



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

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΦΟΡΗΤΕΣ  
ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αλέξιος Χ. Σκλιας

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επόπτευση:** Ιάσοντας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός του Katholieke  
Universiteit Leuven

Αθήνα, Μάρτιος 2024





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

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΦΟΡΗΤΕΣ  
ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αλέξιος Χ. Σκλιας

**Επίβλεψη:** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επόπτευση:** Ιάσωνας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός του Katholieke  
Universiteit Leuven

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Μαρτίου 2024

.....  
Παύλος Γεωργιλάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μαρτίου 2024

.....

Αλέξιος Χ. Σκλιας

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

Copyright © Αλέξιος Σκλιας, 2024.

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

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης μετακίνησης φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε ακτινικά συστήματα διανομής με σκοπό τη στήριξη του δικτύου σε καταστάσεις έκτακτης λειτουργίας. Συνεπώς, άμεσος στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι πρώτον η ελαχιστοποίηση της απόρριψης φορτίου και δεύτερον η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου.

Αρχικά αναλύεται το πρόβλημα της ροής ισχύος για ακτινικά δίκτυα διανομής, πάνω στο οποίο βασίστηκε το μαθηματικό μοντέλο της βέλτιστης μετακίνησης των φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Στις μαθηματικές εξισώσεις αυτές προστέθηκαν στοιχεία του δικτύου όπως είναι οι γεννήτριες για την εφεδρική στήριξη του δικτύου καθώς και οι μπαταρίες. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια με την εφαρμογή απλοποιήσεων έγινε μετατροπή του προβλήματος σε μικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό.

Στην παρούσα εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS και εφαρμόστηκε σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής 15 ζυγών. Κύριο μέρος της διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση της συμπεριφοράς του δικτύου σε έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας σε σενάρια όπου στο δίκτυο είτε δεν υπάρχει μπαταρία είτε υπάρχει σταθερή ή φορητή μπαταρία.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ακτινικά δίκτυα διανομής, ανθεκτικότητα, απόρριψη φορτίου, βελτιστοποίηση, μετακίνηση μπαταρίας, μπαταρίες.



## **ABSTRACT**

The aim of this Diploma Thesis is to formulate and solve the problem of optimal transportation of mobile energy storage units in radial distribution systems to support the network during emergency situations. Therefore, the immediate objective of the optimization problem addressed in this Thesis is firstly to minimize load shedding and secondly to minimize the operating cost of the network.

Initially, the power flow problem for radial distribution networks is analyzed, upon which the mathematical model for the optimal transportation of energy storage units was based. Elements of the network such as generators for backup support and batteries were incorporated into these mathematical equations. The optimization problem that arises was modeled as a mixed-integer nonlinear programming problem, which was then converted into mixed-integer linear programming through simplifications.

In this work, the proposed model was implemented in the GAMS environment and applied to a 15-node radial distribution network. The main part of the thesis involves comparing the behavior of the network in emergency operating conditions in scenarios where the network either lacks a battery or has a stationary or portable battery.

## **KEY WORDS**

Radial distribution networks, resilience, load shedding, optimization, battery relocation, batteries.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023–2024 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον διδάκτορα μηχανικό κ. Ιάσονα Αβραμίδα για την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς και τους συμφοιτητές μου Νίκο, Θοδωρή, Θάνο και Γκέρι για την πολύτιμη στήριξη και βοήθεια που μου έδωσαν όλα τα χρόνια φοίτησης.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας	2
1.3 Δομή της εργασίας	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>5</b>
2.1 Γενικά	5
2.2 Εξοπλισμός δικτύων διανομής	5
2.2.1 Υποσταθμοί διανομής	6
2.2.2 Μετασχηματιστές	6
2.2.3 Διακοπτικά στοιχεία και ασφάλειες	7
2.2.4 Γραμμές διανομής	8
2.2.5 Χωρητικές αντισταθμίσεις	8
2.3 Τοπολογία δικτύων διανομής	9
2.3.1 Ακτινικά συστήματα	9
2.3.2 Βροχοειδή συστήματα	10
2.3.3 Δικτυωτά συστήματα	11
2.3.4 Σύγκριση τοπολογιών	12
2.4 Ανθεκτικότητα δικτύων διανομής	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>15</b>
3.1 Γενικά	15
3.2 Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας	15
3.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	17
3.3.1 Μηχανικά συστήματα αποθήκευσης	17
3.3.2 Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης	19
3.3.2.1 Δευτερεύουσες μπαταρίες	19
3.3.2.2 Μπαταρίες ροής	20
3.3.3 Χημική αποθήκευση ενέργειας	21
3.3.4 Ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης	22
3.4 Φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας	22

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>25</b>
4.1	Γενικά	25
4.2	Ανάλυση ροής ισχύος δικτύων διανομής	25
4.3	Καθορισμός δεδομένων και προβλήματος	27
4.4	Προσομοίωση κανονικής κατάστασης λειτουργίας	28
4.5	Προσομοίωση έκτακτης κατάστασης λειτουργίας	30
4.6	Προσομοίωση συνδυασμού σεναρίων	31
4.7	Απλοποίηση προβλήματος βελτιστοποίησης	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</b>	<b>ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS</b>	<b>33</b>
5.1	Γενικά χαρακτηριστικά λογισμικού GAMS	33
5.2	Σύνταξη κώδικα στο λογισμικό GAMS	34
5.3	Επιλύτης BONMIN	35
5.4	Διαδικασία επίλυσης προβλήματος	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ</b>	<b>45</b>
6.1	Γενικά	45
6.2	Συμβολή φορητών μπαταριών στην μείωση απόρριψης φορτίου	47
6.3	Οικονομική ανάλυση επένδυσης σε φορητές μπαταρίες	54
6.4	Διάρκεια ζωής και αποδοτικότητα μπαταριών	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>57</b>
7.1	Σύνοψη εργασίας και αποτελεσμάτων	57
7.2	Πιθανές επεκτάσεις	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>59</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στις μέρες μας, οι αυξημένες ανάγκες για ηλεκτρική ενέργειας φέρνουν διαρκώς στο προσκήνιο ζητήματα που αφορούν τις προκλήσεις και την αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου από την παραγωγή έως και την τελική κατανάλωση [1]. Το ηλεκτρικό δίκτυο, συγκεκριμένα, χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτά θα μπορούσε πλέον να προστεθεί και η αποθήκευση της ενέργειας, η οποία απασχολεί όλο και πιο έντονα την επιστημονική κοινότητα.

Η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων, της πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής μετατρέπουν αυτές τις μορφές ενέργειας σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας γεννήτριες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την κίνηση τουρμπινών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το τοπίο της παραγωγής ενέργειας υποδηλώνει μια μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική, προωθώντας πιο "καθαρές" πρακτικές, με απώτερο σκοπό ένα μέλλον πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον.

Το σύστημα μεταφοράς ενέργειας επικεντρώνεται στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από το σημείο παραγωγής της σε υποσταθμούς, μέσω γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Οι γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της μεταφοράς. Οι υποσταθμοί αποτελούν κρίσιμους κόμβους στα συστήματα μεταφοράς και διανομής. Λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια σε υψηλή τάση από τις γραμμές μεταφοράς και χρησιμοποιούν μετασχηματιστές για τον υποβιβασμό της τάσης ώστε να πραγματοποιηθεί η διανομή ενέργειας σε καταναλωτές χαμηλής και μέσης τάσης, εξασφαλίζοντας ευστάθεια, ευελιξία και αξιοπιστία στο δίκτυο. Μάλιστα προηγμένες τεχνολογίες, όπως τα έξυπνα δίκτυα (smart grids), ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στους υποσταθμούς, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατανάλωσης ενέργειας, τον άμεσο εντοπισμό βλαβών και τη δυνατότητα ανακατεύθυνσης της ηλεκτρικής ενέργειας για την ελαχιστοποίηση των διακοπών. Αυτές οι διαδικασίες καθίστανται δυνατές μέσω της αξιοποίησης ψηφιακών τεχνολογιών επικοινωνίας και αισθητήρων.

Τα συστήματα διανομής έχουν πιο τοπικό χαρακτήρα και αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ της υποβιβασμένης τάσης στους υποσταθμούς και των τελικών χρηστών, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για πολύπλοκα δίκτυα γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης σχεδιασμένα για την αποτελεσματική και ασφαλή διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Αυτά τα δίκτυα συνδέονται με τους υποσταθμούς στην πλευρά της υποβιβασμένης τάσης και τους μετασχηματιστές. Οι μετασχηματιστές τοποθετούνται, πέρα

από τους υποσταθμούς, και με στρατηγικό τρόπο στις γειτονιές, υποβιβάζοντας την τάση για ασφαλή χρήση και διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ αποτελεσματικής μεταφοράς ενέργειας και ασφαλούς παράδοσης στους χρήστες.

Τα συστήματα διανομής αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις, μεταξύ αυτών η γήρανση των υποδομών, η αυξανόμενη ζήτηση, αλλά και η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι αποκεντρωμένες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών πάνελ και των ανεμογεννητριών, προσθέτουν πολυπλοκότητα στα συστήματα διανομής και παρόλο που συμβάλλουν στη βιωσιμότητα, η διαχείρισή τους απαιτεί έξυπνες λύσεις για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου. Η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός του δικτύου αποτελούν σημαντικά μέτρα για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Έτσι, οι καινοτομίες στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και η αυτοματοποίηση του δικτύου συντελούν στη δημιουργία πιο ανθεκτικών και προσαρμόσιμων δικτύων διανομής.

Όσον αφορά την αποθήκευση ενέργειας, η αξία της στα σύγχρονα συστήματα ενέργειας κρίνεται εξόχως σημαντική. Η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας για μετέπειτα χρήση αντισταθμίζει την αστάθεια που προσφέρουν στο δίκτυο, κυρίως, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και ενισχύει την ανθεκτικότητα του δικτύου έναντι έκτακτων καταστάσεων. Ο όρος ανθεκτικότητα ενός δικτύου διανομής περιλαμβάνει όλα τα μέσα και τις στρατηγικές αντιμετώπισης φαινομένων που έχουν ολέθριες συνέπειες στο δίκτυο αλλά δεν προκύπτουν συχνά.

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ενσωμάτωσης και μετακίνησης φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε ακτινικά δίκτυα διανομής σε έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας. Άμεση προτεραιότητα αποτελεί η εξυπηρέτηση όλων των καταναλωτών και των φορτίων του δικτύου καθώς και η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου. Με άλλα λόγια, σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να εξεταστεί εάν οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της απόρριψης φορτίου χωρίς να επιβαρύνουν οικονομικά το δίκτυο.

## 1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική εργασία οργανώθηκε σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται τα βασικά στοιχεία ενός δικτύου διανομής καθώς και ο όρος ανθεκτικότητα.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας καθώς και οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** κατασκευάζεται το μοντέλο που βασίστηκε η διπλωματική εργασία με χρήση μαθηματικών εξισώσεων.

- 
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται το λογισμικό GAMS στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις με χρήση των εξισώσεων του Κεφαλαίου 4.
  - ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τη συμβολή των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε ένα δίκτυο διανομής.
  - ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι επέκτασής της.
  - ✓ Στο **Κεφάλαιο 8** βρίσκεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση και συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.





## **ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η διαμόρφωση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην διαρκή ανάγκη εξέλιξης των δικτύων διανομής προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι ραγδαία αυξανόμενες ανάγκες και απαιτήσεις των καταναλωτών. Η διαμόρφωση των δικτύων διανομής περιλαμβάνει πληθώρα παραμέτρων, όπως την επιλογή κατάλληλης δομής δικτύου, μετασχηματιστών, καλωδίων καθώς και τους απαραίτητους υπολογισμούς τάσεων, ρευμάτων και ισχύος.

Η ανθεκτικότητα των δικτύων διανομής είναι κρίσιμη για την διασφάλιση της συνεχούς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Ειδικότερα, τα δίκτυα διανομής πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται με γνώμονα την αντοχή τους και έναντι ακραίων και σπάνιων καιρικών φαινομένων, όπως οι πλημμύρες, οι σεισμοί, οι καταιγίδες και άλλες φυσικές καταστροφές.

Τόσο το ζήτημα της διαμόρφωσης όσο και της ανθεκτικότητας των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας διότι οι ενεργειακές ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας είναι πολύ σημαντικές και διαρκώς αυξανόμενες. Έτσι, μέσω της ανθεκτικότητας εξασφαλίζεται η «άμυνα» των δικτύων έναντι προβλημάτων και προκλήσεων, επιτρέποντας την ταχεία αντιμετώπιση και αποκατάσταση τυχόν διακοπών ισχύος ή βλαβών. Επιπλέον, η βέλτιστη διαμόρφωση των δικτύων διανομής προσαρμόζεται συνεχώς στην ολοένα και αυξανόμενη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διανεμημένης παραγωγής.

### **2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

Τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μία ιδιαίτερα περίπλοκη κατασκευή. Παρά τη σύνθετη δομή τους, ο βασικός εξοπλισμός που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι κοινός. Η αλληλεπίδραση του εξοπλισμού στα δίκτυα διανομής είναι ένα σημαντικό θέμα που αφορά τον τρόπο με τον οποίο διασυνδέονται και λειτουργούν μαζί οι διάφορες συσκευές και εξαρτήματα του δικτύου. Κάθε στοιχείο του εξοπλισμού συμβάλλει στην αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του συνολικού συστήματος και επηρεάζει την απόδοση των άλλων στοιχείων. Υπάρχει διασύνδεση του εξοπλισμού των δικτύων διανομής προκειμένου να διασφαλίζεται η μεταφορά, η διανομή και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με τον πιο ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο. Κάθε

εξοπλισμός έχει τον ρόλο του στην προστασία του δικτύου, στη διασφάλιση της αποδοτικής χρήσης της ενέργειας και στη διαχείριση των προκλήσεων που ενδέχεται να παρουσιαστούν.

Τα δίκτυα διανομής, παρά τις διαφορές που παρουσιάζουν ανά χώρα και περιοχή, αποτελούνται από τον εξής απαραίτητο δομικό εξοπλισμό:

1. Υποσταθμοί διανομής
2. Μετασηματιστές
3. Διακοπτικά στοιχεία και ασφάλειες
4. Γραμμές διανομής
5. Χωρητικές αντισταθμίσεις

### 2.2.1. Υποσταθμοί διανομής

Οι υποσταθμοί διανομής είναι βασικό μέρος του συστήματος διανομής καθώς πραγματοποιείται υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών. Για τον υποβιβασμό της τάσης χρησιμοποιούνται μετασηματιστές διανομής καθώς και πληθώρα διακοπτικών στοιχείων τόσο στη πλευρά της μέσης τάσης όσο και της χαμηλής τάσης.

Η επιλογή των στοιχείων αυτών καθώς και των αγωγών είναι σημαντική για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και για την αποφυγή σφαλμάτων που μπορούν να έχουν ολέθριες συνέπειες. Για παράδειγμα, η επιλογή των διακοπτικών στοιχείων πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε κάποιο πιθανό βραχυκύκλωμα να μην καταστρέψει το υλικό [2].

### 2.2.2. Μετασηματιστές

Σε κάθε σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, δομικό και απαραίτητο στοιχείο αποτελούν οι μετασηματιστές (Μ/Σ) ισχύος. Ο ρόλος τους είναι να μετατρέπουν την τάση από ένα επίπεδο σε ένα άλλο με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Έτσι, κατά τη μετατροπή της τάσης από το ένα επίπεδο στο άλλο, η ισχύς παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Οι απώλειες που παρατηρούνται κατά τη λειτουργία του Μ/Σ είναι ο μοναδικός λόγος που η συνολική ενέργεια μειώνεται σε μικρό βαθμό. Με βάση τη λειτουργία τους χωρίζονται σε:

- Μετασηματιστές ανύψωσης τάσης
- Μετασηματιστές υποβιβασμού τάσης
- Μετασηματιστές απομόνωσης. Οι μετασηματιστές απομόνωσης χρησιμοποιούνται για τη γαλβανική απομόνωση του φορτίου και προστατεύουν από πιθανή ηλεκτροπληξία, δεν μετατρέπουν την τάση παρά μόνο απομονώνουν το πρωτεύον και το δευτερεύον.

Με βάση τον τρόπο ψύξης διαχωρίζονται σε:

- Μετασηματιστές ελαίου (Σχήμα 2.1)
- Μετασηματιστές ξηρού τύπου (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.1 : Μετασχηματιστής ελαίου



Σχήμα 2.2: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου.

Με βάση τον χώρο εγκατάστασης, διακρίνονται σε:

- Μετασχηματιστές κλειστού χώρου
- Μετασχηματιστές υπαίθρου

### 2.2.3. Διακοπτικά στοιχεία και ασφάλειες

Σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα διακοπτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και να διακόπτουν την

παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση προβλημάτων ή συντήρησης. Υπάρχουν διάφορα είδη διακοπτικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε ένα τυπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας:

- Αποζεύκτες (Disconnectors). Χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση ενός τμήματος του δικτύου χωρίς να απαιτείται η διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι αποζεύκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- Διακόπτες Φορτίου ( $\Delta/\Phi$  – Switches). Προκειμένου να διακοπεί η ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε εξοπλισμό, όπως οι μετασχηματιστές, χρησιμοποιούνται διακόπτες φορτίου καθώς επιτυγχάνουν την ασφαλή αποσύνδεση των φορτίων από το δίκτυο χωρίς να διακόπτουν όλο το δίκτυο.
- Διακόπτες Ισχύος (βραχυκυκλώσεως,  $\Delta/I$  – Circuit Breakers). Τα μέσα αυτά χρησιμοποιούνται για την προστασία του δικτύου από διάφορες δυσλειτουργίες, όπως την υπερφόρτωση και τα βραχυκυκλώματα. Όταν ανιχνευτεί κάποιο από τα προβλήματα αυτά, διακόπτουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και η ροή μπορεί να επαναφερθεί μετά την επίλυση του προβλήματος.

Επομένως, τα διακοπτικά στοιχεία είναι απαραίτητα για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των δικτύων διανομής. Τα διακοπτικά στοιχεία ενισχύουν την αξιοπιστία του δικτύου καθώς επιτρέπουν την αποκοπή ενός μέρους του, εφόσον παρατηρηθεί κάποια δυσλειτουργία. Αποτελεί σημαντικό ζήτημα να προβλεφθούν εφεδρικοί τρόποι τροφοδότησης του μέρους του δικτύου που αποκόπτεται σε περίπτωση που τα φορτία είναι κρίσιμα.

#### 2.2.4. Γραμμές διανομής

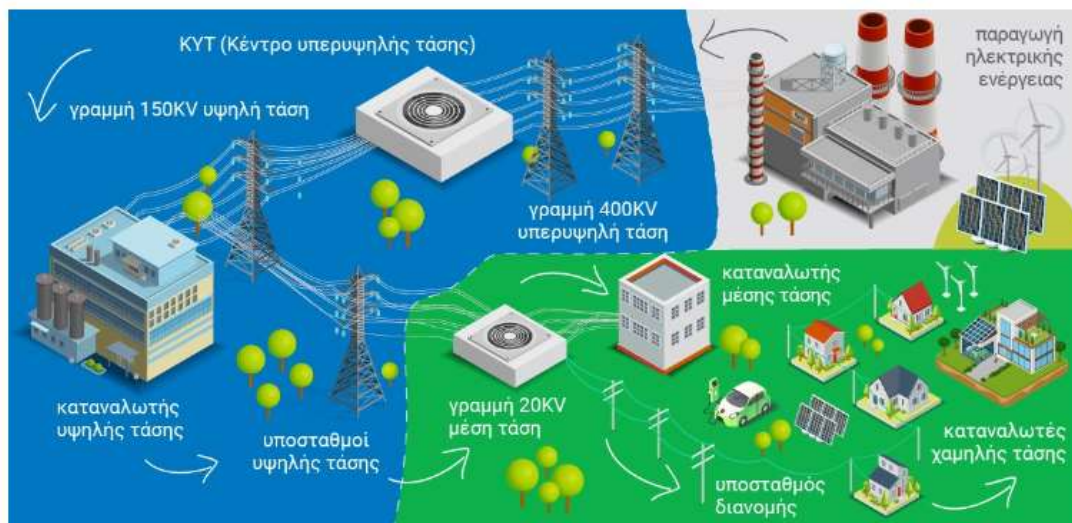
Μέσω των γραμμών διανομής επιτυγχάνεται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα μέρος του δικτύου σε ένα άλλο με σκοπό την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών. Οι γραμμές διανομής αποτελούνται από αγωγούς με κατάλληλη μόνωση και για την συγκράτησή τους χρησιμοποιούνται μονωτήρες που ταυτόχρονα λειτουργούν ως μόνωση των αγωγών ως προς γη. Οι εναέριες γραμμές διανομής στηρίζονται σε ξύλινους στύλους τόσο στην χαμηλή όσο και στη μέση τάση. Αντίθετα, στην υψηλή τάση χρησιμοποιούνται μεταλλικοί στύλοι ή αλλιώς πυλώνες που κατασκευάζονται από χαλύβδινα ελάσματα. Στο Σχήμα 2.3 γίνεται φανερή η διαφορά του δικτύου μεταφοράς από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 2.2.5. Χωρητικές αντισταθμίσεις

Οι συστοιχίες πυκνωτών (capacitor banks) αποτελούνται από πυκνωτές ίδιας χωρητικότητας συνδεδεμένους σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης που θα τοποθετηθούν. Μια συστοιχία πυκνωτών χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση άεργου ισχύος και τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος στους υποσταθμούς ισχύος. Αυτό συμβαίνει χάρη στη δυνατότητά τους να παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο, αντισταθμίζοντας έτσι μέρος της άεργου κατανάλωσης από τις αντιδράσεις των γραμμών [3].

## 2.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Τα δίκτυα διανομής είναι το τελευταίο τμήμα του συστήματος μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών υψηλής τάσης (δίκτυο μεταφοράς) τροφοδοτούνται απευθείας οι καταναλωτές υψηλής τάσης. Ωστόσο, για την εξυπηρέτηση των καταναλωτών μέσης τάσης είναι απαραίτητος ο υποβιβασμός της τάσης του δικτύου, πράγμα που επιτυγχάνεται στους υποσταθμούς υψηλής τάσης. Έπειτα, για την τροφοδότηση των καταναλωτών χαμηλής τάσης απαιτείται εκ νέου υποβιβασμός της τάσης, πράγμα που πραγματοποιείται στους υποσταθμούς διανομής. Η διαδικασία που περιγράφηκε γίνεται εύκολα κατανοητή στο Σχήμα 2.3 [4].

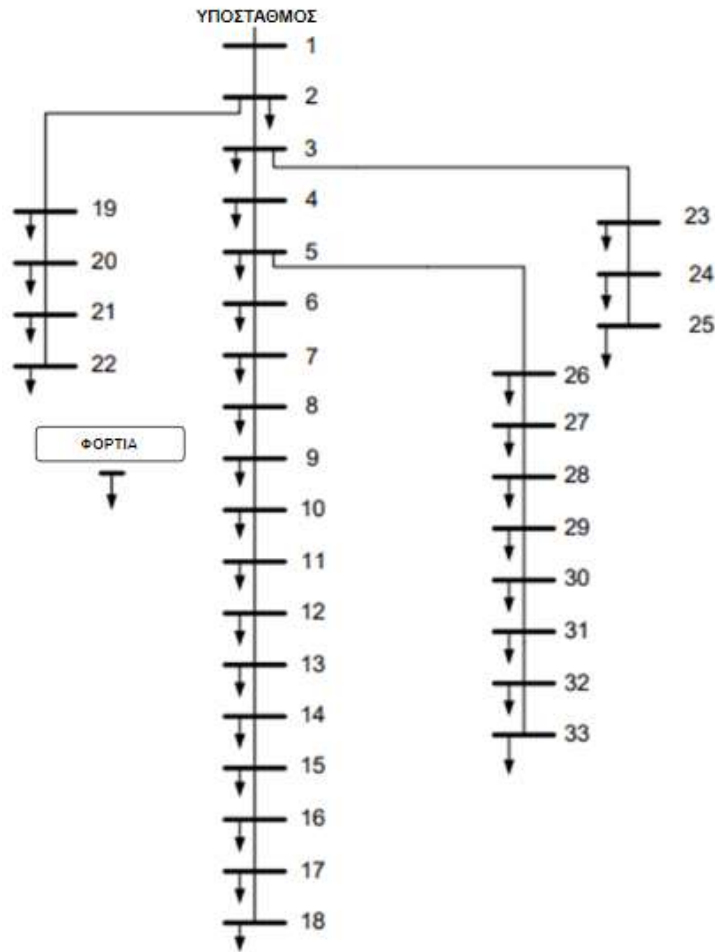


Σχήμα 2.3: Δίκτυο ηλεκτρισμού [5].

Τα δίκτυα διανομής διαφέρουν τοπολογικά, ανάλογα με την περιοχή και τις απαιτήσεις. Οι βασικές τοπολογίες των δικτύων διανομής είναι το ακτινικό, το βροχοειδές και το δικτυωτό δίκτυο.

### 2.3.1. Ακτινικά Συστήματα

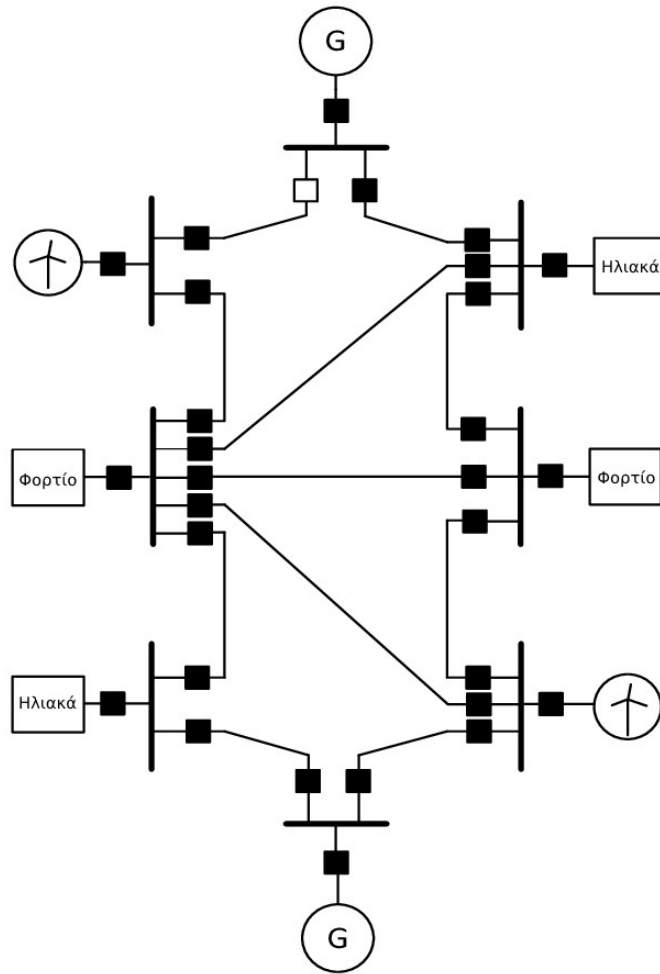
Τα ακτινικά συστήματα διανομής (Σχήμα 2.4) είναι μια τοπολογία που βασίζεται σε έναν κεντρικό υποσταθμό, από τον οποίο ξεκινούν γραμμές τροφοδοσίας προς τους καταναλωτές. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μόνο μία διαδρομή μεταφοράς ενέργειας από τον υποσταθμό προς κάθε καταναλωτή. Το σύστημα σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι οικονομικό και απλό στον σχεδιασμό και την κατασκευή του. Η ακτινική τοπολογία επιτρέπει την απλή δρομολόγηση των καλωδίων ή των γραμμών διανομής ενέργειας από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτές, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος κατασκευής. Ωστόσο, αυτή η τοπολογία έχει το μειονέκτημα της χαμηλής αξιοπιστίας. Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο μία διαδρομή για τη μεταφορά της ενέργειας, εάν αυτή η διαδρομή διακοπεί λόγω βλάβης ή δυσλειτουργίας, τότε ο καταναλωτής μπορεί να χάσει εντελώς την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ενέργειας και μη εξυπηρέτηση των καταναλωτών.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα ακτινικού συστήματος διανομής [6]

### 2.3.2. Βροχοειδή Συστήματα

Τα βροχοειδή συστήματα (Σχήμα 2.5) αποτελούν μια άλλη τοπολογία που χρησιμοποιείται στα συστήματα διανομής. Σε ένα βροχοειδές σύστημα, υπάρχουν πολλαπλά μονοπάτια μεταξύ του υποσταθμού και των καταναλωτών, καθώς οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας σχηματίζουν έναν βρόχο. Τα βροχοειδή συστήματα διανομής προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία σε σχέση με τα ακτινικά συστήματα, καθώς η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να ανακατευθυνθεί μέσω της αντίθετης διαδρομής σε περίπτωση διακοπής ή βλάβης στο ένα μονοπάτι. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν ένα τμήμα του συστήματος πάθει βλάβη, η ενέργεια μπορεί να συνεχίσει να διακινείται μέσω εναλλακτικής διαδρομής. Επιπρόσθετα, τα βροχοειδή συστήματα μπορούν να επιτύχουν καλύτερη ισοκατανομή φορτίου, καθώς η κλειστή διαδρομή επιτρέπει την κατανομή του φορτίου και στις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η κατασκευή και η λειτουργία των βροχοειδών συστημάτων είναι πιο περίπλοκη από τα ακτινικά συστήματα, καθώς απαιτείται προσεκτική σχεδίαση και διαχείριση των διασυνδέσεων και των ελέγχων του συστήματος. Επιπλέον, οι απαιτήσεις σε χώρο για την τοποθέτηση των γραμμών είναι μεγαλύτερες, καθώς απαιτούνται περισσότερες γραμμές για τη σύνδεση των κόμβων σε έναν βρόχο.

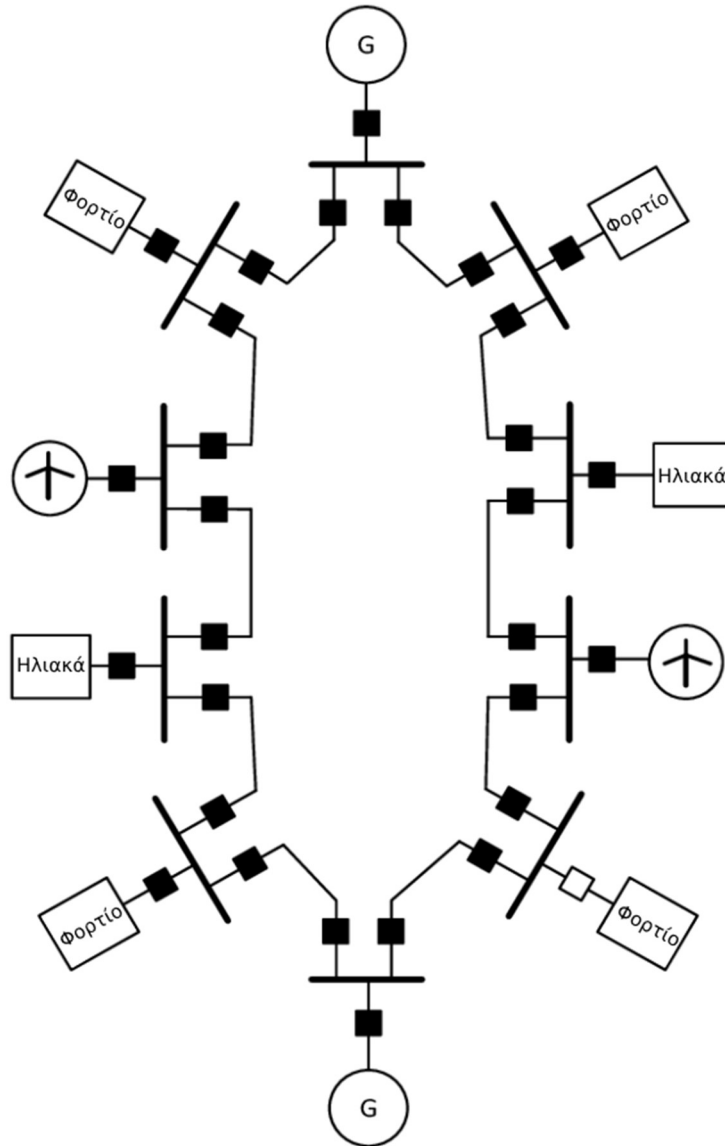


Σχήμα 2.5: Παράδειγμα βροχοειδούς συστήματος διανομής [6]

### 2.3.3. Δικτυωτά Συστήματα

Τα δικτυωτά συστήματα διανομής (Σχήμα 2.6) αποτελούν μια άλλη τοπολογία που χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρικά δίκτυα. Σε ένα δικτυωτό σύστημα, υπάρχουν πολλές διαδρομές μεταξύ του υποσταθμού και των καταναλωτών, σχηματίζοντας ένα πλέγμα. Τα δικτυωτά συστήματα προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία, καθώς η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να ανακατευθυνθεί μέσω διάφορων μονοπατιών σε περίπτωση διακοπής ή βλάβης. Αν κάποιο μονοπάτι πάθει βλάβη, η ενέργεια μπορεί να ρέει μέσω εναλλακτικών διαδρομών για να διατηρηθεί η παροχή ενέργειας προς τους καταναλωτές. Αυτό σημαίνει ότι τα δικτυωτά συστήματα είναι πιο ανθεκτικά σε βλάβες και προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία κατά τη διαχείριση της ενέργειας. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των δικτυωτών συστημάτων είναι η ικανότητά τους να διαχειρίζονται μεγαλύτερο φορτίο. Επειδή υπάρχει πληθώρα διαδρομών για τη μεταφορά της ενέργειας, το φορτίο μπορεί να ισοκατανεμηθεί ανάμεσα στα διάφορα μονοπάτια, επιτρέποντας έτσι την αποτελεσματική χρήση του συστήματος. Το κυριότερο μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι ότι η κατασκευή και η λειτουργία των δικτυωτών συστημάτων είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με τις άλλες τοπολογίες. Επιπλέον, η κατασκευή τους μπορεί να απαιτήσει περισσότερο χώρο και υλικό σε σύγκριση με το βροχοειδές σύστημα καθώς οι απαιτήσεις σε γραμμές είναι ακόμα μεγαλύτερες.





Σχήμα 2.6: Παράδειγμα δικτυωτού συστήματος διανομής [6]

#### 2.3.4. Σύγκριση Τοπολογιών

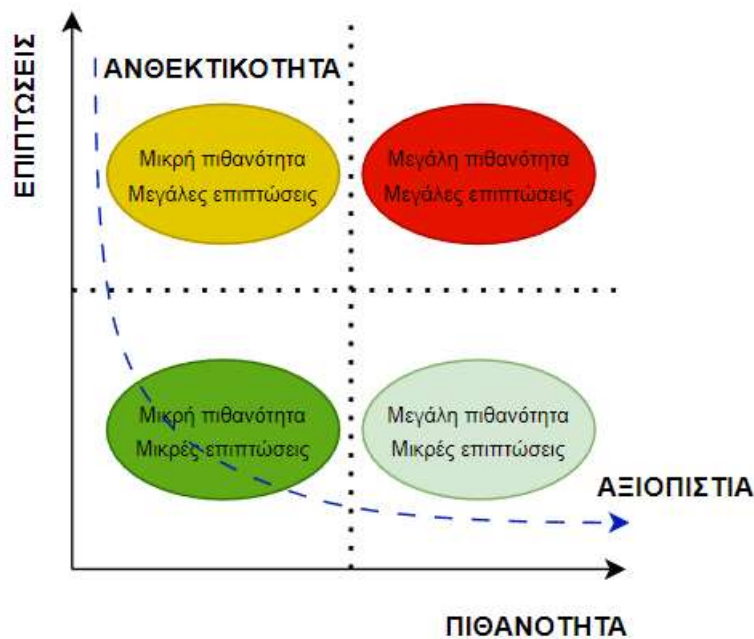
Είναι φανερό ότι καθεμία τοπολογία υπερέχει των άλλων σε κάποιους τομείς και υστερεί σε άλλους. Τα ακτινικά συστήματα διανομής υπερέχουν σημαντικά στην απλότητα του σχεδιασμού καθώς και οικονομικά, έχοντας πολύ μικρότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες τοπολογίες. Το βροχοειδές σύστημα διανομής υπερέχει σε αξιοπιστία του ακτινικού συστήματος καθώς παρέχει εναλλακτικό μονοπάτι για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος, ωστόσο, αυξάνεται σε σύγκριση με το ακτινικό σύστημα, όπως και η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού σε μικρό βαθμό. Τα δικτυωτά συστήματα διανομής είναι τα πιο περίπλοκα, τα πιο αξιόπιστα και σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις και το πιο οικονομικό σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα δικτυωτό σύστημα διανομής περιλαμβάνει πολλά μονοπάτια ανάμεσα σε όλα τα σημεία του. Η ροή ενέργειας ανάμεσα σε οποιαδήποτε δύο σημεία συνήθως πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών διαδρομών και αν εμφανιστεί βλάβη, το σύστημα άμεσα και αυτόματα αλλάζει την κατεύθυνση ροής [7].

## 2.4 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ζωτικής σημασίας κοινωνική υποδομή, παρέχοντας την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία και την ανάπτυξη της κοινωνίας. Συνεπώς, σε έναν κόσμο όπου οι φυσικές καταστροφές, οι τεχνολογικές απειλές και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται όλο και πιο συχνά ορατές και έντονες, η ανθεκτικότητα των δικτύων διανομής έχει αποκτήσει κρίσιμη σημασία.

Η έννοια της ανθεκτικότητας αφορά την ικανότητα ενός συστήματος να αντιμετωπίζει διαταραχές, προβλήματα και προκλήσεις, διατηρώντας τη λειτουργικότητά του και την παροχή των υπηρεσιών του. Στο πλαίσιο των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η ανθεκτικότητα περιλαμβάνει την ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει διακυμάνσεις φορτίου, τεχνικές ανωμαλίες, αλλά και φυσικές καταστροφές, όπως καταιγίδες, πλημμύρες, σεισμούς και πυρκαγιές.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο η ανθεκτικότητα όσο και η έννοια της αξιοπιστίας είναι απαραίτητα στοιχεία για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, συχνά παρατηρείται μία ταύτιση των δύο αυτών εννοιών, πράγμα που καθιστά ακόμα πιο σημαντική την ανάλυσή τους. Η ανθεκτικότητα των δικτύων διανομής αφορά γεγονότα που έχουν μικρή πιθανότητα να συμβούν αλλά ταυτόχρονα προκαλούν μεγάλες επιπτώσεις (φυσικές καταστροφές). Αντίθετα, η αξιοπιστία πραγματεύεται θέματα που δύναται να συμβούν με μεγάλη πιθανότητα έχοντας εμφανώς μικρότερες επιπτώσεις. Στο Σχήμα 2.7 γίνεται εμφανής η διαφορά των εννοιών της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας [8].



Σχήμα 2.7: Διαφορά ανθεκτικότητας και αξιοπιστίας

Σπάνια, αλλά ισχυρά γεγονότα, όπως σεισμοί, τυφώνες, πλημμύρες και άλλες φυσικές καταστροφές, μπορούν να προκαλέσουν διακοπές στην παροχή ενέργειας και να πλήξουν τη λειτουργία των δικτύων. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία αναδεικνύεται η συμβολή των φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Τα δίκτυα διανομής μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό ή να διατηρήσουν τη βασική λειτουργικότητά τους για κάποιο χρονικό διάστημα χάρη στις φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό είναι κρίσιμο για την επικοινωνία, την παροχή βασικών υπηρεσιών και τη διατήρηση της ασφάλειας κατά τη διάρκεια κρίσεων. Πέραν των φυσικών καταστροφών, οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να προστατεύσουν τα συστήματα διανομής από πιθανά ανθρωπογενή ατυχήματα, καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή απρόβλεπτες βλάβες στο ηλεκτρικό δίκτυο

## **ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

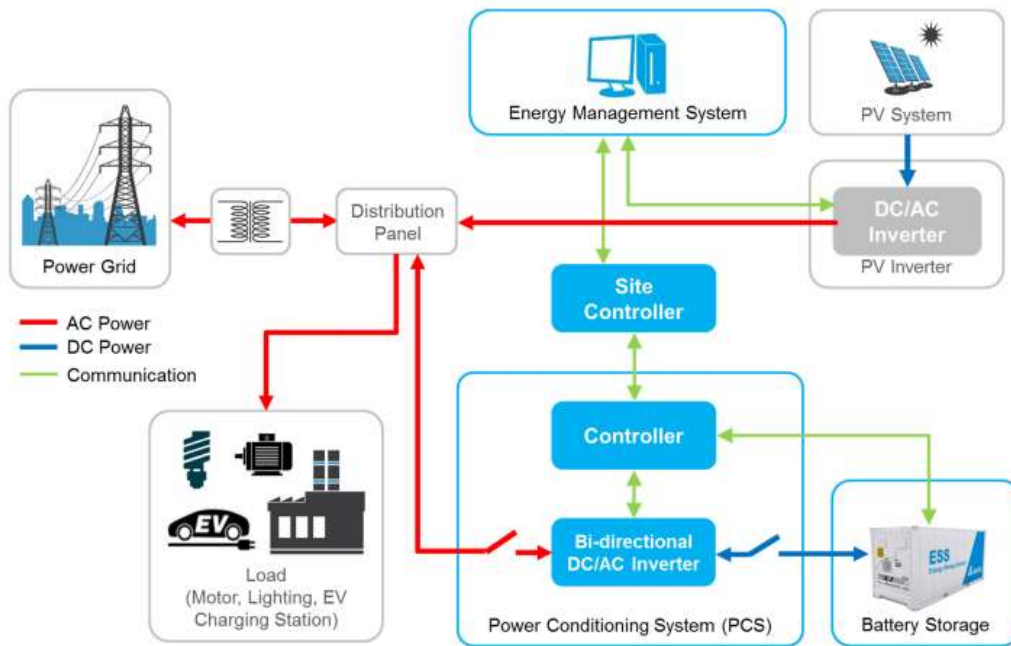
Η αναπόφευκτη εξάντληση των παραδοσιακών πηγών ενέργειας και οι ανησυχίες για τις ανθρωπογενείς κλιματικές αλλαγές έχουν δώσει έντονη ώθηση στην εξερεύνηση και αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, έχουν αναδειχθεί ως καθοριστικοί παράγοντες για την επίτευξη μιας βιώσιμης ενεργειακής μελλοντικής προοπτικής.

Από την άλλη, η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα δίκτυα διανομής παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις είναι η ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εξαρτάται από την ζήτηση που υπάρχει στην αγορά παρά μόνο από καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς, μπορεί να υπάρχουν περιόδους υψηλής παραγωγής χωρίς ανάλογη ζήτηση. Εδώ εισέρχονται στο προσκήνιο οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες αποτελούν ένα κρίσιμο κομμάτι του μέλλοντος της ενεργειακής αναδιαμόρφωσης. Η αποθήκευση ενέργειας λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση, επιτρέποντας την αποθήκευση της υπερβολικής παραγόμενης ενέργειας και την κατανάλωσή της όταν η ζήτηση είναι υψηλή.

Η σπουδαιότητα των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας είναι διπλής φύσης. Αφενός, συμβάλλουν στη διατήρηση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας των δικτύων διανομής, αφού μπορούν να παρέχουν ενέργεια όταν οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι διαθέσιμες. Αφετέρου, μειώνουν την ανάγκη για την υποδομή παραγωγής και διανομής ενέργειας, μειώνοντας τον αντίκτυπο στο περιβάλλον και τις λειτουργικές δαπάνες. Με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, οι μονάδες αποθήκευσης μπορούν να θεωρηθούν ως μέσο ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των δικτύων διανομής αξιοποιώντας τη φορητότητα που αναπτύσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Έτσι, όπως θα αναλυθεί στη διπλωματική εργασία, μέσω των φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας καθίσταται δυνατή η στήριξη του δικτύου σε περιπτώσεις έκτακτων συνθηκών καθώς και σε περιόδους κανονικής λειτουργίας.

### **3.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (ESS – Energy Storage Systems) αποτελούν ολοένα και πιο σημαντικό μέρος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτούνται τεχνολογίες για την ομαλή ένταξή τους στο δίκτυο, έτσι και οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας επιτυγχάνουν τη διασύνδεσή τους με το σύστημα μέσω των PCS (Power Conditioning Systems). Το PCS είναι ένα σύστημα μετατροπής ισχύος μέσω του οποίου επιτυγχάνεται αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Ειδικότερα, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από AC σε DC για τη μεταφορά ισχύος από το δίκτυο προς τις μονάδες αποθήκευσης και από DC σε AC για την αντίθετη πορεία. Στο Σχήμα 3.1 γίνονται κατανοητά τα συστήματα που απαιτούνται για την ενσωμάτωση στο δίκτυο τόσο των μπαταριών όσο και των ανανεώσιμων πηγών και των ηλεκτρικών αυτοκινήτων [9].



Σχήμα 3.1: Ενσωμάτωση ΑΠΕ και ESS στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Η διαρκής αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα μέσω της συνεχής ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστά την αποθήκευση της ενέργειας συνεχώς πιο απαραίτητη. Η ενσωμάτωση των ESS στο ηλεκτρικό δίκτυο προσφέρει πολλά οφέλη, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα του συστήματος. Αναλυτικά, μερικά από αυτά τα οφέλη περιλαμβάνουν:

- **Εξισορρόπηση δικτύου – Grid balancing:** Αποθηκεύοντας μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά και αιολικά πάρκα μπορεί να ενισχυθεί η εξισορρόπηση του δικτύου καθώς παρέχεται η δυνατότητα να απελευθερώνεται η ενέργεια αυτή σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης. Συνεπώς, αντιμετωπίζεται σε μεγάλο βαθμό η έγχυση περιττής ενέργειας στο δίκτυο καθώς και η έλλειψη ενέργειας.
- **Εφεδρική παροχή ισχύος – Backup Power:** Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν ως εφεδρική πηγή ισχύος κατά τη διάρκεια διακοπών ή απροσδόκητων περιστάσεων, εξασφαλίζοντας συνεχή τροφοδότηση κρίσιμων φορτίων του δικτύου.
- **Σταθεροποίηση τιμών ηλεκτρικής ενέργειας:** Μέσω της αποθήκευσης ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και της εκφόρτισης σε περιόδους υψηλής ζήτησης, μπορούν να περιοριστούν οι αιχμές του φορτίου καθώς και οι υψηλές κυμάνσεις των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Έλεγχος άεργης ισχύος, διόρθωση συντελεστή ισχύος, ρύθμιση τάσης:** Τα ηλεκτρονικά ισχύος των μονάδων αποθήκευσης παρέχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν γρήγορα την άεργο καθώς και την ενεργό ισχύ.
- **Αξιοπιστία:** Όταν υπάρχει εφεδρική παροχή ισχύος, σε περιπτώσεις διακοπών, τα φορτία μπορούν να συνεχίσουν να τροφοδοτούνται πράγμα που καθιστά το δίκτυο πιο αξιόπιστο.

- **Μείωση καυσίμων – Περιβαλλοντικό όφελος:** Για την κάλυψη των αναγκών των φορτίων αιχμής χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μονάδες παραγωγής οι οποίες λειτουργούν με καύσιμα. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να αντικαταστήσουν μερικώς τις μονάδες παραγωγής, μειώνοντας, έτσι, την κατανάλωση καυσίμου καθώς και τους ρύπους.

### 3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μια διαδεδομένη προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επικεντρώνεται στην κατάταξή τους με βάση τον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιούν. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χωριστούν με αυτό τον τρόπο στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μηχανικά συστήματα αποθήκευσης
- Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης
- Χημικά συστήματα αποθήκευσης
- Ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης

#### 3.3.1 Μηχανικά συστήματα αποθήκευσης

Μεταξύ των διαφόρων συστημάτων μηχανικής αποθήκευσης, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα περιλαμβάνουν αντλητικά υδροηλεκτρικά εργοστάσια, που συνήθως αναφέρονται ως υδροηλεκτρική αποθήκευση με άντληση, αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα και αποθήκευση ενέργειας με σφονδύλους. Οι τεχνολογίες αυτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποθήκευση και διαχείριση της ενέργειας, συμβάλλοντας σημαντικά στη ευστάθεια των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

**Υδροηλεκτρική αποθήκευση με άντληση (PHS – Pumped Hydro Storage):** Με περισσότερα από 120 GW ανά τον κόσμο, οι εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 3.2) αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 99% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ηλεκτρικής αποθηκευτικής ικανότητας [10] η οποία αντιστοιχεί περίπου στο 3% της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας. Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης λειτουργούν με τη χρήση δύο δεξαμενών νερού σε διαφορετικά υψόμετρα, αντλώντας νερό από την χαμηλότερη στην υψηλότερη δεξαμενή κατά τη χαμηλή ζήτηση (φόρτιση). Στις περιόδους υψηλής ζήτησης, το νερό επιστρέφει από την υψηλότερη στη χαμηλότερη δεξαμενή, κινώντας μία τουρμπίνα με γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τις δύο δεξαμενές. Επίσης, το κάτω επίπεδο μπορεί να εκμεταλλεύεται πλημμυρισμένες στοές ορυχείων και άλλες υπόγειες κοιλότητες. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν τη μεγάλη διάρκεια ζωής και τη σχεδόν απεριόριστη κυκλική σταθερότητα. Κύρια μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την εξάρτηση από την τοπογραφία και τη μεγάλη χρήση εδάφους. Οι βασικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διαχείριση ενέργειας μέσω της χρονικής μετατόπισης, προσφέροντας εφεδρεία κατά τη διάρκεια των χαμηλών και υψηλών αιχμών κατανάλωσης.



Σχήμα 3.2 : Υδροηλεκτρική αποθήκευση με άντληση [11]

**Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (CAES – Compressed Air Energy Storage):** Η αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα είναι μια τεχνολογία γνωστή και χρησιμοποιείται από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κινητών εφαρμογών. Ο αέρας χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης λόγω της διαθεσιμότητάς του. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση του αέρα και την αποθήκευσή του είτε σε μια υπόγεια κατασκευή είτε σε ένα υπέργειο σύστημα δοχείων ή σωλήνων. Όταν χρειάζεται, ο συμπιεσμένος αέρας αναμιγνύεται με φυσικό αέριο, καίγεται και διογκώνεται σε έναν τροποποιημένο αεριοστρόβιλο. Τυπικές επιλογές υπόγειας αποθήκευσης είναι σπήλαια, υδροφόροι ορίζοντες ή εγκαταλελειμμένα ορυχεία. Εάν η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη συμπίεση διαχέεται με ψύξη και δεν αποθηκεύεται, ο αέρας πρέπει να θερμανθεί εκ νέου πριν από την εκτόνωση στον στρόβιλο. Το πλεονέκτημα της CAES είναι η μεγάλη χωρητικότητά της ενώ τα μειονεκτήματά της είναι η χαμηλή απόδοση κυκλικής διαδρομής και ο γεωγραφικός περιορισμός των τοποθεσιών [12].

**Αποθήκευση ενέργειας με σφονδύλους (FES – Flywheel Energy Storage):** Στην αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο, η περιστροφική ενέργεια αποθηκεύεται σε έναν επιταχυνόμενο δρομέα, ο οποίος είναι ένας ογκώδης περιστρεφόμενος κύλινδρος. Τα βασικά συστατικά ενός σφονδύλου περιλαμβάνουν το περιστρεφόμενο σώμα/κύλινδρο, συγκροτούμενο από μια στεφάνη προσαρτημένη σε έναν άξονα, τα εδάφια και το σύστημα μετάδοσης. Η ενέργεια διατηρείται στον σφόνδυλο, κρατώντας το περιστρεφόμενο σώμα σε σταθερή ταχύτητα. Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας. Για την επιτάχυνση του σφονδύλου, παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια από μια διάταξη μετάδοσης. Εάν η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου μειωθεί, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί

να αφαιρεθεί από το σύστημα μέσω της ίδιας συσκευής μετάδοσης. Τα κύρια χαρακτηριστικά των σφονδύλων περιλαμβάνουν την εξαιρετική σταθερότητα των κυκλοφοριών και τη μεγάλη διάρκεια ζωής, τη μικρή συντήρηση, την υψηλή πυκνότητα ισχύος και τη χρήση περιβαλλοντικά αδρανών υλικών. Ωστόσο, οι σφόνδυλοι έχουν υψηλό επίπεδο αυτοεκφόρτισης λόγω της αντίστασης του αέρα και των απωλειών των εδράνων και πάσχουν από χαμηλή απόδοση ρεύματος.

### 3.3.2 Ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης

Τα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης αφορούν ουσιαστικά δύο ειδών μπαταρίες: τις δευτερεύουσες και τις μπαταρίες ροής.

#### 3.3.2.1 Δευτερεύουσες μπαταρίες

Στις δευτερεύουσες μπαταρίες ανήκουν οι περιπτώσεις των μπαταριών που μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναφορτιστούν πολλές φορές. Οι πιο διαδεδομένες περιπτώσεις τέτοιων μπαταριών είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι μπαταρίες μολυβδου και οι μπαταρίες νικελίου καδμίου.

**Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion):** Από το 2000 και μετά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν εξελιχθεί ως η κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας για φορητές συσκευές. Η υψηλή τάση τους επιτρέπει να αντικαταστήσουν περισσότερες κυψέλες από άλλους τύπους μπαταριών. Παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση, ενώ έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε διάφορους χρόνους εκφόρτισης. Παρά τη δημοτικότητά τους σε φορητές συσκευές, η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξή τους αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω του υψηλού κόστους. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν γενικά πολύ υψηλή απόδοση, που συνήθως κυμαίνεται από 95% έως 98%, καθιστώντας τες μια ευέλικτη και καθολική τεχνολογία αποθήκευσης. Ωστόσο, η ασφάλεια παραμένει ένα πρόβλημα για τις μπαταρίες λιθίου λόγω της θερμικής αστάθειας που παρουσιάζουν τα ηλεκτρόδια οξειδίου μετάλλων. Έτσι, στις μπαταρίες λιθίου αποτελεί μονόδρομος η εγκατάσταση κυκλωμάτων εξισορρόπησης της τάσης καθώς και κυκλωμάτων παρακολούθησης για την αποφυγή υπερβολικής φόρτισης ή εκφόρτισης [13].

**Μπαταρίες μολυβδου οξέος:** Οι μπαταρίες μολυβδου οξέος, χρησιμοποιούμενες από το 1890 περίπου, είναι οι πλέον διαδεδομένες σε παγκόσμιο επίπεδο και χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως στην τροφοδοσία έκτακτης ανάγκης, στα φωτοβολταϊκά συστήματα, στην αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της αιολικής ενέργειας και στις μπαταρίες εκκίνησης οχημάτων. Οι σταθερές μπαταρίες μολυβδου οξέος προσφέρουν ώριμη τεχνολογία με διάρκεια ζωής 6 έως 15 ετών και επιλογές σε διάφορους τύπους. Παρά το υψηλό κόστος σε σύγκριση με τις μπαταρίες εκκίνησης, η μαζική παραγωγή μπορεί να τις καταστήσει πιο προσιτές. Είναι γεγονός ότι τα πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών ποικίλουν, υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα, όπως η μειωμένη χωρητικότητα σε υψηλές εκφορτίσεις, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και η χρήση μολυβδου ως επικίνδυνου υλικού. Παρόλα αυτά, προσφέρουν οικονομική απόδοση, εύκολη ανακύκλωση και απλή φόρτιση.



**Μπαταρίες νικελίου καδμίου:** Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd) χρησιμοποιήθηκαν από περίπου το 1915 μέχρι πριν την εμπορική διάθεση των μπαταριών νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH) γύρω στο 1995. Αν και θεωρούνταν τεχνολογικά επιτυχημένες, μεγάλο μειονέκτημά τους ήταν η περιορισμένη χωρητικότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες μόλυβδου-οξέος και μόλυβδου. Παρόλα αυτά, οι μπαταρίες NiCd προσέφεραν εξαιρετικές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες (από  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), και χρησιμοποιούνταν σε μεγάλα συστήματα μπαταριών με παρόμοιο τρόπο με τις μπαταρίες μόλυβδου-οξέος. Ωστόσο, λόγω της τοξικότητας του καδμίου, η χρήση τους περιορίστηκε στην Ευρώπη και απαγορεύτηκε για τους καταναλωτές από το 2006 [13].

### 3.3.2.2 Μπαταρίες ροής

Οι μπαταρίες ροής είναι μια κατηγορία επαναφορτιζόμενων μπαταριών όπου οι αναλώσιμοι ηλεκτρολύτες αντλούνται από δεξαμενές και ρέουν μέσα από κυψέλες μπαταρίας με μεμβράνες που διαχωρίζουν τους διάφορους ηλεκτρολύτες, ενώ ταυτόχρονα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία αυτή είναι κυρίως γνωστή για την ικανότητά της να αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες ενέργειας και να παρέχει σταθερή ισχύ για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι μπαταρίες ροής χαρακτηρίζονται επίσης από τη δυνατότητα να αναβαθμιστούν σχετικά εύκολα με την αύξηση της δεξαμενής ηλεκτρολύτη για μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας. Τέλος, μπορούν να χωριστούν σε μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής και σε υβριδικές μπαταρίες ροής.

**Μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής:** Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (RFB) λειτουργούν με δύο υγρούς ηλεκτρολύτες οι οποίοι περνούν από ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο. Αυτοί οι ηλεκτρολύτες, γνωστοί ως ανολύτες και καθολύτες, κυκλοφορούν σε αντίθετες πλευρές του ηλεκτροχημικού στοιχείου μέσω πορωδών ηλεκτροδίων που διαχωρίζονται από μια μεμβράνη. Τα πρωτόνια διασχίζουν τη μεμβράνη κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης, επιτρέποντας τη μεταφορά ηλεκτρονίων. Τα μεταλλικά ιόντα παραμένουν διαλυμένα, χωρίς αλλαγή φάσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Κατά την εκφόρτιση, τα ηλεκτρόδια συνεχίζουν να τροφοδοτούνται με ενεργές μάζες από τις δεξαμενές. Η τεχνολογία αυτή έχει εφαρμοστεί σε διάφορα οξειδοαναγωγικά ζεύγη, με ένα από τα πιο γνωστά να είναι η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRFB). Η VRFB χρησιμοποιεί δύο οξειδοαναγωγικά ζεύγη,  $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$  ως οξειδωτικό και  $\text{V}^{5+}/\text{V}^{4+}$  ως αναγωγικό, σε διάλυμα θειικού οξέος. Ένα από τα πλεονεκτήματα της VRFB είναι η χρήση ιόντων του ίδιου μετάλλου και στις δύο πλευρές, μειώνοντας τα προβλήματα διασταύρωσης. Η τεχνολογία αυτή έχει υιοθετηθεί σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος, όπως εγκαταστάσεις στην Ιαπωνία, με πιλοτικές δοκιμές να ξεκινούν περίπου από το έτος 2000.

**Υβριδικές μπαταρίες ροής:** Σε μια υβριδική μπαταρία ροής (HFB), μια από τις ενεργές μάζες αποθηκεύεται εσωτερικά στο ηλεκτροχημικό στοιχείο, ενώ η άλλη παραμένει στον υγρό ηλεκτρολύτη που αποθηκεύεται εξωτερικά σε μια δεξαμενή. Οι υβριδικές μπαταρίες ροής συνδυάζουν χαρακτηριστικά των συμβατικών δευτερογενών μπαταριών και των μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής, με τη χωρητικότητα της μπαταρίας να εξαρτάται από το μέγεθος της ηλεκτροχημικής κυψέλης. Παραδείγματα HFB περιλαμβάνουν τα συστήματα Zn-Ce και Zn-Br. Και στις δύο περιπτώσεις, ο ανόλυτος αποτελείται από όξινο διάλυμα ιόντων  $\text{Zn}^{2+}$ , με το

Zn να εναποτίθεται στο ηλεκτρόδιο κατά τη φόρτιση και το  $Zn^{2+}$  να επιστρέφει στο διάλυμα κατά την εκφόρτιση. Ως μεμβράνη χρησιμοποιείται μικροπορώδες υλικό πολυυλοφίνης και τα περισσότερα ηλεκτρόδια είναι σύνθετα υλικά άνθρακα-πλαστικού [13].

### 3.3.3 Χημική αποθήκευση ενέργειας

Η παρούσα ανάλυση της χημικής αποθήκευσης ενέργειας επικεντρώνεται κυρίως στο υδρογόνο και το συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), ως δευτερογενείς φορείς ενέργειας με σημαντικές δυνατότητες για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Ο πρωταρχικός στόχος ενός τέτοιου συστήματος χημικής αποθήκευσης ενέργειας είναι η μετατροπή της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Μόλις παραχθεί, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας είτε στην καθαρή του μορφή είτε ως SNG. Αν και η συνολική απόδοση του υδρογόνου και του SNG μπορεί να είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με τεχνολογίες όπως το PHS και το Li-ion, η χημική αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει με μοναδικό τρόπο την αποθήκευση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, που φθάνουν την κλίμακα των TWh, και για παρατεταμένη διάρκεια, συμπεριλαμβανομένης της εποχιακής αποθήκευσης.

**Υδρογόνο:** Ένα τυπικό σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου περιλαμβάνει έναν ηλεκτρολύτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και μια κυψέλη καυσίμου. Ο ηλεκτρολύτης, ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας, διασπά το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια, απαιτώντας θερμότητα κατά τη διαδικασία. Αποθηκευμένο υπό πίεση σε φιάλες ή δεξαμενές αερίου, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς χρονικό περιορισμό. Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και τα δύο αέρια εισέρχονται στην κυψέλη καυσίμου, όπου υφίστανται αντίστροφη ηλεκτροχημική αντίδραση, παράγοντας νερό, απελευθερώνοντας θερμότητα και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Για οικονομικούς λόγους, το οξυγόνο εκτονώνεται κατά την ηλεκτρόλυση και το ατμοσφαιρικό οξυγόνο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

**Συνθετικό φυσικό αέριο:** Η σύνθεση μεθανίου, γνωστή ως συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), προσφέρει μια δεύτερη επιλογή για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ως χημική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει έναν αντιδραστήρα μεθανοποίησης όπου το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρούν για να σχηματίσουν μεθάνιο μετά την αρχική διάσπαση του νερού σε έναν ηλεκτρολύτη. Παρόμοια με το υδρογόνο, το SNG μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές υπό πίεση, υπόγεια ή να εγχυθεί απευθείας στο δίκτυο φυσικού αερίου. Για τη διαδικασία μεθανοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες πηγές  $CO_2$ , όπως σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή μονάδες βιοαερίου. Για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών, η επιτόπια αποθήκευση  $CO_2$  και  $H_2$  είναι απαραίτητη, ιδίως όταν χρησιμοποιείται  $CO_2$  από την παραγωγή βιοαερίου.

### 3.3.4 Ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης

Τα ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν κρίσιμο κομμάτι της υποδομής ενέργειας, προσφέροντας λύσεις για την αποθήκευση και την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διάρκεια διαφόρων ενεργειακών κύκλων. Στο ευρύ φάσμα των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται, τα συστήματα πυκνωτών διπλής στρώσης (DLC) και η υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES) ξεχωρίζουν για την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά τους.

**Πυκνωτές διπλής στρώσης:** Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλής στιβάδας (DLC) αποτελούν πρωτοπόρο τεχνολογία στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας. Με τη δυνατότητα να προσφέρουν υψηλή ικανότητα ισχύος και μεγάλη αποθηκευτική δυνατότητα, αποτελούν αποτελεσματική λύση για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη αποδέσμευση ενέργειας. Οι DLC διακρίνονται για τη σταθερότητα των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισής τους, καθώς και τη μακρά διάρκεια ζωής τους. Με την ευρεία χρήση σε διάφορους τομείς, από ηλεκτρονικά έως και ηλεκτρικά οχήματα, οι DLC αναδεικνύονται ως κρίσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη αποδοτικών και βιώσιμων ενεργειακών λύσεων.

**Υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας:** Τα συστήματα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (SMES) αποτελούν μια εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία που επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας σε μαγνητικά πεδία. Με τη δυνατότητα να προσφέρουν γρήγορους χρόνους απόκρισης και υψηλή συνολική απόδοση, τα συστήματα αυτά είναι ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστη και αποδοτική αποθήκευση ενέργειας. Η χρήση υπεραγωγίων πηνίων σε συνδυασμό με σύστημα κλιματισμού ισχύος και κρουγονικό σύστημα ψύξης εξασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία και τη μακροχρόνια αποτελεσματικότητα των συστημάτων SMES. Αν και τα μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερευνητικά πειράματα, τα μικρότερα εμπορικά προϊόντα χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο της ποιότητας ισχύος σε διάφορες εφαρμογές, προσφέροντας αξιόπιστη λύση και επίβλεψη στα ηλεκτρικά δίκτυα.

## 3.4 ΦΟΡΗΤΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι τεχνολογικές λύσεις που χρησιμοποιούν ηλεκτροχημικές μπαταρίες ή άλλες μορφές αποθηκευτικών μέσων για να αποθηκεύουν ενέργεια και να την απελευθερώνουν ανάλογα με τις ανάγκες. Αυτές οι μονάδες είναι σχεδιασμένες για να είναι φορητές και εύκολα μεταφερόμενες, συνήθως λειτουργούν με μπαταρίες ιόντων λιθίου ή άλλες προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών.

Χρησιμοποιούνται για πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της εφεδρικής ενέργειας σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή καταστροφής, της φορητής παροχής ενέργειας για κινητές συσκευές και ηλεκτρονικές συσκευές, και της φόρτισης φορητών ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ευρέως σε εκδηλώσεις συναυλιών, κατασκήνωσης, και άλλες παρόμοιες δραστηριότητες όπου η πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι περιορισμένη. Οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας συχνά είναι ευέλικτες και

προσαρμόσιμες, καθώς μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορα περιβάλλοντα και να παρέχουν ενέργεια ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Επίσης, οι προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μονάδες συνήθως προσφέρουν υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Σε πολλές ερευνητικές εφαρμογές έχει αξιολογηθεί η ενσωμάτωση φορητών μονάδων αποθήκευσης στα δίκτυα διανομής. Η ενσωμάτωση των μονάδων αυτών μπορεί όχι μόνο να αναβάλλει την αναγκαία αναβάθμιση των δικτύων αλλά επίσης καθιστά εφικτή την στήριξη του δικτύου σε περιπτώσεις τεράστιας ζήτησης [14]. Επίσης, η ενσωμάτωση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας στα δίκτυα διανομής μπορεί να συνδυαστεί αρμονικά με την ραγδαία ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Με άλλα λόγια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια συγκεκριμένες χρονικές στιγμές βασιζόμενες στις καιρικές συνθήκες πράγμα που καθιστά μεγάλη ανάγκη την εύρεση τρόπων αποθήκευσης της ενέργειας αυτής ώστε να μη παρατηρείται κορεσμός σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους στα δίκτυα διανομής [15].

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η χρήση μεγάλης χωρητικότητας φορητών μονάδων αποθήκευσης ως μέσο στήριξης του δικτύου διανομής σε έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας [16].



## **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η πιθανή στήριξη που μπορούν να προσφέρουν οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και συγκεκριμένα οι φορητές μονάδες στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, προσομοιάστηκε η συμπεριφορά ενός δικτύου διανομής τόσο σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας όσο και σε καταστάσεις έκτακτης λειτουργίας που προκαλούνται κυρίως από ακραία καιρικά φαινόμενα. Στο δίκτυο αυτό ενσωματώθηκαν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό να αξιολογηθεί η συνεισφορά τους σε όλα τα δυνατά σενάρια.

### **4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

Το μοντέλο ροής ισχύος που χρησιμοποιήθηκε στη διπλωματική εργασία δίνει έμφαση στους κόμβους και στις γραμμές του δικτύου διανομής σε αντίθεση με το συμβατικό μοντέλο ροής ισχύος που επικεντρώνεται στη διαφορά φάσης [18]. Συγκεκριμένα, για το μοντέλο αυτό χρειάζεται να οριστούν τα εξής σύνολα:

- $N^B$  : Σύνολο των ζυγών του δικτύου
- $N^L$  : Σύνολο των γραμμών του δικτύου
- $T$ : Σύνολο των χρονικών διαστημάτων

Μεγέθη που χαρακτηρίζουν τους ζυγούς  $i,j$  και τη γραμμή διανομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονικό διάστημα  $t$ :

- Τάση του ζυγού  $i$ :

$$\hat{V}_{it} = V_{it} \angle \theta_i, \quad i \in N^B \quad (4.1)$$

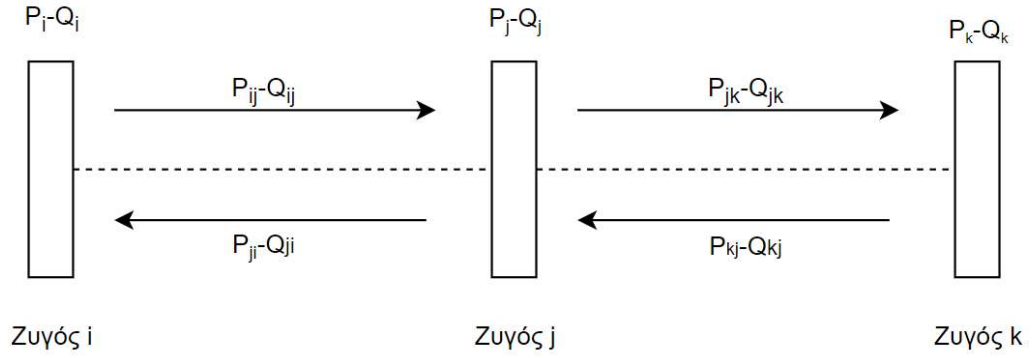
όπου  $V_i$  και  $\theta_i$  το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού  $i$ .

- Φαινόμενη ισχύς του ζυγού  $i$ :

$$\hat{S}_{di} = P_{di} + j * Q_{di}, \quad i \in N^B \quad (4.2)$$

όπου  $P_{di}$  και  $Q_{di}$  η ενεργός και η άεργος κατανάλωση ισχύος του ζυγού  $i$ .

- $R_{ij}, X_{ij}$ : Αντίσταση και αντίδραση γραμμής  $i-j$ .
- $I_{ij,t}$ : μέτρο ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή  $i-j$ .
- $P_{ij,t}, P_{ji,t}$ : Ροή ενεργού ισχύος από τον ζυγό  $i$  στον ζυγό  $j$  και από τον ζυγό  $j$  στο ζυγό  $i$ , αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $Q_{ij,t}, Q_{ji,t}$ : Ροή άεργου ισχύος από τον ζυγό  $i$  στον ζυγό  $j$  και από τον ζυγό  $j$  στο ζυγό  $i$ , αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $P_{i,t}^d, Q_{i,t}^d$ : Απαίτηση ενεργού και άεργου ισχύος ζυγού  $i$ , τη χρονική στιγμή  $t$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1 : Δίκτυο 3 ζυγών

Οι εξισώσεις ροής ενεργού και άεργου ισχύος που περιγράφουν το δίκτυο του Σχήματος 4.1 έχουν τη μορφή:

$$\sum_i (P_{ij,t} - P_{ji,t}) - P_{i,t}^d - R_{ij} * I_{ij,t}^2 = \sum_k (P_{jk,t} - P_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T \quad (4.3)$$

$$\sum_i (Q_{ij,t} - Q_{ji,t}) - Q_{i,t}^d - X_{ij} * I_{ij,t}^2 = \sum_k (Q_{jk,t} - Q_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T \quad (4.4)$$

Εξίσωση πτώσης τάσης μεταξύ των ζυγών  $i, j$ :

$$V_{i,t}^2 - 2 * (R_{ij} * (P_{ij,t} - P_{ji,t}) + X_{ij} * (Q_{ij,t} - Q_{ji,t})) + ((R_{ij}^2 + X_{ij}^2) * I_{ij,t}^2) - V_{j,t}^2 = 0, \quad (4.5)$$

$$i, j \in N^L, t \in T$$

Επίσης, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση η οποία συνδέει το μέτρο της τάσης του κάθε ζυγού με το ρεύμα και τη ροή ισχύος, ενεργού και άεργου, στη γραμμή  $i-j$ :

$$V_{i,t}^2 * I_{ij,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2, \quad i - j \in N^L, t \in T \quad (4.6)$$

Τέλος, είναι αναγκαίο να τηρηθούν οι ακόλουθοι περιορισμοί που αφορούν το μέτρο της τάσης των ζυγών καθώς και την παροχή ενεργού και άεργου ισχύος από το κύριο δίκτυο που τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής:

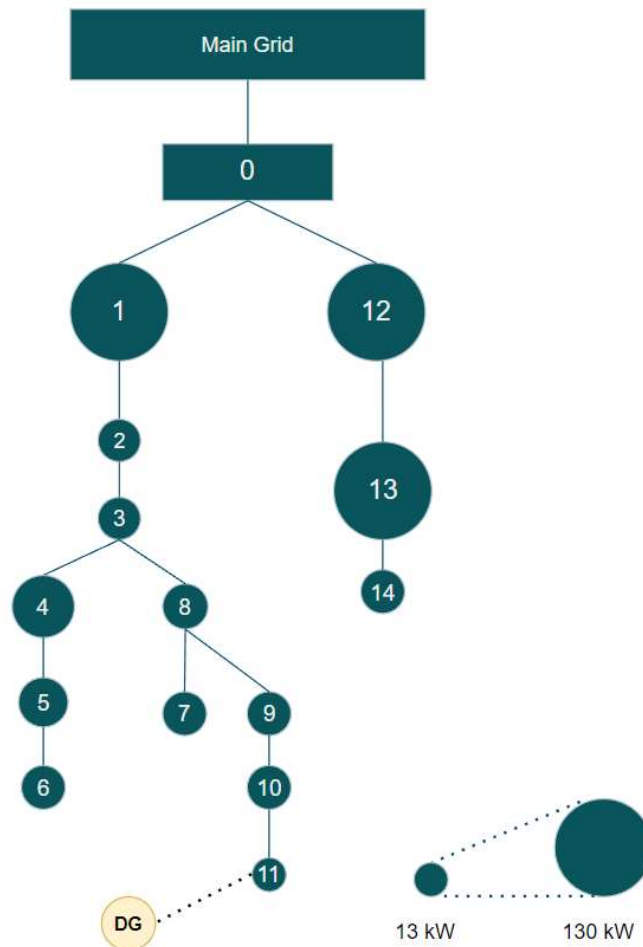
$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N^B \quad (4.7)$$

$$P_{\text{slack}}^{\min} \leq P_{\text{slack}} \leq P_{\text{slack}}^{\max} \quad i \in N^B \quad (4.8)$$

$$Q_{\text{slack}}^{\min} \leq Q_{\text{slack}} \leq Q_{\text{slack}}^{\max} \quad i \in N^B \quad (4.9)$$

### 4.3 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το δίκτυο διανομής πάνω στο οποίο βασίστηκε η διπλωματική εργασία φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 15 ζυγών



Το δίκτυο διανομής του Σχήματος 4.2 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Αποτελείται από 15 ζυγούς εκ των οποίων ο ζυγός «0» συνδέεται με το κύριο δίκτυο.
- Ο ζυγός 11 τροφοδοτείται επιπλέον από μονάδα διανεμημένης παραγωγής.
- Οι απαιτήσεις σε ισχύ διαφέρουν ανά ζυγό γεγονός που προσομοιάζεται και στο Σχήμα 4.2, ανάλογα με τη διάμετρο του κύκλου του κάθε ζυγού φορτίου.

Στο σύστημα προστέθηκαν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας προκειμένου να παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια όποτε απαιτείται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η συμπεριφορά του δικτύου διανομής σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, την κανονική και την έκτακτη κατάσταση λειτουργίας.

Η κανονική κατάσταση λειτουργίας αφορά την πιο συνηθισμένη κατάσταση όπου το δίκτυο δεν αντιμετωπίζει κάποια δυσλειτουργία οποιασδήποτε μορφής και έτσι ικανοποιούνται οι ανάγκες των ζυγών χωρίς πρόβλημα. Στην κατάσταση αυτή οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας δεν αξιοποιούν την φορητότητα καθώς δεν υπάρχει κάποια γραμμή του δικτύου που να έχει τεθεί εκτός λειτουργίας. Έτσι, ο ρόλος τους στη περίπτωση αυτή όπως θα φανεί στο Κεφάλαιο 6 είναι η εξισορροπητική κερδοσκοπία (arbitrage).

Η έκτακτη κατάσταση λειτουργίας αφορά τις περιπτώσεις όπου υπάρχει διακοπή στο δίκτυο κυρίως λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων και ορισμένες γραμμές διανομής βγαίνουν εκτός λειτουργίας. Στο σενάριο αυτό οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας αξιοποιούν την ικανότητα μετακίνησης και παρέχουν στήριξη στους ζυγούς που έχουν αποκοπεί ώστε να εξυπηρετηθούν με επιτυχία οι καταναλωτές.

#### 4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Για την ανάλυση της κανονικής κατάστασης λειτουργίας του δικτύου είναι απαραίτητο να οριστεί το εξής σύνολο σχετικά με το δίκτυο:

- $N^{ES}$  : Σύνολο των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας

Πέρα από τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στην Ενότητα 4.3, η μοντελοποίηση της κανονικής κατάστασης λειτουργίας καθιστά απαραίτητη τη χρήση των παρακάτω μεγεθών:

- $P_{m,i,t}^{charge}$ ,  $Q_{m,i,t}^{charge}$ : Ενεργός και άεργος ισχύς που παρείχε το δίκτυο διανομής στην μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, αντίστοιχα.
- $P_{m,i,t}^{discharge}$ ,  $Q_{m,i,t}^{discharge}$ : Ενεργός και άεργος ισχύς που παρείχε η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο διανομής, αντίστοιχα.
- $P_{i,t}^g$ ,  $Q_t^g$ : Ενεργός και άεργος ισχύς που παρέχει η γεννήτρια στο δίκτυο διανομής στον ζυγό  $i$ , αντίστοιχα.

- $P_{i,t}^{slack}, Q_{i,t}^{slack}$ : Ενεργός και άεργος ισχύς που παρέχει το κύριο δίκτυο στον ζυγό  $i$ , αντίστοιχα.
- $C_t^g$ : Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από τη γεννήτρια στο δίκτυο διανομής.
- $C_t^{slack}$ : Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το κύριο δίκτυο στο δίκτυο διανομής.
- $OC$ : Κόστος κανονικής κατάστασης λειτουργίας.

Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$OC = \sum_{\substack{t \in T \\ i \in NB}} C_t^g * P_{i,t}^g + \sum_{\substack{t \in T \\ i \in NL}} C_t^{slack} * P_{i,t}^{slack} + \sum_{\substack{k \in Nes \\ t \in T \\ i \in NB}} D * (P_{m,i,t}^{charge} + P_{m,i,t}^{discharge}) \quad (4.10)$$

$$i \in N^B, t \in T, m \in N^{ES}$$

όπου ο παράγοντας  $D$  αναλύεται στην [17] και αφορά το κόστος «φθοράς» της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (degradation cost). Η αντικειμενική συνάρτηση προσομοιάζει δηλαδή το συνολικό κόστος τροφοδότησης του δικτύου διανομής από το κύριο δίκτυο και τη γεννήτρια καθώς και το κόστος «φθοράς» της μπαταρίας.

Με την προσθήκη της γεννήτριας και των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας οι εξισώσεις (4.3) και (4.4) παίρνουν την μορφή:

$$\begin{aligned} \sum_i (P_{ij,t} - P_{ji,t}) - P_{i,t}^d + P_{i,t}^{slack} + P_{i,t}^g + \sum_m (P_{m,i,t}^{discharge}) - \sum_m (P_{m,i,t}^{charge}) - R_{ij} * I_{ij,t}^2 \\ = \sum_k (P_{jk,t} - P_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T, m \in N^{ES} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \sum_i (Q_{ij,t} - Q_{ji,t}) - Q_{i,t}^d + Q_{i,t}^{slack} + Q_{i,t}^g + \sum_k (Q_{m,i,t}^{discharge}) - \sum_k (Q_{m,i,t}^{charge}) - X_{ij} * I_{ij,t}^2 \\ = \sum_k (Q_{jk,t} - Q_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T, m \in N^{ES} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Για τη μοντελοποίηση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας ορίζονται τα εξής:

- $e_{m,t}$ : Κατάσταση φόρτισης μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.
- $EF$ : Απόδοση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.
- $E_m$ : Χωρητικότητα μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.
- $P_k$ : Μέγιστη τιμή ενεργού ισχύος που μπορεί να μεταφέρει η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας

- $z_{mi}$ : δυαδική μεταβλητή η οποία είναι 1 εάν η μονάδα αποθήκευσης  $m$  βρίσκεται στον ζυγό  $i$  και 0 διαφορετικά.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας αφορούν την κατάσταση φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας καθώς και περιορισμούς στην ισχύ που μπορεί να φορτίσει και να εκφορτίσει η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας κάθε χρονική στιγμή.

$$e_{m,t} = e_{m,t-1} + \sum_{i \in N^B} \left( P_{m,i,t}^{\text{charge}} * EF - \frac{P_{m,i,t}^{\text{discharge}}}{EF} \right), \quad i \in N^B, t \in T, m \in N^{ES} \quad (4.13)$$

$$0 < e_{m,t} < E_m, t \in T, m \in N^{ES} \quad (4.14)$$

$$e_{m,t_0} = 0,5 * E_m, m \in N^{ES} \quad (4.15)$$

$$0 \leq P_{m,i,t}^{\text{charge}} \leq P_m * z_{ki}, t \in T, i \in N^B, m \in N^{ES} \quad (4.16)$$

$$0 \leq P_{m,i,t}^{\text{discharge}} / EF \leq P_m * z_{mi}, t \in T, i \in N^B, m \in N^{ES} \quad (4.17)$$

#### 4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στην κατάσταση έκτακτης λειτουργίας ενδέχεται να υπάρξει απόρριψη φορτίου σε περίπτωση που το δίκτυο δεν επιτύχει να εξυπηρετήσει πλήρως κάποιον ζυγό. Επομένως, για την προσομοίωση της έκτακτης λειτουργίας κρίνεται απαραίτητο να οριστούν τα εξής:

- $\sigma_{i,t}$ : δυαδική μεταβλητή η οποία είναι 1 εάν το φορτίο του ζυγού  $i$  εξυπηρετείται και 0 διαφορετικά.
- $C^{\text{voll}}$ : κόστος απόρριψης φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας.
- $EC$ : κόστος έκτακτης κατάστασης λειτουργίας.

Σε αυτήν την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την εξής μορφή:

$$EC = \sum_{t \in T} C_t^g * P_{i,t}^g + \sum_{t \in T} C_t^{\text{slack}} * P_{i,t}^{\text{slack}} + \sum_{\substack{k \in N^{\text{es}} \\ t \in T \\ i \in N^B}} D * (P_{m,i,t}^{\text{charge}} + P_{m,i,t}^{\text{discharge}}) + \sum_{\substack{t \in T \\ i \in N^B}} (C^{\text{voll}} * (1 - \sigma_{i,t}) * P_{i,t}^d) \quad (4.18)$$

Συνεπώς, στην αντικειμενική συνάρτηση της κανονικής κατάστασης λειτουργίας προστίθεται το κόστος απόρριψης φορτίου.

Επίσης οι εξισώσεις ροής ενέργειας (4.11) και (4.12) παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} \sum_i (P_{ij,t} - P_{ji,t}) - \sigma_{i,t} * P_{i,t}^d + P_{i,t}^{slack} + P_{i,t}^g + \sum_m (P_{m,i,t}^{discharge}) - \sum_m (P_{m,i,t}^{charge}) - R_{ij} \\ * I_{ij,t}^2 = \sum_k (P_{jk,t} - P_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T, m \in N^{ES} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \sum_i (Q_{ij,t} - Q_{ji,t}) - \sigma_{i,t} * Q_{i,t}^d + Q_{i,t}^{slack} + Q_{i,t}^g + \sum_m (Q_{m,i,t}^{discharge}) - \sum_m (Q_{m,i,t}^{charge}) - X_{ij} \\ * I_{ij,t}^2 = \sum_k (Q_{jk,t} - Q_{kj,t}) \quad i, j, k \in N^B, t \in T, m \in N^{ES} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Δεδομένου ότι σε αυτό το σενάριο λειτουργίας αξιοποιείται η δυνατότητα μετακίνησης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας, ορίζεται η δυαδική μεταβλητή:

- $u_{mi,t}$ : δυαδική μεταβλητή η οποία είναι 1 εάν η μονάδα αποθήκευσης  $m$  βρίσκεται στον ζυγό  $i$  την χρονική στιγμή  $t$  και 0 διαφορετικά.

Έτσι, οι εξισώσεις (4.16) και (4.17) παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$0 \leq P_{m,i,t}^{charge} \leq P_m * u_{mi,t} \quad t \in T, i \in N^B, m \in N^{ES} \quad (4.21)$$

$$0 \leq P_{m,i,t}^{discharge} / EF \leq P_m * u_{mi,t}, \quad t \in T, i \in N^B, m \in N^{ES} \quad (4.22)$$

Επιπλέον, η μοντελοποίηση της μετακίνησης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας από έναν ζυγό σε έναν άλλον περιγράφεται στην ακόλουθη σχέση:

$$u_{mi,t} - u_{mi,t+1} \leq 1 - u_{mj,t+\tau}, \quad t \in T, i \neq j \in N^B, m \in N^{ES}, \tau \in [1, \dots, \min(T_{m,i,t}^d)] \quad (4.23)$$

#### 4.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Στις Ενότητες 4.4 και 4.5 αναλύονται η κανονική και έκτακτη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου διανομής. Ωστόσο, τα δύο αυτά σενάρια δεν είναι ισοπίθανα και συνεπώς για την μοντελοποίηση του συνδυασμού των σεναρίων είναι αναγκαίο να οριστούν τα παρακάτω μεγέθη:

- $\omega_o$ : πιθανότητα να επικρατεί κανονική κατάσταση λειτουργίας
- $\omega_e$ : πιθανότητα να επικρατεί έκτακτη κατάσταση λειτουργίας
- $\gamma$ : ημερήσιος συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου

Σκοπός του προβλήματος που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία είναι η ελαχιστοποίηση της εξής αντικειμενικής συνάρτησης:

$$OBF = \omega_o * OC + \omega_e * EC + \gamma * IC \quad (4.24)$$

όπου ο παράγοντας IC αφορά το κόστος της επένδυσης σε μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και υλοποιήθηκε ως εξής:

$$IC = \sum_m (C^P * P_k * C^E * E_m) \quad (4.25)$$

- $C^P$ : Τιμή αξιολόγησης ισχύος μίας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας
- $C^E$ : Τιμή αξιολόγησης ενέργειας μίας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας

#### 4.7 ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το πρόβλημα που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες του Κεφαλαίου 4 είναι μη γραμμικό, γεγονός που κάνει την επίλυσή του αρκετά πολύπλοκη. Προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκαν οι εξής απλοποιήσεις:

- Από τις εξισώσεις (4.11) και (4.19) αφαιρέθηκε ο όρος  $R_{ij} * I_{ij,t}^2$ .
- Από τις εξισώσεις (4.12) και (4.20) αφαιρέθηκε ο όρος  $X_{ij} * I_{ij,t}^2$ .
- Από την εξίσωση που αφορά τη πτώση τάσης (4.5) αφαιρέθηκε ο όρος  $(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) * I_{ij,t}^2$ .

Συνεπώς, στις εξισώσεις ροής ισχύος αγνοήθηκαν οι απώλειες ενέργειας των γραμμών καθώς το πρόβλημα με τις αλλαγές αυτές μετατρέπεται από MINLP (mixed integer non linear programming) σε MILP (mixed integer linear programming). Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια το πρόβλημα να λύνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα και να μειώνεται η πιθανότητα λάθους που υπήρχε στην προηγούμενη περίπτωση λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζουν συχνά οι επιλύτες στα σύνθετα MINLP προβλήματα. Ωστόσο, οι απλοποιήσεις αυτές πέρα του ότι έκαναν το πρόβλημα ευκολότερα επιλύσιμο επιφέρουν και μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα καθώς οι απώλειες των γραμμών έχουν αγνοηθεί.

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την περιγραφή του προβλήματος και των εξισώσεων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 είναι το GAMS (General Algebraic Modeling System). Αντιπροσωπεύει ένα προηγμένο σύστημα λογισμικού που εξυπηρετεί ως υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού και περιβάλλον σχεδίασης μοντέλων για προβλήματα βελτιστοποίησης. Η κύρια λειτουργία του είναι η διευκόλυνση της διαδικασίας δημιουργίας, περιγραφής και λύσης μαθηματικών μοντέλων που αφορούν προβλήματα βελτιστοποίησης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού που το καθιστούν εύχρηστο είναι:

- Παρέχει μια υψηλού επιπέδου γλώσσα μοντελοποίησης που επιτρέπει στους χρήστες να εκφράζουν μαθηματικά μοντέλα για προβλήματα βελτιστοποίησης με συνοπτικό και ευανάγνωστο τρόπο. Ταυτόχρονα, διευκολύνει τη μετάφραση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου σε μαθηματικές διατυπώσεις.
- Είναι ειδικά σχεδιασμένο για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών, της ενέργειας, της παραγωγής, της διαχείρισης πόρων και άλλων. Υποστηρίζει γραμμικό, μη γραμμικό, ακέραιο και μικτό ακέραιο προγραμματισμό.
- Οι χρήστες μπορούν να αναπαραστήσουν μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας αλγεβρικές εξισώσεις, γεγονός που διευκολύνει τη διατύπωση και επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς.
- Είναι ανεξάρτητο από επιλυτές, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέξουν από μια ποικιλία επιλυτών βελτιστοποίησης με βάση τις ειδικές απαιτήσεις του προβλήματός τους. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών επιλυτών χωρίς τροποποίηση του μοντέλου.
- Παρέχει προηγμένα εργαλεία για τη διαχείριση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων, των μεταβλητών και των περιορισμών. Αυτό βοηθά τους χρήστες να οργανώνουν και να χειρίζονται τα δεδομένα που σχετίζονται με τα μοντέλα βελτιστοποίησής τους.

- Υποστηρίζει εργαλεία γραφικής απεικόνισης, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν γραφήματα και διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μοντέλων βελτιστοποίησης.
- Έχει σχεδιαστεί για να είναι επεκτάσιμο, επιτρέποντας στους χρήστες να ενσωματώνουν προσαρμοσμένους αλγόριθμους και λειτουργίες για να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις μοντελοποίησης ή λύσεων [18].

## 5.2 ΣΥΝΤΑΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

Η σύνταξη του κώδικα βελτιστοποίησης για το πρόβλημα που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 βασίζεται στις κύριες εντολές που προσφέρει το λογισμικό. Οι κυριότερες από τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- **Sets:** Τα σύνολα στο GAMS αντιπροσωπεύουν σύνολα δεικτών που καθορίζουν τις διαστάσεις των μεταβλητών απόφασης, των παραμέτρων και των εξισώσεων. Χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση και την οργάνωση των οντοτήτων που εμπλέκονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης.
- **Parameters:** Οι παράμετροι στο GAMS χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό σταθερών τιμών που σχετίζονται με το μοντέλο. Αυτές μπορεί να είναι συντελεστές, κόστη ή άλλες αριθμητικές τιμές. Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται συχνά για να αντιπροσωπεύουν δεδομένα εισόδου ή σταθερές παραμέτρους στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- **Variables:** Οι μεταβλητές απόφασης στο GAMS αντιπροσωπεύουν τα μεγέθη ή τις τιμές που επιδιώκει να προσδιορίσει η διαδικασία βελτιστοποίησης. Αυτές οι μεταβλητές είναι οι άγνωστοι του μαθηματικού μοντέλου και αποτελούν αντικείμενο βελτιστοποίησης.
- **Scalars:** Είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν μεμονωμένες τιμές σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης. Απλουστεύουν τον κώδικα κρατώντας σταθερές αριθμητικές τιμές, όπως συντελεστές ή κόστη.
- **Equations:** Οι εξισώσεις στο GAMS αντιπροσωπεύουν μαθηματικές σχέσεις ή περιορισμούς στο μοντέλο βελτιστοποίησης. Μπορούν να περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, παραμέτρους και άλλες μαθηματικές εκφράσεις. Οι περιορισμοί χρησιμοποιούνται για να αντικατοπτρίζουν τους περιορισμούς ή τις απαιτήσεις του συστήματος που μοντελοποιείται.
- **Model:** Η δομή του μοντέλου GAMS περιλαμβάνει τον καθορισμό των συνόλων, των παραμέτρων, των μεταβλητών, των εξισώσεων και της αντικειμενικής συνάρτησης που θα αποτελούν το προς επίλυση μοντέλο.

- **Option:** Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διαφόρων πτυχών της διαδικασίας μοντελοποίησης και επίλυσης. Μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του επιλύτη, την εμφάνιση των αποτελεσμάτων και άλλες ρυθμίσεις κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.
- **Solve:** Με την εντολή αυτή καθορίζεται το μοντέλο που θέλουμε να επιλυθεί, το είδος του προγραμματισμού που επιθυμούμε να εφαρμοστεί καθώς και τον στόχο της επίλυσης. Για παράδειγμα, στόχος της επίλυσης μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης του μοντέλου.
- **Display:** Η εντολή αυτή ακολουθεί την εντολή solve και χρησιμοποιείται για να ορίσουμε το τι αποτελέσματα θα θέλαμε να μας εμφανίσει όταν λυθεί το πρόβλημα που έχει στηθεί.

### 5.3 ΕΠΙΛΥΤΗΣ BONMIN

Το GAMS προσφέρει μια ευέλικτη σειρά επιλυτών που καλύπτουν ποικίλες ανάγκες βελτιστοποίησης, καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε διάφορους κλάδους. Η ευελιξία στην επιλογή επιλυτών επιτρέπει στους χρήστες να αντιμετωπίσουν ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης, από γραμμικό και μη γραμμικό προγραμματισμό έως μικτούς ακέραιους. Είτε ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, η μεγιστοποίηση των κερδών ή η επίτευξη άλλων στόχων, το GAMS παρέχει μια ολοκληρωμένη σουίτα επιλυτών που προσαρμόζονται σε διαφορετικές δομές προβλημάτων. Αυτή η ευελιξία επεκτείνει τη δυνατότητα εφαρμογής του GAMS σε σενάρια στην οικονομία, τη μηχανική, τη χρηματοοικονομική και όχι μόνο.

Οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα συγκεκριμένων επιλυτών με βάση την πολυπλοκότητα και τη μαθηματική φύση των μοντέλων βελτιστοποίησής τους. Με ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας και απρόσκοπτη ενσωμάτωση, οι επιλύτες του GAMS δίνουν τη δυνατότητα στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να διερευνούν και να βρίσκουν αποτελεσματικά τις βέλτιστες λύσεις σε ένα πλήθος πλαισίων λήψης αποφάσεων.

Όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 4.7, το πρόβλημα της διπλωματικής εργασίας αρχικά ανήκε στην κατηγορία των MINLP προβλημάτων. Για τον λόγο αυτό επιλέχτηκε ο επιλύτης BONMIN ο οποίος διαθέτει τους εξής αλγορίθμους:

- B-BB : Branch-and-bound
- B-OA : Outer-Approximation
- B-QG : Branch-and-cut of Quesada and Grossmann's
- B-Hyb : Hybrid B-OA

Όταν εφαρμόστηκε η γραμμικοποίηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το πρόβλημα που προέκυψε ανήκε στη κατηγορία MILP. Παρά το γεγονός ότι ο επιλύτης BONMIN ειδικεύεται στα προβλήματα MINLP, στην προκειμένη περίπτωση μπόρεσε να δώσει λύσεις και στο απλοποιημένο μοντέλο. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις ο επιλύτης του προβλήματος παρέμεινε ίδιος.



## 5.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Μόλις ολοκληρωθεί η διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου (Κεφάλαιο 4), για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με χρήση του λογισμικού GAMS, τα βήματα που πρέπει να γίνουν τα εξής:

- Εισαγωγή δεδομένων, παραμέτρων και πινάκων (όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.1 έως 5.4).

```

Set
  i      / 0*14 /
  Bus(i) /4/
  g      /g1/
  dg     /dg1/
  t      /t1*t24/
  ES     /es1/
  s      /s2/;

Alias (i,j);
Alias (i,k);
Alias (t,o);

Scalar Sbase /1/
       Ef /0.9/
       Ek / 1/
       Pk /0.17/
       L /1000/
       Nt /24/
       Cp /1000/
       Ce /50/ ;

Parameter CDgen(t)

/ t1 31
  t2 30
  t3 32
  t4 33
  t5 32
  t6 38
  t7 30
  t8 31
  t9 32
  t10 40
  t11 36
  t12 32
  t13 30
  t14 31
  t15 30
  t16 37
  t17 39
  t18 32
  t19 34
  t20 35
  t21 37
  t22 38
  t23 32
  t24 36/;

```

← SETS

← ΣΤΑΘΕΡΕΣ

← ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Σχήμα 5.1 : Δεδομένα εισόδου

Parameter Cslack(t)

```

/ t1  45
  t2  46
  t3  47
  t4  46
  t5  48
  t6  55
  t7  45
  t8  46
  t9  48
  t10 55
  t11 43
  t12 46
  t13 48
  t14 49
  t15 50
  t16 45
  t17 55
  t18 48
  t19 46
  t20 48
  t21 53
  t22 50
  t23 47
  t24 49/;

```

← ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

ΠΙΝΑΚΑΣ

Table Trans(i,j)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	1	2	3	4	5	6	5	4	5	6	7	1	2	3
1	1	0	1	2	3	4	6	4	3	4	5	6	2	3	4
2	2	1	0	1	2	3	4	3	2	3	4	5	3	4	5
3	3	2	1	0	1	2	3	2	1	2	3	4	4	5	6
4	4	3	2	1	0	1	2	3	2	3	4	5	5	6	7
5	5	4	3	2	1	0	1	4	3	4	5	6	6	7	8
6	6	5	4	3	2	1	0	5	4	5	6	7	7	8	9
7	5	4	3	2	3	4	5	0	1	2	3	4	6	7	8
8	4	3	2	1	2	3	4	1	0	1	2	3	5	6	7
9	5	4	3	2	3	4	5	2	1	0	1	2	6	7	8
10	6	5	4	3	4	5	6	3	2	1	0	1	7	8	9
11	7	6	5	4	5	6	7	4	3	2	1	0	8	9	10
12	1	2	3	4	5	6	7	6	5	6	7	8	0	1	2
13	2	3	4	5	6	7	8	7	6	7	8	9	1	0	1
14	3	4	5	6	7	8	9	8	7	8	9	10	2	1	0;

Σχήμα 5.2 : Δεδομένα εισόδου

```
Parameter Pd(i)
/
0      0
1      0.13
2      0.02
3      0.02
4      0.05
5      0.03
6      0.022 ← ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
7      0.021
8      0.024
9      0.023
10     0.022
11     0.013
12     0.13
13     0.13
14     0.022/ ;

Parameter Qd(i)
/
0      0
1      0.039
2      0.0006
3      0.0006
4      0.015
5      0.009
6      0.0066 ← ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
7      0.0063
8      0.0072
9      0.0069
10     0.0066
11     0.0039
12     0.039
13     0.039
14     0.0066 / ;
```

Σχήμα 5.3 : Δεδομένα εισόδου

```

Set conex 'bus connectivity matrix'
/0.1
 1.2
 2.3
 3.4
 4.5
 5.6
 3.8
 8.7
 8.9
 9.10
10.11
 0.12
12.13
13.14
/;

Set Importconnect (i,g)      Connectivity of imports ← SETS
/  0.g1/;

Set Importconnect2 (i,dg)    Connectivity of imports ← SETS
/ 11.dg1/;

Table branch (i,j,*)
      R      X
 0.1  0.002  0.001
 1.2  0.002  0.001
 2.3  0.002  0.001
 3.4  0.002  0.001
 4.5  0.002  0.001
 5.6  0.002  0.001
 3.8  0.002  0.001
 8.7  0.002  0.001
 8.9  0.002  0.001
 9.10 0.002  0.001
10.11 0.002  0.001
 0.12 0.002  0.001
12.13 0.002  0.001
13.14 0.002  0.001;

```

← ΠΙΝΑΚΑΣ

Σχήμα 5.4 : Δεδομένα εισόδου

- Καθορισμός μεταβλητών και σταθερών τιμών που παίρνουν οι μεταβλητές αυτές (Σχήμα 5.5).

```

Variable OF, v(i,t,s), Plosses(i,j,t,s), Qlosses(i,j,t,s), Pslack(g,t,s),
Qslack(g,t,s), Ptrans(i,j,t,s), Qtrans(i,j,t,s), E(es,t,s);
Positive Variable ac(i,j,t,s), re(i,j,t,s), inac(i,j,t,s), inre(i,j,t,s),
AMP(i,j,t,s), Pgen(dg,t,s), Qgen(dg,t,s), Pcharge(es,i,t,s), Pdischarge(es,i,t,s),
LoadShedding(s);
Binary Variables demand(i,t,s), u(es,i,t);

Pgen.up(dg,t,s) = 0.4;
Qgen.up(dg,t,s) = 0.4;
Pslack.lo(g,t,s) = 0;
Pslack.up(g,t,s) = 2;
Qslack.lo(g,t,s) = 0;
Qslack.up(g,t,s) = 2;
v.lo(i,t,s) = 0.81;
v.up(i,t,s) = 1.21;
ac.fx(i,j,t,s)$(branch(i,j,'R')=0)=0;
re.fx(i,j,t,s)$(branch(i,j,'R')=0)=0;
inac.fx(i,j,t,s)$(branch(i,j,'R')=0)=0;
inre.fx(i,j,t,s)$(branch(i,j,'R')=0)=0;
v.fx('0',t,s)=1.05;
e.up(es,t,s)=EK;
e.lo(es,t,s)=0;
u.fx('es1','1','t1')=1;

```

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ  
 ΘΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ  
 ΔΥΑΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Σχήμα 5.5 : Καθορισμός μεταβλητών.

- Καθορισμός εξισώσεων του προβλήματος (Σχήματα 5.6 και 5.7).

**Equations** Pbal,Qbal,Voltdrop,Cost,Ptransfer,Qtransfer,StateOfCharge, ChargeLimit2,DischargeLimit2,Mobilelimit,Mobilelimit1,OutageModel,LoadShed;

Cost..

```
EC=e= sum((t,dg,s),CDgen(t)*Pgen(dg,t,s))+
      sum((t,g,s),Cslack(t)*Pslack(g,t,s))+
      sum((t,i,s),5000*(1-demand(i,t,s))*Pd(i))+
      sum((es,i,t,s),0.25*(Pcharge(es,i,t,s)+Pdischarge(es,i,t,s)));
```

Pbal(i,t,s)..

```
+SUM(j,ac(j,i,t,s)-inac(j,i,t,s))-SUM(k,ac(i,k,t,s)-inac(i,k,t,s))-
demand(i,t,s)*Pd(i)+sum(g$Importconnect(i,g),Pslack(g,t,s))+
sum(dg$Importconnect2(i,dg),Pgen(dg,t,s))+sum(es,Pdischarge(es,i,t,s))-
sum(es,Pcharge(es,i,t,s))=e=0;
```

Qbal(i,t,s)..

```
+SUM(j,re(j,i,t,s)-inre(j,i,t,s))-SUM(k,re(i,k,t,s)-inre(i,k,t,s))-
demand(i,t,s)*Qd(i)+
sum(g$Importconnect(i,g),Qslack(g,t,s))+
sum(dg$Importconnect2(i,dg),Qgen(dg,t,s))=e=0;
```

Voltdrop(i,j,t,s)\$conex(i,j)..

```
v(i,t,s)-v(j,t,s)-2*(branch(i,j,'R')*(ac(i,j,t,s)-inac(i,j,t,s))+
branch(i,j,'X')*(re(i,j,t,s)-inre(i,j,t,s)))=e=0;
```

Ptransfer(j,i,t,s)\$conex(j,i)..

```
Ptrans(j,i,t,s)=e=ac(j,i,t,s)-inac(j,i,t,s);
```

Qtransfer(j,i,t,s)\$conex(j,i)..

```
Qtrans(j,i,t,s)=e=re(j,i,t,s)-inre(j,i,t,s);
```

StateOfCharge(es,t,s)..

```
e(es,t,s)=e=0.5$(ord(t)=1)+e(es,t-1,s)$ord(t)>1+
sum(i,(Pcharge(es,i,t,s)*Ef-Pdischarge(es,i,t,s)/EF));
```

ChargeLimit2(es,t,s,i)..

```
Pcharge(es,i,t,'s2')=l=Pk*u(es,i,t);
```

DischargeLimit2(es,t,s,i)..

```
Pdischarge(es,i,t,'s2')/Ef=l=Pk*u(es,i,t);
```

MobileLimit(es,i,j,t,o)..

```
u(es,i,t)-u(es,i,t+1)=l=
```

```
1-u(es,j,t+ord(o))$(ord(o)<=min((Trans(i,j)),Nt-ord(t))AND ord(o)>=1);
```

Σχήμα 5.6: Καθορισμός εξισώσεων

```

MobileLimit1(es,t)..
    sum(i,u(es,i,t))=l=1;

OutageModel(i,j,t,s)..
    (ac('8','9',t,'s2') + inac('8','9',t,'s2'))$(ord(t)>=7)=e=0;

LoadShed(s)..
    LoadShedding(s)=e= sum((i,t),(1-demand(i,t,s))*Pd(i));

```

Σχήμα 5.7: Καθορισμός εξισώσεων

- Καθορισμός επιλύτη του προβλήματος καθώς και το ζητούμενο της βελτιστοποίησης. Με άλλα λόγια καθορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και το εάν θέλουμε μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση αυτής. Τέλος, ορίζεται τι αποτελέσματα θέλει ο χρήστης να εξάγει με την εντολή Display (Σχήμα 5.8).

```

MODEL Powerflow /all/ ;

option mip=bonmin;

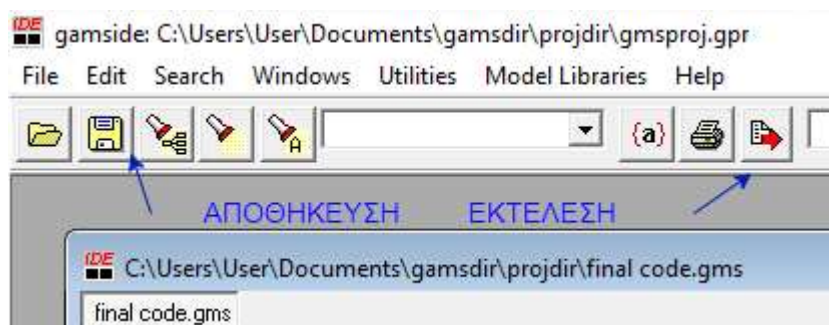
SOLVE Powerflow USING mip MINIMIZING EC;

Display OF.1 , v.1, Pgen.1, Qgen.1, ac.1, re.1, inac.1,
    inre.1,Ptrans.1,Qtrans.1,Pslack.1, Qslack.1,Pcharge.1,
    e.1,Pdischarge.1,demand.1,u.1,LoadShedding.1;

```

Σχήμα 5.8: Καθορισμός επιλύτη και αντικειμενικής συνάρτησης

- Εφόσον ολοκληρώθηκε ο κώδικας του προβλήματος ακολουθεί η αποθήκευση και εκτέλεση ώστε να παρθούν τα αποτελέσματα που ορίσαμε (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Αποθήκευση και εκτέλεση

- Με την εκτέλεση του προγράμματος ανοίγει ένα νέο παράθυρο filename.lst όπου υπάρχουν τα αποτελέσματα που ζητήθηκαν (Σχήμα 5.10). Οι τελείες υποδηλώνουν την τιμή μηδέν και τα πεδία LOWER και UPPER αφορούν το κάτω και το πάνω όριο της μεταβλητής αντίστοιχα. Το πεδίο LEVEL δείχνει τη βέλτιστη τιμή που έδωσε η εκτέλεση του κώδικα.

		---- VAR Pslack				
		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
+	Compilation					
	Equation Listing	SO				
+	Equation					
	Column Listing	SC				
+	Column					
	Model Statistics	SOI				
	Solution Report	SO				
+	SolEQU					
-	SolVAR					
	OF					
	v					
	Pslack					
	Qslack					
	Ptrans					
	Qtrans					
	ac					
	re					
	inac					
	inre					
	Pgen					
	Qgen					
	LoadShedding					
	demand					
	Execution					
+	Display					
	g1.t1.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t2.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t3.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t4.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t5.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t6.s1	.	0.257	2.000	.	
	g1.t7.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t8.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t9.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t10.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t11.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t12.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t13.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t14.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t15.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t16.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t17.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t18.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t19.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t20.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t21.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t22.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t23.s1	.	0.622	2.000	.	
	g1.t24.s1	.	0.622	2.000	.	

Σχήμα 5.10: Αρχείο εξόδου και αποτελέσματα

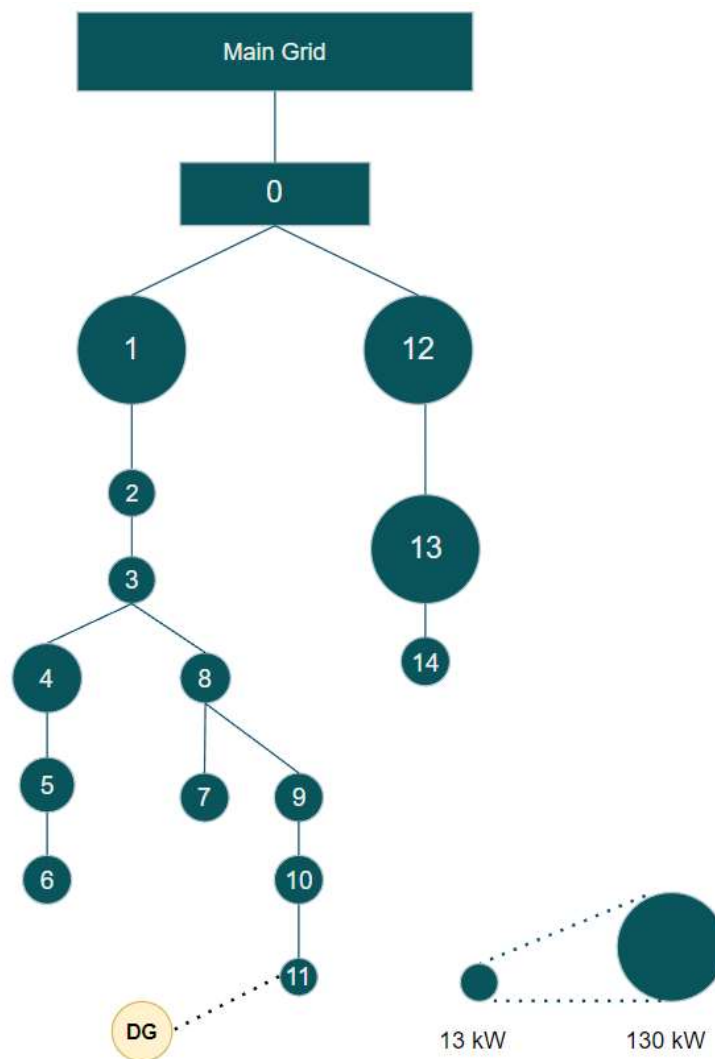




## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το δίκτυο διανομής στο οποίο βασίστηκε η διπλωματική εργασία (Σχήμα 6.1) είναι ακτινικό και περιλαμβάνει 15 ζυγούς.



Σχήμα 6.1 : Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 15 ζυγών

Το δίκτυο χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Η μοναδική επικοινωνία του δικτύου διανομής με το κύριο δίκτυο είναι μέσω του ζυγού «0».
- Στον κάθε ζυγό τα φορτία που εξυπηρετούνται δεν ξεπερνούν τα 130 kW ενώ το ελάχιστο φορτίο είναι 13 kW κάθε χρονικό διάστημα.
- Το δίκτυο υποστηρίζεται και από εφεδρικό τρόπο τροφοδότησης. Συγκεκριμένα, ο ζυγός «11» τροφοδοτείται επιπλέον από μία γεννήτρια η οποία κάθε χρονικό διάστημα μπορεί να παρέχει έως 0,4 MW.
- Για τις μελέτες που παρουσιάζονται στις Ενότητες 6.1, 6.2 και 6.3 χρησιμοποιήθηκαν 24 χρονικά διαστήματα, δηλαδή  $T=24$ .
- Το συνολικό φορτίο που πρέπει να εξυπηρετηθεί αυτά τα χρονικά διαστήματα είναι συνολικά 15,77 MW, ενώ κάθε χρονικό διαστήματα πρέπει να εξυπηρετηθούν 657 kW φορτίο.
- Ο χρόνος που απαιτείται για την μετακίνηση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας από οποιονδήποτε ζυγό προς γειτονικό ζυγό θεωρήθηκε ίσος με ένα χρονικό διάστημα.
- Όλες οι διακοπές που εξετάστηκαν στις ενότητες που ακολουθούν θεωρήθηκε ότι συνέβησαν την χρονική στιγμή  $t7$  και συνέχιζαν να υπάρχουν έως την χρονική στιγμή  $t24$ .

Όσον αναφορά τα κόστη που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές:

- $C^E = 50 \frac{\$}{\text{kWh}}$
- $C^P = 1000 \frac{\$}{\text{kW}}$
- $\bar{C}_t^g = 34 \frac{\$}{\text{MWh}}$  (στο Σχήμα 5.1 φαίνεται αναλυτικά το κόστος τροφοδότησης από την γεννήτρια κάθε χρονική στιγμή)
- $\bar{C}_t^{\text{slack}} = 48 \frac{\$}{\text{MWh}}$  (στο Σχήμα 5.2 φαίνεται αναλυτικά το κόστος τροφοδότησης από το κύριο δίκτυο κάθε χρονική στιγμή)
- $C^{\text{voll}} = 5000 \frac{\$}{\text{MWh}}$

Για τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας επιλέχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά που αναλύθηκαν επίσης στο Κεφάλαιο 4:

- $EF = 0,9$
- $E_k = 1 \text{ MWh}$
- $P_k = 0,17 \text{ MW}$
- Διάρκεια ζωής μπαταρίας 10 χρόνια

## 6.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΦΟΡΗΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στην ενότητα αυτή εξετάστηκε η συμβολή των φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε καταστάσεις έκτακτης λειτουργίας, δηλαδή σε καταστάσεις όπου ορισμένες γραμμές του δικτύου έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι διακοπές που μελετήθηκαν είναι δύο ειδών:

- Διακοπή σε μία γραμμή του δικτύου.
- Διακοπή σε δύο γραμμές του δικτύου.

Για τα δύο είδη διακοπών υπολογίστηκε η απόρριψη φορτίου που θα υπάρξει για τα εξής επιμέρους σενάρια:

- Χωρίς την παρουσία μονάδας αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο.
- Με την παρουσία σταθερής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο.
- Με την παρουσία φορητής μονάδας αποθήκευσης στο δίκτυο.

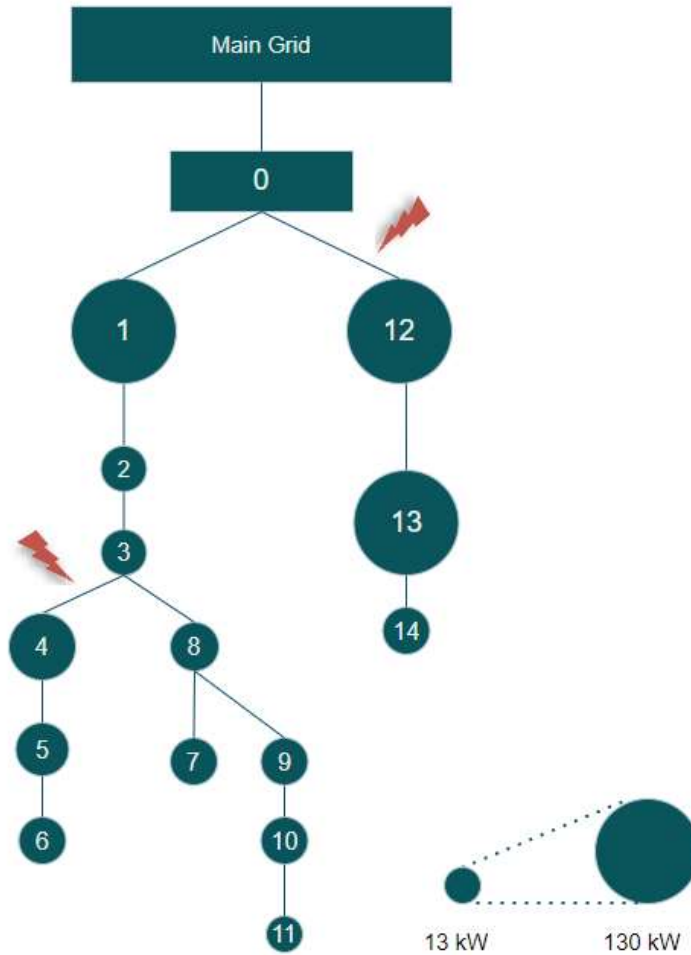
Στο σενάριο της σταθερής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας, η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας τοποθετήθηκε στον ζυγό «4» του δικτύου του Σχήματος 6.1, ενώ στο σενάριο της φορητής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας η μπαταρία την χρονική στιγμή  $t_0$  βρίσκεται στον ζυγό «1».

Όσον αναφορά τις διακοπές σε μία γραμμή του δικτύου διανομής, τα αποτελέσματα αναφορικά με την απόρριψη φορτίου φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1 :** Απόρριψη φορτίου σε σενάρια διακοπών μίας γραμμής του δικτύου

<b>Απόρριψη φορτίου σε MW</b>			
Σενάριο λειτουργίας	Χωρίς μπαταρία	Με σταθερή μπαταρία	Με φορητή μπαταρία
Διακοπή γραμμής 0-1	0	0	0
Διακοπή γραμμής 1-2	0	0	0
Διακοπή γραμμής 2-3	0	0	0
Διακοπή γραμμής 3-4	1,836	0,936	0,56
Διακοπή γραμμής 4-5	0,936	0,936	0,074
Διακοπή γραμμής 5-6	0,396	0,396	0
Διακοπή γραμμής 3-8	0	0	0
Διακοπή γραμμής 8-7	0,378	0,378	0
Διακοπή γραμμής 8-9	0	0	0
Διακοπή γραμμής 9-10	0	0	0
Διακοπή γραμμής 10-11	0	0	0
Διακοπή γραμμής 0-12	5,076	5,076	3,882
Διακοπή γραμμής 12-13	2,736	2,736	1,194
Διακοπή γραμμής 13-14	0,396	0,396	0
<b>Μέσος όρος</b>	<b>0,84</b>	<b>0,78</b>	<b>0,41</b>

Οι διακοπές δύο γραμμών (Σχήμα 6.2) έχουν εμφανώς δυσμενέστερα αποτελέσματα για το δίκτυο διανομής καθώς το δίκτυο αποκόπτεται σε περισσότερα σημεία. Έτσι, η απόρριψη φορτίου που προκύπτει για τις διακοπές δύο γραμμών που μελετήθηκαν φαίνεται στον Πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.2 : Διακοπή γραμμών 0-12 και 3-4 του δικτύου

**Πίνακας 6.2 :** Απόρριψη φορτίου σε σενάρια διακοπής δύο γραμμών του δικτύου

<b>Απόρριψη φορτίου σε MW</b>			
Σενάριο λειτουργίας	Χωρίς μπαταρία	Με σταθερή μπαταρία	Με φορητή μπαταρία
Διακοπή γραμμών 0-1 και 3-8	4,90	4,01	3,30
Διακοπή γραμμών 0-12 και 3-4	6,92	6,01	5,63
Διακοπή γραμμών 2-3 και 8-9	3,01	2,11	1,52
Διακοπή γραμμών 0-1 και 8-9	5,71	4,81	4,20
Διακοπή γραμμής 3-4 και 12-13	4,57	3,67	3,03
<b>Μέσος όρος</b>	<b>5,02</b>	<b>4,12</b>	<b>3,54</b>

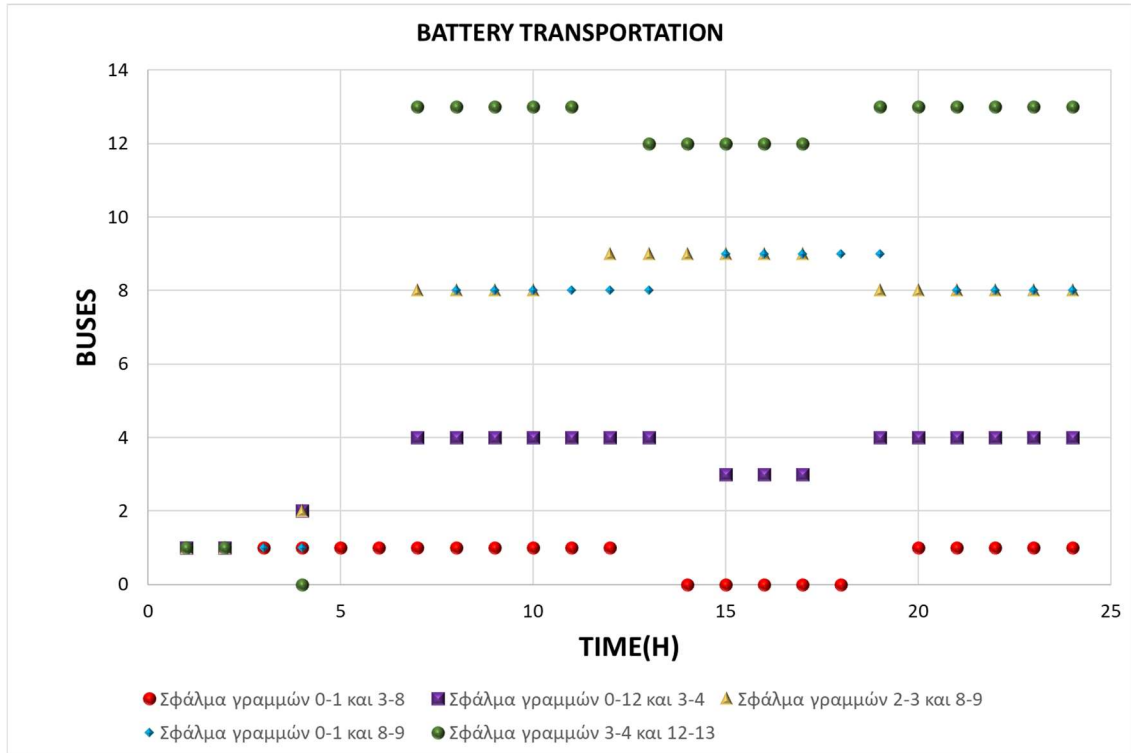
Επομένως, με την φορητή μονάδα αποθήκευσης εξυπηρετείται 1,48 MW φορτίο επιπλέον σε σύγκριση με το σενάριο απουσίας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας πράγμα που συνεπάγεται 29,48% μείωση απόρριψης φορτίου. Αντίστοιχα, σε σύγκριση με τη σταθερή μπαταρία επιτυγχάνεται εξυπηρέτηση επιπλέον 0,58 MW φορτίου δηλαδή η απόρριψη φορτίου μειώνεται κατά 14% .

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.2, το σενάριο με τη μεγαλύτερη απόρριψη φορτίου είναι η διακοπή των γραμμών 0–12 και 3–4. Στο σενάριο αυτό η μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μετακινήθηκε μεταξύ των ζυγών ώστε να στηρίξει το δίκτυο με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Η μετακίνηση της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας πραγματοποιήθηκε ως εξής και περιγράφεται επιπλέον στο Σχήμα 6.3.

- t0: Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «1» όπως έχει οριστεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.
- t1: Η μπαταρία παραμένει στον ζυγό «1» και φορτίζει μέσω του δικτύου.
- t2: Η μπαταρία παραμένει στον ζυγό «1» και φορτίζει μέσω του δικτύου.

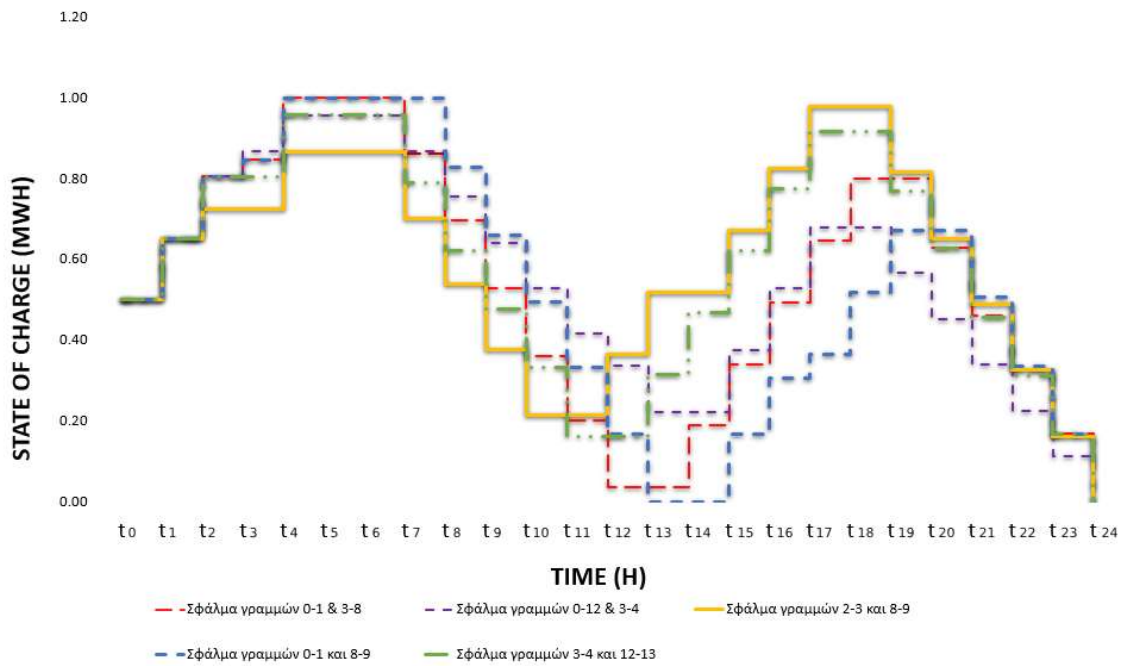
- t3 : Η μπαταρία μετακινείται από τον ζυγό «1» στον ζυγό «2».
- t4 : Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «2» και φορτίζει.
- t5: Η μπαταρία μετακινείται από τον ζυγό «2» στον ζυγό «3».
- t6 : Η μπαταρία μετακινείται από τον ζυγό «3» στον ζυγό «4».
- t7 : Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «4» και εκφορτίζει ώστε να στηρίξει το δίκτυο καθώς οι διακοπές πραγματοποιήθηκαν την t7.
- t8 : Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t9: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t10 : Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t11 : Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t12 : Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t13: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t14: Η μπαταρία μετακινείται από τον ζυγό «4» στον ζυγό «3» ώστε να μπορέσει να φορτίσει ξανά.
- t15: Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «3» και φορτίζει.
- t16: Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «3» και φορτίζει.
- t17: Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «3» και φορτίζει.
- t18 : Η μπαταρία μετακινείται από τον ζυγό «3» στον ζυγό «4».
- t19 : Η μπαταρία βρίσκεται στον ζυγό «4» και εκφορτίζει.
- t20: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t21: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t22: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t23: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».
- t24: Η μπαταρία εκφορτίζει στον ζυγό «4».





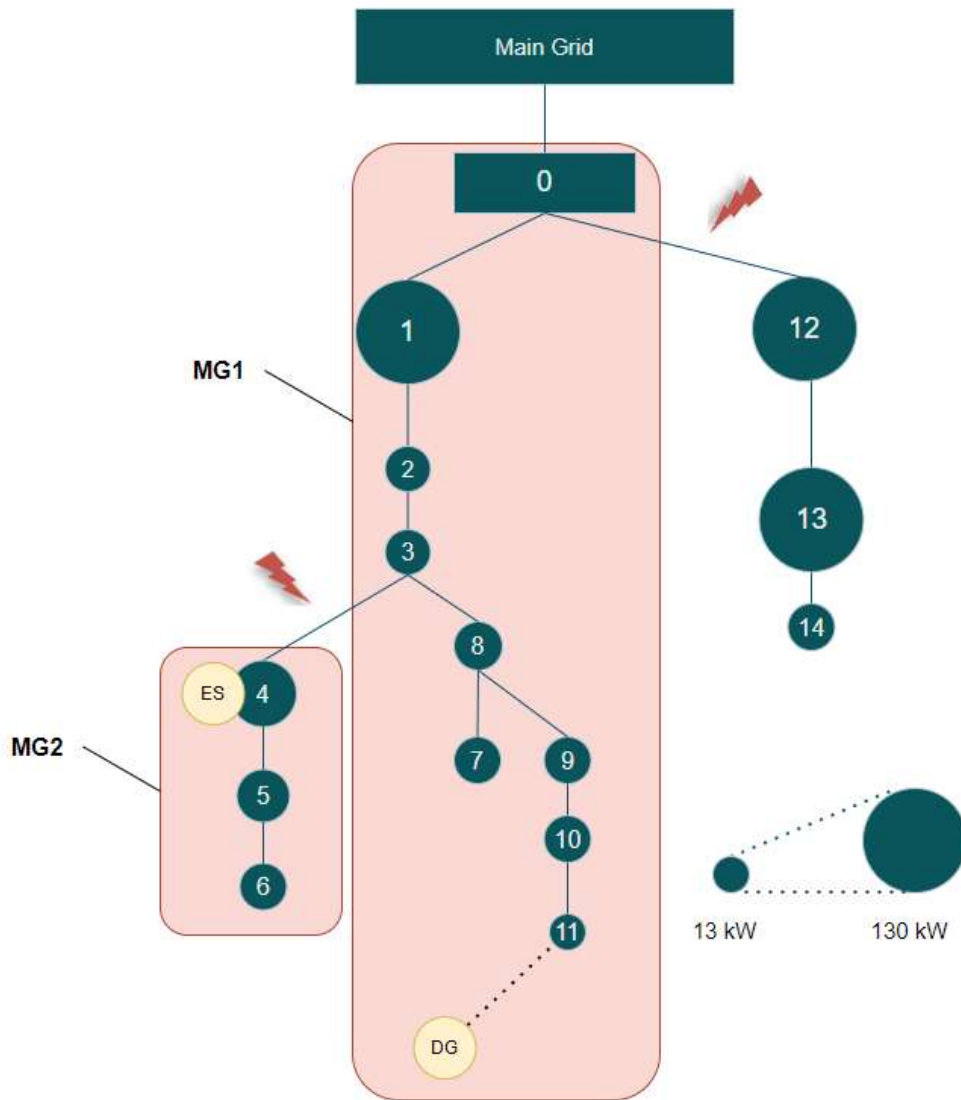
Σχήμα 6.3: Μετακίνηση μπαταρίας στα σενάρια διακοπών δύο γραμμών.

Αντίστοιχα με την θέση της μπαταρίας, στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας για όλα τα σενάρια διακοπών δύο γραμμών.



Σχήμα 6.4: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας για σενάρια διακοπών δύο γραμμών.

Στο παράδειγμα που αναλύθηκε για τη διακοπή των γραμμών 0–12 και 3–4 τις στιγμές όπου η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας βρίσκεται στον ζυγό 4 και εκφορτίζεται έχουν δημιουργηθεί δύο επιμέρους τοπικά δίκτυα (microgrids) ώστε να εξυπηρετηθούν τα φορτία όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Ωστόσο, οι ζυγοί «12», «13» και «14» παραμένουν αποκομμένοι από το δίκτυο σε όλη τη διάρκεια της έκτακτης κατάστασης λειτουργίας.



**Σχήμα 6.5:** Σύνθεση δύο μικροδικτύων (microgrids) στο σενάριο διακοπής των γραμμών 0–12 και 3–4

### 6.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΕ ΦΟΡΗΤΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Τα σενάρια που αναλύθηκαν στην Ενότητα 6.2 αποτελούν σενάρια έκτακτης κατάστασης λειτουργίας και η πιθανότητα να συμβούν είναι εμφανώς μικρότερη από το να επικρατεί κανονική κατάσταση λειτουργίας. Έτσι, για να αξιολογηθεί η επένδυση στις φορητές μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε ότι η πιθανότητα να μην υπάρχει κάποια διακοπή στο δίκτυο είναι 90% ενώ η πιθανότητα να συμβεί κάποια διακοπή που θα θέσει εκτός λειτουργίας ορισμένες γραμμές είναι ίση με 10%. Οπότε σύμφωνα με την εξίσωση (4.24) έχουμε:

- $\omega_o = 0,9$  ή 90%
- $\omega_\varepsilon = 0,1$  ή 10%

Για να αξιολογηθεί η οικονομική συνεισφορά των φορητών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας ελέγχθηκε το συνολικό κόστος για το σύνολο των χρονικών διαστημάτων όπου μελετήθηκε το δίκτυο. Επομένως, στον Πίνακα 6.3 φαίνεται το συνολικό κόστος που θα είχε το δίκτυο διανομής ώστε να εξυπηρετήσει τα φορτία του χωρίς την ύπαρξη μπαταρίας, με την ύπαρξη σταθερής μπαταρίας καθώς και με την ύπαρξη φορητής μπαταρίας.

**Πίνακας 6.3 :** Κόστος σε \$ για την εξυπηρέτηση του δικτύου διανομής

Κόστος σε \$			
Σενάριο λειτουργίας	Χωρίς μπαταρία	Με σταθερή μπαταρία	Με φορητή μπαταρία
Πιθανότητα 90% επικράτησης κανονικής λειτουργίας και 10% έκτακτης λειτουργίας με διακοπή γραμμών 0-1 και 3-8	2954	2512	2173
Πιθανότητα 90% επικράτησης κανονικής λειτουργίας και 10% έκτακτης λειτουργίας με διακοπή γραμμών 0-12 και 3-4	3948	3506	3321
Πιθανότητα 90% επικράτησης κανονικής λειτουργίας και 10% έκτακτης λειτουργίας με διακοπή γραμμών 2-3 και 8-9	2019	1578	1296
Πιθανότητα 90% επικράτησης κανονικής λειτουργίας και 10% έκτακτης λειτουργίας με διακοπή γραμμών 0-1 και 8-9	3356	2915	2615
Πιθανότητα 90% επικράτησης κανονικής λειτουργίας και 10% έκτακτης λειτουργίας με διακοπή γραμμών 3-4 και 12-13	2786	2344	2028
<b>Μέσος όρος</b>	<b>3012</b>	<b>2571</b>	<b>2287</b>

Συνεπώς, με τη φορητή μονάδα αποθήκευσης παρατηρείται μείωση τους κόστους κατά 24% σε σύγκριση με την απουσία μπαταρίας καθώς και 11% σε σύγκριση με την ύπαρξη σταθερής μπαταρίας.

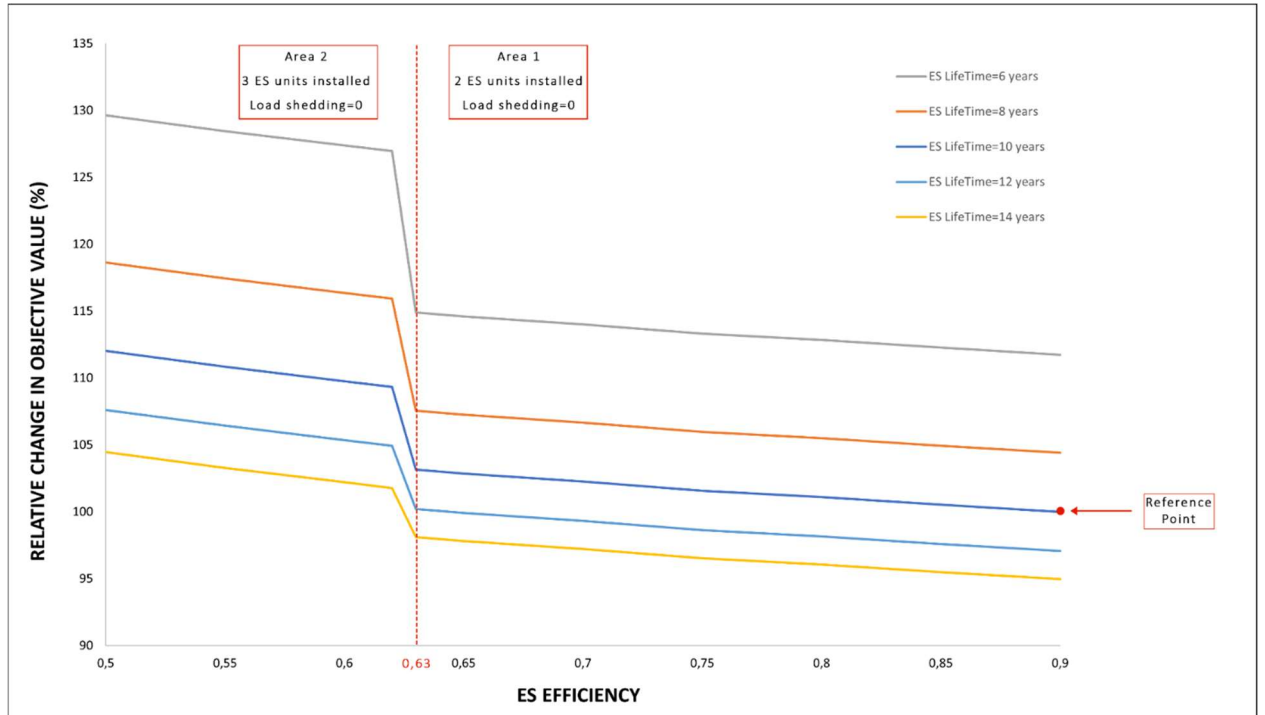
#### 6.4 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Οι μελέτες των Ενοτήτων 6.2 και 6.3 βασίστηκαν στα ακόλουθα στοιχεία των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας:

- $EF = 0,9$
- $E_k = 1 \text{ MWh}$
- $P_k = 0,17 \text{ MW}$
- Διάρκεια ζωής μπαταρίας 10 χρόνια

Θεωρήθηκε σημαντικό να εξεταστεί η επιρροή της διάρκειας ζωής της μπαταρίας καθώς και της αποδοτικότητάς της. Έτσι, για το σενάριο διακοπής της γραμμής 3–4 με πιθανότητα 10% και με πιθανότητα 90% να επικρατεί η κανονική κατάσταση λειτουργίας παρατηρήθηκε η αλλαγή που επιφέρουν στην αντικειμενική συνάρτηση (4.23) τόσο η διάρκεια ζωής όσο και η αποδοτικότητα των μπαταριών. Σαν σημείο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το σενάριο 10 χρόνων διάρκεια ζωής μπαταρίας με αποδοτικότητα 0,9.

Στο Σχήμα 6.6 γίνεται κατανοητό ότι η μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας επιφέρει αύξηση του κόστους καθώς και ότι η μείωση της αποδοτικότητας της μπαταρίας συνεπάγεται άμεσα αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Δεδομένου ότι η αντικειμενική συνάρτηση προσομοιάζει το κόστος λειτουργίας του δικτύου η μείωση της αποδοτικότητας της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαν άμεση συνέπεια την αναγκή τροφοδότησης του δικτύου διανομής από το κύριο δίκτυο ή τη γεννήτρια με επιπλέον ενέργεια ώστε να καλυφτούν οι ανάγκες των καταναλωτών. Επίσης, η ανάγκη αντικατάστασης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε μικρότερο χρονικό διάστημα προσθέτει κόστος λειτουργίας στο δίκτυο πράγμα που αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.6.



**Σχήμα 6.6:** Επίδραση διάρκειας ζωής και αποδοτικότητας μονάδων αποθήκευσης ενέργειας

Αναφορικά με την αποδοτικότητα της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, στο Σχήμα 6.6 φαίνεται ότι υπάρχει ένα σημείο όπου οι δύο μονάδες αποθήκευσης ενέργειας δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν πλήρως τα φορτία. Για αποδοτικότητες μικρότερες από 0,63 προκύπτει ότι χρειάζονται 3 μπαταρίες για να εξυπηρετήσουν το δίκτυο με μηδενική απόρριψη φορτίου ενώ για αποδοτικότητες μεγαλύτερες από 0,63 αρκούν δύο μπαταρίες για να καλύψουν τις ανάγκες.

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ****7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμβολή των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας και ιδιαίτερα των φορητών μονάδων αποθήκευσης σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Στοχεύοντας στην εύρεση τρόπων ώστε να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα των δικτύων διανομής, δηλαδή η άμυνα του δικτύου σε έκτακτες καταστάσεις όπως είναι οι πλημμύρες και άλλες φυσικές καταστροφές, εξετάστηκε η περίπτωση των φορητών μπαταριών. Η αντικειμενική συνάρτηση πάνω στην οποία βασίστηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης είχε ταυτόχρονα ως στόχο να μειώσει το κόστος λειτουργίας όλου του δικτύου διανομής καθώς και να μειώσει όσο περισσότερο γίνεται την απόρριψη φορτίου.

Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας του δικτύου, ο ρόλος των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας περιορίζεται μόνο στη μείωση του κόστους λειτουργίας του δικτύου καθώς φορτίζει τα χρονικά διαστήματα που παρατηρούνται χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά και εκφορτίζει όταν οι τιμές είναι υψηλές. Έτσι, το δίκτυο αγοράζει μικρότερη ποσότητα ενέργειας ώστε να εξυπηρετήσει τους καταναλωτές και τα φορτία του. Η συνεισφορά αυτή, όμως, δεν δικαιολογεί από μόνη της την επένδυση σε φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η ουσιαστικότερη συνεισφορά των μονάδων αυτών προκύπτει σε καταστάσεις έκτακτης λειτουργίας του δικτύου. Σε κατάσταση έκτακτης λειτουργίας του δικτύου οι φορητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μετακινούνται στο δίκτυο ώστε να παρέχουν στήριξη σε καταναλωτές και φορτία που έχουν αποκοπεί. Παρόλο που τα σενάρια αυτά δεν έχουν την ίδια συχνότητα με απλές καθημερινές διακοπές που εμπίπτουν στο φάσμα της αξιοπιστίας και όχι της ανθεκτικότητας του δικτύου διανομής, η σημασία τους είναι κρίσιμη. Οι συνέπειες που μπορεί να υπάρξουν από την αδυναμία τροφοδότησης ορισμένων ζυγών του δικτύου είναι ολέθριες τόσο σε κοινωνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

Λόγω αυτών προέκυψε το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Βάση της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ένα μοντέλο ροής ισχύος το οποίο επικεντρώνεται στις ροές ισχύος των κλάδων του δικτύου (branch power flow model). Στο μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε τόσο ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος όσο και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Στη συνέχεια έγινε απλοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης από MINLP σε MILP με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, πράγμα που κατέστησε το πρόβλημα πιο εύκολα επιλύσιμο με τη χρήση του λογισμικού GAMS.

Το μοντέλο που χτίστηκε και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, εφαρμόστηκε σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής 15 ζυγών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, γίνεται αντιληπτό ότι οι σταθερές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και σε μεγαλύτερο βαθμό οι φορητές μονάδες μπορούν να στηρίξουν το δίκτυο διανομής στη μείωση της απόρριψης φορτίου καθώς και στη μείωση του κόστους λειτουργίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα μετακίνησης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας σε σημεία και καταναλωτές που αδυνατούν να εξυπηρετηθούν από το κεντρικό δίκτυο. Τέλος, αναδείχθηκε

η σημασία της διάρκειας ζωής των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας καθώς και της οικονομικής αποδοτικότητάς τους.

## 7.2 ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η διπλωματική εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί μελλοντικά με ποικίλους τρόπους:

- Προσομοίωση του προβλήματος σε ένα ακτινικό δίκτυο με πραγματικό οδικό δίκτυο για τη μετακίνηση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, τα αποτελέσματα θα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα καθώς στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκαν ίσες οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών.
- Προσομοίωση του προβλήματος για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα ώστε τα αποτελέσματα να αντικατοπτρίζονται σε μεγαλύτερο δείγμα λειτουργίας.
- Προσομοίωση των διακοπών σε τυχαίες χρονικές στιγμές αντί για την εμφάνιση των προβλημάτων συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπως εφαρμόστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Έτσι, η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας δεν θα έχει τρόπο να γνωρίζει πότε θα εμφανιστεί η διακοπή ώστε να προετοιμάσει από πριν τον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π. Γεωργιλιάκης, *Οικονομική και Αξιοπίστη Λειτουργία Σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα, 2023. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-213>  
Προσπελάστηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2024.
- [2] S. Messalti et al., “Design of MV/LV Substation Transformer,” *Engineering*, Vol. 5, pp. 20-25, January 2013. DOI:10.4236/eng.2013.51b004
- [3] T. Gönen, *Electric power distribution system engineering*, 2nd ed, CRC Press, 2008
- [4] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.  
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>  
Προσπελάστηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2024.
- [5] <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou>
- [6] F.R Islam, K. Prakash, K.A. Mamun, A. Lallu, and H.R. Pota, “Aromatic Network: A Novel Structure for Power Distribution System,” *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 25236–25257, Oct. 2017.
- [7] Α. Κ. Τραχανάς, *Μελέτη των εναέριων δικτύων διανομής και αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής των γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2007.
- [8] G. Kandaperumal and A.K. Srivastava “Resilience of the electric distribution systems: concepts, classification, assessment, challenges, and research needs,” *IET Smart Grid*, Vol. 3, pp. 133–143, Apr. 2020.
- [9] C. Zhang, Y.L. Wei, P.F. Cao, and M.C. Lin, “Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 3091–3106, Feb. 2018.
- [10] C. Dötsch, S. Berthold, D. Wolf, J. Tübke, T. Smolinka, J. Bretschneider, and P. Radgen, “Electrical energy storage from 100 kW - state of the art technologies, realisations, fields of use,” *International Renewable Energy Storage Conference*, Bonn, 2007.
- [11] A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, et al. “A review of pumped hydro energy storage,” *Progress in Energy*, Vol. 3, March 2021. DOI: 10.1088/2516-1083/abeb5b
- [12] H. Chen, X. Zhang, J. Liu, and C. Tan, “Compressed air energy storage”. In *Energy Storage–Technologies and Applications*, A. Zobia (Ed.), InTech, London, UK, 2013.
- [13] M.R. Chakraborty, S. Dawn, P.K. Saha, J.B. Basu, and T.S. Ustun, “A Comparative Review on Energy Storage Systems and Their Application in Deregulated Systems,” *Batteries*, Vol. 8, Sep. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries8090124>



- 
- [14] Hosseini Saeed & Badri, Ali & Parvania, Masood. (2014). “A survey on mobile energy storage systems (MESS): Applications, challenges and solutions”. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40. 161–170. 10.1016/j.rser.2014.07.183.
- [15] Abdeltawab Hussein & Mohamed, Yasser (2017). “Mobile Energy Storage Scheduling and Operation in Active Distribution Systems”. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64. 6828-6840. 10.1109/TIE.2017.2682779.
- [16] J. Kim and Y. Dvorkin, “Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, pp. 4996–5006, Sep. 2019.
- [17] M. A. Ortega-Vazquez, “Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, no. 6, pp. 1007–1016, June 2014.
- [18] A. Soroudi, *Power System Optimization Modeling in GAMS*. Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62350-4>