



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΚΟΣΜΑ

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΚΟΣΜΑ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Ιουλίου 2018.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης

Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

.....

Στέφανος Α.Κοσμά

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

Copyright © Στέφανος Α.Κοσμά, 2018
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες απειλές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ικανές να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στο σύστημα, με πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας του για μεγάλο χρονικό διάστημα, με σημαντικές επιπτώσεις τόσο σε οικονομικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο. Ως φυσικές καταστροφές χαρακτηρίζονται τα γεωλογικά και μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως τα ακραία καιρικά γεγονότα, οι πλημμύρες, οι σεισμοί και οι πυρκαγιές. Ως εκ τούτου, απαιτείται η ενίσχυση της ανθεκτικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να αντιμετωπίζει γεγονότα μικρής πιθανότητας, αλλά με μεγάλο αντίκτυπο (high-impact low-probability events), να ανακάμπτει ταχέως μετά την εμφάνιση τέτοιων γεγονότων, καθώς και να προσαρμόζει την λειτουργία του και τη δομή του, ώστε να αντιμετωπίσει και να μετριάσει τις επιπτώσεις παρόμοιων γεγονότων στο μέλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας ενός μικροδικτύου έναντι πλημμύρας, εφαρμόζοντας προληπτικά μέτρα, με στόχο την ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους. Τα προληπτικά μέτρα εφαρμόζονται πριν από την εκδήλωση της πλημμύρας και στοχεύουν στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του μικροδικτύου εντός του επόμενου εικοσιτετράωρου. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στο πρότυπο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα της.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση της βέλτιστης λειτουργίας του μικροδικτύου με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του. Η επίλυση της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του πακέτου YALMIP, όπου αποτελεί μία εργαλειοθήκη μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB. Ως προληπτικά μέτρα εξετάστηκαν η ελεγχόμενη δημιουργία νησίδων εντός του μικροδικτύου, θέτοντας εκτός λειτουργίας τις κρίσιμες γραμμές και κατανέμοντας κατάλληλα την παραγωγή των ελεγχόμενων μονάδων. Ακόμη, μελετάται η συνεισφορά της αλλαγής τοπολογίας. Ως κρίσιμες γραμμές χαρακτηρίζονται οι γραμμές με πιθανότητα κατάρρευσης άνω ενός προκαθορισμένου ορίου. Οι πιθανότητες κατάρρευσης των γραμμών λαμβάνονται από τις καμπύλες ευθραυστότητας. Τα προληπτικά μέτρα πρέπει να εφαρμόζονται πριν την εκδήλωση

της πλημμύρας, και επομένως απαιτείται η ταχύτερη επίλυση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό, γραμμικοποιούνται οι μη γραμμικοί περιορισμοί του προβλήματος, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του.

Στη συνέχεια, η αποδοτικότητα της μεθόδου εξετάστηκε με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την συνεισφορά της προτεινόμενης μεθόδου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του μικροδικτύου έναντι των πλημμυρών. Επίσης, πραγματοποιείται ανάλυση για την επιλογή της κατάλληλης γραμμικής προσέγγισης με κριτήρια το χρόνο και την ακρίβεια επίλυσης του προβλήματος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Φυσικές καταστροφές, πλημμύρες, μικροδίκτυο, ανθεκτικότητα, ελαχιστοποίηση κόστους, σχηματισμός ελεγχόμενων νησίδων, μελέτη ευαισθησίας, ακτινική τοπολογία, γραμμικοποίηση

ABSTRACT

Natural disasters are one of the biggest threats to power systems. They are capable of causing significant damage to the system, with the possibility of shutdown for a long time, with significant economic and social impacts. Natural disasters are geological and meteorological phenomena such as extreme weather events, floods, earthquakes and wildfires. Therefore, it is necessary to enhance the resilience of the electricity system to deal with high-impact low-probability events, to recover quickly after the occurrence of such events, and to adapt its function and structure to deal and mitigate the effects of similar events in the future.

This diploma thesis aims at enhancing the resilience of a microgrid in the case of an upcoming flood by implementing proactive measures with main purpose the minimization of load shedding by considering the most economical way. Proactive measures are implemented before the appearance of the flood and they manage to enhance the resilience of the microgrid within the next 24 hours. The proposed method took place on the standard IEEE 33-bus test system, in order to evaluate its efficiency.

The first part is the mathematical modeling of the optimal operation of the microgrid, which aims at enhancing its resilience. The resolution carried out with the help of YALMIP, where it is a modeling and optimization toolbox and can be used in a MATLAB environment. Controlled islanding is examined as a measure by disabling some of the vulnerable lines of the microgrid and distributing efficiently the production of the controlled units and the configuration of the topology. Elements are defined as vulnerable if their probability of failure surpasses a predetermined vulnerability threshold. Probabilities of failure are taken from the fragility curves. Proactive measures must be implemented before the flood arrives, so a quick resolution of the problem is required. As a result, linearization methods are applied to the nonlinear constraints to reduce the complexity and run time of the resolution.

Consequently, the efficiency of the method has examined by applying the Monte Carlo method. Results indicate the contribution of the proposed method in the enhancement of the

resilience of the microgrid. In addition, a study is being made to select the appropriate linear approach, taking in consideration the run time and the accuracy of the resolution of the problem.

KEY WORDS:

Natural disasters, floods, microgrid, resilience, cost minimization, controlled islanding, vulnerability study, radial topology, linearization

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 στα πλαίσια του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η ολοκλήρωσή της είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας και της συμπόρευσης μου, με διάφορους ανθρώπους οι οποίοι με βοήθησαν καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνηση της και για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκαρδίως αυτά τα άτομα.

Αρχικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική εργασία με τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος κ. Δημήτρη Τράκα για τη βοήθεια, την υπομονή του και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε καθοδηγώντας με σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στους φίλους μου, για την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου οι οποίοι δεν σταμάτησαν να πιστεύουν σε μένα.

Στέφανος Κοσμά
Αθήνα, Ιούλιος 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	19
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	19
1.1 Εισαγωγή.....	19
1.2 Φυσικές καταστροφές και επιπτώσεις τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	21
1.2.1 Στοιχεία από επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	23
1.3 Καταστροφικές συνέπειες πλημμύρας.....	26
1.3.1 Ιστορική αναδρομή στην πλημμύρα της Louisiana το 2016.....	27
1.4 Αναγκαιότητα ανθεκτικότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	30
1.4.1 Καμπύλη ανθεκτικότητας	31
1.5 Μέτρα ενίσχυσης και ανθεκτικότητας	33
1.5.1 Λειτουργικά μέτρα.....	35
1.5.2 Μέτρα ενδυνάμωσης.....	37
1.6 Μικροδίκτυα	38
1.7 Ευφυή δίκτυα	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	43
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	43
2.1 Διατύπωση προβλήματος.....	43
2.1.1 Πρόβλημα βελτιστοποίησης	44
2.1.2 Βέλτιστη ροή ισχύος δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	46
2.1.3 ΥALMIP	46
2.2 Κατάλογος συμβόλων	48
2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση	51
2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση.....	51
2.3.2 Περιορισμοί.....	52
2.4 Δεδομένα δικτύου και προσομοίωσης	57
2.5 Γραμμικοποίηση μη γραμμικών περιορισμών	61
2.5.1 Γραμμικοποίηση εξισώσεων ροής ισχύος.....	61
2.5.2 Γραμμικοποίηση εξίσωσης $P^2 + Q^2 < S_{\max}^2$	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	67
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ	67
3.1 Εισαγωγή.....	67
3.2 Μοντελοποίηση επίδρασης πλημμύρας στο μικροδίκτυο.....	68
3.3 Λειτουργία μικροδικτύου χωρίς την εφαρμογή προληπτικών μέτρων	70
3.4 Σχηματισμός ελεγχόμενων νησίδων	72
3.5 Μελέτη ευαισθησίας	78
3.5.1 Όριο ευθραυστότητας	78
3.5.2 Προσομοίωση Monte Carlo	83
3.6 Συνεισφορά αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του ...	88
3.6.1 Ακτινικό δίκτυο διανομής.....	88
3.6.2 Επαναδιαμόρφωση δικτύου διανομής για αποκατάσταση λειτουργίας.....	89
3.6.3 Μελέτη και διατήρηση ακτινικής τοπολογίας του μικροδικτύου	90
3.7 Πολυπλοκότητα και ακρίβεια μεθόδου γραμμικοποίησης	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	103
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
4.1 Ανακεφαλαίωση.....	103
4.2 Συμβολή και συμπεράσματα.....	104
4.3 Προοπτική και μελλοντικές επεκτάσεις.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	Αριθμός φυσικών καταστροφών και πλημμύρων κατά την περίοδο 1980 -2016 στις ΗΠΑ	21
Σχήμα 2	Διακοπές ηλεκτρικής ενέργειας κατά την περίοδο 1992 - 2012 στις ΗΠΑ.....	25
Σχήμα 3	Καμπύλη ανθεκτικότητας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	31
Σχήμα 4	Σύγκριση αποτελεσματικότητας και κόστους των λειτουργικών μέτρων και των μέτρων ενδυνάμωσης.....	34
Σχήμα 5	Μέτρα ενδυνάμωσης και λειτουργικά μέτρα για την ενίσχυση ανθεκτικότητας του δικτύου ...	35
Σχήμα 6	Παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ του μικροδικτύου	58
Σχήμα 7	Μονογραμμικό διάγραμμα μικροδικτύου 33 ζυγών της IEEE.....	59
Σχήμα 8	Τιμή ανταλλαγής ενέργειας με το άνατι δίκτυο ανά ώρα.....	61
Σχήμα 9	Γραμμική προσέγγιση του $\cos(\theta_i-\theta_j)$ χωρίζοντάς το σε ίσα τμήματα δημιουργώντας επαπτόμενες ευθείες σε κάθε ένα από αυτά	62
Σχήμα 10	Γραμμική προσέγγιση της εξίσωσης $P^2 + Q^2 < S_{\max}^2$, χωρίζοντάς τον κύκλο σε ίσα τμήματα ως προς τον x άξονα δημιουργώντας ορθογώνια που η επιλογή του καθενός ορίζει τα όρια και την κατάλληλη τιμή της ενεργού και άεργου ισχύος.....	64
Σχήμα 11	Γενική μορφή καμπύλης ευθραυστότητας σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου	69
Σχήμα 12	Ακτινικό δίκτυο διανομής με τον κόμβο 1 να είναι το σύστημα τροφοδοσίας του συστήματος	89
Σχήμα 13	Γράφος παραδείγματος Αλγόριθμου Fleury.....	92
Σχήμα 14	(i) Αρχική μη ακτινική τοπολογία δικτύου 34 γραμμών και 33 ζυγών, (ii) Ακτινική τοπολογία δικτύου με την αποκοπή των γραμμών 12-13 και 2-19	95
Σχήμα 15	Καμπύλη χρόνου εκτέλεσης συναρτήσει αριθμού τμημάτων για τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης του $\cos(\theta_i-\theta_j)$	99

Σχήμα 16 Καμπύλη χρόνου εκτέλεσης συναρτήσει αριθμού τμημάτων για τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης των τετραγωνικών περιορισμών 101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Αιτίες που προκάλεσαν τις μεγαλύτερες διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις ΗΠΑ	24
Πίνακας 2	Τοποθεσία και ονομαστική ικανότητα στοιχείων του δικτύου	57
Πίνακας 3	Τεχνικά χαρακτηριστικά ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής	60
Πίνακας 4	Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδων αποθήκευσης.....	60
Πίνακας 5	Πιθανότητα κατάρρευσης ευάλωτων γραμμών σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας	70
Πίνακας 6	Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης στην αρχική λειτουργία του δικτύου.....	72
Πίνακας 7	Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης για την πρώτη περίπτωση	75
Πίνακας 8	Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης για την δεύτερη περίπτωση.....	77
Πίνακας 9	Οι ευάλωτες γραμμές του μικροδικτύου τίθενται εκτός λειτουργίας εάν η πιθανότητα κατάρρευσης ξεπερνάει την τιμή του ορίου ευθραυστότητας	80
Πίνακας 10	Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 3	81
Πίνακας 11	Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 4	82
Πίνακας 12	Πίνακας αποτελεσμάτων της μεθόδου Monte Carlo	85
Πίνακας 13	Τελικός χρονικός προγραμματισμός ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης για κάθε τιμή ορίου.....	87
Πίνακας 14	Πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση μετατροπής σε ακτινικό δίκτυο	96
Πίνακας 15	Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 7	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1	Πλημμύρα στο Τέξας, η οποία προκάλεσε 218 000 αποκοπές ηλεκτρικού ρεύματος με 57683 κατοίκους να μην έχουν καθόλου ηλεκτρική ενέργεια [3]	22
Εικόνα 2	Καταστροφή ηλεκτρικών πυλώνων και γραμμών εξαιτίας ακραίων καιρικών φαινομένων	23
Εικόνα 3	Βήματα και χρονοδιάγραμμα ανταπόκρισης ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υπό την επίδραση ακραίου καιρικού φαινομένου	26
Εικόνα 4	Οι καταστροφικές συνέπειες της πλημμύρας στην περιοχή της Louisiana προκάλεσαν ζημιές σε 146 000 σπίτια.....	28
Εικόνα 5	20 000 κάτοικοι της περιοχής αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους	28
Εικόνα 6	Τα τρίγωνα συμβολίζουν τις διακοπές ενέργειας για την ημέρα Παρασκευή 12 Αυγούστου. Όπως παρατηρείται, οι περισσότερες διακοπές έγιναν κοντά σε ποταμό, αφού αυτός είχε υπερχειλίσει λόγω της έντονης βροχόπτωσης.....	29
Εικόνα 7	Μικροδίκτυο με πηγές ισχύος, φορτία και εξοπλισμό διαχείρισης και ελέγχου	39

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Εισαγωγή

Ο ρυθμός βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου σημειώνει μεγάλη ανάπτυξη στη σύγχρονη εποχή με νέες ανακαλύψεις και βελτιώσεις καθημερινά. Μεγάλο παράγοντα σε αυτή τη βελτίωση αποτελούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου με την χρήση, διατήρηση και βελτίωσή τους απολαμβάνουμε μια ανεπτυγμένη κοινωνία, με διευκολύνσεις σε κάθε τομέα της καθημερινότητάς μας. Αποτελούν θεμέλιο πολιτισμού για κάθε χώρα αφού χάρις στο ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε σπίτια, νοσοκομεία, σχολεία και γενικότερα σε οποιαδήποτε σύγχρονη υποδομή οδηγώντας την κοινωνία μας μακριά από μεσαιωνικές καταστάσεις. Έτσι αντιλαμβανόμαστε πως η δημιουργία ενός αποτελεσματικού, αξιόπιστου, ασφαλούς και ανθεκτικού ηλεκτρικού συστήματος είναι ιδιαίτερος σημαντική την σήμερα ημέρα, για αυτό με τα κατάλληλα μέσα πρέπει να είμαστε έτοιμοι να αντιμετωπίσουμε όλα τα εσωτερικά και εξωτερικά αίτια που μπορούν να προκαλέσουν διακοπές στην λειτουργία του.

Η ανθεκτικότητα και αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να μην αντιμετωπίζουμε προβλήματα διακοπής τους. Συχνά η έννοια της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συγχέονται. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ τους, συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Η αξιοπιστία αναφέρεται στην εξυπηρέτηση του φορτίου με αποδεκτή ποιότητα υπό κανονικές συνθήκες, καθώς και την ταχεία αποκατάσταση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έπειτα από έκθεση του σε ενδογενείς διαταραχές. Η αξιοπιστία λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα και τις επιπτώσεις των μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας των στοιχείων του συστήματος. Η ανθεκτικότητα αναφέρεται στη λειτουργία του ΣΗΕ με αποδεκτή ποιότητα εξυπηρέτησης του φορτίου, στην ελάχιστη αποκοπή

φορτίου και στην ταχεία αποκατάσταση της λειτουργιάς του συστήματος κατά τη διάρκεια και έπειτα από έκθεση του σε εξωγενείς διαταραχές. Η ανθεκτικότητα περιγράφει την αντίδραση του συστήματος έναντι εξωγενών διαταραχών, όπως οι φυσικές καταστροφές και οι κακόβουλες επιθέσεις με μεγάλη επίδραση στο σύστημα.

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η ανθεκτικότητα μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει γεγονότα μικρής πιθανότητας, αλλά με μεγάλο αντίκτυπο (high-impact low-probability events), να ανακάμπτει ταχέως μετά την εμφάνιση τέτοιων γεγονότων, καθώς και να προσαρμόζει την λειτουργία του και τη δομή του, ώστε να αντιμετωπίσει και να μετριάσει τις επιπτώσεις παρόμοιων γεγονότων στο μέλλον [1]. Η προσαρμοστικότητα του συστήματος αναφέρεται στον μακροχρόνιο προγραμματισμό και στη λήψη λειτουργικών μέτρων με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του συστήματος έναντι απρόβλεπτων εξωγενών παραγόντων.

Μία από τις μεγαλύτερες εξωγενείς απειλές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι φυσικές καταστροφές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στο δίκτυο με αποτέλεσμα τη διακοπή της λειτουργίας του για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ το κόστος αποκατάστασης των βλαβών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές δαπάνες. Στις φυσικές καταστροφές συγκαταλέγονται τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι σεισμοί, οι ανεμοστρόβιλοι, οι κεραυνοί, οι πλημμύρες κτλ.

Οι πλημμύρες αποτελούν μια από τις πιο επικίνδυνες φυσικές καταστροφές, έχοντας οδηγήσει σε δαπάνες δισεκατομμυρίων ευρώ εξαιτίας των βλαβών που έχουν προκαλέσει αλλά και της μη εξυπηρέτησης του φορτίου λόγω των βλαβών. Συγκεκριμένα, το 2016 παρατηρήθηκαν 750 φυσικές καταστροφές ανά τον κόσμο, με το κόστος τους να ανέρχεται στα 173 δισεκατομμύρια δολάρια [2]. Μία από τις χειρότερες καταστροφές του 2016 αποτελεί η πλημμύρα στη περιοχή της Louisiana στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με αποτέλεσμα την καταστροφή 60 000 κτιρίων και κόστος 10 δισεκατομμύρια δολάρια.

Αν δεν εφαρμοστούν εγκαίρως τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης τέτοιων καταστάσεων, τότε οι διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος και το κόστος των καταστροφών, πρόκειται να αυξηθούν στο μέλλον. Αυτό παρατηρείται από τη συνεχή αύξηση της συχνότητας

εμφάνιση των φυσικών καταστροφών λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών. Όπως φαίνεται στις καμπύλες του σχήματος 1, στις Η.Π.Α. ο αριθμός των φυσικών καταστροφών από το 1980 μέχρι το 2016 έχει σχεδόν διπλασιαστεί. Μεγάλο ποσοστό των καταστροφών αποτελούν οι πλημμύρες. Αυτό φαίνεται κυρίως τη χρονιά 2016, όπου από τις 91 καταστροφές που έγιναν στις Η.Π.Α., οι 19 ήταν πλημμύρες.



Σχήμα 1 Αριθμός φυσικών καταστροφών και πλημμύρων κατά την περίοδο 1980 -2016 στις ΗΠΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι απαιτείται η ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (resilient grid), ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν αποδοτικά διάφορες καταστροφές, όπως πλημμύρες.

1.2 Φυσικές καταστροφές και επιπτώσεις τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι φυσικές καταστροφές πέρα από το σοβαρό πλήγμα της απώλειας ανθρωπίνων ζώων, και των σημαντικών οικονομικών απωλειών, επηρεάζουν αρνητικά το βιοτικό επίπεδο. Οι

διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος, νερού και επικοινωνίας έχουν ως αποτέλεσμα την ταλαιπωρία και την μείωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων μιας περιοχής. Οι επιπτώσεις αυτές είναι έντονες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο καθώς μια φυσική καταστροφή μπορεί να προκαλέσει ολέθριες καταστροφές στο δίαβα της, όπως καταστροφή πυλώνων, γραμμών μεταφοράς και υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας. Στις Εικόνες 1 και 2 φαίνεται η επίδραση των ακραίων καιρικών φαινομένων στα στοιχεία ενός ΣΗΕ.



Εικόνα 1 Πλημμύρα στο Τέξας, η οποία προκάλεσε 218 000 αποκοπές ηλεκτρικού ρεύματος με 57683 κατοίκους να μην έχουν καθόλου ηλεκτρική ενέργεια [3]

Ως καταστροφή ενός ΣΗΕ, χαρακτηρίζεται η υλική βλάβη μεγάλου μέρους των στοιχείων του δικτύου, η οποία έχει ως αποτελέσματα τη μερική ή ολική διακοπή της λειτουργίας του. Η καταστροφή του ΣΗΕ, έπειτα από την εμφάνιση ενός ακραίου φαινομένου, συχνά οδηγεί σε κατάρρευση του συστήματος, λόγω σοβαρών και ταχέως μεταβαλλόμενων καταστάσεων που πιθανόν να μην έχει υποστεί το ΣΗΕ στο παρελθόν. Μια καταστροφή μπορεί να προκαλέσει τη διακοπή λειτουργίας μεγάλων τμημάτων του ΣΗΕ, οδηγώντας σε μεγάλους χρόνους αποκατάστασης τους. Επομένως, το ΣΗΕ πρέπει να είναι αξιόπιστο απέναντι σε συνήθη

σφάλματα, αλλά και ανθεκτικό (resilient) σε καταστροφές, οι οποίες προκαλούνται από φαινόμενα μικρής συχνότητας εμφάνισης, αλλά με μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του.



Εικόνα 2 Καταστροφή ηλεκτρικών πυλώνων και γραμμών εξαιτίας ακραίων καιρικών φαινομένων

1.2.1 Στοιχεία από επιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

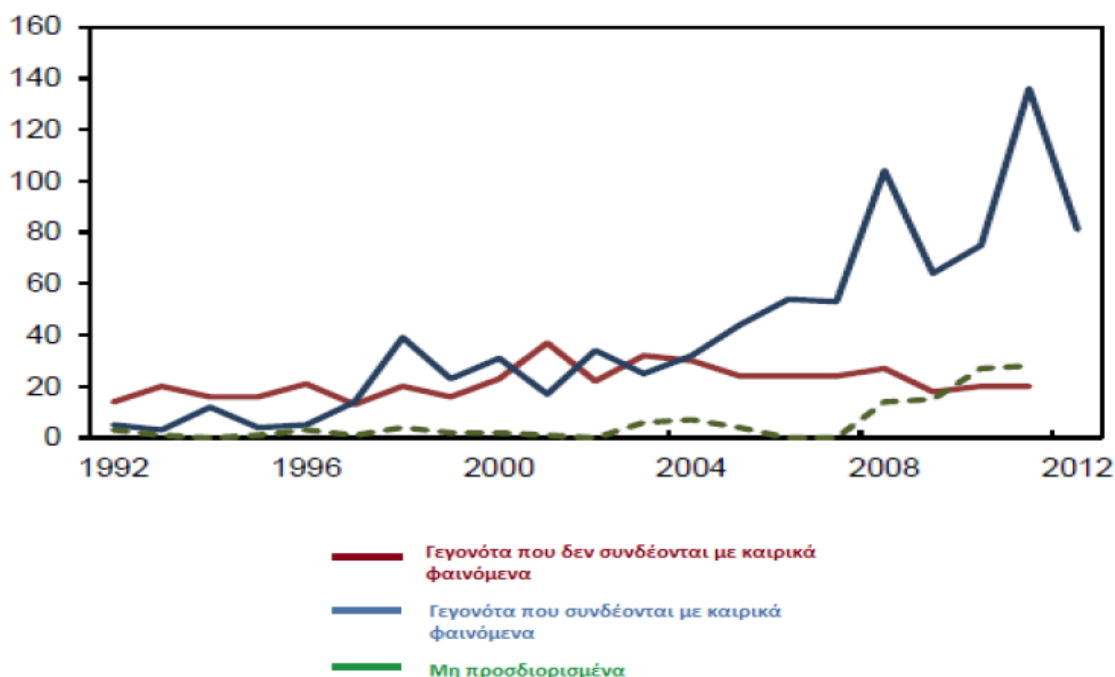
Οι συνέπειες των έντονων καιρικών φαινομένων είναι τεράστιες και ολέθριες. Αυτό παρατηρείται έντονα σε μια από τις πιο πάσχουσες χώρες σε αυτό τον τομέα, τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με τη συχνότητα εμφάνισης των φαινομένων αυτών να αυξάνεται με την πάροδο των χρόνων. Στις ΗΠΑ [4], το 2002, το 58% των διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος, το 87% των διακοπών αυτών επηρέασαν 50 000 περίπου καταναλωτές, προκλήθηκε από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως τυφώνες, καταιγίδες και πλημμύρες. Άρα αντιλαμβανόμαστε ότι η κύρια αιτία διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος στις ΗΠΑ είναι τα σφοδρά καιρικά φαινόμενα. Κάποια από τα

πιο σημαντικά περιστατικά ήταν ο τυφώνας Isabel το 2003, ο τυφώνας Katrina το 2005, οι τυφώνες Sandy και Isaac το 2012 και ο τυφώνας Arthur το 2014. Έπειτα ακολουθεί στον Πίνακα 1 παρουσίαση των στοιχείων και αιτιών που προκάλεσαν διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος κατά την περίοδο 1984 μέχρι 2006.

Πίνακας 1 Αιτίες που προκάλεσαν τις μεγαλύτερες διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις ΗΠΑ

Αιτίες	% των συμβάντων	Μέσος αριθμός σε MWh	Μέσος αριθμός Καταναλωτών
Σεισμοί	0.8	1.408	375.900
Ανεμοστρόβιλοι	2.8	367	115.439
Τυφώνες/τροπικές καταιγίδες	4.2	1.309	782.695
Παγοθύελες	5.0	1.152	343.448
Κεραυνοί	11.3	270	70.944
Άνεμοι/Βροχές	14.8	793	185.199
Άλλες ψυχρές καιρικές συνθήκες	5.5	542	150.255
Φωτιά	5.2	431	111.244
Εσκεμμένες επιθέσεις	1.6	340	24.572
Έλλειψη προμηθειών	5.3	341	138.957
Άλλες εξωτερικές αιτίες	4.8	710	246.071
Σφάλματα εξοπλισμού	29.7	379	57.140
Λάθη χειρισμού	10.1	489	105.322
Πτώση τάσης	7.7	153	212.900
Εθελοντική μείωση	5.9	190	134.543

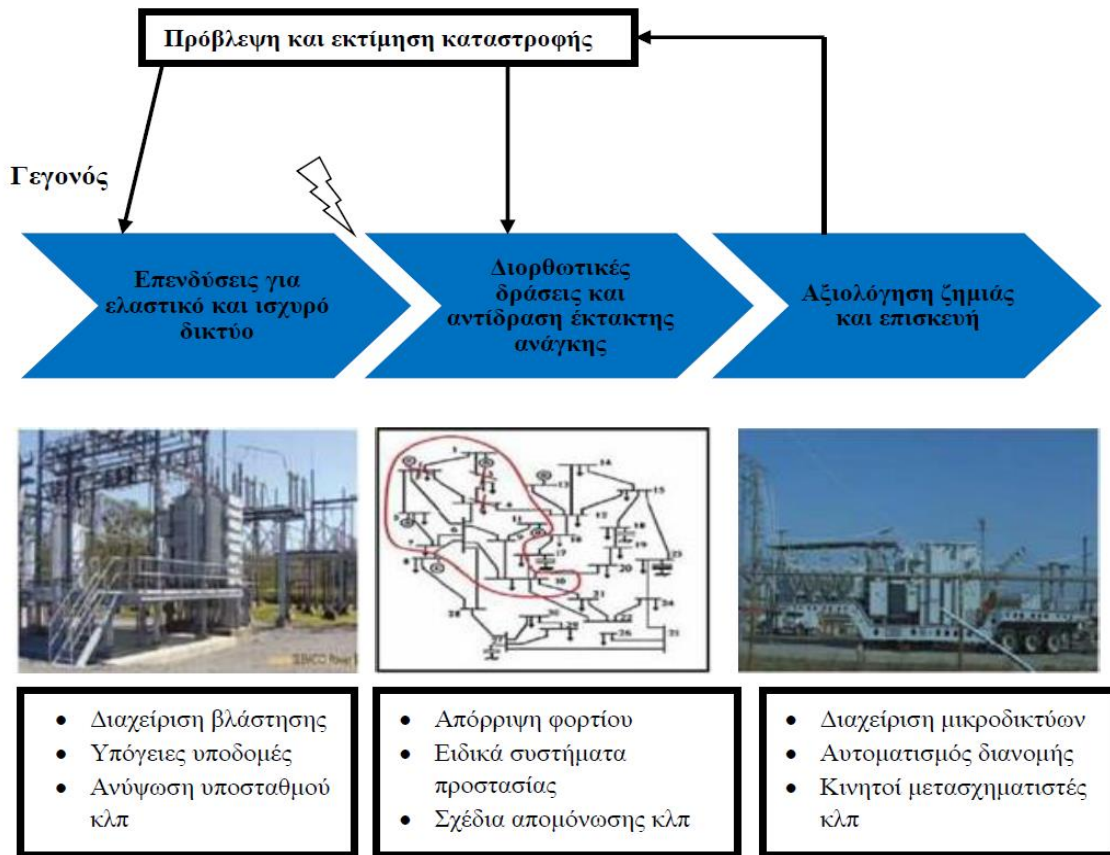
Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, η συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, θέτοντας έτσι προβληματισμούς καθώς και την ανάγκη για την ανάπτυξη ανθεκτικών και αξιόπιστων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα αυτής της αύξησης, παρατηρείται και αύξηση στον αριθμό των διακοπών. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι αυξανόμενες διακοπές που συνδέονται με ακραία καιρικά φαινόμενα από το 1992 έως το 2012 στις ΗΠΑ.



Σχήμα 2 Διακοπές ηλεκτρικής ενέργειας κατά την περίοδο 1992 - 2012 στις ΗΠΑ

Οι συνέπειες των φυσικών καταστροφών είναι αδιαμφισβήτητα τεράστιες [5], για αυτό και δημιουργήθηκε η ανάγκη για μελέτη των επιπτώσεων των ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάγκη αυτή ξεκίνησε το 1930 όταν ο τυφώνας New England χτύπησε την περιοχή της Βοστώνης. Μετά από αρκετά χρόνια μελέτης, έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη πρόοδος σε προχωρημένες μεθόδους που εξετάζουν τη σχέση μεταξύ φυσικών καταστροφών και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η έρευνα γύρω από το θέμα αυτό μπορεί να μελετηθεί από διαφορετικές οπτικές. Σαν πρώτο στάδιο πρέπει να μελετηθεί η

αντίδραση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας έναντι ενός καιρικού φαινομένου. Τα βήματα που πραγματοποιούνται σε αυτό το στάδιο παρουσιάζονται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3 Βήματα και χρονοδιάγραμμα ανταπόκρισης ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υπό την επίδραση ακραίου καιρικού φαινομένου

1.3 Καταστροφικές συνέπειες πλημμύρας

Οι πλημμύρες αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή, μετά τις δασικές πυρκαγιές. Πλημμύρα συμβαίνει λόγω ραγδαίων βροχοπτώσεων και ισχυρών καταιγίδων, από το ανέβασμα της στάθμης των ποταμών ή από το λώσιμο χιονιού. Συμβαίνει επίσης από υποχώρηση φραγμάτων και στην περίπτωση αυτή οι συνέπειες είναι πολύ μεγάλες. Οι πλημμύρες που προκαλούνται από την υπερχειλίση των ποταμών είναι μία συνηθισμένη μορφή

φυσικών καταστροφών και η ένταση τους τα τελευταία χρόνια, έχει δημιουργήσει ιδιαίτερη ανησυχία λόγω των αυξημένων απωλειών σε ανθρώπινες ζωές αλλά και των εκτεταμένων οικονομικών ζημιών.

1.3.1 Ιστορική αναδρομή στην πλημμύρα της Louisiana το 2016

Η πλημμύρα της Louisiana το 2016 [6], ήταν η πιο επιβλαβής φυσική καταστροφή που ακολούθησε μετά από τον τυφώνα Sandy το 2012 και μια από τις πιο θανατηφόρες τα τελευταία χρόνια στις ΗΠΑ. Συνέβηκε τον Αύγουστο του 2016 στην περιοχή της Louisiana με αποτέλεσμα το θάνατο 13 ανθρώπων όπως επίσης και τις ζημιές σε 146 000 σπίτια και συνολικό κόστος καταστροφών να ανέρχεται στα 15 δισεκατομμύρια δολάρια, κατατάσσοντας την στην 7η θέση για τις πιο ζημιογόνες φυσικές καταστροφές στην ιστορία των ΗΠΑ .

Η κύρια αιτία που προκάλεσε την πλημμύρα ήταν η έντονη βροχόπτωση που διήρκησε για αρκετές ώρες με αποτέλεσμα να οδηγήσει στην υπερχειλίση των ποταμών της περιοχής. Συγκεκριμένα καταγράφηκε ότι η στάθμη του νερού έφτασε στα 797 mm και συνολικά συγκεντρώθηκαν 7.1 τρισεκατομμύρια γαλόνια νερού.

Τουλάχιστον 20 000 άνθρωποι αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους και με τη βοήθεια αρκετών εθελοντών μεταφέρθηκαν σε ειδικά καταφύγια. Επίσης κατά τη διάρκεια της πλημμύρας 265 000 μαθητές απομακρύνθηκαν από τα σχολεία τους αφού ως αποτέλεσμα καταστράφηκαν πολλά σχολεία. Στις Εικόνες 4 και 5 φαίνονται οι καταστροφικές συνέπειες της πλημμύρας σε κατοικίες στην περιοχή της Louisiana.

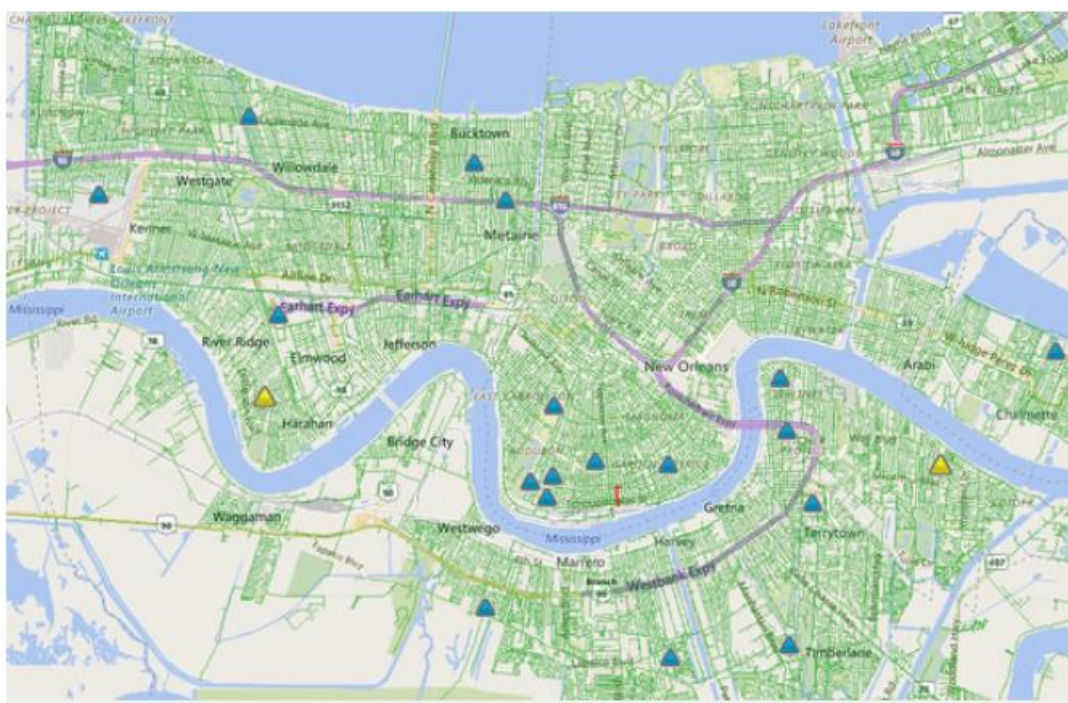


Εικόνα 4 Οι καταστροφικές συνέπειες της πλημμύρας στην περιοχή της Louisiana προκάλεσαν ζημιές σε 146 000 σπίτια



Εικόνα 5 20 000 κάτοικοι της περιοχής αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους

Όσον αφορά το ΣΗΕ της περιοχής, οι ζημιές ήταν επίσης τεράστιες [7], με περίπου 37 000 καταναλωτές χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα, οι οποίοι έπρεπε να περιμένουν τη στάθμη του νερού να κατέβει. Η Entergy (επιχείρηση ενέργειας στη Louisiana) κατάφερε να μειώσει αυτό τον αριθμό σε 12 000, ενώ αρκετά σπίτια και επιχειρήσεις χρειάστηκε να καλέσουν ηλεκτρολόγο ώστε να λύσουν το πρόβλημα αποκοπής του ρεύματος. Η Entergy έδωσε 100 000 δολάρια στον ερυθρό σταυρό ώστε να βοηθήσουν τα θύματα που χρειάστηκε να μεταβούν σε καταφύγια, λόγω του νερού στα σπίτια τους ή λόγω έλλειψης ηλεκτρικού ρεύματος. Η διαδικασία επαναφοράς του ρεύματος άρχισε άμεσα όπου από τον ακραίο αριθμό 37 000, την Πέμπτη 11 Αυγούστου όπου η πλημμύρα έχει φτάσει στην κορύφωσή της, μειώθηκε στους 26 000 καταναλωτές μέχρι την Κυριακή. Έπειτα, απόγευμα Δευτέρας ο αριθμός είχε μειωθεί στους 14 000. Ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των καταναλωτών, έμειναν χωρίς ρεύμα για αρκετό χρονικό διάστημα. Οι διακοπές ρεύματος οδήγησαν στο τερματισμό λειτουργίας σε αρκετά φώτα τροχαίας με αποτέλεσμα οι οδηγοί να είναι πολύ προσεκτικοί στις διασταυρώσεις, ώστε να μην γίνουν ατυχήματα. Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι διακοπές ενέργειας για την ημέρα Παρασκευή 12 Αυγούστου.



Εικόνα 6 Τα τρίγωνα συμβολίζουν τις διακοπές ενέργειας για την ημέρα Παρασκευή 12 Αυγούστου. Όπως παρατηρείται, οι περισσότερες διακοπές έγιναν κοντά σε ποταμό, αφού αυτός είχε υπερχειλίσει λόγω της έντονης βροχόπτωσης

1.4 Αναγκαιότητα ανθεκτικότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι φυσικές καταστροφές προκαλούν τεράστιες ζημιές στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στις γραμμές μεταφοράς και γενικότερα στα στοιχεία ενός δικτύου [5]. Έτσι υπάρχει η αναγκαιότητα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των ηλεκτρικών δικτύων με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται αρκετές έρευνες περί του θέματος. Συγκεκριμένα γίνεται εστίαση σε τρία στοιχεία: την πρόληψη, την ανάκτηση και την επιβίωση.

Πρόληψη: Η πρόληψη των βλαβών στο δίκτυο απαιτεί αλλαγές στα πρότυπα σχεδιασμού του, στις κατευθυντήριες γραμμές για την επισκευή του και στις διαδικασίες επιθεώρησης του εφαρμόζοντας καινοτόμες τεχνολογίες.

Ανάκτηση: Απαιτείται σωστός σχεδιασμός έτσι ώστε το δίκτυο να είναι ανθεκτικό, κάτι το οποίο επιβάλλει την ταχεία εκτίμηση των ζημιών και την έγκαιρη δημιουργία ομάδας εργατών για την αποκατάσταση των βλαβών.

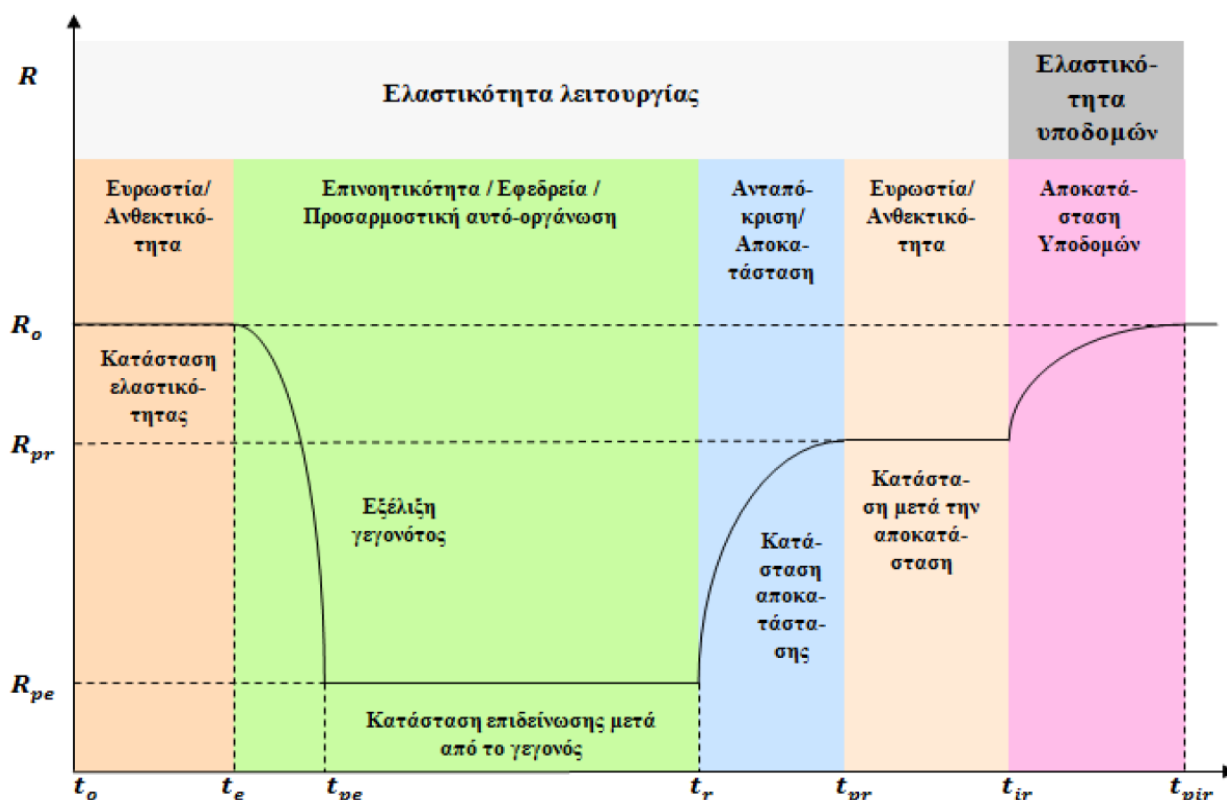
Επιβίωση: Η επιβίωση αναφέρεται στην ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί ένα ελάχιστο επίπεδο λειτουργίας ώστε να εξυπηρετεί μεμονωμένους καταναλωτές ή κοινότητες, σε περίπτωση πλήρους απώλειας της ηλεκτρικής παροχής από το δίκτυο διανομής. Πιο συγκεκριμένα, η επιβίωση συμπεριλαμβάνει την επικοινωνία με τους καταναλωτές, την χρήση ανθεκτικών τεχνολογιών (resilient technologies) για να επιτευχθεί η τροφοδοσία σημαντικών φορτίων, όπως φωτεινοί σηματοδότες κυκλοφορίας, φυλακές, νοσοκομεία και κινητά τηλέφωνα.

Πιο συγκεκριμένα θα ασχοληθούμε με την ανθεκτικότητα ενός δικτύου δηλαδή στην ικανότητα του δικτύου να επανέρχεται γρήγορα μετά από μια καταστροφή ή πιο γενικά στην ικανότητα του δικτύου να προβλέπει έντονα και υψηλού αντίκτυπου γεγονότα και να ανακάμπτει γρήγορα από αυτές τις αναταραχές. Επίσης η ανθεκτικότητα συμπεριλαμβάνει την ικανότητα του δικτύου να μαθαίνει από προηγούμενες καταστάσεις, έτσι ώστε να προσαρμόζει την λειτουργία του και την δομή του, όπως επίσης να προλαμβάνει αλλά και να μετριάσει τις επιπτώσεις από παρόμοια περιστατικά στο μέλλον. Η προσαρμογή αναφέρεται σε ένα μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, καθώς και σε λειτουργικά μέτρα που λαμβάνονται, έτσι ώστε το δίκτυο να είναι έτοιμο να δεχτεί ένα ξαφνικό εξωτερικό πλήγμα. Ουσιαστικά, η ανθεκτικότητα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητά του να μειώνει το μέγεθος ή/και την

διάρκεια των επιπτώσεων, που προκαλούνται από ακραία γεγονότα, στις υποδομές του. Η αποτελεσματική ανθεκτικότητα ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την ικανότητα του να προβλέπει, να απορροφάει, να προσαρμόζεται εύκολα ή/και να ανακάτται γρήγορα από πιθανά γεγονότα που μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές.

1.4.1 Καμπύλη ανθεκτικότητας

Η έννοια της ανθεκτικότητας ενός δικτύου παρουσιάζεται στη επεξηγηματική καμπύλη της ανθεκτικότητας όπου συμπεριλαμβάνονται τα χρονικά επίπεδα ανθεκτικότητας κατά τη διάρκεια του γεγονότος που προκαλεί την διαταραχή. Αυτά τα επίπεδα αποτελούν χαρακτηριστικά στοιχεία της ανθεκτικότητας που πρέπει να διαθέτει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά στις εξελισσόμενες καταστάσεις ενός γεγονότος, όπως για παράδειγμα μια ενδεχόμενη πλημμύρα. Η καμπύλη ανθεκτικότητας παρουσιάζεται στο σχήμα 3 και ακολουθεί η αναλυτική επεξήγησή της.



Σχήμα 3 Καμπύλη ανθεκτικότητας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Πριν συμβεί το γεγονός την χρονική στιγμή t , το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι ισχυρό (robust) και ανθεκτικό (resistant), ώστε να αντέξει το αρχικό πλήγμα. Έτσι, ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να επιδειξει επαρκή ανθεκτικότητα (στο σχήμα επισημαίνεται με R_0 , όπου R είναι ένα δείκτης του επιπέδου ανθεκτικότητας του δικτύου) για να ανταπεξέλθει στο γεγονός. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό είναι να υπάρχει η ικανότητα για προληπτική λειτουργική ευελιξία, καθώς με αυτό τον τρόπο δίνεται το πλεονέκτημα στον διαχειριστή του δικτύου να ενισχύσει τη λειτουργική ανθεκτικότητα του συστήματος.

Μετά από το γεγονός, η κατάσταση του συστήματος χειροτερεύει καθώς η ανθεκτικότητα του την χρονική αυτή περίοδο θέτεται σε μεγάλο κίνδυνο R_{pe} . Επινοητικότητα, εφεδρεία και προσαρμοστική αυτό-οργάνωση είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας που πρέπει να διαθέτει το σύστημα σε αυτό το στάδιο. Αφού αυτά τα χαρακτηριστικά παρέχουν την διορθωτική λειτουργική ευελιξία, η οποία είναι απαραίτητη, έτσι ώστε το σύστημα να προσαρμοστεί και να αντιμετωπίσει τις εξελισσόμενες καταστάσεις (όπου παρόμοιες είναι πολύ πιθανό να μην έχουν ξανασυμβεί στο παρελθόν). Αυτό βοηθάει στο να μειωθούν τόσο οι επιπτώσεις από το γεγονός, όσο και η υποβάθμιση της ανθεκτικότητας (από R_0 σε R_{pe}), προτού η διαδικασία αποκατάστασης ξεκινήσει την χρονική στιγμή tr . Όταν το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση αποκατάστασης επιδεικνύονται οι απαραίτητες κινήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να ανταποκριθεί και να επανέλθει το σύστημα στο αρχικό επίπεδο ανθεκτικότητας όσο το δυνατόν ταχύτερα.

Μόλις η αποκατάσταση ολοκληρωθεί, το σύστημα εισέρχεται στην επόμενη φάση, όπου είναι η κατάσταση μετά την αποκατάσταση. Το επίπεδο ανθεκτικότητας αυτής της κατάστασης είναι R_{pr} , το οποίο έχει μέγιστη τιμή R_0 , δηλαδή $R_{pr} < R_0$. Όμως, παρόλο που το σύστημα μπορεί να έχει επανέλθει στην λειτουργική κατάσταση στην οποία βρισκόταν πριν από την εμφάνιση του γεγονότος, οι υποδομές μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση (ανθεκτικότητα υποδομών), δηλαδή : $(t_{pir} - t_{pr}) > (t_{pr} - tr)$. Αυτό εξαρτάται από την σοβαρότητα των γεγονότων, όπως επίσης και από τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας που θα επιδείξει το σύστημα πριν, κατά την διάρκεια και μετά από την εμφάνιση του εξωτερικού πλήγματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειώσουμε ότι μερικά μέτρα κάνουν το σύστημα περισσότερο ανθεκτικό από πλευράς χειρισμού και λιγότερο

από πλευράς υποδομών. Για παράδειγμα, η υπογειοποίηση μιας εναέριας γραμμής μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα του συστήματος να αντισταθεί στο γεγονός, αλλά αν κάποιο καλώδιο υποστεί βλάβη θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να επισκευαστεί από ότι μια εναέρια γραμμή.

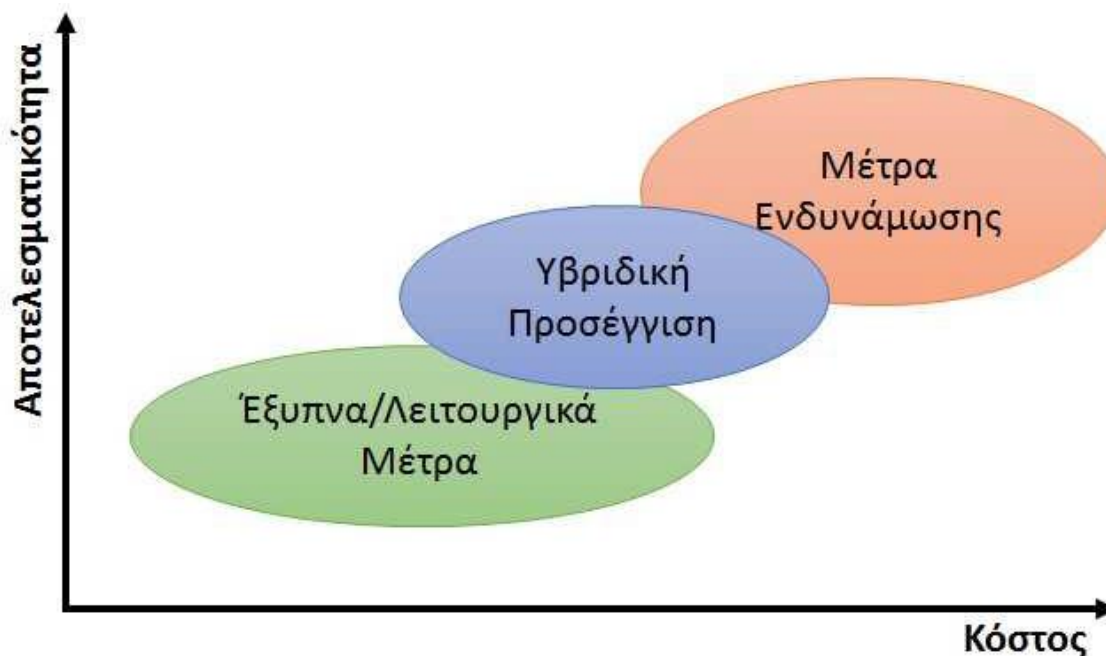
Τέλος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι για την πλήρη κατανόηση και αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός συστήματος, το οποίο είναι εξ ορισμού πολυδιάστατη έννοια, χρειάζεται να γνωρίζουμε τόσο τα επίπεδα ανθεκτικότητας όσο και οι χρόνοι μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος που σχετίζονται με το γεγονός. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3 η ανθεκτικότητα του συστήματος δεν χαρακτηρίζεται μόνο από τα επίπεδα R_0 , R_{pe} και R_{pr} που συνδέονται με τις καταστάσεις του συστήματος, αλλά και από τον χρόνο μετάβασης από την μία κατάσταση στην άλλη, δηλαδή ($t_{pe} - te$), ($t_{pr} - tr$) και ($t_{pir} - tir$) αντίστοιχα. Τέλος, οι δράσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν για να αυξηθεί η ανθεκτικότητα πρέπει να στοχεύουν πρώτον στην μείωση της υποβάθμισης της ανθεκτικότητας κατά την διάρκεια του γεγονότος ($R_0 - R_{pe}$), δεύτερον στην επίτευξη μιας αργής και πιθανότητα ελεγχόμενης υποβάθμισης ($t_{pe} - t_{pr}$) και τέλος στην μείωση του χρόνου αποκατάστασης τόσο από λειτουργική άποψη ($t_{pr} - te$) όσο και από την μεριά των υποδομών: ($t_{pir} - t_{pr}$).

1.5 Μέτρα ενίσχυσης και ανθεκτικότητας

Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών επιχειρήσεων κοινής ωφελείας σε όλο τον κόσμο έχουν αναγνωρίσει την αναγκαιότητα λήψης δράσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των ΣΗΕ. Οι εν λόγω προσπάθειες αποσκοπούν στην προσαρμογή του δικτύου, ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις μελλοντικών ακραίων γεγονότων. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του ΣΗΕ πριν, αλλά και κατά τη διάρκεια του γεγονότος ή βελτιστοποιώντας την απόκρισή του μετά το πέρας του γεγονότος. Οι στόχοι αυτοί επιτυγχάνονται μέσω μέτρων ενδυνάμωσης (hardening measures) και λειτουργικών «ευφυών» μέτρων (operational/smart measures). Τα μέτρα ενδυνάμωσης βασίζονται στη βελτίωση της ανθεκτικότητας υποδομών και έχουν ως στόχο να κάνουν το δίκτυο λιγότερο ευάλωτο σε τέτοια γεγονότα. Τα λειτουργικά μέτρα αναφέρονται σε «ευφυείς» ελέγχους, οι οποίοι πραγματοποιούνται, ώστε να

αντιμετωπιστεί κατάλληλα το γεγονός κατά την εξέλιξή του. Στόχος των λειτουργικών μέτρων είναι το ΣΗΕ να «λυγίσει» και όχι να «σπάσει» κατά τη διάρκεια του γεγονότος.

Η κατάλληλη στρατηγική για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του ΣΗΕ αποφασίζεται λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματικότητα και το κόστος εφαρμογής των μέτρων αυτών. Τα κόστη περιλαμβάνουν αυτά της επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης. Στο Σχήμα 4 συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα και το κόστος εφαρμογής των λειτουργικών μέτρων και των μέτρων ενδυνάμωσης.



Σχήμα 4 Σύγκριση αποτελεσματικότητας και κόστους των λειτουργικών μέτρων και των μέτρων ενδυνάμωσης

Παρατηρείται ότι τα μέτρα ενδυνάμωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αλλά και υψηλότερο κόστος. Μια υβριδική προσέγγιση, η οποία ισχυροποιεί το ΣΗΕ αλλά το κάνει και «ευφύεστερο», παρουσιάζεται ως η πιο βιώσιμη λύση. Στο Σχήμα 5 αναφέρονται διάφορα μέτρα ενδυνάμωσης και λειτουργικά μέτρα.

Μέτρα ενδυνάμωσης: βελτίωση ανθεκτικότητας υποδομών

- Υπογειοποίηση εναέριων γραμμών
- Ανύψωση υποσταθμών
- Μεταφορά εγκαταστάσεων σε περιοχές λιγότερο ευάλωτες σε ακραία γεγονότα
- Αναβάθμιση των στοιχείων του δικτύου με ισχυρότερα υλικά
- Αναδρομολόγηση γραμμών
- Εγκατάσταση πλεοναζόντων γραμμών

Λειτουργικά μέτρα: βελτίωση λειτουργικής ανθεκτικότητας

- Διεσπαρμένη παραγωγή και συστήματα αποθήκευσης
- Διαχείριση ζήτησης
- Αποκεντρωμένος/κατανεμημένος έλεγχος
- Προηγμένη και ακριβής πρόβλεψη καιρικών φαινομένων
- Προγραμματισμός μονάδων παραγωγής - Αναδιανομή παραγωγής
- Αναδιαμόρφωση τοπολογίας δικτύου
- Μικροδίκτυα
- Προηγμένες και προσαρμοστικές τεχνικές αποκατάστασης
- Προσαρμοστικά μέτρα ελέγχων και προστασίας
- Προηγμένα συστήματα οπτικοποίησης και επίγνωσης κατάστασης δικτύου

Σχήμα 5 Μέτρα ενδυνάμωσης και λειτουργικά μέτρα για την ενίσχυση ανθεκτικότητας του δικτύου

1.5.1 Λειτουργικά μέτρα

Τα λειτουργικά μέτρα αποσκοπούν στην ενίσχυση της λειτουργικής ανθεκτικότητας του ΣΗΕ, παρέχοντας την προληπτική και τη διορθωτική ευελιξία, ώστε να αντιμετωπιστούν αποδοτικά τα ακραία φαινόμενα καθ' όλη τη διάρκεια τους. Δίκτυα με μεγάλη διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής, σε συνδυασμό με τη διαχείριση ζήτησης, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας. Η χρήση τοπικών μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, καθιστούν το ΣΗΕ λιγότερο ευάλωτο σε διάφορους κινδύνους, καθώς μεγάλες γραμμές μεταφοράς, οι οποίες είναι πιθανό να καταρρεύσουν, δεν είναι αναγκαίες για τη μεταφορά της παραγωγής, αφού αυτή παράγεται και καταναλώνεται τοπικά.

Η συμβολή των μικροδικτύων στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας ενάντια σε ακραία καιρικά φαινόμενα έχει εφαρμοστεί σε πιλοτικά δίκτυα, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά τους [31]. Ως μικροδίκτυο ορίζεται ένα δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα (νησιδοποιημένη κατάσταση) και με συντονισμένο έλεγχο να διατηρήσει την αδιάλειπτη εξυπηρέτηση των πελατών του, κατά τη διάρκεια έκτακτων αναγκών. Τα μικροδίκτυα έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους ενίσχυσης της ανθεκτικότητας.

Τεχνικές αποκατάστασης (restoration techniques) προσαρμοσμένες σε εκτεταμένες διακοπές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να βελτιώσουν την ανθεκτικότητα των ΣΗΕ. Έπειτα από μια φυσική καταστροφή, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν πολλαπλές βλάβες και η στρατηγική επισκευής τους είναι ζωτικής σημασίας, κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης. Η αποτελεσματική διαχείριση και τοποθέτηση των συνεργείων επισκευής μειώνει τον χρόνο αποκατάστασης και αποσύνδεσης πελατών, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του ΣΗΕ. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην αποκατάσταση της τροφοδότησης στο επίπεδο της διανομής έχουν τα μικροδίκτυα.

Προληπτικά μέτρα, όπως η προληπτική αναδιανομή της παραγωγής και ο κατάλληλος προγραμματισμός ένταξης των μονάδων παραγωγής [32], βασιζόμενα σε εξελιγμένα εργαλεία πρόβλεψης και μεθόδους ελέγχου, αποτελούν μια αποτελεσματική λύση. Τέτοιες μέθοδοι, όπως η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, μπορούν να είναι ιδιαίτερα επωφελείς σε περιπτώσεις, όπου η ταχύτητα αλυσιδωτών σφαλμάτων δεν επιτρέπει την αντίδραση του ανθρώπινου παράγοντα.

Επιπλέον, τα προηγμένα συστήματα οπτικοποίησης και επίγνωσης της κατάστασης του ΣΗΕ είναι μείζονος σημασίας για την επίβλεψη της εξέλιξης της επίδρασης των ακραίων φαινομένων στο δίκτυο. Η κατάλληλη επίγνωση της κατάστασης του ΣΗΕ καθιστά δυνατή την αποτελεσματική και έγκαιρη λήψη αποφάσεων από τον διαχειριστή του συστήματος, προκειμένου να εκτιμηθεί το επίπεδο βλαβών, να καθοριστούν οι προτεραιότητες και να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις για τον μετριασμό των επιπτώσεων και την ταχεία αποκατάσταση του συστήματος.

1.5.2 Μέτρα ενδυνάμωσης

Τα μέτρα ενδυνάμωσης προάγουν κυρίως την ανθεκτικότητα υποδομών και βελτιώνουν την στιβαρότητα και την αντίσταση του ΣΗΕ έναντι εξωτερικών πληγμάτων. Στόχος τους είναι να μειώσουν τη φυσική επίπτωση του καταστροφικού γεγονότος και να εμποδίσουν την καταστροφή μεγάλων τμημάτων του δικτύου. Η μακροχρόνια εκτίμηση της επίδρασης των καταστροφικών γεγονότων στα ΣΗΕ είναι απαραίτητη για την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων ενδυνάμωσης. Στα μέτρα ενδυνάμωσης συμπεριλαμβάνεται η υπογειοποίηση των εναέριων γραμμών, η ανύψωση των υποσταθμών για την προστασία από πλημμύρες, η αναβάθμιση των στοιχείων του δικτύου με ισχυρότερα υλικά, η μεταφορά κρίσιμων εγκαταστάσεων σε λιγότερο ευάλωτες περιοχές, η αναδρομολόγηση γραμμών, καθώς και η κατασκευή γραμμών και μονάδων παραγωγής που δεν θα απαιτούνταν για κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το κόστος ενδυνάμωσης όλου του δικτύου καθιστά μια τέτοια λύση μη βιώσιμη. Επομένως, είναι θεμελιώδους σημασίας η αποδοτική αξιοποίηση περιορισμένου προϋπολογισμού για τη στοχευμένη ενδυνάμωση του δικτύου.

Η υπογειοποίηση των γραμμών θεωρείται ως ένα από τα αποτελεσματικότερα μέτρα έναντι των ακραίων καιρικών φαινομένων και της επαφής με τη βλάστηση. Όμως το κόστος υπογειοποίησης, το οποίο ανέρχεται από 500.000 έως 2 εκατομμύρια ευρώ ανά μίλι, καθιστά την καθολική εφαρμογή αυτού του μέτρου απαγορευτική.

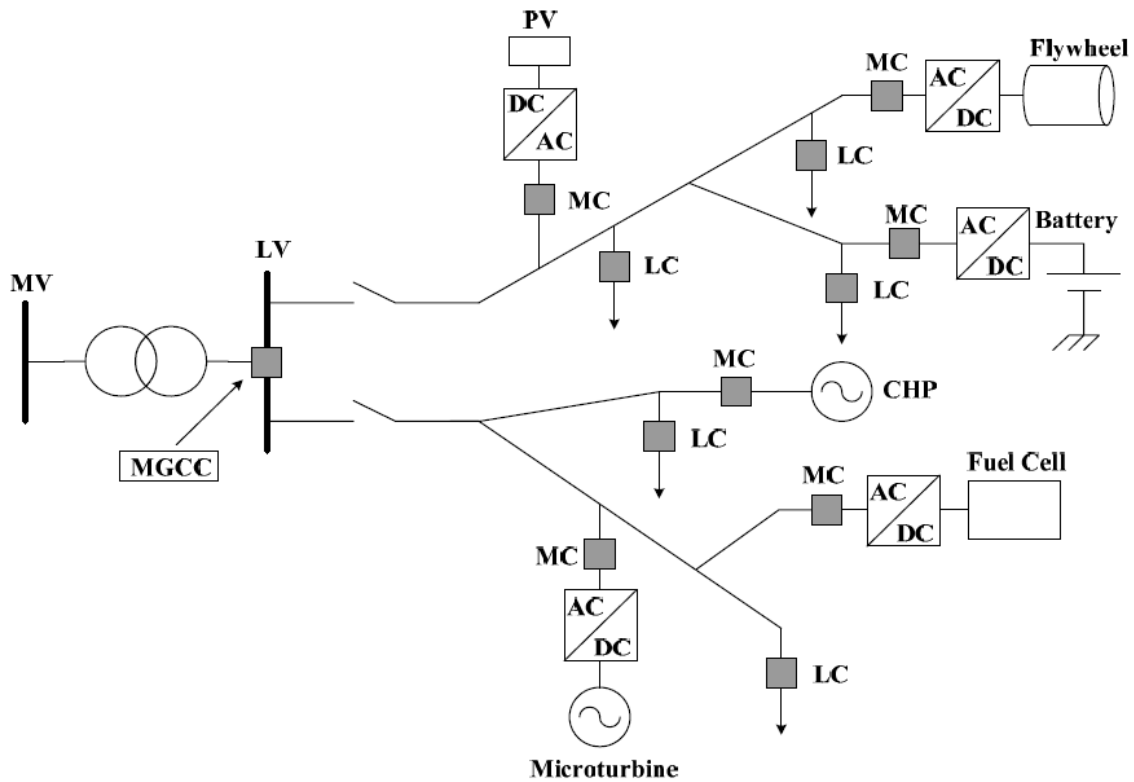
Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέτρα ενδυνάμωσης, τα οποία μπορεί να είναι αποτελεσματικά έναντι μιας συγκεκριμένης απειλής, να έχουν αρνητικές επιπτώσεις σε μια διαφορετική περίπτωση. Για παράδειγμα, η υπογειοποίηση των γραμμών ενισχύει την ανθεκτικότητα των υποδομών του δικτύου ενάντια σε έναν τυφώνα, ωστόσο σε περίπτωση σεισμού η διάρκεια επισκευής των κατεστραμμένων υπόγειων γραμμών οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης.

1.6 Μικροδίκτυα

Ένα μικροδίκτυο (ΜΔ) είναι ενεργό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από ένα συνδυασμό μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, φορτίων και μονάδων αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, αντλιοσταμειωτήρες κ.ά.) σε επίπεδο τάσεως διανομής [27].

Οι γεννήτριες ή πηγές ισχύος που χρησιμοποιούνται σε ένα ΜΔ είναι κατά κύριο λόγο ανανεώσιμες (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά) και συμβατικές πηγές ενέργειας (μικροτουρμπίνες). Οι περισσότερες πηγές ισχύος δεν έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν άμεσα με το δίκτυο. Συνήθως απαιτείται μία ηλεκτρονική διασύνδεση DC/AC ή AC/DC/AC έτσι ώστε να γίνει δυνατή η διοχέτευση της ισχύος στο δίκτυο.

Στην εικόνα 7 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός ΜΔ. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, το ΜΔ ελέγχεται από έναν κεντρικό ελεγκτή (MicroGrid Central Controller, MGCC), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στον υποσταθμό υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ. Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για πολλές λειτουργίες όπως πρόβλεψη φορτίου, διαχείριση της ζήτησης, οικονομικός προγραμματισμός των πηγών ισχύος και είναι ο επικεφαλής του συστήματος ελέγχου. Σε ένα δεύτερο επίπεδο ελέγχου, ελεγκτές που είναι τοποθετημένοι στα φορτία ή σε ομάδα φορτίων (LC) αλλά και ελεγκτές τοποθετημένοι στις πηγές ισχύος (MC) ανταλλάσσουν πληροφορίες με τον κεντρικό ελεγκτή και ελέγχουν τις τοπικές συσκευές.



Εικόνα 7 Μικροδίκτυο με πηγές ισχύος, φορτία και εξοπλισμό διαχείρισης και ελέγχου

Τα ΜΔ συνήθως εγκαθίστανται πιο κοντά στην κατανάλωση, έτσι ώστε τα φορτία να μπορούν να εξυπηρετηθούν αποτελεσματικά χωρίς η εξυπηρέτησή τους να επηρεάζεται από τις απώλειες των γραμμών του δικτύου. Το θεμελιώδες πλεονέκτημα των ΜΔ είναι πως ακόμα και σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο σημείο του δικτύου, οι καταναλωτές μπορούν να λάβουν αδιάλειπτη ισχύ, μειωμένες απώλειες τροφοδοσίας και βελτιωμένη τοπική αξιοπιστία. Το βασικό πλεονέκτημα για το περιβάλλον είναι ότι μειώνουν τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την υπερθέρμανση του πλανήτη με τη χρήση τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

1.7 Ευφυή δίκτυα

Τα ευφυή δίκτυα διαμορφώνονται με τον εκσυγχρονισμό των δικτύων, με την εγκατάσταση ευφών ηλεκτρονικών συσκευών όπως είναι οι έξυπνοι μετρητές και ένα προηγμένης επικοινωνίας και απόκτησης δεδομένων λογισμικό με έλεγχο σε πραγματικό χρόνο που βελτιστοποιεί τη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου [16]. Είναι εύλογο να πούμε ότι το ευφές δίκτυο είναι εξοπλισμένο με σημαντικό αριθμό συσκευών υπολογιστικής ευφυΐας (computer intelligence). Οι αποφάσεις που παίρνει το έξυπνο δίκτυο στοχεύουν στη βελτίωση των λειτουργιών, της συντήρησης και του σχεδιασμού, διασφαλίζοντας ότι κάθε στοιχείο του ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να «μιλάει» και να «ακούει». Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο της τεχνολογίας των έξυπνων δικτύων είναι η αυτοματοποίηση.

Ένα ευφές δίκτυο επιτρέπει τη δημιουργία νέων στρατηγικών διαχείρισης του δικτύου παρέχοντας την αποτελεσματική διαχείριση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, της ζήτησης και των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας για την εξισορρόπηση του φορτίου. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ, η μείωση των απωλειών του συστήματος και η αύξηση της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας, της ανθεκτικότητας και της ασφάλειας του εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτού του δικτύου.

Σε ένα έξυπνο δίκτυο, οι πληροφορίες που ανακτώνται σε πραγματικό χρόνο αποτελούν το βασικό παράγοντα για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου. Ο αντίκτυπος των βλαβών του εξοπλισμού, των φυσικών καταστροφών αλλά και άλλων βλαβών που προκαλούν διαταραχές και διακοπές λειτουργίας στο δίκτυο είναι δυνατόν να αποφευχθούν σε αρκετά μεγάλο βαθμό μέσω της παρακολούθησης, σε πραγματικό χρόνο, της κατάστασης του δικτύου, της διάγνωσης και της προστασίας [28].

Ένα σύγχρονο έξυπνο δίκτυο έχει τις εξής δυνατότητες [17]:

- Βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος
- Βελτίωση της ανθεκτικότητας του συστήματος
- Συγκέντρωση κατανεμημένων πηγών ενέργειας

- Αυτοματοποίηση συντήρησης και λειτουργίας
- Παρουσίαση ευκαιριών για τη βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου
- Ενθάρρυνση της συμμετοχής των καταναλωτών στις διάφορες λειτουργίες του δικτύου και δυνατότητα σύνδεσης όλων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του εξοπλισμού και της λειτουργίας του συστήματος
- Δυνατότητα εισαγωγής νέων προϊόντων , υπηρεσιών και αγαθών

Στη παρούσα εργασία, μελετάται ένα ευφύες μικροδίκτυο και εφαρμόζονται προληπτικά μέτρα για την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς του στην περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 Διατύπωση προβλήματος

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρουσιάζει την κατάλληλη ανθεκτικότητα ώστε να μπορεί να αντιστέκεται και να επανέρχεται στο μικρότερο δυνατό διάστημα στην αρχική του κατάσταση, όταν δεχθεί μία εξωτερική, μεγάλων επιπτώσεων και χαμηλής πιθανότητας διαταραχή (HILP) [8]. Οι φάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το δίκτυο στην περίπτωση τέτοιων διαταραχών είναι οι εξής: η αποφυγή, η επιβίωση και η επαναφορά. Στην διάρκεια των τριών φάσεων, η απόδοση του συστήματος διαφέρει λόγω των επιπτώσεων της διαταραχής.

Στη φάση αποφυγής, επιδιώκουμε να βελτιώσουμε τη λειτουργία του συστήματος, ώστε να ενισχυθεί η ανθεκτικότητά του και να αποφευχθούν ή να μειωθούν τυχόν ζημιές από το επερχόμενο γεγονός. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας προληπτικά μέτρα ενίσχυσης στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα η ανθεκτικότητά του δικτύου ενισχύεται σε όλες τις φάσεις που μπορεί να βρεθεί. Στο στάδιο επιβίωσης, στόχος είναι η μη κατάρρευση του συστήματος, διότι η επαναφορά του μπορεί να είναι χρονοβόρα και πολυέξοδη. Στη φάση επαναφοράς του συστήματος επιδιώκεται η ταχύτερη αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με το στάδιο της αποφυγής όπου θα εφαρμόσουμε προληπτικά λειτουργικά μέτρα σε ένα μικροδίκτυο πριν από την εμφάνιση του γεγονότος. Έτσι προετοιμάζουμε το μικροδίκτυο να αντιμετωπίσει το γεγονός, συγκεκριμένα μια επερχόμενη πλημμύρα, με στόχο τη μέγιστη δυνατή εξυπηρέτηση της ζήτησης υπό τους

οικονομικότερους όρους. Θεωρείται πως η στάθμη του νερού λόγω των πλημμυρών στα διάφορα γεωγραφικά σημεία του μικροδικτύου μπορεί να εκτιμηθεί με σχετικά μεγάλη ακρίβεια.

Αρχικά έγινε η μοντελοποίηση του μικροδικτύου, η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο υποκεφάλαιο, ώστε να εφαρμοστούν σε αυτή τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις που μπορεί να προκαλέσει η επερχόμενη πλημμύρα εφαρμόσαμε προληπτικά μέτρα για την βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου εντός του επόμενου εικοσιτετράωρου. Ως προληπτικά μέτρα εξετάστηκαν η ελεγχόμενη δημιουργία νησίδων εντός του μικροδικτύου, θέτοντας εκτός λειτουργίας τις κρίσιμες γραμμές και κατανέμοντας κατάλληλα την παραγωγή των ελεγχόμενων μονάδων και η συνεισφορά της αλλαγής τοπολογίας. Ως κρίσιμες γραμμές χαρακτηρίζονται οι γραμμές με πιθανότητα κατάρρευσης άνω ενός προκαθορισμένου ορίου. Οι πιθανότητες κατάρρευσης των γραμμών λαμβάνονται από τις καμπύλες ευθραυστότητας. Τα προληπτικά μέτρα πρέπει να εφαρμόζονται πριν την εκδήλωση της πλημμύρας, και επομένως απαιτείται η ταχύτερη επίλυση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό, γραμμικοποιούνται οι μη γραμμικοί περιορισμοί του προβλήματος, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του.

Στη συνέχεια, η αποδοτικότητα της μεθόδου εξετάστηκε με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την συνεισφορά της προτεινόμενης μεθόδου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του μικροδικτύου έναντι των πλημμυρών. Επίσης, πραγματοποιείται ανάλυση για την επιλογή της κατάλληλης γραμμικής προσέγγισης με κριτήρια το χρόνο και την ακρίβεια επίλυσης του προβλήματος.

2.1.1 Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης λειτουργίας ενός μικροδικτύου είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που θα μπορέσει να αναπαραστήσει το πρόβλημα [9]. Ένα τέτοιο μοντέλο βέλτιστου προγραμματισμού αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης (decision variables), μέσω των οποίων είναι δυνατή η έκφραση των τεχνικών περιορισμών (constraints) του δικτύου. Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος ορίζει ένα εφικτό σύνολο (feasible set) και αποτελείται από το σύνολο των λύσεων που

ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης από αυτό το εφικτό σύνολο γίνεται με βάση την τιμή που λαμβάνει μία συνάρτηση, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και εκφράζει το κόστος που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ένα τέτοιο γραμμικό πρόβλημα έχει την παρακάτω τυποποιημένη μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση :

$$\min z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Περιορισμοί:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

Όπου a_{ij}, b_i, c_i είναι οι παράμετροι του προβλήματος.

Με στόχο την κατάλληλη επιλογή των τιμών των μεταβλητών απόφασης: x_1, x_2, \dots, x_n , έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα παραπάνω.

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του YALMIP, όπου αποτελεί μία εργαλειοθήκη μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB.

2.1.2 Βέλτιστη ροή ισχύος δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Η βέλτιστη ροή ισχύος (ή φορτίου) σε ένα ΣΗΕ είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον προσδιορισμό των επιθυμητών τάσεων των κόμβων και των ροών ισχύος για μία δεδομένη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Η βέλτιστη ροή ισχύος είναι χρήσιμη για διάφορους λόγους και μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εκλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος, αφού κατά τη διάρκεια της ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς και είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας.
- Διατήρηση των τάσεων και των ροών ισχύος εντός των περιορισμών λειτουργίας του εκάστοτε δικτύου.
- Μελέτη και αντιμετώπιση ενδεχόμενων διαταραχών που μπορούν να υποστούν τα διάφορα στοιχεία του δικτύου.

Στη παρούσα εργασία εφαρμόζεται βέλτιστη ροή ισχύος πριν και με την εφαρμογή των προληπτικών μέτρων ώστε να προκαθοριστεί η βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Καθορίζεται η λειτουργία κάθε μονάδας παραγωγής και τα προληπτικά μέτρα είναι έτοιμα προς εφαρμογή.

2.1.3 YALMIP

Η ανάπτυξη και επίλυση του μαθηματικού μοντέλου της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το YALMIP (Yet Another LMI Parser). Το YALMIP αποτελεί μία εργαλειοθήκη για το περιβάλλον MATLAB, η οποία είναι αρκετά ισχυρή ώστε να υποστηρίξει αρκετά μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της εργαλειοθήκης αυτής είναι τα ακόλουθα[10]:

- Απλοποίηση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης αφού η ανάπτυξη κώδικα για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος πραγματοποιείται κάνοντας χρήση τυπικών εντολών του προγράμματος MATLAB. Στην πραγματικότητα, τρεις βασικές εντολές του YALMIP είναι αρκετές για την πλειοψηφία των χρηστών ώστε να μοντελοποιήσουν και να επιλύσουν το δικό τους πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- Ικανότητα μοντελοποίησης προβλημάτων ανεξάρτητα του μεγέθους των δεδομένων τους. Ουσιαστικά, με χρήση μίας εντολής και καθορίζοντας τον αριθμό των μεταβλητών, δίνεται η δυνατότητα δήλωσης των μεταβλητών του ίδιου είδους με ενιαίο τρόπο. Έτσι, η ανάπτυξη του ίδιου κώδικα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση τόσο μικρών σε μέγεθος προβλημάτων όσο και για μεγαλύτερα προβλήματα.
- Υποστήριξη διάφορων μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού. Τα τελευταία χρόνια, το YALMIP έχει εξελιχθεί σημαντικά αφού ο χρήστης καθίσταται ικανός να μοντελοποιήσει τις περισσότερες κατηγορίες των προβλημάτων του μαθηματικού προγραμματισμού, ενώ ταυτόχρονα απαλλάσσετε από τις δυσκολίες που αφορούν τις τεχνικές επίλυσης. Για την επίλυση των προβλημάτων, το YALMIP είναι ικανό να αλληλεπιδράσει με ένα σύνολο επιλυτών, το οποίο περιλαμβάνει και επιλυτές δωρεάν διάθεσης αλλά και εμπορικούς, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί εύκολα να ορίσει, μέσω μίας εντολής, τον κατάλληλο “solver” για την επίλυση του προβλήματος.

Ο επιλυτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο GUROBI [11]. Ο GUROBI προσφέρει αρκετές δυνατότητες και είναι ικανός να λύσει προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (LP), τετραγωνικού προγραμματισμού (QP), μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (MIQP), τετραγωνικών περιορισμών (QCP) και μικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (MIQCP) σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ο επιλυτής GUROBI για την λύση των προβλημάτων μικτού ακέραιου προγραμματισμού είναι ο Branch-and-Bound.

2.2 Κατάλογος συμβόλων

1. ΔΕΙΚΤΕΣ

i, j	Δείκτες ζυγών (1 μέχρι N_B)
ij	Δείκτες γραμμών από το ζυγό i και j
t	Δείκτης χρονικού διαστήματος (1 μέχρι N_T)
γ	Δείκτης των τμημάτων γραμμικοποίησης του $\cos(\theta_i - \theta_j)$
$\bar{\cdot}, \underline{\cdot}$	Σύμβολα για ανώτατο και κατώτατο όριο

2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

i. Γραμμές

g, b Αγωγιμότητα γραμμών [p.u.]

ii. Τιμές, κόστος

c^{UP} Τιμή αγοράς/πώλησης ενέργειας από/προς το άναντι δίκτυο [\$/MWh]

c^D Τιμή πώλησης ενέργειας στους καταναλωτές [\$/MWh]

c^G Κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών [\$/MW]

c^{SU}/c^{SD} Κόστος εκκίνησης/τερματισμού των ελεγχόμενων γεννητριών [\\$]

$VOLL$ Τιμή αποκοπής φορτίου [\$/MWh]

iii. Μονάδες αποθήκευσης

η^{ST} Αποδοτικότητα μονάδων αποθήκευσης

E^{ST} Χωρητικότητα μονάδων αποθήκευσης [MWh]

iv. Συντελεστές, σταθερές και όρια

κ, ξ	Συντελεστές για τη γραμμικοποίηση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$
$\Delta\theta_{min/max}^y$	Κατώτατο/ανώτατο όριο κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης του $\cos(\theta_i - \theta_j)$
$pf_{pn}^{P/Q}$	Κατώτατο/ανώτατο όριο ενεργού/άεργου ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των γραμμών
p/q_{pn}^{ST}	Κατώτατο/ανώτατο όριο ενεργού/άεργου ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των μπαταριών
p/q_{pn}^G	Κατώτατο/ανώτατο όριο ενεργού/άεργου ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των ελεγχόμενων μονάδων

v. Άλλα

Δt	Χρονική διάρκεια [s]
M_1	Μεγάλος επαρκής θετικός αριθμός

3. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

i. Γραμμές μεταφοράς

$pf^{P/Q}$	Ενεργός/άεργος ροή ισχύος γραμμής [p.u.]
------------	--

ii. Άναντι δίκτυο, παραγωγή, μονάδες αποθήκευσης και φορτίο

p^{UP}	Ανταλλαγή ενεργού ισχύος με άναντι δίκτυο [p.u.]
$p^{UPB/S}$	Αγορά/πώληση ενεργού ισχύος από/στο άναντι δίκτυο [p.u.]
$p^{WT/PV/G}$	Παραγωγή ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών/φωτοβολταϊκών/ελεγχόμενων γεννητριών [p.u.]
$p^{ST+/-}$	Φόρτιση/εκφόρτιση ενεργού ισχύος των μονάδων αποθήκευσης [p.u.]
p^D/q^D	Ενεργός/άεργος ισχύς που εξυπηρετείται [p.u.]
p^{shed}/q^{shed}	Ενεργός/άεργος ισχύς που αποκόπτεται [p.u.]
q^G	Άεργος ισχύς των ελεγχόμενων γεννητριών [p.u.]
q^{ST}	Άεργος ισχύς των μονάδων αποθήκευσης [p.u.]

su^G, sd^G	Κόστος εκκίνησης και τερματισμού των ελεγχόμενων γεννητριών[\$]
soc^{ST}	Κατάσταση φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης
p_p^l/q_p^l	Ενεργός/άεργος ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των γραμμών
p_p^{ST}/q_p^{ST}	Ενεργός/άεργος ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των μπαταριών
p_p^G/q_p^G	Ενεργός/άεργος ισχύς κάθε τμήματος της γραμμικοποίησης των ελεγχόμενων μονάδων

iii. Δυαδικές μεταβλητές

u^l	Δυαδική μεταβλητή για καθορισμό της κατάστασης της γραμμής
$u_{ij}\zeta$	Δυαδική μεταβλητή για τη γραμμική προσέγγιση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$
u^{UP}	Δυαδική μεταβλητή για καθορισμό αγοράς ή πώλησης ενέργειας από/στο άναντι δίκτυο
u^{ST}	Δυαδική μεταβλητή για καθορισμό της κατάστασης φόρτισης ή εκφόρτισης των μονάδων αποθήκευσης
u^G	Δυαδική μεταβλητή για καθορισμό της κατάστασης λειτουργίας των ελεγχόμενων μονάδων
u_p^l	Δυαδική μεταβλητή για τη γραμμική προσέγγιση του ορίου ροής φαινόμενης ισχύος των γραμμών
u_p^{ST}	Δυαδική μεταβλητή για τη γραμμική προσέγγιση του ορίου παραγωγής φαινόμενης ισχύος των μπαταριών
u_p^G	Δυαδική μεταβλητή για τη γραμμική προσέγγιση του ορίου παραγωγής φαινόμενης ισχύος των ελεγχόμενων μονάδων

iv. Ζυγοί

v	Μέτρο τάσης ζυγού [p.u.]
θ	Γωνία τάσης ζυγού [rad]

v. Άλλα

ζ_{ij}	Γραμμική προσέγγιση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$
--------------	---

2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση

2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) $\min F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ δηλώνει την συσχέτιση των μεταβλητών ενός προβλήματος, έτσι ώστε να καθοριστεί η τιμή του τελικού μεγέθους. Ουσιαστικά, η αντικειμενική συνάρτηση περιγράφει τον στόχο του διαχειριστή του μικροδικτύου που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Στο παρόν μοντέλο, η αντικειμενική συνάρτηση (1) έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου κοινωνικού κόστους, το οποίο εκφράζεται ως η ελάχιστη αποκοπή φορτίου με τον πιο αποδοτικό τρόπο και τηρώντας τα λειτουργικά όρια, κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας. Το προτεινόμενο μοντέλο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου με τους πιο οικονομικούς όρους, θεωρώντας το κόστος λειτουργίας του δικτύου.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VOLLp_{i,t}^{shed}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G) \end{aligned} \quad (1)$$

Συγκεκριμένα, ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης εκφράζει το κόστος αποκοπής φορτίου. Η αξία αποκοπής φορτίου τίθεται αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κόστη, ώστε προτεραιότητα του μοντέλου να είναι η εξυπηρέτηση της ζήτησης. Ο δεύτερος όρος εκφράζει το κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών. Έπειτα, ο τρίτος

όρος περιγράφει το κόστος ενέργειας που ανταλλάσσεται με το άναντι δίκτυο, δηλαδή η διαφορά κόστους της ενέργειας που αγοράζουμε με την ενέργεια που πουλάμε στο άναντι δίκτυο. Τέλος, ο τέταρτος όρος παρουσιάζει το κόστος εκκίνησης και τερματισμού των ελεγχόμενων γεννητριών.

2.3.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί είναι αναγκαίοι ώστε να εκφραστεί και να μοντελοποιηθεί η λειτουργία του μικροδικτύου και να ελαχιστοποιηθεί η αποκοπή φορτίου με τον πιο αποδοτικό τρόπο, τηρώντας τα λειτουργικά όρια. Οι περιορισμοί χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

Ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος

$$p_{i,t}^G + p_{i,t}^{WT} + p_{i,t}^{PV} + p_{i,t}^{ST-} - p_{i,t}^{ST+} - p_{i,t}^D = \sum_{j=1}^{NB} pf_{i,t}^P \quad (2)$$

$$q_{i,t}^G + q_{i,t}^{ST} - q_{i,t}^D = \sum_{j=1}^{NB} pf_{i,t}^Q \quad (3)$$

Οι περιορισμοί (2) και (3) εξασφαλίζουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό, δηλαδή αν η ενέργεια που εγχέεται σε ένα ζυγό i από τις μονάδες παραγωγής, τις γραμμές μεταφοράς και τις μονάδες αποθήκευσης ισούται με το εξυπηρετούμενο φορτίο του ζυγού. Για το ζυγό 1 λαμβάνεται υπόψη και η ανταλλαγή ενέργειας με το άναντι δίκτυο.

Περιορισμοί ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής

$$p_{i,t}^G{}^2 + q_{i,t}^G{}^2 \leq S_{max}^G{}^2 u_{i,t}^G \quad (4)$$

$$su_{i,t}^G \geq 0, su_{i,t}^G \geq c_t^{SU}(u_{i,t}^G - u_{i,t-1}^G) \quad (5)$$

$$sd_{i,t}^G \geq 0, sd_{i,t}^G \geq c_t^{SD}(u_{i,t-1}^G - u_{i,t}^G) \quad (6)$$

Οι ανισότητες (4)-(6) εκφράζουν την ελάχιστη και μέγιστη ικανότητα παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών σε ενεργό και άεργο ισχύ και το κόστος εκκίνησης και τερματισμού τους ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας.

Περιορισμός γραμμών μεταφοράς

$$pf^{P2} + pf^{Q2} \leq S_{max}^l{}^2 u_{ij,t}^l \quad (7)$$

Εκφράζεται η ελάχιστη και μέγιστη μεταφορική ικανότητα των γραμμών, όταν βρίσκονται εντός λειτουργίας.

Εξισώσεις ροής ισχύος

$$-M_1(1 - u_{ij,t}^l) \leq pf_{ij,t}^P - (g_{ij}(v_{i,t} - v_{j,t} - \zeta_{ij,t} + 1) - b_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})) \leq M_1(1 - u_{ij,t}^l) \quad (8)$$

$$-M_1(1 - u_{ij,t}^l) \leq pf_{ij,t}^Q - (-b_{ij}(v_{i,t} - v_{j,t} - \zeta_{ij,t} + 1) - g_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})) \leq M_1(1 - u_{ij,t}^l) \quad (9)$$

Οι ανισότητες (8) και (9) μετατρέπονται σε ισότητες όταν οι γραμμή είναι εντός λειτουργίας και συνδέουν την τάση και την γωνία με την ροή ισχύος. Η σταθερά M_1 ενεργοποιείται όταν η γραμμή βγει εκτός λειτουργίας ώστε να επιτρέψει στην τάση και τη γωνία των ζυγών να λάβουν της επιθυμητές τιμές και εκφράζει τα όρια αντοχής της γραμμής. Η μεταβλητή ζ με την κατάλληλη μέθοδο τμηματικής γραμμικοποίησης προσεγγίζει την τιμή του όρου $\cos(\theta_i - \theta_j)$.

Περιορισμοί γραμμικοποίησης του $\cos(\theta_i - \theta_j)$

$$\zeta_{ij,t} = \sum_y (\kappa_{ij,t,y} \Delta\theta_{ij,t,y} + u_{ij,t,y}^\zeta \xi_{ij,t,y}) \quad (10)$$

$$\sum_y u_{ij,t,y}^\zeta = 1 \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{min}^y u_{ij,t,y}^\zeta \leq \Delta\theta_{ij,t,y} \leq \Delta\theta_{max}^y u_{ij,t,y}^\zeta \quad (12)$$

$$\sum_y \Delta\theta_{ij,t,y} = \theta_{i,t} - \theta_{j,t} \quad (13)$$

Η γραμμικοποίηση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$ έγινε με τη μέθοδο τμηματικής γραμμικοποίησης, η οποία περιγράφεται από τους περιορισμούς (10)-(13). Η συγκεκριμένη μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά σε παρακάτω υποκεφάλαιο.

Όριο μέτρου τάσης

$$\underline{v}_i \leq v_{i,t} \leq \overline{v}_i \quad (14)$$

Τα όρια του μέτρου τάσης κάθε ζυγού πρέπει να βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων.

Περιορισμοί αποκοπής φορτίου

$$0 \leq p_{i,t}^{shed} \leq P_{i,t}^D \quad (15)$$

$$q_{i,t}^{shed} = p_{i,t}^{shed} \frac{Q_{i,t}^D}{P_{i,t}^D} \quad (16)$$

Οι περιορισμοί (15) και (16) ορίζουν τα όρια αποκοπής φορτίου σε κάθε ζυγό , θεωρώντας σταθερό συντελεστή ισχύος.

Περιορισμοί μονάδων αποθήκευσης

$$SOC_{i,t}^{ST} = SOC_{i,t-1}^{ST} + \frac{n_i^{ST} p_{i,t}^{ST+} \frac{\Delta t}{3600}}{E_i^{ST}} - \frac{p_{i,t}^{ST-} \frac{\Delta t}{3600}}{n_i^{ST} E_i^{ST}} \quad (17)$$

$$\underline{SOC}_i^{ST} \leq soc_{i,t}^{ST} \leq \overline{SOC}_i^{ST} \quad (18)$$

$$0 \leq p_{i,t}^{ST+} \leq \overline{p}_i^{ST+} u_{i,t}^{ST} \quad (19)$$

$$0 \leq p_{i,t}^{ST-} \leq n_i^{ST} \overline{p}_i^{ST-} (1 - u_{i,t}^{ST}) \quad (20)$$

$$\underline{q}_i^{ST} \leq q_{i,t}^{ST} \leq \overline{q}_i^{ST} \quad (21)$$

$$p_{i,t}^{ST2} + q_{i,t}^{ST2} \leq S_{max}^{ST2} \quad (22)$$

Οι έξι περιορισμοί περιγράφουν την λειτουργία και τα όρια των μονάδων αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί (17) και (18) δηλώνουν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και τα όρια φόρτισής της αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (19)-(22) καθορίζουν τα όρια της ενεργού και άεργου ισχύς ανάλογα αν βρίσκεται η μπαταρία σε διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης.

Περιορισμοί ανταλλαγής ενέργειας με το άναντι δίκτυο

$$p_t^{UP} = p_t^{UPB} - p_t^{UPs} \quad (23)$$

$$0 \leq p_t^{UPB} \leq \overline{P^{UPB}} u_t^{UP} \quad (24)$$

$$0 \leq p_t^{UPs} \leq \overline{P^{UPs}} (1 - u_t^{UP}) \quad (25)$$

Αρχικά ο περιορισμός (23) δηλώνει την ποσότητα ισχύος που ανταλλάσσεται με το άναντι δίκτυο. Έπειτα, οι περιορισμοί (24) και (25) εκφράζουν τα όρια ανταλλαγής ενεργού ισχύος με το άναντι δίκτυο, ανάλογα αν γίνετε εισαγωγή ή εξαγωγή ενέργειας.

Περιορισμοί εξυπηρετούμενου φορτίου

$$p_{i,t}^D = P_{i,t}^D - p_{i,t}^{shed} \quad (26)$$

$$q_{i,t}^D = Q_{i,t}^D - q_{i,t}^{shed} \quad (27)$$

Τέλος, οι περιορισμοί (26) και (27) εκφράζουν το πραγματικά εξυπηρετούμενο φορτίο το οποίο ισούται με την απαιτούμενη ζήτηση του καταναλωτή μείον το φορτίο που αποκόπτεται εξαιτίας των μέτρων που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση των συνεπειών της πλημμύρας.

2.4 Δεδομένα δικτύου και προσομοίωσης

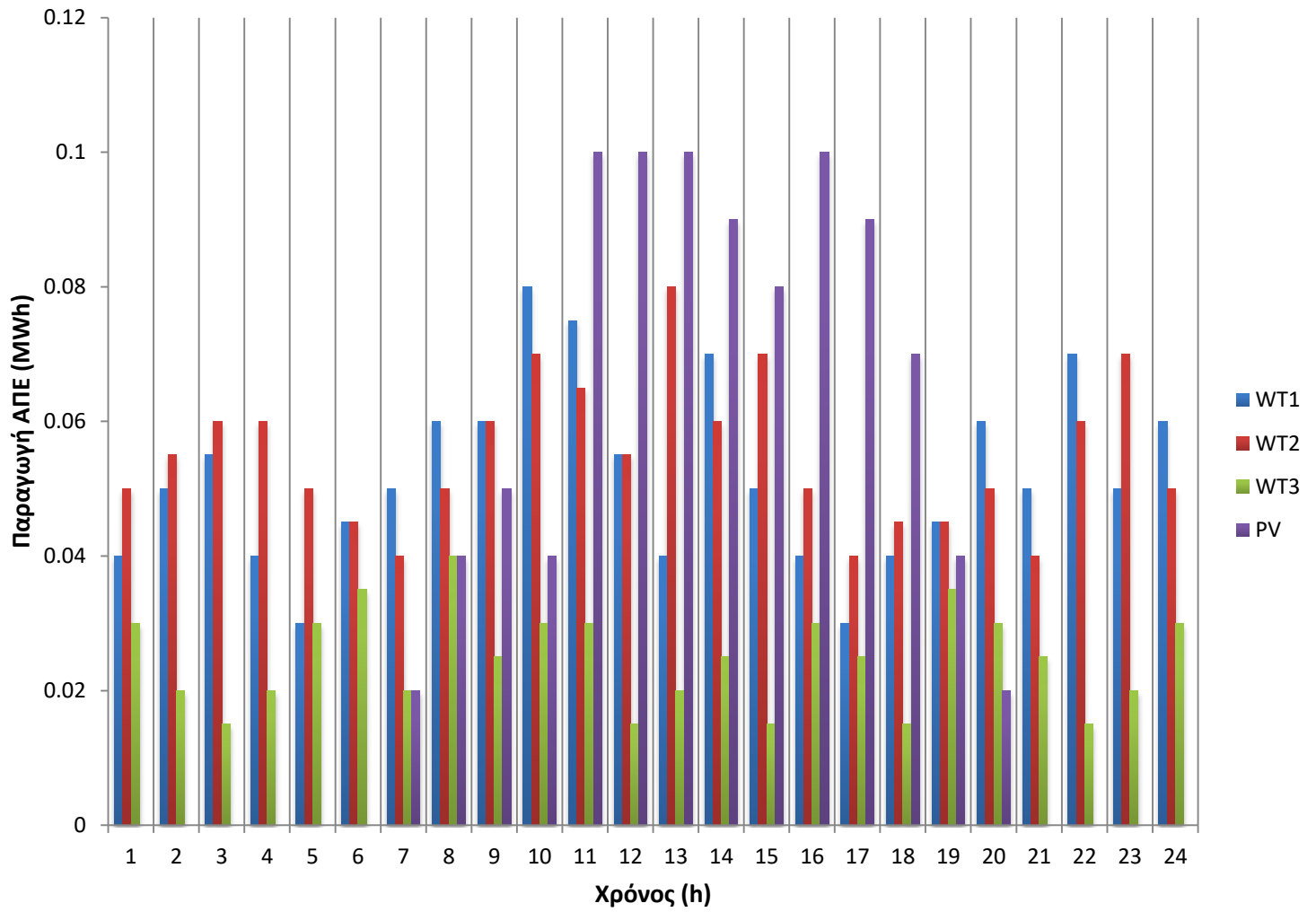
Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε είναι το πρότυπο μικροδίκτυο 33 ζυγών της IEEE. Τα απαιτούμενα δεδομένα ανακτήθηκαν από το άρθρο [12], όπως για παράδειγμα η παραγωγή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, το κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας και τα διάφορα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου.

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται το μικροδίκτυο όπου εφαρμόστηκε το προληπτικό σχέδιο σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας. Αποτελείται από 33 ζυγούς και 32 γραμμές, καθώς και από μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (ελεγχόμενες και μη στοχαστικές μονάδες) και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις ανεμογεννήτριες στους ζυγούς 14, 16, 31, ένα φωτοβολταϊκό στον ζυγό 11, τέσσερις ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής στους ζυγούς 8, 13, 16, 25 και δύο μονάδες αποθήκευσης στους ζυγούς 19 και 26. Επίσης το μικροδίκτυο συνδέεται στον ζυγό 1 με το άναντι δίκτυο, με το οποίο ανταλλάσει ενέργεια.

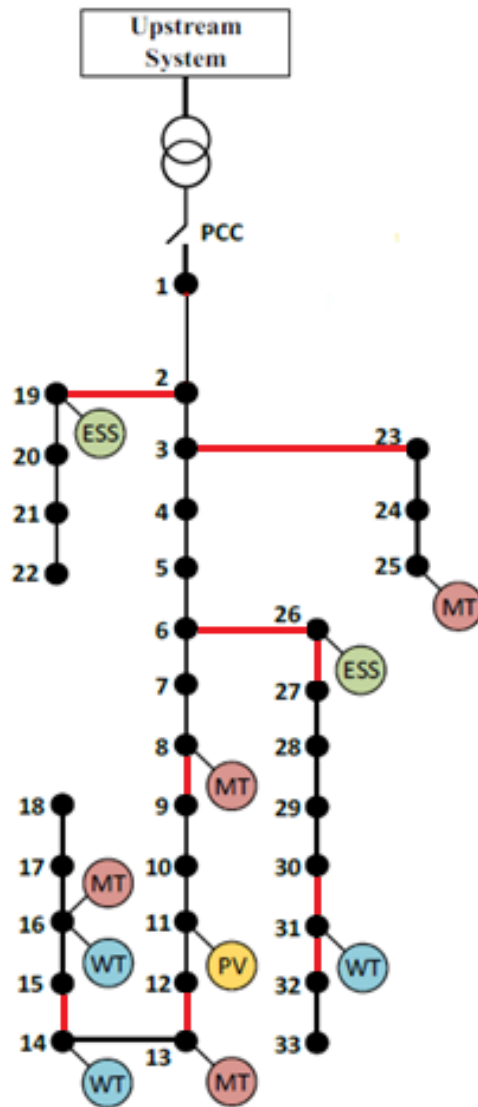
Το μικροδίκτυο εκτείνεται σε ένα μικρό γεωγραφικό χώρο και ως εκ τούτου, όλα τα στοιχεία του εκτίθενται στις ίδιες καιρικές συνθήκες. Η τοποθεσία και η ονομαστική ικανότητα των στοιχείων του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ για το εικοσιτετράωρο που μελετάται το μικροδίκτυο.

Πίνακας 2 Τοποθεσία και ονομαστική ικανότητα στοιχείων του δικτύου

Τύπος	Ζυγός	Ον.Ικανότητα (MW)
WTs	14/16/31	0.8/0.8/0.8
PV	11	0.5
MTs	8/13/16/25	3/2/2/3
ESSs	19/26	0.5/0.5



Σχήμα 6 Παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ του μικροδικτύου



Σχήμα 7 Μονογραμμικό διάγραμμα μικροδικτύου 33 ζυγών της IEEE

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των MTs και των ESSs λαμβάνονται από τη μελέτη [25] και παρουσιάζονται στους πίνακες 3 και 4.

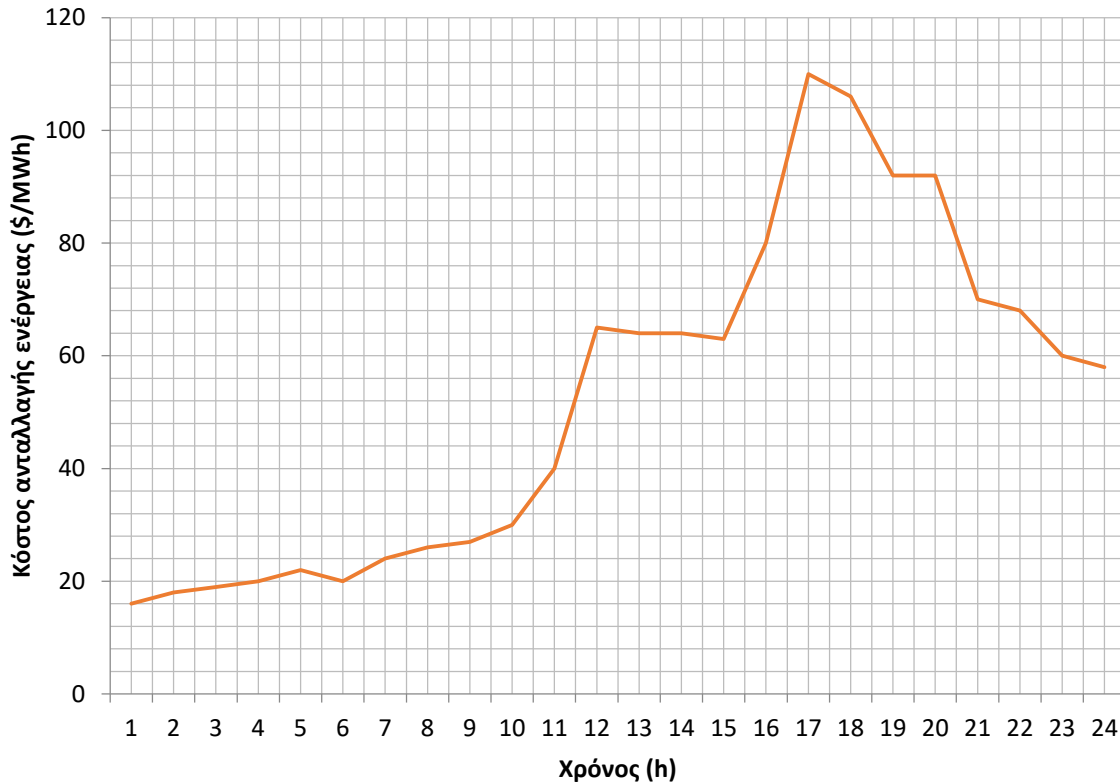
Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής

A/A	$\overline{p^G}$ (MW)	$\underline{p^G}$ (MW)	$\overline{q^G}$ (MVar)	$\underline{p^G}$ (MVar)	c^G (\$/MWh)
MT1	2	0.01	1.5	-1.5	90
MT2	2	0.01	1.5	-1.5	90
MT3	2	0.01	1.5	-1.5	90
MT4	2	0.01	1.5	-1.5	90

Πίνακας 4 Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδων αποθήκευσης

A/A	$SOC_{αρχ}^{ST}$ (%)	$\overline{p^{ST}}$ (MW)	E^{ST} (\$/MWh)	n^{ST}	$\overline{q^{ST}}$ (MVar)	$\underline{q^{ST}}$ (MVar)
ESS1	50	0.5	1.5	0.92	0.3	-0.3
ESS2	50	0.5	1.5	0.92	0.3	-0.3

Η τιμή ανταλλαγής ενέργειας μεταβάλλεται ανά ώρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας από και προς το ανάντι δίκτυο θεωρούνται ίσες σε κάθε χρονική στιγμή. Στην πιο κάτω καμπύλη φαίνεται το κόστος ανταλλαγής της ενέργεια για τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου.



Σχήμα 8 Τιμή ανταλλαγής ενέργειας με το άνατι δίκτυο ανά ώρα

2.5 Γραμμικοποίηση μη γραμμικών περιορισμών

Η παρουσία μη γραμμικών εξισώσεων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθιστά την επίλυσή του αρκετά δύσκολη αφού οδηγεί στη διατύπωση ενός μικτού-ακέραιου μη γραμμικού προβλήματος. Έτσι απαιτείται η ανάγκη γραμμικοποίησης των εξισώσεων αυτών, το οποίο επιτυγχάνεται με διάφορες προσεγγιστικές μεθόδους γραμμικοποίησης.

2.5.1 Γραμμικοποίηση εξισώσεων ροής ισχύος

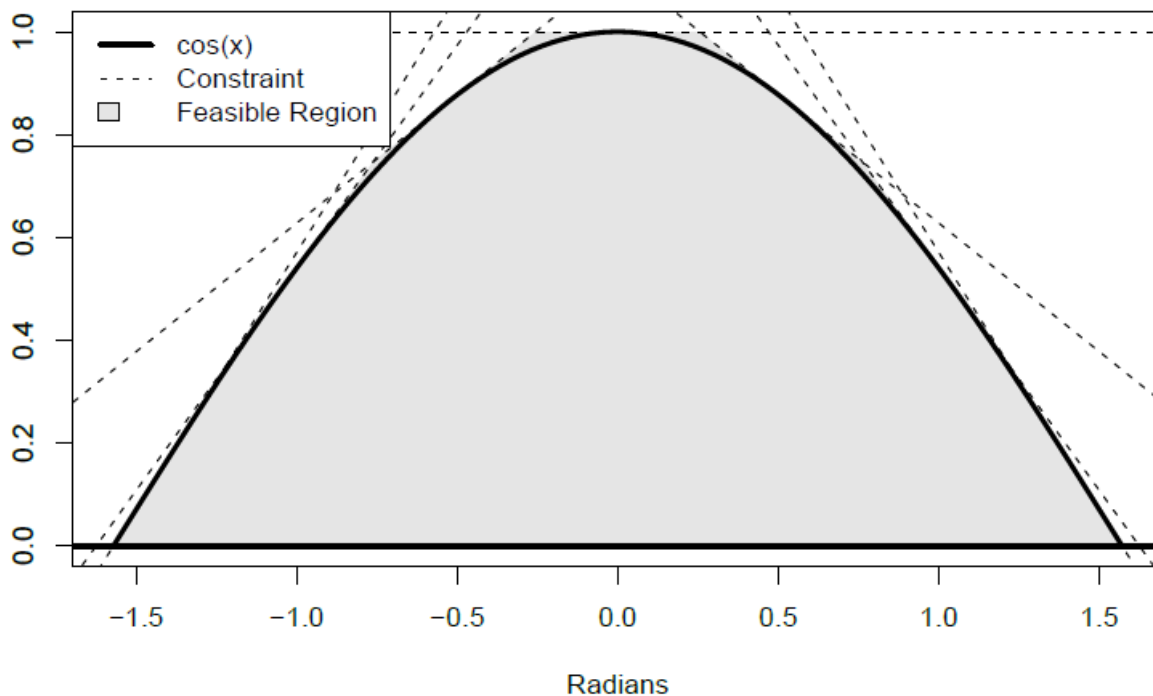
Για την γραμμικοποίηση του όρου $\cos(\theta_i - \theta_j)$ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τμηματικής γραμμικοποίησης [13].

Αρχικά θεωρούμε ότι η διαφορά $\theta_i - \theta_j$ λαμβάνει τιμές από $[-10^\circ, 10^\circ]$, πράγμα λογικό για τις γωνίες δύο γειτονικών ζυγών. Έπειτα το συνημίτονο του διαστήματος αυτού χωρίζεται σε n αριθμό ίσων τμημάτων ως προς τον x άξονα. Η επιλογή του αριθμού των τμημάτων επηρεάζει τον χρόνο υπολογισμού και την ακρίβεια της λύσης. Παρακάτω εξετάζεται η επίδραση της επιλογής του αριθμού αυτού. Στην παρούσα διπλωματική επιλέγονται 10 τμήματα. Για κάθε ένα από τα τμήματα δημιουργήσαμε μια εφαπτομένη ευθεία, της μορφής $y = a \cdot x + b$, στο ενδιάμεσο σημείο του τμήματος.

Έπειτα για την κατάλληλη τιμή της διαφοράς των μεταβλητών θ_i και θ_j επιλέγεται το κατάλληλο τμήμα και επομένως η κατάλληλη εφαπτομένη. Τέλος, η προσεγγιστική τιμή του $\cos(\theta_i - \theta_j)$ ισούται με την τιμή του ζ , η οποία είναι η τιμή y τις συγκεκριμένης εφαπτομένης με εξίσωση:

$$\zeta_n = a_n(\theta_n - \theta_n) + b_n \quad (28)$$

όπου τα a και b είναι η κλίση και ο σταθερός όρος για κάθε μια από τις n εφαπτόμενες, αντίστοιχα.



Σχήμα 9 Γραμμική προσέγγιση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$ χωρίζοντάς το σε ίσα τμήματα δημιουργώντας εφαπτόμενες ευθείες σε κάθε ένα από αυτά

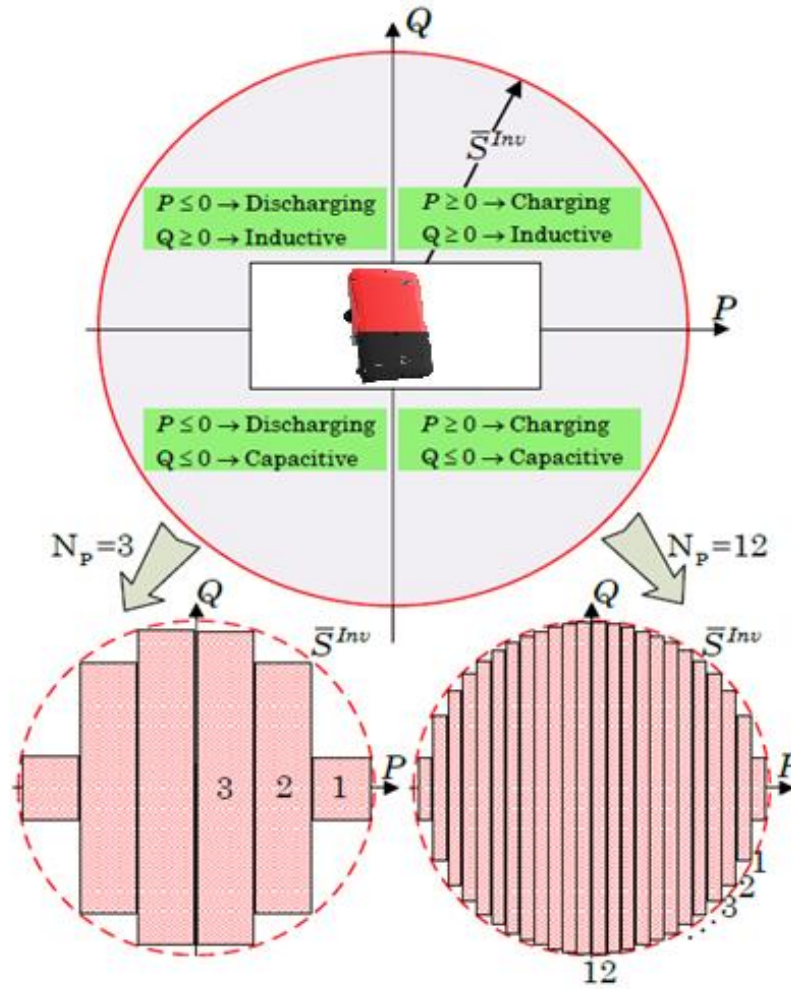
2.5.2 Γραμμικοποίηση εξίσωσης $P^2 + Q^2 < S_{\max}^2$

Στην μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος παρουσιάσαμε τους περιορισμούς που εκφράζουν την ελάχιστη και μέγιστη ικανότητα των γραμμών μεταφοράς καθώς και τον ελεγχόμενων γεννητριών και μπαταριών με τη μορφή μη γραμμικών ανισοτήτων.. Για τις μονάδες παραγωγής και τις μπαταρίες θεωρώντας τον τετραγωνικό περιορισμό, λαμβάνονται υπόψη τα όρια των αναστροφών που συνδέουν τις μονάδες αυτές με το δίκτυο. Απαιτείται η χρήση της κατάλληλης μεθόδου ώστε να επιτευχθεί η γραμμική προσέγγιση του περιορισμού.

Η ύπαρξη των συγκεκριμένων περιορισμών καθιστά το πρόβλημά μας ως ένα πρόβλημα μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς. Με τη γραμμικοποίηση των τετραγωνικών περιορισμών πραγματοποιείται η απλοποίηση και μείωση της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

Η μέθοδος γραμμικοποίησης είναι η εξής [14]:

Παρατηρείται ότι η πιο πάνω εξίσωση είναι η εξίσωση κύκλου. Έτσι αντίστοιχα όπως προηγουμένως, γίνεται τμηματοποίηση του κύκλου σε ίσα τμήματα (λωρίδες) ως προς τον x άξονα. Η επιλογή του αριθμού των τμημάτων επηρεάζει τον χρόνο εκτέλεσης και την ακρίβεια της λύσης. Στην παρούσα διπλωματική επιλέγονται 10 τμήματα. Κάθε τμήμα έχει ελάχιστη και μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η ενεργός και άεργος ισχύς ανάλογα, σε πιο τμήμα βρισκόμαστε και πιο στοιχείο του δικτύου μελετάμε. Στη συνέχεια, επιλέγεται το κατάλληλο τμήμα στο οποίο πρέπει να ανήκει η ενεργός και άεργος ισχύς ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία του μικροδικτύου και τους περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται.



Σχήμα 10 Γραμμική προσέγγιση της εξίσωσης $P^2 + Q^2 < S_{\max}^2$, χωρίζοντας τον κύκλο σε ίσα τμήματα ως προς τον x άξονα δημιουργώντας ορθογώνια που η επιλογή του καθενός ορίζει τα όρια και την κατάλληλη τιμή της ενεργού και άεργου ισχύος

Οι περιορισμοί (29)-(33) περιγράφουν τη μέθοδο τμηματικής γραμμικοποίησης του κύκλου. Η μέθοδος εφαρμόζεται ανάλογα για να επιτευχθεί η γραμμική προσέγγιση των τετραγωνικών περιορισμών που περιγράφουν τα όρια των γραμμών, των ελεγχόμενων γεννητριών και των μονάδων αποθήκευσης .

$$pf_{ij,t}^P = \sum_{n=1}^{10} p_{ij,t,n}^l \quad (29)$$

$$pf_{ij,t}^Q = \sum_{n=1}^{10} q_{ij,t,n}^l \quad (30)$$

$$\sum_n u_{ij,t,y}^l = 1 \quad (31)$$

$$pf_{ij,t,n}^P \min u_{ij,t,n}^l \leq pf_{ij,t,n}^P \leq pf_{ij,t,n}^P \max u_{ij,t,n}^l \quad (32)$$

$$pf_{ij,t,n}^Q \min u_{ij,t,n}^l \leq pf_{ij,t,n}^Q \leq pf_{ij,t,n}^Q \max u_{ij,t,n}^l \quad (33)$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή των διαφόρων σεναρίων που εφαρμόστηκαν καθώς και ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους, σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας. Παράλληλα, εξετάζεται η ευαισθησία της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και του χρόνου εκτέλεσης του προβλήματος ως προς τον αριθμό των τμημάτων που χρησιμοποιούνται για την γραμμικοποίηση του συνημίτονου και των τετραγωνικών περιορισμών. Εξετάζοντας και αναλύοντας διάφορες περιπτώσεις σεναρίων, καταλήγουμε στην επιλογή του βέλτιστου προγραμματισμού του μικροδικτύου, ώστε να γίνεται ενίσχυση της ανθεκτικότητας.

Εφαρμόστηκαν προληπτικά μέτρα στο μικροδίκτυο τα οποία αναδεικνύουν την καταλληλότερη λειτουργία του μικροδικτύου ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση του κόστους λαμβάνοντας υπόψη τις βλάβες που μπορεί να προκαλέσει η επερχόμενη πλημμύρα στις γραμμές του μικροδικτύου. Ως κρίσιμες γραμμές θεωρούνται οι γραμμές με πιθανότητα βλάβης άνω ενός προκαθορισμένου ορίου. Θέτοντας εκτός λειτουργίας τις κρίσιμες γραμμές, σχηματίζονται νησίδες, όπου η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στην βέλτιστη λειτουργία τους, προγραμματίζοντας κατάλληλα τη λειτουργία των μονάδων για την αντιμετώπιση της επίδραση της πλημμύρας. Ακόμα, ελαχιστοποιώντας τη ροή ισχύος των κρίσιμων γραμμών, αποφεύγεται μια πιθανή διαταραχή σε περίπτωση απώλειας των συγκεκριμένων γραμμών. Επίσης εξετάζεται η συνεισφορά της αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του.

Τέλος, με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo εξετάζεται η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου και η επιλογή του καταλληλότερου ορίου για την επιλογή των κρίσιμων γραμμών.

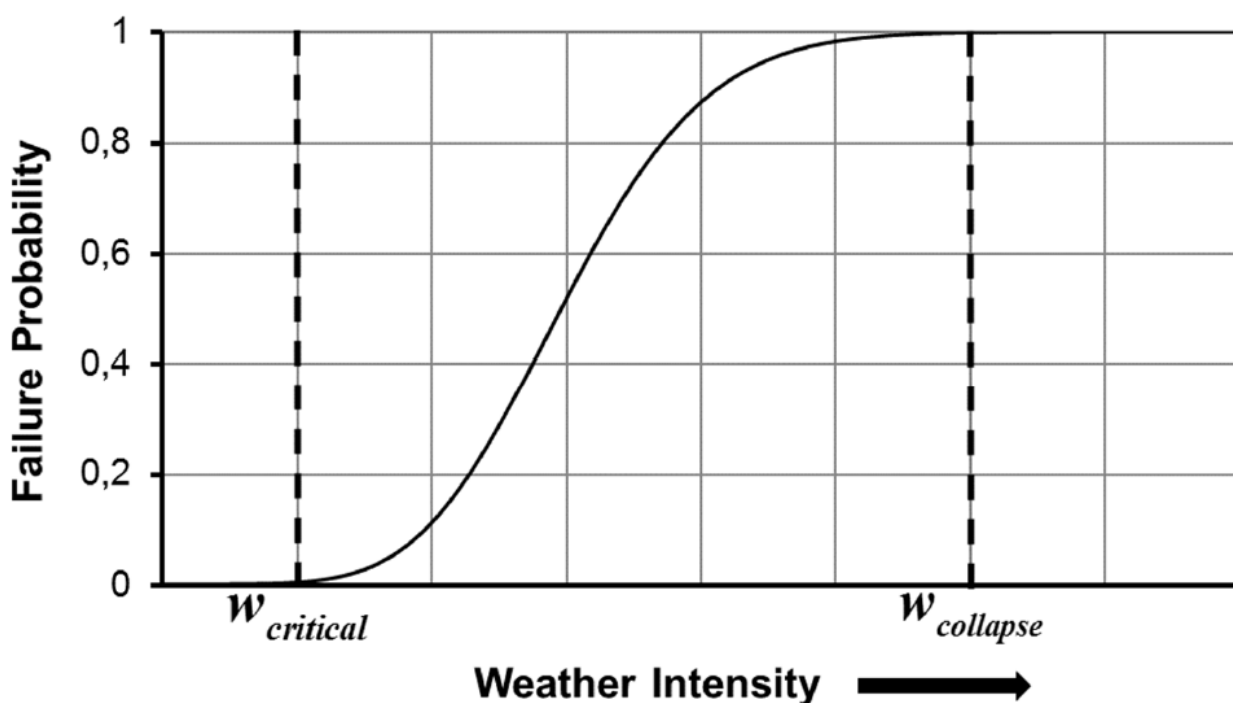
3.2 Μοντελοποίηση επίδρασης πλημμύρας στο μικροδίκτυο

Τα τελευταία χρόνια, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και οι πλημμύρες έχουν προκαλέσει τις περισσότερες καταστροφές στα δίκτυα και έχουν οδηγήσει στις μεγαλύτερες διακοπές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες φυσικές καταστροφές. Για το λόγο αυτό, η ερευνητική κοινότητα έχει εστιάσει κυρίως στη μελέτη επίδρασης των ακραίων καιρικών φαινομένων στα ΣΗΕ και στην εύρεση μέτρων αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών.

Για τη μοντελοποίηση της επίδρασης των ακραίων καιρικών φαινομένων και των πλημμυρών στο ΣΗΕ, συχνά χρησιμοποιούνται οι καμπύλες ευθραυστότητας (fragility curves) των στοιχείων του δικτύου. Η καμπύλη ευθραυστότητας ενός στοιχείου του συστήματος δίνει την πιθανότητα βλάβης του στοιχείου αυτού ως συνάρτηση της έντασης του καιρικού φαινομένου. Οι καμπύλες ευθραυστότητας έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας ενός ΣΗΕ έναντι των καιρικών φαινομένων. Η μορφή της καμπύλης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη σχέση του καιρικού φαινομένου και της πιθανότητας βλάβης του στοιχείου. Για την εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης του στοιχείου, η παράμετρος που περιγράφει την ένταση του καιρικού φαινομένου αντιστοιχίζεται στην πιθανότητα βλάβης, σύμφωνα με την καμπύλη ευθραυστότητας. Ελάχιστες μελέτες, έως τώρα, έχουν επικεντρωθεί στην επίδραση των πλημμυρών στα ΣΗΕ. Συνήθως, τα στοιχεία τα οποία πλήττονται από τις πλημμύρες είναι οι υποσταθμοί, οι μονάδες παραγωγής, οι πυλώνες καθώς και τα υπόγεια καλώδια λόγω της διάβρωσης του εδάφους, αλλά και της υδραυλικής πίεσης. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται μόνο η επίδραση της πλημμύρας στα υπόγεια καλώδια. Για τον υπολογισμό της πιθανότητας βλάβης των γραμμών του μικροδικτύου έγινε χρήση των καμπυλών ευθραυστότητας.

Υπάρχουν διάφορων ειδών καμπύλες ευθραυστότητας ανάλογα με το στοιχείο και το φαινόμενο που μελετάμε. Οι γραμμές και οι πυλώνες αποτελούν τα στοιχεία του μικροδικτύου

τα οποία δέχονται το μεγαλύτερο πλήγμα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας, η βλάβη μιας υπόγειας γραμμής έχει διαφορετική πιθανότητα από τη βλάβη ενός πυλώνα. Συνεπάγεται, λοιπόν, ότι για κάθε στοιχείο του μικροδικτύου αντιστοιχεί διαφορετική καμπύλη ευθραυστότητας. Στο σχήμα 11 παρουσιάζεται η γενική μορφή της καμπύλης ευθραυστότητας και στον πίνακα 5 οι τιμές της πιθανότητας κατάρρευσης των ευάλωτων γραμμών του μικροδικτύου. Να αναφερθεί ότι λόγω μη εύρεσης συγκεκριμένης καμπύλης που αφορά υπόγειες γραμμές, οι τιμές των πιθανοτήτων επιλέχθηκαν με βάση το άρθρο περί του θέματος [8].



Σχήμα 11 Γενική μορφή καμπύλης ευθραυστότητας σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου

Η δημιουργία μιας καμπύλης ευθραυστότητας απαιτεί μεγάλη μελέτη ιστορικών δεδομένων καθώς και εντατική παρακολούθηση γεγονότων σε πραγματικό χρόνο από οργανισμούς που μελετούν καιρικά φαινόμενα. Στην παρούσα εργασία απαιτούνται οι προδιαγραφές της επερχόμενης πλημμύρας οι οποίες παρέχονται από τους οργανισμούς μελέτης καιρικών φαινομένων. Συγκεκριμένα για τις πλημμύρες λαμβάνονται υπόψη η στάθμη του νερού

σε διάφορα γεωγραφικά σημεία και η ένταση της βροχόπτωσης. Ως αποτέλεσμα δημιουργούνται οι καμπύλες ευθραυστότητας οι οποίες προσδιορίζουν την πιθανότητα κατάρρευσης στοιχείων όπως υπόγειες γραμμές.

Πίνακας 5 Πιθανότητα κατάρρευσης ευάλωτων γραμμών σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας

ΥΠΟΓΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ(%)
2-19	5.72
3-23	11.74
6-26	9.81
8-9	27.63
12-13	28.39
14-15	25.86
26-27	26.39
30-31	21.08
31-32	18.28

3.3 Λειτουργία μικροδικτύου χωρίς την εφαρμογή προληπτικών μέτρων

Αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά του μικροδικτύου χωρίς την εφαρμογή προληπτικών μέτρων. Η μόνη απαίτηση είναι η κατάλληλη λειτουργία του μικροδικτύου ώστε η αντικειμενική συνάρτηση (34) να ελαχιστοποιείται.

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \\
& + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \\
& + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\
& + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G) \tag{34}
\end{aligned}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (34) αποτελείται από τέσσερις όρους. Ο πρώτος όρος εκφράζει το κόστος του μη εξυπηρετούμενου φορτίου, το οποίο έχει και την πιο μεγάλη σημασία και αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας μεγάλη τιμή κόστους για κάθε MWh που αποκόπτεται. Έτσι δώσαμε μεγάλη τιμή στην μεταβλητή VoLL και συγκεκριμένα 1000 \$/MWh. Με αυτό τον τρόπο δίνουμε προτεραιότητα στην ικανοποίηση της ζήτησης των καταναλωτών.

Ο δεύτερος όρος εκφράζει το κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών. Το κόστος παραγωγής τίθεται ίσο με 90 \$/MWh. Το κόστος των γεννητριών δεν εξαρτάται μόνο από την παραγωγή τους αλλά και από τον τέταρτο όρο, ο οποίος εκφράζει το συνολικό κόστος εκκίνησης και τερματισμού των ελεγχόμενων γεννητριών, με τιμές 250 \$ και 50 \$ αντίστοιχα.

Επιπλέον, ο τρίτος όρος περιγράφει το κόστος ενέργειας που ανταλλάσσεται με το άναντι δίκτυο, δηλαδή η διαφορά κόστους της ενέργειας που αγοράζουμε με την ενέργεια που πουλάμε στο άναντι δίκτυο. Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας από και προς το άναντι δίκτυο θεωρούνται ίσες σε κάθε χρονική στιγμή και έχουν παρουσιαστεί στο σχήμα 8.

Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του μικροδικτύου και το κόστος των ελεγχόμενων γεννητριών, της ανταλλαγής ενέργειας με το άναντι δίκτυο και η εξυπηρέτηση του ζητούμενου φορτίου.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης στην αρχική λειτουργία του δικτύου

ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ (\$x10³)	3.2666383
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ (\$x10³)	3.2666383
ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ζήτηση καλύπτεται πλήρως καθώς δεν θεωρούνται βλάβες στις γραμμές του μικροδικτύου. Επίσης προτιμάται η κάλυψη του φορτίου μέσω αγοράς ενέργειας από το ανάντι δίκτυο, καθώς η τιμή αγοράς ενέργειας είναι χαμηλότερη από το κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής. Στις περιπτώσεις που λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της πλημμύρας, παρατηρείται η χρήση των ελεγχόμενων μονάδων ώστε να γίνει η κατάλληλη κατανομή της παραγωγής για να εξυπηρετηθεί η ζήτηση φορτίου.

3.4 Σχηματισμός ελεγχόμενων νησίδων

Εξετάζεται ο σχηματισμός ελεγχόμενων νησίδων με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του μικροδικτύου έναντι πλημμύρας. Θεωρείται ότι η επίδραση της πλημμύρας σε κάθε γραμμή εξαρτάται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του χώρου διέλευσης της γραμμής. Επομένως οι πιθανότητες βλάβης των γραμμών διαφέρουν. Επίσης, η πιθανότητα αυτή θεωρείται ότι διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της περιόδου υπό εξέταση.

Στόχος του σχηματισμού ελεγχόμενων νησίδων είναι ο διαχωρισμός του μικροδικτύου σε ευσταθείς και αυτό-επαρκείς νησίδες, απομονώνοντας έτσι τα ευάλωτα στοιχεία του, των οποίων η κατάρρευση μπορεί να οδηγήσει στην εκδήλωση αλυσιδωτών γεγονότων. Η απομόνωση των ευάλωτων στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της εξάπλωσης αυτών των γεγονότων και εμφάνισης σφαλμάτων στις περιοχές που δεν απειλούνται άμεσα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Επομένως τίθοντας τις κρίσιμες γραμμές εκτός λειτουργίας, αποφεύγεται μια πιθανή

διαταραχή σε περίπτωση απώλειας των συγκεκριμένων γραμμών, ενώ παράλληλα συνεχίζεται η αδιάκοπη εξυπηρέτηση του μέγιστου δυνατού ποσοστού της ζήτησης.

Περίπτωση 1

Μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 \min W_1 [& \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G)] \\
 & + W_2 \sum_{j=1}^{NK} |pf_{ij,t}^{PKPISIMEE}| \quad (35)
 \end{aligned}$$

Μελετούνται δύο περιπτώσεις με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση σε μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών και με όλες τις γραμμές να είναι εντός λειτουργίας. Στο πρώτο σενάριο απαιτείται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (35) η οποία αποτελείται από πέντε όρους. Ο πρώτος όρος εκφράζει το κόστος του μη εξυπηρετούμενου φορτίου, το οποίο έχει και τη πιο μεγάλη σημασία και αυτό επιτυγχάνεται από τη μεγάλη τιμή κόστος για κάθε MWh που αποκόπτεται. Έτσι δώσαμε μεγάλη τιμή στην μεταβλητή VoLL και συγκεκριμένα 1000 \$/MWh.

Ο δεύτερος όρος εκφράζει το κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών. Το κόστος παραγωγής είναι 90 \$/MWh. Το κόστος των γεννητριών δεν εξαρτάται μόνο από την παραγωγή τους αλλά και από τον τέταρτο όρο, ο οποίος παρουσιάζει το συνολικό κόστος

εκκίνησης και τερματισμού των ελεγχόμενων γεννητριών, με τιμές 250 \$ και 50 \$ αντίστοιχα για κάθε λειτουργία.

Επιπλέον, ο τρίτος όρος περιγράφει το κόστος της ενέργειας που ανταλλάσσεται με το άναντι δίκτυο. Οι τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας από και προς το άναντι δίκτυο θεωρούνται ίσες σε κάθε χρονική στιγμή.

Ο πέμπτος και τελευταίος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (35) εκφράζει το άθροισμα μεταφοράς ενεργούς ισχύος των κρίσιμων γραμμών. Η προσθήκη αυτού του όρου στην αντικειμενική συνάρτηση γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ροές στις κρίσιμες γραμμές, με στόχο την ελάχιστη μεταβολή της λειτουργίας του μικροδικτύου σε περίπτωση απώλειας των γραμμών αυτών. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται την ανθεκτικότητα του. Για να επιτευχθεί αυτό, ορίσαμε δύο συντελεστές βάρους οι οποίοι ομαδοποιούν την συνάρτηση σε δύο μέρη. Οι τέσσερις πρώτοι όροι πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή βάρους W_1 ο οποίος ισούται με 1 και ο πέμπτος με τον W_2 , ο οποίος ισούται με 130. Η τιμή των δύο συντελεστών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου, έπειτα στην ελαχιστοποίηση της ροής ισχύος των κρίσιμων γραμμών και τέλος στο κόστος των ελεγχόμενων μονάδων και τις ανταλλαγής ενέργειας με το άναντι δίκτυο.

Η επιλογή των κρίσιμων γραμμών έγινε με βάση την πιθανότητα κατάρρευσής τους και συγκεκριμένα είναι αυτές που έχουν πιθανότητα κατάρρευσης μεγαλύτερη από 5%. Η τιμές της μεταφοράς ισχύος είναι σε απόλυτη τιμή αφού η φορά της ισχύος από τον ένα ζυγό στον άλλο είναι αυθαίρετη. Έτσι χρειάζεται η εισαγωγή των απολύτων τιμών ώστε να λάβουμε την τιμή της συνολικής ισχύς που μεταφέρουν οι κρίσιμες γραμμές. Αυτό όμως οδηγεί στην μη γραμμικότητα του προβλήματος. Θέλουμε να αποφύγουμε τους περίπλοκους και χρονοβόρους υπολογισμούς ώστε τα προληπτικά μέτρα να εφαρμόζονται εγκαίρως πριν την εκδήλωση της πλημμύρας. Έτσι για την απλοποίηση του προβλήματος προστίθενται οι κατάλληλοι περιορισμοί, οι οποίοι ανακτήθηκαν από το άρθρο [18], με σκοπό τη γραμμική προσέγγιση των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης που περιέχουν απόλυτο. Οι περιορισμοί για να γίνει η γραμμικοποίηση είναι η εξής:

Δημιουργούμε δύο νέες μεταβλητές U και V για κάθε κρίσιμη γραμμή. Η ισχύς που ρέει σε κάθε κρίσιμη γραμμή αντικαθιστάται στην αντικειμενική συνάρτηση από το άθροισμά των

δύο αντίστοιχων μεταβλητών. Έτσι επιτυγχάνεται η αποφυγή των όρων που περιέχουν απόλυτο και το πρόβλημα μετατρέπεται σε γραμμικό. Έπειτα προστίθενται στο πρόβλημα οι περιορισμοί (36) και (37). Σκοπός των περιορισμών είναι οι μεταβλητές U και V να προσεγγίσουν την τιμή ισχύς της κρίσιμης γραμμής. Οι περιορισμοί ισχύουν για κάθε μια από τις κρίσιμες γραμμές.

$$pf_{ij,t}^{P_{KΡΙΣΙΜΕΣ}} + U_{ij,t} - V_{ij,t} = 0 \quad (36)$$

$$U_{ij,t} \geq 0, V_{ij,t} \geq 0 \quad \forall ij \in N_{KΡΙΣΙΜΕΣ} \quad (37)$$

Εφαρμόζοντας τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση (35) στο μικροδίκτυο ελαχιστοποιείται η ροή στις κρίσιμες γραμμές. Παρατηρείται η συμπεριφορά της λειτουργίας του μικροδικτύου ώστε να ελαχιστοποιείται η αποκοπή φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους όταν ελαχιστοποιείται η ροή στις κρίσιμες γραμμές. Στον πίνακα 7 ακολουθούν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν.

Πίνακας 7 Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης για την πρώτη περίπτωση

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (\$x10³)	4.711287
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ(\$x10³)	1.960887
ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$x10³)	2.0004181
ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	750
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ(\$x10³)	2.7504
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΣΧΥΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (MW)	49.8279

Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου των καταναλωτών, αναμενόμενο λόγω της μεγάλης τιμής που ορίσαμε στη παράμετρο VoLL. Συγκεκριμένα, οι απώλειες φορτίου είναι μηδέν. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι τίθενται σε λειτουργία οι ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής έναντι της

περίπτωσης όπου δεν λήφθηκαν προληπτικά μέτρα. Με τη λειτουργία των ελεγχόμενων μονάδων, το μικροδίκτυο ουσιαστικά χωρίζεται σε νησίδες των οποίων οι ανάγκες καλύπτονται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Έτσι στις κρίσιμες γραμμές που τα συνδέουν ρέει η ελάχιστη δυνατή ενεργός ισχύς. Επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της ροής των κρίσιμων γραμμών του μικροδικτύου και σε περίπτωση αποκοπής ή κατάρρευσής τους δεν επηρεάζεται η λειτουργία του. Πιο αναλυτικά, η συνολική ισχύς που ρέει στις κρίσιμες γραμμές μειώνεται από 83.8700 MW σε 49.8279 MW, δηλαδή μείωση κατά 40.59%

Περίπτωση 2

Μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \\ + \sum_{j=1}^{NK} |pf_{ij,t}^{PKPISIMES}| \end{aligned} \quad (38)$$

Στο δεύτερο σενάριο απαιτείται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (38). Ο πρώτος όρος εκφράζει το κόστος αποκοπής φορτίου και ο δεύτερος τη μεταφορά ισχύς των κρίσιμων γραμμών, ο οποίος λόγω του απολύτου γραμμικοποιείται όπως και στο προηγούμενο σενάριο. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιποι οικονομικοί δείκτες και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού κόστους που προκύπτει από το κόστος αποκοπής φορτίου και το κόστος παραγωγής. Ουσιαστικά η προηγούμενη περίπτωση οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους. Δεν χρειάζονται οι συντελεστές βάρους γιατί η λειτουργία των ελεγχόμενων μονάδων δεν επηρεάζει το συνολικό κόστος. Στον πίνακα 8 ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Ομοίως, παρατηρείται η ελαχιστοποίηση της ροής ενεργούς ισχύος στις κρίσιμες γραμμές.

Πίνακας 8 Αποτελέσματα των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης για την δεύτερη περίπτωση

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (\$x10³)	5.759987
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ(\$x10³)	0.8985054
ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$x10³)	3.8614816
ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	1000
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ(\$x10³)	4.8614816
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΣΧΥΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ (MW)	49.5745

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά με πριν όσο αφορά την αποκοπή φορτίου, δηλαδή μηδέν αφού δίνεται προτεραιότητα στην ελαχιστοποίησή της. Η συνολική ισχύς που ρέει τις κρίσιμες γραμμές είναι όμοια με το προηγούμενο σενάριο, αφού επιδιώκεται παρόμοια συμπεριφορά στη λειτουργία του μικροδικτύου. Οι διαφορές που υπάρχουν με το προηγούμενο σενάριο είναι στη λειτουργία των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και στην ανταλλαγή με το άναντι δίκτυο. Αυτό οφείλεται στη μη ένταξή τους στην αντικειμενική συνάρτηση (38), για αυτό και είναι πιο ελαστική η λειτουργία τους. Όπως αναμενόταν το συνολικό κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου στην Περίπτωση 1 είναι μικρότερο σε σύγκριση με την Περίπτωση 2, καθώς στην αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνεται υπόψη το κόστος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής και το κόστος ανταλλαγής ενέργειας με το ανάντι δίκτυο. Επίσης παρατηρείται η μείωση της συνολική ισχύς που ρέει στις κρίσιμες γραμμές κατά 40.89%

3.5 Μελέτη ευαισθησίας

Έχει αναφερθεί ότι σε κάποια σενάρια γίνεται η μελέτη της ευαισθησίας κάποιων στοιχείων του μικροδικτύου και εξετάζεται η πιθανότητα κατάρρευσής τους έναντι της επερχόμενης πλημμύρας. Συγκεκριμένα τα στοιχεία που λαμβάνουμε υπόψη είναι οι υπόγειες γραμμές. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να προσδιοριστούν οι κρίσιμες γραμμές, δηλαδή αυτές που έχουν πιθανότητα βλάβης άνω ενός προκαθορισμένου ορίου.

3.5.1 Όριο ευθραυστότητας

Στη μελέτη ευαισθησίας του προτεινόμενου μοντέλου ως προς το προκαθορισμένο όριο επιλογής των κρίσιμων γραμμών ενός μικροδικτύου, εξετάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές του ορίου. Τονίζεται ότι στη μελέτη ευαισθησίας οι κρίσιμες γραμμές τίθενται εκτός λειτουργίας και το μικροδίκτυο διαχωρίζεται σε ελεγχόμενες νησίδες κατανέμοντας κατάλληλα την παραγωγή των ελεγχόμενων μονάδων. Υπενθυμίζεται πως μία γραμμή θεωρείται κρίσιμη όταν η πιθανότητα κατάρρευσης της είναι μεγαλύτερη του προκαθορισμένου ορίου.

Περίπτωση 3

Μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VOLLp_{i,t}^{shed}) \\ & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\
& + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G)
\end{aligned} \tag{39}$$

Στην δεύτερη περίπτωση μελετάμε δύο σενάρια με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση σε μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών και με αρχικά όλες τις γραμμές να είναι εντός λειτουργίας. Σκοπός της μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους. Βάσει των προληπτικών ελέγχων τίθενται εκτός λειτουργίας οι κρίσιμες γραμμές και κατανέμεται κατάλληλα η παραγωγή των ελεγχόμενων μονάδων. Με την πράξη αυτή έχουμε κάποιες απώλειες στην εξυπηρέτηση φορτίου αλλά αποφεύγουμε την πιθανή κατάρρευση του μικροδικτύου λόγω απώλειας των γραμμών και ως αποτέλεσμα την αποφυγή του κόστους αποκατάστασης και της χρονοβόρας αυτής διαδικασίας. Η αντικειμενική συνάρτηση (39) παραμένει όπως την προαναφέραμε στην μοντελοποίηση του προβλήματος, χωρίς να έχει προστεθεί κάποιος επιπλέον όρος. Η αντικειμενική συνάρτηση (39) ελαχιστοποιείται για τιμές του προκαθορισμένου ορίου 5%, 10%, 15%, 20% και 25%. Οι γραμμές όπου η πιθανότητα κατάρρευσης τους ξεπερνά το όριο τέθηκαν εκτός λειτουργίας και η λειτουργία των ελεγχόμενων νησίδων βελτιστοποιήθηκε. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα και επιλέγεται η κατάλληλη τιμή ορίου ευθραυστότητας ώστε να ενισχύεται η ανθεκτικότητα του μικροδικτύου βάση της προσομοίωσης Monte Carlo σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας.

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο παρουσιάστηκαν στον πίνακα 5 οι πιθανότητες κατάρρευσης κάθε κρίσιμης γραμμής σε περίπτωση επερχόμενης πλημμύρας. Στον πίνακα 9 υποδεικνύονται με $\sqrt{\quad}$ ποιες γραμμές πρέπει να τεθούν εκτός λειτουργίας για την αντίστοιχη τιμή κάθε ορίου, δηλαδή οι κρίσιμες. Η σύνδεση και αποσύνδεση των γραμμών εντός και εκτός του δικτύου γίνεται με ειδικούς ελεγχόμενους διακόπτες.

Πίνακας 9 Οι ευάλωτες γραμμές του μικροδικτύου τίθενται εκτός λειτουργίας εάν η πιθανότητα κατάρρευσης ξεπερνάει την τιμή του ορίου ευθραυστότητας

ΕΥΑΛΩΤΗ ΓΡΑΜΜΗ	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ	ΟΡΙΟ ΕΥΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ				
		5%	10%	15%	20%	25%
2-19	5.72	√				
3-23	11.74	√	√			
6-26	9.81	√				
8-9	27.63	√	√	√	√	√
12-13	28.39	√	√	√	√	√
14-15	25.86	√	√	√	√	√
26-27	26.39	√	√	√	√	√
30-31	21.08	√	√	√	√	
31-32	18.28	√	√	√		

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο προληπτικός έλεγχος της λειτουργίας του μικροδικτύου για τις διάφορες τιμές του ορίου και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 3

ΟΡΙΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (\$x10 ⁴)	ΑΠ.ΦΟΡΤΙΟΥ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ(\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (\$)	ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ (\$)
5%	2.706986	23.53086	0.8369607	1.9520424	750	0
10%	2.123785	17.53062	1.0051958	1.9520424	750	0
15%	2.045498	17.53062	1.9430986	0.481266	500	0
20%	2.045533	17.53062	1.943449	0.481266	500	0
25%	2.045416	17.53062	1.9422702	0.481266	500	0

Η επιλογή του ορίου γίνεται με κριτήριο τον συμβιβασμό μεταξύ της ελαχιστοποίησης της απώλειας φορτίου και της κατάλληλης προετοιμασίας της λειτουργίας του μικροδικτύου. Επιλέγοντας υψηλό όριο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποκοπής φορτίου αλλά και της ασφάλειας των στοιχείων και της σωστής προετοιμασίας της λειτουργίας του μικροδικτύου. Έτσι η δυνατότητα του μικροδικτύου να αντιστέκεται στην απειλή μιας πλημμύρας, μειώνεται. Από την άλλη, επιλέγοντας πολύ μικρό όριο ευθραυστότητας, αυξάνεται η αποκοπή φορτίου αφού αρκετά στοιχεία θα τεθούν εκτός λειτουργίας χωρίς όλα τους να διατρέχουν υψηλό κίνδυνο για καταστροφή λόγω πλημμύρας. Θεωρητικά για όριο ευθραυστότητας μηδέν πετυχαίνεται η καλύτερος προγραμματισμός της λειτουργίας του μικροδικτύου έναντι πλημμύρας αλλά οι απώλειες φορτίου είναι υψηλές. Συγκεκριμένα για καλύτερη προετοιμασία και διατήρηση της λειτουργίας του μικροδικτύου επιλέγεται όριο 5% αφού τίθενται εκτός λειτουργίας περισσότερες κρίσιμες γραμμές από τις περιπτώσεις για μεγαλύτερες τιμές ορίου. Για προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου επιλέγεται όριο 10% αφού οι απώλειες μειώνονται σε σύγκριση με αυτές μικρότερων τιμών ορίου. Για όριο πάνω από 10%, η εξυπηρέτηση φορτίου δεν βελτιώνεται σημαντικά και η ασφάλεια των στοιχείων μειώνεται. Συνεπώς, η καλύτερη επιλογή φαίνεται να είναι μεταξύ 5% και 10%.

Περίπτωση 4

Μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \quad (40)$$

Σε αυτή την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση (40) που απαιτείται να ελαχιστοποιηθεί είναι ουσιαστικά το κόστος της αποκοπής φορτίου. Με αυτό τον τρόπο παρατηρείται κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του μικροδικτύου όταν δεν λαμβάνονται υπόψη στην αντικειμενική το κόστος της ανταλλαγής με το άναντι δίκτυο και το κόστος παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών για κάθε περίπτωση ορίου. Στον πίνακα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε όριο ευθραυστότητας. Παρατηρείται πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του μικροδικτύου από την επιλογή του ορίου.

Πίνακας 11 Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 4

ΟΡΙΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (\$x10 ⁴)	ΑΠ.ΦΟΡΤΙΟΥ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ (\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (\$)	ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ (\$)
5%	2.786588	23.53086	0.0570187	3.2779982	1000	0
10%	2.189177	17.53062	0.6359724	2.7251766	1000	0
15%	2.191441	17.53062	1.2763718	2.107417	1000	0
20%	2.174896	17.53062	1.450513	1.767828	1000	0
25%	2.173545	17.53062	1.5447702	1.6600565	1000	0

Παρατηρείται ότι η αποκοπή φορτίου παραμένει η ίδια με το προηγούμενο σενάριο. Οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο σεναρίων είναι στη λειτουργία των μονάδων παραγωγής ώστε να εξυπηρετηθεί το ζητούμενο φορτίο. Γίνεται μεγαλύτερη χρήση των

ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και αυτό οφείλεται στο ότι δεν συμπεριλήφθηκε το κόστος τους στην αντικειμενική συνάρτηση (40). Επομένως, μοναδικό κριτήριο είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου με αποτέλεσμα τη μεγάλη ελαστικότητα στη λειτουργία των μονάδων παραγωγής του μικροδικτύου. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιποι οικονομικοί δείκτες και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού κόστους που προκύπτει από το άθροισμα του κόστους αποκοπής φορτίου, ανταλλαγής ενέργειας με το άναντι δίκτυο και παραγωγής. Ουσιαστικά η προηγούμενη περίπτωση οδηγεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου υπό τους οικονομικότερους όρους. Η καλύτερη επιλογή του ορίου φαίνεται να είναι πάλι μεταξύ 5% και 10%, καθώς για μεγαλύτερες τιμές η αποκοπή φορτίου δεν μεταβάλλεται.

3.5.2 Προσομοίωση Monte Carlo

. Πρέπει με τη χρήση μιας κατάλληλης μεθόδου να αποφανθούμε ποια είναι η καταλληλότερη επιλογή του ορίου. Με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo παρουσιάζονται όλα τα πιθανά αποτελέσματα των αποφάσεων που λήφθηκαν και εκτιμάται το αντίκτυπο του ρίσκου.

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια υπολογιστική μαθηματική μέθοδος η οποία επιτρέπει στους ανθρώπους να εκτιμούν το ρίσκο στη περίπτωση που κάνουν ποσοτικές αναλύσεις ή όταν παίρνουν αβέβαιες αποφάσεις. Η τεχνική εφαρμόζεται από επαγγελματίες σε πολλά πεδία όπως στα χρηματοοικονομικά, στη βιομηχανία, στην ενέργεια, στις μεταφορές και στο περιβάλλον.

Η προσομοίωση Monte Carlo παρέχει ένα μεγάλο εύρος πιθανών αποτελεσμάτων και πιθανοτήτων για κάθε πιθανή πράξη. Μπορεί να παρουσιάσει όλα τα πιθανά ακραία σενάρια μαζί με τις πιθανές συνέπειες του κάθε ενός.

Η τεχνική είχε χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά από επιστήμονες για μελέτες περί της ατομικής βόμβας. Έχει πάρει την ονομασία Monte Carlo από το γνωστό θέρετρο του Μονακό. Στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο είχε χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει πληθώρα σωματικά και νοητικά συστήματα.

Στην παρούσα εργασία για κάθε ευάλωτη γραμμή παράχθηκε ένας τυχαίος αριθμός μέσα από την ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ του 0 και 1. Ο αριθμός αυτός στη συνέχεια συγκρίνεται με την πιθανότητα κατάρρευσης των γραμμών και αν ο αριθμός είναι μικρότερος θεωρείται ότι η γραμμή τίθεται σε κατάσταση βλάβης λόγω της πλημμύρας. Η διαδικασία επαναλήφθηκε 50 φορές. Στη συνέχεια αποφασίζεται η λειτουργία του μικροδικτύου βάσει του προγραμματισμού των ελεγχόμενων μονάδων και των μονάδων αποθήκευσης που αποφασίστηκε από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τέλος, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης και των οικονομικών μεγεθών για κάθε όριο ευθραυστότητας. Ως καταλληλότερο όριο επιλέγεται αυτό του οποίου η επιλογή οδηγεί στην ελάχιστη μέση τιμή αποκοπής φορτίου.

Περίπτωση 5

Μικροδίκτυο 33 ζυγών, 32 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPs}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G) \tag{41}
 \end{aligned}$$

Η μέθοδος Monte Carlo εφαρμόστηκε ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση (41). Η λειτουργία των μονάδων παραγωγής, η ανταλλαγή με το άναντι δίκτυο και η κατάσταση λειτουργίας των μονάδων αποθήκευσης θεωρούνται δεδομένα από την περίπτωση 3.

Πίνακας 12 Πίνακας αποτελεσμάτων της μεθόδου Monte Carlo

ΟΡΙΟ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΤΙΜΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ (\$x10³)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΑΠ.ΦΟΡΤΙΟΥ (MW)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ (\$x10³)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (\$x10³)
5%	4.2646338	0.18757	2.3153807	1.7616864
10%	4.1959527	0.21838	2.3428133	1.6347594
15%	3.9822985	0.2686	2.3513688	1.3623296
20%	3.9823405	0.2686	2.3514108	1.3623296
25%	3.9822669	0.2686	2.3513373	1.3623296

Παρατηρώντας τον Πίνακα 12 συμπεραίνεται ότι η καλύτερη επιλογή είναι για όριο ευθραυστότητας 5%. Για μεγάλες τιμές του ορίου η αποκοπή οφείλεται στην απώλεια των ευάλωτων γραμμών και στην μη ετοιμότητα του μικροδικτύου να προσαρμόσει τη λειτουργία του στις νέες συνθήκες. Καθώς μεγαλώνει το όριο, αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Αυτό οφείλεται στο λανθασμένο προγραμματισμό της λειτουργίας των ελεγχόμενων γεννητριών και των μονάδων αποθήκευσης. Την καλύτερη επιλογή αποτελεί το όριο 5% με τις λιγότερες απώλειες φορτίου, λόγω της κατάλληλης προληπτικής κατανομής της παραγωγής των ελεγχόμενων γεννητριών και τον καλύτερο προγραμματισμό της λειτουργίας των μονάδων αποθήκευσης αλλά με ελαφρά μεγαλύτερο συνολικό κόστος.

Συγκεκριμένα για όριο 10% δεν θεωρούνται ως κρίσιμες γραμμές οι 2-19 και 6-26. Έτσι το μικροδίκτυο σε περίπτωση αποκοπής τους δεν έχει προετοιμάσει κατάλληλα της μονάδες του ώστε να ικανοποιηθεί το φορτίο των ζυγών που απομονώνονται. Στις νησίδες που απομονώνονται λόγω κατάρρευσης των γραμμών οι 2-19 και 6-26, υπάρχουν οι δύο μονάδες αποθήκευσης. Στην περίπτωση του 10% οι μονάδες αποθήκευσης δεν έχουν ως στόχο την εξυπηρέτηση φορτίου γιατί βρίσκονται κυρίως σε κατάσταση φόρτισης και μόνο για κάποιες

ώρες εκφορτίζονται τροφοδοτώντας με ενέργεια το δίκτυο. Αντίθετα στην περίπτωση του 5% οι μονάδες αποθήκευσης έχουν ως στόχο να τροφοδοτούν όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου με ενέργεια τα φορτία λόγω του κατάλληλου προγραμματισμού. Η κατάσταση φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης θεωρείται ότι είναι στο 50% πριν την εκδήλωση της πλημμύρας. Αντίστοιχα για τις υπόλοιπες τιμές ορίου, δεν γίνεται η χρήση της ελεγχόμενης γεννήτριας του ζυγού 25 αφού η γραμμή 3-23 έχει θεωρηθεί ως μη κρίσιμη. Ως αποτέλεσμα δεν έχει προβλεφθεί ο κατάλληλος προγραμματισμός των ελεγχόμενων μονάδων. Άρα η καλύτερη επιλογή είναι για όριο 5% αφού επιτυγχάνεται η βέλτιστη προληπτική λειτουργία των ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης οδηγώντας στην ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου.

Στον πίνακα 13 παρουσιάζεται η λειτουργία των ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης για όρια 5%, 10% και 15% (για 15%, 20%, 25% είναι παρόμοια η λειτουργία και τα αποτελέσματα) για όλο το εικοσιτετράωρο. Όταν μια ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής βρίσκεται σε λειτουργία τότε την κατάσταση αυτή την συμβολίζουμε με 1, αλλιώς με 0. Όσον αφορά τις μονάδες αποθήκευσης συμβολίζουμε με 1 όταν βρίσκονται σε κατάσταση φόρτισης και με 0 όταν βρίσκονται σε κατάσταση εκφόρτισης.

Πίνακας 13 Τελικός χρονικός προγραμματισμός ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης για κάθε τιμή ορίου

ΟΡΙΟ 5%																								
ΩΡΕΣ (1-24)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MT1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MT2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ESS1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΟΡΙΟ 10%																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MT1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MT2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ESS1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
ESS2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
ΟΡΙΟ 15%																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
MT1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MT2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MT4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ESS2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1

3.6 Συνεισφορά αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του

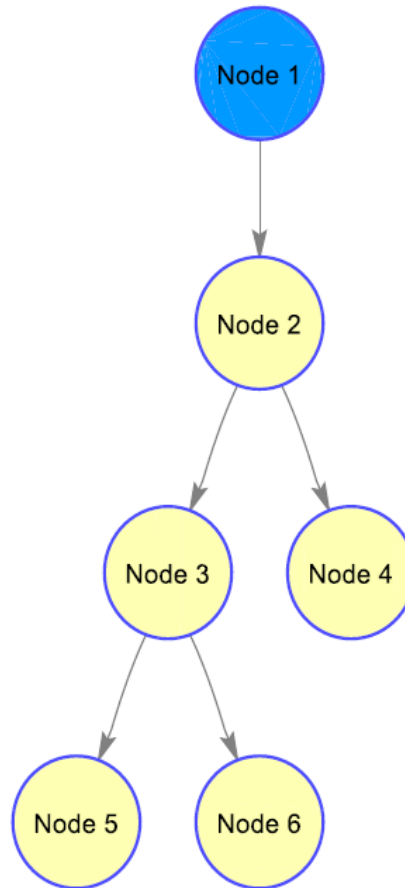
3.6.1 Ακτινικό δίκτυο διανομής

Πάνω από το 80% των δικτύων διανομής παγκοσμίως κατασκευάζονται με ακτινική δομή, στην οποία υπάρχει μόνο μία διαδρομή ανάμεσα σε κάθε καταναλωτή και στον υποσταθμό. Τα ακτινικά δίκτυα διανομής αποτελούν την οικονομικότερη λύση από άλλους τύπους δικτύων διανομής και επίσης είναι απλούστερα στην ανάλυση και στην λειτουργία τους. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η ύπαρξη ενός μοναδικού μονοπατιού ανάμεσα σε κάθε καταναλωτή και στον υποσταθμό, δημιουργώντας έτσι ένα δενδροειδές δίκτυο με απολήξεις του Μ/Σ διανομής. Η δενδροειδής δομή του δίκτυο διανομής περιλαμβάνει τον κορμό του δικτύου, που κατασκευάζεται από αγωγούς μεγάλης διατομής και τις διακλαδώσεις, που έχουν αγωγούς μικρότερης διατομής από ότι ο κορμός. Στις διακλαδώσεις συνδέονται συνήθως οι μετασχηματιστές μέσης τάσης / χαμηλής τάσης (ΜΤ/ΧΤ). Σε αυτή τη δομή συχνά υπάρχουν και βρόχοι (loops, meshes) αλλά τα δίκτυα λειτουργούν σε ακτινική διαμόρφωση με κάποιους ανοικτούς διακόπτες, για να επιτρέπεται η ανίχνευση βλάβης και η απομόνωση τμημάτων σε περίπτωση σφάλματος. Η κάθε γραμμή ενός τέτοιου δικτύου τροφοδοτείται μόνο από το ένα άκρο. Η κύρια γραμμής διανομής, δηλαδή ο κορμός, τροφοδοτείται στην αρχή της από το μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ.

Στην παρούσα εργασία το ακτινικό μικροδίκτυο θα απεικονίζεται με την χρήση γράφου, όπου οι κόμβοι είναι τα σημεία σύνδεσης των φορτίων (ζυγοί) και οι ακμές είναι τα τμήματα των γραμμών μεταξύ δύο κόμβων. Ουσιαστικά το ακτινικό δίκτυο είναι ισοδύναμο με ένα δέντρο.

Η αξιοπιστία τους για συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα χαμηλή και ο λόγος είναι ότι η εμφάνιση σφάλματος σε οποιαδήποτε τοποθεσία προκαλεί διακοπή της παροχής ενέργειας στους καταναλωτές που βρίσκονται κατάντη της περιοχής του σφάλματος. Βέβαια, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ολικά ή εν μέρει με την ύπαρξη των αποζευκτών που είναι ανοικτοί υπό φορτίο, οι οποίοι συνδέουν μεταξύ τους διάφορα σημεία κατά μήκος των κύριων γραμμών διανομής. Αφού λοιπόν απομονωθεί η περιοχή του σφάλματος

με την βοήθεια των κατάλληλων διακοπών απομόνωσης, το υπόλοιπο μέρος του δικτύου θα συνδεθεί κλείνοντας τους κατάλληλους αποζεύκτες σε κάποια γραμμή διανομής.



Σχήμα 12 Ακτινικό δίκτυο διανομής με τον κόμβο 1 να είναι το σύστημα τροφοδοσίας του συστήματος

3.6.2 Επαναδιαμόρφωση δικτύου διανομής για αποκατάσταση λειτουργίας

Τα βασικά στοιχεία ενός μικροδικτύου είναι η συνέχεια τροφοδότησης και η αξιοπιστία. Επομένως, εάν αυτά τα δύο στοιχεία εμφανίσουν διαταραχές από την κανονική τους λειτουργία (ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου) τότε το σύστημα είναι πιθανόν να οδηγηθεί σε οριακές συνθήκες, όπου μπορεί να είναι είτε κατάσταση προειδοποίησης είτε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Αυτό είναι ένα συχνό φαινόμενο σε περιπτώσεις που ένα μικροδίκτυο αντιμετωπίζει τις ολέθριες επιπτώσεις μιας πλημμύρας. Οι συνέπειες των παραπάνω

είναι ικανές να οδηγήσουν σε μεγάλες απώλειες όσον αφορά τον οικονομικό αντίκτυπο που θα έχουν στον διαχειριστή αλλά και την ικανοποίηση των πελατών. Αυτός λοιπόν είναι ο τομέας στον οποίο διεξάγονται αρκετές έρευνες σε πραγματικό χρόνο και οι μελλοντικές καταστάσεις δεν μπορούν ακόμα να προβλεφθούν. Επομένως, η εμφάνιση σφαλμάτων σε ένα μικροδίκτυο είναι ο λόγος για τον οποίο επηρεάζεται η αποδοτικότητα του μικροδικτύου και για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι επιτακτική ανάγκη η διαδικασία της αποκατάστασης, η οποία συμβάλει στη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος μετά από την εμφάνιση σφάλματος. Ο κύριος στόχος της αποκατάστασης του συστήματος είναι να αποκατασταθούν όσο είναι δυνατόν περισσότερα από τα φορτία που επηρεάζονται από το σφάλμα, εξετάζοντας τη διαθέσιμη ισχύ χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του συστήματος.

Η αποκατάσταση λειτουργίας των δικτύων διανομής πραγματοποιείται αλλάζοντας κατάσταση στους διακόπτες απομόνωσης (sectionalizing switches) και τους ανοικτούς υπό φορτίο αποζεύκτες (tie switches). Η εμφάνιση ενός σφάλματος σε κάποιο στοιχείο του συστήματος ανιχνεύεται από τα διάφορα εποπτικά μέσα του συστήματος και στη συνέχεια μέσω των διακοπών απομόνωσης, απομονώνεται το στοιχείο αυτό αλλά και κομμάτι του γειτονικού του δικτύου λόγω της ακτινικής δομής. Στη συνέχεια, γίνεται αναζήτηση της βέλτιστης επαναδιαμόρφωσης με το κλείσιμο των αποζευκτών που είναι ανοικτοί υπό φορτίο προκειμένου να δημιουργηθεί μία νέα διαδρομή ισχύος που θα μπορέσει να ικανοποιήσει τα φορτία τα οποία επηρεάστηκαν από το σφάλμα με την προϋπόθεση η ακτινική τοπολογία, όπως και άλλοι λειτουργικοί περιορισμοί να μην παραβιαστούν. Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της αναδιαμόρφωσης του μικροδικτύου στη περίπτωση που προστεθούν δύο επιπλέον γραμμές και κάποιες από τις ευάλωτες γραμμές πρέπει να τεθούν εκτός λειτουργίας.

3.6.3 Μελέτη και διατήρηση ακτινικής τοπολογίας του μικροδικτύου

Για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και τη σημασίας της ακτινικής τοπολογίας του μικροδικτύου, προστίθενται κάποια νέα δεδομένα και περιορισμοί.. Συγκεκριμένα στο σενάριο που ακολουθεί, έχουν προστεθεί δύο νέες γραμμές . Εφαρμόζοντας τους κατάλληλους περιορισμούς απαιτούμε την ακτινική λειτουργία του μικροδικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με τους

διακόπτες απομόνωσης, με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε να επιλέξουμε αν μια γραμμή θέλουμε να βρίσκεται εντός ή εκτός λειτουργίας.

Για να εισαχθούν οι κατάλληλοι περιορισμοί, πρέπει να γίνει η κατάλληλη μελέτη στη δομή του μικροδικτύου. Ανιχνεύονται τα τμήματα το οποία αλλοιώνουν την ακτινική τοπολογία ώστε να επεξεργαστούν κατάλληλα. Το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση της θεωρίας αλγόριθμων. Αρχικά με τη χρήση αλγόριθμου ανίχνευσης μονοπατιών Euler γίνεται η ανίχνευση των τμημάτων του γράφου που αλλοιώνουν την ακτινική τοπολογία του μικροδικτύου [20]. Ένα μονοπάτι Euler ονομάζεται το μονοπάτι που περνάει ακριβώς μια φορά από κάθε ακμή του γραφήματος. Στο γράφο του μικροδικτύου ανιχνεύσαμε τα μονοπάτια Euler που σχηματίστηκαν εξαιτίας των νέων γραμμών. Γενικά, ένα συνεκτικό γράφημα Γ έχει μονοπάτι Euler αν και μόνο αν όλες οι κορυφές του Γ έχουν άρτιο βαθμό ή όλες οι κορυφές του Γ εκτός από ακριβώς δύο έχουν άρτιο βαθμό. Για την εύρεση των μονοπατιών Euler επιλέχτηκε ο ακόλουθος αλγόριθμος [21]:

Αλγόριθμος Fleury (<1921): με σταδιακή επέκταση του ίχνους T αποφεύγοντας τις γέφυρες (αποκόπτουσες ακμές) στον υπογράφο $G-T$, εκτός αν δεν υπάρχει άλλη επιλογή.

Βήματα αλγόριθμου Fleury:

1. Επιλέγουμε μία κορυφή $v_0 \in V$ ως πρώτη κορυφή του ίχνους. Θέτουμε $T_0 = (v_0)$ και $i \leftarrow 0$

2. Έστω το ίχνος $T_i = (v_0, e_1, v_1, \dots, e_i, v_i)$

Από την κορυφή v_i επιλέγεται τυχαία μία ακμή $e_{i+1} \notin T_i$ που δεν είναι αποκόπτουσα στον υπογράφο

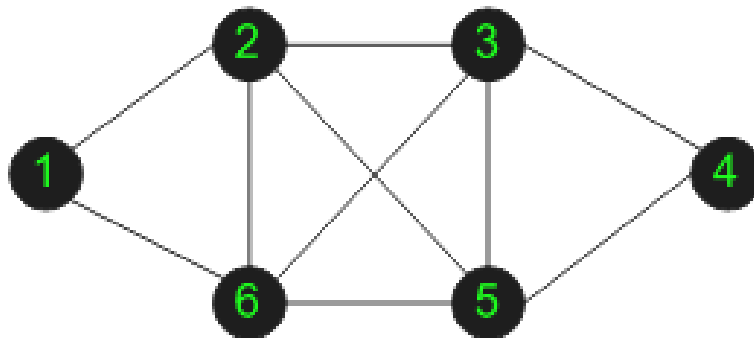
$G - E(T_i)$ εκτός αν δεν υπάρχει άλλη επιλογή. Ορίζεται το ίχνος $T_{i+1} = (T_i, e_{i+1}, v_{i+1})$

Θέτουμε $i \leftarrow i + 1$

3. Αν $i=|E|$, τότε $C=T_i$, είναι ένα ίχνος Euler, αλλιώς πήγαινε στο βήμα 2.

Παράδειγμα Αλγόριθμου Fleury

- Βήμα 1ο: 1
- Βήμα 2ο: επιλέγεται τυχαία η 2. Ίχνος 1, 2
- Βήμα 3ο: επιλέγεται τυχαία η 6. Ίχνος 1, 2, 6
- Βήμα 4ο-5ο: δεν μπορεί να επιλεγεί η 1 γιατί στον υπογράφο $G-(1,2)-(2,6)$ είναι αποκόπτουσα
Ίχνος 1, 2, 6, 5, 3
- Βήμα 6ο-9ο: δεν μπορεί να επιλεγεί η 6 γιατί στον υπογράφο $G-(1,2)-(2,6)-(6,5)-(5,3)$ η (3,6) είναι αποκόπτουσα
Ίχνος 1,2,6,5,3,4,5,2,3
- Βήμα 10ο: επιλέγεται αναγκαστικά η 6
Ίχνος 1,2,6,5,3,4,5,2,3,6
- Βήμα 11ο: επιλέγεται η 1 αναγκαστικά. Ίχνος 1,2,6,5,3,4,5,2,3,6,1



Σχήμα 13 Γράφος παραδείγματος Αλγόριθμου Fleury

Στη συνέχεια αφού έγινε η εύρεση των μονοπατιών Euler, απαιτήθηκε από κάθε μονοπάτι να τεθεί εκτός λειτουργίας η κατάλληλη γραμμή ώστε να επανέλθει το μικροδίκτυο στην ακτινική πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία. Στον γράφο του μικροδικτύου, έχουν ανιχνευτεί δύο μονοπάτια Euler άρα πρέπει ιδανικά να τεθούν εκτός λειτουργίας δύο κατάλληλες γραμμές.

Με την εφαρμογή λειτουργικών μέτρων μελετάται η λειτουργία του μικροδικτύου ως προς την επιλογή των γραμμών για να διατηρηθεί η ακτινική του τοπολογία. Στην επιλογή των γραμμών λαμβάνονται υπόψη και οι πιθανότητες κατάρρευσης. Παράλληλα, παρατηρείται η εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου, η λειτουργία των ελεγχόμενων γεννητριών και η ανταλλαγή ενέργειας με το άνω δίκτυο.

Περίπτωση 6

Μη ακτινικό μικροδίκτυο 33 ζυγών, 34 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

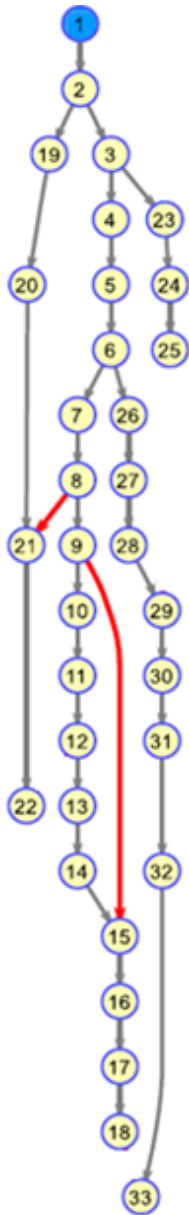
$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\
 & + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G) \tag{42}
 \end{aligned}$$

Σε αυτή την περίπτωση έχουν προστεθεί δύο επιπλέον γραμμές, οι 8-21 και 9-15 οι οποίες οδηγούν στην μη ακτινική τοπολογία του μικροδικτύου. Πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη ακτινική τοπολογία του μικροδικτύου, η οποία οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Πρέπει η επιλογή να διατηρεί το μικροδίκτυο πλήρως συνδεδεμένο ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί όλη τη ζήτηση φορτίου, δηλαδή να μην αποκόπτεται κάποιος ζυγός φορτίου από το μικροδίκτυο. Ακολουθεί παρουσίαση των οικονομικών μεγεθών στον πίνακα 14 καθώς και η αναπαράσταση του αρχικής και τελικής τοπολογίας του μικροδικτύου σε μορφή γράφου.

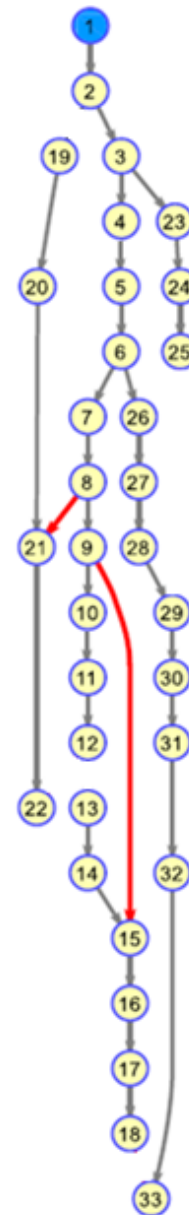
Στους γράφους του σχήματος 14 παρουσιάζεται αριστερά η τοπολογία του μικροδικτύου με την πρόσθεση των δύο επιπλέον γραμμών μεταφοράς οι οποίες δημιουργούν μονοπάτια Euler άρα αλλοίωση της ακτινικής τοπολογίας του μικροδικτύου. Έπειτα με την εφαρμογή των κατάλληλων περιορισμών (43), στον δεξιά γράφο παρατηρείται η νέα ακτινική τοπολογία του μικροδικτύου με τις γραμμές 12-13 και 2-19 να έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας [35]. Το ποιες γραμμές τίθενται εκτός λειτουργίας εξαρτάται και από την πιθανότητα κατάρρευσης των γραμμών. Προτιμάται η να τεθούν εκτός γραμμές με μεγάλη πιθανότητα κατάρρευσης ώστε σε περίπτωση απώλειάς τους να μην προκληθεί διαταραχή στη λειτουργία του μικροδικτύου.

$$\sum_{ij=1}^{Nloop} u_{ij,t}^l = N_{loop} - 1 \quad (43)$$

όπου N_{loop} είναι το σύνολο των γραμμών που δημιουργούν ένα συνδεδεμένο μονοπάτι στον γράφο.



(i)



(ii)

Σχήμα 14 (i) Αρχική μη ακτινική τοπολογία δικτύου 34 γραμμών και 33 ζυγών, (ii) Ακτινική τοπολογία δικτύου με την αποκοπή των γραμμών 12-13 και 2-19

Πίνακας 14 Πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση μετατροπής σε ακτινικό δίκτυο

ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ($\times 10^3$)	3.2666383
ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ($\\$ \times 10^3$)	3.2666383
ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ($\\$ \times 10^3$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (\$)	0
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ($\\$ \times 10^3$)	0

Όπως αναμένεται, παρατηρείται η πλήρης κάλυψη του ζητούμενου φορτίου με τον οικονομικότερο τρόπο δηλαδή την ανταλλαγή με το άναντι δίκτυο. Η επιλογή να τεθούν εκτός λειτουργίας οι συγκεκριμένες δύο γραμμές, διατήρησε την ακτινική και πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία του μικροδικτύου με αποτέλεσμα να εξυπηρετείται η ζήτηση φορτίου κάθε ζυγού. Να σημειωθεί ότι δεν θεωρήθηκε κάποια βλάβη εξαιτίας της πλημμύρας στο μικροδίκτυο.

Περίπτωση 7

Μη ακτινικό μικροδίκτυο 33 ζυγών, 34 γραμμών με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (VoLLp_{i,t}^{shed})$$

$$+ \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (c^G p_{i,t}^G)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{t=1}^{NT} c_t^{UP} (p_t^{UPB} - p_t^{UPS}) \\
& + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NB} (su_{i,t}^G + sd_{i,t}^G)
\end{aligned} \tag{44}$$

Στην παρούσα περίπτωση μελετάμε την αντικειμενική συνάρτηση (44) θεωρώντας τη δυνατότητα αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου. Έπειτα εφαρμόζοντας συγκεκριμένες τιμές ορίου επιλογής κρίσιμων γραμμών, θα επιλέξουμε την καταλληλότερη τιμή ώστε να έχουμε την επιθυμητή λειτουργία στο δίκτυο. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει αναλυθεί παραπάνω με τη διαφορά ότι σε αυτό το σενάριο υπάρχουν δύο επιπλέον γραμμές. Η παρουσία των δύο γραμμών ενισχύει την ανθεκτικότητα του μικροδικτύου. Επιτυγχάνεται επαναδιαμόρφωση του μικροδικτύου για αποκατάσταση της λειτουργίας του αλλάζοντας την κατάσταση των διακοπών απομόνωσης και των αποζευκτών. Μια κρίσιμη γραμμή τίθεται εκτός λειτουργίας ώστε να προγραμματιστεί κατάλληλα η λειτουργία του μικροδικτύου και για αποφυγή τυχόν διαταραχών σε περίπτωση βλάβης της. Στον πίνακα 15 ακολουθεί περιγραφή των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 15 Πίνακας αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση του ορίου ευθραυστότητας για την περίπτωση 7

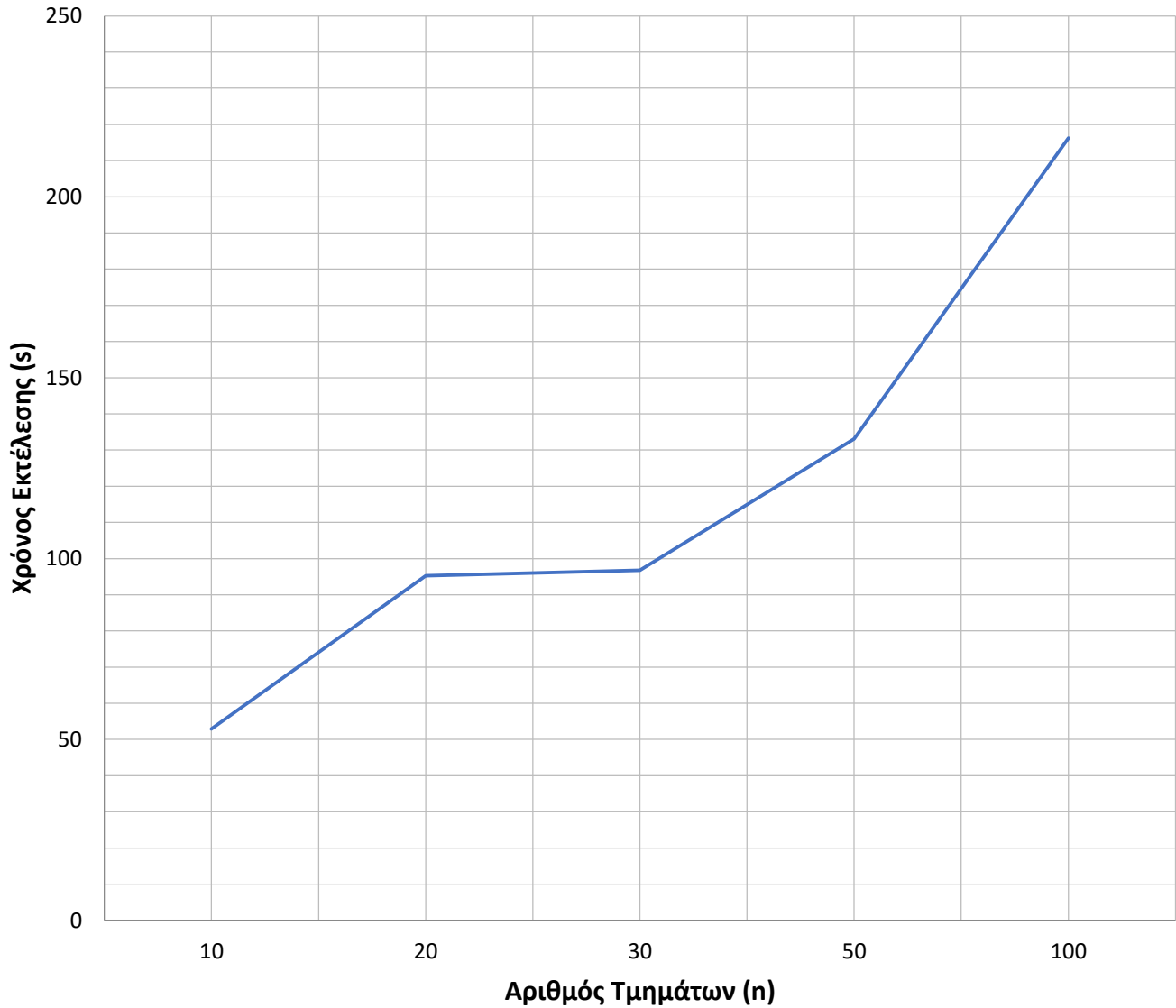
ΟΡΙΟ	ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ (\$x10 ⁴)	ΑΠ.ΦΟΡΤΙΟΥ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΙ ΔΙΚΤΥΟ(\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ (\$x10 ³)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (\$)	ΚΟΣΤΟΣ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ (\$)
5%	1.892651	14.88124	1.0720001	2.2232754	750	0
10%	1.849588	14.51692	1.0056859	2.2232754	750	0
15%	1.771313	14.51692	1.9437071	752.499	500	0
20%	1.771222	14.51692	1.9428002	752.499	500	0
25%	1.771169	14.51692	1.9422702	752.499	500	0

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την αντίστοιχη περίπτωση που δεν λήφθηκε υπόψη η δυνατότητα αλλαγής τοπολογίας, παρατηρείται ότι το κόστος απωλειών φορτίου έχει μειωθεί. Πραγματοποιείται η επαναδιαμόρφωση του μικροδικτύου θέτοντας εντός λειτουργίας τις δύο επιπλέον γραμμές μεταφοράς εάν χρειαστεί. Οι απώλειες φορτίου έχουν μειωθεί λόγω ότι οι δύο επιπλέον γραμμές μπορούν να δημιουργήσουν νέες διαδρομές ισχύος ώστε να ικανοποιήσουν τα φορτία. Το όριο ευθραυστότητας που επιλέγεται είναι το 10%. Η επιλογή του ορίου αυτού γίνεται με κριτήριο τον συμβιβασμό μεταξύ της μείωσης απώλειας φορτίου και της προετοιμασίας και ασφάλειας της λειτουργίας του δικτύου.

3.7 Πολυπλοκότητα και ακρίβεια μεθόδου γραμμικοποίησης

Στην παρούσα εργασία, ζητείται η ελαχιστοποίηση διαφόρων αντικειμενικών συναρτήσεων υπό κάποιους περιορισμούς. Η ύπαρξη μη γραμμικών περιορισμών οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος. Επομένως απαιτείται η γραμμικοποίηση των συγκεκριμένων περιορισμών. Συγκεκριμένα οι εξισώσεις ροής ισχύος, πριν πάρουν την τελική μορφή των περιορισμών (8) και (9), περιλάμβαναν τον μη γραμμικό όρο $\cos(\theta_i - \theta_j)$. Για τη γραμμική προσέγγιση του όρου $\cos(\theta_i - \theta_j)$ χρησιμοποιείται η μέθοδος της τμηματικής γραμμικοποίησης [13].

Γίνεται κατανοητό ότι η επιλογή του αριθμού των τμημάτων που θα επιλεγεί ώστε να γραμμικοποιηθεί το $\cos(\theta_i - \theta_j)$ είναι πολύ σημαντική. Η επιλογή κατάλληλου αριθμού τμημάτων οδηγεί σε καλύτερη γραμμική προσέγγιση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$ χωρίς να προκαλεί χρονοβόρες δοκιμές. Πρέπει να εξεταστεί ο χρόνος εκτέλεσης και η ακρίβεια επίλυσης για διάφορες τιμές τμημάτων ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος τμηματικής γραμμικοποίησης. Οι προτεινόμενες μέθοδοι εφαρμόζονται στην περίπτωση που η πλημμύρα δεν επηρεάζει τη λειτουργία του μικροδικτύου. Στην καμπύλη του σχήματος 15 παρατηρείται ο χρόνος επίλυσης συναρτήσεως του αριθμού τμημάτων για τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης του $\cos(\theta_i - \theta_j)$. Να σημειωθεί ότι ο χρόνος που παρουσιάζεται αφορά μόνο των εύρεση της λύσης και όχι και τον χρόνο ανάγνωσης των δεδομένων από το σύστημα.



ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	10	20	30	50	100
ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ (\$x10^3\$)	3.2668674	3.2666383	3.2666383	3.2666383	3.2666383

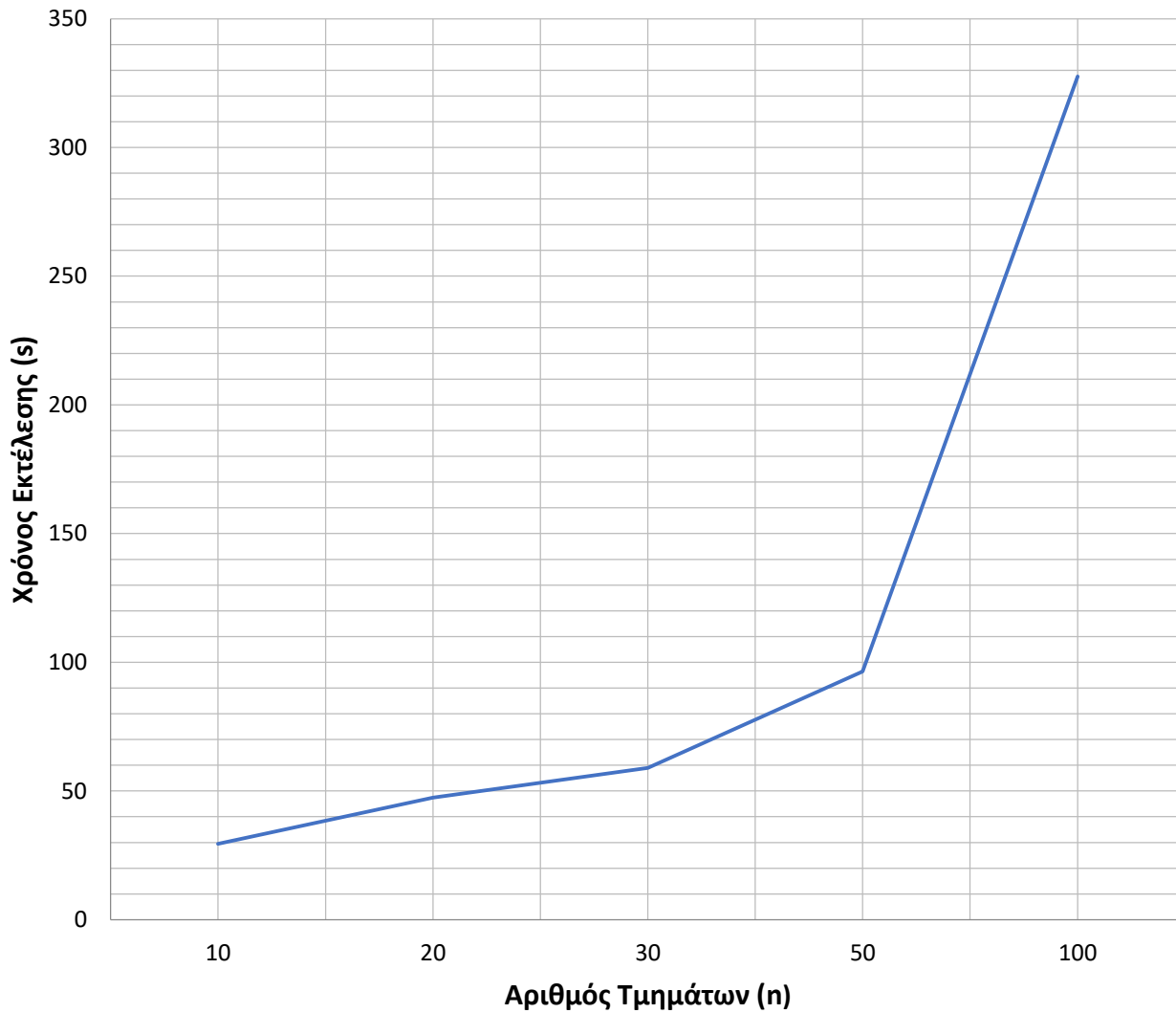
Σχήμα 15 Καμπύλη χρόνου εκτέλεσης συναρτήσει αριθμού τμημάτων για τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης του $\cos(\theta_i - \theta_j)$

Παρατηρώντας την καμπύλη του σχήματος 15 συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τμημάτων, αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος. Επιδιώκεται η

αποφυγή πολύ μεγάλου χρόνου εκτέλεσης και παράλληλα η γραμμική προσέγγιση να έχει μεγάλη ακρίβεια. Αν επιλεγθεί μικρός αριθμός τμημάτων, δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή προσέγγιση, πράγμα που θέλουμε να το αποφύγουμε ανεξάρτητα με το χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Αντίστοιχα αν επιλεγθεί μεγάλος αριθμός τμημάτων προσεγγίζεται αρκετά ο όρος $\cos(\theta_i - \theta_j)$ αλλά απαιτείται πολύ μεγάλος χρόνος εκτέλεσης.

Στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης πέρα από τις εξισώσεις ροής ισχύος, περιέχονται και μη γραμμικοί περιορισμοί που εκφράζουν τα όρια της ενεργού και άεργου ισχύς των γραμμών και των αντιστροφών που συνδέουν τις μονάδες παραγωγής με το μικροδίκτυο. Αποτελούν τετραγωνικούς περιορισμούς και συγκεκριμένα εξισώσεις κύκλων οι οποίες αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος για αυτό απαιτείται η γραμμικοποίησή τους.

Συμπεραίνεται ότι η επιλογή του αριθμού των τμημάτων που θα επιλέξουμε ώστε να γραμμικοποιηθεί ο κύκλος είναι πολύ σημαντική. Επιλέγοντας τον κατάλληλο αριθμό τμημάτων καταλήγουμε σε μια επιθυμητή γραμμική προσέγγιση του κύκλου χωρίς να προκαλούνται χρονοβόρες δοκιμές. Πρέπει να εξεταστεί ο χρόνος εκτέλεσης και η ακρίβεια επίλυσης για διάφορες τιμές τμημάτων ώστε να επιλεγθεί η καταλληλότερη μέθοδος τμηματικής γραμμικοποίησης. Στην καμπύλη του σχήματος 16 παρατηρείται ο χρόνος επίλυσης συναρτήσει του αριθμού τμημάτων για τη γραμμικοποίηση των τετραγωνικών περιορισμών.



ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	10	20	30	50	100
ΤΙΜΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ (\$x10 ³)	3.2666383	3.2666383	3.2666383	3.2666383	3.2666383

Σχήμα 16 Καμπύλη χρόνου εκτέλεσης συναρτήσει αριθμού τμημάτων για τη μέθοδο γραμμικής προσέγγισης των τετραγωνικών περιορισμών

Η εφαρμογή των προληπτικών μέτρων πρέπει να γίνεται έγκαιρα ώστε το μικροδίκτυο να προετοιμάζεται κατάλληλα για την αντιμετώπιση της επερχόμενης πλημμύρας. Ως αποτέλεσμα η

επιλογή του αριθμού τμημάτων αποτελεί ένας συμβιβασμός μεταξύ του χρόνου εκτέλεσης και της ακρίβειας της γραμμικής προσέγγισης. Συγκεκριμένα, επιλέγονται 10 τμήματα για τη γραμμικοποίηση του $\cos(\theta_i - \theta_j)$ και των τετραγωνικών περιορισμών γιατί ο χρόνος εκτέλεσης είναι σε λογικά πλαίσια και η προσεγγιστική τιμή έχει μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για 10 τμήματα δεν έχει ουσιαστική διαφορά από αυτή μεγαλύτερου αριθμού τμημάτων. Συμπεραίνεται ότι η καταλληλότερη επιλογή είναι η γραμμικοποίηση των μη γραμμικών περιορισμών με διαχωρισμό σε 10 τμήματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Ανακεφαλαίωση

Κατά τη χειμερινή περίοδο, σε χώρες με υψηλό ρυθμό βροχοπτώσεων, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία βρίσκονται κυρίως σε περιοχές κοντά από ποταμούς, εκτίθενται στον κίνδυνο πλημμύρας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης λειτουργίας ενός μικροδικτύου με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του έναντι πλημμύρας. Το πρόβλημα λαμβάνει υπόψη την επικινδυνότητα μιας περιοχής να πληγεί από πλημμύρα, καθώς και την επίδρασή της πάνω στις γραμμές του μικροδικτύου. Για τον καθορισμό της βέλτιστης ανθεκτικής λειτουργίας του συστήματος εφαρμόζονται προληπτικά μέτρα.

Προτείνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς, το οποίο ελαχιστοποιεί το κοινωνικό κόστος του μικροδικτύου, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της πλημμύρας. Τα προληπτικά μέτρα που εφαρμόζονται έχουν ως στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας μελετώντας το σχηματισμό ελεγχόμενων νησίδων. Επίσης εξετάζεται και η συμβολή της αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του.

Η προτεινόμενες μέθοδοι εφαρμόζονται στο πρότυπο δίκτυο 33 ζυγών της IEEE. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η λειτουργική ανθεκτικότητα ενός μικροδικτύου βελτιώνεται ενσωματώνοντας την επίδραση της πλημμύρας στο πρόβλημα βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου.

Ο κατάλληλος προγραμματισμός των ελεγχόμενων μονάδων του μικροδικτύου στην περίπτωση επικείμενου ακραίου καιρικού φαινομένου αποδεικνύεται ωφέλιμο μέτρο για την

ενίσχυση της λειτουργικής ανθεκτικότητας του. Παρατηρείται πως ο προγραμματισμός των μονάδων εξαρτάται από το όριο που επιλέγεται για την απόφαση των κρίσιμων γραμμών.

Δεδομένου ότι πρόκειται για μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης και η γρήγορη λήψη αποφάσεων κρίνεται απαραίτητη, η γραμμικοποίηση των εξισώσεων της ροής φορτίου και των τετραγωνικών περιορισμών οδηγούν στη μείωση της πολυπλοκότητας του προβλήματος και την επίλυση του σε εύλογο χρόνο.

4.2 Συμβολή και συμπεράσματα

Οι μη γραμμικές εξισώσεις γραμμικοποιούνται με τις κατάλληλες μεθόδους και το πρόβλημα από μη γραμμικό απλοποιείται σε γραμμικό. Η μετατροπή του προβλήματος οδηγεί στην επίλυση του σε εύλογο χρόνο, μειώνοντας την πολυπλοκότητά του. Έτσι είναι ικανή η ταχύτατη εφαρμογή των προληπτικών μέτρων στο μικροδίκτυο προετοιμάζοντας το εγκαίρως για τις επιπτώσεις της πλημμύρας. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν 10 τμήματα στη μέθοδο τμηματικής γραμμικοποίησης.

Βάσει των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν στην παρούσα εργασία φαίνεται πως ο σχηματισμός ελεγχόμενων νησίδων συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της ανθεκτικότητας των μικροδικτύων έναντι επερχόμενης πλημμύρας. Ο σχηματισμός των νησίδων εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η εκδήλωση διαταραχών σε περίπτωση βλάβης γραμμών λόγω της πλημμύρας και για να γίνει ο κατάλληλος προγραμματισμός των μονάδων. Η κατάρρευση γραμμών ενώ διαρρέονται από μεγάλη ροή ισχύος μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση περεταίρω στοιχείων και στην αλλοίωση της επιθυμητής λειτουργίας του μικροδικτύου. Ελαχιστοποιώντας τη ροή ισχύος που ρέει τις κρίσιμες γραμμές αποφεύγονται τυχόν διαταραχές σε περίπτωση αποκοπής τους και γίνεται ομαλή αποσύνδεσή τους. Παρατηρείται η ελαχιστοποίηση της ροής ισχύος που ρέει τις κρίσιμες γραμμές και συγκεκριμένα η μείωσή της κατά 40.59% και 40.89% αντίστοιχα για της δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Έτσι προστατεύεται και διατηρείται η λειτουργία του μικροδικτύου και των στοιχείων του σε περίπτωση αποκοπής ή κατάρρευσης των κρίσιμων γραμμών.

Γίνεται μελέτη του ορίου επιλογής των κρίσιμων γραμμών με την εφαρμογή διαφόρων τιμών. Επιλέγεται η κατάλληλη τιμή βάσει της οποίας οδηγούμαστε στην ελάχιστη αποκοπή φορτίου. Το συγκεκριμένο προληπτικό μέτρο είναι πολύ σημαντικό να εφαρμόζεται στα μικροδίκτυα πριν την εκδήλωση της πλημμύρας ώστε να αποφευχθούν τυχόν αναπάντεχες βλάβες και κατ' επέκταση το μεγάλο κόστος και χρόνος αποκατάστασης της λειτουργίας του. Επιδιώκεται ο κατάλληλος προληπτικός προγραμματισμός των ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης.

Μελετάται η συμβολή των οικονομικών δεικτών στην αντικειμενική συνάρτηση και στο συνολικό κόστος. Εξετάστηκαν όμοιες περιπτώσεις με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων έδειξαν ότι το οικονομικότερο κόστος λειτουργίας του συστήματος επιτυγχάνεται όταν έχει συμπεριληφθεί στην αντικειμενική συνάρτηση του κόστους, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος ανταλλαγής ενέργειας με το άναντι δίκτυο και το κόστος αποκοπής φορτίου. Παρατηρείται ότι μειώνεται το συνολικό κόστος κατά 3.5% όταν λαμβάνονται υπόψη όλοι οι οικονομικοί όροι.

Στη συνέχεια, η αποδοτικότητα της μεθόδου εξετάστηκε με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Βάσει της μεθόδου γίνεται και η καταλληλότερη επιλογή του ορίου. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την συνεισφορά της προτεινόμενης μεθόδου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του μικροδικτύου έναντι των πλημμυρών. Παρατηρείται ότι για όριο 5% υπάρχουν οι μικρότερες απώλειες φορτίου αφού γίνεται καλύτερος προγραμματισμός λειτουργίας των ελεγχόμενων μονάδων και μονάδων αποθήκευσης. Για μεγαλύτερες τιμές ορίου δεν γίνεται ο σωστός προγραμματισμός της λειτουργίας των μονάδων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποκοπή φορτίου. Με προτεραιότητα την ελαχιστοποίηση των απωλειών φορτίου, επιλέγεται όριο 5%.

Η συνεισφορά αλλαγής τοπολογίας του μικροδικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του είναι σημαντική. Συγκεκριμένα με τη πρόσθεση δύο επιπλέον γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο μπορεί να γίνει επαναδιαμόρφωση του δικτύου. Σε περίπτωση απώλειες κάποιων γραμμών, με ειδικούς διακόπτες τίθενται εντός λειτουργίας οι επιπλέον γραμμές. Παρατηρείται ότι μειώνεται το συνολικό κόστος κατά 12.9% σε σχέση με την περίπτωση που δεν είχαμε τις επιπλέον γραμμές.

4.3 Προοπτική και μελλοντικές επεκτάσεις

Πραγματοποιούνται αρκετές μελέτες για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των μικροδικτύων λόγω της μεγάλης σημασίας που έχουν στη κοινωνία σήμερα. Με τη σωστή μελέτη μπορούν να αναπτυχθούν χρήσιμα μέτρα βελτίωσης της ανθεκτικότητας. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη μοντέλων για τη βέλτιστη ενίσχυση της ανθεκτικότητας των μικροδικτύων, τα οποία θα συνδυάζουν την εφαρμογή λειτουργικών «ευφυών» μέτρων και μέτρων ενδυνάμωσης. Στις περισσότερες μελέτες εξετάζεται η συνεισφορά των μέτρων ενδυνάμωσης, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι δυνατότητες λειτουργικών μέτρων. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο κόστος των μέτρων ενδυνάμωσης, κάτι τέτοιο οδηγεί σε δυσμενέστερες οικονομικά λύσεις για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου ανθεκτικότητας.

Μεγάλη σημασία έχει η μελέτη της συμβολής των μικροδικτύων στην ενίσχυση ανθεκτικότητας του συστήματος μεταφοράς. Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δύο επιπέδων, καθώς και ο συντονισμένος έλεγχός τους, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ.Ν.Τράκας , Συμβολή στην Εκτίμηση και Ενίσχυση της Ανθεκτικότητας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
- [2] U.S. had more floods in 2016 than any year on record[Online]
[Διαθέσιμο]:<https://www.usatoday.com/story/weather/2017/01/04/floods-natural-disasters-2016/96120150/>
- [3] entergynewsroom [Online]
[Διαθέσιμο]:<http://www.entergynewsroom.com/blog/restoration-update/>
- [4] Y. Wang, C. Chen, J. Wang and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1604-1613, March 2016.
- [5] Α.Φροσίνου, Βέλτιστος Σχεδιασμός Αποκατάστασης Βλαβών και Προγραμματισμός Μικροδικτύου για την Ενίσχυση της Ελαστικότητας ενός ΣΗΕ
- [6] 2016 Louisiana floods [Online]
[Διαθέσιμο]:https://en.wikipedia.org/wiki/2016_Louisiana_floods
- [7] Thousands still without power; many will have to wait until water recedes, officials say [Online]
[Διαθέσιμο]:http://www.theadvocate.com/baton_rouge/news/weather_traffic/article_57ef9db6-633c-11e6-b19a-d7be27b1784b.html
- [8] M. H. Amirioun, F. Aminifar and H. Lesani, "Towards Proactive Scheduling of Microgrids against Extreme Floods," in *IEEE Transactions on Smart Grid*.

- [9] Α.Δ.Αθανασίου, ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ
- [10] YALMIP [Online]
[Διαθέσιμο]:<https://yalmip.github.io/>
- [11] GUROPI [Online]
[Διαθέσιμο]:<http://www.gurobi.com/>
- [12] D. N. Trakas and N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distribution System Operation for Enhancing Resilience Against Wildfires," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 2, pp. 2260-2271, March 2018.
- [13] Carleton Coffrin and Pascal Van Hentenryck, "A Linear-Programming Approximation of AC Power Flows" in IEEE Transactions, May 19, 2014
- [14] T. Shekari, S. Golshannavaz and F. Aminifar, "Techno-Economic Collaboration of PEV Fleets in Energy Management of Microgrids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3833-3841, Sept. 2017.
- [15] J. A. Peças Lopes , C. L. Moreira , F. O. Resende, MICROGRIDS BLACK START AND ISLANDED OPERATION
- [16] Smart Grid[Online]
[Διαθέσιμο]:<http://whatis.techtarget.com/definition/smart-grid>
- [17] X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 944-980, Fourth Quarter 2012.
- [18] Y. Wang, M. Shahidehpour, L. L. Lai, L. P. L. P. Huang, H. L. H. L. Yuan and F. Y. Xu, "Resilience-Constrained Hourly Unit Commitment in Electricity Grids," in IEEE Transactions on Power Systems.

- [19] H. Lee Willis, Power Distribution Planning Reference Book, Second Edition, CRC Press, 1 March 2004.
- [20] Μονοπάτια και κυκλώματα Euler και Hamilton [Online]
[Διαθέσιμο]:http://repfiles.kallipos.gr/html_books/3403/main/node46.html
- [21] Θεωρία Γράφων, Θεμελιώσεις-Αλγόριθμοι-Εφαρμογές [Online]
[Διαθέσιμο]:<http://delab.csd.auth.gr/~katsaros/chapter2.ppt>
- [22] Organization for Security and Co-operation in Europe, Protecting Electricity Networks from Natural Hazards
- [23] C. Coffrin, P. Van Hentenryck and R. Bent, "Approximating line losses and apparent power in AC power flow linearizations," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8.
- [24] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [25] A. Gholami, T. Shekari, F. Aminifar and M. Shahidehpour, "Microgrid Scheduling With Uncertainty: The Quest for Resilience," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2849-2858, Nov. 2016.
- [26] P. A. Trodden, W. A. Buksh, A. Grothey and K. I. M. McKinnon, "Optimization-Based Islanding of Power Networks Using Piecewise Linear AC Power Flow," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1212-1220, May 2014.
- [27] Zhenyu Tan, Rui Fan, Yu Liu and Liangyi Sun, "Microgrid black-start after natural disaster with load restoration using spanning tree search," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-5.
- [28] V. C. Gungor et al., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, Nov. 2011.

- [29] Protecting Electricity Networks from Natural Hazards (Book) - Organization for security and co-operation in europe (osce)
- [30] Monte Carlo [Online]
- [Διαθέσιμο]: http://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp
- [31] Executive Office of the President. (2013, Aug.). Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages. White House Office of Sci. and Technol., Washington,D.C.
- Διαθέσιμο:http://energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/Grid%20Resiliency%20Report_FINAL.pdf
- [32] C. Wang; Y. Hou; F. Qiu; S. Lei; K. Liu, "Resilience Enhancement with Sequentially Proactive Operation Strategies," in *IEEE Transactions on Power Systems* , vol.PP, no.99, pp.1-1
- [33] G. Strbac, N. Hatziargyriou, J. P. Lopes, C. Moreira, A. Dimeas, and D. Papadaskalopoulos, "Microgrids: Enhancing the Resilience of the European Megagrid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 35-43, May-June 2015.Ssss
- [34] C. Wang and H. Z. Cheng, "Optimization of Network Configuration in Large Distribution Systems Using Plant Growth Configuration in Large Distribution Systems Using Plant Growth" pp. 119-126, Feb. 2008.
- [35] P. Meneses de Quevedo, J. Contreras, M. J. Rider and J. Allahdadian, "Contingency Assessment and Network Reconfiguration in Distribution Grids Including Wind Power and Energy Storage," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1524-1533, Oct. 2015.