



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

**ΒΕΛΤΙΣΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κουτσόπουλος Κωνσταντίνος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλειος Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



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

ΒΕΛΤΙΣΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κουτσόπουλος Κωνσταντίνος

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλειος Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Οκτωβρίου 2022

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης,
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Γκόνος Ιωάννης,
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

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

Copyright © Κουτσόπουλος Κωνσταντίνος, 2022.
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 μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η επίλυσή του ως προς 1) τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής ενέργειας, 2) την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και 3) την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του ενεργού δικτύου διανομής.

Αρχικά αναλύεται το πρόβλημα της AC ροής ισχύος για δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, πάνω στο οποίο βασίστηκε το μαθηματικό μοντέλο της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξισώσεις και οι περιορισμοί της ροής ισχύος τροποποιούνται κατάλληλα έτσι ώστε να καλύπτουν πολλαπλές χρονικές περιόδους. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού.

Στην παρούσα εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS και εφαρμόστηκε σε δύο δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 4 και 22 ζυγών. Υλοποιούνται και παρουσιάζονται δύο ειδών δοκιμών για το πρώτο δίκτυο (βελτιστοποίηση ως προς την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής και της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς) και τριών ειδών δοκιμών για το δεύτερο δίκτυο (βελτιστοποίηση ως προς την αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής, της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και το κόστος λειτουργίας του δικτύου). Αναλύονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξάγονται συμπεράσματα και προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ροή ισχύος, βέλτιστη ροή ισχύος, προγραμματισμός λειτουργίας, ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, περιορισμός ισχύος αιολικών πάρκων, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ευέλικτα φορτία

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the modeling and solution of the dynamic optimal power flow problem for active power distribution networks. The proposed optimization model seeks to 1) maximize the utilization of wind energy production 2) minimize the energy inputs from the transmission system and 3) minimize the operation cost of the active distribution network.

First, the problem of AC power flow for distribution networks is analyzed, on which the mathematical model of dynamic optimal power flow for active distribution networks was based. The power flow equations and constraints are modified appropriately to cover multiple time periods. The resulting optimization problem was modeled as a nonlinear programming problem.

The proposed model has been developed using GAMS and it was applied to a 4-bus, and 22-bus distribution test system. Two types of tests are implemented and analyzed for the first network (optimization regarding the utilization of wind production and incoming energy from the transmission system) and three types of tests for the second network (optimization regarding the utilization of wind production, incoming energy from the transmission system and network operation costs). The obtained results are discussed, conclusions are drawn, and future research on the topic is proposed.

KEY WORDS

Optimal power flow, dynamic optimal power flow, operational programming, active distribution network, power curtailment, energy storage system, flexible loads

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021–2022 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, αναπληρωτή 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 υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Ευαγγελόπουλο 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, τη μητέρα μου Δήμητρα, τον πατέρα μου Γιώργο και την αδερφή μου Γιώτα, οι οποίοι αποτελούν πηγή δύναμης σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου, τους φίλους και συναδέλφους Άλκη, Βασίλη και Μαρία για την αμέριστη βοήθειά τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας, και την Κωνσταντίνα, στη συμπαράσταση και την αγάπη της οποίας οφείλω το μέλλον μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	15
1.3 Ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	17
1.4 Αντικείμενο της εργασίας	17
1.5 Δομή της εργασίας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΟΡΟΙ	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Αιολικά πάρκα	23
2.2.1 Αιολικά πάρκα χωρίς περιορισμό ισχύος	25
2.2.2 Αιολικά πάρκα με περιορισμό ισχύος	25
2.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	26
2.4 Ευέλικτα φορτία	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Συστήματα μεταφοράς και συστήματα υπομεταφοράς	32
3.3 Δίκτυα διανομής	33
3.4 Παθητικά δίκτυα διανομής	35
3.4.1 Υποχρεώσεις διαχειριστών συστημάτων διανομής	35
3.4.2 Προγραμματισμός και λειτουργία δικτύων διανομής	37
3.5 Διανεμημένοι ενεργειακοί πόροι και επιπτώσεις στη λειτουργία των δικτύων διανομής	37
3.6 Ενεργά δίκτυα διανομής και προγραμματισμός λειτουργίας	39
3.7 Έλεγχος τάσης	40
3.8 Αποφυγή υπερφόρτισης γραμμών δικτύου διανομής	41
3.9 Περιορισμός ισχύος αιολικών πάρκων	42
3.10 Ευελιξία στον προγραμματισμό λειτουργίας	42
3.10.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	43
3.10.2 Ευέλικτα φορτία	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	45
4.1	Εισαγωγή	45
4.2	Κατάλογος συμβόλων	47
4.3	Μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος	49
4.4	Μοντέλο δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος	50
4.5	Μοντελοποίηση περιορισμού ισχύος	55
4.5.1	Με σειρά προτεραιότητας	55
4.5.2	Με κοινό ποσοστό περιορισμού ισχύος	55
4.5.3	Με περιορισμό ισχύος βάσει τεχνικού βέλτιστου	56
4.6	Μοντελοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	56
4.7	Μοντελοποίηση διαχείρισης ευέλικτων φορτίων	59
4.7.1	Άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο	59
4.7.2	Ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	61
5.1	Εισαγωγή	61
5.2	Περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογής	61
5.2.1	Το περιβάλλον της MATLAB	62
5.2.2	Δημιουργία και εκτέλεση m-files	63
5.2.3	Το περιβάλλον του GAMS	64
5.2.4	Δημιουργία και εκτέλεση gms-files	68
5.3	Λογισμικό Δυναμικής Βέλτιστης Ροής Ισχύος για ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	71
5.3.1	Απαιτήσεις συστήματος	71
5.3.2	Εισαγωγή δεδομένων δικτύου	71
5.3.3	Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων	72
5.3.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ	77
6.1	Εισαγωγή	77
6.2	Κατάλογος συμβόλων	78
6.3	Δεδομένα δικτύου διανομής 4 κόμβων	79
6.3.1	Διατύπωση του προβλήματος και σενάρια προσομοιώσεων δικτύου 4 κόμβων	82
6.3.2	Αποτελέσματα δυναμικής διαχείρισης δικτύου 4 κόμβων	82

6.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων	91
6.4	Δεδομένα δικτύου διανομής 22 κόμβων	92
6.4.1	Διατύπωση του προβλήματος και σενάρια προσομοιώσεων δικτύου 22 κόμβων	97
6.4.2	Αποτελέσματα δυναμικής διαχείρισης δικτύου 22 κόμβων	98
6.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων	104
6.5	Αποτελέσματα για διαφορετικά σενάρια και σύγκριση αποτελεσμάτων	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		109
6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	109
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		111

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ηλεκτρισμός είναι ένας θεμελιώδης πόρος στις σύγχρονες κοινωνίες. Χρησιμοποιείται παντού για την ικανοποίηση των βασικών αναγκών της ανθρώπινης φύσης. Η ηλεκτρική ενέργεια παίζει καταλυτικό ρόλο στην οικονομία της εκάστοτε χώρας, καθώς είναι βασική για τη δραστηριότητα τόσο από την πλευρά της βιομηχανίας όσο και στην πλευρά της παροχής υπηρεσιών. Λόγω της σημασίας της είναι απαραίτητο η διαχείριση ολόκληρης της αλυσίδας, από την παραγωγή έως την παροχή ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές, να γίνεται με αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Στο παρελθόν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιλάμβαναν κατά κύριο λόγο συμβατικές μονάδες παραγωγής, όπως σταθμούς καύσης άνθρακα ή αερίου. Σε αυτές τις μονάδες παραγωγής, τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας εξαρτώνται (εντός των ορίων λειτουργίας τους) αποκλειστικά από τη βούληση του Διαχειριστή. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) παράγουν σήμερα ένα μέρος της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν επίδραση στη συνολική ποιότητα ή αξιοπιστία του δικτύου. Ωστόσο, όταν η διείσδυση των ΑΠΕ, και πιο συγκεκριμένα των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα, η διακοπτόμενη φύση της παραγωγής τους μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις σε ολόκληρο το δίκτυο.

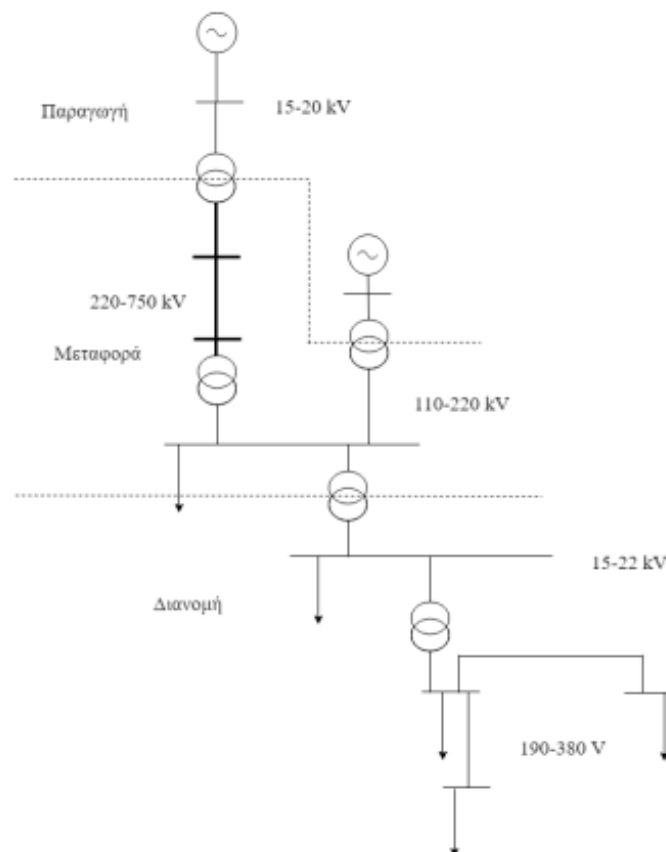
Ο έλεγχος, η λειτουργία, ο σχεδιασμός και η ρύθμιση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει έναν σημαντικό αριθμό μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ διαφέρει αρκετά από εκείνο ενός συστήματος χωρίς αυτές. Αυτό είναι το άμεσο αποτέλεσμα της μεταβλητότητας και της περιορισμένης δυνατότητας στην πρόβλεψη των επιπέδων παραγωγής ενέργειας των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, που καθιστούν απαραίτητη τη χρήση πολλαπλών ευέλικτων μέσων για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας αυτής [1].

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και του εξοπλισμού που διατίθενται για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ιδιωτών και βιομηχανιών για χώρες ή περιοχές. Η λειτουργία ενός ΣΗΕ έγκειται στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των αντίστοιχων καταναλωτών. Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας σπάνια πραγματοποιείται στην αρχική της μορφή και συνήθως μετατρέπεται σε πιο άμεσα αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας, όπως η θερμική, η μηχανική ή απλά ο φωτισμός. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στην δυνατότητα της εύκολης μεταφοράς και της ελεγχιμότητας που προσφέρει με σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης και αξιοπιστίας. Η ορθή λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει την τήρηση κάποιων βασικών αρχών και απαιτήσεων [2], [3]:

- Το σύστημα οφείλει να ανταποκρίνεται επαρκώς σε συνεχείς αλλαγές της ζήτησης του φορτίου. Η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη και επομένως η συνεχής προσαρμογή στην κατανάλωση μέσω του ελέγχου της παρεχόμενης ισχύος είναι απαραίτητη.
- Το σύστημα πρέπει να παρέχει ενέργεια με το λιγότερο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.
- Η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει πρέπει να περιλαμβάνει σταθερή συχνότητα και τάση και υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας.

Αν και τα ΣΗΕ ανά τον κόσμο διαφέρουν ως προς το μέγεθος και τα στοιχεία που τα αποτελούν, όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά και παρόμοια δομή. Συγκεκριμένα όλα τα ΣΗΕ αποτελούνται από τρία διακριτά υποσυστήματα. Αυτά είναι το Σύστημα Παραγωγής, το Σύστημα Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η γενική δομή ενός ΣΗΕ.



Σχήμα 1.1: Γενική δομή ΣΗΕ [3]

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, στους οποίους μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική και κατόπιν σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των γεννητριών. Ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς αυτής ενέργειας οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε [3]:

- Θερμοηλεκτρικούς, όπου η θερμότητα, προερχόμενη για παράδειγμα από καύση ορυκτών καυσίμων μετατρέπεται με τη βοήθεια στροβίλων σε κινητική που οδηγεί τη σύγχρονη γεννήτρια.

- Υδροηλεκτρικούς, όπου η απαραίτητη κινητική ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργεια του νερού καθώς αυτό διέρχεται μέσα από διάφορους τύπους υδροστροβίλων.
- Εναλλακτικού, όπου γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες βρίσκονται στη φύση σε πρακτικά ανεξάντλητες ποσότητες και καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας γίνονται περισσότερο από αισθητές, αναμένεται η χρήση τους να αυξηθεί δραματικά τα επόμενα χρόνια. Ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς μορφής οι περισσότερο διαδεδομένες εφαρμογές των ΑΠΕ στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα, όπου χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του ανέμου με τη βοήθεια ανεμογεννητριών και οι σταθμοί που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια, είτε απευθείας σαν φωτεινή ενέργεια οπότε αναφέρονται ως φωτοβολταϊκά πάρκα, είτε μετατρέποντας την πρώτα σε θερμότητα οπότε ηλιοθερμικοί σταθμοί.

Το σύστημα παραγωγής ενός ΣΗΕ περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από εγκαταστάσεις ισχύος που αναλαμβάνουν τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Οι εγκαταστάσεις αυτές περιλαμβάνουν γραμμές υψηλής τάσης, υποσταθμούς για το μετασχηματισμό των διάφορων επιπέδων τάσεων του συστήματος και υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης σε Μέση Τάση (ΜΤ) προς τροφοδότηση των περιοχών κατανάλωσης. Η υψηλή τάση που επικρατεί στο δίκτυο μεταφοράς βοηθά στη μείωση των απωλειών και συνεπώς σε οικονομικότερη λειτουργία [2].

Το δίκτυο διανομής παραλαμβάνει την ενέργεια που μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές φορτίου μέσω του Συστήματος Μεταφοράς και τη διανέμει μέσα στην εξυπηρετούμενη περιοχή, φθάνοντας μέχρι τον τελευταίο καταναλωτή. Το Δίκτυο Διανομής χωρίζεται σε δυο βαθμίδες: τη διανομή Μέσης Τάσης ή πρωτεύουσα διανομή και τη διανομή Χαμηλής Τάσης ή δευτερεύουσα διανομή. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους σταθμούς ΜΤ/ΧΤ καθώς και τους καταναλωτές Μέσης Τάσης.

1.3 ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ολοένα και αυξανόμενη εγκατάσταση, στα δίκτυα διανομής (ΔΔ), μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ), των οποίων η τεχνολογία τους, λόγω περιβαλλοντικών και οικονομικών παραγόντων, βασίζεται κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), σε συνδυασμό με την αύξηση του φορτίου έχει δημιουργήσει σημαντικές επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας και στον τρόπο προγραμματισμού της ανάπτυξης των ΔΔ [4]. Οι επιπτώσεις αυτές έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ΔΔ, κατά τις προηγούμενες δεκαετίες, είχαν σχεδιαστεί με μοναδικό σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης, χωρίς να ληφθεί υπόψη στη σχεδίαση των ΔΔ η σύνδεση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα ΔΔ. Επομένως, για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις αυτές και για να επιτευχθεί ο στόχος της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ στα ΔΔ, ο “παθητικός” ρόλος

των ΔΔ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αλλάξει και να εξελιχθεί σε πιο “ενεργό” ρόλο.

Στο πρώτο στάδιο της εξέλιξης των ΔΔ, επιδιώκεται η μετατροπή των παθητικών δικτύων σε ενεργά δίκτυα διανομής (active distribution networks), η λειτουργία των οποίων θα είναι παρόμοια με αυτή των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4]. Στα ενεργά δίκτυα διανομής δίνεται η δυνατότητα συντονισμένου ελέγχου του εξοπλισμού του δικτύου και της παραγωγής των ΜΔΠ με στόχο τη βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά λειτουργία του δικτύου και τη μεγαλύτερη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ. Για να γίνει η μετατροπή αυτή, είναι απαραίτητη η τεχνολογική αναβάθμιση του εξοπλισμού του ΔΔ και η εγκατάσταση προηγμένων υποδομών τεχνολογίας πληροφορικής και επικοινωνιών στα ΔΔ, οι οποίες θα επιτρέπουν την εποπτεία και τον έλεγχο του δικτύου σε πραγματικό χρόνο [5]. Η σταδιακή αυτή εξέλιξη των ΔΔ έχει οδηγήσει το ερευνητικό ενδιαφέρον προς την ανάπτυξη νέων μεθόδων για τη λειτουργία του ΔΔ σε κανονική και έκτακτη κατάσταση, καθώς και για τον προγραμματισμό ανάπτυξης του ΔΔ, οι οποίες θα αξιοποιούν τις δυνατότητες των ενεργών δικτύων διανομής για τη βέλτιστη επίτευξη των στόχων τους.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η επίλυσή του ως προς 1) τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής ενέργειας, 2) την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και 3) την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του ενεργού δικτύου διανομής.

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται και οι τύποι τα βασικά χαρακτηριστικά των διανεμημένων ενεργειακών πόρων ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής και η εξέλιξή τους σε ενεργά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η διαδικασία της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος ενεργών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** κατασκευάζεται το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για ενεργά ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** αναλύεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 4 και περιγράφεται το λογισμικό GAMS που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του σχετικού κώδικα επίλυσης του μοντέλου.

-
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε δίκτυα 4 και 22 κόμβων.
 - ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
 - ✓ Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της εργασίας.

ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Διανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι (ΔΕΠ) περιλαμβάνουν: α) μονάδες διανεμημένης παραγωγής, κυρίως τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), β) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και γ) ευέλικτα φορτία, τα οποία μπορούν να ελεγχθούν μέσω δράσεων διαχείρισης ζήτησης [6]. Οι ΔΕΠ είναι αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας μικρής έως μεσαίας κλίμακας (τυπικά μεταξύ του εύρους 3kW έως 50 MW), οι οποίες βρίσκονται συνήθως κοντά στα φορτία [6]. Οι ΔΕΠ συνδέονται συνήθως στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες ευελιξίας τόσο στο δίκτυο διανομής όσο και στο σύστημα μεταφοράς. Οι ΔΕΠ αυξάνονται διαρκώς καθώς αποτελούν μια επιλογή λιγότερο δαπανηρή και ταχύτερα υλοποιήσιμη σε σύγκριση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Οι ΔΕΠ μειώνουν το φορτίο στις γραμμές μεταφοράς και προσφέρουν στους καταναλωτές τη δυνατότητα για ενέργεια χαμηλότερου κόστους, υψηλότερη αξιοπιστία τροφοδοσίας, καλύτερη ποιότητα ισχύος, αυξημένη ενεργειακή απόδοση και ενεργειακή ανεξαρτησία. Η διανεμημένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, υδροηλεκτρική ενέργεια ή βιομάζα συνεισφέρει θετικά στο μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί μια πιο βιώσιμη και φιλική στο περιβάλλον λύση. Κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο ενθαρρύνουν την ενσωμάτωση των ΔΕΠ, ιδιαίτερα των ΑΠΕ, στα συστήματα διανομής ενέργειας.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση των ΔΕΠ στο επίπεδο του δικτύου διανομής, δημιουργεί μια σειρά τεχνικών προκλήσεων. Τρία είναι τα κύρια προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου διανομής:

1. αντίστροφη ροή ισχύος,
2. διακυμάνσεις στις αργές μεταβολές της τάσης: α) ανύψωση τάσης (όταν πρόκειται για ΔΕΠ παραγωγής, όπως μονάδες ΑΠΕ) ή β) πτώση τάσης (όταν πρόκειται για ΔΕΠ κατανάλωσης, όπως ηλεκτρικά οχήματα ή μπαταρίες σε κατάσταση φόρτισης ταυτόχρονα με αιχμή ζήτησης),
3. υπέρβαση των θερμικών ορίων των γραμμών διανομής και των υποσταθμών του δικτύου.

Οι ΔΕΠ που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: α) μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ), β) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και γ) διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης (ΔΠΖ). Παρακάτω ακολουθεί σύντομη επεξήγηση των τριών αυτών κατηγοριών.

- **Μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ):** είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας (από μερικά kW έως 10MW) που συνδέονται στο δίκτυο διανομής ή τροφοδοτούν μικρο-δίκτυα (microgrids) και συνήθως καλύπτουν τις

ενεργειακές ανάγκες της τοπικής περιοχής καθώς βρίσκονται πολύ κοντά στα ηλεκτρικά φορτία που τροφοδοτούν. Οι ΜΔΠ συνδέονται στο δίκτυο διανομής ΜΤ (Μέσης Τάσης) ή ΧΤ (Χαμηλής Τάσης) και χωρίζονται σε κατανεμόμενες μονάδες (dispatchable units) και μη κατανεμόμενες μονάδες (non-dispatchable units). Οι κατανεμόμενες μονάδες είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες μπορούν να προγραμματίσουν την παραγωγή τους λόγω της ικανότητας ελέγχου της πρωτογενούς πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν. Τέτοιες μονάδες περιλαμβάνουν θερμικές μονάδες παραγωγής (παραγωγή από καύσιμα όπως diesel και μαζούτ), υδροηλεκτρική παραγωγή και παραγωγή από σταθμούς βιομάζας ή βιοαερίου. Κατά αντιστοιχία, οι μη κατανεμόμενες μονάδες είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες δεν μπορούν να προγραμματίσουν την παραγωγή τους λόγω της μεταβλητής φύσης της πρωτογενούς πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν. Ως μη κατανεμόμενες μονάδες θεωρούνται οι αιολικοί σταθμοί (σταθμοί ΑΠΕ αποτελούμενοι από μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες) και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί (σταθμοί ΦΒ).

Οι κυριότερες τεχνολογίες ΜΔΠ είναι επιγραμματικά οι ακόλουθες [6]:

- I. Φωτοβολταϊκά συστήματα (παραγωγή από ηλιακή ενέργεια)
- II. Ανεμογεννήτριες (παραγωγή από αιολική ενέργεια)
- III. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί
- IV. Σταθμοί συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ)
- V. Σταθμοί βιομάζας – βιοαερίου
- VI. Μονάδες εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), με φυσικό αέριο, diesel ή άλλα ορυκτά καύσιμα
- VII. Σταθμοί εκμετάλλευσης γεωθερμικής ενέργειας
- VIII. Μικρό-Τουρμπίνες (με φυσικό αέριο ή diesel)

- **Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας:** Προσφέρουν σταθερότητα και ενισχύουν την αξιοπιστία σε δίκτυα με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συλλέγουν την περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια, αυτή η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε, και εγχέουν ενέργεια στο δίκτυο σε ώρες που προβλέπεται έλλειψη παραγωγής (ή πολύ χαμηλή παραγωγή) ενέργειας ή σε περιόδους υψηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (αιχμή ζήτησης). Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται είναι η αντλησιοταμίευση (PHS), τα συστήματα συσσωρευτών (μπαταρίες), τα συστήματα αποθήκευσης με χρήση πεπιεσμένου αέρα (CAES) [6]. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν επίσης να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες σε επίπεδο δικτύων διανομής, όπως υποστήριξη της τάσης του δικτύου, περιορισμό της αιχμής και ρύθμιση της συχνότητας (σε απομονωμένα ηλεκτρικά συστήματα, π.χ. μη διασυνδεδεμένα νησιά).
- **Διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης (ΔΠΖ):** Μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο πρωτοβουλιών που αναλαμβάνονται από τους τελικούς καταναλωτές ή μέσω εκπροσώπησης των τελευταίων από φορείς σωρευτικής εκπροσώπησης (ΦοΣΕ), Aggregators, για να επιτευχθεί η επιθυμητή αλλαγή στο προφίλ ζήτησης. Η ΔΠΖ θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας ή την

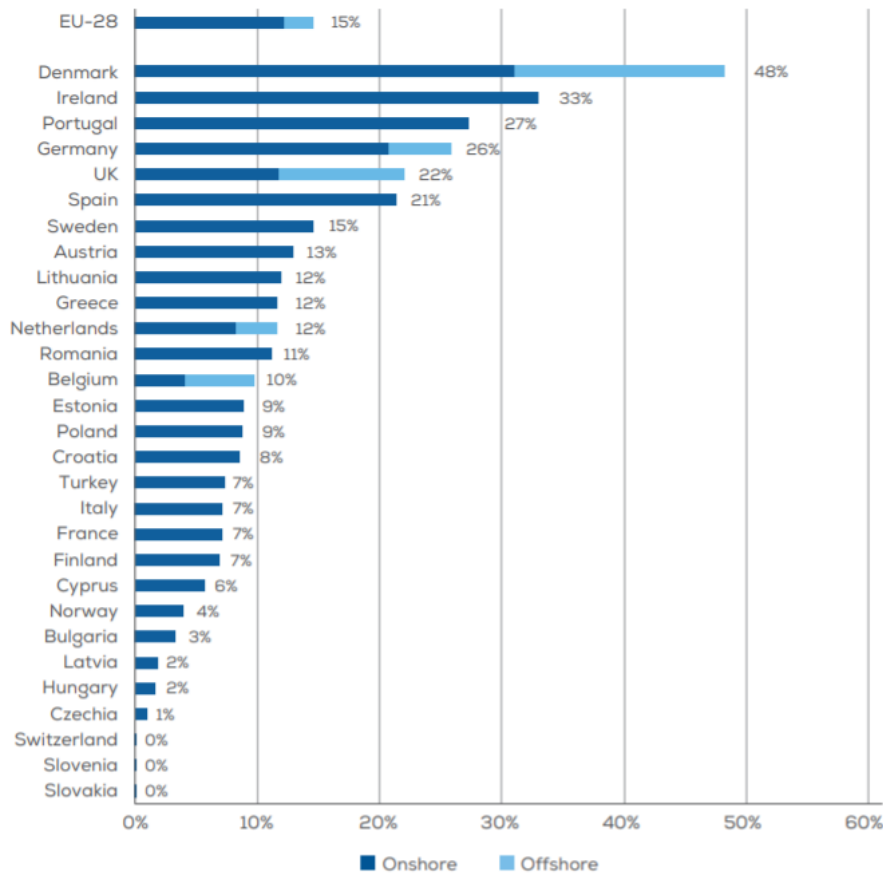
αποτελεσματική αξιοποίησή της. Ο στόχος της ΔΠΖ είναι να εξισορροπήσει τη διαθέσιμη προσφορά σε πραγματικό χρόνο με τη ζήτηση και να διαχειριστεί το κόστος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι ΔΕΠ που χρησιμοποιούνται είναι:

1. Μονάδες ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα έχουν μοντελοποιηθεί αιολικά πάρκα,
2. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές
3. Ευέλικτα φορτία
 - a. Άμεσα διαχειρίσιμα ευέλικτα φορτία
 - b. Ευέλικτα φορτία με αποθήκευση θερμικής ενέργειας

2.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Τα αιολικά πάρκα (Α/Π) αποτελούνται από ένα σύνολο ανεμογεννητριών (Α/Γ) και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της αξιοποίησης της ενέργειας του ανέμου μετατρέποντας την αιολική ενέργεια σε κινητική ενέργεια [7]. Τα τελευταία χρόνια οι Α/Γ παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας σε αρκετά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη αλλά και παγκοσμίως. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης [8], για το έτος 2019, η χώρα με το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προήλθε από αιολική ενέργεια ήταν η Δανία με ποσοστό που αγγίζει το 48%. Ακολούθησαν η Ιρλανδία, η Πορτογαλία και η Γερμανία με ποσοστά 33%, 27% και 26%, αντίστοιχα. Η Ελλάδα βρίσκεται στη 10η θέση της σχετικής λίστας με ποσοστό που αγγίζει το 12%. Αναλυτικότερα στοιχεία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με στοιχεία του ΑΔΜΗΕ [9], μέχρι το τέλος του 2018 λειτουργούσαν Α/Π συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 2.555 MW με πρόβλεψη να ξεπεράσουν τα 7.000 MW μέχρι το τέλος του 2030.



Σχήμα 2.1: Διείσδυση αιολικής παραγωγής σε χώρες της Ευρώπης (2019) [8]

Τα Α/Π μεγάλης ισχύος συνδέονται με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (σταθμοί εγκατεστημένης ισχύος μεγαλύτερης των 10 MW). Τα Α/Π μικρότερης κλίμακας χρησιμοποιούνται κυρίως σε απομονωμένες περιοχές. Η αιολική ενέργεια είναι άφθονη, ανανεώσιμη και ευρέως διανεμημένη σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Τα Α/Π δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου κατά τη λειτουργίας τους, σε αντίθεση με την ενέργεια που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, η κατασκευή Α/Π δεν είναι πάντα αποδεκτή από τις τοπικές κοινωνίες κυρίως λόγω των επιπτώσεων στο περιβάλλον και στο τοπίο στο οποίο εγκαθίστανται [7].

Τα Α/Π είναι μη κατανεμόμενες ΜΔΠ, πράγμα που σημαίνει ότι όλη η διαθέσιμη παραγωγή πρέπει να ληφθεί όταν είναι διαθέσιμη και δύσκολα μπορεί να προβλεφθεί με σχετική ακρίβεια. Δηλαδή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την ζήτηση, όπως γίνεται για παράδειγμα με τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Όταν η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για να καλύψει μικρό ποσοστό της συνολικής ζήτησης σπάνια δημιουργούνται προβλήματα, αλλά όσο η διείσδυση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Π αυξάνεται, προκύπτει ο κίνδυνος της εμφάνισης πλεονάζουσας παραγόμενης ισχύος. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, η πλεονάζουσα παραγόμενη ισχύς πρέπει να εξάγεται σε γειτονικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμα και να πραγματοποιείται αποθήκευση αυτής της ισχύος.

Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης των ανεμογεννητριών, αυτές αντιμετωπίζονταν ως αρνητικά φορτία, υπό την έννοια ότι είχαν τις ίδιες υποχρεώσεις με τους καταναλωτές. Οι υποχρεώσεις αυτές αφορούσαν κυρίως σε ζητήματα ποιότητας ισχύος

στο δίκτυο διανομής που συνδέονταν. Με την πάροδο των χρόνων και καθώς αυξήθηκε η εγκατεστημένη ισχύς των Α/Π, η επίδρασή τους άρχισε να γίνεται αισθητή στο ηλεκτρικό σύστημα.

Όσον αφορά την κατασκευή τους, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες σταθερών και μεταβλητών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούν μηχανές επαγωγής που συνδέονται απευθείας με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούν μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος για τη ρύθμιση των στροφών τους και της έγχυσης ισχύος στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πλεονεκτούν έναντι των σταθερών στροφών διότι δύνανται να πραγματοποιούν ρύθμιση των στροφών τους ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει οδηγήσει στη γενικευμένη χρήση και καθιέρωση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Επιγραμματικά η κατηγορία των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών κάνει χρήση των παρακάτω τεχνολογιών:

- Ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (doubly-fed induction generator – DFIG)
- Γεννήτριες με πλήρη μετατροπέα (full converter - FC)

2.2.1 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΙΣΧΥΟΣ

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν Α/Π που δεν ελέγχονται, δηλαδή δεν λαμβάνουν εντολές περιορισμού της παραγόμενης ισχύος (set-point), και εγγέουν στο δίκτυο όλη τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια [10]. Η διαθέσιμη παραγόμενη ισχύς από ένα Α/Π αυτού του τύπου αντιμετωπίζεται ως αρνητική σταθερή ζήτηση [10]. Τα εν λόγω Α/Π λειτουργούν με σταθερό συντελεστή ισχύος και η άεργος ισχύς αφαιρείται από τη ζήτηση του δικτύου. Σε αυτή την κατηγορία μπορεί να ανήκουν παλαιότερης τεχνολογίας Α/Π, τα οποία δεν διαθέτουν σύστημα εποπτείας (SCADA).

2.2.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΙΣΧΥΟΣ

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα Α/Π που ελέγχονται, δηλαδή λαμβάνουν εντολές περιορισμού της παραγόμενης ισχύος (set-point), και μπορούν να υποστούν περικοπές στην παραγωγή τους, ανάλογα με τους περιορισμούς που θέτει ο Διαχειριστής του δικτύου [10]. Οι περικοπές αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν ώστε να αποφευχθεί η υπέρβαση των θερμικών ορίων των γραμμών του δικτύου ή του υποσταθμού (congestion management) καθώς και σε περιπτώσεις που είναι χαμηλή η ζήτηση και ταυτόχρονα είναι υψηλή η παραγωγή από Α/Π που δεν λαμβάνουν εντολές περιορισμού ισχύος. Η εντολή περιορισμού ισχύος καθορίζεται για κάθε χρονική περίοδο λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του δικτύου και τη διαθέσιμη αιολική παραγωγή. Σε αυτή την κατηγορία μπορεί να ανήκουν Α/Π που διαθέτουν σύστημα εποπτείας και ελέγχου (SCADA) και υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας για τον περιορισμό της ισχύος τους.

Για τη δίκαιη μεταχείριση των παραγωγών που συνδέονται στο δίκτυο και εγγέουν ενέργεια σε αυτό, οι εντολές περιορισμού ισχύος υπολογίζονται από τον Διαχειριστή του

δικτύου με συγκεκριμένους κανόνες ένταξης των Α/Π (Principles of access – PoA). Αυτοί οι κανόνες ένταξης καθορίζουν ποιο Α/Π με περιορισμό ισχύος μπορεί να έχει μεγαλύτερη πρόσβαση στο δίκτυο, δηλαδή να παράγει με προτεραιότητα. Κάποιοι από τους κανόνες ένταξης Α/Π στο δίκτυο είναι οι εξής [10]:

- **Εντολή περιορισμού ισχύος βάσει προτεραιότητας:** Σε αυτόν τον κανόνα ένταξης κάθε Α/Π έχει έναν αριθμό προτεραιότητας και η πρόσβαση στο δίκτυο δίνεται πάντα στα Α/Π υψηλής προτεραιότητας. Δηλαδή αυτός που έχει προτεραιότητα ένταξης λαμβάνει τελευταίος σήμα για περιορισμό της παραγωγής του ή λαμβάνει μικρότερο ποσοστό περιορισμού της παραγωγής του.
- **Κοινή εντολή περιορισμού ισχύος:** Σε αυτόν τον κανόνα ένταξης, όλα τα Α/Π περιορίζονται με την ίδια εντολή περιορισμού ισχύος, η οποία υπολογίζεται ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του συνόλου των Α/Π.
- **Τεχνικά βέλτιστο σημείο λειτουργίας:** Σε αυτόν τον κανόνα ένταξης, κάθε Α/Π λαμβάνει ξεχωριστή εντολή περιορισμού ισχύος λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της περιοχής, στην οποία συνδέεται.

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (energy storage systems – ESS) παρέχουν δυνατότητα για αποθήκευση της ενέργειας τις ώρες υψηλής παραγωγής και χαμηλής ζήτησης (περίσσεια ενέργεια), και χρησιμοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας τις ώρες όπου υπάρχει έλλειψη παραγωγής και η ζήτηση είναι υψηλή. Αυτή η λειτουργία τους αναφέρεται και ως διακίνηση ενέργειας (energy arbitrage). Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση των ενεργών δικτύων διανομής, έτσι ώστε να μειώσουν την περικοπή της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ ή να διαχειριστούν πιθανή υπερφόρτιση του δικτύου. Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα να μετατοπίζουν χρονικά την παραγόμενη ενέργεια. Σε αυτές τις τεχνολογίες περιλαμβάνονται κυρίως οι συσσωρευτές (μπαταρίες), τα συστήματα αποθήκευσης με αντλησιοταμίευση (PHS) και τα συστήματα αποθήκευσης με χρήση πεπιεσμένου αέρα (CAES) [10].

Η ιστορία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ξεκίνησε στις αρχές του 20ού αιώνα με την εμφάνιση μιας ποικιλίας συστημάτων με ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και ικανότητα αποφόρτισης όταν απαιτείται ενέργεια [11]. Αυτό επιτεύχθηκε για πρώτη φορά με την εφεύρεση της τεχνολογίας συσσωρευτή μολύβδου-οξέος (lead– acid battery), που αποτελεί τον πρώτο τύπο επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή και χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία ηλεκτρικών φορτίων σε ηλεκτρικό δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Καθώς εξελισσόταν η τεχνολογία σε διάφορους τομείς, εμφανίστηκαν όλο και περισσότερες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [11]:

- σύστημα αντλησιοταμιευτικού τύπου (pumped hydro system - PHS)
- μονάδες αποθήκευσης με συσσωρευτές (μπαταρίες),
- αποθήκευση ενέργειας με χρήση πεπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage - CAES),
- κυψέλες καυσίμου (fuel cell),
- υπερ-πυκνωτές,
- αποθήκευση ενέργειας με στρεφόμενο σφόνδυλο (FES),

- υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (superconducting magnetic energy storage - SMES) και
- συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

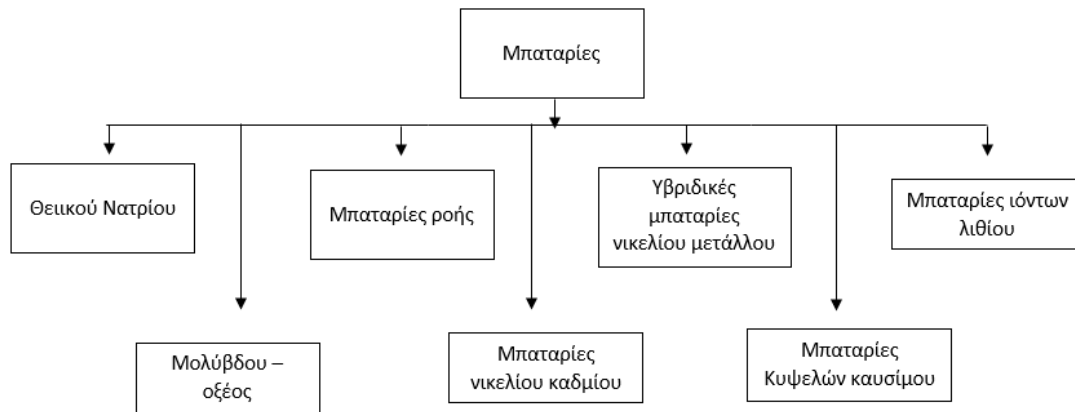
Επιπλέον, τα διάφορα είδη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ταξινομούνται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες [11]:

- μηχανικές(π.χ. αποθήκευση ενέργειας με στρεφόμενο σφόνδυλο, αποθήκευση CAES και αντλιομάστευση),
- ηλεκτρικές (π.χ. πυκνωτές, SMES και υπερ-πυκνωτές),
- θερμικές (π.χ. συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας)
- χημική ενέργεια (π.χ. ηλεκτροχημικές, θερμοχημικές και χημικές συσκευές αποθήκευσης).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές / μπαταρίες (battery storage systems – BSS), τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτροχημικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Ένας συσσωρευτής (μπαταρία) είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας σχεδιασμένη να μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε χημική κατά τη διαδικασία της φόρτισης, καθώς και την αντίστροφη διαδικασία κατά τη διαδικασία εκφόρτισης [11]. Οι μπαταρίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές σε όλο τον κόσμο. Τα βασικά στοιχεία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- τα αποθηκευτικά μέσα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή οι συστοιχίες μπαταριών συνδεδεμένες σε σειρά ή παράλληλα,
- ο μετατροπέας ισχύος με ηλεκτρονικά ισχύος (power conversion system – PCS), ο οποίος αποτελεί την ελεγχόμενη μονάδα του συστήματος αποθήκευσης και διαθέτει μεταξύ άλλων τη δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος,
- το σύστημα ελέγχου και διαχείρισης του συστήματος αποθήκευσης (Battery Energy Management System – BEMS),
- τα επιμέρους συστήματα προστασίας και μετρητικές διατάξεις.

Ανάλογα με τη δυνατότητα φόρτισης/εκφόρτισης (μέγιστη ισχύς) και τη χωρητικότητά τους (ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν), ορισμένες μπαταρίες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που σχετίζονται με το σύστημα μεταφοράς και συνδέονται στην υψηλή τάση, ενώ άλλες για εφαρμογές που σχετίζονται με το δίκτυο διανομής και συνδέονται στη μέση τάση [11]. Επιπλέον, μπαταρίες χρησιμοποιούνται και στη χαμηλή τάση κυρίως σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη διαχείριση ενέργειας αυτοπαραγωγών, δηλαδή καταναλωτών που χρησιμοποιούν κάποια μονάδα παραγωγής μικρής κλίμακας για να εξυπηρετούν τα ηλεκτρικά τους φορτία. Άλλες περιοχές εφαρμογής συστημάτων μπαταριών είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, θαλάσσιες και υποθαλάσσιες αποστολές, αεροδιαστημικές λειτουργίες, φορητά ηλεκτρονικά συστήματα, συστήματα ασύρματων δικτύων και η σταθεροποίηση ηλεκτρικών δικτύων. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι μπαταριών.



Σχήμα 2.2: τύποι μπαταριών [11]

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω μιας διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος (power conditioning system – PCS). Αυτές οι διάταξεις ρυθμίζουν την άεργο ισχύ του συστήματος και είναι σε θέση να εγγέουν ή να απορροφούν άεργο ισχύ. Η λειτουργία "τεσσάρων τεταρτημορίων", γνωστή και ως 4-quadrant λειτουργία, δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα συσσωρευτών να εγγέει ή να απορροφάει ενέργεια είτε όταν φορτίζει είτε όταν εκφορτίζει. Επομένως, η έγχυση ή η απορρόφηση μεγάλης ποσότητας αέργου ισχύος μειώνει την ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης ενεργού ισχύος [12]. Για να μην περιορίζεται η ενεργός ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης του συστήματος συσσωρευτών, βάσει των απαιτήσεων σχεδιασμού, χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος μεγαλύτερης φαινόμενης ισχύος από την ικανότητα ενεργού ισχύος βάσει της οποίας έχει σχεδιαστεί το σύστημα.

Τα οφέλη από τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν [13]:

- Βελτιωμένο έλεγχο και αξιοπιστία του συστήματος για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αυξανόμενης διείσδυσης ΜΔΠ και κυρίως αυτής των μονάδων ΑΠΕ.
- Αύξηση της διείσδυσης των ΜΔΠ και αύξηση της ικανότητας φιλοξενίας νέων ΜΔΠ στο δίκτυο και στο σύστημα.
- Δυνατότητα ρύθμισης τάσης και συχνότητας.
- Βελτίωση της διαχείρισης των στοιχείων του δικτύου (υποσταθμοί, γραμμές δικτύου) με παράταση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του εξοπλισμού λόγω μείωσης της αιχμής ζήτησης.
- Αναβολή της αναβάθμισης ή της ενίσχυσης των στοιχείων του δικτύου λόγω της μείωσης των φορτίων αιχμής.
- Βελτίωση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια προγραμματισμένων ή τυχαίων διακοπών ρεύματος λόγω της δυνατότητας προσωρινής παροχής ενέργειας στους καταναλωτές (δυνατότητα για αδιάλειπτη παροχής ενέργειας στην περιοχή του δικτύου που παρατηρείται το σφάλμα ή η προγραμματισμένη διακοπή).

2.4 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα ευέλικτα φορτία είναι φορτία που μπορούν να διακόψουν τη λειτουργία τους ή να την τροποποιήσουν για ένα χρονικό διάστημα με βάση την κατάσταση του δικτύου. Με άλλα λόγια, είναι φορτία των οποίων η κατανάλωση μπορεί να αναβληθεί ή να μετατοπιστεί σε χρονικές περιόδους που δεν δημιουργεί κάποιο τεχνικό πρόβλημα στο δίκτυο ή που η ενέργεια είναι πιο οικονομική. Ορισμένα από τα ελεγχόμενα φορτία μπορούν να διακόπτονται αυτόματα ή να μετατοπίζουν την κατανάλωσή τους προγραμματισμένα. Τα ευέλικτα φορτία προσφέρουν το πλεονέκτημα της διαχείρισης της κατανάλωσης κατά τις περιόδους αιχμής, της εξισορρόπησης παραγωγής και ζήτησης και της σταθερότητας τάσης [14]. Είναι αποτελεσματικά στην παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ΑΠΕ.

Τα ευέλικτα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- **Ευέλικτο Φορτίο Αποθήκευσης Θερμότητας (Flexible Demand with Thermal Storage - FDTS)**

Σε αυτή την κατηγορία πραγματοποιείται ενεργή διαχείριση ηλεκτρικής θέρμανσης σε συνδυασμό με αποθήκευση θερμότητας, η οποία είναι αυτή που παρέχει ευελιξία. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται σε ένα τέτοιο ηλεκτρικό φορτίο προγραμματίζεται σε επίπεδο ημέρας και υπάρχει ευελιξία με μετατόπιση της ηλεκτρικής κατανάλωσης σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο με ταυτόχρονη αποθήκευση θερμότητας και χρήσης της θερμότητας σε άλλη χρονική περίοδο [10]. Ένα παράδειγμα του εν λόγω μοντέλου διαχείρισης ευέλικτης ζήτησης μπορεί να είναι το δίκτυο τηλεθέρμανσης μιας γειτονιάς που διαθέτει αποθήκευση θερμικής ενέργειας, η οποία τροφοδοτείται από κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στο νησί του Αη Στράτη υπάρχει υπό υλοποίηση τέτοιου είδους ευέλικτο φορτίο.

- **Άμεσα Ελεγχόμενο Ευέλικτο Φορτίο (Directly Managed Flexible Demand - DMFD)**

Ο άμεσος έλεγχος φορτίου περιλαμβάνει τον προγραμματισμό της κατανάλωσης ενός ηλεκτρικού φορτίου. Σε αυτή την κατηγορία το προφίλ κατανάλωσης ευέλικτου φορτίου αλλάζει με τέτοιο τρόπο που η συνολική ενέργεια που προγραμματίζεται να καταναλωθεί από το ηλεκτρικό φορτίο σε επίπεδο ημέρας, δηλαδή η συνολική ημερήσια ενέργεια κατανάλωσης, να είναι ίση με την προβλεπόμενη συνολική ημερήσια ενέργεια κατανάλωσης του ηλεκτρικού φορτίου. Συνεπώς, το προβλεπόμενο προφίλ κατανάλωσης του ηλεκτρικού φορτίου ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαμορφωθεί ένα νέο προφίλ κατανάλωσης (προγραμματισμένο προφίλ κατανάλωσης). Η συνολική ημερήσια καταναλισκόμενη ενέργεια των δύο προφίλ είναι ίση [10]. Παράδειγμα του εν λόγω μοντέλου διαχείρισης ευέλικτης ζήτησης μπορεί να είναι μια βιομηχανική εγκατάσταση ή γενικότερα ένας πελάτης ΜΤ που μπορεί να μετατοπίσει τη βιομηχανική ή εμπορική του δραστηριότητα σε άλλη χρονική περίοδο.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βασικός ρόλος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να συνδέσει την παραγωγή με την κατανάλωση με αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο [15]. Με τον όρο παραγωγή αναφέρεται το πλήθος των διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ικανές να εγχύσουν ισχύ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, με τον όρο κατανάλωση, αναφέρεται το πλήθος των διατάξεων που είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό σύστημα και απορροφούν/καταναλώνουν την εγχεόμενη ισχύ. Τα δίκτυα διανομής (ΔΔ) μέσω ενός συνόλου διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου, έχουν ως στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης [4].

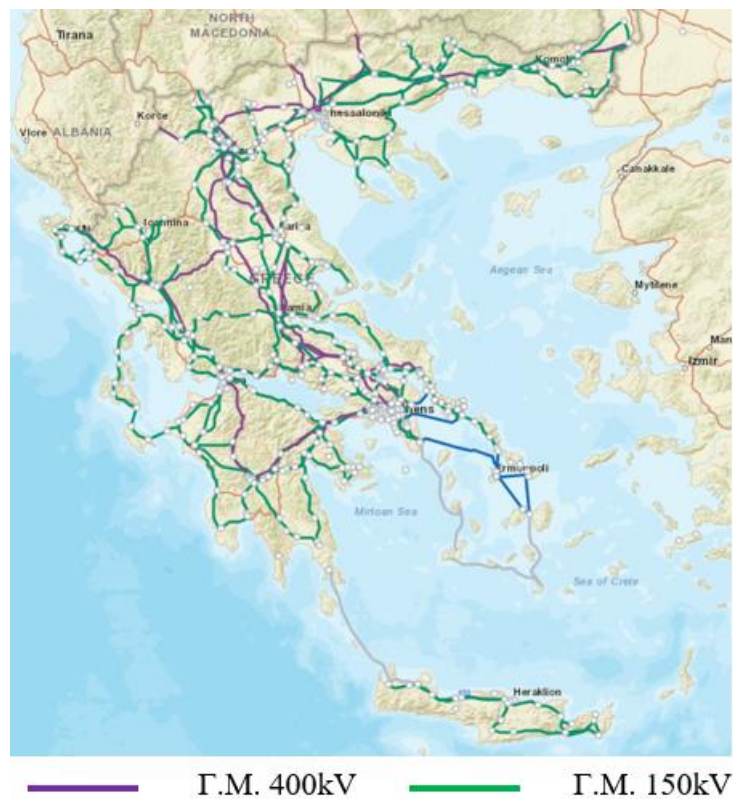
Τα τελευταία χρόνια, η διαρκώς αυξανόμενη εγκατάσταση διανεμημένων ενεργειακών πόρων (ΔΕΠ), όπως μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ), που η τεχνολογία τους βασίζεται κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), μονάδων αποθήκευσης ενέργειας και ευέλικτα φορτία, έχει δημιουργήσει σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία και στη δομή των ΔΔ. Μέχρι πρότινος το ΔΔ είχε απλοποιημένη ακτινική μορφή καθώς η ροή ισχύος είχε πάντα κατεύθυνση από την παραγωγή προς τους καταναλωτές, δηλαδή από τον υποσταθμό (Υ/Σ) υψηλής τάσης (ΥΤ)/μέσης τάσης (ΜΤ) προς τα ηλεκτρικά φορτία [4].

Η αυξανόμενη εγκατάσταση ΔΕΠ αναμένεται να αλλάξει τα ΔΔ από παθητικά σε ενεργά ΔΔ. Στα ενεργά ΔΔ δίνεται η δυνατότητα συντονισμένου ελέγχου των ΔΕΠ, όπως είναι τα ευέλικτα φορτία και οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, των στοιχείων του δικτύου, όπως συστοιχίες πυκνωτών, και της παραγωγής των ΜΔΠ με στόχο τη βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά λειτουργία του δικτύου και τη μεγαλύτερη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ αλλά και εξυπηρέτησης νέων ηλεκτρικών φορτίων, όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα μεταφοράς και τα ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας, στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της παραδοσιακής προσέγγισης λειτουργίας των παθητικών ΔΔ και η μετατροπή τους σε ενεργά ΔΔ. Τέλος, παρουσιάζονται οι πηγές ευελιξίας που αξιοποιούνται για τον προγραμματισμό λειτουργίας των ενεργών ΔΔ και η μεθοδολογία προγραμματισμού της λειτουργίας των ενεργών ΔΔ.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

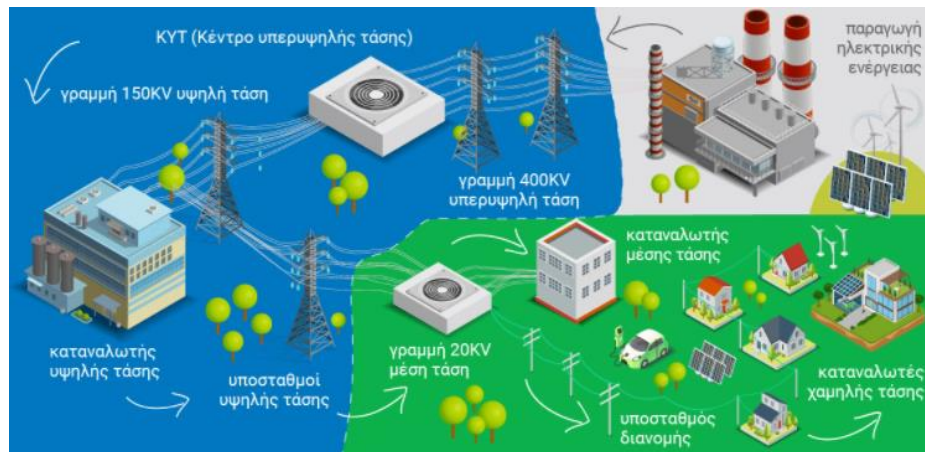
Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ορίζεται ως: «οι γραμμές υψηλής τάσης, οι εγκατεστημένες στην Ελληνική Επικράτεια διασυνδέσεις, χερσαίες ή θαλάσσιες και όλες οι εγκαταστάσεις, εξοπλισμός και εγκαταστάσεις ελέγχου που απαιτούνται για την ομαλή, ασφαλή και αδιάλειπτη διακίνηση ηλεκτρικής ενέργειας από έναν σταθμό παραγωγής σε έναν υποσταθμό, από έναν υποσταθμό σε έναν άλλο ή προς ή από οποιαδήποτε διασύνδεση.» [16]. Το σύστημα μεταφοράς συνδέει τους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα ΔΔ. Η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται σε ΥΤ ή υπερ-ΥΤ (ΥΥΤ) για τη μείωση των ωμικών απωλειών και την εξασφάλιση της οικονομικότερης λειτουργίας [15]. Στην Ευρώπη, η τάση των συστημάτων μεταφοράς είναι συνήθως 150 kV, 225 kV ή 400 kV [15]. Στην Ελλάδα η τάση των συστημάτων μεταφοράς είναι 150 kV ή 400 kV (Σχήμα 3.1). Η επιλογή αυτών των τάσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση από την οποία πρέπει να μεταφερθεί η ισχύς. Σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία, στα συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιείται τάση που φτάνει τα 765 kV [17], ή ακόμα και τα 1,2 MV [18]. Τα συστήματα μεταφοράς περιλαμβάνουν τις γραμμές μεταφοράς, τους υποσταθμούς ζεύξης δικτύων καθώς και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Ακόμα τα συστήματα μεταφοράς εξυπηρετούν απευθείας καταναλωτές ΥΤ με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10 MW, όπως βιομηχανίες, οι οποίοι διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού και δικά τους εσωτερικά δίκτυα ΜΤ και ΧΤ.



Σχήμα 3.1: Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς [19]

Τα συστήματα μεταφοράς είναι περίπλοκα και έχουν βροχοειδή δομή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη τροφοδότηση μέσω εναλλακτικών οδύσεων ροής ισχύος. Αρμόδιοι για την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους είναι οι Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς (Transmission System Operators – TSO). Στην Ευρώπη, υπάρχει στενή διασύνδεση μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς σε διάφορες χώρες. Αυτό επιτρέπει την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ γειτονικών χωρών και συμβάλλει στην καλύτερη σταθερότητα του συστήματος. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η συνεργασία μεταξύ Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς και των δραστηριοτήτων τους διασφαλίζεται από τον φορέα ENTSO-E (Ευρωπαϊκό Δίκτυο Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας – European Network of Transmission System Operators for Electricity).

Τα συστήματα υπο-μεταφοράς ενεργούν ως διεπαφή μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς και των ΔΔ. Σε ορισμένες χώρες, αυτά τα δίκτυα δεν υφίστανται. Όπου υφίστανται, αυτά τα συστήματα είναι δίκτυα ΥΤ και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή ισχύος που παράγεται από μικρότερες μονάδες παραγωγής. Στη Γαλλία, τα συστήματα υπο-μεταφοράς λειτουργούν σε τάση 63 kV ή 90 kV [15]. Σε άλλες χώρες όπως η Ιαπωνία, αυτά τα συστήματα λειτουργούν στα 66 kV ή στα 77 kV [15].



Σχήμα 3.2: Το ελληνικό Δίκτυο Ηλεκτρισμού (Σύστημα μεταφοράς με μπλε χρώμα, Δίκτυο Διανομής με πράσινο χρώμα) [20]

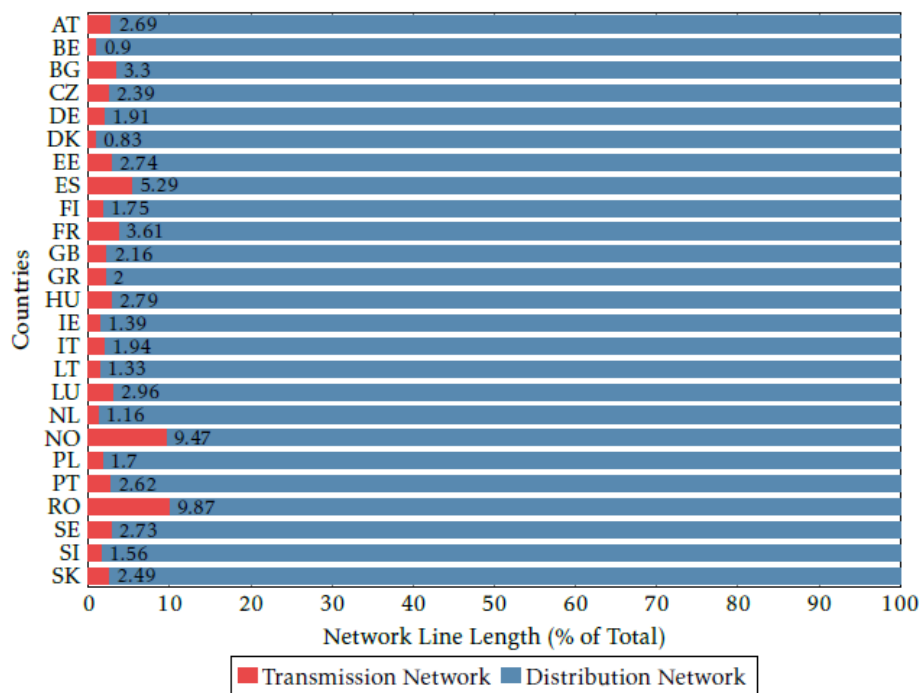
3.3 ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Τα ΔΔ είναι συνήθως δίκτυα ΜΤ (πρωτεύον ΔΔ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ) (δευτερεύον ΔΔ) που χρησιμεύουν για τη διανομή της ενέργειας από τα συστήματα μεταφοράς στους καταναλωτές. Η οδηγία της ΕΕ 2019/944/ΕΚ [21] ορίζει τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ως «μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστημάτων διανομής υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης με σκοπό την παράδοσή της σε πελάτες, μη συμπεριλαμβανομένης όμως της προμήθειας». Τα όρια συστήματος μεταφοράς και ΔΔ είναι ο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, στον οποίο οι μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης μειώνουν το επίπεδο τάσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση των δικτύων διανομής γίνονται συνήθως από Διαχειριστές Συστημάτων Διανομής (ΔΣΔ – Distribution System Operators – DSO). Σε ορισμένες χώρες, ορισμένα δίκτυα υψηλής τάσης ενδέχεται επίσης να θεωρούνται ως ΔΔ, καθώς εμπίπτουν στην αρμοδιότητα των ΔΣΔ. Αυτό συμβαίνει και στην Ελλάδα.

Δίκτυα ΥΤ εντός του αστικού ιστού της Αττικής εμπίπτουν στην αρμοδιότητα του ΔΕΔΔΗΕ. Ο ΔΕΔΔΗΕ επίσης, διαχειρίζεται το δίκτυο ΥΤ της Ρόδου και της Λέσβου. Μέχρι και πριν τη διασύνδεση της Κρήτης, την 1η Νοεμβρίου 2021, η ΥΤ της Κρήτης λειτουργούσε υπό την ευθύνη του ΔΕΔΔΗΕ.

Τα δίκτυα ΜΤ λειτουργούν με τάση από 3 kV έως 36 kV [22]. Στην Ελλάδα, το πρωτεύον ΔΔ λειτουργεί στα 20kV [20], με ορισμένες εξαιρέσεις που το δίκτυο λειτουργεί στα 15 kV και στα 6,6 kV. Ο κύριος ρόλος του πρωτεύοντος ΔΔ είναι να παρέχει ενέργεια στους πελάτες που είναι απευθείας συνδεδεμένοι στη ΜΤ και στο δευτερεύον ΔΔ εξυπηρετώντας τους πελάτες που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό. Στο δευτερεύον ΔΔ (δίκτυο ΧΤ) συνδέεται κατά κύριο λόγο ο μεγαλύτερος όγκος των ηλεκτρικών φορτίων. Ο υποβιβασμός της τάσης από ΜΤ σε ΧΤ πραγματοποιείται μέσω των υποσταθμών διανομής (ΥΣ ΜΤ/ΧΤ), που αποτελούν τη διαπαφή μεταξύ του πρωτεύοντος ΔΔ και του δευτερεύοντος ΔΔ. Τα δίκτυα ΧΤ λειτουργούν συνήθως στα 400 V.

Τα δίκτυα ΜΤ και ΧΤ καλύπτουν πολύ μεγαλύτερη περιοχή από τα δίκτυα ΥΤ και ΥΥΤ, δεδομένης της φύσης των λειτουργιών τους, και επομένως, τα μήκη των ΔΔ υπερβαίνουν κατά πολύ αυτά των συστημάτων μεταφοράς. Με βάση τα δεδομένα που παρέχονται από τους φορείς ENTSO-E και Eurelectric, η αναλογία του μήκους της γραμμής ισχύος για συστήματα μεταφοράς και διανομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σύγκριση μήκους γραμμών μεταφοράς και διανομής ανά χώρα [15]

Μεταξύ των χωρών για τις οποίες διατίθενται δεδομένα, το συνολικό μήκος των γραμμών των ΔΔ αποτελούν περισσότερο από το 97% του συνολικού μήκους των γραμμών που κατασκευάζονται κατά μέσο όρο.

Τα ΔΔ διαχωρίζονται σε εναέρια και υπόγεια, ενώ εξαιτίας του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν (μέσα προστασίας, στοιχεία δικτύου για ζεύξη/απόζευξη, διακοπτικά μέσα, κ.ά.) λειτουργούν ακτινικά.

3.4 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ιστορικά, οι περισσότεροι ΔΣΔ σχεδιάζουν, κατασκευάζουν και λειτουργούν τα δίκτυά τους με παθητικό τρόπο. Ο εν λόγω παθητικός τρόπος προκύπτει από την αντιμετώπιση των δικτύων με την προσέγγιση ότι τα δίκτυα ακολουθούν τη ζήτηση (networks follow demand) [23]. Σε μια τέτοια προσέγγιση, η εξέλιξη της ηλεκτρικής ζήτησης του δικτύου υπαγορεύει τις ενέργειες των ΔΣΔ. Στην παρούσα ενότητα αρχικά παρουσιάζονται οι υποχρεώσεις των ΔΣΔ (Ενότητα 3.4.1) και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρέχουσες διαδικασίες που έχουν υιοθετήσει οι ΔΣΔ για τον προγραμματισμό και τη λειτουργία αυτών των δικτύων (Ενότητα 3.4.2).

3.4.1 ΥΠΟΧΡΕΩΣΕΙΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη τροφοδότηση των τελικών καταναλωτών, οι ΔΣΔ έχουν ευθύνες και υποχρεώσεις προς τους τελικούς καταναλωτές. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω υποχρεώσεις ποικίλουν από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα οι υποχρεώσεις διέπονται από τον Νόμο 4001/2011, ο οποίος ενσωμάτωσε στην Ελληνική νομοθεσία τις διατάξεις της Οδηγίας 2009/72/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 13^{ης} Ιουλίου 2009 «Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και για την κατάργηση της Οδηγίας 2003/45/EK και της Οδηγίας 2009/73/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 13ης Ιουλίου 2009» [24]. Οι υποχρεώσεις αυτές κατηγοριοποιούνται στις εξής: σύνδεση και πρόσβαση στο δίκτυο και ποιότητα τροφοδότησης.

Σύνδεση και πρόσβαση στο δίκτυο

Οι ΔΣΔ υποχρεούνται από τη νομοθεσία να διασφαλίζουν ότι οι καταναλωτές και οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πρόσβαση στο δημόσιο δίκτυο διανομής. Ο ΔΣΔ παρέχει στους χρήστες (καταναλωτές και παραγωγούς) πρόσβαση στο δίκτυο, χωρίς διακρίσεις μεταξύ των χρηστών ή των κατηγοριών χρηστών. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, ο ΔΣΔ συνεργάζεται με τους αιτούμενους σύνδεσης στο Δίκτυο, καθώς και με τους υφιστάμενους Χρήστες του Δικτύου, και τους ενημερώνει για τις υφιστάμενες δυνατότητες, σύμφωνα με τις διατάξεις της νομοθεσίας [25]. Για την πρόσβαση των παραγωγών και των τελικών καταναλωτών στο ΔΔ, οι ΔΣΔ εισπράττουν τέλη για τη σύνδεση με το δίκτυο και χρεώνουν τους τελικούς καταναλωτές για τη χρήση του δικτύου (χρεώσεις χρήσης δικτύου – ΧΧΔ) [26] [25].

Το τέλος σύνδεσης, όπως υποδηλώνει και το όνομα του, χρεώνεται στον χρήστη για να συνδεθεί στο δίκτυο. Χώρες όπως η Δανία χρεώνουν μεγάλο κόστος σύνδεσης για μεγάλους καταναλωτές. Αυτή η χρέωση περιλαμβάνει το σύνολο ή μέρος του κόστους για ενίσχυση του δικτύου που απαιτείται από το αίτημα σύνδεσης (κόστος άμεσης σύνδεσης) και το κόστος των μετασχηματιστών στο δίκτυο (έμμεσο κόστος σύνδεσης). Άλλες χώρες όπως το Βέλγιο και η Πορτογαλία χρεώνουν στους χρήστες μόνο το άμεσο κόστος σύνδεσης στο δίκτυο.

Το τέλος χρήσης, όπως υποδηλώνει και το όνομα του, χρεώνεται στον τελικό καταναλωτή για τη χρήση του δικτύου. Υπόχρεοι για την καταβολή των ΧΧΔ ενός καταναλωτή είναι οι προμηθευτές που τον εκπροσωπούν, αναλογικά προς το ποσοστό εκπροσώπησης του καταναλωτή από κάθε προμηθευτή. Ο ΔΣΔ υπολογίζει σε μηνιαία βάση και κοινοποιεί στον υπόχρεο προμηθευτή την αναλογούσα ΧΧΔ. Για τον υπολογισμό μπορούν να χρησιμοποιούνται Δεδομένα Μετρήσεων ή εκτιμήσεις των μεγεθών που υπεισέρχονται στον υπολογισμό αυτόν ή συνδυασμός τους [25]. Χώρες όπως η Γαλλία διαθέτουν ένα προηγμένο σύστημα για τη ΧΧΔ. Χώρες όπως η Πορτογαλία, το Βέλγιο και η Γερμανία δεν χρεώνουν τέλος χρήσης.

Ποιότητα τροφοδότησης

Η ποιότητα τροφοδότησης καθορίζει την αδιάλειπτη παροχή, την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας και την υποστήριξη πελατών από τους ΔΣΔ. Οι ρυθμιστικές αρχές κάθε χώρας συχνά επιβάλλουν αυστηρές απαιτήσεις απόδοσης σε συνάρτηση των παραπάνω στόχων. Για την Ελλάδα η ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) είναι ο υπεύθυνος φορέας για τα ρυθμιστικά και κανονιστικά ζητήματα στον τομέα της ενέργειας. Στην Ελλάδα ο ΔΣΔ (ΔΕΔΔΗΕ) δεσμεύεται για την ποιότητα των υπηρεσιών του απέναντι στους καταναλωτές κυρίως με δύο τρόπους:

α. Βάσει της Υπουργικής Απόφασης του 2007 (Δ5/ΗΛ/Β/Φ1.10/6636/26.03.2007) έχει προσδιοριστεί η προθεσμία εξυπηρέτησης των αιτημάτων ηλεκτροδότησης των Πελατών.

β. Βάσει του προγράμματος «Εγγυημένες Υπηρεσίες» που εφαρμόζεται από 1/4/2014 (με την έγκριση της ΡΑΕ) [27].

Παράλληλα για τον προσδιορισμό της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παρακολουθούνται δύο κύριοι δείκτες: η μέση ετήσια διάρκεια διακοπών (System average interruption duration index – SAIDI) και η μέση ετήσια συχνότητα διακοπών (System average interruption frequency index – SAIFI) κάθε καταναλωτή [27]. Στην Ευρώπη, η διάρκεια των διακοπών σε όλα τα δίκτυα στο σύστημα ισχύος θεωρείται χαμηλή, με διάρκεια μεταξύ 15 και 400 λεπτών διακοπών τον χρόνο [22]. Σύμφωνα με τον ΔΕΔΔΗΕ, ο δείκτης SAIDI λόγω διακοπών για το έτος 2018 ήταν 188 λεπτά [28].

Η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος αναφέρεται στις αποκλίσεις τάσης, στην ποιότητα της ισχύος (αρμονικές, παραμορφώσεις) και στις αποκλίσεις στη συχνότητα τροφοδοσίας. Στην Ευρώπη, οι αποκλίσεις τάσης που επιτρέπονται για τα ΔΔ ΜΤ καθορίζονται στο 5% από τους Ευρωπαίους ΔΣΔ προκειμένου να είναι σε θέση να περιορίσουν τις αποκλίσεις τάσης στο 10% για τον τελικό καταναλωτή ΧΤ, όπως καθορίζεται από το πρότυπο EN 50160 [29]. Στην κανονική λειτουργία, οι ευρωπαίοι φορείς εκμετάλλευσης υποχρεούνται να διατηρούν την απόκλιση συχνότητας εντός του 1% της ονομαστικής της τιμής των 50 Hz. Μεταξύ των ορίων που ισχύουν για τις διάφορες αρμονικές, ανάλογα με το επίπεδο τάσης, το πρότυπο EN 50160 ορίζει ότι η συνολική αρμονική παραμόρφωση της κυματομορφής ισχύος πρέπει να είναι κάτω από 8%.

Ο κανονισμός σε περισσότερες από τις μισές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προωθεί την τήρηση αυτών των κριτηρίων απόδοσης, συνδέοντας τα έσοδα των ΔΣΔ με την απόδοσή τους με αυτά τα κριτήρια [26].

3.4.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Η πρακτική «συνδέω και ξεχνώ» (που ονομάζεται επίσης προσέγγιση «fit and forget» στον προγραμματισμό και τη λειτουργία των ΔΔ), περιλαμβάνει την επίλυση πιθανών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στα ΔΔ στο στάδιο του προγραμματισμού. Κατά την προσέγγιση αυτή η κατασκευή νέων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, υποδομών καθώς και η ενίσχυση των υπάρχοντων γραμμών, γίνεται με βάση τα τρέχοντα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο και τα ευλόγως αναμενόμενα φορτία που ενδέχεται να συνδεθούν στο δίκτυο στο μέλλον.

Ο γαλλικός ΔΣΔ Enedis θεωρεί ότι τα ΔΔ MT του θα πρέπει να λειτουργούν χωρίς παραβιάσεις των ορίων τάσης ή ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για δύο συνθήκες:

- (1) ελάχιστη παραγωγή & μέγιστη κατανάλωση και
- (2) μέγιστη παραγωγή & ελάχιστη κατανάλωση.

Το ΔΔ MT σχεδιάζεται για να πληροί αυτά τα κριτήρια [30].

Κατά το στάδιο της λειτουργίας, οι ΔΣΔ αποφασίζουν για την τοπολογική διαμόρφωση του δικτύου. Αποφασίζουν για τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας του ΔΔ που θα χρησιμοποιηθούν (ανοιχτές-κλειστές) και λαμβάνουν υπόψη, μεταξύ άλλων, τις εποχιακές διακυμάνσεις του φορτίου καθώς και τις γραμμές τροφοδοσίας που βρίσκονται υπό συντήρηση.

Πιο κοντά στις λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο, τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), On-Load Tap Changers – OLTC, χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης στους κόμβους των ΔΔ. Η αρχή λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ είναι η αλλαγή σύνδεσης που τροποποιούν την αναλογία μετασχηματισμού του μετασχηματιστή του οποίου αποτελούν μέρος. Αυτό αλλάζει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, και συνεπώς την τάση εξόδου του. Αυτή η λειτουργία εξαρτάται από ένα σημείο αναφοράς (set point) το οποίο επιλέγεται με έναν από τους δύο ακόλουθους τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση, το σημείο αναφοράς επιλέγεται να είναι η τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή που διαθέτει το ΣΑΤΥΦ. Στη δεύτερη συνίσταται στη σύγκριση της πρωτογενούς τάσης με τον όρο $U - Z \cdot I$. Εδώ, τα U και I μετρούνται στην έξοδο του μετασχηματιστή και το Z είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δικτύου όπως φαίνεται από την πλευρά δευτερεύοντος. Στη συνέχεια, η ρύθμιση της σύνδεσης αυξάνει ή μειώνει την τάση του δευτερεύοντος, επηρεάζοντας έτσι όλες τις τάσεις κατάντη. Και στις δύο περιπτώσεις, οι αλλαγές σύνδεσης γίνονται χωρίς καμία ορατότητα των πραγματικών συνθηκών του δικτύου [15].

Ακόμη και με την αυτόματη διόρθωση της τάσης μέσω των ΣΑΤΥΦ, αυτός ο τρόπος προγραμματισμού και λειτουργίας των ΔΔ μπορεί να θεωρηθεί παθητικός. Αυτό συμβαίνει επειδή τα προβλήματα δικτύου τόσο στον προγραμματισμό όσο και στη λειτουργία του δικτύου διανομής επιλύονται κατά την εμφάνισή τους.

3.5 ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

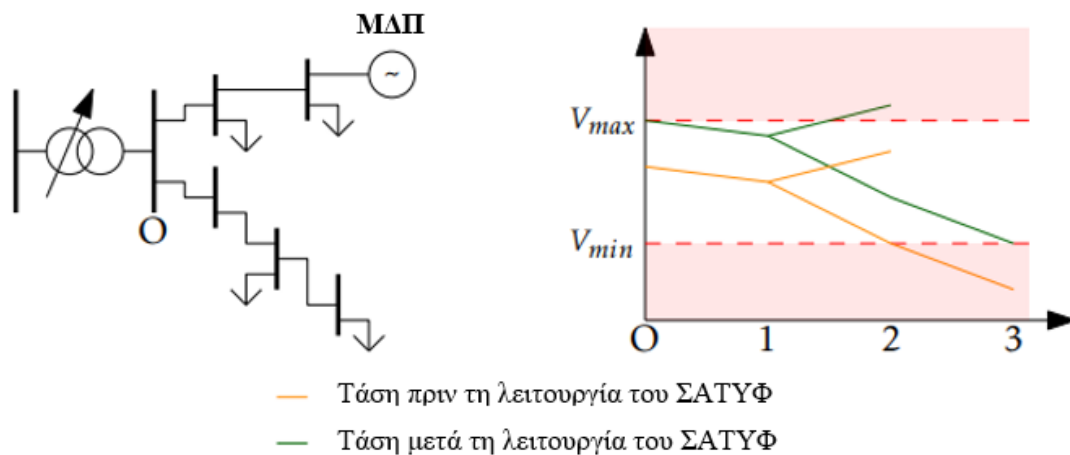
Με την ενσωμάτωση των ΜΔΠ, κυρίως τεχνολογίας ΑΠΕ, τα ΔΔ, τα οποία είχαν σχεδιαστεί να λειτουργούν με παθητικό τρόπο, αντιμετωπίζουν ένα πλήθος προβλημάτων.

Ορισμένα από αυτά τα προβλήματα δεν είναι άμεσα ορατά, καθώς η αρχική ενσωμάτωση ΜΔΠ τείνει να βελτιώσει ορισμένες συνθήκες του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτής της ενσωμάτωσης, και στην ουσία, τα προβλήματα που θέτουν στα ΔΔ, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Λειτουργία των ΣΑΤΥΦ

Η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την ενσωμάτωση ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ. Υπενθυμίζεται ότι η αυτόματη ρύθμιση τάσης των ΣΑΤΥΦ γίνεται με βάση τη μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον της ή με βάση την τάση $U - Z \cdot I$. Με την ενσωμάτωση ΜΔΠ, η αυτόματη ρύθμιση της τάσης ενδέχεται να προκαλέσει παραβιάσεις τάσης του δικτύου.

Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο εάν συνδεθεί μια ΜΔΠ, η έγχυση ισχύος από αυτή προκαλεί αύξηση της τάσης στον κόμβο όπου είναι συνδεδεμένη. Η αρχή λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ θεωρεί ότι οι τάσεις στο δίκτυο μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε περισσότερο από τον υποσταθμό. Παρατηρείται παραβίαση χαμηλής τάσης σε έναν από τους κόμβους, όπως φαίνεται στο προφίλ τάσης πριν τη λειτουργία ΣΑΤΥΦ του Σχήματος 3.4. Εάν το ΣΑΤΥΦ επιλέξει μια ρύθμιση που αυξάνει την τάση, το πρόβλημα της χαμηλής τάσης θα λυνόταν. Ωστόσο, ο κόμβος με τη ΜΔΠ θα παρουσίαζε παραβίαση υπέρτασης, όπως φαίνεται στο προφίλ τάσης μετά τη λειτουργία ΣΑΤΥΦ. Σε μια τέτοια περίπτωση, το ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να διατηρήσει τις τάσεις του δικτύου εντός των καθορισμένων ορίων. Αυτό σημαίνει ότι οι αρχές της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ πρέπει να επανεξεταστούν, με την ανάγκη για πρόσθετους μηχανισμούς ρύθμισης τάσης [15].



Σχήμα 3.4: Λειτουργία ΣΑΤΥΦ με ΜΔΠ [15]

Αντίστροφη ροή ισχύος

Το δεύτερο αποτέλεσμα είναι η αντίστροφη ροή ισχύος. Στο ΔΔ ΜΤ, όταν η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση, η ισχύς ρέει προς το σύστημα μεταφοράς. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζει ουσιαστικά τα κριτήρια σχεδιασμού των ΔΔ. Στην περίπτωση προστασίας, για παράδειγμα, οι ηλεκτρονόμοι μονής κατεύθυνσης δεν αρκούν πλέον. Αυτό απαιτεί πρόσθετες μετατροπές σε αυτά τα δίκτυα. Επίσης, απαιτεί εκτεταμένες λειτουργικές αλλαγές σε όλο το σύστημα και την εφαρμογή πρόσθετων μέτρων ελέγχου [31].

Απώλειες ενεργού ισχύος

Το τρίτο αποτέλεσμα είναι η αλλαγή στις απώλειες ενεργού ισχύος. Ανάλογα με τη θέση και την ποσότητα ισχύος που παράγεται από τις ΜΔΠ που είναι συνδεδεμένες σε ένα ΔΔ, οι απώλειες ενεργού ισχύος μπορεί είτε να αυξηθούν είτε να μειωθούν. Όταν η παραγωγή των ΜΔΠ από ΑΠΕ είναι τοπολογικά πλησίον της κατανάλωσης, η παραγόμενη ενέργεια διανύει μικρότερες αποστάσεις. αυτό μειώνει τις απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Αντίθετα, όταν οι ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ συνδέονται πιο μακριά, οι απώλειες αυξάνονται. Οι απώλειες αυξάνονται επίσης κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και παράγεται υψηλή ισχύς από Α/Π. Γενικά, ο στόχος είναι να μειωθούν αρχικά οι απώλειες όταν υπάρχει χαμηλή ενσωμάτωση ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ και, στη συνέχεια, να αυξηθούν σε υψηλότερα ποσοστά ενσωμάτωσης.

3.6 ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι επιπτώσεις που τίθενται από την ενσωμάτωση ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ και οι νέες ευθύνες που πρέπει να αναλάβουν οι ΔΣΔ έχουν ως αποτέλεσμα την ανάγκη επανεξέτασης του προγραμματισμού και της λειτουργίας των ΔΔ. Τα ενεργά ΔΔ θεωρούνται ως μέσο για την επίλυση αυτών των ζητημάτων από τους ΔΣΔ.

Με στόχο την υψηλότερη διείσδυση ΜΔΠ από ΑΠΕ, ο τρόπος λειτουργίας των ΔΔ πρέπει να τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αξιοποιεί στο μέγιστο τις δυνατότητες των ΔΕΠ. Στο πλαίσιο αυτό τα ΔΔ μετατρέπονται σε ενεργά ΔΔ, τα οποία ορίζονται ως ακολούθως:

«Τα ενεργά ΔΔ είναι δίκτυα που διαθέτουν συστήματα για τον έλεγχο ενός συνδυασμού ΔΕΠ, που αποτελούνται από ΜΔΠ, ευέλικτα φορτία και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ΔΣΔ έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης των ροών ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μια ευέλικτη τοπολογία δικτύου. Οι κάτοχοι των ΔΕΠ ή ο ΔΣΔ αξιοποιεί την ευελιξία των ΔΕΠ για την υποστήριξη του συστήματος διανομής, κάτι που εξαρτάται από ένα κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο και τη σύμβαση σύνδεσής τους στο δίκτυο» [32].

Στον τομέα προγραμματισμού λειτουργίας, οι ΔΣΔ μπορούν να δημιουργήσουν προγράμματα για συντονισμένο έλεγχο των δικτύων τους. Ως μέρος αυτών των προγραμμάτων, μπορούν να ενεργοποιηθούν οι ευελιξίες που υπάρχουν στο δίκτυο και να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση των ενδεχόμενων παραβιάσεων των περιορισμών του δικτύου. Αυτά τα προγράμματα δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθούν οι δαπάνες του δικτύου.

Ο προγραμματισμός λειτουργίας περιλαμβάνει τη δημιουργία βραχυπρόθεσμων προγραμμάτων για ΔΔ. Αυτά τα προγράμματα καταρτίζονται συνήθως για μία ημέρα, σε καθημερινή βάση. Αυτό επιλέγεται διότι η ημέρα αντιπροσωπεύει μια στοιχειώδη χρονική περίοδο που επαναλαμβάνεται. Ο προγραμματισμός λειτουργίας μπορεί επίσης να επιλεγεί για χρονικό ορίζοντα λίγων ημερών ή μιας εβδομάδας κάθε φορά. Σε αυτά τα προγράμματα, παρέχονται σημεία ρύθμισης για τις διαφορετικές ευελιξίες που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο ΔΣΔ.

Οι προβλέψεις των φορτίων και της παραγωγής των ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, καθώς και οι λεπτομέρειες του δικτύου αποτελούν ευθύνη του ΔΣΔ ως Διαχειριστή Δεδομένων. Οι προβλέψεις των φορτίων μπορούν να προκύψουν με βάση τα δεδομένα των έξυπνων μετρητών (smart-meters). Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν την

προσομοίωση των συνθηκών του δικτύου και επιτρέπουν στον ΔΣΔ να προσδιορίσει προσεγγιστικά την ώρα και τη θέση των παραβιάσεων των περιορισμών του δικτύου.

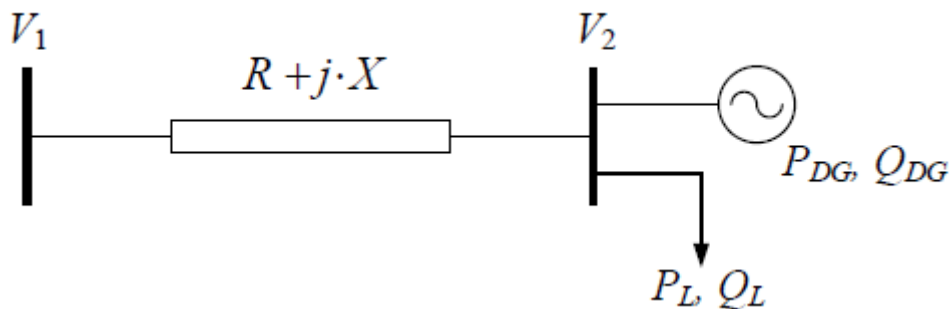
Ο ΔΣΔ μπορεί στη συνέχεια να πραγματοποιήσει μια βέλτιστη επιλογή ευελιξιών του μέσω ενός τεχνικού και οικονομικού μοντέλου βραχυπρόθεσμης βελτιστοποίησης. Αυτή η βελτιστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα σημεία [15]:

1. Το κόστος της ευελιξίας πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Ο στόχος αυτός πρέπει να εκτελείται με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι ο στόχος της τεχνικής και οικονομικής βελτιστοποίησης θα πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους.
2. Οι απώλειες στο δίκτυο (ή οι δαπάνες για απώλειες) πρέπει επίσης να ελαχιστοποιηθούν. Αυτό είναι απαραίτητο για τον μετριασμό της αύξησης των απωλειών λόγω της ενσωμάτωσης των ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ και των αρνητικών επιπτώσεων στα έσοδα του ΔΣΔ και στους στόχους ενεργειακής απόδοσης.
3. Οι ιδιαιτερότητες καθεμιάς από τις ευελιξίες πρέπει να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια στη βελτιστοποίηση. Η ακρίβεια της μοντελοποίησης των ευελιξιών επηρεάζει άμεσα τη λύση της βελτιστοποίησης, και ως εκ τούτου τις δαπάνες του ΔΣΔ.

Τα αποτελέσματα του προγραμματισμού λειτουργίας, όπως για παράδειγμα οι τύποι ευελιξιών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βελτιστοποίηση αλλά και με ποιον τρόπο, θα πρέπει να παρουσιάζονται τόσο στα κέντρα ελέγχου του ΔΣΔ όσο και στα κέντρα ελέγχου των επιλεγμένων ευελιξιών [15].

3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ

Η τάση στα ΔΔ πρέπει να κυμαίνεται εντός συγκεκριμένων ορίων (για παράδειγμα όπως τα όρια που τίθενται από το πρότυπο EN 50160 [29]) . Η σύνδεση ΜΔΠ μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στην τάση, ειδικά όταν η τεχνολογία τους βασίζεται σε ΑΠΕ. Η μεταβολή της τάσης μεταξύ των δύο κόμβων του δικτύου διανομής του Σχήματος 3.5 υπολογίζεται ως ακολούθως:



Σχήμα 3.5: Δίκτυο διανομής με ΜΔΠ

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V_2} = \frac{R \cdot (P_L - P_{DG}) + X \cdot (Q_L \pm Q_{DG})}{V_2} \quad (3.1)$$

όπου V_i είναι το μέτρο της τάσης του κόμβου i , R και X είναι η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση σειράς της γραμμής, αντίστοιχα, P_L και Q_L είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς του

φορτίου, αντίστοιχα, P_{DG} και Q_{DG} είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς της ΜΔΠ, αντίστοιχα. Εξαιτίας της υψηλής τιμής του λόγου της αντίστασης προς την αντίδραση (R/X) των γραμμών διανομής, η ροή ενεργού ισχύος έχει μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της τάσης από ότι η ροή άεργου ισχύος, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (3.1). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε περίπτωση υψηλής διείσδυσης διανεμημένης παραγωγής να προκληθεί ανύψωση τάσης ανάντη του σημείου σύνδεσης της ΜΔΠ στο δίκτυο.

Στα παθητικά ΔΔ χρησιμοποιούνται μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου τάσης και άεργου ισχύος (volt/var control). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ρυθμιστών τάσης. Η βασική λειτουργία του ρυθμιστή τάσης στο σύστημα διανομής είναι να κρατηθεί η τάση σταθερή σε ένα αποδεκτό επίπεδο και σε όλη τη διάρκεια της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του συστήματος. Οι επιθυμητές τάσεις μπορούν να ληφθούν είτε άμεσα ελέγχοντας την τάση ή με τον έλεγχο της ροής άεργου ισχύος η οποία στη συνέχεια έχει επιπτώσεις στην πτώση τάσης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κανονικά για τον έλεγχο της τάσης και της άεργου ισχύος είναι οι μετασχηματιστές που διαθέτουν ΣΑΤΥΦ, η χρήση πυκνωτών σε παράλληλη λειτουργία και οι ρυθμιστές τάσης σε βήματα. Τέτοιος εξοπλισμός χρησιμοποιείται συνήθως βασισμένος στην υπόθεση ότι η ισχύς ρέει σε μια κατεύθυνση μόνο και ότι η τάση μειώνεται κατά μήκος της γραμμής, από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτές [4].

Στα ενεργά ΔΔ οι μέθοδοι ελέγχου τάσης έχουν παρόμοια φιλοσοφία με αυτή των μεθόδων ελέγχου τάσης και άεργου ισχύος των παθητικών δικτύων διανομής. Ωστόσο, η θεμελιώδης διαφορά τους είναι ότι στα ενεργά ΔΔ επιτρέπεται και ο έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος των ΜΔΠ. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανύψωσης τάσης προτείνεται η περικοπή ενεργού ισχύος των ΜΔΠ. Η μέθοδος αυτή, για να υπολογίσει το ποσοστό της περικοπής ενεργού ισχύος των ΜΔΠ που απαιτείται για να βρεθεί η τάση εντός επιτρεπτών ορίων, χρησιμοποιεί τους συντελεστές ευαισθησίας τάσης και θεωρεί ότι η λήψη του ΣΑΤΥΦ στον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ έχει μια σταθερή τιμή, δηλαδή η τάση του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ είναι προκαθορισμένη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανύψωσης τάσης, η περικοπή ενεργού ισχύος των ΜΔΠ είναι πολύ αποτελεσματική, όμως προκαλεί απώλεια εισοδήματος για τους ιδιοκτήτες των ΜΔΠ [4].

3.8 ΑΠΟΦΥΓΗ ΥΠΕΡΦΟΤΙΣΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Οι ΜΔΠ μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη φόρτιση των γραμμών διανομής. Είναι πιθανό η αυξημένη διείσδυση ΜΔΠ να αυξήσει το συνολικό ρεύμα που ρέει στις γραμμές και να οδηγήσει στη λειτουργία των γραμμών καθώς και άλλων στοιχείων του δικτύου πολύ κοντά στα τεχνικά τους όρια [4].

Οι μέθοδοι βέλτιστης διαχείρισης ροής ισχύος σε ενεργά ΔΔ έχουν ως στόχο τη μείωση της συμφόρησης των γραμμών διανομής σε περιόδους όπου υπάρχει υψηλή παραγωγή από ΑΠΕ και χαμηλή ζήτηση φορτίου. Οι μέθοδοι αυτές ακολουθούν στην πλειοψηφία τους στρατηγική κεντρικού ελέγχου, δηλαδή οι αποφάσεις λαμβάνονται από έναν κεντρικό διαχειριστή που έχει υπό την εποπτεία του ολόκληρο το δίκτυο. Επιπλέον, έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τις μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4].

3.9 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Ο περιορισμός παραγωγής αναφέρεται στη μείωση της ενεργού ισχύος που εγχέουν στο δίκτυο οι ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αρχικά, αυτή η ευελιξία μπορεί να φαίνεται επιζήμια για τον στόχο της μεγιστοποίησης της συνεισφοράς των ΑΠΕ. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, η έρευνα έχει δείξει ότι αυτό είναι επωφελές για την οικονομικά αποδοτική λειτουργία των δικτύων [33]. Όταν παραβιάζονται περιορισμοί του δικτύου, ο περιορισμός ισχύος των Α/Π φαίνεται να είναι αποδεκτός.

Στην πρακτική «συνδέω και ξεχνώ» (fit and forget) η μέγιστη παραγωγή ισχύος των ΜΔΠ περιορίζεται από τους περιορισμούς της ροής ισχύος, τα θερμικά όρια γραμμής ή τα όρια τάσης των γραμμών. Το όριο παραγωγής είναι η μέγιστη τοπική παραγωγή που μπορεί να φιλοξενήσει το δίκτυο. Αυτή η παραγωγή χωρίς περιορισμό ισχύος μπορεί να επιτρέπεται να λειτουργεί ανά πάσα στιγμή σε οποιοδήποτε επίπεδο παραγωγής [10].

Ένα σύστημα ενεργής διαχείρισης δικτύου παρέχει την απαραίτητη επικοινωνία και υποδομή ελέγχου για να επιτρέψει πρόσθετες ΜΔΠ με περιορισμό ισχύος να συνεισφέρουν, υπό την προϋπόθεση ότι η παραγωγή αυτών των νέων γεννητριών θα περιοριστεί σύμφωνα με οδηγίες του ΔΣΔ. Ο περιορισμός θα εφαρμοστεί για να αποφευχθεί η παραβίαση των περιορισμών ροής ισχύος το οποίο είναι πιθανό να συμβεί όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και η παραγωγή των ΜΔΠ χωρίς περιορισμό ισχύος είναι υψηλή. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι κλάδοι του δικτύου είναι κοντά στην πλήρη ικανότητα μεταφοράς τους και δεν υπάρχει χωρητικότητα δικτύου για πρόσθετη παραγόμενη ισχύ [10].

3.10 ΕΥΕΛΙΞΙΑ ΣΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στα ενεργά ΔΔ δημιουργείται ο όρος ευελιξία. Ένας ευρέως αποδεκτός ορισμός που εξηγεί τον όρο ευελιξία είναι ο ακόλουθος:

Η ευελιξία είναι η τροποποίηση της έγχυσης ισχύος από τις μονάδες παραγωγής ή/και των μοτίβων κατανάλωσης από την πλευρά των φορτίων ως αντίδραση σε ένα εξωτερικό σήμα (σήμα τιμής ή ενεργοποίησης) προκειμένου να παρέχεται μια υπηρεσία εντός του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [34].

Ο συγκεκριμένος ορισμός μπορεί να θεωρηθεί περιοριστικός επειδή περιορίζει την ευελιξία στην παραγωγή και την κατανάλωση στο δίκτυο. Θα μπορούσε να επαναπροσδιοριστεί ο παραπάνω ορισμός ως ακολούθως:

Η ευελιξία είναι η τροποποίηση της κατάστασης ενός στοιχείου στο δίκτυο ως αντίδραση σε ένα σήμα ενεργοποίησης προκειμένου να βελτιωθούν οι συνθήκες του δικτύου [15].

Με βάση αυτόν τον ορισμό, μια μη εξαντλητική λίστα των ευελιξιών σε ένα σύστημα διανομής είναι η ακόλουθη:

Ευελιξία	Επιδρά σε
Περιορισμός παραγωγής	Έγχυση Ενεργού Ισχύος
Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	Έγχυση Ενεργού Ισχύος/ Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος
Ευέλικτα φορτία	Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος

3.10.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω συσσωρευτών αποτελούνται από ηλεκτρονικό και ηλεκτροχημικό εξοπλισμό ισχύος για τη μετατροπή και αποθήκευση ενέργειας, αντίστοιχα. Η χρήση τους σε εφαρμογές ΔΔ έχει μελετηθεί εδώ και αρκετό καιρό. Στην Ιταλία, για παράδειγμα, ο μεγαλύτερος ΔΣΔ (*e-distribuzione*) σχεδιάζει να εγκαταστήσει συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας σε 40 πρωτεύοντες σταθμούς στο δίκτυό του [35]. Εκτός από κάποιες προγραμματισμένες πιλοτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως αυτή στην Ιταλία, ελάχιστες πραγματικές εφαρμογές αυτών των συστημάτων έχουν υλοποιηθεί ως ευελιξία στα ΔΔ. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο υψηλό κόστος αυτών των συστημάτων. Με τον καιρό και καθώς ορισμένες από τις τεχνολογίες των συστημάτων αυτών εξελίσσονται, το κόστος κατασκευής τους θα μειωθεί.

Με υψηλή ενσωμάτωση των ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως τα συστήματα συσσωρευτών, για την εκμετάλλευση της περίσσιας παραγόμενης ισχύος των μονάδων αυτών. Οι πιθανές χρήσεις τους στον προγραμματισμό λειτουργίας των δικτύων διανομής βρίσκουν τις ρίζες τους στην ικανότητα αυτών των συστημάτων να ελέγχουν τις ροές ισχύος, να ρυθμίζουν τις τάσεις και να εξομαλύνουν τη μεταβλητή παραγωγή από τις ΜΔΠ που προέρχονται από ΑΠΕ με γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο.

Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να περιγραφεί με τις ακόλουθες παραμέτρους: την ονομαστική ενέργεια, τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποθηκεύσει/εκφορτίσει η μπαταρία, την απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης, την κατάσταση φόρτισης, το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης και την διάρκεια ζωής της.

3.10.2 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα ευέλικτα φορτία μπορούν να συνεισφέρουν στην οικονομική και αποδοτική διαχείριση των ενεργών ΔΔ. Με τον έλεγχό τους μειώνεται κυρίως ή αυξάνει η κατανάλωση ισχύος και ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Η διαχείριση ευέλικτων φορτίων μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της υπερφόρτισης των στοιχείων του δικτύου (γραμμών και υποσταθμών). Σήμερα, υπάρχουν εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν δυναμική τιμολόγηση ως μέσο έμμεσου ελέγχου των ευέλικτων φορτίων προκειμένου να εξομαλυνθεί το προφίλ κατανάλωσης. Μερικά παραδείγματα τέτοιων μεθόδων περιλαμβάνουν την επιβολή δύο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας την ημέρα, που καθιερώθηκε το 1965 ή τον ορισμό των 22 κρίσιμων ημερών τον χρόνο όπου οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας ήταν απαγορευτικά υψηλές προκειμένου να προωθηθεί η χαμηλότερη κατανάλωση [15].

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την οικονομική διαχείριση των ευέλικτων φορτίων, τόσο των μικρών καταναλωτών όσο και των καταναλωτών ΜΤ που μπορούν πιο εύκολα να μετατοπίσουν τη δραστηριότητά τους (βιομηχανική ή εμπορική) σε άλλη χρονική περίοδο, είναι μια από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές σήμερα. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται μπορούν να αξιοποιηθούν για την ένταξη των ευέλικτων φορτίων στον προγραμματισμό λειτουργίας των ενεργών ΔΔ.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των ενεργών δικτύων διανομής (ΔΔ) αποσκοπεί στη βέλτιστη λειτουργία του ΔΔ με υψηλή διείσδυση διανεμημένης παραγωγής, κυρίως μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ, και την αυξημένη εγκατάσταση νέων ηλεκτρικών φορτίων. Οι πηγές ευελιξίας για διαχείριση των ενεργών ΔΔ περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως η αποθήκευση ενέργειας και τα ευέλικτα φορτία. Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ενεργών ΔΔ απαιτεί την επίλυση ροής ισχύος και την εξέταση της κατάστασης του δικτύου. Κατά τη βέλτιστη ροή ισχύος (optimal power flow – OPF) πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του προβλήματος ροών ισχύος λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου και τους περιορισμούς των διανεμημένων ενεργειακών πόρων που συνδέονται στο δίκτυο. Η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος (dynamic optimal power flow – DOPF) είναι μια επέκταση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος για την κάλυψη πολλαπλών χρονικών περιόδων όταν υπάρχει χρονική εξάρτηση των καταστάσεων του δικτύου μεταξύ διαφορετικών χρονικών περιόδων. Αυτή η μοντελοποίηση απαιτείται όταν υπάρχουν περιορισμοί με χρονική εξάρτηση, όπως το ισοζύγιο ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η γενική διατύπωση της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος διαχείρισης των ενεργών ΔΔ. Η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της αιολικής παραγωγής των Αιολικών Πάρκων (Α/Π) που δέχονται περιορισμό ισχύος, της αποθήκευσης ενέργειας και της λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων. Αναπτύχθηκαν τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις: α) μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, β) ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και γ) ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του δικτύου.

Η επίλυση ροής ισχύος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της βέλτιστης ροής ισχύος. Η επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη κατανομή των μονάδων παραγωγής με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση που έχει επιλέξει ο Διαχειριστής του Δικτύου. Η βέλτιστη ροή ισχύος περιλαμβάνει τις εξισώσεις ροών ισχύος στο δίκτυο και το ισοζύγιο ισχύος στους κόμβους του δικτύου. Επιπλέον, περιλαμβάνει τους περιορισμούς τάσης (διατήρηση της τάσης εντός των επιτρεπτών ορίων), τους περιορισμούς ροής ισχύος στις γραμμές διανομής (αποφυγή υπέρβασης θερμικών ορίων) και τους περιορισμούς ροής ισχύος στα όρια με το σύστημα μεταφοράς, δηλαδή τα θερμικά όρια των υποσταθμών υψηλής τάσης (ΥΤ) / μέσης τάσης (ΜΤ). Η τυπική σύνθεση της βέλτιστης ροής ισχύος περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και την ελαχιστοποίηση των απωλειών δικτύου. Άλλα κριτήρια βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί για να περιλαμβάνουν τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο διανομής [36], [37].

Η διαχρονική ή αλλιώς δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος αναπτύχθηκε αρχικά ως βελτιστοποίηση σε προβλήματα υδροθερμικών συστημάτων ισχύος, όπου η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να κατανεμηθεί σε διαφορετικούς χρόνους, αλλά η λειτουργία σε μία δεδομένη χρονική στιγμή ταυτόχρονα επηρεάζει την ικανότητα λειτουργίας σε επόμενες χρονικές στιγμές [38], [39]. Η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης

κατανομής της παραγωγής, αλλά και των ευέλικτων φορτίων, που συνδέονται στο δίκτυο και για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα (π.χ. μία ημέρα) για τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου. Η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος χρησιμοποιείται όταν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης εισάγονται μεταβλητές με χρονική εξάρτηση, δηλαδή υπάρχει εξάρτηση της τιμής που θα πάρει μια μεταβλητή τη χρονική περίοδο t με την τιμή της ίδιας μεταβλητής τη χρονική περίοδο $t-1$. Μεταβλητές με χρονική εξάρτηση υπάρχουν στους συσσωρευτές και στα ευέλικτα φορτία (ηλεκτρικό και θερμικό).

Η παραδοσιακή λειτουργία των ΔΔ προϋποθέτει μια στρατηγική «ένταξης και λήθης» (fit-and-forget) που περιορίζει σημαντικά τη διείσδυση των ΜΔΠ [40]. Η ενεργή διαχείριση δικτύων επιτρέπει σε πρόσθετες ΜΔΠ να συνδεθούν στο πλαίσιο μη σταθερών συμφωνιών σύνδεσης και εφαρμόζει περικοπές σε αυτές τις μονάδες για την ικανοποίηση των περιορισμών του δικτύου [10]. Τεχνολογίες όπως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BSS) [10] και τα ευέλικτα φορτία [10], που είναι και οι δύο τεχνολογίες με χρονική εξάρτηση, αποτελούν πλέον σημαντικά μέρη της ενεργής διαχείρισης των ΔΔ.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα μοντέλο για την επίλυση της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος στα ενεργά ΔΔ. Στόχος είναι το μοντέλο αυτό να αξιοποιηθεί για τη διαχείριση των ενεργών ΔΔ προγραμματίζοντας τη λειτουργία τους για έναν συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος βασίζεται στο μοντέλο AC ροής ισχύος (εξισώσεις ροής ισχύος) και το πρόβλημα που διαμορφώνεται ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού. Άλλοι περιορισμοί που μοντελοποιούνται στη συνέχεια του κεφαλαίου είναι ο περιορισμός ισχύος της παραγωγής των ΑΠ με κανόνες ένταξης, καθώς και η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές (BSS) και η λειτουργία των ευέλικτων φορτίων.

4.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύνολα

Ω_{DG}	Σύνολο κόμβων, στους οποίους είναι εγκατεστημένες μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ).
Ω_L	Σύνολο γραμμών (κλάδων) του δικτύου.
Ω_N	Σύνολο κόμβων (ζυγών) του συστήματος.

Γενικά σύμβολα δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος

x	Διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου
y	Διάνυσμα παραμέτρων (δεδομένων εισόδου)
r	Διάνυσμα μεταβλητών με χρονική εξάρτηση
z	Διάνυσμα συμπληρωματικών μεταβλητών
f	Αντικειμενική συνάρτηση
g	Περιορισμοί ισότητας
h	Ανισοτικοί περιορισμοί
k	Περιορισμοί ισότητας εξισώσεων με χρονική εξάρτηση
l	Ανισοτικοί περιορισμοί με χρονική εξάρτηση
t	χρονική περίοδος
Δt	Διάρκεια χρονικής περιόδου κατανομής
t_n	Αριθμός χρονικών περιόδων βελτιστοποίησης
g_{ij}/b_{ij}	Ωμική/επαγωγική αγωγιμότητα σειράς της γραμμής $i-j$.
$P_{d,i}/Q_{d,i}$	Ενεργός/άεργος ισχύς του φορτίου στον κόμβο i .
$P_{dg,i}^{min}/P_{dg,i}^{max}$	Ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος της ΜΔΠ στον κόμβο i .
$Q_{dg,i}^{min}/Q_{dg,i}^{max}$	Ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή αέργου ισχύος της ΜΔΠ στον κόμβο i .
$P_{wg,i}^{min}/P_{wg,i}^{max}$	Ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος Α/Π στον κόμβο i .
$Q_{wg,i}^{min}/Q_{wg,i}^{max}$	Ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή αέργου ισχύος Α/Π στον κόμβο i .
$S_{d,i}$	Μιγαδική ισχύς (φαινόμενη ισχύς) κατανάλωσης του φορτίου στον κόμβο i .
S_{ij}^{max}	Ικανότητα (μέγιστη φαινόμενη ισχύς) της γραμμής $i-j$.
V_{max}/V_{min}	Μέγιστο/ελάχιστο επιτρεπτό όριο του μέτρου της τάσης.
$P_{dg,i}/Q_{dg,i}$	Ενεργός/άεργος ισχύς της ΜΔΠ στον κόμβο i .
$P_{wg,i}/Q_{wg,i}$	Ενεργός/άεργος ισχύς Α/Π στον κόμβο i .
P_{ij}/Q_{ij}	Ενεργός/άεργος ροή ισχύος στη γραμμή $i-j$.
$P_{ss,i}/Q_{ss,i}$	Ενεργός/άεργος ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ του κόμβου i .
$S_{dg,i}$	Μιγαδική ισχύς της ΜΔΠ στον κόμβο i .
S_{ij}	Μιγαδική ροή ισχύος στη γραμμή $i-j$.

$S_{ss,i}$	Μιγαδική ισχύς που ρέει από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ του κόμβου i .
V_i	Μιγαδική τάση του κόμβου i .
V_i	Μέτρο της τάσης του κόμβου i .
θ_i	Γωνία της τάσης του κόμβου i .
<i>Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (BSS)</i>	
$\varepsilon_{in}, \varepsilon_{out}$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης και εκφόρτισης BSS
SOC	Κατάσταση φόρτισης BSS
SOC^{min}/SOC^{max}	Ελάχιστο και μέγιστο όριο της κατάστασης φόρτισης του BSS
P_{BSS}	Έγχυση ισχύος στο δίκτυο από το BSS
P_{BSS}^{charge}	Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο κατά τη φόρτιση του BSS
P_{BSS}^{dis}	Έγχυση ισχύος στο δίκτυο κατά την εκφόρτιση του BSS
P_{BSS}^{rated}	Ονομαστική ισχύς του BSS
Q_{BSS}	Έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο από το BSS
E_{BSS}^{cap}	Χωρητικότητα του BSS (Ονομαστική χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης)
<i>Ευέλικτο Φορτίο Αποθήκευσης Θερμότητας (FDTS)</i>	
P_{FDTS}	Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο από το ευέλικτο φορτίο FDTS
P_{FDTS}^{rated}	Ονομαστική ισχύς κατανάλωσης ευέλικτου φορτίου FDTS
E_{FDTS}^{cap}	Χωρητικότητα του FDTS
P_{heat}	Απαίτηση για εξαγωγή θερμότητας από FDTS
E_{FDTS}	Συνολική ζήτηση ενέργειας του ευέλικτου φορτίου FDTS
SOC_{FDTS}	Κατάσταση φόρτισης FDTS
$SOC_{FDTS}^{min}, SOC_{FDTS}^{max}$	Ελάχιστο και μέγιστο όριο της κατάστασης φόρτισης του FDTS
μ	Συντελεστής απόδοσης της διαχειριζόμενης αποθήκευσης ευέλικτου φορτίου FDTS
<i>Άμεσα Ελεγχόμενο Ευέλικτο Φορτίο (DMFD)</i>	
P_{DMFD}	Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο από το ευέλικτο φορτίο DMFD
P_{DMFD}^{rated}	Ονομαστική ισχύς κατανάλωσης ευέλικτου φορτίου DMFD
E_{DMFD}	Συνολική ζήτηση ενέργειας του ευέλικτου φορτίου DMFD

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος χρησιμοποιώντας το μοντέλο της AC ροής ισχύος. Λόγω της αυξημένης διείσδυσης ΜΔΠ κυρίως από ΑΠΕ, το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος έχει εφαρμογή στα σύγχρονα ΔΔ ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα για τη βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [41]. Η βέλτιστη ροή ισχύος καθορίζει το σημείο λειτουργίας των ελεγχόμενων στοιχείων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της τιμής μιας αντικειμενικής συνάρτησης ικανοποιώντας τους περιορισμούς του προβλήματος [42]. Τα πιο συνηθισμένα ελεγχόμενα στοιχεία σε ένα σύστημα είναι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, τα ευέλικτα φορτία, κ.ά. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται ως αντικειμενική συνάρτηση η ελαχιστοποίηση του συνολικού ωριαίου κόστος παραγωγής, F_t (€/h), όλων των θερμικών μονάδων του συστήματος. Οι πιο συνηθισμένοι περιορισμοί του προβλήματος της βέλτιστης AC ροής ισχύος είναι οι ακόλουθοι [43]:

- Τήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος.
- Τήρηση του ισοζυγίου αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος.
- Το μέτρο της τάσης κάθε ζυγού κυμαίνεται εντός προκαθορισμένων ορίων, δηλαδή μεταξύ μίας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής.
- Η γωνία της τάσης κάθε ζυγού κυμαίνεται εντός προκαθορισμένων ορίων.
- Η γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς είναι προκαθορισμένη (συνήθως είναι ίση με μηδέν).
- Η παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας κυμαίνεται εντός των τεχνικών της ορίων, δηλαδή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης παραγόμενης ενεργού ισχύος.
- Η παραγωγή αέργου ισχύος κάθε γεννήτριας κυμαίνεται εντός των τεχνικών της ορίων, δηλαδή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης παραγόμενης αέργου ισχύος.
- Η ροή φαινόμενης ισχύος σε κάθε γραμμή μεταφοράς πρέπει να μην υπερβαίνει την ονομαστική ικανότητα φόρτισης (ονομαστική φαινόμενη ισχύ) της κάθε γραμμής μεταφοράς.

AC Ροή Ισχύος

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αναπαρασταθεί ως συνεκτικός γράφος $\Gamma = (\Omega_N, \Omega_L)$. Κάθε κόμβος $i \in \Omega_N$ έχει ως χαρακτηριστικό μέγεθος τη μιγαδική τάση του (V_i). Ο κόμβος i συνδέεται με έναν γειτονικό του κόμβο j μέσω γραμμής διανομής $(i, j) \in \Omega_L$ για την οποία είναι γνωστή η σύνθετη αγωγιμότητα σειράς (y_{ij}), ενώ η εγκάρσια αγωγιμότητα της αμελείται. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm και τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, οι εξισώσεις της μιγαδικής ροής ισχύος είναι οι ακόλουθες για κάθε $i, j \in \Omega_N$ [4] [44], [45]:

$$S_{ij} = V_i \cdot V_i^* \cdot y_{ij}^* - V_i \cdot V_j^* \cdot y_{ij} \quad \forall (i, j) \in \Omega_L \quad (4.1)$$

$$S_{ag,i} - S_{d,i} = \sum_j S_{ij} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.2)$$

όπου:

$$\mathbf{V}_i = V_i \cdot e^{j\theta_i} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{S}_{dg,i} = P_{dg,i} + jQ_{dg,i} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{S}_{d,i} = P_{d,i} + jQ_{d,i} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{y}_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (4.6)$$

Οι μιγαδικές εξισώσεις (4.1) και (4.2) χωρίζονται σε πραγματικό και φανταστικό μέρος για την πιο εύκολη ανάλυσή τους:

$$P_{ij} = g_{ij} \cdot V_i^2 - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta_{ij} - b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \sin \theta_{ij} \quad \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (4.7)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} \cdot V_i^2 + b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta_{ij} - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \sin \theta_{ij} \quad \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (4.8)$$

$$P_{dg,i} - P_{d,i} = \sum_{j:j \sim i} P_{ij} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.9)$$

$$Q_{dg,i} - Q_{d,i} = \sum_{j:j \sim i} Q_{ij} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.10)$$

Τα μεγέθη στις (4.7) και (4.8) εκφράζονται στο ανά μονάδα (α.μ.) σύστημα και οι γωνίες σε ακτίνια.

Ένας μεγάλος αριθμός προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν τη λειτουργία και την ανάπτυξη των ΔΔ έχουν ένα σύνολο κοινών περιορισμών. Η τάση κάθε κόμβου i πρέπει να κυμαίνεται εντός επιτρεπτών ορίων, π.χ. $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, σύμφωνα με τη σχέση (11).

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.11)$$

Σε ένα ΔΔ, σε κάποιους κόμβους $i \in \Omega_{DG}$, όπου $\Omega_{DG} \subseteq \Omega_N$, υπάρχουν συνδεδεμένες ΜΔΠ που παρέχουν ενεργό και άεργο ισχύ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε ΜΔΠ μπορεί να παράγει ενεργό και άεργο ισχύ εντός των τεχνικών της ορίων ελάχιστης και μέγιστης ενεργού και άεργου ισχύος, όπως φαίνεται από τις (4.12) και (4.13), αντίστοιχα.

$$P_{dg,i}^{min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{max} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.12)$$

$$Q_{dg,i}^{min} \leq Q_{dg,i} \leq Q_{dg,i}^{max} \quad \forall i \in \Omega_N \quad (4.13)$$

Επιπλέον, το τετράγωνο της φαινόμενης ισχύος που ρέει στον κλάδο $i-j$ πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το τετράγωνο της ικανότητας (τετράγωνο της μέγιστης φαινόμενης ισχύος) του κλάδου $i-j$, όπως φαίνεται από τη σχέση (4.14).

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 \quad \forall (i, j) \in \Omega_L \quad (4.14)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας (4.11)–(4.14) μαζί με τους περιορισμούς ισότητας (4.7)–(4.10) συνθέτουν μία κοινή βάση για ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξισώσεις ροών ισχύος (4.7)–(4.10) εφαρμόζονται στα ΔΔ θεωρώντας ως κόμβο αναφοράς τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Σε ένα ΔΔ, η ισχύς μπορεί να εγγέεται τόσο από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ όσο και από τις ΜΔΠ.

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η βάση ενός μοντέλου δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος (Dynamic Optimal Power Flow – DOPF) είναι η τυπική σύνθεση της βέλτιστης ροής ισχύος για το δίκτυο. Οι γενικές διατυπώσεις της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος και της βέλτιστης ροής ισχύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στη βέλτιστη ροή ισχύος, ένα σύνολο μεταβλητών ελέγχου προσαρμόζεται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, οι σταθερές παράμετροι ορίζουν όρια και τμήματα του συστήματος και οι συμπληρωματικές μεταβλητές είναι εκείνες που είναι συναρτήσεις μεταβλητών ελέγχου και σταθερών παραμέτρων [10].

Το μοντέλο δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος διασπά τον χρονικό ορίζοντα σε t_n χρονικές περιόδους και επεκτείνει όλες τις μεταβλητές της βέλτιστης ροής ισχύος και ορισμένες παραμέτρους σε χρονοσειρές. Το δίκτυο πρέπει να υπακούει στους τυπικούς περιορισμούς του μοντέλου βέλτιστης ροής ισχύος, όπως στις εξισώσεις ροής ισχύος, κατά τη διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου ξεχωριστά. Επιπλέον, δημιουργούνται πρόσθετες μεταβλητές και πρόσθετοι περιορισμοί με χρονική εξάρτηση. Ένα παράδειγμα μιας μεταβλητής με χρονική εξάρτηση είναι η κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SOC) ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή το κλάσμα της συνολικής χωρητικότητας που χρησιμοποιείται τη δεδομένη στιγμή. Η κατάσταση φόρτισης εξαρτάται από τις τιμές φόρτισης και εκφόρτισης σε πολλαπλές χρονικές περιόδους. Το κριτήριο βελτιστοποίησης του μοντέλου δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος είναι η επίλυση του προβλήματος ως προς τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης κατά την πάροδο όλων των χρονικών περιόδων.

Πίνακας 4.1: Βέλτιστη ροή ισχύος και δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος

	Βέλτιστη Ροή Ισχύος	Παραδείγματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος	Δυναμική Βέλτιστη Ροή Ισχύος	Παραδείγματα Δυναμικής Βέλτιστης Ροής Ισχύος
Μεταβλητές Ελέγχου	\mathbf{x}	Παραγόμενη ισχύς	$\mathbf{x}(t)$	Η παραγόμενη ισχύς στον ζυγό της γεννήτριας ανάλογα με τη χρονική περίοδο
Σταθεροί Παράμετροι	\mathbf{y}	Μέγεθος τάσης	$\mathbf{y}(t)$	Μέγεθος τάσης ζυγού ανάλογα με τη χρονική περίοδο
Συμπληρωματικές μεταβλητές	\mathbf{z}	Γωνία τάσης	$\mathbf{z}(t)$	Γωνία τάσης ανάλογα με τη χρονική περίοδο
Μεταβλητές με χρονική εξάρτηση	-	-	$\boldsymbol{\tau}(t)$	Κατάσταση φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας
Αντικειμενική Συνάρτηση	$\min f(x, y, z)$	Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας	$\min f(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \boldsymbol{\tau}(t))$	Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας σε όλες τις χρονικές περιόδους
Περιορισμοί Ισότητας	$g(x, y, z) = 0$	Εξισώσεις ροής ισχύος	$g(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \boldsymbol{\tau}(t)) = 0 \forall t$	Εφαρμογή εξισώσεων ροής ισχύος σε κάθε χρονική περίοδο
Ανισοτικοί Περιορισμοί	$h(x, y, z) \leq 0$	Ελάχιστα και μέγιστα όρια των μονάδων παραγωγής	$h(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \boldsymbol{\tau}(t)) \leq 0 \forall t$	Ελάχιστα και μέγιστα όρια των μονάδων παραγωγής
Περιορισμοί Ισότητας με χρονική εξάρτηση	-	-	$k(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \boldsymbol{\tau}(t)) = 0 \forall t$	Η συνολική ενέργεια που παρέχεται σε ένα φορτίο κατά τη διάρκεια βελτιστοποίησης πρέπει να είναι ίση με τις ενεργειακές του απαιτήσεις
Ανισοτικοί περιορισμοί με χρονική εξάρτηση	-	-	$l(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \boldsymbol{\tau}(t)) \leq 0 \forall t$	Μέγιστα και ελάχιστα όρια της κατάστασης φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Το σενάριο που έχει μοντελοποιηθεί στο πρόβλημα της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από:

- Ένα δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει παραγωγή από ΜΣΠ (στην παρούσα διπλωματική εργασία Αιολικά Πάρκα) με ή χωρίς περιορισμό ισχύος. Το δίκτυο μπορεί να έχει οποιονδήποτε αριθμό σημείων σύνδεσης με το δίκτυο μεταφοράς.
- Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συνδεδεμένο σε καθορισμένο κόμβο.
- Ευέλικτα φορτία συνδεδεμένα σε καθορισμένους κόμβους.
- Μοντελοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις για την αξιοποίηση της παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Αντικειμενικές Συναρτήσεις Προβλήματος

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος πρέπει να μετατραπούν σε κατάλληλες μαθηματικές διατυπώσεις. Οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις είναι οι ακόλουθες.

1) Μεγιστοποίηση Αξιοποίησης Αιολικής Ενέργειας:

$$f_1(x(t), y(t), z(t), r(t)) = \max \left(\frac{\Delta t}{60} \sum_{t=1}^{t_n} P_{wg} \right) \quad (4.15)$$

Κατά την βελτιστοποίηση της εν λόγω αντικειμενικής συνάρτησης αθροίζονται οι συνεισφορές των Α/Π με περιορισμό ισχύος κατά την πάροδο του συνόλου των χρονικών περιόδων. Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρήσης της παραγωγής των Α/Π είτε μέσω της ικανότητας των Α/Π να ανταποκρίνονται στην τοπική ζήτηση είτε να εξάγουν ενέργεια από το δίκτυο διανομής. Η απλή μεγιστοποίηση της συνεισφοράς των ΜΔΠ παραγωγής αυξάνει την πιθανότητα η βέλτιστη λύση να αυξάνει τις απώλειες ως τρόπο αύξησης της παραγωγής, ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνονται οι απώλειες των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

2) Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς:

$$f_2(x(t), y(t), z(t), r(t)) = \frac{\Delta t}{60} \sum_{t=1}^{t_n} P_{ss} \quad (4.16)$$

Κατά τη βελτιστοποίηση της εν λόγω αντικειμενικής συνάρτησης αθροίζονται οι εισαγωγές στο δίκτυο σε κάθε σημείο σύνδεσης με το σύστημα μεταφοράς κατά την πάροδο του συνόλου των χρονικών περιόδων. Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση, επίσης, στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρήσης των Α/Π (και όχι απλώς της παραγωγής τους) είτε μέσω της ικανότητας των Α/Π να ανταποκρίνονται στην τοπική ζήτηση είτε μέσω της εξαγωγής ενέργειας από το δίκτυο διανομής.

3) Ελαχιστοποίηση Κόστους Διαχείρισης του ενεργού Δικτύου Διανομής:

$$\begin{aligned}
 f_3(x(t), y(t), z(t), r(t)) &= \frac{\Delta t}{60} \left[\pi_t P_{ss} + Pr_{curt} P_{curt_wg} + \pi_t (P_{ch} - P_{dis}) + C_{BSS} (P_{ch} + P_{dis}) \right. \\
 &\quad \left. + C_{load} \frac{\sqrt{(P_l - P_{DMFD})^2}}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως κριτήριο βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ.

Δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος

Τα προβλήματα του ΔΔ απαιτούν την επίλυση του προβλήματος κάνοντας χρήση των εξισώσεων AC ροής ισχύος, και ως εκ τούτου το μοντέλο της βέλτιστης ροής ισχύος πρέπει να επιλύεται χρησιμοποιώντας μεθόδους μη γραμμικού προγραμματισμού. Η σύνθεση της στατικής βέλτιστης ροής ισχύος που εφαρμόζεται σε κάθε χρονική περίοδο ως μέρος του μοντέλου της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος είναι η εξής.

- Οι εξισώσεις ισοζυγίου ισχύος

$$g(x(t), y(t), z(t), r(t)) = 0 \quad \forall t \tag{4.18}$$

περιλαμβάνουν περιορισμούς στο ισοζύγιο ισχύος και τις εξισώσεις ροής ισχύος.

- Επίπεδα τάσης σε κάθε κόμβο

$$V_{min}(t) < V(b, t) < V_{max}(t) \quad \forall b, t \tag{4.19}$$

όπου θεωρείται ότι το μέγιστο και το ελάχιστο όριο τάσης παραμένουν σταθερά σε όλο τον χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης.

- Τα θερμικά όρια γραμμών περιορίζουν τη φαινόμενη ροή ισχύος κατά μήκος κάθε γραμμής:

$$-S_{max}(l) < S(l, t) < S_{max}(l) \quad \forall l, t \tag{4.20}$$

- Κάθε σημείο σύνδεσης στο σύστημα μεταφοράς μοντελοποιείται ως γεννήτρια με την ικανότητα να παρέχει θετικές και αρνητικές τιμές πραγματικής και άεργης ισχύος:

$$P_{ss}^{min} < P_{ss}(t) < P_{ss}^{max} \quad \forall gcp, t \tag{4.21}$$

$$Q_{ss}^{min} < Q_{ss}(t) < Q_{ss}^{max} \quad \forall gcp, t \tag{4.22}$$

Η παραγωγή από ΜΔΠ χωρίς περιορισμό ισχύος είναι «απαραίτητη» και αντιμετωπίζεται ως αρνητική σταθερή ζήτηση. Η διαθέσιμη παραγωγή από μια μονάδα χωρίς περιορισμό ισχύος αφαιρείται από τη σταθερή ζήτηση κόμβου. Οι γεννήτριες χωρίς περιορισμό ισχύος λειτουργούν με σταθερό συντελεστή ισχύος και η άεργος ισχύς αφαιρείται επίσης από τη ζήτηση κόμβου.

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Η μοντελοποίηση των κανόνων ένταξης για ΜΔΠ (π.χ. Α/Π) με περιορισμό ισχύος κατά τη δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος μπορεί να επιτευχθεί τροποποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση ή προσθέτοντας επιπλέον περιορισμούς όπως ορίζονται στη συνέχεια.

4.5.1 ΜΕ ΣΕΙΡΑ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ

Για να εφαρμοστεί σειρά προτεραιότητας σε ΜΔΠ με περιορισμό ισχύος, πρέπει να υπάρχει διάκριση στην αξία παραγωγής των μονάδων αυτών. Αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Για την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει έναν δεύτερο όρο που καθορίζει τη σειρά προτεραιότητας:

$$f_1(x(t), y(t), z(t), r(t)) = \min \sum_{t=1}^{t_n} \left\{ \sum_{ss=1}^{ss_n} P_{ss}(t) + \sum_{nf=1}^{nf_n} \frac{p}{k} P_{wg}(nf, t) \right\} \quad (4.23)$$

όπου p είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 1 και n_{nf} , όπου όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το p τόσο η ΜΔΠ που αντιπροσωπεύει είναι μονάδα χαμηλής προτεραιότητας. Ο ορισμός της σταθεράς k συζητείται στη συνέχεια.

Το αρχικό κριτήριο βελτιστοποίησης έχει πλέον προσαρμοστεί έτσι ώστε η παραγωγή από ΜΔΠ υψηλής προτεραιότητας να έχει μεγαλύτερη αξία από ό,τι για τις ΜΔΠ χαμηλής προτεραιότητας στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά αυτή η τιμή «σειράς προτεραιότητας» θα πρέπει να είναι μικρή ώστε να κυριαρχεί ο πρώτος όρος στη σχέση (4.23). Αυτό διασφαλίζει ότι η βελτιστοποίηση συνεχίζει να ελαχιστοποιεί τις εισαγωγές, ενώ η μικρή προσαρμογή του δεύτερου όρου παρέχει την προτεραιότητα και επιλέγει ποια μονάδα παραγωγής θα κατανείμει. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας k έτσι ώστε $k^{-1} \ll 1$ και $p/k < 1$ για τη γεννήτρια χαμηλότερης προτεραιότητας (υψηλότερη p).

4.5.2 ΜΕ ΚΟΙΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Το κοινό ποσοστό περιορισμού είναι ένα σενάριο στο οποίο όλες οι ΜΔΠ λαμβάνουν το ίδιο ποσοστό καθαρού συνολικού περιορισμού ισχύος κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα της βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω πρόσθετων περιορισμών στις μεταβλητές ελέγχου των ΜΔΠ με περιορισμό ισχύος που δίνονται ως:

$$\sum_{t=1}^{t_n} \frac{P_{wg}(nf_i, t)}{P_{wg}^{max}(nf_i, t)} = \sum_{t=1}^{t_n} \frac{P_{wg}(nf_j, t)}{P_{wg}^{max}(nf_j, t)} \quad \forall i \neq j \quad (4.24)$$

όπου i και j αναφέρονται σε διαφορετικές ΜΔΠ με περιορισμό ισχύος. Εδώ η ενεργός ισχύς που περιορίζεται σε κάθε Α/Π πρέπει να είναι η ίδια σε όλο τον χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης. Το κοινό ποσοστό παρέχει ευελιξία σχετικά με το ποιες γεννήτριες μπορούν να περιοριστούν και τότε.

Το συγκεκριμένο σενάριο είναι χρήσιμο κατά τη διεξαγωγή μελετών προγραμματισμού σε χρονικούς ορίζοντες μηνών.

4.5.3 ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΙΣΧΥΟΣ ΒΑΣΕΙ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ

Ο περιορισμός ισχύος ΜΔΠ βάσει τεχνικού βέλτιστου επιτρέπει τη συνεισφορά της ΜΔΠ που βοηθά καλύτερα το δίκτυο ώστε να επιτύχει το εκάστοτε κριτήριο βελτιστοποίησης. Στη μοντελοποίηση της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος, αυτό θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τις αρχικές αντικειμενικές συναρτήσεις και επιτρέποντας στη δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος να επιλέξει ποιας γεννήτριας θα περιορίσει την ισχύ εξόδου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως κύριος κανόνας ένταξης γεννητριών χρησιμοποιείται ο περιορισμός ισχύος βάσει τεχνικού βέλτιστου.

4.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο ρόλος των γραμμών μεταφοράς κατά τη βέλτιστη ροή ισχύος είναι να συνδέουν τους κόμβους του δικτύου. Στη δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να θεωρηθούν ότι εκτελούν έναν παρόμοιο ρόλο που συνδέει κόμβους που διαχωρίζονται στον χρόνο και όχι στον χώρο [10]. Τόσο οι γραμμές μεταφοράς όσο και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας λειτουργούν ως φορείς που μεταφέρουν ενέργεια γύρω από το δίκτυο. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια σε περιόδους χαμηλής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ή περίσσειας παραγωγής από ΑΠΕ και να την επιστρέψουν σε περιόδους υψηλής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ή χαμηλής παραγωγής από ΑΠΕ.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές/μπαταρίες (battery storage systems – BSS) μπορούν να μοντελοποιηθούν ως γεννήτριες με δυνατότητα απορρόφησης θετικής ή αρνητικής ισχύος από το δίκτυο και μια μεταβλητή κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SOC) για την παρακολούθηση της αποθηκευμένης ενέργειας [10]. Η σχέση μεταξύ της απορρόφησης ισχύος σε κάθε χρονική περίοδο και της κατάστασης φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης περιλαμβάνει μια ασυνέχεια ως εξής:

$$\Delta SOC = - \frac{\Delta t}{E_{BSS}^{cap}} \begin{cases} \varepsilon_{in} P_{BSS}, & \text{αν } P_{BSS} \geq 0 \\ 1 \\ \varepsilon_{out} P_{BSS}, & \text{αν } P_{BSS} < 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Το P_{BSS} είναι θετικό κατά την εκφόρτιση και αρνητικό κατά τη φόρτιση και αναφέρεται στη ροή ισχύος **όπως φαίνεται από την πλευρά του δικτύου**. Οι συντελεστές απόδοσης συσχετίζουν αυτήν την τιμή με την ισχύ που απορροφάται ή αφαιρείται από το σύστημα αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών μετατροπής. Η αποδοτικότητα με επιστροφή της αποθήκευσης είναι προϊόν των ε_{in} και ε_{out} . Η ασυνέχεια της σχέσης (4.25) δεν μπορεί να προσαρμοστεί άμεσα σε μια λύση μη γραμμικού προγραμματισμού.

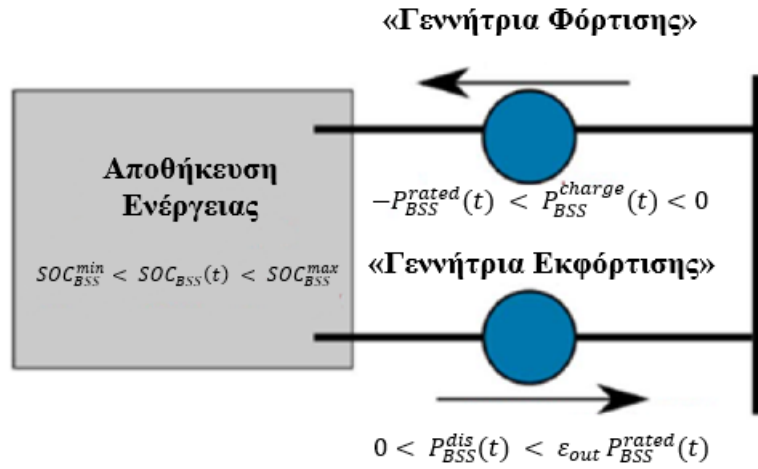
Αυτή η ασυνέχεια μπορεί να αρθεί μοντελοποιώντας το σύστημα αποθήκευσης ως ξεχωριστές γεννήτριες φόρτισης και εκφόρτισης, έτσι ώστε:

$$P_{BSS} = P_{BSS}^{dis} + P_{BSS}^{charge} \quad (4.26)$$

Η γεννήτρια φόρτισης λειτουργεί με αρνητικές τιμές, όπως αυτή φαίνεται από την πλευρά του δικτύου. Το Σχήμα 4.1 δείχνει αυτή τη μοντελοποίηση του BSS. Η πραγματική παραγωγή ενέργειας των δύο γεννητριών έχει τους εξής περιορισμούς:

$$\left. \begin{aligned} -P_{BSS}^{rated}(t) < P_{BSS}^{charge}(t) < 0 \\ 0 < P_{BSS}^{dis}(t) < \varepsilon_{out} P_{BSS}^{rated}(t) \end{aligned} \right\} \forall t \quad (4.27)$$

όπου P_{BSS}^{charge} είναι η ισχύς της «γεννήτριας φόρτισης» και P_{BSS}^{dis} είναι η «γεννήτρια εκφόρτισης», όπως αυτές φαίνονται από την πλευρά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που είναι συνδεδεμένο το BSS



Σχήμα 4.1: Μοντέλο δύο γεννητριών ενός BSS [10].

Η κατάσταση φόρτισης σχετίζεται πλέον με τις ροές ισχύος των δύο γεννητριών και για κάθε χρονική περίοδο ορίζεται από τη σχέση (28):

$$SOC_{BSS}(t) = SOC_{BSS}(0) - \frac{\varepsilon_{in}\Delta t}{E_{BSS}^{cap}} \sum_{t'=1}^t P_{BSS}^{charge}(t') - \frac{\Delta t}{E_{BSS}^{cap} \varepsilon_{out}} \sum_{t'=1}^t P_{BSS}^{dis}(t') \quad (4.28)$$

όπου $SOC_{BSS}(0)$ είναι η αρχική κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή. Η κατάσταση φόρτισης περιορίζεται να παραμείνει εντός των ορίων ως εξής:

$$SOC_{BSS}^{min} < SOC_{BSS}(t) < SOC_{BSS}^{max} \quad \forall t \quad (4.29)$$

Αυτά τα όρια σε θεωρητικό επίπεδο είναι 0 και 1. Ωστόσο, συνηθίζεται να αποφεύγεται η φόρτιση και η εκφόρτιση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στα θεωρητικά του όρια. Σε γενικές γραμμές, αναμένεται ότι την αρχική χρονική περίοδο t_0 και την τελική χρονική περίοδο t_n η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο, δηλαδή:

$$SOC_{BSS}(0) = SOC_{BSS}(t_n) \quad (4.30)$$

Σε αυτό το μοντέλο δεν υπάρχει κανένας περιορισμός για τη διακοπή της φόρτισης και της εκφόρτισης των γεννητριών που λειτουργούν κατά την ίδια χρονική περίοδο. Επομένως, είναι μια μαθηματικά εφικτή λύση η φόρτιση και η εκφόρτιση κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου, αν και αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα σύστημα αποθήκευσης.

Για να αποδειχθεί αυτό αρκεί να ληφθεί υπόψη το φυσικό σύστημα. Κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου υπάρχει μια βέλτιστη αλλαγή στην κατάσταση φόρτισης, το ΔSOC , που σχετίζεται με μια φόρτιση ή εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Σαν μαθηματική διατύπωση, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό φόρτισης και εκφόρτισης που υπακούει τη σχέση:

$$\Delta SOC = - \frac{\Delta t}{E_{BSS}^{cap}} \left\{ \varepsilon_{in} P_{BSS}^{charge} + \frac{P_{BSS}^{dis}}{\varepsilon_{in}} \right\} \quad (4.31)$$

όπου το P_{BSS}^{charge} αντιπροσωπεύει την ισχύ που πρέπει να παραχθεί είτε μέσω της διανεμημένης παραγωγής είτε να εισαχθεί από το σύστημα μεταφοράς. Εάν το κόστος παραγωγής αυτής της ισχύος είναι θετικό στην αντικειμενική συνάρτηση, τότε η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση της τιμής του $|P_{BSS}^{charge}(t)|$ για τη βέλτιστη ΔSOC . Εάν $\varepsilon_{in} \varepsilon_{out} < 1$ αυτό το ελάχιστο εμφανίζεται όταν $P_{BSS}^{charge} = 0$ για περιόδους φόρτισης και $P_{BSS}^{dis} = 0$ για περιόδους εκφόρτισης. Έτσι, για θετικό κόστος παραγωγής και απόδοση συστήματος αποθήκευσης μικρότερη από 1, θα λειτουργεί το πολύ μόνο μία από τις δύο γεννήτριες φόρτισης/εκφόρτισης κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου.

Εκτός από τους περιορισμούς πραγματικής ισχύος που περιγράφονται στις σχέσεις (4.27), η μονάδα αποθήκευσης είναι σε θέση να παρέχει υποστήριξη έργου ισχύος. Ο συνδυασμός ενεργού και άεργου ισχύος από ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας περιορίζεται από τη φαινόμενη ισχύ σύμφωνα με τον περιορισμό:

$$S_{BSS}(t) < S_{BSS}^{rated}(t) \quad (4.32)$$

όπου

$$S_{BSS}(t) = \sqrt{P_{BSS}^2 + Q_{BSS}^2} \quad (4.33)$$

4.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Ένα ευέλικτο φορτίο μοντελοποιείται ως γεννήτρια με αρνητική συνεισφορά όπου το μέγεθος εξόδου κατά τη διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου είναι μια μεταβλητή ελέγχου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των τύπων ευέλικτων φορτίων, όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

4.7.1 ΑΜΕΣΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΕΥΕΛΙΚΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

Η συνολική ενέργεια που παρέχεται στο εν λόγω φορτίο κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα πρέπει να είναι ίση με τη συνολική ενεργειακή του απαίτηση για το διάστημα αυτό. Αυτό μοντελοποιείται ως ακολούθως:

$$\Delta t \sum_{t=1}^{t_n} P_{DMFD}(t) = E_{DMFD} \quad (4.34)$$

Για κάθε χρονικής περιόδου, η παρεχόμενη ισχύς σε αυτό τον τύπο φορτίου πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ της ονομαστικής χωρητικότητας του φορτίου και μιας ελάχιστης παροχής ισχύος. Η τιμή του P_{DMFD}^{min} μπορεί να είναι 0 για όλες τις χρονικές περιόδους t ή μπορεί να είναι υψηλότερη ανάλογα με τις ανάγκες του καταναλωτή σχετικά με την ελάχιστη ισχύ παράδοσης σε προκαθορισμένους χρόνους. Βάση αυτών των προσεγγίσεων διαμορφώνεται ο ακόλουθος περιορισμός

$$-P_{DMFD}^{rated} < P_{DMFD}(t) < -P_{DMFD}^{min}(t) \quad (4.35)$$

$$P_{DMFD}^{min}(t) < P_{DMFD}(t) < P_{DMFD}^{rated} \quad (4.36)$$

4.7.2 ΕΥΕΛΙΚΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στον εν λόγω τύπο φορτίου η ικανότητα του να χρησιμοποιείται ως μέσω αποθήκευσης, στην προκειμένη περίπτωση αποθήκευση θερμότητας, είναι το στοιχείο που παρέχει ευελιξία σε ένα ενεργό ΔΔ. Εκτός από τις σχέσεις (4.34) και (4.36) της Ενότητας 4.8.1 προστίθενται και οι εξισώσεις για την κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SOC) της διάταξης αποθήκευσης θερμότητας του φορτίου. Θεωρείται ότι ένα σταθερό χρονοδιάγραμμα ζήτησης για παροχή ενέργειας (π.χ. $P_{HEAT}(t)$) αποθηκεύεται προσωρινά από τη διάταξη αποθήκευσης θερμότητας:

$$SOC_{FDTS}(t) = SOC_{FDTS}(0) - \frac{\Delta t}{E_{FDTS}^{cap}} \mu \sum_{t'=1}^t P_{FDTS}^{charge}(t') - \frac{\Delta t}{E_{FDTS}^{cap}} \sum_{t'=1}^t P_{Heat}(t') \quad (4.37)$$

Το P_{Heat} , καθώς δεν σχετίζεται με το ηλεκτρικό δίκτυο, ορίζεται ως θετικό για τη ζήτηση. Το μ είναι η απόδοση της μετατροπής μεταξύ ηλεκτρικής και αποθηκευμένης ενέργειας (συντελεστής απόδοσης) και για την τεχνολογία αντλίας θερμότητας αυτή μπορεί να

είναι μεγαλύτερη από 1 [8]. Το $P_{FDTs}(t)$ μοντελοποιείται ως γεννήτρια με αρνητικές ροές ισχύος. Οι περιορισμοί της κατάστασης φόρτισης (SOC) είναι οι ίδιοι με εκείνους των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας:

$$SOC_{FDTs}^{min}(t) < SOC_{FDTs}(t) < SOC_{FDTs}^{max}, \quad \forall t \quad (4.38)$$

$$SOC_{FDTs}(0) = SOC_{FDTs}(t_n) \quad (4.39)$$

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την επίλυση της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος στα ενεργά ΔΔ. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πακέτα λογισμικού: το πακέτο λογισμικού MATLAB για την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος (π.χ. στοιχεία σχετικά με το μοντέλο του δικτύου, προφίλ φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ κλπ) και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έπειτα από την επίλυση του προβλήματος. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System). Αρχικά γίνεται μια περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν (GAMS και MATLAB) και των βασικών εργαλείων τους. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι τεχνικές απαιτήσεις του υπολογιστικού συστήματος για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη κώδικα που περιγράφει το μοντέλο της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος, παρουσιάζεται ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Τέλος, παρουσιάζεται η λειτουργία των επιμέρους αρχείων (m-files και gms-files) και η δομή του λογισμικού.

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για τη διαχείριση των ενεργών δικτύων διανομής είναι το GAMS σε έκδοση 24.1.3.

Το GAMS είναι ένα σύστημα μοντελοποίησης για την επίλυση προβλημάτων μαθηματικής βελτιστοποίησης. Το GAMS έχει σχεδιαστεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης (όπως ενδεικτικά γραμμικών, μη γραμμικών και μικτών ακεραίων προβλημάτων). Το GAMS είναι λογισμικό σύστημα που συνδυάζει τη γλώσσα της μαθηματικής άλγεβρας με τις παραδοσιακές έννοιες του προγραμματισμού υπολογιστών προκειμένου να περιγράψει αποτελεσματικά και να λύσει προβλήματα υπολογισμού. Το GAMS περιέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development environment - IDE) και συνδέεται με μια ομάδα αλγορίθμων επίλυσης βελτιστοποίησης (solvers). Μεταξύ αυτών είναι οι επιλύτες BARON, COIN-OR, CONOPT, CPLEX, DICOPT, MOSEK, SNOPT, SOLUM και XPRESS [46].

Σε συνδυασμό με το GAMS, το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προβλήματος δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος για τη διαχείριση των ενεργών ΔΔ, είναι το MATLAB σε έκδοση 9.2.0 (R2017a).

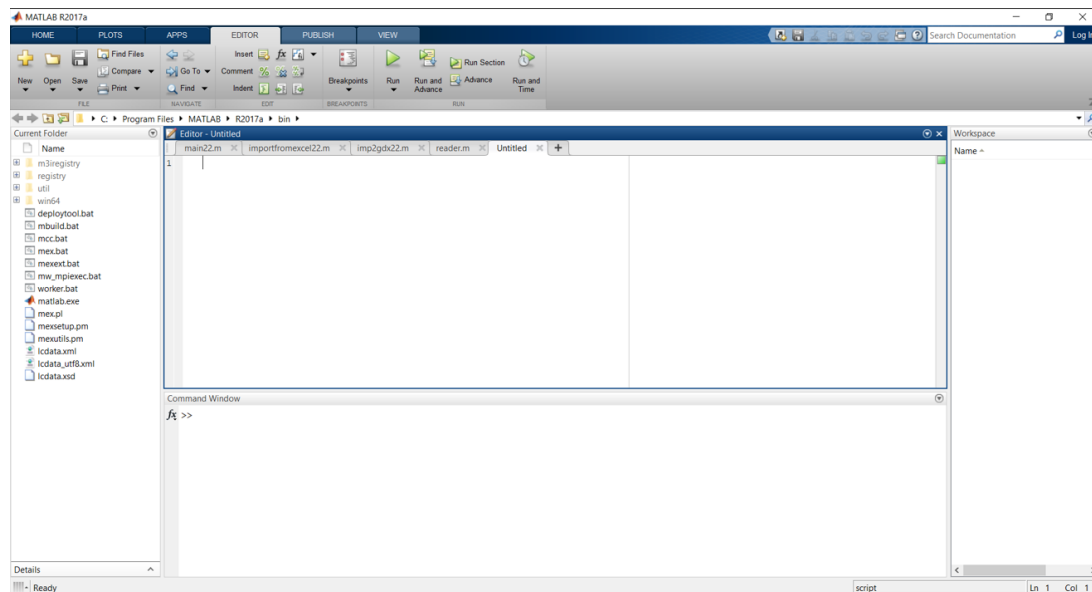
Η MATLAB είναι μια γλώσσα τέταρτης γενιάς, έχει διαδραστικό περιβάλλον και επιτρέπει στον χρήστη να κάνει τεχνικούς υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό, καθώς περιέχει αρκετές εντολές όπως while, for και if. Οι βασικές εντολές της χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εντολές ελέγχου ροής (if) και τις εντολές επαναληπτικών διαδικασιών (for, while) [47].

Συνοπτικά η γλώσσα MATLAB έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Μαθηματικούς/αριθμητικούς υπολογισμούς
- Ανάπτυξη αλγορίθμων
- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση
- Ανάλυση και γραφική παρουσίαση δεδομένων

5.2.1 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ MATLAB

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος της MATLAB είναι (Σχήμα 5.1):



Σχήμα 5.1: Το περιβάλλον του MATLAB.

- Command window (παράθυρο εντολών): Μέσα στο παράθυρο αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσής τους και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων, δηλαδή γίνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα.
- Editor (παράθυρο επεξεργασίας): Το παράθυρο επεξεργασίας είναι ένα απλό πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου όπου μπορούν να φορτώσουν, να επεξεργαστούν και να αποθηκευτούν πλήρη προγράμματα MATLAB. Το παράθυρο του επεξεργασίας έχει επίσης μια εντολή μενού (Debug/Run) που επιτρέπει να υποβληθεί το πρόγραμμα στο παράθυρο εντολών.

- **Command history** (ιστορικό εντολών): Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται οι εντολές που εκτέλεσε ο χρήστης και αν θέλει μπορεί να τις αντιγράψει ή να τις σύρει (drag and drop) στο παράθυρο εντολών.
- **Workspace** (χώρος εργασίας): Ο χώρος διεκπεραίωσης των πράξεων είναι ο βασικός χώρος λειτουργίας του προγράμματος. Ο χώρος αυτός βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή και μέσα σε αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματά τους, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις.
- **Current directory** (τρέχων κατάλογος): Είναι το σημείο αναφοράς των αρχείων του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητό να κληθεί μια συνάρτηση ή ένα m-file πρέπει να βρίσκεται στον τρέχοντα κατάλογο [47].

5.2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ m-files

Ένα από τα πράγματα που κάνουν τη Matlab να υπερτερεί έναντι άλλων γλωσσών προγραμματισμού, είναι η ευκολία με την οποία μπορεί κάποιος να προγραμματίσει.

Στη γενική περίπτωση, για απλούς υπολογισμούς, το παράθυρο εντολών είναι αρκετά εύχρηστο. Ο προγραμματισμός στο παράθυρο εντολών σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει και ένα πλήθος προβλημάτων. Όσο αυξάνεται το πλήθος των εντολών ή πρέπει να αλλάζουν οι τιμές κάποιων μεταβλητών, η διαδικασία να γράφει ο χρήστης στο παράθυρο εντολών είναι χρονοβόρα. Εντούτοις το κύριο πρόβλημα είναι ότι όταν κλείσει το πρόγραμμα τότε ότι γράφτηκε στο παράθυρο εντολών θα σβηστεί.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα πρέπει να γίνεται αποθήκευση των εντολών αυτών σε ένα αρχείο, το οποίο θα καλείται από το παράθυρο εντολών και θα εκτελούνται οι ανάλογες εντολές. Η MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τα λεγόμενα m-files, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα script files και τις functions.

- **Script files**: Για να δημιουργηθεί ένα script file, ακολουθείται η διαδικασία: File → New → Script και ανοίγει ο editor. Μέσα στο παράθυρο αυτό συντάσσονται οι εντολές, όπως ακριβώς θα συντάσσονταν και μέσα στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται μέσα στην ενεργό διεύθυνση αποθήκευσης της MATLAB, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης εκτέλεσής τους με την κλήση του ονόματος τους από το παράθυρο εντολών. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα να αποθηκεύεται πλήθος εντολών, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται όποτε απαιτείται. Τα script files λειτουργούν με γενικές μεταβλητές, δηλαδή είναι “ορατές” και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έξω από το συγκεκριμένο αρχείο.
- **Functions**: Αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των m-files και η διαδικασία δημιουργίας τους είναι: File → New → Function. Η μεγάλη διαφορά τους με τα script files είναι ότι οι μεταβλητές είναι τοπικές, δηλαδή μία μεταβλητή που περιέχεται σε μια function δεν μπορεί να επηρεαστεί από διαδικασίες εκτός function. Ακόμα μπορεί να δεχθεί

δεδομένα σαν ορίσματα και να επιστρέφει αποτελέσματα. Μια function πρέπει πάντα να αρχίζει με την ακόλουθη γραμμή:

$$function [out1, \dots, outn] = funct_name(input1, \dots, inputm)$$

όπου $out1, \dots, outn$ είναι τα αποτελέσματα που επιστρέφονται, $funct_name$ είναι το όνομα της και $input1, \dots, inputm$ τα ορίσματά της. Μια function δεν είναι απαραίτητο να έχει ορίσματα ή να επιστρέφει αποτελέσματα. Σαν ορίσματα, (αντίστοιχα αποτελέσματα), μπορούν να μπουν μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν να είναι πολλών ειδών. Όπως για παράδειγμα αριθμοί, συμβολοσειρές, πίνακες και πολλές άλλες δομές που μπορεί να επεξεργαστεί η MATLAB [48].

5.2.3 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ GAMS

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος του GAMS είναι:

- Καρτέλα προγράμματος (Σχήμα 5.2): Μέσα στην καρτέλα αυτή γράφονται οι εντολές, περιλαμβάνει δηλαδή όλο τον κώδικα της μοντελοποίησης των διάφορων στοιχείων του προβλήματος καθώς και εντολές που καθορίζουν ποιος επιλύτης (solver) θα χρησιμοποιηθεί, τι αποτελέσματα θα παρουσιαστούν, κλπ.

```

set matout "matso14.gdx", curt, Pch, Fdia, Ebas, Esmfd";

Sets
  i      nodes of network
  t      time steps
  wp     wind parks
  b      battery storage systems
  fd     flexible demand systems
  smfd   storage managed flexible demand systems
  fwp;

*duplicates i to j
ALIAS (i,j);

Parameters
  lineY(i,i)  line amplitude Y
  linePhi(i,i) line angle Phi
  BusData(i,*) data of buses
  Pw(t)       Output Active Power of each time step
  Load(i,t)   Load of each time step
  Pr_MWh(t)   hourly price of the wholesale market (EUR per MWh)
  Emin        minimum stored energy
  Emax        maximum stored energy
  E_initial(b) initial stored energy of each bus
  Efd(fd)     initial stored energy of each smfd
  Esmfdmin    minimum smfd stored energy
  Esmfdmax    maximum smfd stored energy
  Esmfd_initial(smfd) initial stored energy of each smfd
  Pheat(t);

G1j(i,j)
B1j(i,j)
LoadP(i,t) demand of active power
LoadQ(i,t) demand of reactive power
thermal(i,i)
load_prf(t);

$GDXIN MsoG22
$LOAD i, t, wp, b, fd, smfd, fwp, lineY, linePhi, BusData, Pw, load, Pr_MWh, Emin, Emax, E_initial, Esmfdmin, Esmfdmax, Esmfd_initial, Pheat, thermal, load_prf
$GDXOUT

```

Σχήμα 5.2: Το περιβάλλον του GAMS.

- Καρτέλα αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.3): Σε αυτή την καρτέλα παρουσιάζονται όλες οι πληροφορίες που αφορούν την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Περιέχει όλα τα αποτελέσματα των εξισώσεων που έχουν επιλυθεί, τις τιμές όλων των μεταβλητών καθώς και τη βέλτιστη λύση της αντικειμενικής συνάρτησης.


```

GAMS 24.1.3 r11464 Released Jul 26, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows 05/16/19 13:26:42 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation
2
3 Sets
4 t time steps
5 wp wind parks
6 b battery storage systems
7 fd flexible demand systems
8 smfd storage managed flexible demand systems
9
10
11
12 *duplicates i to j
13 ALIAS (i,j);
14
15 Parameters
16 lineY(i,i) line amplitude Y
17 linePhi(i,i) line angle Phi
18 BusData(i,*) data of buses
19 Pw(t) Output Active Power of each time step
20 Load(i,t) Load of each time step
21 Pr_30Wh(t) hourly price of the wholesale market (EUR p
22 er MWh)
23 Emin minimum stored energy
24 Emax maximum stored energy
25 E_initial(b) initial stored energy of each bus
26 Efd(fd)
27 Esmfdmin minimum smfd stored energy
28 Esmfdmax maximum smfd stored energy
29 Esmfd_initial(smfd) initial stored energy of each smfd
30 Pheat(t)
31
32 G1j(i,j)
33 B1j(i,j)
34 LoadP(i,t) demand of active power

```

Σχήμα 5.3: Η δομή του αρχείου καταχώρισης GAMS.

- Process window, παράθυρο διεργασίας (Σχήμα 5.4): Σε αυτό το παράθυρο παρουσιάζεται η πρόοδος του προγράμματος κατά τη φάση της μεταγλώττισης και της επίλυσης του προβλήματος (Σχήμα 5.5). Σε περίπτωση που υπάρχουν λάθη στον κώδικα που εμποδίζουν τη σωστή μεταγλώττιση και επίλυσή του, εμφανίζονται κωδικοί λάθους με κόκκινο χρώμα και έναν αριθμό. Ο κάθε αριθμός υποδηλώνει το είδος του προβλήματος προκειμένου να είναι πιο εύκολη η διόρθωση του λάθους. Ένα διπλό κλικ με το ποντίκι θα ανοίξει το αρχείο και θα τοποθετηθεί ο κέρσορας στο σημείο του κώδικα που βρίσκεται το σφάλμα.

22buses_scenario4b

158	0	2	6.2942481299E+01			2.5E-03		T	T
159	0	2	5.9431653473E+01			5.8E-02		T	T
160	0	2	5.9361592576E+01			1.2E-03		T	T
161	0	2	5.9270631214E+01			1.6E-03		T	T
162	0	2	5.8459792633E+01			1.4E-02		T	T
163	0	2	5.7654461459E+01			1.4E-02		T	T
164	0	2	5.4077986101E+01			6.4E-02		T	T
165	0	2	4.8737007548E+01			1.0E-01		T	T
166	0	2	4.8643982193E+01			2.0E-03		T	T
167	0	2	4.3250821152E+01			1.2E-01		T	T
Iter	Phase	Ninf	Infeasibility	RGmax	NSB	Step	InItr	MX	OK
168	0	2	4.2365394431E+01			2.1E-02		T	T
169	0	2	3.8151916149E+01			1.0E-01		T	T
170	0	2	3.4706496916E+01			9.5E-02		T	T
171	0	2	3.3144227529E+01			4.8E-02		T	T
172	0	2	3.2321941110E+01			2.6E-02		T	T
173	0	2	3.0476361426E+01			6.1E-02		T	T
174	0	2	2.5459164201E+01			1.8E-01		T	T
175	0	2	2.5459164201E+01			0.0E+00		T	T
176	0	2	2.4311998688E+01			4.9E-02		T	T
177	0	2	2.3369827452E+01			4.2E-02		T	T
Iter	Phase	Ninf	Infeasibility	RGmax	NSB	Step	InItr	MX	OK
178	0	2	2.2619948139E+01			3.5E-02		T	T
179	0	2	2.1366941084E+01			6.0E-02		T	T
180	0	2	2.0591323816E+01			4.0E-02		T	T
181	0	2	1.9634275867E+01			5.1E-02		T	T
182	0	2	1.9521171024E+01			6.4E-03		T	T
183	0	2	1.8412306110E+01			6.3E-02		T	T
184	0	2	1.7943725032E+01			2.8E-02		T	T
185	0	2	1.5837167139E+01			1.3E-01		T	T
186	0	2	1.1183607443E+01			3.3E-01		T	T
187	0	2	6.8688858273E+00			4.6E-01		T	T

187 0 2 6.8688858273E+00 4.6E-01 T T

Interrupt Stop Summary only Update

Σχήμα 5.4: Process window.

```

--- Starting compilation
--- TRANERR.GMS (12) 1 Mb 1 Err
*** Error 120 in C:\GAMS\GAMSI
Unknown identifier entered
--- TRANERR.GMS (36) 1 Mb 2 Err
*** Error 140 in C:\GAMS\GAMSI
Unknown symbol
--- TRANERR.GMS (42) 1 Mb 5 Err
*** Error 120 in C:\GAMS\GAMSI
Unknown identifier entered
*** Error 340 in C:\GAMS\GAMSI
A label/element with the s
to quote a label/element
set i / a,b,c /; param
*** Error 171 in C:\GAMS\GAMSI
Domain violation for set
--- TRANERR.GMS (43) 1 Mb 7 Err
*** Error 149 in C:\GAMS\GAMSI
Uncontrolled set entered a
*** Error 149 in C:\GAMS\GAMSI
Uncontrolled set entered a
--- TRANERR.GMS (47) 1 Mb 8 Err
*** Error 257 in C:\GAMS\GAMSI

```

Σχήμα 5.5: Process window με λάθη στον κώδικα

- Γραμμή εργαλείων GAMS (Σχήμα 5.6): Στη γραμμή εργαλείων φαίνονται τα ονόματα των αρχείων που είναι ανοιγμένα και ο χρήστης μπορεί να τα επιλέξει και να πραγματοποιήσει διάφορες αλλαγές που επιθυμεί. Τα εικονίδια που υπάρχουν από αριστερά προς τα δεξιά είναι τα ακόλουθα: άνοιγμα αρχείου GAMS (σχήμα φακέλου), αποθήκευση αρχείου (σχήμα δίσκου), εύρεση σε πολλαπλά αρχεία, εύρεση σε ένα αρχείο, εύρεση επόμενου στοιχείου (σχήμα με τον φακό), πεδίο εισαγωγής της λέξης προς αναζήτηση, ταίριασμα παρενθέσεων (σχήμα με τα άγκιστρα), εκτύπωση αρχείου (εικονίδιο εκτυπωτή), εκτέλεση αρχείου (σχήμα με το κόκκινο βελάκι).



Σχήμα 5.6: Γραμμή εργαλείων.

- Γραμμή εργασιών (Σχήμα 5.7): Στη γραμμή εργασιών υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές:

- File: Βασικές λειτουργίες όπως αποθήκευση, διαγραφή, μεταγλώττιση (compile), ανακατεύθυνση αρχείου
- Edit: Υποστηρικτικές λειτουργίες επέμβασης επί του αρχείου
- Search: Γίνεται αναζήτηση και εύρεση λέξεων μέσα στον κώδικα
- Windows: Λειτουργίες επαναδιαμόρφωσης της επιφάνειας εργασίας
- Utilities: Δυνατότητα εγγραφής (recordings) του αρχείου και επαναδιαμόρφωσης του editor
- Model Libraries : Επιλογή κατάλληλης βιβλιοθήκης και δυνατότητα προβολής απλών παραδειγμάτων με στόχο την εξοικείωση του χρήστη με το λογισμικό
- Help: Βοηθητικές πληροφορίες για διάφορες εντολές, δυνατότητες του GAMS και γενικά για το λογισμικό

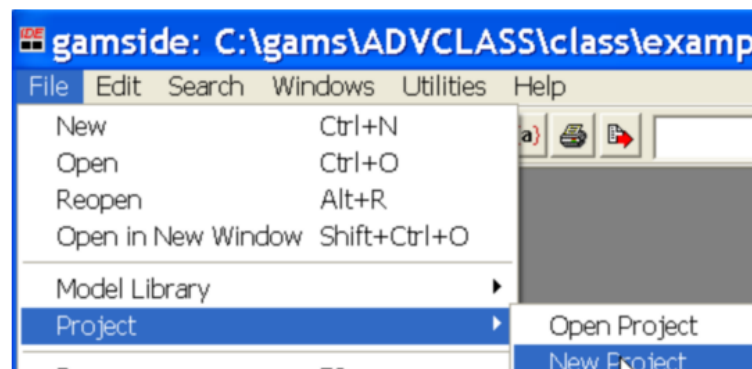


Σχήμα 5.7: Γραμμή εργασιών.

5.2.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ gms-files

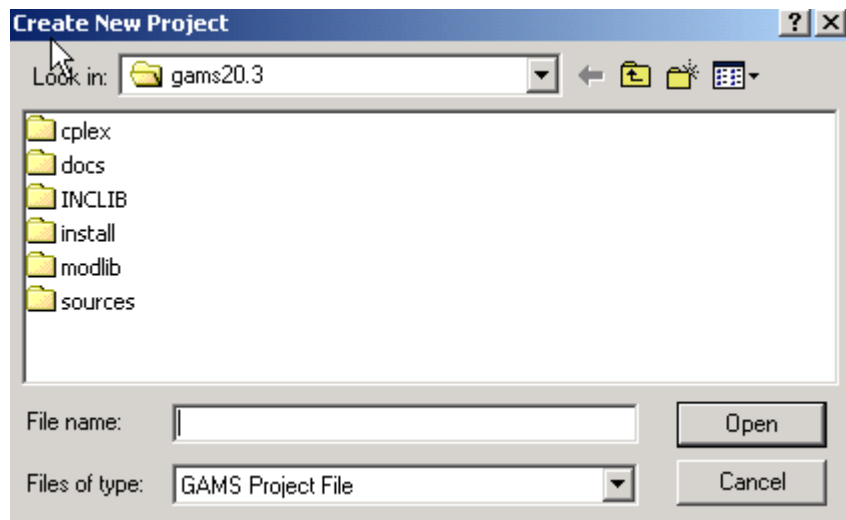
Η χρήση του IDE μετά την εγκατάσταση του προγράμματος περιλαμβάνει μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων για τη δημιουργία και την εκτέλεση ενός gms αρχείου [49]:

- Δημιουργία νέου έργου (Σχήμα 5.8): Αρχικά στη γραμμή εργασιών πατώντας την επιλογή file εμφανίζεται αναδυόμενο παράθυρο που σε αυτό δίνεται η επιλογή για δημιουργία νέου έργου (project). Πατώντας την επιλογή Project και στη συνέχεια την επιλογή New Project δημιουργείται ένα καινούργιο έργο. Το IDE χρησιμοποιεί ένα αρχείο "Project" ώστε να καθοριστεί πού τοποθετούνται όλα τα αποθηκευμένα αρχεία και πού το GAMS αναζητά αρχεία κατά την εκτέλεση του προγράμματος.



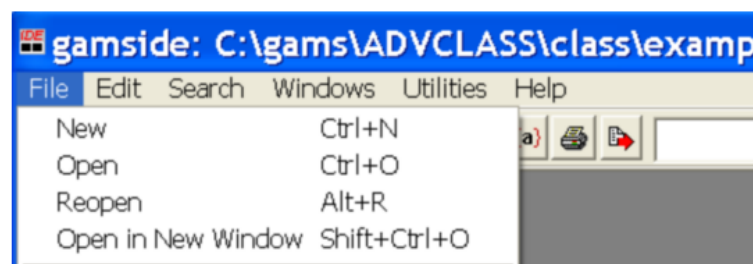
Σχήμα 5.8: Δημιουργία νέου έργου

- Ορισμός ονόματος και τοποθεσία έργου (Σχήμα 5.9): Στο αναδυόμενο παράθυρο στην περιοχή "File name" γίνεται εισαγωγή του ονόματος του αρχείου έργου. Αυτό καθορίζει τον κατάλογο όπου βρίσκονται ως επί το πλείστον τα αρχεία στα οποία υπάρχει πρόσβαση.



Σχήμα 5.9: Ορισμός ονόματος και τοποθεσία έργου

- Δημιουργία ή άνοιγμα ενός αρχείου εισόδου gms (Σχήμα 5.10): Στη γραμμή εργασιών πατώντας την επιλογή file εμφανίζεται αναδυόμενο παράθυρο που σε αυτό δίνονται οι επιλογές για τη δημιουργία και το άνοιγμα ενός αρχείου GMS.



Σχήμα 5.10: Άνοιγμα δημιουργία ενός αρχείου εισόδου gms

- Στη συνέχεια γίνεται προετοιμασία του αρχείου ώστε να είναι έτοιμο προς εκτέλεση (Σχήμα 5.11).

```

set matout "'matsol4.gdx', curt, Pch, Pdis, Ebss, Esmfd';

Sets
    i      nodes of network
    t      time steps
    wp     wind parks
    b      battery storage systems
    fd     flexible demand systems
    smfd   storage managed flexible demand systems
    fwp;

*duplicates i to j
ALIAS (i,j);

Parameters
    lineY(i,t)  line amplitude Y
    linePhi(i,t) line angle Phi
    BusData(i,*) data of buses
    Pw(t)       Output Active Power of each time step
    Load(i,t)  Load of each time step
    Pr_MWh(t)  hourly price of the wholesale market (EUR per MWh)
    Emin        minimum stored energy
    Emax        maximum stored energy
    E_initial(b) initial stored energy of each bus
    Efd(fd)     minimum smfd stored energy
    Esmfdmax    maximum smfd stored energy
    Esmfd_initial(smfd) initial stored energy of each smfd
    Pheat(t)

    Qij(i,j)
    B1j(i,j)
    LoadP(i,t) demand of active power
    LoadQ(i,t) demand of reactive power
    thermal(1,1)
    load_prf(t);

*DOKIM MtoG22
*LOAD i, t, wp, b, fd, smfd, fwp, lineY, linePhi, BusData, Pw, load, Pr_MWh, Emin, Emax, E_initial, Esmfdmin, Esmfdmax, Esmfd_initial, Pheat, thermal, load_prf
*copyto
  
```

Σχήμα 5.11: Προετοιμασία του αρχείου

- Εκτέλεση αρχείου (Σχήμα 5.12): η εκτέλεση του αρχείου με το GAMS γίνεται κάνοντας

κλικ στο κουμπί εκτέλεσης  ή πατώντας το F9.

```

set matout "'matsol4.gdx', curt, Pch, Pdis, Ebss, Esmfd';

Sets
    i      nodes of network
    t      time steps
    wp     wind parks
    b      battery storage systems
    fd     flexible demand systems
    smfd   storage managed flexible demand systems
    fwp;

*duplicates i to j
ALIAS (i,j);

Parameters
    lineY(i,t)  line amplitude Y
    linePhi(i,t) line angle Phi
    BusData(i,*) data of buses
    Pw(t)       Output Active Power of each time step
    Load(i,t)  Load of each time step
    Pr_MWh(t)  hourly price of the wholesale market (EUR per MWh)
    Emin        minimum stored energy
    Emax        maximum stored energy
    E_initial(b) initial stored energy of each bus
    Efd(fd)     minimum smfd stored energy
    Esmfdmax    maximum smfd stored energy
    Esmfd_initial(smfd) initial stored energy of each smfd
    Pheat(t)

    Qij(i,j)
    B1j(i,j)
    LoadP(i,t) demand of active power
    LoadQ(i,t) demand of reactive power
    thermal(1,1)
    load_prf(t);

*DOKIM MtoG22
*LOAD i, t, wp, b, fd, smfd, fwp, lineY, linePhi, BusData, Pw, load, Pr_MWh, Emin, Emax, E_initial, Esmfdmin, Esmfdmax, Esmfd_initial, Pheat, thermal, load_prf
*copyto
  
```

Σχήμα 5.12: Εκτέλεση αρχείου

- Στη συνέχεια στο αρχείο καταχώρησης (Σχήμα 5.3) μπορεί να γίνει περιήγηση στα αποτελέσματα που έχουν προέλθει από την επίλυση του προβλήματος.

5.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.3.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της MATLAB σε έκδοση 9.2.0 (R2017a) και στο περιβάλλον του GAMS σε έκδοση win64 24.1.3. Ο υπολογιστής στον οποίο αναπτύχθηκε το λογισμικό είχε λειτουργικό σύστημα Windows 10 Professional 64-bit, επεξεργαστή AMD Quad-core 3,8-GHz, και μνήμη RAM 16 GB.

Οι τυπικές απαιτήσεις, ώστε το σύστημα να μπορεί να υποστηρίξει το λογισμικό MATLAB είναι στην περίπτωση λειτουργικού συστήματος Windows να είναι νεότερο από Windows 7 Service Pack 1, επεξεργαστή οποιοδήποτε Intel ή AMDx86-64, 4-6 GB χώρο στο σκληρό δίσκο για την εγκατάσταση του λογισμικού MATLAB και 2 GB RAM.

Οι τυπικές απαιτήσεις, ώστε το σύστημα να μπορεί να υποστηρίξει το λογισμικό GAMS είναι στην περίπτωση λειτουργικού συστήματος Windows να είναι νεότερο από Windows 7, επεξεργαστή οποιοδήποτε νεότερο του Intel Dual Core, 450 MB χώρο στο σκληρό δίσκο για την εγκατάσταση του λογισμικού.

5.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η είσοδος των δεδομένων στο GAMS μπορεί να γίνει απευθείας μέσω του κώδικα ή μέσω εξωτερικών πηγών. Η πρώτη περίπτωση κρίνεται ιδιαίτερα συμφέρουσα όταν τα δεδομένα προς εισαγωγή είναι μικρά σε όγκο, ωστόσο για πιο μεγάλες εφαρμογές δεν προτείνεται, καθώς η είσοδος των δεδομένων καταναλώνει πολύ χώρο κάνοντας τον κώδικα υπερβολικά μεγάλο και δυσανάγνωστο.

Εναλλακτική επιλογή για την εισαγωγή δεδομένων είναι μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των προγραμμάτων MATLAB και GAMS. Η σύνδεση μεταξύ MATLAB και GAMS είναι σχετικά απλή. Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των δυο περιβαλλόντων προγραμματισμού γίνεται μέσω της δημιουργίας αρχείου GDX. Το GDX είναι τύπος αρχείου του GAMS για τη μεταφορά δεδομένων. Αυτό είναι ένα ανεξάρτητο αρχείο που αποθηκεύει δεδομένα σε δυαδική μορφή.

Για την εισαγωγή δεδομένων που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης στο περιβάλλον του GAMS αρχικά, πρέπει να καθοριστούν τα δεδομένα τα οποία ο χρήστης επιθυμεί να εισάγει. Τα δεδομένα εισάγονται στο περιβάλλον της MATLAB από αρχείο Excel μέσω της συνάρτησης (function) *importfromexcel*. Στη συνέχεια μέσω της συνάρτησης *imp2gdx* δημιουργείται ένα GDX αρχείο το οποίο χρησιμοποιείται από το μοντέλο GAMS για την εισαγωγή των δεδομένων. Στην εν λόγω συνάρτηση γίνεται αντιστοίχιση των δεδομένων εισόδου που έχουν προέλθει από το αρχείο Excel και μέσω της εντολής *wgdx* τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο αρχείο GDX.

5.3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται στο περιβάλλον ανάπτυξης του GAMS. Το μοντέλο στο GAMS αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια στοιχεία:

- **Σύνολα (Σχήμα 5.13):** τα σύνολα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των δεικτών στις αλγεβρικές αναπαραστάσεις των μοντέλων. Για παράδειγμα, σύνολο μονάδων παραγωγής, ευέλικτων φορτίων κλπ.

```

SGDXIN MtoG22
$LOAD i, t, wp, b, fd, smfd, fwp, lineY, linePhi, BusData, Pw, load, Pr_MWh, Emin, Emax, E_initial, Esmfdmin,
SGDXIN

Sets
    MAPwp (wp,i)    associates wind parks with nodes /wp1.3, wp2.17, wp3.21/
    MAPb (b,i)      associates bss with nodes      /b1.10/
    MAPfd (fd,i)    associates fd with nodes       /fd1.2/
    MAPsmfd (smfd,i) associates smfd with nodes    /smfd1.3/
    MAPfwp (fwp,i) associates wind parks with nodes /fwp1.3, fwp2.21/;

```

Σχήμα 5.13: Σύνολα

- **Δεδομένα (Σχήμα 5.14):** Τα δεδομένα εισόδου κάθε μοντέλου στο GAMS εκφράζονται με τη μορφή παραμέτρων, πινάκων ή scalar. Οι παράμετροι και οι πίνακες καθορίζονται πάνω στα σύνολα. Τα scalars είναι ποσότητες με μοναδική αξία.

```

Scalars
    pi          /3.14159265359/
    pf          loads power factor /0.95/
    ech         Charging efficiency /0.90/
    edis        Discharging efficiency /0.90/
    dt          /15/
    m           /1/;

* Load profile at node i
LoadP(i,t) = Load(i,t);
LoadQ(i,t) = Load(i,t)*tan(arccos(pf));

* Data matrices LineY and LinePhi are defined as symmetric
lineY(i,j)$ (ord(i) gt ord(j)) = lineY(i,j);
linePhi(i,j)$ (ord(i) gt ord(j)) = linePhi(i,j);
thermal(i,j)$ (ord(i) gt ord(j)) = thermal(i,j);
thermal(i,j)=thermal(i,j)/10;
Gij(i,j)=lineY(i,j)*cos(linePhi(i,j));
Bij(i,j)=lineY(i,j)*sin(linePhi(i,j));

```

Σχήμα 5.14: Δεδομένα

- **Μεταβλητές (Σχήμα 5.15):** Οι μεταβλητές είναι σύνολα αποφάσεων και είναι άγνωστες πριν από την επίλυση του μοντέλου.

Variables		
z		objective function
a		objective function 2
ObF		
V(i,t)		voltage at bus i at each time step
d(i,t)		voltage angle at bus i at each time step
Pslack(t)		Active power injected from slack bus at each time step
Qslack(t)		Reactive power injected from slack bus at each time step
Ebss(b,t)		Energy level in the storage unit b during each time step
Esmfd(smfd,t)		
Vslack		voltage at bus 1
curt(wp,t)		generation curtailment of wind power at each wind park at each time step
Pch(b,t)		Active power charge of BSS
Pdis(b,t)		Active power discharge of BSS
Qbss(b,t)		Reactive power of BSS
Pdmfd(fd,t)		Active power of DMFD
Psmfd(smfd,t)		Active power of SMFD
P(i,t)		
Q(i,t)		
Pfl(i,j,t)		
Qfl(i,j,t)		
Active_balance(t)		
Reactive_balance(t)		

Σχήμα 5.15: Μεταβλητές

- Εξισώσεις (Σχήμα 5.16): Οι εξισώσεις περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων και των μεταβλητών.

Equations		
ObjectiveF1		Objective Function
ObjectiveF2		Objective Function 2
ObjectiveF		
* Power injection at node i		
P_inj(i,t)		active power injection at node i during each time step
Q_inj(i,t)		reactive power injection at node i during each time step
* Power balance equations at each node i during each step		
E_bal(i,t)		active power balance at node i during each time step
Q_bal(i,t)		reactive power balance at node i during each time step
* Apparent Power flow inequality constraint for lines		
P_fl(i,j,t)		active power flow for line i-j during each time step
Q_fl(i,j,t)		reactive power flow for line i-j during each time step
S_fl(i,j,t)		apparent power flow limitation for line i-j during each time step
* BSS equality constraints		
Ch_limit(b,t)		Capability charge limitation of BSS
Dis_limit(b,t)		Capability discharge limitation of BSS
Qbss_limit1(b,t)		
Qbss_limit2(b,t)		
Eb(b,t)		Energy balance in each storage unit
Ebl(b,t)		
DifCh(b,t)		

Σχήμα 5.16: Εξισώσεις

- Δήλωση επίλυσης και μοντέλου (Σχήμα 5.17): Το μοντέλο ορίζεται ως ένα σύνολο εξισώσεων που περιέχουν μια αντικειμενική συνάρτηση. Η δήλωση επίλυσης ζητά από το GAMS να λύσει το μοντέλο και να επιλέξει το είδος του προβλήματος (NLP, MIP, MINLP, κ.α.) και το είδος της βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται επί της αντικειμενικής συνάρτησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση).

```

model OPF_bss /all/;

option nlp=conopt;

* Optimality tolerance for reduced gradient
$onecho>conopt.opt
rtredg=1.e-13
rtbndi=1.e-13
rtbndt=1.e-13
$offecho

OPF_bss.optfile=1;
option bratio=1;
option limrow = 45000 ;
option limcol = 2000 ;

Solve OPF_bss using nlp maximizing z;
*Solve OPF_bss using nlp minimizing a;

```

Σχήμα 5.17: Δήλωση επίλυσης και μοντέλου

- Έξοδος (Σχήμα 5.18): Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να παρουσιαστούν οι έξοδοι του επιλυμένου μοντέλου, όπως αποθήκευση σε αρχείο GDX και εμφάνιση στην οθόνη (Σχήμα 5.3) [54].

```

execute_unload %matout%

Display curt.1, Pch.1, Pdis.1, Qbss.1, Ebss.1, Pslack.1, Qslack.1, V.1, d.1, P.1, Q.1,

```

Σχήμα 5.18: Έξοδος

5.3.4 ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όμοια με την είσοδο δεδομένων, έτσι και με την έξοδο των αποτελεσμάτων, οι επιλογές είναι δύο. Η έξοδος των αποτελεσμάτων μπορεί να αποτυπωθεί και στο περιβάλλον GAMS (καρτέλα αποτελεσμάτων), αλλά και σε εξωτερική πηγή, στην προκειμένη περίπτωση το περιβάλλον της MATLAB.

Κατά την εκτέλεση του αρχείου GMS της βελτιστοποίησης του προβλήματος από το περιβάλλον του GAMS δημιουργείται ένα ακόμα αρχείο GDX (Σχήμα 5.18 και Σχήμα 5.19), το οποίο πλέον λειτουργεί σαν αρχείο μεταφοράς αποτελεσμάτων από το περιβάλλον του GAMS στο περιβάλλον της MATLAB.

```

$set matout "'matsol4.gdx', curt, Pch, Pdis, Ebss, Esmfd";

```

Σχήμα 5.18: Δημιουργία αρχείου GDX

```

execute_unload %matout%

```

Σχήμα 5.19: Εντολή για έξοδο του αρχείου προς το περιβάλλον της MATLAB

Τέλος, στο περιβάλλον της MATLAB, κατά αντιστοιχία με την είσοδο των δεδομένων, με χρήση της εντολής *rgdx* τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης αποθηκεύονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι προσομοιώσεις του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν με βάση το λογισμικό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, τα αποτελέσματα συγκρίνονται για διαφορετικά σενάρια προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία του ΔΔ. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης, σε ένα απλό ΔΔ 4 κόμβων, για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας και την κατανόηση της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε ΔΔ 22 κόμβων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του λογισμικού στο ίδιο δίκτυο για διαφορετικά σενάρια (μη ρύθμιση τάσης με άεργο ισχύ από τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, κοινό ποσοστό περιορισμού ισχύος των Α/Π, τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε διαφορετικούς κόμβους και με διαφορετικές τιμές ικανότητας φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας των αποθηκευτικών μέσων). Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής AMD A10-9700 Quad-core @ 3,8 GHz
- Μνήμη RAM 16 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10.1

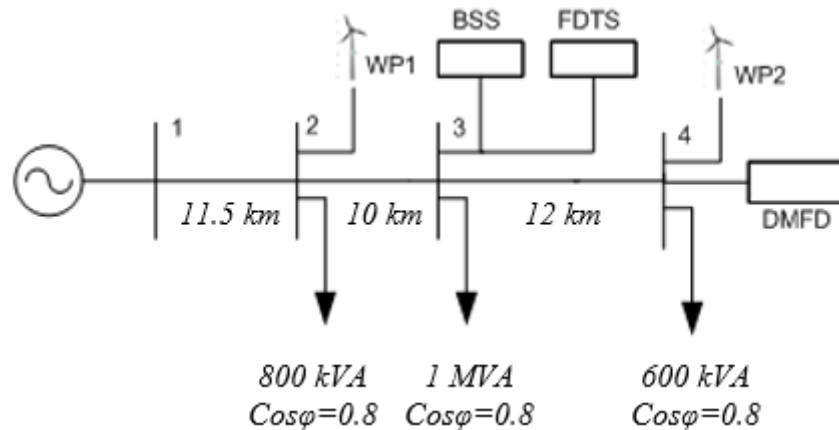
6.2 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια του κεφαλαίου είναι τα ακόλουθα:

S_{BASE}	Βασική ισχύς.
V_{BASE}	Βασική τάση.
Z_{BASE}	Βασική αντίσταση της γραμμής διανομής
<i>Γενικά σύμβολα δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος</i>	
R_{i-j}	Αντίσταση σε α.μ. τιμή της γραμμής διανομής μεταξύ των κόμβων $i-j$.
X_{i-j}	Επαγωγική αντίδραση σε α.μ. τιμή της γραμμής διανομής μεταξύ των κόμβων $i-j$.
V_{max}/V_{min}	Μέγιστο/ελάχιστο επιτρεπτό όριο του μέτρου της τάσης.
S_{ij}^{max}	Ικανότητα (μέγιστη φαινόμενη ισχύς) της γραμμής $i-j$.
P_{ss}	Ενεργός ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ.
P_{wdg}	Ενεργός ισχύς Α/Π με περιορισμό ισχύος.
<i>Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (BSS)</i>	
$\varepsilon_{in}, \varepsilon_{out}$	Βαθμός απόδοσης φόρτισης και εκφόρτισης BSS
SOC	Κατάσταση φόρτισης BSS
SOC^{min}/SOC^{max}	Ελάχιστο και μέγιστο όριο της κατάστασης φόρτισης του BSS
P_{BSS}^{charge}	Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο κατά τη φόρτιση του BSS
P_{BSS}^{dis}	Έγχυση ισχύος στο δίκτυο κατά την εκφόρτιση του BSS
Q_{BSS}	Έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο από το BSS
E_{BSS}^{cap}	Ονομαστική χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης του BSS
<i>Ευέλικτο Φορτίο Αποθήκευσης Θερμότητας (FDTS)</i>	
P_{FDTS}	Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο από το ευέλικτο φορτίο FDTS
E_{FDTS}^{cap}	Χωρητικότητα του FDTS
SOC_{FDTS}	Κατάσταση φόρτισης FDTS
$SOC_{FDTS}^{min}, SOC_{FDTS}^{max}$	Ελάχιστο και μέγιστο όριο της κατάστασης φόρτισης του FDTS
μ	Συντελεστής απόδοσης της διαχειριζόμενης αποθήκευσης ευέλικτου φορτίου FDTS

6.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 4 ΚΟΜΒΩΝ

Έστω το ΔΔ 4 κόμβων και 3 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Στον κόμβο 1 βρίσκεται υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για το λόγο αυτό θεωρείται ζυγός ταλάντωσης (slack bus). Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ) και τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.1. Βασική ισχύς $S_{BASE} = 10MVA$ και βασική τάση $V_{BASE} = 20kV$.



Σχήμα 6.1: Μονογραμμικό ισοδύναμο δικτύου 4 ζυγών

Η βασική αντίσταση της γραμμής διανομής είναι:

$$Z_{BASE} = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(20kV)^2}{10MVA} = 40\Omega \quad (6.40)$$

Οι γραμμές έχουν σύνθετη αντίσταση $Z_0 = (0,22 + j0,36) \Omega/km$. Επομένως με γνωστά τα χιλιόμετρα των γραμμών και τα φορτία των ζυγών, όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.1, προκύπτει ο Πίνακας 6.1.

Πίνακας 6.1: Δεδομένα δικτύου 4 ζυγών.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R_{i-j} (α.μ.)	X_{i-j} (α.μ.)	P ζυγού άφιξης (α.μ.)	Q ζυγού άφιξης (α.μ.)
1	1	2	0,06325	0,01035	0,64	0,48
2	2	3	0,055	0,09	0,8	0,6
3	3	4	0,066	0,108	0,48	0,36
Σύνολο					1,92	1,44

Οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων κάθε ζυγού να μην υπερβαίνουν το $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής τάσης του ζυγού και τα θερμικά όρια των γραμμών να μην υπερβαίνουν τα 5 MVA.

$$V_{min} = 0,95 \text{ α.μ.} \quad (6.2)$$

$$V_{max} = 1,05 \text{ α.μ.} \quad (6.3)$$

$$S_{ij}^{max} = 5MVA = 0,5 \text{ α.μ.} \quad (6.4)$$

Στο δίκτυο των 4 κόμβων είναι διασυνδεδεμένοι ΔΕΠ διαφορετικών τύπων. Στο δίκτυο συνδέονται και λειτουργούν δύο Α/Π με μέγιστη ικανότητα παραγωγής 1,8 MW και 1,2 MW αντίστοιχα, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές ονομαστικής χωρητικότητας 3,1 MWh και ικανότητας ισχύος 1,55 MW, ένα άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο με ικανότητα ρύθμισης ισχύος 0,8 MW και ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας με μέγιστη χωρητικότητα 3,7 MWh και ικανότητα ισχύος 1 MW. Σύμφωνα με τα παραπάνω καθώς και το Σχήμα 6.1, προκύπτει οι πίνακες Πίνακας 6.1 που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά και η τοπολογία των ΔΕΠ του δικτύου.

Πίνακας 6.2: Δεδομένα ΔΕΠ δικτύου 4 ζυγών.

ΔΕΠ	Κόμβος σύνδεσης στο δίκτυο	Ικανότητα ισχύος (MW)	Χωρητικότητα (MWh)
Α/Π Νο1 (WP-1)	2	1,8	-
Α/Π Νο2 (WP-2)	4	1,2	-
BSS	3	1,55	3,1
Άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο (SMFD)	4	0,8	-
Ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας (FDTS)	3	1	3,7

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

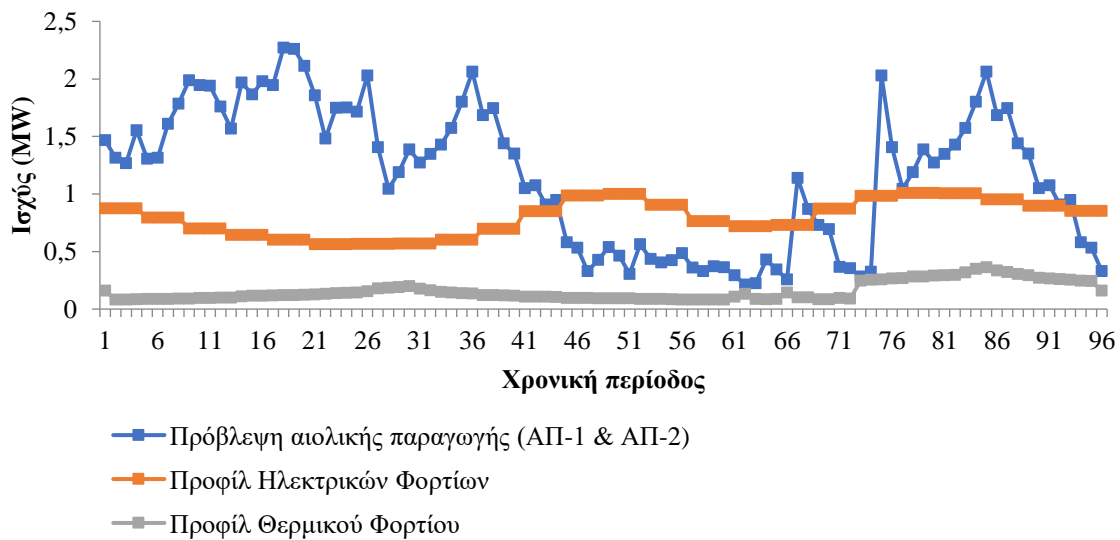
Σύστημα αποθήκευσης με συσσωρευτές	
Παράμετρος	Τιμή
E_{BSS}^{cap}	3,1 MWh
p_{max}^{charge}	1,55 MW
p_{min}^{charge}	0
p_{max}^{dis}	1,55 MW
p_{min}^{dis}	0
SOC_{max}	2,79 MWh ($90\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)
SOC_{min}	0,31 MWh ($10\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)
ε_{in}	90%
ε_{out}	90%
$SOC(0)$	1,55 MWh ($50\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ευέλικτου φορτίου αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά ευέλικτου φορτίου αποθήκευσης θερμότητας.

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	
Παράμετρος	Τιμή
E_{FDTs}^{cap}	3,7 MWh
P_{max}^{charge}	1 MW
$SOC(0)$	1,48 MWh ($40\% \cdot E_{FDTs}^{cap}$)
SOC_{final}	1,48 MWh ($40\% \cdot E_{FDTs}^{cap}$)
μ	1

Οι καμπύλες της συνολικής κατανάλωσης ενεργού ισχύος των ηλεκτρικών φορτίων του δικτύου καθώς και η πρόβλεψη παραγωγής ενεργού ισχύος των Α/Π φαίνονται στο Σχήμα 6.2. Για απλότητα, θεωρείται η ίδια καμπύλη ταχύτητας ανέμου για όλα τα Α/Π. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε ορίζοντα 24 ωρών που χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα των 15 λεπτών. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται επίσης η κατανάλωση ενεργού ισχύος του ελεγχόμενου φορτίου που διαθέτει αποθήκευση θερμικής ενέργειας (θερμικό φορτίο).



Σχήμα 6.2: Προβλέψεις ενεργής ισχύος ηλεκτρικού φορτίου και Α/Π καθώς και το προφίλ του θερμικού φορτίου

6.3.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ 4 ΚΟΜΒΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης της δυναμικής διαχείρισης του ενεργού ΔΔ 4 κόμβων. Έστω ένα ενεργό ΔΔ με δυνατότητα εποπτείας και ελέγχου των ΔΕΠ που συνδέονται σε αυτό. Τα χαρακτηριστικά του εν λόγω ΔΔ (χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς, φορτίων και ΔΕΠ) παρουσιάζονται στην Ενότητα 6.3. Η βελτιστοποίηση αφορά έναν χρονικό ορίζοντα 24 ωρών που χωρίζεται σε χρονικά βήματα των 15 λεπτών, δηλαδή 96 χρονικές περιόδους. Κάθε τύπος ΔΕΠ συμβάλλει με διαφορετικό τρόπο στον προγραμματισμό λειτουργίας του ΔΔ. Για τον λόγο αυτό ο προγραμματισμός λειτουργίας όλων των στοιχείων του ενεργού ΔΔ πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι αντικειμενικοί στόχοι που καλείται να εκπληρώσει ο Διαχειριστής του. Σκοπός είναι να βρεθεί το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας του ΔΔ, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που μελετήθηκαν κατά την εκτέλεση του λογισμικού περιγράφονται αναλυτικά στην Ενότητα 4.4 και συνοψίζονται ως εξής:

- Αντικειμενική συνάρτηση 1: Μεγιστοποίηση αξιοποίησης αιολικής παραγωγής.
- Αντικειμενική συνάρτηση 2: Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

Όσον αφορά τα σενάρια των προσομοιώσεων που επιλέχθηκαν, αυτά περιγράφονται ως ακολούθως:

- **Σενάριο 1:** λαμβάνεται υπόψη μόνο η δυνατότητα περιορισμού ισχύος των Α/Π και το πρόβλημα επιλύεται ως προς τη βελτιστοποίηση της πρώτης και της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής και την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.
- **Σενάριο 2:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 1 και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές.
- **Σενάριο 3:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 2 και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η συμβολή του άμεσα ελεγχόμενου ευέλικτου φορτίου, (DMFD).
- **Σενάριο 4:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 3 και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η συμβολή του ευέλικτου φορτίου αποθήκευσης θερμότητας (FDTs).

6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 4 ΚΟΜΒΩΝ

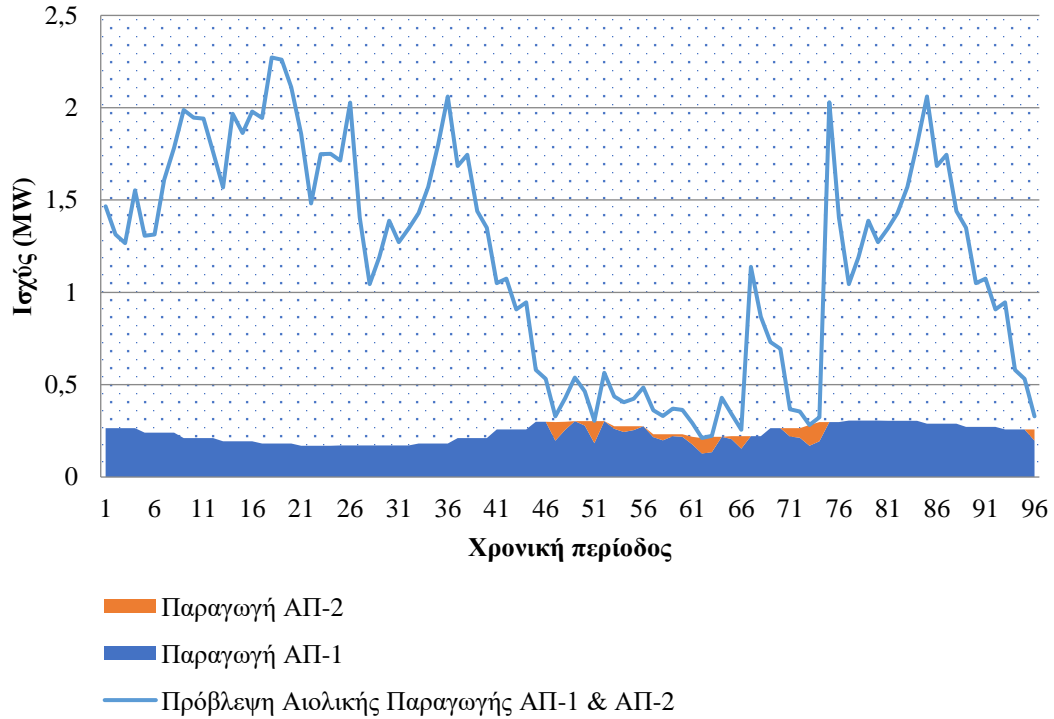
Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης της ενεργής διαχείρισης για το δίκτυο 4 κόμβων, λαμβάνοντας υπόψη τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τα σενάρια που περιγράφονται παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα οι στήλες του πίνακα παρουσιάζουν τα Σενάρια επίλυσης. Ο πίνακας χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος δείχνει τις τιμές έγχυσης ισχύος στο δίκτυο από τα Α/Π που επιδέχονται περιορισμό ισχύος και τη συνεισφορά του συστήματος μεταφοράς για την περίπτωση που το πρόβλημα λύνεται ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής. Το δεύτερο μέρος δείχνει τις τιμές έγχυσης ισχύος στο δίκτυο από τα Α/Π που επιδέχονται περιορισμό ισχύος και τη

συνεισφορά του συστήματος μεταφοράς για την περίπτωση που το πρόβλημα λύνεται ως προς την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

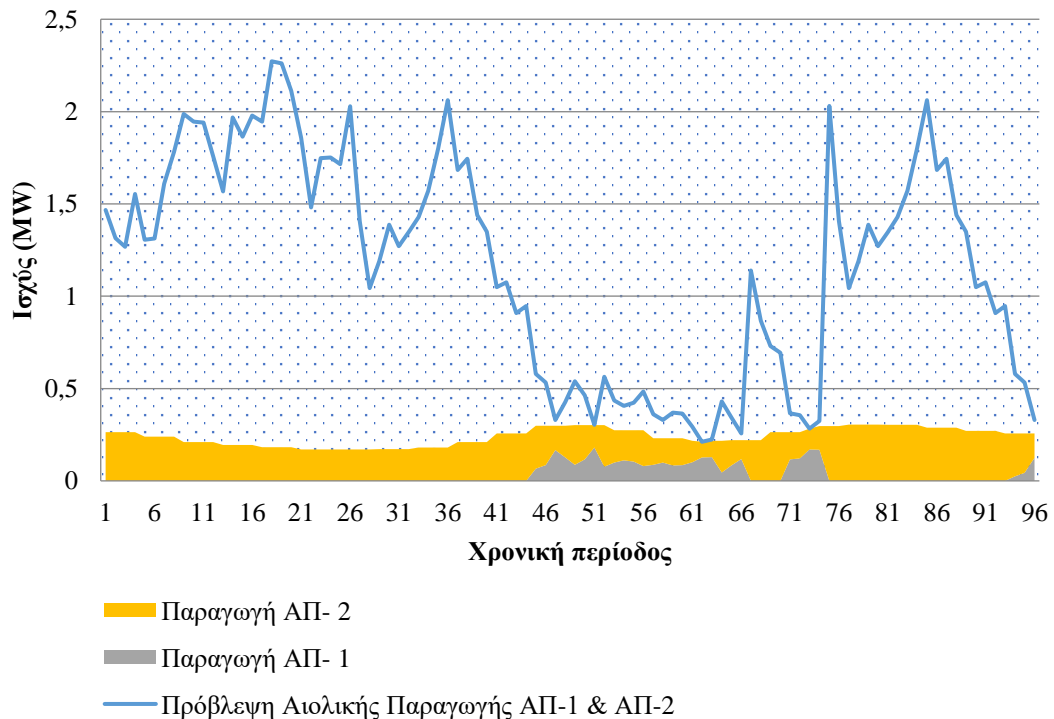
Πίνακας 6.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε σενάριο προσομοίωσης.

Μεγιστοποίηση Αξιοποίησης Αιολικής Ενέργειας				
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	5,78	6,49	6,82	10,88
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	13,51	15,14	15,91	25,40
Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς				
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	5,77	5,76	6,02	9,80
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	13,49	13,44	14,05	22,87

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά γραφικών παραστάσεων με τα αποτελέσματα της παραγωγής ισχύος των Α/Π για κάθε σενάριο και για κάθε αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της ενεργούς διαχείρισης του δικτύου. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς σε MW και στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται τα χρονικά βήματα $t_1 \dots t_{96}$, όπου κάθε t είναι διάστημα 15 λεπτών.

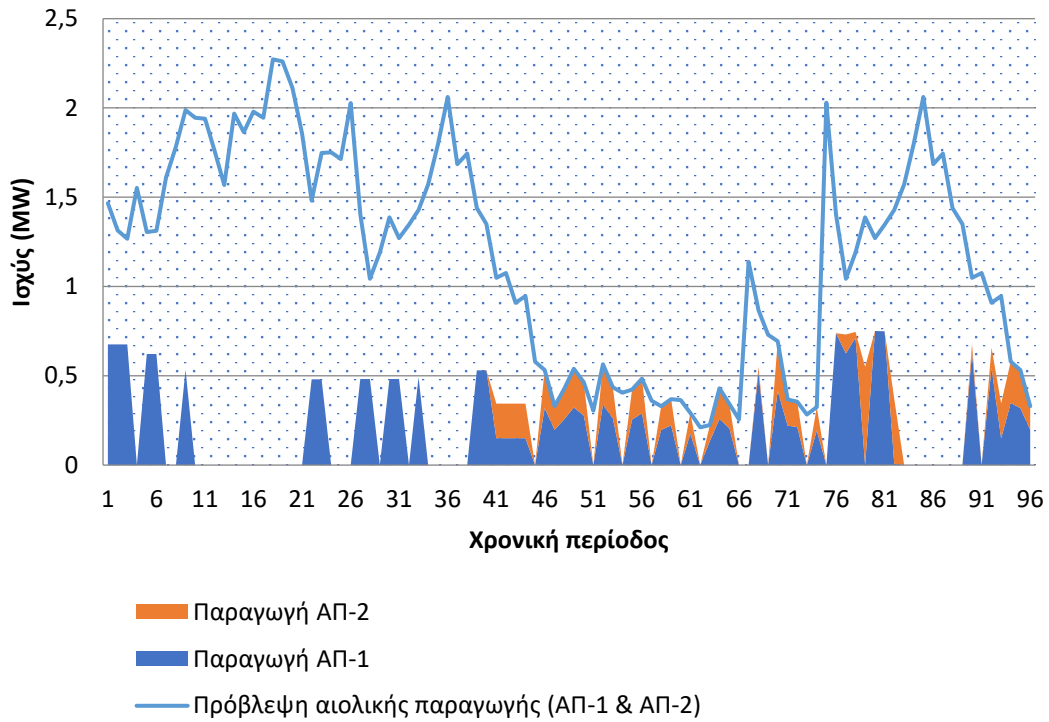


(α)

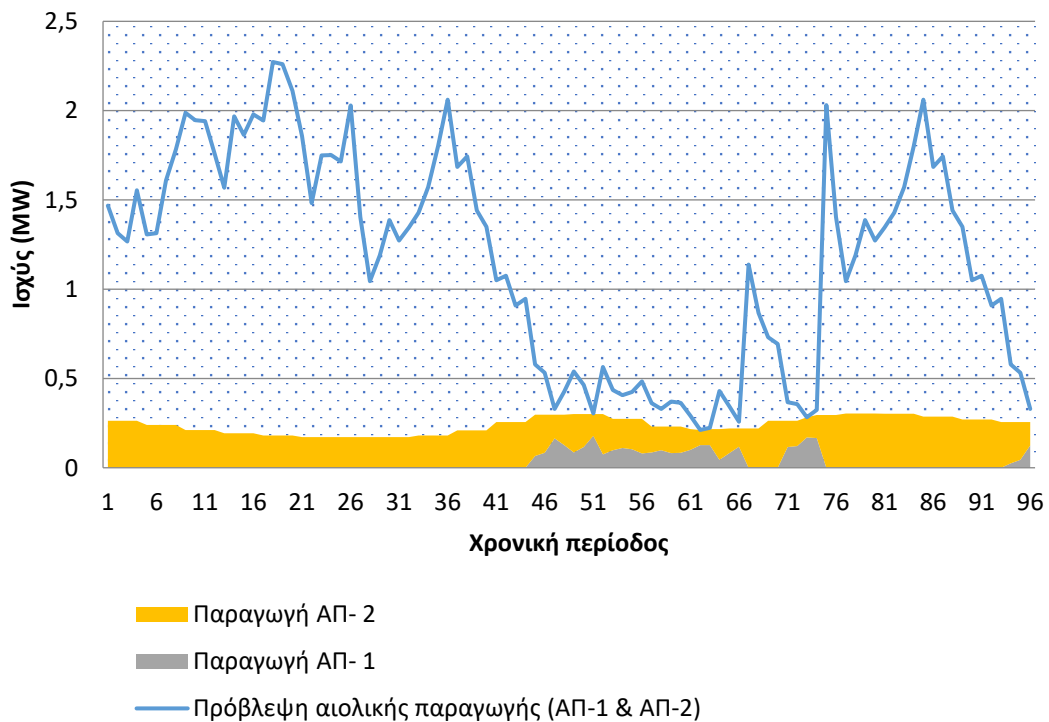


(β)

Σχήμα 6.3: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 1 για επίλυση με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση: α) Μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής, β) Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

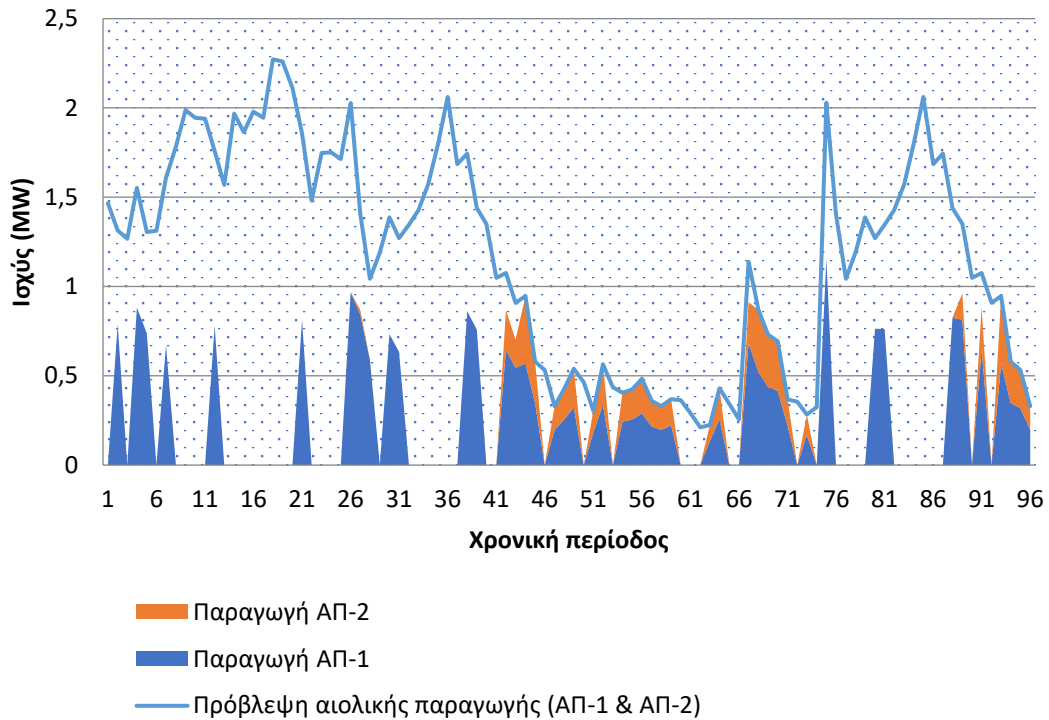


(α)

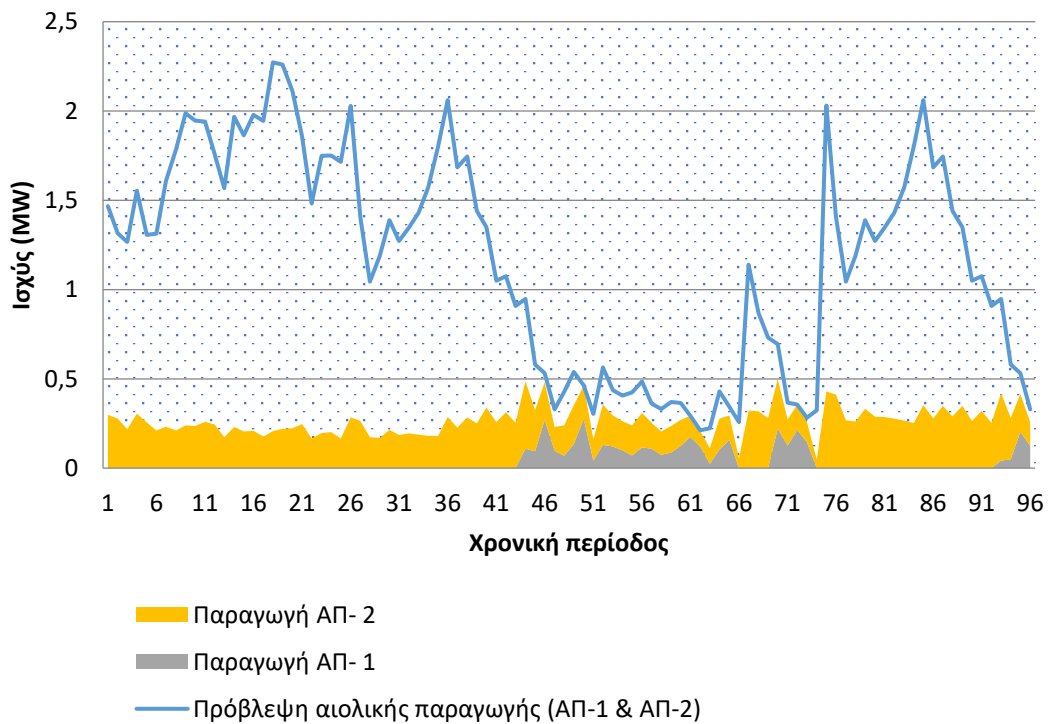


(β)

Σχήμα 6.4: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 2 για επίλυση με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση: α) Μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής, β) Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

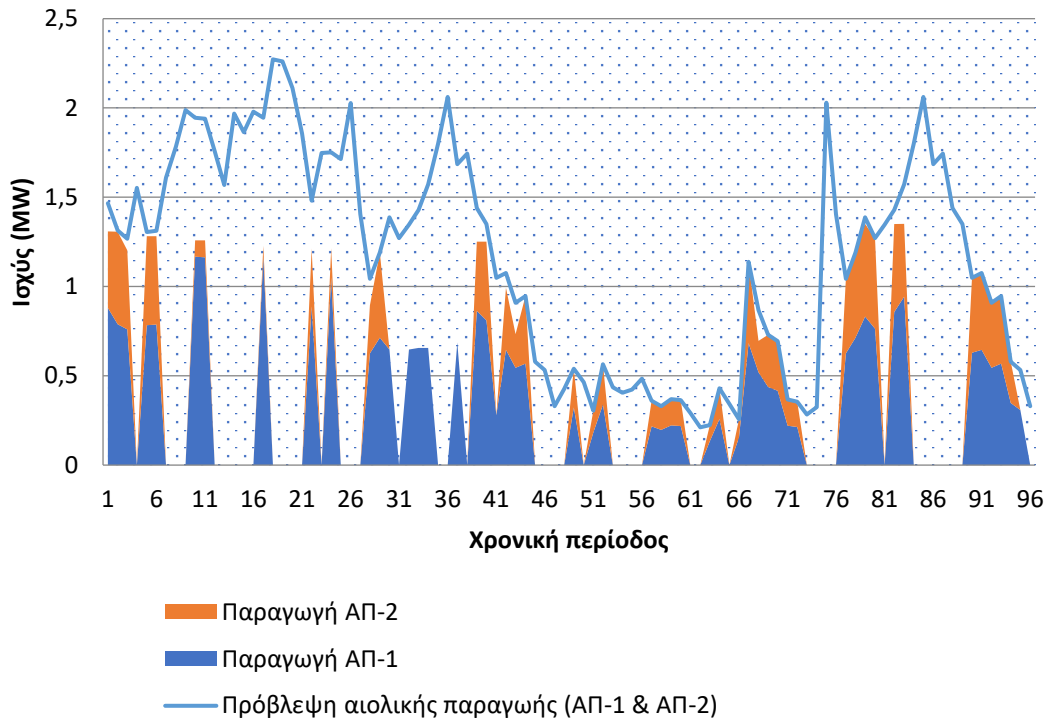


(α)

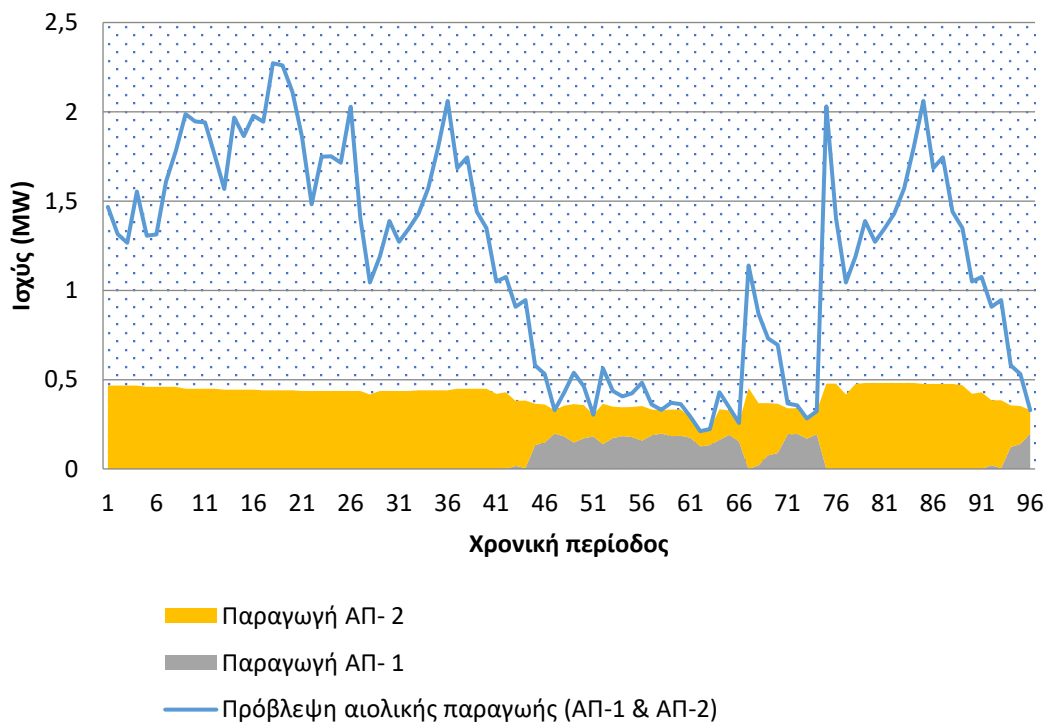


(β)

Σχήμα 6.5: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 3 για επίλυση με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση: α) Μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής, β) Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.



(α)

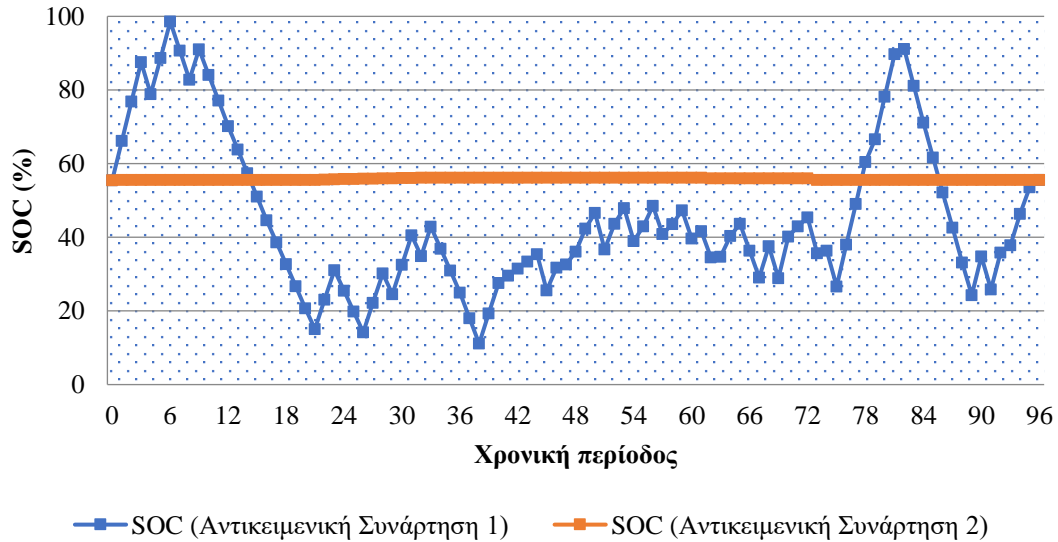


(β)

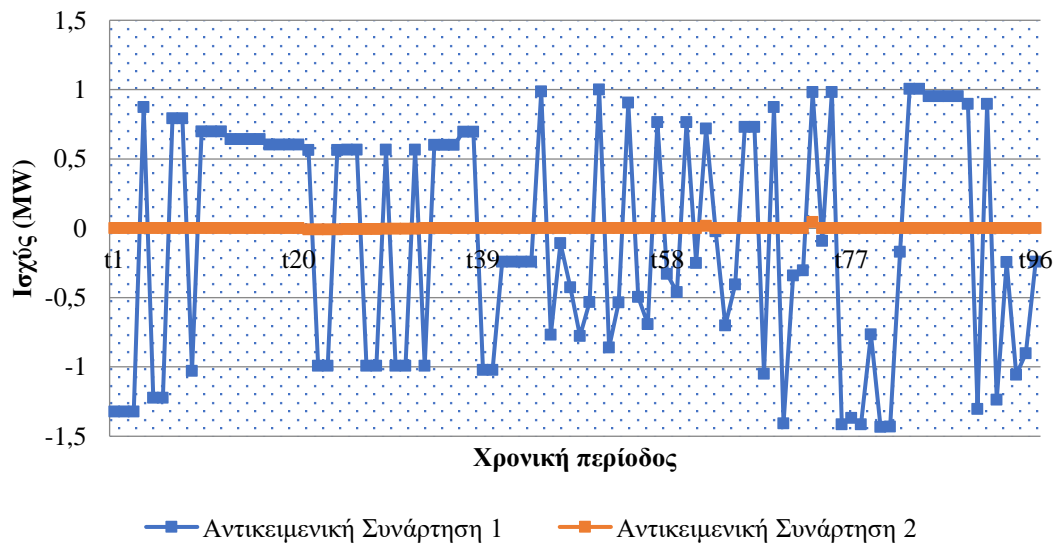
Σχήμα 6.6: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 4 για επίλυση με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση: α) Μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής, β) Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά γραφικών παραστάσεων με τα αποτελέσματα της κατάστασης φόρτισης, φόρτισης/εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και

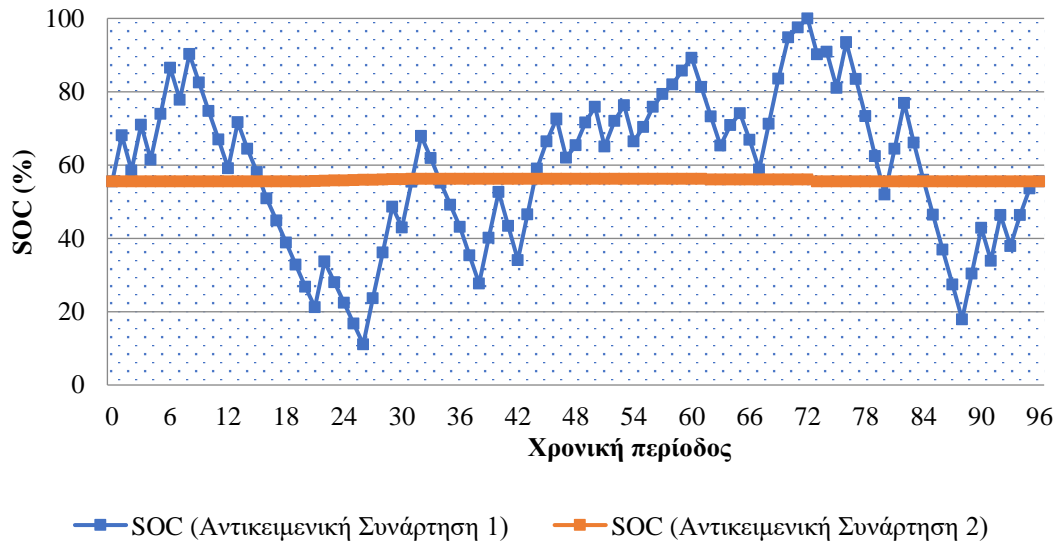
της κατάστασης φόρτισης του φορτίου με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε σενάριο και για κάθε αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της ενεργούς διαχείρισης του δικτύου. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται είτε το ποσοστό της κατάστασης φόρτισης είτε η τιμή ισχύος σε MW και στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται τα χρονικά βήματα $t_1 \dots t_{96}$, όπου κάθε t είναι διάστημα 15 λεπτών.



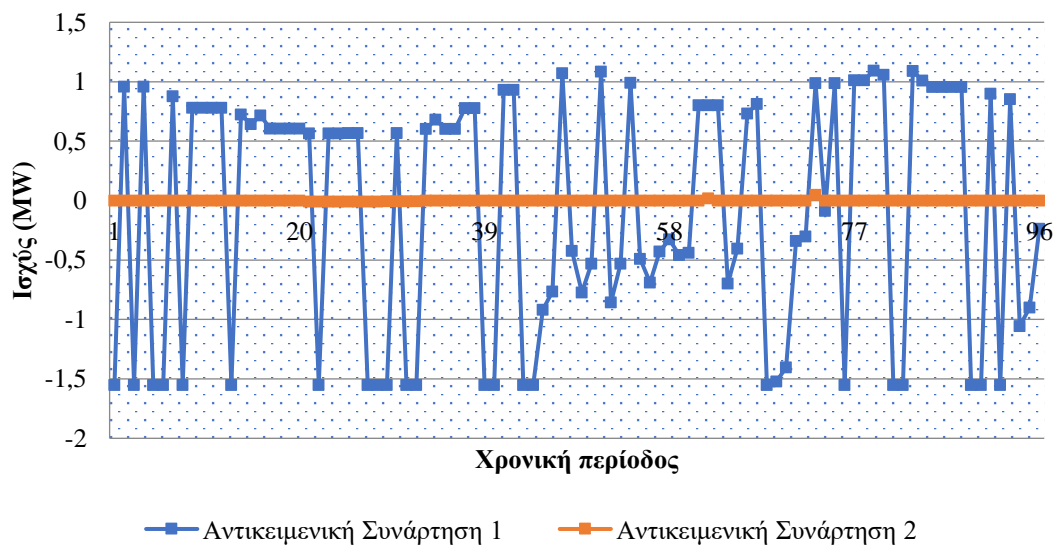
Σχήμα 6.7: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 2



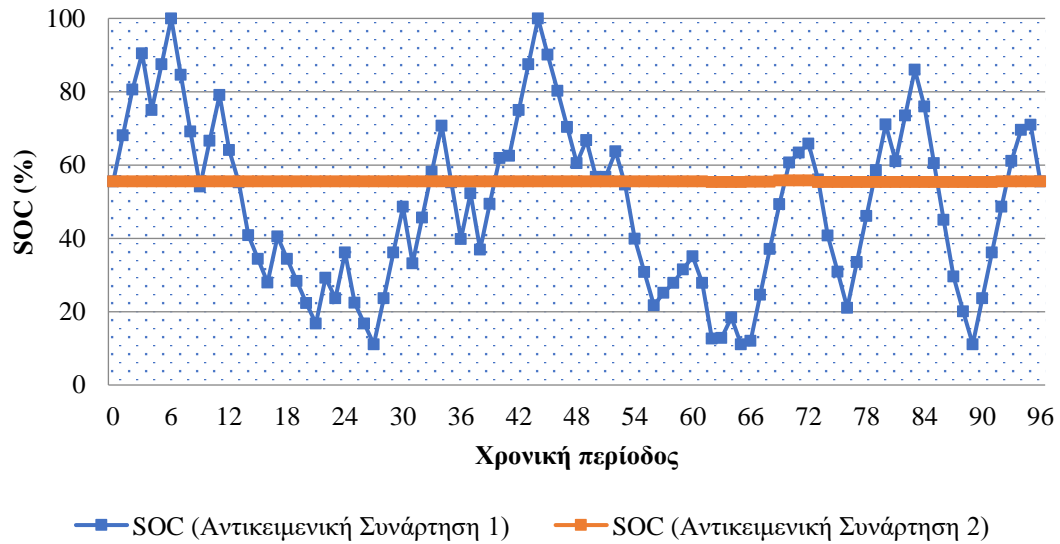
Σχήμα 6.8: Αποτελέσματα φόρτισης/εκφόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 2



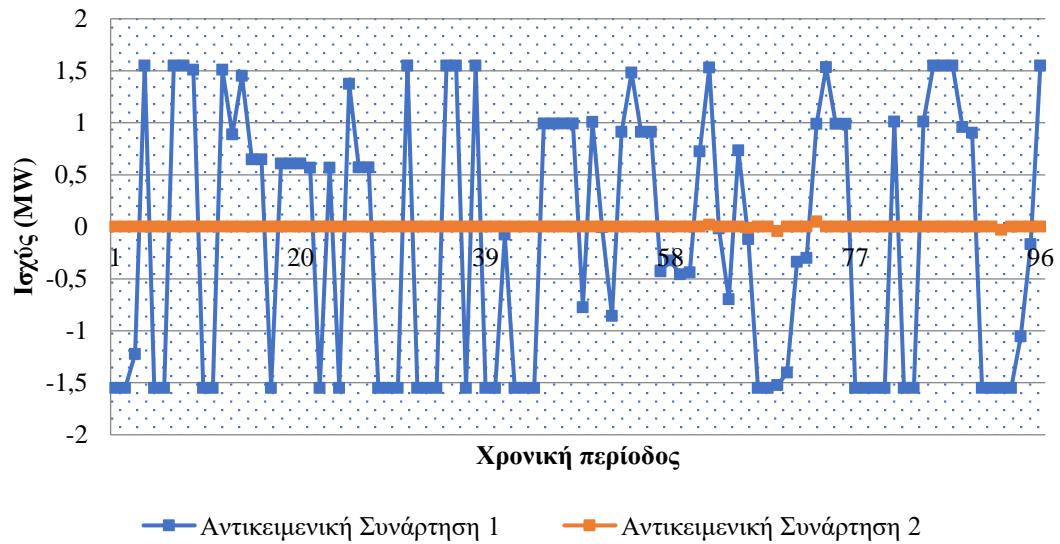
Σχήμα 6.9: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 3



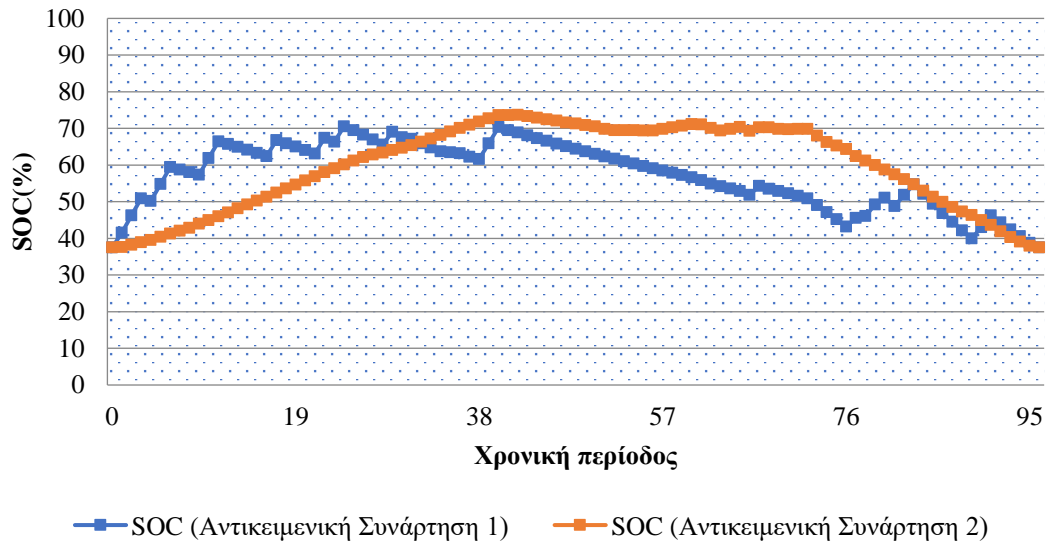
Σχήμα 6.10: Αποτελέσματα φόρτισης/εκφόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 3



Σχήμα 6.11: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 4



Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα φόρτισης/εκφόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 4



Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του FDTs κατά το Σενάριο 4

6.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατηρείται ότι ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής ότι όσο προστίθενται επιπλέον ενεργειακοί πόροι και ευέλικτα φορτία στο ενεργό ΔΔ υπάρχει μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης παραγόμενης αιολικής παραγωγής. Δηλαδή η εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής είναι σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά

Σενάριο 4>Σενάριο 3>Σενάριο 2>Σενάριο 1.

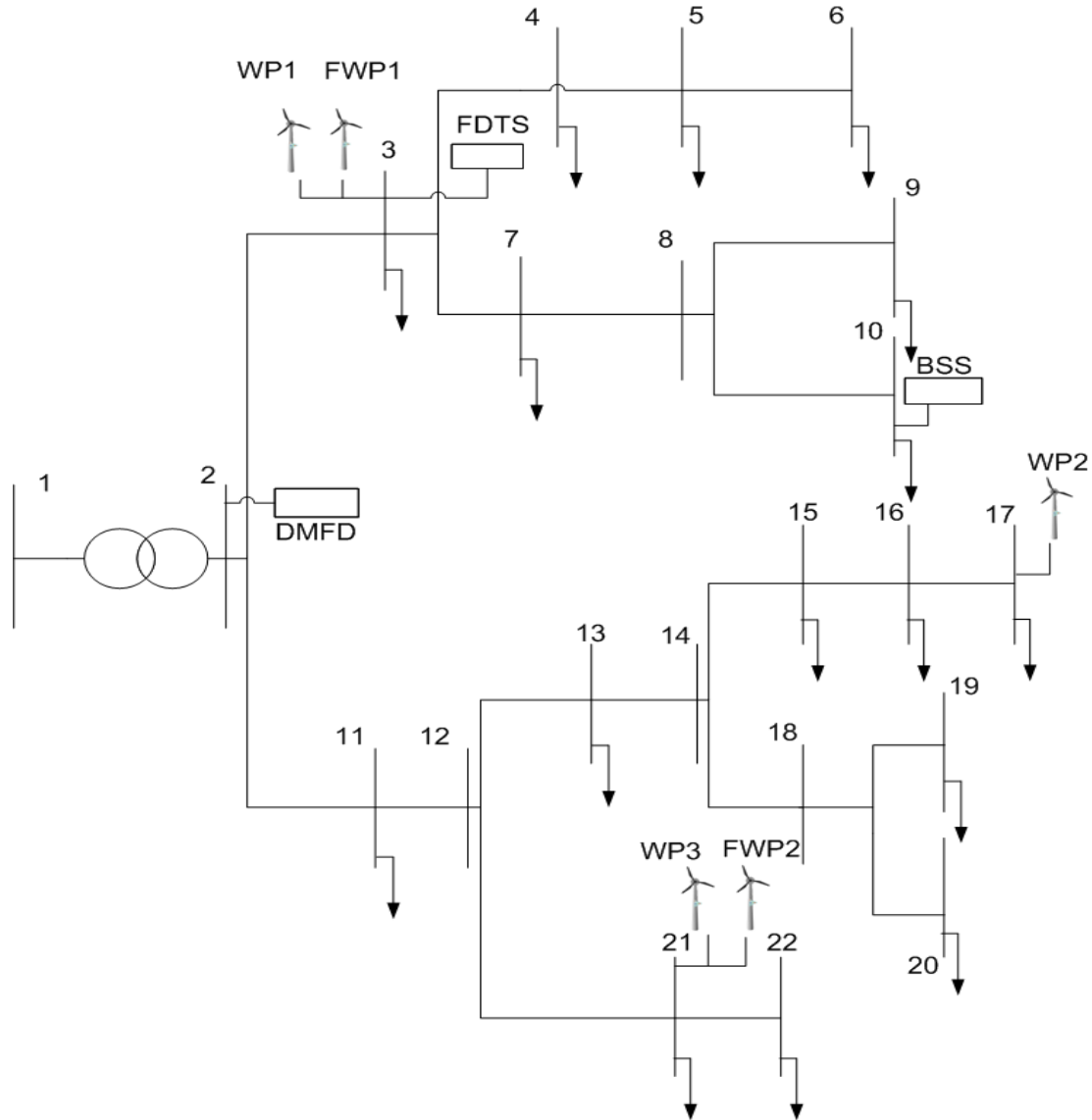
Ως προς την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς παρατηρείται αντίστοιχα ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση εισροών ισχύος από το σύστημα μεταφοράς. Δηλαδή οι εισροές από το σύστημα μεταφοράς είναι σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά

Σενάριο 1>Σενάριο 2>Σενάριο 3>Σενάριο 4.

Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται από το Σχήμα 6.7 έως 6.12 επιβεβαιώνουν την ορθή λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας καθώς παρατηρείται ότι σε κάθε σενάριο η τιμή ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την τιμή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

6.4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ 22 ΚΟΜΒΩΝ

Έστω το ΔΔ 22 κόμβων και 21 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14 Στο κόμβο 1 βρίσκεται υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για το λόγο αυτό θεωρείται ζυγός ταλάντωσης (slack bus). Οι υπόλοιποι κόμβοι του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ) και τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.6. Το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο του δικτύου είναι και . Βασική ισχύς $S_{BASE} = 10MVA$ και βασική τάση $V_{BASE} = 20kV$.



Σχήμα 6.14: Μονογραμμικό ισοδύναμο δικτύου 22 κόμβων

Τα δεδομένα του δικτύου 22 κόμβων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Δεδομένα δικτύου 22 κόμβων.

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R_{i-j} (α.μ.)	X_{i-j} (α.μ.)	P ζυγού άφιξης (α.μ.)	Q ζυγού άφιξης (α.μ.)
1	1	2	0,008063	0,012525	0,315	0,31
2	2	3	0,0086	0,01336	0,1575	0,15
3	3	4	0,005375	0,00835	0,1125	0,11
4	3	7	0,01075	0,0167	0,1575	0,15
5	4	5	0,0086	0,01336	0,18	0,17
6	5	6	0,005913	0,009185	0,09	0,09
7	7	8	0,004838	0,007515	0,225	0,22
8	8	9	0,009138	0,014195	0,0675	0,07
9	8	10	0,0317	0,01055	0,36	0,35
10	2	11	0,02536	0,00844	0,0945	0,09
11	11	12	0,01585	0,005275	0,0945	0,09
12	12	13	0,02536	0,00844	0,1575	0,15
13	12	21	0,02219	0,007385	0,0945	0,09
14	13	14	0,0317	0,01055	0,1125	0,11
15	14	15	0,01902	0,00633	0,0945	0,09
16	14	18	0,01585	0,005275	0,0945	0,09
17	15	16	0,07291	0,024265	0,045	0,04
18	16	17	0,0317	0,01055	0,0945	0,09
19	18	19	0,0317	0,01055	0,1575	0,15
20	18	20	0,04438	0,01477	0,0675	0,07
21	21	22	0,0317	0,01055	0,0675	0,07
Σύνολο					2,83	2,75

Οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων κάθε ζυγού να μην υπερβαίνουν το $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής τάσης του ζυγού και τα θερμικά όρια των γραμμών να μην υπερβαίνουν τα 16 MVA.

$$V_{min} = 0,95 \text{ α.μ.} \quad (6.5)$$

$$V_{max} = 1,05 \text{ α.μ.} \quad (6.6)$$

$$S_{ij}^{max} = 16MVA = 1,6 \text{ α.μ.} \quad (6.7)$$

Στο δίκτυο των 22 κόμβων είναι διασυνδεδεμένοι ΔΕΠ διαφορετικών τύπων. Στο δίκτυο συνδέονται και λειτουργούν δύο Α/Π τα οποία δεν επιδέχονται περιορισμό παραγόμενης

ισχύος με μέγιστη ικανότητα παραγωγής 10 MW και 9 MW αντίστοιχα, τρία Α/Π που μπορεί να πραγματοποιηθεί περιορισμός ισχύος με μέγιστη ικανότητα παραγωγής 30 MW, 25 MW και 22 MW αντίστοιχα, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές ονομαστικής χωρητικότητας 18 MWh και ικανότητα ισχύος 3 MW, ένα άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο με ικανότητα ρύθμισης ισχύος 6 MW και ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας με μέγιστη χωρητικότητα 10 MWh και μέγιστη ικανότητα ισχύος 2 MW. Σύμφωνα με τα παραπάνω καθώς και το Σχήμα 6.14, προκύπτει οι πίνακες Πίνακας 6.7 που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά και η τοπολογία των ΔΕΠ του δικτύου.

Πίνακας 6.7: Δεδομένα ΔΕΠ δικτύου 4 ζυγών.

ΔΕΠ	Κόμβος σύνδεσης στο δίκτυο	Ικανότητα ισχύος (MW)	Χωρητικότητα (MWh)
Α/Π Νο1 χωρίς περιορισμό ισχύος (FWP-1)	3	10	
Α/Π Νο2 χωρίς περιορισμό ισχύος (FWP-2)	21	9	
Α/Π Νο1 (WP-1)	3	30	-
Α/Π Νο2 (WP-2)	17	25	-
Α/Π Νο3 (WP-3)	21	20	
BSS	10	3	18
Άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο (SMFD)	3	6	-
Ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας (FDTS)	17	2	10

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

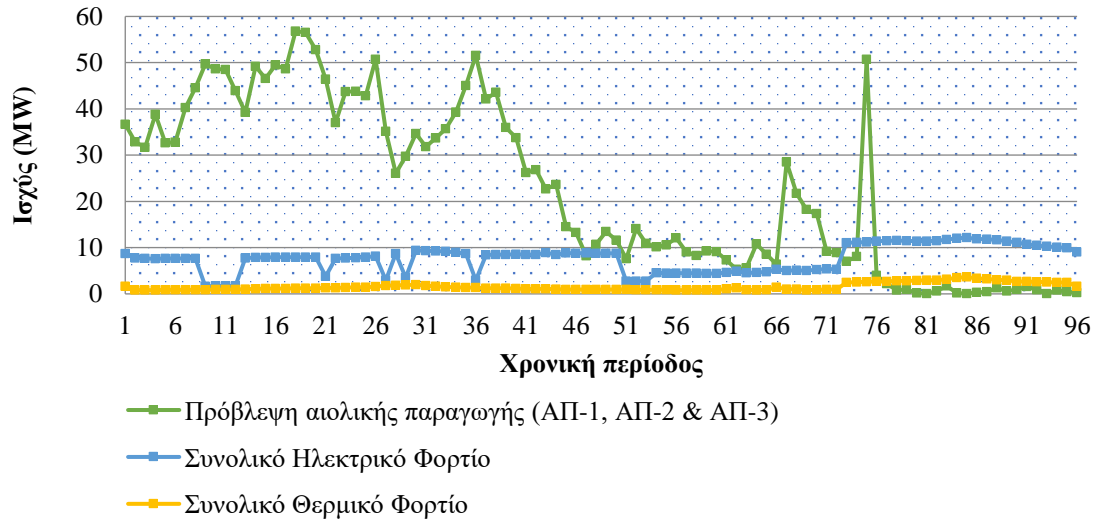
Σύστημα αποθήκευσης με συσσωρευτές	
Παράμετρος	Τιμή
E_{BSS}^{cap}	18 MWh
P_{max}^{charge}	3 MW
P_{min}^{charge}	0
P_{max}^{dis}	3 MW
P_{min}^{dis}	0
SOC_{max}	16.2 MWh ($90\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)
SOC_{min}	1.8 MWh ($10\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)
ϵ_{in}	90%
ϵ_{out}	90%
$SOC(0)$	9 MWh ($50\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)
SOC_{final}	9 MWh ($50\% \cdot E_{BSS}^{cap}$)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ευέλικτου φορτίου αποθήκευσης θερμότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά ευέλικτου φορτίου αποθήκευσης θερμότητας.

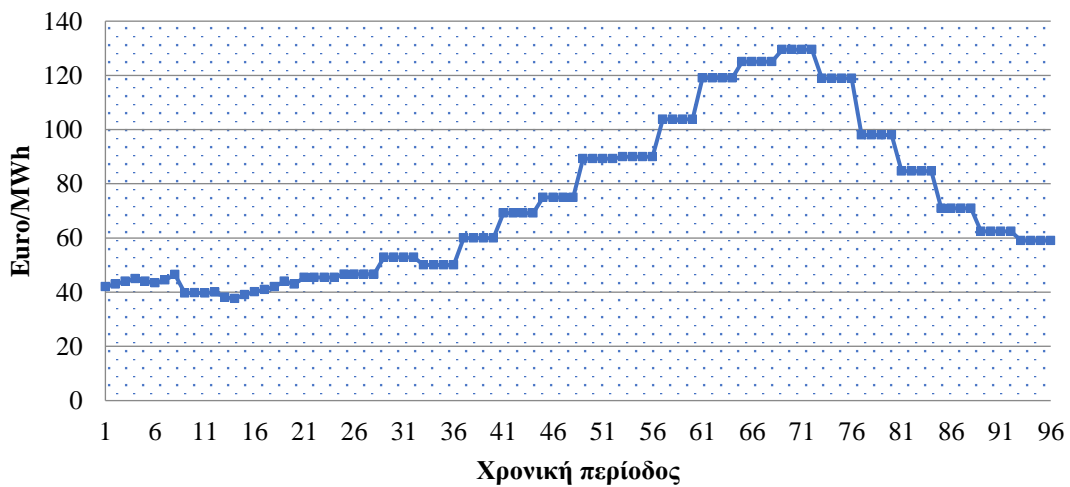
Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	
Παράμετρος	Τιμή
E_{FDTS}^{cap}	10 MWh
P_{max}^{charge}	2 MW
$SOC(0)$	5 MWh ($50\% \cdot E_{FDTS}^{cap}$)
SOC_{final}	5 MWh ($50\% \cdot E_{FDTS}^{cap}$)
μ	1

Οι καμπύλες της συνολικής κατανάλωσης ενεργού ισχύος των ηλεκτρικών φορτίων του δικτύου καθώς και η πρόβλεψη παραγωγής ενεργού ισχύος των Α/Π φαίνονται στο Σχήμα 6.15. Για απλότητα, θεωρείται η ίδια καμπύλη ταχύτητας ανέμου για όλα τα Α/Π. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε ορίζοντα 24 ωρών που χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα των 15 λεπτών. Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται επίσης η κατανάλωση ενεργού ισχύος του ελεγχόμενου φορτίου που διαθέτει αποθήκευση θερμικής ενέργειας (θερμικό φορτίο).



Σχήμα 6.15: Προβλέψεις ενεργής ισχύος ηλεκτρικού φορτίου και Α/Π καθώς και το προφίλ του θερμικού φορτίου

Η πρόβλεψη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh) για το επόμενο 24ωρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16, και οι τιμές που χρησιμοποιούνται στη Συνάρτηση Κόστους Διαχείρισης είναι $Pr_{curt}=100$ (€/MWh), $C_{BSS}=20$ (€/MWh), $C_{load}=20$ (€/MWh).



Σχήμα 6.16: Πρόβλεψη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh) για το επόμενο 24ωρο

6.4.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ 22 ΚΟΜΒΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης της δυναμικής διαχείρισης του ενεργού ΔΔ 22 κόμβων. Τα χαρακτηριστικά του εν λόγω ΔΔ (χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς, φορτίων και ΔΕΠ) παρουσιάζονται στην προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Σε αυτό το ΔΔ θα επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης δυναμικής διαχείρισης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Η βελτιστοποίηση αφορά έναν χρονικό ορίζοντα 24 ωρών που χωρίζεται σε χρονικά βήματα των 15 λεπτών, δηλαδή 96 χρονικές περιόδους. Κάθε τύπος ΔΕΠ συμβάλλει με διαφορετικό τρόπο στον προγραμματισμό λειτουργίας του ΔΔ. Για τον λόγο αυτό ο προγραμματισμός λειτουργίας όλων των στοιχείων του ενεργού ΔΔ πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι αντικειμενικοί στόχοι που καλείται να εκπληρώσει ο Διαχειριστής του. Σκοπός είναι να βρεθεί το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας του ΔΔ, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που μελετήθηκαν κατά την εκτέλεση του λογισμικού περιγράφονται αναλυτικά στην Ενότητα 4.4 και συνοψίζονται ως εξής:

- Αντικειμενική συνάρτηση 1: Μεγιστοποίηση αξιοποίησης αιολικής παραγωγής.
- Αντικειμενική συνάρτηση 2: Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.
- Αντικειμενική συνάρτηση 3: Ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ.

Όσον αφορά τα σενάρια των προσομοιώσεων που επιλέχθηκαν, αυτά περιγράφονται ως ακολούθως:

- **Σενάριο 1:** λαμβάνεται υπόψη μόνο η δυνατότητα περιορισμού ισχύος των Α/Π και το πρόβλημα επιλύεται ως προς τη βελτιστοποίηση της πρώτης και της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής και την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς.
- **Σενάριο 2:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 1 και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές.
- **Σενάριο 3:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 2 και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των ευέλικτων φορτίων, δηλαδή το άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο (DMFD) και ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας (FDTS).
- **Σενάριο 4:** επιλύεται το πρόβλημα σύμφωνα με το σενάριο 3, δηλαδή λαμβάνονται υπόψη όλες οι κατηγορίες ΔΕΠ που έχουν μοντελοποιηθεί και λειτουργούν στο ΔΔ με το πρόβλημα να επιλύεται ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ.

Συνοπτικά τα σενάρια καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση η οποία βελτιστοποιείται κάθε φορά (όπως αναφέρονται στην Ενότητα 6.3) παρουσιάζεται στο Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10: Συνοπτικής παρουσίασης προβλήματος.

Σενάρια	Έλεγχος ΑΠ	Συσσωρευτές	DMFD	FDTS	Αντικειμενική συνάρτηση
Πρώτο	✓				1, 2
Δεύτερο	✓	✓			1, 2
Τρίτο	✓	✓	✓	✓	1, 2
Τέταρτο	✓	✓	✓	✓	3

Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος στο περιβάλλον του GAMS για κάθε σενάριο φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.11: Συνοπτικής παρουσίασης προβλήματος.

Σενάρια	Χρόνος επίλυσης
Σενάριο 1	0 λεπτά και 16,6 δευτερόλεπτα
Σενάριο 2	1 λεπτό και 39,9 δευτερόλεπτα
Σενάριο 3	3 λεπτά και 16,2 δευτερόλεπτα
Σενάριο 4	0 λεπτά και 23,63 δευτερόλεπτα

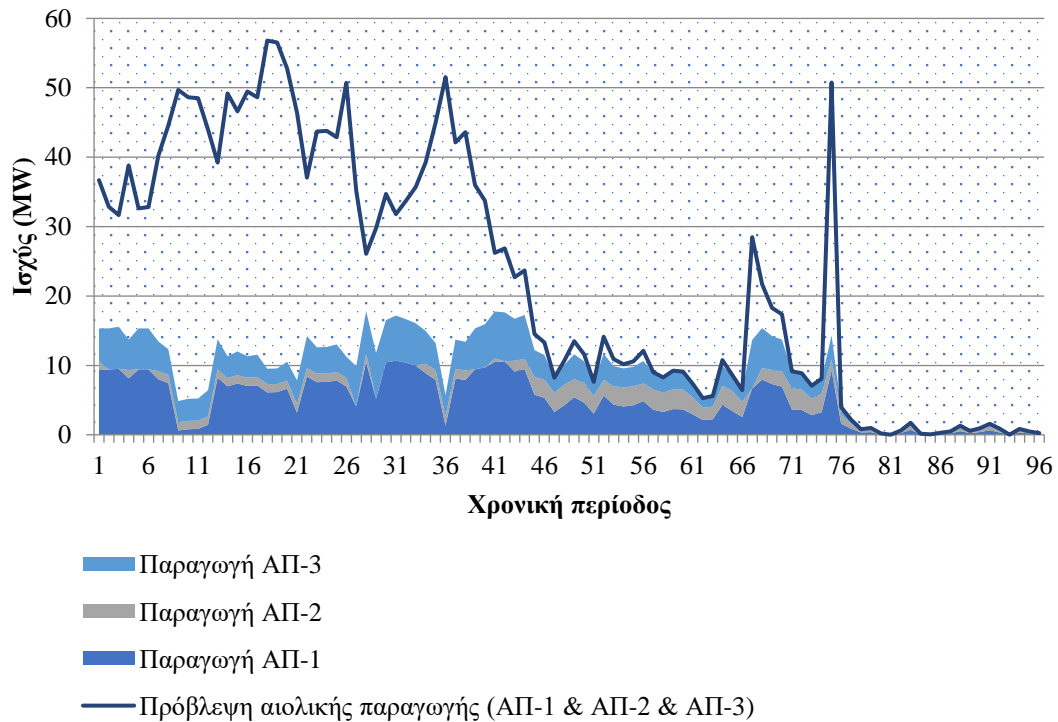
6.4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 22 ΚΟΜΒΩΝ

Στον Πίνακα 6.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης της ενεργής διαχείρισης για το δίκτυο 22 κόμβων, λαμβάνοντας υπόψη τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τα σενάρια που περιγράφηκαν στην Ενότητα 6.3. Πιο συγκεκριμένα οι στήλες του πίνακα παρουσιάζουν τα Σενάρια επίλυσης. Ο πίνακας χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος δείχνει τις τιμές έγχυσης ισχύος στο δίκτυο από τα Α/Π που επιδέχονται περιορισμό ισχύος, τη συνεισφορά του συστήματος μεταφοράς και το κόστος ενεργής διαχείρισης του δικτύου για την περίπτωση που το πρόβλημα λύνεται ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής. Το δεύτερο μέρος δείχνει τις τιμές έγχυσης ισχύος στο δίκτυο από τα Α/Π που επιδέχονται περιορισμό ισχύος, τη συνεισφορά του συστήματος μεταφοράς και το κόστος ενεργής διαχείρισης του δικτύου για την περίπτωση που το πρόβλημα λύνεται ως προς την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς. Το τρίτο μέρος δείχνει τις αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση που το πρόβλημα λύνεται ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του δικτύου.

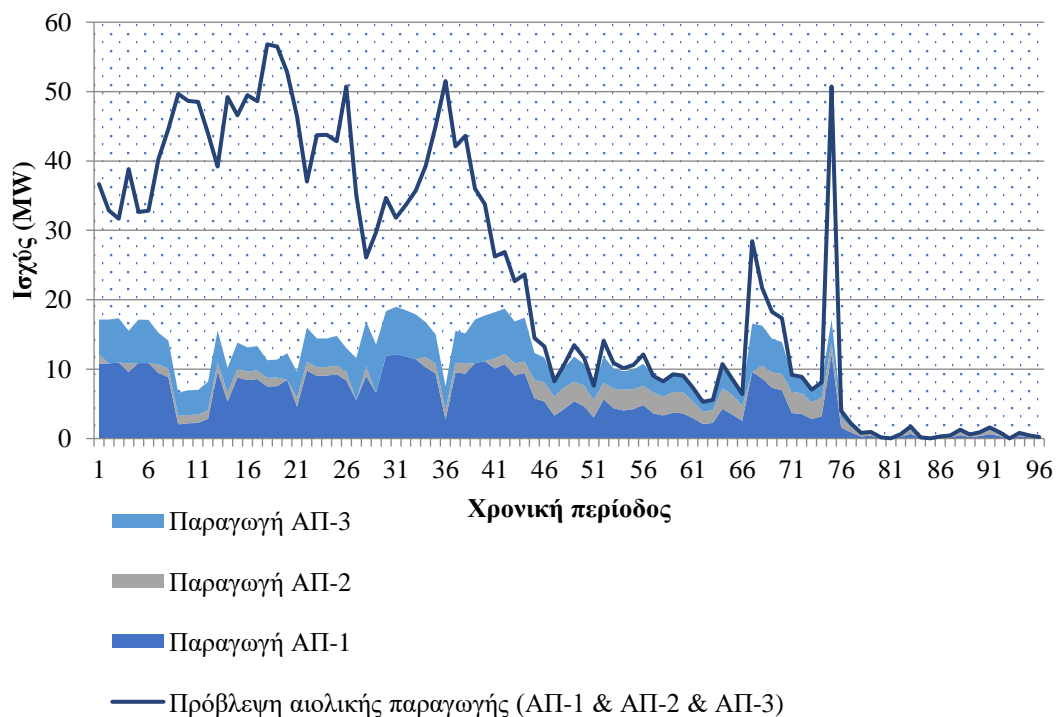
Πίνακας 6.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε σενάριο προσομοίωση.

Μεγιστοποίηση Αξιοποίησης Αιολικής Ενέργειας				
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	222,83	242,16	254,83	-
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	-162,85	-177,40	-191,34	-
Κόστος (€)	-	-	18.660,98	-
Ελαχιστοποίηση εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς				
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	220,05	224,20	252,79	-
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	-163,12	-162,25	-192,78	-
Κόστος (€)	-	-	18.896,96	-
Ελαχιστοποίηση Κόστους Διαχείρισης του ενεργού ΔΔ				
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	-	-	-	241,76
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	-	-	-	-179,12
Κόστος (€)	-	-	-	18.087,51

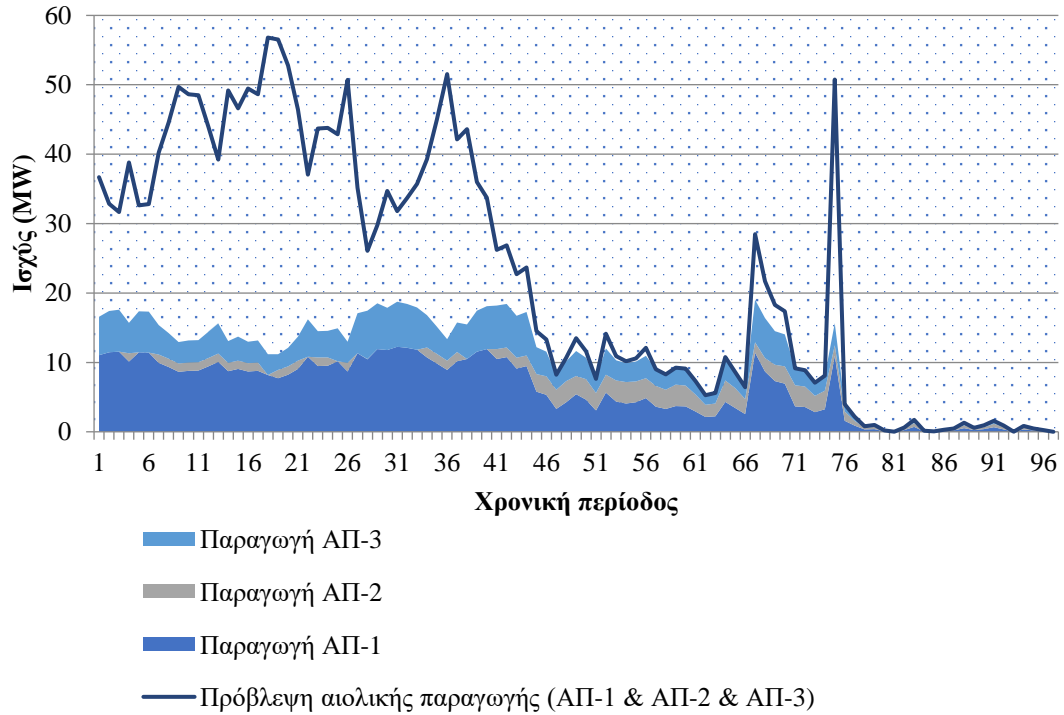
Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά γραφικών παραστάσεων με τα αποτελέσματα της παραγωγής ισχύος των Α/Π για τα σενάρια 1 έως 3 για την περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής, καθώς και τα αποτελέσματα παραγωγής ισχύος των Α/Π για το σενάριο 4 που το πρόβλημα επιλύεται ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η παραγόμενη ισχύς σε MW και στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται τα χρονικά βήματα $t_1 \dots t_{96}$, όπου κάθε t είναι διάστημα 15 λεπτών.



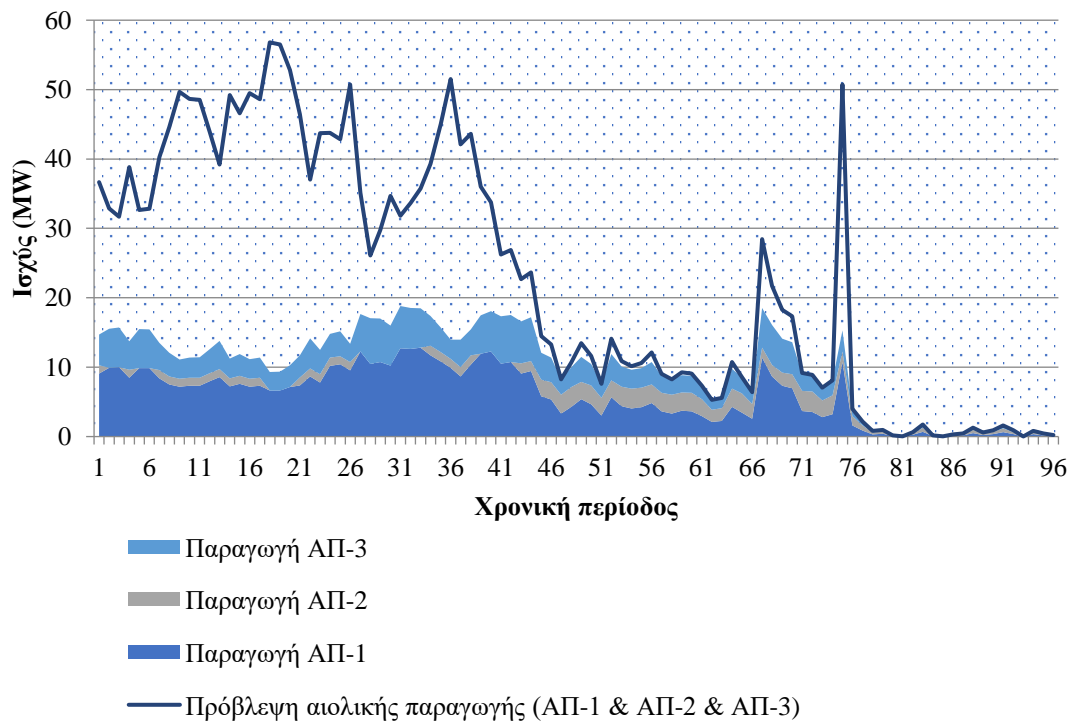
Σχήμα 6.17: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 1 για επίλυση με αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής



Σχήμα 6.18: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 2 για επίλυση με αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής

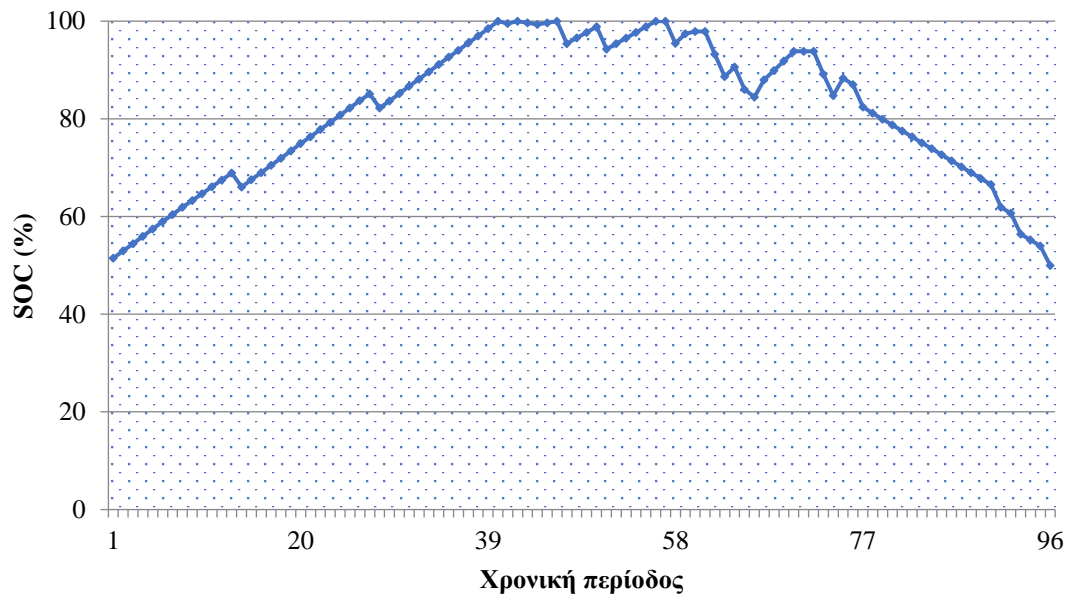


Σχήμα 6.19: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 3 για επίλυση με αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση αιολικής παραγωγής

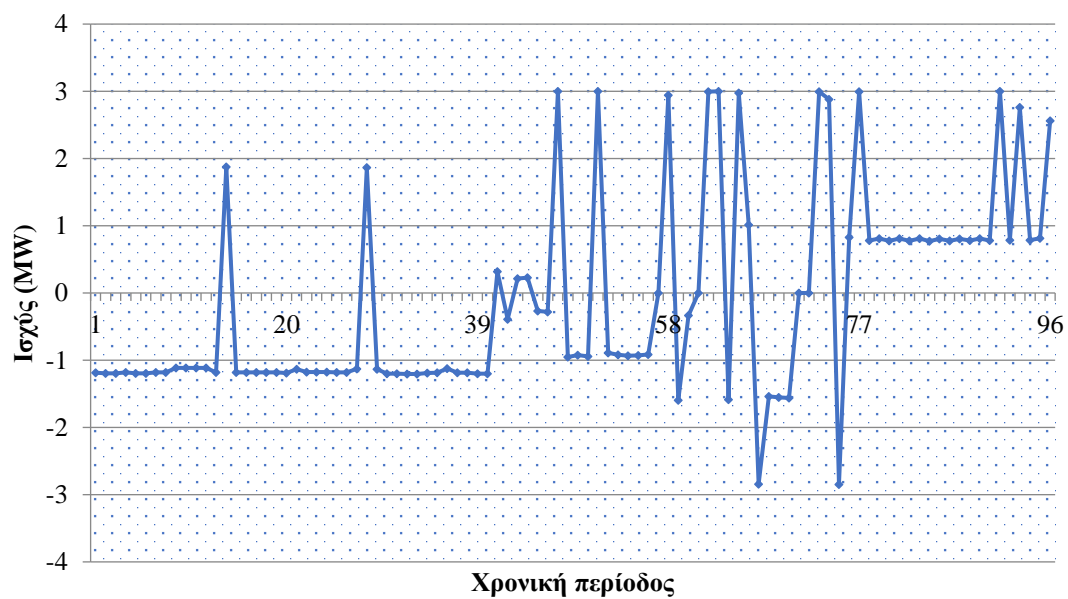


Σχήμα 6.20: Αιολική παραγωγή κατά το Σενάριο 4 για επίλυση με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ

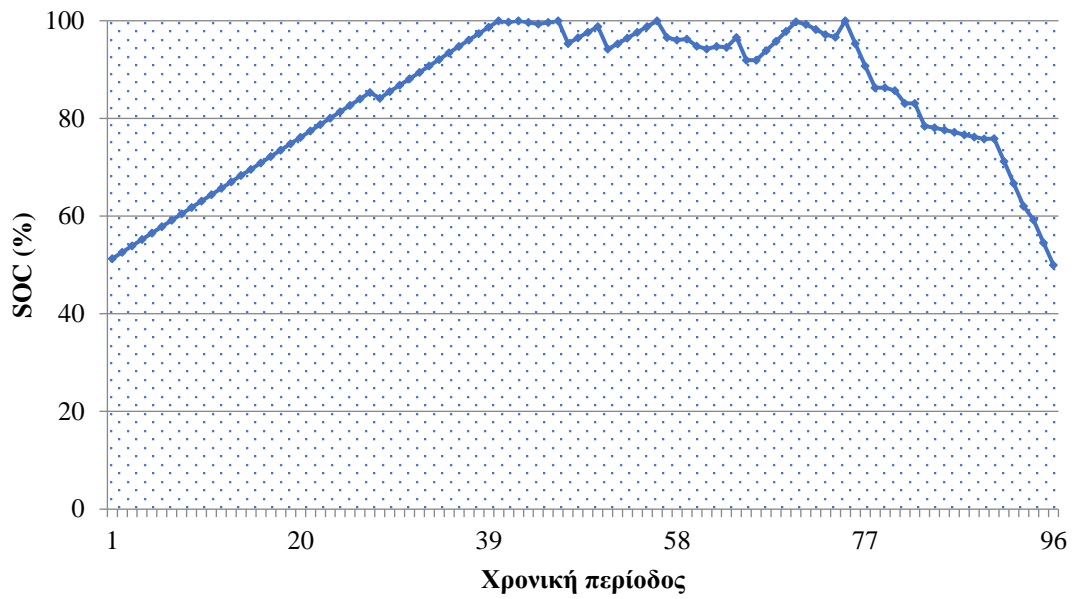
Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά γραφικών παραστάσεων με τα αποτελέσματα της κατάστασης φόρτισης, της φόρτισης/εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και της κατάστασης φόρτισης του φορτίου με δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας για κάθε σενάριο για την περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται είτε το ποσοστό της κατάστασης φόρτισης είτε η τιμή ισχύος σε MW και στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται τα χρονικά βήματα $t_1 \dots t_{96}$, όπου κάθε t είναι διάστημα 15 λεπτών.



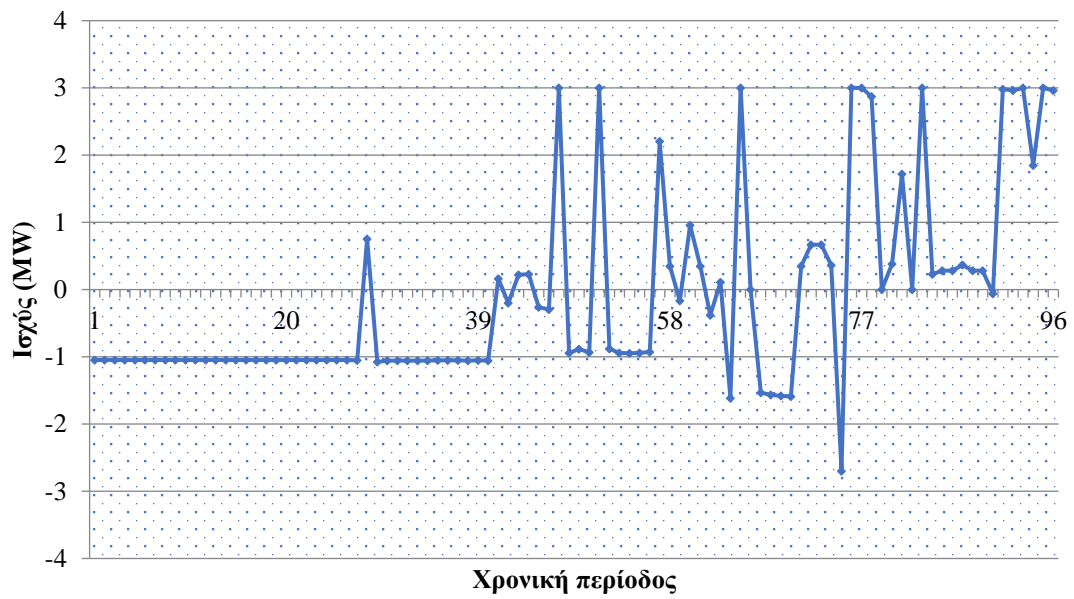
Σχήμα 6.21: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 2



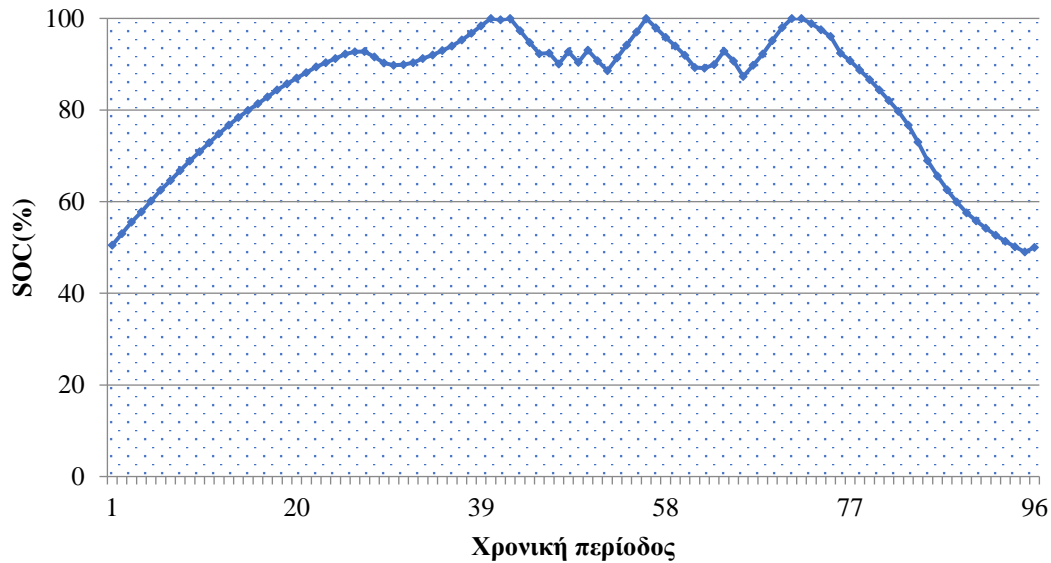
Σχήμα 6.22: Αποτελέσματα φόρτισης/εκφόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 2



Σχήμα 6.23: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 3



Σχήμα 6.24: Αποτελέσματα φόρτισης/εκφόρτισης του BSS κατά το Σενάριο 3



Σχήμα 6.25: Αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτισης του FDTs κατά το Σενάριο 3

6.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατηρείται ότι ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής όσο προστίθενται επιπλέον ενεργειακοί πόροι και εύελικτα φορτία στο ενεργό ΔΔ υπάρχει μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης παραγόμενης αιολικής παραγωγής. Δηλαδή η εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής είναι σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά

Σενάριο 3>Σενάριο 2>Σενάριο 1.

Ως προς την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς παρατηρείται αντίστοιχα ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση εισροών ισχύος από το σύστημα μεταφοράς. Αντιθέτως αυξάνονται οι εκροές ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς. Δηλαδή οι εισροές από το σύστημα μεταφοράς είναι σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά

Σενάριο 1>Σενάριο 2>Σενάριο 3.

Ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ παρατηρείται ότι για να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ υπάρχει μικρότερη εκμετάλλευση αιολικής παραγωγής και μεγαλύτερη συνεισφορά από το σύστημα μεταφοράς. Αυτό πραγματοποιείται διότι κατά τη διαχείριση του δικτύου η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος βρίσκει ως πιο συμφέρουσα την έγχυση ισχύος από το σύστημα μεταφοράς συγκριτικά με την εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής.

Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται από το Σχήμα 6.16 έως 6.20 επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.11. Πιο συγκεκριμένα στο Σενάριο 2 στο οποίο έχει ληφθεί υπόψη το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας παρατηρείται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής στο σύνολο του χρονικού ορίζοντα, σε σχέση με το Σενάριο 1. Κατά το σενάριο 3 παρατηρείται ότι πραγματοποιείται επιπλέον εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής ως αποτέλεσμα της συνεισφοράς των εύελικτων φορτίων. Πιο συγκεκριμένα για παράδειγμα μεταξύ των χρονικών περιόδων t_8 έως t_{13} , που το ηλεκτρικό φορτίο των κόμβων παρουσιάζει μείωση της ζήτησης του, έχουμε αύξηση της εκμετάλλευσης

της αιολικής παραγωγής λόγω της μετατόπισης της ζήτησης του άμεσα ελεγχόμενου ευέλικτου φορτίου για το χρονικό διάστημα αυτό, καθώς και της αποθήκευσης θερμότητας στο αντίστοιχο φορτίο.

Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται από το Σχήμα 6.21 έως 6.24 επιβεβαιώνουν την ορθή λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας καθώς παρατηρείται ότι σε κάθε σενάριο η τιμή ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη τιμή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Ακόμα παρατηρείται ότι το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συνεισφέρει σημαντικά στις απαιτήσεις του δικτύου από το χρονικό διάστημα t_{75} και μετά, που η διαθέσιμη παραγόμενη ισχύς από τα Α/Π μειώνεται δραματικά ως αποτέλεσμα της πρόβλεψης του ανέμου για το χρονικό διάστημα αυτό.

6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα την εκτέλεση του λογισμικού της βέλτιστης ενεργής διαχείρισης για το δίκτυο των 22 κόμβων αλλά για διαφορετικά σενάρια από αυτά που παρουσιάζονται στη γενική διατύπωση του προβλήματος της Ενότητας 6.3. Σκοπός είναι να βρεθεί το βέλτιστο πλάνο λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας του ΔΔ, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της. Αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής η οποία μοντελοποιείται όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.4.

Τα σενάρια που επίλυσης είναι τα εξής:

- Επίλυση του προβλήματος χωρίς να ληφθεί υπόψη η άεργος ισχύς του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Q_{BSS}).
- Κατά την επίλυση του προβλήματος η μοντελοποίηση του περιορισμού ισχύος πραγματοποιείται με τον κανόνα ένταξης των Α/Π με κοινό ποσοστό περιορισμού ισχύος, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.6.2.
- Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε διαφορετικούς κόμβους και με διαφορετικές τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας.

Στον Πίνακα 6.12 και στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω σεναρίων μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Σεναρίου 3 του Πίνακα 6.11. Πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις που δεν λαμβάνεται υπόψη η άεργος ισχύς του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Q_{BSS}) και του περιορισμού ισχύος των Α/Π με κοινό ποσοστό περιορισμού. Στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος με τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε διαφορετικούς κόμβους και με διαφορετικές τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας.

Για την περίπτωση παράβλεψης του Q_{BSS} γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι μειώνεται τόσο η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής όσο και η εξαγωγή ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς καθώς αυξάνεται και το κόστος διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι το

σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιήσει τις άεργες δυνατότητές του για να διαχειριστεί τα επίπεδα άεργου ισχύος και τάσης του δικτύου. Η παράβλεψη του μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή των ορίων τάσης των γραμμών με αποτέλεσμα τον μεγαλύτερο περιορισμό ισχύος των Α/Π που επιδέχονται περιορισμό.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα του μοντέλου με παράβλεψη του Q_{BSS} και για Κοινό περιορισμό ισχύος των ΑΠ

	Σενάριο 3	Χωρίς Q_{BSS}	Με Κοινό περιορισμό
Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	254,83	244,46	137,61
Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	-191,34	-178,32	-75,25
Κόστος (€)	18.660,98	21.337,07	37.746,76

Για την περίπτωση που έχει κοινό ποσοστό περιορισμού στα Α/Π παρατηρείται επίσης ότι μειώνεται σημαντικά τόσο η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής όσο και η εξαγωγή ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς καθώς αυξάνεται και το κόστος διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Και αυτό είναι αναμενόμενο αποτέλεσμα επιβεβαιώνοντας ότι ο πιο αποδοτικός κανόνας ένταξης των Α/Π με περιορισμό ισχύος είναι ο περιορισμός ισχύος βάσει τεχνικού βέλτιστου όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.6.3.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα του μοντέλου με τοποθέτηση του BSS σε διαφορετικό κόμβο και με διαφορετικές τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης (MW) και χωρητικότητας (MWh)

Θέση	Μέγεθος (MW/MWh)	Συνολική αιολική παραγωγή (MWh)	Συνολική εγχεόμενη ισχύς από το σύστημα μεταφοράς (MWh)	Κόστος (€)
10	3/18	254,84	-191,34	18.660,98
10	15/90	341,64	-239,65	4.714,65
10	30/180	341,65	-239,60	4.998,39
3	3/18	254,31	-191,79	18.804,92
3	15/90	339,46	-254,77	7.387,42
3	30/180	369,18	-260,01	1.173,43

Το μοντέλο δυναμικής διαχείρισης ενεργών ΔΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της επίδρασης των μεγεθών και της θέσης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Ο Πίνακας 6.13 δίνει παραδείγματα της συνολικής αύξησης των εξαγωγών, της εκμετάλλευσης της παραγωγής ισχύος και του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ (σε σύγκριση με το αρχικό Σενάριο 3) εάν η τοποθεσία και το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ποικίλλει. Για μια μονάδα BSS παρόμοιου μεγέθους, η τοποθέτησή της στον κόμβο 3 αντί στον κόμβο 10 οδηγεί σε διαφοροποίηση των τιμών της εξαγόμενης ενέργειας στο σύστημα μεταφοράς καθώς και της αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής, καθώς είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει πιο αποτελεσματικά τον περιορισμό ισχύος των αντίστοιχων Α/Π.

Αλλά και στις δύο τοποθεσίες, η συνεχής αύξηση της χωρητικότητας του BSS οδηγεί σε μειωμένες αποδόσεις όσον αφορά τις αυξήσεις στις εξαγωγές στο σύστημα και στη μείωση του περιορισμού ισχύος των Α/Π. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει λιγότερο περιθώριο περικοπής και η χωρητικότητα του δικτύου χρησιμοποιείται πληρέστερα. Τα βέλτιστα επίπεδα BSS σε κάθε κόμβο είναι συνάρτηση οικονομικών παραγόντων καθώς και τεχνικών παραγόντων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μοντελοποίηση της δυναμικής βέλτιστης ροής ισχύος ενεργών δικτύων διανομής (ΔΔ) ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένη σε σενάρια βελτιστοποίησης συγκεκριμένων στόχων. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας είναι να βρεθεί το βέλτιστο πλάνο λειτουργίας κάθε ελεγχόμενης ενεργειακής μονάδας ενός ΔΔ, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της. Ως αντικειμενικές συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής, η ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς και η ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Τα σενάρια που επιλύθηκαν για να επεξηγήσουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου διαχείρισης ενεργών ΔΔ ήταν αρχικά λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον περιορισμό ισχύος των Α/Π. Στη συνέχεια λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές). Έπειτα λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά των ευέλικτων φορτίων (άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο και ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας). Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε ως προς την μεγιστοποίηση της αξιοποίησης αιολικής παραγωγής και την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς. Στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύθηκε ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των διανεμημένων ενεργειακών πόρων (ΔΕΠ). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε για τα ακόλουθα σενάρια:

- Επίλυση του προβλήματος χωρίς να ληφθεί υπόψη η άεργος ισχύς του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Q_{BSS}).
- Κατά την επίλυση του προβλήματος, η μοντελοποίηση του περιορισμού ισχύος πραγματοποιήθηκε με τον κανόνα ένταξης των αιολικών πάρκων (Α/Π) με κοινό ποσοστό περιορισμού ισχύος.
- Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε διαφορετικούς κόμβους και με διαφορετικές τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας.

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε λογισμικό προσομοίωσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον GAMS (General Algebraic Modeling System) το οποίο βοηθά στην επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων βελτιστοποίησης. Για την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 6, ως ΔΔ επιλέχθηκε ένα δίκτυο 22 κόμβων στο οποίο είναι διασυνδεδεμένοι ΔΕΠ διαφορετικών τύπων. Το δίκτυο αποτελείται από δύο Α/Π τα οποία δεν επιδέχονται περιορισμό παραγόμενης ισχύος με μέγιστη ικανότητα παραγωγής 10 MW και 9 MW αντίστοιχα, τρία Α/Π που μπορεί να πραγματοποιηθεί περιορισμός ισχύος με μέγιστη

ικανότητα παραγωγής 30 MW, 25 MW και 22 MW αντίστοιχα, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μέσω συσσωρευτών με μέγιστη χωρητικότητα 18 MWh και μέγιστη ικανότητα ισχύος 3 MW, ένα άμεσα ελεγχόμενο ευέλικτο φορτίο με μέγιστη ικανότητα ισχύος 6 MW και ευέλικτο φορτίο αποθήκευσης θερμότητας με μέγιστη χωρητικότητα 10 MWh και μέγιστη ικανότητα ισχύος 2 MW. Η βελτιστοποίηση αφορά έναν ορίζοντα 24 ωρών που χωρίζεται σε χρονικά βήματα των 15 λεπτών.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων έδειξαν ότι κατά την επίλυση ως προς τη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής όσο προστίθενται επιπλέον ενεργειακοί πόροι και ευέλικτα φορτία στο ενεργό ΔΔ υπάρχει μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης παραγόμενης αιολικής παραγωγής. Αντίστοιχα, κατά την επίλυση ως προς την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης ενέργειας από το σύστημα μεταφοράς παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ελαχιστοποίηση εισροών ισχύος από το σύστημα μεταφοράς. Επιλύοντας ως προς την ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ παρατηρείται ότι για να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους διαχείρισης του ενεργού ΔΔ υπάρχει μικρότερη εκμετάλλευση αιολικής παραγωγής και μεγαλύτερη συνεισφορά από το σύστημα μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει διότι, για τα δεδομένα του συγκεκριμένου δικτύου, κατά τη διαχείριση του δικτύου η δυναμική βέλτιστη ροή ισχύος βρίσκει ως πιο συμφέρουσα την έγχυση ισχύος από το σύστημα μεταφοράς συγκριτικά με την εκμετάλλευση της αιολικής παραγωγής.

Στα πρόσθετα σενάρια, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την περίπτωση παράβλεψης της αέργου ισχύος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Q_{BSS}) μειώνεται τόσο η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής όσο και η εξαγωγή ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς καθώς αυξάνεται και το κόστος διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Για την περίπτωση που εφαρμόζεται κοινό ποσοστό περιορισμού στα Α/Π παρατηρείται ότι μειώνεται σημαντικά τόσο η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής όσο και η εξαγωγή ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς καθώς αυξάνεται και το κόστος διαχείρισης του ενεργού ΔΔ. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση που η τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας γίνει σε διαφορετικούς κόμβους και με διαφορετικές τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας.

7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί ως ακολούθως:

- Εξέταση και μελέτη για την επιλογή της κατάλληλης τοπολογικής θέσης των ΔΕΠ σε ένα ενεργό ΔΔ για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και τον προγραμματισμό λειτουργίας του ΔΔ.
- Εξέταση και μελέτη για την επιλογή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με κατάλληλες τιμές ισχύος φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητας για τον βέλτιστο προγραμματισμό λειτουργίας του ΔΔ.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενεργών ΔΔ, όπου θα λαμβάνονται υπόψη τα πιθανά σφάλματα πρόβλεψης του φορτίου και της παραγωγής ΑΠΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. J. Canejo, M. Carrion and J. M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, vol. 153, Boston, MA: Springer US, 2010.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, EPRI Power System, McGraw-Hill, 1994.
- [3] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδοσεις Συμμετρία, 2010.
- [4] Ν. Χ. Κουτσούκης, *Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, 2019.
- [5] G. T. Heydt, “The next generation of power distribution systems”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, pp. 225-235, November 2010.
- [6] A. M. Shipley and N. R. Elliot, *Distributed Energy Resources and Combined Heat and Power: A Declaration of Terms*, 2000.
- [7] F. Coyle, “Introduction to Wind Power”, *The English Press*, 2011.
- [8] I. Komusanac, G. Brindley, D. Fraile and C. Walsh, “Wind energy in Europe in 2019 - Trends and statistics”, February 2020.
[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf>.
- [9] ΑΔΜΗΕ., “Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2020-2030”, Αθήνα, Δεκέμβριος 2019.
- [10] S. Gill, I. Kockar and G. W. Ault, “Dynamic Optimal Power Flow for Active Distribution Networks”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, pp. 121-131, January 2014.
- [11] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa and N. Bashir, “Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499-514, July 2014.
- [12] A. Gabash and P. Li, “Active-Reactive Optimal Power Flow in Distribution Networks With Embedded Generation and Battery Storage”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, pp. 2026-2035, March 2012.
- [13] A. Nourai, *Installation of the First Distributed Energy Storage System (DESS) at American Electric Power (AEP)*, New Mexico, 2007.
- [14] J. Shen, C. Jiang and B. Li, “Controllable Load Management Approaches in Smart Grids”, *Energy Conservation in Infrastructures*, 2015.
- [15] B. P. Swaminathan, *Operational Planning of Active Distribution Networks - Convex Relaxation under Uncertainty*, Grenoble, France, 2017.
- [16] Νόμος 4001/2011: *Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις*, (ΦΕΚ 179/Α/2011), 22-08-2011.
- [17] S. Sangliano, *STARISTA*, 11 Mar 2021.
[Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1219587/india-share-of-transmission-line-length-by-voltage/>.

- [18] *Wikipedia - Ultra-high-voltage electricity transmission in China*, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-voltage-electricity-transmission-in-China>.
- [19] *ΑΔΜΗΕ - Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας*, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.admie.gr/systima/perigrافي/hartis-grammon>.
- [20] *ΔΕΔΔΗΕ, “deddie.gr”*, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/>.
- [21] “Directive 2019/944/EC of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (Text with EEA relevance)”, June 2019, p. Cited on p. 15.
- [22] Eurelectric, “Power Distribution in Europe - Facts & Figures”, Eurelectric, Brussels, 2020.
- [23] E. R. Puente, D. Six, A. Ramos, M. Maenhoudt and A. Ulian, *Preliminary assessment of the future roles of DSOs, future market architectures and regulatory frameworks for network integration of DRES*, 2014.
- [24] “Ρυθμιστικό Πλαίσιο - Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε.”.
- [25] “Απόφαση 395/2016 - Κώδικας διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ)”, *ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ*, 20 Ιανουάριος 2017.
- [26] A. Ramos, E. R. Puente and D. Six, “Evaluation of current market architecture and regulatory frameworks and the role of DSOs”, *EvolvDSO*, April 2014.
- [27] “Ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών”, *Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. - Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/poioitita-twn-parexomenwn-upiresiwn/>.
- [28] “Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. - Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.deddie.gr/media/1655/corporate-deddhe-gr-webview.pdf>.
- [29] CENELEC, “EN 50160 - Voltage characteristics of electricity supplied by public”, 1999.
- [30] ENEDIS, “Description physique du réseau public”, April 2008.
- [31] SWECO, “Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system”, April 2015.
- [32] C. D'Adamo, C. Abbey, S. Jupe, B. Buchholz, M. Khattabi and F. Pilo, “Development and Operation Of Active Distribution Networks: Results Of CIGRE C6.11 Working Group”, *21st International Conference on Electricity Distribution*, p. Cited on p.1, June 2011.
- [33] S. T. Schröder and H. K. Jacobsen, “Curtailement of renewable generation: Economic optimality and incentives”, *Energy Policy*, vol. 49, pp. 663-675, October 2012.
- [34] Eurelectric, “Flexibility and Aggregation – Requirements for their interaction in the market”, January 2014.
- [35] H. Schuster, J. Kellermann and T. Bongers, “Definition of a Limited but Representative Number of Future Scenarios”, March 2014.
- [36] G. P. Harrison and R. A. Wallace, “Maximising distributed generation”, *Proc. IEEE PES Transm. Distrib.*, September 2003.
- [37] G. P. Harisson and R. A. Wallace, “Optimal power flow evaluation of distribution network capacity for the connection of distributed generation”, *Proc. IEE Gen., Transm. and Distrib*, vol. 152, pp.115-122, January 2005.

- [38] M. E. El-Hawary and D. H. K. Tsang, “The hydrothermal optimal load flow, a practical formulation and solution techniques using newton’s approach”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PS-1, no. 3, pp. 157–166, 1986.
- [39] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa and R. Yokoyama, “Large scale hydrothermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 396-403, February 2000.
- [40] N. Jenkins, N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac and Kirschen David, “Embedded Generation”, *Inst. Electr. Eng.*, London, 2000.
- [41] J. Carpentier, “Contibution a l’etude du dispatching economique”, *Bull. Soc. Francaise Elect.*, vol. 3, pp. 431–447, 1962.
- [42] H. W. Dommel and W. F. Tinney, “Optimal power flow solutions”, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 1968, pp. vol. PAS-87, pp. 1866–1876.
- [43] Π. Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα, 2015, p. 176.
- [44] H. Saadat, *Power system analysis*, 3. e. McGraw-Hill, , New York, 2010.
- [45] A. J. Wood, B. F. Wollenberg and G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation, and Control*, 2. e. Wiley, Επιμ., New York, 1996.
- [46] Wikipedia, “Wikipedia General Algebraic Modeling System”, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/General-Algebraic-Modeling-System>.
- [47] Β. Ευαγγελόπουλος, *ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ*, Αθήνα, 2013.
- [48] A. Knight, *Basics of MATLAB and Beyond*, Washington, D.C : Chapman & Hall/CRC, 1999.
- [49] McCarl GAMS User Guide, “McCarl GAMS User Guide”, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gams.com/mccarlGuide/ide-concept-and-usage.htm>.