



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Στεργιοπούλου Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος, Οκτώβριος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Στεργιοπούλου Κωνσταντίνα

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος, Οκτώβριος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**FAULT ANALYSIS AND EVALUATION IN DISTRIBUTION
NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION**

MSc Thesis

Stergiopoulou Konstantina

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Volos, October 2020

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πους **Μπαργιώτας Δημήτριος**
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Τσουκαλάς Ελευθέριος**
Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Πλέσσας Φώτιος**
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης:

ΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Η Δηλούσα

Στεργιοπούλου Κωνσταντίνα
Ημερομηνία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα “Ανάλυση και Αξιολόγηση Σφαλμάτων σε Δίκτυα Διανομής με Κατανεμημένη Παραγωγή”, έχει σκοπό να αναλύσει τα εκσυγχρονισμένα δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας δίνοντας έμφαση στους τρόπους που ανταποκρίνονται σε διαταραχές.

Αρχικά γίνεται μία σύντομη εισαγωγή στις διατάξεις του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως αυτό έχει οριστεί και λειτουργεί. Στη συνέχεια αναλύεται η μετάβαση στις νέες τεχνολογίες συμπεριλαμβανομένης της Διεσπαρμένης - Κατανεμημένης Παραγωγής (Οι όροι είναι ταυτόσημοι στη ελληνική μετάφραση των Distributed Generation).

Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του νέου συστήματος ενέργειας που αναπτύσσεται, η σημαντικότητα του και τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν από την σύμπραξη του με τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Εφόσον ολοκληρωθεί η θεωρητική ανάλυση και η βιβλιογραφική θεώρηση, γίνεται μετάβαση στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

Στο πειραματικό τμήμα της εργασίας, υλοποιείται η προσομοίωση σφαλμάτων σε δύο επίπεδα. Στο επίπεδο διανομής και στο επίπεδο μεταφοράς του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Μέσα από τα σενάρια τα οποία προσομοιώνονται γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των κατανεμημένων μονάδων που εντάσσονται στο σύστημα. Υλοποιούνται πρακτικά όσα αναλύθηκαν στα βιβλιογραφικά κεφάλαια, μελετώντας την συμπεριφορά της κάθε διάταξης σε κάθε περίπτωση. Κλείνοντας, παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές επεκτάσεις μελέτης του πειραματικού τμήματος της εργασίας.

ABSTRACT

The current thesis, with title “Fault Analysis and Evaluation of Distributed Networks with Distributed Generation”, aims to investigate the response to of contemporary power grid systems to disturbances.

Initially, the traditional power system architecture and its operating principles and the notion of “Distributed Generation” with the necessary changes required for its seamless integration to the power grid are introduced.

The characteristics of the newly emerged power systems leveraging traditional and distributed generation synergies, their importance for more resilient power systems, as well as the induced pitfalls are analyzed. After the bibliographic review and the theoretical analysis of the aforementioned systems, the experimental part of this work is presented.

In the experimental section of this thesis, a fault analysis simulation is performed on two distinct power system levels, i.e., distribution and transmission levels.

First, it is demonstrated how distributed generation assets can affect the power system behavior in our experimental scenarios and then an empirical validation of the assumptions - detailed in the theoretical and bibliographical part of this work - about the impact of distributed generation to power system behavior under fault conditions is shown. Finally, a discussion of the results, and possible future extensions of our work is cited.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	<i>xí</i>
ABSTRACT	<i>xiii</i>
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	<i>xv</i>
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	<i>xviii</i>
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	<i>xix</i>
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	<i>xxiii</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	<i>1</i>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	<i>1</i>
1.1 Γενικά	<i>1</i>
1.2 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	<i>1</i>
1.2.1 Παραγωγή ΗΕ.....	<i>2</i>
1.2.2 Μεταφορά και Διανομή ΗΕ	<i>4</i>
1.2.3 Μετασχηματιστές	<i>7</i>
1.2.4 Υποσταθμοί.....	<i>8</i>
1.3 Παραδοσιακό Μοντέλο ΣΗΕ	<i>9</i>
1.4 Εξέλιξη του ΣΗΕ	<i>12</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	<i>15</i>
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	<i>15</i>
2.1 Εξάπλωση της Κατανεμημένης Παραγωγής	<i>15</i>
2.2 Κατανεμημένη Παραγωγή, από το χθες στο σήμερα	<i>17</i>
2.3 Τεχνολογίες Κατανεμημένης Παραγωγής	<i>17</i>
2.4 Κατηγοριοποίηση των μονάδων με βάση την παραγόμενη ισχύ τους	<i>19</i>
2.5 Επιδράσεις Κατανεμημένης Παραγωγής στο δίκτυο διανομής	<i>19</i>
2.5.1 Ρύθμιση της τάσης.....	<i>21</i>
2.5.2 Ταχεία αυξομείωση της Τάσης	<i>24</i>
2.5.3 Αρμονικές.....	<i>26</i>
2.5.4 Επίδραση στην προστασία στα επίπεδα βραχυκύκλωσης	<i>27</i>
2.5.5 Γείωση.....	<i>28</i>
2.5.6 Φαινόμενο Νησιδοποίησης	<i>30</i>
2.5.7 Μεταβατική ευστάθεια	<i>32</i>
2.6 Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης (Demand Response)	<i>33</i>
2.6.1 Διαταράξεις ισχύος και επίδραση στο Demand Response	<i>34</i>
2.7 Ευελιξία	<i>35</i>
2.8 Περιβαλλοντικές επιδράσεις	<i>35</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	37
ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ.....	37
3.1 Ευφυές Δίκτυο και Μικροδίκτυο	37
3.2 Δομικά Χαρακτηριστικά Μικροδάκτυλων.....	38
3.2.1 Ενεργειακοί Πόροι	38
3.2.1.1 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες.....	38
3.2.1.2 Ανεμογεννήτριες	41
3.2.1.3 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	44
3.2.1.4 Ηλεκτρικά Οχήματα	44
3.2.2 Ενεργά Φορτία	45
3.2.3 Αποθηκευτικά Μέσα.....	46
3.3 Επίδραση των μικροδικτύων στο κυρίως δίκτυο	49
3.4 Θεωρητική Ανάλυση Σφαλμάτων δικτύου	51
3.4.1 Εισαγωγή στα Βραχυκυκλώματα	51
3.4.2 Ανασκόπηση διαταραχών της ποιότητας ισχύος	52
3.4.3 Είδη βραχυκυκλωμάτων	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	59
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ	59
4.1 Εισαγωγή στις Πειραματικές Προσομοιώσεις	59
4.2 Σενάριο λειτουργίας Πρώτο: Μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο επίπεδο διανομής με ενσωματωμένα Φωτοβολταϊκά στοιχεία	60
4.2.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής.....	60
4.2.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας.....	64
4.2.3 Προσομοίωση σφαλμάτων στον Inverter του Φωτοβολταϊκού συστήματος	66
4.2.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault).....	67
4.2.3.2 Διφασικό σφάλμα με τη γη (Line to Line to Ground fault) και Διφασικό σφάλμα (Line to Line fault) χωρίς τη γη	69
4.2.3.3 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)	74
4.2.4 Συμπεράσματα πρώτου σεναρίου	77
4.3 Σενάριο λειτουργίας Δεύτερο: Μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο επίπεδο διανομής με Φωτοβολταϊκά στοιχεία και Ανεμογεννήτρια	78
4.3.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής.....	78
4.3.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας.....	79
4.3.3 Προσομοίωση σφαλμάτων στην πλευρά της Ανεμογεννήτριας	82
4.3.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault).....	82
4.3.3.2 Διφασικό σφάλμα με τη γη (Line to Line to Ground fault) και Διφασικό σφάλμα χωρίς τη γη (Line to Line fault)	85
4.3.3.3 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)	88
4.3.4 Συμπεράσματα δεύτερου σεναρίου	90
4.4 Σενάριο λειτουργίας Τρίτο: Κατανεμημένοι Πόροι συνδεδεμένοι στο επίπεδο Μεταφοράς.....	91
4.4.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής.....	92
4.4.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας.....	94
4.4.3 Προσομοίωση σφαλμάτων	98
4.4.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault).....	98
4.4.3.2 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)	102
4.4.4 Συμπεράσματα τρίτου σεναρίου	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	107
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	113

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2.....	15
Πίνακας 2.1 Τεχνολογίες που περιλαμβάνονται στην ΚΠ.....	18
Πίνακας 2.2 ΚΠ σύμφωνα με την εγκατεστημένη ισχύ.....	19

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 1.....	1
Εικόνα 1.1 Δομή Συστημάτων ΗΕ.....	2
Εικόνα 1.2 Διάταξη λειτουργίας ΘΗΣ.....	3
Εικόνα 1.3 Διατάξεις ΑΠΕ.....	4
Εικόνα 1.4 Σχηματική Αναπαράσταση Μ/Σ.....	7
Εικόνα 1.5 Γενική Διάταξη Υποσταθμού Μεταφοράς.....	8
Εικόνα 1.6 Γενική Διάταξη Υποσταθμού Διανομής.....	9
Εικόνα 1.7 Δομή Παραδοσιακού ΣΗΕ.....	10
Εικόνα 1.8 Αρχιτεκτονική δικτύου με ΚΠ.....	13
Κεφάλαιο 2.....	15
Εικόνα 2.1 Παρουσίαση Δικτύου με ΚΠ.....	15
Εικόνα 2.2 Ζήτηση σε συνάρτηση με τη συχνότητα.....	34
Κεφάλαιο 3.....	37
Εικόνα 3.1 Γενική Διάταξη Μικροδικτύου.....	37
Εικόνα 3.2 Παρουσίαση Φ/Β συστοιχίας.....	38
Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	39
Εικόνα 3.4 Επίδραση Θερμοκρασίας.....	40
Εικόνα 3.5 Επίδραση Ακτινοβολίας.....	40
Εικόνα 3.6 Μοντέλο Επαγωγικής Γεννήτριας Διπλής Τροφοδοσίας (DFIG).....	43
Εικόνα 3.7 Κυματομορφές διαταραχών τάσης.....	52
Εικόνα 3.8 (α) Τριφασικό Βραχυκύκλωμα, (β) Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα με τη γη, (γ) Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς τη γη, (δ) Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη.....	55
Εικόνα 3.9 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για βραχυκύκλωμα μακριά από τη γεννήτρια ($I_{k''} = I_k = I_b$).....	56
Εικόνα 3.10 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για βραχυκύκλωμα κοντά στη γεννήτρια.....	57

Κεφάλαιο 4.....	59
Εικόνα 4.1 Διάταξη μικροδίκτυου σεναρίου ένα.....	60
Εικόνα 4.2 Σταθερό ωμικό φορτίο.....	61
Εικόνα 4.3 Μεταβλητό φορτίο.....	61
Εικόνα 4.4 Καμπύλες πειραματικών φορτίων. α) Μεταβλητό φορτίο β) Σταθερό φορτίο..	61
Εικόνα 4.5 Σύγχρονη Γεννήτρια.....	62
Εικόνα 4.6 Φωτοβολταϊκό σύστημα.....	62
Εικόνα 4.7 Αρχικοποίηση διάταξης αποθήκευσης.....	62
Εικόνα 4.8 Αρχικοποίηση Μ/Σ.....	63
Εικόνα 4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου ένα χωρίς σφάλμα.....	64
Εικόνα 4.10 Ημιτονοειδή σήματα της τάσης του μικροδικτύου.....	65
Εικόνα 4.11 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων του Inverter.....	65
Εικόνα 4.12 Ηλιακό δυναμικό φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	66
Εικόνα 4.13 Διάταξη μικροδικτύου σεναρίου ένα με σφάλμα στο Inverter.....	66
Εικόνα 4.14 Αποτελέσματα προσομοίωσης SLG σφάλματος.....	67
Εικόνα 4.15 Τάση (α) και ρεύμα (β) στον Inverter κατά το σφάλμα SLG	68
Εικόνα 4.16 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης SLG σφάλματος.....	69
Εικόνα 4.17 Αποτελέσματα προσομοίωσης LLG σφάλματος.....	70
Εικόνα 4.18 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το σφάλμα LLG.....	71
Εικόνα 4.19 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LLG σφάλματος.....	71
Εικόνα 4.20 Αποτελέσματα προσομοίωσης LL σφάλματος	72
Εικόνα 4.21 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το σφάλμα LL.....	73
Εικόνα 4.22 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LL σφάλματος.....	74
Εικόνα 4.23 Αποτελέσματα προσομοίωσης τριφασικού σφάλματος.....	75
Εικόνα 4.24 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το τριφασικό σφάλμα.....	76
Εικόνα 4.25 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης τριφασικού σφάλματος.....	77
Εικόνα 4.26 Υλοποίηση Δεύτερου σεναρίου λειτουργίας.....	78
Εικόνα 4.27 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.....	79
Εικόνα 4.28 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας μικροδίκτυου με ανεμογεννήτρια.....	81
Εικόνα 4.29 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων της ανεμογεννήτριας.....	81

Εικόνα 4.30 Εφαρμογή σφάλματος στην πλευρά της ανεμογεννήτριας.....	82
Εικόνα 4.31 Αποτελέσματα προσομοίωσης SLG σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ.....	83
Εικόνα 4.32 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της Α/Γ κατά το σφάλμα SLG	84
Εικόνα 4.33 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης SLG σφάλματος.....	84
Εικόνα 4.34 Αποτέλεσμα προσομοίωσης LLG σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ.....	86
Εικόνα 4.35 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της Α/Γ κατά το σφάλμα LLG.....	86
Εικόνα 4.36 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LLG σφάλματος.....	86
Εικόνα 4.37 Αποτελέσματα προσομοίωσης LL σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ.....	87
Εικόνα 4.38 Τάση (α) ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της Α/Γ κατά το σφάλμα LL.....	87
Εικόνα 4.39 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LL σφάλματος.....	88
Εικόνα 4.40 Αποτελέσματα προσομοίωσης τριφασικού σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ.....	89
Εικόνα 4.41 Τάση (α) και ρεύμα (β) στην πλευρά της Α/Γ κατά το τριφασικό σφάλμα.....	89
Εικόνα 4.42 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης τριφασικού σφάλματος.....	90
Εικόνα 4.43 Διάταξη ΚΠ σε σύστημα μεταφοράς.....	91
Εικόνα 4.44 Λεπτομερής διάταξη Plant 2MVA με ένταξη Φωτοβολταϊκού συστήματος.....	92
Εικόνα 4.45 Φ/Β Σύστημα.....	93
Εικόνα 4.46 Πάρκο Α/Γ.....	93
Εικόνα 4.47 Σύγχρονη γεννήτρια.....	93
Εικόνα 4.48 Αποτελέσματα κανονικής λειτουργίας του συνολικού δικτύου.....	95
Εικόνα 4.49 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας αιολικού πάρκου.....	96
Εικόνα 4.50 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας Φωτοβολταϊκού πάρκου.....	97
Εικόνα 4.51 Θέση εφαρμογής σφάλματος.....	98
Εικόνα 4.52 Γραφικές παραστάσεις του δικτύου κατά το μονοφασικό σφάλμα.....	99
Εικόνα 4.53 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας των ανεμογεννητριών στο μονοφασικό σφάλμα.....	101
Εικόνα 4.54 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας των Φ/Β στο μονοφασικό σφάλμα.....	101
Εικόνα 4.55 Γραφικές παραστάσεις του δικτύου κατά το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα.....	102

Εικόνα 4.56 Γραφικές παραστάσεις του Αιολικού Πάρκου κατά το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα.....	104
Εικόνα 4.57 Γραφική παράσταση ρεύματος του Φωτοβολταϊκού Πάρκου κατά το τριφασικό σφάλμα.....	104

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΗΕ	Ηλεκτρική ενέργεια
ΘΗΣ	Θερμοηλεκτρικός Σταθμός
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Μ/Τ	Μέση Τάση
Χ/Τ	Χαμηλή Τάση
Υ/Τ	Υψηλή Τάση
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΚΠ	Κατακεμημένη Παραγωγή
ΕΔ	Ευφύες Δίκτυο
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
ΗΟ	Ηλεκτρικό Όχημα
Υ/Η	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια
DFIG	Double Feed Induction Generator
SLG	Single Line to Ground
LLG	Line to Line to Ground
LL	Line to Line

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί την βάση της σύγχρονης ζωής. Είναι η δύναμη που θέτει την πρόοδο σε κίνηση, μετακινώντας τον κόσμο προς τα εμπρός, επιτρέποντας την οικονομική ανάπτυξη, την υγεία, τη σύνδεση και την ασφάλεια σε μικρές ή μεγάλες κοινότητες. Το σύγχρονο αυτό θαύμα, το οποίο ξεκίνησε με το σταθμό Pearl Street του Thomas Edison το 1882, εξακολουθεί να παραδίδεται σε όλο και περισσότερους ανθρώπους σε όλο τον κόσμο. Από μία νεοσύστατη βιομηχανία στις αρχές του 20ου αιώνα, η ηλεκτρική ενέργεια, έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της κοινωνίας του εμπορίου και της τεχνολογίας και αναμένεται ότι θα διαδραματίσει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο μελλοντικά, καθώς οι ψηφιακές τεχνολογίες καθίστανται ολοένα και πιο διαδεδομένες.

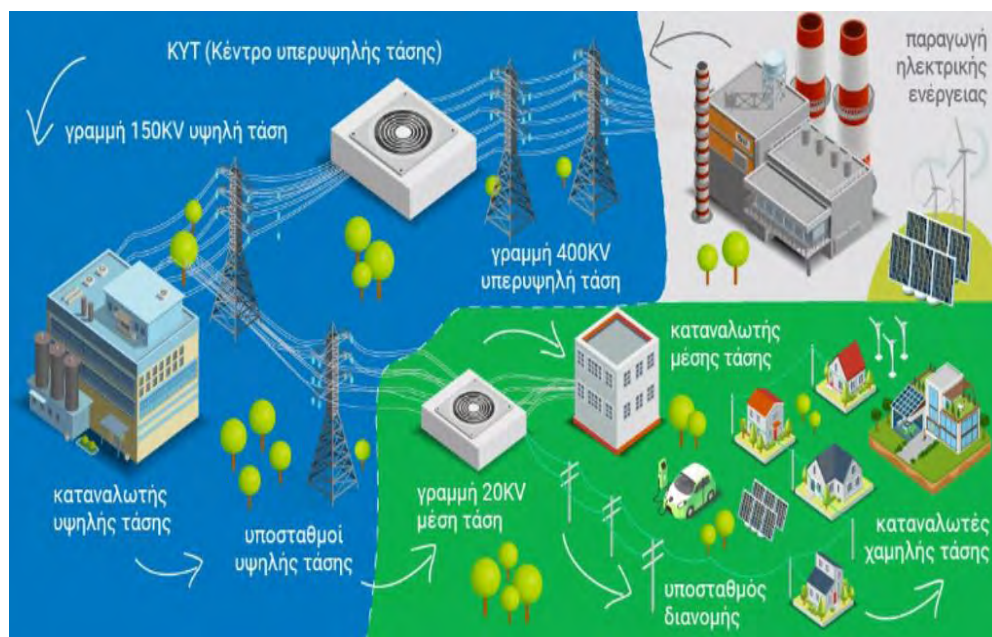
Το παγκόσμιο σύστημα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκεται στην αρχή ενός τεράστιου μετασχηματισμού. Στα επόμενα χρόνια στη βιομηχανία της ενέργειας, πρόκειται να επέλθουν, περισσότερες αλλαγές και βελτιστοποιήσεις, από ό,τι τα τελευταία 125 έτη. Ο κόσμος μεταβαίνει πλέον από ένα παραδοσιακό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) βασιζόμενο πρωτίστως σε μεγάλες κεντρικές τεχνολογίες παραγωγής (μεταφοράς και διανομής), σε μία αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει κατανεμημένες, ψηφιακά ενισχυμένες και χαμηλής εκπομπής άνθρακα πρακτικές. Έτσι λοιπόν, οι παραδοσιακές, οι αναδυόμενες, οι φυσικές και ψηφιακές ενέργειες, συγκλίνουν για να δημιουργήσουν ένα νέο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο θα υποστηρίζει τις απαιτήσεις του 21ου αιώνα. [1]

1.2 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται ένα σύστημα εγκαταστάσεων και μέσων, το οποίο χρησιμοποιείται για την παροχή Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΗΕ) στις περιοχές εξυπηρέτησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία και αξιοπιστία ενός

ΣΗΕ, είναι η αέναη παροχή ΗΕ οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση, με το ελάχιστο δυνατό κόστος, τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. [2]

Τα ΣΗΕ είναι συστήματα με μεγάλη πολυπλοκότητα η οποία δεν σχετίζεται με το μέγεθος τους. Δεν υπάρχουν βασικοί κανόνες όσον αφορά τον τρόπο που δομούνται, αλλά κάθε περίπτωση συστήματος μελετάται ξεχωριστά καθορίζοντας τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες του με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του σε κάθε περίπτωση. Παρόλες τις διαφοροποιήσεις, όλα τα συστήματα ενέργειας έχουν το εξής χαρακτηριστικό, λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και χωρίζονται μεταξύ τους με μετασχηματιστές. [3] Η Εικόνα 1.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα οργάνωσης ενός ΣΗΕ. Παρατηρούνται όλα τα στάδια μετασχηματισμού της ΗΕ, σε όλα τα επίπεδα τάσης και κατά τμήματα θα αναλυθούν στη συνέχεια του εισαγωγικού κεφαλαίου.



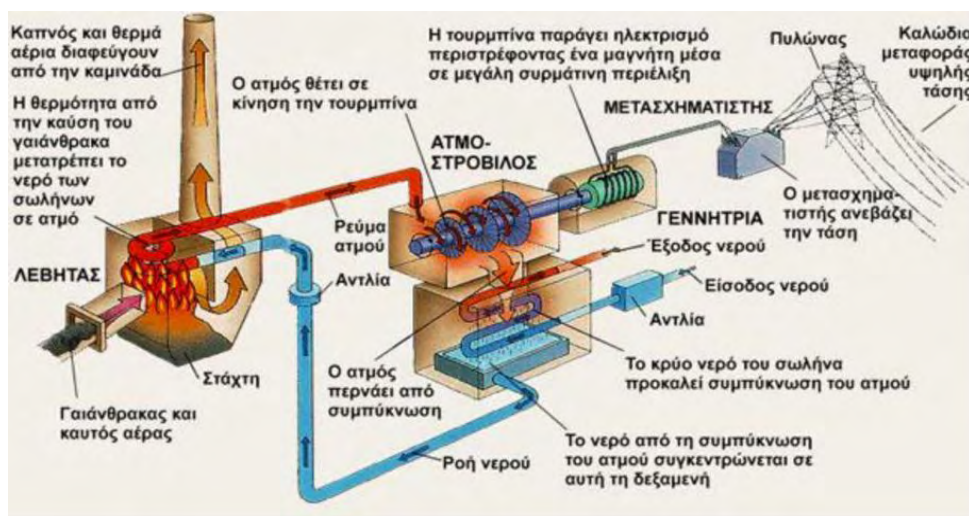
Εικόνα 1.1 Δομή ΣΗΕ

1.2.1 Παραγωγή ΗΕ

Η παραγωγή ΗΕ γίνεται κατά κύριο λόγο σε ειδικούς σταθμούς παραγωγής. Στους σταθμούς παραγωγής ΗΕ γίνεται η μετατροπή πρωτογενών υλών (π.χ., λιγνίτης, φυσικό αέριο, κτλ.) στη τελική ΗΕ που διοχετεύεται στο δίκτυο. Η μετατροπή αυτή καταχρηστικά έχει επικρατήσει να ονομάζεται «παραγωγή ΗΕ», κι αυτό γιατί η ενέργεια προϋπάρχει σε διάφορες μορφές στη φύση, συνεπώς δεν παράγεται, αλλά μετατρέπεται. Η επιλογή της

πηγής γίνεται ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους ενεργειακούς πόρους, την ενεργειακή πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές αλλά και τις κλιματικές ιδιαιτερότητες.

Ανάλογα με το είδος του πόρου, προσδιορίζεται και ο τύπος του σταθμού. Στη συγκεκριμένη κατηγορία παραγωγής, πιο διαδεδομένοι είναι οι **Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί (ΘΗΣ)**. Στους σταθμούς αυτούς, η ΗΕ αποτελεί προϊόν μετατροπής θερμικής ενέργειας από κάποιο ενδιάμεσο στάδιο της συνολικής αλληλουχίας των ενεργειακών μετατροπών. Η αρχική μορφή ενέργειας, από την οποία προκύπτει η παραγωγή ποικίλει. Μπορεί να είναι είτε χημική ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, λιθάνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), είτε πυρηνική ενέργεια ορυκτών καυσίμων (ουράνιο, πλουτώνιο). Ο διαχωρισμός αυτός, προσδιορίζει τον τύπο και τον τρόπο λειτουργίας των σταθμών (στη δεύτερη περίπτωση ο ΘΗΣ έχει επικρατήσει να ονομάζεται πυρηνοληλεκτρικός). Ένα βασικό χαρακτηριστικό των σταθμών είναι ότι περιλαμβάνουν θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, οι οποίες είναι σύγχρονες. (Οι στροφές τους συμπίπτουν με την ονομαστική συχνότητα του παραγομένου ρεύματος). Μία τυπική διάταξη ενός ΘΗΣ, φαίνεται στην Εικόνα 1.2. [4]



Εικόνα 1.2 Διάταξη λειτουργίας ΘΗΣ

Πέρα από τους σταθμούς παραγωγής, ΗΕ παράγεται και με τη χρήση ειδικών διατάξεων μετατροπής ανανεώσιμων πόρων, τις **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)** (Εικόνα 1.3). Με τον όρο ΑΠΕ, ορίζονται οι ενεργειακές πηγές που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον και με τη χρήση ειδικών διατάξεων, μετατρέπουν πρωτογενείς μορφές ενέργειας σε ΗΕ. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις των ΑΠΕ ποικίλουν, και διαμορφώνονται ανάλογα με τον πόρο που διατίθεται προς παραγωγή ΗΕ. Οι ΑΠΕ, εξαιτίας των Ευρωπαϊκών και Παγκόσμιων δεσμεύσεων μείωσης των ρύπων

παρουσιάζουν ιδιαίτερη άνθιση τα τελευταία χρόνια. Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασία θα αναλυθούν κάποιες διατάξεις ΑΠΕ με σκοπό τόσο την ανάλυση της Διεσπαρμένης - Κατανεμημένης Παραγωγής όσο και τη διευθέτηση των πειραματικών δεδομένων.



Εικόνα 1.3 Διατάξεις ΑΠΕ

1.2.2 Μεταφορά και Διανομή ΗΕ

Με βάση την τάση λειτουργίας, το ΣΗΕ διαιρείται σε τέσσερα υποσυστήματα. Ξεκινώντας από το χαμηλότερο επίπεδο τάσης, διακρίνονται στα εξής:

1. Σύστημα Διανομής
2. Σύστημα Υπερμεταφοράς
3. Συστήματα Υπόμεταφοράς
4. Σύστημα Μεταφοράς

Σύστημα διανομής

Στο σύστημα διανομής υπάρχουν δύο επίπεδα τάσης τροφοδοσίας:

- Η μέση τάση ή τάση μέσης τροφοδοσίας 150 22 kV (ΜΤ).
- Η τάση κατανάλωσης 220 V ή χαμηλή τάση τροφοδοσίας (ΧΤ).

Με κατάλληλους μετασχηματιστές διανομής η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Το σύστημα διανομής τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής, όπου η τάση υποβιβάζεται στην τιμή της ΜΤ (η οποία παρέχεται σε μεσαίους μεγέθους καταναλωτές) και στην τιμή της ΧΤ (σε μικρούς οικιακούς καταναλωτές).

Τα δίκτυα διανομής τα οποία βρίσκονται σε πυκνό κατοικημένες περιοχές είναι συνήθως υπόγεια, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση είναι εναέρια. Το δίκτυο διανομής ενός ΣΗΕ, περιλαμβάνει πολύπλοκες και πολυάριθμες διατάξεις όπως μετρητικές διατάξεις, διακόπτες και ασφάλειες. Η συντήρηση των εναέριων γραμμών και των υπόγειων καλωδίων θα πρέπει να γίνεται σχολαστικά και οι απαιτήσεις αυτές καθιστούν το σύστημα διανομής ως το πλέον κοστοβόρο τμήμα του δικτύου.

Σύστημα Υπερμεταφοράς

Το σύστημα υπερμεταφοράς διανέμει ενέργεια στους υποσταθμούς διανομής, που εξυπηρετούν συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, με επίπεδο τάσης που κυμαίνεται μεταξύ 22 kV και 150 kV. Το σύστημα, δέχεται την ενέργεια είτε κατευθείαν από σταθμούς παραγωγής είτε από συστήματα μεταφοράς μέσω υποσταθμών ζεύξεως ή και μετασχηματισμού. Οι μεγάλοι καταναλωτές είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν απευθείας από το σύστημα υπερμεταφοράς. Ο κύριος ρόλος του συστήματος, είναι παρόμοιος με εκείνον ενός συστήματος διανομής με μόνη διαφορά ότι αυτά τα συστήματα εξυπηρετούν μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή. Επίσης, η διανομή της ενέργειας πραγματοποιείται σε υψηλά επίπεδα τάσης και ισχύος.

Συστήματα Υπομεταφοράς

Σε πολλά συστήματα δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ των δικτύων υπομεταφοράς και μεταφοράς. Τα σημερινά δίκτυα υπομεταφοράς είναι κατά κανόνα τα δίκτυα μεταφοράς περασμένων ετών, τα οποία λόγω της αύξησης της διάστασης του συστήματος καλούνται να επιτελέσουν διαφορετικό ρόλο από εκείνον που αρχικά επιτελούσαν. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι απαρτίζονται από γραμμές μεταφοράς με μικρό μήκος και μικρή ισχύ, με επίπεδο τάσης 150 kV.

Συστήματα μεταφοράς

Τα συστήματα μεταφοράς διαφέρουν από τα συστήματα διανομής και υπερμεταφοράς ως προς τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά τους. Το επίπεδο τάσης τους κυμαίνεται μεταξύ 150 kV – 400 kV. Ενώ τα συστήματα διανομής και υπερμεταφοράς μεταφέρουν ενέργεια από μία πηγή προς επιμέρους φορτία, το σύστημα μεταφοράς αφενός χειρίζεται μεγαλύτερα ποσά ισχύος και αφετέρου διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία μεγάλης κατανάλωσης του συστήματος. Η ενέργεια μπορεί να διακινηθεί προς κάθε επιθυμητή κατεύθυνση μέσω των διάφορων γραμμών μεταφοράς κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη οικονομική λειτουργία του συστήματος.

Το σύστημα μεταφοράς, δέχεται απευθείας την ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης και είναι δυνατόν να εξυπηρετεί απευθείας μεγάλους καταναλωτές και να ανταλλάσσει μέσω διασυνδεδετικών γραμμών ενέργεια με άλλα γειτονικά ενεργειακά συστήματα. Σε αντίθεση με τα άλλα συστήματα, τα οποία είναι συνήθως ακτινικά, επειδή διοχετεύουν την ενέργεια σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, το σύστημα μεταφοράς έχει δομή βρόγχου και είναι σε θέση να διοχετεύει την ενέργεια σε περισσότερες κατευθύνσεις. Κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μία σειρά περιορισμών:

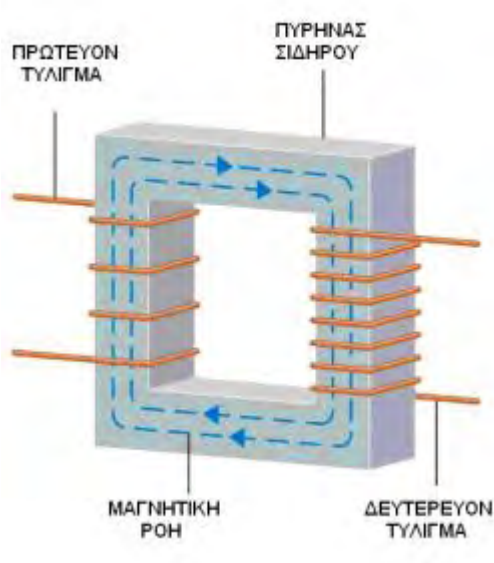
- Το ήδη υπάρχον σύστημα
- Η γεωγραφική θέση των κέντρων κατανάλωσης που υπάρχουν αλλά και των μελλοντικών που θα σχεδιαστούν
- Η γεωγραφική θέση των σταθμών παραγωγής

Η ανάπτυξη ενός συστήματος μεταφοράς ΗΕ είναι μία βαθμιαία αυξητική διαδικασία. Πρέπει πάντοτε να βασίζεται στη σχεδίαση των νέων διασυνδέσεων, στις εκτιμώμενες προβλέψεις αύξησης του πληθυσμού και της βιομηχανικής ανάπτυξης μίας περιοχής. Μέσα στα πλαίσια των υπάρχοντων περιορισμών και μετά τη λήψη αποφάσεων οικονομικής και συχνά πολιτικής φύσης για την επέκταση ενός συστήματος, ο υπεύθυνος σχεδιασμού καλείται να εκπονήσει τα τελικά σχέδια λαμβάνοντας υπόψη όλους τους τεchnοοικονομικούς και οικολογικούς παράγοντες.

1.2.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής (Μ/Σ) καλείται η ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ΗΕ ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ΗΕ διαφορετικού επιπέδου τάσης μέσω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου. Η συσκευή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά, συνήθως, δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το ένα από τα δύο πηνία του Μ/Σ συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο συνδέεται με το φορτίο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.4, το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή τύλιγμα εισόδου του Μ/Σ και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον ή τύλιγμα εξόδου..

Η σημασία των Μ/Σ για την ευρεία διάδοση και εφαρμογή της ΗΕ είναι εξέχουσα. Χωρίς τους μετασχηματιστές, οι απώλειες κατά τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν τεράστιες. Για να γίνει κατανοητό αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι οι απώλειες μιας γραμμής μεταφοράς είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος της γραμμής. Δηλαδή, ο δεκαπλασιασμός του επιπέδου της παραγόμενης τάσης πριν από τη μεταφορά της και η αντίστοιχη μείωση του ρεύματος συνεπάγεται εκατό φορές μείωση των απωλειών μεταφοράς. Ο Μ/Σ, λοιπόν, επιτρέπει την ανύψωση του επιπέδου τάσης της παραγόμενης ΗΕ σε κάποιο κεντρικό σημείο (π.χ. έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό) και τη μεταφορά της σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρές απώλειες.



Εικόνα 1.4 Σχηματική παράσταση Μ/Σ

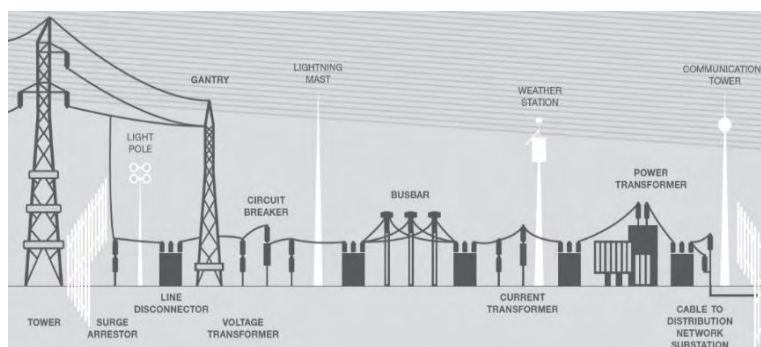
Ανάλογα με τη συγκεκριμένη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος, οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες: Ο Μ/Σ που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσης (π.χ. στα 150 kV), πριν οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδας ή ανύψωσης τάσης. Ο Μ/Σ στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο της τάσης της γραμμής στα επίπεδα της διανομής ονομάζεται μετασχηματιστής υποσταθμού ή υποβιβασμού τάσης. Τέλος, ο Μ/Σ που υποβιβάζει την τάση διανομής στην τάση χρησιμοποίησής της ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής. [5]

1.2.4 Υποσταθμοί

Μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής παρεμβάλλονται οι υποσταθμοί μεταφοράς και διανομής. Οι υποσταθμοί είναι κόμβοι, στους οποίους καταλήγουν και ξεκινάνε γραμμές μεταφοράς και διανομής. Η βασική σκοπιμότητα εισαγωγής υποσταθμών σε ένα ΣΗΕ είναι ο μετασχηματισμός της τάσης της ηλεκτρικής ισχύος, είτε για τη μεταφορά της, είτε για τη διανομή της. Η ανύψωση της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη για τη μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις, προκειμένου να περιοριστούν οι τυχόν απώλειες. Ο υποβιβασμός από την άλλη πλευρά, απαιτείται για τη διάθεση της ηλεκτρικής ισχύος στους τελικούς καταναλωτές. Σε ένα υποσταθμό απαντώνται ζυγοί, διακόπτες, ασφάλειες κ.α.

Οι υποσταθμοί μεταφοράς (Εικόνα 1.5) χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

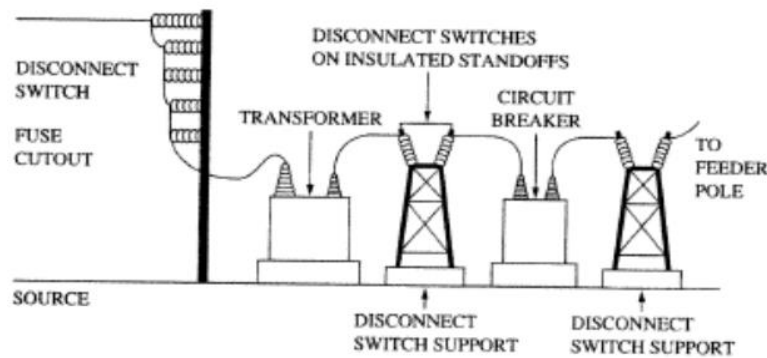
- Υποσταθμοί ανύψωσης της τάσης παραγωγής, από τους σταθμούς παραγωγής στην τάση του δικτύου μεταφοράς (για την Ελλάδα 66, 150, 400kV).
- Υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης, από την τάση του δικτύου μεταφοράς στη μέση τάση του δικτύου διανομής (για την Ελλάδα 15, 22kV).



Εικόνα 1.5 Γενική Διάταξη Υποσταθμού Μεταφοράς

Οι υποσταθμοί διανομής (Εικόνα 1.6) είναι:

- Υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης από τη μέση τάση του δικτύου διανομής (15, 22kV) στη χαμηλή τάση του δικτύου διανομής (220, 380V).

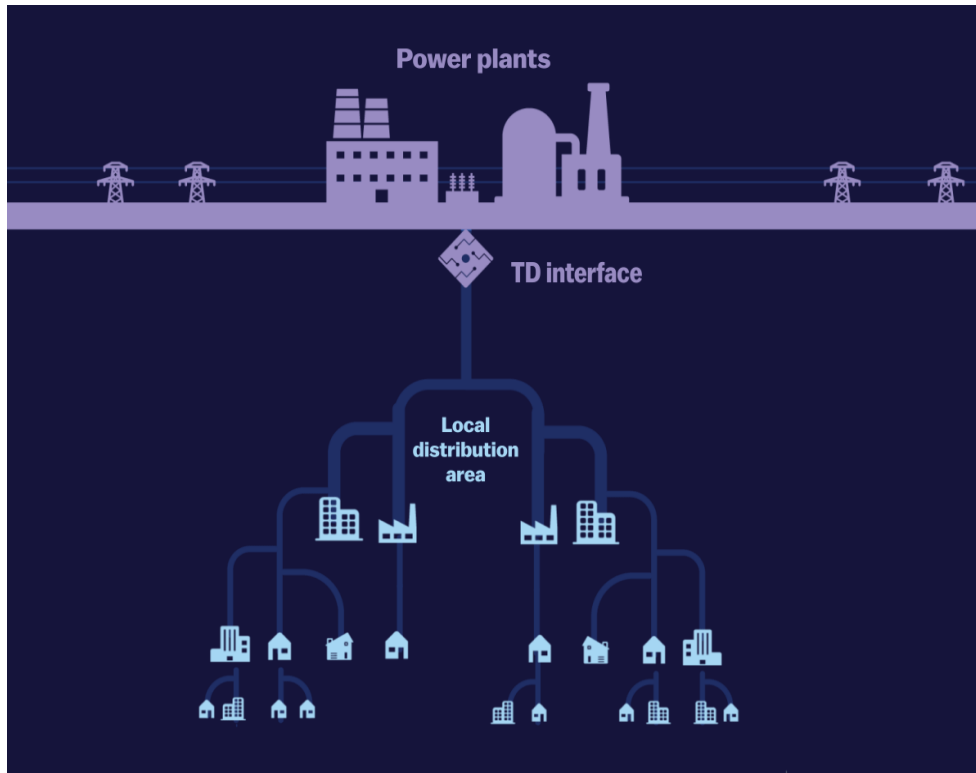


Εικόνα 1.6 Γενική Διάταξη Υποσταθμού Διανομής

1.3 Παραδοσιακό Μοντέλο ΣΗΕ

Αναλύοντας το παραδοσιακό μοντέλο ενεργειακής διανομής του 20ου αιώνα, εντοπίζονται μεγάλοι κεντροποιημένοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που τροφοδοτούνται με άνθρακα ή αέριο, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και μέσω του κεντρικού συστήματος μεταφοράς, διανέμεται στους τελικούς καταναλωτές. Κάθε ξεχωριστή μονάδα παραγωγής, είτε πρόκειται για λιγνιτική μονάδα, είτε υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, είτε πυρηνικό, χαρακτηρίζεται από μία μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ της τάξης του 1GW.

Επομένως, γίνεται αντιληπτό πως το σύστημα μεταφοράς είναι επιφορτισμένο με τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ΗΕ σε μεγάλες αποστάσεις. Στη συνέχεια, η μεταφερόμενη ενέργεια μέσω δύο ή τριών σταδίων υποβιβασμού (μέσω μετασχηματιστών), διοχετεύεται στα δίκτυα των τελικών καταναλωτών. Η βασική δομή ενός ΣΗΕ παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7.



Εικόνα 1.7 Δομή Παραδοσιακού ΣΗΕ

Το βασικό χαρακτηριστικό των παραδοσιακών δικτύων ΗΕ είναι η κεντροποιημένη παραγωγή, η οποία παρουσιάζει πλεονεκτήματα για το δίκτυο, όπως το να εξασφαλίζει την απαιτούμενη ευστάθεια του ΣΗΕ, καθώς επίσης και σταθερά επίπεδα τάσης και συχνότητας στο δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος αποτελούν τον κύριο ρυθμιστή των ανωτέρω παραμέτρων. Η συχνότητα της τάσης του δικτύου επιβάλλεται να είναι ίδια σε όλο το διασυνδεδεμένο σύστημα. Η διατήρηση εξαρτάται από το ισοζύγιο της παραγόμενης ενεργού ισχύος και της κατανάλωσης. Η άμεση ανταπόκριση των σύγχρονων γεννητριών στις ταχείες ή βραδείες μεταβολές των φορτίου που εξυπηρετούν, επιτυγχάνει την παροχή της απαιτούμενης ισχύος.

Από την άλλη πλευρά, η διατήρηση της τάσης εντός των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα. Οι σύγχρονες γεννήτριες διατηρούν το επίπεδο της τάσης (μέτρο της τάσης στην έξοδο τη γεννήτριας) ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρεύμα διέγερσης του δρομέα της γεννήτριας. Όμως, η μετέπειτα ρύθμιση της δεν μπορεί να εξασφαλιστεί αποκλειστικά από την λειτουργία των γεννητριών. Τον ρόλο του ρυθμιστή στην περίπτωση αυτή αναλαμβάνουν οι μετασχηματιστές και ειδικές διατάξεις

ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος (πυκνωτές και πηνία) τα οποία βρίσκονται σε κομβικές θέσεις σε διάφορα σημεία του δικτύου.

Στον αντίποδα των πλεονεκτημάτων της κεντροκοποιημένης παραγωγής υπάρχουν και τα τρωτά σημεία αυτής της διάταξης. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι το αυξημένο κόστος, καθώς οι συγκεντρωτικές μονάδες παραγωγής καλούνται να καλύψουν το σύνολο της ενεργειακής ζήτησης. Κάποιες από τις συνέπειες αυτής της αρχιτεκτονικής αναλύονται στη συνέχεια.

- Το κόστος των επενδύσεων των νέων μονάδων άνω των 500 MW, ή η αναβάθμιση τους είναι αρκετά υψηλό. Είναι αναγκαίο να εντάσσονται στο μακροχρόνιο ενεργειακό προγραμματισμό των κρατών αφού απαιτεί τη δαπάνη μεγάλων κεφαλαίων και δεν μπορεί να γίνει χωρίς συγκεκριμένο σχεδιασμό.
- Η κατασκευή τους αποτελείται από σύνθετα έργα και ο χρόνος που απαιτείται για την παράδοση και την σταδιακή έναρξη λειτουργίας ανέρχεται σε τουλάχιστον 5 χρόνια.
- Εφόσον δεν γίνεται κάποιος δυναμικός προγραμματισμός για τις ανάγκες ενέργειας, οι μονάδες λειτουργούν με υψηλή στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να μπορεί να καλυφθούν ενδεχόμενες αυξομειώσεις της ζήτησης ΗΕ. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας επιφέρει σημαντική σπατάλη καυσίμων, καθώς οι μονάδες εξαναγκάζονται να λειτουργούν σε ισχύ χαμηλότερη της ονομαστικής τους (περίπου στο 90%).
- Για να μπορέσει το σύστημα μεταφοράς να εξυπηρετήσει τη διάταξη της κεντροκοποιημένης παραγωγής εκτείνεται σε γραμμές πολλών χιλιομέτρων. Το σύστημα μεταφοράς για να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες, λειτουργεί με Υψηλές (Υ) και Υπερύψηλές Τάσεις (ΥΤ), αυξάνοντας έτσι τα λειτουργικά του κόστη. Στα κόστη αυτά συμπεριλαμβάνονται, επενδύσεις ακριβού εξοπλισμού Υ και ΥΤ όπως γραμμές, μετασχηματιστές, μονωτήρες και ηλεκτρονικά ισχύος. Παρά το γεγονός ότι μέσω της ΥΤ γίνεται προσπάθεια μείωσης των απωλειών, δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς το κόστος των θερμικών απωλειών είναι εξίσου μεγάλο.

1.4 Εξέλιξη του ΣΗΕ

Όπως όλα τα συστήματα μεγάλης κλίμακας, έτσι και τα ΣΗΕ εξελίσσονται με βάση τις τάσεις που επικρατούν στη σημερινή εποχή. Οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί λόγοι, σε συνδυασμό με την πρόοδο της τεχνολογίας προκάλεσαν την έλευση πρωτοβουλιών σε παγκόσμιο επίπεδο για τον εκσυγχρονισμό των συστημάτων ισχύος.

Σε γενικές γραμμές, αυτές οι πρωτοβουλίες χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη αποκεντρωμένων λύσεων παραγωγής. Ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων ισχύος βασίζεται στον έλεγχο και την σωστή διαχείριση των δικτύων ενέργειας, ενώ παράλληλα στηρίζεται και στην ενοποίηση ανανεώσιμων και μη καταναμημένων πόρων.

Πιο συγκεκριμένα, οι δράσεις εξέλιξης εστιάζουν στα εξής:

- Στην ανάπτυξη της αξιοπιστίας του συστήματος
- Στην ανάπτυξη και ένταξη των ΑΠΕ
- Στην δυναμική διαχείριση της προσφοράς-ζήτησης (demand-response)
- Στην βελτιστοποίηση της μεταφοράς ενέργειας.

Η λεπτομερής ανάλυση των προαναφερθέντων μηχανισμών θα γίνει στο Κεφάλαιο 2. Η Καταναμημένη Παραγωγή (ΚΠ) λοιπόν, της οποίας ένας απλός ορισμός είναι η «ηλεκτροπαραγωγή μικρής κλίμακας», αποτελεί τη νέα έννοια στον χώρο των ΣΗΕ και της αγοράς ΗΕ. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται στην ελληνική βιβλιογραφία και πρακτική για να περιγράψουν την έννοια της ΚΠ είναι η «διανεμημένη παραγωγή», «αποκεντρωμένη παραγωγή» και «δισπαρμένη ή διάσπαρτη παραγωγή». [6]

Οι Καταναμημένοι Πόροι Ενέργειας (ΚΠΕ), περιλαμβάνουν την καταναμημένη παραγωγή, τις μονάδες αποθήκευσης και τα φορτία υπό ενεργή διαχείριση από πλευράς ζήτησης.

Μεταξύ αυτών των πόρων, η ΚΠ έχει σημειώσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η παγίωση των ΚΠΕ, δημιουργεί πολλές προκλήσεις όσον αφορά τη διανομή ισχύος. Αυτές οι προκλήσεις προκύπτουν κυρίως από τη φύση των συστημάτων διανομής, τα οποία σχεδιάστηκαν με την υπόθεση ότι η ΗΕ θα ακολουθεί μια “μονόδρομη πορεία” (από τους υποσταθμούς στους τελικούς καταναλωτές). Η εισαγωγή της αμφίδρομης πορείας της ισχύος, επηρεάζει την προστασία και τον έλεγχο των δικτύων, και συνεπώς, την

αξιοπιστία των συστημάτων διανομής. Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα της λειτουργίας των συστημάτων διανομής αυξάνεται με την ενσωμάτωση της ΚΠ και των προηγμένων συστημάτων ελέγχου, που είναι απαραίτητα για την επίτευξη της επαρκούς και της ασφαλούς λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου. Μία αναπαράσταση της δομής που προαναφέρθηκε, φαίνεται στην Εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8 Αρχιτεκτονική δικτύου με ΚΠ

Παρά τις αδυναμίες αυτές, η ΚΠ θεωρείται ότι ενισχύει την αξιοπιστία και την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Τα κυριότερα οφέλη που προσφέρει η ένταξη της ΚΠ στα συστήματα διανομής, είναι η σταδιακή αποδέσμευση από τις κεντροποιημένες λύσεις τροφοδοσίας και η αποσυμφόρηση των συστημάτων μεταφοράς. Σε αυτή την προσπάθεια αποκέντρωσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον δόθηκε στην ανάπτυξη μικρότερων μονάδων παραγωγής που λειτουργούν είτε με συμβατικά καύσιμα είτε με ΑΠΕ. Παρόλο που κατά κύριο λόγο και εξαιτίας της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, πολλές νέες ΚΠ αφορούν ΑΠΕ, ο όρος της ΚΠ δεν θα πρέπει να συγγέεται αποκλειστικά με αυτές τις κατηγορίες πηγών ενέργειας. Η ΚΠ αναφέρεται σε οποιαδήποτε μορφή παραγωγής, η οποία αποτελεί αποκεντρωμένη λύση στο επίπεδο διανομής του ηλεκτρικού δικτύου.

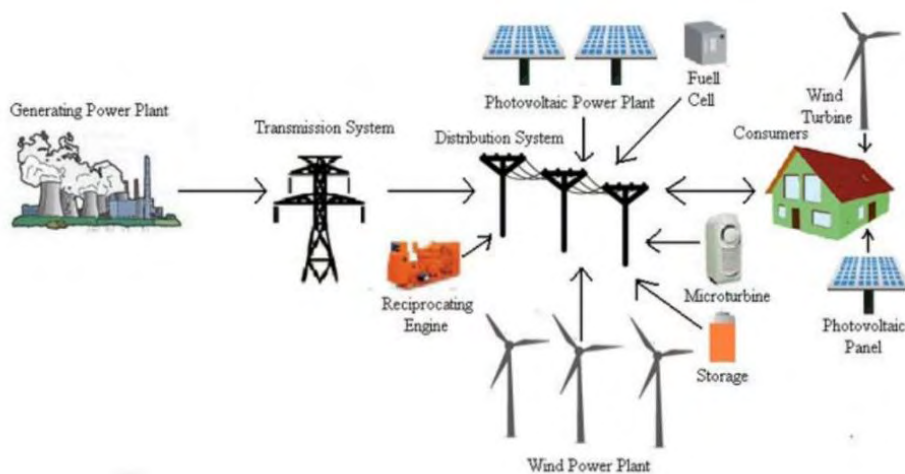
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

2.1 Εξάπλωση της Κατανεμημένης Παραγωγής

Η κλασική δομή των ΣΗΕ, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1, περιλαμβάνει μεγάλους σταθμούς παραγωγής ΗΕ που τροφοδοτούν με ισχύ απομακρυσμένα κέντρα κατανάλωσης μέσω των ηλεκτρικών δικτύων. Η ΗΕ, είναι απαραίτητο να “ταξιδέψει”, πολλά χιλιόμετρα για να μπορέσει να ικανοποιήσει απομακρυσμένα φορτία και το πρόβλημα αυτό διαιωνίζει μη συμφέρουσες οικονομικά ενέργειες.

Για τον λόγο αυτό, αλλά και για πολλούς άλλους που θα αναλυθούν στη συνέχεια της εργασίας, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία βαθμιαία αλλαγή στη δομή του δικτύου ενέργειας. Με αποτέλεσμα η εγκατάσταση κατανεμημένων μονάδων παραγωγής ΗΕ να αποτελεί μία αποδεκτή πραγματικότητα. Η νέα αρχιτεκτονική του δικτύου (Εικόνα 2.1), συμπεριλαμβάνει την εγκατάσταση μικρών μονάδων παραγωγής κοντά στα φορτία που εξυπηρετούν και συνδέονται στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης.



Εικόνα 2.1 Παρουσίαση Δικτύου με ΚΠ

Η εγκατάστασή τους, γίνεται με βάση τις διαθέσιμες τοπικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας. Η διεύρυνση της Κατανεμημένης Παραγωγής στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης, αναμένεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες.

Τα συστήματα αυτά, παρέχουν οφέλη στο δίκτυο, όπως ο ευέλικτος τρόπος λειτουργίας του, καθώς επίσης και σημαντικά πλεονεκτήματα που αφορούν την ενεργειακή αποδοτικότητα, την αξιοπιστία αλλά και την ποιότητα της παραγόμενης ΗΕ.

Δεδομένου ότι, οι μονάδες παραγωγής πρέπει να προσφέρουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παραγωγή ενέργειας, γίνεται σαφές πως, ένας μεγάλος αριθμός μικρότερων μονάδων έχει μεγαλύτερη συλλογική αξιοπιστία από έναν μικρό αριθμό μεγαλύτερων μονάδων, ευνοώντας έτσι τους κατανεμημένους πόρους. Πολλές μικρές μονάδες συμπαραγωγής είναι λιγότερο πιθανό να αποτύχουν ταυτόχρονα σε σχέση με μία μεγάλη μονάδα που προσφέρει την ίδια ισχύ. Επιπλέον οι συνέπειες του σφάλματος, εάν και εφόσον συμβεί, είναι πολύ μικρότερες για μία μικρή μονάδα σε σχέση με τις συνέπειες της μεγαλύτερης.

Οι περισσότεροι διανεμημένοι πόροι, ειδικά οι ΑΠΕ, τείνουν να αποτυγχάνουν λιγότερο σε σχέση με την κεντρικοποιημένη παραγωγή και είναι ευκολότερα και ταχύτερα διαχειρίσιμοι στην επιδιόρθωση των βλαβών. Σε περιοχές όπου είναι δύσκολη η υποστήριξη της απαιτούμενης τάσης του δικτύου, η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να συνεισφέρει και να οδηγήσει σε άνοδο της τάσης. Μπορεί επίσης, να ικανοποιήσει τις τοπικές ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ, με την τοποθέτηση της ΚΠ σε κατάλληλες περιοχές. Χωρίς να είναι αυτοσκοπός, η ΚΠ αποτελεί μία λύση με μικρότερη οικονομική επιβάρυνση.

Όσον αφορά την εγκατάσταση, η συναρμολόγηση ενός μικροδικτύου, μπορεί να γίνει ευκολότερα και σε μικρότερο χρονικό διάστημα, σε οποιαδήποτε τοποθεσία, και κάθε υποσύστημα μπορεί να λειτουργήσει άμεσα χωρίς να επηρεάζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία συμπαραγωγής. Η συνολική χωρητικότητα, μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί κατά βούληση προσθέτοντας ή αφαιρώντας μονάδες αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τις διαφορετικές τεχνολογίες της ΚΠ, τα είδη των πηγών ενέργειας και των καυσίμων που χρησιμοποιούνται είναι διαφοροποιημένα. Ως εκ τούτου, δεν είναι αναγκαία η χρήση συγκεκριμένων τύπων καυσίμων περισσότερο από άλλα. Ανάλογα με τις συνθήκες της κάθε περιοχής εγκατάστασης, λαμβάνεται η κατάλληλη απόφαση της πιο αποδοτικής χρήσης της εκάστοτε πηγής, ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί με τον πλέον αποδοτικότερο τρόπο, αποφεύγοντας τις ζημιωγόνες, οικονομικά και ενεργειακά, συνέπειες.

Πέρα όμως από τα τεχνικά και ενεργειακά ζητήματα που επιλύει η ένταξη της ΚΠ στο δίκτυο διανομής, ένας σημαντικός λόγος της εισαγωγής της, είναι η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας. Πλέον, δίνεται η δυνατότητα, σε ανεξάρτητους παραγωγούς να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο και ενεργή συμμετοχή στις αγορές ενέργειας. [6]

2.2 Κατανεμημένη Παραγωγή, από το χθες στο σήμερα

Η κατανεμημένη παραγωγή, δεν είναι κάτι καινούριο στον τομέα της παραγωγής ΗΕ. Ως μέθοδος παραγωγής, εμφανίστηκε στις αρχές της παραγωγής και της εκμετάλλευσης της ΗΕ. Αποτελούσε, ουσιαστικά τον κανόνα και όχι την εξαίρεση, όπως στη σημερινή εποχή. Την περίοδο εκείνη, τα εργοστάσια παραγωγής ισχύος, παρείχαν ισχύ σε φορτία τα οποία βρίσκονταν χωροταξικά κοντά στις πηγές. Προτού χρησιμοποιηθεί η παραγωγή και η χρήση εναλλασσόμενης ισχύος, τα ηλεκτρικά δίκτυα ήταν συνεχούς ρεύματος με συνέπεια η τάση παροχής και η απόσταση μεταφοράς ισχύος να είναι περιορισμένες.

Προκειμένου να υπάρξει ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, γινόταν χρήση μέσων αποθήκευσης τα οποία ήταν σε θέση να συνδεθούν άμεσα στο δίκτυο ισχύος. Η χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος στην συνέχεια αντικατέστησε το συνεχές, καθώς παρείχε τη δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες ισχύος. Αυτή η προσέγγιση σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, οδήγησε στη μεγιστοποίηση της παραγωγής και ενίσχυσε τη βάση της κεντροποιημένης παραγωγής ενέργειας. [6]

2.3 Τεχνολογίες Κατανεμημένης Παραγωγής

Στην ΚΠ δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός σε σχέση με την τεχνολογία η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της ΗΕ. Ουσιαστικά εντάσσει ποικιλία τεχνολογιών καθώς κάθε υπάρχουσα τεχνολογία είναι εφαρμόσιμη. Συχνά ο όρος ΚΠ, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ. Αυτή η θεώρηση όμως δεν είναι ο κανόνας, καθώς η ΚΠ μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε πρωτογενή πόρο (ανανεώσιμο ή μη). [6]

Μία περιγραφή και ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τυπικά χαρακτηριστικά κάποιων εξ' αυτών και θα αναλυθεί η επίδρασή τους στο κυρίως δίκτυο διανομής.

Πίνακας 2.1 Τεχνολογίες που περιλαμβάνονται στην ΚΠ

Είδος Τεχνολογίας	Τυπικό Διαθέσιμο Μέγεθος Ισχύος ανά δομική Μονάδα
Μονάδες καύσης ΦΑ συνδυασμένου κύκλου	35 MW - 400 MW
Μηχανές εσωτερικής καύσης	5 kW - 10 MW
Στρώβιλοι καύσης	1MW - 250 MW
Μικροστρώβιλοι	1MW - 250 MW
ΑΠΕ	
Μικρά Υδροηλεκτρικά	1MW - 100MW
Ανεμογεννήτριες	200W - 3MW
Φωτοβολταϊκές συστοιχίες	20W - 100kW
Βιομάζα	250kW - 2MW
Κυψέλες Καυσίμου	250kW - 5MW
Αποθήκευση ενέργειας / Συσσωρευτές	500kW - 5MW

Όπως παρατηρείται, πολλές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, εντάσσονται στις ΑΠΕ. Παρόλο που αυτές οι πηγές θεωρούνται άφθονες και ανεξάντλητες, η διαθεσιμότητα και η επάρκεια τους ποικίλει σημαντικά μεταξύ περιοχών και χωρών. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, φωτοβολταϊκές συστοιχίες, ανεμογεννήτριες, μηχανές diesel, κυψέλες καυσίμου και αποθήκευση με συσσωρευτές, αποτελούνται από έναν αριθμό δομικών μονάδων, οι οποίες ενοποιούνται σε μορφή σταθμών παραγωγής ενέργειας. Αυτές οι δομικές μονάδες μπορούν να εγκατασταθούν πολύ γρήγορα στην τελική θέση του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Η κατασκευή και η εγκατάσταση απαιτούν σημαντικά λιγότερο χρόνο από τους μεγάλους, κεντρικής δομής, σταθμούς παραγωγής ισχύος. Κάθε δομική μονάδα μπορεί να λειτουργεί από τη στιγμή που θα εγκατασταθεί,

ανεξαρτήτως της κατάστασης των υπόλοιπων δομικών μονάδων. Σε περίπτωση που μία από τις δομικές μονάδες, παρουσιάσει βλάβη, οι άλλες μονάδες δεν επηρεάζονται. Τυχόν βλάβες αντιμετωπίζονται τοπικά και δεν επιδρούν στη συνολική παραγόμενη ισχύ, καθώς συνήθως αποτελούν μόνο ένα μικρό κομμάτι του συνόλου. [7],[8]

2.4 Κατηγοριοποίηση των μονάδων με βάση την παραγόμενη ισχύ τους

Η ισχύς μίας μονάδας παραγωγής που συνδέεται στο δίκτυο, δεν μπορεί να οριστεί αυθαίρετα. Εξαρτάται από το μέγεθος και την χωρητικότητα του δικτύου διανομής. Συνεπώς, δεν μπορεί να καταστεί σαφής ο ορισμός της ισχύος που εγκαθίσταται, καθώς η χωρητικότητα είναι ανάλογη του επιπέδου της τάσης λειτουργίας.

Ο σχεδιασμός του κάθε συστήματος διανομής, είναι ξεχωριστός και πρέπει να δοθεί ένα σαφές όριο στις μονάδες παραγωγής που μπορούν να συνδεθούν με αυτό. Αυτό το γεγονός, θέτει περιορισμούς στο μέγεθος των μονάδων που θα εισαχθούν. Για τον λόγο αυτό, έχει διατυπωθεί μία διεθνής σύμβαση, με την οποία κατηγοριοποιούνται οι μονάδες ΚΠ, σύμφωνα με το μέγεθος τους. Κατά τον τρόπο αυτό οι μονάδες κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες σύμφωνα με την παραγόμενη ισχύ που προσφέρουν:

Πίνακας 2.2 Κατηγοριοποιήσεις ΚΠ σύμφωνα με την εγκατεστημένη ισχύ

Μονάδες Πολύ Μικρής Κλίμακας	1W - 5 kW
Μονάδες Μικρής Κλίμακας	5kW - 5 MW
Μονάδες Μεσαίας Κλίμακας	5 MW - 50 MW
Μονάδες Μεγάλης Κλίμακας	50 MW - 300 MW

2.5 Επιδράσεις Κατανεμημένης Παραγωγής στο δίκτυο διανομής

Οι δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη διαχείριση του συνόλου του συστήματος ενέργειας, πραγματοποιούν διαρκή και συστηματικό έλεγχο της

ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, καθώς επίσης γίνεται αξιολόγηση της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας και της προστασίας του συστήματος από ατυχήματα. Σε αυτή τη λογική βασίστηκε όλη η δομή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, από την παραγωγή ως την κατανάλωση. Αν και η ροή ισχύος στο σύστημα μεταφοράς δεν είναι προδιαγεγραμμένη, στο σύστημα διανομής η κατεύθυνση είναι συγκεκριμένη (με φορά προς τον καταναλωτή). Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά αναπτύχθηκαν όλοι οι μέθοδοι προστασίας και ελέγχου των ΣΗΕ.

Το σύστημα διανομής χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, στα συστήματα ακτινικού ή βροχοειδούς τύπου. Τα συστήματα ακτινικού τύπου βρίσκονται σε αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές, ενώ τα βροχοειδή συναντώνται στα αστικά κέντρα. Τα βροχοειδή συστήματα, είναι γενικά σχεδιασμένα να λειτουργούν χωρίς την ύπαρξη παραγωγής ενέργειας στο σύστημα διανομής ή στην πλευρά του καταναλωτή. Η εισαγωγή πηγών παραγωγής στο σύστημα διανομής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη ροή φορτίου, τα επίπεδα τάσης στους καταναλωτές καθώς και τον εξοπλισμό του δικτύου. [7]

Για όλους αυτούς του λόγους, η είσοδος των πηγών της ΚΠ, πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να εκ πληρούνται όλα τα κριτήρια αξιοπιστίας. Το μέγεθος, η κατάλληλη θέση σύνδεσης και η δυνατότητα αποσύνδεσης της κατανεμημένης πηγής, είναι απαραίτητα μέτρα τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη σε κάθε μελέτη. Από τη στιγμή που πολλές από τις πηγές της ΚΠ δεν ανήκουν στις δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού αλλά σε ιδιώτες, δεν υπάρχει εγγύηση ότι τα προαναφερθέντα κριτήρια θα ικανοποιούνται, ώστε να υπάρχει θετικό αντίκτυπο σε όλο το σύστημα.

Για να έχει λοιπόν η διείδυση της ΚΠ, τα επιθυμητά αποτελέσματα για το δίκτυο και για να αποφευχθούν οι δυσμένειες, θα πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένοι βασικοί κανόνες και πρότυπα σχετικά με τον έλεγχο, την εγκατάσταση και την χωροθέτηση της. Η ΚΠ, δηλαδή, θα πρέπει να είναι κατάλληλα εναρμονισμένη με τη φιλοσοφία λειτουργίας και τον σχεδιασμό του συνολικού συστήματος. [8]

Τα ζητήματα που προκύπτουν και θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου είναι τα εξής:

- Ρύθμιση της τάσης

- Ταχεία αυξομείωση τάσης (voltage flickering)
- Εμφάνιση μη επιθυμητών αρμονικών
- Όρια ισχύος
- Προστασία απο υπερεντάσεις
- Γειώσεις
- Φαινόμενο Νησιδοποίησης
- Μεταβατική Ευστάθεια

Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς της ΚΠ σε ένα δίκτυο, τόσο πιο κρίσιμη γίνεται η αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών, καθώς από αυτά κρίνεται η συνολική κατάσταση του συνολικού δικτύου.

2.5.1 Ρύθμιση της τάσης

Τα ακτινικά δίκτυα διανομής ρυθμίζονται ως προς την τάση στους υποσταθμούς χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές με αλλαγή λήψεων υπό φορτίο και σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου με ρυθμιστές και πυκνωτές. Μέσω της χρήσης αυτού του εξοπλισμού διατηρούνται εντός ορίων τα επίπεδα της τάσης του δικτύου. Η ρύθμιση της τάσης του δικτύου διανομής βασίζεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα είναι ακτινικά και η ροή ισχύος γίνεται από τον υποσταθμό προς το φορτίο. Η ένταξη της ΚΠ αλλάζει την σταθερή αυτή κατάσταση. Πέρα από το γεγονός ότι εισάγει αβεβαιότητα σε ότι αφορά την κατεύθυνση της ροής ισχύος, θέτει εν αμφιβόλω την χρησιμοποιούμενη πρακτική της ρύθμισης τάσης. Η ΚΠ μπορεί να προκαλέσει αυξομείωση της τάσης στα συνδεδεμένα φορτία.

Για παράδειγμα, ένα οικιακό σύστημα ΚΠ μικρής κλίμακας, που μοιράζεται έναν μετασχηματιστή διανομής με παρόμοια συστήματα, ενδέχεται να αυξήσει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή διανομής, σε τέτοιο βαθμό, που να παραβιαστούν τα προκαθορισμένα όρια. Αυτό είναι πιθανό να συμβεί αν ο μετασχηματιστής διανομής έχει τεθεί στην ανώτερη δυνατή λήψη στην πλευρά του πρωτεύοντος, οπότε και η τάση στο πρωτεύον του είναι κοντά στην ανώτερη αποδεκτή τιμή της. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, θα υπήρχε πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών στην πλευρά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η είσοδος της ΚΠ στο δίκτυο όμως, μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη ροή ισχύος και αύξηση των επιπέδων τάσης, η οποία με την ήδη αυξημένη τάση του

μετασηματιστή, οδηγεί σε υπέρβαση των ορίων της παρεχόμενης τάσης, με ό,τι αυτό συνεπάγεται.

Συμπεραίνεται λοιπόν, πως η επίδραση της ΚΠ στην τάση και για οποιαδήποτε πιθανή εφαρμογή θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται ώστε να εξασφαλιστεί πως κανείς δεν θα επηρεαστεί δυσμενώς. Ένας ακριβής τρόπος για να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός καταναλωμένου συστήματος παραγωγής, σε ότι αφορά τη ρύθμιση της τάσης, είναι η ανάλυση ροής φορτίου του συστήματος χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό ικανό να ανταποκρίνεται σε πολλαπλές πηγές ισχύος στο σύστημα διανομής και στη λειτουργία ρυθμιστών τάσης.

Πέρα από τη ροή φορτίου, ορθό είναι να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της σύνθετης αντίστασης της γραμμής, καθώς και η σχετική ως προς την τάση του συστήματος, φάση του τροφοδοτούμενου από την ΚΠ ρεύματος. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, υπάρχει περίπτωση να καταδείξουν πως η ισχύς της ΚΠ που διεισδύει στο σύστημα, είναι εντός των επιτρεπτών ορίων τάσης στην περιοχή του σημείου σύνδεσης της, αλλά σε μη αποδεκτές τιμές σε πιο απομακρυσμένα σημεία. Η διείσδυση της ΚΠ, εισάγει νέα δεδομένα για τα επίπεδα τάσης στο δίκτυο, οπότε τροποποιεί ριζικά τη χρήση των ρυθμιστών τάσης και των πυκνωτών. Σε όλες τις περιπτώσεις η επίδραση στην ανάντη πλευρά του δικτύου θα είναι αμελητέα όταν η σύνδεση ισχύος ΚΠ είναι οικιακής κλίμακας, μικρότερης των 10kW. Όταν η συνολική ισχύς όμως πολλών μονάδων φτάνει σε οριακό μέγεθος ή όταν το μέγεθος μίας μονάδας είναι αρκετά σημαντικό, τότε η μελέτη ρύθμισης της τάσης είναι αναγκαία για να εξασφαλιστεί ότι η τάση του θεωρούμενου ως ανάντη δικτύου θα διατηρηθεί εντός των αποδεκτών ορίων. Το οριακό κατώφλι της συνδεόμενης ισχύος, που καθιστά μία εξ αρχής μελέτη των επιπέδων της τάσης, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν είναι ξεκάθαρα ορισμένο για κάθε περίπτωση.

Παρόλα αυτά, ένας λογικός εμπειρικός κανόνας είναι ότι αν το συνδεόμενο ρεύμα από ΚΠ σε ένα ζυγό είναι μικρότερο από το 5% του φορτίου στο σημείο σύνδεσης και αν όλοι οι καταναλωτές είχαν αποδεκτά επίπεδα τάσης πριν τη νέα προσθήκη της παραγωγής, τότε δεν είναι πιθανό να εμφανιστεί πρόβλημα τάσης στην ανάντη πλευρά του ζυγού. Σε αντίθετη περίπτωση, αν ξεπερνά το 5%, υπάρχουν ουσιαστικοί λόγοι ανησυχίας σχετικά με τις επικείμενες επιδράσεις. Στην κατάντη πλευρά του ζυγού, ακόμα και στην περίπτωση μίας μικρής γεννήτριας που εισάγει λιγότερο από το 5% του ρεύματος των φορτίων, μετρημένο

πάντα στην ανάντη πλευρά, είναι πιθανό να προκαλέσει πρόβλημα στα εξυπηρετούμενα φορτία. Στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση της τάσης θα επικεντρωθεί στην κατάντη περιοχή που συνδέεται η ΚΠ.

Πέρα από τα επίπεδα τάσης που εξετάστηκαν προηγουμένως, πρέπει να αναλυθεί επίσης το κατά πόσο η ΚΠ θα επηρεάσει τις απώλειες των γραμμών, είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας τις. Οι μονάδες της ΚΠ, έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό πως μπορούν να τοποθετηθούν σε βέλτιστες θέσεις, όπου παρέχουν μέγιστη μείωση στις απώλειες. Η εύρεση των κατάλληλων θέσεων για τις μονάδες με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών, είναι παρόμοια με αυτή των πυκνωτών, όταν χρησιμοποιούνται για τον ίδιο λόγο στο δίκτυο. Η ουσιαστική διαφορά, είναι ότι οι μονάδες ΚΠ θα επηρεάσουν τόσο την ενεργό όσο και την άεργο ροή ισχύος, ενώ αντίθετα οι πυκνωτές επηρεάζουν μόνο την άεργο ισχύ. Οι περισσότερες ηλεκτρογεννήτριες λειτουργούν με συντελεστή ισχύος μεταξύ 0.85-1 επαγωγικό, αλλά υπάρχουν μετατροπείς που μπορούν να παρέχουν άεργο χωρητική αντιστάθμιση. Στα σημεία του δικτύου, που παρατηρούνται αυξημένες απώλειες, ακόμα και μία μικρή μονάδα ΚΠ με ισχύ μόλις 10-20% του εξυπηρετούμενου φορτίου, μπορεί να έχει σημαντικό όφελος μείωσης των απωλειών του συστήματος.

Δυστυχώς, οι περισσότερες ηλεκτρικές επιχειρήσεις που είναι αρμόδιες για το σύνολο του δικτύου δεν έχουν τον έλεγχο των θέσεων εγκατάστασης των μονάδων, καθώς αυτές ανήκουν σε ιδιώτες, και δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη μέθοδο με σκοπό την βελτιστοποίηση του δικτύου.

Όσον αφορά τις μεγαλύτερες μονάδες ΚΠ θα πρέπει να συνδέονται λαμβάνοντας υπόψη τα όρια ισχύος του δικτύου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ΚΠ μπορεί να εισάγει ισχύ που οδηγεί σε υπέρβαση του θερμικού ορίου των εναέριων γραμμών και των καλωδίων, χωρίς όμως να προκαλεί πρόβλημα από πλευράς τάσης, στον ζυγό σύνδεσης. Ο υπολογισμός της ροής φορτίου θα πρέπει να εντοπίζει τα σημεία στα οποία η συνδεδεμένη ισχύς προκαλεί υπερβάσεις των θερμικών ορίων ή των επιπέδων της τάσης, αλλά και το μέγιστο δυνατό εύρος της ισχύος αυτής. Είναι προφανές ότι η σύνδεση μονάδων ΚΠ σε θέσεις που βρίσκονται κοντά στα θερμικά όρια εξοπλισμού, δεν αποτελεί βέλτιστη επιλογή από την πλευρά των απωλειών ισχύος.

Σε ότι αφορά την πτώση τάσης και τις απώλειες των γραμμών, η επίδραση της ΚΠ, είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος του δικτύου που θα γίνει η σύνδεση. Είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί η περίπτωση της επίδρασης των δικτύων διανομής σε αντιπαράθεση με τα δίκτυα μεταφοράς. Οι γραμμές υψηλής τάσης, όπως οι γραμμές μεταφοράς, έχουν μικρή ωμική αντίσταση R , συγκριτικά με τις γραμμές χαμηλής τάσης των δικτύων διανομής και η επίδραση της στην πτώση τάσης είναι πολύ μικρότερη από την επίδραση που προκαλεί η αντίσταση X , αυτών των γραμμών που είναι συγκριτικά μεγαλύτερη $X / R > 5$.

Έτσι, ενώ στα δίκτυα μεταφοράς η αντίδραση είναι η πιο σημαντική παράμετρος σε ότι αφορά την πτώση τάσης και τις απώλειες της γραμμής, στα μέσης και χαμηλής τάσης συστήματα διανομής, η ωμική αντίσταση είναι συχνά μεγαλύτερη ή τουλάχιστον αντίστοιχη με την επαγωγική αντίδραση. Στα συστήματα διανομής δηλαδή, η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι αυτή που προκαλεί ένα σημαντικό ποσοστό της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών, καθώς και των απωλειών σε αυτές. Με βάση τη διαφοροποίηση αυτή, είναι λογικό η επίδραση της ΚΠ να είναι διαφορετική στις δύο αυτές περιπτώσεις, ανάλογα με την ενεργό ή την άεργο συνεισφορά που θα προκαλείται από την έγχυση της ΚΠ στο δίκτυο. [8],[9]

2.5.2 Ταχεία αυξομείωση της Τάσης

Η ταχεία αυξομείωση της τάσης, σε ότι αφορά την ανάλυση και τον περιορισμό της, μπορεί να καταλήξει ένα περίπλοκο ζήτημα. Υπάρχει περίπτωση να προκύψει ως αποτέλεσμα της εκκίνησης μίας μηχανής ή των σταδιακών μεταβολών στην παροχή ισχύος από την ΚΠ που θα επιφέρουν σημαντική αλλαγή της τάσης του δικτύου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να γίνει αντιληπτό ακόμη και από τους καταναλωτές, καθώς όταν μία ηλεκτρογεννήτρια ξεκινά ή η ισχύς που αποδίδει μεταβάλλεται, θα προκληθεί ταχεία αυξομείωση της τάσης στα φορτία φωτισμού. Ο καθορισμός του κινδύνου που προκαλείται από το φαινόμενο αυτό, το οποίο οφείλεται στην εκκίνηση των ηλεκτρογεννητριών ή των διακυμάνσεων στην παραγόμενη από αυτές ισχύ, είναι αρκετά απλή υπόθεση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της τάσης, ειδικά αν το εύρος αυτών των μεταβολών είναι καθορισμένο. Οι διακυμάνσεις, είναι μεταβολές κατά βαθμίδες και δεν υπάρχουν πολύπλοκες δυναμικές αλληλεπιδράσεις στον εξοπλισμό

Η δυναμική συμπεριφορά των μηχανών και οι αλληλεπιδράσεις τους με τους ρυθμιστές τάσης και τις ηλεκτρογεννήτριες που υπάρχουν στο δίκτυο, υπάρχει περίπτωση να περιπλέξουν αρκετά την κατάσταση, καθώς οδηγούν στοιχεία του δικτύου, που αρχικά δεν είχαν σημαντική συνεισφορά στο συγκεκριμένο φαινόμενο, να προκαλούν αύξηση της συχνότητας και της έντασης των βυθισμάτων της τάσης.

Οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ενέργειας από την ΚΠ, ακόμη και από τις πιο ήπιες παραγωγές όπως είναι τα ηλιακά και τα αιολικά συστήματα, μπορούν να οδηγήσουν τους ρυθμιστές τάσης στη δημιουργία ταχέων αυξομειώσεων (εκτός των επιτρεπτών ορίων). Έτσι πέρα από την απλή εκκίνηση και τον τερματισμό των μηχανών ηλεκτροπαραγωγής, το πρόβλημα μπορεί να οφείλεται και σε άλλους παράγοντες. Η αντιμετώπιση αυτών των αλληλεπιδράσεων απαιτεί μία ανάλυση, που είναι πιο συνθέτη από το συνήθη υπολογισμό της πτώσης τάσης που εμφανίζεται κατά την εκκίνηση μία ηλεκτρογεννήτριας.

Η αναγνώριση και η επίλυση των προβλημάτων αυτών είναι δύσκολη και ο μηχανισμός πρέπει να είναι ιδιαίτερος οξυδερκής, ώστε να κατανοήσει την αλληλεπίδραση μεταξύ ΚΠ και του υπόλοιπου συστήματος. Για να μοντελοποιηθεί, με το κατάλληλο λογισμικό, το δίκτυο με την ΚΠ συνδεδεμένη σε αυτό, απαιτεί καλά υποδείγματα των κατανεμημένων ηλεκτρογεννητριών και των αλληλεπιδράσεων τους με τον εξοπλισμό του συστήματος. Χρειάζεται δηλαδή, ένα πακέτο λογισμικού με την ικανότητα να αναλύει τη δυναμική συμπεριφορά των συστημάτων.

Επίσης, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο σύστημα, για να εκτιμηθούν οι διακυμάνσεις της τάσης και της ροής ισχύος, ώστε να καθοριστεί ποιοι είναι οι απαραίτητοι χειρισμοί για τη μείωση των αυξομειώσεων τάσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτά τα δυναμικά προβλήματα ταχείας αυξομείωσης τάσης μπορούν να λυθούν χωρίς λεπτομερή μελέτη. Αντιμετωπίζονται εφαρμόζοντας μία κατάλληλη ρύθμιση σε ένα από τα στοιχεία ελέγχου του δικτύου, μέχρι η εμφανιζόμενη αυξομείωση να εξαφανιστεί, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η λύση δεν είναι προφανής. [10]

2.5.3 Αρμονικές

Οι ηλεκτρογεννήτριες της ΚΠ μπορεί να εισάγουν αρμονικές στο δίκτυο. Ο τύπος και το εύρος τους εξαρτάται από την τεχνολογία παραγωγής ΗΕ και από τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται στο δίκτυο. Ιδιαίτερη ανησυχία προκύπτει στην περίπτωση ύπαρξης μετατροπέων, ο λόγος είναι η πιθανή συνεισφορά τους σε ρεύμα προερχόμενο από τις αρμονικές που παράγονται. Αυτές οι ανησυχίες οφείλονται εν μέρη στη χρήση παλιού τύπου μετατροπέων ισχύος οι οποίοι εμφανίζουν υψηλά επίπεδα αρμονικού ρεύματος. Οι πλειονότητα των νέων μετατροπέων βασίζονται στα IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), ώστε να παράγουν το ημιτονοειδές κύμα. Αυτοί οι μετατροπείς είναι ικανοί να παράγουν μία πολύ καθαρή έξοδο και να ικανοποιούν κατά κανόνα τις απαιτήσεις της IEEE 519-1992. [11]

Πηγή αρμονικών μπορεί να αποτελέσουν στρεφόμενες γεννήτριες, όπως είναι οι σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες. Ανάλογα με το σχεδιασμό των τυλιγμάτων των ηλεκτρογεννητριών, τη μη γραμμικότητα του πυρήνα, τη γείωση και άλλους παράγοντες, μπορούν να υπάρξουν σημαντικές αρμονικές. Οι αρμονικές τρίτης τάξης είναι οι επικρατέστερες σε αυτές τις γεννήτριες και μπορούν να μειωθούν με κατάλληλη διεύθυνση των τυλιγμάτων. Στο ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να οδηγήσει και μία σωστή διεύθυνση της γείωσης της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή ανύψωσης.

Πιο αναλυτικά, υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις κατά τις οποίες εμφανίζονται τα προβλήματα, όπως επίπεδα παραμόρφωσης που υπερβαίνουν τα ισχύοντα πρότυπα, συντονισμός σε συστοιχίες πυκνωτών ή προβλήματα σε εξοπλισμό που είναι ευαίσθητος στις αρμονικές. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί αναδιαστασιολόγηση εξοπλισμού στην πλευρά της ΚΠ ώστε να μειωθεί η πρόσθετη θέρμανση που προκαλούν οι αρμονικές. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται μοντελοποίηση και μελέτη της διείσδυσης της ΚΠ στο δίκτυο σε σχέση με το IEEE 519, με ιδιαίτερη προσοχή σε μεγαλύτερες μονάδες ΚΠ. Τα όρια για την παραμόρφωση της τάσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι 5% για την Total Harmonic Distortion και 3% για οποιαδήποτε από τις επιμέρους αρμονικές.

2.5.4 Επίδραση στην προστασία στα επίπεδα βραχυκύκλωσης

Αν και η συνεισφορά στην ισχύ βραχυκύκλωσης από μία μικρή μονάδα ΚΠ δεν είναι μεγάλη, παρόλα αυτά, η επιμέρους συνεισφορά πολλών μικρών μονάδων ή λίγων μεγάλων μονάδων, μπορεί να επηρεάσει τα επίπεδα βραχυκύκλωσης. Κατά συνέπεια μπορεί να επηρεαστεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια του συστήματος διανομής.

Όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σημείο σφάλματος προέρχεται τόσο από την ΚΠ όσο και από το σύνολο παραγωγής του συστήματος. Αν το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης υπερβαίνει τις δυνατότητες των διακοπών του κυκλώματος, τότε το σφάλμα δεν μπορεί να απομονωθεί. Η επιλογικότητα των διακοπών προστασίας μεταβάλλεται όταν στα δίκτυα διανομής υπάρχουν συνδεδεμένες ηλεκτρογεννήτριες, επειδή οι σύγχρονες κατανεμημένες ή οι επαγωγικές ηλεκτρογεννήτριες αλλάζουν το εύρος, τη διάρκεια και την κατεύθυνση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. [12] Το ρεύμα του σφάλματος αλλάζει και μάλιστα συνήθως αυξάνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρογεννήτριας, αφού η σύνδεση των στρεφόμενων γεννητριών αλλάζει τη σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης των δικτύων διανομής. Αυτή η αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης επηρεάζει την επιλογική συνεργασία των μέσων προστασίας. Γι' αυτόν τον λόγο, πρέπει για κάθε νέα σύνδεση μίας ηλεκτρογεννήτριας, και γενικότερα κάθε είδους ΚΠ, να ελέγχονται τα επίπεδα βραχυκύκλωσης και τα μέσα προστασίας στο δίκτυο διανομής.

Για τους μετατροπείς η συνεισφορά στο σφάλμα εξαρτάται από το μέγιστο ρεύμα και τη διάρκεια στην οποία είναι ρυθμισμένος, από τον κατασκευαστή τους, να ανταποκρίνεται ο περιοριστής ρεύματος που περιέχουν. Σε ορισμένους μετατροπείς η συνεισφορά στο σφάλμα μπορεί να διαρκέσει λιγότερο από έναν κύκλο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο.

Για τις σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες, η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται από την προσφαιματική τάση, την υπομεταβατική και τη μεταβατική αντίδραση της μηχανής και τα χαρακτηριστικά της διέγερσής. Οι επαγωγικές ηλεκτρογεννήτριες μπορούν επίσης να συμβάλλουν στα σφάλματα, όσο παραμένουν σε διέγερση από οποιαδήποτε απομένουσα τάση στο δίκτυο

Για τις περισσότερες επαγωγικές ηλεκτρογεννήτριες, η αξιολόγηση της τιμής ρεύματος διαρκεί μόνο λίγους κύκλους και υπολογίζεται διαιρώντας την προσφαιματική τάση με τη μεταβατική αντίδραση της μηχανής. Παρόλο που οι λίγοι αυτοί κύκλοι διαρκούν σύντομο διάστημα, είναι αρκετοί για να επηρεάσουν τη λειτουργία των διακοπών προστασίας σε αρκετές περιπτώσεις.

Όταν στο σύστημα συνδέεται μία μόνο ηλεκτρογεννήτρια, μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα ο υπολογισμός των μέγιστων ρευμάτων βραχυκύκλωσης, βάσει των στοιχείων του κατασκευαστή, ώστε να εξεταστεί αν υπάρχει ενδεχόμενο σοβαρής επίδρασης στα υφιστάμενα επίπεδα βραχυκύκλωσης. [13] Για πολλές μικρές πηγές ΚΠ διάσπαρτες στο σύστημα ή για μεγαλύτερες ηλεκτρογεννήτριες ΚΠ, η μόνη ακριβής προσέγγιση των επιπτώσεων σφαλμάτων είναι η πραγματοποίηση ανάλυσης βραχυκύκλωσης με τη βοήθεια λογισμικού, το οποίο θα υπολογίσει με λεπτομέρεια τα δεδομένα που αφορούν τη συμπεριφορά των ηλεκτρογεννητριών σε καταστάσεις βραχυκύκλωσης.

Μετά από την ανάλυση αυτή, δίνεται η δυνατότητα να καθοριστεί αν η πρόσθετη μονάδα που είναι επιθυμητό να ενταχθεί, θα αποτελέσει απειλή ή όχι για την αξιοπιστία των συστημάτων προστασίας. Με αυτό τον τρόπο θα ληφθεί η απόφαση για το αν απαιτείται αλλαγή στον σχεδιασμό των συστημάτων. [14]

2.5.5 Γείωση

Η ΚΠ πρέπει να ακολουθείται από την κατάλληλη διάταξη γείωσης, συμβατή με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπου θα συνδεθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να εμφανιστούν ανεπιθύμητες μεταβολές της τάσης και υπερτάσεις, που να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες του εξοπλισμού των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας ή κίνδυνο για τους καταναλωτές.

Τα περισσότερα συστήματα διανομής, χρησιμοποιούν την ουδετέρωση και μάλιστα είναι αποτελεσματικά γειωμένα. [15] Για ένα μονοπολικό βραχυκύκλωμα, σε μία συνήθη γραμμή τριών αγωγών φάσεων και ενός της ουδετέρωσης, η ανύψωση της τάσης που παρουσιάζεται στις χωρίς σφάλμα τάσεις είναι της τάξης 125 - 135 % της κατάστασης προ σφάλματος. [16]

Από τον ορισμό της IEEE, αποτελεσματική γείωση σημαίνει ότι η συνιστώσα της αντίδρασης θετικής ακολουθίας είναι μεγαλύτερη από την ομοπολική συνιστώσα της ωμικής αντίστασης και η ομοπολική συνιστώσα της αντίδρασης είναι κατά τρεις φορές μικρότερη από την συνιστώσα της αντίδρασης θετικής ακολουθίας. Στην περίπτωση που μία πηγή ΚΠ δεν είναι κατάλληλα γειωμένη στη σύνδεση της με το δίκτυο, τότε το μονοπολικό βραχυκύκλωμα μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνες υπερτάσεις, ειδικά εάν παρατηρηθεί το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, όπου προκύπτει το σφάλμα, οι καταναλωτές θα συνεχίζουν να τροφοδοτούνται από ένα κύκλωμα που υπόκειται σε σφάλμα. Οι καταναλωτές, στις υγιείς φάσεις θα υποστούν στη χειρότερη περίπτωση αύξηση της τάσης σε επίπεδα της τάξης του 173% του επιπέδου της προσφαιματικής τάσης, για αόριστη χρονική περίοδο. Σε αυτά τα επίπεδα τάσης, τόσο ο εξοπλισμός του δικτύου όσο και των καταναλωτών θα καταστραφεί. Ο κορεσμός των μετασχηματιστών διανομής θα βοηθούσε ελάχιστα στον περιορισμό αυτής της ανόδου της τάσης, γιατί η τάση θα παραμείνει σε υψηλά επίπεδα.

Για την αποφυγή προβλημάτων στα συστήματα πολλαπλών γειώσεων με ουδετέρωση, όλες οι πηγές ΚΠ που έχουν μεγάλη ισχύ ώστε να μπορούν να δημιουργούν το φαινόμενο της νησιδοποίησης, θα πρέπει να γειώνονται αποτελεσματικά. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλοι ηλεκτρονόμοι προστασίας για να ανιχνεύουν τις υπερτάσεις στο δίκτυο από σφάλματα προς τη γη και να διακόπτουν άμεσα τη σύνδεση τους με το δίκτυο.

Η πρώτη προσέγγιση είναι προτιμητέα, αφού ο σχεδιασμός της προστασίας του δικτύου περιορίζει τις ανυψώσεις της τάσης που θα εμφανιστούν κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Η δεύτερη προσέγγιση, αν και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εγκαταστάσεις, μπορεί να υποβάλλει χρονικά τα φορτία των καταναλωτών σε πολλούς κύκλους υπέρτασης, πριν η μονάδα της ΚΠ που τροφοδοτεί την ισχύ μέσα στη νησίδα, απομονωθεί από το σύστημα. Αν η ΚΠ δεν αποσυνδεθεί αρκετά γρήγορα, δεν μπορούν να αποφευχθούν οι ζημιές στον εξοπλισμό. Όταν ένας μετασχηματιστής ανύψωσης δεν μπορεί να γειωθεί αποτελεσματικά, μία λύση είναι η χρήση ενός ρυθμιζόμενου μετασχηματιστή γείωσης, ο οποίος θα βοηθήσει να επιτευχθεί η αποτελεσματική γείωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οποιεσδήποτε επιπρόσθετες μέθοδοι γείωσης στο σύστημα, είτε είναι μία ρυθμιζόμενη διάταξη γείωσης, είτε είναι μία κατάλληλη διάταξη των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή ανόρθωσης, θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ομοπολικής συνιστώσας του ρεύματος που

αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια σφάλματος προς τη γη στο δίκτυο. Το ποσοστό του ρεύματος που αντισταθμίζεται καθορίζεται από τη σχέση της αντίδρασης της ρυθμιζόμενης διάταξης γείωσης της ΚΠ προς την αντίδραση της γείωσης του υποσταθμού. Στόχος είναι να μην γίνει αισθητό το σφάλμα στο δίκτυο. Η αντίδραση της ρυθμιζόμενης τάσης γείωσης της ΚΠ πρέπει να υπολογίζεται ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα αντισταθμίσει περισσότερο από ένα μικρό κλάσμα του ρεύματος σφάλματος, εμπειρικά προτείνεται ένα ποσοστό της τάξης του 10%.

Για μικρότερες μονάδες ΚΠ τα προηγούμενα ζητήματα, δεν αποτελούν ζήτημα. Στην περίπτωση μίας μεγάλης μονάδας ή πολλών μικρών μονάδων που επενεργούν σαν ρυθμιζόμενες διατάξεις γείωσης, οι μελέτες βραχυκύκλωσης επιβάλλεται να προσδιορίζουν την επίδραση αυτής της παραμέτρου και να εξετάζουν αν απαιτούνται αλλαγές στις ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων προστασίας. Για να περιοριστεί η επίδραση του σφάλματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία αντίσταση γείωσης, για την γείωση του ουδέτερου στην πλευρά της ΚΠ. Αυτό βοηθάει και στο να μειωθεί το ρεύμα που ρέει στα τυλίγματα μετασχηματιστών σε διάταξη τριγώνου, ρεύμα που προκλήθηκε από ομοπολικές συνιστώσες τάσης στο δίκτυο. Ένας έλεγχος των χαρακτηριστικών των ηλεκτρογεννητριών και του δικτύου πριν την εγκατάσταση της μονάδας ΚΠ μπορεί να εξασφαλίσει ότι ζητήματα σχετικά με τον τρόπο γείωσης αντιμετωπίζονται επαρκώς. Η σωστή γείωση είναι σημαντική, για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υποβιβαστεί η ποιότητα και η αξιοπιστία κατά τη σύνδεση των μονάδων ΚΠ. [17],[18]

2.5.6 Φαινόμενο Νησιδοποίησης

Η νησιδοποίηση είναι η κατάσταση κατά την οποία ένα τμήμα του δικτύου συνεχίζει να λειτουργεί και να τροφοδοτείται από μονάδες παραγωγής ή αποθήκευσης συνδεδεμένες σε αυτό, ενώ έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι είτε σκόπιμο είτε μη. [19]

Μη-σκόπιμη Νησιδοποίηση

Οι νησιδοποιήσεις αυτής της κατηγορίας είναι συνήθως μικρής διάρκειας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι εφόσον η νησίδα περιλαμβάνει τυχαία φορτία και παραγωγούς, δεν υπάρχει ταύτιση μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Δημιουργείται έτσι ανισορροπία

στο ισοζύγιο της ισχύος παραγωγής-κατανάλωσης με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται μεγάλες αλλαγές στο μέτρο και τη συχνότητα της τάσης και να οδηγείται εκτός των καθορισμένων ορίων. Αυτή η κατάσταση θα οδηγήσει στη διακοπή της λειτουργίας της παραγωγής που συμμετέχει, με σκοπό να μη διαρκέσει μεγάλο διάστημα η νησίδα που σχηματίζεται. Υπάρχει όμως και η ακραία οριακή περίπτωση σχετικής ισορροπίας του ενεργειακού ισοζυγίου παραγωγής κατανάλωσης που οδηγεί στη διατήρηση της σχηματιζόμενης νησίδας για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Σκόπιμη Νησιδοποίηση

Συμβαίνει σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαίος ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης μέσα στη νησίδα με σκοπό την διατήρηση της ευστάθειας. Το συνηθέστερο παράδειγμα σκόπιμης νησιδοποίησης είναι η λειτουργία ενός μικροδικτύου.

Κατά τα φαινόμενα της νησιδοποίησης εμφανίζονται μία σειρά από αρνητικές επιπτώσεις οι οποίες σχετίζονται με την ασφάλεια την αξιοπιστία και με την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος.

Καταρχάς η νησιδοποίηση μπορεί να αποτελέσει θανάσιμο κίνδυνο για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου στο οποίο συμβαίνει η νησιδοποίηση. Το συγκεκριμένο τμήμα παρόλο που έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο, τροφοδοτείται ακόμη από κάποιο διασυνδεδεμένο σύστημα και ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας είναι αυξημένος. Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστεί σοβαρός κίνδυνος διαταραχών τάσης και συχνότητας πέρα από τα προκαθορισμένα όρια, οδηγώντας έτσι στην καταστροφή οποιονδήποτε συστημάτων που εξακολουθούν να συνδέονται στο σύστημα.

Σε περίπτωση που το νησιδοποιημένο τμήμα επανασυνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο όταν βρίσκεται εκτός φάσης, μπορεί να δημιουργηθούν διαταραχές στη λειτουργία του ιδίου του δικτύου, να υπάρξουν καταστροφές στον εξοπλισμό του διασυνδεδεμένου δικτύου, αλλά και σε οποιοδήποτε διασυνδεδεμένο εξοπλισμό. Σε περίπτωση σφάλματος εντός της νησίδας οι ΚΠ δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης. Εφόσον τα υπάρχοντα μέσα προστασίας είναι επιλεγμένα με βάση τα μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης (τα προερχόμενα από το κεντρικό δίκτυο) δεν μπορούν να αντιληφθούν τα μικρά ρεύματα των ΚΠ κι επομένως δε διεγείρονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση σφαλμάτων

εντός της νησίδας. Για τους προαναφερθέντες λοιπόν λογούς, είναι απαραίτητο το φαινόμενο της νησιδοποίησης να εντοπίζεται και να παύεται έγκαιρα. Το ρολό αυτό αναλαμβάνουν οι αντιστροφείς ως σημείο διεπαφής του δικτύου με το διανεμημένο σύστημα. [20],[21]

2.5.7 Μεταβατική ευστάθεια

Ορίζεται ως η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το συγχρονισμό, όταν αυτό υπόκειται σε κάποια σοβαρή διαταραχή, όπως βραχυκυκλώματα, και απώλειες μεγάλων φορτίων και παραγωγής. Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος όπως επίσης και από τον τύπο, τη σοβαρότητα και τη θέση στην οποία λαμβάνει χώρα η διαταραχή.

Η βασική διαφορά μεταξύ των συμβατικών μονάδων παραγωγής και της ΚΠ, είναι ότι η ΚΠ είναι σχετικά μικρής κλίμακας, σε σχέση με τις σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες, και οι περισσότερες μονάδες ΚΠ συνδέονται με τα δίκτυα διανομής. Όταν συνδέονται στο δίκτυο μικροί σταθμοί, η επίδραση της ΚΠ στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος είναι αμελητέα. Από την άλλη πλευρά, όταν οι μονάδες αυτές είναι μεγαλύτερες είτε ο αριθμός τους είναι σημαντικός, υπάρχει περίπτωση να επηρεάσουν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος είναι από τα πιο βασικά θέματα προβληματισμού με τα οποία ασχολούνται ενδελεχώς οι υπεύθυνοι της μελέτης, σχεδίασης και λειτουργίας του συστήματος. Η ευστάθεια του μέτρου και της φάσης της τάσης υπό μεγάλες διαταραχές αποτελεί σημαντική απαίτηση για την ασφάλεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Μελέτες έχουν δείξει, πως οι μέγιστες αποκλίσεις της φάσης μεταξύ των ηλεκτρογεννητριών μειώνονται με την αύξηση της διείσδυσης των μονάδων της ΚΠ [22]. Η αποσύνδεση ορισμένων μονάδων ΚΠ, όταν η τάση μειώνεται κατά 80% της ονομαστικής τιμής, αντιπροσωπεύει μία επιπλέον διαταραχή στο δίκτυο. Αν συμβεί ένα σφάλμα στο δίκτυο διανομής, το οποίο σαν αποτέλεσμα θα έχει τη βύθιση της τάσης και την αποσύνδεση της γεννήτριας, το μόνο που θα χαθεί είναι μία μικρή χρονική περίοδος παραγωγής ενέργειας. Η μονάδα ΚΠ θα επιταχυνθεί και τελικά θα αποσυνδεθεί για λόγους προστασίας.

Το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας αυτής θα επαναφέρει αυτόματα τη γεννήτρια, αφού πρώτα επανέλθει το δίκτυο σε κανονική λειτουργία. Σαφώς γίνεται αντιληπτό πως, αν αυτή η γεννήτρια αποτελεί βασικό τμήμα του συστήματος με υψηλή παραγωγή για το δίκτυο, απαιτείται περισσότερη προσοχή, ώστε να μην αποσυνδέεται σε περίπτωση που το σφάλμα είναι απομακρυσμένο. Καθώς η αδράνεια της μονάδας είναι τις περισσότερες φορές μικρή και ο χρόνος διακοπής της προστασίας της μεγάλος, ίσως δεν είναι δυνατό να εξασφαλιστεί η ευστάθεια για όλα τα σφάλματα του δικτύου διανομής.

Ένα βασικό πρόβλημα είναι η άσκοπη διακοπή από ευαίσθητους ηλεκτρονόμους σε μεταβολές συχνότητας. Αυτοί ενεργοποιούνται για να αντιμετωπίσουν την νησιδοποίηση, στην περίπτωση όμως σημαντικών σφαλμάτων σε ένα σύστημα μπορεί να μην λειτουργήσουν σωστά και να προβούν στη διακοπή μεγάλης μονάδας παραγωγής ΚΠ ενώ δεν θα έπρεπε. Η διακοπή αυτή, έχει ως αποτέλεσμα περαιτέρω μείωση της συχνότητας. Η επανασύνδεση κάποιου τμήματος του δικτύου διανομής με σημαντική ΚΠ πρέπει να γίνει προσεκτικά. Αν το δίκτυο βασιζόταν στις μονάδες ΚΠ ώστε να εξυπηρετεί το φορτίο του, τότε κατά την επανασύνδεση του θα απαιτηθεί ισχύ προτού μπορέσουν να επανασυνδεθούν οι μονάδες. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται συχνά από τους υπεύθυνους της κεντρικής παραγωγής και των δικτύων μεταφοράς αλλά είναι ασυνήθιστο στα δίκτυα διανομής.

Οι σύγχρονες γεννήτριες κατά τη διάρκεια μιας παροδικής αστάθειας αποσυγχρονίζονται, ενώ οι επαγωγικές “τραβούν” μεγάλα επαγωγικά ρεύματα που προκαλούν αστάθεια και βύθιση της τάσης του δικτύου. Τα όρια στατικής ευστάθειας των επαγωγικών γεννητριών μπορούν επίσης να περιορίσουν τη σύνδεση τους σε πολύ ασθενή δίκτυα διανομής. Μία πολύ μεγάλη σύνθετη αντίσταση πηγής ή ένα χαμηλό επίπεδο ισχύος βραχυκύκλωσης μπορεί να περιορίσει τη μέγιστη ροπή της γεννήτριας σε τέτοιο βαθμό που να μη μπορέσει να επανέλθει στην ονομαστική της λειτουργία. [23]

2.6 Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης (Demand Response)

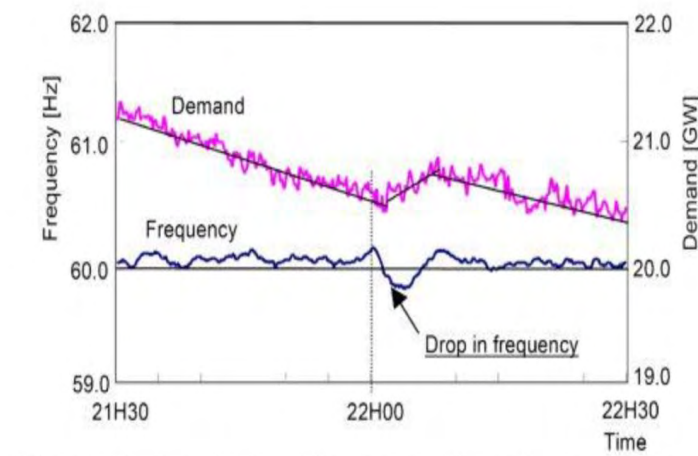
Η ΚΠ κρίνεται απαραίτητο να ελέγχεται κεντρικά. Η απροσδιόριστη λειτουργία της, δεν επηρεάζει μόνο τις διακυμάνσεις που εντοπίζονται στη συχνότητα του δικτύου αλλά επηρεάζει και την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη παροχή ισχύος, είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η απαραίτητη εφεδρεία

ισχύος από πλευράς μεγέθους και διαθεσιμότητας. Αν εντοπιστεί στο δίκτυο, μία μεγάλη αύξηση ισχύος ΚΠ χωρίς να υπόκειται σε περιορισμούς και κάποια δυνατότητα επέμβασης από τον διαχειριστή του δικτύου, τότε ενδεχομένως το δίκτυο να οδηγηθεί σε προβληματικά επίπεδα εφεδρείας.

2.6.1 Διαταράξεις ισχύος και επίδραση στο Demand Response

Στόχος της εισαγωγής της ΚΠ παραγωγής στο δίκτυο είναι η βελτίωση του και όχι η ύπαρξη επιπλέον προβλημάτων. Σε περιπτώσεις όπου η ΚΠ χρησιμοποιεί φυσικές πηγές όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, είναι πιθανό να επηρεάσει τη συχνότητα του συνολικού συστήματος. Γι' αυτό τον λόγο, κύρια αρμοδιότητα του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς σε δίκτυα με εισαγωγές ΚΠ, είναι η διατήρηση της συχνότητας εντός αποδεκτών ορίων τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την αποδοτικότητα των μονάδων ΚΠ.

Έτσι γίνεται αντιληπτό πως, οι εισαγωγές της ΚΠ θα πρέπει να γίνονται με εκ των προτέρων προσεκτικό και συστηματικό σχεδιασμό. Επιπλέον επιβάρυνση στο θέμα της συχνότητας, τίθεται από την μη ελεγχόμενη από τον διαχειριστή του συστήματος λειτουργία της ΚΠ. Η έναρξη ή το σταμάτημα για οικονομικούς ή τεχνικούς λόγους καθορίζονται από τους ιδιοκτήτες των μονάδων αυτών. Αυτή η ατομική πρωτοβουλία, έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της συχνότητας εξαιτίας των ταχύτατων μεταβολών του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης. Η Εικόνα 2.2, παρουσιάζει γραφικά τη σχέση μεταξύ ζήτησης και συχνότητας σε τμήμα του δικτύου στην Ιαπωνία.



Εικόνα 2.2 Ζήτηση σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Όπως φαίνεται, στο διάστημα μεταξύ 21:30 και 22:00 η ζήτηση ακολουθεί πτωτική πορεία, ενώ μετά τις 22:00 δημιουργείται ξαφνική αύξηση. Εκεί παρατηρείται μία απότομη πτώση της συχνότητας. Το συμβάν έχει δύο πιθανά σενάρια πρόκλησης. Η πρώτη περίπτωση είναι να προκλήθηκε μία απότομη αύξηση της ζήτησης. Η δεύτερη να υπήρξε αλλαγή στην προέλευση της διαθέσιμης ισχύος από ιδιωτικές γεννήτριες σε ισχύ, προερχόμενη από το ευρύτερο δίκτυο καθώς η τιμή της ισχύος δικτύου στη διάρκεια της νύχτας 22:00 με 5:00, είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με την υπόλοιπη ημέρα. [24]

2.7 Ευελιξία

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ΚΠ είναι ότι είναι ευέλικτα, καθώς αναφέρονται σε εγκαταστάσεις δομικών μονάδων μικρής κλίμακας, ανεξάρτητες από τη θέση εγκατάστασης τους με μικρές επενδυτικές απαιτήσεις και μικρό χρονικό διάστημα εργασιών υλοποίησης του. Για αυτούς τους λόγους διαθέτουν μεγαλύτερη ευελιξία ισχύος σε σχέση με μεγαλύτερες εγκαταστάσεις παραγωγής. Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ΚΠ, την καθιστούν ιδανική λύση σε περιπτώσεις όπου η ανάγκη επέκτασης της ισχύος του δικτύου με τον συμβατικό τρόπο θα επέφερε υπέρογκο κόστος με χρονοβόρες διαδικασίες μελετών και αδειοδοτήσεων (π.χ. τροφοδοσία απομονωμένων περιοχών όπως νησιά ή δυσπρόσιτες ορεινές περιοχές).

2.8 Περιβαλλοντικές επιδράσεις

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην ΚΠ συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές ρύπων. Η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ (άνεμος, ήλιος, βιομάζα, κύματα, παλίρροια), είναι ιδιαίτερα ελκυστική από περιβαλλοντικής πλευράς, και σε πολλές περιπτώσεις η ΚΠ προτιμάται με σκοπό την εκπλήρωση πολλών θεσμικών πλαισίων τα οποία επιβάλλονται σε χώρες στην Ευρώπη αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Με βασικό άξονα την αυστηροποίηση των περιβαλλοντικών προτύπων και την ανάγκη στροφής από τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής σε νέες, η ΚΠ αποτελεί ένα πιο βιώσιμο τρόπο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών στη σύγχρονη εποχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

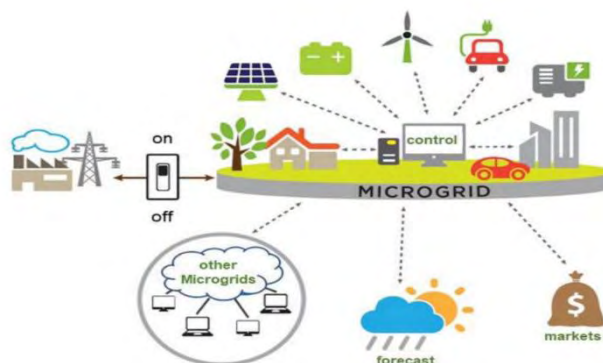
3.1 Ευφύες Δίκτυο και Μικροδίκτυο

Το **Ευφύες Δίκτυο (ΕΔ)**, μπορεί να οριστεί ως μία υποδομή παροχής ΗΕ η οποία υποστηρίζεται από τις τελευταίες τεχνολογίες των επικοινωνιών, των πληροφοριακών συστημάτων και της ηλεκτρονικής. Με τη χρήση αυτών των τεχνολογιών, επιτυγχάνεται ο στόχος του ευφυούς δικτύου, που είναι η ανταπόκριση στις μελλοντικές απαιτήσεις σε κατανάλωση ΗΕ [23]. Η ανάπτυξη του ΕΔ, θα εξασφαλίσει την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του ηλεκτρικού συστήματος μέσω της ανταλλαγής των πληροφοριών, της ΚΠ και της αποθήκευσης της ΗΕ. Η ΚΠ, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο δύο αποτελεί μέρος του ΕΔ. Όσο τα ΕΔ εξελίσσονται σε επίπεδο επικοινωνίας και εποπτείας των συστημάτων ΗΕ, τόσο η ΚΠ θα αναπτύσσεται και θα προσφέρει όφελος στα δίκτυα ΗΕ. Η ανάπτυξη της ΚΠ, προάγει την δημιουργία ενός νέου όρου που καλείται **Μικροδίκτυο** και αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο του ΕΔ. Μικροδίκτυο καλείται ένα σύνολο από ηλεκτρογεννήτριες, αποθηκευτικές διατάξεις και ηλεκτρικά φορτία. Το μικροδίκτυο, μπορεί είτε να λειτουργεί συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο είτε εντελώς αυτόνομο και να εξυπηρετεί το φορτίο του χωρίς καμία άλλη στήριξη από το υπόλοιπο δίκτυο. [25],[26]

Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του μικροδικτύου είναι τα εξής:

- Περιέχει πηγές και φορτία υπό τοπικό ή κεντρικό έλεγχο
- Λειτουργεί συνδεδεμένο και απομονωμένο από το κυρίως δίκτυο

Η Εικόνα 3.1, παρουσιάζει μία τυπική διάταξη ενός μικροδικτύου, όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Εικόνα 3.1 Γενική Διάταξη Μικροδικτύου

3.2 Δομικά Χαρακτηριστικά Μικροδίκτυων

3.2.1 Ενεργειακοί Πόροι

Οι ενεργειακοί πόροι που απαρτίζουν ένα μικροδίκτυο ποικίλουν. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα όμως όλων, ανεξάρτητα από τον τύπο καυσίμου ή της πηγής που χρησιμοποιούν ως πρωτογενή πόρο, είναι ότι αποτελούν μικροπαραγωγές και συνδέονται στο δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης. Οι συνηθέστερες τεχνολογίες διαχείρισης ενεργειακών πόρων που συναντώνται στα μικροδίκτυα αναλύονται στη συνέχεια.

3.2.1.1 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Οι φωτοβολταϊκές (Φ/Β) συστοιχίες αποτελούν μια εναλλακτική λύση στην παραγωγή ενέργειας, που χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία και χαμηλό κόστος, ειδικά σε περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια. Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές Φ/Β εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί σε ολόκληρο τον κόσμο, όπως ηλιακά πάρκα που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, κτίρια αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα με το δίκτυο, ηλιακά μικροδίκτυα, ηλιακά μικροσυστήματα κλπ. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια) φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή «κυψελών»), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Μία τέτοια διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 3.2.

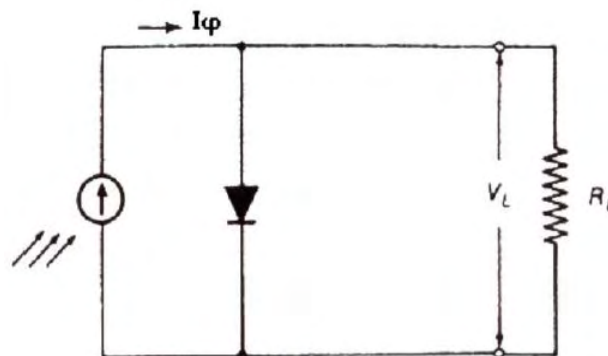


Εικόνα 3.2 Παρουσίαση Φ/Β συστοιχίας

Τα πάνελ αυτά, εκμεταλλεύονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και παράγουν ΗΕ. Βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το

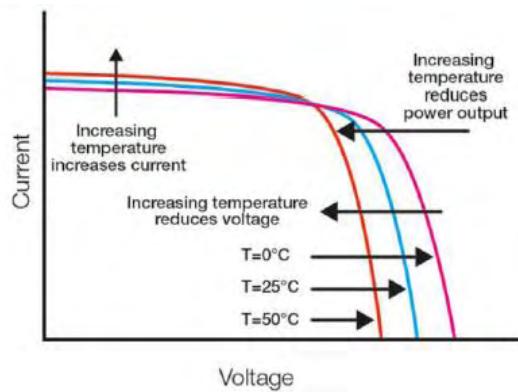
φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανεμημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων: δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μια οπή στη ζώνη σθένους. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και τη συγκέντρωσή τους πάνω στις δύο όψεις του πάνελ (δηλαδή τη φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους). Συγκεκριμένα επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. [27]

Η τιμή της ενέργειας της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία υπολογίζεται από τον τύπο $E = h \cdot \nu \leq Eg$. Όπου $Eg = Ecb - Evt$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, Ecb είναι ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και Evt η κορυφή ζώνης σθένους. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει ένα ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας με τον τρόπο αυτό ωφέλιμη ισχύ. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της Εικόνας 3.3, αποτελεί την απλοποιημένη διάταξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αποτελείται από μία πηγή ρεύματος η οποία ελέγχεται από μία δίοδο.

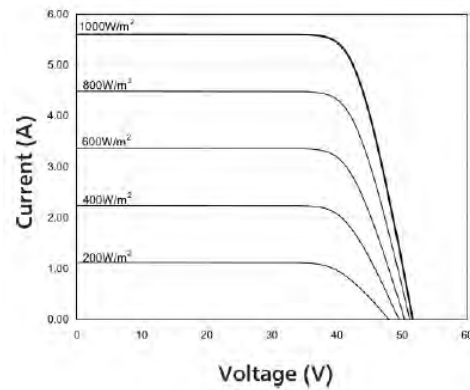


Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η λειτουργία και η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται τόσο από την ηλιακή ακτινοβολία όσο και από τη θερμοκρασία. Οι Εικόνες 3.4 και 3.5, μέσω των καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) παρουσιάζουν την απόκριση των στοιχείων στις μεταβολές που αναφέρθηκαν. [26]



Εικόνα 3.4 Επίδραση Θερμοκρασίας



Εικόνα 3.5 Επίδραση Ακτινοβολίας

Η ΗΕ που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο οι εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών φέρουν μετατροπέα (inverter) που σκοπό έχει να μετατρέψει την έξοδο συνεχούς τάσης της συστοιχίας σε εναλλασσόμενη. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διαφέρουν από τους αντιστροφείς των άλλων ηλεκτρονικών εφαρμογών καθώς μπορούν να ελέγχουν την έξοδο των φωτοβολταϊκών υποπεδίων, προκειμένου να δημιουργούν συνθήκες μέγιστης απόδοσης. [28]

Τα κύρια μεγέθη των αντιστροφέων είναι:

- η ονομαστική ισχύς (PNOM)
- η ονομαστική τάση εισόδου (VDC)
- η ονομαστική τάση εξόδου (VRMS)
- η συχνότητα εξόδου (Hz)
- αριθμός των φάσεων

Όσον αφορά την διακύμανση της ονομαστικής ισχύς των εγκαταστάσεων, εξαρτάται από το φορτίο που έχουν να καλύψουν. Οι Φ/Β συστοιχίες της ΚΠ χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- Σε αυτές που υποστηρίζουν μόνο παράγωγή ΗΕ και έχουν συνήθως ονομαστική ισχύ άνω των 20 kW.

- Σε αυτές που υποστηρίζουν είναι παραγωγή και κατανάλωση, εντοπίζονται στις στέγες των οικιακών καταναλωτών και έχουν ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 10 kW.

Μια επιπλέον μεταξύ τους διαφορά είναι ότι τα πρώτα συνδέονται συνήθως στο δίκτυο μέσης τάσης (MT-20 kV στην Ελλάδα) μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης XT/MT ενώ, τα δεύτερα συνδέονται στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (400 V πολική ή 230 V φασική τάση). Στη δεύτερη κατηγορία είναι προφανές ότι η τυχαιότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο εξαρτάται από δυο αστάθμητους παράγοντες: τις καιρικές συνθήκες και την οικιακή κατανάλωση σε κάθε χρονική στιγμή. Για την πρώτη κατηγορία η κυριότερη αιτία διακύμανσης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς το δίκτυο είναι οι καιρικές συνθήκες. Και στις δυο περιπτώσεις, η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένες, κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος πρέπει να τονιστεί η έλλειψη ευελιξίας-δυνατότητας ρύθμισης της ενεργής ισχύος εξόδου των Φ/Β πάρκων ή της παραγωγής άεργου ισχύος, με τις σημερινές υποδομές και κανονισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί μέχρι σήμερα σκοπός των Φ/Β πάρκων ήταν η έγχυση της μεγίστης ενεργού ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για να γίνει δυνατή η ρύθμιση της ενεργού ισχύος εξόδου ή η παραγωγή άεργου ισχύος, πρέπει να γίνουν αλλαγές στους κανονισμούς και στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος των εγκαταστάσεων. [28]

3.2.1.2 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μία μη συνηθισμένη εγκατάσταση σε μικροδίκτυα. Συνήθως η ονομαστική τους ισχύς ανέρχεται σε μερικά MW καθώς πολλές μαζί δημιουργούν αιολικά πάρκα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που οι ανεμογεννήτριες συναντιούνται περισσότερο στο επίπεδο μεταφοράς και όχι σε αυτό της διανομής που εντάσσονται τα μικροδίκτυα (σκοπός των αιολικών πάρκων είναι η έγχυση της μεγίστης ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο). Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια με τα κίνητρα που δίνονται σε ιδιώτες, τόσο στην Ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, μικρές ανεμογεννήτριες χαμηλότερης ισχύος εγκαθίστανται και στα μικροδίκτυα (εγκατεστημένη ισχύ < 60 kW).

Αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας τους, οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ενός αεροκινητήρα και στη συνέχεια σε

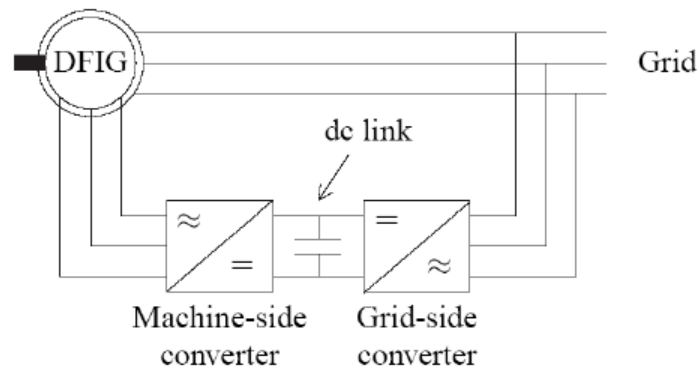
ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Ο προσδιορισμός της θέσης των ανεμογεννητριών αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης στην εγκατάστασή τους. Η θέση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης μέσω της βέλτιστης εκμετάλλευσης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια παρόλο που είναι πολύ γρήγορα αναπτυσσόμενη μορφή ΑΠΕ, χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα στην ενσωμάτωση της στο δίκτυο ισχύος. Κατασκευαστικά, αποτελούνται από μία στήλη κάθετη προς το έδαφος με μία τουρμπίνα στην κορυφή τους και μπορεί να περιστρέφονται πάνω σε οριζόντιο ή κάθετο άξονα. Η πρώτη περίπτωση είναι περισσότερο διαδεδομένη και περιλαμβάνει συνήθως αποσπώμενα πτερύγια. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα παράγουν λιγότερη ενέργεια εγκαθίστανται σπανιότερα.

Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μπορούν να χωριστούν σε τρία βασικά εξαρτήματα:

- Ο ρότορας, ο οποίος αποτελεί περίπου το 20% του κόστους της εγκατάστασης, περιλαμβάνει τις λεπίδες οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας κινητική.
- Η κυρίως ανεμογεννήτρια, η οποία αποτελεί περίπου το 34% του κόστους. Περιλαμβάνει τη γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, και (συνήθως) το κιβώτιο ταχυτήτων, τη διευθυντήρια οδηγό ταχύτητας ή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη μετάδοση, οι οποίες μετατρέπουν τη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής σε υψηλή, ώστε να παραχθεί ενέργεια.
- Ο πύργος υποστήριξης, ο οποίος αποτελεί περίπου το 15% του κόστους και περιλαμβάνει τον πύργο και το μηχανισμό εκτροπής στροφών.

Ένας ιδιαίτερα διαδεδομένος τύπος ανεμογεννήτριας είναι η Α/Γ με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας. Η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (Double Feed Induction Generator - DFIG) είναι γεννήτρια δακτυλοφόρου δρομέα στην οποία μεταφέρεται ισχύς τόσο από το κύκλωμα τροφοδοσίας του στάτη όσο και από το κύκλωμα τροφοδοσίας του δρομέα. Ο στάτης της γεννήτριας, είναι απευθείας συνδεδεμένος στο ηλεκτρικό δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται με αυτό μέσω ενός μετατροπέα (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 Μοντέλο Επαγωγικής Γεννήτριας Διπλής Τροφοδοσίας (DFIG)

Κύρια λειτουργία του αντιστροφέα που συνδέεται στο δίκτυο είναι η διατήρηση σταθερής τάσης στη σύνδεση (dc-link). Στο σημείο αυτό, συνδέεται ένας πυκνωτής με σκοπό να αποφευχθούν οι ανεπιθύμητες διακυμάνσεις της DC τάσης. Από την άλλη πλευρά, κύρια λειτουργία του αντιστροφέα που συνδέεται στον δρομέα, είναι η τροφοδοσία του δρομέα με ρεύμα κατάλληλου πλάτους και συχνότητας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ακριβής έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας της γεννήτριας. Το σύστημα αυτό, κυριαρχεί στις εγκαταστάσεις των Α/Γ, καθώς ο μετατροπέας χειρίζεται μόλις 20 - 30% της συνολικής ισχύος. Επομένως, οι απώλειες στον μετατροπέα είναι αισθητά μειωμένες σε σχέση με συστήματα που ο μετατροπέας χειρίζεται τη συνολική ισχύ. Πέραν τούτου, η διάταξη παρουσιάζει και επιπλέον πλεονεκτήματα. Έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την άεργο ισχύ και να αποσυνδέει τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Επίσης, η γεννήτρια δεν είναι απαραίτητο να μαγνητιστεί από το δίκτυο καθώς έχει τη δυνατότητα να μαγνητισμού και από το κύκλωμα του δρομέα. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος η οποία μπορεί να μοιραστεί στον στάτη από τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

Σε περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις τάσης, η DFIG μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσοστό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης. Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχυτήτων ($\pm 30\%$), το DFIG αποτελεί ιδανική λύση. [29] Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος και της παρούσας διπλωματικής εργασίας, του Κεφαλαίου 4.

3.2.1.3 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Οι ΥΗΣ στην Ελλάδα χωρίζονται σε αυτούς που εντοπίζονται σε μεγάλα τεχνητά φράγματα και σε εκείνους που εντοπίζονται σε σημεία όπου μπορεί να εξασφαλιστεί μεγάλη υψομετρική διαφορά υδατόπτωσης ($> 70 \text{ m}$). Η μεγαλύτερη διαφορά τους είναι ότι οι πρώτοι αποτελούν συνήθως έργα εθνικής εμβέλειας και μεγάλης ισχύος ($> 100 \text{ MW}$), ενώ οι δεύτεροι είναι μικροί σταθμοί με ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 5 MW και είναι συνήθως ιδιωτικών συμφερόντων. Οι μονάδες που εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον είναι οι μικρές μονάδες με ισχύ μέχρι 5 MW , καθώς έχουν συγκεκριμένη γεωγραφική διασπορά (ορεινοί όγκοι, αρά και αραιοκατοικημένες περιοχές) και παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση. Αυτοί οι ΥΗΣ συνδέονται πάντα στο δίκτυο της ΜΤ (20 kV).

Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τεχνολογίες αποθήκευσης είναι και σε αυτή την περίπτωση ασύμφορη, λόγω του μεγάλου επενδυτικού κόστους. Παρόλα αυτά, οι Υ/Η σταθμοί αποτελούν φυσικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό το πλεονέκτημα τους καθιστά πιο ευέλικτους σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ΚΠ που χρησιμοποιούν ΑΠΕ, καθώς μειώνουν την στοχαστικότητα και μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα σε μη αναμενόμενες αυξήσεις της ζήτησης. Τέλος, οι μικροί ΥΗΣ έχουν δυνατότητες ρύθμισης της ισχύος εξόδου ή παραγωγής άεργης ισχύος, λόγω των συγχρόνων γεννητριών που περιλαμβάνουν. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός και των ΥΗΣ είναι η έγχυση της μέγιστης ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

3.2.1.4 Ηλεκτρικά Οχήματα

Ένα Ηλεκτρικό όχημα (ΗΟ) χρησιμοποιεί ηλεκτροκινητήρες για να τεθεί σε κίνηση. Καθώς τα ορυκτά καύσιμα ελαττώνονται και η διακύμανση της τιμής τους είναι αβέβαιη, τα ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα αποκτούν μεγαλύτερη ισχύ στην αγορά. Η ευρεία χρήση και εκμετάλλευση των ΗΟ έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη δύο εννοιών, της έννοιας Δίκτυο προς Όχημα (Grid to Vehicle -- G2V) και Όχημα προς Δίκτυο (Vehicle to Grid -- V2G).

Στο G2V, τα ηλεκτρικά οχήματα τροφοδοτούνται από το δίκτυο. Έτσι δημιουργείται ένα σημαντικό νέο φορτίο στα δίκτυα διανομής. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Υπό συνθήκες υψηλής ζήτησης ενέργειας μπορούν να προκύψουν σοβαρά προβλήματα από την ακανόνιστη ζήτηση για φόρτιση. Μία

λύση για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων και την ελάφρυνση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο είναι η βελτιστοποίηση του προφίλ φόρτισης. Με αλλά λογία χρειάζεται να κρατήσουμε τη μέγιστη ζήτηση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα, λαμβάνοντας υπ' όψη την επιπλέον κατανάλωση ενέργειας από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο V2G, τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν ένα νέο αποθηκευτικό μέσο παρέχοντας ΗΕ. Τα ΗΟ, μπορούν να επικοινωνούν με το δίκτυο, ώστε να παρέχουν ΗΕ σε αυτό, όταν είναι ακίνητα και συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Το G2V και το V2G δεν είναι εντελώς διακριτές εννοιές στο πλαίσιο αναφοράς του ΕΔ. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρικά οχήματα χρειάζεται να παρέχουν ενέργεια για να καλυφθούν έκτακτες ανάγκες αλλά και φορτίζουν όταν η ζήτηση για ΗΕ από το δίκτυο είναι μειωμένη. Έτσι προκύπτει ένα μεγάλο ζήτημα, το πως θα οριστούν οι κατάλληλες ώρες φόρτισης και αποφόρτισης με στόχο την αύξηση της απόδοσης του δικτύου. [30]

3.2.2 Ενεργά Φορτία

Τα ενεργά φορτία, είναι τα φορτία της πραγματικής κατανάλωσης ΗΕ κάθε χρονική στιγμή. Τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής στις απαιτήσεις της ζήτησης χρησιμοποιώντας ειδικούς μηχανισμούς που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 (όπως η νησιδοποίηση). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να απορρίπτουν ή να εξυπηρετούν φορτία με σκοπό την ευστάθεια του συστήματος στα πλαίσια της προσφοράς και της ζήτησης. Ειδικότερα για ένα μικροδίκτυο, ο έλεγχος των φορτιών είναι ακόμη πιο σημαντικός, όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε λειτουργία νησιδοποίησης και πρέπει να ελεγχθεί τοπικά η τάση και η συχνότητα του απομονωμένου συστήματος.

Η αξιοπιστία του μικροδικτύου κρίνεται και ως προς την κάλυψη της ζήτησης και τη δυνατότητα συνεχούς και αδιάλειπτης ικανοποίησης των αναγκών κατανάλωσης. Κατά αυτό τον τρόπο η παραγωγή ΗΕ οφείλει όχι μόνο να είναι ίση με την απαιτούμενη αλλά να διαθέτει και εφεδρεία, στην δυνατότητα παραγωγής, για την κάλυψη τυχών διαταραχών. Το

εύρος της ζήτησης φορτίου συνεχώς μεταβάλλεται και εκφράζεται μέσω της γραφικής παράστασης της ζήτησης ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο (καμπύλη φορτίου).

Η καμπύλη φορτίου αποτελείται από το φορτίο βάσης (Pb), που αφορά το ελάχιστο φορτίο ζήτησης και είναι σταθερό κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Η μεγαλύτερη τιμή φορτίου κατά τη διάρκεια του 24-ώρου ονομάζεται φορτίο αιχμής ή μέγιστη ζήτηση (peak load, Pmax), διαρκεί λίγο χρόνο και καλύπτεται από μικρές μονάδες παραγωγής με ταχεία ανάληψη φορτίου ή από τα μέσα αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένα στο μικροδίκτυο.

3.2.3 Αποθηκευτικά Μέσα

Όσον αφορά την αξιοπιστία και το κόστος εγκατάστασης των μικροδικτύων, οι συστοιχίες μπαταριών αποτελούν σημαντικά στοιχεία. Παρόλο που μια συστοιχία μπαταριών αντιπροσωπεύει μονό το 8% του αρχικού κόστους ενός νεοσύστατου συστήματος, αντιπροσωπεύει το 23% του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς απαιτείται αντικατάσταση κατά τη χρονική διάρκεια λειτουργίας του (20 έτη). Οι μπαταριές αποθήκευσης παρέχουν στο μικροδίκτυο πλεονεκτήματα και δίνουν λύσεις στην αδιάλειπτη λειτουργία του.

Η στοχαστικότητα που διακρίνει συνήθως τις πηγές που το συνθέτουν, καλύπτεται από τα συστήματα αποθήκευσης. Επιπλέον μέσω αυτών, τους δίνεται η δυνατότητα απόκρισης σε στιγμιαία φορτία αιχμής και σταθεροποιούν την τάση του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο τα αποθηκευτικά μέσα, συμβάλλουν στην τόνωση της αξιοπιστίας ενός μικροδικτύου.

Τα συστήματα παραγωγής έχουν υψηλές απαιτήσεις από τις μπαταριές αποθήκευσης που τα απαρτίζουν. Κάποιες από αυτές είναι το χαμηλό κόστος συντήρησης, η ικανότητα να ανταπεξέρχονται στις εκτεταμένες αποφορτίσεις και υπερφορτίσεις, η υψηλή απόδοση φόρτισης και η μεγάλη διάρκεια ζωής.

Παλαιότεροι τρόποι λειτουργίας χρησιμοποιούσαν τα όρια της τάσης με σκοπό την προστασία των μπαταριών από την αποφόρτιση και την υπερφόρτιση. Πλέον, ο τρόπος λειτουργίας τους μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα η διαχείριση τους γίνεται σε συνδυασμό

με την εξασφάλιση της προστασίας τους. Με την αύξηση της ζήτησης των τελευταίων ετών, έχουν γίνει πολλές έρευνες με σκοπό τη βελτίωση του καθορισμού των επιπέδων φόρτισης.

Όσον αφορά τις συνθήκες λειτουργίας τους καθορίζονται ανάλογα με το πεδίο που εφαρμόζονται (π.χ. Φ/Β εφαρμογές, ΗΟ). Τα ΗΟ, όπως αναλύθηκε, αποτελούν τον επικρατέστερο τρόπο ενσωμάτωσης μεγάλης ποσότητας διανεμημένης αποθήκευσης ενέργειας στα μικροδίκτυα του δικτύου διανομής. Έτσι λοιπόν, ένας δεδομένος τρόπος υπολογισμού του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας θα είναι καταλληλότερος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απ' ό,τι για κάποια άλλη. Προκειμένου να μετρηθεί το επίπεδο φόρτισης, χρειάζεται η γνώση της φύσης της εφαρμογής. [31]

Ένα πλήρες επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας επιτυγχάνεται όταν (σύμφωνα με το DIN43539) το ρεύμα της μπαταρίας σε συνθήκες σταθερής τάσης και θερμοκρασίας διατηρείται αμετάβλητο για 2 ώρες. Ο ορισμός αυτός δεν περιλαμβάνει το πρόβλημα της φθοράς της μπαταρίας που επιφέρει ο χρόνος ή το επίπεδο υγείας της μπαταρίας. Στην πραγματικότητα, η χωρητικότητα μιας μπαταρίας ενδέχεται να αλλάξει στη διάρκεια του κύκλου ζωής της εξαιτίας διάφορων προβλημάτων (μείωση της ικανότητας γόμωσης του ενεργού υλικού, αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη ή διάβρωση των αγωγών ρεύματος).

Οι δυο τύποι μπαταριών που εφαρμόζονται σε μικροδίκτυα (κυρίως σε ΦΒ συστήματα) είναι οι μπαταρίες μόλυβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου εξαιτίας του υψηλότερου κόστους, της χαμηλότερης ενεργειακής απόδοσης και της περιορισμένης θερμοκρασιακής λειτουργίας (40 ° C), συναντώνται σπανιότερα. Από την άλλη πλευρά οι επικρατέστερες, μπαταρίες μολύβδου-οξέος προτιμώνται εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας ζωής, τις περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν τις βαθιές αποφορτίσεις χωρίς φθορές. [32]

Πριν αναφερθούν οι μέθοδοι καθορισμού επιπέδου φόρτισης, πρέπει να τονιστεί ότι το σφάλμα που εισάγεται από όλες τις μεθόδους καθιστά απαραίτητη τη χρήση ελεγκτή φόρτισης σε σειρά με τη μπαταρία, για να αποφευχθεί υπερφόρτιση ή πλήρης εκφόρτωση της μπαταρίας.

Επίσης, η μέθοδος που εφαρμόζεται στην πράξη σε ένα μικροδίκτυο, πρέπει να πληροί κάποιες επιπλέον προϋποθέσεις:

Πρέπει να είναι

- Αξιόπιστη
- Οικονομικά συμφέρουσα
- Απλή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη

Έχοντας υπόψη λοιπόν τα προαναφερθέντα κριτήρια, αναλύονται οι λόγοι που οι επικρατέστερες μέθοδοι ελέγχων μπαταριών σήμερα δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των μικροδικτύων.

- **Η μέθοδος μέτρησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη** (για σταθερούς συσσωρευτές με υγρό ηλεκτρολύτη)
Είναι αντιοικονομική, αφού θα πρέπει να εγκατασταθεί καινούριος εξοπλισμός μέτρησης χημικών στοιχείων και μάλιστα για το σύνολο των μπαταριών του μικροδικτύου. Αυτό σημαίνει ότι δεν αποτελεί απλή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη λύση.
- **Η μέθοδος ανοικτού κυκλώματος**
Απαιτεί τη διακοπή του κυκλώματος για να εφαρμοστεί. που είναι ανεπίτρεπτο σε μικροδίκτυα.
- **Η μέθοδος Coup de Fouet**
Απαιτεί να προηγηθεί πλήρης φόρτιση μπαταριών, το οποίο δεν συμβαίνει ποτέ σε πραγματικά συστήματα.
- **Τα Νευρωσικά Δίκτυα**
Απαιτούν αξιόπιστα, και αντιπροσωπευτικά δεδομένα φορτίσεων και αποφορτίσεων της μπαταρίας. Επομένως γίνεται σαφές, ότι σε μια συστοιχία μπαταριών θα προηγηθούν εκτενείς δοκιμές φόρτισης και αποφόρτισης, αρά παραβιάζεται το αντίστοιχο κριτήριο που τέθηκε στην αρχικά. Επίσης, τα νευρωσικά δίκτυα εισάγουν σφάλματα κατά τη λειτουργία τους.
- **Τα πηνία σύρματος**
Αποτελεί αντιοικονομική και αρκετά περίπλοκη μέθοδο.

Συνεπώς οι μέθοδοι που κρίθηκαν ότι μπορεί να εφαρμοστούν για εφαρμογές μικροδικτύων και πιθανότατα να ενσωματωθούν στα συστήματα ελέγχου των μικροδικτύων του μέλλοντος είναι οι ακόλουθες:

- **Μέθοδος υπολογισμού Ah**

Η μέθοδος υπολογισμού του αριθμού των Ah, παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις σύντομες χρονικά εφαρμογές, ιδίως στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες φόρτισης της μπαταρίας. Βέβαια στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές η συχνότητα φόρτισης και εκφόρτωσης είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης παρουσιάζει δυο σημαντικά προβλήματα: Απαιτεί μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων και απαιτεί αναβαθμονόμηση του αρχικού συστήματος..

- **Γραμμικό μοντέλο**

Το γραμμικό μοντέλο, το οποίο εφαρμόζεται σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα φαίνεται αρκετά αξιόπιστο και απλό, κατάλληλο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και φυσικά σχετικά δοκιμασμένο.

- **Φίλτρο Kalman**

Οι υπολογισμοί για να εφαρμοστεί το φίλτρο Kalman είναι πολύπλοκοι και απαιτούν κάποια αρχικά δεδομένα. (όπως την τάση ανοικτού κυκλώματος ή την τάση μετά από 3 ώρες ανάπαυση της μπαταρίας). Σε περίπτωση που τα στοιχεία αυτά δεν παρέχονται, χρειάζεται να υπολογιστούν. Η αξιοπιστία όμως της μεθόδου κυριαρχεί έναντι των υπολοίπων. [32]

3.3 Επίδραση των μικροδικτύων στο κυρίως δίκτυο

Πρακτικά, τα μικροδίκτυα αποτελούν μικρογραφίες του κύριου δικτύου και συνδράμουν στην ΚΠ, δίνοντας σε απομονωμένους καταναλωτές την πρόσβαση σε αδιάλειπτη, τοπική ηλεκτρική παροχή. Τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Τοπική παραγωγή ισχύος και θερμότητας μεσώ των εφαρμογών συμπαραγωγής, με αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.
- Ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ΗΕ
- Ενισχυμένη αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα του συστήματος ενέργειας
- Δραστική μείωση των απωλειών μεταφοράς ΗΕ εξαιτίας της τοπικής παραγωγής
- Δυνατότητα ελέγχου τάσης και ισχύος του δικτύου
- Αποτροπή της κατάρρευσης σε περιόδους αιχμής φορτιού, μεσώ της μείωσης του φορτιού του δικτύου
- Οικονομικά οφέλη για τους χρήστες
- Αξιοποίηση φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)
- Σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂
- Αποφυγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων για εγκαταστάσεις. [33]

Όλα τα οφέλη που αναφέρθηκαν, μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο με τη σωστή ένταξη και εποπτεία των μικροδικτύων στα υφιστάμενα δίκτυα. Γι' αυτό τον λόγο, οι μελέτες λειτουργίας τους πριν την εγκατάσταση είναι απαραίτητες. Οι μελέτες αυτές θα πρέπει να γίνονται τόσο για την κανονική λειτουργία τους όσο και για τη συμπεριφορά τους σε μη φυσιολογικές περιπτώσεις (βλάβες, διαταραχές).

3.4 Θεωρητική Ανάλυση Σφαλμάτων δικτύου

3.4.1 Εισαγωγή στα Βραχυκυκλώματα

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60909, ως βραχυκύκλωμα ορίζεται η τυχαία ή ηθελημένη αγώγιμη επαφή δυο ή και περισσότερων σημείων ενός κυκλώματος, τα οποία σε ομαλή λειτουργία βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά.

Η συνθέτη αντίσταση του αγώγιμου δρόμου μπορεί να κυμαίνεται από μηδενική ή σχεδόν μηδενική τιμή (βραχυκύκλωμα) έως τιμές που προσεγγίζουν το άπειρο (διακοπή). Αντί του ορού βραχυκύκλωμα χρησιμοποιείται πολλές φορές ο όρος σφάλμα, αν και περιλαμβάνει και αλλού είδους διαταραχές από την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. [34] Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν μεταβατικά φαινόμενα και θεωρούνται ηλεκτρικής φύσεως και δυναμικής μορφής. Με την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος δημιουργείται απότομη μεταβολή της κατάστασης του συστήματος, με στιγμιαίο μηδενισμό ή βύθιση της τάσης, σε διαφορετικά επίπεδα στο κάθε ζυγό, σε αναλογία με τη θέση που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα.

Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της εξερχομένης ισχύος της γεννήτριας, ενώ η μηχανική ισχύς των στροβίλων παραμένει σταθερή. Άρα η ευστάθεια του συστήματος επηρεάζεται μέσω της πλεονάζουσας κινητήριας ισχύος και της επερχόμενης επιτάχυνσης της μηχανής. Τελικά η ένταση του ρεύματος αυξάνεται (ρεύμα βραχυκύκλωσης), και αν οι διακοπτικοί μηχανισμοί δεν λειτουργήσουν άμεσα ενδέχεται να προκαλέσουν μόνιμες βλάβες στα στοιχεία του συστήματος (κυρίως στις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές).

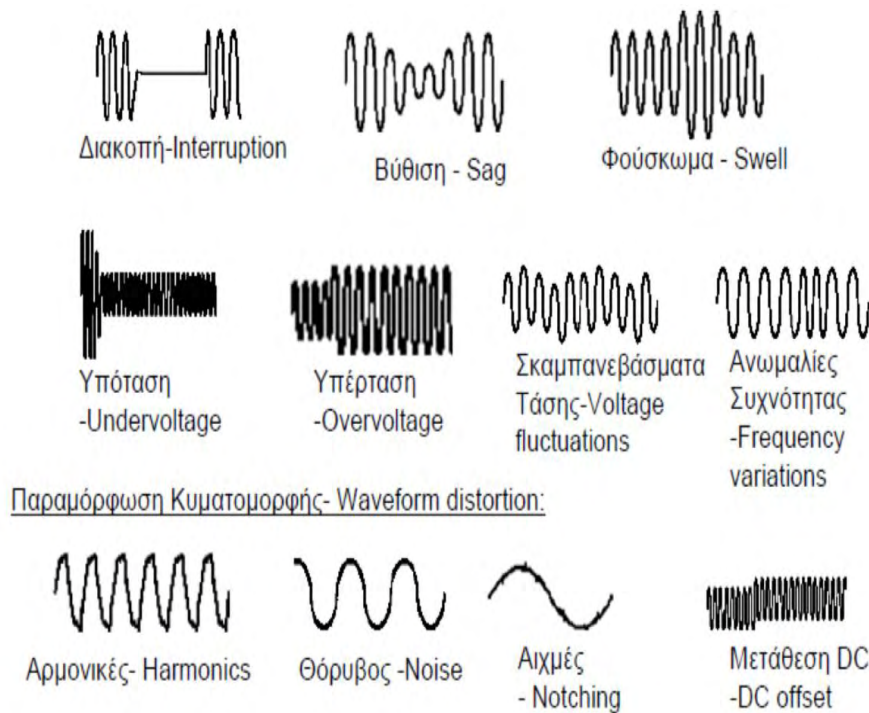
Οι επιπτώσεις του βραχυκυκλώματος ενδέχεται να προκαλέσουν τα εξής:

- Διακοπή της παροχής ισχύος
- Δυναμική αστάθεια
- Απώλεια συγχρονισμού

Επιπλέον μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των συσκευών του συστήματος ή της μόνωσης των εξαρτημάτων, αλλά και εμφάνιση ανεπιθύμητων μηχανικών και θερμικών τάσεων στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. [35]

3.4.2 Ανασκόπηση διαταραχών της ποιότητας ισχύος

Τα προβλήματα της διατάραξης της ποιότητας ισχύος (όπως βυθίσεις τάσης, διακοπές ισχύος, αρμονικές κ.α.) μπορούν να προέλθουν από εξωτερικούς παράγοντες όπως βλάβες ή φθορές γραμμών (ακραία καιρικά φαινόμενα, ανθρώπινα σφάλματα κ.α.) από αστοχία εξοπλισμού (μετασχηματιστών, πυκνωτών, τροφοδοσιών) καθώς και λόγω φορτίων ηλεκτρονικών ισχύος όπως συστήματα αδιάλειπτου παροχής ισχύος (UPS), ελεγχόμενοι κινητήρες, επαγωγικά συστήματα θέρμανσης, θέση σε λειτουργία ή εκτός μεγάλων φορτίων κ.α. Οι διαταραχές αυτές, έχουν επιρροή στις κυματομορφές της τάσης των δικτύων. Οι συνηθέστερες φαίνονται στην Εικόνα 3.7 που ακολουθεί και αναλύονται στη συνέχεια της ενότητας.



Εικόνα 3.7 Κυματομορφές διαταραχών τάσης

Διακοπές Ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η βύθιση τάσης κάτω από 10% θεωρείται διακοπή, με την τάση να μηδενίζεται. Ενώ βάση των διεθνών προτύπων θεωρείται ότι όταν η πτώση τάσης πέσει κάτω από το 1% της ονομαστικής της ξεκινάει ο χρόνος καταγραφής της πτώσης τάσης και χωρίζονται σε μικρής διάρκειας (< 3min) και σε μεγάλης διάρκειας

(>3min) οφειλόμενες σε σφάλματα. Οι διακοπές μεγάλης διάρκειας οφείλονται σε κάποιο σοβαρό σφάλμα, το οποίο δεν καθάρισε μετά την επαναλειτουργία του συστήματος προστασίας και είναι αναγκαία η επιτόπου αποκατάσταση τους. Από την άλλη πλευρά, οι διακοπές μικρής διάρκειας οφείλονται σε σφάλματα τα οποία μετά την λειτουργία των αυτομάτων διακοπών ισχύος το δίκτυο επανέρχεται σε κανονική λειτουργία. Οι τελευταίες τύπου διαταραχές συναντιούνται κυρίως σε δίκτυα διανομής.

Βυθίσεις Τάσης

Η βύθιση τάσης (sag) υφίσταται όταν η rms τάση σε οποιαδήποτε φάση πέσει κάτω από ένα ποσοστό της ονομαστικής της τιμής, ενώ βύθιση κάτω του 10% της ονομαστικής της τιμής θεωρείται διακοπή. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αυτής είναι το μέγεθος και η διάρκεια της βύθισης. Οι κυρίες αιτίες εμφάνισης βύθισης είναι η εκκίνηση κινητήρων ή η απότομη αλλαγή φορτίου (απότομη πτώση, αργή ανάκαμψη & συμμετρική βύθιση), η ενεργοποίηση μετασχηματιστών (απότομη πτώση, αργή ανάκαμψη και ασύμμετρη βύθιση) καθώς και τα βραχυκυκλώματα / σφάλματα (απότομη πτώση, απότομη ανάκαμψη και συμμετρική ή ασύμμετρη βύθιση). Επίλυση αυτών, επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης UPS και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, αλλά και από το δίκτυο μέσω μείωσης της συχνότητας των σφαλμάτων και της διάρκειας των διακοπών. [36],[37]

Υπερτάσεις

Οι υπερτάσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πλάτος τους και την διάρκεια τους. Οι μεταβατικές υπερτάσεις είναι ανεπιθύμητες, ταχείας ή βραχείας διάρκειας διαταραχές που προκαλούν παραμορφώσεις στην τάση και το ρεύμα, ενώ καθίστανται επικίνδυνες για τον εξοπλισμό και τα φορτία των διασυνδεδεμένων ΣΗΕ. Προκαλούνται από κεραυνούς, προβλήματα στη λειτουργία διακοπών ισχύος και σε λοιπά φαινόμενα διακοπής και σφαλμάτων. Παρατηρούνται υπερτάσεις μικρής διάρκειας και μεγάλου πλάτους, πχ. πρόωρη διακοπή ρεύματος από διακόπτες ισχύος πριν το μηδενισμό του ρεύματος και υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας με την χειρίστη περίπτωση αυτών να είναι ίση με την πολική τάση του δικτύου εμφανιζόμενη σε υγιείς φάσεις και διάρκειας όσο το σφάλμα, πχ. μονοφασικό σφάλμα σε αγείωτα δίκτυα.

Διακυμάνσεις Τάσης (voltage fluctuation)

Οι διακυμάνσεις τάσης δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τα φορτία με εξαίρεση το φορτίο φωτισμού, όπου η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού αντιλαμβάνεται την αλλαγή φωτεινότητας, το λεγόμενο «τρεμόπαιγμα» (light-flicker) του φωτός, λόγω αλλαγής φωτεινότητας των λαμπτήρων σε διαφορετικές συχνότητες. Προκαλούνται όταν τα φορτία καταναλώνουν ρεύματα που έχουν σημαντικές αιφνίδιες ή περιοδικές διακυμάνσεις ενώ όταν το ρεύμα καταναλώνεται προκαλεί πρόσθετες μειώσεις τάσεως στο σύστημα με συνέπεια τη διακύμανση της τάσης. Τέτοια φορτία είναι πχ. οι ηλεκτρικοί κλίβανοι, οι κινητήρες κατά την εκκίνηση τους κ.α. Επίλυση αυτών επισέρχεται με την αφαίρεση του προβληματικού φορτίου από το δίκτυο (με εγκατάσταση UPS κ.α.).

Αρμονικές

Οι αρμονικές τάσης ή ρεύματος αφορούν την παραμόρφωση μιας ιδανικής κυματομορφής τάσης ή ρεύματος μέσω αρμονικών ημιτονοειδούς τάσης των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας του συστήματος (50 ή 60Hz). Αποτελούν το αποτέλεσμα του εκσυγχρονισμού των συστημάτων ΗΕ μέσω της χρήσης των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος και προκαλείται κυρίως από τα μη γραμμικά φορτία. Δηλαδή φορτία όπου το ρεύμα έχει διαφορετική κυματομορφή από αυτή της τάσης. Οι αρμονικές που δημιουργούνται μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στα φορτία. [38]

3.4.3 Είδη βραχυκυκλωμάτων

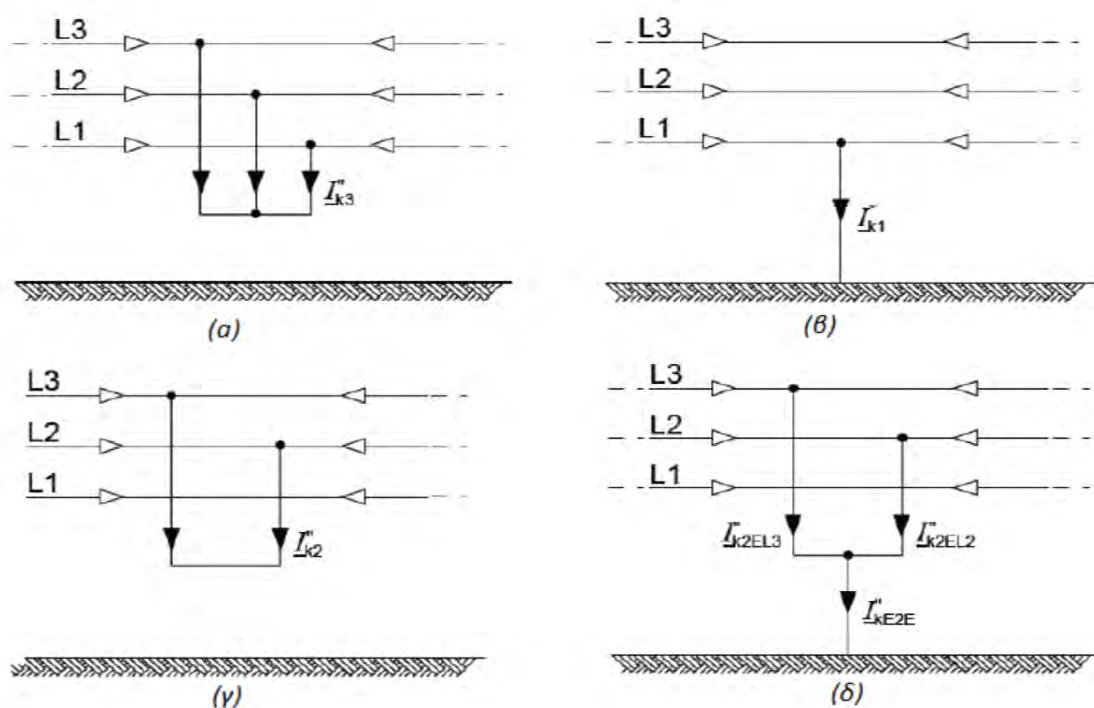
Τα σφάλματα ανάλογα με τα στοιχεία μεταξύ των οποίων αποκαθίσταται αγωγίμος δρόμος διακρίνονται σε μονοφασικά σφάλματα προς γη και πολυφασικά σφάλματα (προς ή χωρίς γη).

Επιπλέον διάκριση σφαλμάτων, η οποία υπαγορεύεται από το επίπεδο φόρτισης του δικτύου κατά την εκδήλωση των μεταβατικών φαινομένων, είναι ο διαχωρισμός με βάση τη συμμετρία. Στα συμμετρικά ανήκουν τα τριφασικά βραχυκυκλώματα (symmetrical three-phase: 3P) όπου υπάρχει επαφή, σε κάποιο σημείο, και των τριών φάσεων μεταξύ τους. Είναι

σπανία αλλά από τα πιο σοβαρά σφάλματα. Η συμμετρικότητα τους όμως επιτρέπει και τον εύκολο υπολογισμό τους, βάση των οποίων βαθμονομείται και επιλέγεται η διακοπτική ικανότητα των διακοπών ισχύος του συστήματος. [39],[40]

Στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα ανήκουν τα εξής:

- Μονοφασικά βραχυκυκλώματα (φάση-γη) (single line-to-ground: SLG) (Εικόνα 3.8 β).
- Διφασικά βραχυκυκλώματα χωρίς γη (line to line: LL) (Εικόνα 3.8 γ).
- Διφασικά βραχυκυκλώματα προς γη (double line-to-ground: LLG) (Εικόνα 3.8 δ).



Εικόνα 3.8 (α) Τριφασικό Βραχυκύκλωμα, (β) Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα με τη γη, (γ) Διφασικό Βραχυκύκλωμα χωρίς τη γη, (δ) Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη.

Ένας επιπλέον διαχωρισμός που γίνεται στα βραχυκυκλώματα, σχετίζεται με τον χρόνο παραμονής τους στα δίκτυα αλλά και με τον τρόπο που εκκαθαρίζονται. Σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά, τα βραχυκυκλώματα διακρίνονται στα εξής:

1. Παροδικά

- Αυτοαποσβενούμενα (εξαλείφονται μόνα τους, ακόμη και αν δεν υπάρξει διακοπή της τάσης του δικτύου)

- Κυρίως παροδικά: εξαλείφονται με στιγμιαία διακοπή της τάσης
- Ημιμόνιμα: εξαλείφονται με διακοπή μεγαλύτερη του ενός δευτερολέπτου
- Σφάλματα με επανένανυση: δεν εξαλείφονται οριστικά αλλά επανεμφανίζονται και η εξάλειψη τους απαιτεί παρέμβαση. Εμπεριέχουν σοβαρούς κίνδυνους για το δίκτυο εξαιτίας των επανεμφανιζόμενων μεταβατικών υπερτάσεων. Η εξάλειψη τους απαιτεί άμεση παρέμβαση καθώς τα φαινόμενα κατά την διακοπή και την επανεμφάνιση τους προκαλούν έντονες διηλεκτρικές καταπονήσεις.

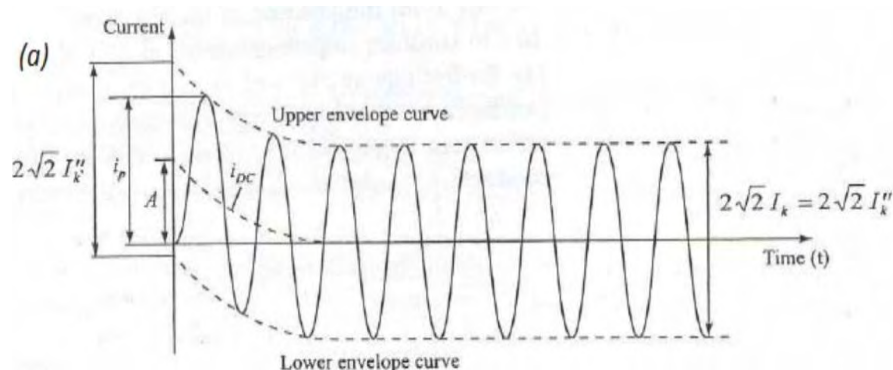
2. Μόνιμα

- Παραμένουν στο δίκτυο, ανεξάρτητα από το αν γίνει διακοπή ή όχι της τάσης και για να εξαλειφθούν απαιτείται παρέμβαση

Τέλος, μια επιπλέον διάκριση των βραχυκυκλωμάτων προκύπτει από την θέση στην οποία δημιουργούνται (ως προς την θέση του πόρου στον οποίο γίνεται η παραγωγή). Τα σφάλματα αυτά διαχωρίζονται στα εξής:

1. Βραχυκύκλωμα μακριά από τον πόρο παραγωγής

Θεωρούνται τα βραχυκυκλώματα όπου μεταξύ γεννήτριας και θέσης σφάλματος η συνθέτη αντίσταση είναι μεγαλύτερη από αυτή της γεννήτριας. Διαφορετικά, όταν το διπλάσιο του ρεύματος λειτουργίας δεν υπερβαίνεται σε καμία μηχανή. Το ρεύμα μετρά το σφάλμα είναι το άθροισμα μιας συνεχούς και μιας εναλλασσόμενης συνιστώσας με την τελευταία να παραμένει σχετικά σταθερή (Εικόνα 3.9).



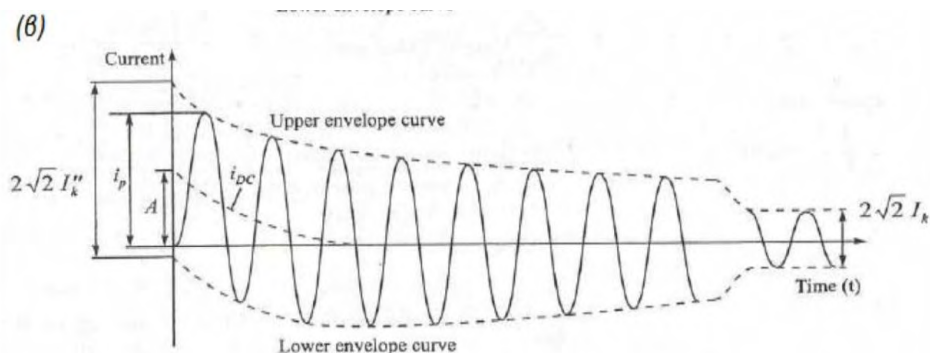
Εικόνα 3.9 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για βραχυκύκλωμα μακριά από τη γεννήτρια ($I_k'' = I_k = I_b$).

2. Βραχυκύκλωμα κοντά στον πόρο παραγωγής

Στην περίπτωση αυτή η συνθέτη αντίσταση μεταξύ γεννήτριας και θέσης σφάλματος είναι μικρότερη από αυτή της γεννήτριας, ή διαφορετικά η τιμή του αρχικού συμμετρικού ρεύματός βραχυκύκλωσης, τουλάχιστον σε μια μηχανή, υπερβαίνει το διπλάσιο του ρεύματός λειτουργίας τη στιγμή που υφίσταται το σφάλμα. Η έντονη μεταβολή της αντίδρασης της γεννήτριας είναι αυτή που ευθύνεται για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, και πραγματοποιείται στις εξής τρεις περιόδους.

- Υπομεταβατική ($10\text{ms} \leq t \leq 20\text{ms}$).
- Μεταβατική ($20\text{ms} \leq t \leq 500\text{ms}$).
- Μόνιμης κατάστασης ($t > 500\text{ms}$).

Σε αντίθεση με το βραχυκύκλωμα μακριά από την γεννήτρια, η τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας του ρεύματός μεταβάλλεται $I_k'' > I_k > I_b$ (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 Ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, για βραχυκύκλωμα κοντά στη γεννήτρια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

Στο δεύτερο τμήμα της διπλωματικής εργασίας συγκεντρώνονται όλες οι πειραματικές προσομοιώσεις και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτές. Θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν περιπτώσεις λειτουργίας μικροδικτύων δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν, τόσο σε επίπεδο κανονικής λειτουργίας όσο και σε επίπεδα διαταραχών.

Αρχικά, γίνεται διαχωρισμός των μικροδικτύων που κατασκευάζονται ως προς το επίπεδο στο οποίο συνδέονται στο δίκτυο (επίπεδο διανομής, επίπεδο μεταφοράς) και εξάγονται συμπεράσματα όπως προκύπτουν από τις γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων. Η αρχιτεκτονική των μικροδικτύων σε κάθε περίπτωση έχει επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο ώστε τόσο η λειτουργία τους όσο και η συμπεριφορά τους στις διάφορες συνθήκες που υπόκεινται να είναι ρεαλιστική. [41]

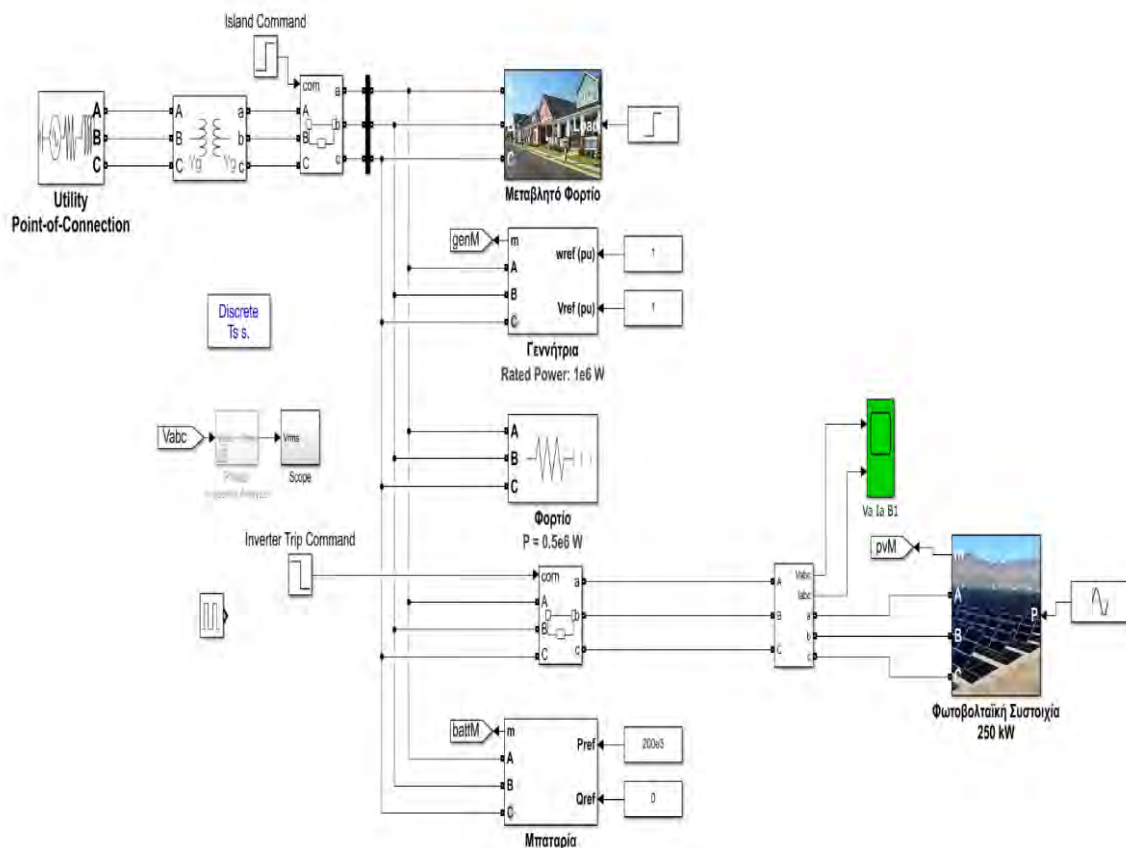
4.1 Εισαγωγή στις Πειραματικές Προσομοιώσεις

Στο Κεφάλαιο αυτό, θα μελετηθεί η επίδραση της ΚΠ τόσο στο δίκτυο διανομής όσο και στο δίκτυο μεταφοράς. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο τρία, στο επίπεδο μεταφοράς επειδή περιλαμβάνονται μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής τα ρεύματα των βραχυκυκλωμάτων είναι μεγαλύτερα, και κατ' επέκταση προκαλούν μεγαλύτερες επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, στο δίκτυο διανομής η επίδραση τους είναι μικρότερη. Μέσα από τη μελέτη των σεναρίων λειτουργίας των μικροδικτύων γίνεται προσπάθεια να αποδειχθεί τόσο αυτή η θεωρητική υπόθεση, όσο και άλλες δυσλειτουργίες που θα προκύψουν από τα πειραματικά δεδομένα, σε ιδανικές και μη συνθήκες λειτουργίας.

Αρχικά θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικές διατάξεις που ενσωματώνουν κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους. Στη συνέχεια θα προσομοιωθεί το κάθε σενάριο ξεχωριστά και τέλος θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της λειτουργίας τους υπό μη-συμβατικές συνθήκες (πχ. σφάλματα). Όλες οι προσομοιώσεις των πειραματικών δεδομένων έχουν γίνει στο περιβάλλον MATLAB / SIMULINK και παρατίθενται τα γραφικά δεδομένα όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

4.2 Σενάριο λειτουργίας Πρώτο: Μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο επίπεδο διανομής με ενσωματωμένα Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Στην Εικόνα 4.1, παρουσιάζεται η συνολική πειραματική διάταξη του πρώτου σεναρίου, όπως σχεδιάστηκε στο περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Όλα τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στον σχεδιασμό (φορτία, αποθηκευτικά μέσα, γεννήτριες κ.α.), περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 4.2.1.

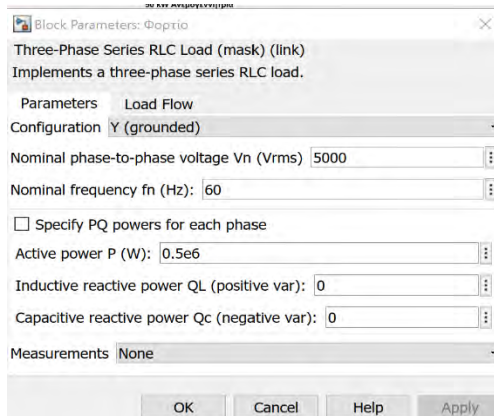


Εικόνα 4.1 Διάταξη μικροδίκτυου σεναρίου ένα

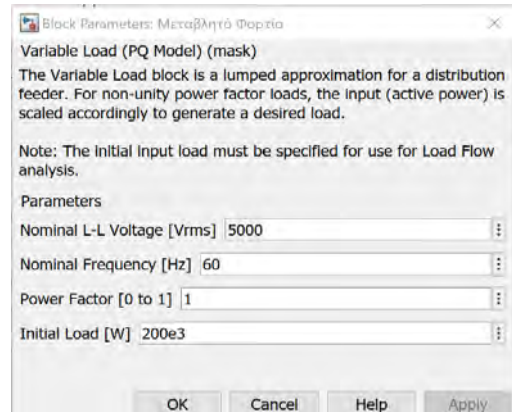
4.2.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής

Στο συγκεκριμένο σενάριο έχουμε δύο φορτία προς εξυπηρέτηση. Το πρώτο αφορά ένα σταθερό τριφασικό ωμικό φορτίο της τάξης των 500 kW (Εικόνα 4.2). Το συγκεκριμένο φορτίο συγκεντρώνει όλες τις σταθερές καταναλώσεις που συνδέονται στο μικροδίκτυο Το

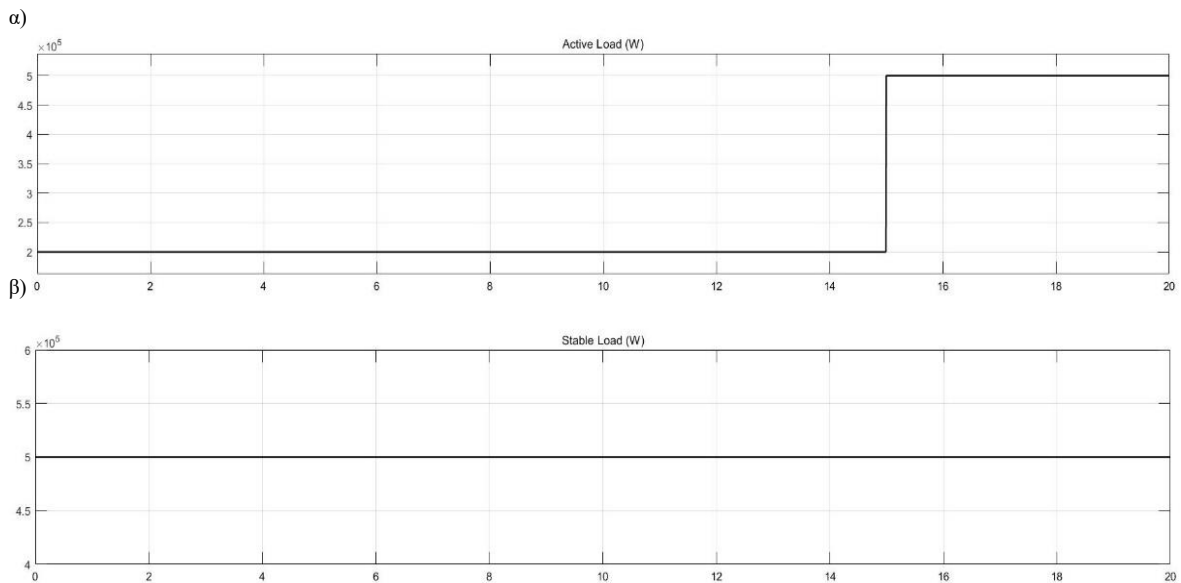
δεύτερο αφορά, ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο το οποίο αρχικοποιείται στα 200 kW (Εικόνα 4.3) και στη χρονική στιγμή $t=15s$ η κατανάλωση του αυξάνεται στα 500 kW. Ο σκοπός αυτού του φορτίου, είναι να καταγράψει μία απότομη μεταβολή στην ζήτηση ισχύος (όπως και συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t=15s$, Εικόνα 4.4 (α)), καθώς και να παρουσιάσει την επίδραση της στη λειτουργία του δικτύου (αυξομειώσεις τάσης, συχνότητας κλπ.).



Εικόνα 4.2 Σταθερό ωμικό φορτίο

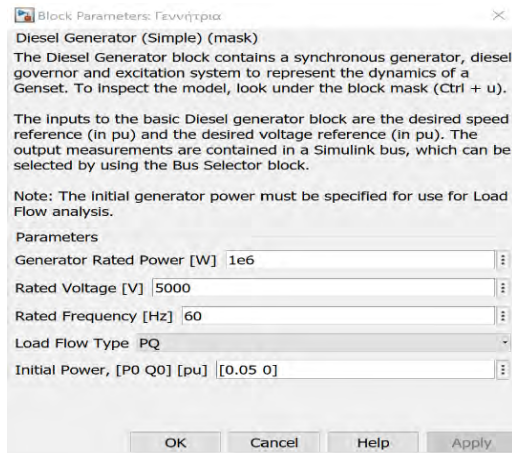


Εικόνα 4.3 Μεταβλητό φορτίο

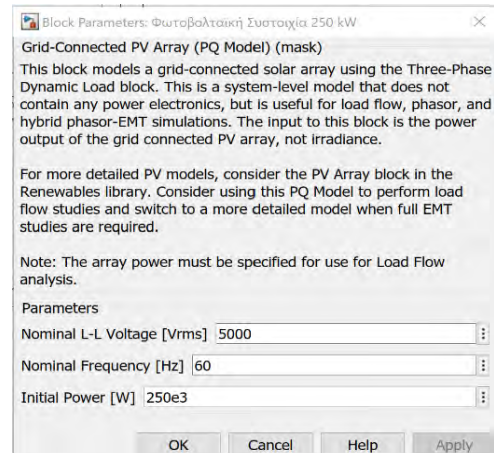


Εικόνα 4.4 Καμπύλες πειραματικών φορτίων. α) Μεταβλητό φορτίο β) Σταθερό φορτίο

Οι γεννήτριες που έχουν ενταχθεί στην προσομοίωση περιλαμβάνουν μία συμβατική σύγχρονη γεννήτρια Diesel (Εικόνα 4.5), με ονομαστική ισχύ 1 MW, και μία συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων με δυνατότητα μέγιστης παροχής 300 kW στο δίκτυο, ανάλογα με το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό (Εικόνα 4.6).

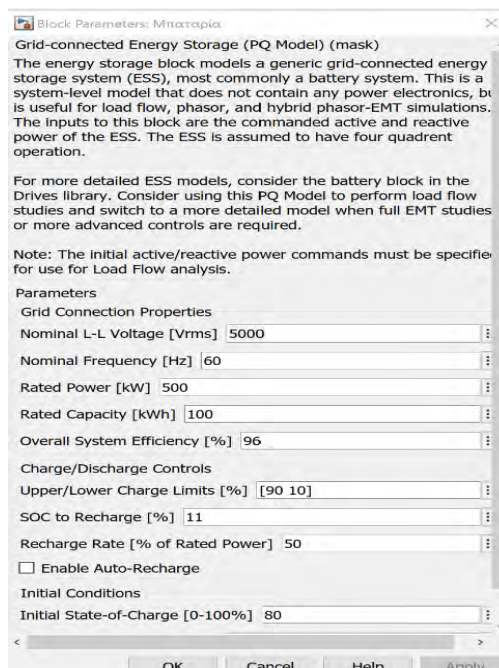


Εικόνα 4.5 Σύγχρονη Γεννήτρια



Εικόνα 4.6 Φωτοβολταϊκό σύστημα

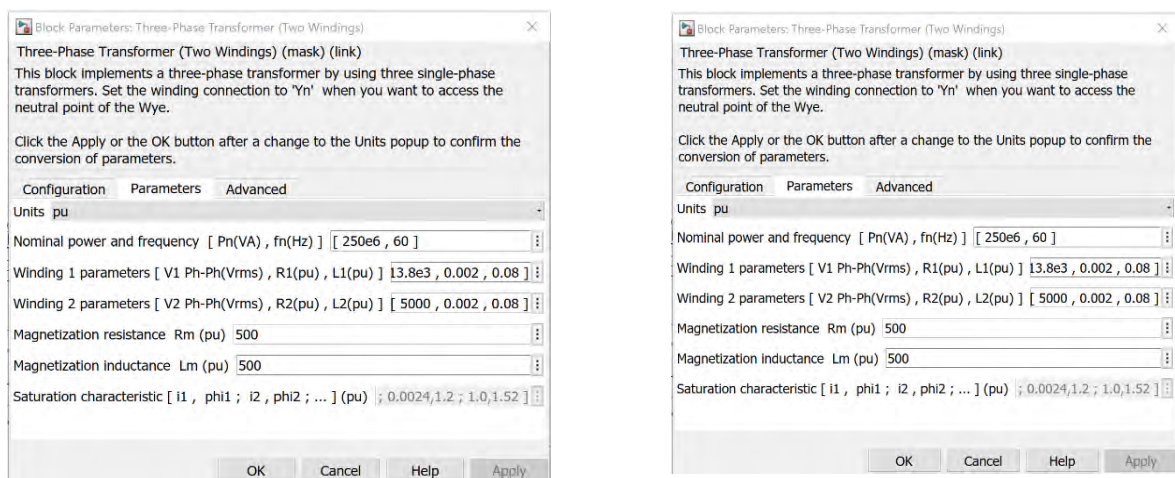
Τέλος, η διάταξη περιλαμβάνει μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με μέγιστη ισχύ 500 kW (rated power) και χωρητικότητα 100 kWh (Rated Capacity). Η μπαταρία όπως φαίνεται και από τις παραμέτρους προσομοίωσης της (Εικόνα 4.7), έχει όρια φόρτισης 90% -10% (άνω και κάτω αντίστοιχα). Όταν η μπαταρία βρίσκεται σε ποσοστό φόρτισης $\geq 90\%$, μεταφέρει ισχύ και τροφοδοτεί το δίκτυο. Στην περίπτωση που τα όρια φόρτισης πέσουν κάτω από 10% η μπαταρία λειτουργεί ως φορτίο προκειμένου να φορτιστεί. Η φόρτιση της γίνεται από το κυρίως δίκτυο (όταν το μικροδίκτυο συνδέεται σε αυτό), ενώ στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας η φόρτιση γίνεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν είναι εφικτό (π.χ., όταν το μεταβλητό φορτίο κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα ή υπάρχει περίσσεια ενέργειας τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας).



Εικόνα 4.7 Αρχικοποίηση διάταξης αποθήκευσης

Όσον αφορά την εξυπηρέτηση των φορτίων από τους διαθέσιμους πόρους προτεραιότητα δίνεται στη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται προσπάθεια μέγιστης εκμετάλλευσης ενέργειας του φωτοβολταϊκού (όταν διατίθεται) ελαχιστοποιώντας έτσι τις συνέπειες της στοχαστικότητας που διακρίνει τις ΑΠΕ. Επόμενη κατά σειρά, σε περίπτωση που η ζήτηση δεν καλύπτεται από το φωτοβολταϊκό, είναι η μπαταρία. Τελευταίος πόρος προς εξυπηρέτηση των φορτίων είναι η γεννήτρια. Χρησιμοποιείται με στόχο την εγγυημένη τροφοδοσία σε συνθήκες που οι ΑΠΕ αδυνατούν να συμβάλουν στην αυτονομία του μικροδικτύου και για λόγους αξιοπιστίας στις διακυμάνσεις της ζήτησης.

Το μικροδύκτιο λειτουργεί στην στάθμη των 5 kV και συνδέεται στο κυρίως δίκτυο μέσω του ζυγού μεταφοράς. Στον ζυγό αυτό, συνδέεται μετασχηματιστής (Μ/Σ) με ονομαστική ισχύ 250 MVA και είναι γειωμένος κατά Yg-Yg. Το πρωτεύων τύλιγμα του Μ/Σ λειτουργεί στα 13.8 kV ενώ το δευτερεύον στα 5 kV (τάση μικροδικτύου). Τέλος το δίκτυο διανομής, είναι ρυθμισμένο να λειτουργεί με στάθμη $V_{rms}=13.8$ kV phase-to-phase και λόγο αντίδρασης $X/R=7$ (Εικόνα 4.8).

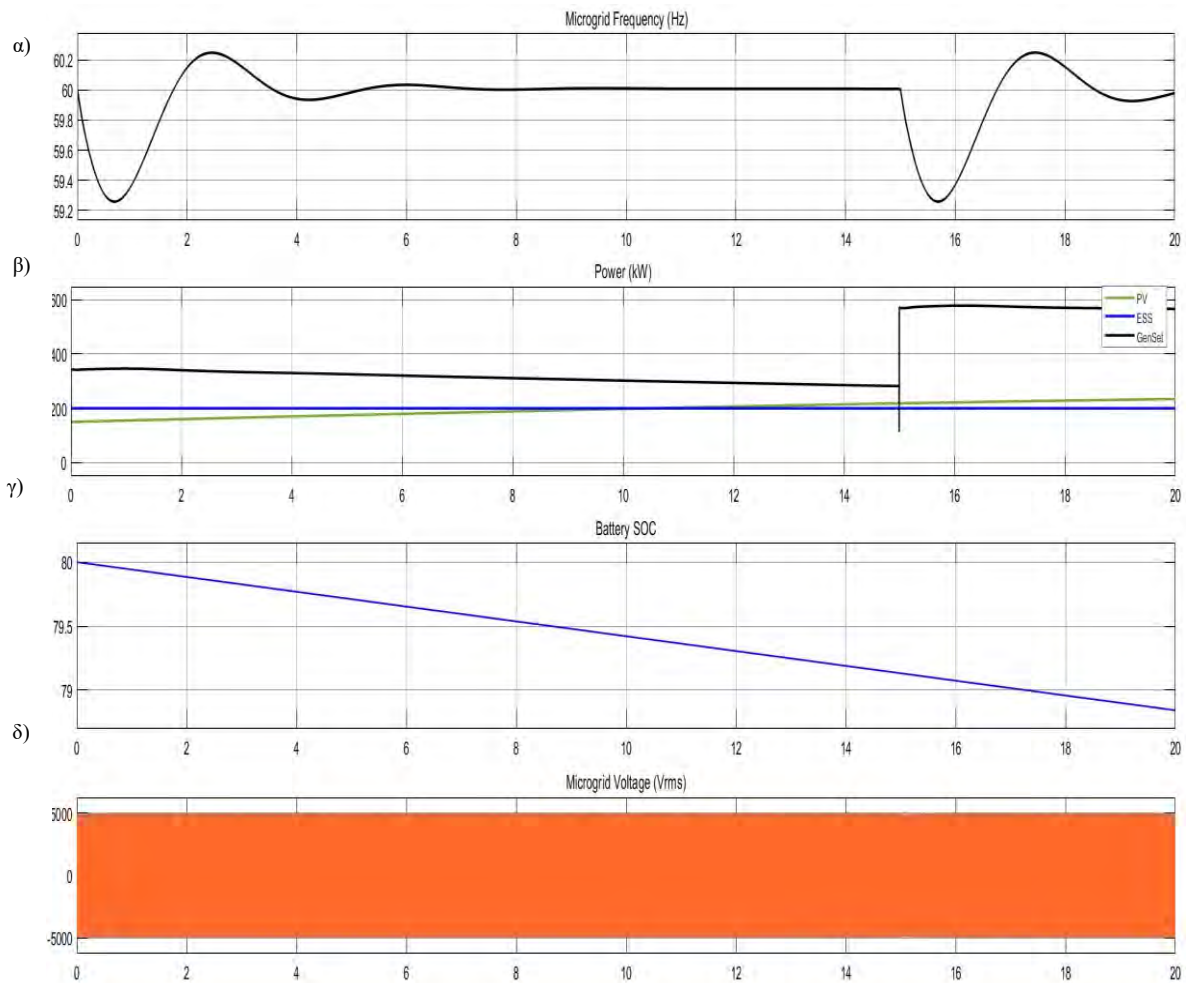


Εικόνα 4.8 Αρχικοποίηση Μ/Σ

Όπως φαίνεται από την διάταξη της Εικόνας 4.1, το μικροδίκτυο έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει είτε σε σύνδεση με το κυρίως δίκτυο είτε ανεξάρτητο από αυτό. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω του trip command που εφαρμόζεται στο σημείο σύνδεσης των δύο διατάξεων. Για την καλύτερη μελέτη των σεναρίων που θα εξεταστούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, το μικροδίκτυο τίθεται σε λειτουργία νησιδοποίησης. Η επιλογή αυτή προέκυψε από το γεγονός ότι η σύνδεση με τον άπειρο ζυγό, ελαχιστοποιούσε τα φαινόμενα που τίθενται υπό μελέτη, απομακρύνοντας μας από τον στόχο των πειραμάτων.

4.2.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας

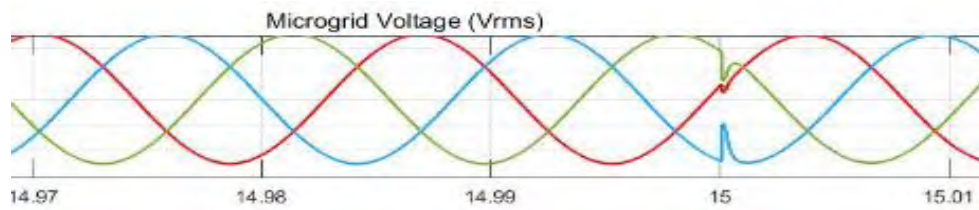
Στην πρώτη υποπερίπτωση του σεναρίου ένα, παρουσιάζεται η προσομοίωση του μικροδुकτίου όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 4.2.1, υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας (χωρίς σφάλμα). Στην γραφική παράσταση της Εικόνας 4.9 (α), φαίνεται ο τρόπος που επηρεάζεται η συχνότητα του δικτύου. Αρχικά μέχρι την χρονική στιγμή $t=4s$ παρατηρείται μία διακύμανση της συχνότητας και αυτό συμβαίνει λόγω της σύγχρονης γεννήτριας (μέχρι την σταθεροποίηση της ισχύς εξόδου της).



Εικόνα 4.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου ένα χωρίς σφάλμα

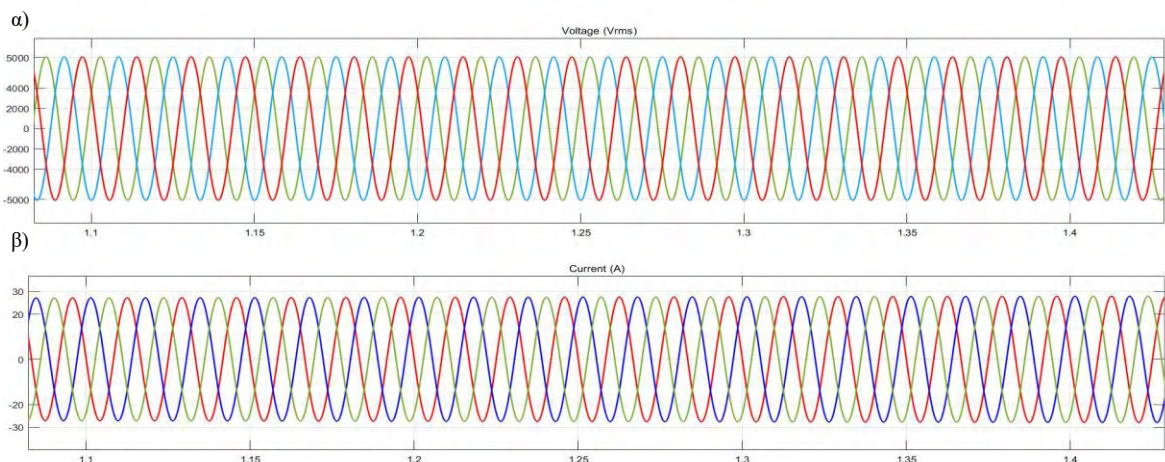
Αυτή η διακύμανση οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο στοιχεία παροχής ενέργειας δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση των φορτίων και η γεννήτρια αναλαμβάνει να εξυπηρετήσει τα φορτία του μικροδικτύου. Στη συνέχεια, η συχνότητα του δικτύου σταθεροποιείται μέχρι τη χρονική στιγμή $t=15s$ όπου προκλήθηκε μία ξαφνική αύξηση στη ζήτηση ενέργειας λόγω του μεταβλητού φορτίου. Έτσι λοιπόν, την χρονική στιγμή $t=15s$, όπως φαίνεται από τη γραφική παράσταση της Εικόνας 4.9 (β), το φωτοβολταϊκό και η μπαταρία έχουν κορεστεί

και ο μόνος διαθέσιμος πόρος που μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ισχύ είναι η σύγχρονη γεννήτρια. Για αυτό το λόγο παρατηρείται η στιγμιαία αύξηση στην ισχύ εξόδου της. Η Εικόνα 4.9 (γ), δείχνει τον ρυθμό εκ φόρτισης της μπαταρίας και όπως φαίνεται ο βαθμός μείωσης ακολουθεί σταθερή πορεία. Καθώς το πειραματικό σενάριο εκτελείται για τη χρονική διάρκεια 0 - 20s, η μπαταρία εκφορτίζεται κατά 12%. Τέλος η Εικόνα 4.9 (δ), παρουσιάζει τα ημιτονοειδή σήματα των τριών φάσεων της τάσης του δικτύου τα οποία ακολουθούν ομαλή πορεία μέχρι τη στιγμή της διαταραχής ($t = 15s$), όπως φαίνεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια στην Εικόνα 4.10.



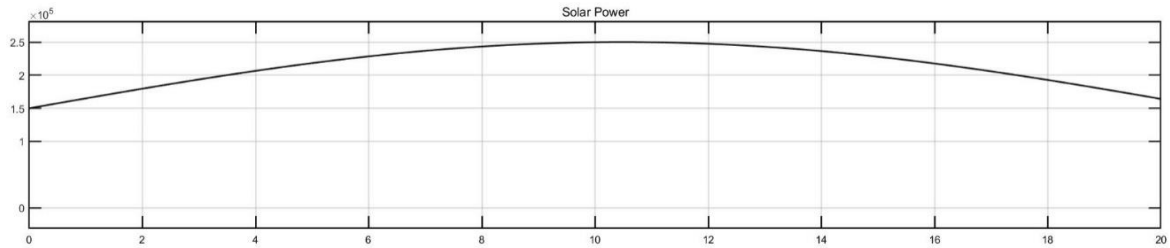
Εικόνα 4.10 Ημιτονοειδή σήματα της τάσης του μικροδικτύου

Οι επιπτώσεις αύξησης της ζήτησης προκάλεσαν παραμόρφωση στην τάση του μικροδικτύου. Γίνεται αντιληπτό πως το μέγεθος της αύξησης της ζήτησης επηρεάζει γραμμικά το μέγεθος της παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου (αυξομειώσεις ζήτησης). Γι' αυτό το λόγο ο έλεγχος και ο προγραμματισμός του demand-response θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα μικροδίκτυα να μην κινδυνεύουν από τέτοια φαινόμενα. Τέλος, στις γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 4.11 (α),(β), φαίνεται η τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού, το οποίο δεν επηρεάζεται από τα φαινόμενα που δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 4.11 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων του Inverter

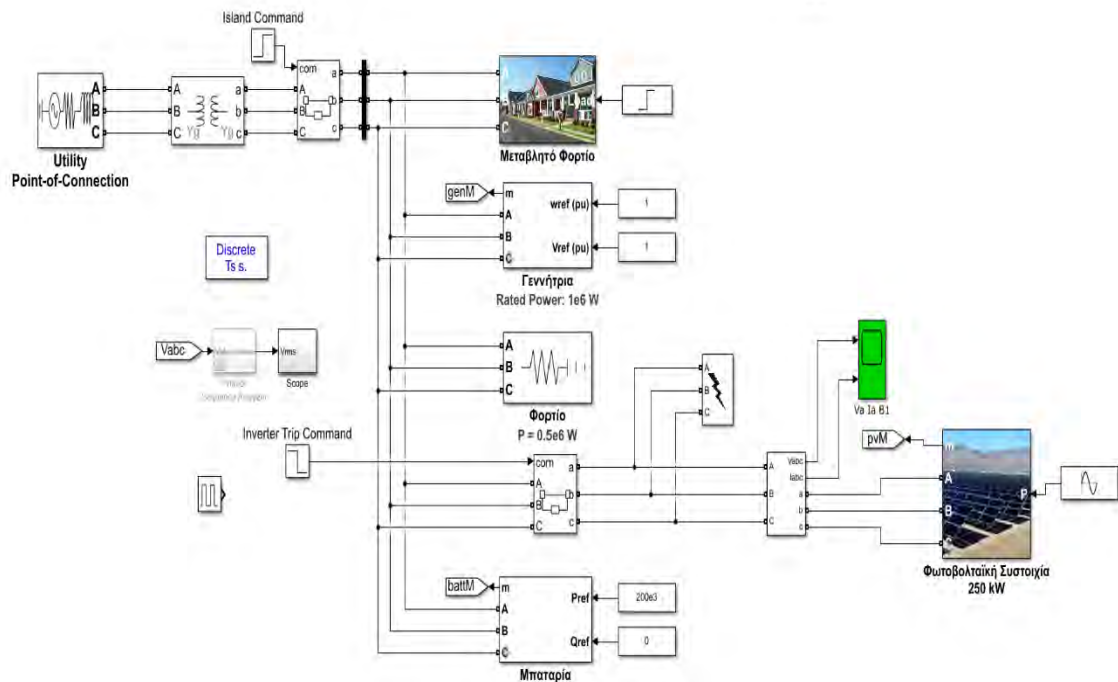
Η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού εξαρτάται από την καμπύλη του ηλιακού δυναμικού που εφαρμόζεται στη συστοιχία, με σκοπό την πειραματική μελέτη. Όσο αυξάνεται η ηλιοφάνεια τόσο αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς του. Στην Εικόνα 4.12, παρουσιάζεται η μεταβαλλόμενη καμπύλη που προκύπτει από την αύξηση του ηλιακού δυναμικού.



Εικόνα 4.12 Ηλιακό δυναμικό φωτοβολταϊκής συστοιχίας

4.2.3 Προσομοίωση σφαλμάτων στον Inverter του Φωτοβολταϊκού συστήματος

Η Εικόνα 4.13, παρουσιάζει την διάταξη του μικροδικτύου και το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται πειραματικά το σφάλμα για τις ανάγκες των πειραμάτων που ακολουθούν.

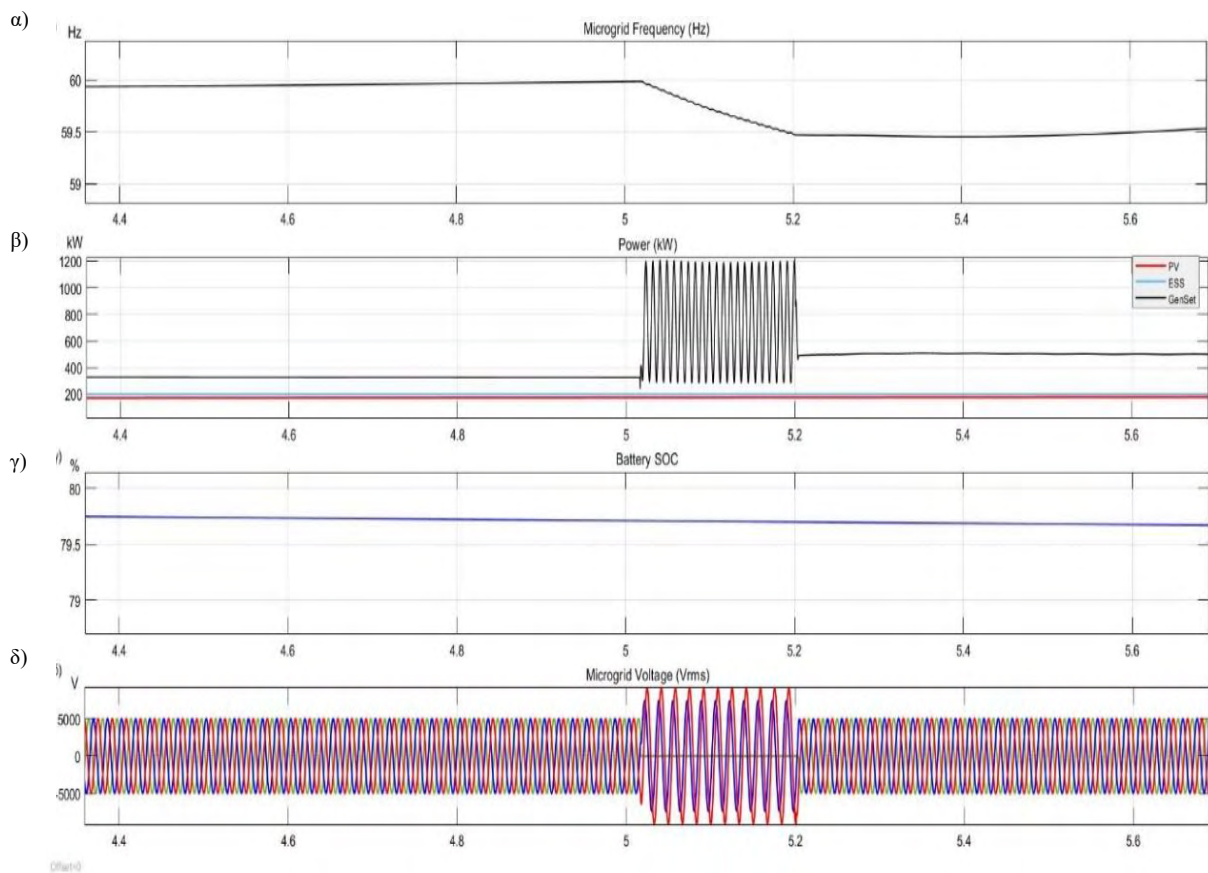


Εικόνα 4.13 Διάταξη μικροδικτύου σεναρίου ένα με σφάλμα στον Inverte

4.2.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τη χρονική στιγμή $t=5s$ συμβαίνει **μονοφασικό σφάλμα** στην πλευρά του inverter του φωτοβολταϊκού συστήματος. Όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.14), τη χρονική στιγμή του σφάλματος παρατηρείται παραμόρφωση της συχνότητας με απότομη στιγμιαία μείωση (Εικόνα 4.14 (α)). Μετά το σφάλμα, η συχνότητα του δικτύου επανέρχεται σε φυσιολογική τιμή μετά το $t=10$. Όπως ήταν αναμενόμενο καθώς το φωτοβολταϊκό σύστημα απομονώνεται από το σύστημα προκειμένου να επιτευχθεί ταχύτερη ανάκαμψη η γεννήτρια αναγκάζεται να καλύψει τη ζητούμενη ισχύ που προηγουμένως κάλυπτε το φωτοβολταϊκό.

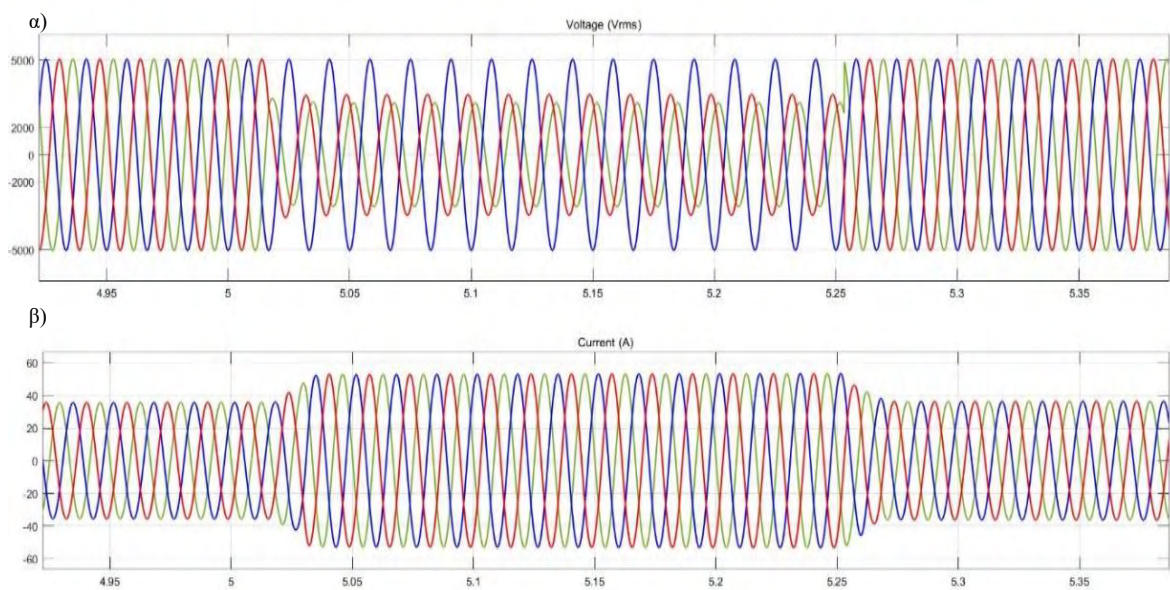
Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.14 (β), καθώς μετά την επαναφορά ($t > 5.2s$) η ισχύς αυξάνεται. Στην γραφική παράσταση της Εικόνας 4.14 (δ), φαίνεται ο τρόπος που επηρεάζεται η τάση του μικροδικτύου, εξαιτίας του μονοφασικού σφάλματος. Από τη χρονική στιγμή $t=5s$ μέχρι $t=5.25s$, η φάση που συμβαίνει το σφάλμα μηδενίζεται ενώ οι υπόλοιπες δύο παρουσιάζουν αυξομειώσεις πέρα των επιτρεπόμενων ορίων.



Εικόνα 4.14 Αποτελέσματα προσομοίωσης SLG σφάλματος

Συμπεραίνουμε πως, αν η χρονική διάρκεια του σφάλματος είναι μεγαλύτερη από αυτή που έχει οριστεί πειραματικά, η διατάραξη που αναλύθηκε θα επιφέρει περισσότερες συνέπειες στο δίκτυο και ο χρόνος ανάκαμψης του θα αυξηθεί. Σε περίπτωση που δεν ξεπεραστεί το σφάλμα το δίκτυο δεν θα μπορέσει να ανακάμψει.

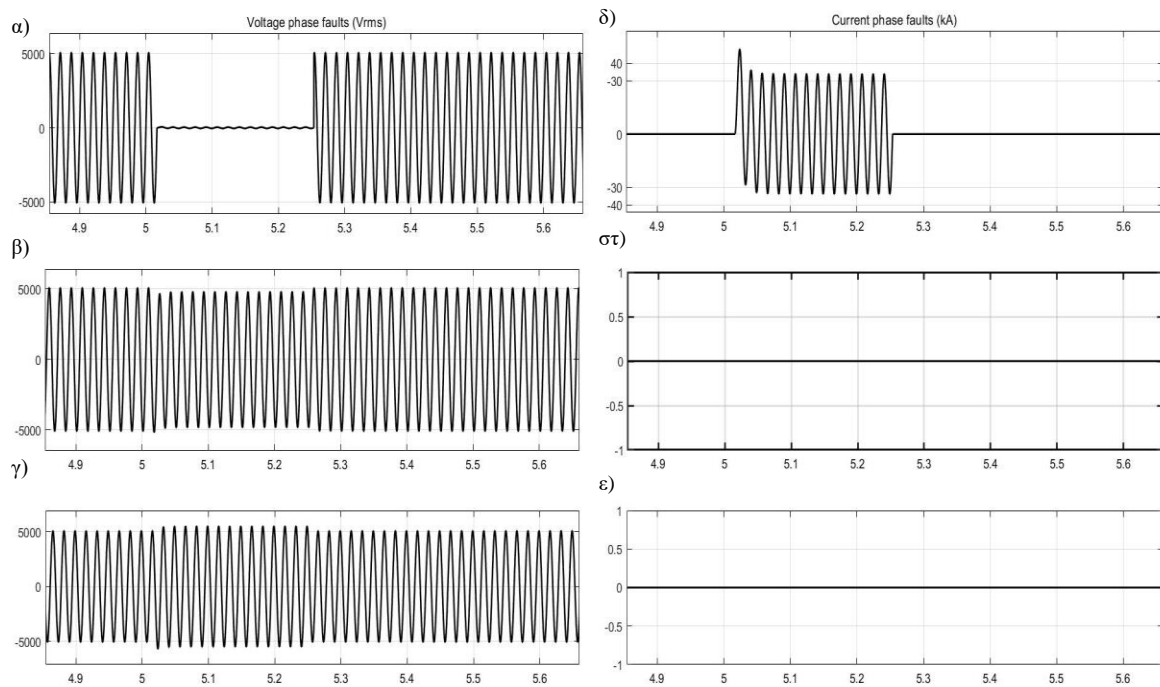
Από την άλλη πλευρά στην Εικόνα 4.15, παρατηρείται ο τρόπος που επηρεάζεται το φωτοβολταϊκό σύστημα από το μονοφασικό σφάλμα. Η αύξηση στο ρεύμα του inverter (Εικόνα 4.15 (α)) όπως και η διαταραχή της τάσης (Εικόνα 4.15 (β)), δεν θέτει σε κίνδυνο την διάταξη του εξοπλισμού πριν την απομόνωση. Ο λόγος της απομόνωσης γίνεται με σκοπό την ασφάλεια του μικροδικτύου.



Εικόνα 4.15 Τάση (α) και ρεύμα (β) στον Inverter κατά το σφάλμα SLG

Το τμήμα απομονώνεται με σκοπό την προστασία του από το ρεύμα βραχυκύκλωσης που δημιουργείται στο σημείο του σφάλματος. Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.16), παρουσιάζονται οι τάσεις και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης τη στιγμή του μονοφασικού σφάλματος.

Όπως παρατηρείται, οι γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 4.16 (α,β,γ), αφορούν τις τάσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, μία φάση της τάσης μηδενίζεται κατά τη διάρκεια εφαρμογής του σφάλματος. Αναφορικά με το ρεύμα, (Εικόνα 4.16 (δ,στ,ε)), το μόνο ρεύμα βραχυκύκλωσης που παρατηρείται είναι της φάσης που συμβαίνει το σφάλμα και κυμαίνεται μεταξύ -35 - 35 kA, ενώ τα υπόλοιπα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι 0.



Εικόνα 4.16 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης SLG σφάλματος

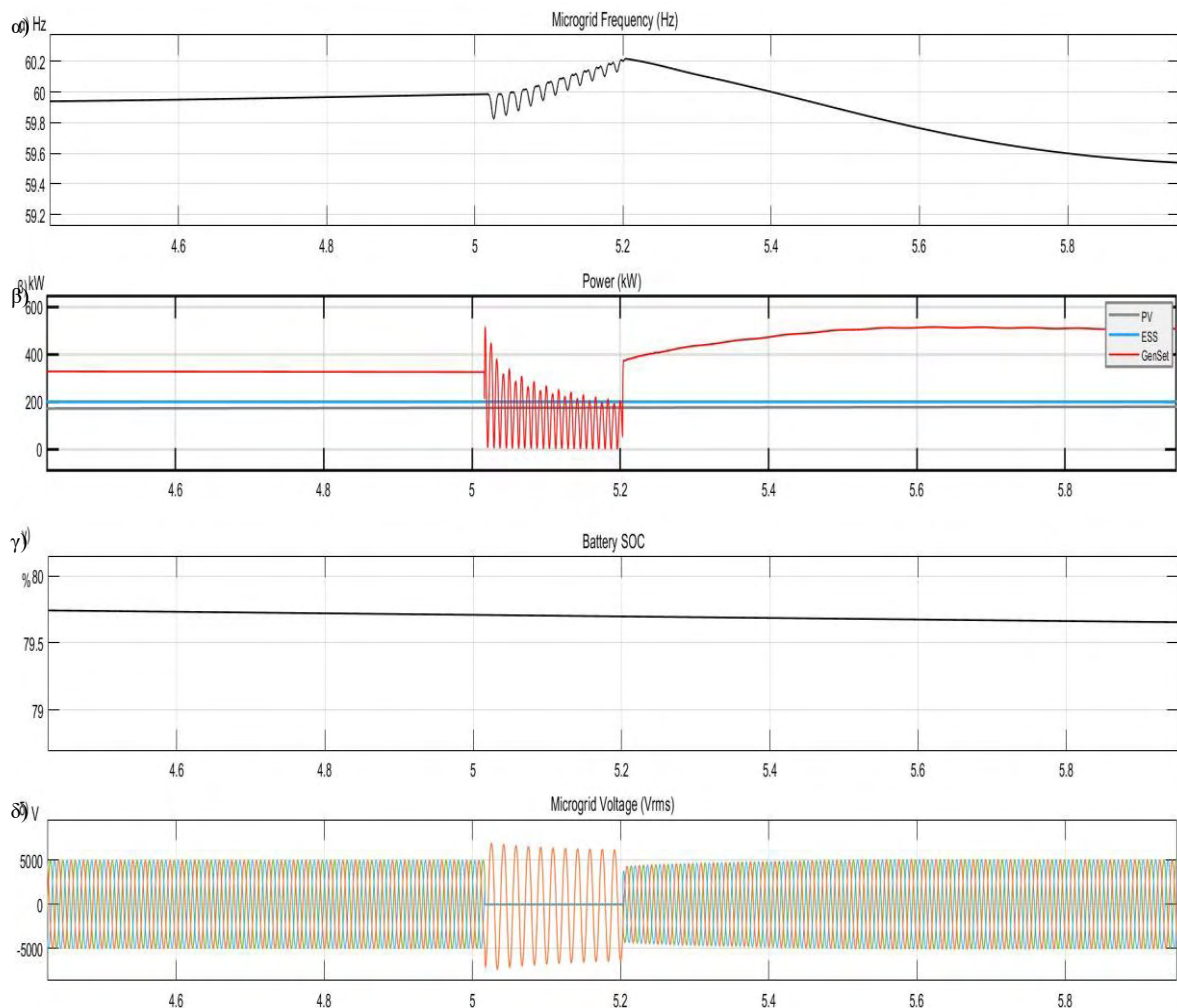
4.2.3.2 Διφασικό σφάλμα με τη γη (Line to Line to Ground fault) και Διφασικό σφάλμα (Line to Line fault) χωρίς τη γη

Στην πρώτη περίπτωση του σεναρίου τη χρονική στιγμή $t=5s$, εφαρμόζεται **Διφασικό σφάλμα με τη γη (LLG)** στο σημείο σύνδεσης του inverter της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ο τρόπος αντίδρασης του μικροδικτύου φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.17). Σε σύγκριση με την προσομοίωση του μονοφασικού σφάλματος, εντοπίζεται διαφορά στη συμπεριφορά της συχνότητας του δικτύου.

Στο συγκεκριμένο σφάλμα παρουσιάζεται παλλόμενη αύξηση μικρότερου εύρους (Εικόνα 4.17 (α)), η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της εξόδου της γεννήτριας με διαφορετικό τρόπο σε σύγκριση με τη συχνότητα εξετάστηκε στην Εικόνα 4.14 (α).

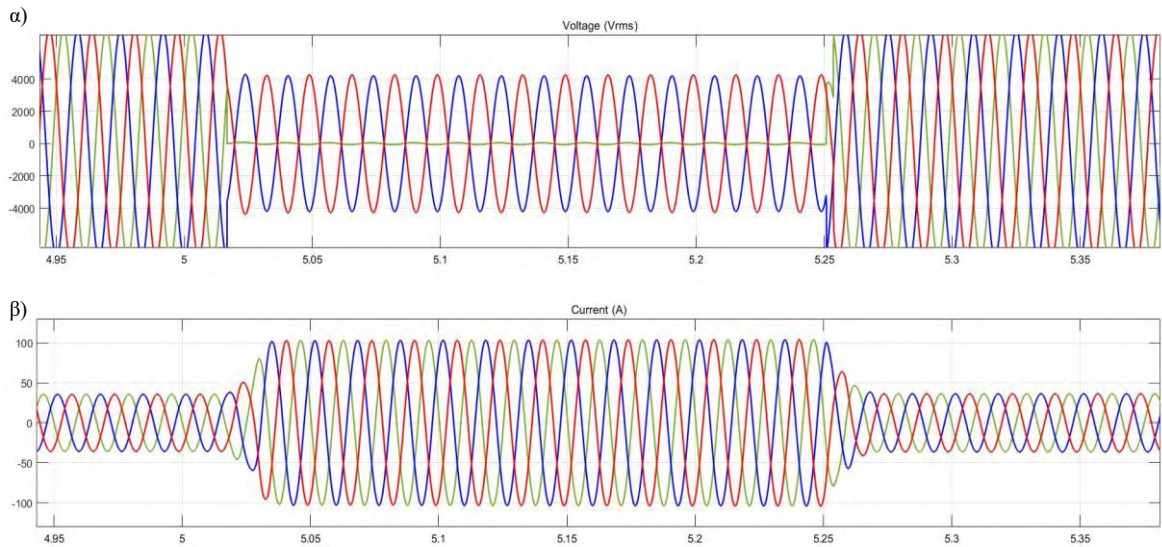
Η γεννήτρια παρουσιάζει παλλόμενη ισχύ εξόδου που κυμαίνεται από 0 έως 450 kW κατά τη διάρκεια του σφάλματος (Εικόνα 4.17 (β)). Πριν την σταθεροποίηση της γεννήτριας, η οποία παρατηρήθηκε ότι συμβαίνει και πάλι μετά το $t=10s$. Η αύξηση της ισχύος που

παρατηρείται μετά το σφάλμα, οφείλεται στη απόσυρση του Φ/Β. Εφόσον η Φ/Β συστοιχία δεν αποδίδει ισχύ στο μικροδίκτυο, η γεννήτρια αποτελεί την μόνη εφεδρική λύση, καθώς το φορτίο της μπαταρίας δεν επαρκεί. Όσον αφορά την τάση του μικροδικτύου, επηρεάζεται περισσότερο σε σχέση με την εφαρμογή του μονοφασικού σφάλματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι δύο φάσεις έχουν μηδενιστεί ενώ η τρίτη έχει φτάσει στη στάθμη των 7 kV μέχρι τη χρονική στιγμή 5,2s, πριν επανέλθει στην κανονική του λειτουργία.



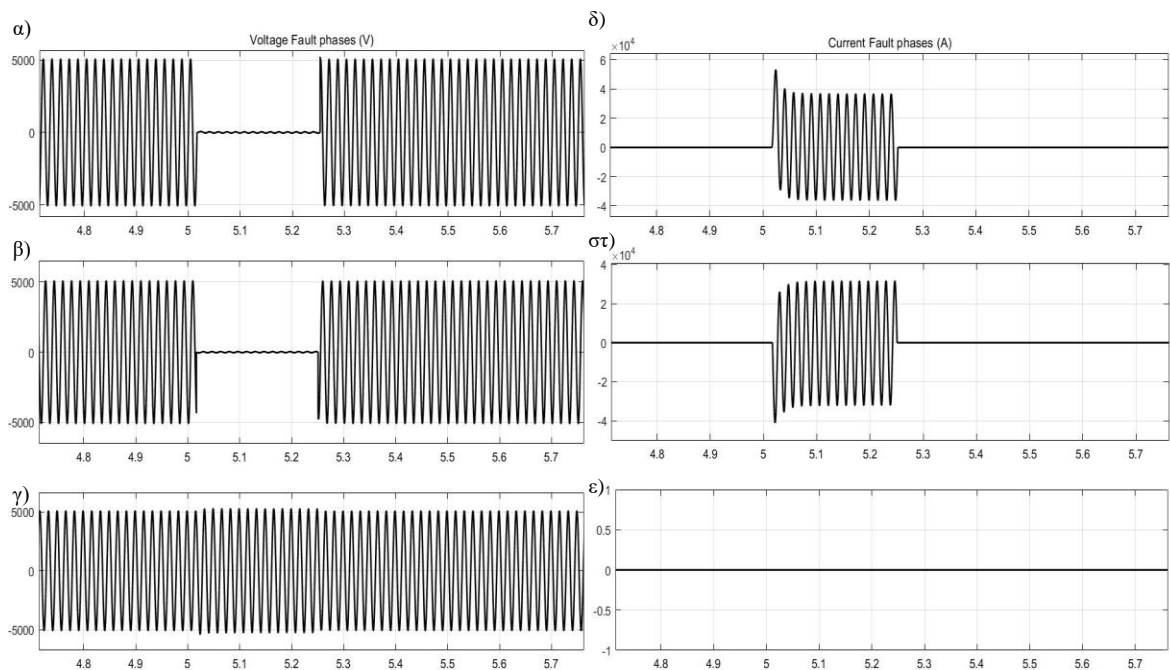
Εικόνα 4.17 Αποτελέσματα προσομοίωσης LLG σφάλματος

Η τάση και το ρεύμα στον inverter εμφανίζουν αξιοσημείωτες αποκλίσεις σε σχέση με την προσφαλματική λειτουργία. Όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 4.18, παρατηρείται πτώση τάσεις στις δύο φάσεις και μηδενισμός της τρίτης (Εικόνα 4.18 (α)). Από την άλλη πλευρά το ρεύμα, στη διάρκεια του σφάλματος (Εικόνα 4.18 (β)), ξεπερνά την διπλάσια τιμή του, πριν το φωτοβολταϊκό απομακρυνθεί από το μικροδίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση ο εξοπλισμός θα κινδύνευε από καταστροφές λόγω υπερτάσης.



Εικόνα 4.18 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το σφάλμα LLG

Κλείνοντας το πειραματικό σενάριο, στην Εικόνα 4.19 παρατίθενται οι τάσεις και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης των τριών φάσεων. Όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις της τάσης (Εικόνα 4.19 (α,β,γ)), δύο φάσεις μηδενίζονται ενώ η τρίτη παραμένει στην σταθερή της τιμή 5 kV τάση του μικροδικτύου. Τα αντίστοιχα ρεύματα σφαλμάτων των δύο φάσεων που επηρεάστηκαν και φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις στην Εικόνα 4.19 (δ,στ,ε), κυμαίνονται από -30 – 30 kA (κατά μέσο όρο), το οποίο ξεπερνά κατά πολύ τα ρεύματα υπό φυσιολογικές συνθήκες του μικροδικτύου.

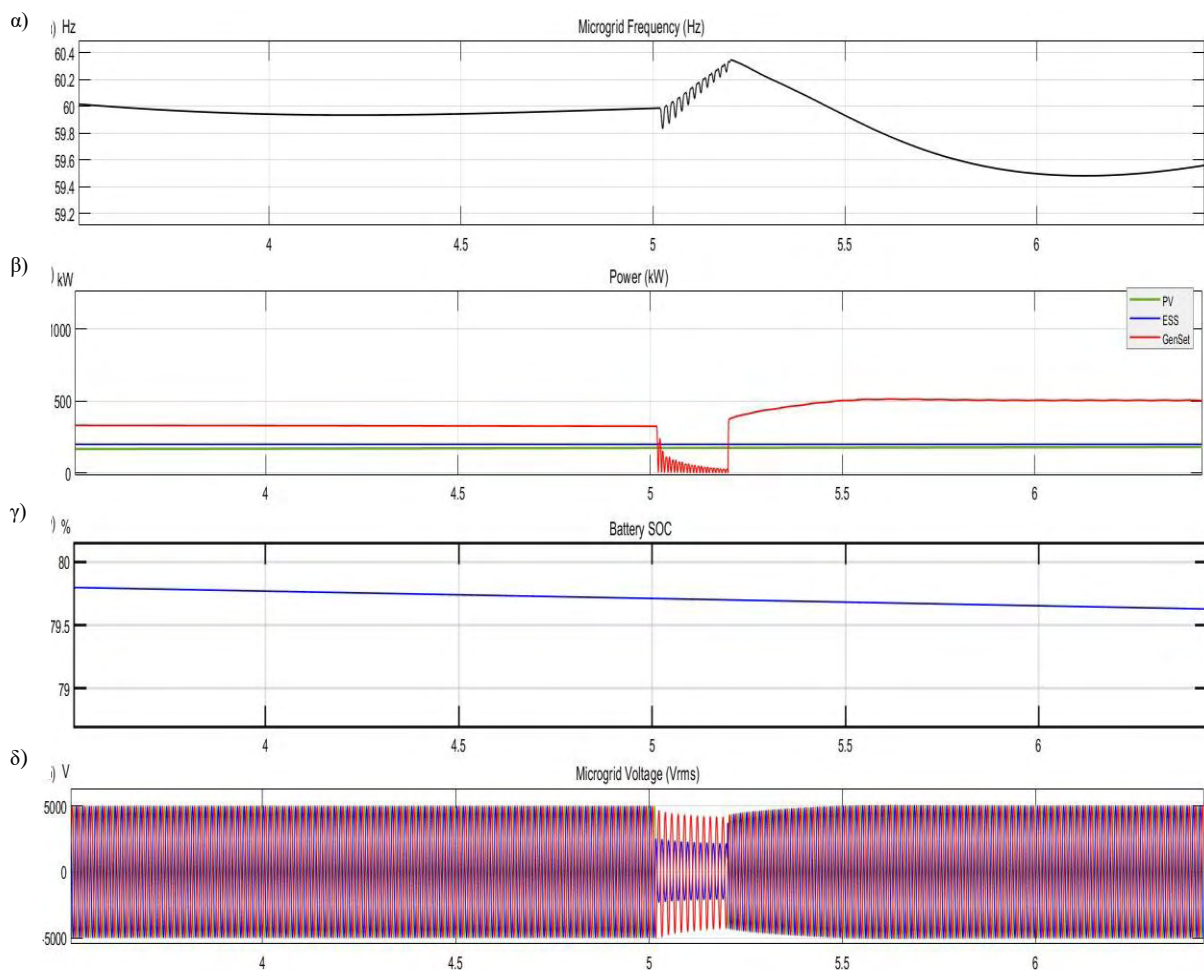


Εικόνα 4.19 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LLG σφάλματος

Στην δεύτερη περίπτωση του σεναρίου τη χρονική στιγμή $t=5s$ εφαρμόζεται **Διφασικό σφάλμα (LL) χωρίς τη γη**, στο ίδιο σημείο του μικροδικτύου. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του διφασικού σφάλματος με τη γη αλλά το εύρος των τιμών διαταραχής διαφέρει.

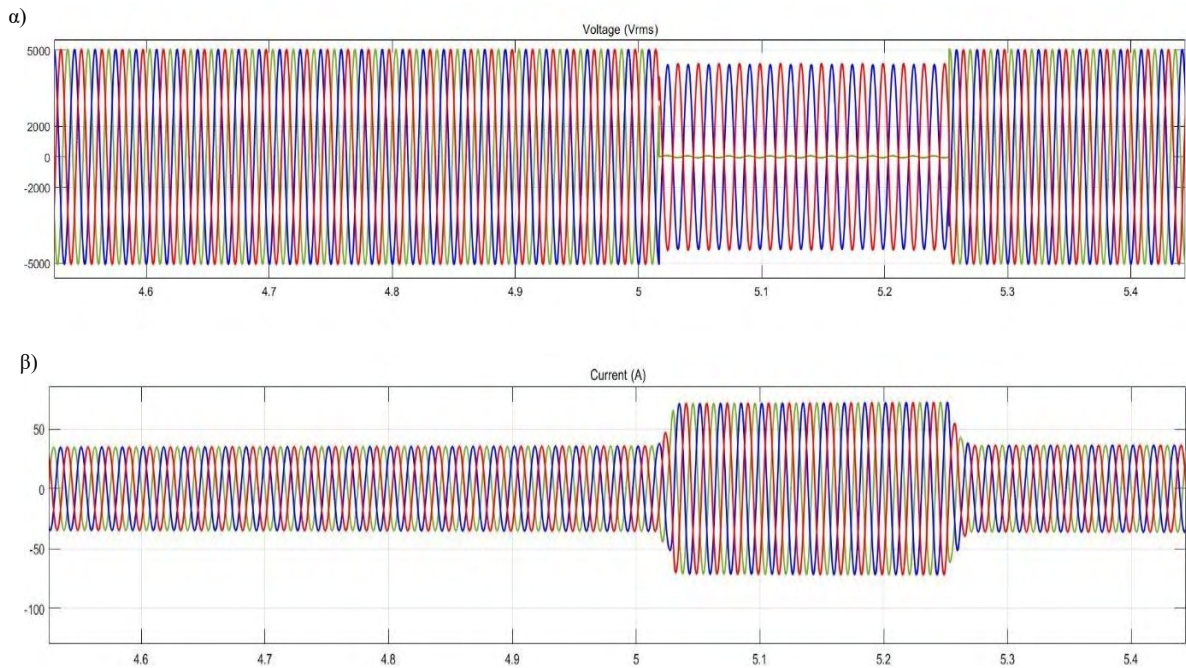
Όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.20), το σφάλμα επηρεάζει τη συχνότητα σε μεγαλύτερο βαθμό (αύξηση κατά 0,2 Hz περισσότερο) σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα (Εικόνα 4.20 (α)) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γεννήτρια να πλήττεται εντονότερα, λαμβάνοντας τιμές κοντά στο 0, κατά τη διάρκεια εφαρμογής του σφάλματος (Εικόνα 4.20 (β)).

Η τάση των δύο φάσεων που δεν μηδενίζονται παρουσιάζουν μείωση κατά 1 και 3kV αντίστοιχα (Εικόνα 4.20 (δ)) ενώ η παραμόρφωση υποχωρεί ολικά μετά τη χρονική στιγμή $t = 5,5s$.



Εικόνα 4.20 Αποτελέσματα προσομοίωσης LL σφάλματος

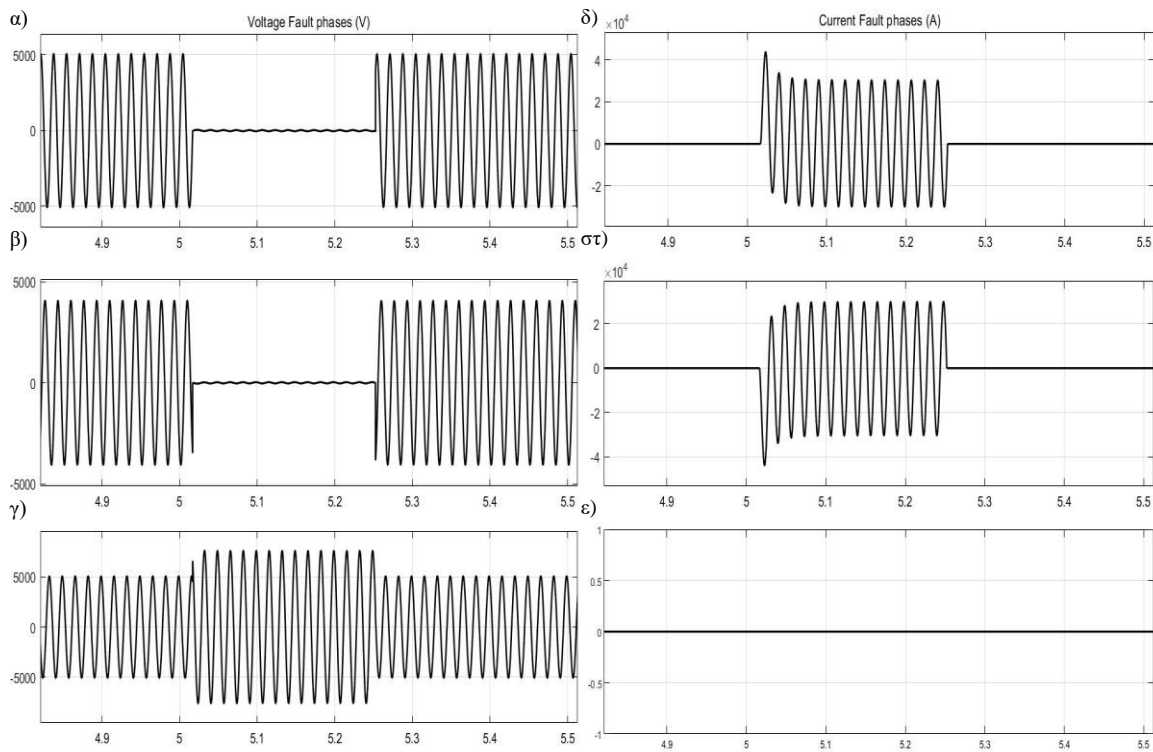
Από τις γραφικές παραστάσεις της τάσης (Εικόνα 4.21 (α)) και του ρεύματος (Εικόνα 4.21 (β)) στον inverter, παρατηρείται σημαντική διαταραχή. Η τάση παρουσιάζει βύθιση ενώ το ρεύμα παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 55%. Το αποτέλεσμα αυτό καθιστά αναγκαία την απομάκρυνση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Εικόνα 4.21 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το σφάλμα LL

Κλείνοντας, στην Εικόνα 4.22, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των φάσεων της τάσης (Εικόνα 4.22 (α,β,γ)) και του ρεύματος (Εικόνα 4.22 (δ,στ,ε)) βραχυκύκλωσης. Στις γραφικές παραστάσεις που αφορούν τις τάσεις (Εικόνα 4.22 (α,β,γ)), παρατηρείται μηδενισμός στις δύο εκ των τριών φάσεων (α,β). Η φάση της γραφικής παράστασης της Εικόνας 4.22 (γ), παρόλο που παρουσιάζει μικρή αύξηση κατά τη χρονική περίοδο εφαρμογής του σφάλματος (εξαιτίας του μηδενισμού των υπολοίπων), δεν επιδρά στην αντίστοιχη φάση του ρεύματος (Εικόνα 4.22 (ε)). Όπως φαίνεται, η συγκεκριμένη φάση του ρεύματος δεν βραχυκυκλώνεται, παραμένει μηδενική.

Από την άλλη πλευρά, οι φάσεις των ρευμάτων των γραφικών παραστάσεων (Εικόνα 4.22 (δ,ε)) πλήττονται κατά τη διάρκεια του σφάλματος και παρουσιάζουν αυξομειώσεις που κυμαίνονται από -30 – 30 kA.



Εικόνα 4.22 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LL σφάλματος

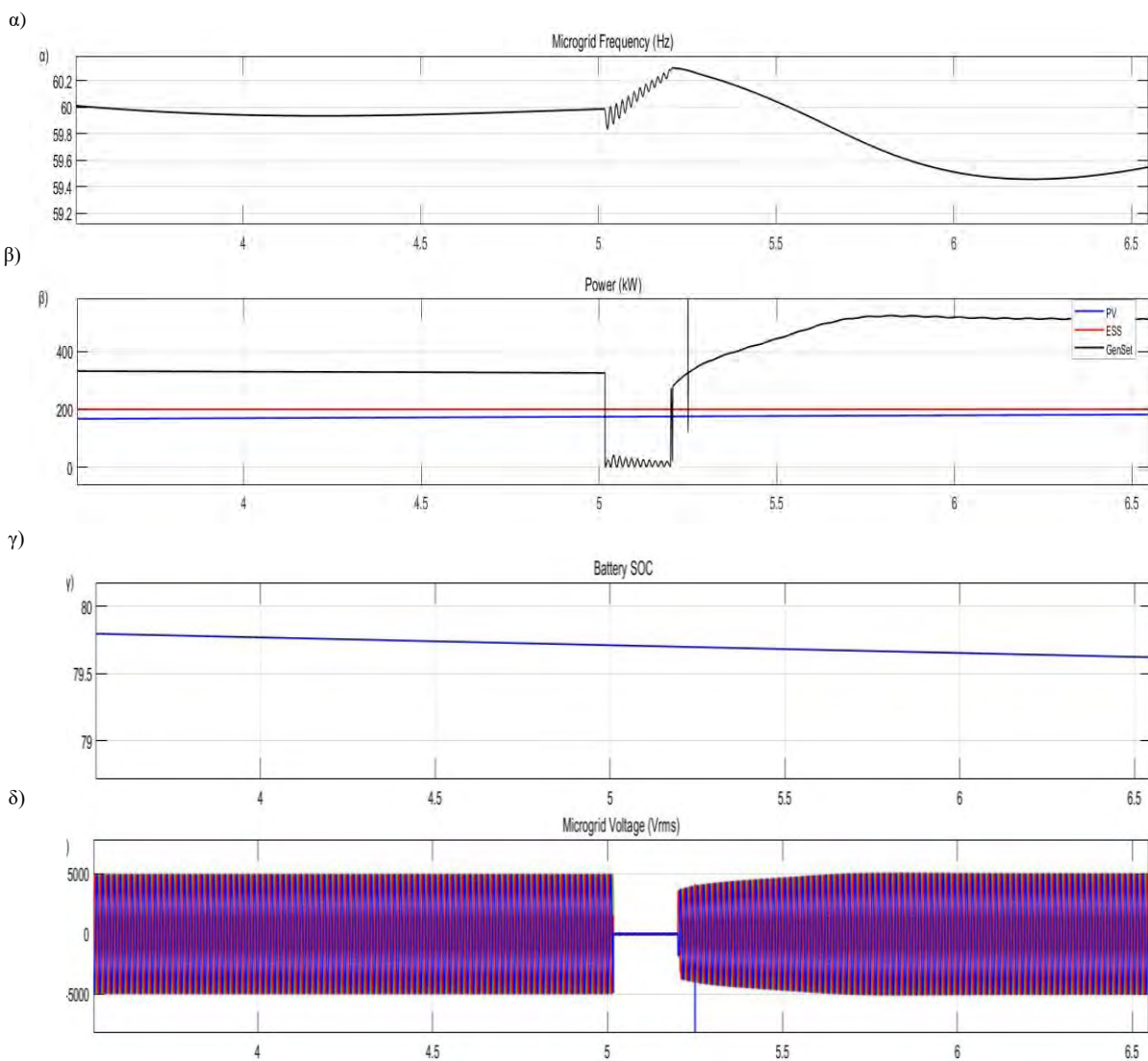
4.2.3.3 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)

Στο τριφασικό συμμετρικό σφάλμα, όσον αφορά τη συχνότητα παρατηρείται και πάλι παραμόρφωση όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις (στην περίπτωση αυτή αύξηση). Το εύρος της κυμαίνεται στα όρια της περίπτωσης του Διφασικού σφάλματος χωρίς τη γη (Εικόνα 4.23 (α)). Σε αυτό το σφάλμα παρατηρείται πως τη χρονική στιγμή του βραχυκυκλώματος ($t=5s$), η ισχύς εξόδου της γεννήτριας πλήττεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το σύνολο των πειραματικών σεναρίων που προηγήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι να εκκαθαριστεί το σφάλμα, η ισχύς της γεννήτριας παίρνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν (Εικόνα 4.23 (β)).

Μετά τη χρονική στιγμή $t=5.2s$, το δίκτυο προσπαθεί να ανακάμψει. Καθώς η Φ/Β συστοιχία αποσύρεται και πάλι για λόγους ασφαλείας, η ισχύς της γεννήτριας παρουσιάζει στιγμιαία αύξηση καθώς από την μία πλευρά προσπαθεί να αποκαταστήσει τη λειτουργία της και

ταυτόχρονα να ανταπεξέλθει στην κάλυψη της επιπλέον ζήτησης (εξαιτίας της απόσυρσης της Φ/Β συστοιχίας και της αδυναμίας της μπαταρίας να καλύψει εξολοκλήρου το φορτίο).

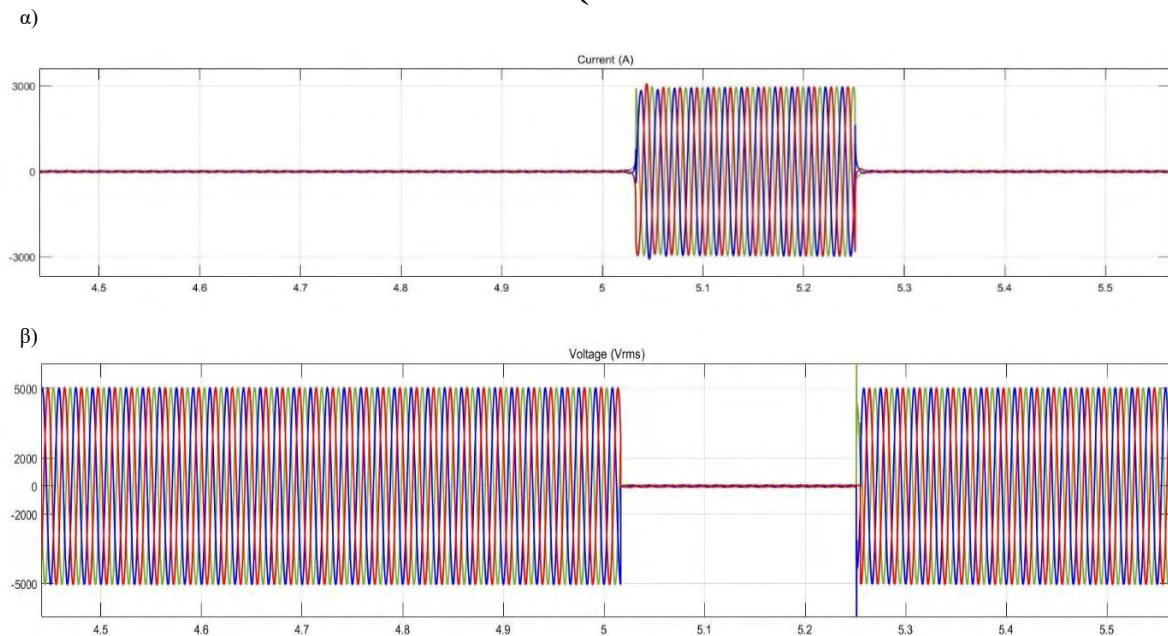
Ο χρόνος ανάκαμψης της σχετίζεται άμεσα με την αποσταθεροποίηση του δικτύου, καθώς η λειτουργία της επανέρχεται μετά την αποκατάσταση του. Η τάση του μικροδικτύου από την άλλη μηδενίζεται και η επαναφορά στην κανονική λειτουργία επιτυγχάνεται μετά τη χρονική στιγμή $t > 5.5$ s (Εικόνα 4.23 (δ)).



Εικόνα 4.23 Αποτελέσματα προσομοίωσης Τριφασικού σφάλματος

Η Εικόνα 4.24, παρουσιάζει τις τρεις φάσεις της τάσης και του ρεύματος στον inverter κατά το τριφασικό σφάλμα. Όπως παρατηρείται, από την γραφική παράσταση της Εικόνας 4.24 (α), η τάση μηδενίζεται κατά τη διάρκεια εφαρμογής του σφάλματος και στις τρεις φάσεις

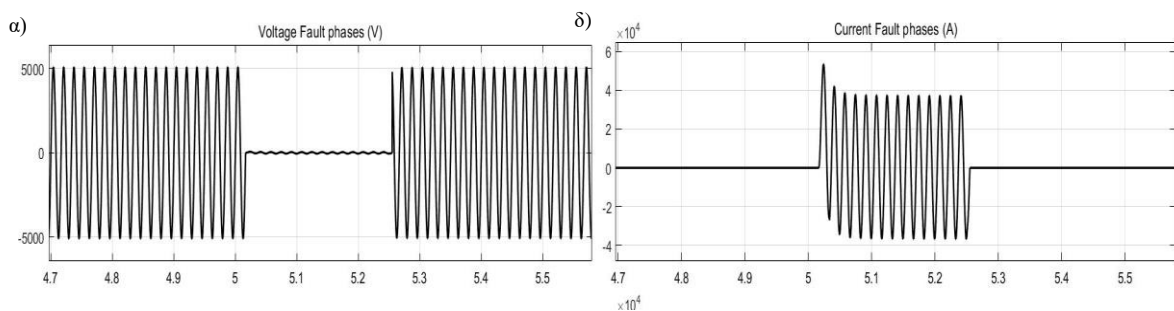
της. Όσον αφορά το ρεύμα, τη στιγμή του σφάλματος ($t=5s$), λαμβάνει ακραίες τιμές (≥ 3 kA), οι οποίες θα οδηγούσαν στην καταστροφή του εξοπλισμού. Για αυτό το λόγο οι μηχανισμοί ασφαλείας του δικτύου επεμβαίνουν άμεσα απομονώνοντας το σφάλμα ($t = 5.25s$).

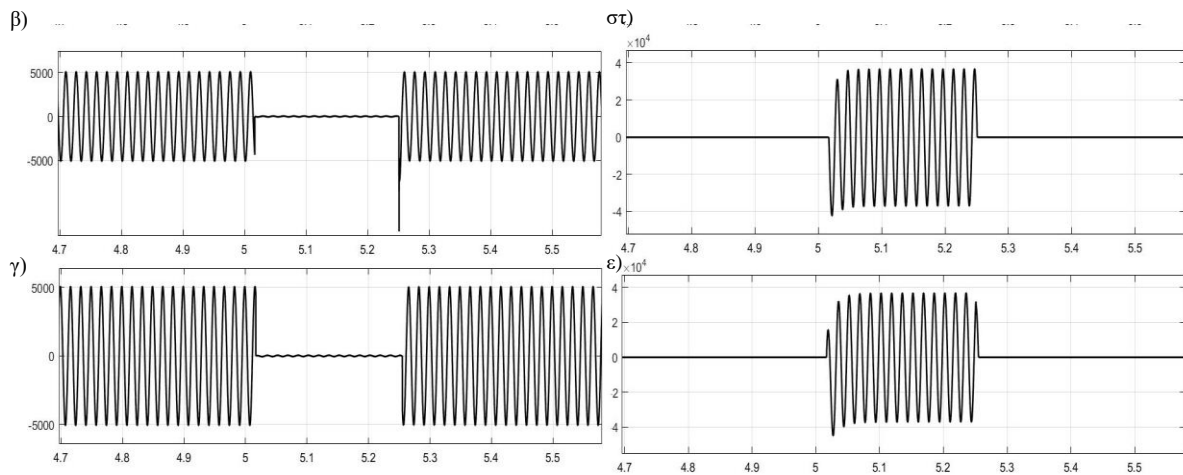


Εικόνα 4.24 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στον Inverter κατά το τριφασικό σφάλμα

Τέλος, στην Εικόνα 4.25, παρουσιάζονται οι τρεις φάσεις των τάσεων (Εικόνα 4.25 (α,β,γ)) και τα των ρευμάτων (Εικόνα 4.25 (δ,στ,ε)) βραχυκύκλωσης κατά το τριφασικό σφάλμα. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τρεις φάσεις, τόσο της τάσης (Εικόνα 4.25 (α,β,γ)) όσο και των ρευμάτων (Εικόνα 4.25 (δ,στ,ε)) παρουσιάζουν διαταραχή.

Πιο συγκεκριμένα όλες οι φάσεις των τάσεων μηδενίζονται (για τη χρονική διάρκεια του σφάλματος), ενώ όλες οι φάσεις των ρευμάτων, εμφανίζουν αυξομειώσεις που κυμαίνονται από $-40 - 40$ kA.





Εικόνα 4.25 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης τριφασικού σφάλματος

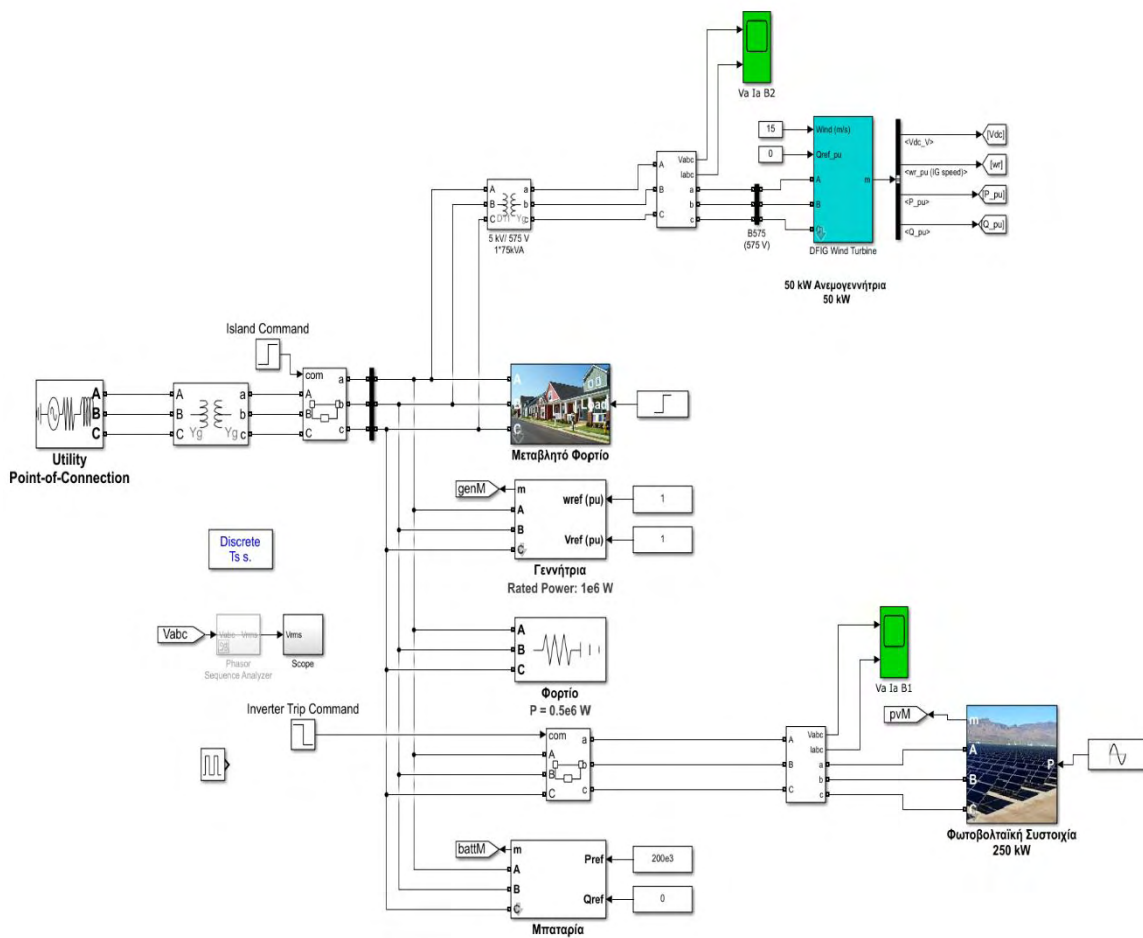
4.2.4 Συμπεράσματα πρώτου σεναρίου

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων των σφαλμάτων του πρώτου πειραματικού σεναρίου, συμπεραίνουμε πως το πιο επιβλαβές σφάλμα για το δίκτυο ήταν το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα. Όπως ήταν αναμενόμενο, επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τόσο τη συχνότητα όσο και την τάση του μικροδικτύου. Επιπρόσθετα, το ρεύμα που παρατηρήθηκε στην διάταξη της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, κατά τη διάρκεια του σφάλματος, κυμάνθηκε σε ακραία επίπεδα. Η γεννήτρια από την άλλη σχεδόν μηδένισε την παραγωγή της και η μετέπειτα ανάκαμψη της παρουσίασε σημαντικές στιγμιαίες διακυμάνσεις ισχύος. Παρόλο που με τη χρήση διακοπτικών μέσων η φωτοβολταϊκή διάταξη αποσύρθηκε, ο χρόνος αντίδρασης του συστήματος, θα έπρεπε να είναι συντομότερος σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια που μελετήθηκαν. Στόχος αυτής της δράσης, είναι η ελαχιστοποίηση των επιδράσεων του σφάλματος τόσο στον εξοπλισμό όσο και στην αξιοπιστία του μικροδικτύου.

Από την άλλη πλευρά το μονοφασικό σφάλμα επηρέασε σε μεγαλύτερο βαθμό την συμπεριφορά της γεννήτριας. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος παρατηρήθηκε αποσυντονισμός της γεννήτριας καθώς παρατηρήθηκε η εντονότερη βύθιση στη συχνότητα, σε σχέση με το σύνολο των πειραμάτων του πρώτου σεναρίου. Σε όλες τις περιπτώσεις, για λόγους ασφαλείας, έγινε απόσυρση των φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση της παραγόμενης ισχύος στην γεννήτρια μετά την ανάκαμψη, καθώς αποτελεί τον μόνο δυναμικό πόρο που μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση ισχύος από τα φορτία του μικροδικτύου.

4.3 Σενάριο λειτουργίας Δεύτερο: Μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο επίπεδο διανομής με Φωτοβολταϊκά στοιχεία και Ανεμογεννήτρια

Στην Εικόνα 4.26, παρουσιάζεται η διάταξη του μικροδικτύου, όπως σχεδιάστηκε για τις ανάγκες του δεύτερου πειραματικού σεναρίου. Παρατηρώντας την διάταξη του μικροδικτύου, εντοπίζεται η νέα εισαγωγή της διάταξης της ανεμογεννήτριας (η οποία θα αναλυθεί στην παράγραφο 4.3.1), ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι παραμετροποιημένα σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 4.1.

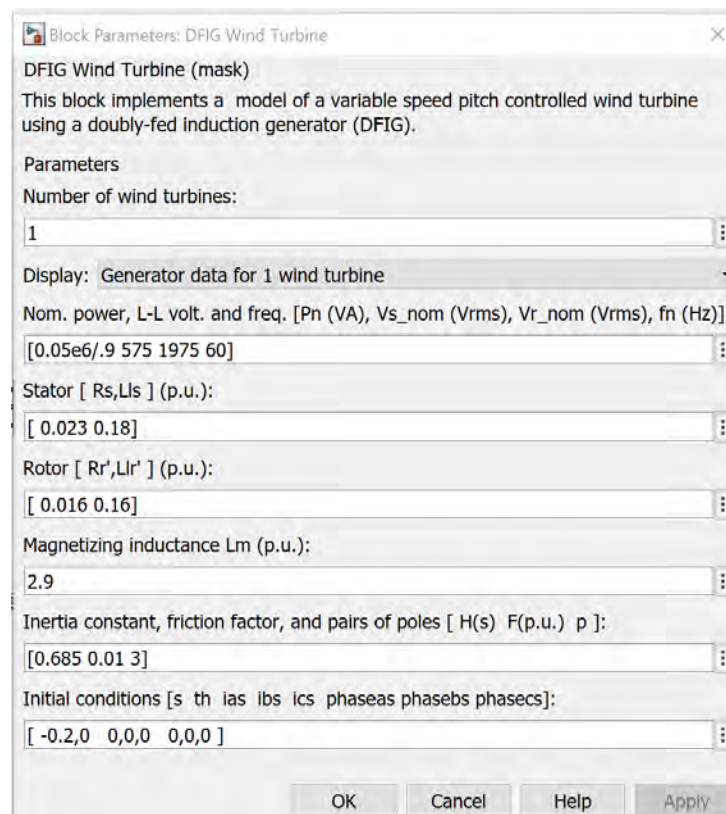


Εικόνα 4.26 Διάταξη μικροδικτύου σεναρίου δύο

4.3.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής

Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας του μικροδικτύου, όπως προαναφέρθηκε, εισάγεται μία μικρής κλίμακας ανεμογεννήτρια με ισχύ λειτουργίας 50 kW. Ο λόγος που επιλέχτηκε η

συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύς για την ανεμογεννήτρια, είναι και ο σκοπός του πειράματος. Στόχος είναι να μελετηθεί, η αντίδραση του μικροδικτύου με την εισαγωγή ενός πόρου που πιο συχνά συναντάται στο επίπεδο μεταφοράς (και όχι τόσο στο επίπεδο διανομής) και αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου συνόλου (πάρκου), που στόχο έχει την έγχυση ενέργειας στο δίκτυο μεταφοράς. Η ανεμογεννήτρια που προστέθηκε είναι τύπου DFIG, και κατά τη διάρκεια του πειράματος εφαρμόστηκε σταθερή ταχύτητα ανέμου 15 m/s μέσω ενός trip command στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε (Εικόνα 4.26). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας της παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.27.



Εικόνα 4.27 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

4.3.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας

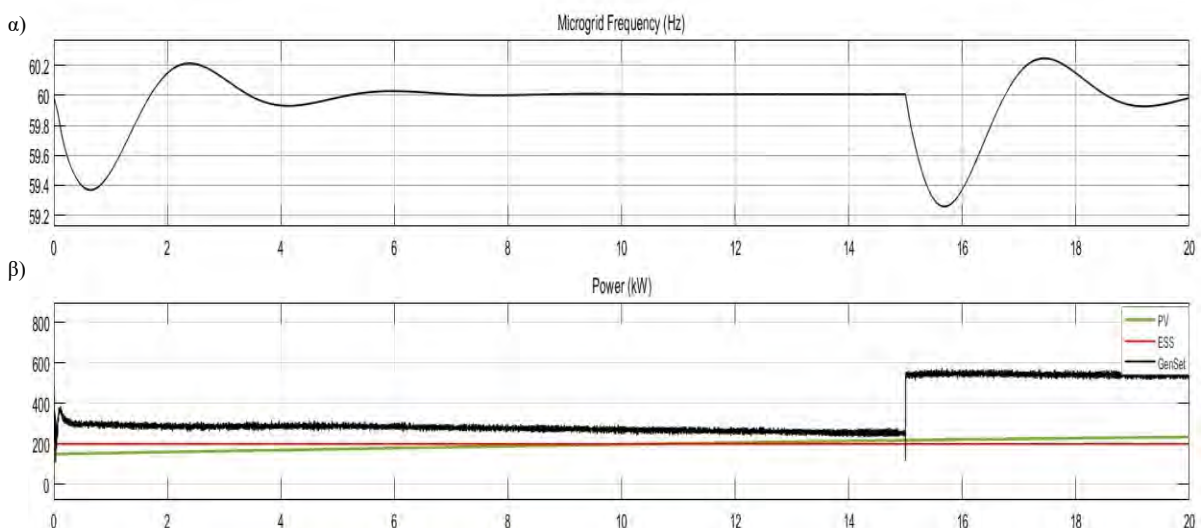
Κατά την έναρξη της κανονικής λειτουργίας του μικροδικτύου η συχνότητα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την κανονική λειτουργία του πρώτου σεναρίου (Εικόνα 4.28 (α)). Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα εμφανίζει μία διαταραχή μέχρι να τεθεί σε λειτουργία και να σταθεροποιηθεί η παραγωγή τόσο της συμβατικής γεννήτριας όσο και της

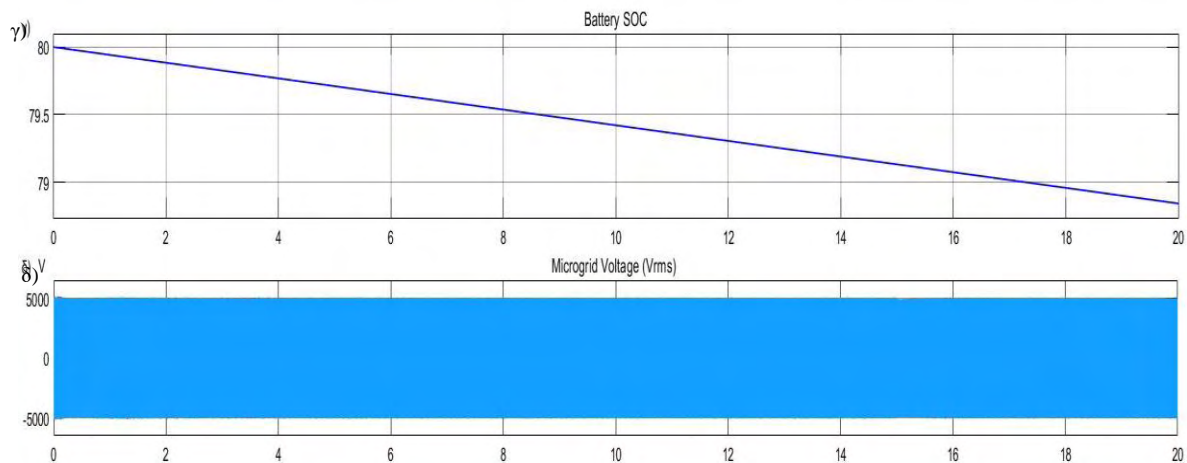
ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια παρατηρείται μικρότερο εύρος βύθισης σε σχέση με το πρώτο σενάριο (0.2 Hz μικρότερη) καθώς προσφέρεται στο μικροδίκτυο επιπλέον παραγόμενη ισχύς (λόγω της ένταξης της ανεμογεννήτριας).

Η αναπαράσταση της γεννήτριας, σε αυτή την περίπτωση, περιλαμβάνει και την ανεμογεννήτρια (γραμμή GenSet Εικόνα 4.28 (β)). Οι μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στη γραφική παράσταση της ισχύος των γεννητριών, προκαλούνται από την ανεμογεννήτρια. Αυτό συμβαίνει, λόγω της μεταβλητότητας της εξόδου της καθώς η λειτουργία της εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου που εισάγεται. Η δεύτερη βύθιση της τάσης, που παρατηρείται τη χρονική στιγμή $t = 15s$, οφείλεται στην εφαρμογή της αύξησης ζήτησης (λόγω του μεταβλητού φορτίου) και ισχύει ότι αναλύθηκε στο πρώτο σενάριο κανονικής λειτουργίας.

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία και η μπαταρία αποδίδουν ενέργεια στο μικροδίκτυο όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο σενάριο. Η μπαταρία με την έναρξη του μικροδικτύου βρίσκεται στο 80%, και αποφορτίζεται σταθερά κατά τη διάρκεια του πειράματος (Εικόνα 4.28 (γ)).

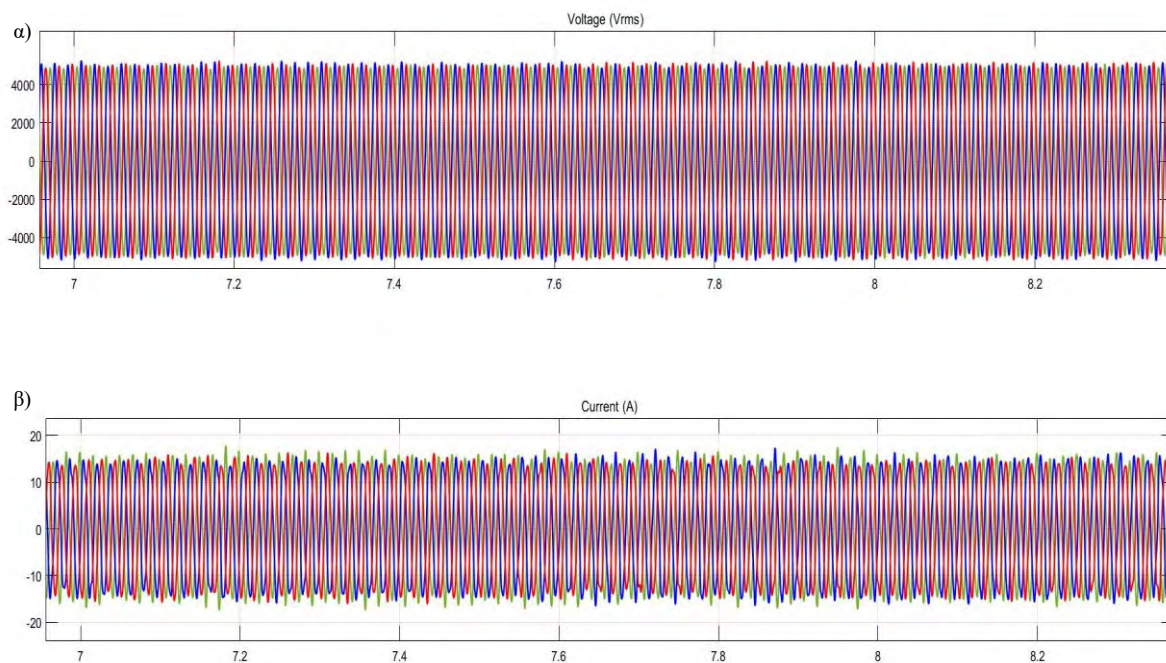
Η γραφική παράσταση της Εικόνας 4.28 (δ), παρουσιάζει τις τρεις φάσεις της κανονικής λειτουργίας του μικροδικτύου, οι οποίες ακολουθούν φυσιολογική ημιτονοειδή πορεία από -5 kV- 5 kV, σύμφωνα με την τάση του μικροδικτύου. Η μόνη διαταραχή που εντοπίζεται είναι τη χρονική στιγμή $t = 15s$, όπου πραγματοποιήθηκε η αύξηση της ζήτησης ενέργειας από το μεταβλητό φορτίο και παρατηρείται μία στιγμιαία παραμόρφωση της κυματομορφής.





Εικόνα 4.28 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας μικροδίκτυου με ανεμογεννήτρια

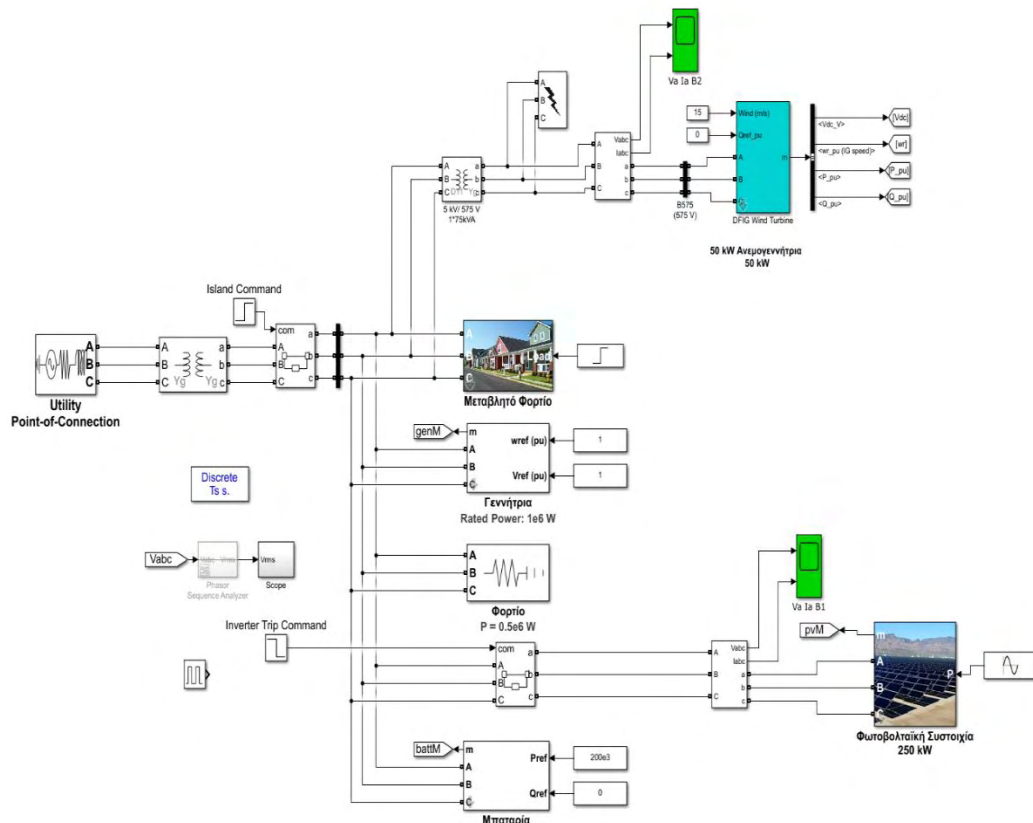
Η ανεμογεννήτρια, συνδέεται με το κυρίως μικροδίκτυο μέσω μετασχηματιστή υποβιβασμού. Παρουσιάζει μείωση της τάσης από τα 5 kV στα 575V και κατ' επέκταση παρατηρείται υποδεκαπλασιασμός του ρεύματος της ανεγεννήτριας. Οι πραγματικές τιμές των τριών φάσεων της τάσης και του ρεύματος της κανονικής λειτουργίας, μετά τον μετασχηματισμό παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.29 (α) και (β) αντίστοιχα .



Εικόνα 4.29 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων της ανεμογεννήτριας

4.3.3 Προσομοίωση σφαλμάτων στην πλευρά της Ανεμογεννήτριας

Στην πλευρά της ανεμογεννήτριας τη χρονική στιγμή $t=10s$, εφαρμόζεται πειραματικά σφάλμα με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς του δικτύου (Εικόνα 4.30).

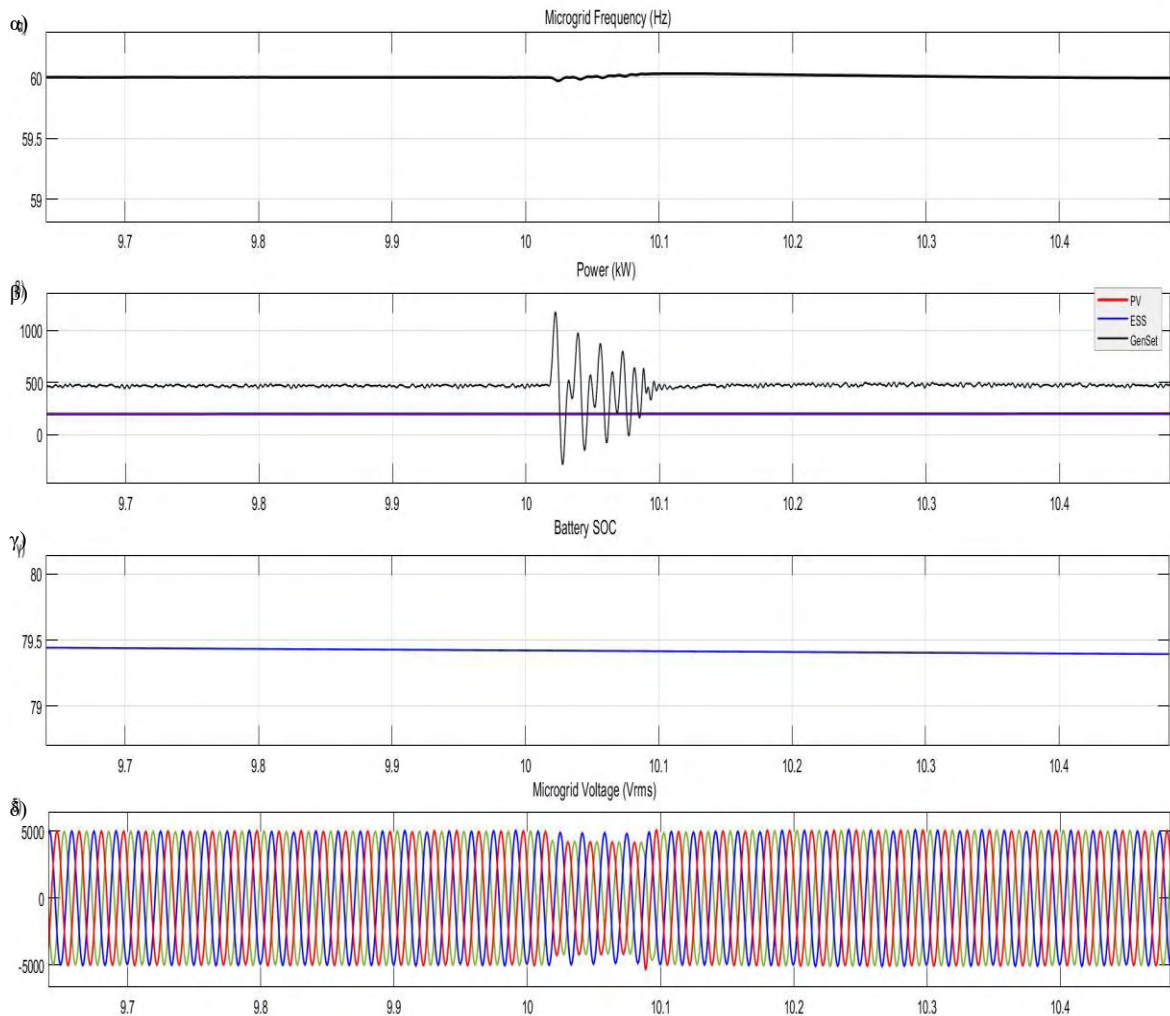


Εικόνα 4.30 Εφαρμογή σφάλματος στην πλευρά της ανεμογεννήτριας

4.3.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault)

Στο μονοφασικό σφάλμα, όπως φαίνεται από τη γραφική παράσταση της συχνότητας του μικροδικτύου δικτύου (Εικόνα 4.31 (α)), δεν παρατηρείται σημαντική διαταραχή στη συχνότητα του μικροδικτύου. Η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας είναι συγκριτικά μικρή σε σχέση με τα φορτία που εξυπηρετούνται. Από τη γραφική παράσταση, της Εικόνας 4.31 (β), φαίνεται πως από τη χρονική στιγμή $t=10s$ μέχρι $t=10.15s$, οι γεννήτριες (συμβατική και ανεμογεννήτρια) χάνουν στιγμιαία τον συγχρονισμό τους και οι τιμές διακυμαίνονται

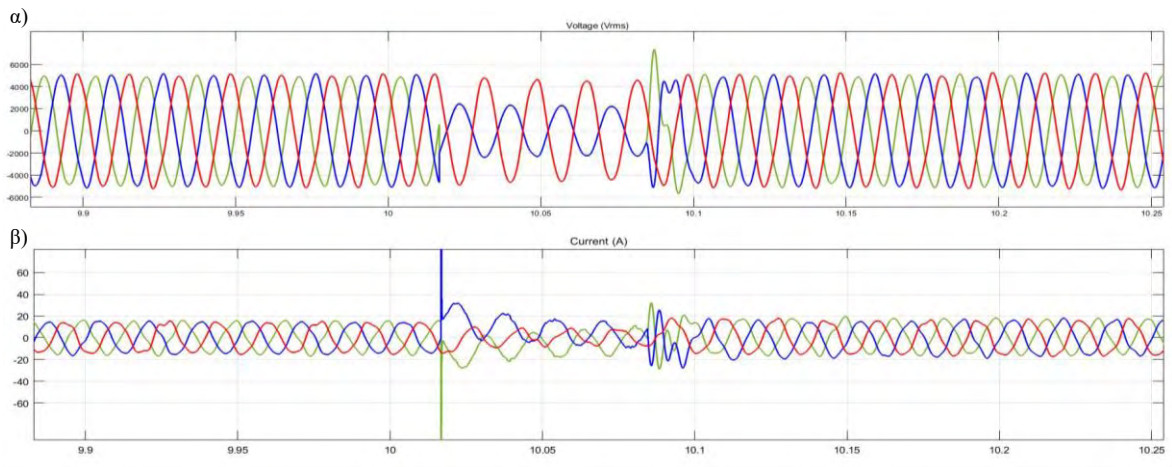
μεταξύ (-300 kW – 1100 kW). Αμέσως μετά τη χρονική στιγμή αυτή επανέρχονται στην πρότερη τους λειτουργία. Επίσης από την γραφική παράσταση της τάσης (Εικόνα 4.31 (δ)) φαίνεται πως δεν δημιουργείται κάποια σοβαρή διαταραχή μεγάλης διάρκειας, η αποκατάσταση της είναι άμεση.



Εικόνα 4.31 Αποτελέσματα προσομοίωσης SLG σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ

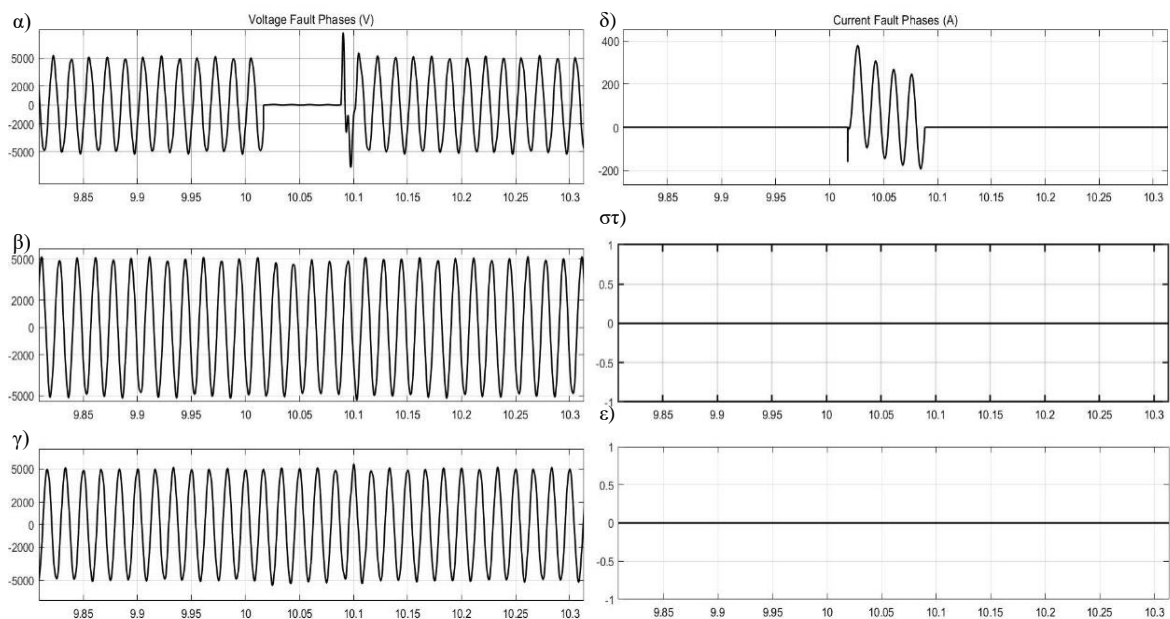
Αναφορικά με την τιμή των τριών φάσεων της τάσης και του ρεύματος στην πλευρά της ανεμογεννήτριας, όπου συμβαίνει το σφάλμα (Εικόνα 4.32) παρατηρούνται τα εξής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.32 (α), η μία φάση της τάσης μηδενίζεται και οι άλλες δύο παρουσιάζουν διαταραχή τόσο στην περίοδο όσο και στο πλάτος τους. Το ρεύμα, (Εικόνα 4.32 (β)), παρουσιάζει στιγμιαία σημαντική αύξηση τη χρονική στιγμή εφαρμογής του σφάλματος και στη συνέχεια η τιμή του για 0,1 s σχεδόν διπλασιάζεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη καθώς τη στιγμή του σφάλματος παρατηρήθηκε στιγμιαία αλματώδης αύξηση και στην ισχύ. Η επαναφορά του όμως στην φυσιολογική λειτουργία

είναι άμεση. Δεν δημιουργείται κάποια μόνιμη βλάβη, το σφάλμα ήταν παροδικό (ξεπεράστηκε σε 0.1s) και έτσι δεν αποτέλεσε κίνδυνο για τη λειτουργία του μικροδικτύου.



Εικόνα 4.32 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της ανεμογεννήτριας κατά το σφάλμα SLG

Στην Εικόνα 4.33, παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των τριών φάσεων της τάσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Όπως φαίνεται τη χρονική στιγμή 10s, η μία φάση της τάσης (Εικόνα 4.33 (α)) μηδενίζεται για 0.1s (διάρκεια σφάλματος) ενώ για το ίδιο χρονικό διάστημα το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Εικόνα 4.33 (δ)) κυμαίνεται από -200 – 400 A. Οι υπόλοιπες φάσεις (τάσης και ρεύματος) όπως ήταν αναμενόμενο μένουν ανεπηρέαστες.



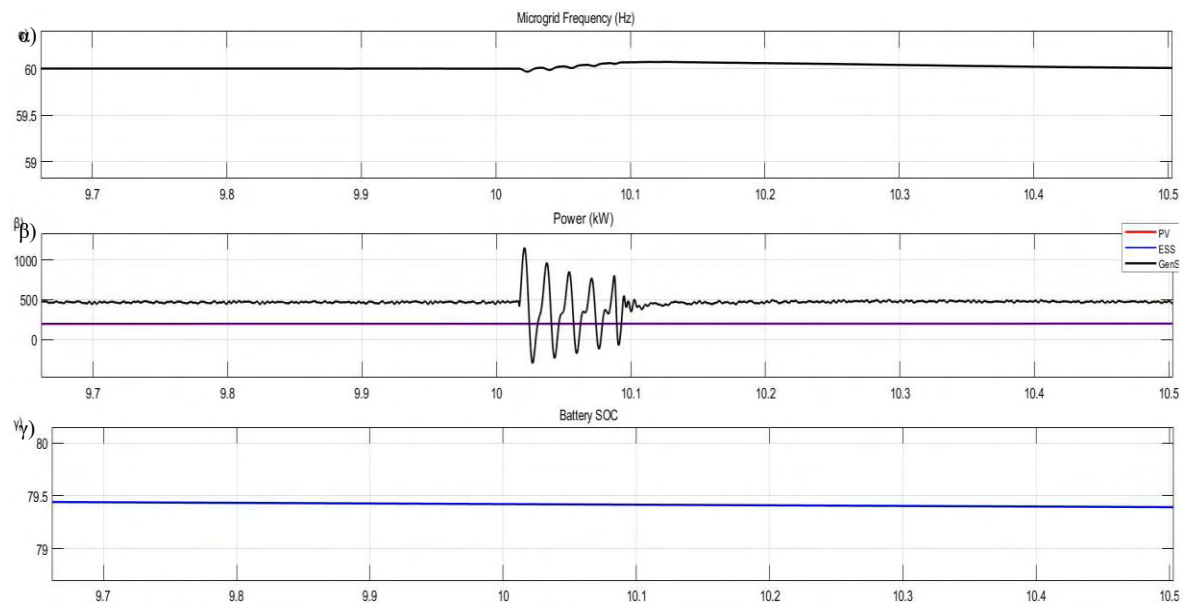
Εικόνα 4.33 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης SLG σφάλματος

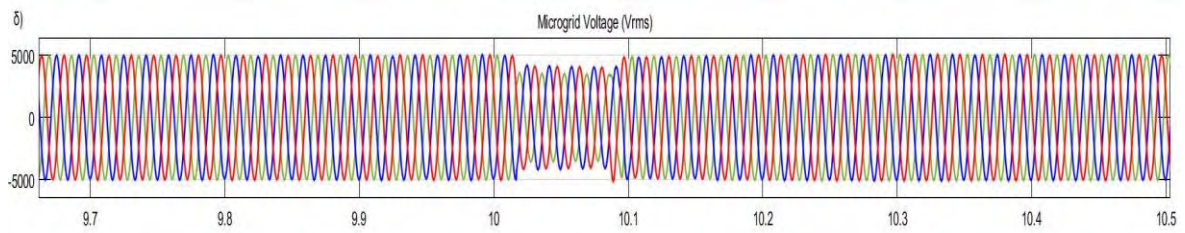
4.3.3.2 Διφασικό σφάλμα με τη γη (Line to Line to Ground fault) και Διφασικό σφάλμα χωρίς τη γη (Line to Line fault)

Στα επόμενα γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματα των δύο σφαλμάτων (Line to Line to Ground και Line to Line αντίστοιχα). Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά ως προς τη συχνότητα του μικροδικτύου και στα δύο σφάλματα (Εικόνα 4.34 (α) και 4.37 (α)), καθώς η αύξηση είναι < 0.1 Hz. Επιπλέον η ισχύς και οι τάσεις φαίνονται να επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο, καθώς οι διαφορές είναι ανεπαίσθητες (Εικόνα 4.34 (β) και 4.37(β)).

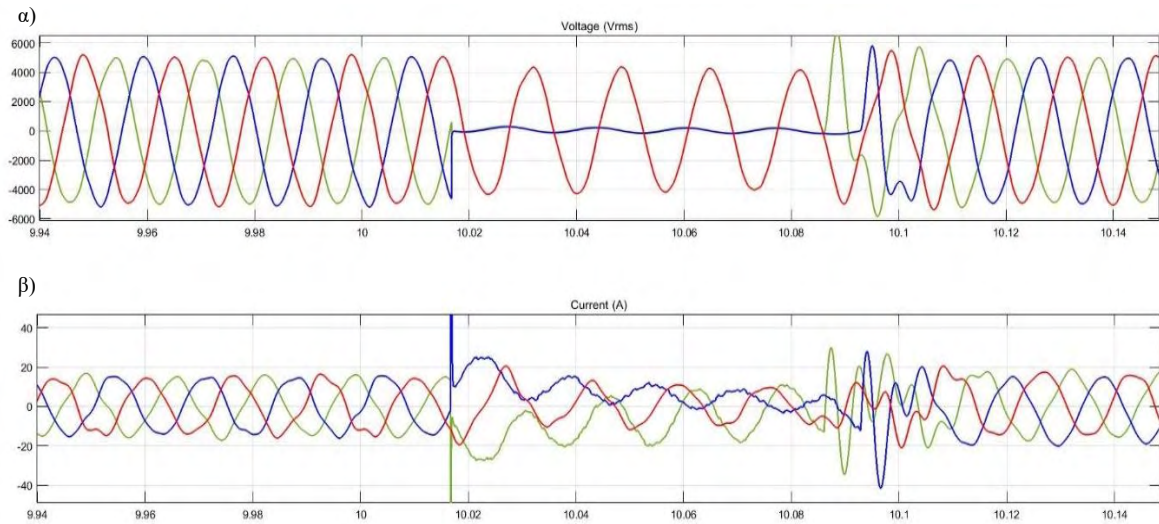
Αναφορικά με την τάση στο σημείο του σφάλματος παρατηρείται να πλήττονται οι αντίστοιχες φάσεις για κάθε περίπτωση (μηδενισμός/αποσυντονισμός). Το ρεύμα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το ρεύμα του μονοφασικού σφάλματος που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα (4.3.3.1) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.35 (α),(β) και 4.38 (α),(β), αντίστοιχα.

Αναφορικά με τις τάσεις και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης παρατηρείται και εδώ παρόμοια συμπεριφορά με μικρές διαφορές. Οι δύο από τις 3 φάσεις και στις δύο περιπτώσεις μηδενίζονται ενώ τα αντίστοιχα ρεύματα βραχυκύκλωσης τους κυμαίνονται από $-100 - 400$ A (Εικόνες 4.36 και 4.39 αντίστοιχα). Στη συνέχεια του υπό κεφαλαίου παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις τόσο του LLG όσο και του LL σφάλματος, και περιγράφουν γραφικά την ανάλυση που προηγήθηκε.

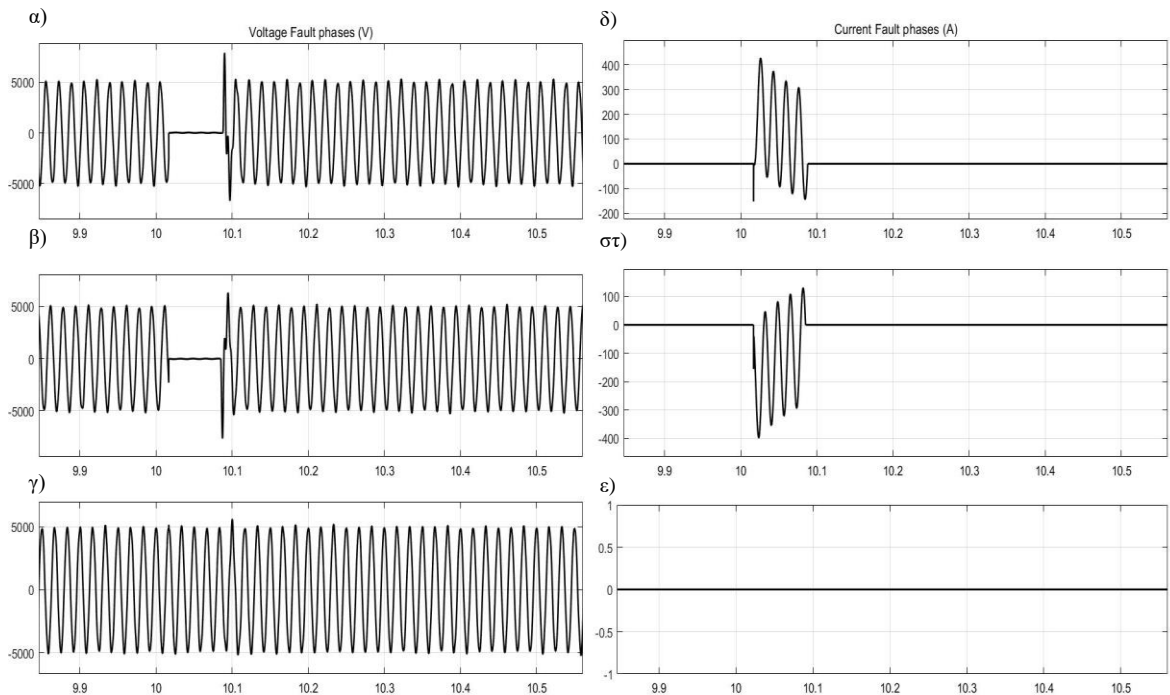




Εικόνα 4.34 Αποτέλεσμα προσομοίωσης LLG σφάλματος

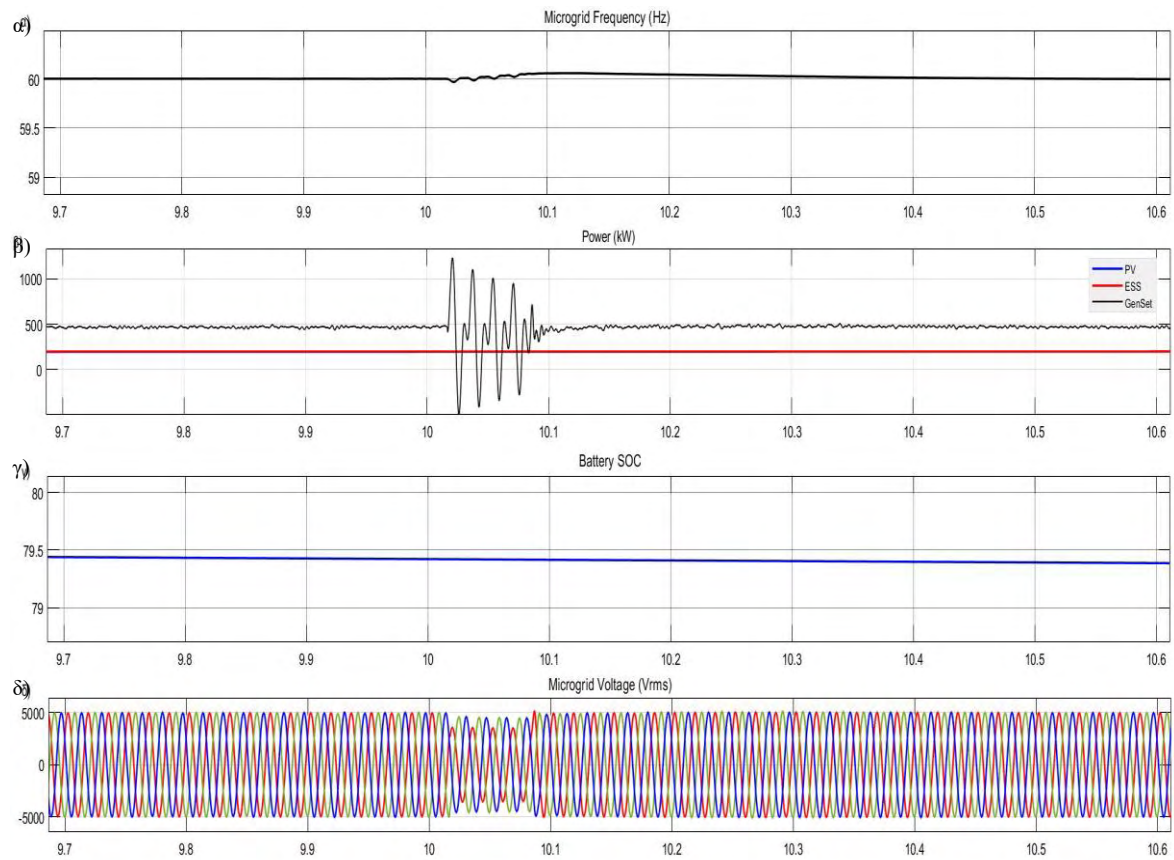


Εικόνα 4.35 Τάση (α) ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της Α/Γ κατά το σφάλμα LLG

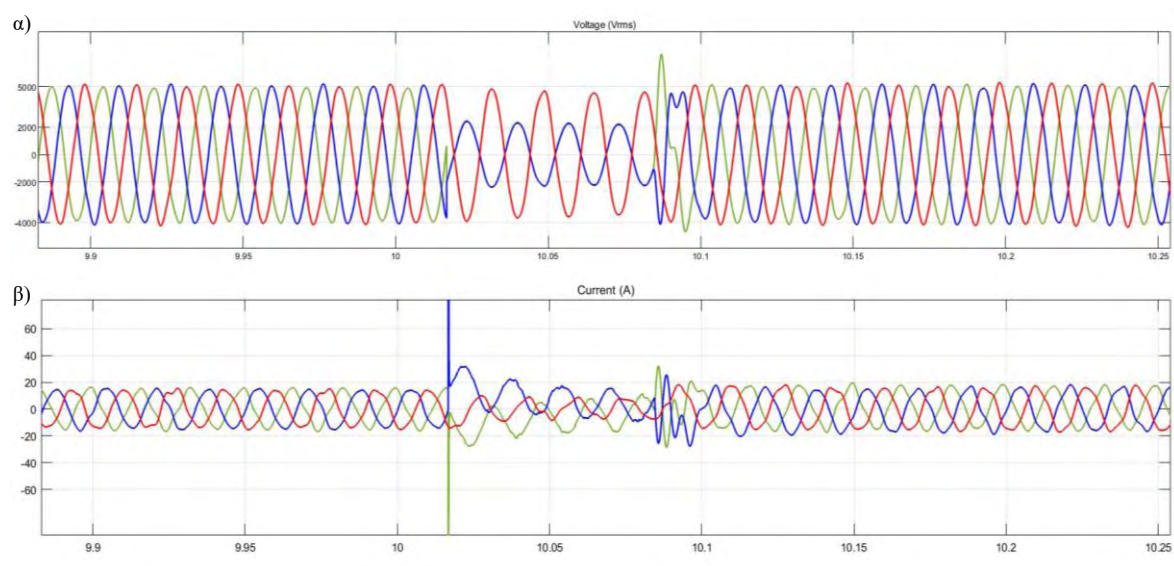


Εικόνα 4.36 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LLG σφάλματο

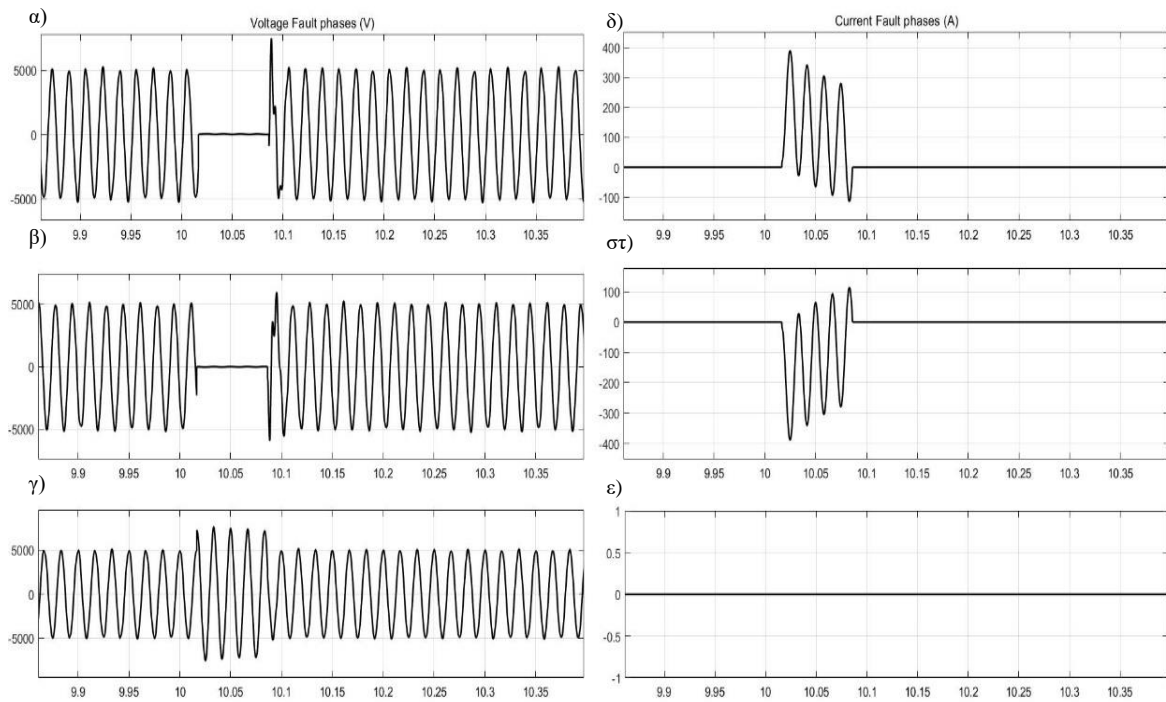
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις της προσομοίωσης του **Διφασικού σφάλματος (LL)** χωρίς τη γη, όπως αναλύθηκαν, στην θεωρητική ανάλυση της ενότητας.



Εικόνα 4.37 Αποτελέσματα προσομοίωσης LL σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ



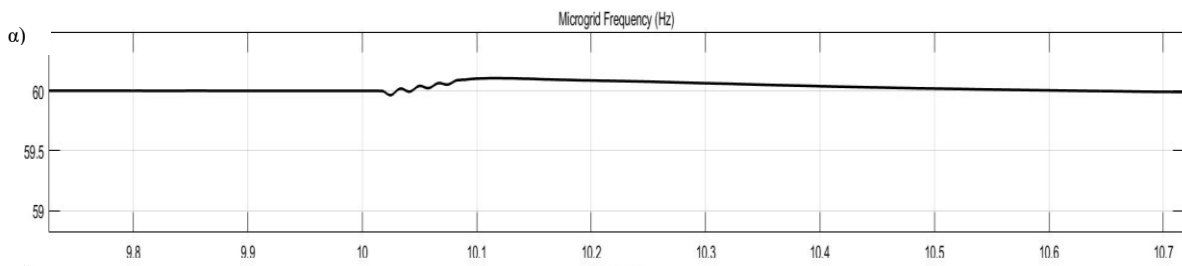
Εικόνα 4.38 Τάση (α) και ρεύμα (β) τριών φάσεων στην πλευρά της Α/Γ κατά το σφάλμα LL

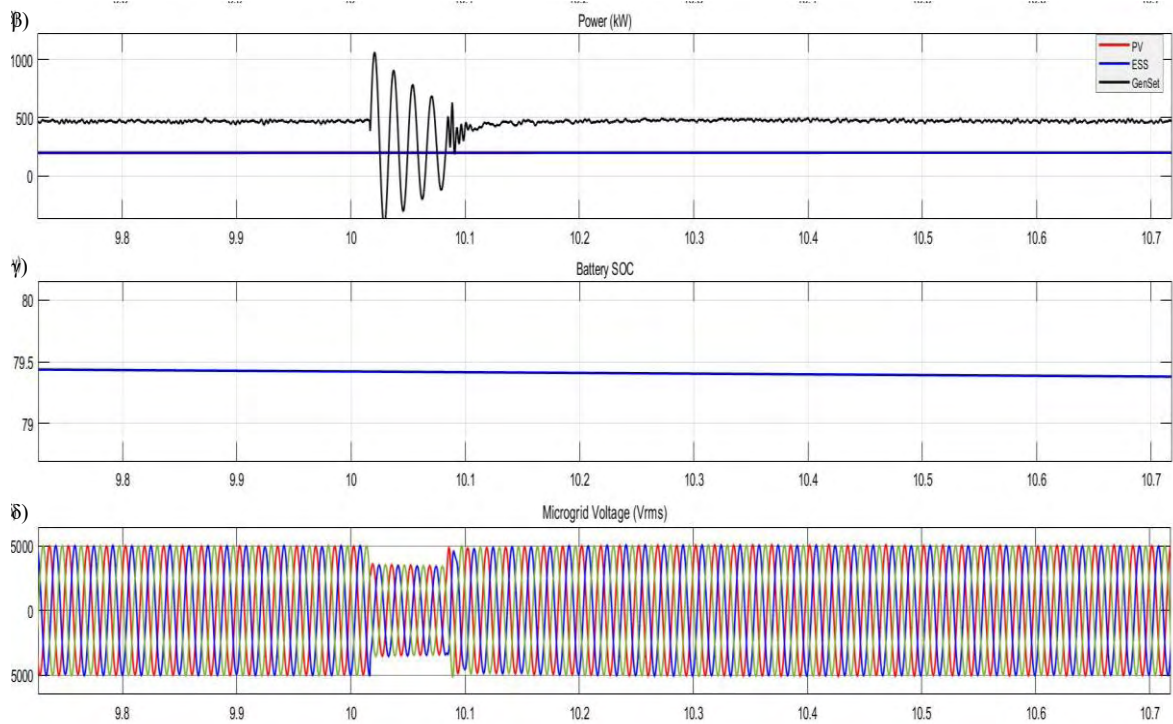


Εικόνα 4.39 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης LL σφάλματος

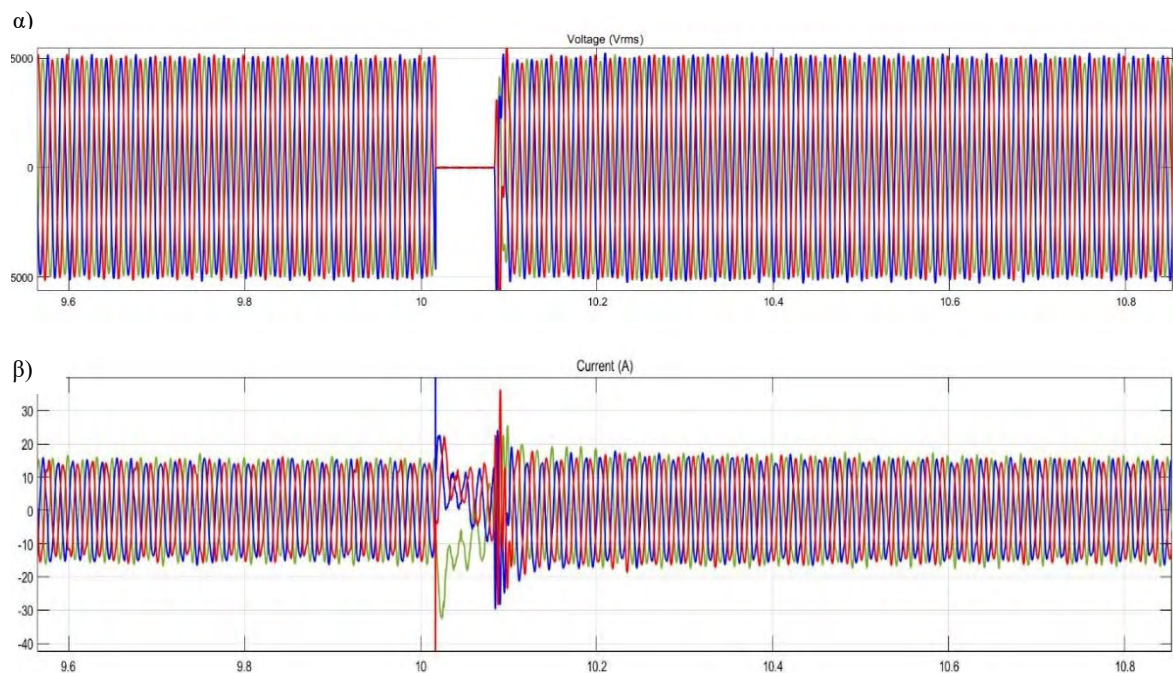
4.3.3.3 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)

Παρατίθενται τα γραφήματα όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του τριφασικού σφάλματος στην πλευρά της ανεμογεννήτριας. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ο ίδιος αποσυντονισμός στις γεννήτριες, με μικρή διακύμανση στη συχνότητα του μικροδικτύου (Εικόνα 4.40 (α)). Αναφορικά με την ανεμογεννήτρια που συμβαίνει το σφάλμα, παρατηρείται μηδενισμός των τριών φάσεων της τάσης (Εικόνα 4.41 (α)). Το ρεύμα, τη χρονική στιγμή του σφάλματος λαμβάνει ακραία τιμή και στη συνέχεια ακολουθεί ακανόνιστη ημιτονοειδή πορεία (Εικόνα 4.41 (β)).



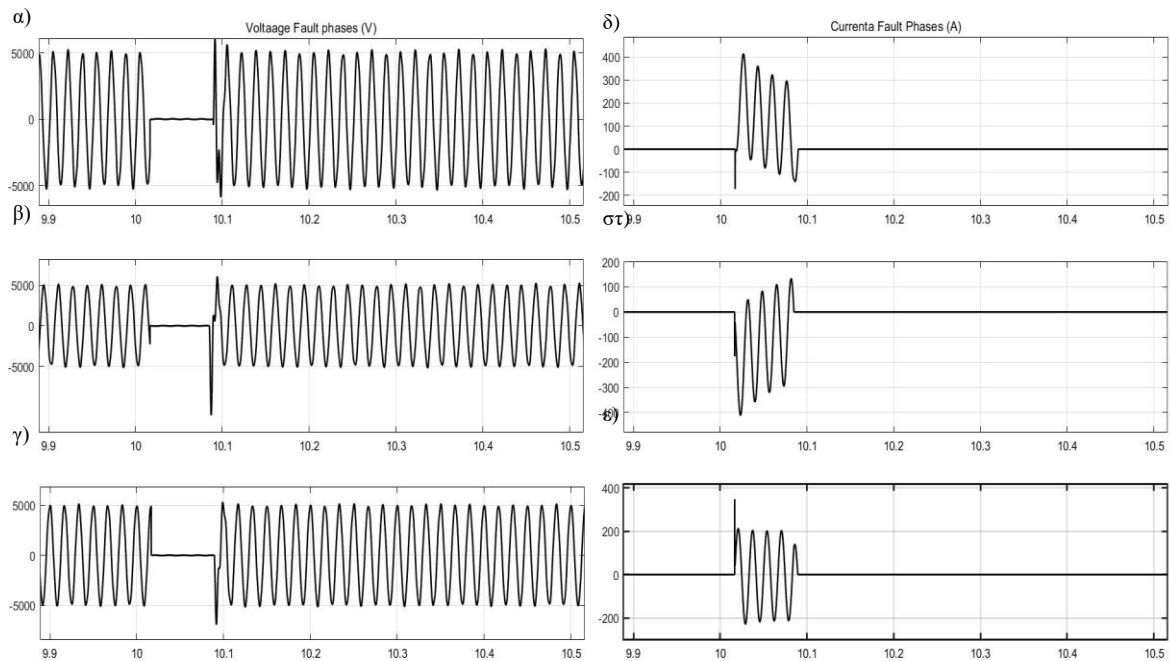


Εικόνα 4.40 Αποτελέσματα προσομοίωσης τριφασικού σφάλματος στην πλευρά της Α/Γ



Εικόνα 4.41 Τάση και Ρεύμα στην πλευρά της Α/Γ κατά το τριφασικό σφάλμα

Τέλος αναφορικά με τις τάσεις και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης (Εικόνα 4.42), παρατηρείται μηδενισμός όλων των φάσεων της τάσης (Εικόνα 4.42 (α,β,γ)), ενώ οι τιμές των φάσεων του ρεύματος βραχυκύκλωσης κυμαίνονται από $-400 - 400$ A (Εικόνα 4.42 (δ,στ,ε)).



Εικόνα 4.42 Τάσεις (α,β,γ) και ρεύματα (δ,στ,ε) βραχυκύκλωσης τριφασικού σφάλματος

4.3.4 Συμπεράσματα δευτέρου σεναρίου

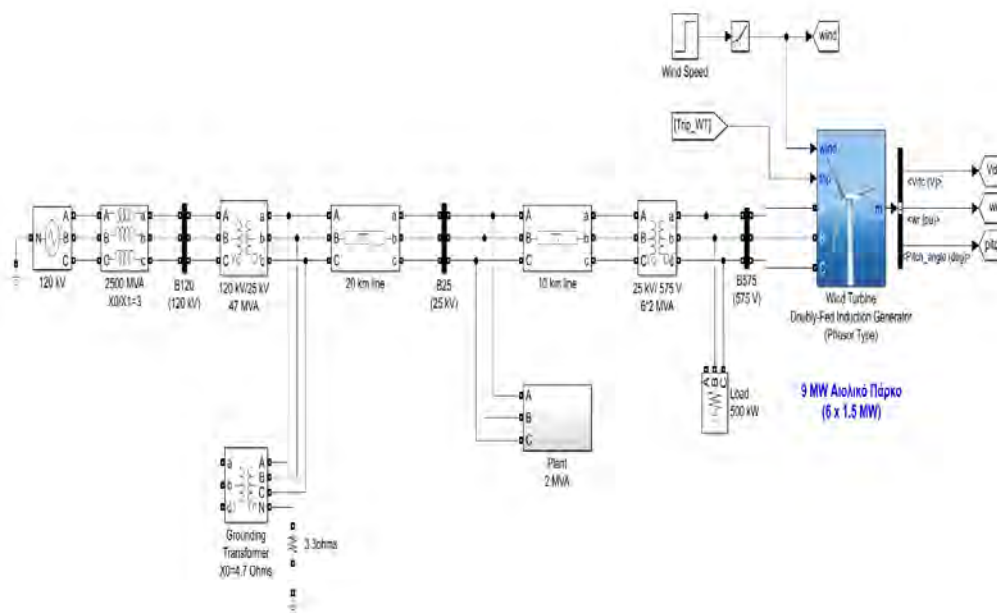
Στο δεύτερο σενάριο με την ένταξη της ανεμογεννήτριας και την προσομοίωση όλων των σφαλμάτων παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά του δικτύου κατά το σφάλμα ήταν παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις (όσον αφορά την διατάραξη της συχνότητας και τον αποσυντονισμό των γεννητριών). Σε όλες τις περιπτώσεις, εμφανίστηκε στιγμιαία αύξηση των ρευμάτων της ανεμογεννήτριας η οποία προέκυψε από τον αποσυντονισμό των γεννητριών (όπως φαίνεται και στις γραφικές παραστάσεις ανάλογα με τις φάσεις που πλήττονται σε κάθε περίπτωση εμφανίζεται στιγμιαία αύξηση).

Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η ισχύς της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τα φορτία του μικροδικτύου ήταν σημαντικά μικρότερη. Συνεπώς, τα σφάλματα δεν επηρέασαν το μικροδίκτυο σε τέτοιο βαθμό ώστε να δημιουργηθούν μεγάλες αυξομειώσεις στη συχνότητα και στην τάση. Σε περίπτωση που η ισχύς της ανεμογεννήτριας ήταν συγκρίσιμη με τα φορτία του δικτύου, η επίδραση των σφαλμάτων στη λειτουργία του μικροδικτύου θα ήταν σαφώς σημαντικότερη.

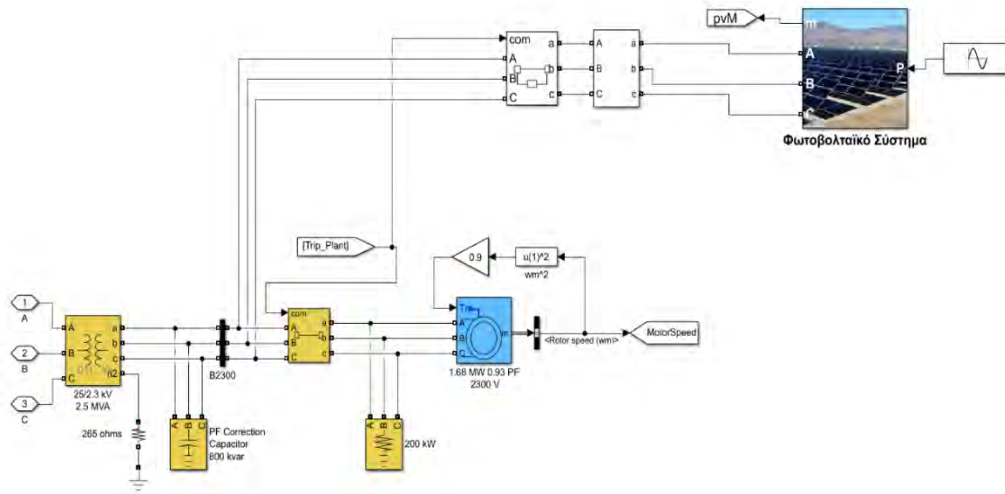
4.4 Σενάριο λειτουργίας Τρίτο: Καταναμημένοι Πόροι συνδεδεμένοι στο επίπεδο Μεταφοράς

Στο τρίτο σενάριο λειτουργίας της εργασίας, εξετάζεται ένα σύστημα μεταφοράς στο οποίο έχουν ενσωματωθεί τόσο συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες όσο και ανανεώσιμοι πόροι, πιο συγκεκριμένα ένα αιολικό και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο (Εικόνες 4.43 και 4.44, αντίστοιχα). [42]

Καθώς το σύστημα μεταφοράς έχει διαφορετικό σκοπό και αρχιτεκτονική από αυτό της διανομής, στόχος του πειράματος είναι να αναλυθεί η συμπεριφορά των πόρων που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό υπό μη-συμβατικές συνθήκες, και να παρουσιαστούν οι συνέπειες που προκύπτουν, από την εισαγωγή σφαλμάτων. Η διαφορά αυτού του σεναρίου σε σχέση με τα προηγούμενα που μελετήθηκαν, έγκειται τόσο στα μεγέθη των μονάδων που εισάγονται (μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ), όσο και στη διαφορετική δομή του δικτύου (μεγαλύτερο μήκος γραμμών και εξυπηρέτηση απομακρυσμένων φορτίων). Η αρχιτεκτονική και η παραμετροποίηση των πηγών και του δικτύου που σχεδιάστηκε αναλύεται λεπτομερώς, στην ενότητα 4.4.1.



Εικόνα 4.43 Διάταξη ΚΠ στο σύστημα μεταφοράς



Εικόνα 4.44 Λεπτομερής διάταξη Plant 2MVA με ένταξη Φωτοβολταϊκού συστήματος

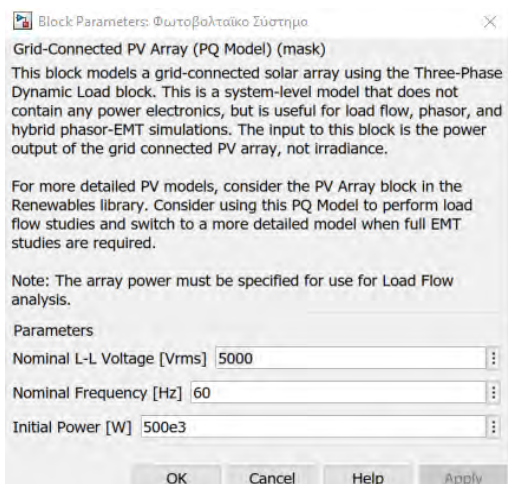
4.4.1 Στοιχεία Αρχιτεκτονικής

Όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή της ενότητας 4.4, σκοπός του τρίτου πειραματικού σεναρίου είναι να αναλυθεί ένα σύστημα μεταφοράς με καταναμημένους πόρους. Γι' αυτό τον σκοπό, διαθέτουμε ένα σύστημα μεταφοράς το οποίο μπορεί να χωριστεί σε 2 διαφορετικά τμήματα με βάση την τάση λειτουργίας. Η υψηλότερη, με βάση το δυναμικό λειτουργίας περιοχή, λειτουργεί στα 120kV και σε αυτό το σημείο είναι συνδεδεμένη μια ιδανική τριφασική πηγή τάσης, χωρητικότητας 2500MVA η οποία μοντελοποιεί το λοιπό σύστημα μεταφοράς, εκτός του τμήματος που ενσωματώνει την ΚΠ.

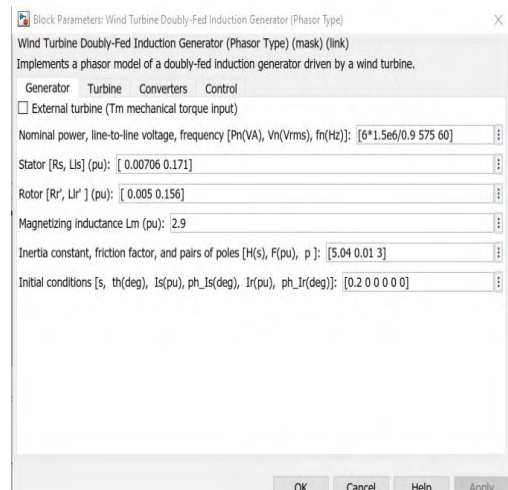
Το υπόλοιπο σύστημα χωρίζεται σε δύο περιοχές οι οποίες ενώνονται με το κυρίως σύστημα μεταφοράς μέσω των απαραίτητων Μ/Σ. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένας Μ/Σ τύπου Yg-D (αστέρας-τρίγωνο) για να υποβιβάσει την τάση από τα 120kV στα 25kV. Στο σημείο των 25kV προσδένονται τόσο οι καταναμημένοι πόροι όσο και η συμβατική σύγχρονη γεννήτρια.

Το αιολικό πάρκο συμπεριλαμβάνει 6 ανεμογεννήτριες με ισχύ 1.5MW η καθεμία, συνολικά 9MW ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο συνδέεται στο σημείο των 25kV, μέσω ενός Μ/Σ Yg-D (αστέρας-τρίγωνο) με λόγο τυλίγματος 25 kV: 575V και χωρητικότητα 12MVA. Αντίστοιχα, ένας Μ/Σ τύπου D-Yn (τρίγωνο-αστέρα) με λόγο τυλίγματος 25 kV /2.3kV και χωρητικότητα 2.5MVA χρησιμοποιείται για να συνδεθούν τόσο η σύγχρονη γεννήτρια όσο και η φωτοβολταϊκή συστοιχία (Εικόνα 4.44). Η σύγχρονη γεννήτρια προσφέρει ισχύ της τάξης των 1.68MW στο δίκτυο με συντελεστή ισχύος 0.93, ενώ τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του πάρκου, μπορούν να προσφέρουν μέγιστη ισχύ της τάξης των 500kW.

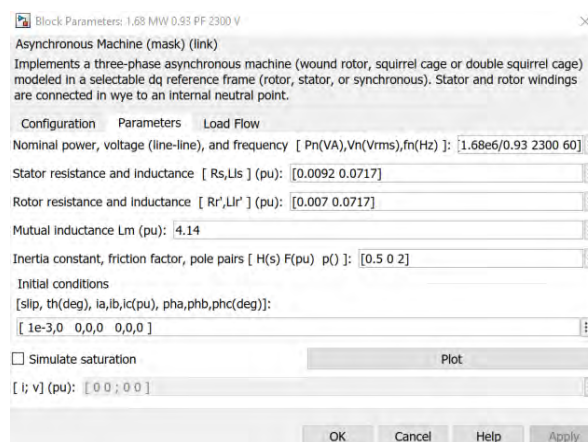
Συγκεκριμένα, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τις ανεμογεννήτριες, τη σύγχρονη γεννήτρια αλλά και τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες 4.45, 4.46 και 4.47, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.45 Φ/Β Σύστημα



Εικόνα 4.46 Πάρκο Α/Γ

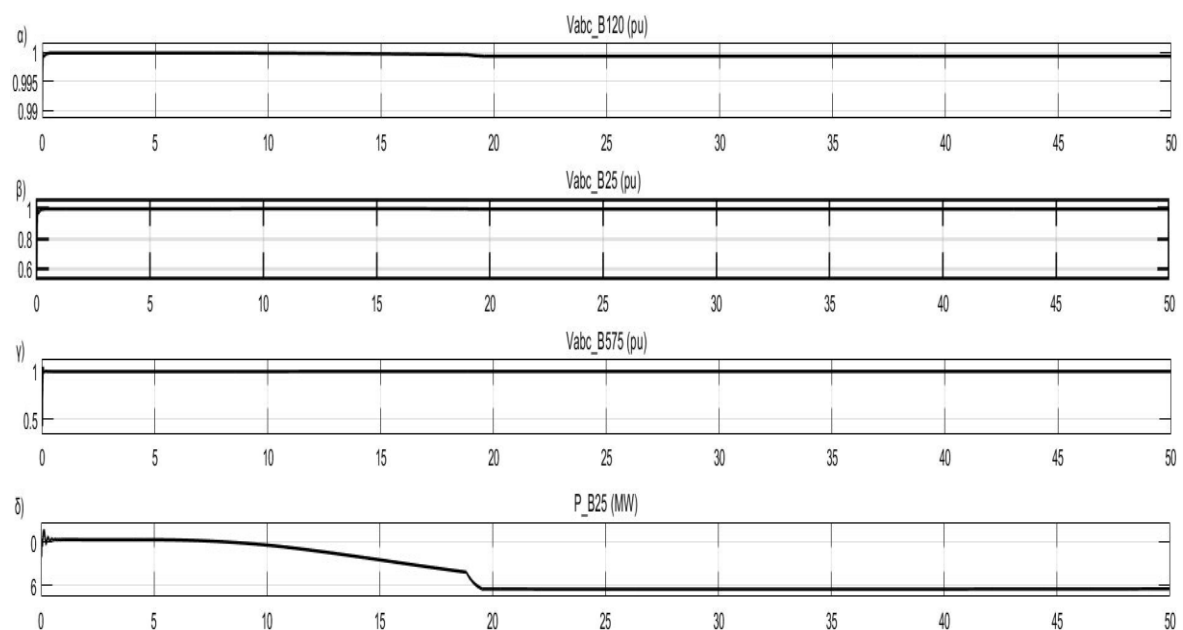


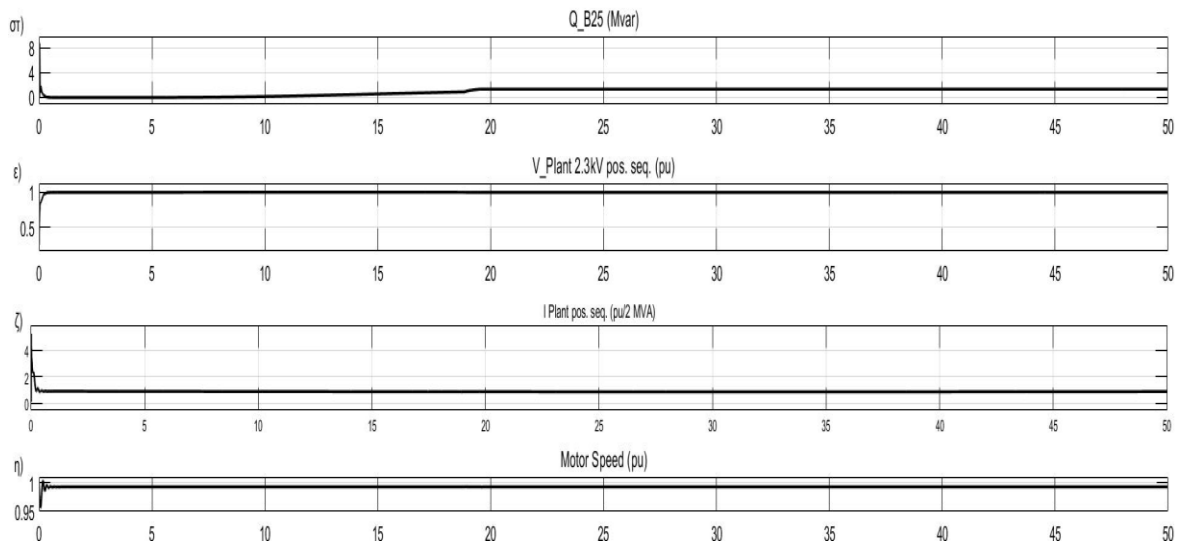
Εικόνα 4.47 Σύγχρονη γεννήτρια

Για την προστασία του συστήματος από σφάλματα και τα επακόλουθα υπερ-υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώσεως, μηχανισμοί προστασίας έχουν ενσωματωθεί και στο μοντέλο της προσομοίωσης. Σε κάθε ένα από τα επακόλουθα είδη σφάλματων που θα παρουσιαστούν (μονοφασικά, τριφασικά, κτλ.), στη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$ το σφάλμα εισάγεται στο σύστημα, ενώ στη χρονική στιγμή $t=5.2\text{sec}$ οι μηχανισμοί προστασίας ενεργοποιούνται προκειμένου να απομονώσουν το σφάλμα από το δίκτυο. Προφανώς, η διατήρηση του σφάλματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα θα παρουσίαζε σοβαρότερες επιπτώσεις στο δίκτυο, όμως δεν θα ήταν ρεαλιστική καθώς όχι μόνο θα διακινδύνευε την καταστροφή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και των πόρων (γεννήτριες, φωτοβολταϊκά, κτλ.), αλλά ακόμη και την υπερφόρτωση των αγωγών μεταφοράς.

4.4.2 Προσομοίωση κανονικής λειτουργίας

Στο πρώτο σκέλος της προσομοίωσης του σεναρίου τρία, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις όπως προέκυψαν από την κανονική λειτουργία του δικτύου χωρίς την εφαρμογή σφαλμάτων. Στην εικόνα 4.48, φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συνολικό δίκτυο.

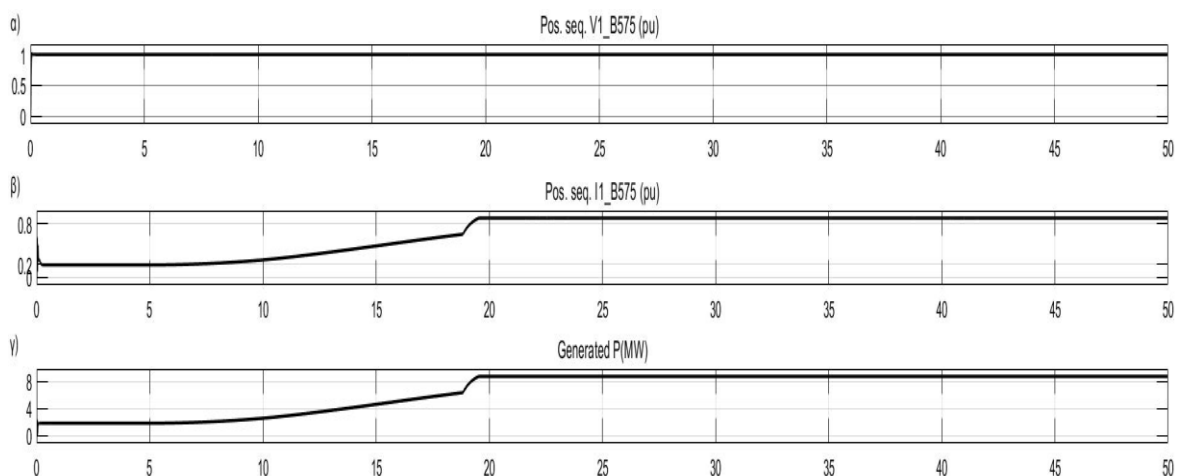


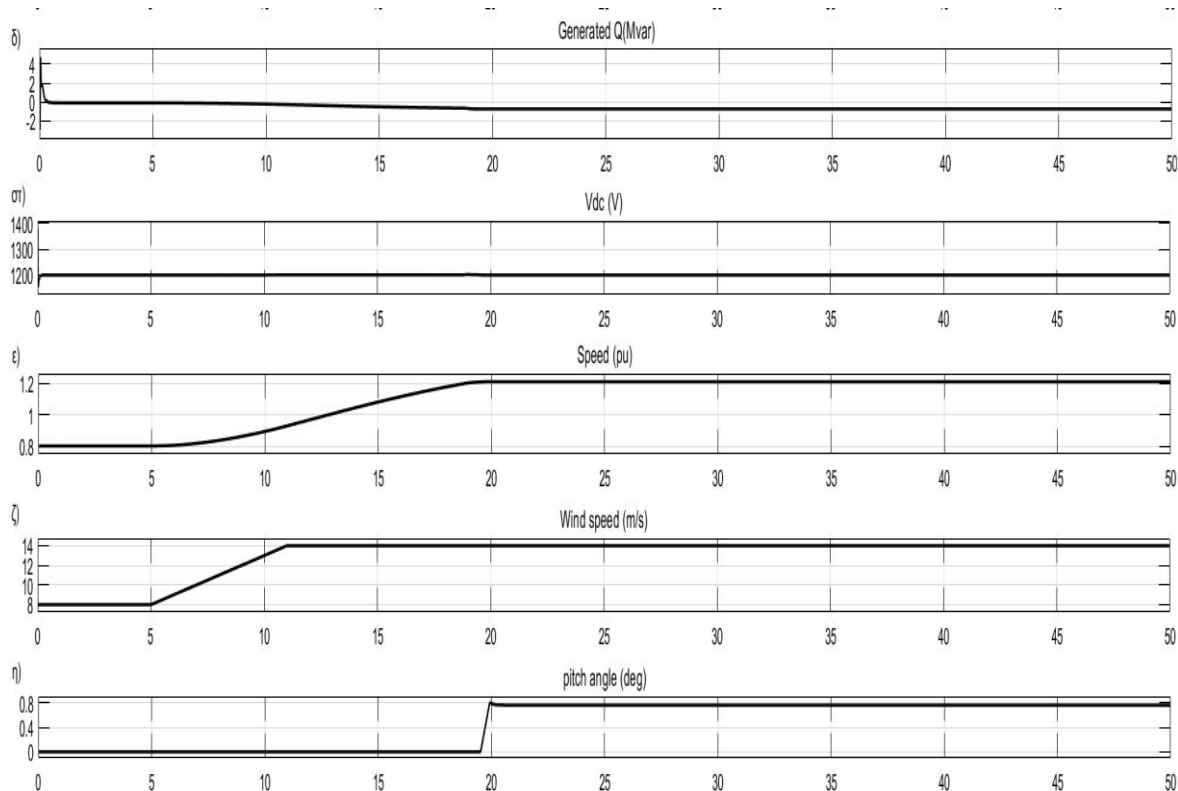


Εικόνα 4.48 Αποτελέσματα κανονικής λειτουργίας του συνολικού δικτύου

Οι γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 4.48 (α,β,γ), παρουσιάζουν την τάση του δικτύου, όπως αυτή μετρήθηκε στους 3 ζυγούς που το απαρτίζουν. Παρατηρείται (σε όλους τους ζυγούς) ότι η τάση με την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος, παίρνει την τιμή 1 pu (τάση κανονικής λειτουργίας του συστήματος). Η γραφική παράσταση στην Εικόνα 4.48 (δ) δείχνει την διακύμανση της παραγωγής ενέργειας στον ζυγό B25, που είναι σημείο σύνδεσης όλων των πηγών της ΚΠ που εισήχθησαν. Όπως φαίνεται από τη χρονική στιγμή $t=0s$ μέχρι τη χρονική στιγμή $t=19s$, παρατηρείται αύξηση ισχύος μέχρι τη σταθεροποίηση της μετά τη χρονική στιγμή $t=20s$. Οι υπόλοιπες μετρήσεις που περιγράφονται γραφικά, όπως οι γραφικές παραστάσεις της τάσης (Εικόνα 4.48 (ι)), του ρεύματος (Εικόνα 4.48 (ζ)), αποδεικνύουν την φυσιολογική λειτουργία του συστήματος (1 pu).

Η Εικόνα 4.49 που ακολουθεί, παρουσιάζει τα δεδομένα που εξήχθησαν από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου





Εικόνα 4.49 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας αιολικού πάρκου

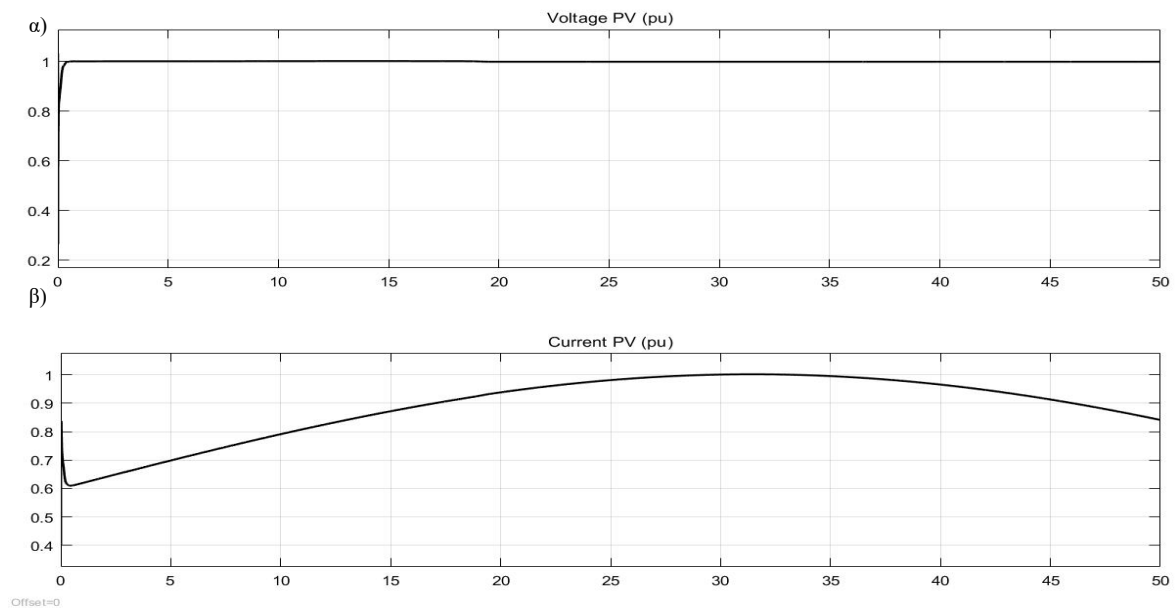
Η γραφική παράσταση της Εικόνας 4.49 (α), δείχνει την σταθερή τάση των ανεμογεννητριών. Τη χρονική στιγμή που τίθενται σε λειτουργία, η τάση της θετικής ακολουθίας σταθεροποιείται στο 1 pu. Το παραγόμενο ρεύμα της γραφικής παράστασης της Εικόνας 4.49 (β), ακολουθεί την πορεία της παραγόμενης ισχύος των γεννητριών η οποία φαίνεται στην γραφική παράσταση της Εικόνας 4.49 (γ).

Όπως φαίνεται, η ισχύς από τη χρονική στιγμή $t=0$ μέχρι την χρονική στιγμή $t=19.75$, ακολουθεί αυξητική πορεία μέχρι να σταθεροποιηθεί. Αυτό το γεγονός είναι λογικό και επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα της ταχύτητας περιστροφής των ανεμογεννητριών (Εικόνα 4.49 (ε)). Η ταχύτητα των γεννητριών καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου. Όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση ζ, η ταχύτητα του ανέμου, από τη χρονική στιγμή $t=5s$ έως τη χρονική στιγμή $t=11s$, αυξάνεται μέχρι να σταθεροποιηθεί στα 14 m/s.

Ταυτόχρονα, και η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας ακολουθεί παρόμοιο προφίλ λειτουργίας, μέχρι να ισορροπήσει μετά το $t=20s$. Γίνεται σαφές και πειραματικά, ότι η λειτουργία και η παραγωγή ισχύος από τις σύγχρονες γεννήτριες των ανεμογεννητριών εξαρτώνται από τον ανανεώσιμο πόρο του ανέμου. Για να διασφαλιστεί λοιπόν ο μέγιστος βαθμός απόδοσης

ενός πάρκου, θα πρέπει τόσο η θέση του όσο και η ρυθμίσεις λειτουργίας του, να εξασφαλίζουν τη μέγιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού.

Η εικόνα 4.50 που ακολουθεί, παρουσιάζει χαρακτηριστικά λειτουργίας (τάση (α) και ρεύμα (β) αντίστοιχα) του φωτοβολταϊκού πάρκου που έχει εισαχθεί στο σύστημα μεταφοράς.

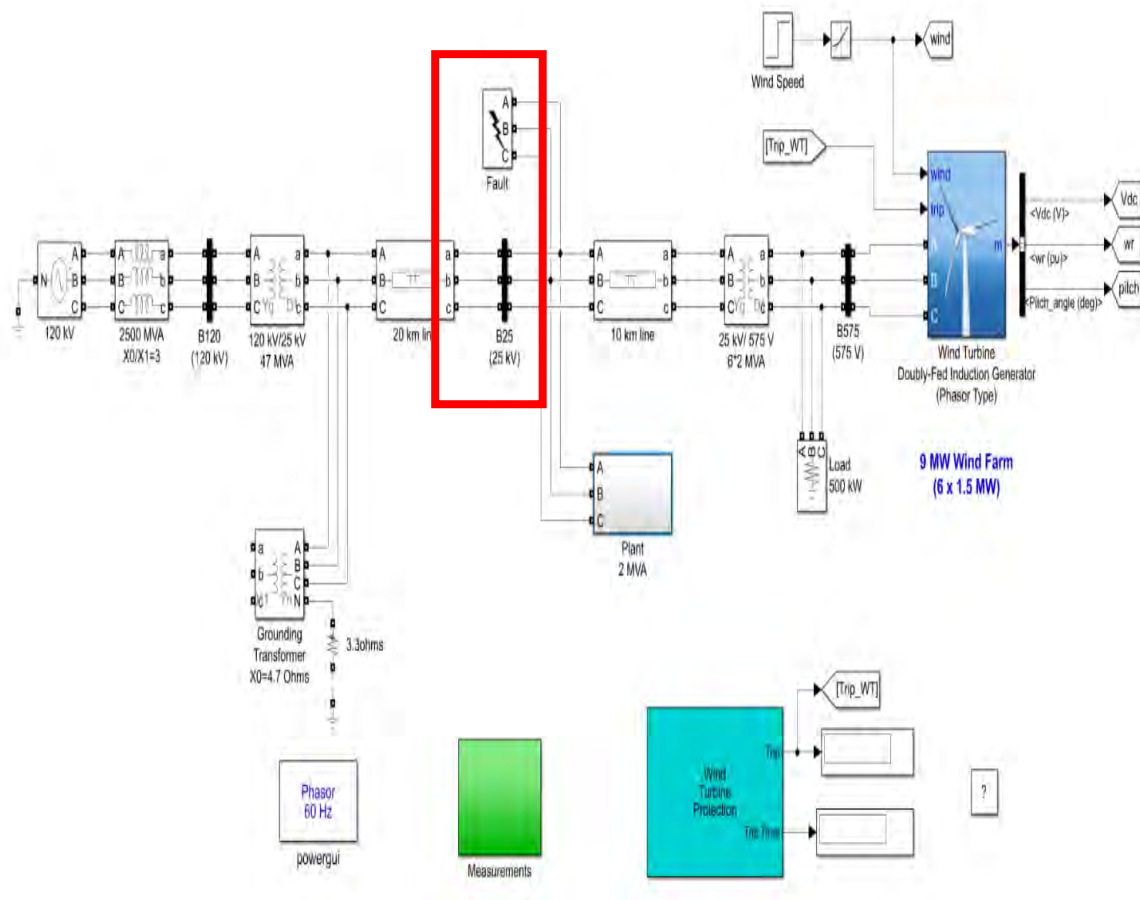


Εικόνα 4.50 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας Φωτοβολταϊκού πάρκου

Το Φωτοβολταϊκό πάρκο λοιπόν, όπως φαίνεται από την γραφική παράσταση της Εικόνας 4.50 (α), με το που τίθεται σε λειτουργία στιγμιαία σταθεροποιεί την τάση λειτουργίας (πριν τη χρονική στιγμή $t=1s$). Επιπλέον από την ίδια χρονική στιγμή και μετά το ρεύμα που παράγεται μέσω των φωτοβολταϊκών μονάδων παρουσιάζει σταδιακή αύξηση (Εικόνα 4.40 (β)) ακολουθώντας το ηλιακό δυναμικό όπως ορίστηκε στην προσομοίωση. Γίνεται αντιληπτό πως το φωτοβολταϊκό πάρκο ενχύνει στο δίκτυο την παραγόμενη ισχύ.

4.4.3 Προσομοίωση σφαλμάτων

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.51, τη χρονική στιγμή $t=5s$, εφαρμόζουμε σφάλμα στο ζυγό B25, όπου συνδέονται οι ανανεώσιμοι πόροι με το υπόλοιπο κύκλωμα. Τα σφάλματα που θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες είναι το μονοφασικό σφάλμα με τη γη, και το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν οι ΚΠ είναι συνδεδεμένοι κανονικά στο κυρίως δίκτυο.

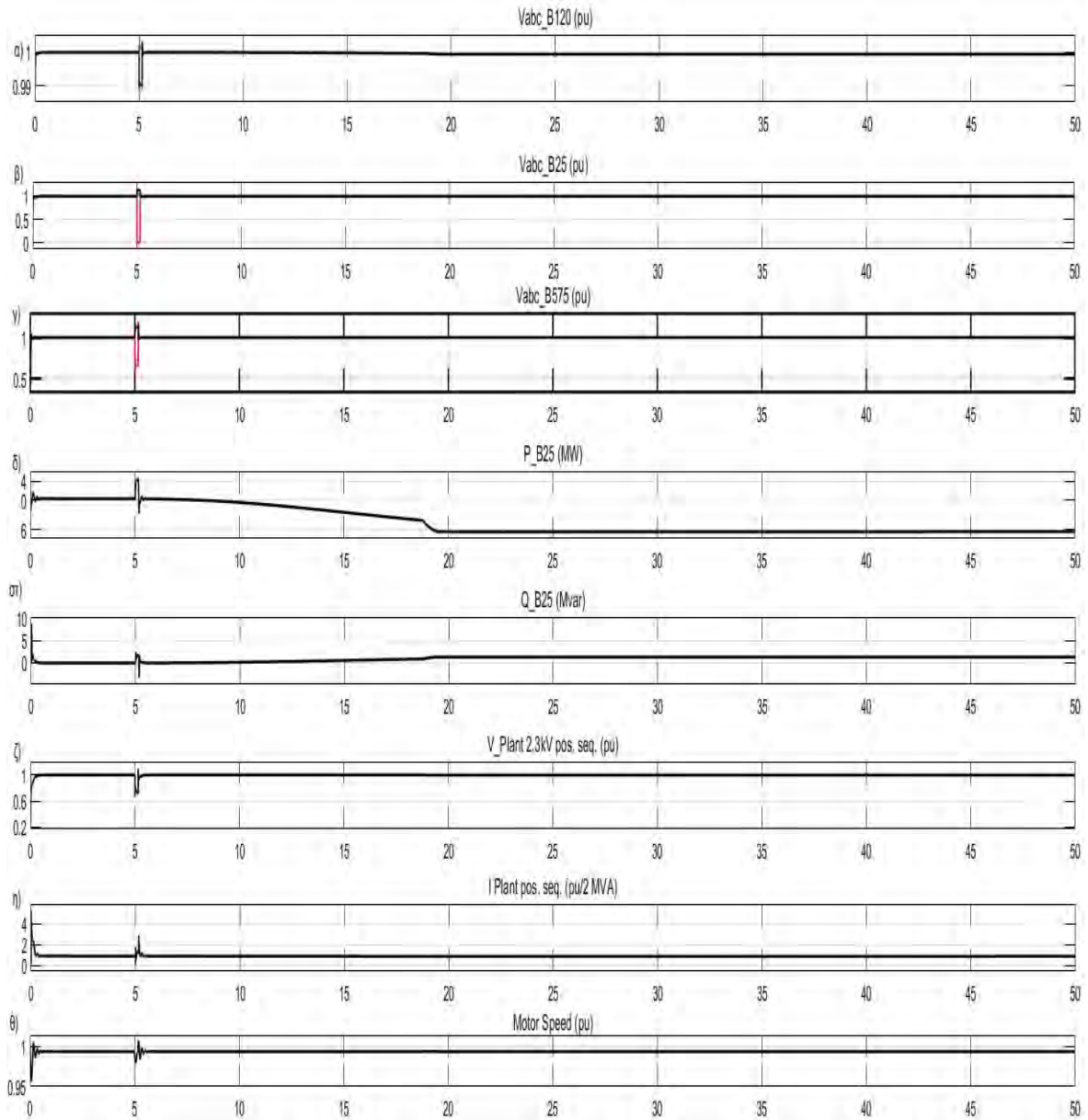


Εικόνα 4.51 Θέση εφαρμογής σφάλματος

4.4.3.1 Μονοφασικό σφάλμα με τη γη (Single Line to Ground fault)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τη χρονική στιγμή $t=5s$ προκαλείται μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό B25. Όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.52) οι οποίες αφορούν το συνολικό δίκτυο, τη χρονική στιγμή του σφάλματος ($t=5s$) παρατηρούνται οι εξής συμπεριφορές. Από τις τρεις πρώτες γραφικές παραστάσεις της

Εικόνας 4.52 (α,β,γ), εξάγονται τα συμπεράσματα που αφορούν την επιρροή του σφάλματος στις τάσεις των τριών ζυγών του συστήματος. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρήχθησαν, η τάση που επηρεάστηκε σε μεγαλύτερο βαθμό, είναι η τάση του ζυγού B25 (Εικόνα 4.52 (γ)), όπου προκλήθηκε και το σφάλμα.



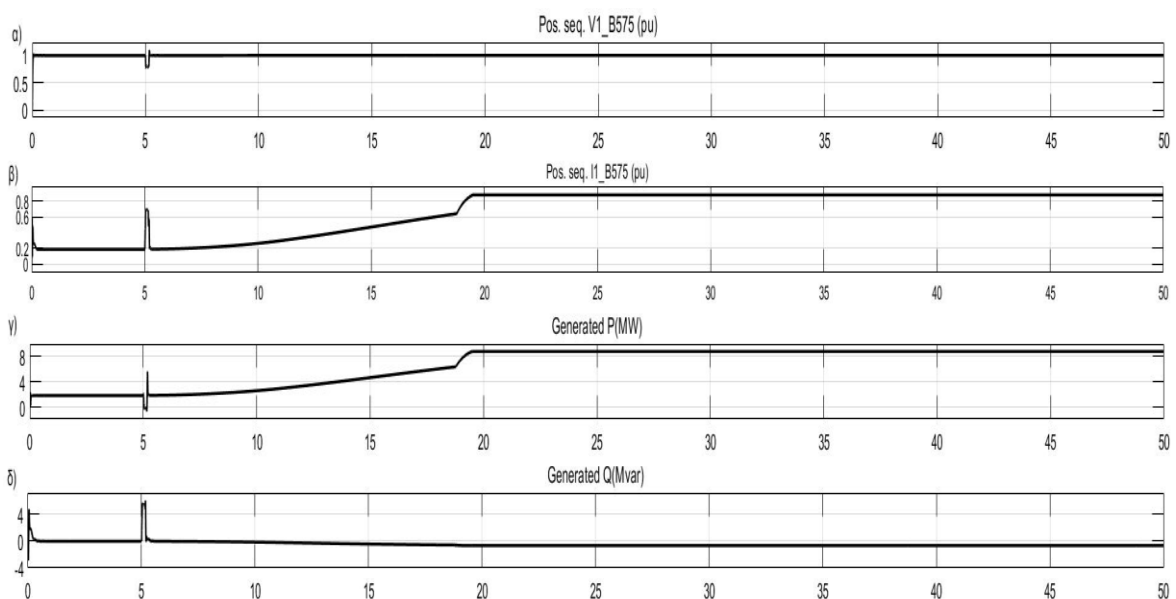
Εικόνα 4.52 Γραφικές παραστάσεις του δικτύου κατά το μονοφασικό σφάλμα

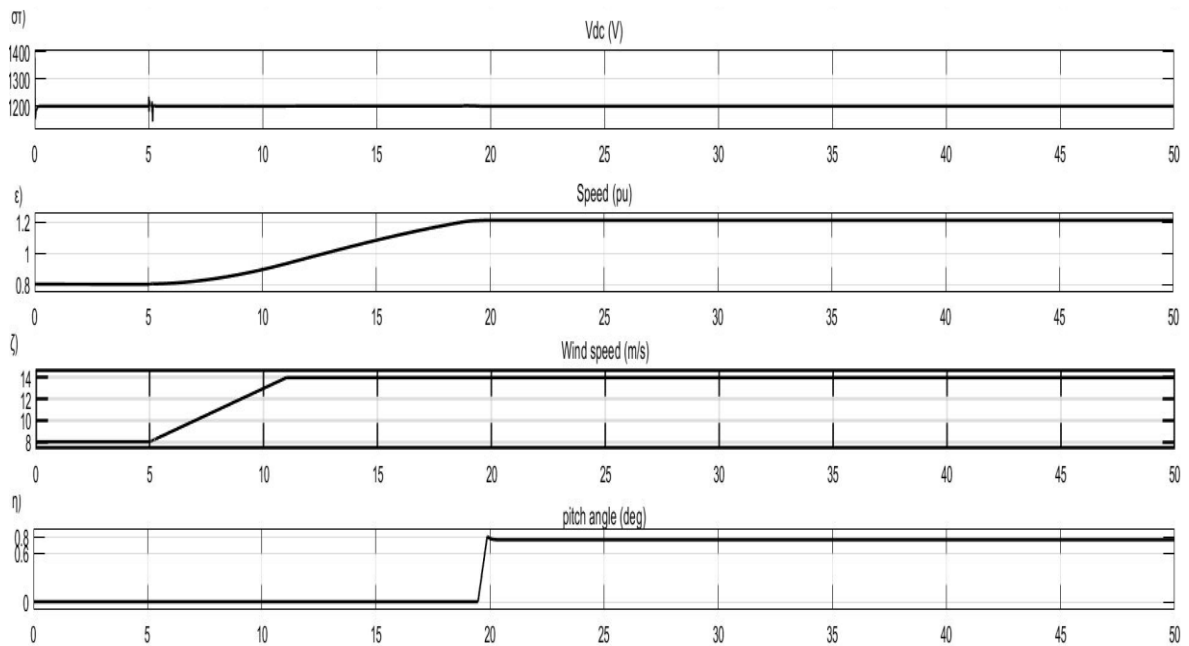
Οι βυθίσεις που δημιουργήθηκαν στις τάσεις των 3 διαφορετικών περιοχών του δικτύου (120 kV, 25 kV, 575 V), ήταν στιγμιαίες και η μεγαλύτερη βύθιση παρατηρείται στο σημείο του σφάλματος, τμήμα των 25 kV όπου προκλήθηκε μηδενισμός της τάσης. Η επίδραση στην περιοχή των 120 kV είναι η μικρότερη, ενώ στα 575 V όπου λειτουργεί η

ανεμογεννήτρια παρατηρείται επίσης σημαντική βύθιση της τάσης. Παρ' όλα αυτά το σύστημα επανέρχεται γρήγορα στην κανονική του λειτουργία και οι τάσεις αποκαθίστανται. Παρατηρώντας την ισχύ του δικτύου, υπάρχει μία στιγμιαία αύξηση (Εικόνα 4.53 (δ)). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην τιμή του ρεύματος (Εικόνα 4.53 (η)) και οφείλονται στον στιγμιαίο αποσυντονισμό της γεννήτριας (Εικόνα 4.53 (θ)). Όταν η γεννήτρια συντονίζεται και πάλι, οι συνθήκες κανονικής λειτουργίας αποκαθίστανται και το δίκτυο επανέρχεται στην πρότερη του κατάσταση.

Στην Εικόνα 4.53, παρατηρείται η επίδραση του μονοφασικού σφάλματος στο αιολικό πάρκο. Όπως φαίνεται, τη χρονική στιγμή του σφάλματος ($t=5s$), συμβαίνουν στιγμιαίες αυξομειώσεις στα επίπεδα του ρεύματος και της τάσης (Εικόνα 4.53 (α) και (β)) που επηρεάζουν παροδικά την παραγόμενη ισχύ (Εικόνα 4.53 (γ)) και την τάση του (Εικόνα 4.53 (στ)). Το πάρκο, μετά το σφάλμα επανέρχεται αμέσως στην προηγούμενη του κατάσταση καθώς το σφάλμα απομονώνεται και δεν προκαλεί μόνιμη βλάβη.

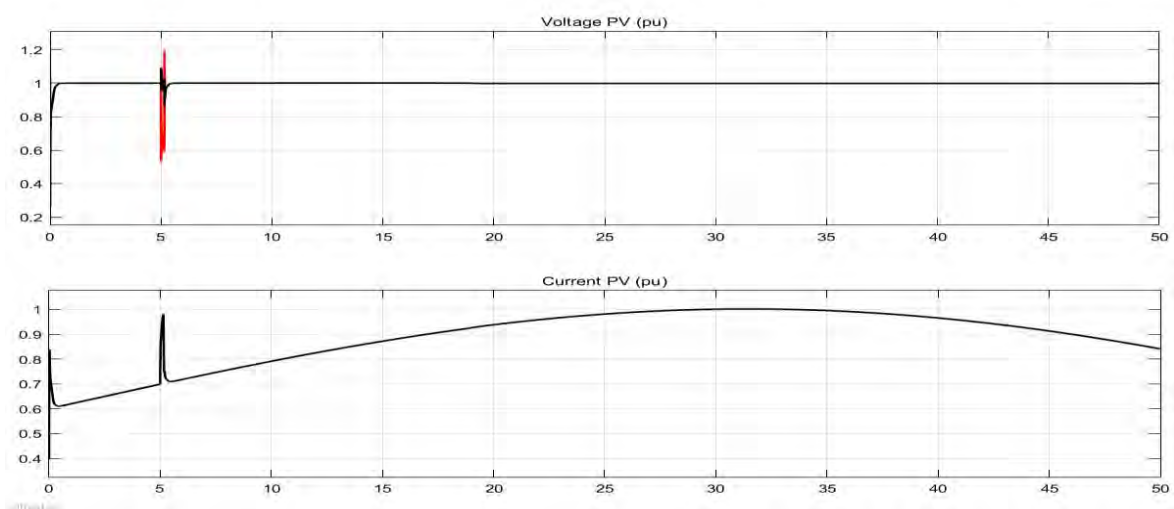
Για λόγους ασφαλείας του δικτύου, η ανεμογεννήτριες απομακρύνονται μέσω κατάλληλου δια κοπτικού υλικού (circuit breaker) από το υπόλοιπο σύστημα μόλις εντοπιστεί μη-επιτρεπτή συμπεριφορά. Σε περίπτωση που δεν απομακρύνονταν έγκαιρα, τα ρεύματα σφαλμάτων θα αυξάνονταν σε μη ρεαλιστικά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό, στην προσομοίωση, τη χρονική στιγμή $t=5.2s$ το αιολικό πάρκο αποσυνδέεται από το σύστημα και επανασυνδέεται τη χρονική στιγμή $t=20s$.





Εικόνα 4.53 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας των ανεμογεννητριών στο μονοφασικό σφάλμα

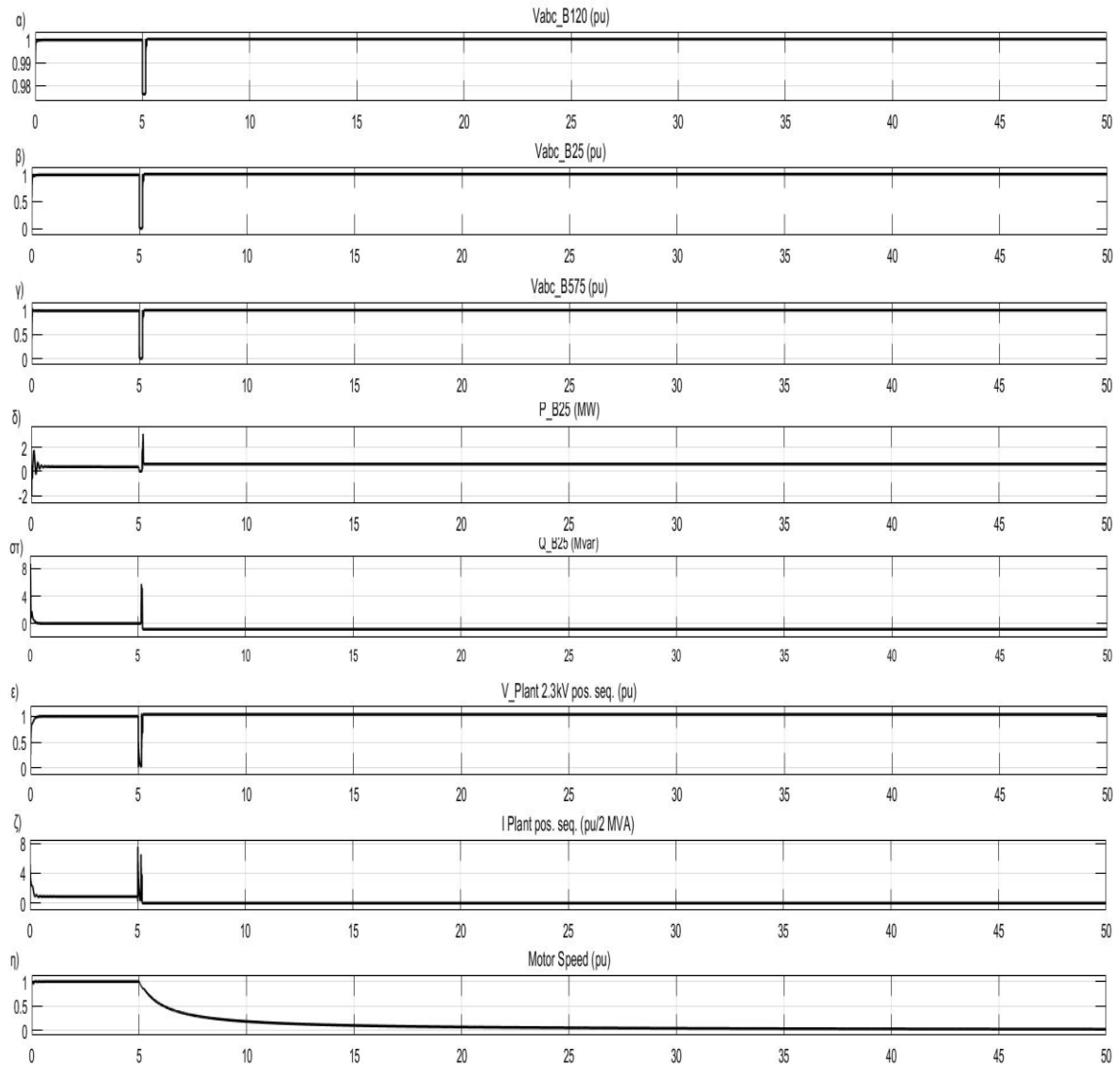
Όσον αφορά το φωτοβολταϊκό σύστημα, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά αντίδρασης με το αιολικό πάρκο στο μονοφασικό σφάλμα. Τη χρονική στιγμή εφαρμογής του σφάλματος παρατηρήθηκαν, στιγμιαίες αυξομειώσεις στην τάση (Εικόνα 4.54 (α)) όπως και στο ρεύμα (εικόνα 4.54 (β)). Και σε αυτή την περίπτωση, το σφάλμα ξεπεράστηκε, με την απομάκρυνση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από το σύστημα, το οποίο στη συνέχεια επανήλθε στην ονομαστική του λειτουργία.



Εικόνα 4.54 Γραφικές παραστάσεις λειτουργίας των Φ/Β στο μονοφασικό σφάλμα

4.4.3.2 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα (Three phase fault)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τη χρονική στιγμή $t=5s$ συμβαίνει τριφασικό συμμετρικό σφάλμα στον ζυγό B25. Όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν (Εικόνα 4.55) οι οποίες αφορούν το συνολικό δίκτυο, τη χρονική στιγμή του σφάλματος ($t=5s$) παρατηρούνται τα εξής. Η επίδρασή του τριφασικού σφάλματος δεν επιβαρύνει εξίσου και τις τρεις διαφορετικές περιοχές λειτουργίας του κυκλώματος.



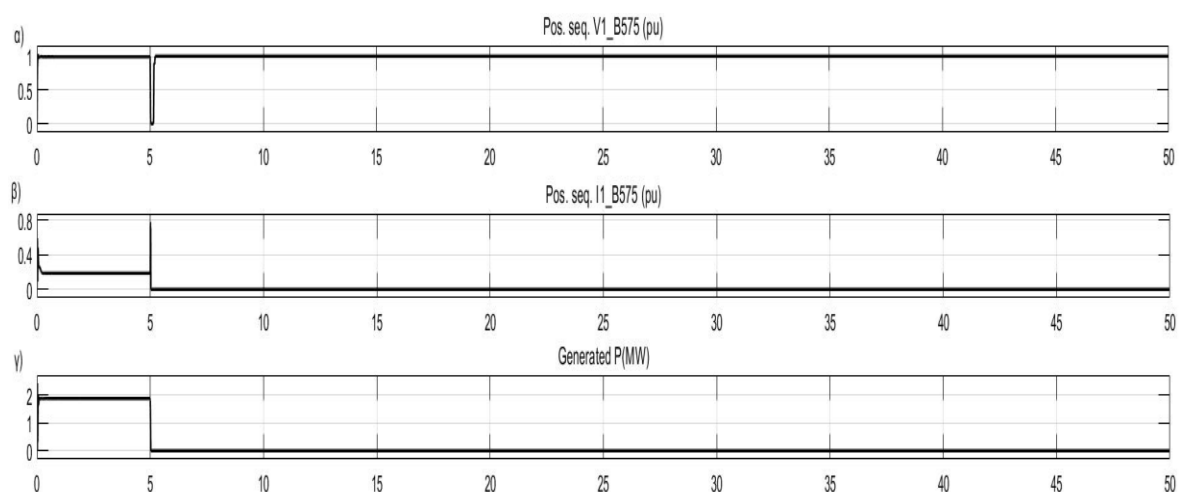
Εικόνα 4.55 Γραφικές παραστάσεις του δικτύου κατά το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

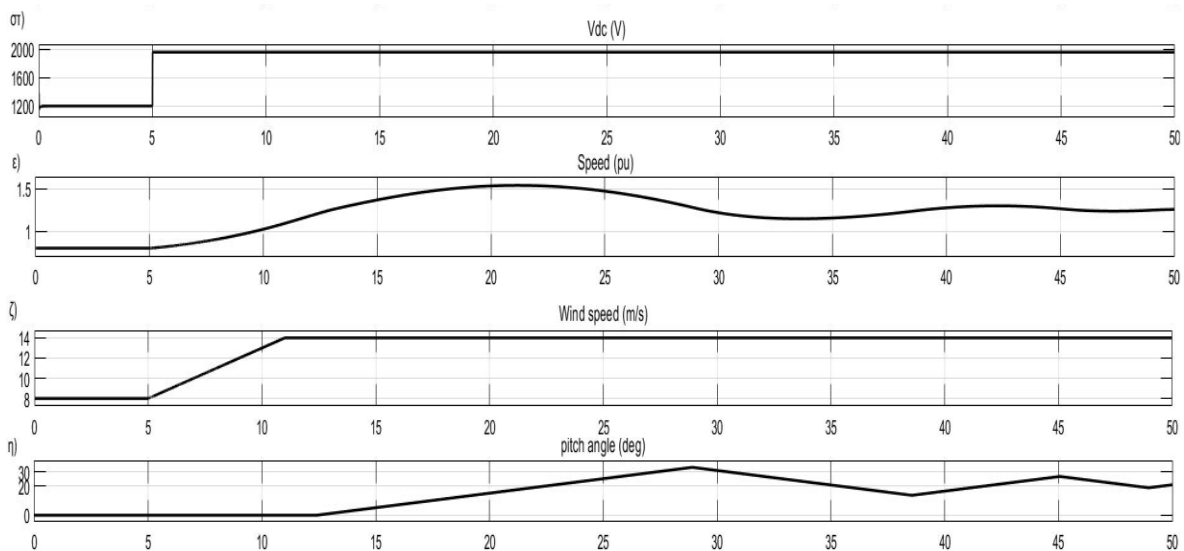
Συγκεκριμένα, το τμήμα του κυκλώματος που λειτουργεί στα 120kV (Εικόνα 4.55 (α)) εμφανίζει τη μικρότερη επιβάρυνση λόγω της σύνδεσής του με το λοιπό σύστημα μεταφοράς του οποίου η αδράνεια της σύγχρονης παραγωγής περιορίζει την έκτασή του.

Από την άλλη πλευρά, τόσο το τμήμα των 25kV (Εικόνα 4.55 (β)) όσο και το τμήμα των 575V (Εικόνα 4.55 (γ)) όπου υπάρχει άμεση σύνδεση με τις ανεμογεννήτριες, δέχονται σημαντικές επιπτώσεις. Η τάση από 1pu, πέφτει στο 0 pu (Εικόνα 4.55 (ε)) με όλες τις συνέπειες που προκαλεί αυτό σε ένα ΣΗΕ (π.χ., blackout). Το βύθισμα των τάσεων και η ραγδαία αύξηση του ρεύματος (Εικόνα 4.55 (ζ)), έχουν σαν αποτέλεσμα τη στιγμιαία αύξηση τόσο της ενεργού (P) (Εικόνα 4.55 (δ)) όσο και της άεργου (Q) ισχύος (Εικόνα 4.55 (στ)) και την διακοπή λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας (Εικόνα 4.55 (η)).

Για να περιορίσουμε την έκταση του σφάλματος και τις συνέπειες του, μετά από 0.2s ($t=5.2s$) απομακρύνουμε την ανεμογεννήτρια από το κύκλωμα ώστε να εξεταστεί κατά πόσο μπορεί να επανέλθει στην κανονική του λειτουργία.

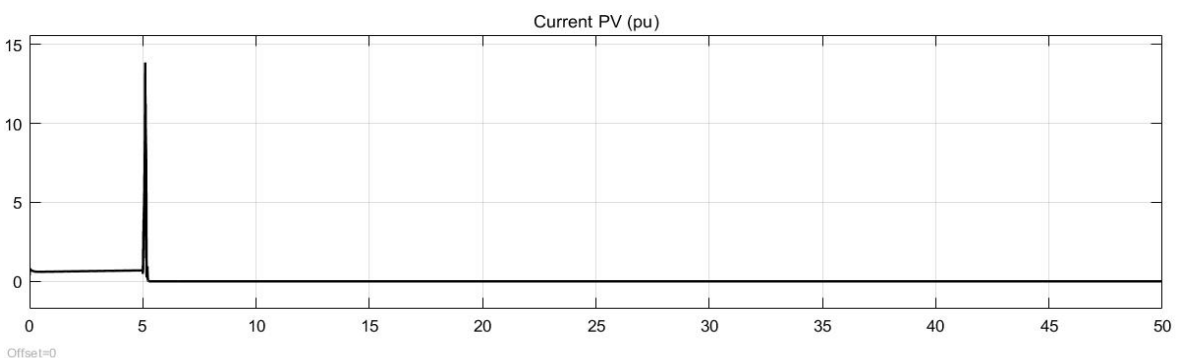
Στην εικόνα 4.56 φαίνεται αναλυτικά η επίδραση του τριφασικού σφάλματος στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Μετά το τριφασικό σφάλμα και την αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας (άνοιγμα του circuit breaker) παρατηρούμε πως το ρεύμα (Εικόνα 4.56 (β)) και η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας (Εικόνα 4.56 (γ)) μηδενίζονται. Επίσης παρατηρείται, πως παρά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (Εικόνα 4.56 (ζ)), η ταχύτητα περιστροφής καθώς επίσης και η γωνία των ελίκων της ανεμογεννήτριας δεν σταθεροποιούνται (Εικόνα 4.56 (ε),(η)), λόγω της απομάκρυνσης της γεννήτριας από το κύκλωμα και της παύσης της παραγωγής και έγχυσης ισχύος στο σύστημα μεταφοράς. Στην περίπτωση του τριφασικού σφάλματος δεν επιχειρήθηκε η επανασύνδεση της ανεμογεννήτριας στο ΣΗΕ λόγω της ασταθούς συμπεριφοράς της.





Εικόνα 4.56 Γραφικές παραστάσεις του Αιολικού Πάρκου κατά το τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Παρόμοια συμπεριφορά με το αιολικό πάρκο, εντοπίζεται και στο φωτοβολταϊκό. Πιο συγκεκριμένα, το τριφασικό σφάλμα που προκλήθηκε στο ζυγό B25 (σημείο πρόσδεσης των ΚΠ), επηρεάζει εξίσου τη λειτουργία τους. Έτσι στην Εικόνα 4.57, βλέπουμε την στιγμιαία μεταβολή του ρεύματος στο φωτοβολταϊκό πάρκο. Την χρονική στιγμή του σφάλματος το ρεύμα αυξήθηκε από 0.7 pu σε ~12 pu. Η ακραία αυτή διακύμανση της τιμής του ρεύματος, καθιστά απαραίτητη την άμεση απομόνωση του. Σε περίπτωση που δεν απομακρύνονταν έγκαιρα και αυτός ο πόρος από το σύστημα, το στιγμιαίο ρεύμα θα αυξάνονταν ακόμη περισσότερο διακινδυνεύοντας τη λειτουργία του συνολικού συστήματος μεταφοράς.



Εικόνα 4.57 Γραφική παράσταση ρεύματος του Φωτοβολταϊκού Πάρκου κατά το τριφασικό σφάλμα

4.4.4 Συμπεράσματα τρίτου σεναρίου

Στο τρίτο σενάριο προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός συστήματος μεταφοράς ενέργειας το οποίο ενσωματώνει κατανεμημένους πόρους υπό την επίδραση μονοφασικών και τριφασικών σφαλμάτων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν πως σε περίπτωση που οι κατανεμημένες διατάξεις δεν απομακρυνθούν άμεσα από το σύστημα θα κινδυνέψει η κανονική λειτουργία του.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του μονοφασικού σφάλματος, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης τόσο στην ανεμογεννήτρια όσο και στο φωτοβολταϊκό πάρκο παρόλο που οι τιμές τους αυξήθηκαν σημαντικά σε σχέση με την κανονική λειτουργία, μετά την αποσύνδεσή τους το κύκλωμα σταθεροποιείται. Επίσης, η επανασύνδεση των κατανεμημένων πόρων είναι εφικτή, μετά το $t=20s$ χωρίς να επηρεαστεί η κανονική λειτουργία του ΣΗΕ. Αντίθετα, στη περίπτωση του τριφασικού σφάλματος παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερα στιγμιαία ρεύματα βραχυκύκλωσης, τα οποία θα αυξάνονταν ακόμη περισσότερο σε περίπτωση που δεν απομακρύνουμε έγκαιρα τους κατανεμημένους πόρους από το σύστημα ($t=5.2s$).

Επιπρόσθετα, η μετασφαλματική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας μετά την απομάκρυνση της από το κύκλωμα δεν επέτρεψε την επανασύνδεσή της στο ΣΗΕ, καθώς θα αποσυντόνιζε τη συχνότητα λειτουργίας και θα δημιουργούσε αυξομειώσεις στην τάση λειτουργίας. Στο συγκεκριμένο σενάριο, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειραματικές δράσεις με μειώσεις του χρόνου εφαρμογής του σφάλματος. Σκοπός ήταν ο έλεγχος της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας μετασφαλματικά ώστε να εξεταστεί η επανένταξη της στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα ήταν το ίδιο για το φ/β πάρκο το οποίο μετά το σφάλμα δεν ανταποκρίνεται ούτε επανήλθε στη κανονική του λειτουργία.

Συνοψίζοντας, τα συμπεράσματα της προσομοίωσής μας δείχνουν πως οι συνέπειες ενός μονοφασικού ή τριφασικού σφάλματος μπορούν να θέσουν την λειτουργία του ΣΗΕ σε κίνδυνο. Το τριφασικό σφάλμα, αν και λιγότερο συνηθισμένο από το αντίστοιχο μονοφασικό, μπορεί να προκαλέσει πολύ σοβαρότερες επιπτώσεις και αν δεν απομακρυνθεί εγκαίρως να προκαλέσει την κατάρρευση τους συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τα ΣΗΕ εξελίσσονται και ο ρόλος τους διαφοροποιείται καθώς σύγχρονες τεχνολογίες εισάγονται σε αυτά με αυξανόμενο ρυθμό. Η μετάβαση στα έξυπνα δίκτυα και οι αποκεντρωμένες λύσεις παραγωγής, είναι δύο μείζονα στοιχεία τα οποία θα απασχολήσουν την επιστημονική κοινότητα τα επόμενα χρόνια.

Παρατηρούμε, πως όταν μονάδες παραγωγής μικρότερης εγκατεστημένης ισχύος εγκαθίστανται κοντά στα φορτία που εξυπηρετούν, λειτουργώντας αυτόνομα ή υποστηρικτικά, συμβάλουν στην καλύτερη εξυπηρέτηση της ζήτησης και στη βέλτιστη αξιοποίηση των εναλλακτικών ενεργειακών πόρων.

Η έντονη εξάπλωση, της Διεσπαρμένης – Κατανεμημένης Παραγωγής, αποτελεί κίνητρο πειραματικής μελέτης για την παρούσα διπλωματική εργασία. Επιδιώκεται η ανάλυση των διαταραχών που προκύπτουν από την ένταξη της ΚΠ στα δίκτυα και μελετάται η συμπεριφοράς τους (τόσο των μονάδων όσο και των ίδιων των δικτύων) κάτω από μη συμβατικές συνθήκες λειτουργίας.

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που αναλύονται στο Κεφάλαιο 4, γίνεται αντιληπτό πως κάθε νέα προέκταση και επέμβαση στα ΣΗΕ, πρέπει να συνοδεύεται από σωστή μελέτη και προσεκτικούς χειρισμούς. Για αυτό το λόγο μελετήθηκαν ειδικές διατάξεις ασφαλείας και τεχνικές (όπως η απομόνωση μέσω διακοπών) με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και την προστασία τόσο των διατάξεων που εισήχθησαν όσο και των δικτύων. Μελετήθηκαν συγκεκριμένα σενάρια και παρατέθηκαν τα συμπεράσματα που προέκυψαν με σκοπό την προστασία των συστημάτων.

Μελλοντικά, με την εξέλιξη των συστημάτων, μπορούν να συμπεριληφθούν και νέες πειραματικές μελέτες. Τυχόν προεκτάσεις της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να μελετήσουν νέα σενάρια λειτουργίας, διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής και μέσα ασφαλείας από κακόβουλες επιθέσεις στα μικροδίκτυα με σκοπό την ασφαλή και αδιάλειπτη λειτουργία των ΣΗΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IEEE power & energy magazine February 2018
- [2] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής,, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2001.
- [3] Βουρνάς Κ. και Παππαδιάς Β., Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας- Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος, Αθήνα: Σ. ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ % ΣΙΑ Ο.Ε., 2010.
- [4] noesis.edu.gr
- [5] Οικιακή Τεχνολογία, Δέσποινα Σδραλη,Επ, Επ Καθηγήτρια Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Κωνσταντίνος Αμπελιώτης, Αν. Καθηγήτρια Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Εκδόσεις Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα
- [6] Διείδυση Κατανεμημένης Ηλεκτροπαραγωγής σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, Κουτρομπέζης Γεώργιος 2012
- [7] Έλεγχος κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ένταξη της σε μικροδίκτυα, Παπαδημητρίου Χριστίνα 2012.
- [8] P.P Barker and R.W. De Mello, “Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1 – radial distribution systems” in Proc. 2000 Power Engineering
- [9] R. A Walling R. Saint, R. C. Dugan J. Burke, and I, A. Kojovic, “Summary of distributed resources impact on power delivery systems”, IEEE Trans. Power Del, vol. 23, no.3, pp.1636-1644, jul. 2008
- [10] Ackermann T., Andersson G., Soder L., “Distributed generation: a definition”, Electric Power Systems Research, 57, pp. 195-204,2001
- [11] H.R Linden, “Distributed Power Generation – The logical Response to Restructuring and Convergence”.
- [12] International Energy Agency, “Enhancing the Market Deployment of Energy Technology: A Survey of Eight Technologies”, Paris 2007.
- [13] IEEE Standard 519-1992, “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, Published by IEEE,1993.
- [14] N. Hadjsaid, J. Canard, and F. Dumas, “Dispersed generation impact on distribution networks,” IEEE Comput. Appl. Power, vol. 12, no. 2, pp. 22-28, Apr. 1999.

- [15] Dugan R.C, McDermott T.E “Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems”, IEEE IAS Rusal Electric Power Conference, Little Rock, AR, pp. A3-1 -A.3-6, May 2001
- [16] R. C Dugan and McDermott T.E, “Distributed Generation”, IEEE Ind. Applicat. Mag., vol.8 2002
- [17] IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Power Systems, Parts 1-4, IEEE Std. C63.92 Parts 1-4, Published by Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- [18] IEEE Guide for the Application of metal Oxide Surge Arresters for alternating Current Systems, Std. C62.22-1997, Published by Institute of Electrical and Electronic Engineers,1998.
- [19] M. Ropp. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive systems. s.1.: IEA, 2002
- [20] Ιωάννης Γ. Λιανός, “Διαστασιολόγηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 500kWp με χρήση trackers”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούλιος 2012.
- [21] Ιζαμπέλα Π. Κασούρου, “Αξιολόγηση της προστασίας σε κατακεκομμένη παραγωγή”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2010.
- [22] Jenkins N., Allan R., Crossley P., Kirschen D., Strbac G., “Embedded Generation”, The Institute of Electrical Engineers, London, pp.273 (IEE Power and Energy Series 31), 2010.
- [23] J. G. Slootweg and W. L Kling “Impacts of Distributed generation on power system transient stability”, Power Engineering Society Summer meeting, 2002 IEEE, vol. 2, pp. 862-867, 21-25 July 2002.
- [24] CIGRE WG C6.01, “Development of Dispersed Generation and Consequences for Power Systems”, Final Report, July 2003.
- [25] H. Laaksonen, K. Kauhaniemi, S. Voima, "Microgrid Voltage Level Management and Role as Part of Smart Grid Voltage Control," IEEE PowerTech'11 Conference, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [26] D. Coll-Mayor, A. Notholt, A. Engler, E. Garcia-Moreno, "Using Minigrids for stabilizing the Main Grid," presented at the CIGRE Conference, Paris, France, 2006.
- [27] Κ. Θ. Δέρβος, ‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Από τη θεωρία στην πράξη’, Ε.Μ.Π. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Αθήνα, Ιανουάριος 2013

- [28] Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ, Γεώργιος Πριονιστής, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2018
- [29] Andreas Petersson, Ph.D. Dissertation 'Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines', Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2005.
- [30] S. W. Hadley and A. A. Tsvetkova. "Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation". *Electric Journal*, 22(10):5668, 2009.
- [31] D. Stimoniaris, D. Tsiamitros, T. Kottas, N. Asimopoulos, E. Dialynas, "Smart Grid Simulation Using Small-Scale Pilot Installations-Experimental Investigation of a Centrally-Controlled Microgrid," *IEEE PowerTech'11 Conference*, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [32] D. Stimoniaris, D. Tsiamitros, N. Poulakis, T. Kottas, V. Kikis, E. Dialynas, "Investigation of Smart Grid Topologies Using Pilot Installations-Experimental Results," 2011 *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (IEEE-ISGT-2011)*, Manchester, UK, 2011. available at <http://ieeexplore.ieee.org>
- [33] Γεώργιος Κατσαρός, «Μοντελοποίηση και Δυναμική Ανάλυση Μικροδικτύου», Διπλωματική Εργασία για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Nemertes
- [34] Ανάλυση και Έλεγχος Σφαλμάτων σε Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βασιλά Γεωργία, Διπλωματική Εργασία για το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Η/Υ, Πάτρα 2016
- [35] Κανονισμοί IEC 60909: "Ρεύματα βραχυκύκλωσης σε τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος - Υπολογισμός ρευμάτων". Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης Α.Ε., Αθήνα, 2002
- [36] «Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Νικόλαος Α. Βοβός
- [37] «Power System Analysis», Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zurich, Goran Andersson, September 2012
- [38] «Balanced (Symmetrical) Fault», Παρουσίαση, ELE B7 Power Systems Engineering

- [39] Μαρία Καλογερά, «Προστασία Μικροδικτύου Συνδεδεμένου στο δίκτυο Διανομής Χαμηλής Τάσης από Μεγάλα Ρεύματα που Οφείλονται σε Βυθίσεις Τάσης του Δικτύου Διανομής», Διπλωματική Εργασία για το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Nemertes)
- [40] Planning and implementation of bankable microgrids, Michael Stadler, Researchgate Publication, May 2019.
- [41] www.Matlab.com
- [42] Modeling and Analysis of Grid Networks with Distributed Resources using MATLAB/SIMULINK, 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems December 16-19, 2012, Bengaluru, India

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 ΔΕΔΗΕ

Εικόνα 1.2 www.noesis.edu.gr

Εικόνα 1.3 liberal.gr

Εικόνα 1.4 Οικιακή Τεχνολογία, Δέσποινα Σδραλη, Επ Καθηγήτρια Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου, Κωνσταντίνος Αμπελιώτης, Αν. Καθηγήτρια Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου, Εκδόσεις Ελληνικά

Εικόνα 1.7 Transmission Substation - ElectraNet

Εικόνα 1.6 Distribution Substations pages.mtu.edu

Εικόνα 1.7 www.vox.com

Εικόνα 1.8 www.vox.com

Εικόνα 2.1 revel-energy.com

Εικόνα 2.2 CIGRE WG C6.01, “Development of Dispersed Generation and Consequences for Power Systems”, Final Report, July 2003.

Εικόνα 3.1 Planning and implementation of bankable microgrids, Michael Stadler, Researchgate Publication, May 2019.

Εικόνα 3.2 rikurenergy.com

Εικόνα 3.3 Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ, Γεώργιος Πριονιστής, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2018

Εικόνα 3.4 Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ, Γεώργιος Πριονιστής, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2018

Εικόνα 3.5 Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ, Γεώργιος Πριονιστής, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2018

Εικόνα 3.6 www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece499/notes/01_intro_to_facts.pdf, «Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς», Παρουσίαση, Δρ. Ανδρέας Σταύρου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Κύπρου

Εικόνα 3.7 «Power System Analysis», Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zurich, Goran Andersson, September 2012

Εικόνα 3.8 «Balanced (Symmetrical) Fault», Παρουσίαση, ELE B7 Power Systems Engineering

Εικόνα 3.9 «Balanced (Symmetrical) Fault», Παρουσίαση, ELE B7 Power Systems Engineering

