



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μελέτη φαινομένων μεταβατικής ευστάθειας από την
χωροταξική εξέταση ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων στο
ηλεκτρικό δίκτυο**

Διπλωματική Εργασία

Κρυστάμτσης Νικόλαος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούνιος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

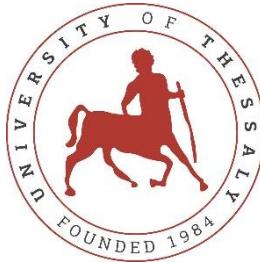
**Μελέτη φαινομένων μεταβατικής ευστάθειας από την
χωροταξική εξέταση ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων στο
ηλεκτρικό δίκτυο**

Διπλωματική Εργασία

Κρυστάμτσης Νικόλαος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούνιος 2022



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

**Study of transient stability analysis from the spatial examination
of the integration of wind farms into the power grid**

Diploma Thesis

Krystamtsis Nikolaos

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

June 2022

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

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

Μέλος

Λουτρίδης Σπυρίδων

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

Μέλος

Παναπακίδης Ιωάννης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο 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, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν 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

Κρυστάμτσης Νικόλαος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Krystamtsis Nikolaos

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς αλληλεπιδράσεων με διάφορα άτομα, καθένα από τα οποία είχε σημαντικό ρόλο στην περάτωση της. Αξίζει λοιπόν, να αφιερωθεί η παρούσα σελίδα προκειμένου να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στα άτομα αυτά, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν.

Αρχικά, στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Μπαργιώτα Δημήτριο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Π.Θ ο οποίος είχε καθοριστικό ρόλο στην διεξαγωγή και ολοκλήρωση παρούσας διπλωματικής εργασίας, ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και συνεργασία του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Λουτρίδη Σπυρίδωνα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και τον κ. Παναπακίδη Ιωάννη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, που καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου υπήρξαν στήριγμα, μέσα από όλες τις δυσκολίες που μπορεί να αντιμετώπιζαν.

Διπλωματική Εργασία

Ενσωμάτωση της Αιολικής Ενέργειας στο Ηλεκτρικό Δίκτυο

Κρυστάμπης Νικόλαος

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζονται τα φαινόμενα μεταβατικής ευστάθειας που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωση και την παράλληλη χωροταξική εξέταση αιολικών πάρκων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και παρουσιάζεται η δομή τους. Έπειτα, πραγματοποιείται η ανάλυση ροής φορτίου πάνω στα ΣΗΕ και εξετάζονται οι διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων. Ακολούθως, αναλύεται η ανάγκη για χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αιολική ενέργεια. Έπειτα, παρουσιάζονται οι τύποι ανεμογεννητριών, σε χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις στο σύστημα 39 ζυγών της IREE, με τη συμμετοχή αιολικών πάρκων χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοιώσεων PowerWorld Simulator. Εξετάζεται η συμπεριφορά του δικτύου πάνω σε τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα και οι καμπύλες ευστάθειας, αφού προσδιοριστεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Τέλος, γίνεται συλλογή και σύγκριση των αποτελεσμάτων και προκύπτουν συμπεράσματα.

Λέξεις-κλειδιά: ανεμογεννήτρια, αιολικά πάρκα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βραχυκυκλώματα, ενέργεια, ευστάθεια, ισχύς, καμπύλες, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, μεταβατική αστάθεια, μεταβατική ευστάθεια, μονοφασικά βραχυκυκλώματα, προσομοίωση, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τριφασικά βραχυκυκλώματα

Diploma Thesis

Integration of Wind Power Into the Electric Grid

Krystamtsis Nikolaos

Abstract

In the present diploma thesis, the phenomena of transitional stability that occur during the integration and the parallel spatial examination of wind farms in the power grid are examined. First, an introduction is made to power grids and their structure is presented. Then, the power flow analysis is performed on the power grids and the different types of short circuits are examined. Next, the need for the use of renewable energy sources (RES) is analyzed and special emphasis is given to wind energy. Also, the types of wind turbines are presented in onshore and offshore wind farms. The simulations are then performed on the IEEE – 39 bus system, involving wind farms using the PowerWorld Simulator. The network behavior on three-phase and single-phase short circuits and the stability curves are examined, after determining the critical clearance time. Finally, the results are collected and compared to each other and conclusions are drawn.

Keywords: critical clearance time, curves, conventional energy forms, energy, power, power grid, renewable energy sources, short circuits, single – phase short circuits, simulation, stability, three – phase short circuits, transient stability, wind farms, wind turbine

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxxvii</i>
<i>Κατάλογος γραφημάτων</i>	<i>xi</i>
<i>Συντομογραφίες</i>	<i>xli</i>
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</i>	<i>1</i>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	<i>1</i>
1.1.1 Συνεισφορά	<i>1</i>
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας.....	<i>2</i>
<i>Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας</i>	<i>3</i>
2.1 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	<i>3</i>
2.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	<i>4</i>
2.3 Βασικές συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	<i>6</i>
2.4 Διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	<i>9</i>
2.5 Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	<i>12</i>
<i>Κεφάλαιο 3 Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας</i>	<i>15</i>
3.1 Ανάλυση ροής φορτίου	<i>15</i>
3.1.1 Μέθοδος Gauss – Seidel	<i>18</i>
3.1.2 Μέθοδος Newton - Raphson	<i>18</i>
3.2 Βραχυκύκλωμα	<i>19</i>
3.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες	<i>20</i>
3.2.2 Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα	<i>25</i>

3.2.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη	25
3.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα	27
3.2.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη	28
Κεφάλαιο 4 Αιολική Ενέργεια.....	29
4.1 Ανάγκη για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	29
4.2 Προοπτικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ	31
4.3 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας έναντι των άλλων ΑΠΕ	33
4.4 Επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων.....	35
4.4.1 Κατανομή Weibull.....	35
4.4.2 Κατανομή Rayleigh	36
4.4.3 Ενέργεια και άνεμος	37
Κεφάλαιο 5 Ανεμογεννήτριες	39
5.1 Ανασκόπηση της αιολικής ενέργειας.....	39
5.2 Βασικά στοιχεία ανεμογεννητριών.....	41
5.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)	43
5.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT).....	44
5.3 Τύποι ανεμογεννητριών.....	47
5.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, Τύπου 1(Fixed – Speed Wind Turbines, Type 1).....	47
5.3.2 Ανεμογεννήτριες με περιορισμένη μεταβλητή ταχύτητα, Τύπου 2 (Limited Variable – Speed Wind Turbines, Type 2)	49
5.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος, Τύπου 3 (Variable – Speed Wind Turbines With Partial – Scale Power Converter, Type 3).....	50
5.3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με πλήρης κλίμακα μετατροπέα ισχύος, Τύπου 4 (Variable – Speed Wind Turbines With Full-Scale Power Converter, Type 4)	52
5.4 Υπεράκτια αιολικά πάρκα.....	53
5.4.1 Σύγκριση χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων	54
5.4.2 Θεμελιώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	56
Κεφάλαιο 6 - Προσομοιώσεις μεταβατικής ευστάθειας	59
6.1 Ανάλυση συστήματος	59
6.2 Μεθοδολογία και ερευνητικά ερωτήματα.....	60
6.2.1 Προσδιορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης και ευστάθειας του δικτύου	60
6.2.2 Ανεμογεννήτριες στο PowerWorld Simulator	62

6.3 Προσομοιώσεις στο σύστημα 39 ζυγών της IEEE	63
6.3.1 Σενάριο Α1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου	65
6.3.2 Σενάριο Α2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου	69
6.3.3 Σενάριο Α3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου	73
6.3.4 Σενάριο Α4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου	77
6.3.5 Σενάριο Β1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	82
6.3.6 Σενάριο Β2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	87
6.3.7 Σενάριο Β3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	91
6.3.8 Σενάριο Β4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	95
6.3.9 Σενάριο Γ1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ.....	100
6.3.10 Σενάριο Γ2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ.....	105
6.3.11 Σενάριο Γ3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ.....	109
6.3.12 Σενάριο Γ4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ.....	113
6.3.13 Σενάριο Α5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου	118
6.3.14 Σενάριο Α6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου	122
6.3.15 Σενάριο Α7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου	126
6.3.16 Σενάριο Α8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου	130
6.3.17 Σενάριο Β5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	135
6.3.18 Σενάριο Β6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	139
6.3.19 Σενάριο Β7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	143
6.3.20 Σενάριο Β8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ	147
6.3.21 Σενάριο Γ5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ	152
6.3.22 Σενάριο Γ6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ	156
6.3.23 Σενάριο Γ7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ	160
6.3.24 Σενάριο Γ8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ	164
6.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Συγκρίσεις ανά σενάριο	169
6.4.1 Σενάριο Α.....	169
6.4.2 Σενάριο Β.....	170
6.4.3 Σενάριο Γ	171
6.5 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Συγκρίσεις ανά ζυγό	173
6.5.1 Ζυγός 1.....	173
6.5.2 Ζυγός 12.....	174
6.5.3 Ζυγός 16.....	176
6.5.4 Ζυγός 20.....	177
Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα.....	180
Βιβλιογραφία.....	183

Κατάλογος εικόνων

<i>Εικόνα 1: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας</i>	5
<i>Εικόνα 2: Τομή σύγχρονης γεννήτριας</i>	7
<i>Εικόνα 3: Τομή μετασχηματιστή λαδιού</i>	8
<i>Εικόνα 4: Ελληνικό Εθνικό ΣΗΕ, 2017</i>	11
<i>Εικόνα 5: Διάγραμμα Rotor Angle – t, για γεννήτρια που α) διατηρεί την ευστάθεια της β) που χάνει την ευστάθεια της</i>	13
<i>Εικόνα 6: Γραφική αναπαράσταση συμμετρικών συνιστωσών</i>	21
<i>Εικόνα 7: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας</i>	23
<i>Εικόνα 8: Δίκτυα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας μιας σύγχρονης μηχανής</i>	24
<i>Εικόνα 9: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδέσεις μετασχηματιστών</i>	24
<i>Εικόνα 10: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη</i>	25
<i>Εικόνα 11: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό βραχυκύκλωμα</i>	27
<i>Εικόνα 12: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη</i>	28
<i>Εικόνα 13: Μορφές ΑΠΕ</i>	30
<i>Εικόνα 14: Κορυφαίες χώρες με δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2017 σε GW</i>	33
<i>Εικόνα 15: Χωρική κατανομή της παραγωγής αιολικής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο, στα τέλη του 2021</i>	40
<i>Εικόνα 16: Εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή στον ελλαδικό χώρο, για το 2021</i>	41
<i>Εικόνα 17: Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο της ανεμογεννήτριας και στην παραγωγή ισχύος</i>	42
<i>Εικόνα 18: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα</i>	42
<i>Εικόνα 19: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής</i>	44
<i>Εικόνα 20: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα περιστροφής</i>	45

<i>Εικόνα 21: a)Στρόβιλος Savonius b)Στρόβιλος Darrieus.....</i>	46
<i>Εικόνα 22: Δομή ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας</i>	48
<i>Εικόνα 23: Δομή ανεμογεννήτριας περιορισμένης μεταβλητής ταχύτητας</i>	50
<i>Εικόνα 24: Δομή ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος.....</i>	51
<i>Εικόνα 25: Δομή ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με πλήρης κλίμακα μετατροπέα ισχύος</i>	53
<i>Εικόνα 26: Σύγκριση χερσαίου και υπεράκτιου αιολικού δυναμικού στην Ευρώπη, για διαφορετικά βάθη και απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος</i>	54
<i>Εικόνα 27: Τύποι θεμελιώσεων για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα</i>	57
<i>Εικόνα 28: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator</i>	60
<i>Εικόνα 29: Ανεμογεννήτρια DFIG (Τύπου 3) στο PowerWorld Simulator</i>	62
<i>Εικόνα 30: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)</i>	66
<i>Εικόνα 31: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)</i>	66
<i>Εικόνα 32: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)</i>	67
<i>Εικόνα 33: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)</i>	67
<i>Εικόνα 34: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)</i>	68
<i>Εικόνα 35: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,70 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A1).....</i>	68
<i>Εικόνα 36: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)</i>	70
<i>Εικόνα 37: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)</i>	70
<i>Εικόνα 38: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)</i>	71

<i>Εικόνα 39: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)</i>	71
<i>Εικόνα 40: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)</i>	72
<i>Εικόνα 41: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,60 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A2).....</i>	72
<i>Εικόνα 42: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)</i>	74
<i>Εικόνα 43: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)</i>	74
<i>Εικόνα 44: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)</i>	75
<i>Εικόνα 45: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)</i>	75
<i>Εικόνα 46: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)</i>	76
<i>Εικόνα 47: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A3).....</i>	76
<i>Εικόνα 48: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)</i>	78
<i>Εικόνα 49: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)</i>	78
<i>Εικόνα 50: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)</i>	79
<i>Εικόνα 51: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)</i>	79
<i>Εικόνα 52: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)</i>	80

<i>Εικόνα 53: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A4).....</i>	80
<i>Εικόνα 54: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator, για το σενάριο B</i>	82
<i>Εικόνα 55: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)</i>	84
<i>Εικόνα 56: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)</i>	84
<i>Εικόνα 57: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)</i>	85
<i>Εικόνα 58: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)</i>	85
<i>Εικόνα 59: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)</i>	86
<i>Εικόνα 60: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,80 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B1).....</i>	86
<i>Εικόνα 61: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)</i>	88
<i>Εικόνα 62: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)</i>	88
<i>Εικόνα 63: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)</i>	89
<i>Εικόνα 64: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)</i>	89
<i>Εικόνα 65: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)</i>	90
<i>Εικόνα 66: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,65 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B2).....</i>	90

<i>Εικόνα 67: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)</i>	92
<i>Εικόνα 68: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)</i>	92
<i>Εικόνα 69: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)</i>	93
<i>Εικόνα 70: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)</i>	93
<i>Εικόνα 71: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)</i>	94
<i>Εικόνα 72: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B3).....</i>	94
<i>Εικόνα 73: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)</i>	96
<i>Εικόνα 74: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)</i>	96
<i>Εικόνα 75: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)</i>	97
<i>Εικόνα 76: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)</i>	97
<i>Εικόνα 77: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)</i>	98
<i>Εικόνα 78: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B4).....</i>	98
<i>Εικόνα 79: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator, για το σενάριο Γ</i>	100
<i>Εικόνα 80: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1).....</i>	102
<i>Εικόνα 81: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1).....</i>	102

<i>Εικόνα 82: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)</i>	103
<i>Εικόνα 83: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)</i>	103
<i>Εικόνα 84: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)</i>	104
<i>Εικόνα 85: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,40 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ1)</i>	104
<i>Εικόνα 86: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)</i>	106
<i>Εικόνα 87: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)</i>	106
<i>Εικόνα 88: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)</i>	107
<i>Εικόνα 89: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)</i>	107
<i>Εικόνα 90: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)</i>	108
<i>Εικόνα 91: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ2)</i>	108
<i>Εικόνα 92: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)</i>	110
<i>Εικόνα 93: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)</i>	110
<i>Εικόνα 94: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)</i>	111
<i>Εικόνα 95: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)</i>	111
<i>Εικόνα 96: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)</i>	112

<i>Εικόνα 97: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ3)</i>	112
<i>Εικόνα 98: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4).....</i>	114
<i>Εικόνα 99: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4).....</i>	114
<i>Εικόνα 100: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4).....</i>	115
<i>Εικόνα 101: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4).....</i>	115
<i>Εικόνα 102: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4).....</i>	116
<i>Εικόνα 103: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ4)</i>	116
<i>Εικόνα 104: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)</i>	119
<i>Εικόνα 105: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)</i>	119
<i>Εικόνα 106: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)</i>	120
<i>Εικόνα 107: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)</i>	120
<i>Εικόνα 108: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)</i>	121
<i>Εικόνα 109: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 1,05 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A5).....</i>	121
<i>Εικόνα 110: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)</i>	123

<i>Εικόνα 111: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)</i>	123
<i>Εικόνα 112: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)</i>	124
<i>Εικόνα 113: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)</i>	124
<i>Εικόνα 114: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)</i>	125
<i>Εικόνα 115: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,75 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A6).....</i>	125
<i>Εικόνα 116: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)</i>	127
<i>Εικόνα 117: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)</i>	127
<i>Εικόνα 118: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)</i>	128
<i>Εικόνα 119: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)</i>	128
<i>Εικόνα 120: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)</i>	129
<i>Εικόνα 121: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A7).....</i>	129
<i>Εικόνα 122: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)</i>	131
<i>Εικόνα 123: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)</i>	131
<i>Εικόνα 124: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)</i>	132
<i>Εικόνα 125: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)</i>	132

<i>Εικόνα 126: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)</i>	133
<i>Εικόνα 127: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,30 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A8).....</i>	133
<i>Εικόνα 128: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την χρονική στιγμή $t = 10sec$, όπου αποτελεί τη λήξη της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι η ευστάθεια του συστήματος διατηρείται (Σενάριο B5)</i>	136
<i>Εικόνα 129: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 sec$ (Σενάριο B5)</i>	136
<i>Εικόνα 130: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 sec$ (Σενάριο B5)</i>	137
<i>Εικόνα 131: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 sec$ (Σενάριο B5)</i>	137
<i>Εικόνα 132: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 sec$ (Σενάριο B5)</i>	138
<i>Εικόνα 133: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)</i>	140
<i>Εικόνα 134: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)</i>	140
<i>Εικόνα 135: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)</i>	141
<i>Εικόνα 136: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)</i>	141
<i>Εικόνα 137: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)</i>	142
<i>Εικόνα 138: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 1,05 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B6).....</i>	142
<i>Εικόνα 139: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)</i>	144

<i>Εικόνα 140: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)</i>	144
<i>Εικόνα 141: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)</i>	145
<i>Εικόνα 142: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)</i>	145
<i>Εικόνα 143: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)</i>	146
<i>Εικόνα 144: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B7)</i>	146
<i>Εικόνα 145: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)</i>	148
<i>Εικόνα 146: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)</i>	148
<i>Εικόνα 147: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)</i>	149
<i>Εικόνα 148: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)</i>	149
<i>Εικόνα 149: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)</i>	150
<i>Εικόνα 150: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B8)</i>	150
<i>Εικόνα 151: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)</i>	153
<i>Εικόνα 152: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)</i>	153
<i>Εικόνα 153: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)</i>	154
<i>Εικόνα 154: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)</i>	154

<i>Εικόνα 155: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5).....</i>	155
<i>Εικόνα 156: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,50 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ5)</i>	155
<i>Εικόνα 157: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6).....</i>	157
<i>Εικόνα 158: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6).....</i>	157
<i>Εικόνα 159: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6).....</i>	158
<i>Εικόνα 160: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6).....</i>	158
<i>Εικόνα 161: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6).....</i>	159
<i>Εικόνα 162: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ6)</i>	159
<i>Εικόνα 163: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7).....</i>	161
<i>Εικόνα 164: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7).....</i>	161
<i>Εικόνα 165: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7).....</i>	162
<i>Εικόνα 166: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7).....</i>	162
<i>Εικόνα 167: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7).....</i>	163
<i>Εικόνα 168: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ7)</i>	163

<i>Εικόνα 169: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8).....</i>	165
<i>Εικόνα 170: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8).....</i>	165
<i>Εικόνα 171: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8).....</i>	166
<i>Εικόνα 172: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8).....</i>	166
<i>Εικόνα 173: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8).....</i>	167
<i>Εικόνα 174: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ8)</i>	167

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Ταξινόμηση ζυγών ανάλυσης ροής φορτίου.....	16
Πίνακας 2: Εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για τη διάρκεια ζωής, των διάφορων πηγών ενέργειας.....	31
Πίνακας 3: Σύγκριση κόστους, χρόνου απόσβεσης και χρόνου κατασκευής για ηλιακά, αιολικά και γεωθερμικά πάρκα.....	34
Πίνακας 4: Συμπλήρωση πεδίων για μοντελοποίηση ανεμογεννητριών DFIG (Τύπου 3) στο PowerWorld Simulator.....	62
Πίνακας 5: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A1.....	65
Πίνακας 6: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A2.....	69
Πίνακας 7: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A3.....	73
Πίνακας 8: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A4.....	77
Πίνακας 9: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια A1-A4.....	81
Πίνακας 10: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο B1.....	83
Πίνακας 11: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο B2.....	87
Πίνακας 12: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο B3.....	91
Πίνακας 13: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο B4.....	95
Πίνακας 14: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια B1-B4.....	99
Πίνακας 15: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο Γ1.....	101

Πίνακας 33: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ8.....	164
Πίνακας 34: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια Γ5-Γ8.....	168
Πίνακας 35: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης των στερεών και μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j pu, πάνω στους επιλεγμένους ζυγούς του συστήματος, για τα τρία σενάρια προς μελέτη.....	168
Πίνακας 36: Σύγκριση ζυγών για δεδομένο σενάριο.....	173
Πίνακας 37: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 1.....	174
Πίνακας 38: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 12.....	175
Πίνακας 39: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 16.....	176
Πίνακας 40: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 20.....	178
Πίνακας 41: Σύγκριση σεναρίων για δεδομένο ζυγό.....	179

Κατάλογος γραφημάτων

<i>Γράφημα 1: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο A.....</i>	170
<i>Γράφημα 2: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο B.....</i>	171
<i>Γράφημα 3: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο Γ.....</i>	172
<i>Γράφημα 4: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό 1.....</i>	174
<i>Γράφημα 5: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό 12.....</i>	175
<i>Γράφημα 6: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό 16.....</i>	177
<i>Γράφημα 7: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό 20.....</i>	178

Συντομογραφίες

ΑΠΕ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Μ.Τ. Μέση Τάση

ΣΗΕ Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Υ.Τ. Υψηλή Τάση

Χ.Τ. Χαμηλή Τάση

CCT Critical Clearance Time

DFIG Doubly Fed Induction Generator

DLG Double Line to Ground

HAWT Horizontal Axis Wind Turbine

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

LL Line to Line

PMSG Permanent Magnet Synchronous Generator

SCIG Squirrel Cage Induction Generator

SLG Single Line to Ground

VAWT Vertical Axis Wind Turbine

WRIG Wound Rotor Induction Generator

WRSG Wound Rotor Synchronous Generator

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Βασικό αντικείμενο ενασχόλησης των ηλεκτρολόγων μηχανικών αποτελεί η ανάλυση των ΣΗΕ και των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου 39 ζυγών της IEEE, σε τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα με την ενσωμάτωση και την χωροταξική εξέταση, αιολικών πάρκων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PowerWorld Simulator.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξέταση τριών σεναρίων στο σύστημα 39 ζυγών της IEEE. Βασική συνιστώσα αποτελεί ο προσδιορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης και οι καμπύλες ευστάθειας. Αρχικά, η παραγωγή ενέργειας γίνεται με χρήση συμβατικών γεννητριών στο δίκτυο. Έπειτα, η παραγωγή ενέργειας στους δύο ζυγούς αντικαθίσταται από ανεμογεννήτριες, ίδιας ισχύος. Τέλος, στο δίκτυο του πρώτου σεναρίου η παραγωγή ενέργειας τριών διαφορετικών ζυγών, από συμβατικές γεννήτριες αντικαθίσταται από ανεμογεννήτριες.

1.1.1 Συνεισφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το βιβλιογραφικό και τις προσομοιώσεις. Προκειμένου να καλυφθεί το δεύτερο μέρος, υλοποιήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Μελετήθηκε το σύστημα 39 ζυγών της IEEE
2. Εξετάσθηκαν τρία σενάρια πάνω σε αυτό
3. Μελετήθηκαν οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των τριφασικών και μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων πάνω στους ίδιους ζυγούς
4. Εξετάσθηκαν οι καμπύλες ευστάθειας του συστήματος
5. Μετά από συγκρίσεις, προέκυψαν συμπεράσματα για τα παραπάνω σενάρια

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζεται η δομή τους και οι συνιστώσες που τα απαρτίζουν. Επίσης, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στο Ελληνικό Εθνικό ΣΗΕ.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι ανάλυσης ροής φορτίου στα ΣΗΕ. Έπειτα, γίνεται επεξήγηση των διαφορετικών τύπων βραχυκυκλωμάτων που εμφανίζονται και μαθηματική ανάλυση αυτών

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στην ανάγκη για χρήση των ΑΠΕ και εξετάζονται οι προοπτικές της αιολικής ενέργειας. Παράλληλα, αναλύονται τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων ΑΠΕ και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Επίσης, γίνονται συγκρίσεις ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους των ανεμογεννητριών που συναντώνται και τέλος εξετάζονται τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, με τις προοπτικές, τις θεμελιώσεις και τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνονται οι προσομοιώσεις πάνω στο σύστημα 39 ζυγών της ΙΕΕΕ. Εξετάζονται τρία σενάρια και πραγματοποιούνται τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα στους ίδιους ζυγούς. Αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο προσδιορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων και οι καμπύλες ευστάθειας, ενώ δεν παραλείπονται οι συγκρίσεις με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σύμφωνα με όλα τα παραπάνω.

Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Το 1882 ο Τόμας Έντισον εγκαινίασε τον πρώτο σταθμό κεντρικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το φορτίο προς κάλυψη ήταν 400 λαμπτήρες με κατανάλωση 83 W έκαστος. Εκείνο το διάστημα, τέθηκε σε λειτουργία ο σταθμός Holborn Viaduct, που ήταν ο πρώτος που θα εξυπηρετούσε τους καταναλωτές και όχι εξειδικευμένα φορτία. Το σύστημα αυτό, χρησιμοποιούσε μία γεννήτρια των 60 kW, κινούμενη από μία ατμομηχανή και η τάση παραγωγής ήταν 100 V συνεχούς ρεύματος. Ο πρώτος μεγάλος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος στη Μεγάλη Βρετανία, ήταν στο Deptford. Η ηλεκτρική ισχύς παραγόταν από μηχανές των 10000 ίππων και μεταφερόταν στους καταναλωτές του Λονδίνου στα 10 kV. (B.M. Weedy, 2012).

Κατά τη διάρκεια εκείνης της περιόδου, η διαμάχη μεταξύ των υποστηρικτών του συνεχούς και του εναλλασσόμενου ρεύματος κορυφώθηκε. Η εφεύρεση του μετασχηματιστή ήταν η αιτία που οδήγησε στην επικράτηση των υποστηρικτών του εναλλασσόμενου ρεύματος. Παράλληλα, η ανάπτυξη συστημάτων πολλών φάσεων από τον Nikola Tesla έκανε τα ηλεκτρικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος πιο ελκυστικά (B.M. Weedy, 2012). Οι καινοτόμες εφευρέσεις του τελευταίου, όσον αφορά τις γεννήτριες, τους μετασχηματιστές και τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος αποτέλεσαν τη βάση για τα σημερινά πολύπλοκα συστήματα ισχύος (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2008).

Το πρώτο μονοφασικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ήταν στην πόλη του Oregon, όπου η ισχύς παραγόταν μέσω δύο υδροστροβίλων και μεταφερόταν στο Portland στα 4 kV. Πολλές ήταν οι εταιρίες που απασχολήθηκαν με τη μεταφορά της ενέργειας στις περιοχές της χώρας. Αρχικά, κάθε εταιρεία λειτουργούσε σε διαφορετική συχνότητα, με τιμές που κυμαίνονταν από 25 έως 133 Hz. Ωστόσο, όταν η ανάγκη για διασύνδεση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κρίθηκε επιτακτική, υιοθετήθηκε ως στάνταρ η τιμή των 60 Hz για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και τον

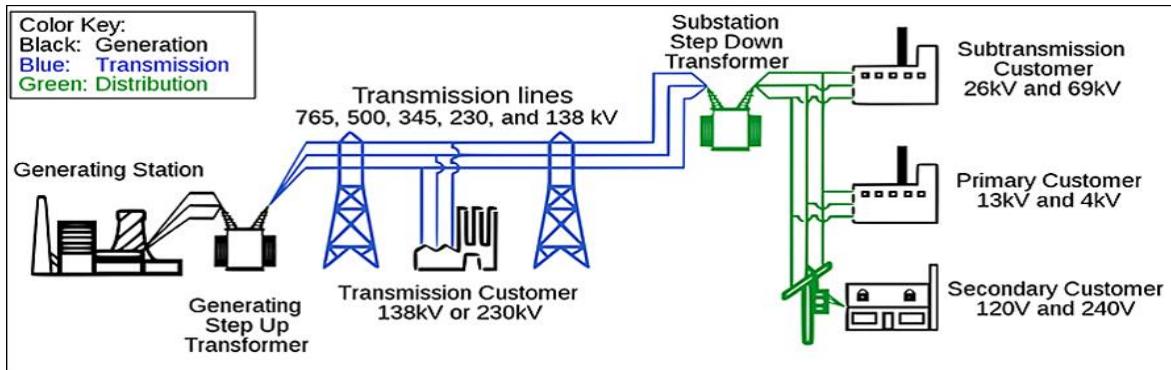
Καναδά. Στην Ευρώπη, η αντίστοιχη συχνότητα που επιλέχθηκε ήταν τα 50 Hz (Hadi-Saadat, 1999).

Η χρήση ολοένα και υψηλότερων επιπέδων τάσης, προέκυψε από την ανάγκη για μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Στα πρώτα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος οι τιμές που μπορούσε να λάβει η τάση ήταν 12, 44 και 60 kV και το 1966 έφτασε μέχρι τα 765 kV. Το πρόβλημα που άρχισε να γίνεται εμφανές ήταν ότι ο μεγάλος αριθμός επιπέδων τάσης προκαλούσε σημαντικά προβλήματα στην τυποποίηση του βιομηχανικού εξοπλισμού. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκαν οι τιμές 115, 132, 138, 150, 161, 220, 230 και 275 kV ως στάνταρ για την υψηλή τάση και οι τιμές 345, 400, 500, και 765 kV για την υπερύψηλή τάση (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2008).

2.2 Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ος *Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)* ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού των μέσων και γενικότερα όλων των υποδομών που απαιτούνται για την ασφαλή και ποιοτική εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών διεσπαρμένων γεωγραφικά σε ηλεκτρική ενέργεια σε τοπικό, σε εθνικό ή ακόμα και σε διεθνές επίπεδο (Μαλατέστας, 2019: 3). Το κάθε σύστημα δομείται με βάση τις ιδιαιτερότητες του, ωστόσο αποτελεί κοινή πρακτική η διάκριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα εξής τμήματα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1:

- Κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις
- Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης (Μαλατέστας, 2019)



Εικόνα 1: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Πηγή: http://solarcellcentral.com/smart_grid_page.html

Αρχικά, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είχαν τοπικό χαρακτήρα. Ήταν εγκατεστημένοι σε μικρή απόσταση από τους καταναλωτές που εξυπηρετούσαν και τα δίκτυα μεταφοράς λειτουργούσαν υπό χαμηλή τάση και συνεχές ρεύμα, γεγονός που τα καθιστούσε περιορισμένα. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή, η τιμή της τάσης που έχουν οι ακροδέκτες των γεννητριών είναι 20 - 30 kV και ανυψώνεται στα επίπεδα τάσεων του συστήματος μεταφοράς (Πολυζάκης, 2017).

Οι γραμμές μεταφοράς υπέρ-υψηλής τάσης και οι υποσταθμοί ανύψωσης και υποβιβασμού, είναι στοιχεία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η τελευταία, μεταφέρεται μέσω εναέριων γραμμών ή υπόγειων καλωδίων που διαρρέονται από τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Στην Ελλάδα, τα επίπεδα τάσης που χρησιμοποιούνται έχουν τιμές 150 kV και 400 kV στα, ενώ στην Ευρώπη γίνεται χρήση και των 220 kV. Σε αστικά και βιομηχανικά κέντρα κατανάλωσης, οι τάσεις υποβιβάζονται σε υποσταθμούς που καταλήγουν οι γραμμές μεταφοράς, με τυπικές τιμές 15-20 kV και σε σπανιότερες περιπτώσεις τα 6 kV (Πολυζάκης 2017).

Με τον όρο <<διανομή>> της ηλεκτρικής ενέργειας, εννοούμε το σύνολο της υλικοτεχνικής υποδομής (υποσταθμοί, δίκτυα διανομής, διατάξεις διακοπής, ελέγχου και προστασίας) μέσω της οποίας η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στα κέντρα κατανάλωσης μέσης και χαμηλής τάσης (Μαλατέστας, 2019: 6). Οι τάσεις τροφοδοσίας του συστήματος διανομής διακρίνονται σε δύο επίπεδα, τη μέση τάση (M.T.) και τη χαμηλή τάση (X.T.). Στο ελληνικό δίκτυο η μέση τάση είναι 20 kV και η χαμηλή 400 V. Στο δίκτυο διανομής εντάσσονται και

οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ, αλλάζει η τάση και ο τρόπος τροφοδοσίας τους (Πολυζάκης, 2017). Για το ελληνικό σύστημα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες καταναλωτών:

- Καταναλωτές υψηλής τάσης (ΥΤ) στα 150 kV, για ισχύ ≥ 10 MW
- Καταναλωτές μέσης τάσης (ΜΤ) στα 22 kV, για ισχύ ≥ 200 kW
- Καταναλωτές χαμηλής τάσης (ΧΤ) στα 230 / 400 V, για ισχύ ≤ 200 kW (Μαλατέστας, 2019)

2.3 Βασικές συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Τα σημερινά ηλεκτρικά δίκτυα εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα. Ωστόσο, κάθε ένα από αυτά αποτελείται από τις εξής βασικές συνιστώσες:

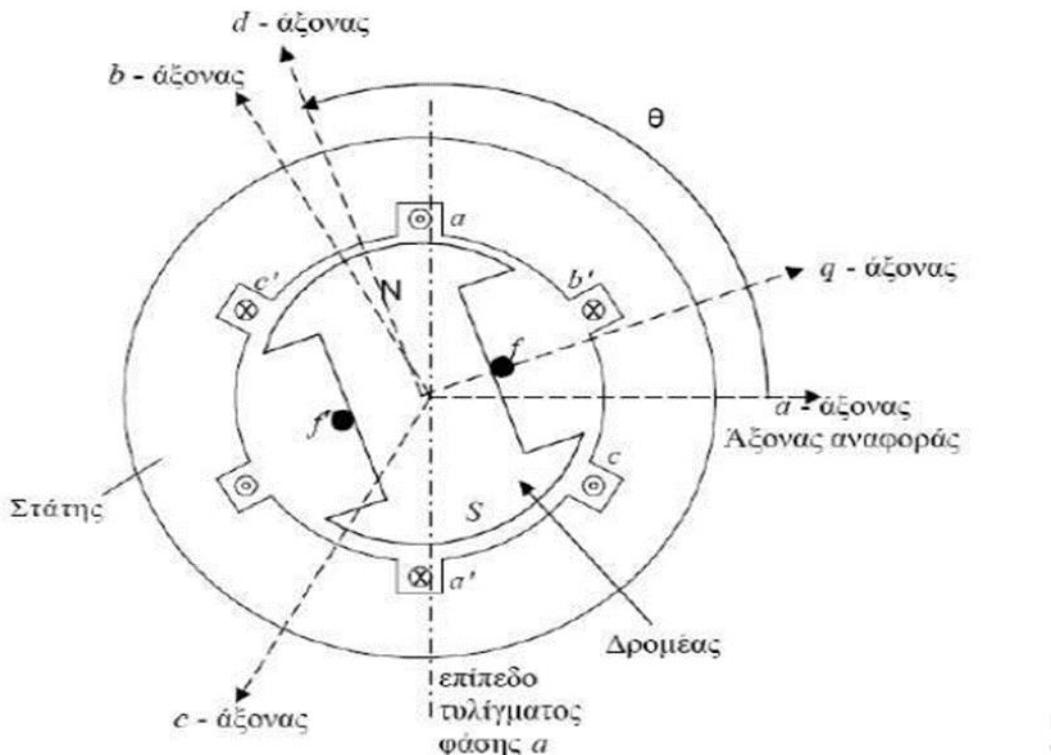
- Σύγχρονη γεννήτρια
- Τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος
- Γραμμή μεταφοράς (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2019)

Οι σύγχρονες γεννήτριες (*synchronous generators*) είναι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια (Πολυζάκης, 2017: 727). Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες είναι εκείνες που παράγουν ως επί το πλείστον την ηλεκτρική ισχύ. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η σύγχρονη γεννήτρια στρέφεται υπό σταθερή ταχύτητα και συχνότητα, γεγονός που οφείλει και την ονομασία της (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2019). Τα δύο βασικά μέρη της σύγχρονης γεννήτριας φαίνονται στην Εικόνα 2 και είναι τα εξής:

- Ο στάτης, που είναι το ακίνητο μέρος
- Ο δρομέας που είναι το περιστρεφόμενο

Ο στάτης, είναι μία κυλινδρική σιδηρομαγνητική κατασκευή που έχει αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια. Στις αύλακες αυτές, τοποθετούνται τα τρία τυλίγματα που διαθέτει σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μία για κάθε φάση) και απέχουν μεταξύ τους 120° . Ο δρομέας είναι μία συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή που περιστρέφεται μέσα στο στάτη. Στο δρομέα περιέχεται ένα τύλιγμα, που ονομάζεται τύλιγμα πεδίου ή διέγερσης και τροφοδοτείται με πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Στόχος της τελευταίας είναι

η δημιουργία ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2008). Διακρίνονται δύο τύποι δρομέα, ο κυλινδρικός και ο δρομέας με έκτυπους πόλους. Ο πρώτος, χρησιμοποιείται σε γεννήτριες υψηλής ταχύτητας ενώ ο δεύτερος είναι πιο αποδοτικός για γεννήτριες μικρής ταχύτητας (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2019).



Εικόνα 2: Τομή σύγχρονης γεννήτριας

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας»

(Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2008: 126)

Οι μετασχηματιστές ισχύος (ή απλά μετασχηματιστές) είναι απαραίτητοι για την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν:

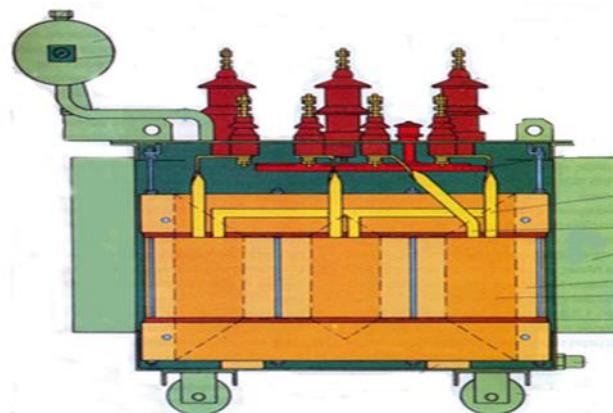
- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (20 / 150 kV ή 20 / 400 kV)
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς (150 / 400 kV)

- Μετασχηματιστές διανομής, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα τάσης που ζητούνται από τους καταναλωτές (15 kV / 380 V) (Γιαννακόπουλος-Βοβός, 2008)

Οι μετασχηματιστές λειτουργούν μέσω του φαινομένου της επαγωγής. Η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον είναι ανάλογη της τάσης του πρωτεύοντος, κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα. Αυτό σημαίνει ότι, η κατάλληλη επιλογή του αριθμού σπειρών των τυλιγμάτων μπορεί να οδηγήσει στην ανύψωση ή στον υποβιβασμό της τάσης. Παλαιότερα, η μόνωση των μετασχηματιστών γινόταν με ορυκτό λάδι, ενώ σήμερα προτιμάται η χυτορητίνη παρόλο που έχει αυξημένο κόστος (Πολυζάκης, 2017). Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η τομή ενός μετασχηματιστή λαδιού. Οι δυνατές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων στους τριφασικούς μετασχηματιστές είναι οι εξής:

- Y - Y (Αστέρα - Αστέρα)
- Y - Δ (Αστέρα - Τριγώνου)
- Δ - Y (Τριγώνου - Αστέρα)
- Δ - Δ (Τριγώνου - Τριγώνου)

Συνήθως ο ουδέτερος κόμβος του αστέρα είναι γειωμένος (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2008).



Εικόνα 3: Τομή μετασχηματιστή λαδιού

*Πηγή: Προσαρμογή Εικόνας 3 από το βιβλίο «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος»
(Πολυζάκης, 2017: 724)*

Τα ηλεκτρικά δίκτυα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέσο στο οποίο βρίσκονται, τα εναέρια και τα υπόγεια. Μία εναέρια γραμμή μεταφοράς, συνήθως

αποτελείται από τρεις αγωγούς που περιέχουν τις τρεις φάσεις του συστήματος (Pedro Ponce, 2018). Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς θα πρέπει η τάση στην αρχή και στο τέλος της γραμμής να μην παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση, η συχνότητα να είναι σταθερή και οι απώλειες να είναι ελαχιστοποιημένες (Πολυζάκης, 2017). Γι' αυτό το λόγο, βασικό υλικό κατασκευής των αγωγών είναι το αλουμίνιο με ενισχυμένο χάλυβα, εξαιτίας της χαμηλής αντίστασης που προσφέρει το πρώτο σε συνδυασμό με την αντοχή στην καταπόνηση του δεύτερου (Pedro Ponce, 2018).

Στα υπόγεια δίκτυα οι αγωγοί είναι μονωμένοι μεταξύ τους και προστατεύονται από ένα εξωτερικό περίβλημα. Σε επίπεδα κόστους, οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς τείνουν να είναι ακριβότερες λόγω της δυσκολίας κατασκευής και συντήρησης τους (Pedro Ponce, 2018). Ωστόσο, μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι η ασφάλεια, η καλαισθησία που παρέχουν και η εξοικονόμηση χώρου. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αστικά κέντρα και για μικρές αποστάσεις, ενώ εντοπίζονται σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης τάσης. Για το λόγο αυτό, το δίκτυο διανομής επιδιώκεται να είναι αποκλειστικά υπόγειο (Πολυζάκης, 2017). Για την κατασκευή τους, είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών ακροκιβωτίων που τοποθετούνται σε βάθος 50 – 70 εκατοστών, προκειμένου να αντέχουν στην καταπόνηση τους (Pedro Ponce, 2018).

Τέλος, ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν τα υποβρύχια δίκτυα, όπου χρησιμοποιούνται είτε για την ένωση των νησιών με το εθνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για την διακρατική ένωση των χωρών. Το κόστος κατασκευής και συντήρησης που παρουσιάζουν είναι υψηλό, διότι απαιτούνται ειδικά καλώδια για την λειτουργία τους (Πολυζάκης, 2017).

2.4 Διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την έκταση που καλύπτουν:

- Εθνικά συστήματα, που καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας
- Περιφερειακά συστήματα, που καλύπτουν το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής
- Ιδιωτικά συστήματα, που καλύπτουν τις ανάγκες ενός μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος (Πολυζάκης, 2017)

Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κορυφώθηκε με τη διασύνδεση τους. Το 1906 ήταν η αφετηρία για τις διεθνείς διασυνδέσεις εθνικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος τους, ήταν η αξιοπιστία και η οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου. Βασικός ρόλος των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η ανταλλαγή ισχύος που καλύπτουν το μέγιστο φορτίο ή τυχόν μεταβολές στο δίκτυο. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τους, είναι η καλύτερη αξιοποίηση των πιο αποδοτικών μονάδων παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, προκειμένου να επιτευχθεί η διασύνδεση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να λειτουργούν υπό ίδια συχνότητα και οι μονάδες παραγωγής να είναι πλήρως συγχρονισμένες μεταξύ τους (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2008).

Το Ελληνικό Εθνικό ΣΗΕ παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. Η διασύνδεση του με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω γραμμών μεταφοράς με τα δίκτυα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας, της Ιταλίας και της Τουρκίας (στοιχεία ΑΔΜΗΕ).

Η διασύνδεση Ελλάδας – Αλβανίας επιτυγχάνεται μέσω:

- Μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV και ικανότητα μεταφοράς 1400 MVA
- Μίας γραμμής μεταφοράς 150 kV και ικανότητα μεταφοράς 138 MVA

Η διασύνδεση Ελλάδας – Βουλγαρίας επιτυγχάνεται μέσω:

- Μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV και ικανότητα μεταφοράς 1400 MVA

Η διασύνδεση Ελλάδας – Βόρειας Μακεδονίας επιτυγχάνεται μέσω:

- Δύο γραμμών μεταφοράς 400 kV και ικανότητα μεταφοράς 1400 MVA

Η διασύνδεση Ελλάδας – Ιταλίας επιτυγχάνεται μέσω:

- Μίας υποβρύχιας γραμμής μεταφοράς συνεχούς ρεύματος 400 kV και ικανότητα μεταφοράς 500 MW

Η διασύνδεση Ελλάδας – Τουρκίας επιτυγχάνεται μέσω:

- Μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV και ικανότητα μεταφοράς 2000 MVA (στοιχεία ΑΔΜΗΕ)



Εικόνα 4: Ελληνικό Εθνικό ΣΗΕ, 2017

Πηγή: <https://www.admie.qr/systima/perigrafi/hartis-grammon>

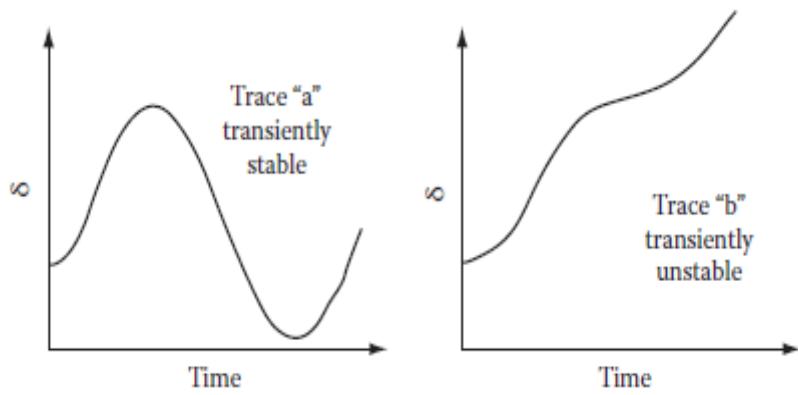
2.5 Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίσθηκε ως πρόβλημα ήδη από τη δεκαετία του 1920, όπου η δομή των τότε δικτύων, ήταν απομακρυσμένοι σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτούσαν φορτία σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτά τα προβλήματα, συχνά εξαιτίας της ανεπαρκούς ροπής ήταν η πρώτη εμφάνιση μεταβατικής αστάθειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. «*Ως μεταβατική ευστάθεια ορίζεται η ικανότητα ενός συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό όταν υποβάλλεται σε παροδικές διαταραχές*» (Leonard L. Grigsby, 2012: 9.1). Στις διαταραχές αυτές εντάσσονται, τα βραχυκυκλώματα, η απώλεια παραγωγής ή η απώλεια στοιχείων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρόλο που υπάρχουν πολλές μορφές αστάθειας σε ένα δίκτυο, η μεταβατική αστάθεια αποτελεί αντικείμενο μελέτης και σχεδιασμού των ΣΗΕ. Πολλά συστήματα είναι επιρρεπή στη μεταβατική αστάθεια και εξαιτίας της σύντομης διάρκειας αυτών των φαινομένων, ο διαχειριστής του δικτύου δεν έχει χρόνο για άμεσες παρεμβάσεις.

Σημαντικό διάγραμμα για την κατανόηση της μεταβατικής ευστάθειας αποτελούν οι καμπύλες Rotor Angle – της γεννήτριας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Αυτές οι καμπύλες δείχνουν αν μία γεννήτρια διατηρεί την ευστάθεια της όταν υποβληθεί σε μία διαταραχή, όπως φαίνεται στην πρώτη περίπτωση ή αν χάνει το συγχρονισμό της όπως φαίνεται στην περίπτωση β. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας καλείται ευσταθές εάν όλες οι σύγχρονες μηχανές είναι σε λειτουργία ευστάθειας με το δίκτυο και μεταξύ τους. Εφόσον μία σύγχρονη μηχανή τείνει να χάσει την ευστάθεια της, η γωνιακή ταχύτητα της συνεχίζει να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου (Leonard L. Grigsby, 2012) (M.A. Pai, 1989) (Mania Pavella, 2000).

Μία προσέγγιση που καθορίζει τη μεταβατική ευστάθεια ενός δικτύου, αποτελεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, ο οποίος παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος. Ο τελευταίος, ορίζεται ως ο μέγιστος χρόνος που χρειάζεται από τη σύγχρονη γεννήτρια, ώστε να διατηρήσει ότι οι γεννήτριες του συστήματος θα παραμείνουν σε συγχρονισμό. Αποτελεί δηλαδή, την τελευταία χρονική στιγμή όπου εάν δεν έχει εκκαθαριστεί το σφάλμα που προέκυψε, χάνεται η ευστάθεια του συστήματος. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι απαραίτητος προκειμένου να ρυθμιστεί η διακοπτική ικανότητα και προστασία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Yurika, 2018).



*Εικόνα 5: Διάγραμμα Rotor Angle – t, για γεννήτρια που α) διατηρεί την ευστάθεια της
 β) που χάνει την ευστάθεια της*

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Power System Stability and Control, Third Edition» (Leonard L. Grigsby, 2012: 9-2)

Κεφάλαιο 3 Ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

3.1 Ανάλυση ροής φορτίου

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ανάλυση ροής φορτίου αφορά την εύρεση λύσης που προσδιορίζει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ. Στην πραγματικότητα, η σημασία της ανάλυσης ροής φορτίου έχει να κάνει με τον υπολογισμό των μεταβλητών μόνιμης κατάστασης, δηλαδή εκείνων των μεταβλητών που επιτρέπουν τον υπολογισμό οποιασδήποτε μεταβλητής στο σύστημα. Κάθε ζυγός σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από τις εξής μεταβλητές (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2008):

- P_{Gi} , παραγωγή πραγματικής ισχύος
- Q_{Gi} , παραγωγή άεργου ισχύος
- V_i , μέτρο τάσης του ζυγού
- δ_i , φασική γωνία του ζυγού

Το αρχικό πρόβλημα με την ανάλυση ροής φορτίου αφορά την αναγνώριση των γνωστών και άγνωστων μεταβλητών του συστήματος. Ανάλογα με τον τύπο των μεταβλητών οι ζυγοί του ΣΗΕ διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019):

- Ζυγός αναφοράς (Slack bus): Θεωρείται ως ο ζυγός αναφοράς του συστήματος, επειδή έχει προκαθορισμένο το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία του (ονομάζεται και swing bus) (Albadi Mohammed, 2019). Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει πάντα ένας ζυγός αναφοράς και είναι ζυγός παραγωγής. Για λόγους διευκόλυνσης θεωρείται ότι έχει τάση με μέτρο 1 ρυ και φασική γωνία ίση με 0° (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019)
- Ζυγοί με ελεγχόμενη τάση (Generation bus): Είναι οι ζυγοί που διατηρούν σταθερό το μέτρο της τάσης, ρυθμίζοντας το ρεύμα πεδίου μίας σύγχρονης γεννήτριας (Faruk Dilsiz, 2014).
- Ζυγοί φορτίου (Load bus): Όλοι οι ζυγοί που δεν έχουν γεννήτρια, ονομάζονται ζυγοί φορτίου. Η πραγματική και άεργος ισχύς τους είναι προκαθορισμένες και ίσες με μηδέν (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019)

Σε κάθε κατηγορία ζυγών υπάρχουν οι γνωστές προκαθορισμένες ποσότητες και οι αγνωστες που υπολογίζονται, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Ταξινόμηση ζυγών ανάλυσης ροής φορτίου

Τύπος ζυγού Προκαθορισμένες μεταβλητές Αγνωστες μεταβλητές

<i>Slack bus</i>	$ V , \delta$	P_G, Q_G
<i>PV bus</i>	$ V , P_G$	δ, Q_G
<i>Load bus</i>	P_G, Q_G	$ V , \delta$

Πηγή: Προσαρμογή Πίνακα 1 από το βιβλίο «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας» (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019: 92)

Ο Πίνακας αγωγιμοτήτων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει τις τιμές των αγωγιμοτήτων των γραμμών μεταφοράς και των ζυγών. Είναι τετραγωνικός Πίνακας με διαστάσεις ίσες με το πλήθος των ζυγών του συστήματος. Χαρακτηριστικό του Πίνακα αγωγιμοτήτων αποτελεί η συμμετρία που παρουσιάζει κατά μήκος της κύριας διαγώνιου. Έστω ο παρακάτω Πίνακας αγωγιμοτήτων ενός ΣΗΕ με η ζυγούς (Albadi Mohammed, 2019):

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Για κάθε ένα από τα στοιχεία του Πίνακα ισχύει ότι:

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \quad (2)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (3)$$

Η βασική σχέση για την ανάλυση ροής φορτίου, προκύπτει από τη μέθοδο των κόμβων και είναι η εξής (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019):

$$I_{bus} = Y_{bus} \bullet V_{bus} \quad (4)$$

Όπου:

- I_{bus} : Το διάνυσμα ρευμάτων I_i που εισέρχονται στους ζυγούς, διαστάσεων $n \times 1$
- V_{bus} : Το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών που μετρούνται ως προς το ζυγό αναφοράς, διαστάσεων $n \times 1$, με στοιχεία της μορφής $V_i = |V_i| \angle \delta_i$
- Y_{bus} : Ο Πίνακας αγωγιμότητας των ζυγών, διαστάσεων $n \times n$, με στοιχεία της μορφής $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$

Η εξίσωση του ρεύματος που εισέρχεται στο ζυγό i μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad (5)$$

Η μιγαδική ισχύς που εισέρχεται στο ζυγό i είναι:

$$S_i = V_i \bullet I_i^* = V_i (\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j)^* \quad (6)$$

Επίσης, για τη μιγαδική ισχύς του ζυγού i ισχύει ότι:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \bullet I_i^* \Rightarrow I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (7)$$

Από τις εξισώσεις (5), (6), (7) προκύπτει ότι:

$$P_i - jQ_i = V_i^* (\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j) \quad (8)$$

Κάνοντας χρήση των πολικών συντεταγμένων, προκύπτει η πραγματική και η άεργος ισχύς για κάθε έναν από τους ζυγούς του συστήματος:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (9)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (10)$$

3.1.1 Μέθοδος Gauss – Seidel

Η μέθοδος Gauss – Seidel είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την επίλυση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Αρχικά, επιλέγεται αυθαίρετα ένα διάνυσμα λύσεων. Σε κάθε επανάληψη το διάνυσμα των λύσεων ενημερώνεται, έως ότου οι τιμές αρχίσουν να συγκλίνουν (Albadi Mohammed, 2019). Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019).

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (5) και (7) προκύπτει:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii} V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j \Rightarrow V_i = \frac{1}{y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j \right] \quad (11)$$

για $i = 1, 2, 3 \dots n$

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Gauss – Seidel ο τύπος της εξίσωσης επανάληψης είναι:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij} V_j^{(v)} \right] \quad (12)$$

για $i = 1, 2, 3 \dots n$

3.1.2 Μέθοδος Newton - Raphson

Η μέθοδος Newton – Raphson είναι η πιο διαδεδομένη στην ταυτόχρονη επίλυση μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Βάση της μεθόδου αυτής, αποτελούν τα αναπτύγματα της σειράς Taylor (Hadi Saadat, 1999). Ο απαιτούμενος χρόνος της κάθε επανάληψης για τη μέθοδο Newton – Raphson, είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο της μεθόδου Gauss – Seidel. Ωστόσο, η πρώτη απαιτεί σημαντικά λιγότερες επαναλήψεις για να πετύχει σύγκλιση των τιμών, γεγονός που την καθιστά πιο αποτελεσματική μέθοδο (B.M. Weedy, 2012). Κάνοντας χρήση των αναπτυγμάτων της σειράς Taylor στις σχέσεις (9) και (10), προκύπτει (Olukayode A. Afolabi, 2015):

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

Όπου: ΔP και ΔQ είναι η διαφορά μεταξύ των προκαθορισμένων και υπολογισμένων τιμών. Επίσης ισχύει η σχέση:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (14)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (15)$$

Ο Πίνακας J συμβολίζει τον Ιακωβιανό Πίνακα, με στοιχεία:

$$J1 = \frac{\partial P}{\partial \delta}, J2 = \frac{\partial P}{\partial V}, J3 = \frac{\partial Q}{\partial \delta}, J4 = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (16)$$

Επομένως, η νέα τιμή για την τάση του ζυγού i είναι:

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (17)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (18)$$

3.2 Βραχυκυκλώματα

Βραχυκύκλωμα ενός κυκλώματος ονομάζεται κάθε σφάλμα που παρεμβαίνει στην κανονική ροή του ρεύματος (John J. Grainger, 1994: 380). Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αρκετά βραχυκυκλώματα προκαλούνται από υπερτάσεις του συστήματος που προκύπτουν από την πτώση κεραυνών ή εξαιτίας της κακής μόνωσης του δικτύου. Τα ρεύματα βραχυκυκλώματος συχνά είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ονομαστικά ρεύματα λειτουργίας και ως αποτέλεσμα προκαλούν θερμικές βλάβες στον εξοπλισμό του συστήματος (John J. Grainger, 1994).

Επίσης, οι ζυγοί του ΣΗΕ καταπονούνται εξαιτίας των υψηλών μαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων. Γι' αυτό το λόγο, τα τμήματα του δικτύου που παρουσιάστηκε το βραχυκύκλωμα, θα πρέπει να αφαιρεθούν όσο το δυνατόν γρηγορότερα από τη λειτουργία του συστήματος (J. Duncan Glover, 2010). Τα βραχυκυκλώματα που προκύπτουν στις γραμμές μεταφοράς διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019), (Mubarak, 2015):

- Συμμετρικά βραχυκυκλώματα, περιλαμβάνουν τα τριφασικά βραχυκυκλώματα (3 Phase Symmetric Fault)
- Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα, περιλαμβάνουν τα βραχυκυκλώματα μίας φάσης με τη γη (Single Line to Ground – SLG), τα βραχυκυκλώματα μεταξύ δύο φάσεων (Line

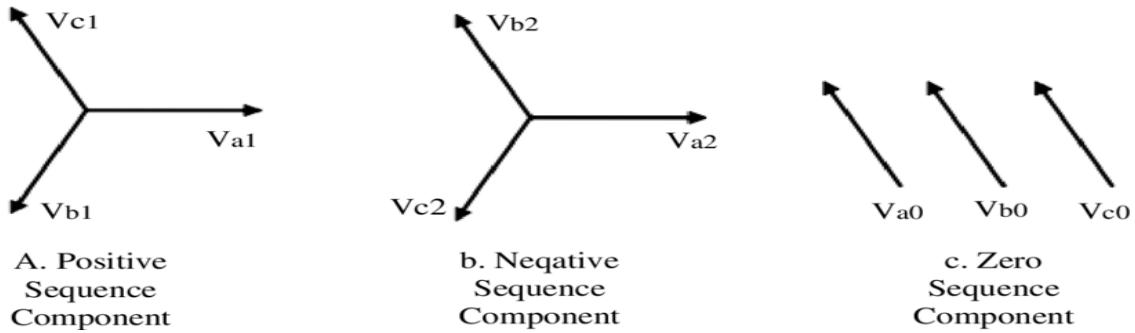
to Line - LL) και τα βραχυκυκλώματα δύο φάσεων με τη γη (Double Line to Ground - DLG)

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης της πρώτης περίπτωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα. Ωστόσο, για τη δεύτερη κατηγορία βραχυκυκλωμάτων, οι υπολογισμοί είναι πιο πολύπλοκοι καθώς το σύστημα δεν είναι συμμετρικό. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται η μέθοδος των συμμετρικών συνιστώσων (Mubarak, 2015).

3.2.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Μία διαδεδομένη τεχνική για την ανάλυση ασύμμετρων συστημάτων πολλών φάσεων, είναι οι συμμετρικές συνιστώσες. Η μέθοδος αυτή, ανακαλύφθηκε από τον Charles L. Fortescue το 1913 (Pedro Ponce, 2018). Οι συμμετρικές συνιστώσες αποτελούν μία τεχνική μοντελοποίησης που επιτρέπει την ανάλυση και το σχεδιασμό τριφασικών συστημάτων. Αποδομώντας ένα πολύπλοκο τριφασικό δίκτυο σε τρία απλούστερα ακολουθιακά δίκτυα αποκαλύπτονται περίπλοκα φαινόμενα, με πιο απλοϊκούς όρους (J. Duncan Glover, 2010). Οποιοδήποτε τριφασικό, ασύμμετρο σύστημα τάσεων και ρευμάτων μπορεί να αντικατασταθεί από τα ακόλουθα τρία συστήματα φάσεων (B.M. Weedy, 2012), (Olle I. Elgerd, 1982):

- Σύστημα θετικής ακολουθίας, που περιέχει τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασικές μετατοπίσεις 120° και 240° και φασική ακολουθία a-b-c (Εικόνα 6A)
- Σύστημα αρνητικής ακολουθίας που περιέχει τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασικές μετατοπίσεις 240° και 120° και φασική ακολουθία a-c-b (Εικόνα 6b)
- Σύστημα μηδενικής ακολουθίας που περιέχει τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και μηδενική φασική μετατόπιση (Εικόνα 6c)



Εικόνα 6: Γραφική αναπαράσταση συμμετρικών συνιστωσών

Πηγή: «Advanced Control Techniques for Enhancing the Power System Stability at OOS Condition» (Ali M. Eltamaly, 2019: 3)

Δεδομένου ότι κάθε μία από τις μη συμμετρικές φάσεις του δικτύου είναι το άθροισμα των συνιστωσών της, οι τάσεις των αρχικών φάσεων μπορούν να εκφραστούν ως εξής (John J. Grainger, 1994):

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (19)$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \quad (20)$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \quad (21)$$

Ο αριθμός των άγνωστων μεταβλητών μπορεί να μειωθεί εάν κάθε συνιστώσα των φάσεων V_b , V_c εκφραστεί ως συνάρτηση των συνιστωσών της τάσης V_a και του φάσορα $a = 1 \angle 120^\circ$. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_b^{(0)} = V_a^{(0)} \quad V_c^{(0)} = V_a^{(0)} \quad (22)$$

$$V_b^{(1)} = a^2 V_a^{(1)} \quad V_c^{(1)} = a V_a^{(1)} \quad (23)$$

$$V_b^{(2)} = a V_a^{(2)} \quad V_c^{(2)} = a^2 V_a^{(2)} \quad (24)$$

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (19), (20), (21) τις (22), (23) και (24) οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (25)$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \quad (26)$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \quad (27)$$

Ή σε μορφή Πίνακα:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τα ρεύματα αντί για τις τάσεις. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα που θα προέκυψαν σε μορφή Πίνακα είναι:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Αντιστρέφοντας τον Πίνακα της σχέσης (29), προκύπτει:

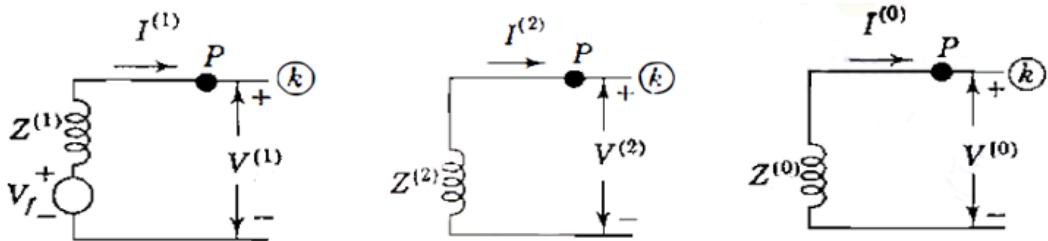
$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (31)$$

Εφόσον οι συμμετρικές συνιστώσες είναι το ζητούμενο και τα αρχικά διανύσματα των τάσεων και των ρευμάτων είναι γνωστά, γίνεται χρήση του αντίστροφου Πίνακα Α, όπως αυτός παρουσιάζεται στη σχέση (31). Οι νέες εξισώσεις για την επίλυση του προβλήματος είναι:

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (33)$$

Ο προσδιορισμός των ρευμάτων βραχυκύλωσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με την χρήση του θεωρήματος Thevenin, το οποίο επιτρέπει την αντικατάσταση του κυκλώματος με μία γεννήτρια και μία σύνθετη αντίσταση σε σειρά (John J. Grainger, 1994). Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας φαίνονται στην Εικόνα 7:

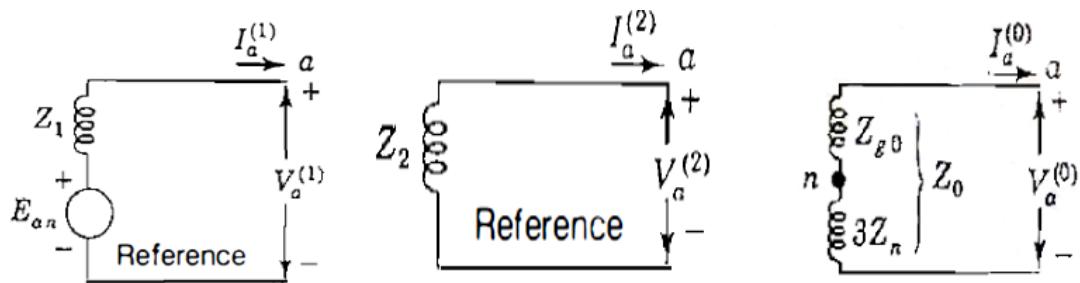


Εικόνα 7: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

Πηγή: Προσαρμογή Εικόνας 7 από το βιβλίο «Power System Analysis» (John J. Grainger, 1994: 473)

Μελετώντας τα ακολουθιακά κυκλώματα μίας σύγχρονης μηχανής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 8, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις (John J. Grainger, 1994), (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019):

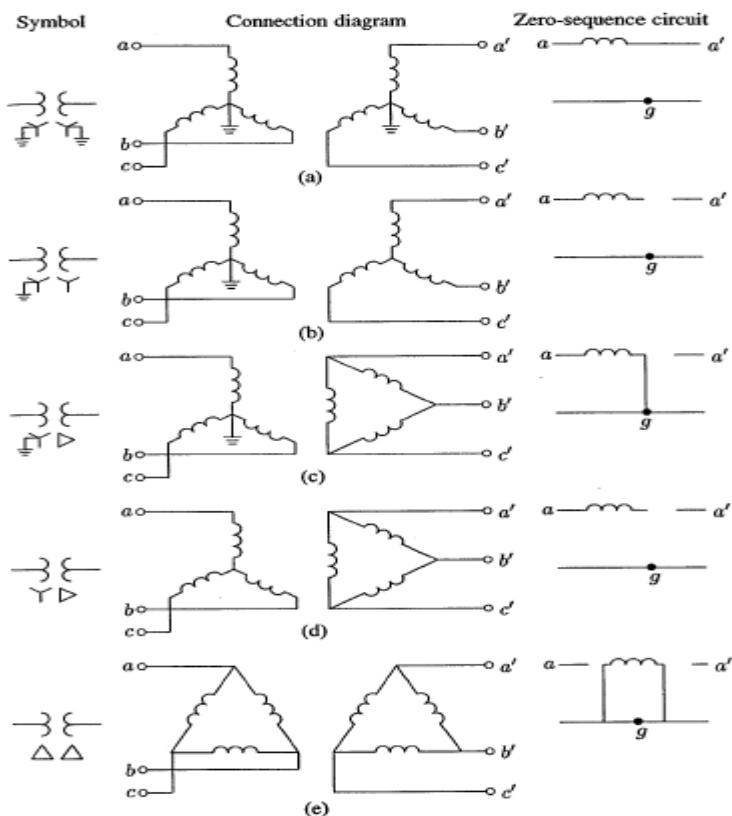
- Το κύκλωμα θετικής ακολουθίας περιλαμβάνει την πηγή τάσης σε σειρά με την αντίστοιχη σύνθετη αντίσταση
- Τα δίκτυα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας δεν περιλαμβάνουν πηγή τάσης, παρά μόνο τις σύνθετες αντιστάσεις των κυκλωμάτων τους
- Ο ζυγός αναφοράς των δικτύων θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ο ουδέτερος κόμβος της γεννήτριας
- Ο ζυγός αναφοράς για το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας είναι η γη στη γεννήτρια



Εικόνα 8: Δίκτυα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας μιας σύγχρονης μηχανής

Πηγή: Προσαρμογή Εικόνας 8 από το βιβλίο «Power System Analysis» (John J. Grainger, 1994: 445)

Ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή (Δ ή Y) και η ύπαρξη γείωσης του ουδέτερου κόμβου, καθορίζουν την τιμή της σύνθετης αντίστασης στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας (Γιαννακόπουλος – Βοβός, 2019). Στην Εικόνα 9, παρουσιάζονται τα δίκτυα μηδενικής ακολουθίας των μετασχηματιστών για διάφορες συνδέσεις.



Εικόνα 9: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδέσεις μετασχηματιστών

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Power System Analysis» (Hadi Saadat, 1999)

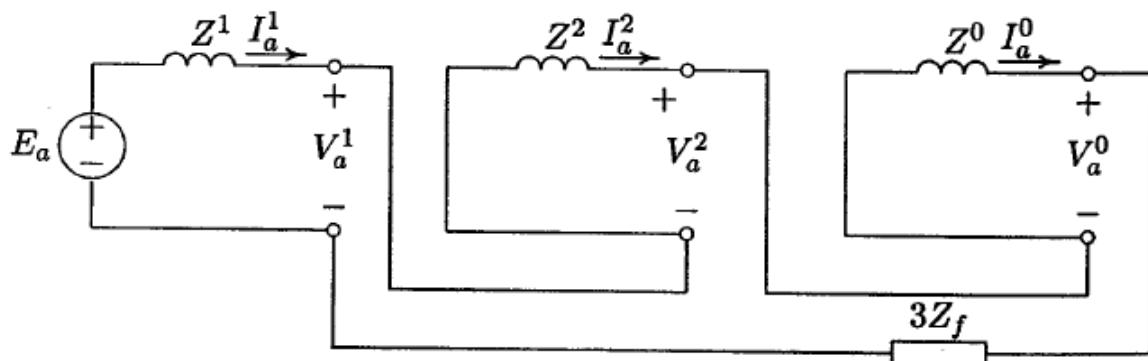
3.2.2 Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα

Σε αυτό τον τύπο βραχυκύκλωμάτων, συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις του συστήματος. Παρόλο που συμβαίνουν σπάνια, είναι τα πιο επίπονα σφάλματα που συναντώνται στο δίκτυο. Για την επίλυση τους χρησιμοποιείται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος – δηλαδή η θετική ακολουθία, με σύνθετη αντίσταση Z_1 – εξαιτίας της συμμετρίας που παρουσιάζεται. Ένα βραχυκύκλωμα, αντιπροσωπεύει μια δομική αλλαγή στο δίκτυο ισοδύναμη με την προσθήκη μίας σύνθετης αντίστασης Z_f , στο σημείο του βραχυκύκλωματος. Όταν η σύνθετη αντίσταση είναι ίση με μηδέν ($Z_f = 0$), τότε το βραχυκύκλωμα καλείται στερεό. Το σύστημα που έχει υποστεί βραχυκύκλωμα μπορεί να λυθεί κάνοντας χρήση του θεωρήματος Thevenin. Έτσι, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_f είναι ίσο με (Hadi Saadat, 1999):

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (34)$$

3.2.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη

Στα μονοφασικά βραχυκύκλωματα σε επαφή με τη γη, χρησιμοποιείται η σύνθετη αντίσταση του κάθε ακολουθιακού κυκλώματος, που προκύπτει από το θεώρημα Thevenin, συνδέοντας τα τρία δίκτυα σε σειρά (Hadi Saadat, 1999). Η μορφή του ακολουθιακού δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 10:



Εικόνα 10: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Power System Analysis: 422» (Hadi Saadat, 1999)

Υποθέτοντας, ότι το μονοφασικό βραχυκύλωμα σε επαφή με τη γη συμβαίνει στη φάση α, μέσω μίας αντίστασης Z_f οι σχέσεις που ισχύουν είναι οι εξής (Hadi Saadat, 1999), (J.C. Das, 2002):

$$I_b = I_c = \theta \quad (35)$$

$$V_a = Z_f I_a \quad (36)$$

Τότε αντικαθιστώντας στη σχέση (33) τη σχέση (35), προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow I_a^{(0)} = I_a^{(1)} = I_a^{(2)} = \frac{1}{3} I_a \Leftrightarrow I_a = 3I_0 \quad (37)$$

Αντίστοιχα, για την τάση της φάσης α, ισχύει η εξίσωση:

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (38)$$

Από τις σχέσεις (36), (37) και (38) προκύπτει:

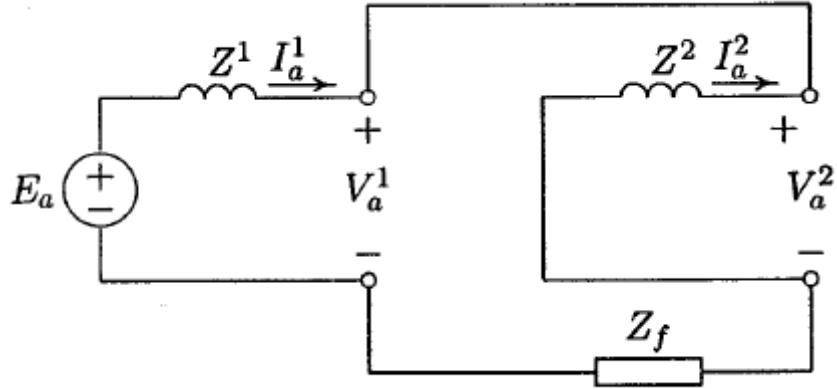
$$3I_0 Z_f = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} = -I_0 Z_0 + (V_a - I_1 Z_1) - I_2 Z_2 \Leftrightarrow I_0 = \frac{V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (40)$$

Για το ρεύμα βραχυκυκλώματος ισχύει ότι:

$$I_a = 3I_0 = \frac{3V_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (41)$$

3.2.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα

Στην Εικόνα 11, παρουσιάζεται ένα διφασικό βραχυκύκλωμα, μεταξύ των φάσεων b και c του συστήματος μέσω μίας αντίστασης Z_f .



Εικόνα 11: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό βραχυκύκλωμα

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο: «Power System Analysis: 425» (Hadi Saadat, 1999)

Οι σχέσεις που ισχύουν είναι (Hadi Saadat, 1999), (J.C. Das, 2002):

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (42)$$

$$I_b + I_c = 0 \quad (43)$$

$$I_a = 0 \quad (44)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (33) τις σχέσεις (43) και (44), προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (45)$$

Από τη σχέση (45), οι εξισώσεις ισχύουν είναι οι εξής:

$$I_a^{(0)} = 0 \quad (46)$$

$$I_a^{(1)} = -I_a^{(2)} \quad (47)$$

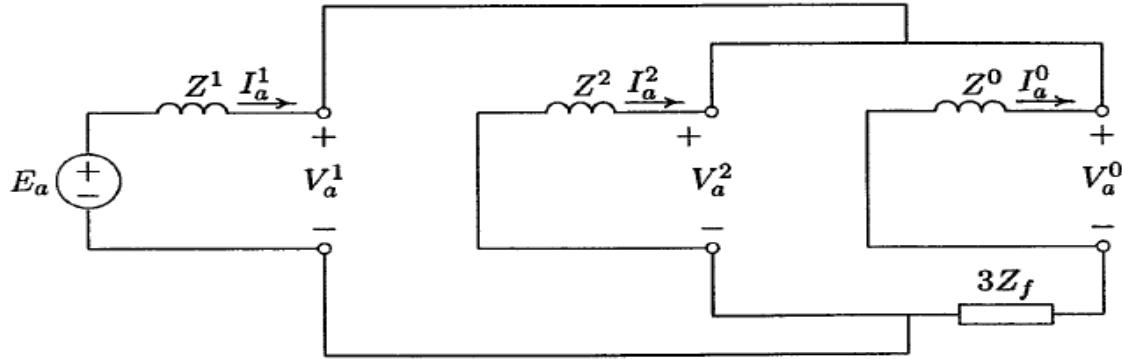
Το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι ίσο με:

$$I_a^{(1)} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (48)$$

$$I_b = -I_c = -j\sqrt{3}I_a^{(1)} = \frac{-j\sqrt{3}E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (49)$$

3.2.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη

Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται ένα διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη. Συμμετέχουν οι φάσεις b και c του συστήματος και το βραχυκύκλωμα γίνεται μέσω της αντίστασης Z_f , σε επαφή με τη γη.



Εικόνα 12: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο: «Power System Analysis: 427» (Hadi Saadat, 1999)

Οι σχέσεις που ισχύουν σε διφασικό βραχυκύκλωμα σε επαφή με τη γη είναι (Hadi Saadat, 1999):

$$V_b = V_c = Z_f(I_b + I_c) \quad (50)$$

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} = 0 \quad (51)$$

Για τα ρεύματα των ακολουθιακών δικτύων ισχύει ότι:

$$I_a^{(0)} = -\frac{E_a - Z_1 I_a^{(1)}}{Z_0 + 3Z_f} \quad (52)$$

$$I_a^{(2)} = -\frac{E_a - Z_1 I_a^{(1)}}{Z_2} \quad (53)$$

$$I_a^{(1)} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}} \quad (54)$$

Κεφάλαιο 4 Αιολική Ενέργεια

4.1 Ανάγκη για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια, αναλαμβάνει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στη ζωή των καταναλωτών. Ήδη, αποτελεί απαραίτητο μέσο για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών, για ένα μεγάλο αριθμό νοικοκυριών. Ωστόσο, η αξιοπιστία και η προσιτή τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται να γίνουν ακόμα πιο κρίσιμες για τη ζωή και την ευημερία των ανθρώπων (World Energy Outlook, 2021 – IEA). Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας το 2009, έφτασε περίπου τις 146.000 TWh, ενώ την επόμενη δεκαετία και συγκεκριμένα το έτος 2019 άγγιξε τις 173.000 TWh (Hannah Ritchie, 2020). Το ποσοστό αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης αυξήθηκε κατά 18% σε μόλις 10 χρόνια, γεγονός που αποδεικνύει τις ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις.

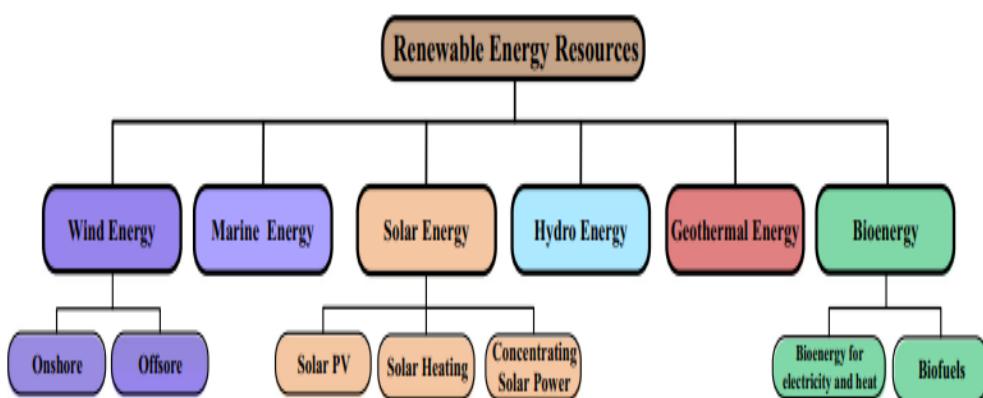
«Οι πηγές ενέργειας που μόλις εξαντληθούν, δεν αναπληρώνονται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καλούνται ως συμβατικές μορφές ενέργειας». Οι πιο ευρέως διαδεδομένες είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο γαιάνθρακας (Muhammad Kamran, 2021). Η κατανάλωση συμβατικών μορφών ενέργειας, προσφέρει μεγάλα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ενισχύει την οικονομική ανάπτυξη των κρατών. Όμως, αποτελεί αναμφίβολα σημαντική πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Επομένως, η χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας, θέτει τα έθνη σε δίλημμα, όσον αφορά τη μείωση της ρύπανσης και την οικονομική ανάπτυξη (Miraj Ahmed Bhuiyan, 2022) (Phebe Asantewaa Owusu, 2016).

Τα ορυκτά καύσιμα δεν αποτελούν πλέον αξιόπιστη πηγή παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών. Αυτό οφείλεται στις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που παρουσιάζονται από την χρήση τους. Παράλληλα, πολλές από τις ουσίες που απελευθερώνονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων εγκυμονούν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Η μεγάλη εξάρτηση από τις συμβατικές μορφές ενέργειας, οι οποίες είναι περιορισμένες ως προς τους πόρους, σταδιακά οδηγεί σε ενεργειακή κρίση και αποτελεί απειλή για την οικονομική κατάσταση μίας χώρας (Phebe Asantewaa Owusu, 2016). Όλα αυτά, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ανάγκη για

χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μονόδρομος (Al-Obaidi, 2018, Umair Shahzad, 2015, M. Dolores Esteban, 2010).

Οι ΑΠΕ δε συμβάλλουν στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα, σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση των παραπάνω, είναι εμφανώς λιγότερες σε σύγκριση με την καύση των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, το κύριο πλεονέκτημα των πρώτων αποτελεί η αέναη διαθεσιμότητα τους. Η παραγωγή ενέργειας γίνεται με καθαρό και βιώσιμο τρόπο δίχως να απελευθερώνουν επιβλαβείς ουσίες για την ανθρώπινη υγεία (Umair Shahzad, 2015, Al-Obaidi, 2018). Το βασικό μειονέκτημα τους αφορά την εισαγωγή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και τη μετέπειτα διάθεση τους στους πολίτες. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα και κατά συνέπεια αρκετά δαπανηρή (Miraj Ahmed Bhuiyan, 2022).

Οι σημαντικότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα, η γεωθερμία, η υδροηλεκτρική και η παλιρροιακή ενέργεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Οι ΑΠΕ είναι αξιόπιστες, άφθονες και δυνητικά φθηνές, εφόσον οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν σε συνδυασμό με τις σημερινές υποδομές ενισχυθούν. Το μεγαλύτερο κόστος τους, αφορά την κατασκευή και τη συντήρηση των υποδομών και όχι την ίδια την παραγωγή ενέργειας. Αντίθετα, η χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας, απαιτεί δαπανηρές έρευνες και επικίνδυνες εξορύξεις, οι οποίες θα αυξάνονται με την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης (Umair Shahzad, 2015, Al-Obaidi, 2018, Zekai Sen, 2008).



Εικόνα 13: Μορφές ΑΠΕ

Πηγή: Εικόνα από τη δημοσίευση με τίτλο «Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology» (Omar Ellabban, 2014)

Πίνακας 2: Εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για τη διάρκεια ζωής, των διάφορων πηγών ενέργειας

Πηγή Ενέργειας	Εκπομπή Διοξειδίου του Άνθρακα(t/GWh)
Λιγνίτης	964
Πετρέλαιο	726
Φυσικό Αέριο	484
Πυρηνικοί Σταθμοί	8
Αιολικά Πάρκα	7
Φωτοβολταϊκά Πάρκα	5
Υδροηλεκτρικά Πάρκα	4

Πηγή: Πίνακας από τη δημοσίευση «Why offshore wind energy?» (M. Dolores Esteban, 2010)

4.2 Προοπτικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ

Οι πρώτης γενιάς ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, περιορίζονται κυρίως σε τοποθεσίες όπου οι πόροι που χρησιμοποιούν είναι διαθέσιμοι. Για την αιολική και την ηλιακή ενέργεια, τη γεωθερμία και την υδροηλεκτρική ενέργεια, οι τοποθεσίες εκμετάλλευσης είναι περιορισμένες σε τόπους, όπου ο βασικός πόρος είναι άφθονος και καλής ποιότητας. Η μελλοντική χρήση τους εξαρτάται από τη βέλτιστη αξιοποίηση τους και την αντιμετώπιση προκλήσεων σχετικά με το περιβάλλον και την κοινωνική αποδοχή (Baratta A., 2011).

Η δεύτερη γενιά των ΑΠΕ είναι εμπορικά ανεπτυγμένη, με κίνητρα που αποσκοπούν στη μείωση της διασφάλισης του κόστους. Υπεράκτια αιολικά πάρκα, προηγμένη βιομάζα και άλλες τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ενέργειας, ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Παρόλο που οι παραπάνω μορφές των ΑΠΕ είναι ενεργειακά ισχυρές, θεωρούνται ως αναπτυσσόμενες και συναντώνται ανταγωνιστικές σε μικρό αριθμό κρατών. Προκειμένου,

οι συνθήκες ανάπτυξης να γίνουν ευνοϊκές και για άλλα έθνη, θα πρέπει να μειωθεί το κόστος κατασκευής και να θεσπιστούν φιλόξενες ενεργειακές πολιτικές (Baratta A., 2011).

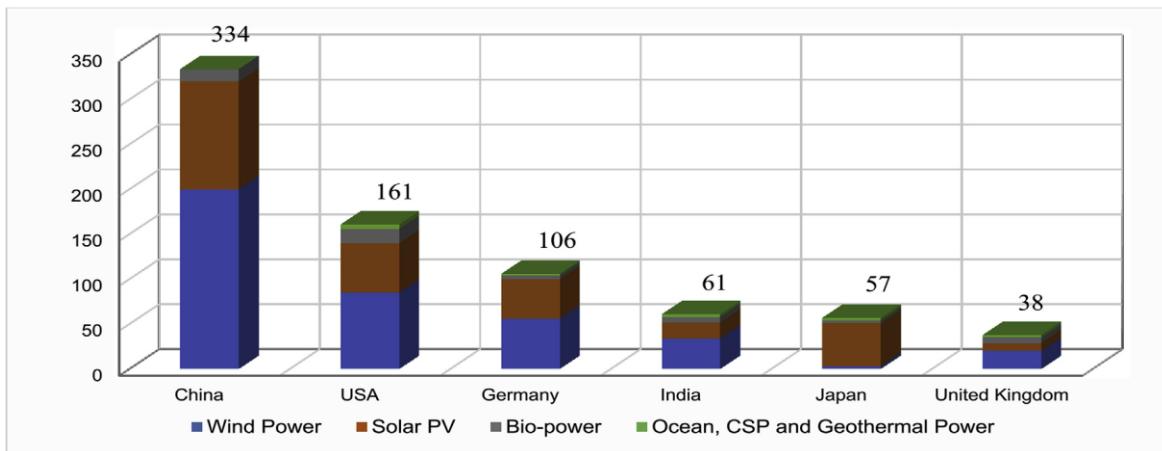
Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας τρίτης γενιάς, όπως είναι η προηγμένη αεριοποίηση της βιομάζας, η γεωθερμία και η παλιρροιακή ενέργεια δεν έχουν εμπορευματοποιηθεί ευρέως. Οι δυνατότητες ανάπτυξης τους είναι αρκετά υψηλές, σε σχέση με άλλες μορφές των ΑΠΕ, ωστόσο απαιτείται επαρκής χρηματοδότηση και δημιουργία ανταγωνιστικών προγραμμάτων, σε διεθνές επίπεδο. Η συγκεκριμένη γενιά των ΑΠΕ αποτελεί ιδιαίτερα υποσχόμενη πηγή παραγωγής ενέργειας για το μέλλον (Baratta A., 2011).

Ήδη από το 2004, πολλές χώρες είχαν αρχίσει να δημιουργούν εγκαταστάσεις προκειμένου να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Την περίοδο εκείνη η Ευρώπη θεωρούταν από τους πρωτοπόρους σε αυτόν τον τομέα, με τη βιομηχανία να απασχολεί 200.000 άτομα και κάθε χρόνο να γίνονται επενδύσεις που έφταναν τα 10 δισεκατομμύρια ευρώ (K. Kaygusuz, 2007). Η παγκόσμια παραγωγή αιολικής ενέργειας έφτασε τα 47 GW, με τα μεγαλύτερα έργα να σημειώνονται στην Ισπανία, την Πορτογαλία, τη Γερμανία, την Ινδία, τις ΗΠΑ και την Ιταλία. Αντίστοιχα, τα μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά πάρκα ήταν συγκεντρωμένα στην Ιαπωνία, τη Γερμανία και τις ΗΠΑ (Baratta A., 2011).

Σήμερα, οι ετήσιες προσθήκες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, αναμένεται να φτάσουν τα 305GW ετησίως μεταξύ του χρονικού διαστήματος 2021 και 2026. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, πλησίασε το 60% σε σύγκριση με την τελευταία πενταετία. Η βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των αιολικών και των φωτοβολταϊκών πάρκων, οι στόχοι για μηδενικούς ρύπους που έχουν τεθεί από τα έθνη και η τάση για συνεχή πολιτική υποστήριξη, εξηγούν την ταχεία αυτή ανάπτυξη. Ωστόσο, παρά την ανοδική πορεία που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ, οι τελευταίες αντιμετωπίζουν μια σειρά προβλημάτων που έχουν να κάνουν με την αδειοδότηση, την κοινωνική αποδοχή την χρηματοδότηση και την ένταξη στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι προκλήσεις αυτές θα πρέπει να αντιμετωπισθούν, ώστε οι ΑΠΕ να αξιοποιηθούν κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο (Renewables 2021 – Analysis and forecast to 2026, IEA).

4.3 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας έναντι των άλλων ΑΠΕ

Το 2012 οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας κάλυψαν περίπου το 22% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης (Phebe Asantewaa Owusu, 2012). Στα τέλη του 2015, το ποσοστό αυτό έφτασε το 23.7% και την επόμενη χρονιά άγγιξε το 29.9%. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτού του ποσοστού οφειλόταν -κατά φθίνουσα σειρά- στην αιολική, την ηλιακή και την υδροηλεκτρική ενέργεια αντίστοιχα. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται η συμβολή των ΑΠΕ μεταξύ των έξι κορυφαίων χωρών του κόσμου, για το έτος 2017. Σήμερα, πολλές είναι οι χώρες που έχουν συνειδητοποιήσει τη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και έχουν αναλάβει πρωτοβουλίες για επενδύσεις σε αυτόν τον τομέα. Γι' αυτό το λόγο, το 2017 οι παγκόσμιες αγορές αύξησαν τις επενδύσεις τους κατά 2% σε σχέση με το προηγούμενο έτος (Subhajit Dawn, 2019).



Εικόνα 14: Κορυφαίες χώρες με δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2017 σε GW

Πηγή: REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*) από τη δημοσίευση με τίτλο «*Wind power: Existing status, achievements and government's initiative towards renewable power dominating India*» (Subhajit Dawn, 2019)

Η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί εξαιτίας της διαθεσιμότητας των πόρων σε συνδυασμό με την ωριμότητα της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί (M. Dolores Esteban, 2010). Επιπλέον, βασικά πλεονεκτήματα της τελευταίας αποτελούν ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των αιολικών πάρκων, η απουσία του κόστους καυσίμου και η μη συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Subhajit Dawn, 2019). Σε ότι έχει να κάνει με το κόστος παραγωγής της ενέργειας, τον χρόνο

κατασκευής και τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης, από τον Πίνακα 3 είναι φανερό ότι η αιολική ενέργεια αποτελεί την ωριμότερη μορφή ενέργειας.

Πίνακας 3: Σύγκριση κόστους, χρόνου απόσβεσης και χρόνου κατασκευής για ηλιακά, αιολικά και γεωθερμικά πάρκα

Ενέργεια	Κόστος (US/kW h)	Χρόνος απόσβεσης (έτη)	Χρόνος κατασκευής (έτη)
----------	------------------	---------------------------	-------------------------

Ηλιακή	0,24\$	1 – 2,7	0,3 – 0,5
Αιολική	0,07\$	0,4 – 1,4	< 1
Γεωθερμικά	0,07\$	5,7	3 – 5

Πηγή: Προσαρμογή Πίνακα 3 από τη δημοσίευση με τίτλο «Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems» (Kewen Li, 2015)

Τα μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας αφορούν το αρχικό επενδυτικό κόστος, το οποίο είναι υψηλό και τις μετέπειτα συντηρήσεις των αιολικών πάρκων. Παράλληλα, η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μη σταθερή παραγωγή ενέργειας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Τέλος, η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων απαιτεί μεγάλες εκτάσεις γης και συχνά έχει αρνητικές συνέπειες στην πανίδα της εκάστοτε περιοχής (Umair Shahzad, 2016).

Ωστόσο, η ταχεία ανάπτυξη των αιολικών πάρκων σε συνδυασμό με τη βιωσιμότητα και την καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστούν την τελευταία την πιο ελκυστική πηγή από τις ΑΠΕ για πολλές χώρες του κόσμου. Ο σύντομος χρόνος κατασκευής και απόσβεσης της αρχικής επένδυσης μπορεί να αιτιολογήσει τις επενδύσεις που γίνονται στα αιολικά πάρκα και με αποτέλεσμα το ποσοστό διείσδυσης στα ΣΗΕ να αυξάνεται συνεχώς. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται, αφού η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας διπλασιάζεται κάθε τρία χρόνια τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα (Kewen Li, 2015, Subhrojit Dawn, 2019).

4.4 Επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων

Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα τόσο στον χώρο, όσο και στον χρόνο. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο εικοσιτετράωρο, αποτελούν συχνά αιτία καταπόνησης των ανεμογεννητριών και υποβάθμισης της ενεργειακής παραγωγής. Εξαιτίας των δύο παραπάνω παραγόντων, κατά την εγκατάσταση αιολικών πάρκων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συλλογή και η επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων των τουλάχιστον 2-3 τελευταίων ετών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται οι κατανομές των Weibull και Rayleigh, οι οποίες αποτελούν μαθηματικά εργαλεία για τον προσδιορισμό της πιθανότητας πιθανότητας του ανέμου (Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004).

4.4.1 Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull έχει να κάνει με την πιθανότητα το μέτρο της έντασης της ταχύτητας του ανέμου να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. Η παραπάνω κατανομή είναι μία γενικευμένη περίπτωση της κατανομής Γάμμα (Γ). Αφορά δύο παραμέτρους και αυτό την καθιστά πιο ευέλικτη σε σχέση με την κατανομή Rayleigh. Η γενική μορφή της πρώτης είναι μία συνάρτηση δύο μεταβλητών για την ταχύτητα του ανέμου και δίνεται από τον τύπο (Πολυζάκης, 2017, Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004):

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{u}{c}\right)^k, \quad k>0, u>0, c>1 \quad (55)$$

όπου:

- η παράμετρος c καλείται παράμετρος κλίμακας, εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και έχει μονάδα μέτρησης m/s. Στον ελλαδικό χώρο λαμβάνει τιμές: $3 \leq c \leq 7$
- η παράμετρος k καλείται παράμετρος μορφής, αφορά τη μέση ταχύτητα και αποτελεί αδιάστατο μέγεθος. Στον ελλαδικό χώρο λαμβάνει τιμές: $1 \leq k \leq 2$

Προκειμένου να υπολογισθεί η πιθανότητα ύπαρξης ανέμου στο διάστημα ταχυτήτων $u - \frac{du}{2}$, $u + \frac{du}{2}$, γίνεται χρήση του γινομένου $f(u)du$, δηλαδή (Μαλατέστας, 2019):

$$P(u - \frac{du}{2} \leq u \leq u + \frac{du}{2}) = f(u)du \quad (56)$$

Η αντίστοιχη αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας της κατανομής Weibull δίνεται από τον τύπο (Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004):

$$F(u) = 1 - \exp(-\frac{u}{c})^k \quad (57)$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου δίνεται από τον τύπο (Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004):

$$u_m = c\Gamma(1 + \frac{1}{k}) \quad (58)$$

4.4.2 Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh αποτελεί ένα υποσύνολο της κατανομής Weibull. Αποτελεί μία συνάρτηση με μία μόνο μεταβλητή, γεγονός που την καθιστά πιο απλή στην χρήση. Για την χρήση της απαιτείται η γνώση της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου και η αναλυτική της μορφή είναι (Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004):

$$f(u) = \frac{\pi u^2}{2u_m^2} \exp[-\frac{\pi}{4}(\frac{u}{u_m})^2] \quad (59)$$

Ισοδύναμα εάν στην κατανομή Weibull η παράμετρος μορφής λάβει την τιμή 2 ($k = 2$) προκύπτει η συνάρτηση πυκνότητας για την κατανομή Rayleigh. Με βάση τη σχέση (55) προκύπτει (E. Kavak Akpinar, 2004):

$$f(u) = (\frac{2u}{c^2}) \exp(-\frac{u}{c})^k \quad (60)$$

Η αντίστοιχη αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας της κατανομής Rayleigh δίνεται από τον τύπο (Μαλατέστας, 2019):

$$F(u) = 1 - \exp[-\frac{\pi}{4}(\frac{u}{u_m})^2] \quad (61)$$

Η κατανομή Rayleigh υπερτερεί της κατανομής Weibull στο γεγονός ότι για την χρήση της, απαιτείται μόνο η γνώση της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, η τελευταία αποδίδει καλύτερα την καμπύλη κατανομής των συχνοτήτων των ταχυτήτων του ανέμου (Μαλατέστας, 2019, E. Kavak Akpinar, 2004).

4.4.3 Ενέργεια και άνεμος

Σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία και ερμηνεία των ανεμολογικών δεδομένων παίζουν οι δύο παρακάτω ταχύτητες (E. Kavak Akpinar, 2004):

- Η πιο πιθανή ταχύτητα του ανέμου ($u_{\text{MostProbable}}$, u_{MP})
- Η ταχύτητα του ανέμου που φέρει τη μέγιστη ενέργεια ($u_{\text{MaxEnergy}}$, u_{ME})

Η πρώτη αφορά την πιο συχνή ταχύτητα ανέμου δεδομένης της κατανομής της πιθανότητας και εκφράζεται από τη σχέση:

$$u_{\text{MP}} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (62)$$

Αντίστοιχα, η δεύτερη ταχύτητα έχει να κάνει με την ταχύτητα του ανέμου που μεταφέρει τη μέγιστη αιολική ενέργεια και δίνεται από τον τύπο (E. Kavak Akpinar, 2004):

$$u_{\text{ME}} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (63)$$

Η ισχύς του ανέμου που ρέει με ταχύτητα u μέσα από μία επιφάνεια A , είναι ίση με (Πολυζάκης, 2017, E. Kavak Akpinar, 2004):

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (64)$$

Όπου ρ : πυκνότητα του αέρα

Η μηνιαία ή ετήσια πυκνότητα αιολικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας για μία περιοχή, με βάση την κατανομή Weibull και έπειτα με βάση την κατανομή Rayleigh ($k = 2$), μπορεί να εκφραστεί ως εξής (E. Kavak Akpinar, 2004):

$$P_{Weibull} = \frac{1}{2} \rho c^3 \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (65)$$

$$P_{Rayleigh} = \frac{3}{\pi} \rho u_m^3 \quad (66)$$

Κεφάλαιο 5 Ανεμογεννήτριες

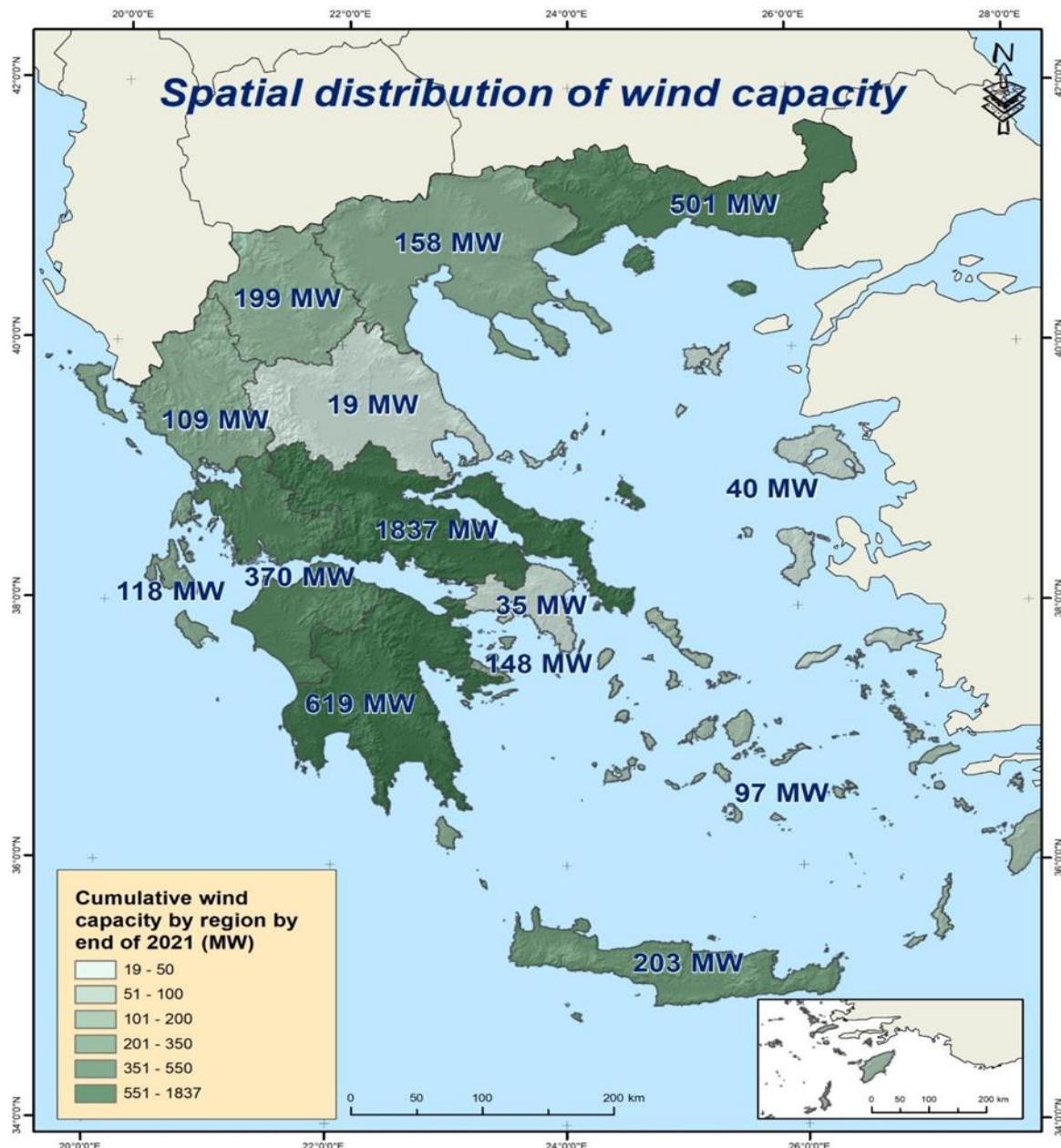
5.1 Ανασκόπηση της αιολικής ενέργειας

«Ος αιολικό πάρκο ορίζεται ένα σύστημα μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου, σε ηλεκτρική ενέργεια». Βασική συνιστώσα των τελευταίων αποτελούν οι ανεμογεννήτριες (Subhajit Dawn, 2019). Μεταξύ του χρονικού διαστήματος 1850 – 1970, περισσότεροι από 6 εκατομμύρια ανεμόμυλοι είχαν εγκατασταθεί στις ΗΠΑ, για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική. Η κύρια χρήση τους ήταν η άντληση του νερού για πότισμα και κάλυψη των αναγκών σε νερό των αγροκτημάτων και των σπιτιών. Ωστόσο, μεγάλη ώθηση για την αιολική ενέργεια, αποτέλεσε το έτος 1973 όπου συνέβη το εμπάργκο πετρελαίου και αρκετές χώρες άρχισαν να επενδύουν στον τομέα αυτόν. Γι' αυτό το λόγο, μία νέα αγορά ενέργειας ξεκίνησε στις ΗΠΑ, τη δεκαετία του 1980. Μέχρι το 1997, η αιολική ενέργεια είχε ήδη αρχίσει να διεισδύει στο ΣΗΕ των ΗΠΑ, με την Καλιφόρνια να παράγει το 2% της συνολικής της ενέργειας, μέσω ανεμογεννητριών (Tushar K. Ghosh, 2011).

Το 2006, η Ευρώπη ήταν ηγέτης όσον αφορά την κατασκευή και ανάπτυξη αιολικών πάρκων. Η εγκατεστημένη παραγωγή ενέργειας ήταν ίση με 1.683 MW το 1994 και μέχρι το 2005 είχε αυξηθεί 24 φορές, φτάνοντας τα 40 GW, ποσό ίσο με το 2,8% της ευρωπαϊκής κατανάλωσης ενέργειας (Advisory Council of the European Wind Energy Technology Platform, 2006). Τη χρονιά του 2009, δύο εκ των τριών κορυφαίων κατασκευαστών ανεμογεννητριών στον κόσμο είχαν ευρωπαϊκή καταγωγή. Η Vestas, με έδρα τη Δανία, η Enercon με έδρα τη Γερμανία και η General Electric με έδρα τις ΗΠΑ, αποτέλεσαν τους μεγαλύτερους προμηθευτές ανεμογεννητριών διεθνώς (AIMU Technical Services Committee, 2012). Το 2021 οι νέες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη, έφτασαν τα 17,4 GW (14 GW σε χερσαία αιολικά πάρκα και 3,4GW σε υπεράκτια) (Wind EUROPE, 2022).

Στην Ελλάδα, το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό κυρίως στην κεντρική Στερεά Ελλάδα, στην Πελοπόννησο, στην ανατολική Μακεδονία και Θράκη και στη δυτική Ελλάδα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, στα τέλη του 2021 έφτασε τα 4.451 MW και η αναλυτική χωρική κατανομή παραγωγής αιολικής ενέργειας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 15 (HWEA, 2021).

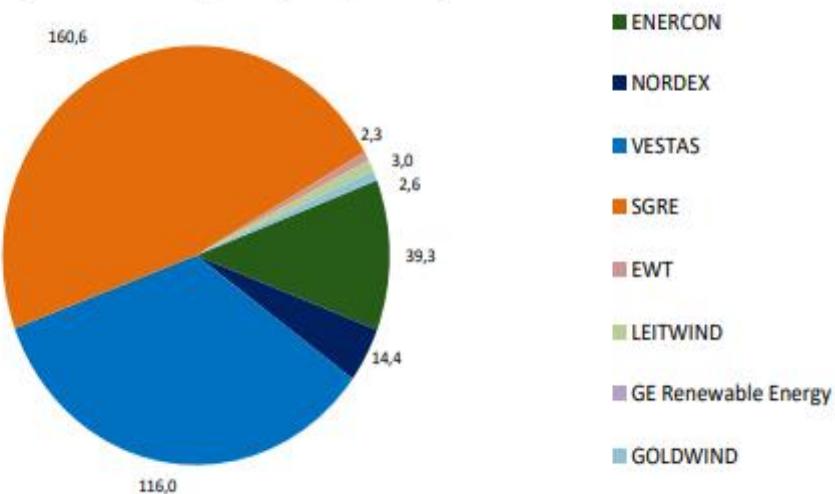
Η νέα ισχύς που προστέθηκε στην ήδη υπάρχουσα το 2021, ήταν ίση με 338,3 MW και η εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή, φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 15: Χωρική κατανομή της παραγωγής αιολικής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο, στα τέλη του 2021

Πηγή: Εικόνα από την έκδοση στατιστικών στοιχείων, HWEA Wind Energy Statistics – 2021

2021 Installed MW per manufacturer (total new capacity 338,3 MW)



Εικόνα 16: Εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή στον ελλαδικό χώρο, για το 2021

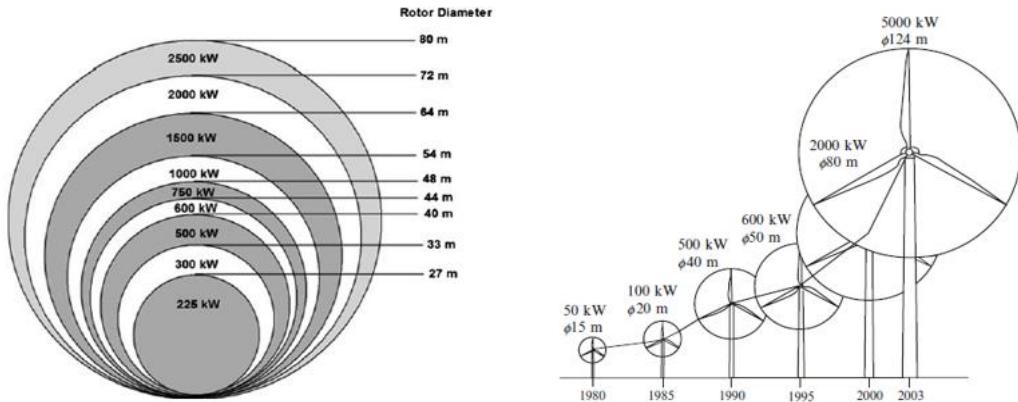
Πηγή: Εικόνα από την έκδοση στατιστικών στοιχείων, HWEA Wind Energy Statistics – 2021

5.2 Βασικά στοιχεία ανεμογεννητριών

Η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα, που αλληλεπιδρά με πολλούς κλάδους της επιστήμης και της μηχανικής. Παρόλο που η αύξηση των ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια είναι τεράστια σε διεθνές επίπεδο, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις. Επειδή οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας και έχουν οικονομικά πλεονεκτήματα, το τυπικό μέγεθος των τελευταίων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (Magdi S. Mahmoud, 2012). Στην Εικόνα 17, παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στο μέγεθος των ανεμογεννητριών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω σε αυτό το πλαίσιο και σε ότι έχει να κάνει με την ηλεκτρική ισχύ εξόδου, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε (N.S.Patil, 2013):

- Μικρού μεγέθους, έως 2 kW για χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήση σε απομακρυσμένες εφαρμογές
- Μεσσαίου μεγέθους, 2 έως 100 kW για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικίες

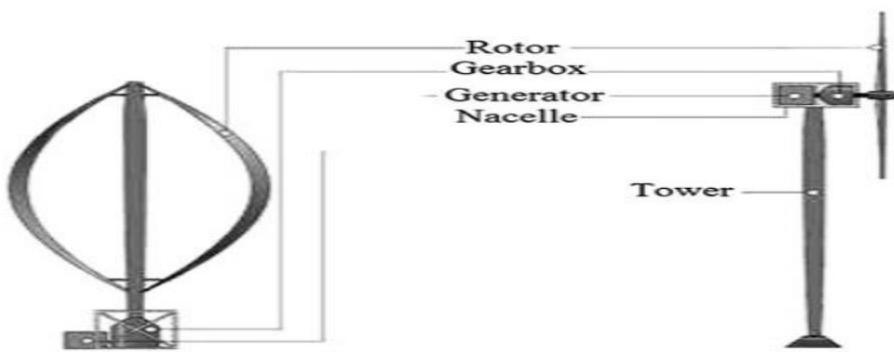
- Γιγαντιαίου μεγέθους, άνω των 100 kW, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κεντρικά δίκτυα



Εικόνα 17: Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο της ανεμογεννήτριας και στην παραγωγή ισχύος

Πηγή: Προσαρμογή Εικόνας 17 από το βιβλίο «Energy Resources and Systems, Volume 2: Renewable Sources» (Tushar K. Ghosh, 2011: 26, 27)

Η βασική διάκριση στις ανεμογεννήτριες γίνεται ανάλογα με τον άξονα περιστροφής, σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου (Horizontal-Axis Wind Turbines – HAWT) και κατακόρυφου άξονα (Vertical-Axis Wind Turbines – VAWT) (Ahmed Farouk AbdelGawad, 2016). Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας σε μικρή κλίμακα, ενώ οι πρώτες είναι υπεύθυνες για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η περιγραφή τους εξαρτάται από τον άξονα περιστροφής τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18 (Magdi S. Mahmoud, 2012).



Εικόνα 18: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα

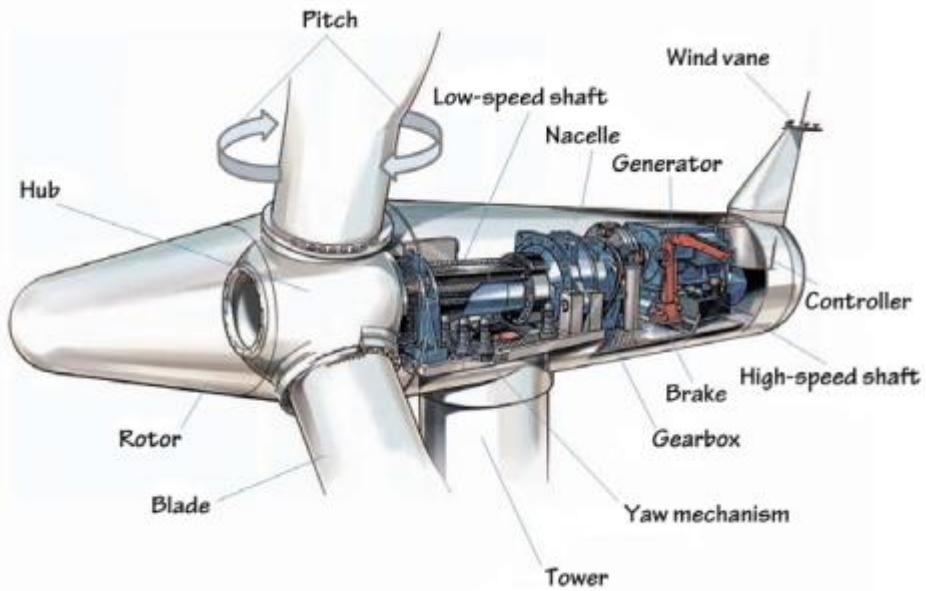
Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Applied Control Systems Design» (Magdi S. Mahmoud, 2012: 16)

5.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)

Όπως υποδηλώνει και το όνομα τους, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι τοποθετημένες οριζόντια, παράλληλα με το έδαφος (Magdi S. Mahmoud, 2012). Τα κύρια μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι είναι ο πύργος, ο ρότορας, το σύστημα μετάδοσης, η γεννήτρια, ο μηχανισμός περιστροφής και το σύστημα ελέγχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 (Πολυζάκης, 2017). Ωστόσο, ο πύργος, η νασέλα και ο ρότορας αποτελούν τα βασικά στοιχεία που είναι ορατά από το έδαφος. Η νασέλα στεγάζει τη γεννήτρια, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον άξονα υψηλής ταχύτητας, ο οποίος με τη σειρά του κινείται από το κιβώτιο ταχυτήτων. Το τελευταίο αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας, ο οποίος συνδέεται με το ρότορα που περιλαμβάνει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Τα πτερύγια δέχονται την κινητική ενέργεια του ανέμου και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική, μέσω της ανεμογεννήτριας (Tushar K. Ghosh, 2011), (Magdi S. Mahmoud, 2012), (Ahmed Farouk AbdelGawad, 2016).

Οι λεπίδες των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, περιστρέφονται σε κατακόρυφο επίπεδο. Κατά την περιστροφή, οι λεπίδες δημιουργούν μία διαφορά πίεσης μπροστά και πίσω τους, η οποία αποτελεί την αιτία της κίνησης τους. Η κατεύθυνση αυτού του τύπου ανεμογεννητριών πρέπει να είναι προς τη σωστή κατεύθυνση, ώστε να είναι αποδοτικές. Βασικό πλεονέκτημα των HAWT αποτελεί η θέση των λεπίδων, η οποία καθιστά την ανεμογεννήτρια στοιβαρή και σταθερή. Επίσης, η ικανότητα προσαρμογής των λεπίδων μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις ζημιές κατά τη διάρκεια μίας καταιγίδας. Επιπλέον, η χρήση υψηλών πύργων επιτρέπει την αξιοποίηση ισχυρότερων ανέμων με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας (Tushar K. Ghosh, 2011) (Magdi S. Mahmoud, 2012). Τέλος, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα εμφανίζουν υψηλή αποδοτικότητα και επιτρέπουν την απομακρυσμένη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων τους (Asma Tounsi, 2018).

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν να κάνουν με το μέγεθος τους και το κόστος της επένδυσης. Αρχικά, παρατηρείται μεγάλη δυσκολία κατά τη μεταφορά τους, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους που τις διακρίνει. Επίσης, το κόστος της εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό και απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης. Συνέπεια αυτού, αποτελεί η καταστροφή της καλαισθησίας αυτών των περιοχών. Τέλος, το κόστος συντήρησης είναι ιδιαίτερα αυξημένο σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. (Tushar K. Ghosh, 2011), (Magdi S. Mahmoud, 2012) (Asma Tounsi, 2018).



Εικόνα 19: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής

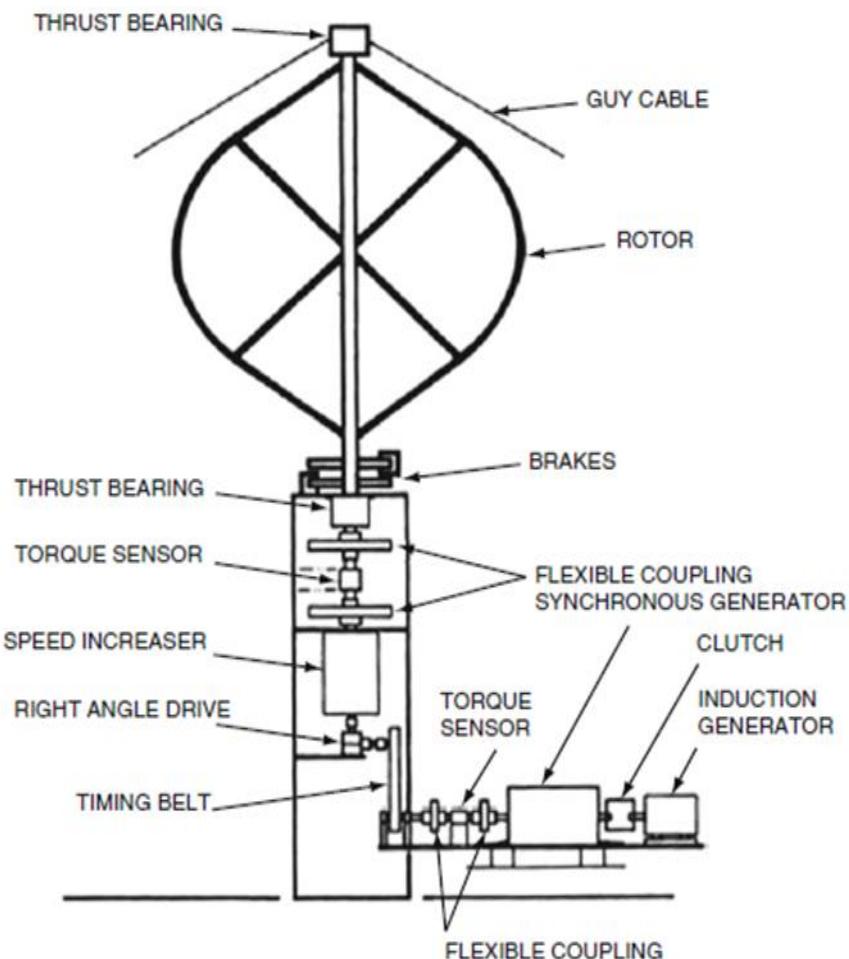
Πηγή: Εικόνα από τη δημοσίευση με τίτλο «*Careers in Wind Energy*» (James Hamilton, 2010)

5.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT)

Τα πτερύγια των VAWT περιστρέφονται στο οριζόντιο επίπεδο και ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφα τοποθετημένος. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου βρίσκονται μόνιμα σε ευθυγράμμιση με τον άνεμο και δεν χρειάζεται να προσαρμόζονται σε αλλαγή της κατεύθυνσης του. Αυτό σημαίνει ότι για τη λειτουργία τους δεν απαιτείται τόσο περίπλοκος μηχανισμός. Η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος και επομένως δεν χρειάζεται πύργος στήριξης για το στρόβιλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 (Tushar K. Ghosh, 2011), (Magdi S. Mahmoud, 2012). Επιπλέον, οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες μπορούν να αξιοποιήσουν ακόμα και τους πιο θυελλώδεις ανέμους (Ahmed Farouk AbdelGawad, 2016).

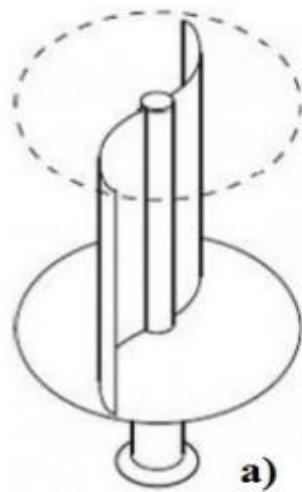
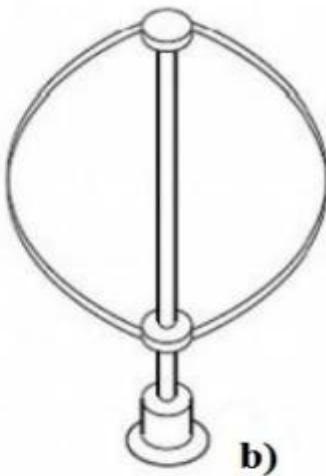
Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι αρκετά σπάνιες και επί του παρόντος, η πιο εμπορική παραγωγή τους είναι ο στρόβιλος Darrieus ενώ στη δεύτερη θέση βρίσκεται ο στρόβιλος Savonius. Στην πρώτη περίπτωση, ο σχεδιασμός των πτερυγίων έχει αυγοειδές σχήμα και απαιτείται μία εξωτερική πηγή ενέργειας προκειμένου ξεκινήσει η περιστροφή, με αποτέλεσμα η ροπή εκκίνησης να είναι πολύ χαμηλή. Οι νέοι στρόβιλοι Darrieus,

χρησιμοποιούν εξωτερικές δομές, αντί για καλώδια συγκράτησης, για να ενισχύσουν τη σταθερότητα της δομής τους. Ο στρόβιλος Savonius αποτελείται από δύο ημι-κύλινδρους τοποθετημένους σε έναν κατακόρυφο άξονα, ο οποίος έχει το σχήμα S σε κάτωψη. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι σχετικά αργή, αλλά αποδίδει υψηλή ροπή. Παρόλο που οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι φθηνές και αξιόπιστες, η απόδοση τους είναι χαμηλή (Tushar K. Ghosh, 2011) (Magdi S. Mahmoud, 2012) (Ahmed Farouk AbdelGawad, 2016). Στην Εικόνα 21, παρουσιάζονται οι δύο τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα.



Εικόνα 20: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα περιστροφής

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «*Energy Resources and Systems, Volume 2: Renewable Resources*» (Tushar K. Ghosh, 2011)

Savonius**Darrieus-rotor**

Εικόνα 21: a)Στρόβιλος Savonius b)Στρόβιλος Darrieus

Πηγή: Προσαρμογή Εικόνας 21 από τη δημοσίευση με τίτλο «Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use» (Francesco Castellani, 2019)

Πλεονέκτημα των VAWT αποτελεί η εύκολη συντήρηση τους, εξαιτίας του μικρού μεγέθους και της θέσης τους κοντά στο έδαφος. Επίσης, οι λεπίδες τους είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην απαιτείται σύστημα εκτροπής. Επιπλέον, οι τουρμπίνες αυτές είναι κατάλληλες για κορυφογραμμές και λόφους, αφού οι ταχύτητες του ανέμου είναι μεγαλύτερες κοντά στο έδαφος. Έτσι, σε αυτές τις τοποθεσίες οι VAWT παράγουν μεγαλύτερη ισχύ από τις HAWT που τοποθετούνται ψηλότερα. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν χρειάζονται πύργο στήριξης και κατά συνέπεια δεν απαιτούν τόσο μεγάλες εκτάσεις γης. Τέλος, η εγκατάσταση τους είναι εύκολη και δεν απαιτούν μεγάλο κόστος συντήρησης (Tushar K. Ghosh, 2011), (Magdi S. Mahmoud, 2012) (Asma Tounsi, 2018).

Μειονέκτημα των VAWT, είναι η απαίτηση επίπεδης επιφάνειας για την εγκατάσταση τους, διαφορετικά το κόστος αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι παράγουν ενέργεια μόνο στο 50% της απόδοσης των HAWT. Εξαιτίας της χαμηλής αποδοτικότητας τους, δεν χρησιμοποιούνται για εμπορικές χρήσεις. Αντίθετα, εντοπίζονται σε έργα χαμηλότερης ισχύος και σε κατοικίες. Τέλος, συχνά με την χρήση ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα εντοπίζονται υψηλοί κραδασμοί και ηχορύπανση.

5.3 Τύποι ανεμογεννητριών

Η λειτουργία των ανεμογεννητριών βασίζεται σε δύο διαδικασίες. Η πρώτη αφορά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική, μέσω του ρότορα και των λεπίδων της ανεμογεννήτριας, ενώ η δεύτερη έχει να κάνει με τη μετάδοση της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο (E.H. Camm, 2009). Προκειμένου οι τελευταίες να ενταχθούν στο ΣΗΕ, θα πρέπει να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις (Pedro Ponce, 2018):

- 'Ιση ακολουθία, σε μία τριφασική μηχανή η ακολουθία καθορίζεται από την εσωτερική διαμόρφωση των περιελίξεων και την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής. Γι' αυτό είναι σημαντικό να καθιερωθεί η σύμβαση της ίδιας ακολουθίας ανάμεσα στη γεννήτρια και στο δίκτυο
- 'Ιση τάση, η διαφορά δυναμικού μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν για να αποφευχθούν σφάλματα κατά την ενσωμάτωση στο δίκτυο
- 'Ιση μετατόπιση φάσης, το μέτρο αλλά και η γωνία μετατόπισης της τάσης θα πρέπει να έχουν στιγμιαία ίση τιμή

Ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας, τα ηλεκτρονικά ισχύος, τη δυνατότητα ελέγχου ισχύος και ταχύτητας, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες.

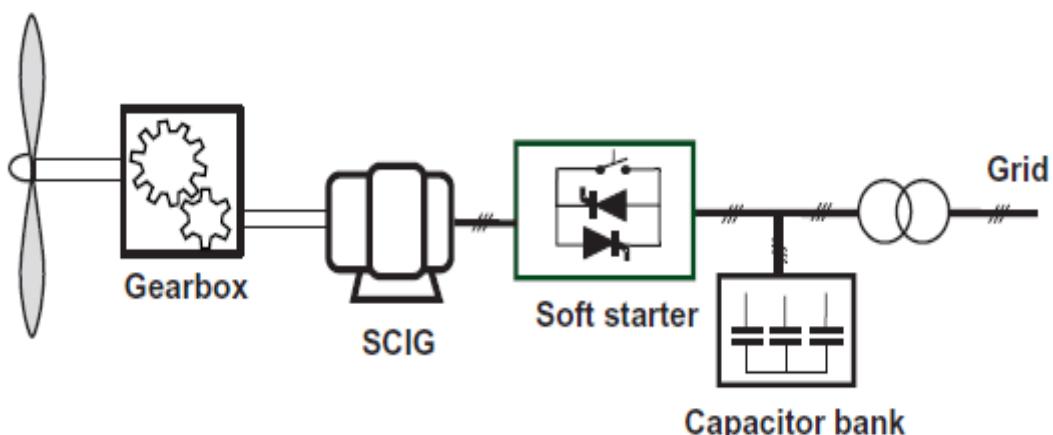
5.3.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, Τύπου 1(Fixed – Speed Wind Turbines, Type 1)

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας χρησιμοποιούν ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μια γεννήτρια τύπου SCIG (Squirrel Cage Induction Generator) για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Η ιδέα αυτή εφαρμόστηκε πρώτη φορά από Δανούς κατασκευαστές τις δεκαετίες του 1980 – 1990. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 22, η γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή. Το σύστημα των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας περιλαμβάνει ένα soft – starter, για την πιο ομαλή ενσωμάτωση της ανεμογεννήτριας στο ηλεκτρικό δίκτυο και μία συστοιχία πυκνωτών για αντιστάθμιση της αέργου ισχύος. Ο σχεδιασμός της είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνει

μέγιστη απόδοση σε μία συγκεκριμένη ταχύτητα του ανέμου (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009), (Gonzalo Bustos, 2012).

Δεδομένου ότι η γεννήτρια SCIG, λειτουργεί σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, ανεξαρτήτως του ανέμου διατηρεί σταθερή την ταχύτητα λειτουργίας της. Η ιδέα αυτή, είναι δημοφιλής εξαιτίας της χαμηλής τιμής, της απλότητας της κατασκευής και της στιβαρότητας της δομής. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξαιτίας της διατήρησης της σταθερής ταχύτητας, η ανεμογεννήτρια μετατρέπει τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου σε μηχανικές διακυμάνσεις και έπειτα σε μεταβολές ηλεκτρικής ισχύος εξόδου. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται υψηλή μηχανική καταπόνηση στην ανεμογεννήτρια (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Στα μειονεκτήματα χρήσης των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας, εντάσσονται ο περιορισμένος έλεγχος της ποιότητας της ισχύος και η απώλεια ελέγχου για την κατανάλωση αέργου ισχύος. Επίσης, η απουσία ελέγχου της ταχύτητας προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για τις τελευταίες (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).



Εικόνα 22: Δομή ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Wind Energy Engineering, A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines» (Trevor M. Letcher, 2017: 155)

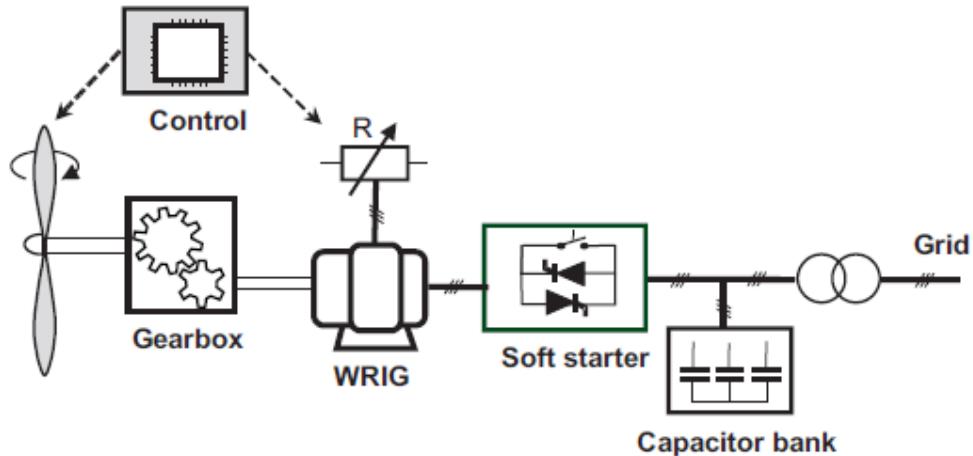
5.3.2 Ανεμογεννήτριες με περιορισμένη μεταβλητή ταχύτητα, Τύπου 2 (Limited

Variable – Speed Wind Turbines, Type 2)

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας προωθήθηκε αρχικά από την κατασκευαστική εταιρεία Vestas από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 έως το 2006 και ύστερα χρησιμοποιήθηκε από την SUZLON με έδρα την Ινδία. Σε αυτού του τύπου τις ανεμογεννήτριες, ο στάτορας μίας γεννήτριας τύπου WRIG (Wound Rotor Induction Generator) είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ οι περιελίξεις του ρότορα είναι συνδεδεμένες σε σειρά με μία μεταβλητή πρόσθετη αντίσταση ρότορα, η οποία ελέγχεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23 (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Αλλάζοντας την αντίσταση του ρότορα, μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας και αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, ελέγχοντας την ισχύ εξόδου από τη γεννήτρια WRIG. Το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης, καθορίζει το εύρος της μεταβλητής ταχύτητας από 0 – 10%. Ωστόσο, ένα μέρος της ενέργειας που εξάγεται από τη μεταβλητή αντίσταση αποβάλλεται ως απώλεια θερμότητας. Το σύστημα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιεί ένα soft – starter για να μειώσει το ρεύμα εκκίνησης και μία συστοιχία πυκνωτών για αντιστάθμιση της αέργου ισχύος για τη μαγνήτιση της γεννήτριας. Τέλος, η χρήση ανεμογεννητριών περιορισμένης μεταβλητής ταχύτητας, επιτρέπει τον έλεγχο της μεταβλητής αντίστασης και της γωνίας των λεπίδων (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Σημαντικό πλεονέκτημα για τις ανεμογεννήτριες περιορισμένης μεταβλητής ταχύτητας, αποτελεί το εύρος στροφών λειτουργίας, σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει τη μείωση των διακυμάνσεων στα μηχανικά φορτία και την ισχύ. Βασικό μειονέκτημα, αποτελεί το περιορισμένο εύρος ταχύτητας, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της πρόσθετης αντίστασης. Παράλληλα, ένα μέρος της ισχύος, καταναλώνεται στην τελευταία. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν αυξημένη αεροδυναμική απόδοση και αποτελούν το αρχικό βήμα για την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας που κυριαρχούν στην αγορά σήμερα (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).



Εικόνα 23: Δομή ανεμογεννήτριας περιορισμένης μεταβλητής ταχύτητας

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «*Wind Energy Engineering, A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*» (Trevor M. Letcher, 2017: 156)

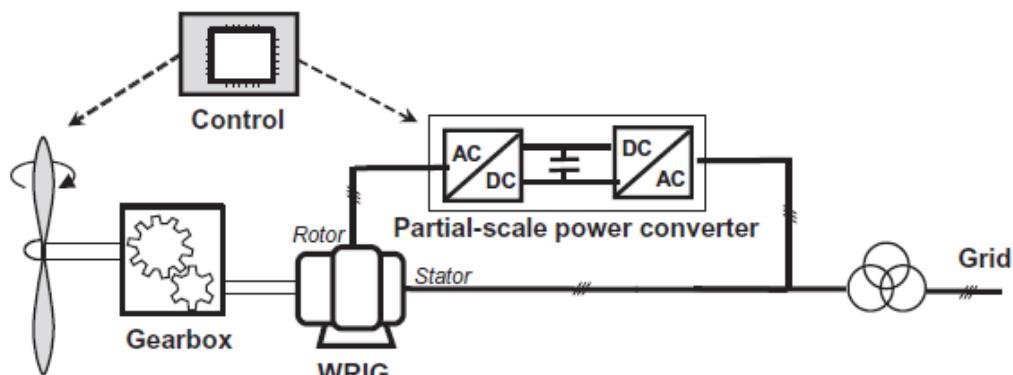
5.3.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος, Τύπου 3 (Variable – Speed Wind Turbines With Partial – Scale Power Converter, Type 3)

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος, είναι γνωστές ως Doubly Fed Induction Generator (DFIG) και αποτελούν εξέλιξη των ανεμογεννητριών που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3.2. Αυτές οι ανεμογεννήτριες υποστηρίζουν ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας, με αποτέλεσμα να είναι η δημοφιλέστερη επιλογή στην αγορά (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Σε ότι έχει να κάνει με τον τρόπο λειτουργίας τους, ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ όπως αναφέρθηκε ο ρότορας μέσω ενός μετατροπέα ισχύος μερικής κλίμακας (περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας) στο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του τελευταίου καθορίζουν το εύρος στροφών (συνήθως 630% της ονομαστικής ταχύτητας). Επίσης, εξαιτίας του μετατροπέα καθίσταται δυνατή η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, καθώς μεταβάλλεται η ηλεκτρική συχνότητα του ρότορα. Επιπλέον, είναι δυνατή η αντιστάθμιση αέργου ισχύος με αποτέλεσμα την ομαλή διασύνδεση στο δίκτυο, χωρίς την χρήση soft – starter και συσκευών χωρητικής αντιστάθμισης. Εκτός από την ισχύ που παραδίδεται στο δίκτυο από το στάτη της γεννήτριας, παρέχεται ισχύς μέσω του μετατροπέα όταν η γεννήτρια κινείται

πιο γρήγορα από τη σύγχρονη ταχύτητα. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η γεννήτρια κινείται πιο αργά από τη σύγχρονη ταχύτητα η ισχύς ρέει μέσω των δύο μετατροπέων και από το ρότορα στο στάτη (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009), (Kaushik Das, 2016).

Το κόστος κατασκευής αυτών των ανεμογεννητριών είναι υψηλότερο σε σχέση με τους δύο τύπους που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, η δυνατότητα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε ένα εύρος ταχυτήτων επιτρέπει, εξαιτίας της χρήσης του μετατροπέα, τον έλεγχο της σαν μονάδα στο σύστημα ισχύος. Στα πλεονεκτήματα χρήσης αυτού του τύπου ανεμογεννητριών, είναι οι μειωμένες απώλειες του συστήματος, επειδή ο μετατροπέας που χρησιμοποιείται είναι και αυτός μικρότερος. Βασικό μειονέκτημα, αποτελεί η ανάγκη για τακτική συντήρηση και το υψηλό κόστος αυτής. Επίσης, η προσθήκη επιπλέον προστασίας στο μετατροπέα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες ισχύος στην περίπτωση βλάβης στο δίκτυο (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).



Εικόνα 24: Δομή ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «Wind Energy Engineering, A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines» (Trevor M. Letcher, 2017: 157)

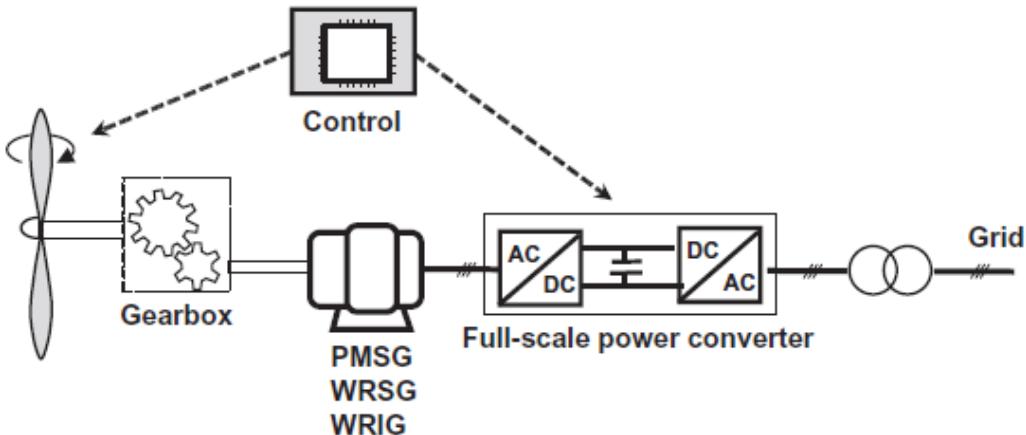
5.3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με πλήρης κλίμακα μετατροπέα ισχύος,

Tύπου 4 (Variable – Speed Wind Turbines With Full-Scale Power Converter, Type 4)

Σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννητριών, οι γεννήτριες συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός πλήρης κλίμακας μετατροπέα ισχύος, ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο της γεννήτριας σε εύρος έως και 100%. Επιπλέον, εγγυάται την ομαλότητα κατά τη σύνδεση στο ΣΗΕ και την αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Κοινό χαρακτηριστικό με τις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος, είναι ο έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και ο έλεγχος βήματος για τον περιορισμό της ταχύτητας του ρότορα. Ο τύπος της γεννήτριας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποικίλλει και μπορεί να είναι είτε WRSG (Wound Rotor Synchronous Generator) ή WRIG, είτε PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Σε πολλές ανεμογεννήτριες απουσιάζει το κιβώτιο ταχυτήτων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25, όπου είναι σχεδιασμένο με διακεκομμένες γραμμές. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μία πολυπολική γεννήτρια direct – drive. Η διαφορά των γεννητριών με και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων είναι στην ταχύτητα του ρότορα της τελευταίας. Στις γεννήτριες direct – drive η ταχύτητα περιστροφής είναι χαμηλή, επειδή ο ρότορας της γεννήτριας είναι συνδεδεμένος στην πλήμνη. Η χαμηλή ταχύτητα αποτελεί το λόγο που απαιτείται η παραγωγή μεγαλύτερης ροπής και κατά συνέπεια με περισσότερους πόλους (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).

Συγκριτικά με τις προηγηθείσες ανεμογεννήτριες, τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου έχουν να κάνουν με την καλύτερη απόδοση, το πιο απλό κιβώτιο ταχυτήτων – που μπορεί να παραληφθεί και αυτό συνεπάγεται μειωμένες απώλειες, χαμηλότερο κόστος και αύξηση της αξιοπιστίας εξαιτίας της εξάλειψης μηχανικών εξαρτημάτων – τον έλεγχο της ισχύος και της ταχύτητας και μία λιγότερο περίπλοκη αντιμετώπιση στα σφάλματα του συστήματος. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών, έχει να κάνει με το αυξημένο κόστος, εξαιτίας του μετατροπέα ισχύος (χρήση 100% σε σύγκριση με το 30% στις ανεμογεννήτριες της παραγράφου 5.3.3). Επίσης, η αύξηση των απωλειών προκύπτει από τη συνολική επεξεργασία της ισχύος. Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να καταστήσει τις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη κλίμακα μετατροπέα ισχύος, το δημοφιλέστερο τύπο στο μέλλον (Trevor M. Letcher, 2017), (E.H. Camm, 2009).



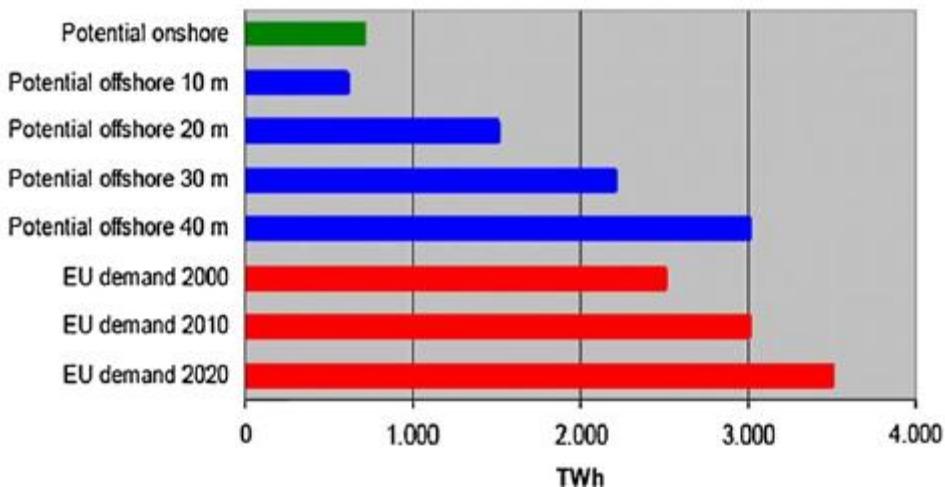
Εικόνα 25: Δομή ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με πλήρης κλίμακα μετατροπέα ισχύος

Πηγή: Εικόνα από το βιβλίο «*Wind Energy Engineering, A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*» (Trevor M. Letcher, 2017: 158)

5.4 Υπεράκτια αιολικά πάρκα

Η αιολική ενέργεια θεωρείται ως μία από τις πιο βασικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η κύρια ανάπτυξη της, έγινε μέσω της κατασκευής χερσαίων αιολικών πάρκων. Το 2009 η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων ήταν μόλις ίση με 2000 MW. Συγκεκριμένα, η πρώτη υπεράκτια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στη Σουηδία το 1990 και απέδιδε ισχύ ίση με 220 kW. Η θέση της ήταν στα 350 μέτρα από την ακτή, σε βάθος ίσο με 6 μέτρα και ήταν στηριγμένη σε τρίποδη κατασκευή. Μεταξύ του διαστήματος 1991 – 1998 πραγματοποιήθηκαν έργα όπου εξετάσθηκαν διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών και θεμελιώσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ανεμογεννήτριες 450 – 600 kW και η εγκατάσταση τους έγινε σε αποστάσεις 4 – 6 χιλιομέτρων από την ακτή. Παρόλο που υπήρχαν αμφιβολίες, τα έργα αυτά παρουσίασαν υψηλούς δείκτες κερδοφορίας και αξιοπιστίας. Στο τέλος του έτους 2012, οι εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είχαν φτάσει σε πλήθος τις 1662, με τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να φτάνει τα 5 GW, κατανεμημένες σε 10 Ευρωπαϊκές χώρες. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του χερσαίου και υπεράκτιου δυναμικού της αιολικής ενέργειας, στην Ευρώπη. Προκειμένου να υλοποιηθούν οι δεσμεύσεις που αναλήφθηκαν

στο Πρωτόκολλο του Κιότο, είναι απαραίτητη η προώθηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (M. Dolores Esteban, 2010), (EWEA, 2013).



Εικόνα 26: Σύγκριση χερσαίου και υπεράκτιου αιολικού δυναμικού στην Ευρώπη, για διαφορετικά βάθη και απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος

Πηγή: Εικόνα από τη δημοσίευση με τίτλο «Why offshore wind energy?» (M. Dolores Esteban, 2010)

5.4.1 Σύγκριση χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ανάπτυξης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι η έλλειψη χώρου για την εγκατάσταση χερσαίων ανεμογεννητριών. Παράλληλα, η ωριμότητα της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του ανέμου στη θάλασσα, καθιστούν τα πρώτα ελκυστική επιλογή για την εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων. Η κύρια διαφορά μεταξύ των χερσαίων και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων έχει να κάνει με το περιβάλλον της εγκατάστασης. Στη θάλασσα, οι θεμελιώσεις είναι πιο πολύπλοκες, γεγονός που καθιστά την εργασία πιο δύσκολη και απαιτητική. Παρακάτω, θα γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των δύο τεχνολογιών (M. Dolores Esteban, 2010) (EWEA, 2013) (IRENA, 2019) (Hevia-Koch, 2019).

Αρχικά, η ποιότητα του ανέμου στη θάλασσα είναι καλύτερη σε σύγκριση με αυτή της ξηράς. Η ταχύτητα είναι επίσης μεγαλύτερη και πιο ομοιόμορφη και αυξάνεται με την απομάκρυνση από την ακτή. Αυτό σημαίνει ότι δεν εμφανίζονται τόσο έντονα φαινόμενα αναταράξεων και κατά συνέπεια δεν παρατηρούνται αστάθειες στην παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων,

είναι η τοποθέτηση της τουρμπίνας για συγκεκριμένες διαστάσεις. Προκειμένου να αξιοποιηθούν καλύτερα τα κύματα του τυρβώδους αέρα, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα επιτρέπουν την τοποθέτηση του στροβίλου πιο χαμηλά σε σύγκριση με τα αντίστοιχα χερσαία (M. Dolores Esteban, 2010) (EWEA, 2013) (IRENA, 2019) (Hevia-Koch, 2019).

Επιπρόσθετα, οι μεγαλύτερες διαθέσιμες εκτάσεις όπου μπορούν να εγκατασταθούν τα αιολικά πάρκα, επιτρέπουν τη δημιουργία αιολικών πάρκων υψηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, ευνοείται η χρήση μεγάλων ανεμογεννητριών επιτυγχάνοντας περισσότερη παραγωγή ανά μονάδα εγκατάστασης. Τέλος, η τοποθέτηση τους μακριά από κατοικίσιμες εκτάσεις γης, περιορίζει τις εκπομπές θορύβου στις γύρω περιοχές (M. Dolores Esteban, 2010) (EWEA, 2013) (IRENA, 2019) (Hevia-Koch, 2019).

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι το υψηλό κόστος αδειοδότησης και μηχανικής κατασκευής. Στα χερσαία αιολικά πάρκα, το κόστος των ανεμογεννητριών είναι περίπου ίσο με το 75% της συνολικής επένδυσης, ενώ στα υπεράκτια αιολικά το κόστος αυτό ισούται με μόλις το 33%. Επίσης, δεν υπάρχουν θαλάσσιες υποδομές που να συνδέουν την παραγωγή της αιολικής ενέργειας με τους καταναλωτές. Αυτό σημαίνει ότι, θα πρέπει να δημιουργηθούν από την αρχή ηλεκτρικά δίκτυα προκειμένου να μεταφέρεται η ηλεκτρική ισχύς (M. Dolores Esteban, 2010) (EWEA, 2013) (IRENA, 2019) (Hevia-Koch, 2019).

Επιπλέον, στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι απαραίτητη η χρήση ανεπτυγμένων τεχνολογιών. Πολλά ερευνητικά προγράμματα προσπαθούν να αποφασίσουν ποιος θα είναι ο καλύτερος τύπος ανεμογεννήτριας, ώστε να προσαρμόζεται στο θαλάσσιο περιβάλλον και να είναι προετοιμασμένος για θαλάσσιες διαβρώσεις, αφού υπάρχουν δυσκολίες προσβασιμότητας σε αυτό. Ακόμα, εξαιτίας της τραχύτητας στην επιφάνεια θάλασσας, οι μηχανικές αναταράξεις είναι μεγαλύτερες γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τον χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών. Τέλος, η αξιολόγηση των αιολικών δεδομένων στη θάλασσα είναι πολύ πιο δαπανηρή από την ξηρά. Προκειμένου να αναπτυχθούν περαιτέρω, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα πρέπει να υπάρξουν βελτιώσεις σε τεχνολογίες που αφορούν τις ανεμογεννήτριες, τις θεμελιώσεις και τις φάσεις της κατασκευής (M. Dolores Esteban, 2010) (EWEA, 2013) (IRENA, 2019) (Hevia-Koch, 2019).

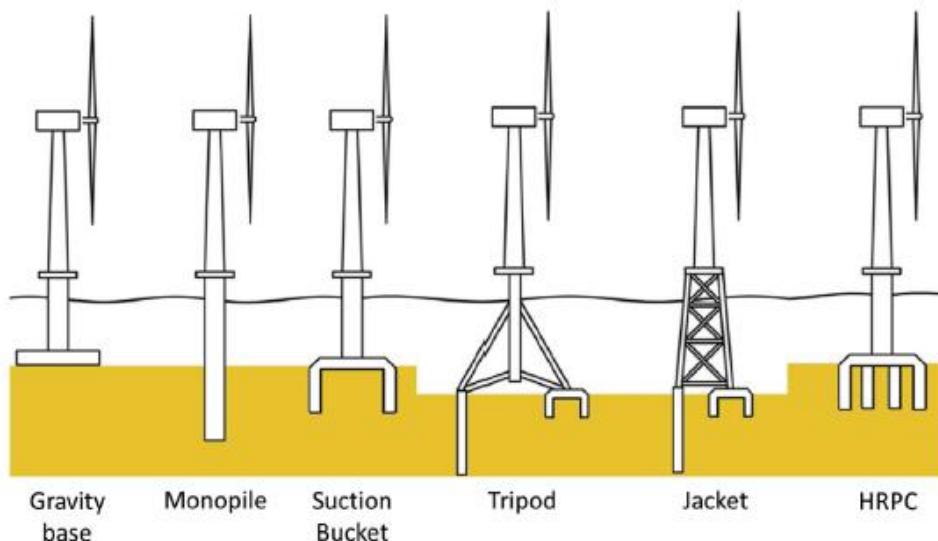
5.4.2 Θεμελιώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Οι πιο δημοφιλείς θεμελιώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι οι κατασκευές monopile, jacket, tripod και gravity based, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Κάθε τύπος, έχει τα δικά του πλεονεκτήματα όπως θα αναλυθεί παρακάτω (H. Diaz, 2020) (EWEA, 2013):

- Gravity base, αποτελεί κατασκευή με κύρια βάση το σκυρόδεμα, η οποία περιλαμβάνει έναν κεντρικό άξονα, φτιαγμένο από χάλυβα. Χρησιμοποιείται για βάθη μεγαλύτερα από 20 μέτρα και σε υπεράκτια αιολικά πάρκα μεγάλης παραγωγής ισχύος. Αυτός ο τύπος αποτελεί την ωριμότερη μορφή θεμελίωσης, αφού ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος κατά την εγκατάσταση των αιολικών πάρκων. Συναντάται κατά κύριο λόγο στην Ασία, όπου το 2020, αποτέλεσε το 70% των υπεράκτιων θεμελιώσεων
- Monopile, η εγκατάσταση περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός πυλώνα στο πυθμένα της θάλασσας, με ύψος 50 – 60 μέτρα και διάμετρο 5 – 6 μέτρα. Το βάρος της κατασκευής αγγίζει τους 500 – 800 τόνους. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης χρησιμοποιείται σε τοποθεσίες με βάθος 30 μέτρων και αποτελεί τη δημοφιλέστερη επιλογή για τις εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων. Από οικονομικής άποψης, αυτή η επιλογή είναι και η πιο οικονομική, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του θαλάσσιου πυθμένα στην Ευρώπη. Το 2018, αυτός ο τύπος θεμελίωσης αποτέλεσε το 63% των υπεράκτιων αιολικών πάρκων
- Suction Bucket, αυτή η θεμελίωση έχει το σχήμα ενός ανάποδου κουβά, ο οποίος αγκυρώνεται στο πυθμένα της θάλασσας για να στηρίξει τη δομή της ανεμογεννήτριας. Το νερό αντλείται από το εσωτερικό του κουβά, προκειμένου να μειωθεί η πίεση στο εσωτερικό του. Ο σχηματισμός της δομής σε συνδυασμό με την άντληση του νερού, επιτρέπει να βυθιστεί ο κουβάς στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε μεγάλα βάθη και μεγάλες ανεμογεννήτριες και είναι οικονομικά εφικτή εξαιτίας της γρήγορης και απλής διαδικασίας της εγκατάστασης της
- Tripod, η συγκεκριμένη δομή θεωρείται σχετικά ελαφριά. Κάτω από τον κεντρικό χαλύβδινο πυλώνα υπάρχει ένα ατσάλινο πλαίσιο, που μεταφέρει τις καταπονήσεις από τον πύργο σε άλλους τρεις πυλώνες. Κάθε ένας από αυτούς, αγκυρώνεται στο πυθμένα της θάλασσας προκειμένου να στηριχθεί η

ανεμογεννήτρια. Οι πυλώνες εγκαθίστανται σε βάθος 10 – 20 μέτρων. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης συναντάται στις Ευρωπαϊκές χώρες εξαιτίας του βάθους της θάλασσας και των μετεωρολογικών χαρακτηριστικών τους. Επίσης, χρησιμοποιείται για υψηλό αιολικό δυναμικό και σε συνθήκες καταιγίδας ή τυφώνων, είναι πιο αποτελεσματικός από τη θεμελίωση με έναν πυλώνα

- Jacket structure, περιλαμβάνει τετράποδους πυλώνες, με διασυνδεδεμένα εγκάρσια στηρίγματα με διάμετρο ίση με 2 μέτρα. Οι πυλώνες στερεώνονται στο βυθό της θάλασσας, σε βάθος 25 – 50 μέτρα. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης συναντάται στην Κορέα, καθώς αποτελεί τον κατάλληλο τύπο, σύμφωνα με το βάθος του νερού και τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν
- High Rise Pile Cap (HRPC), αυτή η δομή χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες περιοχές με βάθος έως 20 μέτρα και μαλακό έδαφος. Το κόστος της εγκατάστασης είναι χαμηλό και αξιόπιστο. Αποτελείται από μία πλατφόρμα σκυροδέματος, υψηλότερη από την επιφάνεια της θάλασσας και μία ομάδα από σωλήνες χάλυβα στο κάτω μέρος της πλατφόρμας. Στο Βιετνάμ, όλα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα χρησιμοποιούσαν αυτόν τον τύπο θεμελίωσης, το 2020



Εικόνα 27: Τύποι θεμελιώσεων για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα

Πηγή: Εικόνα από τη δημοσίευση με τίτλο «Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms» (H. Diaz, 2020)

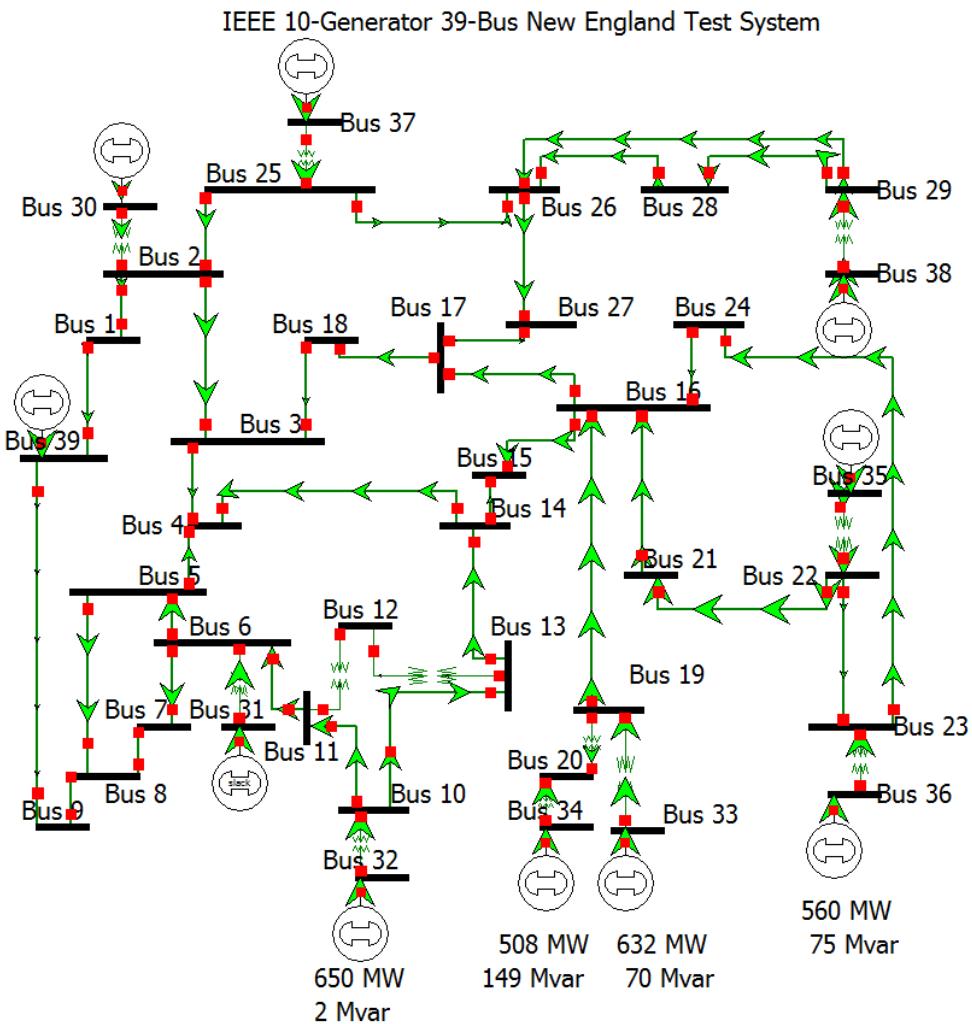
Κεφάλαιο 6 - Προσομοιώσεις μεταβατικής ευστάθειας

6.1 Ανάλυση συστήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η μεταβατική συμπεριφορά του δικτύου 39 ζυγών της IEEE. Το σύστημα περιέχει 10 γεννήτριες συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με 6192 MW, 19 φορτία, 11 μετασχηματιστές και 46 γραμμές μεταφοράς. Εξετάζονται τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα πάνω σε διάφορους ζυγούς του συστήματος σε τρία διαφορετικά σενάρια. Το σύστημα προς μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 28 και τα εξεταζόμενα σενάρια είναι τα εξής:

- **Σενάριο A:** Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο γίνεται εξ ολοκλήρου με συμβατικές γεννήτριες, που έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 και 39
- **Σενάριο B:** Οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 32 και 37 αντικαθίστανται με ανεμογεννήτριες τύπου 3, παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο ίση με 1190 MW, ποσοστό ίσο με το 19,2% ($\approx 20\%$) της συνολικής παραγωγής ενέργειας
- **Σενάριο Γ:** Οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 30, 35 και 38 αντικαθίστανται με ανεμογεννήτριες τύπου 3, παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο ίση με 1730 MW, ποσοστό ίσο με το 27,9% ($\approx 30\%$) της συνολικής παραγωγής ενέργειας

Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις μελετάται η μεταβατική ευστάθεια του δικτύου και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων. Αφού γίνει η συλλογή των δεδομένων, προκύπτουν συμπεράσματα για το ΣΗΕ.



Εικόνα 28: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator

6.2 Μεθοδολογία και ερευνητικά ερωτήματα

6.2.1 Προσδιορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης και ευστάθειας του δικτύου

Προκειμένου να μελετηθεί η μεταβατική ευστάθεια του παραπάνω δικτύου, εφαρμόζονται τριφασικά στερεά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ στους ζυγούς 1, 12, 16 και 20 του συστήματος. Αρχικά, διερευνάται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης για κάθε ένα από τα σφάλματα. Σε κάθε περίπτωση, μελετάται η διάρκεια του φαινομένου για 10 δευτερόλεπτα. Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1$ sec, εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα. Με βήμα $t_{step} = 50 \text{ ms} = 0,05 \text{ sec}$, προσδιορίζεται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος. Εάν την χρονική στιγμή $t_1 = t_{fault} + N$

* t_{step} , όπου N: το πλήθος των διαδοχικών επαναλήψεων ($N = 0, 1, 2, \dots, 18$), χάνεται η ευστάθεια του συστήματος, τότε η εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος γίνεται την χρονική στιγμή $t_{clear} = t_1 - t_{step}$ και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι στο $t_{critical} = t_{clear} - t_{fault}$.

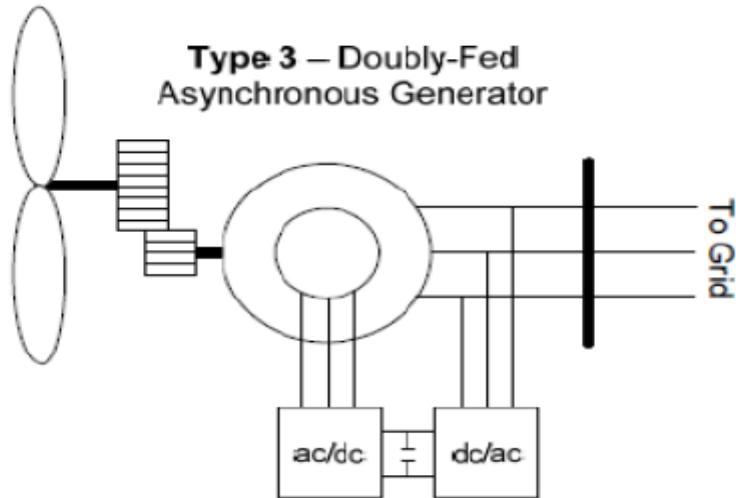
Την χρονική στιγμή εκκαθάρισης του σφάλματος, ανοίγουν οι διακόπτες ισχύος της γραμμής μεταφοράς, προκειμένου να απομονωθεί το αντίστοιχο κομμάτι του δικτύου $t_{open_line} = t_{clear}$. Η γραμμή μεταφοράς, επαναφέρεται στο δίκτυο, την χρονική στιγμή $t_{close_line} = 5 \text{ sec}$ (ή λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή, εφόσον κριθεί απαραίτητο). Οι χρόνοι, t_{fault} , t_{clear} , t_{open_line} , t_{close_line} , $t_{critical}$ συγκεντρώνονται σε έναν Πίνακα για κάθε επανάληψη.

Τέλος, προκειμένου να μελετηθεί η ευστάθεια του συστήματος, εξετάζονται οι παρακάτω καμπύλες συναρτήσει του χρόνου:

- Σχετική γωνίας ισχύος της γεννήτριας (δ) (σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας του ζυγού 31, ο οποίος αποτελεί το ζυγό αναφοράς του συστήματος)
- Συχνότητα (f), των ζυγών των γεννητριών του συστήματος σε Hz
- Τάση (V) των ζυγών των γεννητριών σε μονάδες ρυ
- Πραγματική ισχύς (P) των γεννητριών του συστήματος σε MW
- Άεργος ισχύς (Q) των γεννητριών του συστήματος σε MVAr
- Σχετική γωνία ισχύος της γεννήτριας (δ), σε περίπτωση αστάθειας

6.2.2 Ανεμογεννήτριες στο PowerWorld Simulator

Προκειμένου να μελετηθούν τα σενάρια Β και Γ στο σύστημα 39 ζυγών της IEEE, χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες τύπου 3 – DFIG, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29: Ανεμογεννήτρια DFIG (Τύπου 3) στο PowerWorld Simulator

Στο λογισμικό PowerWorld Simulator η συμπλήρωση των παρακάτω πεδίων με τις αντίστοιχες τιμές, επιτρέπει την αντικατάσταση των συμβατικών γεννητριών με ανεμογεννήτριες.

Πίνακας 4: Συμπλήρωση πεδίων για μοντελοποίηση ανεμογεννητριών DFIG (Τύπου 3) στο PowerWorld Simulator

Πεδίο	Τιμή
<i>Machine Model</i>	<i>REGC_A</i>
<i>Exciters</i>	<i>REEC_A</i>
<i>Governors</i>	<i>WTGT_A</i>
<i>Stabilizers</i>	<i>WTGPT_A</i>
<i>Other models</i>	<i>REPC_A, WTGAR_A, WTGTRQ_A</i>

6.3 Προσομοιώσεις στο σύστημα 39 ζυγών της IEEE

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Α περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης τριφασικών συμμετρικών σφαλμάτων:

Σενάριο Α1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Β περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης τριφασικών συμμετρικών σφαλμάτων:

Σενάριο Β1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Γ περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης τριφασικών συμμετρικών σφαλμάτων:

Σενάριο Γ1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Σενάριο Γ2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Σενάριο Γ3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Σενάριο Γ4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Α περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης μονοφασικών σφαλμάτων:

Σενάριο Α5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου

Σενάριο Α8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Α περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης μονοφασικών σφαλμάτων:

Σενάριο Β5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Σενάριο Β8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

Για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας το Σενάριο Α περιλαμβάνει τις εξής περιπτώσεις μελέτης μονοφασικών σφαλμάτων:

Σενάριο Γ5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Σενάριο Γ6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

Σενάριο Γ7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

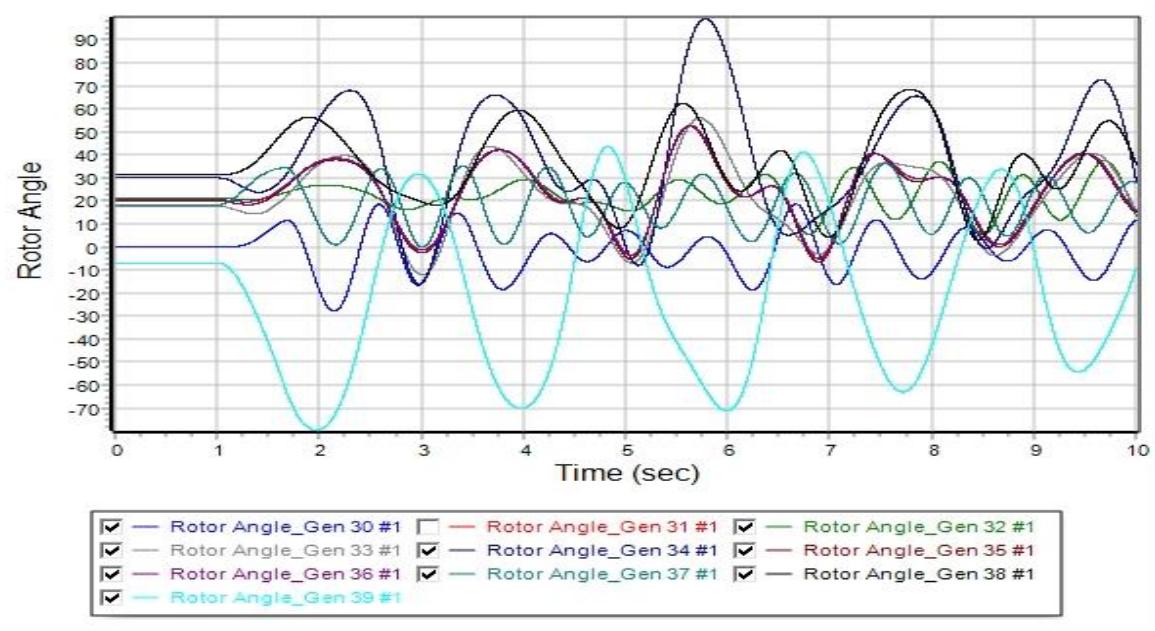
Σενάριο Γ8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

6.3.1 Σενάριο A1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου

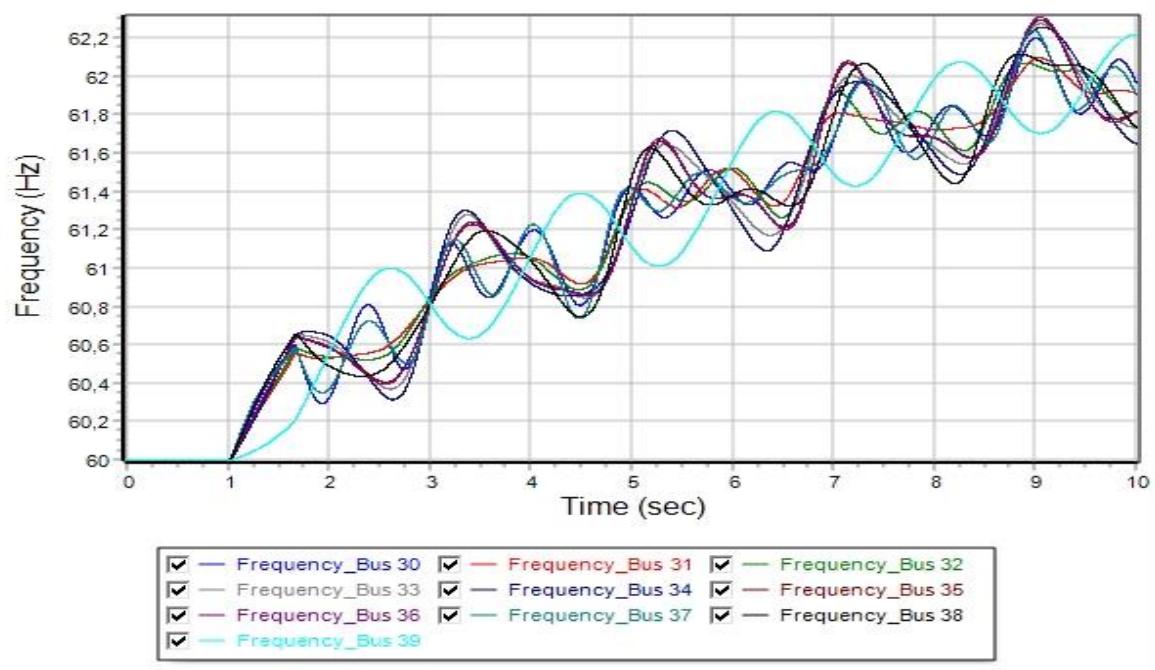
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,65 \text{ sec}$, δηλ. $0,65 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,65 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5. Παράλληλα, στις Εικόνες 30, 31, 32, 33 και 34 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,70 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 35, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 5: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A1

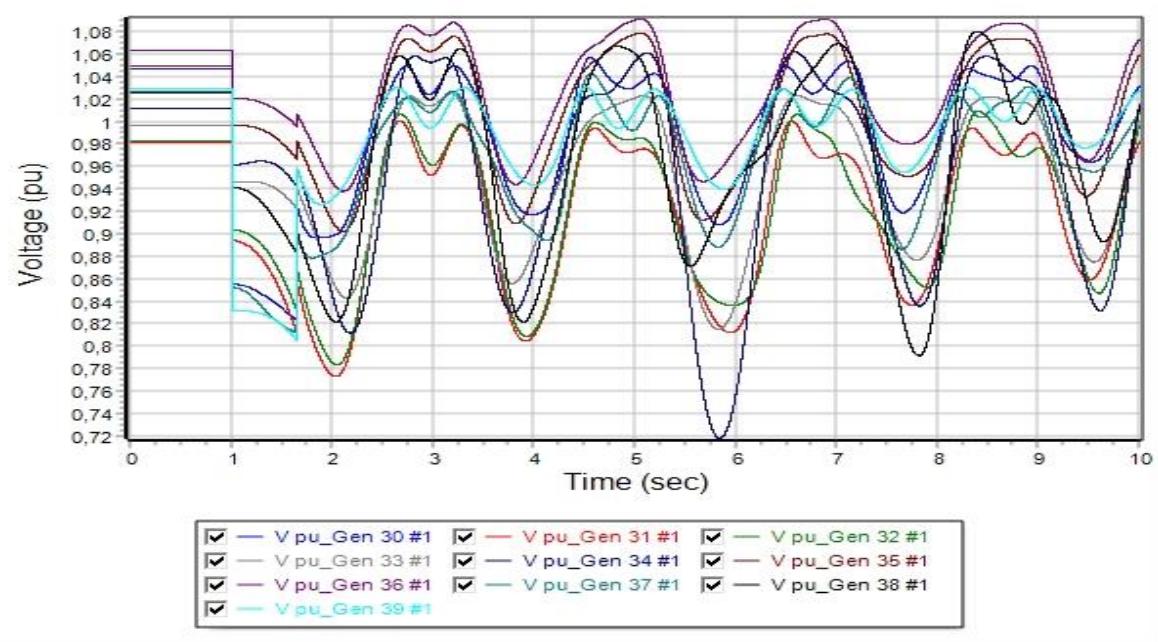
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,65
t_{open_line}	1,65
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,65



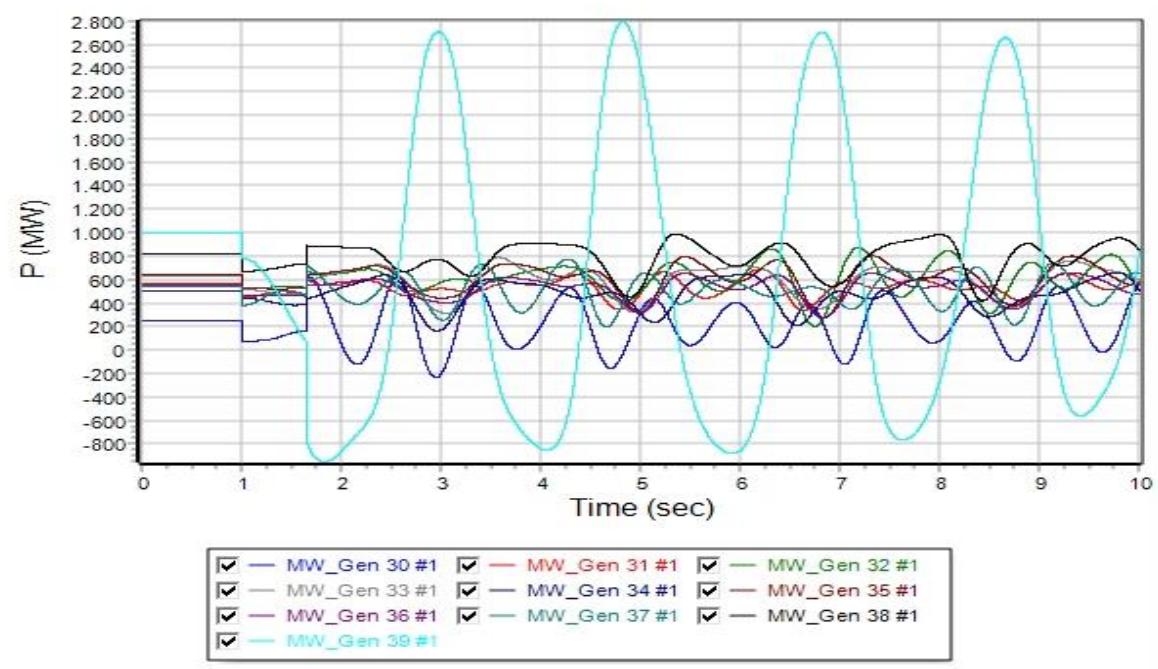
Εικόνα 30: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)



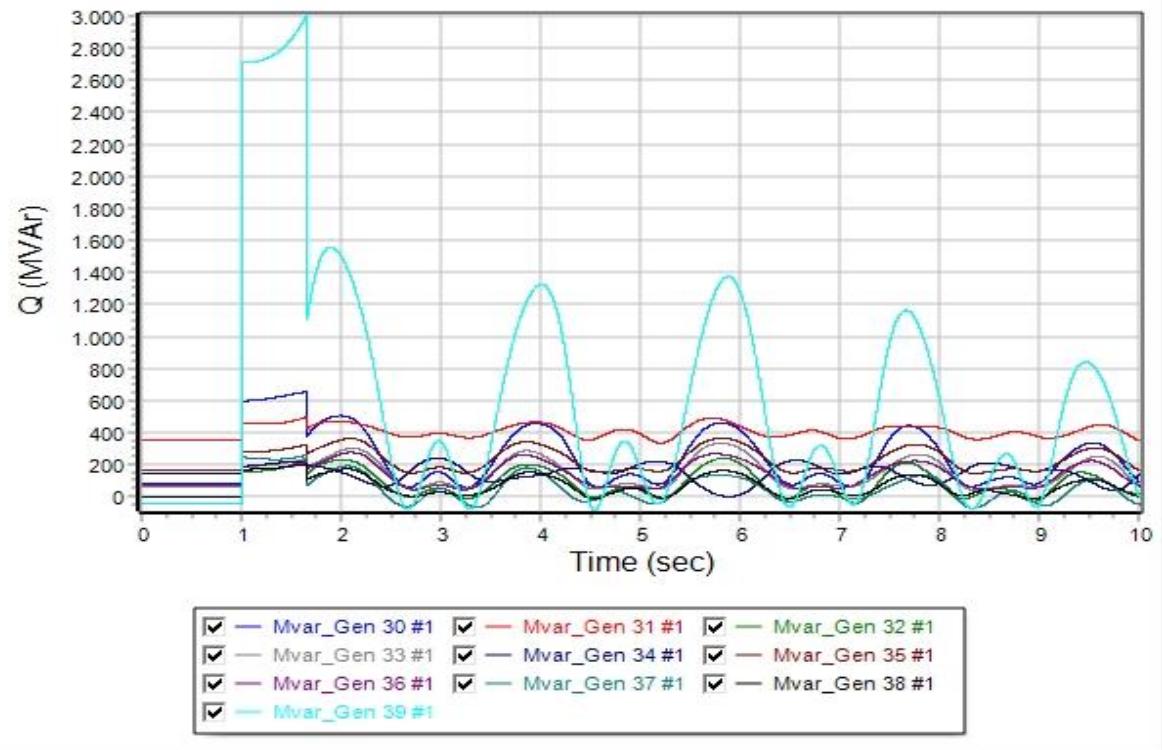
Εικόνα 31: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)



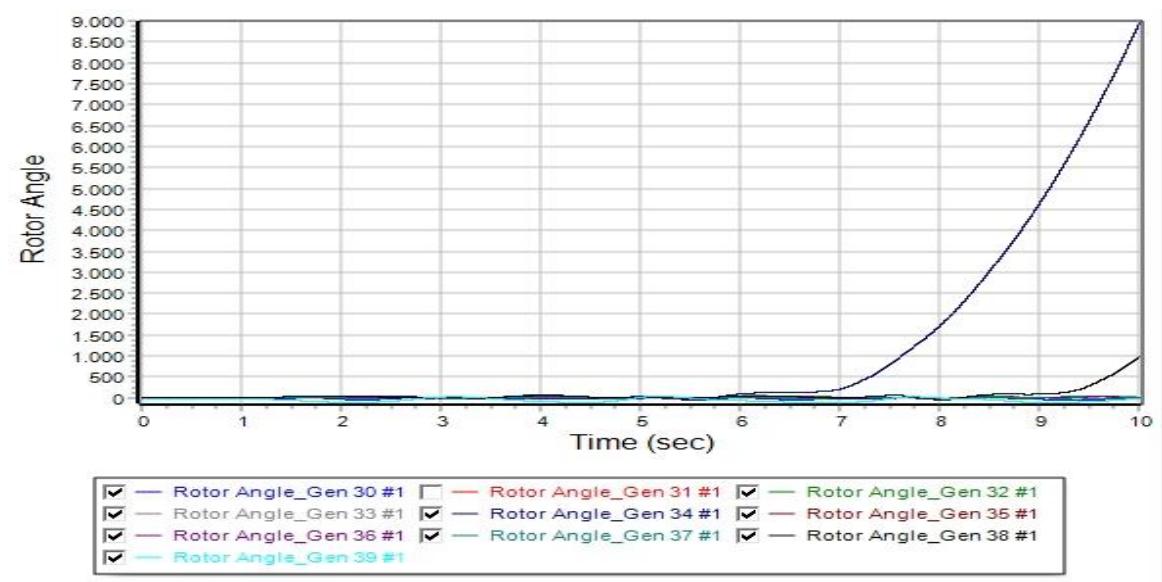
Εικόνα 32: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)



Εικόνα 33: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)



Εικόνα 34: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,65 sec (Σενάριο A1)



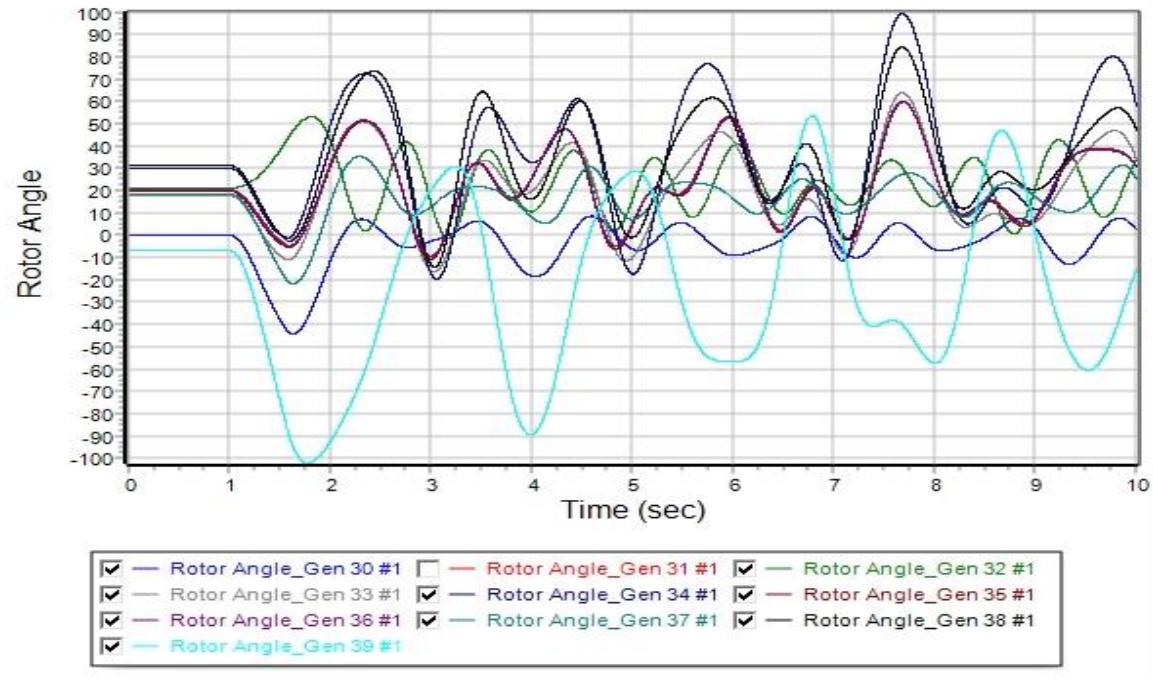
Εικόνα 35: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,70 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A1)

6.3.2 Σενάριο A2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου

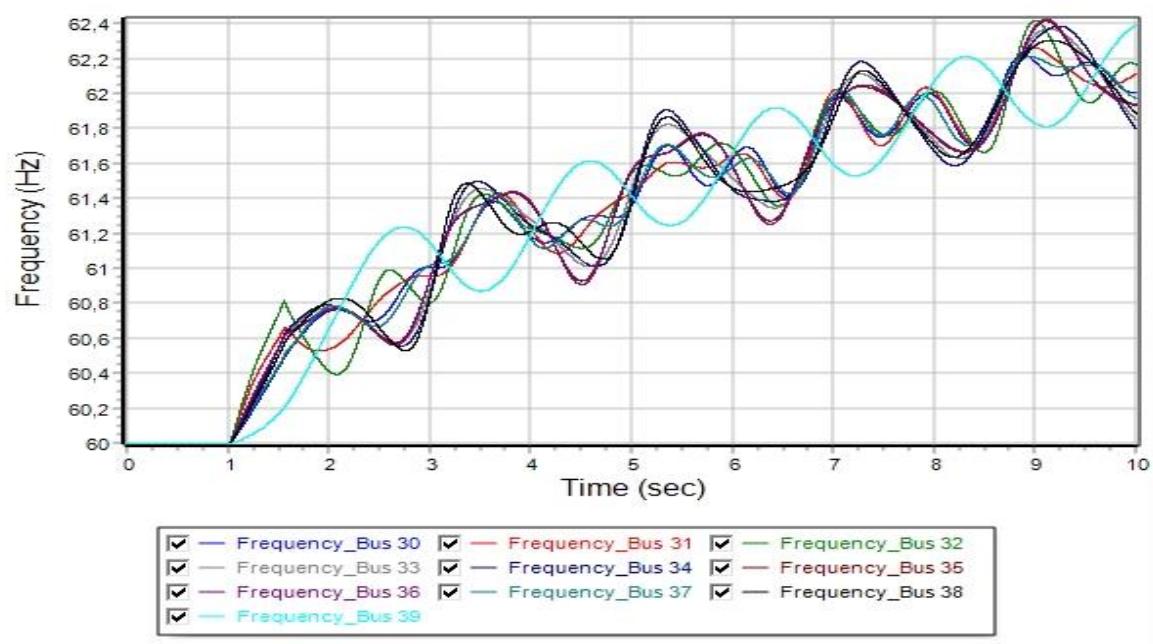
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,65 \text{ sec}$, δηλ. $0,55 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,55 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6. Παράλληλα, στις Εικόνες 36, 37, 38, 39 και 40 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,60 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 41, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 6: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο A2

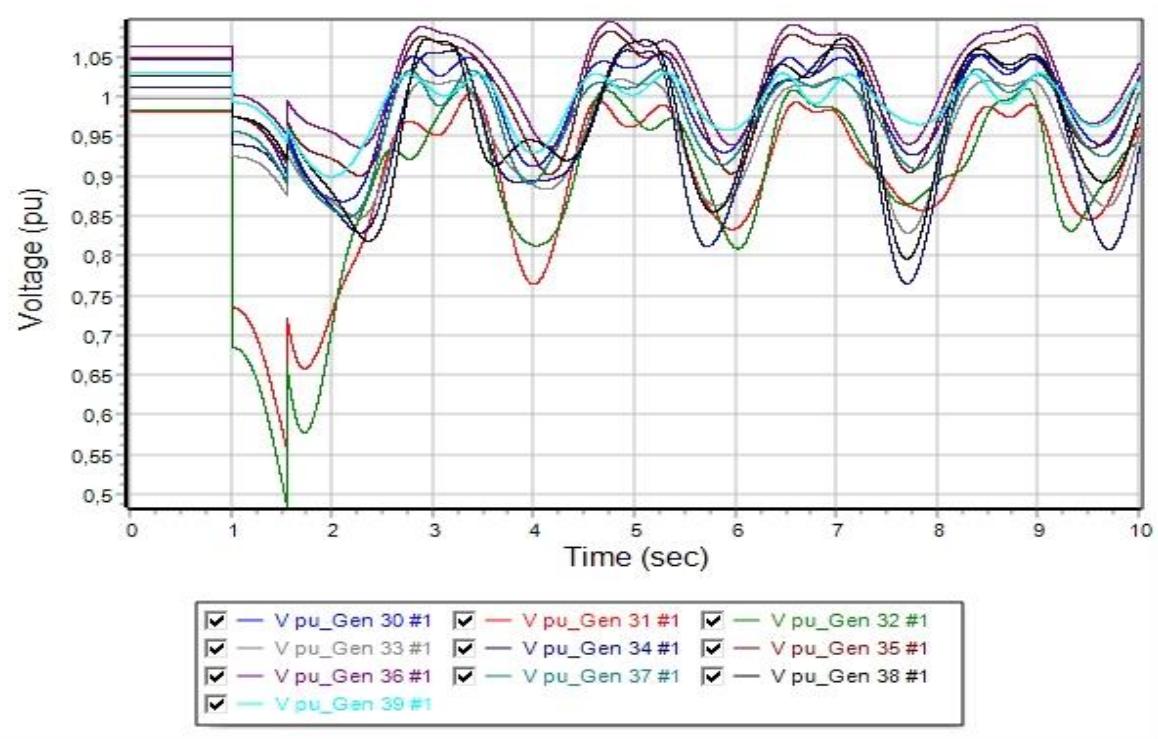
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,55
t_{open_line}	1,55
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,55



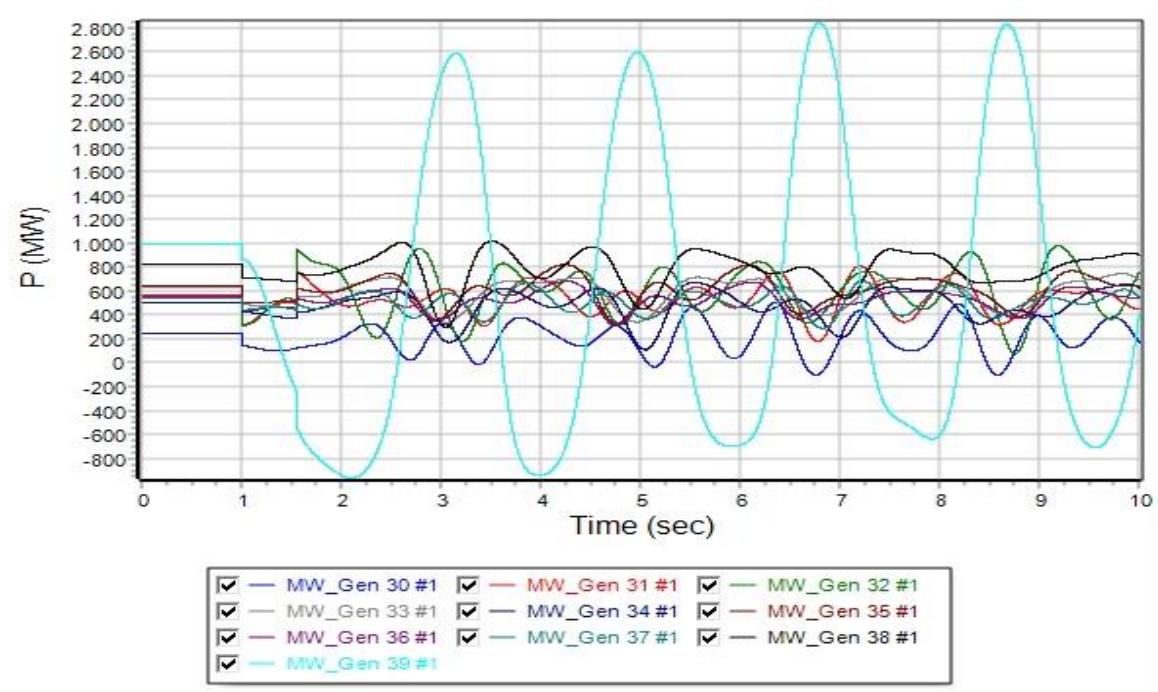
Εικόνα 36: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)



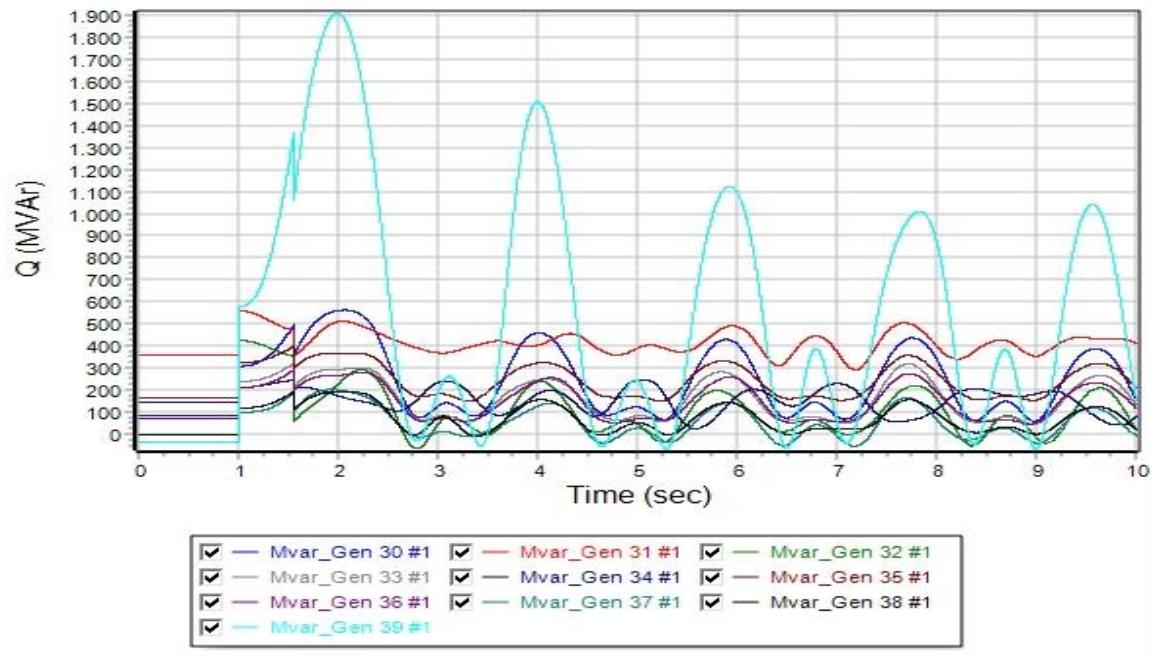
Εικόνα 37: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)



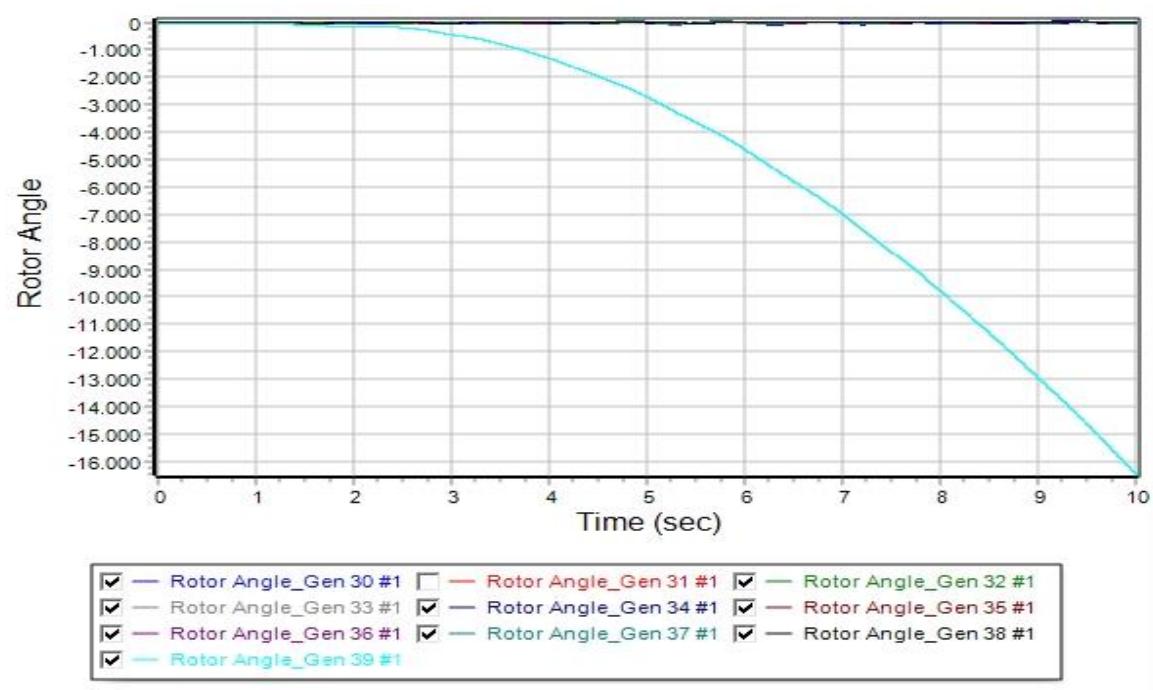
Εικόνα 38: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)



Εικόνα 39: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)



Εικόνα 40: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,55 sec (Σενάριο A2)



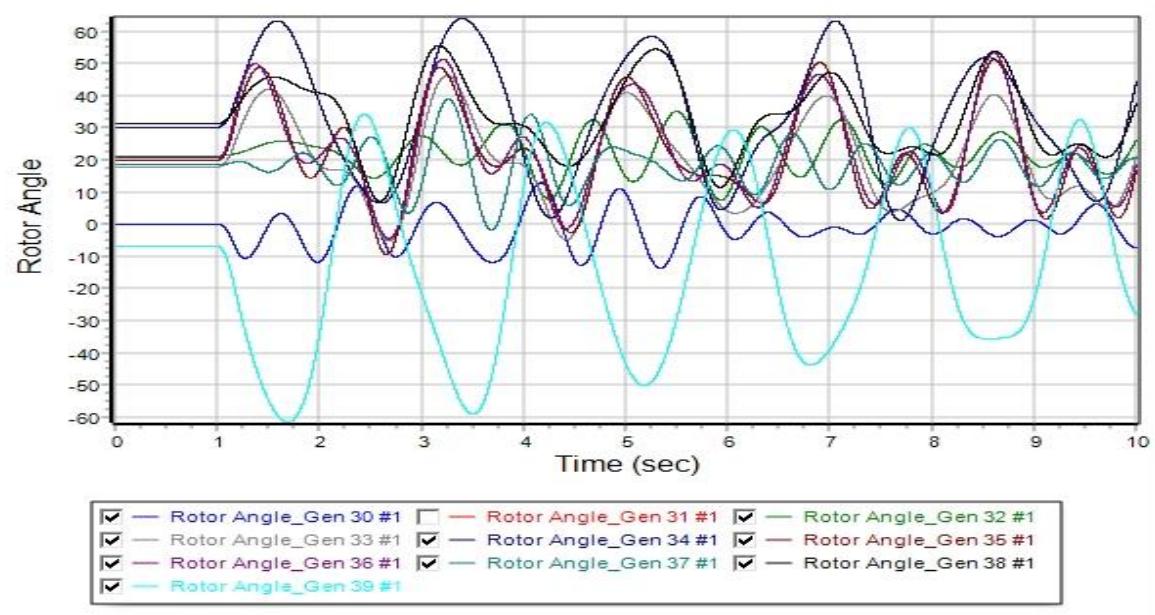
Εικόνα 41: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,60 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A2)

6.3.3 Σενάριο Α3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου

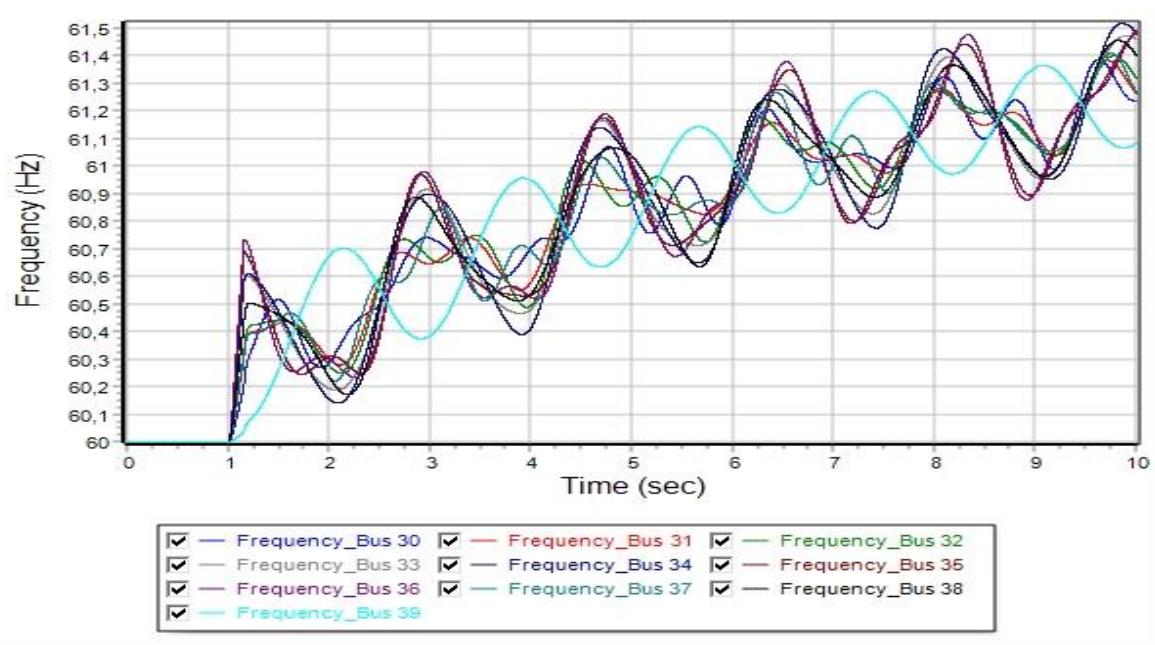
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,15 \text{ sec}$, δηλ. $0,15 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7. Παράλληλα, στις Εικόνες 42, 43, 44, 45 και 46 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 47, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 7: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπών ισχύος, για το σενάριο Α3

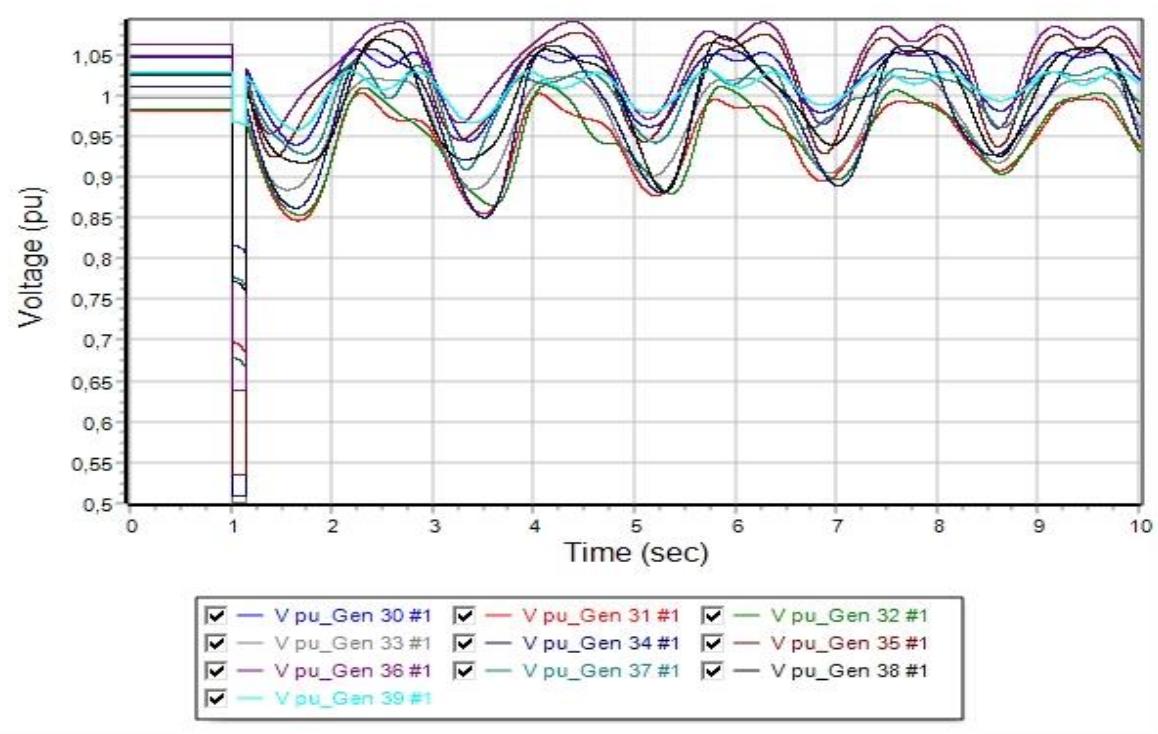
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,15
t_{open_line}	1,15
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,15



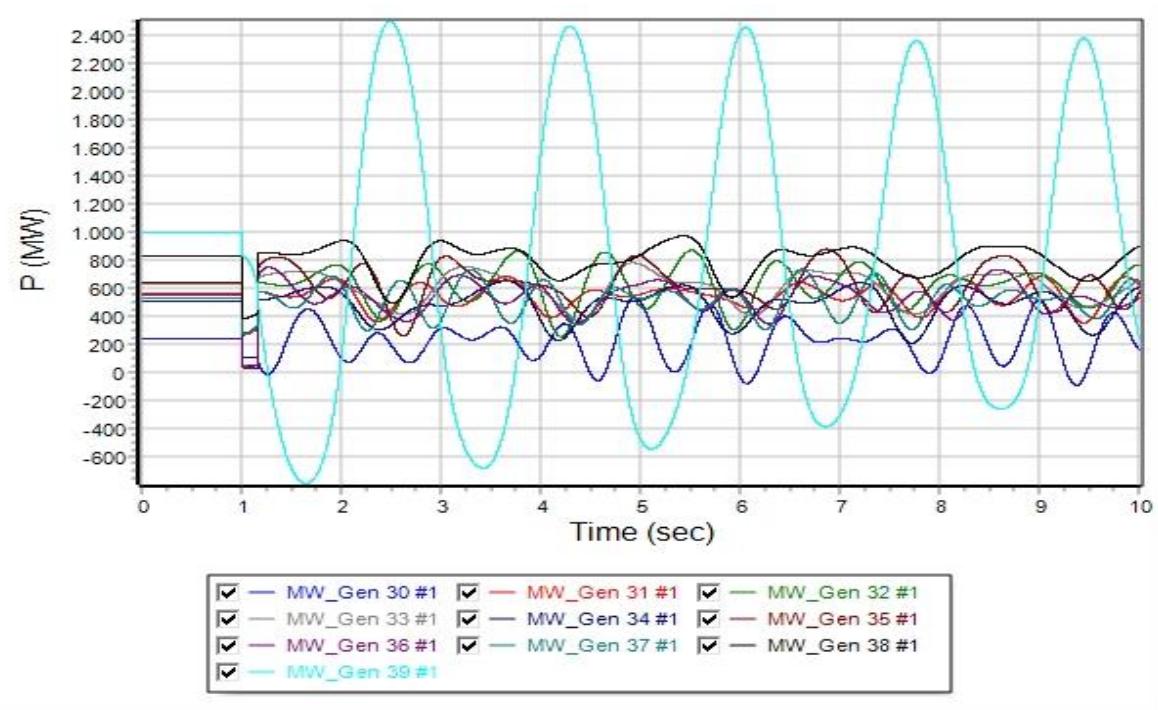
Εικόνα 42: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)



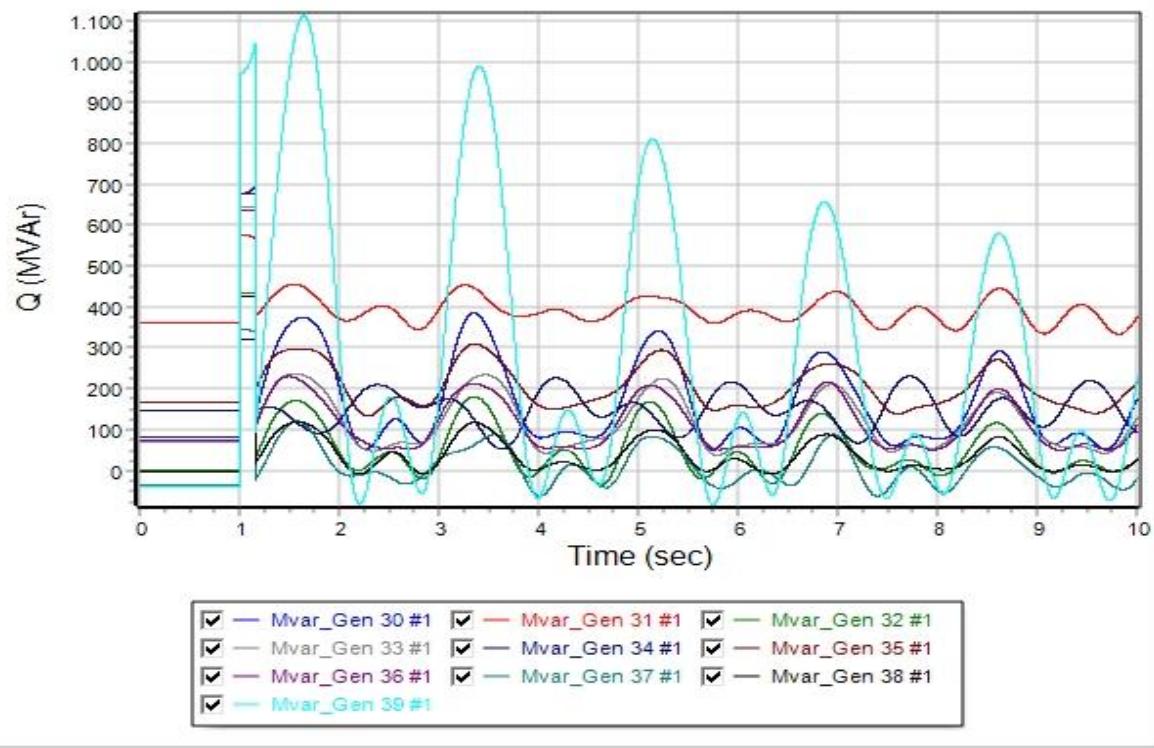
Εικόνα 43: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)



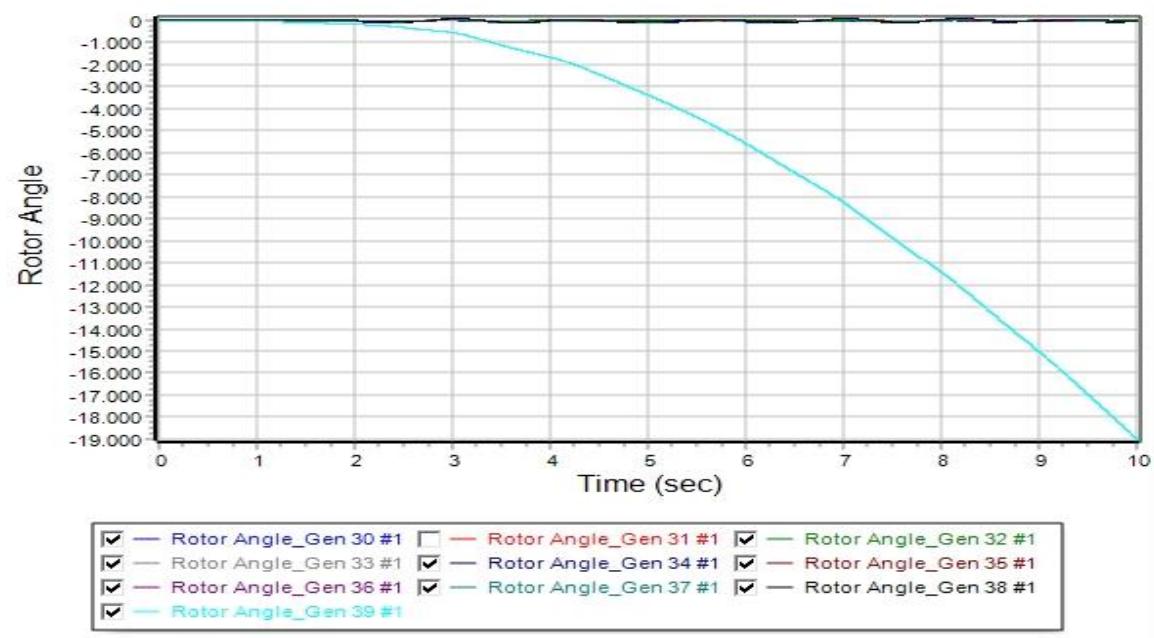
Εικόνα 44: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)



Εικόνα 45: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)



Εικόνα 46: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο A3)



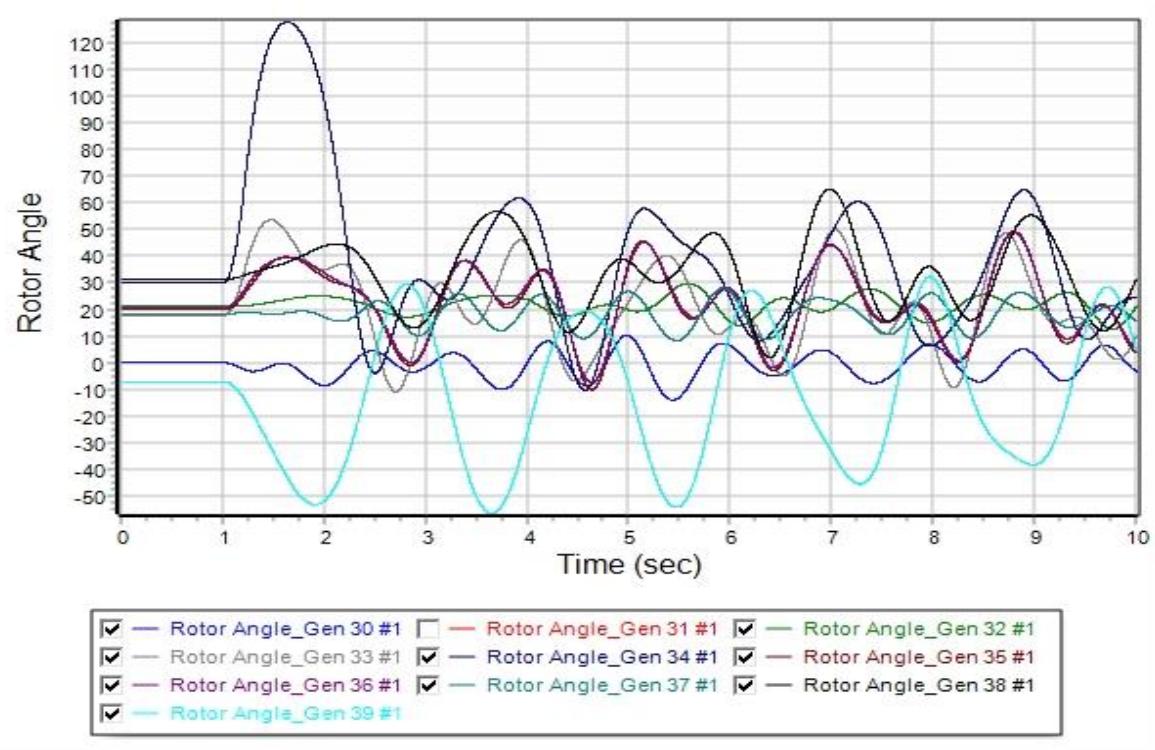
Εικόνα 47: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A3)

6.3.4 Σενάριο A4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου

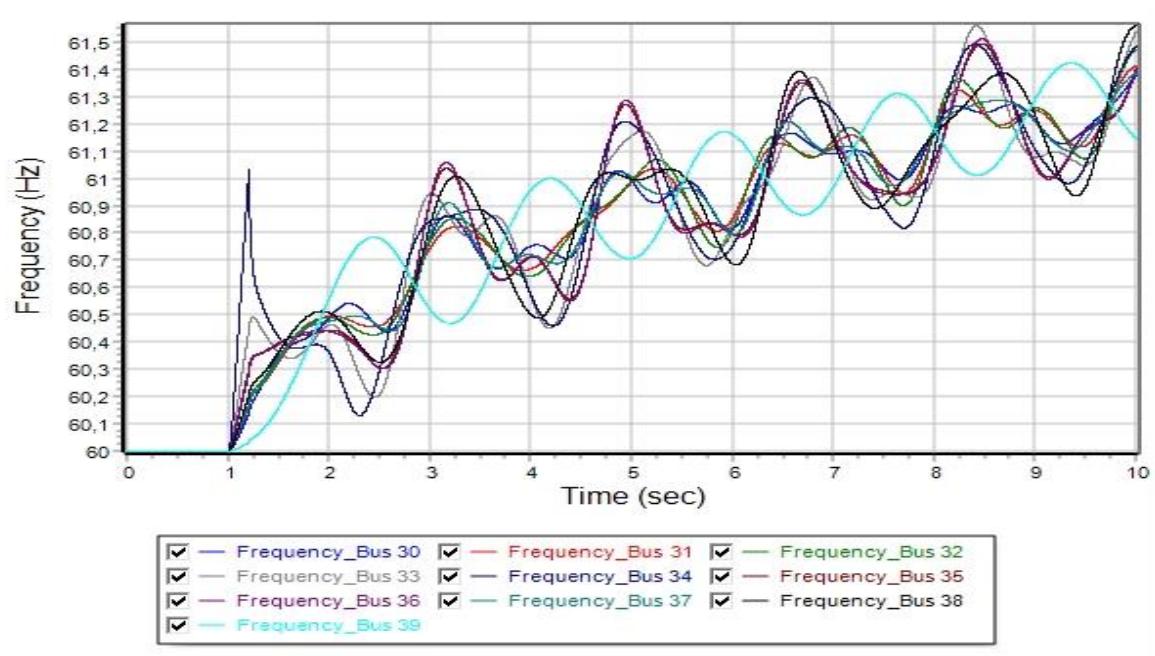
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,15 sec, δηλ. $0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8. Παράλληλα, στις Εικόνες 48, 49, 50, 51 και 52 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,25 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 53, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 8: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο A4

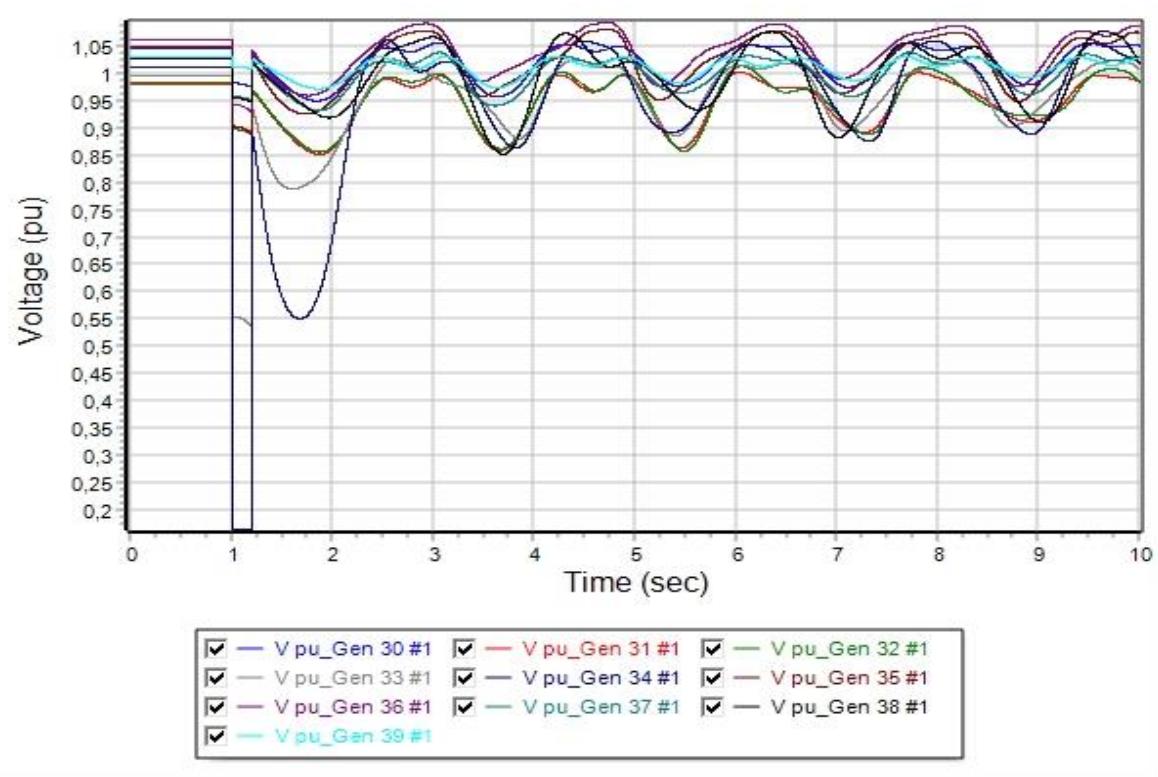
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,20
t_{open_line}	1,20
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,20



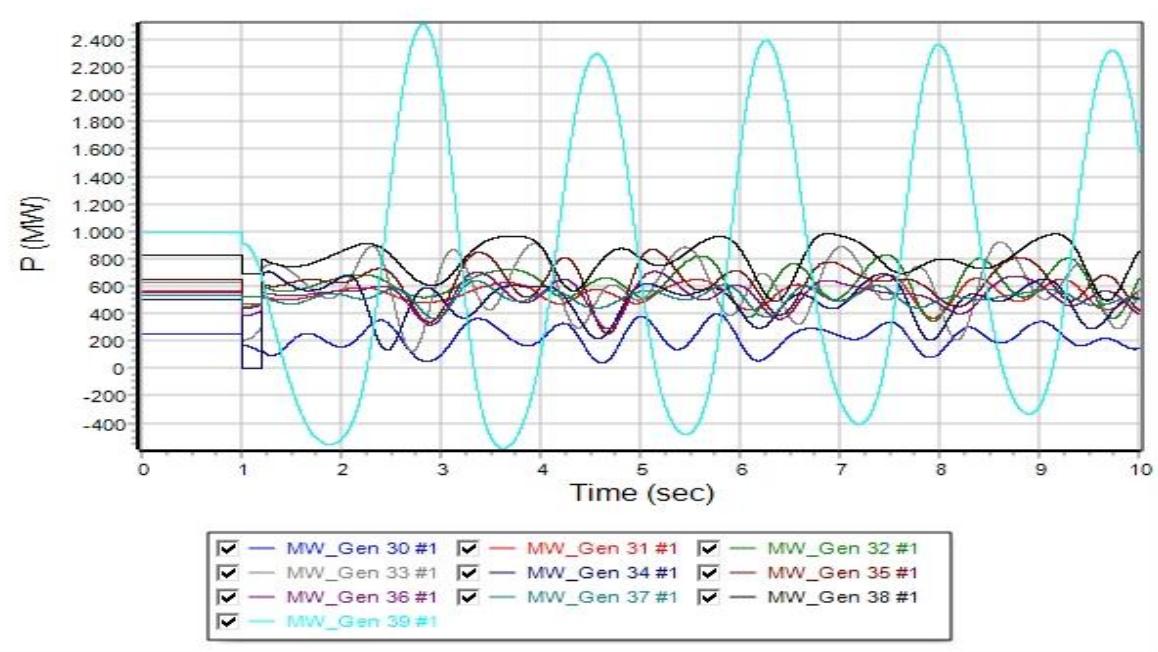
Εικόνα 48: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)



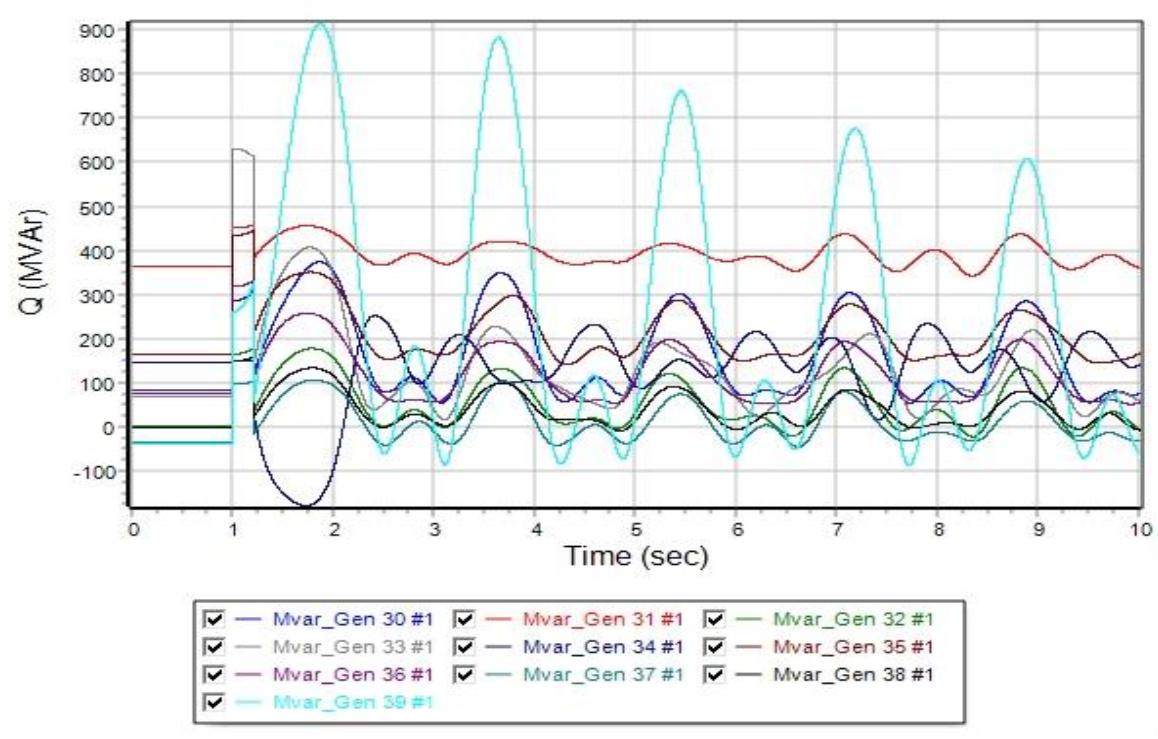
Εικόνα 49: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)



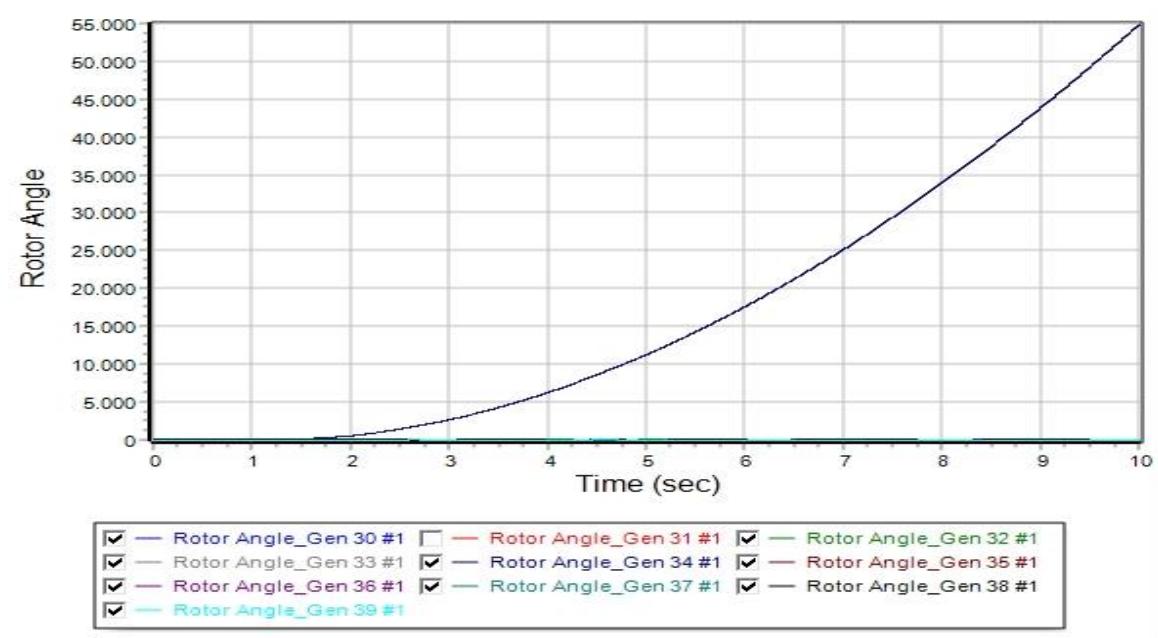
Εικόνα 50: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)



Εικόνα 51: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)



Εικόνα 52: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A4)



Εικόνα 53: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A4)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα:

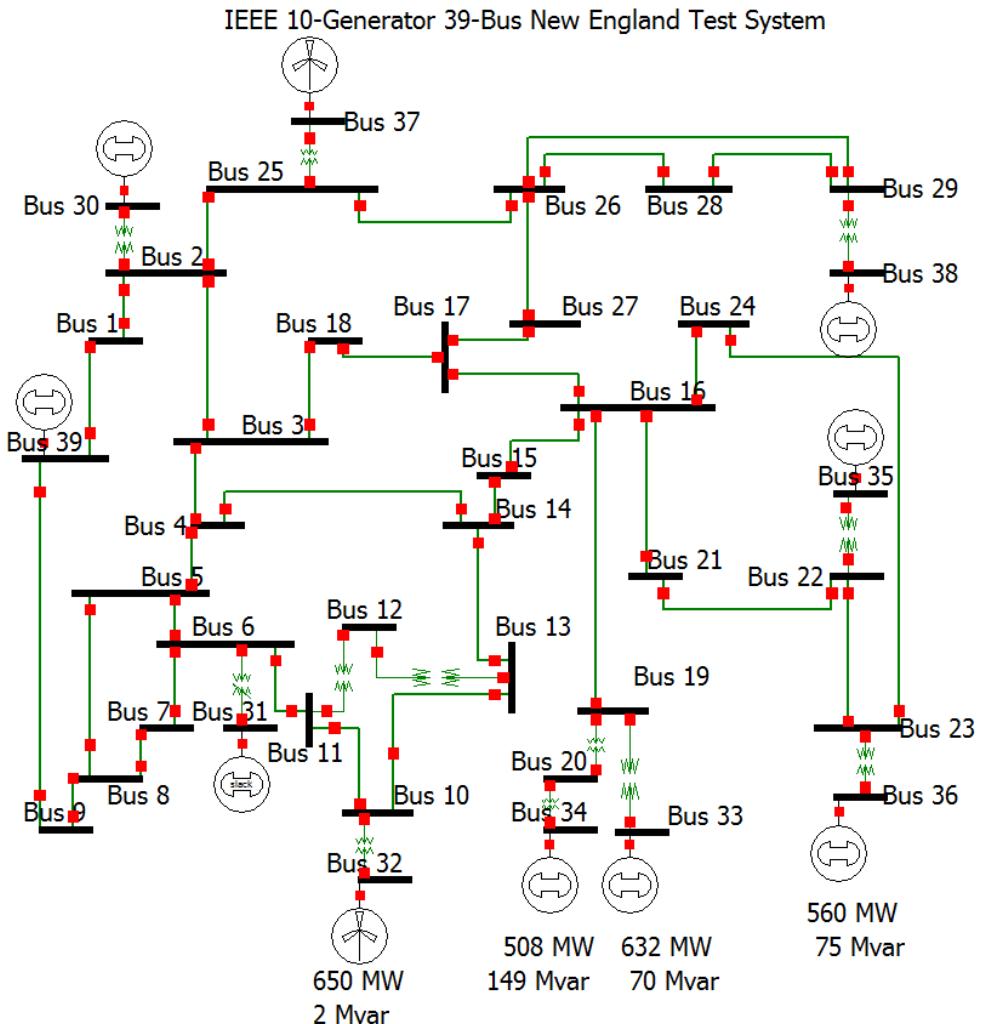
Πίνακας 9: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια A1-A4

Χρονική στιγμή/ Σενάριο A	A1	A2	A3	A4
t_{fault}	1,00	1,00	1,00	1,00
t_{clear}	1,65	1,55	1,15	1,20
t_{open_line}	1,65	1,55	1,15	1,20
t_{close_line}	5,00	5,00	5,00	5,00
$t_{critical}$	0,65	0,55	0,15	0,20

6.3.5 Σενάριο B1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20%

ΑΠΕ

Στο σενάριο Β, εξετάζεται η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών με ποσοστό διείσδυσης ίσο με το 20% της συνολικής παραγωγής ισχύος του ΣΗΕ. Οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 32 και 37 αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες DFIG (Τύπου 3), με παραγωγή ισχύος ίση με 1190 MW. Το σύστημα προς μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 54.

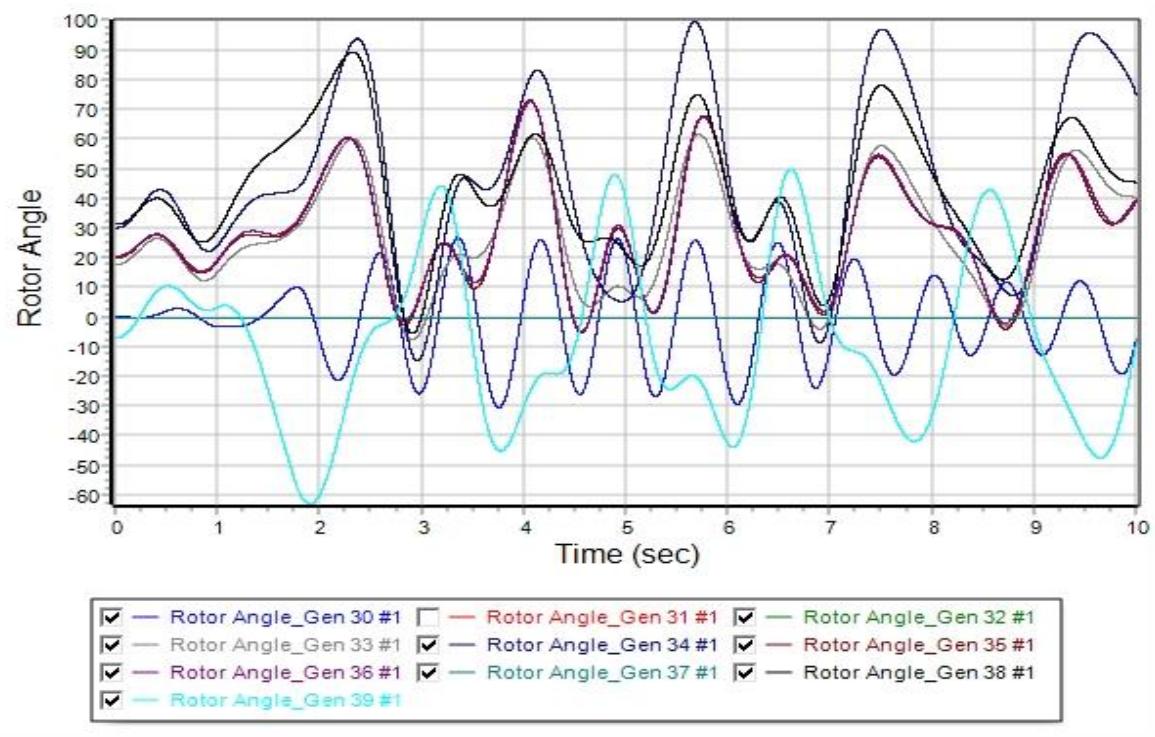


Εικόνα 54: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator, για το σενάριο B

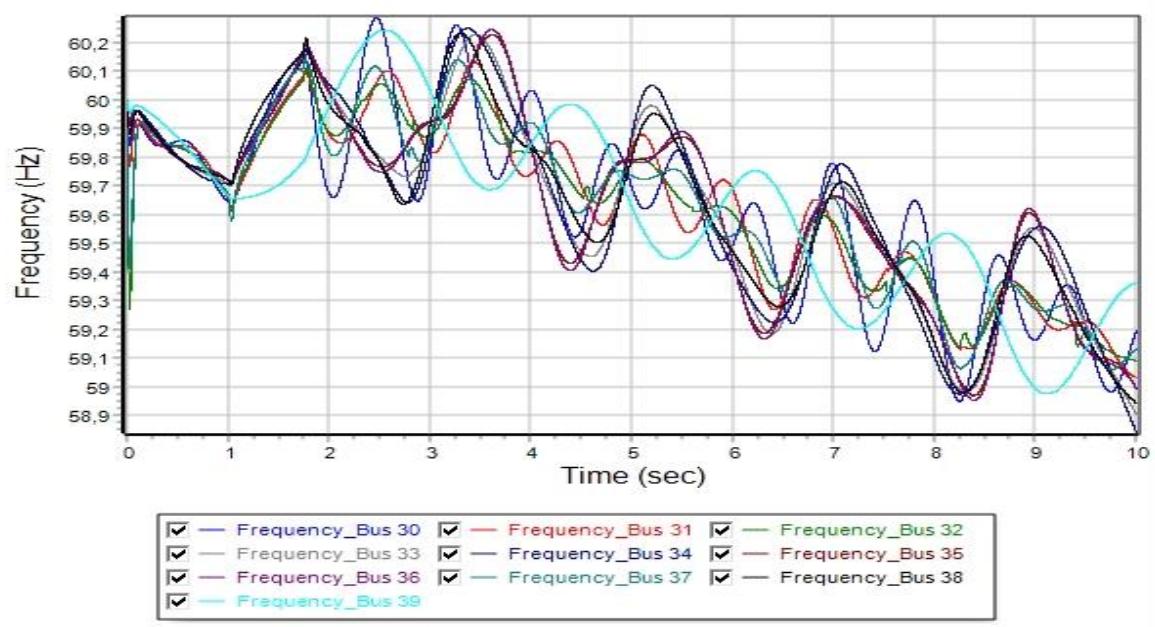
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0$ sec, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,75 sec, δηλ. 0,75 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,75$ sec. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10. Παράλληλα, στις Εικόνες 55, 56, 57, 58 και 59 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,80$ sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 60, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 10: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B1

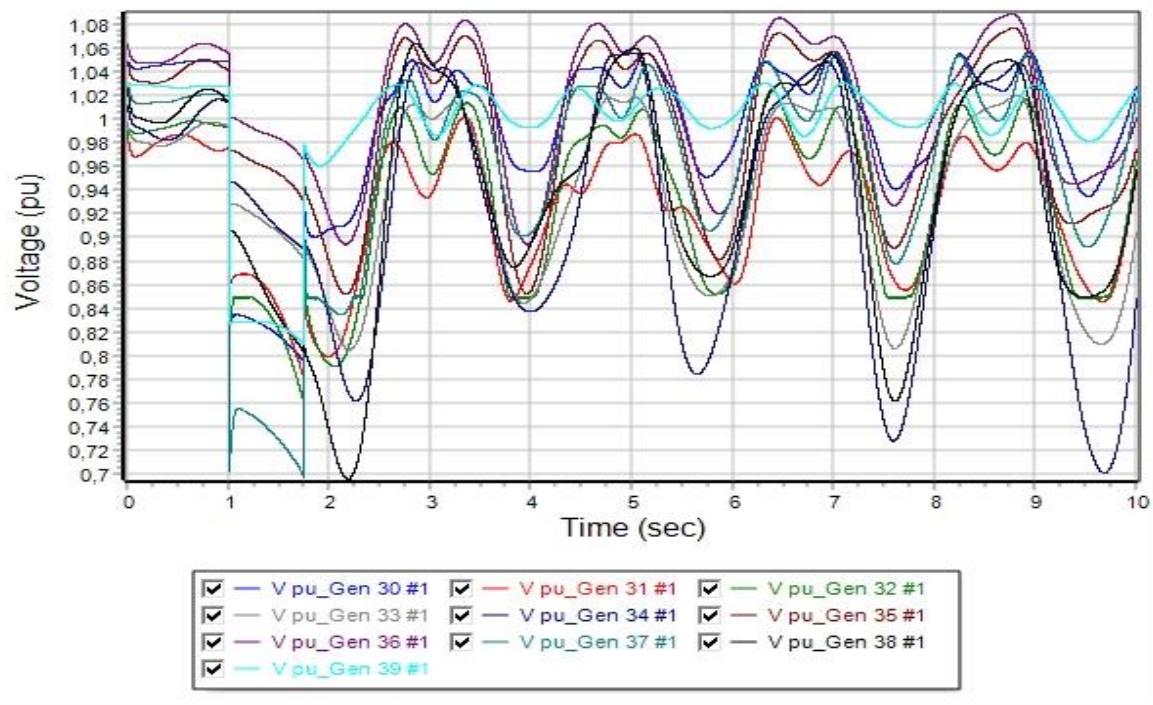
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,75
t_{open_line}	1,75
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,75



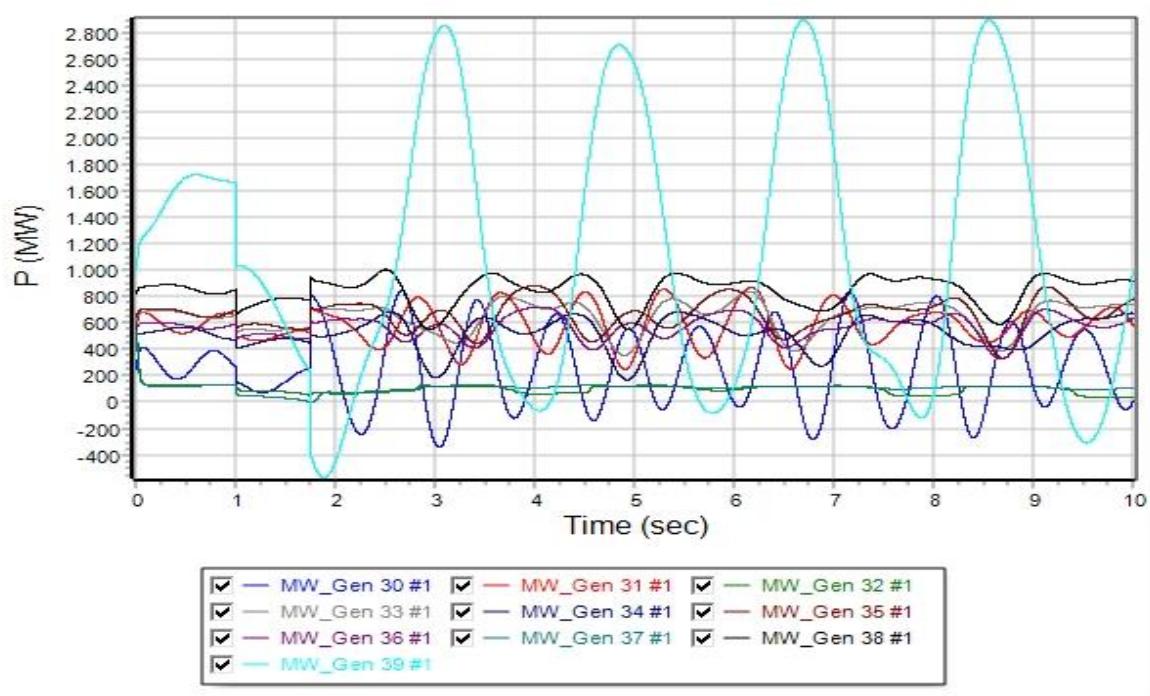
Εικόνα 55: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)



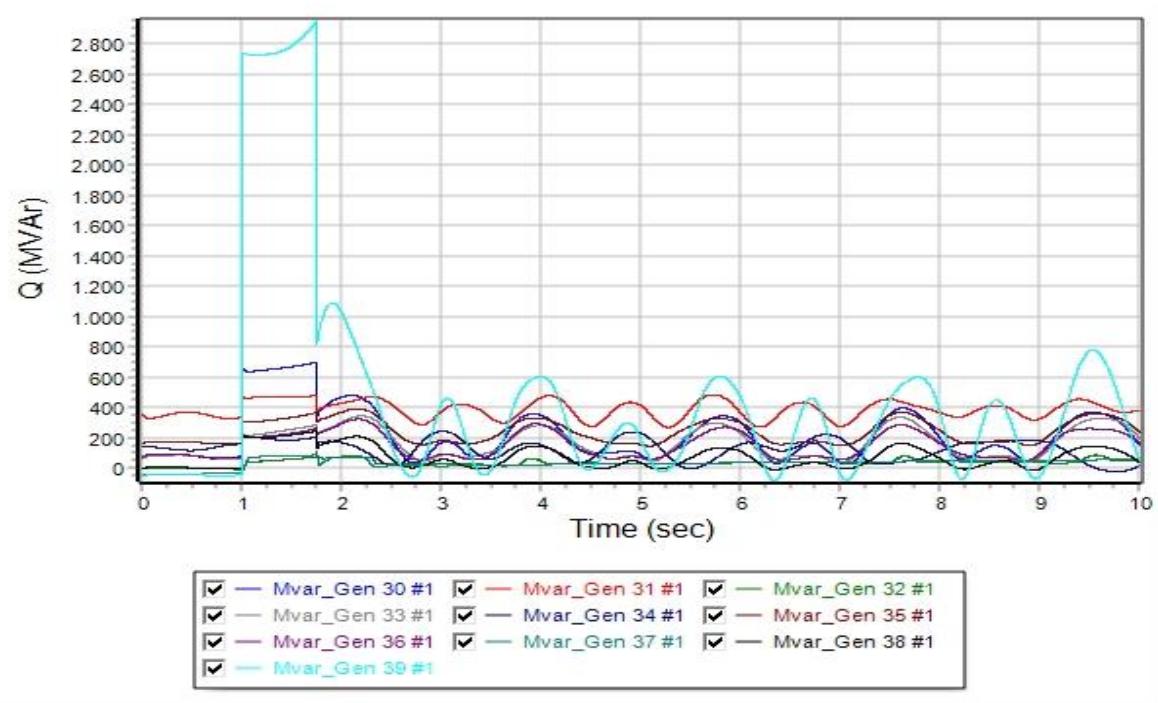
Εικόνα 56: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)



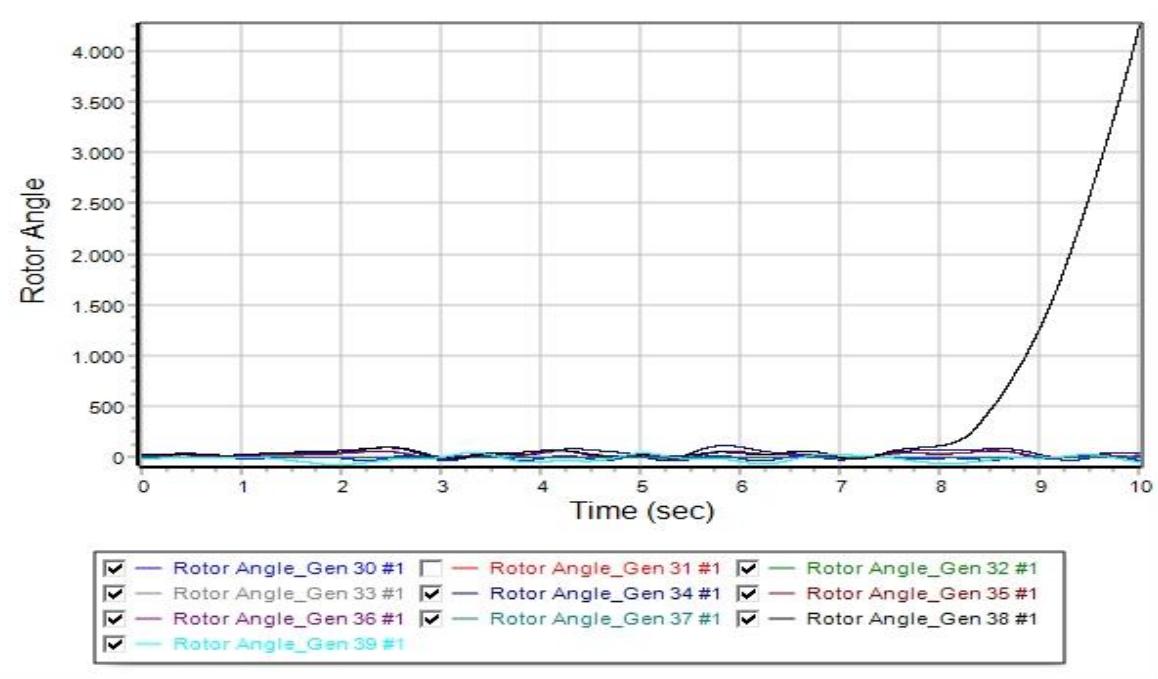
Εικόνα 57: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)



Εικόνα 58: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)



Εικόνα 59: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,75 sec (Σενάριο B1)



Εικόνα 60: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,80 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B1)

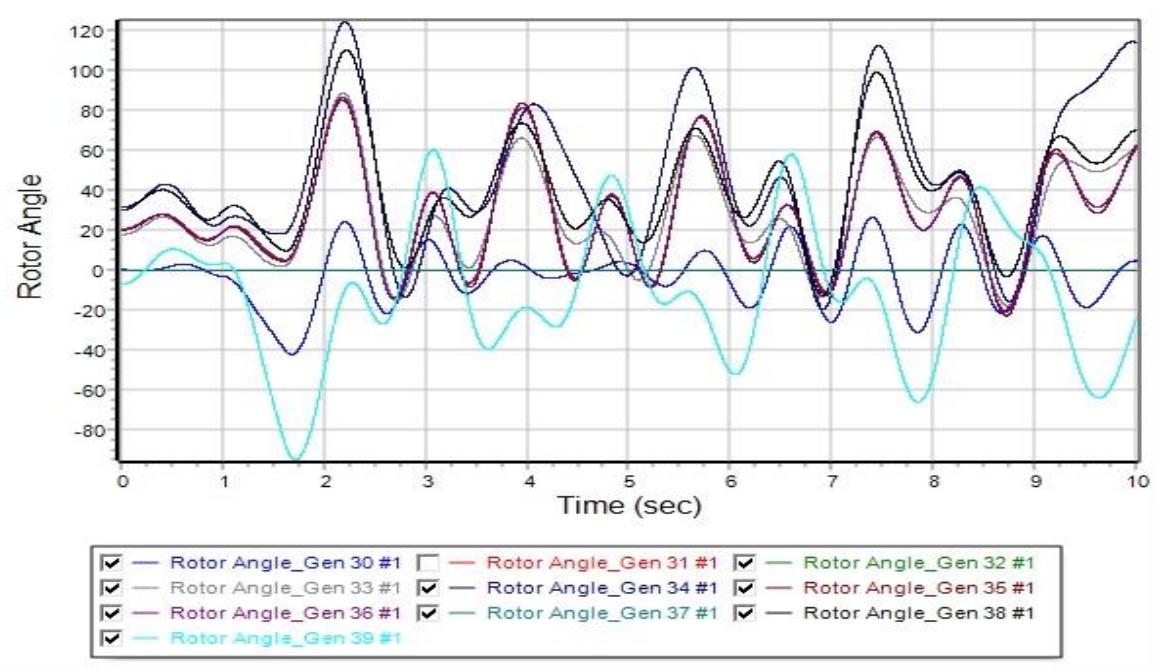
6.3.6 Σενάριο B2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20%

ΑΠΕ

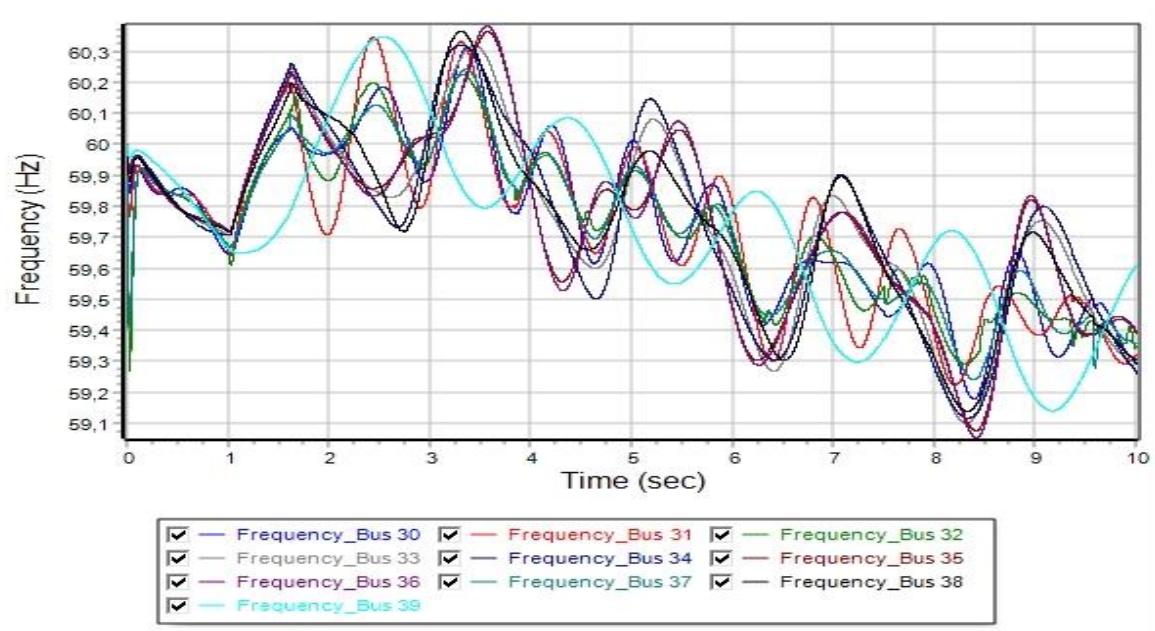
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,60 sec, δηλ. 0,60 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,60 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 11. Παράλληλα, στις Εικόνες 61, 62, 63, 64 και 65 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 66, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 11: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B2

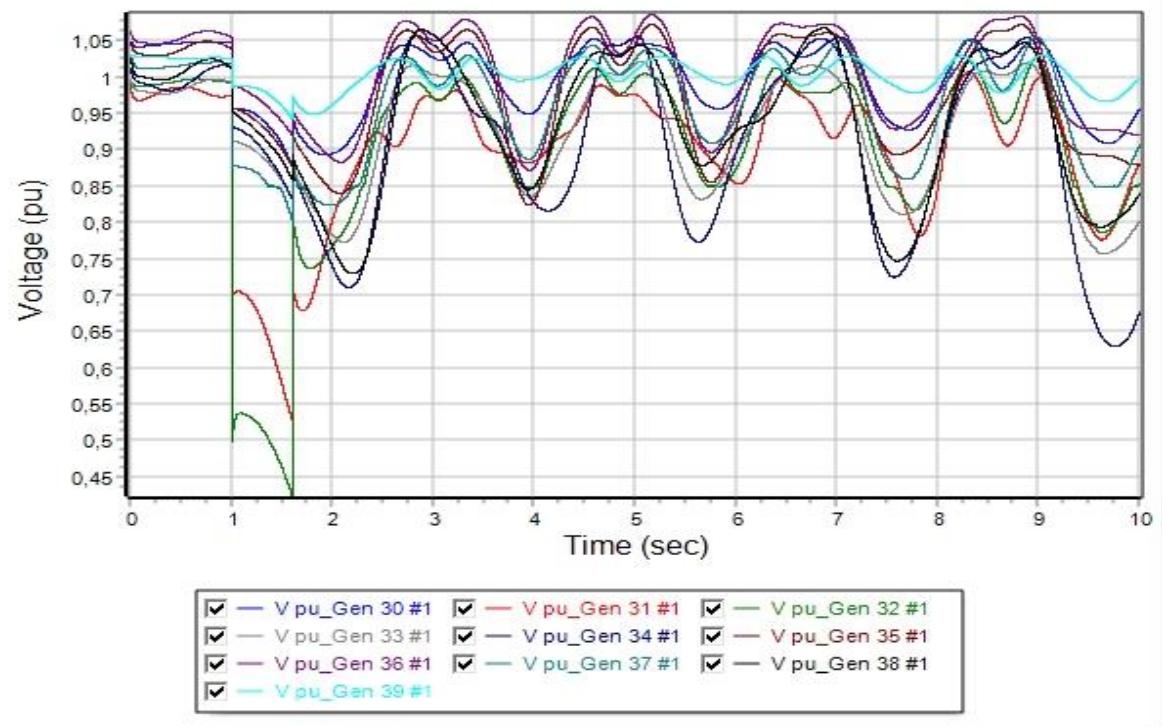
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,60
t_{open_line}	1,60
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,60



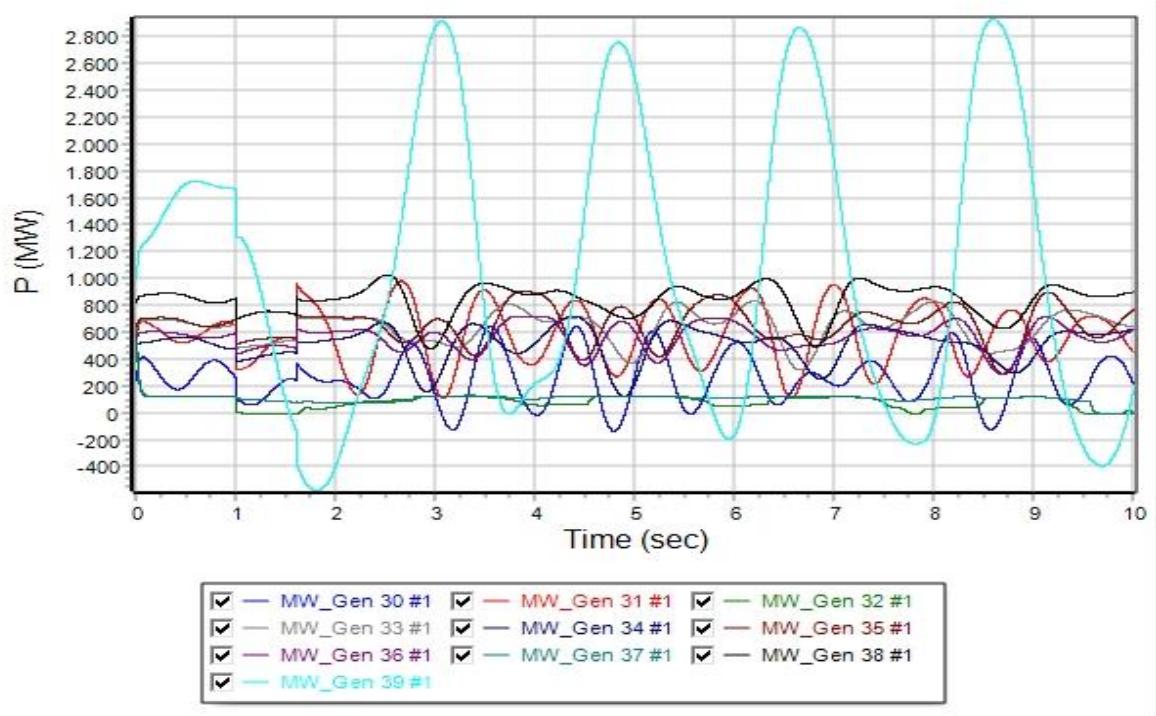
Εικόνα 61: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)



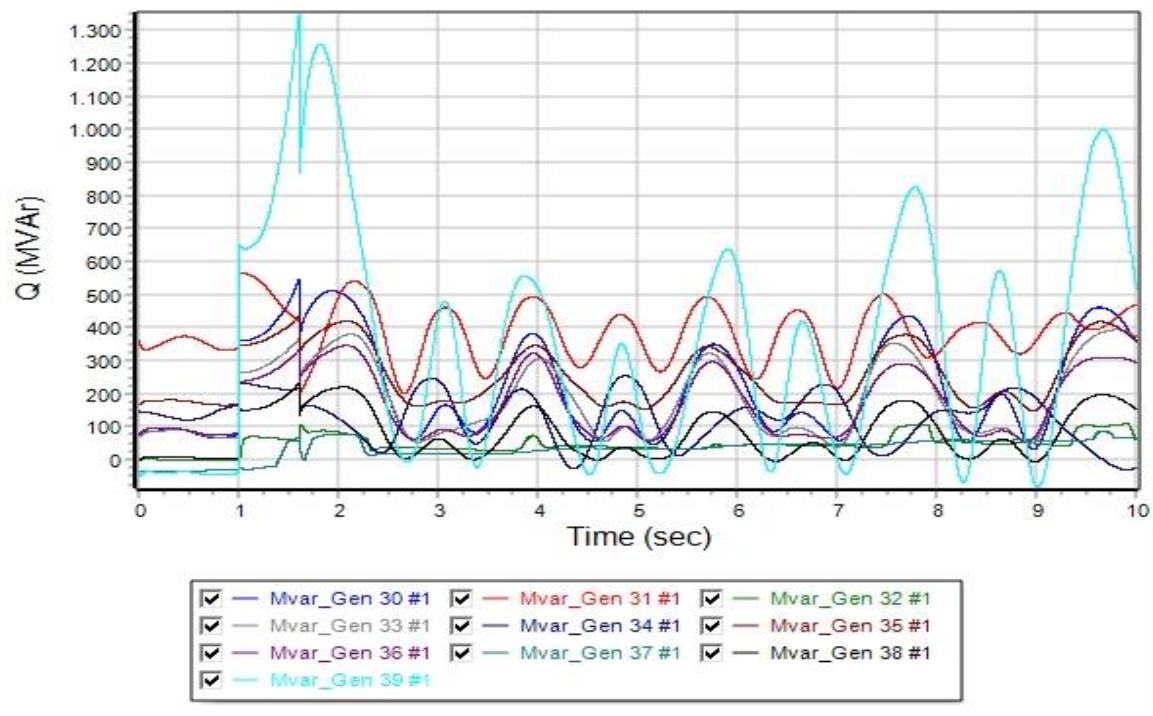
Εικόνα 62: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)



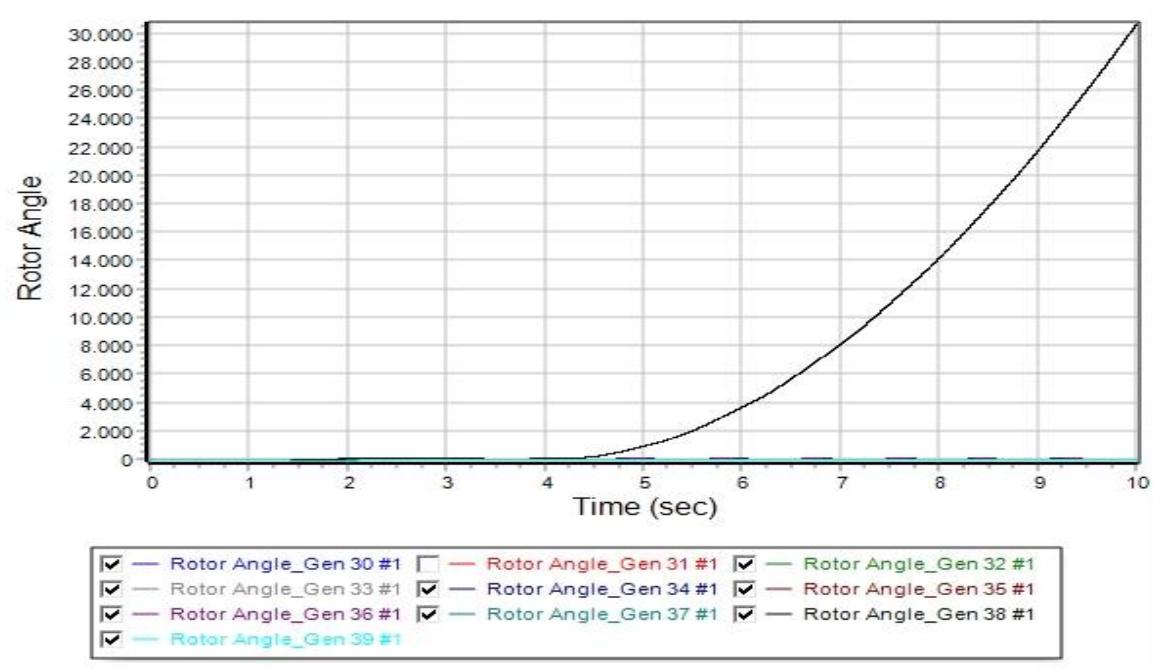
Εικόνα 63: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)



Εικόνα 64: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)



Εικόνα 65: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,60 sec (Σενάριο B2)



Εικόνα 66: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,65 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B2)

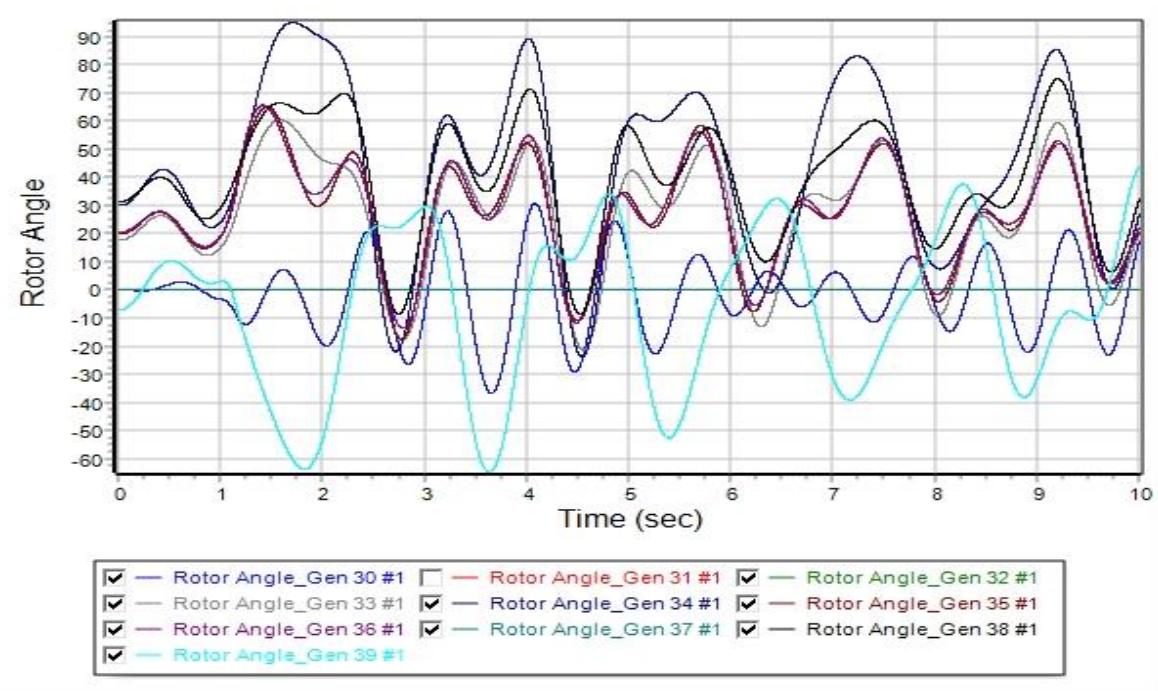
6.3.7 Σενάριο B3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20%

ΑΠΕ

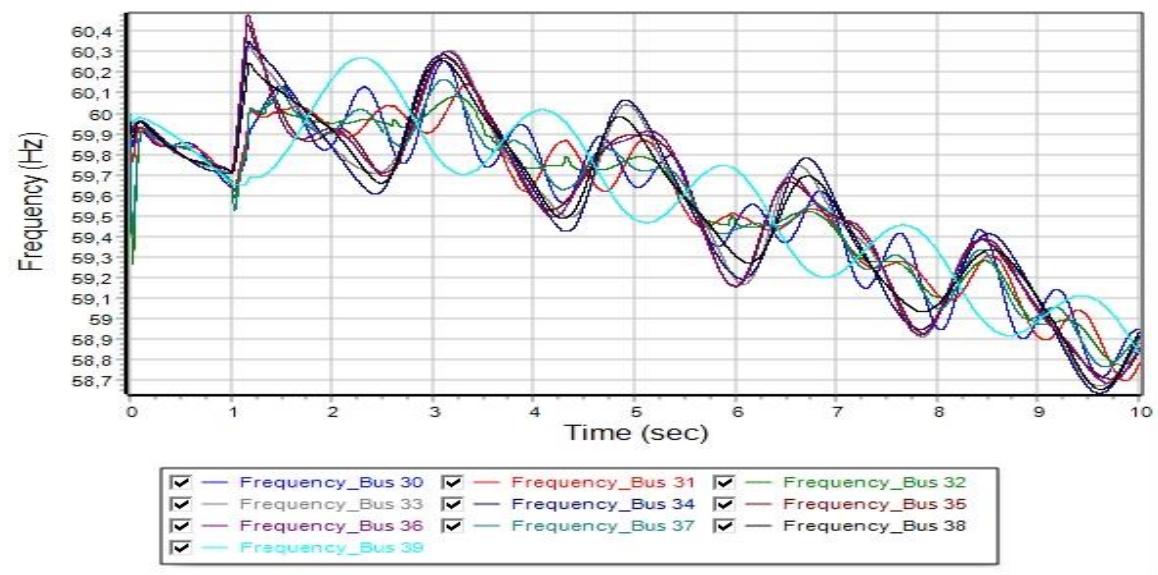
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,15 sec, δηλ. 0,15 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 12. Παράλληλα, στις Εικόνες 67, 68, 69, 70 και 71 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 72, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 12: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B3

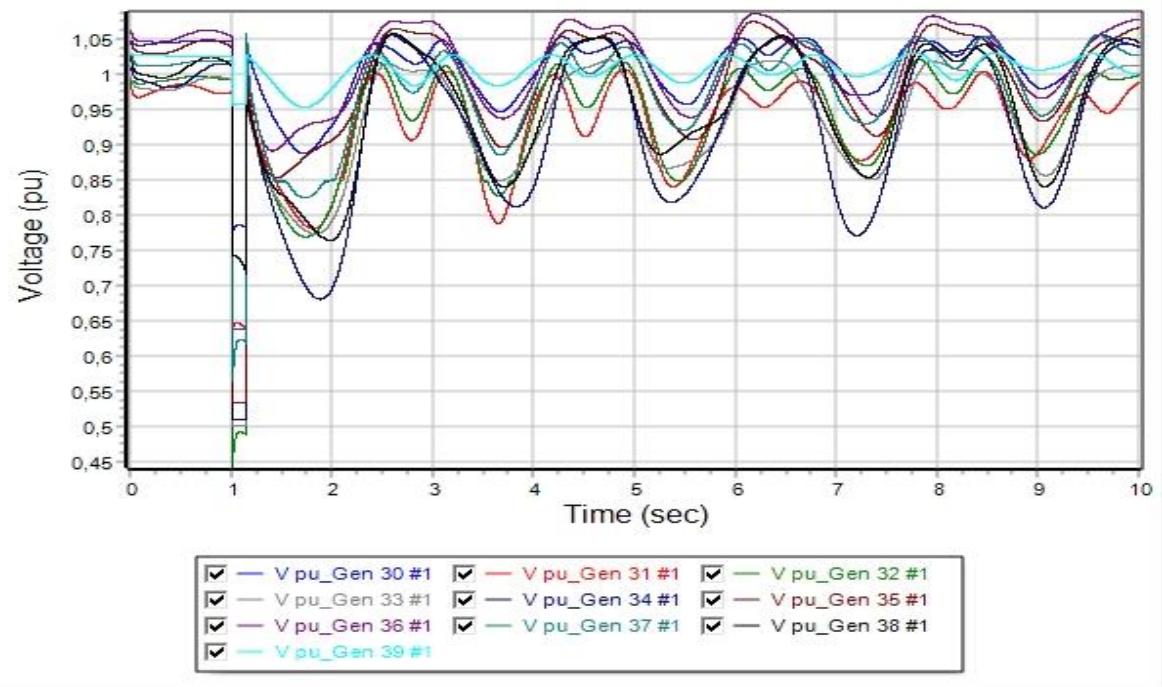
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,15
t_{open_line}	1,15
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,15



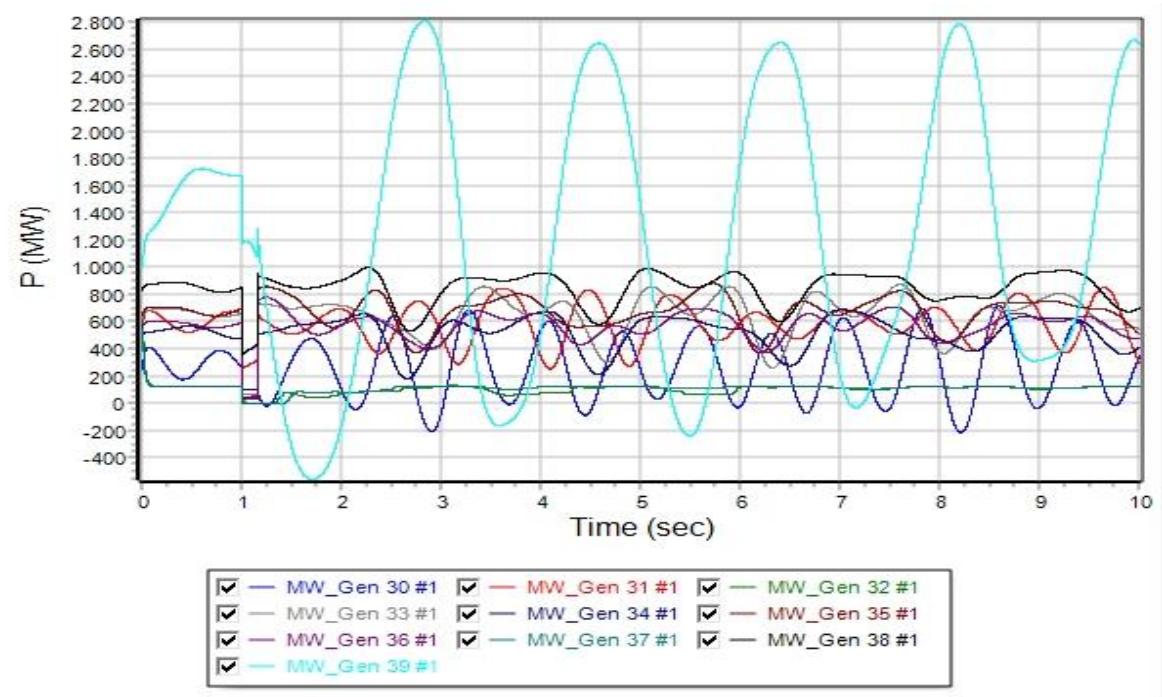
Εικόνα 67: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)



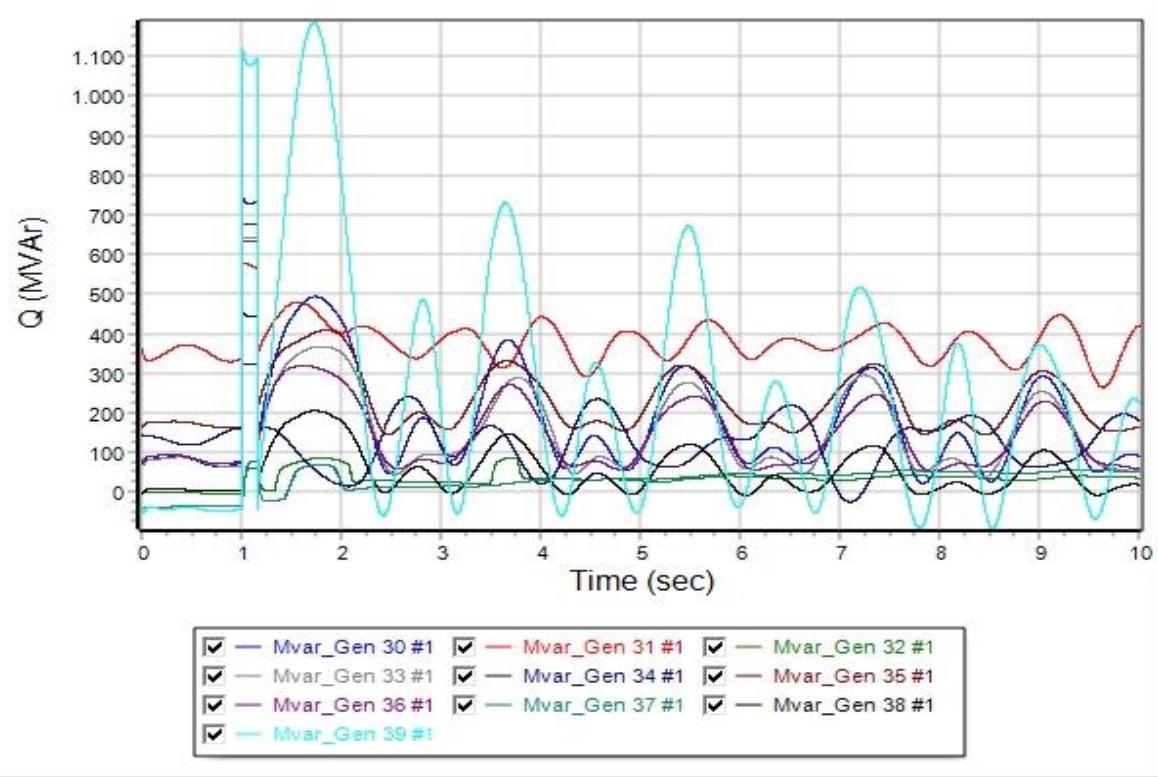
Εικόνα 68: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)



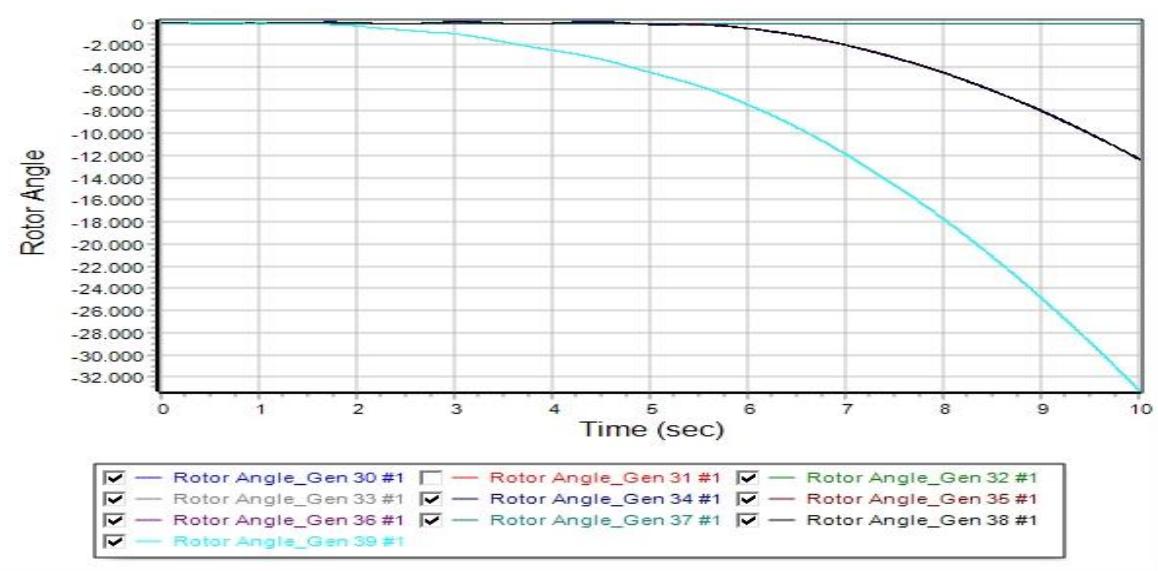
Εικόνα 69: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)



Εικόνα 70: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)



Εικόνα 71: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B3)



Εικόνα 72: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B3)

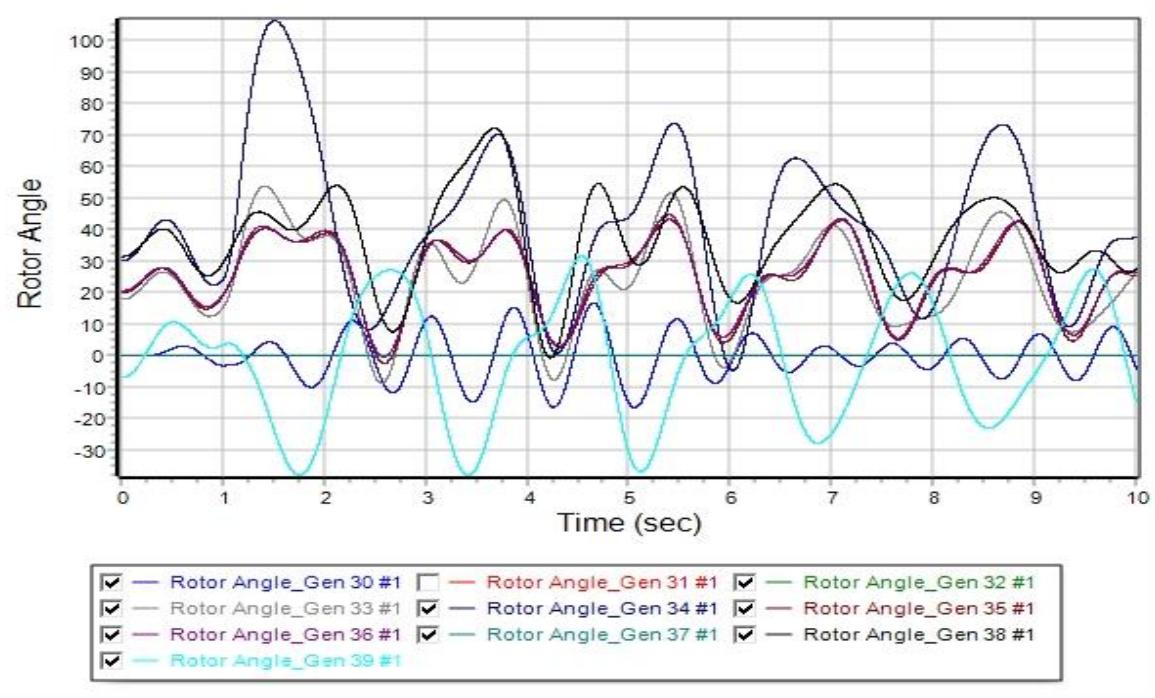
6.3.8 Σενάριο B4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20%

ΑΠΕ

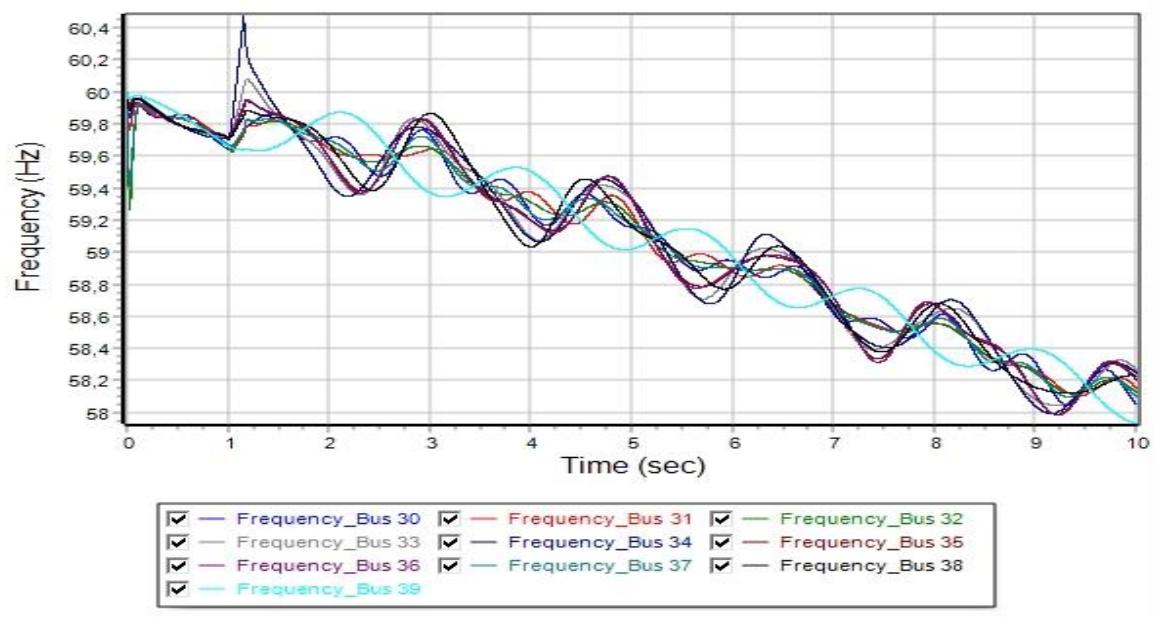
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,15 sec, δηλ. 0,15 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 13. Παράλληλα, στις Εικόνες 73, 74, 75, 76 και 77 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 78, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 13: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B4

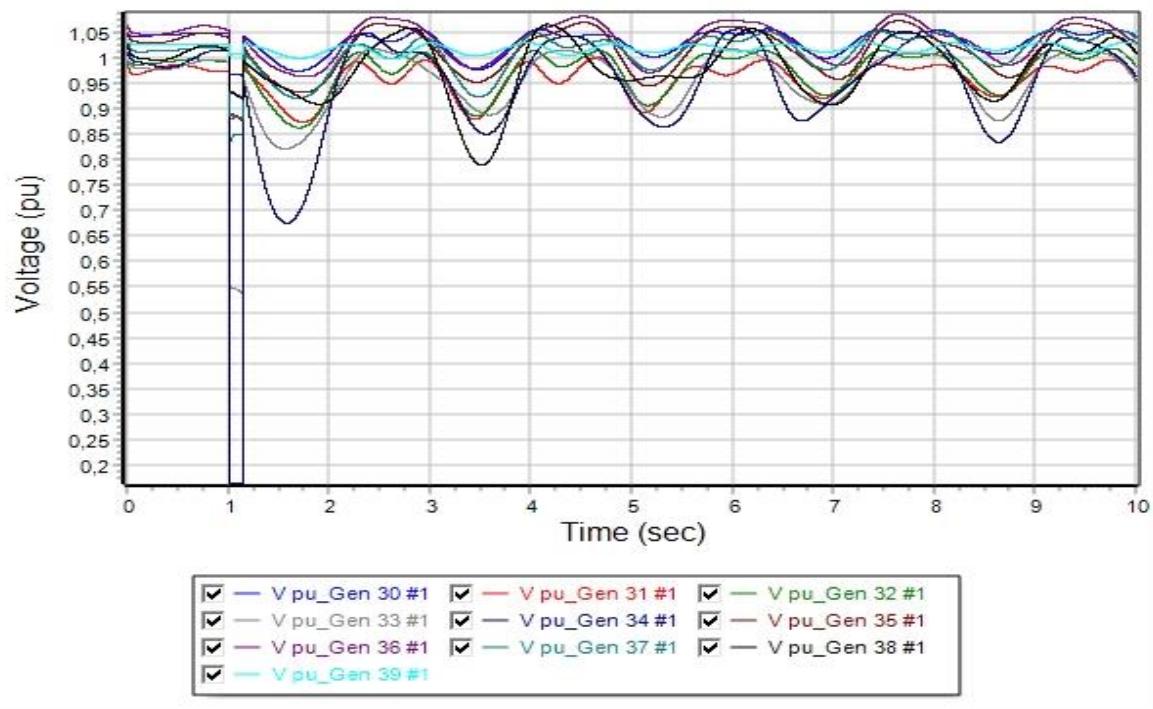
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,15
t_{open_line}	1,15
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,15



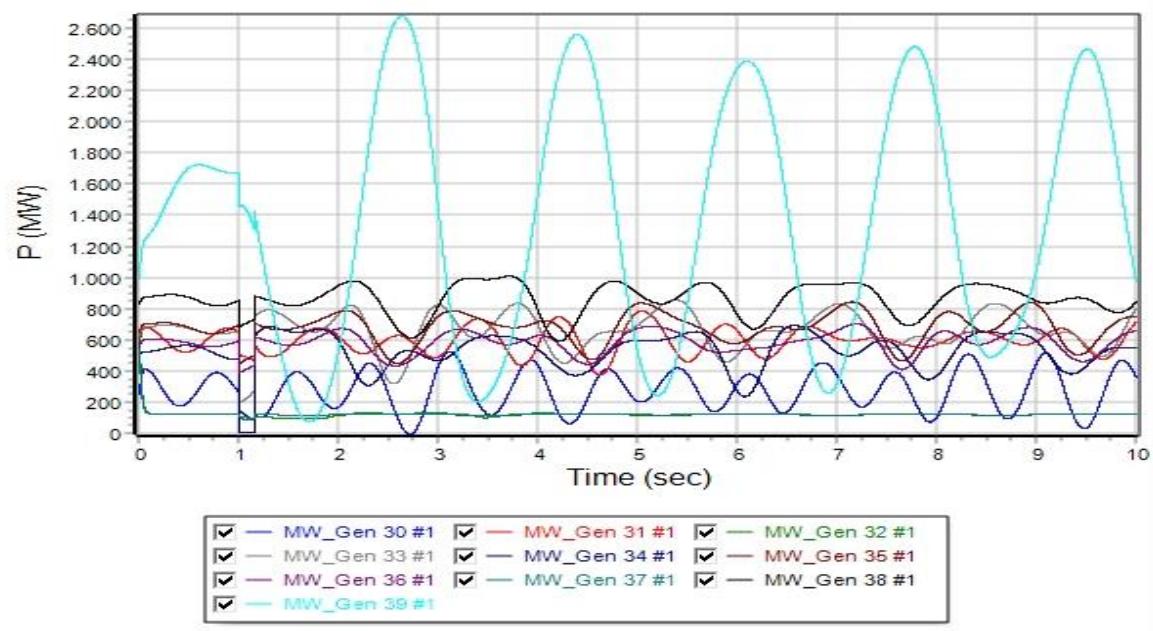
Εικόνα 73: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)



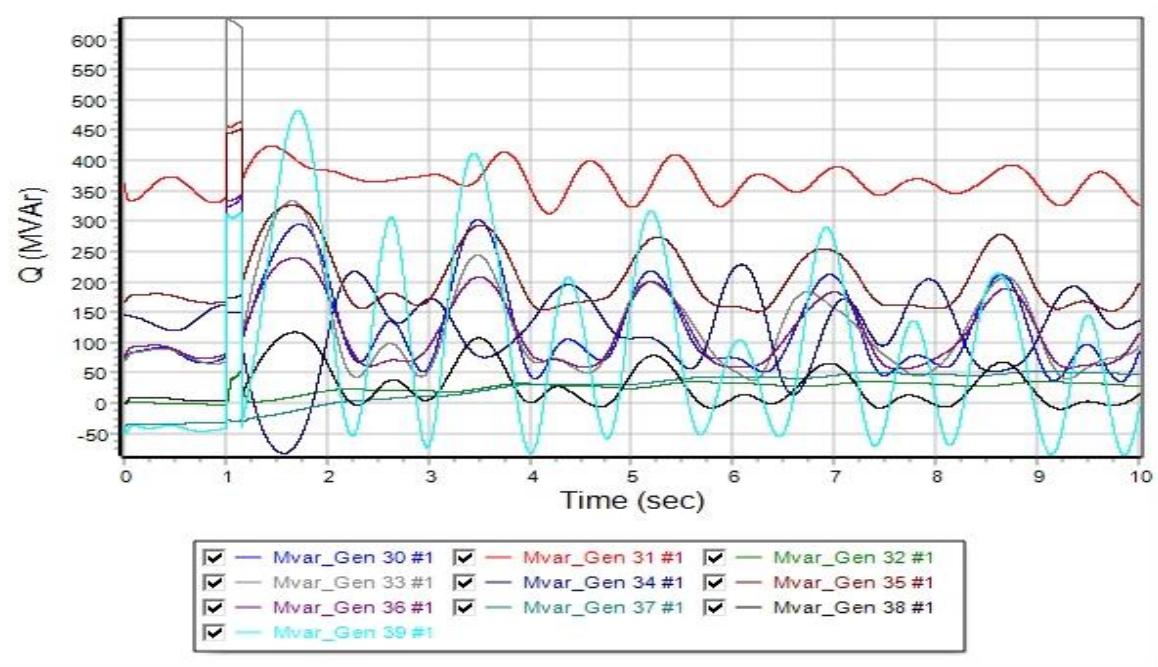
Εικόνα 74: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)



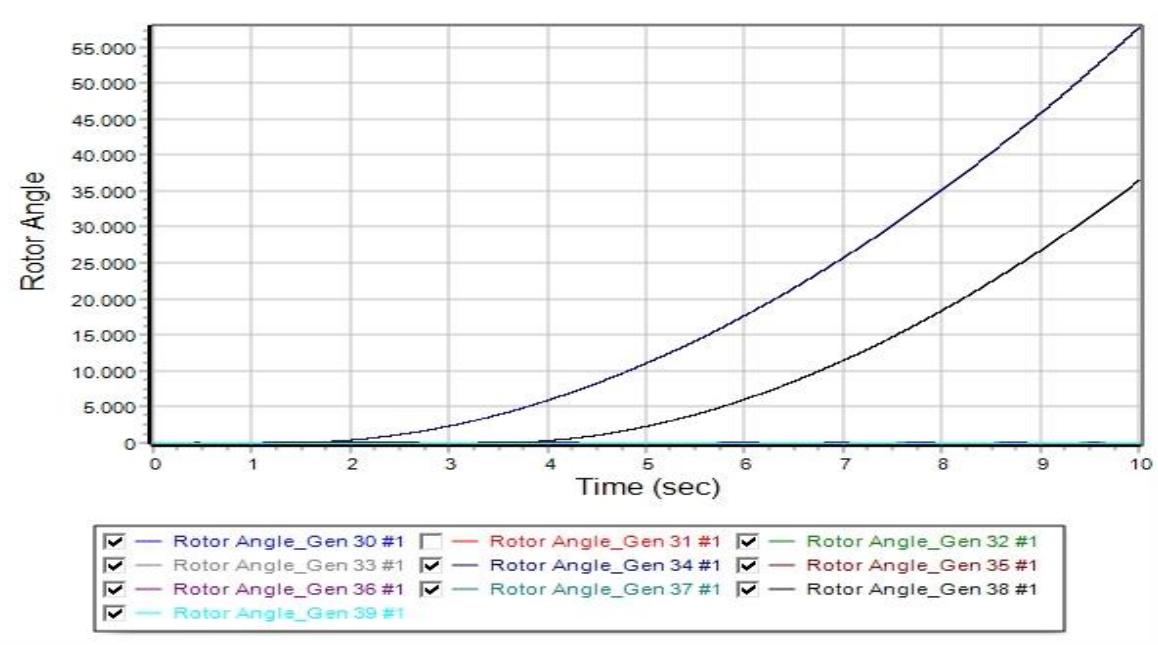
Εικόνα 75: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)



Εικόνα 76: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)



Εικόνα 77: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο B4)



Εικόνα 78: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B4)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα:

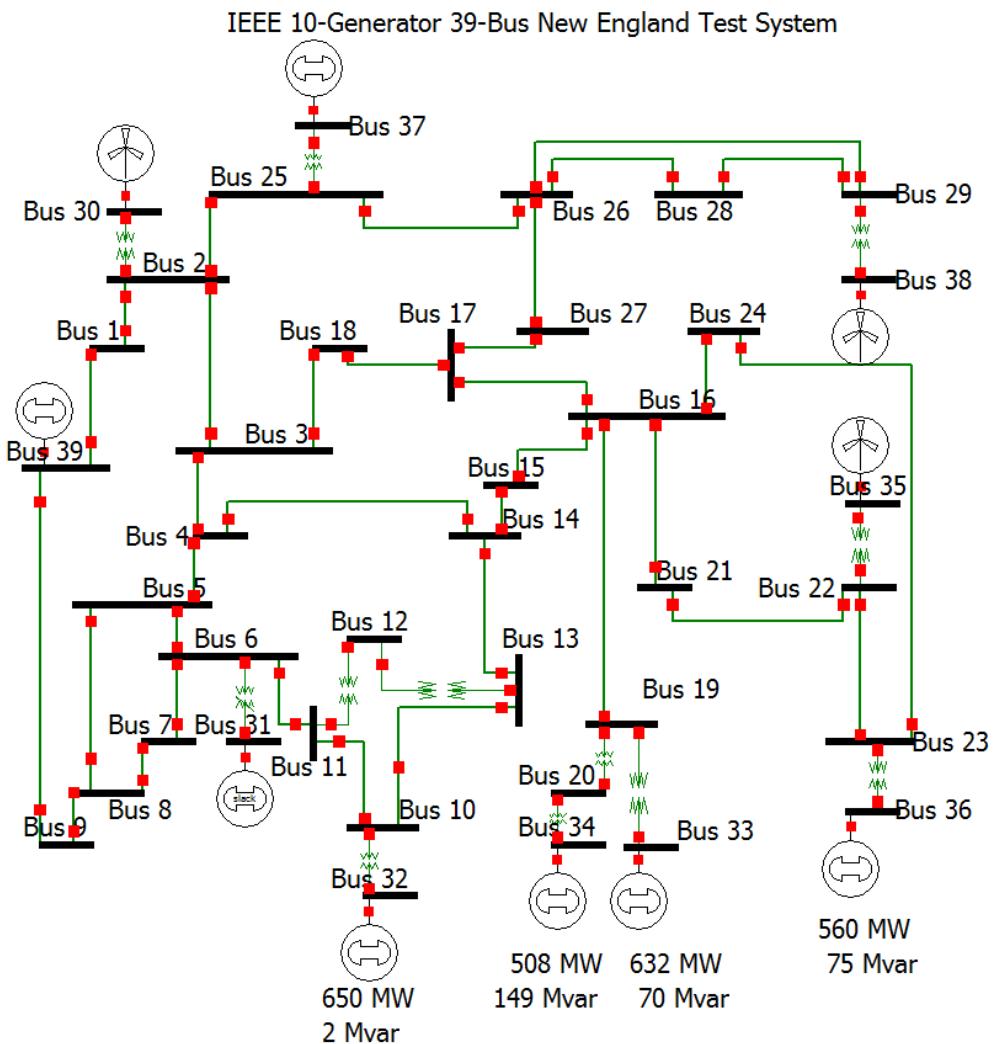
Πίνακας 14: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια B1-B4

Χρονική στιγμή/ Σενάριο B	B1	B2	B3	B4
t_{fault}	1,00	1,00	1,00	1,00
t_{clear}	1,75	1,60	1,15	1,15
t_{open_line}	1,75	1,60	1,15	1,15
t_{close_line}	5,00	5,00	5,00	5,00
$t_{critical}$	0,75	0,60	0,15	0,15

6.3.9 Σενάριο Γ1: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30%

ΑΠΕ

Στο σενάριο Γ, εξετάζεται η ενσωμάτωση ανεμογεννητριών με ποσοστό διείσδυσης ίσο με το 30% της συνολικής παραγωγής ισχύος του ΣΗΕ. Οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 30, 35 και 38 αντικαθίστανται από ανεμογεννήτριες DFIG (Τύπου 3), με παραγωγή ισχύος ίση με 1730 MW. Το σύστημα προς μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 79.

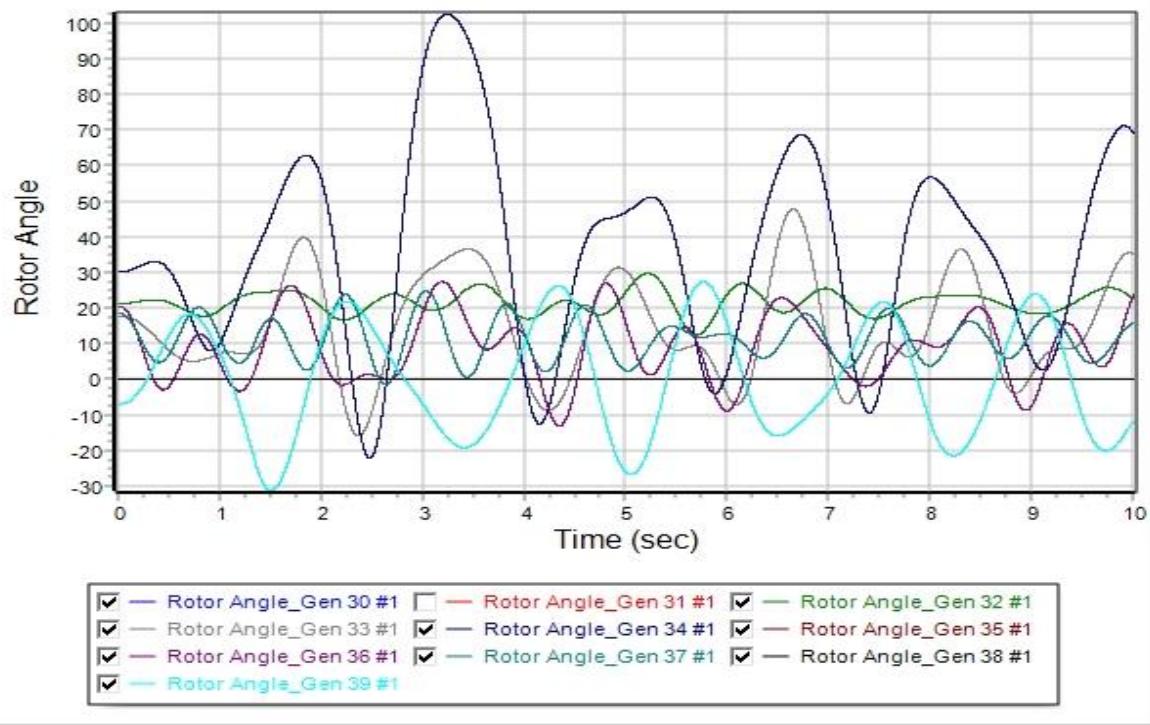


Εικόνα 79: Σύστημα 39 ζυγών της IEEE, στο λογισμικό PowerWorld Simulator, για το σενάριο Γ

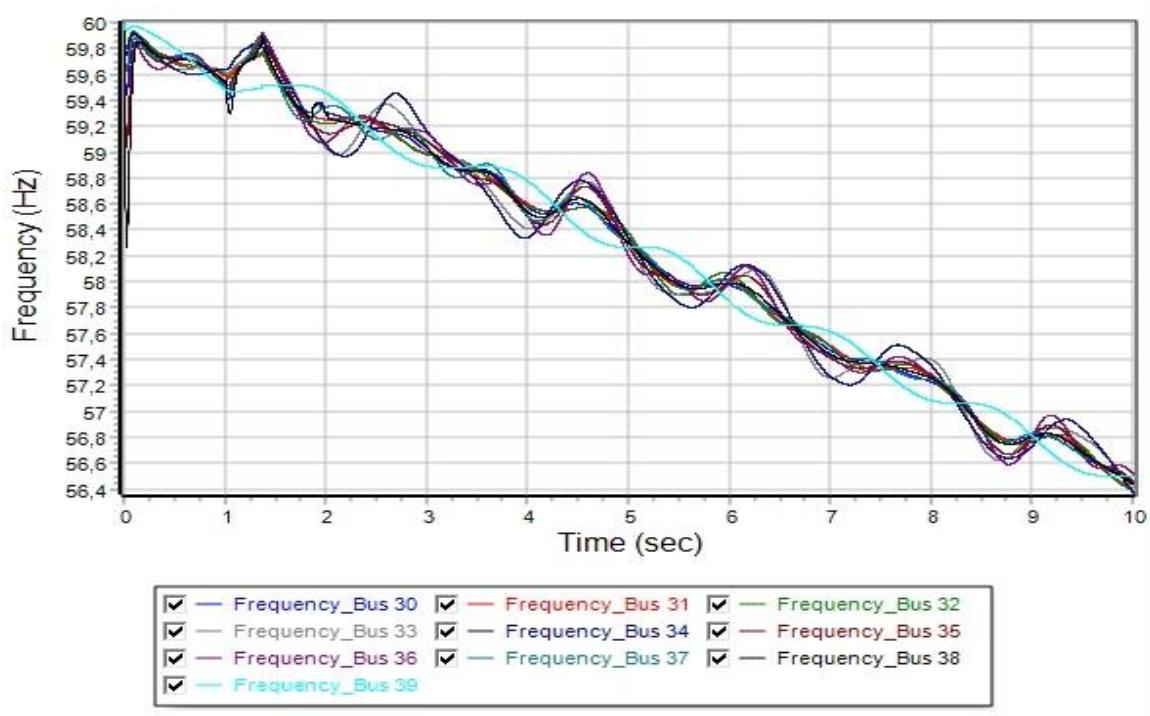
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0$ sec, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,15 sec, δηλ. 0,35 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,35$ sec. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 15. Παράλληλα, στις Εικόνες 80, 81, 82, 83 και 84 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,40$ sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 85, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 15: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ1

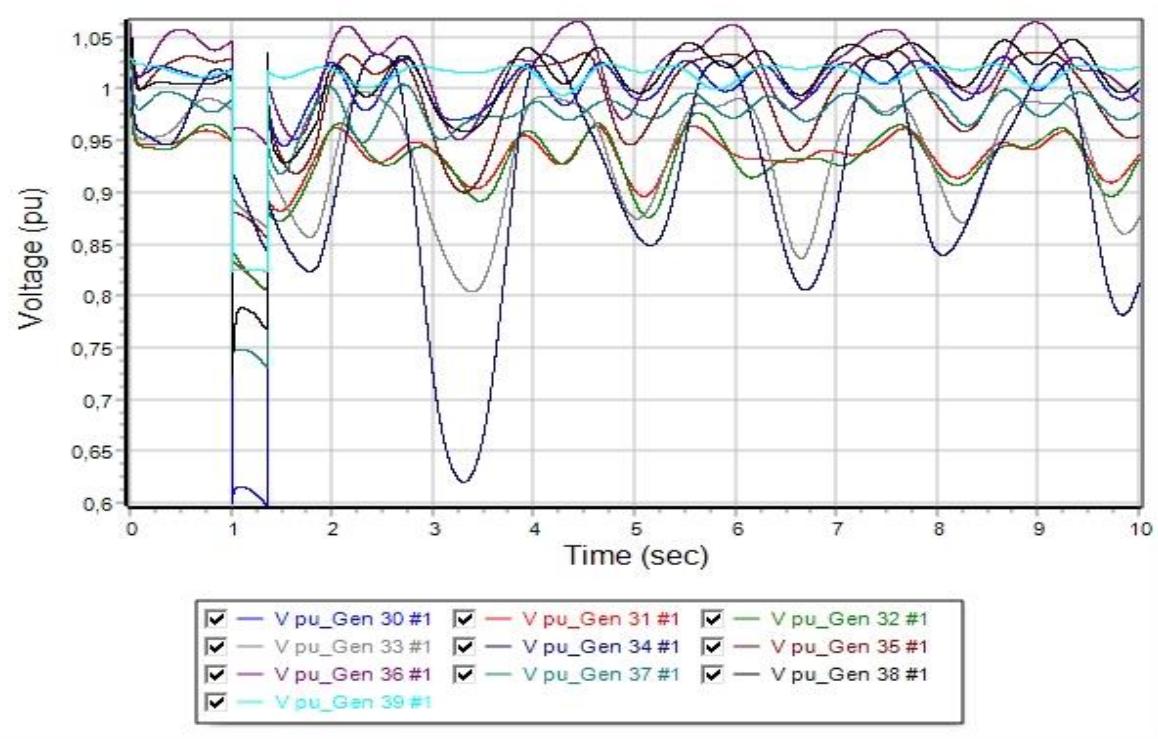
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,35
t_{open_line}	1,35
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,35



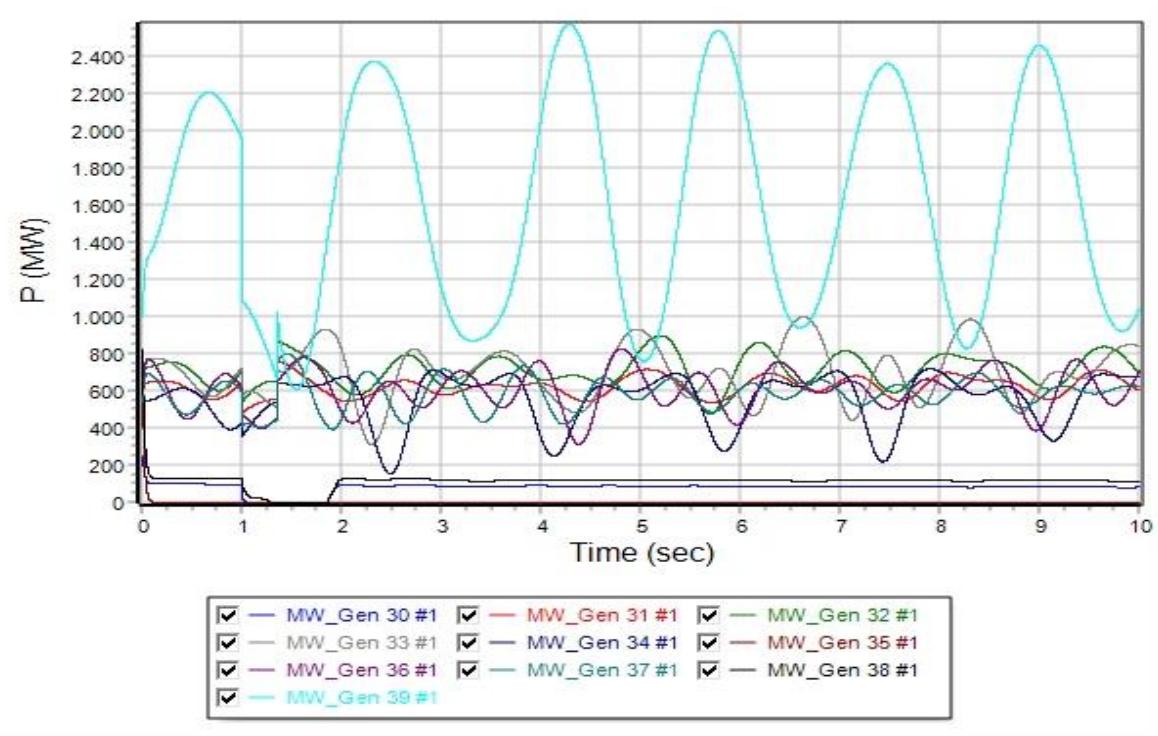
Εικόνα 80: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)



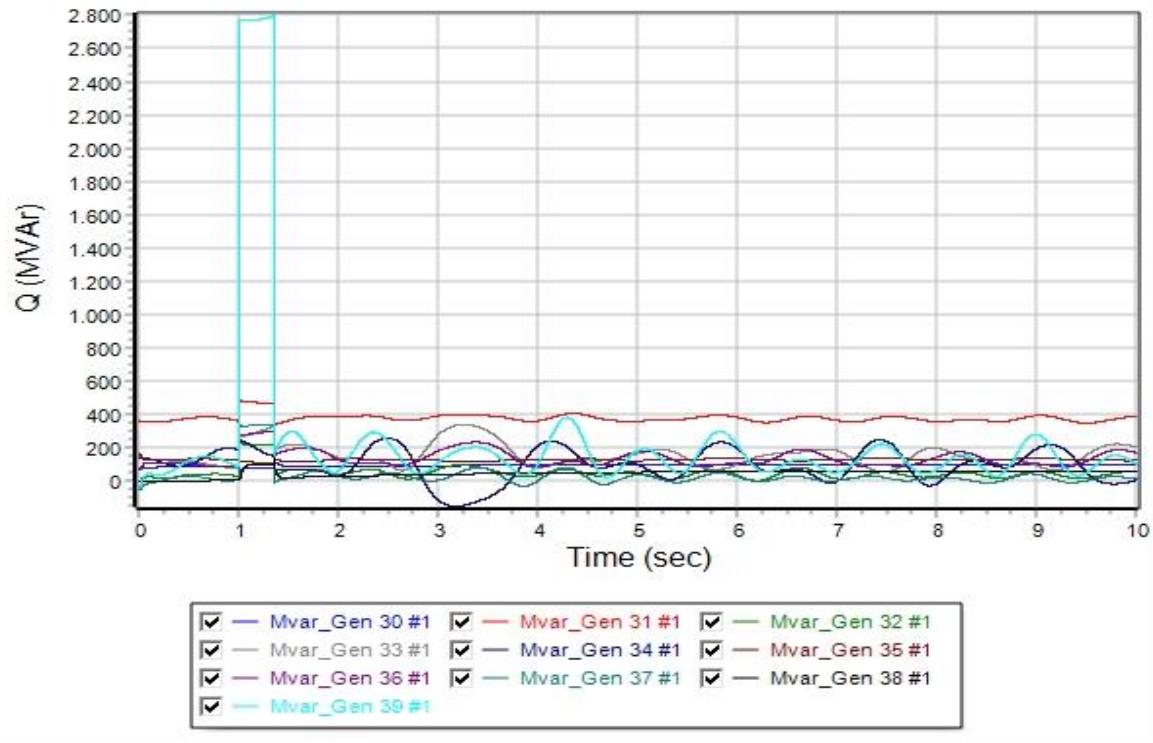
Εικόνα 81: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)



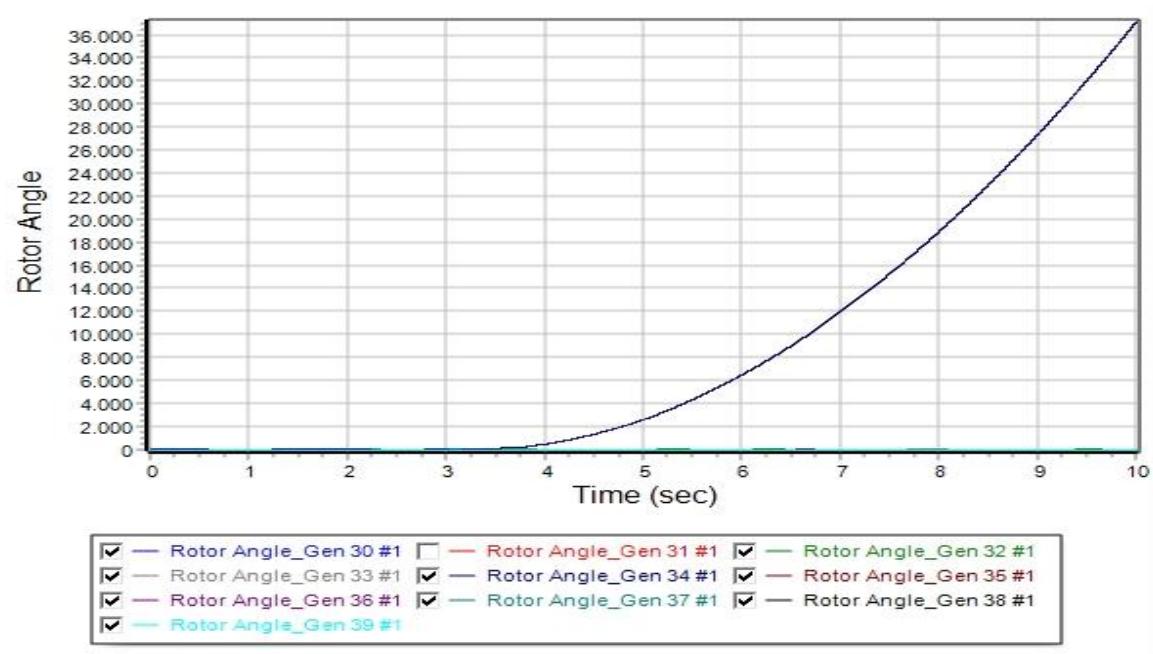
Εικόνα 82: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)



Εικόνα 83: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)



Εικόνα 84: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης īso με 0,35 sec (Σενάριο Γ1)



Εικόνα 85: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,40 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ1)

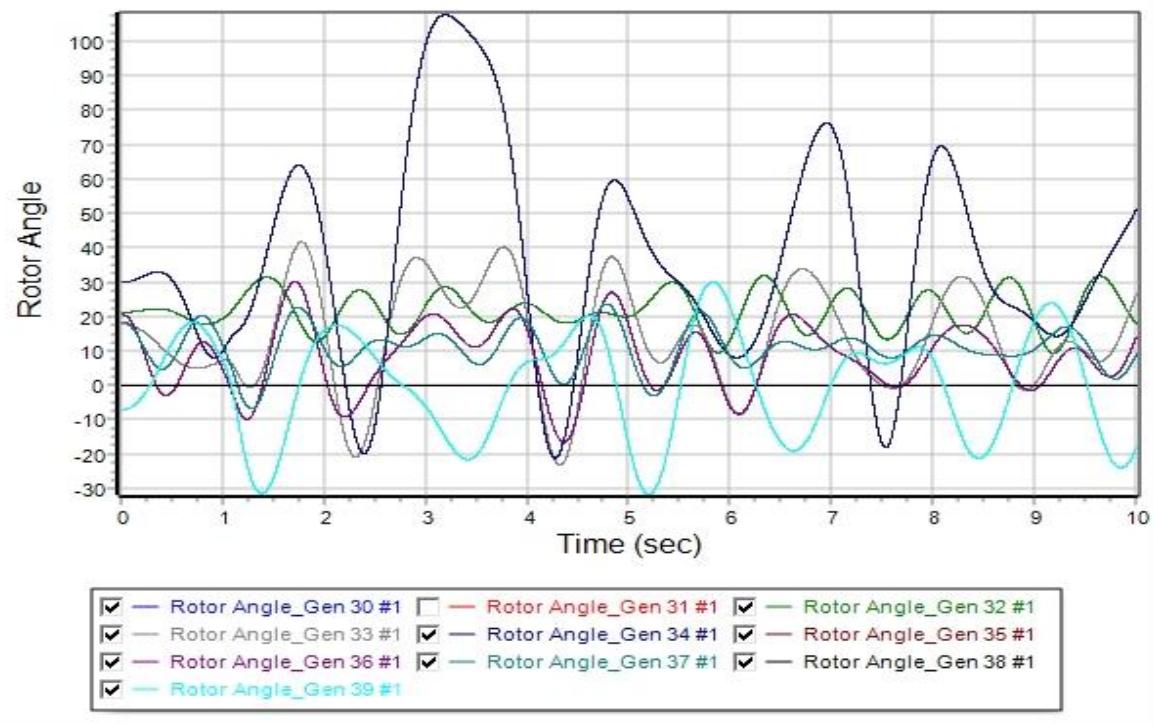
6.3.10 Σενάριο Γ2: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30%

ΑΠΕ

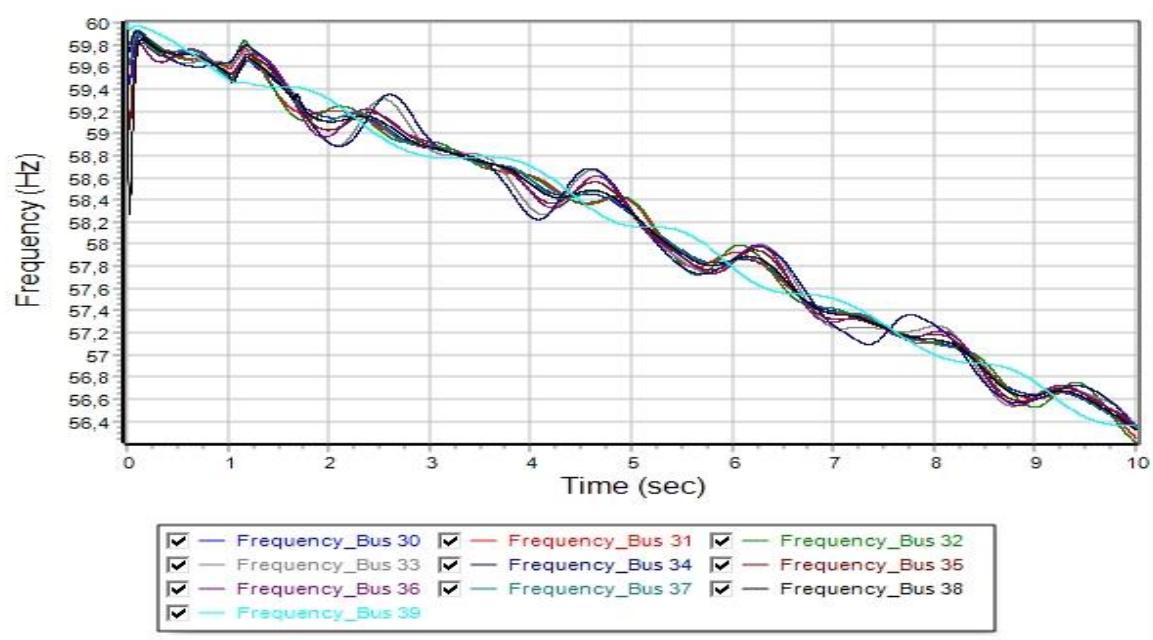
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,15 sec, δηλ. 0,15 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 16. Παράλληλα, στις Εικόνες 86, 87, 88, 89 και 90 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 91, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 16: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ2

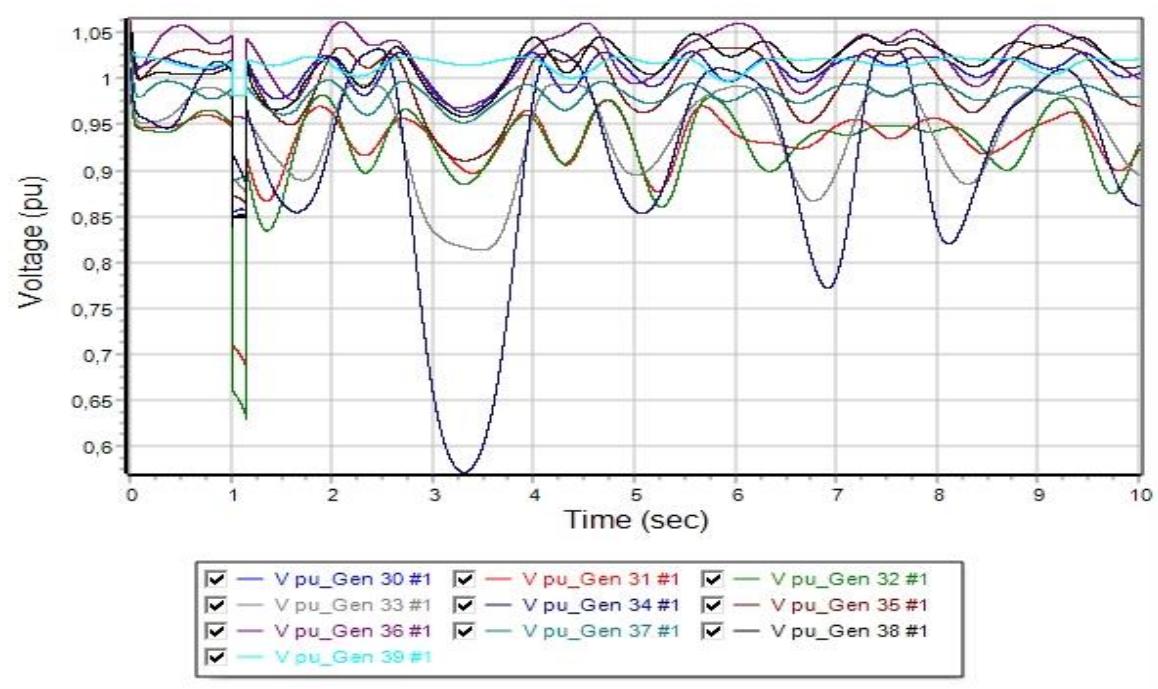
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,15
t_{open_line}	1,15
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,15



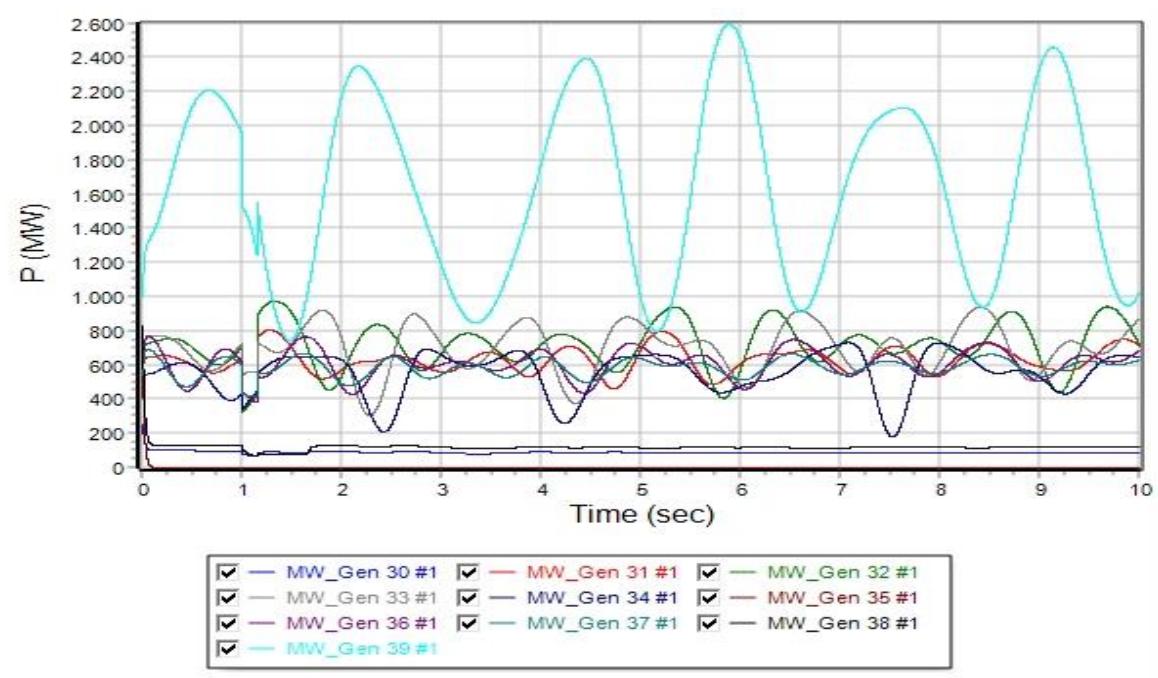
Εικόνα 86: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)



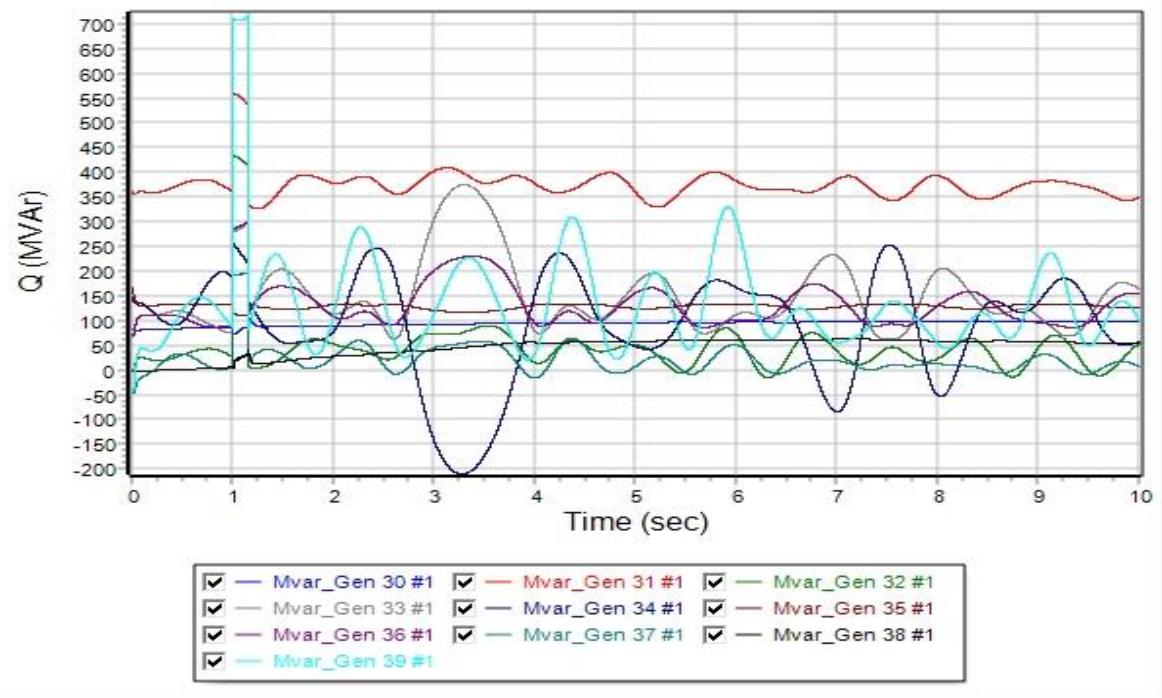
Εικόνα 87: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)



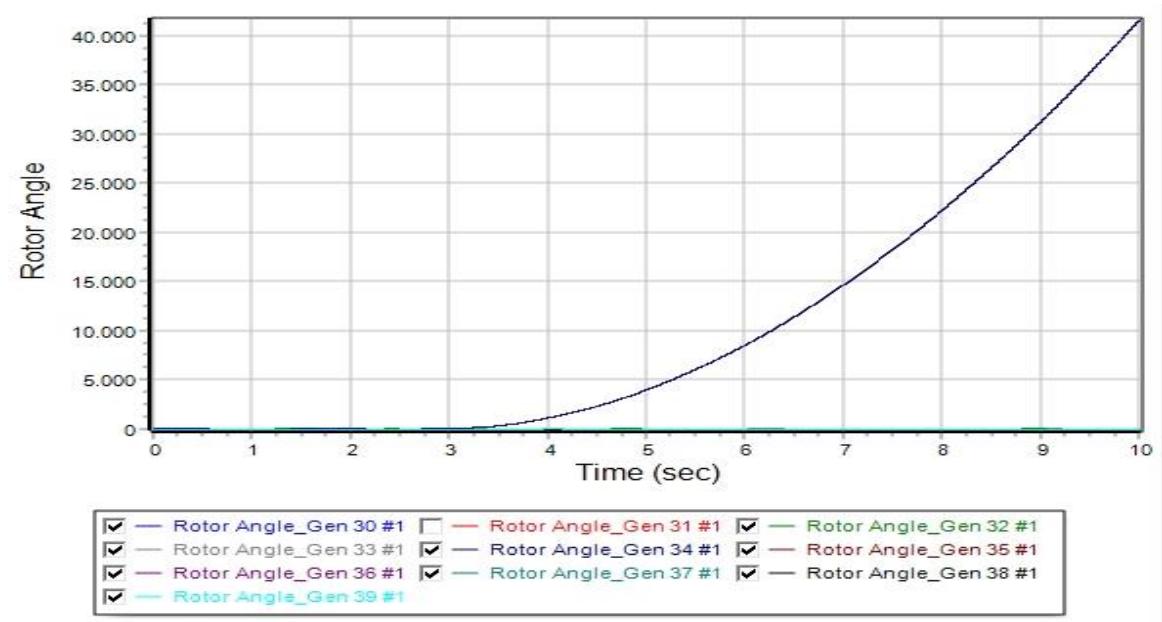
Εικόνα 88: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)



Εικόνα 89: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)



Εικόνα 90: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,15 sec (Σενάριο Γ2)



Εικόνα 91: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,20 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ2)

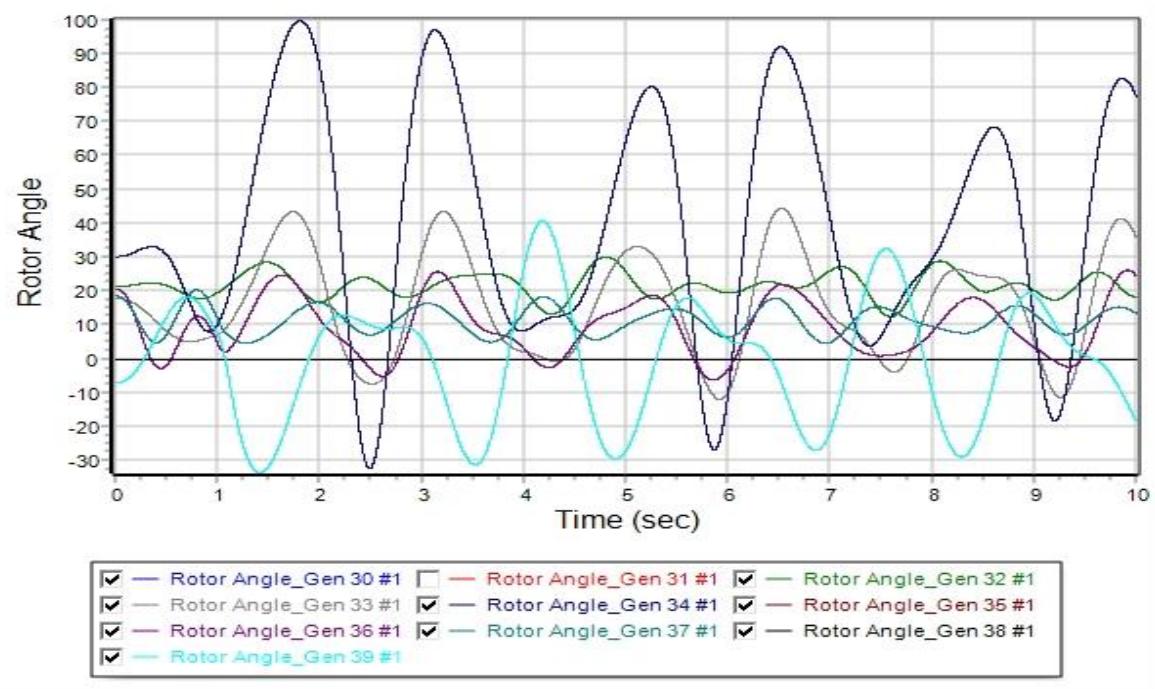
6.3.11 Σενάριο Γ3: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30%

ΑΠΕ

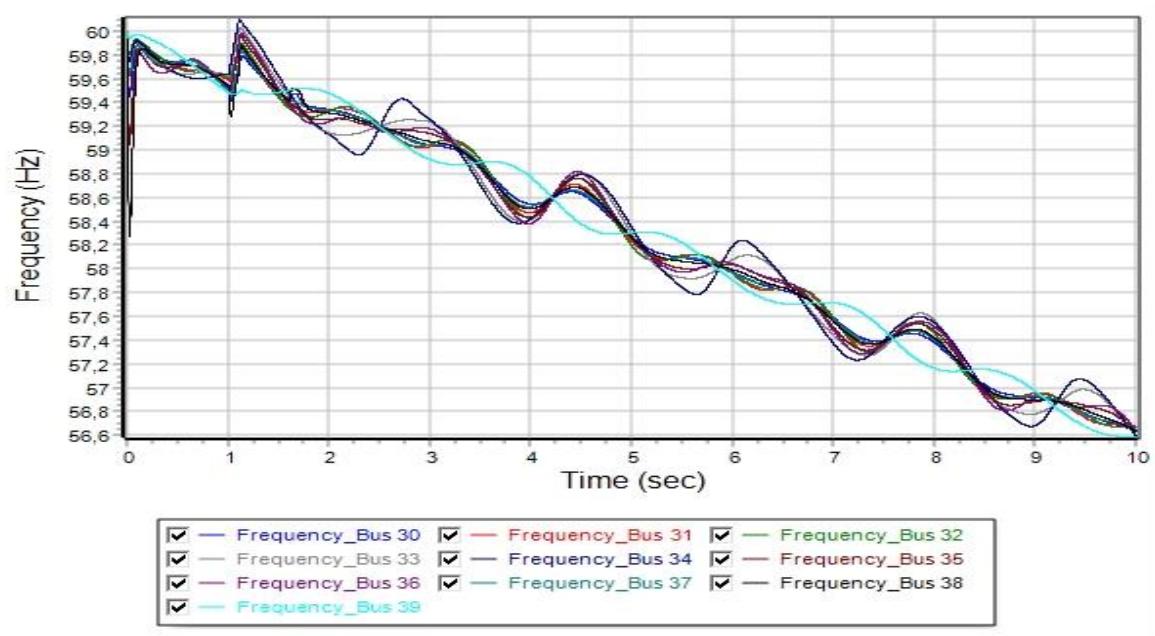
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,10 sec, δηλ. 0,10 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,10 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 17. Παράλληλα, στις Εικόνες 92, 93, 94, 95 και 96 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 97, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 17: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ3

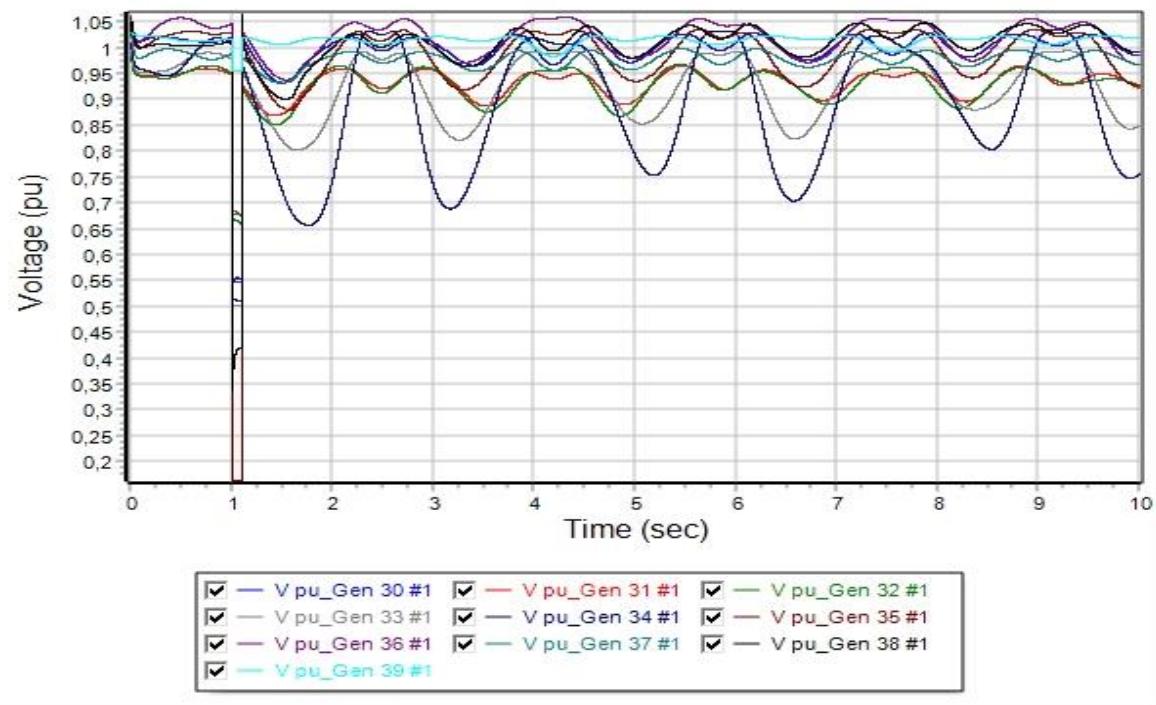
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,10
t_{open_line}	1,10
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,10



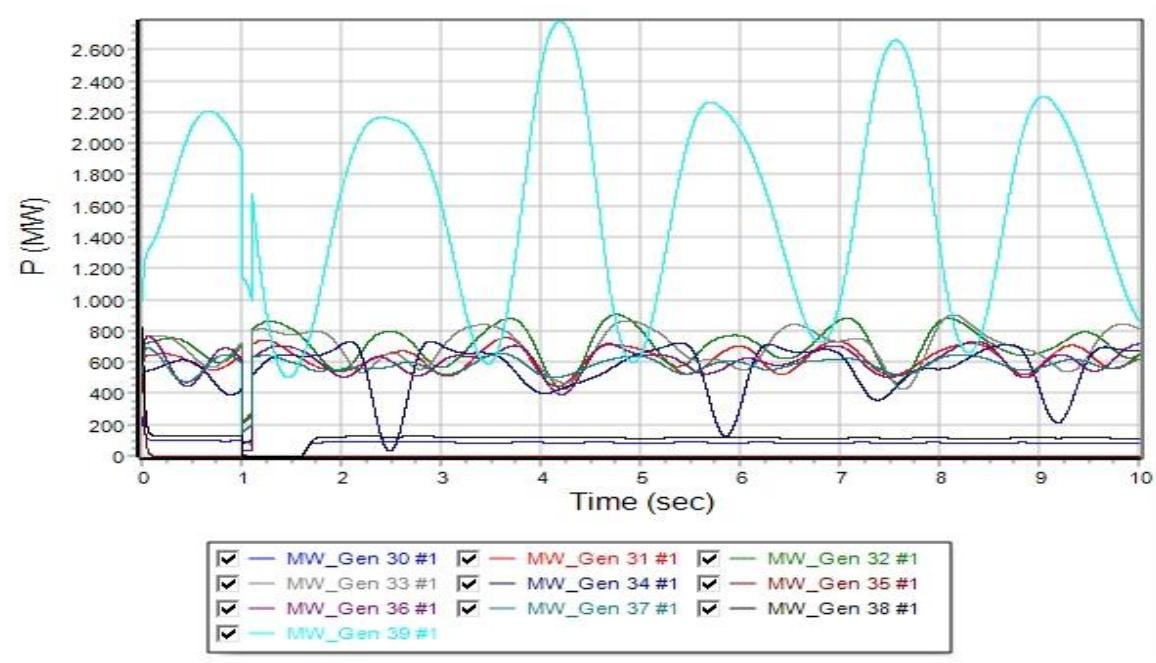
Εικόνα 92: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)



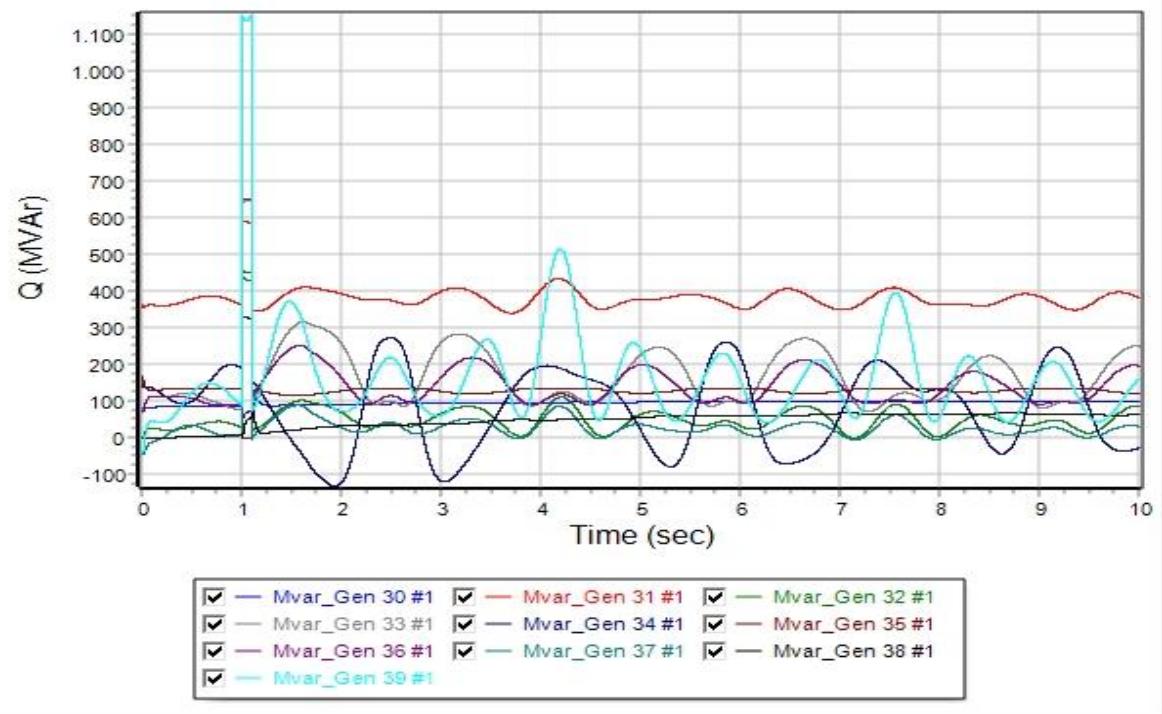
Εικόνα 93: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)



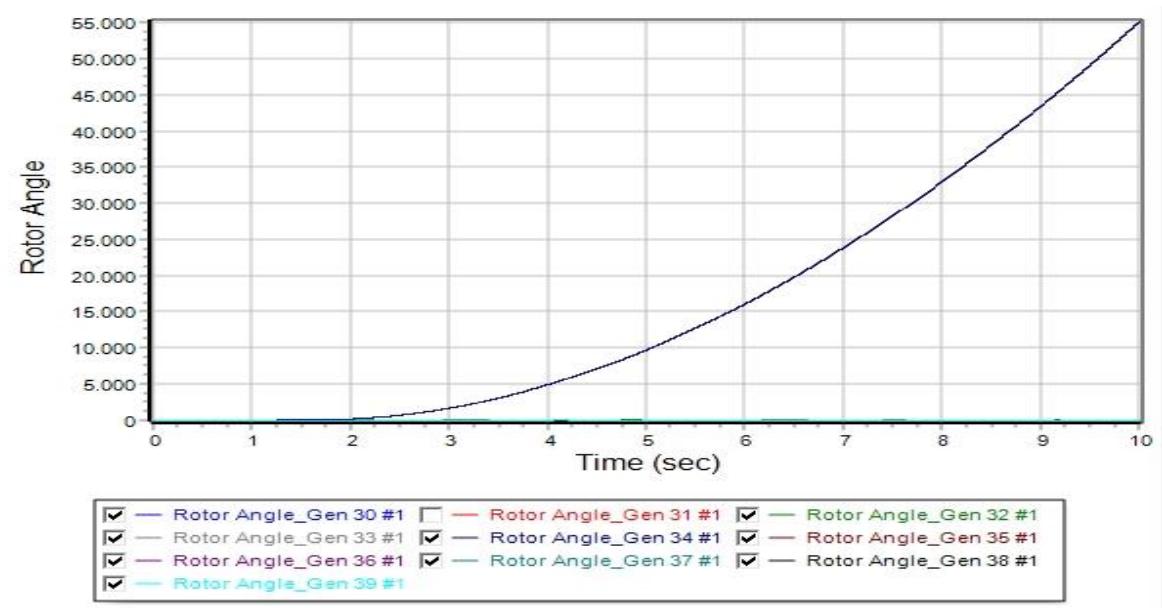
Εικόνα 94: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)



Εικόνα 95: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)



Εικόνα 96: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ3)



Εικόνα 97: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ3)

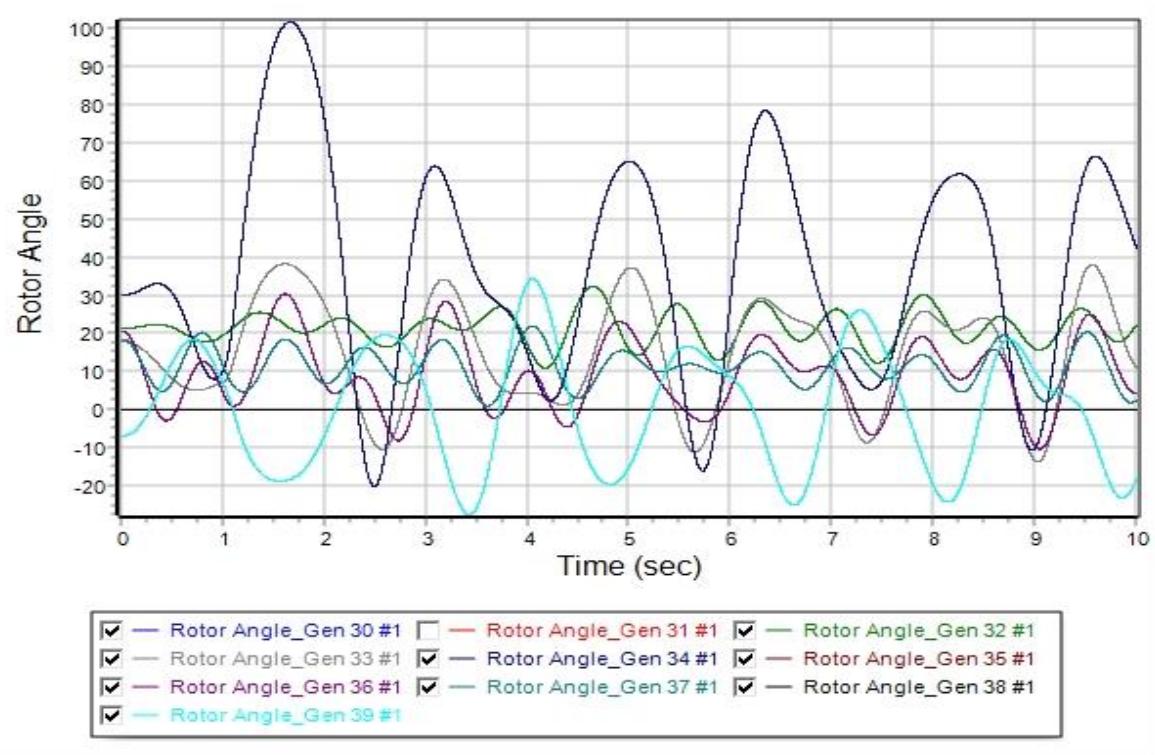
6.3.12 Σενάριο Γ4: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30%

ΑΠΕ

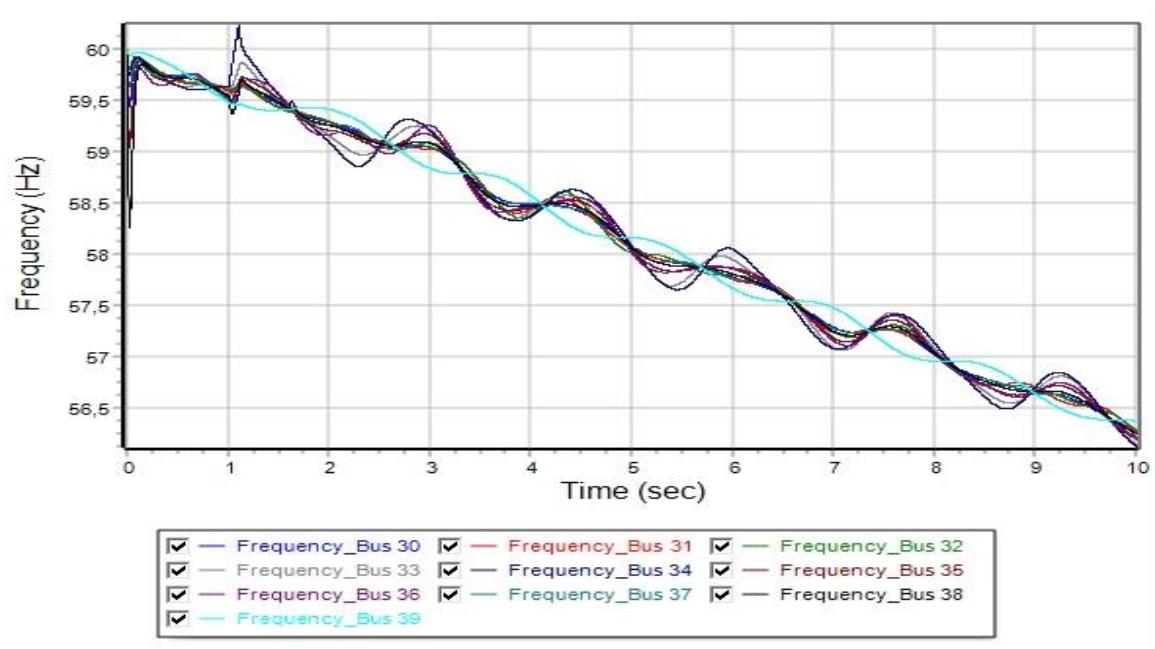
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,10 sec, δηλ. 0,10 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,10 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 18. Παράλληλα, στις Εικόνες 98, 99, 100, 101 και 102 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 103, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 18: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ4

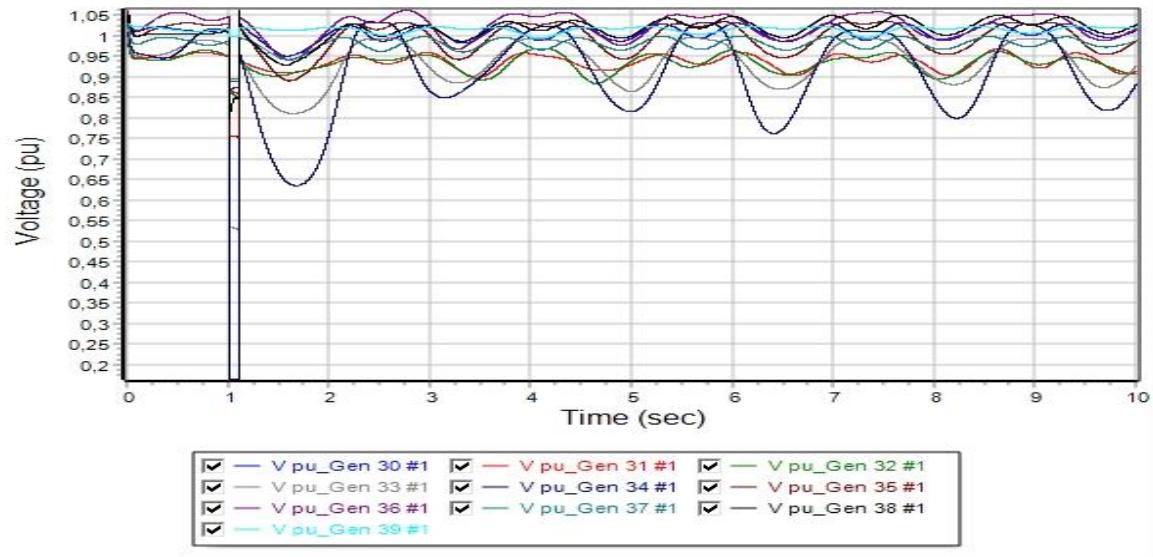
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,10
t_{open_line}	1,10
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,10



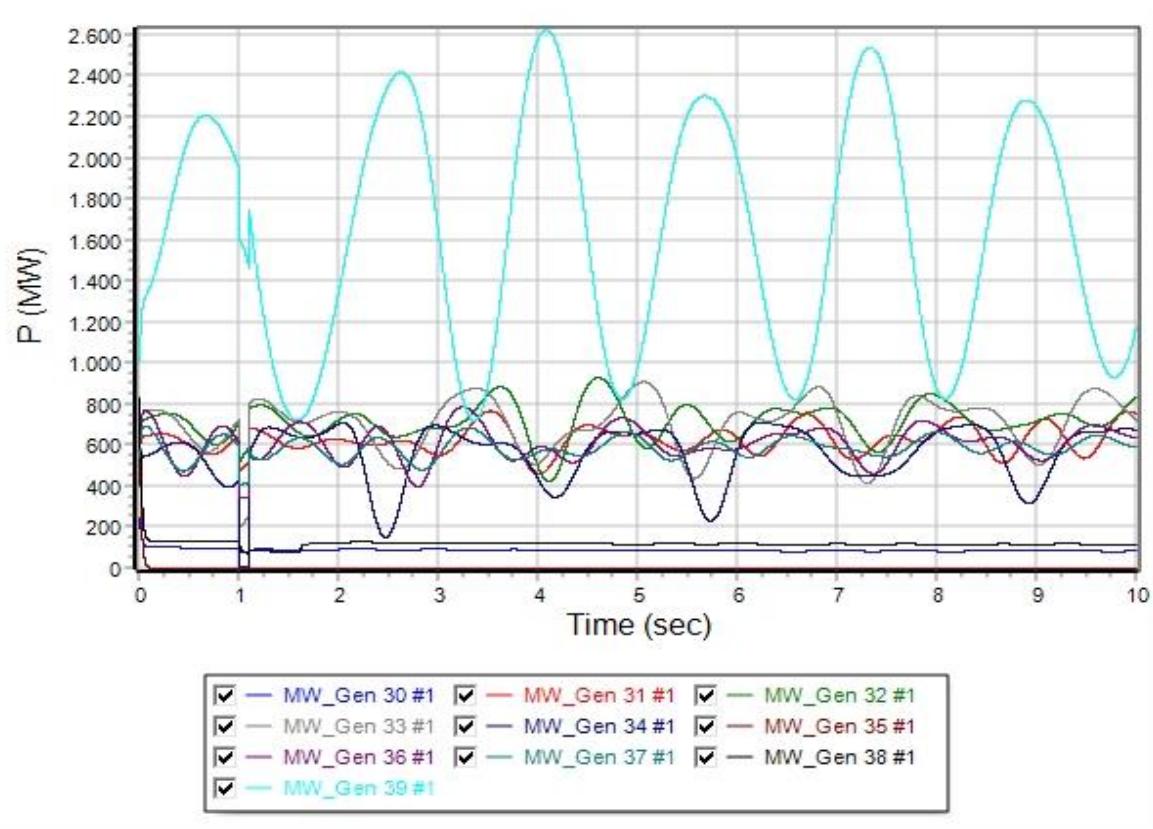
Εικόνα 98: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4)



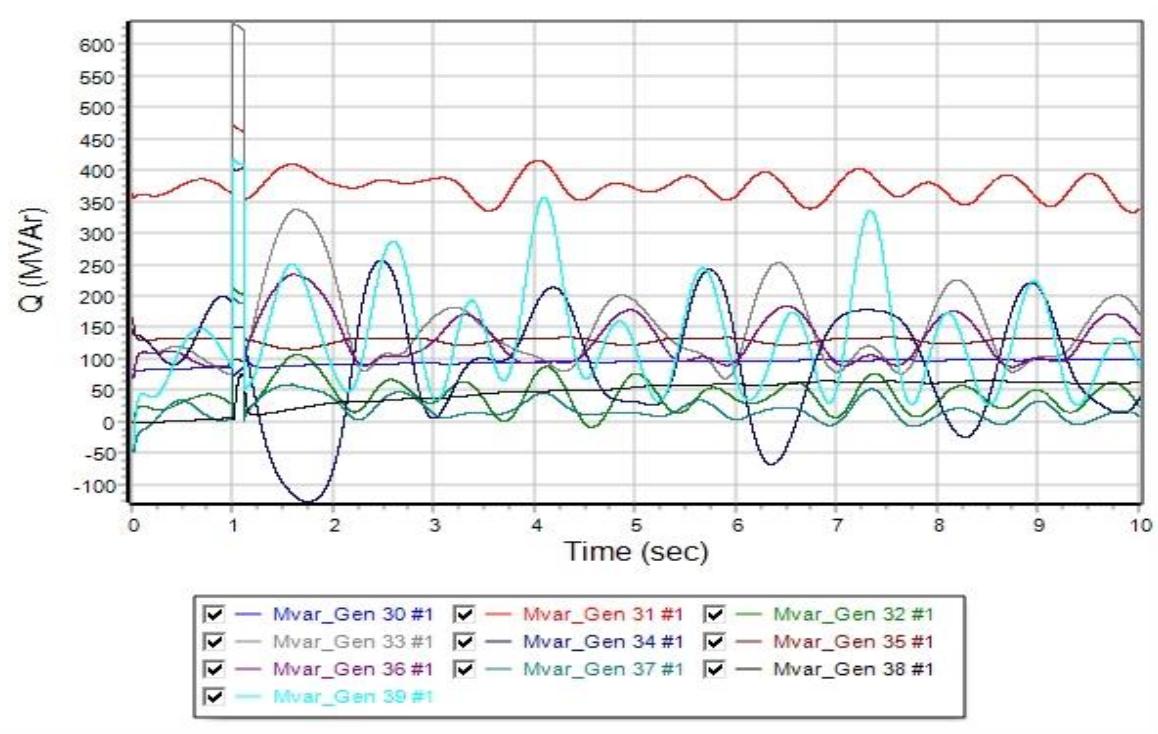
Εικόνα 99: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4)



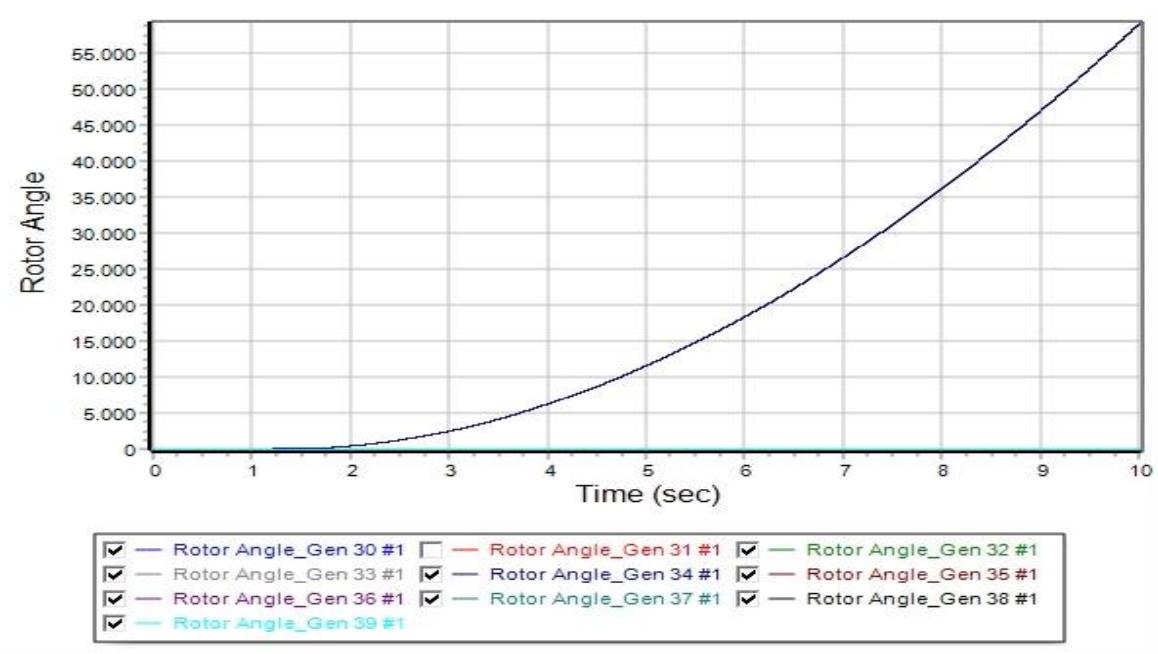
Εικόνα 100: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4)



Εικόνα 101: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4)



Εικόνα 102: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ4)



Εικόνα 103: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ4)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 19: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάριο Γ1-Γ4

<i>Χρονική στιγμή/Σενάριο Γ</i>	<i>Γ1</i>	<i>Γ2</i>	<i>Γ3</i>	<i>Γ4</i>
<i>t_{fault}</i>	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>t_{clear}</i>	1,35	1,15	1,10	1,10
<i>t_{open_line}</i>	1,35	1,15	1,10	1,10
<i>t_{close_line}</i>	5,00	5,00	5,00	5,00
<i>t_{critical}</i>	0,35	0,15	0,10	0,10

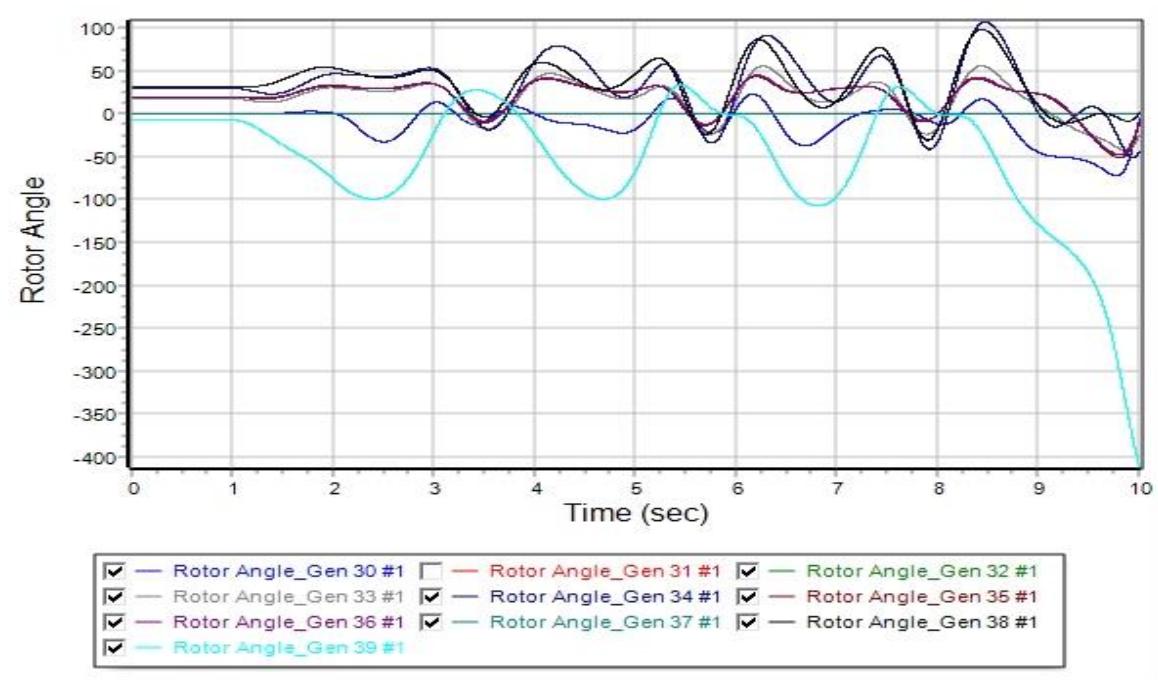
Στη συνέχεια εξετάζονται τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα πάνω στους ίδιους ζυγούς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, μελετάται ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος και έπειτα εξετάζονται οι καμπύλες ευστάθειας του συστήματος, για τα τρία παραπάνω σενάρια. Οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων και οι καμπύλες ευστάθειας σε στερεά μονοφασικά βραχυκυκλώματα, είχαν τα ίδια αποτελέσματα με τα τριφασικά. Γι' αυτό μελετώνται μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας μικρής επαγωγικής αντίστασης με τιμή ίση με 0,01j pu.

6.3.13 Σενάριο Α5: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου

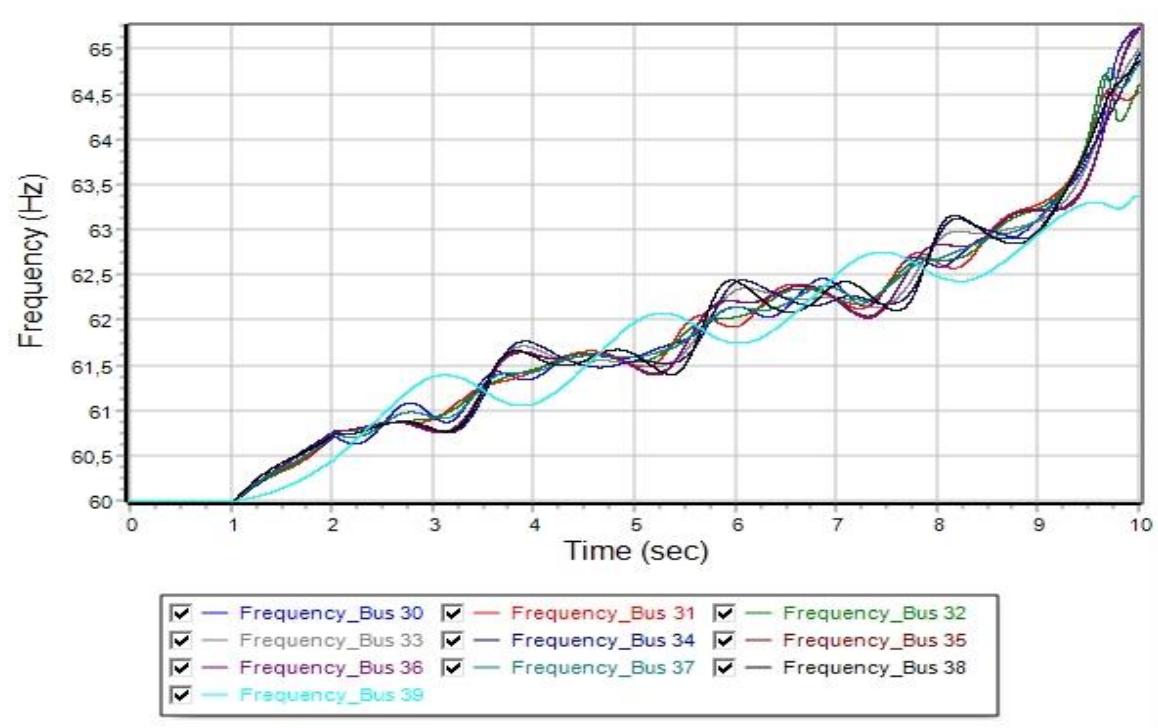
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος, μέσω επαγγαγικής αντίστασης με τιμή $0,01 \text{ j pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $2,00 \text{ sec}$, δηλ. $1,00 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 1,00 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 20. Παράλληλα, στις Εικόνες 104, 105, 106, 107 και 108 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 1,05 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 109, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 20: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Α5

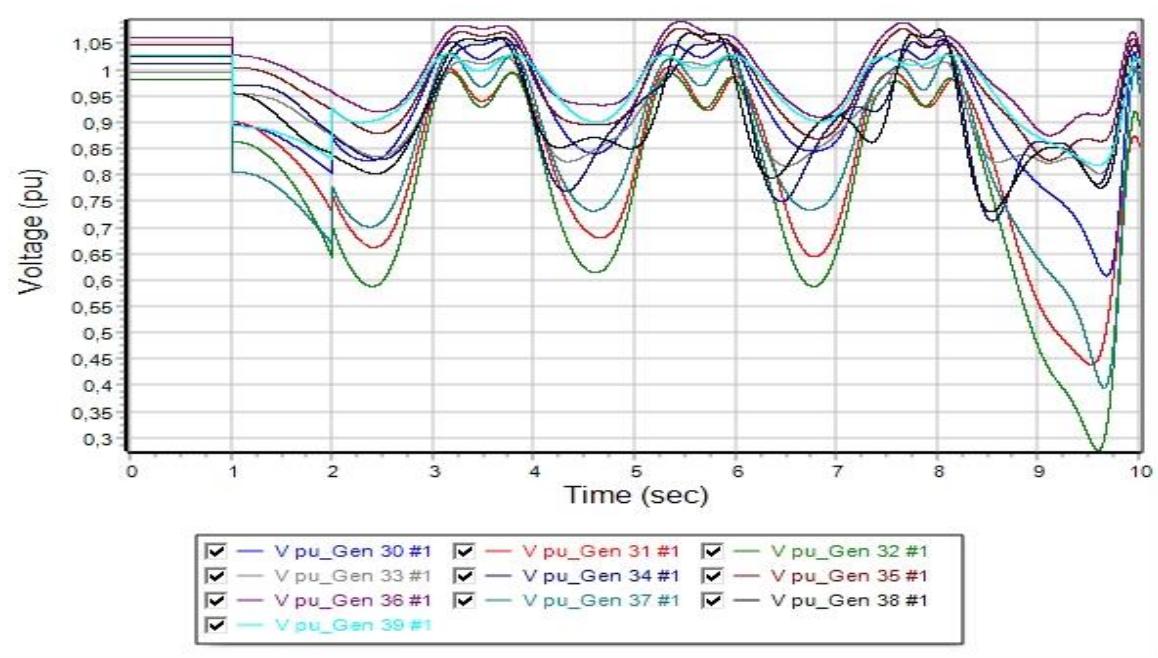
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	2,00
t_{open_line}	2,00
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	1,00



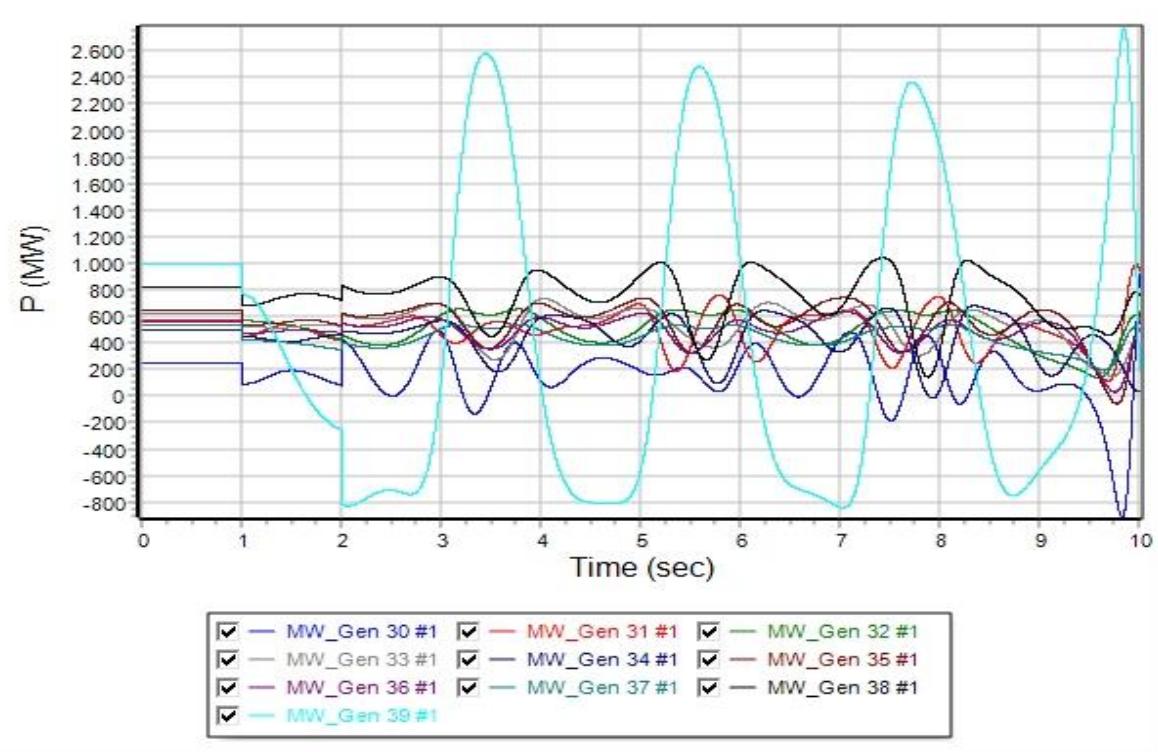
Εικόνα 104: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)



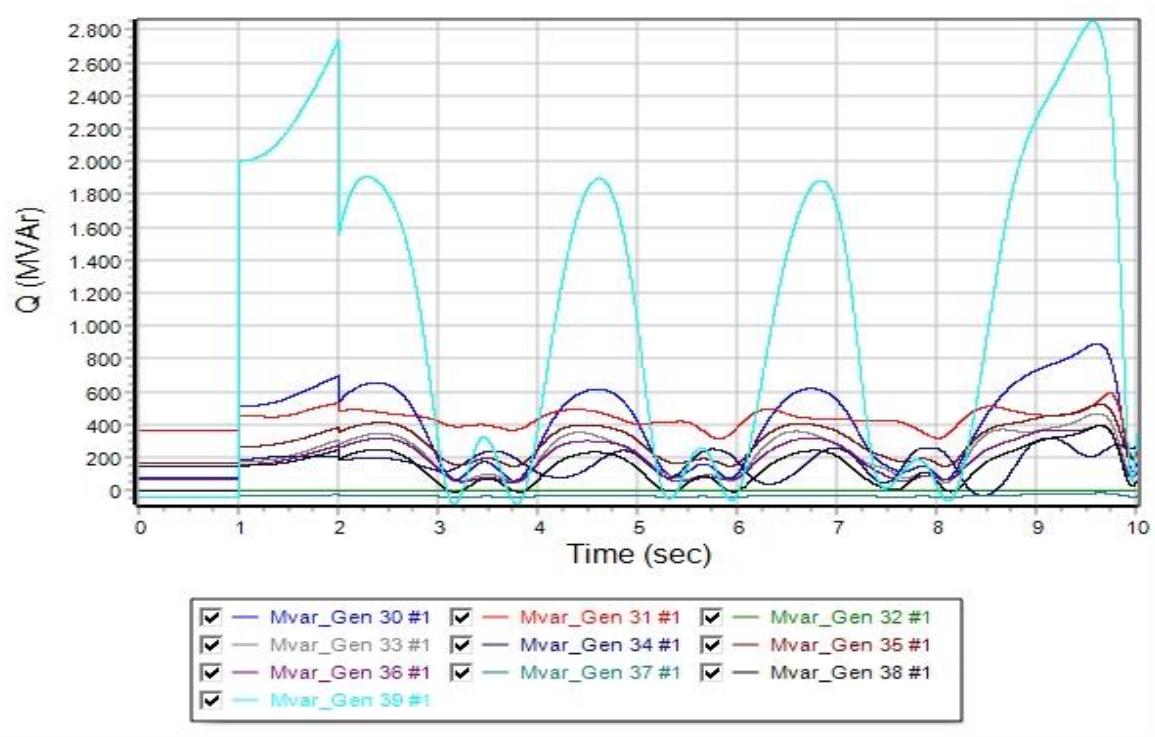
Εικόνα 105: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)



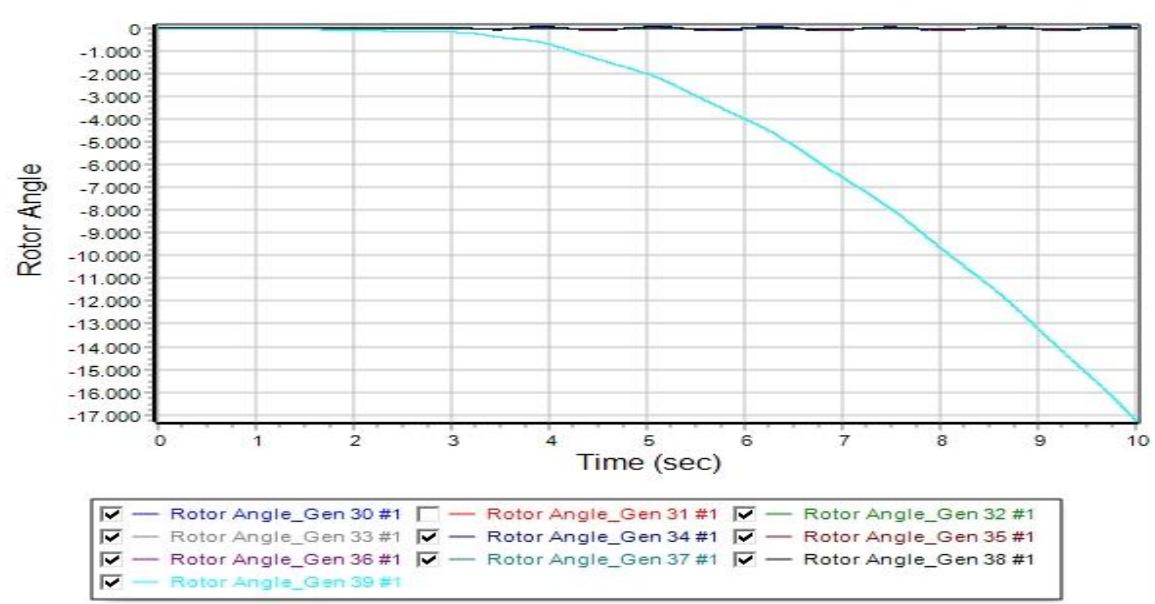
Εικόνα 106: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)



Εικόνα 107: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)



Εικόνα 108: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο A5)



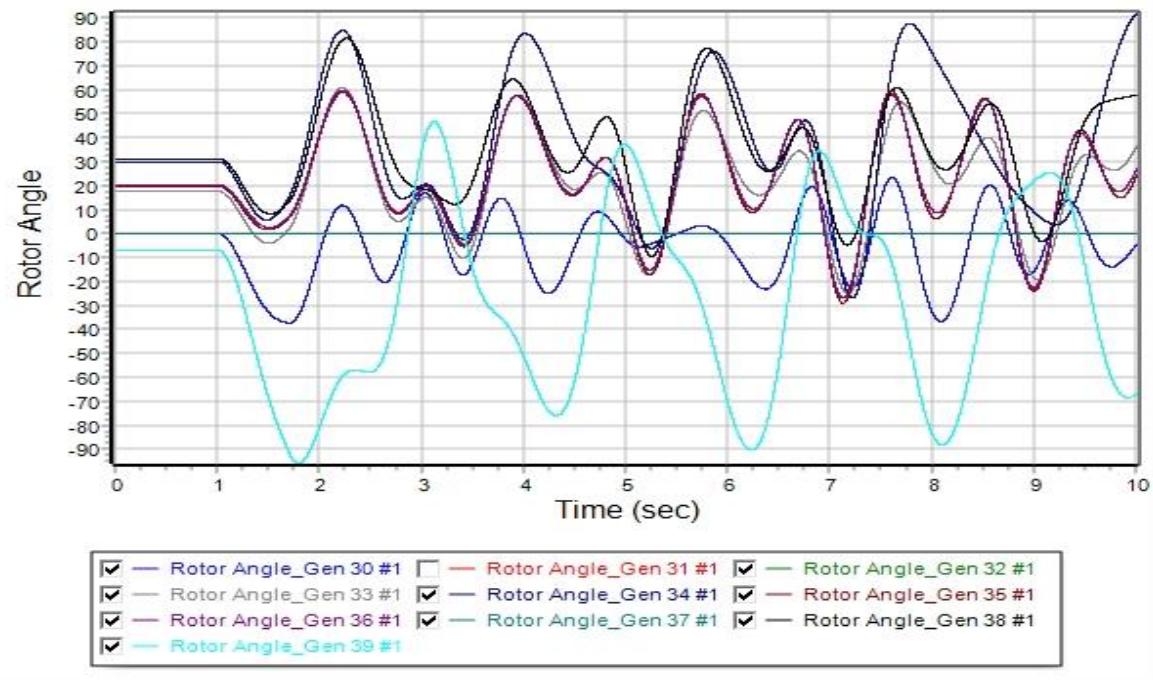
Εικόνα 109: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 1,05 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A5)

6.3.14 Σενάριο Α6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του αρχικού δικτύου

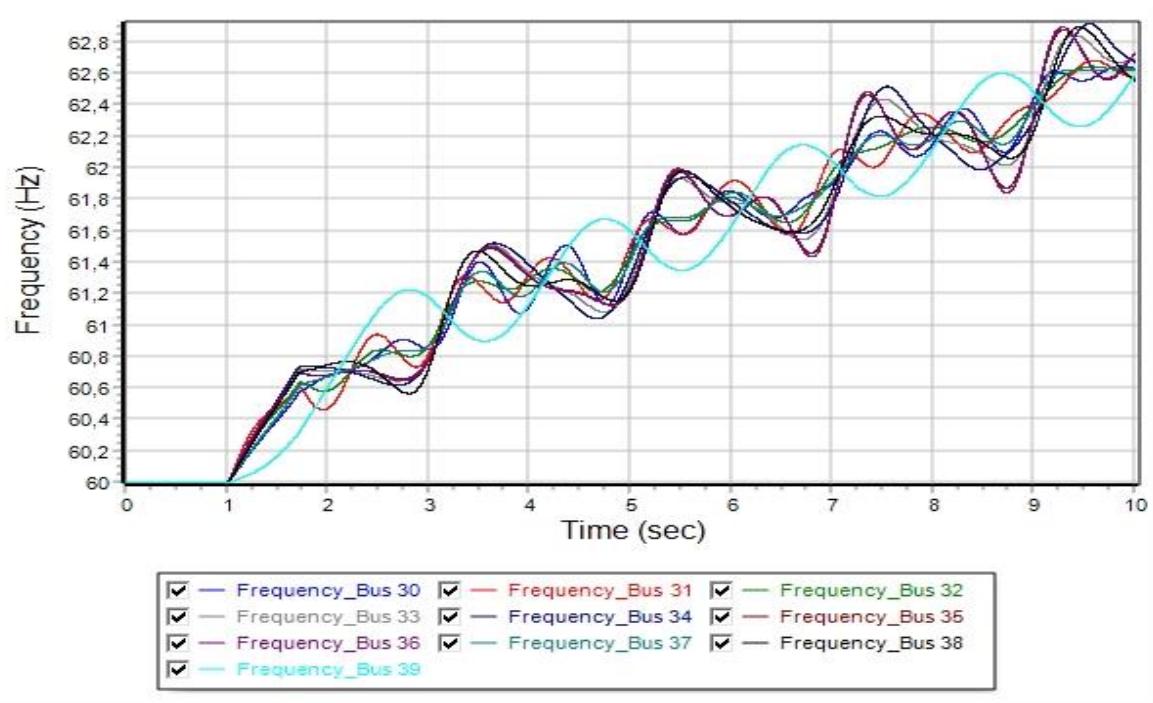
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,70 \text{ sec}$, δηλ. $0,70 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,70 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 21. Παράλληλα, στις Εικόνες 110, 111, 112, 113 και 114 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,80 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 115, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 21: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Α6

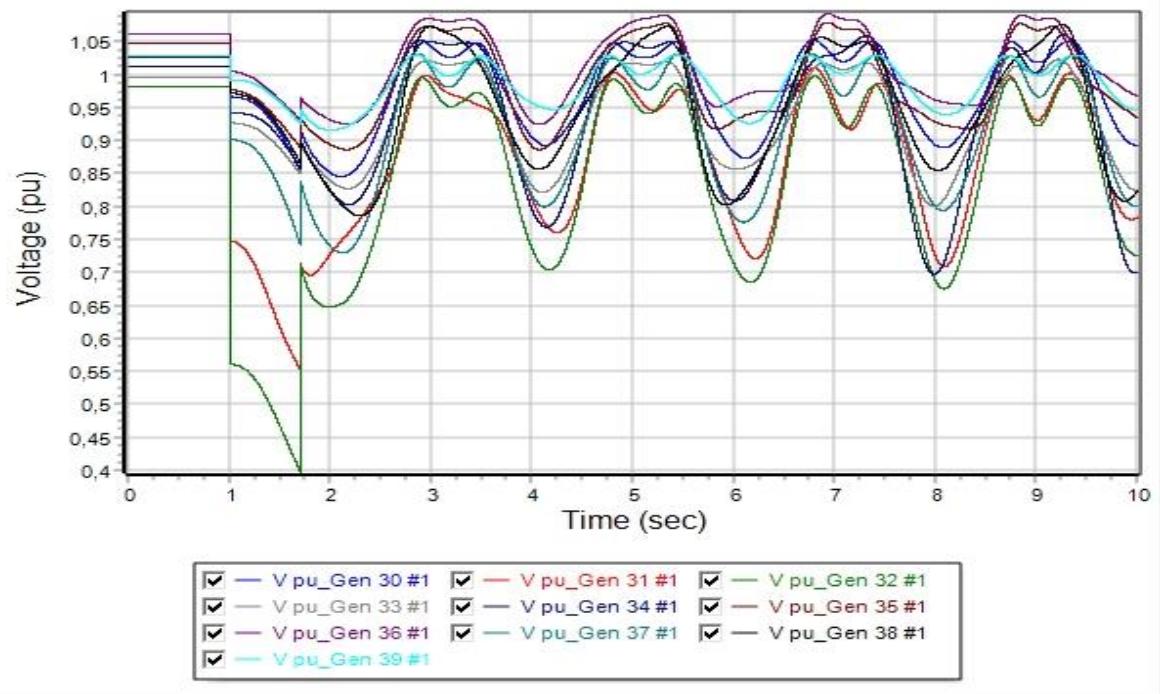
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,70
t_{open_line}	1,70
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,70



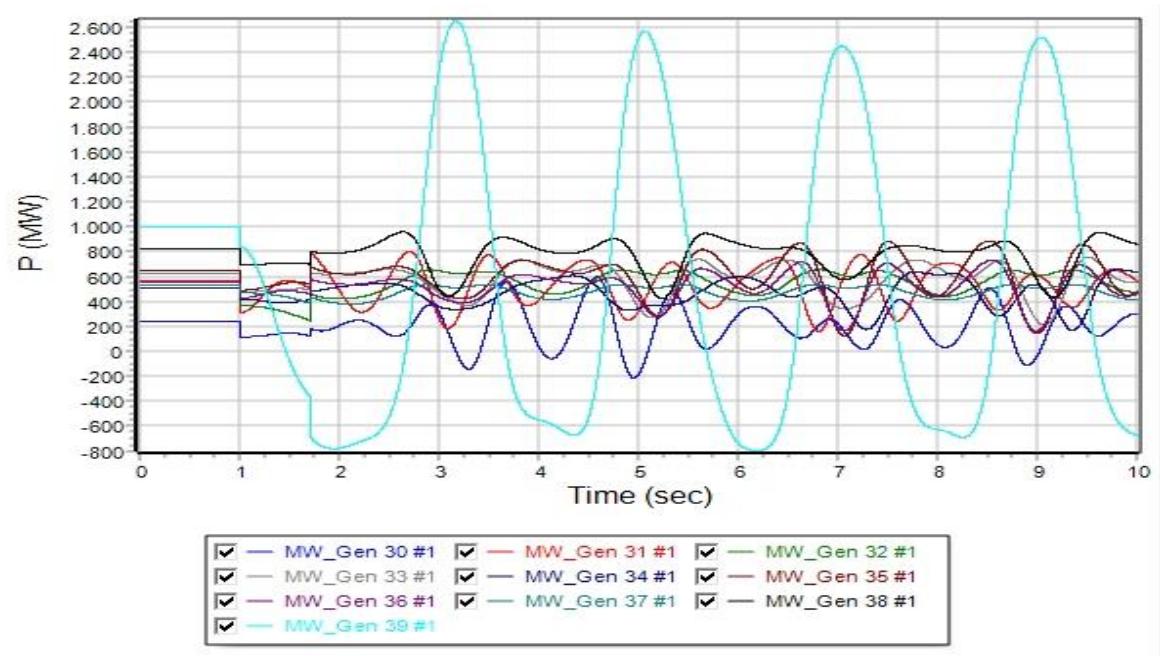
Εικόνα 110: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)



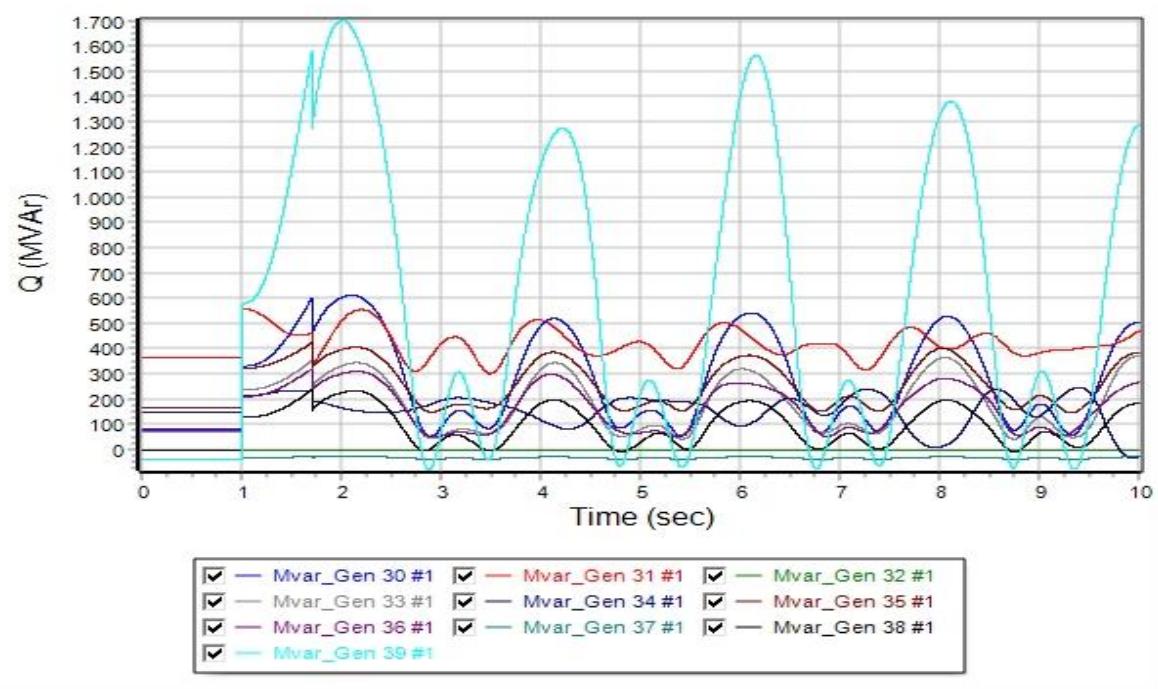
Εικόνα 111: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)



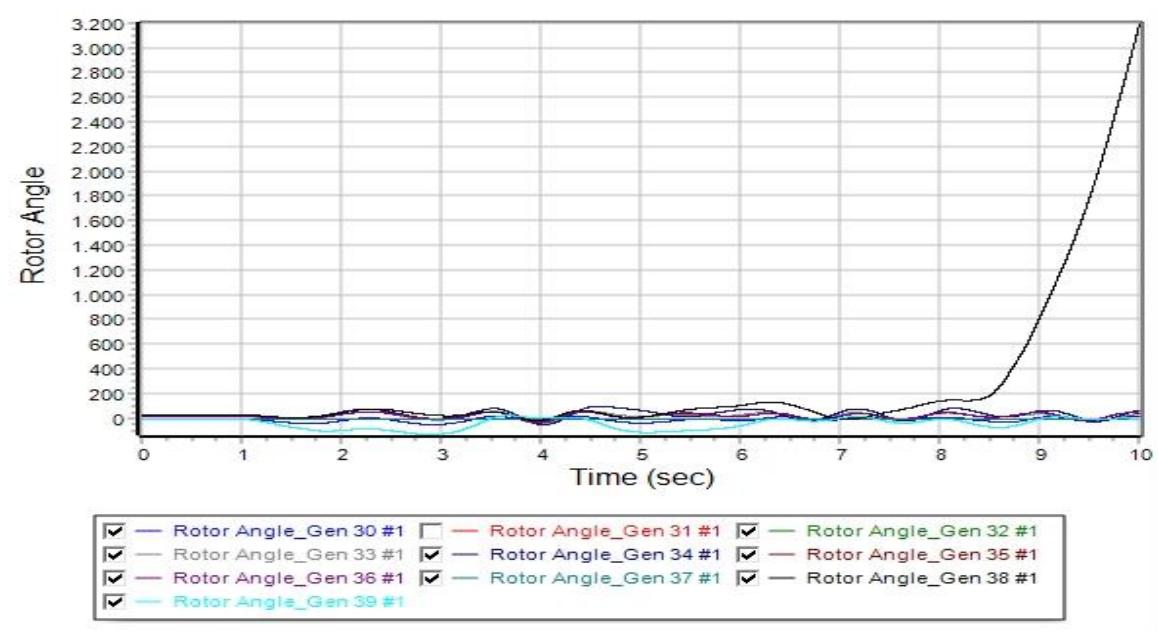
Εικόνα 112: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)



Εικόνα 113: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)



Εικόνα 114: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,70 sec (Σενάριο A6)



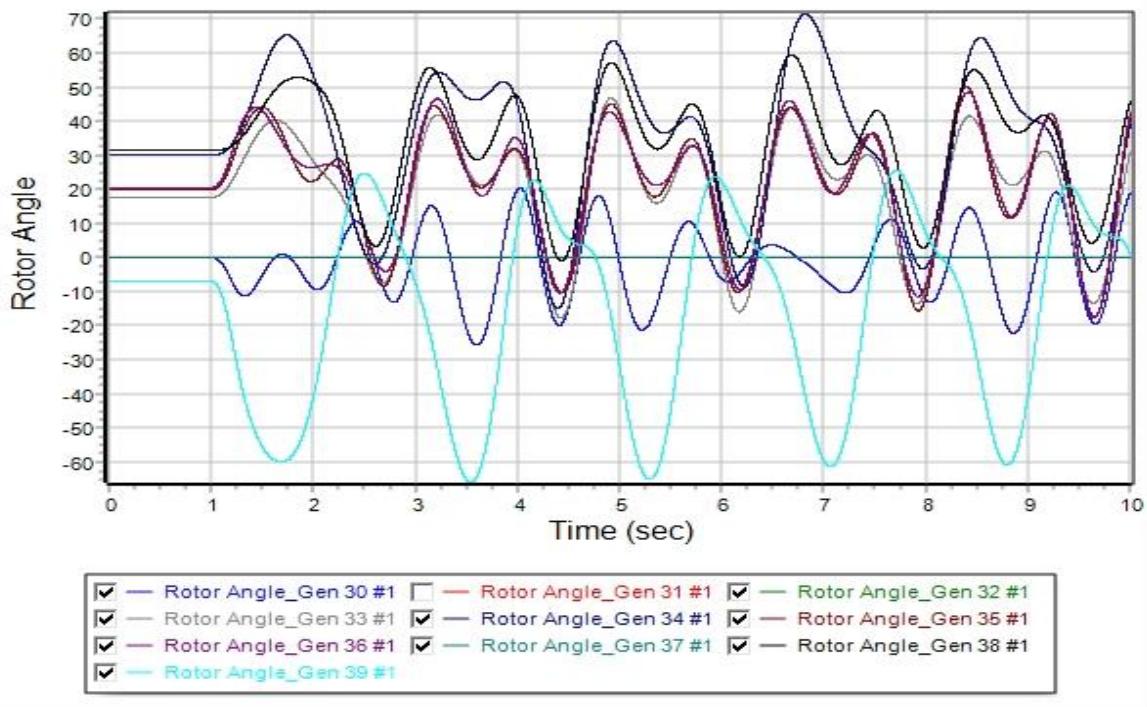
Εικόνα 115: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,75 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A6)

6.3.15 Σενάριο A7: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 16 του αρχικού δικτύου

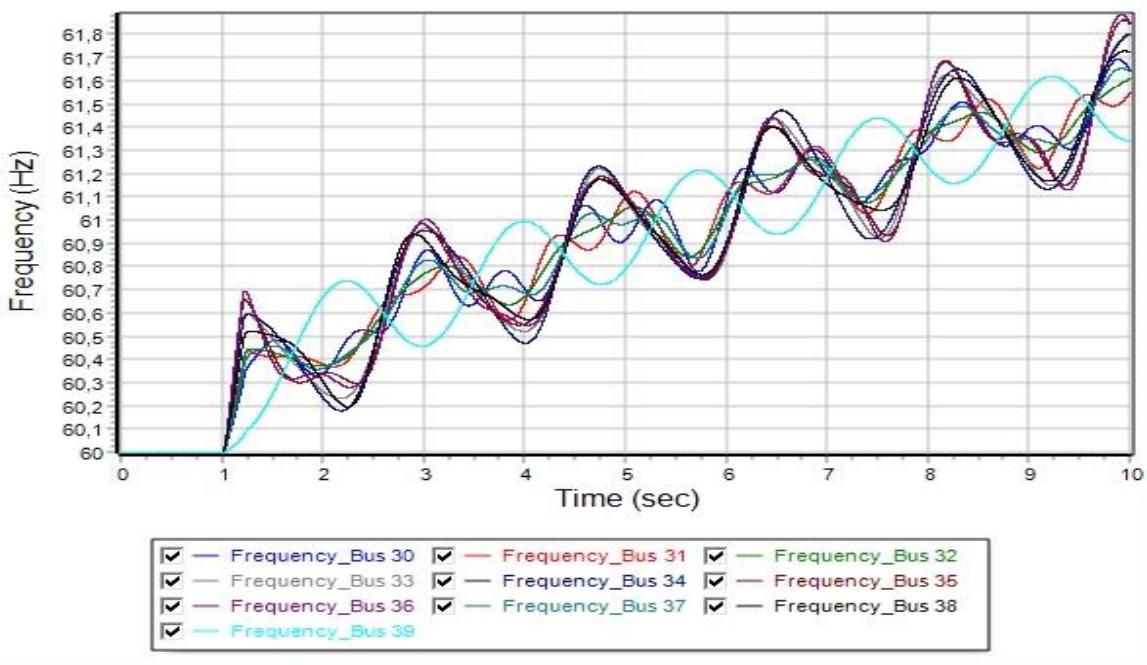
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,20 \text{ sec}$, δηλ. $0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 22. Παράλληλα, στις Εικόνες 116, 117, 118, 119 και 120 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,25 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 121, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 22: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο A7

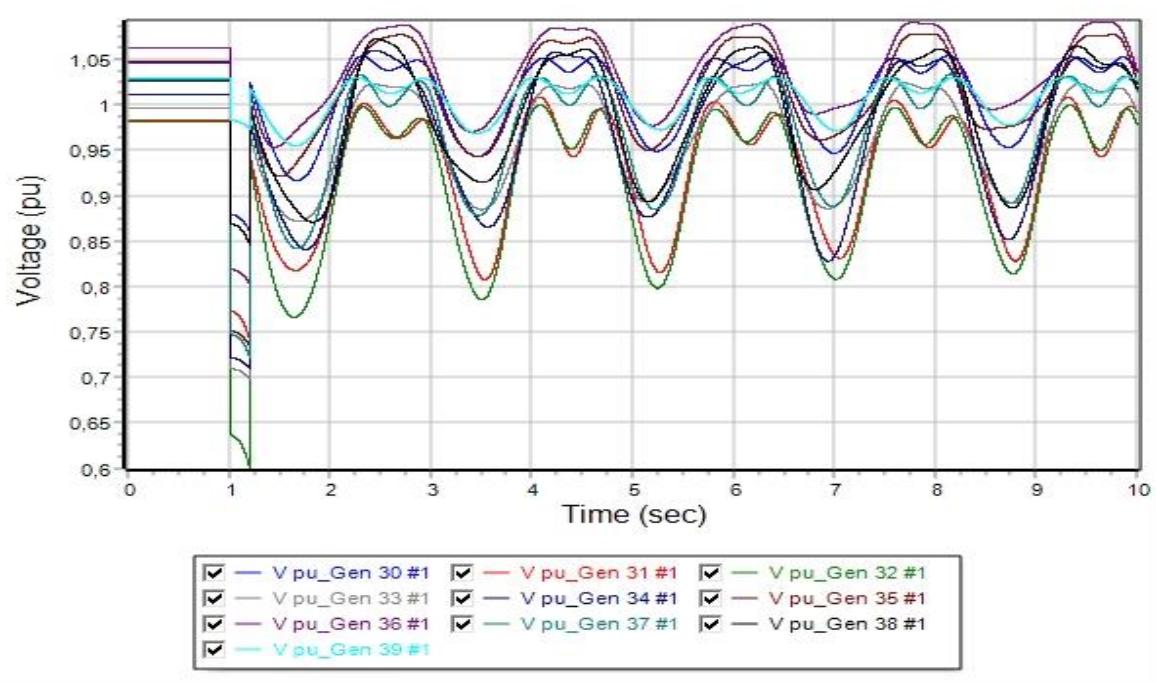
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,20
t_{open_line}	1,20
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,20



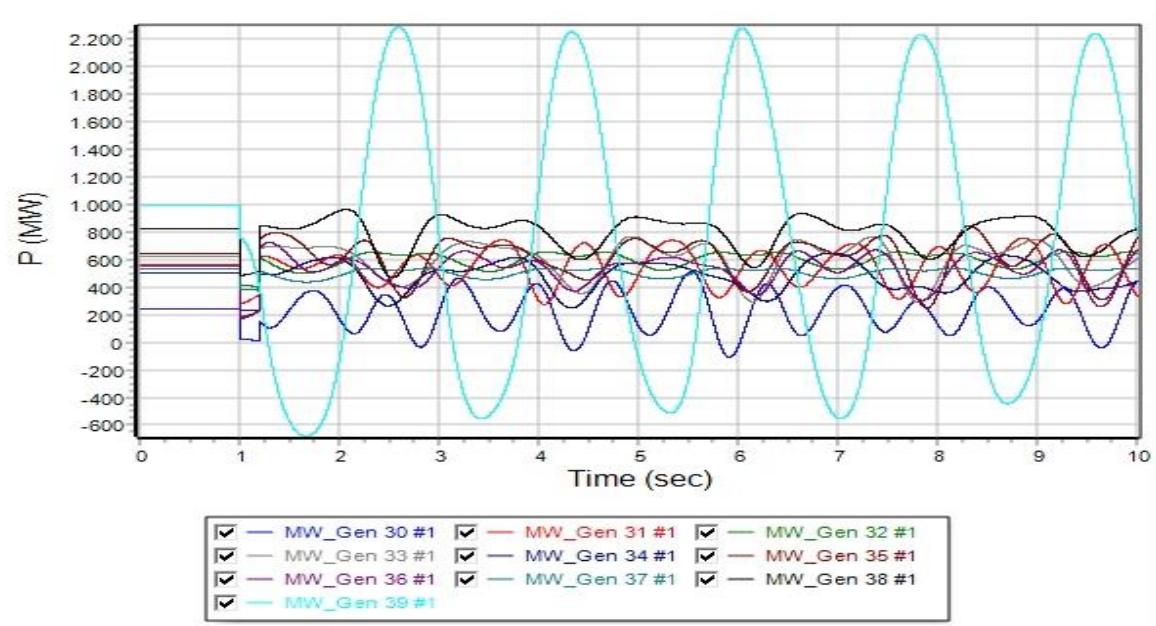
Εικόνα 116: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)



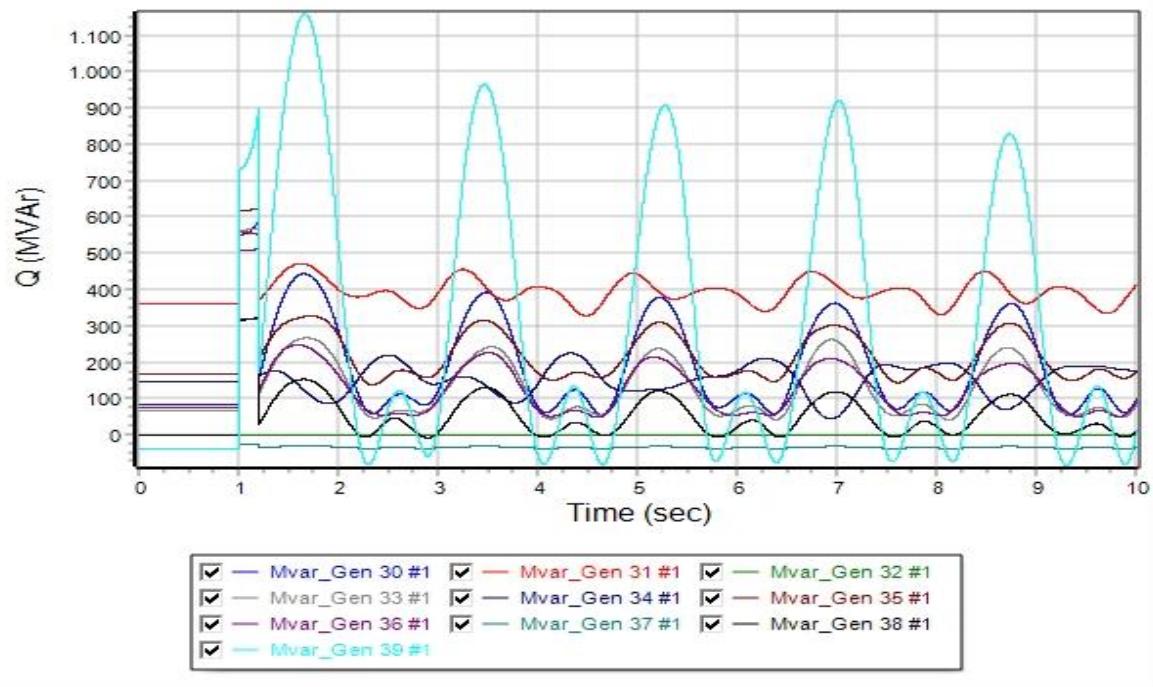
Εικόνα 117: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)



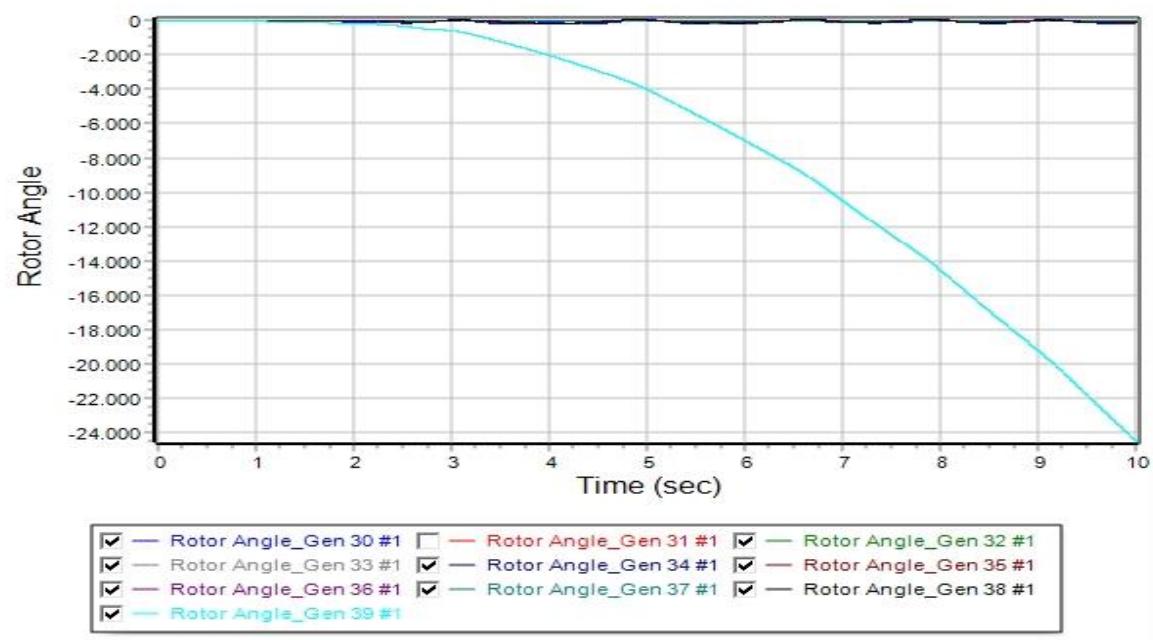
Εικόνα 118: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)



Εικόνα 119: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)



Εικόνα 120: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο A7)



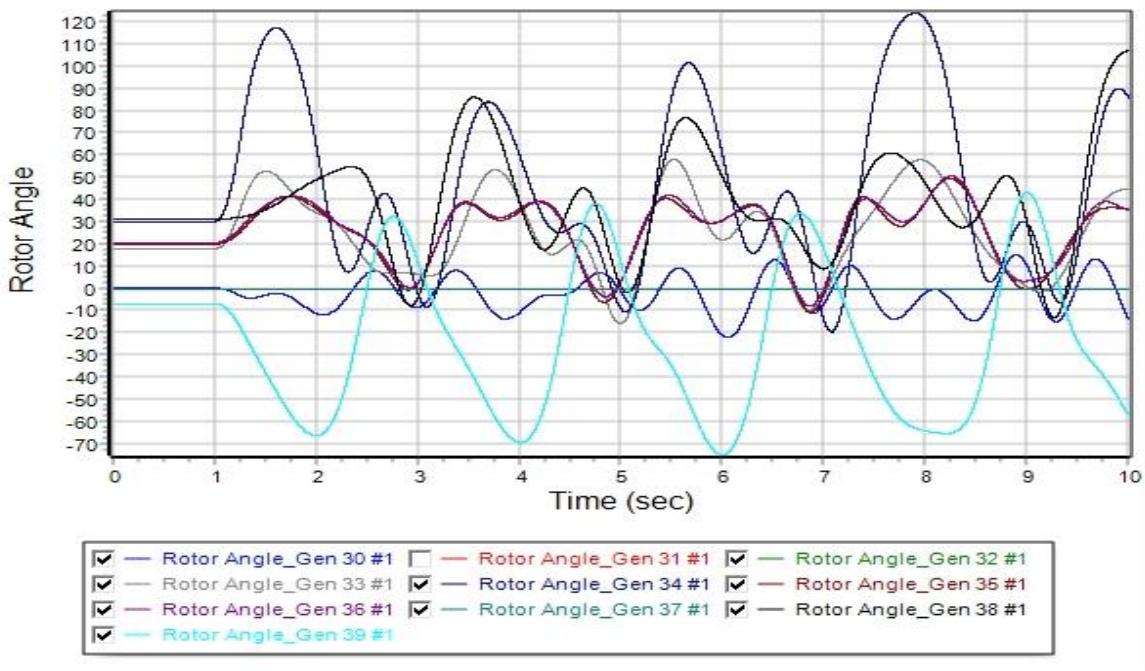
Εικόνα 121: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A7)

6.3.16 Σενάριο Α8: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 20 του αρχικού δικτύου

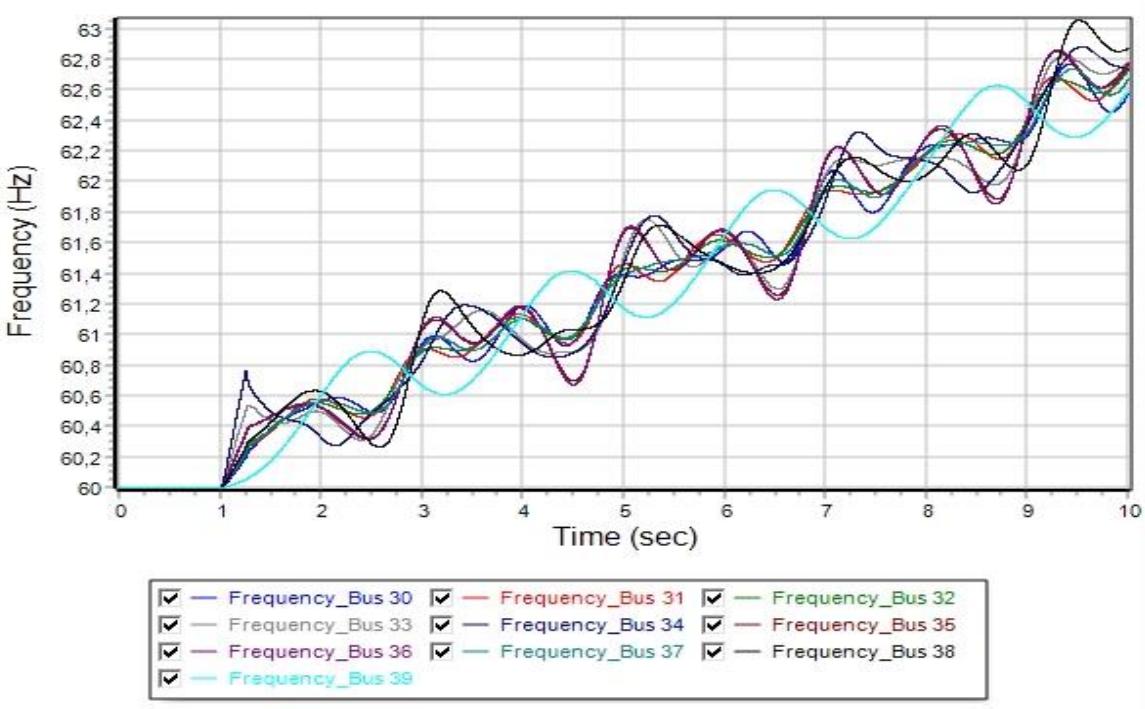
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0$ sec, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,25 sec, δηλ. 0,25 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,25$ sec. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 23. Παράλληλα, στις Εικόνες 122, 123, 124, 125 και 126 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,30$ sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 127, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 23: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Α8

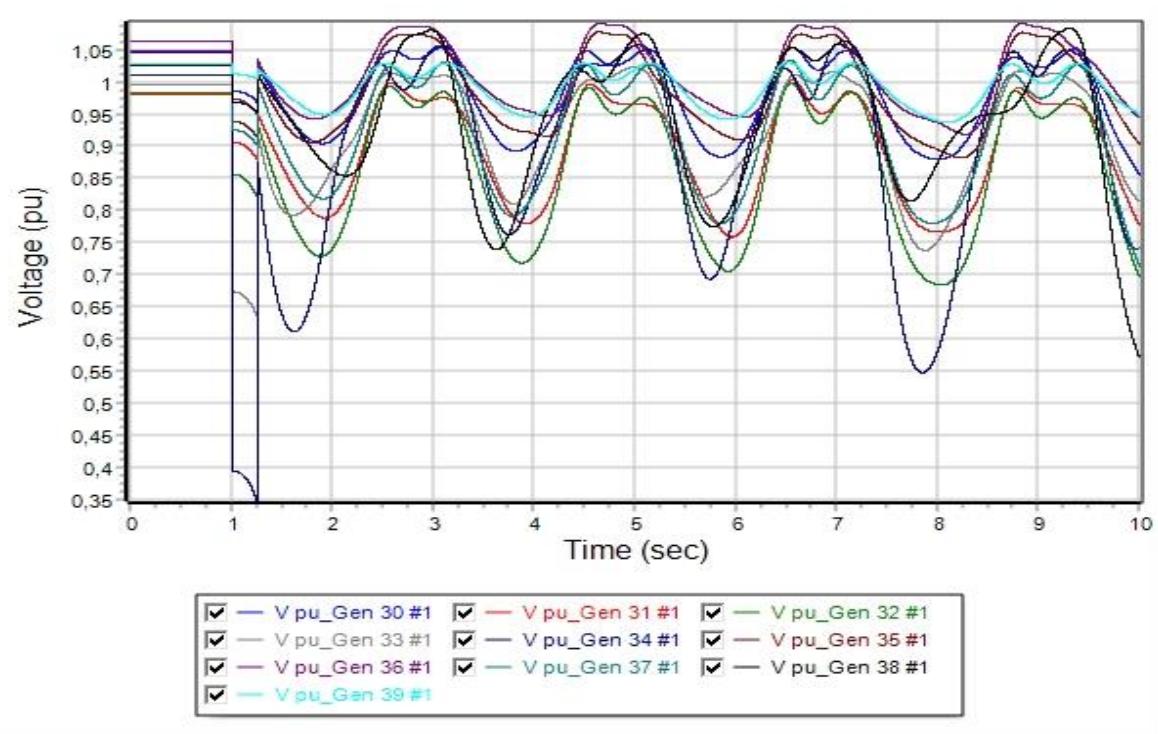
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,25
t_{open_line}	1,25
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,25



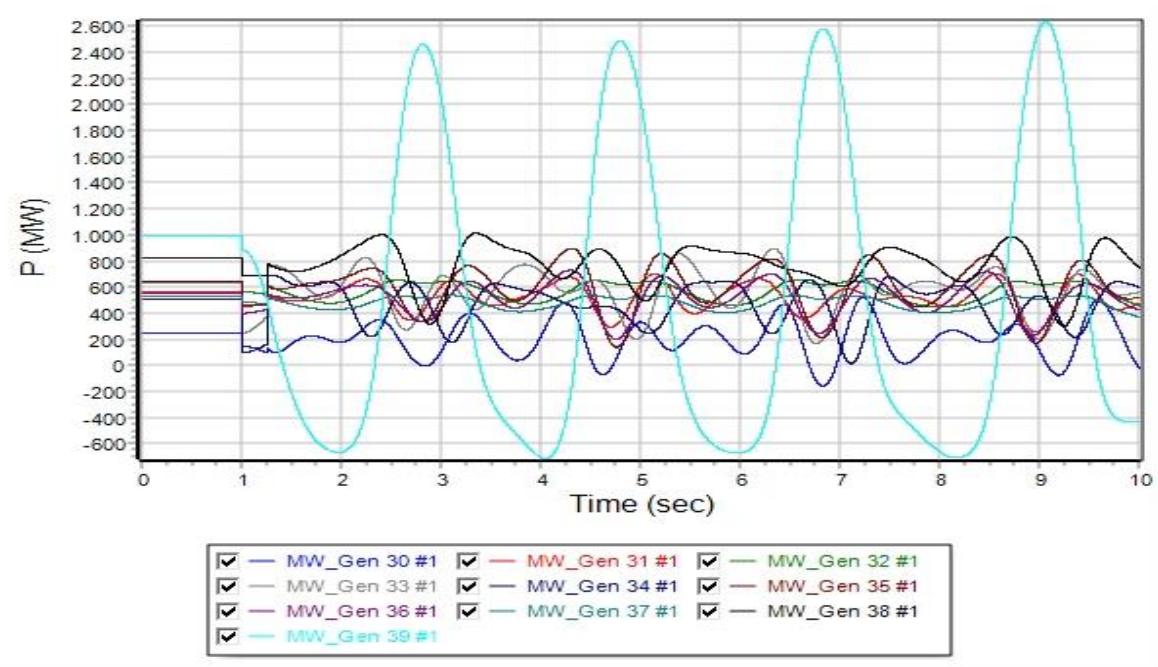
Εικόνα 122: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)



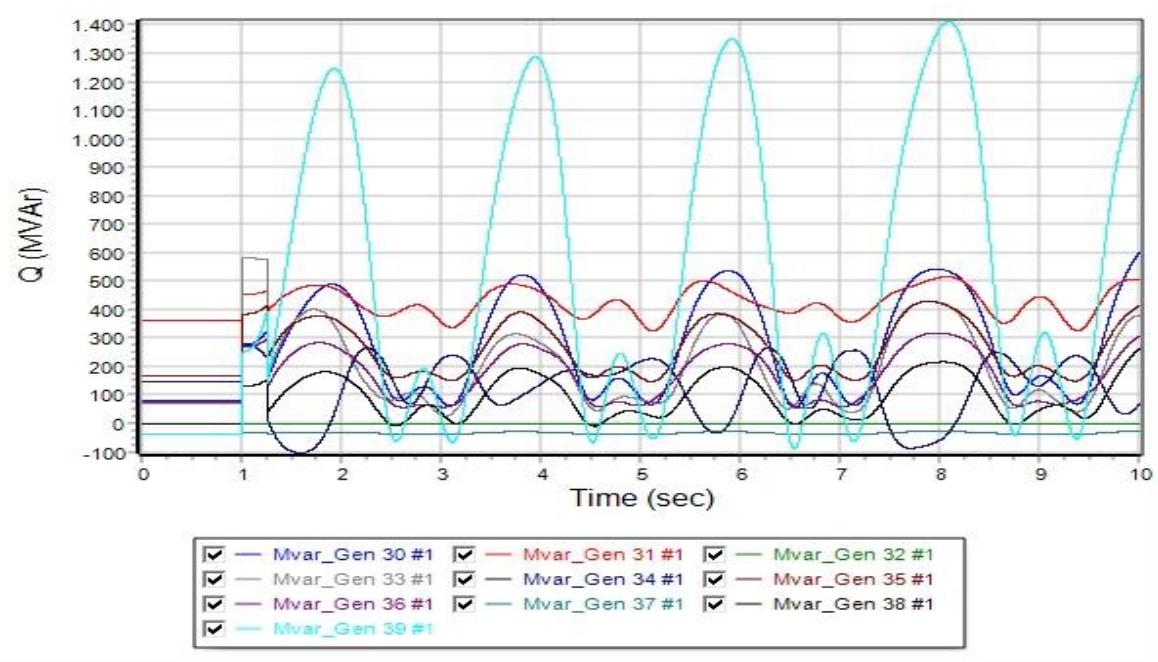
Εικόνα 123: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)



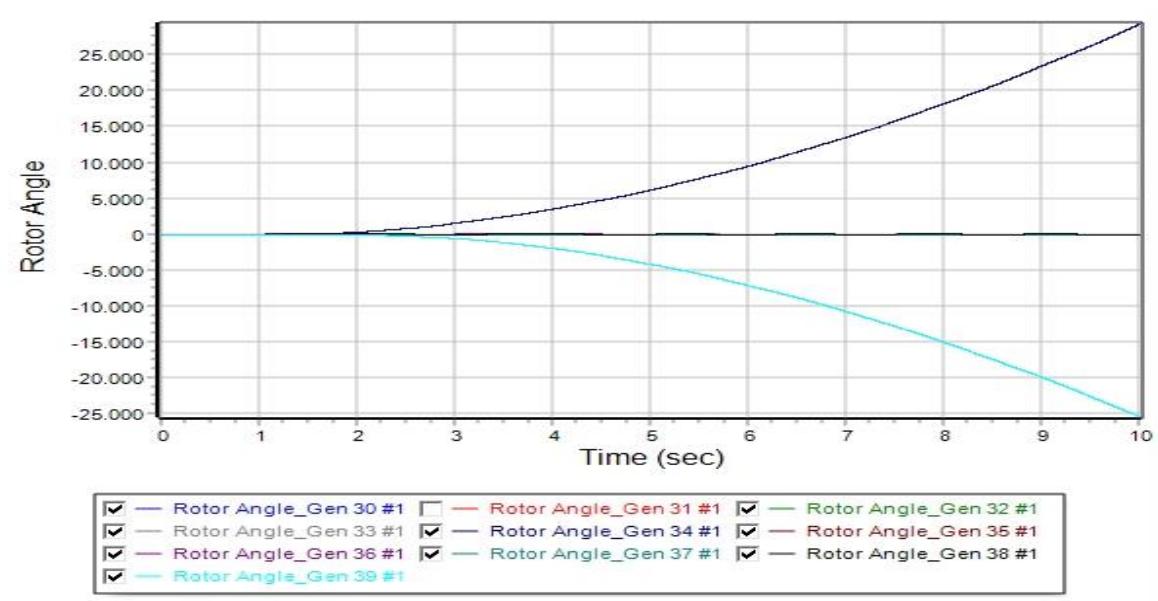
Εικόνα 124: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)



Εικόνα 125: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)



Εικόνα 126: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,25 sec (Σενάριο A8)



Εικόνα 127: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,30 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο A8)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του μονοφασικού βραχυκυκλώματος μέσω αντίστασης με τιμή 0,01 j pu, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 24: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια A5-A8

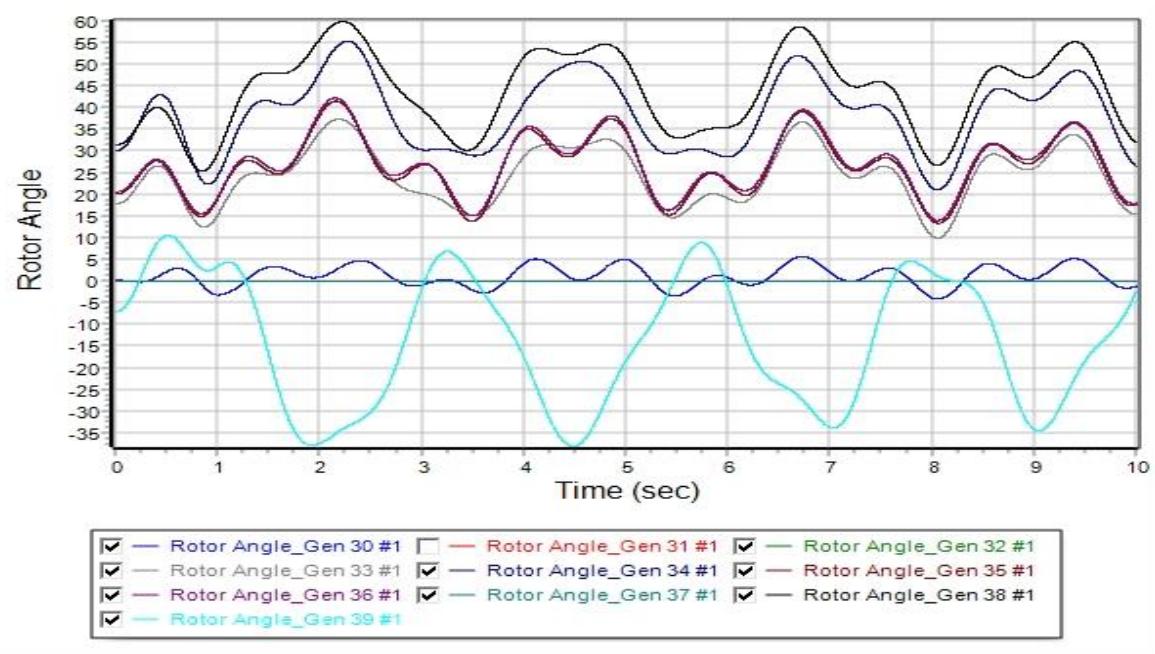
Χρονική στιγμή/ Σενάριο A	A5	A6	A7	A8
t_{fault}	1,00	1,00	1,00	1,00
t_{clear}	2,00	1,70	1,20	1,25
t_{open_line}	2,00	1,70	1,20	1,25
t_{close_line}	5,00	5,00	5,00	5,00
$t_{critical}$	1,00	0,70	0,20	0,25

6.3.17 Σενάριο B5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

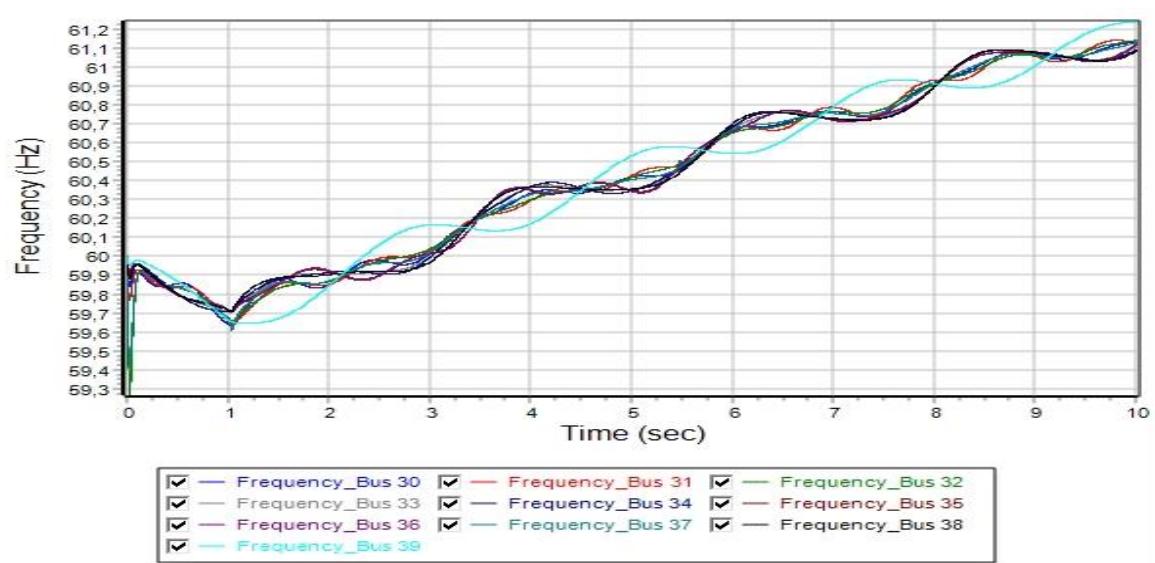
Ομοίως με τα τριφασικά βραχυκύκλωματα, στο σενάριο B, οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 32 και 37, έχουν αντικατασταθεί με ανεμογεννήτριες και ποσοστό διείσδυσης στο δίκτυο ίσο με 20%. Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Έπειτα από μελέτη, παρατηρήθηκε ότι η ευστάθεια του συστήματος δεν χάνεται, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 128, οι γωνίες των γεννητριών κινούνται όλες μαζί, την χρονική στιγμή $t = 10 \text{ sec}$, που αποτελεί τη λήξη της προσομοίωσης. Γι' αυτό το λόγο, έχει σημειωθεί ο χρόνος εφαρμογής του βραχυκύκλωματος, αλλά απουσιάζει ο κρίσιμου χρόνος εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), στον Πίνακα 25. Παράλληλα, στις Εικόνες 128, 129, 130, 131, 132 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1.

Πίνακας 25: Χρόνος εφαρμογής βραχυκύκλωματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B5

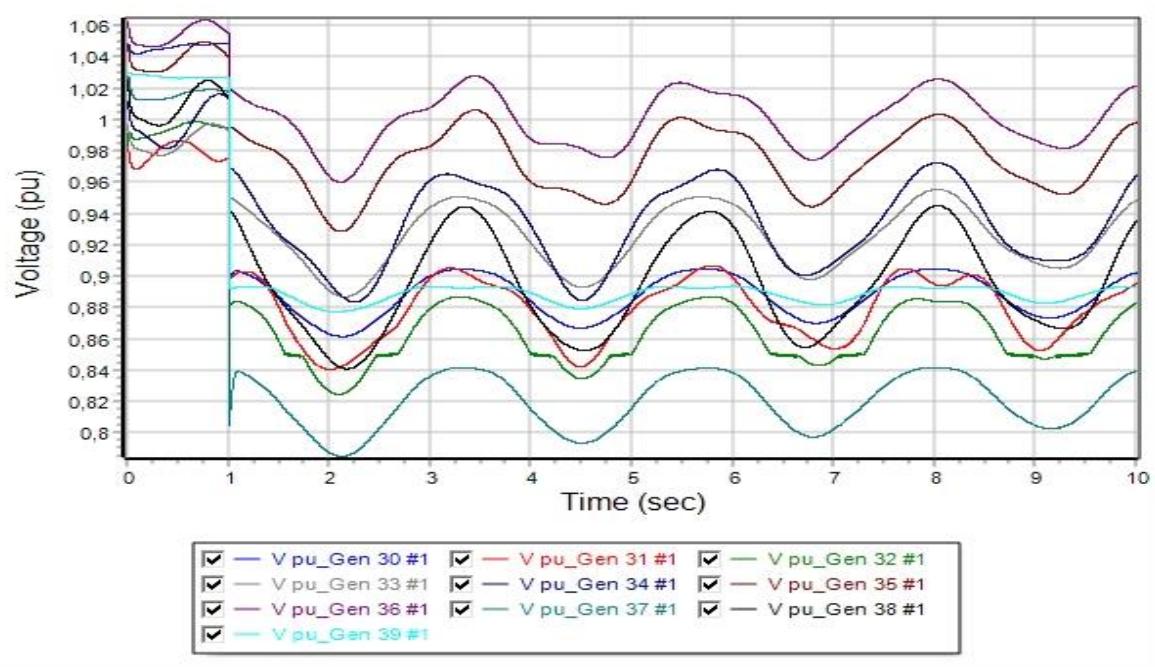
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	-
t_{open_line}	-
t_{close_line}	-
$t_{critical}$	-



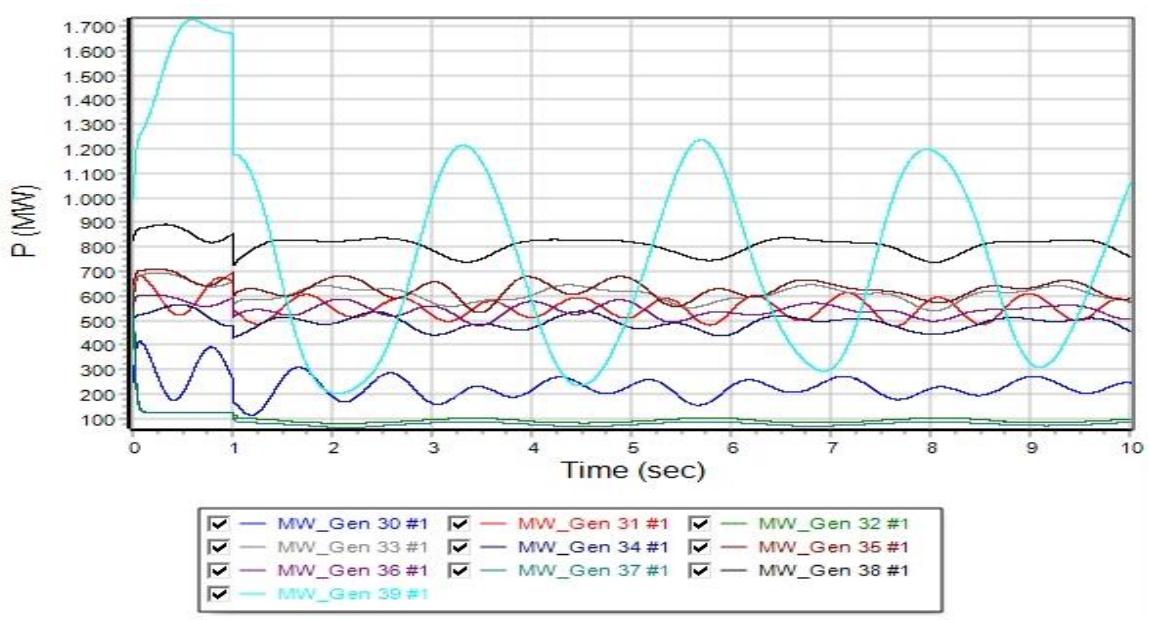
Εικόνα 128: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για την χρονική στιγμή $t = 10\text{sec}$, όπου αποτελεί τη λήξη της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι η ευστάθεια του συστήματος διατηρείται (Σενάριο B5)



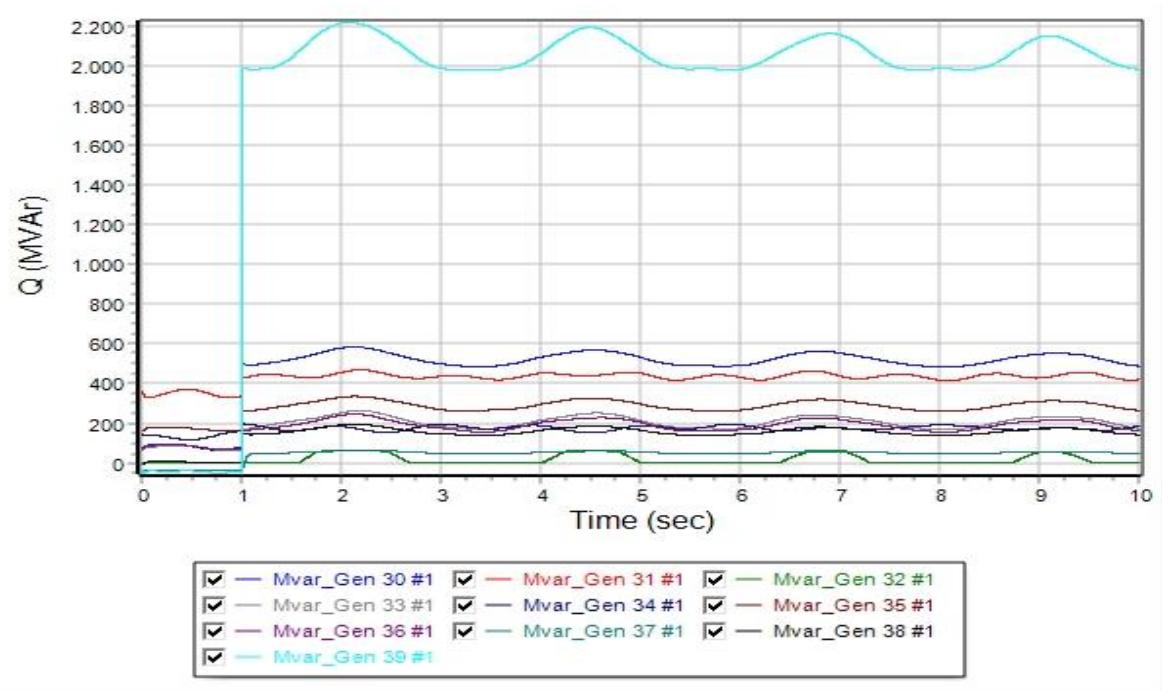
Εικόνα 129: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10\text{ sec}$ (Σενάριο B5)



Εικόνα 130: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 \text{ sec}$ (Σενάριο B5)



Εικόνα 131: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 \text{ sec}$ (Σενάριο B5)



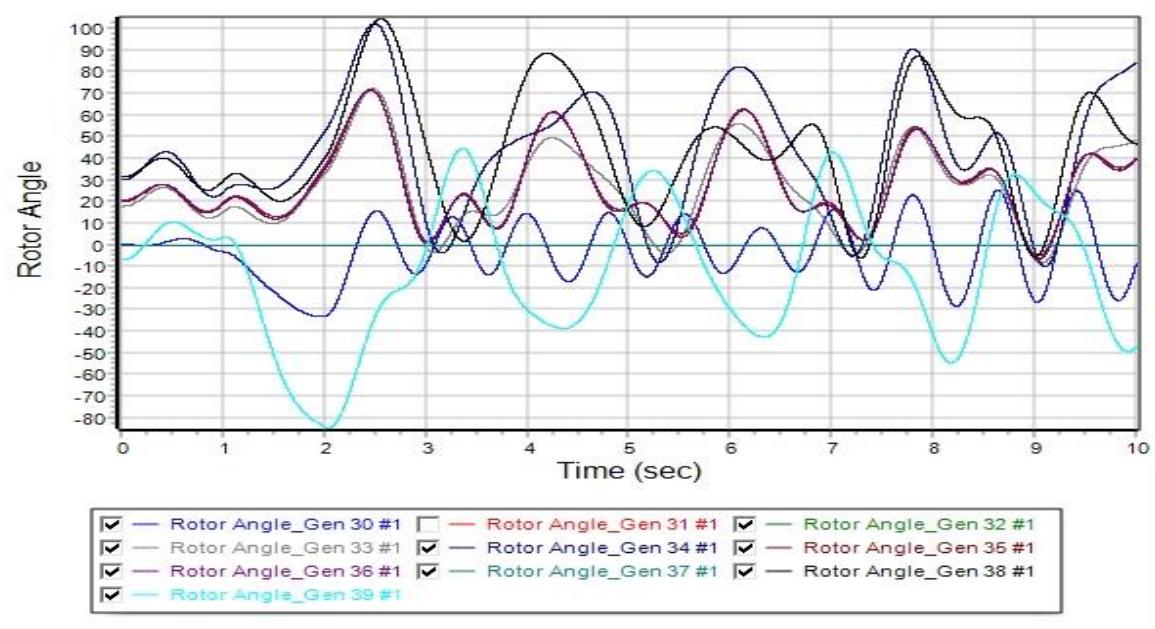
Εικόνα 132: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τη χρονική στιγμή $t = 10 \text{ sec}$ (Σενάριο B5)

6.3.18 Σενάριο B6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

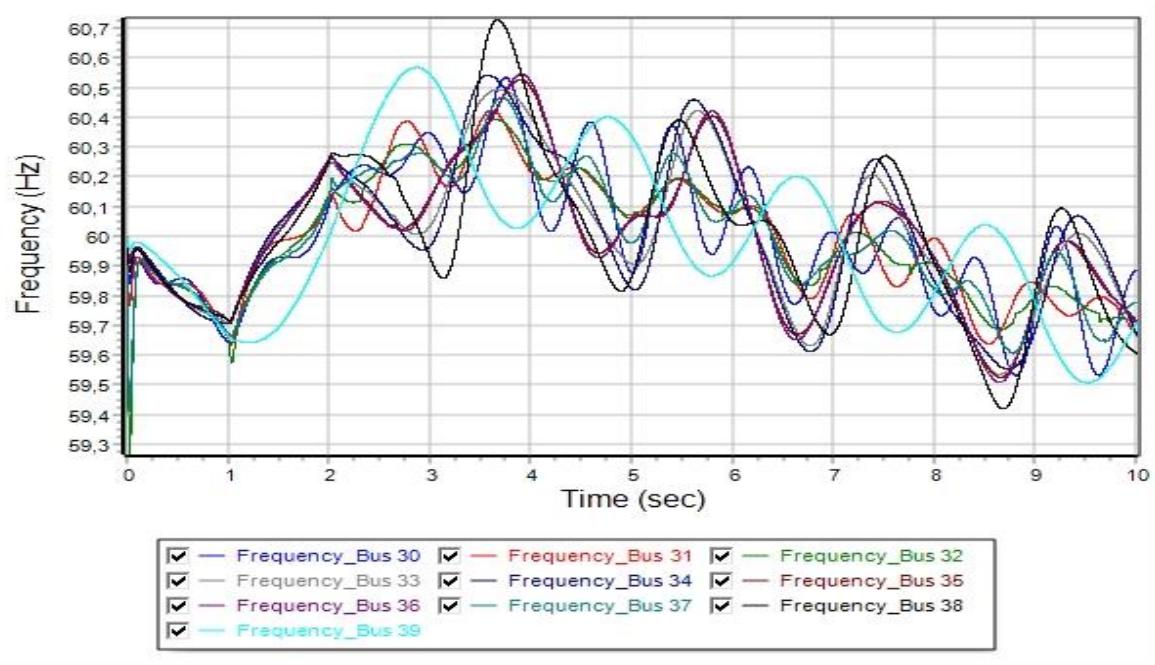
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $2,00 \text{ sec}$, δηλ. $1,00 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 1,00 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 26. Παράλληλα, στις Εικόνες 133, 134, 135, 136 και 137 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 1,05 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 138, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 26: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B6

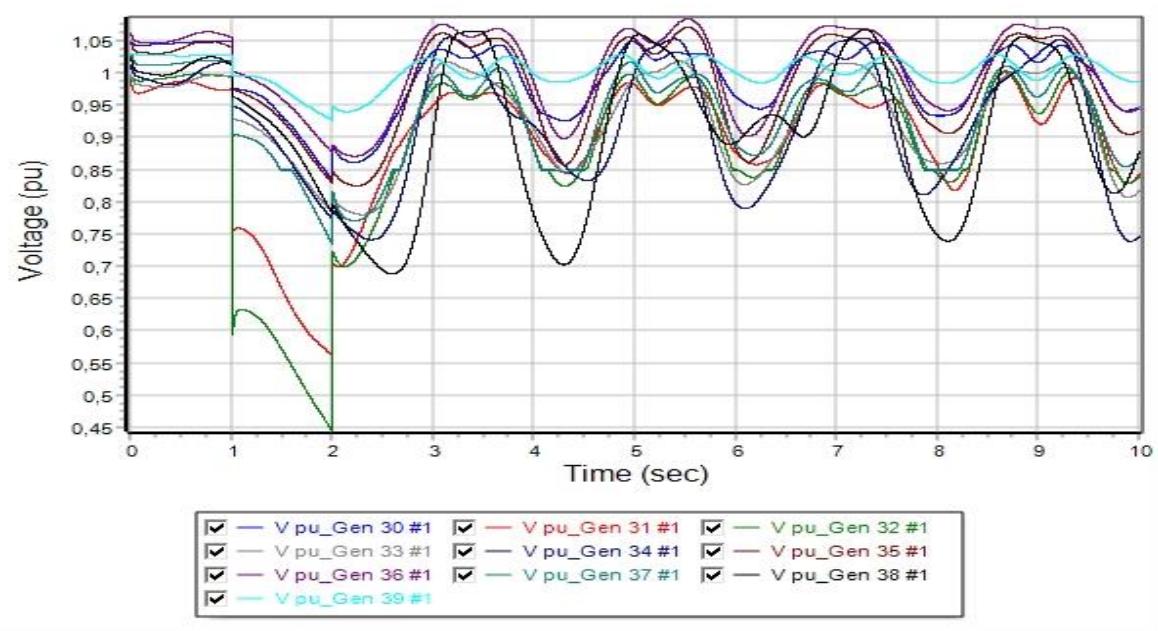
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	2,00
t_{open_line}	2,00
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	1,00



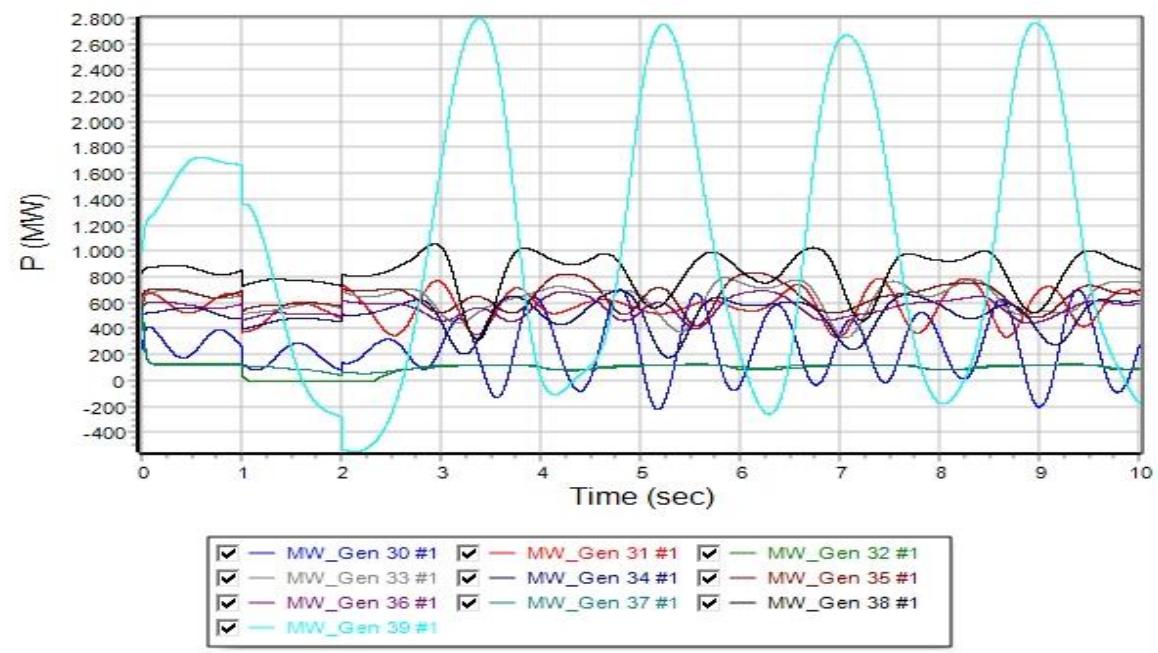
Εικόνα 133: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)



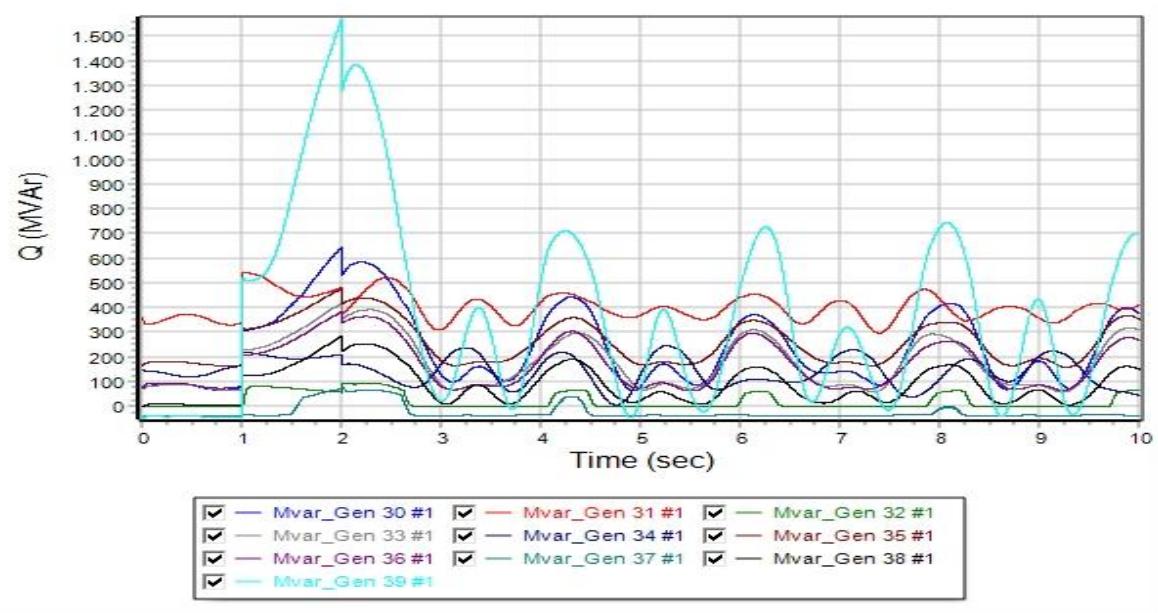
Εικόνα 134: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)



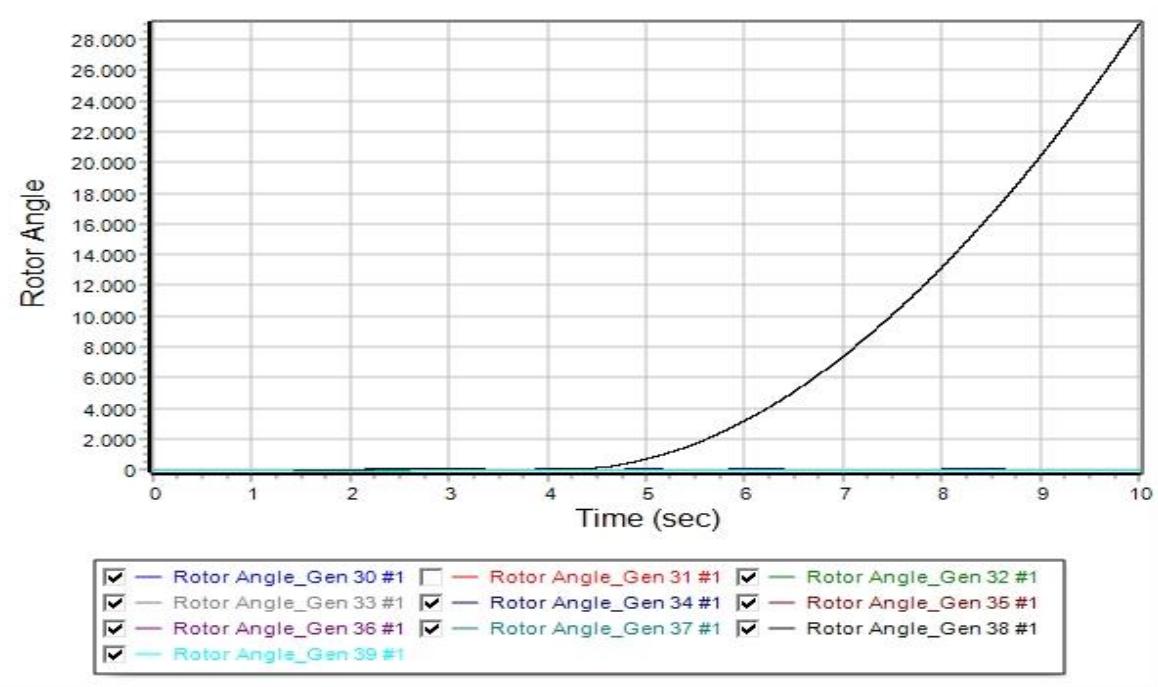
Εικόνα 135: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)



Εικόνα 136: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)



Εικόνα 137: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 1,00 sec (Σενάριο B6)



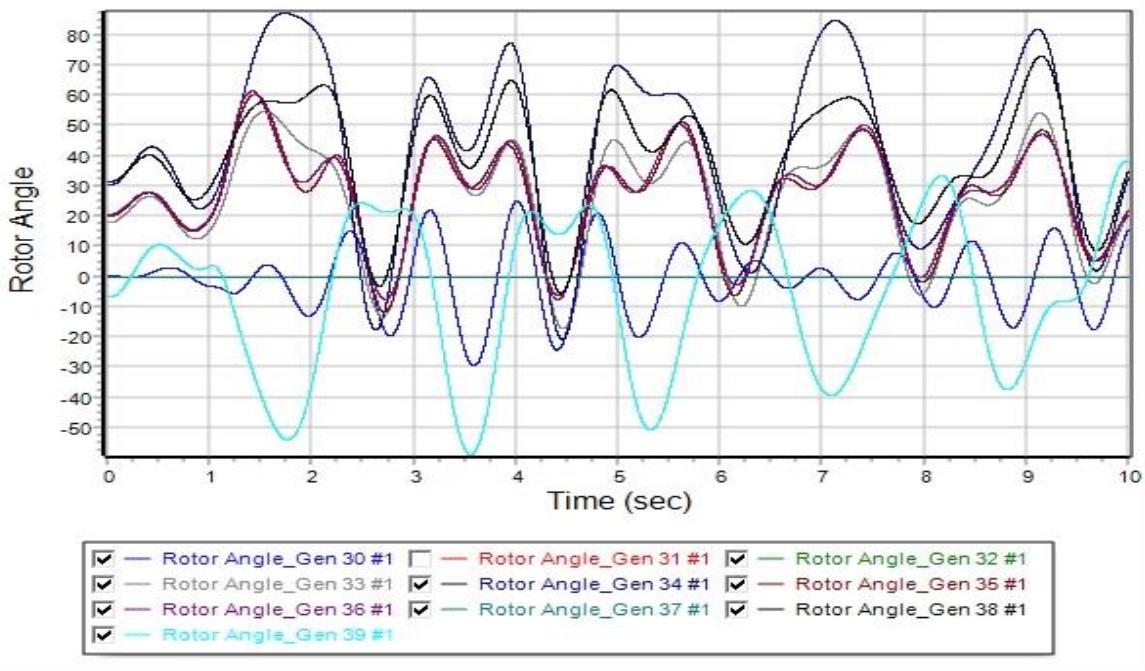
Εικόνα 138: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 1,05 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B6)

6.3.19 Σενάριο B7: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

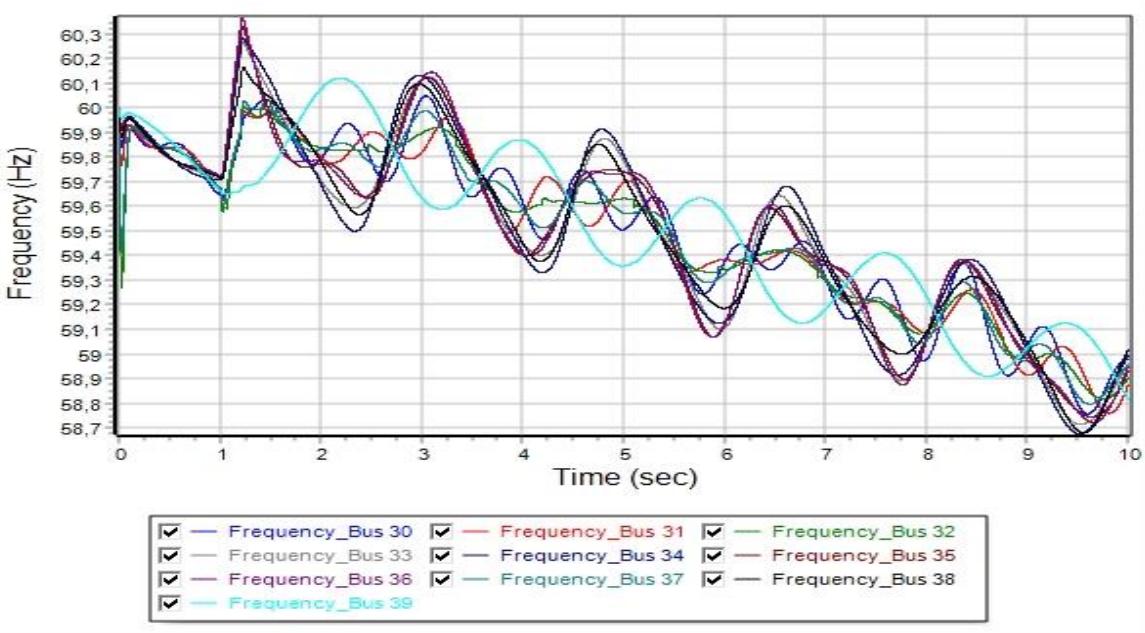
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,20 \text{ sec}$, δηλ. $0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 27. Παράλληλα, στις Εικόνες 139, 140, 141, 142 και 143 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 1,05 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 144, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 27: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B7

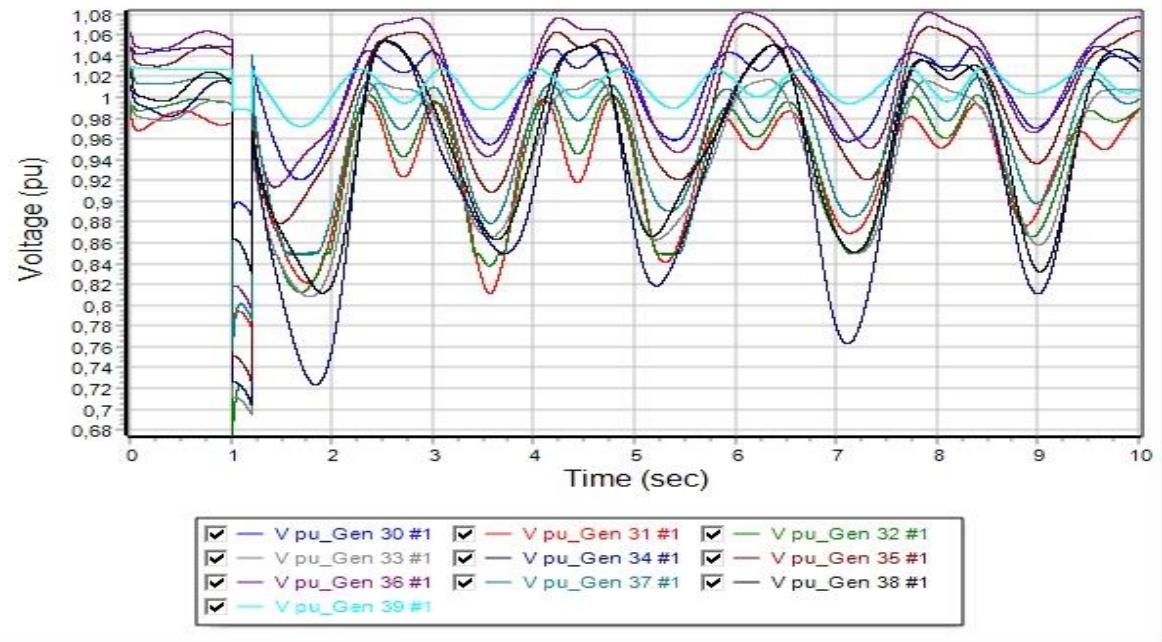
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,20
t_{open_line}	1,20
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,20



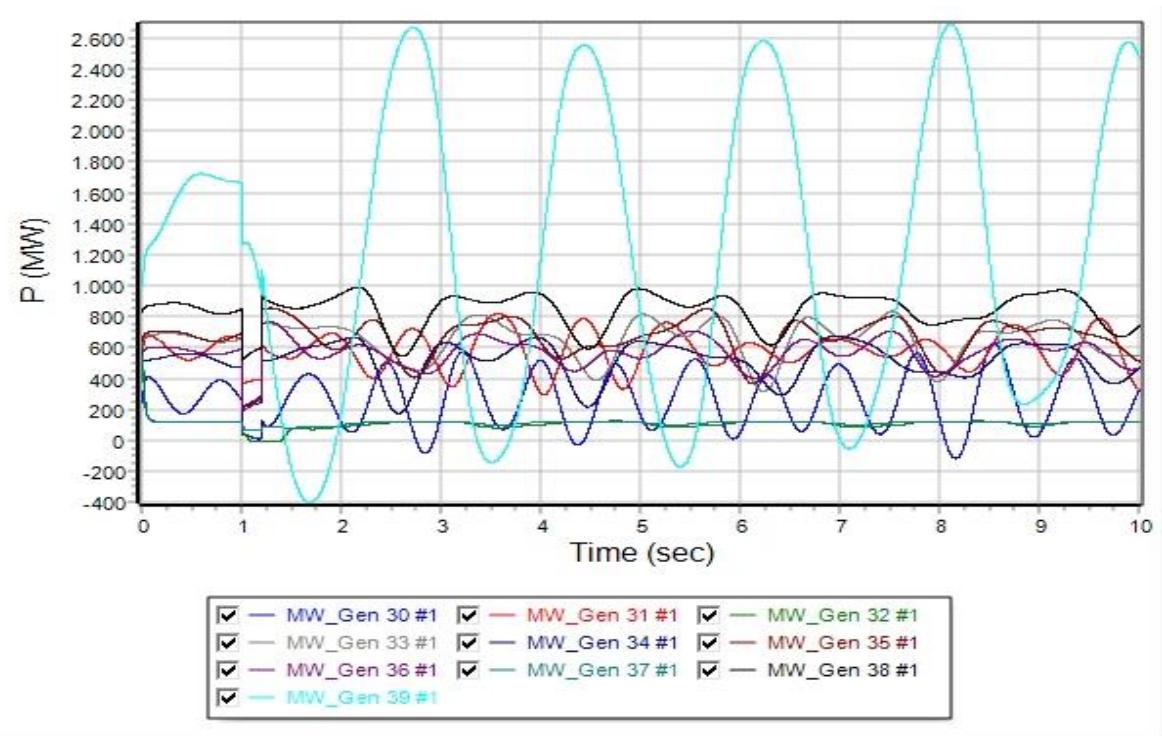
Εικόνα 139: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)



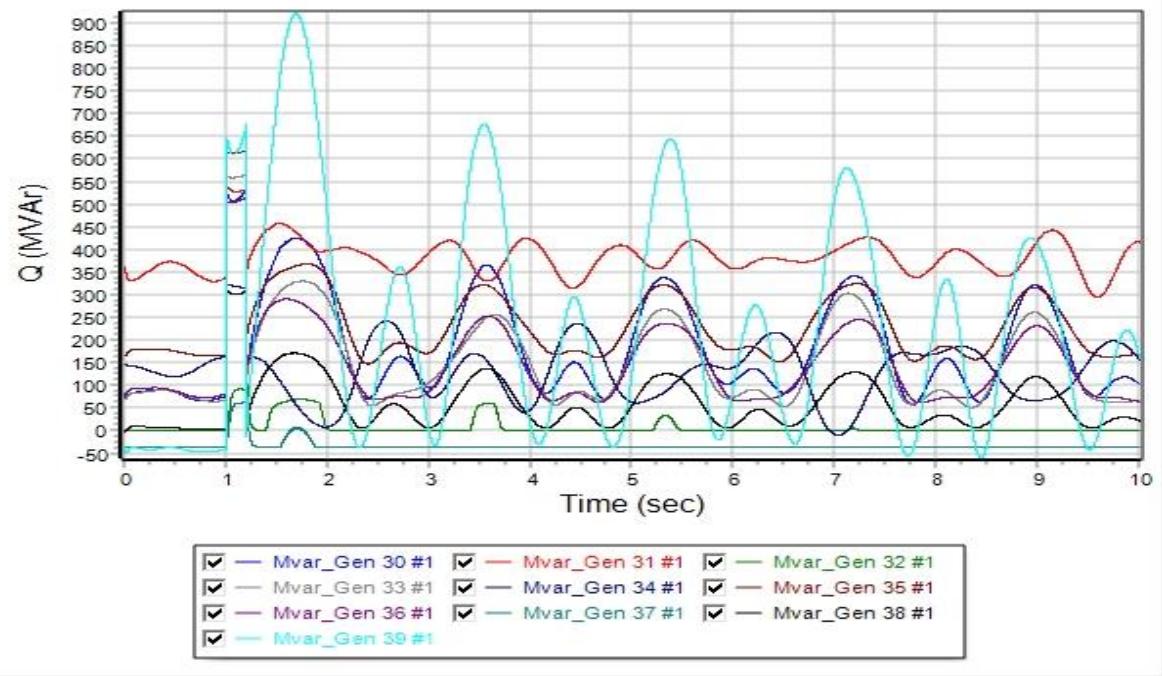
Εικόνα 140: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)



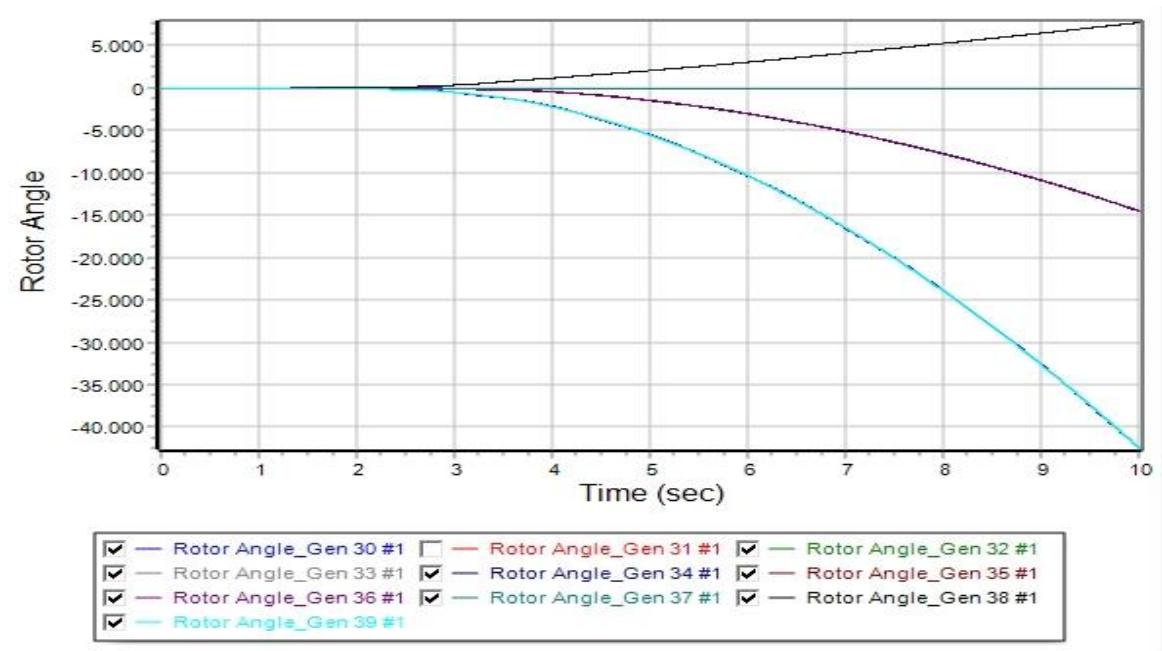
Εικόνα 141: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)



Εικόνα 142: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)



Εικόνα 143: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B7)



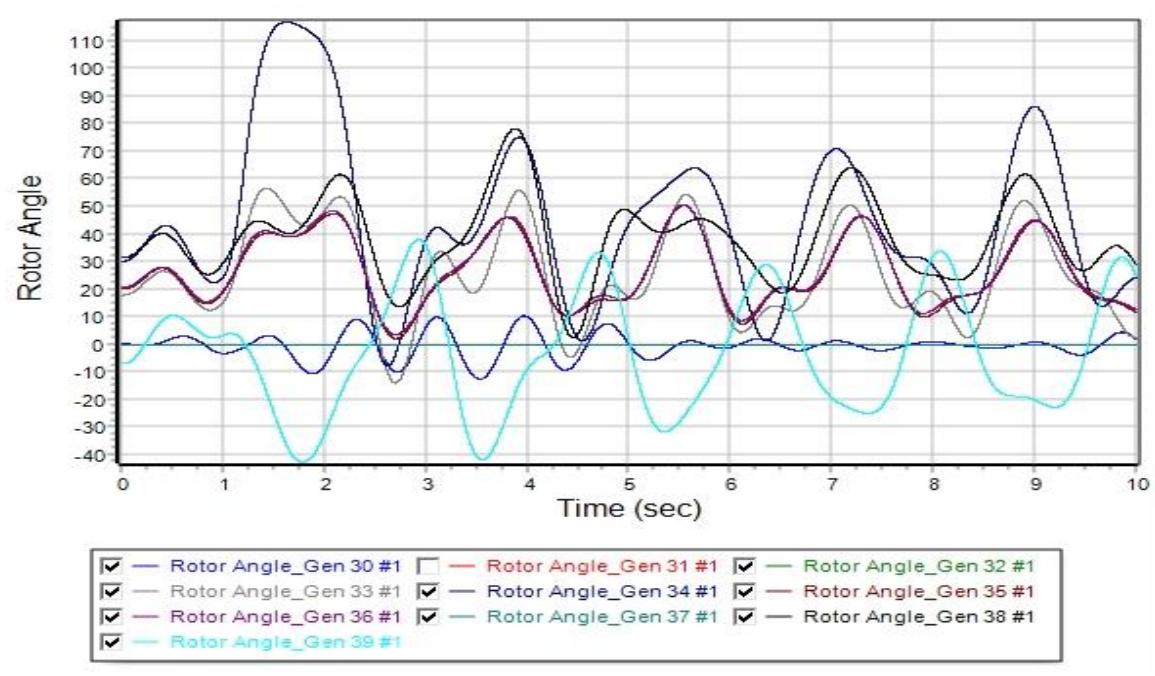
Εικόνα 144: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B7)

6.3.20 Σενάριο B8: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 20% ΑΠΕ

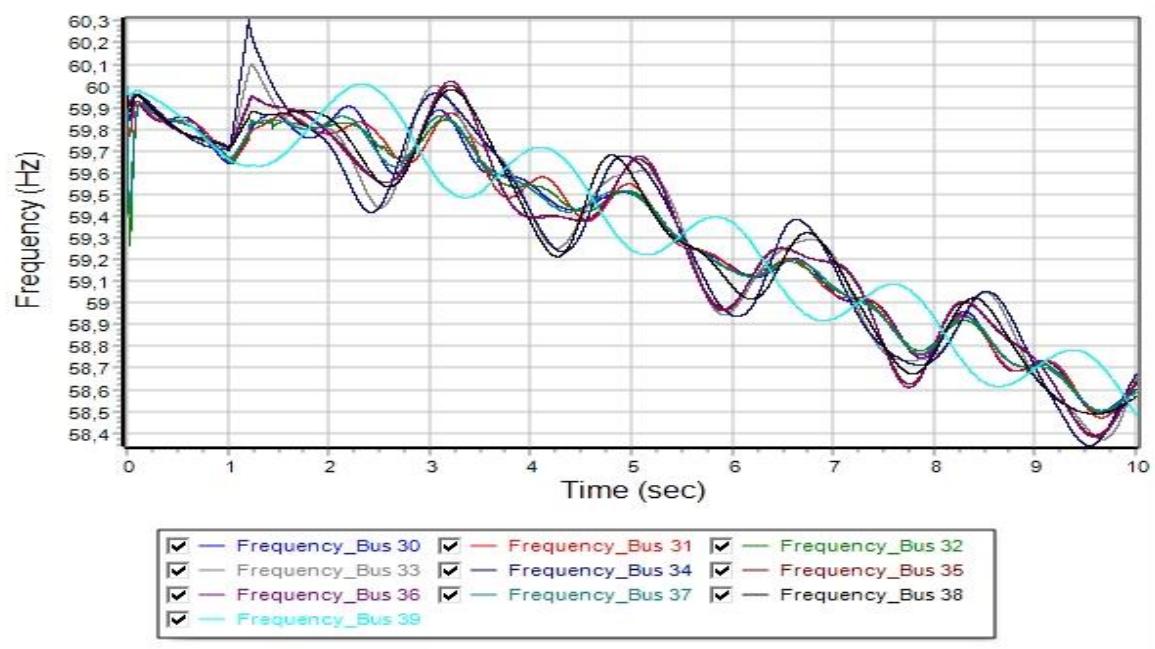
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,20 \text{ sec}$, δηλ. $0,20 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,20 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 28. Παράλληλα, στις Εικόνες 145, 146, 147, 148 και 149 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,25 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 150, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα.

Πίνακας 28: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο B8

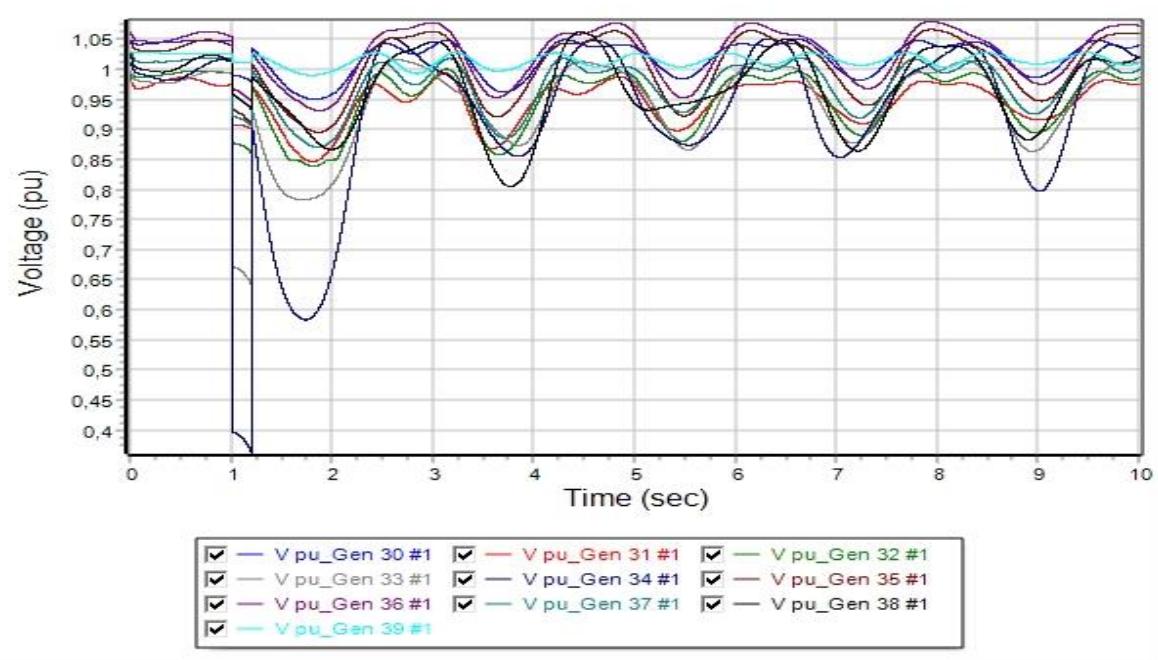
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,20
t_{open_line}	1,20
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,20



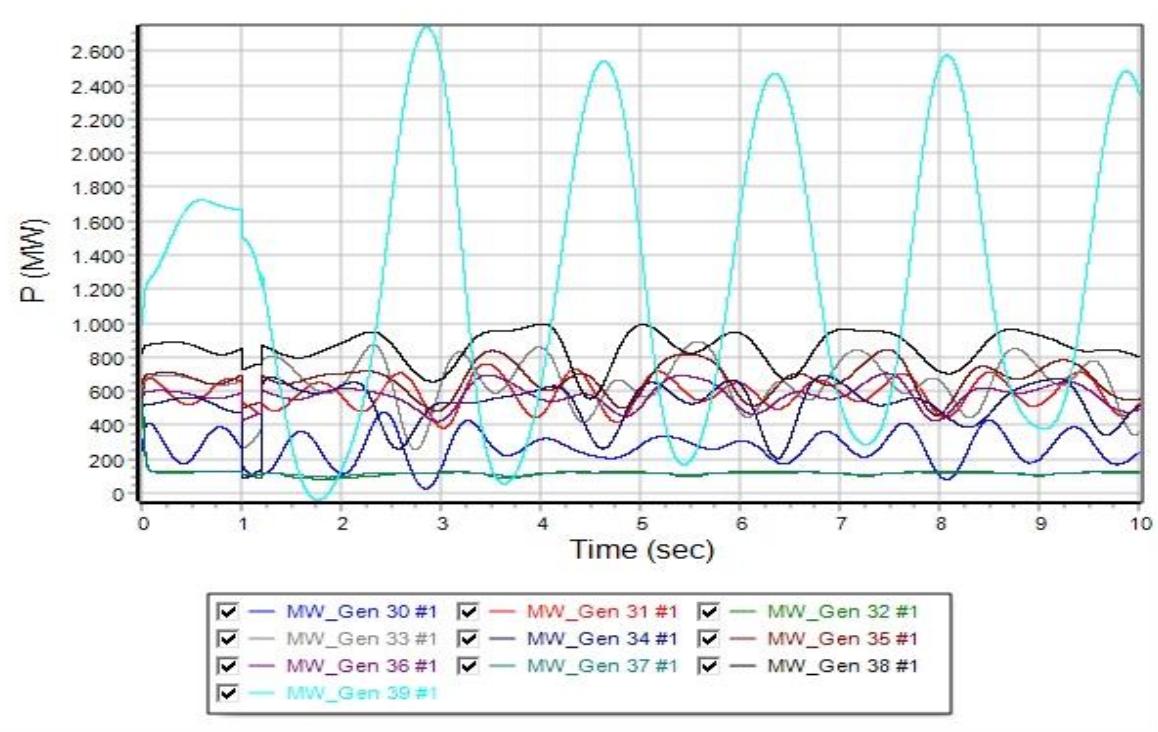
Εικόνα 145: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)



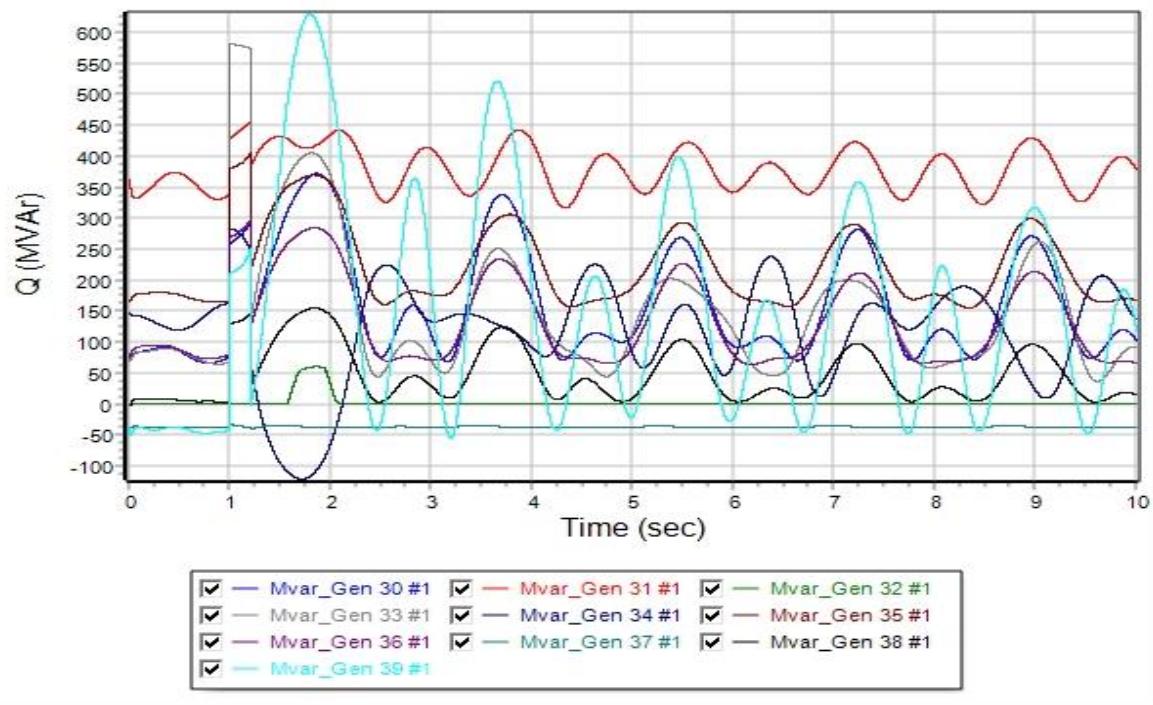
Εικόνα 146: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)



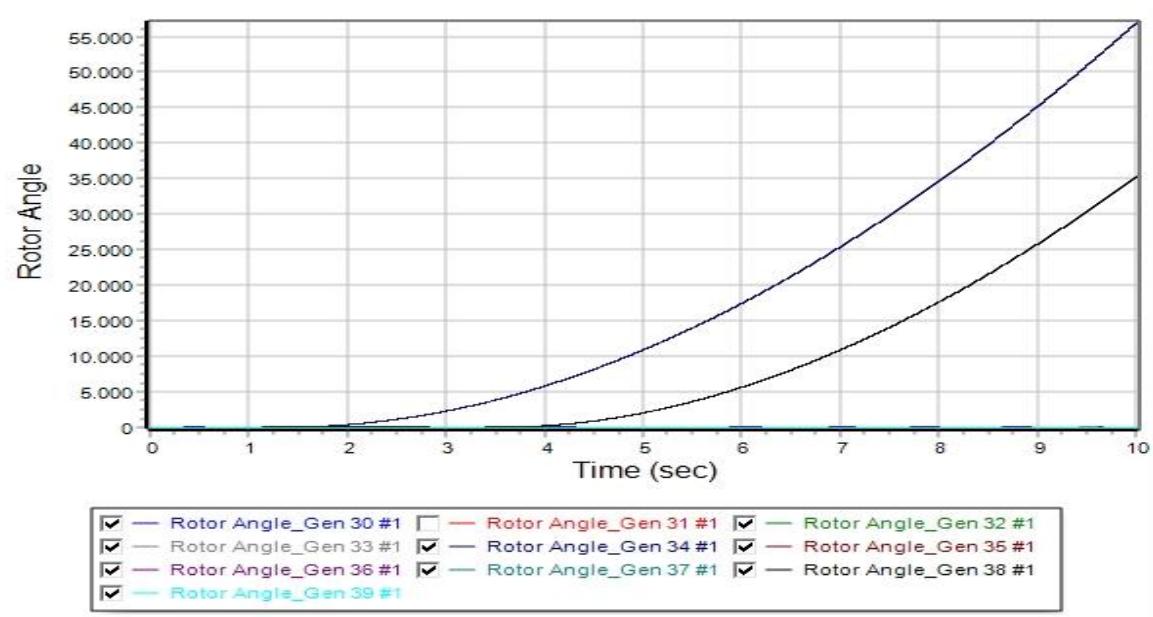
Εικόνα 147: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)



Εικόνα 148: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)



Εικόνα 149: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο B8)



Εικόνα 150: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο B8)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του μονοφασικού βραχυκυκλώματος μέσω αντίστασης με τιμή 0,01 j pu, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα, για το σενάριο B:

Πίνακας 29: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια B5-B8

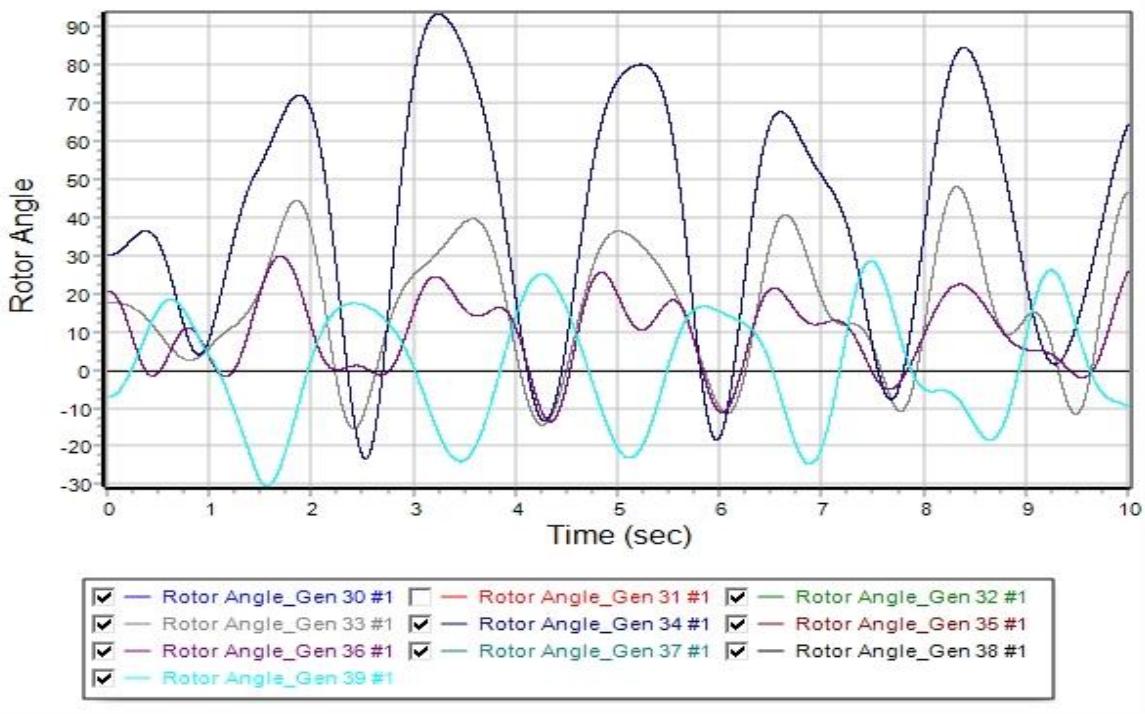
Χρονική στιγμή/ Σενάριο B	B5	B6	B7	B8
t_{fault}	1,00	1,00	1,00	1,00
t_{clear}	-	2,00	1,20	1,20
t_{open_line}	-	2,00	1,20	1,20
t_{close_line}	-	5,00	5,00	5,00
$t_{critical}$	-	1,00	0,20	0,20

6.3.21 Σενάριο Γ5: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 1 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

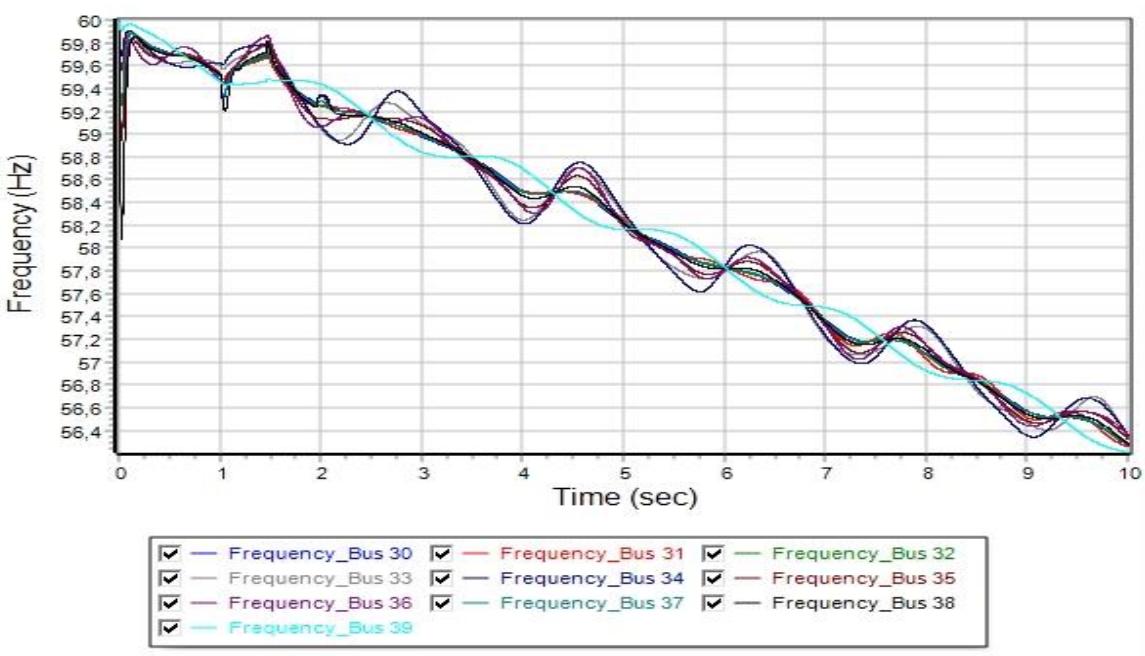
Ομοίως με τα τριφασικά βραχυκυκλώματα, στο σενάριο Γ, οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 30, 35 και 38, έχουν αντικατασταθεί με ανεμογεννήτριες και ποσοστό διείσδυσης στο δίκτυο ίσο με 30%. Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,45 \text{ sec}$, δηλ. $0,45 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,45 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 30. Παράλληλα, στις Εικόνες 151, 152, 153, 154 και 155 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,50 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 156, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 30: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ5

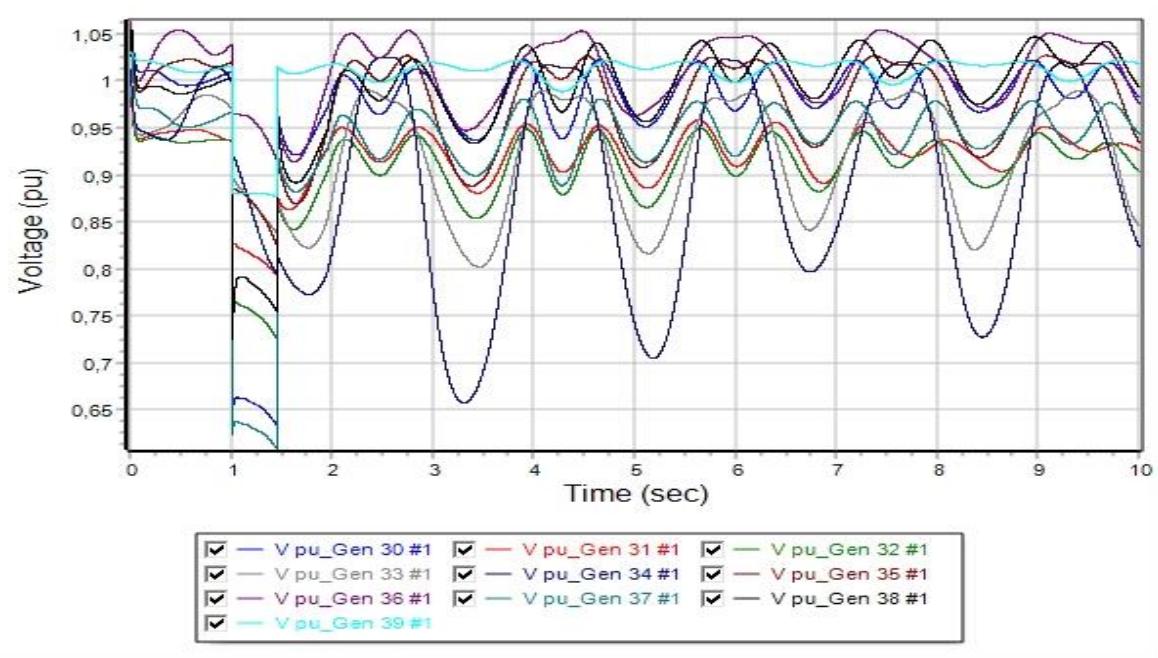
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,45
t_{open_line}	1,45
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,45



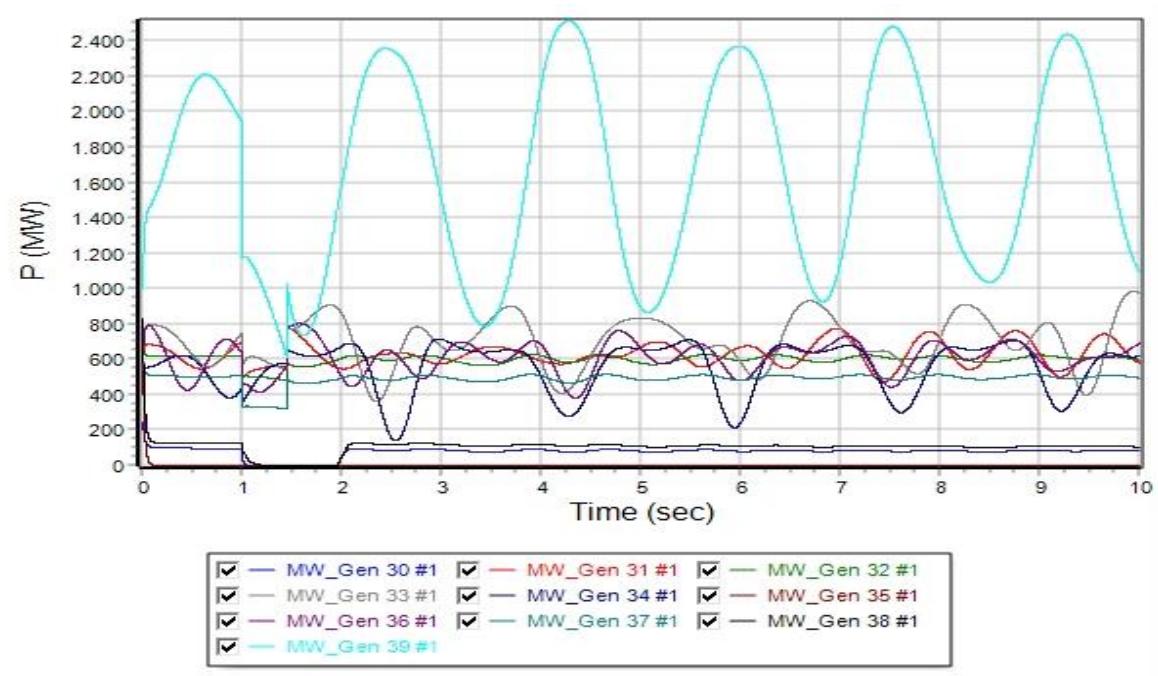
Εικόνα 151: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)



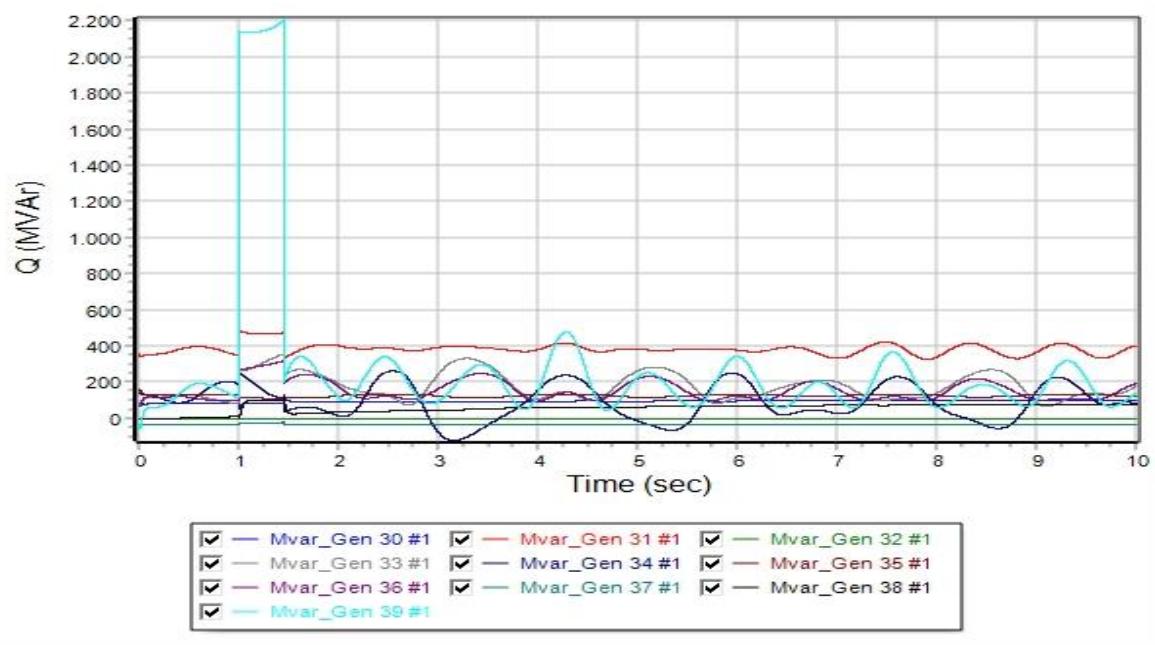
Εικόνα 152: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)



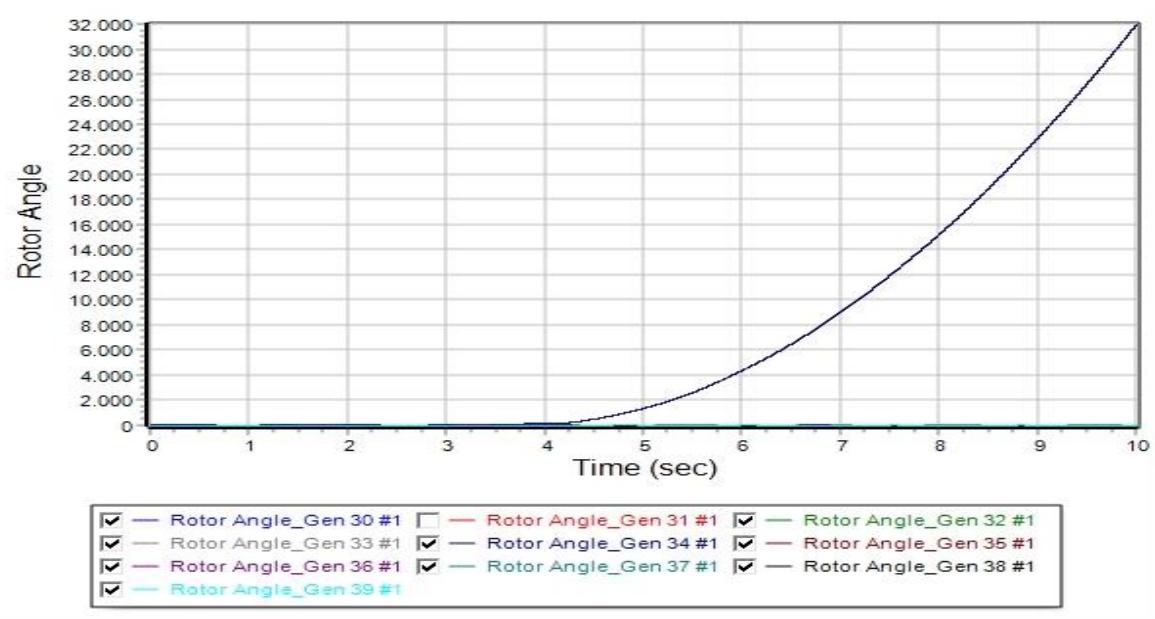
Εικόνα 153: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)



Εικόνα 154: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)



Εικόνα 155: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,45 sec (Σενάριο Γ5)



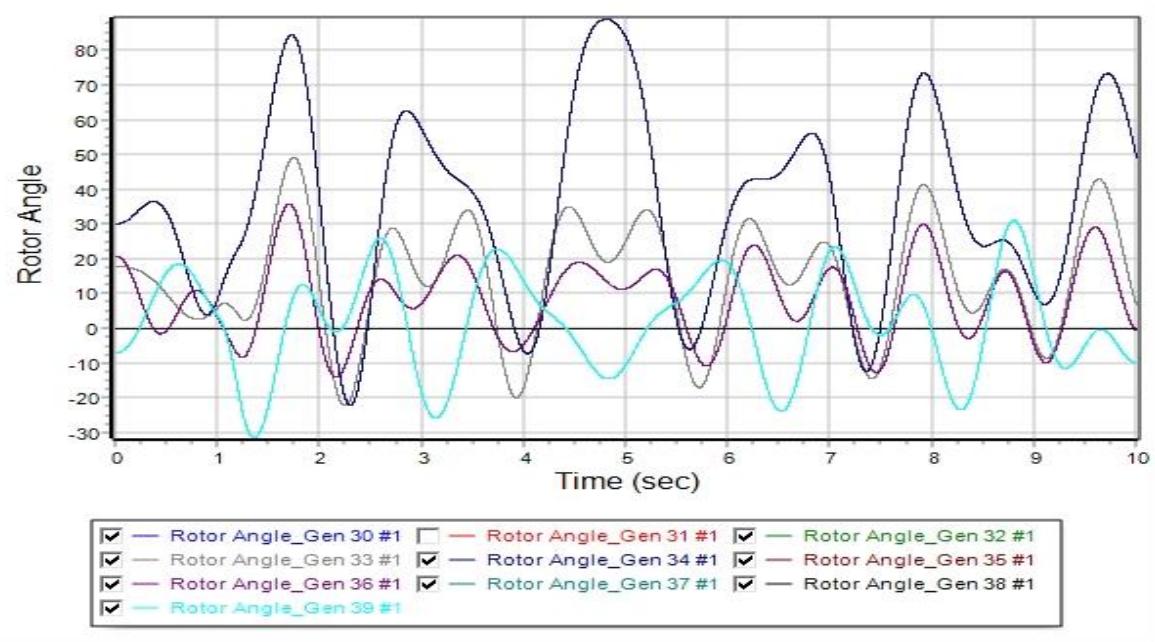
Εικόνα 156: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,50 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ5)

6.3.22 Σενάριο Γ6: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 12 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

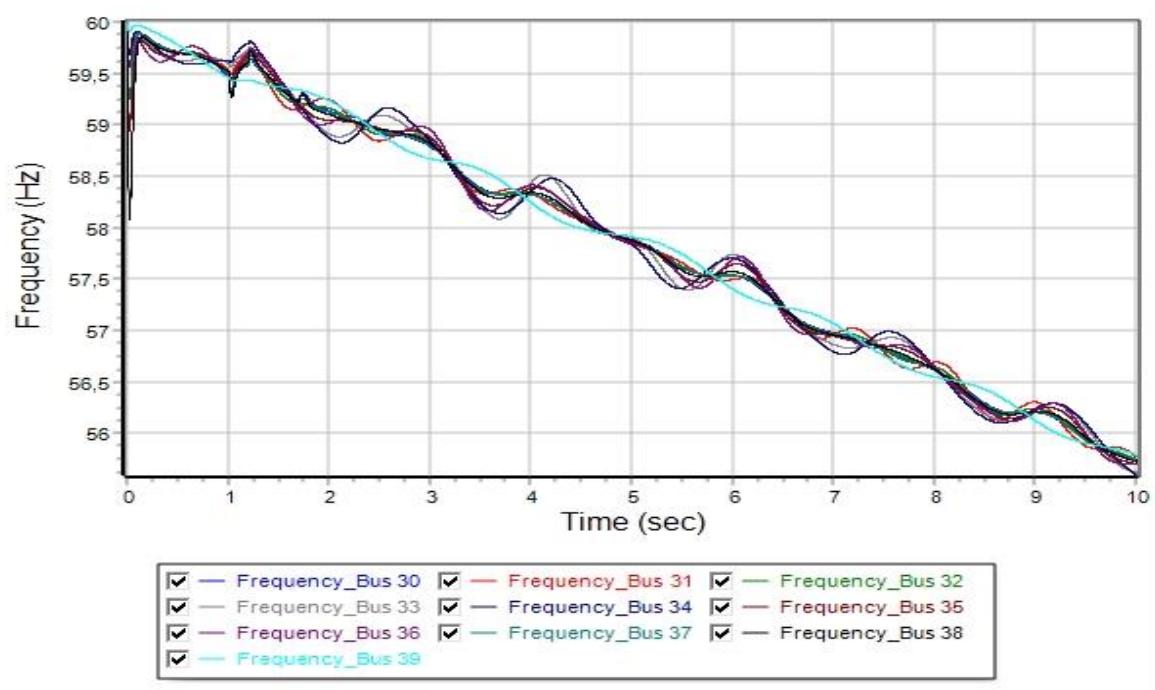
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0$ sec, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 12 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,20 sec, δηλ. 0,20 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,20$ sec. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 31. Παράλληλα, στις Εικόνες 157, 158, 159, 160 και 161 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,25$ sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 162, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 31: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ6

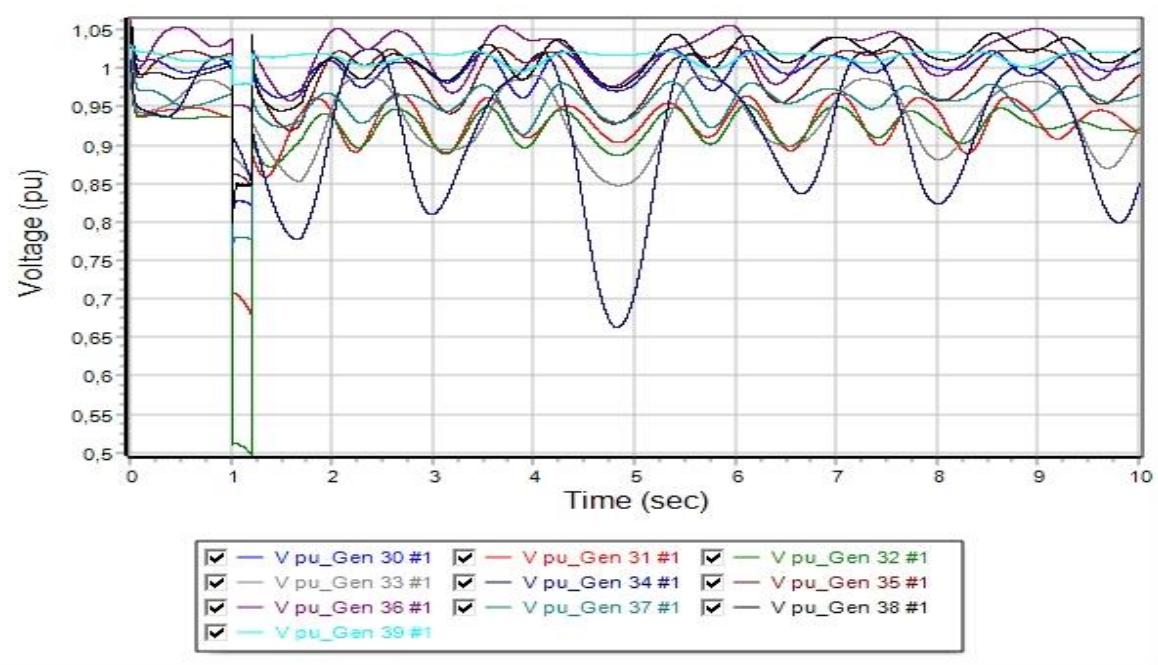
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,20
t_{open_line}	1,20
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,20



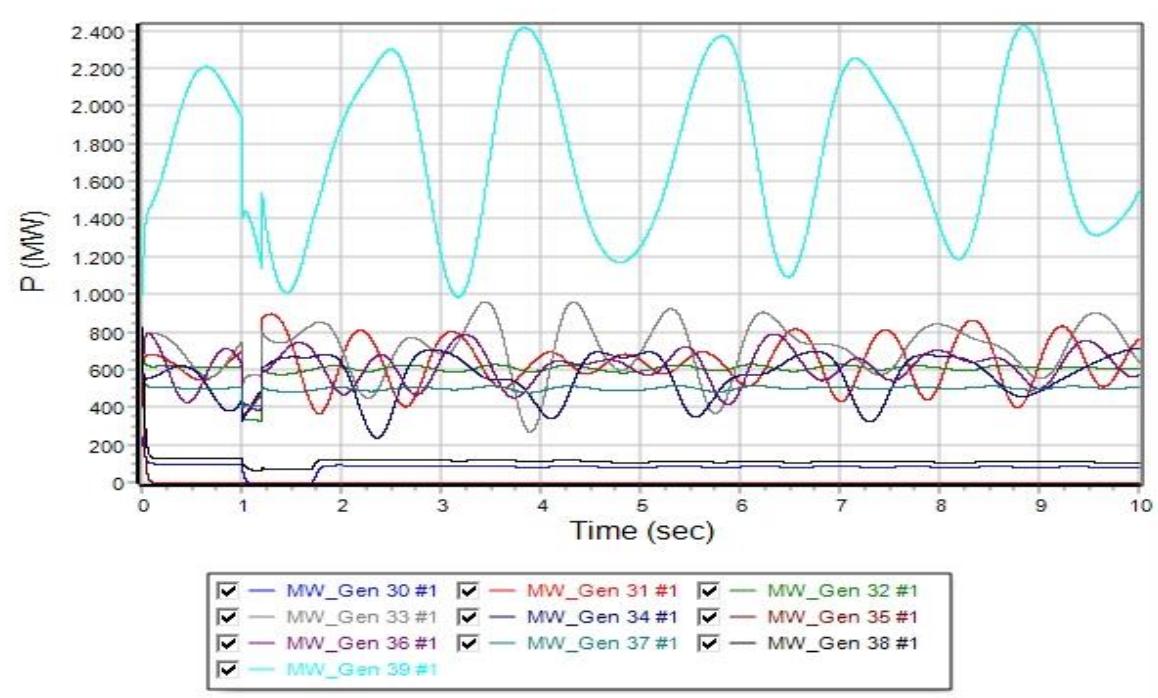
Εικόνα 157: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6)



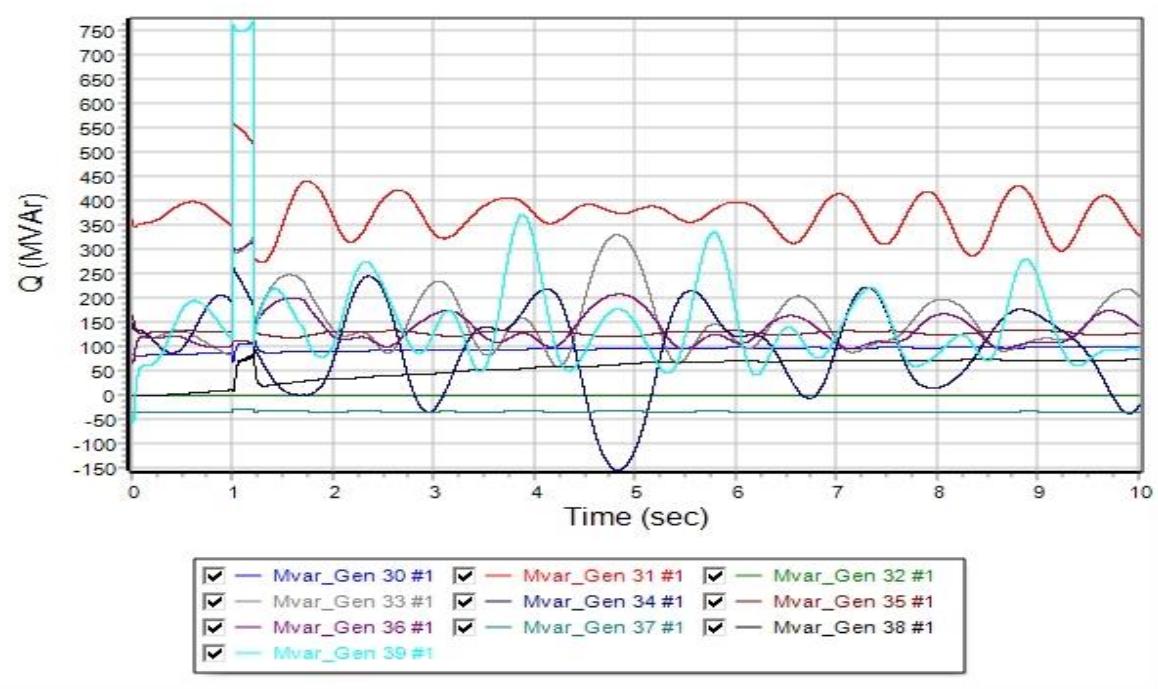
Εικόνα 158: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6)



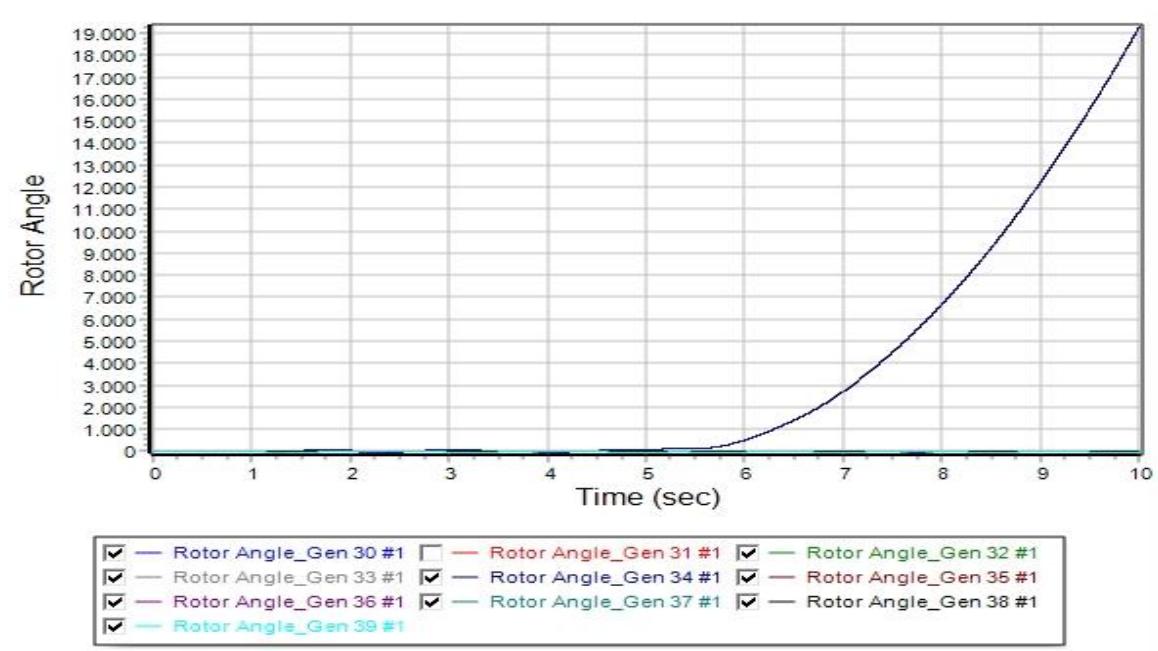
Εικόνα 159: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6)



Εικόνα 160: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6)



Εικόνα 161: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,20 sec (Σενάριο Γ6)



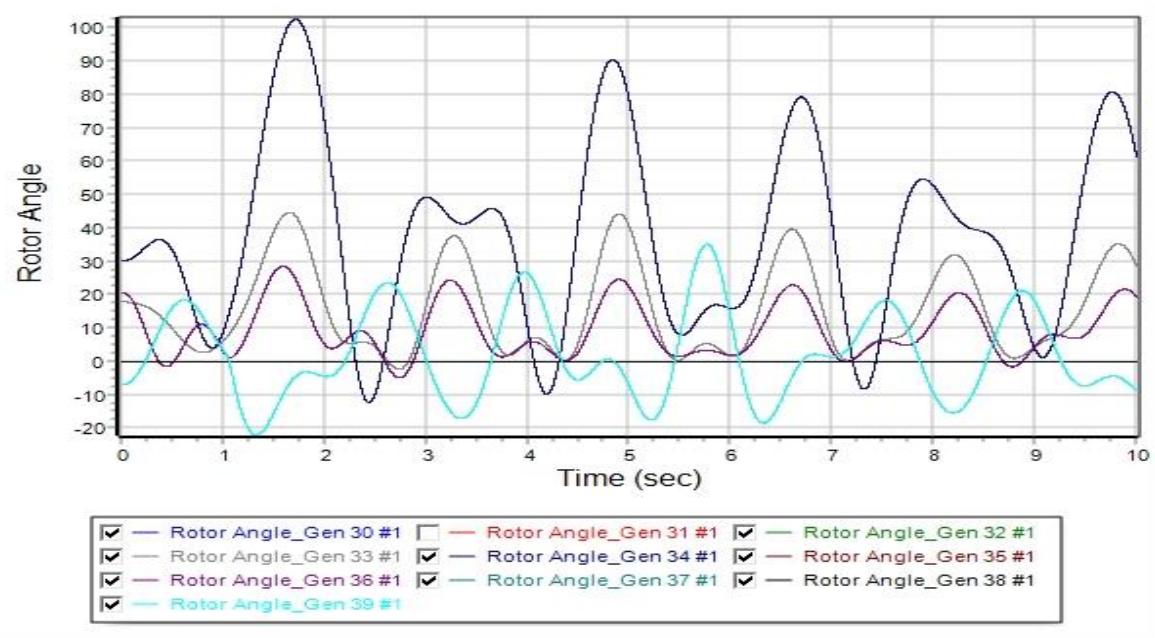
Εικόνα 162: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,25 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ6)

6.3.23 Σενάριο Γ7: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 16 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

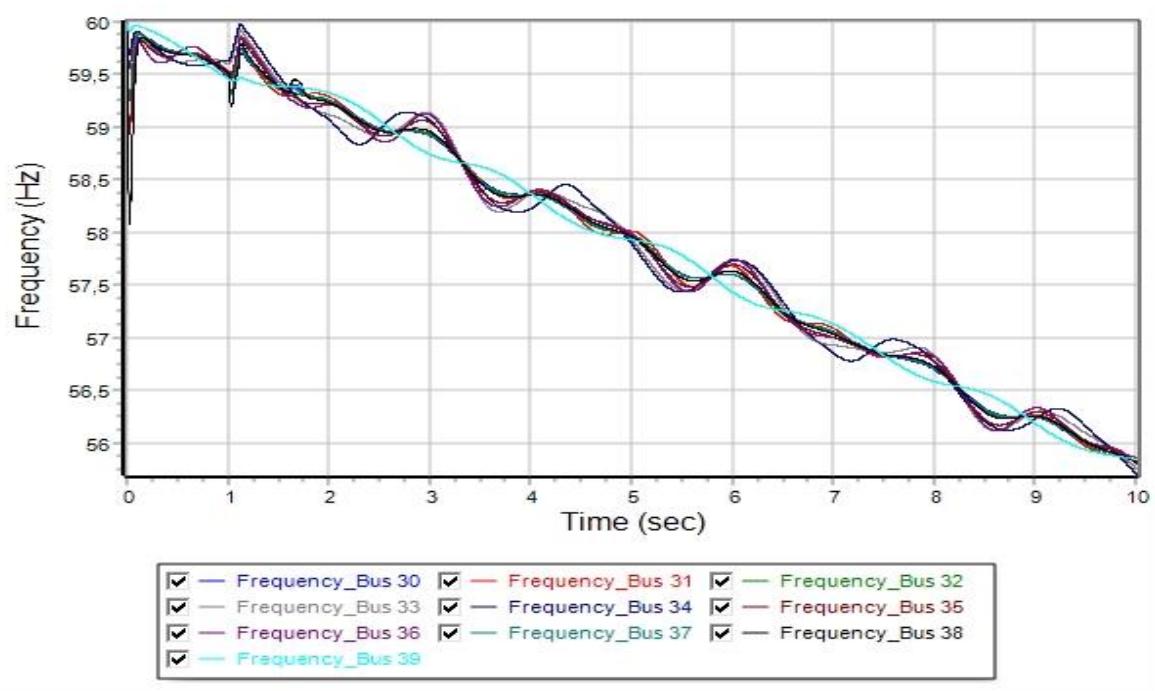
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0$ sec, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 16 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο 1,10 sec, δηλ. 0,10 sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,10$ sec. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 32. Παράλληλα, στις Εικόνες 163, 164, 165, 166 και 167 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,15$ sec από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 168, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 32: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ7

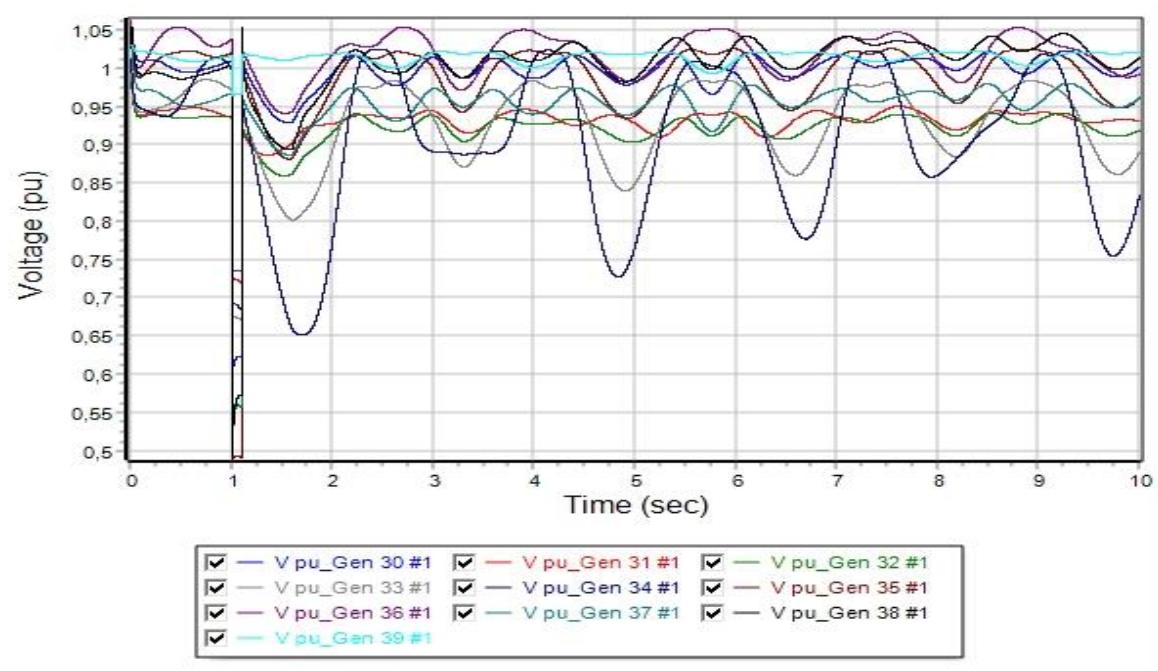
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,10
t_{open_line}	1,10
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,10



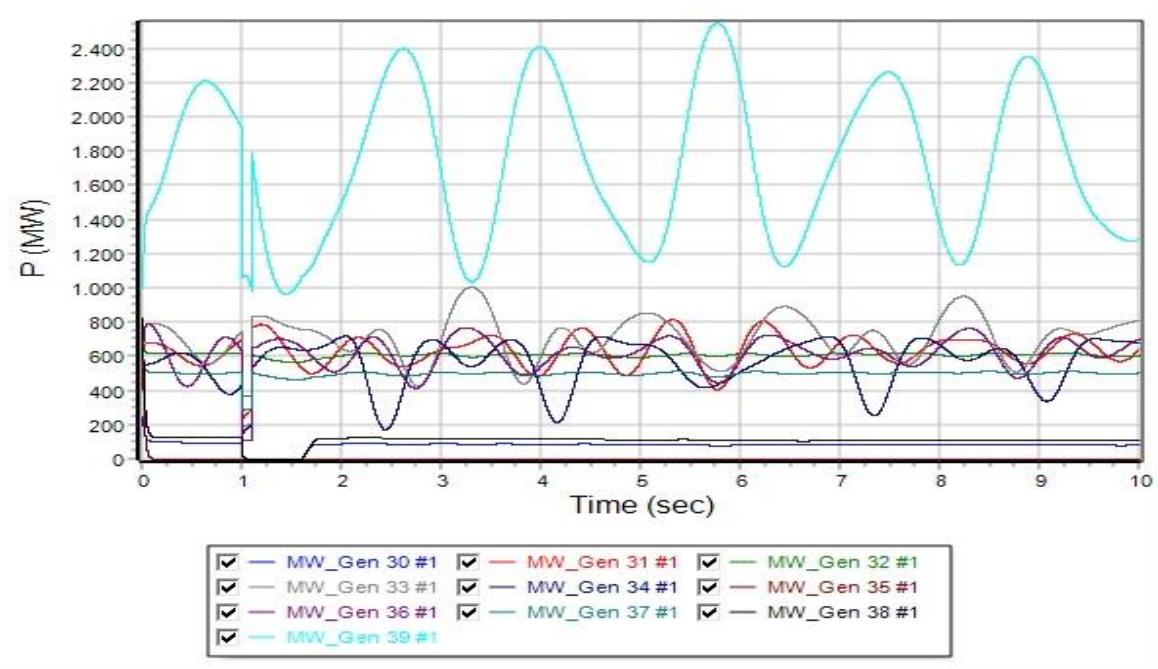
Εικόνα 163: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7)



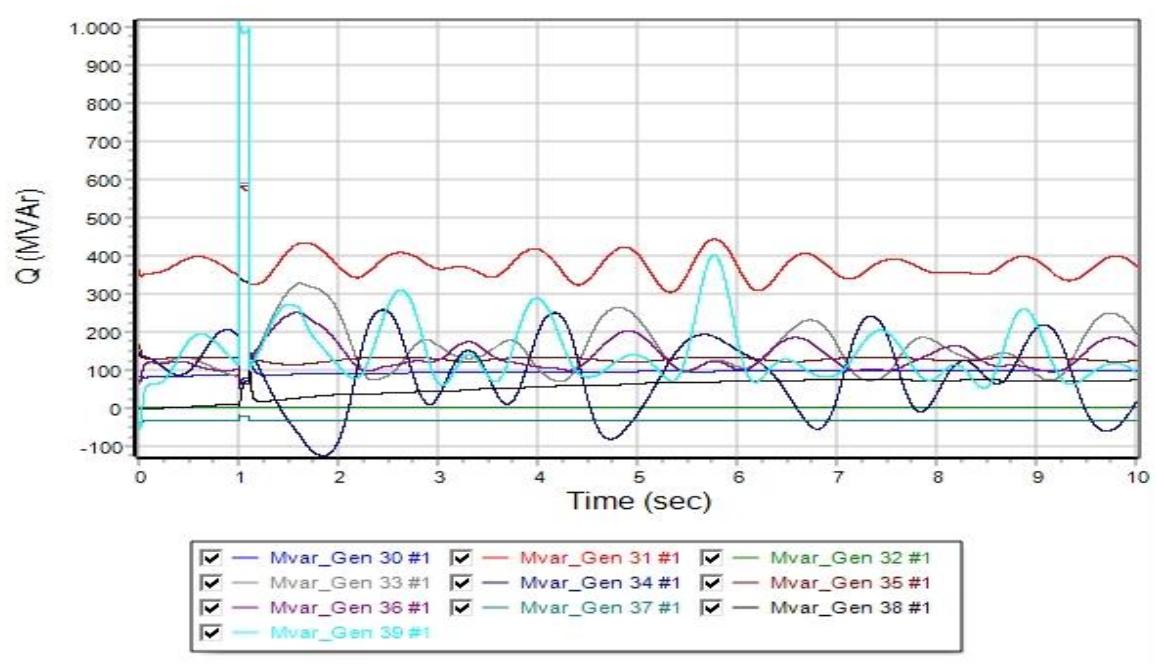
Εικόνα 164: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7)



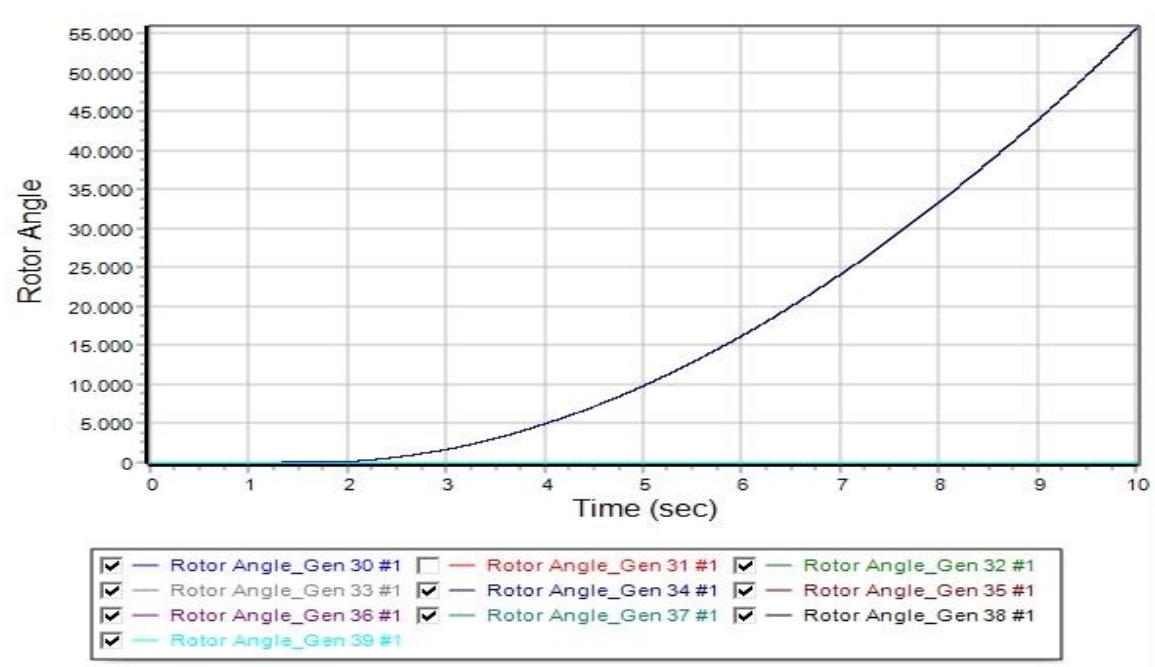
Εικόνα 165: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7)



Εικόνα 166: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7)



Εικόνα 167: Καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ7)



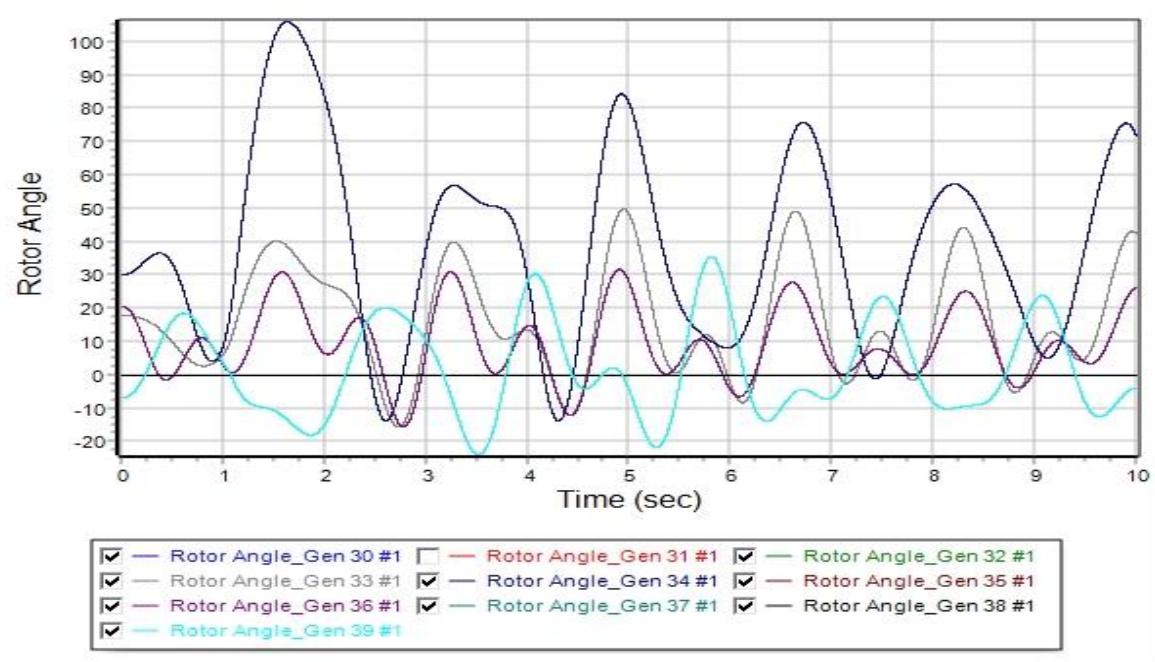
Εικόνα 168: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ7)

6.3.24 Σενάριο Γ8: Μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 20 με ενσωμάτωση 30% ΑΠΕ

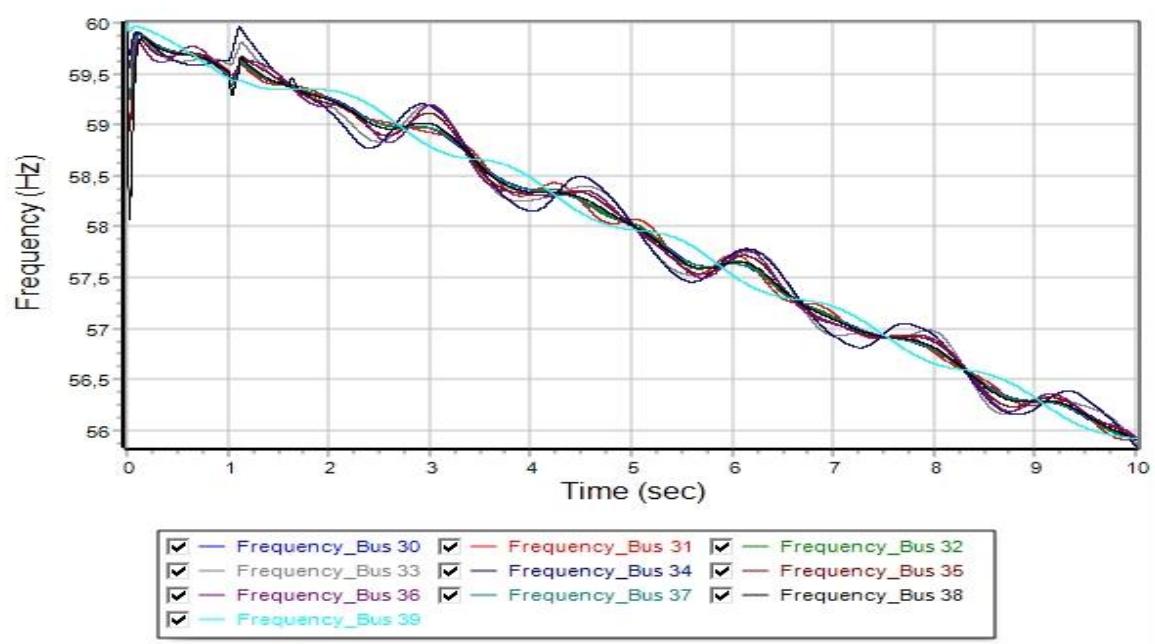
Την χρονική στιγμή $t_{fault} = 1,0 \text{ sec}$, εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύλωμα στο ζυγό 20 του συστήματος, μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή $0,01j \text{ pu}$. Έπειτα από μελέτη, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος για την διατήρηση ευστάθειας του δικτύου εμφανίζεται στο χρόνο $1,10 \text{ sec}$, δηλ. $0,10 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος. Επομένως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι $t_{critical} = 0,10 \text{ sec}$. Οι χρόνοι εφαρμογής του βραχυκυκλώματος, κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο ΣΗΕ (άνοιγμα διακοπτών ισχύος) και επαναφοράς της γραμμής μεταφοράς στο δίκτυο (κλείσιμο διακοπτών ισχύος), εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 33. Παράλληλα, στις Εικόνες 169, 170, 171, 172 και 173 απεικονίζονται οι καμπύλες που περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.1. Η ευστάθεια του συστήματος, χάνεται για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$ από την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος, αφού όπως φαίνεται από την Εικόνα 174, οι γωνίες των γεννητριών δεν κινούνται όλες μαζί, όταν εκκαθαριστεί το βραχυκύλωμα.

Πίνακας 33: Χρόνος εφαρμογής βραχυκυκλώματος, κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, χρονική στιγμή ανοίγματος και κλείσιμο των διακοπτών ισχύος, για το σενάριο Γ8

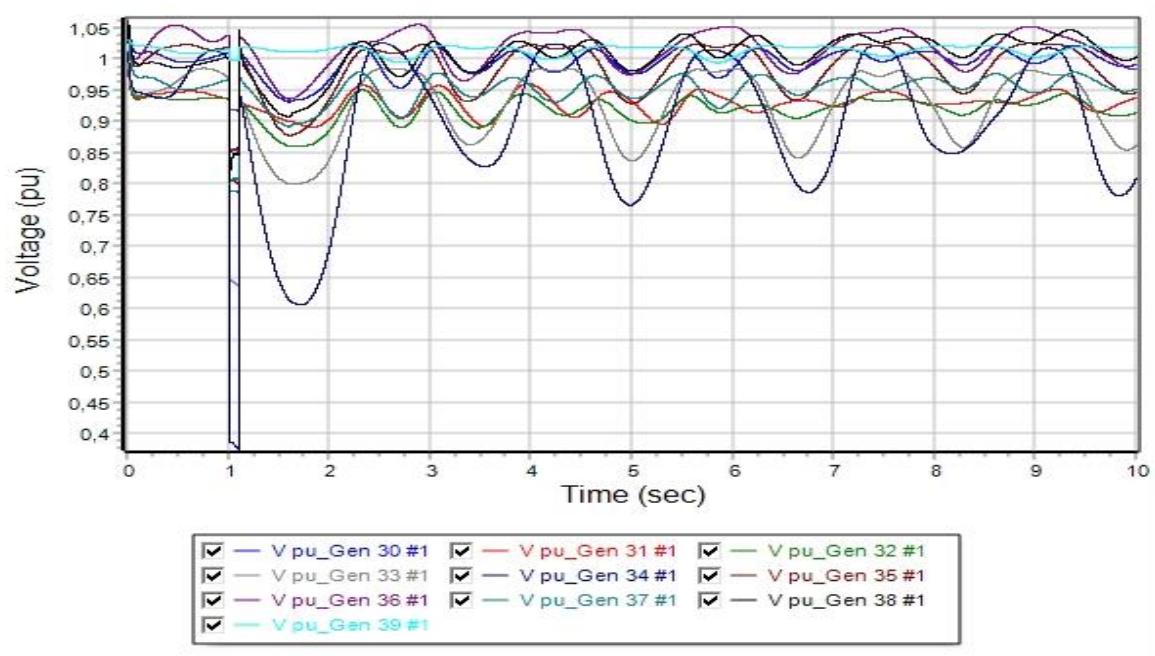
Χρονική στιγμή	Δευτερόλεπτα
t_{fault}	1,00
t_{clear}	1,10
t_{open_line}	1,10
t_{close_line}	5,00
$t_{critical}$	0,10



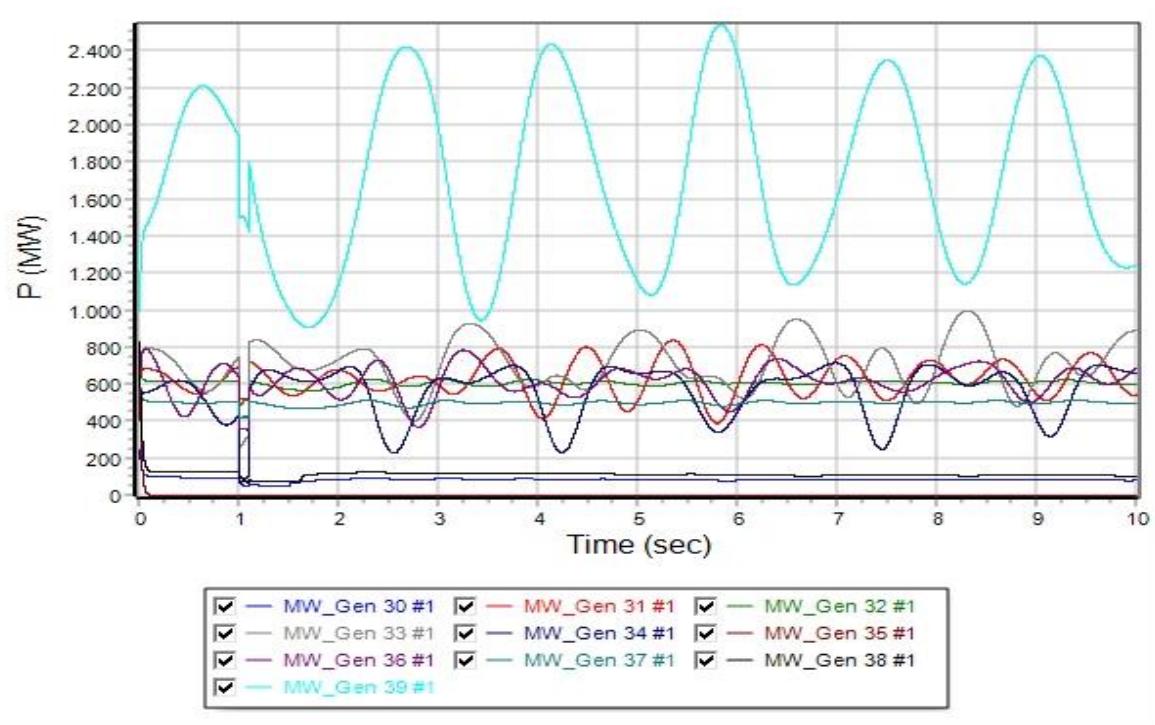
Εικόνα 169: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8)



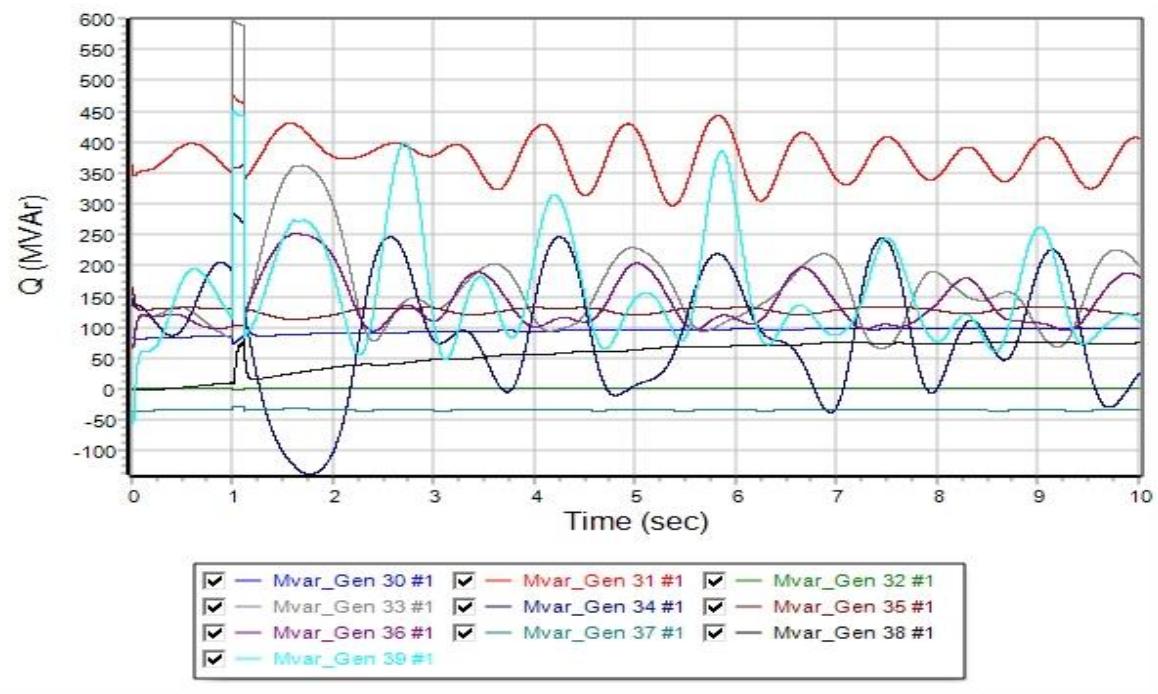
Εικόνα 170: Καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8)



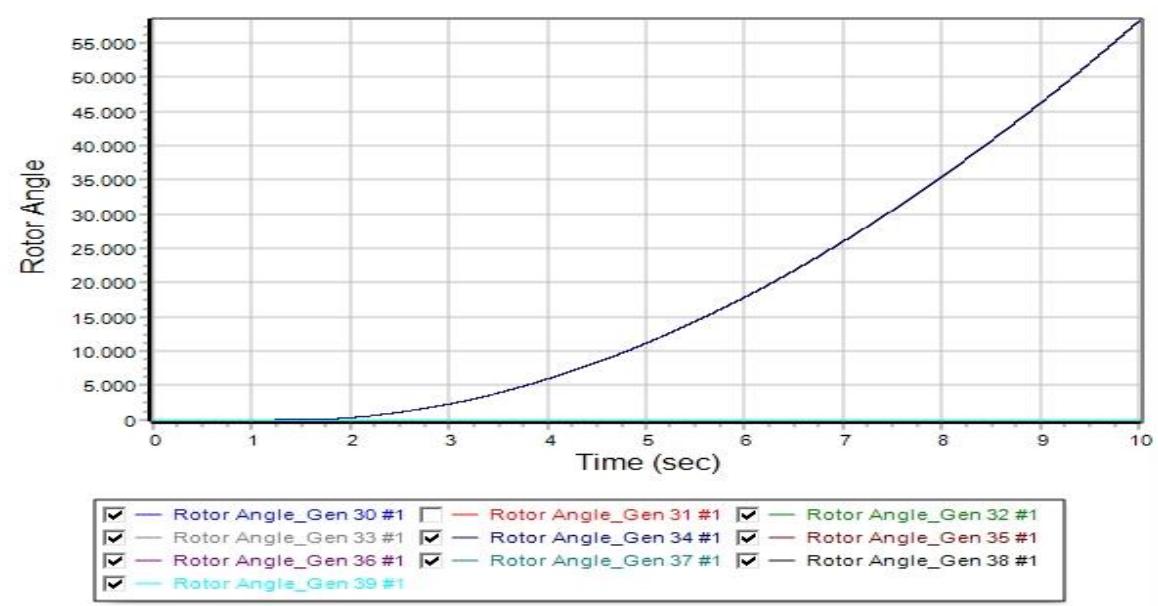
Εικόνα 171: Καμπύλες της τάσης των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8)



Εικόνα 172: Καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8)



Εικόνα 173: Καμπύλες της áεργου ισχύος των γεννητριών του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης ίσο με 0,10 sec (Σενάριο Γ8)



Εικόνα 174: Καμπύλες των σχετικών γωνιών των γεννητριών (δ) του συστήματος, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης στο 0,15 sec. Η ευστάθεια του συστήματος χάνεται (Σενάριο Γ8)

Συνοπτικά, οι χρόνοι εφαρμογής του μονοφασικού βραχυκυκλώματος μέσω αντίστασης με τιμή $0,01 \text{ j ru}$, ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, το άνοιγμα των διακοπών ισχύος της γραμμής μεταφοράς και το αντίστοιχο κλείσιμο των διακοπών ισχύος, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα, για το σενάριο Γ:

Πίνακας 34: Χρόνοι μελέτης των προσομοιώσεων, για τα σενάρια Γ5-Γ8

Χρονική στιγμή/	Γ5	Γ6	Γ7	Γ8
Σενάριο Γ				
t_{fault}	1,00	1,00	1,00	1,00
t_{clear}	1,45	1,20	1,10	1,10
t_{open_line}	1,45	1,20	1,10	1,10
t_{close_line}	5,00	5,00	5,00	5,00
$t_{critical}$	0,45	0,20	0,10	0,10

Στον Πίνακα 35 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των στερεών τριφασικών και μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων μέσω αντίστασης με τιμή $0,01 \text{j ru}$, πάνω στους ζυγούς 1, 12, 16 και 20 του συστήματος, για τα τρία σενάρια προς μελέτη.

Πίνακας 35: Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης των στερεών τριφασικών και μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων μέσω αντίστασης με τιμή $0,01 \text{j ru}$, πάνω στους επιλεγμένους ζυγούς του συστήματος, για τα τρία σενάρια προς μελέτη

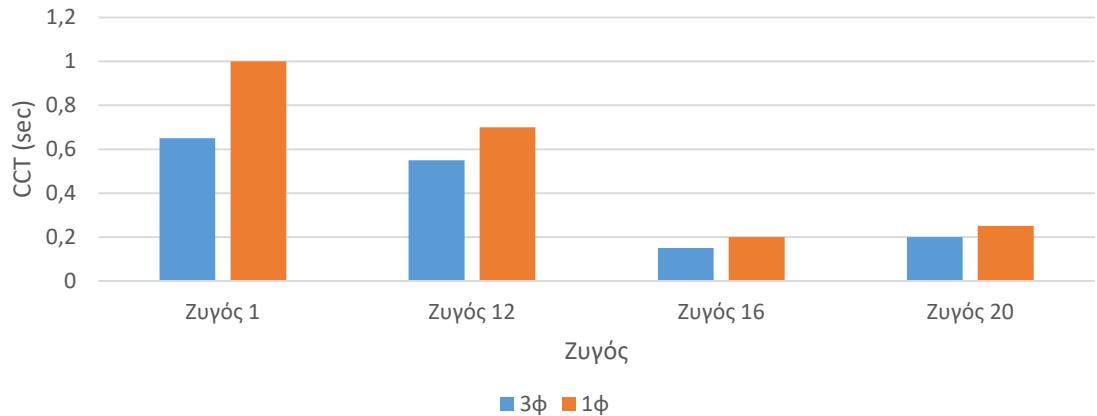
	Σενάριο Α			Σενάριο Β		
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ
Ζυγός 1	0,65	1,00	0,75	-	0,35	0,45
Ζυγός 12	0,55	0,70	0,60	1,00	0,15	0,20
Ζυγός 16	0,15	0,20	0,15	0,20	0,10	0,10
Ζυγός 20	0,20	0,25	0,15	0,20	0,10	0,10

6.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Συγκρίσεις ανά σενάριο

6.4.1 Σενάριο Α

Για το σενάριο Α των παραπάνω προσομοιώσεων εξετάσθηκαν στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ, πάνω στους ζυγούς 1, 12, 16 και 20 του συστήματος. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 35, παρατηρείται ότι οι κρίσμοι χρόνοι εκκαθάρισης στα μονοφασικά βραχυκυκλώματα είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους χρόνους για τα τριφασικά βραχυκυκλώματα, στους ζυγούς που πραγματοποιήθηκαν τα σφάλματα. Από αυτό προκύπτει ότι τα τριφασικά βραχυκυκλώματα είναι τα πιο επιβλαβή σφάλματα για το ΣΗΕ. Συγκρίνοντας τους κρίσμους χρόνους εκκαθάρισης των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων μεταξύ τους, γίνεται αντιληπτό ότι ο ζυγός 1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά, αφού προσφέρει στο σύστημα περισσότερο χρόνο για την εκκαθάριση του σφάλματος. Αντίθετα, ο ζυγός 16 αποτελεί την χειρότερη περίπτωση εμφάνισης στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος για το ίδιο σενάριο. Σε ότι έχει να κάνει με τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ, στο ζυγό 1 εντοπίζεται ο μεγαλύτερος κρίσμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος, ενώ στο ζυγό 16 ο μικρότερος. Η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσμους χρόνους εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων για δεδομένο ζυγό, εμφανίζεται στο ζυγό 1 και είναι ίση με 350 ms, ενώ η μικρότερη στους ζυγούς 16 και 20 και είναι ίση με 50 ms. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για το σενάριο Α, την καλύτερη συμπεριφορά σε περίπτωση εμφάνισης βραχυκυκλώματος παρουσιάζει ο ζυγός 1, ενώ την χειρότερη ο ζυγός 16. Στο γράφημα 1, γίνεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Σενάριο Α - Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων

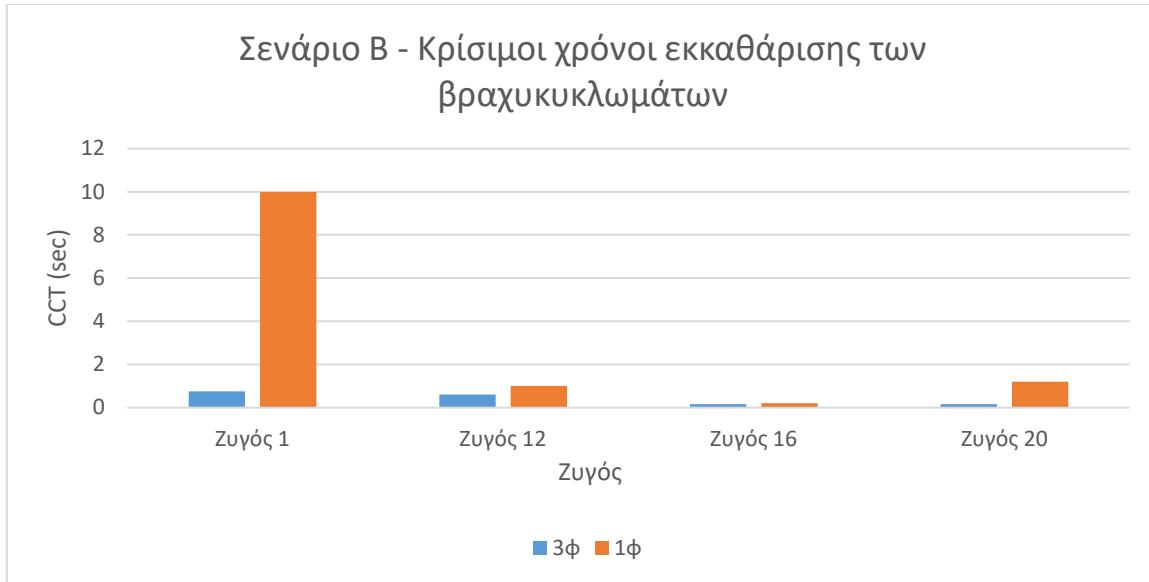


Γράφημα 1: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο Α

6.4.2 Σενάριο Β

Για το σενάριο Β των παραπάνω προσομοιώσεων εξετάσθηκαν στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή $0,01j$ pu, πάνω στους ζυγούς 1, 12, 16 και 20 του συστήματος. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 35, παρατηρείται ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης στα μονοφασικά βραχυκυκλώματα είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους χρόνους για τα τριφασικά βραχυκυκλώματα, στους ζυγούς που πραγματοποιήθηκαν τα σφάλματα. Συγκρίνοντας τους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων μεταξύ τους, γίνεται αντιληπτό ότι ο ζυγός 1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά, αφού προσφέρει στο σύστημα περισσότερο χρόνο για την εκκαθάριση του σφάλματος. Αντίθετα, οι ζυγοί 16 και 20 αποτελούν την χειρότερη περίπτωση εμφάνισης στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος για το ίδιο σενάριο. Σε ότι έχει να κάνει με τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω αντίστασης με τιμή $0,01j$ pu, στο ζυγό 1 εντοπίζεται ο μεγαλύτερος κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος, αφού το σύστημα δεν χάνει την ευστάθεια του για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ στους ζυγούς 16 και 20 οι μικρότεροι. Η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων για δεδομένο ζυγό, εμφανίζεται στο ζυγό 1, ενώ η μικρότερη στους ζυγούς 16 και 20 και είναι ίση με 50 ms. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για το σενάριο Β, την καλύτερη συμπεριφορά σε περίπτωση

εμφάνισης βραχυκυκλώματος παρουσιάζει ο ζυγός 1, ενώ την χειρότερη οι ζυγοί 16 και 20. Στο γράφημα 2, γίνεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του μονοφασικού βραχυκυκλώματος μέσω μίας αντίστασης με τιμή $j0,01$ ρυθμωρήθηκε ίσος με 10 sec (δηλαδή ίσος με τη διάρκεια της προσομοίωσης) για ποιοτικούς λόγους αναπαράστασης των δεδομένων.

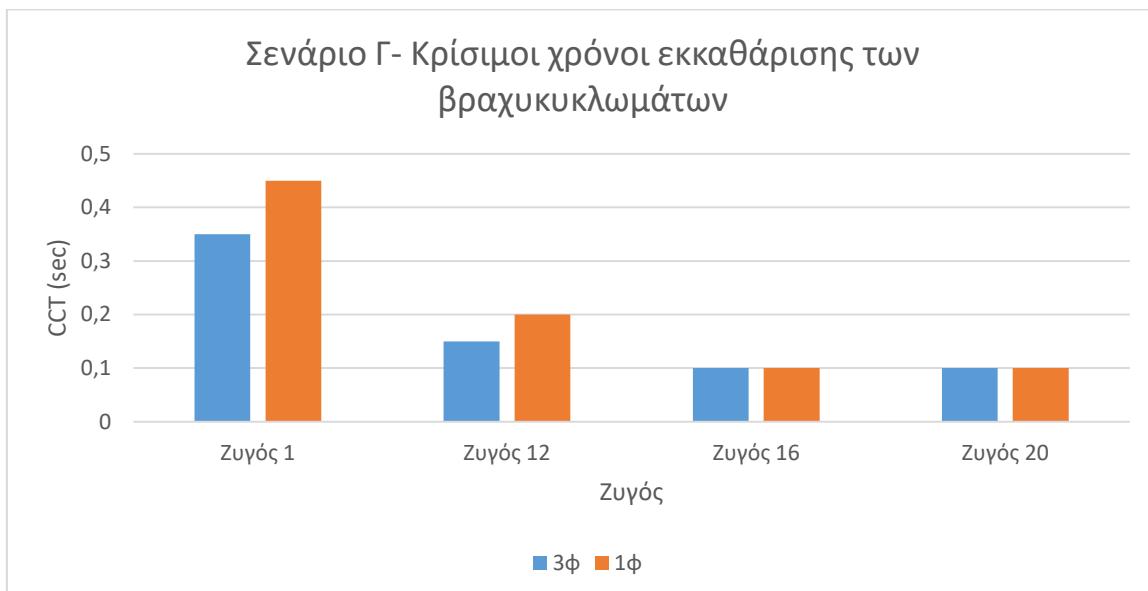


Γράφημα 2: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο Β

6.4.3 Σενάριο Γ

Για το σενάριο Γ των παραπάνω προσομοιώσεων εξετάσθηκαν στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ, πάνω στους ζυγούς 1, 12, 16 και 20 του συστήματος. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 35, παρατηρείται ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης στα μονοφασικά βραχυκυκλώματα είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους χρόνους για τα τριφασικά βραχυκυκλώματα, στους δύο εκ των τεσσάρων ζυγών που πραγματοποιήθηκαν τα σφάλματα, ενώ είναι ίσοι στους άλλους δύο. Συγκρίνοντας τους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων μεταξύ τους, γίνεται αντιληπτό ότι ο ζυγός 1 έχει την καλύτερη συμπεριφορά, αφού προσφέρει στο σύστημα περισσότερο χρόνο για την εκκαθάριση του σφάλματος. Αντίθετα, οι ζυγοί 16 και 20 αποτελούν την χειρότερη περίπτωση εμφάνισης στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος για το ίδιο σενάριο. Σε ότι έχει να κάνει με τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ, στο ζυγό 1 εντοπίζεται

ο μεγαλύτερος κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος, ενώ στους ζυγούς 16 και 20 οι μικρότεροι. Η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων για δεδομένο ζυγό, εμφανίζεται στο ζυγό 1 και είναι ίση με 100 ms, ενώ η μικρότερη στους ζυγούς 16 και 20 και είναι ίση με Ω. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για το σενάριο A, την καλύτερη συμπεριφορά σε περίπτωση εμφάνισης βραχυκυκλώματος παρουσιάζει ο ζυγός 1, ενώ την χειρότερη οι ζυγοί 16 και 20. Στο γράφημα 3, γίνεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.



Γράφημα 3: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το σενάριο Γ

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, προκύπτει ο Πίνακας 36 για τον καλύτερο και χειρότερο ζυγό για δεδομένο σενάριο. Ως καλύτερος ζυγός θεωρείται αυτό που έχει το μεγαλύτερο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος και αντίστοιχα ως χειρότερος, αυτό με το μικρότερο.

Πίνακας 36: Σύγκριση ζυγών για δεδομένο σενάριο

Σύγκριση ζυγών για δεδομένο σενάριο

Σενάρια/Ζυγοί με την καλύτερη – χειρότερη συμπεριφορά	Ζυγός με την καλύτερη συμπεριφορά	Ζυγός με την χειρότερη συμπεριφορά		
	3φ	1φ	3φ	1φ
Σενάριο A	Ζυγός 1	Ζυγός 1	Ζυγός 16	Ζυγός 16
Σενάριο B	Ζυγός 1	Ζυγός 1	Ζυγός 16, 20	Ζυγός 16, 20
Σενάριο Γ	Ζυγός 1	Ζυγός 1	Ζυγός 16, 20	Ζυγός 16, 20

Σύμφωνα με τον Πίνακα 36, προκειμένου να προκύψει ο ζυγός με την καλύτερη και χειρότερη συμπεριφορά, σε πιθανή εμφάνιση βραχυκυκλώματος στο δίκτυο, εξετάσθηκαν 6 περιπτώσεις κάθε φορά. Ως ζυγός με την καλύτερη συμπεριφορά καθορίστηκε ο ζυγός 1 με ποσοστό 100%, ενώ ως χειρότερος καθορίστηκε ο ζυγός 16 με ποσοστό 100% και ακολούθησε ο ζυγός 20 με ποσοστό 66,6%.

6.5 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων – Συγκρίσεις ανά ζυγό

6.5.1 Ζυγός 1

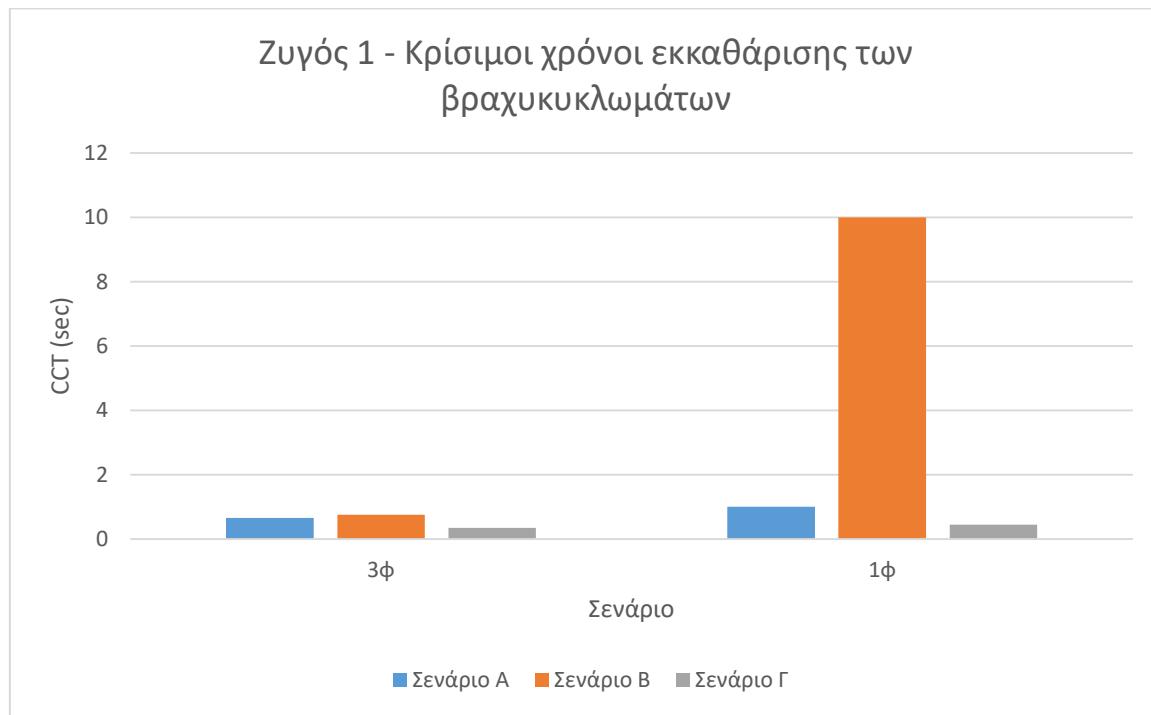
Στο ζυγό 1 του συστήματος, εξετάζονται στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Μελετώνται τρία σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα, κάθε ένα με διαφορετικό ποσοστό και διαφορετικούς ζυγούς ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας. Από τον Πίνακα 35, γίνεται αντιληπτό ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων στο ζυγό 1, είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους τριφασικούς για όλα τα σενάρια προς μελέτη. Ο τελευταίος παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σενάριο B, ενώ την χειρότερη στο σενάριο Γ. Αντίστοιχα, για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται επίσης στο σενάριο B και η χειρότερη στο σενάριο Γ. Για δεδομένο σενάριο, η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης μεταξύ των βραχυκυκλωμάτων εμφανίζεται στο σενάριο B, όπου στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα δεν χάνεται η ευστάθεια του συστήματος, ενώ η μικρότερη στο σενάριο Γ, ίση με 100 ms. Τα

αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 37 και στο γράφημα 4, γίνεται η οπτικοποίηση τους. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του μονοφασικού βραχυκυκλώματος μέσω μίας αντίστασης με τιμή $j0,01$ ρυ θεωρήθηκε ίσος με 10 sec (διάρκεια της προσομοίωσης) για ποιοτικούς λόγους αναπαράστασης των δεδομένων.

Πίνακας 37: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 1

Zυγός 1

Σενάριο/CCT	3φ	1φ
Σενάριο A	0,65	1,00
Σενάριο B	0,75	-
Σενάριο Γ	0,35	0,45



Γράφημα 4: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό

6.5.2 Ζυγός 12

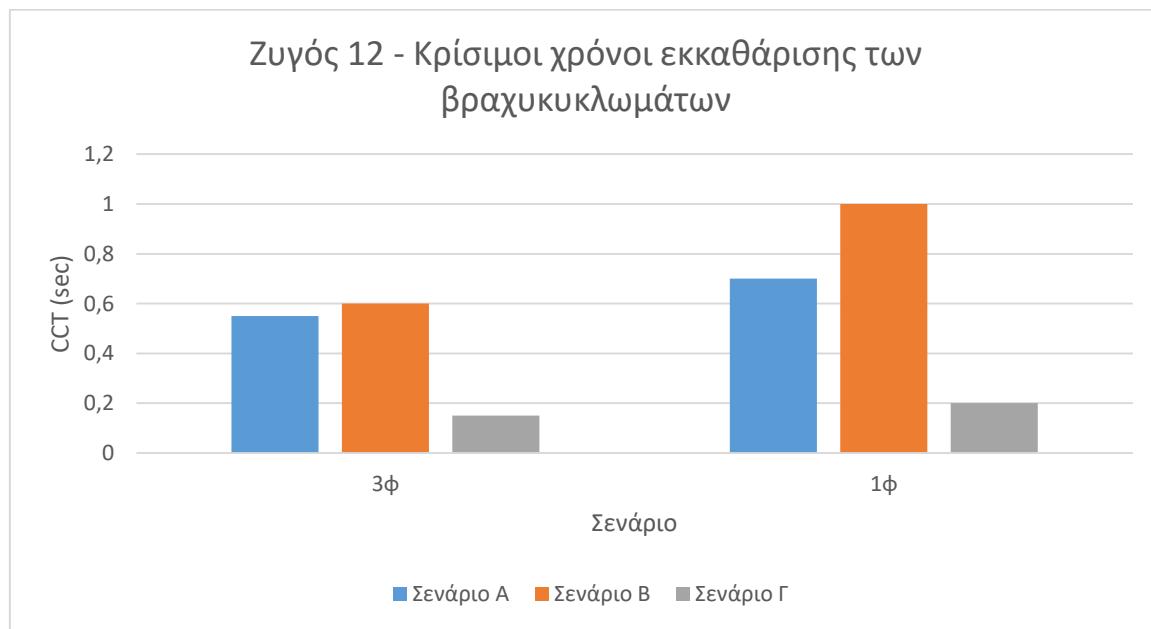
Στο ζυγό 12 του συστήματος, εξετάζονται στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή $0,01j$ ρυ. Μελετώνται τρία σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα, κάθε ένα με διαφορετικό ποσοστό και

διαφορετικούς ζυγούς ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας. Από τον Πίνακα 35, γίνεται αντιληπτό ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων στο ζυγό 12, είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους τριφασικούς για όλα τα σενάρια προς μελέτη. Ο τελευταίος παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σενάριο Β, ενώ την χειρότερη στο σενάριο Γ. Αντίστοιχα, για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται επίσης στο σενάριο Β και η χειρότερη στο σενάριο Γ. Για δεδομένο σενάριο, η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης μεταξύ των βραχυκυκλωμάτων εμφανίζεται στο σενάριο Β και είναι ίση με 400 ms, ενώ η μικρότερη στο σενάριο Γ, ίση με 50 ms. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 38 και στο γράφημα 5, γίνεται η οπτικοποίηση τους.

Πίνακας 38: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 12

Ζυγός 12

Σενάριο/CCT	3φ	1φ
Σενάριο Α	0,55	0,70
Σενάριο Β	0,60	1,00
Σενάριο Γ	0,15	0,20



Γράφημα 5: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό

6.5.3 Ζυγός 16

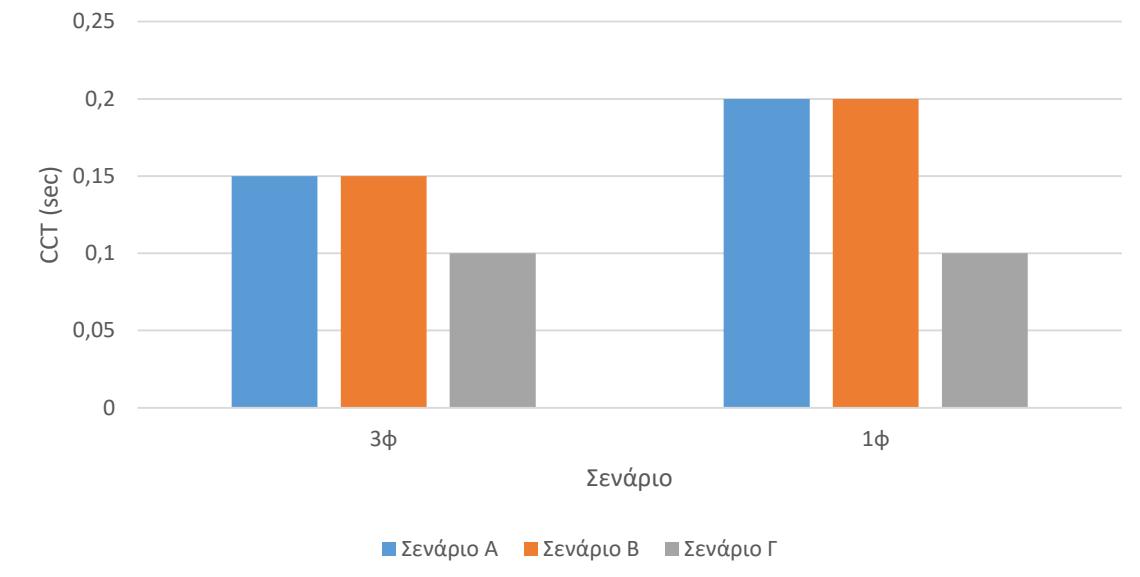
Στο ζυγό 16 του συστήματος, εξετάζονται στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Μελετώνται τρία σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα, κάθε ένα με διαφορετικό ποσοστό και διαφορετικούς ζυγούς ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας. Από τον Πίνακα 35, γίνεται αντιληπτό ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων στο ζυγό 16, είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους τριφασικούς για τα σενάρια A και B, ενώ είναι ίσοι για το σενάριο Γ προς μελέτη. Ο τελευταίος παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στα σενάρια A και B, ενώ την χειρότερη στο σενάριο Γ. Αντίστοιχα, για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται επίσης στα σενάρια A και B και η χειρότερη στο σενάριο Γ. Για δεδομένο σενάριο, η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης μεταξύ των βραχυκυκλωμάτων εμφανίζεται στα σενάρια A και B και είναι ίση με 50 ms, ενώ η μικρότερη στο σενάριο Γ, ίση με Ω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 39 και στο γράφημα 6, γίνεται η οπτικοποίηση τους.

Πίνακας 39: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 16

Ζυγός 16

Σενάριο/CCT	3φ	1φ
Σενάριο A	0,15	0,20
Σενάριο B	0,15	0,20
Σενάριο Γ	0,10	0,10

Ζυγός 16 - Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων



Γράφημα 6: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό

16

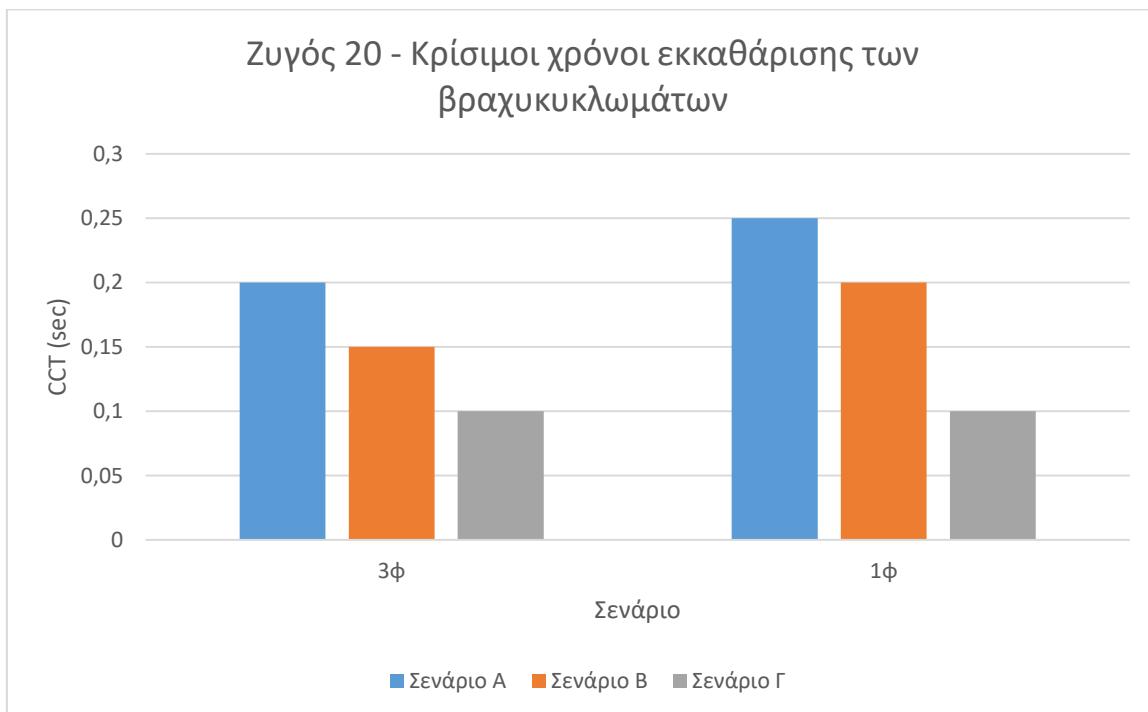
6.5.4 Ζυγός 20

Στο ζυγό 20 του συστήματος, εξετάζονται στερεά τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα μέσω μίας αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ. Μελετώνται τρία σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα, κάθε ένα με διαφορετικό ποσοστό και διαφορετικούς ζυγούς ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας. Από τον Πίνακα 35, γίνεται αντιληπτό ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων στο ζυγό 20, είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους τριφασικούς για τα σενάρια Α και Β, ενώ είναι ίσοι για το σενάριο Γ προς μελέτη. Ο τελευταίος παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σενάριο Α, ενώ την χειρότερη στο σενάριο Γ. Αντίστοιχα, για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j ρυ η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται επίσης στο σενάριο Α και η χειρότερη στο σενάριο Γ. Για δεδομένο σενάριο, η μεγαλύτερη διαφορά στους κρίσιμους χρόνους εκκαθάρισης μεταξύ των βραχυκυκλωμάτων εμφανίζεται στα σενάρια Α και Β και είναι ίση με 50 ms, ενώ η μικρότερη στο σενάριο Γ, ίση με Ω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 40 και στο γράφημα 7, γίνεται η οπτικοποίηση τους.

Πίνακας 40: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για το ζυγό 20

Ζυγός 20

Σενάριο/CCT	3φ	1φ
Σενάριο A	0,20	0,25
Σενάριο B	0,15	0,20
Σενάριο Γ	0,10	0,10



Γράφημα 7: Οπτικοποίηση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης βραχυκυκλωμάτων για το ζυγό 20

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, προκύπτει ο Πίνακας 41 για το καλύτερο και χειρότερο σενάριο για δεδομένο ζυγό. Ως καλύτερο σενάριο θεωρείται αυτό που έχει το μεγαλύτερο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος και αντίστοιχα ως χειρότερο, αυτό με το μικρότερο.

Πίνακας 41: Σύγκριση σεναρίων για δεδομένο ζυγό

Σύγκριση σεναρίων για δεδομένο ζυγό

Ζυγοί/Καλύτερο – Χειρότερο Σενάριο	Καλύτερο Σενάριο		Χειρότερο Σενάριο	
	3φ	1φ	3φ	1φ
Ζυγός 1	Σενάριο B	Σενάριο B	Σενάριο Γ	Σενάριο Γ
Ζυγός 12	Σενάριο B	Σενάριο B	Σενάριο Γ	Σενάριο Γ
Ζυγός 16	Σενάριο A, B	Σενάριο A,B	Σενάριο Γ	Σενάριο Γ
Ζυγός 20	Σενάριο A	Σενάριο A	Σενάριο Γ	Σενάριο Γ

Σύμφωνα με τον Πίνακα 41, προκειμένου να προκύψει το καλύτερο και χειρότερο σενάριο, σε πιθανή εμφάνιση βραχυκυκλώματος στο δίκτυο, εξετάσθηκαν 8 περιπτώσεις κάθε φορά. Ως καλύτερο σενάριο καθορίστηκε το σενάριο B με ποσοστό 75% και ακολούθησε το σενάριο A με ποσοστό 50%, ενώ ως χειρότερο σενάριο καθορίστηκε το σενάριο Γ με ποσοστό 100%.

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα

Οι ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του παγκόσμιου πληθυσμού καθίστανται αδύνατο να καλυφθούν από τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Οι τελευταίες έχουν αρνητικές επιπτώσεις για την ανθρώπινη υγεία και για το περιβάλλον και γι' αυτό το λόγο, η χρήση τους πρέπει να μετριασθεί. Λύση στο πρόβλημα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καθαρό και βιώσιμο τρόπο, αποτελούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κάθε μία από αυτές έχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τους εκάστοτε παράγοντες που μελετώνται. Προκειμένου να αξιοποιηθούν κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο θα πρέπει να γίνει συνετή η χρήση τους, σύμφωνα με τις αντίστοιχες ανάγκες που υπάρχουν. Σήμερα, η αιολική ενέργεια αποτελεί την ωριμότερη μορφή των ΑΠΕ, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Μεγάλο αντικείμενο μελέτης των ηλεκτρολόγων μηχανικών αποτελεί η ευστάθεια των ΣΗΕ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάσθηκαν και αναλύθηκαν οι διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων που συναντώνται. Από αυτούς, επιλέχθηκαν τα τριφασικά και τα μονοφασικά βραχυκυκλώματα, ως χειρότερη περίπτωση για εξέταση στο πάνω στο σύστημα 39 ζυγών της IEE, εξαιτίας της επίδρασης τους στη μεταβατική ευστάθεια του δικτύου. Μελετήθηκε η μεταβατική συμπεριφορά του παραπάνω συστήματος για την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στο ΣΗΕ σε διαφορετικό ποσοστό διείσδυσης και τοποθεσίας κάθε φορά. Σε κάθε περίπτωση εξετάσθηκε ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων και οι καμπύλες ευστάθειας του δικτύου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, σαν καλύτερο σενάριο από αυτά που εξετάσθηκαν, χαρακτηρίστηκε το σενάριο Β, όπου το ποσοστό διείσδυσης των ανεμογεννητριών στο ΣΗΕ έφτασε το 20% και αντικαταστάθηκαν οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 32 και 37. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σε τριφασικά και μονοφασικά βραχυκυκλώματα είχε την ίδια συμπεριφορά, αφού αυξήθηκε σε δύο εκ των τεσσάρων ζυγών, σε έναν παρέμεινε ίδιος και στον τελευταίο ελαττώθηκε, σε σύγκριση με το αρχικό σενάριο Α. Αντίστοιχα, σαν χειρότερο σενάριο χαρακτηρίστηκε το σενάριο Γ, όπου οι συμβατικές γεννήτριες των ζυγών 30, 35 και 38 αντικαταστάθηκαν από ανεμογεννήτριες με συνολικό ποσοστό διείσδυσης ίσο με 30%. Σε αυτό το σενάριο, όλοι οι κρίσιμοι χρόνοι

εκκαθάρισης των τριφασικών και μονοφασικών βραχυκυκλωμάτων ελαττώθηκαν, σε σχέση με το σενάριο A.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έδειξαν ότι για ποσοστό ενσωμάτωσης της τάξης του 30% της αιολικής ενέργειας, το δίκτυο παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια σε μεταβατικά φαινόμενα. Η πρόταση αυτή, έρχεται σε συμφωνία με μελέτες μεταβατικής ευστάθειας με την ενσωμάτωση αιολικών πάρκων στα συστήματα των 9 και 14 ζυγών της IEEE (Ahmad Adel Alsakati, 2021), (Satish Kumar, 2015). Αντίθετα, η χρήση ανεμογεννητριών σε χαμηλότερο ποσοστό διείσδυσης, μπορεί να ενισχύσει τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος, πάνω σε βραχυκυκλώματα, όπως αναφέρθηκε και σε άλλες δημοσιεύσεις. Σημαντική συνιστώσα πάνω στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης των βραχυκυκλωμάτων αποτελεί ο ζυγός όπου πραγματοποιείται το σφάλμα (Jaikumar Pettikkattil Radhakrishnan, 2014), (Aminudin Anuar, 2020).

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία:

- [1] Ν. Α., & Γιαννακόπουλος, Γ. Β. (2019). Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Β' έκδοση). ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.
- [2] Βοβός, Ν. Α., & Γιαννακόπουλος, Γ. Β. (2017). Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Β' ΕΚΔΟΣΗ). ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ
- [3] BOBOΣ, N. A. (2019). ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.
- [4] Γιαννακόπουλος, Γ. Β., & Βοβός, Ν. Α. (2008). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.
- [5] Μαλατέστας, Π. (2019). ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- [6] Πολυζάκης, Α. (2017). Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (1st edition.). Power Heat Cool.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία:

- [1] Afolabi, O. A., Ali, W. H., Cofie, P., Fuller, J., Obiomon, P., & Kolawole, E. S. (2015). Analysis of the load flow problem in power system planning studies. *Energy and Power Engineering*, 07(10), 509–523. <https://doi.org/10.4236/epe.2015.710048>
- [2] Ahmed Abdel Gawad. (χ.χ.). *Utilization of Wind Energy in Green Buildings*.
- [3] AIMU Technical Services Committee. (2012). *WIND TURBINE PAPER*.
- [4] Akpinar, E. K., & Akpinar, S. (2005). An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Conversion and*

Management, 46(11–12), 1848–1867.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.012>

- [5] Alsakati, A. A., Vaithilingam, C. A., & Alnasseir, J. (2021). Transient stability assessment of ieee 9-bus system integrated wind farm. MATEC Web of Conferences, 335, 02006. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202133502006>
- [6] Al-Obaidi, A. S. M., & NguyenHuynh, T. (2018). Renewable vs. conventional energy: Which wins the race to sustainable development? *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 434, 012310.
- [7] Anuar, A., Wahab, M. A. A., Arshad, S. N. M., Romli, M. I. F., Bakar, A. H. A., & Bakar, M. A. A. (2020). Transient stability for IEEE 14 bus power system using power world simulator. *Journal of Physics: Conference Series*, 1432(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1432/1/012009>
- [8] Baratta, A. (2011). Renewable energy: Status and prospects – status of electricity generation from renewable energy. Στο F. Princiotta (Επιμ.), *Global Climate Change—The Technology Challenge* (τ. 38, σσ. 157–189). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3153-2_5
- [9] Bhuiyan, M. A., Zhang, Q., Khare, V., Mikhaylov, A., Pinter, G., & Huang, X. (2022). Renewable energy consumption and economic growth nexus—A systematic literature review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 878394. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878394>
- [10] Bustos, G., Vargas, L. S., Milla, F., Sáez, D., Zareipour, H., & Nuñez, A. (2012, Οκτώβριος). *Comparison of fixed speed wind turbines models: A case study*.
- [11] Castellani, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Natili, F., Buttà, D., & Hirschl, A. (2019). Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy

system for residential use. *Machines*, 7(2), 35.

<https://doi.org/10.3390/machines7020035>

- [12] Das, J. C. (2002). *Power system analysis: Short-circuit load flow and harmonics*. Marcel Dekker.

- [13] Das, K., Hansen, A. D., & Sørensen, P. E. (2016). Understanding IEC standard wind turbine models using SimPowerSystems. *Wind Engineering*, 40(3), 212–227.

<https://doi.org/10.1177/0309524X16642058>

- [14] Dawn, S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K., Singh, A. K., & Panda, R. (2019). Wind power: Existing status, achievements and government's initiative towards renewable power dominating India. *Energy Strategy Reviews*, 23, 178–199.

<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.002>

- [15] Díaz, H., & Guedes Soares, C. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*, 209, 107381.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107381>

- [16] Dilsiz, F. (2014). *POWER FLOW ANALYSIS Power Flow Study*.

- [17] Elgerd, O. I. (1982). *Electric energy systems theory: An introduction* (2nd ed). McGraw-Hill.

- [18] Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764.

- [19] Eltamaly, A. M., Mohamed, Y. S., El-Sayed, A.-H. M., & Elghaffar, A. N. A. (2019). Advanced control techniques for enhance the power system stability at oos condition. *Insight - Energy Science*, 2(1), 15. <https://doi.org/10.18282/i-es.v2i1.89>

- [20] Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, 36(2), 444–450.
- [21] European Wind Energy Association. (2013). *Deep Water The next step for offshore wind energy*.
- [22] European Wind Energy Technology Platform. (2006). *Wind Energy: A Vision for Europe in 2030*.
- [23] Ghosh, T. K., Prelas, M. A., & Ghosh, T. K. (2011). *Renewable resources*. Springer.
- [24] Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2012). *Power system analysis and design* (5th ed). Cengage Learning.
- [25] Goudarzi, N., & Zhu, W. D. (2013). A review on the development of wind turbine generators across the world. *International Journal of Dynamics and Control*, 1(2), 192–202.
- [26] Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill, Inc.
- [27] Grigsby, L. L. (2012). *Power system satbility and control*. CRC Press.
- [28] Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - "Energy". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/energy>'
[Online Resource]
- [29] Hamilton, J., & Liming, D. (2010, Σεπτέμβριος). *Careers in Wind Energy*.
- [30] Hevia-Koch, P., & Klinge Jacobsen, H. (2019). Comparing offshore and onshore wind development considering acceptance costs. *Energy Policy*, 125, 9–19.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.019>
- [31] HWEA, W. E. S.-2021. (χ.χ.). *Wind Energy Statistics—2021* [Statistics].

- [32] IEEE Power & Energy Society, & Camm, E. H. (2009). *Characteristics of wind turbine generators for wind power plants in 2009* ieee power & energy society general meeting: Pesgm 2009 ; calgary, alberta, canada, 26—30 july 2009. IEEE.
- [33] Institute of Electrical and Electronics Engineers (Επιμ.). (2013). *A Review on Wind Turbine Generator Topologies in 2013 international conference on power, energy and control (ICPEC 2013): Dindigul, india, 6—8 february 2013*. IEEE.
- [34] International Energy Agency. (2021). *Renewables 2021 Analysis and forecast to 2026*.
- [35] International Multi-Conference on Systems, S., and Devices, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Ecole Nationale d'Ingenieurs de Sfax, & Association Tunisienne des Sciences Appliquées et de Technologie. (2018). *On the wind energy conversion systems in Ssd '18: The 15th international multi-conference on systems, signals & devices: Program of the multi-conference on systems, signals & devices: Ssd 2018: March 19-22, 2018, hammamet, Tunisia*.
- [36] International Energy Agency. (2021). *World Energy Outlook 2021*.
- [37] IRENA. (2019). *FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*.
- [38] Jaikumar Pettikkattil Radhakrishnan, (2014). Transient Stability Analysis of Grid with DFIG Wind Power Plant. CALIFORNIA STATE UNIVERSITY, NORTHRIDGE.
- [39] Katsivelakis, M., Bargiotas, D., & Daskalopulu, A. (2020). Transient stability analysis in power systems integrated with a doubly-fed induction generator wind farm. 2020 11th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA, 1–7.

- [40] Kaygusuz, K., Yüksel, Ö., & Sari, A. (2007). Renewable energy sources in the european union: Markets and capacity. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(1), 19–29.
- [41] Letcher, T. M. (Επιμ.). (2017). *Wind energy engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines*. Academic Press, an imprint of Elsevier.
- [42] Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1464–1474.
- [43] Mahmoud, M. S., & Xia, Y. (2012). *Applied control systems design*. Springer.
- [44] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd ed). Wiley.
- [45] Mubarak, A. S., Hassan, A. S., Umar, N. H., & Nasiru, M. (2015). *An Analytical Study of Power System under the Fault Conditions using different Methods of Fault Analysis*.
- [46] Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- [47] Pai, M. A., & Lipo, T. A. (1989). *Energy function analysis for power system stability*. Springer US.
- [48] Ponce, P., Molina, A., Mata, O., Ibarra, L., & MacCleery, B. (2018). *Power system fundamentals*.
- [49] Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. WCB/McGraw-Hill.
- [50] Satish Kumar, *Analysis of Power Flow, Continuous Power Flow and Transient Stability of IEEE-14 Bus Integrated Wind Farm Using PSAT*, in Institute of Electrical

and Electronics Engineers & IEEE Power & Energy Society (Επιμ.). (2015). 2015 international conference on energy economics and environment (ICEEE 2015): Greater noida, india, 27-28 march 2015. IEEE.

- [51] Şen, Z. (2008). *Solar energy fundamentals and modeling techniques: Atmosphere, environment, climate change, and renewable energy*. Springer.
- [52] Shahzad, U. (2015). *The Need For Renewable Energy Sources*.
- [53] Shahzad, U. (2016). *A Quantitative Comparison of Wind and Solar Energy*.
- [54] Volkov, K. N., & Albadi, M. (2020). *Power Flow Analysis (Chapter 5) in Computational models in engineering*.
- [55] Yurika, (2018). *Determination of Critical Clearing Time in Transient Stability Analysis* in 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS).
- [56] Weedy, B. M. (Επιμ.). (2012). *Electric power systems* (5th ed). John Wiley & Sons, Ltd.
- [57] Wind EUROPE. (2022). *Wind energy in Europe 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*.

Για το σύστημα των 39 ζυγών της IEEE:

- [1] <http://sys.elec.kitami-it.ac.jp/ueda/demo/WebPF/39-New-England.pdf>
- [2] Anantha Pai. *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Springer, 1989.
Cited in [1].
- [3] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, “A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 2, March/April 1979, pp. 573-584. Cited in [1].