



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Αύξηση της Ελαστικότητας Δικτύου Διανομής μέσω
Σχηματισμού Βέλτιστων Αυτοτροφοδοτούμενων
Μικροδικτύων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθέριος Χ. Βενιζέλος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητή Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Αύξηση της Ελαστικότητας Δικτύου Διανομής μέσω
Σχηματισμού Βέλτιστων Αυτοτροφοδοτούμενων
Μικροδικτύων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθέριος Χ. Βενιζέλος

**Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητή Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2016.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
Ελευθέριος Χ. Βενιζέλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βενιζέλος Ελευθέριος – Ιωάννης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π.

Αντικείμενο της εργασίας είναι ο σχεδιασμός βέλτιστων αυτοτροφοδοτούμενων μικροδικτύων με σκοπό την αύξηση της ελαστικότητας του δικτύου διανομής. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται η εύρεση του βέλτιστου στρατηγικού σχεδιασμού του δικτύου τόσο σε ομαλές όσο και σε κρίσιμες καταστάσεις για το δίκτυο.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Δημήτρη Τράκα, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η βοήθειά του ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους φίλους μου για τη στήριξη και τη βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ Χ. ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη αύξησης της ελαστικότητας ενός δικτύου διανομής μέσω κατάλληλου διαχωρισμού του δικτύου σε αυτοτροφοδοτούμενα μικροδίκτυα. Στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο διανομής, ο σχηματισμός μικροδικτύων, ικανών να λειτουργήσουν αυτόνομα, συμβάλλει στην μείωση της αποκοπής φορτίου και αυξάνει τα επίπεδα αξιοπιστίας και ελαστικότητας του δικτύου. Ο διαχωρισμός του δικτύου σε μικροδίκτυα την στιγμή του σφάλματος επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση διακοπών στις κατάλληλες γραμμές του δικτύου.

Σκοπός της προτεινόμενης μεθόδου είναι η εύρεση της τοποθέτησης των διακοπών που οδηγούν στο βέλτιστο διαχωρισμό. Για τη μελέτη του προβλήματος χρησιμοποιείται το πρότυπο δίκτυο διανομής 69 ζυγών της IEEE και μελετώνται περιπτώσεις σχεδιασμού τόσο σε ομαλές όσο και σε συνθήκες ακραίων φαινομένων.

Πιο αναλυτικά η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγική περιγραφή για τη δομή και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) στην πάροδο του χρόνου και περιγράφεται το σενάριο του μικροδικτύου καθώς και ρόλος που έχει στη δομή των σύγχρονων ΣΗΕ.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και παρουσιάζεται η μοντελοποίηση τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η προτεινόμενη μέθοδος για την αξιολόγηση διαχωρισμού του δικτύου σε μικροδίκτυα και περιγράφεται αναλυτικά η αντικειμενική συνάρτηση που ορίζεται.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται οι βασικές έννοιες του γενετικού αλγορίθμου (ΓΑ) και η χρήση του στην παρούσα εργασία.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται μία υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ως παράδειγμα και περιγράφεται αναλυτικά κάθε βήμα της μεθόδου.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης για διάφορα σενάρια σχεδιασμού του δικτύου και επισημαίνονται ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά ανά σχεδιασμό.

Στο **Κεφάλαιο 7** εισάγεται η έννοια της ελαστικότητας του δικτύου. Γίνεται μια περιγραφή της έννοιας και υπογραμίζεται η σπουδαιότητά της ως μέτρο αξιολόγησης της συμπεριφοράς του δικτύου. Ακόμα, παρουσιάζονται σενάρια συνθηκών ακραίων φαινομένων προκειμένου να αναδειχθεί ο ρόλος της ελαστικότητας και να μελετηθεί η συμπεριφορά των προτεινόμενων σχεδιασμών.

Στο **Κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα των αποτελεσμάτων για τους προτεινόμενους σχεδιασμούς

Στο **Παράρτημα** παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των προσομοιώσεων καθώς και ο υπολογισμός της πιθανότητας για αριθμό ενδεχομένων μεγαλύτερο του δύο.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Ελαστικότητα, σχεδιασμός δικτύου, διαχωρισμός, μικροδίκτυο σφάλματος, νησίδα, μοντελοποίηση, επίδραση, επίπτωση, δείκτης αξιολόγησης, κρίσιμη κατάσταση, ζώνες επικινδυνότητας, πιθανότητα, ζήτηση φορτίου, αιολική παραγωγή, φωτοβολταϊκή παραγωγή, συνολικής παραγωγή από ΑΠΕ, μικροτουρμπίνες, ισοζύγιο ισχύος, γενετικός αλγόριθμος, περιορισμοί.

Abstract

This thesis proposes a methodology for enhancing grid resilience through optimum design of multiple self-adequate microgrids in a smart distribution system. The well-known IEEE 69-bus distribution system is selected as the test system. The effect of optimization coefficient on the design is investigated using sensitivity studies.

In case of a disturbance in the distribution system, the design of self-adequate microgrids enhances grid resilience through load loss elimination.

The design is being implemented through switch placement in certain lines. If there is a fault in the distribution system the switches that define the corresponding microgrid where the fault occurs, open.

If there is a fault in a microgrid, the microgrid and all its loads will be disconnected. This fault will cause service interruption for the downstream microgrids unless there is enough distributed generation in the downstream microgrids to support the loads for the duration of service interruption. In order to evaluate the proposed design of microgrids, two indices are created. The first index measures the impact of the disconnected load and the second one measures the impact of the imbalance in the downstream microgrids for the duration of service interruption. The combination of the two aforementioned indices is the optimization coefficient of the design.

This dissertation is organized as follows.

In the *first chapter*, a short analysis of the structure of power systems is being presented as long as the concept of microgrid that has become a key subject in the smart grid area.

In the *second chapter*, a short reference to renewable energy sources follows. Also the generation models of renewable energy sources (RES) are being presented.

In the *third chapter*, the proposed methodology for optimum design of multiple self-adequate microgrids is introduced.

The *fourth chapter* presents the genetic algorithm (GA).

In the *fifth chapter*, an illustrative example of the objective function's implementation is being presented.

In the *sixth chapter*, the case studies and the results obtained by applying the method to the IEEE 69-bus distribution system are presented.

The *seventh chapter* presents the concept of grid resilience and the illustrative case studies with the corresponding results are discussed.

In the *eighth chapter*, the basic conclusions for the proposed designs are being presented.

In the *appendix*, the data that used in the case studies are presented.

KEY WORDS:

microgrid, resilience, smart grid, genetic algorithm, distribution system, renewable energy sources, self-adequate, method, load loss, imbalance, wind turbines, photovoltaics, microturbine, islands, fault, high impact low probability (HILP), impact, modeling.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract.....	3
Κατάλογος Πινάκων	9
Κατάλογος Σχημάτων	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	15
1.1.1. Εισαγωγή	15
1.1.2. Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	15
1.1.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	16
1.1.4. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.....	17
1.1.5. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	18
1.1.6. Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	19
1.1.7. Λειτουργία και έλεγχος ΣΗΕ.....	19
1.2. Η εξέλιξη των ΣΗΕ και η Αποκεντρωμένη Παραγωγή.....	20
1.3. Διεσπαρμένη Παραγωγή στο δίκτυο Μ.Τ. και Χ.Τ.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Εισαγωγή	29
2.1. Αιολική Ενέργεια.....	30
2.1.1. Χαρακτηριστικά του ανέμου.....	30
2.1.2. Παράμετρος μορφής k	31
2.1.3. Παράμετρος κλίμακας c	32
2.1.4. Μέση ταχύτητα.....	32
2.1.5. Ισχύς εξόδου των Α/Γ.....	33
2.2. Ηλιακή Ενέργεια	35
2.2.1. Μοντελοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	35
2.2.2. Ισχύς εξόδου των Φ/Β.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

<i>Εισαγωγή</i>	41
3.1. Μοντελοποίηση Ζήτησης Φορτίου και Διεσπαρμένης Παραγωγής	42
3.2. Υπολογισμός συνολικά εγκατεστημένων ονομαστικών μεγεθών παραγωγής και φορτίου «μικροδίκτυου σφάλματος» ή «νησίδας»	43
3.3. Υπολογισμός επίπτωσης «μικροδικτύου σφάλματος»	44
3.3.1. Υπολογισμός ζήτησης φορτίου «μικροδικτύου σφάλματος» ή «νησίδας»	44
3.3.2. Υπολογισμός του δείκτη επίπτωσης για δεδομένο «μικροδίκτυο σφάλματος» .	46
3.4. Υπολογισμός επίπτωσης «νησίδων»	47
3.4.1. Υπολογισμός παραγωγής ισχύος από Αιολικά «νησίδας».....	47
3.4.2. Υπολογισμός παραγωγής ισχύος από Φωτοβολταϊκά «νησίδας».....	49
3.4.3. Υπολογισμός συνολικής παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ «νησίδας»	51
3.4.4. Υπολογισμός ισοζυγίου ισχύος για κάθε «νησίδα»	52
3.4.5. Υπολογισμός του ισοζυγίου ισχύος με χρήση Μικροτουρμπίνων	53
3.4.6. Υπολογισμός της επίδρασης σφάλματος σε δεδομένη «νησίδα».....	54
3.4.7. Επίδραση σφάλματος σε όλες τις «νησίδες».....	54
3.5. Επίδραση σφάλματος δεδομένου μικροδικτύου στο δίκτυο	54
3.5.1. Υπολογισμός πιθανότητας σφάλματος μικροδικτύου	54
3.5.2. Υπολογισμός της επίδρασης σφάλματος	55
3.6. Δείκτης αξιολόγησης του προτεινόμενου σχεδιασμού	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

<i>Εισαγωγή</i>	59
4.1. Η δομή του Γενετικού Αλγόριθμου	60
4.2. Βασικά χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων	61
4.3. Χρήση Γενετικού Αλγόριθμου στην παρούσα Εργασία	63
4.3.1. Περιορισμοί της αντικειμενικής συνάρτησης (<i>penalties</i>).....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

<i>Εισαγωγή</i>	67
5.1. Χαρακτηριστικά της ώρας εξέτασης	68
5.2. Ανάλυση περίπτωσης σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 1	69
5.2.1. Υπολογισμός επίπτωσης «μικροδίκτυου σφάλματος»	69
5.2.2. Υπολογισμός επίπτωσης «νησίδων»	71
2.5.3. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 1 στο δίκτυο	77
2.6. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 2 στο δίκτυο	78
2.7. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 3 στο δίκτυο	79
2.8. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 4 στο δίκτυο	80
2.9. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 5 στο δίκτυο	81
2.10. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 6 στο δίκτυο	82
2.11. Τελικός δείκτης αξιολόγησης	83
<i>Σχόλια</i>	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

<i>Εισαγωγή</i>	87
6.1. Σχέση μεταξύ αριθμού μικροδικτύων και τελικού δείκτη αξιολόγησης	87
6.2. Βαρύτητα κάθε συνιστώσας του δείκτη αξιολόγησης	93
6.3. Ζήτηση φορτίου ανά μικροδίκτυο κάθε σχεδιασμού	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

<i>Εισαγωγή</i>	99
7.1. Παρουσίαση Σεναρίων και Διεξαγωγή Προσομοιώσεων	101
7.1.1. Τυπική ημέρα Καλοκαιριού χωρίς υψηλό βαθμό επικινδυνότητας	101
7.1.2. Σενάριο μεμονωμένων κρίσιμων περιοχών	102
7.1.3. Σενάριο ζωνών επικινδυνότητας	103

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
---------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	111
1. Δεδομένα.....	111
<i>1.1. Το δίκτυο.....</i>	111
<i>1.2. Δεδομένα Δικτύου.....</i>	112
<i>1.3. Η καμπύλη Ζήτησης Φορτίου.....</i>	115
<i>1.4. Παραγωγή Φωτοβολταϊκών.....</i>	116
<i>1.5. Παραγωγή Αιολικών.....</i>	117
2. Υπολογισμός πιθανοτήτων	118
Βιβλιογραφία	121

Κατάλογος Πινάκων

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1. Χαρακτηριστικά διάφορων τύπων κατανεμημένης παραγωγής23

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1. Η εκτιμώμενη ζήτηση φορτίου για το Μικροδίκτυο 1 σε kW70

Πίνακας 5.2. Οι εκτιμώμενες τιμές του ισοζυγίου ισχύος της νησίδας 3 σε kW76

Κεφάλαιο 6

Πίνακας 6.1. Ο δείκτης επίδρασης σφάλματος ανά σχεδιασμό.....87

Πίνακας 6.2. Αποκοπή φορτίου και ανισορροπία ισοζυγίου ισχύος ανά σχεδιασμό .93

Πίνακας 6.3. Ποσοστά εγκατεστημένου φορτίου ανά σχεδιασμό και Μικροδίκτυο .94

Παράρτημα

Πίνακας Π.1. Η αντιστοίχιση μεταξύ ζυγών και γραμμών.....111

Πίνακας Π.2. Οι παραγωγές ανά τύπο και ζυγό113

Πίνακας Π.3. Τα ονομαστικά εγκατεστημένα μεγέθη ανά ζυγό114

Πίνακας Π.4. Η ζήτηση φορτίου για κάθε αντιπροσωπευτική ώρα του έτους ως ποσοστό του ονομαστικού115

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του παρελθόντος.	21
Σχήμα 1.2. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωμάτωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας.	22

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1. Μορφή της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής k και με παράμετρο κλίμακας $c = 10$ m/s.	31
Σχήμα 2.2. Μορφή της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου κλίμακας c και με παράμετρο μορφής $k = 2$ (κατανομή Rayleigh).	32
Σχήμα 2.3. Καμπύλη ισχύος της A/Γ	34
Σχήμα 2.4. Απλοποιημένη καμπύλη ισχύος της A/Γ	35
Σχήμα 2.5. Απλοποιημένη καμπύλη ισχύος Φ/B	37

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1. Ενδεικτική Κατανομή Gauss	45
Σχήμα 3.2. Ενδεικτική Κατανομή Rayleigh	48
Σχήμα 3.3. Ενδεικτική Κατανομή Beta.....	50

Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1. Ο αρχικός διαχωρισμός του δικτύου 69 ζυγών σε 6 Μικροδίκτυα	68
Σχήμα 5.2. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 1	69
Σχήμα 5.3. Η καμπύλη ζήτησης φορτίου της ώρας που εξετάζεται	72
Σχήμα 5.4. Η κατανομή Weibull της ταχύτητας του ανέμου για την ώρα που εξετάζεται.....	72
Σχήμα 5.5. Η κατανομή Beta της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για την ώρα που εξετάζεται.....	73
Σχήμα 5.6. Η καμπύλη της συνολικής παραγωγής από ΑΠΕ για την ώρα που εξετάζεται.....	74
Σχήμα 5.7. Η καμπύλη ισοζυγίου ισχύος της νησίδας 3	75
Σχήμα 5.8. Το ισοζύγιο ισχύος με συνεισφορά Μικροτουρμπίνων.....	76
Σχήμα 5.9. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 2	78
Σχήμα 5.10. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 3	79
Σχήμα 5.11. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 4	80
Σχήμα 5.12. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 5	81
Σχήμα 5.13. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 6	82

Κεφάλαιο 6

Σχήμα 6.1. Ο δείκτης αξιολόγησης σε σχέση με τον αριθμό των μικροδικτύων	88
Σχήμα 6.2. Η βελτίωση του δείκτη αξιολόγησης ανά σχεδιασμό.....	88
Σχήμα 6.3. Το αρχικό δίκτυο χωρίς σχεδιασμό Μικροδικτύων.....	89
Σχήμα 6.4. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 2 Μικροδίκτυα	89
Σχήμα 6.5. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 3 Μικροδίκτυα	90
Σχήμα 6.6. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 4 Μικροδίκτυα	90
Σχήμα 6.7. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 5 Μικροδίκτυα	91
Σχήμα 6.8. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 6 Μικροδίκτυα	91
Σχήμα 6.9. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 7 Μικροδίκτυα	92
Σχήμα 6.10. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 8 Μικροδίκτυα	92
Σχήμα 6.11. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 9 Μικροδίκτυα	93
Σχήμα 6.12. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 2	94
Σχήμα 6.13. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 3	94
Σχήμα 6.14. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 4	95
Σχήμα 6.15. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 5	95
Σχήμα 6.16. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 6	95
Σχήμα 6.17. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 7	96
Σχήμα 6.18. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 8	96
Σχήμα 6.19. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 9	96

Κεφάλαιο 7

Σχήμα 7.1. Ο βέλτιστος διαχωρισμός του αρχικού δικτύου σε 6 μικροδίκτυα	101
Σχήμα 7.2. Οι γραμμές του δικτύου με αυξημένη πιθανότητα σφάλματος	102
Σχήμα 7.3. Ο βέλτιστος σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη ευάλωτες περιοχές	103
Σχήμα 7.4. Οι ζώνες επικινδυνότητας.....	104
Σχήμα 7.5. Ο βέλτιστος σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη ζώνες επικινδυνότητας..	104

Παράρτημα

Σχήμα Π.1. Η ζήτηση φορτίου ανά ζυγό	112
Σχήμα Π.2. Η ζήτηση φορτίου ανά ζυγό ως ποσοστό του συνολικού φορτίου.	113
Σχήμα Π.3. Η ετήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου	116
Σχήμα Π.4. Η απλοποιημένη καμπύλη ισχύος των Φ/Β.....	116
Σχήμα Π.5. Η απλοποιημένη καμπύλη παραγωγής των Α/Γ	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1.1. Εισαγωγή

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης [1][2][3]. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί ως το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της είτε να μετατρέπεται σε κάποια αποθηκεύσιμη μορφή ενέργειας. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων και της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσεως.

1.1.2. Δομή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η δομή και η σύνθεση του ΣΗΕ εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το μέγεθός του. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και γι' αυτό ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών πρέπει να είναι ενιαίος, με στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της κατανάλωσης με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως. Η διανομή είναι μια διαφορετική λειτουργία που

σχεδιάζεται και αναπτύσσεται χωριστά και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών που εξυπηρετεί.

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας παραμένει σταθερή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό. Στα τριφασικά συστήματα η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους πολύ πιο ομαλή και αποδοτική απ' ό,τι θα ήταν αν η ροή ήταν παλλόμενη, όπως συμβαίνει στα μονοφασικά συστήματα.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητα τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ η καμπύλη ζήτησης περιγράφει χρονικά την απασχόληση των εγκαταστάσεων μεταφοράς και διανομής από τους καταναλωτές. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος προοδευτικά αυξάνει από την παραγωγή προς τη διανομή, γιατί μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις.

1.1.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιείται η μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση και από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα κ.α.

Η παραγωγή από την καύση ορυκτών καυσίμων, τη γεωθερμία και τη βιομάζα πραγματοποιείται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με τη χρησιμοποίηση ατμοηλεκτρικών και νηξελοηλεκτρικών σταθμών. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι και αυτοί ατμοηλεκτρικοί σταθμοί που όμως ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Επίσης, θερμική παραγωγή πραγματοποιείται σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, όπου έχουμε

συνδυασμό λειτουργίας αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου και τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου χρησιμοποιούνται στο ατμοηλεκτρικό μέρος του σταθμού.

Η θερμική παραγωγή χαρακτηρίζεται ως ένας έμμεσος τρόπος παραγωγής, γιατί προηγούνται δύο στάδια μετατροπών. Άμεσο τρόπο παραγωγής έχουμε όταν παρακάμπτεται το στάδιο μετατροπής σε μηχανική ενέργεια, όπως συμβαίνει στις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς η κινητική και η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των υδροστροβίλων και των γεννητριών. Διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς φυσικής ροής και ρυθμιζόμενης ροής.

Οι πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται σε κάποιον ζυγό του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών. Γι' αυτό και τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των ηλιακών κυψελών. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

1.1.4. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης απ' όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς πρέπει να παρέχει σταθερή τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να βρίσκονται σε ισορροπία. Η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή, η οποία συνεπάγεται ελάχιστο ετήσιο κόστος μεταφοράς.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται υπό υψηλή τάση διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς ισχύος. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Η μορφή των δικτύων μεταφοράς μπορεί να είναι διαμήκης ή κυκλική ανάλογα με τη σχετική θέση των σταθμών παραγωγής ως προς τα κέντρα κατανάλωσης. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι βρογχοειδής σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής.

Η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως γι' αυτό χρησιμοποιούνται υπερυψηλές τάσεις για την

επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς. Επιπλέον οι μειωμένες απώλειες τις οποίες συνεπάγεται η μεταφορά με υπερυψηλές τάσεις, καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές.

Το κόστος μεταφοράς αποτελεί τη συνισταμένη του κόστους εγκατάστασης, του κόστους απωλειών και του κόστους συντηρήσεως της γραμμής. Κριτήριο για την επιλογή μιας τάσης μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό σημαίνει ότι η εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας από μια περαιτέρω αύξηση της τάσης λειτουργίας αντισταθμίζεται από τις αναγκαίες επιπρόσθετες επενδύσεις στη γραμμή και στο λοιπό εξοπλισμό. Το κόστος του εξοπλισμού αυξάνει τόσο γρήγορα στις υψηλές τάσεις, ώστε να υπάρχει κάποια μέγιστη τιμή τάσεως πάνω από την οποία γίνεται αντιοικονομική η μεταφορά.

1.1.5. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου που απαιτούνται ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να διανεμηθεί στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των οποίων αυτή φτάνει ως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση.

Η διάκριση μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η αξία των εγκαταστάσεων διανομής κυμαίνεται στο 30% του συνόλου των εγκαταστάσεων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της διανομής είναι το πλήθος των στοιχείων που το αποτελούν. Οι απώλειες ενέργειας στο επίπεδο της διανομής είναι περίπου διπλάσιες από το επίπεδο μεταφοράς.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και του τρόπου χωροταξικής διαμόρφωσης. Τα δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται σε δίκτυα υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερο δαπανηρά και σε αυτά η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη. Ωστόσο στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων τα δίκτυα κατασκευάζονται υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτίρια αλλά και για λόγους αισθητικής.

1.1.6. Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για την εξασφάλιση της σωστής σχεδίασης, της καλής και αξιόπιστης λειτουργίας των ΣΗΕ εκπονούνται εξειδικευμένες μελέτες. Οι μελέτες ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε μελέτες μόνιμης κατάστασης και σε μελέτες μεταβατικής κατάστασης. Οι μελέτες μόνιμης κατάστασης περιλαμβάνουν ανάλυση ροών φορτίου και την οικονομική κατανομή φορτίου, ενώ οι μελέτες μεταβατικής κατάστασης περιλαμβάνουν την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, των ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων και της ευστάθειας.

Με τον όρο ανάλυση ροών φορτίου εννοούμε τον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες φορτίσεως και λειτουργίας. Οι μελέτες αυτές είναι αναγκαίες τόσο κατά τη διάρκεια της καθημερινής λειτουργίας όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.

1.1.7. Λειτουργία και έλεγχος ΣΗΕ

Η διαχείριση της ενέργειας ενός μεγάλου διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με κεντρικά συστήματα εποπτείας και αυτομάτου ελέγχου, με τα οποία εξασφαλίζεται οικονομική λειτουργία, υψηλός δείκτης ασφάλειας και μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση και συχνότητα, οι τιμές των οποίων πρέπει να διατηρούνται σταθερές μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια και η τήρηση αυτών των συνθηκών καθορίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης του καταναλωτή. Η σχεδίαση του συστήματος και η λειτουργία του πρέπει να εξισορροπούν καλή ποιότητα εξυπηρέτησης και καλό δείκτη αξιοπιστίας με ικανοποιητικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης αποτελούν τις δύο βασικές διαδικασίες λειτουργίας ενός ΣΗΕ. Η συχνότητα συνδέεται με το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος. Η συνεχής εξισορρόπηση του ισοζυγίου αυτού έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθερή τιμή της συχνότητας. Σε κάθε μεταβολή του φορτίου η παραγωγή πρέπει να προσαρμόζεται άμεσα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται από τους ρυθμιστές στροφών των στροβίλων, οι οποίοι αποτελούν συστήματα κλειστού βρόχου και ανταποκρίνονται αυτόματα στις αλλαγές του φορτίου. Στα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα το πρόβλημα του ελέγχου συχνότητας είναι σύνθετο και περιλαμβάνει την κατανομή των μεταβολών ζήτησης μεταξύ των διαφόρων μονάδων.

Το πρόβλημα της διατήρησης της τάσης μεταξύ των επιτρεπόμενων ορίων περιπλέκεται από το γεγονός ότι η τάση δεν είναι ενιαία σε όλο το σύστημα, όπως η συχνότητα, αλλά ποικίλει από θέση σε θέση και σχετίζεται με την άεργο ισχύ, η οποία διακινείται από το σύστημα. Επομένως, η ρύθμιση της τάσης δεν μπορεί να γίνεται

μόνο από τις γεννήτριες που είναι φυσιολογικά οι πηγές άεργου ισχύος, αλλά γίνεται και με άλλα μέσα σε περισσότερες θέσεις του δικτύου και συγκεκριμένα με τη ρύθμιση της σχέσης μεταφοράς των μετασχηματιστών, με τη σύνδεση και αποσύνδεση πυκνωτών, πηνίων και εξειδικευμένων διατάξεων.

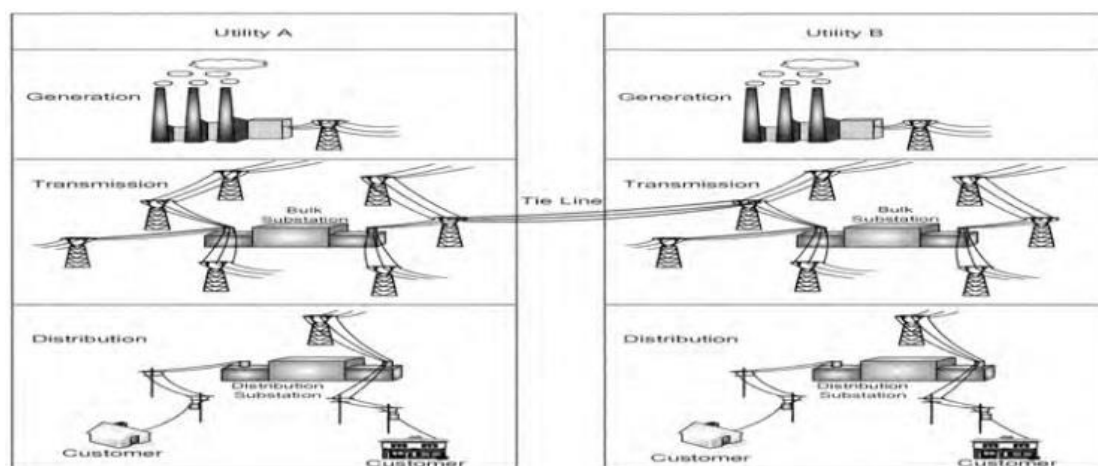
1.2. Η εξέλιξη των ΣΗΕ και η Αποκεντρωμένη Παραγωγή

Η κλασική δομή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) περιλαμβάνει μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτούν την ισχύ τους σε απομακρυσμένα κέντρα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ηλεκτρικών δικτύων. Για πολλούς λόγους όμως τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια βαθμιαία αλλαγή αυτής της δομής [4]. Η εγκατάσταση κατανεμημένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι μερικών δεκάδων MW στο δίκτυο μέσης τάσης έχει γίνει μια αποδεκτή πραγματικότητα. Η νέα επιδίωξη αφορά στην εγκατάσταση όλο και μικρότερων μονάδων παραγωγής, όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα φορτία στο Δίκτυο Διανομής χαμηλής τάσης, με βάση τις διαθέσιμες τοπικές πηγές πρωτογενούς ενέργειας. Αυτή η διεύρυνση της κατανεμημένης παραγωγής στο Δίκτυο Διανομής χαμηλής τάσης επιδιώκεται και αναμένεται να αυξηθεί την επόμενη δεκαετία για διάφορους λόγους με πιο σημαντικούς:

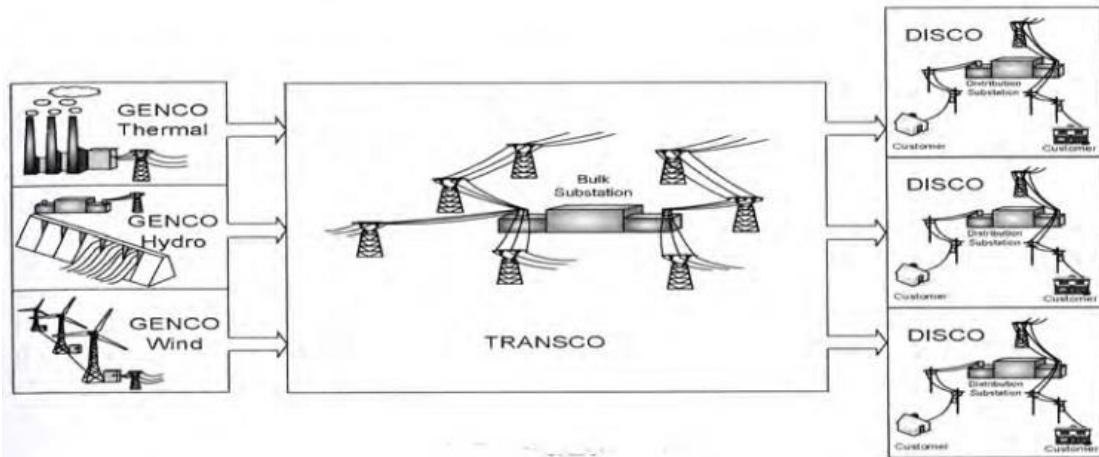
- Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μεθόδους φιλικές στο περιβάλλον ώστε να μειωθεί η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα, που εκπέμπουν οι παραδοσιακές μονάδες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα όπως ο λιγνίτης ή το πετρέλαιο.
- Τη διεύρυνση της ποικιλίας των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι απαραίτητη για οικονομικούς λόγους (περιορισμός των εισαγόμενων καυσίμων) αλλά και λόγω του περιορισμένου χρόνου που αναμένεται να υπάρχει επάρκεια των συμβατικών καυσίμων.
- Την αλματώδη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθώς και μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) και των κυψελών καυσίμου.
- Την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που επιτρέπει στους ανεξάρτητους παραγωγούς να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο και δίνει κίνητρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- Τη συνεχή αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που δημιουργεί την ανάγκη κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς, που πέρα από το μεγάλο οικονομικό κόστος είναι αβέβαιη η κατασκευή τους λόγω των κοινωνικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ευστάθεια των ΣΗΕ και να καθίσταται επισφαλής η τροφοδότηση των φορτίων.
- Τα σύγχρονα φορτία (συστήματα ελέγχου, υπολογιστές, επικοινωνίες) απαιτούν αδιάλειπτη παροχή ισχύος και τάση απαλλαγμένη από οποιαδήποτε ανωμαλία. Τα σημερινά ΣΗΕ αδυνατούν να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ παραγωγής και φορτίου.

Μέχρι σήμερα οι κατανεμημένες παραγωγές που συνδέονται στο Δίκτυο Διανομής, εκτός λίγων εξαιρέσεων, περιορίζονται μόνο στην παροχή ενέργειας στο σύστημα και δεν συνεισφέρουν σε άλλες λειτουργικές ανάγκες όπως η παροχή εφεδρείας, η υποστήριξη της τάσης και η βελτίωση της αξιοπιστία στην τροφοδοσία του φορτίου. Για να εξασφαλιστεί ο σημερινός τρόπος λειτουργίας των ΣΗΕ και να αποφευχθεί η νησιδοποίηση τμημάτων του δικτύου, οι κατανεμημένες παραγωγές αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν υπάρχουν μεγάλες διαταραχές και επανασυνδέονται όταν αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία. Αυτή όμως η αντιμετώπιση του δεν είναι δυνατόν να συνεχισθεί όταν η διεύθυνσή τους αυξηθεί σημαντικά. Αντίστοιχη πορεία διέγραψαν τα αιολικά πάρκα, που αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν παρουσιάζονταν διαταραχές, όμως σε περιοχές όπου η διεύθυνσή τους αυξήθηκε σημαντικά αυτή η αποσύνδεση δημιουργούσε μεγάλα προβλήματα στην ευστάθεια των ΣΗΕ. Γι' αυτό σε πολλά δίκτυα σήμερα οι κώδικες τους απαιτούν την παραμονή των πάρκων στο δίκτυο και την παροχή βοήθειας στα ΣΗΕ σε περίπτωση διαταραχών και όχι την αποσύνδεσή τους. Είναι απαραίτητο συνεπώς οι κατανεμημένες παραγωγές να παραμένουν στο δίκτυο και να προσφέρουν υπηρεσίες στήριξης της τάσης και της συχνότητας. Δηλαδή το Δίκτυο Διανομής από παθητικό που είναι σήμερα πρέπει να γίνει ενεργό και επομένως να λειτουργεί με δυνατότητες που σήμερα έχουν τα δίκτυα υψηλής τάσης.

Στο Σχήμα.1.1. παρουσιάζεται η μορφή των ηλεκτρικών δομών τους παρελθόντος και στο Σχήμα 1.2. παρουσιάζεται η μορφή του δικτύου με εγκατάσταση κατανεμημένων παραγωγών.



Σχήμα 1.1. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του παρελθόντος.



Σχήμα 1.2. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωμάτωση κατακεντρωμένων πηγών ενέργειας.

1.3. Διεσπαρμένη Παραγωγή στο δίκτυο Μ.Τ. και Χ.Τ.

Η παροχή βοηθητικών υπηρεσιών (*ancillary services*) στο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ελέγχου των ηλεκτρονικών μετατροπέων με τους οποίους συνδέεται η πλειοψηφία των κατακεντρωμένων παραγωγών στο δίκτυο. Αυτές οι ελεγχόμενες κατακεντρωμένες μικρές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας (<100kWe) που συνδέονται σε κλάδους του δικτύου χαμηλής τάσης με σκοπό την τροφοδοσία του τοπικού φορτίου, μαζί με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και ελεγχόμενα φορτία διαμορφώνουν μια νέα δομή συστήματος, το μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο είναι ουσιαστικά μια μικρογραφία ενός μεγάλου διασυνδεδεμένου δικτύου και αντιμετωπίζεται σαν μια μονάδα που αποδίδει ισχύ όταν απαιτείται, αλλά μπορεί και να μεταβαίνει σε αυτόνομη λειτουργία όταν χρειαστεί [4]. Αξίζει να σημειωθεί πως εκτός από την αυξημένη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, η αυτόνομη λειτουργία συνεπάγεται και αύξηση της διάρκειας παραγωγής των μονάδων οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να αποσυνδεθούν. Επιπλέον, η ανάπτυξη δομών μικροδικτύου είναι προϋπόθεση για να γίνει δυνατή η διείσδυση μεγάλου ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη διανομή.

Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 1997 στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 15 χωρών (ΕΕ15) ήταν 13.9% και από αυτήν το 90% ήταν υδροηλεκτρική ενέργεια. Με την Ευρωπαϊκή οδηγία τους 2001 ετέθη ως στόχος το ποσοστό αυτό να φτάσει το 21% το 2010 στην ΕΕ27. Όμως το 2005 η συνολική παραχθείσα ενέργεια από ΑΠΕ έφτασε μόλις το 15%, παρά τα μέτρα ανάπτυξης των ΑΠΕ, που αύξησαν την εγκατεστημένη ισχύ των ανεμογεννητριών κατά 150% και της βιομάζας 23%. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των ΑΠΕ περιλαμβάνει μεγάλες μονάδες εγκατεστημένες στην υψηλή και μέση τάση, ενώ για να υπάρξει μια νέα δυναμική ανάπτυξη των ΑΠΕ και να προσεγγιστεί έστω ο στόχος που ετέθη, πρέπει να υπάρξει ευρεία ανάπτυξή τους και με μικρές μονάδες σε κλίμακα οικίας συνδεδεμένες στη χαμηλή τάση της Διανομής. Όπως αναφέρθηκε αυτή η μεγάλη διείσδυση επιβάλλεται και από άλλους λόγους όπως:

- Η απαίτηση των σύγχρονων φορτίων για αδιάλειπτη παροχή ισχύος και τάση απαλλαγμένη από οποιαδήποτε ανωμαλία.
- Ο περιορισμός της κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς και η μείωση των απωλειών δικτύου
- Η μείωση των κατασκευών νέων συμβατικών μονάδων παραγωγής και η οικονομική λειτουργία του συστήματος, αφού με την τοπική κάλυψη της μεταβαλλόμενης πραγματικής και αέργου ισχύος των φορτίων αποφεύγεται η ένταξη δαπανηρών κεντρικών μονάδων στο σύστημα.

Στον Πίνακα 1.1. παρουσιάζονται διάφορα είδη ανανεώσιμων ή μη καταναμημένων παραγωγών, η απόδοσή τους και οι δυνατότητές τους. Τόσο οι μικροτουρμπίνες που είναι μικροί αεριοστρόβιλοι, όσο και οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν δυνατότητες συμπαραγωγής θερμότητας με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόδοση.

Πίνακας 1.1. Χαρακτηριστικά διάφορων τύπων καταναμημένης παραγωγής

Τύποι Καταναμημένης Παραγωγής	Δυνατότητα Παραγωγής	Απόδοση (%)	Αποσπώμενοι
<i>Μηχανή Εσωτερικής Καύσης</i>	50 kW - 5 MW	25 - 40	Ναι
<i>Τουρμπίνες πετρελαίου</i>	1 MW - 100 MW	30 - 40	Ναι
<i>Μικροτουρμπίνες</i>	10 kW - 500 kW	20 - 30	Ναι
<i>Αιολικά</i>	150 kW - 5 MW	< 40	Όχι
<i>Φωτοβολταϊκά</i>	200 W - 10 MW	10 - 20	Όχι
<i>Βιομάζα</i>	20 MW - 50 MW	10 - 20	Ναι
<i>Κύτταρα Καυσίμου</i>	0.5 kW - 3 MW	40 - 65	Ναι

Η απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου προϋποθέτει την ύπαρξη στο σύστημα πηγών με ελεγχόμενη παραγωγή. Φυσικά η παροχή ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές δεν μπορεί να είναι συνεχώς διαθέσιμη και μάλιστα εδώ υφίσταται εξομάλυνση στην διαθεσιμότητα λόγω γεωγραφικής διασποράς, αφού όλες οι πηγές εντοπίζονται στην ίδια περιοχή της γραμμής Χ.Τ. όπου συνδέονται. Αναμένονται λοιπόν απότομες μεταβολές στην ισχύ που παρέχεται από τις μονάδες αυτές. Οι υπόλοιπες πηγές, από τις οποίες μπορεί να εξασφαλιστεί μια συνέχεια στην παραγωγή, έχουν αργή αντίδραση σε μεταβολές του συστήματος π.χ. κύτταρα καυσίμου. Συνεπώς αν πρόκειται το μικροδίκτυο να λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία με τα προαναφερόμενα οφέλη, θα συμμετέχουν απαραίτητα και πηγές συσσώρευσης ενέργειας. Οι πηγές αυτές παρέχουν ισχύ σε περιπτώσεις διαταραχών υποστηρίζοντας το σύστημα και διατηρώντας έτσι την ποιότητα ισχύος στα απαιτούμενα επίπεδα. Πηγές συσσώρευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι: Μπαταρίες, σφόνδυλοι με υπεραγωγίμη δράση, υπερπυκνωτές και υπεραγωγίμα πηνία (SMES).

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας, οι μικροπηγές συνδέονται στο δίκτυο Χ.Τ. μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Αυτό είναι απαραίτητο για να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο τους, αφού η παρεμβολή του μετατροπέα αποσυνπλέκει τον έλεγχο της πρωτογενούς πηγής ισχύος από αυτόν του δικτύου. Όμως τις περισσότερες φορές η σύνδεση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι επιβεβλημένη καθώς είναι αδύνατη η απευθείας σύνδεση των πηγών με το δίκτυο. Για παράδειγμα οι μπαταρίες, τα φωτοβολταϊκά και οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ισχύ σε Σ.Ρ. (DC), ενώ οι μικροτουρμπίνες και οι σφόνδυλοι σε Ε.Ρ. (AC) με πολύ υψηλή και μεταβλητή συχνότητα αντίστοιχα. Ουσιαστικά ο έλεγχος των αντιστροφών καθορίζει την παροχή ενεργού και αέργου ισχύος από τις μικροπηγές στο σύστημα. Αναλαμβάνει να προσαρμόσει τα χαρακτηριστικά παραγωγής ισχύος της κάθε μικροπηγής στις ανάγκες του συστήματος και ταυτόχρονα την ρύθμιση της τάσης στο μικροδίκτυο. Αποκτά λοιπόν πρωτεύουσα σημασία για τη σύνδεση των μικροπηγών στο δίκτυο και τον σχηματισμό του μικροδικτύου.

Η χρήση των αντιστροφών για τη σύνδεση των μονάδων στο δίκτυο, διαφοροποιεί την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ή με ένα απομονωμένο σύστημα ισχύος στο οποίο συμμετέχουν μονάδες όπως γεννήτριες ντίζελ, υδροστρόβιλοι και ανεμογεννήτριες. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζουν την ευσταθή λειτουργία τους στις στρεφόμενες μάζες των μηχανών που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Στην περίπτωση του μικροδικτύου όλες σχεδόν οι πηγές συνδέονται μέσω αντιστροφών και έτσι το σύστημα δεν διαθέτει την απαραίτητη αδράνεια που εξασφαλίζουν οι στρεφόμενες μηχανές μέσω της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας. Ακόμα και αν οι μικροπηγές βασίζουν την λειτουργία τους στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή, η στρεφόμενη μηχανή είναι απομονωμένη από το δίκτυο με την παρεμβολή του αντιστροφέα (π.χ. ανεμογεννήτρια με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης). Εναπόκειται στον έλεγχο των αντιστροφών που συνδέουν στο δίκτυο διατάξεις συσσώρευσης ενέργειας και πηγές με ελεγχόμενη παραγωγή ισχύος, να υποκαταστήσει την ευσταθή απόκριση που έχει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με στρεφόμενες μηχανές. Εκτός από τον έλεγχο των αντιστροφών των μικροπηγών, ελεγκτές μπορεί να τοποθετηθούν και σε μέρος των φορτίων του μικροδικτύου. οι ελεγκτές αυτοί μπορεί να πραγματοποιούν απόρριψη και εισαγωγή φορτίων ανάλογα με την κρισιμότητά τους ώστε να διατηρείται η επιθυμητή ισορροπία παραγωγής – κατανάλωσης στο σύστημα.

Προκειμένου να επιτευχθούν τα προσδοκώμενα αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας, προβλέπονται δύο ακόμα επίπεδα ελέγχου του μικροδικτύου πέρα από τον τοπικό έλεγχο των μικροπηγών (MC – Microgeneration Control) και των φορτίων (LC – Load Control). Σε αμέσως επόμενο επίπεδο ενεργεί ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου (MGCC – Microgrid Central Controller). Ο κεντρικός αυτός ελεγκτής θα έχει την γενική εποπτεία του μικροδικτύου και θα μπορεί να εντολοδοτεί τους τοπικούς ελεγκτές των μικροπηγών σχετικά με την παραγωγή τους αλλά και να λαμβάνει από αυτούς πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση παραγωγής τους, με στόχο την βελτιστοποίηση και τον σχεδιασμό της παραγωγής. Κατά την απομονωμένη λειτουργία ο έλεγχος του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου αποκτά τον χαρακτήρα της βελτιστοποίησης και του σχεδιασμού της παραγωγής που επιτελείται σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Τέλος, κατά την συνδεδεμένη λειτουργία με το υπερκείμενο

δίκτυο Μ.Τ., ο έλεγχος από τον κεντρικό ελεγκτή θα γίνεται σε συντονισμό με το Σύστημα διαχείρισης του Δικτύου Διανομής (DMS – Distribution Management System) που θα αποτελεί το τελευταίο επίπεδο ελέγχου και η οποιαδήποτε βελτιστοποίηση της παραγωγής στο μικροδίκτυο θα εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες στο Δίκτυο Διανομής.

Είναι φανερό ότι το εύρος των τεχνικών προβλημάτων που θα πρέπει να λυθούν ώστε να καταστεί δυνατή η απρόσκοπτη λειτουργία των μικροδικτύων είναι μεγάλο. Ειδικά η απομονωμένη λειτουργία παρουσιάζει ποικίλες δυσκολίες. Η μετάβαση από την συνδεδεμένη λειτουργία στην απομονωμένη καθώς και ο συγχρονισμός και η επανασύνδεση τους μικροδικτύου στο υπερκείμενο δίκτυο αποτελούν προαπαιτούμενα για την εξασφάλιση της συνεχούς λειτουργίας του. Ευσταθή λειτουργία, ζητήματα προστασίας και ασφάλειας, έλεγχος και επικοινωνία των μικροπηγών σε τοπικό και κεντρικό επίπεδο, θέματα ποιότητας ισχύος, είναι τομείς που χρήζουν έρευνας. Ακόμα και η τοπολογία του μικροδικτύου σε ακτινική ανάπτυξη είναι υπό διερεύνηση, ενώ εξετάζεται για μεγαλύτερη ευελιξία και η περίπτωση σύνδεσης όλων των μικροπηγών σε δίκτυο συνεχούς ρεύματος το οποίο θα συνδέεται με το δίκτυο Χ.Τ. με αντιστροφή σε κάποιο σημείο του. Κάποια τεχνικά ζητήματα αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια:

- **Ασφάλεια:** Οι κατανεμημένες παραγωγές που είναι ενσωματωμένες σε δίκτυα είναι πιθανόν να διατηρούν ενεργές τις γραμμές έπειτα από την αποσύνδεση του υπερκείμενου δικτύου δημιουργώντας έτσι κινδύνους για το προσωπικό που δουλεύει στην αποκατάσταση ενός σφάλματος ή στην συντήρηση του δικτύου. Η IEEE έχει αναπτύξει μια τεχνική έκθεση (IEEE Standard 1547) σχετικά με τη νησιδοποίηση του δικτύου όπου η νησιδοποιημένη κατανεμημένη παραγωγή οφείλει να αποσυνδεθεί μέσα σε 2 δευτερόλεπτα από τη στιγμή της νησιδοποίησης. Η αξιόπιστη ανίχνευση της νησιδοποίησης και η αυτόνομη λειτουργία της κατανεμημένης παραγωγής για την κάλυψη κρίσιμων φορτίων χρήζει έρευνας.
- **Λειτουργία και Αξιοπιστία:** Η ενσωμάτωση κατανεμημένων παραγωγών στο δίκτυο Χ.Τ. μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου εφόσον αυτό δεν είναι σχεδιασμένο για ενσωμάτωση τέτοιων πηγών. Για παράδειγμα, κατανεμημένες παραγωγές με κυμαινόμενη ισχύ εξόδου (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά κ.α.) ή με χρήση επαγωγικών γεννητριών που έχουν απαιτήσεις σε άεργο ισχύ δυσχεραίνουν την αξιοπιστία λειτουργίας του δικτύου.
- **Ποιότητα Ισχύος:** Με δεδομένο πως η πλειονότητα των κατανεμημένων πηγών ενσωματώνεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών εγείρονται ερωτήματα για την ποιότητα της ισχύος που παρέχεται. Εφόσον, οι αρμονικές που παράγονται από τους μετατροπείς δεν φιλτράρονται επαρκώς, μπορεί να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα και μη επιθυμητή λειτουργία των συνδεδεμένων φορτίων. Οι τεχνικές εκθέσεις 519-1992 και 1547-2003 της IEEE προτείνουν ότι η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που εισάγει μια κατανεμημένη παραγωγή δεν πρέπει να ξεπερνά το 5%.
- **Οικονομικά Ζητήματα:** Οικονομικά ζητήματα που αφορούν τις συμφωνίες αγοράς και πώλησης της ενέργειας, αλλά και ρυθμίσεις που καθορίζουν την

ευθύνη των ιδιοκτητών κατανεμημένης παραγωγής και του δικτύου απέναντι σε διάφορα οικονομικά και τεχνικά θέματα κάνουν αναγκαία την ύπαρξη μιας ρυθμιστικής αρχής σαν την Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (Federal Energy Regulatory Commission - FERC) που δημιουργήθηκε το 1977 στις ΗΠΑ.

Τα τελευταία χρόνια, μεγάλη πρόκληση για τους μηχανικούς αποτελεί η εύρεση του βέλτιστου πλάνου τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ΜΔΠ στα δίκτυα διανομής. Ο εκάστοτε διαχειριστής του δικτύου καλείται να ελαχιστοποιήσει το κόστος απωλειών ενέργειας και των συνολικών δαπανών από την σύνδεση των ΜΔΠ στο δίκτυο, με την ικανοποίηση όλων των τεχνικών περιορισμών, προκειμένου να τροφοδοτούνται επαρκώς οι καταναλωτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Εισαγωγή

Ο όρος «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» (ΑΠΕ), σύμφωνα με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27^{ης} Σεπτεμβρίου 2001, σημαίνει τις μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως π.χ. αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, βιομάζα, αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, αέρια εκλυόμενα από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και βιοαέρια.

Οι «ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» ή «ήπιες μορφές ενέργειας» ή «νέες πηγές ενέργειας» είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχήν, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερο, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργεια που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσια της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών μορφών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος «στάτους κβο» στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα βοηθούσε σημαντικά στη ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασσικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και

ειδικά η αιολική και υ υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α. ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2010 το 25% της ενέργειας θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως υδροηλεκτρικά και βιομάζα).[5]

Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στην Αιολική και την Ηλιακή παραγωγή ενέργειας, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω

2.1. Αιολική Ενέργεια

2.1.1. Χαρακτηριστικά του ανέμου

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου [6] περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t) \quad (2.1)$$

Όπου:

$V_w(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα

\bar{V}_w : η μέση ταχύτητα

$v(t)$: η τυρβώδης συνιστώσα της ταχύτητας

Υπολογίζεται συνήθως η μέση ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου \bar{V}_w , η οποία είναι αυτή που λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό για την ενεργειακή απόδοση των Α/Γ. Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός της μέσης ωριαίας τιμής όπου T είναι το διάστημα της μιας ώρας.

$$\bar{V}_w = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (2.2)$$

Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, u , σε μια συγκεκριμένη θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας *Weibull* η οποία δίνεται παρακάτω:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{για } 0 \leq v \leq \infty \quad (2.3)$$

Όπου:

k : η παράμετρος μορφής

c : η παράμετρος κλίμακας

2.1.2. Παράμετρος μορφής k

Η μορφή της συνάρτησης *Weibull* $h(v)$, καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου μορφής k . Στο Σχήμα 2.1. εικονίζεται η συνάρτηση για τέσσερις ενδεικτικές τιμές. Παρατηρείται ότι αύξηση της τιμής του k προκαλεί αύξηση του ύψους της κατανομής, καθώς και κάποια μετατόπιση της κατανομής σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου. Ειδικές περιπτώσεις με ενδιαφέρον είναι οι ακόλουθες:

- $k = 1$ προκύπτει η εκθετική κατανομή:

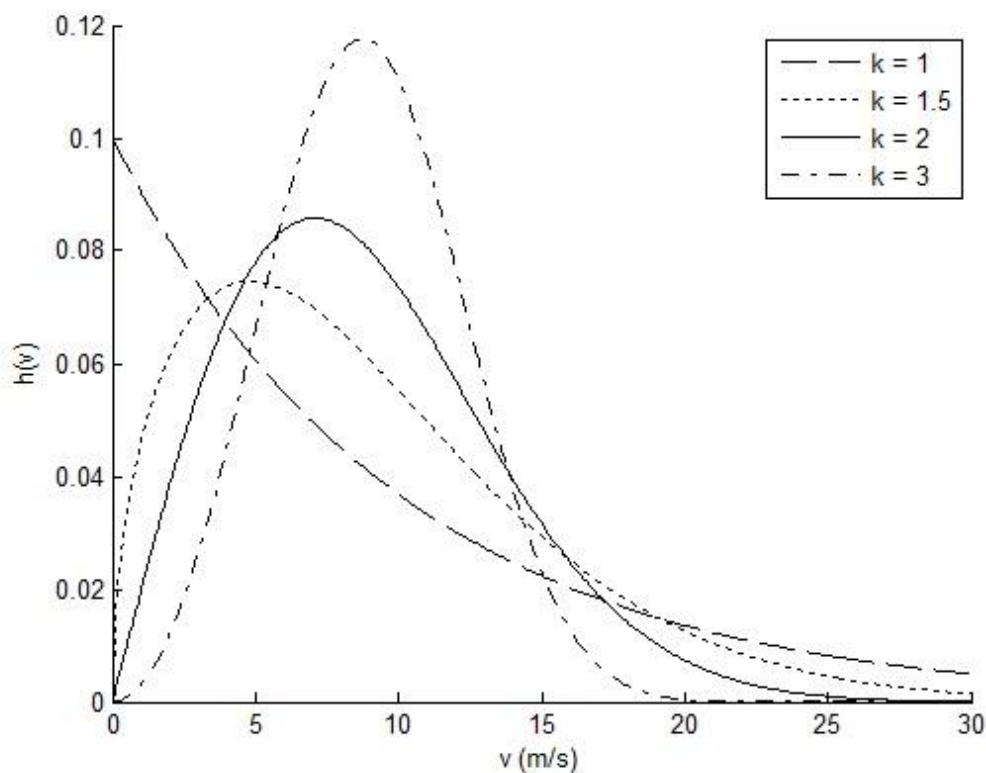
$$h(v) = \frac{1}{c} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)} \quad (2.4)$$

- $k = 2$ προκύπτει η εκθετική *Rayleigh*:

$$h(v) = \frac{2}{c^2} v e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (2.5)$$

- $k > 3$ η κατανομή προσεγγίζει την *Κανονική* κατανομή (*Gauss*).

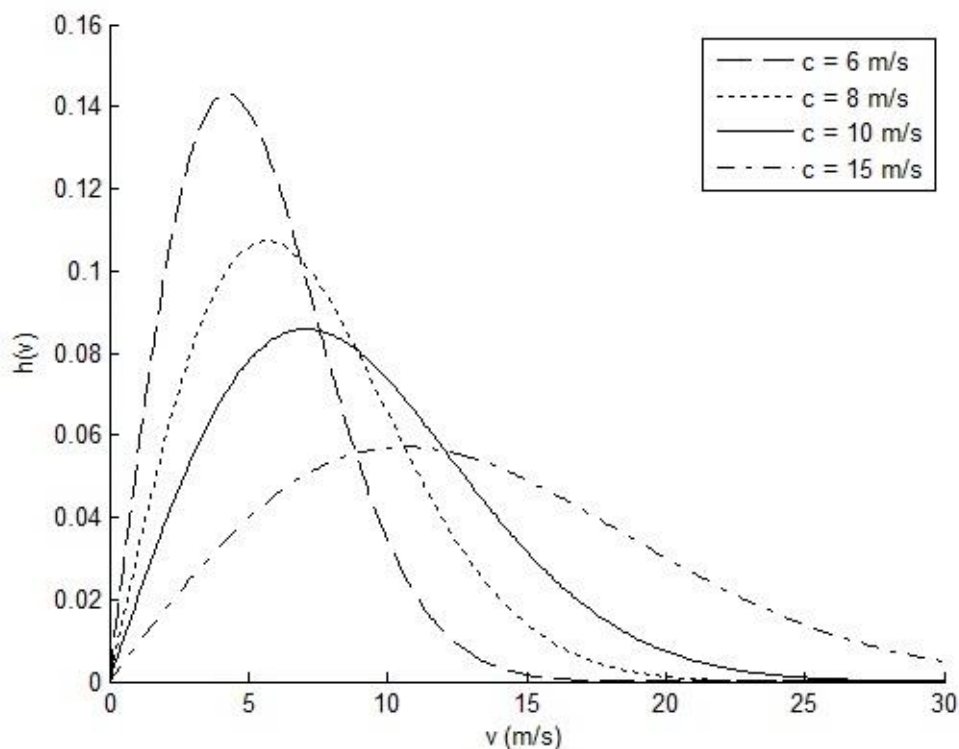
Συνήθεις τιμές της παραμέτρου k είναι μεταξύ 1.5 και 2.5, ενώ πολύ συχνά λαμβάνεται $k = 2$, δηλαδή χρησιμοποιείται η κατανομή *Rayleigh*. Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1.5 και 2.0.



Σχήμα 2.1. Μορφή της κατανομής *Weibull* για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής k και με παράμετρο κλίμακας $c = 10$ m/s

2.1.3. Παράμετρος κλίμακας c

Για δεδομένη τιμή της παραμέτρου μορφής, η παράμετρος κλίμακας c καθορίζει τη μέση τιμή της ταχύτητας στη θέση που εξετάζεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2., όπου $k = 2$ (κατανομή *Rayleigh*). Αύξηση του c προκαλεί μετατόπιση της κατανομής σε υψηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 2.2. Μορφή της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου κλίμακας c και με παράμετρο μορφής $k = 2$ (κατανομή *Rayleigh*)

2.1.4. Μέση ταχύτητα

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε μια συγκεκριμένη θέση υπολογίζεται από την κατανομή *Weibull*:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} v h(v) dv = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2.6)$$

Όπου με Γ συμβολίζεται η συνάρτηση *Γάμμα*. Ειδικά για την κατανομή *Rayleigh* η παραπάνω σχέση απλοποιείται στη συχνά χρησιμοποιούμενη:

$$\bar{V} = c \Gamma(1.5) \cong 0.886 \cdot c \approx 0.90 \cdot c \quad (2.7)$$

Συνεπώς, με γνωστή τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε μια θέση (πράγμα σύνηθες, δεδομένου ότι οι θέσεις χαρακτηρίζονται από τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου), μια προσέγγιση της αντίστοιχης στατιστικής κατανομής είναι:

$$h(v) = \frac{1.6 \cdot v}{\bar{V}^2} e^{-1.6 \left(\frac{v}{\bar{V}}\right)^2} \quad (2.8)$$

Και κατ' επέκταση με γνωστή τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε συγκεκριμένη θέση υπολογίζεται και η τιμή της παραμέτρου κλίμακας c , όπως παρακάτω:

$$c = 1.128 \cdot \bar{V} \quad (2.9)$$

2.1.5. Ισχύς εξόδου των Α/Γ

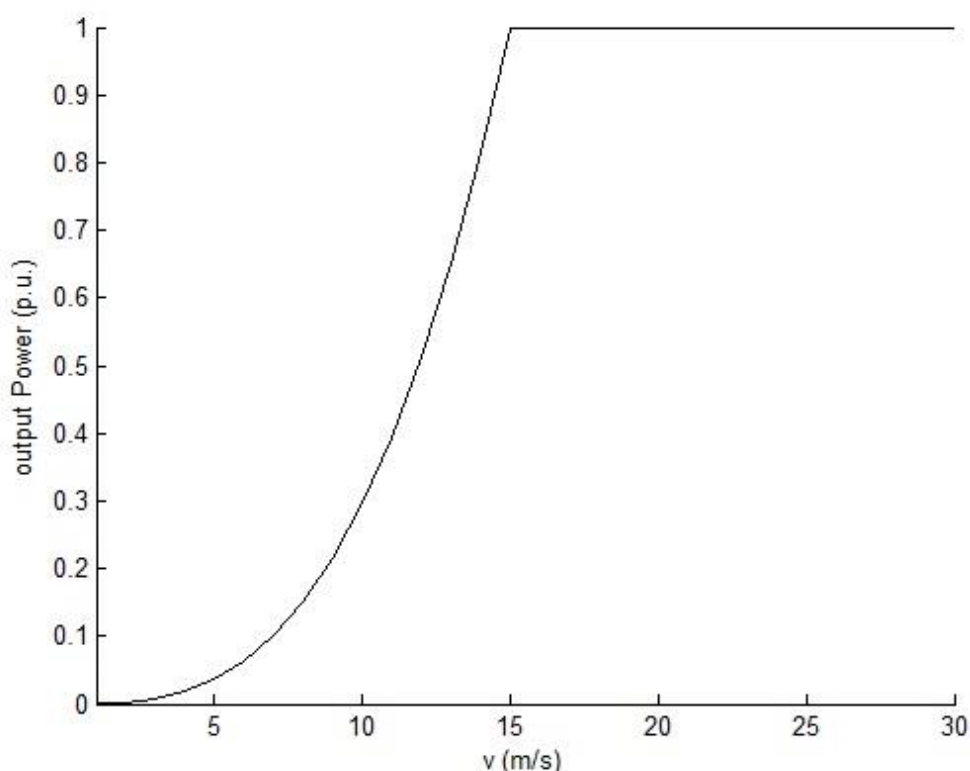
Ένα μέρος της ισχύος του ανέμου P_A , μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ P_m στον δρομέα της Α/Γ. Στη συνέχεια η μηχανική ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ P_e μέσω της γεννήτριας στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας. Τέλος, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ισχύς τροφοδοτείται στο δίκτυο κι ένα μικρότερο μέρος αυτού χάνεται σε ηλεκτρικές απώλειες. Η ισχύς του δρομέα της ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho C_p A \bar{V}_w^3 \quad (2.10)$$

Όπου:

- ρ : η πυκνότητα του αέρα
- C_p : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p = C_p(\lambda, \beta)$
- λ : ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου $\lambda = (R \cdot \omega_R) / \bar{V}_w$
- β : η γωνία του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου
- A : η επιφάνεια δρομέα ($A = \pi \cdot R$)
- \bar{V}_w : η ταχύτητα του ανέμου

Η καμπύλη ισχύος της Α/Γ που εξάγεται από τον τύπο (2.10) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. που ακολουθεί:



Σχήμα 2.3. Καμπύλη ισχύος της Α/Γ

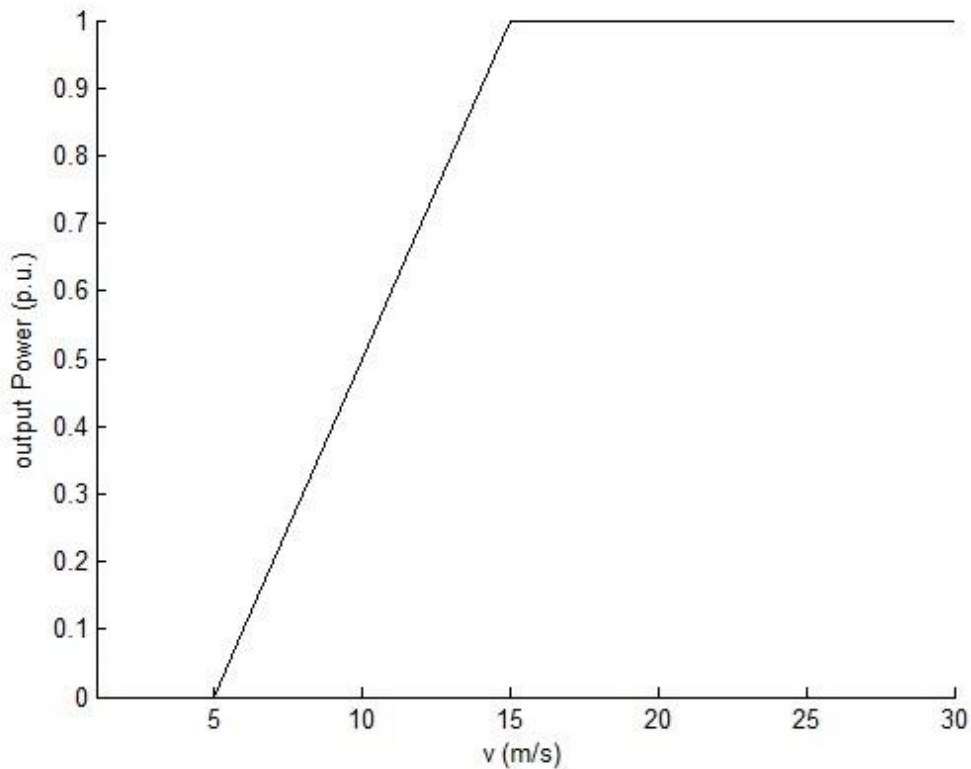
Χάριν απλοποίησης γίνεται η παραδοχή πως η ισχύς εξόδου $P(v)$ εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου [7] και η τελική της τιμή θα υπολογίζεται γραμμικά από την παρακάτω σχέση:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (2.11)$$

Όπου:

- v_{ci} : (v_{cut-in}) ταχύτητα ένταξης της Α/Γ
- v_{co} : ($v_{cut-out}$) ταχύτητα απένταξης της Α/Γ
- v_r : ταχύτητα στην οποία η Α/Γ παράγει την ονομαστική της ισχύ
- v : τυχαία ταχύτητα του ανέμου που εξετάζεται κάθε φορά
- P_{rated} : ονομαστική ισχύς της Α/Γ

Στο Σχήμα 2.4. παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος της Α/Γ που εξάγεται από τον τύπο (2.11).



Σχήμα 2.4. Απλοποιημένη καμπύλη ισχύος της Α/Γ

2.2. Ηλιακή Ενέργεια

2.2.1. Μοντελοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η στατιστική κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας s , η οποία είναι αυτή που λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό για την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β [10], περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας *Beta* [7] η οποία δίνεται παρακάτω:

$$h(s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \times s^{(\alpha-1)} \times (1 - s)^{(\beta-1)} \quad (2.12)$$

λαμβάνοντας τους περιορισμούς: $0 \leq s \leq 1, \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0$

Οι α , β είναι παράμετροι της κατανομής $Beta$ και υπολογίζονται ως εξής:

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (2.13)$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (2.14)$$

Όπου:

- μ : η μέση τιμή των μετρήσεων για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
 σ : η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

2.2.2. Ισχύς εξόδου των Φ/B

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ εκμεταλλεύονται ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η ισχύς εξόδου του Φ/B εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου και τα χαρακτηριστικά του Φ/B πάνελ [7].

$$T_c = T_A + s \left(\frac{N_{OT} - 20}{0.8} \right) \quad (2.15)$$

$$I = s[I_{sc} + K_I(T_c - 25)] \quad (2.16)$$

$$V = V_{oc} - K_V \times T_c \quad (2.17)$$

$$P_s = N \times FF \times V \times I \quad (2.18)$$

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.19)$$

Όπου:

- T_c : η θερμοκρασία του Φ/B στοιχείου σε $^{\circ}\text{C}$
 T_A : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου σε $^{\circ}\text{C}$
 K_V : ο συντελεστής τάσης-θερμοκρασίας σε $\text{V}/^{\circ}\text{C}$
 K_I : ο συντελεστής ρεύματος-θερμοκρασίας σε $\text{A}/^{\circ}\text{C}$
 N_{OT} : η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/B στοιχείου σε $^{\circ}\text{C}$
 FF : ο συντελεστής πλήρωσης
 I_{sc} : το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε A
 V_{oc} : η τάση ανοιχτοκυκλώσεως σε V
 I_{MPP} : το ρεύμα σε κατάσταση μέγιστης ισχύος σε A
 V_{MPP} : η τάση σε κατάσταση μέγιστης ισχύος σε V
 P_s : η ισχύς εξόδου του Φ/B
 s : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε (W/m^2)

Οι παραπάνω παράμετροι είναι χαρακτηριστικά μεγέθη του Φ/B στοιχείου και δίνονται από τον κατασκευαστή.

Χάρην απλοποιήσεως γίνεται η παραδοχή πως η ισχύς εξόδου P_s εξαρτάται μόνο από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [8] και η τελική της τιμή θα υπολογίζεται γραμμικά από την παρακάτω σχέση:

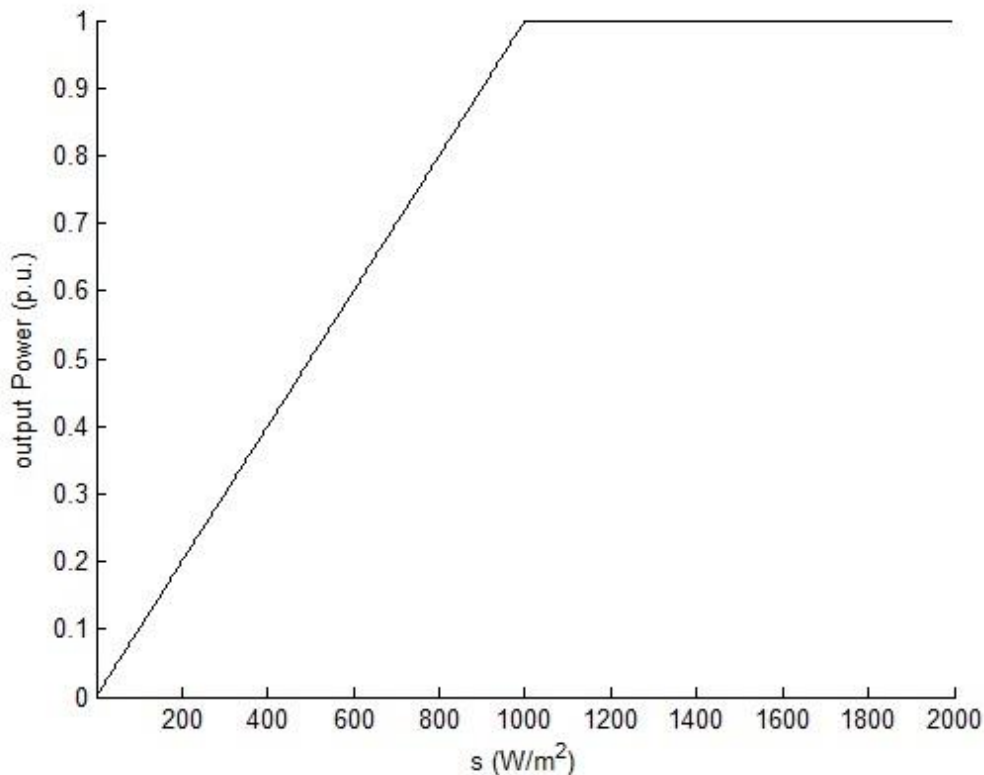
$$P_s = \begin{cases} P_{rated} \frac{s}{s_r} & 0 \leq s < s_r \\ P_{rated} & s \geq s_r \end{cases} \quad (2.20)$$

Όπου:

- s : η τυχαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που εξετάζεται κάθε φορά
- s_r : η τιμή της ακτινοβολίας όπου παράγεται η ονομαστική ισχύς του Φ/B
- P_{rated} : η ονομαστική ισχύς εξόδου του Φ/B

Ως πρότυπη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για τη μέγιστη δυνατή απόδοση των Φ/B επιλέγεται $s_r = 1000 \text{ W/m}^2$, η οποία συχνά αναφέρεται και ως «ισχύς ενός Ηλίου». [9]

Η καμπύλη ισχύος για το Φ/B που προκύπτει από τον τύπο (2.20) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Απλοποιημένη καμπύλη ισχύος Φ/B

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

Εισαγωγή

Με την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής παρέχεται η δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης από μονάδες που βρίσκονται κοντά στον τελικό καταναλωτή, αυξάνοντας την αξιοπιστία του δικτύου. Σε μια κατάσταση σφάλματος του δικτύου διανομής, που το κυρίως δίκτυο αδυνατεί να τροφοδοτήσει ένα ποσοστό των φορτίων του δικτύου διανομής, ο σχηματισμός μικροδικτύων, ικανών να λειτουργήσουν αυτόνομα με την ελάχιστη αποκοπή φορτίου, μπορεί να αυξήσει περαιτέρω την αξιοπιστία του δικτύου.

Ο σχηματισμός των μικροδικτύων πρακτικά γίνεται με την τοποθέτηση διακοπών στα σύνορά τους. Οι διακόπτες αυτοί ενεργοποιούνται σε κρίσιμη για το δίκτυο κατάσταση προκειμένου να περιοριστεί το σφάλμα. Είναι προφανές ότι προϋποτίθεται ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο παράλληλα με το δίκτυο της ηλεκτρικής ισχύος το οποίο θα ελέγχει τη λειτουργία των διακοπών αλλά και γενικότερα θα έχει την εποπτεία του μικροδικτύου. Ένα από τα πλεονεκτήματα του αποκεντρωμένου ελέγχου (αυτόνομη λειτουργία) είναι ότι το μικροδίκτυο μπορεί να ορίσει τοπικά την κρισιμότητα κάθε φορτίου που εμπεριέχει, με σκοπό να αποκοπούν πρώτα τα λιγότερο κρίσιμα φορτία σε περίπτωση που συμβεί σφάλμα στο ευρύτερο δίκτυο. Επίσης με αυτό τον τρόπο το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα και να ρυθμίσει την ευστάθειά του ή ακόμα και να τροφοδοτήσει κρίσιμα φορτία που ανήκουν σε γειτονικά μικροδίκτυα [18].

Σκοπός της μεθόδου είναι η βέλτιστη τοποθέτηση διακοπών στις γραμμές ενός ακτινικού Δικτύου Διανομής για τον σχηματισμό αυτοεξυπηρετούμενων μικροδικτύων. Στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, οι διακόπτες που ορίζουν το μικροδίκτυο στο οποίο συμβαίνει το σφάλμα ανοίγουν ώστε να αποτρέψουν την εξάπλωση του σφάλματος στο υπόλοιπο δίκτυο. Θεωρείται ότι το μικροδίκτυο στο οποίο συμβαίνει το σφάλμα βγαίνει εκτός λειτουργίας και θα ονομάζεται «*μικροδίκτυο σφάλματος*». Το ανάντι δίκτυο του μικροδικτύου δεν επηρεάζεται από την διαταραχή καθώς παραμένει συνδεδεμένο με το Δίκτυο Μεταφοράς, το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει τα φορτία του. Το κατάντι δίκτυο, το οποίο μετά το άνοιγμα των διακοπών χωρίζεται σε «*νησίδες*», συνεχίζει να εξυπηρετεί τα φορτία του σύμφωνα με την παραγωγική ικανότητά του. Στην περίπτωση που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν πλήρως τα φορτία, πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου ώστε να εξισωθεί η παραγωγή με την ζήτηση.

Για την εύρεση της βέλτιστης τοποθέτησης των διακοπών ορίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία μοντελοποιεί την επίδραση του σφάλματος στο δίκτυο. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης κατά την περίοδο σχεδιασμού με την δυνατότητα σχηματισμού μικροδικτύων. Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει υπόψη

την πιθανότητα διαταραχής σε οποιοδήποτε μικροδίκτυο και μελετά την επίδραση στο «μικροδίκτυο σφάλματος» ($impact_{selfMG}$) καθώς και στις σχηματιζόμενες «νησίδες» του κατάντι δικτύου ($impact_{downstreamMG}$).

3.1. Μοντελοποίηση Ζήτησης Φορτίου και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η μοντελοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγή και της ζήτησης φορτίου είναι πολύ σημαντική προκειμένου να αξιολογήσουμε τον διαχωρισμό του Δικτύου Διανομής. Η διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ) στην παρούσα εργασία αποτελείται από αιολικά, φωτοβολταϊκά και μικροτουρμπίνες. Η παραγωγή από μικροτουρμπίνες θεωρείται ελεγχόμενη παραγωγή ενώ η παραγωγή ισχύος από τις ΑΠΕ θεωρείται αβέβαιη παραγωγή, κι αυτό διότι εξαρτάται από στοχαστικές παραμέτρους που εισάγουν τυχαιότητα. Μια τέτοια παράμετρος είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, που επηρεάζει καθοριστικά την φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας, καθώς επίσης και η ταχύτητα του ανέμου που καθορίζει την αιολική παραγωγή ενέργειας. Έτσι, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου για κάθε ώρα της ημέρας μοντελοποιούνται με τις κατανομές *Beta* και *Weibull* αντίστοιχα.

Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του διαχωρισμού στη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού (ένα έτος) θεωρούνται 4 αντιπροσωπευτικές ημέρες, όπου η καθεμία αντιστοιχεί και σε μια εποχή (*Χειμώνας, Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο*). Κάθε ημέρα χωρίζεται σε 24 ώρες και για κάθε ώρα ορίζεται μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) που μοντελοποιεί την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μια σ.π.π. που μοντελοποιεί την ταχύτητα του ανέμου.

Το φορτίο μοντελοποιείται επίσης ανά ώρα και ακολουθεί την κανονική κατανομή. Οι ωριαίες κατανομές των αιολικών, των φωτοβολταϊκών και των φορτίων διαιρούνται σε n καταστάσεις (*states*), όπου η κάθε μια κατάσταση έχει τη δική της πιθανότητα εμφάνισης. Υποθέτοντας ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η ταχύτητα του ανέμου είναι δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους μεγέθη, οποιοσδήποτε συνδυασμός παραγωγής και ζήτησης φορτίου μπορεί να υπολογιστεί απλά συνελίσσοντας τις αντίστοιχες πιθανότητες. Ο αριθμός των καταστάσεων που επιλέγεται επηρεάζει τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο και την πολυπλοκότητα του υπολογισμού, επομένως είναι σημαντικό να οριστεί ένας κατάλληλος αριθμός καταστάσεων. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας αριθμός της τάξης των 10 - 15 καταστάσεων ανά ώρα. Το αποτέλεσμα κάθε κατάστασης υπολογίζεται ξεχωριστά και στο τέλος ενσωματώνονται όλες οι καταστάσεις σε έναν κοινό ωριαίο δείκτη [11].

3.2. Υπολογισμός συνολικά εγκατεστημένων ονομαστικών μεγεθών παραγωγής και φορτίου «μικροδίκτυου σφάλματος» ή «νησίδα»

Στα δίκτυα διανομής συνήθως δεν υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις από ζυγό σε ζυγό και επομένως θεωρείται ότι γεωγραφικά ισχύουν οι ίδιες καιρικές συνθήκες σε όλη την έκταση του δικτύου. Έτσι, είναι δόκιμο να θεωρηθεί ότι οι παραγωγές από όμοιες ΑΠΕ ακολουθούν την ίδια καμπύλη παραγωγής.

Για παράδειγμα, οι εγκατεστημένες φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής εντός ενός μικροδικτύου ακολουθούν την ίδια καμπύλη παραγωγής επομένως είναι εφικτό να προστεθούν όλες οι φωτοβολταϊκές μονάδες με σκοπό σε κάθε μικροδίκτυο να θεωρείται μια συνισταμένη εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκών.

Ομοίως, αντιμετωπίζεται και η αιολική παραγωγή, το εγκατεστημένο φορτίο καθώς και η συνισταμένη εγκατεστημένη ισχύς από ελεγχόμενες μονάδες (μικροτουρμπίνες). Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ονομαστικά εγκατεστημένα μεγέθη εντός κάθε «μικροδικτύου σφάλματος» ή σχηματιζόμενης «νησίδα».

Χρειάζεται να αναφερθεί ότι η μεταβλητή num_of_buses συμβολίζει τον αριθμό των ζυγών εντός του εκάστοτε μικροδικτύου.

- Υπολογισμός συνολικής εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος αιολικών σε κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» ή «νησίδα»:

$$WT_rated = \sum_{bus=1}^{num_of_buses} WT_rated_{bus} \quad (3.1)$$

Όπου, WT_rated_{bus} είναι η εγκατεστημένη αιολική παραγωγή ανά ζυγό και WT_rated είναι η συνολική εγκατεστημένη αιολική παραγωγή στο «μικροδίκτυο σφάλματος» ή τη «νησίδα» που εξετάζεται.

- Υπολογισμός συνολικής εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος φωτοβολταϊκών σε κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» ή «νησίδα»:

$$PV_rated = \sum_{bus=1}^{num_of_buses} PV_rated_{bus} \quad (3.2)$$

Όπου, PV_rated_{bus} είναι η εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή ανά ζυγό και PV_rated είναι η συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή στο «μικροδίκτυο σφάλματος» ή τη «νησίδα» που εξετάζεται.

- Υπολογισμός συνολικής εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος μικροτουρμπίνων σε κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» ή «νησίδα»:

$$MT_{rated} = \sum_{bus=1}^{num_of_buses} MT_{rated}_{bus} \quad (3.3)$$

Όπου, MT_{rated}_{bus} είναι η εγκατεστημένη παραγωγή από μικροτουρμπίνες ανά ζυγό και MT_{rated} είναι η συνολική εγκατεστημένη παραγωγή από μικροτουρμπίνες στο «μικροδίκτυο σφάλματος» ή τη «νησίδα» που εξετάζεται.

- Υπολογισμός συνολικής εγκατεστημένης ονομαστικής ζήτησης φορτίου σε κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» ή «νησίδα»:

$$LD_{rated} = \sum_{bus=1}^{num_of_buses} LD_{rated}_{bus} \quad (3.4)$$

Όπου, LD_{rated}_{bus} είναι το εγκατεστημένο φορτίο σε κάθε ζυγό και LD_{rated} είναι το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο στο «μικροδίκτυο σφάλματος» ή τη «νησίδα» που εξετάζεται.

3.3. Υπολογισμός επίπτωσης «μικροδικτύου σφάλματος»

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όταν ένα μικροδίκτυο βγει εκτός λειτουργίας, αυτομάτως όλο του το φορτίο παύει να εξυπηρετείται (αποκοπή φορτίου). Η επίδραση του σφάλματος στο μικροδίκτυο αυτό είναι ανάλογη της αποκοπής φορτίου που πραγματοποιείται.

3.3.1. Υπολογισμός ζήτησης φορτίου «μικροδικτύου σφάλματος» ή «νησίδας»

Για τον υπολογισμό της ζήτησης φορτίου για συγκεκριμένη ώρα χρησιμοποιούνται οι δεδομένες καμπύλες φορτίου και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή όπως παρακάτω, όπου ενσωματώνονται και οι απώλειες των γραμμών ως ποσοστό της ζήτησης φορτίου:

$$Load_{Demand(MG, hour)} = (LD_{rated} \cdot ld_{percentage}_{(hour)}) \cdot (1 + EnergyLoss_{percentage}) \quad (3.5)$$

Σημειώνεται ότι το ποσοστό απωλειών $EnergyLoss_{percentage}$ κυμαίνεται στο 5% [11].

Επίσης, είναι αναγκαίο να μοντελοποιηθεί η αβεβαιότητα της ζήτησης φορτίου. Γι' αυτό το λόγο θεωρούμε ότι η στατιστική κατανομή της ζήτηση φορτίου περιγράφεται από την καμπύλη της Κανονικής κατανομής (*Gaussian*), της οποίας η εξίσωση είναι:

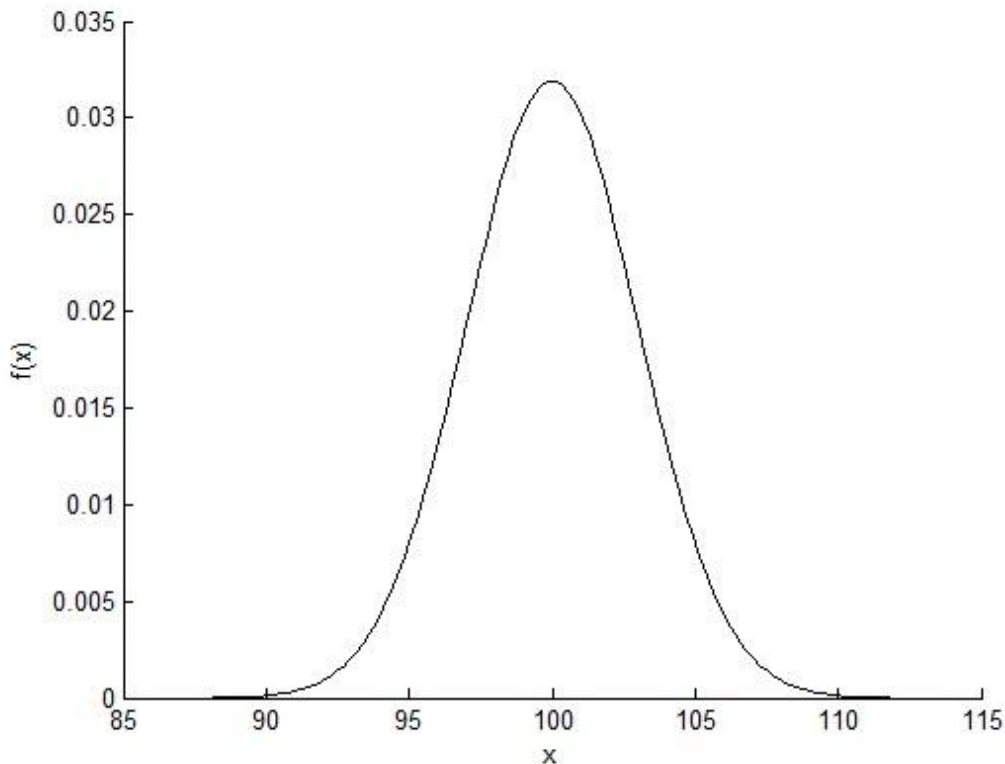
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, & -\infty \leq X \leq \infty \\ 0 & , \quad \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.6)$$

λαμβάνοντας τους περιορισμούς: $-\infty \leq \mu \leq \infty, \quad \sigma > 0$

Όπου:

μ : η μέση τιμή
 σ : η τυπική απόκλιση

Ως τυπική απόκλιση λαμβάνεται ενδεικτικά $\sigma = 3\%$. Και μια ενδεικτική μορφή της κανονικής κατανομής παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.1*.



Σχήμα 3.1. Ενδεικτική Κατανομή Gauss

Για να μετρηθεί η επίδραση του σφάλματος που αφορά στο «μικροδίκτυο σφάλματος» για όσες ώρες εξετάζεται ο σχεδιασμός του δικτύου, σχηματίζεται ο παρακάτω δείκτης:

$$Load_impact_{selfMG} = \sum_{hour=1}^{hours} Load_impact_{self(MG, hour)} \quad (3.7)$$

Όπου:

$$Load_impact_{self(MG, hour)} = Load_Demand_{(MG, hour)}^2 \quad (3.8)$$

Γενικότερα, η παραπάνω καμπύλη του Σχήματος 3.1. μπορεί να χωριστεί σε έναν αριθμό n διαστημάτων. Από κάθε διάστημα εξάγεται μια αντιπροσωπευτική τιμή της ζήτησης φορτίου και η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισής της. Κάθε ζεύγος ζήτηση φορτίου-πιθανότητας αποτελεί μία κατάσταση (*state*) από τις συνολικά n καταστάσεις εντός της ώρας που εξετάζεται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις [15].

$$load_{state} = (x_l + x_{l+1})/2 \quad (3.9)$$

$$ld_prob_{state} = \int_{x_l}^{x_{l+1}} f(x) dx \quad (3.10)$$

Όπου:

- x_l, x_{l+1} : τα άκρα που ορίζουν το διάστημα που εξετάζεται κάθε φορά
- $f(x)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Κανονικής κατανομής
- $load_{state}$: η αντιπροσωπευτική τιμή της ζήτησης φορτίου για το διάστημα
- ld_prob_{state} : η πιθανότητα εμφάνισης της αντίστοιχης ζήτησης φορτίου

3.3.2. Υπολογισμός του δείκτη επίπτωσης για δεδομένο «μικροδίκτυο σφάλματος»

Η συνιστώσα που αφορά στο «μικροδίκτυο σφάλματος» και συμβάλλει στον τελικό δείκτη αξιολόγησης του διαχωρισμού είναι ο δείκτης αποκοπής φορτίου:

$$impact_{selfMG} = Load_impact_{selfMG} \quad (3.11)$$

Ο κύριος στόχος εν μέσω σφάλματος είναι η ελαχιστοποίηση του μη εξυπηρετούμενου φορτίου. Έτσι, ο σχεδιασμός των βέλτιστων μικροδικτύων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κυρίως αυτή την παράμετρο.

3.4. Υπολογισμός επίπτωσης «νησίδων»

Για δεδομένο «μικροδίκτυο σφάλματος», σχηματίζεται ένας αριθμός από μικροδίκτυα στα κατάντι αυτού, για τα οποία στόχος είναι να συνεχίσουν την λειτουργία τους με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες φορτίου. Η συνιστώσα που αφορά στις «νησίδες» έγκειται στην ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης εντός τους. Όσο μικρότερη είναι η ανισορροπία παραγωγής και ζήτησης στις «νησίδες», τόσο καλύτερος είναι ο προτεινόμενος διαχωρισμός.

Έστω ότι ο αριθμός των «νησίδων» που σχηματίζονται είναι k . Για κάθε «νησίδα» υπολογίζεται το ισοζύγιο ισχύος εντός της για όλες τις ώρες που εξετάζεται ο σχεδιασμός του δικτύου και στο τέλος αθροίζονται τα ισοζύγια όλων των πιθανών «νησίδων» για να εξαχθεί μία τελική συνιστώσα αξιολόγησης, η οποία περιγράφει τη συνολική εικόνα της ευρωστίας του κατάντι μέρους του «μικροδίκτυου σφάλματος». Επομένως, η επίδραση του σφάλματος στις «νησίδες» εκφράζεται με την ανισορροπία ισχύος εντός τους.

3.4.1. Υπολογισμός παραγωγής ισχύος από Αιολικά «νησίδα»

Κύριο δεδομένο για τον υπολογισμό της παραγωγής ισχύος των αιολικών είναι η ταχύτητα του ανέμου για τη συγκεκριμένη ώρα που εξετάζεται κάθε φορά. Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου εντός της συγκεκριμένης ώρας θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή *Weibull* [6]. Η κατανομή αυτή έχει δυο παραμέτρους, την παράμετρο μορφής k και την παράμετρο κλίμακας c . Στην έκταση της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι $k = 2$ και έτσι προκύπτει η κατανομή *Rayleigh* η οποία είναι μια ειδική περίπτωση της *Weibull*. Η παράμετρος κλίμακας c καθορίζεται όπως παρακάτω:

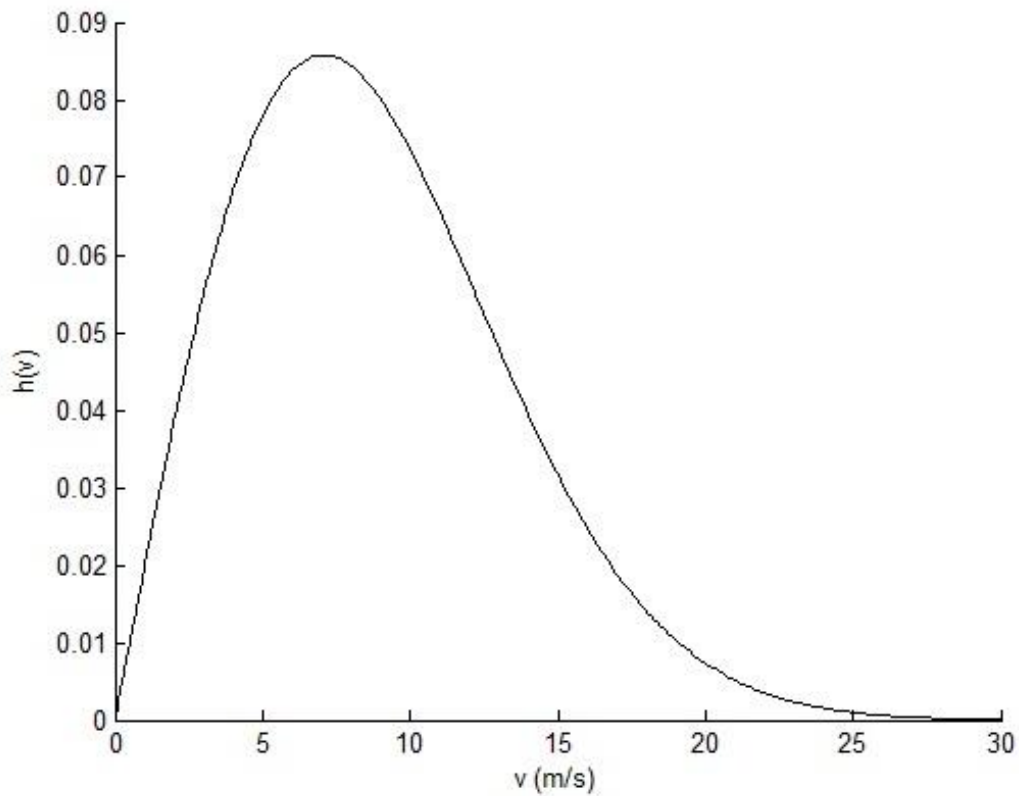
$$c = 1.128 \cdot v \quad (3.12)$$

Όπου: v είναι η δεδομένη ταχύτητα ανέμου για την ώρα που εξετάζεται.

Παρακάτω παρατίθεται η εξίσωση της κατανομής *Weibull*:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{για } 0 \leq v \leq \infty \quad (3.13)$$

Και θέτοντας $c = 10$ και $k = 2$ εξάγεται μια ενδεικτική καμπύλη κατανομής *Rayleigh* η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Ενδεικτική Κατανομή Rayleigh

Η παραπάνω καμπύλη χωρίζεται σε έναν αριθμό n διαστημάτων. Από κάθε διάστημα εξάγεται μια αντιπροσωπευτική τιμή της ταχύτητας του ανέμου και η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισής της. Κάθε ζεύγος ταχύτητας ανέμου-πιθανότητας αποτελεί μία κατάσταση (*state*) από τις συνολικά n καταστάσεις εντός της ώρας που εξετάζεται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις [15]:

$$wind_{state} = (v_i + v_{i+1})/2 \quad (3.14)$$

$$wt_prob_{state} = \int_{v_i}^{v_{i+1}} h(v)dv \quad (3.15)$$

Όπου:

- v_i, v_{i+1} : τα άκρα που ορίζουν το διάστημα που εξετάζεται κάθε φορά
- $h(v)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull
- $wind_{state}$: η αντιπροσωπευτική τιμή της ταχύτητας του ανέμου για το διάστημα
- wt_prob_{state} : η πιθανότητα εμφάνισης της αντίστοιχης ταχύτητας ανέμου

Στη συνέχεια υπολογίζεται για κάθε κατάσταση (*state*) η ισχύς εξόδου των Α/Γ όπως περιγράφεται παρακάτω:

$$WT_{gen_{state}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ WT_{rated} \times \frac{(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ WT_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (3.16)$$

Όπου:

- v_{ci} : (v_{cut-in}) ταχύτητα ένταξης των Α/Γ
- v_{co} : ($v_{cut-out}$) ταχύτητα απένταξης των Α/Γ
- v_r : ταχύτητα στην οποία οι Α/Γ παράγουν την ονομαστική τους ισχύ
- $v = wind_{state}$: ταχύτητα του ανέμου σε κάθε κατάσταση
- WT_{rated} : ονομαστική ισχύς της Αιολικής Ενέργειας εντός του μικροδικτύου
- $WT_{gen_{state}}$: η τιμή της παραγόμενης ισχύς για τη συγκεκριμένη κατάσταση

3.4.2. Υπολογισμός παραγωγής ισχύος από Φωτοβολταϊκά «νησίδας»

Κύριο δεδομένο για τον υπολογισμό της παραγωγής ισχύος από φωτοβολταϊκά είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η στατιστική κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της συγκεκριμένης ώρας θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή *Beta* η οποία περιγράφεται παρακάτω:

$$h(s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \times s^{(\alpha-1)} \times (1 - s)^{(\beta-1)} \quad (3.17)$$

λαμβάνοντας τους περιορισμούς: $0 \leq s \leq 1, \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0$

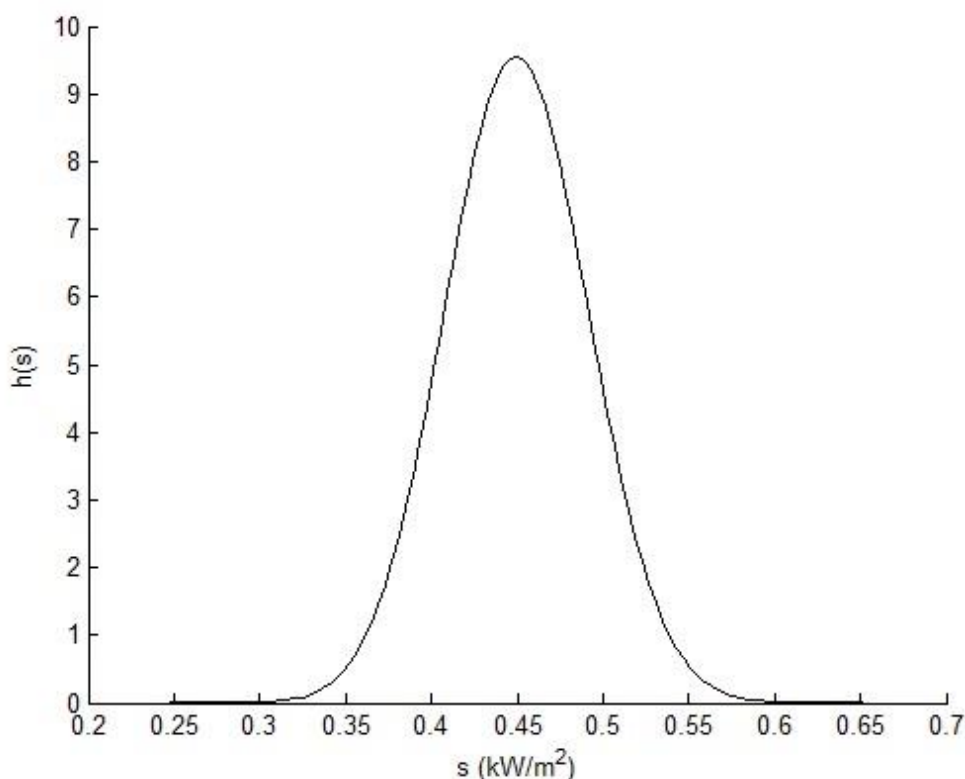
Οι α, β είναι παράμετροι της κατανομής *Beta* και υπολογίζονται ως εξής:

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (2.13) \quad \alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (3.18)$$

Όπου:

- μ : η μέση τιμή των μετρήσεων για την έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας
- σ : η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Γ : η συνάρτηση «Γάμμα»

Μια τυπική μέση ωριαία τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι $s = 0.45 \text{ kW/m}^2$. Κατ' επέκταση υπολογίζεται $\alpha = 151.9354$ και $\beta = 137.686$ και η αντίστοιχη καμπύλη κατανομής παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Ενδεικτική Κατανομή Beta

Η παραπάνω καμπύλη χωρίζεται σε έναν αριθμό n διαστημάτων. Από κάθε διάστημα εξάγεται μια αντιπροσωπευτική τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισής της. Κάθε ζεύγος ακτινοβολίας-πιθανότητας αποτελεί μία κατάσταση (*state*) από τις συνολικά n καταστάσεις εντός της ώρας που εξετάζεται [15]. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις:

$$solar_{state} = (s_i + s_{i+1})/2 \quad (3.19)$$

$$pv_prob_{state} = \int_{s_i}^{s_{i+1}} h(s) ds \quad (3.20)$$

Όπου:

- s_i, s_{i+1} : τα άκρα που ορίζουν το διάστημα που εξετάζεται κάθε φορά
- $h(s)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Beta
- $solar_{state}$: η αντιπροσωπευτική τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για το διάστημα
- pv_prob_{state} : η πιθανότητα εμφάνισης της αντίστοιχης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Στη συνέχεια υπολογίζεται για κάθε κατάσταση (*state*) η ισχύς εξόδου των Φ/Β όπου χάριν απλοποίησης γίνεται η παραδοχή πως η ισχύς εξόδου PV_gen_{state} εξαρτάται μόνο από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [10] στη συγκεκριμένη κατάσταση και η τελική της τιμή θα υπολογίζεται γραμμικά από την παρακάτω σχέση:

$$PV_gen_{state} = \begin{cases} PV_rated \frac{s}{s_r} & 0 \leq s < s_r \\ PV_rated & s \geq s_r \end{cases} \quad (3.21)$$

Όπου:

- $s = solar_{state}$: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε κατάσταση
- s_r : η τιμή της ακτινοβολίας όπου παράγεται η ονομαστική ισχύς του Φ/Β
- PV_rated : η ονομαστική ισχύς εξόδου των Φ/Β εντός του μικροδικτύου
- PV_gen_{state} : η τιμή της παραγόμενης ισχύς για τη συγκεκριμένη κατάσταση

3.4.3. Υπολογισμός συνολικής παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ «νησίδας»

Για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ εφαρμόζεται η πράξη της συνέλιξης μεταξύ των καταστάσεων παραγωγής ισχύος (*states*) των αιολικών και των φωτοβολταϊκών, που προκύπτουν για τη συγκεκριμένη ώρα που εξετάζεται κάθε φορά. Πιο αναλυτικά:

Εφαρμόζοντας την πράξη της συνέλιξης μεταξύ δύο διανυσμάτων μήκους n το καθένα, προκύπτει ένα διάνυσμα μήκους $n + n - 1$ [12]. Επομένως, από την παρακάτω συνέλιξη:

$$\begin{aligned} res_prob [i] &= wt_prob[i] * pv_prob[i] \\ &\triangleq \sum_{k=N_L}^{N_H} wt_prob[k] \cdot pv_prob[i - k] \end{aligned} \quad (3.22)$$

προκύπτει το διάνυσμα res_prob μήκους $n + n - 1$ το οποίο εμπεριέχει τις πιθανότητες για κάθε πιθανό συνδυασμό παραγωγής αιολικών και φωτοβολταϊκών, δημιουργώντας $n + n - 1$ νέες καταστάσεις παραγωγής (res_states) εντός της ώρας που εξετάζεται. Οι τιμές παραγωγής ισχύος res_power , που αντιστοιχούν στις παραπάνω πιθανότητες εξάγονται από το διάστημα που σχηματίζεται από τις παρακάτω τιμές:

$$\min_res = \min(pv_gen_{state}) + \min(wt_gen_{state}) \quad (3.23)$$

$$\max_res = \max(pv_gen_{state}) + \max(wt_gen_{state}) \quad (3.24)$$

Οι παραπάνω τιμές res_power , res_prob περιγράφουν την καμπύλη συνολικής παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ για την ώρα που εξετάζεται, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος της «νησίδας».

3.4.4. Υπολογισμός ισοζυγίου ισχύος για κάθε «νησίδα»

Υπολογίζονται οι αντίστοιχες καταστάσεις της ζήτησης φορτίου, όπως και στην παράγραφο 3.3.1. όπου κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από την πιθανότητα εμφάνισής της ld_prob_{state} και το μέγεθος της ζήτησης $load_{state}$.

Εφαρμόζοντας την πράξη της συνέλιξης μεταξύ των πιθανών καταστάσεων της συνολικής παραγωγής ΑΠΕ και της ζήτησης φορτίου εξάγεται μια νέα καμπύλη η οποία περιγράφει το ισοζύγιο ισχύος εντός της συγκεκριμένης «νησίδας», για την ώρα που εξετάζεται. Πιο αναλυτικά προκύπτουν τα παρακάτω:

Οι πιθανότητες των νέων ενεργειακών καταστάσεων που προκύπτουν (*imbalance states*) είναι $n + n + n - 2$ σε αριθμό [12] και υπολογίζονται με τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned} imb_prob [i] &= res_prob[i] * ld_prob[i] \\ &\triangleq \sum_{k=N_L}^{N_H} res_prob[k] \cdot ld_prob[i - k] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Οι τιμές ισχύος imb_power , που αντιστοιχούν στις παραπάνω πιθανότητες εξάγονται από το διάστημα που σχηματίζεται από τις παρακάτω τιμές:

$$\min_imbalance = \min(res_power_{state}) + \max(load_{state}) \quad (3.26)$$

$$\max_imbalance = \max(res_power_{state}) + \min(load_{state}) \quad (3.27)$$

Τέλος, για τον υπολογισμό της εκτιμώμενης ανισορροπίας εντός δεδομένης «νησίδας» για συγκεκριμένη ώρα εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:

$$imbalance_{(island, hour)} = \sum_{state=1}^{imb_states} imb_power_{state} \cdot imb_prob_{state} \quad (3.28)$$

3.4.5. Υπολογισμός του ισοζυγίου ισχύος με χρήση Μικροτουρμπίνων

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται ως βέβαιη παραγωγή η παραγωγή από μικροτουρμπίνες προκειμένου να μετριαστεί η ανισορροπία ισχύος εντός των «νησίδων». Η χρήση των μικροτουρμπίνων εξαρτάται από την κατάσταση του ισοζυγίου ισχύος εντός της εκάστοτε «νησίδας» και διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ανισορροπία για την κατάσταση που εξετάζεται τότε δεν υπάρχει ανάγκη για χρήση των μικροτουρμπίνων.
- Σε περίπτωση που η κατάσταση της ανισορροπίας είναι θετική, δηλαδή η ζήτηση υπερκαλύπτεται και υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής από ΑΠΕ, δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης των μικροτουρμπίνων και το ισοζύγιο ισχύος της «νησίδας» για την κατάσταση της ώρας που εξετάζεται παραμένει ως έχει.
- Στην περίπτωση που η κατάσταση της ανισορροπίας είναι αρνητική, δηλαδή η παραγωγή από τις ΑΠΕ δεν καλύπτει τη ζήτηση φορτίου, τότε είναι επιτακτική η χρήση της ελεγχόμενης παραγωγής προκειμένου να μετριαστεί η ανισορροπία παραγωγής και ζήτησης εντός της «νησίδας». Το μέγεθος της συνεισφοράς των μικροτουρμπίνων καθορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ τους και από το μη εξυπηρετούμενο φορτίο κάθε κατάστασης. Πιο αναλυτικά:
 - Αν η εγκατεστημένη ισχύς των μικροτουρμπίνων είναι μεγαλύτερη από την ανισορροπία για την κατάσταση (*state*) που εξετάζεται, τότε η ανισορροπία μηδενίζεται.

$$imb_MT_power_{state} = 0$$

- Σε αντίθετη περίπτωση η ανισορροπία μετριάζεται όπως παρακάτω:

$$imb_MT_power_{state} = imb_power_{state} + MT_rated_{island} \quad (3.29)$$

Για τον υπολογισμό της εκτιμώμενης βελτιωμένης ανισορροπίας εντός δεδομένης «νησίδας» για συγκεκριμένη ώρα εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:

$$imbalance_MT_{(island, hour)} = \sum_{state=1}^{imb_states} imb_MT_power_{state} \cdot imb_prob_{state} \quad (3.30)$$

3.4.6. Υπολογισμός της επίδρασης σφάλματος σε δεδομένη «νησίδα»

Για να μετρηθεί η επίδραση σφάλματος δεδομένης «νησίδας» και για όσες ώρες εξετάζεται ο σχεδιασμός του δικτύου, σχηματίζεται ο παρακάτω δείκτης:

$$impact_{island} = \sum_{hour=1}^{hours} impact_{(island, hour)} \quad (3.31)$$

Όπου:

$$impact_{(island, hour)} = imbalance_MT^2_{(island, hour)} \quad (3.32)$$

3.4.7. Επίδραση σφάλματος σε όλες τις «νησίδες»

Ο υπολογισμός της επίδρασης σφάλματος που αφορά σε όλες τις «νησίδες» για την περίοδο σχεδιασμού θα ονομάζεται δείκτης ανισορροπίας ισοζυγίου ισχύος και προκύπτει:

$$impact_{downstreamMG} = \sum_{island=1}^{num_of_islands} impact_{island} \quad (3.33)$$

Επι της ουσίας ο παραπάνω τύπος δίνει την εικόνα της ποιότητας του δικτύου στα κατάντι του «μικροδικτύου σφάλματος» *MG*.

3.5. Επίδραση σφάλματος δεδομένου μικροδικτύου στο δίκτυο

3.5.1. Υπολογισμός πιθανότητας σφάλματος μικροδικτύου

Στην έκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρείται ότι για να βγει εκτός λειτουργίας ένα μικροδίκτυο αρκεί να υποστεί βλάβη έστω μία γραμμή εντός του. Επομένως, η πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας ένα μικροδίκτυο είναι ανάλογη του αριθμού των γραμμών που εμπεριέχονται σε αυτό. Για κάθε μικροδίκτυο υπολογίζεται η πιθανότητα να βγει εκτός λειτουργίας.

Εφαρμόζοντας αναδρομικά τον παρακάτω τύπο για n αριθμό γραμμών:

$$P(L_1UL_2) = P(L_1) + P(L_2) - P(L_1 \cap L_2) \quad (3.34)$$

υπολογίζεται εν τέλει η ζητούμενη πιθανότητα για κάθε μικροδίκτυο:

$$probability_{faultMG} = P(L_1UL_2 \dots L_n) \quad (3.35)$$

Όπου, η πιθανότητα $P(L_1UL_2 \dots L_n)$ είναι επί της ουσίας η πιθανότητα να παρουσιαστεί σφάλμα στη 1^η ή στη 2^η ή στη n -οστή γραμμή του μικροδικτύου που εξετάζεται. Επίσης, τα $L_1, L_2 \dots L_n$ αντιπροσωπεύουν τα ενδεχόμενα να παρουσιαστεί σφάλμα στην αντίστοιχη γραμμή. Στο παράρτημα επιλύεται ο τύπος (3.35) για τον υπολογισμό της πιθανότητας για ένωση τριών και τεσσάρων ενδεχομένων ως παράδειγμα.

3.5.2. Υπολογισμός της επίδρασης σφάλματος

Για κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» εξάγεται το παρακάτω αποτέλεσμα, το οποίο αξιολογεί τη μορφή που παίρνει το δίκτυο όταν το συγκεκριμένο μικροδίκτυο υφίσταται σφάλμα:

$$impact_{MG} = (impact_{selfMG} + impact_{downstreamMG}) \cdot probability_{fault} \quad (3.36)$$

Όπου:

- $impact_{self}$ εμπεριέχει την επίπτωση της αποκοπής φορτίου του «μικροδικτύου σφάλματος» στη συνολική επίδραση σφάλματος.
- $impact_{downstreamMG}$ εμπεριέχει την επίπτωση της ανισορροπίας ισχύος εντός των «νησίδων» που σχηματίζονται στα κατάντι του «μικροδικτύου σφάλματος»
- $probability_{fault}$ είναι η πιθανότητα το εκάστοτε μικροδίκτυο να βγει εκτός λειτουργίας λόγω σφάλματος.

3.6. Δείκτης αξιολόγησης του προτεινόμενου σχεδιασμού

Προκειμένου να υπάρξει μια γενική εικόνα για την αξιολόγηση του διαχωρισμού, προστίθενται οι επιδράσεις σφάλματος ($impact_{MG}$) που προκύπτουν για κάθε «μικροδίκτυο σφάλματος» MG , και υπολογίζεται ο τελικός δείκτης αξιολόγησης του προτεινόμενου σχεδιασμού του Δικτύου Διανομής.

$$impact_{allMGs} = \sum_{i=1}^{num_of_MGs} impact_{MG}^i \quad (3.37)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα [14]. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας. Η μόνη «επικοινωνία» του Γ.Α. με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του, ανεξάρτητα από την σημασία του προβλήματος.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γ.Α. είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένες θέσεις του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος που καλούνται τοποθεσίες (loci). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου, όπως για παράδειγμα το χρώμα των μαλλιών, έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται alleles (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype). Παραδείγματος χάριν, ένας ζωντανός οργανισμός είναι ο φαινότυπος των χρωμοσωμάτων του. Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων, και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος λύσεων.

Οι Γ.Α. διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι, ένας Γ.Α. πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι καλύτερες λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά κακές λύσεις απορρίπτονται. Ο διαχωρισμός και η

αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

4.1. Η δομή του Γενετικού Αλγόριθμου

Η δομή ενός απλού Γενετικού Αλγορίθμου έχει σε γενικές γραμμές ως εξής: κατά την διάρκεια της γενιάς t , ο Γ.Α. διατηρεί ένα πληθυσμό $P(t)$ από n πιθανές λύσεις (individuals): $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$. Κάθε Individual x_i^t αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενιά $t+1$) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούριο αυτό πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με τη βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της *διασταύρωσης* και της *μετάλλαξης* σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Για παράδειγμα, έστω δύο γονείς αναπαριστώνται με χρωμοσώματα πέντε γονιδίων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ και $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$ αντίστοιχα, τότε οι απόγονοι που θα προκύψουν από διασταύρωση με σημείο διασταύρωσης (crossover point) το σημείο 2 είναι οι $(a_1, b_1, c_2, d_2, e_2)$ και $(a_2, b_2, c_1, d_1, e_1)$. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Για παράδειγμα, έστω ότι ένας individual αναπαρίσταται με το διάνυσμα πέντε διαστάσεων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$, τότε ο individual που θα προκύψει με μετάλλαξη στη δεύτερη και στην τέταρτη διάσταση είναι ο $(a_1, b_1^*, c_1, d_1^*, e_1)$. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι ένας Γ.Α. για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε συστατικά:

1. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Έναν τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού από πιθανές λύσεις (αρχικοποίηση).
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος.
4. Γενετικούς τελεστές για τη δημιουργία νέων μελών (λύσεων).
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο Γ.Α. (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.τ.λ.).

4.2. Βασικά χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα κυριότερα να χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν και τους δίνουν υπεροχή είναι τα εξής:

1. Οι Γ.Α. δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Για παράδειγμα, αναφέρεται το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης: έστω ένα μαύρο κουτί με πέντε δυαδικούς διακόπτες (on - off). Για κάθε συνδυασμό s των διακοπών παράγεται μια έξοδος $f(s)$. Ζητείται ο συνδυασμός των διακοπών που μεγιστοποιεί την έξοδο. Με τις παραδοσιακές μεθόδους, το μέγιστο θα εντοπιζόταν κάνοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Σε έναν Γ.Α. όμως, η πρώτη ενέργεια είναι η κωδικοποίηση των διακοπών ως συμβολοσειρές πεπερασμένου μήκους. Μια απλή κωδικοποίηση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας μια δυαδική συμβολοσειρά μήκους πέντε, όπου η κάθε θέση αναπαριστά ένα διακόπτη. Το 0 αντιστοιχεί στη θέση “off” και το 1 στη θέση “on”. Δηλαδή η συμβολοσειρά 11110 κωδικοποιεί το συνδυασμό κατά τον οποίο οι πρώτοι τέσσερις διακόπτες είναι “on” και ο τελευταίος “off”. Η κωδικοποίηση δεν είναι απαραίτητα να είναι πάντα δυαδική, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους αρκετοί από τους οποίους δεν είναι προφανείς. Το στοιχείο της κωδικοποίησης, όπως εξηγείται παρακάτω, είναι εκείνο που επιτρέπει στους Γ.Α. να κάνουν παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.
2. Οι Γ.Α. κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Αυτό το «βήμα προς βήμα» ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχική τοπικού ακροτάτου που δεν είναι ολικό. Οι Γ.Α. εξαλείφουν αυτό τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων (σύνολο από συμβολοσειρές). Έτσι μπορούν να «ανεβαίνουν» πολλούς λόφους (hill-climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μια λάθος κορυφή. Γυρίζοντας στο παράδειγμα με το μαύρο κουτί, οι κλασικές μέθοδοι θα ξεκινούσαν το ψάξιμο από ένα συνδυασμό των διακοπών και στη συνέχεια εφαρμόζοντας κάποιο κανόνα μετάβασης θα δοκίμαζαν τον επόμενο (ψάξιμο σημείο προς σημείο). Αντιθέτως, ένας Γ.Α. αρχίζει το ψάξιμό του από ένα πληθυσμό συνδυασμών συμβολοσειρών και κατόπιν παράγει διαδοχικά καινούριους. Ένας αρχικός πληθυσμός θα μπορούσε να είναι πχ. 01101, 11000, 01000 και 10011. Έπειτα, «τρέχοντας» ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους πληθυσμούς που συγκλίνουν προς την επιθυμητή λύση. Διαλέγοντας ένα

πληθυσμό που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

3. Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτησης και καμία επιπρόσθετη πληροφορία. Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους Γ.Α. Το ψάξιμό τους είναι κατά κάποιο τρόπο «τυφλό». Αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση, πράγμα που τους προσδίδει μεγάλη ευελιξία. Έτσι όμως, προκύπτει το ερώτημα αν συμφέρει να αγνοούνται οι βοηθητικές πληροφορίες. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο έχουν αναπτυχθεί μορφές Γ.Α. που αξιοποιούν και τέτοιου είδους πληροφορίες (Knowledge-Based Genetic Algorithms).
4. Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των Γ.Α. χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη. Δε λαμβάνονται αποφάσεις με το «στρίψιμο ενός νομίσματος». Το στοιχείο της τύχης χρησιμοποιείται ως οδηγός για αναζήτηση σε περιοχές που αναμένεται να δώσουν καλά αποτελέσματα.

Τα τέσσερα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά συμβάλουν αποφασιστικά ώστε να έχουν οι Γ.Α. την ιδιότητα της ευρωστίας.

Τα βασικά βήματα ενός απλού Γενετικού Αλγορίθμου είναι τα εξής:

1. Δημιουργία, με τυχαίο τρόπο, ενός αρχικού πληθυσμού δυνατών λύσεων (Αρχικοποίηση - Initialization).
2. Αξιολόγηση κάθε λύσης χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.
3. Επιλογή ενός νέου πληθυσμού με βάση την απόδοση κάθε μέλους (δυνατής λύσης) του προηγούμενου πληθυσμού (Επιλογή - Selection).
4. Εφαρμογή στον πληθυσμό που προκύπτει μετά τη διαδικασία επιλογής των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (Crossover) και της μετάλλαξης (Mutation).
5. Μετά την ολοκλήρωση του προηγούμενου βήματος, δημιουργείται η επόμενη γενιά και επιστρέφουμε στο βήμα 2.
6. Μετά από κάποιον αριθμό γενιών (επαναλήψεων) και αφού δεν παρατηρείται πλέον κάποια σημαντική βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης, ο Γενετικός Αλγόριθμος τερματίζεται.

Το καλύτερο χρωμόσωμα αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση (πιθανώς καθολικά βέλτιστη).

4.3. Χρήση Γενετικού Αλγόριθμου στην παρούσα Εργασία

Το πρόβλημα στην παρούσα εργασία είναι η εύρεση της βέλτιστης τοποθέτησης των διακοπών προκειμένου να σχηματιστούν όσο το δυνατόν βέλτιστα μικροδίκτυα στην περίπτωση ανοίγματος των διακοπών. Επομένως, το σύνολο των πιθανών θέσεων ενός διακόπτη αποτελεί ένα διάνυσμα, μήκους όσο το πλήθος των γραμμών. Στο παρόν πρόβλημα το δίκτυο διανομής ακτινικής τοπολογίας είναι 69 ζυγών, που σημαίνει ότι περιλαμβάνονται 68 γραμμές.

Στη συνέχεια κωδικοποιούνται οι θέσεις των γραμμών και των διακοπών ως εξής:

Σχηματίζεται ένα διάνυσμα με 68 στοιχεία, όπου κάθε στοιχείο μπορεί να πάρει την τιμή 0 ή 1, δηλαδή εν τέλει σχηματίζεται ένα δυαδικό διάνυσμα. Το 0 αναπαριστά τοποθέτηση διακόπτη στην αντίστοιχη θέση ενώ το 1 σημαίνει ότι η γραμμή παραμένει ως έχει.

Το δυαδικό διάνυσμα λαμβάνεται ως είσοδο ώστε να υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο από τον τύπο (3.37). Οι θέσεις των διακοπών αποκωδικοποιούνται και σχηματίζονται τα μικροδίκτυα. Ο διαχωρισμός αυτός αξιολογείται σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Προκειμένου ο Γενετικός Αλγόριθμος να γίνει πιο αποδοτικός, οδεύοντας με γρηγορότερο ρυθμό προς την περιοχή των επιθυμητών λύσεων, επιβάλλονται κάποιοι περιορισμοί (*penalties*) στην υπάρχουσα μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.3.1. Περιορισμοί της αντικειμενικής συνάρτησης (*penalties*)

Ως περιορισμούς του προβλήματος θέτουμε τη δημιουργία επιθυμητού αριθμού μικροδικτύων και την αποφυγή δημιουργίας απομονωμένων ζυγών. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται να τεθεί ένας μηχανισμός ο οποίος θα καθιστά εξαιρετικά ασύμφορο το ενδεχόμενο απομονωμένων ζυγών. Αυτό επιτυγχάνεται βάζοντας πρόστιμο (*penalty*) ανάλογο του αριθμού των απομονωμένων ζυγών όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned} \text{penalty}_{\text{isolated_buses}} \\ = (\text{isolated}_{\text{buses}} + (|\text{MG}_{\text{demanded}} - \text{MG}_{\text{created}}| + 1)) \cdot 5000 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Ο λόγος που το $\text{penalty}_{\text{isolated_buses}}$ είναι ανάλογο και του αριθμού που εκφράζει την απόσταση των σχηματισμένων μικροδικτύων από τον επιθυμητό αριθμό αυτών, είναι ότι κάτι τέτοιο συνεισφέρει στην αποδοτικότητα του γενετικού αλγορίθμου.

Ο περιορισμός για το σχηματισμό επιθυμητού αριθμού μικροδικτύων επιτυγχάνεται θέτοντας ένα πρόστιμο (*penalty*) στις λύσεις που προτείνονται, ανάλογο της διαφοράς του αριθμού των μικροδικτύων που απαιτούνται από τον αριθμό των μικροδικτύων που σχηματίζονται εν τέλει.

$$\text{penalty}_{\text{num_MGs}} = |\text{MG}_{\text{demanded}} - \text{MG}_{\text{created}}| \cdot \text{impact}_{\text{allMG}} \quad (4.2)$$

Ο τελικός δείκτης αξιολόγησης του προτεινόμενου διαχωρισμού, ο οποίος εμπεριέχει τόσο την πληροφορία αυτών καθ'αυτών των χαρακτηριστικών του συστήματος όσο και τους περιορισμούς για την αποδοτικότερη εξεύρεση λύσης είναι ο παρακάτω:

$$impact = impact_{allMGs} + penalty_{num_MGs} + penalty_{isolated_buses} \quad (4.3)$$

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί την είσοδο του Γενετικού Αλγορίθμου με σκοπό την εύρεση των θέσεων των διακοπών, προκειμένου να σχηματιστούν τα βέλτιστα μικροδίκτυα. Πιο αναλυτικά, ο γενετικός αλγόριθμος προτείνει το σχηματισμό κάποιων μικροδικτύων, η αντικειμενική συνάρτηση αξιολογεί τον προτεινόμενο διαχωρισμό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση ή να εφαρμοστεί κάποιο κριτήριο τερματισμού του Γενετικού Αλγορίθμου.

Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο γενετικός αλγόριθμος του *MatLAB*. Ως είσοδοι στον αρχικό Γ.Α. λαμβάνονται τα παρακάτω:

1. Η αντικειμενική συνάρτηση την οποία ο Γ.Α. καλείται να ελαχιστοποιήσει.
2. Το μήκος του διανύσματος που παίρνει ως είσοδο η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση.
3. Την παράμετρο που επιτρέπει μόνο ακέραιες τιμές ως στοιχεία του διανύσματος εισόδου της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης.
4. Τους περιορισμούς για κάθε στοιχείο του διανύσματος εισόδου της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης ως προς την τιμή τους, με ελάχιστη τιμή το 0 και μέγιστη το 1. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται ένα δυαδικό διάνυσμα ως είσοδος στην αντικειμενική συνάρτηση, που είναι και το επιθυμητό.
5. Παράμετροι που καθορίζουν τα κριτήρια τερματισμού, τον αριθμό γενεών (generations), καθώς επίσης και την απεικόνιση της διαδικασίας.

Ως έξοδοι του Γ.Α. λαμβάνονται τα παρακάτω:

1. Η βέλτιστη λύση, δηλαδή ο ελάχιστος δείκτης αξιολόγησης (*impact*) που υπολογίστηκε σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.
2. Οι αντίστοιχες θέσεις των διακοπών που προκύπτουν για τη βέλτιστη λύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

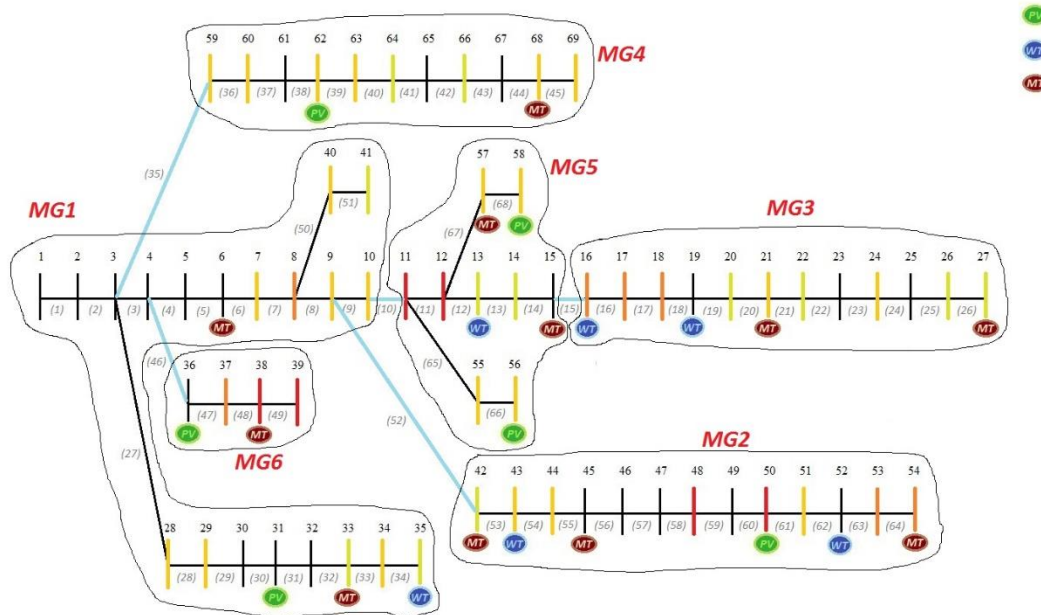
Εισαγωγή

Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στο πρότυπο δίκτυο διανομής 69 ζυγών της IEEE. Η απόφαση τοποθέτησης των διακοπών δημιουργεί τον σχηματισμό των μικροδικτύων και τον «αρχικό διαχωρισμό» του δικτύου. Στη συνέχεια εξετάζεται η πιθανότητα σφάλματος σε κάθε σχηματιζόμενο μικροδίκτυο. Το μέρος του δικτύου που υπάρχει στα ανάντι του «μικροδικτύου σφάλματος» κάθε φορά, δεν ενδιαφέρει για την αξιολόγηση καθώς παραμένει συνδεδεμένο με το Δίκτυο Μεταφοράς. Αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι η επίπτωση του «μικροδικτύου σφάλματος» καθώς και η επίπτωση των τυχόν «νησίδων» που μπορεί να σχηματίζονται στα κατάντι αυτού, στην τελική επίδραση σφάλματος. Κατά συνέπεια, για κάθε μια περίπτωση σφάλματος η μορφή που παίρνει το υπό εξέταση μέρος του δικτύου είναι μοναδική, καθώς για κάθε ένα διαφορετικό «μικροδίκτυο σφάλματος» σχηματίζονται και διαφορετικές «νησίδες». Έτσι, πρακτικά για έναν αρχικό διαχωρισμό σε k μικροδίκτυα, εξετάζονται και αξιολογούνται k διαφορετικές καταστάσεις-μορφές του δικτύου, με δείκτη αξιολόγησης τον $impact_{MG}$. Τέλος, προκειμένου να υπάρξει μια συνολική αξιολόγηση της τοποθέτησης των διακοπών σχηματίζεται ένας γενικότερος δείκτης αξιολόγησης που εμπεριέχει την αξιολόγηση όλων των επιμέρους k καταστάσεων-μορφών που μπορεί να βρεθεί το αρχικό δίκτυο 69 ζυγών. Ο ζητούμενος δείκτης αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους δεικτών $impact_{MG}$ και συμβολίζεται ως $impact_{allMGs}$.

Η ανάλυση για κάθε πιθανή κατάσταση σφάλματος διαχωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι η επίπτωση που έχουν τα χαρακτηριστικά του «μικροδικτύου σφάλματος» ($impact_{selfMG}$) και εκφράζεται μέσω του δείκτη αποκοπής φορτίου. Το δεύτερο μέρος της ανάλυσης ερευνά την επίπτωση που έχει η ανισορροπία των «νησίδων» που σχηματίζονται ($impact_{downstreamMG}$) και εκφράζεται μέσω του δείκτη ανισορροπίας του ισοζυγίου ισχύος. Παρακάτω θα υπολογιστούν αναλυτικά αυτοί οι δείκτες και θα γίνει εμφανές πως σχηματίζεται τόσο ο δείκτης αξιολόγησης που αναφέρεται σε συγκεκριμένη κατάσταση του δικτύου ($impact_{MG}$), όσο και ο τελικός δείκτης ($impact_{allMG}$) ο οποίος αξιολογεί σφαιρικά τον σχεδιασμό του δικτύου.

Η τοποθέτηση και το μέγεθος κάθε εγκατεστημένης μονάδας παραγωγής και φορτίου καθώς και η καμπύλη ζήτησης φορτίου ανά ώρα, λαμβάνονται από τα δεδομένα που παρουσιάζονται εκτενώς στο Παράρτημα.

Για το παρόν παράδειγμα επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν 5 διακόπτες στις θέσεις των γραμμών (10 15 35 46 52) και κατά συνέπεια σχηματίζονται **6 μικροδίκτυα**. Ο αρχικός διαχωρισμός του δικτύου 69 ζυγών παρουσιάζεται στο *Σχήμα 5.1*.



Σχήμα 5.1. Ο αρχικός διαχωρισμός του δικτύου 69 ζυγών σε 6 Μικροδίκτυα

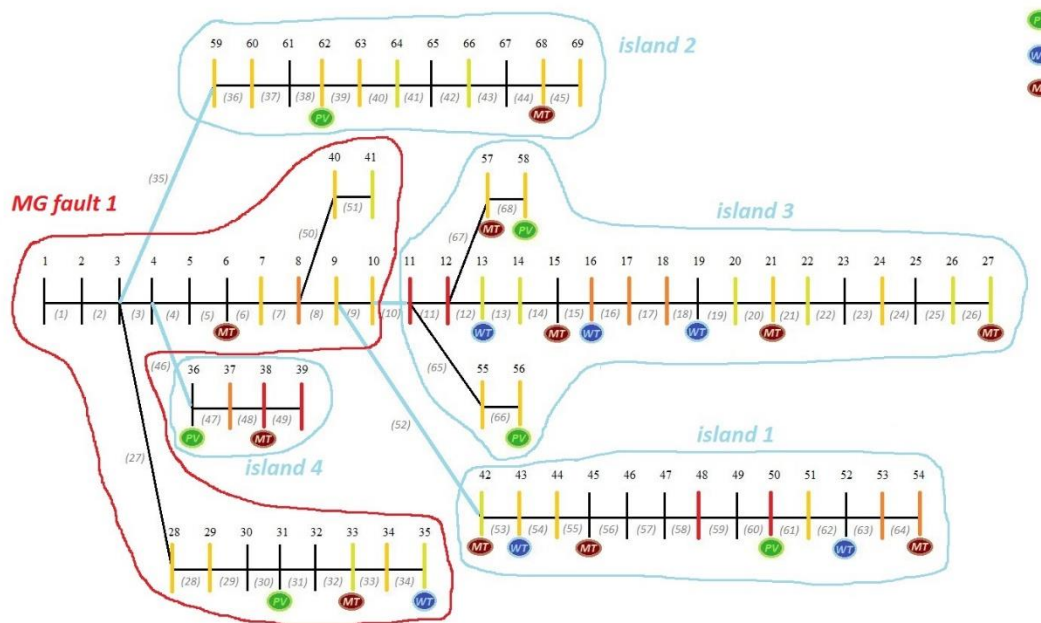
5.1. Χαρακτηριστικά της ώρας εξέτασης

Όπως έχει προαναφερθεί η μοντελοποίηση του έτους περιγράφεται από 4 αντιπροσωπευτικές ημέρες. Για κάθε μία ώρα της ημέρας δίνεται μία τιμή έντασης της ακτινοβολίας του ήλιου, μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και ένα ποσοστό ζήτησης φορτίου. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται οι παραγωγές από τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά καθώς και η ζήτηση του φορτίου.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται να αναλυθεί ως παράδειγμα η ώρα 12 της αντιπροσωπευτικής ημέρας του *Καλοκαιριού*, όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι $v = 8.2866 \text{ m/s}$, η μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι $s = 0,9162 \text{ kW/m}^2$ και το ποσοστό ζήτησης φορτίου είναι $ld_percentage = 96\%$ ως προς το ονομαστικό.

5.2. Ανάλυση περίπτωσης σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 1

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 1* φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 1

Σε αυτή την περίπτωση το ρόλο του «μικροδικτύου σφάλματος» παίρνει το *Μικροδίκτυο 1* και σχηματίζονται 4 «νησίδες» όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα.

5.2.1. Υπολογισμός επίπτωσης «μικροδίκτυου σφάλματος»

5.2.1.1. Υπολογισμός της ζήτησης φορτίου για το Μικροδίκτυο 1

Με χρήση του τύπου (3.4) υπολογίζεται το εγκατεστημένο ονομαστικό φορτίο για το *Μικροδίκτυο 1* τα οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στον υπολογισμό της ζήτησης φορτίου ($LD_{rated_{MG1}}$).

$$LD_{rated_{MG1}} = 308.5 \text{ kW}$$

Για τον υπολογισμό της ζήτησης φορτίου χρησιμοποιείται ο τύπος (3.5) και με βάση το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο ($LD_{rated_{MG1}}$) που υπολογίστηκε πιο πάνω προκύπτει εν τέλει η ζήτηση φορτίου για το *Μικροδίκτυο 1* την ώρα 12 της αντιπροσωπευτικής ημέρας του *Καλοκαιριού*.

$$Load_Demand_{MG1} = 311 \text{ kW}$$

5.2.1.2. Υπολογισμός δείκτη αποκοπής φορτίου

Για τον υπολογισμό της επίπτωσης αποκοπής φορτίου για την περίοδο σχεδιασμού (ένα έτος) χρησιμοποιούνται οι τύποι (3.7) και (3.8) και το αποτέλεσμα του αντίστοιχου δείκτη είναι το παρακάτω:

$$Load_impact_{selfMG1} = 4.9045$$

Στον Πίνακα 5.1. παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες τιμές της ζήτησης φορτίου στο Μικροδίκτυο 1 για την περίοδο σχεδιασμού που εξετάζεται (ένα έτος).

Πίνακας 5.1. Η εκτιμώμενη ζήτηση φορτίου για το Μικροδίκτυο 1 σε kW

ώρα	Χειμώνας	Ανοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
1	142.53	158.72	213.79	194.36
2	126.33	137.67	191.12	173.3
3	116.61	126.33	178.16	160.34
4	113.37	123.09	161.96	152.24
5	106.9	121.47	153.86	145.77
6	110.13	119.85	153.86	145.77
7	116.61	124.71	153.86	155.48
8	152.24	153.86	187.88	178.16
9	187.88	194.36	234.85	218.65
10	213.79	218.65	267.24	252.66
11	229.99	234.85	294.77	272.1
12	242.94	246.18	310.97	288.29
13	252.66	249.42	317.45	298.01
14	252.66	239.7	314.21	288.29
15	229.99	220.27	298.01	268.86
16	220.27	204.07	275.34	251.04
17	213.79	197.59	267.24	242.94
18	229.99	204.07	278.58	249.42
19	268.86	217.03	296.39	259.14
20	268.86	223.51	301.25	276.96
21	255.9	246.18	307.73	310.97
22	236.47	265.62	323.93	285.05
23	213.79	233.23	283.43	262.38
24	220.27	194.36	242.94	233.23

Η επίπτωση του «μικροδικτύου σφάλματος» στον τελικό δείκτη αξιολόγησης του σχεδιασμού σύμφωνα με τη σχέση (3.11) προκύπτει:

$$impact_{selfMG1} = 4.9045$$

5.2.2. Υπολογισμός επίπτωσης «νησίδων»

Στο σενάριο απώλειας του *Μικροδικτύου 1* σχηματίζονται 4 «νησίδες» στα κατάντι αυτού. Επιλέγεται να παρουσιαστεί αναλυτικά η επίπτωση της «νησίδας 3» για την ώρα 12 της αντιπροσωπευτικής ημέρας του *Καλοκαιριού*.

5.2.2.1. Υπολογισμός ισοζυγίου ισχύος εντός της «νησίδας 3»

Με χρήση των τύπων (3.1) – (3.4) υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη για τη «νησίδα 3» τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της παραγωγής από ΑΠΕ ($PV_rated_{island3}$, $WT_rated_{island3}$), της ζήτησης φορτίου ($LD_rated_{island3}$) καθώς και στη βελτίωση του ισοζυγίου ισχύος ($MT_rated_{island3}$) εντός της «νησίδας».

$$PV_rated_{island3} = 50 \text{ kW}$$

$$WT_rated_{island3} = 100 \text{ kW}$$

$$MT_rated_{island3} = 200 \text{ kW}$$

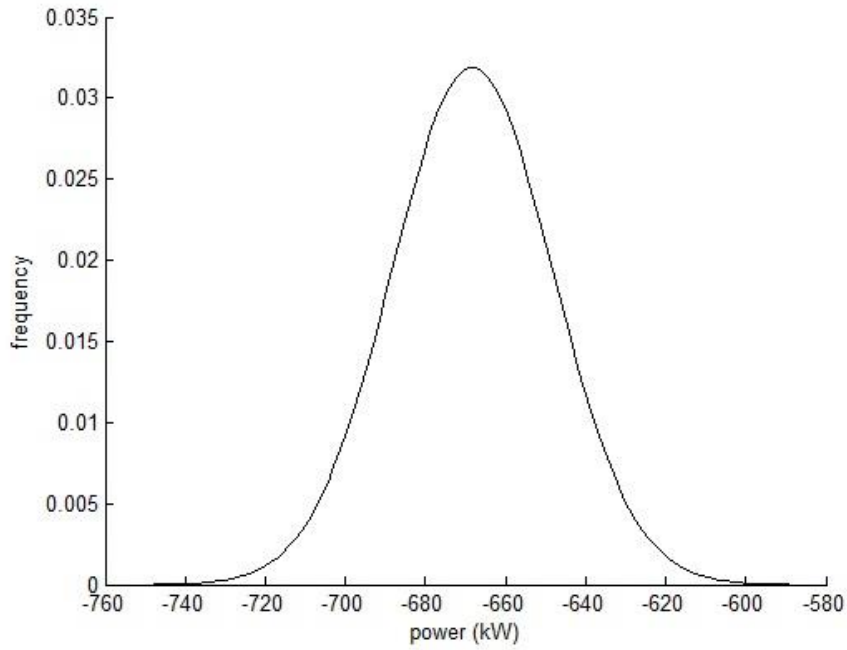
$$LD_rated_{island3} = 663 \text{ kW}$$

5.2.2.2. Υπολογισμός ζήτησης φορτίου

Για τον υπολογισμό της ζήτησης φορτίου χρησιμοποιείται ο τύπος (3.5) και με βάση το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο ($LD_rated_{island3}$) που υπολογίστηκε πιο πάνω, προκύπτει εν τέλει η ζήτηση φορτίου για τη «νησίδα 3» την ώρα 12 της αντιπροσωπευτικής ημέρας του *Καλοκαιριού*.

$$Load_Demand_{island3} = 668.304 \text{ kW}$$

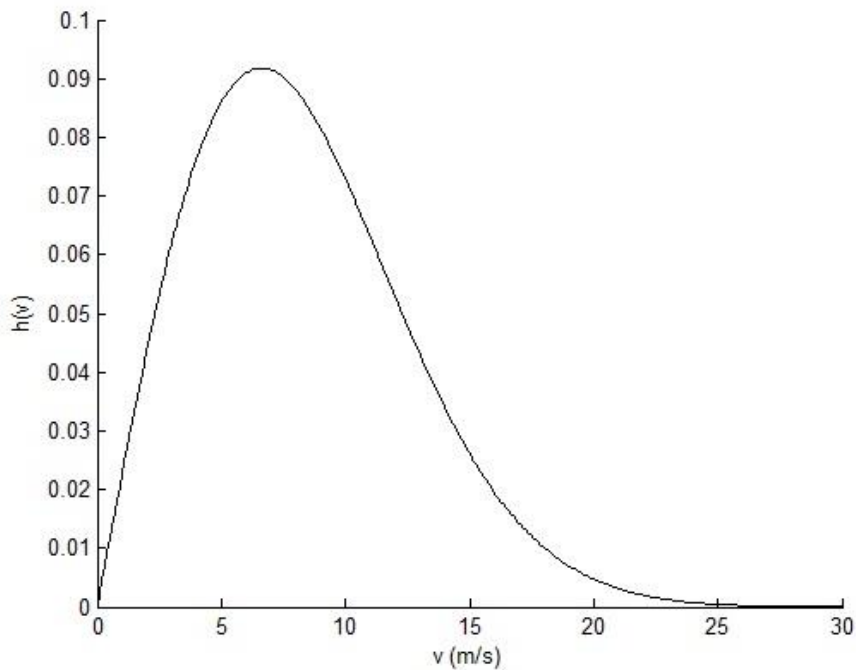
Είναι αναγκαίο να μοντελοποιηθεί η αβεβαιότητα της ζήτησης φορτίου. Γι' αυτό το λόγο θεωρείται ότι η στατιστική κατανομή της ζήτησης φορτίου περιγράφεται από την καμπύλη της Κανονικής κατανομής (*Gaussian*), όπως στο *Σχήμα 5.3*.



Σχήμα 5.3. Η καμπύλη ζήτησης φορτίου της ώρας που εξετάζεται

2.5.2.3. Υπολογισμός της αιολικής παραγωγής

Από την εξίσωση (3.12) υπολογίζεται η παράμετρος κλίμακας ίση με $c \cong 9,3473$. Για παράμετρο μορφής $k = 2$ η συνάρτηση της κατανομής *Weibull* μετατρέπεται σε συνάρτηση κατανομή *Rayleigh* όπως φαίνεται στο *Σχήμα 5.4*.

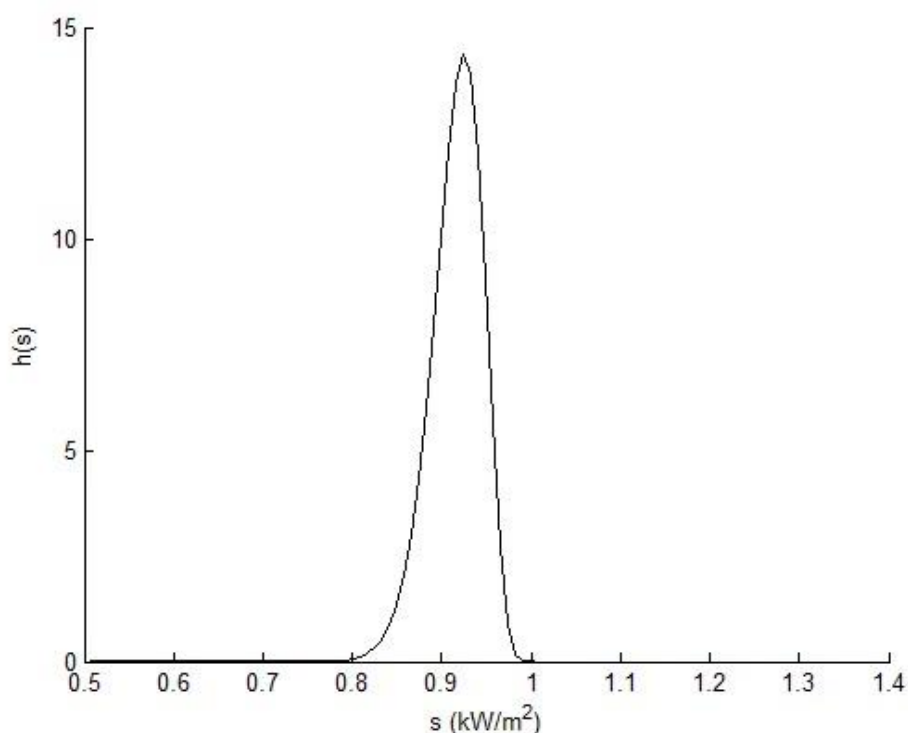


Σχήμα 5.4. Η κατανομή Weibull της ταχύτητας του ανέμου για την ώρα που εξετάζεται

Από την παραπάνω καμπύλη εξάγονται με χρήση των τύπων (3.14) και (3.15) 10 διαφορετικές καταστάσεις ($wind_{state}, wt_{prob_{state}}$) και για κάθε κατάσταση υπολογίζεται η αντίστοιχη παραγωγή αιολικής ενέργειας ($WT_{gen_{state}}$) με βάση την εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών ($WT_{rated_{island3}}$) που υπολογίστηκε πιο πάνω και με χρήση του τύπου (3.16).

2.5.2.4. Υπολογισμός της φωτοβολταϊκής παραγωγής

Θεωρώντας την τυπική απόκλιση των μετρήσεων για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της ώρας που εξετάζεται 15%, από τους τύπους (3.17) – (3.18) εξάγεται η καμπύλη κατανομής $Beta$ η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.5. και περιγράφει την κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για την ώρα που εξετάζεται.

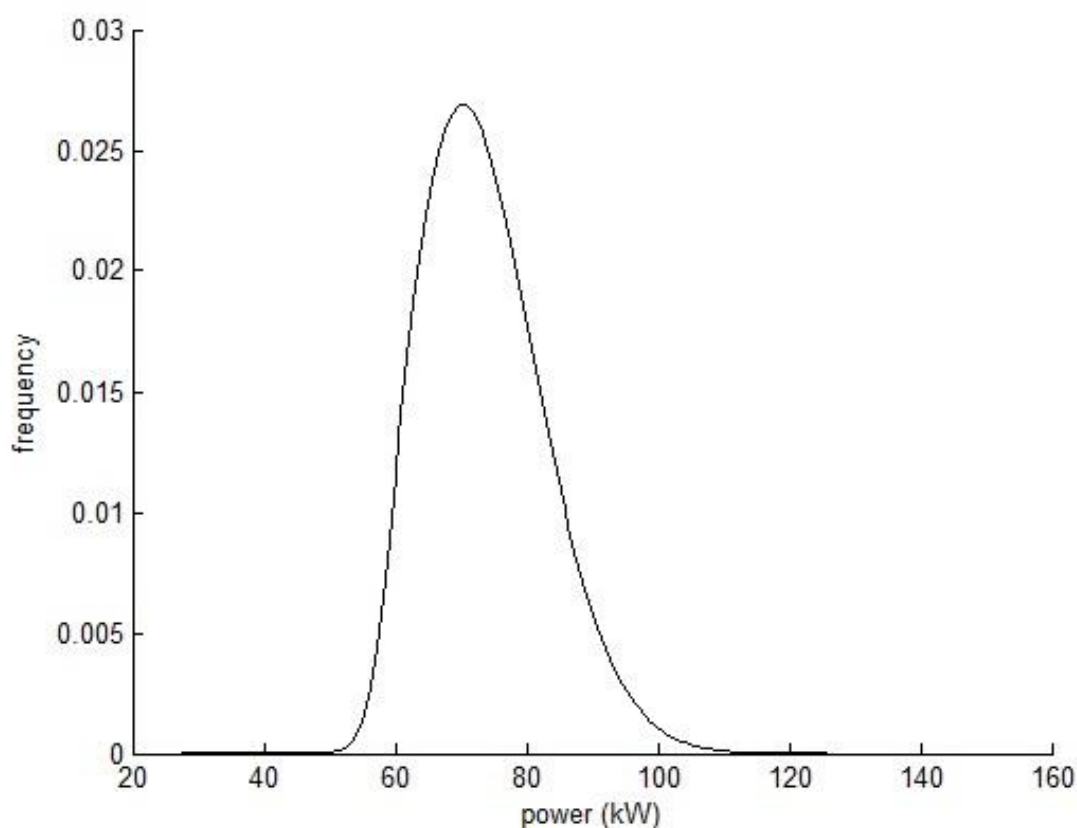


Σχήμα 5.5. Η κατανομή Beta της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για την ώρα που εξετάζεται

Από την παραπάνω καμπύλη εξάγονται με χρήση των τύπων (3.19) και (3.20) 10 διαφορετικές καταστάσεις ($solar_{state}, pv_{prob_{state}}$) και για κάθε κατάσταση υπολογίζεται η αντίστοιχη παραγωγή ηλιακής ενέργειας ($PV_{gen_{state}}$) με βάση την εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β ($PV_{rated_{island3}}$) που υπολογίστηκε πιο πάνω και με χρήση του τύπου (3.21).

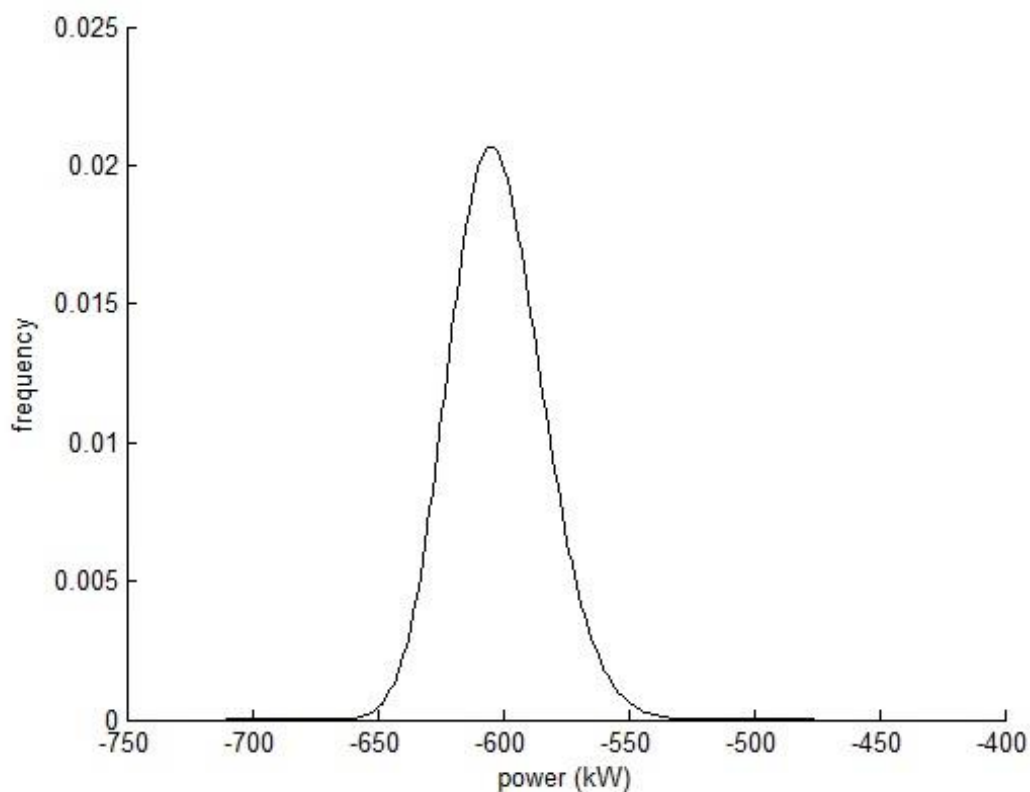
2.5.2.5. Υπολογισμός της συνολικής παραγωγής από ΑΠΕ

Για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ εφαρμόζεται η πράξη της συνέλιξης μεταξύ των καταστάσεων παραγωγής ισχύος (*states*) των αιολικών και των φωτοβολταϊκών, που προκύπτουν για τη συγκεκριμένη ώρα που εξετάζεται κάθε φορά. Με χρήση του τύπου (3.22) υπολογίζονται οι πιθανότητες της συνδυασμένης παραγωγής αιολικών και φωτοβολταϊκών (*res_prob*). Ακόμα εξάγονται οι τιμές παραγωγής ισχύος που αντιστοιχούν στις παραπάνω πιθανότητες (*res_power*) και η αντίστοιχη καμπύλη παραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6. Η καμπύλη της συνολικής παραγωγής από ΑΠΕ για την ώρα που εξετάζεται

Συνελίσσοντας την καμπύλη της ζήτησης φορτίου με την καμπύλη της συνολικής παραγωγής από ΑΠΕ προκύπτει στο Σχήμα 5.7, η καμπύλη ισοζυγίου ισχύος εντός της «νησίδας 3» για την ώρα 12 της αντιπροσωπευτικής ημέρας του Καλοκαιριού.



Σχήμα 5.7. Η καμπύλη ισοζυγίου ισχύος της νησίδας 3

2.5.2.6. Υπολογισμός ισοζυγίου ισχύος με συνεισφορά Μικροτουρμπίνων

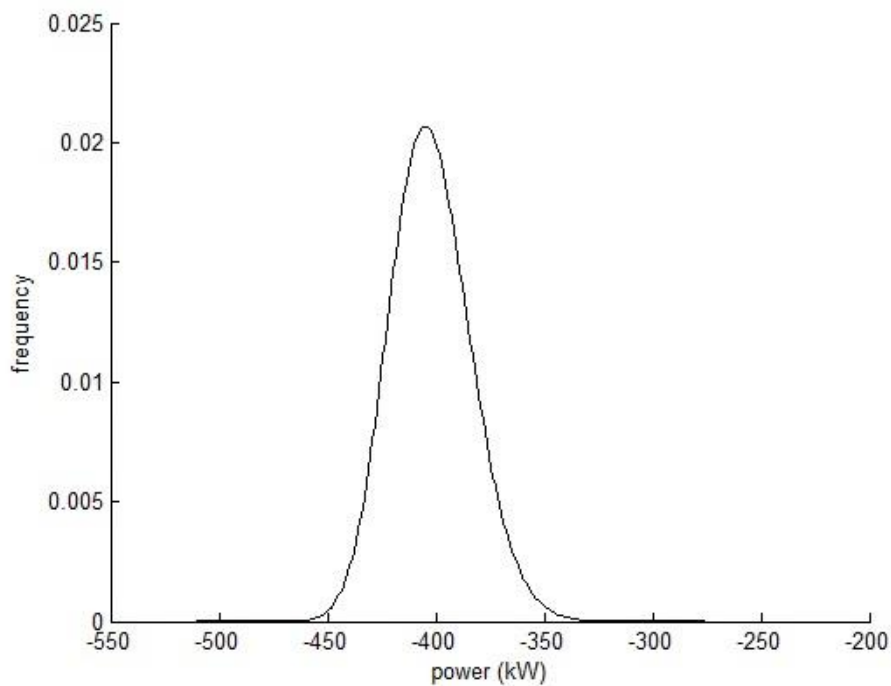
Τέλος, με βάση την συνολική εγκατεστημένη ισχύ των μικροτουρμπίνων που έχει υπολογιστεί πιο πάνω ($MT_{rated_{island3}}$) και με χρήση του τύπου (3.29) στην παράγραφο 3.4.5. ενσωματώνεται η συνεισφορά των μικροτουρμπίνων στο τελικό ισοζύγιο ισχύος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.8. και η εκτιμώμενη τιμή ανισορροπίας υπολογίζεται πλέον από τον τύπο (3.30).

$$imbalance_{MT_{island3}} = -402.8 \text{ kW}$$

Για κάθε ώρα της περιόδου σχεδιασμού που εξετάζεται παράγεται για τη «νησίδα 3» μια αντίστοιχη καμπύλη ισοζυγίου ισχύος και υπολογίζεται η αντίστοιχη εκτιμώμενη τιμή της με χρήση του τύπου (3.30). Τα αποτελέσματα για κάθε πιθανή ώρα ενός έτους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Οι εκτιμώμενες τιμές του ισοζυγίου ισχύος της νησίδας 3 σε kW

<i>ώρα</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>
1	-78,61	-113,28	-235,25	-187,71
2	-42,24	-67,51	-184,59	-140,96
3	-21,44	-42,51	-157,38	-112,14
4	-16	-35,39	-121,18	-94,69
5	-6,66	-31,91	-103,75	-80,52
6	-11,5	-21,77	-96,18	-80,98
7	-16,49	-29,22	-94,12	-96,41
8	-92,02	-86,1	-161,53	-144,79
9	-165,51	-166,1	-254,5	-227,27
10	-215,36	-211,68	-314,82	-293,37
11	-244,97	-241,91	-369,85	-329,11
12	-268,8	-264,96	-402,76	-361,16
13	-287,49	-270,38	-415,15	-381,44
14	-287,69	-248,16	-408,79	-362,32
15	-240,03	-205,5	-375,43	-324,22
16	-223,96	-175,55	-332,03	-291,46
17	-216,54	-169,25	-324,21	-280,28
18	-257,43	-192,41	-358,85	-297,71
19	-344,05	-227,44	-404,24	-328,55
20	-355,44	-244,59	-416,29	-368,4
21	-327,51	-303,62	-442,69	-443,11
22	-285,46	-347,76	-478,82	-386,59
23	-235,24	-277,53	-390,04	-336,18
24	-250,24	-192,18	-299,75	-272,39



Σχήμα 5.8. Το ισοζύγιο ισχύος με συνεισφορά Μικροτουρμπίων

Για να υπολογιστεί η συνολική επίπτωση της «νησίδας 3» για περίοδο σχεδιασμού ενός έτους χρησιμοποιούνται οι τύποι (3.31) και (3.32) και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται παρακάτω:

$$impact_{island3} = 6.4871$$

2.5.2.7. Υπολογισμός του δείκτη ανισορροπίας ισοζυγίου ισχύος

Ο συνολικός δείκτης επίπτωσης που αφορά σε όλες τις «νησίδες» που σχηματίζονται σε περίπτωση που το *Μικροδίκτυο 1* βγει εκτός λειτουργίας υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου (3.33) και το αποτέλεσμα είναι:

$$impact_{downstreamMG1} = 10.532$$

2.5.3. Επίδραση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 1* στο δίκτυο

Το *Μικροδίκτυο 1* εμπεριέχει 19 γραμμές και η κάθε γραμμή έχει πιθανότητα σφάλματος 1%. Με χρήση του τύπου (3.35) για $n = 19$ προκύπτει η πιθανότητα το *Μικροδίκτυο 1* να βγει εκτός λειτουργίας.

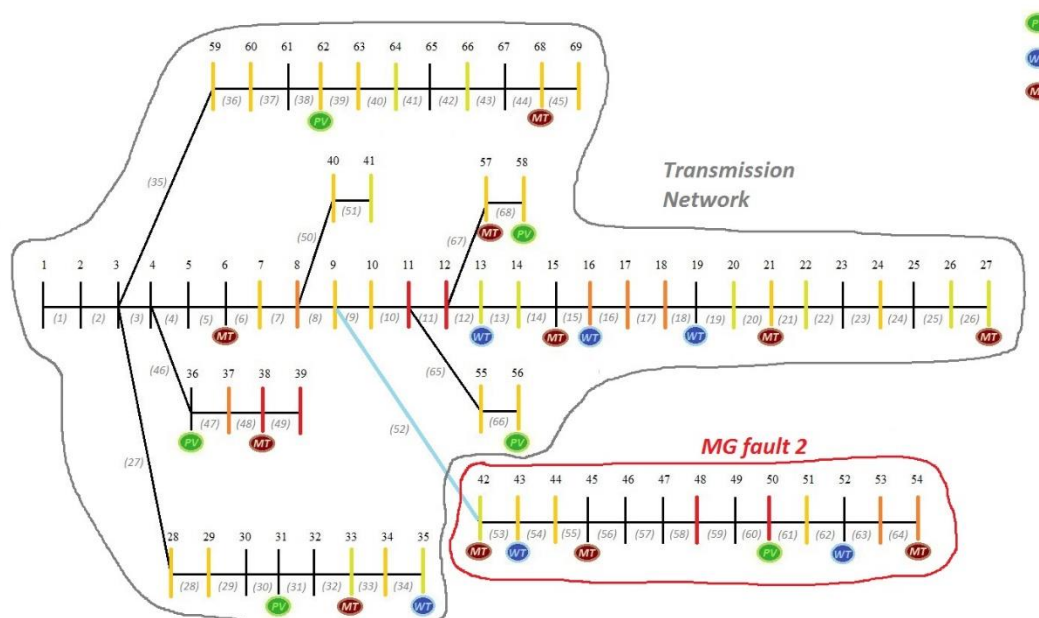
$$probability_{faultMG1} = 0.1738$$

Ο δείκτης που εκφράζει την επίδραση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 1* σε όλο το δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού υπολογίζεται από τον τύπο (3.36) και το αποτέλεσμα προκύπτει παρακάτω:

$$impact_{MG1} = 2.6833$$

2.6. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 2 στο δίκτυο

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 2* φαίνεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 2

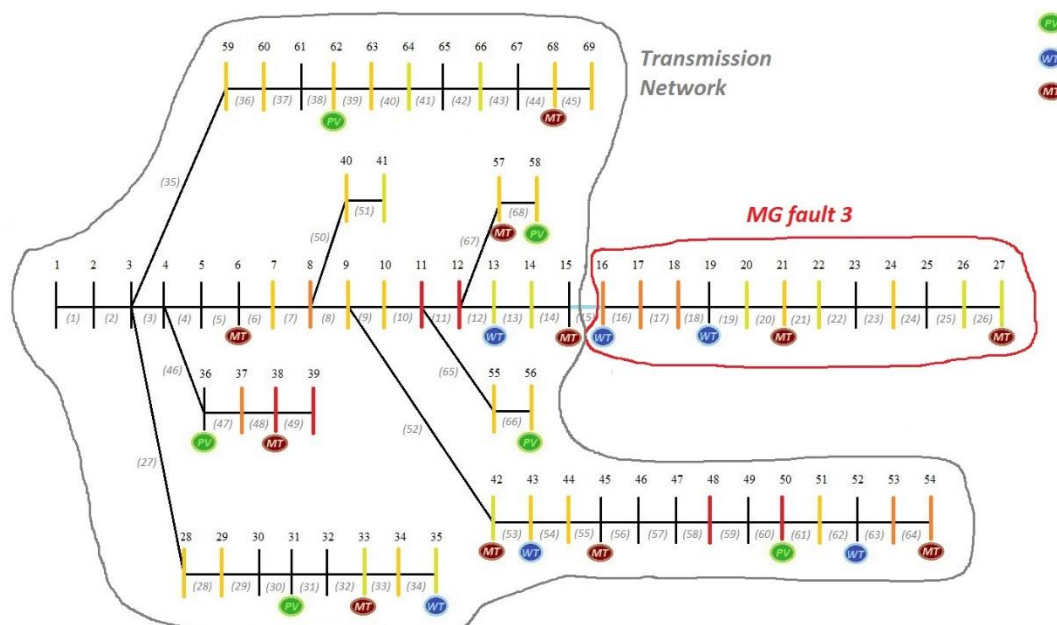
Στην περίπτωση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 2* δεν σχηματίζονται «νησίδες» όπως φαίνεται και παραπάνω. Το μέρος του δικτύου που βρίσκεται στα ανάντι του *Μικροδικτύου 2* δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του δείκτη αξιολόγησης καθώς θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το Δίκτυο Μεταφοράς.

Ο δείκτης που αφορά στην επίδραση πιθανού σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 2* στο δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού είναι:

$$impact_{MG2} = 1.1568$$

2.7. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 3 στο δίκτυο

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 3* φαίνεται στο *Σχήμα 5.10*.



Σχήμα 5.10. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 3

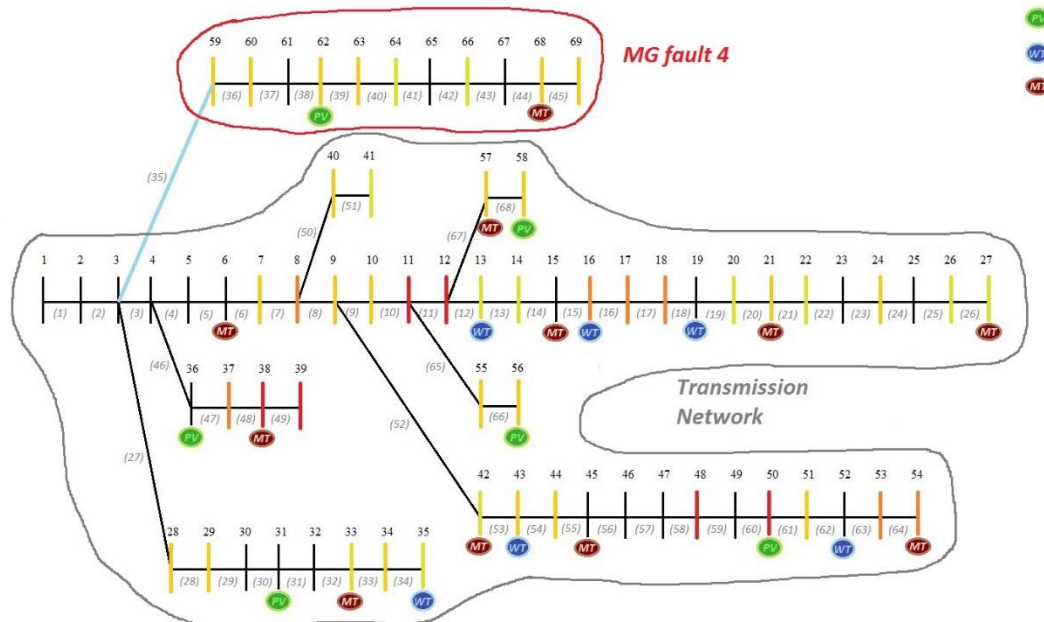
Στην περίπτωση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 3* δεν σχηματίζονται «νησίδες» όπως φαίνεται και παραπάνω. Το μέρος του δικτύου που βρίσκεται στα ανάντι του *Μικροδικτύου 3* δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του δείκτη αξιολόγησης καθώς θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το Δίκτυο Μεταφοράς.

Ο δείκτης που αφορά στην επίδραση πιθανού σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 3* στο δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού είναι:

$$impact_{MG3} = 0.3788$$

2.8. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 4 στο δίκτυο

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 4* φαίνεται στο *Σχήμα 5.11*.



Σχήμα 5.11. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 4

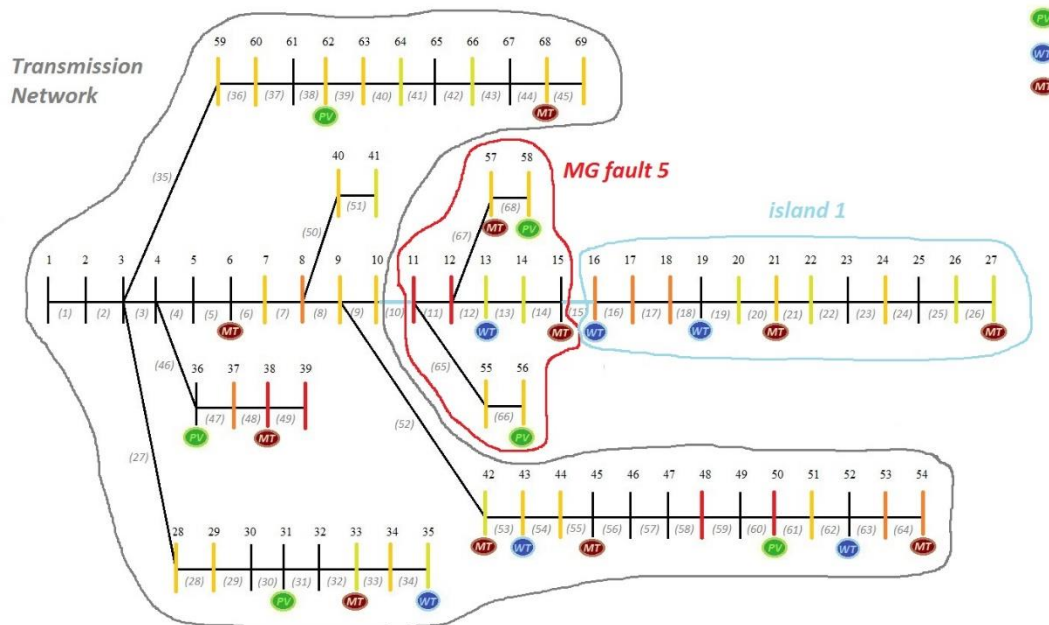
Στην περίπτωση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 4* δεν σχηματίζονται «νησίδες» όπως φαίνεται και παραπάνω. Το μέρος του δικτύου που βρίσκεται στα ανάντι του *Μικροδικτύου 4* δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του δείκτη αξιολόγησης καθώς θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το Δίκτυο Μεταφοράς.

Ο δείκτης που αφορά στην επίδραση πιθανού σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 4* στο δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού είναι:

$$impact_{MG4} = 0.1723$$

2.9. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 5 στο δίκτυο

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 5* φαίνεται στο *Σχήμα 5.12*.



Σχήμα 5.12. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 5

Στην περίπτωση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 5* σχηματίζεται μια «νησίδα» όπως φαίνεται και στο παραπάνω *Σχήμα*. Το μέρος του δικτύου που βρίσκεται στα ανάντι του *Μικροδικτύου 5* δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του δείκτη αξιολόγησης καθώς θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το Δίκτυο Μεταφοράς.

Ένα μέρος της επίδρασης του σφάλματος οφείλεται στην αποκοπή φορτίου εντός του *Μικροδικτύου 5*:

$$impact_{selfMG5} = 8.1631$$

Κι ένα μέρος οφείλεται στο ισοζύγιο ισχύος που προκύπτει στη «νησίδα 1» που σχηματίζεται:

$$impact_{downstreamMG5} = impact_{island1} = 1.1871$$

Η πιθανότητα να εμφανιστεί σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 5* και κατ' επέκταση να εφαρμοστεί αυτός ο διαχωρισμός είναι:

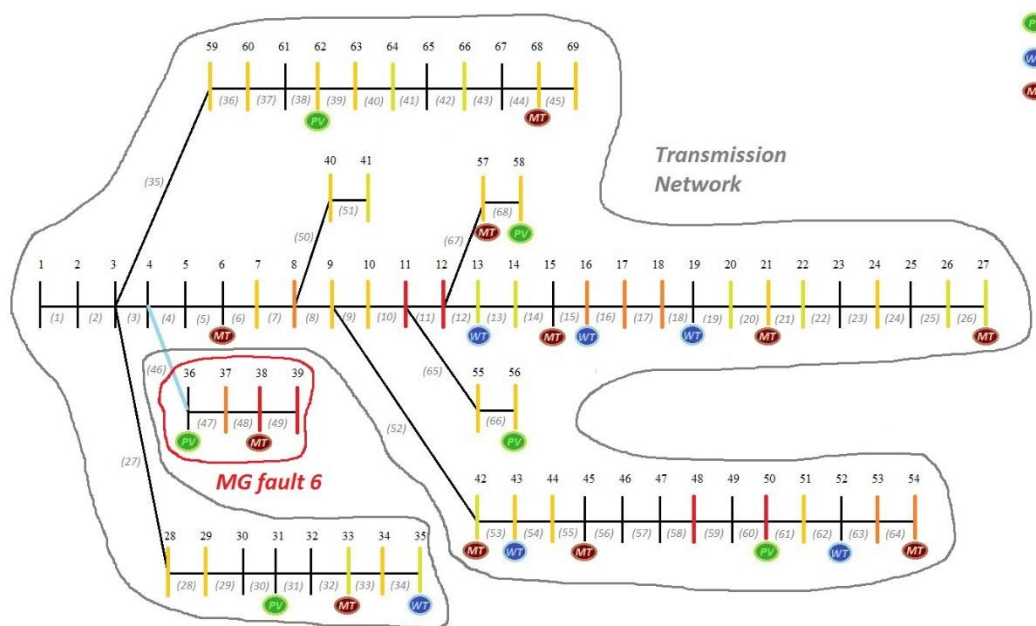
$$probability_{faultMG5} = 0,0773$$

Και με χρήση του τύπου (3.40) προκύπτει παρακάτω ο δείκτης που εκφράζει την επίδραση πιθανού σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 5* στο δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού:

$$impact_{MG5} = 0.7224$$

2.10. Επίδραση σφάλματος εντός του Μικροδικτύου 6 στο δίκτυο

Η μορφή-κατάσταση του δικτύου μετά από σφάλμα εντός του *Μικροδικτύου 6* φαίνεται στο *Σχήμα 5.13*.



Σχήμα 5.13. Η μορφή του δικτύου για σφάλμα στο Μικροδίκτυο 6

Στην περίπτωση σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 6* δεν σχηματίζονται «νησίδες» όπως φαίνεται και παραπάνω. Το μέρος του δικτύου που βρίσκεται στα ανάντι του *Μικροδικτύου 6* δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό του δείκτη αξιολόγησης καθώς θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το Δίκτυο Μεταφοράς.

Ο δείκτης που αφορά στην επίδραση πιθανού σφάλματος εντός του *Μικροδικτύου 6* στο δίκτυο για την περίοδο σχεδιασμού είναι:

$$impact_{MG6} = 0.1718$$

2.11. Τελικός δείκτης αξιολόγησης

Για τον υπολογισμό του τελικού δείκτη αξιολόγησης του διαχωρισμού χρησιμοποιείται ο τύπος (3.41) και το αποτέλεσμα είναι:

$$impact_{allMGs} = 5.2854$$

Σχόλια

Οι δείκτες $Load_impact_{selfMG}$ και $impact_{island}$ υπολογίζονται στο παράδειγμα που αναλύθηκε σύμφωνα με τους αντίστοιχους τύπους του κεφαλαίου 3. Ωστόσο, οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή του κάθε παραπάνω τύπου διαιρούνται με τον αριθμό 10^6 ώστε αν προκύψουν τα ακριβή αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν κατά την επίλυση του παραδείγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εισαγωγή

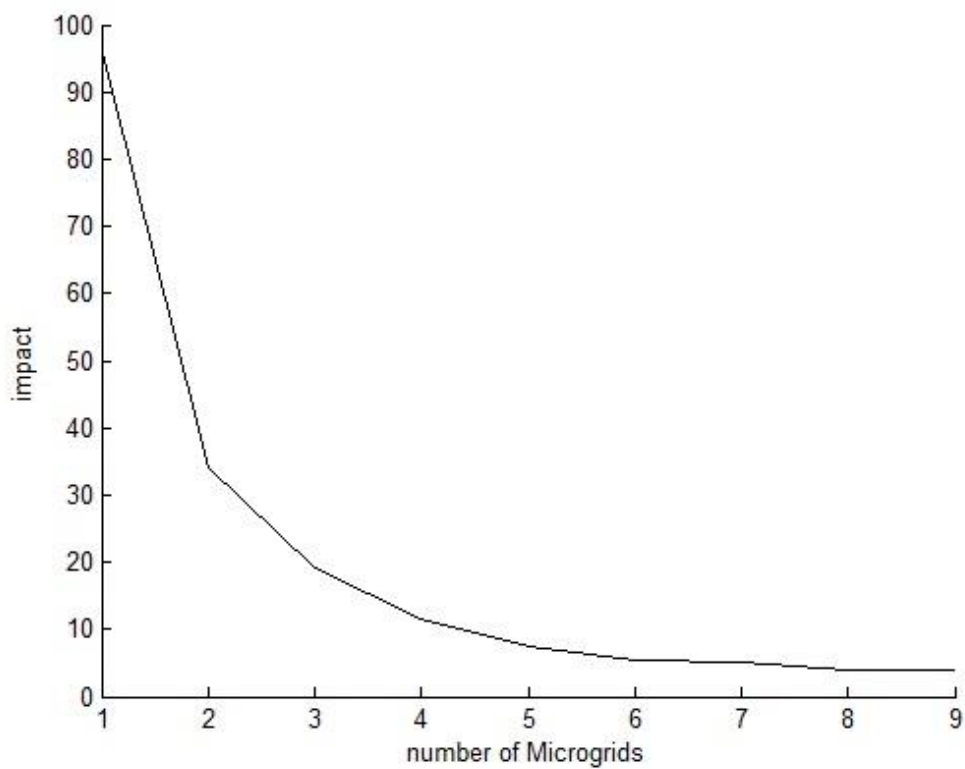
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τις εκτελέσεις του Γενετικού Αλγορίθμου θεωρήθηκε αριθμός γενεών ίσος με *Generations* = 100 και ένα κριτήριο τερματισμού *Stall Generation Limit* = 40.

6.1. Σχέση μεταξύ αριθμού μικροδικτύων και τελικού δείκτη αξιολόγησης

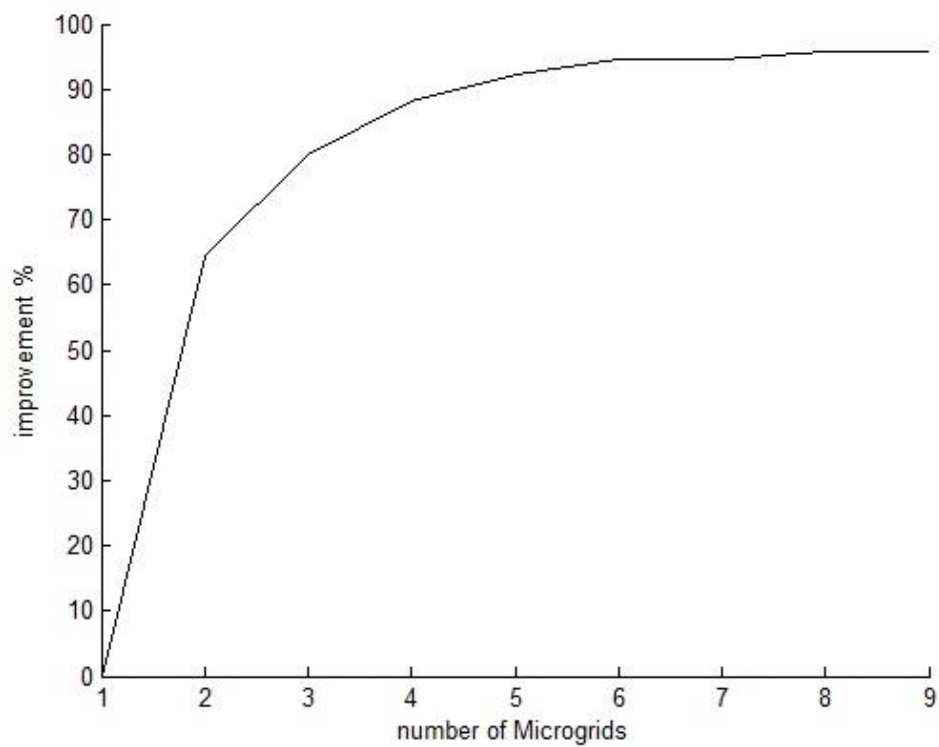
Στο Πίνακα 6.1. παρουσιάζεται ο δείκτης αξιολόγησης για διαφορετικό αριθμό μικροδικτύων καθώς και το ποσοστό βελτίωσής του ανά σχεδιασμό. Στα Σχήματα 6.1. και 6.2. παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα.

Πίνακας 6.1. Ο δείκτης επίδρασης σφάλματος ανά σχεδιασμό

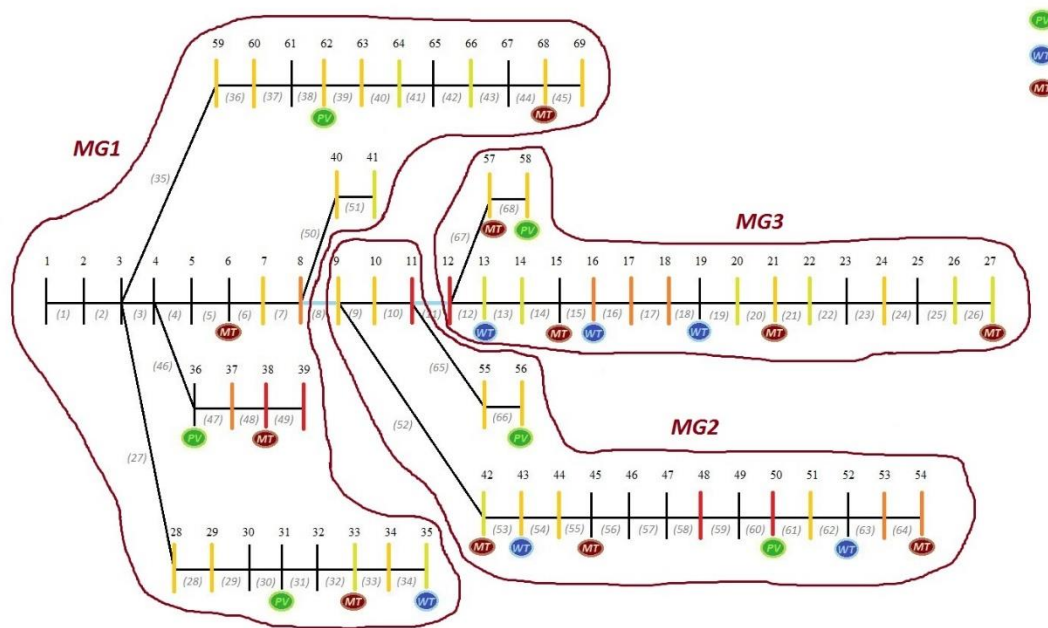
Αριθμός Μικροδικτύων	Θέσεις των Διακοπών	Δείκτης Αξιολόγησης	Βελτίωση του Δείκτη %
1	-	95.8298	-
2	8	34.1118	64.4
3	8 11	19.2924	79.87
4	11 46 52	11.446	88.06
5	11 35 47 52	7.3927	92.29
6	10 15 35 46 52	5.2854	94.48
7	11 20 29 35 46 55	5.1803	94.59
8	9 11 12 35 46 52 60	3.9877	95.84
9	10 12 20 27 35 43 46 52	3.2983	96.66



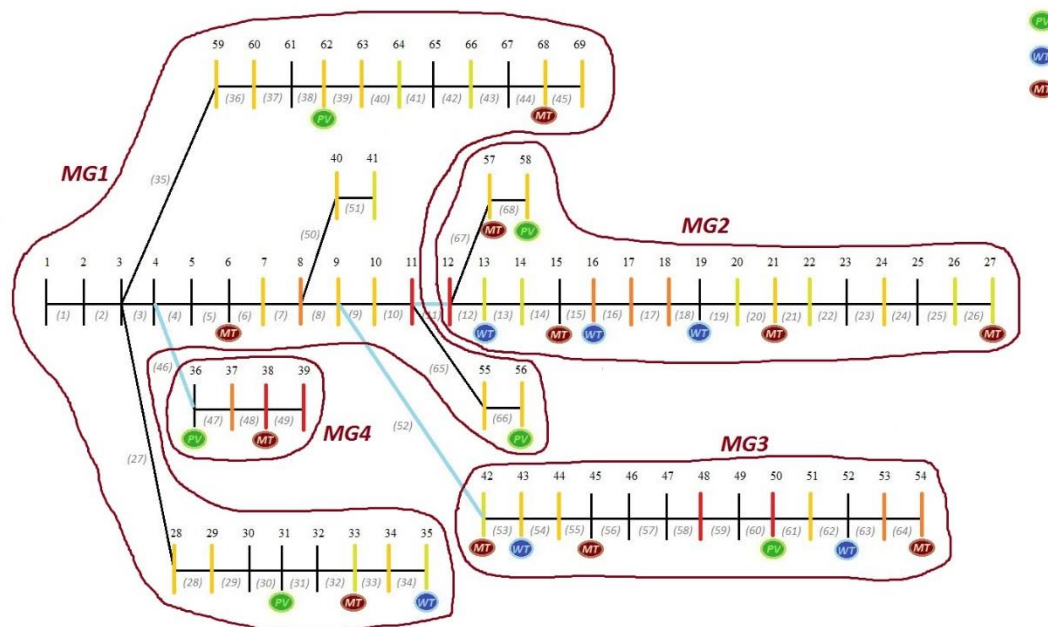
Σχήμα 6.1. Ο δείκτης αξιολόγησης σε σχέση με τον αριθμό των μικροδικτύων



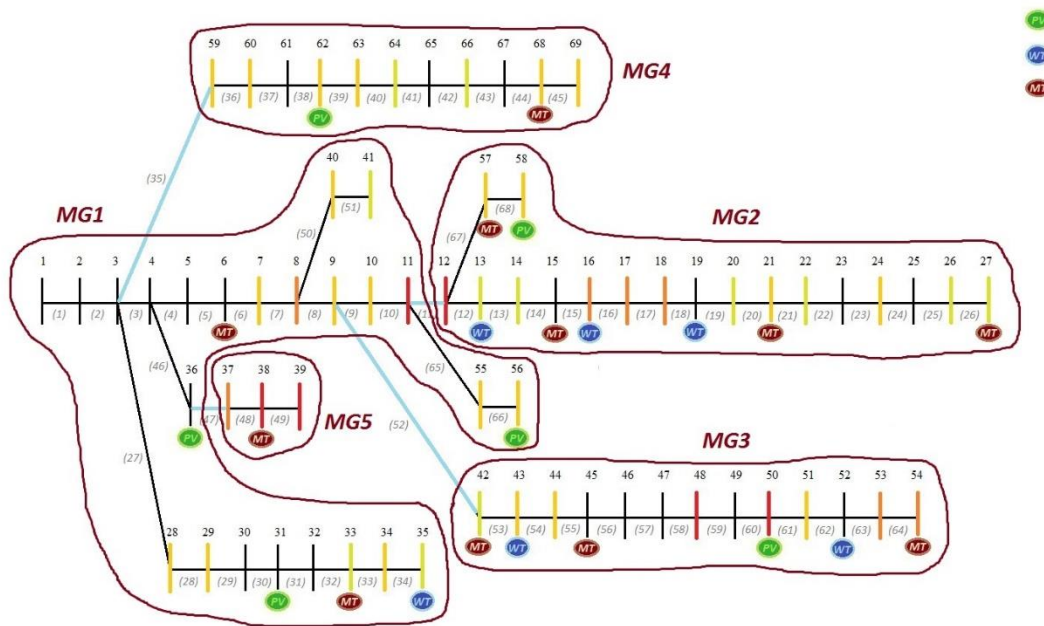
Σχήμα 6.2. Η βελτίωση του δείκτη αξιολόγησης ανά σχεδιασμό



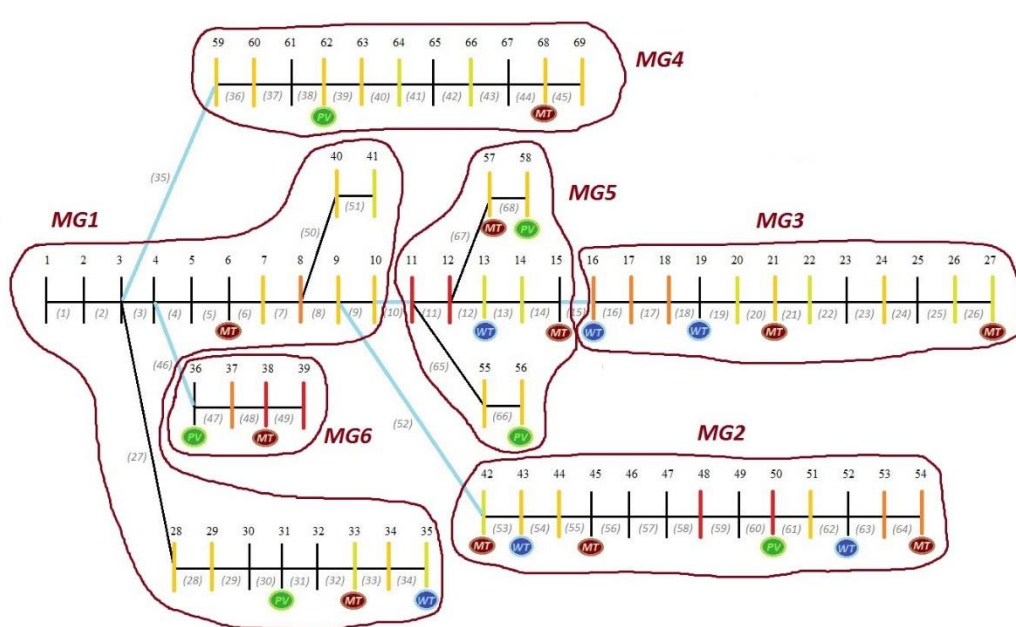
Σχήμα 6.5. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 3 Μικροδίκτυα



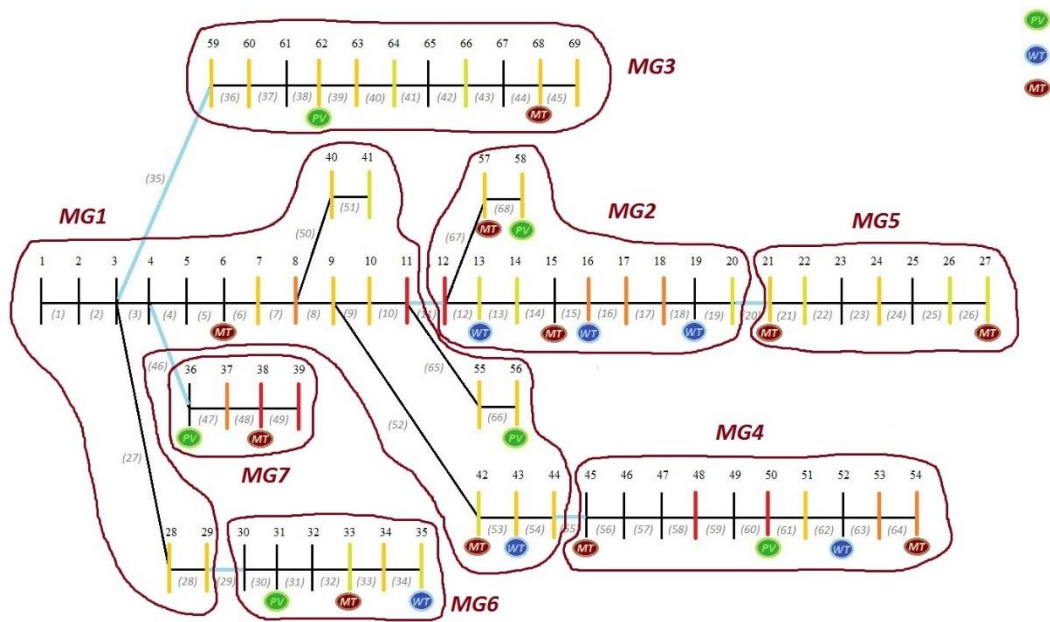
Σχήμα 6.6. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 4 Μικροδίκτυα



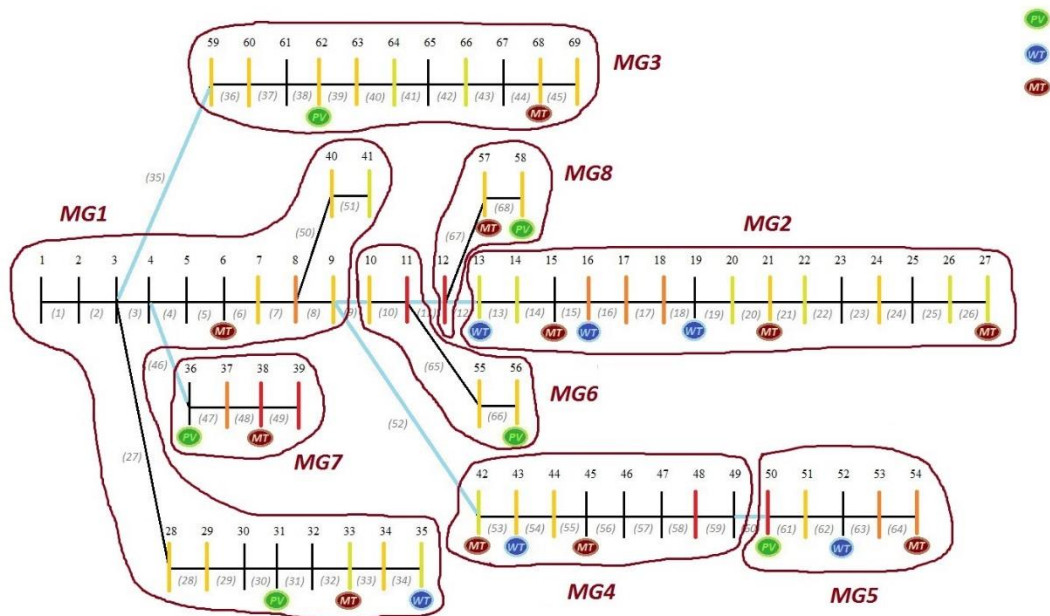
Σχήμα 6.7. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 5 Μικροδίκτυα



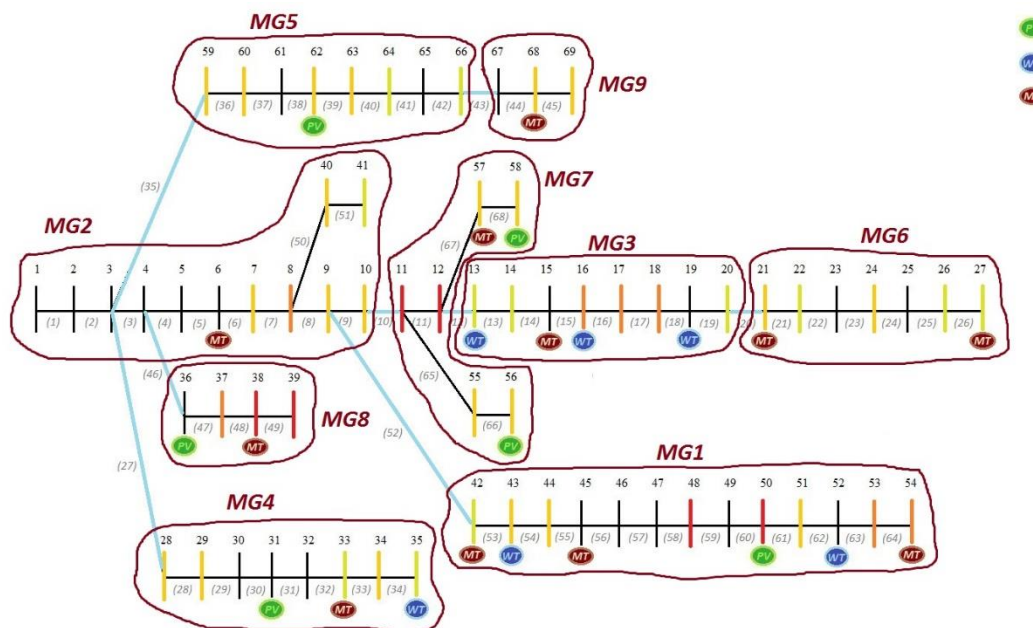
Σχήμα 6.8. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 6 Μικροδίκτυα



Σχήμα 6.9. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 7 Μικροδίκτυα



Σχήμα 6.10. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 8 Μικροδίκτυα



Σχήμα 6.11. Ο βέλτιστος σχεδιασμός για 9 Μικροδίκτυα

6.2. Βαρύτητα κάθε συνιστώσας του δείκτη αξιολόγησης

Ο τελικός δείκτης αξιολόγησης όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες. Αυτές οι συνιστώσες είναι ο δείκτης Αποκοπής Φορτίου και ο δείκτης Ανισορροπίας του Ισοζυγίου Ισχύος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε δείκτη στο τελικό αποτέλεσμα. Στον Πίνακα 6.2. παρουσιάζονται για διαφορετικό αριθμό σχηματιζόμενων μικροδικτύων, οι επιμέρους συνιστώσες του τελικού δείκτη αξιολόγησης καθώς και το ποσοστό βαρύτητας του κάθε δείκτη στο τελικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 6.2. Αποκοπή φορτίου και ανισορροπία ισοζυγίου ισχύος ανά σχεδιασμό

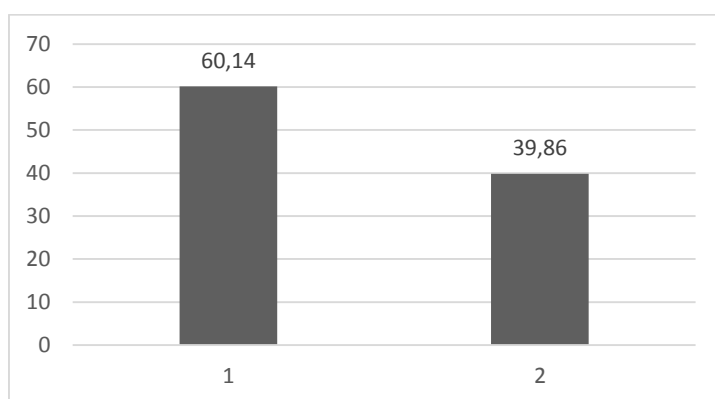
Αριθμός Μικροδικτύων	Αποκοπή Φορτίου	Ανισορροπία Ισοζυγίου Ισχύος	Αποκοπή Φορτίου %	Ανισορροπία Ισοζυγίου Ισχύος %
1	95.8298	0	100	0
2	29.217	4.8948	85.7	14.3
3	14.1191	5.1733	73.2	26.8
4	9.8661	1.58	86.2	13.8
5	5.873	1.5197	79.4	20.6
6	3.3629	1.9225	63.6	36.4
7	4.0716	1.1088	78.6	21.4
8	1.9118	2.0759	47.9	52.1
9	2.1752	1.1231	65,95	34.05

6.3. Ζήτηση φορτίου ανά μικροδίκτυο κάθε σχεδιασμού

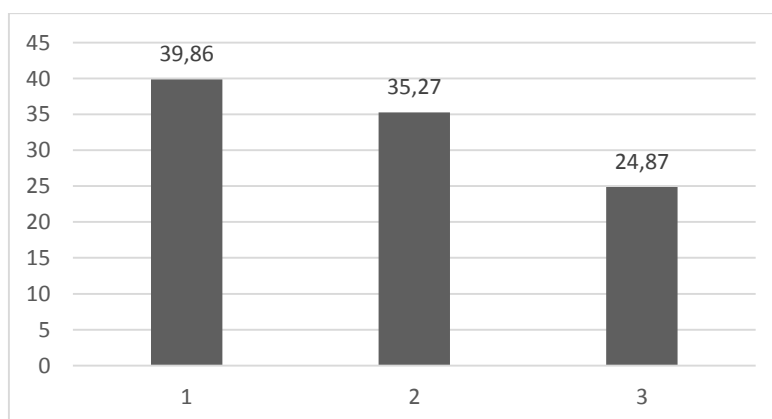
Ακόμα στον Πίνακα 6.3. παρουσιάζεται η ζήτηση φορτίου σε κάθε μικροδίκτυο, ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης στο διάστημα που εξετάζεται, για 9 περιπτώσεις σχεδιασμού του δικτύου. Παρακάτω στα Σχήματα 6.12. - 6.19. παρουσιάζονται τα αντίστοιχα γραφήματα.

Πίνακας 6.3. Ποσοστά εγκατεστημένου φορτίου ανά σχεδιασμό και Μικροδίκτυο

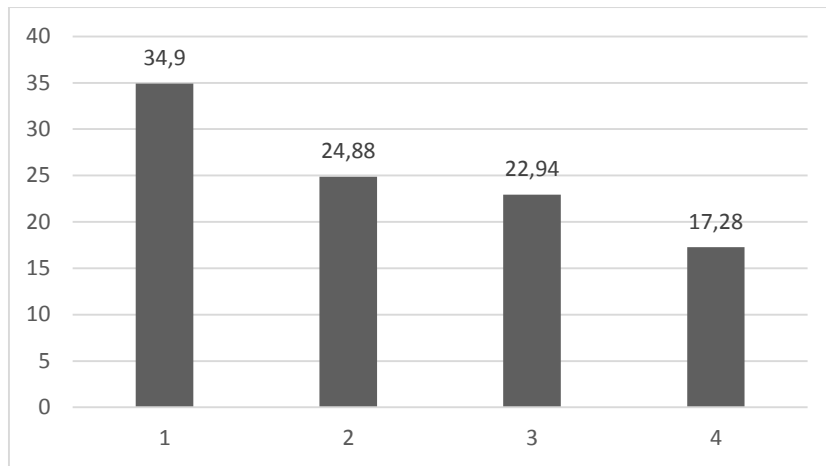
Σχεδιασμός	MG 1	MG 2	MG 3	MG 4	MG 5	MG 6	MG 7	MG 8	MG 9
1	100								
2	60.14	39.86							
3	39.86	35.27	24.87						
4	34.9	24.88	22.94	17.28					
5	25.26	24.87	22.94	9.65	17.28				
6	15.92	22.94	13.67	9.65	20.54	17.28			
7	26.12	19.76	9.65	20.12	5.11	1.96	17.28		
8	14.47	14.5	9.65	7.97	14.97	10.78	17.29	10.37	
9	22.94	11.27	9.39	6.64	5.52	5.11	19.71	17.29	4.13



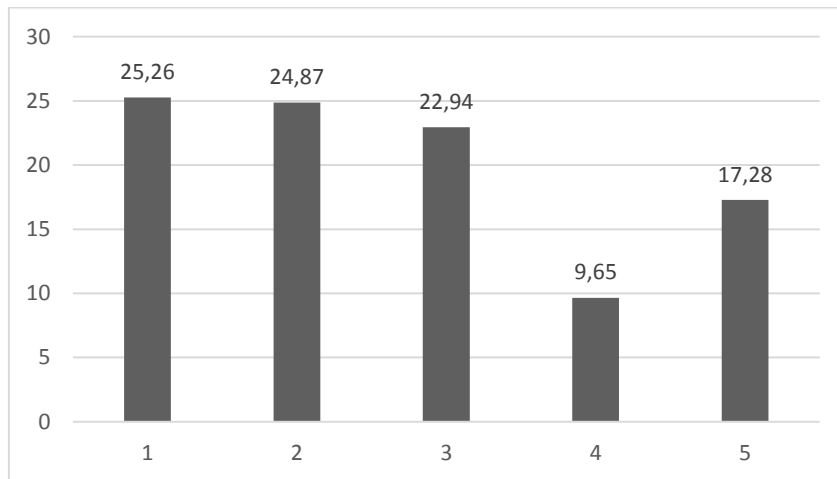
Σχήμα 6.12. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 2



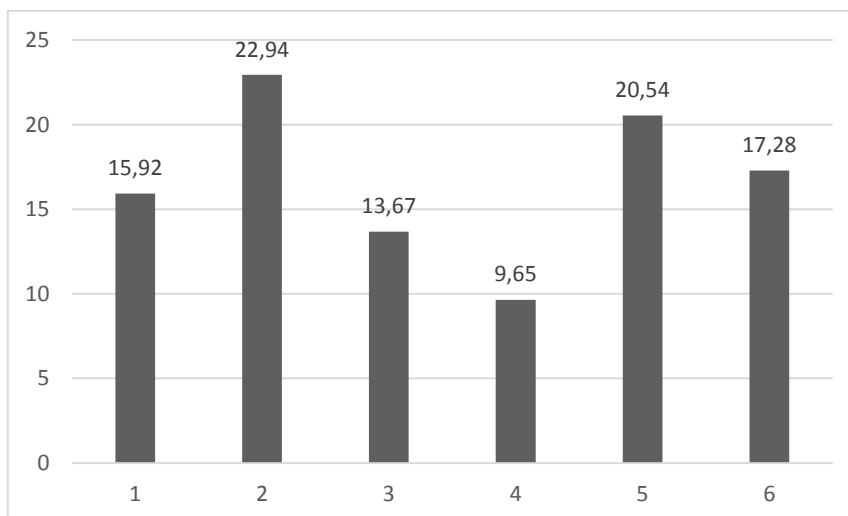
Σχήμα 6.13. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 3



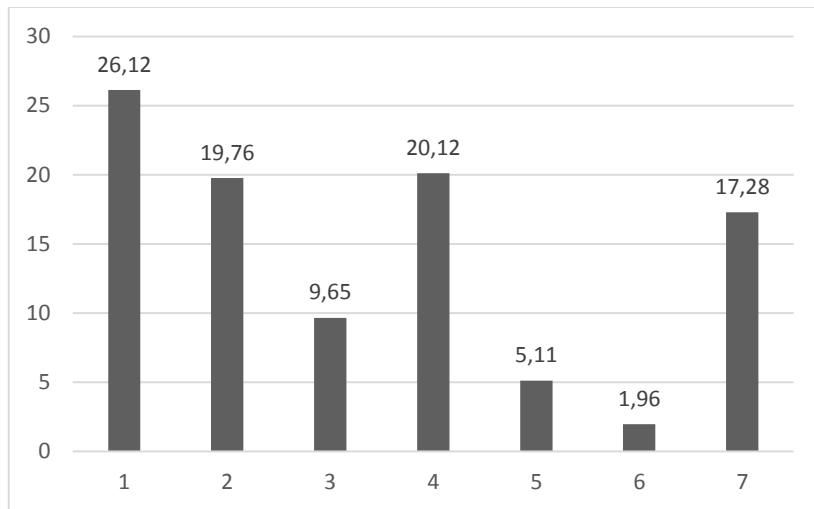
Σχήμα 6.14. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 4



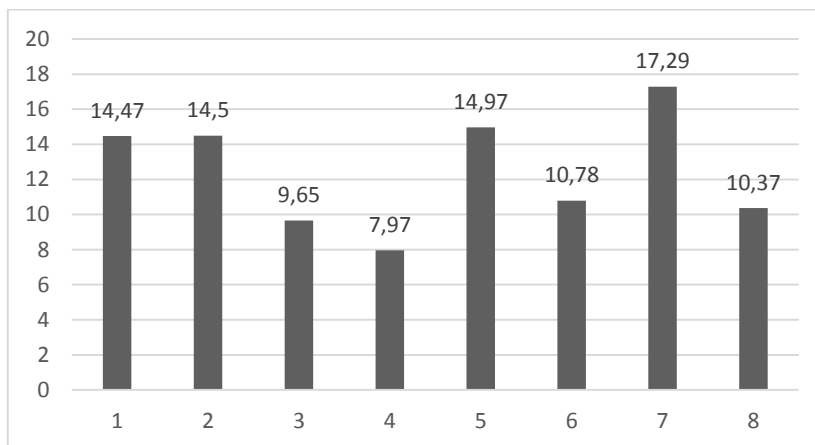
Σχήμα 6.15. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 5



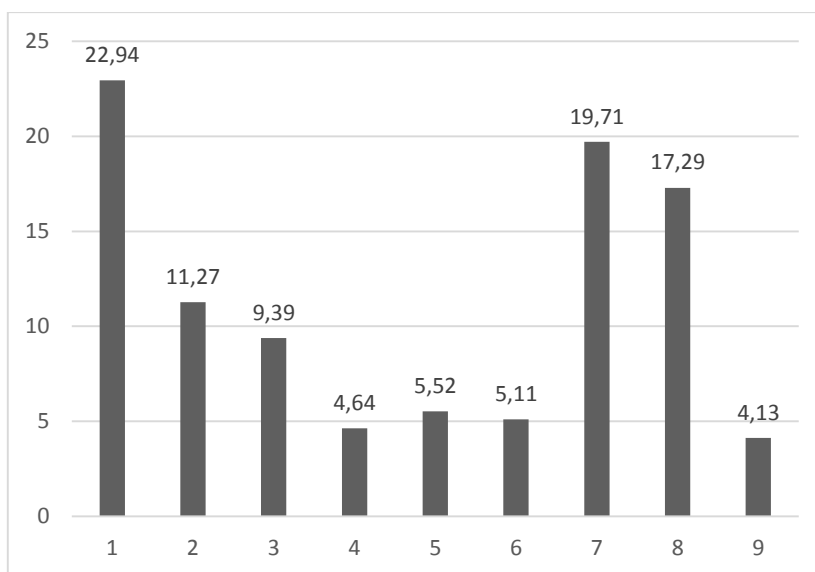
Σχήμα 6.16. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 6



Σχήμα 6.17. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 7



Σχήμα 6.18. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 8



Σχήμα 6.19. Τα ποσοστά ζήτησης φορτίου ανά μικροδίκτυο για το Σχεδιασμό 9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

Εισαγωγή

Πρόσφατα περιστατικά σοβαρών καιρικών φαινομένων έχουν εγείρει ερωτήματα σχετικά με το πόσο ικανά είναι τα σημερινά συμβατικά ΣΗΕ να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά ένα πιθανό σοβαρό καιρικό φαινόμενο διατηρώντας την εξυπηρέτηση κρίσιμων φορτίων, όπως τα νοσοκομεία, οι τηλεπικοινωνίες, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, κέντρα πληροφοριών κ.α. Η ικανότητα ενός ΣΗΕ να μπορεί να αντιστέκεται στα ακραία φαινόμενα και να ανακάμπτει σε σύντομο χρονικό διάστημα ονομάζεται ελαστικότητα (*resilience*) του δικτύου. Ο διαχωρισμός ενός δικτύου σε μικροδίκτυα είναι ένας τρόπος να βελτιωθεί η ελαστικότητα και η εξυπηρέτηση του φορτίου σε κρίσιμες καταστάσεις για το δίκτυο, όπως ένα σοβαρό καιρικό φαινόμενο ή γενικότερα μια πιθανή βλάβη στην περιοχή του δικτύου. Η συμβατική μορφή των ΣΗΕ, με τη συγκεντρωμένη παραγωγή η οποία είναι απομακρυσμένη από τα φορτία, ο κεντρικός έλεγχος που εφαρμόζεται καθώς και το μεγάλο γεωγραφικό μέγεθός τους, καθιστούν την παραδοσιακή μορφή των δικτύων επισφαλή σε διαταραχές καθώς αρκεί ένα σφάλμα για να διακοπεί η λειτουργία σε μεγάλο μέρος του δικτύου. Δεδομένου ότι είναι αρκετά κοινό να βρεθεί μια περιοχή με υψηλή ζώνη επικινδυνότητας γειτονικά σε μία περιοχή με χαμηλή ζώνη επικινδυνότητας ο διαχωρισμός του δικτύου μπορεί να περιορίσει το αντίκτυπο του σφάλματος. Το σφάλμα στη ζώνη υψηλής επικινδυνότητας μπορεί να προέρχεται από τυφώνα, από πλημμύρα ή ακόμα και από πυρκαγιά. (π.χ. μέρος του δικτύου που είναι κοντά σε δασύλλια είναι περισσότερο εκτεθειμένο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που υπάρχει μεγάλος κίνδυνος πυρκαγιάς). Έτσι, απομονώνοντας το κρίσιμο μέρος του δικτύου περιορίζεται η πιθανή διαταραχή χωρίς να εξαπλώνεται στο υπόλοιπο δίκτυο[17].

Η ιδέα του μικροδικτύου έχει πολλαπλά οφέλη για τη λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος του δικτύου επηρεάζει καθοριστικά την αντίδραση του δικτύου σε κρίσιμες καταστάσεις. Με αυτό τον τρόπο το δίκτυο γίνεται πιο ελαστικό (*resilient*) αντιμετωπίζοντας φυσικές καταστροφές με δυνατότητες γρήγορης επαναφοράς στην προ σφάλματος κατάσταση.

Κάποιες από τις μονάδες Διεσπαρμένης παραγωγής όπως οι Μικροτουρμπίνες, η Βιομάζα ή οι Ντιζελογεννήτριες εξαρτώνται από άλλες υποδομές, όπως το δίκτυο φυσικού αερίου ή οι αυτοκινητόδρομοι. Έτσι, σε περίπτωση ενός σοβαρού φυσικού φαινομένου θα υπάρξει δυσκολία στον ανεφοδιασμό και την εμπορεία αυτών των μονάδων παραγωγής. Γι' αυτό το λόγο το μέγεθος και η τοποθεσία που θα επιλεγεί να εγκατασταθούν τέτοιου είδους μονάδες παραγωγής πρέπει να αποφασιστεί λαμβάνοντας υπόψη και τους παραπάνω κινδύνους, προκειμένου το δίκτυο να γίνει πιο ανθεκτικό σε πιθανή κρίσιμη κατάσταση. Μια εναλλακτική στο πρόβλημα αυτό είναι η τοποθέτηση Αιολικών ή Φωτοβολταϊκών των οποίων η παραγωγή εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα. Το πρόβλημα σε αυτή την εναλλακτική είναι ότι καθίσταται αναγκαία η εγκατάσταση

μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, κάτι που είναι αρκετά δαπανηρό καθώς επίσης οι μονάδες αποθήκευσης έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής. Διενεργώντας κατάλληλες μελέτες πάνω στα ζητήματα του είδους και της θέσης της Διεσπαρμένης Παραγωγής είναι δυνατό να προκύψει μια εξαιρετικά αποδοτική λύση, ενισχύοντας έτσι την ελαστικότητα του δικτύου σε πιθανές διαταραχές.

Μια επιπρόσθετη χρησιμότητα των μικροδικτύων είναι η συνεισφορά τους στην έναρξη λειτουργίας μεγάλων συμβατικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (black start). Κατά τη διάρκεια κάποιου σοβαρού καιρικού φαινομένου είναι πιθανό κάποιος μεγάλος συμβατικός σταθμός παραγωγής να βγει εκτός λειτουργίας. Για την επαναλειτουργία του σταθμού χρειάζεται ενέργεια προκειμένου να ηλεκτριστούν οι γραμμές μεταφοράς και στη συνέχεια να δοθεί μια αρχική ροπή στον άξονα της γεννήτριας του σταθμού. Συνήθως χρειάζονται μεγάλα ποσά αέργου ισχύος προκειμένου να ηλεκτριστούν κατάλληλα οι μεγάλοι μήκους γραμμές μεταφοράς. Από την άλλη μεριά τα μικροδίκτυα έχουν περιορισμένη ισχύ κι έτσι η ικανότητά τους να ηλεκτρίσουν τις γραμμές δεν είναι πάντα αρκετή. Ωστόσο, κάποιο μικροδίκτυο που είναι γεωγραφικά κοντά σε συμβατικό σταθμό παραγωγής, ο οποίος δεν έχει την ικανότητα επανεκκίνησης (*black start capability*) μόνος του, μπορεί να συνεισφέρει στο ποσό της ενέργειας που είναι αναγκαία για την επαναλειτουργία του σταθμού. Κάτι τέτοιο θα συνέβαλλε στην ενίσχυση της ελαστικότητας του δικτύου, μιας και ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της ελαστικότητας του δικτύου στη λογική των έξυπνων δικτύων είναι η ικανότητα του δικτύου να επανέρχεται στην μόνιμή του κατάσταση[18].

Γενικά, ο όρος ελαστικότητα του δικτύου είναι κατά κάποιο τρόπο ασαφής. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει διάφορες μορφές κρίσιμων καταστάσεων που επηρεάζουν την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας στον τελικό καταναλωτή. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται από τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου το δίκτυο να είναι προετοιμασμένο να μετριάσει τυχόν σφάλματα και να ελαχιστοποιήσει τη διάρκειά τους. Ωστόσο υπάρχει γόνιμος τόπος για έρευνα πάνω σε τεχνικές επιβίωσης του δικτύου σε φαινόμενα που συμβαίνουν σπάνια άλλα έχουν σοβαρές επιπτώσεις (*High Impact Low Probability-HILP events*), όπως είναι ένας τυφώνας[19].

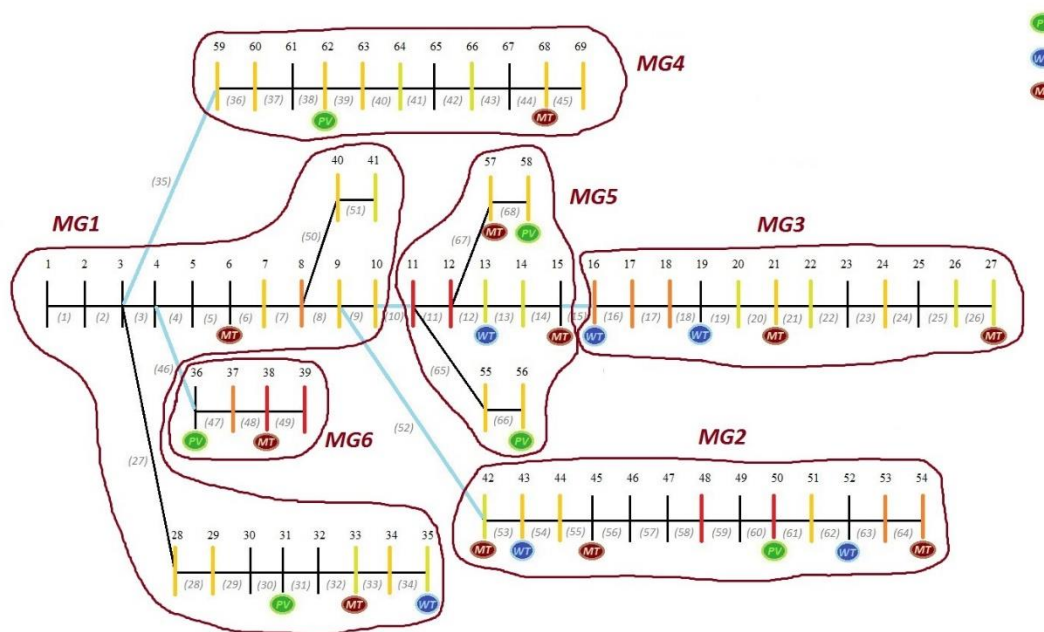
7.1. Παρουσίαση Σεναρίων και Διεξαγωγή Προσομοιώσεων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την ανάδειξη του στρατηγικού σχεδιασμού μικροδικτύων στην ενίσχυση της ελαστικότητας του δικτύου. Σε όλη την έκταση των παρακάτω προσομοιώσεων ο σχεδιασμός του δικτύου γίνεται με την απαίτηση να σχηματιστούν 6 αυτοτροφοδοτούμενα μικροδίκτυα και ως επίπεδο ελαστικότητας λαμβάνεται υπόψη η πιθανή αποκοπή φορτίου. Επίσης, μια κατάσταση υψηλής επικινδυνότητας σφάλματος εκφράζεται με την αύξηση της πιθανότητας σφάλματος στις γραμμές που ανήκουν στην κρίσιμη περιοχή κάθε φορά.

Στο κεφάλαιο 6 έγινε εμφανές πως ο η επίδραση του σφάλματος στο δίκτυο μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των μικροδικτύων που σχηματίζονται. Προκειμένου να δειχθεί η αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού όσον αφορά στην ελαστικότητα του δικτύου θεωρείται συγκεκριμένος αριθμός σχηματιζόμενων μικροδικτύων και πιο συγκεκριμένα το μέτρο σύγκρισης των προτεινόμενων σχεδιασμών στην παρούσα ενότητα είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός που προέκυψε από το κεφάλαιο 6 για την περίπτωση των 6 μικροδικτύων.

7.1.1. Τυπική ημέρα Καλοκαιριού χωρίς υψηλό βαθμό επικινδυνότητας

Ο βέλτιστος διαχωρισμός σε κανονικές συνθήκες φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Οι διακόπτες τοποθετούνται στις θέσεις (10 15 35 46 52) και το αποτέλεσμα του δείκτη αξιολόγησης για την αντιπροσωπευτική ημέρα του Καλοκαιριού είναι $impact = 1.8289$.

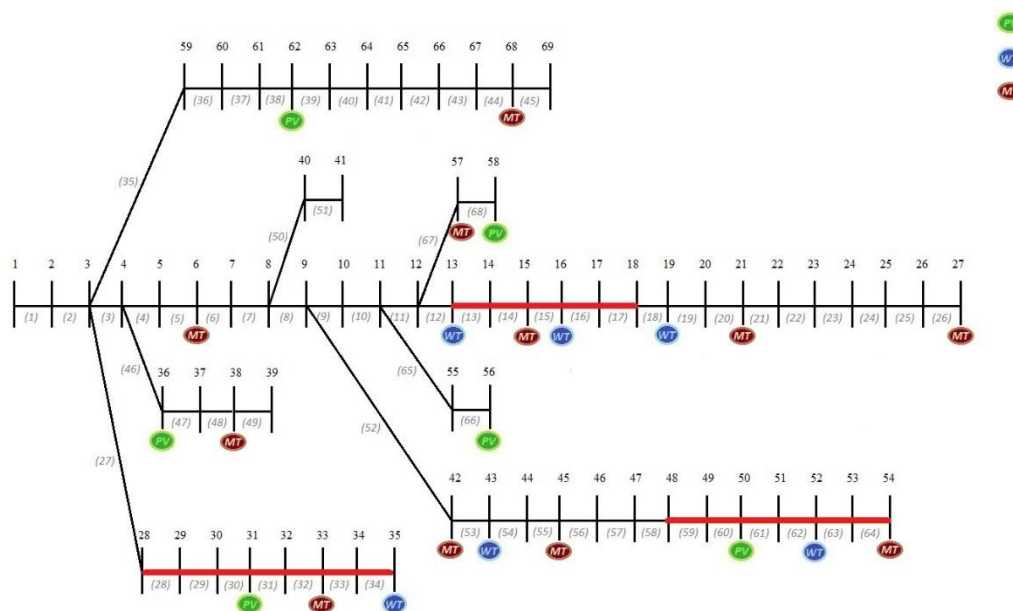


Σχήμα 7.1. Ο βέλτιστος διαχωρισμός του αρχικού δικτύου σε 6 μικροδίκτυα

7.1.2. Σενάριο μεμονωμένων κρίσιμων περιοχών

Ως κατάσταση υψηλής επικινδυνότητας θεωρείται το σενάριο μέρος του δικτύου να βρίσκεται κοντά σε δασύλλιο, όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες να προκληθεί πυρκαγιά, με αποτέλεσμα να πληγεί το δίκτυο της περιοχής. Έτσι οι γραμμές του δικτύου κοντά στο δασύλλιο θεωρούνται εκτεθειμένες και αυτό εκφράζεται στην αντικειμενική συνάρτηση με την υψηλή πιθανότητα που έχουν να βγουν εκτός λειτουργίας.

Στη συνέχεια θεωρούμε σενάριο όπου οι γραμμές (13 – 17, 28 – 34, 59 – 64) παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα σφάλματος ίση με $line_{prob} = 0.3$. Στο Σχήμα 7.2. φαίνεται το μέρος του δικτύου με την αυξημένη πιθανότητα σφάλματος.

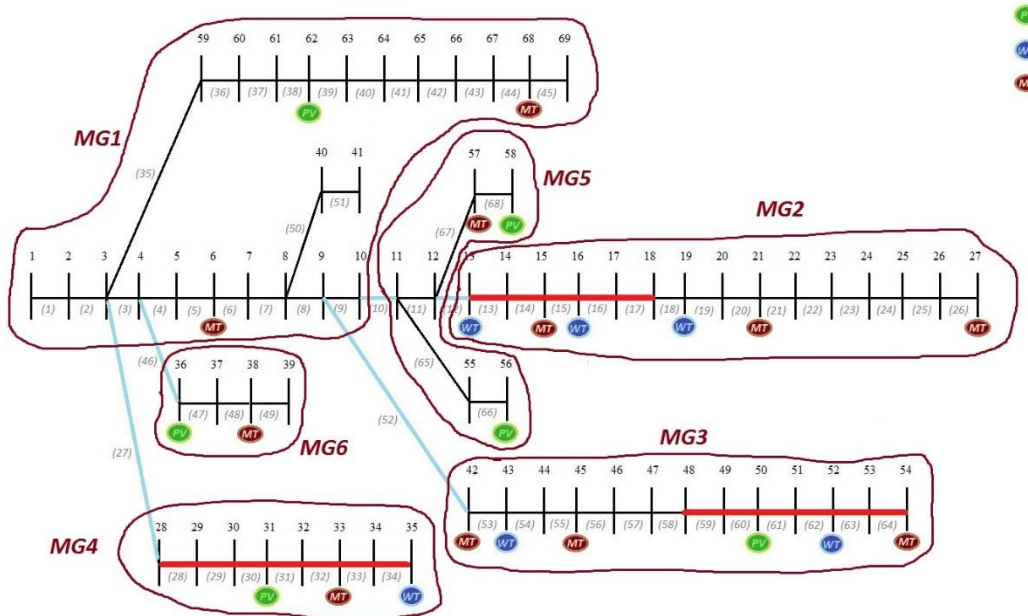


Σχήμα 7.2. Οι γραμμές του δικτύου με αυξημένη πιθανότητα σφάλματος

Σύμφωνα με τον αρχικό διαχωρισμό (10 15 35 46 52) το αποτέλεσμα του δείκτη αξιολόγησης για αυτό το σενάριο είναι $impract = 10.5899$. Η πρόκληση στην οποία καλείται να απαντήσει η μέθοδος που αναπτύχθηκε είναι η εύρεση ενός σχεδιασμού μικροδικτύων που να μειώνει τον αντίκτυπο του σεναρίου αυτού.

Από προσομοιώσεις προέκυψε ο διαχωρισμός του δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Οι διακόπτες τοποθετούνται στις θέσεις (10 12 27 46 52) και ο δείκτης αξιολόγησης του σχεδιασμού μειώνεται αισθητά, $impact = 5.6839$.

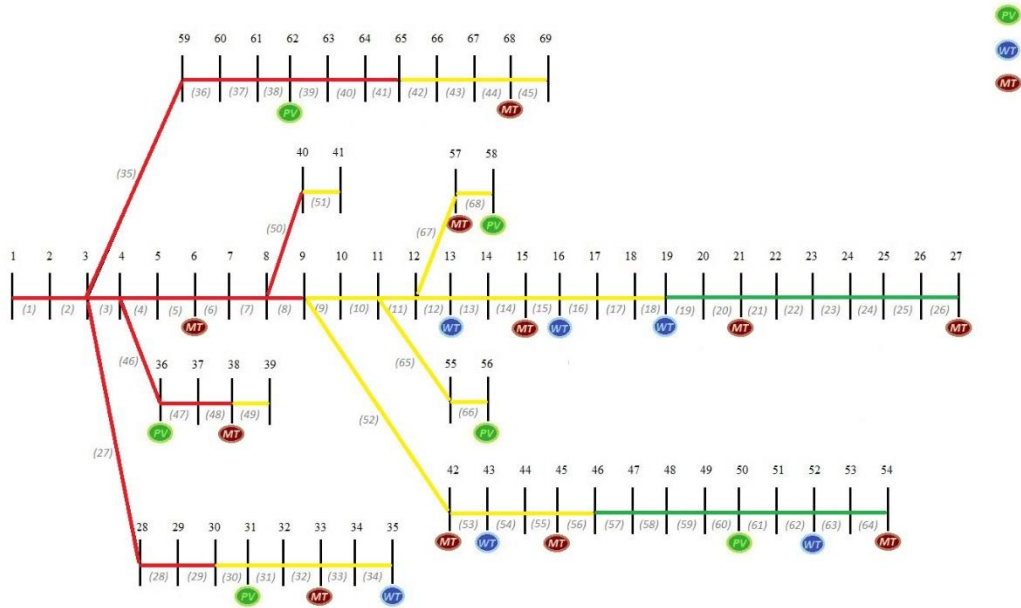
Γίνεται εμφανές ότι ο νέος διαχωρισμός που προτείνεται έχει ως κατεύθυνση την ομαδοποίηση των ευάλωτων μερών του δικτύου.



Σχήμα 7.3. Ο βέλτιστος σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη ευάλωτες περιοχές

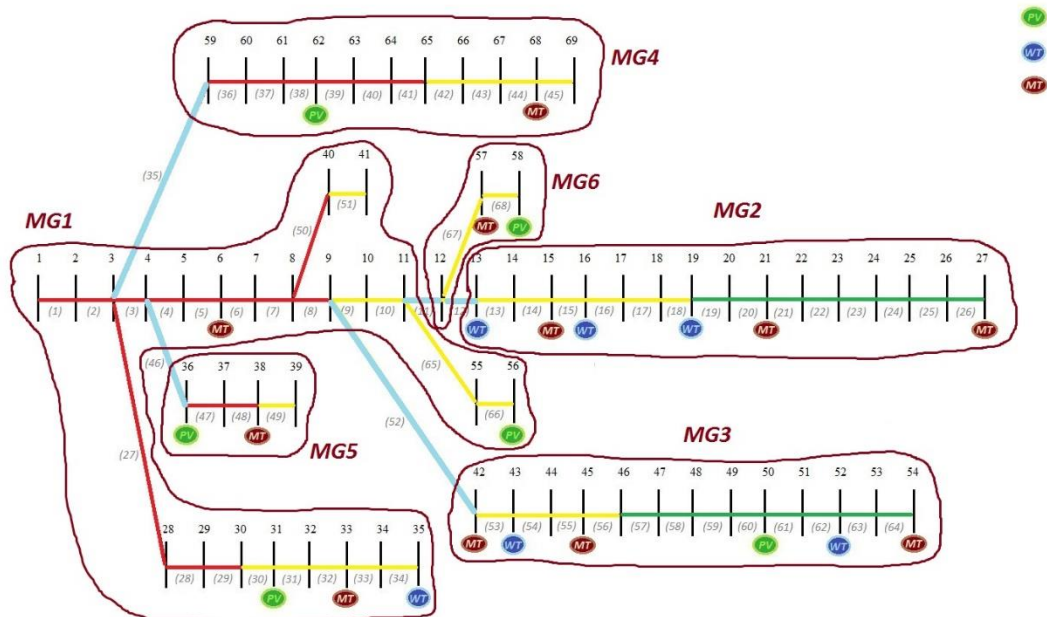
7.1.3. Σενάριο ζωνών επικινδυνότητας

Στη συνέχεια θεωρούμε σενάριο όπου το αρχικό δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες επικινδυνότητας. Πιο συγκεκριμένα χωρίζεται σε τρεις ζώνες επικινδυνότητας με πιθανότητες σφάλματος γραμμής $line_{zone1} = 0.1$, $line_{zone2} = 0.2$ και $line_{zone3} = 0.3$. Οι γραμμές (1 – 8, 27 – 29, 35 – 41, 46 – 48, 50) ανήκουν στη ζώνη επικινδυνότητας 3, οι γραμμές (9 – 18, 30 – 34, 42 – 45, 49, 51 – 56, 65 – 68) ανήκουν στη ζώνη επικινδυνότητας 2 και στη ζώνη επικινδυνότητας 1 ανήκουν οι γραμμές (19 – 26, 57 – 64). Η εικόνα του δικτύου σε αυτό το σενάριο φαίνεται στο Σχήμα 7.5.



Σχήμα 7.4. Οι ζώνες επικινδυνότητας

Σύμφωνα με τον αρχικό διαχωρισμό (10 15 35 46 52) το αποτέλεσμα του δείκτη αξιολόγησης για αυτό το σενάριο είναι $impract = 13.522$. Η πρόκληση στην οποία καλείται να απαντήσει η μέθοδος που αναπτύχθηκε είναι η εύρεση ενός σχεδιασμού μικροδικτύων που να μειώνει την επίδραση σφάλματος του σεναρίου αυτού. Από προσομοιώσεις προέκυψε ο διαχωρισμός του δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Οι διακόπτες τοποθετούνται στις θέσεις (11 12 35 46 52) και ο δείκτης αξιολόγησης του σχεδιασμού μειώνεται, $impract = 12.2129$.



Σχήμα 7.5. Ο βέλτιστος σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη ζώνες επικινδυνότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 6 προκύπτει ότι επίδραση σφάλματος στο δίκτυο μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των μικροδικτύων. Βάση του Πίνακα 6.2. που δείχνει τη βαρύτητα που έχει το φορτίο «μικροδικτύου σφάλματος» στον τελικό δείκτη αξιολόγησης γίνεται εμφανές ότι όσο μικρότερο είναι το μικροδίκτυο, τόσο μικρότερο θα είναι το εγκατεστημένο φορτίο εντός του και κατ' επέκταση θα μειώνεται και η τελική επίδραση πιθανού σφάλματος στο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλά σε αριθμό αλλά μικρά σε μέγεθος μικροδίκτυα για την ελαχιστοποίηση του δείκτη αξιολόγησης του προτεινόμενου σχεδιασμού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κλίση της καμπύλης στο Σχήμα 6.2. όπου όσο ο αριθμός των μικροδικτύων αυξάνει, η κλίση της ευθείας μειώνεται. Επιπλέον, μετά τον αριθμό των 6 μικροδικτύων η αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζει πολύ μικρή βελτίωση.

Από τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 7 παρατηρείται ότι ο σχεδιασμός για μεμονωμένη ευάλωτη περιοχή που προκύπτει στην παράγραφο 7.1.2. αν εφαρμοστεί σε ομαλές συνθήκες έχει αποτέλεσμα $impract = 2.0711$, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τον αντίκτυπο του αρχικού σχεδιασμού σε ομαλές συνθήκες. Επίσης, ο σχεδιασμός για ζώνες επικινδυνότητας που προκύπτει στην παράγραφο 7.1.3. αν εφαρμοστεί σε ομαλές συνθήκες έχει αποτέλεσμα $impract = 1.9328$, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τον δείκτη αξιολόγησης του αρχικού σχεδιασμού σε ομαλές συνθήκες.

Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις δείχνουν ότι σε συνθήκες ακραίων γεγονότων χρειάζεται ειδικός σχεδιασμός για την ενίσχυση της ελαστικότητας του δικτύου. Σημειώνεται ότι το αποτέλεσμα του δείκτη αξιολόγησης για τους σχεδιασμούς που προκύπτουν για την αύξηση της ελαστικότητας του δικτύου ($2.0711 - 1.9328$), σε ομαλές καταστάσεις είναι πολύ κοντά στον δείκτη αξιολόγησης του αρχικού σχεδιασμού $impract = 1.8289$, σε ομαλές συνθήκες. Έτσι, η εφαρμογή σχεδιασμού σε περίπτωση ακραίων φαινομένων παρουσιάζει καλή συμπεριφορά και σε ομαλές συνθήκες και μπορεί να αποτελέσει τον μόνιμο στρατηγικό σχεδιασμό του δικτύου.

Τέλος, ο σχεδιασμός που προέκυψε από το σενάριο της ευάλωτης περιοχής στην παράγραφο 7.1.2. παρουσιάζει επίδραση $impract = 13.602$ αν χρησιμοποιηθεί ως σχεδιασμός στο σενάριο ζωνών επικινδυνότητας της παραγράφου 7.1.3. Ο δείκτης αξιολόγησης σε αυτήν την περίπτωση είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίζεται για τον βέλτιστο σχεδιασμό που προκύπτει από τις ζώνες επικινδυνότητας στην παράγραφο 7.1.3.

Αυτό δείχνει ότι ο σχεδιασμός που προκύπτει κάθε φορά εξαρτάται από τις συνθήκες που κυριαρχούν στην περιοχή του δικτύου και δεν υπάρχει ένας μοναδικός βέλτιστος σχεδιασμός μικροδικτύων.

Μέσω των παραπάνω συμπερασμάτων γίνεται εμφανές ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός του δικτύου μπορεί να ελαχιστοποιήσει την επίδραση τυχόν σφάλματος και κατ' επέκταση να μειώσει την αποκοπή φορτίου. Επίσης μπορεί να αυξήσει το επίπεδο ελαστικότητας του δικτύου καλύπτοντας ένα μεγάλο ποσοστό της ζήτησης σε καταστάσεις ακραίων φαινομένων, ελαχιστοποιώντας την έκταση ενός πιθανού σφάλματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Δεδομένα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στην αντικειμενική συνάρτηση με σκοπό να δοκιμαστεί η μέθοδος μέσω προσομοιώσεων.

1.1. Το δίκτυο

Η τοπολογία και η αντιστοίχιση ζυγών και γραμμών του δικτύου διανομής 69 ζυγών παρουσιάζεται στον Πίνακα Π.1.

Πίνακας Π.1. Η αντιστοίχιση μεταξύ ζυγών και γραμμών.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης
1	1	2	35	3	59
2	2	3	36	59	60
3	3	4	37	60	61
4	4	5	38	61	62
5	5	6	39	62	63
6	6	7	40	63	64
7	7	8	41	64	65
8	8	9	42	65	66
9	9	10	43	66	67
10	10	11	44	67	68
11	11	12	45	68	69
12	12	13	46	4	36
13	13	14	47	36	37
14	14	15	48	37	38
15	15	16	49	38	39
16	16	17	50	8	40
17	17	18	51	40	41
18	18	19	52	9	42
19	19	20	53	42	43
20	20	21	54	43	44
21	21	22	55	44	45
22	22	23	56	45	46
23	23	24	57	46	47
24	24	25	58	47	48
25	25	26	59	48	49

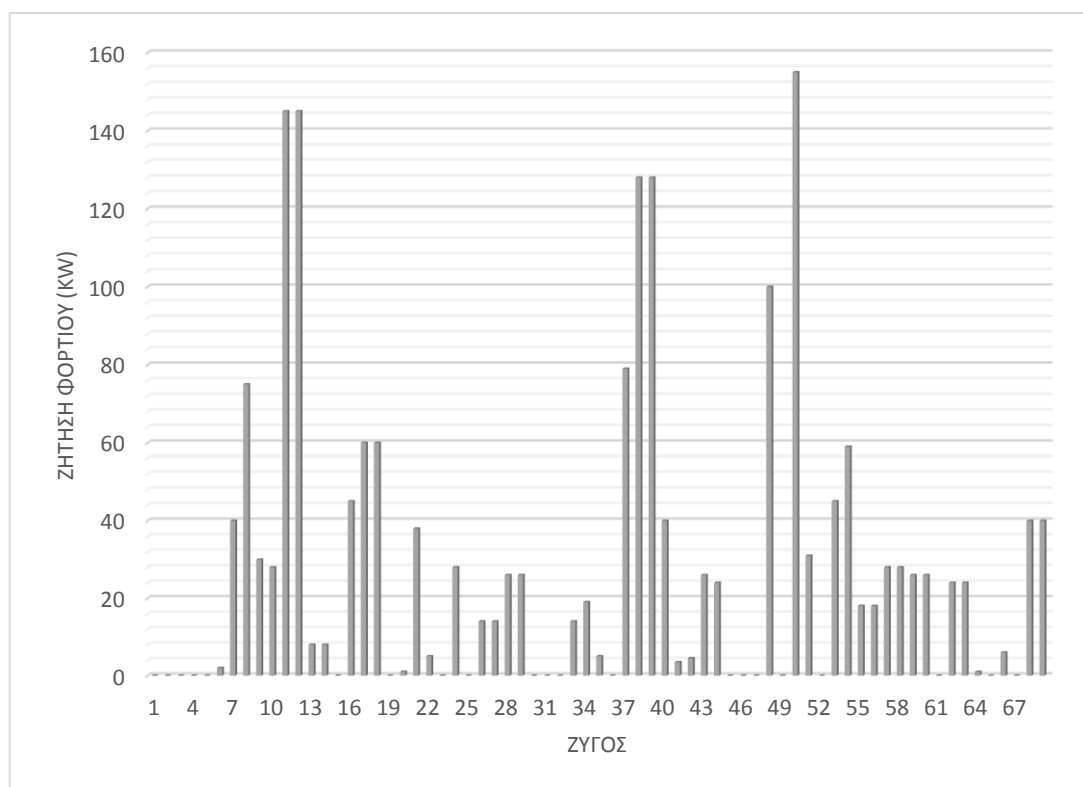
Πίνακας Π.1. Η αντιστοίχιση μεταξύ ζυγών και γραμμών. (συνέχεια)

<i>Γραμμή</i>	<i>Ζυγός αναχώρησης</i>	<i>Ζυγός άφιξης</i>
26	26	27
27	3	28
28	28	29
29	29	30
30	30	31
31	31	32
32	32	33
33	33	34
34	34	35

<i>Γραμμή</i>	<i>Ζυγός αναχώρησης</i>	<i>Ζυγός άφιξης</i>
60	49	50
61	50	51
62	51	52
63	52	53
64	53	54
65	11	55
66	55	56
67	12	57
68	57	58

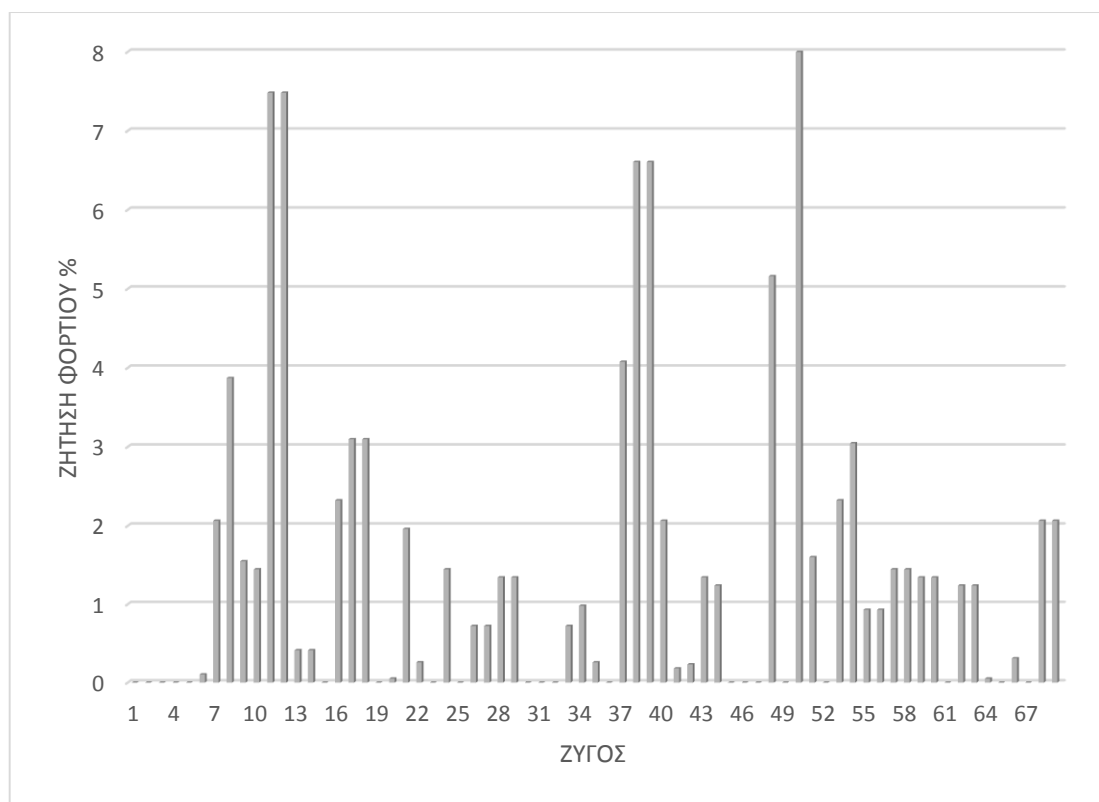
1.2. Δεδομένα Δικτύου

Το φορτίο του δικτύου ανά ζυγό παρουσιάζεται στο *Σχήμα Π.1.*



Σχήμα Π.1. Η ζήτηση φορτίου ανά ζυγό

Στο Σχήμα Π.2. παρουσιάζεται η ζήτηση φορτίου ανά ζυγό ως ποσοστό της μέγιστης συνολικής ζήτησης φορτίου του δικτύου.



Σχήμα Π.2. Η ζήτηση φορτίου ανά ζυγό ως ποσοστό του συνολικού φορτίου.

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή που είναι εγκατεστημένη στο Δίκτυο Διανομής 69 ζυγών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2. ανά τύπο και ζυγό [11]:

Πίνακας Π.2. Οι παραγωγές ανά τύπο και ζυγό

Τύπος Μονάδας ΔΠ	Ζυγός	Ονομαστική Ισχύς (kW)
Αιολικά	13 16 19 35 43 52	50 25 25 50 50 50
Φωτοβολταϊκά	30 36 50 56 58 62	25 25 25 25 25 25
Μικροτουρμπίνες	6 15 21 27 33 38 42 45 54 57 68	25 50 25 50 75 50 50 50 75 75 75

Η Διεσπαρμένη Παραγωγή και το μέγιστο Φορτίο του Δικτύου Διανομής 69 ζυγών παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα Π.3. ανά ζυγό και τύπο παραγωγής [11].

Πίνακας Π.3. Τα ονομαστικά εγκατεστημένα μεγέθη ανά ζυγό

Ζυγός	Φορτίο (kW)	Φ/Β (kW)	Α/Γ (kW)	Μ/Τ (kW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	2	0	0	25
7	40	0	0	0
8	75	0	0	0
9	30	0	0	0
10	28	0	0	0
11	145	0	0	0
12	145	0	0	0
13	8	0	50	0
14	8	0	0	0
15	0	0	0	50
16	45	0	25	0
17	60	0	0	0
18	60	0	0	0
19	0	0	25	0
20	1	0	0	0
21	38	0	0	25
22	5	0	0	0
23	0	0	0	0
24	28	0	0	0
25	0	0	0	0
26	14	0	0	0
27	14	0	0	50
28	26	0	0	0
29	26	0	0	0
30	0	25	0	0
31	0	0	0	0
32	0	0	0	0
33	14	0	0	75
34	19	0	0	0
35	5	0	50	0

Ζυγός	Φορτίο (kW)	Φ/Β (kW)	Α/Γ (kW)	Μ/Τ (kW)
36	0	25	0	0
37	79	0	0	0
38	128	0	0	50
39	128	0	0	0
40	40	0	0	0
41	3,5	0	0	0
42	4,5	0	0	50
43	26	0	50	0
44	24	0	0	0
45	0	0	0	50
46	0	0	0	0
47	0	0	0	0
48	100	0	0	0
49	0	0	0	0
50	155	25	0	0
51	31	0	0	0
52	0	0	50	0
53	45	0	0	0
54	59	0	0	75
55	18	0	0	0
56	18	25	0	0
57	28	0	0	75
58	28	25	0	0
59	26	0	0	0
60	26	0	0	0
61	0	0	0	0
62	24	25	0	0
63	24	0	0	0
64	1	0	0	0
65	0	0	0	0
66	6	0	0	0
67	0	0	0	0
68	40	0	0	75
69	40	0	0	0

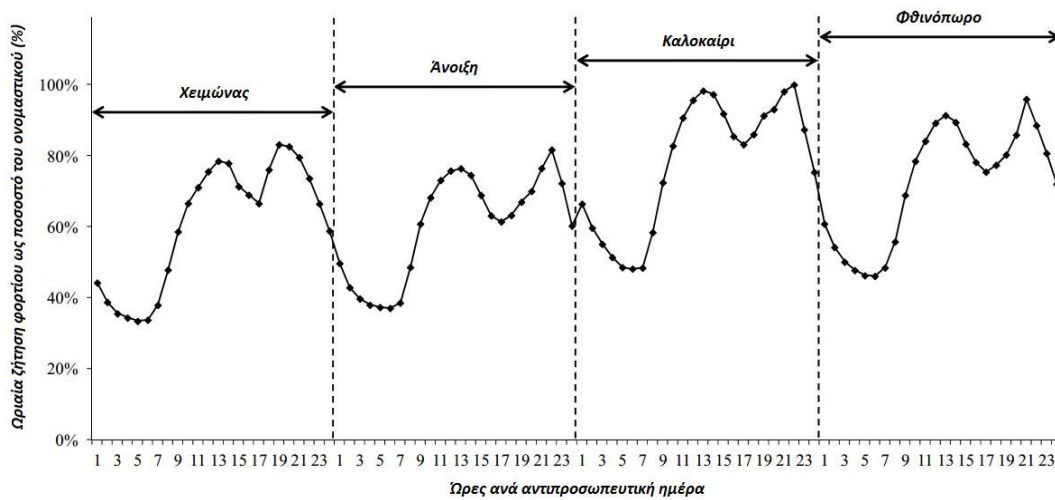
1.3. Η καμπύλη Ζήτησης Φορτίου

Η ζήτηση φορτίου ως ποσοστό της συνολικής μέγιστης ζήτησης φορτίου παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα Π.4. για κάθε ώρα κάθε αντιπροσωπευτικής ημέρας του έτους [16].

Πίνακας Π.4. Η ζήτηση φορτίου για κάθε αντιπροσωπευτική ώρα του έτους ως ποσοστό του ονομαστικού

<u>ΧΕΙΜΩΝΑΣ</u>		<u>ΑΝΟΙΞΗ</u>		<u>ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ</u>		<u>ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ</u>	
ώρα	Ζήτηση Φορτίου %	ώρα	Ζήτηση Φορτίου %	ώρα	Ζήτηση Φορτίου %	ώρα	Ζήτηση Φορτίου%
1	44	1	49	1	66	1	60
2	39	2	42.5	2	59	2	53.5
3	36	3	39	3	55	3	49.5
4	35	4	38	4	50	4	47
5	33	5	37.5	5	47.5	5	45
6	34	6	37	6	47.5	6	45
7	36	7	38.5	7	47.5	7	48
8	47	8	47.5	8	58	8	55
9	58	9	60	9	72.5	9	67.5
10	66	10	67.5	10	82.5	10	78
11	71	11	72.5	11	91	11	84
12	75	12	76	12	96	12	89
13	78	13	77	13	98	13	92
14	78	14	74	14	97	14	89
15	71	15	68	15	92	15	83
16	68	16	63	16	85	16	77.5
17	66	17	61	17	82.5	17	75
18	71	18	63	18	86	18	77
19	83	19	67	19	91.5	19	80
20	83	20	69	20	93	20	85.5
21	79	21	76	21	95	21	96
22	73	22	82	22	100	22	88
23	66	23	72	23	87.5	23	81
24	68	24	60	24	75	24	72

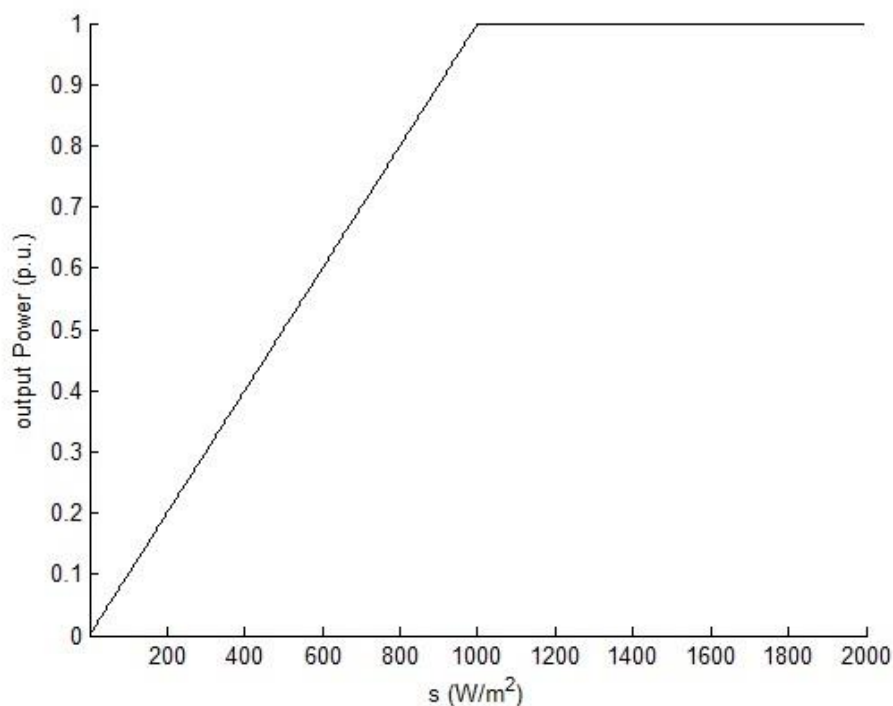
Η καμπύλη ζήτησης φορτίου που προκύπτει από τα παραπάνω ποσοστά παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.3. [16].



Σχήμα Π.3. Η ετήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου

1.4. Παραγωγή Φωτοβολταϊκών

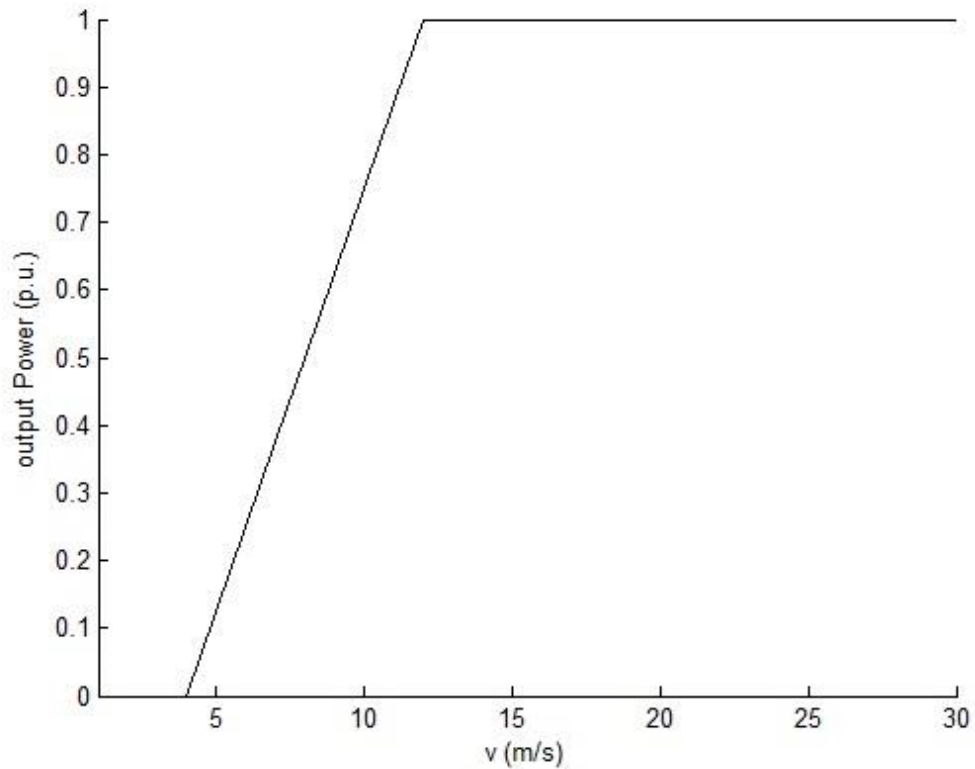
Η Φωτοβολταϊκή Παραγωγή που είναι εγκατεστημένη στο δίκτυο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι αποτελείται από Φ/Β στοιχεία τα οποία παράγουν την ονομαστική τους ισχύ σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $s = 1 \text{ kW/m}^2$. Η απλοποιημένη καμπύλη ισχύος των Φ/Β σύμφωνα με τον τύπο (2.20) παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.4.



Σχήμα Π.4. Η απλοποιημένη καμπύλη ισχύος των Φ/Β

1.5. Παραγωγή Αιολικών

Η αιολική παραγωγή που είναι εγκατεστημένη στο δίκτυο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι αποτελείται από ανεμογεννήτριες με ταχύτητα ονομαστικής ισχύς $v_r = 12 \text{ m/s}$, ταχύτητα ένταξης $v_{ci} = 4 \text{ m/s}$ και ταχύτητα απένταξη $v_{co} = 25 \text{ m/s}$. Η απλοποιημένη καμπύλη ισχύος σύμφωνα με τον τύπο (2.11) παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.5.



Σχήμα Π.5. Η απλοποιημένη καμπύλη παραγωγής των Α/Γ

2. Υπολογισμός πιθανοτήτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας για αριθμό ενδεχομένων μεγαλύτερο του δύο. Χρησιμοποιείται στην εύρεση της πιθανότητας «κάποιο μικροδίκτυο να βγει εκτός λειτουργίας» και ως πιθανότητας ενδεχομένου θεωρείται η πιθανότητα σφάλματος της γραμμής.

Η πιθανότητα να συμβεί ένα από τα δύο ενδεχόμενα A ή B είναι η παρακάτω:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (\text{Π. 1})$$

Για να υπολογιστεί η αντίστοιχη πιθανότητα για περισσότερα από δύο ενδεχόμενα εφαρμόζεται ο παραπάνω τύπος αναδρομικά. Πιο αναλυτικά υπολογίζεται παρακάτω, ως παράδειγμα η περίπτωση υπολογισμού της πιθανότητας τριών και τεσσάρων ενδεχομένων ενδεχομένων.

- **Υπολογισμός της πιθανότητας τριών ενδεχομένων**

Τα τρία ενδεχόμενα είναι τα A, B, C και ζητείται η πιθανότητα $P(A \cup B \cup C)$.

Θέτω: $P(D) = P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ και εφαρμόζω τον τύπο (Π. 1)

Οπότε προκύπτει η πιθανότητα: $P(D \cup C) = P(D) + P(C) - P(D \cap C)$

Εκτελούνται οι απαραίτητες πράξεις:

$$P[(A \cup B) \cup C] = P(A \cup B) + P(C) - P[(A \cup B) \cap C]$$

$$P[(A \cup B) \cup C] = P(A) + P(B) - P(A \cap B) + P(C) - [P(A) + P(B) - P(A \cap B)] \cdot P(C)$$

$$P[(A \cup B) \cup C] = P(A) + P(B) - P(A \cap B) + P(C) - [P(A)P(C) + P(B)P(C) - P(A \cap B)P(C)]$$

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) + P(C) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C)$$

Και προκύπτει ο τύπος της αντίστοιχης πιθανότητας:

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C)$$

- *Υπολογισμός της πιθανότητας τεσσάρων ενδεχομένων*

Τα τέσσερα ενδεχόμενα είναι τα A, B, C, E

Θέτω: $P(Z) = P(AUBUC)$ και εφαρμόζω τον τύπο (Π. 1)

Οπότε προκύπτει η πιθανότητα: $P(ZUE) = P(Z) + P(E) - P(Z \cap E)$

Εκτελούνται οι απαραίτητες πράξεις:

$$P(AUBUCUE) = P(AUBUC) + P(E) - P[(AUBUC) \cap E]$$

$$\begin{aligned} P(AUBUCUE) &= P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) \\ &+ P(A)P(B)P(C) + P(E) - [P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) \\ &- P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C)] * P(E) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(AUBUCUE) &= P(A) + P(B) + P(C) + P(E) - P(A)P(B) - P(A)P(C) \\ &- P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C) - [P(A)P(E) + P(B)P(E) \\ &+ P(C)P(E) - P(A)P(B)P(E) - P(A)P(C)P(E) - P(B)P(C)P(E) \\ &+ P(A)P(B)P(C)P(E)] \end{aligned}$$

Και προκύπτει ο τύπος της αντίστοιχης πιθανότητας:

$$\begin{aligned} P(AUBUCUE) &= P(A) + P(B) + P(C) + P(E) - P(A)P(B) - P(A)P(C) \\ &- P(B)P(C) - P(A)P(E) - P(B)P(E) - P(C)P(E) \\ &+ P(A)P(B)P(C) + P(A)P(B)P(E) + P(A)P(C)P(E) \\ &+ P(B)P(C)P(E) - P(A)P(B)P(C)P(E) \end{aligned}$$

Βιβλιογραφία

- [1] Β.Παπαδιάς, "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας (Τόμος 1)", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1985.
- [2] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.
- [3] Βατίκαλος Γ. Άγγελος, "Βραχυπρόθεσμος Υδροθερμικός Προγραμματισμός και Μελέτη μη Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με Μεγάλη Διείσδυση ΑΠΕ και Αντλησιοταμίευση Χωρίς Άντληση από το Δίκτυο σε Συνθήκες Βέλτιστης Ροής Φορτίου", Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Αθήνα, Οκτώβριος 2009.
- [4] Χριστίνα Ν. Παπαδημητρίου, "Έλεγχος Κατανεμημένης Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας για ένταξή της σε Μικροδίκτυα", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούνιος 2012.
- [5] Δημήτρης Ν. Τράκας, "Επιπτώσεις της Αιολικής Διείσδυσης στην Ασφάλεια και Αξιοπιστία Λειτουργίας Απομονωμένων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα, Οκτώβριος 2009.
- [6] Σταύρος Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", Σημειώσεις Παραδόσεων, Αθήνα 2008.
- [7] S. A. Arefifar, Y. A. R. I. Mohamed and T. H. M. El-Fouly, "Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1491-1502, Sept. 2012.
- [8] Z. Liu, F. Wen and G. Ledwich, "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generators in Distribution Systems Considering Uncertainties," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2541-2551, Oct. 2011.
- [9] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος "Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.
- [10] Βασίλειος Α. Ευαγγελόπουλος, "Βέλτιστος Σχεδιασμός Διεσπαρμένης Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής λαμβάνοντας υπόψη Αβεβαιότητες", Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα, Μάρτιος 2013.
- [11] S. A. Arefifar, Y. A. R. I. Mohamed and T. H. M. EL-Fouly, "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1567-1575, Sept. 2013.
- [12] Γεώργιος Καραγιάννης, Πέτρος Α. Μαραγκός, "Βασικές Αρχές Σημάτων & Συστημάτων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2011.
- [13] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1997.
- [14] Ευστράτιος Φ. Γεωργόπουλος, Σπυρίδων Δ. Λυκοθανάσης, "Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους", Σημειώσεις Εργαστηρίου Αναγνώρισης Προτύπων, Πάτρα, 1999.
- [15] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360-370, Feb. 2010.

- [16] E.E. Sfikas, Y.A. Katsigiannis, P.S. Georgilakis, "Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 67, May 2015.
- [17] A. Kwasinski, V. Krishnamurthy, J. Song and R. Sharma, "Availability Evaluation of Micro-Grids for Resistant Power Supply During Natural Disasters," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2007-2018, Dec. 2012
- [18] K. Schneider; F. Tuffner; M. Elizondo; C. C. Liu; Y. Xu; D. Ton, "Evaluating the Feasibility to Use Microgrids as a Resiliency Resource," in *IEEE Transactions on Smart Grid* , vol.PP, no.99, pp.1-1
- [19] J. Hurtt and L. Mili, "Residential microgrid model for disaster recovery operations," *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, Grenoble, 2013, pp. 1-6.