



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ανάλυση Ενδεχόμενων Καταστάσεων σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής
Ενέργειας με Διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων**

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Σκόρδας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

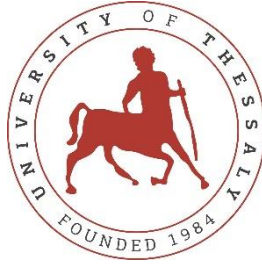
**Ανάλυση Ενδεχόμενων Καταστάσεων σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής
Ενέργειας με Διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων**

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Σκόρδας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Contingency Analysis in an Electric Power Grid with PV System
Penetration**

Diploma Thesis

Nikolaos Skordas

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

September 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Δημήτριος Μπαργιώτας

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Ελευθέριος Κόντης

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

Μέλος

Σπυρίδων Λουτρίδης

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

Νικόλαος Σκόρδας

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

Nikolaos Skordas

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δημήτριο Μπαργιώτα, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την επιστημονική του υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του ήταν καθοριστική τόσο σε επίπεδο γνώσεων όσο και σε επίπεδο εμπύχωσης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. Ελευθέριο Κοντή και κ. Σπυρίδωνα Λουτρίδη, για τον χρόνο που διέθεσαν, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ επίσης τους φίλους μου, για τη διαρκή συμπαράσταση και τις στιγμές κατανόησης σε περιόδους πίεσης. Η παρουσία τους αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα σε αυτό το απαιτητικό αλλά δημιουργικό ταξίδι.

Τέλος, ένα βαθύ και θερμό ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την αμέριστη αγάπη, τη στήριξη και την υπομονή τους. Χωρίς εκείνους, η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας δεν θα ήταν δυνατή.

Ανάλυση Ενδεχόμενων Καταστάσεων σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας με Διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Νικόλαος Σκόρδας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων για διαφορετικές ενδεχόμενες καταστάσεις (Contingency analysis - μόνιμη κατάσταση). Η μελέτη εξετάζει την επίδραση της παραγωγικής διαμόρφωσης του συστήματος καθώς επίσης και της μερικής κάλυψης της ζήτησης από φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα σενάρια που θα εξεταστούν είναι η βέλτιστη γεωγραφική κατανομή της παραγωγής ενέργειας, η παραγωγή από φωτοβολταϊκά για διάφορα ποσοστά διείσδυσης επί της ολικής παραγωγής καθώς και η ανάλυση για διαφορετικές ενδεχόμενες καταστάσεις (contingency analysis). Θα εξεταστούν επίσης σενάρια για Transient Stability Contingency (Ενδεχόμενες καταστάσεις μεταβατικής ευστάθειας).

Σκοπός της έρευνας είναι ο σχεδιασμός και η ορθή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ως προς την αξιοπιστία και την ευστάθεια υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και για διάφορες ενδεχόμενες καταστάσεις ή πιθανά προβλήματα στο δίκτυο, θα γίνει αξιολόγηση της ποιότητας και η σταθερότητάς του. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό PowerWorld Simulator έδειξαν ότι η αποκεντρωμένη διάταξη φωτοβολταϊκών μονάδων συμβάλλει στη μείωση υπερτάσεων και στη βελτίωση της κατανομής φορτίων σε σχέση με τη κεντροποιημένη, ενώ η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης PV στα επίπεδα του 20% και 40% μειώνει τα περιθώρια ευστάθειας και αυξάνει την πιθανότητα αποκλίσεων τάσης. Επιπλέον, από τη μελέτη των ενδεχόμενων καταστάσεων μεταβατικής ευστάθειας προέκυψε ότι οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος: στα τριφασικά βραχυκυκλώματα (3LG) οι χρόνοι είναι οι

μικρότεροι και περιορίζονται ακόμη περισσότερο ανάλογα με την κρισιμότητα της γραμμής μεταφοράς που χάνεται πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα και την απόσταση του βραχυκυκλώματος από αυτήν. Ενώ στα μονοφασικά ως προς την γη σφάλματα (SLG) οι χρόνοι είναι μεγαλύτεροι, δίνοντας στο σύστημα μεγαλύτερα περιθώρια απόκρισης. Η σύγκριση δείχνει ότι η απόκριση του συστήματος όταν αυτό λειτουργεί υπό N-1 ενδεχόμενες καταστάσεις επηρεάζει αρνητικά και τις δύο κατηγορίες σφαλμάτων, με πιο έντονη επιβάρυνση στα τριφασικά, τα οποία καθορίζουν και τα οριακά κριτήρια ευστάθειας. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η ορθή χωρική κατανομή και ο κατάλληλος σχεδιασμός μπορούν να ενισχύσουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων με υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών.

Λέξεις-κλειδιά: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Φωτοβολταϊκά, Διείσδυση Φωτοβολταϊκών, Ανάλυση Ενδεχόμενων Καταστάσεων, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Ανάλυση Ενδεχομένων Καταστάσεων Μεταβατικής Ευστάθειας, Κρίσιμος Χρόνος Εκκαθάρισης, Σχετική Γωνία Γεννητριών, Υπερφορτώσεις, Αποκλίσεις Τάσης, Ενδεχόμενη Κατάσταση N-1, Βέλτιστη Κατανομή Παραγωγής, Αξιοπιστία Συστήματος.

Contingency Analysis in an Electric Power Grid with PV System Penetration

Nikolaos Skordas

Abstract

This diploma thesis focuses on the analysis of an electric power system with the integration of photovoltaic (PV) systems under different contingency scenarios (steady-state contingency analysis). The study examines the impact of the system's generation configuration, as well as the partial coverage of demand by photovoltaic units. The scenarios under investigation include the optimal geographical distribution of generation, the penetration of photovoltaics at various levels of the total production, and the assessment of the system under different contingency conditions. Scenarios of Transient Stability Contingency are also considered.

The objective of this research is the design and proper operation of a power system with integrated photovoltaic units, with respect to its reliability and stability under various operating conditions and possible contingencies or network faults. The evaluation also includes an assessment of the system's power quality and stability. Simulations carried out with the PowerWorld Simulator demonstrated that a decentralized arrangement of PV units contributes to the reduction of overvoltages and improves load distribution compared to the centralized configuration. On the other hand, increasing the PV penetration levels to 20% and 40% reduces the system's stability margins and increases the likelihood of voltage deviations.

Furthermore, the transient stability analysis showed that the critical clearing times vary depending on the type of fault: in the case of three-phase short circuits (3LG), the clearing times are the shortest and become even more restricted depending on the criticality of the transmission line lost before the fault and the distance of the fault from it. In contrast, in

single line-to-ground faults (SLG), the clearing times are longer, giving the system more response time. The comparison highlights that the system's response under N-1 contingency conditions negatively affects both categories of faults, with a more severe impact on three-phase faults, which ultimately define the stability limits. Overall, the results indicate that proper spatial distribution and careful planning can enhance the stability and reliability of power systems with high photovoltaic penetration.

Keywords: Power System, Renewable Energy Sources, Photovoltaics, PV Penetration, Contingency Analysis, Power Flow Analysis, Contingency Stability Analysis, Critical Clearing Time, Generator Relative Angle, Overloads, Voltage Deviations, N-1 Contingency, Optimal Generation Allocation, System Reliability.

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>xxii</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxvii</i>
<i>Συντομογραφίες.....</i>	<i>xxix</i>
Κεφάλαιο 1	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής	3
1.2.1 Συνεισφορά.....	3
1.3 Οργάνωση του τόμου	4
Κεφάλαιο 2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	7
2.1 Ορισμός και Βασική Δομή	7
2.1.1 Παραγωγή	8
2.1.2 Μεταφορά	9
2.1.3 Διανομή.....	10
2.2 Ανάλυση Συστήματος.....	11
2.2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου	11
2.2.2 Ανάλυση Σφαλμάτων	13
2.3 Ευστάθεια Συστήματος	15
2.3.1 Ευστάθεια Γωνίας Ρότορα	17
2.3.2 Ευστάθεια Τάσης	18
2.3.3 Ευστάθεια Συχνότητας.....	19
2.4 Αξιοπιστία Συστήματος	20

2.4.1 Δείκτες Αξιοπιστίας.....	20
2.4.2 Αξιολόγηση Αξιοπιστίας	22
2.5 Προστασία Συστήματος	23
2.5.1 Προστατευτικές Διατάξεις	23
2.5.2 Αποκατάσταση Ομαλής Λειτουργίας.....	26
Κεφάλαιο 3 Ηλιακή ενέργεια και Φωτοβολταϊκά	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών.....	31
3.2.1 Μονοκρυσταλλικά Πάνελ	32
3.2.2 Πολυκρυσταλλικά Πάνελ	33
3.2.3 Thin-film Πάνελ.....	34
3.3 Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	35
3.3.1 Μεταβλητή Παραγωγή	36
3.3.2 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion).....	37
Κεφάλαιο 4 Ενδεχόμενα Σενάρια σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	40
4.1 Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης.....	40
4.2 Ανάλυση Μεταβατικής Ευστάθειας.....	43
4.2.1 Κρίσιμος Χρόνος Εκκαθάρισης	45
4.2.2 Σταθμισμένη Μέση Αδράνεια	46
4.2.3 Ηλεκτρική Εμπέδηση	47
4.2.4 Υπομεταβατική και Μεταβατική Αντίδραση	48
4.2.5 Υπομεταβατική και Μεταβατική Σταθερά Χρόνου	49
4.3 Ασφάλεια σε Ενδεχόμενες Καταστάσεις	50
4.3.1 Στατική Αξιολόγηση Ασφάλειας	51
4.3.2 Δείκτες Ασφάλειας.....	53
Κεφάλαιο 5 Προσομοιώσεις Σεναρίων Λειτουργίας με Powerworld.....	54
5.1 Βασικά Στοιχεία Δικτύου	54
5.2 Μελέτη Ροής Φορτίου	56
5.2.1 Σύστημα χωρίς Διείσδυση PV	57
5.2.2 Σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη).....	59
5.2.3 Σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη)	62
5.2.4 Σύστημα με 40% Διείσδυση PV.....	64

5.3 Μελέτη N-1 Ενδεχομένων Καταστάσεων	67
5.3.1 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος χωρίς Διείσδυση PV	67
5.3.2 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) .	70
5.3.3 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη)	73
5.3.4 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 40% Διείσδυση PV	76
5.3.5 Συμπεράσματα από τις Προσομοιώσεις Ενδεχομένων Καταστάσεων.....	78
5.4 Μελέτη Ενδεχομένων Καταστάσεων Μεταβατικής Ευστάθειας	80
5.4.1 3LG στην γραμμή 4-5 προς τον ζυγό 5.....	81
5.4.2 SLG στην γραμμή 4-5 προς τον ζυγό 5	86
5.4.3 3LG στην γραμμή 12-6 προς τον ζυγό 6.....	91
5.4.4 SLG στην γραμμή 12-6 προς τον ζυγό 6.....	96
5.4.5 Συμπεράσματα από την Μελέτη Μεταβατικής Ευστάθειας Ενδεχομένων Καταστάσεων	101
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....	103
6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	103
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	104
Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Οι λειτουργίες ενός παραδοσιακού ΣΗΕ [22].	11
Εικόνα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Κίνα από το 2010 έως το 2022 [3].	30
Εικόνα 3.3: α. Το Mohammed Bin Rashid Al Maktoum, β. Το Noor Solar Park, γ. Tengger Desert Solar Park [19].	31
Εικόνα 3.4: Μονοκρυσταλλικό κελί πυριτίου και φωτοβολταϊκό πάνελ [21].	33
Εικόνα 3.5: Πολυκρυσταλλικό κελί και πλέγμα πυριτίου [21].	34

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 5.1 Το δίκτυο χωρίς διείσδυση PV μετά την OPF.....	59
Σχήμα 5.2 Το δίκτυο με 20% διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) μετά από OPF.....	61
Σχήμα 5.3 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από OPF.	64
Σχήμα 5.4 Το δίκτυο 40% Διείσδυση PV μετά από OPF.....	66
Σχήμα 5.5 Το δίκτυο μετά από το άνοιγμα της γραμμής 1-2 και την ανάλυση OPF.....	68
Σχήμα 5.6 Το δίκτυο μετά από το άνοιγμα της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.	69
Σχήμα 5.7 Το δίκτυο μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.....	70
Σχήμα 5.8 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 1-2 και την ανάλυση OPF.	71
Σχήμα 5.9 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.	72
Σχήμα 5.10 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.....	73
Σχήμα 5.11 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 1-2 και την ανάλυση OPF.	74
Σχήμα 5.12 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.	75
Σχήμα 5.13 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.....	76
Σχήμα 5.14 Το δίκτυο με 40% Διείσδυση PV μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.....	77
Σχήμα 5.15 Το δίκτυο με 40% Διείσδυση PV μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.....	78
Σχήμα 5.16 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,35 sec.)	82
Σχήμα 5.17 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,36 sec.	83
Σχήμα 5.18 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,36 sec.	83

Σχήμα 5.19 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,37 sec.)	85
Σχήμα 5.20 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,38 sec.	85
Σχήμα 5.21 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,38 sec.	86
Σχήμα 5.22 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,38 sec.)	87
Σχήμα 5.23 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,39 sec.	88
Σχήμα 5.24 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,39 sec.	88
Σχήμα 5.25 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,41 sec.)	90
Σχήμα 5.26 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,42 sec.	90
Σχήμα 5.27 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,42 sec.	91
Σχήμα 5.28 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1 sec.)	92
Σχήμα 5.29 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,1 sec.	93
Σχήμα 5.30 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,1 sec.	93
Σχήμα 5.31 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1,3 sec.)	95
Σχήμα 5.32 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,4 sec.	95
Σχήμα 5.33 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,4 sec.	96
Σχήμα 5.34 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,46 sec.)	97

Σχήμα 5.35 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,47 sec.	98
Σχήμα 5.36 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,47 sec.	98
Σχήμα 5.37 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1,4 sec.)	100
Σχήμα 5.38 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,5 sec.	100
Σχήμα 5.39 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,5 sec.	101

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 5.1 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος χωρίς διείσδυση PV.....	57
Πίνακας 5.2 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος χωρίς διείσδυση PV.....	58
Πίνακας 5.3 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος με 20% διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη).59	
Πίνακας 5.4 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος με 20% διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη).	60
Πίνακας 5.5 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη). ..	62
Πίνακας 5.6 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη).	62
Πίνακας 5.7 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος 40% Διείσδυση PV.	64
Πίνακας 5.8 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος 40% Διείσδυση PV.....	65
Πίνακας 5.9 Στοιχεία μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας.	81
Πίνακας 5.11 Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης ευστάθειας.	101

Συντομογραφίες

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΣΑ	Στατική Αξιολόγηση Ασφάλειας
ΜΤ	Μέση Τάση
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερ Υψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
AC	Alternating Current
AGC	Automatic Generation Control
ASAI	Average Service Availability Index
CCT	Critical Clearing Time
CVT	Capacitor Voltage Transformer
CTA	Contingency Transient Analysis
DC	Direct Current
DER	Distributed Energy Resources
DG	Distributed Generation
ENS	Energy Not Supplied
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
HVDC	High Voltage Direct Current
IED	Intelligent Electronic Device
IHD	Individual Harmonic Distortion
PCC	Point of Common Coupling

PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

PLC Programmable Logic Controller

PV PhotoVoltaics

RTDS Real Time Digital Simulator

SAIDI System Average Interruption Duration Index

SAIFI System Average Interruption Frequency Index

SCC Short Circuit Capacity

SSA Steady State Analysis

THD Total Harmonic Distortion

TSA Transient Stability Analysis

WAMS Wide Area Measurement System

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) σήμερα έχουν εξελιχθεί από αυτά που γνωρίζαμε παλαιότερα, καθώς έχουν ενσωματωθεί τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), αποθήκευσης μέσω μπαταριών, ευέλικτης μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος (FACTS), συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC), κ.ά. [1]. Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας σε συνδυασμό με την αύξηση του συνολικού φορτίου αλλάζουν την δυναμική συμπεριφορά των ΣΗΕ και τα αναβαθμίζουν σε πιο έξυπνα και πολύπλοκα συστήματα [1]. Αυτά τα Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids) αποτελούν το μέλλον των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Πρόκειται για αυτοματοποιημένα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογίες επικοινωνιών και δικτύων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαφορετικών λειτουργιών τους [2]. Ωστόσο, τα Έξυπνα Δίκτυα χρειάζονται προσεκτικό σχεδιασμό καθώς η αυτοματοποιημένη λειτουργία τους ενδέχεται να προκαλέσει μεταβολές τάσεων και ρευμάτων και να υποβαθμίσει την ποιότητα της ισχύος [2]. Η ταχεία απόκριση του εξοπλισμού, όπως η είσοδος και η έξοδος μονάδων παραγωγής από το δίκτυο, προκαλεί αρμονικές παραμορφώσεις στην τάση του δικτύου και οδηγούν σε αστάθεια του συστήματος [2]. Προκύπτει έτσι η ανάγκη οι βιομηχανίες ενέργειας να επενδύσουν στον ορθό σχεδιασμό, έλεγχο και ασφάλεια των Έξυπνων Δικτύων καθώς τα υπάρχοντα δίκτυα δεν είναι σε θέση να ενσωματώσουν εύκολα αυτά τα συστήματα [2]. Επιπλέον, τα Έξυπνα Δίκτυα χρειάζονται έξυπνους διαχειριστές και γι' αυτό επιβάλλεται το ανθρώπινο δυναμικό να είναι εξοικωμένο με τις νέες τεχνολογίες και να διαθέτει τις απαραίτητες δεξιότητες [2]. Οι βιομηχανίες ενέργειας βλέποντας την ενεργειακή κρίση και την κλιματική αλλαγή να απειλούν την κοινωνία και τον πλανήτη, οδηγήθηκαν στην υιοθέτηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας για την παραγωγή ισχύος, καθώς είναι πιο καθαρές και βιώσιμες επιλογές σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα [3]. Τα τελευταία χρόνια οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν γίνει εξαιρετικά δημοφιλείς στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στους βιομηχανικούς όσο και στους οικιακούς καταναλωτές εξαιτίας της αφθονίας τους [4]. Ειδικότερα, η ηλιακή ενέργεια λόγω της

απλότητας και της εύκολης αξιοποίησής της από φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των παραγωγών ενέργειας [4]. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι τοποθετημένα αυτή τη στιγμή ανά τον κόσμο έχουν εγκατεστημένη ισχύ αρκετά GW σε χώρες με υψηλά ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ [4]. Ωστόσο, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκαν ώστε η παραγωγή ενέργειας να γίνεται με συμβατικά καύσιμα, προκαλώντας αρκετές προκλήσεις στην λειτουργία και στην ευστάθειά τους με την ενσωμάτωση ΑΠΕ [2]. Καταρχάς, η λανθασμένη τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ και η κακή χωροταξία του δικτύου, αποδυναμώνουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και υποβαθμίζουν την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος [5]. Επιπλέον, η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει την αδράνεια του συστήματος, το οποίο επηρεάζει την μεταβατική ευστάθειά του (Transient Stability) μειώνοντας την αντοχή του σε ξαφνικά σφάλματα [6]. Ταυτόχρονα, η κατανεμημένη παραγωγή με φωτοβολταϊκά εμπεριέχει έναν υψηλό βαθμό τυχαιότητας καθώς είναι σημαντικά εξαρτώμενη από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις περιοχές με εγκατεστημένα πάνελ [5]. Η μεταβλητή παραγωγή προκαλεί αύξηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης στο σημείο κοινής σύνδεσης και αποτελεί ένα πρόβλημα που ταλανίζει τόσο την παραγωγή όσο και τους καταναλωτές [2]. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αποτελεί μια δαπανηρή διαδικασία καθώς χρειάζονται συστήματα για την διενέργεια μετρήσεων και εκπαιδευμένο προσωπικό [2]. Οι ΑΠΕ παίζουν καίριο ρόλο στην ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούν έναν σημαντικό τομέα ενδιαφέροντος που εξετάζεται διαρκώς, προκειμένου να αναθεωρηθούν τα υπάρχοντα συστήματα [2,6]. Η τεχνολογική ανάπτυξη των δικτύων και η υιοθέτηση αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας φέρνει σοβαρά προβλήματα στην υλοποίηση, στην λειτουργία, στον έλεγχο, στην αξιοπιστία και στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος [5]. Κρίνεται απαραίτητο, λοιπόν, να γίνουν δοκιμές και προσομοιώσεις σε συστήματα με ενσωματωμένες ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τον προσεκτικό σχεδιασμό του δικτύου, για την εύρεση ενός αξιόπιστου, βιώσιμου και ασφαλούς συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [6].

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση ενδεχόμενων καταστάσεων σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας με διείσδυση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Η παρουσία φωτοβολταϊκών εισάγει σημαντικές προκλήσεις, όπως η μεταβλητότητα και αβεβαιότητα της παραγωγής, η μείωση της συστημικής αδράνειας και η πιθανότητα εμφάνισης κρίσιμων αποκλίσεων τάσης, συχνότητας ή γωνίας ρότορα κατά τη διάρκεια σφαλμάτων ή διαταραχών. Αυτά τα προβλήματα καθιστούν το δίκτυο πιο ευάλωτο σε σενάρια αστάθειας και απώλειας αξιοπιστίας. Η εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση αυτών των φαινομένων μέσω μεθόδων ανάλυσης ροής φορτίου και μεταβατικής ευστάθειας, εφαρμόζοντας κατάλληλους δείκτες απόδοσης όπως δείκτες τάσης και ισχύος και προσομοιώσεις για διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης φωτοβολταϊκών. Μέσα από αυτή την ανάλυση, επιδιώκεται η ιεράρχηση των πιο κρίσιμων σεναρίων και η διατύπωση στρατηγικών για τη βελτίωση της σταθερότητας και της ασφάλειας λειτουργίας του δικτύου.

1.2.1 Συνεισφορά

Συγκεκριμένα, μέσω της μελέτης ασφάλειας N-1 αποδείχθηκε ότι η χωρική κατανομή της PV παραγωγής έχει καθοριστική σημασία για τη σταθερότητα του συστήματος, καθώς η αποκεντρωμένη διάταξη περιορίζει τις υπερφορτίσεις και τις αποκλίσεις τάσης σε σχέση με την συγκεντρωτική. Παράλληλα, μέσω της διερεύνησης της μεταβατικής ευστάθειας προσδιορίστηκαν με ακρίβεια τα χρονικά όρια εντός των οποίων πρέπει να εκκαθαρίζονται τα σφάλματα, προκειμένου να αποτραπεί η απώλεια συγχρονισμού και η κατάρρευση του συστήματος. Η συμβολή της εργασίας συνοψίζεται στην ανάδειξη τριών βασικών σημείων: (α) η αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκών μειώνει τα περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος, (β) η αποκεντρωμένη διάταξη παραγωγής είναι σαφώς πιο αποδοτική από την κεντροποιημένη, και (γ) οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας. Μέσα από αυτά τα ευρήματα, η εργασία παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για τον σχεδιασμό όσο και για την προστασία μελλοντικών ΣΗΕ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

1.3 Οργάνωση του τόμου

Το Κεφάλαιο 2 προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της δομής και της λειτουργίας των ΣΗΕ. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η βασική αρχιτεκτονική τους, με έμφαση στα τρία βασικά στάδια: παραγωγή, μεταφορά και διανομή. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι βασικές μέθοδοι μελέτης των ΣΗΕ, όπως η ανάλυση ροής φορτίου και η ανάλυση σφαλμάτων. Επιπλέον, θα συζητηθεί η ευστάθεια του συστήματος, καλύπτοντας την ευστάθεια γωνίας ρότορα, τάσης και συχνότητας, καθώς και η αξιοπιστία των ΣΗΕ μέσα από δείκτες αξιοπιστίας και μεθόδους αξιολόγησης. Τέλος, θα παρουσιαστεί η προστασία του συστήματος, οι βασικές προστατευτικές διατάξεις και οι διαδικασίες αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας μετά από σφάλματα ή διακοπές.

Το Κεφάλαιο 3 αναδεικνύει τη βασική έννοια της ηλιακής ενέργειας και τη σημασία της στην ηλεκτροπαραγωγή. Θα παρουσιαστούν οι τρεις κύριες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά και thin-film), με ανάλυση των χαρακτηριστικών και των περιοχών εφαρμογής τους. Επιπλέον, θα εξεταστεί η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στα ΣΗΕ, αναδεικνύοντας τις προκλήσεις που προκύπτουν από τη μεταβλητή παραγωγή και την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD), καθώς και οι επιπτώσεις τους στη σταθερότητα και την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει τον τρόπο που μπορεί να αναλυθεί η συμπεριφορά του ΣΗΕ κάτω από διάφορες λειτουργικές συνθήκες. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η ανάλυση μόνιμης κατάστασης του συστήματος, ενώ στη συνέχεια θα εξεταστεί η μεταβατική ευστάθεια μέσω κρίσιμων παραμέτρων όπως ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης, η σταθμισμένη μέση αδράνεια, η ηλεκτρική εμπέδηση και οι σταθερές χρόνου υπομεταβατικής και μεταβατικής αντίδρασης. Τέλος, θα αναλυθεί η ασφάλεια του ΣΗΕ, με παρουσίαση της στατικής αξιολόγησης ασφάλειας (ΣΣΑ) και των σχετικών δεικτών, ώστε να γίνει σαφές πώς διασφαλίζεται η λειτουργία του υπό ενδεχόμενες καταστάσεις.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει μια πλήρη περιγραφή του μοντέλου του ΣΗΕ που χρησιμοποιείται στην ανάλυση. Θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία των προσομοιώσεων με το Powerworld, περιλαμβάνοντας τα διάφορα σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με ανάλυση και

σχόλια για τις παρατηρούμενες τάσεις και σχετικές γωνίες των γεννητριών και συζητήσεις για τυχόν αποκλίσεις ή ενδιαφέροντα ευρήματα.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα βασικά ευρήματα της εργασίας. Ο αναγνώστης θα βρει συνοπτική ανασκόπηση των σημαντικότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη θεωρητική και πρακτική ανάλυση των ΣΗΕ και των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις ή βελτιώσεις στη μεθοδολογία και στην εφαρμογή των ΣΗΕ, δίνοντας κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα ή εφαρμογές.

Κεφάλαιο 2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Ορισμός και Βασική Δομή

Εξ'ορισμού τα ΣΗΕ είναι δίκτυα που διαθέτουν εξοπλισμό για την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με βασικά κριτήρια την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την αποδοτικότητά τους [7]. Συνεπώς, πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν διαρκώς ποιοτική και οικονομική ισχύ στους καταναλωτές [7]. Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα ΣΗΕ είναι η τάση και το ρεύμα τα οποία υπακούν στην συχνότητας του δικτύου, η οποία για την χώρα μας είναι 50 Hz, και είναι σημαντικό οι τιμές τους να κυμαίνονται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους [1]. Στα παραδοσιακά ΣΗΕ η ροή ισχύος και πληροφοριών μέσα στο σύστημα είναι μονόδρομη από την παραγωγή στην κατανάλωση και οι καταναλωτές δεν έχουν την δυνατότητα να αποφασίσουν τον τρόπο και τον χρόνο που λαμβάνουν ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα δεν γνωρίζουν κάθε στιγμή το κόστος της ενέργειας που καταναλώνουν [8]. Επιπλέον, οι περισσότερες λειτουργίες γίνονται χειροκίνητα από τους διαχειριστές με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ταχύτητα απόκρισης του συστήματος σε ενδεχόμενα σφάλματα ή αυξομειώσεις φορτίου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια, αυξημένο λειτουργικό κόστος, κακή ποιότητα ισχύος και αποκοπή φορτίων ή γενικό blackout [9]. Ο κύκλος της ηλεκτρικής ισχύος στα ΣΗΕ ξεκινά με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι είναι συνήθως υδροηλεκτρικές ή θερμικές μονάδες, όπως ντιζελογεννήτριες και υδροηλεκτρικά εργοστάσια αλλά και αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα [8,9]. Οι δύο τελευταίες μονάδες παρέχουν ελάχιστη ή και μηδενική αδράνεια στο δίκτυο, καθώς δεν διαθέτουν περιστρεφόμενες μάζες, ωστόσο, έχουν γρηγορότερη απόκριση από τις συμβατικές γεννήτριες [10]. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως συγκεντρωμένη σε μια περιοχή του δικτύου μακριά από τα φορτία [8,10]. Μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης, οι οποίοι βρίσκονται σε υποσταθμούς κοντά στις μονάδες παραγωγής, η τάση αυξάνεται με σκοπό την μεταφορά μέσω γραμμών μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες ισχύος [9,10]. Στη συνέχεια, η ισχύς εισέρχεται στο δίκτυο διανομής και προτού φτάσει στον τελικό καταναλωτή, η

τάση μειώνεται ξανά στα απαραίτητα επίπεδα λειτουργίας για τις ηλεκτρικές συσκευές ή εγκαταστάσεις [9].

2.1.1 Παραγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από διάφορες μορφές ενέργειας όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, η πυρηνική ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία [9]. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday ο οποίος αναφέρει ότι ο ηλεκτρισμός μπορεί να παραχθεί μέσω της κίνησης ενός βρόχου καλωδίου ή ενός δίσκου από χαλκό ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη [9]. Η πλειονότητα της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες έχουν ονομαστική ισχύ αρκετά MW, και αποτελούν έναν αξιόπιστο τρόπο μετατροπής της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια [11,p.17]. Αυτές οι γεννήτριες διαθέτουν την ικανότητα στην μόνιμη κατάσταση να λειτουργούν τόσο με σταθερή ταχύτητα όσο και συχνότητα [11,p.17]. Τα βασικά τους μέρη είναι ο στάτης, που είναι το σταθερό μέρος, και ο δρομέας, που είναι το περιστρεφόμενο [31,p.17-18]. Ο δρομέας περιστρέφεται από κάποιον στρόβιλο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μαγνητικό πεδίο [11,p.18]. Στη συνέχεια, μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, αντίθετης φοράς, από το μαγνητικό και άρα παράγεται τάση [11,p. 17]. Η τάση που παράγεται γίνεται σε επίπεδα συνήθως 11 kV, 13.2 kV ή 13.8 kV [10]. Στο μέλλον αναμένεται οι ΑΠΕ να παίξουν καίριο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς τα ορυκτά καύσιμα αρχίζουν να εξαντλούνται και η καύση τους είναι εξαιρετικά ρυπογόνα διαδικασία [9]. Εκτός από συγκεντρωμένη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι διασκορπισμένη (DG) σε διάφορα σημεία του δικτύου αξιοποιώντας τις ΑΠΕ για την παραγωγή ποιοτικής και αξιόπιστης ισχύος [9]. Οι καταναεμημένοι ενεργειακοί πόροι (DER) όπως τα φωτοβολταϊκά αποτελούν μικρές γεννήτριες, ισχύος μερικών kW, οι οποίες παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, εισάγουν ορισμένες προκλήσεις στο ΣΗΕ [9]. Καταρχάς, όταν πρόκειται για συγκεντρωμένη παραγωγή, η εγκατάστασή τους χρειάζεται συνήθως αρκετό χώρο ώστε η παραγωγή τους να είναι ικανοποιητική και η απόδοση τους να είναι σταθερή [9]. Το πρόβλημα αυτό λύνεται, εν μέρη, με την αξιοποίηση της αποκεντρωμένης παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα της παραγωγής αυτών των μονάδων [9]. Επίσης, το κόστος εγκατάστασης και το λειτουργικό κόστος των μονάδων είναι αρκετά υψηλό σε

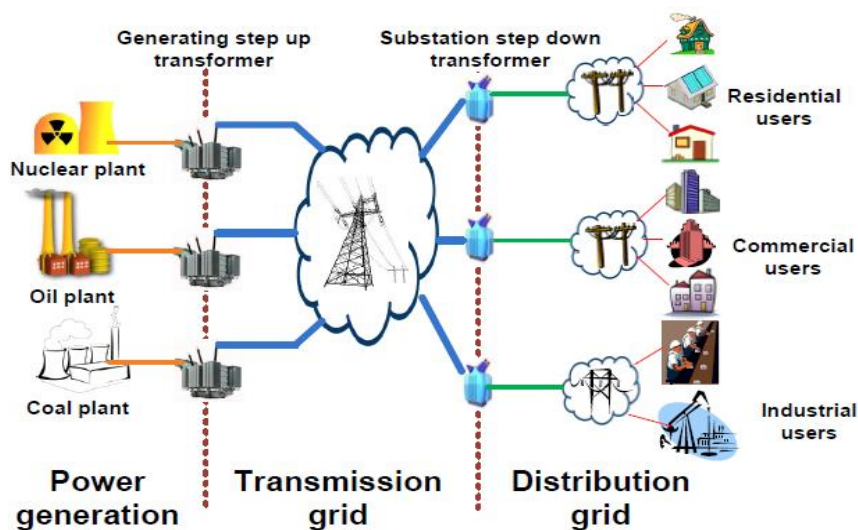
σχέση με τις συμβατικές γεννήτριες καθιστώντας τες λιγότερο ελκυστικές για τους παραγωγούς ενέργειας [9].

2.1.2 Μεταφορά

Το μεταφορικό δίκτυο περιλαμβάνει γραμμές μεταφοράς, υποσταθμούς και συστήματα προστασίας και ελέγχου [9,10]. Τα συστήματα προστασίας και ελέγχου προσφέρουν δυνατότητες ανάλυσης της κατάστασης και της συμπεριφοράς του δικτύου, παρακολούθησης σημαντικών μεγεθών όπως η τάση και η συχνότητα, ταχείας ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων προτού προκληθούν σημαντικότερα προβλήματα [9]. Ειδικότερα, οι νέες τεχνολογίες αισθητήρων, για την μέτρηση της τάσης, της συχνότητας και του ρεύματος συμβάλουν στη βελτίωση της αξιοποίησης της ισχύος, της ποιότητας της ενέργειας και διασφαλίζουν την ασφάλεια του ΣΗΕ [9]. Στο ΣΗΕ οι υποσταθμοί βρίσκονται στα σημεία όπου η τάση μετασχηματίζεται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο επίπεδο και η λειτουργίες τους περιλαμβάνουν την αυτοματοποίηση, τον συντονισμό και τον έλεγχο του επιπέδου τάσης του συστήματος [9]. Υποστηρίζοντας αυτά τα χαρακτηριστικά, ένας υποσταθμός μπορεί να ανταποκρίνεται άμεσα και να παρέχει αυξημένη ασφάλεια για τους χειριστές του [9]. Βασικό στοιχείο των υποσταθμών είναι οι μετασχηματιστές [11,p. 23]. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως αναφέραμε γίνεται σε χαμηλά επίπεδα τάσης για την οικονομική λειτουργία των γεννητριών [11,p. 23]. Προκειμένου να αυξηθεί η φόρτιση των γραμμών και να γίνεται πιο αποτελεσματική η μεταφορά της ισχύος, δηλαδή να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω της αντίστασης των καλωδίων και του αέρα, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης [11,p. 23]. Οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν ισχύ υψηλής τάσης (ΥΤ) της τάξης των 220 kV ή υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) της τάξης των 500 kV [10]. Στη συνέχεια, αυτό το επίπεδο τάσης υποβιβάζεται σε διάφορα χαμηλότερα επίπεδα μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης για την διανομή της ισχύος ανάλογα με την χρήση που επιθυμεί ο καταναλωτής [11,p. 23]. Η τοπολογία του δικτύου μεταφοράς είναι συνήθως πλέγματος, ώστε να προσφέρει εναλλακτικές διαδρομές ροής ισχύος, αυξάνοντας την αξιοπιστία και τη δυνατότητα ανακατανομής φορτίων σε περιπτώσεις βλαβών ή συντήρησης [7].

2.1.3 Διανομή

Το τελικό στάδιο του κύκλου ηλεκτρικής ισχύος περιλαμβάνει τη διανομή της ενέργειας στους καταναλωτές μεσαίας και χαμηλής τάσης [10]. Στους υποσταθμούς μέσης τάσης (MT) φτάνει ισχύς ΥΤ και ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού μετατρέπει την ΥΤ σε MT η οποία είναι συνήθως 11 kV ώστε να διανεμηθεί στους καταναλωτές MT, όπως οι βιομηχανίες [10]. Έπειτα, η ισχύς MT μεταφέρεται με γραμμές διανομής προς νέους μετασχηματιστές υποβιβασμού και μετατρέπεται σε χαμηλή τάση (ΧΤ) της τάξης των 400 V για τροφοδοσία των οικιακών καταναλωτών [10]. Η μεγαλύτερη πρόκληση που καλείται να επιλύσει το δίκτυο διανομής είναι πώς θα διανεμηθεί η ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο που να εξυπηρετεί καλύτερα τους τελικούς χρήστες [9]. Καθώς πολλοί διεσπαρμένοι παραγωγοί ενσωματώνονται στο δίκτυο, από τη μία αυξάνεται η ευελιξία του συστήματος ως προς την παραγωγή ισχύος, διότι η παραγωγή βρίσκεται πιο κοντά στην κατανάλωση, όμως από την άλλη ο έλεγχος της ροής ισχύος γίνεται μια πολύ πιο περίπλοκη διαδικασία [9]. Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στις διακυμάνσεις της τάσης και η απόδοσή του εξαρτάται από την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος, η οποία επηρεάζεται από καιρικές συνθήκες και βραχυκυκλώματα [9]. Γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται ευρέως αισθητήρες για την μέτρηση του ρεύματος και της τάσης με δυνατότητες ελέγχου και παρακολούθησης των μεγεθών σε πραγματικό, συμβάλλοντας στην ορθή διαχείριση της ισχύος που φτάνει στους καταναλωτές [9]. Οι αισθητήρες αυτοί είναι κατασκευασμένοι με μεγάλη ακρίβεια και επιτελούν λειτουργίες ανίχνευσης σφαλμάτων σε γραμμές διανομής και προστασίας του δικτύου διανομής [9]. Φαινόμενα όπως η υπερθέρμανση των γραμμών διανομής και η διάβρωση των αγωγών εντοπίζονται και διορθώνονται με ταχύτητα και ευκολία, ενώ παράλληλα ενεργοποιούνται, εάν κρίνεται απαραίτητο, πυκνωτές εξομάλυνσης τάσης για την σταθεροποίηση του συστήματος [9]. Αυτός ο εξοπλισμός καθιστά το δίκτυο διανομής πιο αποδοτικό και ασφαλές εφόσον έχει την ικανότητα αυτόματης αναδρομολόγησης της ροής ισχύος, ώστε να μεγιστοποιείται η διαθεσιμότητά της στους οικιακούς και βιομηχανικούς καταναλωτές [9]. Στην Εικόνα 2.1 απεικονίζεται η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή ισχύος σε ένα σύγχρονο ΣΗΕ.



Εικόνα 2.1: Οι λειτουργίες ενός παραδοσιακού ΣΗΕ [22].

2.2 Ανάλυση Συστήματος

Η Ανάλυση των ΣΗΕ είναι απαραίτητη για τη σωστή κατανόηση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Μέσω της ανάλυσης, μπορούν να εντοπιστούν αδυναμίες, να προβλεφθούν πιθανά προβλήματα και να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την ενίσχυση της ευστάθειας, της αξιοπιστίας και την διασφάλιση της προστασίας τους. Η σωστή λειτουργία των ΣΗΕ είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα σήμερα, όπου το ενεργειακό τοπίο μεταβάλλεται με την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ. Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ΣΗΕ περιλαμβάνουν την Ανάλυση Ροής Φορτίου (Load Flow Analysis) και την Ανάλυση Βραχυκυκλωμάτων (Fault Analysis). Η πρώτη μορφή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τάσεων και ρών ισχύος, ενώ η δεύτερη μελετά τη συμπεριφορά του συστήματος για διάφορες περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, όπως συμμετρικά και ασύμμετρα.

2.2.1 Ανάλυση Ροής Φορτίου

Η Ανάλυση Ροής Φορτίου (Load Flow Analysis) αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τη μελέτη και τη λειτουργική αξιολόγηση των ΣΗΕ [12]. Στόχος της είναι ο υπολογισμός των τάσεων σε κάθε κόμβο, των φάσεων, των ρών ενεργού και άεργου ισχύος σε όλες τις γραμμές, καθώς και των απωλειών ισχύος στο σύστημα υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης (steady-state) [12]. Αρχικά, είναι απαραίτητο να κατασκευάσουμε τον πίνακα

σύνθετων αγωγιμοτήτων Y_{bus} καθώς είναι σημαντικό για την ανάλυση να γνωρίζουμε τον τρόπο που είναι συνδεδεμένες οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές του συστήματος με τα στοιχεία που τον συνθέτουν [11,ρ. 94]. Ο Y_{bus} περιέχει όλα τα παθητικά στοιχεία του συστήματος και για ένα σύστημα με n ζυγούς οι διαστάσεις του είναι $n \times n$ [11,ρ. 52]. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του πίνακα και των ροών ισχύος βασίζονται στους νόμους του Kirchhoff και είναι μη γραμμικές [12]. Εκφράζονται ως συναρτήσεις της τάσης, της φάσης και των χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως η αγωγιμότητα και η μαγνητική αγωγιμότητα μεταξύ των κόμβων. Οι βασικές εξισώσεις ροής φορτίου για τον κάθε κόμβο i είναι:

$$P_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cdot \cos\theta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin\theta_{ij})$$

$$Q_i = V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cdot \sin\theta_{ij} + B_{ij} \cdot \cos\theta_{ij})$$

Όπου P_i , Q_i είναι η ενεργός και άεργος ισχύς που εισέρχεται στον κόμβο i , η V_i είναι το μέτρο τάσης στον κόμβο i , G_{ij} και B_{ij} είναι η αγωγιμότητα και η μαγνητική αγωγιμότητα μεταξύ των κόμβων i και j και θ_{ij} είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των κόμβων i και j [12]. Η μέθοδος Newton–Raphson είναι η πλέον διαδεδομένη για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου [13]. Βασίζεται στη γραμμικοποίηση των εξισώσεων μέσω ανάπτυξης Taylor και στην επαναληπτική επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων που περιλαμβάνει τον πίνακα Jacobian και το διάνυσμα των υπολοίπων [13]. Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$J(xk) \cdot \Delta xk = -F(xk)$$

$$x(k+1) = xk + \Delta xk$$

Όπου $J(xk)$ είναι ο πίνακας Jacobian και περιέχει τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων ως προς τις αγνώστους, Δxk είναι το διάνυσμα διόρθωσης δηλαδή πόσο πρέπει να μεταβληθούν οι τιμές του xk για να προσεγγίσουν τη λύση, $F(xk)$ είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων μεταξύ υπολογιζόμενης και επιθυμητής ισχύος στους κόμβους και x_{k+1} είναι το νέο διάνυσμα τιμών μετά την εφαρμογή της διόρθωσης [13].

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης:

$$||\Delta xk|| < \varepsilon$$

με ε ένα πολύ μικρό θετικό όριο [13]. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από ταχεία σύγκλιση όταν η αρχική εκτίμηση είναι κοντά στη λύση, όμως μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα σύγκλισης σε περιπτώσεις κακώς δρομολογημένων συστημάτων ή όταν η αρχική εκτίμηση είναι ακατάλληλη [13]. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχει προταθεί η

συνεχής μέθοδος Newton (Continuous Newton's Method) [13]. Σε αυτή τη μέθοδο, το πρόβλημα ροής φορτίου μετασχηματίζεται σε σύστημα διαφορικών εξισώσεων αρχικών τιμών, το οποίο μπορεί να επιλυθεί με μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης όπως Runge-Kutta ή Euler [13]. Η βασική εξίσωση της μεθόδου είναι:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -J(x(t))^{-1}F(x(t)), \quad x(0) = x_0$$

Όπου $x(t)$ είναι το διάνυσμα των αγνώστων ως συνάρτηση του χρόνου, $dx(t)/dt$ είναι ο ρυθμός μεταβολής του διανύσματος λύσης ως προς τον χρόνο και $J(x(t))$ είναι ο αντίστροφος πίνακας Jacobian ο οποίος χρησιμοποιείται για να κατευθύνει τη λύση προς τη σωστή κατεύθυνση [13]. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει αυξημένη σταθερότητα και είναι πιο ανθεκτική σε κακές αρχικές εκτιμήσεις [13]. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι σε μεγάλα ή πολύπλοκα δίκτυα, όπου η παραδοσιακή μέθοδος Newton–Raphson δυσκολεύεται να συγκλίνει [13]. Η αξιοπιστία των παραπάνω μεθόδων ενισχύεται με τη χρήση σύγχρονων περιβαλλόντων προσομοίωσης όπως το RTDS (Real Time Digital Simulator) και το PowerWorld [12]. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν την προσομοίωση της ροής φορτίου τόσο σε κανονικές όσο και σε διαταραγμένες συνθήκες λειτουργίας, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για την τάση, τη ροή ισχύος και τη σταθερότητα του συστήματος σε πραγματικό χρόνο [12]. Έτσι, οι μελετητές μπορούν να αξιολογούν τη συμπεριφορά του συστήματος, να εντοπίζουν αδυναμίες και να σχεδιάζουν μέτρα ενίσχυσης της αξιοπιστίας και της ασφάλειας [12]. Συνοψίζοντας, η ανάλυση ροής φορτίου είναι ουσιαστικής σημασίας για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των σύγχρονων δικτύων ισχύος [12,13]. Οι μέθοδοι Newton–Raphson και Continuous Newton καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες ακρίβειας και σταθερότητας, ενώ η εφαρμογή τους σε σύγχρονα ψηφιακά περιβάλλοντα καθιστά δυνατή την αξιόπιστη προσομοίωση και αξιολόγηση πολύπλοκων ηλεκτρικών συστημάτων [13].

2.2.2 Ανάλυση Σφαλμάτων

Ο όρος σφάλμα αναφέρεται για να περιγράψει μια ξαφνική και ανεπιθύμητη διαταραχή που συμβαίνει στο ΣΗΕ η οποία ενδέχεται να επηρεάσει την φυσιολογική λειτουργία του με καταστροφή του εξοπλισμού του και καταπόνηση του δικτύου [14]. Ένα σφάλμα προκαλεί πολύ υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώματος τα οποία μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα σε σημεία του δικτύου [14]. Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε συμμετρικά

και ασύμμετρα [14]. Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα επηρεάζουν μία ή δύο φάσεις και χωρίζονται σε μονοφασικά μιας γραμμής με την γη (L-G), διφασικά μεταξύ δύο γραμμών (L-L) και διφασικά δύο γραμμών με την γη (L-L-G) [14]. Αυτά τα σφάλματα είναι τα πιο πιθανά να συμβούν σε ένα ΣΗΕ σε σχέση με τα συμμετρικά [14]. Τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα είναι τριφασικά, δηλαδή οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους, και ρέει το μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκυκλώματος από όλες τις περιπτώσεις σφαλμάτων, καθιστώντας τα πιο επικίνδυνα για το σύστημα εάν δεν απομονωθούν εγκαίρως [14]. Η αντοχή ενός σημείου στο δίκτυο μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της ανάλυσης βραχυκυκλώματος στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC), αναλύοντας το σύστημα από την πλευρά του φορτίου [10]. Συνεπώς, είναι σκόπιμο να αξιολογείται η μονάδα παραγωγής που είναι συνδεδεμένη στο PCC, χρησιμοποιώντας τον δείκτη δυσκαμψίας του δικτύου ή λόγο ισχύος βραχυκυκλώματος (Grid Stiffness Index ή Short-circuit Ratio) [10]. Για την ανάλυση μετατρέπουμε όλα τα φυσικά μεγέθη του συστήματος στο ισοδύναμο ανά μονάδα σύστημα (per unit) και η ισχύς βραχυκυκλώματος (SCC) υπολογίζεται ως το γινόμενο της προσφαλματικής τάσης επί το ρεύμα βραχυκυκλώματος [3, 11, p. 162]. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος υπολογίζεται από την μετασφαλματική τάση στο σημείο του βραχυκυκλώματος διαιρεμένη με την συνολική αντίσταση που “φαίνεται” από το σημείο που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα [3, 11, p. 163]. Οι εξισώσεις είναι :

$$SCC = |V_{pre}| \cdot |I_{sc}| \text{ pu MVA}$$

$$I_{sc} = \frac{V_{sc}}{Z_{th}} \text{ pu A}$$

Ο υπολογισμός της Z_{th} γίνεται με τη χρήση του θεωρήματος του Thevenin [11, p. 163]. Στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνουμε την τάση στο σημείο του βραχυκυκλώματος ίση με 1 pu και τότε η ισχύς βραχυκυκλώματος είναι ίση με το ρεύμα βραχυκυκλώματος [3]. Οι προστατευτικές διατάξεις όπως τα ρελέ και οι διακόπτες ισχύος παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία απομόνωσης του σημείου που συμβαίνει το σφάλμα από το υπόλοιπο σύστημα για να προστατευτεί η πλειονότητα του δικτύου [14]. Οι διακόπτες ισχύος σχεδιάζονται και επιλέγονται βάσει της ικανότητάς τους να διακόπτουν το ρεύμα, λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα βραχυκυκλώματος μέχρι το ρελέ να ξεπεράσει το όριο ενεργοποίησής του [14]. Για την διασφάλιση της ασφάλειας του συστήματος είναι ορθότερο να γίνεται η αποκοπή του σημείου του βραχυκυκλώματος στο αρχικό στάδιο του σφάλματος, διότι ενδέχεται να μην μπορέσει να διακόψει την ροή του ρεύματος

βραχυκυκλώματος προς το υγιές κομμάτι του δικτύου, λόγω της εσωτερικής αγωγιμότητας τόξου [14]. Η ισχύς βραχυκυκλώματος ενός ζυγού αποτελεί και έναν δείκτη της αντοχής του σε βραχυκυκλώματα [3,14]. Μια μικρή τιμή του δείκτη υποδηλώνει ότι στο σημείο η τάση θα υποστεί μια μεγάλη και απότομη βύθιση, ενώ μια μεγάλη τιμή του δείκτη ότι η τάση δεν θα μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό [3]. Η ανάλυση αυτών των βραχυκυκλωμάτων συμβάλλει στην ορθή αξιολόγηση της ασφάλειας και της ευστάθειας των ΣΗΕ ειδικότερα εφόσον τα σύγχρονα συστήματα ενσωματώνουν γρήγορα και μαζικά παραγωγή ισχύος από ΑΠΕ [10]. Η ενσωμάτωση αυτή δημιουργεί διακυμάνσεις στα ρεύματα βραχυκυκλώματος καθώς οι μετατροπείς ισχύος που διαθέτουν οι ΑΠΕ παρέχουν ελάχιστη αντοχή σε αυτά [10]. Οι προσομοιώσεις σφαλμάτων σε συστήματα με διείσδυση ΑΠΕ έχουν αποδείξει ότι εάν το βραχυκύκλωμα είναι στην πλευρά της ΥΤ του δικτύου τότε το ρεύμα βραχυκυκλώματος περνάει και από την μονάδα παραγωγής μέσω του μετατροπέα της, συμβάλλοντας στην παροχή ρεύματος προς το σφάλμα, με αποτέλεσμα η ένταση του ρεύματος βραχυκυκλώματος να αυξάνεται σημαντικά και η SCC του συστήματος να επηρεάζεται αρκετά [3]. Αντίθετα, εάν το βραχυκύκλωμα είναι στην πλευρά της ΜΤ ή ΧΤ δεν υπάρχει διαρροή του ρεύματος βραχυκυκλώματος στην μονάδα παραγωγής με αποτέλεσμα η επίδρασή της στην SCC του συστήματος να είναι αμελητέα [3].

Η ανάλυση σφαλμάτων αποτελεί βασικό κομμάτι της αξιολόγησης αξιοπιστίας και προστασίας ιδιαίτερα στα ΣΗΕ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ [3,10,12]. Γι' αυτό τον λόγο, κρίνεται απαραίτητη η αναθεώρηση της κλασικής μεθόδου ανάλυσης σφαλμάτων, ενσωματώνοντας ψηφιακές προσομοιώσεις με τη βοήθεια λογισμικών, όπως το Power World για δυναμική ανάλυση των συστημάτων υπό περιπτώσεις σφαλμάτων, και σύγχρονες μεθοδολογίες ανθεκτικότητας [3,12]. Ταυτόχρονα, η τοπολογία του δικτύου, η θέση σύνδεσης των γεννητριών και τα συστήματα μετατροπής ισχύος επιδρούν καθοριστικά στο μέγεθος και τη διάρκεια του ρεύματος βραχυκυκλώματος απειλώντας την ευστάθεια του συστήματος [10,12].

2.3 Ευστάθεια Συστήματος

Η ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επανακτά μία κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας ύστερα

από μια διαταραχή, όπως μία βλάβη, απότομη μεταβολή φορτίου ή αποσύνδεση γεννήτριας [1]. Για μια δεδομένη αρχική συνθήκη λειτουργίας, το σύστημα θεωρείται σταθερό όταν, μετά την αποκατάσταση της διαταραχής, οι βασικές μεταβλητές του, όπως τάση, συχνότητα και γωνία των γεννητριών, παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων, διασφαλίζοντας ότι δεν θα προκληθεί κατάρρευση ή αποσύνδεση σημαντικών τμημάτων του δικτύου [1]. Η διατήρηση αυτής της ισορροπίας είναι κρίσιμη για τη συνεχή, ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του ενεργειακού συστήματος [1]. Για την διασφάλιση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τόσο την βραχυπρόθεσμη όσο και την μακροπρόθεσμη ευστάθειά του [15]. Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια αποτελεί την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τον συγχρονισμό του μετά από μια ξαφνική διαταραχή, ενώ η μακροπρόθεσμη έπεται από μια ήπια αλλά παρατεταμένη διαταραχή [15]. Η αστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα μη επιθυμητό φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή καταστροφή του εξοπλισμού του, απώλεια ισχύος σε κάποιο σημείο του δικτύου και ένα γενικό blackout [12]. Για τη διασφάλιση της αξιόπιστης και ασφαλούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ, είναι απαραίτητο να διατηρείται η ευστάθεια όλων των βασικών παραμέτρων του δικτύου [12]. Ακόμη και μια μικρή απόκλιση από το κρίσιμο σημείο λειτουργίας μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια γωνίας ρότορα, τάσης ή συχνότητας [12]. Ανεξάρτητα από το μέγεθος και το είδος της διαταραχής, όπως βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς, απώλεια μιας μεγάλης γεννήτριας ή ενός μετασχηματιστή, το σύστημα πρέπει να αντέχει, να προσαρμόζεται και να λειτουργεί με επιτυχία υπό αυτές τις συνθήκες ώστε να παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ [15]. Ο στόχος είναι να αναλυθεί η συμπεριφορά του δικτύου υπό τέτοιες συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία των διακοπών ισχύος για την απομόνωση των σφαλμάτων [12]. Επιπλέον, πρέπει να εξεταστεί πώς επηρεάζουν οι διακυμάνσεις του φορτίου τις παραμέτρους του συστήματος με την ενσωμάτωση ΑΠΕ σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης [12]. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ κρίνεται ιδιαίτερα επίκαιρη, καθώς η αξιοποίησή τους αυξάνεται σταδιακά στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα [12]. Η διατήρηση του συγχρονισμού των γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της ενέργειας, των τάσεων σε όλα τα σημεία του δικτύου και της συχνότητας είναι κρίσιμης σημασίας για την ορθή λειτουργία του συστήματος [15]. Παρακάτω αναλύονται οι τρεις βασικοί τύποι ευστάθειας που είναι απαραίτητο να ισχύουν σε ένα ΣΗΕ.

2.3.1 Ευστάθεια Γωνίας Ρότορα

Αρχικά, η σταθερότητα της γωνίας του ρότορα των σύγχρονων γεννητριών αναφέρεται στην ικανότητα των διασυνδεδεμένων σύγχρονων μονάδων παραγωγής ενός ΣΗΕ να διατηρούν συγχρονισμό μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, αλλά και να επανέρχονται σε κατάσταση συγχρονισμού μετά την εμφάνιση μικρών ή μεγάλων διαταραχών, όπως βραχυκυκλώματα ή ξαφνικές μεταβολές φορτίου [1]. Τα σφάλματα, ενδέχεται να δημιουργήσουν μια ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης κάτι το οποίο οδηγεί το σύστημα να χάσει τον συγχρονισμό του και να αλλάξει η γωνία του ρότορα μιας γεννήτριας [12]. Μια σύγχρονη γεννήτρια παραμένει σε συγχρονισμό όταν επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που παράγεται από τον ρότορα ή δρομέα και της μηχανικής ροπής που παρέχεται από τον στάτη [1,10]. Για να διατηρηθεί η σταθερότητα του συστήματος, οι δύο αυτές ροπές πρέπει να είναι ίσες και αντίθετες, εξασφαλίζοντας μια σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα [1]. Επομένως, η σταθερότητα γωνίας εξαρτάται από την ικανότητα της σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά αυτή την κρίσιμη ισορροπία ροπών έπειτα από οποιαδήποτε διαταραχή [1,10]. Η απουσία επαρκούς ή θετικής ροπής συγχρονισμού μπορεί να οδηγήσει σε παροδική αστάθεια χωρίς ταλαντώσεις, γνωστή και ως ακραία παροδική αστάθεια [1]. Σε αυτή την περίπτωση, οι γωνίες των ρότορων των σύγχρονων γεννητριών παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για την ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος [1]. Από την άλλη πλευρά, όταν η ροπή απόσβεσης δεν είναι επαρκώς αρνητική ή δεν υπάρχει καθόλου, προκύπτει ταλαντωτική αστάθεια έπειτα από μικρές διαταραχές [1]. Αυτός ο τύπος αστάθειας σχετίζεται με την εμφάνιση συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών, οι οποίες μετακινούνται από το αριστερό (σταθερό) προς στο δεξί (ασταθές) ημιεπίπεδο του μιγαδικού επιπέδου, υποδεικνύοντας την απώλεια σταθερότητας [1]. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο σύστημα μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά την ευστάθεια της γωνίας του ρότορα των σύγχρονων γεννητριών, ανάλογα με τη δομή του δικτύου, την θέση εγκατάστασης των ΑΠΕ και τον τύπο και την απόσταση της διαταραχής από τις μονάδες αυτές [1]. Το μέγεθος της επίδρασης των ΑΠΕ στη σταθερότητα του ΣΗΕ ποικίλει ανάλογα με τον βαθμό διείσδυσης των ΑΠΕ, την τοπολογία του δικτύου και την ζήτηση που καλείται να καλύψει κάθε δεδομένη χρονική στιγμή [1]. Πιο συγκεκριμένα, οι μαζική παραγωγή ισχύος από ΑΠΕ ενδέχεται να μεταβάλλει τις ροές

ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, οδηγώντας στην μειωμένη απόσβεση των ταλαντώσεων και των φαινομένων μεταβατικής ευστάθειας, να επηρεάσει τις στροφές του ρότορα και την απόσβεση των μηχανικών ταλαντώσεων των γεννητριών και να ελαττώσει την συνολική άεργο ισχύ του συστήματος που είναι κρίσιμη για την αποκατάσταση της σταθερής λειτουργίας του σε περιπτώσεις διαταραχών [1]. Γι' αυτό τον λόγο, κρίνεται απαραίτητο να γίνεται ορθός σχεδιασμός και έλεγχος των μετατροπών ισχύος που διαθέτουν οι ΑΠΕ ώστε να μειωθεί η επίδρασή τους στην ευστάθεια γωνίας ρότορα των σύγχρονων γεννητριών [1].

2.3.2 Ευστάθεια Τάσης

Εκτός από τη ευστάθεια γωνίας ρότορα, ένα ακόμη κρίσιμο είδος ευστάθειας σε ένα ΣΗΕ είναι η ευστάθεια τάσης [1,10]. Αυτή αφορά την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τις τάσεις στους ζυγούς κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, ακόμη και μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής [1,10]. Η διατήρηση της τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς να παρέχει την απαιτούμενη ενεργό και άεργο ισχύ που ζητούν τα φορτία [1,10,12]. Όταν η ικανότητα αυτή προσεγγίζει τα όριά της προκαλείται πτώση τάσης, η οποία μπορεί να εξελιχθεί σε γενικότερη αστάθεια τάσης του συστήματος [1]. Οι μεταβολή της τάσης ενδέχεται να προκαλέσει απώλειες φορτίων, αποσύνδεση διασυνδεδετικών γραμμών, μειωμένη απόδοση του εξοπλισμού, καταστροφή στοιχείων του δικτύου και δυσλειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών, οδηγώντας σε φαινόμενα αποσταθεροποίησης, εκτεταμένες διακοπές λειτουργίας και υψηλότερο λειτουργικό κόστος [1,3,12]. Η άεργος ισχύς είναι δυσκολότερο να μεταφερθεί σε σχέση με την ενεργό, καθώς επηρεάζεται από την αντίδραση των γραμμών μεταφοράς [10]. Επομένως, η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο σύστημα, λόγω των χαρακτηριστικών και του τρόπου σύνδεσής τους, ενδέχεται να επηρεάσει την ευστάθεια της τάσης του συστήματος, καθώς οι ΑΠΕ προσφέρουν ελάχιστη ή και μηδενική άεργο ισχύ στο δίκτυο για την εξομάλυνση των τάσεων [10]. Μάλιστα, ο έλεγχος της ευστάθειας τάσης σε αυτά τα συστήματα γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκος, καθώς έστω και μια απότομη μεταβολή της τάσης της τάξης του $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής, μπορεί να επηρεάσει τον inverter και να διακόψει την παραγωγή ισχύος [10]. Υπάρχουν δύο είδη ευστάθειας τάσης, η βραχυπρόθεσμη και η μακροπρόθεσμη [1]. Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης σχετίζεται με την ταχεία απόκριση διαφόρων δυναμικών στοιχείων του

συστήματος, των οποίων η συμπεριφορά επηρεάζει άμεσα την τάση κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά από μια διαταραχή [1]. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται φορτία ταχείας μεταβολής, όπως οι επαγωγικοί κινητήρες, συνδέσεις HVDC και γεννήτριες που λειτουργούν μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών, όπως οι ΑΠΕ [1]. Η ανάλυση αυτού του τύπου ευστάθειας εστιάζει σε χρόνο λίγων δευτερολέπτων μετά την εμφάνιση της διαταραχής και απαιτεί μοντελοποίηση των υπερταχέων μεταβατικών φαινομένων που εμφανίζονται στο σύστημα [1]. Σε αντίθεση με τα υπερταχέως μεταβατικά φαινόμενα της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας, η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης σχετίζεται με τη συμπεριφορά στοιχείων του συστήματος που αντιδρούν πιο αργά σε σχέση με την διάρκεια της διαταραχής [1]. Η αστάθεια αυτής της μορφής συνήθως εκδηλώνεται ως βαθμιαία και συνεχής πτώση των τάσεων σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου [1]. Η ικανότητα υποστήριξης τάσης και μεταφοράς ισχύος μειώνεται περαιτέρω όταν οι σύγχρονες γεννήτριες φτάνουν στα όρια της ικανότητάς τους, συνήθως λόγω κορεσμού του μαγνητικού πεδίου, γεγονός που περιορίζει την περαιτέρω συμμετοχή τους στην αποκατάσταση της σταθερότητας του συστήματος [1,10].

2.3.3 Ευστάθεια Συχνότητας

Η τελευταία μορφή ευστάθειας που είναι κρίσιμη σε ένα ΣΗΕ είναι η ευστάθεια της συχνότητας του συστήματος [10]. Η αστάθεια συχνότητας εμφανίζεται όταν η ισχύς που παράγεται από τις σύγχρονες γεννήτριες δεν επαρκεί για να καλύψει τη συνολική ζήτηση του συστήματος και οδηγεί σε μείωση της συχνότητας σε ολόκληρο το δίκτυο [10]. Εάν η διαφορά μεταξύ παραγόμενης και απαιτούμενης ισχύος παραμένει για σημαντικό χρονικό διάστημα και η αδράνεια του συστήματος δεν επαρκεί για να στηρίξει τη συχνότητα, τότε μπορεί να προκύψουν σοβαρά φαινόμενα απόκλισης ισχύος [10,12]. Για τον έλεγχο της συχνότητας ενός συστήματος σε περιπτώσεις απόκλισης υπάρχουν τρία επίπεδα ρύθμισης [1]. Στο πρώτο επίπεδο ρύθμισης, η απόκλιση συχνότητας αρχικά αντισταθμίζεται από την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα περιστρεφόμενα μέρη των σύγχρονων γεννητριών [10]. Με αυτόν τον τρόπο, εισάγεται ενεργός και άεργος ισχύς στο δίκτυο [1]. Η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας μειώνει την απότομη μεταβολή της συχνότητας σε περίπτωση διαταραχής, ωστόσο, δεν ρυθμίζει τη συχνότητα του συστήματος στην προβλεπόμενη τιμή (50 Hz) [1]. Στο δεύτερο επίπεδο ρύθμισης, οι ρυθμιστές στροφών των σύγχρονων γεννητριών αυξάνουν την παραγωγή ισχύος με σκοπό

να εξισορροπήσουν την παραγωγή με την ζήτηση [1]. Τα φορτία συμβάλλουν σε αυτή την ρύθμιση καθώς καταναλώνουν λιγότερη ισχύ λόγω της απόκλισης της συχνότητας [1]. Σκοπός της δευτερεύουσας ρύθμισης είναι η σταθεροποίηση του συστήματος σε μία νέα συχνότητα, μικρότερη από την ονομαστική, ώστε να καλύπτονται τα φορτία αλλά για μικρό χρονικό διάστημα καθώς οι συσκευές και ο εξοπλισμός του συστήματος είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν στην ονομαστική συχνότητα [1]. Επίσης, το δεύτερο επίπεδο ρύθμισης καλείται να επαναφέρει την εφεδρεία του πρώτου σε περίπτωση νέας απόκλισης της συχνότητας [1]. Τέλος, το τρίτο επίπεδο ρύθμισης συχνότητας, περιλαμβάνει τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC), ο οποίος επαναφέρει τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή με την ανακατανομή του φορτίου και την εκκίνηση εφεδρικών μονάδων παραγωγής [1]. Επιπλέον, το τρίτο επίπεδο ρύθμισης πρέπει να αποκαταστήσει την εφεδρεία του δεύτερου [1]. Μια τεχνολογία που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια της συχνότητας είναι η παραγωγή ισχύος από ΑΠΕ καθώς κατά κανόνα παρέχουν στο σύστημα ελάχιστη αδράνεια [10]. Με τη μαζική ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μονάδων σε ένα ΣΗΕ, ένας σημαντικός αριθμός σύγχρονων γεννητριών θα αντικατασταθεί, οδηγώντας στη μείωση της συνολικής αδράνειας του συστήματος γεγονός που ενδέχεται να οδηγήσει σε προβλήματα ευστάθειας συχνότητας [10]. Επιπλέον, προκύπτουν σημαντικές οικονομικές συνέπειες που σχετίζονται τις καιρικές συνθήκες, όπως η μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου, προκειμένου να εξασφαλιστούν οι απαραίτητες εφεδρείες για την αποκατάσταση της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος [1]. Παρά τα προβλήματα που εισάγει η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στο δίκτυο, έχει αποδειχθεί ότι η ορθή κατασκευή και εγκατάσταση μονάδων με μετατροπείς για την παραγωγή ισχύος ενδέχεται να συμβάλει αποτελεσματικά στον έλεγχο και στην αποκατάσταση της συχνότητας του δικτύου ειδικά στην περίπτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες [1].

2.4 Αξιοπιστία Συστήματος

2.4.1 Δείκτες Αξιοπιστίας

Ο βασικός στόχος της αξιολόγησης αξιοπιστίας στα ΣΗΕ είναι η αδιάκοπη παροχή ποιοτικής ισχύος στους καταναλωτές [5]. Βέβαια είναι εξίσου σημαντική η επίτευξη μιας ισορροπίας μεταξύ κόστους και ποιότητας ισχύος [5]. Συγκεκριμένα, αποσκοπεί στη

διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος με το χαμηλότερο δυνατό λειτουργικό κόστος [5]. Η ανάλυση αξιοπιστίας στο επίπεδο του δικτύου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στον ορθό σχεδιασμό, στην αναβάθμιση των υποδομών και στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του συστήματος [5]. Βέβαια, η ενίσχυση του επιπέδου αυτοματισμού στα δίκτυα δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τον έλεγχο των συστημάτων [5]. Καθώς τα δίκτυα εξελίσσονται σε πιο "έξυπνα" και περιλαμβάνουν καταναλωτή παραγωγή ενέργειας, αναδεικνύεται η ανάγκη για εις βάθος μελέτη της αξιοπιστίας παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ισχύος [5]. Η κατανόηση και διαχείριση της αξιοπιστίας των ΣΗΕ αποτελεί ζήτημα υψηλής προτεραιότητας για τη σταθερή και αποδοτική τους λειτουργία [5]. Οι βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ είναι ο **SAIFI**, ο **SAIDI**, ο **ASAI** και ο **ENS** [5].

Ο **SAIDI (System Average Interruption Duration Index)** εκφράζει τη μέση διάρκεια διακοπής ανά καταναλωτή ανά έτος και υπολογίζεται ως:

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum (U_i \cdot N_i)}{\sum N_i}$$

Όπου U_i είναι η διάρκεια κάθε διακοπής και N_i ο αριθμός των επηρεαζόμενων καταναλωτών [5]. Προφανώς, όσο μικρότερος είναι αυτός ο δείκτης τόσο καλύτερη αξιοπιστία έχει το δίκτυο [5].

Ο **SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)** μετρά τη μέση συχνότητα των διακοπών ανά καταναλωτή και υπολογίζεται ως:

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i \cdot N_i}{\sum N_i}$$

Όπου λ_i είναι η μέση συχνότητα με την οποία συμβαίνουν διακοπές ρεύματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο φορτίου, όπως σε έναν υποσταθμό ή καταναλωτή [5]. Τα δίκτυα με μεγάλη αξιοπιστία πρέπει να έχουν μικρό τέτοιο δείκτη [5].

Ο **ASAI (Average Service Availability Index (%))** εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που η παροχή ρεύματος ήταν διαθέσιμη σε σχέση με το σύνολο του έτους για όλους τους καταναλωτές και ο τύπος του είναι:

$$\text{ASAI} = 1 - \left(\frac{\sum U_i \cdot N_i}{8760 \cdot N_i} \right)$$

Όπου ο αριθμός 8760 είναι οι συνολικές ώρες του έτους [5]. Τιμές κοντά στο 1 (ή 100%) σημαίνουν υψηλή διαθεσιμότητα ισχύος από το σύστημα και άρα μεγαλύτερη αξιοπιστία [5].

Τέλος, ο **ENS (Energy Not Supplied)** αναφέρεται στην ενέργεια που δεν παραδόθηκε λόγω διακοπών και υπολογίζεται ως εξής:

$$ENS = \sum P_{ai} \cdot U_i$$

Όπου ο συντελεστής P_{ai} είναι το μέσο φορτίο σε κάποιο σημείο του δικτύου [5]. Εκφράζει την ενεργειακή επίπτωση των διακοπών την οποία θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε [5].

2.4.2 Αξιολόγηση Αξιοπιστίας

Η διαδικασία αξιολόγησης της αξιοπιστίας σε ένα ΣΗΕ περιλαμβάνει συνήθως την επιλογή των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, την εκτίμηση αυτών των καταστάσεων και τον υπολογισμό των σχετικών δεικτών αξιοπιστίας [5]. Για τον υπολογισμό των δεικτών εφαρμόζεται η μέθοδος Monte Carlo [5]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δειγματοληψία για την επιλογή καταστάσεων και υπολογίζει τους δείκτες μέσω στατιστικής ανάλυσης [5]. Αρχικά, γίνεται καθορισμός των δεδομένων του μοντέλου του συστήματος, αρχικοποιείται ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης και υπολογίζεται ο μέσος χρόνος μέχρι την εμφάνιση του σφάλματος για κάθε στοιχείο του συστήματος [5]. Το στοιχείο με το μικρότερο χρόνο θεωρείται ότι έχει τη βλάβη [5]. Στη συνέχεια, εντοπίζονται τα φορτία που επηρεάζονται από το ελαττωματικό στοιχείο και με σταδιακή αύξηση της συχνότητας των σφαλμάτων, προστίθεται ο χρόνος επισκευής του στοιχείου στον συνολικό χρόνο σφάλματος [5]. Εάν ο πραγματικός χρόνος προσομοίωσης είναι μεγαλύτερος από τον προκαθορισμένο υπολογίζονται οι δείκτες αξιοπιστίας όλου του συστήματος και γίνεται αξιολόγηση της αξιοπιστίας του, ενώ εάν είναι μικρότερος υπολογίζονται ξανά οι μέσοι χρόνοι μέχρι την εμφάνιση της βλάβης και ακολουθείται η ίδια διαδικασία [5]. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι κοντά στην πραγματικότητα καθώς είναι κατάλληλη για προσομοίωση τυχαίων παραγόντων, όπως οι τυχαίες βλάβες και οι μεταβολές των καιρικών συνθηκών [5]. Επιπλέον, είναι ιδανική για αξιολόγηση της αξιοπιστίας σε μεγάλα συστήματα καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του συστήματος όταν ικανοποιείται μια μέτρηση [5]. Τέλος, χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς διότι είναι αρκετά κατανοητή και εύκολη στην χρήση και προσδιορίζει την κατανομή πιθανοτήτων των δεικτών αξιοπιστίας [5].

2.5 Προστασία Συστήματος

Η μαζική ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, στα ΣΗΕ συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της καθαρής ενέργειας, αλλά παράλληλα φέρνει νέες προκλήσεις [3]. Οι μορφές αυτές ενέργειας χαρακτηρίζονται από διακοπτόμενη και ασταθή παραγωγή, καθώς και από υψηλή αβεβαιότητα, γεγονός που δυσκολεύει τη σταθερή λειτουργία του δικτύου [3]. Σε ένα νέο ενεργειακό περιβάλλον όπου οι ανανεώσιμες πηγές παίζουν κυρίαρχο ρόλο, η παραδοσιακή λογική λειτουργίας του συστήματος αλλάζει και πλέον η ζήτηση ακολουθεί την παραγωγή [3]. Τα ΣΗΕ σήμερα είναι ιδιαίτερα σύνθετα και εκτίθενται σε ποικίλες διαταραχές, όπως φυσικά φαινόμενα και μεταβολές στη ζήτηση των καταναλωτών [8]. Σε αυτό το πλαίσιο, ο ρόλος της προστασίας τους είναι καθοριστικός, καθώς έχει ως στόχο την ανίχνευση ανωμαλιών και την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, σε περιπτώσεις βλαβών [8].

2.5.1 Προστατευτικές Διατάξεις

Η ανίχνευση ανωμαλιών σε ένα ΣΗΕ απαιτεί την παρακολούθηση των βασικών παραμέτρων του όπως οι τάσεις των ζυγών, το ρεύμα βραχυκυκλώματος και οι γωνίες των γεννητριών ώστε να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος του εξοπλισμού σε περιπτώσεις βλαβών [16]. Όταν σε ένα ΣΗΕ προκύψουν μεγάλες διαταραχές, όπως η αποσύνδεση μιας γραμμής μεταφοράς, τα σφάλματα εντοπίζονται και αποκαθίστανται γρήγορα μέσω των συστημάτων προστασίας υψηλής ταχύτητας που είναι ενσωματωμένα στο δίκτυο [7]. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν με σκοπό τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του συστήματος [7]. Η αστάθεια που προκαλείται από σφάλματα μπορεί να αντιμετωπιστεί και να αποκατασταθεί μέσω της χρήσης προστατευτικών διατάξεων, όπως οι διακόπτες ισχύος, τα ρελέ και άλλος εξοπλισμός προστασίας [12]. Οι συσκευές αυτές παρεμβαίνουν γρήγορα για να περιορίσουν τις επιπτώσεις των σφαλμάτων ώστε γίνει αποκατάσταση της σταθερής κατάστασης λειτουργίας [12]. Βασικό στοιχείο της προστασίας αποτελεί ο ηλεκτρονόμος, ο οποίος ευθύνεται για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση προβλημάτων στο δίκτυο [8]. Οι πρώτοι ηλεκτρονόμοι που κατασκευάστηκαν ήταν ηλεκτρομηχανικοί, στη συνέχεια αναπτύχθηκαν οι ημιαγωγιμοί και πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως ηλεκτρονόμοι με μικρο-επεξεργαστές, οι οποίοι κερδίζουν σε ταχύτητα και προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ασφάλεια σε σχέση με τους προηγούμενους [8]. Γι' αυτήν την λειτουργία της προστασίας χρησιμοποιούνται

αισθητήρες για την μέτρηση αυτών των μεγεθών και ενεργοποιητές οι οποίοι εκτελούν διορθωτικές ενέργειες [16]. Ένας κοινός αισθητήρας αποτελείται από μια συσκευή ανίχνευσης, έναν μικροεπεξεργαστή, έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, έναν επεξεργαστή ψηφιακού σήματος και ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας με τον ενεργοποιητή [16]. Στη συνέχεια, το σήμα πληροφορίας προωθείται στον ενεργοποιητή με σκοπό την λήψη αποφάσεων και την ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος [16]. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία καθώς δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές πηγές και θόρυβο, χαμηλά κόστη λειτουργίας και εγκατάστασης διότι είναι σημαντικό να λειτουργούν σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και να υπάρχουν παντού στο δίκτυο και μεγάλη διάρκεια ζωής για να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια απόδοσή τους χωρίς συχνές αντικαταστάσεις (10-20 έτη) [16]. Τα στοιχεία του συστήματος που χρίζουν την μεγαλύτερη προστασία είναι οι γεννήτριες, οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές [17]. Οι γεννήτριες είναι σημαντικό να διαθέτουν διακόπτες προστασίας από υπερένταση και υπερφόρτωση σε περιπτώσεις επικίνδυνης λειτουργίας [17]. Επίσης, πρέπει να περιλαμβάνουν εξοπλισμό για την ρύθμιση των στροφών του ρότορα, της τάσης λειτουργίας και της συχνότητας ώστε να διασφαλίζεται η ευστάθεια και η αξιοπιστία του ΣΗΕ όταν έχει προκληθεί ένα σφάλμα [17]. Επιπλέον, η λειτουργία τους θα πρέπει να ελέγχεται εξ' αποστάσεως από το κέντρο ελέγχου μέσω ελεγκτών PLC και να υπάρχουν συσκευές μέτρησης του εναλλασσόμενου ρεύματος για τον εντοπισμό σφαλμάτων στους αισθητήρες των γεννητριών [17]. Οι γραμμές μεταφοράς προστατεύονται με συστήματα προστασίας που βασίζονται στην εμπέδηση της γραμμής ή στο ρεύμα της όπως ρελέ υπέρτασης και υπερέντασης [17]. Για την απόζευξη των γραμμών σε περίπτωση βλάβης χρησιμοποιούνται ανιχνευτές υπερέντασης ώστε να αποφεύγονται λανθασμένοι χειρισμοί εάν το ρελέ υπέρτασης αποτύχει, ωστόσο, κάτι τέτοιο μειώνει την ευαισθησία του συστήματος προστασίας κατά την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του ΣΗΕ [17]. Η προστασία των μετασχηματιστών αποτελεί μια πιο περίπλοκη διαδικασία καθώς τα ρελέ υπέρτασης και υπερέντασης επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες όπως οι παροδικές υπερτάσεις, τα μικρά ρεύματα βραχυκυκλώματος και τα ισχυρά ρεύματα μαγνήτισης [17]. Αρχικά, τα περισσότερα ρελέ μπορούν να έχουν σταθερή λειτουργία σε περιπτώσεις υπερτάσεων αλλά παρ' όλα αυτά είναι σημαντικό να ελέγχονται εάν έχουν ενεργοποιηθεί λανθασμένα στο παρελθόν [17]. Κάποιες φορές μετά από την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του ΣΗΕ ενδέχεται τα

ρεύματα βραχυκυκλώματος να είναι μικρότερα από τα προβλεπόμενα με αποτέλεσμα να μην εντοπίζονται από τα ρελέ υπέρτασης ώστε να ανοίξουν, οδηγώντας σε βλάβη του εξοπλισμού του δικτύου [17]. Επιπλέον, ο κορεσμός του μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει τα μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης, μεγάλης διάρκειας, τα οποία να εντοπιστούν από τα ρελέ υπέρτασης και να αποκόψουν λανθασμένα γραμμές του δικτύου [17]. Για την αποφυγή αυτών των φαινομένων κρίνεται απαραίτητος ο συνεχής έλεγχος των ρελέ και η πραγματοποίηση ανάλυσης ροής φορτίου για την διασφάλιση της ευστάθειας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του ΣΗΕ [17]. Επιπλέον, για την επιτυχή αποκατάσταση του ΣΗΕ χρησιμοποιείται μια πληθώρα συσκευών όπως διακόπτες μεταγωγής και μπαταρίες για την επανεκκίνηση του συστήματος μετά από πλήρη διακοπή λειτουργίας [17]. Οι διακόπτες μεταγωγής έχουν την ικανότητα να αλλάζουν την κατάσταση που βρίσκεται το σύστημα μεταξύ κανονικής και επικίνδυνης λειτουργίας [17]. Επίσης, προκειμένου να διευκολύνεται ο έλεγχος και η συντήρηση των διακοπών διαθέτουν διακόπτες παράκαμψης χωρίς να αποκόπτεται η ροή ισχύος στα φορτία [17]. Ακόμη, μπορούν να ελέγχουν την φάση, παρέχοντας προστασία από τις μεταβολές της συχνότητας του δικτύου ώστε να παραμείνει το σύστημα σε ευστάθεια [17]. Επιπλέον, οι μπαταρίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην σωστή λειτουργία των ρελέ προστασίας κατά την διαδικασία αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας [17]. Η χωρητικότητά τους πρέπει να καλύπτει το φορτίο καθ' όλη την χρήση τους και η διάρκεια ζωής τους να είναι ανεξάρτητη από μια μεγάλης κλίμακας διακοπή ρεύματος [17]. Έτσι τα συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες και ανιχνευτές μεταβολών τάσεων συμβάλλουν στην αξιόπιστη και αδιάκοπη παροχή ισχύος [17]. Κατά την αποκατάσταση του συστήματος, μπορεί να παρουσιαστεί αστάθεια τάσεων οπότε πρέπει να ελέγχεται ότι τα ρελέ υπέρτασης δεν σταματούν να λειτουργούν εξαιτίας πολύ μικρών μεταβολών της τάσης [17]. Κάποια σύγχρονα ψηφιακά ρελέ επιτρέπουν την ρύθμιση αυτών των ορίων με αρκετά μεγάλη ευαισθησία [18]. Τα βασικά και τα εφεδρικά ρελέ προστασίας πρέπει να είναι σε λειτουργία κατά την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας καθώς κάποια ρελέ μπορεί να διακόψουν λανθασμένα τις γραμμές λόγω προσωρινών μεταβολών ισχύος [17]. Επιπλέον, μπορεί να είναι χρήσιμο να απενεργοποιούνται οι αυτόματες επαναζεύξεις γραμμών, ώστε να μη γίνεται προσπάθεια επανασύνδεσης όταν υπάρχει ακόμη σφάλμα σε κάποιο στοιχείο του δικτύου, κάτι που θα μπορούσε να προκαλέσει κατάρρευση του συστήματος [17].

2.5.2 Αποκατάσταση Ομαλής Λειτουργίας

Επιπλέον, ένα ιδανικό ΣΗΕ διαθέτει την δυνατότητα να παρακολουθεί και να αναλύει με ακρίβεια την κατάσταση λειτουργίας του δικτύου [18]. Μέσω του συντονισμού των λειτουργιών του, μπορεί να προβλέπει ενεργά πιθανές μεταβολές και να ανταποκρίνεται δυναμικά σε διάφορες διαταραχές, ενισχύοντας την ευστάθεια και την προσαρμοστικότητά του σε πραγματικό χρόνο [18]. Μετά από μια διαταραχή το σύστημα πρέπει να επαναφέρεται σε κανονική λειτουργία γρήγορα και αξιόπιστα ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στους καταναλωτές [18]. Έτσι υποκατηγορίες της προστασίας αποτελούν η πρόγνωση των καταστάσεων του συστήματος, η ελαστικότητα και η στιβαρότητα του [18]. Η πρόγνωση καταστάσεων αφορά την ικανότητα του συστήματος να υπολογίσει τις μελλοντικές καταστάσεις που θα βρίσκεται ώστε να στείλει προειδοποίηση για επερχόμενους κινδύνους [18]. Μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης μπορούν να εντοπιστούν καταστάσεις όπως επικείμενη υπερφόρτωση γραμμών, χαμηλή τάση σε κρίσιμους ζυγούς και αποσταθεροποίηση της συχνότητας του δικτύου ώστε να καταρτιστούν λεπτομερή σχέδια αποκατάστασης έκτακτης ανάγκης [17,18]. Η πρόγνωση επιτρέπει τη λήψη προληπτικών μέτρων, όπως η προσαρμογή φορτίου, η αλλαγή τοπολογίας του δικτύου, η αυτόματη απομόνωση ελαττωματικών στοιχείων μέσω ρελέ, η αποκοπή φορτίου και η εκκίνηση εφεδρικών μονάδων, με στόχο την αποτροπή της επέκτασης της διαταραχής [3,18]. Η ελαστικότητα ενός ΣΗΕ αναφέρεται στην δυνατότητά του να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά καθ' όλη τη διάρκεια ενός κύκλου διαταραχής [3]. Πριν την εμφάνιση μιας διαταραχής, το σύστημα είναι σε θέση να αναγνωρίσει και να εφαρμόσει προληπτικές ενέργειες για την αποτροπή βλαβών [3]. Κατά τη διάρκεια της διαταραχής, εμφανίζει ικανότητες απορρόφησης των επιπτώσεων, ώστε να τροφοδοτήσει τα κρίσιμα φορτία του [3,18]. Μετά το πέρας της διαταραχής, διαθέτει την απαραίτητη δυναμική για ταχεία επαναφορά στην κανονική λειτουργία, εξασφαλίζοντας ελαχιστοποίηση των συνεπειών στον εξοπλισμό του δικτύου και στους ίδιους τους καταναλωτές [3]. Ένα στιβαρό δίκτυο μπορεί να αντέξει απότομες μεταβολές φορτίου, απώλειες στοιχείων ή ακραία καιρικά φαινόμενα χωρίς να οδηγηθεί σε κατάρρευση [18]. Η διατήρηση της συγχρονισμένης λειτουργίας των γεννητριών, η σταθερότητα της τάσης, η υψηλή ανοχή σε βραχυκυκλώματα και η περικοπή της παραγόμενης ισχύος συμβάλλουν στην σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου [3,18]. Ο έλεγχος του επιπέδου τάσης του δικτύου και των ρευμάτων βραχυκυκλώματος αποτελεί την πιο σημαντική ενέργεια

στην διαδικασία αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας του ΣΗΕ προκειμένου οι μεταβολές των τάσεων στην σταθερή και δυναμική κατάστασή του να μην επηρεάσουν τον εξοπλισμό του συστήματος και να μην διαφύγουν μεγάλα ρεύματα τα οποία ενδέχεται να τον καταστρέψουν [17]. Επίσης, η διαδικασία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο λανθασμένος χειρισμός μπορεί να οδηγήσει σε άνοιγμα ή κλείσιμο διακοπών καθυστερώντας ή επιβραδύνοντας την όλη διαδικασία αποκατάστασης [17]. Το κυριότερο θέμα προστασίας κατά την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας παραμένει η αποσύνδεση ή καταστροφή στοιχείων του συστήματος λόγω κάποιας βλάβης που προκλήθηκε [17]. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ασθενή, είναι συνήθως γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, μονώσεις μετασχηματιστών και απομονωμένοι μετασχηματιστές τάσης και ρεύματος και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο αποκατάστασης του συστήματος [17]. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ σημαντικά τα συστήματα διαφορικής προστασίας γραμμής που μετράνε το ρεύμα εισόδου και εξόδου μιας γραμμής μεταφοράς [17]. Εάν τα ρεύματα είναι ίσα τότε δεν παρουσιάζεται βλάβη στη γραμμή, ενώ εάν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στα ρεύματα τότε το σύστημα αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει σφάλμα μέσα στη γραμμή και διατάσσει άμεση αποκοπή από το υπόλοιπο δίκτυο [17]. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως ένα δίκτυο οπτικών ινών για επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν οι μεταβολές των επιπέδων τάσης έχουν δημιουργήσει προβλήματα στα PLC και στους χωρητικούς μετασχηματιστές τάσης (CVT) [17]. Όταν συμβεί μια γενική διακοπή λειτουργίας του συστήματος (blackout) ενδέχεται πολλοί διακόπτες να είναι ανοιχτοί ή κλειστοί ανάλογα με το είδος της διαταραχής που υπέστη το σύστημα [17]. Για παράδειγμα οι διακόπτες των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών μπορεί να ανοίξουν από ένα βραχυκύκλωμα ή μια υπερφόρτωση του δικτύου, ενώ οι διακόπτες των γεννητριών από μια απότομη μεταβολή του φορτίου, της τάσης ή της συχνότητας του δικτύου [17]. Στην περίπτωση που το blackout διαρκέσει αρκετή ώρα, οι διακόπτες μπορεί να χάσουν το ρεύμα χαμηλής τάσης που χρειάζονται για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός τους έως ότου λειτουργήσει μια εφεδρική μονάδα παραγωγής ισχύος, με αποτέλεσμα οι διακόπτες να γίνονται δυσλειτουργικοί και να καθυστερήσει ή να μπλοκαριστεί η αποκατάσταση του ΣΗΕ [17]. Γι' αυτό είναι κρίσιμο οι υποσταθμοί να διαθέτουν μικρές μονάδες παραγωγής ισχύος για επανεκκίνηση του συστήματος μετά από ένα blackout (black start) [17]. Όλοι οι διακόπτες ισχύος πρέπει να είναι ανοιχτοί προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία του black start [17]. Κάποιες φορές

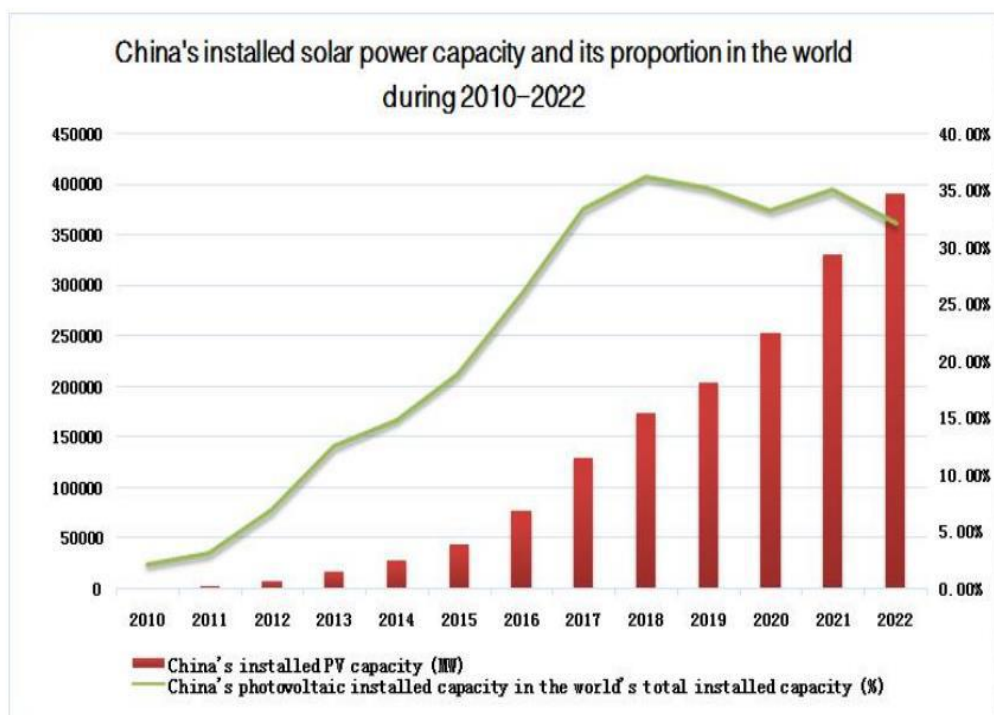
ενδέχεται ο διακόπτης να φαίνεται ανοιχτός από μια ενδεικτική λυχνία αλλά στην πραγματικότητα να μην είναι λόγω βλάβης, απώλειας τροφοδοσίας ή προβλήματος επικοινωνίας και γι' αυτό οι χειριστές έχουν καθήκον να πατήσουν να ανοίξει ακόμη και σε αυτή την περίπτωση [17]. Για να συνδεθεί μια γεννήτρια στο δίκτυο με σωστό τρόπο πρέπει πρώτα να κλείσουν κάποιοι διακόπτες για να σταθεροποιηθεί η κατάσταση σε εκείνο το σημείο του δικτύου καθώς όταν συνδέεται μια γεννήτρια σε ένα άδειο ή ελαφρώς φορτισμένο δίκτυο, μπορεί να προκληθούν υπερτάσεις [17]. Σταδιακά αποκαθιστώντας την ομαλή συμπεριφορά σε μικρά τμήματα του δικτύου, δημιουργείτε η ανάγκη να διασυνδεθούν μεταξύ τους χωρίς να προκληθεί νέα διαταραχή στην τάση και στην συχνότητα του δικτύου [17]. Στο κοινό σημείο σύζευξης των τμημάτων, με την βοήθεια οργάνων μέτρησης φάσης, τάσης και συχνότητας ελέγχεται εάν τα δύο τμήματα του δικτύου είναι συγχρονισμένα ώστε να αποτραπούν ισχυρά ρεύματα σφάλματος μεταξύ τους πριν κλείσει ο διακόπτης [17]. Ταυτόχρονα, με αυτήν την διαδικασία συνδέονται σιγά σιγά φορτία στο δίκτυο με σκοπό να σταθεροποιηθεί η συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα, να εξισορροπηθεί η παραγόμενη ισχύς και να παραμείνει σε ευστάθεια το ΣΗΕ [17]. Στη συνέχεια, οι διαχειριστές αναλαμβάνουν να διατηρήσουν τα επίπεδα τάσης και συχνότητας σταθερά ρυθμίζοντας χειροκίνητα τις γεννήτριες και κλείνοντας σταδιακά τους διακόπτες στις γραμμές διανομής μέχρι να καλύπτεται η ζήτηση και να ενεργοποιηθούν τα αυτόματα συστήματα ελέγχου [17]. Τα μελλοντικά ΣΗΕ θα αντιμετωπίσουν νέες προκλήσεις στον τομέα της προστασίας, καθώς η παραγωγή ενέργειας και η δομή του δικτύου θα μεταβάλλονται διαρκώς λόγω της ενσωμάτωσης καταναμημένων μονάδων παραγωγής [8]. Αυτές οι μονάδες, παρότι συμβάλλουν στην αυξημένη αξιοπιστία και αποδοτικότητα του δικτύου, προκαλούν δυσκολίες στα συστήματα προστασίας, κυρίως επειδή μπορούν να μεταβάλουν το ρεύμα σφάλματος με μη προβλέψιμο τρόπο [8]. Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις, το δίκτυο θα πρέπει να διαθέτει προηγμένες δυνατότητες προσαρμογής και αποκατάστασης [8]. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση σύγχρονων αισθητήρων, εξελιγμένων μετρητικών συστημάτων και τεχνολογιών ταχείας επικοινωνίας, ώστε να γίνεται συνεχής παρακολούθηση και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των προστατευτικών διατάξεων και των κέντρων ελέγχου [8]. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία παίζουν οι έξυπνοι ηλεκτρονικοί αισθητήρες (Intelligent Electronic Devices ή IED), που ενσωματώνονται στο δίκτυο για να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της προστασίας σε ένα σύγχρονο ΣΗΕ [8].

Κεφάλαιο 3 Ηλιακή ενέργεια και Φωτοβολταϊκά

3.1 Εισαγωγή

Η σημερινή ενεργειακή κρίση και η αλλαγή του κλίματος αποτελούν δύο μεγάλα ζητήματα που επηρεάζουν σοβαρά την ανθρώπινη κοινωνία και τη μελλοντική της πορεία [3]. Η ανάγκη για καθαρές και βιώσιμες ενεργειακές λύσεις είναι πλέον πιο επιτακτική από ποτέ, και η ενεργειακή βιομηχανία καλείται να βρει εναλλακτικές μορφές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον [3]. Μια εξαιρετικά ανερχόμενη τάση στον τομέα της ενέργειας αποτελεί η παραγωγή ενέργειας από την ακτινοβολία του ήλιου δηλαδή την ηλιακή ενέργεια [19]. Η ηλιακή ενέργεια βρίσκεται σε αφθονία και είναι προσβάσιμη από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη [4]. Είναι μια μορφή θερμικής ενέργειας που βασίζεται στη διαδικασία σύντηξης στην επιφάνεια του ήλιου [20]. Πρόκειται για μια ανανεώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας, χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος συντήρησης του εξοπλισμού και ενδέχεται να μειώσει τις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος με την ορθή διαχείρισή της [20]. Ωστόσο, απαιτείται ένα υψηλό κεφάλαιο για την εγκατάσταση μονάδων συλλογής και μετατροπής της, εξαρτάται από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η συννεφιά και απαιτούνται στοιχεία αποθήκευσης για την αποφυγή μη αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας [20]. Χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία λόγω και της έκτασής τους χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του έτους και πρωτοστατούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα [19]. Πιο συγκεκριμένα η Ινδία απολαμβάνει 250-300 ημέρες ηλιοφάνειας ανά έτος με μέση ηλιακή ακτινοβολία 200 MW/km² [19]. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των χωρών για την υπεροχή τους σε αυτόν τον τομέα έχει βοηθήσει στο να αναπτυχθούν καινοτόμες τεχνολογίες συλλογής της ηλιακής ενέργειας και μετατροπής της σε ηλεκτρική με υψηλότερο βαθμό απόδοσης [19]. Οι δύο βασικές τεχνολογίες είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τα ηλιακά θερμικά συστήματα [20]. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες (PV), μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ρεύμα (DC) το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο (AC) από έναν μετατροπέα καθώς το ηλεκτρικό δίκτυο λειτουργεί με AC [20]. Σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), μέχρι το 2020 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από φωτοβολταϊκές μονάδες παγκοσμίως έφτασε τα 760,4 GW, σημειώνοντας αύξηση 31,4% σε σχέση με το 2019 [3]. Την ίδια

χρονιά, προστέθηκαν 181,9 GW νέας φωτοβολταϊκής ισχύος, κάτι που αντιπροσωπεύει μια εντυπωσιακή αύξηση 86,4% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος [3]. Το 2021 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων της Κίνας έφτασε τα 66,4 GW και το 2022 έγινε η μεγαλύτερη πηγή καθαρής ενέργειας ξεπερνώντας την ενέργεια από ηλιακά θερμικά συστήματα [18]. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα ενέργειας, χρησιμοποιούν εστιασμένη ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνουν ένα υγρό για την παραγωγή ατμού [20]. Στη συνέχεια, ο ατμός περιστρέφει έναν αεριοστρόβιλο, παράγοντας κινητική ενέργεια στην άκρη του οποίου υπάρχει ένας μετατροπέας της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια [20]. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών της Κίνας και το ποσοστό της στην συνολική παγκόσμια ισχύ από φωτοβολταϊκά.



Εικόνα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Κίνα από το 2010 έως το 2022 [3].

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο υποσχόμενες επιλογές για το μέλλον, καθώς είναι μια ανεξάντλητη και φυσικά διαθέσιμη πηγή ενέργειας [20]. Προέρχεται από τον ήλιο με τη μορφή φωτός και θερμότητας, χωρίς κόστος και χωρίς να επιβαρύνει το περιβάλλον [20]. Οι περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως εστιάζουν στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία και μείωση της χρήσης συμβατικών πηγών, όπως τα ορυκτά καύσιμα [20]. Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται, αυξάνεται και η ανάγκη για περισσότερη παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας, καθιστώντας τη χρήση της ηλιακής ενέργειας πιο σημαντική από ποτέ [20]. Πολλές χώρες ανά τον κόσμο που διαθέτουν τεράστιες εκτάσεις και δέχονται άπλετο ηλιακό φως όπως η Κίνα, το Μαρόκο και το Ντουμπάι διαθέτουν τεράστια φωτοβολταϊκά πάρκα για την παραγωγή ισχύος σε μαζική κλίμακα [19]. Στην Κίνα το πάρκο στην έρημο Tengger καλύπτει μια έκταση 1200 km² με φωτοβολταϊκά εγκατεστημένης ισχύος περίπου 1.5 GW και παράγει ετησίως πάνω από 15 GW ισχύος [19]. Το Mohammed Bin Rashid Al Maktoum στο Ντουμπάι, το οποίο πρόκειται να γίνει το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό πάρκο στον κόσμο, έχει εγκατεστημένη ισχύ 2450 MW και αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια [19]. Το Noor Solar Park βρίσκεται στο Μαρόκο με εγκατεστημένη ισχύ 1117 MW και είναι το μεγαλύτερο έργο συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας στον κόσμο καθώς εκτός από τη βασική εγκατάσταση, διαθέτει και μια μονάδα φωτοβολταϊκών 72 MW, αυξάνοντας τη συνολική παραγωγική ικανότητά του [19]. Στην Εικόνα 3.3 απεικονίζονται τα φωτοβολταϊκά πάρκα που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 3.3: α. Το Mohammed Bin Rashid Al Maktoum, β. Το Noor Solar Park, γ. Tengger Desert Solar Park [19].

3.2 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες εκμεταλλεύονται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε συνεχές ρεύμα [21]. Το 2017 το 40% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν από φωτοβολταϊκά και εάν συνεχιστεί ο ρυθμός ανάπτυξής τους θα ξεπεράσουν το 10% της συνολικής παραγωγής ενέργειας σε μερικά χρόνια [21]. Η ανάγκη για πιο βελτιωμένη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική έχει δημιουργήσει διάφορες προκλήσεις και έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πάνελ [21]. Το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι το πιο διαδεδομένο ημιαγώγιμο

υλικό που χρησιμοποιείται στα ηλιακά κελιά των φωτοβολταϊκών [22]. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το τελλούριο του καδμίου (CdTe), ο χαλκός ίνδιο σεληνιούχο γάλλιο (CIS) και το άμορφο πυρίτιο (a-Si) [23]. Οι τρεις βασικότερες τεχνολογίες που εφαρμόζονται τα παραπάνω υλικά είναι στα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα thin-film πάνελ [21,22].

3.2.1 Μονοκρυσταλλικά Πάνελ

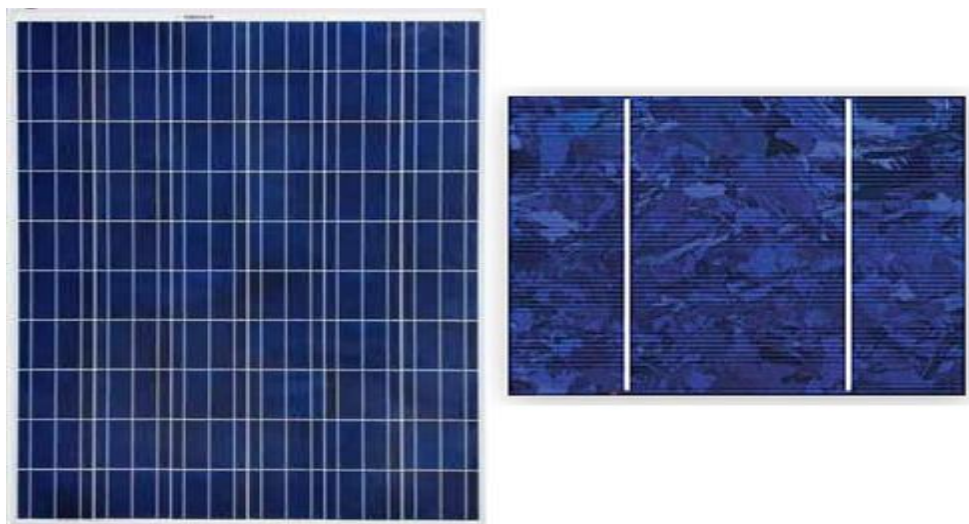
Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι η παλαιότερη τεχνολογία από τις τρεις που προαναφέραμε [21]. Κατασκευάζεται από κρύσταλλο πυρίτιο, υψηλής ποιότητας, με την μέθοδο Czochralski η οποία απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>1400 °C) και ένα αέριο περιβάλλον όπως αργό για την αποφυγή οξείδωσης [21]. Τα κελιά έχουν ομοιόμορφη μαύρη ή σκούρα μπλε απόχρωση και είναι κομμένα σε στρογγυλεμένο τετράγωνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4 [21]. Η απόδοσή τους κυμαίνεται στο εύρος 15-22%, υψηλότερη από τις υπόλοιπες τεχνολογίες, χρειάζονται μικρότερη επιφάνεια για την ίδια παραγωγή με το πολυκρυσταλλικό και διαθέτουν μακροχρόνια αξιοπιστία, ωστόσο, έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιείται [21,22]. Επιπλέον, τα μονοκρυσταλλικά πάνελ παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού και υψηλών θερμοκρασιών, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για περιοχές με συχνές νεφώσεις ή υψηλό ηλιακό δυναμικό [21]. Παράλληλα, λόγω της μεγαλύτερης ενεργειακής απόδοσης, χρησιμοποιούνται ευρέως σε οικιακές και εμπορικές εγκαταστάσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος [21]. Παρότι το αρχικό κόστος είναι υψηλότερο, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και η καλύτερη ενεργειακή απόδοση οδηγούν σε μικρότερο κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος [21]. Στην Εικόνα 3.4 απεικονίζονται ένα μονοκρυσταλλικό κελί πυριτίου και ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.



Εικόνα 3.4: Μονοκρυσταλλικό κελί πυριτίου και φωτοβολταϊκό πάνελ [21].

3.2.2 Πολυκρυσταλλικά Πάνελ

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ημιαγωγού που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά πάνελ [22]. Κατασκευάζεται από λιωμένο πυρίτιο το οποίο ψύχεται γρήγορα σε έναν θάλαμο με γραφίτη SiO/SiN με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα μπλοκ από πολλούς μικρούς κρυστάλλους [21]. Στη συνέχεια, το μπλοκ κόβεται σε τετράγωνα κελιά μπλε-γκρι χρώματος κάτι το οποίο βοηθάει στη μέγιστη κάλυψη της επιφάνειας [21]. Η δημοφιλία αυτού του τύπου έγκειται στο γεγονός ότι είναι αρκετά φθηνότερο στην παραγωγή, έχει απλούστερη διαδικασία κατασκευής σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και γίνεται καλύτερη χρήση του διαθέσιμου χώρου μέσα στο κελί [22]. Ωστόσο, η οξείδωση του πυριτίου είναι μεγαλύτερη με αυτήν την μέθοδο και άρα το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μικρότερη απόδοση του εύρους 14-20% [21]. Επιπρόσθετα, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ έχουν μικρότερη απόδοση σε συνθήκες περιορισμένου φωτισμού και υψηλών θερμοκρασιών συγκριτικά με τα μονοκρυσταλλικά [21]. Παρά το γεγονός αυτό, παραμένουν ιδανική λύση για εγκαταστάσεις με μεγάλο διαθέσιμο χώρο και περιορισμένο προϋπολογισμό, όπως αγροτικές ή βιομηχανικές εφαρμογές [21]. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής τους είναι επίσης μικρότερο λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής απαίτησης κατά την κατασκευή τους [21]. Τέλος, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανοχή στις σκιές από τα μονοκρυσταλλικά, γεγονός που μπορεί να τα καθιστά πιο αποδοτικά σε ορισμένες εγκαταστάσεις με εμπόδια ή περιοδική σκίαση [21]. Στην Εικόνα 3.5 απεικονίζονται ένα πολυκρυσταλλικό κελί και πλέγμα πυριτίου.



Εικόνα 3.5: Πολυκρυσταλλικό κελί και πλέγμα πυριτίου [21].

3.2.3 Thin-film Πάνελ

Τα κελιά λεπτού φιλμ (thin-film) αποτελούν μία εναλλακτική προσέγγιση στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [21]. Απαιτούν λιγότερο υλικό για την κατασκευή τους και γιαυτό το τελικό προϊόν είναι πολύ λεπτό, περίπου 35-260 nm [21]. Οι τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του είναι το άμορφο πυρίτιο, το CdTe και ο CIS [21]. Το υλικό τοποθετείται συνήθως πάνω σε γυαλί μέσω της μεθόδου PECVD, υπό χαμηλές θερμοκρασίες (200-400 °C) [21]. Η μέθοδος αυτή είναι φθηνότερη από τις προηγούμενες για την κατασκευή κρυσταλλικού πυριτίου, αλλά το κελί λεπτού φιλμ είναι λιγότερο αποδοτικό [21,22]. Στην περίπτωση του άμορφου πυριτίου η απόδοση του πάνελ δεν ξεπερνάει το 9.8%, το πάνελ από τελλούριο του καδμίου μέχρι 18.6% και του χαλκού ινδίου σεληνιούχου γαλλίου έως 19.2% [21]. Τα thin-film πάνελ παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλού φωτισμού, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για περιβάλλοντα με ακραίες κλιματικές συνθήκες ή εσωτερικές εφαρμογές [21]. Επίσης, λόγω της ευκαμψίας τους, μπορούν να τοποθετηθούν σε επιφάνειες όπου τα κρυσταλλικά πάνελ δεν είναι πρακτικά, όπως σε καμπυλωτές ή ελαφριές κατασκευές [21]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η αισθητικά ομοιόμορφη εμφάνιση, η οποία τα καθιστά κατάλληλα για αρχιτεκτονικές εφαρμογές ενσωμάτωσης σε κτήρια [21]. Ωστόσο, η μειωμένη απόδοση ανά τετραγωνικό μέτρο και η μικρότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τις τεχνολογίες πυριτίου εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς στην ευρεία εφαρμογή τους [21].

3.3 Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ποιότητα της ισχύος έχει αναδυθεί ως ένα κρίσιμο θέμα τόσο για τους παραγωγούς ενέργειας όσο και για τους καταναλωτές [2]. Η κακή ποιότητα ισχύος μπορεί να οδηγήσει στην υπερθέρμανση των γραμμών μεταφοράς, την βλάβη μετασχηματιστών και την μειωμένη επίδοση του εξοπλισμού του δικτύου [2]. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ παγκοσμίως να φτάνει σε επίπεδα αρκετών χιλιάδων GW [4]. Το ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών ενδέχεται να επηρεάσει την παρούσα κατάσταση των ΣΗΕ ανάλογα με την συνεισφορά τους στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος [23]. Η τάση αυτή ενδέχεται να έχει μεγάλο αντίκτυπο ιδιαίτερα στο δίκτυο διανομής των ΣΗΕ, καθώς έχουν σχεδιαστεί για μονόδρομη ροή ισχύος [24]. Ωστόσο, η παραγωγή ισχύος από ηλιακή ενέργεια μπορεί να υποστηρίξει εξίσου αμφίδρομη ροή ενέργειας και πληροφοριών, δημιουργώντας ορισμένες προκλήσεις στον σχεδιασμό και λειτουργία των ΣΗΕ καθώς δεν είναι σχεδιασμένα να επιτελούν τέτοιες ενέργειες [23]. Έρευνες έχουν δείξει ότι η αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων παραγωγής ισχύος με φωτοβολταϊκές ενδέχεται να προξενήσει αστάθειες σε βασικά μεγέθη του ΣΗΕ [23]. Για παράδειγμα εάν οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνδεθούν συγκεντρωτικά απευθείας στο ΣΗΕ μεγέθη όπως η τάση, η συχνότητα, η ενεργός και άεργος ισχύς του δικτύου θα επηρεαστούν, ενδεχομένως χειροτερεύοντας τους δείκτες αξιοπιστίας του και υποβαθμίζοντας την λειτουργία του [5]. Επίσης, μια απότομη μεταβολή του φορτίου ή της παραγωγής των φωτοβολταϊκών λόγω σκίασης επηρεάζει την γωνία των συμβατικών γεννητριών καθώς καλούνται να καλύψουν την διαφορά ισχύος μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ώστε να μην αποκοπούν φορτία και βρεθεί το ΣΗΕ σε συνθήκες αστάθειας [23]. Γι' αυτό είναι σημαντικό να εγκατασταθούν κατάλληλα συστήματα ελέγχου και αντιστάθμισης ισχύος, ώστε οι φωτοβολταϊκές μονάδες να λειτουργούν συντονισμένα με τις απαιτήσεις του ΣΗΕ [5]. Από την άλλη, η αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκές μονάδες φαίνεται ότι βοηθάει στην ευστάθεια του συστήματος κατά την διάρκεια μιας διαταραχής καθώς υπάρχει καλύτερη κατανομή της παραγωγής, συμβαίνουν μικρότερες τοπικές διαταραχές και αποσυμφορείται το δίκτυο διότι η παραγωγή βρίσκεται κοντά στο φορτίο [23]. Ο σχεδιασμός για την ένταξη των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο πρέπει να γίνει με σωστό τρόπο και να είναι ξεκάθαρος για τις

εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να μπορούν να τον λειτουργούν ασφαλή και αποτελεσματικά [2]. Επιπλέον, η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκών είναι απαραίτητη για την μετάβαση σε ένα σύστημα πιο φιλικό προς το περιβάλλον, ωστόσο, εισάγει ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα, όπως η μεταβλητή παραγωγή τους και οι επιπτώσεις στην ολική αρμονική παραμόρφωση [4].

3.3.1 Μεταβλητή Παραγωγή

Τα φωτοβολταϊκά, ως γνωστόν, εξαρτώνται από την ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς δεν παράγουν σταθερή ισχύ, επομένως, η ενσωμάτωσή τους σε ηλεκτρικά συστήματα απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό καθώς προκύπτουν διάφορες προκλήσεις [4]. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως τα φωτοβολταϊκά οροφής και τα ηλιακά πάρκα στο δίκτυο έχουν ως στόχο την συνεχή κάλυψη του φορτίου ακόμη και σε συνθήκες περιορισμένης ηλιακής ακτινοβολίας [23]. Ειδικά στην περίπτωση που παρατηρηθεί σκίαση ενός ολόκληρου φωτοβολταϊκού πάρκου η παραγωγή ισχύος του θα μειωθεί σημαντικά ανάλογα με την διάρκεια και το ποσοστό της σκίασης [23]. Τα σύννεφα μπλοκάρουν την ηλιακή ακτινοβολία του ήλιου ελαττώνοντας την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά σε ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς τάσης [23]. Για παράδειγμα μια σκίαση ενός λεπτού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της παραγωγής ισχύος κατά 75 % και να δημιουργήσει προβλήματα σταθερότητας στο δίκτυο αν δεν υπάρχει πρόβλεψη ή εξισορρόπηση [23]. Η μεταβλητή παραγωγή ενέργειας μπορεί να προκαλέσει απότομες μεταβολές σε σημαντικά μεγέθη όπως η συχνότητα και η τάση του συστήματος, το οποίο επηρεάζει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του [4,6]. Επίσης, οι κινήσεις των σύννεφων όσο μεταβάλλεται η ηλιακή ακτινοβολία λόγω ώρας, καιρού και πάχους σύννεφων ενδέχεται να επηρεάσουν τις καμπύλες ρεύματος τάσης αλλάζοντας την παραγόμενη ισχύ της μονάδας, μειώνοντας την τάση και το ρεύμα εξόδου του πάνελ και αυξάνοντας την θερμοκρασία του [23]. Η μεταβολή των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού οδηγεί στην μειωμένη απόδοσή του, στην αστάθεια ισχύος εξόδου, στην δυσκολία ελέγχου του συστήματος και τελικά στην υπερφόρτωση ή αποσταθεροποίηση του συστήματος [23]. Επιπλέον, η υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών επηρεάζει την ευστάθεια του συστήματος, καθώς μπορεί να προκαλέσει απόκλιση των τάσεων σε διάφορα σημεία του δικτύου, μεταβάλλοντας την γωνία του ρότορα των γεννητριών, ειδικά εάν αλλάξει η τοπολογία ή το συνολικό φορτίο του, καθώς τα φωτοβολταϊκά δεν παρέχουν φυσική αδράνεια στο

σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [6]. Επίσης, η χωροταξία και η τοποθεσία των φωτοβολταϊκών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιβαρύνει συγκεκριμένα σημεία του δικτύου, αυξάνοντας τον κίνδυνο αστάθειας [6]. Αυτά τα φαινόμενα γίνονται πιο έντονα λόγω της έλλειψης αποθήκευσης ενέργειας και της μικρής αδράνειας που παρέχουν οι φωτοβολταϊκές μονάδες στην προσπάθεια σταθεροποίησης του συστήματος σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης [6]. Σε ΣΗΕ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, η μεταβλητότητα της ηλιακής παραγωγής επηρεάζει συνεχώς την ευστάθεια του συστήματος, με αποτέλεσμα οι δείκτες ισχύος και τάσης να μεταβάλλονται ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία τη δεδομένη στιγμή [25]. Όταν αλλάζει η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται η ισχύς που παράγουν τα φωτοβολταϊκά, οπότε επιβάλλεται να μελετηθούν διαφορετικά σενάρια παραγωγής ισχύος από φωτοβολταϊκά στο δίκτυο, για να προσδιοριστεί ο τρόπος που επηρεάζεται το ΣΗΕ κάθε φορά που τα φωτοβολταϊκά σκιάζονται [23]. Ταυτόχρονα, προκειμένου να αποφεύγονται οι αστάθειες τάσεων και συχνότητας του δικτύου, λόγω απότομων μεταβολών ισχύος, πρέπει να υπολογίζεται ο αριθμός των φωτοβολταϊκών που μπορεί να “αντέξει” ένα ΣΗΕ χωρίς να προκληθούν σοβαρά προβλήματα αστάθειας και να εξεταστεί η βέλτιστη τοποθέτησή τους σε σωστά σημεία του δικτύου ώστε να βοηθούν στην λειτουργία του και να δημιουργούν όσο το δυνατόν λιγότερα θέματα στην παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ισχύος [26]. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη νέων δεικτών επίδοσης που λαμβάνουν υπόψη τις ταχύτατες μεταβολές της ηλιακής παραγωγής, ώστε να υποστηρίζονται πιο έγκαιρες και ακριβείς αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας παράλληλα την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων προστασίας σε μελλοντικά δίκτυα με έντονη παρουσία φωτοβολταϊκών μονάδων [25].

3.3.2 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion)

Για την σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο ΣΗΕ χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/AC καθώς ρυθμίζουν την τάση και την συχνότητα της παραγόμενης ισχύος ώστε να είναι σε συγχρονισμό με το δίκτυο και διευκολύνουν τον έλεγχο και την παρακολούθηση των φωτοβολταϊκών μονάδων [26]. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά προκαλούν συχνά διαταραχές στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του δικτύου γνωστές ως πρόβλημα αρμονικών [26]. Ο δείκτης που παρουσιάζει το μέγεθος της παραμόρφωσης, λόγω των αρμονικών, στο κοινό σημείο σύζευξης (PCC) δηλαδή, στο σημείο του δικτύου που

συνδέεται ο μετατροπέας με το δίκτυο μεταφοράς ή διανομής ονομάζεται Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD) [2]. Ουσιαστικά, υπολογίζει το πόσο επηρεάζεται η καθαρή κυματομορφή από τις επιπλέον συχνότητες και μπορεί να εφαρμοστεί είτε στο ρεύμα είτε στην τάση [2]. Ο τύπος της είναι ο εξής:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum F_n^2}}{F_1} \times 100 \%$$

Όπου $n > 1$ και F_i οι κυματομορφές [2].

Σύμφωνα με κάποια πρότυπα, για τους μετασχηματιστές που λειτουργούν σε περιβάλλον με αρμονικές, ισχύουν ότι: η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (THDi) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 5% και η ενεργός τιμή της τάσης σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 110% της ονομαστικής τάσης όταν ο μετασχηματιστής είναι χωρίς φορτίο, και το 105% όταν λειτουργεί στο ονομαστικό του φορτίο [2]. Αυτό σημαίνει ότι η παραμόρφωση τάσης λόγω αρμονικών πρέπει να μην υπερβαίνει το 0,458 σε συνθήκες χωρίς φορτίο και το 0,32 όταν το φορτίο είναι στο μέγιστο [2]. Σε δίκτυα χαμηλής τάσης, όπως το δίκτυο διανομής, το όριο για την ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης (THDv) είναι 8% και το όριο για το ποσοστό παραμόρφωσης της τάσης που προκαλείται από μία μόνο αρμονική (IHDv) είναι μέχρι 5% [26]. Επίσης, για δίκτυα μέσης τάσης το όριο της THDv είναι 5% και της IHDv μέχρι 3% [26]. Για την διασφάλιση της ποιότητας της ισχύος και την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού του δικτύου, υπάρχει και το πρότυπο IEEE 519-2014 το οποίο παρέχει οδηγίες για τον έλεγχο των αρμονικών παραμορφώσεων με βάση το ρεύμα βραχυκυκλώματος και το μέγιστο ρεύμα του φορτίου [26]. Πιο αναλυτικά αναφέρει ότι η μέγιστη ολική παραμόρφωση του ρεύματος όταν το ρεύμα βραχυκυκλώματος (Isc) είναι από 20 μέχρι 50 φορές μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα (IL), επιτρέπεται να είναι μέχρι 8% [26]. Είναι σημαντικό τα αρμονικά ρεύματα να βρίσκονται μεταξύ των ορίων που έχουν οριστεί από τα IEEE πρότυπα διότι εάν ξεπεραστούν ενδέχεται να προκληθούν αρνητικές συνέπειες στο ΣΗΕ όπως απώλειες ισχύος, μειωμένη ποιότητα ισχύος, αποκοπή τμημάτων του δικτύου και ολική κατάρρευση του ΣΗΕ [26]. Ταυτόχρονα, η υπέρβαση των παραπάνω ορίων της αρμονικής τάσης ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στα ευαίσθητα στοιχεία του δικτύου (υπολογιστές, συστήματα αυτοματισμού, UPS κ.ά.) όπως υπερθέρμανση, λανθασμένη λειτουργία και πρόωρη φθορά [26]. Πιο απλά, οι δείκτες THDv και THDi δείχνουν πόσο έχει παραμορφωθεί το σήμα της τάσης και του ρεύματος από το ιδανικό ημιτονοειδές,

λόγω της παρουσίας αρμονικών, δηλαδή ανεπιθύμητων συχνοτήτων που προστίθενται στο σήμα [26]. Οι συχνότητες αυτές δημιουργούνται συνήθως λόγω της ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ή απότομων διαταραχών που συμβαίνουν στο δίκτυο [6]. Είναι γενικά δύο δείκτες της αξιοπιστίας του δικτύου καθώς προσφέρουν μια εικόνα του αποτελέσματος πάνω στην τάση και το ρεύμα όλων των αρμονικών που παρουσιάζονται στο σύστημα [26]. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές τους, τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα των αντίστοιχων μεγεθών και απαιτείται η χρήση ειδικών φίλτρων αρμονικών [26]. Από την άλλη, ο δείκτης IHDv μετράει πόσο επηρεάζει η κάθε μεμονωμένη αρμονική (π.χ. η 3η, η 5η, η 7η κ.ά.) το σήμα της τάσης [26]. Ο IHDv χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό προβλημάτων που προέρχονται από συγκεκριμένες αρμονικές και έτσι μπορούμε να εστιάσουμε την αντιμετώπιση εκεί που υπάρχει το πρόβλημα, επιλέγοντας τα κατάλληλα φίλτρα για εκείνη την αρμονική με αποτέλεσμα να προστατεύουμε το σύστημα πιο ουσιαστικά [26]. Όταν υπάρχει ισχυρή παρουσία μετατροπένων φωτοβολταϊκών σε ένα ΣΗΕ είναι σημαντικό να γίνεται επαρκής ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος για να διαπιστωθεί εάν παραβιάζονται τα όρια των παραμορφώσεων [26]. Εάν κριθεί απαραίτητη η εγκατάσταση φίλτρου για τις αρμονικές που εισάγονται στο σύστημα, αυτό θα οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης του εξοπλισμού, μείωση των βλαβών των στοιχείων του δικτύου και εξασφάλιση ποιοτικότερης ισχύος στους καταναλωτές [26]. Τα ΣΗΕ δεν είχαν αρχικά σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζουν την ευρεία χρήση φωτοβολταϊκών μονάδων, γεγονός που δημιουργεί πλέον σημαντικές προκλήσεις [2]. Οι αλλαγές αυτές καθιστούν αναγκαία την προσαρμογή των κανονισμών λειτουργίας των δικτύων σε πολλές χώρες, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις που προκύπτουν από την εγκατάσταση και λειτουργία τους [2]. Παράλληλα, είναι απαραίτητη η αναθεώρηση των διεθνών προτύπων που αφορούν την ποιότητα ισχύος, καθώς οι μέθοδοι και τα τεχνικά μέσα που χρησιμοποιούνταν μέχρι σήμερα για τη μέτρησή της δεν είναι πλέον κατάλληλα ή επαρκή για τα σύγχρονα δίκτυα [2]. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο να εξασφαλίζεται επαρκής εφεδρεία από συμβατικές γεννήτριες, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αστάθειας, αναξιοπιστίας, αποκοπής φορτίων, καταστροφής του εξοπλισμού και γενικότερα υποβάθμισης του ΣΗΕ [6].

Κεφάλαιο 4 Ενδεχόμενα Σενάρια σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μελέτη των ενδεχόμενων καταστάσεων αποτελεί βασικό εργαλείο πρόβλεψης και πρόληψης κρίσιμων καταστάσεων που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία και την αξιοπιστία του δικτύου. Ως ενδεχόμενη κατάσταση (contingency) σε ένα ΣΗΕ ορίζεται η απώλεια ενός ή περισσότερων στοιχείων του δικτύου, όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές ή γραμμές μεταφοράς, είτε πρόκειται για προγραμματισμένη είτε για απρόβλεπτη διακοπή [27]. Οι δύο βασικές κατηγορίες ανάλυσης για ενδεχόμενα σενάρια είναι η ανάλυση μόνιμης κατάστασης (Steady State Analysis), μέσω της οποίας αξιολογείται η στατική συμπεριφορά του συστήματος μετά την εκκαθάριση του σφάλματος και η ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας (Transient Stability Analysis), όπου εξετάζεται η απόκριση του συστήματος σε απότομες και δυναμικές διαταραχές, όπως βραχυκυκλώματα και απώλειες στοιχείων. Κρίσιμη, επίσης, θεωρείται η ασφάλεια στις ενδεχόμενες καταστάσεις δηλαδή η ικανότητα του συστήματος να αντέχει και να συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά ή με ελεγχόμενο τρόπο, όταν προκύψει μία απρόσμενη βλάβη ή μεταβολή σε κάποιο από τα βασικά του στοιχεία.

4.1 Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης

Μια από τις σοβαρότερες δυσκολίες που προκύπτουν από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μονάδων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η εισαγωγή αρμονικών ταλαντώσεις στην ισχύ που παράγουν λόγω εναλλαγών της ηλιακής ακτινοβολίας [4]. Η συγχρονισμένη λειτουργία των γεννητριών παραγωγής ενέργειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα σταθερότητας [15]. Όλες οι σύγχρονες γεννήτριες πρέπει να παραμένουν σε συγχρονισμό (in-step) για να λειτουργεί ορθά το σύστημα και να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ισχύς στους καταναλωτές [15]. Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με την απότομη μεταβολή του φορτίου, τα σφάλματα σε στοιχεία του δικτύου ή η αλλαγή της γωνίας του ρότορα των γεννητριών μπορεί να επηρεάσει τόσο τις τάσεις όσο και τα ρεύματα του συστήματος προκαλώντας πτώσεις τάσεων, αποκοπές φορτίων ακόμη και καταστροφή του εξοπλισμού [4]. Για να είναι το ΣΗΕ σε θέση να αντέχει

τις διαταραχές που προκαλούνται ανεξάρτητα από το είδος, το μέγεθος και την διάρκεια τους κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός της σταθερής του κατάστασης [4,15].

Η Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης (SSA) αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στον τομέα των ΣΗΕ, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης και της ασφάλειάς τους υπό διαφορετικά πιθανά σενάρια βλαβών σε κατάσταση λειτουργίας μετά τον καθαρισμό ενός σφάλματος [4]. Η θερμική καταπόνηση των καλωδίων, η πτώση της τάσης και η σταθερότητα του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την ικανότητα μεταφοράς ισχύος των γραμμών μεταφοράς [28]. Αρχικά, ελέγχονται περιπτώσεις που μεγάλα ρεύματα διέρχονται από τα καλώδια με αποτέλεσμα να υπερθερμανθούν οδηγώντας σε ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως το μέταλλο να χάσει την αντοχή του, το σύρμα να διασταλεί και να 'κρεμάσει', κάνοντας πιο επικίνδυνη την επαφή με δέντρα ή άλλα αντικείμενα ή ακόμη σε ακραίες περιπτώσεις να προκληθεί ζημιά στο μονωτικό υλικό και να προκληθεί φωτιά [28]. Επίσης, γίνεται υπολογισμός της πτώσης τάσης και του δείκτη L ο οποίος είναι ένας μαθηματικός δείκτης που χρησιμοποιείται για να μετράει πόσο σταθερή είναι η τάση σε ένα συγκεκριμένο σημείο φόρτισης του συστήματος [28]. Αυτή η τεχνική λαμβάνει υπόψη, συνήθως, μία μόνο μεταβολή του συστήματος (N-1) και διερευνά τους κρίσιμους ζυγούς τάσης σε περιπτώσεις όπως η απώλεια μιας γεννήτριας, η καταστροφή ενός μετασχηματιστή ή το βραχυκύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς [10]. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος στην σταθερή μετασφαλματική κατάσταση λειτουργίας και υπολογίζονται οι νέες τάσεις στους κρίσιμους ζυγούς καθώς και ο δείκτης L ως εξής :

$$L_j = | 1 - \sum_{i=1}^{i=g} F_{ji} \cdot \frac{V_i}{V_j} |$$

όπου g είναι οι ζυγοί των γεννητριών, j είναι οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος και F_{ji} είναι το γινόμενο $[Y_{jj}]^{-1} \cdot [Y_{ji}]$ τα οποία προκύπτουν από τον πίνακα αγωγιμοτήτων του συστήματος [10,28]. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ζυγό του συστήματος που συνδέεται με φορτία [28]. Ταυτόχρονα, τα ρεύματα σφάλματος έχουν υπολογιστεί τόσο για συμμετρικά τριφασικά όσο και για ασύμμετρα μονοφασικά βραχυκυκλώματα [10]. Όταν η τιμή του δείκτη L πλησιάζει το 0 το σύστημα θεωρείται σταθερό και η τάση του ζυγού δεν κινδυνεύει να μεταβληθεί σε ακραίο βαθμό, απέχοντας πολύ από την αστάθεια [28]. Μια τιμή μεταξύ 0 και 1 εγκυμονεί κινδύνους, αρχίζει να φαίνεται μια πίεση στην ευστάθεια και χρειάζεται ιδιαίτερους χειρισμούς όπως η ρύθμιση τάσης και η

αντιστάθμιση άεργου ισχύος [28]. Σε περιπτώσεις που η τιμή του δείκτη L αυξηθεί περαιτέρω και πλησιάσει το 1, το σύστημα βρίσκεται στην επικίνδυνη ζώνη, πλέον απέχει ελάχιστα από την αστάθεια και για να αποφευχθεί μια γενική κατάρρευση του δικτύου επιβάλλεται να ρυθμίσουμε την παραγωγή ισχύος, να χρησιμοποιηθούν εφεδρικές μονάδες ή σε ακραίες περιπτώσεις να αποκοπούν φορτία [28]. Εάν παρόλα αυτά ο δείκτης L γίνει ίσος με 1, το δίκτυο αδυνατεί να τροφοδοτήσει τα φορτία επαρκώς και οδηγείται σε κατάρρευση τάσης [28]. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα εισέρχεται στο στάδιο προστασίας όπου η ρύθμιση τάσης από τις γεννήτριες είναι αδύνατη και ο μόνος τρόπος να επανέλθει η ευστάθεια είναι με την αποκοπή φορτίων και την απόζευξη γεννητριών ή γραμμών μεταφοράς για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του ευαίσθητου εξοπλισμού του δικτύου [28]. Με αυτήν την διαδικασία προσδιορίζεται το όριο φόρτισης ενός δικτύου [28]. Παρόμοια ανάλυση μπορεί να γίνει σε περιπτώσεις με ή χωρίς την σύνδεση της φωτοβολταϊκής μονάδας με το δίκτυο [10]. Πέρα από τις τιμές των ρευμάτων σφάλματος χωρίς το φωτοβολταϊκό, η ανάλυση αυτή βοηθά στο να εκτιμηθεί κατά πόσο η σύνδεση της μονάδας επηρεάζει τα επίπεδα ρεύματος σφάλματος στον υποσταθμό [10]. Επιπλέον, η καταλληλότητα του σημείου σύνδεσης της φωτοβολταϊκής μονάδας εξαρτάται σημαντικά από την αντοχή του σε σφάλματα [10]. Με βάση τις μετρήσεις που γίνονται, συνήθως με την βοήθεια κάποιου λογισμικού, αξιολογείται εάν ένα ΣΗΕ είναι ικανό να παραμείνει σε ευστάθεια μετά τον καθαρισμό του σφάλματος [10]. Τελικά, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τάσεων των ζυγών και των ρευμάτων βραχυκυκλώματος, για τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, προκύπτει η βέλτιστη τοπολογία και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών μονάδων στο ΣΗΕ για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητάς του [10]. Πιο ειδικά, οι φωτοβολταϊκές μονάδες πρέπει να τροφοδοτούν το σύστημα με την απαραίτητη ισχύ και ταυτόχρονα η διακύμανση της τάσης να είναι εντός των ορίων $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής για φυσιολογικές συνθήκες και $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (contingencies) ενώ παράλληλα λειτουργούν ικανοποιητικά σε ένα εύρος συχνοτήτων 49.5 – 50.5 Hz με μικρές μεταβολές του συντελεστή ισχύος [4]. Κάθε σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος έχει ένα μέγιστο όριο ισχύος που μπορεί να μεταφέρει με ασφάλεια το οποίο ονομάζεται P_{max} και στην κανονική του λειτουργία, το σύστημα δουλεύει σε κάποιο επίπεδο παραγωγής ισχύος το οποίο ονομάζεται P_{op} [28]. Το όριο της ευστάθειας στην μόνιμη κατάσταση ονομάζεται περιθώριο ευστάθειας (stability margin),

εξαρτάται σημαντικά από την διαφορά αυτών των δύο ποσοτήτων και υπολογίζεται ως εξής:

$$\%stability\ margin = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max}} \times 100\%$$

Η ερμηνεία του περιθωρίου ευστάθειας στη μόνιμη κατάσταση σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τον συγχρονισμό και τη ευστάθεια της τάσης υπό αυξανόμενες συνθήκες φόρτισης [28]. Όταν το περιθώριο ευστάθειας πλησιάζει το 100% το σύστημα λειτουργεί αποδοτικά, μπορεί να αντέξει μεταβολές στο φορτίο και στην παραγωγή ισχύος και διαθέτει αυξημένη ικανότητα να απορροφήσει μικρές διαταραχές όπως η βλάβη μιας γραμμής μεταφοράς [28]. Όσο μικρότερο είναι το περιθώριο ευστάθειας τόσο πιο ευάλωτο είναι το σύστημα σε οποιαδήποτε διαταραχή και απέχει λιγότερο από την αστάθεια [28]. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ενίσχυσης της ευστάθειας όπως η αύξηση της παραγωγής ισχύος και η χρήση συστημάτων ελέγχου ευστάθειας ώστε να σταθεροποιηθεί η τάση [28]. Στην ακραία περίπτωση που το περιθώριο ευστάθειας μηδενιστεί το σύστημα λειτουργεί ακριβώς στο σημείο οριακής ευστάθειας ($P_{op} = P_{max}$) και το δίκτυο έχει μηδενική ανοχή σε διαταραχές [28]. Ακόμη και μια πολύ μικρή μεταβολή θα οδηγήσει σε αστάθεια, δηλαδή απώλεια συγχρονισμού γεννητριών, κατάρρευση τάσης ή γενική κατάρρευση του δικτύου και για να το επαναφέρουμε, πρέπει να μειώσουμε το φορτίο που καλύπτει ή να αυξήσουμε την παραγωγή ισχύος με την βοήθεια εφεδρικών μονάδων ή αποθήκευσης ενέργειας [28].

4.2 Ανάλυση Μεταβατικής Ευστάθειας

Η ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τον συγχρονισμό του, δηλαδή να συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά χωρίς αποσυντονισμό των γεννητριών του, αμέσως μετά από μια μεγάλη και ξαφνική διαταραχή ονομάζεται μεταβατική ευστάθεια [15]. Όταν παρουσιάζεται σφάλμα σε ένα ΣΗΕ, η ενέργεια απελευθερώνεται γρήγορα, προκαλώντας μια ξαφνική διαταραχή στο σύστημα [6]. Η αστάθεια του συστήματος μπορεί να προκληθεί από αποκλίσεις στην γωνία του ρότορα, μεταβολές στην ροή ισχύος, βύθιση τάσεων κρίσιμων ζυγών, εναλλαγές στην συχνότητα του συστήματος κ.ά. [15]. Αν και η Ανάλυση Ροής Φορτίου προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος πριν και μετά από μια διαταραχή, δεν μπορεί να αποτυπώσει τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, δηλαδή στο κρίσιμο

χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης και της εκκαθάρισης του σφάλματος [7]. Η Ανάλυση της Μεταβατικής Ευστάθειας (Transient Stability Analysis) ενός ΣΗΕ παρέχει δεδομένα σχετικά με τη σταθερότητα της γωνίας του ρότορα των γεννητριών και την ικανότητα συγχρονισμού αφού υποβληθεί σε διαφορετικές διαταραχές πριν τον καθαρισμό τους [7]. Πριν προχωρήσουμε στην TSA, είναι αναγκαίο να προηγηθεί η Ανάλυση Ροής Φορτίου του ΣΗΕ, προκειμένου να προσδιοριστεί η νέα κατάσταση ισορροπίας του συστήματος μετά τη διαταραχή [7]. Αυτή η διαδικασία αποτελεί τη βάση για την ακριβή αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη διάρκεια της μεταβατικής φάσης [7]. Η TSA θα πρέπει να πραγματοποιείται για να διασφαλιστεί ότι ένα ΣΗΕ μπορεί να αντισταθεί στην μεταβατική κατάσταση που ακολουθεί μετά από κάποια διαταραχή [15]. Κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών, για την αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος χρησιμοποιούνται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των συσκευών [7]. Η μεταβατική ευστάθεια επηρεάζεται από τον τρόπο λειτουργίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων στοιχείων του συστήματος, όπως η σύγχρονη γεννήτρια, ο διεγέρτης, ο ρυθμιστής στροφών και ο μετατροπέας τάσης [7]. Ο διεγέρτης είναι μια μονάδα που υποστηρίζει την προστασία της σύγχρονης γεννήτριας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και συμβάλλει στη σταθεροποίηση του συστήματος [7]. Το σύστημα διέγερσης ρυθμίζει το ρεύμα πεδίου της γεννήτριας με βάση την απαιτούμενη τάση στους ακροδέκτες της [7]. Ο ρυθμιστής στροφών αποτελεί τον βασικό μηχανισμό ελέγχου της σύγχρονης γεννήτριας, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση της σταθερότητας της πραγματικής ισχύος και της συχνότητας του συστήματος σε περιπτώσεις διαταραχών [7]. Ο ρυθμιστής ελέγχει την παροχή της μηχανικής ισχύος προς τη γεννήτρια, ώστε να προσαρμόζεται άμεσα στις απαιτήσεις του συστήματος [7]. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για TSA σε ένα ΣΗΕ με τις πιο διαδεδομένες να είναι τρεις: η άμεση μέθοδος (direct method), η μέθοδος προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου (time domain) και η μέθοδος τεχνητής νοημοσύνης (AI) [29]. Η άμεση μέθοδος βασίζεται στο κριτήριο ευστάθειας Lyapunov, με σκοπό τη διαμόρφωση μιας κατάλληλης μαθηματικής συνάρτησης που αποτυπώνει ποσοτικά τη μεταβατική ευστάθεια του ΣΗΕ [29]. Η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου βασίζεται στην επίλυση διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος, μέσω αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης [29]. Η ευστάθεια του συστήματος αξιολογείται με βάση την εξέλιξη της γωνίας του ρότορα των γεννητριών, θεωρώντας σε κάθε χρονικό βήμα ότι η επιτάχυνση

του ρότορα παραμένει σταθερή [29]. Παραδοσιακά, αυτές οι μέθοδοι εφαρμόζονται με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η τοπολογία του συστήματος, τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, οι συνθήκες λειτουργίας και τα σενάρια των διαταραχών [29]. Η εμφάνιση της τεχνολογίας WAMS (Wide Area Measurement Systems) δίνει τη δυνατότητα στην μέθοδο τεχνητής νοημοσύνης να αξιοποιήσει πραγματικά δεδομένα για την διερεύνηση της μεταβατικής ευστάθειας σε πραγματικό χρόνο [29]. Έτσι, η τεχνητή νοημοσύνη δημιουργεί βάσεις δεδομένων μέσω πολλών εξομοιώσεων, περιορίζει την ανάγκη για εκτεταμένες offline προσομοιώσεις και κατασκευάζει μοντέλα με χρήση έξυπνων αλγορίθμων, επιτρέποντας την αξιόπιστη αξιολόγηση της ευστάθειας του συστήματος [29]. Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ευστάθειας των ΣΗΕ με τους πιο βασικούς να είναι: ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ενός σφάλματος (Critical Clearing Time), η σταθμισμένη μέση αδράνεια, η ηλεκτρική εμπέδηση, η υπομεταβατική και μεταβατική αντίδραση των γεννητριών και η υπομεταβατική και μεταβατική σταθερά χρόνου των γεννητριών [6].

4.2.1 Κρίσιμος Χρόνος Εκκαθάρισης

Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (CCT) είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα για να αποκαταστήσει το σφάλμα και να επιστρέψει σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας χωρίς ζημιές στο σύστημα [6]. Απλούστερα, είναι το μέγιστο χρονικό όριο εντός του οποίου πρέπει να αποκατασταθεί το σφάλμα για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα παραμένει σε ευστάθεια [6]. Επίσης, εξαρτάται από την ποσότητα της κινητικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα μετά από μια διαταραχή [6]. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια του συστήματος, τόσο περισσότερη κινητική ενέργεια αποθηκεύεται και τόσο μεγαλύτερος είναι ο CCT [6]. Ένας μεγαλύτερος CCT σηματοδοτεί αυξημένη σταθερότητα του συστήματος, καθώς παρέχει περισσότερο χρόνο για την ανάκαμψη από διαταραχές πριν προκληθεί απώλεια συγχρονισμού [6]. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μπορεί να επηρεάσει το CCT με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον χώρο εγκατάστασης στο δίκτυο και το ποσοστό διείσδυσής τους [6,7]. Παρότι η ενσωμάτωσή τους τείνει να μειώνει τη συνολική αδράνεια του συστήματος και να οδηγήσει σε μικρότερο CCT και αυξημένο κίνδυνο αστάθειας η στρατηγική τοποθέτησή τους μπορεί να συμβάλει στην ανακατανομή της ροής ισχύος βελτιώνοντας τελικά την λειτουργία του συστήματος [6,7]. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι σημαντικός και για τον σχεδιασμό προστατευτικών διατάξεων

όπως τα ρελέ και οι διακόπτες ισχύος ενός ΣΗΕ καθώς πρέπει ο χρόνος απομόνωσης της βλάβης να είναι μικρότερος από τον CCT ώστε το σύστημα να παραμείνει σε ευστάθεια [12]. Μια αύξηση του CCT θα αυξήσει τις μεταβολές της τάσης και της συχνότητας του συστήματος και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητο να παρακολουθούμε αυτές τις παραμέτρους και για διαφορετικούς χρόνους εκκαθάρισης να γίνεται έλεγχος εάν το σύστημα παραμένει σε ευστάθεια ή χάνει τον συγχρονισμό του [12]. Η καθυστέρηση στην εκκαθάριση μίας βλάβης μπορεί να οδηγήσει το ΣΗΕ σε ασταθή λειτουργία καθώς η δυναμική απόκριση των γεννητριών επηρεάζεται άμεσα από τον χρόνο απομάκρυνσης του σφάλματος [12]. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος να παραμένει μικρότερος του CCT ώστε το δίκτυο να μην παραβιάζει τα όρια σταθερότητας και να εξασφαλίζεται η συνέχιση της ομαλής και συγχρονισμένης λειτουργίας του [12].

4.2.2 Σταθμισμένη Μέση Αδράνεια

Η σταθμισμένη μέση αδράνεια είναι μια παράμετρος της μεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ και υποδηλώνει την ικανότητα του να διατηρεί την ευστάθειά του κατά την διάρκεια μιας διαταραχής [6]. Ουσιαστικά, εκφράζει το ποσό της κινητική ενέργεια που αποθηκεύουν συνολικά όλα τα περιστρεφόμενα μέρη του δικτύου [6]. Η συμβολή κάθε μηχανής στη συνολική αδράνεια δεν είναι ίδια, αλλά σταθμίζεται ανάλογα με την ισχύ που παράγει σε σχέση με τη συνολική ισχύ του συστήματος [6]. Για παράδειγμα, μια μεγάλη γεννήτρια που παρέχει μεγάλο ποσό ισχύος στο δίκτυο, αποθηκεύει περισσότερη κινητική ενέργεια στον ρότορά της και άρα διαθέτει μεγάλη αδράνεια [6]. Με πιο απλά λόγια, εάν χαθεί ισχύς απότομα στο σύστημα, αυτή η γεννήτρια μπορεί να προσφέρει περισσότερη ενέργεια για λίγα δευτερόλεπτα ώστε να μη πέσει αμέσως η συχνότητα συμβάλλοντας στην διατήρηση της ευστάθειας [6]. Ο μαθηματικός τύπος της σταθμισμένης μέσης αδράνειας είναι ο εξής :

$$H_{sys} = \frac{\sum(H_i \times S_i)}{\sum S_i}$$

Όπου H_i είναι ο συντελεστής αδράνειας της γεννήτριας i και S_i είναι η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας i [6]. Όταν η H_{sys} είναι υψηλή, τότε το δίκτυο διαθέτει μεγάλη ποσότητα αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας στους ρότορες των γεννητριών, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό σε ξαφνικές διαταραχές εφόσον η συχνότητα μεταβάλλεται αργά [6]. Αντίθετα,

όταν η H_{sys} είναι χαμηλή, τότε υπάρχει λιγότερη αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στους ρότορες και σε μια απότομη μεταβολή του φορτίου, η συχνότητα αλλάζει πιο γρήγορα και υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος αστάθειας [6]. Ο υπολογισμός της H_{sys} μπορεί να αξιολογήσει την απόκριση του συστήματος σε διάφορες διαταραχές και να οδηγήσει τους διαχειριστές του να πάρουν τις κατάλληλες αποφάσεις για την συνέχιση της ασφαλούς και σταθερής λειτουργίας του [6]. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η μαζική ενσωμάτωση ΑΠΕ σε ένα ΣΗΕ έχει σημαντική επίδραση στην σταθμισμένη μέση αδράνεια του δικτύου αφού διαθέτουν πολύ μικρή αδράνεια καθώς δεν βασίζονται σε μεγάλες μηχανές με ρότορες που αποθηκεύουν κινητική ενέργεια, όπως οι συμβατικές γεννήτριες [6]. Όταν το ποσοστό διείσδυσης τους στο δίκτυο είναι μικρό, το πρόβλημα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού το μεγαλύτερο μέρος της αδράνειας το παρέχουν οι κλασικές γεννήτριες, ωστόσο, όταν το ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ γίνει μεγάλο, τότε το σύστημα γίνεται πιο ευάλωτο [6]. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση διαταραχής όπως μια βλάβη ή μια απότομη αύξηση του συνολικού φορτίου, η συχνότητα θα αλλάξει πολύ πιο γρήγορα και ενδέχεται το δίκτυο να οδηγηθεί σε αστάθεια [6].

4.2.3 Ηλεκτρική Εμπέδηση

Η ηλεκτρική εμπέδηση (E_d) μεταξύ δύο σημείων παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των συνεπειών που προκαλεί ένα σφάλμα σε ένα σημείο του δικτύου και η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε αυτό, ώστε να αξιολογηθεί η ευστάθεια του ΣΗΕ [6]. Η υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς, οι αλλαγές του φορτίου και τα βραχυκυκλώματα επηρεάζουν τα στοιχεία του δικτύου και μεταβάλλουν μεγέθη όπως η τάση, το ρεύμα και η συχνότητά του [6]. Η επίδραση των μεταβολών αυτών στην ευστάθεια του ΣΗΕ γίνεται ξεκάθαρη με τον υπολογισμό της ηλεκτρικής εμπέδησης στα κρίσιμα σημεία του δικτύου [6]. Με αυτήν την μέθοδο γίνεται εμφανές πόσο 'δυσκολεύεται' η ηλεκτρική ισχύς να περάσει από έναν ζυγό σε έναν άλλον [6]. Πιο αναλυτικά, ο πίνακας αγωγιμοτήτων περιέχει πληροφορίες για την αγωγιμότητα ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου [6]. Λαμβάνοντας, τον αντίστροφο αυτού του πίνακα βρίσκουμε τις "ηλεκτρικές αποστάσεις" ανάμεσα στους ζυγούς [6]. Όταν η εμπέδηση ανάμεσα σε δύο ζυγούς είναι χαμηλή, τότε αυτοί είναι 'ηλεκτρικά κοντά' και το ρεύμα διέρχεται χωρίς μεγάλες απώλειες από τα δύο σημεία του δικτύου συνεπώς το ΣΗΕ διαθέτει υψηλό περιθώριο ευστάθειας, ενώ όταν η εμπέδηση είναι μεγάλη, οι κόμβοι είναι 'ηλεκτρικά μακριά' με αποτέλεσμα να

δυσκολεύεται η ισχύς να διέλθει και να χάνεται περισσότερη ενέργεια ή να χρειάζεται μεγαλύτερη τάση για την ίδια ροή ισχύος οδηγώντας σε θέματα αστάθειας [6].

4.2.4 Υπομεταβατική και Μεταβατική Αντίδραση

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η αντίδραση είναι μια παράμετρος που δείχνει πόσο η γεννήτρια αντιστέκεται στη ροή ρεύματος όταν συμβαίνει μια διαταραχή, όπως ένα βραχυκύκλωμα [6]. Στην περίπτωση που συμβεί ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα στα τυλίγματα του ρότορα, εφαρμόζονται συμμετρικές τάσεις στα άκρα του στάτη με αποτέλεσμα η μαγνητική ροή στο d-άξονα να εξαρτάται από την υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας ($X'd$) [6]. Η υπομεταβατική συμπεριφορά της γεννήτριας ξεκινάει μόλις έχει συμβεί το σφάλμα, διαρκεί μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου και σε αυτήν παρουσιάζονται υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώματος και πτώσεις τάσεις μειώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος και δημιουργώντας κίνδυνο για τον εξοπλισμό του δικτύου [6]. Από την άλλη, επειδή η αντίδραση είναι μικρή και τα ρεύματα είναι υψηλά η γεννήτρια έχει την ικανότητα να υποστηρίξει την τάση και το ΣΗΕ να διατηρηθεί σε συγχρονισμό [6]. Βέβαια με την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο τα ρεύματα βραχυκυκλώματος είναι αρκετά μικρότερα με πιθανή συνέπεια να μην ανιχνευθούν από τους διακόπτες προστασίας και να προκύψει κίνδυνος αστάθειας στο σύστημα [6]. Στη συνέχεια, μόλις το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας αρχίσει να προσαρμόζεται στην διαταραχή, η μαγνητική ροή εξαρτάται από την μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας [6]. Το μεταβατικό στάδιο διαρκεί μερικά δέκατα του δευτερολέπτου και τα ρεύματα βραχυκυκλώματος έχουν ελαττωθεί αρκετά σε σχέση με το υπομεταβατικό στάδιο, παρόλα αυτά είναι πολύ μεγαλύτερα από τα φυσιολογικά ρεύματα στην κανονική λειτουργία των γεννητριών [6]. Επίσης, η μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας ($X'd$) είναι μεγαλύτερη από την υπομεταβατική μειώνοντας την σταθερότητα της τάσης σε αυτό το στάδιο μετά την διαταραχή, ωστόσο, με την σειρά της είναι μικρότερη από την αντίδραση στη σύγχρονη κατάσταση των γεννητριών [6]. Η αντίδραση των γεννητριών αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο στην κατανόηση της συμπεριφοράς τους καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που συμβαίνουν μετά από μια διαταραχή επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση του συστήματος [6]. Για να καταλάβουμε πλήρως πώς αντιδρούν οι γεννήτριες στις διαταραχές, κρίνεται απαραίτητο να μελετηθούν τα ρεύματα βραχυκυκλώματος που εισέρχονται στο σύστημα μετά από ένα

σφάλμα στο υπομεταβατικό και μεταβατικό στάδιο για διαφορετικά σενάρια φορτίου και διαφορετική διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων συμβάλλοντας στην βελτίωση της ευστάθειας του ΣΗΕ [6].

4.2.5 Υπομεταβατική και Μεταβατική Σταθερά Χρόνου

Η υπομεταβατική σταθερά χρόνου ($T''d$) χρησιμοποιείται στην ανάλυση ενός ΣΗΕ για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά από την εμφάνιση ενός σφάλματος [6]. Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα, τα ρεύματα που περνούν στη γεννήτρια είναι τεράστια και επικίνδυνα, αλλά διαρκούν μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, συνήθως μερικούς κύκλους του δικτύου [6]. Πρακτικά αυτή η σταθερά εκφράζει την ταχύτητα που τα ρεύματα βραχυκυκλώματος της γεννήτριας μειώνονται και αρχίζουν να σταθεροποιούνται σε χαμηλότερο επίπεδο [6]. Αποτελεί εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση της υπομεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ και δίνει την δυνατότητα να εξάγουμε συμπεράσματα για την ρύθμιση των ρελέ προστασίας των στοιχείων του δικτύου [6]. Ο τύπος που υπολογίζεται είναι ο εξής :

$$T''d = T''do \times \frac{X''d}{X'd}$$

Όπου $T''do$ είναι η αρχική τιμή της υπομεταβατικής σταθεράς, $X''d$ είναι η υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας και $X'd$ είναι η μεταβατική αντίδρασή της [6]. Η υπομεταβατική σταθερά χρόνου σχετίζεται με τη συμπεριφορά του ρότορα και των τυλιγμάτων απόσβεσης της γεννήτριας [6]. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της $T''d$, τόσο πιο γρήγορα αποσβένονται τα πολύ μεγάλα αρχικά ρεύματα βραχυκυκλώματος, κάτι που είναι θετικό για την προστασία του συστήματος [6]. Αντίθετα, μια μεγαλύτερη τιμή της $T''d$ σημαίνει ότι τα υψηλά ρεύματα διαρκούν περισσότερο, αυξάνοντας τις θερμικές και ηλεκτροδυναμικές καταπονήσεις του εξοπλισμού [6]. Στη συνέχεια, τα ρεύματα βραχυκυκλώματος μειώνονται, αλλά παραμένουν ακόμη σχετικά υψηλά για κάποιο διάστημα [6]. Στο μεταβατικό στάδιο μετά από την εμφάνιση ενός σφάλματος η ταχύτητα με την οποία αποσβένονται αυτά τα ρεύματα εξαρτάται από την μεταβατική σταθερά χρόνου ($T'd$) [6]. Ο τύπος της είναι ο κάτωθι:

$$T'd = T'do \times \frac{X'd}{Xd}$$

Όπου $T'do$ είναι η αρχική σταθερά χρόνου, η $X'd$ είναι η μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας και Xd η μεταβατική αντίδρασή της [6]. Μία μικρή τιμή της $T'd$ υποδηλώνει ότι

τα ρεύματα αποσβένονται πιο γρήγορα και ο εξοπλισμός υφίσταται λιγότερη καταπόνηση συμβάλλοντας στην μεγαλύτερη ευστάθεια του ΣΗΕ [6]. Βέβαια, μια μεγάλη τιμή του $T'd$ υποδηλώνει πως τα ρεύματα βραχυκυκλώματος εισέρχονται για περισσότερο χρόνο στα τυλίγματα των γεννητριών, δημιουργώντας πιθανές βλάβες στα στοιχεία του δικτύου, υποβαθμίζοντας την ευστάθεια του ΣΗΕ [6]. Ωστόσο, με την διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ΣΗΕ αυτές οι παράμετροι ευστάθειας επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό [6]. Για παράδειγμα, εάν ένα φωτοβολταϊκό τοποθετηθεί κοντά σε ένα φορτίο ή σε ένα ασθενές σημείο του δικτύου και συμβεί κάποιο σφάλμα μπορεί να επιδεινώσει τις ταλαντώσεις και να προκαλέσει αστάθεια σε εκείνο το σημείο [6]. Επιπλέον, με την υψηλή διείσδυση PV μειώνονται οι $T''d$ και $T'd$ καθώς μειώνεται η αδράνεια του συστήματος, αυξάνοντας την απόκρισή του, αλλά καθιστώντας το πιο ευάλωτο σε διαταραχές [6].

4.3 Ασφάλεια σε Ενδεχόμενες Καταστάσεις

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της πολυπλοκότητας των ΣΗΕ, οι πιθανοί παράγοντες διαταραχών έχουν αυξηθεί, γεγονός που μειώνει τη σταθερότητα και την προβλεψιμότητα της λειτουργίας του συστήματος [25]. Το δίκτυο πλέον λειτουργεί σε ένα πιο ανταγωνιστικό περιβάλλον και για να διατηρηθεί η αξιοπιστία του σε βάθος χρόνου, απαιτείται ο σωστός σχεδιασμός του καθώς και συνεχής παρακολούθηση, ώστε να διασφαλίζεται πάντοτε η ασφάλειά του [25]. Στα ΣΗΕ, η αξιολόγηση της ασφάλειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και για τη διασφάλιση της αξιόπιστης παροχής ισχύος [27]. Ένα ΣΗΕ κατηγοριοποιείται σε πέντε βασικές καταστάσεις λειτουργίας: κανονική, συναγερμού, έκτακτης ανάγκης, κρίσιμη και αποκατάστασης [25]. Κάθε μία από αυτές αντιπροσωπεύει διαφορετικό επίπεδο ασφάλειας και απαιτεί διαφορετικές ενέργειες ελέγχου για τη διατήρηση ή επαναφορά της ευστάθειας του συστήματος [25]. Στην κανονική κατάσταση, το σύστημα πληροί όλους τους περιορισμούς λειτουργίας, η παραγωγή καλύπτει πλήρως τη ζήτηση και δεν παρατηρούνται υπερφορτώσεις ή αποκλίσεις τάσης και συχνότητας [25]. Όταν αυξάνεται η πιθανότητα διαταραχής, το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση συναγερμού, όπου παρόλο που οι περιορισμοί συνεχίζουν να ικανοποιούνται, ενδέχεται μία επερχόμενη διαταραχή να οδηγήσει σε παραβίασή τους [25]. Σε περίπτωση μιας σοβαρής διαταραχής, το σύστημα περνά σε

κατάσταση έκτακτης ανάγκης, όπου παραβιάζονται οι περιορισμοί, χωρίς όμως το δίκτυο να έχει καταρρεύσει πλήρως [25]. Εάν η διαταραχή είναι πολύ έντονη και δεν αντιμετωπιστεί εγκαίρως, το σύστημα εισέρχεται σε κρίσιμη κατάσταση, κατά την οποία σημειώνονται σοβαρές παραβιάσεις και απώλειες φορτίου, οδηγώντας σε αποσύνθεση τμημάτων του δικτύου και κύριος στόχος είναι να προστατευτούν όσο το δυνατόν περισσότερα τμήματα του συστήματος από καταστροφή [25]. Τέλος, μετά την μερική σταθεροποίηση της τάσης και της συχνότητας, το σύστημα εισέρχεται στη φάση αποκατάστασης, από όπου μπορεί σταδιακά να επιστρέψει σε κατάσταση συναγερμού ή κανονικής λειτουργίας [25].

4.3.1 Στατική Αξιολόγηση Ασφάλειας

Η Στατική Αξιολόγηση Ασφάλειας (ΣΣΑ) αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφαλούς λειτουργίας των ΣΗΕ [27]. Η αξιοπιστία είναι θεμελιώδης αρχή, καθώς οποιαδήποτε απόκλιση από την ομαλή λειτουργία μπορεί να οδηγήσει σε διακοπές παροχής ισχύος, πτώσεις τάσης και κινδύνους για τον εξοπλισμό του δικτύου [27]. Γ' αυτό, η ύπαρξη μεθόδων, όπως η ΣΣΑ, καθίσταται απαραίτητη, ώστε να διασφαλίζεται ότι το δίκτυο μπορεί να ανταπεξέλθει ακόμη και σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας [27,30]. Μέσω της ΣΣΑ αξιολογείται η ικανότητα του συστήματος να ανταποκριθεί σε πιθανά σενάρια βλαβών, όπως η απώλεια μιας γεννήτριας, είτε πρόκειται για προγραμματισμένα είτε για απρόβλεπτα γεγονότα [25,27]. Η απώλεια μιας μονάδας παραγωγής μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, προκαλώντας μεταβολές στις τάσεις και στις ροές ισχύος [30]. Ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας που χάνεται, οι συνέπειες μπορεί να είναι από ήπιες έως και καταστροφικές για τη λειτουργία του δικτύου [30]. Για παράδειγμα, σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα, η απώλεια μιας μεγάλης γεννήτριας ή μονάδας ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτιση γραμμών μεταφοράς ή σε πτώση τάσης σε κρίσιμους ζυγούς [30]. Με την βοήθεια της Ανάλυσης Μόνιμης Κατάστασης ελέγχονται οι τιμές κρίσιμων μεγεθών, όπως οι τάσεις στους ζυγούς και οι ροές ισχύος στις γραμμές, ώστε να εντοπιστούν πιθανές υπερβάσεις των επιτρεπτών ορίων μετά από κάθε ενδεχόμενο σενάριο [27]. Για παράδειγμα, μια υπέρβαση του ορίου θερμικής καταπόνησης μιας γραμμής μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και καταστροφή του αγωγού, ενώ μια μεγάλη απόκλιση τάσης μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργία των ευαίσθητων στοιχείων του δικτύου ή ακόμη και να

οδηγήσει σε αστάθεια τάσης [27]. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι το σύστημα, μετά τη διαταραχή, έχει επιστρέψει σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας (steady-state) [25]. Η υπόθεση της μόνιμης κατάστασης επιτρέπει τον απλοποιημένο υπολογισμό και την εξαγωγή αποτελεσμάτων με μικρότερο υπολογιστικό κόστος [27]. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην πραγματικότητα, το σύστημα ακολουθεί μια δυναμική διαδικασία αποκατάστασης (υπομεταβατική, μεταβατική) η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ταλαντώσεις και παροδικές μεταβολές που δεν εμφανίζονται στην SSA [6,25,27]. Οι ταλαντώσεις αυτές μπορεί να είναι κρίσιμες σε οριακές καταστάσεις, καθώς αν δεν αποσβεστούν γρήγορα, το σύστημα ενδέχεται να απωλέσει τη συγχρονισμένη λειτουργία του [6]. Επομένως, η ΣΣΑ παρέχει μια πιο “στατική εικόνα” του δικτύου, η οποία όμως δεν αντικατοπτρίζει πάντοτε όλα τα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται στην πραγματικότητα [30]. Αντίθετα, εξετάζει μόνο τις παραμέτρους της νέας ισορροπίας του συστήματος μέσω Αναλύσεων Ροής Φορτίου, οι οποίοι αποδίδουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά του δικτύου στη μόνιμη κατάσταση [25,27]. Παρότι η μεθοδολογία αυτή είναι αποτελεσματική, η εφαρμογή της σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα παρουσιάζει υπολογιστικές προκλήσεις, καθώς απαιτεί επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς για κάθε πιθανό σενάριο [26]. Καθώς τα ΣΗΕ γίνονται όλο και πιο σύνθετα, με αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ και μεγαλύτερο αριθμό διασυνδέσεων, ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων που πρέπει να εξεταστούν αυξάνεται εκθετικά [27]. Αυτό συνεπάγεται αυξημένο φόρτο επεξεργασίας και ανάγκη για πιο αποδοτικούς αλγόριθμους, οι οποίοι θα μπορούν να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε όσο το δυνατόν ταχύτερα [27]. Επιπλέον, η ανάπτυξη μεθόδων ΑΙ και μηχανικής μάθησης (ML) προσφέρει νέες δυνατότητες στη ΣΣΑ, μειώνοντας σημαντικά το πλήθος των σεναρίων που πρέπει να εξεταστούν μέσω παραδοσιακών υπολογισμών [30]. Η πληροφορία που προκύπτει είναι πολύτιμη για τη λήψη προληπτικών και διορθωτικών μέτρων που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα και την επιχειρησιακή συνέχεια του συστήματος σε πραγματικό χρόνο [27]. Οι χειριστές των ΣΗΕ μπορούν να λάβουν αποφάσεις για την ανακατανομή της παραγωγής, την ενεργοποίηση εφεδρειών, την αποκοπή φορτίου σε ακραίες περίπτωση και την τροποποίηση της τοπολογίας του δικτύου, ώστε να αποφευχθούν υπερφορτίσεις και πτώσεις τάσης [25,27,30]. Με τον τρόπο αυτό, η ΣΣΑ δεν αποτελεί μόνο ένα εργαλείο πρόβλεψης αλλά και ένα πρακτικό μέσο για την άμεση λήψη αποφάσεων που προστατεύουν την ευστάθεια και την αξιοπιστία του ΣΗΕ [27,30].

4.3.2 Δείκτες Ασφάλειας

Στο πλαίσιο της ΣΣΑ, χρησιμοποιούνται δείκτες απόδοσης για την αξιολόγηση των ενδεχόμενων καταστάσεων σε ΣΗΕ με ενσωματωμένες ΑΠΕ [25]. Οι δύο βασικότεροι δείκτες είναι: ο δείκτης ισχύος (PI_{MW}) και ο δείκτης τάσης (PI_V) [25]. Ο PI_{MW} υπολογίζεται ως εξής:

$$PI_{MW} = \sum \left(\frac{Wi}{2} \right) \times \left(\frac{PI}{PI_{Lim}} \right)^2$$

Όπου Wi είναι ένας μη-αρνητικός συντελεστής που καθορίζει πόσο σημαντική είναι η υπερφόρτωση της γραμμής i σε σχέση με τις υπόλοιπες, ο PI είναι η ροή ισχύος της γραμμής i σε MW και ο PI_{Lim} είναι η χωρητικότητα της γραμμής i σε MW [25]. Ο PI_{MW} κατατάσσει τις διαταραχές με βάση την υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς [25]. Αν είναι μηδέν, σημαίνει ότι δεν παρατηρείται καμία υπερφόρτωση στο σύστημα, ενώ εάν ο δείκτης λάβει θετική τιμή, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο πιο σοβαρή θεωρείται η παραβίαση των ορίων μεταφοράς [25]. Ο PI_V υπολογίζεται ως εξής:

$$PI_V = \sum \left(\frac{Wvi}{2} \right) \times \left(\frac{|Vi| - |ViSP|}{\Delta V_{lim}} \right)^2$$

Όπου Wvi είναι ένας μη-αρνητικός συντελεστής που καθορίζει πόσο σημαντική είναι η τάση του ζυγού i σε σχέση με τους υπόλοιπους, η Vi είναι η μετασφαλματική τάση του ζυγού i , $ViSP$ είναι η ονομαστική τάση του ζυγού i και ΔV_{lim} είναι το μέγιστο αποδεκτό εύρος εντός του οποίου μπορεί να μεταβληθεί η τάση σε έναν κόμβο του συστήματος σε σχέση με την ονομαστική τιμή της, χωρίς να θεωρείται παραβίαση ή πρόβλημα λειτουργίας [25]. Ο PI_V εντοπίζει με ακρίβεια τα σενάρια που προκαλούν υπερβάσεις ορίων τάσης στους κρίσιμους ζυγούς [25]. Τιμή PI_V ίση με μηδέν σημαίνει ότι όλες οι τάσεις παραμένουν εντός των αποδεκτών ορίων [25]. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του PI_V , τόσο περισσότερες και εντονότερες είναι οι αποκλίσεις τάσης, κάτι που υποδεικνύει πιθανή αστάθεια και ανάγκη για παρέμβαση στο σύστημα [25].

Κεφάλαιο 5 Προσομοιώσεις Σεναρίων Λειτουργίας με Powerworld

5.1 Βασικά Στοιχεία Δικτύου

Η ανάλυση που παρουσιάζεται στη παρούσα διπλωματική βασίζεται στο πρότυπο σύστημα IEEE 14, ένα δοκιμαστικό δίκτυο που χρησιμοποιείται διεθνώς για την αξιολόγηση της ροής φορτίου, της ευστάθειας και της αξιοπιστίας σε ΣΗΕ. Το σύστημα περιλαμβάνει συνολικά 14 ζυγούς, 20 γραμμές μεταφοράς, 5 γεννήτριες και 3 μετασχηματιστές, ενώ στους ζυγούς φορτίων συνδέονται 11 φορτία συνολικής ζήτησης 259 MW και 81,3 MVar. Ο ζυγός 1 λειτουργεί ως ζυγός αναφοράς, παρέχοντας τις αναφορές τάσης και συχνότητας για το υπόλοιπο σύστημα, ενώ στους ζυγούς 2, 3, 6 και 8 συνδέονται οι υπόλοιπες γεννήτριες και λειτουργούν ως ζυγοί ελέγχου τάσης, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση της τάσης και την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Οι γραμμές μεταφοράς του συστήματος έχουν διαφορετικές αντιδράσεις, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση της κατανομής ισχύος και των απωλειών, ενώ οι μετασχηματιστές διαθέτουν ρυθμιζόμενο λόγο μετασχηματισμού. Η ανάλυση του συστήματος γίνεται υπό τις εξής βασικές παραμέτρους: (i) τα επίπεδα διείσδυσης φωτοβολταϊκών (0%, 20%, 40%), (ii) την γεωγραφική κατανομή της παραγωγής ισχύος (δισπαρμένη ή συγκεντρωτική), (iii) την συμπεριφορά του συστήματος σε ενδεχόμενες καταστάσεις (N-1 contingency) και (iv) την λειτουργία του συστήματος μετά από μια δυναμική διαταραχή όπως ένα βραχυκύκλωμα σε έναν κρίσιμο ζυγό του δικτύου σε μια ενδεχόμενη κατάσταση (Contingency Transient Analysis). Η χρήση του προτύπου IEEE 14 επιτρέπει, παράλληλα, τη σύγκριση με αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, καθιστώντας τα ευρήματα πιο αξιόπιστα και τεκμηριωμένα.

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μονάδων στο δίκτυο πραγματοποιείται προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των ΑΠΕ στην ευστάθεια και την αξιοπιστία υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Αρχικά, γίνεται ανάλυση με μηδενική διείσδυση φωτοβολταϊκών μονάδων στην οποία το σύστημα λειτουργεί μόνο με τις συμβατικές γεννήτριες και χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς. Στη συνέχεια, λαμβάνεται παραγωγή από φωτοβολταϊκά 20% επί της συνολικής παραγωγής ισχύος και αναπαριστά μια μέση παρουσία φωτοβολταϊκών στο δίκτυο επηρεάζοντας εμφανώς τη ροή ισχύος και τις τάσεις

στους ζυγούς. Τέλος, για κάλυψη του 40% της συνολικής παραγωγής από φωτοβολταϊκά παρουσιάζεται υψηλή συμμετοχή φωτοβολταϊκών μονάδων, με σημαντική επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, στις απώλειες ισχύος και στην ευστάθεια τάσης και συχνότητας. Όσον αφορά τη γεωγραφική κατανομή των φωτοβολταϊκών, εξετάζονται δύο πιθανά σενάρια. Αρχικά, οι φωτοβολταϊκές μονάδες τοποθετούνται διεσπαρμένα σε δύο ζυγούς φορτίων για διείσδυση 20% και για 40%, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες μεταφοράς και να υποστηριχθεί η τάση κοντά στα φορτία. Έτσι, προσομοιώνονται μικρές αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής διάσπαρτα στο δίκτυο ώστε να μειωθεί η πιθανότητα υπερφόρτωσης μιας μόνο γραμμής μεταφοράς. Στη συνέχεια, η παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκές μονάδες συγκεντρώνεται σε έναν ζυγό αναπαριστώντας ένα μεγάλο κεντρικό φωτοβολταϊκό πάρκο για 20% διείσδυση και σε δύο γειτονικούς ζυγούς για την περίπτωση του 40%. Η τοποθέτηση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση πιθανών προβλημάτων όπως η αύξηση τάσεων σε τοπικό επίπεδο και οι επιπτώσεις στις ροές ισχύος σε όλο το δίκτυο. Η συνδυαστική ανάλυση των τριών επιπέδων διείσδυσης με τα δύο σενάρια γεωγραφικής κατανομής προσφέρει μια πλήρη εικόνα της επίδρασης των φωτοβολταϊκών μονάδων στην ευστάθεια, την ποιότητα ισχύος και τις απώλειες του δικτύου.

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας του συστήματος πραγματοποιείται μέσω Contingency Analysis (N-1), στην οποία εξετάζεται η απώλεια ενός κρίσιμου στοιχείου κάθε φορά. Σε δίκτυα με περισσότερους ζυγούς θα μπορούσαμε να πραγματοποιήσουμε ανάλυση N-2 αλλά σε μικρά δίκτυα δεν έχει νόημα καθώς αποτελεί σπάνιο φαινόμενο να χαθούν δύο στοιχεία του ταυτόχρονα και συνήθως σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα οδηγείται σε ολική κατάρρευση. Τα επιλεγμένα σενάρια περιλαμβάνουν την απώλεια δύο γεννητριών του συστήματος και δύο γραμμών μεταφοράς. Στην περίπτωση απώλειας μιας γεννήτριας αφαιρείται μία από τις δύο μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης στη ροή ισχύος, την τάση στους ζυγούς και την πιθανότητα υπερφόρτωσης άλλων γραμμών. Στο σενάριο απώλειας μιας γραμμής μεταφοράς, αφαιρείται μια κρίσιμη γραμμή η οποία μεταφέρει ισχύ μεγαλύτερη από το 50% του ορίου υπερφόρτωσης της γραμμής, προκειμένου να αξιολογηθεί η ανακατανομή των ροών, οι επιπτώσεις στις τάσεις και η συμπεριφορά των υπόλοιπων γραμμών. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων επιτρέπουν την εκτίμηση της ανθεκτικότητας του δικτύου σε απρόβλεπτες καταστάσεις και την εύρεση των ζυγών ή γραμμών που χρήζουν ιδιαίτερης

προσοχής. Από την άλλη, η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εξετάζεται μέσω της Contingency Transient Analysis (CTA) η οποία συνδυάζει την Contingency Analysis με την TSA. Τα σενάρια που εξετάζονται σε αυτήν την περίπτωση είναι δύο είδη βραχυκυκλωμάτων (μονοφασικό, τριφασικό) σε δύο σημαντικούς ζυγούς του συστήματος στην άκρη της γραμμής στην πλευρά του ζυγού ενώ, παράλληλα, έχουμε αφαιρέσει μια γεννήτρια ή μια γραμμή μεταφοράς του δικτύου. Στις προσομοιώσεις θα ληφθεί υπόψιν μηδενική διείσδυση φωτοβολταϊκών μονάδων. Η μελέτη αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της ικανότητας των σύγχρονων γεννητριών να διατηρήσουν την σχετική γωνία ρότορα τους (relative angle) σταθερή και να μην ξεφύγει κάποια των 180 μοιρών και τον υπολογισμό του CCT προκειμένου να αξιολογηθεί εάν το σύστημα είναι ικανό να παραμείνει σε κατάσταση ευστάθειας.

5.2 Μελέτη Ροής Φορτίου

Για να γίνει ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος IEEE 14 όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.1 έγινε χρήση του προγράμματος PowerWorld. Με το συγκεκριμένο εργαλείο μπορούμε να αναλύσουμε το σύστημα σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Με το πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε ανάλυση του συστήματος για 4 διαφορετικά σενάρια τοπολογίας. Ξεκινώντας από την περίπτωση χωρίς καθόλου διείσδυση, προχωρώντας σε σενάριο 20% αποκεντρωμένης διείσδυσης, στη συνέχεια σε σενάριο 20% συγκεντρωμένης διείσδυσης και τέλος σε σενάριο 40% αποκεντρωμένης διείσδυσης. Τα σενάρια αυτά επιτρέπουν τη σύγκριση της επίδρασης τόσο της ποσότητας όσο και της χωρικής κατανομής της παραγωγής από ΑΠΕ, ώστε να εκτιμηθούν οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν στις τάσεις των ζυγών, στις ροές ισχύος και στη δυναμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια βραχυπρόθεσμων διαταραχών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί η λειτουργική ευστάθεια και η αξιοπιστία του συστήματος σε διαφορετικά επίπεδα και τύπους διείσδυσης φωτοβολταϊκών. Βάλαμε περιορισμούς τόσο στις γραμμές όσο και στους ζυγούς του συστήματος. Συγκεκριμένα, σε όλες τις γραμμές μεταφοράς τέθηκε ενιαίο θερμικό όριο 100 MVA, ώστε να ελέγχεται η φόρτισή τους και να εντοπίζονται τυχόν υπερφορτώσεις. Για τους ζυγούς ορίστηκαν επιτρεπτά όρια τάσης από 0,95 pu έως 1,05 pu, σύμφωνα με τα συνήθη όρια λειτουργίας. Με αυτούς τους περιορισμούς μπορούμε

να αξιολογήσουμε αν το σύστημα παραμένει σε ασφαλή λειτουργία κατά την απλή ανάλυση ή σε σενάρια αστοχίας.

5.2.1 Σύστημα χωρίς Διείσδυση PV

Κατά την αρχική ανάλυση ροής φορτίου παρατηρήθηκε ότι ο ζυγός 1 παρουσιάζει τάση εκτός των αποδεκτών ορίων (0,95–1,05 pu), ενώ παράλληλα η γραμμή μεταφοράς 1-2 υπερφορτωνόταν ξεπερνώντας το θερμικό της όριο. Για την αποκατάσταση αυτών των προβλημάτων κρίθηκε αναγκαία η εκτέλεση Optimal Power Flow (OPF), ώστε μέσω της κατάλληλης ανακατανομής παραγωγής και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος να επανέλθουν οι τάσεις και οι ροές εντός των προκαθορισμένων περιορισμών. Στους Πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα δεδομένα κάθε ζυγού και κάθε γραμμής του συστήματος μετά από την διεξαγωγή Optimal Power Flow Analysis:

Πίνακας 5.1 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος χωρίς διείσδυση PV.

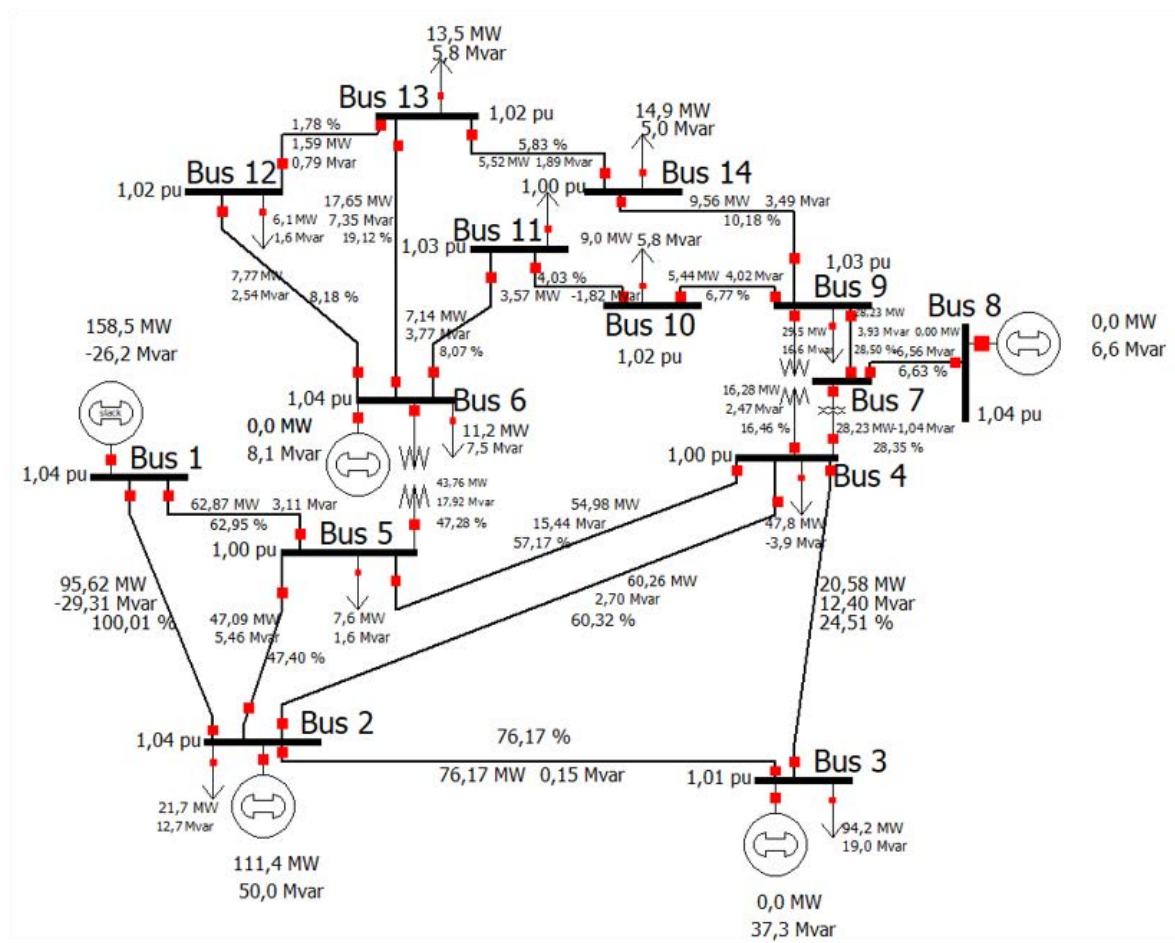
Ζυγός	V (pu)	Φορτίο P (MW)	Φορτίο Q (Mvar)	Παραγωγή P (MW)	Παραγωγή Q (Mvar)
1	1,04			158,48	-16,9
2	1,04	21,70	12,70	111,36	50,00
3	1,01	94,20	19,00	0,00	37,29
4	1,00	47,80	-3,90		
5	1,00	7,60	1,60		
6	1,04	11,20	7,50	0,00	8,10
7	1,03				
8	1,04			0,00	6,63
9	1,03	29,50	16,60		
10	1,02	9,00	5,80		
11	1,02	3,50	1,80		
12	1,03	6,10	1,60		
13	1,02	13,50	5,80		

14	1,00	14,90	5,00		
----	------	-------	------	--	--

Πίνακας 5.2 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος χωρίς διείσδυση PV.

Γραμμή	MW Flow	MVAr Flow	MVA Limit	% of MVA Limit
Ζυγοί 1–2	95,6	-29,3	100	100
Ζυγοί 1–5	62,9	3,1	100	62,9
Ζυγοί 2–3	76,2	0,2	100	76,2
Ζυγοί 2–4	60,3	2,7	100	60,3
Ζυγοί 2–5	47,1	5,5	100	47,4
Ζυγοί 3–4	-20,6	-12,4	100	24,5
Ζυγοί 4–5	-55,0	15,4	100	57,2
Ζυγοί 4–7	28,2	-1,0	100	28,4
Ζυγοί 4–9	16,3	2,5	100	16,5
Ζυγοί 5–6	43,8	17,9	100	47,3
Ζυγοί 6–11	7,1	3,8	100	8,1
Ζυγοί 6–12	7,8	2,5	100	8,2
Ζυγοί 6–13	17,7	7,3	100	19,1
Ζυγοί 7–8	0,0	-6,6	100	6,6
Ζυγοί 7–9	28,2	3,9	100	28,5
Ζυγοί 9–10	5,4	4,0	100	6,8
Ζυγοί 9–14	9,6	3,5	100	10,2
Ζυγοί 10–11	-3,6	-1,8	100	4,0
Ζυγοί 12–13	1,6	0,8	100	1,8
Ζυγοί 13–14	5,5	1,9	100	5,8

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το Σύστημα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά την OPF Analysis:



Σχήμα 5.1 Το δίκτυο χωρίς διείσδυση PV μετά την OPF.

5.2.2 Σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη)

Σε αυτήν την περίπτωση επιλέξαμε να αντικαταστήσουμε την γεννήτρια στον ζυγό 6 με μία φωτοβολταϊκή μονάδα συνολικής εγκατεστημένης πραγματικής ισχύος: $20\% \times 270 \text{ MW} = 54 \text{ MW}$ και άεργου 0 MVar . Κατά την ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος προκύπτουν υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 και υπέρταση στον ζυγό 6. Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα δεδομένα κάθε ζυγού και κάθε γραμμής του συστήματος μετά από την διεξαγωγή Optimal Power Flow Analysis για την λύση των προβλημάτων:

Πίνακας 5.3 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος με 20% διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη).

Ζυγός	V (pu)	Φορτίο P (MW)	Φορτίο Q (Mvar)	Παραγωγή P (MW)	Παραγωγή Q (Mvar)
1	1,04			101,30	-27,4

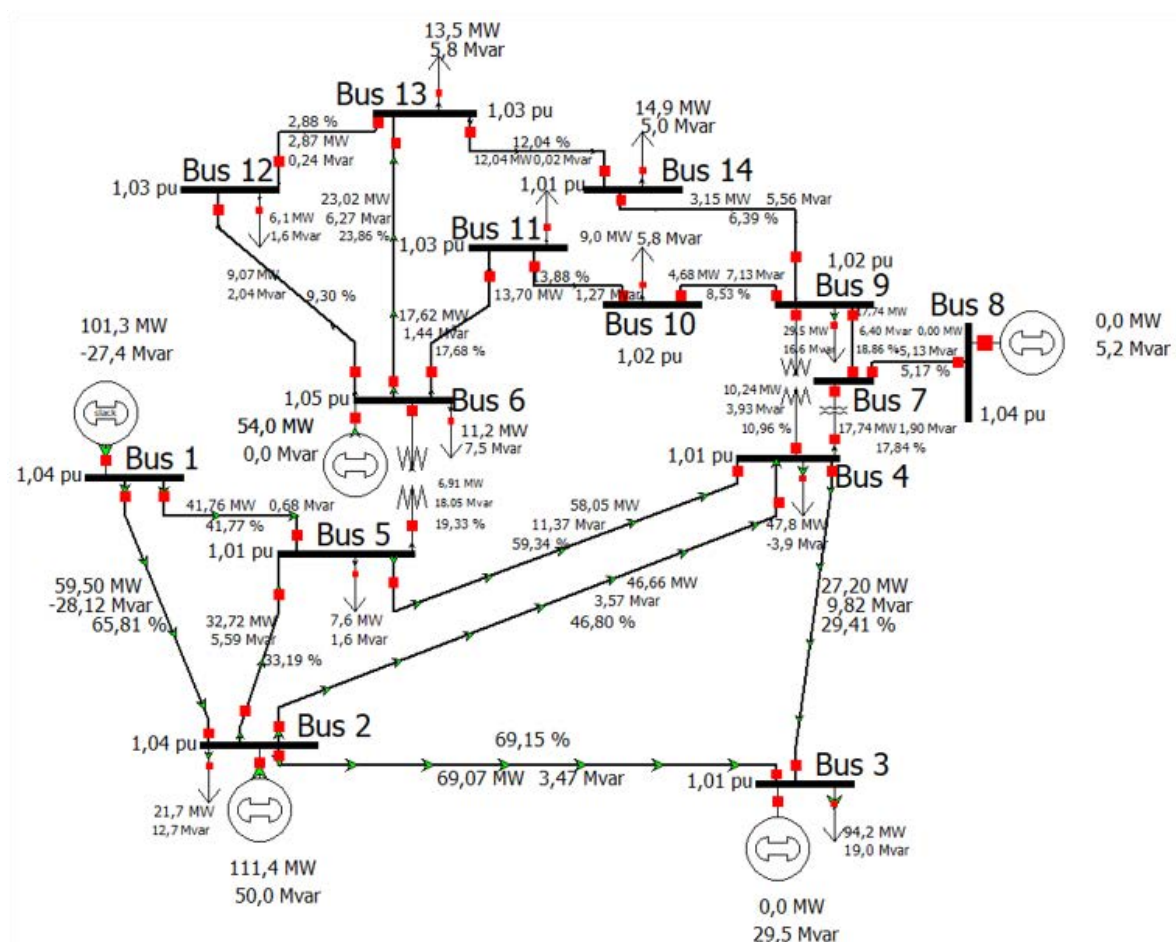
2	1,04	21,70	12,70	111,36	50,00
3	1,01	94,20	19,00	0,00	29,50
4	1,01	47,80	-3,90		
5	1,01	7,60	1,60		
6	1,05	11,20	7,50	54,00	0,00
7	1,03				
8	1,04			0,00	5,20
9	1,02	29,50	16,60		
10	1,02	9,00	5,80		
11	1,03	3,50	1,80		
12	1,03	6,10	1,60		
13	1,03	13,50	5,80		
14	1,01	14,90	5,00		

Πίνακας 5.4 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος με 20% διείσδυση PV
(Κεντριοποιημένη).

Γραμμή	MW Flow	MVAr Flow	MVA Limit	% of MVA Limit
Ζυγοί 1–2	59,5	-28,12	100	65,81
Ζυγοί 1–5	41,76	0,68	100	41,77
Ζυγοί 2–3	69,07	3,47	100	69,15
Ζυγοί 2–4	46,66	3,57	100	46,80
Ζυγοί 2–5	32,72	5,59	100	33,19
Ζυγοί 3–4	-27,20	-9,82	100	29,41
Ζυγοί 4–5	-58,05	-11,37	100	59,34
Ζυγοί 4–7	17,74	1,90	100	17,84
Ζυγοί 4–9	10,24	3,93	100	10,96
Ζυγοί 5–6	6,91	18,05	100	19,33
Ζυγοί 6–11	17,62	1,44	100	17,68

Ζυγοί 6–12	9,07	2,04	100	9,30
Ζυγοί 6–13	23,02	6,27	100	23,86
Ζυγοί 7–8	0,00	-5,13	100	5,17
Ζυγοί 7–9	17,74	6,4	100	18,86
Ζυγοί 9–10	4,68	7,13	100	8,53
Ζυγοί 9–14	3,15	5,56	100	6,39
Ζυγοί 10–11	-13,70	-1,27	100	13,88
Ζυγοί 12–13	2,87	0,24	100	2,88
Ζυγοί 13–14	12,04	0,02	100	12,04

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το Σύστημα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά την OPF Analysis:



Σχήμα 5.2 Το δίκτυο με 20% διείσδυση PV (Κεντρικοποιημένη) μετά από OPF.

5.2.3 Σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη)

Σε αυτήν την περίπτωση επιλέξαμε να αντικαταστήσουμε τις γεννήτριες στους ζυγούς 6 και 8. Το 70% της ισχύος εγκαταστάθηκε στον ζυγό 6 και το υπόλοιπο 30% στον ζυγό 8. Επομένως η εγκατεστημένη πραγματική ισχύς στον ζυγό 6 είναι: $(20\%) \times (70\%) \times 270 \text{ MW} = 37,8 \text{ MW}$ και στον ζυγό 8: $(20\%) \times (30\%) \times 270 \text{ MW} = 16,2 \text{ MW}$. Κατά την ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος προκύπτει υπερφόρτωση της γραμμής 1-2. Στους Πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα δεδομένα κάθε ζυγού και κάθε γραμμής του συστήματος μετά από την διεξαγωγή Optimal Power Flow Analysis για την λύση του προβλήματος:

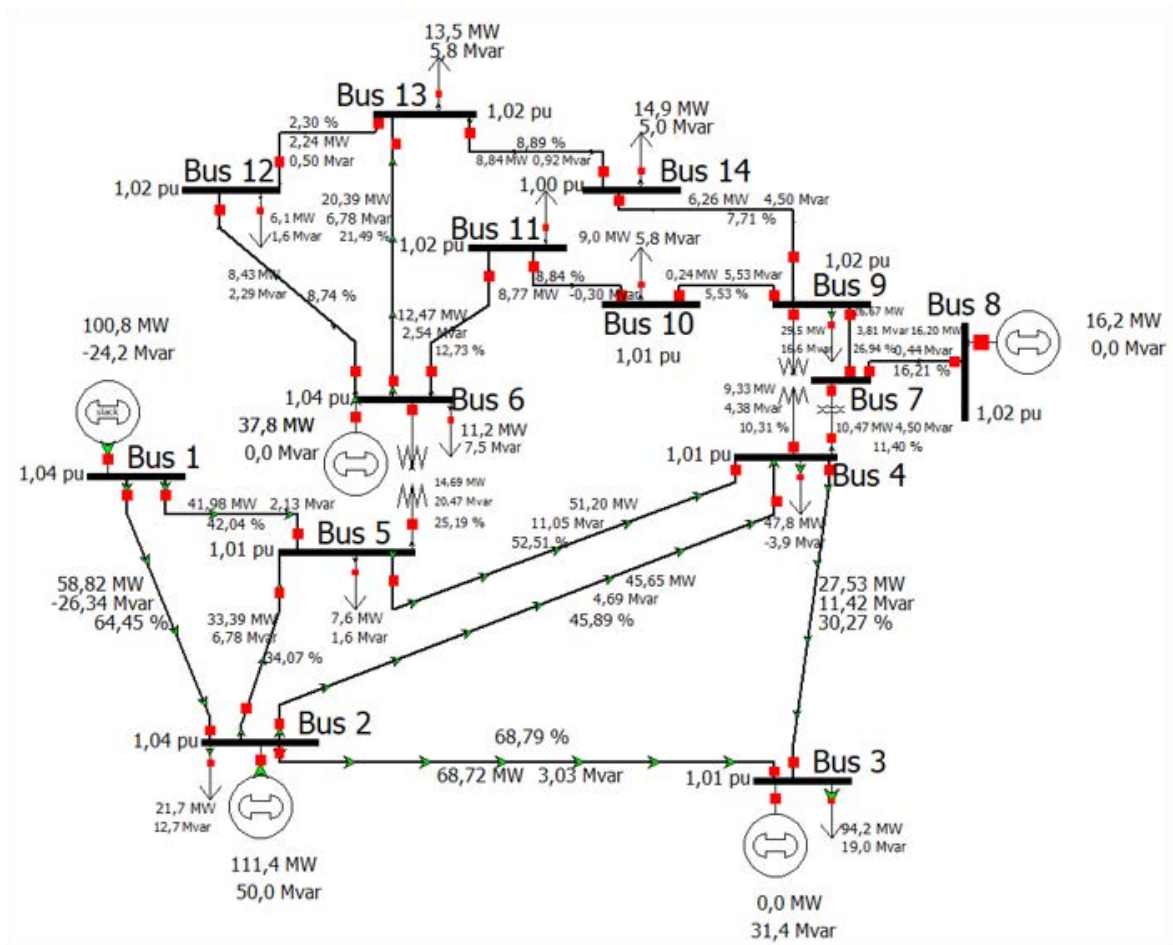
Πίνακας 5.5 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη).

Ζυγός	V (pu)	Φορτίο P (MW)	Φορτίο Q (Mvar)	Παραγωγή P (MW)	Παραγωγή Q (Mvar)
1	1,04			100,80	-24,2
2	1,04	21,70	12,70	111,36	50,00
3	1,01	94,20	19,00	0,00	31,40
4	1,01	47,80	-3,90		
5	1,01	7,60	1,60		
6	1,04	11,20	7,50	37,8	0,00
7	1,03				
8	1,02			16,2	0,00
9	1,02	29,50	16,60		
10	1,01	9,00	5,80		
11	1,02	3,50	1,80		
12	1,02	6,10	1,60		
13	1,02	13,50	5,80		
14	1,00	14,90	5,00		

Πίνακας 5.6 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη).

Γραμμή	MW Flow	MVAr Flow	MVA Limit	% of MVA Limit
Ζυγοί 1–2	58,82	-26,34	100	64,45
Ζυγοί 1–5	41,98	2,13	100	42,04
Ζυγοί 2–3	68,72	3,03	100	68,79
Ζυγοί 2–4	45,65	4,69	100	45,89
Ζυγοί 2–5	33,39	6,78	100	34,07
Ζυγοί 3–4	-27,53	-11,42	100	30,27
Ζυγοί 4–5	-51,20	-11,05	100	52,51
Ζυγοί 4–7	10,47	4,50	100	11,40
Ζυγοί 4–9	9,33	4,38	100	10,31
Ζυγοί 5–6	14,69	20,47	100	25,19
Ζυγοί 6–11	12,47	2,54	100	12,73
Ζυγοί 6–12	8,43	2,29	100	9,74
Ζυγοί 6–13	20,39	6,78	100	21,49
Ζυγοί 7–8	-16,20	-0,44	100	16,21
Ζυγοί 7–9	26,67	3,81	100	26,94
Ζυγοί 9–10	0,24	5,53	100	5,53
Ζυγοί 9–14	6,26	4,50	100	7,71
Ζυγοί 10–11	-8,77	0,30	100	8,84
Ζυγοί 12–13	2,24	0,50	100	2,30
Ζυγοί 13–14	8,84	0,92	100	8,89

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται το Σύστημα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά την OPF Analysis:



Σχήμα 5.3 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από OPF.

5.2.4 Σύστημα με 40% Διείσδυση PV

Σε αυτήν την περίπτωση επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε κατακεντρωμένη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος $40\% \times 270 \text{ MW} = 108 \text{ MW}$ θα δημιουργήσει αρκετά θέματα ευστάθειας και θα καταστήσει το σύστημα πιο ευάλωτο σε δυναμικές διαταραχές. Αυτή τη φορά το 60% της ισχύος εγκαταστάθηκε στον ζυγό 6 και το υπόλοιπο 40% στον ζυγό 8. Επομένως η εγκατεστημένη πραγματική ισχύς στον ζυγό 6 είναι: $(40\%) \times (60\%) \times 270 \text{ MW} = 64,8 \text{ MW}$ και στον ζυγό 8: $(40\%) \times (40\%) \times 270 \text{ MW} = 43,2 \text{ MW}$. Κατά την ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος προκύπτει άνοδος της τάσης του ζυγού 6 πάνω από 1,05 pu. Στους Πίνακες 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα δεδομένα κάθε ζυγού και κάθε γραμμής του συστήματος μετά από την διεξαγωγή Optimal Power Flow Analysis για την λύση του προβλήματος:

Πίνακας 5.7 Στοιχεία Ζυγών του Συστήματος 40% Διείσδυση PV.

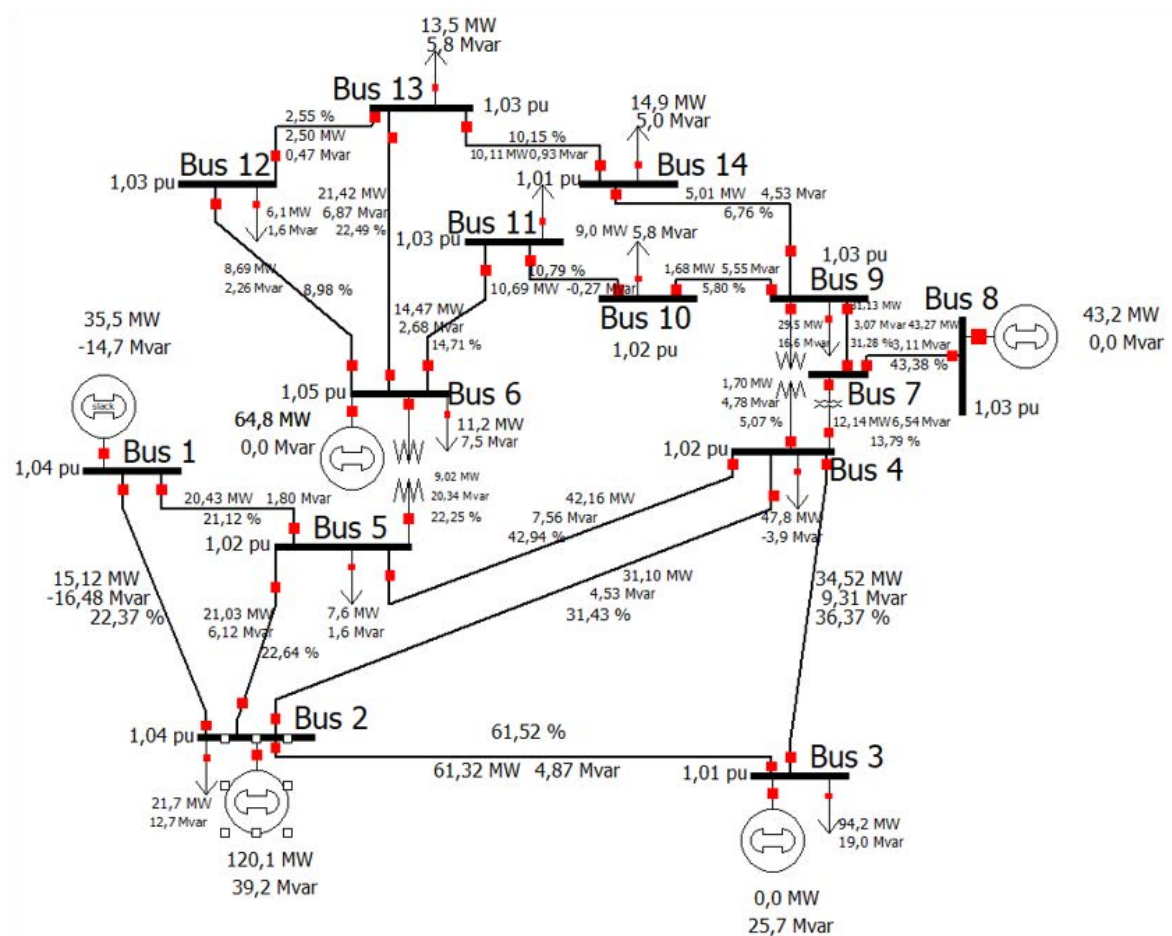
Ζυγός	V (pu)	Φορτίο P (MW)	Φορτίο Q (Mvar)	Παραγωγή P (MW)	Παραγωγή Q (Mvar)
1	1,04			35,5	-14,7
2	1,04	21,70	12,70	120,1	39,2
3	1,01	94,20	19,00	0,00	25,7
4	1,02	47,80	-3,90		
5	1,02	7,60	1,60		
6	1,05	11,20	7,50	64,8	0,00
7	1,04				
8	1,03			43,2	0,00
9	1,03	29,50	16,60		
10	1,02	9,00	5,80		
11	1,03	3,50	1,80		
12	1,03	6,10	1,60		
13	1,03	13,50	5,80		
14	1,01	14,90	5,00		

Πίνακας 5.8 Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς του Συστήματος 40% Διείσδυση PV.

Γραμμή	MW Flow	MVA _r Flow	MVA Limit	% of MVA Limit
Ζυγοί 1–2	15,12	-16,48	100	22,37
Ζυγοί 1–5	20,43	1,80	100	21,12
Ζυγοί 2–3	61,32	4,87	100	61,52
Ζυγοί 2–4	31,10	4,53	100	31,43
Ζυγοί 2–5	21,03	6,12	100	22,64
Ζυγοί 3–4	-34,52	-9,31	100	36,37
Ζυγοί 4–5	-42,16	-7,56	100	42,94
Ζυγοί 4–7	12,14	6,54	100	13,79
Ζυγοί 4–9	1,70	4,78	100	5,07

Ζυγοί 5–6	9,02	20,34	100	22,25
Ζυγοί 6–11	14,47	2,68	100	14,71
Ζυγοί 6–12	8,69	2,26	100	8,98
Ζυγοί 6–13	21,42	6,87	100	22,49
Ζυγοί 7–8	-43,27	-3,11	100	43,38
Ζυγοί 7–9	31,13	3,07	100	31,28
Ζυγοί 9–10	1,68	5,55	100	5,80
Ζυγοί 9–14	5,01	4,53	100	6,76
Ζυγοί 10–11	-10,69	0,27	100	10,79
Ζυγοί 12–13	2,50	0,47	100	2,55
Ζυγοί 13–14	10,11	0,93	100	10,15

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται το Σύστημα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά την OPF Analysis:



Σχήμα 5.4 Το δίκτυο 40% Διείσδυση PV μετά από OPF.

5.3 Μελέτη N-1 Ενδεχομένων Καταστάσεων

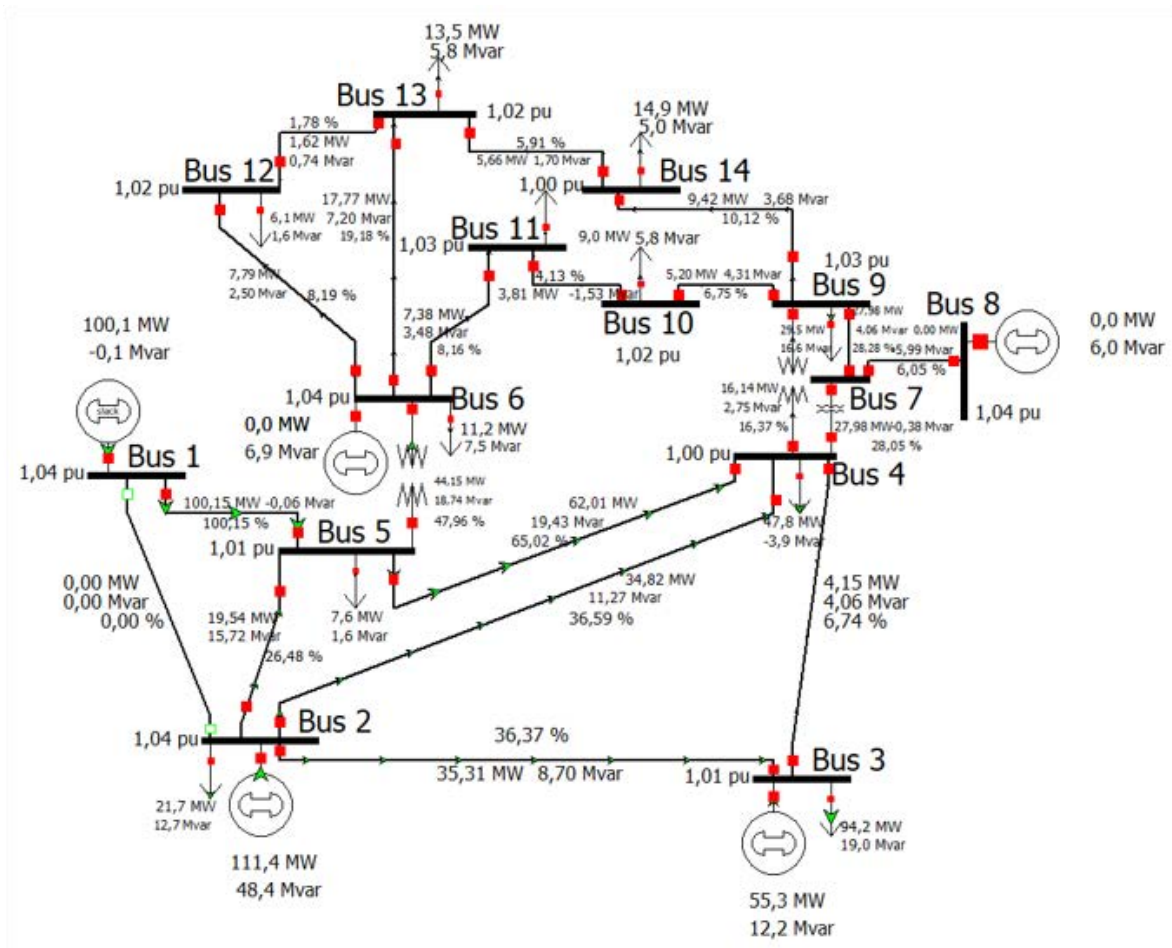
Η μελέτη N-1 ενδεχομένων καταστάσεων αποτελεί βασικό εργαλείο αξιολόγησης της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ισχύος. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, το δίκτυο θα πρέπει να παραμένει σε ασφαλή και αποδεκτή λειτουργία ακόμη και μετά την αιφνίδια απώλεια ενός μόνο στοιχείου. Στην παρούσα εργασία η ανάλυση εστιάζει σε δύο βασικές κατηγορίες σεναρίων: αφενός στην απώλεια των δύο γραμμών μεταφοράς που παρουσιάζουν ποσοστό φόρτισης μεγαλύτερο του 50% του θερμικού ορίου MVA, και αφετέρου στην απώλεια των δύο γεννητριών με τη μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Η επιλογή αυτών των περιπτώσεων δικαιολογείται από το γεγονός ότι αντιπροσωπεύουν τα πιο κρίσιμα και επιβαρυντικά σενάρια για το σύστημα, καθώς η υπερφόρτωση των γραμμών ενδέχεται να οδηγήσει σε αλυσιδωτές αστοχίες ενώ η απόσυρση μεγάλων μονάδων παραγωγής επηρεάζει άμεσα την ισορροπία ισχύος και τη τάση του συστήματος. Μέσα από τη διερεύνηση αυτών των ενδεχομένων καταστάσεων επιδιώκεται η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ανθεκτικότητα και τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του εξεταζόμενου συστήματος. Από την ανάλυση ροής φορτίου που έγινε στο Κεφάλαιο 5.2 προέκυψε ότι οι γραμμές 1-2 και 2-3 είναι οι πιο επιβαρυνμένες για τα σενάρια χωρίς διείσδυση PV στο δίκτυο και για 20% διείσδυση, με ποσοστά φόρτισης που προσεγγίζουν το θερμικό τους όριο, ενώ για την περίπτωση της 40% διείσδυσης προέκυψε μόνο η γραμμή 2-3 να έχει ποσοστό φόρτισης μεγαλύτερο από 50%. Η γραμμή 1-2 και 2-3 αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του δικτύου καθώς, μεταφέροντας σημαντική ποσότητα ισχύος από την γεννήτρια 1 και 2 αντίστοιχα προς το υπόλοιπο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες γραμμές προκειμένου να εξεταστεί η απώλειά τους στο πλαίσιο της CA (N-1). Παράλληλα, επιλέχθηκαν και οι γεννήτριες 1 και 2, για κάθε περίπτωση, καθώς αυτές παράγουν την συνολική πραγματική ισχύ που τροφοδοτεί το δίκτυο, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις ενδεχόμενης απώλειάς τους στη συνολική λειτουργία και ευστάθεια του συστήματος.

5.3.1 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος χωρίς Διείσδυση PV

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενδεχόμενα που εξετάστηκαν κατά τη μελέτη N-1, όπου αναλύεται η επίδραση της απώλειας μίας γραμμής μεταφοράς ή μίας γεννήτριας στο σύστημα χωρίς διείσδυση PV. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι: (A1) απώλεια γραμμής 1-2, (A2) απώλεια γραμμής 2-3 και (A3) απομάκρυνση γεννήτριας 2.

Ενδεχόμενο A1:

Στην πρώτη προσομοίωση θεωρείται το άνοιγμα της γραμμής 1-2, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό φόρτισης (100%). Η προσομοίωση έδειξε ότι αμέσως μετά την απόζευξη παρατηρούμε μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-5 με τιμή 167.68% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής και μια υπερφόρτωση της γραμμής 5-4 με τιμή 106.96% της μέγιστης επιτρεπτής. Προκειμένου να επαναφέρουμε τις φορτίσεις των γραμμών εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής (Generation Rescheduling), μειώνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 1 που τροφοδοτεί τις υπερφορτωμένες γραμμές και αυξάνοντας την παραγωγή πραγματικής ισχύος της γεννήτριας 3. Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.

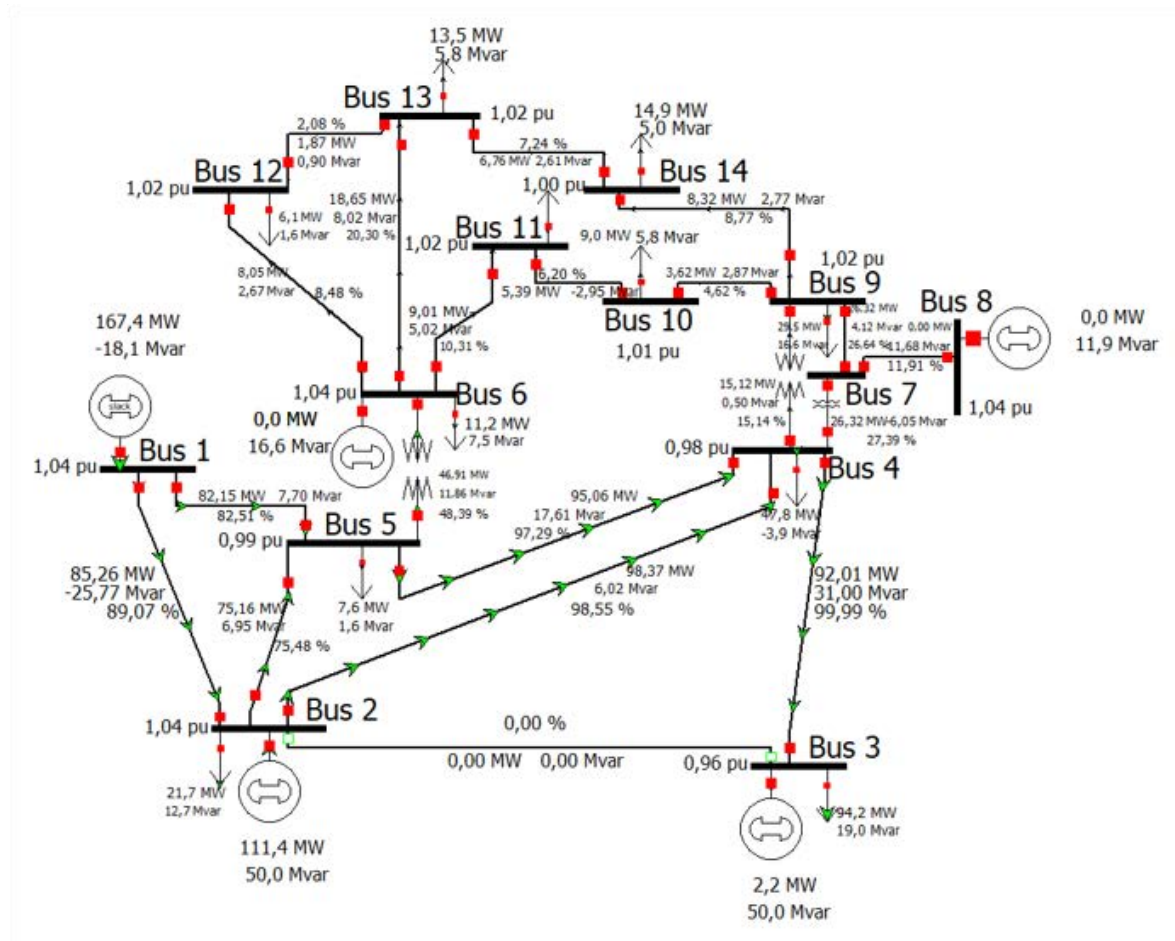


Σχήμα 5.5 Το δίκτυο μετά από το άνοιγμα της γραμμής 1-2 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο A2:

Στην δεύτερη προσομοίωση θεωρείται το άνοιγμα της γραμμής 2-3, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει το εξίσου υψηλό ποσοστό φόρτισης (76,2%). Η

προσομοίωση έδειξε ότι αμέσως μετά την απόζευξη παρατηρούμε μια υπερφόρτωση της γραμμής 4-3 με τιμή 102.38% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 4-3 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής αυξάνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να τροφοδοτεί κατευθείαν το φορτίο του ζυγού 3. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.

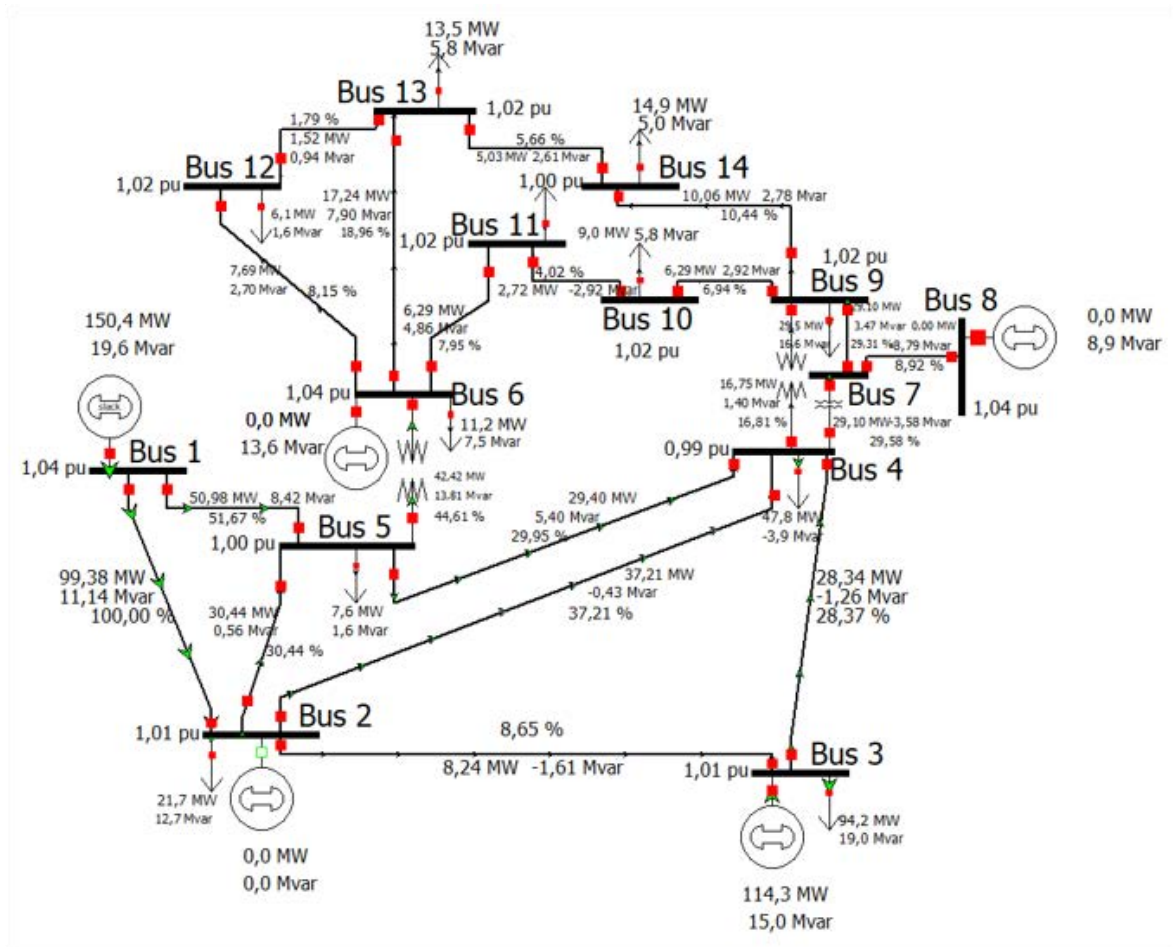


Σχήμα 5.6 Το δίκτυο μετά από το άνοιγμα της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο A3:

Σε αυτήν την προσομοίωση θεωρείται η απομάκρυνση της γεννήτριας 2 από το δίκτυο, λόγω κάποιας βλάβης ή για συντήρηση. Η προσομοίωση έδειξε ότι αμέσως μετά την απομάκρυνση της γεννήτριας παρατηρούμε μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 με τιμή 193.04% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 1-2 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής αυξάνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να τροφοδοτεί τα φορτία

του συστήματος μαζί με την γεννήτρια 1. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.7 Το δίκτυο μετά από την απομάκρυνση της γεννήτρια 2 και την ανάλυση OPF.

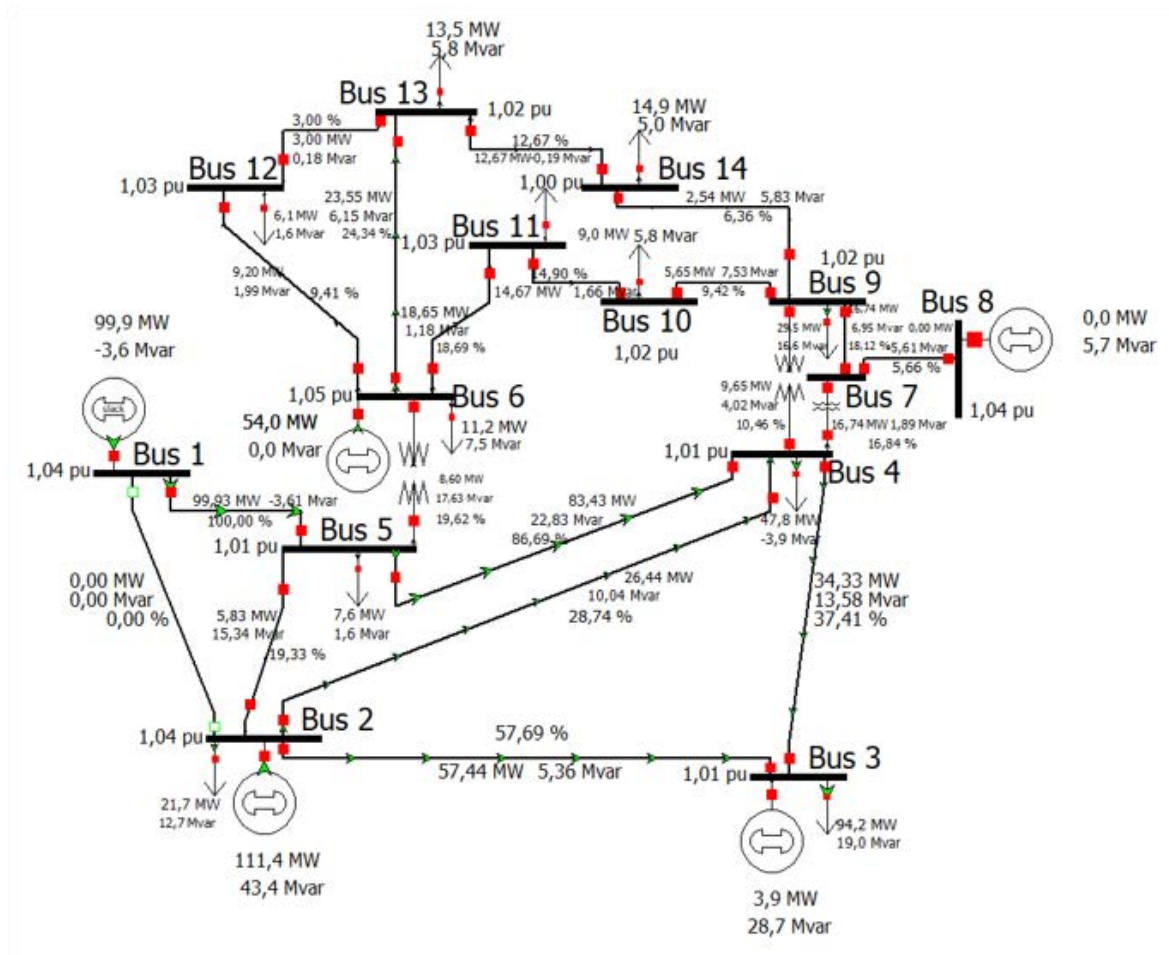
5.3.2 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενδεχόμενα που εξετάστηκαν κατά τη μελέτη N-1, όπου αναλύεται η επίδραση της απώλειας μίας γραμμής μεταφοράς ή μίας γεννήτριας στο σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη). Τα σενάρια που εξετάζονται είναι: (B1) απώλεια γραμμής 1-2, (B2) απώλεια γραμμής 2-3 και (B3) απομάκρυνση γεννήτριας 2.

Ενδεχόμενο B1:

Στην πρώτη προσομοίωση θεωρείται το άνοιγμα της γραμμής 1-2, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει υψηλό ποσοστό φόρτισης (65,8%). Με την προσομοίωση του συστήματος παρατηρείτε μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-5 στο 104,64 % της

μέγιστης επιτρεπτής τιμής δημιουργώντας κίνδυνο υπερθέρμανσης της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 1-5 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής αυξάνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 1-5 μειώνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 1. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.

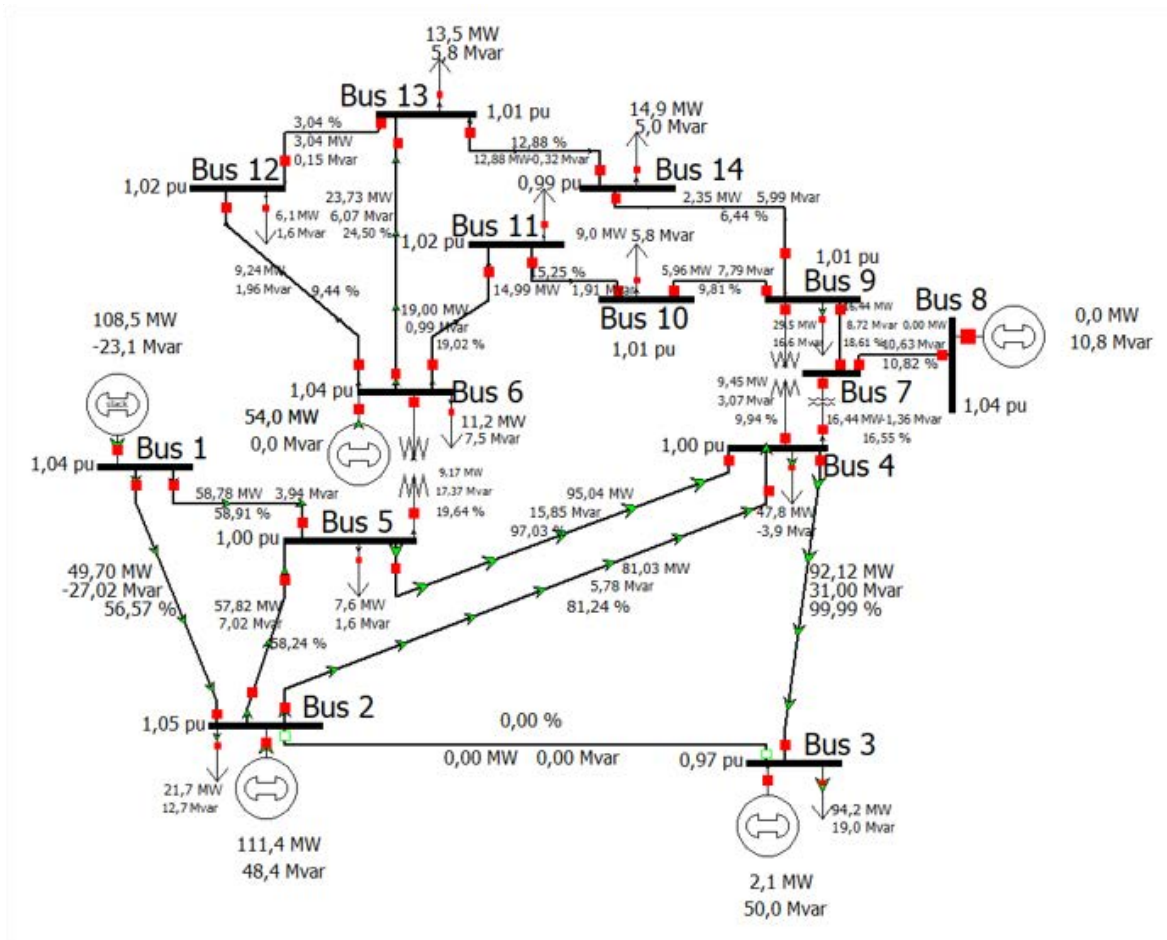


Σχήμα 5.8 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 1-2 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο B2:

Στην δεύτερη προσομοίωση θεωρείται το άνοιγμα της γραμμής 2-3, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό φόρτισης (69,2%). Με την προσομοίωση του συστήματος παρατηρείτε μια υπερφόρτωση της γραμμής 4-3 στο 102,26 % της μέγιστης επιτρεπτής τιμής δημιουργώντας κίνδυνο υπερθέρμανσης της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 4-3 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής

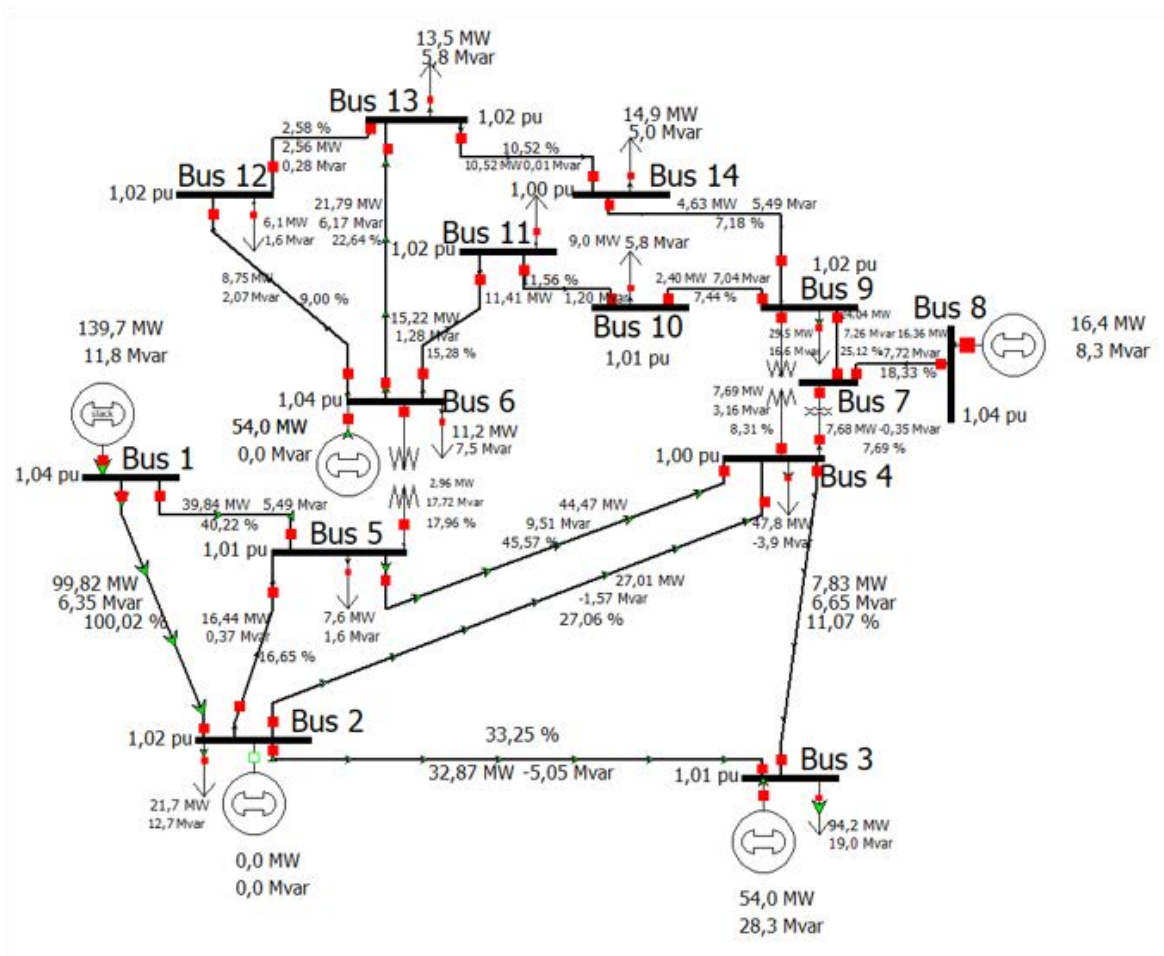
αυξάνοντας πάλι την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 4-3 μειώνοντας την παραγωγή της γεννήτριας 1. Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.9 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο B3:

Σε αυτήν την προσομοίωση θεωρείται η απομάκρυνση της γεννήτριας 2 από το δίκτυο, λόγω κάποιας βλάβης ή για συντήρηση. Η προσομοίωση αναδεικνύει μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 στο 156,20% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής, κάτι που αποτελεί μη αποδεκτό σενάριο καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφή της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 1-2 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής αυξάνοντας πάλι την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 1-2 λόγω της γεννήτριας 1. Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.10 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Κεντριοποιημένη) μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.

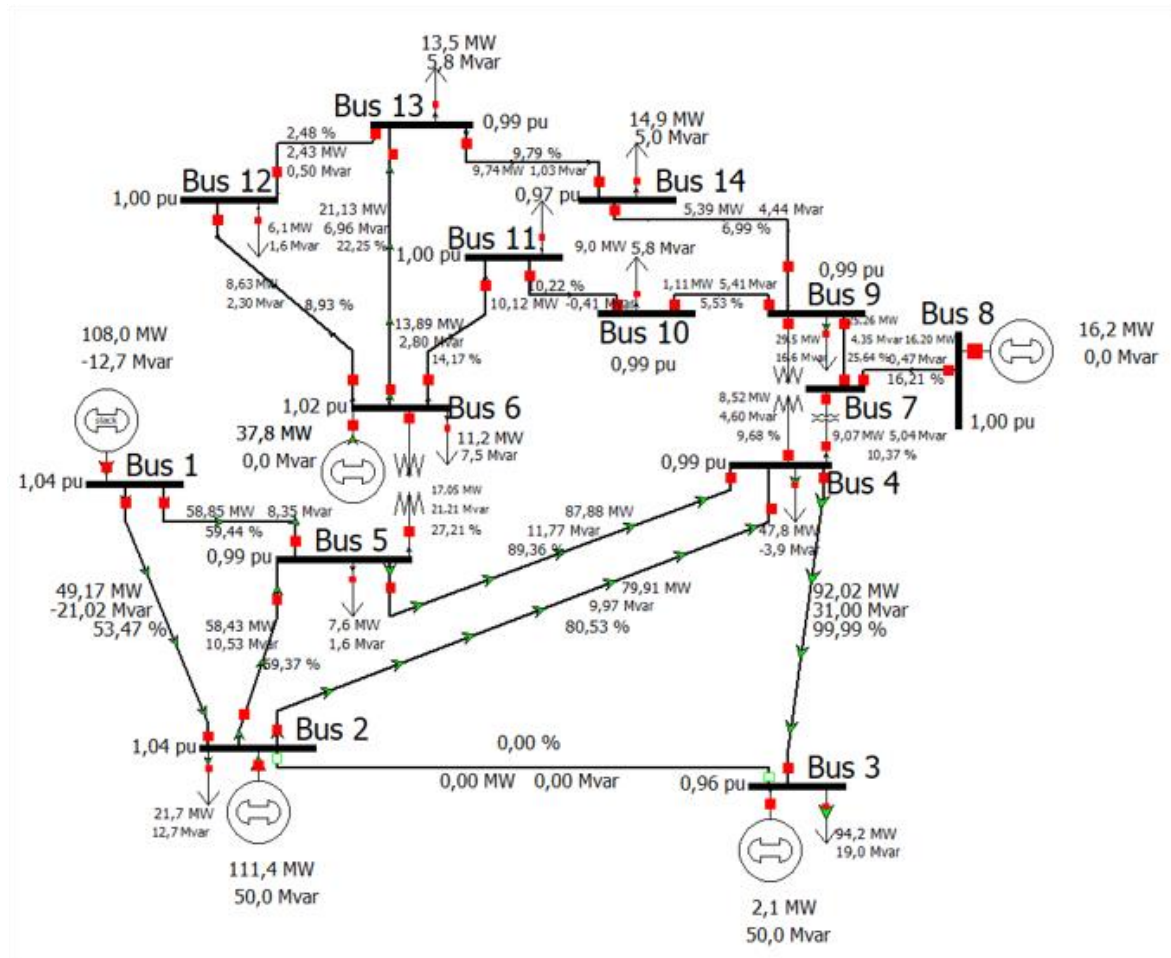
5.3.3 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενδεχόμενα που εξετάστηκαν κατά τη μελέτη N-1, όπου αναλύεται η επίδραση της απώλειας μίας γραμμής μεταφοράς ή μίας γεννήτριας στο σύστημα με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη). Τα σενάρια που εξετάζονται είναι: (Γ1) απώλεια γραμμής 1-2, (Γ2) απώλεια γραμμής 2-3 και (Γ3) απομάκρυνση γεννήτριας 2.

Ενδεχόμενο Γ1:

Στην πρώτη προσομοίωση θεωρείται το άνοιγμα της γραμμής 1-2, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει υψηλό ποσοστό φόρτισης (64,5%). Με την προσομοίωση του συστήματος παρατηρείται μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-5 στο 104,07 % της μέγιστης επιτρεπτής τιμής δημιουργώντας κίνδυνο καταστροφής της γραμμής.

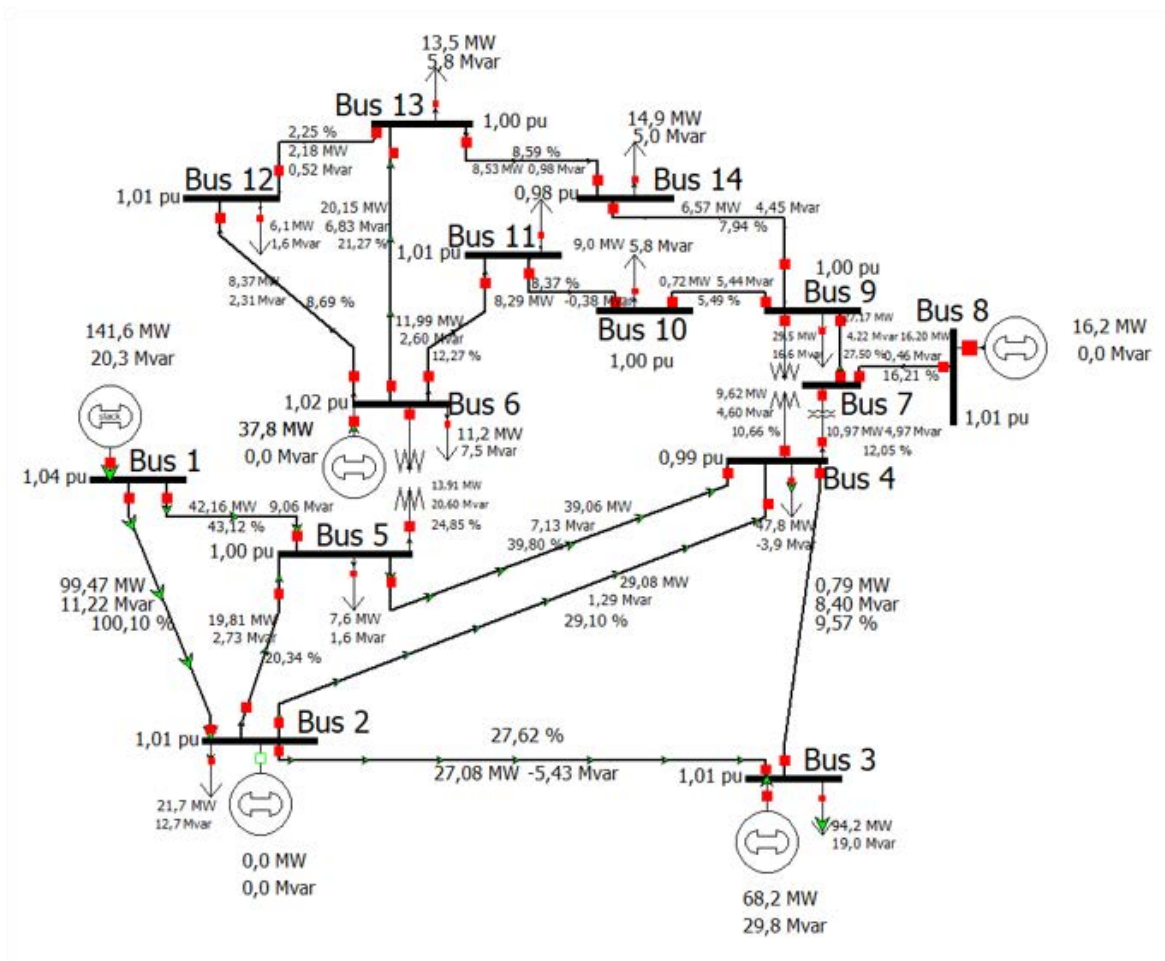
η γραμμή 4-3 και να τροφοδοτήσει ικανοποιητικά το φορτίου στον ζυγό 3. Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.12 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο Γ3:

Σε αυτήν την προσομοίωση θεωρείται η απομάκρυνση της γεννήτριας 2 από το δίκτυο, λόγω κάποιας βλάβης ή για συντήρηση. Μέσω της προσομοίωσης φαίνεται μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 στο 156,26% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής, κάτι που αποτελεί μη αποδεκτό σενάριο καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφή της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 1-2 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει νέα κατανομή της παραγωγής αυξάνοντας πάλι την παραγωγή της γεννήτριας 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 1-2 λόγω της μεγάλης παραγωγής πραγματικής ισχύος από την γεννήτριας 1. Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.13 Το δίκτυο με 20% Διείσδυση PV (Αποκεντρωμένη) μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.

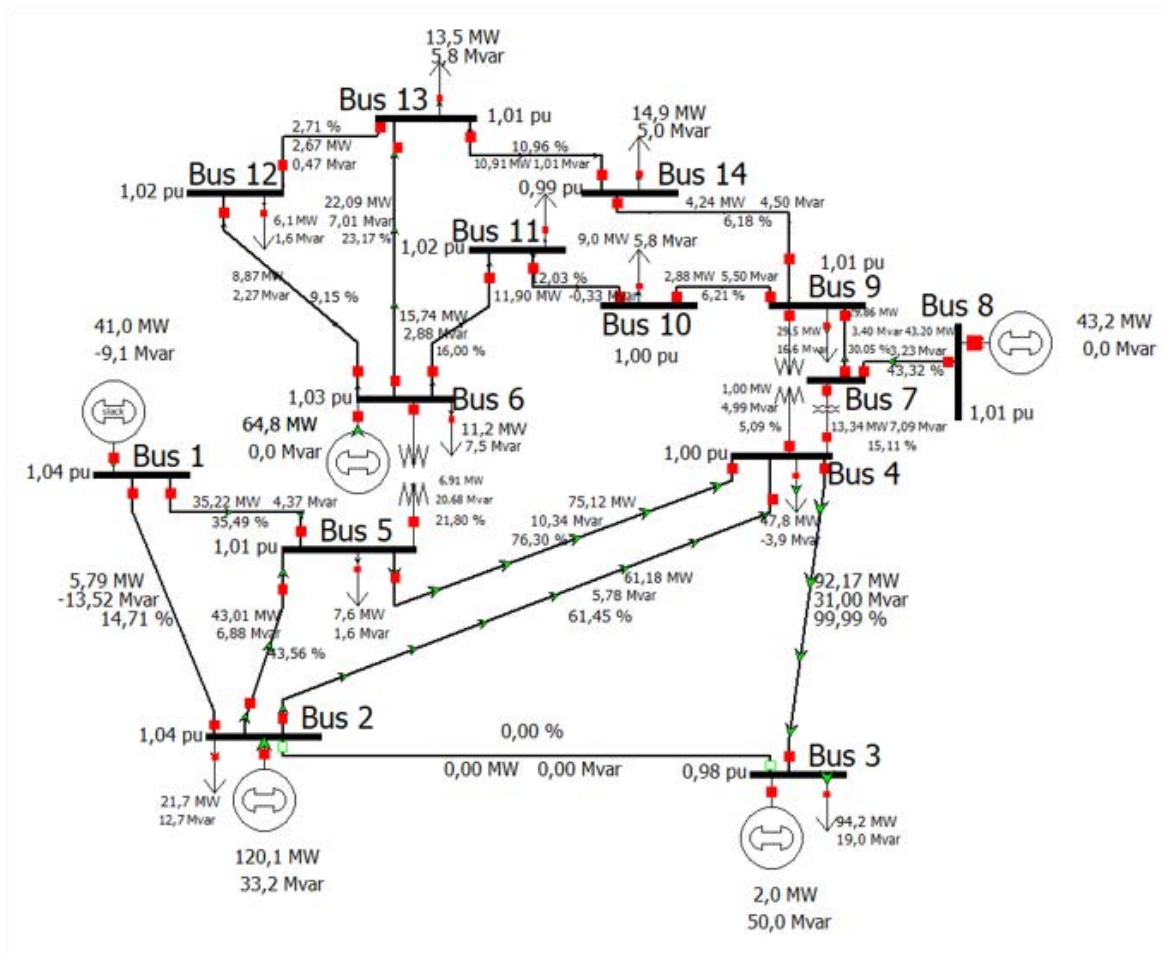
5.3.4 Ανάλυση Ενδεχομένων Σεναρίων του Συστήματος με 40% Διείσδυση PV

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενδεχόμενα που εξετάστηκαν κατά τη μελέτη N-1, όπου αναλύεται η επίδραση της απώλειας μίας γραμμής μεταφοράς ή μίας γεννήτριας στο σύστημα με 40% Διείσδυση PV. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι: (Δ1) απώλεια γραμμής 2-3 και (Δ2) απομάκρυνση γεννήτριας 2.

Ενδεχόμενο Δ1:

Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε το άνοιγμα της γραμμής 2-3, λόγω κάποιου σφάλματος, η οποία εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό φόρτισης (61,5%) και αποτελεί την μόνη γραμμή με ποσοστό μεγαλύτερο από 50%. Με την προσομοίωση του συστήματος παρατηρείται μια υπερφόρτωση της γραμμής 4-3 στο 102,20 % της μέγιστης επιτρεπτής τιμής δημιουργώντας κίνδυνο υπερθέρμανσης της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε

την φόρτιση της γραμμής 4-3 εντός των επιθυμητών ορίων, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανακατανομή της παραγωγής αυξάνοντας την παραγωγή πραγματικής ισχύος της γεννήτριας 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 4-3 και να τροφοδοτήσει ικανοποιητικά το φορτίου στον ζυγό 3. Στο Σχήμα 5.14 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.

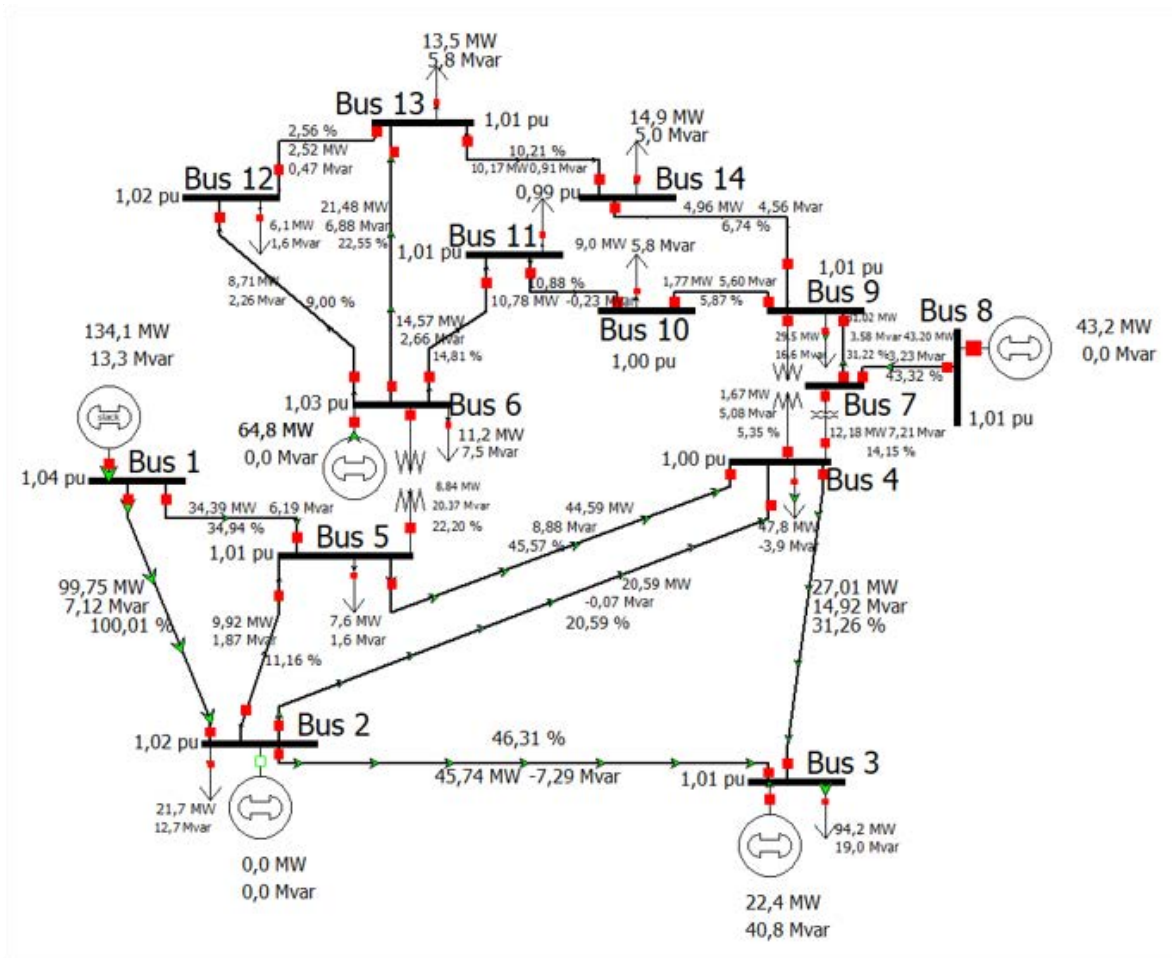


Σχήμα 5.14 Το δίκτυο με 40% Διείσδυση PV μετά από την απώλεια της γραμμής 2-3 και την ανάλυση OPF.

Ενδεχόμενο Δ2:

Ως τελευταία προσομοίωση θεωρούμε την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 από το δίκτυο, λόγω κάποιας βλάβης ή για συντήρηση. Μέσω της προσομοίωσης φαίνεται μια υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 στο 118,39% της μέγιστης επιτρεπτής τιμής, κάτι που αποτελεί μη αποδεκτό σενάριο καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφή της γραμμής. Προκειμένου να επαναφέρουμε την φόρτιση της γραμμής 1-2 εντός των επιθυμητών ορίων, είναι απαραίτητο να γίνει βέλτιστη κατανομή της παραγωγής αυξάνοντας την παραγωγή των γεννητριών 1 και 3 ώστε να αποσυμφορηθεί η γραμμή 1-

2 και να καλύπτονται τα φορτία. Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται το σύστημα μετά από την πραγματοποίηση OPF.



Σχήμα 5.15 Το δίκτυο με 40% Διείσδυση PV μετά από την απομάκρυνση της γεννήτριας 2 και την ανάλυση OPF.

5.3.5 Συμπεράσματα από τις Προσομοιώσεις Ενδεχομένων Καταστάσεων

Στο βασικό σενάριο χωρίς PV, η απώλεια της γραμμής 1-2 προκάλεσε πολύ σοβαρές υπερφορτίσεις: η γραμμή 1-5 έφτασε το 167,68% του θερμικού της ορίου και η γραμμή 5-4 το 106,96%. Παράλληλα, η απώλεια της γραμμής 2-3 οδήγησε την γραμμή 4-3 σε υπερφόρτωση 102,38%. Ακόμη πιο κρίσιμη αποδείχθηκε η απώλεια της γεννήτριας 2, καθώς η γραμμή 1-2 εκτοξεύθηκε στο 193,04%, τιμή που καθιστά το σενάριο εντελώς μη αποδεκτό χωρίς διορθωτικά μέτρα.

Στο σενάριο με 20% PV και συγκεντρωτική παραγωγή, η εικόνα βελτιώνεται μερικώς. Η απώλεια της γραμμής 1-2 προκάλεσε μόνο την υπερφόρτωση της γραμμής 1-5 στο 104,64%, ενώ η απώλεια της γραμμής 2-3 οδήγησε τη γραμμή 4-3 στο 102,26%. Παρά την

ελάφρυνση σε σχέση με το βασικό σενάριο, η απώλεια της γεννήτριας 2 εξακολουθεί να είναι προβληματική, με τη γραμμή 1-2 να φορτίζεται στο 156,20%, ποσοστό που υπερβαίνει σημαντικά τα επιτρεπτά όρια.

Στην περίπτωση με 20% PV αποκεντρωμένη παραγωγή, η κατανομή της ισχύος έγινε πιο ισορροπημένη και οι τάσεις ήταν πιο κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, ωστόσο, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν σχετικά παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Έτσι, η απώλεια της γραμμής 1-2 φόρτισε τη γραμμή 1-5 στο 104,07%, ενώ η απώλεια της γραμμής 2-3 προκάλεσε υπερφόρτωση 102,38% στη γραμμή 4-3. Αν και οι υπερβάσεις παραμένουν, είναι σαφώς ηπιότερες από το βασικό σενάριο και εδώ η απώλεια της γεννήτριας 2 οδηγεί σε σοβαρό πρόβλημα, με τη γραμμή 1-2 να φτάνει το 156,26%, τιμή πολύ κοντά σε αυτήν του κεντρικού σεναρίου.

Τέλος, στο σενάριο με 40% PV, η κατάσταση βελτιώνεται ακόμη περισσότερο. Η απώλεια της γραμμής 2-3 οδήγησε σε υπερφόρτωση της γραμμής 4-3 στο 102,20%, ποσοστό οριακά πάνω από το επιτρεπτό. Η απομάκρυνση της γεννήτριας 2, αν και παραμένει κρίσιμη, είχε σαφώς μικρότερη επίδραση σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, καθώς η γραμμή 1-2 έφτασε στο 118,39%. Παρότι η τιμή αυτή εξακολουθεί να υπερβαίνει το όριο, η βελτίωση σε σχέση με το 193,04% του βασικού συστήματος είναι εμφανής. Ωστόσο, οι τάσεις των ζυγών εμφάνισαν μεγαλύτερες αποκλίσεις, φανερώνοντας ότι η μεγάλη διείσδυση χωρίς κατάλληλες παρεμβάσεις ενισχύει την ευπάθεια του δικτύου.

Η συγκριτική θεώρηση όλων των σεναρίων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευάλωτο στην απώλεια της γεννήτριας 2, με την υπερφόρτωση της γραμμής 1-2 να αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η διείσδυση των φωτοβολταϊκών, και ιδιαίτερα με αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος, οι επιπτώσεις γίνονται ηπιότερες και τα ποσοστά φόρτισης μειώνονται αισθητά. Η περίπτωση με 40% PV αναδεικνύεται ως η πιο ασφαλής και σταθερή, καθώς το δίκτυο ανταποκρίνεται καλύτερα στις απώλειες γραμμών και γεννητριών, παραμένοντας πλησιέστερα στα αποδεκτά λειτουργικά όρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η ανάλυση για την απομάκρυνση της γεννήτριας 1 έδειξε ότι, σε όλες τις περιπτώσεις διείσδυσης και χωροταξίας του δικτύου, δεν προέκυψε καμία υπέρβαση ορίων ούτε στις τάσεις των ζυγών ούτε στις ροές των γραμμών. Το εύρημα αυτό καταδεικνύει ότι το σύστημα διαθέτει επαρκή εφεδρεία ασφαλείας και παρουσιάζει ανθεκτικότητα έναντι της συγκεκριμένης διαταραχής. Συνεπώς, η απώλεια της εν λόγω γεννήτριας δεν αναμένεται να δημιουργήσει

προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί αξιόπιστα βάσει του κριτηρίου N-1.

5.4 Μελέτη Ενδεχομένων Καταστάσεων Μεταβατικής Ευστάθειας

Η αξιολόγηση της μεταβατικής ευστάθειας πραγματοποιείται αποτελεσματικότερα μέσω της μελέτης των χρονικών καμπυλών που προκύπτουν μετά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος στο σύστημα. Η διαδικασία αυτή κατατάσσεται στην έμμεση προσέγγιση, καθώς το PowerWorld επιλύει το πλήρες σύστημα των διαφορικών εξισώσεων και παρουσιάζει με ακρίβεια την εξέλιξη των κρίσιμων μεγεθών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μεταβολή της σχετικής γωνίας του ρότορα των γεννητριών, καθώς και στη συμπεριφορά των τάσεων στους ζυγούς των γεννητριών αλλά και στους ζυγούς όπου εφαρμόζεται το σφάλμα. Μέσα από αυτές τις καμπύλες είναι δυνατή η παρακολούθηση της απόκρισης του δικτύου πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το βραχυκύκλωμα, ώστε να διαπιστωθεί αν το σύστημα κατορθώνει να επαναφέρει τον συγχρονισμό του. Σε γενικές γραμμές, ένα ηλεκτρικό δίκτυο θεωρείται ευσταθές όταν, μετά την παροδική ταλάντωση, οι σχετικές γωνίες των ρότορων δεν υπερβαίνουν τις 180 μοίρες και οι τάσεις των ζυγών συγκλίνουν σε μία νέα ισορροπημένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη μελέτη αναζητείται ο CCT, στον οποίο θα εκκαθαριστεί ένα σφάλμα, ώστε το σύστημα να μπορέσει να μη χάσει εντελώς το συγχρονισμό του. Τέλος, θα αξιολογηθούν δύο τύποι σφαλμάτων, το στερεό τριφασικό (3LG) και το μονοφασικό ως προς την γη (SLG) που συμβαίνουν στους ζυγούς 5 και 6 ως προς την ικανότητα διατήρησης της ευστάθειας. Επίσης, για την μεταβατική ανάλυση του συστήματος τα σφάλματα θα εφαρμόζονται στην άκρη μιας γραμμής πολύ κοντά στον ζυγό ή όπως θα το ονομάζουμε: "σφάλμα στην γραμμή προς τον ζυγό".

Ένα ακόμη δεδομένο που θα λάβουμε υπόψη μας είναι ότι πριν συμβεί το σφάλμα το δίκτυο θα είναι σε κατάσταση που έχει χάσει μια γραμμή μεταφοράς του (N-1). Για αυτή την μελέτη θα εξεταστούν οι απώλειες των γραμμών 1-2 και 2-3, πριν συμβεί το σφάλμα, καθώς από την μελέτη των ενδεχόμενων σεναρίων προέκυψαν ως εξαιρετικά κρίσιμες για την ροή ισχύος του δικτύου. Στην πράξη, το δίκτυο υπό N-1 βρίσκεται ήδη πιο ευάλωτο σε νέες διαταραχές, αφού η απώλεια μιας γραμμής περιορίζει τα διαθέσιμα μονοπάτια ροής ισχύος και αυξάνει τις φορτίσεις στις υπόλοιπες γραμμές. Έτσι, όταν σε αυτή την

κατάσταση προστεθεί ένα βραχυκύκλωμα, οι ταλαντώσεις των γωνιών ρότορα και οι διακυμάνσεις τάσης τείνουν να είναι πιο έντονες και να εξασθενούν πιο δύσκολα. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση αναδεικνύει σενάρια που ενδέχεται να μην εμφανίζονταν στην απλή μεταβατική μελέτη, όπου το σύστημα ξεκινούσε από μια πιο ευνοϊκή κατάσταση ισορροπίας. Συνεπώς, η ενσωμάτωση της υπόθεσης N-1 πριν από την εφαρμογή του σφάλματος προσφέρει ένα πιο αυστηρό κριτήριο αξιολόγησης της ευστάθειας. Εάν το δίκτυο παραμένει συγχρονισμένο και ανακτά τη μόνιμη κατάστασή του ακόμη και σε αυτό το δυσμενές σενάριο, τότε θεωρείται ότι διαθέτει υψηλό επίπεδο ανθεκτικότητας και αξιοπιστίας. Επιπλέον, για την δυναμική μελέτη θα χρησιμοποιήσουμε το δίκτυο χωρίς διείσδυση PV. Αναλυτικά όλες οι αρχικές συνθήκες της μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9 Στοιχεία μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας.

ΣΦΑΛΜΑΤΑ	Time Step (seconds)	Time Start (seconds)	Time End (seconds)	Resistance (pu)
3LG	0,001	1	10	0
SLG	0,001	1	10	0,05

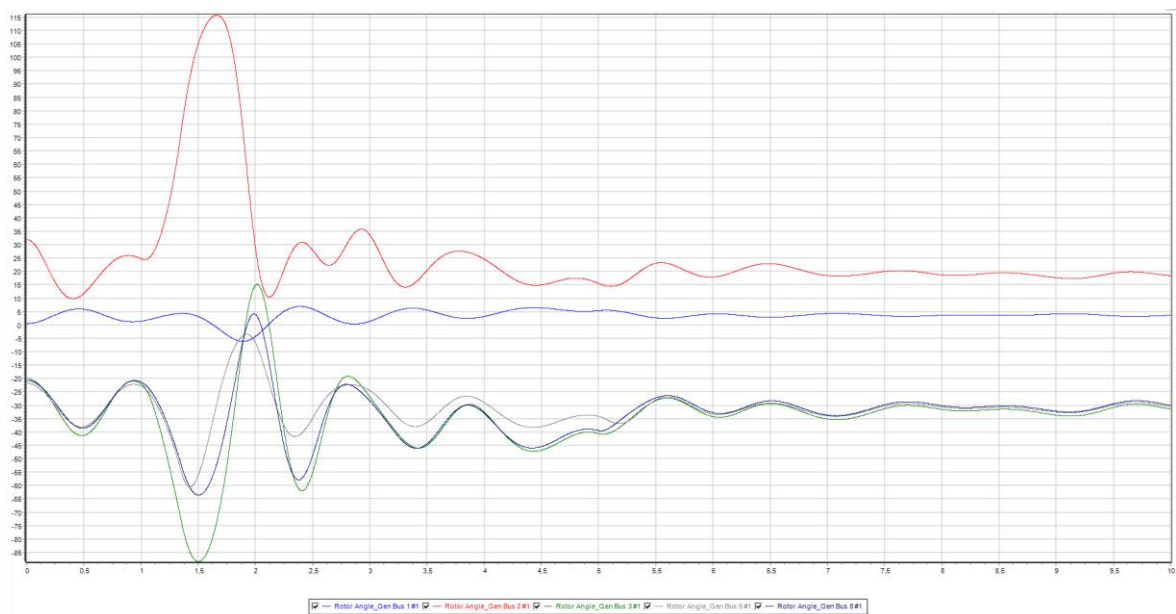
5.4.1 3LG στην γραμμή 4-5 προς τον ζυγό 5

Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0 \text{ sec}$ ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 1-2. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1 \text{ sec}$ πάνω στην γραμμή 4-5 κοντά στον ζυγό 5. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 4-5 την χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 1,36 \text{ sec}$, εάν το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-5, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ κλείνουμε την γραμμή 4-5.

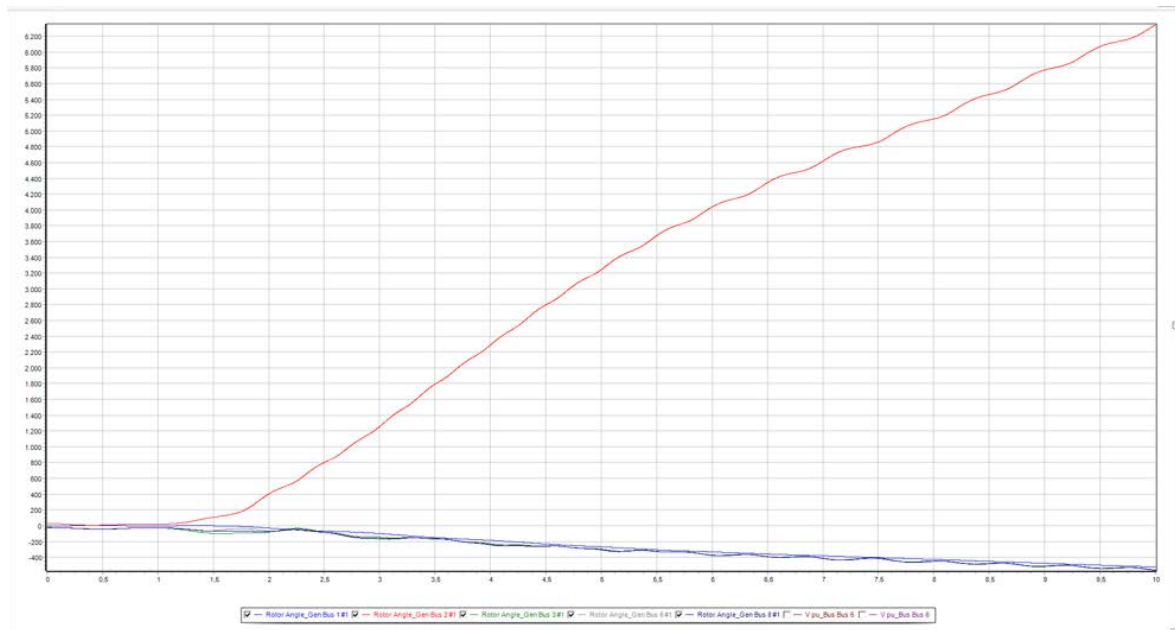
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.16 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (0,35 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1 \text{ sec}$, και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από CCT = 0,35 sec., ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτή είναι η γεννήτρια 2.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.17 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 0,36 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 4-5 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Οι γεννήτριες επιταχύνονται ανεξέλεγκτα, οι σχετικές γωνίες τους ξεπερνούν τις 180 μοίρες και το σύστημα καθίσταται ασταθές. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

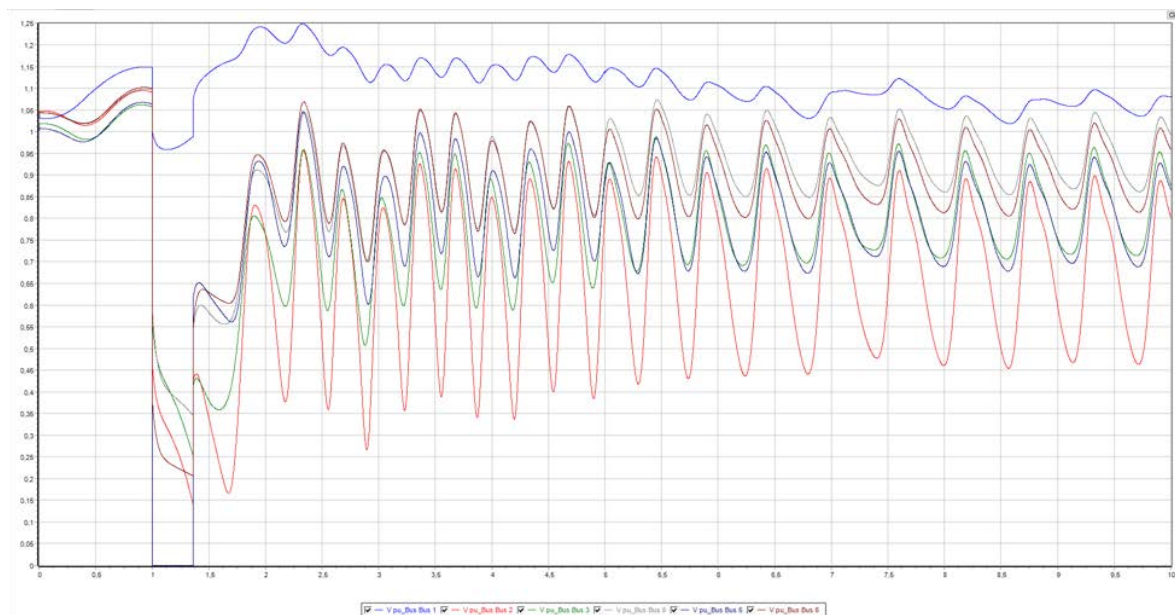
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.18 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την χρονική στιγμή $t = 1$ sec που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,4$ sec οι οποίες στην συνέχεια ταλαντώνονται με μεγάλη συχνότητα. Αυτό είναι ακόμη ένα στοιχείο που υποδηλώνει γενικευμένη αστάθεια του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η τάση στον ζυγό 1 έχει τις μικρότερες μεταβολές κάτι το οποίο είναι λογικό αφού συνδέεται σε αυτόν ισχυρή γεννήτρια για στήριξη της τάσης.



Σχήμα 5.16 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,35 sec.)



Σχήμα 5.17 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,36 sec.



Σχήμα 5.18 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,36 sec.

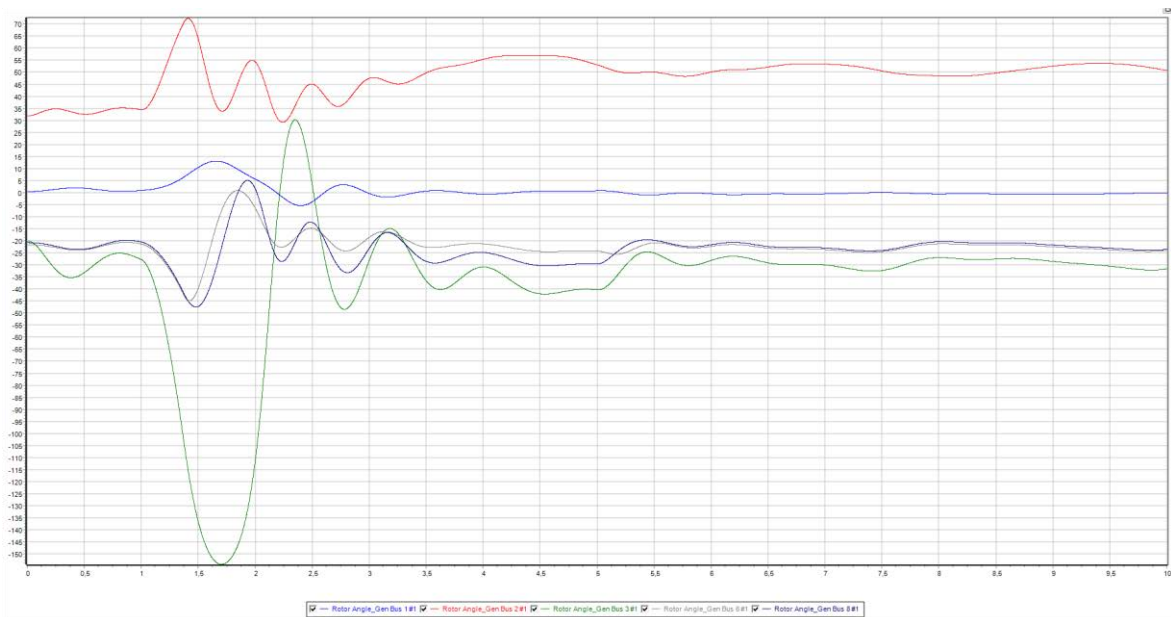
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 2-3. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 4-5 κοντά στον ζυγό 5. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 4-5 την χρονική στιγμή $t = 1,37$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 1,38$ sec, εάν το

υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-5, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ κλείνουμε την γραμμή 4-5.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.19 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης ($0,37 \text{ sec}$). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1 \text{ sec.}$, και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από $CCT = 0,37 \text{ sec.}$, ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας 3 μεταβάλλεται πιο έντονα.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.20 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης $0,38 \text{ sec}$ όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 4-5 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον ζυγό 3 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 3,1 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας. Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 3 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

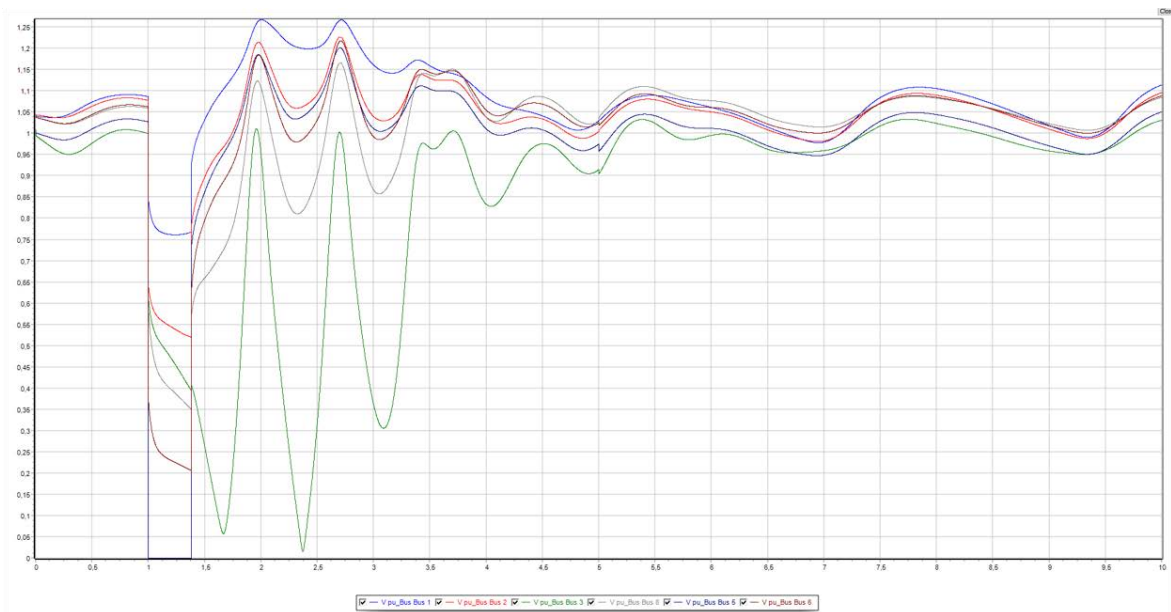
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.21 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,4 \text{ sec}$ και στην συνέχεια επανέρχονται στις φυσιολογικές τιμές.



Σχήμα 5.19 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,37 sec.)



Σχήμα 5.20 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,38 sec.



Σχήμα 5.21 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,38 sec.

5.4.2 SLG στην γραμμή 4-5 προς τον ζυγό 5

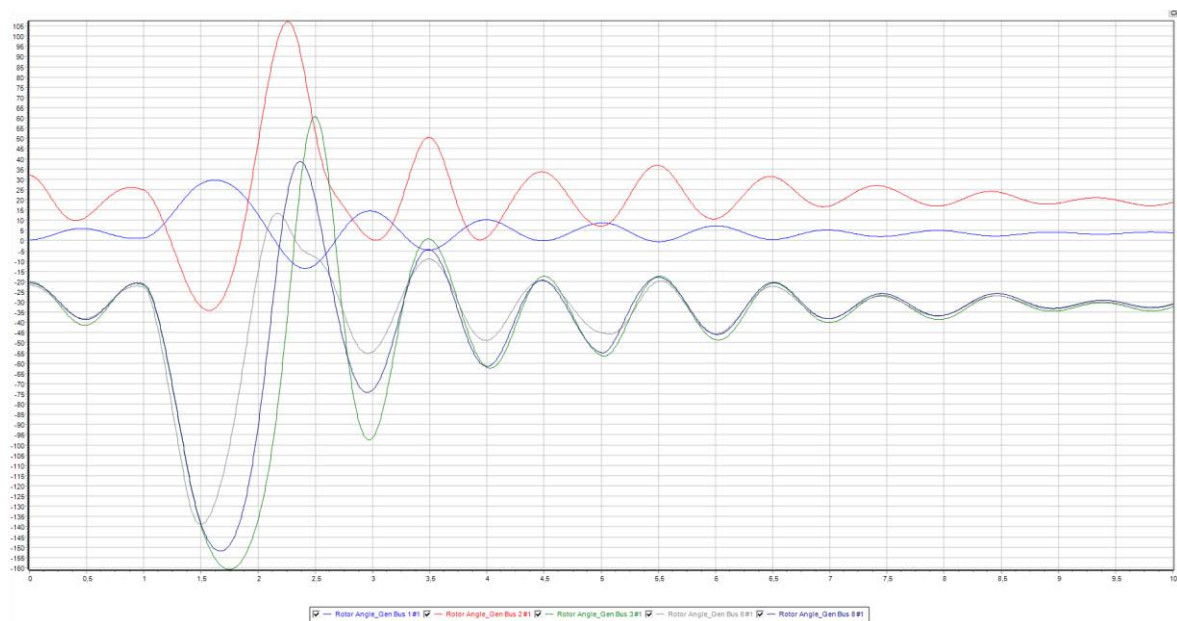
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 1-2. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 4-5 κοντά στον ζυγό 5. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 4-5 την χρονική στιγμή $t = 1,38$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 1,39$ sec, εάν το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-5, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5$ sec κλείνουμε την γραμμή 4-5.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.22 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (0,38 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1$ sec., και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από CCT = 0,38 sec., ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας 3 μεταβάλλεται πιο έντονα.

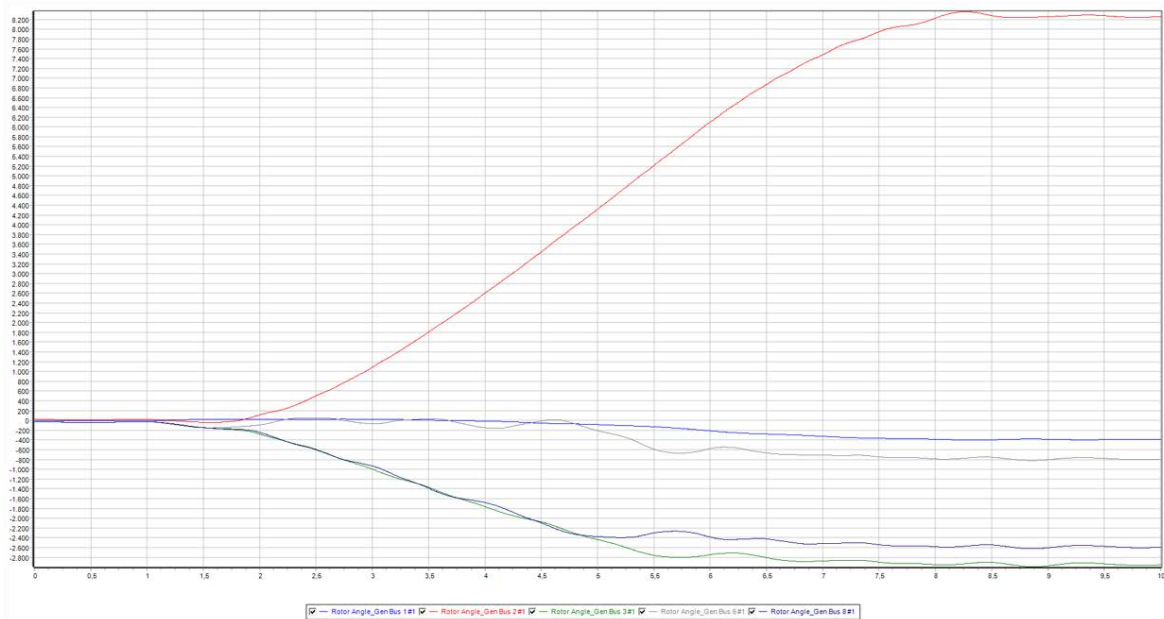
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.23 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 0,39 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 4-5 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Οι γεννήτριες επιταχύνονται ανεξέλεγκτα, οι σχετικές γωνίες τους ξεπερνούν τις 180 μοίρες και το

σύστημα καθίσταται ασταθές. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

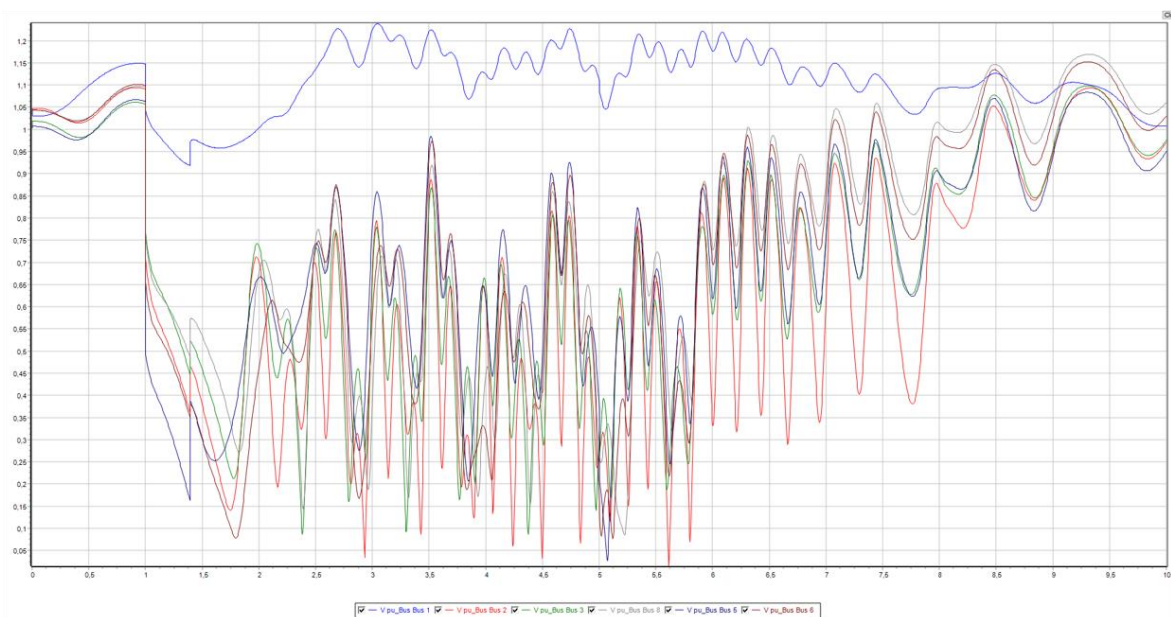
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.24 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,4 \text{ sec}$ οι οποίες στην συνέχεια ταλαντώνονται με μεγάλη συχνότητα. Αυτό είναι ακόμη ένα στοιχείο που υποδηλώνει γενικευμένη αστάθεια του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η τάση στον ζυγό 1 έχει τις μικρότερες μεταβολές κάτι το οποίο είναι λογικό αφού συνδέεται σε αυτόν ισχυρή γεννήτρια για στήριξη της τάσης.



Σχήμα 5.22 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,38 sec.)



Σχήμα 5.23 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,39 sec.



Σχήμα 5.24 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,39 sec.

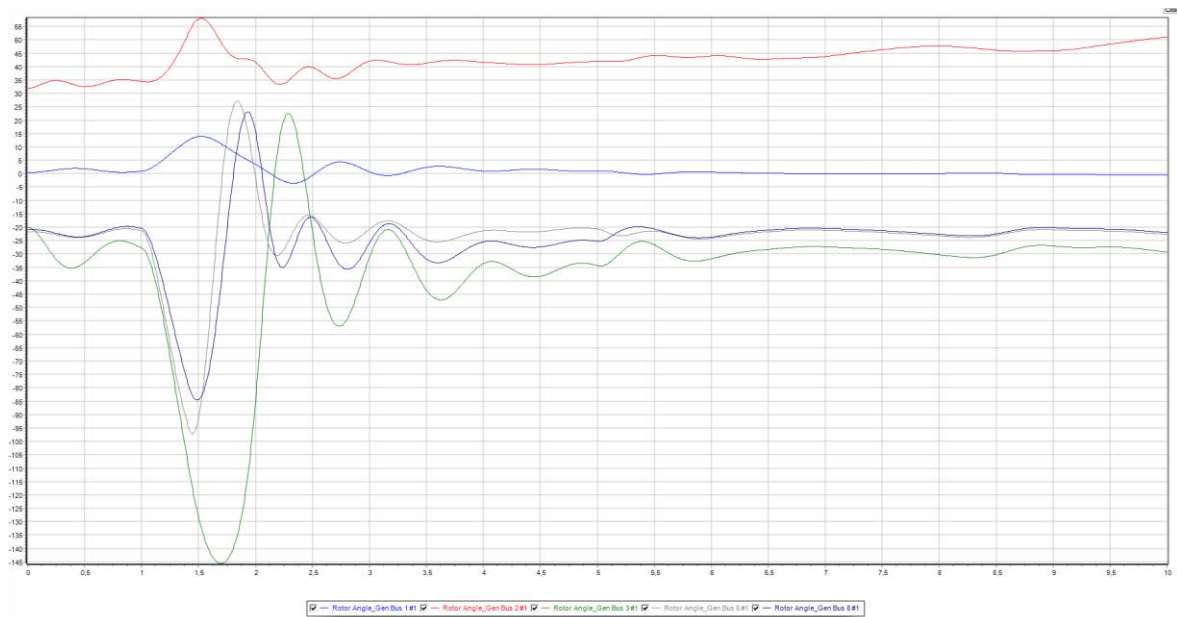
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 2-3. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 4-5 κοντά στον ζυγό 5. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 4-5 την χρονική στιγμή $t = 1,41$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 1,42$ sec, εάν το

υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 4-5, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ κλείνουμε την γραμμή 4-5.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.25 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (0,41 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1 \text{ sec.}$, και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από CCT = 0,41 sec., ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας 3 μεταβάλλεται πιο έντονα.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.26 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 0,42 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 4-5 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον ζυγό 3 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 3 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας. Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 3 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

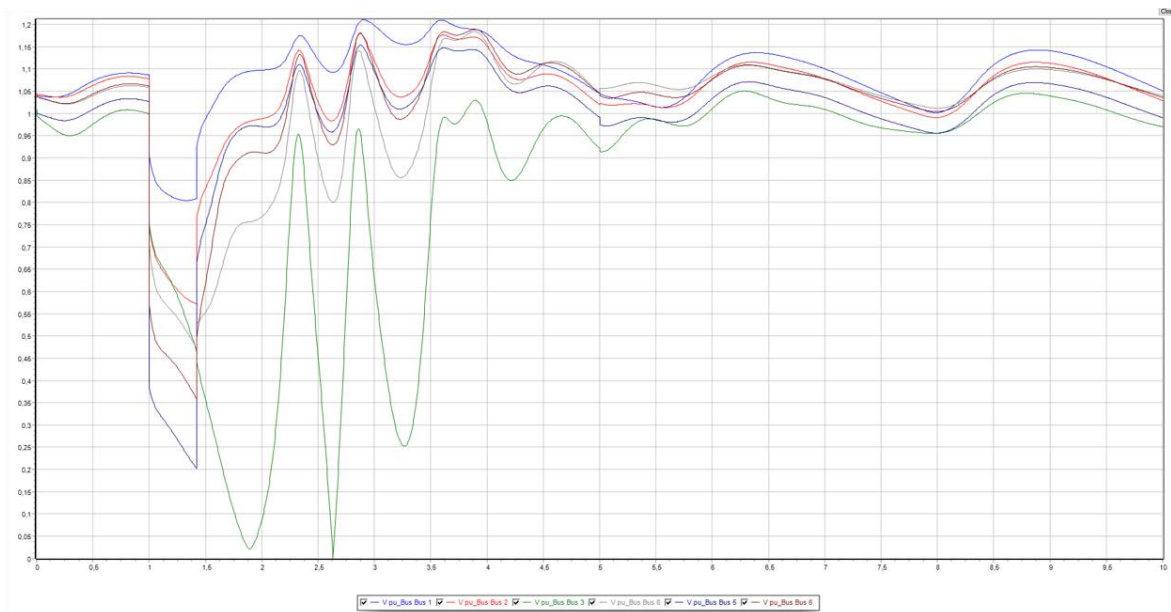
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.27 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,4 \text{ sec}$ και στην συνέχεια επανέρχονται στις φυσιολογικές τιμές.



Σχήμα 5.25 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,41 sec.)



Σχήμα 5.26 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,42 sec.



Σχήμα 5.27 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 4-5 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,42 sec.

5.4.3 3LG στην γραμμή 12-6 προς τον ζυγό 6

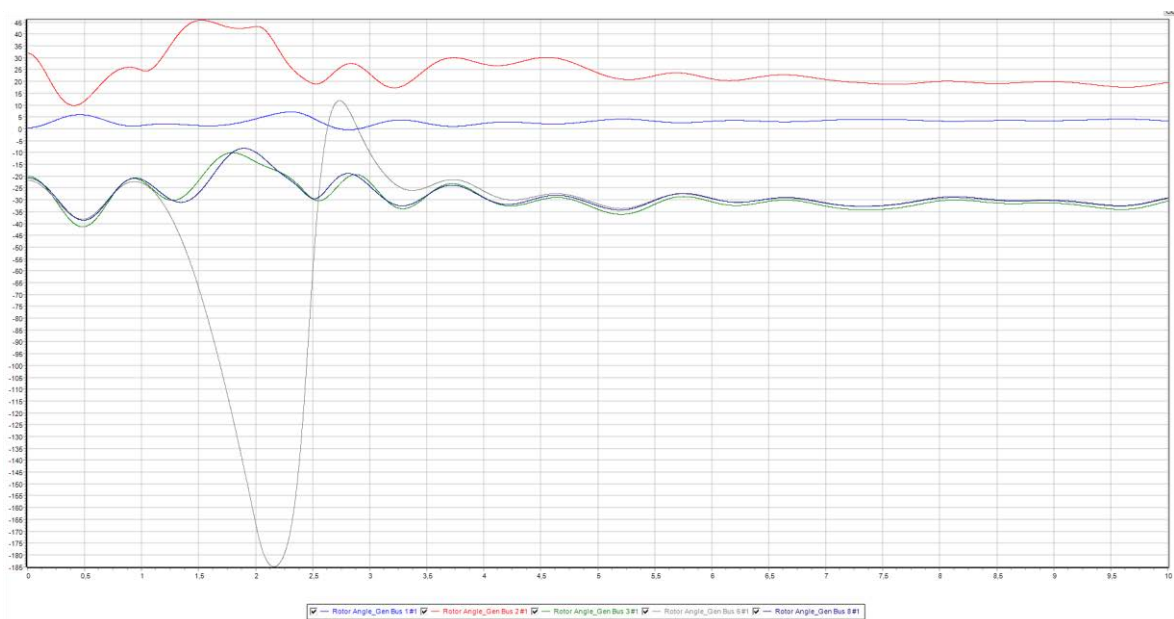
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 1-2. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 12-6 κοντά στον ζυγό 6. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 12-6 την χρονική στιγμή $t = 2$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 2,1$ sec, εάν το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 12-6, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5$ sec κλείνουμε την γραμμή 12-6.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.28 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (1 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1$ sec., και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από $CCT = 1$ sec., ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτή είναι η γεννήτρια 6.

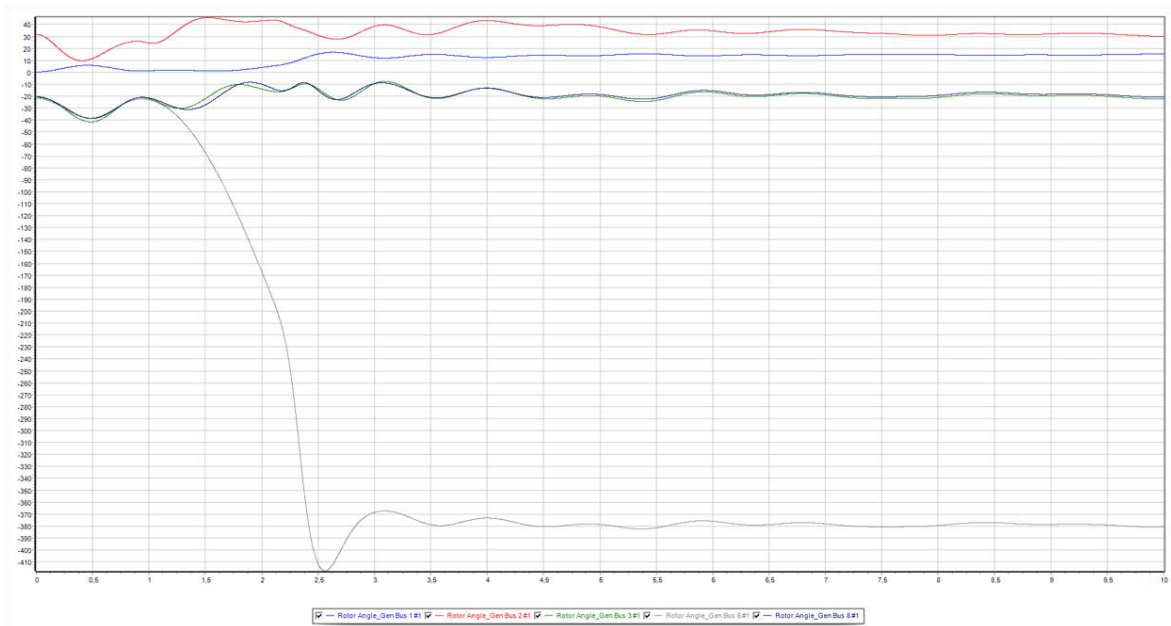
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.29 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 1,1 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 12-6 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον

ζυγό 6 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 2,6 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας. Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 6 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

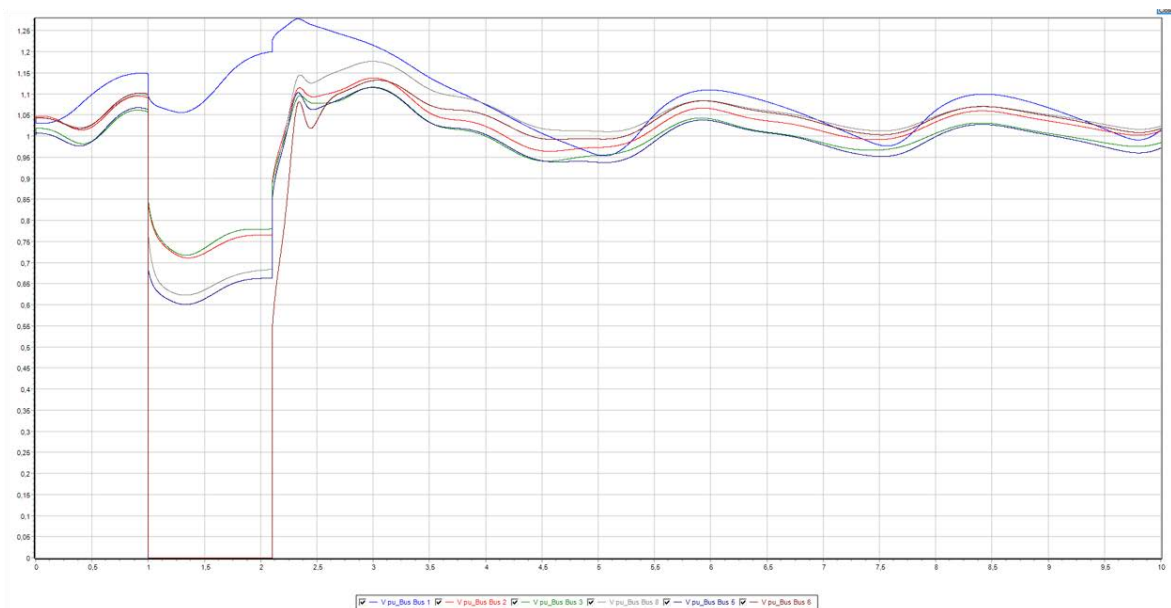
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.30 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα $\Delta t = 1,2 \text{ sec}$. Η αδυναμία του συστήματος να ανακάμψει γρήγορα οφείλεται στην αποθήκευση υπερβολικής κινητικής ενέργειας από τις γεννήτριες και στην ευρεία διάχυση της διαταραχής στο δίκτυο, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη γενικευμένης αστάθειας.



Σχήμα 5.28 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1 sec.)



Σχήμα 5.29 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,1 sec.



Σχήμα 5.30 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,1 sec.

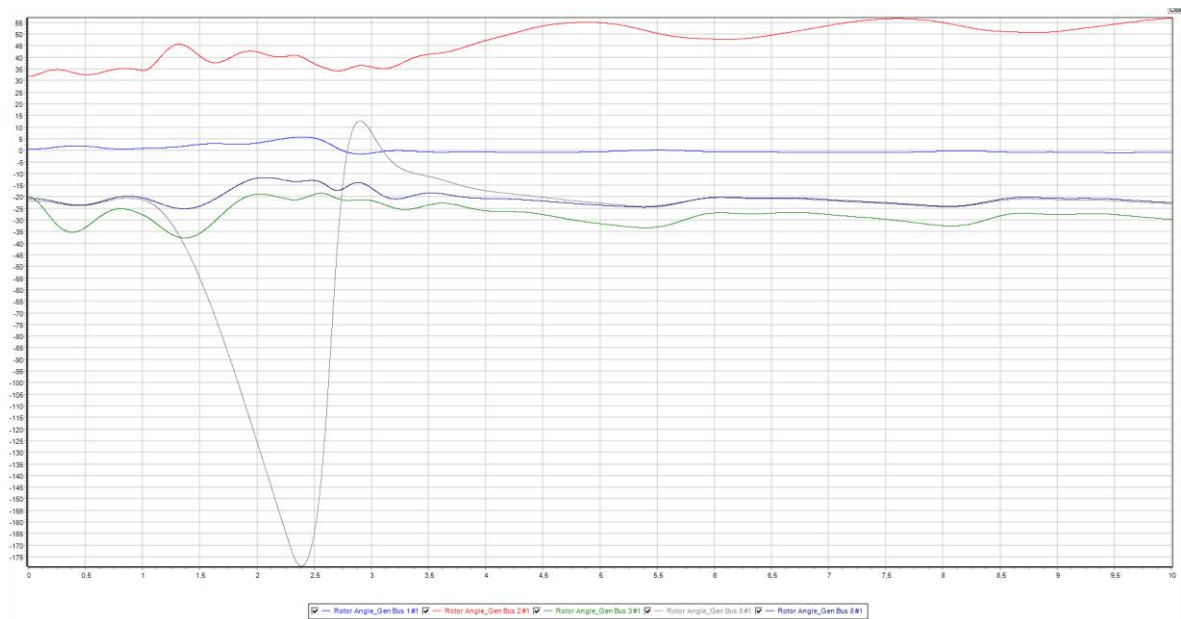
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 2-3. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 12-6 κοντά στον ζυγό 6. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 12-6 την χρονική στιγμή $t = 2,3$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 2,4$ sec, εάν

το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 12-6, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ κλείνουμε την γραμμή 12-6.

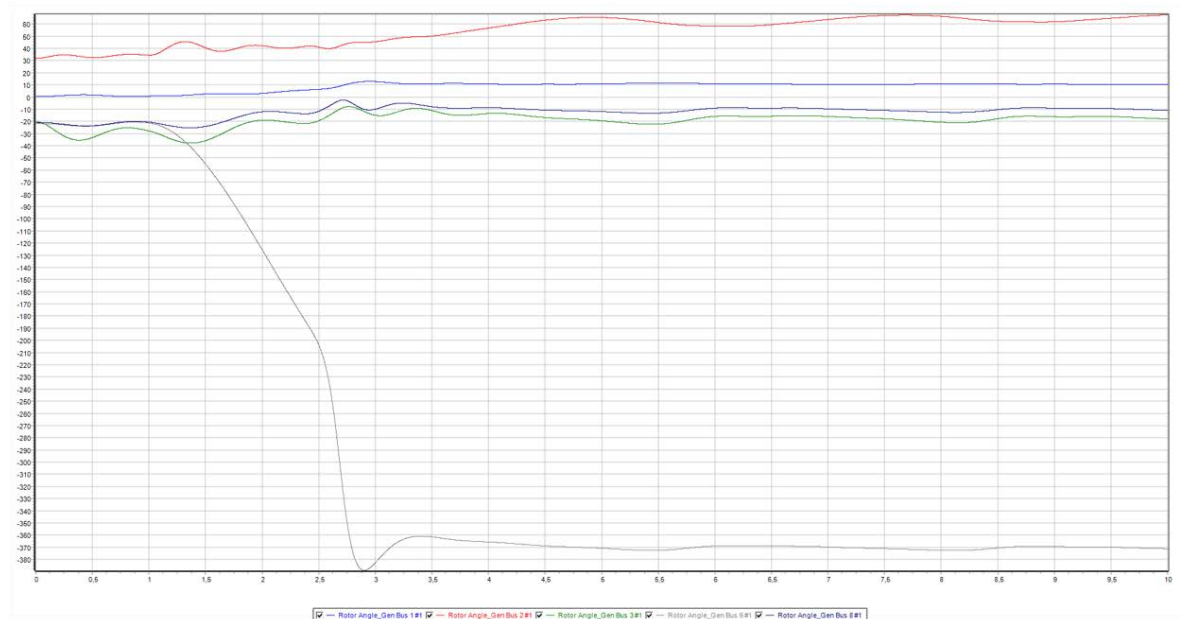
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.31 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (1,3 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1 \text{ sec.}$, και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από $\text{CCT} = 1,3 \text{ sec.}$, ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτή είναι η γεννήτρια 6.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.32 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 1,4 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 12-6 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον ζυγό 6 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 2,7 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας. Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 6 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

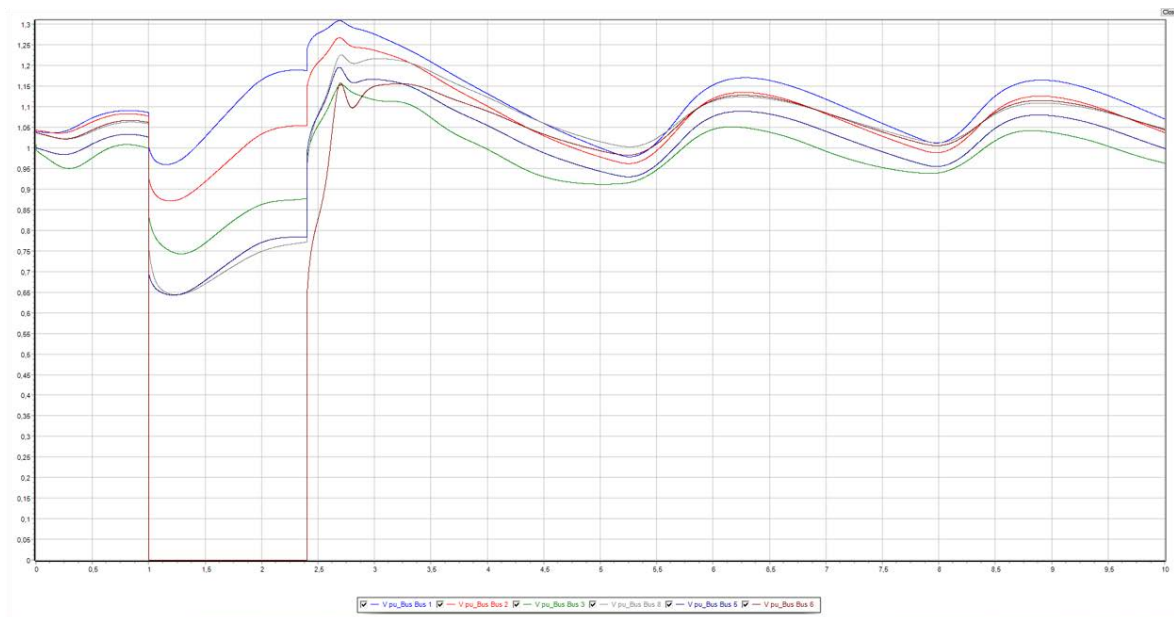
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.33 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα $\Delta t = 1,4 \text{ sec}$. Η αδυναμία του συστήματος να ανακάμψει γρήγορα οφείλεται στην αποθήκευση υπερβολικής κινητικής ενέργειας από τις γεννήτριες και στην ευρεία διάχυση της διαταραχής στο δίκτυο, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη γενικευμένης αστάθειας.



Σχήμα 5.31 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1,3 sec.)



Σχήμα 5.32 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,4 sec.



Σχήμα 5.33 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για 3LG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,4 sec.

5.4.4 SLG στην γραμμή 12-6 προς τον ζυγό 6

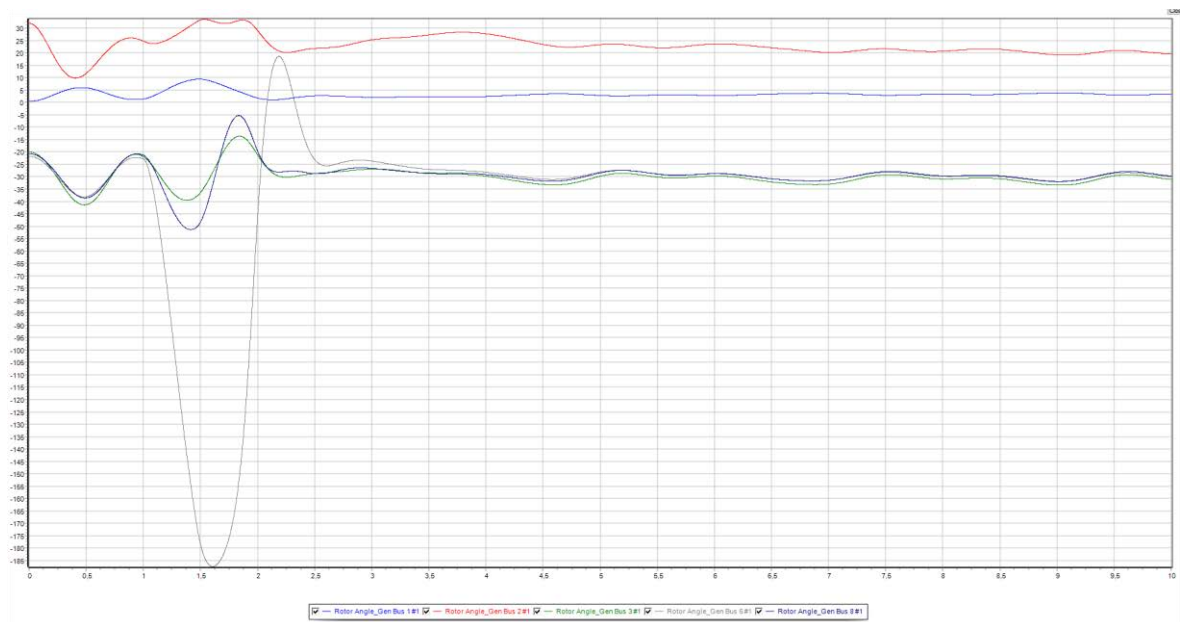
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 1-2. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 12-6 κοντά στον ζυγό 6. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 12-6 την χρονική στιγμή $t = 1,46$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 1,47$ sec, εάν το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 12-6, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5$ sec κλείνουμε την γραμμή 12-6.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.34 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (0,46 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1$ sec., και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από CCT = 0,46 sec., ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτή είναι η γεννήτρια 6.

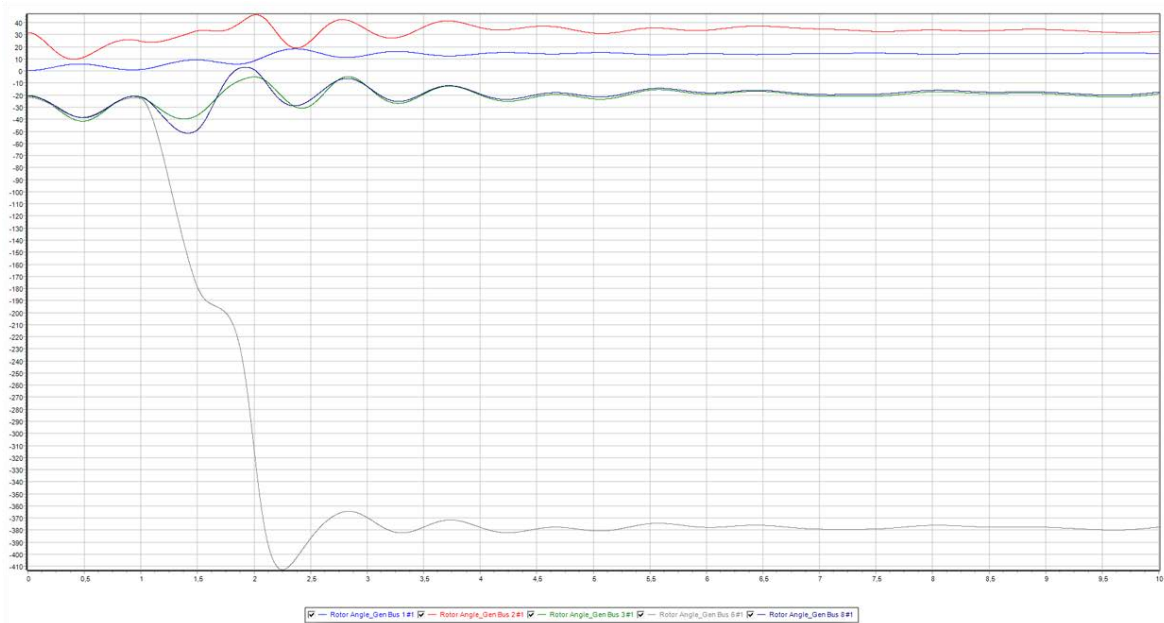
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.35 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 0,47 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 12-6 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον

ζυγό 6 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 2,1 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 6 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

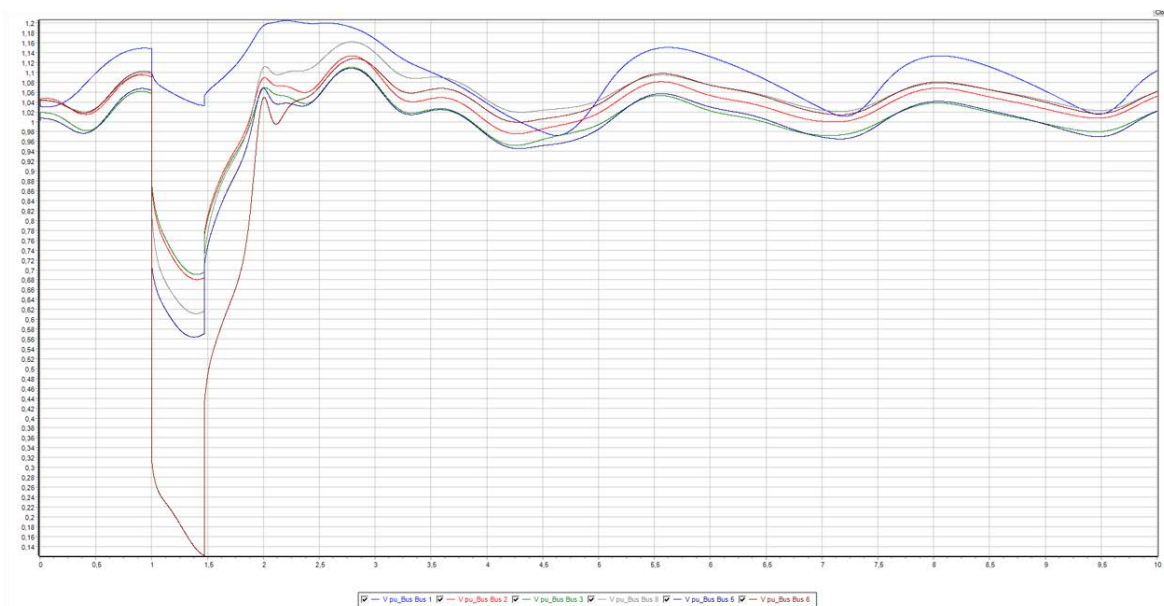
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.36 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για χρονικό διάστημα $\Delta t = 0,5 \text{ sec}$ και στην συνέχεια επανέρχονται στις φυσιολογικές τιμές.



Σχήμα 5.34 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (0,46 sec.)



Σχήμα 5.35 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,47 sec.



Σχήμα 5.36 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 1-2 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 0,47 sec.

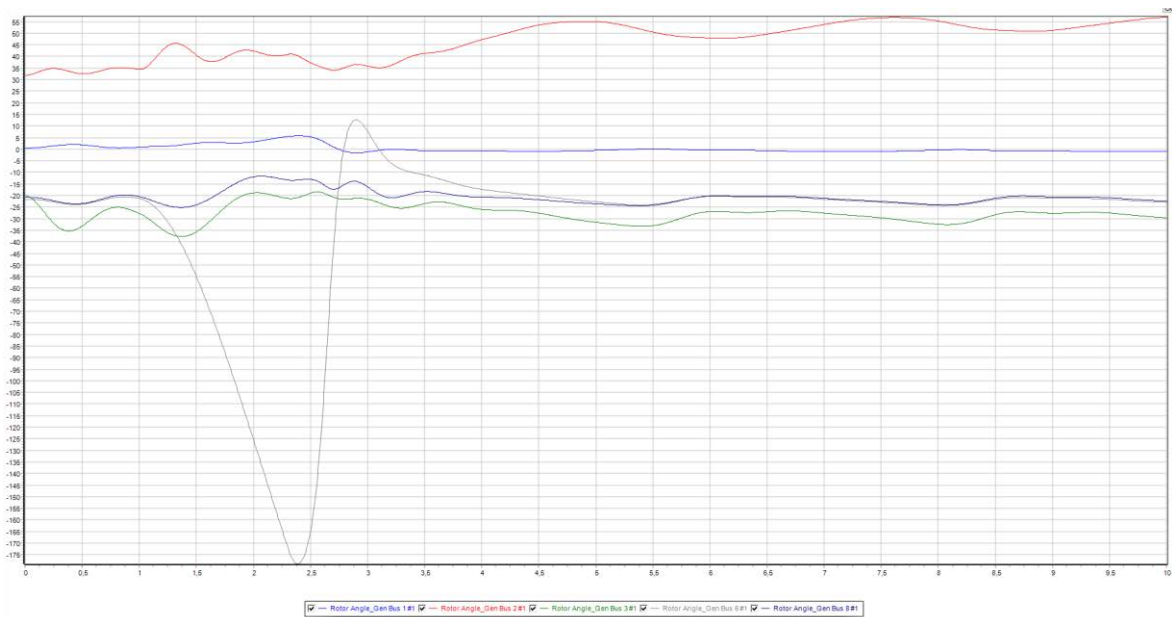
Αρχικά θεωρούμε ότι την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 2-3. Το βραχυκύκλωμα εφαρμόζεται την χρονική στιγμή $t_F = 1$ sec πάνω στην γραμμή 12-6 κοντά στον ζυγό 6. Για να εκκαθαριστεί το βραχυκύκλωμα, ανοίγουν οι διακόπτες της γραμμής 12-6 την χρονική στιγμή $t = 2,4$ sec. Επομένως, τη χρονική στιγμή $t = 2,5$ sec, εάν

το υπόλοιπο δίκτυο παρέμενε σε σύνδεση με τη γραμμή 12-6, τότε θα οδηγούνταν σε αστάθεια. Επιπλέον, την χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$ κλείνουμε την γραμμή 12-6.

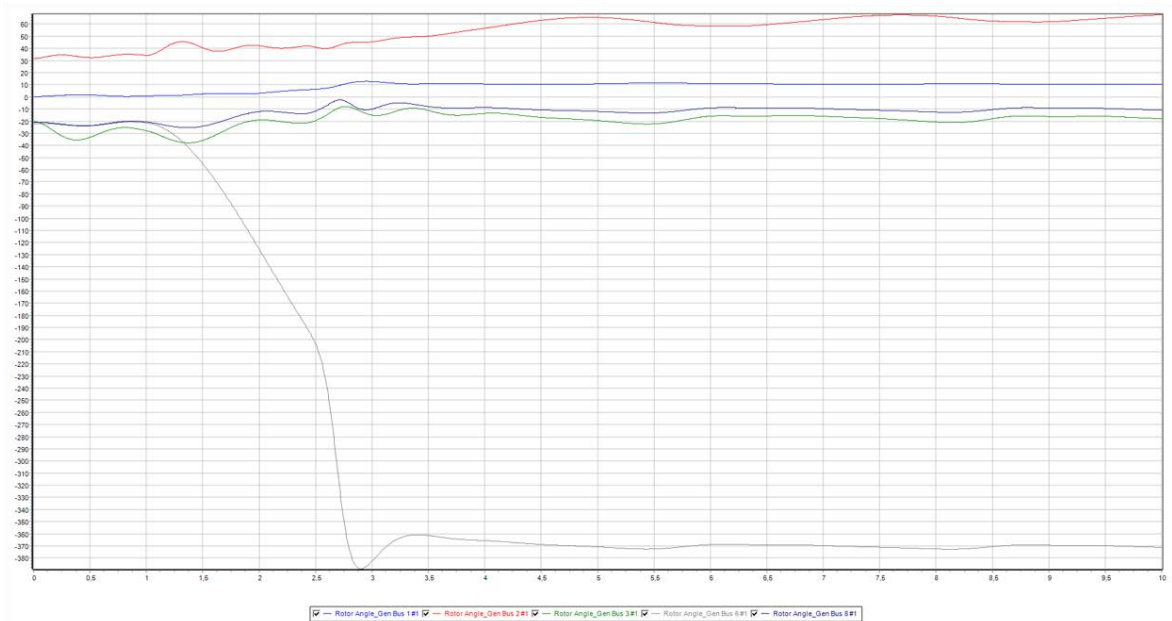
Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.37 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης (1,4 sec). Προκύπτει απότομη ταλάντωση στο $t = 1 \text{ sec.}$, και η σταθερότητα χάνεται προσωρινά. Μετά από $\text{CCT} = 1,4 \text{ sec.}$, ανοίγουν οι διακόπτες για την απαραίτητη εκκαθάριση και παρατηρείται μεγαλύτερη ταλάντωση σε όλα τα σχήματα, η οποία στην συνέχεια αποσβένει. Επίσης, η γωνία της γεννήτριας πλησιέστερα στο σημείο του σφάλματος μεταβάλλεται πιο έντονα. Αυτή είναι η γεννήτρια 6.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.38 εμφανίζονται οι σχετικές γωνίες των γεννητριών ως προς την γωνία αναφοράς (γωνία γεννήτριας 1) για χρόνο εκκαθάρισης 1,5 sec όπου έχουμε αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η καθυστερημένη απόζευξη της γραμμής 12-6 οδηγεί σε υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Η γεννήτρια στον ζυγό 6 επιταχύνεται ανεξέλεγκτα, η σχετική γωνία της ξεπερνά τις 180 μοίρες και στην συνέχεια σε $t = 2,7 \text{ sec}$ επανέρχεται σε νέα θέση λειτουργίας. Παρόλα αυτά το σύστημα θεωρείται ότι είναι ασταθές καθώς η γεννήτρια στον ζυγό 6 έχει χάσει τον συγχρονισμό της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η απώλεια συγχρονισμού συνεπάγεται κατάρρευση της μεταβατικής ευστάθειας, γεγονός μη αποδεκτό για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Σε πραγματικές συνθήκες αυτό συνεπάγεται γενικευμένες αποκοπές φορτίων και καταπόνηση του εξοπλισμού.

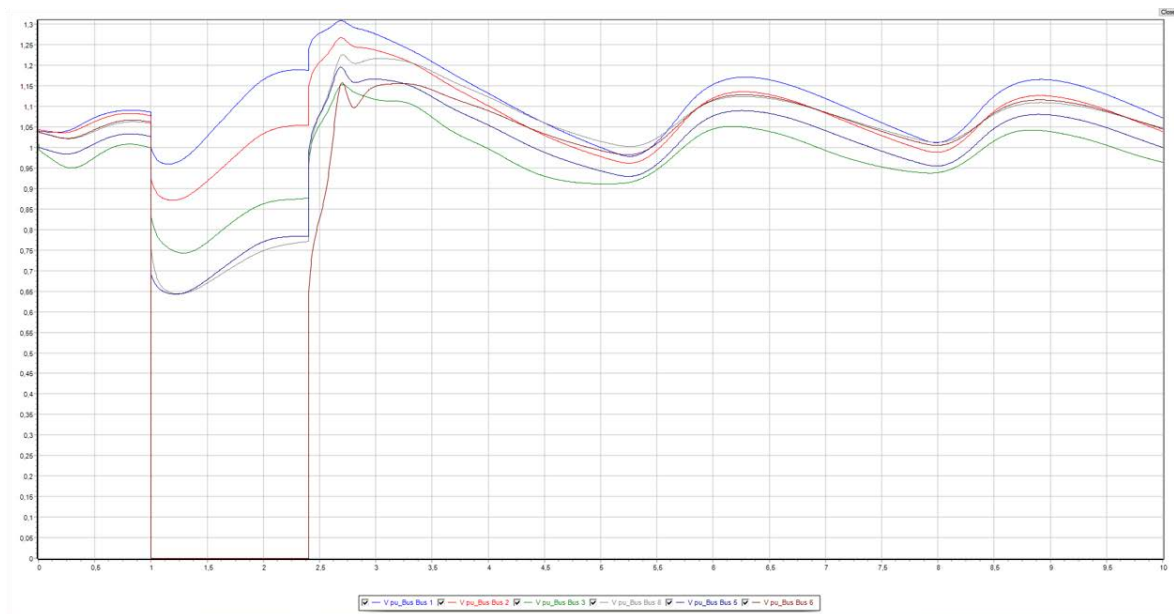
Επιπλέον, από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, στο Σχήμα 5.39 εμφανίζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών του συστήματος. Την στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα υπάρχει γενική πτώση τάσεων των κρίσιμων ζυγών του συστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα $\Delta t = 1,4 \text{ sec}$. Η αδυναμία του συστήματος να ανακάμψει γρήγορα οφείλεται στην αποθήκευση υπερβολικής κινητικής ενέργειας από τις γεννήτριες και στην ευρεία διάχυση της διαταραχής στο δίκτυο, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη γενικευμένης αστάθειας.



Σχήμα 5.37 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος (1,4 sec.)



Σχήμα 5.38 Καμπύλη σχετικής γωνίας γεννητριών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,5 sec.



Σχήμα 5.39 Καμπύλη τάσεων κρίσιμων ζυγών για SLG στη γραμμή 12-6 με απώλεια της γραμμής 2-3 για χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος 1,5 sec.

5.4.5 Συμπεράσματα από την Μελέτη Μεταβατικής Ευστάθειας Ενδεχομένων Καταστάσεων

Στον Πίνακα 5.10 φαίνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για το σχολιασμό της προσομοίωσης της μεταβατικής ευστάθειας. Ο CCT μειώνεται όσο αυξάνεται η σοβαρότητα μίας μεταβατικής διαταραχής.

Πίνακας 5.10 Συνολικά αποτελέσματα της μελέτης ευστάθειας.

ΣΦΑΛΜΑΤΑ	Ζυγοί	CCT (sec)
3LG με απώλεια της γραμμής 1-2	4-5	0,35
	12-6	1
3LG με απώλεια της γραμμής 2-3	4-5	0,37
	12-6	1,3
SLG με απώλεια της γραμμής 1-2	4-5	0,38
	12-6	0,46
SLG με απώλεια της γραμμής 2-3	4-5	0,41
	12-6	1,4

Από τον Πίνακα 5.10 προκύπτει ότι οι CCT διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, τη γραμμή στην οποία αυτό εφαρμόζεται, καθώς και την προϋπάρχουσα απώλεια γραμμής. Ειδικότερα, τα τριφασικά σφάλματα (3LG) αποδεικνύονται τα πλέον δυσμενή, καθώς στη γραμμή 4–5 οι τιμές του CCT κυμαίνονται μόλις μεταξύ 0,35–0,37 sec, γεγονός που καταδεικνύει τα εξαιρετικά περιορισμένα περιθώρια χρόνου για ασφαλή εκκαθάριση. Στη γραμμή 12–6 οι αντίστοιχες τιμές είναι υψηλότερες (1,0–1,3 sec), ωστόσο εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμες συνθήκες, καθώς η καθυστέρηση πέραν αυτών των ορίων οδηγεί σε απώλεια συγχρονισμού.

Αντίθετα, τα μονοφασικά σφάλματα ως προς τη γη (SLG) παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερους χρόνους εκκαθάρισης. Στη γραμμή 4–5 οι τιμές κυμαίνονται από 0,38–0,41 sec, ενώ στη γραμμή 12–6 τα περιθώρια είναι σημαντικά μεγαλύτερα (0,46–1,4 sec), προσφέροντας στο σύστημα περισσότερες δυνατότητες ασφαλούς ανάκαμψης. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και στις περιπτώσεις SLG, η καθυστερημένη απόζευξη πέραν του κρίσιμου χρόνου συνεπάγεται γενικευμένη αστάθεια.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η γραμμή 4–5 αποτελεί το πλέον ευάλωτο τμήμα του δικτύου, καθώς εκεί οι κρίσιμοι χρόνοι είναι οι μικρότεροι τόσο για τα τριφασικά όσο και για τα μονοφασικά σφάλματα. Η γραμμή 12–6 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, με μεγαλύτερα χρονικά περιθώρια για εκκαθάριση, χωρίς ωστόσο να εξαλείφεται ο κίνδυνος αστάθειας σε περίπτωση καθυστέρησης.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο σύστημα, το οποίο για να λειτουργεί απρόσκοπτα απαιτεί κάθε φορά την επιλεκτική συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών μονάδων παραγωγής, μεταφοράς και κατανάλωσης. Η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται όχι μόνο από τις παραμέτρους σχεδίασης και τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης, αλλά και από την αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του δικτύου σε πραγματικό χρόνο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της ευστάθειας ενός ΣΗΕ υπό την παρουσία φωτοβολταϊκών μονάδων, εξετάζοντας τόσο τη στατική όσο και τη μεταβατική του συμπεριφορά. Στο Κεφάλαιο 5, έγινε η παράθεση των αποτελεσμάτων των μελετών ροής φορτίου, των ενδεχομένων σεναρίων λειτουργίας και της μεταβατικής ευστάθειας ενδεχομένων σεναρίων στο πρότυπο δίκτυο IEEE 14. Αυτά αποτελούν κρίσιμο κομμάτι της έρευνας, του ελέγχου και της προστασίας ενός ΣΗΕ από τον ηλεκτρολόγο μηχανικό. Στο Κεφάλαιο 5.2, η ανάλυση ροής φορτίου έδειξε ότι για ποσοστά διείσδυσης 20% υπήρχαν τρεις γραμμές με φορτίσεις πάνω από 50% με μικρές μόνο μεταβολές στις τάσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην αποκεντρωμένη διάταξη των PV μονάδων οι φορτίσεις ήταν ελαφρώς μειωμένες. Στο ποσοστό διείσδυσης 40%, οι φορτίσεις των γραμμών ήταν ακόμη ήπιες διαθέτοντας μόνο μια γραμμή (2-3) με ποσοστό φόρτισης πάνω από 50%, ωστόσο, οι τάσεις παρουσίασαν πιο έντονες αποκλίσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αυξημένη συμμετοχή φωτοβολταϊκών μειώνει τα περιθώρια ασφαλείας τάσης του δικτύου. Στο Κεφάλαιο 5.3, οι προσομοιώσεις ενδεχομένων N-1 ανέδειξαν ότι η απώλεια συγκεκριμένων γραμμών, όπως η 1-2 και η 2-3, επιβαρύνει σοβαρά τη λειτουργία του συστήματος. Σε ορισμένα σενάρια παρατηρήθηκαν τεράστιες υπερφορτίσεις, όπως στην περίπτωση της γραμμής 1-2 με την απομάκρυνση της γεννήτριας 2, όπου παρατηρήθηκε ποσοστό φόρτισης άνω του 190%. Η ενσωμάτωση PV μονάδων βελτίωσε μερικώς την κατάσταση, αλλά η αποκεντρωμένη διάταξη αποδείχθηκε σαφώς πιο αποδοτική στην εξομάλυνση των τάσεων των ζυγών. Στο σενάριο με 40% διείσδυση PV, ωστόσο, η λειτουργία του συστήματος επιδεινώθηκε ξανά, με σοβαρές

αποκλίσεις τάσεων. Στο Κεφάλαιο 5.4, η μελέτη των ενδεχομένων καταστάσεων μεταβατικής ευστάθειας αποκάλυψε τη σημασία του CCT. Στα τριφασικά βραχυκυκλώματα, ακόμη και μικρές καθυστερήσεις εκκαθάρισης οδήγησαν σε απώλεια συγχρονισμού, με τις σχετικές γωνίες των γεννητριών να ξεπερνούν τις 180 μοίρες. Στα μονοφασικά σφάλματα, οι επιπτώσεις ήταν πιο ήπιες, αλλά και πάλι η υπέρβαση του κρίσιμου χρόνου προκάλεσε γενικευμένη αστάθεια. Σημαντικό εύρημα αποτέλεσε η συμπεριφορά των γεννητριών στους ζυγούς 3 και 6, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις επιταχύνθηκαν ανεξέλεγκτα και συνέβαλαν στην αποσταθεροποίηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.10, όπου φαίνεται ότι οι κρίσιμοι χρόνοι κυμαίνονται από 0,35 έως 1,4 sec, ανάλογα με την αρχική απώλεια γραμμής που έχουμε, τον τύπο του σφάλματος και το σημείο του δικτύου που συμβαίνει.

Συνολικά, η εργασία απέδειξε ότι η αυξημένη διείσδυση PV μονάδων επηρεάζει αρνητικά τόσο τη στατική όσο και τη μεταβατική ευστάθεια του ΣΗΕ. Η αποκεντρωμένη χωροθέτηση των μονάδων βελτιώνει την ευστάθεια τάσης του συστήματος, αλλά η ανάγκη για βελτιστοποίηση της προστασίας και της ταχείας εκκαθάρισης των σφαλμάτων παραμένει κρίσιμη. Ο CCT είναι απαραίτητος στη μελέτη της προστασίας ενός ΣΗΕ καθώς βάσει αυτού προγραμματίζονται οι διακόπτες ισχύος και οι προστασίες των στοιχείων του συστήματος για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η απρόσκοπτη λειτουργία του.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Με βάση τα ευρήματα της μελέτης, προτείνονται ορισμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Μια πρώτη προσέγγιση αφορά τη διερεύνηση ακόμη υψηλότερων ποσοστών διείσδυσης φωτοβολταϊκών, ώστε να καθοριστούν τα πραγματικά όρια ασφαλούς λειτουργίας. Επιπλέον, αξίζει να μελετηθεί η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων προστασίας, όπως οι ευφυείς αλγόριθμοι ελέγχου που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο. Η ανάπτυξη μικροδικτύων και η διερεύνηση της δυνατότητας λειτουργίας τους σε κατάσταση νησίδας με την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσε επίσης να ενισχύσει την ευελιξία και την ανθεκτικότητα των ΣΗΕ. Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον να συνδυαστούν τα τεχνικά αποτελέσματα με οικονομικές αναλύσεις, ώστε να αξιολογηθεί το κόστος των απαιτούμενων επενδύσεων για τη διατήρηση της ευστάθειας.

Βιβλιογραφία

- [1] N. Hatziargyriou et al., "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 4, pp. 3271-3281, July 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774. keywords: {Power system stability;Stability criteria;Power electronics;Phase locked loops;Control systems;Converter-driven stability;electric resonance stability;frequency stability;power system stability;small-signal stability;transient stability;voltage stability},
- [2] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez and M. T. Kahn, "Total Harmonics Distortion (THD) with PV System Integration in Smart Grids: Case Study," 2019 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Wellington, South Africa, 2019, pp. 102-108. keywords: {Total harmonic distortion;Harmonic analysis;Smart grids;Renewable energy sources>Loading;Standards;distorted waveform;harmonic distortion;Smart distribution grid;PV systems},
- [3] L. Ye, Y. Yang, F. Zhu, W. Qi and J. Chen, "Resilience Evaluation of Grid Operation Mode for the New Power System," 2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2022, pp. 610-614, doi: 10.1109/PSGEC54663.2022.9881055. keywords: {Resistance;Power supplies;Voltage;System recovery;Reliability engineering;Power grids;Dispatching;resilient power grid;short-circuit current;power flow analysis;network reconfiguration;N-1 analysis;topology analysis},
- [4] N. Wannoï, N. Jirsuwankul, P. Sarikprueck, C. Chompooiwai and C. Wannoï, "A Novel Technique to Identify Proper Locations for Distributed Renewable Generation Integration to Minimize Contingency Impact," 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Weihai, China, 2020, pp. 276-281, doi: 10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208443.
- [5] G. Shan, J. Hangwei and H. Haiteng, "Reliability analysis of active distribution network with distributed renewable power plant cluster," 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Xi'an, China, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/CICED.2016.7576271. keywords: {Power system reliability;Reliability;Indexes;Power generation;Permeability;Automation;Monte Carlo methods;active distribution network;distributed renewable power plant cluster;reliability analysis;sequential Monte-Carlo simulation method},

- [6] R. Mishan, A. Abdelkader, M. Egan and M. Benidris, "Impacts of High Penetration PV Systems on Power System Stability Parameters," 2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Nashville, TN, USA, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IAS54024.2023.10406826.
- [7] E. Tavukcu and B. E. Türkay, "Transient stability analysis of the transmission system considering the initial steady state results," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2017, pp. 758-763, doi: 10.1109/ATEE.2017.7905054.
- [8] B. Tetteh and K. Awodele, "Power System Protection Evolutions from Traditional to Smart Grid Protection," 2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Canada, 2019, pp. 12-16, doi: 10.1109/SEGE.2019.8859874. keywords: {Smart grids;Circuit faults;Relays;Substations;Power system reliability;Reliability;power system;protection;smart grid;transitioning;schemes;distributed generation},
- [9] X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 944-980, Fourth Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.101911.00087.
- [10] U. Azhar, A. Ilyas, W. Shen and M. Korki, "Feasibility Study of Integrating Photovoltaic Generation Power Plant into a Distribution Network in Pakistan," 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597810. keywords: {Photovoltaic systems;Codes;Power system dynamics;Stability criteria;Distribution networks;Power system stability;Transformers;Solar PV power plant;power flow;short-circuit analysis;dynamic stability;three-phase faults;Grid Codes},
- [11] Ν. Α. Βοβός, Γ. Β. Γιαννακόπουλος, "Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Πάτρα: Εκδόσεις Ζήτη, 2019.
- [12] A. Gupta, S. Gupta and A. Shukla, "Real-Time Digital Simulation for Investigating Transient Stability of Power System Network," 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), Bhubaneswar, India, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245825.
- [13] F. Milano, "Continuous Newton's Method for Power Flow Analysis," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 1, pp. 50-57, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2004820.keywords: {Newton method;Load flow analysis;Load flow;Bifurcation;Robustness;Voltage;Power system

modeling;Differential equations;Power system analysis computing;Continuous Newton's method;ill-conditioned power flow;Newton–Raphson's method;optimal multiplier;robust power flow;Runge–Kutta formulas},

- [14] S. A. Shaikh, K. Kumar, A. R. Solangi, S. Kumar and A. A. Soomro, "Short Circuit Analysis & Over current Relaying Coordination of IEEE 9-Bus System," 2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC), Jamshoro, Pakistan, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IMTIC.2018.8467260. keywords: {Circuit faults;Relays;Circuit breakers;Power system stability;Load flow analysis;Power system reliability;Reliability;IEEE 9- Bus system;Load flow analysis;Short circuit (SC) analysis;Protection relaying coordination;OC protection},
- [15] N. A. Salim, H. Mohamed, M. E. S. Bin Ensnat and Z. M. Yasin, "System Transient Stability Due to Various Contingency Using Power World Simulator," 2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA), Putrajaya, Malaysia, 2023, pp. 279-284, doi: 10.1109/ICPEA56918.2023.10093191.
- [16] Kayastha, Nipendra & Niyato, Dusit & Hossain, Ekram & Han, Zhu. (2014). Smart grid sensor data collection, communication, and networking: A tutorial. Wireless Communications and Mobile Computing. 14. <https://doi.org/10.1002/wcm.2258>.
- [17] T. S. Sidhu et al., "Protection issues during system restoration," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 47-56, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839734. keywords: {Power system protection;Power system restoration;Power system reliability;Power system interconnection;Power system management;Reliability engineering;Design engineering;Power engineering and energy;Systems engineering and theory;Delay;Blackouts;blackstart;power system protection;power system relays;power system restoration},
- [18] J. Niu, Q. Zhou, P. Gao, Y. Zhang, J. Zhang and L. Liu, "Challenges and Suggestions for Building a High Resilience Green Power Grid in Northwest China under the Background of “Dual Carbon”," 2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), Lanzhou, China, 2023, pp. 676-679, doi: 10.1109/ICSGSC59580.2023.10319140. keywords: {Power measurement;Green buildings;Smart cities;Buildings;Power grids;Smart grids;Security;High proportion of new energy;New Power System;High toughness transmission end power grid;Prospects for New Energy Development},

- [19] A. KhareSaxena, S. Saxena and K. Sudhakar, "Solar Energy Policy for India: An Overview," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 10, no. 6, pp. 2308-2320, November 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.03080.
- [20] P. Rani, R. Taya and V. P. Reddy, "A Review on Solar Energy and Different Electricity Generations," 2023 International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 2023, pp. 231-234, doi: 10.1109/PEEIC59336.2023.10451552. keywords: {Renewable energy sources;Costs;Electricity;Solar energy;Production;Water pollution;Power generation;solar energy;Electricity;Renewable energy},
- [21] D. d. B. Mesquita, J. Lucas de S. Silva, H. S. Moreira, M. Kitayama and M. G. Villalva, "A review and analysis of technologies applied in PV modules," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895369. keywords: {PV modules;PV technology;silicon crystalline;thin film},
- [22] N. Kumar, P. Yadav and S. S. Chandel, "Comparative analysis of four different solar photovoltaic technologies," 2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), Greater Noida, India, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235077. keywords: {Inverters;MONOS devices;Silicon;Photovoltaic systems;Biological system modeling;Maximum power point trackers;Photovoltaic technology;simulation;PVsyst;performance},
- [23] R. H. Al-Hudaib and S. Alghuwainem, "Influence of Bulk PV Penetration on Power System Transient Stability," 2022 6th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 717-722, doi: 10.1109/ICITISEE57756.2022.10057781. keywords: {Renewable energy sources;Power system stability;Stability analysis;Mathematical models;Steady-state;Transient analysis;Synchronous machines;PV;power system stability;Solar energy;grid Integration},
- [24] U. Azhar, M. Rizwan, W. Shen and M. Korki, "Performance Analysis of a Low Voltage Distribution Network in Pakistan under High Penetration of Rooftop Solar PV Systems," 2022 IEEE PES 14th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Melbourne, Australia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC53445.2022.10072154. keywords: {Low voltage>Loading;Distribution networks;Propagation losses;Software;Behavioral sciences;Performance analysis;Rooftop PV systems;power flow;Low Voltage network;Voltage profile;Power Distribution},

- [25] L. Liyanarachchi, N. Hosseinzadeh, A. Mahmud, A. Gargoom and E. M. Farahani, "Contingency Ranking Selection using Static Security Performance Indices in Future Grids," 2020 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Hobart, Australia, 2020, pp. 1-6. keywords: {Radiation effects;Power system stability;Real-time systems;Steady-state;Performance analysis;Indexes;Power system security;Power System Security;Static Security Assessment;Contingency Ranking;Contingency Selection;Real Power Performance Index;Voltage Performance Index;Renewable technologies},
- [26] Syafii, Krismadinata, Fahmi, Aulia and R. Syahputra, "Harmonic Analysis of PV Inverter-Based EV Charging Station Activity on the Utility Grid," 2024 11th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), Yogyakarta, Indonesia, 2024, pp. 109-112, doi: 10.1109/EECSI63442.2024.10776235. keywords: {Total harmonic distortion;Simulation;Voltage;Carbon dioxide;Solar energy;Harmonic analysis;IEEE Standards;Electric vehicle charging;Inverters;Power harmonic filters;EV charging station;harmonics analysis;PV inverter;electric vehicle},
- [27] P. S. V. Prabhakar, R. Krishan and D. R. Pullaguram, "Static Security Assessment of Large Power Systems Under N-1-1 Contingency," 2022 22nd National Power Systems Conference (NPSC), New Delhi, India, 2022, pp. 35-40, doi: 10.1109/NPSC57038.2022.10069705. keywords: {Power transmission lines;Parallel programming;High performance computing;Contingency management;Transformers;Computational efficiency;Security;Contingency Ranking;Contingency Screening;Line Flows;Load Flow;Outage;Remedial Action;Static Security Assessment.},
- [28] D. Thukaram, H. P. Khincha and P. Shyamala, "Comparative Studies of Transient and Steady State Analysis for a Typical 765kV/400kV EHV Transmission System in Indian Power System," 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, New Delhi, India, 2006, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2006.344306. keywords: {Power system transients;Transient analysis;Steady-state;Power system analysis computing;Voltage control;Power grids;System analysis and design;Iterative methods;Load flow analysis;Power system interconnection;Line loadability;Power Transfer Capability;Switching over voltages;Voltage stability},
- [29] H. Wang and Z. Li, "A Review of Power System Transient Stability Analysis and Assessment," 2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao), Qingdao, China, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PHM-Qingdao46334.2019.8942834. keywords: {Power system stability;Transient

analysis;Numerical stability;Stability criteria;Circuit stability;transient stability assessment;power system;power-electronized power system;probability assessment;artificial intelligence},

- [30] C. I. F. Agreira, C. M. M. Ferreira and F. P. M. Barbosa, "Electric power system's steady-state security analysis applying the Rough Set Theory considering an incomplete information system," 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, 2009, pp. 1-5. keywords: {Steady-state;Information security;Power system security;Information analysis;Set theory;Information systems;Data security;Power system analysis computing;Rough sets;Knowledge acquisition;Electric power systems;Incomplete information systems;Rough Set Theory;Steady-state security analysis},