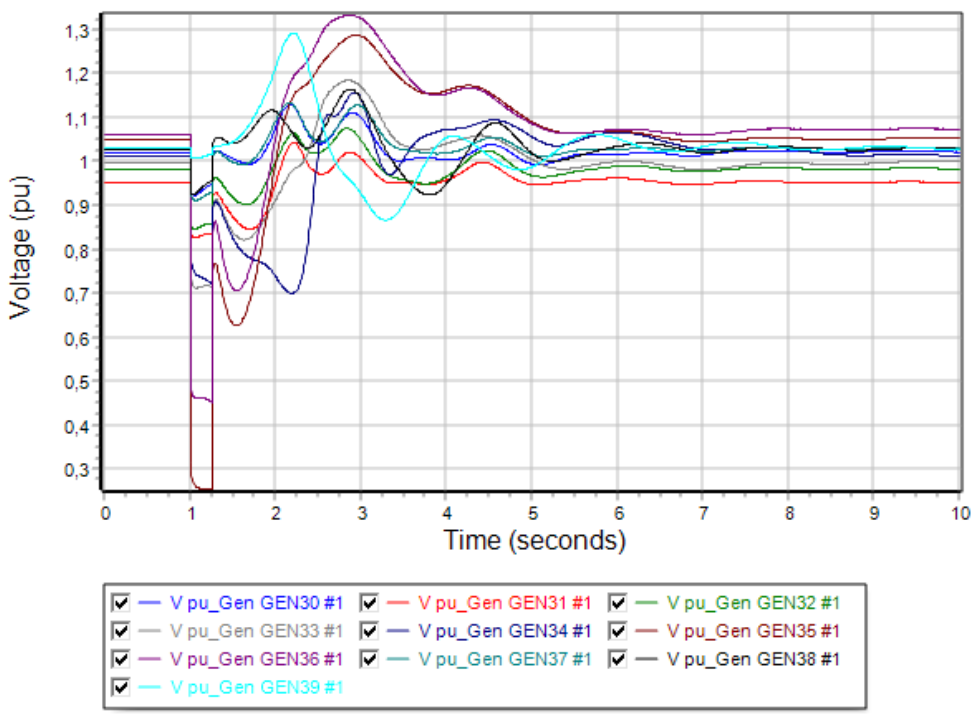
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,25
Open Line	t = 1,25
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,25



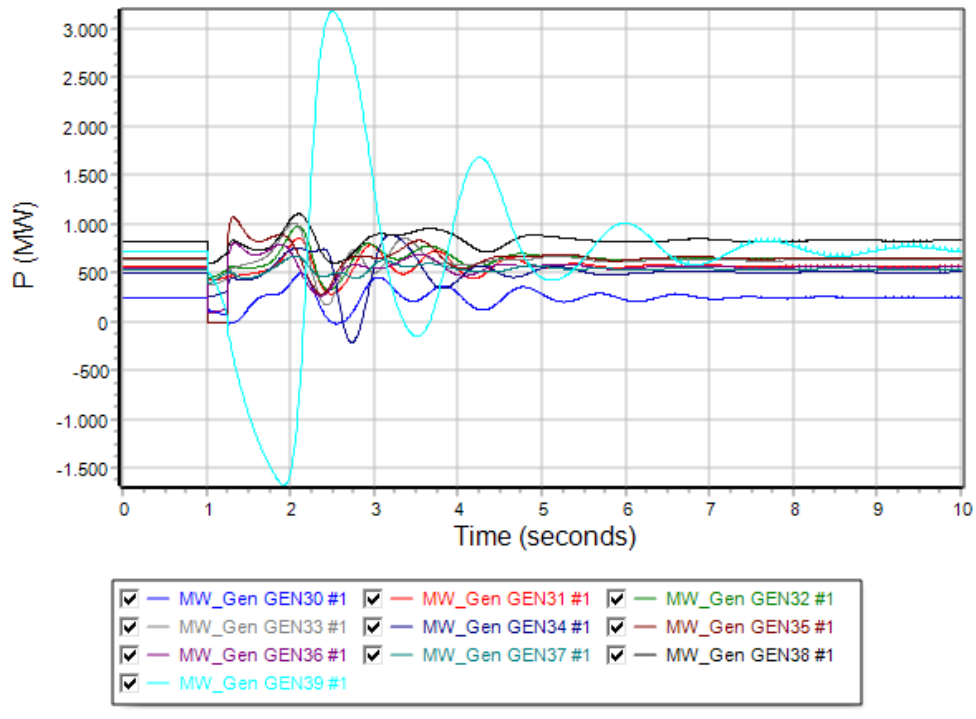
Σχήμα 6.13: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,25sec.



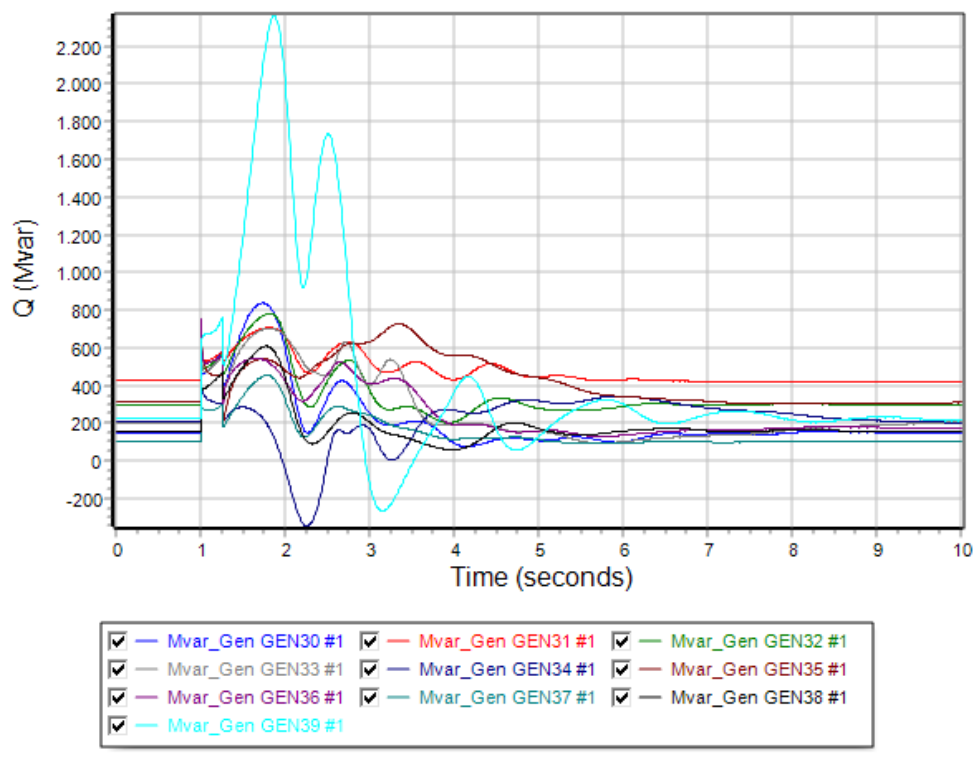
Σχήμα 6.14: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



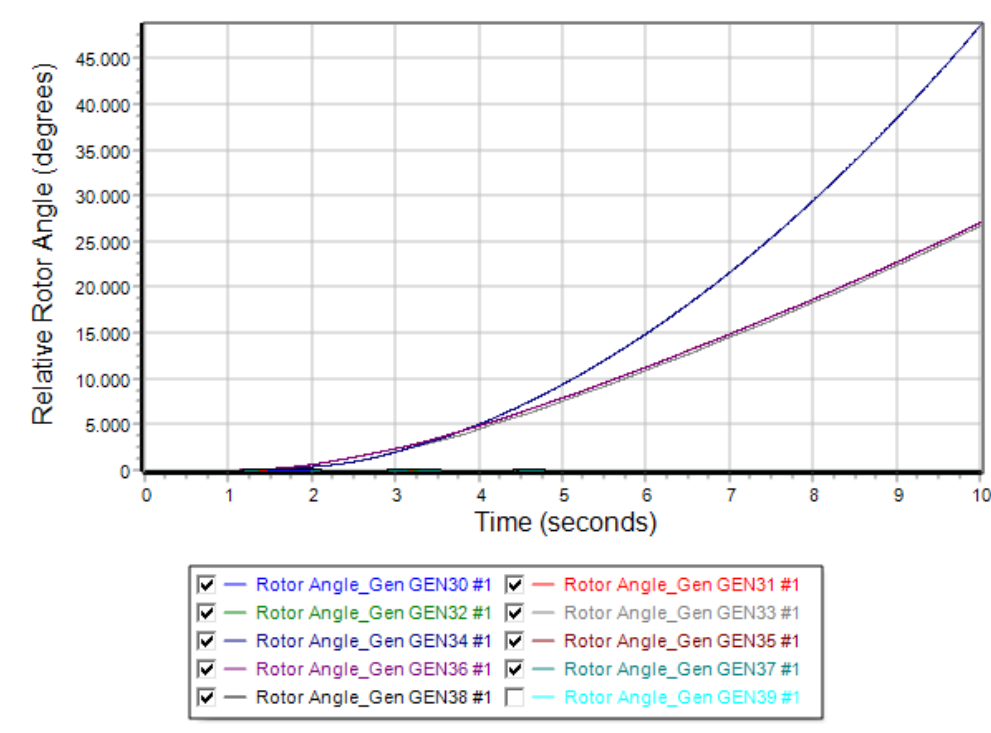
Σχήμα 6.15: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.16: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.17: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



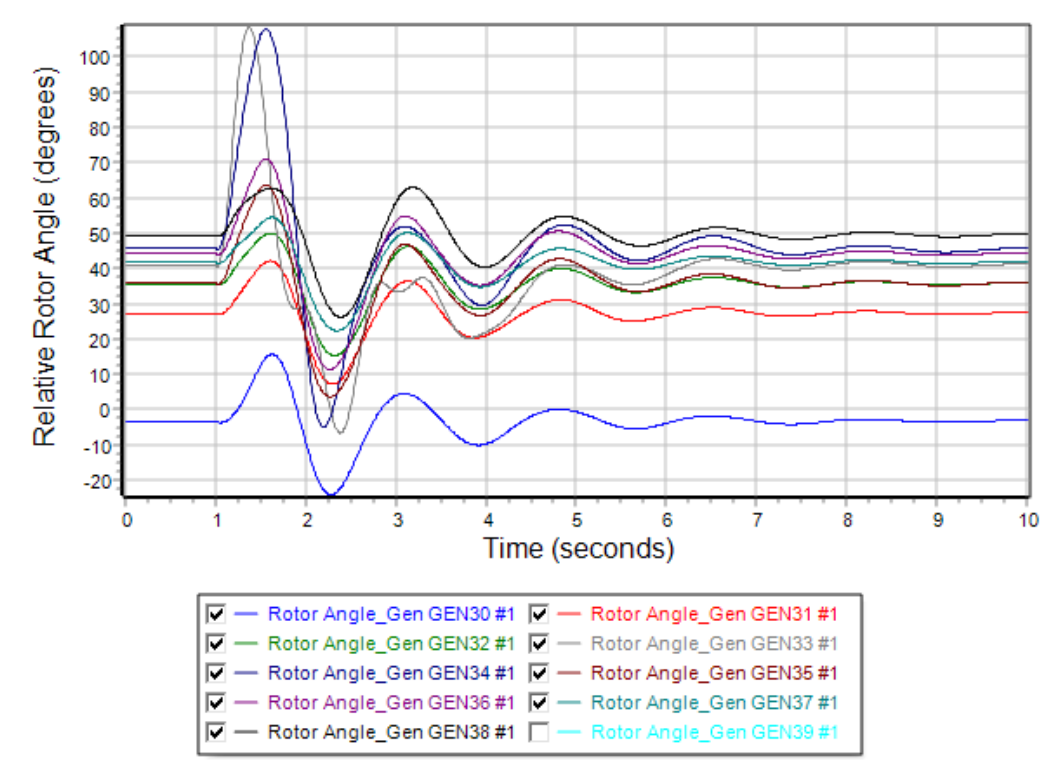
Σχήμα 6.18: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.

Περίπτωση A3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου

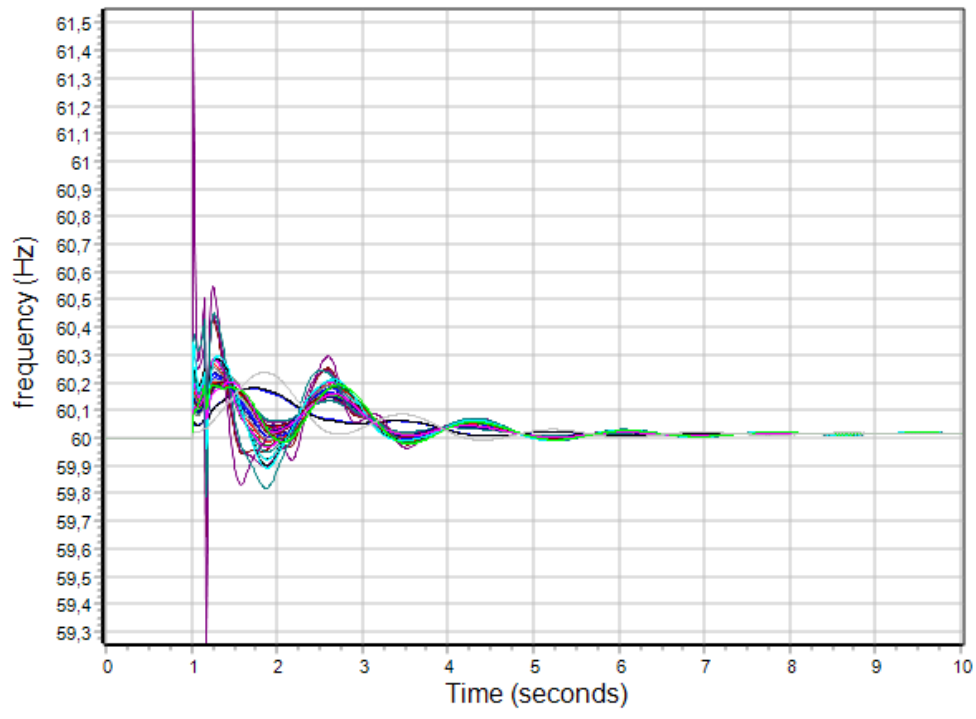
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.20 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.21 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.22 και 6.23 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.24 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,20\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,15 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.3: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A3-3phase fault.

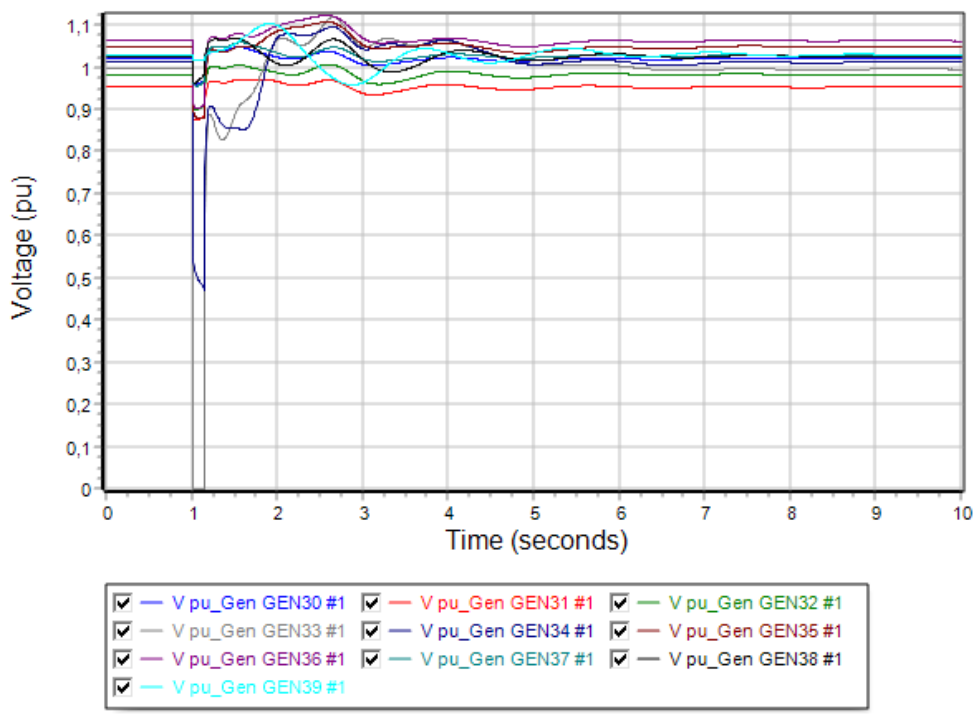
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,15
Open Line	t = 1,15
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,15



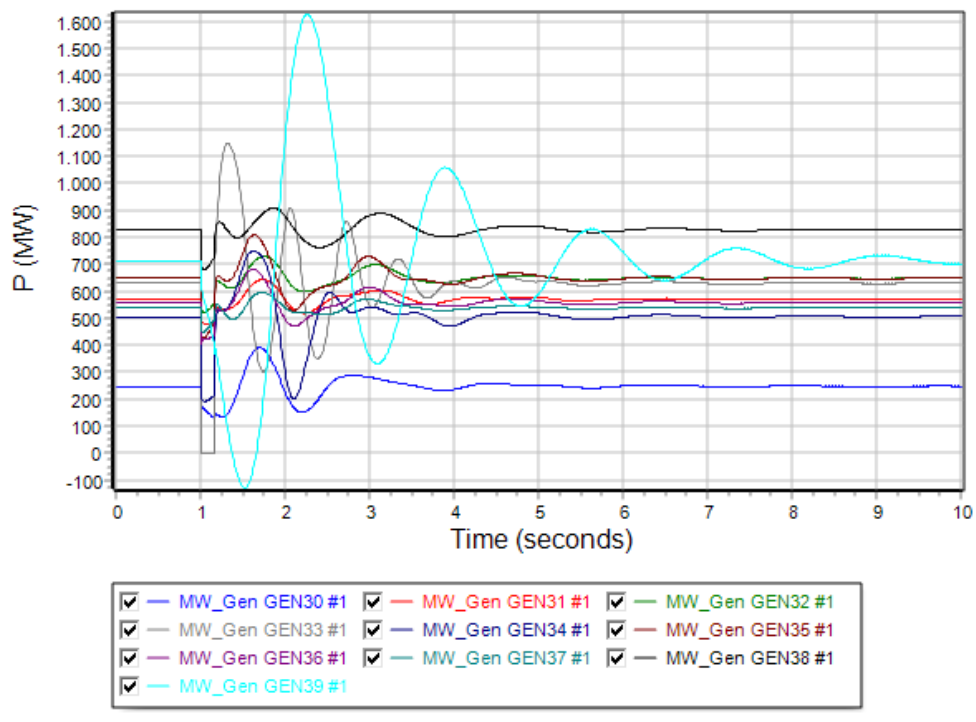
Σχήμα 6.19: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,15sec.



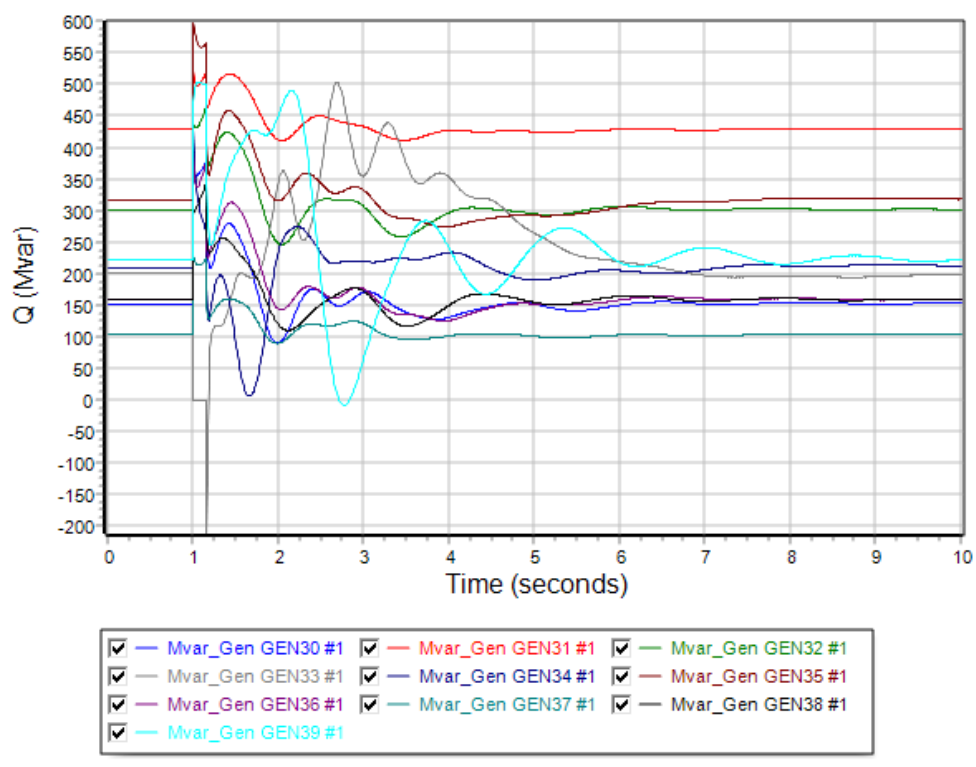
Σχήμα 6.20: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



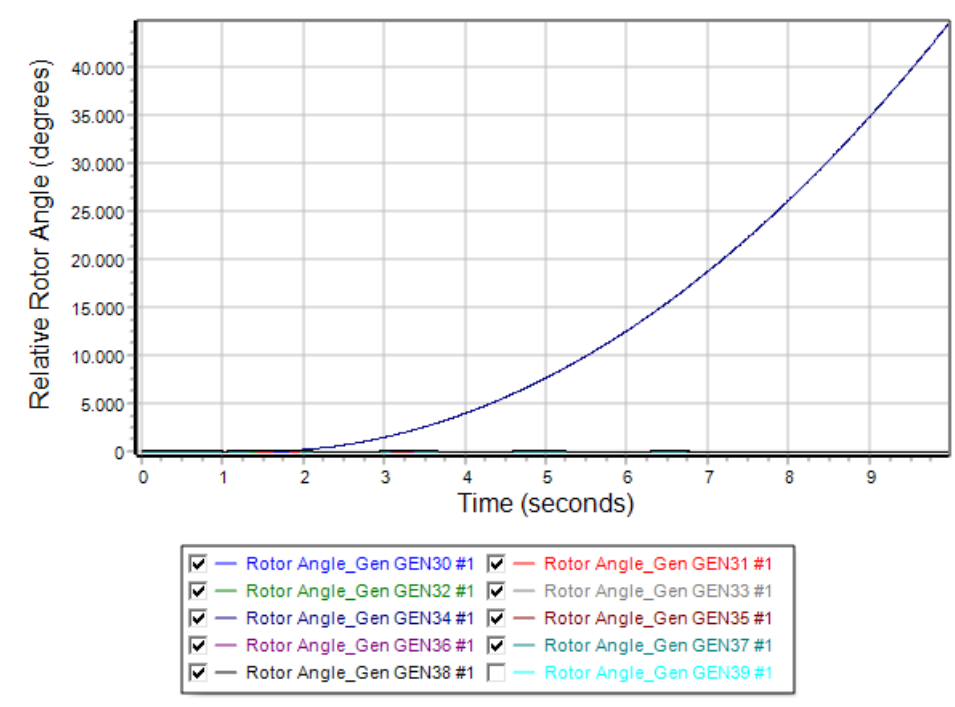
Σχήμα 6.21: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.22: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.23: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.24: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.

6.5.2 Σενάριο B: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Στο Σενάριο B πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ένα ποσοστό 20% της συνολικής παραγωγής όπου η ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες και το υπόλοιπο 80% από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στους ζυγούς 35 και 37. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια, για την εφαρμογή 3phase fault, επιλέγουμε:

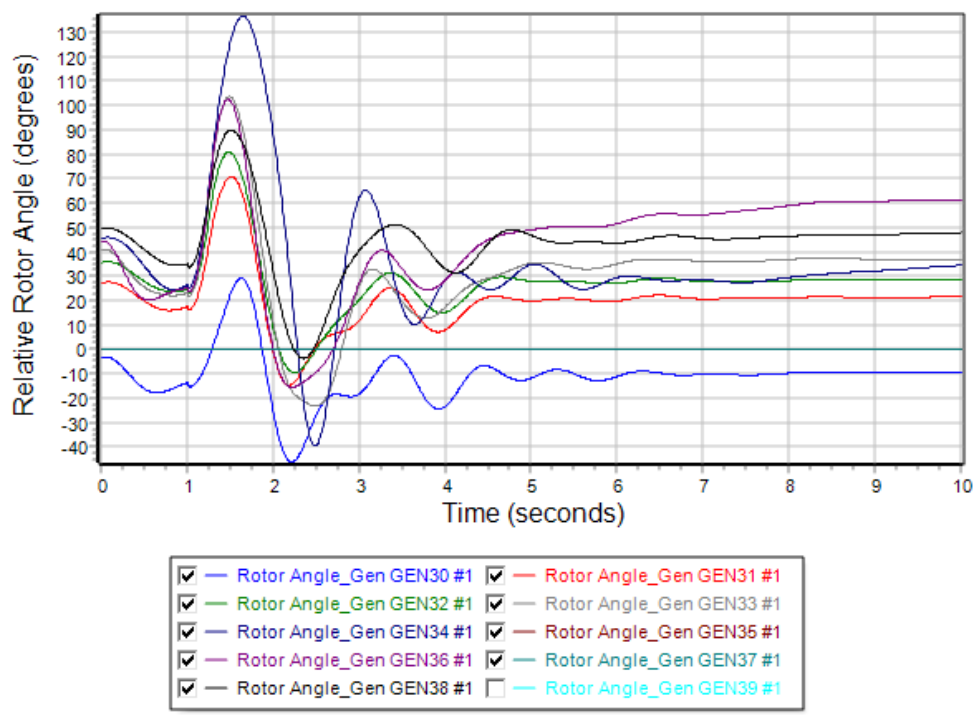
- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

Περίπτωση B1: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 15 του δικτύου

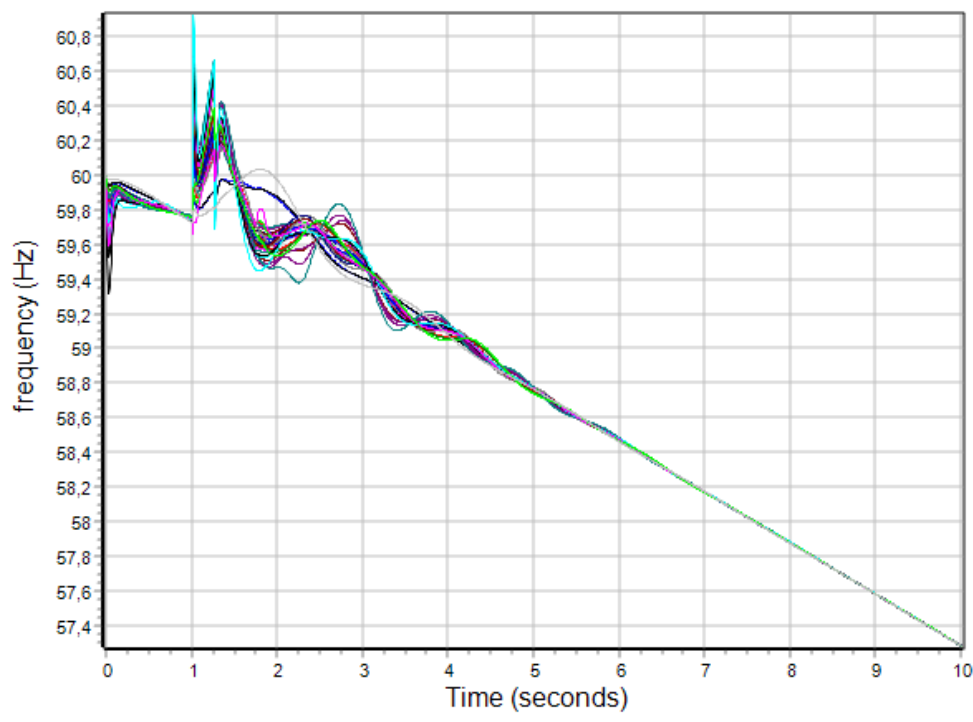
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.4 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.25 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.26 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.27 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.28 και 6.29 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.30 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.4: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B1-3phase fault.

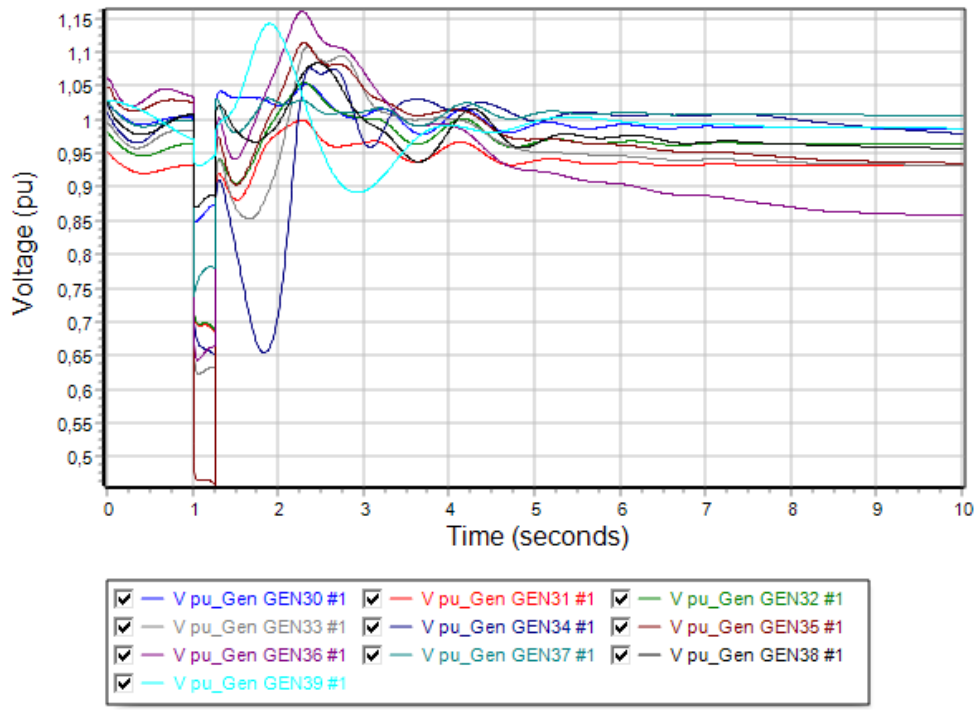
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



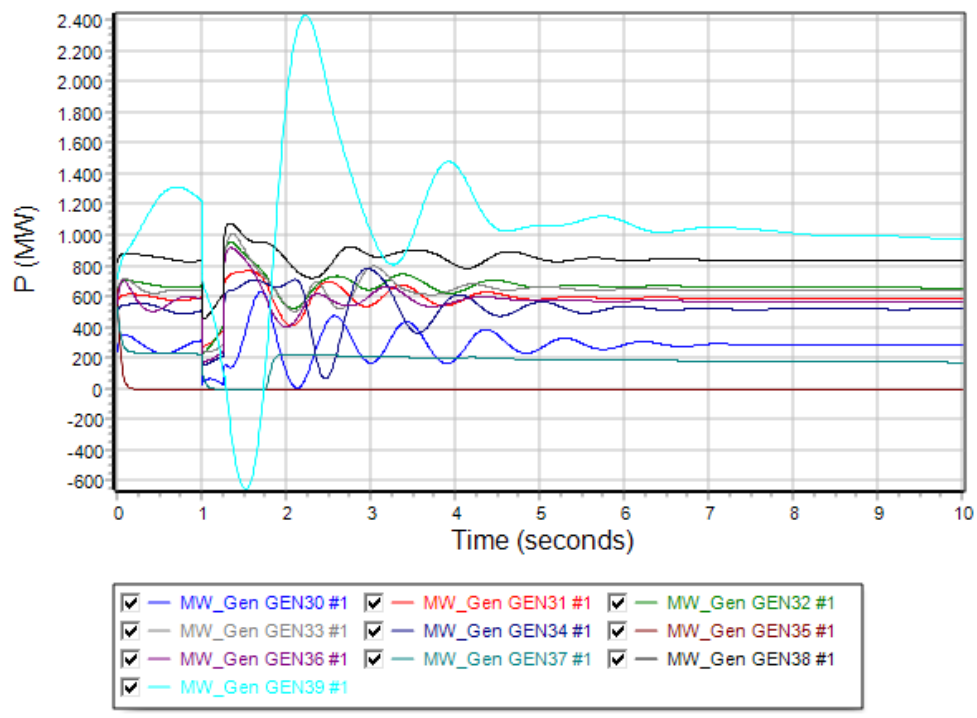
Σχήμα 6.25: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



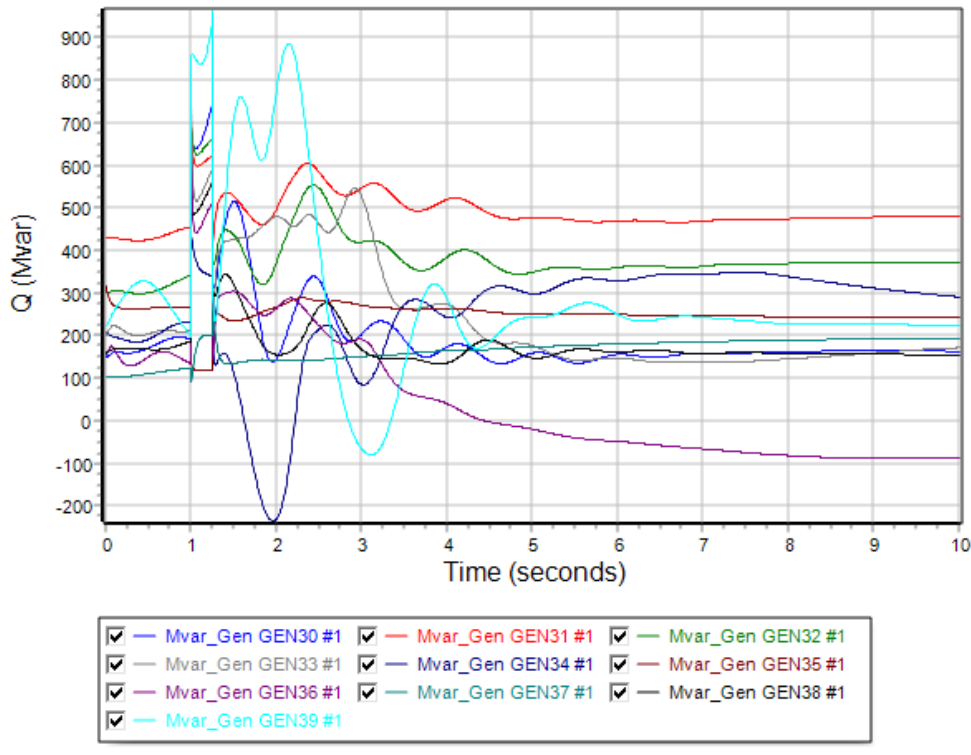
Σχήμα 6.26: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



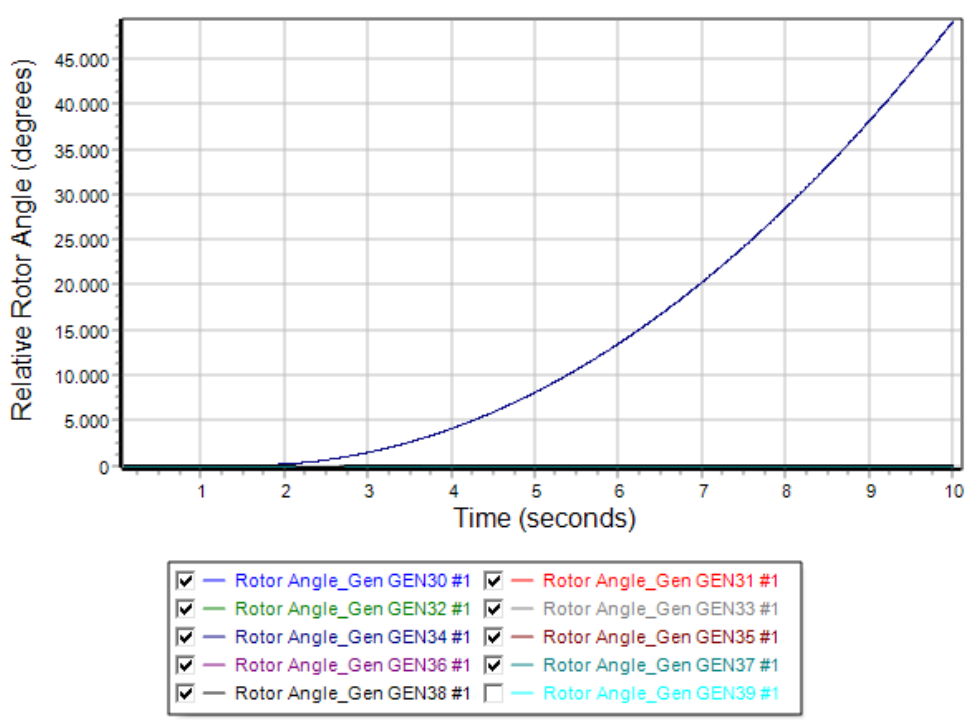
Σχήμα 6.27: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.28: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.29: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



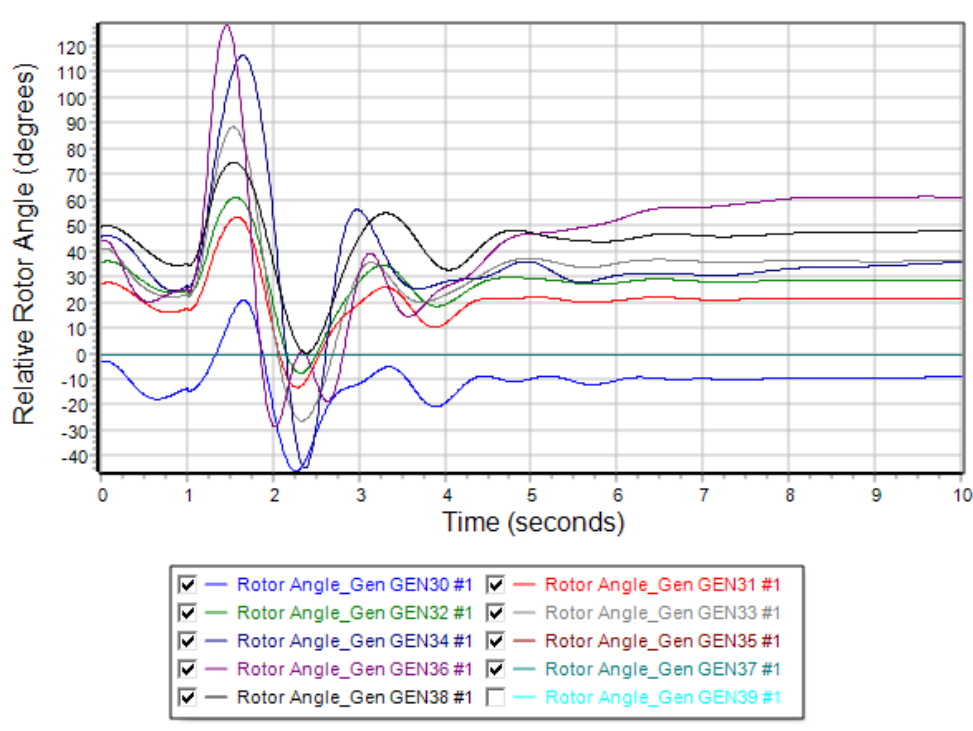
Σχήμα 6.30: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.

Περίπτωση B2: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 22 του δικτύου

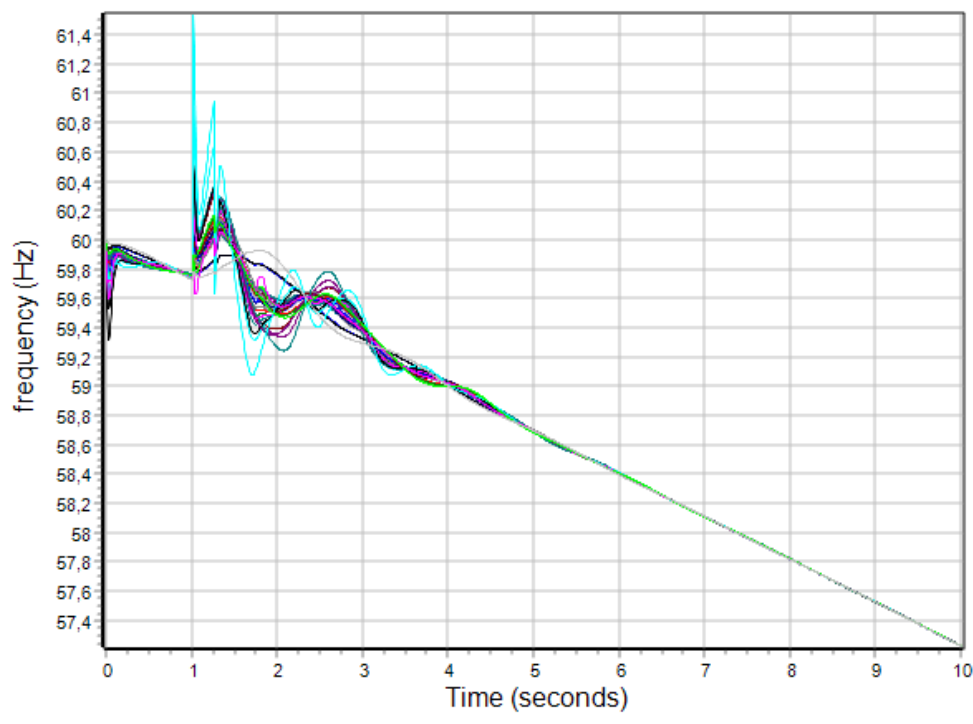
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.5 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.31 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.32 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.33 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.34 και 6.35 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.36 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα με την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.5: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B2-3phase fault.

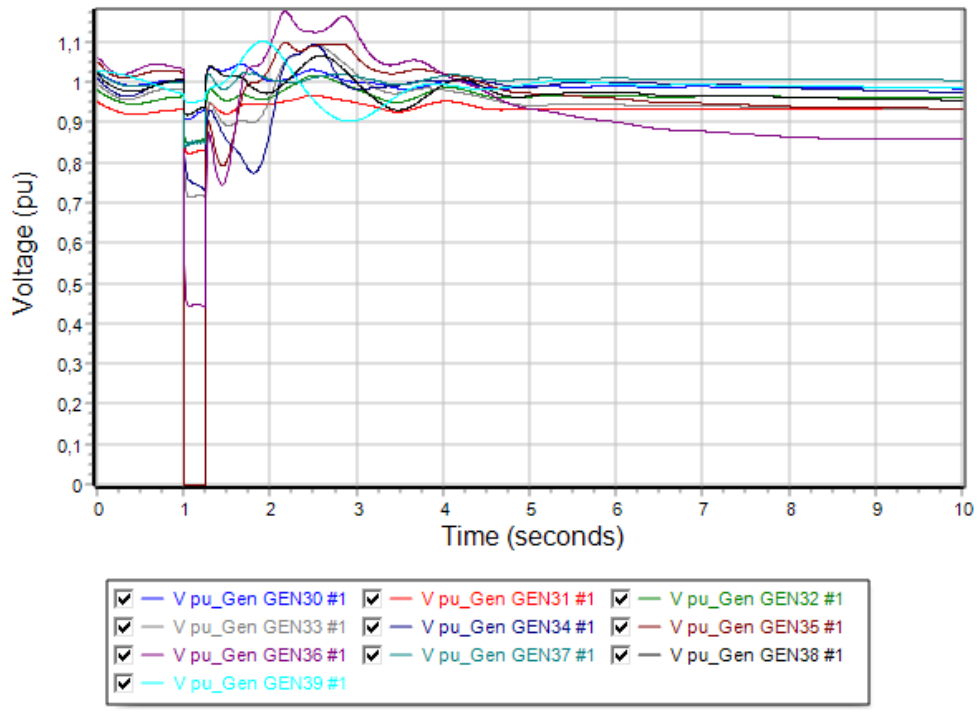
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



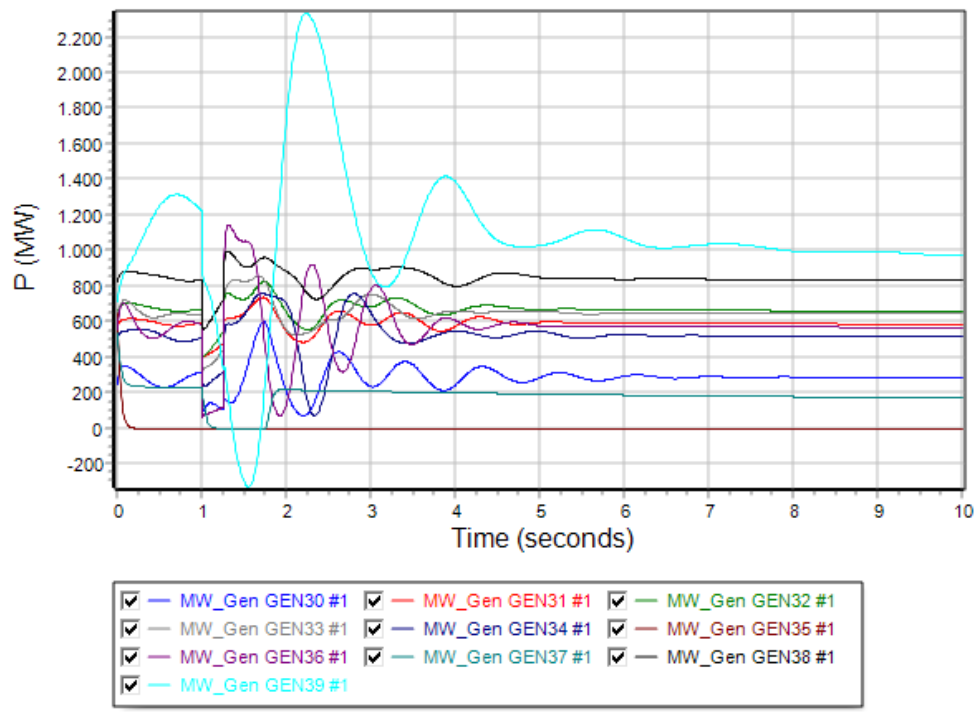
Σχήμα 6.31: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



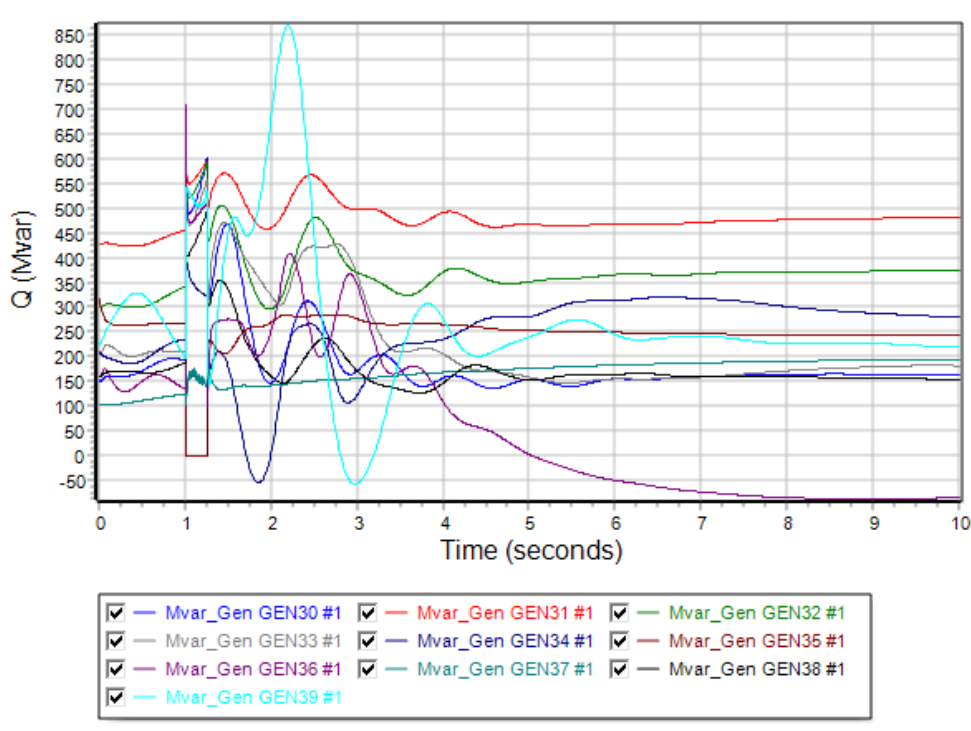
Σχήμα 6.32: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



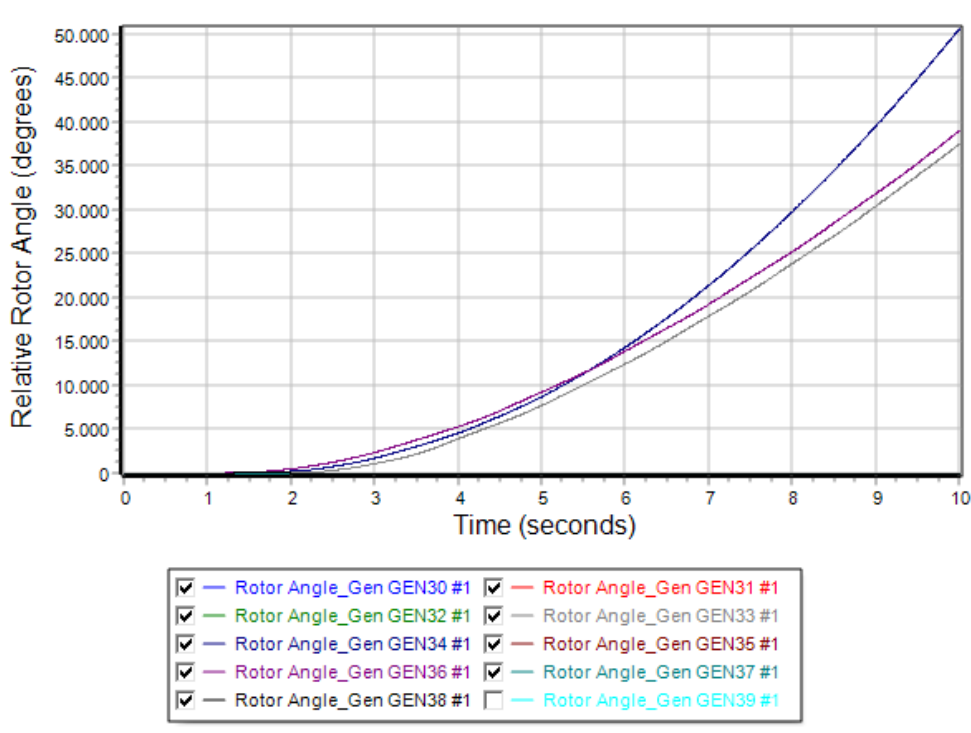
Σχήμα 6.33: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.34: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.35: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



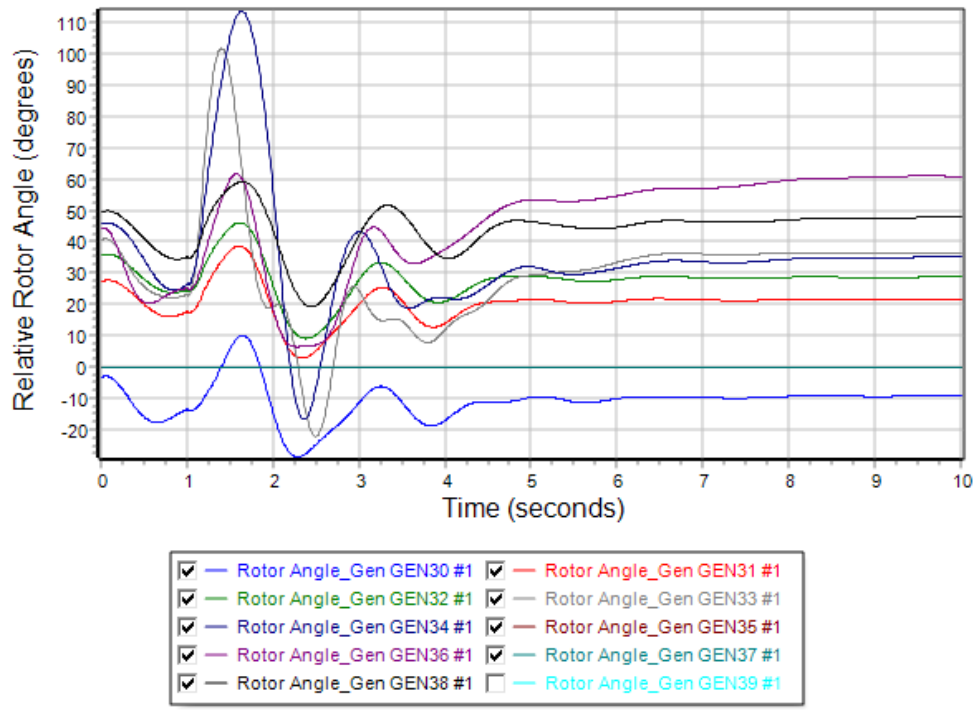
Σχήμα 6.36: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,3\text{sec}$.

Περίπτωση B3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου

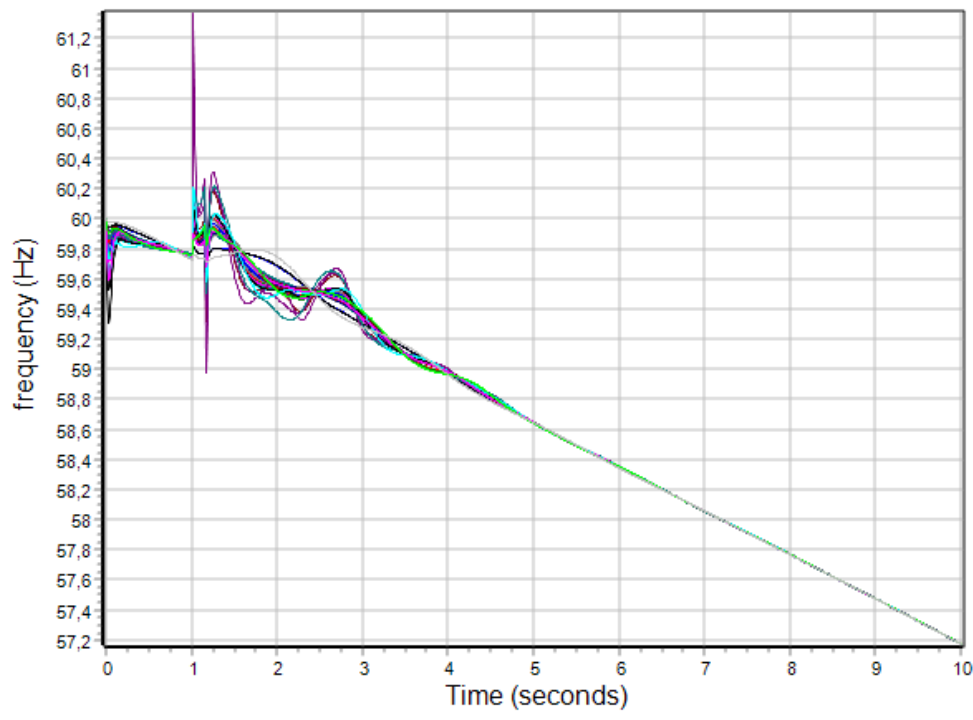
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.37 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.38 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.39 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.40 και 6.41 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.42 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,20\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,15 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.6: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B3-3phase fault.

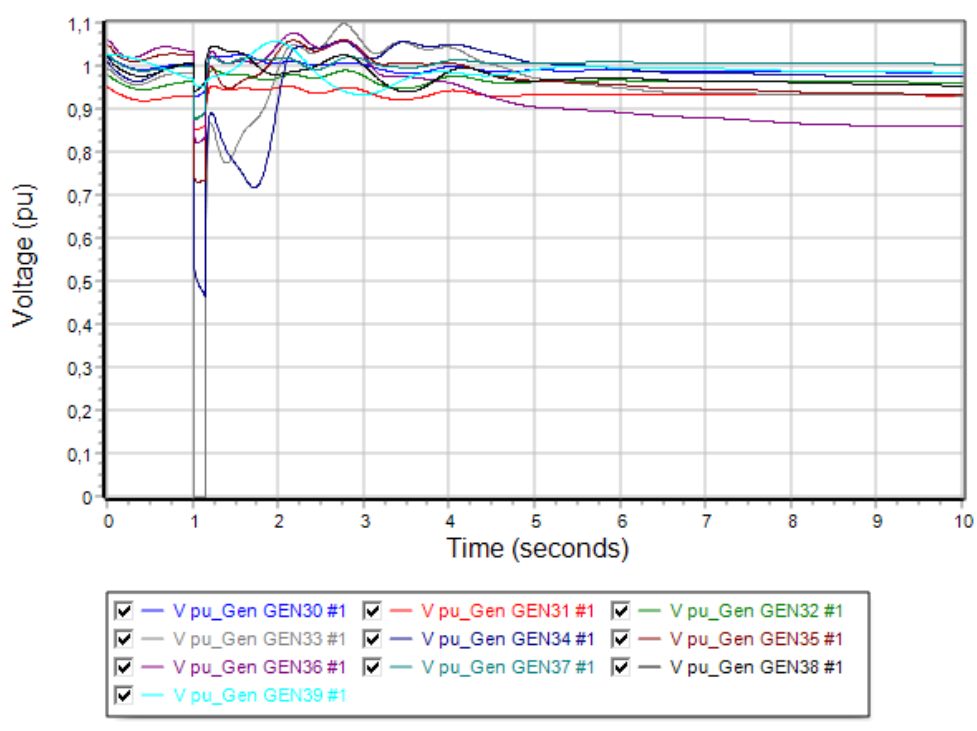
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,15$
Open Line	$t = 1,15$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,15$



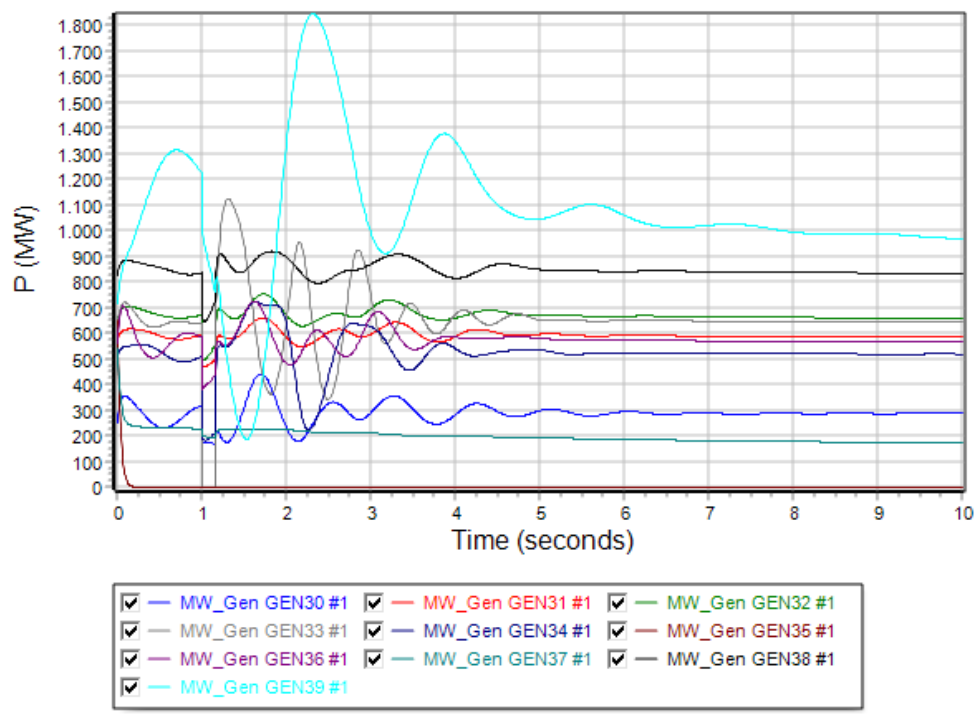
Σχήμα 6.37: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



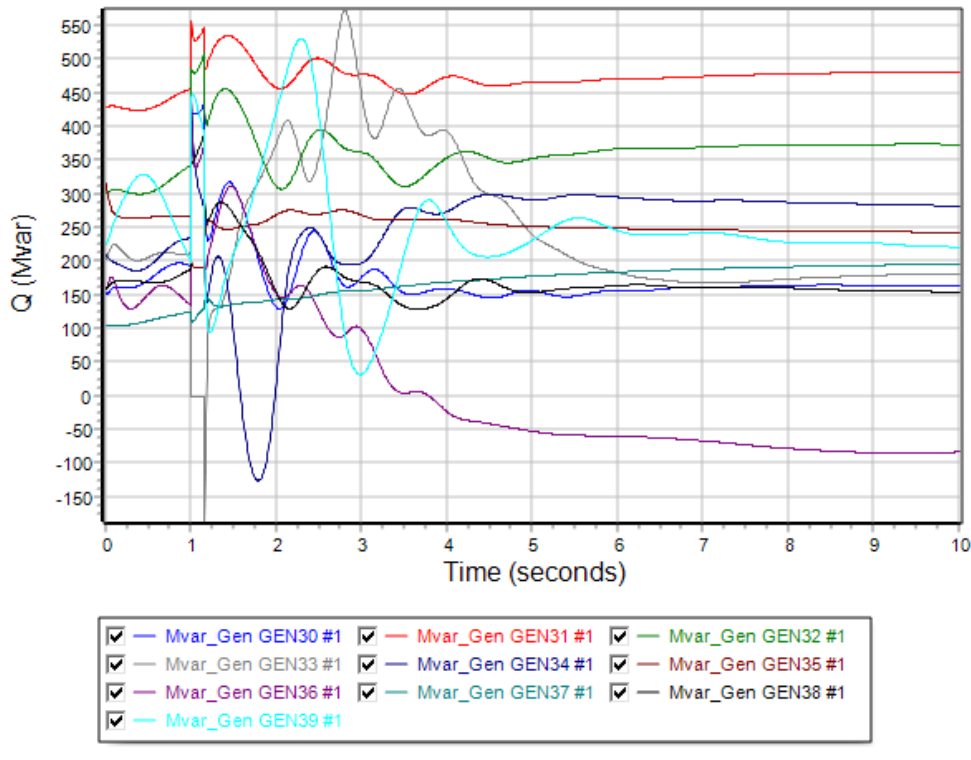
Σχήμα 6.38: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



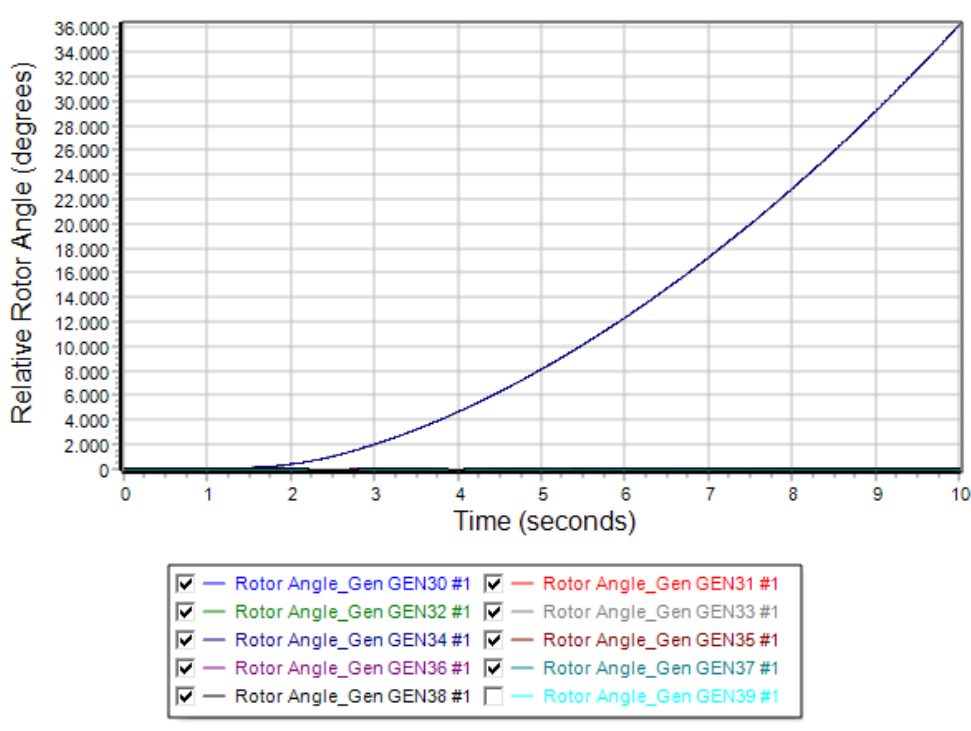
Σχήμα 6.39: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.40: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.41: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.42: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.

6.5.3 Σενάριο Γ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Στο Σενάριο Γ πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα βασισμένη στο Σενάριο Β υπάρχει ένα ποσοστό 20% της συνολικής παραγωγής όπου η ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες και το υπόλοιπο 80% από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Στις ανεμογεννήτριες που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 35 και 37 ελαττώνουμε το ποσοστό παραγόμενης ενεργού ισχύος στο 50%. Η μείωση αυτή αντισταθμίζεται από την γεννήτρια του ζυγού αναφοράς του δικτύου μας για την εξισορρόπηση της ζήτησης. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια και για την εφαρμογή 3phase fault, επιλέγουμε:

- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

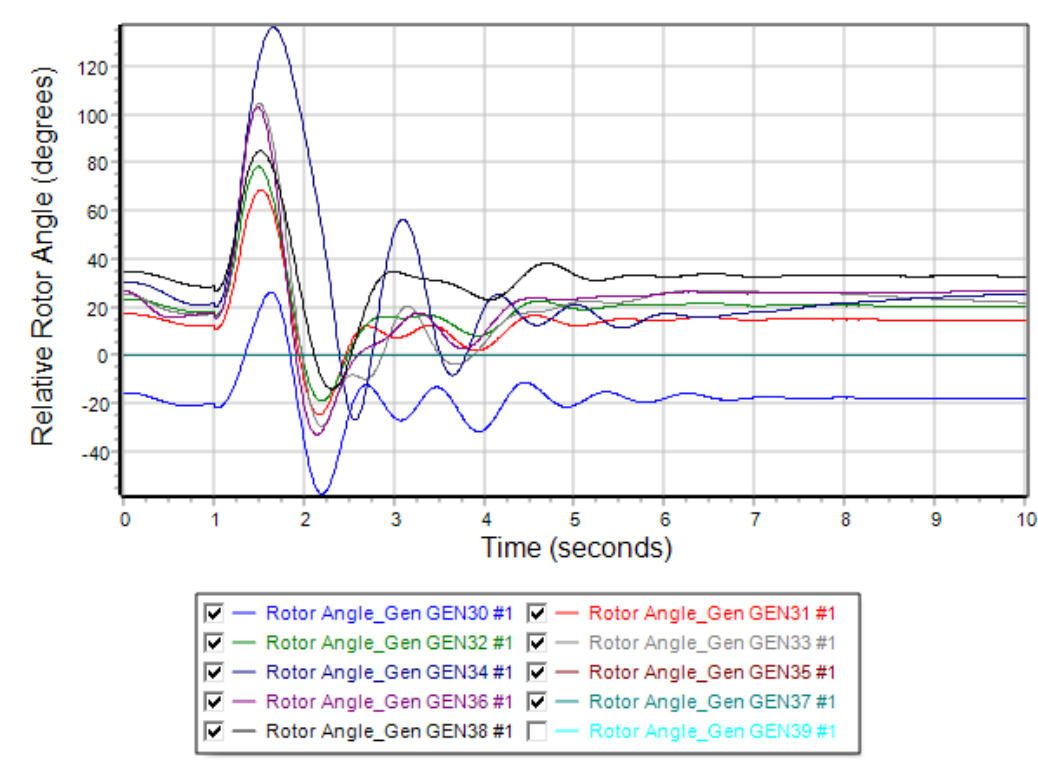
Περίπτωση Γ1: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 15 του δικτύου

Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.7 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.43 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.44 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.45 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.46 και 6.47 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.48 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,35\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσι-

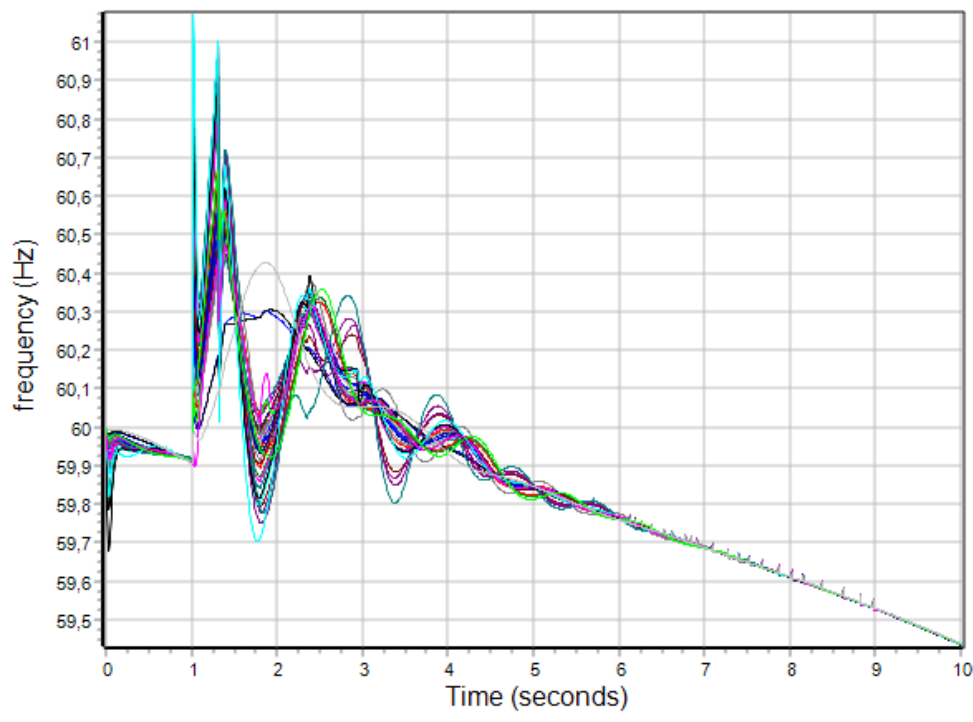
μος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,30 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.7: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ1-3phase fault.

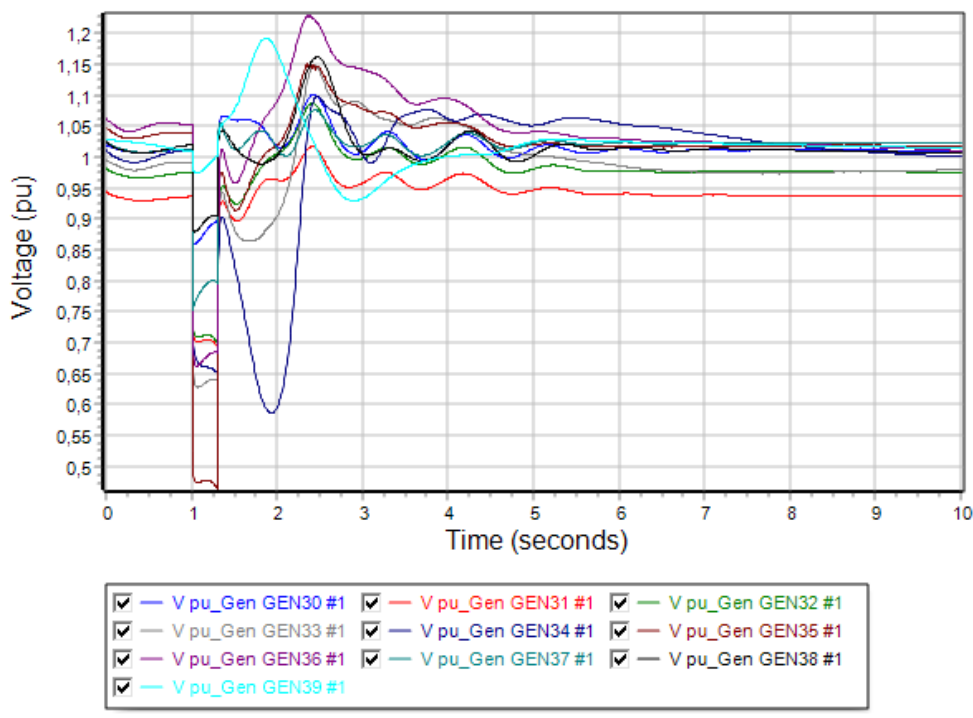
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,30
Open Line	t = 1,30
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,30



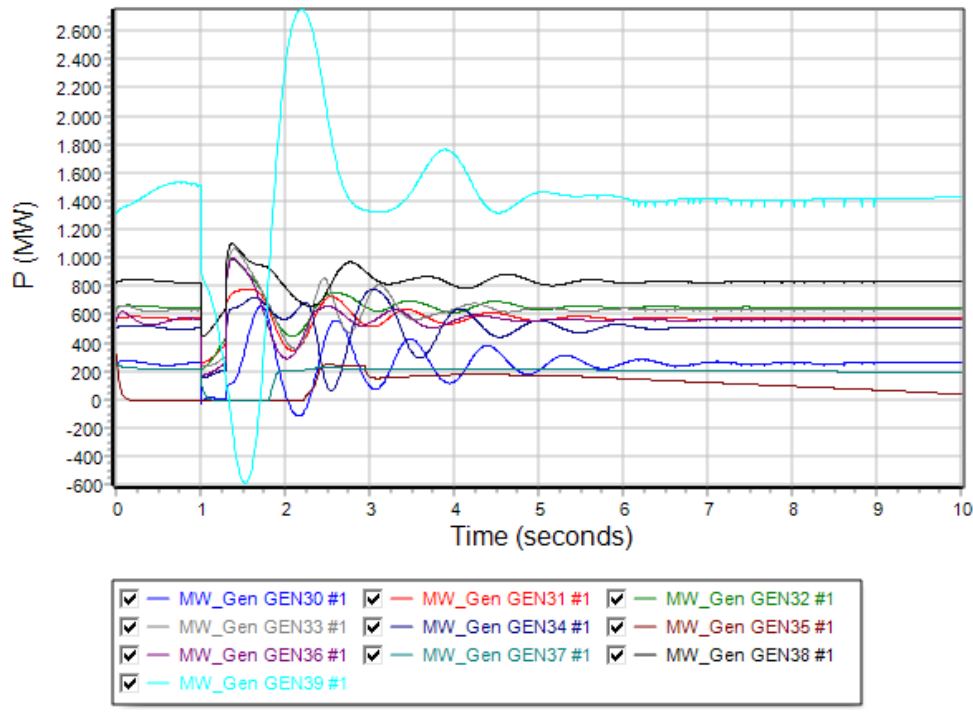
Σχήμα 6.43: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,30sec.



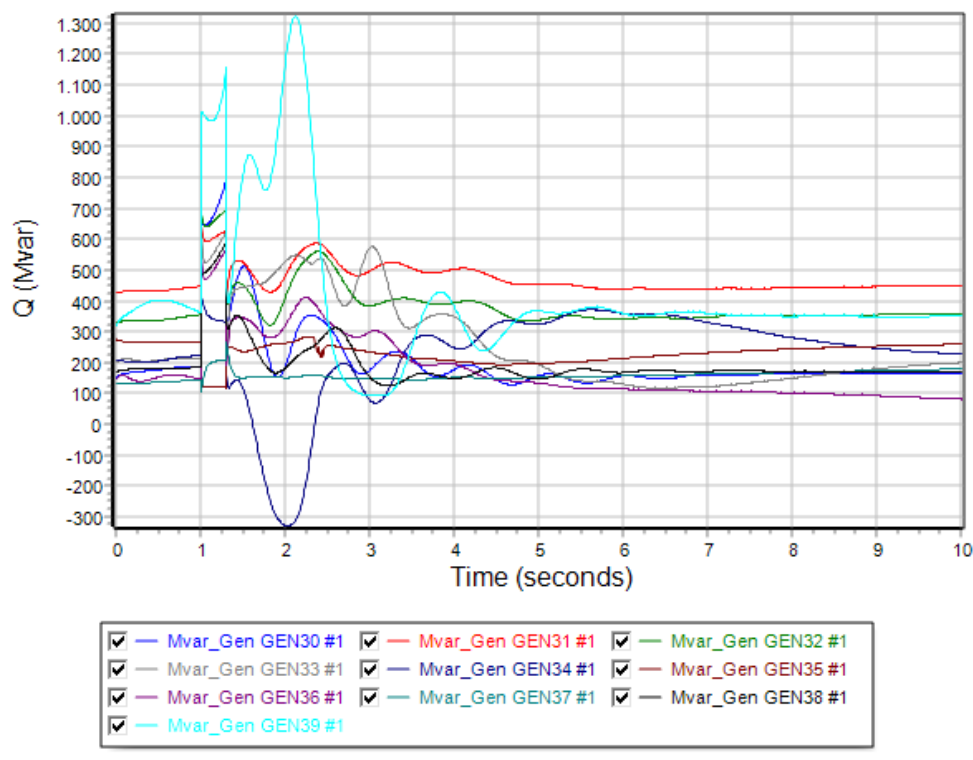
Σχήμα 6.44: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



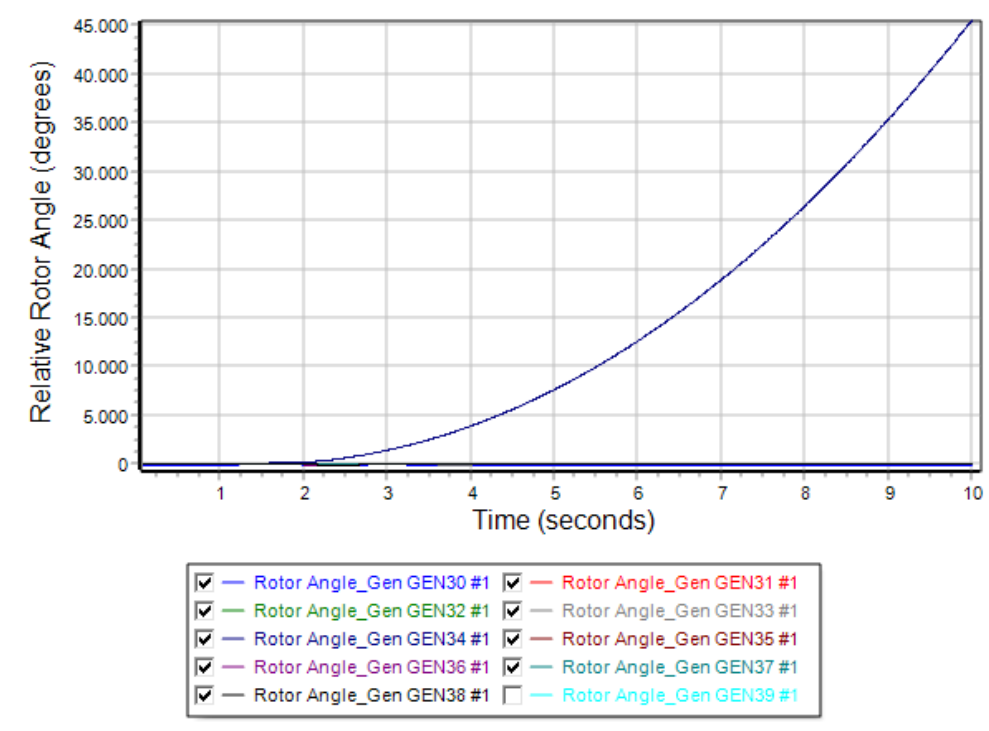
Σχήμα 6.45: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.46: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.47: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



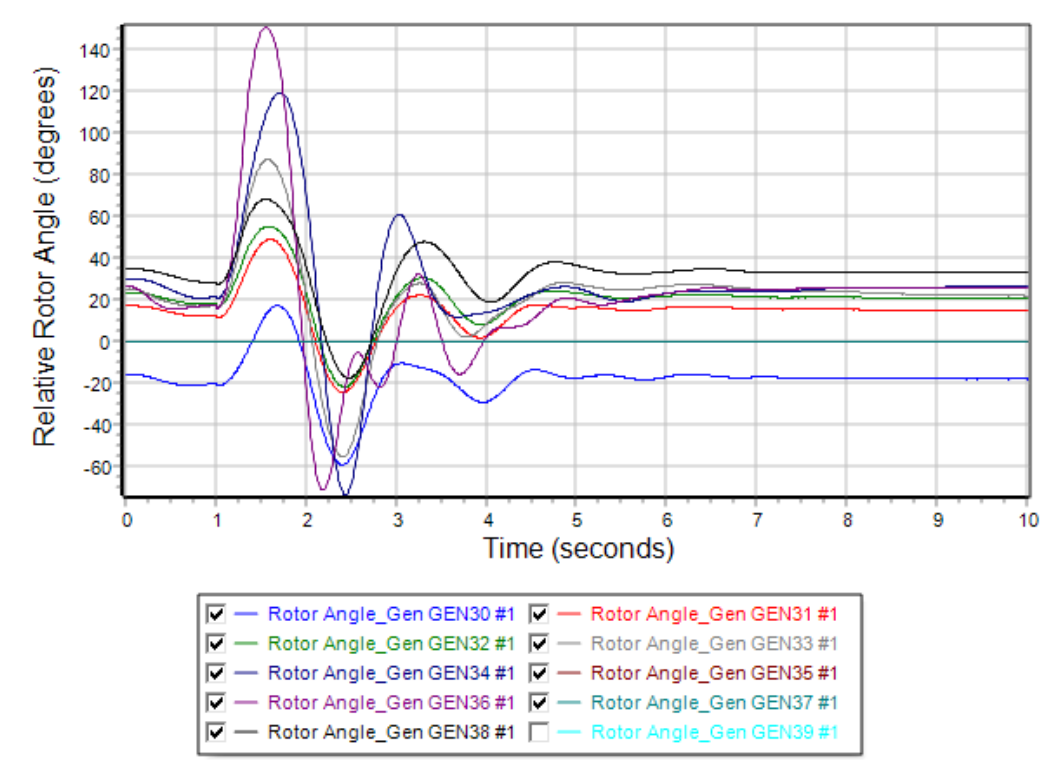
Σχήμα 6.48: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.

Περίπτωση Γ2: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 22 του δικτύου

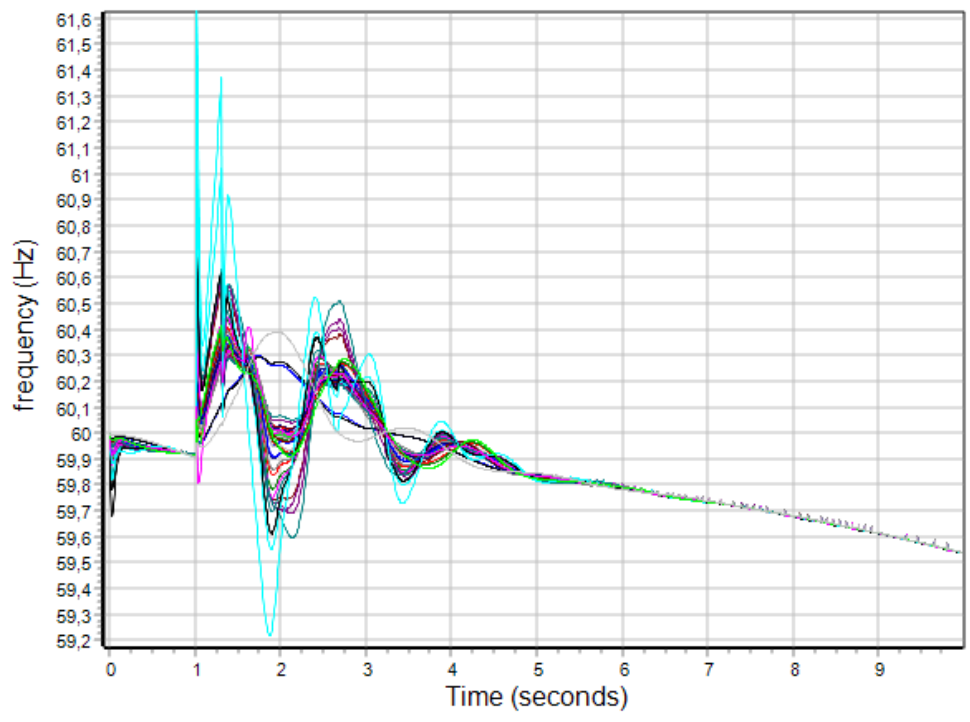
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.8 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.49 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.50 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.51 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.52 και 6.53 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.54 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,35\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,30 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.8: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ2-3phase fault.

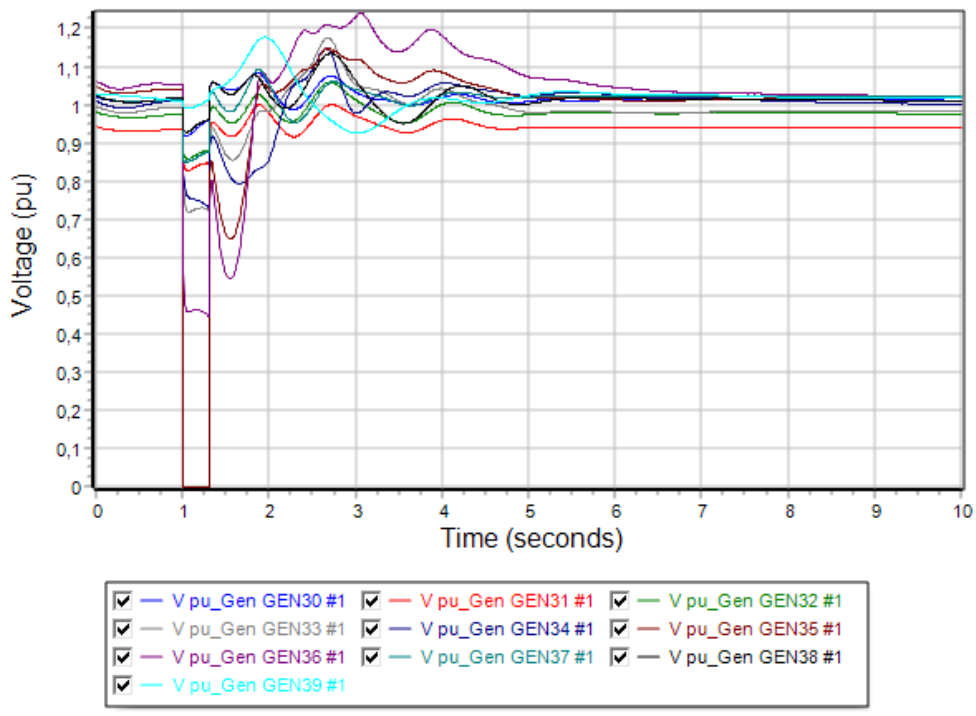
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,30
Open Line	t = 1,30
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,30



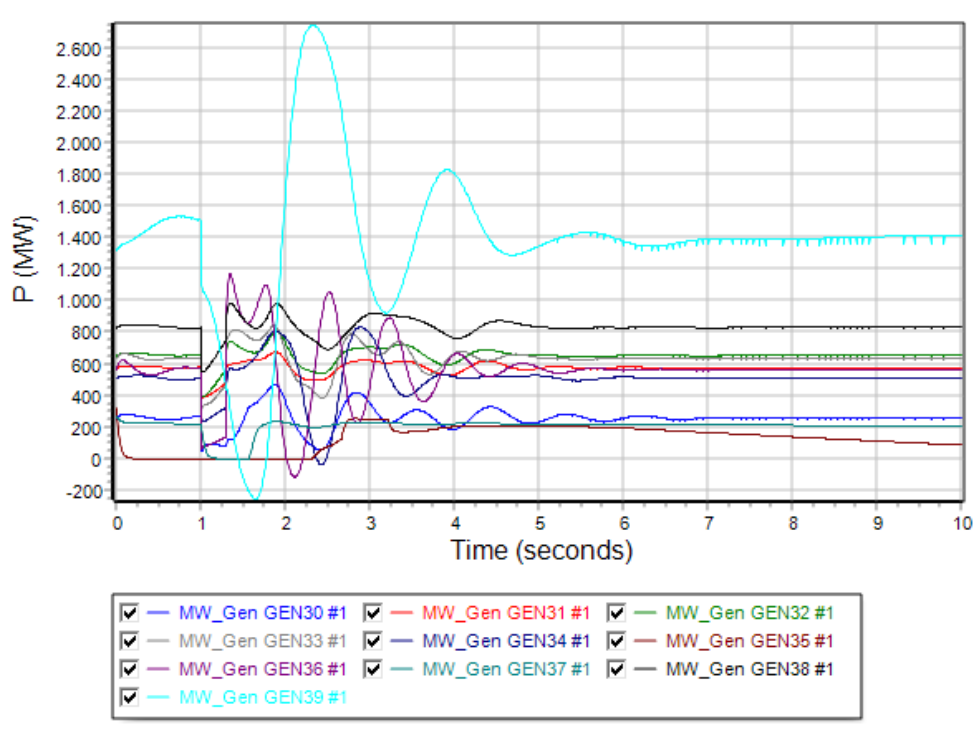
Σχήμα 6.49: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,30sec.



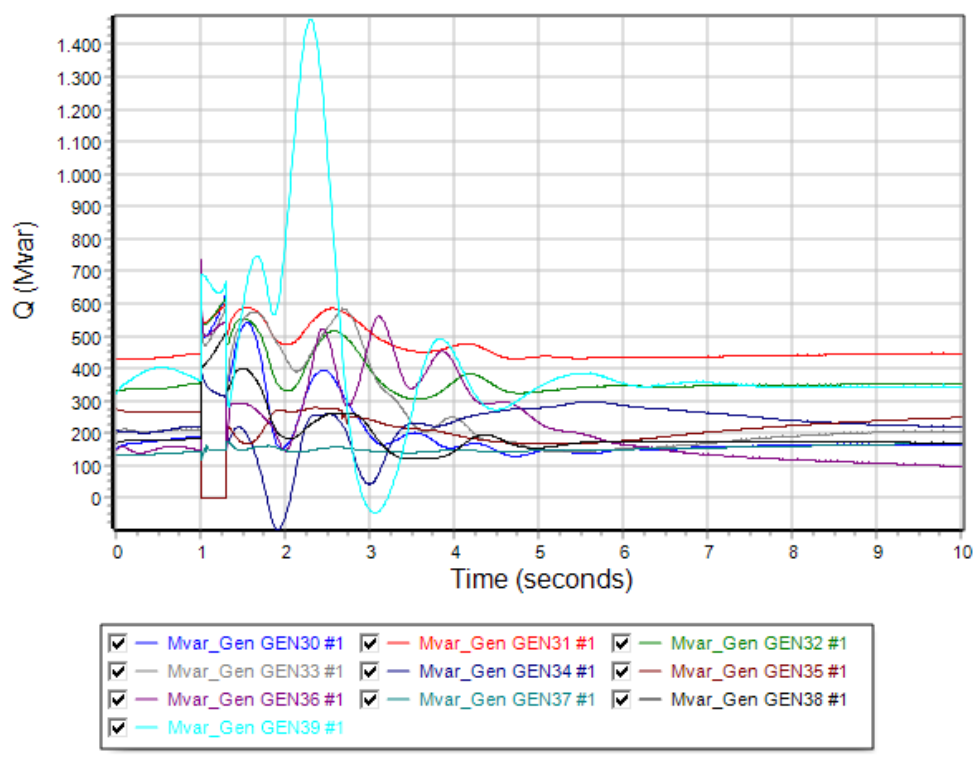
Σχήμα 6.50: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



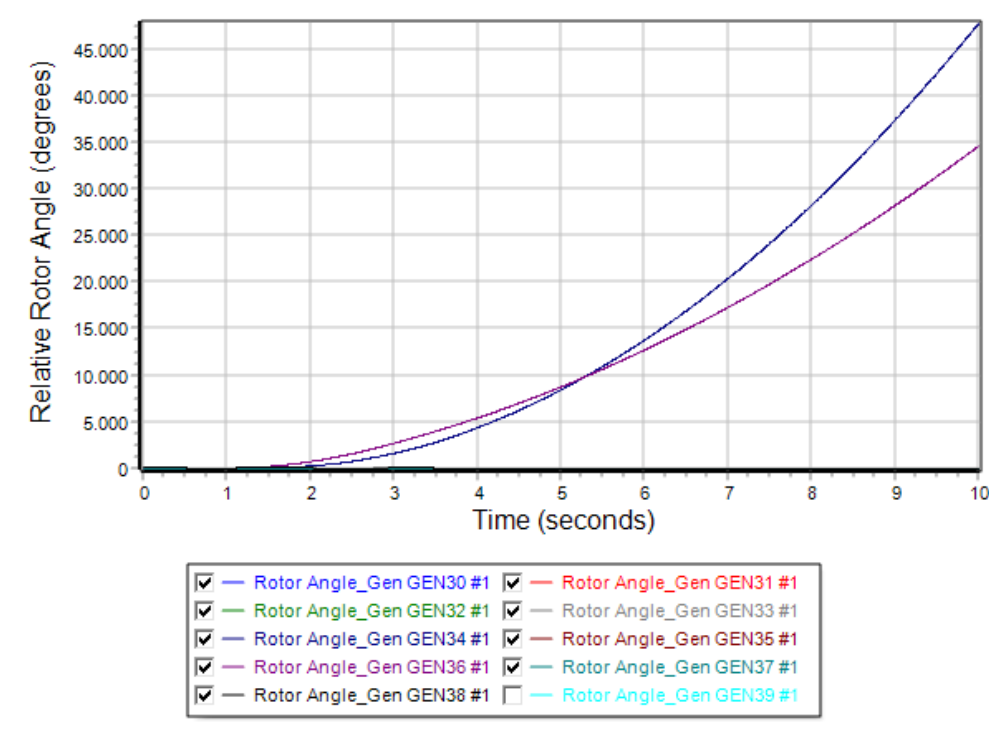
Σχήμα 6.51: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.52: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.53: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



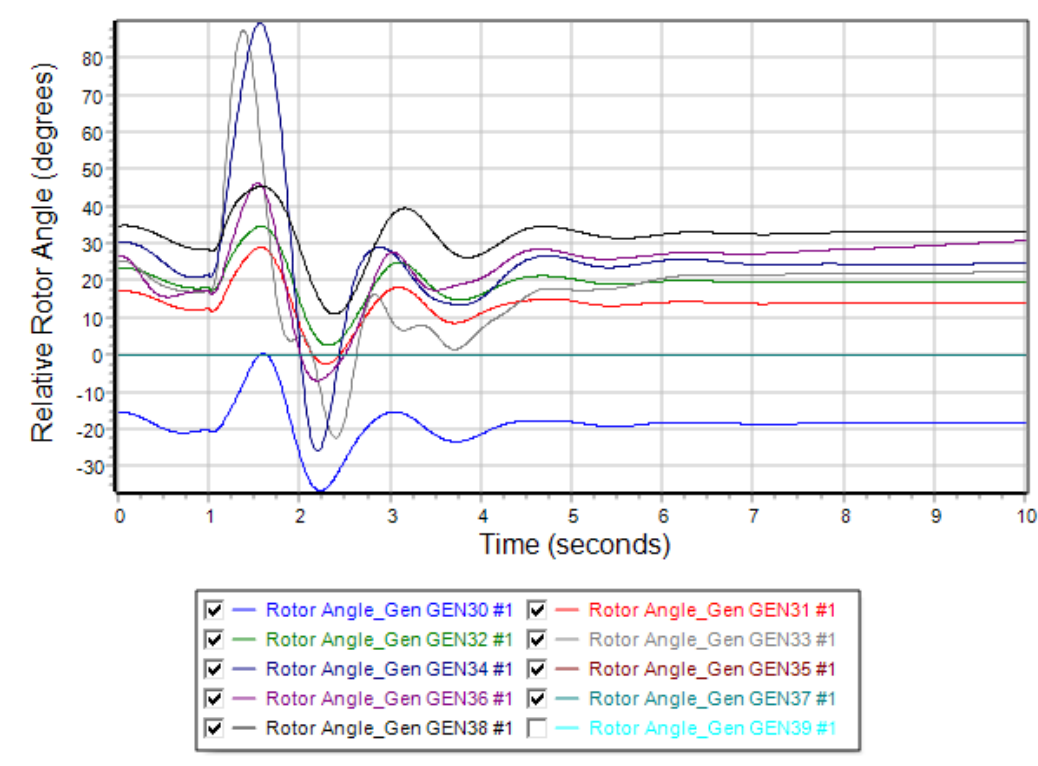
Σχήμα 6.54: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.

Περίπτωση Γ3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου

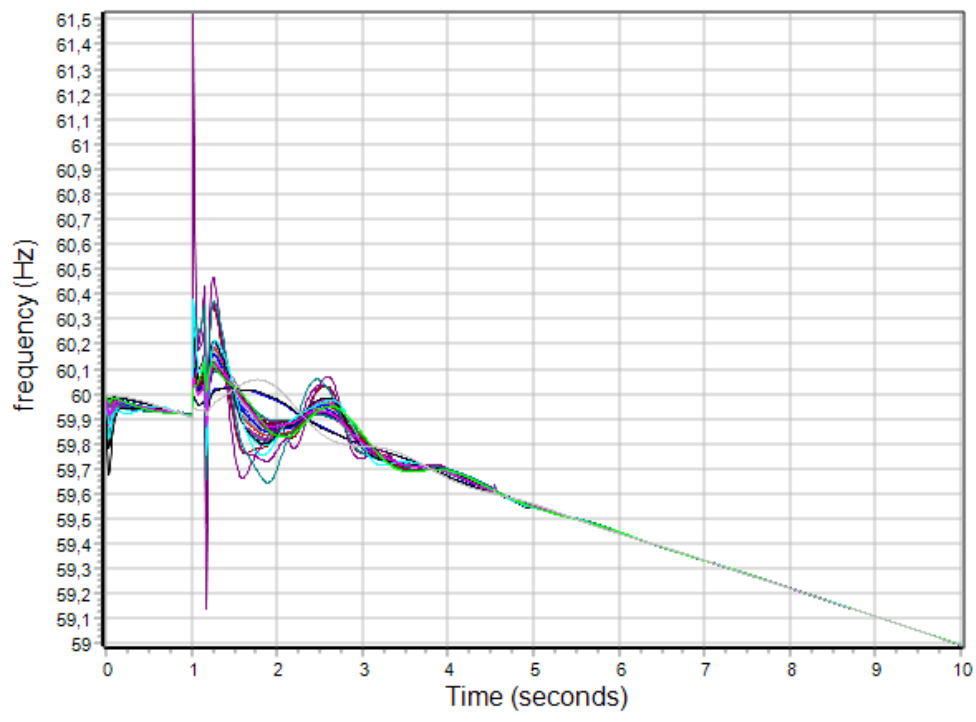
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.9 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.55 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.56 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.57 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.58 και 6.59 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.60 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,20\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,15 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.9: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ3-3phase fault.

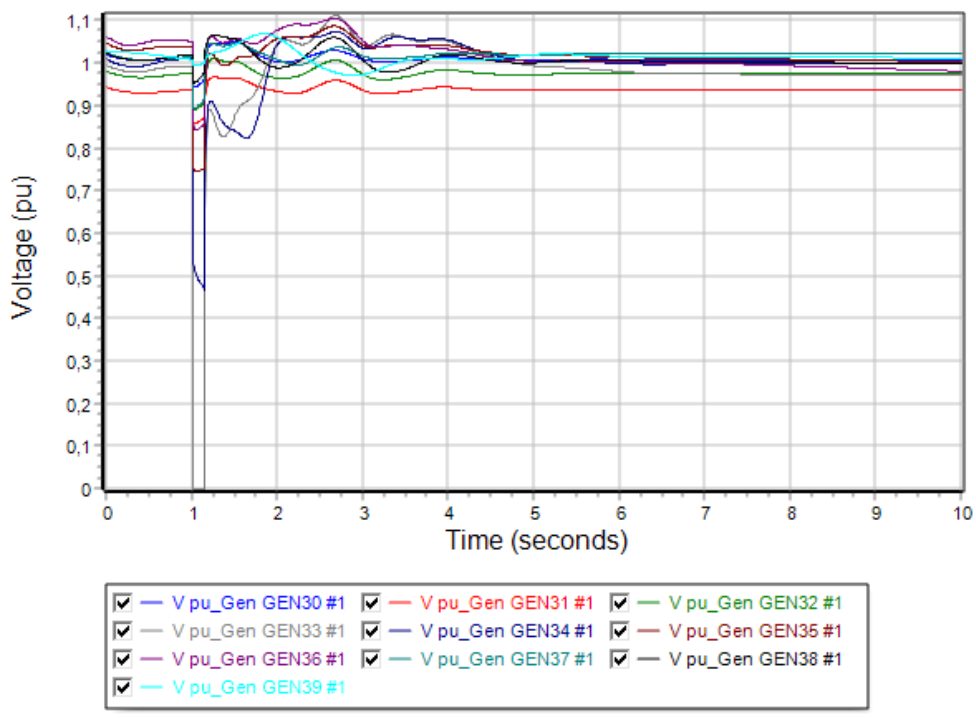
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,15
Open Line	t = 1,15
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,15



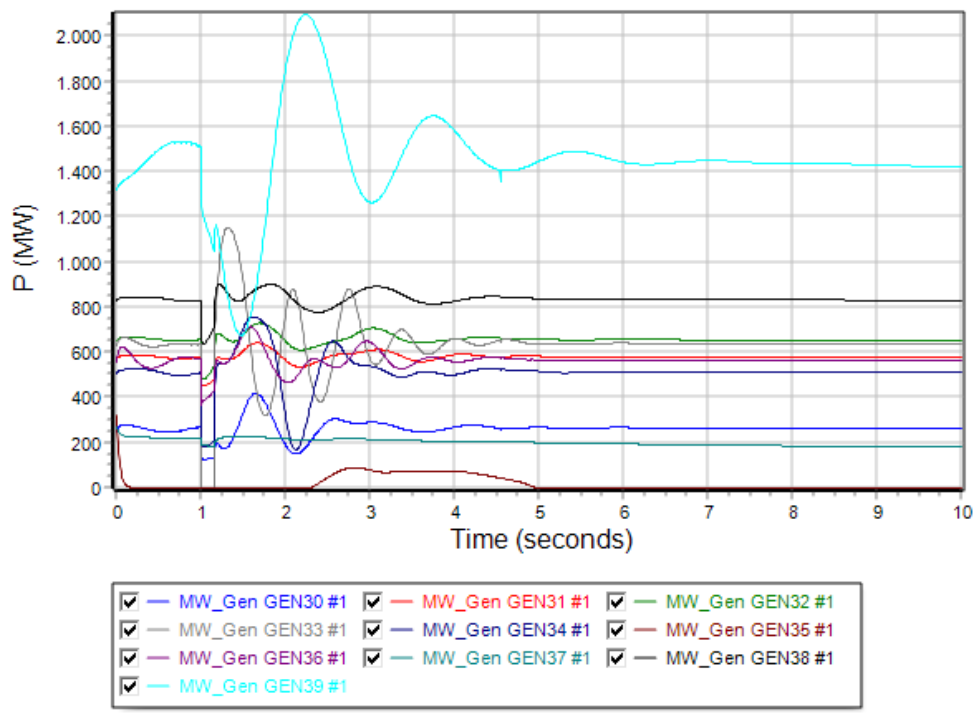
Σχήμα 6.55: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,15sec.



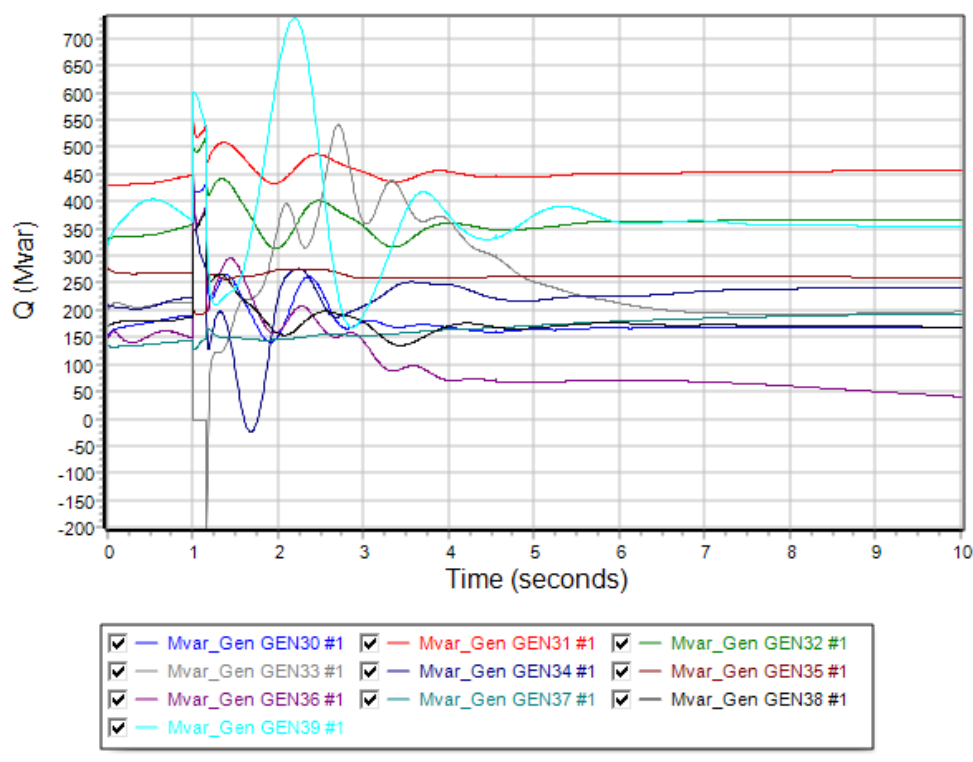
Σχήμα 6.56: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



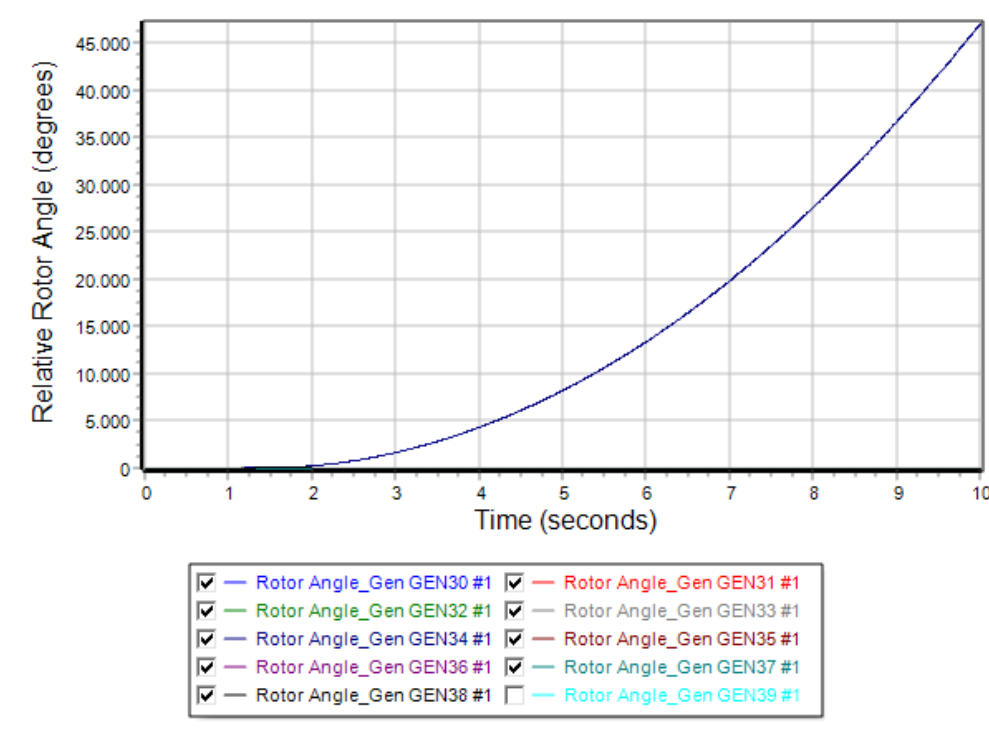
Σχήμα 6.57: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.58: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.59: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,15\text{sec}$.



Σχήμα 6.60: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.

6.5.4 Σενάριο Δ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Στο Σενάριο Δ πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα αυξάνουμε το ποσοστό της παραγωγής ενέργειας που προέρχεται από ανεμογεννήτριες κατά 10% με βάση το Σενάριο Γ, επιτυγχάνοντας έτσι ποσοστό 30% παραγωγής από αιολική ενέργεια. Το υπόλοιπο 70% καλύπτεται από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Έχοντας ως βάση τις ανεμογεννήτριες που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 35 και 37 του Σεναρίου Γ, αντικαθιστούμε την γεννήτρια του ζυγού 33 με ανεμογεννήτρια (WT3) με το 100% της παραγωγής της. Για να μπορούμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια και για την εφαρμογή 3phase fault, επιλέγουμε:

- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια

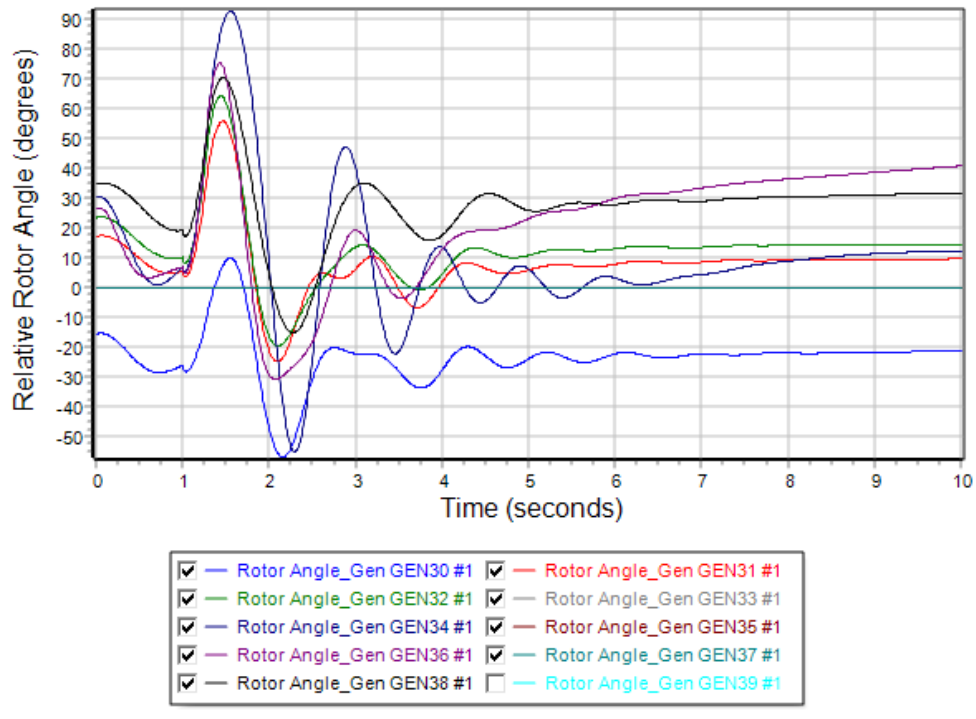
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

Περίπτωση Δ1: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 15 του δικτύου

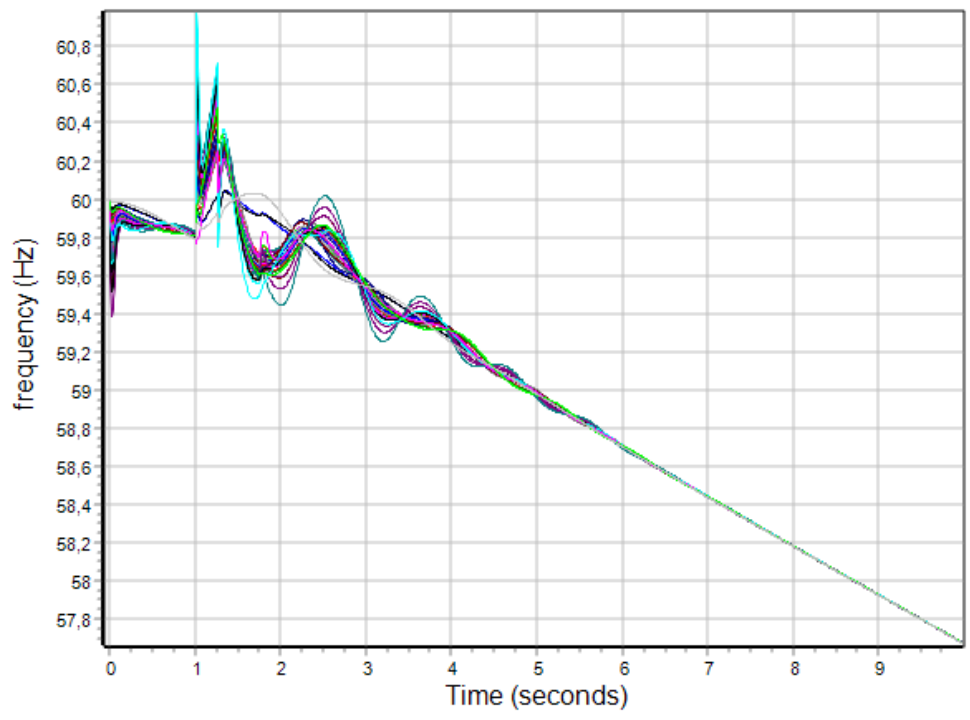
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.10 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.61 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.62 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.63 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.64 και 6.65 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.66 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.10: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ1-3phase fault.

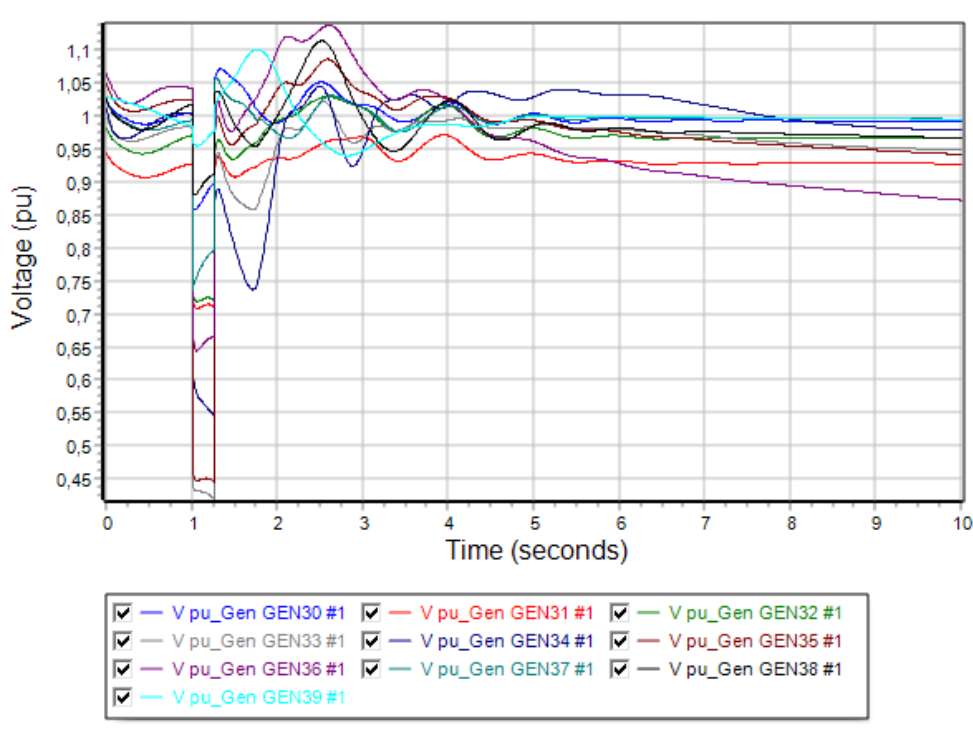
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



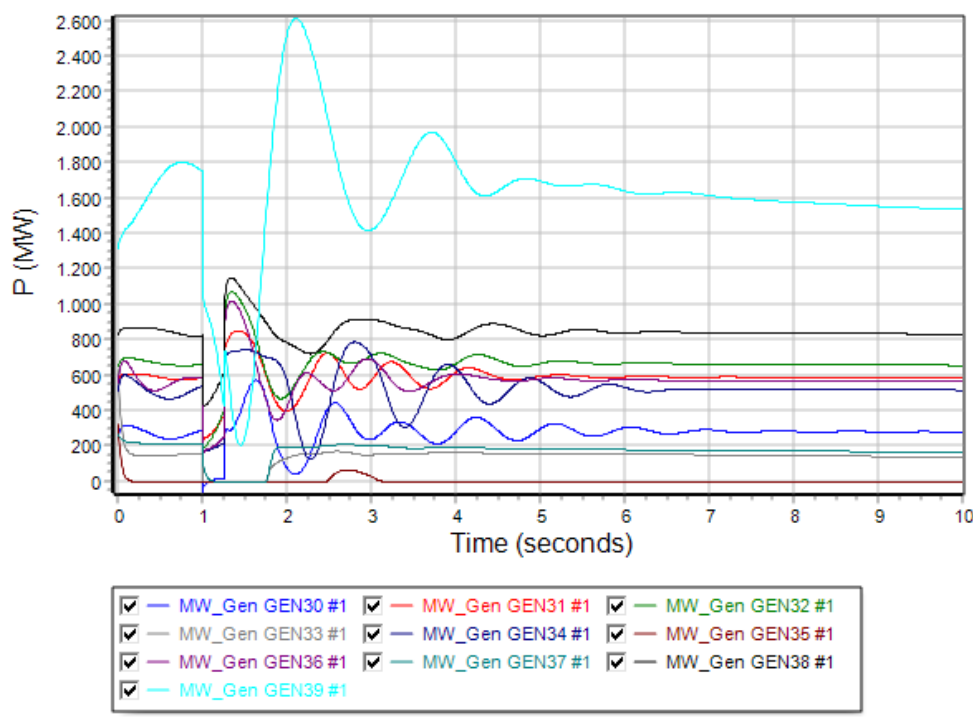
Σχήμα 6.61: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



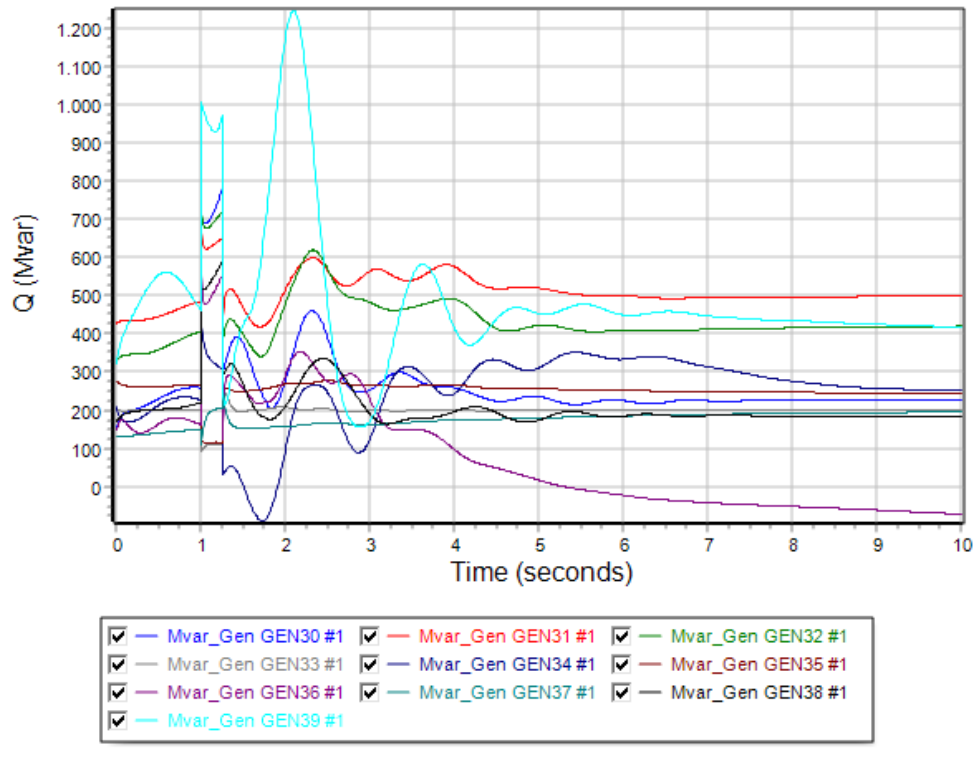
Σχήμα 6.62: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



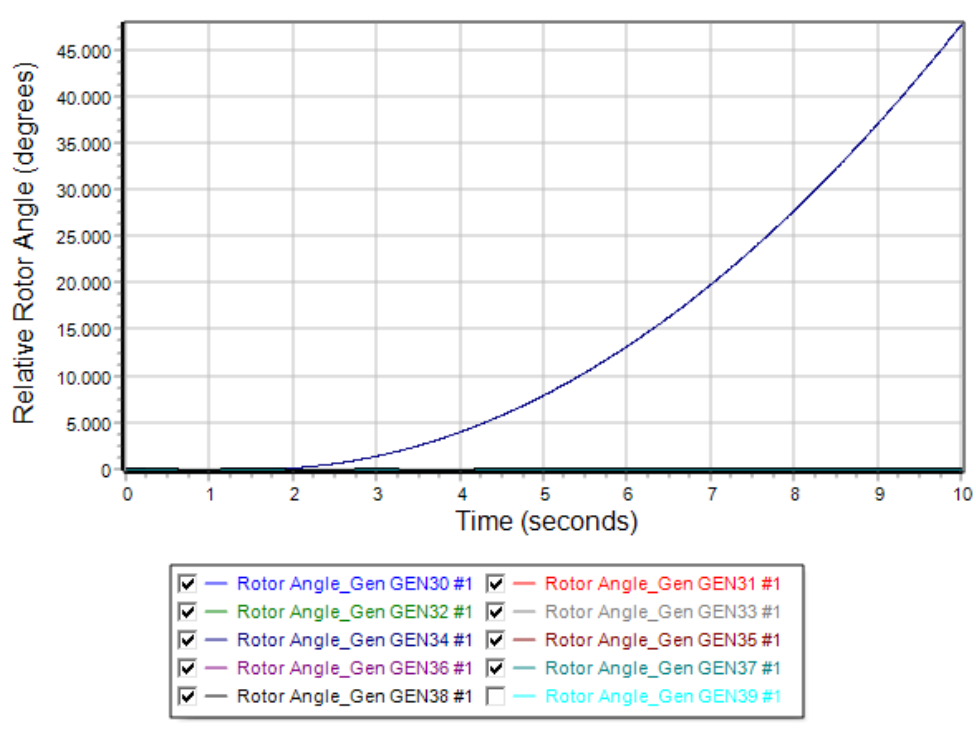
Σχήμα 6.63: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.64: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.65: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



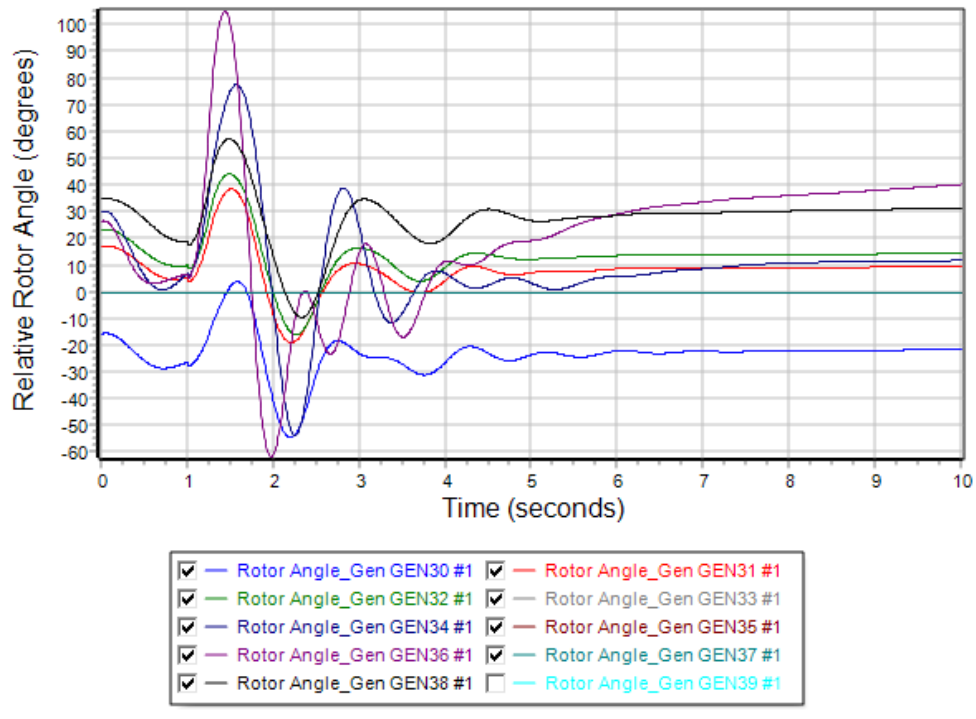
Σχήμα 6.66: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.

Περίπτωση Δ2: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 22 του δικτύου

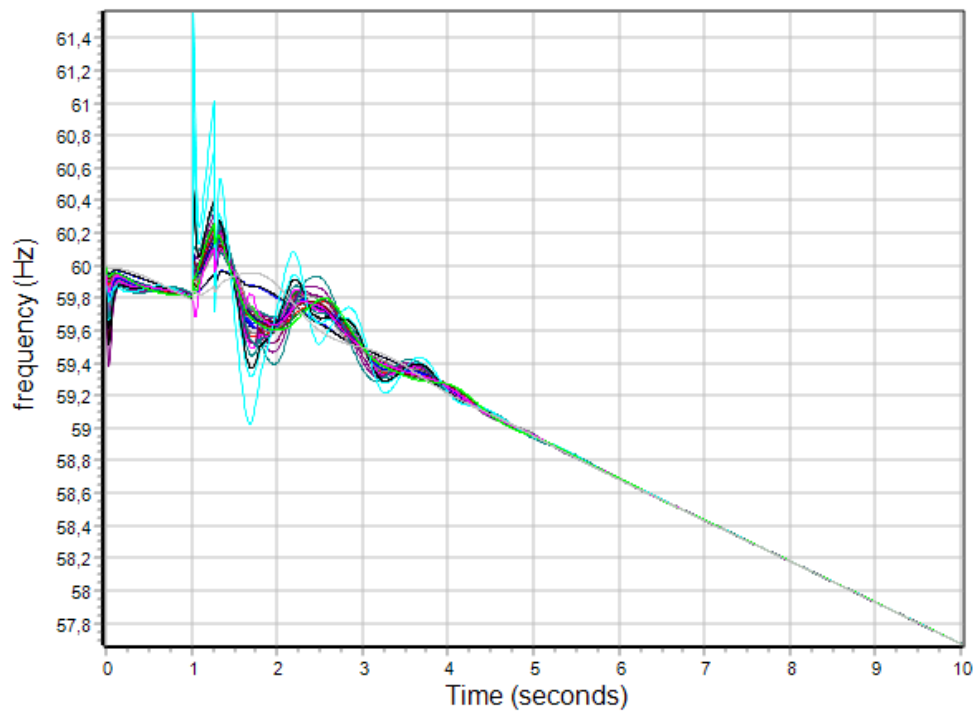
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.11 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.67 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.68 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.69 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.70 και 6.71 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.72 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.11: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ2-3phase fault.

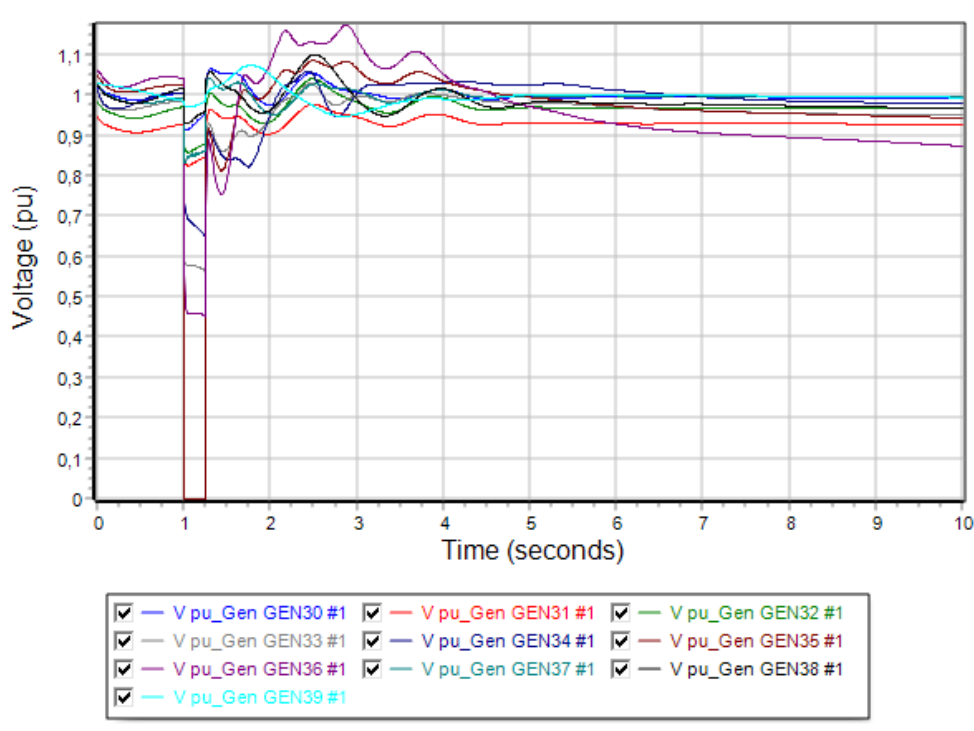
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



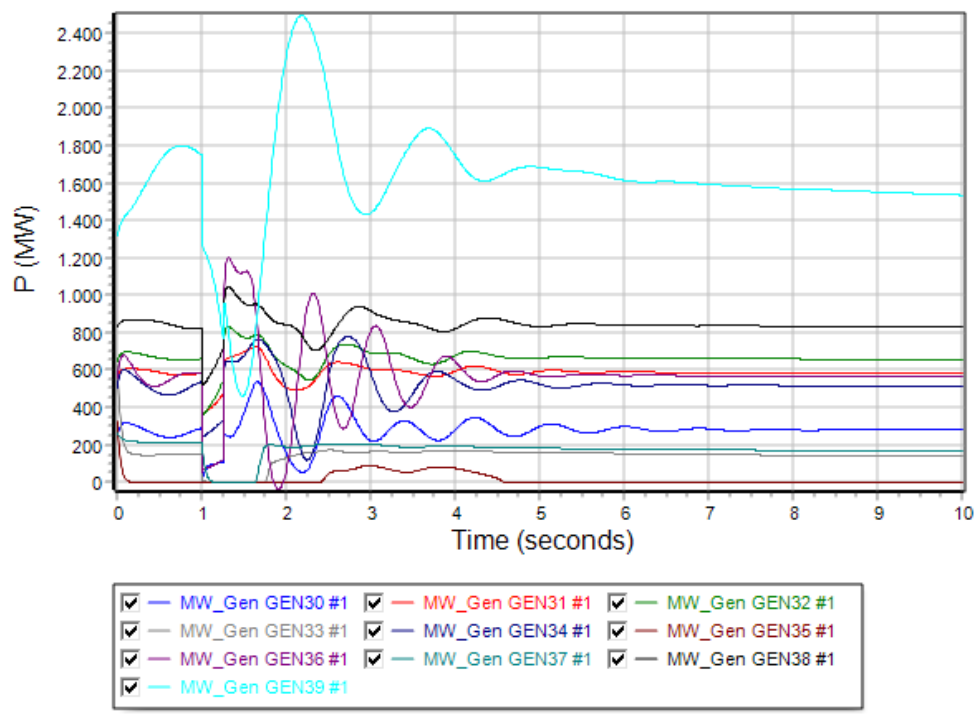
Σχήμα 6.67: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



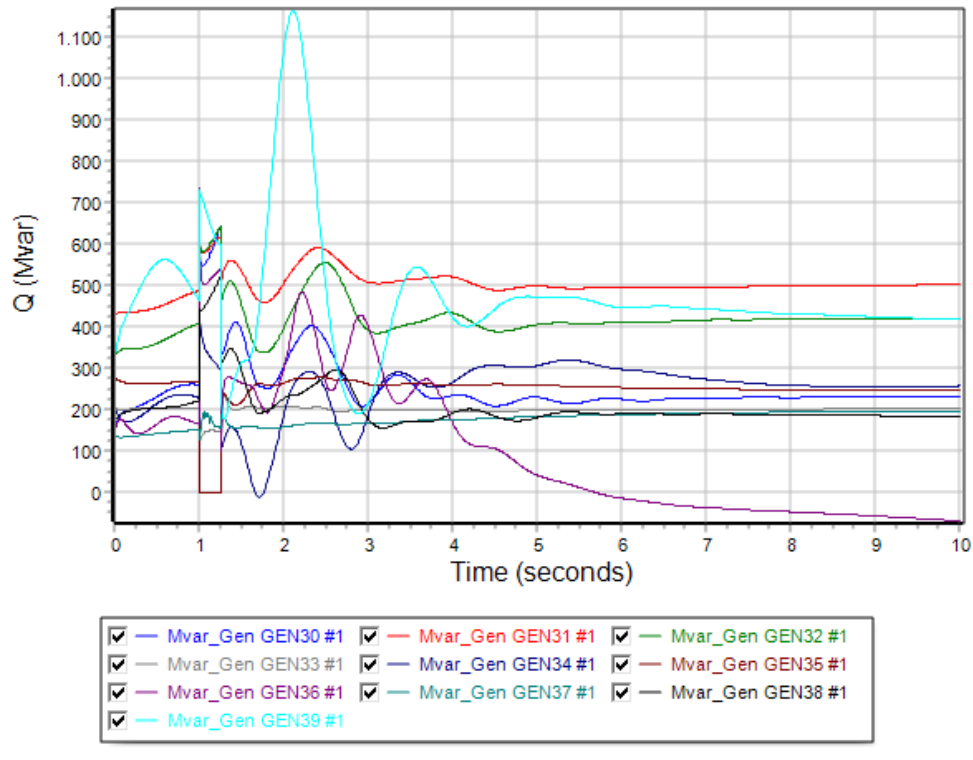
Σχήμα 6.68: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



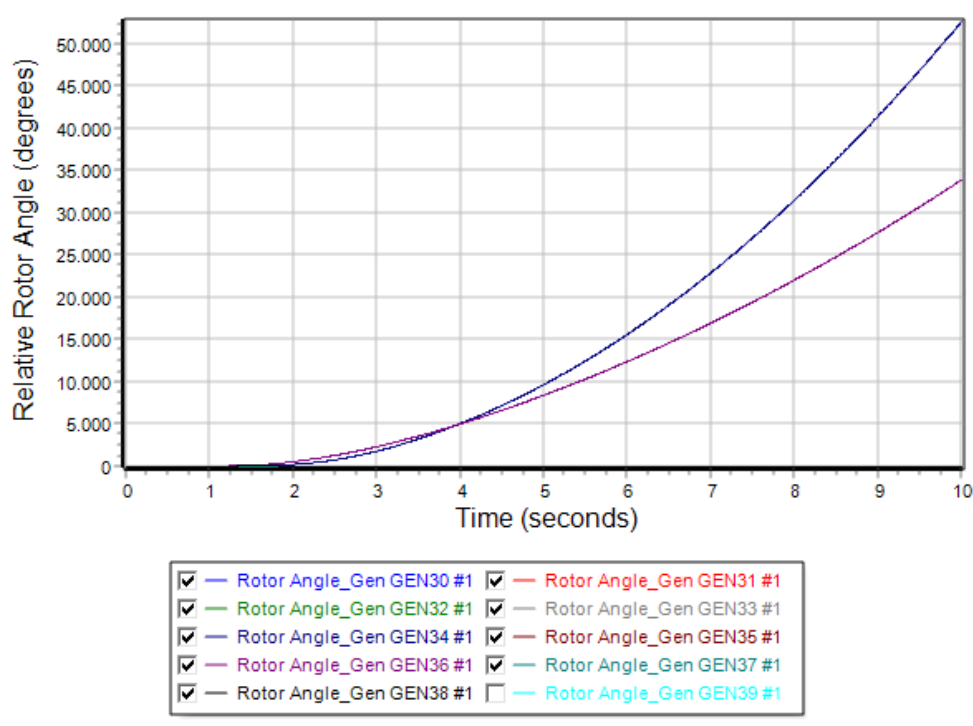
Σχήμα 6.69: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25$ sec.



Σχήμα 6.70: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25$ sec.



Σχήμα 6.71: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25$ sec.



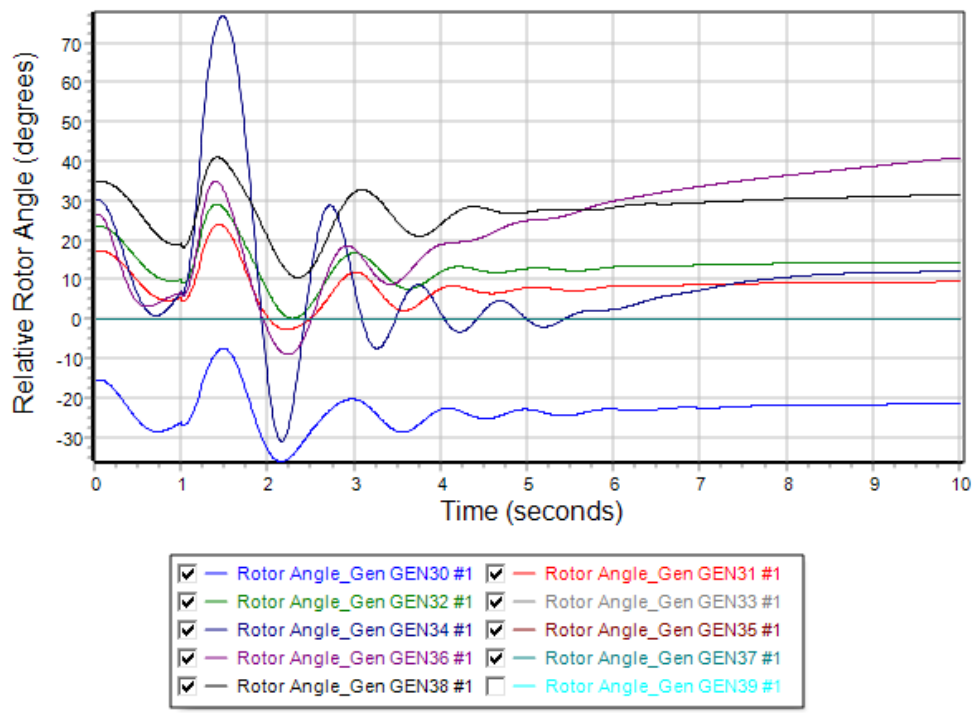
Σχήμα 6.72: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30$ sec.

Περίπτωση Δ3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου

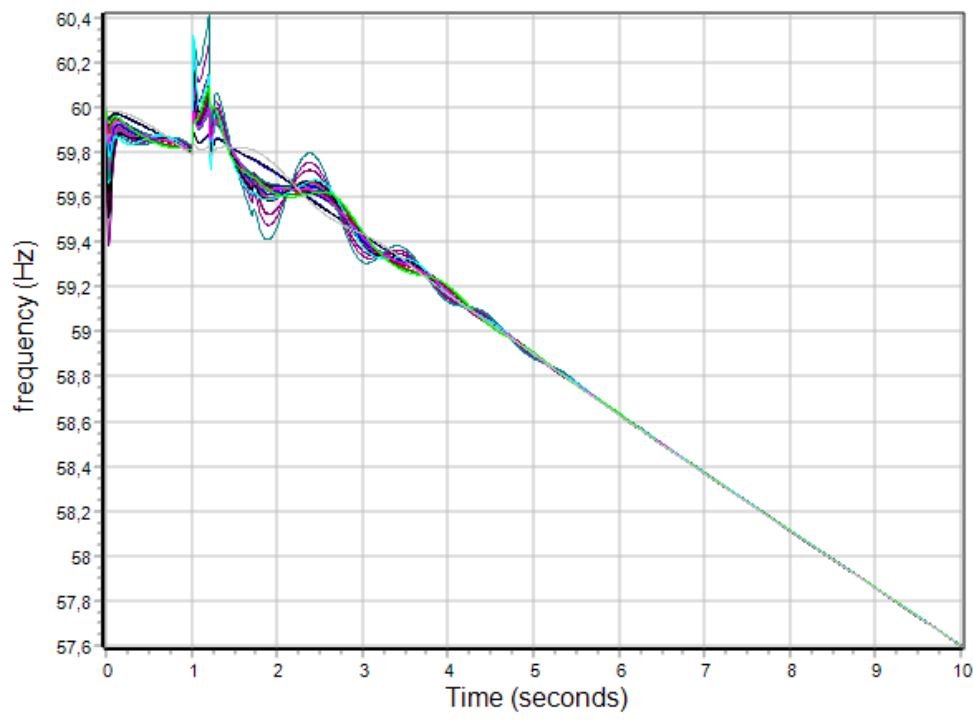
Εφαρμόζουμε τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.12 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.73 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.74 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.75 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.76 και 6.77 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.78 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,25\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,20 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.12: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ3-3phase fault.

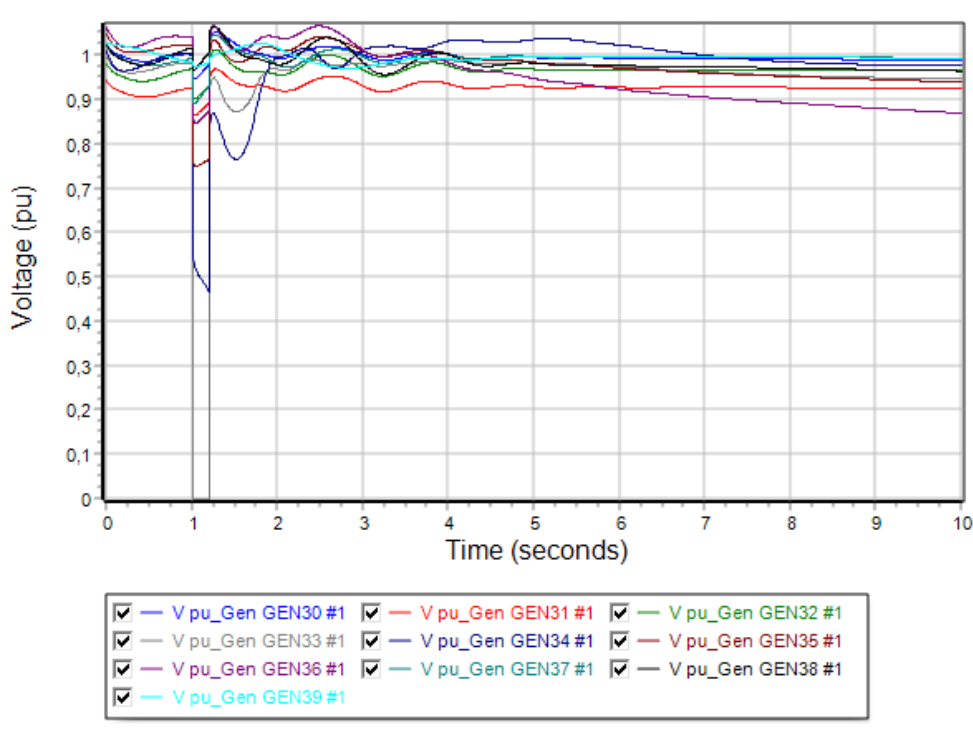
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,20$
Open Line	$t = 1,20$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,20$



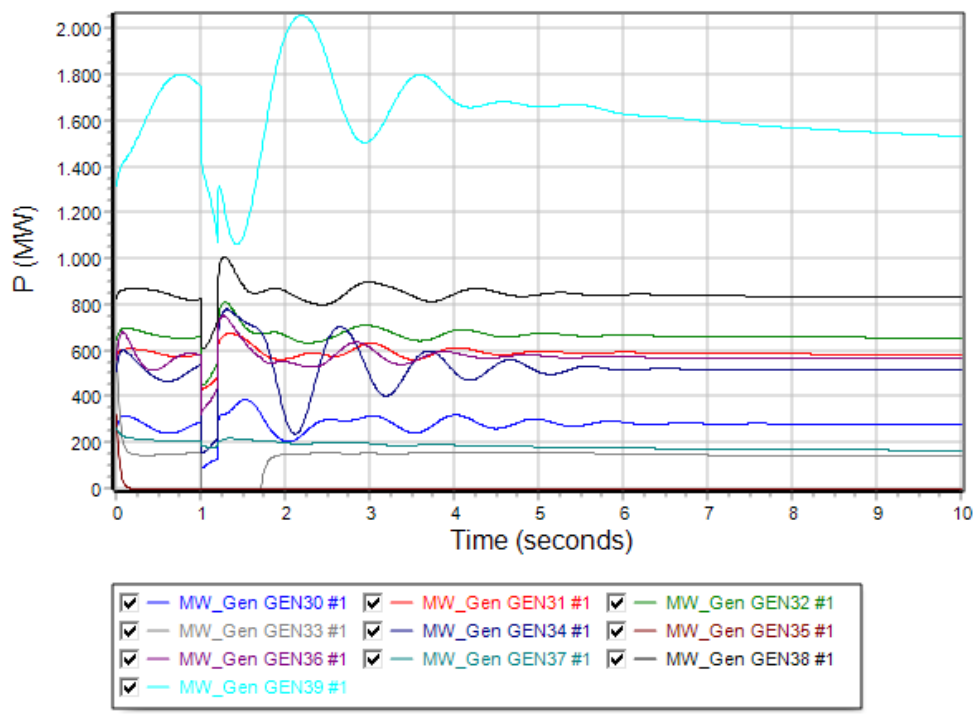
Σχήμα 6.73: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.



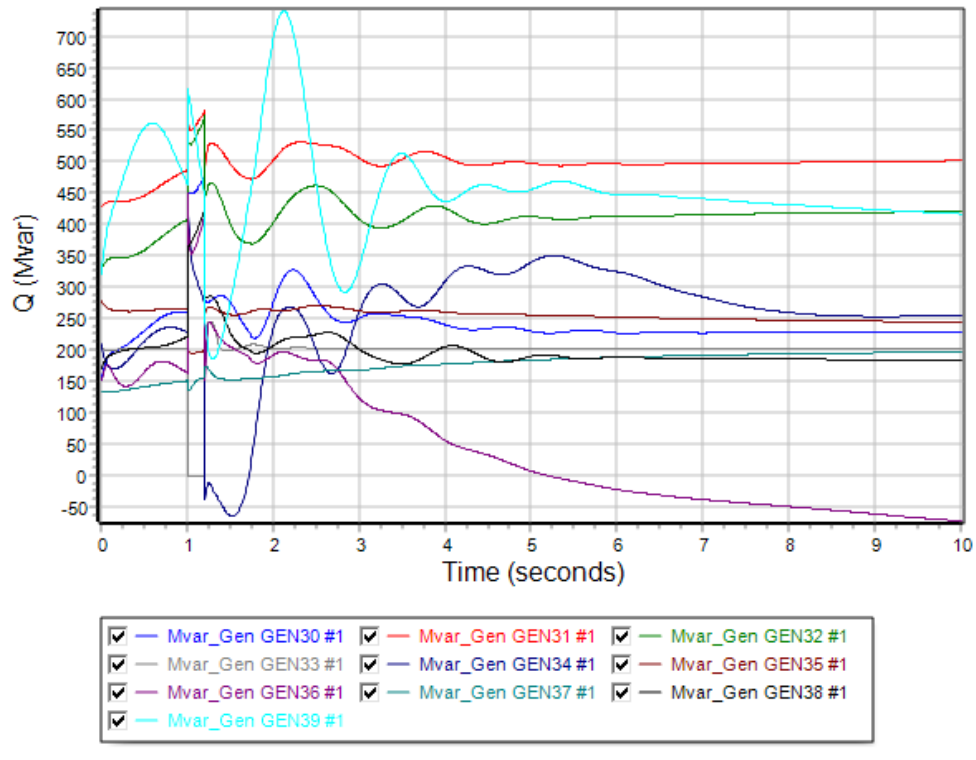
Σχήμα 6.74: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.



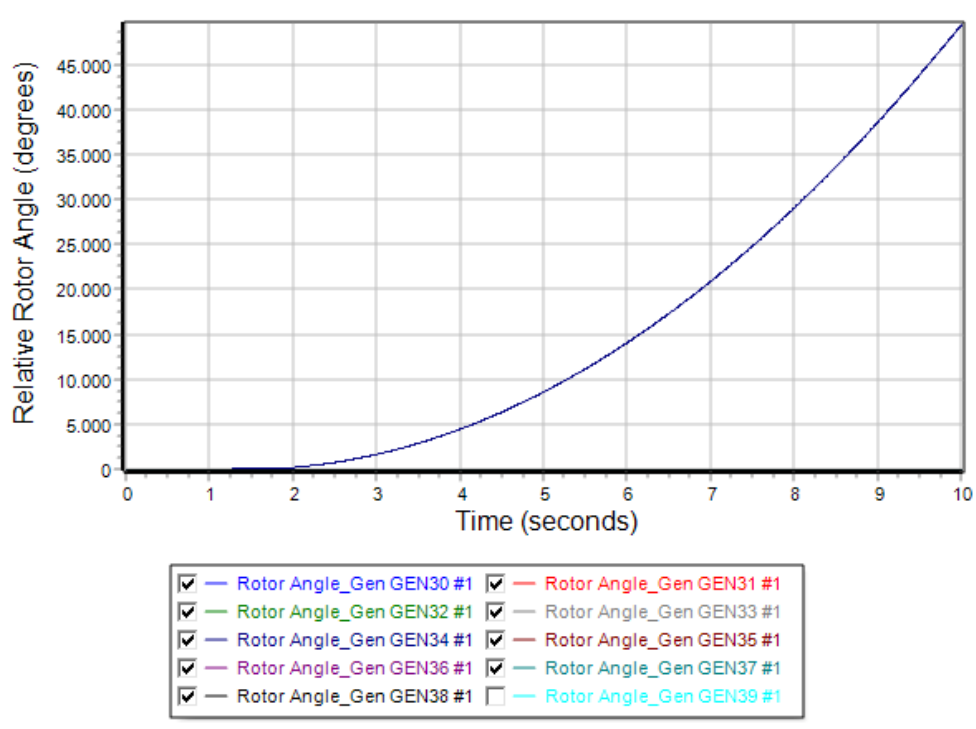
Σχήμα 6.75: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.



Σχήμα 6.76: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.



Σχήμα 6.77: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,20\text{sec}$.



Σχήμα 6.78: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.

6.5.5 Σενάριο A: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη

Στο Σενάριο A πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν ολόκληρη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από συμβατικές πηγές. Το δίκτυο αποτελείται από 39 ζυγούς. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια, για την εφαρμογή SLG fault, επιλέγουμε:

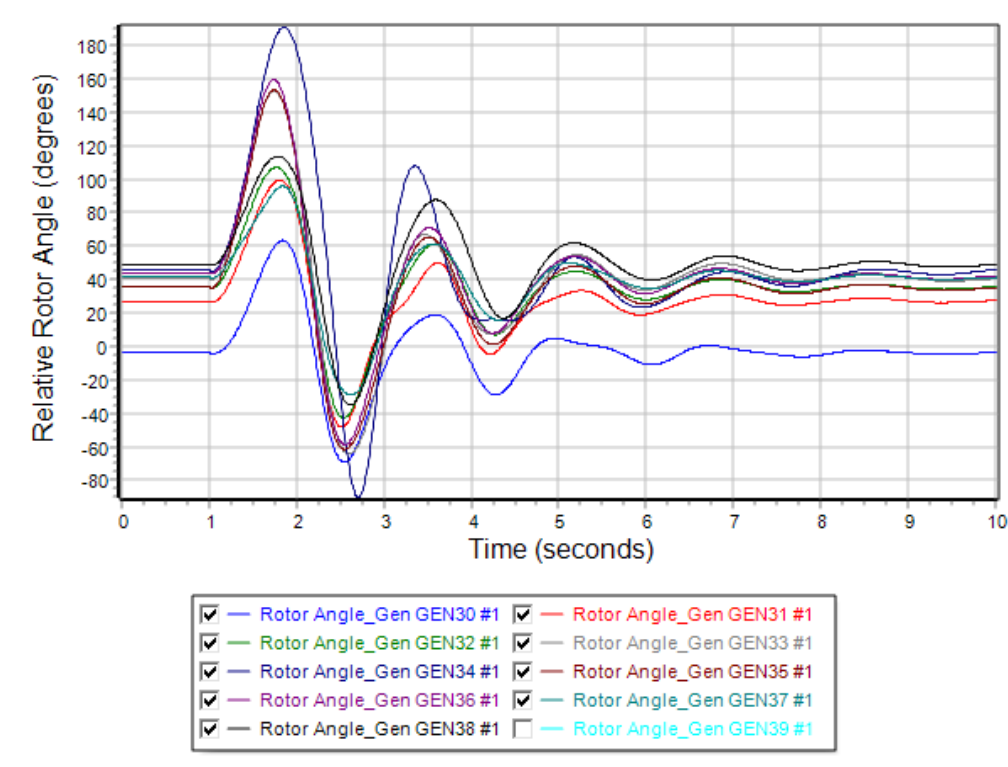
- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

Περίπτωση A1: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 15 του δικτύου

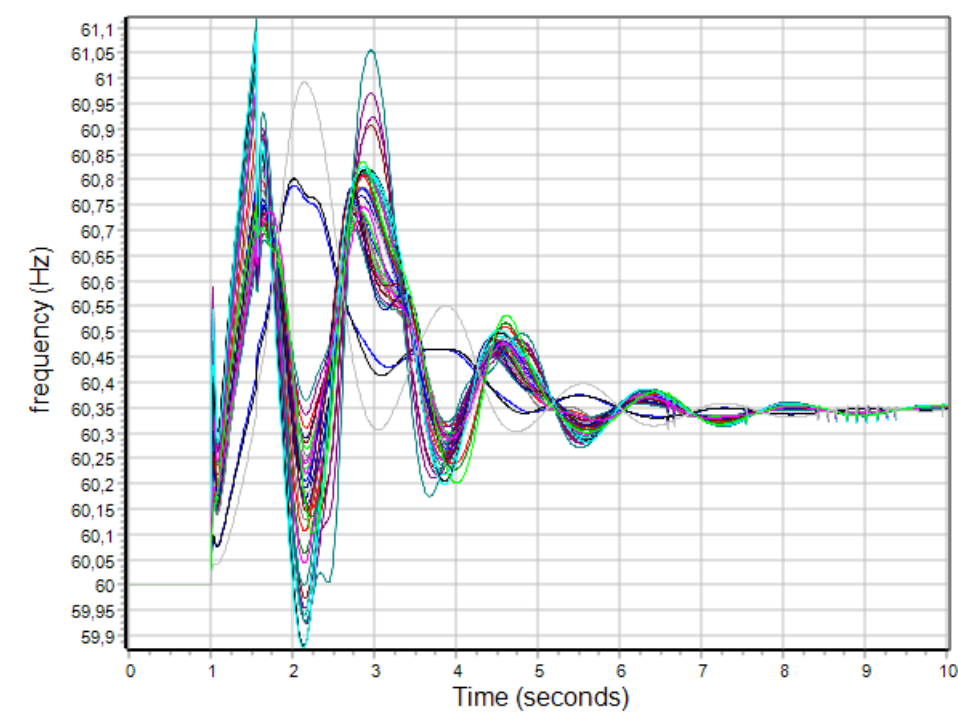
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.13 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.79 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.80 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.81 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.82 και 6.83 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.84 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,60\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,55 δευτερόλεπτα με την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.13: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A1 - SLG fault.

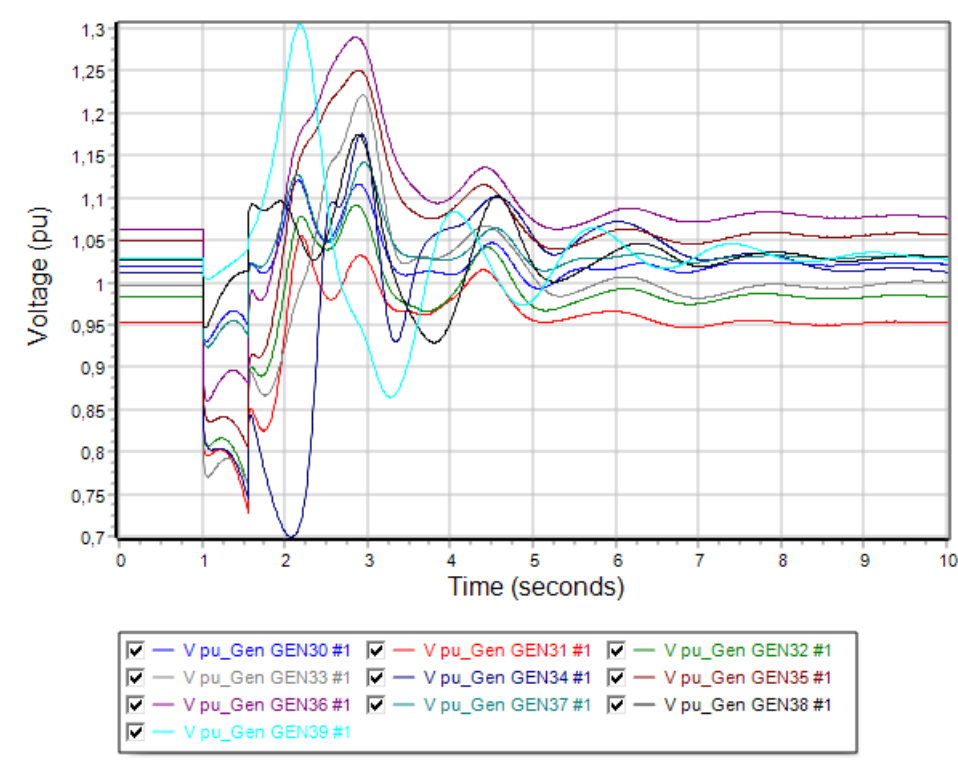
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,55
Open Line	t = 1,55
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,55



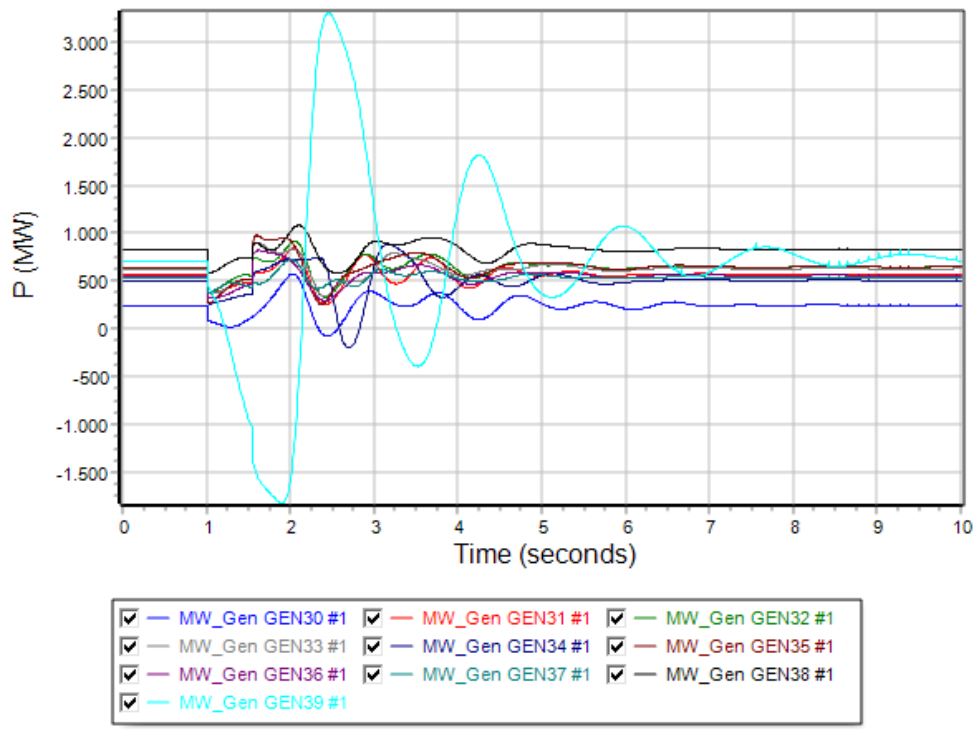
Σχήμα 6.79: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,55sec.



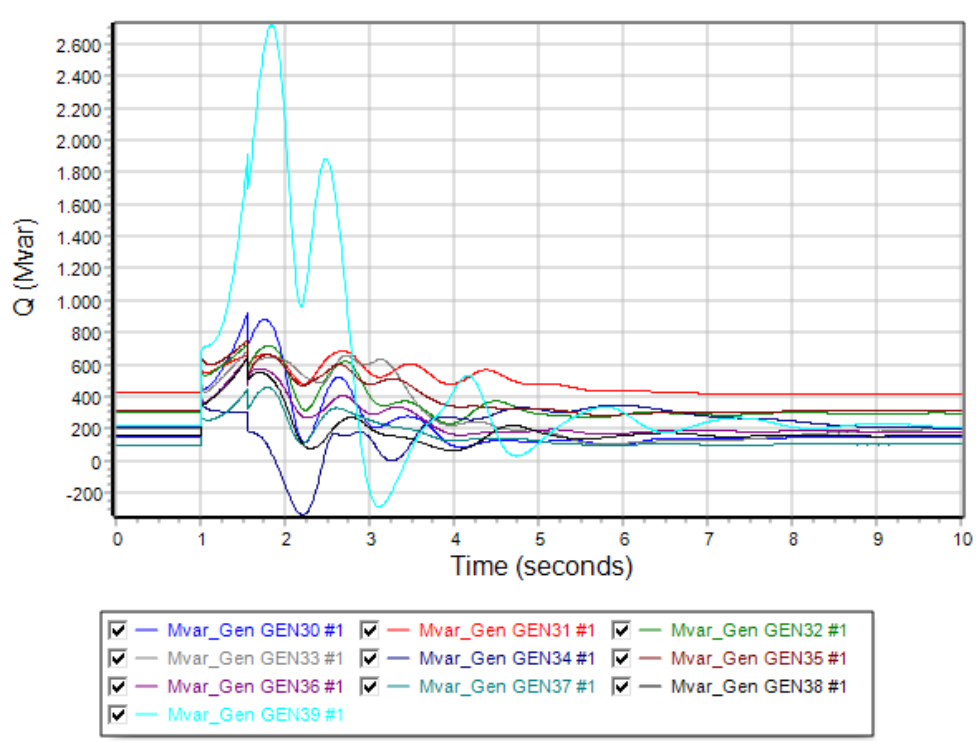
Σχήμα 6.80: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$.



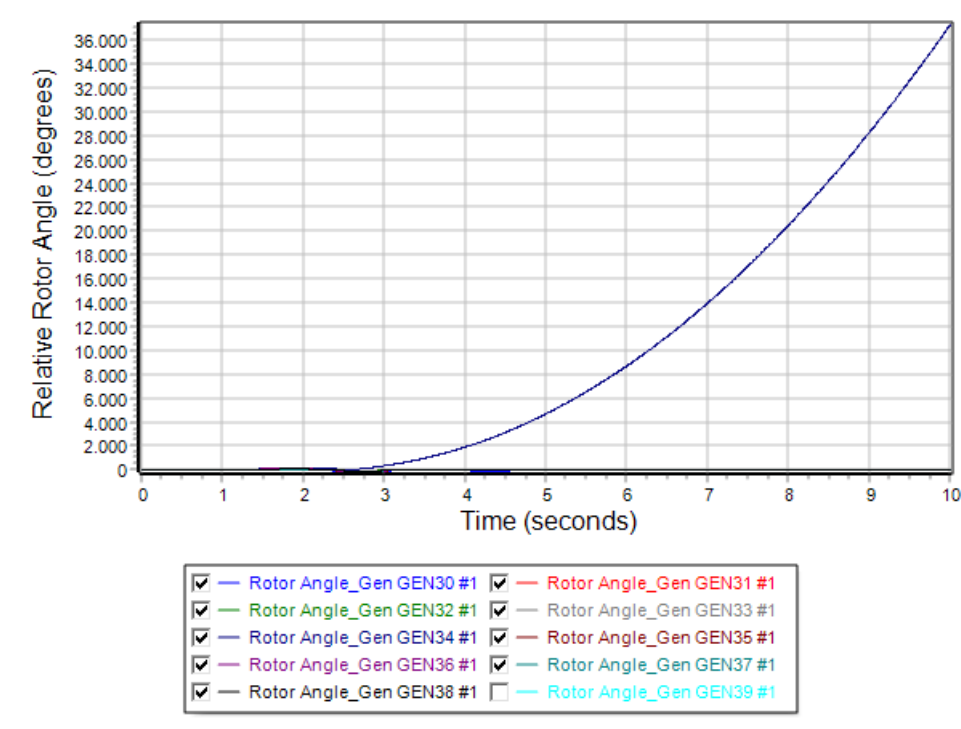
Σχήμα 6.81: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$.



Σχήμα 6.82: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$.



Σχήμα 6.83: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,55\text{sec}$.



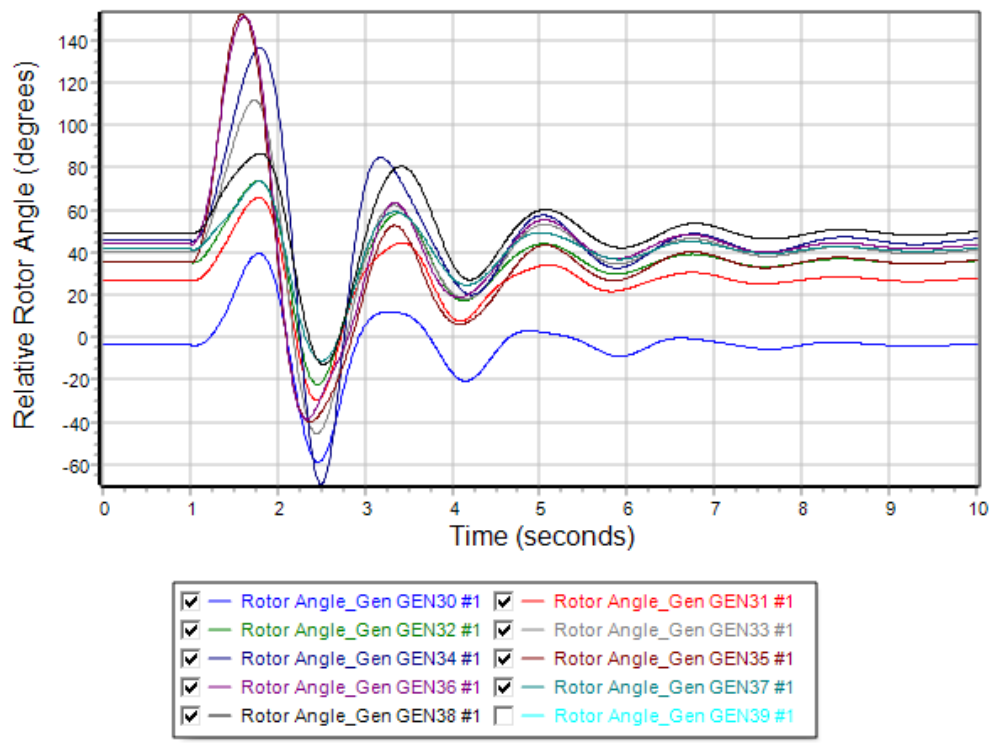
Σχήμα 6.84: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,60\text{sec}$.

Περίπτωση Α2: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 22 του δικτύου

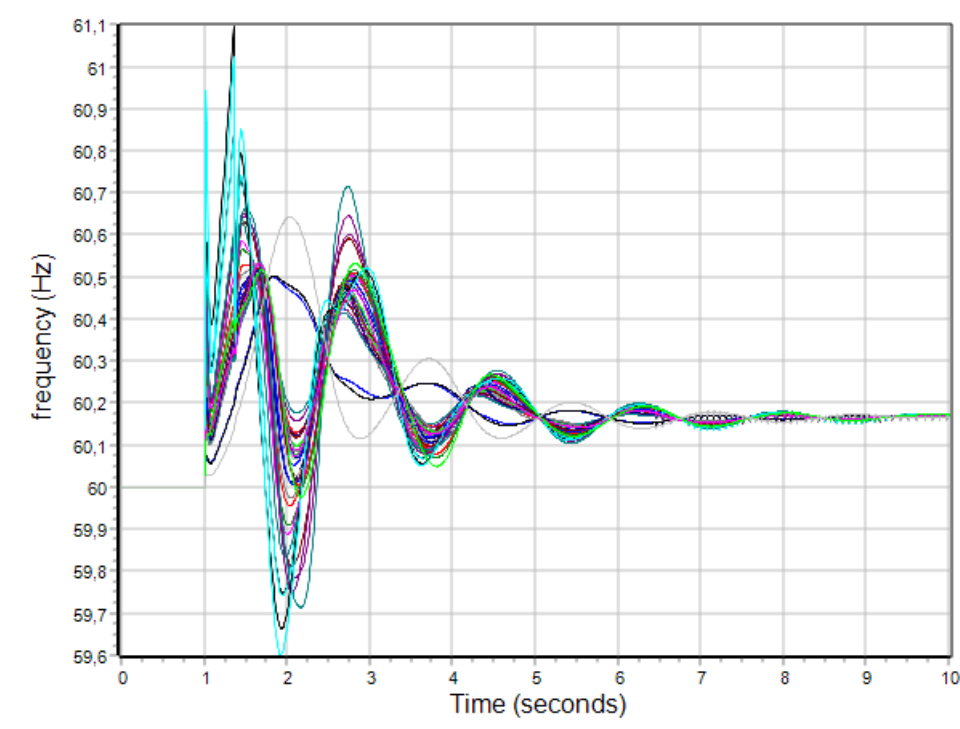
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.14 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.85 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.86 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.87 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.88 και 6.89 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.90 αναπαριστούνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,40\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,35 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.14: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A2-SLG fault.

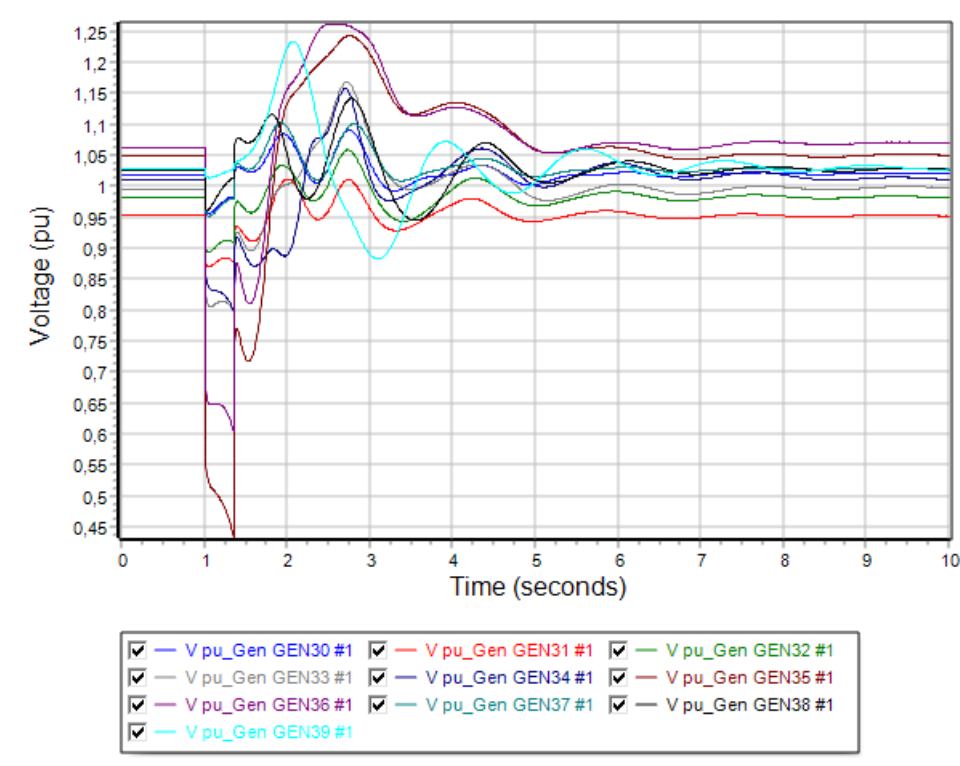
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,35
Open Line	t = 1,35
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,35



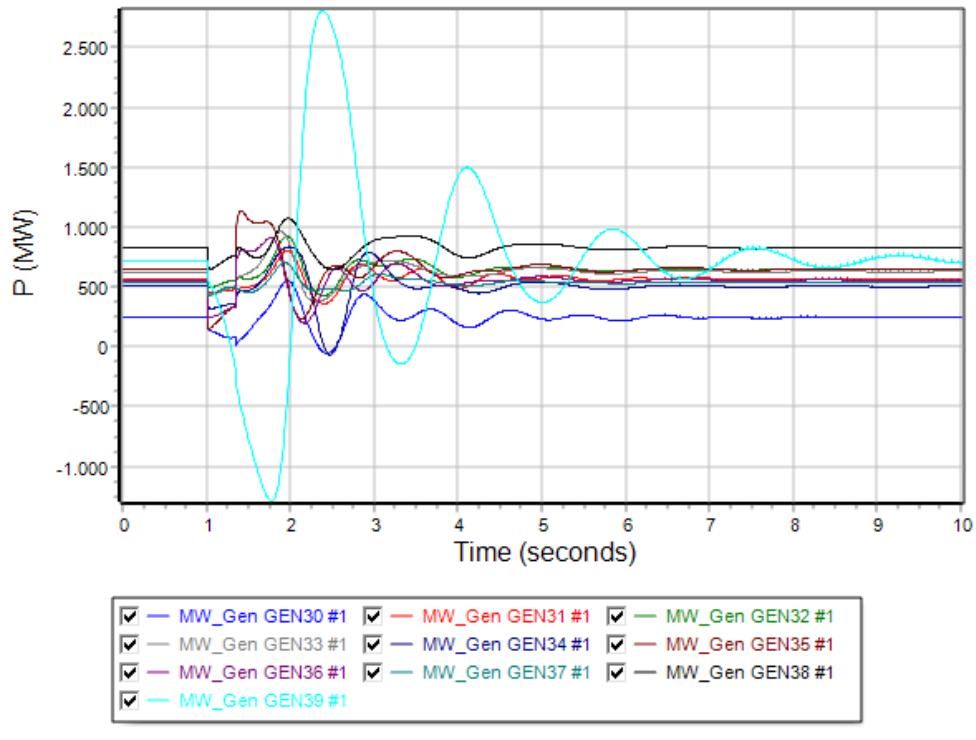
Σχήμα 6.85: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,35sec.



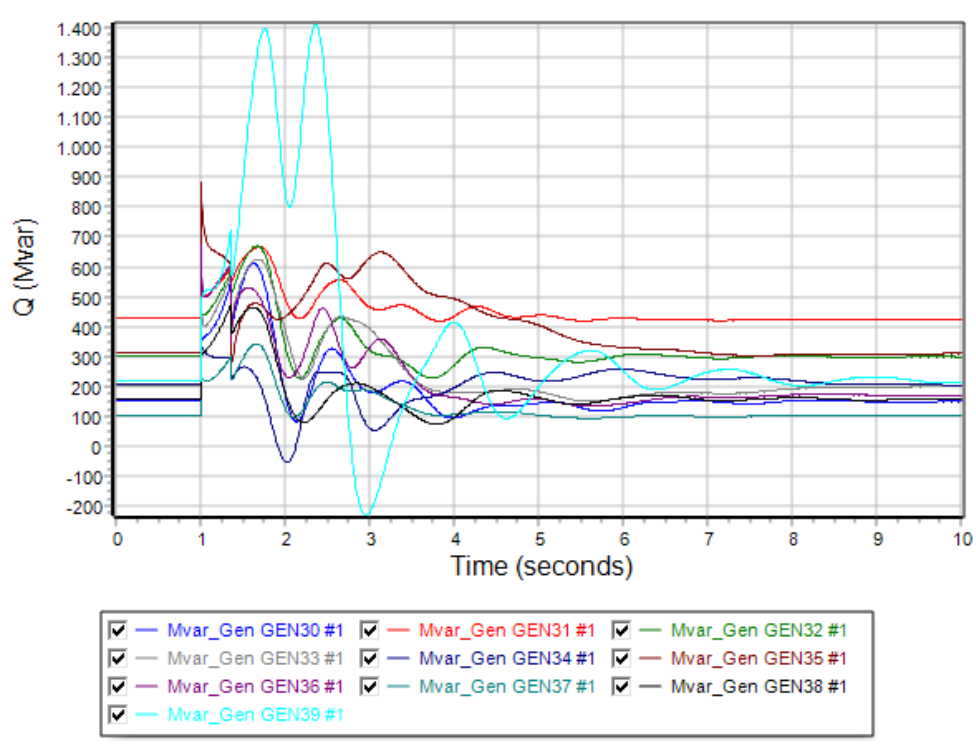
Σχήμα 6.86: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



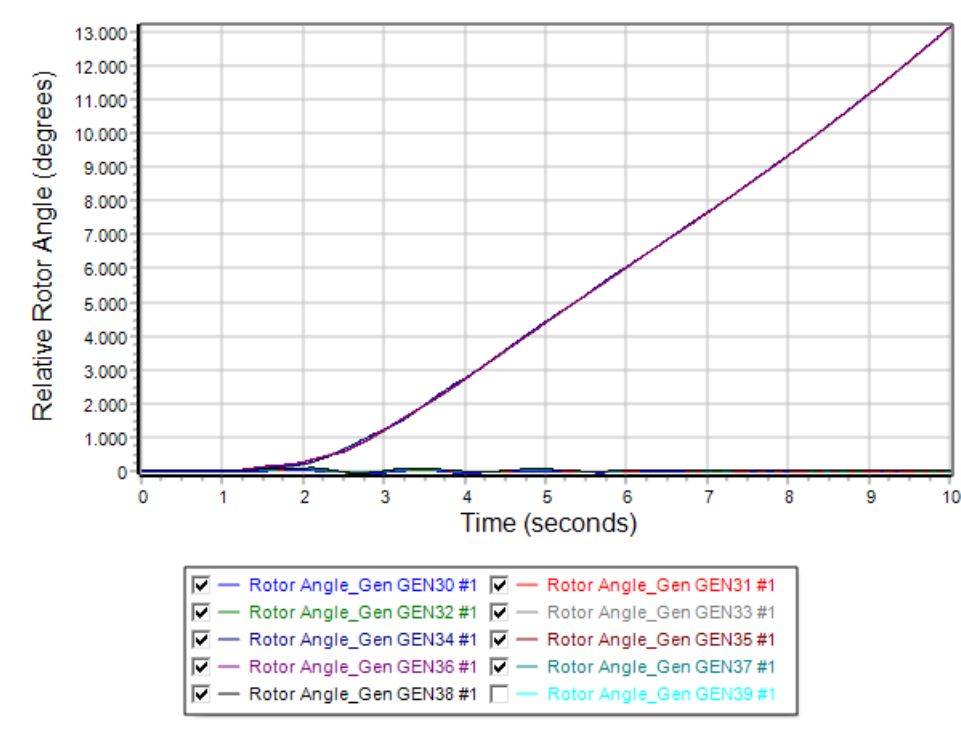
Σχήμα 6.87: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.88: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.89: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



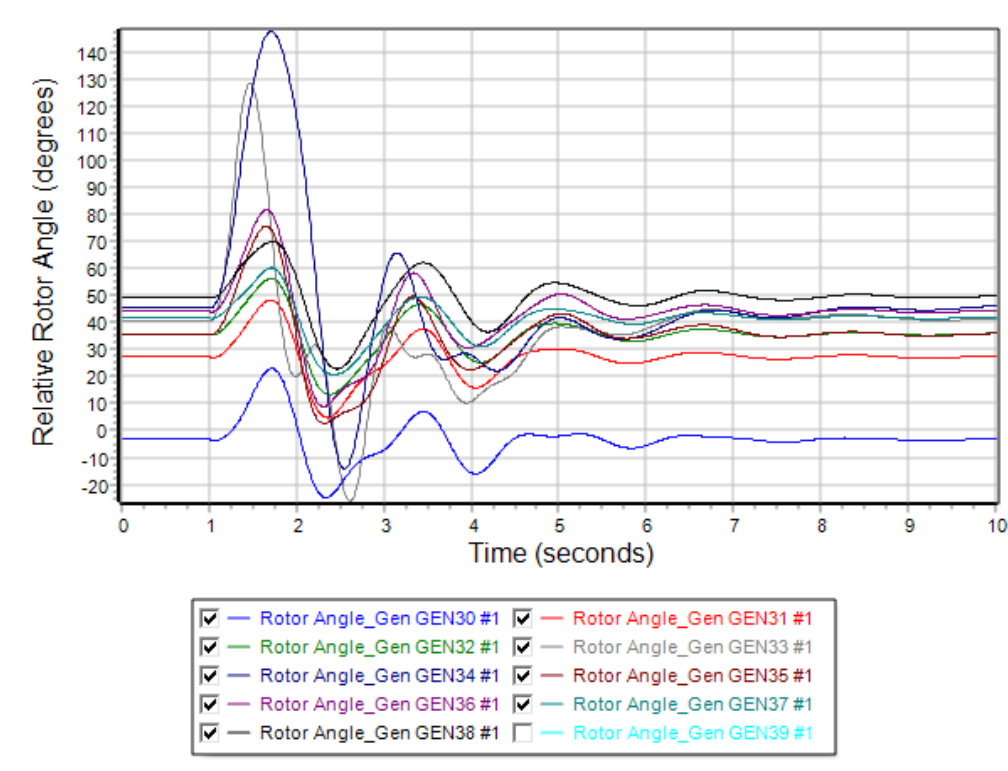
Σχήμα 6.90: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.

Περίπτωση Α3: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 33 του δικτύου

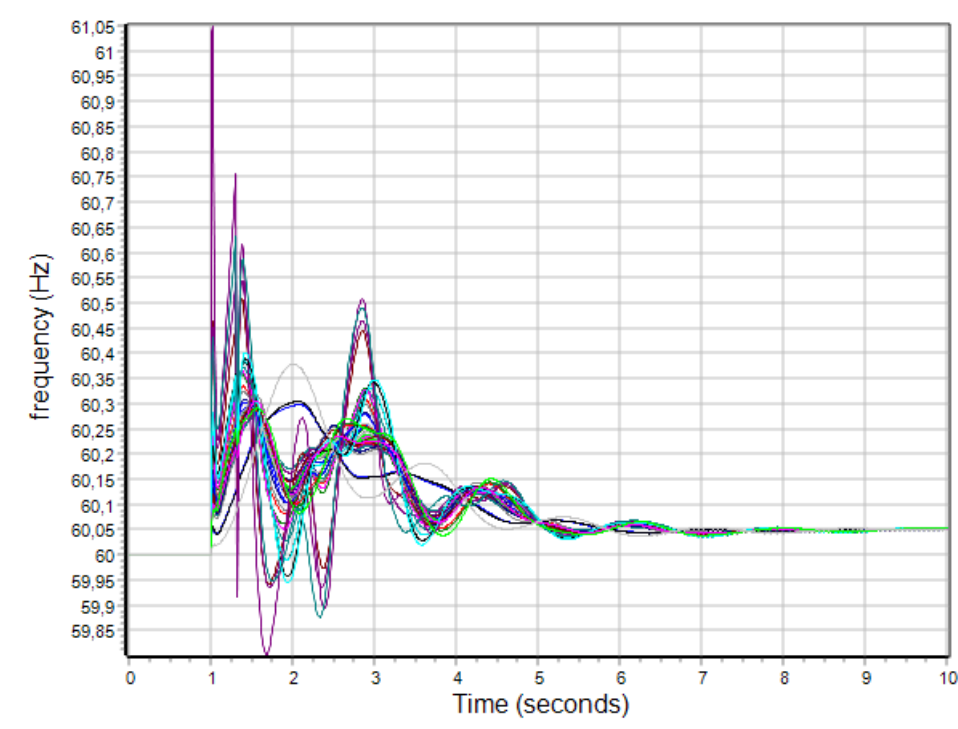
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.15 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.91 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.92 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.93 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.94 και 6.95 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.96 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,35\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,30 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.15: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση A3-SLG fault.

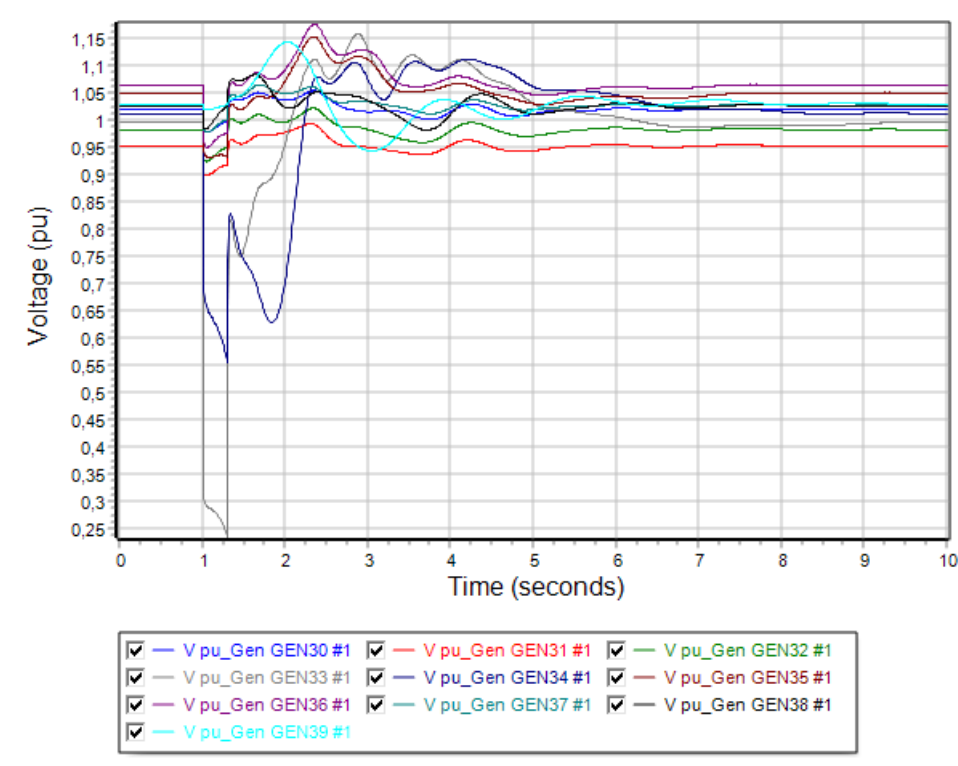
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,30
Open Line	t = 1,30
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,30



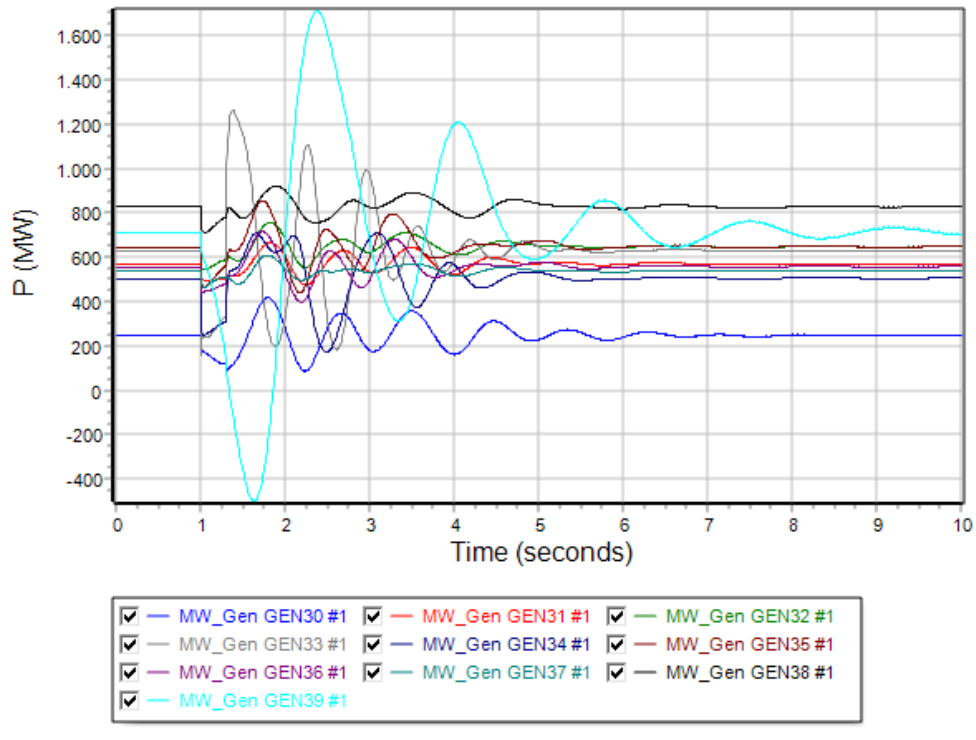
Σχήμα 6.91: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,30sec.



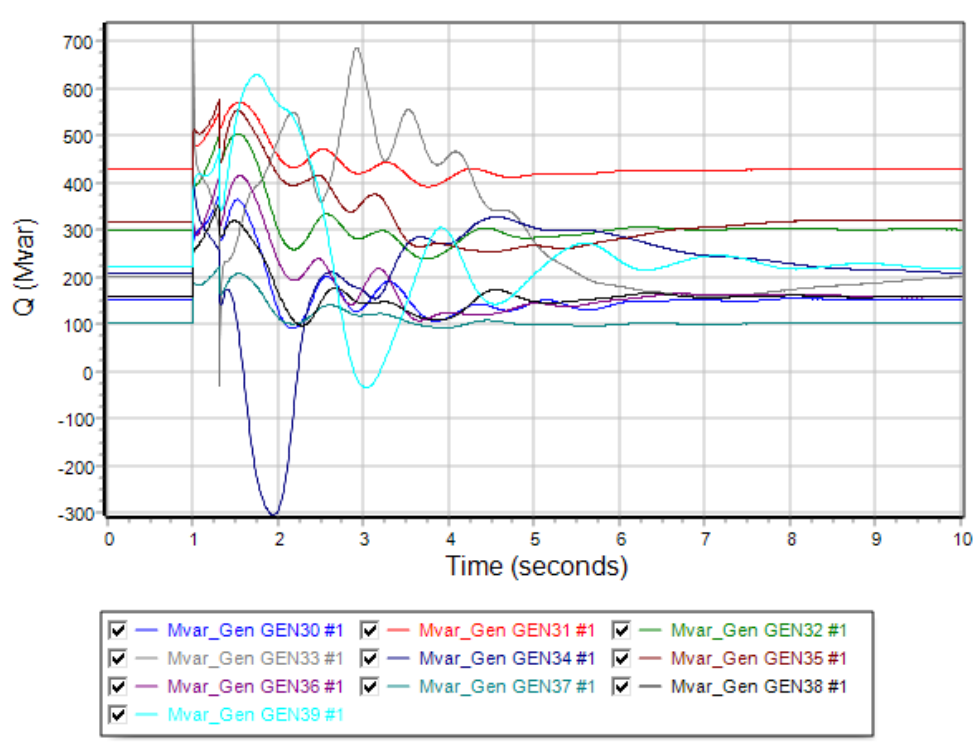
Σχήμα 6.92: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



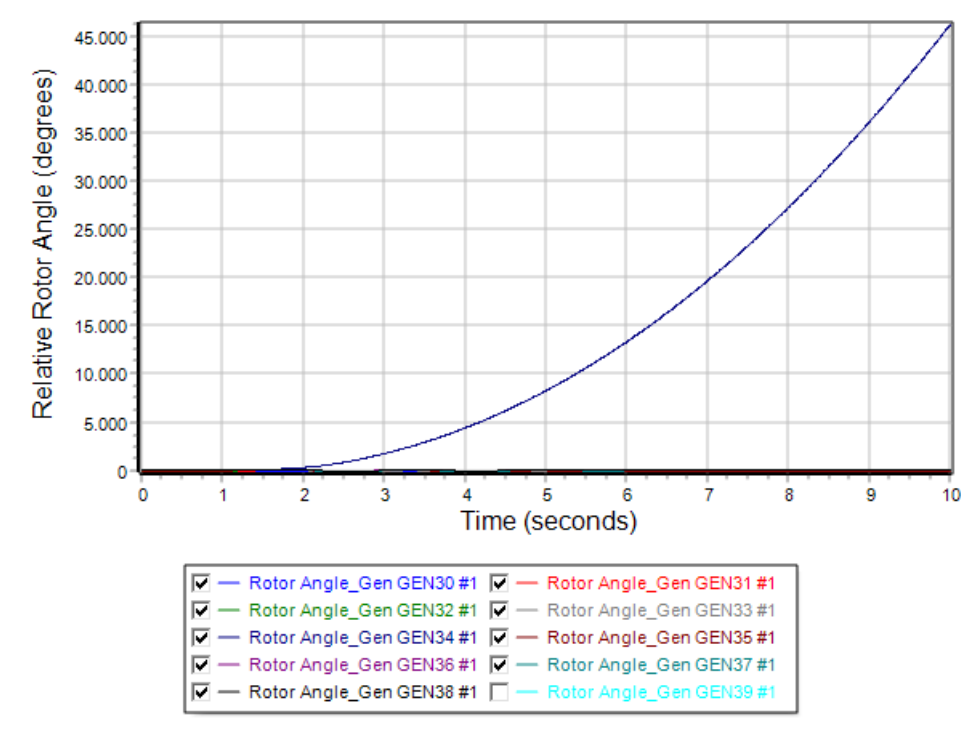
Σχήμα 6.93: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.94: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.95: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.



Σχήμα 6.96: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.

6.5.6 Σενάριο Β: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη

Στο Σενάριο Β πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ένα ποσοστό 20% της συνολικής παραγωγής όπου η ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες και το υπόλοιπο 80% από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στους ζυγούς 35 και 37. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια, για την εφαρμογή SLG fault, επιλέγουμε:

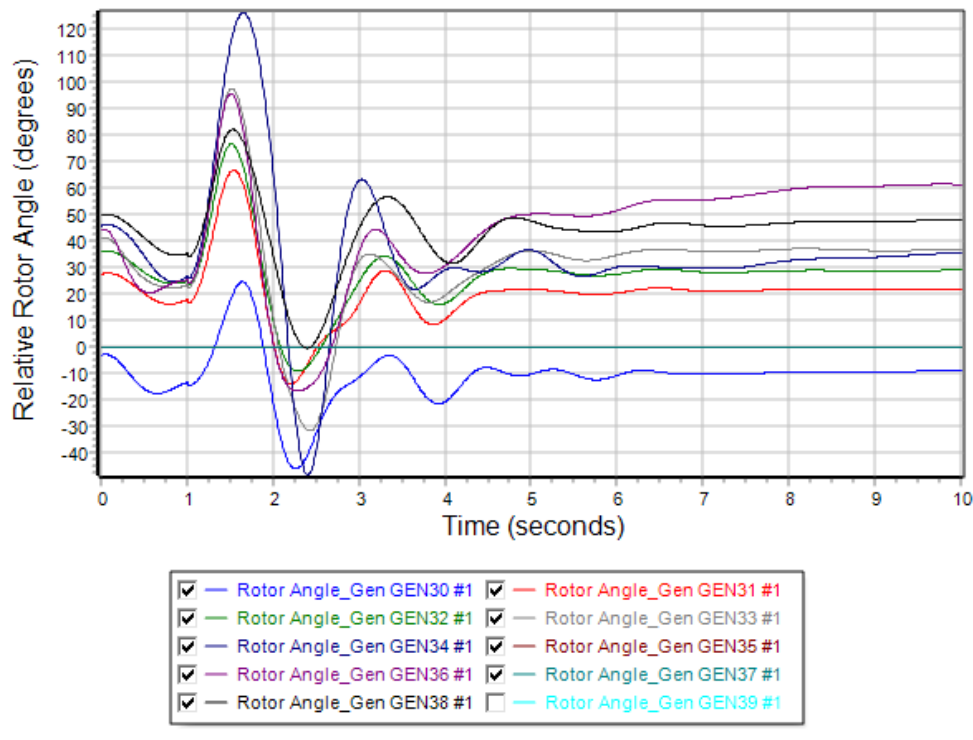
- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

Περίπτωση B1: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 15 του δικτύου

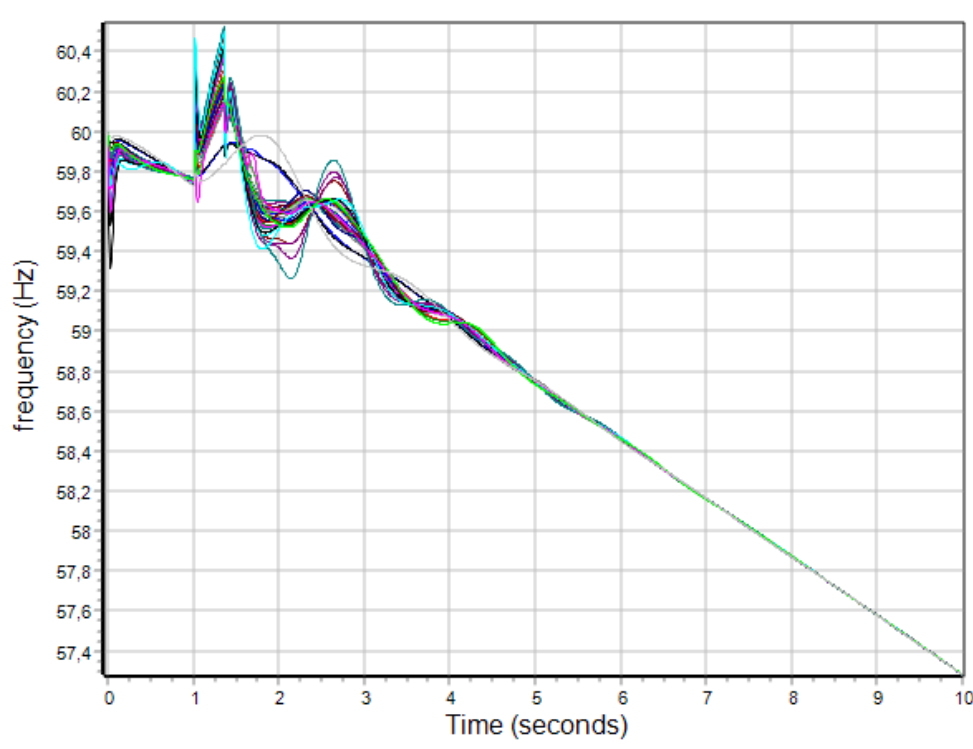
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.16 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.97 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.98 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.99 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.100 και 6.101 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.102 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,40\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,35 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.16: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B1-SLG fault.

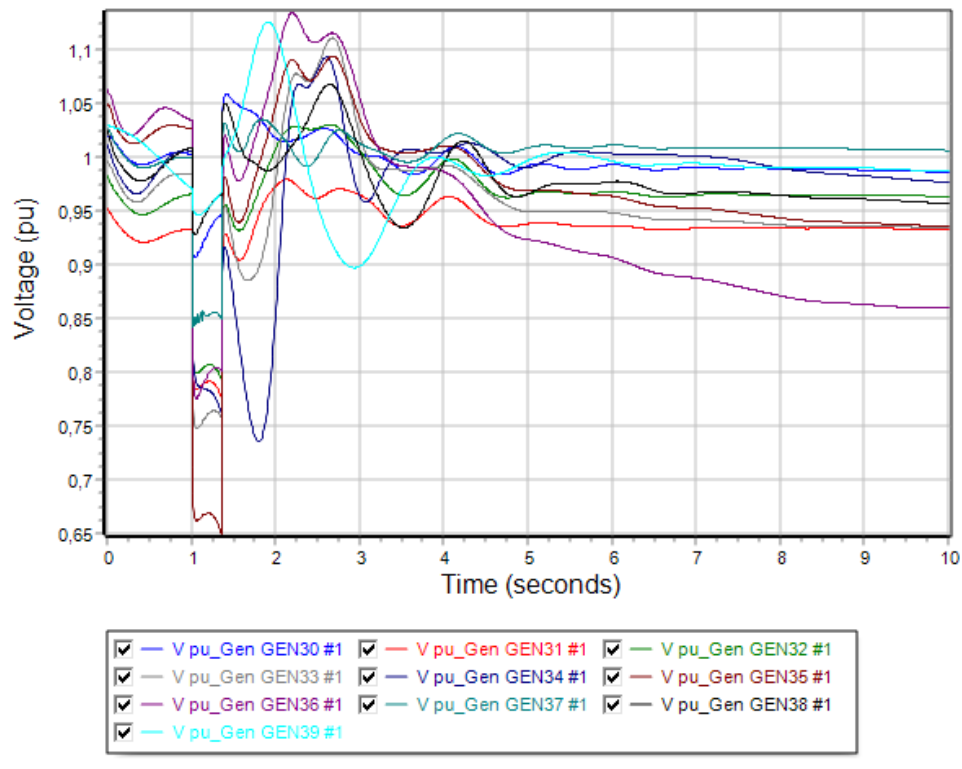
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,35$
Open Line	$t = 1,35$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,35$



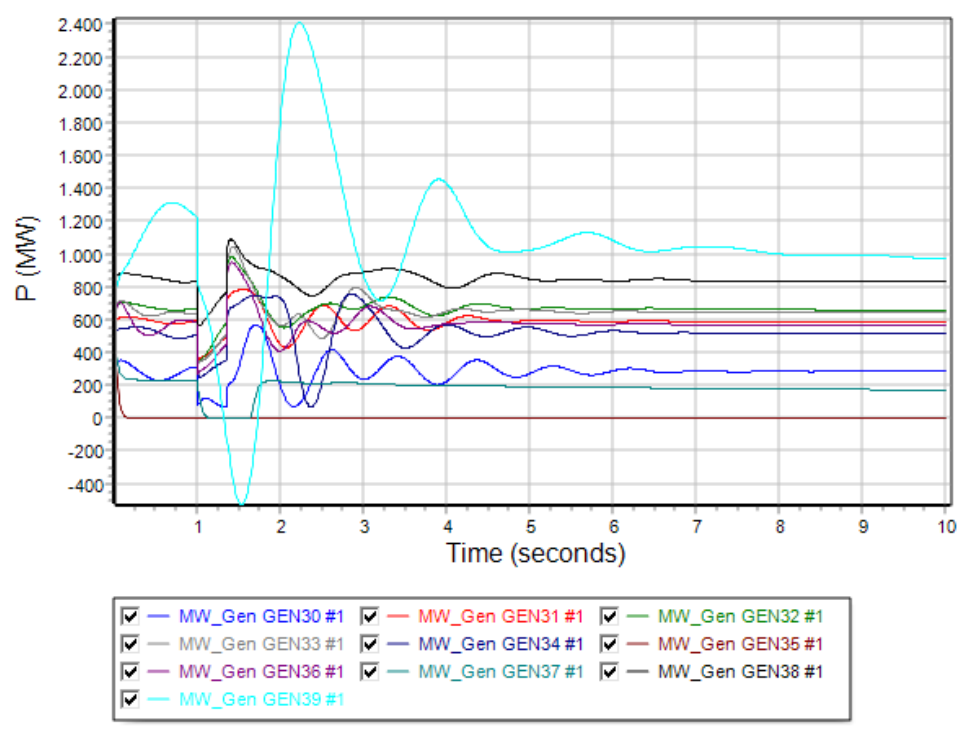
Σχήμα 6.97: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



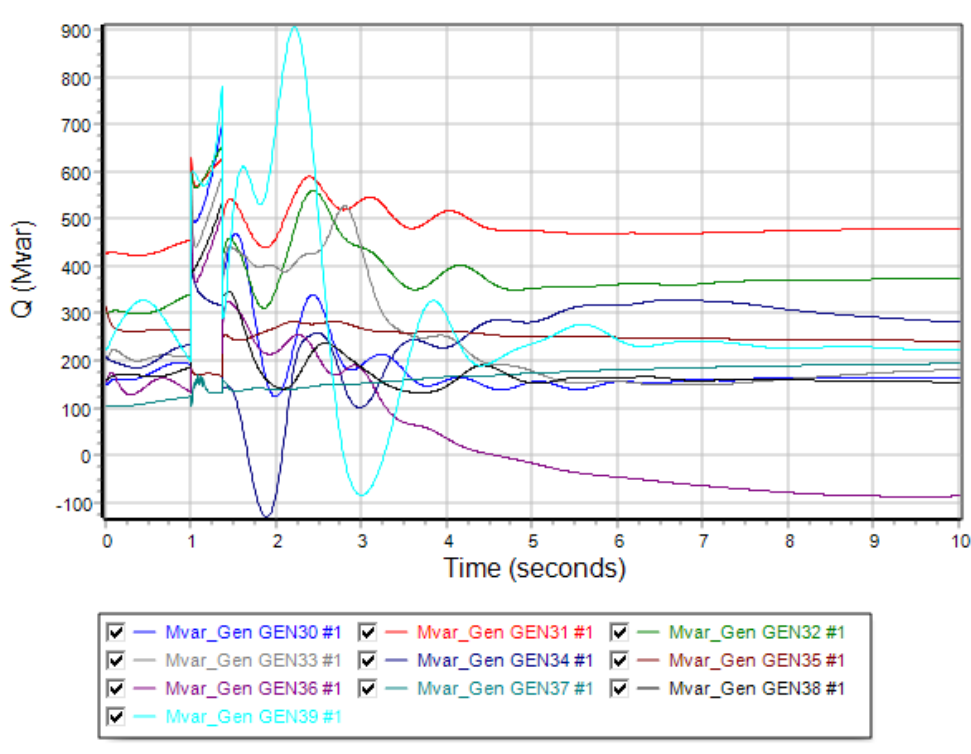
Σχήμα 6.98: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



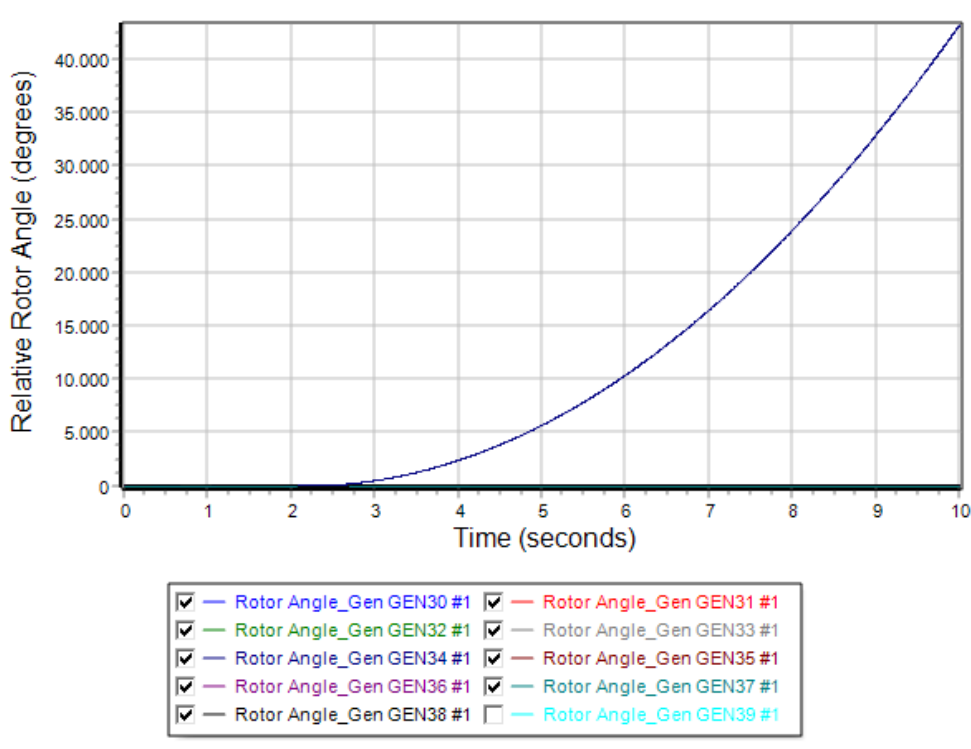
Σχήμα 6.99: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.100: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.101: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



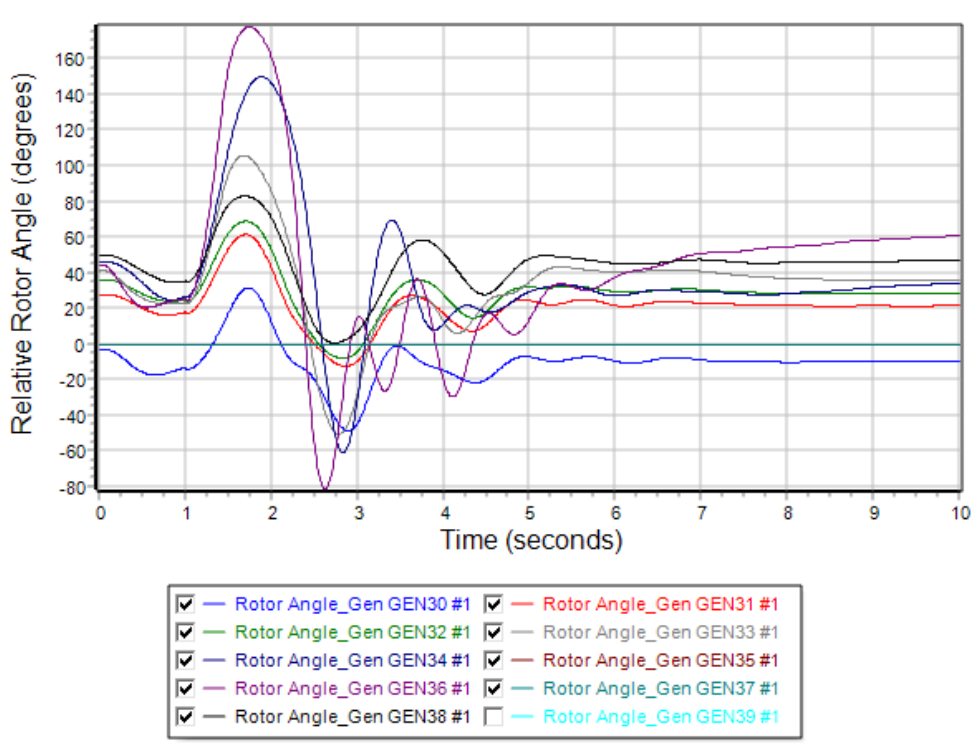
Σχήμα 6.102: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.

Περίπτωση B2: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 22 του δικτύου

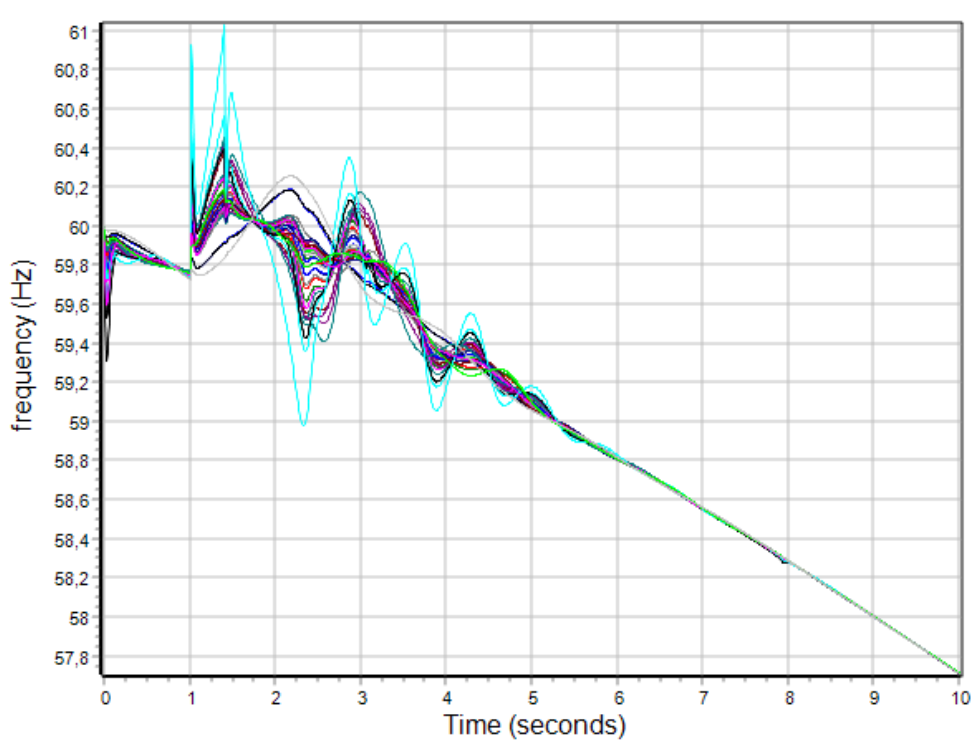
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.17 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.103 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.104 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.105 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.106 και 6.107 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.108 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,45\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,40 δευτερόλεπτα με την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.17: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B2-SLG fault.

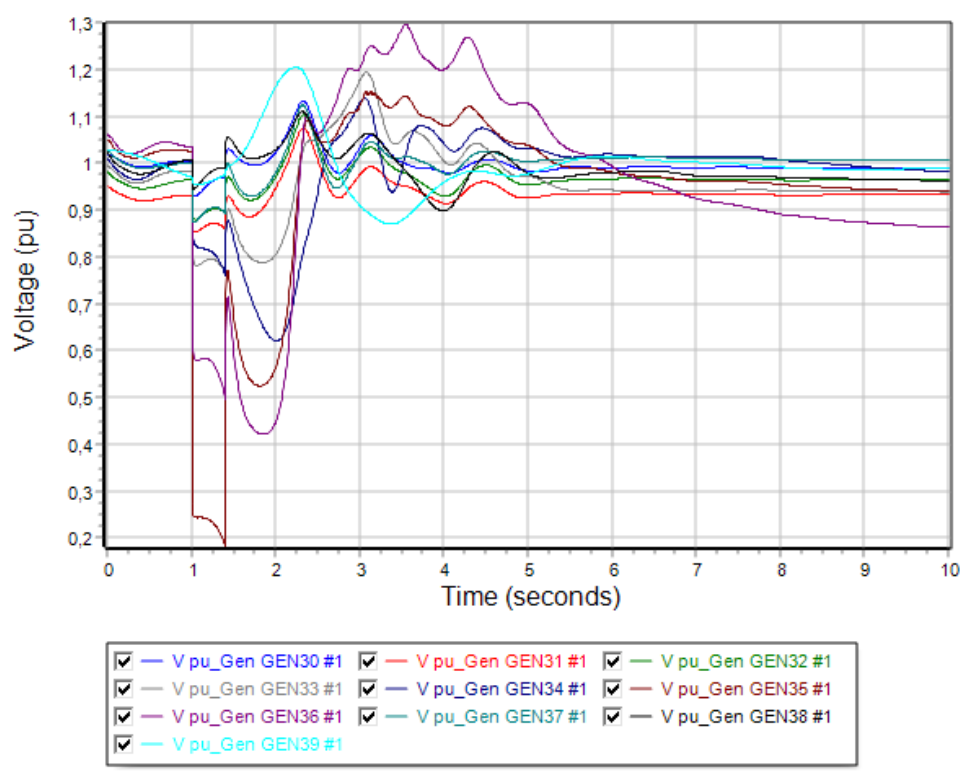
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,40$
Open Line	$t = 1,40$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,40$



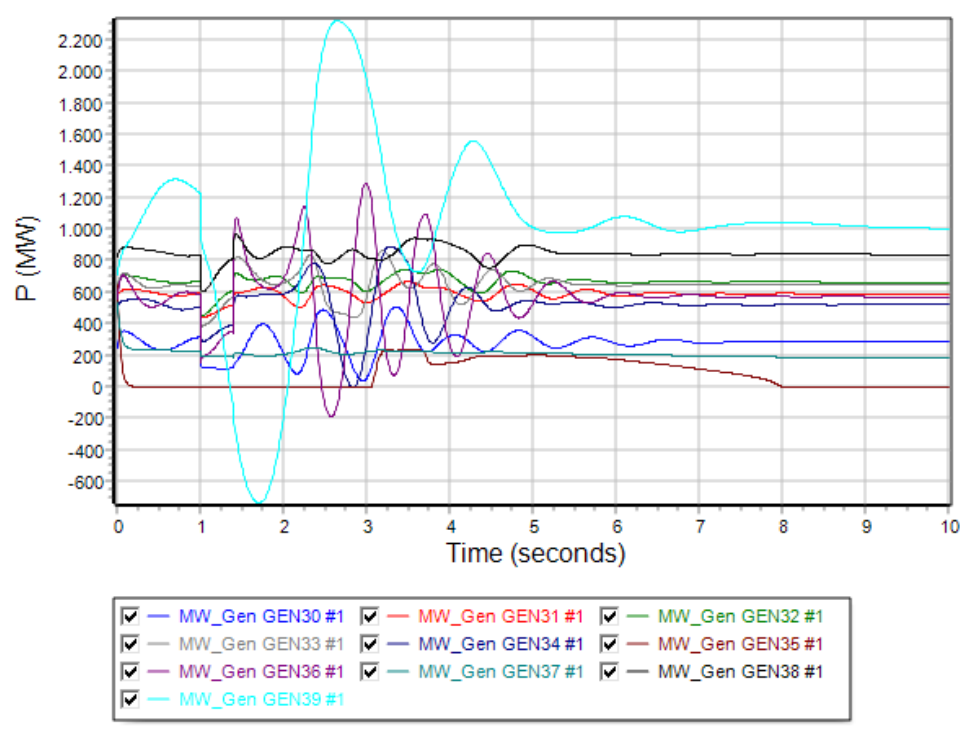
Σχήμα 6.103: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



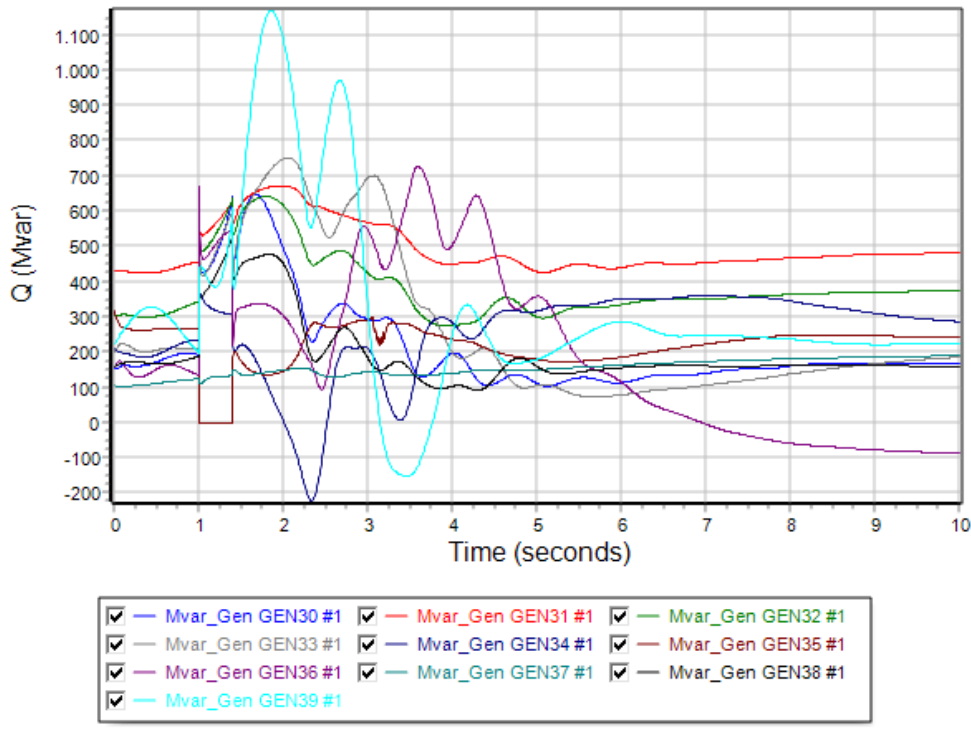
Σχήμα 6.104: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



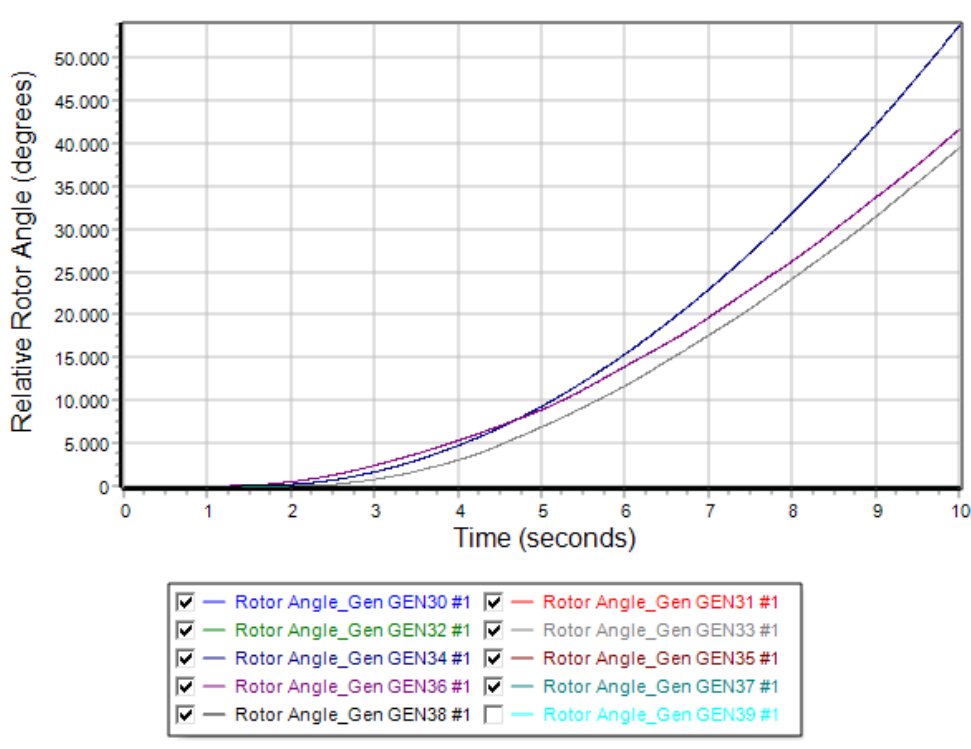
Σχήμα 6.105: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.106: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.107: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



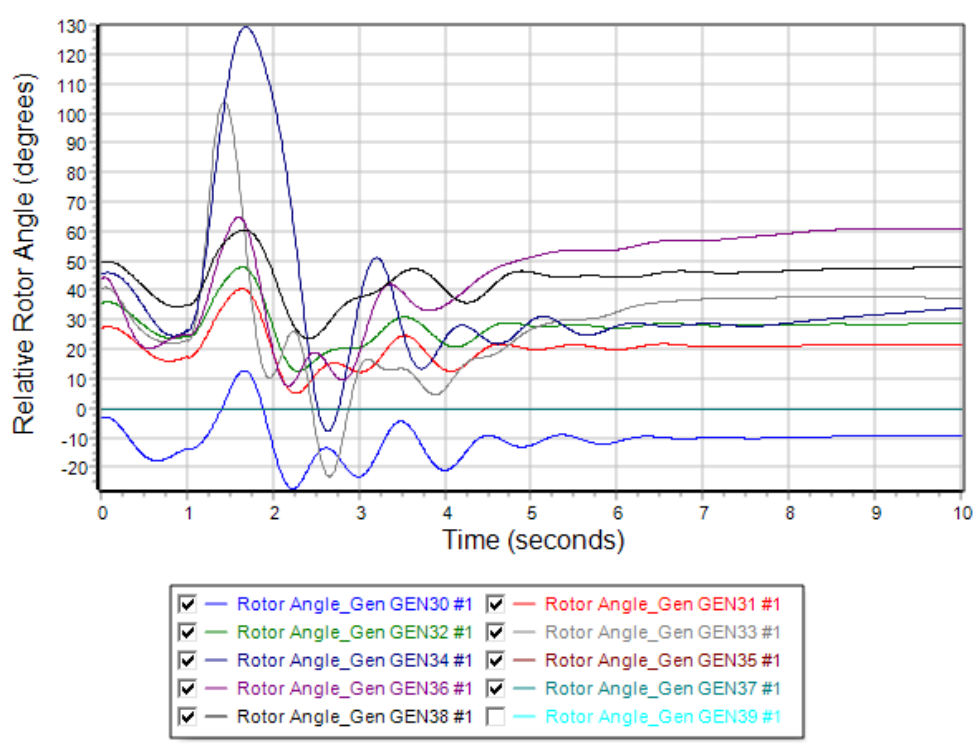
Σχήμα 6.108: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.

Περίπτωση B3: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 33 του δικτύου

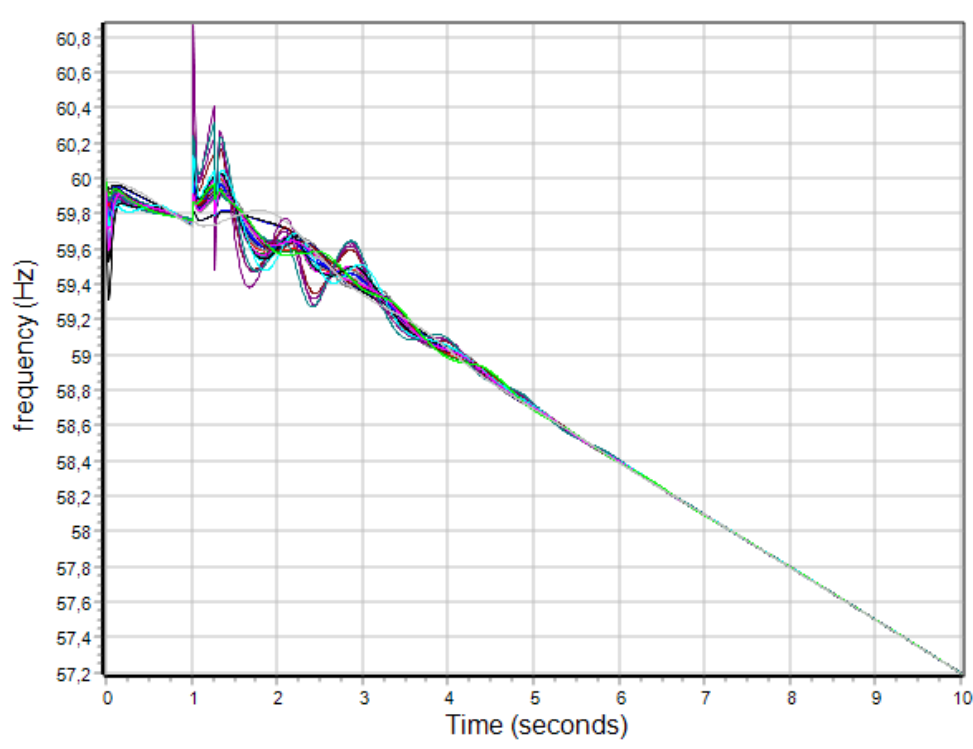
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.18 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.109 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.110 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.111 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.112 και 6.113 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.114 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.18: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση B3-SLG fault.

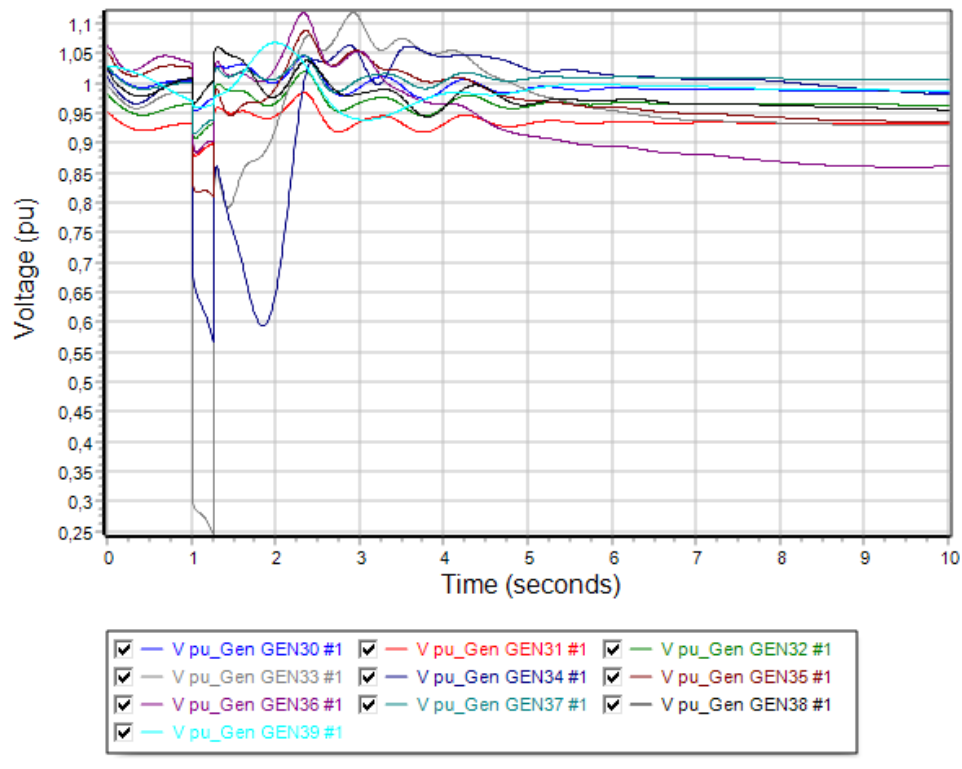
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



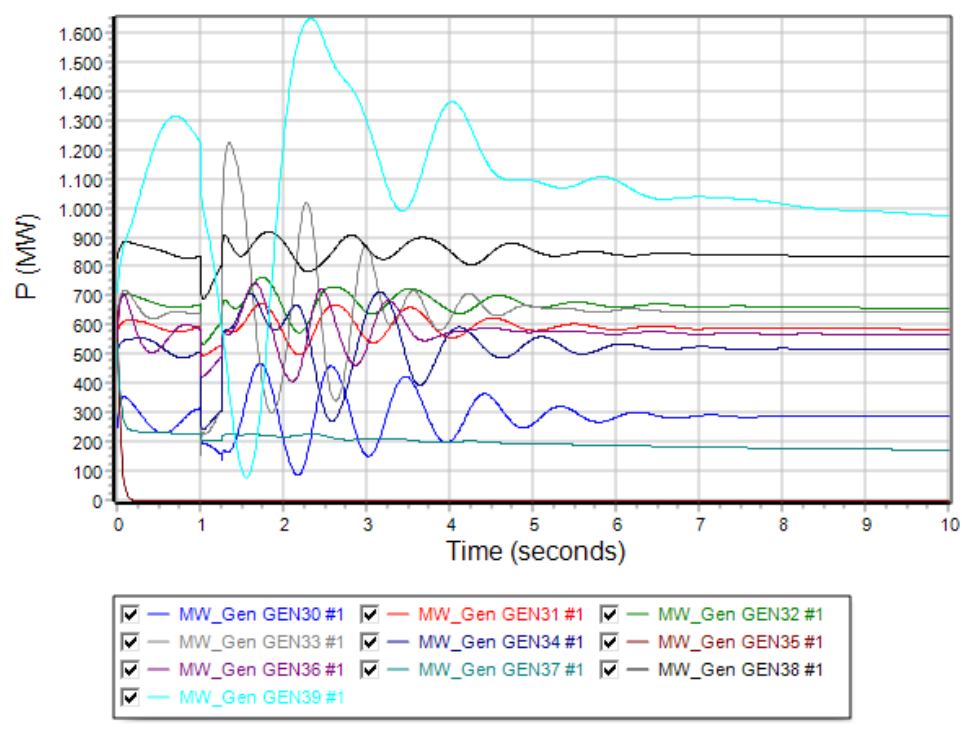
Σχήμα 6.109: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



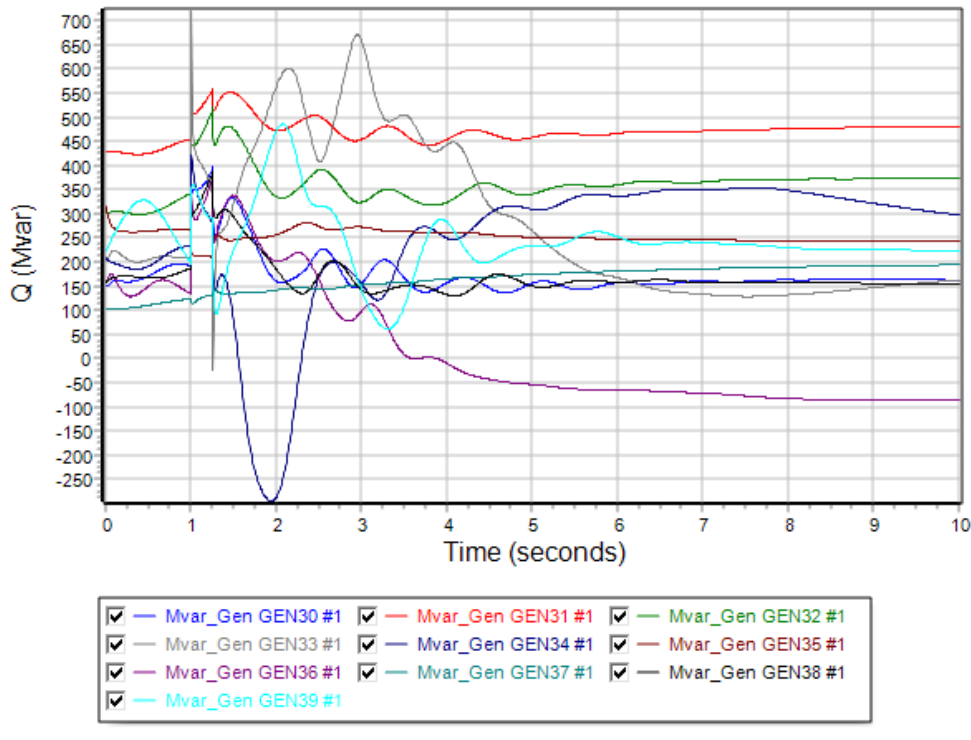
Σχήμα 6.110: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



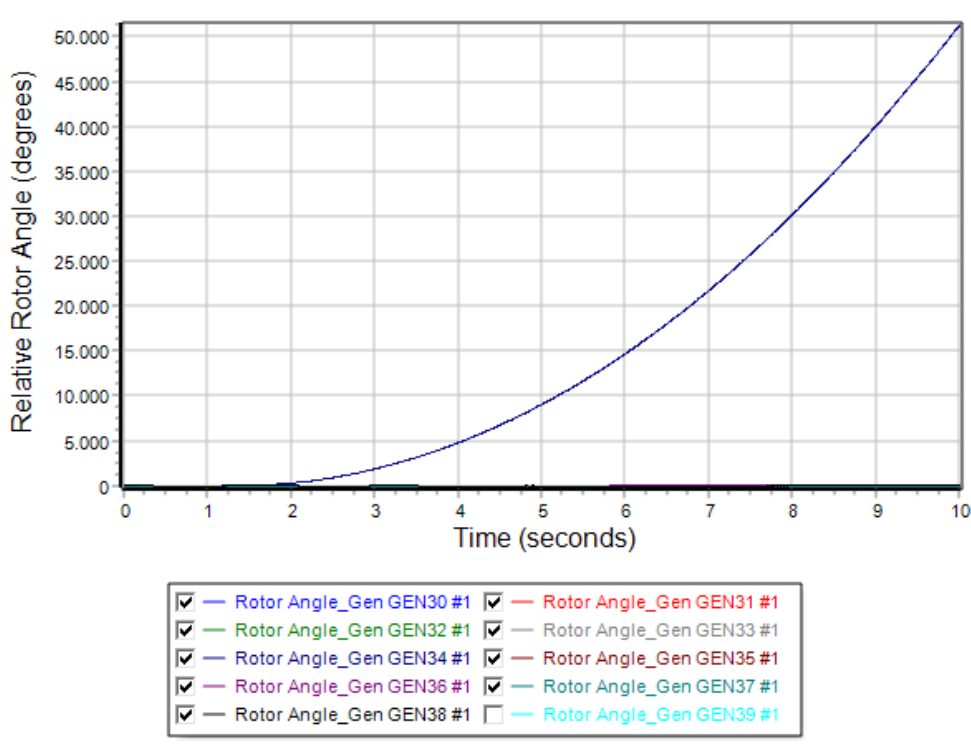
Σχήμα 6.111: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.112: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.113: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.114: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.

6.5.7 Σενάριο Γ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη

Στο Σενάριο Γ πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα βασισμένη στο Σενάριο Β υπάρχει ένα ποσοστό 20% της συνολικής παραγωγής όπου η ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες και το υπόλοιπο 80% από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Στις ανεμογεννήτριες που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 35 και 37 ελαττώνουμε το ποσοστό παραγόμενης ενεργού ισχύος στο 50%. Η μείωση αυτή αντισταθμίζεται από την γεννήτρια του ζυγού αναφοράς του δικτύου μας για την εξισορρόπηση της ζήτησης. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια και για την εφαρμογή SLG fault, επιλέγουμε:

- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

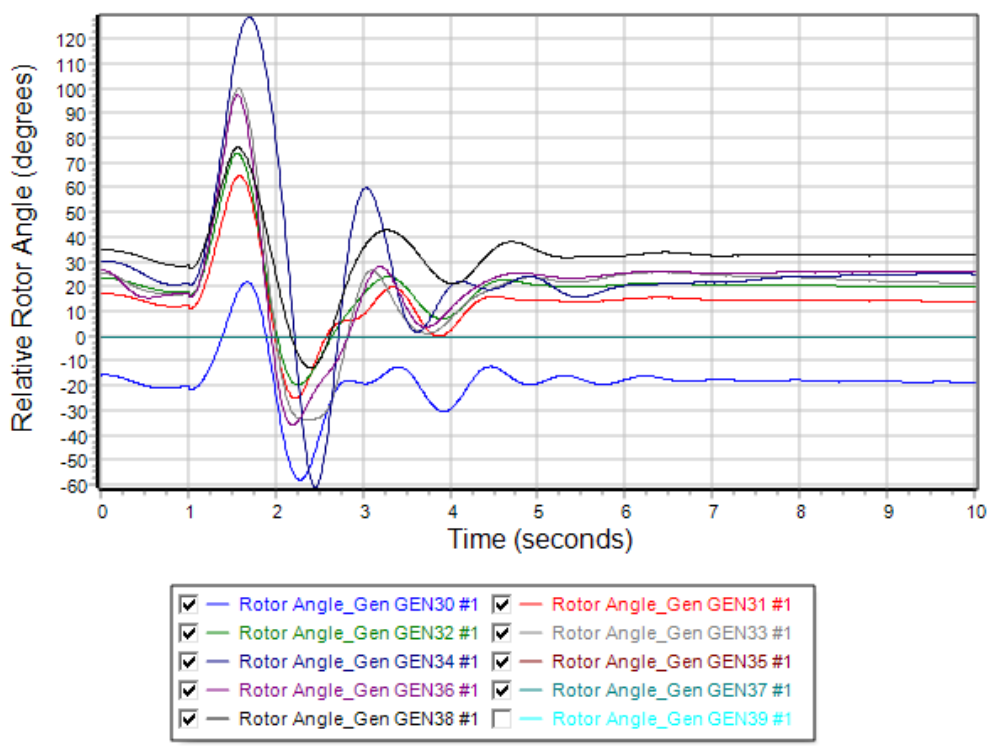
Περίπτωση Γ1: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 15 του δικτύου

Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.19 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.115 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.116 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.117 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.118 και 6.119 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.120 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,50\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο

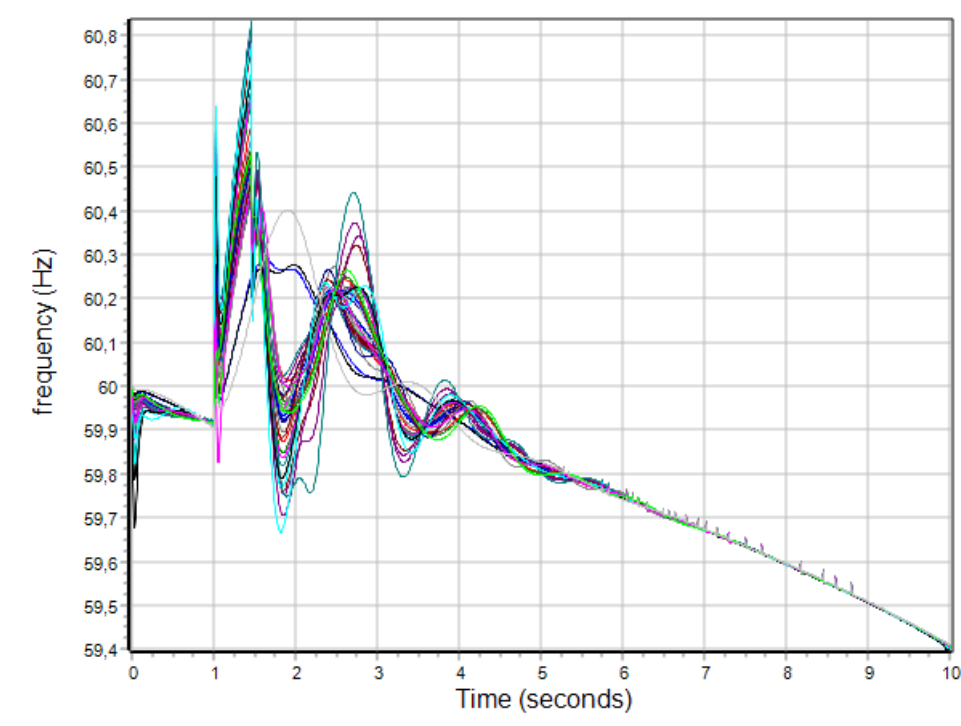
κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,45 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.19: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ1-SLG fault.

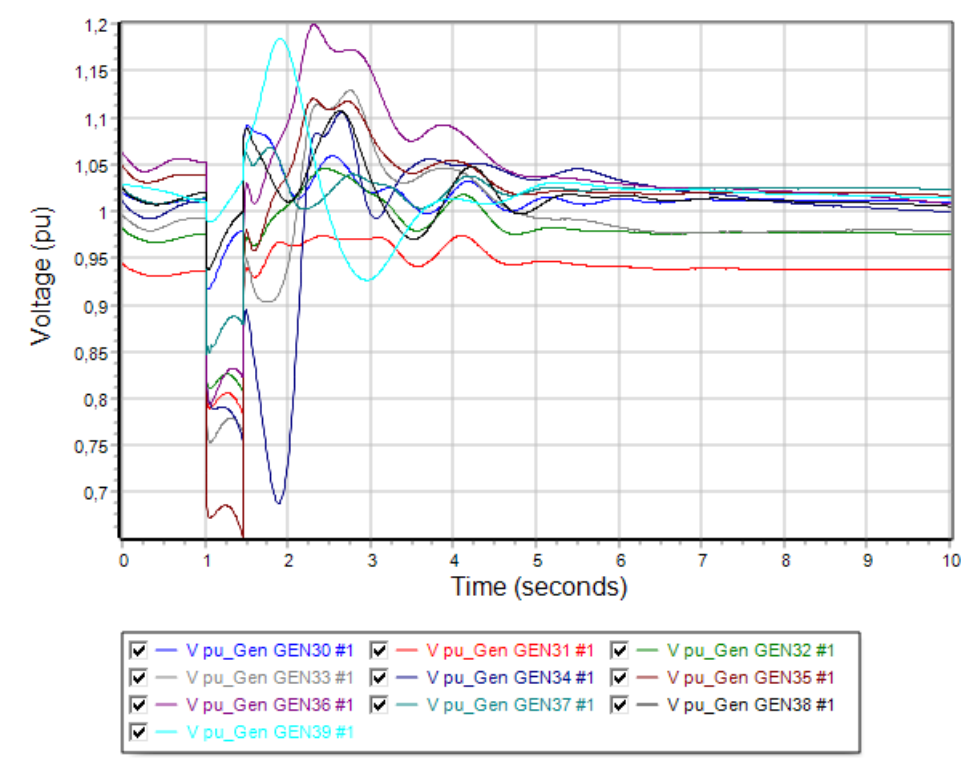
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,45
Open Line	t = 1,45
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,45



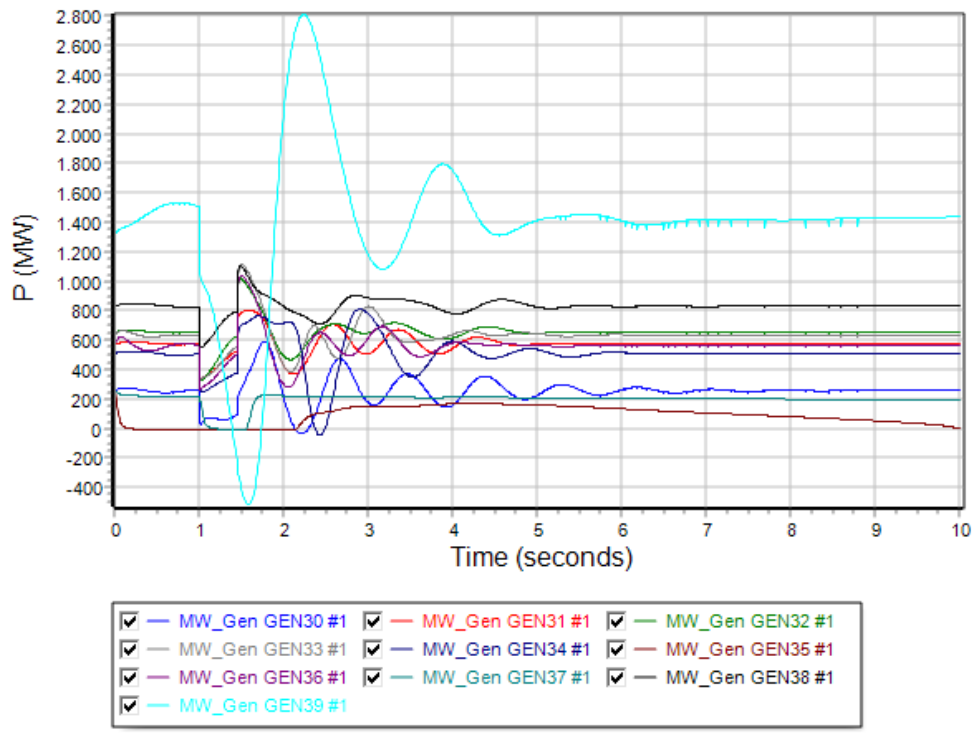
Σχήμα 6.115: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,45sec.



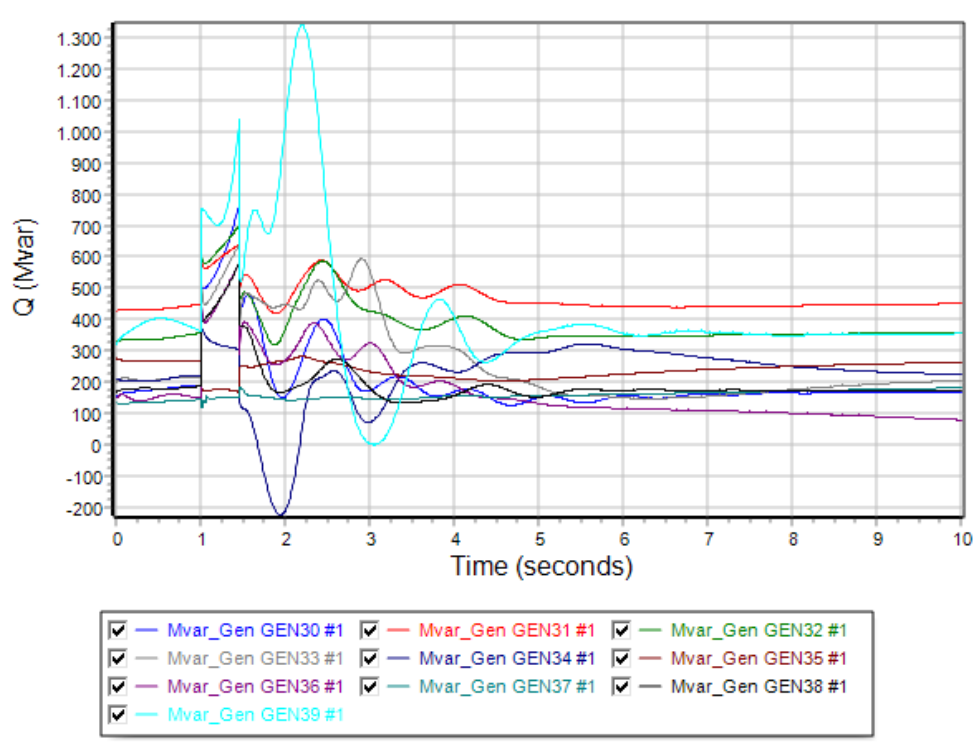
Σχήμα 6.116: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.



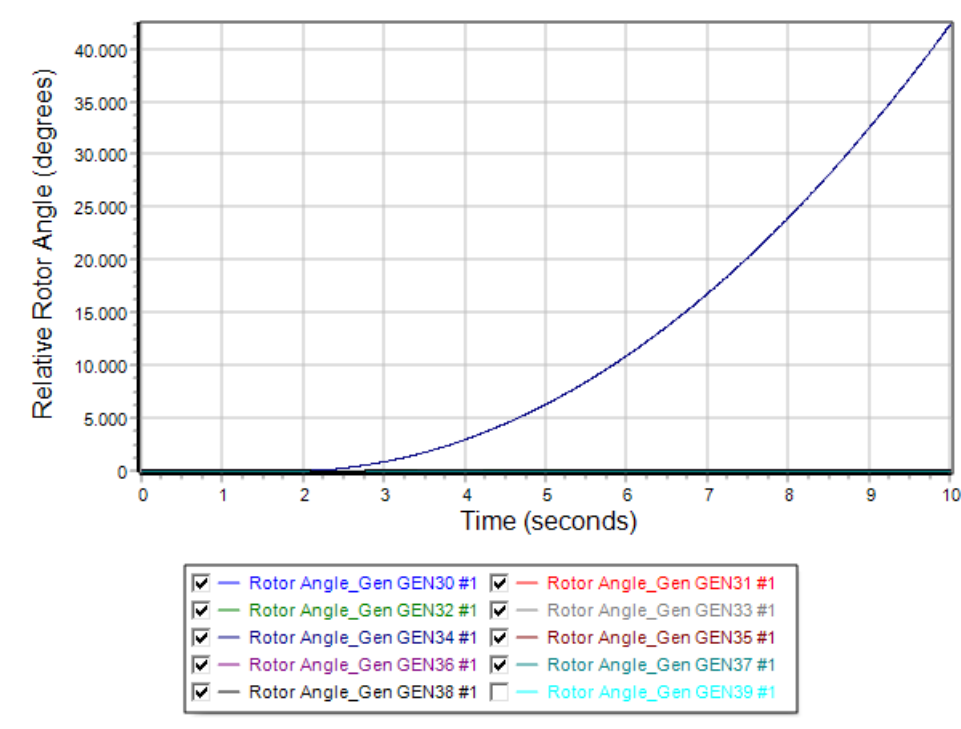
Σχήμα 6.117: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.



Σχήμα 6.118: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.



Σχήμα 6.119: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.



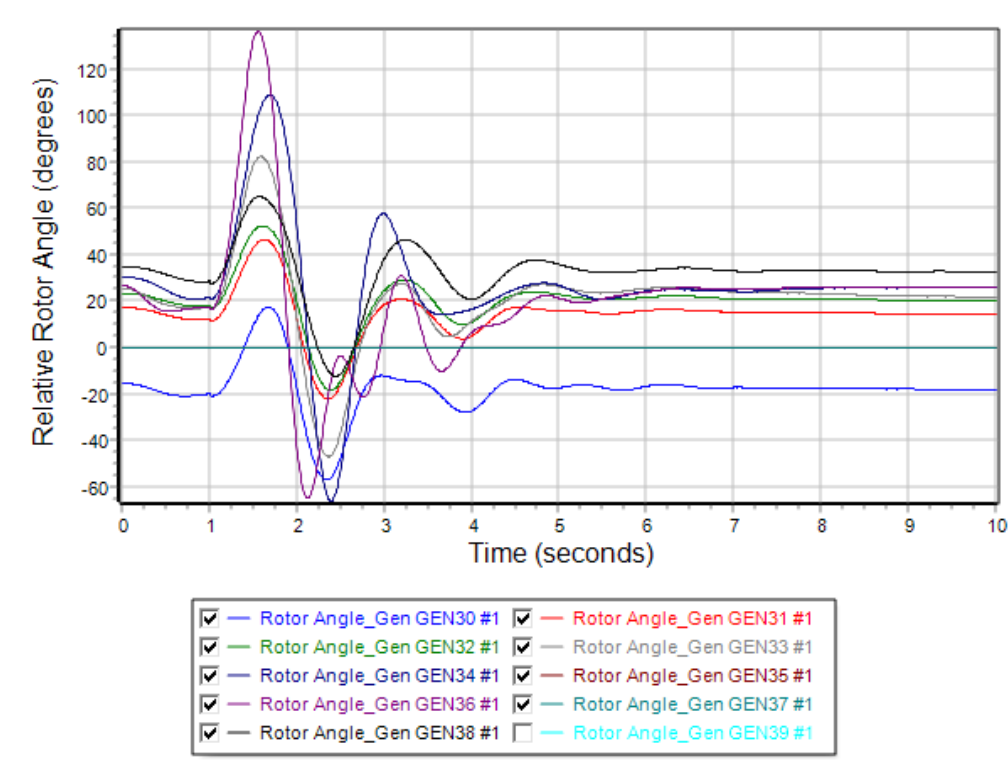
Σχήμα 6.120: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,50\text{sec}$.

Περίπτωση Γ2: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 22 του δικτύου

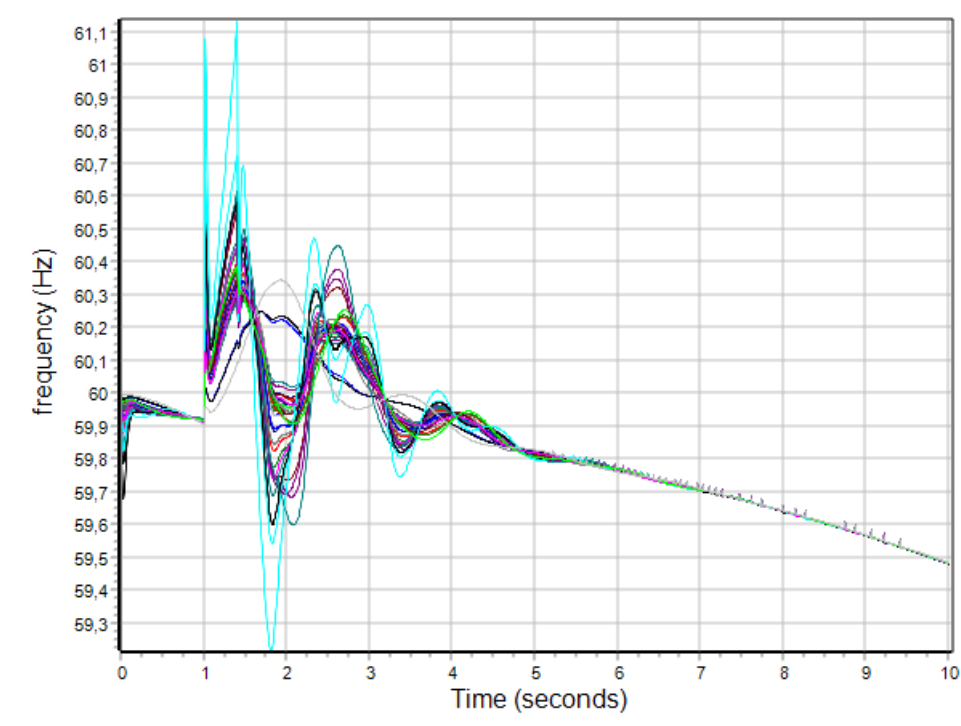
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.20 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.121 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.122 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.123 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.124 και 6.125 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.126 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,45\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,40 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.20: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ2-SLG fault.

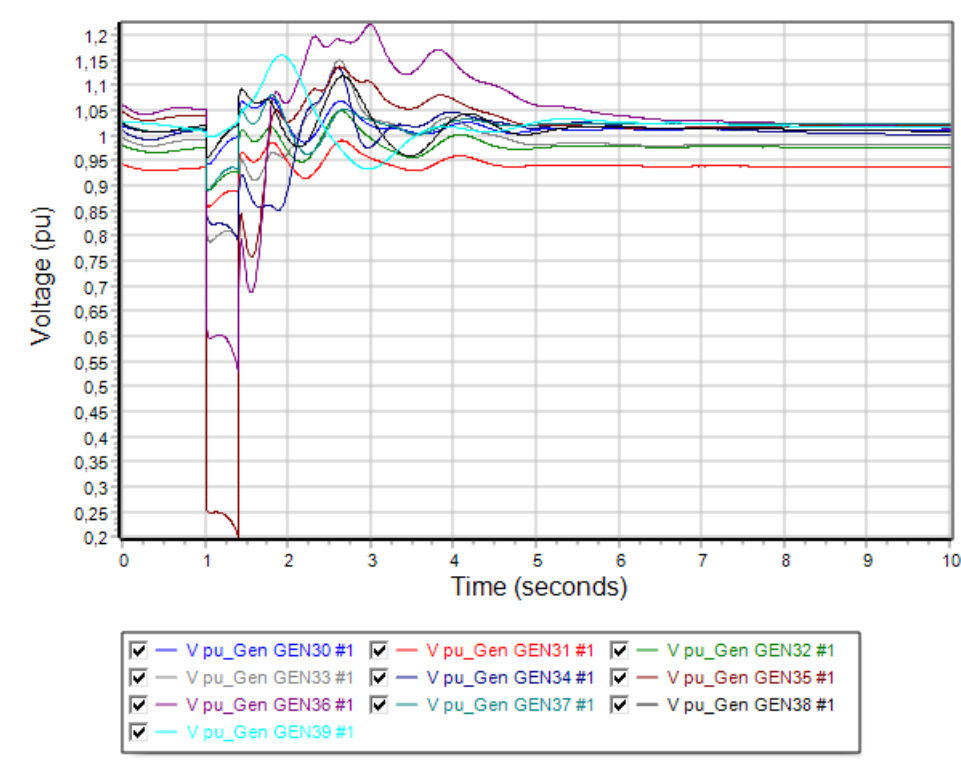
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,40
Open Line	t = 1,40
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,40



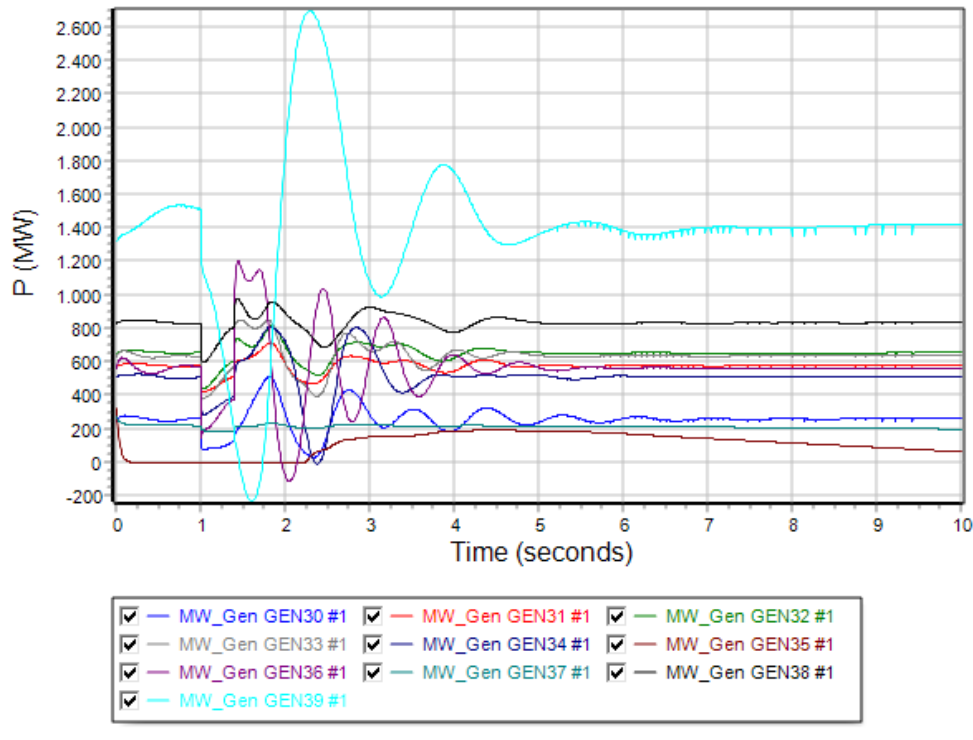
Σχήμα 6.121: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,40sec.



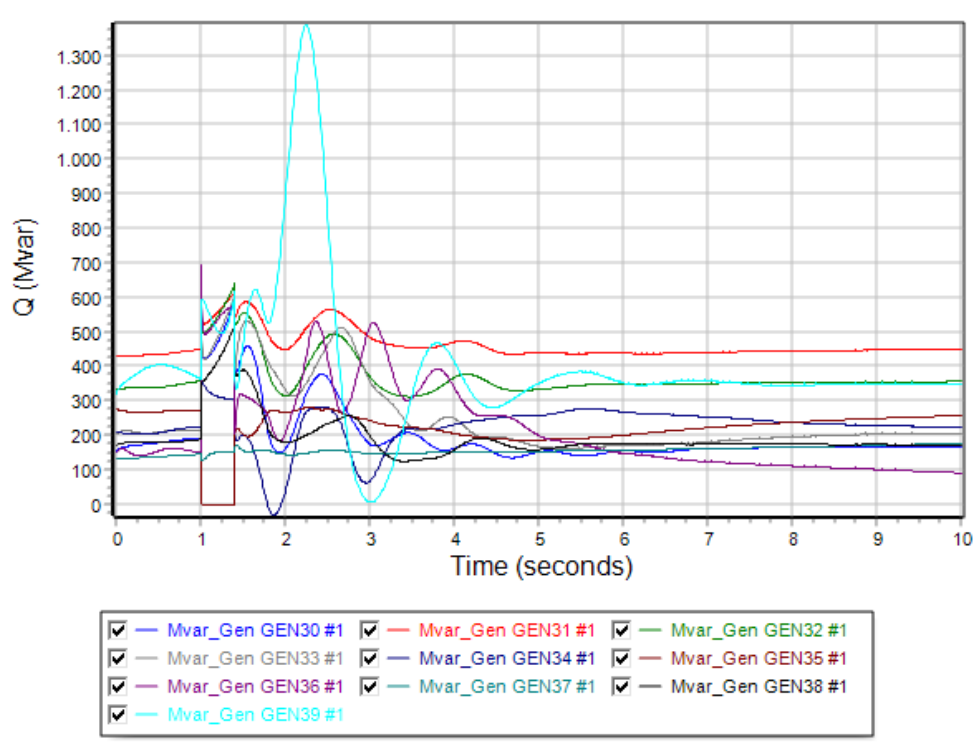
Σχήμα 6.122: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



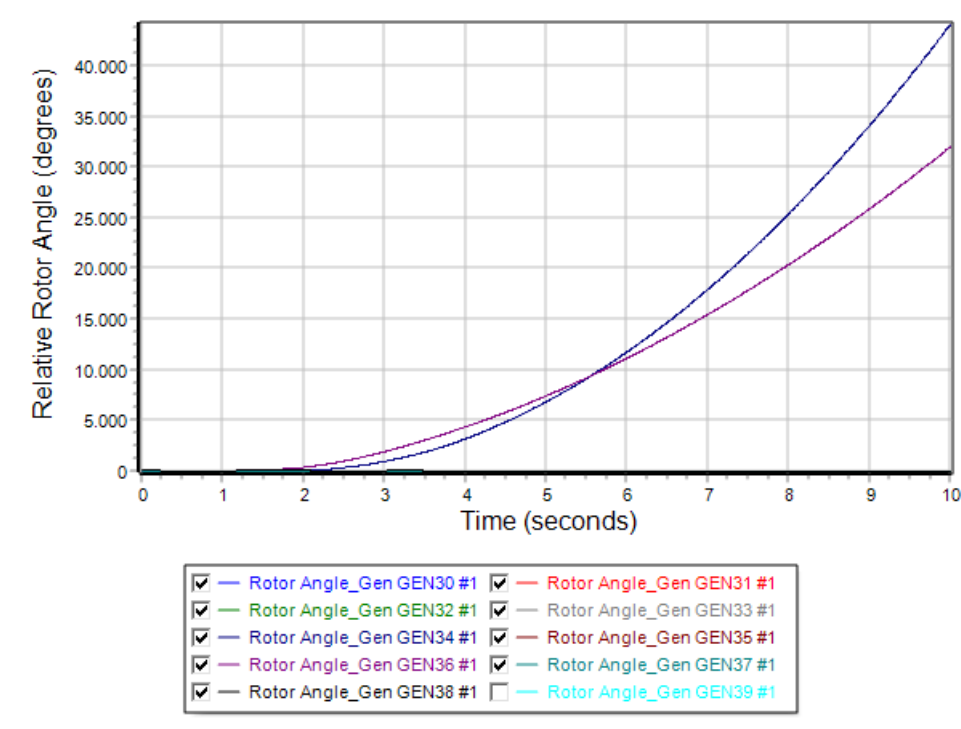
Σχήμα 6.123: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.124: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.125: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



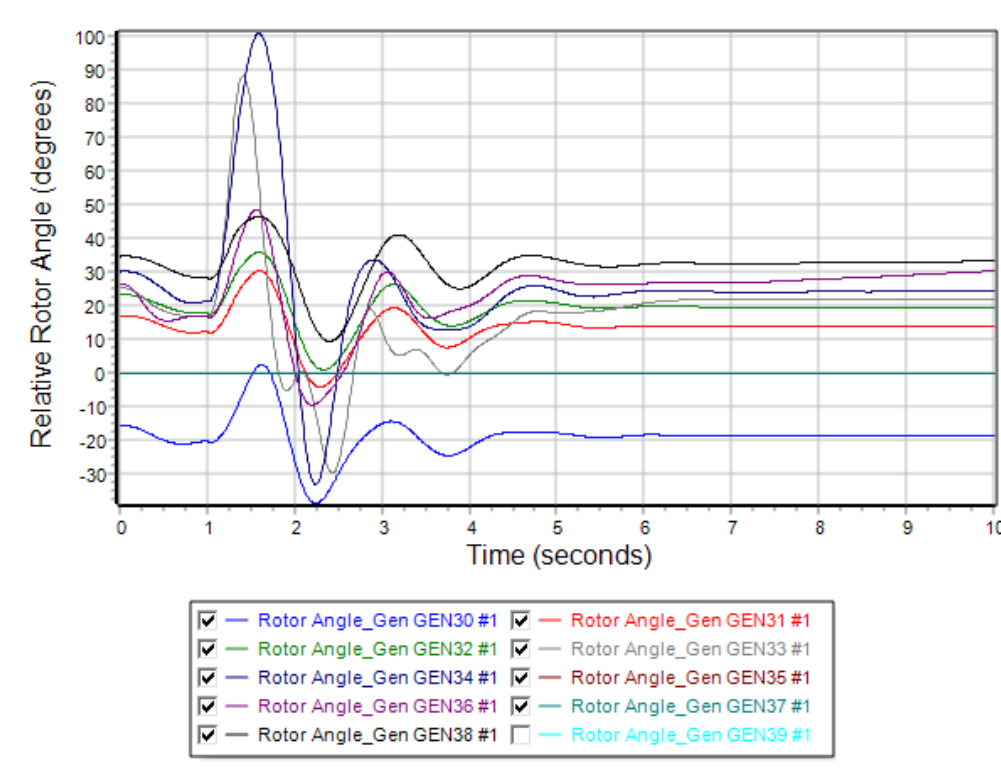
Σχήμα 6.126: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.

Περίπτωση Γ3: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 33 του δικτύου

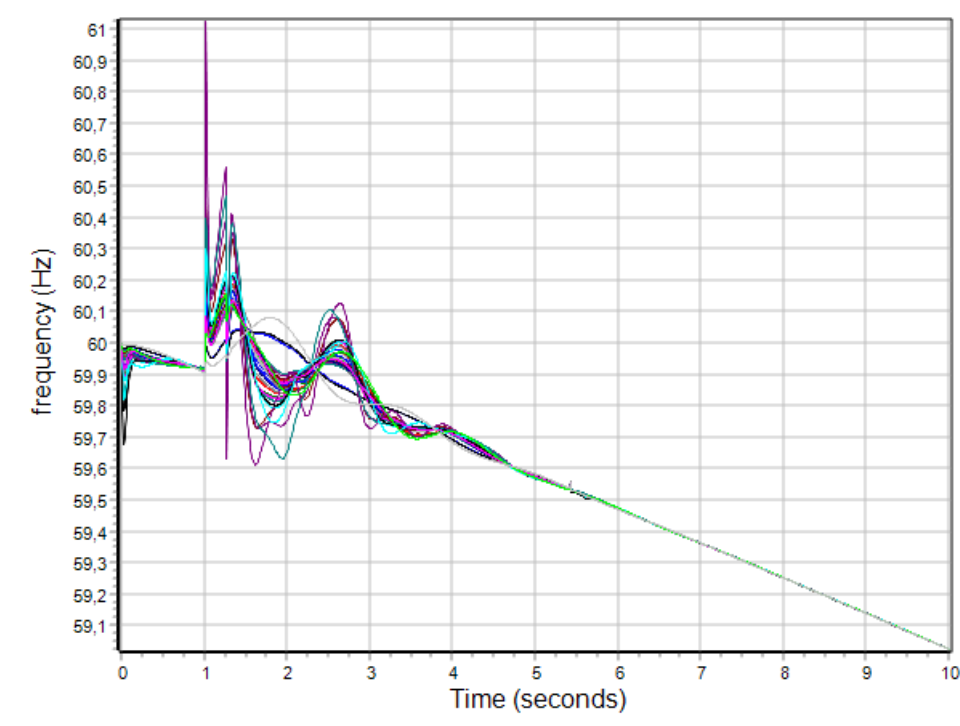
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.21 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.127 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.128 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.129 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.130 και 6.131 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.132 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.21: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Γ3-SLG fault.

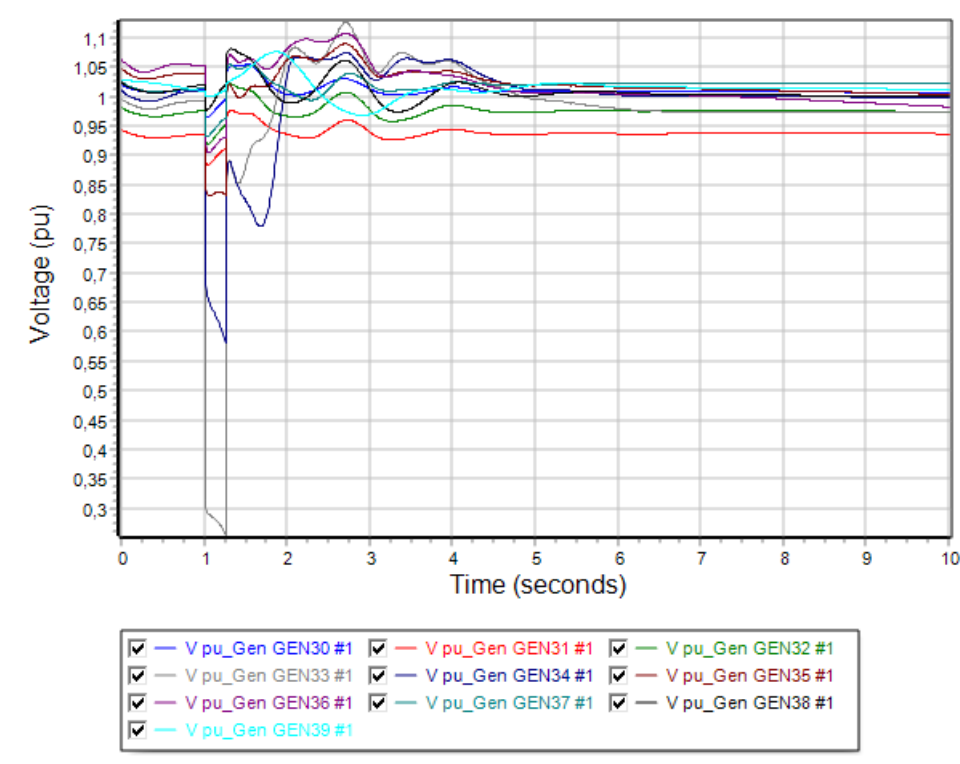
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	t = 1,00
Clear Fault	t = 1,25
Open Line	t = 1,25
Close Line	t = 2,00
CCT	t = 0,25



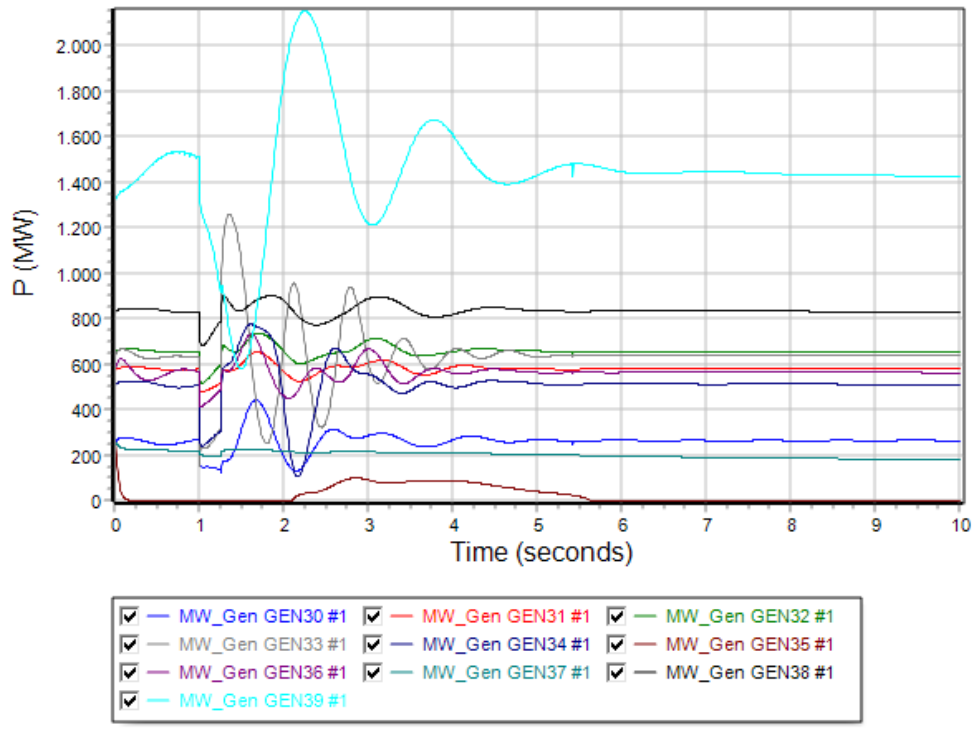
Σχήμα 6.127: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή t=1,25sec.



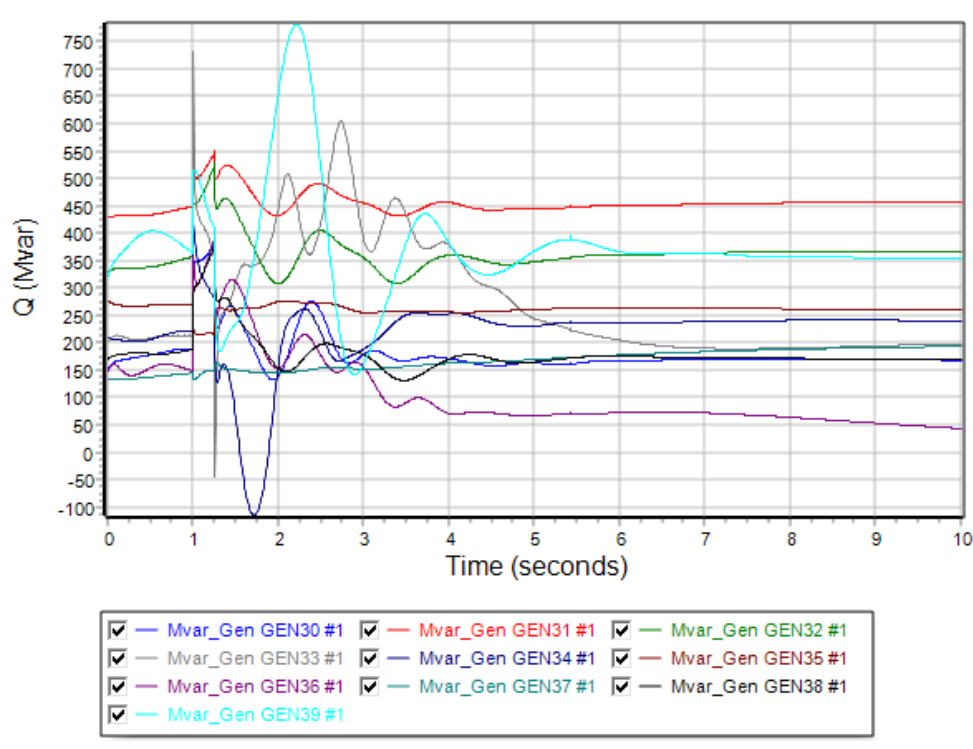
Σχήμα 6.128: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



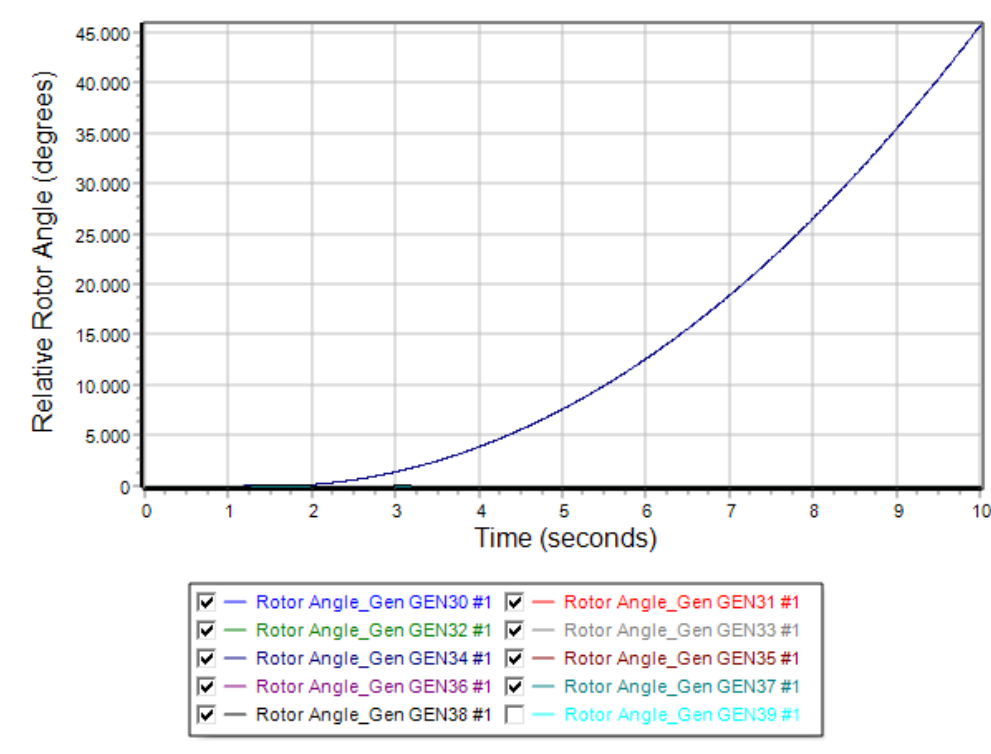
Σχήμα 6.129: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.130: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.131: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.132: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30\text{sec}$.

6.5.8 Σενάριο Δ: Προσδιορισμός κρίσιμων χρόνων για μονοφασικό σφάλμα με τη γη

Στο Σενάριο Δ πραγματοποιείται μελέτη μεταβατικής ευστάθειας όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υβριδική μορφή. Πιο συγκεκριμένα αυξάνουμε το ποσοστό της παραγωγής ενέργειας που προέρχεται από ανεμογεννήτριες κατά 10% με βάση το Σενάριο Γ, επιτυγχάνοντας έτσι ποσοστό 30% παραγωγής από αιολική ενέργεια. Το υπόλοιπο 70% καλύπτεται από τις ήδη υπάρχουσες συμβατικές πηγές. Έχοντας ως βάση τις ανεμογεννήτριες που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 35 και 37 του Σεναρίου Γ, αντικαθιστούμε την γεννήτρια του ζυγού 33 με ανεμογεννήτρια (WT3) με το 100% της παραγωγής της. Για να μπορέσουμε να καλύψουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις ζυγών όπως αναφέρθηκαν στα παραπάνω κριτήρια και για την εφαρμογή SLG fault, επιλέγουμε:

- Την γραμμή μεταφοράς 15-16 πλησίον του ζυγού 15, που είναι απομακρυσμένη από κάποια γεννήτρια.
- Την γραμμή μεταφοράς 22-23 πλησίον του ζυγού 22, που είναι κοντά σε γεννήτρια

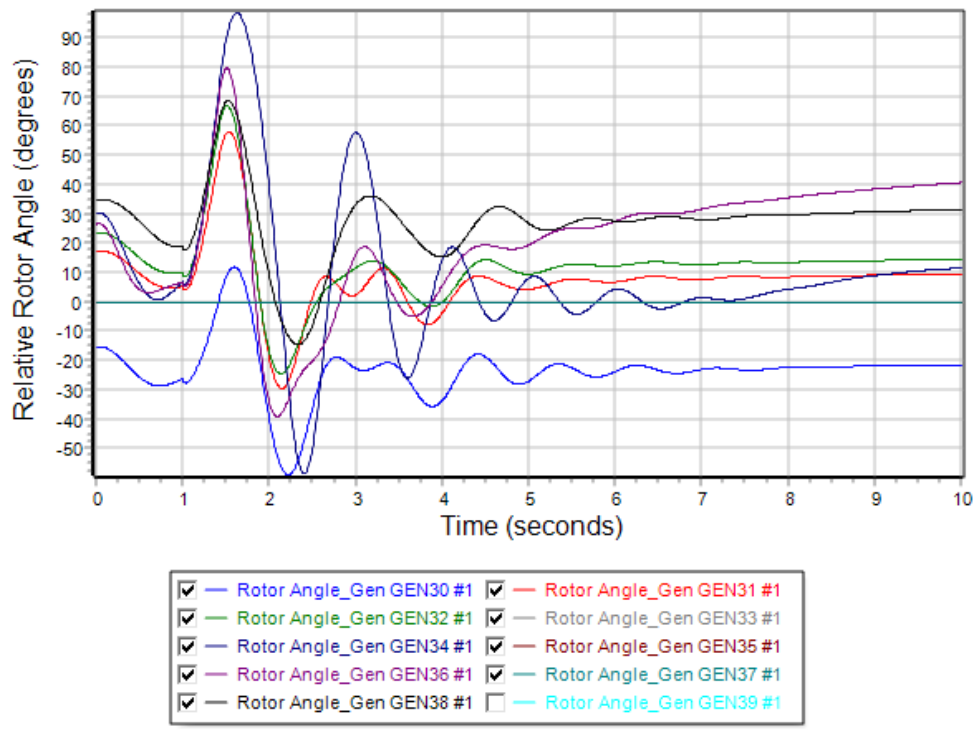
- Τον ζυγό 33 που αποτελεί ζυγό γεννήτριας του δικτύου.

Περίπτωση Δ1: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 15 του δικτύου

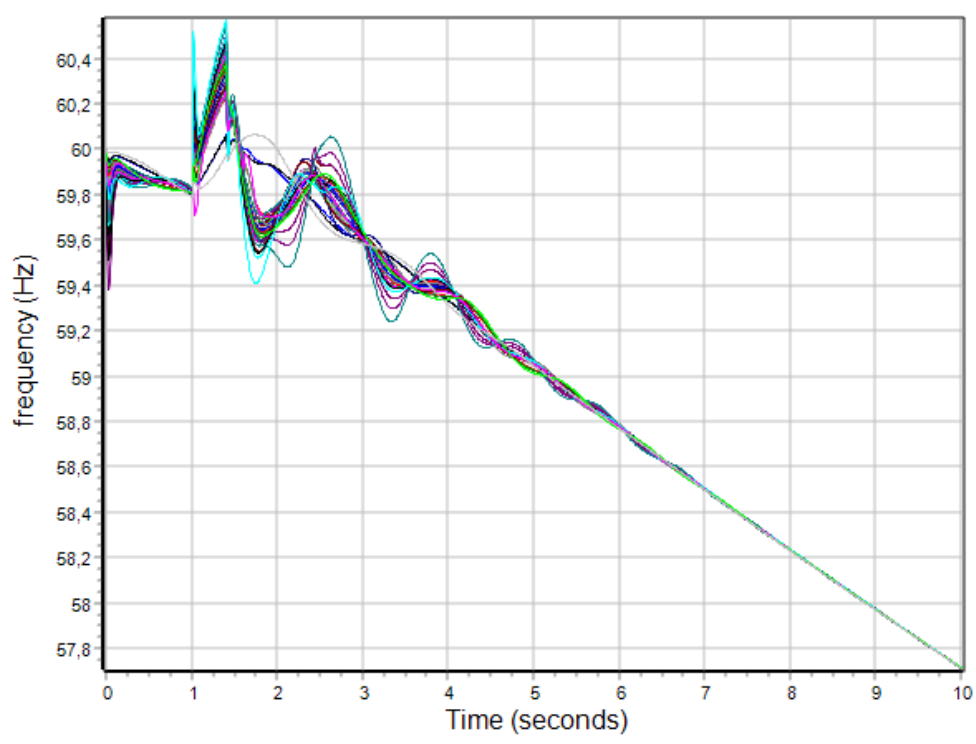
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 15-16 πλησίον του ζυγού 15. Στον Πίνακα 6.22 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.133 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.134 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.135 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης, που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.136 και 6.137 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.138 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,45\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,40 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.22: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ1-SLG fault.

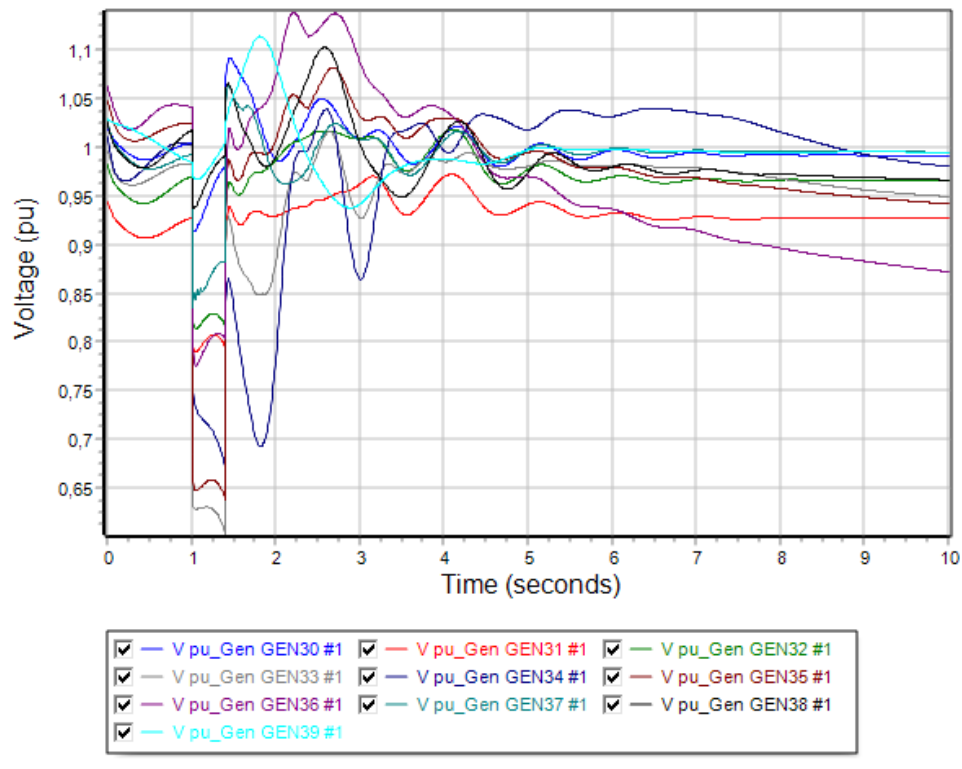
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,40$
Open Line	$t = 1,40$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,40$



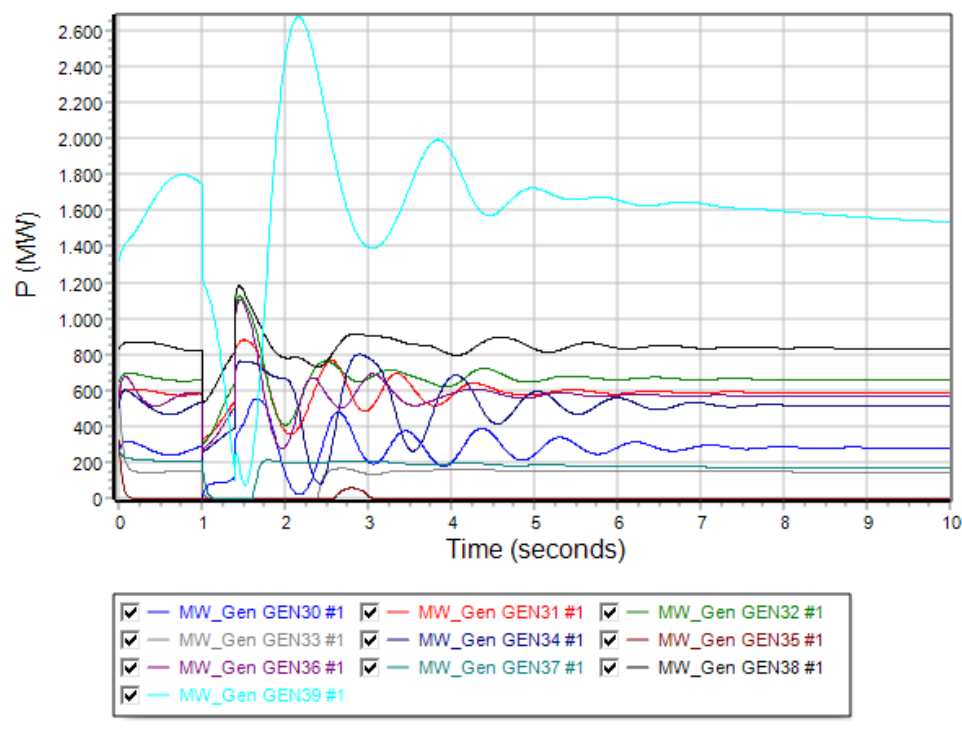
Σχήμα 6.133: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



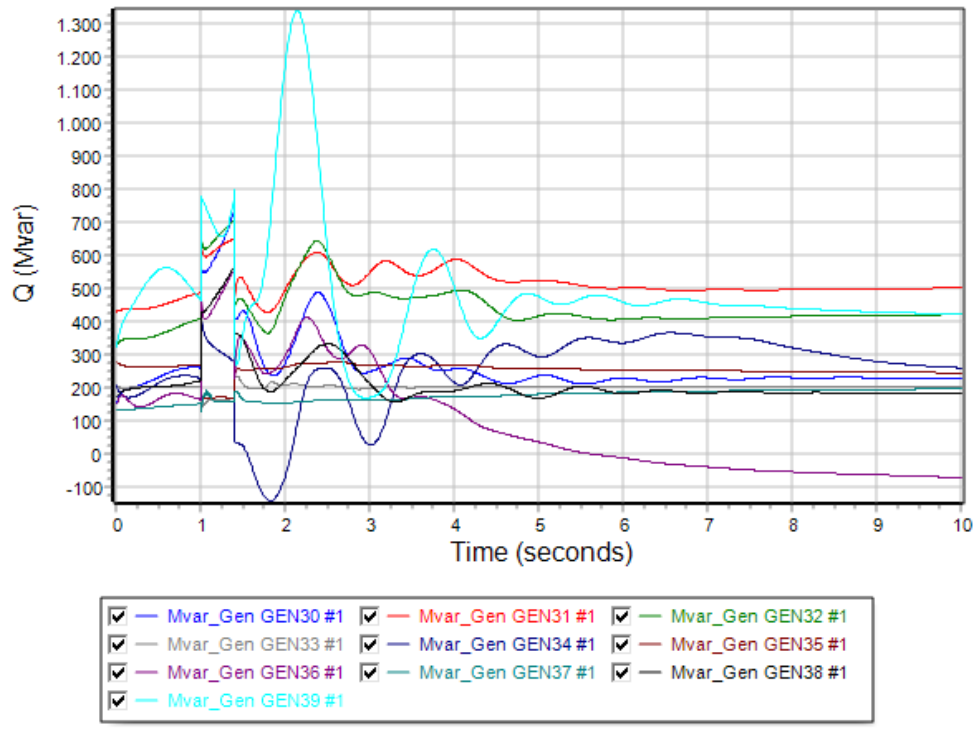
Σχήμα 6.134: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



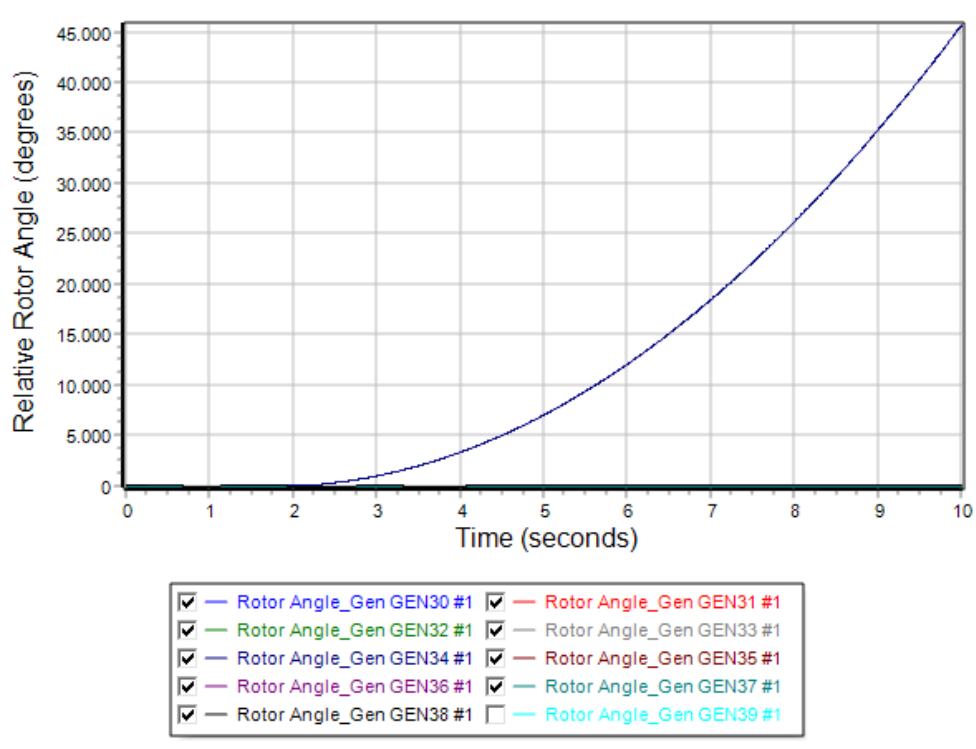
Σχήμα 6.135: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.136: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



Σχήμα 6.137: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40\text{sec}$.



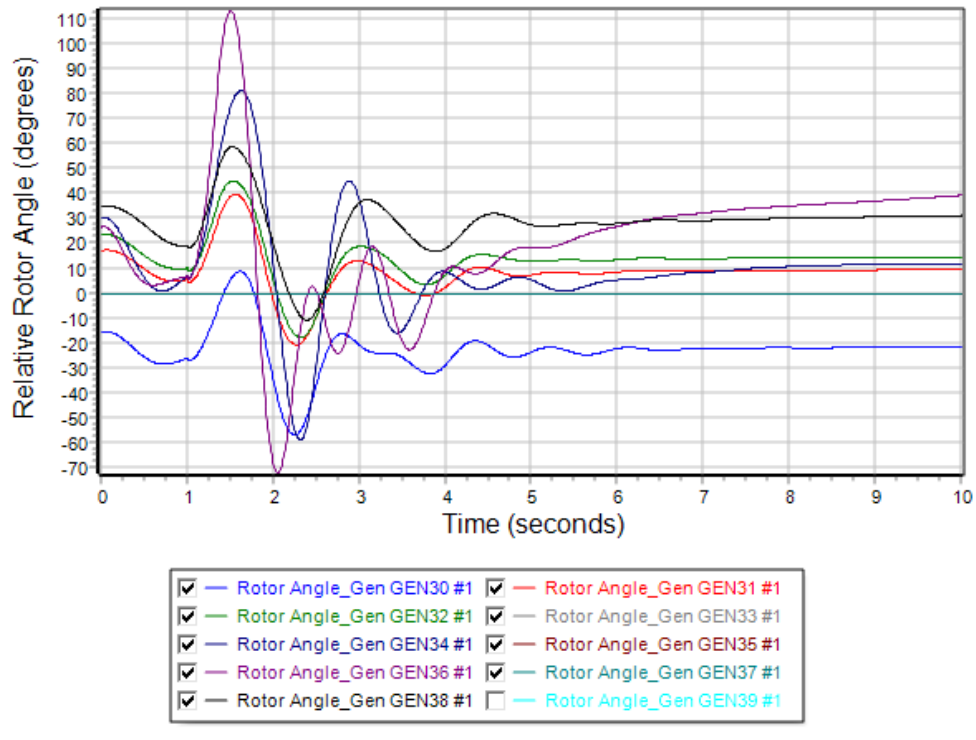
Σχήμα 6.138: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,45\text{sec}$.

Περίπτωση Δ2: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 22 του δικτύου

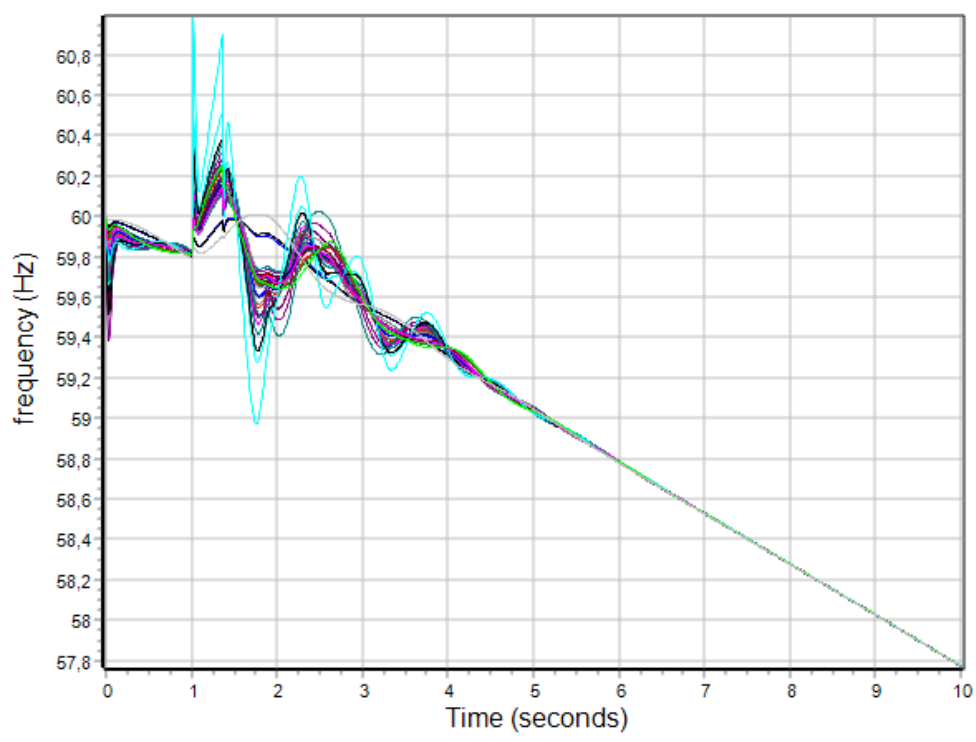
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στην γραμμή 22-23 πλησίον του ζυγού 22. Στον Πίνακα 6.23 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.139 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.140 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.141 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.142 και 6.143 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.144 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,40\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,35 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.23: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ2-SLG fault.

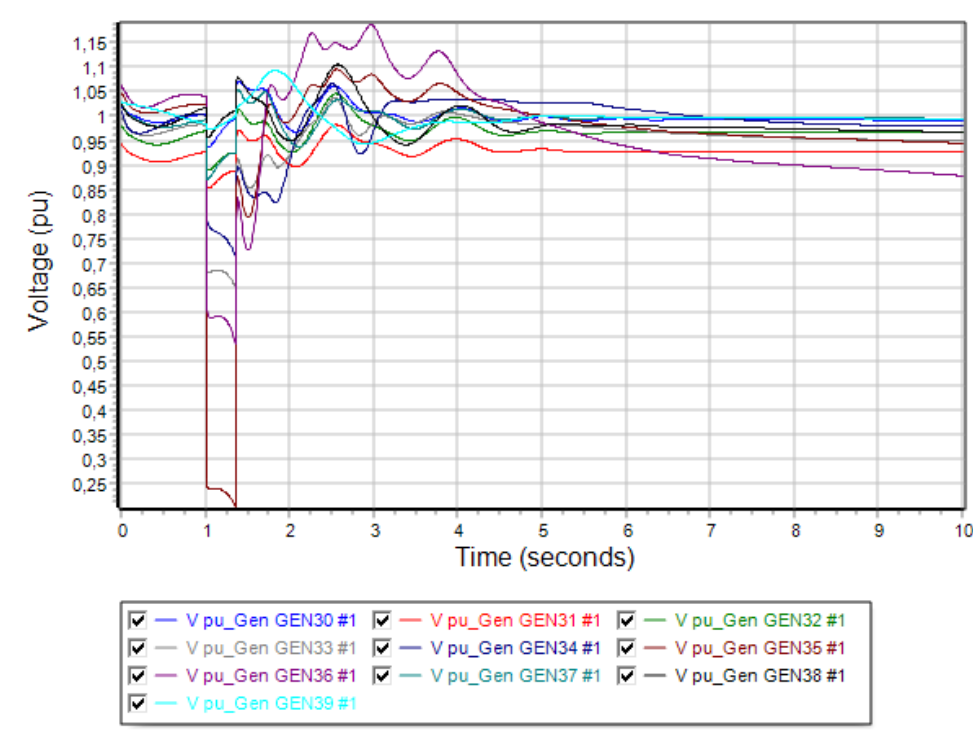
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,35$
Open Line	$t = 1,35$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,35$



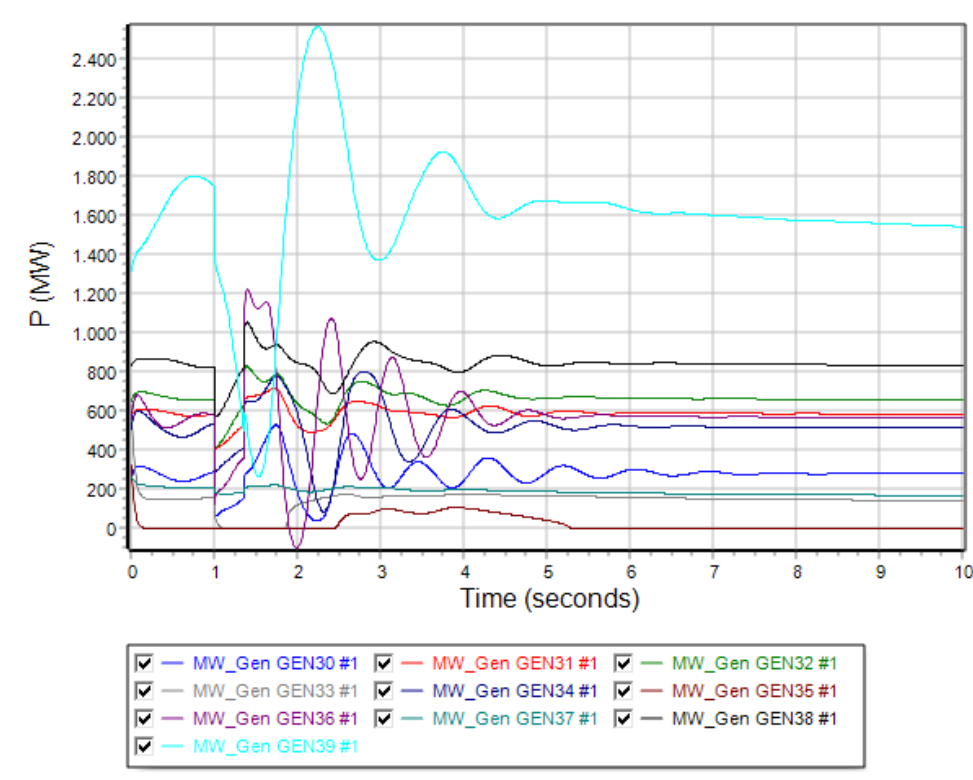
Σχήμα 6.139: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



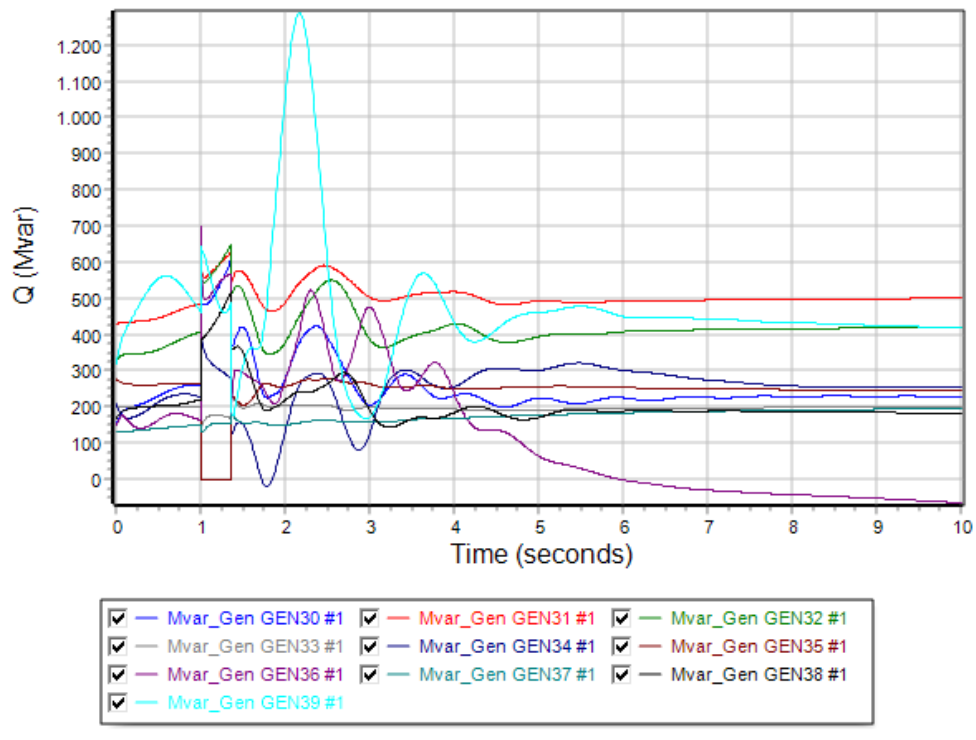
Σχήμα 6.140: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



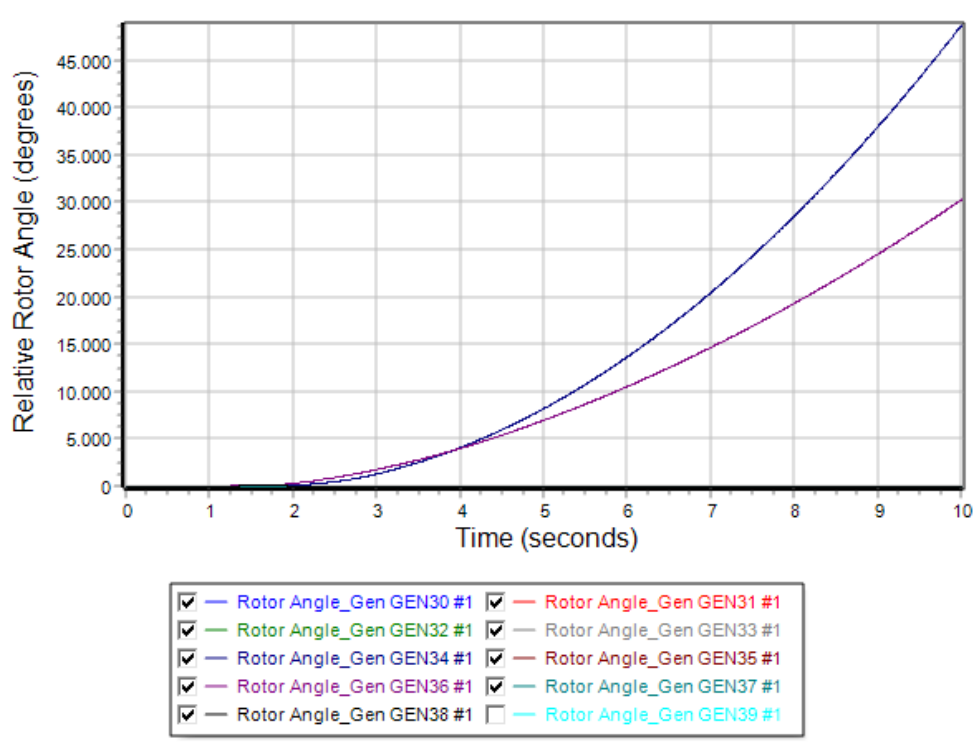
Σχήμα 6.141: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.142: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35\text{sec}$.



Σχήμα 6.143: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,35$ sec.



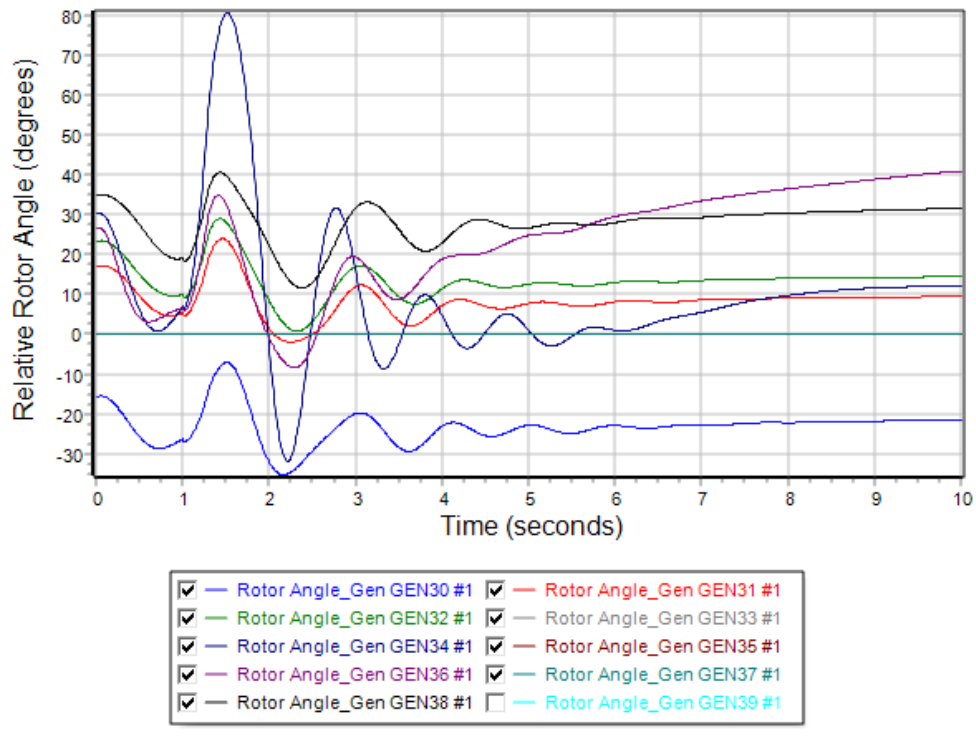
Σχήμα 6.144: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,40$ sec.

Περίπτωση Δ3: Μονοφασικό σφάλμα με τη γη στον ζυγό 33 του δικτύου

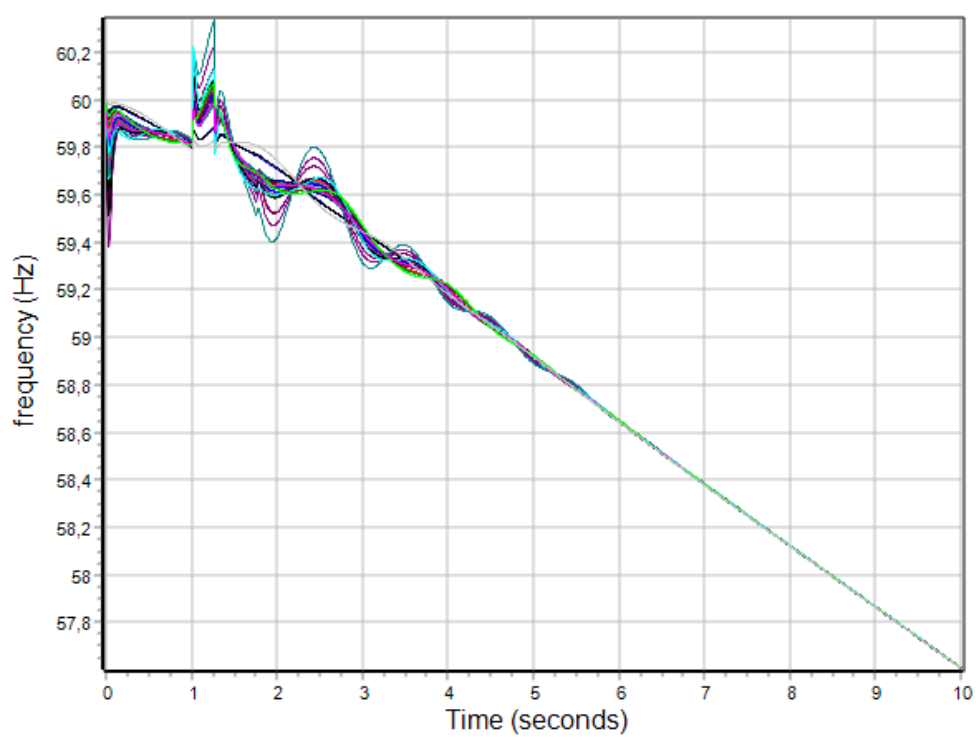
Εφαρμόζουμε μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 33 του δικτύου που αποτελεί ζυγό της αντίστοιχης γεννήτριας. Στον Πίνακα 6.24 φαίνονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων χρόνων, δηλαδή των χρόνων εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος από το σημείο εφαρμογής του. Στην συνέχεια στο Σχήμα 6.145 απεικονίζονται οι φθίνουσες ταλαντώσεις των σχετικών γωνιών του ρότορα των γεννητριών του συστήματος ως προς την γωνία του ζυγού αναφοράς την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$. Η δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος στον οποίο διατηρείται η ευστάθεια. Στο Σχήμα 6.146 φαίνεται η καμπύλη των συχνοτήτων των γεννητριών ως προς τον χρόνο εκκαθάρισης. Στο Σχήμα 6.147 φαίνονται οι βυθίσεις τάσεις την χρονική στιγμή του σφάλματος μέχρι την χρονική στιγμή εκκαθάρισης που επανέρχονται στις αρχικές τιμές. Ακολουθούν στο Σχήμα 6.148 και 6.149 οι καμπύλες πραγματικής και αέργου ισχύος των γεννητριών που υποδηλώνουν την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τέλος, στο Σχήμα 6.150 αναπαριστώνται οι ταλαντώσεις των γωνιών του ρότορα για χρόνο εκκαθάρισης $t=1,30\text{sec}$ στον οποίο χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Με βάση τα παραπάνω ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ανέρχεται 0,25 δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή του σφάλματος για την αποφυγή αστάθειας.

Πίνακας 6.24: Χρόνοι προσομοίωσης: Περίπτωση Δ3-SLG fault.

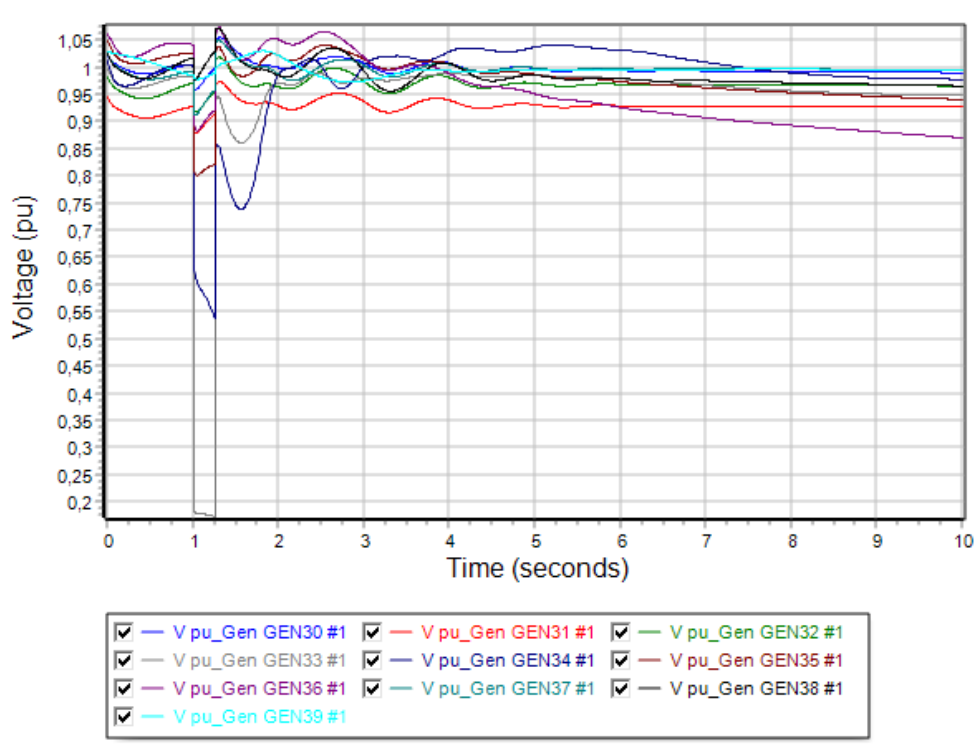
Διαδικασία προσομοίωσης	Χρονική στιγμή (sec)
Apply Fault	$t = 1,00$
Clear Fault	$t = 1,25$
Open Line	$t = 1,25$
Close Line	$t = 2,00$
CCT	$t = 0,25$



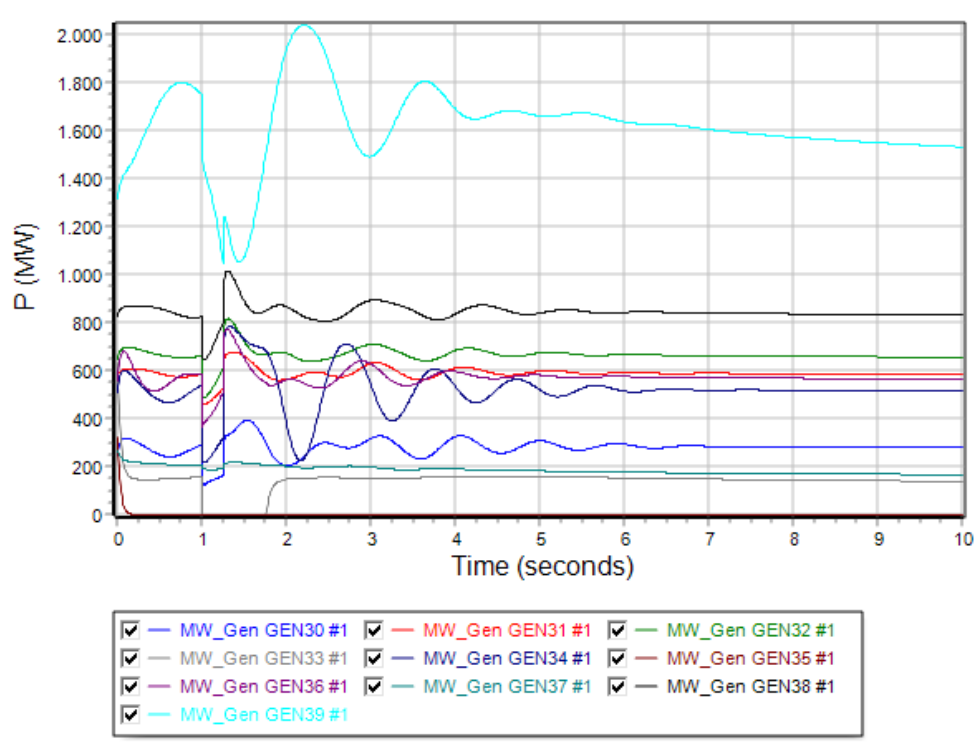
Σχήμα 6.145: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



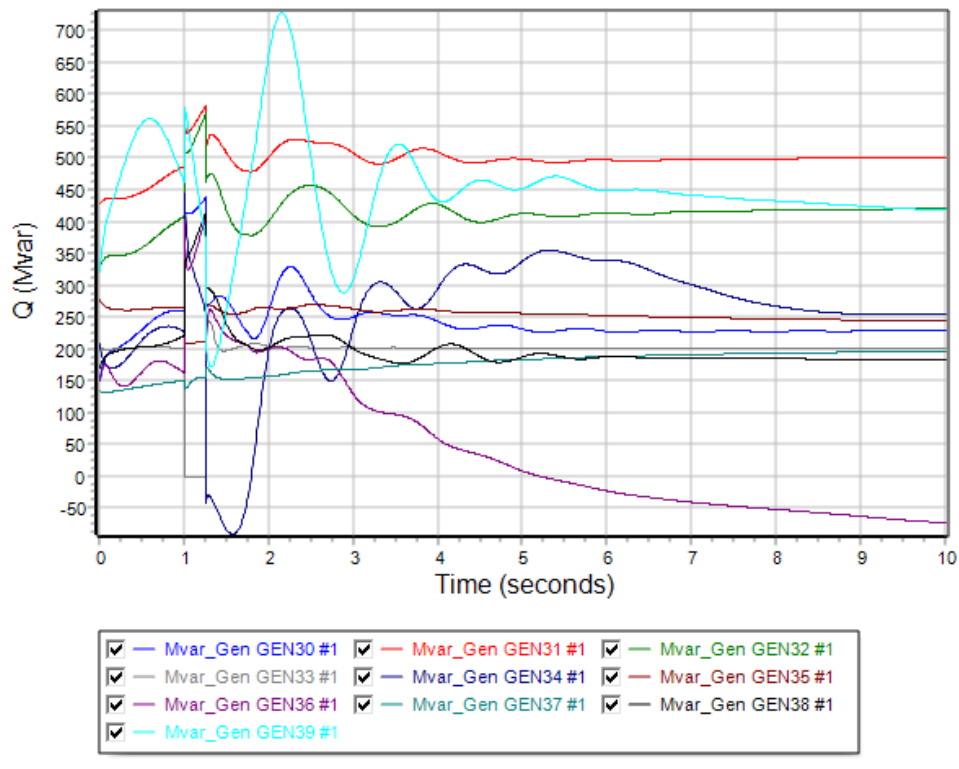
Σχήμα 6.146: Καμπύλη συχνότητας γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



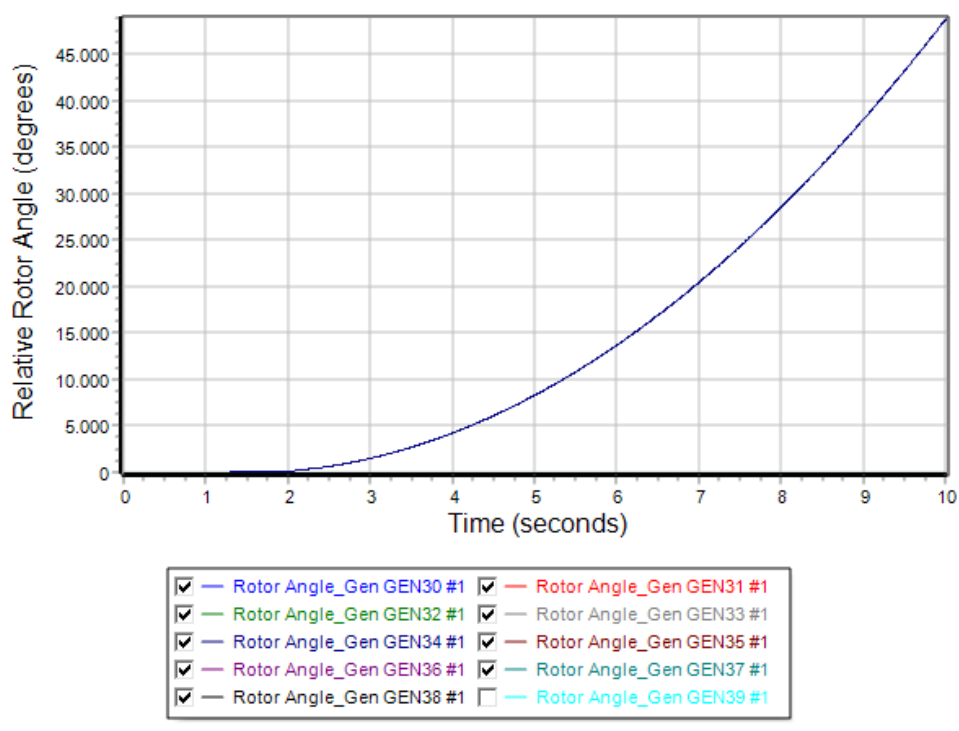
Σχήμα 6.147: Καμπύλη τάσης ζυγών γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.148: Καμπύλη πραγματικής ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25\text{sec}$.



Σχήμα 6.149: Καμπύλη αέργου ισχύος γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,25$ sec.



Σχήμα 6.150: Καμπύλη σχετικής γωνίας ρότορα γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο την χρονική στιγμή $t=1,30$ sec.

6.6 Συνολικά συμπεράσματα

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η εκτέλεση κάθε σεναρίου με τις αντίστοιχες καμπύλες (δ , f , V , P , Q) που προέκυπταν κάθε φορά. Έχοντας ως άμεσο κριτήριο την σχετική γωνία του ρότορα κάθε γεννήτριας ως προς τη γωνία του ζυγού αναφοράς, βγήκαν και τα αντίστοιχα συμπεράσματα ως προς τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος από την έναρξή του. Στον Πίνακα 6.25 σημειώνονται οι CCT όπως εκείνοι προέκυψαν από την εφαρμογή στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος σε κάθε σενάριο. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αυτοί οι χρόνοι είναι ίδιοι και στην περίπτωση ενός στερεού μονοφασικού βραχυκυκλώματος εάν αυτό λάμβανε χώρα σε κάποιον από τους παρακάτω ζυγούς.

Πίνακας 6.25: Συνολικοί χρόνοι προσομοίωσης για τριφασικό σφάλμα.

Συνολικοί κρίσιμοι χρόνοι - CCT				
Ζυγοί σφάλματος	Σενάριο A	Σενάριο B	Σενάριο Γ	Σενάριο Δ
Bus 15	$t = 0,35s$	$t = 0,25s$	$t = 0,30s$	$t = 0,25s$
Bus 22	$t = 0,25s$	$t = 0,25s$	$t = 0,30s$	$t = 0,25s$
Bus 33	$t = 0,15s$	$t = 0,15s$	$t = 0,15s$	$t = 0,20s$

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα διαπιστώνουμε πως στο σύστημα των 39 ζυγών η ευστάθεια μπορεί εύκολα να διατηρηθεί είτε αποτελείται από συμβατικές πηγές είτε από ένα υβριδικό σύστημα συμβατικών πηγών και ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με το Σενάριο B αυτό που παρατηρούμε είναι ότι με την ενσωμάτωση δύο ανεμογεννητριών ο χρόνος εκκαθάρισης θα παραμείνει στα ίδια περίπου πλαίσια με το αρχικό μας σύστημα, με μια μικρή μείωση στον ζυγό 15. Παρ'όλα αυτά στο Σενάριο Γ όπου ελαττώνουμε την τιμή της ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών στο 50%, ο χρόνος εκκαθάρισης αυξάνεται σε σχέση με το Σενάριο B. Στο σενάριο Δ άξιο αναφοράς είναι ότι στον ζυγό 33 που γίνεται το βραχυκύκλωμα και αποτελεί τον ζυγό που αντικαταστήθηκε με ανεμογεννήτρια, ο κρίσιμος χρόνος αυξήθηκε δείχνοντας την αξιοπιστία των συγκεκριμένων πηγών. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σχετικά καθώς εξαρτώνται άμεσα από την τοπολογία και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μας.

Αντίστοιχα προκύπτει και ο Πίνακας 6.26 με τους συνολικούς χρόνους εκκαθάρισης για την εφαρμογή ενός ασύμμετρου μονοφασικού σφάλματος με σχεδόν μηδενική αντίσταση βραχυκύκλωσης ($Z_f = 0 + j0.01pu$).

Πίνακας 6.26: Συνολικοί χρόνοι προσομοίωσης για μονοφασικό σφάλμα.

Συνολικοί κρίσιμοι χρόνοι - CCT				
Ζυγοί σφάλματος	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ	Σενάριο Δ
Bus 15	t = 0,55s	t = 0,35s	t = 0,45s	t = 0,40s
Bus 22	t = 0,35s	t = 0,40s	t = 0,40s	t = 0,35s
Bus 33	t = 0,30s	t = 0,25s	t = 0,25s	t = 0,25s

Οι χρόνοι εκκαθάρισης για μονοφασικό σφάλμα αυξήθηκαν σε σύγκριση με το τριφασικό λόγω και των μικρότερων ρευμάτων βραχυκύκλωσης που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο τύπο σφάλματος. Στο Σενάριο Β με την ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο παρατηρούμε μείωση του χρόνου εκκαθάρισης για σφάλμα μακριά από πηγή και διατήρηση σχεδόν των ίδιων τιμών, με μια απόκλιση 50msec, σε ζυγούς κοντά σε γεννήτριες. Στο Σενάριο Γ, παρατηρούμε αύξηση του χρόνου εκκαθάρισης κατά 100msec σε σχέση με Σενάριο Β, σε ζυγό απομακρυσμένο από την παραγωγή. Στο Σενάριο Δ παρατηρούμε μια διατήρηση παρόμοιων τιμών εκκαθάρισης σε σχέση με το Σενάριο Γ, με την απόκλιση να είναι στα 50msec. Και στις δύο περιπτώσεις σφαλμάτων διαπιστώσαμε ότι η αύξηση χωρητικότητας των DFIG έχει αρνητικό αντίκτυπο σε απόκριση μεγάλων βλαβών κοντά σε αιολικά πάρκα, με αποτέλεσμα ο CCT να είναι αισθητά μειωμένος.

Πολλές μελέτες και μηχανικοί υποστηρίζουν πως η ένταξη των αιολικών πάρκων με την αντικατάσταση των παραδοσιακών πηγών με ανεμογεννήτριες τύπου DFIG ενισχύουν σε ικανοποιητικά επίπεδα την μεταβατική ευστάθεια. Παρ' όλα αυτά πολλές από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί τόσο στο δίκτυο των 39 ζυγών όσο και σε δίκτυα με μικρότερο αριθμό ζυγών, δείχνουν ότι σε τέτοιες περιπτώσεις είτε μπορεί να βελτιωθεί είτε να μειωθεί η ικανότητα διατήρησης της ευστάθειας. Αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους τύπους γεννητριών που χρησιμοποιούνται, τις τοπολογίες των συστημάτων ισχύος και την τοποθεσία εμφάνισης των διάφορων τύπων σφαλμάτων.

Επιπλέον, σε μερικές περιπτώσεις επειδή οι σύγχρονες γεννήτριες ενός συστήματος έχουν υψηλότερη τιμή σταθεράς αδράνειας Η σε σχέση με τις DFIG, οδηγούμαστε σε καλύτερη φυσική ικανότητα απόσβεσης. Τα συστήματα ισχύος που έχουν ενσωματωμένα αιολικά πάρκα είναι λιγότερο ευαίσθητα σε παροδικά γεγονότα όταν η πτώση τάσης, ο CCT και η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών είναι κάτω από κάποια όρια και όταν η ζήτηση φορτίου είναι πάνω από το κατώτερο όριο.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Από την αρχή της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ο στόχος επικεντρώνονταν στην βελτίωση της αξιοπιστίας του, τόσο στο κομμάτι των πηγών ενέργειας που θα χρησιμοποιηθούν όσο και στο τομέα της μεταφοράς και τροφοδότησης κάθε καταναλωτή. Η εξέλιξη που παρουσιάζονταν στο τομέα της ενέργειας ισοδυναμούσε με την ανάπτυξη ολόκληρης της κοινωνίας. Η εύρεση νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας ώθησε την ανάπτυξη των ΑΠΕ για ευρεία χρήση. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών που συναντάται σε μεγάλα αστικά κέντρα. Επιπλέον η άμεση ανάγκη για αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας με διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην πραγματοποίηση μελετών για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους, όταν τροφοδοτούν ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με την δυναμική ανάλυση ενός συστήματος 39 ζυγών της IEEE που αφορούσε την Νέα Αγγλία. Σκοπός της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του συστήματος και πιο συγκεκριμένα της μεταβατικής ευστάθειάς του, όταν έρχονταν αντιμέτωπο με στερεά συμμετρικά και ασύμμετρα βραχυκυκλώματα. Η τοπολογία του δικτύου μας οδήγησε στην προσομοίωση των σφαλμάτων σε διαφορετικούς ζυγούς για καλύτερη διαπίστωση της συμπεριφοράς. Η μελέτη της ευστάθειας βασίστηκε τόσο όταν η συνολική παραγωγή ενέργειας προέρχονταν από συμβατικές πηγές όσο και με την υιοθέτηση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής με ανεμογεννήτριες διπλή τροφοδοσίας (DFIG-WT3). Η ανάπτυξη στα ηλεκτρονικά ισχύος οδήγησε στη χρήση των DFIG καθώς παρέχουν μια σειρά απο πλεονεκτήματα όπως φθηνότερη τιμή, υψηλή ενεργειακή απόδοση, δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και καλή ποιότητα ισχύος.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήσαμε για κάθε είδος παραγωγής ενέργειας, δηλαδή είτε αυτή προέρχονταν από συμβατικές πηγές είτε από συνδυασμό συμβατικών και ανεμογεννητριών, καταλήξαμε στο συμπέρασμα της διατήρησης της ευστάθειας χωρίς να υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης. Αρκετές μελέτες που αφορούν την ευστάθεια των ανεμογεννητριών έχουν δείξει ότι η ένταξη τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν επιφέρει αστάθειες λόγω της μεταβλητότητας της πηγής που χρησιμοποιούν, αλλά αντιθέτως αυξάνουν τα ποσοστά σταθερότητας δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα όταν αυτό τηρεί κάποιες συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Τα προβλήματα από τις ανισορροπίες ισχύος που προκαλούνται από τη μεταβλητότητα και τη διαλείπουσα αιολική ενέργεια σε συνδυασμό με τις δυναμικές μεταβολές στην ζήτηση του φορτίου, μπορούν εύκολα να επιλυθούν. Η χρήση συστημάτων αποθέματος ισχύος ή συσκευών αντιστάθμισης άεργου ισχύος, μαζί με προηγμένο εξοπλισμό διανομής και ταχύτερους απομονωτές, που μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν σε αιολικά πάρκα των DFIG, εξασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος κατά την διάρκεια παροδικών γεγονότων. Μια τέτοια έρευνα, της μεταβατικής ευστάθειας, διευκολύνει την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων και μπορεί να προσφέρει μελλοντικά στοιχεία για την ενσωμάτωση μεγαλύτερης κλίμακας αιολικής ενέργειας.

Την σημερινή εποχή η αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας με εξελιγμένα συστήματα έχει οδηγήσει στην εύρεση νέων τρόπων μελέτης των συστημάτων ενέργειας. Η χρησιμοποίηση αισθητήρων σε διάφορα μέρη του δικτύου δίνει περισσότερες δυνατότητες ελέγχου και μελέτης. Επιπλέον η χρησιμοποίηση μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης για ακριβείς προβλέψεις για την παραγωγή ενέργειας, την εμφάνιση σφαλμάτων, καιρικών συνθηκών κ.λπ. δίνει την δυνατότητα για βελτίωση ελέγχου τόσο της αιολικής ενέργειας όσο και των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών. Τέλος, τα τελευταία χρόνια με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης των τιμών από ορυκτά καύσιμα έχει δημιουργηθεί η τάση για ένα πιο βιώσιμο και «πράσινο» μέλλον στο τομέα της ενέργειας που θα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ΑΠΕ. Τα παραπάνω αποτελούν τα εχέγγυα για την δημιουργία ενός ευφυή δικτύου, ικανό να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις τόσο ως προς την ζήτηση όσο και όταν έρχεται αντιμέτωπο με διάφορες προκλήσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Statistics | windeurope. <https://windeurope.org/intelligence-platform/statistics/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 10-05-2022.
- [2] Alberto Pliego Marugán, Fausto Pedro García Márquez, Jesus María Pinar Perez, and Diego Ruiz-Hernández. A survey of artificial neural network in wind energy systems. *Applied Energy*, 228:1822–1836, 10 2018.
- [3] Marco Casini. Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4:56–65, 2016.
- [4] Hamdy Sultan. Stability of wtg/ fuel cells power system integrated with ug. stability of wtg/fuel cells power system integrated to utility grid view project power quality problems in the power system of tajikistan view project. Technical report, 2014.
- [5] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Α. Βοβό. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, Β' edition, 2008.
- [6] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Α. Βοβό. *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2 edition, 2008.
- [7] Sreemoyee Chatterjee and Suprovab Mandal. A novel comparison of gauss-seidel and newton-raphson methods for load flow analysis. In *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, pages 1–7, 2017.
- [8] B.M. Weedy, B.J. Cory, N. Jenkins and J.B. Ekanayake, and G. Strbac. *Electric Power Systems*. Wiley, United Kingdom, fifth edition, 2012.
- [9] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Α. Βοβό. *Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρική Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, Β' edition, 2008.

- [10] Prabha Kundur, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic, Carson Taylor, Thierry Van Cutsem, and Vijay Vittal. Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19:1387–1401, 8 2004.
- [11] Velimir Lackovic. Power system transient stability study fundamentals credit: 3 pdh. Technical report.
- [12] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Inc, 1994.
- [13] Udaya Annakkage and Ali Mehrizi-Sani. Transient stability in power systems. Technical report.
- [14] João Pedro De Carvalho. Electric power system transient stability analysis methods. Technical report.
- [15] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, and Ervin Bossanyi. *Wind Energy Handbook*. Wiley, England, 2001.
- [16] Wind energy. <https://www.irena.org/wind>. Ημερομηνία πρόσβασης: 10-05-2022.
- [17] Shiwei Xia, Qian Zhang, S. T. Hussain, Baodi Hong, and Weiwei Zou. Impacts of integration of wind farms on power system transient stability. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8, 8 2018.
- [18] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, and Mike Hughes. *Wind Energy Generation Modelling and Control*. Wiley, United Kingdom, 2009.
- [19] Bin Wu, Yongqiang Lang, Navid Zargari, and Samir Kouro. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Wiley, Canada, 2011.
- [20] Muhammad Rayyan Fazal and Muhammad Kamran. Wind energy. *Renewable Energy Conversion Systems*, pages 153–192, 2021.
- [21] Michail Katsivelakis, Dimitrios Bargiotas, and Aspasia Daskalopulu. Transient stability analysis in power systems integrated with a doubly-fed induction generator wind farm. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

Βασικά δεδομένα και χαρακτηριστικά δικτύου

Πίνακας Α.1: Line and transformer data-Table I.

Line Data & Transformer Tap						
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	0.0000	0.0000
1	39	0.0010	0.0250	0.7500	0.0000	0.0000
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	0.0000	0.0000
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	0.0000	0.0000
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	0.0000	0.0000
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	0.0000	0.0000
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	0.0000	0.0000
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	0.0000	0.0000
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	0.0000	0.0000
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	0.0000	0.0000
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	0.0000	0.0000
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	0.0000	0.0000
7	8	0.0004	0.0046	0.0789	0.0000	0.0000
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	0.0000	0.0000
9	39	0.0010	0.0250	0.2000	0.0000	0.0000

Πίνακας Α.2: Line and transformer data-Table II.

Line Data & Transformer Tap						
From Bus	To Bus	R	X	B	Magnitude	Angle
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	0.0000	0.0000
10	13	0.0004	0.0043	0.0729	0.0000	0.0000
13	14	0.0009	0.0101	0.1723	0.0000	0.0000
14	15	0.0018	0.0217	0.3660	0.0000	0.0000
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	0.0000	0.0000
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	0.0000	0.0000
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	0.0000	0.0000
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	0.0000	0.0000
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	0.0000	0.0000
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	0.0000	0.0000
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	0.0000	0.0000
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	0.0000	0.0000
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	0.0000	0.0000
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	0.0000	0.0000
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	0.0000	0.0000
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	0.0000	0.0000
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	0.0000	0.0000
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	0.0000	0.0000
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	0.0000	0.0000
12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.0000
12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.006	0.0000
6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.070	0.0000
10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.070	0.0000
19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.070	0.0000
20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.009	0.0000
22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.025	0.0000
23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.000	0.0000
25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.025	0.0000
2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.025	0.0000
29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.025	0.0000
19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.060	0.0000

Πίνακας Α.3: Bus data-Table I.

Power & Voltage Data					
Bus No.	Voltage (pu)	Load P(MW)	Load Q(Mvar)	Generation P(MW)	Generation Q(Mvar)
1	1.03159∠ - 16.86	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.01932∠ - 26.60	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.97887∠ - 31.71	600.00	250.00	0.00	0.00
4	0.97457∠ - 30.78	450.00	184.00	0.00	0.00
5	0.96654∠ - 28.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.96495∠ - 27.30	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.90849∠ - 28.35	233.80	840.00	0.00	0.00
8	0.92328∠ - 28.35	522.00	176.00	0.00	0.00
9	0.98902∠ - 17.65	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.98996∠ - 26.14	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.98108∠ - 26.65	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.98161∠ - 28.48	120.00	30.00	0.00	0.00
13	0.98651∠ - 27.22	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.98136∠ - 29.48	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.97900∠ - 32.20	320.00	153.00	0.00	0.00
16	0.99341∠ - 31.66	329.40	323.00	0.00	0.00
17	0.99251∠ - 31.97	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.98591∠ - 32.34	158.00	30.00	0.00	0.00
19	1.03572∠ - 26.91	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.98316∠ - 28.37	680.00	103.00	0.00	0.00

Πίνακας Α.4: Bus data-Table II.

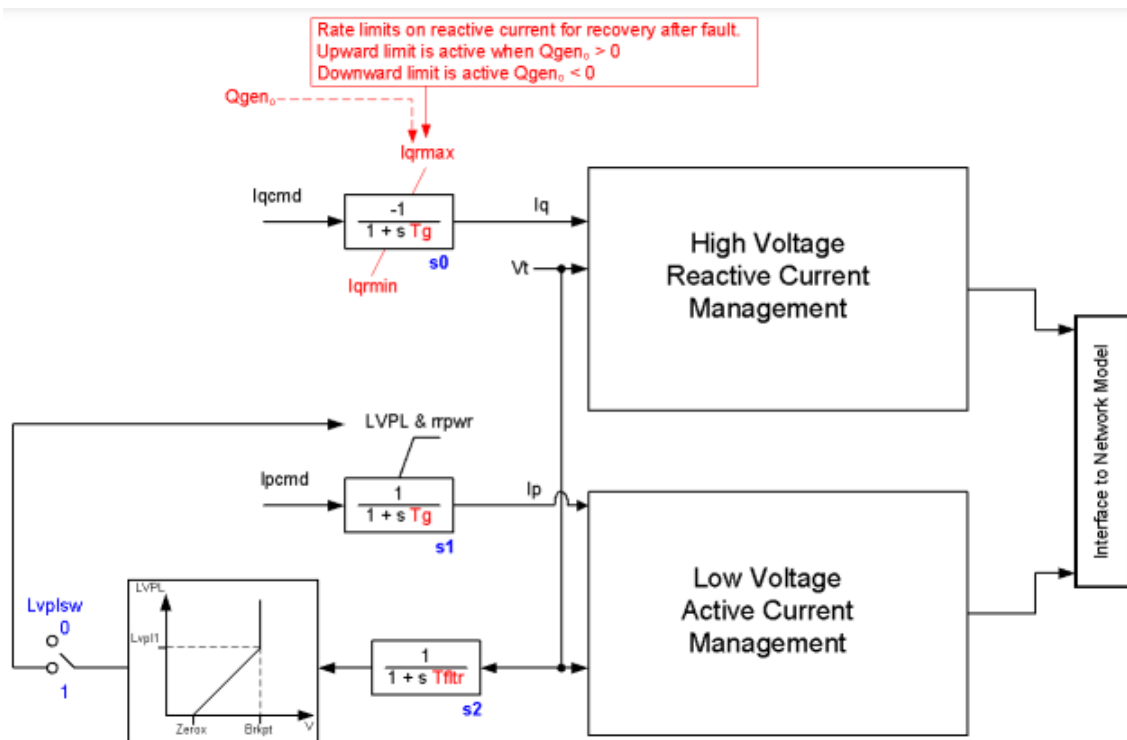
Power & Voltage Data					
Bus No.	Voltage (pu)	Load		Generation	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
21	1.00728∠ - 30.76	274.00	115.00	0.00	0.00
22	1.03770∠ - 27.80	0.00	0.00	0.00	0.00
23	1.03210∠ - 27.41	247.50	84.60	0.00	0.00
24	1.00331∠ - 31.94	308.60	-92.20	0.00	0.00
25	1.02256∠ - 27.30	224.00	47.20	0.00	0.00
26	1.01754∠ - 29.32	139.00	17.00	0.00	0.00
27	0.99960∠ - 31.77	281.00	75.50	0.00	0.00
28	1.02390∠ - 25.64	206.00	27.60	0.00	0.00
29	1.02687∠ - 22.76	283.50	126.90	0.00	0.00
30	1.02064∠ - 24.05	0.00	0.00	250.00	153.18
31	0.94550∠ - 20.32	80.00	40.00	572.93	429.80
32	0.98310∠ - 17.92	0.00	0.00	650.00	302.57
33	0.99720∠ - 21.66	0.00	0.00	632.00	203.20
34	1.01230∠ - 23.16	0.00	0.00	508.00	210.67
35	1.04930∠ - 25.30	0.00	0.00	650.00	316.99
36	1.06350∠ - 19.47	0.00	0.00	560.00	160.48
37	1.02780∠ - 23.84	0.00	0.00	540.00	105.03
38	1.02650∠ - 15.65	0.00	0.00	830.00	159.94
39	1.03000∠ - 10.96	400.00	2500.00	715.24	224.30

Παράρτημα Β

Διαγράμματα ανεμογεννήτριας τύπου 3 (WT3)

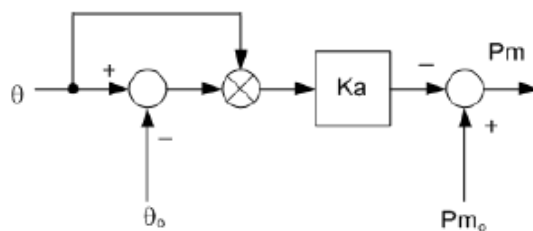
Σε αυτό το Παράρτημα φαίνονται τα διαγράμματα των κάθε μπλοκ που απαιτείται να εισάγουμε στο PowerWorld για να μπορέσουμε να αναπαραστήσουμε μια ανεμογεννήτρια τύπου 3, δηλαδή διπλής τροφοδοσίας επαγωγική γεννήτρια (DFIG).

1. Renewable energy generator/converter model (regc_a).



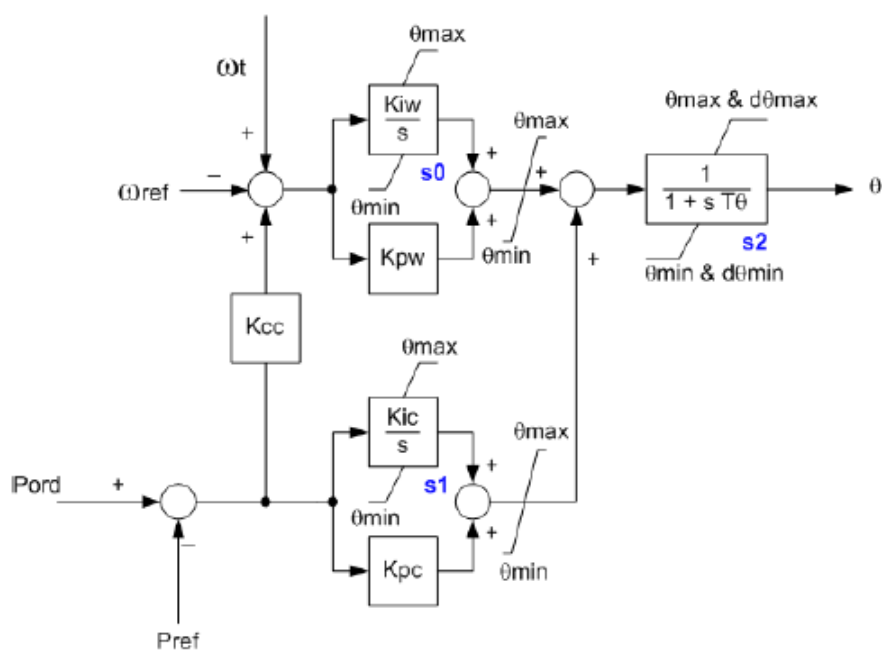
Σχήμα Β.1: Renewable energy generator/converter model (regc_a).

4. Wind turbine generator aero-dynamics (wtgar_a).



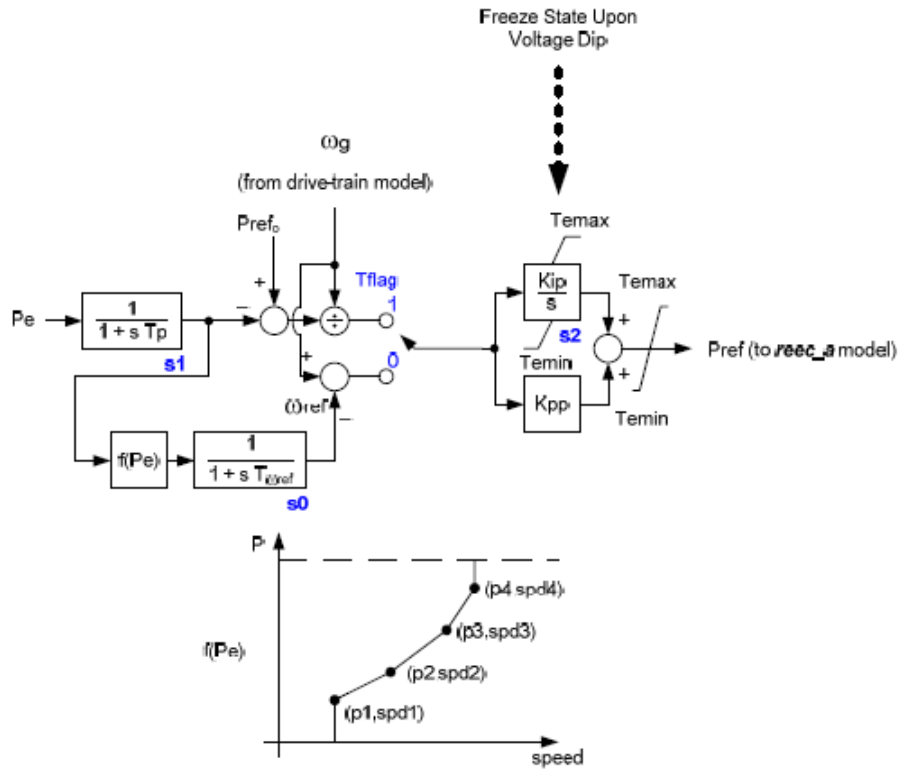
Σχήμα B.4: Wind turbine generator aero-dynamics (wtgar_a).

5. Wind turbine generator pitch controller (wtgpt_a).



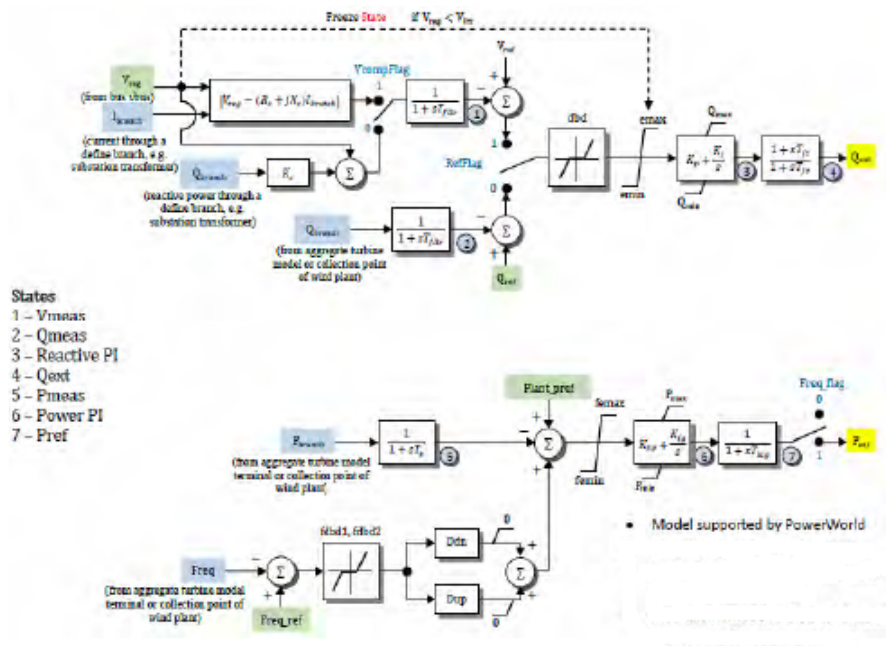
Σχήμα B.5: Wind turbine generator pitch controller (wtgpt_a).

6. Wind turbine generator torque control (wtgtrq_a).



Σχήμα Β.6: Wind turbine generator torque control (wtgtrq_a).

7. Renewable energy power plant controller (repc_a).



Σχήμα Β.7: Renewable energy power plant controller (repc_a).