



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Βέλτιστος Σχεδιασμός Αποκατάστασης Βλαβών και
Προγραμματισμός Μικροδικτύου για την Ενίσχυση της
Ελαστικότητας ενός ΣΗΕ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φροσινού Γ. Ασημίνα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Βέλτιστος Σχεδιασμός Αποκατάστασης Βλαβών και
Προγραμματισμός Μικροδικτύου για την Ενίσχυση της
Ελαστικότητας ενός ΣΗΕ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φροσινού Γ. Ασημίνα

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουλίου 2016.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παύλος Γεωργιλιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Φροσινού Γ. Ασημίνα

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

Copyright © Φροσινού Γ. Ασημίνα, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι φυσικές καταστροφές μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες βλάβες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με σημαντικές επιπτώσεις τόσο σε οικονομικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο. Συνεπώς καθίσταται αναγκαία η βελτίωση της ελαστικότητας (*resilience*) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία απαιτεί την δημιουργία ενός σχεδίου μέσω του οποίου θα γίνεται εφικτή η γρήγορη αποκατάσταση των βλαβών του έπειτα από την εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων. Στα πλαίσια αυτών των απαιτήσεων κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία, στη οποία παρουσιάζονται δυο μοντέλα που αναπτύχθηκαν με στόχο την βελτιστοποίηση της ελαστικότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ενός μικροδικτύου αντίστοιχα. Η μαθηματική μοντελοποίηση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος μαθηματικού προγραμματισμού General Algebraic Modeling System (GAMS).

Στο πρώτο σκέλος της εργασίας παρουσιάζεται ένα οικονομικά αποδοτικό μοντέλο που στοχεύει στην ενίσχυση της ελαστικότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της αποτελεσματικής ανταπόκρισης του στην αποκατάσταση βλαβών, που οφείλονται σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Το μοντέλο ενεργοποιείται μετά την εμφάνιση του ακραίου καιρικού φαινομένου και χρησιμοποιείται για την εύρεση του βέλτιστου χρονοδιαγράμματος επισκευής των βλαβών του δικτύου. Οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου και των μονάδων παραγωγής καθώς και οι περιορισμοί των διαθέσιμων πόρων εισάγονται στο πρόβλημα. Επιπρόσθετα, το κόστος απόρριψης φορτίου χρησιμοποιείται ως ένα μέτρο που εκπροσωπεί την κρισιμότητα κάθε φορτίου του δικτύου, επηρεάζοντας το χρονοδιάγραμμα επισκευής. Τα διαφορετικά σενάρια που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση του μοντέλου εφαρμόστηκαν στο πρότυπο δίκτυο 118-ζυγών της IEEE.

Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας παρουσιάζουμε ένα μοντέλο για το βέλτιστο προγραμματισμό ενός μικροδικτύου. Στόχος του μοντέλου είναι η κάλυψη του φορτίου του μικροδικτύου με τον οικονομικά αποδοτικότερο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη και την περίπτωση νησιδοποίησης του μικροδικτύου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το συνολικό κόστος του μικροδικτύου αποτελείται από το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των τοπικών μονάδων παραγωγής, καθώς και από το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο. Το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού του μικροδικτύου αποτελείται από ένα κυρίως πρόβλημα που περιλαμβάνει τη συνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου στο κεντρικό δίκτυο και από ένα υπό-πρόβλημα που σχετίζεται με την απομονωμένη λειτουργία του. Συγκεκριμένα εξετάζεται η ικανότητα του μικροδικτύου να μεταβεί σε κατάσταση νησιδοποίησης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που εκτιμάται ότι το κυρίως δίκτυο υπάρχει πιθανότητα να αδυνατεί να τροφοδοτήσει το μικροδίκτυο. Στο κυρίως πρόβλημα αποφασίζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός λειτουργίας του μικροδικτύου σε συνδεδεμένη λειτουργία και τα αποτελέσματα δίνονται ως δεδομένα στο υπό-πρόβλημα, έτσι ώστε να εξεταστεί αν το μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτήσει με επάρκεια τα φορτία του συνυπολογίζοντας την νησιδοποίηση. Κατάλληλα «cuts» προστίθενται στο κυρίως πρόβλημα σε περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η κάλυψη του φορτίου σε κατάσταση νησιδοποίησης. Έτσι γίνεται αναθεώρηση του χρονοδιαγράμματος λειτουργίας των γεννητριών, των συστημάτων αποθήκευσης

ηλεκτρικής ενέργειας και των ρυθμιζόμενων φορτίων. Αριθμητικές προσομοιώσεις αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

Λέξεις Κλειδιά:

Ελαστικότητα, ακραία καιρικά φαινόμενα, ελαχιστοποίηση κόστους, αποκατάσταση δικτύου, διανομή πόρων, μικροδίκτυο, νησιδοποίηση, βέλτιστος σχεδιασμός.

ABSTRACT

Damages in power grids due to natural disasters resulted in significant economic, social, and physical disruptions. A cost - effective restoration scheme to improve power grid resilience is of utmost importance. The present thesis meets these requirements by presenting two models developed in order to improve the resilience of a main grid and a microgrid respectively. These models designed in a high- level modeling system for mathematical programming and optimization: General Algebraic Modeling System (*GAMS*).

In the first part of this thesis is presented a cost-effective system-level restoration scheme to improve power grids resilience by efficient response to the damages due to natural disasters. A post-disaster decision making model is developed to find the optimal repair schedule, unit commitment solution, and system configuration in restoration of the damaged power grid. The physical constraints of the power grid, associated with the unit commitment and restoration, are considered in the proposed model. The value of lost load (VOLL) is used as a viable measure to represent the criticality of each load in the power grid. Different scenarios are developed to analyze the proposed model on the standard IEEE 118-bus test system. This study provides a prototype and proof of concept for utility companies to consider economics of disaster and include unit commitment model into the post-disaster restoration process.

In the second part of this thesis is presented a model for microgrid optimal scheduling considering islanding constraints. The objective of the problem is to minimize the microgrid total operation cost which comprises the generation cost of local resources and cost of energy purchase from the main grid. The microgrid optimal scheduling problem is decomposed into a grid-connected operation master problem and an islanded operation subproblem. The microgrid capability in operating in the islanded mode for every two hours in a twenty-four hours schedules scrutinized by an islanding criterion. The integer scheduling decisions determined in the master problem will be examined against the microgrid islanding feasibility in the subproblem. The scheduling decisions will be revised using proper islanding cuts if sufficient generation is not available to guarantee a feasible islanding. Islanding cuts will revise generating units, energy storage systems, and adjustable loads schedules. The lost load of adjustable loads is penalized by an inconvenience factor in the objective. Numerical simulations demonstrate the effectiveness of the proposed microgrid optimal scheduling model and explore its economic and reliability merits.

Keywords:

Resilience, natural disasters, cost minimization, restoration, distributed energy resource, islanded operation, lost load, microgrid, optimal scheduling, adjustable load.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στα πλαίσια του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου που μου έδωσε την ευκαιρία να διεκπεραιώσω αυτό το τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Παύλο Γεωργιλάκη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή της εξέτασης της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος κ. Δημήτρη Τράκα για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε και για την άψογη συνεργασία μας κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ήταν πάντα άμεσα διαθέσιμος να απαντήσει στις απορίες μου και να με καθοδηγήσει. Χάρη στην πολύτιμη βοήθεια του κατάφερα να ολοκληρώσω αυτήν την εργασία.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Φροσινού Ασημίνα

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</i>	21
<i>Η έννοια και η σημασία της ελαστικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας</i>	21
<i>1.1 Εισαγωγή</i>	21
<i>1.2 Φυσικές καταστροφές και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας</i>	22
<i>1.2.1 Στοιχεία από τις επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας</i>	24
<i>1.2.2 Ιστορική αναδρομή στον τυφώνα Sandy</i>	26
<i>1.2.3 Περιγραφή φυσικών καταστροφών και αντίδραση του δικτύου κατά την εμφάνισή τους</i>	29
<i>1.3 Αναγκαιότητα για ελαστικότητα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας</i>	31
<i>1.3.1 Συλλαμβάνοντας την έννοια της ελαστικότητας</i>	33
<i>1.3.2 Καμπύλη ελαστικότητας</i>	34
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</i>	37
<i>Αποκατάσταση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά από εμφάνιση καταστροφής</i>	37
<i>2.1 Εισαγωγή</i>	37
<i>2.2 Περιγραφή του μοντέλου</i>	38
<i>2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση</i>	39

2.3.1 Υπόμνημα.....	41
2.3.2 Αντικειμενική συνάρτηση	43
2.3.3 Περιορισμοί	43
2.4 Στοιχεία και δεδομένα μοντέλου	51
2.4.1 Τοπολογία δικτύου	51
2.4.2 Στοιχεία του δικτύου που έχουν καταστραφεί.....	52
2.4.3 Κόστος απώλειας φορτίου.....	54
2.4.4 Κόστος επισκευής.....	54
2.4.5 Κόστος των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	55
2.6 Αποτελέσματα.....	55
2.7 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	61
<i>Βέλτιστος προγραμματισμός μικροδικτύου σε κατάσταση νησιδοποίησης</i>	<i>61</i>
3.1 Εισαγωγή	61
3.2 Περιγραφή του μοντέλου βέλτιστου προγραμματισμού ενός μικροδικτύου	64
3.2.1 Στοιχεία του μικροδικτύου	64
3.2.2 Μοντέλο βέλτιστου προγραμματισμού ενός μικροδικτύου	66
3.2.3 <i>T</i> - κριτήριο νησιδοποίησης.....	68

3.3 Μαθηματική μοντελοποίηση	69
3.3.1 Υπόμνημα.....	69
3.3.2 Σχεδιασμός συνδεδεμένου δικτύου (κύριο πρόβλημα)	70
3.3.3 Αντικειμενική συνάρτηση κύριου προβλήματος	71
3.3.4 Περιορισμοί κύριου προβλήματος	72
3.3.5 Σχεδιασμός νησιδοποίησης (υπό-πρόβλημα)	76
3.3.6 Αντικειμενική συνάρτηση υπό-προβλήματος	76
3.3.7 Περιορισμοί υπό-προβλήματος	76
3.3.8 Προσπάθεια επίτευξης βέλτιστης λειτουργίας μικροδικτύου σε κατάσταση νησιδοποίησης	80
3.4 Δεδομένα των ενεργών στοιχείων του μικροδικτύου	81
3.5 Αποτελέσματα.....	84
3.6 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	89
<i>Γενικά συμπεράσματα</i>	<i>89</i>
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Αιτίες μεγαλύτερων διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος στις ΗΠΑ	24
Πίνακας 2 Περιγραφή φυσικών καταστροφών βασισμένη σε πολλαπλές πηγές	30
Πίνακας 3 Στοιχεία κατεστραμμένων ζυγών.....	53
Πίνακας 4 Στοιχεία κατεστραμμένων γραμμών μεταφοράς	53
Πίνακας 5 Στοιχεία κατεστραμμένων μονάδων παραγωγής.....	53
Πίνακας 6 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής ζυγών στα σενάρια I - III	56
Πίνακας 7 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής γραμμών μεταφοράς στα σενάρια I - III.....	57
Πίνακας 8 Οικονομικοί δείκτες για τα σενάρια I – III.....	57
Πίνακας 9 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής ζυγών στο σενάριο IV.....	58
Πίνακας 10 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής γραμμών μεταφοράς στο σενάριο IV.....	58
Πίνακας 11 Οικονομικοί δείκτες για το σενάριο IV	59
Πίνακας 12 Δεδομένα μονάδων παραγωγής (E: Ελεγχόμενες, Σ: Στοχαστικές)	82
Πίνακας 13 Δεδομένα συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας - ESS	82
Πίνακας 14 Δεδομένα φορτίων (S: Shiftable, C: Curtailable)	82
Πίνακας 15 Ωριαία ζήτηση σταθερού φορτίου στο μικροδίκτυο.....	82
Πίνακας 16 Ωριαία παραγωγή ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής	83
Πίνακας 17 Ωριαίες τιμές αγοράς	83
Πίνακας 18 Τελικός χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	84

Πίνακας 19 Τελικός χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας ρυθμιζόμενων φορτίων.....	85
Πίνακας 20 Δεδομένα επιπρόσθετου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων και της κλιματικής αλλαγής στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας	23
Εικόνα 2 Το 2008 το ινστιτούτο Edison Electric Reliability ανέφερε ότι το 67% του χρόνου διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σχετιζόταν με ακραία καιρικά φαινόμενα	23
Εικόνα 3 Διακοπές ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, 1992-2012.....	25
Εικόνα 4 Εθνικές καταστροφές στις ΗΠΑ, 1980-2010.....	25
Εικόνα 5 Μετά τον τυφώνα Sandy, μεγάλο τμήμα του Μανχάταν ήταν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα.....	27
Εικόνα 6 Στον απόηχο του τυφώνα Sandy, ένας κινητός σταθμός φόρτισης στο Breezy Point, της Νέας Υόρκης (αριστερά). Οι κάτοικοι της Νέας Υόρκης συναθροίζονται γύρω από μια γεννήτρια για να φορτίσουν τα κινητά τους τηλέφωνα, μετά από μέρες χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα (δεξιά).	28
Εικόνα 7 Καταναλωτές χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα από τον τυφώνα Σάντι	29
Εικόνα 8 Καμπύλη Ελαστικότητας.....	36
Εικόνα 9 IEEE 118- Bus Test System.....	52
Εικόνα 10 Βέλτιστο κόστος επισκευής βλαβών για 5 διαφορετικές περιπτώσεις στο σενάριο IV.....	59
Εικόνα 11 Διάγραμμα ροής.....	66
Εικόνα 12 Χρονικός προγραμματισμός φόρτισης και αποφόρτισης συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	86
Εικόνα 13 Κόστος λειτουργίας (€) της ι-οστής περίπτωσης ανάλυσης	88

Η έννοια και η σημασία της ελαστικότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [1] αποτελούν ένα στοιχείο ζωτικής σημασίας των κρίσιμων υποδομών κάθε χώρας και χρησιμεύουν ως ένα βασικό θεμέλιο για τον σύγχρονο τρόπο ζωής. Το ηλεκτρικό δίκτυο παράγει, μεταφέρει και διανέμει ηλεκτρική ενέργεια σε εκατομμύρια σπίτια, σχολεία, γραφεία και εργοστάσια. Μέσα στον 21^ο αιώνα έχουν πραγματοποιηθεί επενδύσεις εκατομμυρίων για να εκσυγχρονιστούν τα ηλεκτρικά δίκτυα. Ο βασικός στόχος είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου, αποτελεσματικού, ασφαλή και ανθεκτικού ηλεκτρικού δικτύου σε όλα τα εσωτερικά και εξωτερικά αίτια που μπορούν να προκαλέσουν διακοπές στην λειτουργία του.

Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι υψηλή, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι διακοπές λειτουργίας τους. Κάτω από ορισμένες συγκυρίες, όπως για παράδειγμα μετά από έντονα καιρικά φαινόμενα, το δίκτυο μπορεί να υποστεί ζημιές με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται διακοπές στην λειτουργία του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος και το κόστος αποκατάστασης του μπορεί να είναι μεγάλος.

Πιο συγκεκριμένα, η νούμερο ένα αιτία που έχει προκαλέσει διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι τα έντονα καιρικά φαινόμενα και το κόστος ανέρχεται σε δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο, εξαιτίας των απωλειών ή της μη εξυπηρέτησης φορτίου, των καταστροφών στις υποδομές κλπ. Επίσης το ολοένα και γηραιότερο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει κάνει τους Αμερικανούς πιο επιρρεπείς σε διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος εξαιτίας του καιρού. Μεταξύ 2003 και 2012 έγιναν σχεδόν 679 διακοπές στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλονταν σε καιρικά φαινόμενα, οι οποίες επηρέασαν πάνω από 50.000 καταναλωτές.

Ο αριθμός των διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος λόγω άσχημων καιρικών φαινομένων προβλέπεται να αυξηθεί καθώς οι κλιματικές αλλαγές αυξάνουν την συχνότητα και την ένταση των τυφώνων, των χιονοθυελλών, των πλημμύρων και άλλων ακραίων καιρικών φαινομένων. Το 2012, οι Ηνωμένες Πολιτείες υπέστησαν κόστος 11 δισεκατομμυρίων λόγω των καταστροφών από τα έντονα καιρικά φαινόμενα, το δεύτερο μεγαλύτερο κόστος από κάθε άλλη χρονιά που έχει καταγραφεί.

Συνεπώς, ένα ελαστικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (*resilient grid*) είναι αυτό το οποίο αντιστέκεται στα δυσμενή γεγονότα, όπως τα σφοδρά καιρικά φαινόμενα και ένα αξιόπιστο δίκτυο (*reliable grid*) είναι αυτό με λιγότερες και μικρότερες διακοπές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Μέθοδοι για την βελτίωση της ελαστικότητας (*resilience*) και της αξιοπιστίας (*reliability*) του δικτύου ερευνούνται και εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας υψηλής τεχνολογίας λύσεις.

1.2 Φυσικές καταστροφές και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι πρόσφατες φυσικές καταστροφές [2] που έλαβαν μέρος στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής είχαν σημαντικές επιπτώσεις σε οικονομικό, αλλά και σε κοινωνικό επίπεδο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι προκάλεσαν σημαντική ταλαιπωρία στους κατοίκους των περιοχών που επλήγησαν από αυτές, εξαιτίας των διακοπών που πραγματοποιήθηκαν τόσο στην παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος και του νερού, όσο και στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τμήματα δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου.



Εικόνα 1 Επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων και της κλιματικής αλλαγής στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 2 Το 2008 το ινστιτούτο Edison Electric Reliability ανέφερε ότι το 67% του χρόνου διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σχετιζόταν με ακραία καιρικά φαινόμενα

1.2.1 Στοιχεία από τις επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

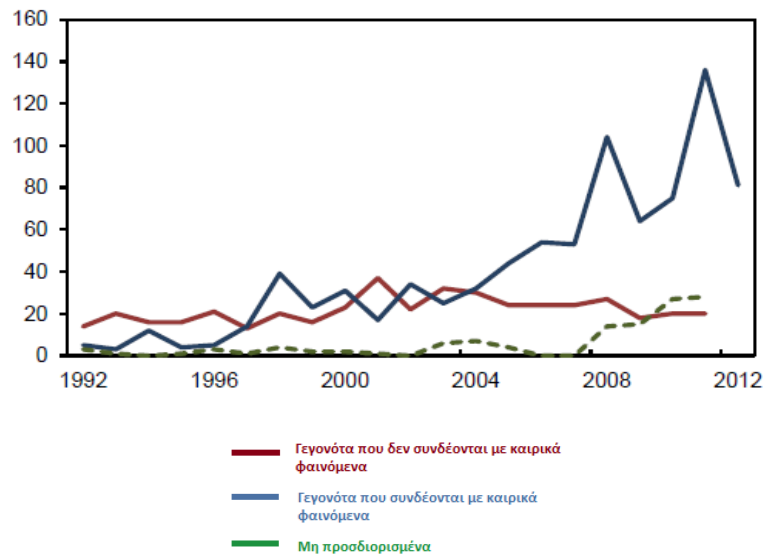
Τα σφοδρά καιρικά φαινόμενα [3], όπως προαναφέραμε αποτελούν την κύρια αιτία για διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος που προκλήθηκαν από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως καταιγίδες, τυφώνες, πλημμύρες αποτελούν το 58 % των διακοπών που συνέβησαν από το 2002 και το 87% των διακοπών που επηρέασαν 50.000 ή και παραπάνω καταναλωτές. Τα πιο αξιοσημείωτα 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. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε αναλυτικά μερικά από τα πιο σημαντικά περιστατικά. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα στοιχεία με τις αιτίες που προκάλεσαν μεγάλες διακοπές ρεύματος από το 1984 έως το 2006.

Πίνακας 1 Αιτίες μεγαλύτερων διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος στις ΗΠΑ

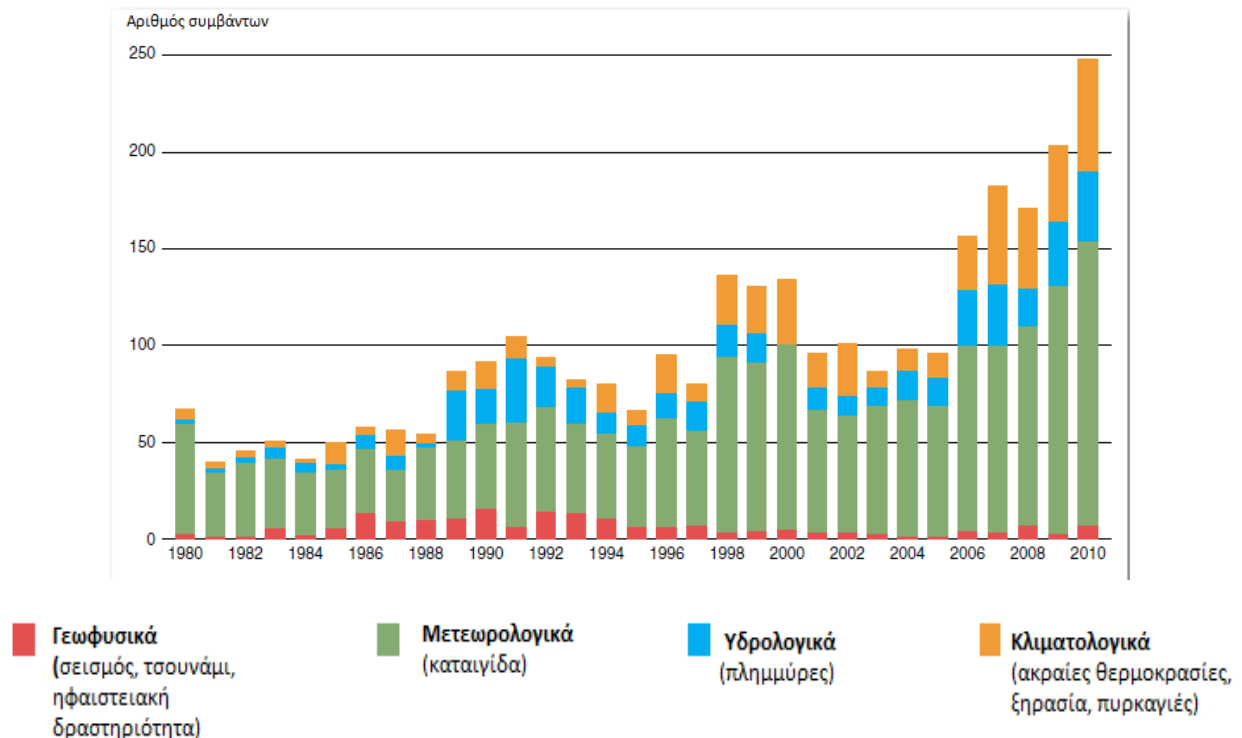
Αιτίες	% των συμβάντων	Μέσος αριθμός σε MWh	Μέσος αριθμός Καταναλωτών
Σεισμοί	0,8	1.408	375.900
Ανεμοστρόβιλοι	2,8	367	115.439
Τυφώνες/τροπικές καταιγίδες	4,2	1.309	782.695
Παγοθύελλες	5,0	1.152	343.448
Κεραυνοί	11,3	270	70.944
Άνεμοι/Βροχές	14,8	793	185.199
Άλλες ψυχρές καιρικές συνθήκες	5,5	542	150.255
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

Επιπρόσθετα, τα συμβάντα των μεγάλων διακοπών και των ακραίων καιρικών φαινομένων συνεχώς αυξάνονται. Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι αυξανόμενες διακοπές που συνδέονται με ακραία καιρικά φαινόμενα από το 1992 στις ΗΠΑ και στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι εθνικές καταστροφές που έχουν συμβεί στις ΗΠΑ από το 1980 έως το 2010, όπου η αυξανόμενη εμφάνισή τους είναι ξεκάθαρη, φτάνοντας συνολικά τα 247 περιστατικά το 2010.

Γεγονότα



Εικόνα 3 Διακοπές ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, 1992-2012



Εικόνα 4 Εθνικές καταστροφές στις ΗΠΑ, 1980-2010

Το 2009 βρέθηκε ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου προκαλούν κλιματικές αλλαγές, όπως υψηλές θερμοκρασίες, θερμότερους ωκεανούς, αύξηση της στάθμης της θάλασσας και ακραία καιρικά φαινόμενα. Τα αυξανόμενα ακραία καιρικά φαινόμενα όμως αποτελούν μια από τις σημαντικότερες απειλές που θέτει η κλιματική αλλαγή. Για παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών αναμένετε να αυξήσει την συχνότητα εμφάνισης τυφώνων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τυφώνες αντλούν ενέργεια από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Ομοίως, οι καταιγίδες του χειμώνα θα γίνουν ισχυρότερες.

1.2.2 Ιστορική αναδρομή στον τυφώνα Sandy

Ο τυφώνας Σάντι (Sandy) [4] είναι το μεγαλύτερο σύστημα τροπικών καταιγίδων που έχει καταγραφεί στον Ατλαντικό. Ο τυφώνας επηρέασε την Δομινικανή Δημοκρατία, την Αϊτή, τις Μπαχάμες, την Κούβα, την ανατολική ακτή των ΗΠΑ και στη συνέχεια τον ανατολικό Καναδά και την περιοχή των Μεγάλων λιμνών. Ο τυφώνας Σάντι αναπτύχθηκε πάνω από την Καραϊβική τις 22 Οκτωβρίου 2012 και εξελίχθηκε σε τροπική καταιγίδα. Στις 24 Οκτωβρίου αναβαθμίστηκε και έγινε τροπικός τυφώνας και στις 25 Οκτωβρίου ήταν τυφώνας κατηγορίας 2. Μετά από δύο μέρες έχασε ισχύ και για λίγο υποβαθμίστηκε σε τροπική καταιγίδα. Στις 29 Οκτωβρίου μετακινήθηκε προς τα βόρεια, προς τις ανατολικές ακτές των ΗΠΑ, ως τυφώνας ισχύος 1. Ο τυφώνας έπληξε στις ΗΠΑ την περιοχή από την Βιρτζίνια, μέχρι την Νέα Αγγλία προκαλώντας εκτεταμένες πλημμύρες.

Οι επιβεβαιωμένοι θάνατοι [5] λόγω του τυφώνα έφτασαν τους 233, εκ των οποίων ο θάνατος των 50 οφείλεται στις διακοπές του ηλεκτρικού ρεύματος. Πολλές περιοχές των ΗΠΑ τέθηκαν σε κατάσταση εκτάτου ανάγκης. Στο Μανχάταν, περίπου 250.000 σπίτια έμειναν χωρίς ηλεκτρικό και σε ολόκληρη τη πολιτεία της Νέας Υόρκης οι άνθρωποι χωρίς ηλεκτρισμό έφτασαν το 1,5 εκατομμύριο και σε ολόκληρες τις ΗΠΑ τα 8,5 εκατομμύρια.



Εικόνα 5 Μετά τον τυφώνα Sandy, μεγάλο τμήμα του Μανχάταν ήταν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα

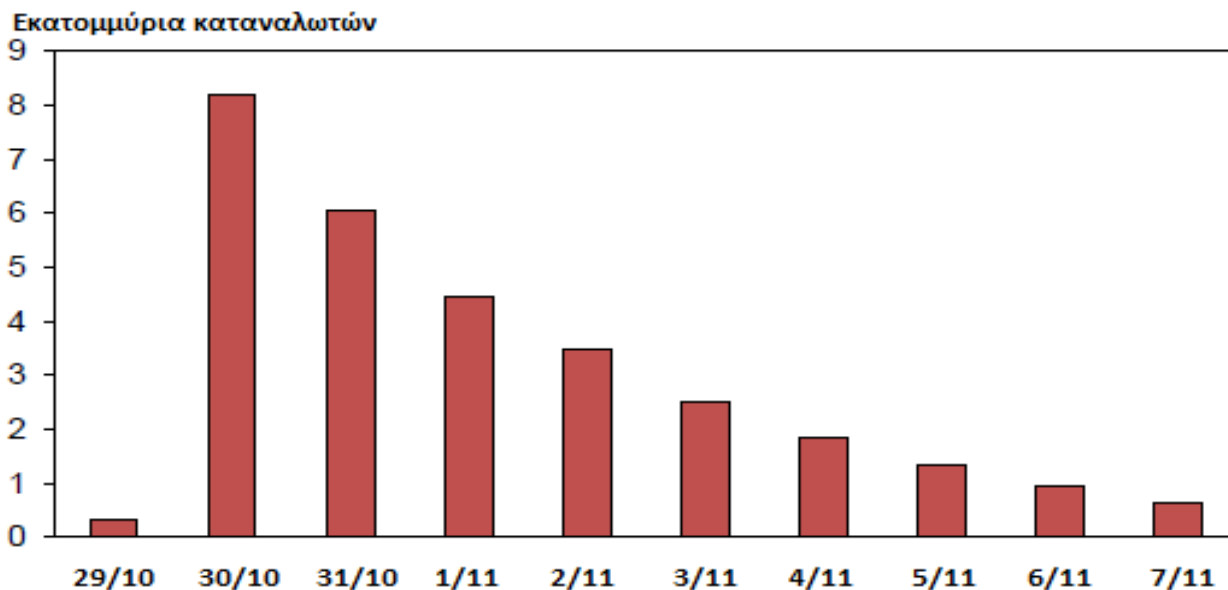
Λόγω των πλημμυρών και των πεσμένων δέντρων έκλεισαν πολλοί δρόμοι και γέφυρες. Το μετρό της Νέας Υόρκης (σήραγγες, σταθμοί) πλημμύρισε προκαλώντας τις μεγαλύτερες καταστροφές στη ιστορία του. Το νοσοκομείο NYU Langone στις όχθες του Ιστ Ρίβερ μετέφερε τους ασθενείς του σε άλλα νοσοκομεία.

Οι κάτοικοι της περιοχής [5] της Νέας Υόρκης με κινητούς σταθμούς φόρτισης και με γεννήτριες προσπαθούσαν να καλύψουν τις πρώτες ανάγκες τους. Στην Εικόνα 6 παρατηρούνται μερικά παραδείγματα.



Εικόνα 6 Στον απόηχο του τυφώνα Sandy, ένας κινητός σταθμός φόρτισης στο Breezy Point, της Νέας Υόρκης (αριστερά). Οι κάτοικοι της Νέας Υόρκης συναθροίζονται γύρω από μια γεννήτρια για να φορτίσουν τα κινητά τους τηλέφωνα, μετά από μέρες χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα (δεξιά).

Από το πρωί της 1^{ης} Νοεμβρίου [6] είχαν αποκατασταθεί δύο δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά υπήρχαν περισσότεροι από 600.000 καταναλωτές χωρίς ρεύμα. Η Consolidated Edison (επιχείρηση ενέργειας στην Νέα Υόρκη) πρόβλεψε ότι η ζημιά θα έχει αποκατασταθεί πλήρως μέχρι της 3 Νοεμβρίου. Όμως, το απόγευμα της ίδια μέρας ανακοίνωσαν ότι η συντριπτική πλειονότητα των πελατών θα τροφοδοτηθούν ξανά την 10^η και την 11^η Νοεμβρίου. Μάλιστα, ορισμένοι καταναλωτές θα συνδέονταν ξανά στο δίκτυο μετά από μια επιπλέον βδομάδα ή και περισσότερο. Συνολικά, 57.000 εργαζόμενοι [7] από 30 πολιτείες και από τον Καναδά πήγαν στην Νέα Υόρκη για να βοηθήσουν την Consolidated Edison να αποκαταστήσει την τροφοδοσία στην περιοχή. Επίσης, μεταξύ 28 Οκτωβρίου και 12 Νοεμβρίου, οι εργαζόμενοι δούλευαν σε βάρδιες 16 ωρών για να ανταποκριθούν στις 1.3 εκατομμύρια αναφερθέντες διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος. Τελικά, ακόμη και μέχρι τον Ιανουάριο του 2013, 8.200 άτομα δεν είχαν ηλεκτρικό ρεύμα. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τα εκατομμύρια των καταναλωτών που είχαν μείνει χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα από τις 29 Οκτωβρίου μέχρι τις 7 Νοεμβρίου (στοιχεία από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ).



Εικόνα 7 Καταναλωτές χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα από τον τυφώνα Σάντι

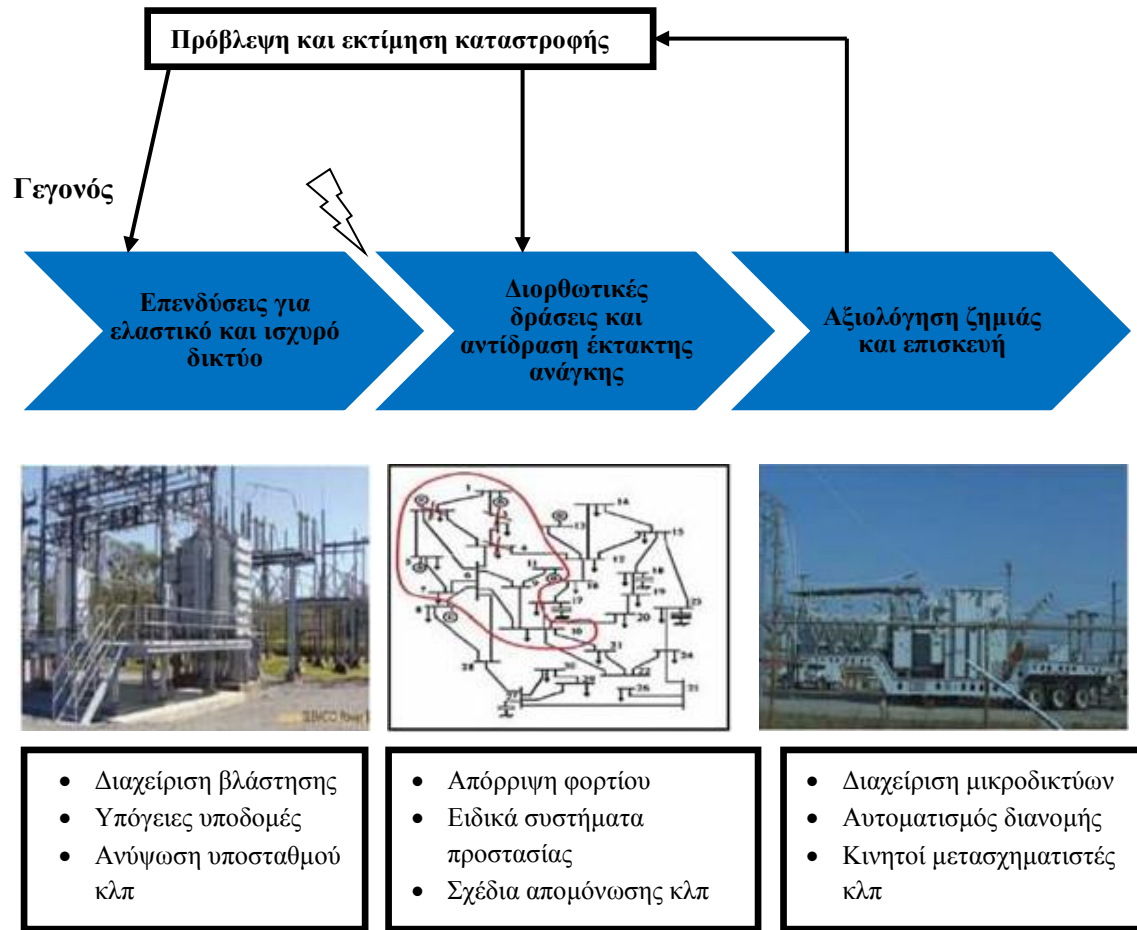
1.2.3 Περιγραφή φυσικών καταστροφών και αντίδραση του δικτύου κατά την εμφάνισή τους

Η μελέτη των επιπτώσεων [2] των ακραίων καιρικών φαινομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει ξεκινήσει από τα μέσα του 1930 όταν ο τυφώνας New England χτύπησε την περιοχή της Βοστώνης. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει αξιόλογη πρόοδος σε προχωρημένες μεθόδους που εξετάζουνε την σχέση μεταξύ φυσικών καταστροφών και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα εξαιτίας της πολυπλοκότητας και του διεπιστημονικού χαρακτήρα του θέματος οι ερευνητικές δραστηριότητες διεξάγονται αραιά σε διαφορετικούς τομείς. Στον πίνακα 2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των φυσικών καταστροφών βασισμένα σε πολλαπλές πηγές.

Πίνακας 2 Περιγραφή φυσικών καταστροφών βασισμένη σε πολλαπλές πηγές

Τύπος	Πληγέντες περιοχές	Προβλεψιμότητα	Απόσταση	Χρόνος επίδρασης
Τυφώνες/τροπικές καταιγίδες	Παράκτιες Περιοχές	24-72 ώρες, μέτρια έως καλή	Μεγάλη (ακτίνα μέχρι 1.000 μίλια)	Ωρες έως μέρες
Ανεμοστρόβιλοι	Ενδοχώριες Πεδιάδες	0-2 ώρες, κακή έως μέτρια	Μικρή (ακτίνα μέχρι 5 μίλια)	Λεπτά έως ώρες
Χιονοθύελλες/ Παγοθύελλες	Περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους	24-72 ώρες, μέτρια προς καλή	Μεγάλη, μέχρι 1.000 μίλια	Ωρες έως μέρες
Σεισμοί	Περιοχές στις γραμμές σφάλματος	Δευτερόλεπτα έως λεπτά, κακή	Μικρή έως μεγάλη	Λεπτά έως μέρες (μετά το πλήγμα)
Τσουνάμι	Παράκτιες Περιοχές	Λεπτά έως ώρες, μέτρια	Μικρή έως μεγάλη	Λεπτά έως ώρες
Ξηρασία/Πυρκαγιές	Ενδοχώριες Πεδιάδες	Μέρες, καλή	Μεσαία έως μεγάλη	Μέρες έως μήνες

Η έρευνα του θέματος των φυσικών καταστροφών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μελετηθεί από διαφορετικές οπτικές. Αρχικά όμως θα πρέπει να προσδιοριστεί η αντίδραση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όταν συμβαίνει ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο. Η Εικόνα 5 περιγράφει την διαδικασία της αντίδρασης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας κατά την επίδραση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου.



Εικόνα 5 Χρονοδιάγραμμα ανταπόκρισης του δικτύου υπό την επίδραση ακραίου καιρικού φαινομένου

1.3 Αναγκαιότητα για ελαστικότητα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση [8] έγινε κατανοητό ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα και άλλες φυσικές καταστροφές εκθέτουν τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τις γραμμές μεταφοράς και γενικά όλα τα στοιχεία του δικτύου σε κίνδυνο. Για αυτό το λόγο η επιστημονική κοινότητα [9] κάνει προσπάθειες για να ενδυναμώσει (**harden**) το ηλεκτρικό δίκτυο, εστιάζοντας σε τρία στοιχεία: *πρόληψη, ανάκτηση και 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 ελαστικό, κάτι το οποίο επιβάλει την ταχεία εκτίμηση των ζημιών, την έγκαιρη δημιουργία ομάδας εργατών για την αποκατάσταση της βλάβης και άμεσα διαθέσιμα ανταλλακτικά. Στο τυφώνα Σάντι πολλές ομάδες εργατών δεν μπορούσαν να φτάσουν στις πληγείσες περιοχές, επειδή οι δρόμοι είχαν μπλοκαριστεί από πεσμένα δέντρα, με αποτέλεσμα να μένουν άπραγες για μεγάλο χρονικό διάστημα.

➤ **Επιβίωση:**

Η επιβίωση αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να καταφέρει να διατηρήσει ένα ελάχιστο επίπεδο λειτουργίας για να εξυπηρετήσει μεμονωμένους καταναλωτές ή κοινότητες, σε περίπτωση πλήρους απώλειας της ηλεκτρικής παροχής από το σύστημα διανομής. Πιο συγκεκριμένα η επιβίωση συμπεριλαμβάνει την επικοινωνία με τους καταναλωτές, την χρήση ελαστικών τεχνολογιών (**resilient technologies**) για να επιτευχθεί η τροφοδοσία σημαντικών φορτίων, όπως σήματα κυκλοφορίας, φυλακές, νοσοκομεία και κινητά τηλέφωνα.

Στην εργασία αυτή θα επικεντρωθούμε στην εξασφάλιση της ελαστικότητας του δικτύου. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε την έννοια της ελαστικότητας (**resilience**):

Η λέξη [10] ελαστικότητα (**resilience/resiliency**) προέρχεται από την λατινική λέξη “resilio”, η οποία αναφέρεται στην ικανότητα ενός αντικειμένου να ανακάμπτει και να επιστρέφει στην αρχική του μορφή ή θέση όταν έχει δεχτεί κάποια τάση (όπως για παράδειγμα να έχει λυγιστεί, συμπιεστεί ή πιεστεί). Στο πλαίσιο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να επανέρχεται γρήγορα μετά από μια καταστροφή ή πιο γενικά αναφέρεται στην ικανότητα του δικτύου να προβλέπει έντονα και υψηλού αντίκτυπου γεγονότα και να ανακάμπτει γρήγορα από αυτές τις αναταραχές. Τέλος, 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 μετριάζει τις επιπτώσεις από παρόμοια περιστατικά στο μέλλον. Η προσαρμογή αναφέρεται σε ένα μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, καθώς και σε μέτρα που πρέπει να ληφθούν στην λειτουργία του για να μειωθούν τα αδύναμα σημεία του δικτύου, έτσι ώστε το δίκτυο να είναι έτοιμο να δεχτεί ένα ξαφνικό εξωτερικό πλήγμα. Ουσιαστικά, η ελαστικότητα 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 ελαστικότητα ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την ικανότητα του να προβλέπει, να απορροφάει, να προσαρμόζεται εύκολα ή/και να ανακάμπτει γρήγορα από πιθανά γεγονότα που μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές.

1.3.1 Συλλαμβάνοντας την έννοια της ελαστικότητας

Πρώτη φορά η έννοια [11] της ελαστικότητας (**resilience**) ορίστηκε από τον C.S Holling, το 1973 ως μέτρο ανθεκτικότητας, ικανότητας απορρόφησης αλλαγών, διαταραχών και διατήρησης της ίδιας σχέσης μεταξύ πληθυσμών και μεταβλητών καταστάσεων. Μετά από αυτόν τον θεμελιώδη ορισμό, η έννοια της ελαστικότητας, έχει εξελιχθεί εντυπωσιακά σε αρκετά συστήματα: όπως σε συστήματα διαχείρισης ασφαλείας, συστήματα οργάνωσης, όπως επίσης και συστήματα κοινωνικοοικολογικά και οικονομικά. Μετά τον ορισμό του Holling πολλές ερμηνείες της ελαστικότητας έχουν αναπτυχθεί, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί ορισμοί κάτι που έχει οδηγήσει σε έλλειψη της κατανόησης του τι πραγματικά είναι η ελαστικότητα. Στο πλαίσιο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ως κρίσιμων υποδομών, η εικόνα είναι θολή, καθώς η έννοια της ελαστικότητας έχει εμφανιστεί τις τελευταίες δεκαετίες. Έχουν γίνει προσπάθειες από διάφορους οργανισμούς παγκοσμίως, όπως το Κέντρο Ερευνών Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου, αλλά και το Κέντρο Ερευνών Ενεργειακών Μηχανικών των Ηνωμένων Πολιτειών για να οριστεί η έννοια της ελαστικότητας και να διαχωριστεί από την έννοια της αξιοπιστίας (**reliability**). Σύμφωνα με το κέντρο του Ηνωμένου Βασιλείου η ελαστικότητα περιλαμβάνει την αξιοπιστία, αλλά περιλαμβάνει και περαιτέρω την αντοχή, την εφεδρεία, την ανταπόκριση και την ανάκαμψη ως βασικά χαρακτηριστικά. Ένας άλλος πρωτοπόρος ορισμός προέρχεται από το Διεπιστημονικό και Εθνικό Κέντρο για Αντισεισμική Έρευνα Μηχανικών, όπου ένα γενικό πλαίσιο του τι είναι η ελαστικότητα (**resilience**) έχει αναπτυχθεί και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε υποδομή ζωτικής σημασίας, συμπεριλαμβανομένων και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το γενικό πλαίσιο περιλαμβάνει τις λέξεις: ευρωστία, εφεδρεία, επινοητικότητα και ταχύτητα (δηλαδή τα **4Rs: robustness, redundancy, resourcefulness** και **rapidity**). Η λίστα με τους ορισμούς της ελαστικότητας είναι ατέλειωτη, αλλά όλοι οι ορισμοί εστιάζονται στην ικανότητα του δικτύου να προβλέπει, να απορροφάει και να επανέρχεται γρήγορα όταν δεχθεί ένα εξωτερικό, μεγάλων επιπτώσεων και χαμηλής πιθανότητας πλήγμα.

1.3.2 Καμπύλη ελαστικότητας

Η επεξηγηματική εννοιολογική καμπύλη [11] της ελαστικότητας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 8 δείχνει τα επίπεδα ελαστικότητας σε όλον τον χρονικό ορίζοντα του γεγονότος που προκαλεί την διαταραχή. Ουσιαστικά, υποδεικνύει τα χαρακτηριστικά στοιχεία ελαστικότητας όπου ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να διαθέτει για να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά με τις εξελισσόμενες καταστάσεις ενός γεγονότος, για παράδειγμα μια βαριά καταιγίδα που κινείται κατά μήκος του συστήματος.

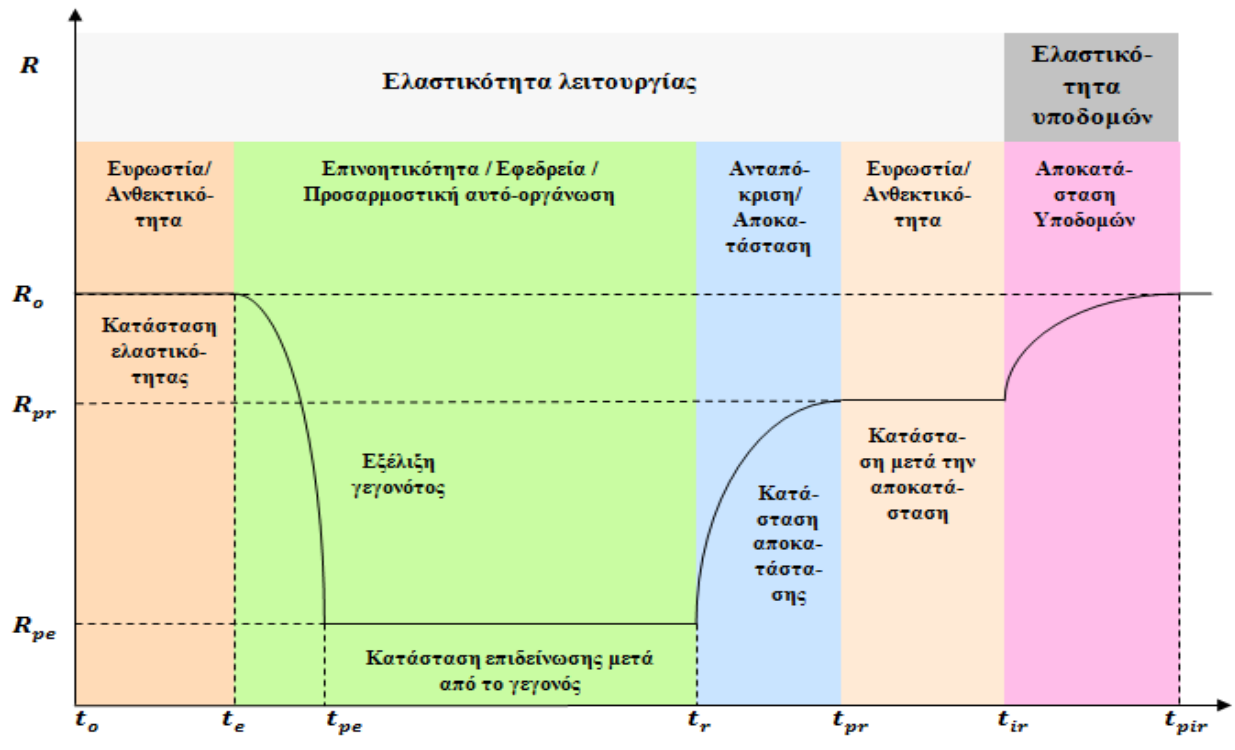
Πριν συμβεί το γεγονός την χρονική στιγμή t , το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι ισχυρό (**robust**) και ανθεκτικό (**resistant**), ώστε να αντέξει το αρχικό πλήγμα. Έτσι, ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να επιδείξει επαρκή ελαστικότητα (στο σχήμα επισημαίνεται με R_o , όπου R είναι ένα δείκτης του επιπέδου ελαστικότητας 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 ρυθμίσει το σύστημα σε κατάσταση ελαστικότητας.

Μετά από το γεγονός, η κατάσταση του συστήματος χειροτερεύει καθώς η ελαστικότητα του την χρονική αυτή περίοδο θέτεται σε μεγάλο κίνδυνο R_{pe} . Επινοητικότητα, εφεδρεία και προσαρμοστική αυτό-οργάνωση είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ελαστικότητας 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 ελαστικότητας (από R_o σε R_{pe}), προτού η διαδικασία αποκατάστασης ξεκινήσει την χρονική στιγμή t_r . 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 ελαστικότητας όσο το δυνατόν γρηγορότερα.

Μόλις η αποκατάσταση ολοκληρωθεί, το σύστημα εισέρχεται στην επόμενη φάση, όπου είναι η κατάσταση μετά την αποκατάσταση. Το επίπεδο ελαστικότητας αυτής της κατάστασης είναι R_{pr} , το οποίο θα έχει μέγιστη τιμή R_o , δηλαδή $R_{pr} < R_o$. Όμως, ενώ το σύστημα παρόλο που μπορεί να έχει επανέλθει στην λειτουργική κατάσταση στην οποία βρισκόταν πριν από την εμφάνιση του γεγονότος (έχοντας έναν ορισμένο βαθμό λειτουργικής ελαστικότητας), οι υποδομές μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση (ελαστικότητα υποδομών), δηλαδή: $(t_{pir} - t_{pr}) > (t_{pr} - t_r)$. Αυτό θα εξαρτηθεί από την σοβαρότητα των γεγονότων, όπως επίσης και από τα χαρακτηριστικά ελαστικότητας που θα επιδείξει το σύστημα πριν, κατά την διάρκεια και μετά από την εμφάνιση του εξωτερικό

πλήγματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειώσουμε ότι μερικά μέτρα θα κάνουν το σύστημα περισσότερο ελαστικό από πλευράς χειρισμού και λιγότερο από πλευράς υποδομών. Για παράδειγμα, η μετακίνηση μιας εναέριας γραμμής σε υπόγεια μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα του συστήματος να αντισταθεί στο γεγονός, αλλά αν κάποιο καλώδιο υποστεί κάποια βλάβη θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να επισκευαστεί από ότι μια εναέρια γραμμή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα, αν το γεγονός πρόκειται να συμβεί σύντομα, όπως ένα τσουνάμι που μπορεί να ακολουθήσει μετά από έναν μεγάλο σεισμό.

Τέλος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι για την πλήρη κατανόηση και αξιολόγηση ενός συστήματος ελαστικότητας, το οποίο είναι εξ ορισμού πολυδιάστατη έννοια, τόσο τα επίπεδα ελαστικότητας όσο και οι χρόνοι μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος που σχετίζονται με το γεγονός χρειάζονται. Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 8 η ελαστικότητα του συστήματος δεν χαρακτηρίζεται μόνο από τα επίπεδα R_o , 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 $(t_{pe} - t_e)$, $(t_{pr} - t_r)$ και $(t_{pir} - t_{ir})$ αντίστοιχα. Τέλος, οι δράσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν για να αυξηθεί η ελαστικότητα πρέπει να στοχεύουν πρώτον στην μείωση της υποβάθμισης της ελαστικότητας κατά την διάρκεια του γεγονότος ($R_o - R_{pe}$), δεύτερον στην επίτευξη μιας αργής και πιθανότητα ελεγχόμενης υποβάθμισης $(t_{pe} - t_{pr})$ και τέλος στην μείωση του χρόνου αποκατάστασης τόσο από λειτουργική άποψη: $(t_{pr} - t_e)$ όσο και από την μεριά των υποδομών: $(t_{pir} - t_{pr})$.



Εικόνα 8 Καμπύλη Ελαστικότητας

Αποκατάσταση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά από εμφάνιση καταστροφής

2.1 Εισαγωγή

Έχει γίνει κατανοητό [12] ότι είναι αναγκαία η ύπαρξη ελαστικού (*resilience*) δικτύου, έτσι ώστε οι καταναλωτές να τροφοδοτούνται με επάρκεια και χωρίς διακοπές. Όμως, όπως αναφέρεται στον ορισμό [13] του ελαστικού (*resilience*) δικτύου η γρήγορη ανάκτηση της πλήρους λειτουργίας του δικτύου, μετά την εμφάνιση μιας καταστροφής η οποία προκαλεί βλάβη σε ένα μέρος των στοιχείων του, παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ελαστικότητας του. Για αυτό το λόγο σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε ένα μοντέλο ανάκτησης του δικτύου μεταφοράς μετά την εμφάνιση μιας καταστροφής.

Για να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της ανάκτησης του δικτύου μεταφοράς έπειτα από την εμφάνιση μιας καταστροφής, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα μικτού ακεραίου προγραμματισμού. Το μοντέλο θεωρεί τους περιορισμούς που εισάγει το συνεργείο συντήρησης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών όπως επίσης και το κόστος από την ποινή που επιβάλλεται όταν δεν τροφοδοτούνται τα φορτία, έτσι ώστε να βρεθεί το πρόγραμμα αποκατάστασης που ελαχιστοποιεί το κόστος. Χρησιμοποιώντας την δομή του μικτού ακεραίου προγραμματισμού για την μοντελοποίηση του προβλήματος έχει πραγματοποιηθεί η βέλτιστη αποκατάσταση του ελαττωματικού δικτύου.

2.2 Περιγραφή του μοντέλου

Κατά την εμφάνιση φυσικών καταστροφών προκαλούνται βλάβες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κύρια δομικά στοιχεία του δικτύου που υπόκεινται σε βλάβες είναι οι μονάδες παραγωγής, οι γραμμές μεταφοράς και οι ζυγοί των υποσταθμών. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε επικεντρώνεται στην αποκατάσταση της βλάβης μετά την εμφάνιση της καταστροφής και είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων για τις υπηρεσίες ενέργειας. Ο βασικός του στόχος είναι να οργανώσει τις δραστηριότητες επισκευής των γραμμών μεταφοράς καθώς και των ζυγών, παράλληλα με τις αντίστοιχες για την επισκευή των μονάδων παραγωγής με αποδοτικό τρόπο.

Όταν η καταστροφή [14] χτυπήσει το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ο διαχειριστής προβαίνει στην εκτίμηση των ζημιών από μια εναέρια έρευνα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται ελικόπτερα, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ή δορυφορικές τεχνολογίες στις πληγείσες περιοχές. Επίσης πραγματοποιείται και έλεγχος του εδάφους από επιθεωρητές εάν οι δρόμοι δεν έχουν επηρεαστεί από την καταστροφή. Η διαδικασία αξιολόγησης της καταστροφής περιλαμβάνει την καταμέτρηση των ζημιών που έχουν προκληθεί στο δίκτυο και στη συνέχεια αποφασίζεται κατά πόσο μια εγκατάσταση ή ένα στοιχείο έχει υποστεί βλάβη. Σε περίπτωση βλάβης υπολογίζεται ο αναμενόμενος χρόνος που απαιτείται για την επισκευή του (TTR – Time to Repair). Οι μονάδες παραγωγής θεωρούνται ενσωματωμένο στοιχείο της επιχείρησης ενέργειας με αποτέλεσμα να ορίζεται για κάθε μονάδα ένας υπεύθυνος για τις εργασίες επισκευής των κατεστραμμένων εγκαταστάσεων. Συνεπώς ο υπεύθυνος κάθε κατεστραμμένης μονάδας παραγωγής υποβάλει ένα χρονοδιάγραμμα για τις εργασίες επισκευής της. Το χρονοδιάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται από τον διαχειριστή ως βάση για τον προγραμματισμό της επισκευής των γραμμών μεταφοράς και των ζυγών με βασικό σκοπό να επιτευχθεί ο καλύτερος συντονισμός.

Θεωρούμε δυο καταστάσεις λειτουργίας για κάθε στοιχείο. Η πρώτη είναι να βρίσκεται σε *κατάσταση βλάβης* (damaged). Αυτό συμβαίνει όταν το στοιχείο παρουσιάζει μεγάλες ζημιές, με αποτέλεσμα να είναι εκτός λειτουργίας. Η δεύτερη είναι να βρίσκεται σε *κατάσταση λειτουργίας* (functional). Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο είτε δεν έχει επηρεαστεί καθόλου από την καταστροφή, είτε ότι έχει υποστεί ζημιές ήσσονος σημασίας και είναι σε θέση να συνεχίσει κανονικά την λειτουργία του.

Μετά τον προσδιορισμό της αρχικής κατάστασης (*βλάβης ή λειτουργίας*) του κάθε στοιχείου το επόμενο στάδιο είναι η κατανομή των διαθέσιμων πόρων αποκατάστασης για την επισκευή των κατεστραμμένων εξαρτημάτων. Έχουμε θεωρήσει ότι ο μοναδικός πόρος που είναι περιορισμένος είναι τα άτομα που υπάρχουν σε διαθεσιμότητα για να συμμετάσχουν στην επισκευή τους. Αντίθετα είναι δεδομένο ότι πληθώρα ανταλλακτικών και τμημάτων του

εξοπλισμού που απαιτούνται για την αποκατάσταση είναι διαθέσιμα. Στην συνέχεια, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η κατανομή των πόρων επηρεάζεται σημαντικά από το επίπεδο κρισιμότητας του φορτίου που πρέπει να αποκατασταθεί, καθώς και τα έξοδα που συνδέονται με την κατάσχεση των πόρων σε κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και τον τόπο.

Με γνώμονα τα παραπάνω, ο στόχος του προβλήματος ορίζεται ως η ελαχιστοποίηση του κόστους που προκύπτει από τις διακοπές του φορτίου, μαζί με το κόστος των πόρων για την αποκατάσταση της βλάβης και τέλος το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος που οφείλεται στις διακοπές του φορτίου προσδιορίζεται από τα MW που το σύστημα αδυνάτησε να τροφοδοτήσει επί την τιμή (VOLL - Value of Lost Load) που ορίζεται για την απόρριψη του φορτίου. Η τιμή αυτή είναι διαφορετική για κάθε φορτίο και διαμορφώνεται από το επίπεδο κρισιμότητας του. Ουσιαστικά, είναι ένα σημαντικό στοιχείο της μικρο- και μακροοικονομικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αντιπροσωπεύει την προθυμία των πελατών να πληρώσουν για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να αποφύγουν την διακοπή της. Το κόστος διακοπής φορτίου [15] μετριέται σε ευρώ ανά MWh και ο καθορισμός του μπορεί να βασίζεται είτε στην οριακή τιμή της επόμενης μονάδας του διακοπτόμενου ηλεκτρικού φορτίου, είτε στο μέσο όρο της αξίας των διακοπτόμενων φορτίων. Ωστόσο, αυτό ποικίλλει ανάλογα με το είδος της χρήσης και διακοπής.

2.3 Μαθηματική μοντελοποίηση

Το συνολικό πρόβλημα της αποκατάστασης βλάβης μετά την εμφάνιση της καταστροφής, από μαθηματικής άποψης ανάγεται σε ένα γραμμικό πρόβλημα επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων που απαρτίζουν το μαθηματικό μοντέλο της παραγωγικής διαδικασίας, συζευγμένο με ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας Αντικειμενικής Συνάρτησης (π.χ. κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κόστος λειτουργίας κλπ). Οι εξισώσεις του Μοντέλου αποτελούν περιορισμούς για το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή οι μεταβλητές της δε μπορούν να πάρουν οποιεσδήποτε τιμές αλλά πρέπει να ικανοποιούν και τις εξισώσεις του μοντέλου. Στην συνέχεια περιγράψουμε αναλυτικά την δομή ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού:

Σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού δεδομένων n μεταβλητών και m γραμμικών εξισώσεων ή ανισοτήτων, ζητούνται οι τιμές αυτών των μεταβλητών, οι οποίες ικανοποιούν αυτές τις εξισώσεις και ανισώσεις και βελτιστοποιούν κάποια γραμμική συνάρτηση αυτών των μεταβλητών.

Δηλαδή ζητείται η μεγιστοποίηση μιας γραμμικής συνάρτησης:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^n c_k x_k$$

με την προϋπόθεση να ικανοποιούνται οι γραμμικοί περιορισμοί:

$$\sum_{k=1}^n a_{ik} x_k \leq b_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

Συνεπώς ένα μαθηματικό μοντέλο ενός γενικού γραμμικού προγραμματισμού έχει την εξής τυποποιημένη μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση :

$$\min z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

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 μοντέλου.

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 μοντέλου πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος μαθηματικού προγραμματισμού: General Algebraic Modeling System (GAMS) και ανάγεται στα προβλήματα μικτού ακεραίου προγραμματισμού (Mixed integer programming -MIP).

2.3.1 Υπόμνημα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι επεξηγήσεις όλων των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν στην μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος:

I. Δείκτες:

b	Δείκτης για του ζυγούς.
i	Δείκτης για της μονάδες παραγωγής.
l	Δείκτης για της γραμμές μεταφοράς.
t	Δείκτης για τον χρόνο.

II. Παράμετροι:

C_{bt}	Ωριαίο κόστος του συνεργείου για την επισκευή του ζυγού b, την χρονική στιγμή t.
C_{lt}	Ωριαίο κόστος του συνεργείου για την επισκευή της γραμμής μεταφοράς b, την χρονική στιγμή t.
C_{it}^g	Κόστος παραγωγής της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
C_{it}^{sd}	Κόστος τερματισμού λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
C_{it}^{su}	Κόστος έναρξης λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
D_{bl}	Φορτίο ζήτησης του ζυγού b, την χρονική στιγμή t.
DR_i	Δυνατότητα μείωσης παραγωγής της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
DT_i	Ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος διακοπής λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i.
G_i	Αρχικός χρόνος όπου ήταν ενεργοποιημένη η μονάδα παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
L_i	Αρχικός χρόνος όπου ήταν απενεργοποιημένη η μονάδα παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
M	Μεγάλη θετική σταθερά.
P_i^{max}	Μέγιστη ικανότητα παραγωγής της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
P_i^{min}	Ελάχιστη ικανότητα παραγωγής της μονάδας παραγωγής i, την χρονική στιγμή t.
R_t^{max}	Αριθμός διαθέσιμων εργατών την χρονική στιγμή t.
R_b	Απαιτούμενος αριθμός εργατών για επισκευή του ζυγού b, την χρονική στιγμή t.
R_l	Απαιτούμενος αριθμός εργατών για επισκευή της γραμμής μεταφοράς l, την χρονική στιγμή t.

TTR	Απαιτούμενος χρόνος για επισκευή
UR_i	Δυνατότητα αύξησης παραγωγής της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .
RT_i	Ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος λειτουργίας της μονάδα παραγωγής i .
$VOLL_{bt}$	Κόστος απώλειας φορτίου ζυγού b , την χρονική στιγμή t .
α_{ib}	Στοιχείο της μονάδας παραγωγής i και του ζυγού b στον πίνακα πρόσπτωσης γεννητριών-ζυγών.
β_{ib}	Στοιχείο της γραμμής μεταφοράς l και του ζυγού b στον πίνακα πρόσπτωσης γραμμών-ζυγών.

III. Μεταβλητές:

I_{it}	Κατάσταση παραγωγής της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t : 1 εάν παράγει, 0 διαφορετικά
LI_{bt}	Απόρριψη φορτίου από τον ζυγό b , την χρονική στιγμή t .
P_{it}	Παραγωγή ενεργούς ισχύος της μονάδα παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .
PL_{lt}	Ροή ισχύος της γραμμής μεταφοράς l , την χρονική στιγμή t .
SD_{it}	Μεταβλητή κόστους τερματισμού λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .
SU_{it}	Μεταβλητή κόστους έναρξης λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .
u_{bt}	Μεταβλητή κατάστασης επισκευής του ζυγού b , την χρονική στιγμή t : 1 εάν επισκευάζεται, 0 διαφορετικά.
v_{lt}	Μεταβλητή κατάστασης επισκευής της γραμμής μεταφοράς l , την χρονική στιγμή t : 1 εάν κατασκευάζεται, 0 διαφορετικά.
w_{lt}	Διακοπή λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς l , την χρονική στιγμή t : 0 εάν έχει βλάβη ή είναι υπό επισκευή, 1 διαφορετικά.
y_{it}	Διακοπή λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t : 0 εάν έχει βλάβη ή είναι υπό επισκευή, 1 διαφορετικά.
z_{bt}	Διακοπή λειτουργίας του ζυγού b , την χρονική στιγμή t : 0 εάν έχει βλάβη ή είναι υπό επισκευή, 1 διαφορετικά.
δ_{bt}	Γωνία τάσης του ζυγού b , την χρονική στιγμή t .

2.3.2 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 δικτύου που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος αποκοπής φορτίου, το κόστος αποκατάστασης λειτουργίας και το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min_{u,v,LI,P,SU,SD} \left\{ \sum_t \sum_b VOLL_{bt} LI_{bt} + \sum_t \sum_b C_{bt} R_b u_{bt} + \sum_t \sum_l C_{lt} R_l v_{lt} + \sum_t \sum_i C_{it}^g P_{it} + SU_{it} + SD_{it} \right\} \quad (2.2.2)$$

Όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος απώλειας φορτίου μέσα στον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού αποκατάστασης, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος των πόρων που διατίθενται στους ζυγούς. Επιπρόσθετα, ο τρίτος όρος περιλαμβάνει το κόστος των πόρων που καταναλώνονται για την επισκευή των γραμμών μεταφοράς. Τέλος, ο τέταρτος όρος ενσωματώνει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλων των μονάδων παραγωγής που τροφοδοτούν το σύστημα, συμπεριλαμβανομένου το κόστος παραγωγής, το κόστος εκκίνησης και το κόστος τερματισμού. Το συνολικό κόστος των πόρων διαμορφώνεται από το άθροισμα των γινομένων των κατανεμημένων πόρων σε κάθε στοιχείο του δικτύου επί το κόστος των πόρων ανάλογα με το στοιχείο που επισκευάζεται. Οι δυαδικές μεταβλητές u_{bt} και v_{lt} υποδηλώνουν εάν μια μονάδα των πόρων της ομάδας συντήρησης κατανέμεται την χρονική στιγμή t σε κάποιον ζυγό (b) ή κάποια γραμμή μεταφοράς (l) αντίστοιχα, (1 εάν διατίθεται, αλλιώς 0).

2.3.3 Περιορισμοί

A. Περιορισμοί μοντελοποίησης κατάστασης βλάβης

Η μοντελοποίηση της κατάστασης βλάβης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για την επίτευξη του τελικού στόχου. Ουσιαστικά είναι ένας μηχανισμός που επιτρέπει στο μοντέλο να διαθέσει πόρους

μόνο στα κατεστραμμένα στοιχεία του συστήματος. Ο μηχανισμός αυτός θα πρέπει επίσης να είναι ικανός να σταματήσει την κατανομή των πόρων και να αλλάξει την κατάσταση των αντίστοιχων στοιχείων, δηλαδή από κατάσταση βλάβης σε κατάσταση λειτουργίας, όταν περάσει ο χρόνος που έχει προκαθοριστεί για την επισκευή του αντίστοιχου στοιχείου.

Ο μηχανισμός που επιτελεί την παραπάνω λειτουργία και είναι αποκλειστικά για τις μονάδες παραγωγής ενέργειας μοντελοποιείται ως εξής:

$$y_{it} = 0, \text{ if } t \leq TTR_i, \text{ διαφορετικά } y_{it} = 1, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.1)$$

Ο γραμμικός προγραμματισμός όμως δεν δέχεται περιορισμούς του τύπου: «αν-τότε». Συνεπώς πρέπει να δημιουργηθεί ένας εναλλακτικός τρόπος για να μοντελοποιηθεί. Έτσι ξαναγράφεται στην ακόλουθη μορφή:

$$t - My_{it} \leq TTR_i, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.2)$$

$$My_{it} \leq TTR_i, \quad \forall i, \quad \forall t = 0, 1 \dots, TTR_i \quad (2.2.3.3)$$

Όπου η δυαδική μεταβλητή y_{it} αντιπροσωπεύει την κατάσταση βλάβης ή λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t . Η δυαδική μεταβλητή y_{it} είναι ίση με 0, αν η μονάδα παραγωγής i έχει υποστεί βλάβη που οφείλεται στην καταστροφή και δεν έχει επισκευαστεί μέχρι την χρονική στιγμή t , διαφορετικά είναι ίση με 1. Ο χρόνος που απαιτείται από την αρχή του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού, για να επισκευαστεί και να επανέλθει στο δίκτυο ικανή να παράγει, η υπό βλάβη μονάδα i αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή TTR_i . Εάν το στοιχείο δεν έχει υποστεί ζημιά τότε ο χρόνος που απαιτείται για την επισκευή του είναι ίσος με 0.

Οι επόμενοι περιορισμοί παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ των δυαδικών μεταβλητών w_{lt} και z_{bt} με τις αντίστοιχες δυαδικές μεταβλητές v_{lt} και u_{bt} .

$$0 \leq w_{l(t+1)} - \frac{(\sum_{k=1}^t v_{lk} - TTR_l + 0.5)}{M} \leq 1, \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.4)$$

$$0 \leq z_{b(t+1)} - \frac{(\sum_{k=1}^t u_{bk} - TTR_b + 0.5)}{M} \leq 1, \quad \forall b, \forall t \quad (2.2.3.5)$$

Όπου οι δυαδικές μεταβλητές z_{bt} και w_{lt} εκφράζουν αν ο ζυγός b ή η γραμμή μεταφοράς l αντίστοιχα είναι σε κατάσταση βλάβης ή σε κατάσταση λειτουργίας την χρονική

στιγμή t . Αν η γραμμή μεταφοράς l είναι σε κατάσταση βλάβης τότε η δυαδική μεταβλητή w_{lt} γίνεται 0. Μόλις όμως επισκευαστεί η τιμή της w_{lt} γίνεται 1 και παραμένει έως έχει μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού. Όσον αφορά την δυαδική μεταβλητή v_{lt} αφορά την μεταβλητή απόφασης για την επισκευή της γραμμής μεταφοράς l . Αν η γραμμή μεταφοράς l είναι υπό επισκευή την χρονική στιγμή t , τότε η μεταβλητή απόφασης v_{lt} παίρνει την τιμή 1, διαφορετικά είναι 0. Κατ' αντιστοιχία, η z_{bt} είναι ίση με 0, όταν ο ζυγός b , την χρονική στιγμή t , είναι σε κατάσταση βλάβης. Από την στιγμή όμως που θα επισκευαστεί και μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού έχει την τιμή 1. Τέλος, η δυαδική μεταβλητή u_{bk} είναι η μεταβλητή απόφασης για την επισκευή του ζυγού b , η οποία παίρνει την τιμή 1 όταν ο ζυγός b επισκευάζεται, διαφορετικά είναι ίση με 0.

Επιπρόσθετα, επιβάλλεται επιτακτική η ανάγκη να δημιουργηθεί ένας περιορισμός που θα εξασφαλίζει ότι διατίθενται ο απαραίτητος χρόνος και οι απαραίτητοι πόροι για την αποκατάσταση κάθε κατεστραμμένου στοιχείου. Για αυτό το λόγο ορίστηκαν οι δυο παρακάτω περιορισμοί:

$$\sum_{k=t}^{t+TTR_l-1} v_{lk} \geq TTR_l(v_{lt} - v_{l(t-1)}), \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.6)$$

$$\sum_{k=t}^{t+TTR_b-1} u_{bk} \geq TTR_b(u_{bt} - u_{b(t-1)}), \quad \forall b, \forall t \quad (2.2.3.7)$$

Έχουμε υποθέσει ότι όταν ξεκινήσει η επιχείρηση επισκευής κάποιου στοιχείου τότε η διαδικασία αυτή θα πρέπει να συνεχιστεί τουλάχιστον μέχρι τον υπολογισμένο χρόνο επισκευής (TTR). Επιπρόσθετα με αυτό, οι παραπάνω περιορισμοί εξαλείφουν την περίπτωση της μερικής επισκευής των κατεστραμμένων στοιχείων.

Τέλος, οι παρακάτω περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι δεν θα γίνει περιττή κατανομή πόρων για την επισκευή των εξαρτημάτων:

$$y_{i(t+1)} \geq y_{it}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.8)$$

$$w_{l(t+1)} \geq w_{lt}, \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.9)$$

$$z_{b(t+1)} \geq z_{bt}, \quad \forall b, \forall t \quad (2.2.3.10)$$

B. Περιορισμοί κατανομής πόρων

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου περιορίζεται από συγκεκριμένη ποσότητα πόρων με τον παρακάτω τρόπο:

$$\sum_l R_l v_{lt} + \sum_b R_b u_{bt} \leq R_t^{max}, \quad \forall t \quad (2.2.3.11)$$

Ο περιορισμός αυτός παρουσιάζει την μέγιστη ποσότητα πόρων που μπορούν να διατεθούν σε όλο το σύστημα κάθε χρονική στιγμή.

C. Περιορισμοί ισοζυγίου φορτίου

Είναι απαραίτητο μετά την καταστροφή να επιβάλλεται το ισοζύγιο φορτίου στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον παρακάτω περιορισμό:

$$\sum_{i \in N_b} P_{it} + \sum_{l \in N_b} PL_{lt} + LI_{bt} = D_{bt}, \quad \forall b, \forall t \quad (2.2.3.12)$$

Όπου N_b είναι το σύνολο των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα με τον ζυγό b . Το ισοζύγιο φορτίου στον ζυγό b εξασφαλίζει ότι η ενέργεια που εγχέεται σε ένα ζυγό b από τις συνδεδεμένες στον ζυγό γραμμές μεταφοράς και γεννήτριες επιτυγχάνει να καλύψει πλήρως το φορτίο του ζυγού. Αν όμως η ενέργεια που εγχέεται δεν είναι επαρκής, τότε η μερική τροφοδοσία του φορτίου θα διακοπεί. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβλητή διακοπή φορτίου LI_{bt} . Η μεταβλητή διακοπής φορτίου είναι μη αρνητική και μικρότερη από το φορτίο που συνδέεται στο αντίστοιχο ζυγό b .

D. Περιορισμοί παραγωγικών μονάδων

Η ενεργός ισχύς που θα παράγει η μονάδα παραγωγής i περιορίζεται από το αν η μονάδα παραγωγής έχει υποστεί βλάβη, από το αν έχει κριθεί απαραίτητο η συγκεκριμένη γεννήτρια να παράγει και τέλος από την ελάχιστη και μέγιστη ικανότητα παραγωγής της. Συνεπώς, μέσω του παρακάτω περιορισμού μπορούμε να ελέγξουμε την παραγωγή της γεννήτριας i :

$$P_i^{min} y_{it} I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{max} y_{it} I_{it}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.13)$$

Όμως ο παραπάνω περιορισμός είναι μη γραμμικός και επιβάλλεται επιτακτική η ανάγκη να δημιουργηθεί ένας εναλλακτικός τρόπος έτσι ώστε να εκφραστεί μαθηματικά. Για αυτό το λόγο μετατρέπεται ο παραπάνω περιορισμός σε μια νέα μεταβλητή και ένα νέο σύνολο εξισώσεων. Η νέα μεταβλητή είναι δυαδική και παρουσιάζεται στην συνέχεια:

$$n_{it} = y_{it}I_{it} \quad (2.2.3.14)$$

Το σύνολο των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθεί η απαιτούμενη γραμμικότητα παραθέτονται παρακάτω:

$$P_i^{min}n_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{max}n_{it}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.15)$$

$$n_{it} - y_{it} \leq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.16)$$

$$n_{it} - I_{it} \leq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.17)$$

$$-n_{it} + y_{it} + I_{it} \leq 1, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.18)$$

$$n_{it} \geq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.19)$$

$$I_{it} \leq y_{it}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.20)$$

Είναι σημαντικό να προσέξουμε ότι αν η γεννήτρια δεν είναι σε κατάσταση λειτουργίας, δεν μπορεί να της τεθεί εντολή να παράγει. Για αυτό το λόγο ο περιορισμός για το αν θα παράγει ή όχι σε συνδυασμό με την κατάσταση βλάβης της παίρνει μέρος σε όλον τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού.

Τέλος, η κατάσταση βλάβης ενός ζυγού b που συνδέεται η κάθε μονάδα παραγωγής i , περιορίζει την παραγωγή ενεργούς ισχύος ως εξής:

$$-M \sum_b \alpha_{ib} z_{bt} \leq P_{it} \leq M \sum_b \alpha_{ib} z_{bt}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.21)$$

Όπου α_{ib} είναι το στοιχείο από τον πίνακα πρόσπτωσης γεννητριών και ζυγών και παίρνει την τιμή 1 αν η μονάδα παραγωγής i συνδέεται στον ζυγό b , διαφορετικά είναι ίση με το 0. Αν ο ζυγός b που συνδέεται η γεννήτρια i είναι κατεστραμμένος τότε η γεννήτρια που συνδέεται σε αυτόν απενεργοποιείται.

E. Περιορισμοί ισοζυγίου ισχύος

Ενσωματώνοντας στην φύση του δικτύου την κατάσταση βλάβης των γραμμών μεταφοράς l που συνδέονται στους αντίστοιχους ζυγούς b και την επίδραση τους στην ροή ενεργούς ισχύος επινοήθηκαν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$-PL_l^{max} w_{lt} \leq PL_{lt} \leq PL_l^{max} w_{lt}, \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.22)$$

$$-M \sum_b \beta_{lb}^{from} z_{bt} \leq PL_{lt} \leq M \sum_b \beta_{lb}^{from} z_{bt}, \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.23)$$

$$-M \sum_b |\beta_{lb}^{to}| z_{bt} \leq PL_{lt} \leq M \sum_b |\beta_{lb}^{to}| z_{bt}, \quad \forall l, \forall t \quad (2.2.3.24)$$

$$\begin{aligned} -M(1 - w_{lt}) - M \left(1 - \sum_b |\beta_{lb}| z_{bt} \right) &\leq PL_{lt} - \frac{\sum_b \beta_{lb} \delta_{bt}}{x_l} \\ &\leq M(1 - w_{lt}) + M(1 - \sum_b |\beta_{lb}| z_{bt}), \quad \forall l, \forall t \forall b \end{aligned} \quad (2.2.3.25)$$

Όπου β_{lb}^{from} αντιπροσωπεύει το θετικό στοιχείο από τον πίνακα πρόσπτωσης γραμμών μεταφοράς και ζυγών, ενώ το β_{lb}^{to} το αρνητικό στοιχείο του ίδιου πίνακα. Όπως εμφανίζεται στην εξίσωση (2.2.3.22) εάν η γραμμή μεταφοράς l την χρονική στιγμή t είναι σε κατάσταση λειτουργίας τότε η γραμμή μεταφοράς μπορεί να μεταφέρει ισχύ, αλλά περιορίζεται από την μέγιστη ικανότητα μεταφοράς της. Αν όμως η γραμμή μεταφοράς l είναι σε κατάσταση βλάβης τότε η ροή ισχύος της γραμμής θα μηδενιστεί. Επιπρόσθετα, όσο κάποιος από τους ζυγούς b στους οποίους είναι συνδεδεμένο κάποιο από τα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς l είναι σε κατάσταση βλάβης, τότε η γραμμή αυτή δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των εξισώσεων: (2.2.3.23) έως (2.2.3.25).

F. Περιορισμοί κόστους εκκίνησης και τερματισμού γεννητριών

Το κόστος εκκίνησης και τερματισμού της λειτουργίας μια μονάδας παραγωγής i έχουν προστεθεί στην αντικειμενική συνάρτηση σαν θετικές μεταβλητές, έτσι ώστε να αποφευχθεί η προσθήκη επιπλέον λογικών μεταβλητών, ώστε να βελτιωθεί η υπολογιστική αποδοτικότητα του προγράμματος. Βασισμένοι στις εξισώσεις: (2.2.3.27) και (2.2.3.29) οι μεταβλητές του κόστους εκκίνησης και τερματισμού ορίζονται στις εξισώσεις: (2.2.3.26) και (2.2.3.28).

$$SU_{it} \geq C_{it}^{su} \left(I_{it} - \sum_{k=1}^{\tau} I_{i(t-k)} \right), \quad \forall i, \forall t, \forall \tau = 1, \dots, ND_i \quad (2.2.3.26)$$

$$SU_{it} \geq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.27)$$

$$SD_{it} \geq C_{it}^{sd} (I_{i(t-1)} - I_{it}), \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.28)$$

$$SD_{it} \geq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.29)$$

Όπου το ND_i είναι ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων όπου το κόστος εκκίνησης θα μετρηθεί για την μονάδα παραγωγής i .

G. Τεχνικοί περιορισμοί γεννητριών

Ο βασικός στόχος αυτής της κατηγορίας περιορισμών είναι να ξεπεραστούν οι μηχανικοί και οι θερμικοί περιορισμοί, έτσι ώστε να μειωθεί (ramp-down) ή να αυξηθεί (ramp-up) η παραγωγή της ενεργού ισχύος μια μονάδας παραγωγής i . Επιπλέον, θα πρέπει στις θερμικές μονάδες παραγωγής η αλλαγή της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει μόνο σταδιακά. Έτσι οι γεννήτριες όταν λειτουργούν δεν μπορούν να σταματήσουν την λειτουργία τους ακαριαία (minimum up time) και όταν είναι σε ανενεργή κατάσταση απαιτείται κάποιος χρόνος μέχρι να μπορέσουν να ενεργοποιηθούν ξανά (minimum down time).

Έτσι στο σύστημα επιβάλλονται οι περιορισμοί που αφορούν τους ramp-up, minimum up time καθώς και τους ramp-down και minimum down time περιορισμούς των γεννητριών. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση των προαναφερθέντων περιορισμών:

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR_i I_{i(t-1)} + UR_i^{su} (I_{it} - I_{i(t-1)}) + P_i^{max} (1 - I_{it}), \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.30)$$

$$P_{it} \leq P_i^{max} I_{i(t+1)} + DR_i^{sd} (I_{it} - I_{i(t-1)}), \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.31)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR_i I_{it} + DR_i^{sd} (I_{i(t-1)} - I_{it}) + P_i^{max} (1 - I_{i(t-1)}), \quad \forall i, \forall t \quad (2.2.3.32)$$

Η μέγιστη μεταβολή που επιτρέπεται στην αύξηση της παραγωγής (ramp-up) ορίζεται μέσω της εξίσωσης (2.2.3.30), ο περιορισμός που αφορά το shut down ramp rate ορίζεται από την εξίσωση (2.2.3.31), ενώ η μέγιστη μεταβολή που επιτρέπεται στην μείωση της παραγωγής (ramp-down) ενσωματώνεται στους περιορισμούς μέσω της εξίσωσης (2.2.3.32).

Στην συνέχεια έχουμε καταγράψει το σύνολο των περιορισμών που υλοποιούν το minimum up time που πρέπει να τηρηθεί:

$$\sum_{t=1}^{G_i} (1 - I_{it}) = 0, \quad \forall i \quad (2.2.3.33)$$

$$\sum_{k=t}^{t+UT_i-1} I_{ik} \geq UT_i(I_{it} - I_{i(t-1)}), \quad \forall i, \forall t = G_i + 1, \dots, NT - UT_i + 1 \quad (2.2.3.34)$$

$$\sum_{k=t}^{NT} (I_{ik} - (I_{it} - I_{i(t-1)})) \geq 0, \quad \forall i, \forall t = NT - UT_i + 2, \dots, NT \quad (2.2.3.35)$$

Όπου $G_i = \min\{NT, (UT_i - U_i^0)I_i^0\}$ είναι ο χρόνος της αρχικής περιόδου κατά την οποία η γεννήτρια i ήταν σε κατάσταση λειτουργίας, U_i^0 είναι ο αριθμός των περιόδων όπου η μονάδα παραγωγής i ήταν ενεργοποιημένη μέχρι τις αρχές του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού επισκευής και I_i^0 είναι η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας i .

Τέλος, παρατίθεται το σύνολο των περιορισμών που απαιτούνται για να υλοποιηθεί ο minimum down time περιορισμός :

$$\sum_{t=1}^{L_i} I_{it} = 0, \quad \forall i \quad (2.2.3.36)$$

$$\sum_{k=t}^{t+DT_i-1} (1 - I_{ik}) \geq DT_i(I_{i(t-1)} - I_{it}), \quad \forall i, \forall t = L_i + 1, \dots, NT - DT_i + 1 \quad (2.2.3.37)$$

$$\sum_{k=t}^{NT} (1 - I_{ik} - (I_{i(t-1)} - I_t)) \geq 0, \quad \forall i, \forall t = NT - DT_i + 2, \dots, NT \quad (2.2.3.38)$$

Όπου $L_i = \min\{NT, (DT_i - S_i^0)(1 - I_i^0)\}$ είναι ο χρόνος της αρχικής περιόδου κατά την οποία η γεννήτρια i ήταν απενεργοποιημένη, S_i^0 είναι ο αριθμός των περιόδων όπου η μονάδα παραγωγής i ήταν απενεργοποιημένη μέχρι τις αρχές του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού επισκευής.

H. Περιορισμοί πλήρους αποκατάστασης των βλαβών

Υπάρχει μια περίπτωση το σύστημα των φορτίων να έχει επανέλθει πλήρως, ενώ μερικές γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς και ζυγοί να μην έχουν επισκευαστεί ακόμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γεννήτριες, οι γραμμές μεταφοράς και οι ζυγοί που λειτουργούν συνεισφέρουν για τα περιττά στοιχεία που έχουν υποστεί βλάβη και βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Επομένως, λόγω των οικονομικών περιορισμών του συστήματος η διαδικασία αποκατάστασης μπορεί να πραγματοποιείται μερικώς. Ωστόσο, λόγω των πιθανών αυξήσεων στην ζήτηση του φορτίου, το σύστημα μπορεί να μην είναι σε θέση να τροφοδοτήσει πλήρως και οικονομικά τα φορτία, πέρα από τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού αποκατάστασης. Έτσι θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι όλα τα χαλασμένα στοιχεία θα επισκευαστούν μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα αποκατάστασης. Ο παρακάτω περιορισμός πραγματοποιεί αυτή την λειτουργία:

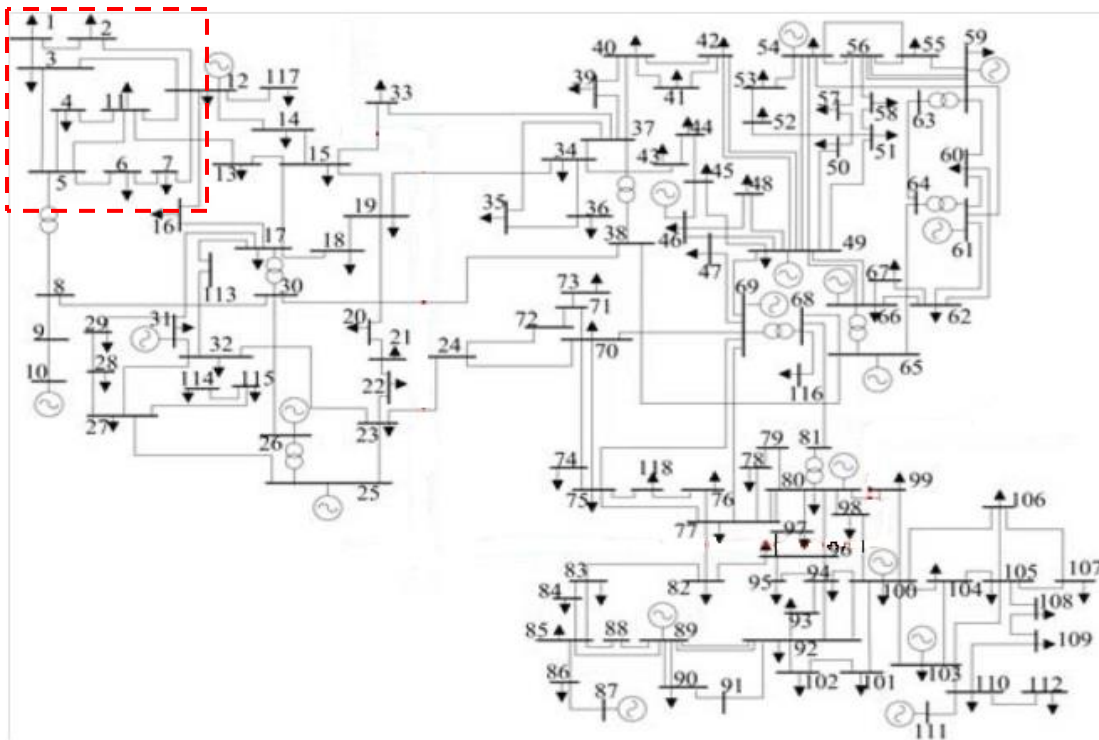
$$\sum_i y_{i(NT)} + \sum_b z_{b(NT)} + \sum_l w_{l(NT)} = NG + NB + NL \quad (2.2.3.39)$$

Όπου NT είναι το μήκος του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού αποκατάστασης και NG, NB και NL είναι ο αριθμός των μονάδων παραγωγής, των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα.

2.4 Στοιχεία και δεδομένα μοντέλου

2.4.1 Τοπολογία δικτύου

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέχθηκε για την δημιουργία του μοντέλου της αποκατάστασης βλάβης μετά την εμφάνιση μιας καταστροφής είναι το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 118 ζυγών της IEEE– IEEE 118-Bus. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 118 ζυγούς, 54 μονάδες παραγωγής, 186 γραμμές και 91 φορτία. Κρίνεται σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι αποτελεί ένα από τα πρότυπα δίκτυα της IEEE, το οποίο αντιπροσωπεύει ένα τμήμα του Αμερικάνικου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (στην κεντροδυτική ΗΠΑ) τον Δεκέμβριο του 1962. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το δίκτυο. Η περιοχή που βρίσκεται εντός του πλαισίου είναι η περιοχή που πλήττεται από τον τυφώνα:



Εικόνα 9 IEEE 118- Bus Test System

2.4.2 Στοιχεία του δικτύου που έχουν καταστραφεί

Μετά την εμφάνιση του φαινομένου και την αξιολόγηση της ζημιάς καταγράφονται οι ζυγοί, οι γραμμές και οι γεννήτριες που είναι σε κατάσταση βλάβης, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την αποκατάστασή τους. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα στοιχεία. Από τους ζυγούς που έχουν διαπιστωθεί με βλάβη, οι ζυγοί B1, B2, B3, B4, B7 και B11 είναι ζυγοί φορτίου, ενώ ο ζυγός B5 δεν έχει φορτίο. Επιπρόσθετα, έχει προσδιοριστεί το είδος του φορτίου που φέρει ο κάθε ζυγός. Πιο συγκεκριμένα, ο ζυγός B1 έχει εμπορικό φορτίο, ο B11 βιομηχανικό φορτίο και οι υπόλοιποι αστικό φορτίο. Επίσης θα πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι ο «Χρόνος αποκατάστασης βλάβης» που αναφέρεται στον Πίνακα 3 και στον Πίνακα 4 δείχνει την εκτιμώμενη διάρκεια της επισκευής των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα. Ενώ ο «Χρόνος αποκατάστασης βλάβης» που αναφέρεται στον Πίνακα 5 δείχνει το χρόνο που χρειάζεται από την αρχή του ορίζοντα σχεδιασμού αποκατάστασης των βλαβών για κάθε μονάδα παραγωγής που έχει υποστεί βλάβη.

Στην συνέχεια φαίνονται οι πίνακες που έχουν συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία:

Πίνακας 3 Στοιχεία κατεστραμμένων ζυγών

Ζυγοί	Χρόνος αποκατάστασης βλάβης (Ωρες)	Τύπος φορτίου
B1	24	Εμπορικό
B2	11	Αστικό
B3	18	Αστικό
B4	15	Κρίσιμο
B5	5	Τίποτα
B7	4	Αστικό
B11	22	Βιομηχανικό

Πίνακας 4 Στοιχεία κατεστραμμένων γραμμών μεταφοράς

Γραμμές	Χρόνος αποκατάστασης βλάβης (Ωρες)
L1	20
L2	18
L10	16
L14	10
L16	22

Πίνακας 5 Στοιχεία κατεστραμμένων μονάδων παραγωγής

Μονάδες παραγωγής	Χρόνος αποκατάστασης βλάβης (Ωρες)
G1	17
G2	12
G3	24
G5	8

2.4.3 Κόστος απώλειας φορτίου

Όπως έχουμε προαναφέρει το κόστος διακοπής του φορτίου διαφέρει για κάθε φορτίο και διαμορφώνεται από το επίπεδο κρισιμότητας του. Όσον αφορά το βιομηχανικό φορτίο το κόστος ανέρχεται στα 3,706 €/kWh και για το εμπορικό φορτίο η αντίστοιχη τιμή διαμορφώνεται στα 6,979 €/kWh. Επιπρόσθετα, το κόστος διακοπής του αστικού φορτίου είναι 0,110 €/kWh. Τέλος, το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στον ζυγό B4 είναι κρίσιμο, συνεπώς για να επιβληθεί μεγαλύτερη προτεραιότητα στην επισκευή του ορίσαμε το κόστος διακοπής του στα 10 €/kWh.

2.4.4 Κόστος επισκευής

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο το μέγεθος των ομάδων που θα αναλάβουν την επισκευή των στοιχείων του δικτύου που βρίσκονται υπό βλάβη είναι ο μόνος πόρος που το μέγεθος του βρίσκεται υπό περιορισμό. Συνεπώς, θεωρείται ότι για κάθε ζυγό που βρίσκεται εκτός λειτουργίας απαιτούνται 12 συνεργεία επισκευής ανά ώρα, ενώ για κάθε γραμμή μεταφοράς 18 συνεργεία επισκευής ανά ώρα. Παρά το γεγονός ότι ανάλογα με το επίπεδο δεξιοτήτων που μπορεί να κατέχει το κάθε συνεργείο επηρεάζεται και το κόστος επισκευής, έχουμε υποθέσει ότι όλα τα συνεργεία επισκευής έχουν ίσο επίπεδο δεξιοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να πληρώνονται όλοι εξίσου, (θα μπορούσαμε να το σκεφτούμε ως μια δέσμευση των πόρων όπου ο μέσος μισθός τους χρησιμοποιείται ως είσοδος στο μοντέλο).

Τα ωρομίσθια των συνεργείων επισκευής ποικίλουν ανάλογα με την βάρδια εργασίας και τους τύπους των επισκευών. Ορίζονται συνολικά 3 βάρδιες εργασίας. Η πρώτη βάρδια είναι από 8:00 π.μ. έως 4:00 μ.μ. , η δεύτερη από 4:00 μ.μ. έως 12 μ.μ. και η τρίτη από 12:00 μ.μ. έως 8:00 π.μ. . Συνεπώς, για την επισκευή των ζυγών ο μέσος μισθός διαμορφώνεται στα 60 €/ώρα για την πρώτη, 70 €/ώρα για την δεύτερη και 80 €/ώρα για την τρίτη βάρδια. Επίσης, για την επισκευή των γραμμών μεταφοράς η μέση αμοιβή είναι 65 €/ώρα για την πρώτη, 75 €/ώρα για την δεύτερη και 85 €/ώρα για την τρίτη βάρδια.

2.4.5 Κόστος των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Επιπρόσθετα, έχουμε υποθέσει ότι όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν το ίδιο κόστος παραγωγής, εκκίνησης και τερματισμού της λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος παραγωγής θεωρείται ότι ανέρχεται στα 35,09 €/MWh. Επίσης, το κόστος τερματισμού της λειτουργίας τους υποτίθεται ότι είναι 250 € για κάθε μονάδα παραγωγής. Τέλος, το κόστος εκκίνησης κάθε μονάδας ορίζεται στα 150 € για την πρώτη ώρα μετά από την τελευταία διακοπή λειτουργίας της και για κάθε επιπλέον ώρα (έως και οκτώ ώρες μετά) προστίθεται το στοιχειώδες κόστος των 25 €. Το σχέδιο της αποκατάστασης της βλάβης ξεκινάει στις 8:00 π.μ. και η διάρκεια του σχεδιασμού αποκατάστασης (NT) έχει οριστεί στις 120 ώρες.

2.6 Αποτελέσματα

Συνολικά δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια με την βοήθεια των οποίων αναλύσαμε το μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω. Ο βασικός στόχος είναι η πρόβλεψη των οικονομικών επιπτώσεων που θα υπάρχουν για την αποκατάσταση των ζημιών μετά την καταστροφή. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα τέσσερα σενάρια:

- i. Στο πρώτο σενάριο (**σενάριο I**) το πρόβλημα λύθηκε λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ποσότητα του φορτίου όπου το δίκτυο δεν θα καταφέρει να τροφοδοτήσει. Το κόστος που δαπανάτε για την επισκευή των στοιχείων του δικτύου που έχουν πάθει ζημιά μετά την εμφάνιση της καταστροφής δεν έχει συμπεριληφθεί. Συνεπώς ο βασικός στόχος αυτού του σεναρίου είναι να ελαχιστοποιήσει την ποσότητα του φορτίου που απορρίπτεται και η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώθηκε ως εξής:

$$\min_{LI} \left\{ \sum_t \sum_b LI_{bt} \right\} \quad (2.6.1)$$

- ii. Στο δεύτερο σενάριο (**σενάριο II**) το πρόβλημα λύθηκε λαμβάνοντας υπόψη το κόστος που προκύπτει από την απόρριψη φορτίου και το κόστος που επιβάλλει η επισκευή των βλαβών που έχουν προκύψει μετά την εμφάνιση του ακραίου καιρικού φαινομένου, χωρίς όμως να συμπεριληφθεί το κόστος παραγωγής. Άρα ο στόχος του σεναρίου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους απόρριψης φορτίου και επισκευής και η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος παρουσιάζεται στην συνέχεια:

$$\min_{LI,u,v} \left\{ \sum_t \sum_b VOLL_{bt} LI_{bt} + \sum_t \sum_b C_{bt} R_b u_{bt} + \sum_t \sum_l C_{lt} R_l v_{lt} \right\} \quad (2.6.2)$$

- iii. Το τρίτο σενάριο (**σενάριο III**) λύθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλους τους οικονομικούς παράγοντες δηλαδή το κόστος απόρριψης φορτίου, το κόστος επισκευής και το συνολικό κόστος παραγωγής. Συνεπώς το σενάριο αυτό είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος όλων αυτών των όρων και η αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\min_{LI,u,v,P,SU,SD} \left\{ \sum_t \sum_b VOLL_{bt} LI_{bt} + \sum_t \sum_b C_{bt} R_b u_{bt} + \sum_t \sum_l C_{lt} R_l v_{lt} + \sum_t \sum_i (C_{it}^g P_{it} + SU_{it} + SD_{it}) \right\} \quad (2.6.3)$$

- iv. Το τέταρτο σενάριο (**σενάριο IV**) είναι ουσιαστικά μια προέκταση του τρίτου σεναρίου. Η αντικειμενική συνάρτηση παραμένει η ίδια αλλά τώρα ο στόχος μας είναι να εξετάσουμε τις οικονομικές συνέπειες του αριθμού των διαθέσιμων πόρων, δηλαδή τον αριθμό των ατόμων που απαρτίζουν την ομάδα που αναλαμβάνει τις επισκευές των στοιχείων που παρουσίασαν βλάβη. Πιο συγκεκριμένα αναλύσαμε 5 περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θεωρήσαμε ότι το μέγεθος της ομάδας είναι 50 άτομα, στην δεύτερη 75 άτομα, στην τρίτη 100 άτομα, στην τέταρτη 125 άτομα και τέλος στην πέμπτη 175 άτομα.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε καθένα από τα σενάρια που περιγράψαμε παραπάνω. Στον πίνακα 6 και στον πίνακα 7 παρουσιάζεται το βέλτιστο πρόγραμμα που προέκυψε για την επισκευή των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα, σε καθένα από τα σενάρια I-III. Επιπλέον, στον πίνακα 8 εμφανίζονται αναλυτικά όλοι οι οικονομικοί δείκτες του μοντέλου καθώς και το μέγεθος του φορτίου που απορρίφθηκε.

Πίνακας 6 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής ζυγών στα σενάρια I - III

Ζυγός	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
B1	1-24	1-24	1-24
B2	1-11	1-11	1-11
B3	1-18	1-18	1-18
B4	1-15	1-15	1-15
B5	11-15	3-7	5-9
B7	1-4.	1-4	1-4
B11	1-22	1-22	1-22

Πίνακας 7 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής γραμμών μεταφοράς στα σενάρια I - III

Γραμμή	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
L1	5-24	47-66	3-22
L2	102-119	1-18	19-36
L10	104-109	25-40	17-32
L14	108-117	25-35	18-27
L16	98-119	45-66	95-116

Πίνακας 8 Οικονομικοί δείκτες για τα σενάρια I – III

Οικονομικοί δείκτες	Σενάριο I	Σενάριο II	Σενάριο III
Συνολικό κόστος (x 10 ³ €)	29.582,44	33.057,66	26.253,76
Κόστος απόρριψης φορτίου(x 10 ³ €)	25.138	24.959	24.891
Κόστος παραγωγής(x 10 ³ €)	4.248,6	7.910,8	1.1704
Κόστος επισκευής(x 10 ³ €)	195,84	187,860	192,36
Φορτίο που απορρίφθηκε (MWh)	5.441	5.710	6.236

Από τα αποτελέσματα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή του σεναρίου I, όπου ελαχιστοποιείται μόνο η ποσότητα του φορτίου που απορρίπτεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιποι οικονομικοί δείκτες, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους που προκύπτει από την αποκοπή φορτίου, οδηγώντας συνολικά σε αύξηση του κατά 9,9 % σε σχέση με το σενάριο III και σε αύξηση συνολικά 12,7 % του συνολικού κόστους πάλι σε σχέση με το σενάριο III. Στο σενάριο II παρόλο που ελαχιστοποιείται το άθροισμα του κόστους αποκοπής φορτίου και του κόστους επισκευής το αποτέλεσμα του οδηγεί και σε μεγαλύτερο κόστος απόρριψης φορτίου αλλά και σε μεγαλύτερο συνολικό κόστος, σε σχέση με το σενάριο III. Τέλος, στο σενάριο III όπου ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος όλων των οικονομικών δεικτών οδηγούμαστε όπως είναι φυσικό στο χαμηλότερο συνολικό κόστος και από τα τρία σενάρια, με αποτέλεσμα το σενάριο αυτό να παρέχει τον πιο οικονομικό τρόπο προγραμματισμού της αποκατάστασης των βλαβών. Ουσιαστικά το σενάριο αυτό προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ του κόστους παραγωγής, του κόστους απόρριψης φορτίου και του κόστους επισκευής. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιήσαμε το σενάριο III ως σημείο αναφοράς για τα σενάρια I και II.

Στο σενάριο IV μελετήθηκε ο οικονομικός αντίκτυπος των διαθέσιμων πόρων. Το βέλτιστο πρόγραμμα για τις περιπτώσεις 1 έως 5 του σεναρίου IV για του ζυγού και τις γραμμές μεταφορές παρουσιάζονται στους πίνακες 9 και 10 αντίστοιχα.

Πίνακας 9 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής ζυγών στο σενάριο IV

Ζυγός	R=50	R=75	R=100	R=125	R=175
B1	10-33	1-24	1-24	1-24	1-24
B2	5-15	14-24	1-11	1-11	1-11
B3	23-40	21-38	12-29	1-18	1-18
B4	1-15	1-15	1-15	1-15	1-15
B5	1-5	9-13	11-15	11-15	11-15
B7	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4
B11	1-22	1-22	1-22	1-22	1-22

Πίνακας 10 Βέλτιστο πρόγραμμα επισκευής γραμμών μεταφοράς στο σενάριο IV

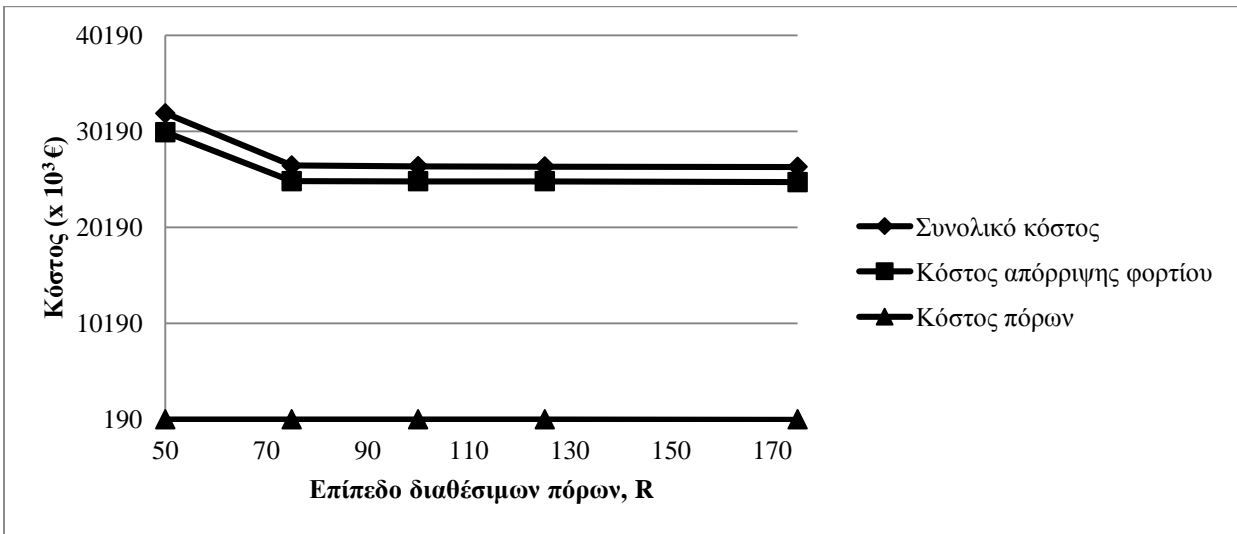
Γραμμή	R=50	R=75	R=100	R=125	R=175
L1	16-35	1-20	1-20	1-20	1-20
L2	100-117	16-33	1-18	1-18	1-18
L10	99-114	25-40	16-31	18-33	102-118
L14	96-105	25-34	19-28	17-26	22-31
L16	64-85	96-117	98-119	96-117	1-22

Όπως ήταν αναμενόμενο ο ζυγός B4 επισκευάζεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα σε όλα τα σενάρια, καθώς το φορτίο του είναι κρίσιμο. Η κρισιμότητα του φορτίου ορίστηκε μέσω του κόστους απόρριψης φορτίου. Επίσης, οι εργασίες επισκευής, στα εμπορικά και στα βιομηχανικά φορτία, B1 και B11 αντίστοιχα, ξεκίνησαν στην αρχή του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού εξαιτίας των δαπανηρών διακοπών απόρριψης φορτίου που έχουν. Από την άλλη πλευρά η επισκευή των γραμμών μεταφοράς στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων αναβάλλεται για την μέση ή για το τέλος του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού.

Στον πίνακα 11 συνοψίζονται το συνολικό κόστος επισκευής, το κόστος απόρριψης φορτίου, το κόστος παραγωγής, το κόστος που δαπανάτε στους πόρους και τέλος το συνολικό φορτίο που απορρίφθηκε για το σενάριο IV. Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση των οικονομικών δεικτών.

Πίνακας 11 Οικονομικοί δείκτες για το σενάριο IV

Οικονομικοί δείκτες	R=50	R=75	R=100	R=125	R=175
Συνολικό κόστος (x 10 ³ €)	32.075,14	26.641,6	26.549,82	26.529,44	26.493,58
Κόστος απόρριψης φορτίου (x 10 ³ €)	30.109	25.001	24.982	24.985	24.900
Κόστος πόρων (x 10 ³ €)	191,34	191,7	193,62	192,24	190,98
Φορτίο που απορρίφθηκε (MWh)	9.160	7.398	6.628	6.317	6.010



Εικόνα 10 Βέλτιστο κόστος επισκευής βλαβών για 5 διαφορετικές περιπτώσεις στο σενάριο IV

Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος των διαθέσιμων πόρων που διαθέτουμε, τόσο μικρότερη είναι και η ποσότητα του φορτίου που αποκόπτεται. Επιπρόσθετα, ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων πόρων οδηγεί και σε χαμηλότερο συνολικό κόστος. Αυτό είναι λογικό αφού η απόρριψη φορτίου είναι αρκετά δαπανηρή και όταν διαθέτουμε μεγαλύτερους πόρων μειώνεται η ποσότητα του φορτίου που αποκόπτεται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι όσο μεγαλώνει το επίπεδο των διαθέσιμων πόρων η τάση του συνολικού κόστους επισκευής έχει φθίνουσα πορεία διότι επεκτείνεται ο χρόνος αποκατάστασης και η αποκατάσταση πραγματοποιείται με οικονομικά αποδοτικότερο τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται προγραμματίζοντας τις επισκευές κυρίως στα χρονικά διαστήματα με χαμηλό κόστος πληρωμής των συνεργείων. Ωστόσο το συνολικό κόστος που καταναλώνεται στους πόρους είναι σημαντικά χαμηλότερο από όλους τους άλλους οικονομικούς δείκτες.

2.7 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Ένα αποτελεσματικό μοντέλο προτάθηκε για να επιτευχθεί η αποκατάσταση των ζημιών που είχαν προκληθεί μετά την εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο αυτό είναι σε θέση να βρει το βέλτιστο πρόγραμμα αποκατάστασης των εξαρτημάτων που έχουν υποστεί βλάβη, με τον πιο οικονομικό τρόπο. Το κόστος απόρριψης φορτίου, το κόστος επισκευής και το κόστος παραγωγής αποτέλεσαν τους οικονομικούς δείκτες που μελετήθηκαν. Τα αριθμητικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το επίπεδο των διαθέσιμων πόρων παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο συνολικό κόστος αποκατάστασης της βλάβης. Η επένδυση σε μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων πόρων οδηγεί σε μειωμένο συνολικό κόστος επισκευής. Επιπρόσθετα, τα υψηλά επίπεδα διαθέσιμων πόρων έχουν ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη μερική αποκατάσταση του δικτύου. Συμπερασματικά, η μελέτη δείχνει ότι η ενσωμάτωση του “unit commitment”, του κόστους απόρριψης φορτίου και του κόστους επισκευής στο μοντέλο απόφασης για την επισκευή του δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους.

Βέλτιστος προγραμματισμός μικροδικτύου σε κατάσταση νησιδοποίησης

3.1 Εισαγωγή

Τα μικροδίκτυα [16] έχουν εισαχθεί με στόχο να διευθύνουν την εμφάνιση ενός μεγάλου αριθμού ελεγχόμενων ενεργών πηγών (*Distributed energy resources- DERs*) στα συστήματα διανομής και επιπλέον να διαχειριστούν τις συνεχείς προκλήσεις που εμφανίζονται σε ενεργειακό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, φτιάχνοντας εξυπνότερα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (*smarter power grids*). Ένα μικροδίκτυο, το οποίο από τεχνολογικής απόψεως είναι ένα μικρής ισχύος δίκτυο που μπορεί να τροφοδοτηθεί μόνο του και έχει την δυνατότητα της νησιδοποίησης, παρέχει μια τοπική ελεγχόμενη ευφυΐα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, για να τροφοδοτεί τα φορτία με αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο [17]-[19].

Τα μικροδίκτυα προσδίδουν μοναδικές ευκαιρίες στην διαχείριση και στο σχεδιασμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το να προσφέρουν βελτιωμένη αξιοπιστία εισάγοντας την ικανότητα της αυτό-αποκατάστασης της ισχύος στο τοπικό δίκτυο διανομής, μειώνοντας την πιθανότητα απόρριψης φορτίου και προσφέροντας υψηλότερη ποιότητα ισχύος μέσω της διαχείρισης των τοπικών φορτίων. Επιπρόσθετα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι τα μικροδίκτυα, όχι μόνο μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιώντας ποικίλες πηγές ενέργειας, αλλά και προσφέροντας την δυνατότητα οικονομικότερης διαχείρισης του δικτύου μειώνοντας τα κόστη μεταφοράς και διανομής. Τέλος, προσφέρουν ενεργειακή απόδοση καθώς ανταποκρίνονται στις τιμές της αγοράς σε πραγματικό χρόνο και μειώνουν το κόστος επέκτασης του δικτύου μέσα από αναβολή επενδύσεων σε νέες μονάδες παραγωγής και σε εγκαταστάσεις μεταφοράς, παρέχοντας μια γρήγορη και αποτελεσματική ανταπόκριση στην τροφοδοσία φορτίων που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές [20]-[22].

Σημαντικό χαρακτηριστικό [23] ενός μικροδικτύου είναι η ικανότητά της νησιδοποίησης του από το κυρίως δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η νησιδοποίηση τυπικά πραγματοποιείται μέσω της γρήγορης αποσύνδεσης του μικροδικτύου, όταν συμβεί κάποιο σφάλμα στο δίκτυο διανομής, έτσι ώστε να διασφαλίσει τα στοιχεία του μικροδικτύου από διαταραχές και να επιτρέψει την αδιάκοπη τροφοδοσία των φορτίων. Επίσης, πραγματοποιεί την προστασία των ευαίσθητων φορτίων από σημαντικές πτώσεις τάσεις, όταν μια γρήγορη λύση από το κυρίως δίκτυο δεν είναι επικείμενη.

Το μικροδίκτυο λειτουργεί σε κατάσταση σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, όμως πάντα θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη ισχύ σε περίπτωση που απαιτείται να μεταβεί σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το μικροδίκτυο νησιδοποιείται, από το κυρίως δίκτυο, με την χρήση διακοπών που βρίσκονται στο σημείο της κοινής σύζευξης (*Point of Common Coupling-PCC*) και έχει την ικανότητα να τροφοδοτεί με επάρκεια τα φορτία του χρησιμοποιώντας τοπικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο προγραμματισμός του μικροδικτύου σχετικά με το σε ποια κατάσταση θα βρίσκεται, σε κατάσταση σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο ή σε κατάσταση νησιδοποίησης, γίνεται από τον διαχειριστή του δικτύου με βάση την ασφάλεια και οικονομικούς λόγους. Ο διαχειριστής του δικτύου, ουσιαστικά, αποφασίζει την αλληλεπίδραση του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο, αποφασίζει για την εναλλαγή μεταξύ διασύνδεσης και νησιδοποίησης καθώς και την βέλτιστη λειτουργία των τοπικών πηγών. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του μικροδικτύου είναι αρκετά διαφορετικός από τον αντίστοιχο σχεδιασμό του κεντρικού δικτύου (*unit commitment*). Η στοχαστική παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του μικροδικτύου. Ακόμη ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι ότι ένα υψηλό ποσοστό των τοπικών φορτίων μπορεί να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις των τιμών, γεγονός που καθιστά την ισορροπία των μονάδων παραγωγής και των φορτίων του μικροδικτύου περισσότερο ευέλικτη. Τέλος, όταν είμαστε στην κατάσταση σύνδεσης του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο, τότε το τελευταίο παρουσιάζεται ως ένας άπειρος ζυγός που έχει απεριόριστη ικανότητα προσφοράς και ζήτησης ενέργειας και αμβλύνει τις αναντιστοιχίες ενέργειας στο μικροδίκτυο επιτρέποντας την μεταφοράς ενέργειας από αυτό.

Επίσης θα πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι το κυρίως δίκτυο μπορεί να παρέχει απόθεμα στο μικροδίκτυο, όταν η προβλεπόμενη μεταβολή στην παραγωγή των μονάδων ενέργειας δεν έχει πραγματοποιηθεί ή όταν τα σφάλματα στην πρόβλεψη φορτίου είναι υψηλά. Ωστόσο, ο βέλτιστος σχεδιασμός του μικροδικτύου και το πρόβλημα του *unit commitment* στο κεντρικό δίκτυο μοιράζονται έναν κοινό στόχο: τον καθορισμό του ελάχιστου κόστους λειτουργίας των διαθέσιμων πηγών παραγωγής ενέργειας για την τροφοδοσία των προβλεπόμενων φορτίων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς λειτουργίας τους που επικρατούν. Παρά το γεγονός ότι μοιράζονται έναν κοινό στόχο, οι προαναφερθείσες διαφορές δεν επιτρέπουν την άμεση εφαρμογή των υφιστάμενων μεθόδων του *unit commitment* για τον σχεδιασμό του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας του μικροδικτύου. Επίσης, η ταχεία ανάπτυξη των μικροδικτύων

επιβάλλει επιτακτική την ανάγκη για την εύρεση νέων μεθοδολογιών που θα πραγματοποιήσουν μια συνολική μοντελοποίηση όλων των ενεργών στοιχείων του μικροδικτύου και θα επικεντρωθούν ιδιαίτερα στις απαιτήσεις της νησιδοποίησης του, όταν το κεντρικό δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο.

Ο βέλτιστος προγραμματισμός του μικροδικτύου έχει εκτενώς ερευνηθεί στη βιβλιογραφία. Στα υπάρχοντα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης των μικροδικτύων παρουσιάζονται κεντρικά και τα ελεγχόμενα μοντέλα. Στο κεντρικό μοντέλο συλλέγονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την σχεδίαση του μικροδικτύου και εκτελείται κεντρική λειτουργία και έλεγχος. Στην ελεγχόμενη λειτουργία, όμως, κάθε στοιχείο θεωρείται ως ένας παράγοντας με ικανότητα λήψης διακριτών αποφάσεων και το βέλτιστο πρόγραμμα περιλαμβάνει την επαναληπτική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των παραγόντων. Και τα δύο συστήματα ελέγχου έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά το κεντρικό μοντέλο είναι περισσότερο επιθυμητό, δεδομένου ότι εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του μικροδικτύου και την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών βελτιστοποίησης. Τα κύρια μειονεκτήματα του κεντρικού μοντέλου είναι ότι μειώνει την ευελιξία προσθήκης νέων στοιχείων και έχει εκτεταμένες υπολογιστικές απαιτήσεις. Αυτά τα μειονεκτήματα μετριάζονται στο μοντέλο που θα παρουσιάσουμε στην συνέχεια.

Το μοντέλο που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια είναι ένα μοντέλο κεντρικής βέλτιστης διαχείρισης του μικροδικτύου, στο οποίο έχουν συμπεριληφθεί πολλαπλές περιόδους, όπου απαιτείται νησιδοποίηση. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας του συνδεδεμένου μικροδικτύου την επόμενη μέρα, με την χρήση των διαθέσιμων πόρων παραγωγής, των αποθηκευτικών συστημάτων ενέργειας, ρυθμιζόμενων φορτίων και με την συνεισφορά του κεντρικού δικτύου, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς που επικρατούν στην λειτουργία του. Στη συνέχεια, η λύση που προκύπτει εξετάζεται και σε κατάσταση νησιδοποίησης, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι το μικροδίκτυο έχει την ικανότητα να μεταβεί γρήγορα σε κατάσταση νησιδοποίησης, εάν χρειαστεί. Ένα κριτήριο νησιδοποίησης προτείνεται, το οποίο αποδεικνύει την ελαστικότητα (**resilience**) του μικροδικτύου, όταν λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης για ποικίλες διάρκειες χρόνου. Ένα επαναληπτικό μοντέλο, που βασίζεται στην τεχνική: **Bender's Decomposition**, χρησιμοποιείται για την λειτουργία του μικροδικτύου όταν είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο (ως κύριο πρόβλημα), καθώς και όταν πραγματοποιείται νησιδοποίηση (ως υπό-πρόβλημα). Το επαναληπτικό μοντέλο μειώνει σημαντικά τους επιβαρυνμένους υπολογισμούς του προβλήματος και καθιστά ικανή μια γρήγορη λύση.

Το μοντέλο που θα παρουσιαστεί παρακάτω έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά για μικροδίκτυα. Η νέα συμβολή του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι εξετάζει αποτελεσματικά την αβεβαιότητα της νησιδοποίησης του μικροδικτύου (από την ώρα που πραγματοποιείται η νησιδοποίηση και σε όλη την διάρκεια της) στα πλαίσια του βέλτιστου προγράμματος σχεδιασμού του μικροδικτύου. Επιπρόσθετα, το προτεινόμενο μοντέλο επιτρέπει στο

μικροδίκτυο να λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης και να τροφοδοτεί με επάρκεια τα τοπικά φορτία, όταν ο χρόνος και η διάρκεια, όπου το κεντρικό δίκτυο θα είναι εκτός, είναι άγνωστα. Θεωρήσαμε ότι το μικροδίκτυο νησιδοποιείται συνολικά ένα δίωρο μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Επίσης, το προτεινόμενο μοντέλο είναι ευέλικτο, καθώς επιτρέπει την προσθήκη νέων στοιχείων στο μικροδίκτυο, με την χρήση ενός μοντέλου αποσύνθεσης, το οποίο μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο του προβλήματος το οποίο το καθιστά κατάλληλο για μοντέλα σχεδιασμού κεντρικών προγραμμάτων μικροδικτύων. Τέλος, το προτεινόμενο μοντέλο ανήκει στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, των οποίων η βασική δομή έχει περιγραφεί αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα,

3.2 Περιγραφή του μοντέλου βέλτιστου προγραμματισμού ενός μικροδικτύου

3.2.1 Στοιχεία του μικροδικτύου

Τα στοιχεία του μικροδικτύου, τα οποία μοντελοποιούνται στο πρόγραμμα βέλτιστου σχεδιασμού αποτελούνται από τα φορτία, τις τοπικές μονάδες παραγωγής και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Τα φορτία του μικροδικτύου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα σταθερά και τα ρυθμιζόμενα. Τα σταθερά φορτία δεν μπορούν να τροποποιηθούν και πρέπει να ικανοποιούνται κάτω από τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα, τα ρυθμιζόμενα φορτία ανταποκρίνονται γρήγορα σε διακυμάνσεις τιμών και στα σήματα ελέγχου από τον διαχειριστή του δικτύου. Επιπρόσθετα, τα ρυθμιζόμενα φορτία μπορούν, είτε να περικοπούν (αυτή η κατηγορία ονομάζεται: *curtailable loads*), είτε να αναβληθούν (αυτή η κατηγορία ονομάζεται: *shiftable loads*), εξαιτίας των οικονομικών κινήτρων ή των απαιτήσεων της νησιδοποίησης.

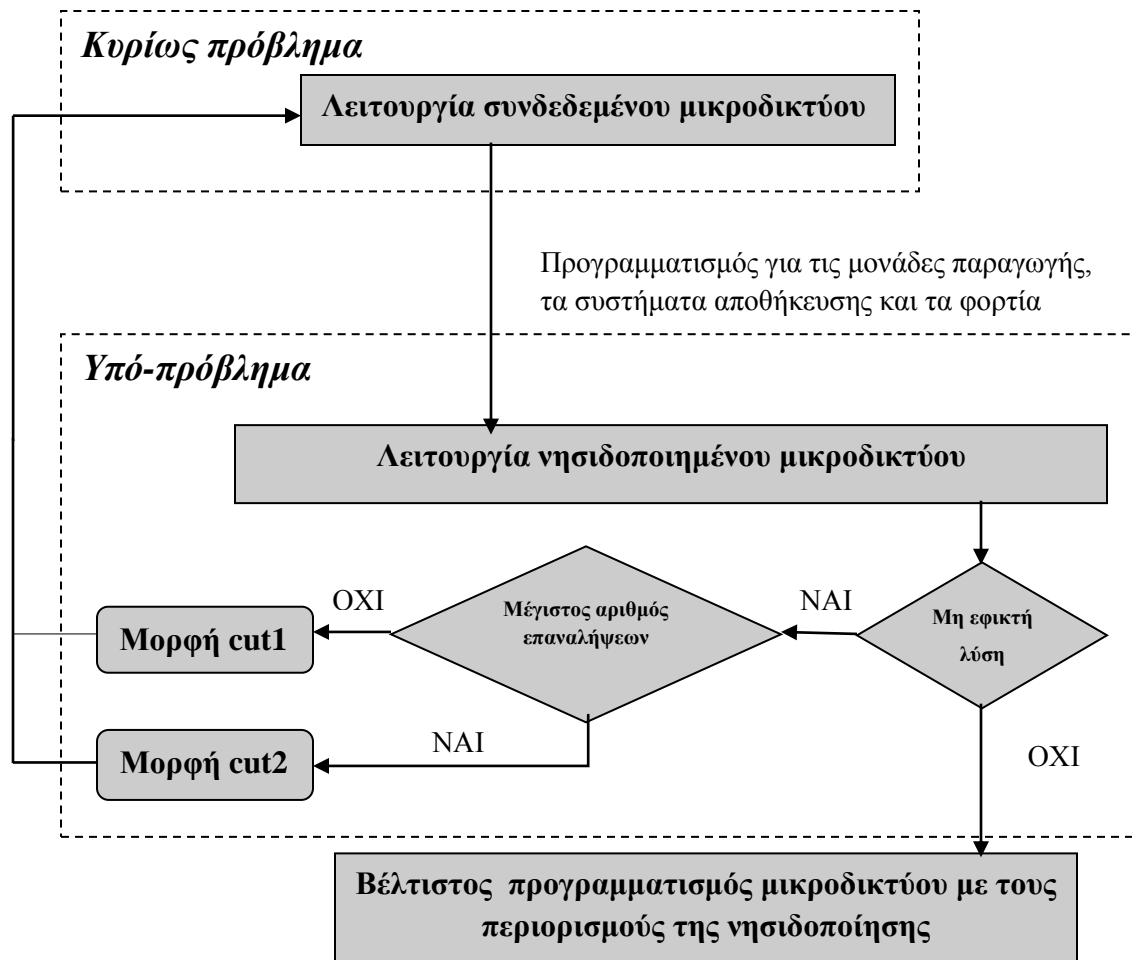
Οι μονάδες παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο είναι είτε ελεγχόμενες, είτε στοχαστικές. Οι ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής μπορούν να ελέγχονται από τον διαχειριστή του δικτύου και να υπόκεινται σε τεχνικούς περιορισμούς ανάλογα με τον τύπο της μονάδας, όπως τα όρια ικανότητας τους, η μέγιστη ή η ελάχιστη επιτρεπόμενη μεταβολή στην παραγωγή τους, ο ελάχιστος χρόνος όπου επιτρέπεται να είναι ανοικτές ή κλειστές και τέλος τα όρια εκπομπών τους. Ωστόσο, οι στοχαστικές μονάδες δεν μπορούν να υπόκεινται σε έλεγχο από τον διαχειριστή του δικτύου, καθώς η πηγή εισόδου είναι ανεξέλεγκτη. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες παράγουν μεταβλητή (ασταθή και διακοπτόμενη) ενέργεια. Η διακοπτόμενη παραγωγή δείχνει ότι η παραγωγή δεν είναι πάντα διαθέσιμη και η αστάθεια υποδηλώνει ότι η παραγωγή κυμαίνεται σε διαφορετικές κλίμακες

κάθε χρονική στιγμή. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν αρνητικό αντίκτυπο στις στοχαστικές μονάδες παραγωγής και αυξάνουν τα λάθη στην πρόβλεψη του επιπέδου παραγωγής τους.

Ως εκ τούτου, οι στοχαστικές μονάδες παραγωγής συχνά ενισχύονται με συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια εφαρμογή αυτών των συστημάτων αποθήκευσης είναι να συντονίσουν και να εξασφαλίσουν μαζί με τις μονάδες παραγωγής την παραγωγική επάρκεια του μικροδικτύου. Επίσης, όταν η τιμή της αγοράς είναι υψηλή το μικροδίκτυο μπορεί να καλύψει την ζήτηση των φορτίων με την αποθηκευμένη ενέργεια που υπάρχει σε αυτά τα συστήματα, για να μειωθεί το κόστος λειτουργίας του. Τέλος, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας παίζουν κυρίαρχο ρόλο στις εφαρμογές νησιδοποίησης του μικροδικτύου.

3.2.2 Μοντέλο βέλτιστου προγραμματισμού ενός μικροδικτύου

Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου μοντέλου για τον βέλτιστο προγραμματισμό του μικροδικτύου:



Εικόνα 11 Διάγραμμα ροής

Το πρόβλημα διασπάται σε ένα κυρίως πρόβλημα, όπου το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο και σε ένα υπό-πρόβλημα, όπου το μικροδίκτυο είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το κυρίως πρόβλημα αποφασίζει την βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας, την κατανομή των διαθέσιμων κατανεμημένων μονάδων, το αν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα βρίσκονται σε κατάσταση φόρτισης ή αποφόρτισης, το χρονοδιάγραμμα των ρυθμιζόμενων φορτίων, καθώς και την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με

το κεντρικό δίκτυο. Ο βέλτιστος προγραμματισμός χρησιμοποιείται στο υπό-πρόβλημα για να εξετάσει την επάρκεια του μικροδικτύου και να διαβεβαιώσει ότι τα φορτία θα τροφοδοτούνται χωρίς διακοπές, σε διάφορα σενάρια νησιδοποίησης. Αν η νησιδοποίηση [28] δεν είναι εφικτή, επειδή για παράδειγμα το μικροδίκτυο δεν είναι ικανό να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων, τότε παράγεται ένα Benders cut, πχ το *cut1*, το οποίο βασίζεται στις δεσμεύσεις λειτουργίας του δικτύου (*unit commitment*) και στον προγραμματισμό των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Το Benders cut αποστέλλεται πίσω στο κυρίως πρόβλημα για να γίνει αναθεώρηση της τρέχουσας λύσης. Ουσιαστικά, το Benders cut δείχνει ότι οι αναντιστοιχίες στην ισχύ που παρουσιάστηκαν στο υπό-πρόβλημα μπορούν να μετριαστούν από την αναπροσαρμογή των περιορισμών των μονάδων παραγωγής και του προγραμματισμού των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο κυρίως πρόβλημα. Η αναθεωρημένη λύση θα εξεταστεί στην επόμενη επανάληψη του υπό-προβλήματος, που σχετίζεται με την νησιδοποίηση. Η επαναληπτική διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρις ότου όλα τα σενάρια νησιδοποίησης να είναι εφικτά. Είναι πιθανό, παρόλα αυτά, σε ορισμένα σενάρια να μην εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ενέργεια, έτσι ώστε να είναι εγγυημένη μια εφικτή νησιδοποίηση. Σε αυτή την περίπτωση, παράγεται το *cut2*, βασισμένο στο χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των ρυθμιζόμενων φορτίων. Αυτό το Benders cut αναθεωρεί το χρονικό διάστημα λειτουργίας των ρυθμιζόμενων φορτίων, μετατοπίζοντας το φορτίο επιτρέποντας έτσι εφικτή την πραγματοποίηση της νησιδοποίησης. Οι αλλαγές και οι διακοπές στα φορτία των καταναλωτών, ως αποτέλεσμα της παραπάνω αλλαγής τιμωρείται από την αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό το Benders cut δείχνει ότι οι αναντιστοιχίες ισχύος στο υπό-πρόβλημα μπορούν να μετριαστούν αναπροσαρμόζοντας τα φορτία, (επιπρόσθετα με τους περιορισμούς των μονάδων παραγωγής και το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο κυρίως πρόβλημα). Η τελική λύση λαμβάνεται, όταν όλα τα σενάρια νησιδοποίησης είναι εφικτά. Τέλος, σημειώνεται ότι τα *cut1* και *cut2* απεικονίζονται στους περιορισμούς με την μορφή ανισότητας, η οποία παρέχει μια χαμηλότερη εκτίμηση της συνολικής αναντιστοιχίας στο υπό-πρόβλημα, ως συνάρτηση των μεταβλητών προγραμματισμού στο κυρίως πρόβλημα.

Το χρονοδιάγραμμα για την επόμενη μέρα υπολογίζεται για το κυρίως πρόβλημα και το υπό-πρόβλημα, δηλαδή ένα χρονικός ορίζοντας 24 ωρών λαμβάνεται υπόψη. Οποιοσδήποτε άλλος χρονικός ορίζοντας μπορεί να επιλεγεί βασισμένος στην διακριτική ευχέρεια του κυρίως προβλήματος, χωρίς να γίνει καμία αλλαγή στο προτεινόμενο μοντέλο και στην μοντελοποίηση του. Βέβαια η επιλογή του εικοσιτετράωρου ως χρονικού ορίζοντα θα επιτρέψει στον χειριστή του δικτύου να ωφεληθεί από τις προβλέψεις για την επόμενη μέρα, στις τιμές της αγοράς που παρέχονται από την επιχείρηση ενέργειας. Επίσης, θα του επιτρέψει να παρακολουθεί τους καθημερινούς κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι περιορισμοί λειτουργίας των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας φόρτισης και αποφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας θα αποφασιστούν στο κυρίως πρόβλημα και θα παραμείνουν αμετάβλητα στο υπό-πρόβλημα. Επίσης, το σταθερό φορτίο του μικροδικτύου, η παραγωγή των στοχαστικών μονάδων παραγωγής, η τιμή της αγοράς στο

σημείο κοινής σύζευξης, όπως και αντίστοιχη τιμή της ενέργειας την οποία πουλάει το μικροδίκτυο πίσω στο κυρίως δίκτυο εισάγονται ως δεδομένα στο μοντέλο καθώς έχουν προβλεφθεί πρωτότερα. Τέλος έχουμε υποθέσει ότι τα στοιχεία του μικροδικτύου είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και δεν υπόκεινται σε διακοπές κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού.

3.2.3 T - κριτήριο νησιδοποίησης

Το μικροδίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να μεταβεί σε λειτουργία νησιδοποίησης τις χρονικές στιγμές όπου παρουσιάζονται διαταραχές στο κεντρικό δίκτυο. Θα πρέπει, επίσης, να επανασυνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο όταν η διαταραχή σταματήσει. Συνεπώς απαιτείται ο κατάλληλος προγραμματισμός του μικροδικτύου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή λειτουργία του με τον πιο οικονομικό τρόπο. Επομένως, οι πηγές του μικροδικτύου θα πρέπει να προγραμματίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζουν την συνεχή τροφοδοσία των φορτίων. Θα πρέπει δηλαδή, να επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των φορτίων αποκλειστικά από τις τοπικές πηγές ενέργειας όσο το μικροδίκτυο βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης και ταυτόχρονα να τροφοδοτούνται τα φορτία με όσο το δυνατόν λιγότερες διακοπές.

Για να αποτελέσει χαρακτηριστικό γνώρισμα του μικροδικτύου η ικανότητα του να αντιμετωπίζει τις απαιτήσεις των νησιδοποιήσεων, ένα T - κριτήριο νησιδοποίησης προτείνεται. Το T δηλώνει τον αριθμό των συνεχόμενων ωρών στο χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού όπου το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση νησιδοποίησης. Ένα T - κριτήριο νησιδοποίησης προϋποθέτει ότι το μικροδίκτυο θα μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση νησιδοποίησης για χρονική διάρκεια T ωρών, μόλις το μικροδίκτυο απομονωθεί από το κεντρικό δίκτυο. Σε αυτές τις T συνεχόμενες ώρες όπου το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα, τα φορτία τροφοδοτούνται πλήρως από τις τοπικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, αφού δεν μπορεί να μεταφερθεί ισχύς από το κυρίως δίκτυο. Αυτό το κριτήριο παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση στην διασφάλιση της ελαστικότητας του μικροδικτύου (*resiliency*) και στην απευθείας επάρκεια παραγωγής σε λειτουργία νησιδοποίησης.

3.3 Μαθηματική μοντελοποίηση

3.3.1 Υπόμνημα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι επεξηγήσεις όλων των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν στην μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος:

I. Δείκτες:

b	Δείκτης για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας
ch	Εκθέτης για κατάσταση φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
d	Δείκτης για τα φορτία
dch	Εκθέτης για κατάσταση αποφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
i	Δείκτης για τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ενέργειας
s	Δείκτης για τα σενάρια
t	Δείκτης για τον χρόνο
\wedge	Υπολογισμένες μεταβλητές

II. Σύνολα:

D	Σύνολο των ρυθμιζόμενων φορτίων
G	Σύνολο των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής
S	Σύνολο των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

III. Παράμετροι:

DR	Δυνατότητα μείωσης της παραγωγής
DT	Ελάχιστος χρόνος απενεργοποίησης
E	Συνολική απαιτούμενη ενέργεια των ρυθμιζόμενων φορτίων
F(\cdot)	Κόστος παραγωγής
K_a	Παράγοντας ποινής
MC	Ελάχιστος χρόνος φόρτισης
MD	Ελάχιστος χρόνος αποφόρτισης
MU	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας
U	Κατάσταση διακοπής της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο

UR	Δυνατότητα αύξησης της παραγωγής
UT	Ελάχιστος χρόνος ενεργοποίησης
α, β	Χρόνος έναρξης και λήξης των ρυθμιζόμενων φορτίων
ρ	Τιμές αγοράς

IV. Μεταβλητές:

C	Κατάσταση φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας
D	Ζήτηση φορτίου
I	Κατάσταση λειτουργίας των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής
P	Ισχύς ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής
P_M	Ισχύς κεντρικού δικτύου
SD	Κόστος απενεργοποίησης
SL_1, SL_2	Μεταβλητές αναφοράς
SU	Κόστος ενεργοποίησης
T^{ch}	Αριθμός διαδοχικών ωρών φόρτισης
T^{dch}	Αριθμός διαδοχικών ωρών αποφόρτισης
T^{on}	Αριθμός διαδοχικών ωρών σε κατάσταση ON
T^{off}	Αριθμός διαδοχικών ωρών σε κατάσταση OFF
u	Κατάσταση αποφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
v	Κατάσταση φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
w	Ανισότητα ισχύος
z	Κατάσταση ρυθμιζόμενων φορτίων
λ, μ, π	Δυικές μεταβλητές
Δ_d	Διαστήματα λειτουργίας των ρυθμιζόμενων φορτίων

3.3.2 Σχεδιασμός συνδεδεμένου δικτύου (κύριο πρόβλημα)

Στην συνέχεια της εργασίας θα παρουσιαστεί η μαθηματική μοντελοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου. Πρόκειται για ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακεραίου / Mixed integer programming (MIP), το οποίο έχει υλοποιηθεί με την βοήθεια του περιβάλλοντος μαθηματικού προγραμματισμού: General Algebraic Modeling System (GAMS).

3.3.3 Αντικειμενική συνάρτηση κύριου προβλήματος

Η *αντικειμενική συνάρτηση* του κύριου προβλήματος, όπου το μικροδίκτυο βρίσκεται σε κατάσταση σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ως εξής:

$$\text{Min} \sum_t \sum_{i \in G} [F_i(P_{it})I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] + \sum_t \rho_t P_{M,t} \quad (3.3.3)$$

Ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης έχει ως σκοπό την διαχείριση του κόστους των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής, στον οποίο συμπεριλαμβάνεται το κόστος παραγωγής, ενεργοποίησης και απενεργοποίησης κάθε μονάδας παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού.

Επιπρόσθετα, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης σχετίζεται με το κόστος μεταφοράς ενέργειας από και προς το κυρίως δίκτυο, με βάση την τιμή της αγοράς στο σημείο της κοινής σύζευξης (*PCC*) του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο. Όταν δηλαδή το μικροδίκτυο διαθέτει περίσσεια ισχύ, τότε την πουλάει στο κυρίως δίκτυο και ο όρος: $P_{M,t}$ στην αντικειμενική συνάρτηση θα είναι αρνητικός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ποσό αυτό αποτελεί κέρδος για το μικροδίκτυο και όχι κόστος. Αντίθετα, όταν το μικροδίκτυο αγοράζει ισχύ από το κεντρικό δίκτυο, τότε ο όρος $P_{M,t}$ είναι θετικός και συνολικά ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης θα έχει θετική τιμή, καθώς το ποσό αυτό αποτελεί κόστος για το μικροδίκτυο.

3.3.4 Περιορισμοί κύριου προβλήματος

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται όλοι οι περιορισμοί τους οποίους θα πρέπει να ικανοποιεί το κυρίως πρόβλημα, έτσι ώστε να παράγει τα επιθυμητά αποτελέσματα:

A. Περιορισμοί παραγωγικών μονάδων

Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς παρουσιάζεται παρακάτω και αφορά την κάλυψη της ζήτησης κάθε χρονική στιγμή και ονομάζεται εξίσωση ενεργειακής ισορροπίας:

$$\sum_t (P_{it} + P_{M,t}) = \sum_d D_{dt}, \quad \forall t \quad (3.3.4.1)$$

Ουσιαστικά η εξίσωση (3.3.4.1) βεβαιώνει ότι το άθροισμα της ισχύος που προκύπτει από την παραγωγή των ελεγχόμενων και των στοχαστικών μονάδων, των μονάδων αποθήκευσης και της ισχύος που παρέχει το κεντρικό δίκτυο – δεύτερος όρος, θα είναι ίσα με την ωριαία ζήτηση του φορτίου. Η προβλεπόμενη παραγωγή των στοχαστικών μονάδων παραγωγής χρησιμοποιείται στην παραπάνω εξίσωση, όπου μπορεί το πρόγραμμα να την μεταχειριστεί και ως αρνητικό φορτίο. Επιπρόσθετα, η παραγωγή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να έχουν θετική τιμή, η οποία υποδηλώνει ότι το σύστημα φορτίζει ή αρνητική τιμή το οποίο δείχνει ότι το σύστημα αποφορτίζεται ή τέλος μηδενική τιμή στην περίπτωση όπου το σύστημα παραμένει αδρανές.

Στην συνέχεια, ορίζεται ο περιορισμός που ορίζουν την μέγιστη ισχύ που μπορεί να μεταφέρει το κεντρικό δίκτυο:

$$-P_M^{max} \leq P_{M,t} \leq P_M^{max}, \quad \forall t \quad (3.3.4.2)$$

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς που μεταφέρεται από το κυρίως δίκτυο περιορίζεται από τα όρια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτουν οι γραμμές σύνδεσης του μικροδικτύου με αυτό.

Όσον αφορά τις ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής, η παραγωγή τους υποβάλλεται σε περιορισμούς που ορίζουν η μέγιστη και η ελάχιστη ικανότητα παραγωγής της κάθε μονάδας.

Οπότε σε συνδυασμό με την δυαδική μεταβλητή $I_{i,t}$, η οποία δείχνει αν η μονάδα παραγωγής i την χρονική στιγμή t είναι ενεργοποιημένη διαμορφώνεται ο περιορισμός όπου εξασφαλίζει ότι η παραγωγή δεν θα ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια. Ο περιορισμός αυτός ορίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$P_i^{min} I_{i,t} \leq P_{it} \leq P_i^{max} I_{i,t}, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.4.3)$$

Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας που εξασφαλίζει την σωστή λειτουργία των μονάδων παραγωγής είναι η τήρηση των επιτρεπτών μεταβολών στην παραγωγή κάθε μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t . Η μαθηματική μοντελοποίηση του παρουσιάζεται στην συνέχεια:

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR_i, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.4.4)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR_i, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.4.5)$$

Η μαθηματική εξίσωση (3.3.4.4) αφορά την επιτρεπτή μείωση της παραγωγής (*ramp-up*), ενώ η εξίσωση (3.3.4.5), αφορά την επιτρεπτή αύξηση της παραγωγής της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .

Τέλος, οι μονάδες παραγωγής δεν μπορούν να σταματήσουν να λειτουργούν ακαριαία, ούτε να ενεργοποιηθούν αυτόματα, όταν βρίσκονται σε ανενεργή κατάσταση. Συνεπώς, ορίζεται ο χρόνος που πρέπει να μείνουν ανοικτές ή κλειστές: *minimum up time* και *minimum down time*. Στην συνέχεια καταγράφεται το σύνολο των περιορισμών που υλοποιούν το *minimum up time*, εξίσωση (3.3.4.6) και *minimum down time*, εξίσωση (3.3.4.7) που πρέπει να τηρηθούν από την μονάδα παραγωγής i , την χρονική στιγμή t .

$$T_{it}^{on} \geq UT_i (I_{it} - I_{i(t-1)}), \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.4.6)$$

$$T_{it}^{off} \geq DT_i (I_{i(t-1)} - I_{it}), \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.4.7)$$

B. Περιορισμοί συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας:

Κάθε σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας i μπορεί να φορτίσει και να αποφορτίσει μέχρι ενός συγκεκριμένου ορίου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που υλοποιούν αυτούς τους περιορισμούς:

$$P_{it} \leq P_{it}^{dch,max} u_{it} - P_{it}^{ch,min} v_{it}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.4.8)$$

$$P_{it} \geq P_{it}^{dch,min} u_{it} - P_{it}^{ch,max} v_{it}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.4.9)$$

Όταν το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (*ESS*) i , φορτίζεται την χρονική στιγμή t τότε η δυαδική μεταβλητή v_{it} παίρνει την τιμή 1 και η δυαδική μεταβλητή u_{it} γίνεται 0. Έτσι επιβάλλονται τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια φόρτισης. Κατά αντιστοιχία όταν πραγματοποιείται αποφόρτιση την χρονική στιγμή t η μεταβλητή v_{it} αλλάζει την τιμή της σε 0 και η u_{it} σε 1. Με αποτέλεσμα τα ελάχιστα και τα μέγιστα όρια αποφόρτισης να επιβάλλονται. Όταν τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φορτίζουν τότε η ενέργεια τους θεωρείται αρνητική και τα σχετικά όρια σημειώνονται με ένα μείον. Οι εκθέτες ch και dch χρησιμοποιούνται για την λειτουργία της φόρτισης και της αποφόρτισης αντίστοιχα.

Κάθε χρονική στιγμή μόνο η λειτουργία της φόρτισης ή της αποφόρτισης είναι δυνατόν να πραγματοποιείται, συνεπώς οι δυαδικές μεταβλητές περιορίζονται μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$u_{it} + v_{it} \leq 1, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.4.10)$$

Επιπρόσθετα, η κατάσταση φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης i (*energy storage system state of charge- SOC*), την χρονική στιγμή t είναι ίση με το επίπεδο φόρτισης της, την χρονική στιγμή $t-1$, μείον την ισχύ που θα καταναλώσει την χρονική στιγμή t . Επιπλέον, περιορίζεται από την μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης C_i^{max} . Αυτές οι συνθήκες μοντελοποιούνται μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$C_{it} = C_{i(t-1)} - P_{it}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.4.11)$$

$$0 \leq C_{it} \leq C_i^{max}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.4.12)$$

Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι τα συστήματα αποθήκευσης παραμένουν στην ίδια κατάσταση φόρτισης στην αρχή και στο τέλος του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού.

C. Περιορισμοί ρυθμιζόμενων φορτίων:

Τα ρυθμιζόμενα φορτία υπόκεινται σε ελάχιστη και μέγιστη ονομαστική ισχύ. Όταν το ρυθμιζόμενο φορτίο d καταναλώνει ενέργεια, την χρονική στιγμή t , η αντίστοιχη μεταβλητή απόφασης z_{dt} θα γίνει ίση με 1, διαφορετικά θα είναι μηδέν. Στην εξίσωση (3.3.4.13) φαίνεται ο περιορισμός που περιγράφεται παραπάνω:

$$D_{dt}^{min} z_{dt} \leq D_{dt} \leq D_{dt}^{max} z_{dt}, \quad \forall d \in D, \forall t \quad (3.3.4.13)$$

Επιπρόσθετα, κάθε φορτίο καταναλώνει την απαιτούμενη ενέργεια για να ολοκληρώσει έναν κύκλο λειτουργίας που καθορίζεται από τους καταναλωτές. Η αρχή του χρονικού διαστήματος καθώς και το τέλος του κατά το οποίο το ρυθμιζόμενο φορτίο d καταναλώνει ενέργεια είναι οι τιμές των μεταβλητών α_d, β_d αντίστοιχα. Η εξίσωση (3.3.4.14) διαβεβαιώνει ότι θα καλύπτονται οι ανάγκες του ρυθμιζόμενου φορτίου d για το χρονικό διάστημα που έχει οριστεί.

$$\sum_{t \in [\alpha_d, \beta_d]} D_{dt} = E_d, \quad \forall d \in D \quad (3.3.4.14)$$

Τέλος, ορισμένα φορτία μπορεί να υπόκεινται σε ελάχιστους χρόνους λειτουργίας, όπου είναι ο αριθμός των διαδοχικών ωρών κατά τις οποίες το φορτίο που καταναλώνει ισχύ είναι ενεργοποιημένο. Η εξίσωση που παρουσιάζεται στην συνέχεια ενσωματώνει αυτόν τον περιορισμό στο μοντέλο του κυρίως προβλήματος:

$$T_{dt}^{on} \geq MU_d (z_{dt} - z_{d(t-1)}), \quad \forall d \in D, \forall t \quad (3.3.4.15)$$

3.3.5 Σχεδιασμός νησιδοποίησης (υπό-πρόβλημα)

Καθώς έχει εκτελεστεί το κυρίως πρόβλημα και οι μεταβλητές απόφασης έχουν πάρει συγκεκριμένες τιμές, πραγματοποιείται η επίλυση του υπό-προβλήματος. Το υπό-πρόβλημα, όπως έχουμε προαναφέρει, θα πάρει μερικές από τις τιμές των μεταβλητών που έχουν βρεθεί στο κυρίως πρόβλημα, όπου το μικροδίκτυο βρισκόταν σε κατάσταση σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, ως δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα θα πάρει ως δεδομένα όλες τις δυαδικές τιμές του κύριου προβλήματος. Στο σημείο όπου ξεκινάει η επίλυση του υπό-προβλήματος θα γίνει νησιδοποίηση του μικροδικτύου σε διάφορες χρονικές περιόδους και με διαφορετική διάρκεια, που η κάθε περίπτωση ενσωματώνεται σε ένα σενάριο. Ο κύριος σκοπός είναι να καλύψουμε την ζήτηση μόνο με τις πηγές παραγωγής που υπάρχουν στο μικροδίκτυο.

3.3.6 Αντικειμενική συνάρτηση υπό-προβλήματος

Η **αντικειμενική συνάρτηση** του υπό-προβλήματος που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.3.6). Πρόκειται για το άθροισμα των θετικών μεταβλητών $SL_{1,ts}$ και $SL_{2,ts}$ κάθε χρονική στιγμή t . Οι μεταβλητές $SL_{1,ts}$ και $SL_{2,ts}$ αντιπροσωπεύουν μια εικονική παραγωγή και ένα εικονικό φορτίο αντίστοιχα. Οι μηδενικές τιμές των παραπάνω μεταβλητών υποδηλώνουν ότι επιτυγχάνεται αντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης στο μικροδίκτυο. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο για τα σενάρια s να ελαχιστοποιηθούν οι αναντιστοιχίες μεταξύ παραγωγής και ζήτησης στο μικροδίκτυο και η ιδανική τιμή της είναι προφανώς η μηδενική.

$$\text{Min } w_s = \sum_t (SL_{1,ts} + SL_{2,ts}) \quad (3.3.6)$$

3.3.7 Περιορισμοί υπό-προβλήματος

A. Περιορισμοί ισοζυγίου ισχύος

Κάθε χρονική στιγμή t πρέπει η συνολική παραγωγή που προέρχεται από τις μονάδες παραγωγής που βρίσκονται στο μικροδίκτυο συν την ενέργεια που προσφέρεται ή παρέχεται στο κεντρικό δίκτυο να είναι ίση με τις απαιτήσεις όλων των φορτίων. Στο ισοζύγιο ενέργειας

προστίθεται και η εικονική παραγωγή και το εικονικό φορτίο, δηλαδή οι μεταβλητές $SL_{1,ts}$ και $SL_{2,ts}$. Η εξίσωση του ισοζυγίου είναι η (3.3.7.1) και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\sum_i P_{its} + P_{M,ts} + SL_{1,ts} - SL_{2,ts} = \sum_d D_{dts}, \quad \forall t \quad (3.3.7.1)$$

B. Εισαγωγή αποτελεσμάτων από το κυρίως πρόβλημα

Όπως προαναφέρθηκε το υπό-πρόβλημα παίρνει από το κυρίως πρόβλημα τα αποτελέσματα των μεταβλητών που σχετίζονται με την κατάσταση λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, την κατάσταση φόρτισης και αποφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης καθώς και το πρόγραμμα λειτουργίας των φορτίων. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για την δυαδική μεταβλητή I_{its} , που δείχνει την κατάσταση λειτουργία της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t , την δυαδική μεταβλητή u_{its} , που υποδηλώνει την κατάσταση αποφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης i , την χρονική στιγμή t . Επιπρόσθετα, δεδομένα του υπό-προβλήματος θα αποτελέσουν και οι τιμές της δυαδικής μεταβλητής v_{ist} , η οποία αναφέρεται στην κατάσταση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας i , την χρονική στιγμή t . Τέλος, όσον αφορά το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των φορτίων διατηρούνται στο υπό-πρόβλημα οι τιμές της δυαδικής μεταβλητής z_{dts} , που για κάθε χρονική στιγμή t κάθε φορτίου d μας δείχνει την κατάσταση λειτουργίας. Οι δυικές αυτών των μεταβλητών χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σχέσεων αποκοπής για την νησιδοποίηση. Συνεπώς, οι παρακάτω εξισώσεις παρουσιάζουν αυτήν την ανάθεση τιμών στις τοπικές μεταβλητές για τις I_{its} , u_{it} , v_{its} και z_{dts} αντίστοιχα:

$$I_{its} = \hat{I}_{it} \quad \lambda_{its}, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.7.2)$$

$$u_{its} = \hat{u}_{it} \quad \mu_{its}^{dch}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.3)$$

$$v_{its} = \hat{v}_{it} \quad \mu_{its}^{ch}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.4)$$

$$z_{dts} = \hat{z}_{dt} \quad \pi_{dts}, \quad \forall d \in D, \forall t \quad (3.3.7.5)$$

C. Δυνατότητα αποκοπής μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο

Στο υπό-πρόβλημα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα κάθε χρονική στιγμή να μπορεί να απομονωθεί το μικροδίκτυο. Ουσιαστικά ανοίγει το σημείο σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο και το μικροδίκτυο καλείται να λειτουργήσει μόνο του. Για αυτό τον λόγο ορίζεται μια νέα δυαδική παράμετρος U_{ts} η οποία όταν έχει τιμή 1 υποδηλώνει ότι το μικροδίκτυο την χρονική στιγμή t είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο, διαφορετικά όταν είναι 0 έχει πραγματοποιηθεί νησιδοποίηση (για το σενάριο s). Επιπλέον, θα πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι η δυαδική μεταβλητή U_{ts} βοηθάει στην παραγωγή των σεναρίων νησιδοποίησης. Ουσιαστικά τα σεναρία νησιδοποίησης χρησιμοποιούν την κατάσταση διακοπής για να παραχθούν. Σε κάθε σενάριο η κατάσταση διακοπής λειτουργίας θα έχει τιμές 0 ή 1 ανάλογα με την διάρκεια της νησιδοποίησης και αυτό λαμβάνεται υπόψη στο υπό-πρόβλημα, του σχεδιασμού νησιδοποίησης, ως δεδομένο. Η εξίσωση (3.3.7.6) υλοποιεί την παραπάνω λειτουργία:

$$-P_M^{max}U_{ts} \leq P_{M,ts} \leq P_M^{max}U_{ts}, \quad \forall t \quad (3.3.7.6)$$

D. Τεχνικοί περιορισμοί παραγωγικών μονάδων

Το υπό-πρόβλημα που υλοποιεί την λειτουργία της νησιδοποίησης περιορίζεται περαιτέρω από τις σχέσεις που διαβεβαιώνουν ότι οι μονάδες παραγωγής θα λειτουργήσουν μέσα στα επιτρεπτά όρια. Πιο συγκεκριμένα σε συνδυασμό με τις καταστάσεις λειτουργίας της μονάδας παραγωγής i , την χρονική στιγμή t και για το σενάριο s , δηλαδή της δυαδικής μεταβλητής I_{its} και με τα μέγιστα και ελάχιστα όρια επιτρεπτής παραγωγής τους περιορίζεται η παραγωγή. Επιπλέον, ορίζεται η μέγιστη δυνατή αύξηση και μείωση της παραγωγής κάθε χρονική στιγμή t (*ramp up* και *ramp down*). Το σύνολο των παρακάτω εξισώσεων πραγματοποιούν τα προαναφερθέντα με την σειρά που ειπώθηκαν:

$$P_i^{min}I_{its} \leq P_{its} \leq P_i^{max}I_{its}, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.7.7)$$

$$P_{its} - P_{i(t-1)s} \leq UR_i, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.7.8)$$

$$P_{i(t-1)s} - P_{its} \leq DR_i, \quad \forall i \in G, \forall t \quad (3.3.7.9)$$

E. Περιορισμοί συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως ακριβώς περιγράψαμε και στο κυρίως πρόβλημα τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπόκεινται σε μέγιστη και ελάχιστη ικανότητα φόρτισης και αποφόρτισης. Οπότε οι εξισώσεις (3.3.7.10) και (3.3.7.11) χρησιμοποιούν τα όρια αυτά, που είναι δεδομένα, σε συνδυασμό με τις μεταβλητές απόφασης: u_{its} και v_{its} , για να εξασφαλίσουν ότι θα πραγματοποιηθεί σωστά η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης.

$$P_{its} \leq P_{it}^{dch,max} u_{its} - P_{it}^{ch,min} v_{its}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.10)$$

$$P_{its} \geq P_{it}^{dch,min} u_{its} - P_{it}^{ch,max} v_{its}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.11)$$

Τέλος, ορίζεται το επίπεδο χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης i , κάθε χρονική στιγμή t και για κάθε σενάριο s , το οποίο βέβαια περιορίζεται και από το μέγιστο επίπεδο της, όπως ακριβώς ίσχυε και στο κυρίως πρόβλημα. Οι παρακάτω εξισώσεις αφορούν τα προαναφερθείσα φαινόμενα:

$$C_{its} = C_{i(t-1)s} - P_{its}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.12)$$

$$0 \leq C_{its} \leq C_i^{max}, \quad \forall i \in S, \forall t \quad (3.3.7.13)$$

F. Περιορισμοί ρυθμιζόμενων φορτίων

Κάθε ρυθμιζόμενο φορτίο έχει μια μέγιστη και ελάχιστη ονομαστική ισχύ, η οποία δεν διαφοροποιείται σε σχέση με ότι ίσχυε στο κυρίως πρόβλημα. Συνεπώς, με ανάλογο τρόπο όπως και στο κυρίως πρόβλημα, διαμορφώνονται οι σχέσεις που εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία των ρυθμιζόμενων φορτίων, έτσι ώστε όχι μόνο να μην ξεπεράσουν τις ονομαστικές τιμές τους κάθε χρονική στιγμή t και σε κάθε σενάριο s , αλλά και να ικανοποιήσουν με επάρκεια και στους χρόνους όπου έχουν καθορίσει οι καταναλωτές, την ζήτηση. Οι εξισώσεις (3.3.7.14) και (3.3.7.15) σχεδιάστηκαν με στόχο να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις:

$$D_{dt}^{min} z_{dts} \leq D_{dt} \leq D_{dt}^{max} z_{dts}, \quad \forall d \in D, \forall t \quad (3.3.7.14)$$

$$\sum_{t \in [\alpha_d, \beta_d]} D_{dts} = E_d, \quad \forall d \in D \quad (3.3.7.15)$$

3.3.8 Προσπάθεια επίτευξης βέλτιστης λειτουργίας μικροδικτύου σε κατάσταση νησιδοποίησης

Οι μηδενικές αναντιστοιχίες στην λειτουργία νησιδοποίησης του υπό-προβλήματος εξασφαλίζουν ότι το σύνολο της παραγόμενης και της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας του μικροδικτύου θα τροφοδοτήσουν με επάρκεια το τοπικό φορτίο. Έτσι θα μπορέσει το μικροδίκτυο να περάσει σε κατάσταση νησιδοποίησης, χωρίς να υπάρχει διακοπή στην τροφοδοσία των φορτίων. Όταν όμως η αντικειμενική συνάρτηση του υπό-προβλήματος (3.3.6), δεν έχει μηδενική τιμή δημιουργείται η εξίσωση (3.3.8.1) που ονομάζεται **cut 1** και παρουσιάζεται στην συνέχεια. Το **cut 1** προστίθεται στην επόμενη επανάληψη του κυρίως προβλήματος, που αφορά την λειτουργία του συνδεδεμένου με το κεντρικό δίκτυο, μικροδικτύου, έτσι ώστε να αναθεωρηθεί το τρέχον χρονοδιάγραμμα του μικροδικτύου.

Cut 1:

$$\hat{w}_s + \sum_{i \in G} \lambda_{its} (I_{it} - I_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{dch} (u_{it} - u_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{ch} (v_{it} - v_{its}) \leq 0 \quad (3.3.8.1)$$

Όπου λ_{its} , μ_{its}^{dch} , μ_{its}^{ch} είναι οι δυικές μεταβλητές που ορίστηκαν στις εξισώσεις: (3.3.7.2), (3.3.7.3), (3.3.7.4) αντίστοιχα. Η ανισότητα **Cut 1** δείχνει ότι οι αναντιστοιχίες μεταξύ παραγωγής, αποθήκευσης και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην κατάσταση νησιδοποίησης μπορούν να μετριαστούν με την αναπροσαρμογή του χρονοδιαγράμματος του μικροδικτύου στο κυρίως πρόβλημα όπου έχουμε το διασυνδεδεμένο δίκτυο. Οι δυικές μεταβλητές στην αποκοπή νησιδοποίησης είναι η οριακή μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης του υπό-προβλήματος. Αυτή η αποκοπή οδηγεί σε αλλαγές στην κατάσταση λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, καθώς και σε αλλαγές στο χρονοδιάγραμμα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, βασισμένες στις εκτιμήσεις της νησιδοποίησης. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου οι αναντιστοιχίες σε όλα τα σενάρια νησιδοποίησης να γίνουν μηδέν. Ωστόσο είναι πιθανό και μετά από ένα ορισμένο αριθμό επαναλήψεων να μην έχει εγγυηθεί η ομαλή νησιδοποίηση, δηλαδή μετά την αναθεώρηση της κατάστασης λειτουργίας των μονάδων παραγωγής και του χρονοδιαγράμματος των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

να μην υπάρχει μηδενική αναντιστοιχία σε όλα τα σενάρια. Για να επιλυθεί αυτό το ζήτημα γίνεται αναθεώρηση στο χρονοδιάγραμμα των ρυθμιζόμενων φορτίων χρησιμοποιώντας την παρακάτω ανισότητα: **Cut2:**

Cut2:

$$\begin{aligned} \hat{w}_s + \sum_{i \in G} \lambda_{its} (I_{it} - I_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{dch} (u_{it} - u_{its}) + \sum_{i \in S} \mu_{its}^{ch} (v_{it} - v_{its}) \\ + \sum_{i \in D} \pi_{dts} (z_{dt} - z_{dts}) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.3.8.2)$$

Όπου π_{dts} είναι η δυική μεταβλητή που ορίστηκε στην εξίσωση: (3.3.7.5). Η ανισότητα **Cut 2** επιτρέπει την ταυτόχρονη αλλαγή στην κατάσταση λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, του χρονοδιαγράμματος των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στο χρονοδιάγραμμα των ρυθμιζόμενων φορτίων, έτσι ώστε να είναι εγγυημένη μια εφικτή κατάσταση νησιδοποίησης.

Η περίοδος 24 ωρών και βήμα μίας ώρας θεωρούνται στην μοντελοποίηση του κυρίως προβλήματος όπως και του υπό-προβλήματος. Κατά συνέπεια, ο χρόνος νησιδοποίησης θεωρείται ότι είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της μίας ώρας. Πιο μικροί χρονικοί περίοδοι θα μπορούσαν να θεωρηθούν χωρίς σημαντικές αλλαγές στο προτεινόμενο μοντέλο. Η επιλογή του κατάλληλου χρονικού διαστήματος για τον προγραμματισμό αντιπροσωπεύει έναν συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας της λύσης και του χρόνου υπολογισμού της. Μικρότερα διαστήματα θα μπορούσαν να θεωρήσουν περισσότερα δεδομένα και να παρέχουν πιο ακριβείς λύσεις αυξάνοντας ταυτόχρονα τις υπολογιστικές απαιτήσεις.

3.4 Δεδομένα των ενεργών στοιχείων του μικροδικτύου

Τα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής, των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ESS καθώς και των ρυθμιζόμενων φορτίων δίνονται στους Πίνακες 12 έως 14 αντίστοιχα. Επίσης οι προβλέψεις των τιμών του μικροδικτύου για την ωριαία ζήτηση του σταθερού φορτίου, των στοχαστικών μονάδων παραγωγής καθώς και οι τιμές της αγοράς για όλο το εικοσιτετράωρο του χρονικού ορίζοντα του σχεδιασμού δίνονται τους Πίνακες 15 έως 17 αντίστοιχα.

Πίνακας 12 Δεδομένα μονάδων παραγωγής (E: Ελεγχόμενες, Σ: Στοχαστικές)

Μονάδες παραγωγής	Τύπος	Συντελεστές κόστους (€/MWh)	Min-Max χωρητικότητα (MW)	Μinχρόνος Up/Down (h)	ΡυθμόςRamp Up/Down (MW/h)
G1	E	27,7	1 - 5	3	2,5
G2	E	39,1	1 - 5	3	2,5
G3	E	61,3	0,8 - 3	1	3
G4	E	65,6	0,8 - 3	1	3
G5	Σ	0	0 - 1	-	-
G6	Σ	0	0 - 1,5	-	-

Πίνακας 13 Δεδομένα συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας - ESS

Σύστημα αποθήκευσης	Χωρητικότητα (MWh)	Min-Max ικανότητα φόρτισης/αποφόρτισης (MW)	Min χρόνος φόρτισης/αποφόρτισης (h)
ESS1	10	0,4 - 2	5

Πίνακας 14 Δεδομένα φορτίων (S: Shiftable, C: Curtailable)

Φορτίο	Τύπος	Min-Max χωρητικότητα (MW)	Απαιτούμενη ενέργεια (MWh)	Αρχικός-Τελικός χρόνος (h)	Min χρόνος ενεργοποίησης (h)
L1	S	0 - 0,4	1,6	11 - 15	1
L2	S	0 - 0,4	1,6	15 - 19	1
L3	S	0,02 - 0,8	2,4	16 - 18	1
L4	S	0,02 - 0,8	2,4	14 - 22	1
L5	C	1,8 - 2	47	1 - 24	24

Πίνακας 15 Ωριαία ζήτηση σταθερού φορτίου στο μικροδίκτυο

Χρόνος (h)	1	2	3	4	5	6
Φορτίο (MW)	8,65	8,51	8,47	9,03	8,79	8,81
Χρόνος (h)	7	8	9	10	11	12
Φορτίο (MW)	9,1	11	11,19	11,78	12,08	12,13
Χρόνος (h)	13	14	15	16	17	18
Φορτίο (MW)	13,92	15,27	15,36	15,69	16,13	16,14
Χρόνος (h)	19	20	21	22	23	24
Φορτίο (MW)	15,56	15,51	14,00	13,03	9,82	9,45

Πίνακας 16 Ωριαία παραγωγή ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής

Χρόνος (h)	1	2	3	4	5	6
G5	0	0	0	0	0,63	0,80
G6	0	0	0	0	0	0
Χρόνος (h)	7	8	9	10	11	12
G5	0,62	0,71	0,68	0,35	0,62	0,36
G6	0	0	0	0	0	0,75
Χρόνος (h)	13	14	15	16	17	18
G5	0,4	0,37	0	0	0,05	0,04
G6	0,81	1,20	1,23	1,28	1,00	0,78
Χρόνος (h)	19	20	21	22	23	24
G5	0	0	0,57	0,60	0	0
G6	0,71	0,92	0	0	0	0

Πίνακας 17 Ωριαίες τιμές αγοράς

Χρόνος (h)	1	2	3	4	5	6
Τιμή (€/MWh)	15,03	10,97	13,51	15,36	18,51	21,8
Χρόνος (h)	7	8	9	10	11	12
Τιμή (€/MWh)	17,3	22,83	21,84	27,09	37,06	68,95
Χρόνος (h)	13	14	15	16	17	18
Τιμή (€/MWh)	65,79	66,57	65,44	79,79	115,45	110,28
Χρόνος (h)	19	20	21	22	23	24
Τιμή (€/MWh)	96,05	90,53	77,38	70,95	59,42	56,68

3.5 Αποτελέσματα

Συνολικά εξετάσαμε 3 σενάρια λειτουργίας του συστήματος μας. Στην συνέχεια παραθέτουμε και σχολιάζουμε τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο.

I. Συνδεδεμένο μικροδίκτυο στο κεντρικό δίκτυο για ένα συνεχόμενο εικοσιτετράωρο

Η πρώτη περίπτωση που μελετάτε σχετίζεται με την συνεχόμενη εικοσιτετράωρη σύνδεση του μικροδικτύου στο κεντρικό δίκτυο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής καθώς και του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας:

Πίνακας 18 Τελικός χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής και συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

	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
G1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
ESS	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Όταν μια ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής βρίσκεται σε λειτουργία τότε την κατάσταση αυτή την συμβολίζουμε με 1, αλλιώς με 0. Όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας συμβολίζουμε με -1 όταν φορτίζεται, με 1 όταν αποφορτίζεται και με 0 όταν βρίσκεται σε ανενεργή κατάσταση.

Η ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής 1 βρίσκεται σε λειτουργία όλο το εικοσιτετράωρο καθώς έχει το μικρότερο συντελεστή κόστους (27,7 €/ MWh). Οι μονάδες παραγωγής 2 έως 4 θα μπουν σε κατάσταση λειτουργίας όταν ο συντελεστής κόστους τους (€/ MWh) είναι μικρότερος από την ωραία τιμή της αγοράς (€/MWh). Τέλος, το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φορτίζεται όταν η ωραία τιμή της αγοράς είναι χαμηλή, δηλαδή από την χρονική στιγμή 1 έως 6, ενώ αποφορτίζεται από την χρονική στιγμή 16 έως 20, όπου η ωραία τιμή της αγοράς είναι υψηλή. Με αυτό επιτυγχάνεται η μετατόπιση φορτίου ίσου με 10 MW από τις ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας των ρυθμιζόμενων φορτίων :

Πίνακας 19 Τελικός χρονικός προγραμματισμός λειτουργίας ρυθμιζόμενων φορτίων

	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
L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
L3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
L4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
L5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Παρατηρούμε ότι η λειτουργία των ρυθμιζόμενων φορτίων έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να τηρούνται οι απαιτήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Δηλαδή τα ρυθμιζόμενα φορτία απορροφούν ενέργεια τις χρονικές στιγμές που έχει ορίζει ο καταναλωτής. Επίσης, ο προγραμματισμός των ρυθμιζόμενων φορτίων έχει πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο φθηνότερος τρόπος τροφοδότησής τους. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιήθηκε απόρριψη φορτίου, με αποτέλεσμα οι καταναλωτές να είναι σε θέση να λάβουν όλη την ποσότητα του φορτίου που έχουν ζητήσει.

Το κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου, όταν είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο για ένα εικοσιτετράωρο, ανέρχεται στα 11.957€. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι το μικροδίκτυο αποφασίζει με ποιον τρόπο θα τροφοδοτήσει τα φορτία του στηριζόμενο μόνο στους οικονομικούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, θα θέσει σε λειτουργία μια ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής τις ώρες όπου ο συντελεστής κόστους της (€/ MWh) είναι μικρότερος από την ωραία τιμή της αγοράς (€/MWh). Επίσης, θα επιδιώξει να πραγματοποιήσει την μέγιστη παραγωγή των μονάδων του για να πουλήσει την περίσσεια παράγωγη στο κεντρικό δίκτυο και να αυξήσει την ηλεκτρική ενέργεια που έχει αποθηκευμένη (δηλαδή να μειώσει περαιτέρω το κόστος λειτουργίας). Τέλος, ορίζει την αποφόρτιση των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας τις χρονικές στιγμές όπου υπάρχει αιχμή του φορτίου και η ωραία τιμή της αγοράς παρουσιάζει μέγιστο για τον ίδιο ακριβώς λόγο.

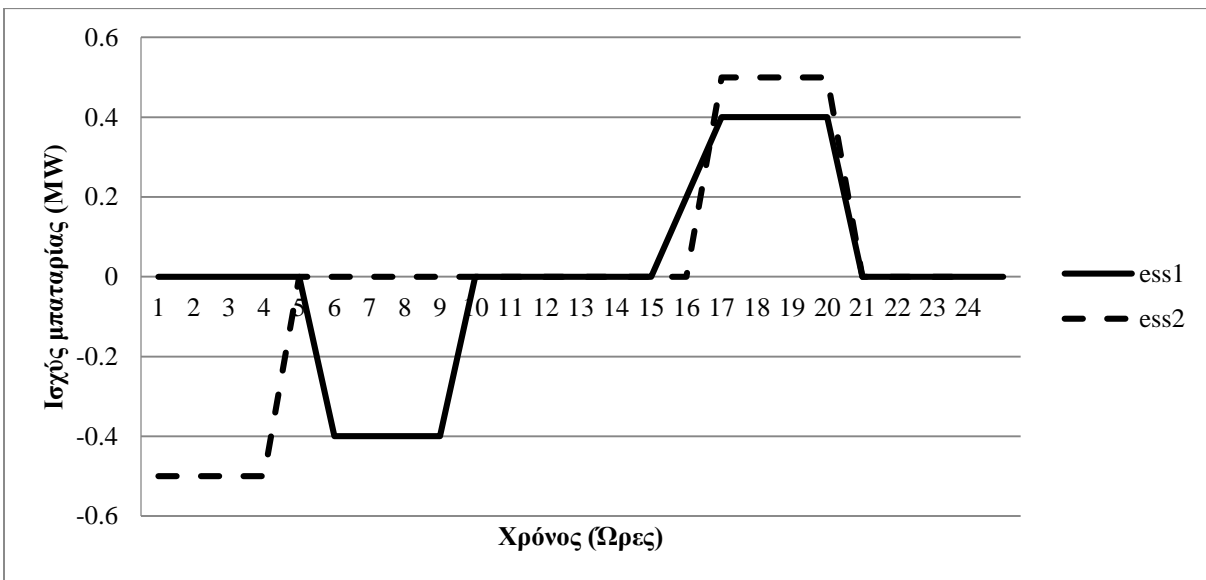
II. Προσθήκη δεύτερου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Ο ρόλος των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ερευνάται περαιτέρω με την προσθήκη ενός δεύτερου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά του φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 20 Δεδομένα επιπρόσθετου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα αποθήκευσης	Χωρητικότητα (MWh)	Min-Max ικανότητα φόρτισης/αποφόρτισης (MW)	Μinχρόνος φόρτισης/αποφόρτισης (h)
ESS2	10	0,5- 2,5	4

Στο παρακάτω διάγραμμα συγκρίνεται ο προγραμματισμός φόρτισης και αποφόρτισης των δύο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας:



Εικόνα 12 Χρονικός προγραμματισμός φόρτισης και αποφόρτισης συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Το νέο κόστος λειτουργίας ανέρχεται στα: 11.201€. Συνεπώς έχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου κατά 6,3%.

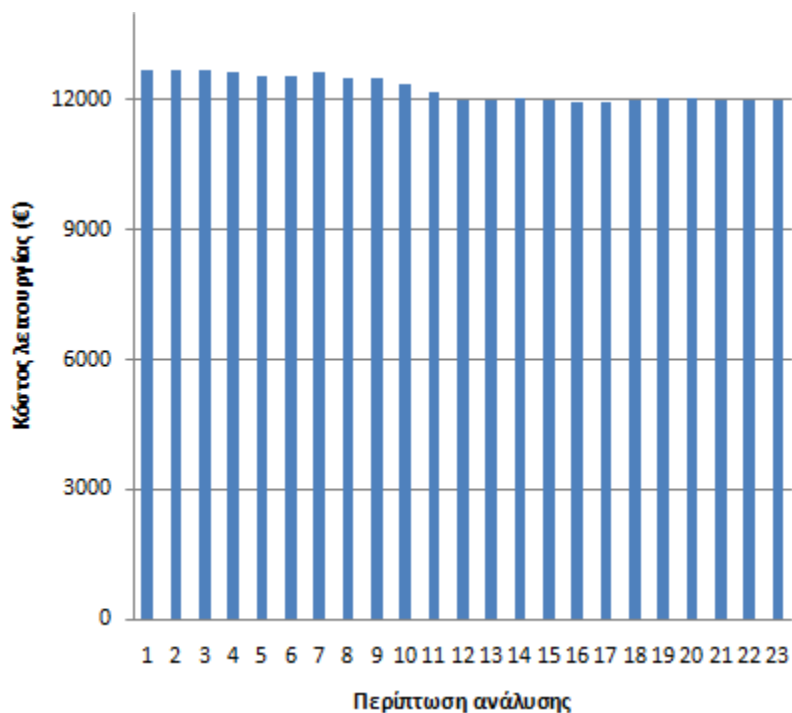
Παρατηρούμε ότι και τα δύο συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φορτίζονται όσο οι ωριαίες τιμές της αγοράς έχουν χαμηλή τιμή. Ωστόσο το δεύτερο σύστημα επειδή διαθέτει μεγαλύτερο ρυθμό φόρτισης, φορτίζεται από την αρχή του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού μέχρι την χρονική στιγμή 4 όπου σημειώνονται οι χαμηλότερες τιμές της αγοράς, ενώ η φόρτιση του πρώτου συστήματος καθυστερεί 5 ώρες. Η επικάλυψη των προγραμμάτων φόρτισης των δύο συστημάτων απαιτεί περαιτέρω παραγωγή από τις ελεγχόμενες μονάδες

παραγωγής, όμως αυτές τις ώρες αυτές οι μονάδες παραγωγής δεν συμφέρει να παράγουν πάνω από την ελάχιστη δυνατή παραγωγή τους. Επομένως, το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθυστερεί την φόρτιση του για να τροφοδοτηθεί από το κεντρικό δίκτυο. Επιπρόσθετα και τα δύο συστήματα αποφορτίζονται τις ώρες όπου παρουσιάζεται η αιχμή του φορτίου κατά την οποία η τιμή της αγοράς είναι υψηλή, οπότε δεν συμφέρει το μικροδίκτυο να αγοράσει ενέργεια από το κεντρικό δίκτυο. Συνεπώς, αντί της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τον κεντρικό δίκτυο τις ώρες όπου η ωριαία τιμή είναι πολύ υψηλή, το μικροδίκτυο εξυπηρετεί τους καταναλωτές του με την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα παραπάνω συστήματα. Έτσι επιτυγχάνεται το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας του μικροδικτύου.

III. Συνεχόμενη δίωρη αποκοπή του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο

Στο τρίτο σενάριο μελετήσαμε την συνεχόμενη δίωρη αποκοπή του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήσαμε τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού για όλα τα συνεχόμενα δίωρα που υπάρχουν μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο, δηλαδή συνολικά 23 περιπτώσεις. Δηλαδή, η 1η περίπτωση αναφέρετε στην αποκοπή του μικροδικτύου τις χρονικές στιγμές: t_1 και t_2 , η 2η περίπτωση τις χρονικές στιγμές: t_2 και t_3 κοκ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το κόστος της κάθε περίπτωσης. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται οι περιπτώσεις και στον κάθετο το αντίστοιχο κόστος σε €.



Εικόνα 13 Κόστος λειτουργίας (€) της ι-οστής περίπτωσης ανάλυσης

Το μοντέλο βρίσκει λύσεις σε όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρούμε επίσης ότι τις πρώτες ώρες το κόστος λειτουργίας είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις επόμενες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις χρονικές περιόδους οι μπαταρίες είναι αφόρτιστες.

3.6 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μικροδίκτυο μπορεί να βελτιώσει το λειτουργικό του κόστος χρησιμοποιώντας μια σειρά από τοπικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και ρυθμιζόμενα φορτία. Όλα αυτά βέβαια σε συνδυασμό με την δυνατότητα που του δίνεται να πουλάει ηλεκτρική ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο ή να αγοράζει από αυτό όταν η τιμή της αγοράς είναι χαμηλή. Επιπρόσθετα, το μικροδίκτυο επιτυγχάνει να τροφοδοτήσει τα φορτία και να καλύψει τις αναγκές των καταναλωτών όταν το κεντρικό δίκτυο δεν είναι συνδεδεμένο με το μικροδίκτυο.

Γενικά συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν δυο μοντέλα που έχουν ως στόχο να βελτιώσουν την ελαστικότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο μοντέλο στοχεύει στην εύρεση του βέλτιστου χρονικού σχεδιασμού αποκατάστασης των βλαβών των στοιχείων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινόμενο. Ενώ το δεύτερο μοντέλο μελετά την ικανότητα ενός μικροδικτύου να νησιδοποιηθεί από το κεντρικό δίκτυο και να τροφοδοτήσει με επάρκεια και χωρίς διακοπές τα φορτία του.

Το πρώτο μοντέλο αναλύθηκε με την χρήση αρκετών σεναρίων. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων έδειξαν ότι το οικονομικότερο κόστος λειτουργίας του συστήματος επιτυγχάνεται όταν έχει συμπεριληφθεί στην συνάρτηση του κόστους, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος αποκατάστασης των βλαβών και το κόστος αποκοπής φορτίου. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο του μοντέλου αυτού είναι ότι είναι ικανό να ορίσει τα κρίσιμα φορτία του συστήματος, δηλαδή τα φορτία που πρέπει το δίκτυο να τροφοδοτήσει απαραίτητα, τα οποία μπορεί να είναι νοσοκομεία ή εγκαταστάσεις επεξεργασία νερού. Σε όλα τα σενάρια η αποκατάσταση της ζημιάς στους ζυγούς, οι οποίοι έφεραν κρίσιμο φορτίο, είχε προτεραιότητα και πραγματοποιήθηκε στην αρχή του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού. Τέλος, ιδιαίτερο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση των πόρων οδηγεί σε μικρότερη αποκοπή φορτίου και μέχρι ένα όριο αύξησης το κόστος επισκευής μειώνεται. Συνεπώς με την εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου οδηγηθήκαμε στην αύξηση της ελαστικότητας του δικτύου μέσω της μείωσης του χρόνου αποκατάστασης του δικτύου με τον πιο οικονομικό και αποδοτικό τρόπο.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του δεύτερου μοντέλου οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο μοντέλο καθιστά ικανή την αποτελεσματική νησιδοποίηση του μικροδικτύου πετυχαίνοντας ταυτόχρονα και το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας του. Όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται συνέχεια συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο είναι ικανό να εκμεταλλευτεί τις χαμηλές τιμές της αγοράς με το να φορτίσει αυτά τα χρονικά διαστήματα τα συστήματα

αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του και να χρησιμοποιήσει την αποθηκευμένη ενέργεια για να τροφοδοτήσει τα φορτία του όταν οι τιμές της αγοράς είναι υψηλές. Έτσι επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων. Επίσης, στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται μια διαταραχή στο κεντρικό δίκτυο το μικροδίκτυο μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση νησιδοποίησης και να τροφοδοτήσει αποτελεσματικά τα φορτία του. Η δυνατότητα νησιδοποίησης ενός μικροδικτύου και η συνεχής τροφοδότηση των φορτίων του μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην βελτίωση της ελαστικότητας του συστήματος κατά την διάρκεια όλων των φάσεων ενός ακραίου καιρικού φαινομένου.

Συνοψίζοντας και τα δυο μοντέλα που αναπτύχθηκαν προτείνουν έναν ικανό τρόπο για να βελτιωθεί η ελαστικότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθιστούν ικανό το κεντρικό δίκτυο ή ένα μικροδίκτυο να προσαρμόζεται εύκολα και να ανακτάται γρήγορα από πιθανά γεγονότα που μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “ECONOMIC BENEFITS OF INCREASING ELECTRIC GRID RESILIENCE TO WEATHER OUTAGES”, President’s Council of Economic Advisers and the U.S. Department of Energy’s Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, August 2013
- [2] “Enhancing Distribution Resiliency, Opportunities for Applying Innovative Technologies”, EPRI, January 2013
- [3] 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
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Effects_of_Hurricane_Sandy_in_New_York
- [5] Seth Mullendore, Robert G. Sanders, Lewis Milford, with Henry Misas and Adje Mensah, “Resilience for Free, How Solar+Storage Could Protect Multifamily Affordable Housing from Power Outages at Little or No Net Cost” , Clean Energy Group, October 2015
- [6] <http://nation.time.com/2012/11/26/hurricane-sandy-one-month-later/>
- [7] http://www.nj.com/news/index.ssf/2012/11/power_not_so_slow_to_be_restor.html
- [8] “Physical Vulnerability of Electric Systems to Natural Disasters and Sabotage”, Congress of the United States office of technology assessment, June 1990
- [9] <http://www.epri.com/Pages/Grid-Resiliency.aspx>
- [10] M. Panteli; P. Mancarella, "Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events," in IEEE Systems Journal , vol.PP, no.99
- [11] Mathaios Panteli and Pierluigi Mancarella, “The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?” , IEEE Power & Energy Magazine, May/June 2015
- [12] A. Arab, A. Khodaei, S. K. Khator and Z. Han, "Electric Power Grid Restoration Considering Disaster Economics," in IEEE Access, vol. 4
- [13] J. Winkler, L. Duenas-Osorio, R. Stein, and D. Subramanian, “Performance assessment of topologically diverse power systems subjected to hurricane events,” Reliability Engineering & System Safety, vol. 95, no. 4, pp.323-336, Apr. 2010.
- [14] Center Point Energy, Inc, Homepage, 2013 [Online], Available: <http://www.centerpointenergy.com/en-us/>

- [15] London Economics International LLC, "Estimating the value of lost load: Briefing paper prepared for the ERCOT by LEI," Boston, MA. 2013.
- [16] A. Khodaei, "Microgrid Optimal Scheduling With Multi-Period Islanding Constraints," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3
- [17] M. Shahidehpour, "Role of smart microgrid in a perfect power system," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2010.
- [18] A. Flueck and Z. Li, "Destination perfection," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 6, no. 6, pp. 36–47, Nov./Dec. 2008.
- [19] M. Shahidehpour and J. Clair, "A functional microgrid for enhancing reliability, sustainability, and energy efficiency," *Electr. J.*, vol. 25, no. 8, pp. 21–28, Oct. 2012.
- [20] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou, and N. Hatziargyriou, "Making microgrids work," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 40–53, May 2008.
- [21] I. Bae and J. Kim, "Reliability evaluation of customers in a microgrid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1416–1422, Aug. 2008.
- [22] S. Kennedy and M. Marden, "Reliability of islanded microgrids with stochastic generation and prioritized load," in *Proc. IEEE Power tech*, Bucharest, Romania, Jun. 2009.
- [23] A. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, and R. Garcia-Bertrand, *Decomposition Techniques in Mathematical Programming*. New York, NY, USA: Springer, 2006.