



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκών Πάρκων και ενσωμάτωση σε
Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Θωμάς

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Ιούνιος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκών Πάρκων και ενσωμάτωση σε
Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Θωμάς

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Ιούνιος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Design of Photovoltaic Parks and Integration into a Power System

Diploma Thesis

Konstantinos Thomas

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

June 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Φεύγας Αθανάσιος

Ε.ΔΙ.Π, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Πλέσσας Φώτιος

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

Κωνσταντίνος Θωμάς

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

Konstantinos Thomas

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Δημήτριο Μπαργιώτα για τη βοήθεια που παρείχε τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο κατά τη συγγραφή της εργασίας μου.

Ευχαριστώ επίσης τους κυρίους Φεύγα Αθανάσιο και Πλέσσα Φώτιο που δέχτηκαν να είναι μέλη της επιτροπής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους συγγενείς μου που με στήριξαν κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκών Πάρκων και ενσωμάτωση σε Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κωνσταντίνος Θωμάς

Περίληψη

Οι ανάγκες εξοικονόμησης ενέργειας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθιστούν σημαντική την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, η δέσμευση των χωρών να συνεισφέρουν εθνικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί πρόκληση για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός ΣΗΕ. Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάρκων σε ΣΗΕ. Παρουσιάζεται ο αναγκαίος εξοπλισμός, η χωροθέτηση και η διαστασιολόγηση του πάρκου λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς εγκατάστασης καθώς και η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάρκων σε πρότυπο IEEE 30 ζυγών, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες πραγματικής ισχύος και τους περιορισμούς του συστήματος. Στόχος της διπλωματικής είναι ο υπολογισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων κατά τη διείσδυση ισχύος φωτοβολταϊκού πάρκου στο σύστημα σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγωγής και η σύγκριση της ευαισθησίας του σε σχέση με το αρχικό σύστημα και με το σύστημα κατά την προσθήκη μόνο συμβατικής γεννήτριας. Κατά τη μελέτη μεταβατικής ευστάθειας για το σύστημα των 30 ζυγών διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκού πάρκου χειροτερεύει τη συμπεριφορά του συστήματος σε σφάλματα ζυγών λόγω των χαμηλότερων κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων των ζυγών 1, 2, 5 και 6 σε σχέση με την συμπεριφορά του συστήματος κατά την προσθήκη μίας μόνο συμβατικής γεννήτριας. Ο σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού πάρκου πραγματοποιείται μέσω λογισμικού PVSYST ενώ η ενσωμάτωση γίνεται μέσω λογισμικού Powerworld.

Λέξεις-κλειδιά:

ΣΗΕ, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Ηλιακή Ενέργεια, Φωτοβολταϊκά Πάρκα, PVSYST, Powerworld

Design of Photovoltaic Parks and Integration into a Power System

Konstantinos Thomas

Abstract

The need to save energy to reduce greenhouse gas emissions makes it important to use renewable energy sources in the electric grid. At the same time, the commitment of countries to contribute nationally to the reduction of energy consumption is a challenge for the effective design of a power system. Specifically, this thesis includes the design and integration of photovoltaic parks in a power system. The necessary equipment, location and dimensioning of the park, depending on the installation's limitations, as well as the integration of photovoltaic parks in the IEEE 30 bus system are presented, considering real power losses and the system's limitations. The aim of the thesis is to calculate the critical clearing time of the faults as a share of the total production is dependent on photovoltaic park power at a rate of 25% and to compare its sensitivity in relation to the original system and to the system when adding only a conventional generator. During the transient stability study for the 30 bus system it was found that the integration of a photovoltaic park worsens the behavior of the system in bus faults due to the lower fault critical clearing times of buses 1, 2, 5 and 6 compared to the system's behavior when adding a single conventional generator. The photovoltaic park design is done through PVSYST software while the integration is done through Powerworld software.

Keywords:

Power System, Load Flow Analysis, Solar Power, PV Parks, PVSYST, Powerworld

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 σχημάτων</i>	<i>xxxix</i>
<i>Κατάλογος πινάκων.....</i>	<i>xli</i>
<i>Συντομογραφίες</i>	<i>xliii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	4
1.2 Οργάνωση του τόμου	4
Κεφάλαιο 2 Φωτοβολταϊκά	7
2.1 Ηλιακή Ενέργεια	7
2.2 Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας.....	11
2.3 Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική	12
2.4 Φωτοβολταϊκή μονάδα πυριτίου	14
2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/Β μονάδας	17
Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός φωτοβολταϊκού πάρκου.....	19
3.1 Το φωτοβολταϊκό σύστημα.....	19
3.1.1 Ελεγκτές φόρτισης.....	20
3.1.2 Αντιστροφέας	21
3.1.3 Μετρητές ενεργειακού συμψηφισμού	24
3.2 Χωροθέτηση φωτοβολταϊκών μονάδων	25
3.3 Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών μονάδων.....	28

3.3.1 Σταθερές βάσεις.....	29
3.3.2 Ιχνηλάτες.....	29
3.4 Σκίαση και διάγραμμα μηνιαίων τροχιών ήλιου	30
3.5 Ενδεικτική μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου με τη χρήση του λογισμικού PVSYST.....	32
3.5.1 Το λογισμικό PVSYST	32
3.5.2 Δεδομένα προσομοίωσης και αποτελέσματα.....	32
Κεφάλαιο 4 Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	53
4.1 Γενική απεικόνιση συστήματος	53
4.1.1 Σύγχρονη γεννήτρια	55
4.1.2 Μετασχηματιστές ισχύος	57
4.1.3 Γραμμές μεταφοράς	59
4.1.4 Φορτία	62
Κεφάλαιο 5 Ανάλυση Ροής Φορτίου.....	65
5.1 Το σύστημα per unit.....	69
5.2 Μέθοδοι ανάλυσης Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	71
5.2.1 Μέθοδος Gauss - Seidel.....	71
5.2.2 Μέθοδος Newton – Raphson.....	73
Κεφάλαιο 6 Ευστάθεια συστήματος και μεταβατική ανάλυση.....	75
6.1 Βραχυκυκλώματα	75
6.1.1 Μεταλλικό ή στερεό συμμετρικό βραχυκύκλωμα.....	82
6.1.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη.....	83
6.1.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα	85
6.1.4 Διφασικό Βραχυκύκλωμα με τη γη	87
6.2 Ευστάθεια συστήματος και κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος	89
6.2.1 Μεταβατική Ευστάθεια και Εξισώσεις ταλάντωσης.....	91
6.2.2 Η μέθοδος των ίσων εμβαδών.....	96
6.2.3 Η μέθοδος Euler	101
Κεφάλαιο 7 Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκού πάρκου στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	104
7.1 Το πρότυπο σύστημα 30 ζυγών στο λογισμικό Powerworld	104
7.1 Μοντέλα προσομοίωσης.....	110
7.1.1 Μοντέλο συμβατικής γεννήτριας	110

7.1.2 Μοντέλο Φ/Β πάρκου	111
7.2 Προσθήκη συμβατικής γεννήτριας στο σύστημα	113
7.2.1 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 2	114
7.2.2 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 3	115
7.2.3 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 4	118
7.2.4 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 5	119
7.2.5 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 6	121
7.2.6 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 7	123
7.2.7 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 8	125
7.2.8 Συμπεράσματα τοποθέτησης 1 συμβατικής γεννήτριας	127
7.3 Διείσδυση ισχύος Φ/Β πάρκου στο σύστημα σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας	129
7.3.1 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 2	129
7.3.2 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 3	131
7.3.3 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 4	133
7.3.4 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 5	134
7.3.5 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 6	136
7.3.6 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 7	138
7.3.7 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 8	141
7.3.8 Συμπεράσματα διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας στο σύστημα	143
7.4 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας και εύρεση κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης συστήματος 30 ζυγών	144
7.4.1 Σενάριο A1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1.....	150
7.4.2 Σενάριο A1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1	153
7.4.3 Σενάριο A2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2.....	156
7.4.4 Σενάριο A2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2	159
7.4.5 Σενάριο A5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5.....	162
7.4.6 Σενάριο A5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5	165
7.4.7 Σενάριο A6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6.....	168
7.4.8 Σενάριο A6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6	171
7.4.9 Σενάριο B1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1.....	174
7.4.10 Σενάριο B1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1	177
7.4.11 Σενάριο B2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2	180
7.4.12 Σενάριο B2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2	183
7.4.13 Σενάριο B5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5	186
7.4.14 Σενάριο B5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5	189

7.4.15 Σενάριο B6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6	192
7.4.16 Σενάριο B6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6	195
7.4.17 Σενάριο Γ1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1	198
7.4.18 Σενάριο Γ1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1	201
7.4.19 Σενάριο Γ2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2	204
7.4.20 Σενάριο Γ2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2	207
7.4.21 Σενάριο Γ5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5	210
7.4.22 Σενάριο Γ5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5	213
7.4.23 Σενάριο Γ6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6	216
7.4.24 Σενάριο Γ6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6	219
7.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων	222
7.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Α και Β	224
7.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Α και Γ	224
7.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Β και Γ	225
7.5.4 Εύρεση καλύτερου και χειρότερου σεναρίου ανά ζυγό	226
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα	227
8.1 Μελλοντικές επεκτάσεις	228
Βιβλιογραφία	229
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	233

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία.....	3
Εικόνα 1.2: Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής στην Ελλάδα	3
Εικόνα 2.1: Η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνιστώσες της [6].....	7
Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σημείο παρατήρησης Ο [6].....	8
Εικόνα 2.3: Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο [6]	9
Εικόνα 2.4: Γεωγραφικές συντεταγμένες σημείου παρατήρησης Τ πάνω στην επιφάνεια της γης, με γεωγραφικό μήκος τόξου ΟΓ και γεωγραφικό πλάτος τόξου ΓΤ [6]	9
Εικόνα 2.5: Σχέσεις μεταξύ γωνιών [25]	11
Εικόνα 2.6: Πυρανόμετρο.....	12
Εικόνα 2.7: Ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n κατά τη διάρκεια φωτισμού της [6].....	13
Εικόνα 2.8: (α) Μονοκρυσταλλική, (β) Πολυκρυσταλλική και (γ) Άμορφου πυριτίου κυψέλη.....	14
Εικόνα 2.9: (Αριστερά) Πολυκρυσταλλική μονάδα, (Δεξιά) Μονοκρυσταλλική μονάδα...	15
Εικόνα 2.10: Κιβώτιο διακλάδωσης [8]	16
Εικόνα 2.11: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, P-V Φ/Β μονάδας [9].....	17
Εικόνα 2.12: Επίδραση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (Αριστερά) και θερμοκρασίας (Δεξιά) σε τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες [6].....	18
Εικόνα 3.1: Κυματομορφή εξόδου ενός αντιστροφέα διαμόρφωσης εύρους παλμών [6]	22
Εικόνα 3.2: Οι διαφορετικές δομές Φ/Β συστήματος βάσει αντιστροφέα [11]	23
Εικόνα 3.3: Τοπολογία συνδέσεων μετρητικών διατάξεων σε αυτοπαραγωγό ενεργειακού συμψηφισμού [14]	25
Εικόνα 3.4: Χωροθέτηση Φ/Β μονάδων με σταθερές βάσεις σε παράλληλες σειρές και οριζόντιο επίπεδο [12]	26
Εικόνα 3.5: Αναπαράσταση εμπειρικού υπολογισμού ελάχιστης απόστασης μεταξύ Φ/Β σειρών [11]	27
Εικόνα 3.6: (Αριστερά) Σταθερές βάσεις με σκυροδέτηση, (Δεξιά) Σταθερές βάσεις για σκεπές [11]	28

Εικόνα 3.7: Ηλιοπαρακολουθητής [11]	28
Εικόνα 3.8: Ενδεικτική αναπαράσταση ηλιακού χάρτη περιοχής εγκατάστασης	31
Εικόνα 3.9: Τοπογραφική αποτύπωση ενδεικτικού γεωτεμάχιου	33
Εικόνα 3.10: Δορυφορική απεικόνιση ενδεικτικού γεωτεμάχιου	33
Εικόνα 3.11: Ηλιακός χάρτης ενδεικτικού γεωτεμάχιου	34
Εικόνα 3.12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για τη θερινή περίοδο μεταξύ Απριλίου – Σεπτεμβρίου	35
Εικόνα 3.13: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για όλους τους μήνες	35
Εικόνα 3.14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για τη χειμερινή περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου – Μαρτίου	35
Εικόνα 3.15: Υποδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε τάση εισόδου μικρότερη της ελάχιστης λειτουργίας του αντιστροφέα (Περίπτωση 1)	37
Εικόνα 3.16: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη απόλυτη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης απόλυτης τάσης εισόδου του αντιστροφέα (Περίπτωση 3)	37
Εικόνα 3.17: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη απόλυτη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης του συστήματος της Φ/Β μονάδας (Περίπτωση 4)	37
Εικόνα 3.18: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης εισόδου του αντιστροφέα (Περίπτωση 2 και 3)	37
Εικόνα 3.19: Το μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης για 1 string 20 Φ/Β μονάδων συνδεδεμένων σε 1 αντιστροφέα βάσει προεπιλογών	38
Εικόνα 3.20: Νοτιοδυτικό εμπόδιο 1	39
Εικόνα 3.21: Νοτιοδυτικό εμπόδιο 2	39
Εικόνα 3.22: Βορειοδυτικό εμπόδιο 2.....	39
Εικόνα 3.23: Βορειοδυτικό εμπόδιο 1.....	39
Εικόνα 3.24: Ανατολικό εμπόδιο.....	39
Εικόνα 3.25: Νοτιοανατολικό εμπόδιο	39
Εικόνα 3.26: Βορειοανατολικό εμπόδιο	40
Εικόνα 3.27: Τρισδιάστατη απεικόνιση γεωτεμάχιου στο λογισμικό	40
Εικόνα 3.28: Τρόπος τοποθέτηση μονάδων σε εικονικούς «πίνακες».....	41
Εικόνα 3.29: Διερεύνηση σκιάσεων πάνω στις Φ/Β μονάδες	42
Εικόνα 3.30: Επίδραση σκιάσεων στις 9:00, 22/12/2024	43
Εικόνα 3.31: Επίδραση σκιάσεων στις 10:30, 22/12/2024	43

Εικόνα 3.32: Επίδραση σκιάσεων σε αζιμούθιο ήλιου 0°, 22/12/2024	44
Εικόνα 3.33: Επίδραση σκιάσεων στις 13:30, 22/12/2024	44
Εικόνα 3.34: Επίδραση σκιάσεων στις 15:00, 22/12/2024	44
Εικόνα 3.35: Ηλιακός χάρτης με κοντινή σκίαση	46
Εικόνα 3.36: Αποτελέσματα τρισδιάστατης σχεδίασης Φ/Β εγκατάστασης.....	46
Εικόνα 3.37: Τελικά αποτελέσματα συστήματος για δεδομένη επιφάνεια.....	47
Εικόνα 3.38: Περίπτωση όπου κάθε MPPT είσοδο δέχεται ένα μόνο string.....	48
Εικόνα 3.39: Τοποθέτηση των strings	49
Εικόνα 3.40: Παραγωγή και απόδοση συστήματος σε MWh	51
Εικόνα 3.41: Απώλειες συστήματος.....	52
Εικόνα 4.1: Το μονογραμμικό διάγραμμα ενός ΣΗΕ [16].....	54
Εικόνα 4.2: Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα [18]	56
Εικόνα 4.3: Αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας στο μονογραμμικό διάγραμμα	56
Εικόνα 4.4: (Αριστερά) Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα, (Δεξιά) Μετασχηματιστής τύπου μανδύα [19]	57
Εικόνα 4.5: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή [19]	58
Εικόνα 4.6: Αναπαράσταση μετασχηματιστή ισχύος στο μονογραμμικό διάγραμμα	59
Εικόνα 4.7: Τομή αγωγού με 7 κλώνους χάλυβα και 24 κλώνους αλουμινίου [16]	60
Εικόνα 4.8: Ισοδύναμο γραμμών μεταφοράς μικρού μήκους [18]	60
Εικόνα 4.9: Π-Ισοδύναμο γραμμών μεταφοράς μεσαίου μήκους [18]	61
Εικόνα 4.10: Το στοιχειώδες τμήμα της γραμμής μεταφοράς [16]	62
Εικόνα 4.11: Π-Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους [16].....	62
Εικόνα 4.12: Αναπαράσταση φορτίων στο μονογραμμικό διάγραμμα [18]	64
Εικόνα 5.1: Αναπαράσταση συνιστωσών ισχύος ζυγού i.....	66
Εικόνα 5.2: Οι περιοχές του μετασχηματιστή.....	70
Εικόνα 6.1: Γραφική ανάλυση ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων ρευμάτων στις συμμετρικές του συνιστώσες [18]	76
Εικόνα 6.2: Γραφική ανάλυση ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων τάσεων στις συμμετρικές του συνιστώσες [20]	77
Εικόνα 6.3: Ακολουθιακά κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας [18]	79

Εικόνα 6.4: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για τις διάφορες συνδέσεις τριφασικών Μ/Σ δύο τυλιγμάτων [18]	79
Εικόνα 6.5: Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμής μεταφοράς [20].....	80
Εικόνα 6.6: Ακολουθιακά δίκτυα φορτίων χωρίς περιστρεφόμενες μηχανές [20]	81
Εικόνα 6.7: (Αριστερά) Ακολουθιακά δίκτυα σύγχρονων μηχανών, (Δεξιά) Ακολουθιακά δίκτυα επαγωγικών μηχανών [20]	81
Εικόνα 6.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin θετικής ακολουθίας για υπολογισμό ρεύματος βραχυκυκλώματος I_f	82
Εικόνα 6.9: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη [20]	83
Εικόνα 6.10: Αναπαράσταση SLGF με ακολουθιακά δίκτυα [20]	84
Εικόνα 6.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα [20]	85
Εικόνα 6.12: Αναπαράσταση LLF με ακολουθιακά δίκτυα [20].....	86
Εικόνα 6.13: Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη [20]	87
Εικόνα 6.14: Αναπαράσταση DLGF με ακολουθιακά δίκτυα [20]	88
Εικόνα 6.15: Γραφική παράσταση γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό [20]	96
Εικόνα 6.16: Επιτάχυνση στροβίλου για χρονική στιγμή $t = 0 +$	97
Εικόνα 6.17: Πρώτη υπέρβαση σταθερής κατάστασης για χρονική στιγμή $t = t_1$	97
Εικόνα 6.18: Ολοκλήρωση πρώτης ταλάντωσης τη χρονική στιγμή $t=t_2$	98
Εικόνα 6.19: Ταλαντώσεις και σταθεροποίηση τη χρονική στιγμή $t=t_{final}$	98
Εικόνα 6.20: Αποσυγχρονισμός γεννήτριας για παραβίαση του ορίου μεταβατικής ευστάθειας	99
Εικόνα 6.21: Κριτήριο ίσων εμβαδών κατά τη διάρκεια του σφάλματος και μετά την εκκαθάρισή του [28].....	100
Εικόνα 6.22: Γραφική παράσταση μεθόδου Euler [20]	101
Εικόνα 6.23: Γραφική παράσταση τροποποιημένης μεθόδου Euler [20]	101
Εικόνα 7.1: Μοντέλο Γεννήτριας	110
Εικόνα 7.2: Μοντέλο Διεγέρτη γεννήτριας	111
Εικόνα 7.3: Μοντέλο Ρυθμιστή στροβίλου	111
Εικόνα 7.4: Μοντέλο Γεννήτριας/Μετατροπέα Φ/Β πάρκου	112
Εικόνα 7.5: Μοντέλο Διεγέρτη Φ/Β πάρκου	112
Εικόνα 7.6: Μοντέλο Ελεγκτή Ενεργού-Άεργου ισχύος Φ/Β πάρκου	113
Εικόνα 7.7: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 2.....	114

Εικόνα 7.8: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 3.....	116
Εικόνα 7.9: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 4.....	118
Εικόνα 7.10: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 5.....	120
Εικόνα 7.11: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 6.....	122
Εικόνα 7.12: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 7.....	124
Εικόνα 7.13: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 8.....	126
Εικόνα 7.14: Απώλειες συστήματος με εγκατάσταση παράλληλης γραμμής 6-8.....	128
Εικόνα 7.15: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 2	130
Εικόνα 7.16: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 3	131
Εικόνα 7.17: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 4	133
Εικόνα 7.18: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 5	135
Εικόνα 7.19: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 6	137
Εικόνα 7.20: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 7	140
Εικόνα 7.21: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 8	141
Εικόνα 7.22: Ορισμός γεννήτριας αναφοράς στο Powerworld	147
Εικόνα 7.23: Παράθυρο ορισμού σεναρίων στο Powerworld.....	147
Εικόνα 7.24: Αρχικοποίηση βημάτων 1,2 για στερεό τριφασικό σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς 1-3 σε $t_{fault} = 1 \text{ sec}$, πλησίον του ζυγού 1	148
Εικόνα 7.25: Εφαρμογή εκκαθάρισης σφάλματος σύμφωνα με το βήμα 3 στη γραμμή μεταφοράς 1-3 σε t_{clear}	148
Εικόνα 7.26: Άνοιγμα διακοπών ισχύος σύμφωνα με το βήμα 4 της γραμμής 1-3 σε $t_{open_line} = t_{clear}$	149
Εικόνα 7.27: Επαναφορά της γραμμής 1-3 σύμφωνα με το βήμα 5 σε $t_{close_line} = 5 \text{ sec}$	149
Εικόνα 7.28: Σενάριο A1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec.....	150
Εικόνα 7.29: Σενάριο A1T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec	150
Εικόνα 7.30: Σενάριο A1T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec	151
Εικόνα 7.31: Σενάριο A1T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec.....	151

Εικόνα 7.32: Σενάριο A1T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec	152
Εικόνα 7.33: Σενάριο A1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec (αστάθεια συστήματος)	152
Εικόνα 7.34: Σενάριο A1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	153
Εικόνα 7.35: Σενάριο A1M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	153
Εικόνα 7.36: Σενάριο A1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	154
Εικόνα 7.37: Σενάριο A1M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	154
Εικόνα 7.38: Σενάριο A1M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	155
Εικόνα 7.39: Σενάριο A1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,25 sec (αστάθεια συστήματος)	155
Εικόνα 7.40: Σενάριο A2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	156
Εικόνα 7.41: Σενάριο A2T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	156
Εικόνα 7.42: Σενάριο A2T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	157
Εικόνα 7.43: Σενάριο A2T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	157
Εικόνα 7.44: Σενάριο A2T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec	158
Εικόνα 7.45: Σενάριο A2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,25 sec (αστάθεια συστήματος)	158

Εικόνα 7.46: Σενάριο A2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec	159
Εικόνα 7.47: Σενάριο A2M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec	159
Εικόνα 7.48: Σενάριο A2M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec	160
Εικόνα 7.49: Σενάριο A2M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec	160
Εικόνα 7.50: Σενάριο A2M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec	161
Εικόνα 7.51: Σενάριο A2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,35 sec (αστάθεια συστήματος)	161
Εικόνα 7.52: Σενάριο A5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	162
Εικόνα 7.53: Σενάριο A5T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	162
Εικόνα 7.54: Σενάριο A5T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	163
Εικόνα 7.55: Σενάριο A5T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	163
Εικόνα 7.56: Σενάριο A5T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	164
Εικόνα 7.57: Σενάριο A5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,35 sec (αστάθεια συστήματος)	164
Εικόνα 7.58: Σενάριο A5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	165
Εικόνα 7.59: Σενάριο A5M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	165
Εικόνα 7.60: Σενάριο A5M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	166

Εικόνα 7.61: Σενάριο A5M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	166
Εικόνα 7.62: Σενάριο A5M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec	167
Εικόνα 7.63: Σενάριο A5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,35 sec (αστάθεια συστήματος)	167
Εικόνα 7.64: Σενάριο A6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec	168
Εικόνα 7.65: Σενάριο A6T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec	168
Εικόνα 7.66: Σενάριο A6T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec	169
Εικόνα 7.67: Σενάριο A6T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec.....	169
Εικόνα 7.68: Σενάριο A6T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec	170
Εικόνα 7.69: Σενάριο A6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,15 sec (αστάθεια συστήματος)	170
Εικόνα 7.70: Σενάριο A6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	171
Εικόνα 7.71: Σενάριο A6M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	171
Εικόνα 7.72: Σενάριο A6M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec.....	172
Εικόνα 7.73: Σενάριο A6M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	172
Εικόνα 7.74: Σενάριο A6M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	173

Εικόνα 7.75: Σενάριο A6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,75 sec (αστάθεια συστήματος)	173
Εικόνα 7.76: Σενάριο B1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec	174
Εικόνα 7.77: Σενάριο B1T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec	174
Εικόνα 7.78: Σενάριο B1T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec	175
Εικόνα 7.79: Σενάριο B1T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec	175
Εικόνα 7.80: Σενάριο B1T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec	176
Εικόνα 7.81: Σενάριο B1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,2 sec (αστάθεια συστήματος)	176
Εικόνα 7.82: Σενάριο B1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	177
Εικόνα 7.83: Σενάριο B1M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	177
Εικόνα 7.84: Σενάριο B1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	178
Εικόνα 7.85: Σενάριο B1M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	178
Εικόνα 7.86: Σενάριο B1M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	179
Εικόνα 7.87: Σενάριο B1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,5 sec (αστάθεια συστήματος)	179
Εικόνα 7.88: Σενάριο B2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	180

Εικόνα 7.89: Σενάριο B2T – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	180
Εικόνα 7.90: Σενάριο B2T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	181
Εικόνα 7.91: Σενάριο B2T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec.....	181
Εικόνα 7.92: Σενάριο B2T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec	182
Εικόνα 7.93: Σενάριο B2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,75 sec (αστάθεια συστήματος)	182
Εικόνα 7.94: Σενάριο B2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec	183
Εικόνα 7.95: Σενάριο B2M – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec	183
Εικόνα 7.96: Σενάριο B2M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec.....	184
Εικόνα 7.97: Σενάριο B2M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec	184
Εικόνα 7.98: Σενάριο B2M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec	185
Εικόνα 7.99: Σενάριο B2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4 sec (αστάθεια συστήματος)	185
Εικόνα 7.100: Σενάριο B5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	186
Εικόνα 7.101: Σενάριο B5T – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	186
Εικόνα 7.102: Σενάριο B5T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec.....	187
Εικόνα 7.103: Σενάριο B5T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	187

Εικόνα 7.104: Σενάριο B5T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	188
Εικόνα 7.105: Σενάριο B5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)	188
Εικόνα 7.106: Σενάριο B5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	189
Εικόνα 7.107: Σενάριο B5M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	189
Εικόνα 7.108: Σενάριο B5M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	190
Εικόνα 7.109: Σενάριο B5M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	190
Εικόνα 7.110: Σενάριο B5M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	191
Εικόνα 7.111: Σενάριο B5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)	191
Εικόνα 7.112: Σενάριο B6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec	192
Εικόνα 7.113: Σενάριο B6T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec	192
Εικόνα 7.114: Σενάριο B6T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec	193
Εικόνα 7.115: Σενάριο B6T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec	193
Εικόνα 7.116: Σενάριο B6T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec	194
Εικόνα 7.117: Σενάριο B6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,5 sec (αστάθεια συστήματος)	194

Εικόνα 7.118: Σενάριο B6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec	195
Εικόνα 7.119: Σενάριο B6M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec	195
Εικόνα 7.120: Σενάριο B6M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec	196
Εικόνα 7.121: Σενάριο B6M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec	196
Εικόνα 7.122: Σενάριο B6M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec	197
Εικόνα 7.123: Σενάριο B6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec (αστάθεια συστήματος)	197
Εικόνα 7.124: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec	198
Εικόνα 7.125: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec	198
Εικόνα 7.126: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec	199
Εικόνα 7.127: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec	199
Εικόνα 7.128: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec	200
Εικόνα 7.129: Σενάριο Γ1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3 sec (αστάθεια συστήματος)	200
Εικόνα 7.130: Σενάριο Γ1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec	201
Εικόνα 7.131: Σενάριο Γ1M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec	201
Εικόνα 7.132: Σενάριο Γ1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec	202

Εικόνα 7.133: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec	202
Εικόνα 7.134: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec	203
Εικόνα 7.135: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,1 sec (αστάθεια συστήματος)	203
Εικόνα 7.136: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec	204
Εικόνα 7.137: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec	204
Εικόνα 7.138: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec	205
Εικόνα 7.139: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec	205
Εικόνα 7.140: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec	206
Εικόνα 7.141: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec (αστάθεια συστήματος)	206
Εικόνα 7.142: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec	207
Εικόνα 7.143: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec	207
Εικόνα 7.144: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec	208
Εικόνα 7.145: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec	208
Εικόνα 7.146: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec	209

Εικόνα 7.147: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec (αστάθεια συστήματος)	209
Εικόνα 7.148: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	210
Εικόνα 7.149: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	210
Εικόνα 7.150: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	211
Εικόνα 7.151: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	211
Εικόνα 7.152: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec	212
Εικόνα 7.153: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)	212
Εικόνα 7.154: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	213
Εικόνα 7.155: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	213
Εικόνα 7.156: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	214
Εικόνα 7.157: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	214
Εικόνα 7.158: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec	215
Εικόνα 7.159: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,5 sec (αστάθεια συστήματος)	215
Εικόνα 7.160: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec	216

Εικόνα 7.161: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec	216
Εικόνα 7.162: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec	217
Εικόνα 7.163: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec	217
Εικόνα 7.164: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec	218
Εικόνα 7.165: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,8 sec (αστάθεια συστήματος)	218
Εικόνα 7.166: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec	219
Εικόνα 7.167: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec	219
Εικόνα 7.168: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec	220
Εικόνα 7.169: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec	220
Εικόνα 7.170: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec	221
Εικόνα 7.171: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec (αστάθεια συστήματος)	221
Εικόνα Π1: Αρχείο δεδομένων καιρού από PVSYST.....	233
Εικόνα Π2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β μονάδας AEG	234
Εικόνα Π3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα AEG.....	235
Εικόνα Π4: Ηλιακός χάρτης του ενδεικτικού γεωτεμάχιου με σκίαση ορίζοντα (με γκρι)	236

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κατανάλωση τελικής και πρωτογενούς ενέργειας ανά έτος στην Ευρώπη	1
Σχήμα 2.1: (Αριστερά) Απεικόνιση ζυγών και «δαχτύλων» στην κυψέλη, (Δεξιά) σύνδεση κυψελών σε σειρά και παράλληλα φωτοβολταϊκής μονάδας	15
Σχήμα 2.2: Λειτουργία διόδων παράκαμψης σε περίπτωση σκιασμένης κυψέλης [8]	16
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση αυτόνομου και συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα [26]	19
Σχήμα 3.2: Τυπική αναπαράσταση τριφασικού αντιστροφέα [12]	21
Σχήμα 3.3: Ενδεικτικό διάγραμμα υπολογισμού λόγου $dchm$ [12]	27
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα απωλειών λόγω κοντινών σκιάσεων	45
Σχήμα 3.5: Τελικό μονογραμμικό διάγραμμα και αναπαράσταση συστήματος.....	48
Σχήμα 4.1: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και οι διαχειριστές του.....	53
Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση συστήματος 30 ζυγών στο λογισμικό Powerworld.....	105
Σχήμα 7.2: Υπερφόρτωση γεννήτριας και γραμμής 1-2	109
Σχήμα 7.3: Οριακή υπερφόρτωση γραμμών 2-6 και 6-8	109
Σχήμα 7.4: Τοποθέτηση γεννήτριας στο ζυγό 2	114
Σχήμα 7.5: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 3 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 3	116
Σχήμα 7.6: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 3	116
Σχήμα 7.7: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 4	118
Σχήμα 7.8: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 5	120
Σχήμα 7.9: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 6	121
Σχήμα 7.10: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 7 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 7 ..	123
Σχήμα 7.11: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 7 ..	124
Σχήμα 7.12: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 8 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 8 ..	125
Σχήμα 7.13: Πραγματικές απώλειες κατά την προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας	127
Σχήμα 7.14: Καταστάσεις γραμμών ζυγού 6 με την εγκατάσταση παράλληλης γραμμής 6-8	128
Σχήμα 7.15: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 2	129
Σχήμα 7.16: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 3	131

Σχήμα 7.17: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 4	133
Σχήμα 7.18: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 5	135
Σχήμα 7.19: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 6	137
Σχήμα 7.20: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 7	139
Σχήμα 7.21: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 7 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 7	139
Σχήμα 7.22: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 1 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 8	141
Σχήμα 7.23: Πραγματικές απώλειες κατά την μελέτη διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας.....	143
Σχήμα 7.24: Κατάσταση ζυγών 1-8 κατά την προσθήκη γεννήτριας και Φ/Β πάρκου	144
Σχήμα 7.25: Συνοπτικά αποτελέσματα απωλειών μόνιμων καταστάσεων.....	222
Σχήμα 7.26: Συνοπτικά αποτελέσματα απωλειών ανά ζυγό τοποθέτησης.....	222
Σχήμα 7.27: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σεναρίου Α και Β	224
Σχήμα 7.28: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σεναρίου Α και Γ	225
Σχήμα 7.29: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σεναρίου Β και Γ	225

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Κατανάλωση τελικής και πρωτογενούς ενέργειας ανά έτος στην Ευρώπη	2
Πίνακας 3.1: Δοκιμές ελάχιστης απόστασης	42
Πίνακας 3.2: Ωριαία μέγιστη παραγωγή ανά μήνα σε kW	50
Πίνακας 5.1: Κατηγορίες ζυγών και μεταβλητές.....	68
Πίνακας 7.1: Δεδομένα φορτίων συστήματος 30 ζυγών	106
Πίνακας 7.2: Απώλειες συστήματος.....	106
Πίνακας 7.3: Τάσεις ζυγών συστήματος	108
Πίνακας 7.4: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 2	114
Πίνακας 7.5: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 3	117
Πίνακας 7.6: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 4	118
Πίνακας 7.7: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 5	120
Πίνακας 7.8: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 6	122
Πίνακας 7.9: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 7	124
Πίνακας 7.10: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 8	126
Πίνακας 7.11: Πραγματικές απώλειες κατά την προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας....	128
Πίνακας 7.12: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 2	130
Πίνακας 7.13: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 3	132
Πίνακας 7.14: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 4	133
Πίνακας 7.15: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 5	135
Πίνακας 7.16: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 6	137
Πίνακας 7.17: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 7	140
Πίνακας 7.18: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 8	142
Πίνακας 7.19: Πραγματικές απώλειες κατά την μελέτη διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας.....	143
Πίνακας 7.20: Αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σεναρίων	223
Πίνακας 7.21: Καλύτερο και χειρότερο σενάριο ανά ζυγό	226
Πίνακας Π1: Δυναμικά δεδομένα Φ/Β πάρκου (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές)	237

Πίνακας Π2: Δυναμικά δεδομένα γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων για τη γεννήτρια και τον διεγέρτη (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές)	237
Πίνακας Π3: Δυναμικά δεδομένα γεννητριών για ρυθμιστή στροβίλου (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές).....	238

Συντομογραφίες

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΗΕΔ	Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
κ.λπ.	και λοιπά
Μ/Σ	μετασχηματιστής
ΡΑΑΕΥ	Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Φ/Β	φωτοβολταϊκό
AGC	Automatic Generation Control
AM	Air Mass
CCT	Critical Clearing Time
CIG	Converter-Interfaced Generator
COP	Conference of the Parties
DC	direct current
DHI	Diffused Horizontal Irradiance
DLGF	Double Line to Ground Fault
GHI	Global Horizontal Irradiance
IEA	International Energy Agency
LLF	Line to Line Fault
MICR	Maximum Input Current Rating
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
Mtoe	Million Tonnes of Oil Equivalent
OCR	Output Current Rating
PLL	Phase-Locked Loop
PV	photovoltaic
RMS	Root Mean Square

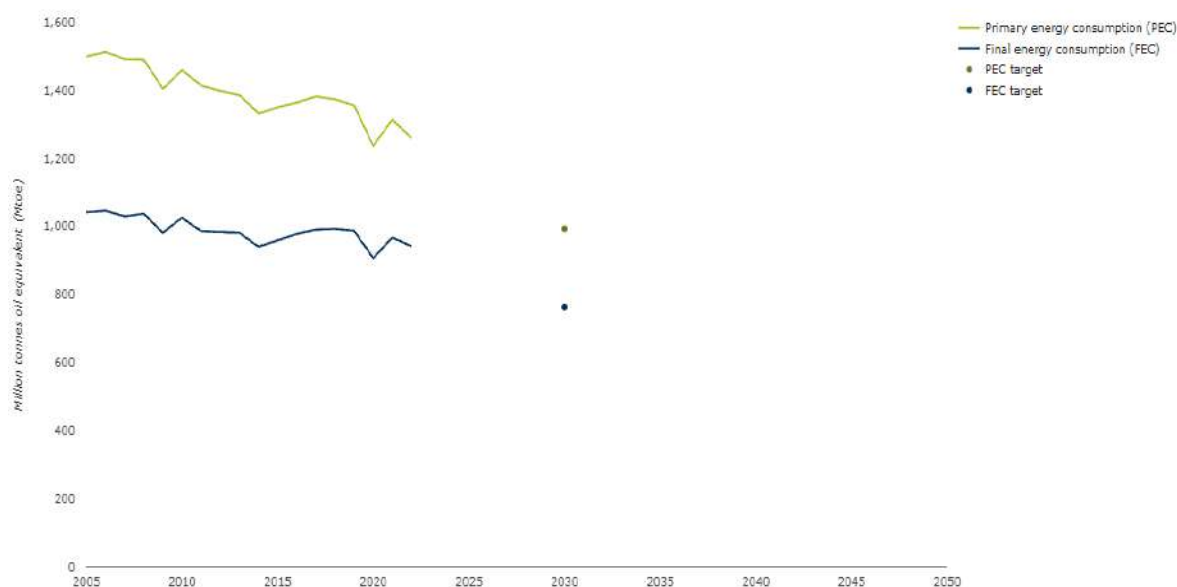
SCC	Short Circuit Capacity
SLGF	Single Line to Ground Fault
VR	Voltage Rating

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής αποτελεί ένα από τα καίρια προβλήματα της ανθρωπότητας. Μια σοβαρή προσπάθεια αντιμετώπισης πραγματοποιήθηκε στις 12 Δεκεμβρίου 2015 με τη γνωστή «Συμφωνία του Παρισιού» (COP 21). Η συμφωνία έθετε μακροπρόθεσμους στόχους ώστε να:

- μειώσει δραστικά τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για να συγκρατήσει την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας.
- αξιολογεί περιοδικά τη συλλογική πρόοδο των εθνών προς αυτόν τον στόχο.
- παρέχει χρηματοδότηση στις αναπτυσσόμενες χώρες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.
- επιτευχθούν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050.

Για την Ευρώπη, συγκεκριμένα, εκδόθηκε οδηγία ώστε να επιτευχθεί πρόσθετη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 11,7% έως το 2030, έτσι ώστε η τελική κατανάλωση ενέργειας της Ένωσης να μην υπερβαίνει τα 763 Mtoe καθώς και η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας να μην υπερβαίνει τα 992,5 Mtoe, σε σύγκριση με τις προβλέψεις της αναμενόμενης χρήσης ενέργειας για το 2030 όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 και Πίνακα 1.1 [1], [2], [3].



Σχήμα 1.1: Κατανάλωση τελικής και πρωτογενούς ενέργειας ανά έτος στην Ευρώπη

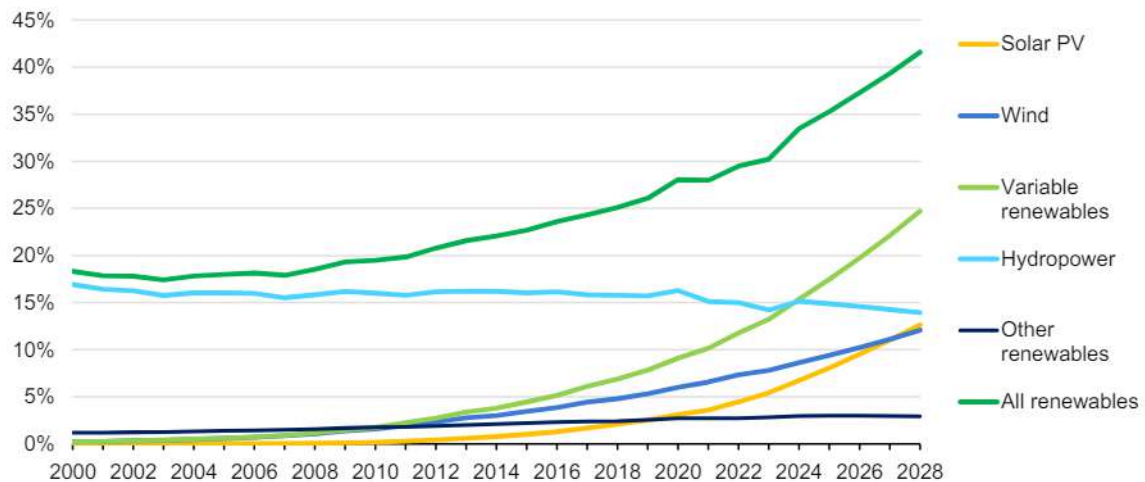
Πίνακας 1.1: Κατανάλωση τελικής και πρωτογενούς ενέργειας ανά έτος στην Ευρώπη

Year	Primary energy consumption (PEC)	Final energy consumption (FEC)	PEC target	FEC target
2005	1497.8	1041.3		
2006	1511.4	1045.8		
2007	1490.2	1028.5		
2008	1488.8	1036.7		
2009	1403.3	980.8		
2010	1458.3	1025.2		
2011	1412.8	985.3		
2012	1397	983.2		
2013	1384.8	981		
2014	1330.8	939.2		
2015	1348.4	958.6		
2016	1362.5	977.6		
2017	1381	989.9		
2018	1371.9	992.3		
2019	1354.4	986.4		
2020	1235.8	906.3		
2021	1313.2	967.1		
2022	1258.2	940.5		
2023				
2024				
2025				
2026				
2027				
2028				
2029				
2030			992.5	763

Για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιούνται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Καθώς προέρχονται από απεριόριστους, φυσικά αναπληρωμένους πόρους, παρατηρείται τάση συνεχούς ανάπτυξης και βελτίωσης τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας). Μάλιστα, από ανάλυση της IEA (Διεθνής Οργάνωση Ενέργειας) προβλέπεται ότι μέχρι το 2028 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ αναμένεται να φτάσει περίπου 14400 TWh. Το 2028 εκτιμάται ότι 42% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα προέρχεται από ΑΠΕ, όπου αιολικά και

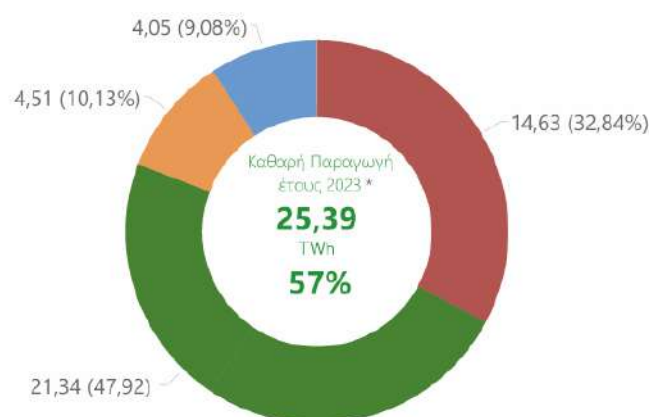
Φ/Β (φωτοβολταϊκά) πάρκα να συνθέτουν 25% ενώ η υδροηλεκτρική παραγωγή να παραμένει η μεγαλύτερη. Η Εικόνα 1.1 περιέχει την εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας ανά τεχνολογία σύμφωνα με την ανάλυση IEA [4].

Electricity generation by technology, 2000-2028



Εικόνα 1.1: Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία

Στον ελληνικό χώρο η επίδραση των ΑΠΕ είναι ιδιαίτερα αισθητή. Συγκεκριμένα, ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) δήλωσε ότι το 2023 το 57% του ενεργειακού μείγματος καλύφθηκε από ΑΠΕ ξεπερνώντας τις 25 TWh με τη μεγαλύτερη μηνιαία παραγωγή από ΑΠΕ τον Αύγουστο του 2023 (2,25 TWh). Στην Εικόνα 1.2 διακρίνονται τα ποσοστά συνεισφοράς στη συνολική παραγωγή ανά τεχνολογία [5].



Εικόνα 1.2: Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ προϋποθέτει και την ένταξη κατάλληλων αποθηκευτικών μέσων. Καθώς οι ΑΠΕ επηρεάζονται από περιβαλλοντικές συνθήκες και

την τοποθεσία τους, εισάγονται στο ΣΗΕ (Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας) αποθηκευτικές μονάδες που στόχο έχουν να αντισταθμίσουν διακυμάνσεις του δικτύου, να καλύψουν τη στιγμιαία ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια και να αποθηκεύσουν περίσσεια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Η έλλειψη αποθηκευτικών μονάδων και ταυτόχρονα η χρήση ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και να επηρεάσει την ενεργειακή ποιότητα του δικτύου.

Η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και η μετάβαση σε μηδενικές εκπομπές ισχυροποιούν τη θέση των ΑΠΕ στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχή ενσωμάτωση των ΑΠΕ, όμως, θα πρέπει να συνοδεύεται από τους κατάλληλους μηχανισμούς εξασφάλισης της σταθερότητας του δικτύου και από τους περιορισμούς που τίθενται στη πραγματικότητα.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στο σχεδιασμό ενός Φ/Β πάρκου και της ενσωμάτωσης Φ/Β πάρκου σε πρότυπο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, είναι αρχικά αναγκαίο να κατανοηθεί η δομή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας καθώς και των συνιστωσών που εξασφαλίζουν την σταθερή και αδιάληπτη κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αναγκαία βήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της πραγματικότητας και την εξασφάλιση της υγιούς λειτουργίας των Φ/Β πάρκων. Οι περιορισμοί επίσης της τεχνολογίας των Φ/Β θα ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη της ενσωμάτωσης πάρκων στο πρότυπο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας καθώς η εμφάνιση σφαλμάτων στο σύστημα είναι αναπόφευκτη.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται σε δυο μέρη: το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τον τρόπο λειτουργίας καθώς και την χωροθέτηση του Φ/Β πάρκου, ενώ στο

δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του ΣΗΕ και την τοποθέτηση φωτοβολταϊκού πάρκου σε αυτό:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής μονάδας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός σχεδιασμός φωτοβολταϊκού πάρκου σε γήπεδο.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το ΣΗΕ και τα στοιχεία που το απαρτίζει.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η ανάλυση ροής φορτίου και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της σταθερής λειτουργίας.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα σφάλματα, η μεταβατική ευστάθεια, η εξίσωση ταλάντωσης και οι μέθοδοι μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας.

Στο Κεφάλαιο 7 μελετάται η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκού πάρκου σε πρότυπο ΣΗΕ 30 ζυγών με τη βοήθεια του λογισμού Powerworld.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των Κεφαλαίων 3 και 7 καθώς και επισημαίνονται τυχόν προκλήσεις που μπορεί να προκύψουν κατά το σχεδιασμό και την τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πάρκου.

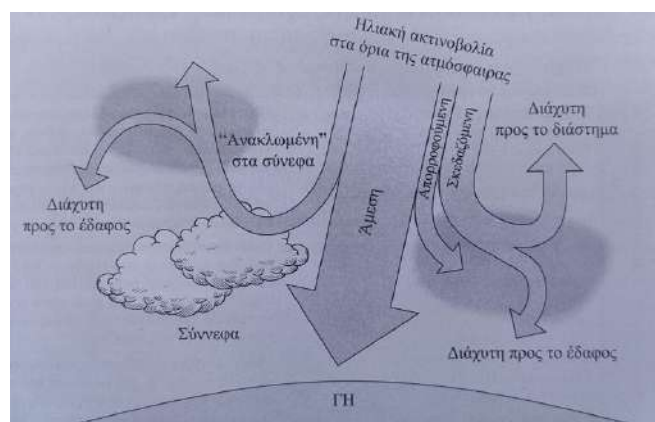
Κεφάλαιο 2 Φωτοβολταϊκά

2.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ολική (global) ακτινοβολία που φτάνει στη γήινη επιφάνεια αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- Άμεση (direct): ευθύγραμμη δέσμη μετά από εξασθένιση στην ατμόσφαιρα.
- Διάχυτη (diffused): δέσμες μετά από σκέδαση από μόρια του αέρα, σωματίδια και σύννεφα.
- Ανακλώμενη (scattered): δέσμες που ανακλώνται από ατμοσφαιρικά συστατικά
- Απορροφούμενη (absorbed): δέσμες που απορροφούνται από ατμοσφαιρικά συστατικά.

Οι διάφορες συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1 [6].



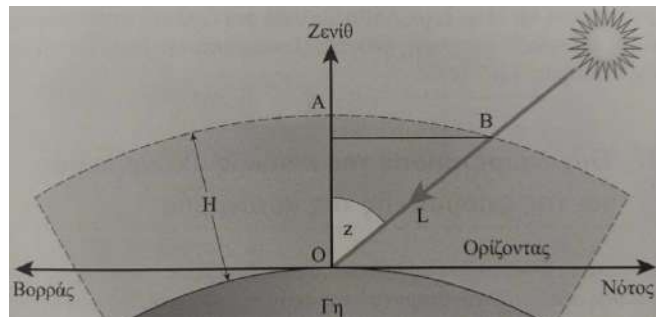
Εικόνα 2.1: Η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνιστώσες της [6]

Η φασματική κατανομή και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης εξαρτώνται από το μήκος της διαδρομής που οι ηλιακές ακτίνες ακολούθησαν μέσα στην ατμόσφαιρα. Όταν ο ήλιος βρίσκεται στην κατακόρυφο πάνω από το σημείο παρατήρησης (θέση ζενίθ του ήλιου), η διαδρομή αυτή έχει το ελάχιστο μήκος.

Η φασματική κατανομή που αντιστοιχεί στη θέση ζενίθ του ήλιου ($z=0^\circ$) χαρακτηρίζεται ως «Μάζα Αέρα 1» (Air Mass 1 ή AM 1). Παραβλέποντας την καμπυλότητα της γης, ο προσεγγιστικός ορισμός του συντελεστή μάζας (ικανοποιητικός για γωνίες μικρότερες των 60°) είναι:

$$AM = \frac{L}{M} \cong \frac{1}{\cos z} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

Για τον ορισμό του AM (Εικόνα 2.2), το σημείο παρατήρησης O θεωρείται σε μηδενικό υψόμετρο (επιφάνεια της θάλασσας). Για μεγαλύτερες γωνίες η σχέση είναι πιο σύνθετη [6].

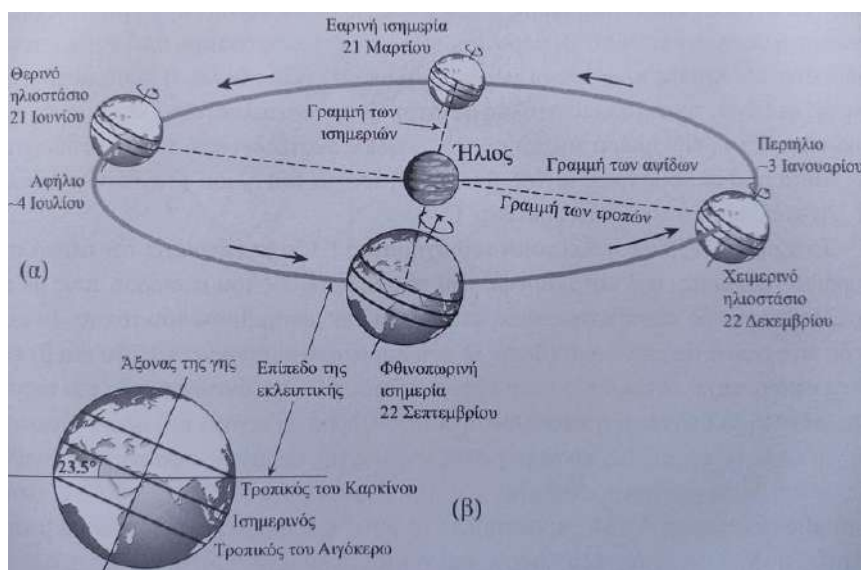


Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε σημείο παρατήρησης O [6]

Για τον υπολογισμό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας πρέπει να ληφθεί υπόψη και η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο. Η κίνηση της γης μπορεί να αναλυθεί σε δυο κύριες συνιστώσες:

- Περιφορά γύρω από τον ήλιο, σε ελλειπτική τροχιά, με τον ήλιο στη μια των δυο εστιών.
- Περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της.

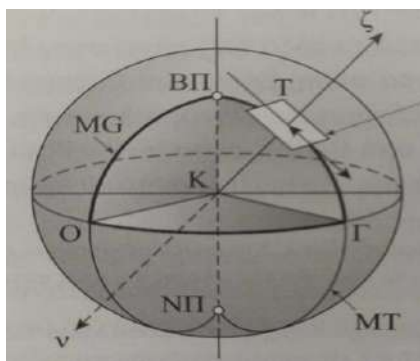
Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο στις πιο χαρακτηριστικές της θέσεις της σε ένα έτος.



Εικόνα 2.3: Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο [6]

Συνεπώς, για τον υπολογισμό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι γνωστό το:

- Γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή, όπου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με τον παρατηρητή και του Ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος παίρνει τιμές μεταξύ $[0^\circ - 90^\circ]$ για το βόρειο ημισφαίριο και μεταξύ $[0^\circ - (-90^\circ)]$ για το νότιο ημισφαίριο (καμπύλη ΒΠΓ στην Εικόνα 2.4).
- Γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή, όπου είναι η γωνία που σχηματίζεται από το μεσημβρινό του Greenwich και το μεσημβρινό του παρατηρητή. Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές μεταξύ $[0^\circ - (-180^\circ)]$ για τόπους ανατολικά του Greenwich και μεταξύ $[0^\circ - 180^\circ]$ για τόπους δυτικά του Greenwich (καμπύλη ΟΓ στην Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Γεωγραφικές συντεταγμένες σημείου παρατήρησης T πάνω στην επιφάνεια της γης, με γεωγραφικό μήκος τόξου ΟΓ και γεωγραφικό πλάτος τόξου ΓΤ [6]

Το μέγεθος ενδιαφέροντος για εφαρμογές που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία είναι η ενέργεια που αποτίθεται από την άμεση ηλιακή συνιστώσα, ανά ημέρα, σε μια επιφάνεια (direct daily solar radiation energy):

$$E_d = E_m * \cos\theta \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

όπου

E_m : η ενέργεια που προσπίπτει σε διάστημα μιας ώρας σε μια επιφάνεια κάθετη στην άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας στην περίπτωση ηλιοφάνειας.

θ : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ άμεσης συνιστώσας ηλιακής ακτινοβολίας και την κάθετο στην επιφάνεια.

Για τον υπολογισμό του $\cos\theta$ γίνεται χρήση των σχέσεων μεταξύ γωνιών

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta * \sin\varphi * \cos\beta - \sin\delta * \cos\varphi * \sin\beta * \cos\gamma + \cos\delta * \cos\varphi \\ & * \cos\beta * \cos\omega + \cos\delta * \sin\varphi * \sin\beta * \cos\gamma * \cos\omega \\ & + \cos\delta * \sin\beta * \sin\gamma * \sin\omega \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

και

$$\cos\theta = \cos\theta_z * \cos\beta + \sin\theta_z * \sin\beta * \cos(\gamma_s - \gamma) \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

όπου

δ : ηλιακή απόκλιση, γωνιακή θέση του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού, από εξίσωση Cooper (1969).

φ : γεωγραφικό πλάτος.

β : κλίση, γωνία μεταξύ του επιπέδου της εν λόγω επιφάνειας και της οριζόντιας.

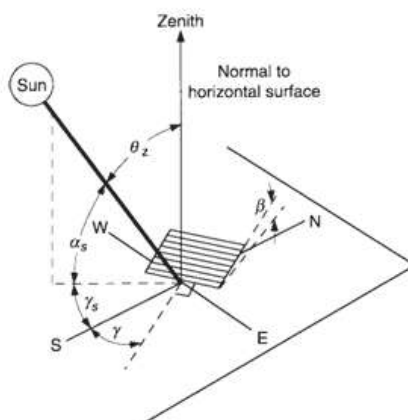
γ : επιφανειακή αζιμουθιακή γωνία, απόκλιση της προβολής σε οριζόντιο επίπεδο του κανονικού προς την επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό.

ω : γωνία ώρας, η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της με 15° την ώρα.

θ_z : γωνία ζενίθ, η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της γραμμής προς τον ήλιο, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης δέσμης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια.

γ_s : ηλιακή αζιμουθιακή γωνία, η γωνιακή μετατόπιση από νότια της προβολής της δέσμης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.

Στην Εικόνα 2.5 περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του $\cos\theta$ [6].



Εικόνα 2.5: Σχέσεις μεταξύ γωνιών [25]

2.2 Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας

Για την εκτίμηση της εντάσεως ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται κατάλληλα όργανα μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Στους θερμικούς αισθητήρες, των οποίων η ένδειξη οφείλεται στη θέρμανση της φωτιζόμενης επιφάνειας μιας πλάκας από ορισμένο υλικό.
- Στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης, στους οποίους η μέτρηση οφείλεται στις ενεργειακές μεταβάσεις των ηλεκτρονίων του υλικού κατά την απορρόφηση φωτονίων [6].

Στους θερμικούς ανιχνευτές ανήκουν:

- Το πυρανόμετρο, όπου η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Με τη θέρμανση των πλακών δημιουργείται διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ εκτιθέμενης στο φως και αυτής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μορφή του πυρανόμετρου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6.
- Ο πυροηλεκτρικός κρύσταλλος, όπου βασίζεται στην τροποποίηση της διπολικής ηλεκτρικής ροπής διηλεκτρικών υλικών (πυροηλεκτρικό φαινόμενο). Η αύξηση της

θερμοκρασίας του πυροηλεκτρικού υλικού οδηγεί σε πόλωση του υλικού λόγω θέρμανσής του [6].

Στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης ανήκουν:

- Οι φωτοδίοδοι κενού ή φωτοκύτταρα.
- Οι φωτοδίοδοι ημιαγωγών.
- Ο φασματογράφος, ο οποίος αναλύει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μιας πηγής.
- Το φασματοφωτόμετρο, όπου σαρώνει το φάσμα όλου του λειτουργικού εύρους μηκών κύματος και καταγράφει σε ηλεκτρονική «μνήμη» [6].



Εικόνα 2.6: Πυρανόμετρο

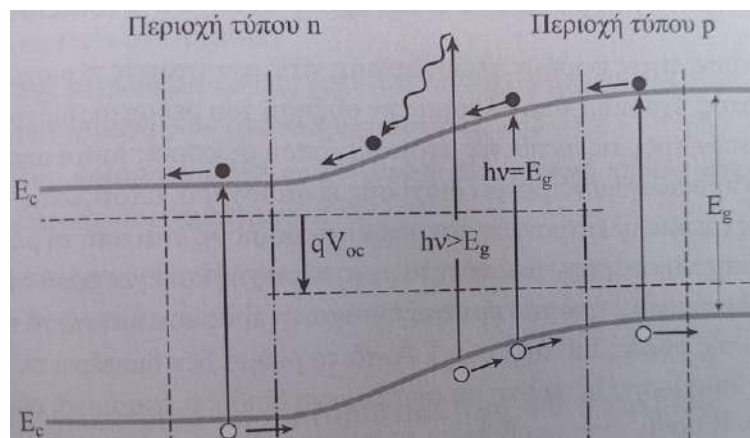
2.3 Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

Η μετατροπή της άμεσης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται στις ηλιακές ή φωτοβολταϊκές κυψέλες. Οι κυψέλες αυτές είναι ημιαγώγιμες διατάξεις που λειτουργούν βάσει φωτοηλεκτρικού φαινομένου:

- Το φωτιζόμενο μέταλλο φορτίζεται μόνο όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση από μια ορισμένη τιμή (συχνότητα κατωφλίου).
- Αν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας κατωφλίου, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Η εκπομπή φωτονίων από το μέταλλο γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με το φωτισμό της επιφάνειάς του.

Στις φωτοβολταϊκές κυψέλες η φωτοηλεκτρική μετατροπή πραγματοποιείται στην επαφή p-n μιας φωτιζόμενης διόδου και βασίζεται στο ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζεται κατά

μήκος της περιοχής φορτίου χώρου της ένωσης δυο ημιαγωγικών υλικών τύπου n και τύπου p. Όταν το φως κατάλληλου μήκους κύματος προσπίπτει στις κυψέλες, η ενέργεια από το φωτόνιο μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια του υλικού και τα αναγκάζει να μεταπηδήσουν σε μια υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση γνωστή ως ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) όπου και είναι ελεύθερα να κινηθούν στην πλευρά n. Η μετάβαση αυτή αφήνει πίσω «οπές» στη ζώνη σθένους, τα οποία μπορούν επίσης να μετακινηθούν αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση στην πλευρά p. Αυτή η μετατόπιση του ηλεκτρονίου ως αποτέλεσμα της προστιθέμενης ενέργειας δημιουργεί δυο φορείς φορτίου, δηλαδή ένα ζεύγος «ηλεκτρονίου-οπής». Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, με την επίδραση του πεδίου, αποτελεί ρεύμα με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p. Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται φωτορεύμα. Η Εικόνα 2.7 περιλαμβάνει το ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n [6].



Εικόνα 2.7: Ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n κατά τη διάρκεια φωτισμού της [6]

Συνοπτικά ισχύουν οι εξής περιπτώσεις:

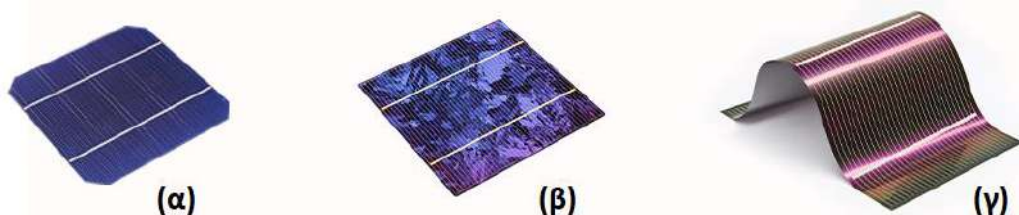
- $E < E_G$: το φωτόνιο δεν παράγει φορείς στην κυψέλη και η ενέργεια χάνεται ως θερμότητα στον ημιαγωγό, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του.
- $E > E_G$: το φωτόνιο παράγει ένα ζεύγος «ηλεκτρόνιο-οπή» στην κυψέλη. Η επιπλέον ενέργεια ($E - E_G$) απορροφάται πάλι ως θερμότητα στον ημιαγωγό αυξάνοντας τη θερμοκρασία του [6].

2.4 Φωτοβολταϊκή μονάδα πυριτίου

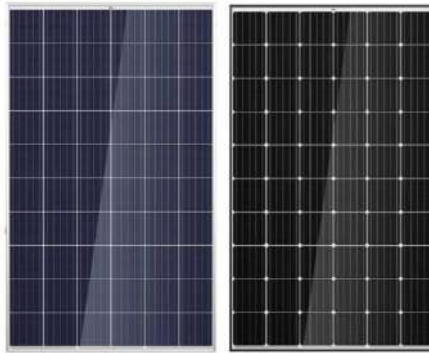
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου, διαδεδομένα ευρύτατα στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών κυψελίδων, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής:

- Στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (Monocrystalline Silicon): Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο ($\approx 300 \mu\text{m}$) με υψηλή απόδοση πλαισίων (μεταξύ 13% έως 18%) και υψηλό κόστος κατασκευής. Το κρυσταλλικό πλαίσιο είναι ομοιογενές.
- Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Polycrystalline Silicon): Αποτελούνται από πολλαπλά μικρά κρύσταλλα πυριτίου (πάχους 10 έως 50 μm). Η απόδοσή του σε βιομηχανική μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου κυμαίνεται από 10% έως 14% και το κόστος κατασκευής του είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
- Στοιχεία ταινίας (Ribbon Silicon): Δημιουργείται λεπτή ταινία από τηγμένο υλικό, ωστόσο υπάρχει περιορισμένη βιομηχανική παραγωγή.
- Στοιχεία άμορφου πυριτίου (Thin film Silicon): Χρησιμοποιείται η τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων. Η απόδοση αυτών των φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνεται από 6% έως 8% [6].

Μια Φ/Β μονάδα (solar panel) αποτελείται από πολλές φωτοβολταϊκές κυψέλες, συνδεδεμένες συνήθως σε σειρά, τάσης που ορίζεται από τους κατασκευαστές όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Οι συνδεδεμένες σε σειρά κυψέλες προστατεύονται με γυάλινη πλάκα υψηλής διαφάνειας και ειδικό πλαστικό υλικό για προστασία από την υγρασία, προσαρμοσμένα σε μεταλλικό πλαίσιο υψηλής αντοχής. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β συστοιχίας (photovoltaic ή αλλιώς PV array) και παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.8: (α) Μονοκρυσταλλική, (β) Πολυκρυσταλλική και (γ) Άμορφου πυριτίου κυψέλη

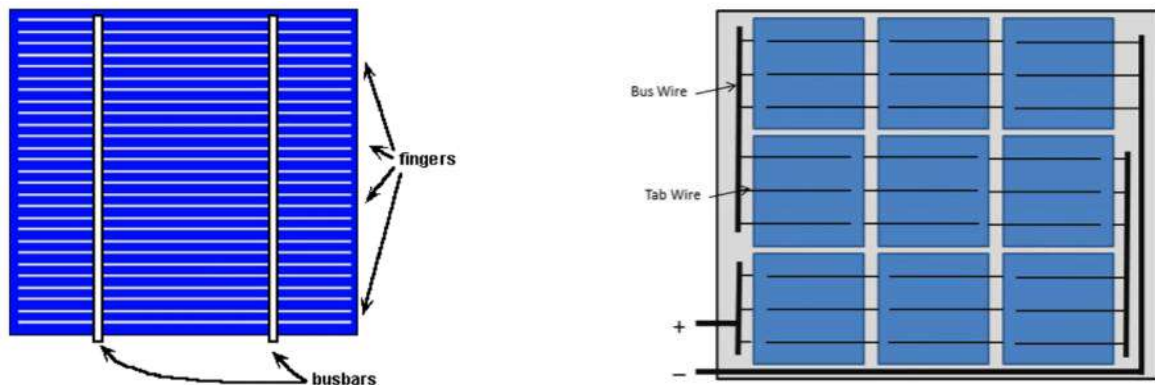


Εικόνα 2.9: (Αριστερά) Πολυκρυσταλλική μονάδα, (Δεξιά) Μονοκρυσταλλική μονάδα

Ηλεκτρικές επαφές κατασκευασμένες από ζυγούς (busbars) και «δάχτυλα» (fingers) είναι τυπωμένες στο στοιχείο πυριτίου. Ο σκοπός των ζυγών στις ηλιακές κυψέλες είναι να μεταφέρουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος που παράγεται όταν τα φωτόνια χτυπούν τα κύτταρα, ενώ τα «δάχτυλα» συλλέγουν το παραγόμενο DC ρεύμα (direct current) και το παραδίδουν στους ζυγούς. Οι κυψέλες συνδέονται με καλώδια:

- Σε σειρά για αύξηση της συνολικής τάσης.
- Παράλληλα για να αυξηθεί το συνολικό ρεύμα.

Η δομή και οι συνδέσεις εντός της ηλιακής κυψέλης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: (Αριστερά) Απεικόνιση ζυγών και «δαχτύλων» στην κυψέλη, (Δεξιά) σύνδεση κυψελών σε σειρά και παράλληλα φωτοβολταϊκής μονάδας

Ανάλογα με τον αριθμό των ζυγών μπορεί να αλλάξει η απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας. Μεγαλύτερος αριθμός ζυγών:

- Μειώνει τις απώλειες εσωτερικής αντίστασης.

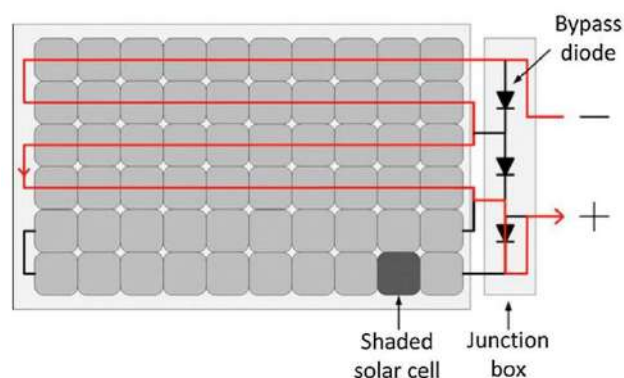
- Μειώνει το μήκος των «δαχτύλων» μεταξύ των ζυγών, γεγονός που μειώνει τις απώλειες αντίστασης «δαχτύλων».

Επομένως, πρόσθετοι ζυγοί στην ηλιακή μονάδα μπορούν να αυξήσουν την απόδοσή του [7].

Η φωτοβολταϊκή μονάδα συνοδεύεται και από κιβώτιο διακλάδωσης (Junction Box). Το κιβώτιο διακλάδωσης συνδέει την ισχύ που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη με εξωτερικές γραμμές. Περιέχει εσωτερικά διόδους παράκαμψης (Bypass Diodes), οι οποίες χρησιμεύουν ως διαδρομές παράκαμψης επιτρέποντας το ρεύμα να παρακάμπτει ελλειψματικές ή κακής απόδοσης κυψέλες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Ενδεικτικό κιβώτιο διακλάδωσης απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10 [8].



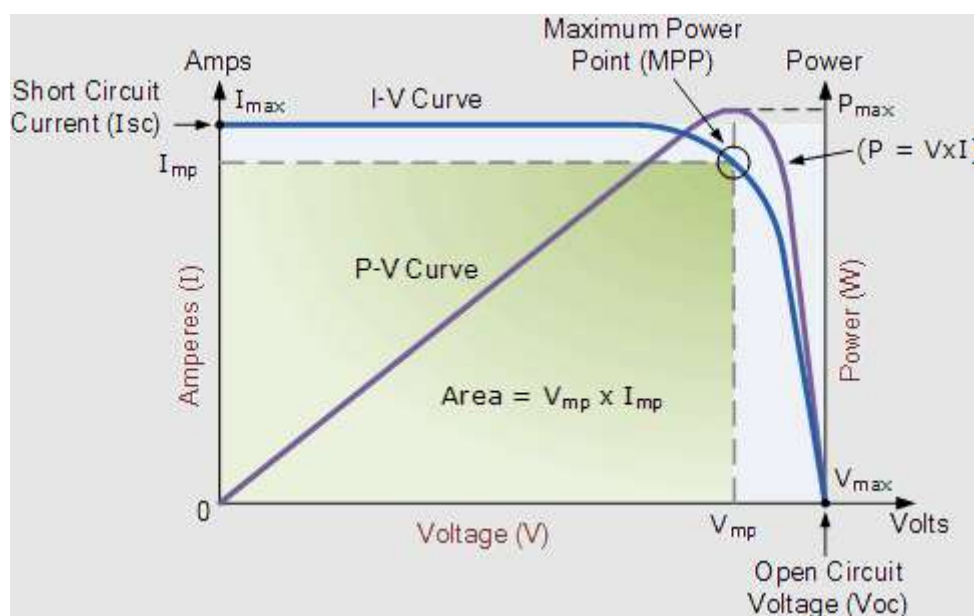
Εικόνα 2.10: Κιβώτιο διακλάδωσης [8]



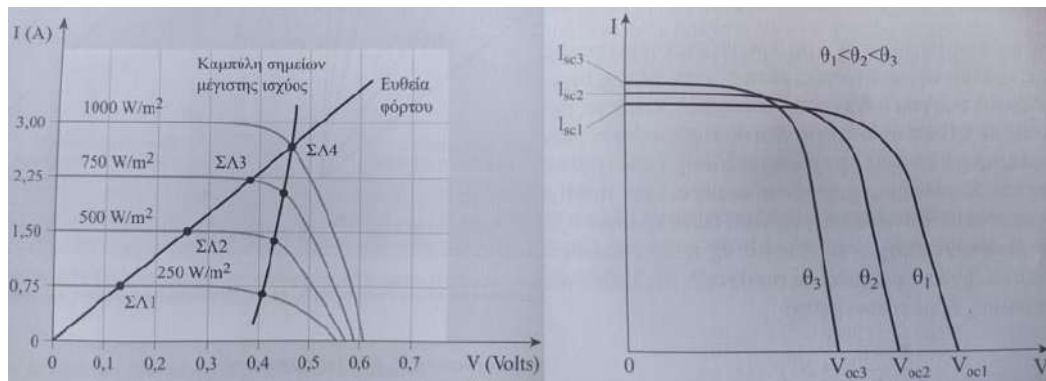
Σχήμα 2.2: Λειτουργία διόδων παράκαμψης σε περίπτωση σκιασμένης κυψέλης [8]

2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/B μονάδας

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, P-V μας δίνουν πληροφορία για τη λειτουργία της Φ/B μονάδας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (STC). Παρατηρώντας ταυτόχρονα την Εικόνα 2.11, το σημείο που τέμνει τη χαρακτηριστική I-V και την καμπύλη συνδεδεμένου φορτίου δίνει τον κατάλληλο συνδυασμό ρεύματος-τάσης λειτουργίας. Ωστόσο, στο Μέγιστο Σημείο Ισχύος (Maximum Power Point ή MPP), η παραγόμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Οι κατασκευαστές στα φυλλάδιά τους παρέχουν τόσο τις χαρακτηριστικές καμπύλες όσο και τα όρια λειτουργίας κάθε ξεχωριστής Φ/B μονάδας. Ωστόσο, οι επιδράσεις τόσο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και της θερμοκρασίας τείνουν να αλλάζουν τα επίπεδα λειτουργίας της Φ/B μονάδας ανά τόπο όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12. Για αυτό το λόγο οι κατασκευαστές συμπεριλαμβάνουν στα φυλλάδια κάθε Φ/B μονάδας και ανάλογους συντελεστές διόρθωσης [6], [9].



Εικόνα 2.11: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, P-V Φ/B μονάδας [9]



Εικόνα 2.12: Επίδραση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (Αριστερά) και θερμοκρασίας (Δεξιά) σε τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες [6]

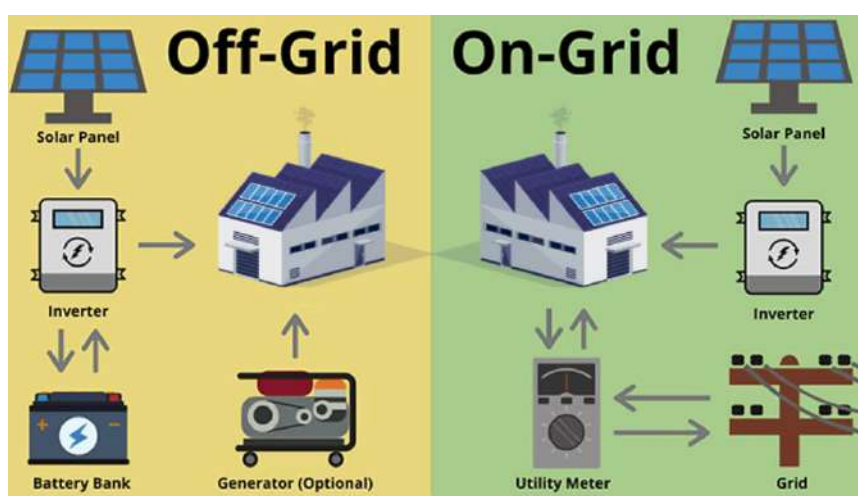
Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός φωτοβολταϊκού πάρκου

3.1 Το φωτοβολταϊκό σύστημα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε τρεις τύπους:

- Αυτόνομα συστήματα (Standalone systems): η ενέργεια παράγεται και καταναλώνεται από τον αυτοπαραγωγό και δεν αλληλοεπιδρούν με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιείται συνήθως στην τροφοδότηση οικιακών συστημάτων, περιλαμβάνει μπαταρίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και συνοδεύεται από εφεδρική γεννήτρια.
- Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid-connected systems): το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθώντας πιστά τα εθνικά και διεθνή πρότυπα ηλεκτρικής ασφάλειας.
- Υβριδικά συστήματα (Hybrid systems): συνδυάζει τα παραπάνω συστήματα με την πιθανή προσθήκη εναλλακτικής πηγής ενέργειας ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση και να βελτιωθεί η αξιοπιστία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα οι συνιστώσες των αυτόνομων και συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 [10].



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση αυτόνομου και συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα [26]

3.1.1 Ελεγκτές φόρτισης

Σημαντική συσκευή για την ομαλή αποθήκευση ενέργειας σε συσσωρευτή αποτελεί ένας ελεγκτής φόρτισης. Ο ελεγκτής φόρτισης εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης τόσο από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας (φωτοβολταϊκά ή γεννήτρια), στην περίπτωση της υπερφόρτισης, όσο από το σύστημα κατανάλωσης (οικιακό σύστημα), στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Δηλαδή, η απομόνωση του συστήματος αποθήκευσης προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει τα άνω ή τα κάτω όρια τάσης (setpoints), όπου και ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες. Ο ελεγκτής φόρτισης τοποθετείται είτε ως ξεχωριστή μονάδα είτε βρίσκεται ενσωματωμένος με τον αντιστροφέα σε μια ολοκληρωμένη μονάδα [6].

Η πιο δημοφιλής τεχνική για τους ελεγκτές φόρτισης είναι η Παρακολούθηση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking ή MPPT). Η τεχνική αυτή προσαρμόζει την τάση της συστοιχίας στην τάση του συσσωρευτή και προσαρμόζει το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η προσαρμογή στη τάση του συσσωρευτή εξασφαλίζει την πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας και την αποφυγή συνθηκών υπέρτασης του συσσωρευτή [6].

Οι ελεγκτές φόρτισης βαθμολογούνται σύμφωνα με:

- βαθμολογία τάσης (Voltage Rating ή VR), δηλαδή

$$VR = V_{OC} * N_S * t_{CC} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

- βαθμολογία μέγιστου ρεύματος εισόδου (Maximum Input Current Rating ή MICR), όπου ισχύει

$$MICR = I_{SC,C} * N_P \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

- βαθμολογία ρεύματος εξόδου (Output Current Rating ή OCR), όπου προκύπτει ως

$$OCR = \frac{P_{PVS,C}}{V_{AS}} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

όπου,

V_{OC} : μέγιστη τάση Φ/Β μονάδας (V).

N_S : αριθμός μονάδων σε σειρά.

t_{CC} : συντελεστής αντιστάθμισης θερμοκρασίας, λαμβάνεται υπόψη για διαφορετικές τοπικές θερμοκρασίες έναντι των STC συνθηκών.

$I_{SC,C}$: μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως Φ/Β μονάδας για τις τοπικές καιρικές και θερμοκρασιακές συνθήκες (A).

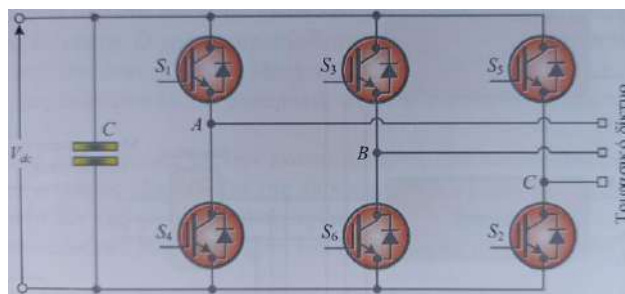
N_P : αριθμός παράλληλων κλάδων (strings).

$P_{PVS,C}$: ισχύς Φ/Β συστοιχίας για τις τοπικές καιρικές και θερμοκρασιακές συνθήκες (W).

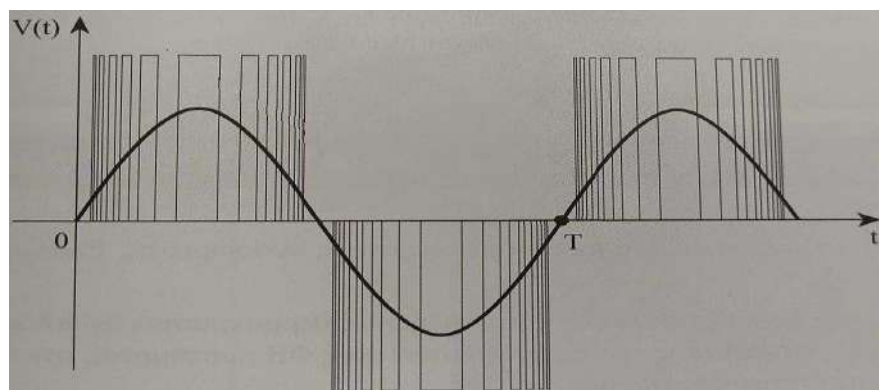
V_{AS} : τάση συστήματος συσσωρευτών (V) [6].

3.1.2 Αντιστροφείς

Πυλώνας ενός Φ/Β συστήματος αποτελεί ο αντιστροφέας (inverter). Ο αντιστροφέας είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει τάση DC σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική, 230V ανά φάση, 50Hz). Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (τρανζίστορ ισχύος), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών, μεταβαλλόμενης διάρκειας, που πλησιάζει την ημιτονική μορφή. Ενσωματωμένος εντός του αντιστροφέα βρίσκεται και ελεγκτής φόρτισης τεχνικής MPPT. Η γενική μορφή αναπαράστασης ενός τριφασικού μετατροπέα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2 και η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1 [6].



Σχήμα 3.2: Τυπική αναπαράσταση τριφασικού αντιστροφέα [12]

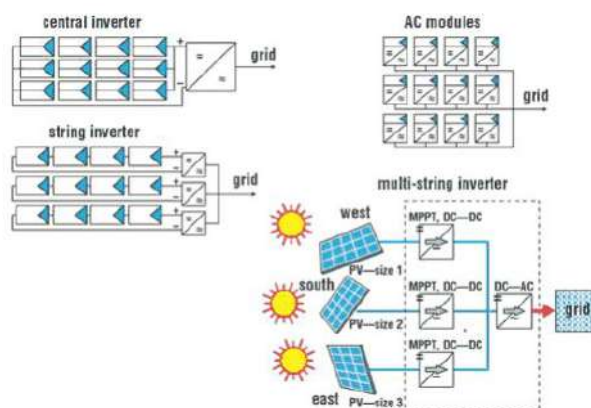


Εικόνα 3.1: Κυματομορφή εξόδου ενός αντιστροφέα διαμόρφωσης εύρους παλμών [6]

Ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των Φ/Β μονάδων που χρησιμοποιείται, οι αντιστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters), όπου όλες οι Φ/Β συστοιχίες συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους σε έναν αντιστροφέα. Το πρόβλημα αυτής της υλοποίησης είναι η σπατάλη όλης της παραγόμενης ενέργειας σε περίπτωση βλάβης.
- Αντιστροφείς κλάδων (string inverters), όπου κάθε κλάδος συνδέεται σε έναν αντιστροφέα και έπειτα όλοι οι αντιστροφείς συνδέονται παράλληλα, παρέχοντας τη συνολική ενέργεια του Φ/Β συστήματος. Σε περίπτωση βλάβης ενός αντιστροφέα, χάνεται ισχύς μόνο από το κομμάτι του προβληματικού.
- Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters), όπου πολλαπλοί κλάδοι μπορούν να συνδεθούν σε έναν αντιστροφέα. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε είσοδος έχει τους δικούς της ελεγκτές μέγιστης ισχύος και μετατροπείς. Χρησιμοποιείται συνήθως σε περίπτωση που μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης (χωροθέτηση, τρόποι στήριξης κ.λπ.).
- Ενσωματωμένοι αντιστροφείς σε Φ/Β μονάδες (module integrated ή micro inverters), όπου σε κάθε Φ/Β μονάδα ξεχωριστά ενσωματώνεται και ένας αντιστροφέας. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε οικιακές εγκαταστάσεις με προβλήματα σκίασης [11].

Στην Εικόνα 3.2 φαίνονται οι διαφορετικές δομές Φ/Β συστήματος ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης στον αντιστροφέα.



Εικόνα 3.2: Οι διαφορετικές δομές Φ/Β συστήματος βάσει αντιστροφέα [11]

Κατά τη σχεδίαση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της νησιδοποίησης (islanding). Στη περίπτωση που τμήμα του δικτύου, στο οποίο βρίσκονται φωτοβολταϊκά συστήματα, αποκοπεί από τη κεντρική τροφοδοσία, αν οι αντιστροφείς παραμένουν συνδεδεμένοι τότε:

- το προσωπικό συντήρησης που εκτελεί εργασίες στο σημείο σύνδεσης
- ο εξοπλισμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων από μεταβατικά φαινόμενα κατά την αυτόματη ή χειροκίνητη επαναφορά του δικτύου

βρίσκονται σε κίνδυνο. Το φαινόμενο της νησιδοποίησης θα πρέπει να αντιμετωπιστεί από τον αντιστροφέα και με μετρήσεις παρακολούθησης του δικτύου, ώστε να αποσυνδέεται ο αντιστροφέας αυτόματα από το δίκτυο [11].

Τέλος, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος στον αντιστροφέα. Αρμονική παραμόρφωση δημιουργείται όταν:

- οι αντιστροφείς μετατρέπουν το ρεύμα DC σε εναλλασσόμενο με τη χρήση εναλλαγής διαμόρφωσης πλάτους παλμού (Pulse Width Modulation ή PWM)
- μη γραμμικά φορτία απαιτούν κυματομορφή ρεύματος διαφορετικής του κύματος της εφαρμοζόμενης τάσης

τα οποία προκαλούνται από τα τρανζίστορ, διόδους κ.λπ. που περιέχουν αυτές οι συσκευές. Ως μέτρο της ποιότητας του ρεύματος, το μέτρο του οποίου δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5%, χρησιμοποιείται ο δείκτης «Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης» (Total Harmonic Distortion ή THD), ο οποίος ορίζεται ως:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

όπου

I_h : η ενεργός τιμή (Root Mean Square ή RMS) της αρμονικής τάξης h , συχνότητας ($50 * h$) Hz.

I_1 : η ενεργός τιμή (RMS) της θεμελιώδους αρμονικής των 50 Hz [11].

Συνοπτικά, οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι αντιστροφείς, ώστε να είναι δυνατή η σύνδεσή τους με το δημόσιο δίκτυο, είναι:

- Χρόνος αποσύνδεσης από το δίκτυο σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 0,5 δευτερόλεπτα, προστασία ορίων τάσης αντιστροφέων από -20% έως +15%, προστασία ορίων συχνότητας αντιστροφέων +/-0,5 Hz (λειτουργία νησιδοποίησης), ο χρόνος επανασύνδεσης του αντιστροφέα πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 λεπτά.
- Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD) μικρότερη από 5% στην ονομαστική ισχύ.
- Σε αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή απομόνωσης, το ρεύμα DC που εγχέεται στο δίκτυο, γεγονός που σχετίζεται με την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου, να είναι μικρότερο από 0,5% του ονομαστικού AC ρεύματος εξόδου [12].

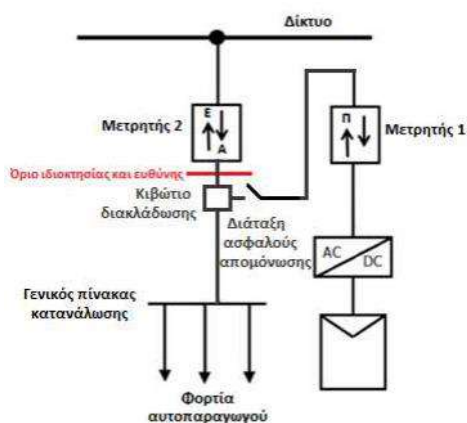
3.1.3 Μετρητές ενεργειακού συμψηφισμού

Παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β συστήματος που διαθέτουν την ενέργεια στο δίκτυο είναι υποχρεωμένοι να εγκαταστήσουν μετρητές ενέργειας Net Metering ή ενεργειακού συμψηφισμού. Με τον όρο Net metering εννοούμε την διοχέτευση της τοπικά παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ στο δίκτυο, ενώ η καταναλισκόμενη απορροφάται επίσης από το δίκτυο [13]. Σύμφωνα με τον ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής

Ηλεκτρικής Ενέργειας), η εγκατάσταση μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται από την παρακάτω τοπολογία:

- Μετρητής 1: μετρητική διάταξη παραγωγής Φ/Β συστήματος αυτοπαραγωγού.
- Μετρητής 2: μετρητική διάταξη εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας ΔΕΔΔΗΕ στο όριο δικτύου και αυτοπαραγωγού.
- Κιβώτιο διακλάδωσης αυτοπαραγωγού σε σημείο της γραμμής Πίνακα και Μετρητή 2.
- Διάταξη ασφαλούς απομόνωσης της παραγωγής του Φ/Β αυτοπαραγωγού.

Η τοπολογία συνδέσεων των μετρητικών διατάξεων αυτοπαραγωγού σύμφωνα με ΔΕΔΔΗΕ απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Τοπολογία συνδέσεων μετρητικών διατάξεων σε αυτοπαραγωγό ενεργειακού συμψηφισμού [14]

Η μετρητική διάταξη θα συνοδεύεται από μονάδα επικοινωνίας (modem) με τον βοηθητικό της εξοπλισμό (τροφοδοτικό, καλώδιο σύνδεσης μετρητή-μονάδας επικοινωνίας και κεραία) συμβατή με τον τύπο του μετρητή παραγωγής (Μετρητής 1) καθώς και οποιοσδήποτε επιπρόσθετος εξοπλισμός που χρειάζεται βάσει ΔΕΔΔΗΕ [14].

3.2 Χωροθέτηση φωτοβολταϊκών μονάδων

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια επηρεάζεται άμεσα από τον τρόπο εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων. Σε κάθε περίπτωση τρόπων στήριξης ο βέλτιστος προσανατολισμός (γωνία αζιμούθιου) και η βέλτιστη κλίση πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε η γωνία πρόσπτωσης της

ηλιακής ακτινοβολίας να είναι κάθετη στις Φ/Β μονάδες. Για τα ελληνικά δεδομένα, ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι ο νότιος, ωστόσο η βέλτιστη κλίση των μονάδων διαφέρει σε κάθε περιοχή και ανά μήνα.

Ωστόσο, είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ Φ/Β σειρών. Η απόσταση αυτή καθορίζει την επίδραση της σκίασης μεταξύ δυο διαδοχικών Φ/Β σειρών. Συγκεκριμένα για εγκατάσταση μονάδων σε σταθερές βάσεις, όπου υπάρχουν διαδοχικές παράλληλες σειρές (Εικόνα 3.4), η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σειρών ορίζεται από τη σχέση

$$d_m = \left(\frac{d_c}{h_m}\right) * h_m + g_m * \cos(\beta_s) \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

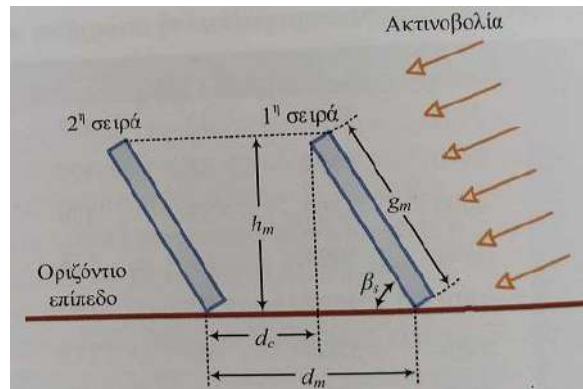
όπου

β_s : η γωνία κλίσης κάθε σειράς Φ/Β μονάδων.

g_m : το πλάγιο ύψος των σειρών (τοποθέτηση σε οριζόντιο επίπεδο).

h_m : το κάθετο ύψος κάθε σειράς Φ/Β μονάδων.

d_c : η κενή απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σειρών.



Εικόνα 3.4: Χωροθέτηση Φ/Β μονάδων με σταθερές βάσεις σε παράλληλες σειρές και οριζόντιο επίπεδο [12]

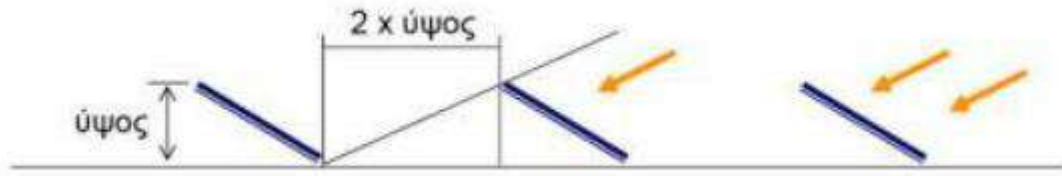
Βάσει του παραπάνω τύπου ο λόγος $\frac{d_c}{h_m}$ προκύπτει από διαγράμματα γεωγραφικού πλάτους των περιοχών, η τιμή του οποίου μπορεί να αυξάνεται απότομα για γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο από 40° [12].

Εναλλακτικός εμπειρικός υπολογισμός ελάχιστης απόστασης είναι να ληφθεί υπόψη, αντί για το λόγο $\left(\frac{d_c}{h_m}\right)$ στην εξίσωση 3.5, τουλάχιστον δύο φορές το κάθετο ύψος κάθε σειράς

όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5 [11], δηλαδή

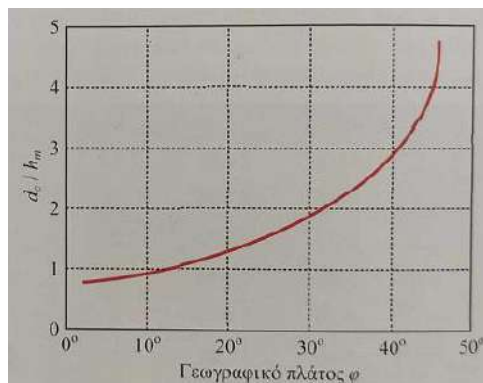
$$d_m = 2 * h_m + g_m * \cos (\beta_s)$$

Εξίσωση 3.6



Εικόνα 3.5: Αναπαράσταση εμπειρικού υπολογισμού ελάχιστης απόστασης μεταξύ Φ/Β σειρών [11]

Ο λόγος $\frac{d_c}{h_m}$ μπορεί να υπολογιστεί μόνο με χρήση διαγράμματος από βιβλιογραφικές πηγές λαμβάνοντας υπόψη το κατάλληλο γεωγραφικό πλάτος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Ενδεικτικό διάγραμμα υπολογισμού λόγου $\frac{d_c}{h_m}$ [12]

Στην περίπτωση των trackers ή γενικότερα ανομοιογενούς εδάφους στον χώρο εγκατάστασης η ελάχιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών είναι πολυπλοκότερη. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει τα ζεύγη ανά δύο σειρών να εξεταστούν ξεχωριστά προσομοιώνοντας τις σκιάσεις μεταξύ τους κατά την περίοδο των εντονότερων σκιάσεων.

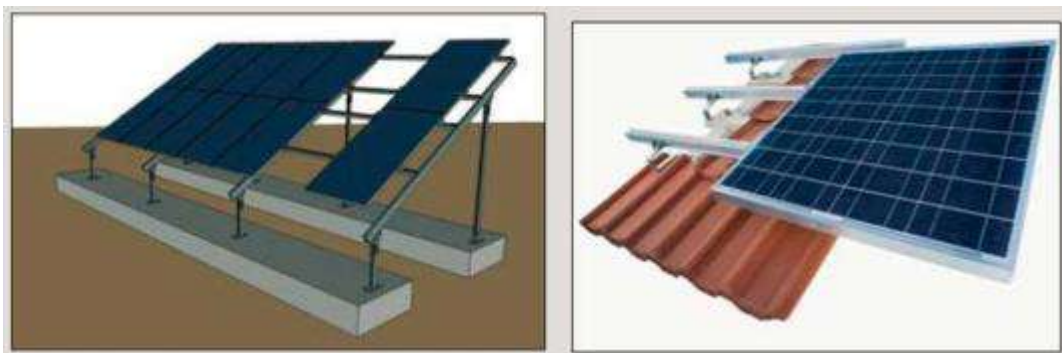
Τέλος, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οδεύσεις καλωδίων και δρόμων εργασιών συντήρησης. Συγκεκριμένα για την όδευση των καλωδίων θα τοποθετηθούν κανάλια τα οποία τοποθετούνται κάτω από τις βάσεις, συλλέγοντας τα καλώδια και οδεύοντας στον χώρο εγκατάστασης αντιστροφών ή κεντρικού πίνακα. Για ευκολία οι δρόμοι εργασιών συντή-

ρησης θα δημιουργούνται παράλληλα των οδεύσεων καλωδίων για την ευκολότερη συντήρηση του εξοπλισμού [11].

3.3 Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών μονάδων

Η έδραση των Φ/Β μονάδων επί εδάφους επιτυγχάνεται συνήθως με δυο τρόπους:

- Με σταθερές βάσεις, δηλαδή βάσεις σταθερής κλίσης ως προς την οριζόντιο (Εικόνα 3.6).
- Με ηλιοπαρακολουθητές (trackers), δηλαδή συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (Εικόνα 3.7) [11].



Εικόνα 3.6: (Αριστερά) Σταθερές βάσεις με σκυροδέτηση, (Δεξιά) Σταθερές βάσεις για σκεπές [11]



Εικόνα 3.7: Ηλιοπαρακολουθητής [11]

3.3.1 Σταθερές βάσεις

Οι σταθερές βάσεις είναι ο απλούστερος τρόπος έδρασης Φ/Β μονάδων. Στις σταθερές βάσεις οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των μονάδων κατά το μεσημέρι όπου έχουμε τη μέγιστη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Ανάλογα με τις ανάγκες παραγωγής, η κλίση τους διαφέρει ως προς τη μέση ετήσια, την χειμερινή ή την καλοκαιρινή παραγωγή. Η κατασκευή σταθερών βάσεων περιλαμβάνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα.
- Οι βάσεις τοποθετούνται επί του εδάφους είτε με σκυροδέτηση είτε απευθείας με εδαφόμπτυξη.
- Οι σταθερές βάσεις αποτελούνται συνήθως από τεμάχια τα οποία συναρμολογούνται επί το έργω.

3.3.2 Ιχνηλάτες

Οι ιχνηλάτες ή trackers αποτελούν πολύπλοκες, δαπανηρές αλλά αποδοτικότερες κατασκευές. Οι trackers είναι ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, ώστε να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου. Οι μονάδες στηρίζονται στο μεταλλικό πλέγμα του tracker, το οποίο μπορεί να στηρίξει μία ή πολλές δεκάδες φωτοβολταϊκές μονάδες. Οι trackers διακρίνονται σε:

- Μονού άξονα: διακρίνονται σε 1) οριζόντιου μονού άξονα (horizontal single axis tracker), όπου ο στρεφόμενος άξονας ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση βορρά - νότου, 2) σε κάθετου μονού άξονα (vertical single axis tracker), όπου ο άξονας περιστρέφεται από την ανατολή έως τη δύση με ρυθμιζόμενη κλίση ανάλογα με την εποχή του έτους και 3) σε μονού άξονα με κλίση του άξονα περιστροφής ως προς την επιφάνεια του εδάφους (tilted single axis tracker), όπου ο άξονας ευθυγραμμίζεται με τον πολικό αστέρα ώστε η κλίση του άξονα να είναι ίση με το γεωγραφικό

πλάτος του τόπου εγκατάστασης.

- Διπλού άξονα, όπου παρακολουθούν τόσο την γωνία αζιμούθιου όσο και τη γωνία ανύψωσης του ήλιου, επιτυγχάνοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα παραγωγής ενέργειας.

Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δυο τρόπους:

- Με ηλιακούς αισθητήρες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου
- Μέσω λογισμικού, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους για τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα [11], [12].

3.4 Σκίαση και διάγραμμα μηνιαίων τροχιών ήλιου

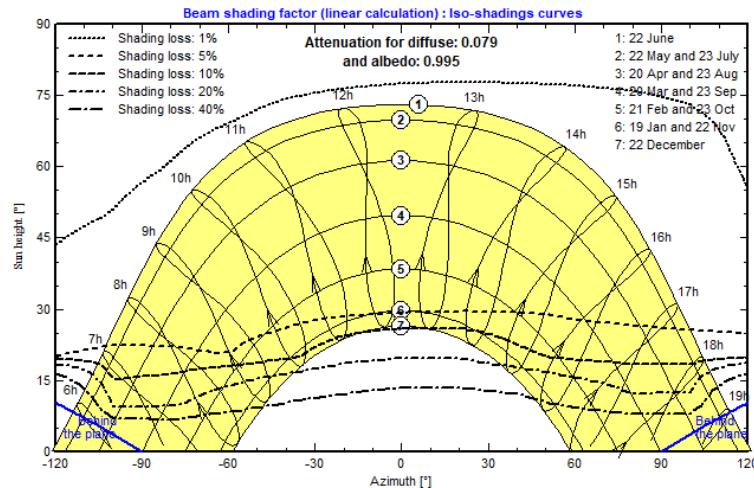
Η σκίαση αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι επίδρασης της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά. Ο τρόπος εγκαταστάσεις πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε τυχόν περιβάλλοντα εμπόδια δε θα προκαλούν σκιάσεις από την ηλιακή ώρα 9:00 έως την ηλιακή ώρα 15:00, οποιαδήποτε ημέρα του έτους. Οι εντονότερες σκιάσεις παρατηρούνται στους χειμερινούς μήνες, με αποκορύφωμα το χειμερινό ηλιοστάσιο (22 Δεκεμβρίου) [12].

Για την αξιολόγηση των σκιάσεων χρησιμοποιείται το διάγραμμα του ηλιακού χάρτη της περιοχής. Στον ηλιακό χάρτη αποτυπώνεται η θέση του ήλιου κάθε μέρα ή μήνα του έτους και σε οποιαδήποτε ώρα. Πάνω στον ηλιακό χάρτη της περιοχής σχεδιάζεται η επιφάνεια σκίασης, βάσει των παρακάτω:

- Με αναφορά το κέντρο περιοχής εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος, διατυπώνονται τα εμπόδια από τη διεύθυνση της ανατολής μέχρι τη δύση. Ο νότος αντιστοιχεί στις 0°.
- Σε κάθε εμπόδιο προσδιορίζεται το ύψος του σε μοίρες.

- Σημειώνεται πάνω στον ηλιακό χάρτη το ύψος σε μοίρες κάθε εμποδίου, ως προς τη γωνία αζιμούθιου που βρίσκεται.

Στην Εικόνα 3.8 σχεδιάζεται πάνω στον ηλιακό χάρτη τα ποσοστά σκίασης ενδεικτικής περιοχής εγκατάστασης [12].



Εικόνα 3.8: Ενδεικτική αναπαράσταση ηλιακού χάρτη περιοχής εγκατάστασης

Η κατασκευή του ηλιακού χάρτη της περιοχής πραγματοποιείται αυτόματα μέσω λογισμικών και βάσεων δεδομένων, όπως της Meteonorm, όπου παρέχει μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα για οποιαδήποτε τοποθεσία στη γη. Όσο αφορά τη βάση Meteonorm, τα δεδομένα καλύπτουν:

- Παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance ή GHI)
- Διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία (Diffused Horizontal Irradiance ή DHI)
- Ταχύτητα ανέμου
- Θερμοκρασία κ.λπ. [15].

3.5 Ενδεικτική μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου με τη χρήση του λογισμικού PVSYST

3.5.1 Το λογισμικό PVSYST

Το PVSYST είναι το πλέον διαδεδομένο λογισμικό σχεδιασμού Φ/Β συστημάτων. Παρέχει στον μηχανικό αυτόματο υπολογισμό των απαιτήσεων του συστήματος καθώς υποστηρίζεται από βάσεις δεδομένων μετεωρολογικών συνθηκών της τοποθεσίας εγκατάστασης, δυνατότητα επιλογής της γεωγραφικής περιοχής της εγκατάστασης καθώς και η δυνατότητα επιλογής πραγματικών συσκευών και μονάδων από κατασκευαστές, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων είναι αποθηκευμένα στις βιβλιοθήκες του λογισμικού. Έχει επίσης τη δυνατότητα του σχεδιασμού των τρισδιάστατων εμποδίων σκίασης, το κατάλληλο διάγραμμα ηλιακού χάρτη περιοχής εγκατάστασης και προσομοίωση σκίασης, ευνοώντας χειροκίνητο σχεδιασμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δυο Φ/Β σειρών. Τέλος, περιλαμβάνει επιπρόσθετες λειτουργίες όπως τις απώλειες του συστήματος, την αυτοκατανάλωση, την αποθήκευση με συσσωρευτές κ.λπ.. Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση PVSYST 8.0.6.

3.5.2 Δεδομένα προσομοίωσης και αποτελέσματα

Για την παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο (grid-connected) με έδραση Φ/Β μονάδων σταθερών βάσεων απευθείας εδαφόμπτυξης.

Η τοποθεσία βρίσκεται στην Ελιά Σιθωνίας Χαλκιδικής. Από τον ιδιοκτήτη έχει δοθεί η τοπογραφική αποτύπωση του γεωτεμάχιου καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες (Εικόνα Π1 παραρτήματος). Στην Εικόνα 3.9 και Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται η τοπογραφική αποτύπωση και δορυφορική απεικόνιση του γεωτεμάχιου αντίστοιχα.

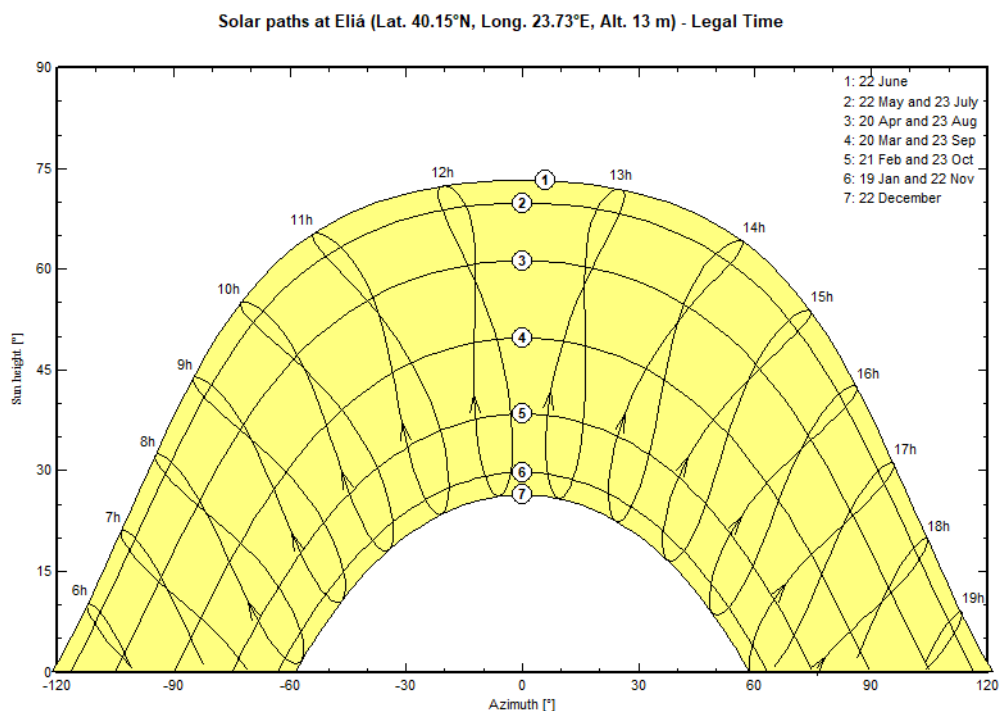


Εικόνα 3.9: Τοπογραφική αποτύπωση ενδεικτικού γεωτεμάχιου



Εικόνα 3.10: Δορυφορική απεικόνιση ενδεικτικού γεωτεμάχιου

Η επιλογή του τόπου μέσω προγράμματος θα δώσει αυτόματα και τον ηλιακό χάρτη του βάσει δεδομένων Meteonorm όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Η επιλογή της πραγματικής ώρας πραγματοποιείται πάνω στις κάθετες καμπύλες και για ορισμένη ημέρα του χρόνου προκύπτει το ύψος που βρίσκεται ο ήλιος καθώς και το αζιμούθιο.

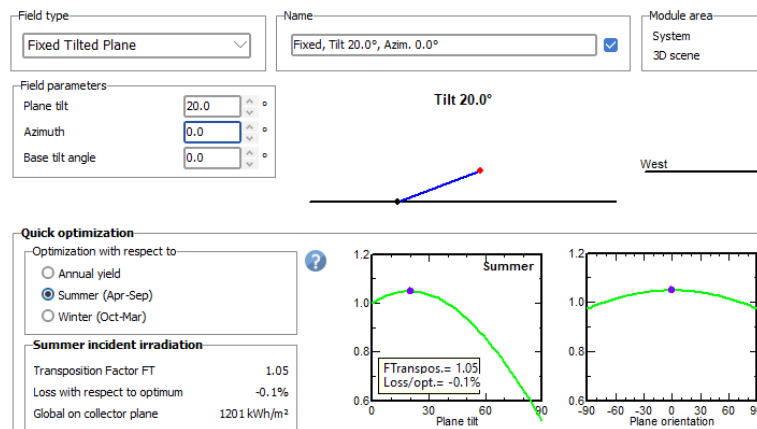


Εικόνα 3.11: Ηλιακός χάρτης ενδεικτικού γεωτεμάχιου

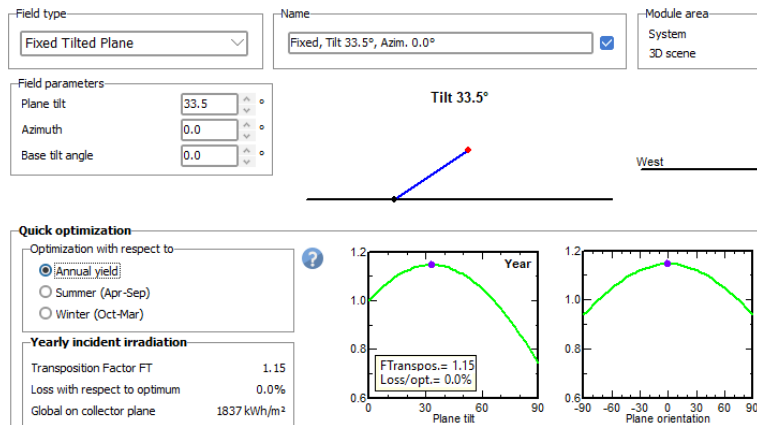
Ταυτόχρονα παράγονται μέσω Meteoporm και το αρχείο δεδομένων καιρού τα οποία συμπεριλαμβάνονται στην Εικόνα Π1 του παραρτήματος.

Στην καρτέλα προσανατολισμού των Φ/Β μονάδων δίνονται οι επιλογές της κλίσης επιπέδου των μονάδων, η αζιμουθιακή γωνία και η γωνία κλίσης της βάσης της μονάδας. Καθώς το γεωτεμάχιο δεν ακολουθεί κάποια κλίση, τα πεδία ενδιαφέροντος αποτελούν η κλίση επιπέδου των μονάδων και η αζιμουθιακή γωνία. Η βελτιστοποίηση παραγωγής μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε:

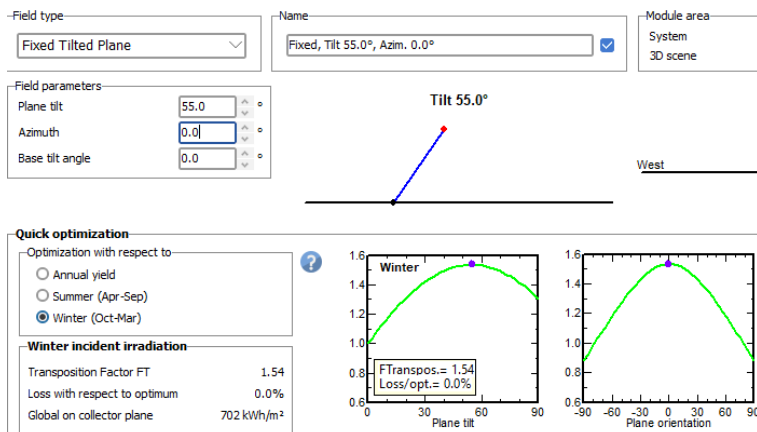
- Για τη θερινή περίοδο μεταξύ Απριλίου – Σεπτεμβρίου με κλίση 20° (Εικόνα 3.12).
- Για όλους τους μήνες (annual yield) με κλίση 33.5° (Εικόνα 3.13).
- Για τη χειμερινή περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου – Μαρτίου με κλίση 55° (Εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για τη θερινή περίοδο μεταξύ Απριλίου – Σεπτεμβρίου



Εικόνα 3.13: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για όλους τους μήνες



Εικόνα 3.14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης κλίσης μονάδων για τη χειμερινή περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου – Μαρτίου

Λόγω της αυξημένης παραγωγής και ζήτησης της θερινής περιόδου, ο σχεδιασμός των Φ/Β μονάδων θα πραγματοποιηθεί με επιλογή της κλίσης μονάδων 20°.

Στην καρτέλα συστήματος επιλέγονται:

- Ο τύπος της Φ/Β μονάδας κατασκευαστών.
- Ο τύπος του αντιστροφέα κατασκευαστών.
- Η σχεδιασμένη εφικτή ισχύς της περιοχής.
- Η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης της περιοχής.

Αρχικά η μόνη αναγκαία επιλογή δεδομένων είναι ο τύπος της Φ/Β μονάδας, ο τύπος του αντιστροφέα των κατασκευαστών και η επιλογή χωρίς διαστασιολόγηση (No sizing), καθώς δεν έχει σχεδιαστεί η τρισδιάστατη αποτύπωση της περιοχής εγκατάστασης στην καρτέλα Κοντινές Σκιάσεις (Near Shadings). Επιλέγονται οι παρακάτω συσκευές:

- Μονάδα μονοκρυσταλλικού πυριτίου 450Wp, 28V της AEG με μήκος 1762 mm, πλάτος 1134 mm, επιφάνειας 1,998 m² (Εικόνα Π2 παραρτήματος).
- Αντιστροφέας 15kW, 180-850V, τριφασικής εξόδου 400V, 50/60Hz με 2 εισόδους MPPT (Εικόνα Π3 παραρτήματος).

Απαραίτητες προϋποθέσεις κατά την διαστασιολόγηση των strings είναι οι παρακάτω:

- Η ελάχιστη τάση λειτουργίας της συστοιχίας Φ/Β μονάδων (V_{mpp} , 60°C) θα είναι πάνω από την ελάχιστη λειτουργίας εισόδου του αντιστροφέα (V_{min} , εύρους MPPT, Εικόνα 3.15)
- Η μέγιστη τάση λειτουργίας της συστοιχίας (V_{mpp} , 20°C) θα είναι κάτω από τη μέγιστη τάση λειτουργίας του αντιστροφέα (V_{max} , εύρους MPPT, Εικόνα 3.18)
- Η μέγιστη απόλυτη τάση συστοιχίας (V_{OC} , -10°C) θα είναι κάτω από την μέγιστη απόλυτη τάση εισόδου του αντιστροφέα (Εικόνες 3.16 και 3.18)
- Η μέγιστη απόλυτη τάση συστοιχίας (V_{OC} , -10°C) δε θα υπερβαίνει τη μέγιστη τάση συστήματος που καθορίζεται για τη Φ/Β μονάδα (Εικόνα 3.17)

Για τους λόγους που έγιναν αναφορά παραπάνω, η εκτίμηση μονάδων σε σειρά θα είναι μεταξύ από 6 έως 23.

Nb. of inverters: 1, Operating voltage: 180-850 V, Input maximum voltage: 1000 V, Global Inverter's power: inverter with 2 MPPT

Design the array
Number of modules and strings
 Mod. in series: 5, Nb. strings: 1, between 6 and 23

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 153 V
 Vmpp (20°C): 171 V
 Voc (-10°C): 213 V

Εικόνα 3.15: Υποδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε τάση εισόδου μικρότερη της ελάχιστης λειτουργίας του αντιστροφέα (Περίπτωση 1)

Nb. of inverters: 1, Operating voltage: 180-850 V, Input maximum voltage: 1000 V, Global Inverter's power: inverter with 2 MPPT

Design the array
Number of modules and strings
 Mod. in series: 24, Nb. strings: 1, between 6 and 23

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 734 V
 Vmpp (20°C): 820 V
 Voc (-10°C): 1024 V

Εικόνα 3.16: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη απόλυτη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης απόλυτης τάσης εισόδου του αντιστροφέα (Περίπτωση 3)

Design the array
Number of modules and strings
 Mod. in series: 18, Nb. strings: 1, between 6 and 23

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 1101 V
 Vmpp (20°C): 1230 V
 Voc (-10°C): 1536 V

Maximum Array Voltage
 Absolute maximum voltage of the Array in any conditions (i.e. Voc at lowest possible ambient temperature).
 Maximum voltage IEC: 1500 V
 Maximum voltage UL (US): 1500 V

Εικόνα 3.17: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη απόλυτη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης του συστήματος της Φ/Β μονάδας (Περίπτωση 4)

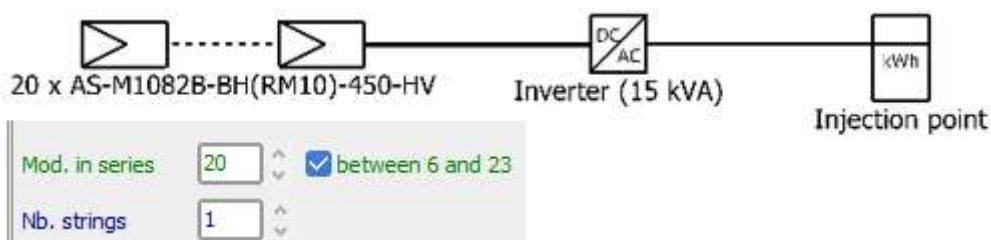
Nb. of inverters: 1, Operating voltage: 180-850 V, Input maximum voltage: 1000 V, Global Inverter's power: inverter with 2 MPPT

Design the array
Number of modules and strings
 Mod. in series: 25, Nb. strings: 1, between 6 and 23

Operating conditions
 Vmpp (60°C): 765 V
 Vmpp (20°C): 854 V
 Voc (-10°C): 1067 V

Εικόνα 3.18: Υπερδιαστασιολόγηση μονάδων οδηγεί σε μέγιστη τάση μεγαλύτερη της μέγιστης τάσης εισόδου του αντιστροφέα (Περίπτωση 2 και 3)

Τέλος, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης του μονογραμμικού διαγράμματος της εγκατάστασης χωρίς τις προστασίες και τους τύπους καλωδιώσεων. Ενδεικτικά το μονογραμμικό διάγραμμα πάνω σε έναν αντιστροφέα έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με την Εικόνα 3.19.



Εικόνα 3.19: Το μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης για 1 string 20 Φ/Β μονάδων συνδεδεμένων σε 1 αντιστροφέα βάσει προεπιλογών

Στην καρτέλα Ορίζοντας δημιουργείται αυτόματα μέσω Meteonorm οι σκιάσεις του ορίζοντα, σημειωμένες πάνω στον ηλιακό χάρτη του ενδεικτικού γεωτεμάχιου (Εικόνα Π4 παραρτήματος).

Στην καρτέλα Κοντινών Σκιάσεων θα σχεδιαστούν τα κοντινά εμπόδια που πιθανώς δημιουργούν σκιάσεις στο Φ/Β σύστημα. Κατά τη αυτόματη τοποθέτηση του γεωτεμάχιου με το PVSYST, ορίζεται αυτόματα ο προσανατολισμός (εφόσον η τοποθέτηση βασιστεί στα δορυφορικά δεδομένα). Κατά την διερεύνηση του γεωτεμάχιου με φυσική παρουσία, παρατηρούνται τα εξής εμπόδια:

- Θαμνώδες όριο μήκους ~11 m και ύψους 1 m με οικία επίπεδης στέγης 6 m (Εικόνα 3.20)
- Οικία με κεκλιμένη στέγη 3 m κλίσης 20° και δέντρο 6 m (Εικόνα 3.21)
- Θαμνώδη όρια μεταβλητού συνολικού μήκους ~37 m ύψους 2-2.50 m μπροστά σε ξενοδοχείο ύψους 6 m κλίσης στέγης 20° (Εικόνα 3.22)
- Θαμνώδες όριο μήκους ~80 m και ύψους 3 m (Εικόνα 3.23)
- Δέντρο ύψους 7 m στο όριο γεωτεμάχιου και δρόμου (Εικόνα 3.24)

- Θαμνώδες όριο μήκους 97 m και μεταβλητού ύψους 0-3 m με οικία επίπεδης στέγης 6 m (Εικόνα 3.25)
- Λόφος μέγιστου ύψους 3 m στο όριο γεωτεμάχιου και δρόμου (Εικόνα 3.26)



Εικόνα 3.21: Νοτιοδυτικό εμπόδιο 2



Εικόνα 3.20: Νοτιοδυτικό εμπόδιο 1



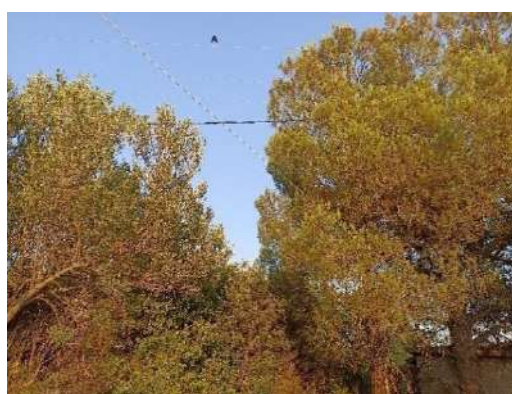
Εικόνα 3.23: Βορειοδυτικό εμπόδιο 1



Εικόνα 3.22: Βορειοδυτικό εμπόδιο 2



Εικόνα 3.25: Νοτιοανατολικό εμπόδιο



Εικόνα 3.24: Ανατολικό εμπόδιο



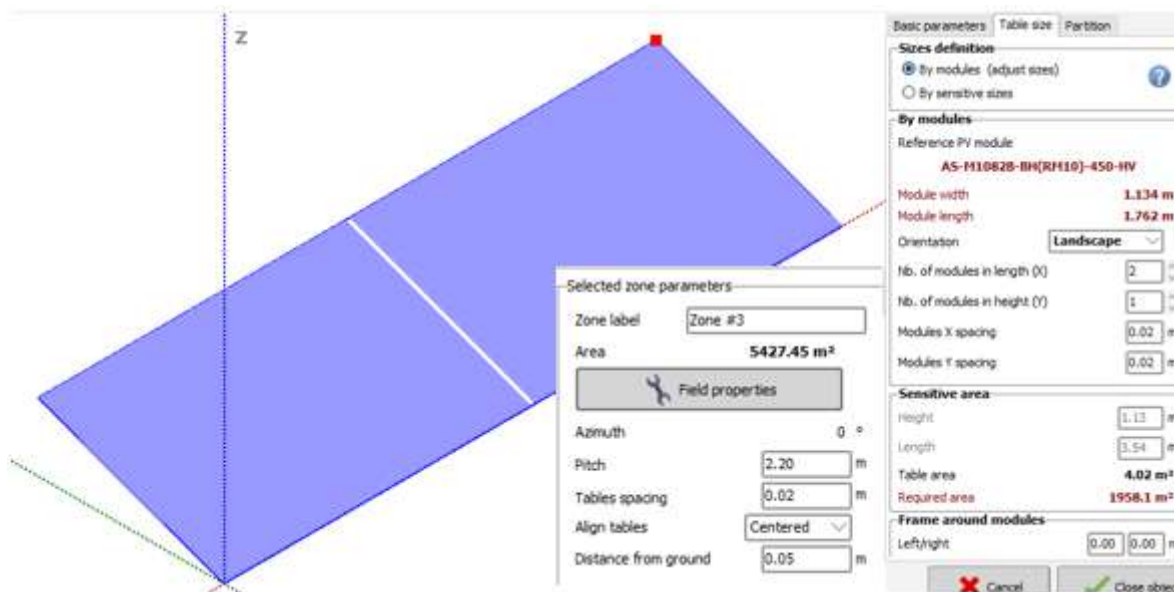
Εικόνα 3.26: Βορειοανατολικό εμπόδιο

Με βάση τα εμπόδια που έχουν προαναφερθεί έχει σχεδιαστεί η τρισδιάστατη απεικόνιση του γεωτεμάχιου στο PVSYST (Εικόνα 3.27) υπολογισμένης συνολικής επιφάνειας $5427,45 \text{ m}^2$ με ωφέλιμη επιφάνεια που θα υπολογιστεί κατά την τοποθέτηση των Φ/Β μονάδων. Πάνω στην τρισδιάστατη απεικόνιση σχεδιάστηκαν οι κάθετοι και οριζόντιοι δρόμοι εργασιών καθώς και η απαγορευμένη περιοχή σχεδιασμού όπου θα τοποθετηθούν οι διατάξεις προστασίας του Φ/Β συστήματος από την πλευρά του παραγωγού.



Εικόνα 3.27: Τρισδιάστατη απεικόνιση γεωτεμάχιου στο λογισμικό

Η τοποθέτηση των Φ/Β μονάδων θα πραγματοποιηθεί ανά δυο ως «πίνακες» με ενδιαμέσους συγκρατητές μονάδων 2 cm. Η προηγούμενη επιλογή θα πρέπει να αναφερθεί τόσο στην καρτέλα των «πινάκων» όσο και στην καρτέλα της ζώνης σχεδιασμού (Εικόνα 3.28). Οι τρισδιάστατοι «πίνακες» που θα τοποθετηθούν αναπαριστούν τις κατασκευές σταθερών βάσεων.



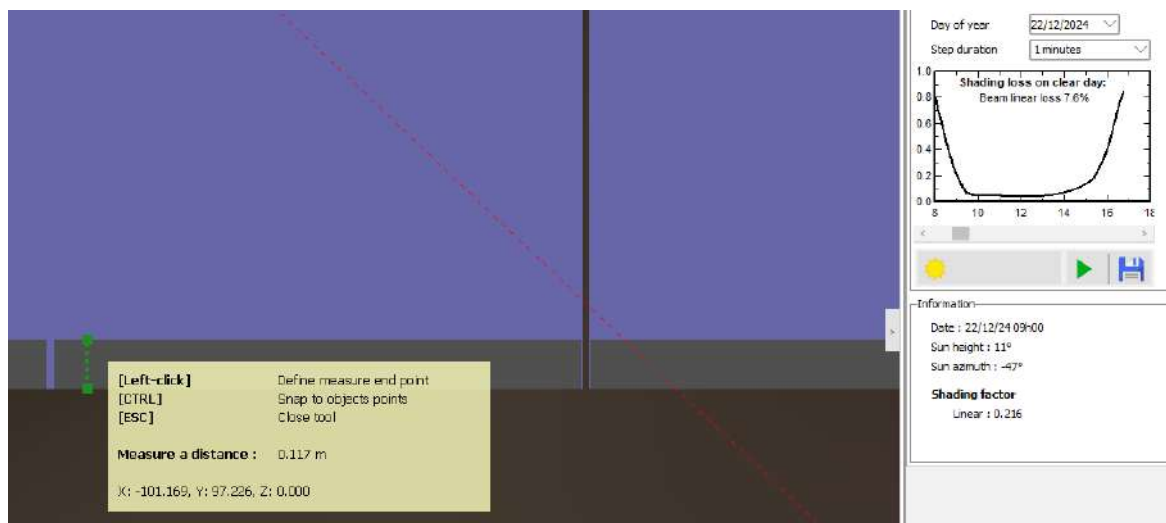
Εικόνα 3.28: Τρόπος τοποθέτηση μονάδων σε εικονικούς «πίνακες»

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών (Pitch), μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$h_m = 1,762 * \cos(20^\circ) \approx 1,656 \text{ m και}$$

$$d_m = pitch = 3 * h_m = 4,968 \text{ m (εξίσωση 3.6)}$$

ή σύμφωνα με τις εντονότερες σκιάσεις του χειμερινού ηλιοστάσιου (22 Δεκεμβρίου) παρατηρώντας από τις 9:00 έως τις 15:00 στην τρισδιάστατη προσομοίωση του PVSYST και ρυθμίζοντας ανάλογα ώστε να εξουδετερωθούν. Το βήμα της προσομοίωσης θα είναι ανά λεπτό. Για ελάχιστη προεπιλεγμένη απόσταση μεταξύ δύο σειρών 2,20 m στις 9:00 του χειμερινού ηλιοστάσιου παρατηρείται μερική σκίαση 0,117 m (Εικόνα 3.29). Προσθέτοντας στην ελάχιστη απόσταση 0,12 cm έχουμε 2,32 m δε θα εκμηδενιστούν οι σκιάσεις αυτές καθώς το γεωγραφικό πλάτος είναι μεγαλύτερο από 40° και επίσης δεν υπάρχει διάγραμμα υπολογισμού λόγου $\frac{d_c}{h_m}$ (Σχήμα 3.3) για το γεωτεμάχιο αυτό.



Εικόνα 3.29: Διερεύνηση σκιάσεων πάνω στις Φ/Β μονάδες

Επαναλαμβάνοντας την προσομοίωση ξεκινώντας από ελάχιστη απόσταση 2,20 m και επιλέγοντας εμπειρικά βήμα 0,1 m, δημιουργείται ο Πίνακας 3.1 δοκιμών.

Πίνακας 3.1: Δοκιμές ελάχιστης απόστασης

PITCH (m)	Σκίαση πάνω στο στη μονάδα (m) στις 9:00, 22/12/2024
2,20	0,117
2,30	0,079
2,40	0,035
2,50	0

Για τη μέγιστη δυνατή τοποθέτηση Φ/Β μονάδων θα επιλεχθεί ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σειρών (Pitch) 2,5 m.

Παρατηρείται ότι για το χειμερινό ηλιοστάσιο (22 Δεκεμβρίου) τα εμπόδια που κυρίως προκαλούν τις εντονότερες σκιάσεις είναι το δέντρο και οι οικίες καθώς δημιουργούν σκίαση σε μεγάλο ποσοστό της διάρκειας της προσομοίωσης. Στις Εικόνες 3.30-3.34 παρουσιάζονται οι προσομοιωμένες σκιάσεις για την ημερομηνία 22/12/2024.



Εικόνα 3.30: Επίδραση σκιάσεων στις 9:00, 22/12/2024



Εικόνα 3.31: Επίδραση σκιάσεων στις 10:30, 22/12/2024



Εικόνα 3.32: Επίδραση σκιάσεων σε αζιμούθιο ήλιου 0°, 22/12/2024

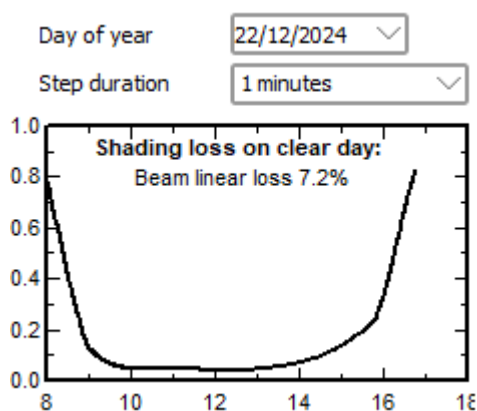


Εικόνα 3.33: Επίδραση σκιάσεων στις 13:30, 22/12/2024



Εικόνα 3.34: Επίδραση σκιάσεων στις 15:00, 22/12/2024

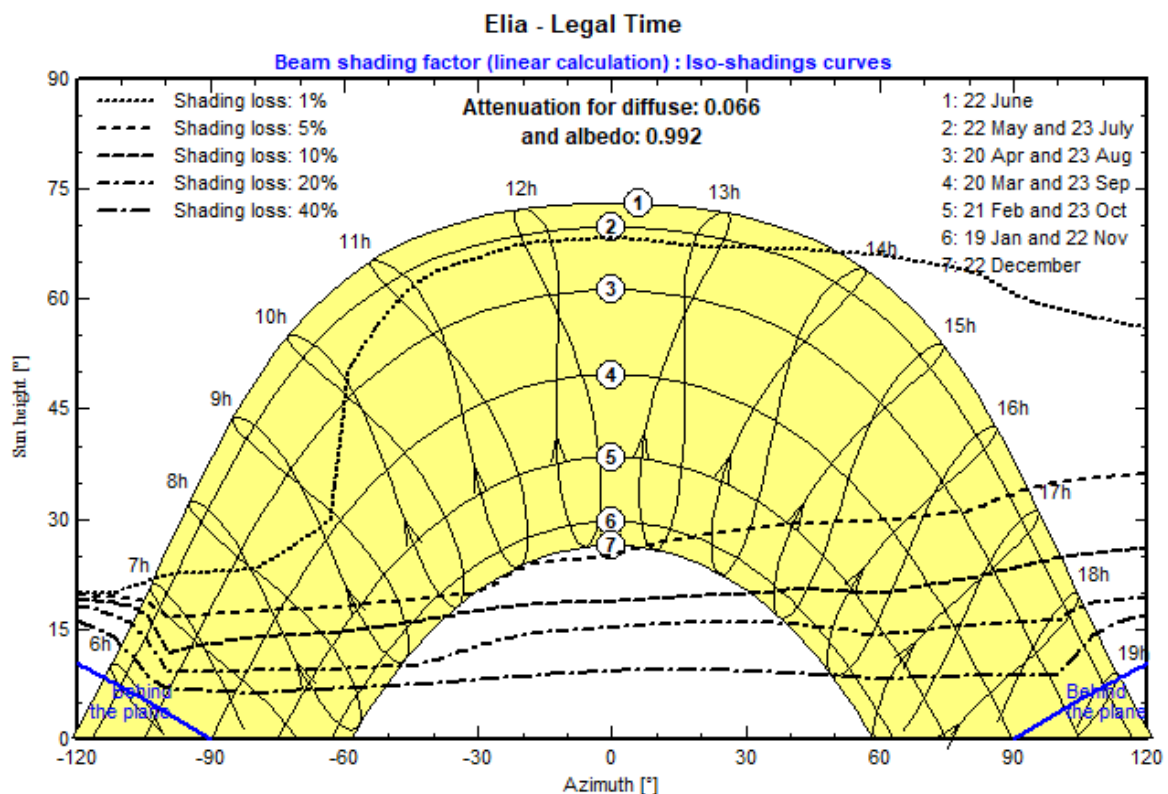
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται και το διάγραμμα απωλειών λόγω κοντινών σκιάσεων ανά ώρα στις 22/12/2024.



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα απωλειών λόγω κοντινών σκιάσεων

Κατά την εξαγωγή του ηλιακού χάρτη με κοντινή σκίαση, είναι δυνατό να ερευνηθούν οι απώλειες για τη θερινή περίοδο, όπου είναι και ο λόγος επιλογής της κλίσης 20° της Φ/Β μονάδας. Όπως φαίνεται στην καμπύλη 4 και πάνω της Εικόνα 3.35, υπάρχουν:

- απώλειες πάνω από 1% σε μεγάλο ποσοστό της θερινής περιόδου από τις 11:00 μέχρι τις 15:00.
- απώλειες κοντά στο 1% από τις 9:00 μέχρι τις 10:00, οι οποίες αυξάνονται από τις 10:00 και μετά λόγω των νοτιοδυτικών, νοτιοανατολικών και ανατολικών εμποδίων στο γεωτεμάχιο.
- απώλειες τουλάχιστον 1% σε μεγάλο ποσοστό της θερινής περιόδου από τις 13:00 έως τις 15:00.



Εικόνα 3.35: Ηλιακός χάρτης με κοντινή σκίαση

Έχοντας σχεδιάσει και την τρισδιάστατη περιοχή εγκατάστασης πάνω στο γεωτεμάχιο, δίνεται και αυτόματα η μέγιστη ωφέλιμη επιφάνεια εγκατάστασης Φ/Β μονάδων, όπου θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του αριθμού των μονάδων, των κλάδων (strings) και των αντιστροφέων. Η μέγιστη επιφάνεια που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς είναι 1822 m^2 (Εικόνα 3.36).

Orientation	Fixed, Tilt 20.0°, Azim. 0.0°		
	PV system 3D scene		
Number of sub-arrays	456	Associated 3D tables	
PV modules / tables area	1822 m ²	Size of PV modules	1.76 x 1.13 m
Number of PV modules	912		

Εικόνα 3.36: Αποτελέσματα τρισδιάστατης σχεδίασης Φ/Β εγκατάστασης

Επιστρέφοντας στην καρτέλα του συστήματος, χρησιμοποιείται η μέγιστη επιφάνεια που έχει βρεθεί από την σκίαση (Εικόνα 3.37). Για επιφάνεια 1822 m^2 το PVSYST θα δώσει αυτόματα τον αριθμό Φ/Β μονάδων σε σειρά, τον αριθμό των κλάδων (strings) καθώς και τον αριθμό των αντιστροφέων που μπορούν να τοποθετηθούν για τη μέγιστη παραγωγή

ενέργειας.

The screenshot displays the PVSYST software interface for a PV array design. The 'Sub-array' section shows the orientation as 'Fixed, Tilt 20.0°, Azim. 0.0°'. The 'Select the PV module' section shows the selection of 'AEG - AS-M108JB-6H(RM10)-450-H' with a power of 450 Wp. The 'Select the inverter' section shows the selection of 'AEG - AS-IC02-15000-2 (15 kW, Three-phase, 2 M)' with a power of 15 kW. The 'Design the array' section shows the number of modules as 900 and the number of strings as 45. The 'Global system summary' section provides a overview of the system parameters.

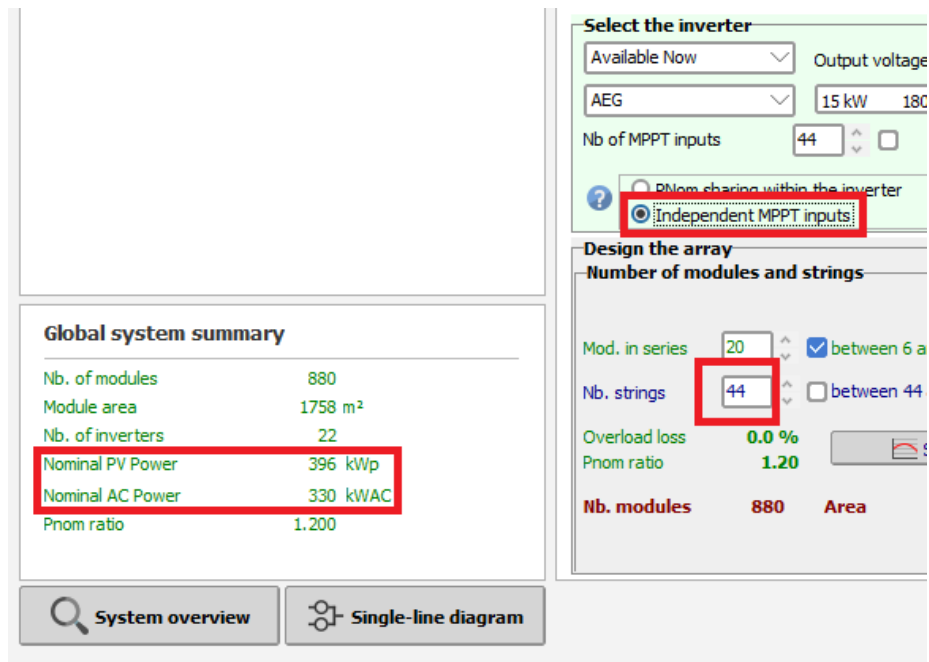
Global system summary	
Nb. of modules	900
Module area	1798 m²
Nb. of inverters	22
Nominal PV Power	405 kWp
Nominal AC Power	330 kWAC
Pnom ratio	1.227

Εικόνα 3.37: Τελικά αποτελέσματα συστήματος για δεδομένη επιφάνεια

Η επιλογή PNOM sharing with the inverter, σύμφωνα με την Εικόνα 3.37, χρησιμοποιείται για τη δυνατότητα διαμοιρασμού της συνολικής ονομαστικής ισχύς εξόδου μεταξύ διαφορετικών MPPT των αντιστροφών, καθώς το PVSYST υποθέτει ότι ένας αντιστροφέας με N εισόδους MPPT συμπεριφέρεται ως N πανομοιότυποι αντιστροφείς, με ονομαστική ισχύ

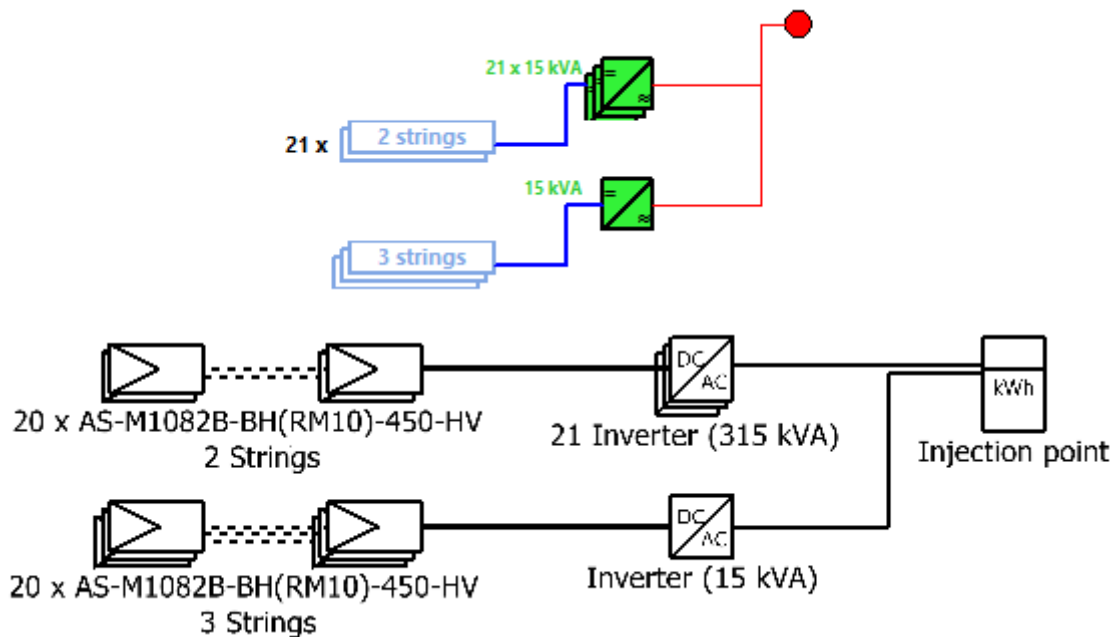
$$P_{NOM,MPPT} = \frac{P_{NOM,αντιστροφή}}{N} \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερφόρτωσης. Καθώς κάθε αντιστροφέας δέχεται από 2 strings, $22 \times 2 = 44$ strings είναι κανονικά συνδεδεμένα ενώ υπολείπεται 1 string που μπορεί να δημιουργήσει υπερφόρτωση εάν συνδεθεί μαζί με άλλο string σε ίδια MPPT είσοδο και συνολικά η είσοδος αυτή ξεπερνά τα $15/2 = 7,5$ kW. Εναλλακτικά, θα πρέπει να αφαιρεθεί το επιπρόσθετο string με αποτέλεσμα μικρότερη παραγωγή ισχύος, γεγονός που φαίνεται στην Εικόνα 3.38.



Εικόνα 3.38: Περίπτωση όπου κάθε MPPT είσοδο δέχεται ένα μόνο string

Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται η αναπαράσταση και το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος. Σε 21 αντιστροφείς συνδέονται σε κάθε MPPT είσοδό τους από 1 string ενώ σε 1 αντιστροφή συνδέονται 3 strings εφόσον δόθηκε η επιλογή διαμοιρασμού ισχύος.



Σχήμα 3.5: Τελικό μονογραμμικό διάγραμμα και αναπαράσταση συστήματος

Κατόπιν σχεδιάζονται οι τοποθετήσεις των strings για κάθε αντιστροφέα με μέριμνα την τοπικότητα των Φ/Β μονάδων. Οι όμοιοι χρωματισμοί ανήκουν σε διαφορετικά strings, για αυτό το λόγο δεν εμφανίζονται στον ίδιο χώρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.39.



Εικόνα 3.39: Τοποθέτηση των strings

Στην καρτέλα Προσομοίωση, δίνεται δυνατότητα εξαγωγής τελικών αποτελεσμάτων παραγωγής:

- Ο Πίνακας 3.2 δείχνει την ωριαία μέγιστη που μπορεί να αποδώσει στο δίκτυο ως τελική ενέργεια ανά μήνα.
- Η Εικόνα 3.40 δείχνει την παραγωγή σε MWh καθώς και τον δείκτη απόδοσης για κάθε ξεχωριστό μήνα.
- Η Εικόνα 3.41 δείχνει τις απώλειες συστήματος.

Πίνακας 3.2: Ωριαία μέγιστη παραγωγή ανά μήνα σε kW



PVsyst V8.0.6
VC1, Simulation date:
17/01/25 19:06
with V8.0.6

Project: Elia

Variant: Final simulation

KONSTANTINOS THOMAS (Greece)

Final simulation

Hourly maximum values for E_Grid [kW]

	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H
January	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.2	145.7	204.1	236.0	241.9
February	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	81.5	176.1	238.5	283.6	302.6
March	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.3	157.3	222.9	290.7	338.7	343.1
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.9	96.0	201.0	284.2	326.2	362.5	356.9
May	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	32.9	127.2	217.4	283.7	328.2	353.0	358.5
June	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	39.9	126.8	216.6	279.8	332.1	346.5	351.8
July	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	28.5	121.0	213.4	281.7	329.4	355.7	362.7
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	92.7	181.4	253.5	304.6	332.5	341.8
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	91.4	199.2	270.4	332.9	330.0	344.1
October	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.6	166.5	231.0	282.7	314.4	318.2
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	99.0	185.7	257.9	268.0	261.2
December	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.4	129.3	198.8	234.5	232.0
Year	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	39.9	127.2	217.4	284.2	332.9	362.5	362.7

	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
January	220.9	192.8	131.4	50.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
February	275.3	241.4	182.4	99.5	20.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
March	352.1	274.9	212.1	131.8	35.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
April	340.9	292.4	229.8	148.4	60.1	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
May	343.3	303.1	251.2	167.8	77.3	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
June	338.3	305.9	250.8	173.5	84.8	28.5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
July	350.6	315.5	263.6	184.3	93.1	26.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0
August	329.7	304.9	231.1	169.7	78.4	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September	302.8	267.9	207.3	129.0	46.6	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
October	279.7	232.9	188.6	96.8	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	244.2	186.0	112.1	28.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
December	222.4	169.2	100.5	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Year	352.1	315.5	263.6	184.3	93.1	28.5	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0

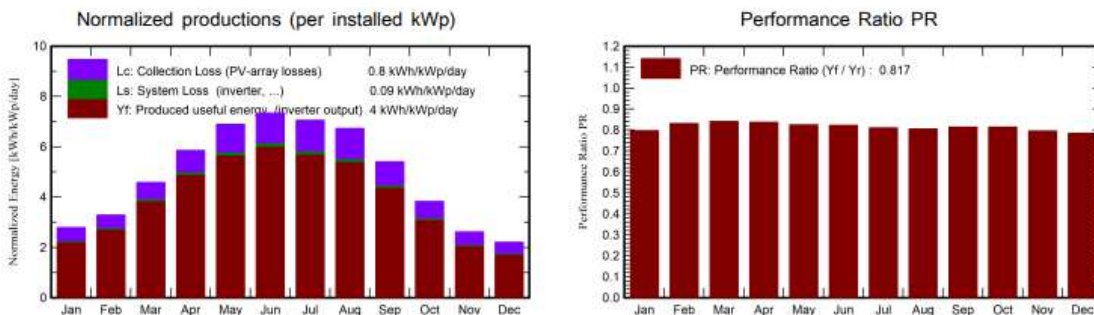


PVsyst V8.0.6
VC1, Simulation date:
17/01/25 19:06
with V8.0.6

Project: Elia
Variant: Final simulation
KONSTANTINOS THOMAS (Greece)

Main results

System Production
Produced Energy 591.07 MWh/year
Apparent energy 591.07 MVAh/year
Specific production 1459 kWh/kWp/year
Perf. Ratio PR 81.73 %



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	60.8	31.05	4.32	86.7	77.9	28.63	27.98	0.797
February	72.3	35.34	6.33	92.0	85.4	31.67	30.94	0.830
March	121.2	60.91	10.30	142.2	133.1	49.49	48.45	0.841
April	161.2	74.34	14.50	175.8	166.1	60.92	59.62	0.837
May	209.1	75.03	20.26	213.7	202.7	72.90	71.33	0.824
June	220.6	79.21	24.89	220.1	209.2	74.92	73.29	0.822
July	217.2	79.02	27.53	218.6	207.2	73.34	71.75	0.810
August	195.5	72.76	27.19	208.6	197.7	69.53	68.06	0.806
September	141.6	59.75	21.34	162.2	152.5	54.59	53.42	0.813
October	95.8	47.86	16.25	118.8	110.1	40.00	39.13	0.813
November	58.7	32.80	11.26	78.4	71.2	25.90	25.27	0.796
December	48.7	27.85	6.06	68.7	61.5	22.40	21.83	0.785
Year	1602.8	675.92	15.91	1785.8	1674.7	604.32	591.07	0.817

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation
DiffHor Horizontal diffuse irradiation
T_Amb Ambient Temperature
GlobInc Global incident in coll. plane
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
EArray Effective energy at the output of the array
E_Grid Energy injected into grid
PR Performance Ratio

Εικόνα 3.40: Παραγωγή και απόδοση συστήματος σε MWh

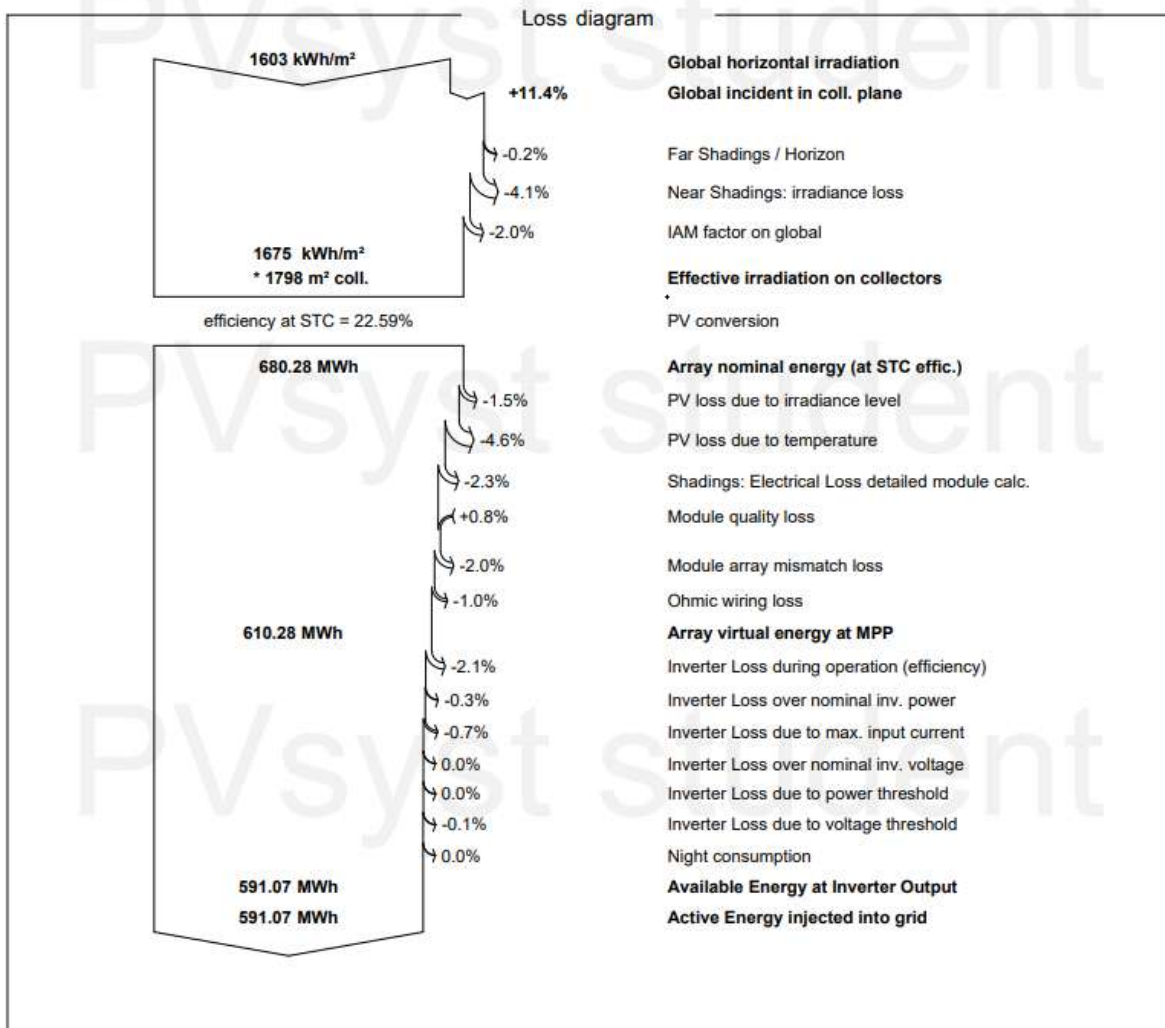


PVsyst V8.0.6
VC1, Simulation date:
17/01/25 19:06
with V8.0.6

Project: Elia

Variant: Final simulation

KONSTANTINOS THOMAS (Greece)



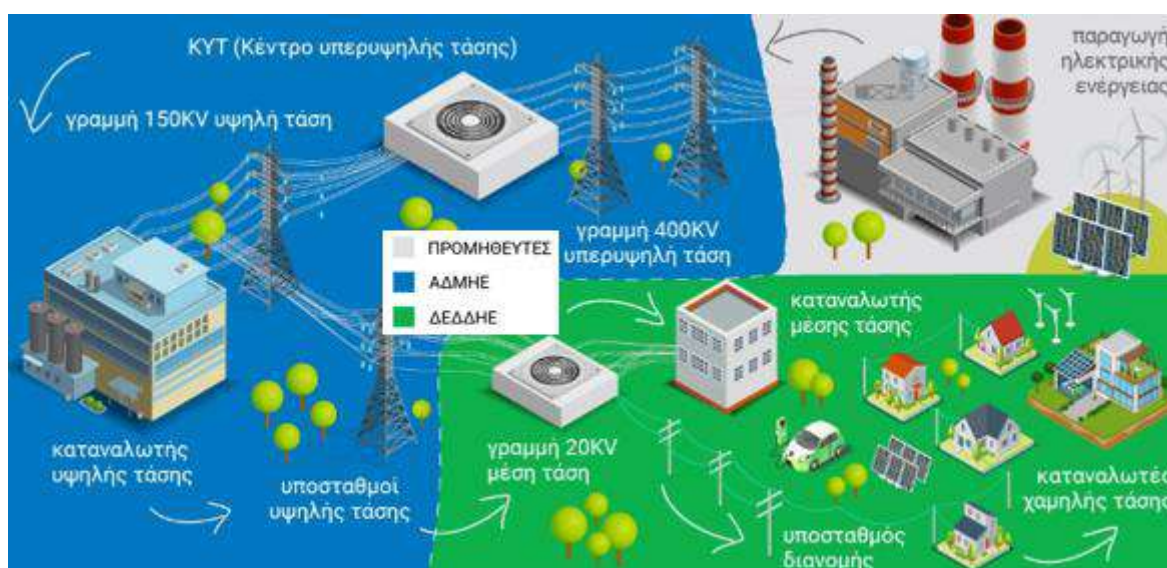
Εικόνα 3.41: Απώλειες συστήματος

Κεφάλαιο 4 Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

4.1 Γενική απεικόνιση συστήματος

Για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β συστήματα στους καταναλωτές είναι απαραίτητη η ύπαρξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) όπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Για την επίτευξη της παροχής αυτής της ενέργειας, το ΣΗΕ γενικότερα περιέχει

- Σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται η αναγκαία ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τη ζήτηση. Αποτελούνται από δημόσιο προμηθευτή και ιδιώτες.
- Γραμμές μεταφοράς, που αποτελούν φορείς μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τους καταναλωτές. Τη ευθύνη των γραμμών μεταφοράς αναλαμβάνει ο ΑΔΜΗΕ όπου εξασφαλίζει την ομαλή, ασφαλής και αδιάλειπτη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δίκτυο διανομής, όπου η ενέργεια των γραμμών μεταφοράς διαμοιράζεται στους επιμέρους καταναλωτές. Αρμόδιος φορέας του δικτύου διανομής είναι ο ΔΕΔΔΗΕ ο οποίος αναλαμβάνει τη συντήρηση, την ανάπτυξη, τη λειτουργία του δικτύου διανομής καθώς και τη πρόσβαση των καταναλωτών στο δίκτυο αυτό [16].

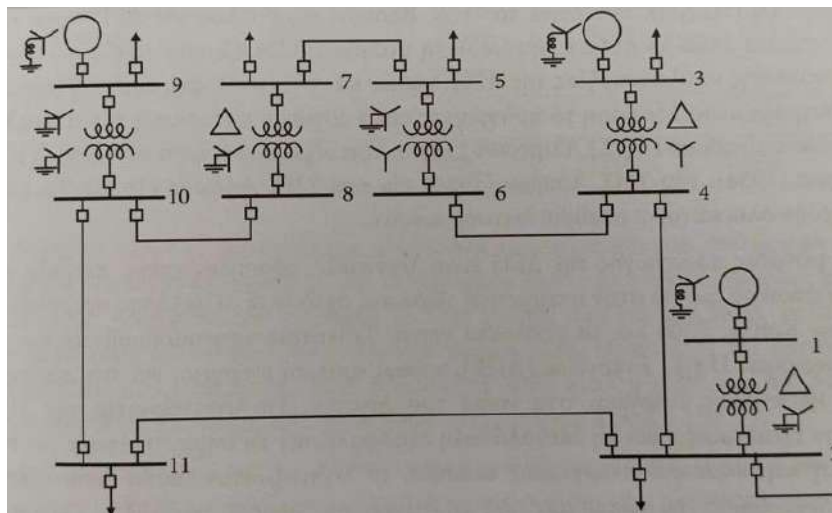


Σχήμα 4.1: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και οι διαχειριστές του

Γενική, ωστόσο, ρυθμιστική αρχή της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η ΡΑΑΕΥ (Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων) όπου μέλημά της είναι ο έλεγχος, η εποπτεία και η ρύθμιση της αγοράς ενέργειας [17].

Καθώς η πραγματική αναπαράσταση του ΣΗΕ είναι πολύπλοκη, χρησιμοποιείται το μονογραμμικό του διάγραμμα σύμφωνα με την Εικόνα 4.1. Σκοπός του μονογραμμικού διαγράμματος είναι να δώσει μια απλοποιημένη μορφή κάθε σημαντικής συνιστώσας του. Η αναπαράσταση του ΣΗΕ σε μονογραμμικό διάγραμμα χρησιμεύει στην ανάλυση της συνεχούς και μεταβατικής λειτουργίας του, συνιστώσες ωστόσο που δε κρίνονται σημαντικές κατά τις αναλύσεις αυτές αγνοούνται και δεν περιλαμβάνονται στο μονογραμμικό διάγραμμα. Οι πιο σημαντικές συνιστώσες οι οποίες αναλύονται υποχρεωτικά στο μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ είναι οι εξής:

- Η σύγχρονη γεννήτρια.
- Οι μετασχηματιστές ισχύος.
- Οι γραμμές μεταφοράς.
- Οι διακόπτες ισχύος.
- Τα φορτία ή Καταναλωτές [16].



Εικόνα 4.1: Το μονογραμμικό διάγραμμα ενός ΣΗΕ [16]

4.1.1 Σύγχρονη γεννήτρια

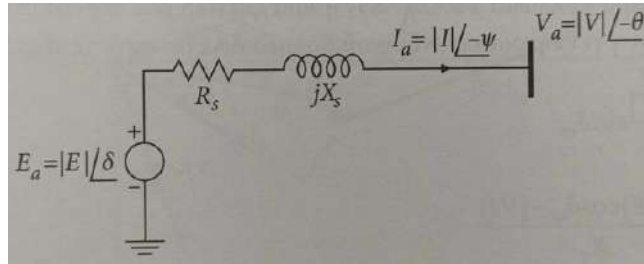
Οι σύγχρονες γεννήτριες αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής εμπορικής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος εξόδου ατμοστρόβιλων, αεριοστρόβιλων και υδροστρόβιλων σε ηλεκτρική ενέργεια για το δίκτυο. Δυο βασικά μέρη διακρίνονται στις σύγχρονες γεννήτριες:

- τον στάτη (stator), όπου είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων που φέρει στην εσωτερική του επιφάνεια οδούς των τυλιγμάτων τριών συμμετρικών ζωνών (μία για κάθε φάση). Τα τυλίγματα του στάτη τοποθετούνται σε αυτές τις οδούς, τυλιγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι ζώνες που θα σχηματίζονται να απέχουν μεταξύ τους 120° .
- τον δρομέα (rotor), όπου είναι μια συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής και περιστρέφεται μέσα στον στάτη. Στον δρομέα υπάρχει το τύλιγμα πεδίου το οποίο παράγει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, μέσω πηγής συνεχούς ρεύματος, εντός της γεννήτριας. Ο δρομέας διαχωρίζεται από τον στάτη από μικρό διάκενο αέρα ώστε να είναι εύκολη η περιστροφή του

Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται έτσι ώστε για σταθερή ταχύτητα δρομέα, να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε ένα από τα τυλίγματα του στάτη. Οι τρεις αυτές τάσεις έχουν το ίδιο μέτρο και την ίδια συχνότητα και παρουσιάζουν φασική διαφορά 120° η μία με την άλλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τριφασικής πηγής [16].

Για τη μελέτη της σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση στη μόνιμη λειτουργία χρησιμοποιείται το μονοφασικό ισοδύναμό της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Αποτελείται από πηγή τάσης E_a που συνδέεται σε σειρά με αντίσταση R_s , που είναι η ανά φάση αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και αντίδραση, που είναι η σύγχρονη αντίδραση X_s της σύγχρονης γεννήτριας η οποία λαμβάνει υπόψη τη ροή που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη. Η πηγή τάσης έχει μέτρο ανάλογο του ρεύματος διέγερσης και αναπαριστά τη λειτουργία χωρίς φορτίο των τυλιγμάτων του στάτη που οφείλεται στο ρεύμα διέγερσης. Η σχέση μεταξύ πηγής τάσης και τερματικής φασικής τάσης V_a του ζυγού στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια βασίζεται στην εξίσωση

$$E_a = V_a + R_s * I_a + j(X_s * I_a) \quad \text{Εξίσωση 4.1}$$



Εικόνα 4.2: Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα [18]

Για τον υπολογισμό της πραγματικής και άεργους ισχύος που παρέχει η σύγχρονη γεννήτρια, λαμβάνοντας υπόψη ότι για τις πραγματικές γεννήτριες ισχύει ότι $R_s \ll X_s$, ισχύει

$$P_G = \frac{|E| * |V|}{X_s} * \sin \delta_m \quad \text{Εξίσωση 4.2}$$

και

$$Q_G = \frac{|V| * (|E| * \cos \delta_m - |V|)}{X_s} \quad \text{Εξίσωση 4.3}$$

με

$$\delta_m = \angle E_a - \angle V_a = \delta + \theta \quad \text{Εξίσωση 4.4}$$

όπου δ_m είναι η γωνία ισχύος, θετική όταν η E_a προηγείται της V_a . Ωστόσο σε μελέτες ροής φορτίου το κύκλωμα στην Εικόνα 4.2 αντικαθίσταται από το σύμβολο της γεννήτριας της Εικόνας 4.3 στο μονογραμμικό διάγραμμα [18].



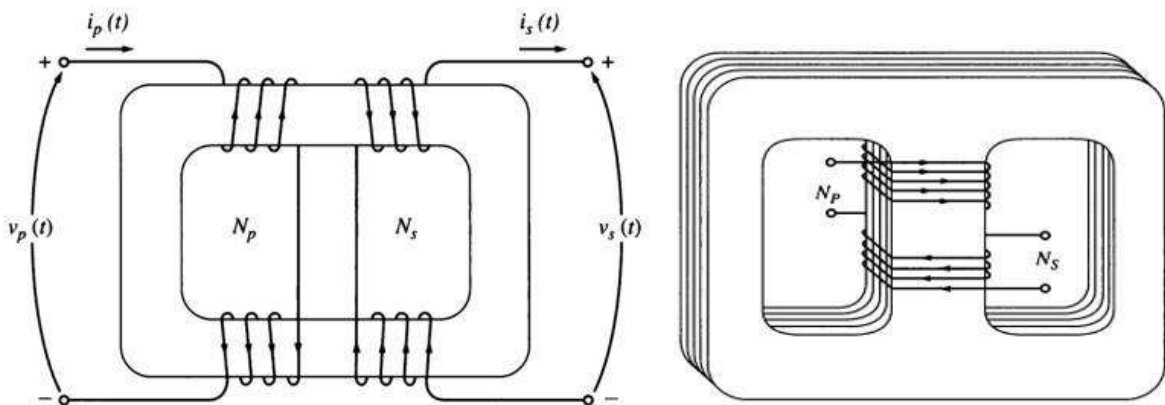
Εικόνα 4.3: Αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας στο μονογραμμικό διάγραμμα

4.1.2 Μετασχηματιστές ισχύος

Για τη σύνδεση τμημάτων του ΣΗΕ που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης χρησιμοποιούνται οι μετασχηματιστές ισχύος. Η βασική λειτουργία των μετασχηματιστών ισχύος είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικού επιπέδου τάσης. Δυο είναι οι τρόποι κατασκευής ενός μετασχηματιστή ισχύος (παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4):

- Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δυο πλευρές ενός ορθογώνιου πυρήνα με φύλλα χάλυβος (μετασχηματιστής τύπου πυρήνα).
- Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος πυρήνα τριών σκελών (μετασχηματιστής τύπου μανδύα).

Και στις δυο περιπτώσεις, οι πυρήνες κατασκευάζονται από λεπτά δυναμοελάσματα, ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους, που έχουν σκοπό τη μείωση των δινορρευμάτων.



Εικόνα 4.4: (Αριστερά) Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα, (Δεξιά) Μετασχηματιστής τύπου μανδύα [19]

Ανάλογα με τη λειτουργία τους, οι μετασχηματιστές ισχύος διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

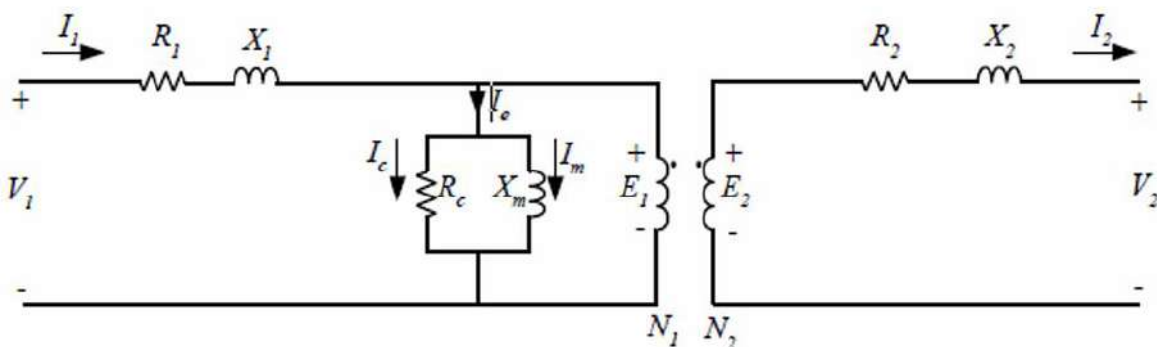
- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (20/150kV ή 20/400kV).
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς.

- Μετασχηματιστές διανομής, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα τάσης που ζητούνται από τους καταναλωτές (πχ. 15kV/400V) [16], [19].

Για τη μελέτη του μετασχηματιστή ισχύος ανά φάση στη μόνιμη λειτουργία χρησιμοποιείται το μονοφασικό ισοδύναμό του όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5. Στο μονοφασικό ισοδύναμο του μετασχηματιστή ισχύος περιλαμβάνονται οι απώλειές του, όπου οι πιο βασικές είναι οι παρακάτω:

- Απώλειες χαλκού, δηλαδή τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.
- Απώλειες των δινορρευμάτων, δηλαδή τις θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα.
- Απώλειες υστέρησης, όπου έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα.
- Ροή διαρροής, όπου πρόκειται για της μαγνητικές ροές που ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δύο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα.

Για τον προσδιορισμό των αυτεπαγωγών και των αντιστάσεων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός μετασχηματιστή είναι δυνατό να γίνει μόνο πειραματικά, ωστόσο μια καλή προσέγγιση είναι η διαδοχική υλοποίηση του πειράματος ανοιχτού κυκλώματος και του πειράματος βραχυκύκλωσης. Γενικότερα, ο μετασχηματιστής ισχύος περιγράφεται από τον λόγο μετασχηματισμού του

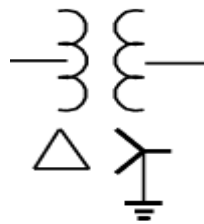


Εικόνα 4.5: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή [19]

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = \alpha$$

Εξίσωση 4.5

όπου N_i ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος ($i=1$) και δευτερεύοντος ($i=2$) τυλίγματος [19]. Για την απλοποιημένη αναπαράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος κατά τη μέγλητη ροής φορτίου, χρησιμοποιείται το σύμβολο του μετασχηματιστή όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6. Οι γειώσεις των μετασχηματιστών συνήθως αγνοούνται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Powerworld.



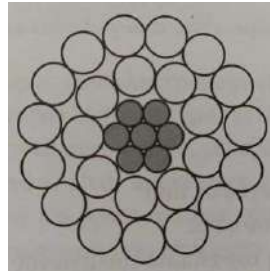
Εικόνα 4.6: Αναπαράσταση μετασχηματιστή ισχύος στο μονογραμμικό διάγραμμα

4.1.3 Γραμμές μεταφοράς

Εξίσου σημαντικό κομμάτι του ΣΗΕ είναι η γραμμή μεταφοράς. Η βασική της λειτουργία είναι να μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια, με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες, από τους σταθμούς παραγωγής προς τους καταναλωτές. Χρησιμοποιούνται συνήθως εναέριες γραμμές μεταφοράς, οι οποίες διακρίνονται από τους εξής τύπους αγωγών αλουμινίου:

- Αγωγοί εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο.
- Αγωγοί εξ ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου.
- Αγωγοί αλουμινίου ενισχυμένοι με χάλυβα.
- Αγωγοί αλουμινίου ενισχυμένοι με κράμα.

Οι αγωγοί αλουμινίου είναι κατά κανόνα πολύκλωνοι λόγω της ευκαμψίας τους έναντι καταπονήσεων [16]. Στην Εικόνα 4.7 φαίνεται ενδεικτική τομή αγωγού.



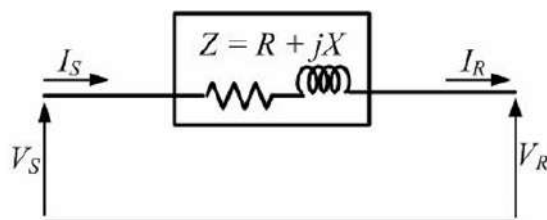
Εικόνα 4.7: Τομή αγωγού με 7 κλώνους χάλυβα και 24 κλώνους αλουμινίου [16]

Για τη μελέτη της γραμμής μεταφοράς ανά φάση στη μόνιμη λειτουργία χρησιμοποιείται το μονοφασικό ισοδύναμό της, διαφορετικό ανάλογα του μήκους. Γενικότερα, οι τρεις βασικές παράμετροι μιας γραμμής μεταφοράς, που μετρούνται συνήθως ανά μονάδα μήκους, είναι:

- Η αντίσταση σε σειρά r , σε Ω/m .
- Η επαγωγή σε σειρά L , σε H/m .
- Η εγκάρσια χωρητικότητα C , σε F/m .

Για γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους, δηλαδή μήκους μικρότερου από 80km (Εικόνα 4.8), η εγκάρσια χωρητικότητα μπορεί να παραληφθεί χωρίς να υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την αντίσταση και τα την επαγωγική αντίδραση. Δηλαδή ισχύει η εξίσωση

$$V_S = V_R + I * Z \quad \text{Εξίσωση 4.6}$$



Εικόνα 4.8: Ισοδύναμο γραμμών μεταφοράς μικρού μήκους [18]

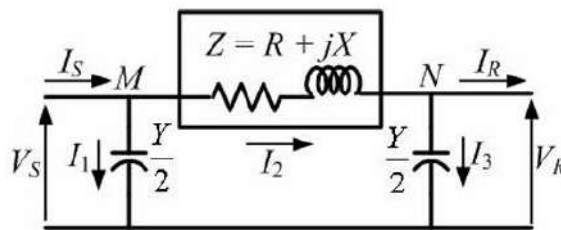
Για τη γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους, δηλαδή μήκους από 80km έως 250km (Εικόνα 4.9), τότε λαμβάνεται υπόψη η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής $Y = j\omega Cl$, η οποία

διαίρεται σε δύο ίσα τμήματα το καθένα από τα οποία τοποθετείται στα άκρα αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Δηλαδή ισχύουν οι εξισώσεις

$$V_S = \left(\frac{Z * Y}{2} + 1 \right) * V_R + I_R * Z \quad \text{Εξίσωση 4.7}$$

και

$$I_S = V_R * Y * \left(1 + \frac{Z * Y}{4} \right) + \left(1 + \frac{Z * Y}{2} \right) * I_R \quad \text{Εξίσωση 4.8}$$



Εικόνα 4.9: Π-Ισοδύναμο γραμμών μεταφοράς μεσαίου μήκους [18]

Για τη γραμμή μεταφοράς μεγάλου μήκους, δηλαδή μήκους μεγαλύτερο από 250km (Εικόνες 4.10 και 4.11), πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα στοιχειώδη τμήματα της γραμμής συνδεδεμένα σε σειρά και ομοιόμορφα κατανεμημένα, το κάθε ένα από τα οποία εμφανίζει στοιχειώδη σύνθετη αντίσταση και χωρητικότητα. Δηλαδή, οι τελικές εξισώσεις που θα περιγράφουν το ισοδύναμο γραμμών μεσαίου μήκους θα είναι οι παρακάτω

$$V_S = V_R * \cosh(\gamma * l) + Z_C * I_R * \sinh(\gamma * l), \quad \text{Εξίσωση 4.9}$$

$$I_S = V_R * \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_C} + I_R * \cosh(\gamma * l), \quad \text{Εξίσωση 4.10}$$

$$Z_e = Z * \frac{\sinh(\gamma * l)}{\gamma * l}, \quad \text{Εξίσωση 4.11}$$

και

$$\frac{Y_e}{2} = \frac{Y * \tanh(\frac{\gamma * l}{2})}{\gamma * l} \quad \text{Εξίσωση 4.12}$$

όπου

l : το μήκος της γραμμής (m).

$Z = z * l$: η συνολική εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής (Ω).

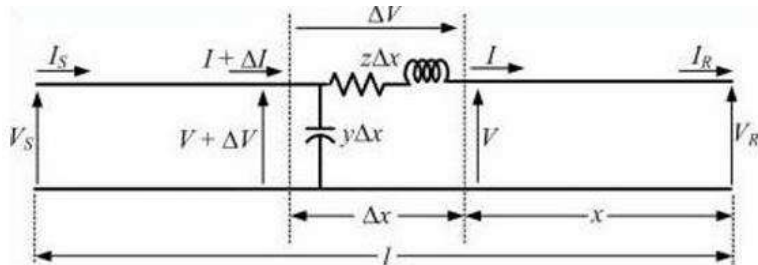
$Y = y * l$: η συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής (S).

$z = r + j\omega L$: η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής ανά μονάδα μήκους (Ω/m).

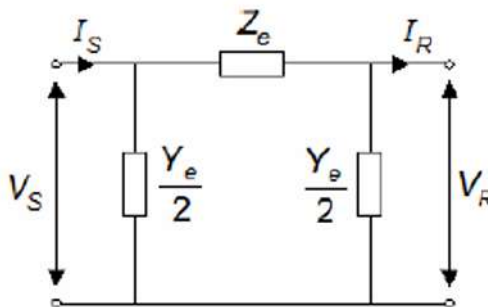
Y_s : η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής ανά μονάδα μήκους (S/m).

$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{r+j\omega L}{j\omega C}}$: η χαρακτηριστική αντίσταση (Ω).

$\gamma = \sqrt{z * y}$: η σταθερά διάδοσης (m^{-1}) [16], [18].



Εικόνα 4.10: Το στοιχειώδες τμήμα της γραμμής μεταφοράς [16]



Εικόνα 4.11: Π-Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους [16]

4.1.4 Φορτία

Οι συνιστώσες του ΣΗΕ που καταναλώνουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φορτία ή καταναλωτές. Τα διάφορα φορτία μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες.

- Συσκευές θέρμανσης.
- Ηλεκτρονικές συσκευές.
- Φωτιστικά.

Συγκεκριμένα, το τυπικό σύνθετο φορτίο, που αποτελεί την πλειοψηφία των πραγματικών φορτίων, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μπορεί να προβλεφθεί το μέγεθος και ο τρόπος μεταβολής.
- Η μεταβολή του πραγματοποιείται σχεδόν σταθερά από λεπτό σε λεπτό.
- Καταναλώνει πάντοτε άεργο ισχύ (λόγω κυρίως των επαγωγικών κινητήρων).
- Υπάρχει συμμετρική τριφασική λειτουργία.
- Εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα [18].

Για τη μελέτη των φορτίων στη μόνιμη λειτουργία λαμβάνονται υπόψη όλα τα φορτία κάθε περιοχής συνδεδεμένων σε ένα ζυγό. Συνήθως περιγράφεται από την πραγματική ισχύς P_L και άεργο ισχύς Q_L κατανάλωσης καθώς και τις μεταβολές τους ΔP_L , ΔQ_L σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις

$$P_L = P_{L0} * \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^a * (1 + k_{pf} * \Delta f), \quad \text{Εξίσωση 4.13}$$

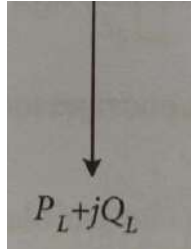
$$Q_L = Q_{L0} * \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^b * (1 + k_{qf} * \Delta f), \quad \text{Εξίσωση 4.14}$$

$$\Delta P_L \cong \frac{\partial P_L}{\partial f} * \Delta f + \left(\frac{\partial P_L}{\partial |V|} \right) * \Delta |V| \quad \text{Εξίσωση 4.15}$$

και

$$\Delta Q_L \cong \frac{\partial Q_L}{\partial f} * \Delta f + \left(\frac{\partial Q_L}{\partial |V|} \right) * \Delta |V| \quad \text{Εξίσωση 4.16}$$

όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στις τιμές των αντίστοιχων ποσοτήτων στην αρχική συνθήκη λειτουργίας, οι εκθέτες a και b έχουν ακέραιες τιμές 0 έως 2 (0=σταθερή ισχύ, 1=σταθερό



Εικόνα 4.12: Αναπαράσταση φορτίων στο μονογραμμικό διάγραμμα [18]

ρεύμα, 2=σταθερή σύνθετη αντίσταση), η σταθερά k_{pf} παίρνει τιμές από 0 έως 3.0 και η σταθερά k_{qf} παίρνει τιμές από -2.0 έως 0. Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται η αναπαράσταση φορτίων στο μονογραμμικό διάγραμμα [18].

Κεφάλαιο 5 Ανάλυση Ροής Φορτίου

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του δικτύου στη μόνιμη κατάσταση χρησιμοποιείται η ανάλυση ροής φορτίου. Η ανάλυση ροής φορτίου είναι ζωτικής σημασίας στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ΣΗΕ καθώς διερευνάται ο τρόπος κάλυψης της ζήτησης με χρήση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας από τα οποία επιλέγεται η καλύτερη δυνατή λύση. Ιδιαίτερα σημαντική η συμβολή της στην περίπτωση όπου σχεδιάζονται μεταβολές ή μελλοντικές επεκτάσεις σε υπάρχον ΣΗΕ, π.χ. κατά την ανάπτυξη νέων μονάδων παραγωγής, τροφοδοσία με νέα φορτία κ.λπ., αφού πριν την υλοποίηση αυτών, είναι αναγκαίο να μελετηθούν οι επιπτώσεις που θα έχουν στη λειτουργία του συστήματος. Κατά την ανάλυση ροής φορτίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής περιορισμοί:

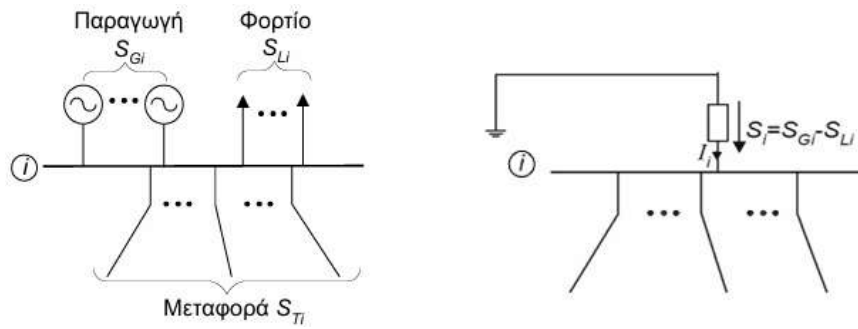
- Να μην υπερβούν οι οριακές δυνατότητες των πηγών.
- Οι τάσεις των ζυγών να λειτουργούν εντός προβλεπόμενων ορίων ώστε να μειωθούν οι απώλειες του συστήματος.
- Να αποφεύγεται η υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών πέραν της ονομαστικής λειτουργίας τους (ποσοστό μικρότερο ή ίσο από 100%).
- Να μην υπερβαίνουν τα όρια λήψεων των μετασχηματιστών [18].

Για την ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται το μονοφασικό τους ισοδύναμο. Αρχικά, αναλύεται η παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ζυγό ξεχωριστά σύμφωνα με την Εικόνα 5.1. Για ζυγό i γεννητριών μιγαδικής ισχύος S_{Gi} και φορτία μιγαδικής ισχύος S_{Li} μεταφέρεται εκτός του ζυγού υπολειπομένη μιγαδική ισχύ S_{Ti} σύμφωνα με τη σχέση

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

ή διαφορετικά

$$S_{Ti} = S_i = S_{Gi} - S_{Li} \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$



Εικόνα 5.1: Αναπαράσταση συνιστωσών ισχύος ζυγού i

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κόμβων, από την οποία προκύπτει η εξίσωση

$$I_{BUS} = Y_{BUS} * V_{BUS} \quad \text{Εξίσωση 5.3}$$

όπου περιλαμβάνει τα διανύσματα της κάθε αντίστοιχης ποσότητας, η ισχύς του ζυγού i S_{Ti} προκύπτει ως

$$S_{Ti} = S_{Gi} - S_{Li} = V_i * \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} * V_j \right)^* \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

Για τις συζυγείς παραστάσεις, θέτοντας

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \quad \text{Εξίσωση 5.5}$$

και

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \quad \text{Εξίσωση 5.6}$$

έχουμε από την εξίσωση 5.4, εκφρασμένη σε πολικές συντεταγμένες για τις τάσεις $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ και αγωγιμότητες $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$, τις στατικές εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή

$$P_{Ti} = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n |V_i| * |V_j| * |y_{ij}| * \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 5.7}$$

$$Q_{Ti} = Q_{Gi} - Q_{Li} = - \sum_{j=1}^n |V_i| * |V_j| * |y_{ij}| * \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 5.8}$$

Λόγω της μη γραμμικότητας των εξισώσεων αυτών, χρησιμοποιούνται αριθμητικές λύσεις μέσω ψηφιακού υπολογιστή [18].

Βάσει των παραπάνω εξισώσεων, ο κάθε ζυγός σχετίζεται με τις μεταβλητές $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Li}, Q_{Li}, |V_i|$ και δ_i . Αυτές ταξινομούνται ως εξής:

- Μη ελέγξιμες μεταβλητές, δηλαδή οι πραγματικές και οι άεργες καταναλώσεις του ζυγού P_{Li}, Q_{Li} .
- Μεταβλητές ελέγχου, δηλαδή οι παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος του ζυγού P_{Gi}, Q_{Gi} .
- Μεταβλητές κατάστασης, δηλαδή τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i που επηρεάζονται από τη μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου.

Από τις έξι μεταβλητές κάθε ζυγού είναι μόνο γνωστές (από ιστορικά στοιχεία) οι καταναλώσεις πραγματικής και άεργου ισχύος P_{Li}, Q_{Li} . Ωστόσο δίνεται η δυνατότητα προκαθορισμού των ποσοτήτων $P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|, |\delta_i|$ ανάλογα με τον τύπο των ζυγών:

- Ζυγοί φορτίου (Load Bus), όπου είναι οι ζυγοί μηδενική παραγωγή και γνωστή κατανάλωση. Οι άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται μέσω επίλυσης εξισώσεων ροής φορτίου είναι το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης.
- Ζυγοί ελεγχόμενης τάσης (Voltage Control Bus), όπου συνδέονται γεννήτριες σταθερής παραγωγής και κρατιέται το μέτρο της τάσης σταθερό σε προκαθορισμένη τιμή. Σε αυτούς τους ζυγούς μπορούν να συνυπάρχουν και φορτία. Οι άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται μέσω επίλυσης εξισώσεων ροής φορτίου είναι η άεργος παραγόμενη ή καταναλισκόμενη ισχύ και η φασική γωνία της τάσης.
- Ζυγός αναφοράς (Slack ή Swing Bus), όπου συνδέεται η παραγωγή η οποία αναλαμβάνει την διατήρηση του ισοζυγίου παραγωγής, ζήτησης και απωλειών, όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.9. Στον ζυγό αναφοράς προκαθορίζεται το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης, καθώς και περιλαμβάνονται τυχόν φορτία. Οι άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται μέσω επίλυσης εξισώσεων ροής φορτίου είναι παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος [18].

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες ζυγών και οι μεταβλητές τους ανά κατηγορία.

$$S_{GEN,SYSTEM} = S_{LOAD,SYSTEM} + S_{LOSSES,SYSTEM} \quad \text{Εξίσωση 5.9}$$

Πίνακας 5.1: Κατηγορίες ζυγών και μεταβλητές

ΤΥΠΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ	ΑΓΝΩΣΤΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ
ΖΥΓΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	$P_{Gi} = 0, Q_{Gi} = 0, P_{Li}, Q_{Li}$	$ V_i , \delta_i$
ΖΥΓΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΣΗΣ	$P_{Gi}, V_i , P_{Li}, Q_{Li}$	Q_{Gi}, δ_i
ΖΥΓΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	$ V_i = 0, \delta_i = 0, P_{Li}, Q_{Li}$	P_{Gi}, Q_{Gi}

Για τον υπολογισμό των αγνώστων ποσοτήτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω περιορισμοί:

- $|V_{i,min}| < |V_i| < |V_{i,max}|$.
- $|\delta_i - \delta_j| < (\delta_i - \delta_j)_{max}$.
- $P_{Gi,min} < P_{Gi} < P_{Gi,max}$ για τις υπάρχουσες πηγές παραγωγής.
- $Q_{Gi,min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,max}$ για τις υπάρχουσες πηγές παραγωγής.
- Περιορισμοί στις μεταβλητές ελέγχου για λόγους οικονομικής λειτουργίας, βασισμένη επίσης και στους παραπάνω περιορισμούς [18].

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να ληφθεί κατά την κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS} .

Τα στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων υπολογίζονται με τον παρακάτω τρόπο:

- Κάθε Y_{ij} ισούται με το αρνητικό της αγωγιμότητας που συνδέεται μεταξύ των κόμβων i, j ή μηδέν αν δεν υπάρχει σύνδεση
- Κάθε Y_{ii} ισούται με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στον κόμβο i . Σε περίπτωση συνδεδεμένης γραμμής μεταφοράς θα λαμβάνεται το ήμισυ της αγωγιμότητας αυτής, σύμφωνα με το π-ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς [18].

5.1 Το σύστημα per unit

Για την ανάλυση ροής φορτίου θα πρέπει να αναλυθούν οι συνιστώσες του τριφασικού συστήματος. Ο τυπικός υπολογισμός θα περιελάμβανε τη μία φάση και λόγω συμμετρίας του τριφασικού συστήματος υπολογίζονται οι υπόλοιπες. Σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο, θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη και οι συνδεσμολογίες των τριφασικών μηχανών (γεννήτριας και κινητήρα), των μετασχηματιστών και των γραμμών μεταφοράς, γεγονός που θα δυσκόλευε την ανάλυση του ΣΗΕ.

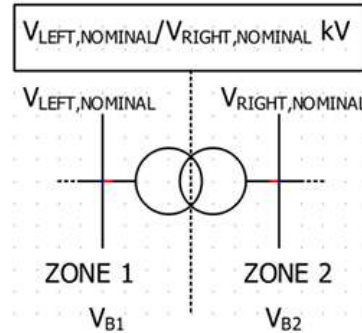
Οι δυσκολίες της ανάλυσης του τριφασικού συστήματος απλοποιούνται με τη χρήση του ανα μονάδα συστήματος. Οι ανά μονάδα τιμές κάθε συστατικού στοιχείου του ΣΗΕ μπορεί να οριστεί ως τον λόγο της πραγματικής τιμής $X_{NOMINAL}$ προς την τιμή βάσης $|X_{BASE}|$, η οποία επιλέγεται ανάλογα την περιοχή που ανήκει (Εικόνα 5.2) και στην ποσότητα, δηλαδή

$$x_{pu} = \frac{X_{NOMINAL}}{|X_{BASE}|} \quad \text{Εξίσωση 5.10}$$

Κατά τη μετατροπή του τριφασικού συστήματος σε ανά μονάδα, η επιλογή των βάσεων γίνεται ως εξής:

- Επιλέγεται βάση ισχύος (τριφασική) $|S_{BASE}|$ (συνήθως σε MVA) η οποία θα είναι ίδια για όλο το σύστημα
- Οι βάσεις τάσης $|V_{BASE,i}|$ (πολικές τάσεις) κάθε περιοχής i (συνήθως σε kV) που χωρίζει ο μετασχηματιστής θα ισοδυναμούν με την ανάλογη τάση στους ακροδέκτες του τυλιγματος μετασχηματιστή στο οποίο είναι συνδεδεμένη η περιοχή. Η σχέση μεταξύ ακροδεκτών τυλιγμάτων M/Σ (μετασχηματιστή) και των ανάλογων βάσεων τάσης περιγράφεται με την εξίσωση

$$|V_{BASE,2}| = |V_{BASE,1}| * \frac{|V_{LEFT,NOMINAL}|}{|V_{RIGHT,NOMINAL}|} \quad \text{Εξίσωση 5.11}$$



Εικόνα 5.2: Οι περιοχές του μετασχηματιστή

- Η βάση αντίστασης $|Z_{BASE,i}|$ κάθε περιοχής i (συνήθως σε Ohm) σύμφωνα με τον τύπο

$$|Z_{BASE,i}| = \frac{(|V_{BASE,i}|)^2}{|S_{BASE}|} \quad \text{Εξίσωση 5.12}$$

- Η βάση ρεύματος $|I_{BASE,i}|$ κάθε περιοχής i (συνήθως σε kA) σύμφωνα με τον τύπο

$$|I_{BASE,i}| = \frac{|S_{BASE}|}{\sqrt{3} * |V_{BASE,i}|} \quad \text{Εξίσωση 5.13}$$

Στην περίπτωση που η βάση τάσης που επιλέχθηκε για το τμήμα του δικτύου i , όπου συνδέονται οι συνιστώσες, διαφέρει από την ονομαστική τιμή του τυλίγματος του Μ/Σ που ανήκει, τότε οι ανά μονάδα τιμές των σύνθετων αντιστάσεων τους θα πρέπει να αναφερθούν στις νέες βάσεις χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση μετατροπής

$$Z_{pu,new} = Z_{pu,old} * \left(\frac{|V_{i,NOMINAL}|}{|V_{BASE,i}|} \right)^2 * \frac{|S_{BASE}|}{|S_{COMPONENT}|} \quad \text{Εξίσωση 5.14}$$

όπου $|S_{COMPONENT}|$ είναι το μέτρο της ονομαστικής ισχύος της συνιστώσας της περιοχής (MVA). Για την εύρεση των πραγματικών τιμών μιας συνιστώσας αρκεί να λυθεί η Εξίσωση 5.10 ως προς $X_{NOMINAL}$ [18].

5.2 Μέθοδοι ανάλυσης Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι μη γραμμικές και είναι αναγκαία η επίλυση μέσω προσεγγίσεως. Για την εύρεση σωστών αποτελεσμάτων κρίνεται επιτακτική η ανάγκη χρήσης επαναληπτικών διαδικασιών από τις οποίες το προηγούμενο αποτέλεσμα επίλυσης θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του επόμενου αποτελέσματος. Χρησιμοποιώντας μια λίστα εντολών που ορίζουν τη διαδοχή των πράξεων, η λύση της επαναληπτικής διαδικασίας συγκλίνει σε μια τελική τιμή, η ταχύτητα της οποίας εξαρτάται από τον τρόπο σύγκλισης και τα όρια σύγκλισης [18].

Οι επαναληπτικές διαδικασίες απαιτούν την αρχικοποίηση τιμών ή τιμές εκκίνησης. Οι τιμές εκκίνησης των επαναληπτικών διαδικασιών για την επίλυση ενός ΣΗΕ ορίζεται από τον Πίνακα 5.1 ανάλογα με τον τύπο του ζυγού.

5.2.1 Μέθοδος Gauss - Seidel

Η μέθοδος Gauss-Seidel πρόκειται για την απλούστερη επαναληπτική μέθοδο για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα για την ανάλυση μικρών ΣΗΕ. Ο τρόπος και η εξίσωση επίλυσης στηρίχθηκε σε παραλλαγή της μεθόδου Jacobi σε μορφή πινάκων (κεφαλαία) και διανυσμάτων [20] όπου ισχύει

$$x_{i+1} = M * x_i + D^{-1} * y \quad \text{Εξίσωση 5.15}$$

όπου

$$M = D^{-1} * (D - A) \quad \text{Εξίσωση 5.16}$$

και

$$D = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 5.17}$$

Η παραλλαγή της Gauss-Seidel μεθόδου, ακολουθώντας την εξίσωση 5.17 και χρησιμοποιώντας μιγαδική αναπαράσταση του κάθε όρου, γίνεται χρήση του παρακάτω επαναληπτικό τύπου για τον υπολογισμό του μέτρου και της φασικής γωνίας της τάσης στους ζυγούς φορτίου

$$V_{i,(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} * \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_{i,(v)})^*} - \sum_{k=1}^{i-1} y_{ik} * V_{k,(v+1)} - \sum_{k=i}^n y_{ik} * V_{k,(v)} \right], \quad \text{Εξίσωση 5.18}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

και του παρακάτω επαναληπτικού τύπου για τον υπολογισμό της άεργου ισχύος στους ζυγούς ελεγχόμενης τάσης

$$Q_{i,(v+1)} = -|V_i| * \left[\sum_{k=1}^{i-1} |V_{k,(v+1)}| * |y_{ik}| * \sin(\delta_{k,(v+1)} - \delta_{i,(v)} + \gamma_{ik}) + \sum_{k=i}^n |V_{k,(v)}| * |y_{ik}| * \sin(\delta_{k,(v)} - \delta_{i,(v)} + \gamma_{ik}) \right], \quad \text{Εξίσωση 5.19}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

λαμβάνοντας υπόψη τα όρια παραγωγής $Q_{Gi,min} < Q_{Gi} < Q_{Gi,max}$, δηλαδή να ισχύει

$Q_{i,min} < Q_i < Q_{i,max}$, εφόσον ισχύει $Q_{Gi,min} = Q_{Li} + Q_{i,min}$, $Q_{Gi,max} = Q_{Li} + Q_{i,max}$. Έπειτα, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.18 στην εξίσωση 5.19 για την εύρεση της φασικής γωνίας της τάσης στο ζυγό ελεγχόμενης τάσης, αγνοείται το αποτέλεσμα του μέτρου τάσης καθώς παραμένει σταθερό. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν

- οι τάσεις όλων των ζυγών (εκτός του ζυγού αναφοράς) στην v+1 επανάληψη δε διαφέρουν από εκείνες της v επανάληψης περισσότερο από μια ποσότητα ε, δηλαδή όταν $|\Delta V_{(v+1)}| = |V_i - V_{i,(v)}| < \epsilon$ ή
- φτάσει στο μέγιστο επιτρεπτό όριο επαναλήψεων [18].

5.2.2 Μέθοδος Newton – Raphson

Η πλέον διαδεδομένη επαναληπτική μέθοδο για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ενός ΣΗΕ είναι η Newton-Raphson. Η μέθοδος αυτή συγκλίνει γρηγορότερα, είναι πιο ακριβής ωστόσο απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με την Gauss-Seidel. Η Newton-Raphson αντικαθιστά τον πίνακα **D** στην εξίσωση 5.15 με τον Ιακωβιανό πίνακα **J**, όπου τα στοιχεία του αποτελούνται από μερικές παράγωγοι, δηλαδή

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 5.20}$$

Η επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson λαμβάνει τα εξής βήματα:

- Για προκαθορισμένες τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος $P_{i,spec}$, $Q_{i,spec}$, υπολογίζονται οι διαφορές πραγματικής και άεργου ισχύος ΔP , ΔQ για κάθε ζυγό i σύμφωνα με τις εξισώσεις

$$\Delta P_{i,(v)} = P_{i,spec} - P_{i,(v)} \quad \text{Εξίσωση 5.21}$$

και

$$\Delta Q_{i,(v)} = Q_{i,spec} - Q_{i,(v)} \quad \text{Εξίσωση 5.22}$$

όπου τα $P_{i,(v)}$ και $Q_{i,(v)}$ υπολογίζονται με τις εξίσωση 5.7, εξίσωση 5.8, δηλαδή

$$P_{i,(v)} = \sum_{j=1}^N |V_{i,(v)}| * |V_{j,(v)}| * |y_{ij}| * \cos(\delta_{j,(v)} - \delta_{i,(v)} + \gamma_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 5.23}$$

και

$$Q_{i,(v)} = - \sum_{j=1}^N |V_{i,(v)}| * |V_{j,(v)}| * |y_{ij}| * \sin(\delta_{j,(v)} - \delta_{i,(v)} + \gamma_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 5.24}$$

- Υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας, όπου διαιρείται στα μέρη J1, J2, J3, J4

$$J = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 5.25}$$

- Με απαλοιφή Gauss και εύρεση αντιστρόφου Ιακωβιανού πίνακα, λύνεται η σχέση με τα διανύσματα $\Delta \delta_{(v)}, \Delta P_{(v)}, \Delta |V|_{(v)}, \Delta Q_{(v)}$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_{(v)} \\ \Delta |V|_{(v)} \end{bmatrix} = J^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P_{(v)} \\ \Delta Q_{(v)} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 5.26}$$

- Υπολογίζεται το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης της επόμενης επανάληψης με την παρακάτω σχέση διανυσμάτων $\delta_{(v+1)}, \delta_{(v)}, \Delta \delta_{(v)}, |V|_{(v+1)}, |V|_{(v)}, \Delta |V|_{(v)}$

$$\begin{bmatrix} \delta_{(v+1)} \\ |V|_{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{(v)} \\ |V|_{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_{(v)} \\ \Delta |V|_{(v)} \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 5.27}$$

Η επίτευξη της σύγκλισης της μεθόδου θα πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε από τις παρακάτω περιπτώσεις πραγματοποιηθεί συντομότερα

- Για όλους τους ζυγούς του δικτύου (εκτός του ζυγού αναφοράς) ικανοποιούνται οι σχέσεις

$$|\Delta P_{i,(v)}| = |P_{i,spec} - P_{i,(v)}| < \varepsilon \quad \text{Εξίσωση 5.28}$$

και

$$|\Delta Q_{i,(v)}| = |Q_{i,spec} - Q_{i,(v)}| < \varepsilon \quad \text{Εξίσωση 5.29}$$

- φτάσει στο μέγιστο επιτρεπτό όριο επαναλήψεων [18], [20].

Κεφάλαιο 6 Ευστάθεια συστήματος και μεταβατική ανάλυση

Τα σφάλματα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απρόοπτες ηλεκτρικές βλάβες που διακόπτουν την κανονική λειτουργία. Οι διαταραχές αυτές ανάλογα με τη διάρκειά τους μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Υπερταχεία μεταβατικά φαινόμενα, όπου προκαλούνται από πτώση κεραυνών και από απότομες αλλά προγραμματισμένες μεταβολές δικτύου διακοπτικών λειτουργιών. Διαταραχές αυτού του τύπου προκαλούν ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται κατά μήκος των γραμμών και προκαλεί ανακλώμενα κύματα και υπερτάσεις στο τέλος των γραμμών
- Βραχυκυκλώματα, όπου προκαλούνται από τις κυματικές υπερτάσεις των υπερταχέων μεταβατικών φαινομένων ή πτώση δέντρων ή οχημάτων στις γραμμές μεταφοράς ή τους πύργους στήριξης ή δυνατούς ανέμους ή σπάσιμο αγωγών κ.λπ.. Τα βραχυκυκλώματα συνοδεύονται πάντα από ένα βύθισμα των τάσεων του συστήματος, το οποίο προκαλεί ξαφνική ελάττωση της ισχύος στην έξοδο των γεννητριών και επειδή η ισχύς εισόδου παραμένει σταθερή (πριν την λειτουργία του συστήματος ελέγχου του στροβίλου) η γεννήτρια επιταχύνεται με αποτέλεσμα την δημιουργία μηχανικών ταλαντώσεων.
- Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις των σύγχρονων μηχανών, όπου κυρίως προκαλούνται από βραχυκυκλώματα και μπορούν να οδηγήσουν σε αποσυγχρονισμό των μηχανών και μερική ή ολική διακοπή της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος.

Στις παρακάτω υποενότητες θα πραγματοποιηθεί περιγραφή και επεξήγηση τόσο των τύπων των βραχυκυκλωμάτων όσο και των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων [18].

6.1 Βραχυκυκλώματα

Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν την κύρια πηγή διαταραχής της ευστάθειας του ΣΗΕ. Μπορούν να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μεταλλικό ή στερεό, συμμετρικό βραχυκύκλωμα και των τριών φάσεων.

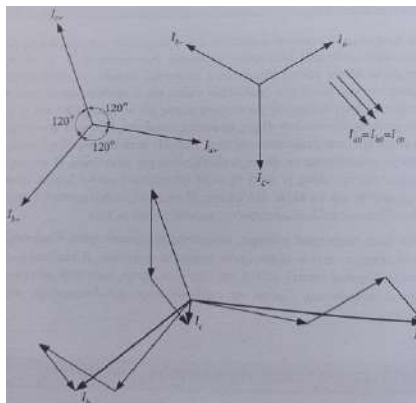
- Βραχυκύκλωμα δύο φάσεων με την τρίτη φάση υγιή.
- Βραχυκυκλώματα μιας φάσης με τη γη.

Τα βραχυκυκλώματα που έχουν περιγραφεί παραπάνω, βάσει της συμμετρικότητας του σφάλματος, διακρίνονται σε συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα:

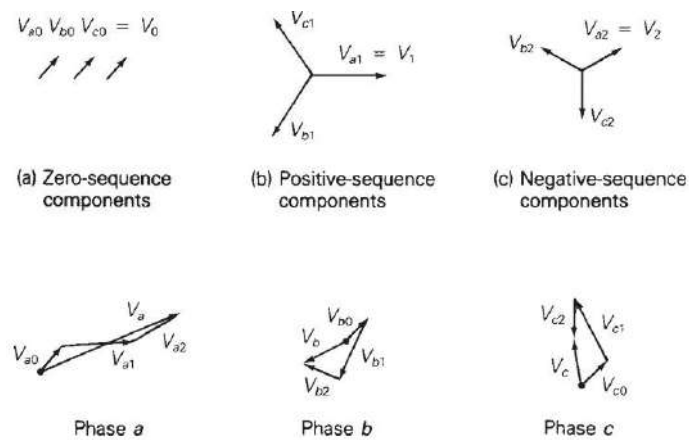
- Τα συμμετρικά σφάλματα (μεταλλικό ή στερεό βραχυκύκλωμα) επηρεάζουν εξίσου και τις τρεις φάσεις προκαλώντας ισχυρά ρεύματα βραχυκυκλώματος.
- Τα ασύμμετρα σφάλματα (βραχυκυκλώματα δύο φάσεων με την τρίτη φάση υγιή και βραχυκύκλωμα μιας φάσης με τη γη) περιλαμβάνουν ανισορροπία μεταξύ των φάσεων, που οδηγεί σε ανισορροπία τάσης και ρεύματος [18].

Τα βραχυκυκλώματα, συμμετρικά ή ασύμμετρα, μπορούν να αναλυθούν με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών (Εικόνες 6.1 και 6.2). Σύμφωνα με τον Fortescue, για οποιοδήποτε σύνολο μη ισορροπημένων τριφασικών τάσεων (V_A, V_B, V_C) ή ρευμάτων (I_A, I_B, I_C), οι συμμετρικές συνιστώσες εκφράζονται ως:

- Συνιστώσες θετικής ακολουθίας, που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασική μετατόπιση 120° , φασική ακολουθία abc ίδια με την αρχική και δείκτη + ή 1.
- Συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας, που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο και φασική μετατόπιση 120° , αλλά φασική ακολουθία acb αντίθετη από την αρχική και δείκτη - ή 2.
- Συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας, που αποτελούνται από τρία ίσα σε μέτρο διανύσματα, με μηδενική φασική γωνία μετατόπισης το ένα από το άλλο και δείκτη 0.



Εικόνα 6.1: Γραφική ανάλυση ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων ρευμάτων στις συμμετρικές του συνιστώσες [18]



Εικόνα 6.2: Γραφική ανάλυση ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων τάσεων στις συμμετρικές του συνιστώσες [20]

Οι συμμετρικές συνιστώσες τόσο των τάσεων όσο και των ρευμάτων ορίζονται από τους ακόλουθους μετασχηματισμούς:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 6.1}$$

και

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 6.2}$$

όπου

$$a = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{Εξίσωση 6.3}$$

Σε τριφασικό σύστημα συνδεδεμένο σε αστέρα Υ, το ρεύμα ουδετέρου I_n είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων γραμμής, δηλαδή:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad \text{Εξίσωση 6.4}$$

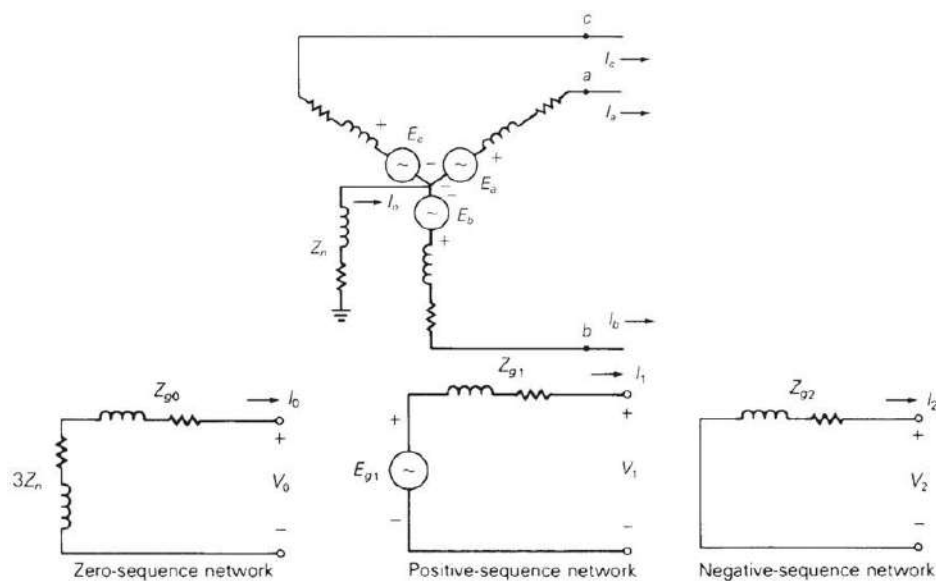
και άρα ισούται με το τριπλάσιο του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας, δηλαδή:

$$I_n = 3 * I_0 \quad \text{Εξίσωση 6.5}$$

Όταν δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής σε ένα τριφασικό σύστημα, το I_n είναι μηδέν και άρα δεν υπάρχει ρεύμα μηδενικής ακολουθίας στα ρεύματα γραμμής [18], [20].

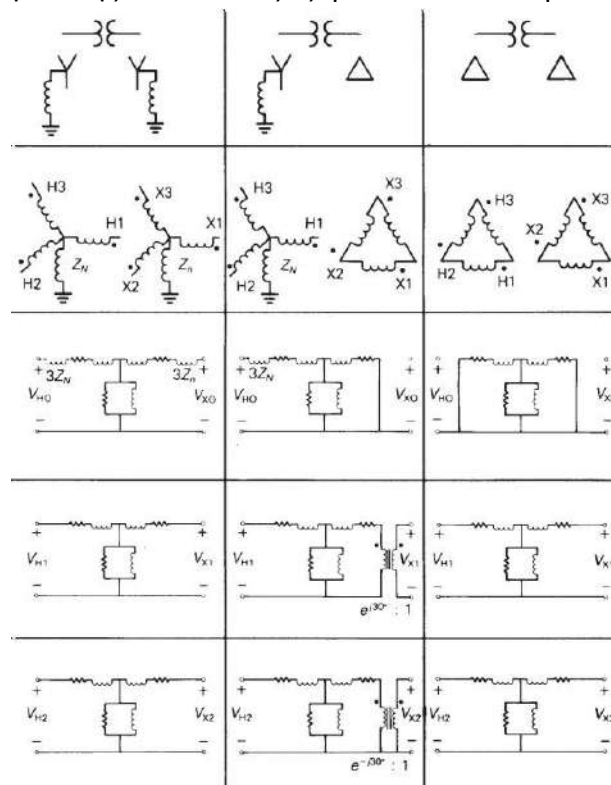
Καθεμία από τις τρεις συμμετρικές συνιστώσες (θετική, αρνητική και μηδενική συνιστώσα) μοντελοποιείται ως ξεχωριστό δίκτυο σύνθετων αντιστάσεων ή αλλιώς ακολουθιακών δικτύων. Κάθε ακολουθιακό δίκτυο είναι ξεχωριστό, αποσυνδεδεμένο από τα άλλα δύο, έχει ανεξάρτητα ρεύματα, τάσεις καθώς και ανεξάρτητες σύνθετες αντιστάσεις από τα υπόλοιπα. Ο τύπος του συμμετρικού ή ασύμμετρου βραχυκυκλώματος καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους τα ακολουθιακά δίκτυα. Προτού, ωστόσο, πραγματοποιηθεί η σύνδεση μεταξύ των ακολουθιακών δικτύων, θα πρέπει να κατασκευαστούν οι σύνθετες αντιστάσεις καθενός δικτύου ξεχωριστά, οι οποίες κατασκευάζονται βάση των συνιστωσών που απαρτίζουν το ΣΗΕ:

- Γεννήτρια: Οι παραγόμενες τάσεις είναι κατά προσέγγιση μόνο θετικής ακολουθίας, γιατί η γεννήτρια είναι σχεδιασμένη να τροφοδοτεί συμμετρικές τριφασικές τάσεις. Το δίκτυο θετικής ακολουθίας αποτελείται από μια ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας της γεννήτριας. Στη συνέχεια, το δίκτυο αρνητικής ακολουθίας δεν περιλαμβάνει ΗΕΔ αλλά μόνο τις σύνθετες αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας. Τέλος, το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας περιλαμβάνει μόνο τις σύνθετες αντιστάσεις αρνητικής ακολουθίας που βασίζονται στην επίδραση των πηνίων απόσβεσης και την αντίσταση γείωσης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρονική στιγμή της ανάλυσης του βραχυκυκλώματος καθώς η σύνθετη αντίσταση αλλάζει. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζονται τα ακολουθιακά κυκλώματα της σύγχρονης γεννήτριας.



Εικόνα 6.3: Ακολουθιακά κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας [18]

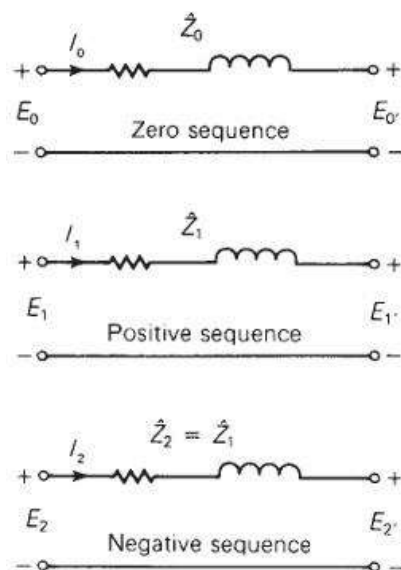
- Μετασχηματιστές: Οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ταυτοτικές και ισούται με τη σύνθετη αντίσταση σκέδασης. Ωστόσο, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων



Εικόνα 6.4: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για τις διάφορες συνδέσεις τριφασικών Μ/Σ δύο τυλιγμάτων [18]

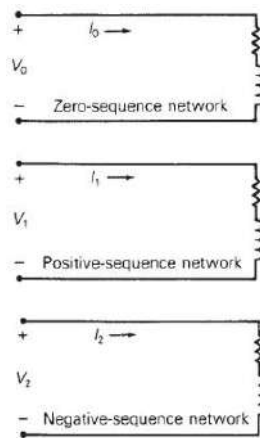
των του (τριγώνου ή αστέρα) και από το αν ο ουδέτερος του αστέρα είναι γειωμένος ή όχι. Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζονται τα δίκτυα μηδενικής ακολουθίας για τις διάφορες συνδέσεις τριφασικών μετασχηματιστών δύο τυλιγμάτων. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων των ακολουθιακών δικτύων για τον μετασχηματιστή παρέχεται συνήθως από εργοστασιακούς ελέγχους μετασχηματιστών.

- Γραμμές μεταφοράς: Οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ταυτοτικές. Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας έχει διάφορες τιμές, ανάλογα με τον πραγματικό δρόμο επιστροφής των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας (επιστροφή μέσω γης, επιστροφή μέσω εναέριων γραμμών γείωσης κ.λπ.). Σε κάθε περίπτωση ο υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων των ακολουθιακών κυκλωμάτων εξαρτάται από το μήκος και τα χαρακτηριστικά της γραμμής. Στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζονται τα ακολουθιακά κυκλώματα των γραμμών μεταφοράς.

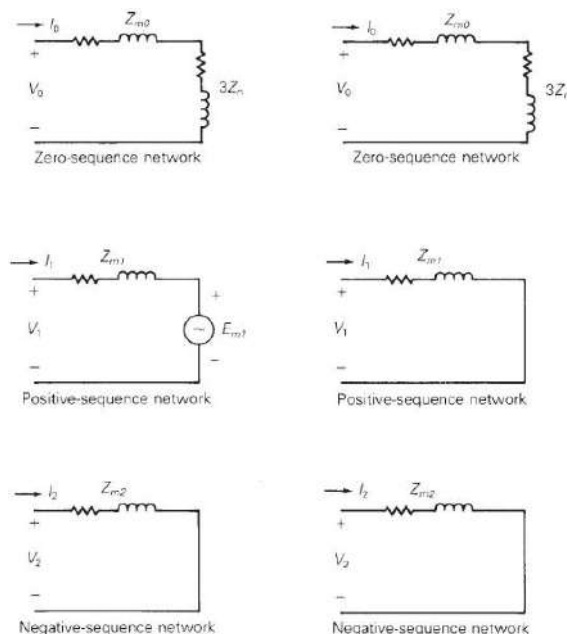


Εικόνα 6.5: Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμής μεταφοράς [20]

- Φορτία: Για μη περιστρεφόμενες μηχανές (Εικόνα 6.6), ο υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων κάθε ξεχωριστού ακολουθιακού δικτύου πραγματοποιείται μέσω πινάκων για τους οποίους συνήθως λαμβάνεται υπόψη συμμετρικό φορτίο. Στους πίνακες αυτούς λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά των φορτίων αυτών (αμοιβαίες αντιστάσεις και αυτο-αντιστάσεις ή mutual και self-impedances). Για τις περιστρεφόμενες μηχανές (Εικόνα 6.7), ισχύει ο παρόμοιος σχεδιασμός ακολουθιακών δικτύων με τις γεννήτριες, με τη διαφορά ότι αλλάζει ο τρόπος αναφοράς των ακολουθιακών ρευμάτων. Για τις επαγωγικές μηχανές, ωστόσο, αφαιρείται η ΗΕΔ καθώς δεν έχουν πηγή DC μαγνητικής ροής στα κυκλώματα του ρότορα [18], [20].



Εικόνα 6.6: Ακολουθιακά δίκτυα φορτίων χωρίς περιστρεφόμενες μηχανές [20]



Εικόνα 6.7: (Αριστερά) Ακολουθιακά δίκτυα σύγχρονων μηχανών, (Δεξιά) Ακολουθιακά δίκτυα επαγωγικών μηχανών [20]

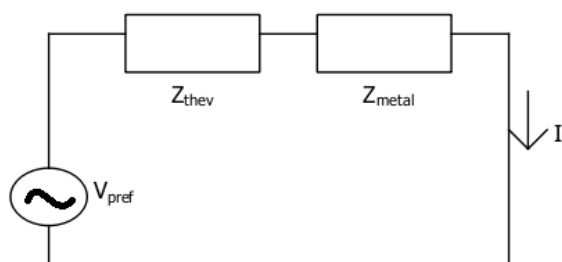
6.1.1 Μεταλλικό ή στερεό συμμετρικό βραχυκύκλωμα

Το μεταλλικό ή στερεό συμμετρικό βραχυκύκλωμα αποτελεί το σοβαρότερο είδος σφάλματος κατά τη μελέτη της ποιότητας του ΣΗΕ. Είναι συμμετρικό, δηλαδή και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους, είτε με είτε χωρίς να εμπλέκεται η γείωση. Το βραχυκύκλωμα αυτό προκαλεί τα ισχυρότερα ρεύματα σφάλματος, τόσο λόγω της ελάχιστης αντίστασης βραχυκύκλωσης όσο και του γεγονότος ότι όλες οι μηχανές του συστήματος θα τροφοδοτούσαν το βραχυκύκλωμα. Τη στιγμή του σφάλματος η τάση στο σημείο βραχυκύκλωσης μηδενίζεται καθώς και ελαττώνονται οι τάσεις των ζυγών καθιστώντας αναγκαία τη μελέτη της αντοχής του δικτύου.

Ο υπολογισμός του ρεύματος βραχυκυκλώματος για το συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα είναι απλός. Εφόσον μετατραπεί το σύστημα μόνο σε δίκτυο θετικής ακολουθίας και βρεθεί το κατά Thevenin ισοδύναμό του κύκλωμα (Εικόνα 6.8), θα χρησιμοποιηθεί η προσφαλματική τιμή της τάσης στο σημείο του σφάλματος V_{pref} , δηλαδή θα ισχύει

$$I_f = \frac{V_{pref}}{Z_{THEV} + Z_{metal}} \quad \text{Εξίσωση 6.6}$$

όπου Z_{metal} η επιπλέον αντίσταση για τον τύπο του βραχυκυκλώματος (για στερεό $Z_{metal} = 0$) [18].



Εικόνα 6.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin θετικής ακολουθίας για υπολογισμό ρεύματος βραχυκυκλώματος I_f

Η αντοχή κάθε ζυγού σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity ή SCC) μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσφέρει ένα ΣΗΕ κατά τη διάρκεια ενός

βραχυκυκλώματος στον i-ζυγό και ορίζεται σαν το γινόμενο των μέτρων της προσφαλματικής τάσης του i-ζυγού και του ρεύματος βραχυκυκλώματος, δηλαδή ισχύει

$$|SCC_i| = |V_{pref,i}| * |I_{f,i}| \text{ pu MVA} \quad \text{Εξίσωση 6.7}$$

ή χρησιμοποιώντας πολική τάση σε KV και το φασικό ρεύμα σε KA

$$|SCC_i| = \sqrt{3} * |V_{pref,i}| * |I_{f,i}| \text{ MVA} \quad \text{Εξίσωση 6.8}$$

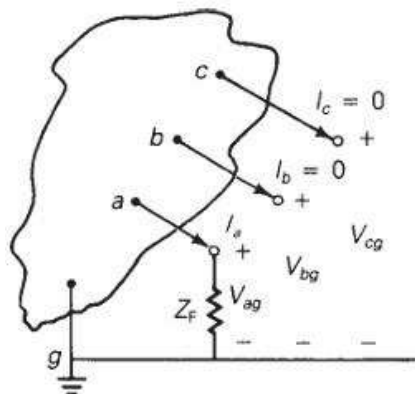
Στην περίπτωση όπου η προσφαλματική τάση του ζυγού είναι 1 pu, τότε ο υπολογισμός της αντοχής στο βραχυκύκλωμα απλοποιείται σε

$$|SCC_i| \simeq |I_{f,i}| \text{ pu MVA} \quad \text{Εξίσωση 6.9}$$

Η εξίσωση 6.9 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μελέτης ΣΗΕ χωρίς απώλειες [18].

6.1.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη (Single Line to Ground Fault ή SLGF) εμφανίζεται όταν μια φάση έρχεται σε επαφή με το έδαφος ή μια γειωμένη κατασκευή αντίστασης Z_F (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη [20]

Έστω η φάση a δημιουργεί το μονοφασικό βραχυκύκλωμα. Τότε οι συνθήκες βραχυκυκλώματος είναι οι εξής:

$$I_b = I_c = 0, \quad \text{Εξίσωση 6.10}$$

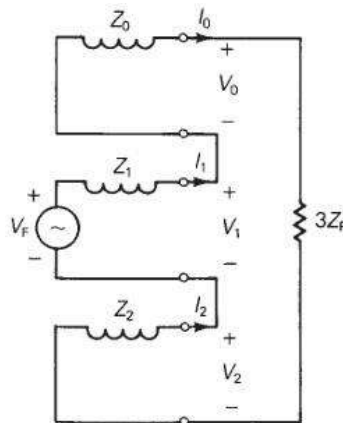
$$V_{ag} = Z_F * I_a \quad \text{Εξίσωση 6.11}$$

Από τις εξισώσεις 6.1, 6.2, 6.10 και 6.11 προκύπτει ότι

$$I_0 = I_1 = I_2, \quad \text{Εξίσωση 6.12}$$

$$(V_0 + V_1 + V_2) = (Z_F) * 3 * I_1 \quad \text{Εξίσωση 6.13}$$

δηλαδή τα ακολουθιακά δίκτυα θα συνδεθούν σε σειρά μεταξύ τους με την αντίσταση $3Z_F$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.10.



Εικόνα 6.10: Αναπαράσταση SLGF με ακολουθιακά δίκτυα [20]

Σύμφωνα με την ακολουθιακή αναπαράσταση ισχύει

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 * Z_F} \quad \text{Εξίσωση 6.14}$$

όπου V_F η προσφαλματική τάση στο σημείο του σφάλματος. Τότε το ρεύμα σφάλματος της φάσης a θα είναι ίσο με

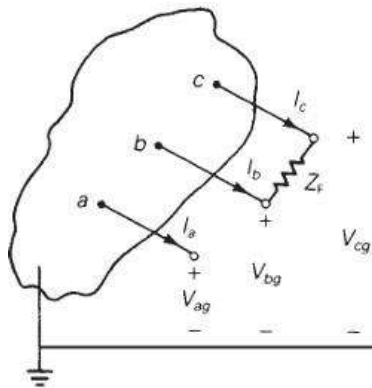
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 3 * I_1$$

Εξίσωση 6.15

Τέλος, τα ρεύματα των φάσεων b, c, δηλαδή I_b και I_c , είναι προφανώς μηδέν [20].

6.1.3 Διφασικό Βραχυκύκλωμα

Ένα διφασικό βραχυκύκλωμα (Line to Line Fault ή LLF) εμφανίζεται όταν δύο φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους, είτε απευθείας είτε μέσω μιας σύνθετης αντίστασης Z_F , χωρίς να εμπλέκεται η γείωση (Εικόνα 6.11).



Εικόνα 6.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα [20]

Έστω οι φάσεις b και c δημιουργούν το διφασικό βραχυκύκλωμα. Τότε οι συνθήκες βραχυκυκλώματος είναι οι εξής:

$$I_a = 0,$$

Εξίσωση 6.16

$$I_c = -I_b,$$

Εξίσωση 6.17

$$V_{bg} - V_{cg} = Z_F * I_b$$

Εξίσωση 6.18

Από τις εξισώσεις 6.1, 6.2, 6.16, 6.17 και 6.18 προκύπτει ότι

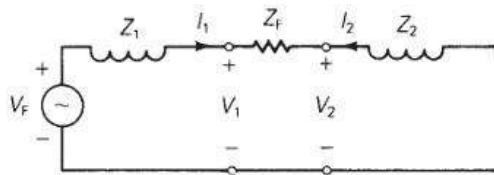
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3} * (a - a^2) * I_b \\ \frac{1}{3} * (a^2 - a) * I_b \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 6.19}$$

ή

$$I_2 = -I_1, \quad \text{Εξίσωση 6.20}$$

$$V_1 - V_2 = Z_F * I_1 \quad \text{Εξίσωση 6.21}$$

δηλαδή θα συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους τα δίκτυα θετικής και αρνητικής ακολουθίας με την αντίσταση Z_F όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.12.



Εικόνα 6.12: Αναπαράσταση LLF με ακολουθιακά δίκτυα [20]

Σύμφωνα με την ακολουθιακή αναπαράσταση ισχύει

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad \text{Εξίσωση 6.22}$$

$$I_0 = 0 \quad \text{Εξίσωση 6.23}$$

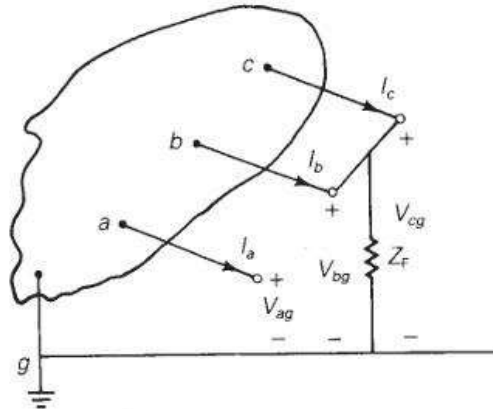
όπου V_F η προσφαλματική τάση στο σημείο του σφάλματος. Τότε τα ρεύματα σφάλματος των φάσεων b,c θα είναι ίσα με

$$I_b = -I_c = I_0 + a^2 * I_1 + a * I_2 = (a^2 - a) * I_1 \quad \text{Εξίσωση 6.24}$$

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές το γεγονός ότι το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας αποκόπτεται από την ανάλυση και δε συμβάλλει στο ρεύμα βραχυκύκλωσης [20].

6.1.4 Διφασικό Βραχυκύκλωμα με τη γη

Ένα διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη (Double Line to Ground Fault ή DLGF) εμφανίζεται όταν δύο φάσεις αγγίζουν ταυτόχρονα το έδαφος είτε απευθείας είτε μέσω αντίστασης Z_F (Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13: Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη [20]

Έστω οι φάσεις b και c δημιουργούν το διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη. Τότε οι συνθήκες βραχυκυκλώματος είναι οι εξής:

$$I_a = 0, \quad \text{Εξίσωση 6.25}$$

$$V_{cg} = V_{bg}, \quad \text{Εξίσωση 6.26}$$

$$V_{bg} = Z_F * (I_b + I_c) \quad \text{Εξίσωση 6.27}$$

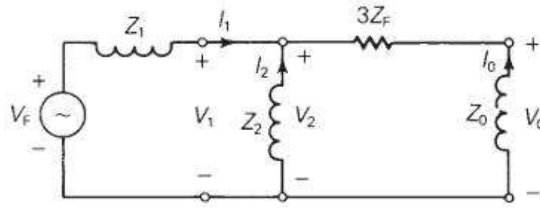
Από τις εξισώσεις 6.1, 6.2, 6.25, 6.26, 6.27 προκύπτει ότι

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0, \quad \text{Εξίσωση 6.28}$$

$$V_1 = V_2, \quad \text{Εξίσωση 6.29}$$

$$V_0 - V_1 = V_0 - V_2 = 3 * Z_F * I_0 \quad \text{Εξίσωση 6.30}$$

δηλαδή τα ακολουθιακά δίκτυα θα συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους, με το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας να περιλαμβάνει την αντίσταση $3Z_F$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.14.



Εικόνα 6.14: Αναπαράσταση DLGF με ακολουθιακά δίκτυα [20]

Σύμφωνα με την ακολουθιακή αναπαράσταση ισχύει

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + \left[\frac{Z_2 * (Z_0 + 3 * Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3 * Z_F} \right]} \quad \text{Εξίσωση 6.31}$$

και με χρήση διαιρέτη ρεύματος, τα ρεύματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι ίσα με

$$I_2 = (-I_1) * \frac{Z_0 + 3 * Z_F}{Z_0 + Z_2 + 3 * Z_F} \quad \text{Εξίσωση 6.32}$$

$$I_0 = (-I_1) * \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2 + 3 * Z_F} \quad \text{Εξίσωση 6.33}$$

όπου V_F η προσφαλματική τάση στο σημείο του σφάλματος. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_F θα βρεθεί βρίσκοντας τα ρεύματα των φάσεων I_b, I_c και έπειτα προσθέτοντας τα ρεύματα αυτά μεταξύ τους, δηλαδή

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \text{Εξίσωση 6.34}$$

$$I_F = I_b + I_c \quad \text{Εξίσωση 6.35}$$

Συνεπώς, κατά τη μελέτη του διφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη, χρησιμοποιούνται και τα τρία ακολουθιακά δίκτυα [20].

6.2 Ευστάθεια συστήματος και κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος

Η ευστάθεια του ΣΗΕ αποτελεί κρίσιμο κριτήριο της ποιότητας των συνιστωσών του. Αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος ισχύος να μεταβάλλεται από ένα σημείο λειτουργίας σταθερής κατάστασης μετά από διαταραχή σε ένα άλλο σημείο λειτουργίας σταθερής κατάστασης, χωρίς οι γεννήτριες να χάνουν τον συγχρονισμό ή να έχουν μη αποδεκτές αποκλίσεις τάσης και συχνότητας. Διακρίνονται πέντε κατηγορίες ευστάθειας οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα ενός ΣΗΕ:

- Ευστάθεια γωνίας ρότορα.
- Ευστάθεια τάσης.
- Ευστάθεια συχνότητας.
- Ευστάθεια συντονισμού.
- Ευστάθεια μετατροπών.

Η ευστάθεια συντονισμού και η ευστάθεια μετατροπών εντάσσονται στην ευστάθεια του ΣΗΕ λόγω του γεγονότος της υψηλής διείσδυσης γεννητριών με διασύνδεση μετατροπών (Converter-Interfaced Generators ή CIGs) [21].

Σημαντική κατηγορία αποτελεί η ευστάθεια γωνίας ρότορα. Η ευστάθεια γωνίας ρότορα αφορά την ικανότητα των διασυνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών σε ένα ΣΗΕ να παραμείνουν σε συγχρονισμό υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και να ανακτούν το συγχρονισμό αφού υποβληθούν σε μικρή ή μεγάλη διαταραχή. Μια μηχανή διατηρεί τον συγχρονισμό της εάν η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ίση και αντίθετη με την μηχανική ροπή που παρέχεται από τον κύριο κινητήρα της. Κατά συνέπεια, αυτός ο τύπος ευστάθειας εξαρτάται από την ικανότητα των σύγχρονων μηχανών να διατηρούν ή να αποκαθιστούν την ισορροπία μεταξύ αυτών των δύο αντίθετων ροπών [21].

Εξίσου σημαντική κατηγορία αποτελεί η ευστάθεια τάσης. Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερές τάσεις κοντά στην ονομαστική τιμή σε όλους τους ζυγούς του συστήματος αφού υποβληθεί σε διαταραχή. Εξαρτάται από την ικανότητα των συνδυασμένων συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς να παρέχουν την ισχύ

που απαιτείται από τα φορτία. Αυτή η ικανότητα περιορίζεται από τη μέγιστη μεταφορά ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σύνολο ζυγών και συνδέεται με την πτώση τάσης που συμβαίνει όταν η ισχύς ρέει μέσω επαγωγικών αντιδράσεων του δικτύου μεταφοράς [21].

Η τελική κατηγορία ευστάθειας που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε ένα παραδοσιακό ΣΗΕ είναι η ευστάθεια συχνότητας. Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί μια σταθερή συχνότητα συστήματος μετά από διαταραχή. Εξασφαλίζει ότι οι αποκλίσεις συχνότητας παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων για την αποφυγή ζημιών στον εξοπλισμό, κατάρρευσης του συστήματος ή διακοπής ρεύματος [21].

Οι παραπάνω τρεις κατηγορίες περιλαμβάνονται σε όλα τα είδη ΣΗΕ καθώς δεν είναι εφικτή η βελτίωση της ποιότητας του ΣΗΕ χωρίς να ληφθούν υπόψη. Οι υπόλοιπες δύο κατηγορίες (ευστάθεια συντονισμού και μετατροπών) αφορούν σύγχρονα ΣΗΕ στα οποία περιλαμβάνονται πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών (CIG). Αυτές οι πηγές περιλαμβάνουν συστήματα όπως ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πάρκα), αποθήκευση μπαταριών κ.λπ.

Η ευστάθεια συντονισμού αφορά την ταλαντώσεις συντονισμού του ΣΗΕ. Αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να αντέχει και να αποσβένει ταλαντώσεις συντονισμού που προκαλούνται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρονικών ισχύος, γραμμών μεταφοράς και παθητικά στοιχεία όπως οι πυκνωτές. Σε αυτή την κατηγορία μελετώνται στρατηγικές μετριασμού ασταθειών συντονισμού που προκύπτουν από

- Την διείδυση ηλεκτρονικών ισχύος όπως οι αντιστροφείς των Φ/Β πάρκων.
- Την σειριακή αντιστάθμιση σε γραμμές μεταφοράς.
- Τις τράπεζες πυκνωτών στο δίκτυο κ.λπ.

Τέλος, για την βελτίωση της ποιότητας του ΣΗΕ με CIG είναι αναγκαία η μελέτη της ευστάθειας των μετατροπέων. Η ευστάθεια των μετατροπέων αναφέρεται στην ικανότητα λειτουργίας των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος και αλληλεπίδρασης τους με τις υπόλοιπες συνιστώσες του ΣΗΕ, καθώς η λειτουργία του μετατροπέα διακρίνεται για:

- Την ταχύτατη ανταπόκρισή του σε μεταβολές του συστήματος.
- Την χαμηλή του αδράνεια.
- Την είσοδο αρμονικών στο σύστημα λόγω των διακοπτικών του λειτουργιών.
- Τις προκλήσεις συγχρονισμού που δημιουργεί, καθώς οι μετατροπείς βασίζονται σε βρόχους κλειδώματος φάσης (Phase-Locked Loops ή PLLs), που μπορεί να είναι ευαίσθητοι σε διαταραχές [21].

Η γενικότερη κατηγοριοποίηση της ευστάθειας του ΣΗΕ βασίζεται στο χρονοδιάγραμμα των διαταραχών και την απόκριση του συστήματος. Η κατηγοριοποίηση αυτή περιλαμβάνει την:

- Ευστάθεια σταθερής κατάστασης, όπου εξετάζονται μικρές ταλαντώσεις γωνίας ισχύος λόγω σταδιακής αύξησης του φορτίου.
- Μεταβατική ευστάθεια, όπου διερευνάται η ικανότητα διατήρησης του συγχρονισμού μετά από μια μεγάλη ξαφνική διαταραχή.
- Δυναμική ευστάθεια, όπου μελετώνται τυχόν ταλαντώσεις χαμηλών συχνοτήτων από ενέργειες ρυθμιστή γεννήτριας, συστήματος διέγερσης και AGC (αυτόματου ελέγχου παραγωγής ή Automatic Generation Control).

Η χρονική διάρκεια αξιολόγησης του συστήματος διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία και ανάλογα του τύπου της αξιολόγησης [20].

6.2.1 Μεταβατική Ευστάθεια και Εξισώσεις ταλάντωσης

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας δίνεται έμφαση στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μεταβατική ευστάθεια αναφέρεται στην

ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί συγχρονισμό μετά από ξαφνική διαταραχή. Αυτή η διαταραχή μπορεί να είναι βραχυκύκλωμα, διακοπή της γεννήτριας, μεταγωγή γραμμής (line switching) κ.λπ. Η μεταβατική ευστάθεια εστιάζει στην συμπεριφορά του συστήματος αμέσως μετά τη διαταραχή και καθορίζει εάν οι γεννήτριες μπορούν να παραμείνουν σε συγχρονισμό. Συνήθως, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός της κατάστασης του συστήματος πριν τη διαταραχή.
- Εισαγωγή της διαταραχής στο σύστημα.
- Υπολογισμός των μηχανικών ταλαντώσεων των δρομέων των μηχανών που προσδιορίζονται από τον υπολογισμό της γωνιακής θέσης του.
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς των ταλαντώσεων της γωνιακής θέσης όλων των δρομέων των μηχανών. Στην περίπτωση απόσβεσης, όταν δηλαδή το σύστημα τείνει να σταθεροποιείται στη νέα μόνιμη κατάσταση, κρίνεται ως μεταβατικά ευσταθές για τη συγκεκριμένη διαταραχή [18], [20].

Η μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας απαιτεί την μελέτη της συμπεριφοράς της σύγχρονης γεννήτριας. Για αυτό το λόγο καθίσταται αναγκαία η ανάλυση της εξίσωσης ταλάντωσης της γεννήτριας. Η εξίσωση ταλάντωσης βοηθά στην πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο αλλάζουν οι γωνίες του ρότορα της γεννήτριας με την πάροδο του χρόνου.

Προτού παρουσιαστεί η εξίσωση της ταλάντωσης, θα πρέπει να αναφερθεί η εξίσωση της κίνησης του στροβίλου. Έστω μια μονάδα παραγωγής που αποτελείται από μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια και το μέσο κίνησης του στροβίλου της. Η κίνηση του στροβίλου καθορίζεται από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, που δίνεται από

$$J * \alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a \quad \text{Εξίσωση 6.36}$$

όπου

J : η συνολική ροπή αδράνειας περιστρεφόμενων μαζών ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).

α_m : η γωνιακή επιτάχυνση στροβίλου (rad/s^2).

T_m : η μηχανική ροπή που παρέχεται από το μέσο κίνησης του στροβίλου μείον τη ροπή επιβράδυνσης λόγω μηχανικών απωλειών ($\text{N}\cdot\text{m}$).

T_e : η ηλεκτρική ροπή που αντιστοιχεί στη συνολική τριφασική ηλεκτρική ισχύ εξόδου της γεννήτριας συν ηλεκτρικές απώλειες (N-m).

T_a : καθαρή ροπή επιτάχυνσης (N-m).

Η γωνιακή επιτάχυνση του στροβίλου α_m δίνεται από

$$\alpha_m(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} \quad \text{Εξίσωση 6.37}$$

όπου

ω_m : η γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου (rad/s).

θ_m : η γωνιακή θέση του στροβίλου ως προς έναν ακίνητο άξονα (rad) [20].

Βάσει των παραπάνω εξισώσεων αλλάζει και η ταχύτητα του στροβίλου. Η ταχύτητα του στροβίλου εξαρτάται άμεσα από τη σχέση μεταξύ T_m και T_e . Εάν

- $T_m(t) = T_e(t)$ (σταθερή κατάσταση), η γωνιακή επιτάχυνση α_m είναι μηδέν, με αποτέλεσμα μια σταθερή ταχύτητα στροβίλου που ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα.
- $T_m(t) > T_e(t)$, η T_a είναι θετική και α_m είναι επομένως θετική, με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του στροβίλου.
- $T_m(t) < T_e(t)$, η T_a είναι αρνητική και α_m είναι επομένως αρνητική, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας του στροβίλου [20].

Είναι βολικό η εξίσωση της κίνησης του στροβίλου να μετατραπεί στην εξίσωση ταλάντωσης. Με συνοπτικό τρόπο παρουσιάζονται τα βήματα μετατροπής της εξίσωσης κίνησης:

- Εκφράζεται η θ_m σε σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου ω_{msyn} (rad/s) και γωνιακή θέση στροβίλου σε σχέση με μια σύγχρονη περιστρεφόμενη αναφορά δ_m (rad), σύμφωνα με τον τύπο

$$\theta_m(t) = \omega_{msyn} * t + \delta_m(t) \quad \text{Εξίσωση 6.38}$$

- Έπειτα μετατρέπεται η ροπή σε ισχύ per-unit, πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση 6.37 με $\omega_m(t)$ και διαιρώντας την με S_{rated} , την ονομαστική ισχύ σε MVA της γεννήτριας, σύμφωνα με τη σχέση

$$p_{p.u}(t) = \frac{\omega_m(t) * T_m(t)}{S_{rated}} \quad \text{Εξίσωση 6.39}$$

- Στη συνέχεια συμπεριλαμβάνεται η κανονικοποιημένη σταθερά αδράνειας H , αντικαθιστώντας στην προηγούμενη εξίσωση βάσει τύπου

$$H = \frac{\frac{1}{2} * J * \omega_{msyn}^2}{S_{rated}} \quad \text{Εξίσωση 6.40}$$

- Ορίζεται η per-unit γωνιακή ταχύτητα στροβίλου $\omega_{p.u}$ και αντικαθίστανται οι κατάλληλοι όροι βάσει σχέσης

$$\omega_{p.u}(t) = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}} \quad \text{Εξίσωση 6.41}$$

- Μετατρέπονται οι μηχανικές ποσότητες $\alpha_m(t)$, $\omega_m(t)$, $\delta_m(t)$ και ω_{msyn} στις ηλεκτρικές τους ποσότητες για σύγχρονη γεννήτρια με P πόλους με βάση τις σχέσεις

$$a_e(t) = \frac{P}{2} * \alpha_m(t) \quad \text{Εξίσωση 6.42}$$

$$\omega_e(t) = \frac{P}{2} * \omega_m(t) \quad \text{Εξίσωση 6.43}$$

$$\delta_e(t) = \frac{P}{2} * \delta_m(t) \quad \text{Εξίσωση 6.44}$$

$$\omega_{esyn} = \frac{P}{2} * \omega_{msyn} \quad \text{Εξίσωση 6.45}$$

$$\omega_{p.u} = \frac{\omega(t)}{\omega_{syn}} = \frac{\frac{2}{P} * \omega(t)}{\frac{2}{P} * \omega_{esyn}} = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}} \quad \text{Εξίσωση 6.46}$$

- Συμπεριλαμβάνεται ο όρος της αναπαράστασης της ροπής απόσβεσης κάθε φορά που η γεννήτρια αποκλίνει από τη σύγχρονη ταχύτητά της, με τιμή ανάλογη με την απόκλιση της ταχύτητας, δηλαδή ο όρος $(D/\omega_{esyn}) * (d\delta_e(t)/dt)$, όπου οι μονάδες του D είναι per-unit ισχύς διαιρεμένη με per-unit απόκλιση ταχύτητας.

Βάσει των παραπάνω βημάτων μετατροπής, η εξίσωση ταλάντωσης είναι η

$$\frac{2 * H}{\omega_{syn}} * \omega_{p.u}(t) * \left(\frac{d^2 \delta_e(t)}{dt^2} \right) = p_{mp.u}(t) - p_{ep.u}(t) - \frac{D}{\omega_{esyn}} * \left(\frac{d\delta_e(t)}{dt} \right) \quad \text{Εξίσωση 6.47}$$

$$= p_{ap.u}(t)$$

όπου

$p_{mp.u}$: η per-unit ισχύς της μηχανικής ροπής.

$p_{ep.u}$: η per-unit ισχύς της ηλεκτρικής ροπής.

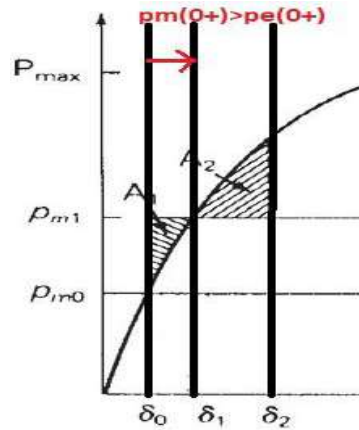
$p_{ap.u}$: η per-unit ισχύς της καθαρής ροπής [20].

Γνωρίζοντας την εξίσωση ταλάντωσης, είναι δυνατό να καθοριστεί η συμπεριφορά του στροβίλου με μαθηματικές τεχνικές. Πρακτικά χρησιμοποιούνται δύο μαθηματικοί τρόποι για τη μελέτη μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων:

- Με άμεσες μεθόδους, όπου η ευστάθεια εξετάζεται χωρίς την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Αυτές οι μέθοδοι αποσκοπούν στην ερμηνεία και την κατανόηση του φαινομένου της μεταβατικής ευστάθειας στα ηλεκτρικά συστήματα. Χαρακτηριστική άμεση μέθοδος είναι η μέθοδος των ίσων εμβαδών.
- Με έμμεσες μεθόδους, όπου επιλύονται οι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις με αριθμητικές μεθόδους, που εφαρμόζονται σε ψηφιακούς υπολογιστές. Χαρακτηριστική έμμεση μέθοδος είναι η μέθοδος του Euler [18], [20].

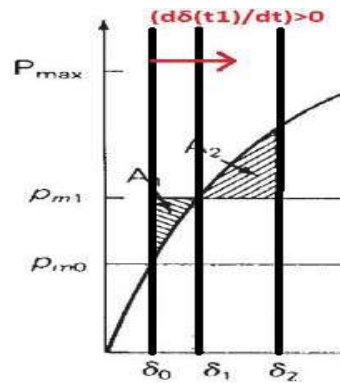
Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη σταθεροποίησης της γεννήτριας στη νέα μόνιμη κατάσταση p_{m1} και δ_1 , παρατηρούνται τα εξής φαινόμενα:

1. $p_m(0^+) = p_{m1} > p_e(0^+)$, η ισχύς καθαρής ροπής επιτάχυνσης $p_a(0^+)$ είναι θετική και $d^2\delta(0^+)/dt^2$ είναι θετικό. Ο στρόβιλος επιταχύνεται και η δ αυξάνεται (Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.16: Επιτάχυνση στρόβιλου για χρονική στιγμή $t = 0^+$

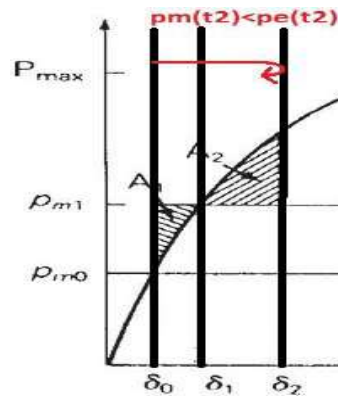
2. Τη χρονική στιγμή t_1 , όπου $\delta = \delta_1$, $p_e = p_{m1}$ και $d^2\delta(0^+)/dt^2 = 0$. Ωστόσο $d\delta(t_1)/dt$ είναι θετικό και η δ συνεχίζει να αυξάνεται υπερβαίνοντας την τελική της σταθερή κατάσταση (Εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.17: Πρώτη υπέρβαση σταθερής κατάστασης για χρονική στιγμή $t = t_1$

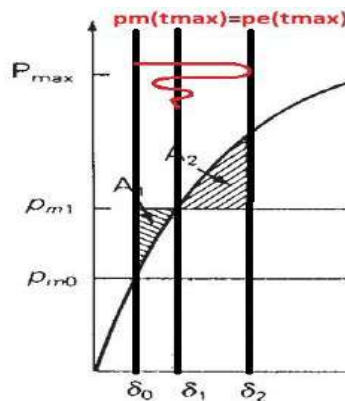
3. Τη χρονική στιγμή $t_1 < t < t_2$, $\delta > \delta_1$, $p_m < p_e$, η ισχύς καθαρής ροπής επιτάχυνσης $p_a(t_1 < t < t_2)$ είναι αρνητική και ο στρόβιλος επιβραδύνεται.

4. Τη χρονική στιγμή $t = t_2$, $\delta = \delta_2 = \delta_{max}$ και η δ θα τείνει να μετακινηθεί πάλι προς το δ_1 (Εικόνα 6.18).



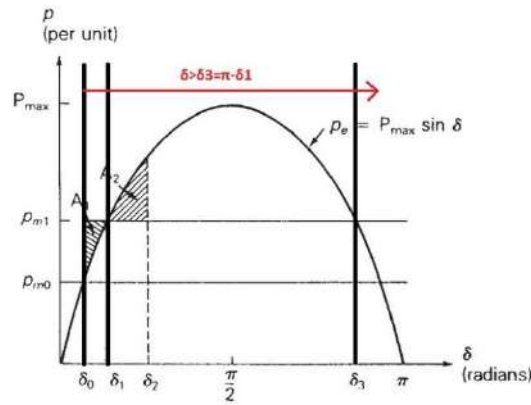
Εικόνα 6.18: Ολοκλήρωση πρώτης ταλάντωσης τη χρονική στιγμή $t=t_2$

5. Λόγω των επιδράσεων απόσβεσης, ο στρόβιλος θα σταθεροποιηθεί στην τελική σταθερή κατάσταση γωνιακής θέσης δ_1 σε χρόνο $t = t_{final}$ ύστερα από ταλαντώσεις γύρω σε αυτή (Εικόνα 6.19).



Εικόνα 6.19: Ταλαντώσεις και σταθεροποίηση τη χρονική στιγμή $t=t_{final}$

6. Εάν κατά την πρώτη ταλάντωση ($t = t_2$) η γωνιακή θέση στροβίλου ξεφύγει από το όριο μεταβατικής ευστάθειας δ_3 για το οποίο ισχύει $\delta_3 = \pi - \delta_1$, τότε η p_m υπερσχύει της p_e και ο στρόβιλος θα επιταχύνει ξανά προκαλώντας περαιτέρω αύξηση της δ και απώλεια συγχρονισμού της γεννήτριας (Εικόνα 6.20) [20].



Εικόνα 6.20: Αποσυγχρονισμός γεννήτριας για παραβίαση του ορίου μεταβατικής ευστάθειας

Η διατήρηση της ευστάθειας επιτυγχάνεται με την ισοδυναμία των εμβαδών A_1 και A_2 . Συγκεκριμένα, τα εμβαδά επιτάχυνσης A_1 και A_2 είναι ίσα με

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{mp.u} - p_{ep.u}) d\delta, \quad \text{Εξίσωση 6.49}$$

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_{ep.u} - p_{mp.u}) d\delta \quad \text{Εξίσωση 6.50}$$

και εάν διατηρείται η ευστάθεια τότε ισχύει

$$A_1 = A_2$$

ή

$$p_{mp.u} * (\delta_2 - \delta_0) = P_{ep.u,max} * [\cos(\delta_0) - \cos(\delta_2)] \quad \text{Εξίσωση 6.51}$$

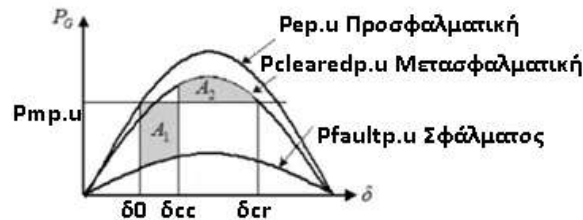
Στην πραγματικότητα, έχει ουσία η μελέτη αυτών των εμβαδών κατά τα σφάλματα. Για να επανέλθει η γεννήτρια στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας θα πρέπει η δ να μη ξεπεράσει το όριο μεταβατικής ευστάθειας $\delta_{cr} = \delta_3 = \pi - \delta_1$. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει κατά την πρώτη ταλάντωση οι διακόπτες ασφαλείας να εκκαθαρίσουν το σφάλμα πριν την χρονική στιγμή $t = t_{cc}$ γωνιακής θέσης στροβίλου $\delta = \delta_{cc}$, έτσι ώστε τα εμβαδά A_1 (χρονική διάρκεια σφάλματος) και A_2 (εκκαθάριση σφάλματος) να είναι ίσα. Η δ_{cc} ονομάζεται κρί-

σιμη γωνία εκκαθάρισης και εξαρτάται από την τιμή της $p_{mp.u}$, ενώ ο χρόνος t_{cc} ονομάζεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης CCT (Critical Clearing Time). Ο υπολογισμός της κρίσιμης γωνίας εκκαθάρισης βασίζεται στην σταθερή $p_{mp.u}$, στην καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος που σχηματίζει το σφάλμα πριν την εκκαθάρισή του $p_{faultp.u}$ και την μετασφαλματική καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος $p_{clearedp.u}$, αντικαθιστώντας κατάλληλα στις εξισώσεις 6.49 και 6.50. Δηλαδή θα ισχύει

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (p_{mp.u} - p_{faultp.u}) d\delta, \quad \text{Εξίσωση 6.52}$$

$$A_2 = \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{cr}} (p_{clearedp.u} - p_{mp.u}) d\delta \quad \text{Εξίσωση 6.53}$$

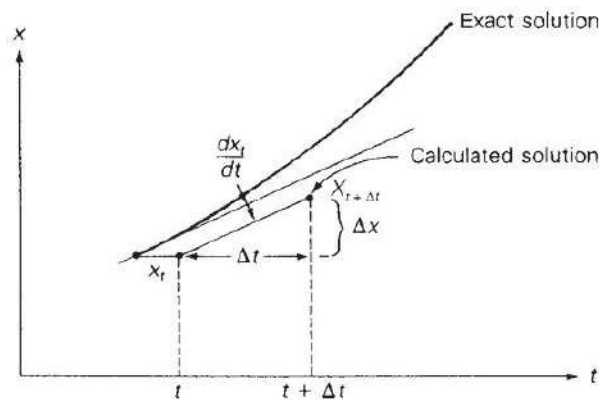
όπου για $A_1 = A_2$ ο άγνωστος όρος είναι η δ_{cc} και με τη χρήση της εξίσωσης ταλάντωσης επιτυγχάνεται και η εύρεση του t_{cc} . Σημειώνεται ότι τόσο η καμπύλη $p_{faultp.u}$ όσο η καμπύλη $p_{clearedp.u}$ αλλάζουν ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος στον άπειρο ζυγό της γεννήτριας, γεγονός το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.21 [20].



Εικόνα 6.21: Κριτήριο ίσων εμβαδών κατά τη διάρκεια του σφάλματος και μετά την εκκαθάρισή του [28]

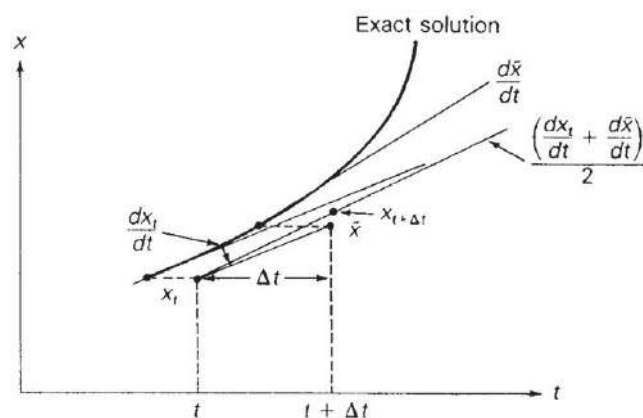
6.2.3 Η μέθοδος Euler

Για προβλήματα ευστάθειας πολλαπλών μηχανών χρησιμοποιούνται τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση της εξίσωσης ταλάντωσης κάθε μηχανής. Η πιο απλή για την κατανόηση των τεχνικών αυτών είναι η μέθοδος Euler, η οποία υπολογίζει τη λύση μιας διαφορικής εξίσωσης προσεγγίζοντας την καμπύλη με μικρά ευθύγραμμα βήματα. Ξεκινά από ένα γνωστό αρχικό σημείο και προχωρά υπολογίζοντας την κλίση σε αυτό το σημείο. Χρησιμοποιώντας αυτή την κλίση, προβλέπει το επόμενο σημείο κάνοντας ένα μικρό βήμα προς την κατεύθυνση της κλίσης, γεγονός το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.22. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται, χτίζοντας κατά προσέγγιση διαδρομή κατά μήκος της καμπύλης.



Εικόνα 6.22: Γραφική παράσταση μεθόδου Euler [20]

Για την βελτίωση της ακρίβειας χρησιμοποιείται μια τροποποίηση στη μέθοδο Euler όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.23. Η τροποποίηση αυτή υπολογίζει την κλίση τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος του διαστήματος και στη συνέχεια υπολογίζει τον μέσο όρο αυτών των κλίσεων [20].



Εικόνα 6.23: Γραφική παράσταση τροποποιημένης μεθόδου Euler [20]

Η τροποποιημένη μέθοδος Euler χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας ω και γωνιακής θέσης στροβίλου δ . Με κατάλληλη επεξεργασία της εξίσωσης ταλάντωσης 6.47, προκύπτουν οι καμπύλες

$$\frac{d\delta_t}{dt} = \omega_t - \omega_{syn}, \quad \text{Εξίσωση 6.54}$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{p_{ap.u,t} * \omega_{syn}}{2 * H * \omega_{p.u,t}} \quad \text{Εξίσωση 6.55}$$

όπου ω_t, δ_t οι παλιές τιμές τους στην αρχή του διαστήματος και $p_{ap.u,t}$ η per-unit ισχύς της καθαρής ροπής υπολογισμένη για $\delta = \delta_t$ και $\omega_{p.u,t} = \omega_t / \omega_{syn}$. Εφαρμόζονται τα παρακάτω βήματα:

1. Εύρεση των προκαταρκτικών τιμών $\tilde{\delta}$, $\tilde{\omega}$ βάσει εξισώσεων

$$\tilde{\delta} = \delta_t + \left(\frac{d\delta_t}{dt} \right) * \Delta t, \quad \text{Εξίσωση 6.56}$$

$$\tilde{\omega} = \omega_t + \left(\frac{d\omega_t}{dt} \right) * \Delta t \quad \text{Εξίσωση 6.57}$$

2. Υπολογισμός κλίσεων στα $\tilde{\delta}$, $\tilde{\omega}$ χρησιμοποιώντας κατάλληλα την εξίσωση ταλάντωσης 6.47, από την οποία προκύπτουν εξισώσεις παρόμοιες με τις εξισώσεις 6.54 και 6.55

$$\frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \tilde{\omega} - \omega_{syn}, \quad \text{Εξίσωση 6.58}$$

$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \frac{\tilde{p}_{ap.u} * \omega_{syn}}{2 * H * \tilde{\omega}_{p.u}} \quad \text{Εξίσωση 6.59}$$

όπου $\tilde{p}_{ap.u}$ η per-unit ισχύς της καθαρής ροπής υπολογισμένη για $\delta = \tilde{\delta}$ και $\tilde{\omega}_{p.u} = \tilde{\omega}/\omega_{syn}$.

3. Εύρεση των νέων τιμών $\delta_{t+\Delta t}$ και $\omega_{t+\Delta t}$ στο τέλος του διαστήματος σύμφωνα με τις εξισώσεις

$$\delta_{t+\Delta t} = \delta_t + \frac{\left(\frac{d\delta_t}{dt} + \frac{d\tilde{\delta}}{dt}\right)}{2}, \quad \text{Εξίσωση 6.60}$$

$$\omega_{t+\Delta t} = \omega_t + \frac{\left(\frac{d\omega_t}{dt} + \frac{d\tilde{\omega}}{dt}\right)}{2} \quad \text{Εξίσωση 6.61}$$

Η διαδικασία ξεκινά για $t = 0$ με προσδιορισμένες αρχικές τιμές δ_0 και ω_0 και συνεχίζει επαναληπτικά μέχρι τελικής χρονικής στιγμής $t = t_{final}$ [20].

Κεφάλαιο 7 Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκού πάρκου στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

7.1 Το πρότυπο σύστημα 30 ζυγών στο λογισμικό Powerworld

Το λογισμικό Powerworld είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για τη μελέτη και διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας ενός ΣΗΕ. Χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας για την ανάλυση, τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ΣΗΕ, καθώς έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει και να βελτιστοποιεί την απόδοση του συστήματος ισχύος βάσει σεναρίων. Το εργαλείο αυτό διαθέτει:

- Ανάλυση ροής ισχύος, όπου αναλύεται η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για την αξιολόγηση της ροής ισχύος.
- Δυναμική προσομοίωση, όπου δίνεται η δυνατότητα προσομοιώσεων μεταβατικών φαινομένων επιτρέποντας τη μελέτη της ευστάθειας του συστήματος και την απόκριση σε διαταραχές.
- Ανάλυση βραχυκυκλώματος, όπου αναλύονται τα βραχυκυκλώματα για την αξιολόγηση των συστημάτων προστασίας.
- Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου υποστηρίζει τη μοντελοποίηση ΑΠΕ όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια.

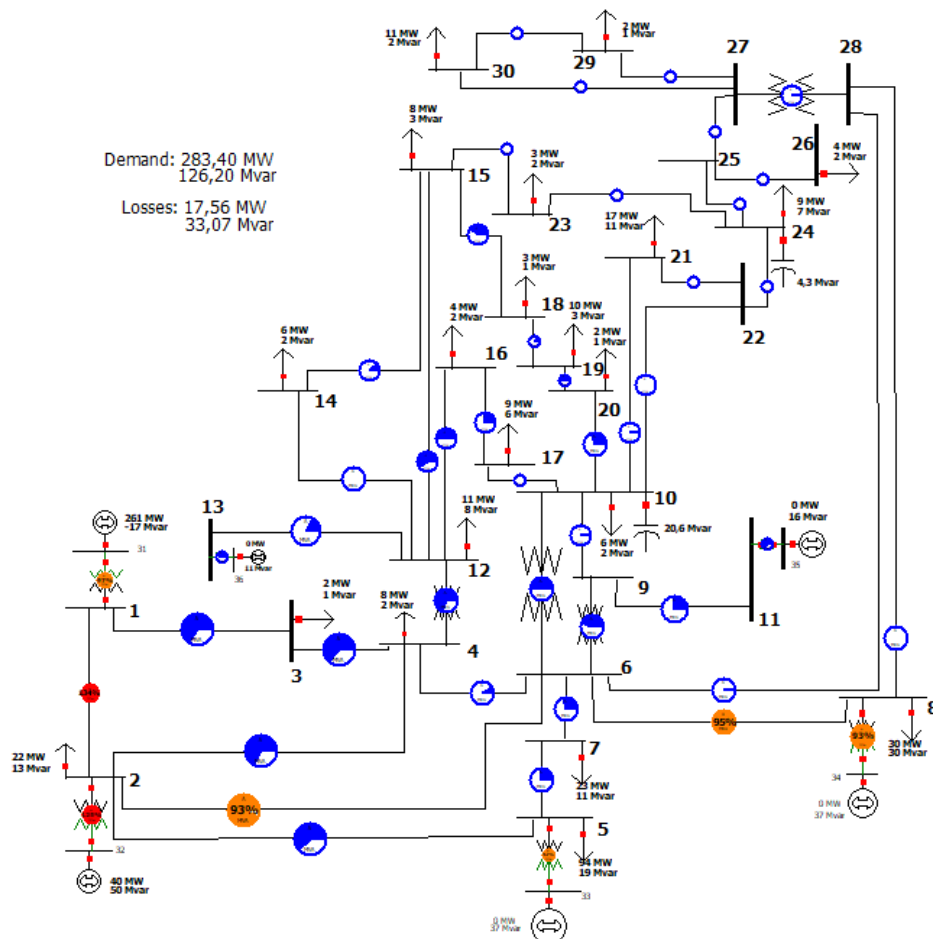
Πάνω στο λογισμικό Powerworld θα προσομοιωθεί η μόνιμη λειτουργία του συστήματος 30 ζυγών. Το σύστημα αυτό αντιπροσωπεύει μια απλή προσέγγιση του αμερικανικού ΣΗΕ σύμφωνα με τον Δεκέμβριο του 1961 το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Το σύστημα αποτελείται από:

- 2 σύγχρονες γεννήτριες, όπου αναλαμβάνουν τον ρόλο παραγωγής ισχύος.
- 4 σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς σύγχρονους αντισταθμιστές, όπου αναλαμβάνουν τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Σε αυτές τις γεννήτριες η ποσότητα άεργου ισχύος μπορεί να ρυθμίζεται συνεχώς.
- 21 φορτία.

- 2 αντισταθμιστές (fixed shunts).
- 37 γραμμές μεταφοράς.
- 4 μετασχηματιστές [22], [23].

Ως ζυγός αναφοράς (slack bus) του συστήματος ορίζεται ο ζυγός 1 (GLEN LYN). Οι βάσεις τάσεων είναι

- 132 kV για τους ζυγούς 1 - 8 και 28
- 33 kV για τους ζυγούς 10,12,14-27,29 και 30
- 11 kV για τους ζυγούς 11 και 13
- 1 kV για τον ζυγό 9



Σχήμα 7.1: Αναπαράσταση συστήματος 30 ζυγών στο λογισμικό Powerworld

Η ζήτηση του φορτίου είναι 283,4 MW και 126,2 MVar σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Δεδομένα φορτίων συστήματος 30 ζυγών

Bus Number	Bus Name	Pload (MW)	Qload (Mvar)
2	CLAYTOR 132,00	21,7	12,7
3	KUMIS 132,00	2,4	1,2
4	HANCOCK 132,00	7,6	1,6
5	FIELDAL 132,00	94,2	19,0
7	BLAINE 132,00	22,8	10,9
8	REUSENS 132,00	30,0	30,0
10	ROANOKE 33,00	5,8	2,0
12	HANCOCK 33,00	11,2	7,5
14	BUS 14 33,00	6,2	1,6
15	BUS 15 33,00	8,2	2,5
16	BUS 16 33,00	3,5	1,8
17	BUS 17 33,00	9,0	5,8
18	BUS 18 33,00	3,2	0,9
19	BUS 19 33,00	9,5	3,4
20	BUS 20 33,00	2,2	0,7
21	BUS 21 33,00	17,5	11,2
23	BUS 23 33,00	3,2	1,6
24	BUS 24 33,00	8,7	6,7
26	BUS 26 33,00	3,5	2,3
29	BUS 29 33,00	2,4	0,9
30	BUS 30 33,00	10,6	1,9

Οι απώλειες του συστήματος, έπειτα από επίλυση Newton-Raphson είναι 17,56 MW και 33,07 MVar. Οι απώλειες αυτές προέρχονται από τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές. Σημαντικότερες απώλειες σημειώνονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Απώλειες συστήματος

From Number	To Number	MW Loss	Mvar Loss	% of MVA Limit (Max)
1	2	5,19	9,69	134,3
32	2	0	0	125,1
31	1	0	0,01	96,8
6	8	0,11	-0,53	95,9

34	8	0	0	93,2
2	6	1,95	1,97	92,8
33	5	0	0	92,2
4	12	0	4,69	71,5
1	3	3,11	6,97	67,6
2	4	1,02	-0,79	67,4
35	11	0	0	65
2	5	2,95	7,99	63,4
3	4	0,86	1,59	63,3
12	15	0,22	0,43	59,9
12	16	0,05	0,11	50
6	10	0	1,28	49,6
19	20	0,02	0,03	45,6
6	9	0	1,63	45,2
13	36	0	0	42,8
15	18	0,04	0,08	39
10	20	0,08	0,18	30,5
6	7	0,38	-0,55	29,4
5	7	0,17	-1,63	28,6
9	11	0	0,47	25
16	17	0,01	0,03	24,9
18	19	0	0,01	17,9
12	13	0	0,14	16,5
14	15	0,01	0,01	10,8
4	6	0,63	1,29	7,4
9	10	0	0,8	2,8
28	27	0	1,29	1,9
10	21	0,11	0,24	1,9
6	28	0,06	-1,12	1,9
10	22	0,05	0,11	0,9
12	14	0,07	0,16	0,8
27	30	0,16	0,31	0,7
10	17	0,01	0,04	0,7
22	24	0,05	0,07	0,7
27	29	0,09	0,16	0,6
15	23	0,03	0,06	0,6
25	27	0,02	0,05	0,5
25	26	0,04	0,07	0,4
8	28	0	-4,35	0,4
29	30	0,03	0,06	0,4
24	25	0,01	0,02	0,2
21	22	0	0	0,2
23	24	0,01	0,01	0,2

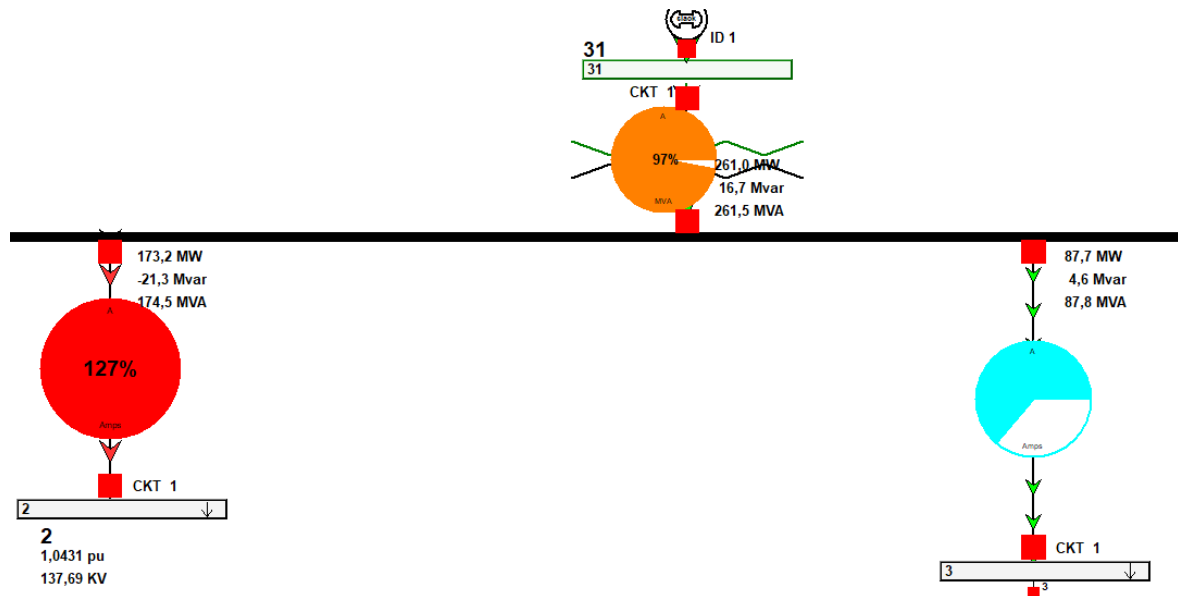
Οι τάσεις στους ζυγούς φαίνονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3: Τάσεις ζυγών συστήματος

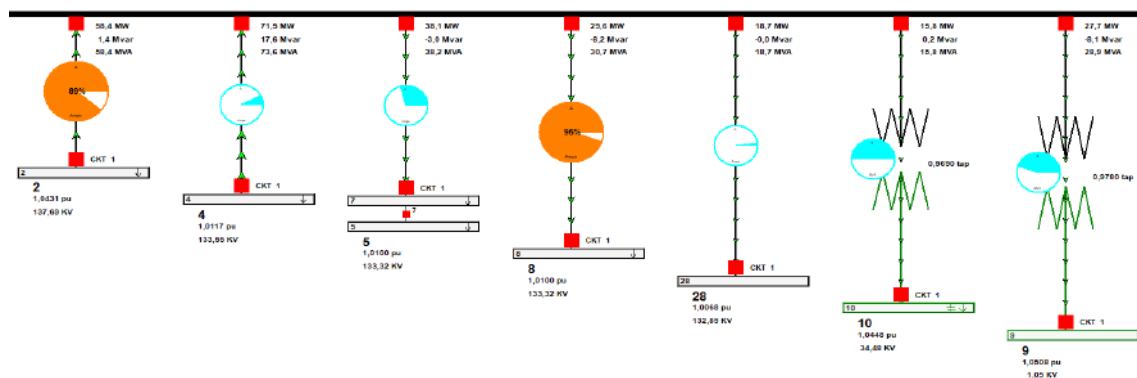
Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,04	-5,35
3	1,02	-7,53
4	1,01	-9,29
5	1,01	-14,17
6	1,01	-11,07
7	1,00	-12,87
8	1,01	-11,82
9	1,05	-14,11
10	1,04	-15,7
11	1,08	-14,11
12	1,06	-14,95
13	1,07	-14,95
14	1,04	-15,84
15	1,04	-15,93
16	1,04	-15,53
17	1,04	-15,86
18	1,03	-16,54
19	1,03	-16,72
20	1,03	-16,52
21	1,03	-16,14
22	1,03	-16,13
23	1,03	-16,32
24	1,02	-16,49
25	1,02	-16,07
26	1,00	-16,49
27	1,02	-15,54
28	1,01	-11,69
29	1,00	-16,77
30	1,00	-17,66
31	1,06	0
32	1,04	-5,35
33	1,01	-14,17
34	1,01	-11,82
35	1,08	-14,11
36	1,07	-14,95

Το πρόβλημα στο σύστημα αυτό είναι η υπερφόρτωση της γραμμής μεταφοράς 1-2, οριακή υπερφόρτωση στις γραμμές 2-6 και 6-8 καθώς και η υπερφόρτωση της γεννήτριας του φτάνει στα 261 MVA σε σχέση με τα ονομαστικά στοιχεία του 270 MVA.

Σύμφωνα με τα Σχήματα 7.2 και 7.3 απαιτείται η άρση της υπερφόρτωσης τόσο της γεννήτριας όσο και των γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 7.2: Υπερφόρτωση γεννήτριας και γραμμής 1-2



Σχήμα 7.3: Οριακή υπερφόρτωση γραμμών 2-6 και 6-8

7.1 Μοντέλα προσομοίωσης

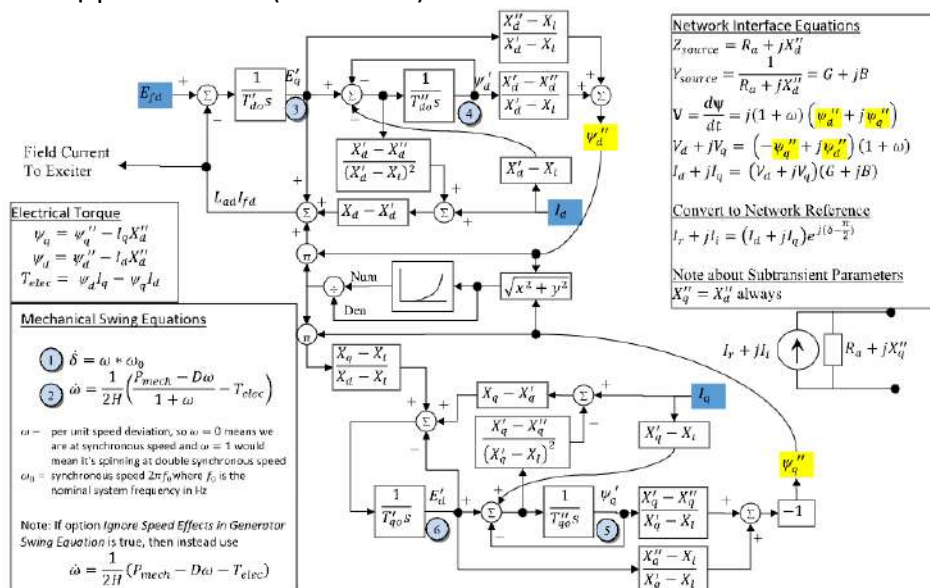
Για την μελέτη της συμπεριφοράς των γεννητριών και των Φ/Β πάρκων θα χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά στηρίζονται στις οδηγίες του Western Electricity Coordinating Council και διακρίνονται σε

- 3 blocks συμβατικής γεννήτριας.
- 3 blocks Φ/Β πάρκου [24].

7.1.1 Μοντέλο συμβατικής γεννήτριας

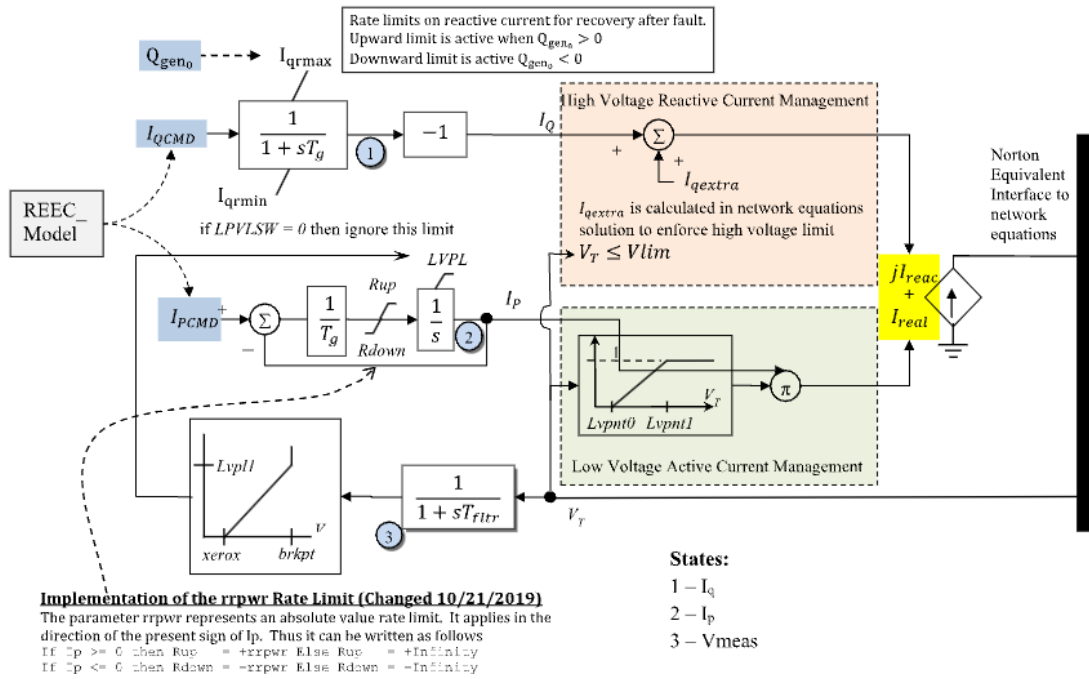
Τα 3 blocks που θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των Φ/Β πάρκων είναι τα παρακάτω:

- Η Γεννήτρια GENROU (Εικόνα 7.1).



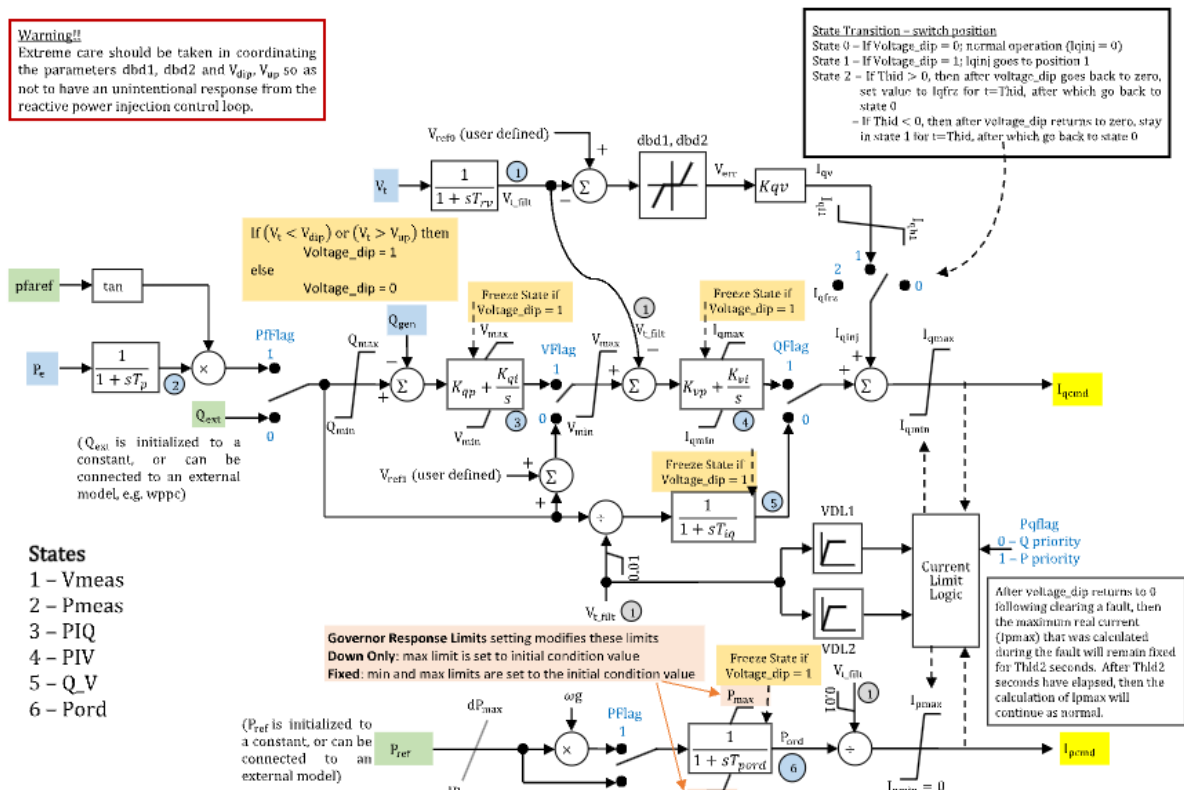
Εικόνα 7.1: Μοντέλο Γεννήτριας

- Η Γεννήτρια/Μετατροπέας REGC_A (Εικόνα 7.4).

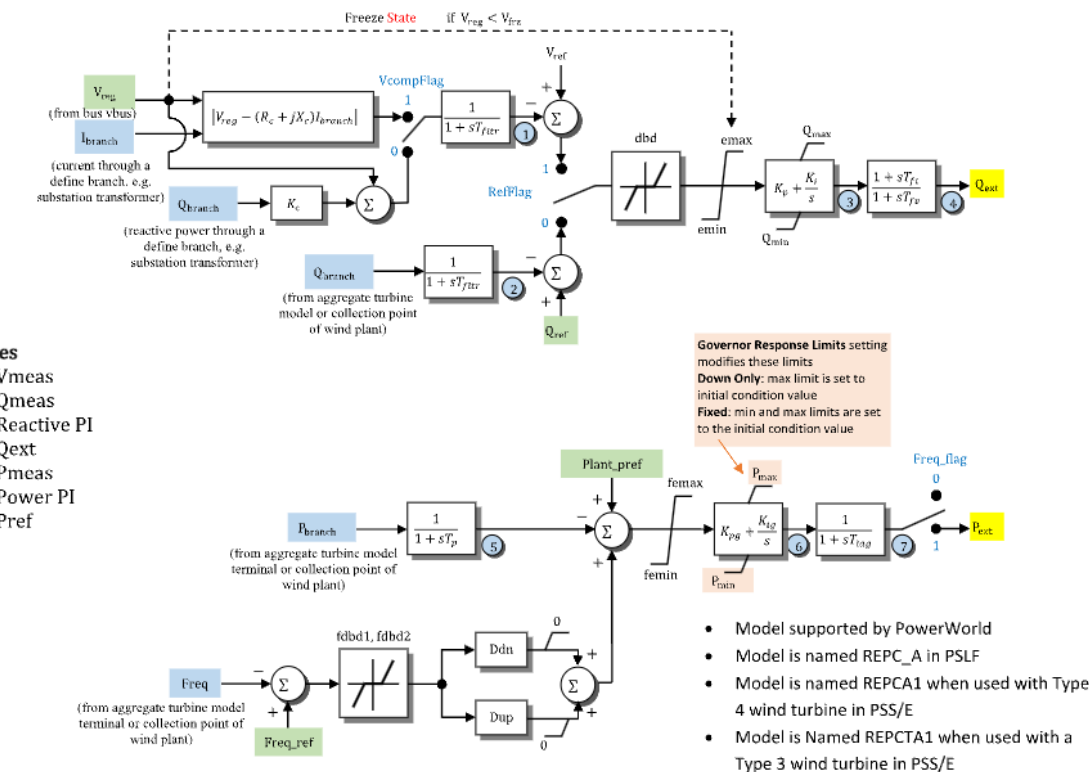


Εικόνα 7.4: Μοντέλο Γεννήτριας/Μετατροπέα Φ/Β πάρκου

- Ο Διεγέρτης REEC_A (Εικόνα 7.5).



Εικόνα 7.5: Μοντέλο Διεγέρτη Φ/Β πάρκου



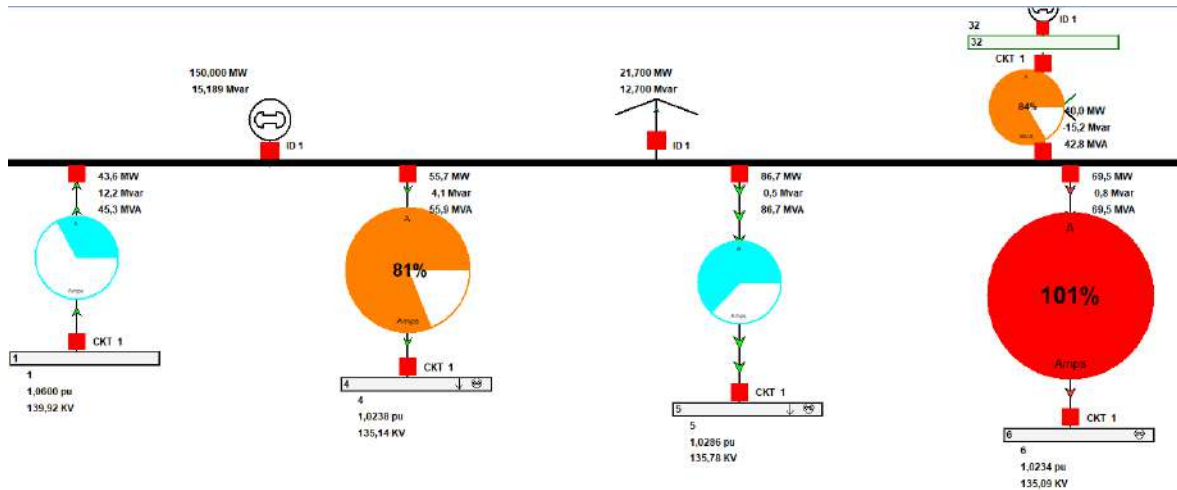
Εικόνα 7.6: Μοντέλο Ελεγκτή Ενεργού-Άεργου ισχύος Φ/Β πάρκου

7.2 Προσθήκη συμβατικής γεννήτριας στο σύστημα

Καθώς η συνολική ζήτηση ισχύος είναι 300,9 MW και 134 MVar, θα προστεθεί άλλη 1 συμβατική γεννήτρια, όμοια με τη γεννήτρια του ζυγού 1 μέγιστης ισχύος 150 MW. Η εύρεση του ζυγού τοποθέτησης αυτής της γεννήτριας θα γίνει με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών των γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών.

7.2.1 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 2

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 2. Αν και απελευθερώθηκε η υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 1, ωστόσο προκαλείται υπερφόρτωση της γραμμής 2-6 (Σχήμα 7.4). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.7.



Σχήμα 7.4: Τοποθέτηση γεννήτριας στο ζυγό 2

Total: 295,06 MW
114,24 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 11,66 MW
13,39 Mvar

Εικόνα 7.7: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 2

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.4.

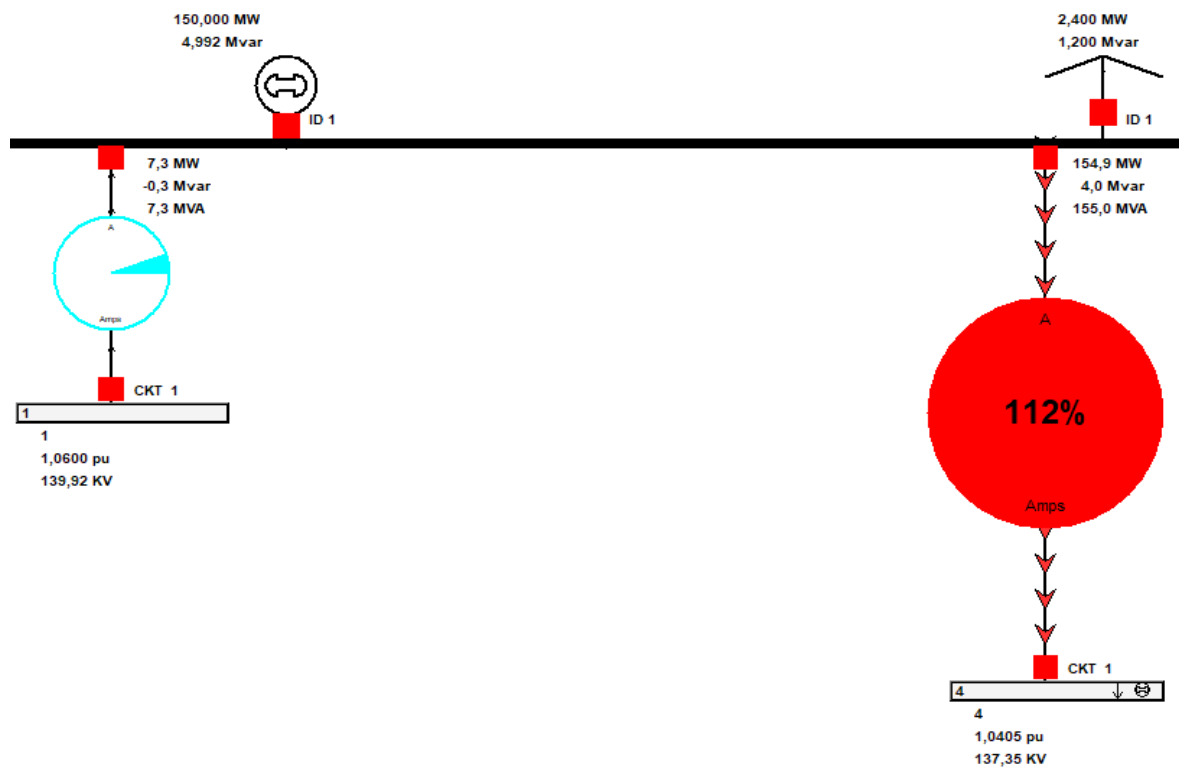
Πίνακας 7.4: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 2

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-1,43
3	1,03	-5,19
4	1,02	-6,36
5	1,03	-10,43
6	1,02	-7,82
7	1,02	-9,41

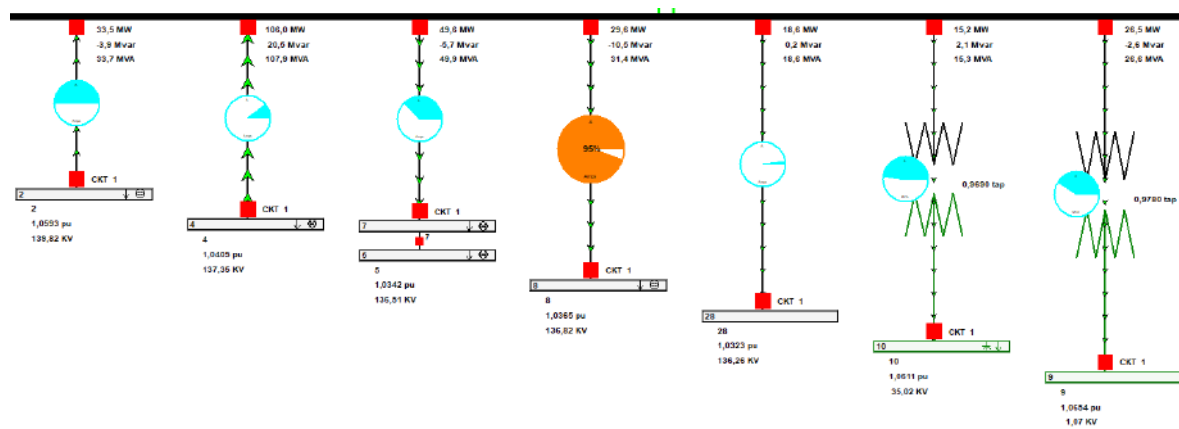
8	1,02	-8,57
9	1,06	-10,86
10	1,05	-12,45
11	1,08	-10,86
12	1,06	-11,78
13	1,07	-11,78
14	1,05	-12,65
15	1,04	-12,73
16	1,05	-12,33
17	1,05	-12,62
18	1,04	-13,32
19	1,03	-13,48
20	1,04	-13,28
21	1,04	-12,88
22	1,04	-12,87
23	1,03	-13,09
24	1,03	-13,23
25	1,03	-12,8
26	1,01	-13,21
27	1,04	-12,27
28	1,02	-8,44
29	1,02	-13,47
30	1,00	-14,34
31	1,06	0
32	1,06	-1,43
33	1,03	-10,43
34	1,02	-8,57
35	1,08	-10,86
36	1,07	-11,78

7.2.2 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 3

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 3. Αν και απελευθερώθηκε η υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 1, ωστόσο προκαλείται υπερφόρτωση της γραμμής 3-4 και 6-8 (Σχήματα 7.5 και 7.6). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.8.



Σχήμα 7.5: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 3 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 3



Σχήμα 7.6: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 3

Total: 294,35 MW
108,85 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 10,95 MW
8,36 Mvar

Εικόνα 7.8: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 3

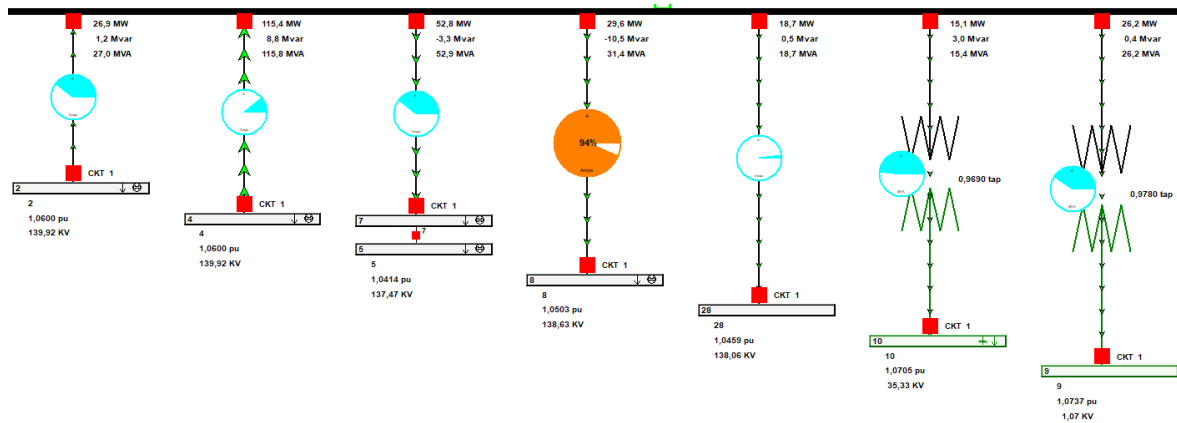
Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 3

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-3,12
3	1,06	-0,66
4	1,04	-3,68
5	1,03	-10,43
6	1,04	-6,15
7	1,03	-8,41
8	1,04	-6,88
9	1,07	-8,94
10	1,06	-10,42
11	1,08	-8,94
12	1,07	-9,35
13	1,07	-9,35
14	1,06	-10,26
15	1,05	-10,4
16	1,06	-10,07
17	1,06	-10,52
18	1,04	-11,08
19	1,04	-11,3
20	1,05	-11,14
21	1,05	-10,84
22	1,05	-10,83
23	1,04	-10,86
24	1,04	-11,15
25	1,04	-10,85
26	1,02	-11,25
27	1,05	-10,41
28	1,03	-6,74
29	1,03	-11,59
30	1,02	-12,43
31	1,06	0
32	1,06	-3,12
33	1,03	-10,43
34	1,04	-6,88
35	1,08	-8,94
36	1,07	-9,35

7.2.3 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 4

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 4. Εμφανίζεται υπερφόρτωση στη γραμμή 6-8 (Σχήμα 7.7). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.9.



Σχήμα 7.7: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 4

Total: 290,85 MW
98,15 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 7,51 MW
-1,85 Mvar

Εικόνα 7.9: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 4

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.6.

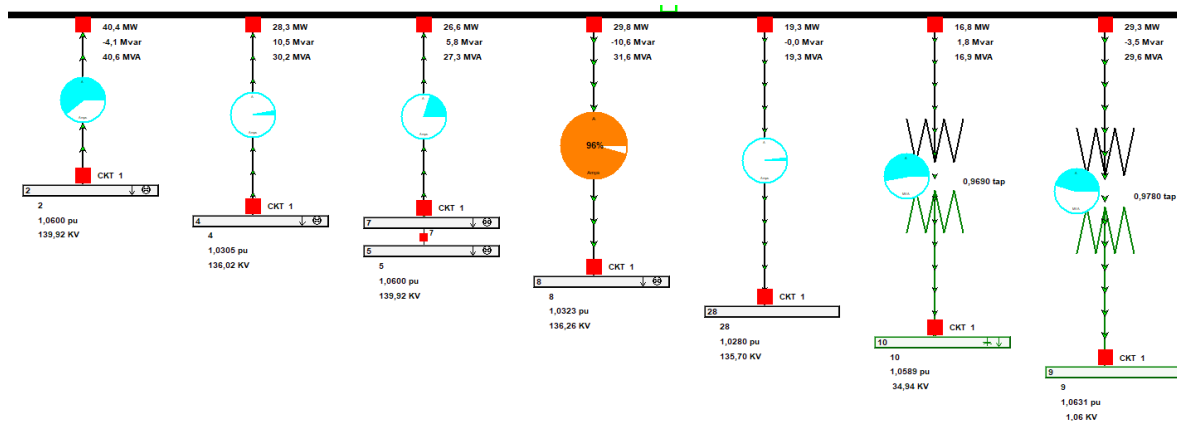
Πίνακας 7.6: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 4

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-2,51
3	1,06	-2,1
4	1,06	-2,54
5	1,04	-9,49
6	1,05	-5,06
7	1,04	-7,37
8	1,05	-5,77
9	1,07	-7,77
10	1,07	-9,21

11	1,08	-7,77
12	1,08	-8,09
13	1,07	-8,09
14	1,06	-8,99
15	1,06	-9,14
16	1,07	-8,82
17	1,06	-9,29
18	1,05	-9,82
19	1,05	-10,05
20	1,05	-9,89
21	1,06	-9,62
22	1,06	-9,6
23	1,05	-9,61
24	1,05	-9,92
25	1,05	-9,65
26	1,03	-10,04
27	1,06	-9,23
28	1,05	-5,63
29	1,04	-10,38
30	1,03	-11,2
31	1,06	0
32	1,06	-2,51
33	1,04	-9,49
34	1,05	-5,77
35	1,08	-7,77
36	1,07	-8,09

7.2.4 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 5

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 5. Εμφανίζεται υπερφόρτωση στη γραμμή 6-8 (Σχήμα 7.8). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.10.



Σχήμα 7.8: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 5

Total: 289,13 MW
90,64 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 5,73 MW
-9,97 Mvar

Εικόνα 7.10: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 5

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.7.

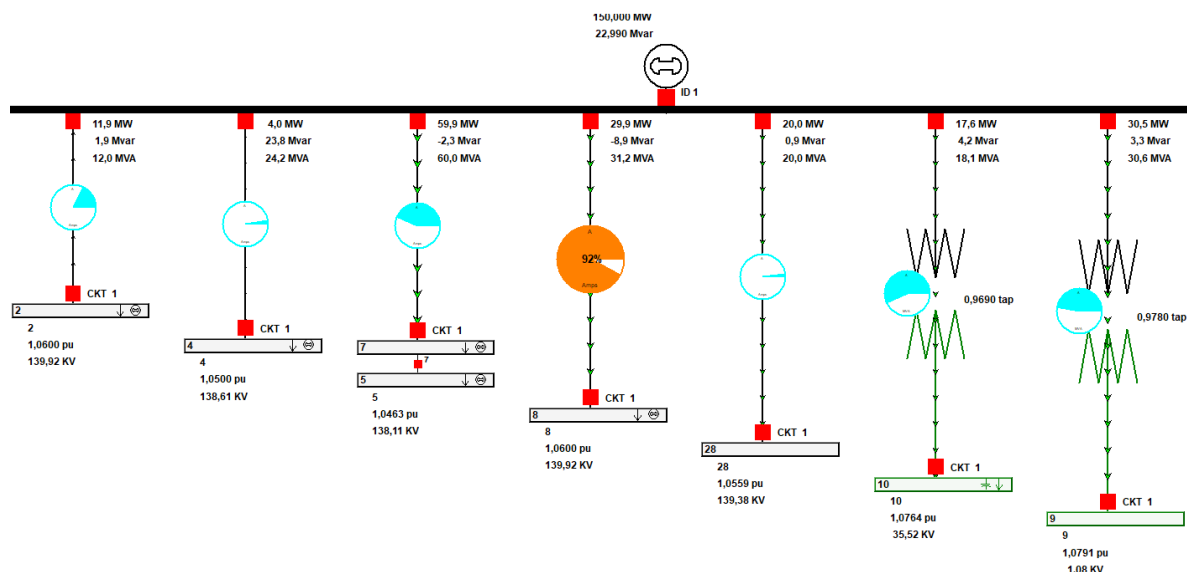
Πίνακας 7.7: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 5

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-1,73
3	1,04	-3,85
4	1,03	-4,7
5	1,06	-1,19
6	1,03	-5,4
7	1,03	-4,13
8	1,03	-6,14
9	1,06	-8,52
10	1,06	-10,16
11	1,08	-8,52
12	1,07	-9,76
13	1,07	-9,76
14	1,05	-10,59
15	1,05	-10,64
16	1,06	-10,2

17	1,05	-10,38
18	1,04	-11,15
19	1,04	-11,27
20	1,04	-11,05
21	1,05	-10,6
22	1,05	-10,59
23	1,04	-10,93
24	1,04	-10,97
25	1,04	-10,47
26	1,02	-10,87
27	1,04	-9,9
28	1,03	-6,02
29	1,02	-11,08
30	1,01	-11,93
31	1,06	0
32	1,06	-1,73
33	1,06	-1,19
34	1,03	-6,14
35	1,08	-8,52
36	1,07	-9,76

7.2.5 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 6

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 6. Εμφανίζεται υπερφόρτωση στη γραμμή 6-8 (Σχήμα 7.9). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.11.



Σχήμα 7.9: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 6

Total: 289,13 MW
90,75 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 5,73 MW
-8,99 Mvar

Εικόνα 7.11: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 6

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.8.

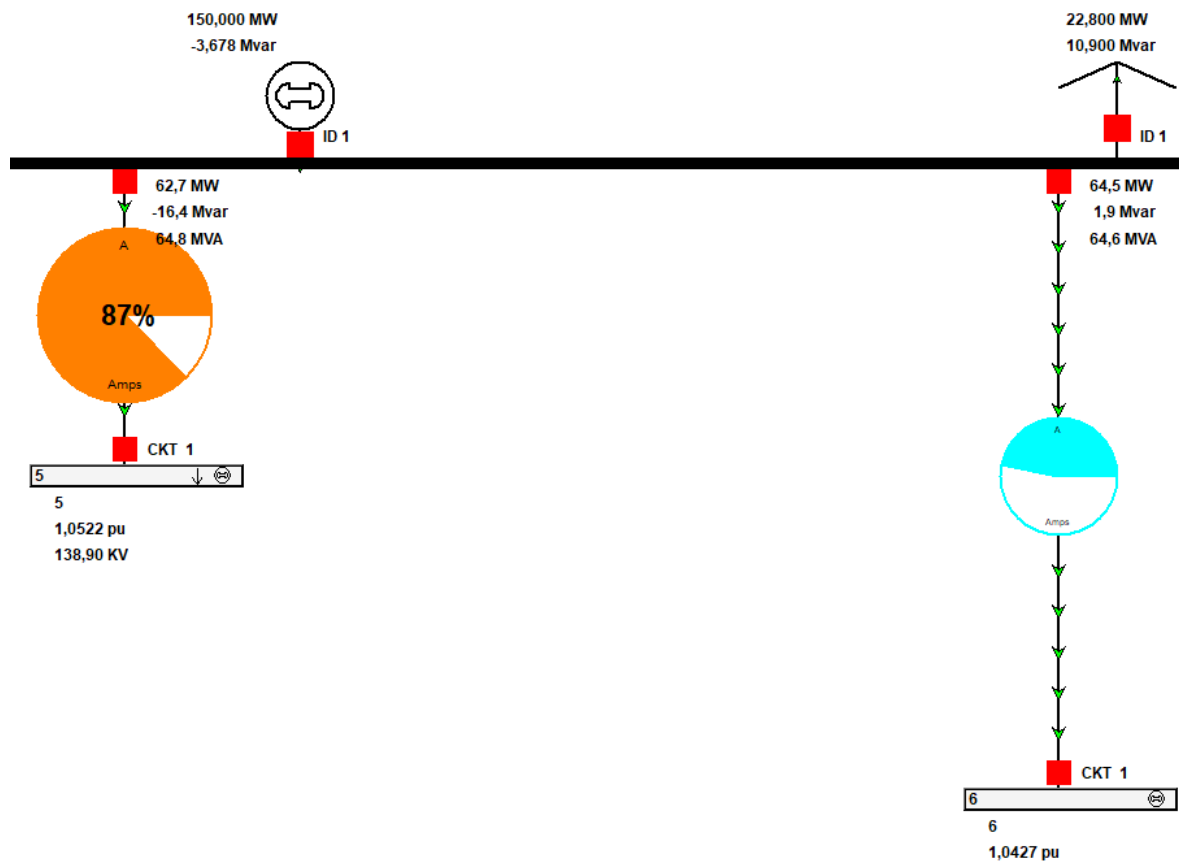
Πίνακας 7.8: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 6

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-2,19
3	1,05	-2,73
4	1,05	-3,32
5	1,05	-8,45
6	1,06	-3,38
7	1,05	-5,94
8	1,06	-4,07
9	1,08	-6,49
10	1,08	-8,14
11	1,08	-6,49
12	1,08	-7,9
13	1,07	-7,9
14	1,06	-8,68
15	1,06	-8,73
16	1,07	-8,28
17	1,07	-8,38
18	1,05	-9,18
19	1,05	-9,27
20	1,06	-9,04
21	1,06	-8,57
22	1,07	-8,56
23	1,05	-8,96
24	1,05	-8,94
25	1,06	-8,41
26	1,04	-8,8
27	1,07	-7,83
28	1,06	-3,98
29	1,05	-8,96
30	1,04	-9,76

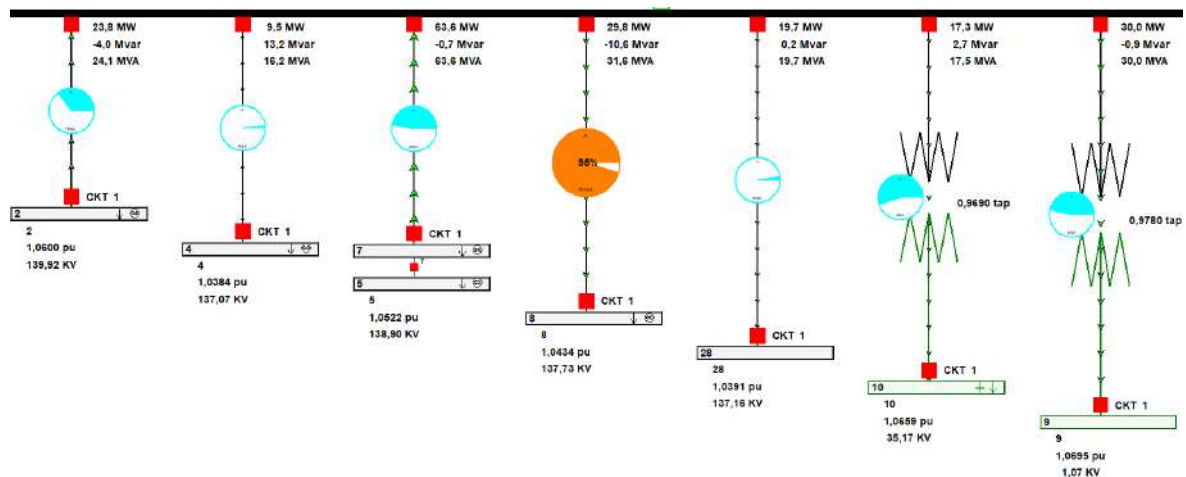
31	1,06	0
32	1,06	-2,19
33	1,05	-8,45
34	1,06	-4,07
35	1,08	-6,49
36	1,07	-7,9

7.2.6 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 7

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 7. Εμφανίζονται υπερφορτώσεις στις γραμμές 5-7 και 6-8 (Σχήματα 7.10 και 7.11). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.12.



Σχήμα 7.10: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 7 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 7



Σχήμα 7.11: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 6 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 7

Total: 289,79 MW
91,92 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 6,39 MW
-8,34 Mvar

Εικόνα 7.12: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 7

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.9.

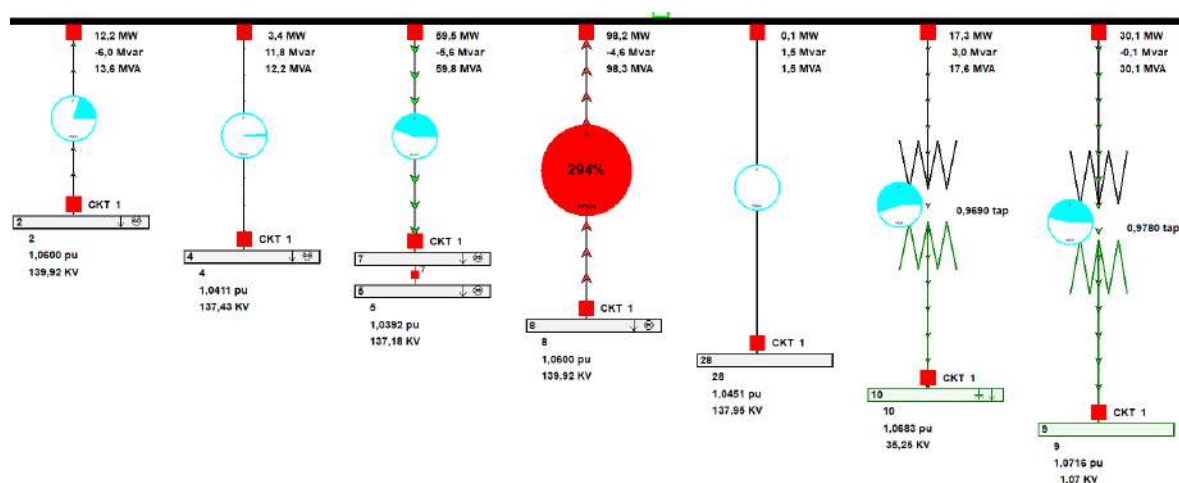
Πίνακας 7.9: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 7

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-2,02
3	1,04	-3,16
4	1,04	-3,84
5	1,05	-5,53
6	1,04	-4,14
7	1,06	-1,43
8	1,04	-4,86
9	1,07	-7,28
10	1,07	-8,94
11	1,08	-7,28
12	1,07	-8,66
13	1,07	-8,66
14	1,06	-9,46

15	1,05	-9,5
16	1,06	-9,05
17	1,06	-9,17
18	1,05	-9,98
19	1,04	-10,07
20	1,05	-9,84
21	1,05	-9,37
22	1,05	-9,36
23	1,05	-9,75
24	1,04	-9,75
25	1,04	-9,22
26	1,03	-9,61
27	1,05	-8,64
28	1,04	-4,75
29	1,03	-9,79
30	1,02	-10,63
31	1,06	0
32	1,06	-2,02
33	1,05	-5,53
34	1,04	-4,86
35	1,08	-7,28
36	1,07	-8,66

7.2.7 Σύνδεση συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 8

Η γεννήτρια συνδέεται στον ζυγό 8. Εμφανίζεται απαγορευτική υπερφόρτωση στις γραμμή 6-8 (Σχήμα 7.12). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.13.



Σχήμα 7.12: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 8 για τοποθέτηση γεννήτριας σε ζυγό 8

Total: 290,39 MW
95,64 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 6,99 MW
-4,50 Mvar

Εικόνα 7.13: Απώλειες συστήματος για σύνδεση γεννήτριας σε ζυγό 8

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.10.

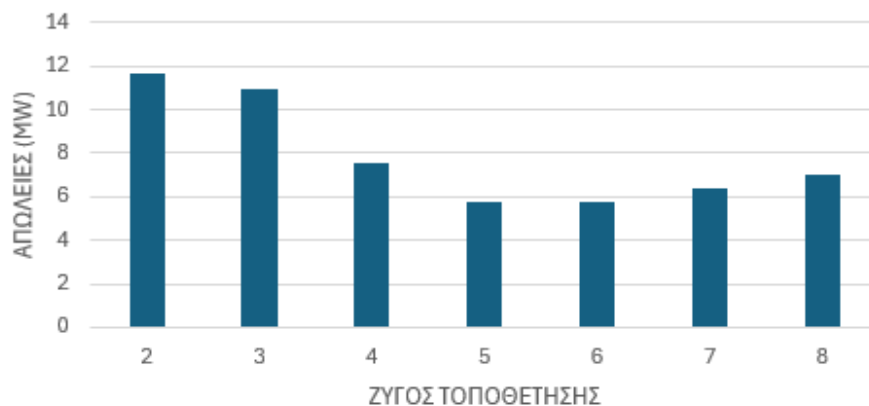
Πίνακας 7.10: Τάσεις ζυγών. Γεννήτρια στο ζυγό 8

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,06	-2,23
3	1,04	-2,66
4	1,04	-3,22
5	1,04	-8,49
6	1,05	-3,23
7	1,04	-5,87
8	1,06	-1,12
9	1,07	-6,36
10	1,09	-8,01
11	1,08	-6,36
12	1,07	-7,85
13	1,07	-7,85
14	1,06	-8,63
15	1,05	-8,65
16	1,06	-8,19
17	1,06	-8,27
18	1,05	-9,09
19	1,05	-9,17
20	1,05	-8,94
21	1,06	-8,43
22	1,06	-8,42
23	1,05	-8,84
24	1,05	-8,75
25	1,05	-8
26	1,03	-8,39
27	1,06	-7,29
28	1,05	-3,21
29	1,04	-8,44
30	1,03	-9,26

31	1,06	0
32	1,06	-2,23
33	1,04	-8,49
34	1,06	-1,12
35	1,08	-6,36
36	1,07	-7,85

7.2.8 Συμπεράσματα τοποθέτησης 1 συμβατικής γεννήτριας

Η διερεύνηση ροής φορτίου με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας σταματά στον ζυγό 8. Η επιλογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη καθώς τόσο το σημαντικότερο σύνολο των φορτίων βρίσκεται γύρω στην περιοχή των ζυγών 2,5,7 και 8, όσο το γεγονός των όμοιων υπερφορτώσεων γραμμών στους ζυγούς από 2 έως 8 κατά την τοποθέτηση. Στο Σχήμα 7.13 παρουσιάζονται συγκριτικά οι πραγματικές απώλειες ανά ζυγό τοποθέτησης της συμβατικής γεννήτριας.

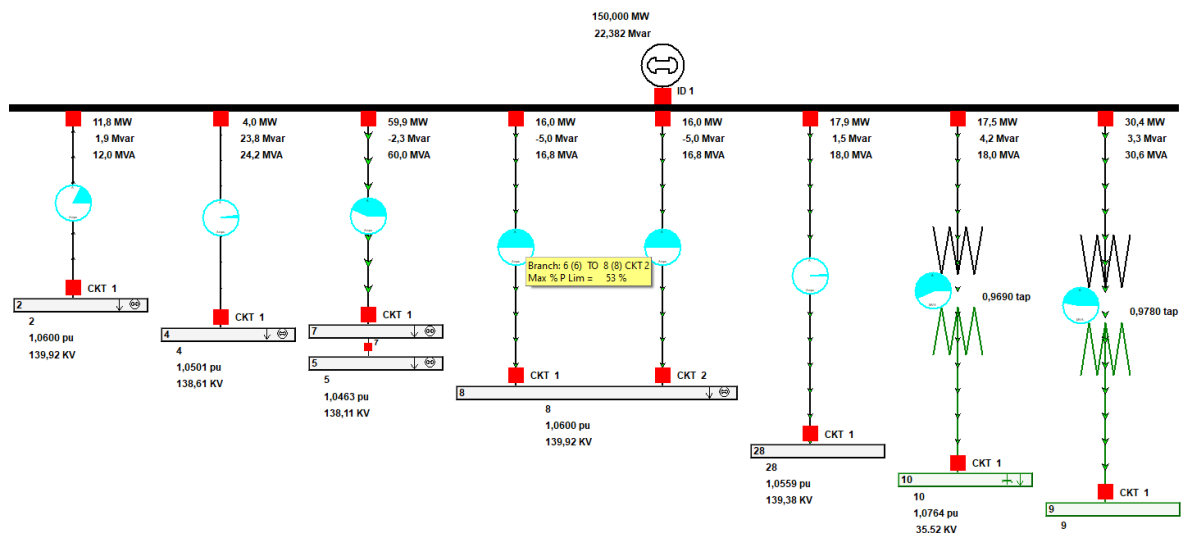


Σχήμα 7.13: Πραγματικές απώλειες κατά την προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.11 συστήνεται η τοποθέτηση της 1 συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 6. Το πρόβλημα της οριακής υπερφόρτωσης της γραμμής 6-8 μπορεί να λυθεί με εγκατάσταση δεύτερης παράλληλης γραμμής με όμοια χαρακτηριστικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.14. Με αυτόν τον τρόπο διαμοιράζεται στις παράλληλες γραμμές 6-8 η ισχύς. Στην Εικόνα 7.14 φαίνονται οι απώλειες του συστήματος με την εγκατάσταση παράλληλης γραμμής στους ζυγούς 6-8.

Πίνακας 7.11: Πραγματικές απώλειες κατά την προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας

ΖΥΓΟΣ	MW	Mvar	MVA
2	11,66	13,39	17,8
3	10,95	8,36	13,8
4	7,51	1,85	7,7
5	5,73	9,97	11,5
6	5,73	8,99	10,7
7	6,39	8,34	10,5
8	6,99	4,5	8,3



Σχήμα 7.14: Καταστάσεις γραμμών ζυγού 6 με την εγκατάσταση παράλληλης γραμμής 6-8

8

Total: 289,01 MW
89,51 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 5,67 MW
-10,22 Mvar

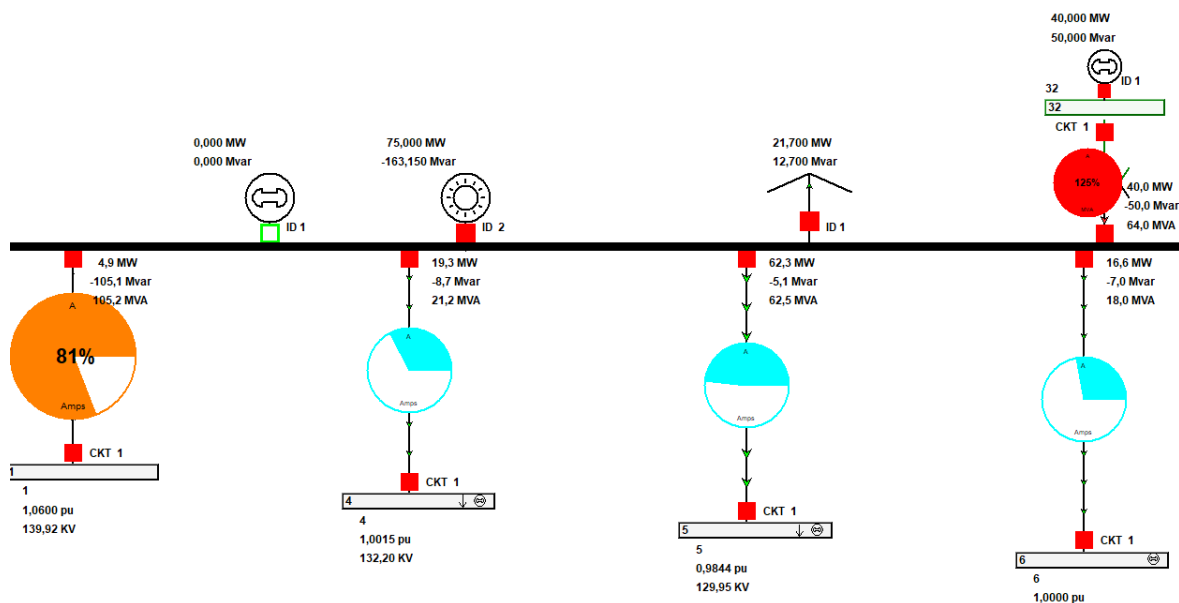
Εικόνα 7.14: Απώλειες συστήματος με εγκατάσταση παράλληλης γραμμής 6-8

7.3 Διείσδυση ισχύος Φ/Β πάρκου στο σύστημα σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας

Θεωρείται ότι το 25% της πραγματικής ισχύος παράγεται από Φ/Β πάρκα. Θα ληφθεί υπόψη φωτοβολταϊκό πάρκο που παράγει συνολικά πραγματική ισχύς $300 \text{ MW} * 0,25 = 75 \text{ MW}$. Οι ζυγοί που θα εξεταστούν θα είναι από τον 2 έως τον 8 διότι σε αυτούς τους ζυγούς εμφανίζεται το σημαντικότερο ποσοστό ζήτησης. Λαμβάνεται υπόψη το σύστημα της ενότητας 7.2.8 με συνδεδεμένη συμβατική γεννήτρια στον ζυγό 6 και 2 παράλληλες γραμμές μεταφοράς από τον 6 στον 8.

7.3.1 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 2

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 2. Εμφανίζονται οριακή υπερφόρτωση στη γραμμή 1-2 καθώς και στη γεννήτρια του ζυγού 2 (Σχήμα 7.15). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.15.



Σχήμα 7.15: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 2

Total: 290,96 MW
101,71 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 7,56 MW
0,15 Mvar

Εικόνα 7.15: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 2

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.12.

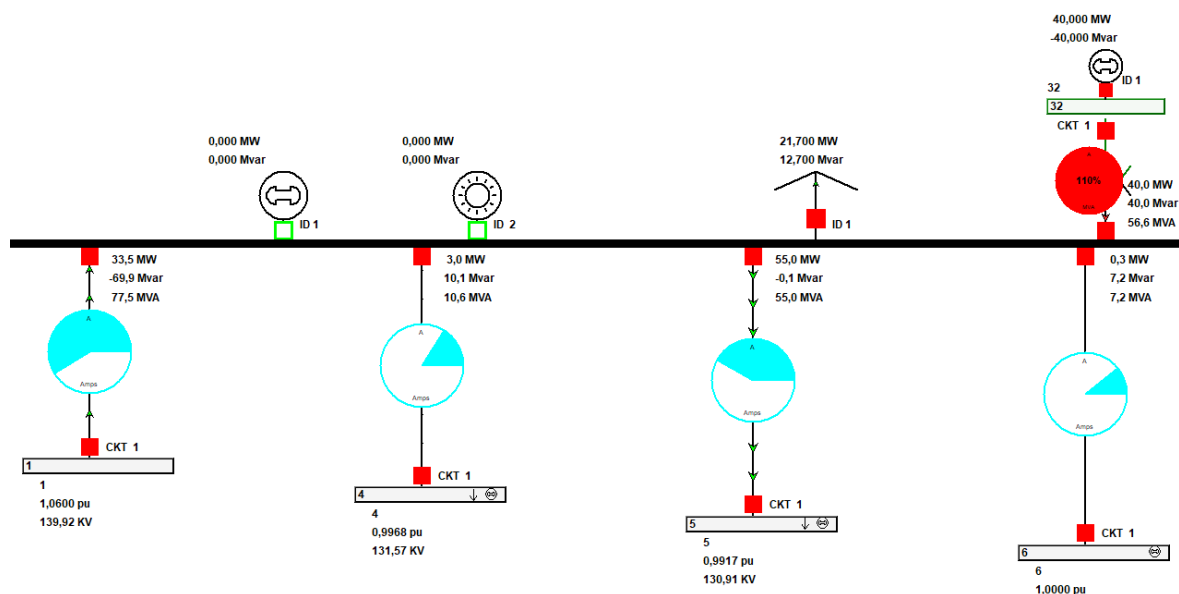
Πίνακας 7.12: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 2

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,00	0,91
3	1,01	-1,07
4	1,00	-1,23
5	1,00	-6,38
6	1,00	-0,94
7	1,00	-3,7
8	1,00	-1,35
9	1,04	-4,38
10	1,04	-6,17
11	1,08	-4,38
12	1,05	-6,21
13	1,07	-6,21
14	1,04	-7,01
15	1,03	-7
16	1,04	-6,46
17	1,03	-6,48
18	1,02	-7,41
19	1,02	-7,46
20	1,02	-7,19
21	1,03	-6,63
22	1,03	-6,62
23	1,02	-7,17
24	1,01	-7,05
25	1,01	-6,35
26	1,00	-6,78
27	1,02	-5,66
28	1,00	-1,52
29	1,00	-6,91

30	0,98	-7,81
31	1,06	0
32	1,00	0,91
33	0,98	-6,38
34	1,00	-1,35
35	1,08	-4,38
36	1,07	-6,21

7.3.2 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 3

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 3. Εμφανίζεται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 (Σχήμα 7.16). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.16.



Σχήμα 7.16: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 3

Total: 290,59 MW
99,94 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 7,21 MW
-1,66 Mvar

Εικόνα 7.16: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 3

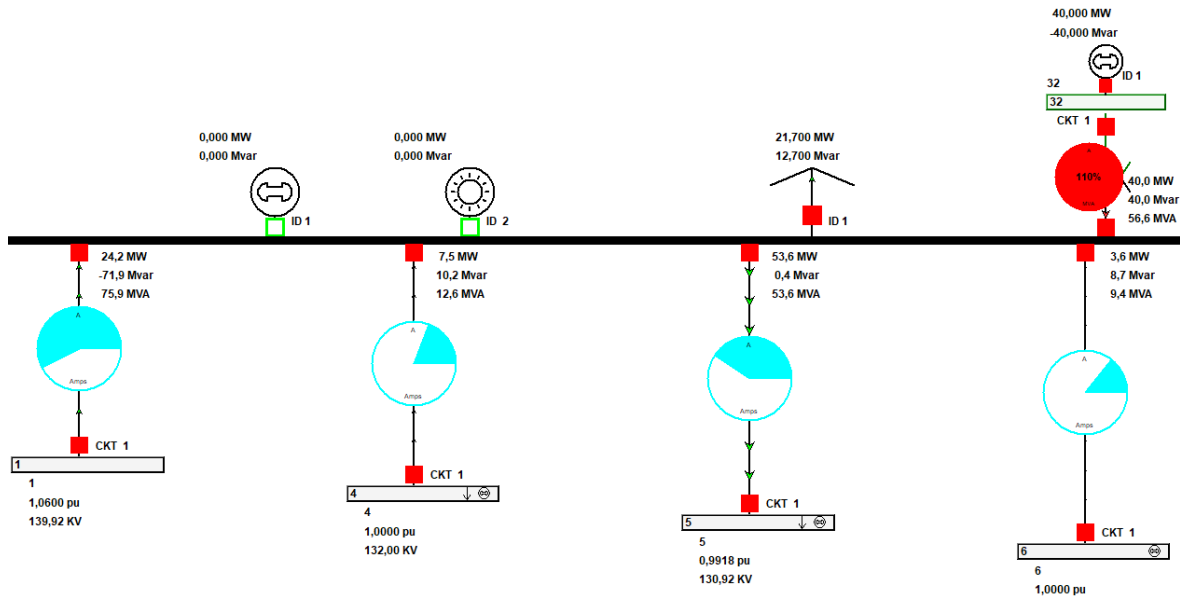
Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.13.

Πίνακας 7.13: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 3

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,01	-0,34
3	1,00	1,81
4	1,00	0,34
5	0,99	-6,5
6	1,00	-0,01
7	1,00	-3,21
8	1,00	-0,43
9	1,04	-3,36
10	1,04	-5,09
11	1,08	-3,36
12	1,05	-4,89
13	1,07	-4,89
14	1,04	-5,72
15	1,03	-5,74
16	1,04	-5,24
17	1,03	-5,36
18	1,02	-6,22
19	1,02	-6,31
20	1,02	-6,06
21	1,03	-5,55
22	1,03	-5,54
23	1,02	-5,98
24	1,01	-5,94
25	1,01	-5,32
26	0,99	-5,75
27	1,01	-4,67
28	1,00	-0,59
29	0,99	-5,92
30	0,98	-6,82
31	1,06	0
32	1,02	-0,34
33	0,99	-6,5
34	1,00	-0,43
35	1,08	-3,36
36	1,07	-4,89

7.3.3 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 4

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 4. Εμφανίζεται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 (Σχήμα 7.17). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.17.



Σχήμα 7.17: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 4

Total: 289,93 MW
97,56 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 6,53 MW
-4,06 Mvar

Εικόνα 7.17: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 4

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.14.

Πίνακας 7.14: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 4

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,02	-0,03
3	1,01	0,78
4	1,00	1,09
5	0,99	-6,02

6	1,00	0,67
7	0,99	-2,61
8	1,00	0,25
9	1,05	-2,66
10	1,04	-4,39
11	1,08	-2,66
12	1,05	-4,16
13	1,07	-4,17
14	1,04	-5
15	1,03	-5,02
16	1,04	-4,52
17	1,03	-4,65
18	1,02	-5,5
19	1,02	-5,59
20	1,02	-5,35
21	1,03	-4,84
22	1,03	-4,83
23	1,02	-5,26
24	1,01	-5,23
25	1,01	-4,62
26	0,99	-5,05
27	1,01	-3,98
28	1,00	0,09
29	0,99	-5,23
30	0,98	-6,13
31	1,06	0
32	1,02	-0,03
33	0,99	-6,02
34	1,00	0,25
35	1,08	-2,66
36	1,07	-4,17

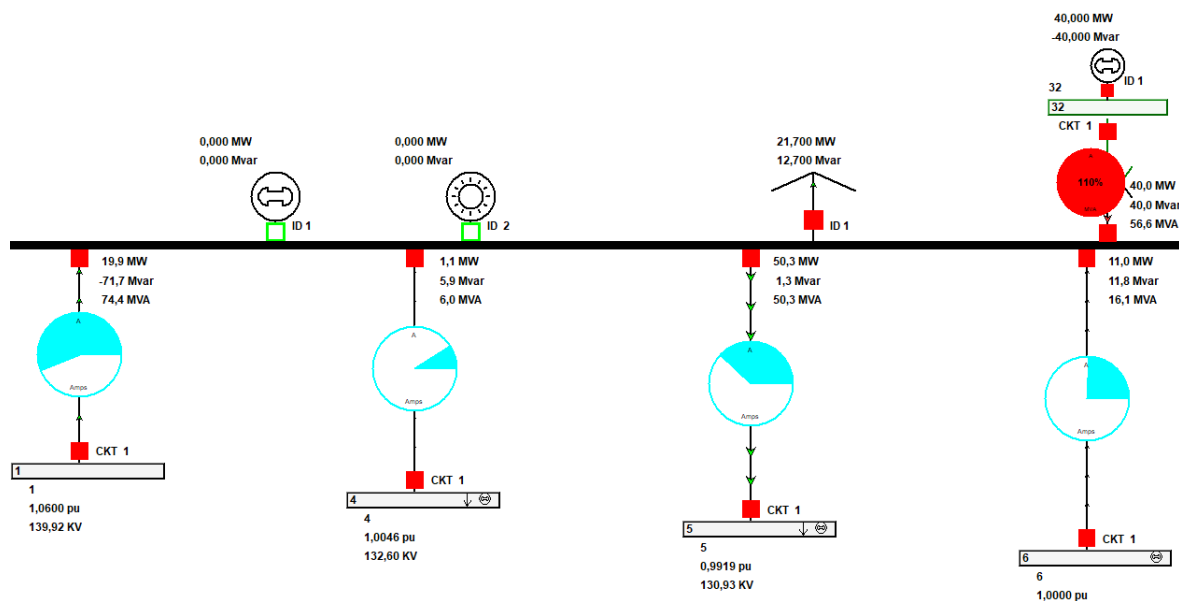
7.3.4 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 5

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 5. Εμφανίζεται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 (Σχήμα 7.18). Οι απώλειες του συστήματος είναι σημαντικά ελαχιστοποιημένες, γεγονός που γίνεται ξεκάθαρο στην Εικόνα 7.18.

11	1,08	-3,06
12	1,05	-5,12
13	1,07	-5,12
14	1,04	-5,89
15	1,03	-5,85
16	1,04	-5,28
17	1,03	-5,23
18	1,02	-6,22
19	1,02	-6,24
20	1,02	-5,96
21	1,03	-5,36
22	1,03	-5,35
23	1,02	-5,98
24	1,02	-5,79
25	1,01	-5,04
26	0,99	-5,47
27	1,02	-4,32
28	1,00	-0,14
29	1,00	-5,57
30	0,98	-6,46
31	1,06	0
32	1,02	0,39
33	1,00	-1,21
34	1,00	0,04
35	1,08	-3,06
36	1,07	-5,12

7.3.5 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 6

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 6. Εμφανίζεται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 (Σχήμα 7.19). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.19.



Σχήμα 7.19: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 6

Total: 290,17 MW
98,03 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 6,79 MW
-3,48 Mvar

Εικόνα 7.19: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 6

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.16.

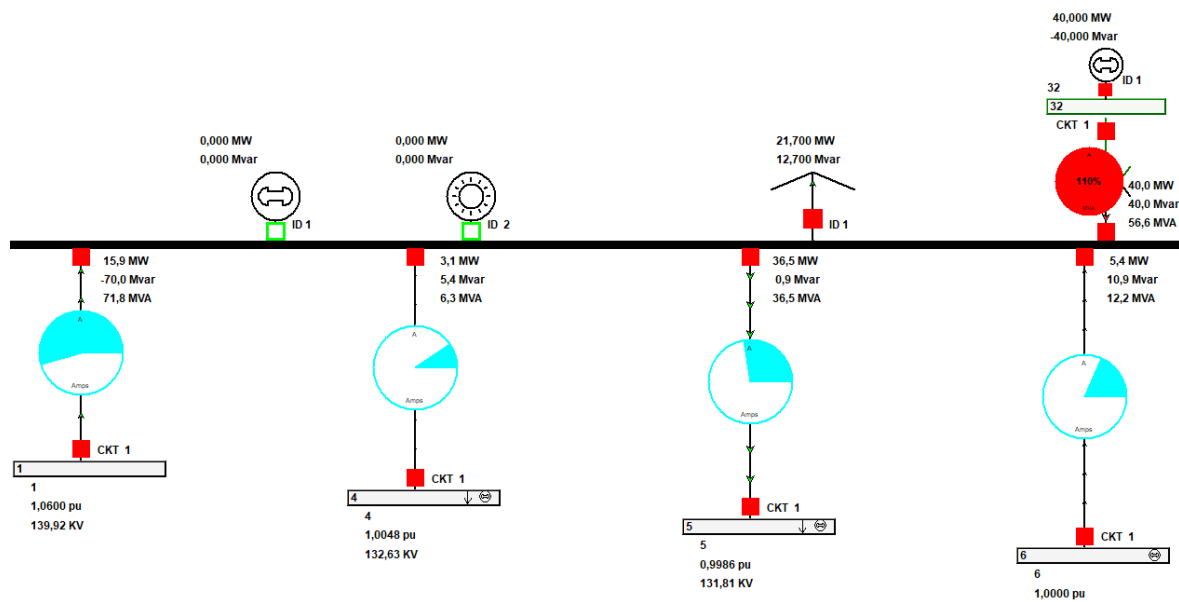
Πίνακας 7.16: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 6

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,02	0,1
3	1,02	0,28
4	1,00	0,45
5	0,99	-5,48
6	1,00	1,64
7	1,00	-1,81
8	1,00	1,22
9	1,05	-1,95
10	1,04	-3,82
11	1,08	-1,95
12	1,05	-4,19

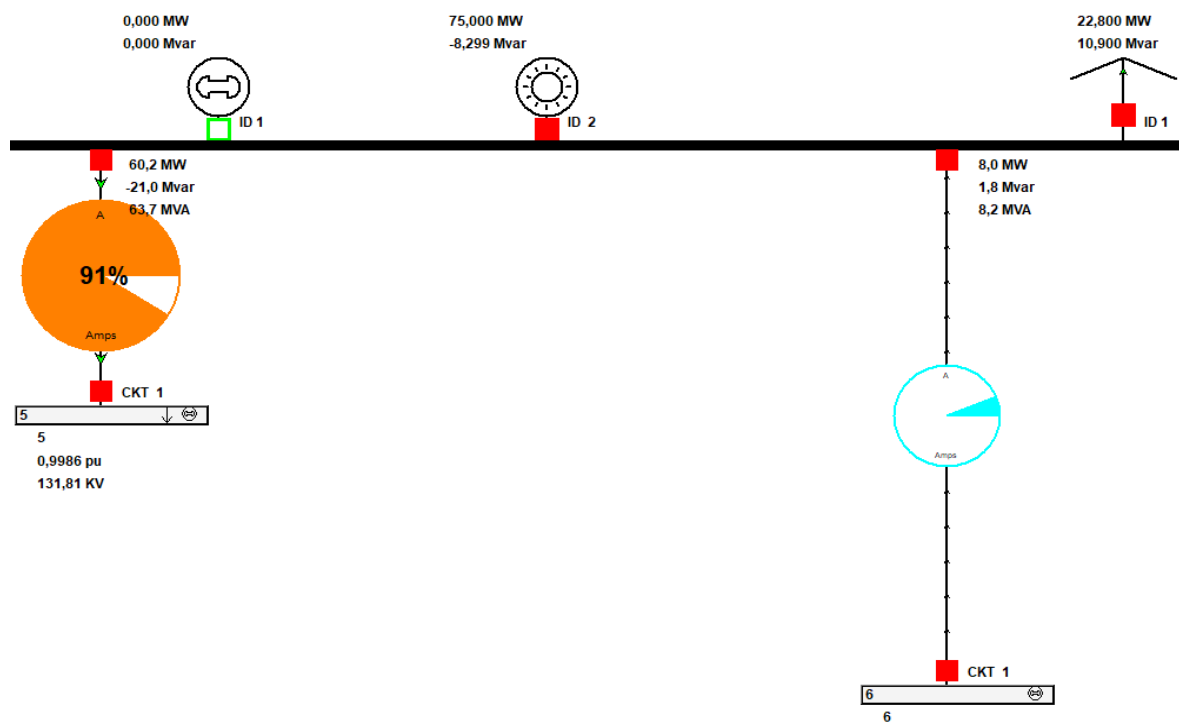
13	1,07	-4,19
14	1,04	-4,95
15	1,03	-4,89
16	1,04	-4,29
17	1,04	-4,18
18	1,02	-5,21
19	1,02	-5,21
20	1,02	-4,92
21	1,03	-4,28
22	1,03	-4,27
23	1,02	-4,97
24	1,02	-4,73
25	1,01	-3,94
26	0,99	-4,37
27	1,02	-3,19
28	1,00	1,04
29	1,00	-4,44
30	0,98	-5,33
31	1,06	0
32	1,02	0,1
33	0,99	-5,48
34	1,00	1,22
35	1,08	-1,95
36	1,07	-4,19

7.3.6 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 7

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 7. Εμφανίζονται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 καθώς και οριακή υπερφόρτωση της γραμμής 5-7 (Σχήματα 7.20 και 7.21). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.20.



Σχήμα 7.20: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 2 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 7



Σχήμα 7.21: Υπερφορτώσεις γραμμών ζυγού 7 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 7

Total: 288,77 MW
92,52 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 5,37 MW
-8,99 Mvar

Εικόνα 7.20: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 7

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.17.

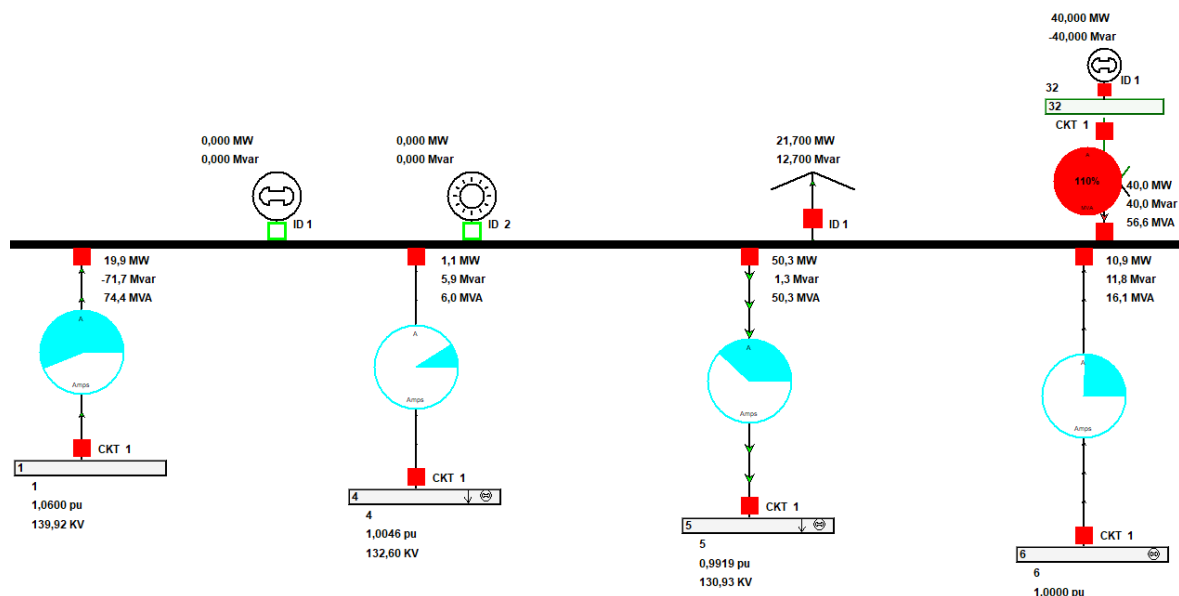
Πίνακας 7.17: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 7

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,02	0,2
3	1,02	0,03
4	1,00	0,13
5	1,00	-3,8
6	1,00	1,15
7	1,00	0,74
8	1,00	0,74
9	1,05	-2,4
10	1,04	-4,25
11	1,08	-2,4
12	1,05	-4,57
13	1,07	-4,57
14	1,04	-5,33
15	1,03	-5,28
16	1,04	-4,7
17	1,04	-4,61
18	1,02	-5,62
19	1,02	-5,63
20	1,02	-5,34
21	1,03	-4,72
22	1,03	-4,71
23	1,02	-5,38
24	1,02	-5,16
25	1,01	-4,39
26	0,99	-4,82
27	1,02	-3,65
28	1,00	0,56
29	1,00	-4,9

30	0,98	-5,79
31	1,06	0
32	1,02	0,2
33	1,00	-3,8
34	1,00	0,74
35	1,08	-2,4
36	1,07	-4,57

7.3.7 Σύνδεση Φ/Β πάρκου στον ζυγό 8

Το πάρκο συνδέεται στον ζυγό 8. Εμφανίζεται υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2 (Σχήμα 7.22). Οι απώλειες του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 7.21.



Σχήμα 7.22: Υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού 1 για τοποθέτηση πάρκου σε ζυγό 8

Total: 290,23 MW
98,17 Mvar

Demand: 283,40 MW
126,20 Mvar

Losses: 6,83 MW
-3,39 Mvar

Εικόνα 7.21: Απώλειες συστήματος για σύνδεση πάρκου σε ζυγό 8

Τα αποτελέσματα των τάσεων ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 7.18.

Πίνακας 7.18: Τάσεις ζυγών. Φ/Β πάρκο στο ζυγό 8

Number	PU Volt	Angle (Deg)
1	1,06	0
2	1,02	0,09
3	1,02	0,28
4	1,00	0,45
5	0,99	-5,48
6	1,00	1,63
7	1,00	-1,82
8	1,00	2,12
9	1,05	-1,94
10	1,04	-3,8
11	1,08	-1,94
12	1,05	-4,18
13	1,07	-4,18
14	1,04	-4,93
15	1,03	-4,87
16	1,04	-4,28
17	1,03	-4,17
18	1,02	-5,2
19	1,02	-5,2
20	1,02	-4,9
21	1,03	-4,26
22	1,03	-4,25
23	1,02	-4,95
24	1,02	-4,69
25	1,01	-3,84
26	0,99	-4,26
27	1,02	-3,05
28	1,00	1,23
29	1,00	-4,3
30	0,98	-5,19
31	1,06	0
32	1,02	0,09
33	0,99	-5,48
34	1,00	2,12
35	1,08	-1,94
36	1,07	-4,18

7.3.8 Συμπεράσματα διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας στο σύστημα

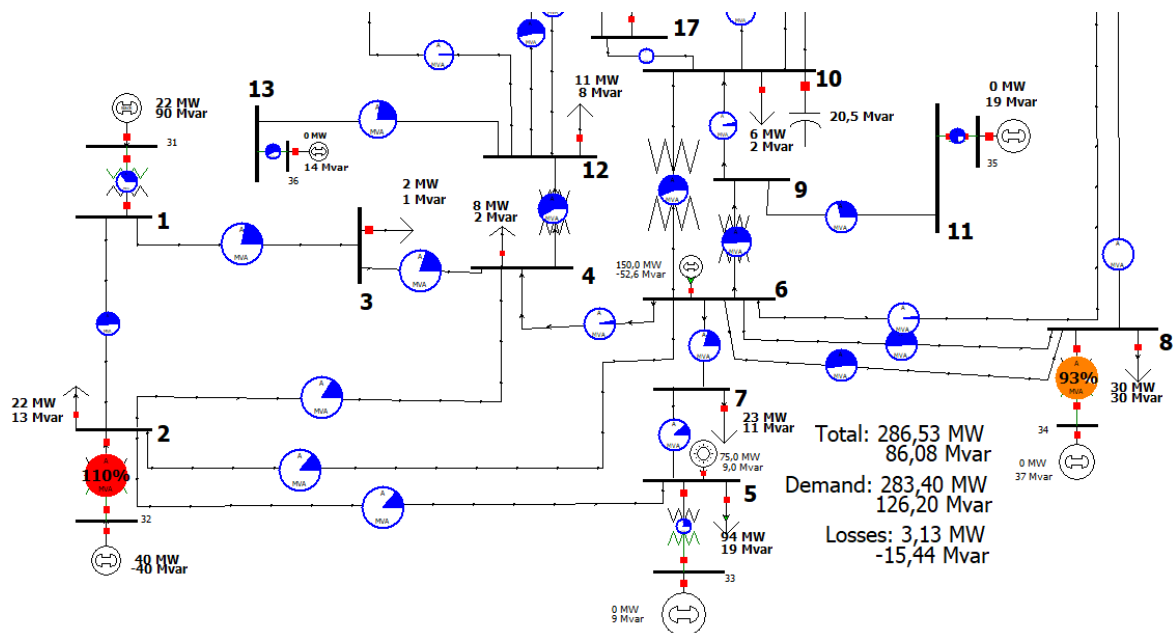
Σύμφωνα με τον Πίνακα 7.19 συστήνεται η τοποθέτηση του Φ/Β πάρκου στον ζυγό 5. Η υπερφόρτωση της γεννήτριας στον ζυγό 2 είναι αναπόφευκτη λόγω ονομαστικών MVA. Στο Σχήμα 7.23 διακρίνεται ξεκάθαρα ότι οι απώλειες κατά την τοποθέτηση του Φ/Β πάρκου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την τοποθέτηση στους υπόλοιπους ζυγούς. Τέλος, στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζεται η κατάσταση του συστήματος έπειτα από προσθήκη γεννήτριας και διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου.

Πίνακας 7.19: Πραγματικές απώλειες κατά την μελέτη διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας

ΖΥΓΟΣ	MW	Mvar	MVA
2	7,56	0,15	7,6
3	7,21	1,66	7,4
4	6,53	4,06	7,7
5	3,13	15,44	15,8
6	6,79	3,48	7,6
7	5,37	8,99	10,5
8	6,83	3,39	7,6



Σχήμα 7.23: Πραγματικές απώλειες κατά την μελέτη διείσδυσης ισχύος Φ/Β πάρκου σε ποσοστό 25% της παραγόμενης ενέργειας



Σχήμα 7.24: Κατάσταση ζυγών 1-8 κατά την προσθήκη γεννήτριας και Φ/Β πάρκου

7.4 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας και εύρεση κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης συστήματος 30 ζυγών

Συνολικά θα μελετηθούν τα παρακάτω σενάρια:

- Σενάριο A1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 του αρχικού δικτύου.
- Σενάριο A6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 του αρχικού δικτύου.

- Σενάριο B1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο B6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 με προσθήκη 1 συμβατικής γεννήτριας στο αρχικό δίκτυο.
- Σενάριο Γ1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.

- Σενάριο Γ5Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ6Τ: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.
- Σενάριο Γ6Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6 του συστήματος της ενότητας 7.3.8 με το Φ/Β πάρκο να συμβάλλει σε ποσοστό 25% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.

Στη μελέτη αυτή θα καταγράφονται για κάθε ξεχωριστό βραχυκύκλωμα:

- Οι καμπύλες των σχετικών γωνιών ισχύος δ των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με τον χρόνο.
- Οι καμπύλες των συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Οι καμπύλες της πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Οι καμπύλες της άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με τον χρόνο.
- Οι καμπύλες των τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο.

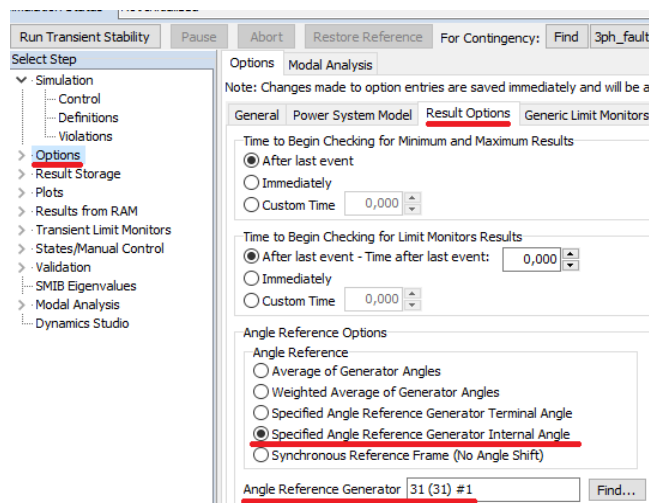
Για την εκτίμηση και εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης στους ζυγούς 1,2,5 και 6 για το κάθε βραχυκύκλωμα ξεχωριστά, θα εφαρμοσθεί η παρακάτω διαδικασία:

1. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται στο χρόνο $t_{fault} = 1 \text{ sec}$ μετά την έναρξη προσομοίωσης. Στο χρονικό διάστημα $0 \leq t < 1$ λαμβάνει χώρα ανάλυση ροής φορτίου.
2. Τη χρονική στιγμή $t_{fault} = 1 \text{ sec}$ θα εμφανιστεί το ανάλογο σφάλμα σε γραμμή μεταφοράς συνδεδεμένη στον εξεταζόμενο ζυγό, πλησίον του ζυγού αυτού.
3. Αρχικοποιείται ο χρόνος εκκαθάρισης $t_{clear} = t_{fault} + t_{step} = 1,05 \text{ sec}$. Κάθε φορά που παρατηρείται ότι το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του, δηλαδή συγκλίνουν οι καμπύλες των χαρακτηριστικών γωνιών των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων, τότε αυξάνεται το βήμα t_{step} κατά $0,05 \text{ sec}$, δηλαδή $t_{step} = t_{step,new} = t_{step,old} + 0,05 \text{ sec}$ και πραγματοποιείται εκ νέου βραχυκύκλωμα για

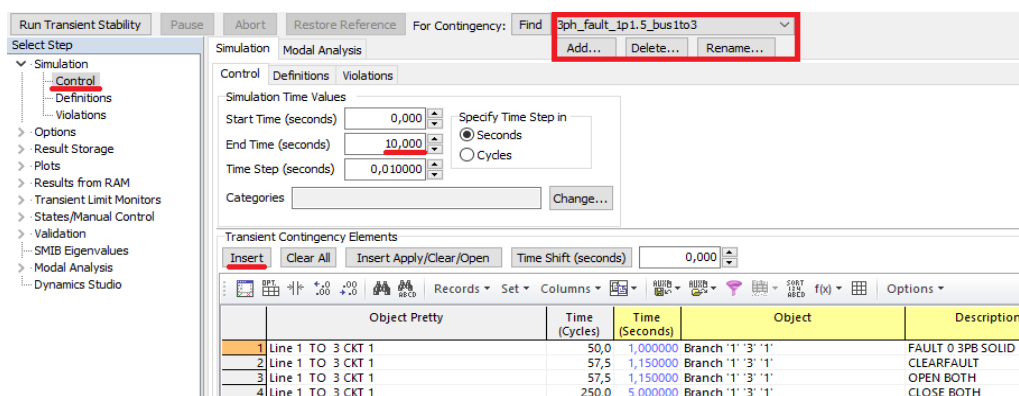
το νέο χρόνο εκκαθάρισης t_{clear} . Η επαναληπτική αυτή διαδικασία θα σταματήσει όταν το σύστημα χάσει την ευστάθειά του, με τις καμπύλες των χαρακτηριστικών γωνιών και σύγχρονων αντισταθμίσεων να μη συγκλίνουν. Τότε η προηγούμενη επανάληψη θα αντιστοιχεί στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης $t_{critical} = t_{clear,final} - t_{fault}$.

4. Τη χρονική στιγμή $t_{open_line} = t_{clear,final}$ πραγματοποιείται άνοιγμα των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής που εμφανίστηκε το σφάλμα.
5. Τη χρονική στιγμή t_{close_line} η γραμμή τίθεται ξανά υπό τάση με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι t_{end} .

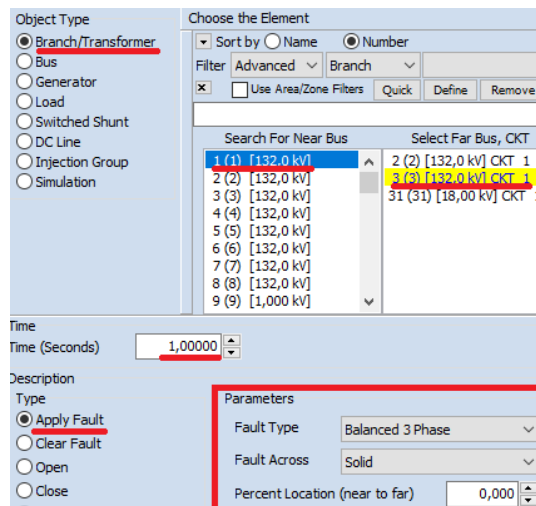
Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σύγκριση των σχετικών γωνιών είναι να ορισθεί μια γεννήτρια ως αναφορά για τις γωνίες των υπολοίπων. Στις Εικόνες 7.22-7.27 φαίνονται οι αρχειοποιήσεις πριν την εκτέλεση της επαναληπτικής διαδικασίας για την εκτίμηση και την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης στους ζυγούς 1,2,5 και 6.



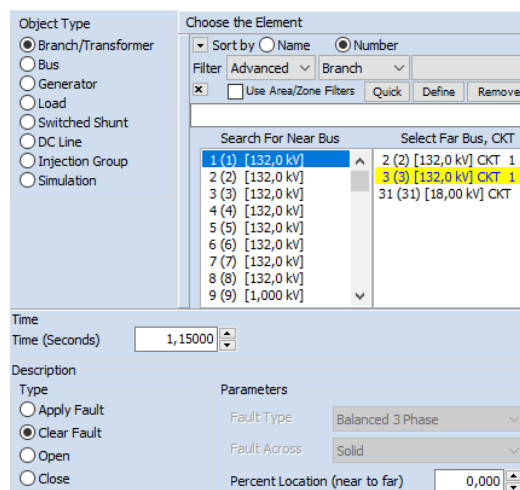
Εικόνα 7.22: Ορισμός γεννήτριας αναφοράς στο Powerworld



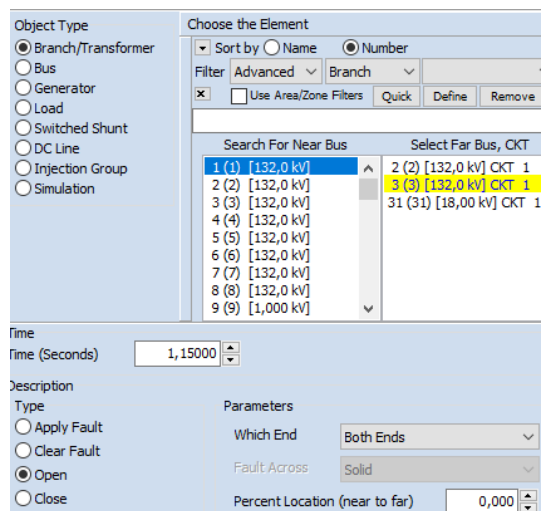
Εικόνα 7.23: Παράθυρο ορισμού σεναρίων στο Powerworld



Εικόνα 7.24: Αρχικοποίηση βημάτων 1,2 για στερεό τριφασικό σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς 1-3 σε $t_{fault} = 1 \text{ sec}$, πλησίον του ζυγού 1

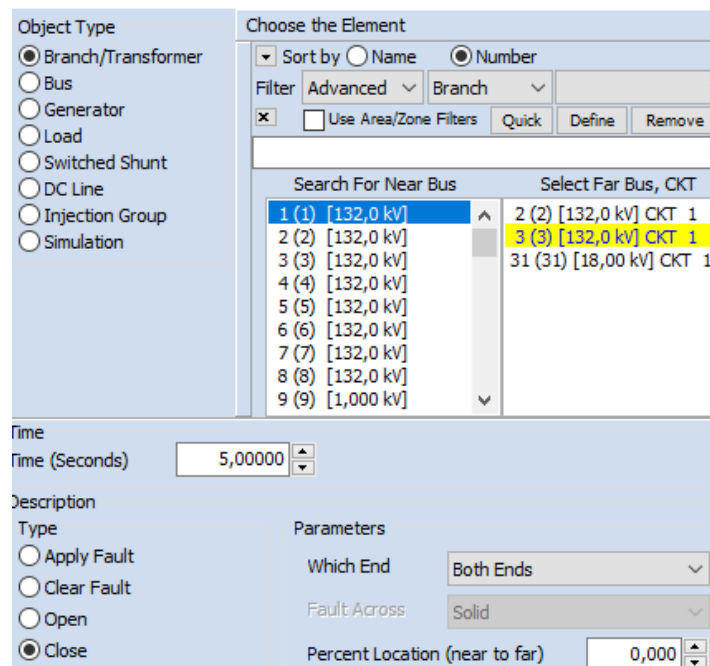


Εικόνα 7.25: Εφαρμογή εκκαθάρισης σφάλματος σύμφωνα με το βήμα 3 στη γραμμή μεταφοράς 1-3 σε t_{clear}



Εικόνα 7.26: Άνοιγμα διακοπών ισχύος σύμφωνα με το βήμα 4 της γραμμής 1-3 σε

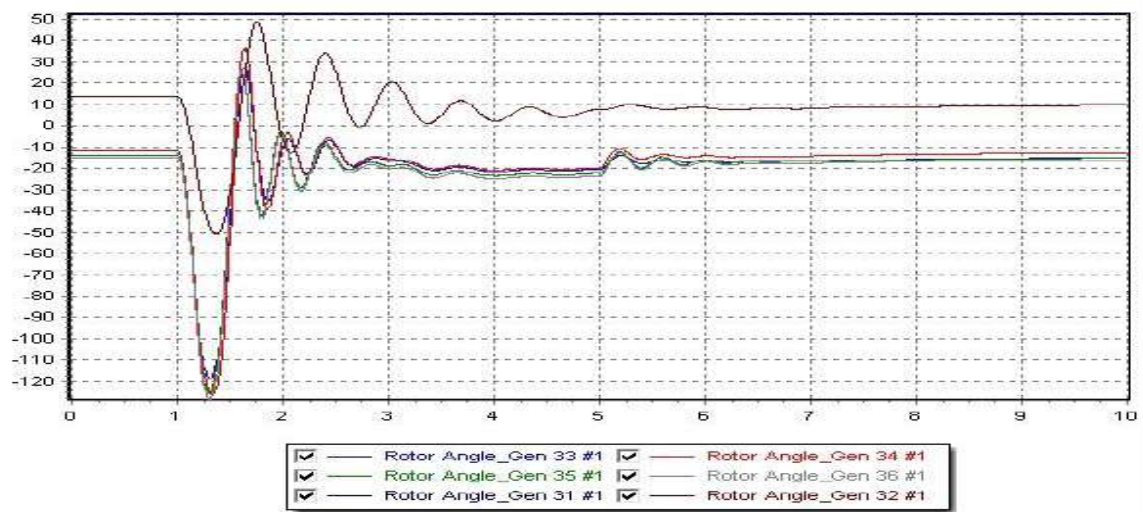
$$t_{open_line} = t_{clear}$$



Εικόνα 7.27: Επαναφορά της γραμμής 1-3 σύμφωνα με το βήμα 5 σε $t_{close_line} = 5 \text{ sec}$

7.4.1 Σενάριο A1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

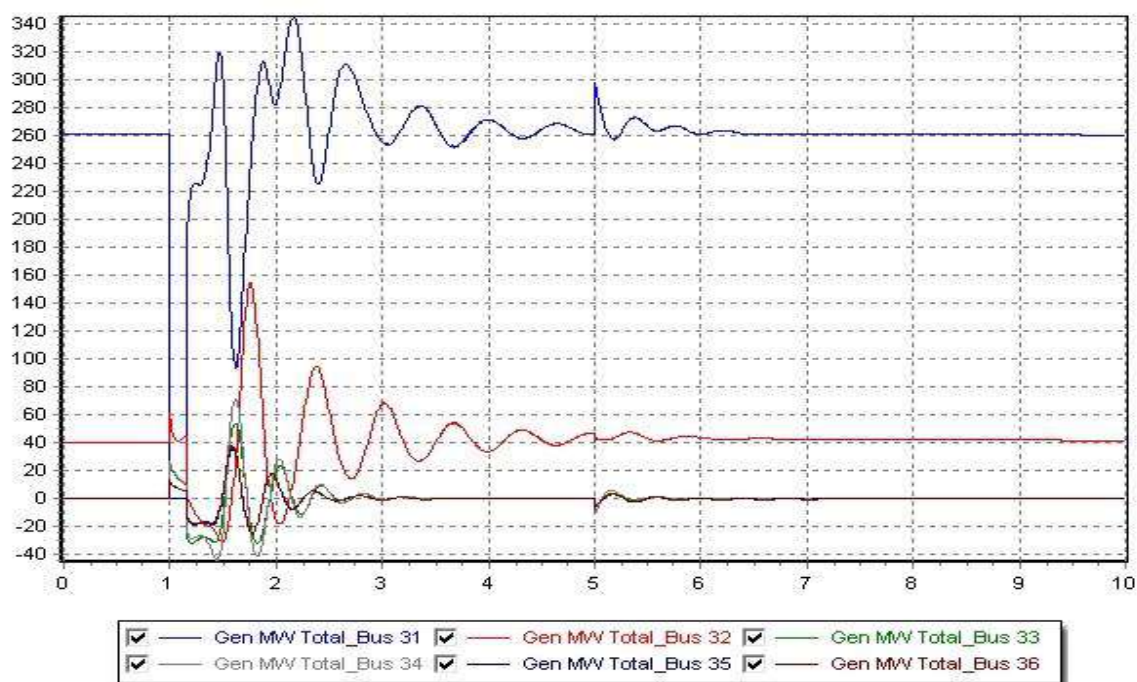
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 0,15 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 1,2 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.28-7.33).



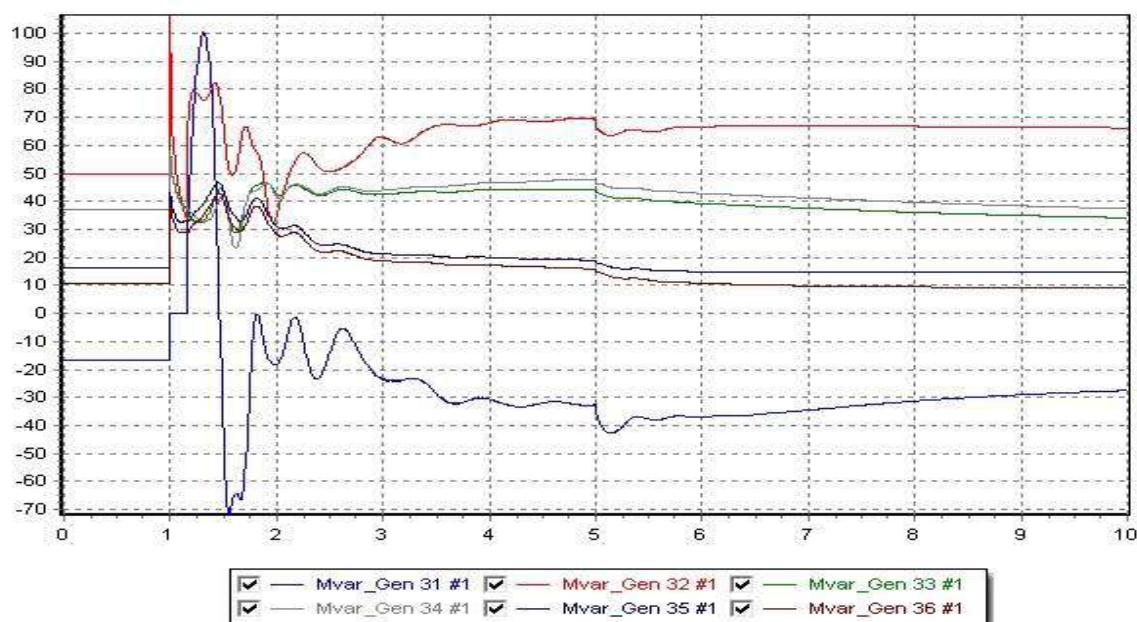
Εικόνα 7.28: Σενάριο A1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec



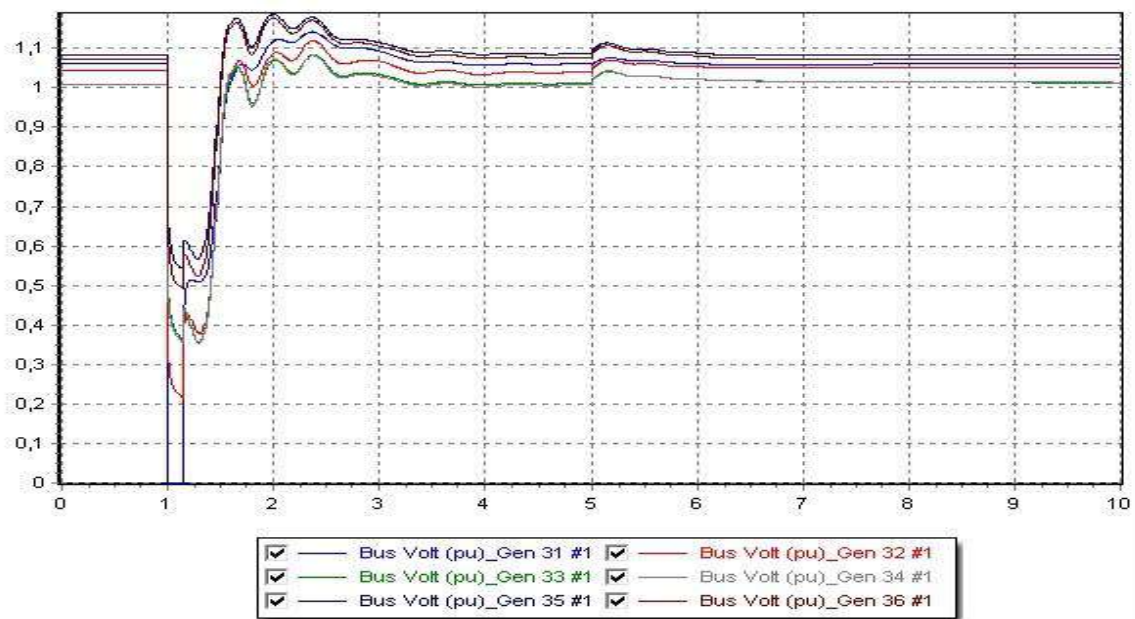
Εικόνα 7.29: Σενάριο A1T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec



Εικόνα 7.30: Σενάριο A1T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec



Εικόνα 7.31: Σενάριο A1T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec



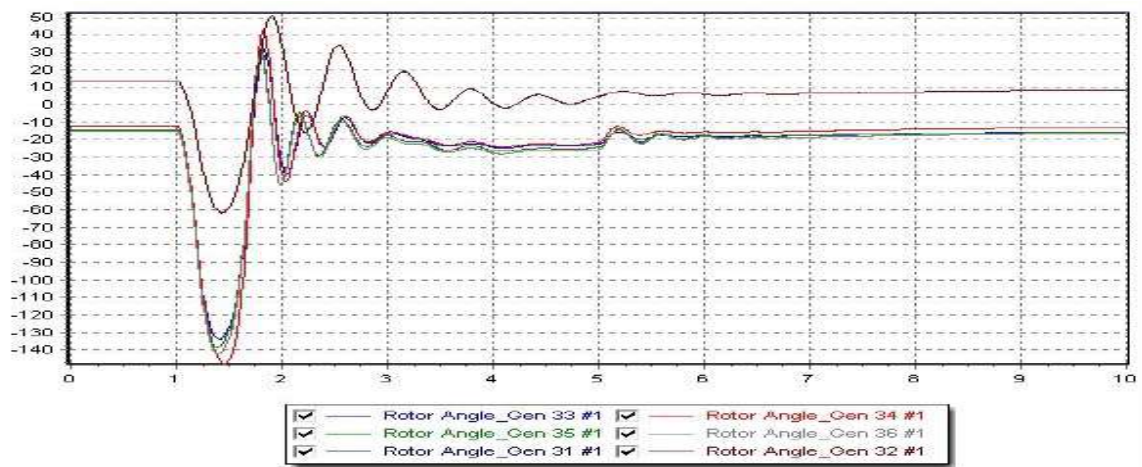
Εικόνα 7.32: Σενάριο A1T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,15 sec



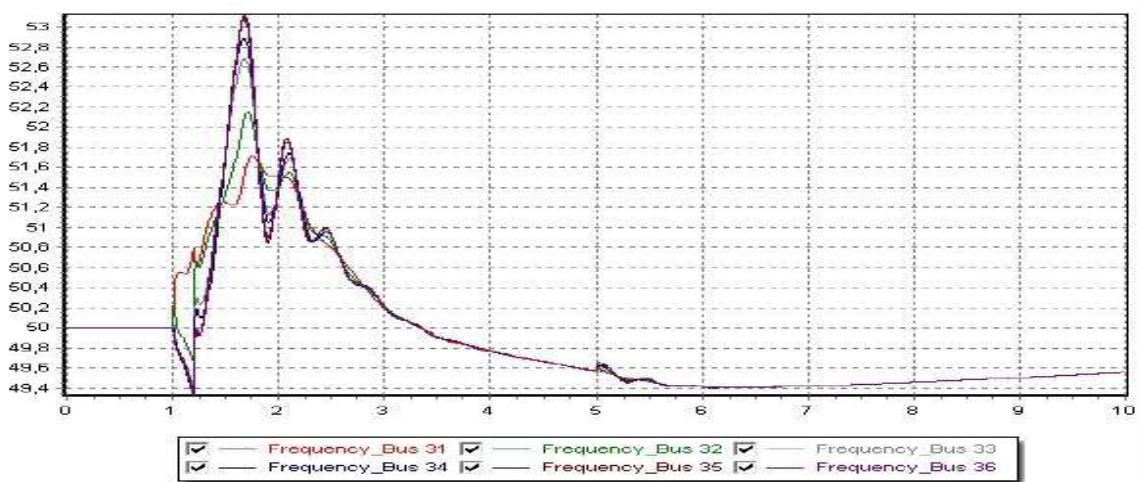
Εικόνα 7.33: Σενάριο A1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.2 Σενάριο A1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

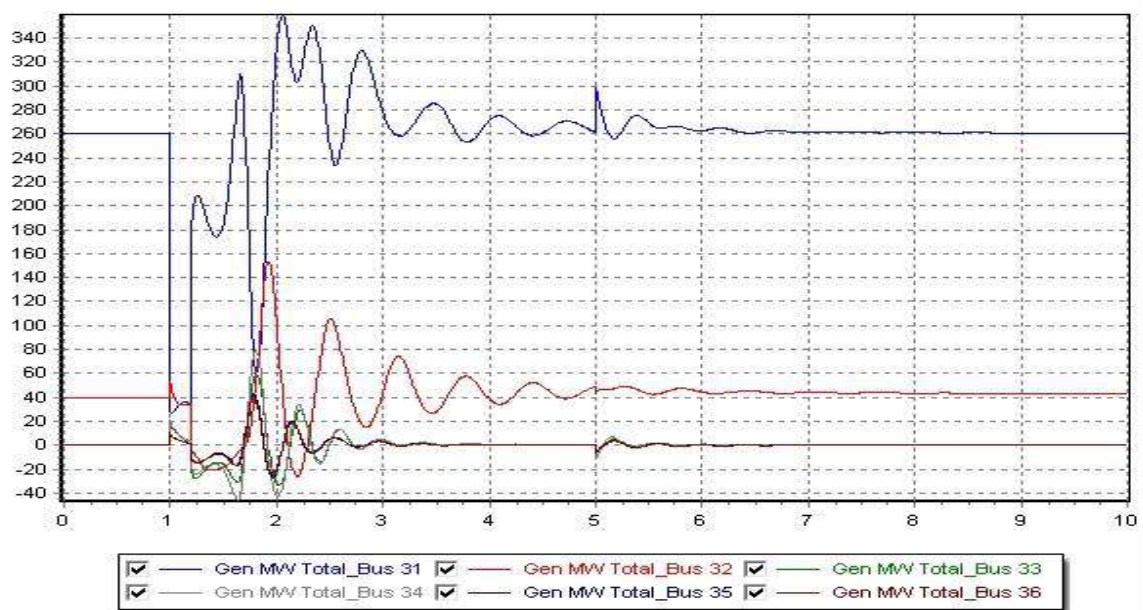
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 0,2 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 1,25 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.34-7.39).



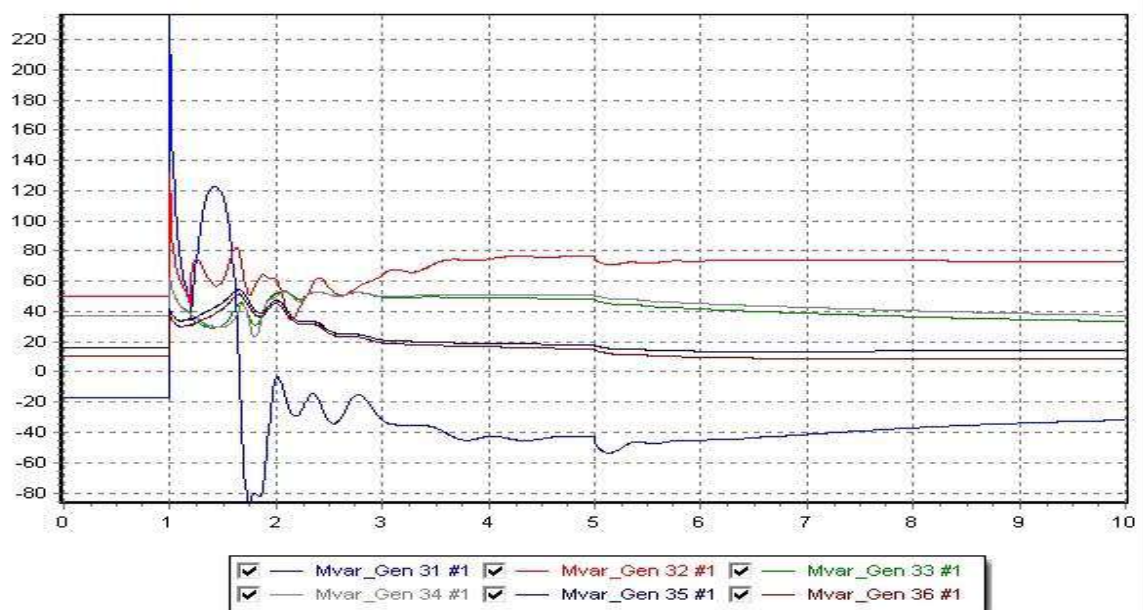
Εικόνα 7.34: Σενάριο A1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



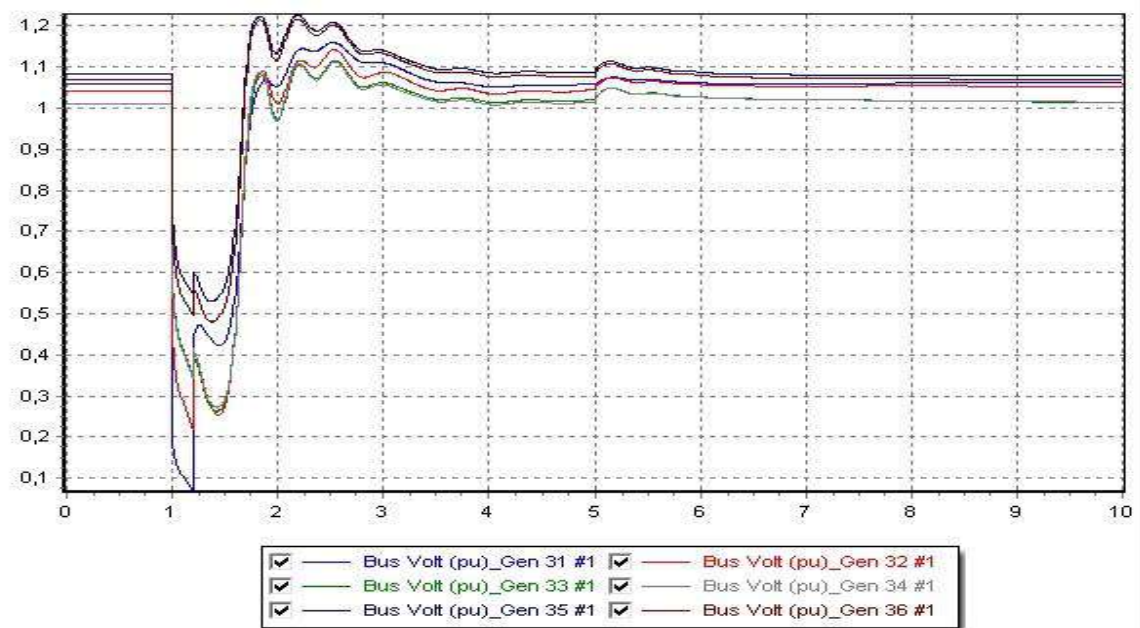
Εικόνα 7.35: Σενάριο A1M – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



Εικόνα 7.36: Σενάριο A1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



Εικόνα 7.37: Σενάριο A1M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



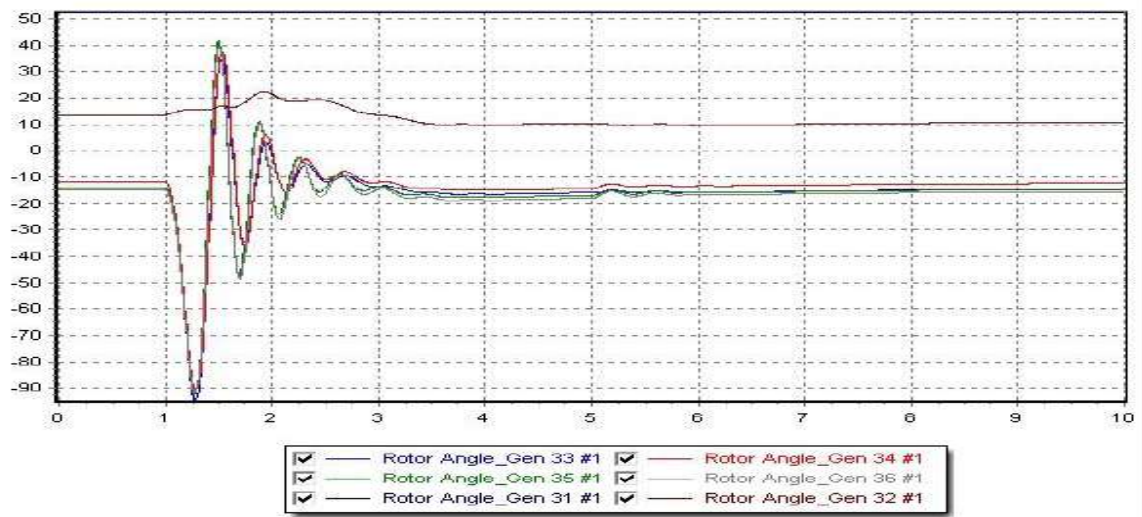
Εικόνα 7.38: Σενάριο A1M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



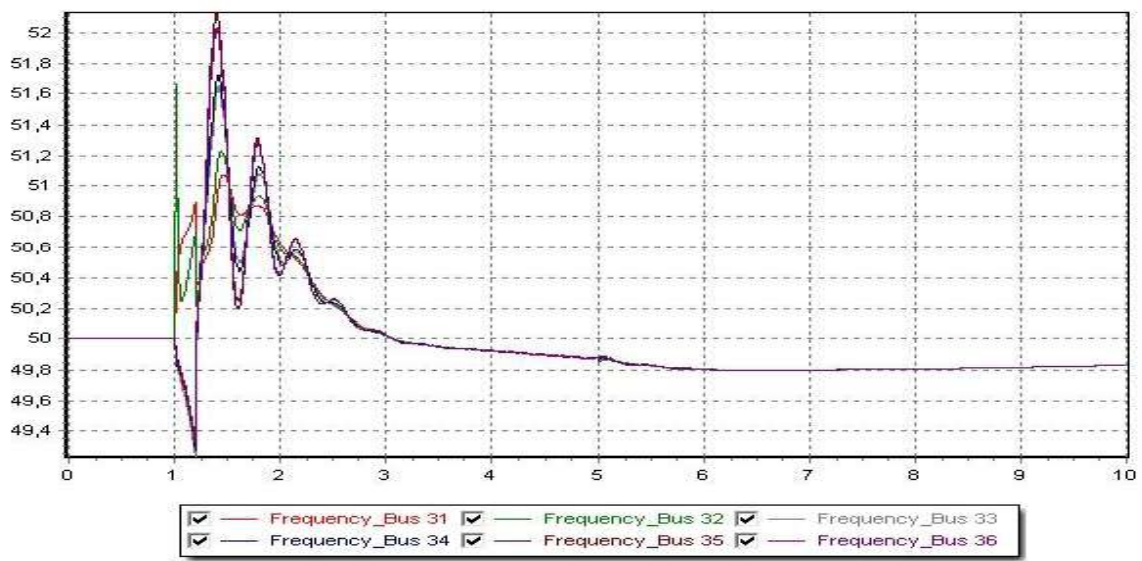
Εικόνα 7.39: Σενάριο A1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,25 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.3 Σενάριο A2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

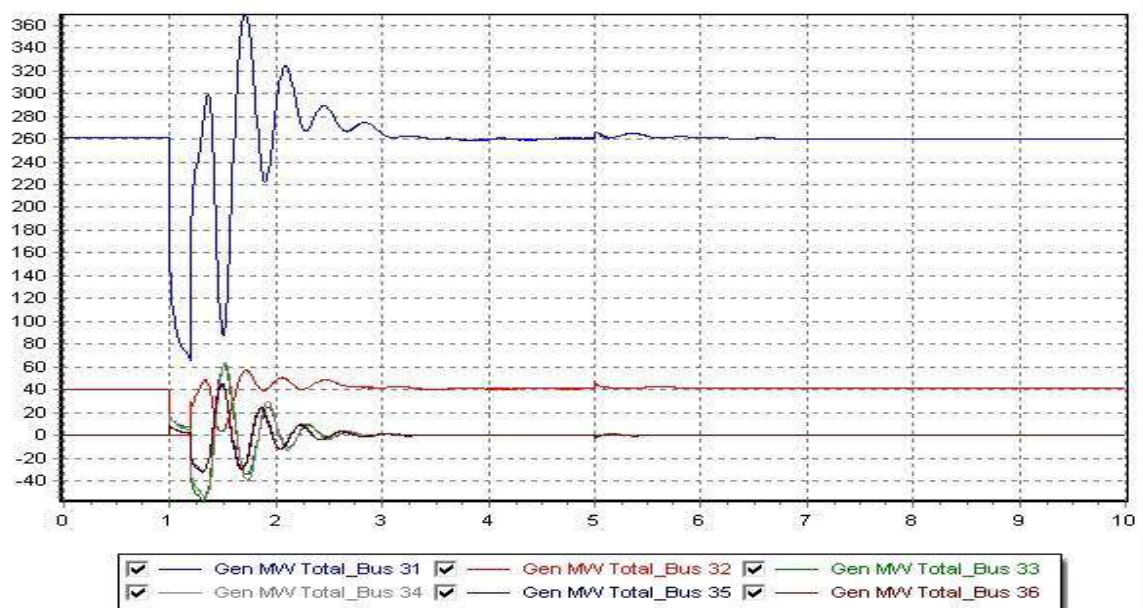
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 0,2 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 1,25 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.40-7.45).



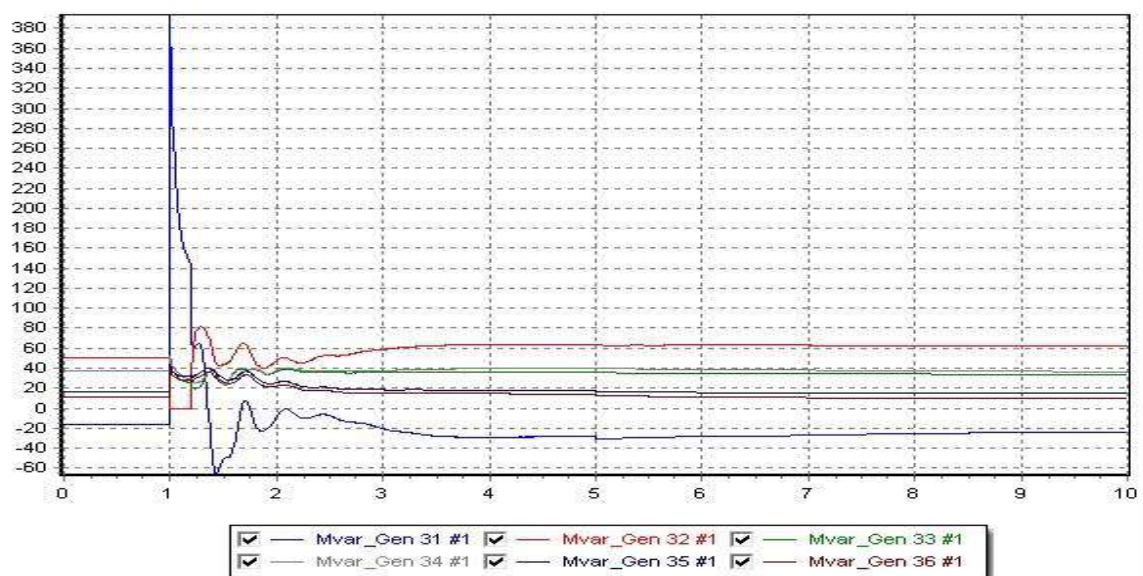
Εικόνα 7.40: Σενάριο A2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



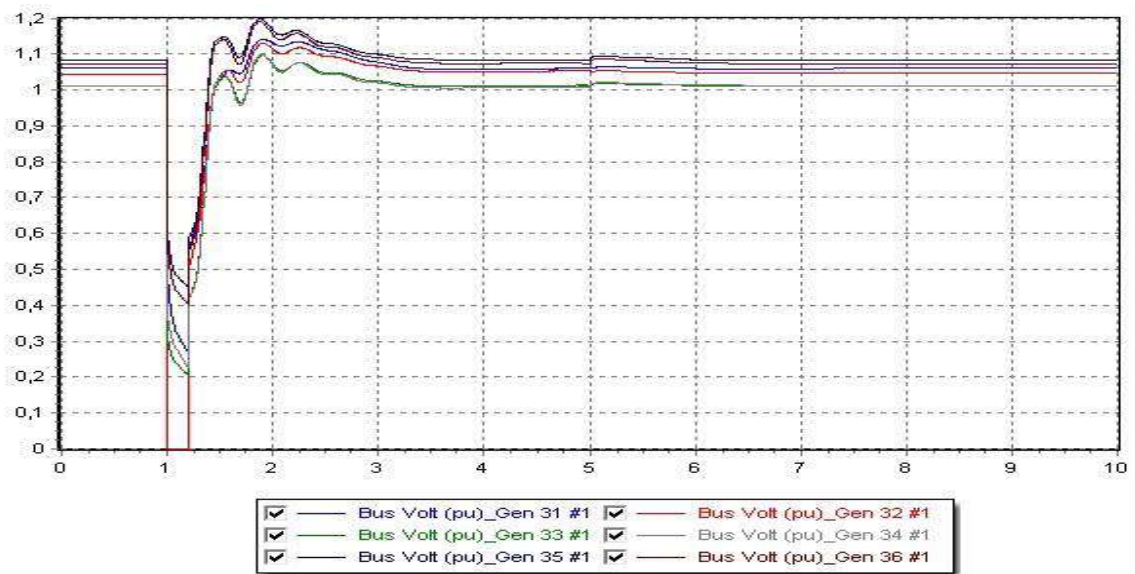
Εικόνα 7.41: Σενάριο A2T – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



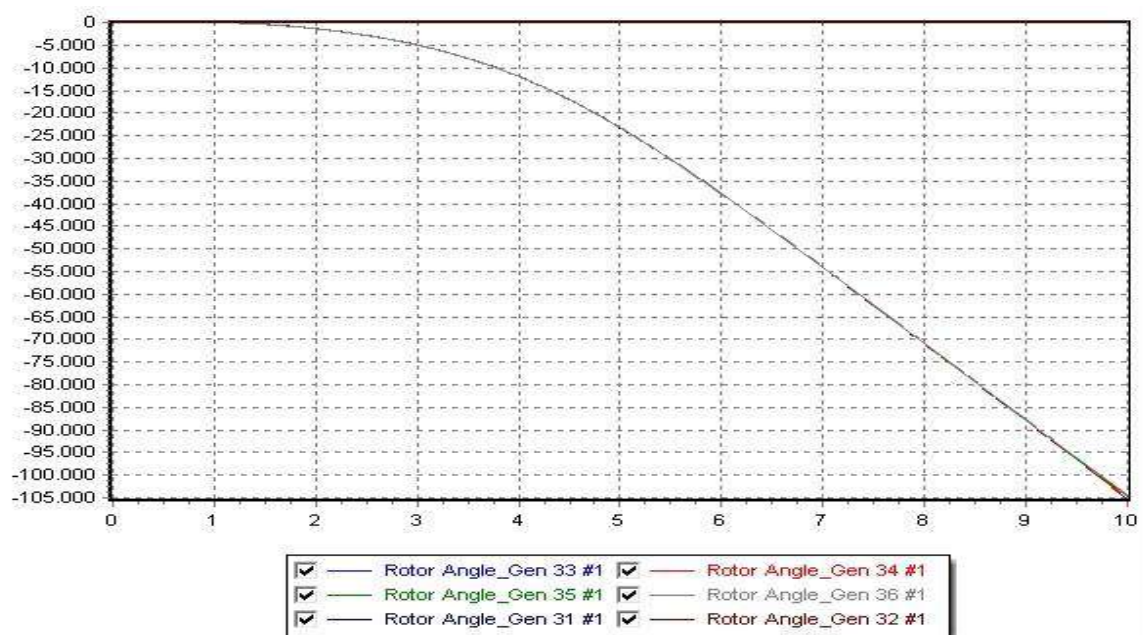
Εικόνα 7.42: Σενάριο A2T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



Εικόνα 7.43: Σενάριο A2T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



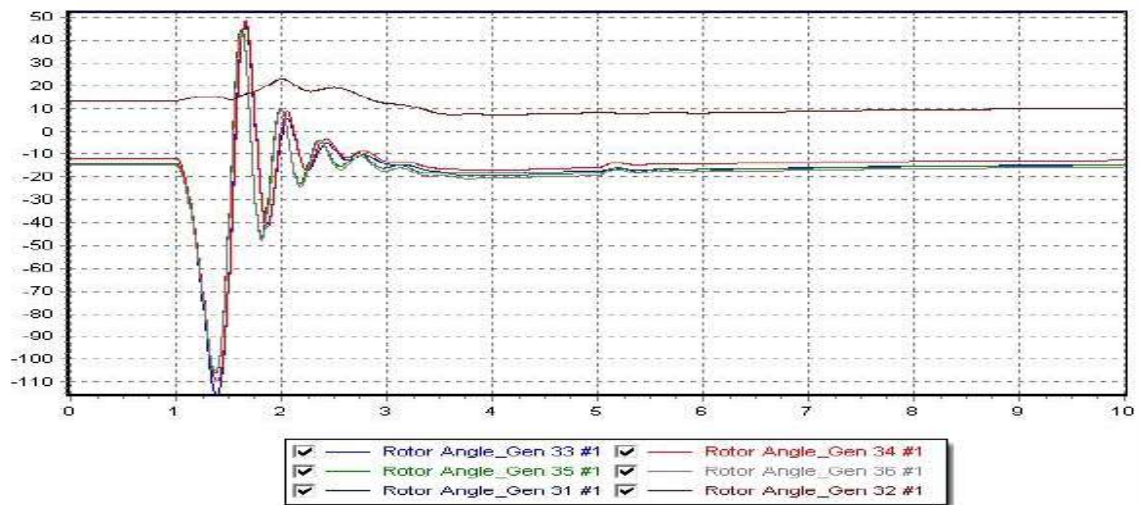
Εικόνα 7.44: Σενάριο A2T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,2 sec



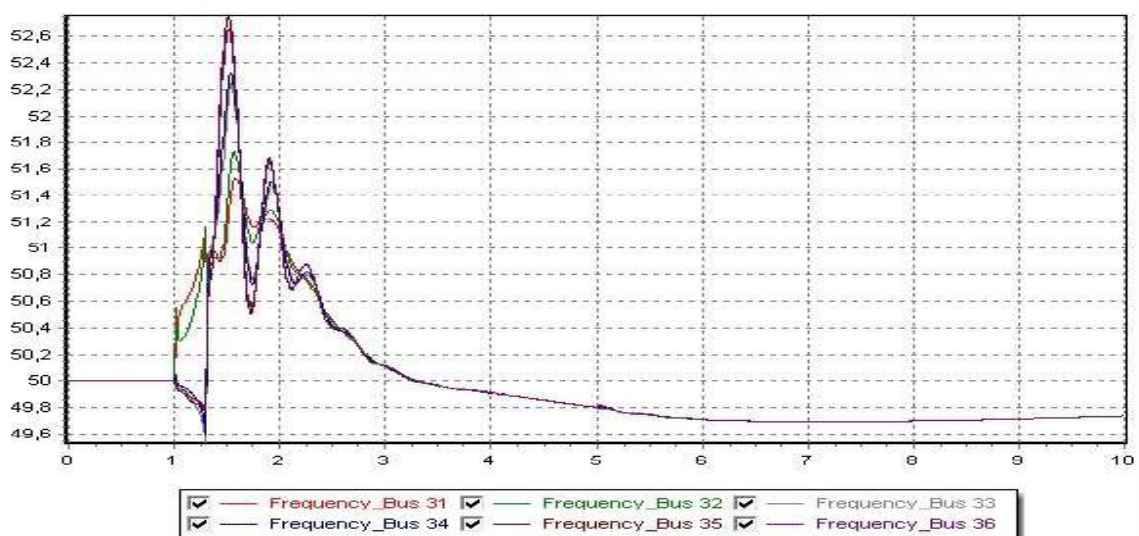
Εικόνα 7.45: Σενάριο A2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,25 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.4 Σενάριο A2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

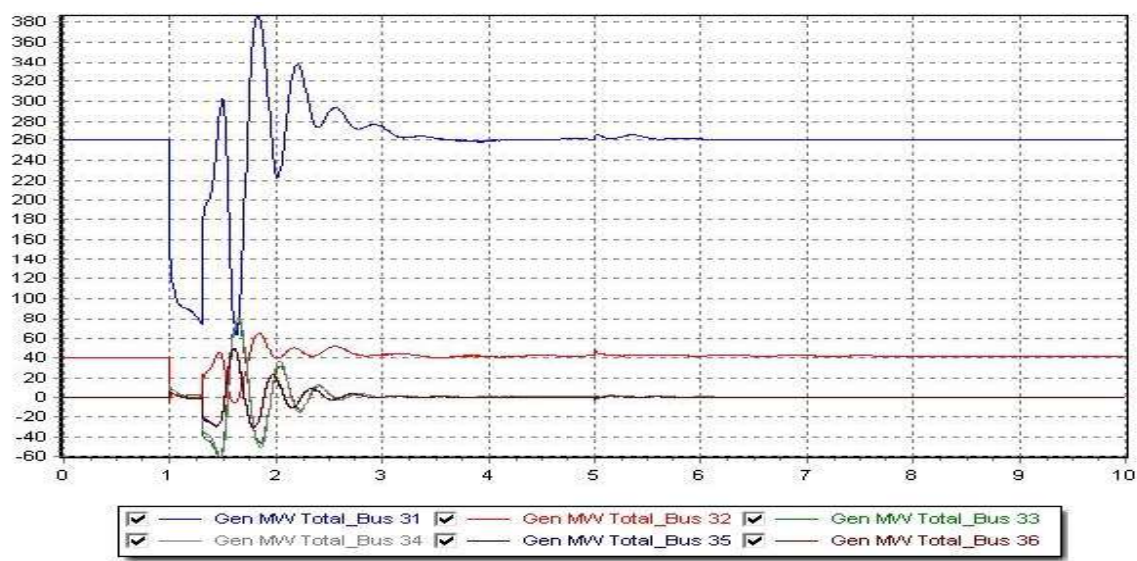
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 0,3 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 1,35 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.46-7.51).



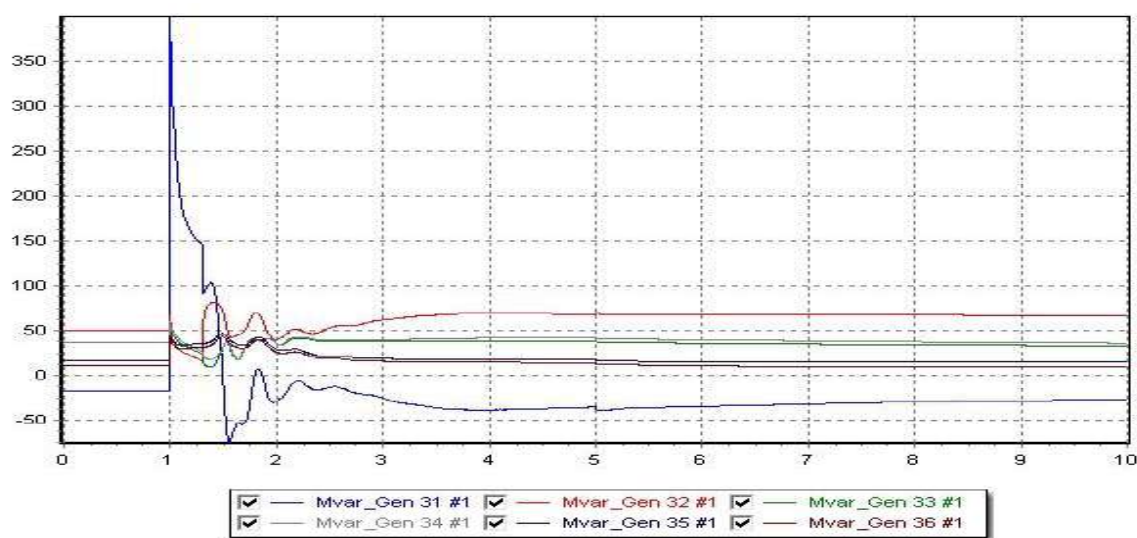
Εικόνα 7.46: Σενάριο A2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec



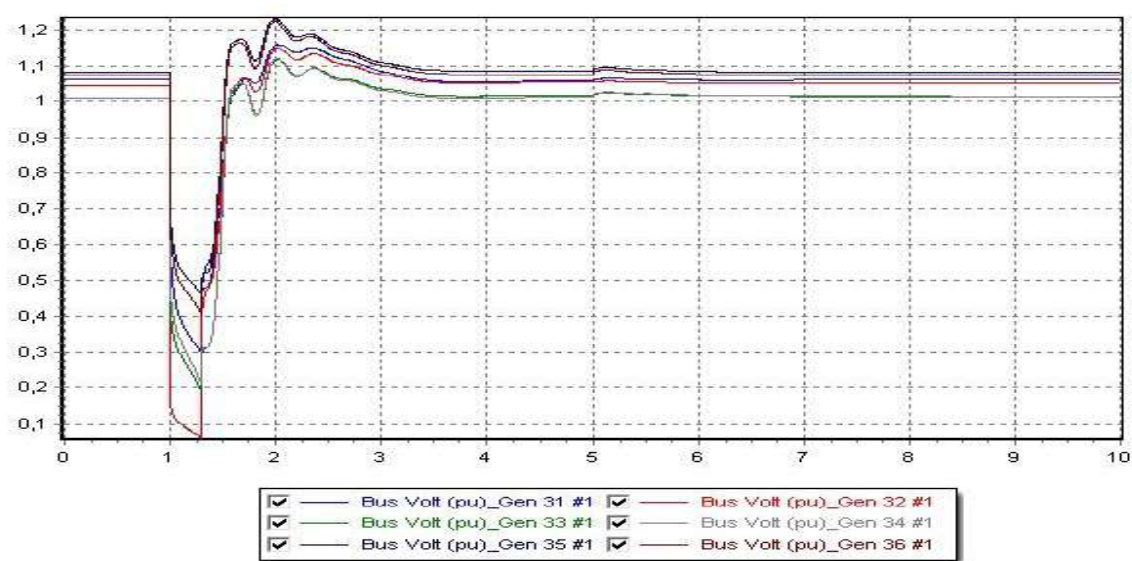
Εικόνα 7.47: Σενάριο A2M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec



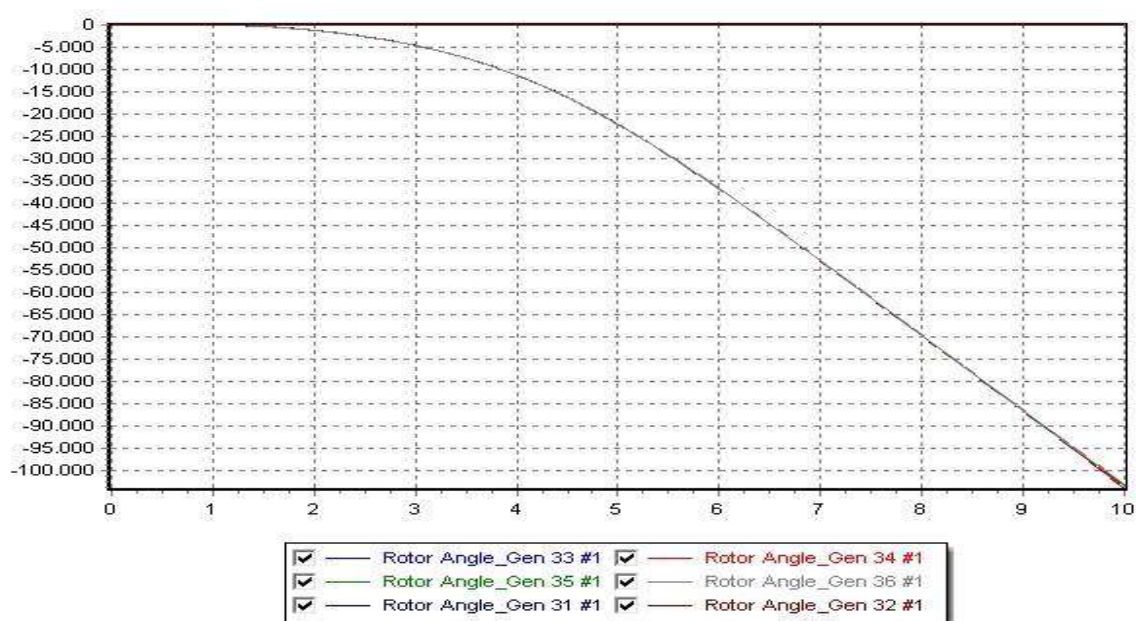
Εικόνα 7.48: Σενάριο A2M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec



Εικόνα 7.49: Σενάριο A2M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec



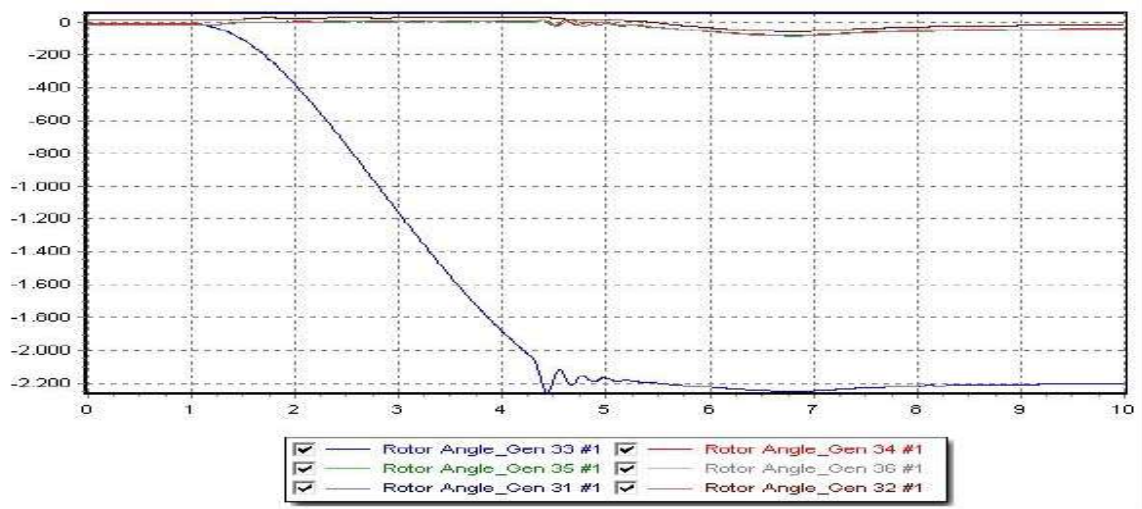
Εικόνα 7.50: Σενάριο A2M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,3 sec



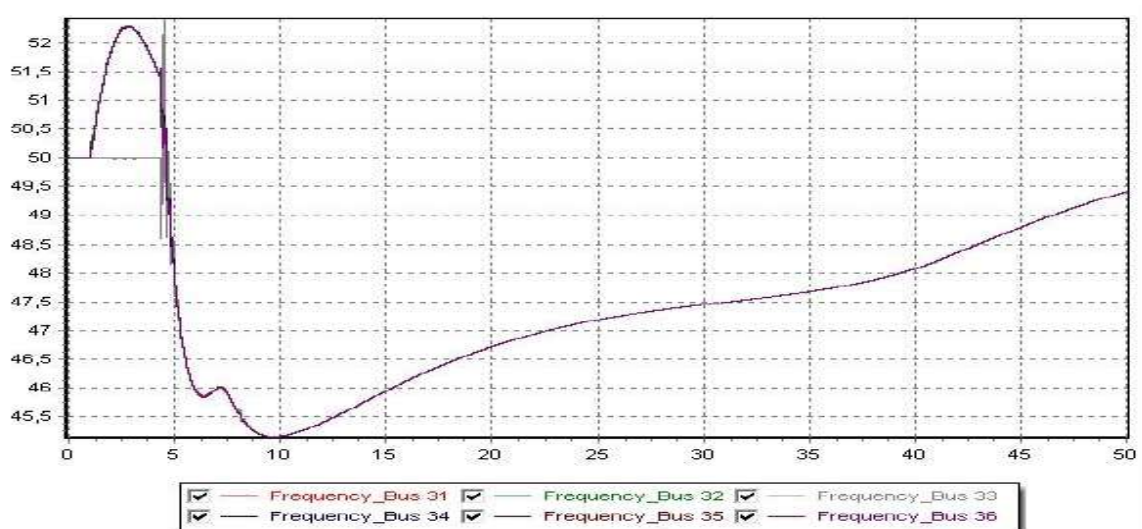
Εικόνα 7.51: Σενάριο A2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,35 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.5 Σενάριο A5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

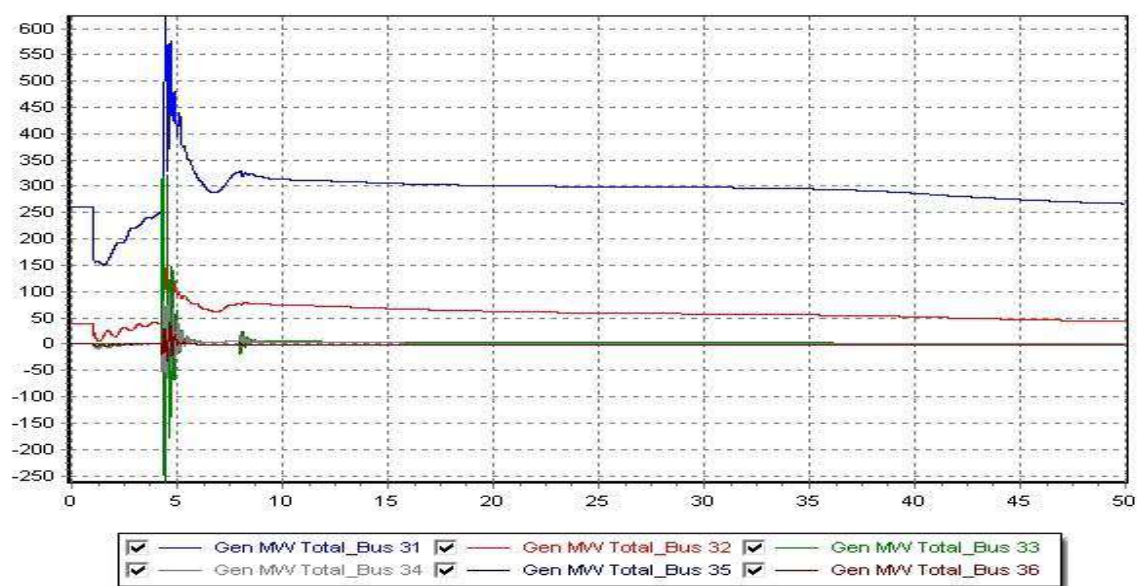
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,30 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,35 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.52-7.57). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



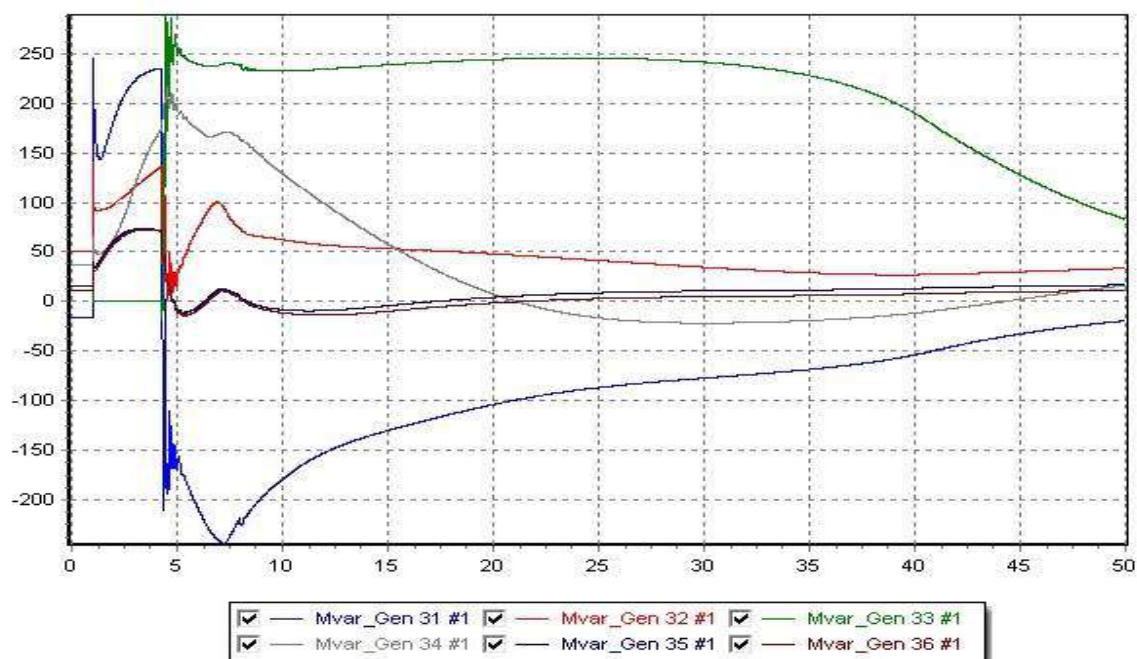
Εικόνα 7.52: Σενάριο A5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



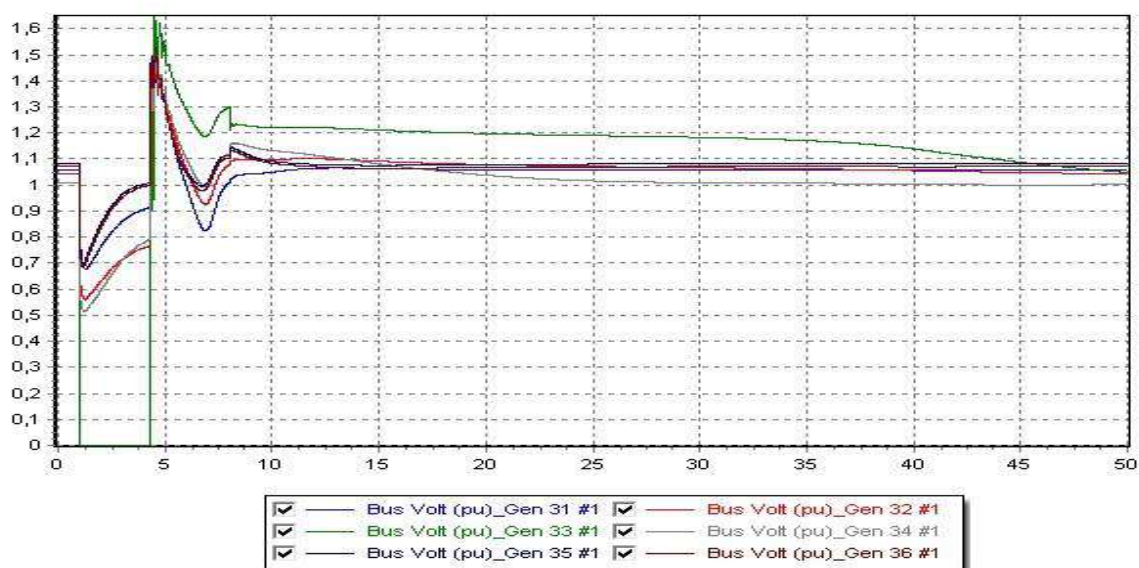
Εικόνα 7.53: Σενάριο A5T – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



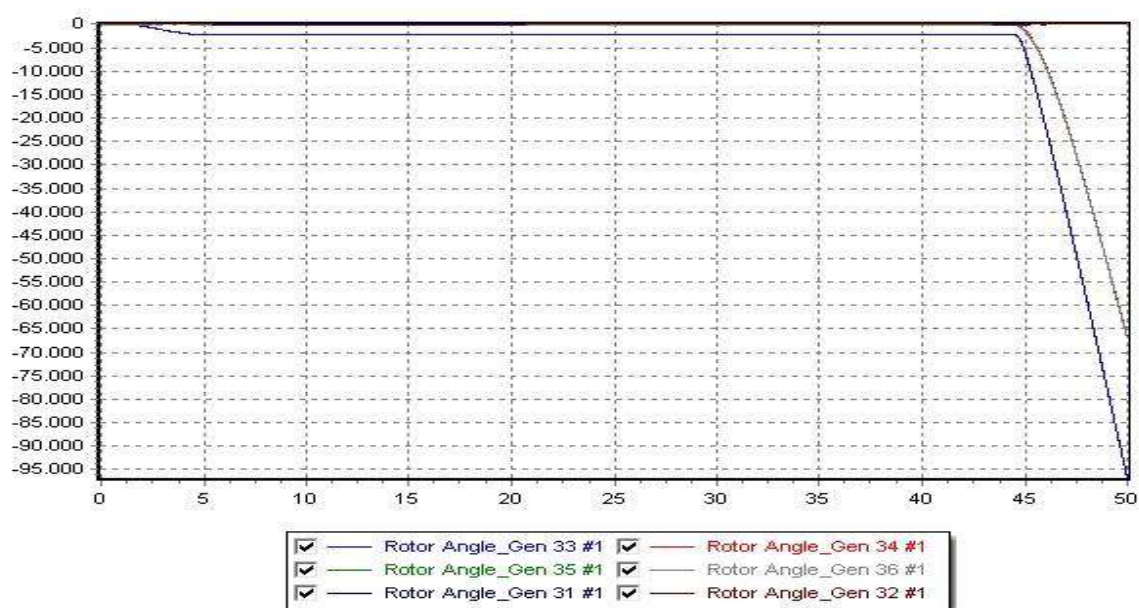
Εικόνα 7.54: Σενάριο A5T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



Εικόνα 7.55: Σενάριο A5T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



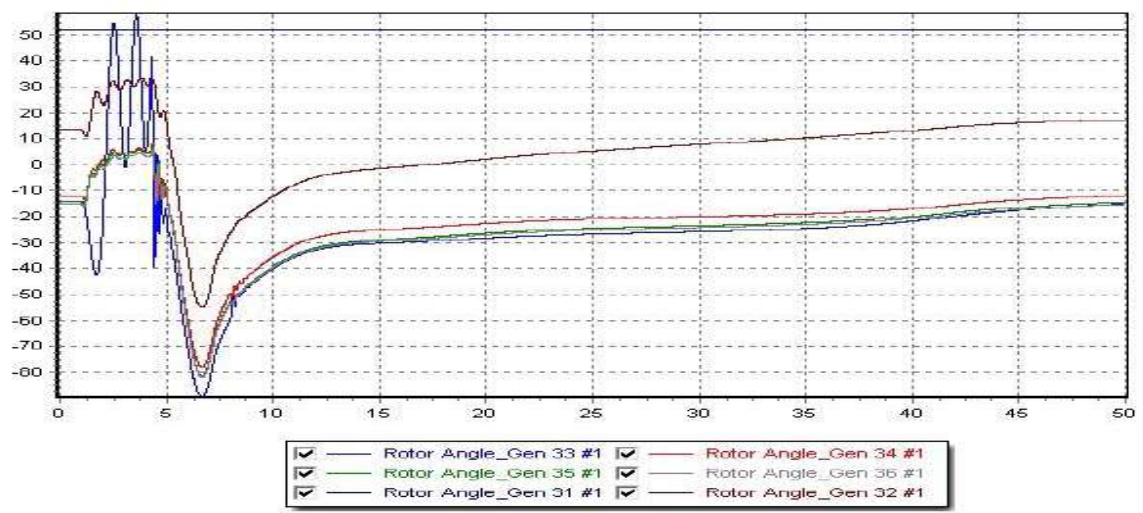
Εικόνα 7.56: Σενάριο A5T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



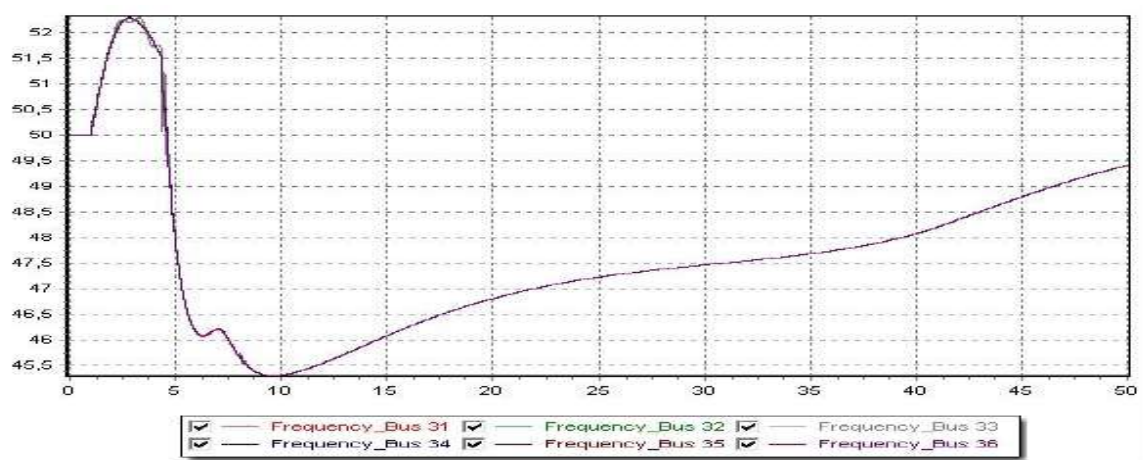
Εικόνα 7.57: Σενάριο A5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,35 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.6 Σενάριο A5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

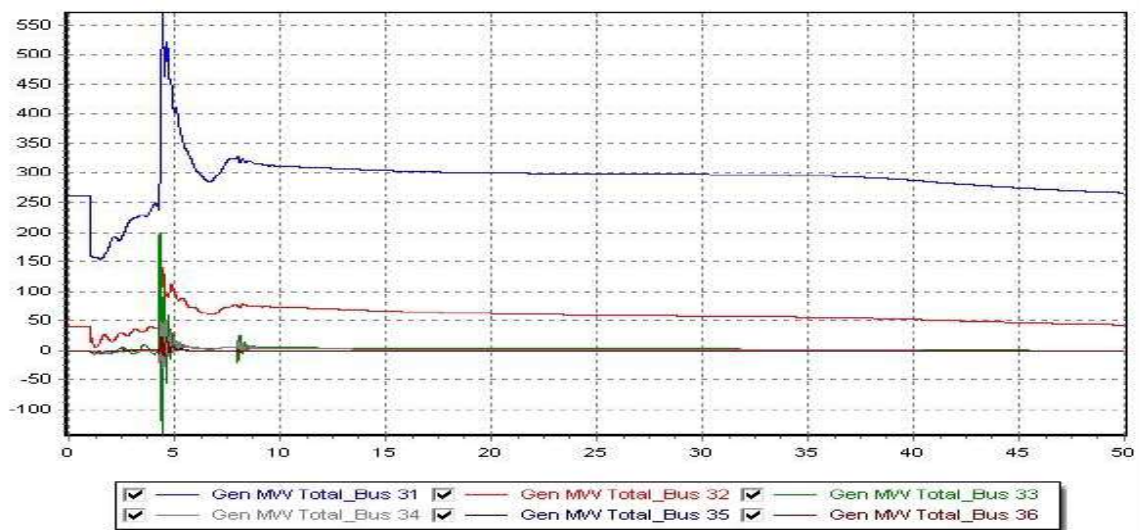
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,3 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,35 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.58-7.63). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



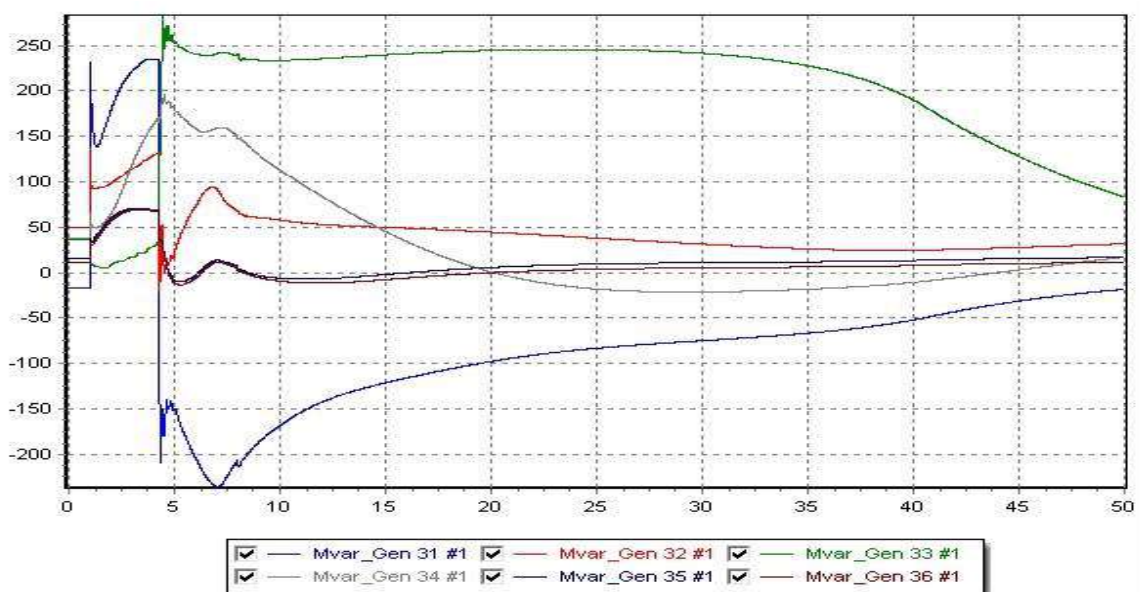
Εικόνα 7.58: Σενάριο A5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



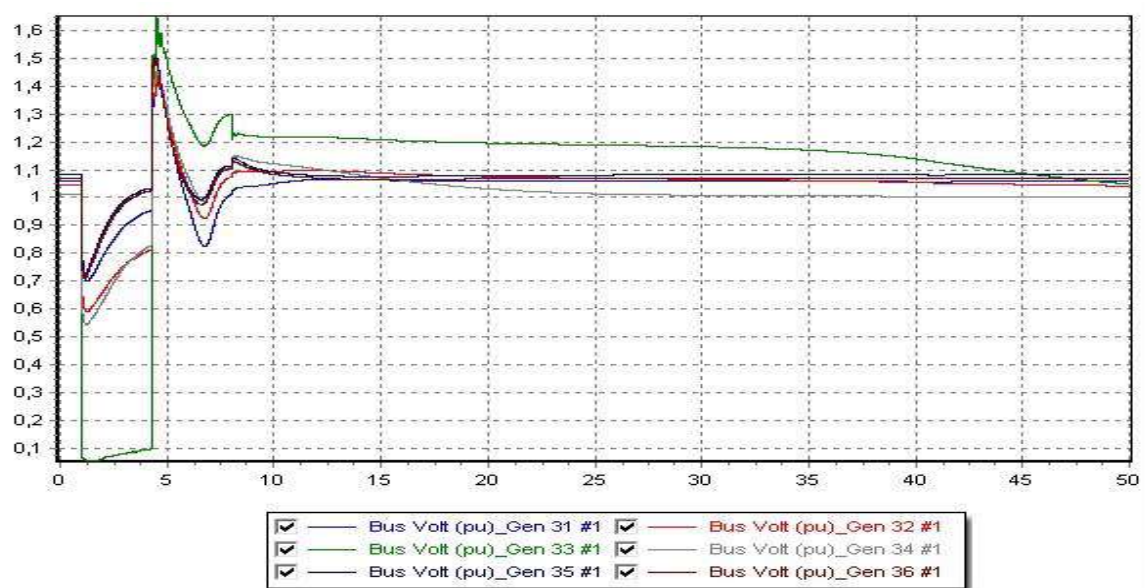
Εικόνα 7.59: Σενάριο A5M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



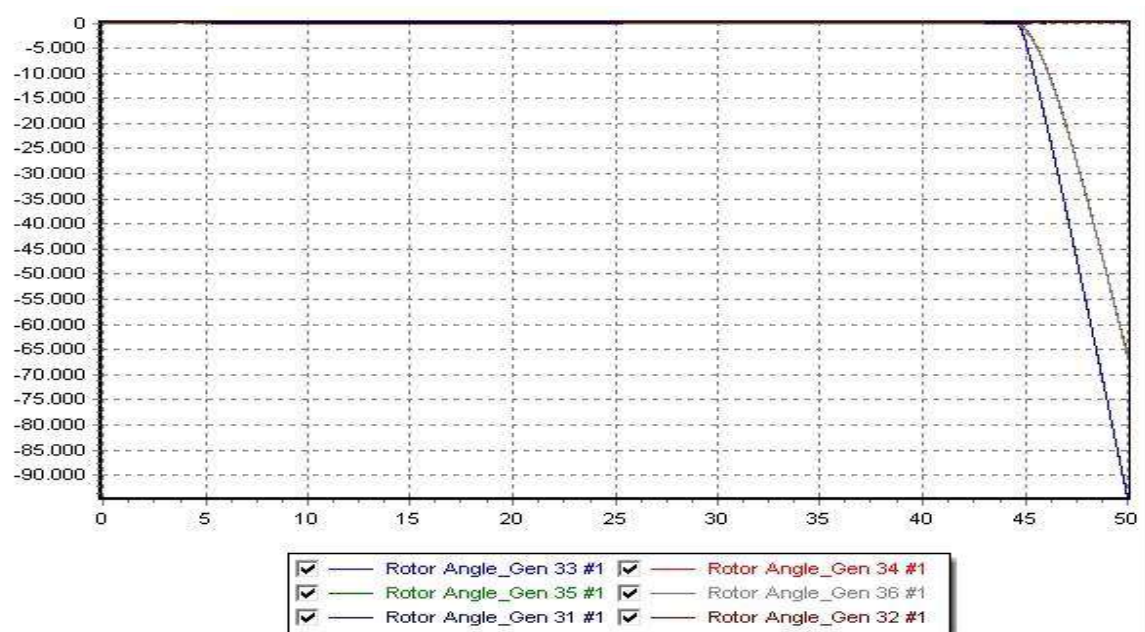
Εικόνα 7.60: Σενάριο A5M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



Εικόνα 7.61: Σενάριο A5M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



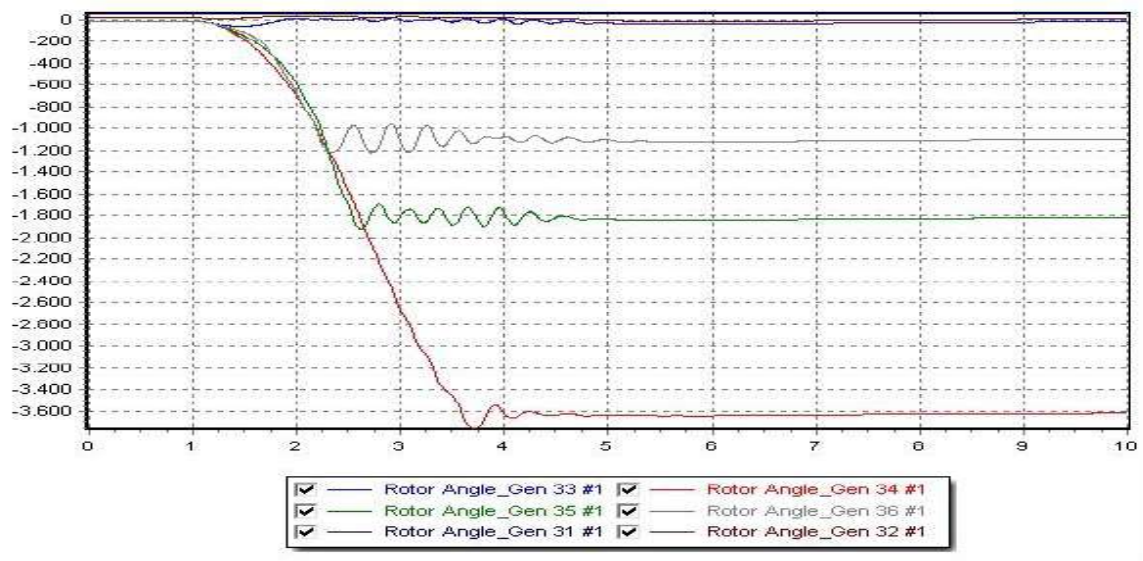
Εικόνα 7.62: Σενάριο A5M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec



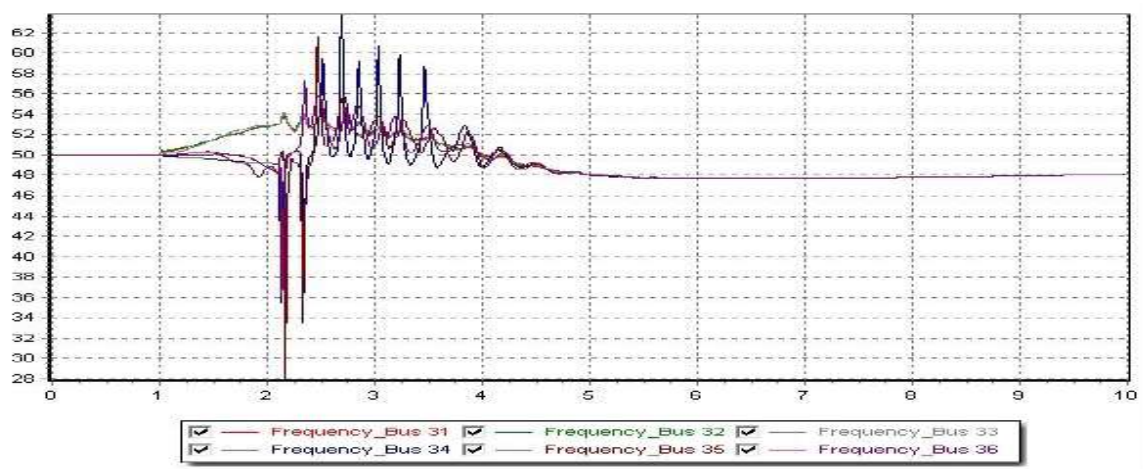
Εικόνα 7.63: Σενάριο A5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,35 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.7 Σενάριο A6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

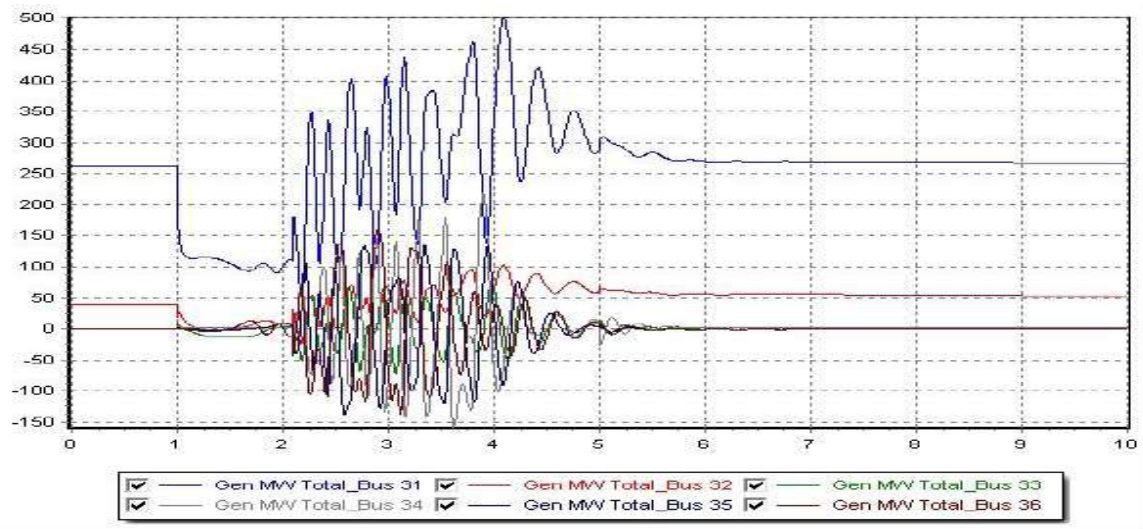
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 1,1 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 2,15 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.64-7.69). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



Εικόνα 7.64: Σενάριο A6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec



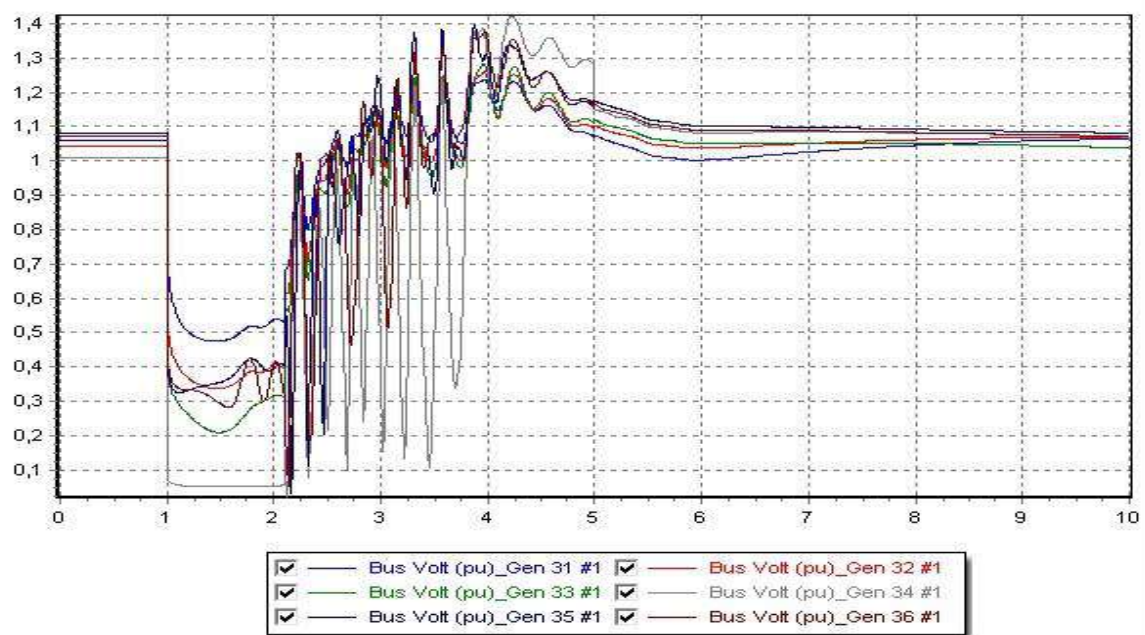
Εικόνα 7.65: Σενάριο A6T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec



Εικόνα 7.66: Σενάριο A6T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec



Εικόνα 7.67: Σενάριο A6T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec



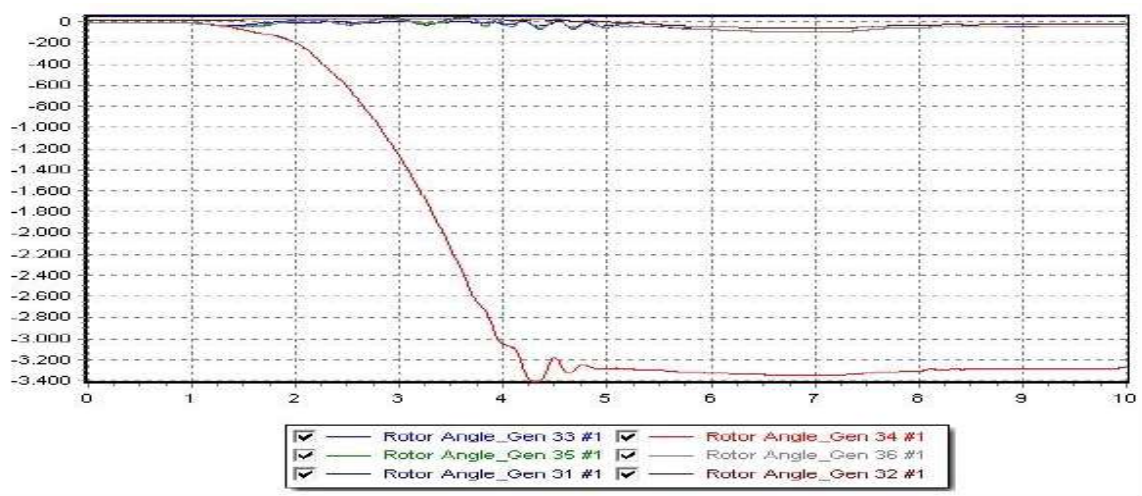
Εικόνα 7.68: Σενάριο A6T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec



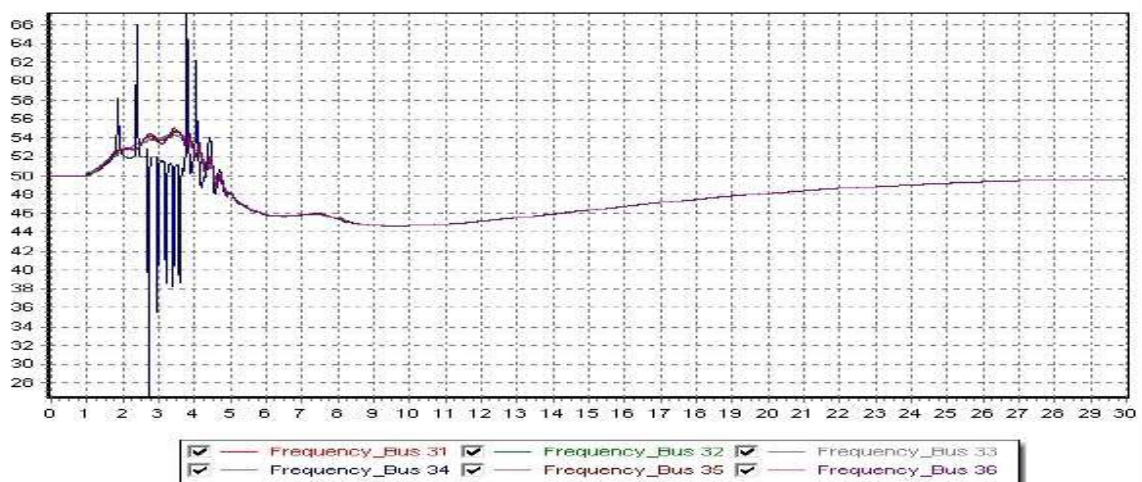
Εικόνα 7.69: Σενάριο A6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,15 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.8 Σενάριο A6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

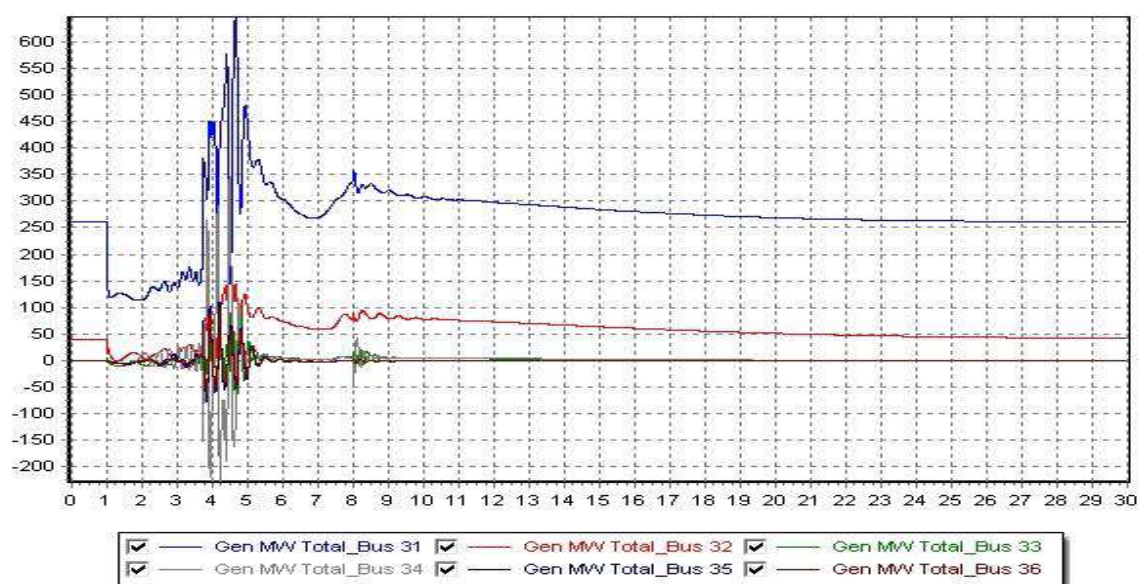
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,7 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3,75 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.70-7.75). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



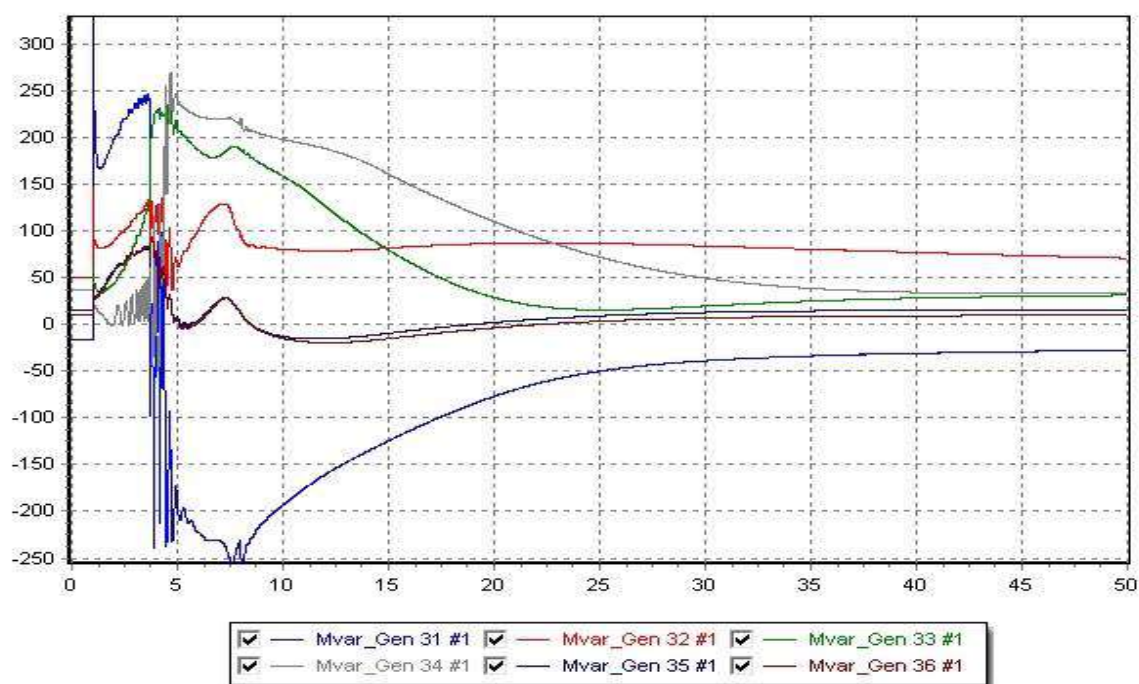
Εικόνα 7.70: Σενάριο A6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



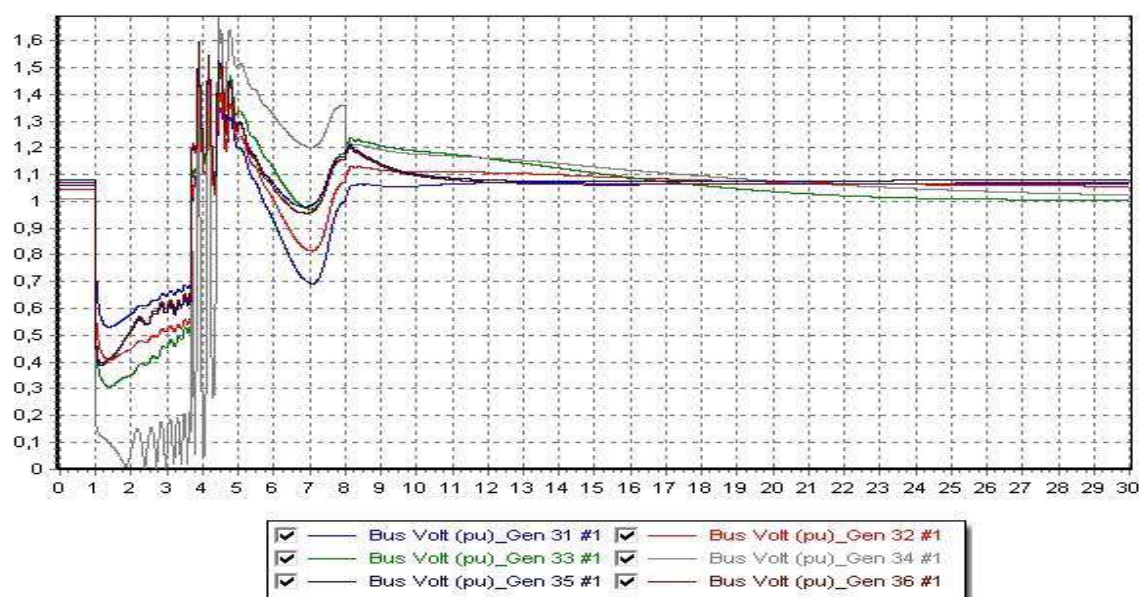
Εικόνα 7.71: Σενάριο A6M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



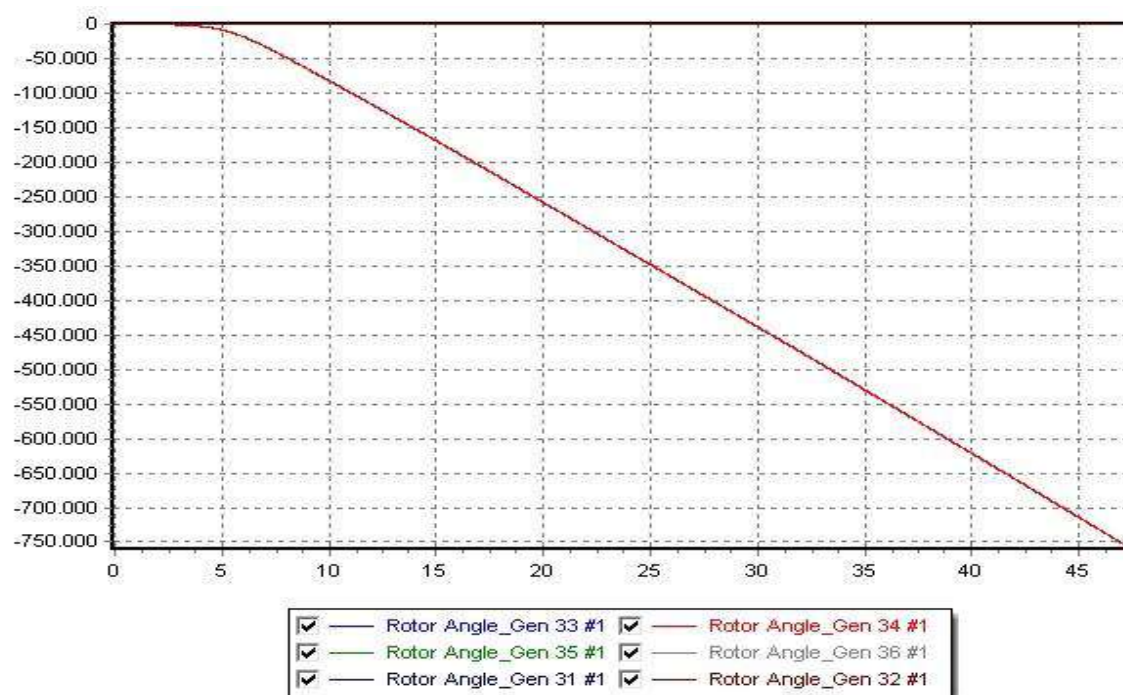
Εικόνα 7.72: Σενάριο Α6Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



Εικόνα 7.73: Σενάριο Α6Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



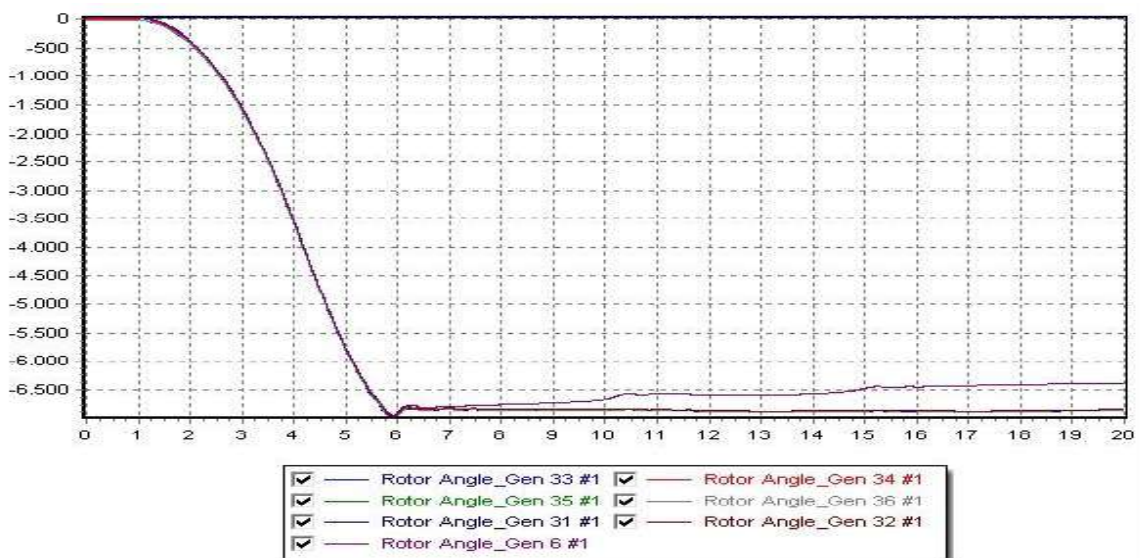
Εικόνα 7.74: Σενάριο A6M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



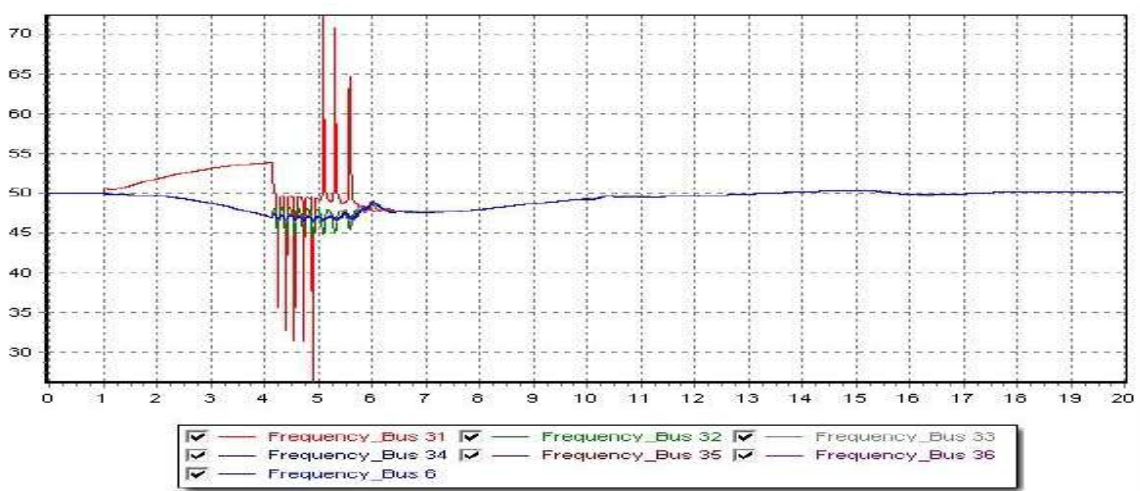
Εικόνα 7.75: Σενάριο A6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,75 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.9 Σενάριο B1T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

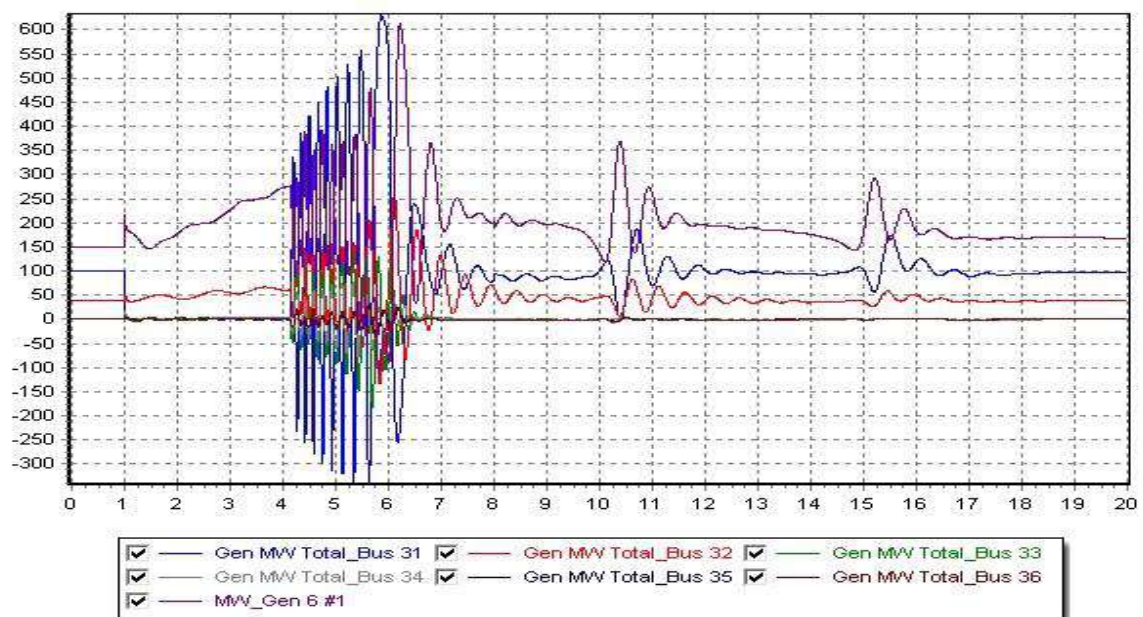
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,15 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,2 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.76-7.81). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



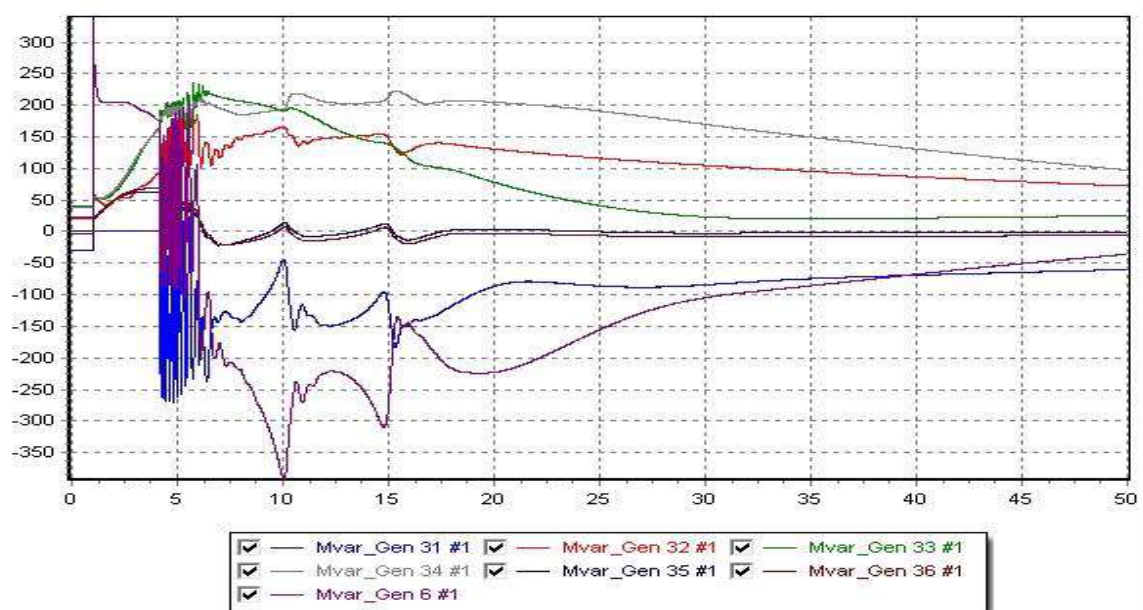
Εικόνα 7.76: Σενάριο B1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec



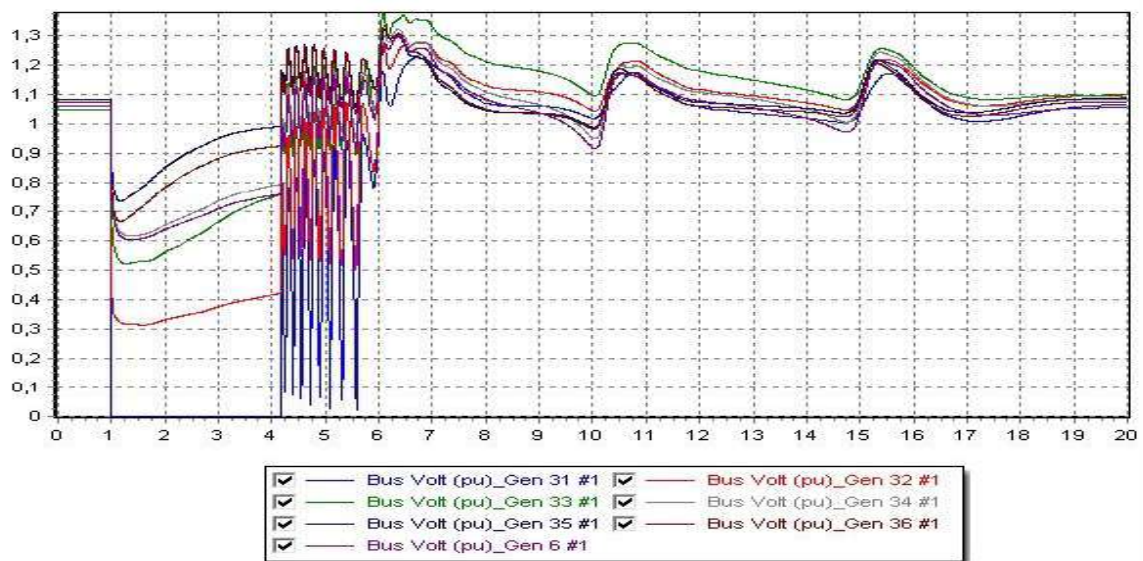
Εικόνα 7.77: Σενάριο B1T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec



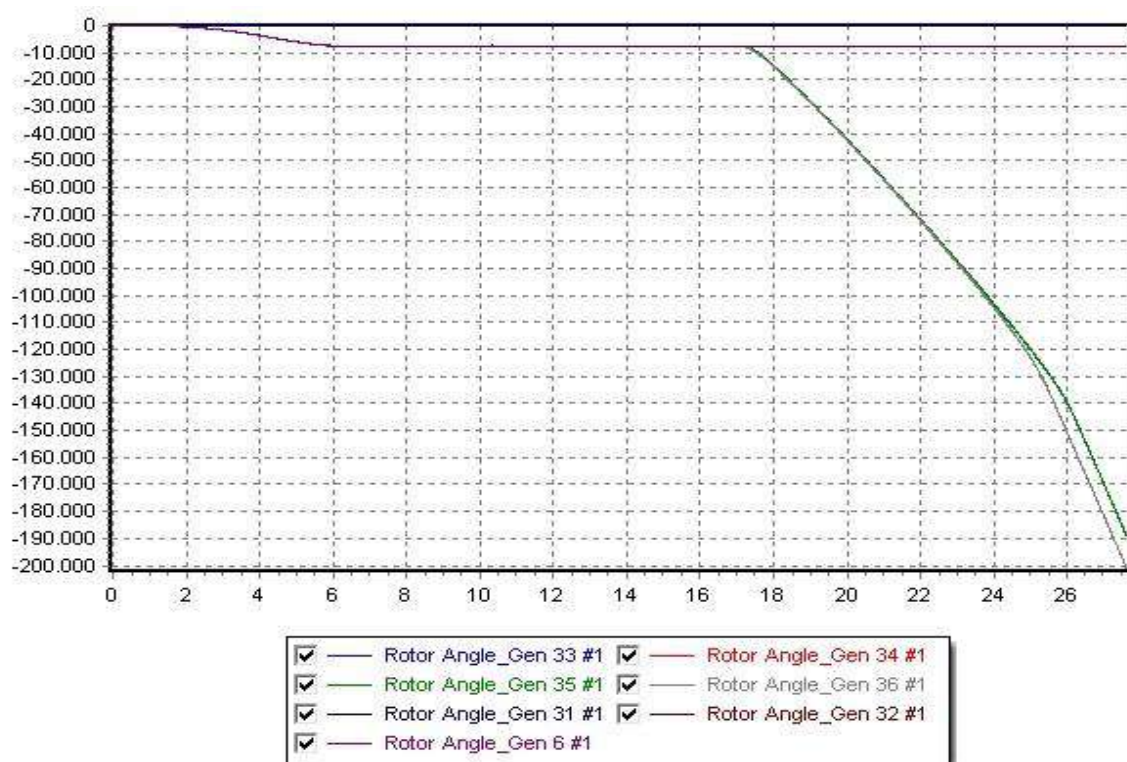
Εικόνα 7.78: Σενάριο B1T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec



Εικόνα 7.79: Σενάριο B1T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec



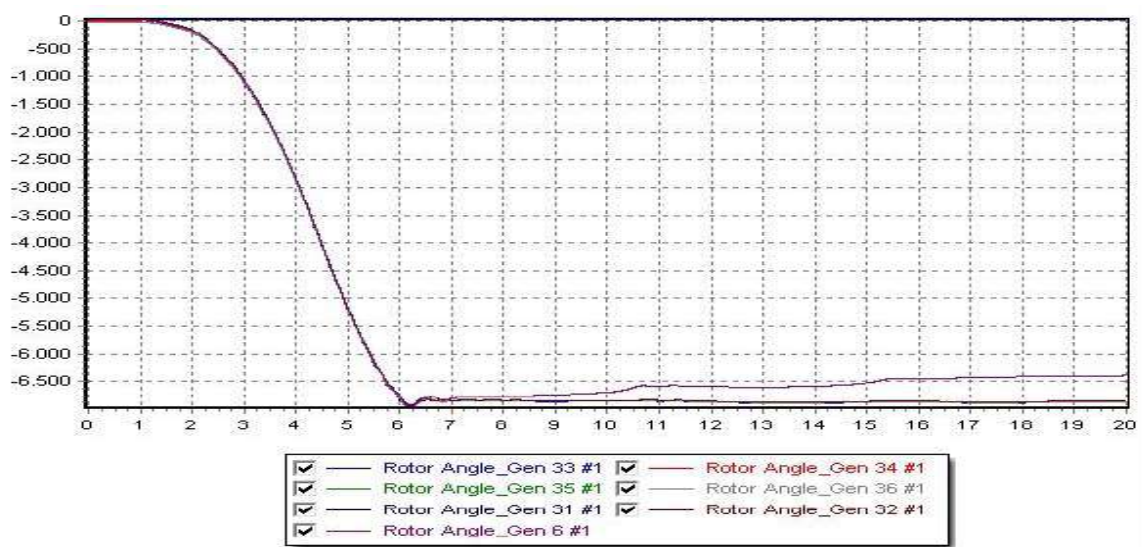
Εικόνα 7.80: Σενάριο B1T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,15 sec



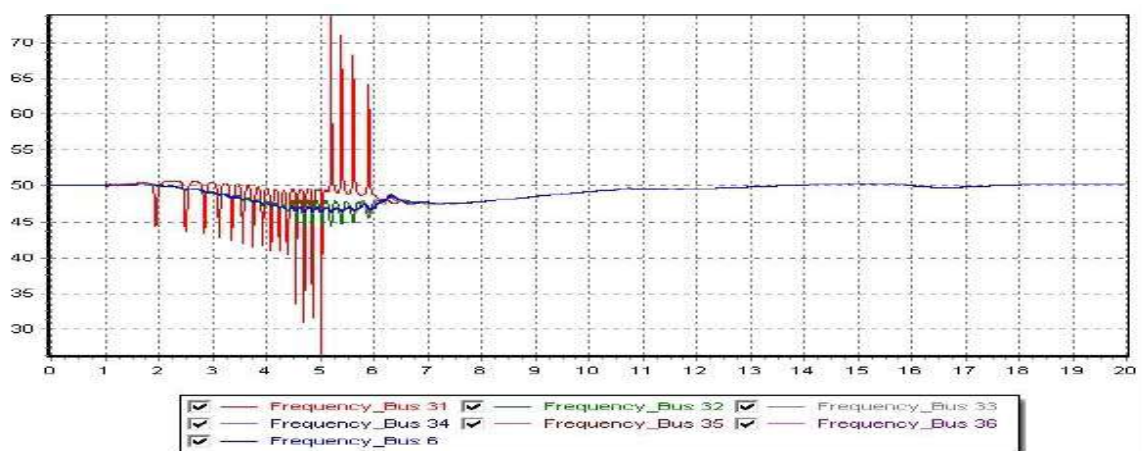
Εικόνα 7.81: Σενάριο B1T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,2 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.10 Σενάριο B1M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

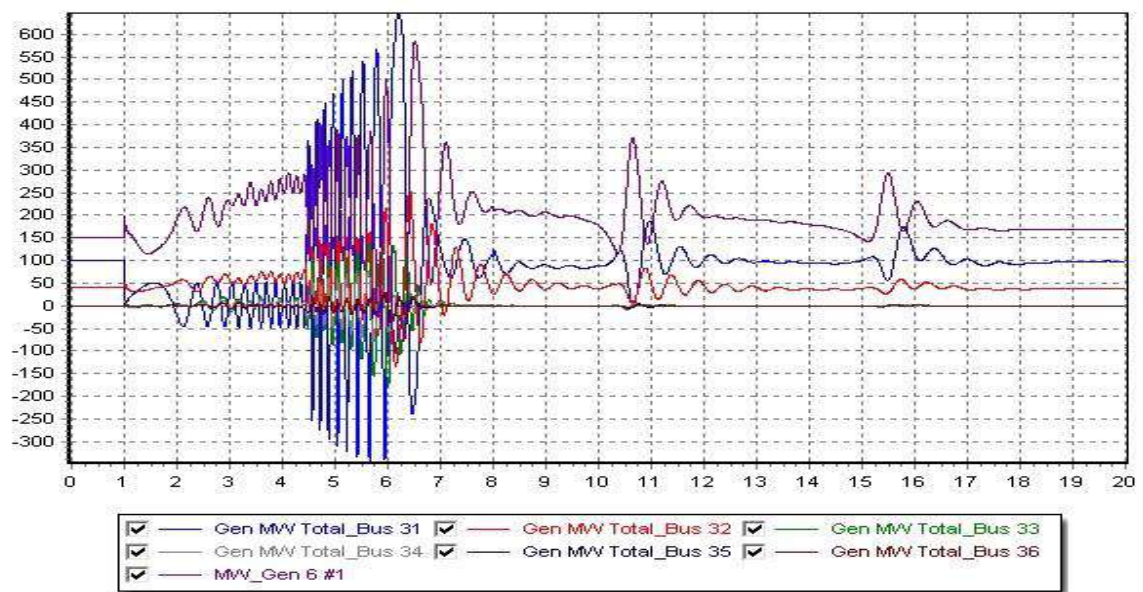
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,45 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,5 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.82-7.87). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



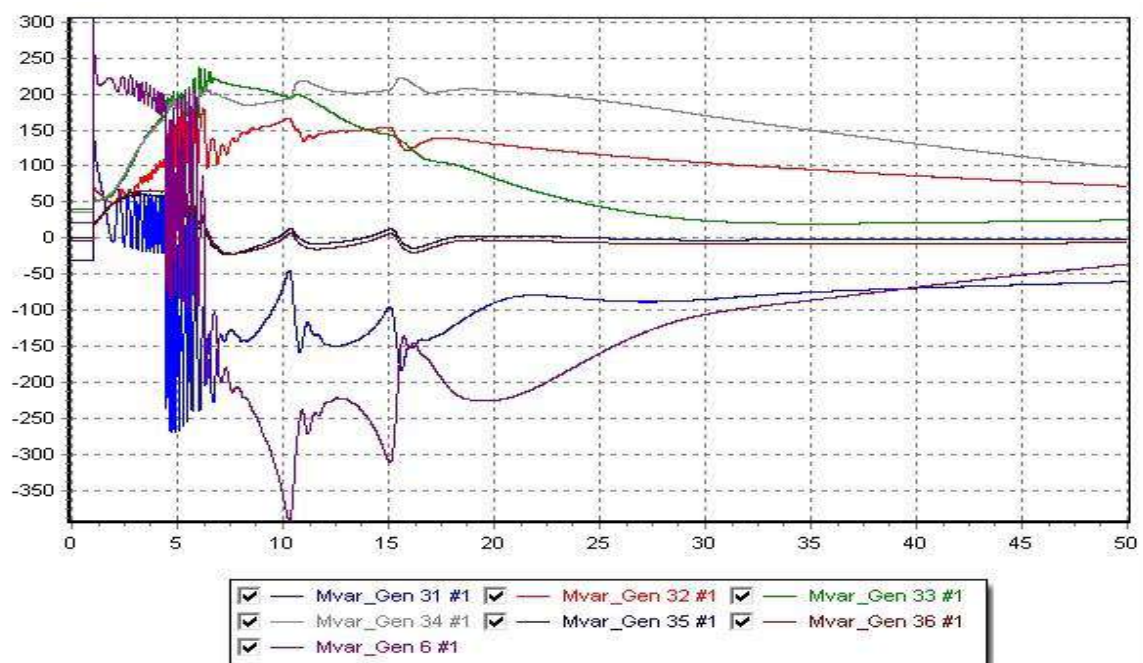
Εικόνα 7.82: Σενάριο B1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



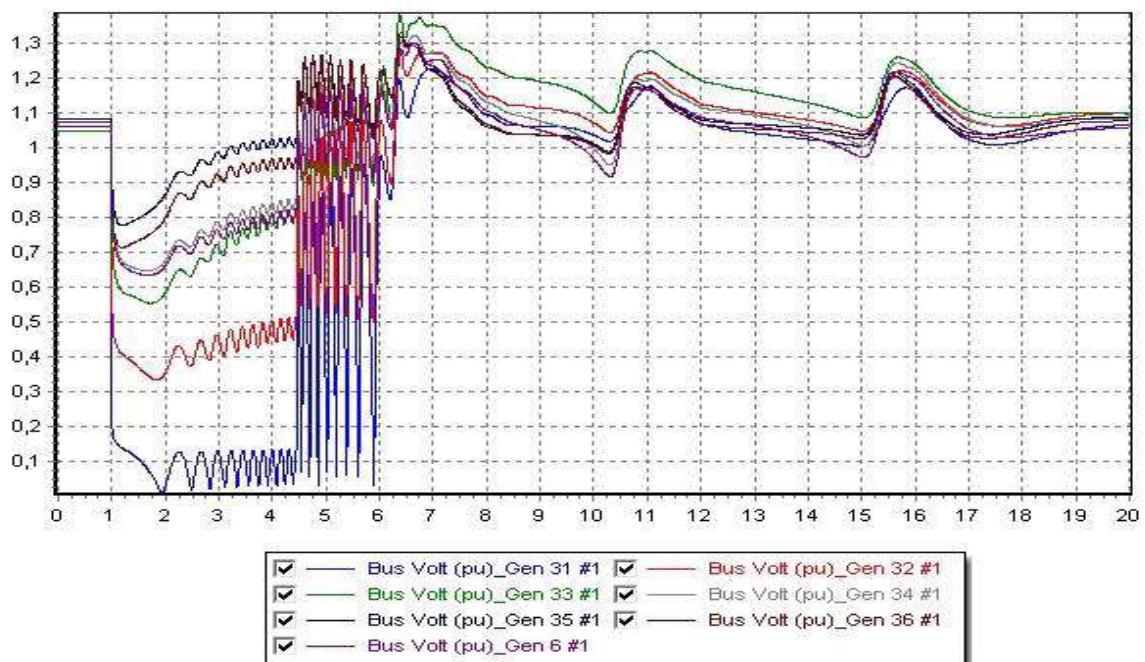
Εικόνα 7.83: Σενάριο B1M – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



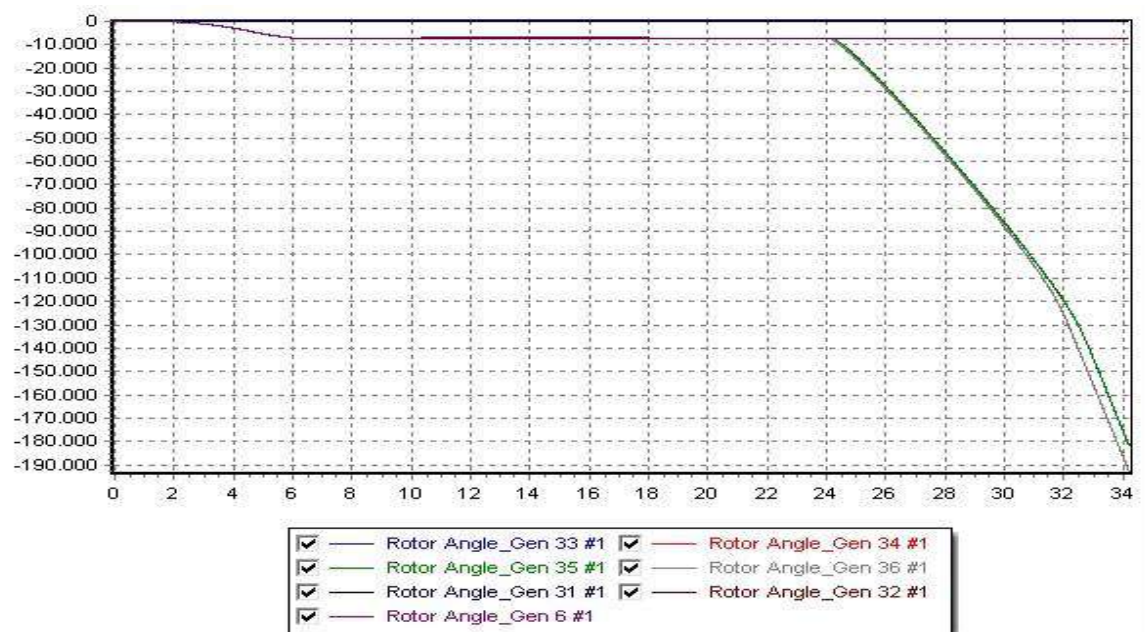
Εικόνα 7.84: Σενάριο B1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



Εικόνα 7.85: Σενάριο B1M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



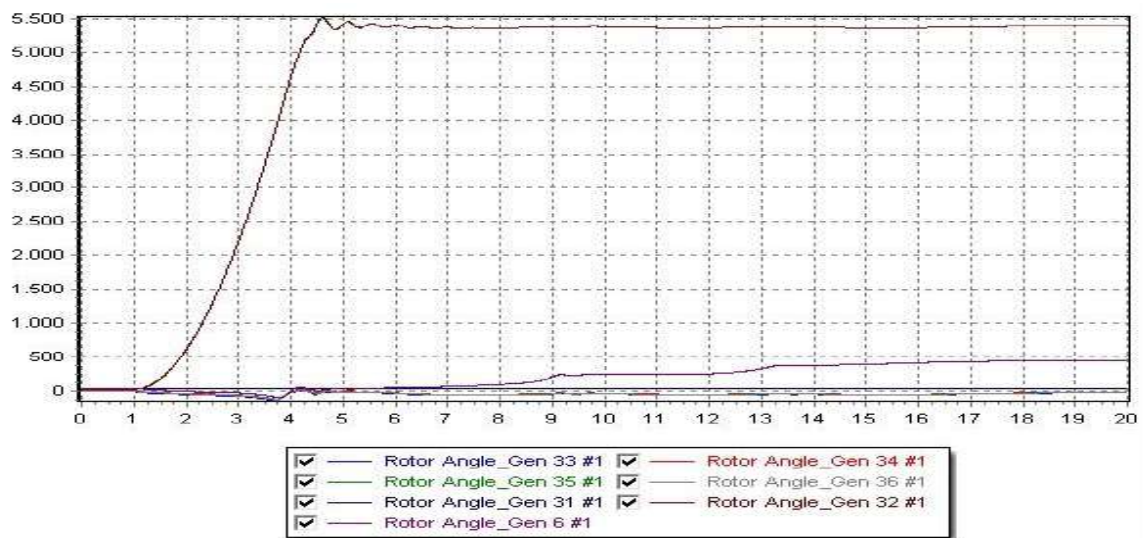
Εικόνα 7.86: Σενάριο B1M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



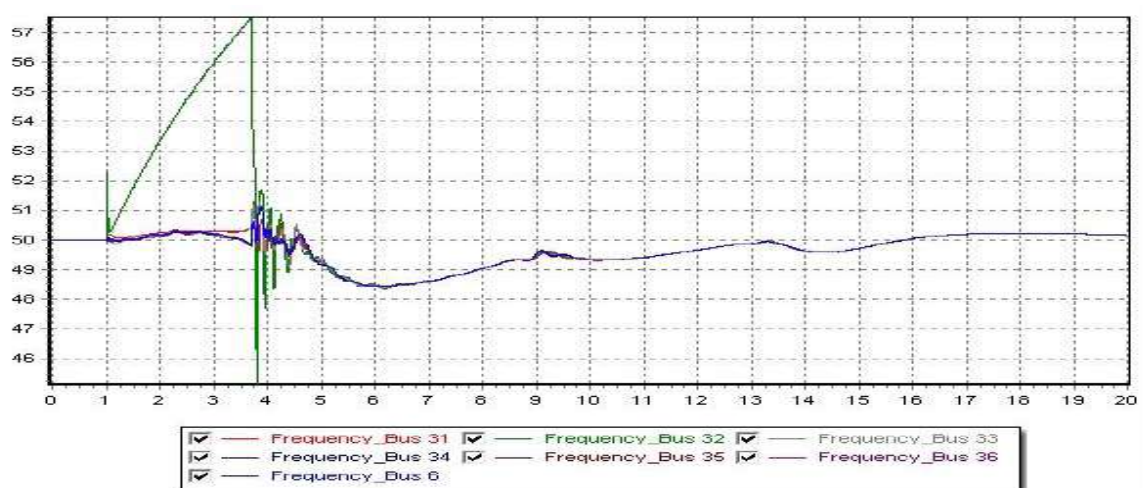
Εικόνα 7.87: Σενάριο B1M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,5 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.11 Σενάριο B2T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

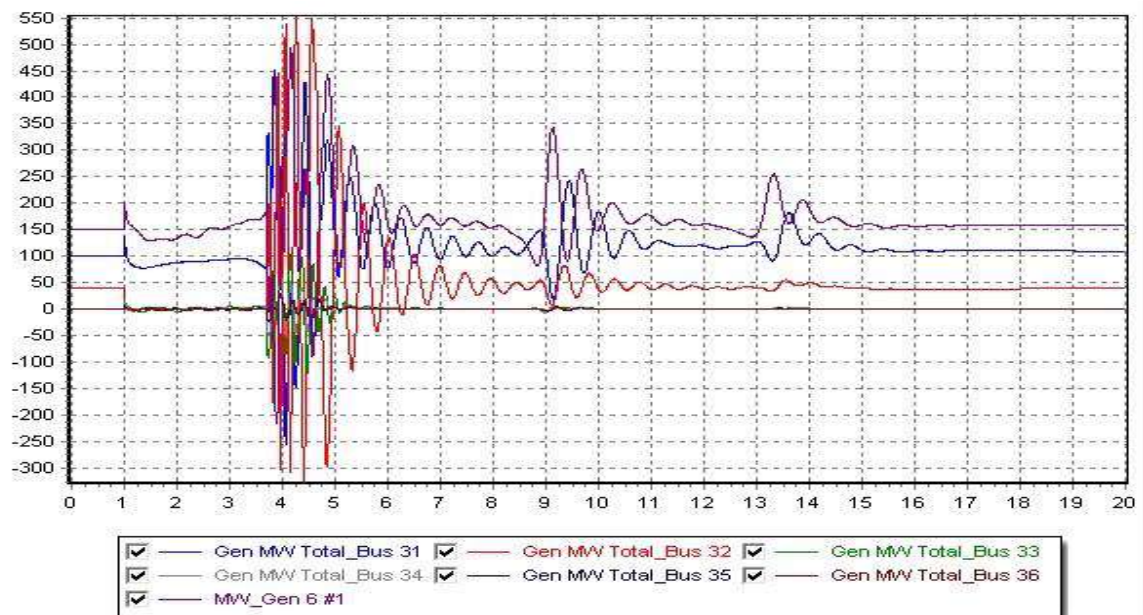
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,7 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3,75 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.88-7.93). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



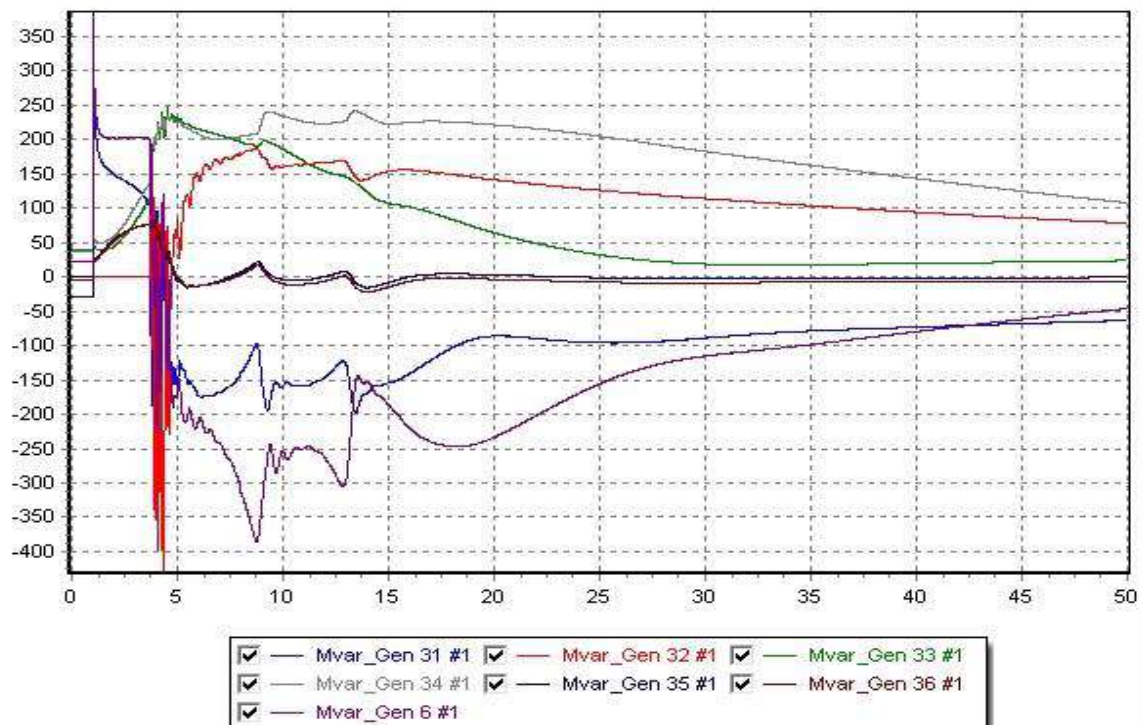
Εικόνα 7.88: Σενάριο B2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



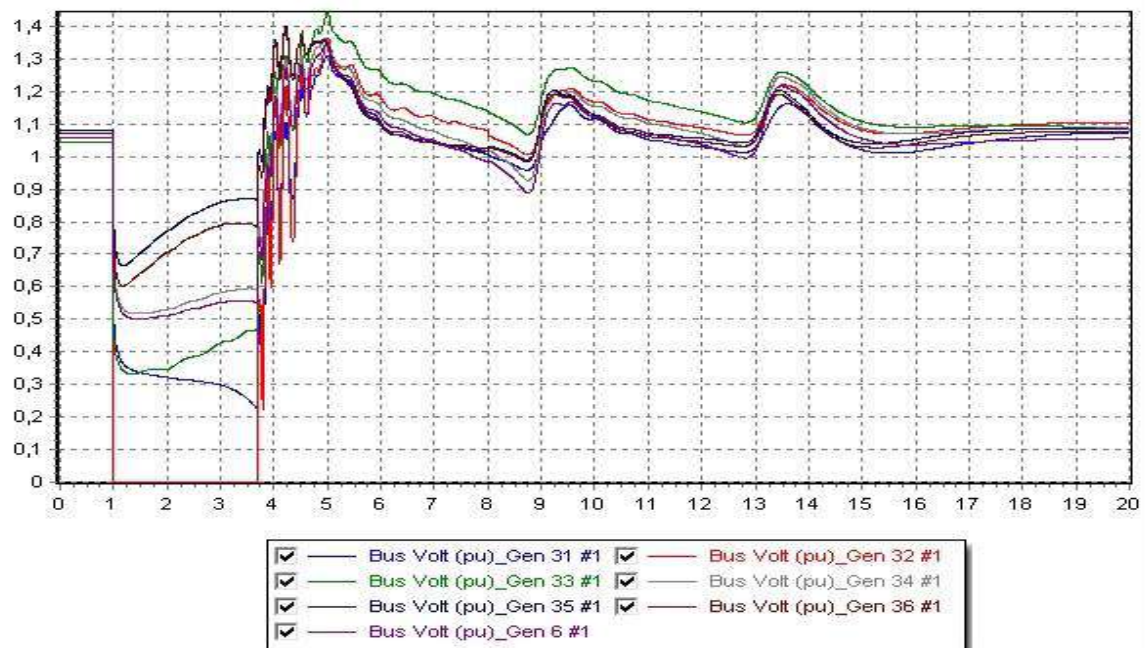
Εικόνα 7.89: Σενάριο B2T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



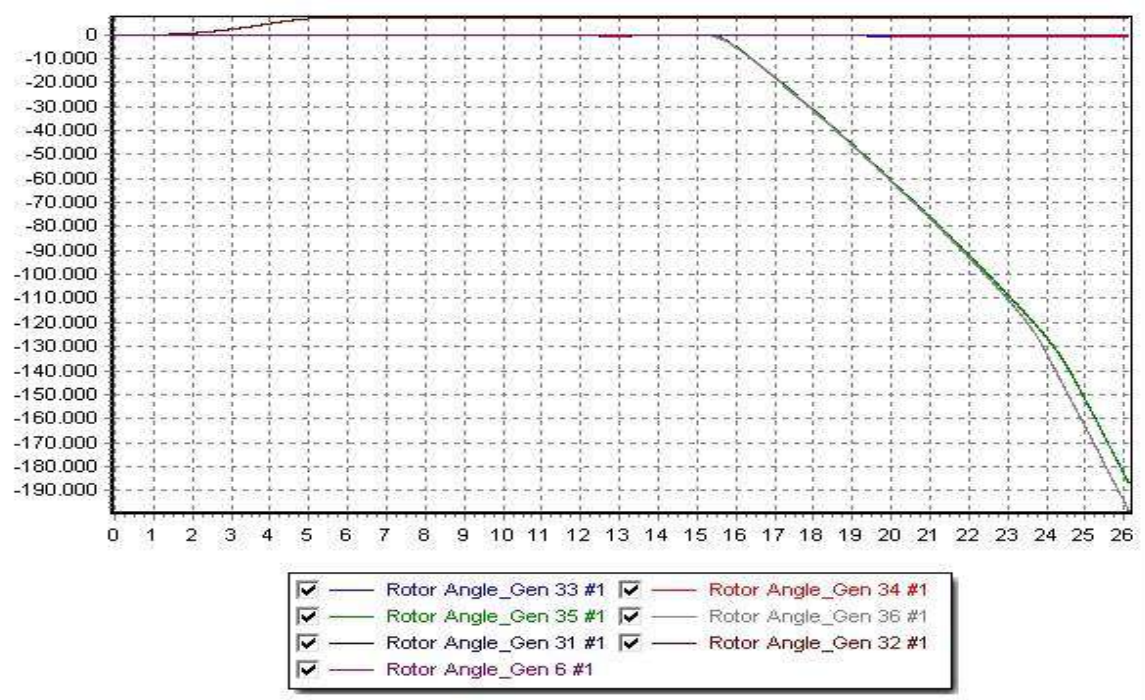
Εικόνα 7.90: Σενάριο B2T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



Εικόνα 7.91: Σενάριο B2T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



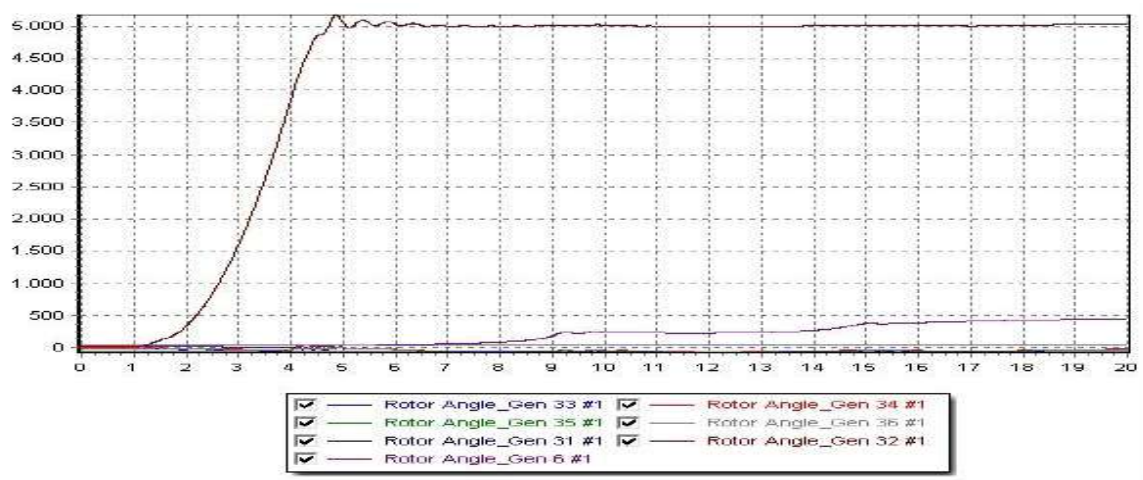
Εικόνα 7.92: Σενάριο B2T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,7 sec



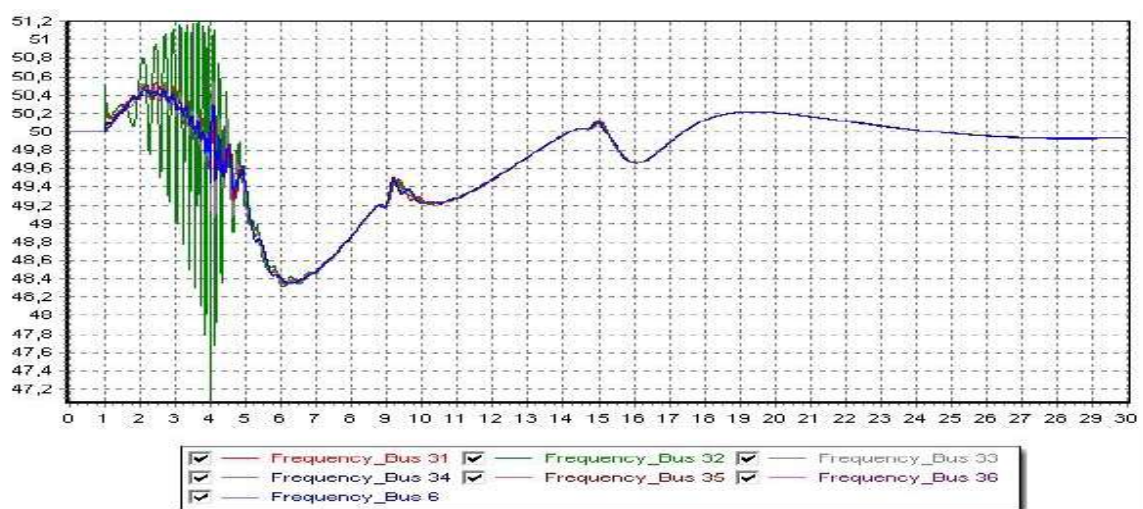
Εικόνα 7.93: Σενάριο B2T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,75 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.12 Σενάριο B2M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

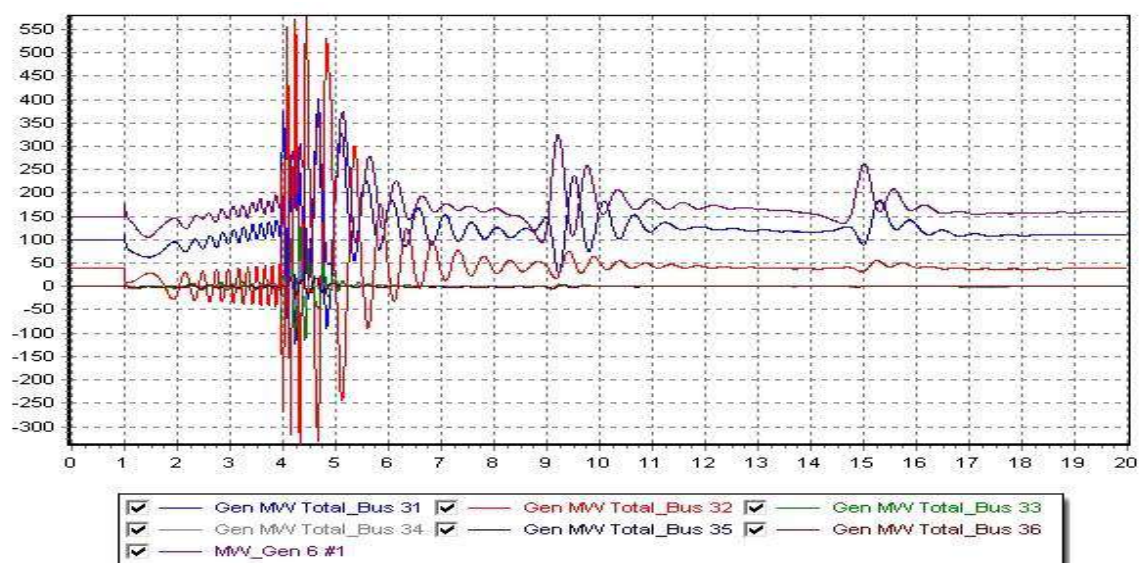
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,95 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.94-7.99). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



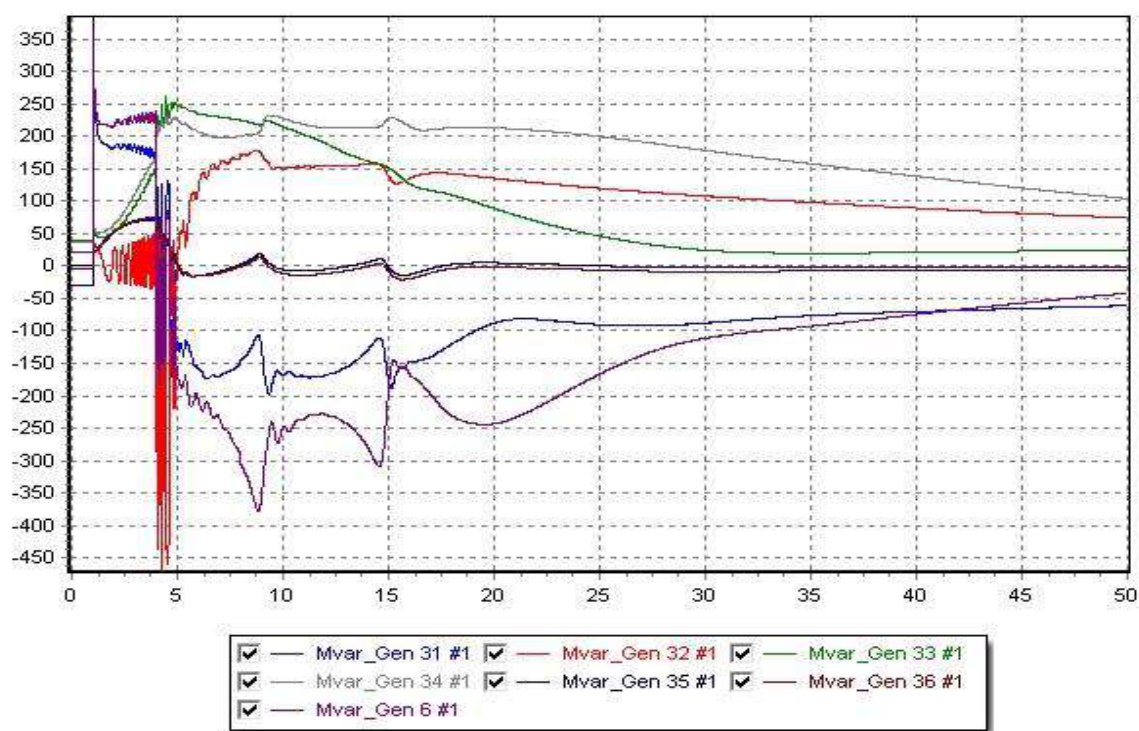
Εικόνα 7.94: Σενάριο B2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec



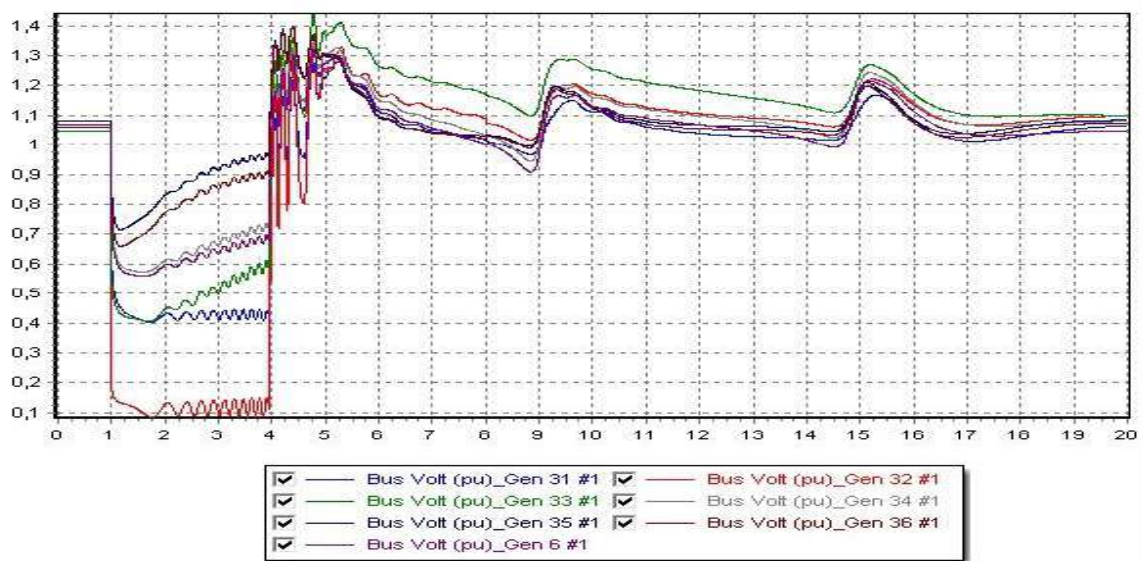
Εικόνα 7.95: Σενάριο B2M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec



Εικόνα 7.96: Σενάριο B2M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec



Εικόνα 7.97: Σενάριο B2M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec



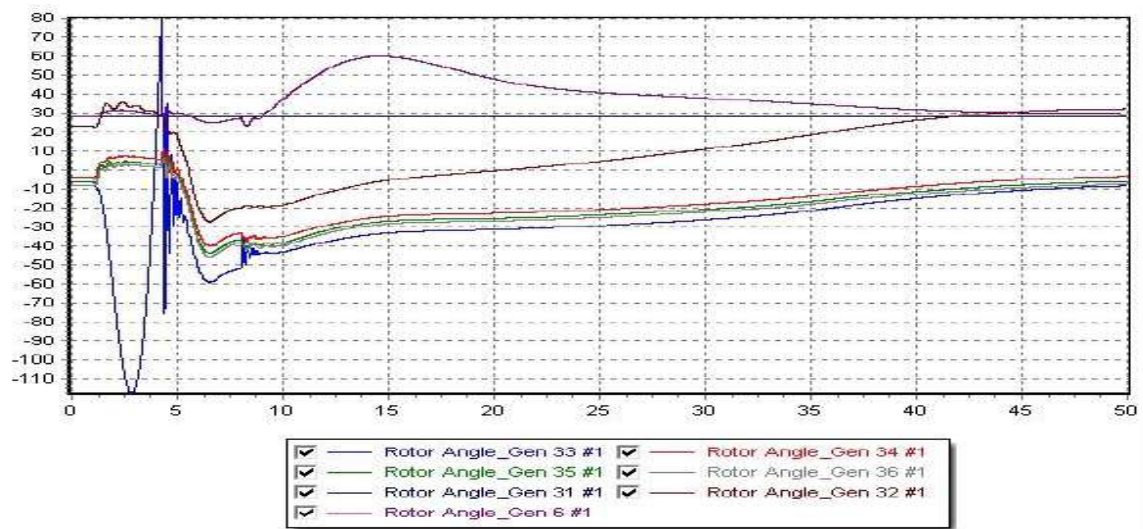
Εικόνα 7.98: Σενάριο B2M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec



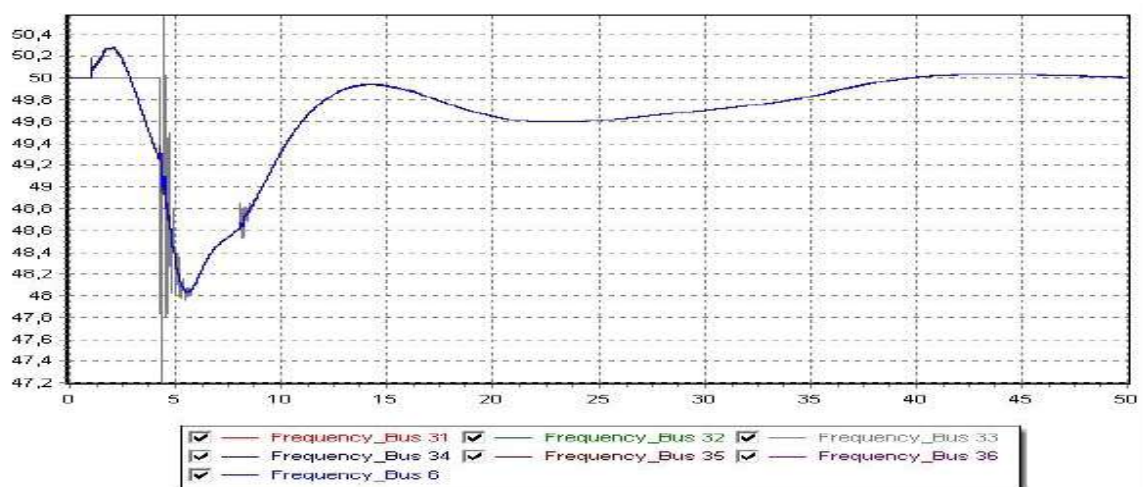
Εικόνα 7.99: Σενάριο B2M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.13 Σενάριο B5T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

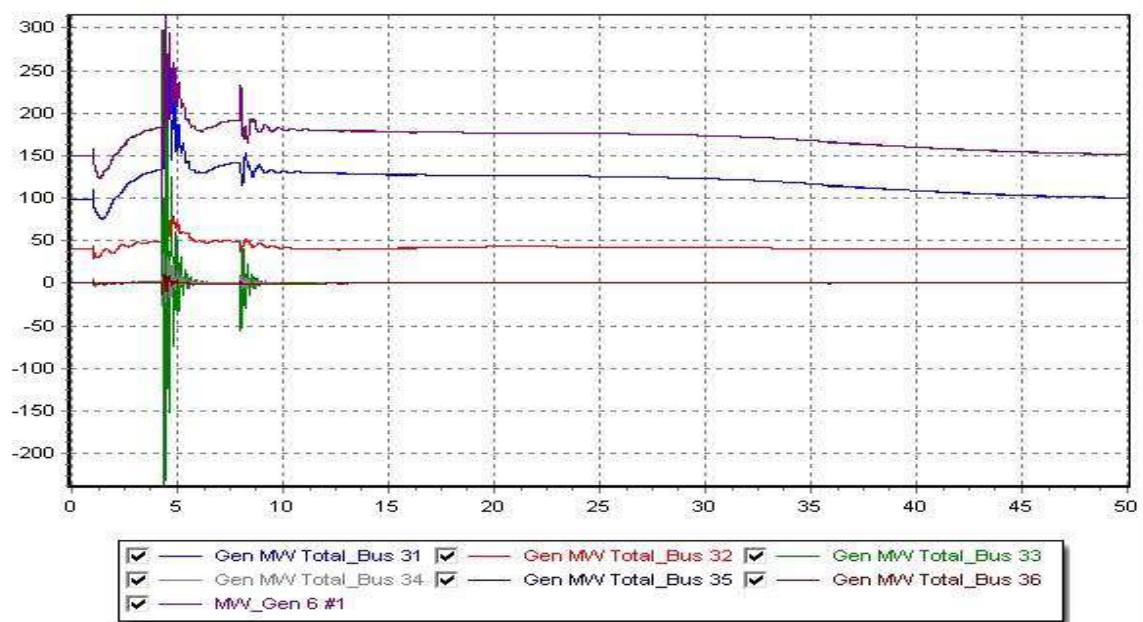
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,25 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,3 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.100-7.105). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



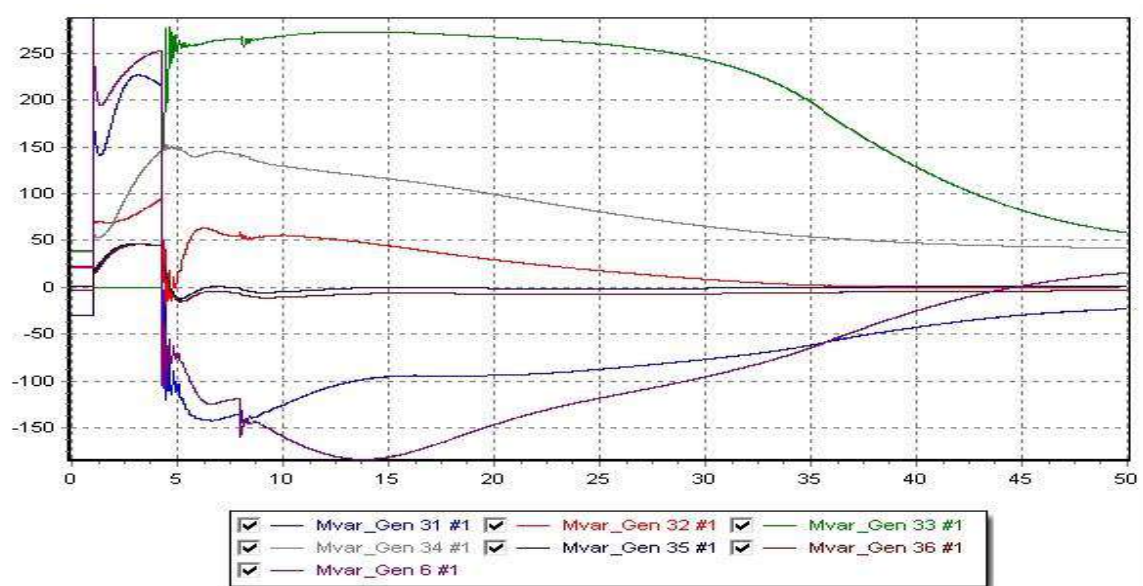
Εικόνα 7.100: Σενάριο B5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



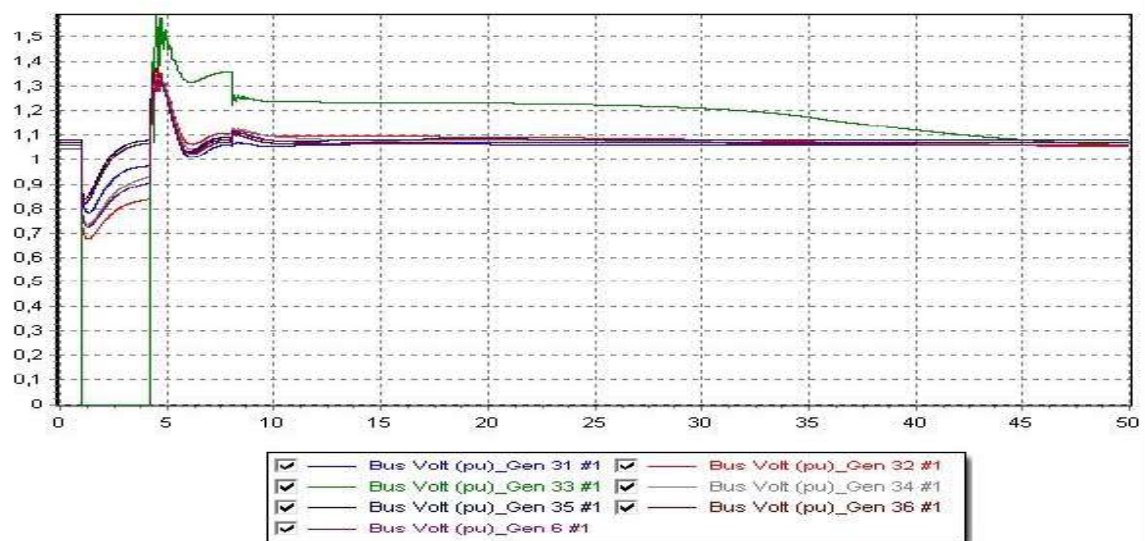
Εικόνα 7.101: Σενάριο B5T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



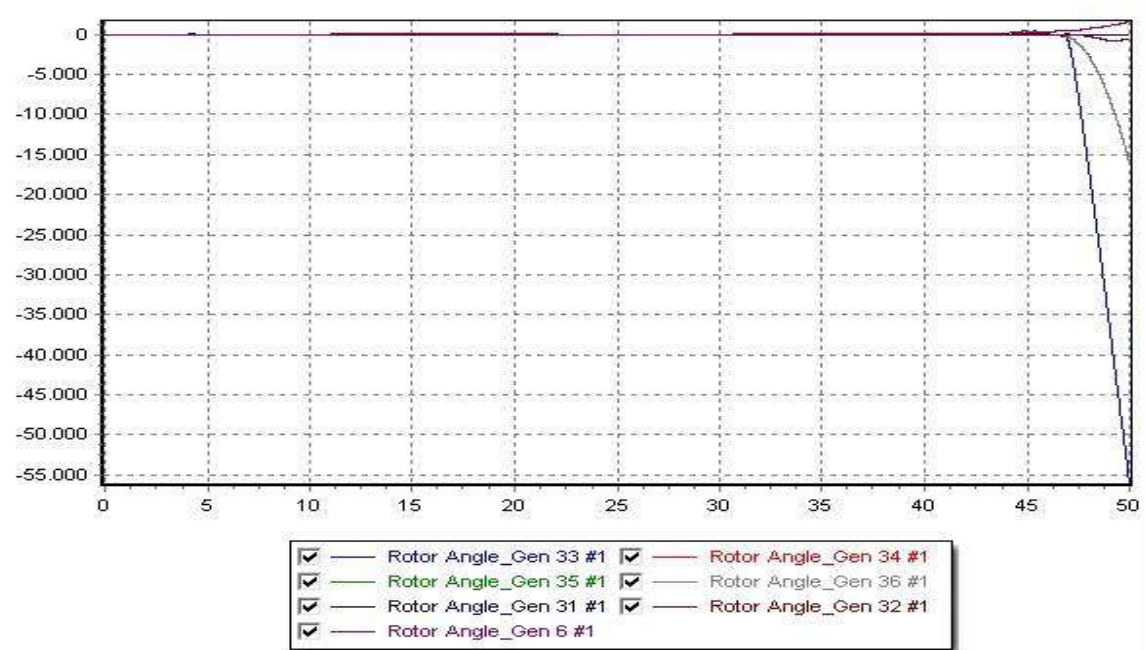
Εικόνα 7.102: Σενάριο B5T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



Εικόνα 7.103: Σενάριο B5T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



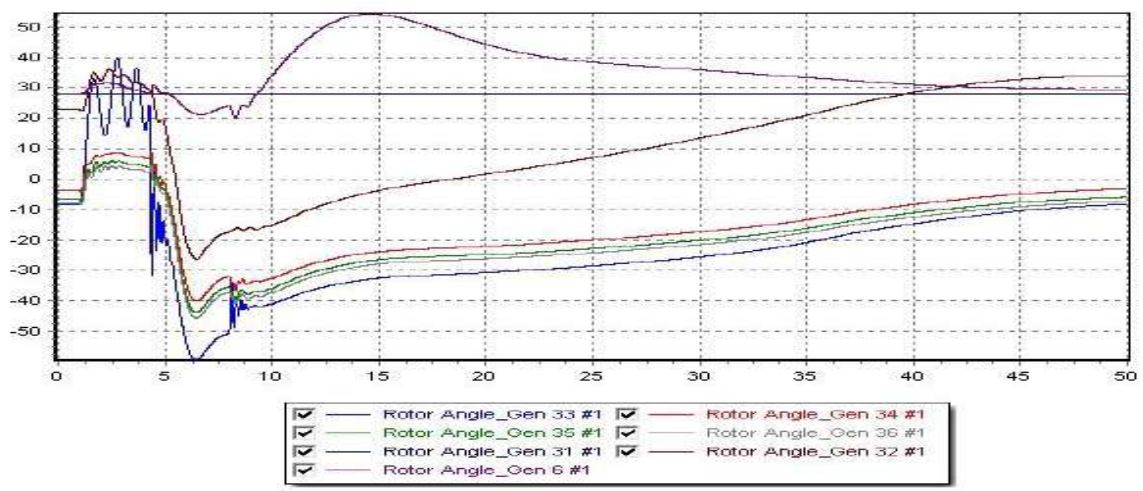
Εικόνα 7.104: Σενάριο B5T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



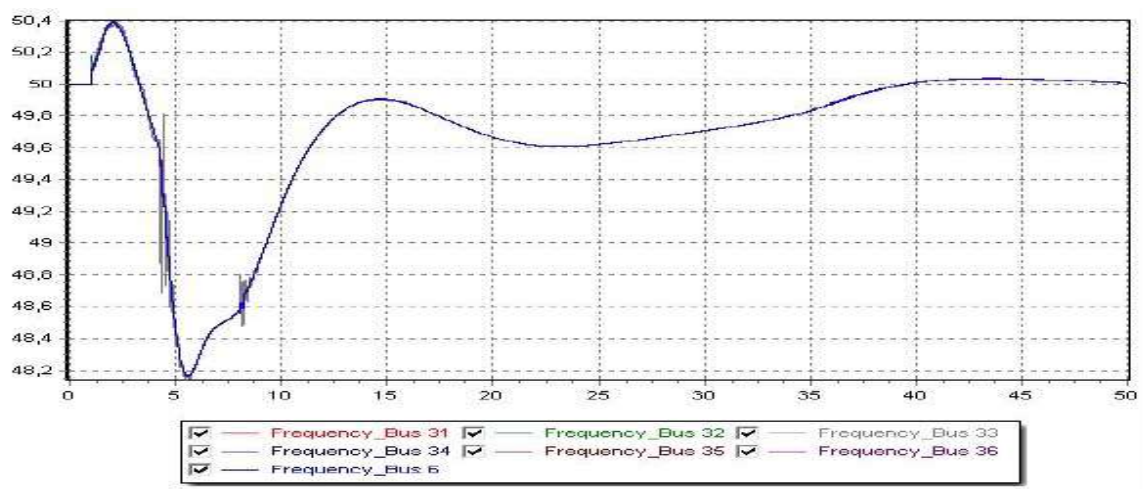
Εικόνα 7.105: Σενάριο B5T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.14 Σενάριο B5M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

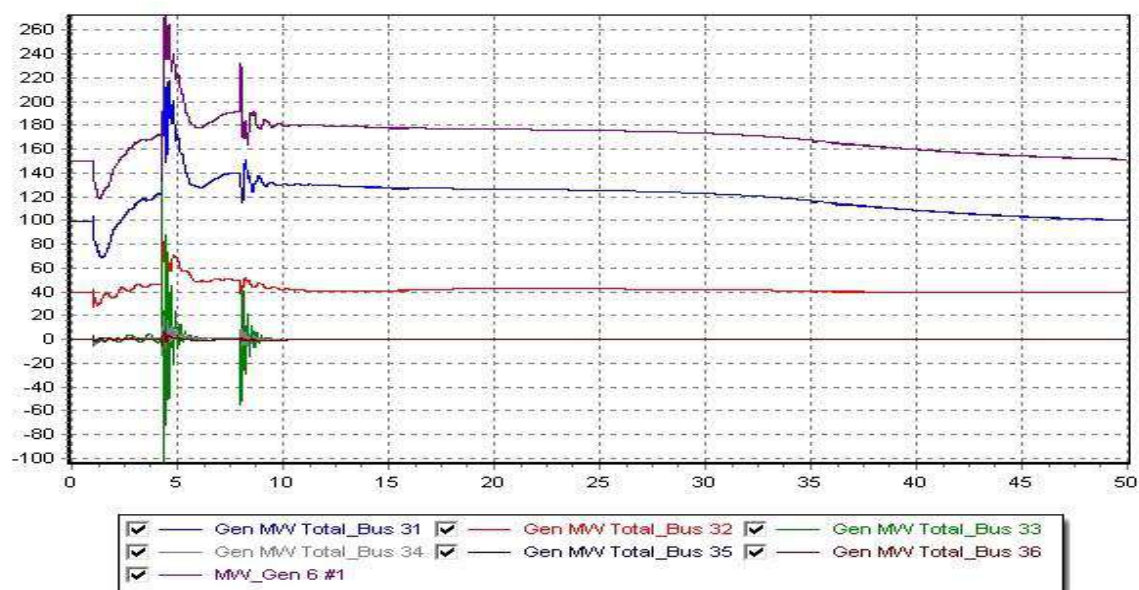
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,25 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,3 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.106-7.111). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



Εικόνα 7.106: Σενάριο B5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



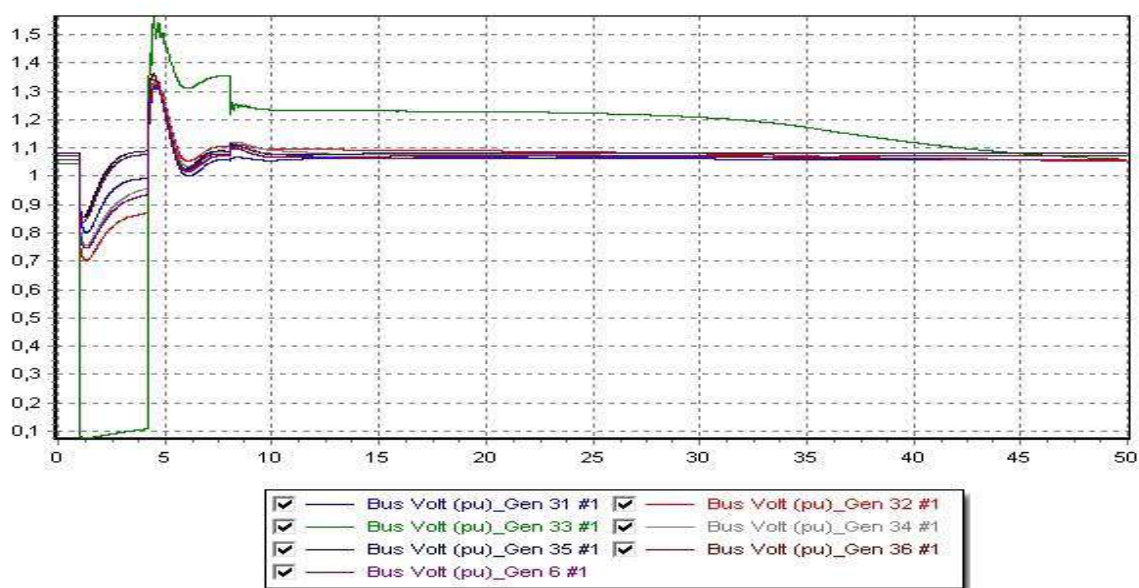
Εικόνα 7.107: Σενάριο B5M – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



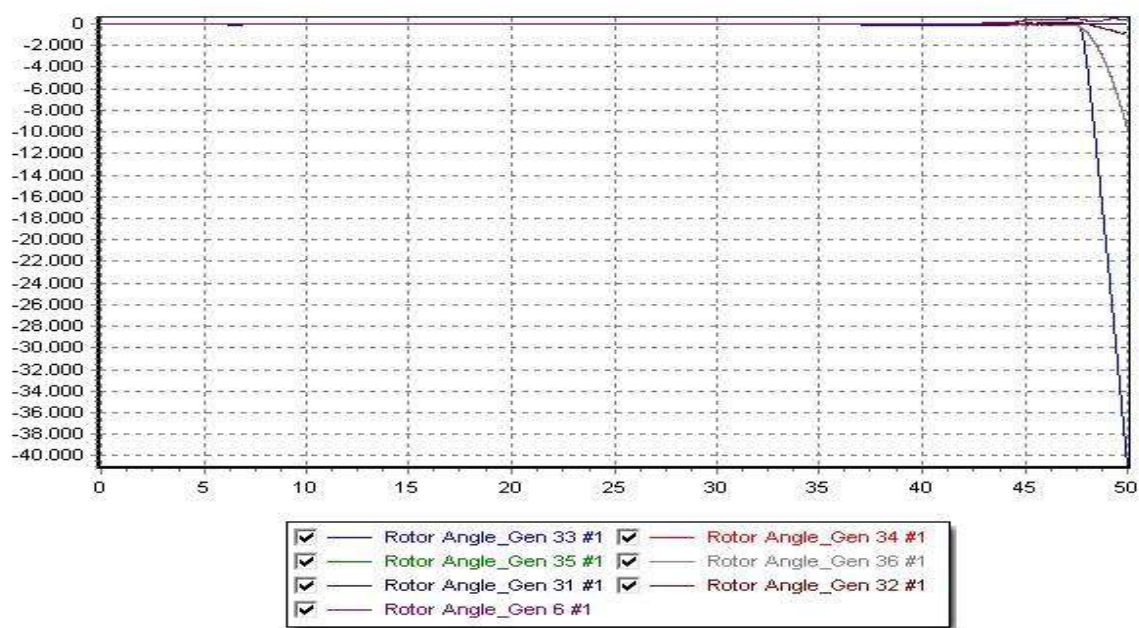
Εικόνα 7.108: Σενάριο B5M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



Εικόνα 7.109: Σενάριο B5M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



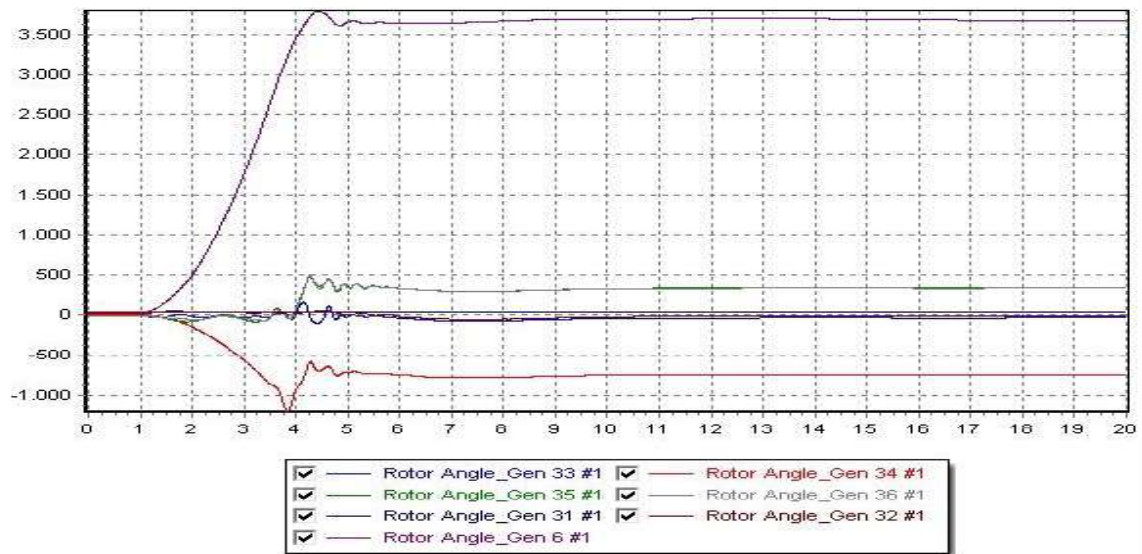
Εικόνα 7.110: Σενάριο B5M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντι-σταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



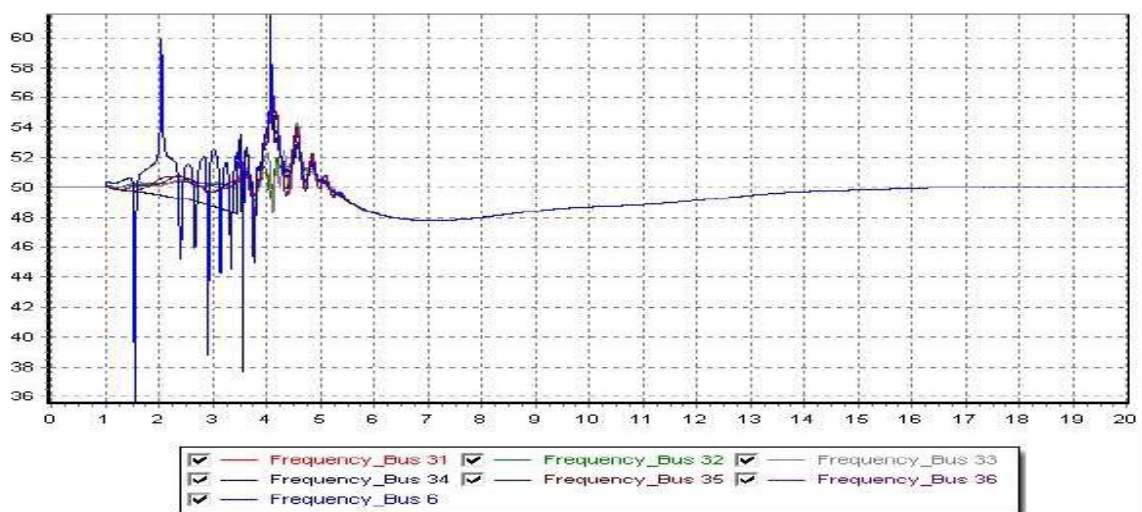
Εικόνα 7.111: Σενάριο B5M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.15 Σενάριο B6T: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

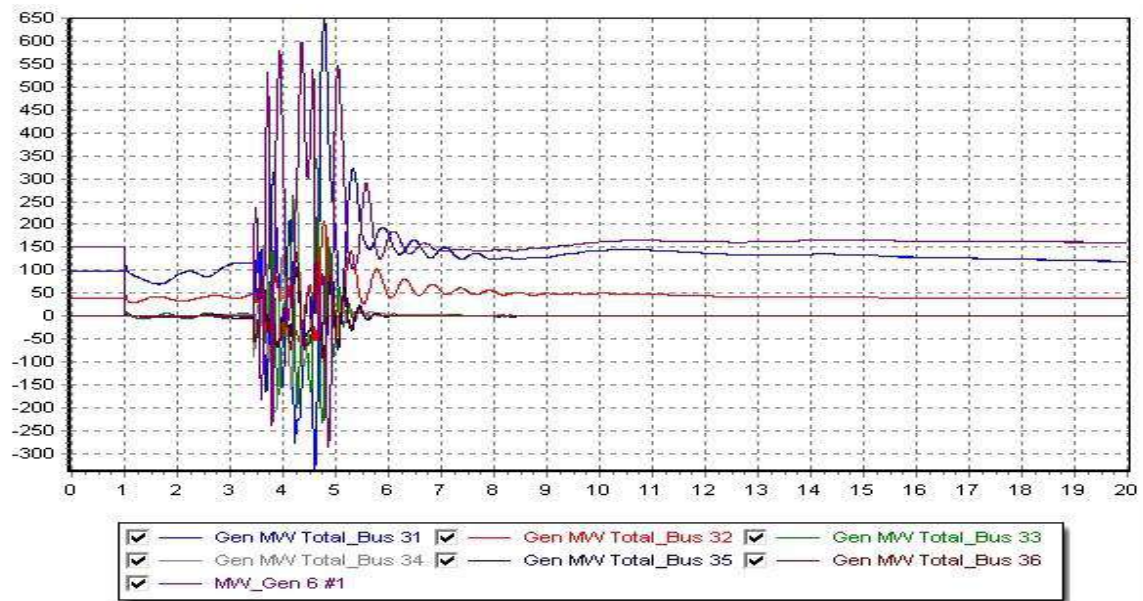
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,45 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3,50 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.112-7.117). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



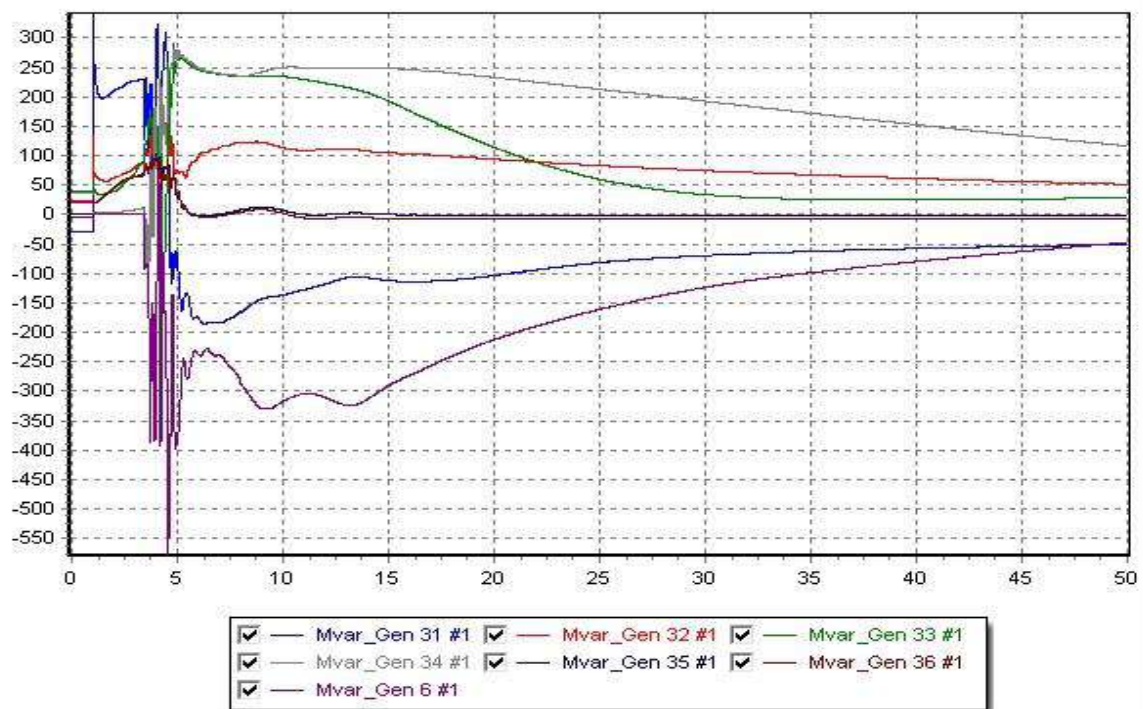
Εικόνα 7.112: Σενάριο B6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec



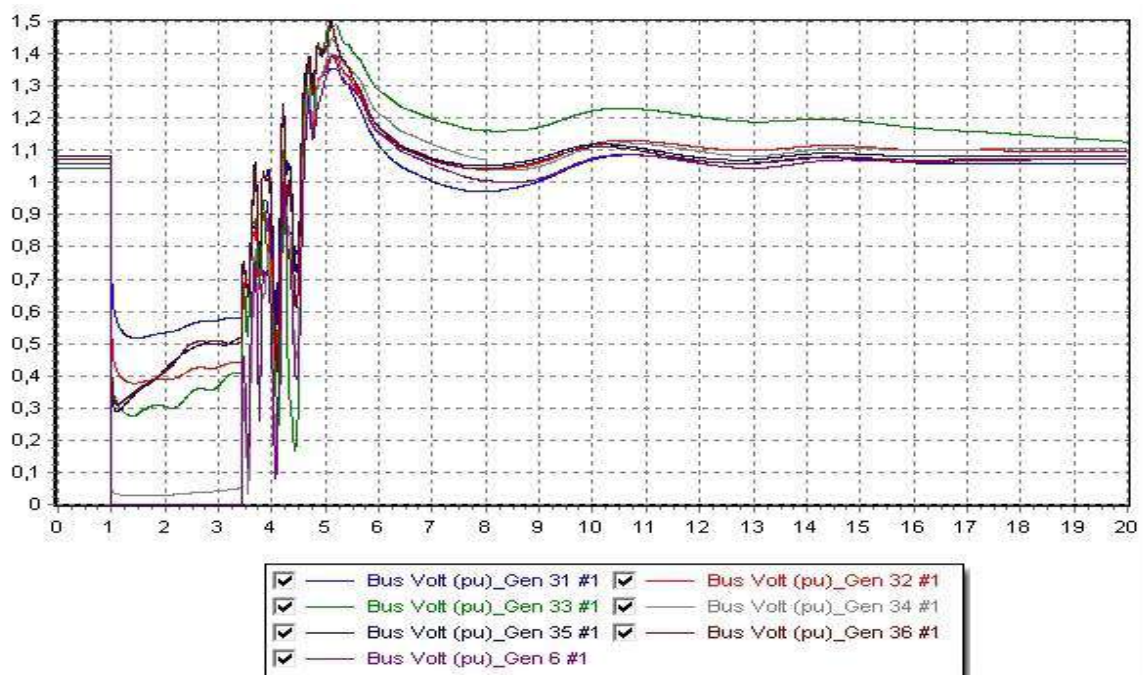
Εικόνα 7.113: Σενάριο B6T – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec



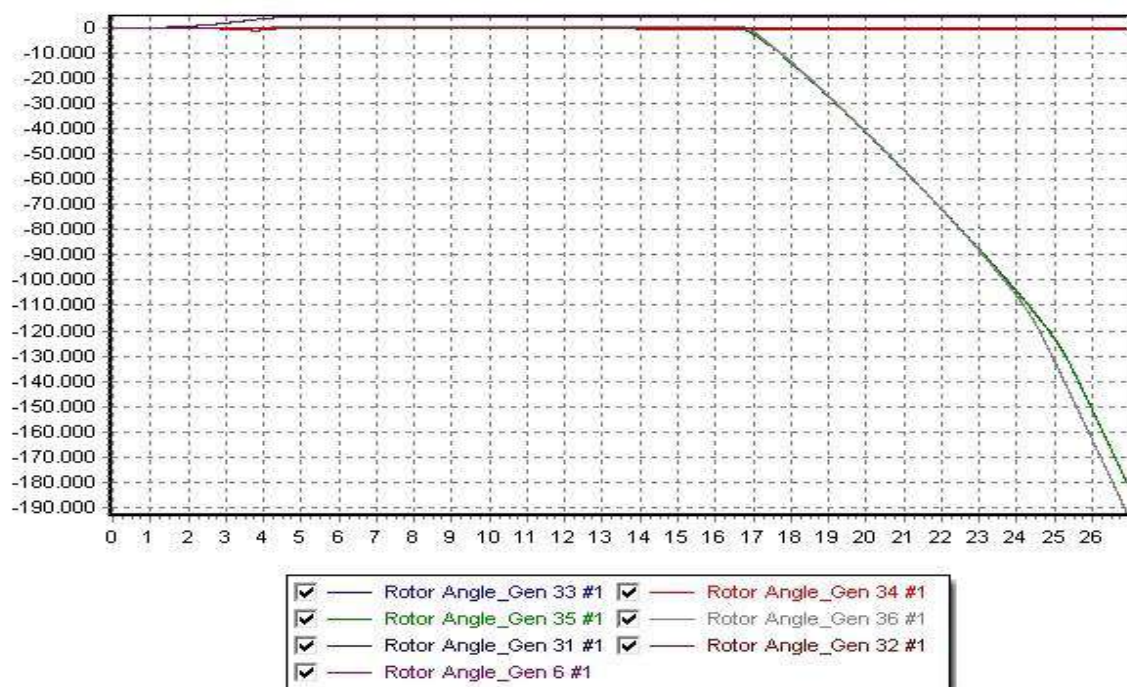
Εικόνα 7.114: Σενάριο B6T – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec



Εικόνα 7.115: Σενάριο B6T – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec



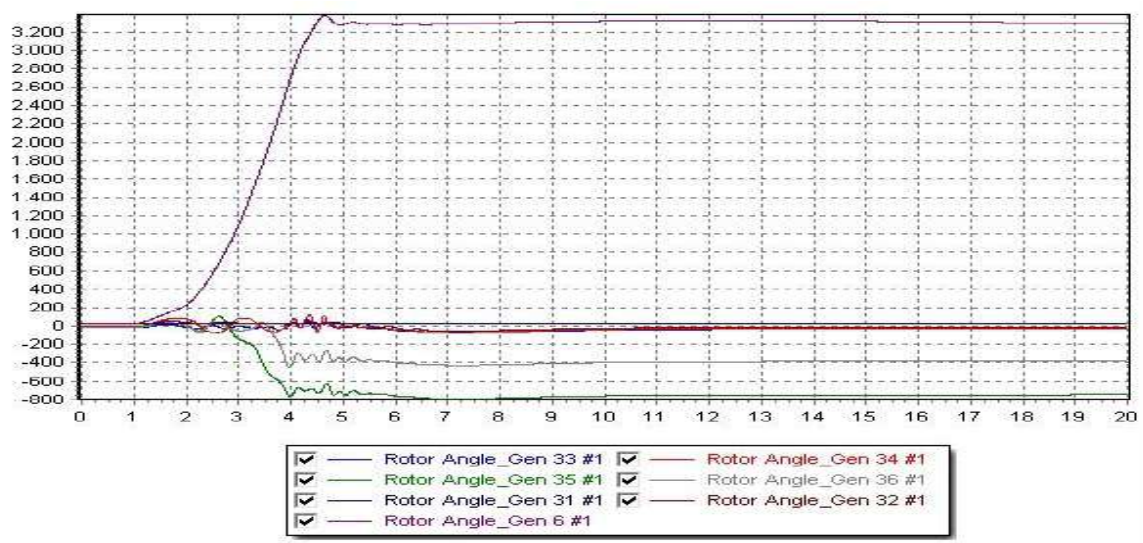
Εικόνα 7.116: Σενάριο B6T – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,45 sec



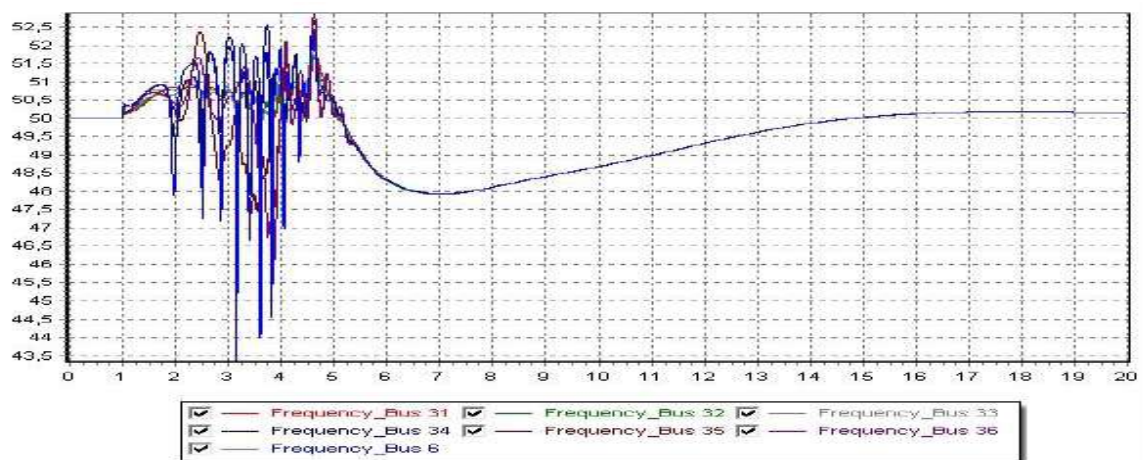
Εικόνα 7.117: Σενάριο B6T – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,5 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.16 Σενάριο B6M: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

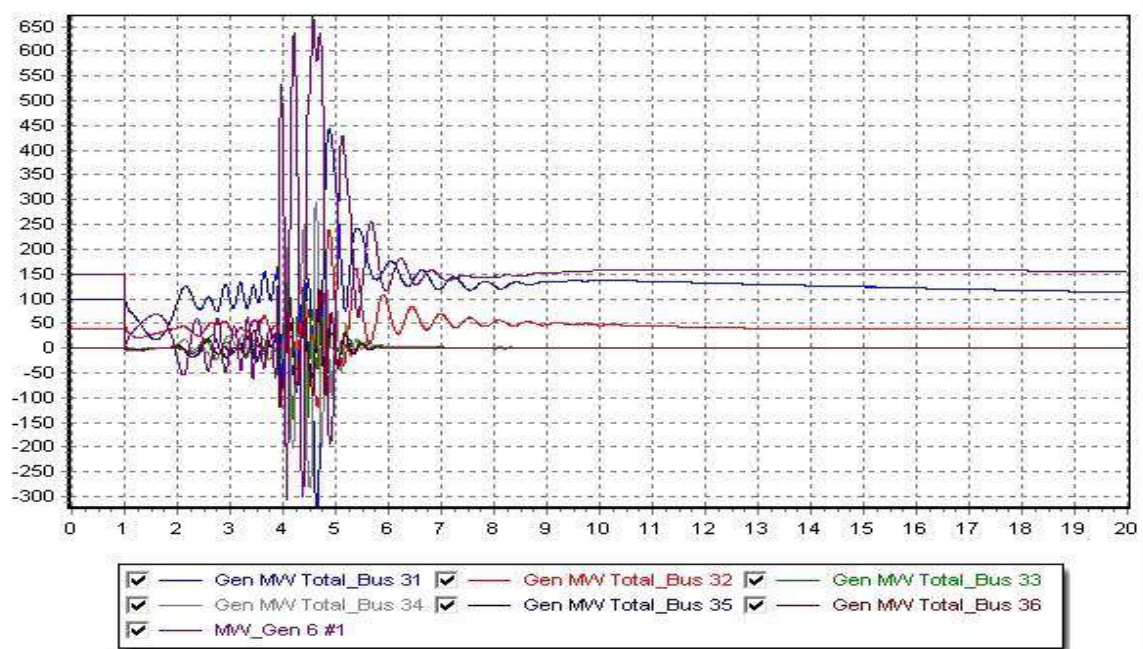
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,9 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3,95 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.118-7.123). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



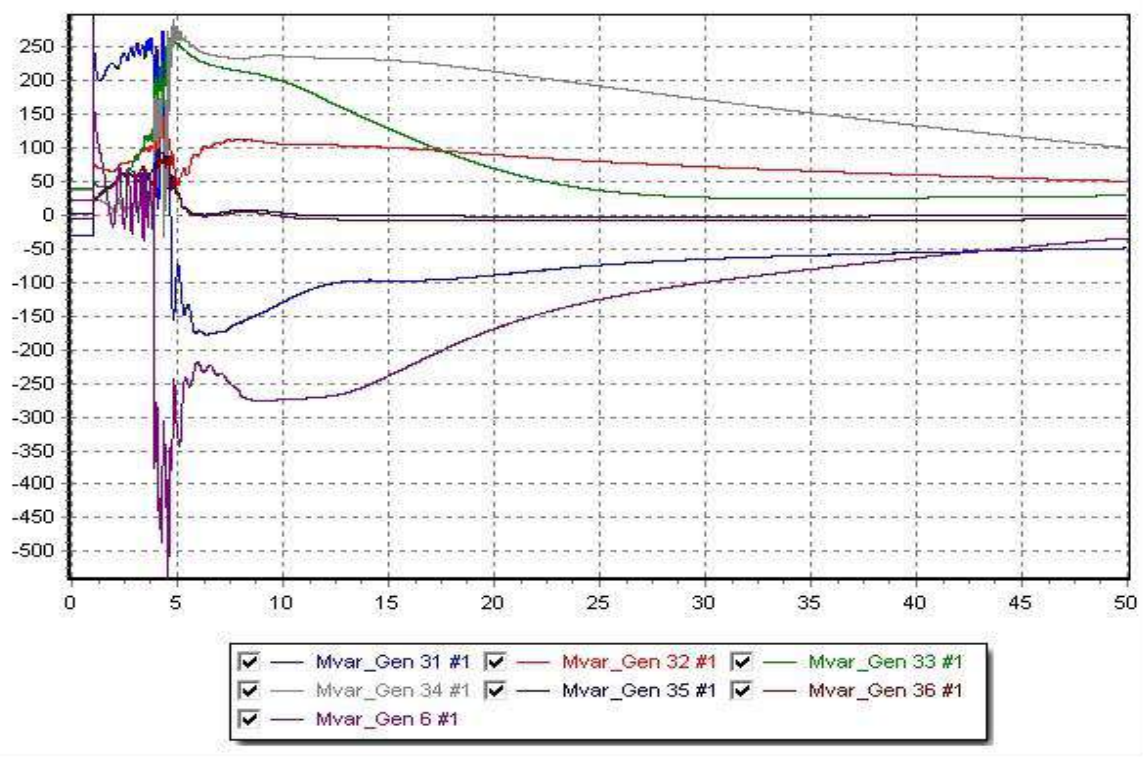
Εικόνα 7.118: Σενάριο B6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec



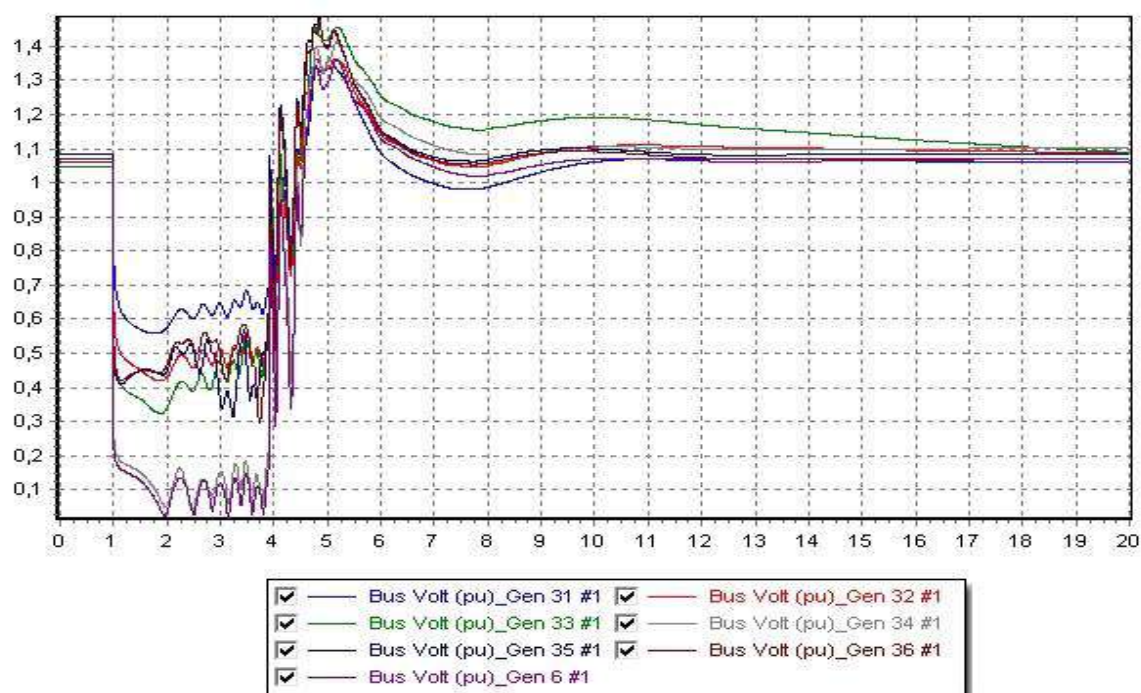
Εικόνα 7.119: Σενάριο B6M – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec



Εικόνα 7.120: Σενάριο B6M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec



Εικόνα 7.121: Σενάριο B6M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec



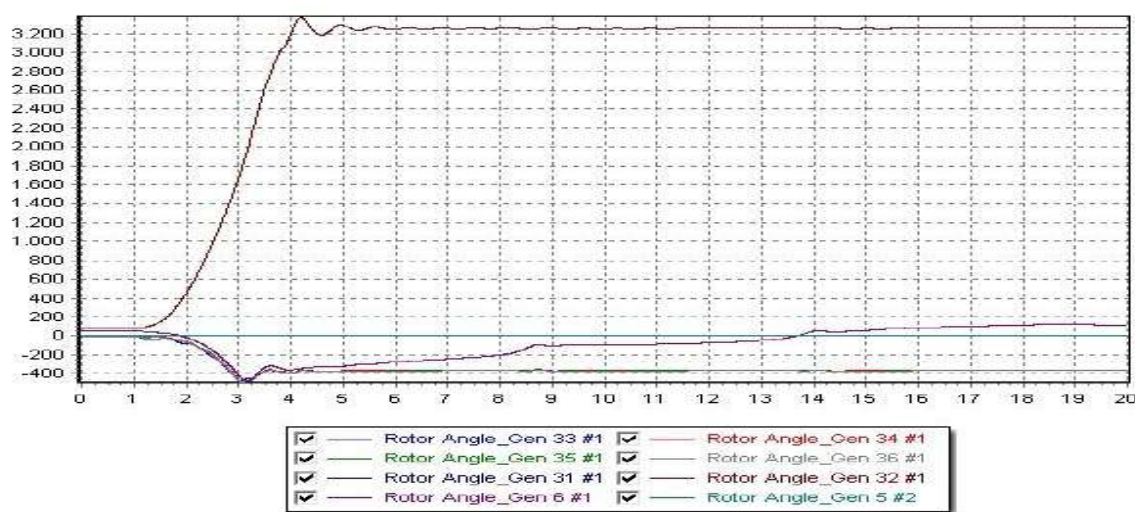
Εικόνα 7.122: Σενάριο B6M – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,9 sec



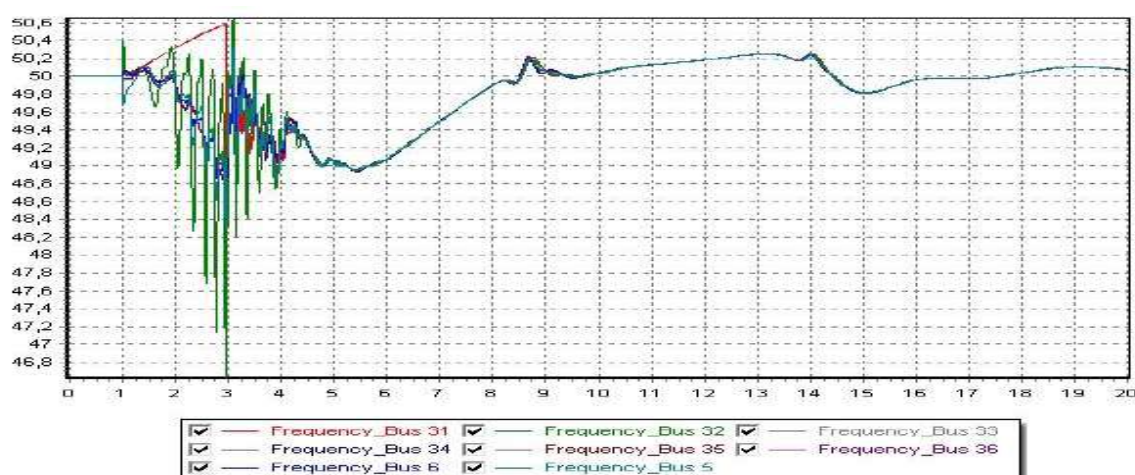
Εικόνα 7.123: Σενάριο B6M – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,95 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.17 Σενάριο Γ1Τ: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

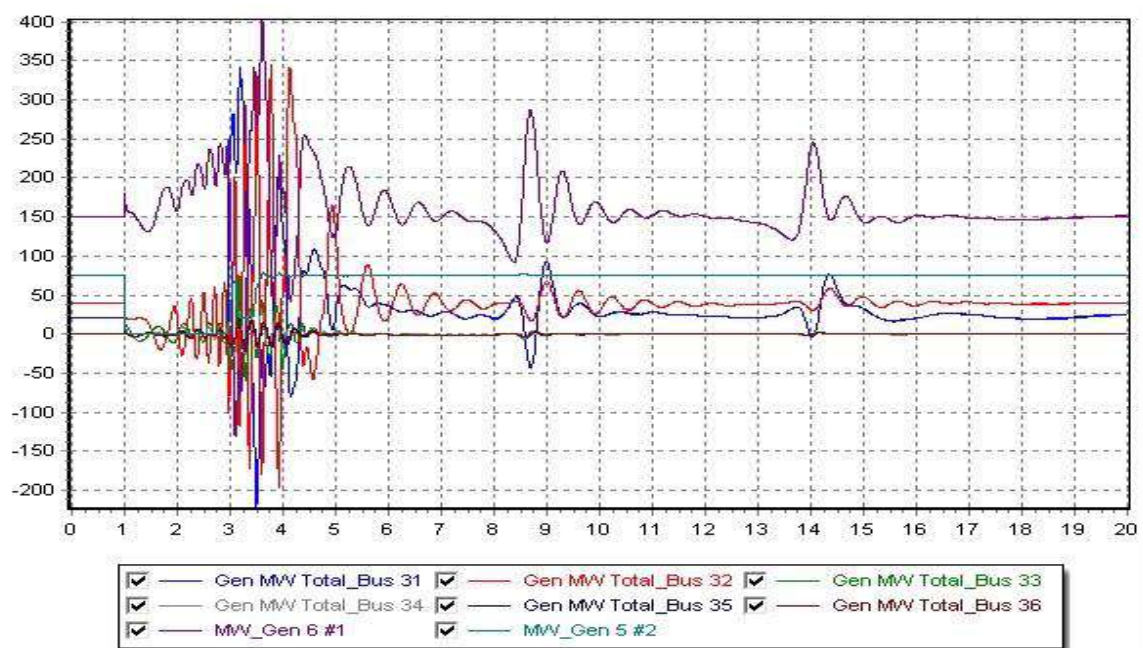
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 1,95 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.124-7.129). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



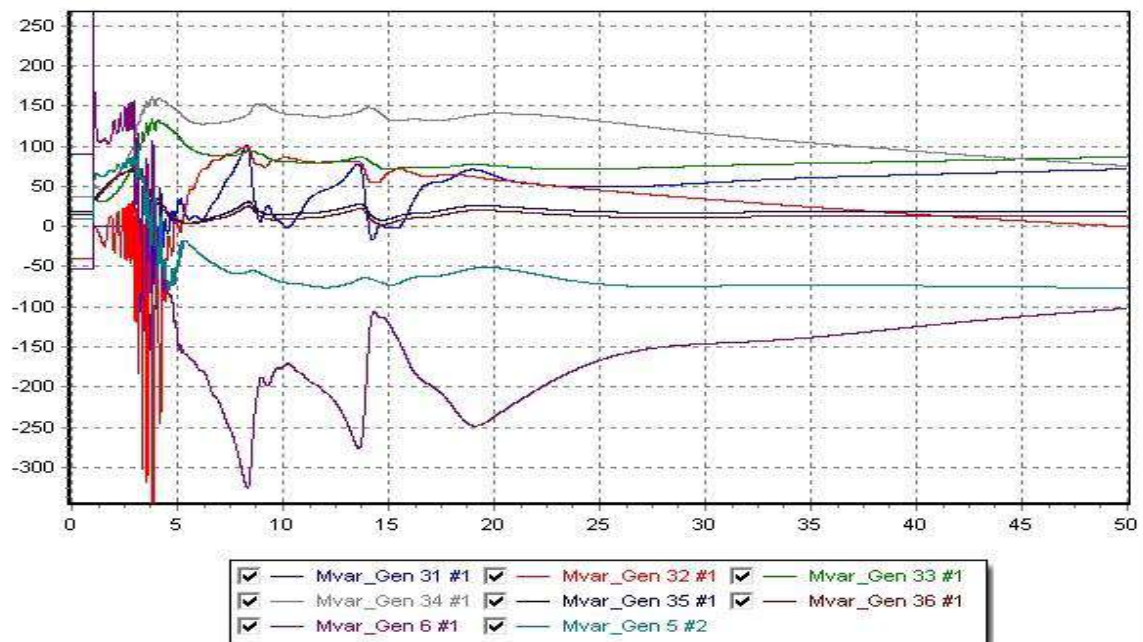
Εικόνα 7.124: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec



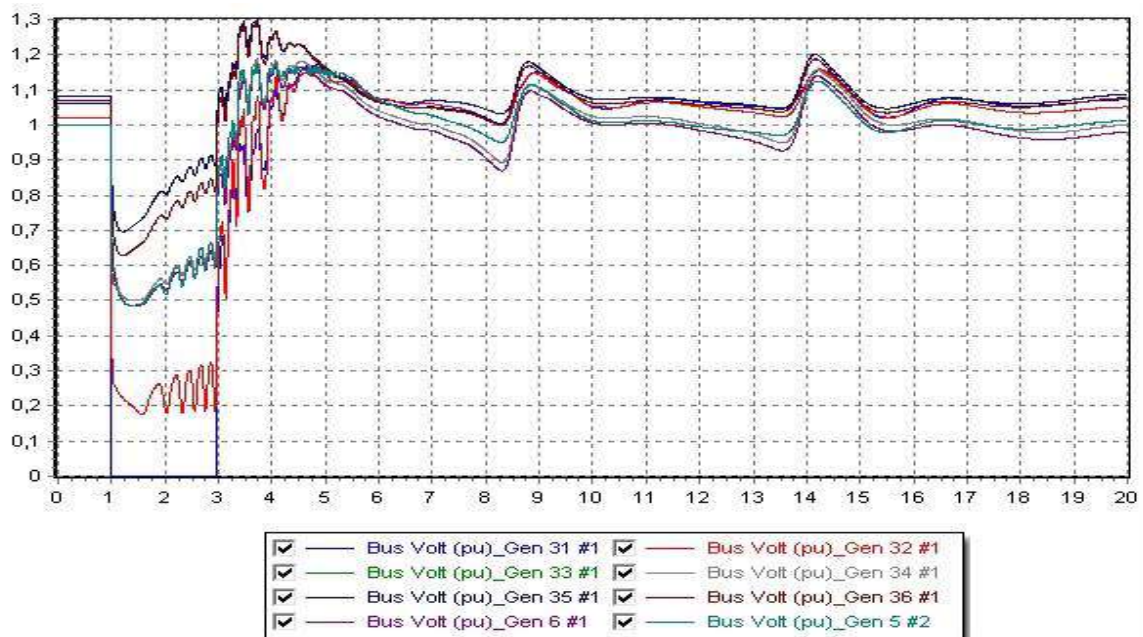
Εικόνα 7.125: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec



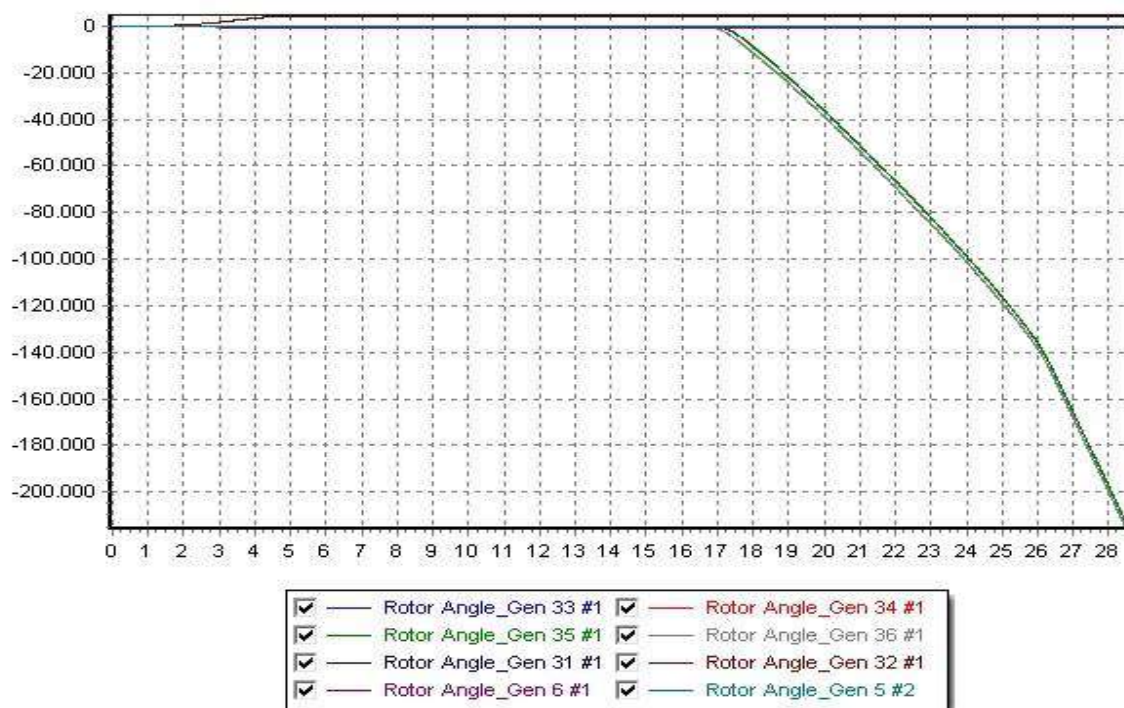
Εικόνα 7.126: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec



Εικόνα 7.127: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec



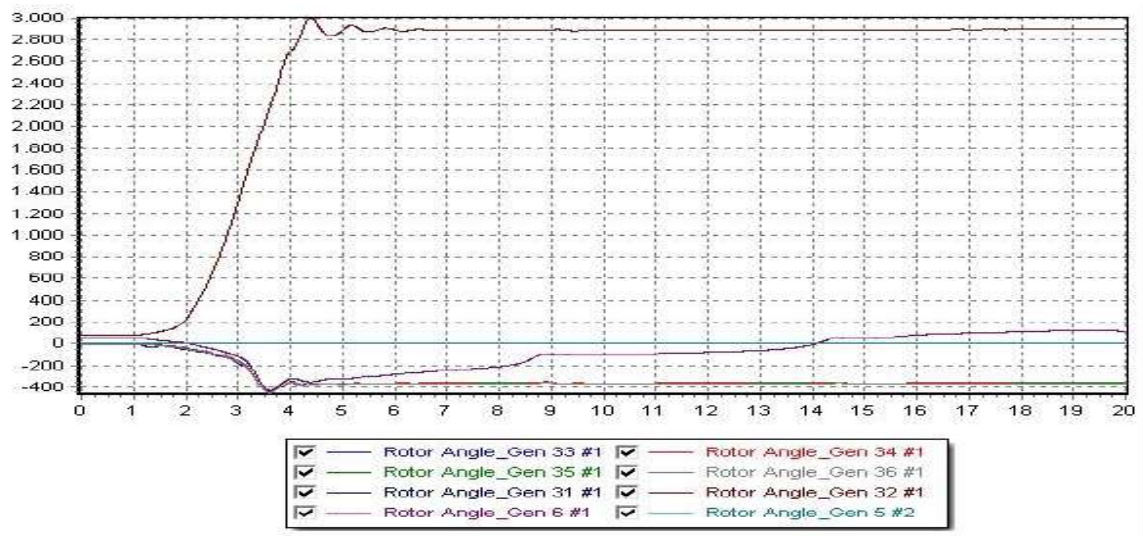
Εικόνα 7.128: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντι-σταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec



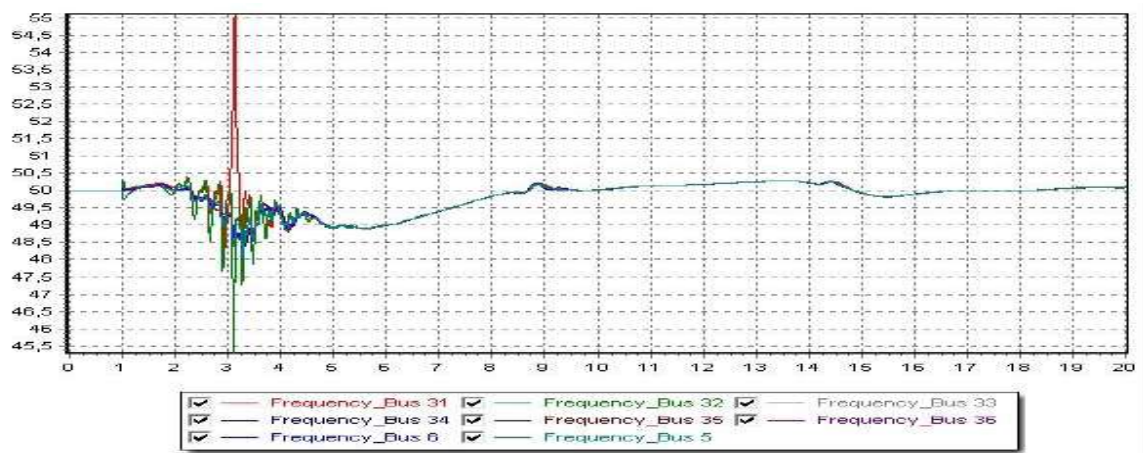
Εικόνα 7.129: Σενάριο Γ1Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.18 Σενάριο Γ1Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 1

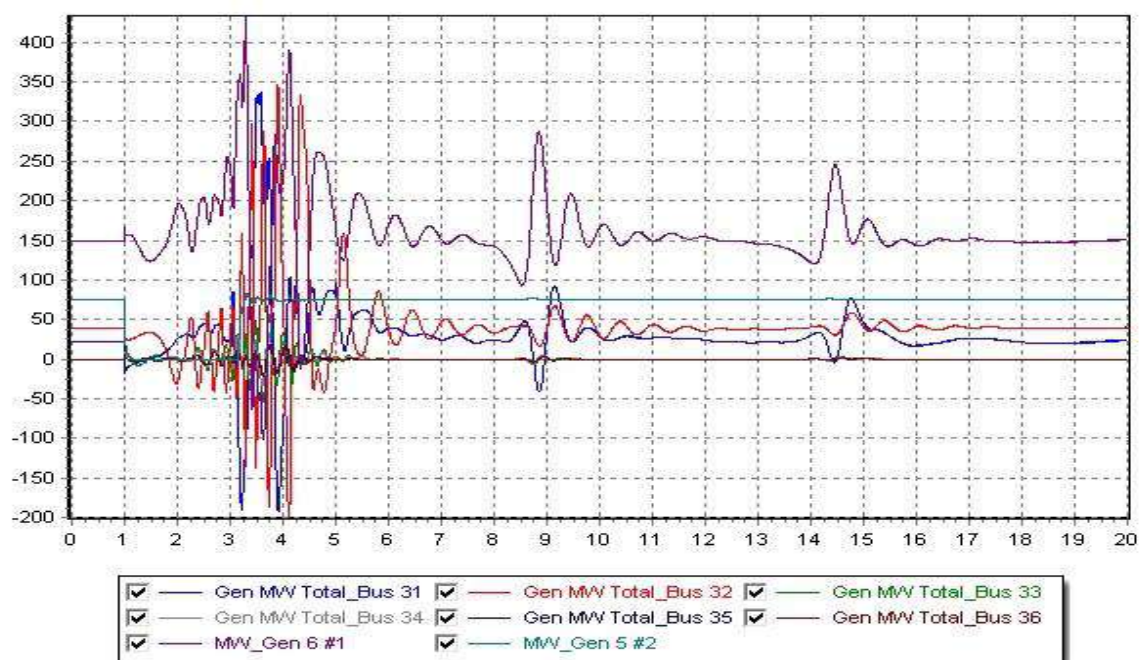
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 1-3 πλησίον του ζυγού 1 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 2,05 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 3,1 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.130-7.135). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



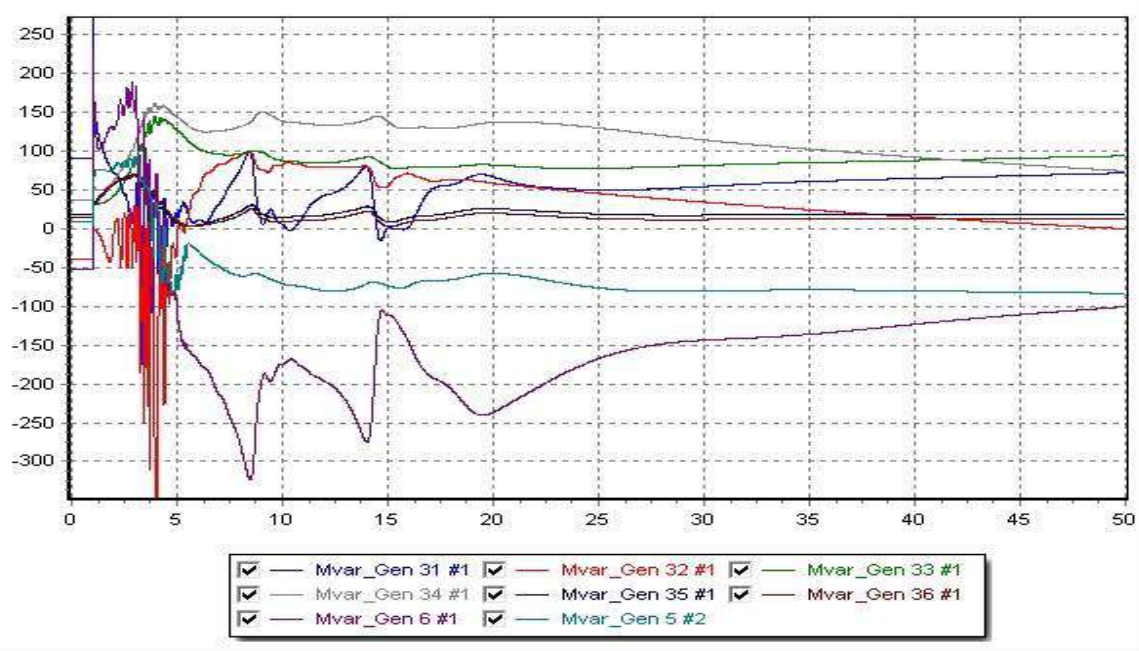
Εικόνα 7.130: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec



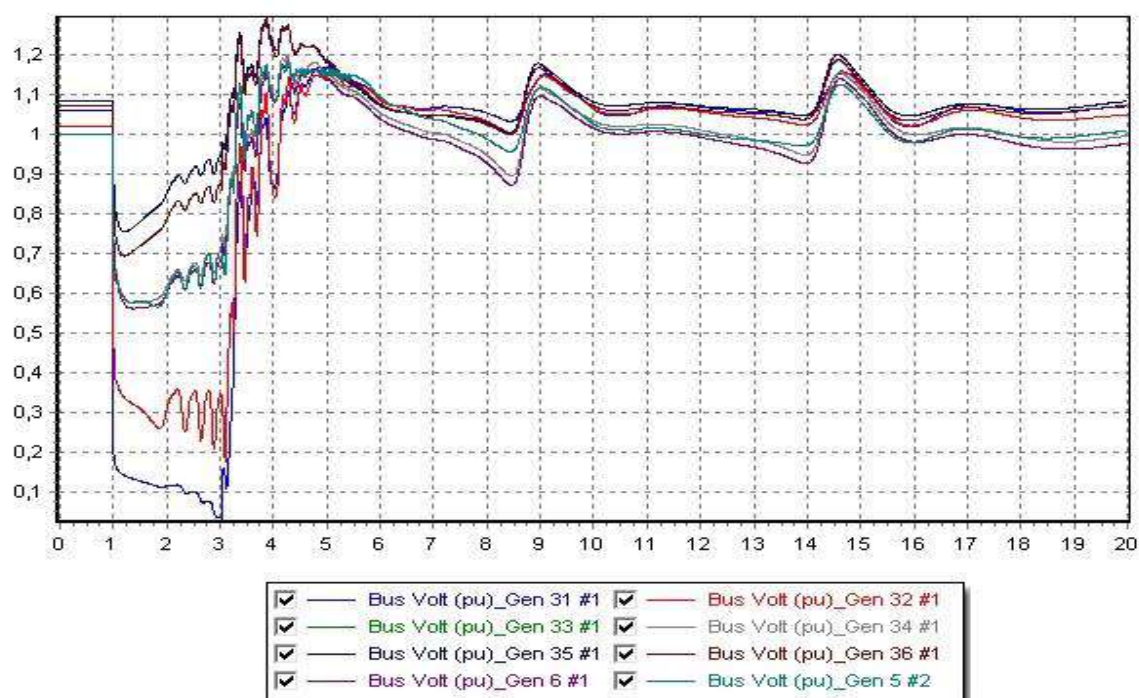
Εικόνα 7.131: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec



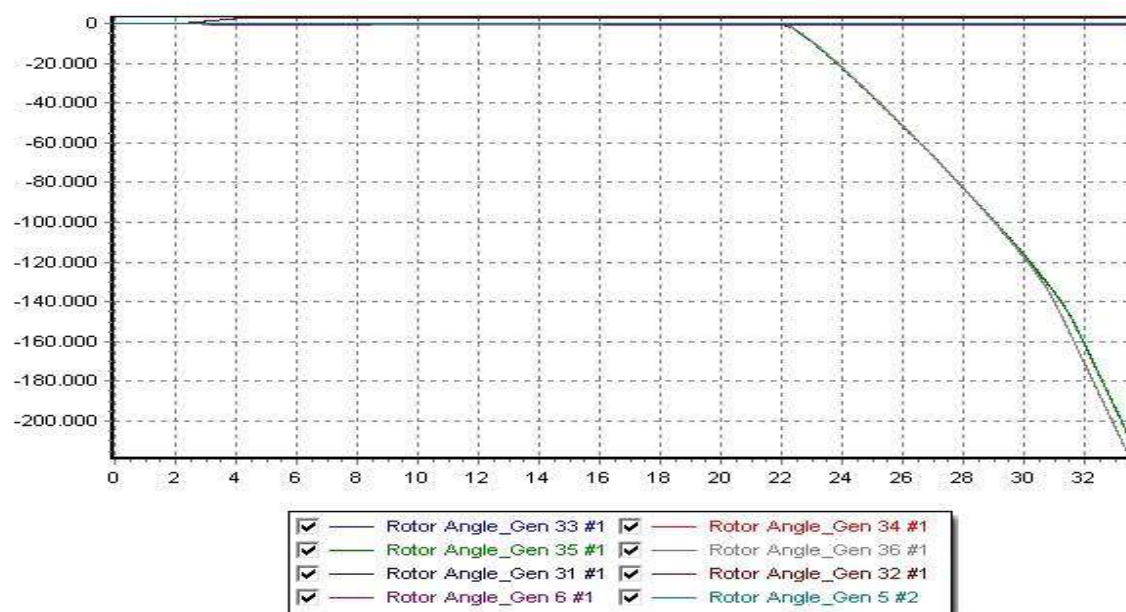
Εικόνα 7.132: Σενάριο Γ1M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec



Εικόνα 7.133: Σενάριο Γ1M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec



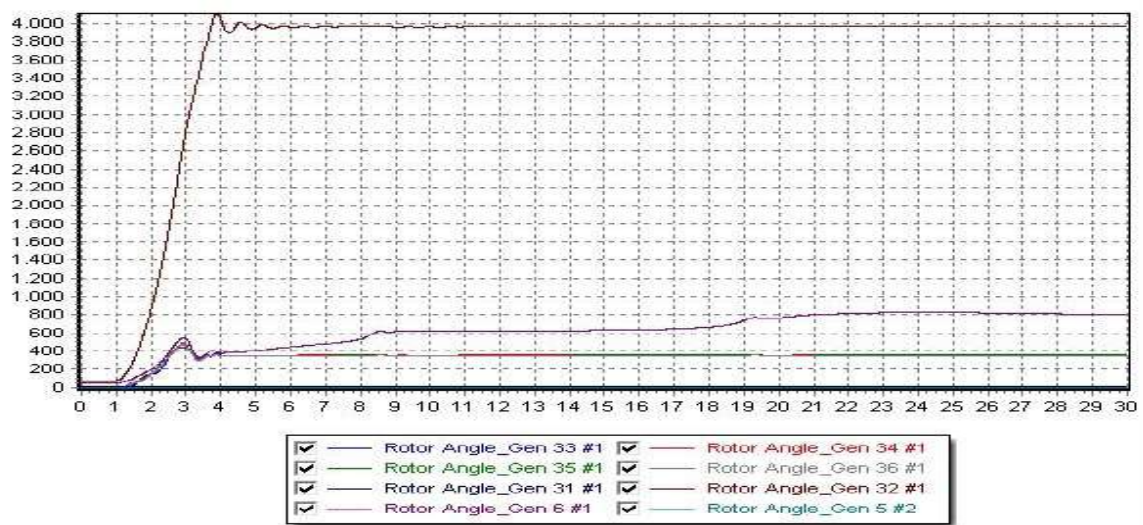
Εικόνα 7.134: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,05 sec



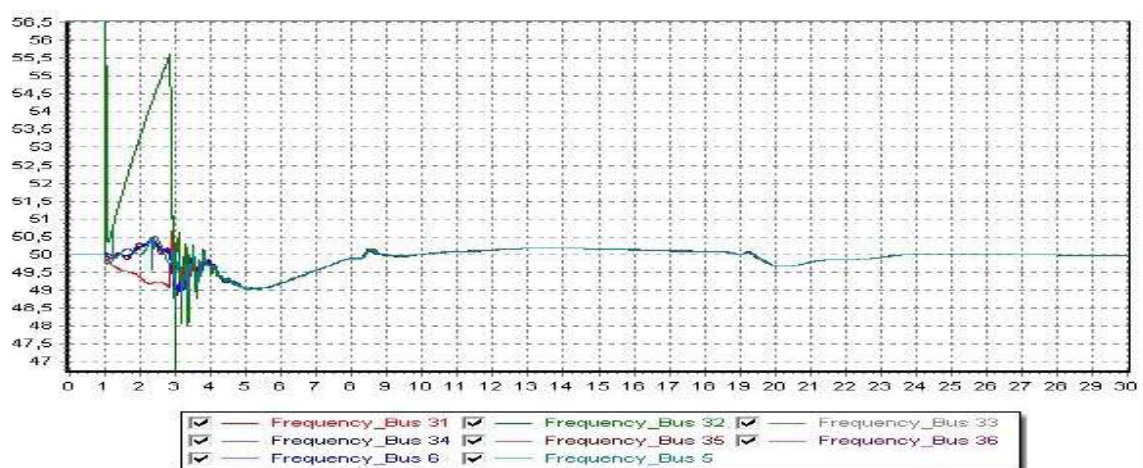
Εικόνα 7.135: Σενάριο Γ1Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 3,1 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.19 Σενάριο Γ2Τ: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

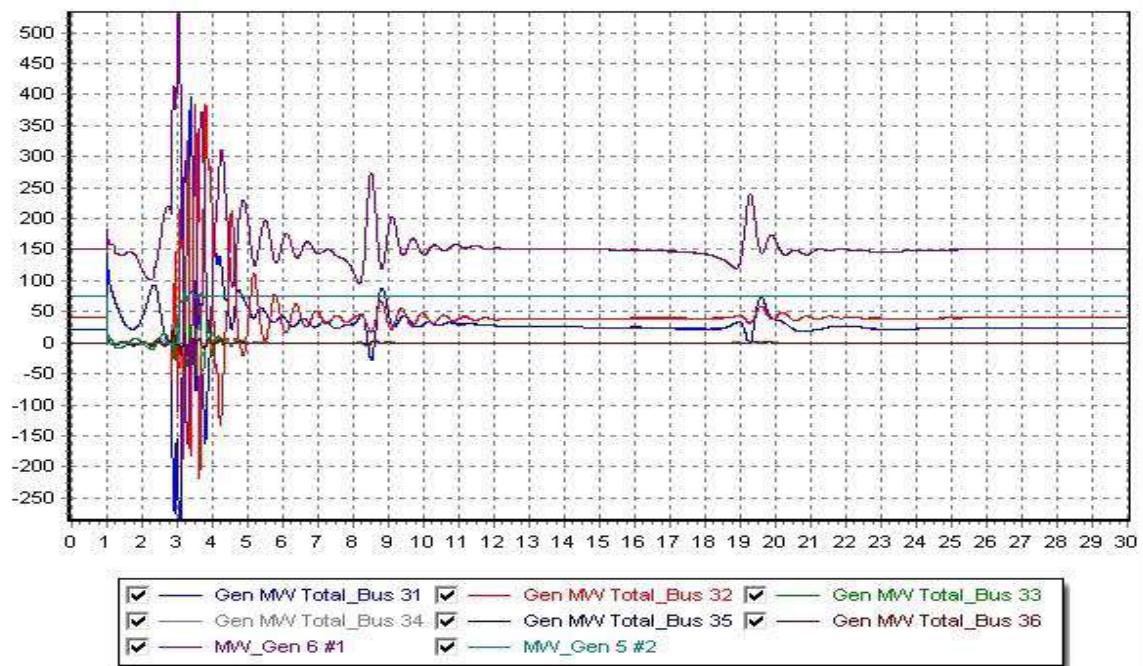
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 1,85 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 2,9 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.136-7.141). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



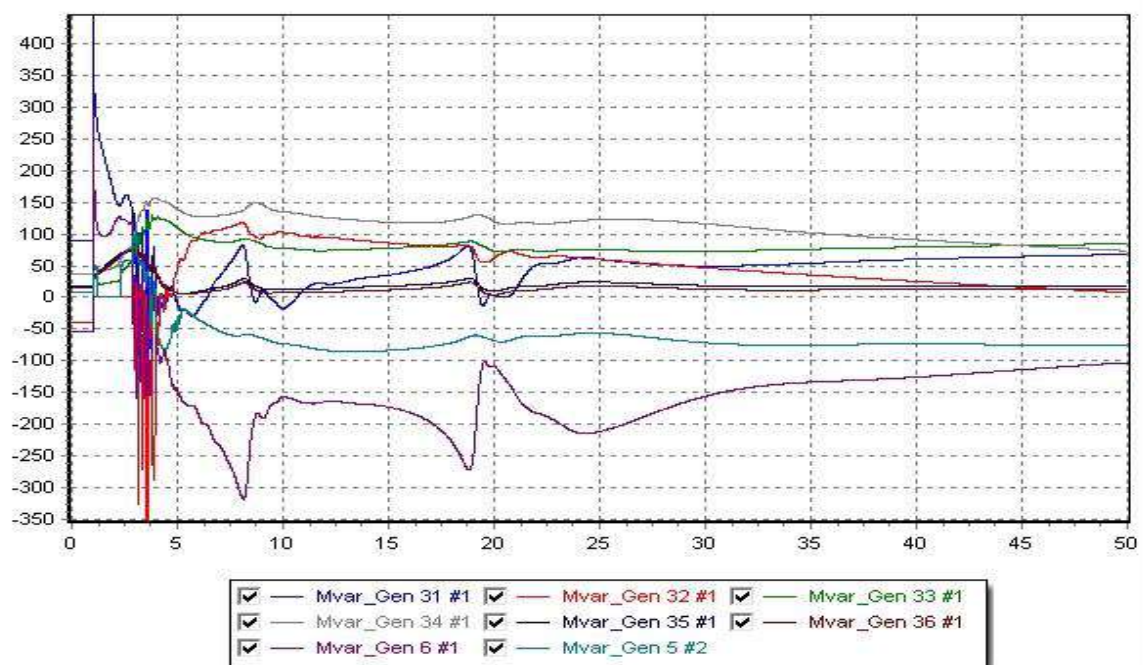
Εικόνα 7.136: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec



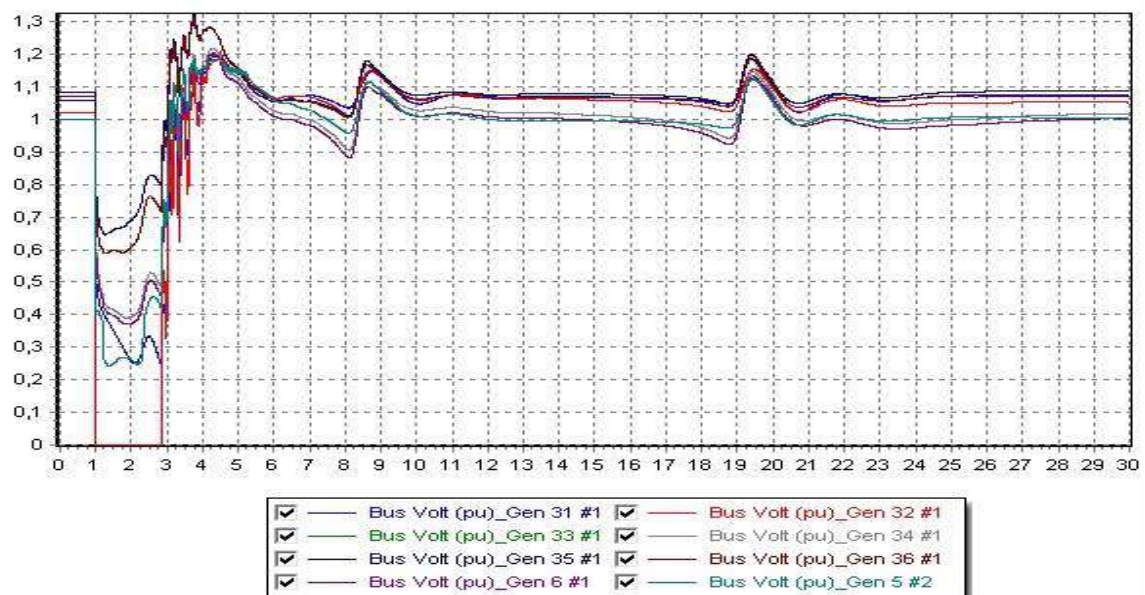
Εικόνα 7.137: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες συχνотήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec



Εικόνα 7.138: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec



Εικόνα 7.139: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec



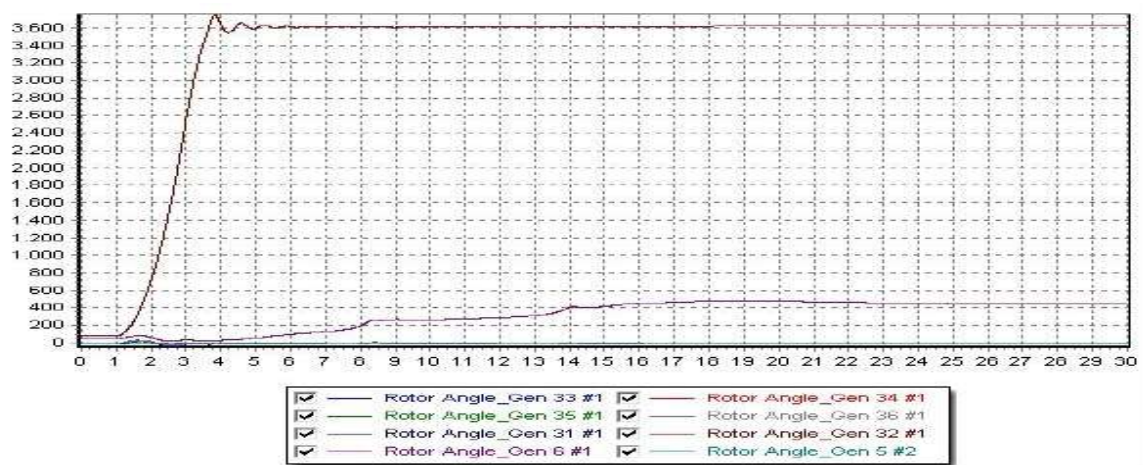
Εικόνα 7.140: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,85 sec



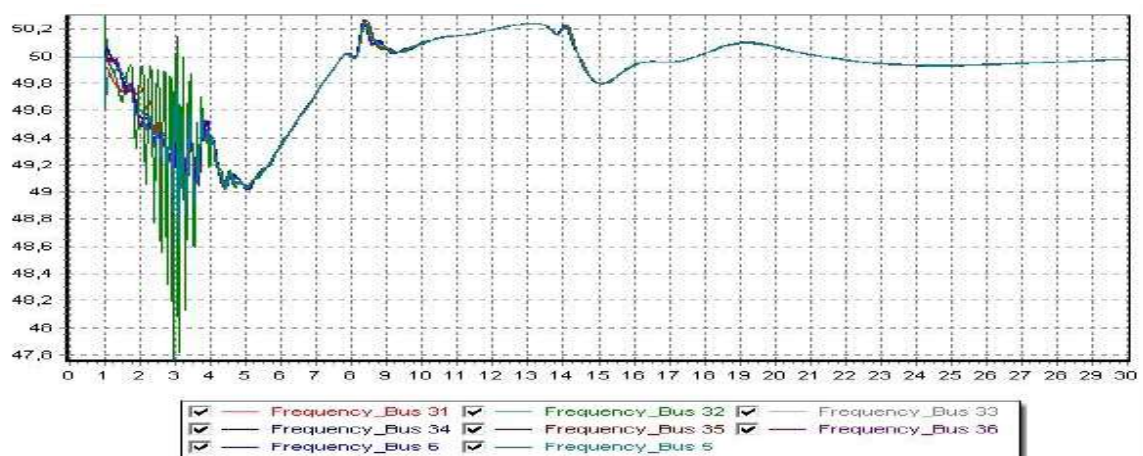
Εικόνα 7.141: Σενάριο Γ2Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.20 Σενάριο Γ2Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 2

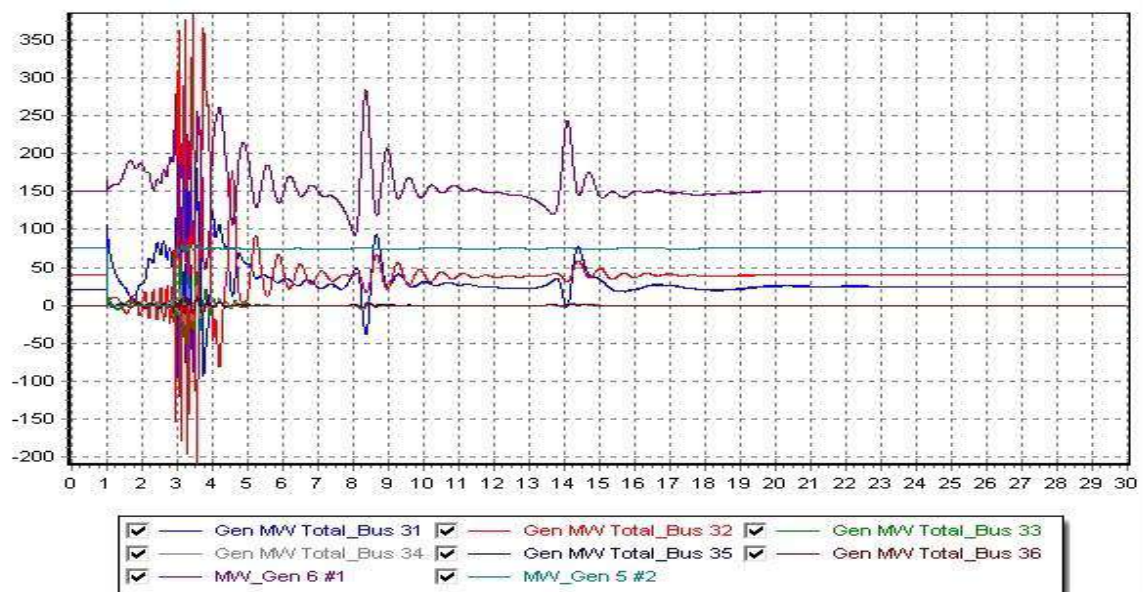
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 2-4 πλησίον του ζυγού 2 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 1,9 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 2,95 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.142-7.147). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



Εικόνα 7.142: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec



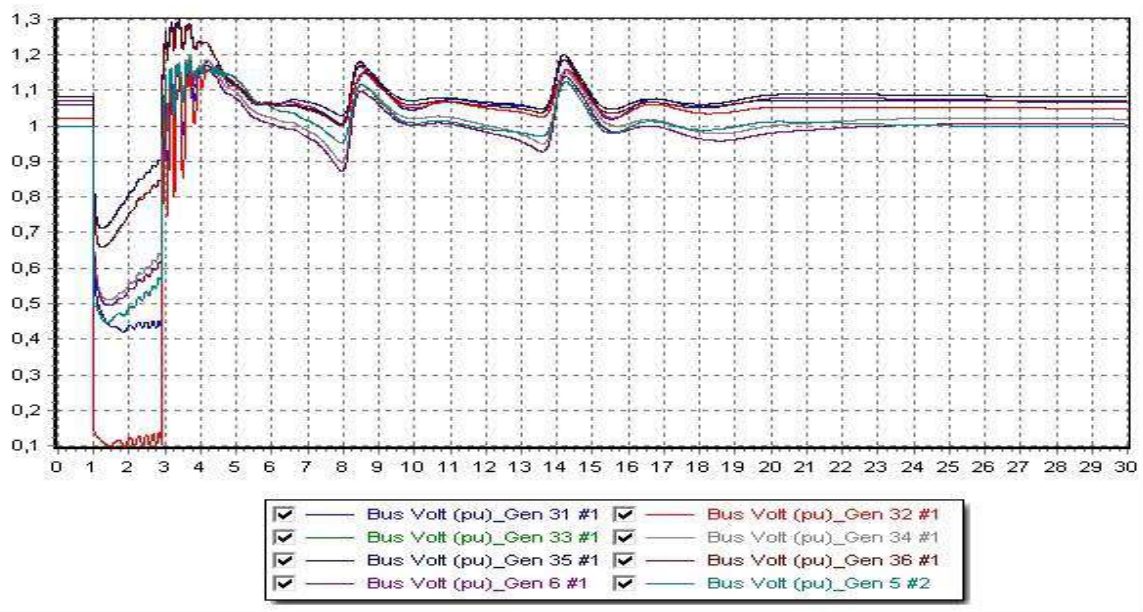
Εικόνα 7.143: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec



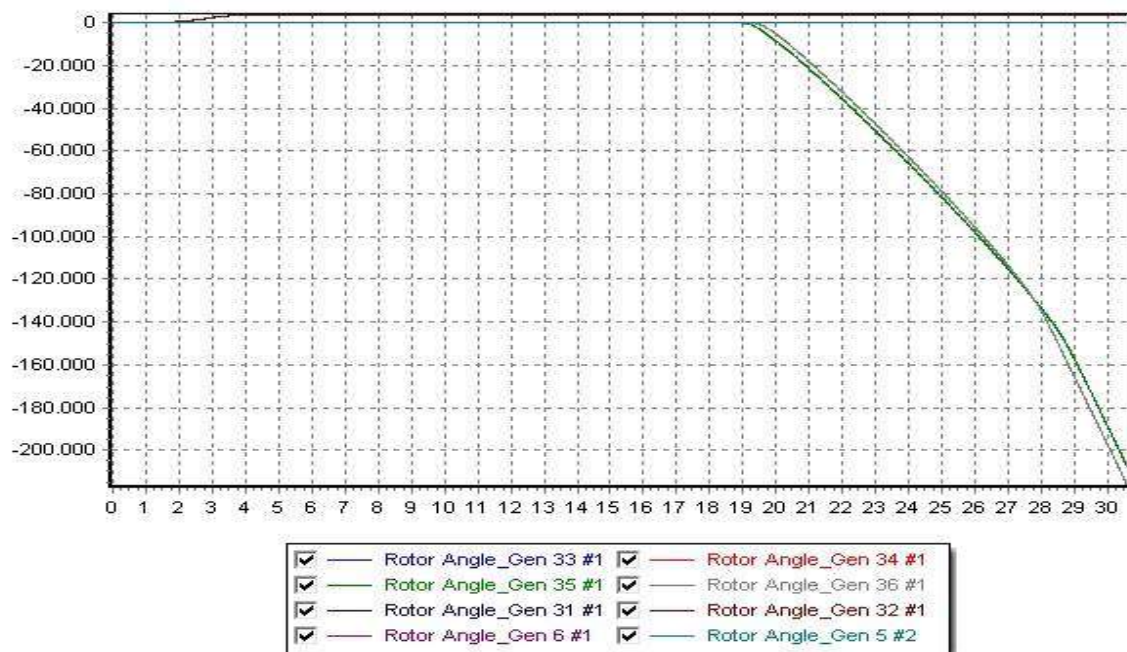
Εικόνα 7.144: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec



Εικόνα 7.145: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec



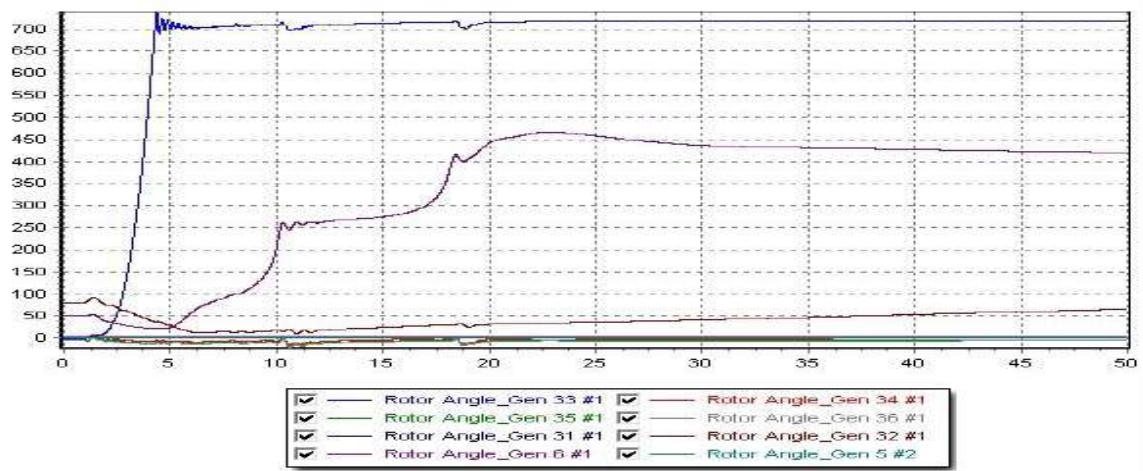
Εικόνα 7.146: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,9 sec



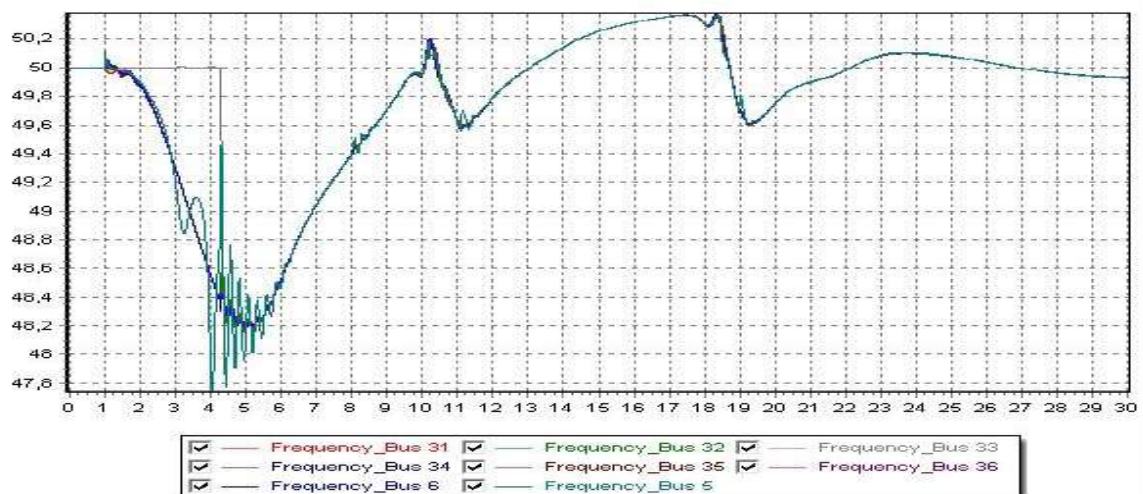
Εικόνα 7.147: Σενάριο Γ2Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,95 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.21 Σενάριο Γ5Τ: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

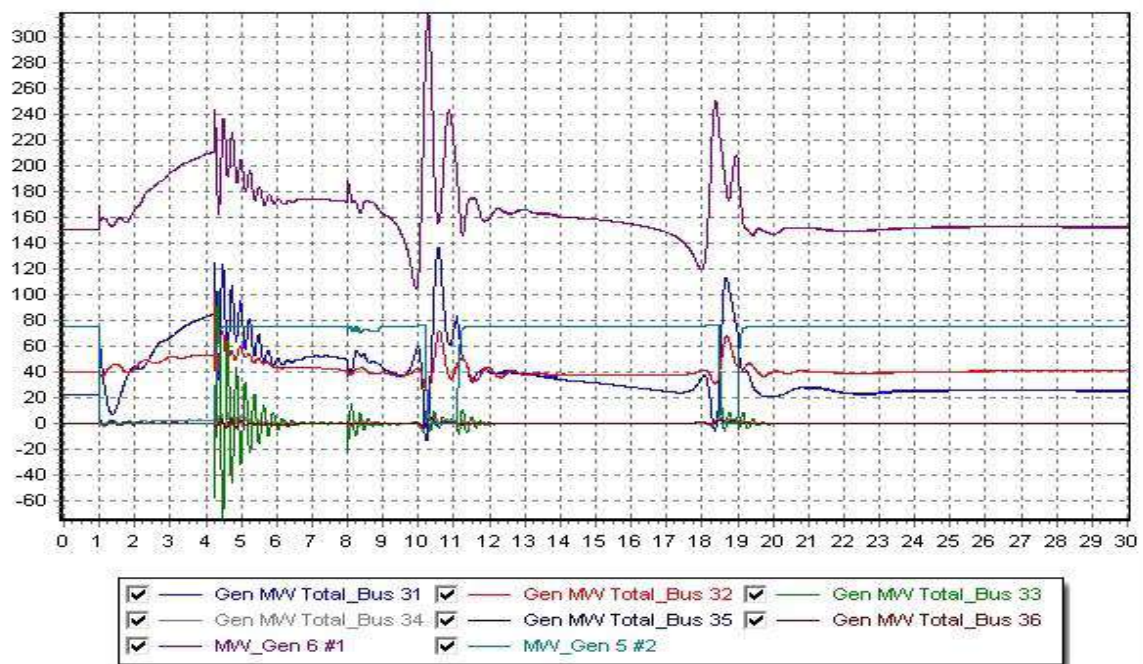
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,25 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,3 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.148-7.153). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



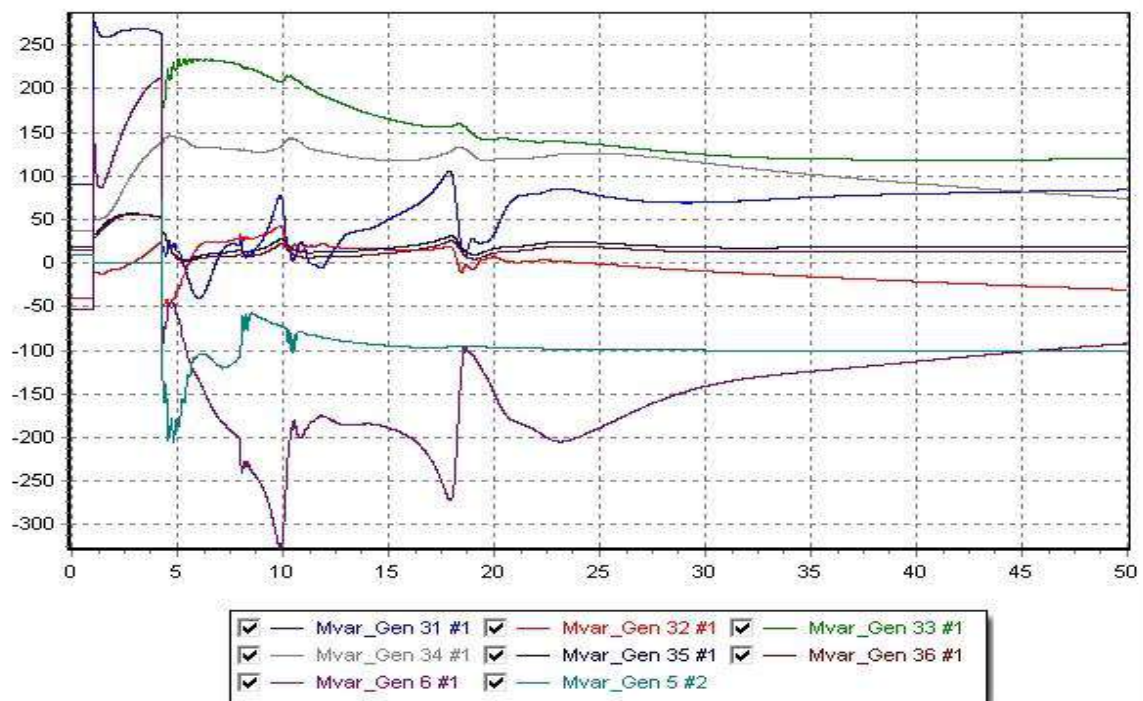
Εικόνα 7.148: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



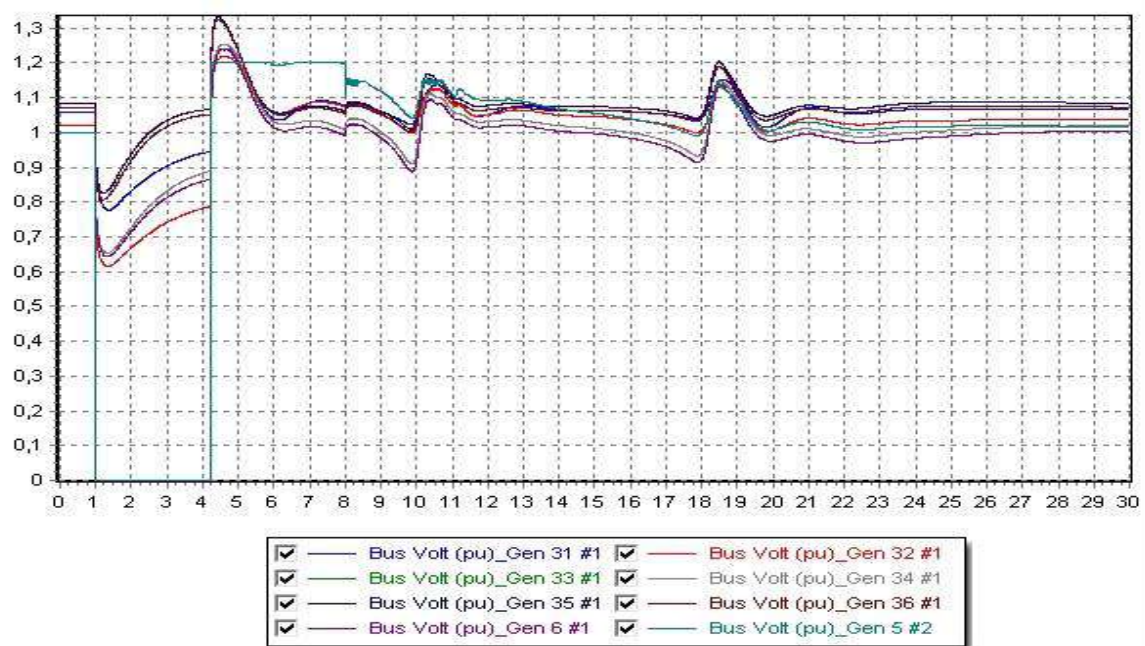
Εικόνα 7.149: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



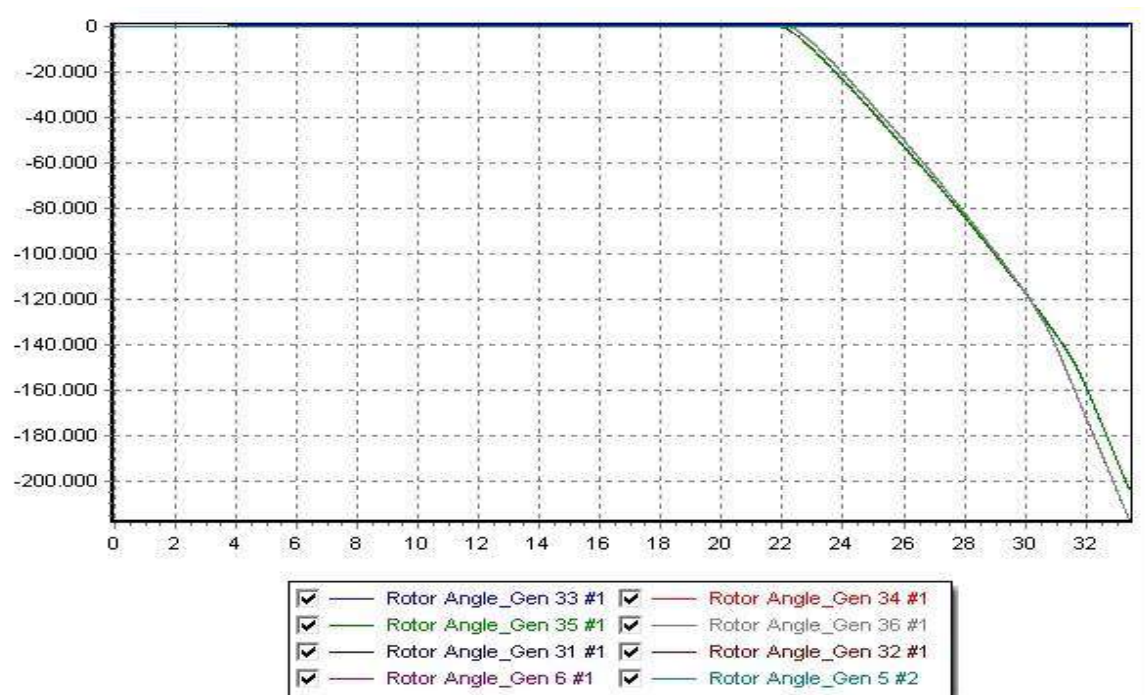
Εικόνα 7.150: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



Εικόνα 7.151: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



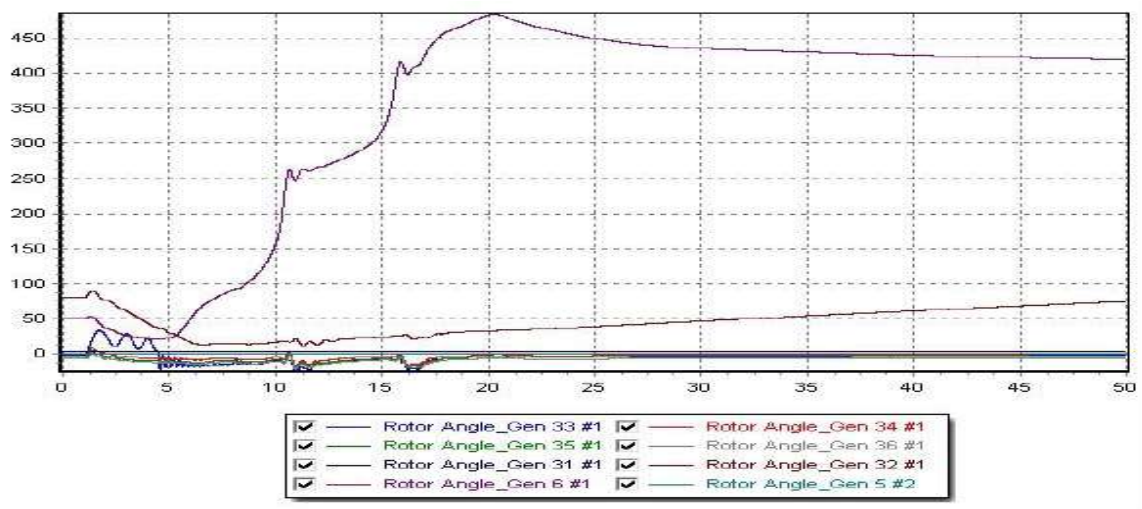
Εικόνα 7.152: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,25 sec



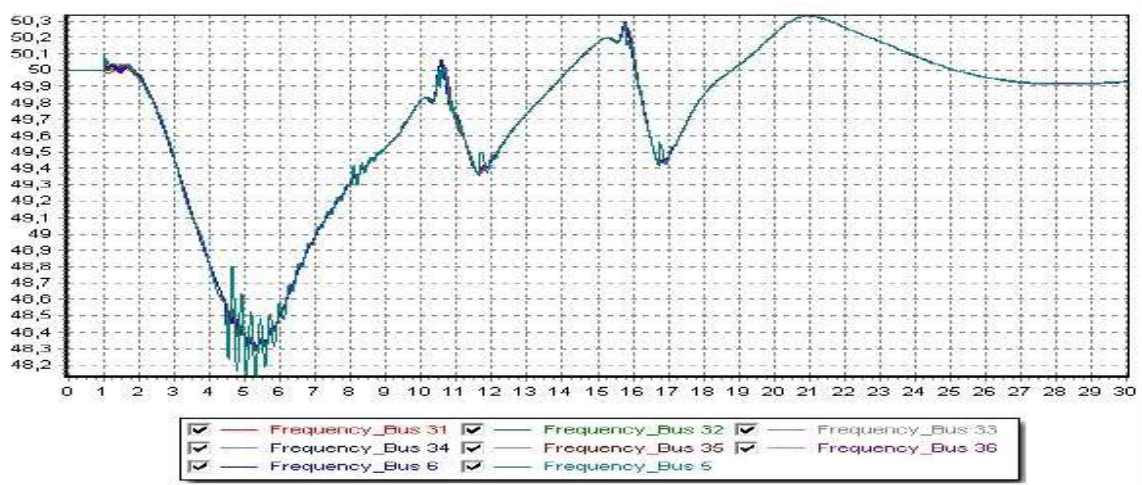
Εικόνα 7.153: Σενάριο Γ5Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,3 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.22 Σενάριο Γ5Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 5

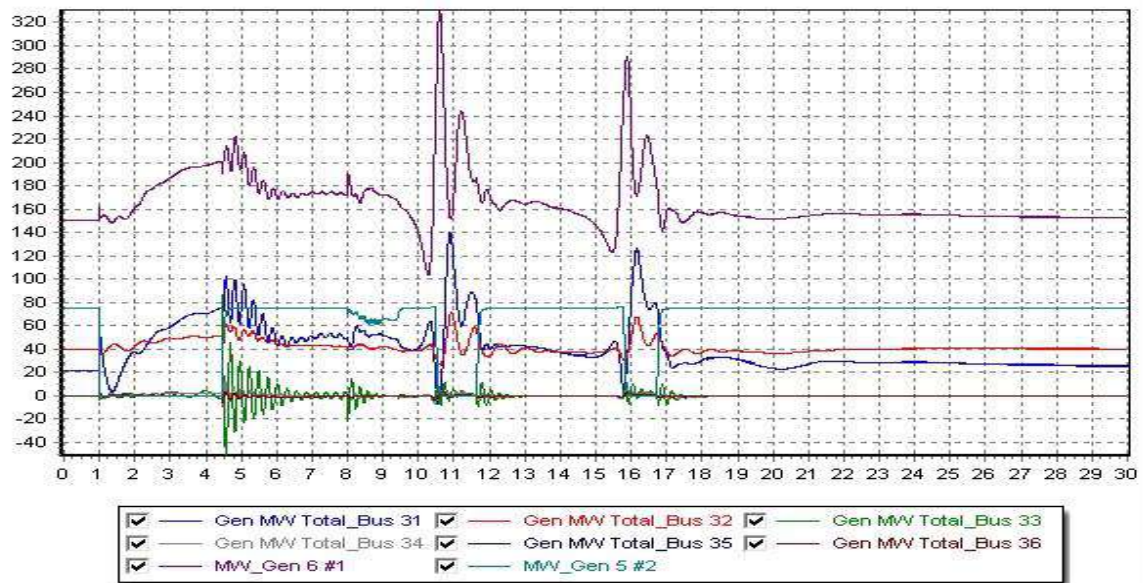
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 5-7 πλησίον του ζυγού 5 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 3,45 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 4,5 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.154-7.159). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



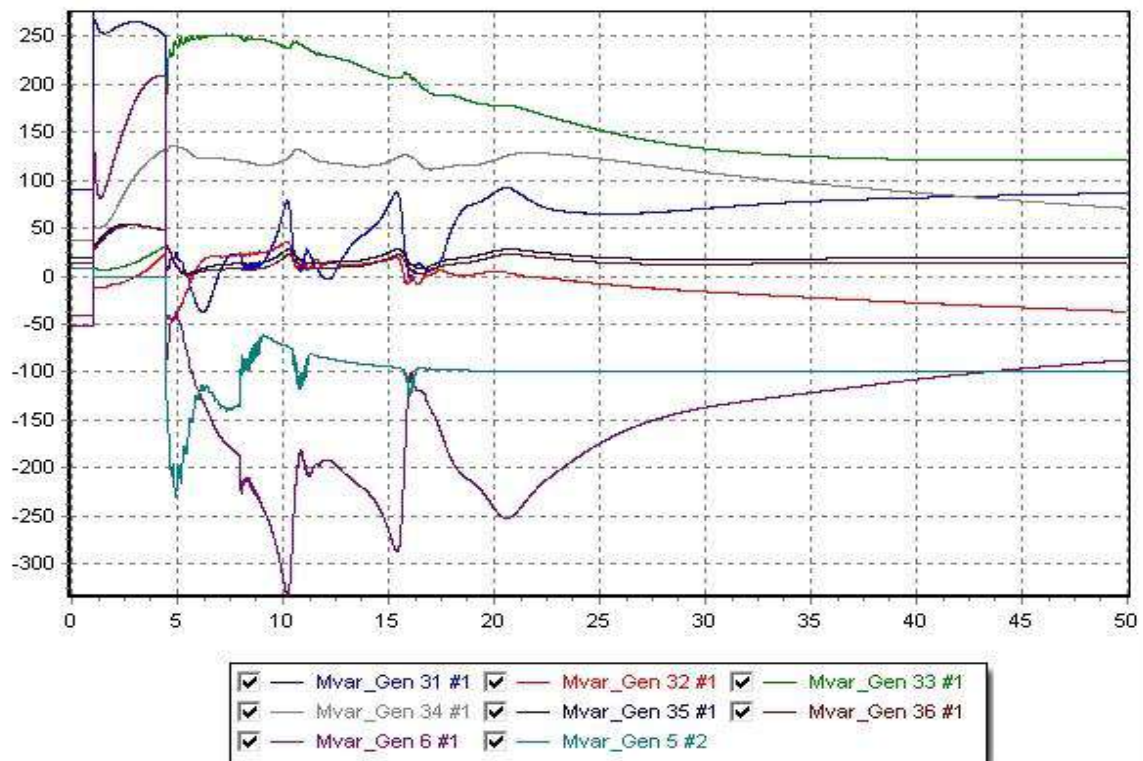
Εικόνα 7.154: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



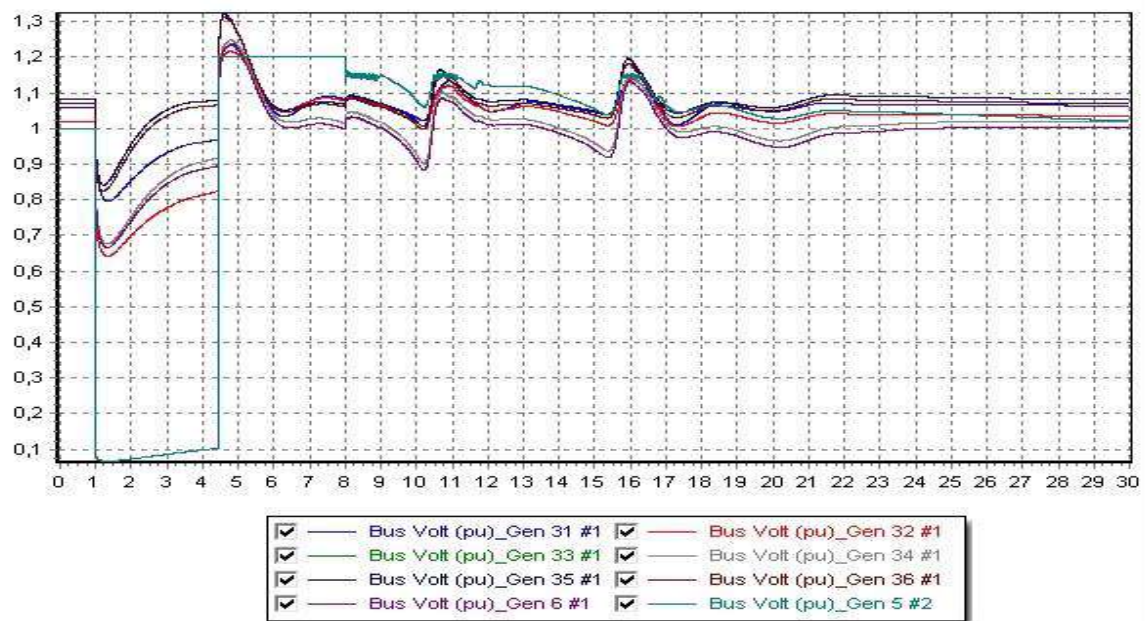
Εικόνα 7.155: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



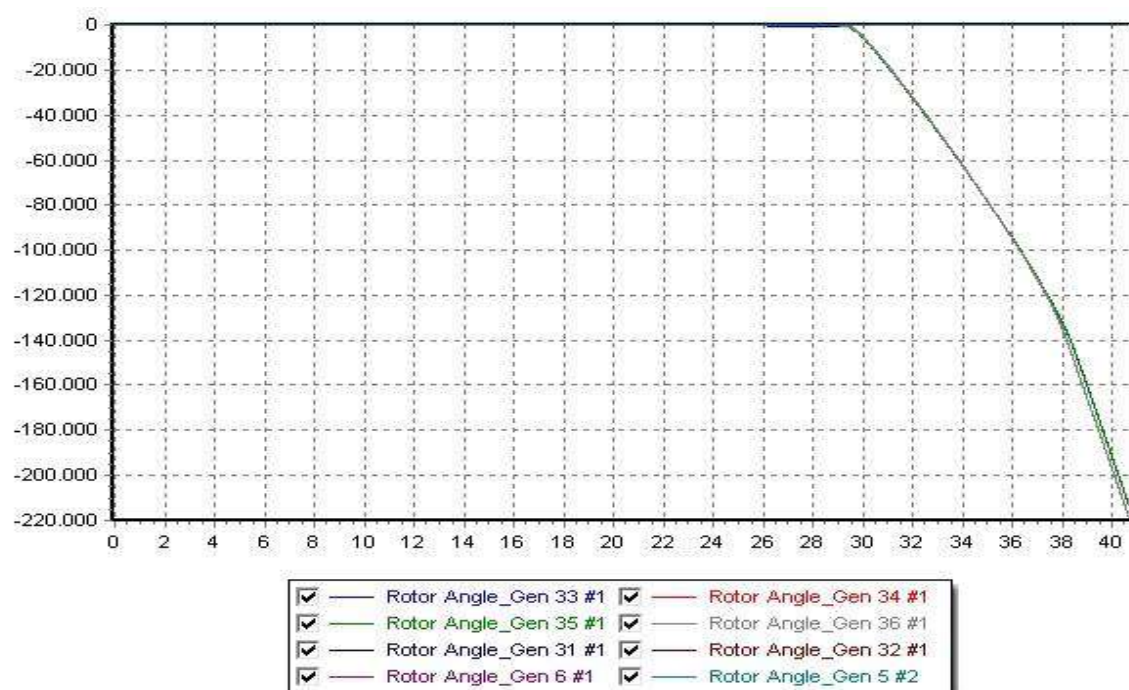
Εικόνα 7.156: Σενάριο Γ5M – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



Εικόνα 7.157: Σενάριο Γ5M – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



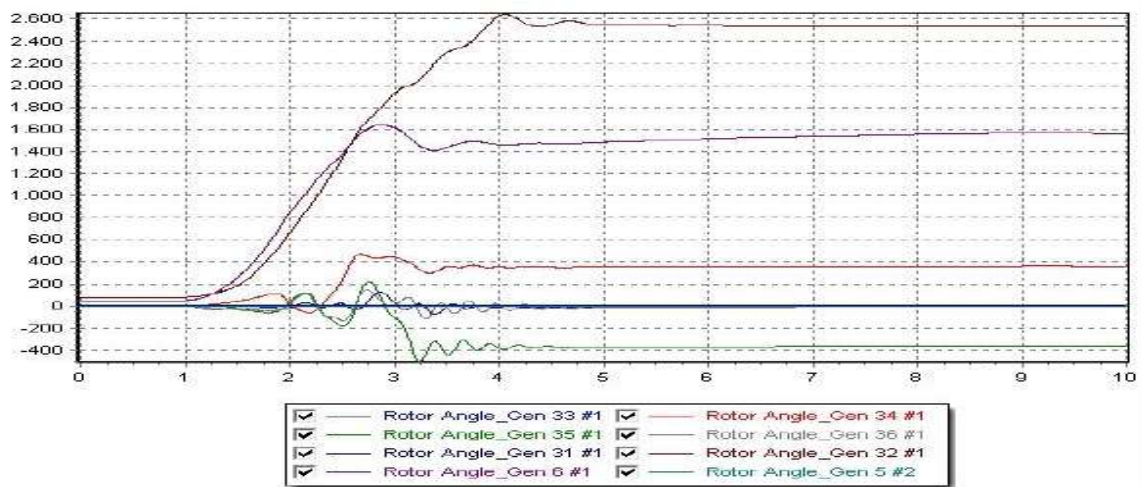
Εικόνα 7.158: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,45 sec



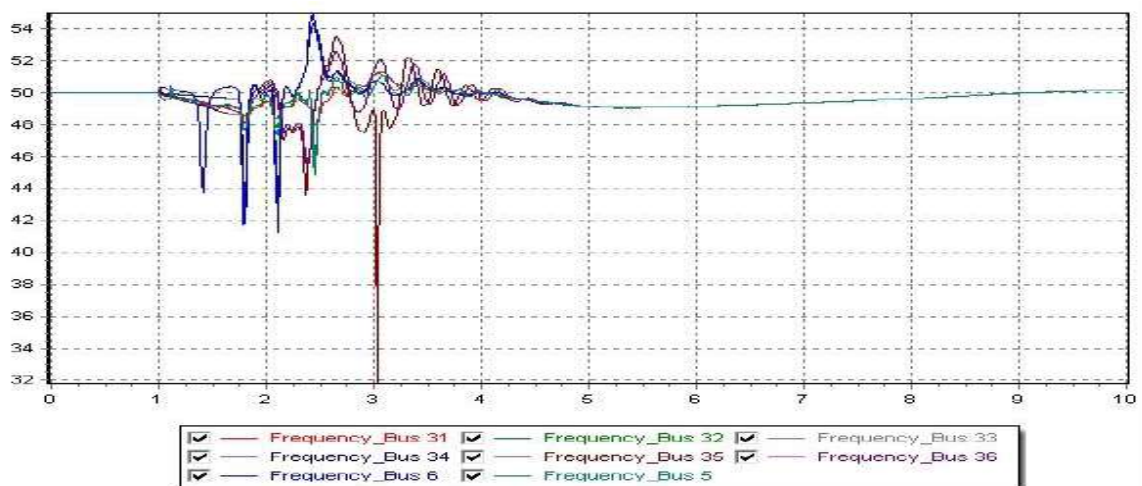
Εικόνα 7.159: Σενάριο Γ5Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 4,5 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.23 Σενάριο Γ6Τ: Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

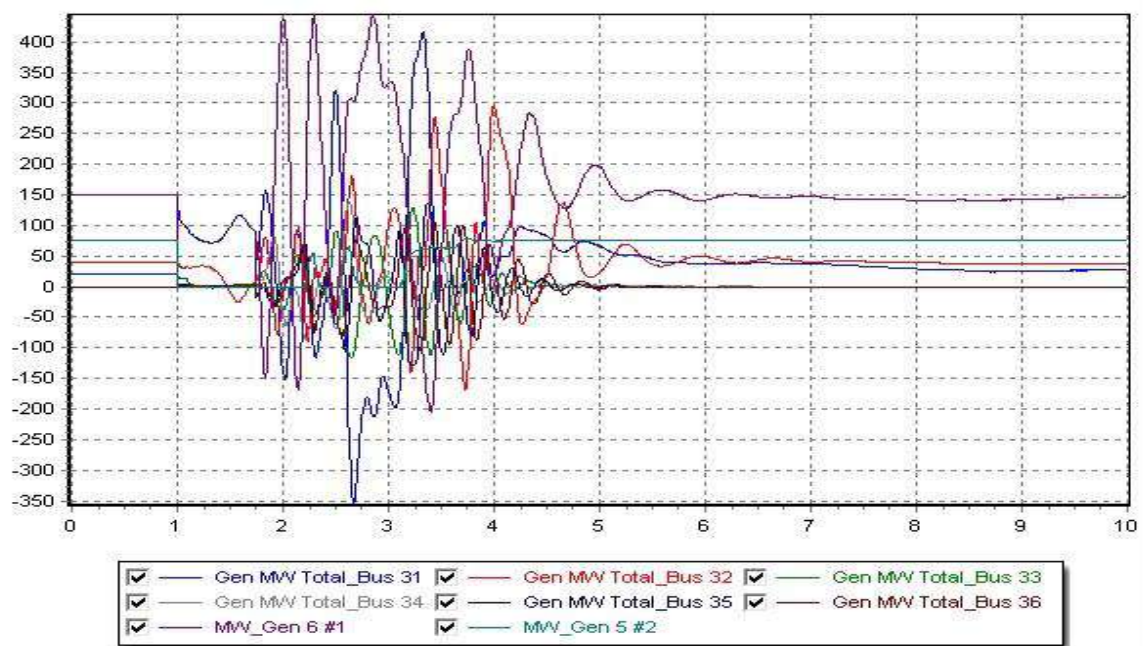
Εφαρμόζεται στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 0,75 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 1,8 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.160-7.165). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



Εικόνα 7.160: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec



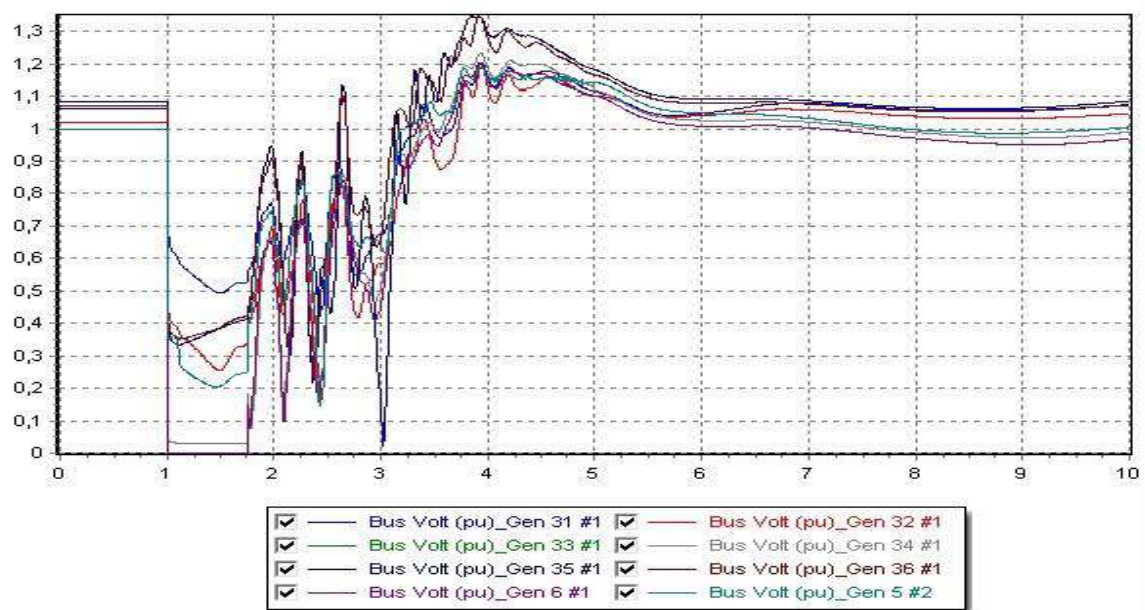
Εικόνα 7.161: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec



Εικόνα 7.162: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec



Εικόνα 7.163: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec



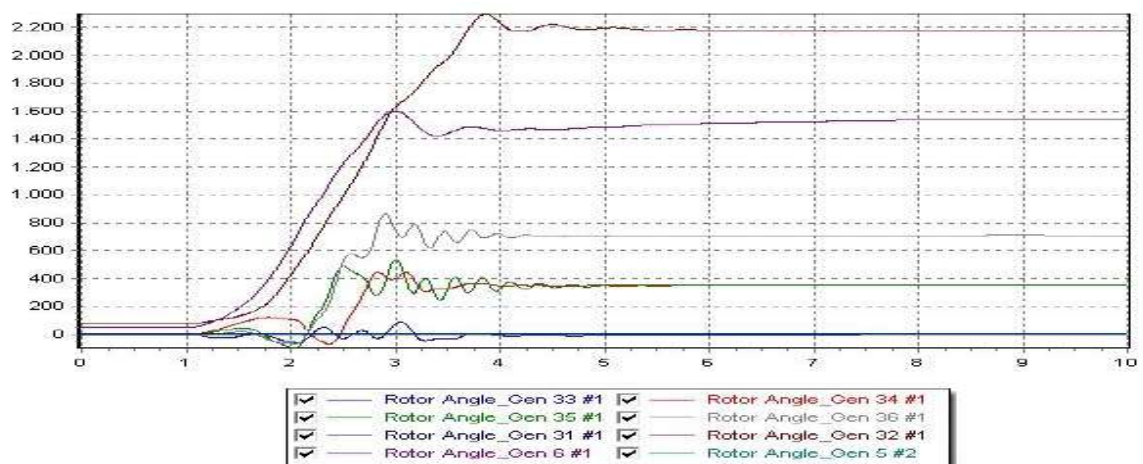
Εικόνα 7.164: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,75 sec



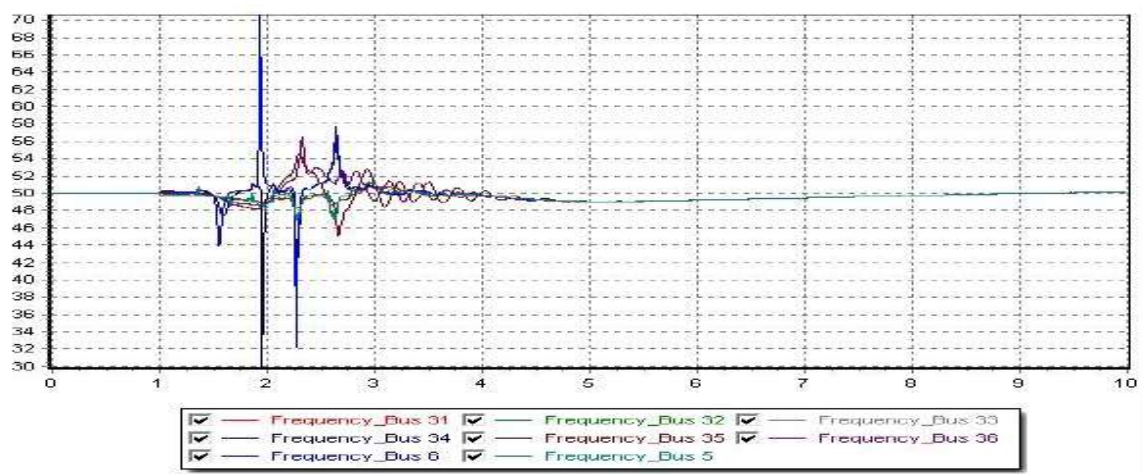
Εικόνα 7.165: Σενάριο Γ6Τ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 1,8 sec (αστάθεια συστήματος)

7.4.24 Σενάριο Γ6Μ: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 6

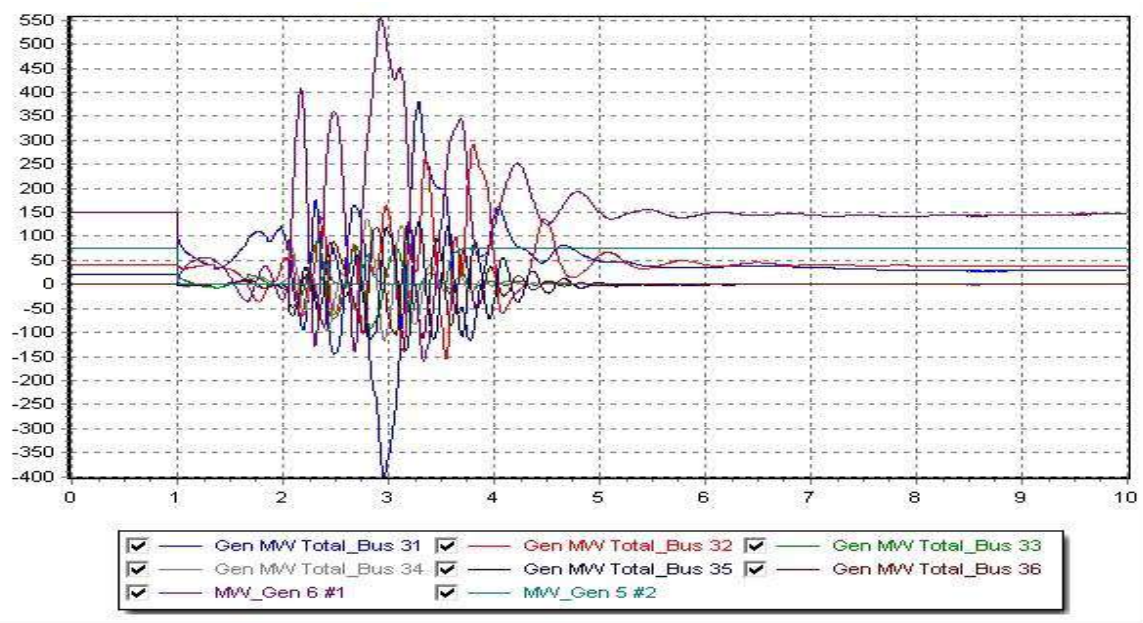
Εφαρμόζεται μονοφασικό βραχυκύκλωμα μέσω επαγωγικής αντίστασης με τιμή 0,01j στη γραμμή 6-8 πλησίον του ζυγού 6 του συστήματος. Το σύστημα παραμένει ευσταθές για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος $t_{critical} = 1,05 \text{ sec}$. Για χρόνο εκκαθάρισης $t_{clear} = 2,1 \text{ sec}$ οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων παύουν να συγκλίνουν με αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει την ευστάθειά του (Εικόνες 7.166-7.171). Σημειώνεται ότι ο χρόνος προσομοίωσης πρέπει να επεκταθεί άνω των 10 sec αλλιώς η αστάθεια δεν είναι εντοπίσιμη.



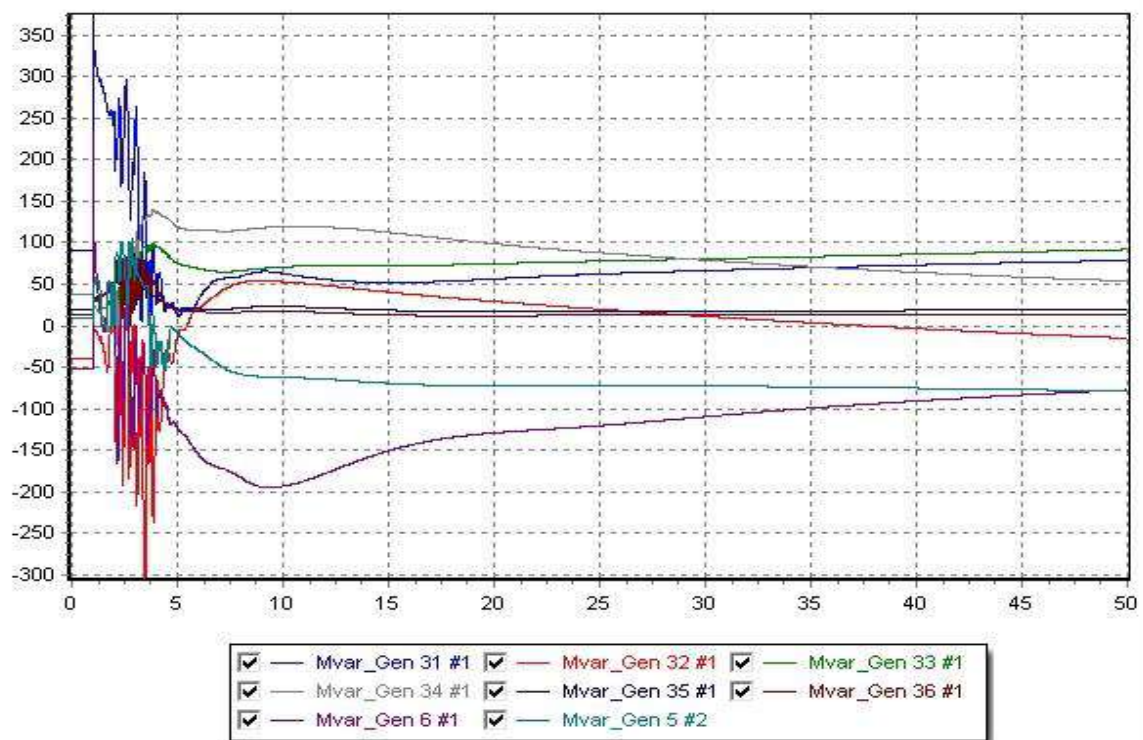
Εικόνα 7.166: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος δ ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec



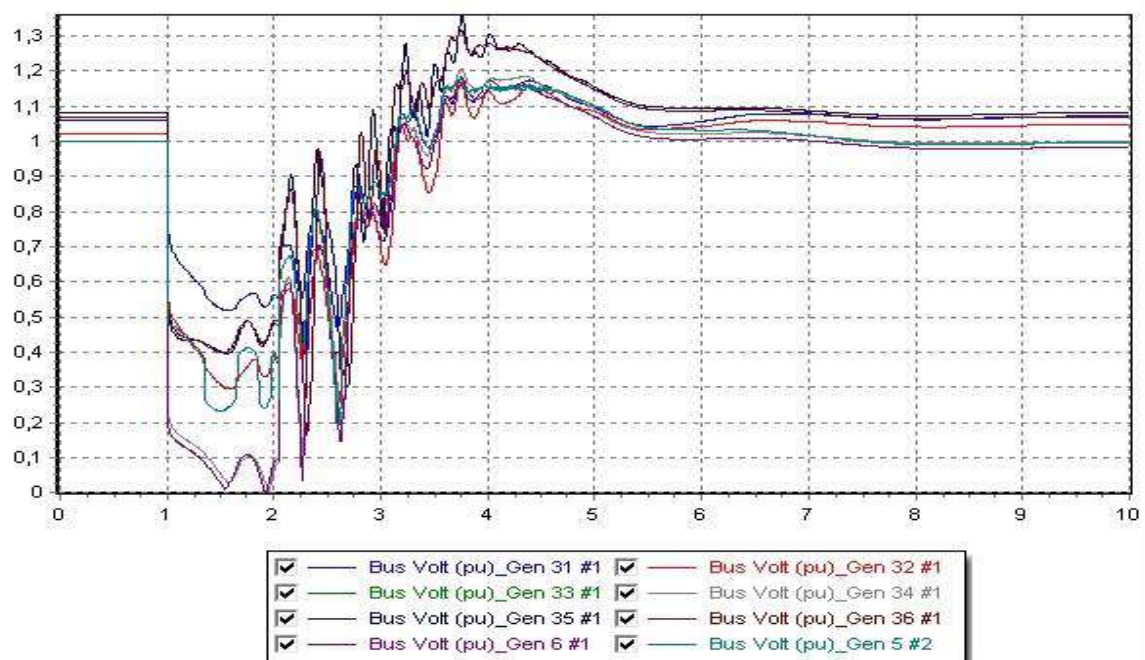
Εικόνα 7.167: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες συχνοτήτων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec



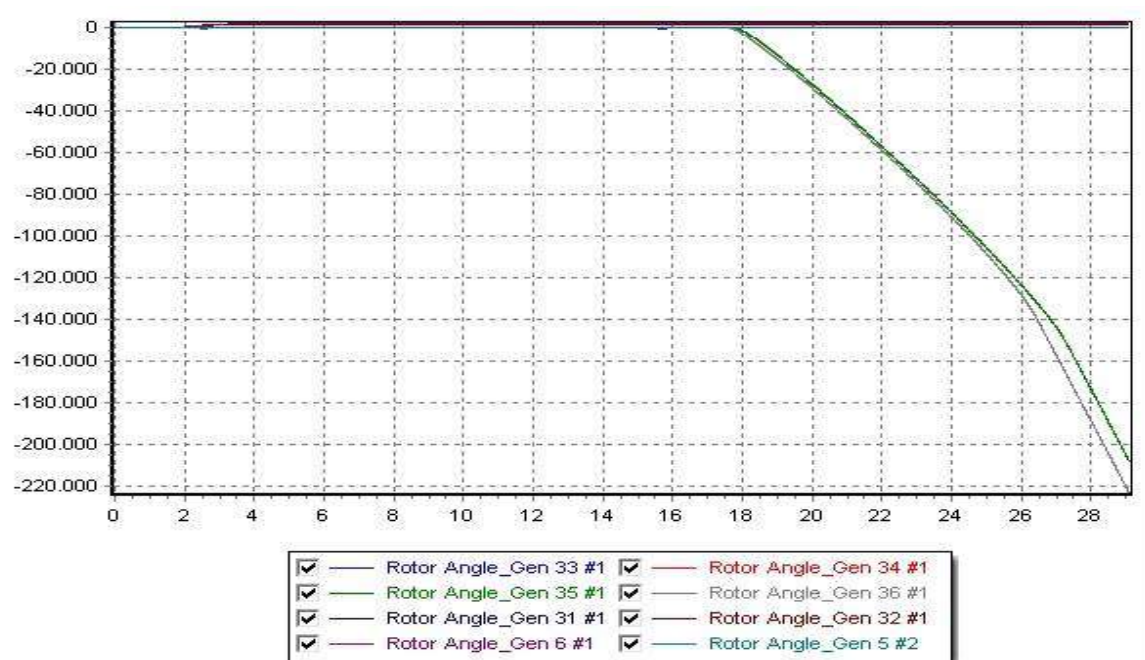
Εικόνα 7.168: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες πραγματικής ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec



Εικόνα 7.169: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες άεργου ισχύος των γεννητριών σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec



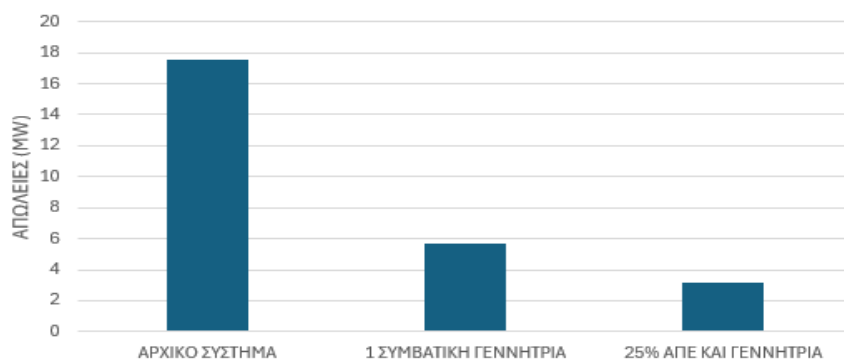
Εικόνα 7.170: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες τάσεων των γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,05 sec



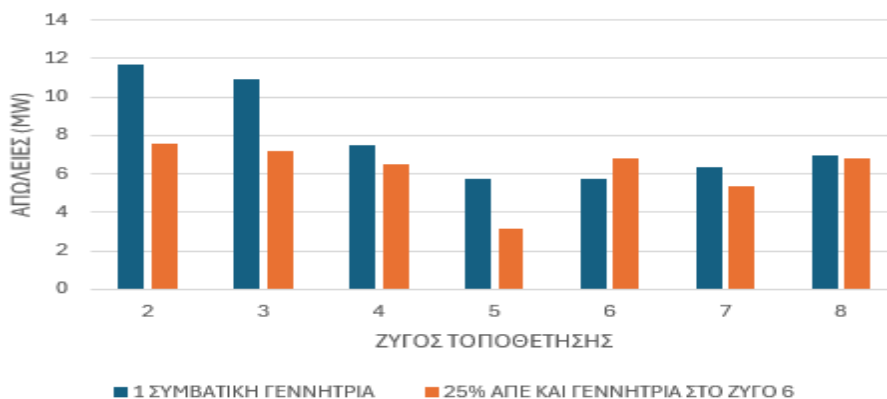
Εικόνα 7.171: Σενάριο Γ6Μ – Καμπύλες σχετικών γωνιών ισχύος ως προς τον ζυγό αναφοράς σε συνάρτηση με το χρόνο, για χρόνο εκκαθάρισης 2,1 sec (αστάθεια συστήματος)

7.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Κατά τη μελέτη του συστήματος 30 ζυγών αναλύθηκε η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας κατά Newton-Raphson. Το σύστημα αρχικά παρουσίαζε οριακή υπερφόρτωση γεννήτριας στον ζυγό 1 και υπερφορτώσεις γραμμών 1-2 και 6-8, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Οι απώλειες κατά την επίλυση του αρχικού συστήματος ήταν 17,56 MW. Στη συνέχεια προστέθηκε 1 συμβατική γεννήτρια στον ζυγό 6 με σκοπό την απελευθέρωση της γεννήτριας του ζυγού 1. Οι απώλειες κατά την επίλυση του συστήματος με 1 συμβατική γεννήτρια ήταν 5,67 MW σύμφωνα με την Εικόνα 7.14. Έπειτα, ενσωματώθηκε Φ/Β πάρκο το οποίο αναλάμβανε το 25% της συνολικής παραγόμενης πραγματικής ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα παρουσίαζε απώλειες 3,13 MW με βέλτιστη τοποθέτηση στον ζυγό σύμφωνα με το Σχήμα 7.24. Στο Σχήμα 7.25 φαίνονται τα αποτελέσματα των απωλειών των ενοτήτων 7.2.8 και 7.3.8, τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους ανά ζυγό τοποθέτησης σύμφωνα με το Σχήμα 7.26.



Σχήμα 7.25: Συνοπτικά αποτελέσματα απωλειών μόνιμων καταστάσεων



Σχήμα 7.26: Συνοπτικά αποτελέσματα απωλειών ανά ζυγό τοποθέτησης

Τέλος, μελετήθηκε η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος στους ζυγούς 1,2,5 και 6 στις περιπτώσεις στερεού τριφασικού σφάλματος και μονοφασικού σφάλματος μέσω αντίστασης με τιμή 0,01j pu για το αρχικό σύστημα (σενάριο Α), κατά την προσθήκη συμβατικής γεννήτριας (σενάριο Β) και κατά την ενσωμάτωση Φ/Β πάρκου (σενάριο Γ). Στον Πίνακα 7.20 παρουσιάζονται οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των σφαλμάτων για τα τρία σενάρια.

Πίνακας 7.20: Αποτελέσματα κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σεναρίων

ΣΦΑΛΜΑ	ΣΕΝΑΡΙΟ Α	ΣΕΝΑΡΙΟ Β	ΣΕΝΑΡΙΟ Γ
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 1	0,15	3,15	1,95
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 1	0,2	3,45	2,05
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 2	0,2	2,7	1,85
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 2	0,3	2,95	1,9
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 5	3,3	3,25	3,25
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 5	3,3	3,25	3,45
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 6	1,1	2,45	0,75
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΖΥΓΟΣ 6	2,7	2,9	1,05

Παρατηρείται σύμφωνα με τον Πίνακα 7.20 ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης στα μονοφασικά βραχυκυκλώματα είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι από τους αντίστοιχους χρόνους για τα τριφασικά βραχυκυκλώματα. Τα αποτελέσματα αυτής της παρατήρησης προκύπτουν από το γεγονός ότι ένα τριφασικό σφάλμα κοντά σε ζυγό μειώνει την τάση στο μηδέν όπως φαίνεται και από τις καμπύλες τάσεων. Πιο συγκεκριμένα ένα τριφασικό σφάλμα κοντά σε ζυγό γεννήτριας αφαιρεί την ηλεκτρομαγνητική ροπή της αμέσως ενώ το μονοφασικό σφάλμα κοντά σε ζυγό γεννήτριας δεν μειώνει απευθείας στο μηδέν την ηλεκτρομαγνητική ροπή της. Σε κάθε περίπτωση, η μηχανική είσοδος παραμένει, έτσι η γεννήτρια επιταχύνει γρήγορα, αυξάνοντας τη γωνία δ του στροβίλου.

7.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Α και Β

Η σύγκριση μεταξύ σεναρίων Α και Β καθίσταται κρίσιμη για την εκτίμηση των βελτιώσεων του συστήματος κατά την προσθήκη συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 6. Παρατηρείται βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος κατά το σενάριο Β καθώς προσφέρεται περισσότερος χρόνος για την εκκαθάριση των σφαλμάτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.27. Αισθητή βελτίωση παρουσιάζει το σύστημα κατά το στερεό τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 1 καθώς η χρονική διαφορά μεταξύ σεναρίου Α και Β είναι 3 sec ενώ η χρονική διαφορά στο μονοφασικό σφάλμα για τον ίδιο ζυγό είναι 3,25 sec.



Σχήμα 7.27: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σεναρίου Α και Β

7.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Α και Γ

Η σύγκριση μεταξύ σεναρίων Α και Γ κρίνεται επίσης αναγκαία για την εκτίμηση των βελτιώσεων του συστήματος κατά την προσθήκη συμβατικής γεννήτριας στον ζυγό 6 και κατά τη διείσδυση ισχύος Φ/Β πάρκου στο ζυγό 5. Παρατηρείται βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος κατά το σενάριο Γ όσο αφορά τα σφάλματα σε υψηλό ποσοστό καθώς προσφέρεται περισσότερος χρόνος για την εκκαθάριση των σφαλμάτων σύμφωνα με το Σχήμα 7.28, ωστόσο η συμπεριφορά του συστήματος για τα σφάλματα του ζυγού 6 χειροτερεύει με έντονη διαφορά σε χρονική διάρκεια στο μονοφασικό σφάλμα 1,65 sec. Τέλος, η βελτίωση στον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του μονοφασικού σφάλματος στο ζυγό 5 είναι σχεδόν αμελητέα κατά το σενάριο Γ.



Σχήμα 7.28: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σε-
ναρίου Α και Γ

7.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων Β και Γ

Για την σφαιρική εικόνα του συστήματος θα πρέπει να εκτιμηθούν οι βελτιώσεις του συστήματος συγκρίνοντας τα σενάρια Β και Γ. Παρόλο που η διεύθυνση ισχύος Φ/Β πάρκου στο ζυγό 5 είχε ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες για το σύστημα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.29, ωστόσο η συμπεριφορά του κατά την εμφάνιση σφαλμάτων στους ζυγούς 1,2 και 6 χειροτερεύει στο σενάριο Γ σε σχέση με το Β. Ιδιαίτερα αισθητή είναι η χρονική διαφορά 1,7 sec κατά το στερεό τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 6, όπου το σενάριο Β προσφέρει περισσότερο χρόνο εκκαθάρισης σε σχέση με το Γ.



Σχήμα 7.29: Σύγκριση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων σε-
ναρίου Β και Γ

7.5.4 Εύρεση καλύτερου και χειρότερου σεναρίου ανά ζυγό

Βάσει των ενοτήτων 7.5.1, 7.5.2 και 7.5.3 παρατηρείται ότι η προσθήκη συμβατικής γεννήτριας και Φ/Β πάρκου βελτιώνει τη συμπεριφορά του δικτύου για τα σφάλματα που έχουν εξεταστεί στους ζυγούς 1, 2, 5 και 6. Κατασκευάζοντας τον Πίνακα 7.21 ο οποίος περιέχει τα καλύτερα και χειρότερα σενάρια ανά ζυγό, παρατηρείται ότι το σύστημα του σεναρίου Β είχε την καλύτερη συμπεριφορά σε ποσοστό 75% ενώ την χειρότερη είχε το σύστημα του σεναρίου Α σε ποσοστό 50%. Αν και το σενάριο Γ είχε τις λιγότερες απώλειες πραγματικής ισχύος και αποτελούσε βελτίωση του σεναρίου Α κυρίως λόγω των μεγαλύτερων χρονικών διαφορών των χρόνων εκκαθάρισης των σφαλμάτων στους ζυγούς 1 και 2 σε σχέση με το σενάριο Α, οι χρόνοι εκκαθάρισης των σφαλμάτων ήταν χειρότεροι σε σχέση με το σενάριο Β.

Πίνακας 7.21: Καλύτερο και χειρότερο σενάριο ανά ζυγό

	Καλύτερο σενάριο		Χειρότερο σενάριο	
	3φ	1φ	3φ	1φ
Ζυγός 1	Β	Β	Α	Α
Ζυγός 2	Β	Β	Α	Α
Ζυγός 5	Α	Γ	Β/Γ	Β
Ζυγός 6	Β	Β	Γ	Γ

Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η σχεδίαση Φ/Β συστήματος σε πραγματικό γεωτεμάχιο καθώς και μελετήθηκε το πρότυπο σύστημα 30 ζυγών κατά την ενσωμάτωση Φ/Β πάρκων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής η σχεδίαση του συστήματος βασίστηκε σε σταθερές βάσεις με εμπόδια σκίασης με γωνία κλίσης 20° για τη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας κατά τη θερινή περίοδο. Καθοριστικό ρόλο κατά τη σχεδίαση είχαν η επιλογή της απόστασης δυο διαδοχικών σειρών, η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης και οι τύποι των μονάδων και των αντιστροφών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς προσδιόριζαν τον αριθμό των κλάδων (strings) και τον τρόπο εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων. Ιδιαίτερη προσοχή έπρεπε να δοθεί στον τρόπο τοποθέτησης των strings πάνω στις συστοιχίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.39 ώστε να απλοποιηθούν οι συνδέσεις τους στους αντίστοιχους αντιστροφείς.

Στο δεύτερο μέρος μελετήθηκε η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος 30 ζυγών με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την βελτίωση της ποιότητας του συστήματος. Αρχικά το σύστημα παρουσίαζε υψηλές απώλειες, οριακή υπερφόρτωση γεννήτριας ζυγού αναφοράς και υπερφορτώσεις γραμμών μεταφοράς. Κατά την τοποθέτηση 1 συμβατικής γεννήτριας στο σύστημα, απελευθερώθηκε η γεννήτρια του ζυγού αναφοράς και μειώθηκαν οι απώλειες του συστήματος. Έπειτα λήφθηκε υπόψη διείσδυση ισχύος 25% της συνολικής παραγόμενης πραγματικής ισχύος από Φ/Β πάρκο με σκοπό την μελέτη της μόνιμης λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρήθηκε αισθητή μείωση των απωλειών παρόλο που υπήρχε μικρή υπερφόρτωση της γεννήτριας του ζυγού 2. Και στα δυο σενάρια, ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου ζυγού εγκατάστασης κρίθηκε απαραίτητη για την μείωση των απωλειών καθώς και την αναγκαία εγκατάσταση παράλληλης γραμμής 6-8.

Έπειτα μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος κατά την εμφάνιση στερεού τριφασικού και μονοφασικού σφάλματος στους ζυγούς 1, 2, 5 και 6. Κατά τη σύγκριση αποτελε-

σμάτων κρίθηκε ως καλύτερο σενάριο το Β καθώς το σύστημα αυτό εξασφάλιζε περισσότερο χρόνο ώστε να εκκαθαριστούν τα σφάλματα ενώ το σενάριο Α κρίθηκε ως το χειρότερο. Παρόλο που η διείσδυση ισχύος από Φ/Β πάρκο στο ζυγό 5 του συστήματος παρείχε τις μικρότερες απώλειες, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι οι χρόνοι εκκαθάρισης των σφαλμάτων ήταν μικρότεροι σε σχέση με το σενάριο Β, γεγονός που διακρίνεται με την σύγκριση των κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης σφαλμάτων στους ζυγούς 1, 2, 5 και 6 μεταξύ των βελτιωμένων συστημάτων των σεναρίων Β και Γ.

Από τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας έγιναν ξεκάθαροι οι περιορισμοί σχεδιασμού και εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων. Από την πλευρά της σχεδίασης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο χώρος και το περιβάλλον εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος. Οι περιορισμοί αυτοί καθορίζουν και την τελική παραγόμενη ισχύ προς το δίκτυο κατανάλωσης. Από την πλευρά της μελέτης της μόνιμης και της μεταβατικής λειτουργίας ενός ΣΗΕ πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες του ΣΗΕ, το ποσοστό διεισδύσεως ισχύος Φ/Β συστημάτων καθώς και η ανταπόκριση του συστήματος σε σφάλματα ζυγών. Η επιλογή της θέσης της εγκατάστασης του Φ/Β πάρκου δεν πρέπει να πραγματοποιείται αποκλειστικά με γνώμονα τις ελάχιστες δυνατές απώλειες καθώς διαπιστώθηκε ότι η διείσδυση Φ/Β πάρκου στο συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να χειροτερέψει τη συμπεριφορά του δικτύου σε σφάλματα ζυγών.

8.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιορίζεται στη προσομοίωση Φ/Β συστήματος και στην μελέτη μόνιμης και μεταβατικής λειτουργίας ενός ΣΗΕ. Όσο αφορά το σχεδιασμό εγκατάστασης, μπορούν να αναλυθούν οι καλωδιώσεις, οι διατάξεις προστασίας καθώς και το μονογραμμικό διάγραμμα τόσο της εγκατάστασης όσο και των πινάκων προστασίας της. Είναι επίσης εφικτή η διερεύνηση του οικονομικού κόστους και η αναφορά στο νομοθετικό πλαίσιο το οποίο πρέπει να στηριχθεί η μελέτη για τη νόμιμη εφαρμογή της. Όσο αφορά τη μελέτη ενός ΣΗΕ, μπορεί να διερευνηθεί η βέλτιστη οικονομική λειτουργία του.

Βιβλιογραφία

- [1] «Conference, Paris Climate Change,» November 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://unfccc.int/documents/184656>.
- [2] «ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2023/1791 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ για την ενεργειακή απόδοση και την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2023/955,» 13 Σεπτεμβρίου 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2023_231_R_0001&qid=1695186598766.
- [3] «Primary and final energy consumption in Europe,» 27 Μαρτίου 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/primary-and-final-energy-consumption>.
- [4] «IEA, Renewables 2023, IEA, Paris,» Ιανουάριος 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
- [5] «ΑΔΜΗΕ, 2023: A Record Year for Renewable Energy Sources - The Evolution of the Energy Mix in the Decade,» 30 Ιανουαρίου 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/nea/deltia-typoy/hronia-rekor-2023-gia-tin-kathari-energeia-stin-ellada>.
- [6] Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, 2019.
- [7] A. & D. A. & Q. A. & A. A. & R. R. Sangi, «Improving the performance of silicon solar cell by optimizing metallization. Measurement and Control,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://tinyurl.com/48z5st5e>.
- [8] «To Solar PV Junction Box,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gr.dsnsolar.com/info/the-solar-pv-junction-box-54220386.html>.
- [9] «Solar Cell I-V Characteristic Curves,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>.
- [10] K. R. S. M. G. M. K. A. N. A. Parimita Mohanty, «PV System Design for Off-Grid Applications,» [Ηλεκτρονικό]. Available:

- https://www.researchgate.net/publication/281972861_PV_System_Design_for_Off-Grid_Applications.
- [11] Γ. Κ. Μ. Τ. Φ. Σ. Μωυσής Δαμιανίδης, «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων,» ΤΕΕ ΤΚΜ, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [12] Ι. Ν. Κιοσκερίδης, ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΣΙΟΛΑ, 2021.
- [13] ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, «Net metering,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Net_metering.
- [14] ΔΕΔΔΗΕ, «Τεχνικό Εγχειρίδιο για την εγκατάσταση της μετρητικής διάταξης παραγωγής στις εσωτερικές εγκαταστάσεις αυτοπαραγωγών με ενεργειακό συμψηφισμό (net metering),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://tinyurl.com/4s6b9dxy>.
- [15] PVSYST, «Meteonorm,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/meteo_source_meteonorm.htm.
- [16] Ν. Α. Β. Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2008.
- [17] Βικιπαίδεια, «Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://tinyurl.com/27auepfx>.
- [18] Γ. Β. Γ. Νικόλαος Α. Βοβός, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, 2008.
- [19] S. J. CHAPMAN, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2014.
- [20] T. J. O. M. S. S. J. Duncan Glover, POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, CENGAGE LEARNING, 2016.
- [21] Nikos Hatziaargyriou, Jovica Milanovic, Claudia Rahmann, Venkataramana Ajjarapu, Claudio Canizares, Istvan Erlich, David Hill, Ian Hiskens, Innocent Kamwa, Bikash Pal, Pouyan Pourbeik, Juan Sanchez-Gasca, Aleksandar Stankovic, Thierry Van Cutsem, Vijay Vittal και Costas Vournas, «Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, τόμ. 36, αρ. 4, 2021.

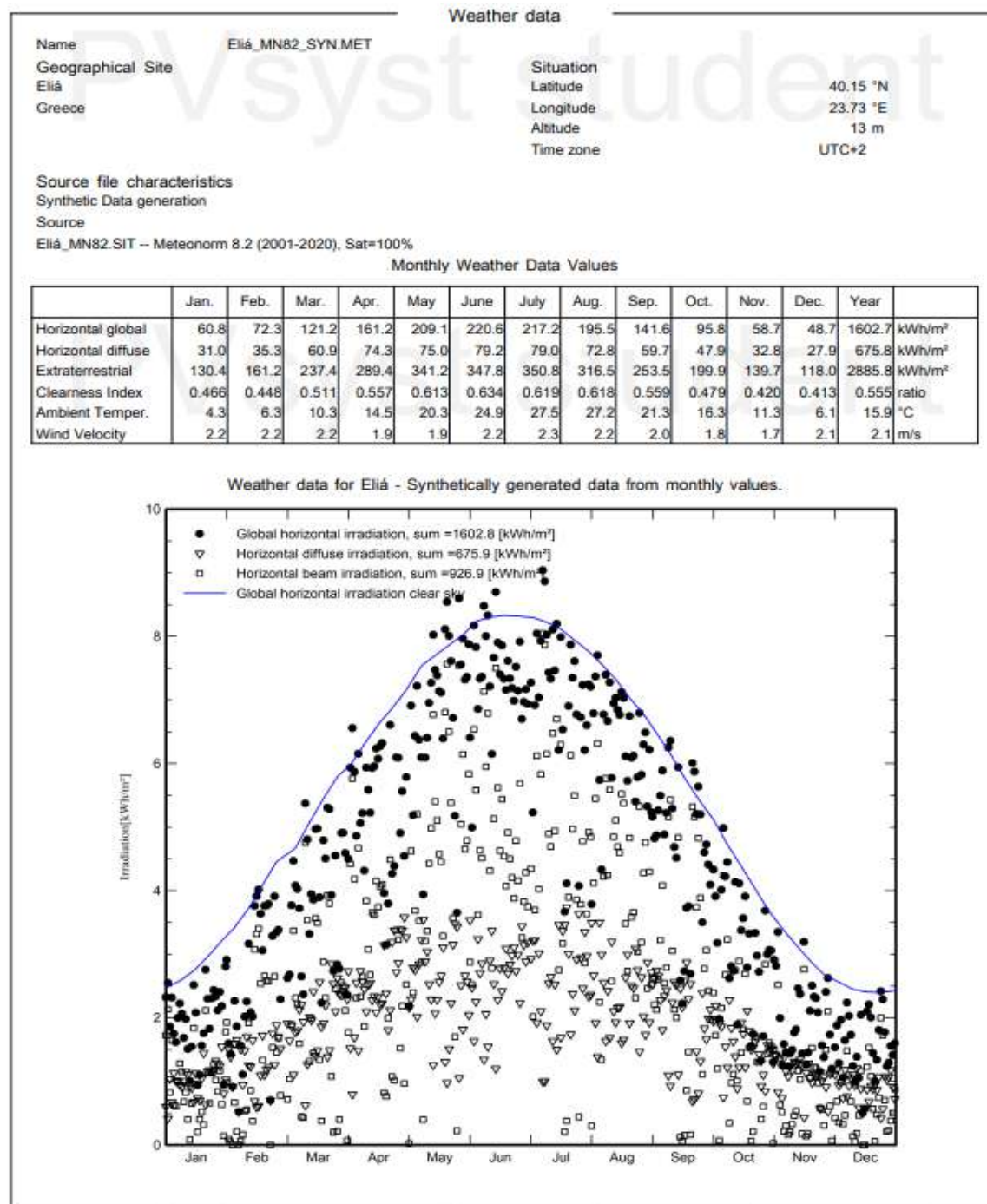
- [22] G. C. O. E. -. U. o. Illinois, «IEEE 30-Bus System,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>.
- [23] K. -. U. o. Cyprus, «IEEE 30-bus modified test system,» 31 3 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/index.php/ieee-30-bus-modified-test-system/>.
- [24] W. E. C. Council, «Generic Solar Photovoltaic System,» 2012.
- [25] John A. Duffie και William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2013.
- [26] G. RENEWABLES, «On-Grid or Off-Grid Solar Power Systems: Which is Better?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gserenewables.com/blog/on-grid-and-off-grid-solar-power-system/>.
- [27] ΔΕΔΔΗΕ, «Το Δίκτυο Ηλεκτρισμού,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/>.
- [28] Γ. Β. Γ. Νικόλαος Α. Βοβός, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ζήτη, 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

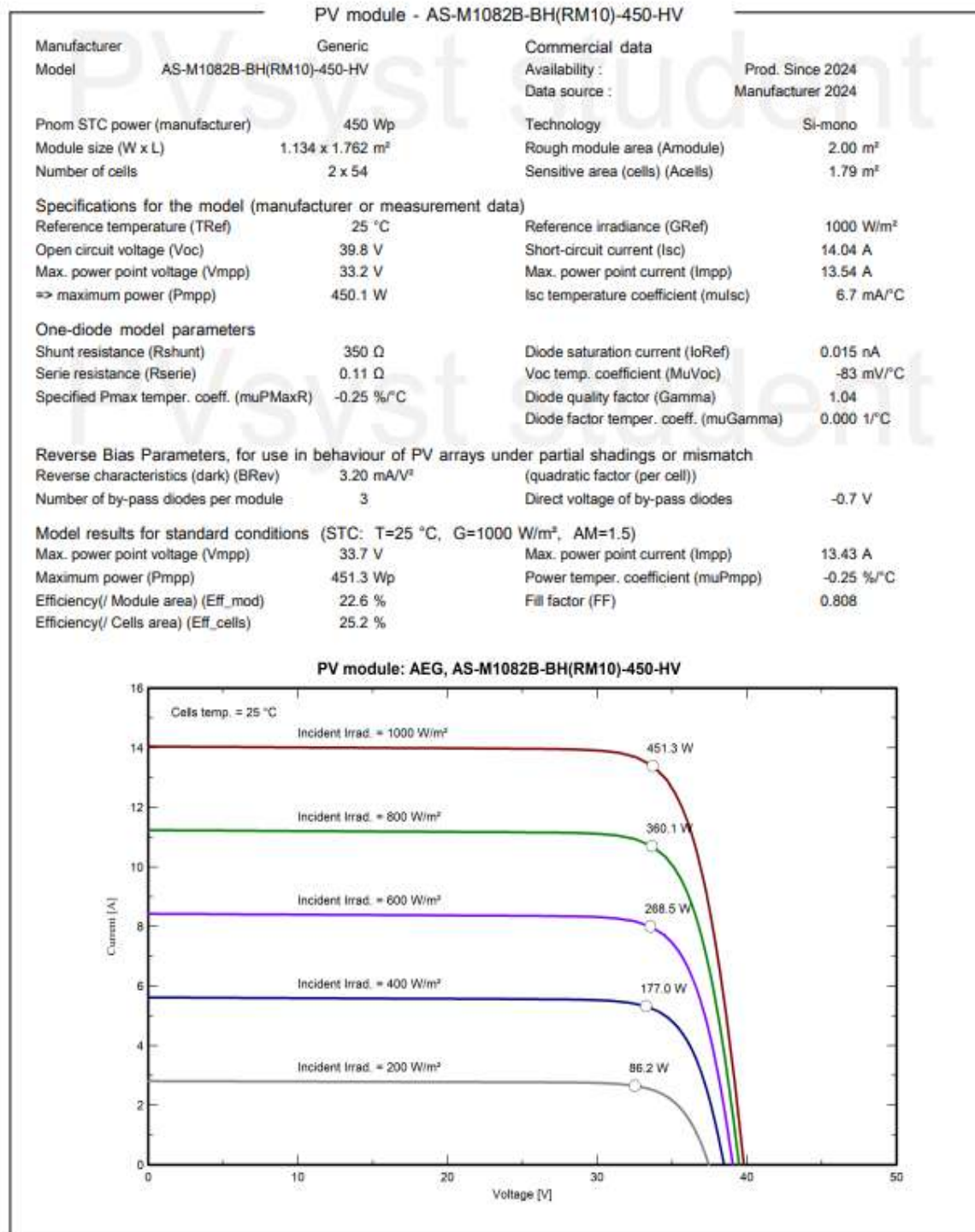


PVsyst V8.0.6

KONSTANTINOS THOMAS (Greece)



Εικόνα Π1: Αρχείο δεδομένων καιρού από PVSYST

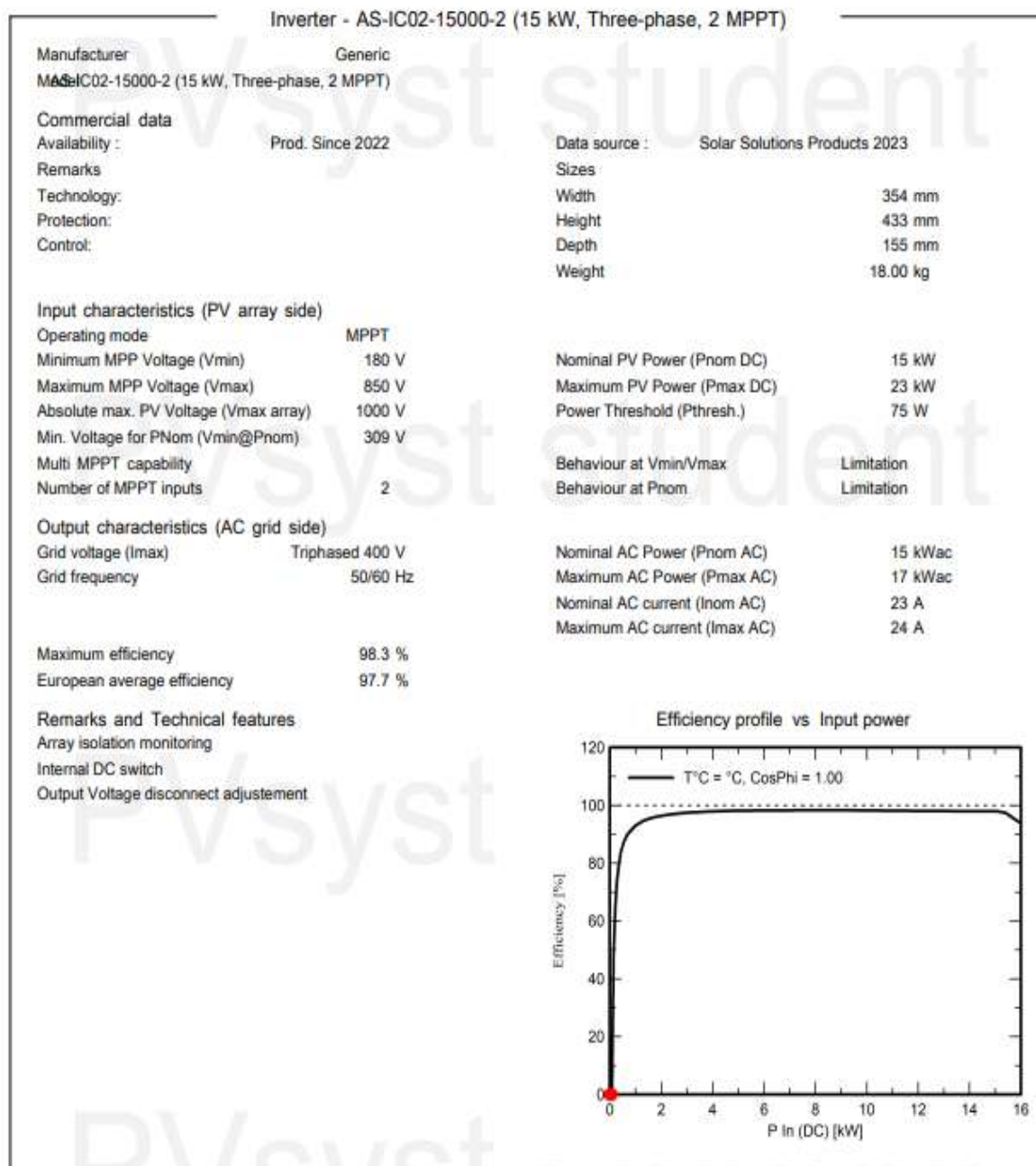


Εικόνα Π2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β μονάδας AEG



PVsyst V8.0.6

KONSTANTINOS THOMAS (Greece)

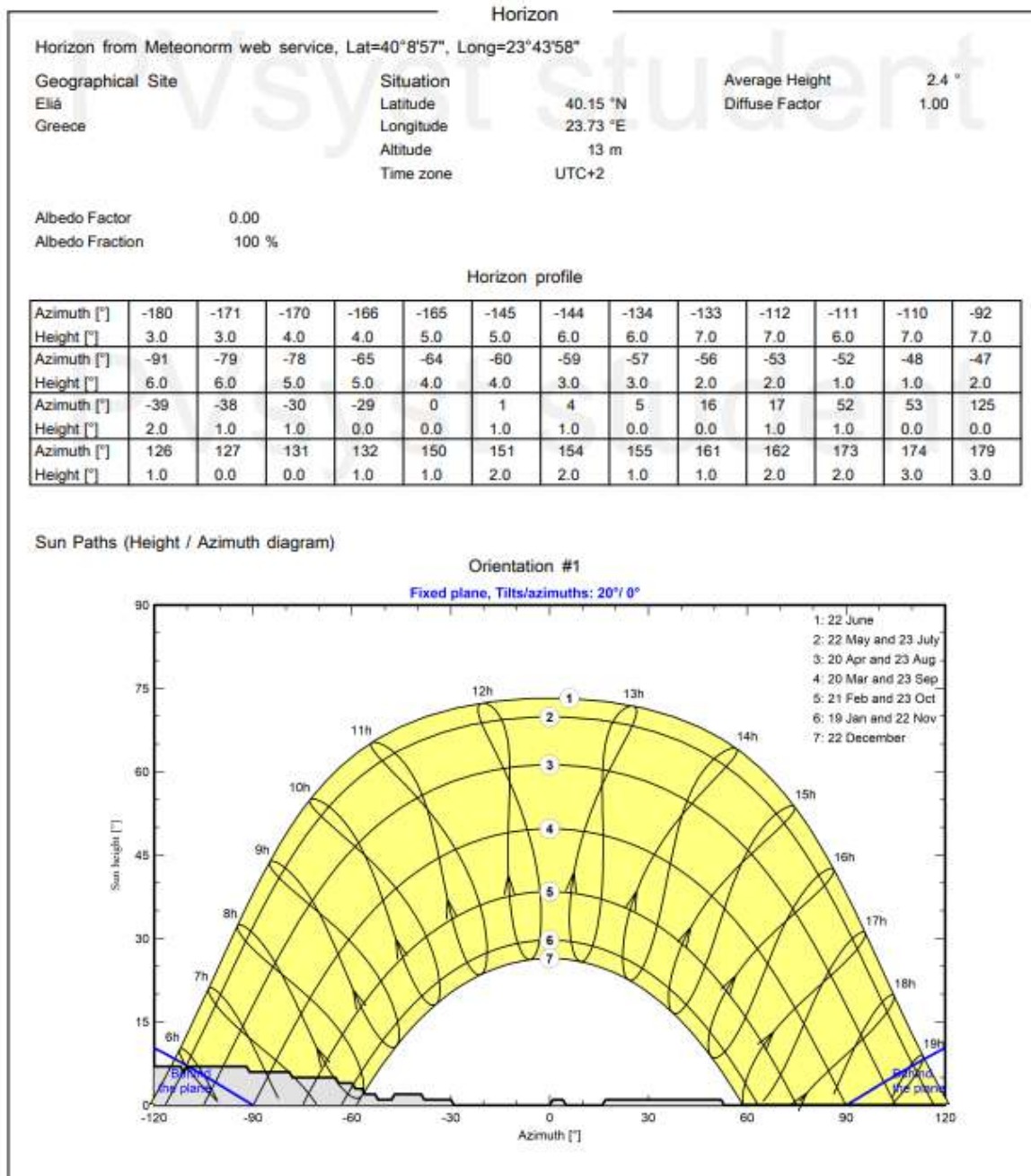


Εικόνα Π3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα AEG



PVsyst V8.0.6

KONSTANTINOS THOMAS (Greece)



Εικόνα Π4: Ηλιακός χάρτης του ενδεικτικού γεωτεμάχου με σκίαση ορίζοντα (με γκρι)

Πίνακας Π1: Δυναμικά δεδομένα Φ/Β πάρκου (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές)

REGC_A	Z5	REEC_A	Z5	REPC_A	Z5
LVPLSW	1	Vdip	0,85	RefFlag	1
rrpwr	10	Vup	1,15	VcompFlag	1
brkpt	0,9	kqv	5	Tfltr	0,05
zerox	0,5	lqh1	1,1	Kp	10
LVPL1	1,22	lql1	-1,1	Ki	10
Vlim	1,2	Thld2	0,5	Tfv	3
LVPnt1	0,8	Qmax	0,436	Vfrz	0,7
LVPnt0	0,4	Qmin	-0,436	Kc	1
Td	0,04	Vmax	1,1	emax	1
T_LVPV	0,02	Vmin	0,9	emin	-1
Qmin	-1,3	Kqi	0,1	Qmax	1
Khv	0,7	Kvp	18	Qmin	-1
		Kvi	5	Kpg	10
		dPmax	99	Kig	10
		dPmin	-99	femax	1
		Pmax	1	femin	-1
		lmax	1,3	Pmax	2
				Tlag	3
				Ddn	20

Πίνακας Π2: Δυναμικά δεδομένα γεννητριών και σύγχρονων αντισταθμίσεων για τη γεννήτρια και τον διεγέρτη (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές)

GENROU	Z1/Z6	Z2	Z5/Z8	Z11/Z13
H	4,13	5,078	1,52	1,2
D	2	2	0	0
Ra	0,0016	0	0	0,0025
Xd	1,7	1,27	2,373	1,769
Xq	1,62	1,24	1,172	0,855
Xdp	0,256	0,209	0,343	0,304
Xqp	0,245	0,85	1,172	0,5795
Xdpp=Xqpp	0,185	0,116	0,231	0,2035
Xl	0,155	0,108	0,132	0,1045
Tdop	4,8	6,6	11,6	8
Tqop	0,004	0,004	0,159	0,008
Tdopp	0,04	0,04	0,058	0,0525
Tqopp	0,04	0,04	0,201	0,04
S(1.0)	0,125	0,2067	0,295	0,304
S(2.0)	0,45	0,724	0,776	0,666

IEEE T1	Z1/Z6	Z2	Z5/Z8	Z11/Z13
Ka	30	400	400	400
Ta	0,4	0,05	0,05	0,05
Vrmax	4,59	613	6,63	4407
Vrmin	-4,59	-613	-6,63	-4407
Ke	-0,02	-0,0769	-0,17	-0,17
Te	0,56	1,37	0,95	0,95
Kf	0,05	0,4	0,04	0,04
Tf	1,3	1	1	1
E1	2,5875	3,0975	6375	4,2375
SE1	0,7298	0,1117	0,2174	0,2174
E2	3,45	4,13	8,5	5,65
SE2	1,3496	0,2248	0,9388	0,9386

Πίνακας Π3: Δυναμικά δεδομένα γεννητριών για ρυθμιστή στροβίλου (μηδέν στις υπόλοιπες τιμές)

BPA_GG	Z1/Z6	Z2
Pmax	0,8518	1035
R	0,0185	0,1523
T1	0,1	0,2
T3	259	0,3
T4	0,1	0,09
T5	10	0
F	272	1