



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μεγιστοποίηση του ηλεκτρικού χώρου στα δίκτυα διανομής με βέλτιστο έλεγχο του χρόνου λειτουργίας των Φ/Β μονάδων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
Μάριος Αλέξανδρου Μανωλιουδάκη

Επιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Η σελίδα αυτή αφέθηκε σκόπιμα κενή



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Μεγιστοποίηση του ηλεκτρικού χώρου στα δίκτυα διανομής με βέλτιστο έλεγχο του χρόνου λειτουργίας των Φ/Β μονάδων

Μάριος Αλέξανδρος Μανωλιουδάκης

Επιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17η Οκτωβρίου 2024

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ
Άρης – Ευάγγελος Δημέας

Καθηγητής ΕΜΠ
Γεώργιος Κορρές

Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

.....

.....

.....

Μάριος Αλέξανδρος Μανωλιουδάκης

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

Copyright © Μάριος Αλέξανδρος Μανωλιουδάκης, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος της, για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικό 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 κερδοσκοπικούς σκοπούς πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η ανάγκη διείσδυσης όλο και περισσότερων Φ/Β μονάδων στα δίκτυα διανομής. Ωστόσο η διείσδυση των Φ/Β μονάδων περιορίζεται από τον ηλεκτρικό χώρο του εκάστοτε δικτύου διανομής. Η αποδεκτή χωρητικότητα ενσωμάτωσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ενός δικτύου διανομής εξαρτάται από τον ηλεκτρικό χώρο του δικτύου. Όταν κορεστεί ο ηλεκτρικός χώρος του δικτύου απαιτούνται επενδύσεις για την αναβάθμιση της υφιστάμενης υποδομής και την υποστήριξη μεγαλύτερων δυνατοτήτων ενσωμάτωσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ως εναλλακτική λύση, η εγκατάσταση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με την προϋπόθεση ύπαρξης περικοπών της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να επιτρέψει την αύξηση του ηλεκτρικού χώρου του δικτύου. Συνεπώς κρίνεται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης κατάλληλης μεθοδολογίας για κατάλληλο έλεγχο αποκοπής των Φ/Β μονάδων του δικτύου όταν πρόκειται να παραβιαστούν οι λειτουργικοί περιορισμοί.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μία μεθοδολογία ελέγχου των Φ/Β μονάδων εστιάζοντας ταυτόχρονα στην μεγιστοποίηση της εγγεόμενης ενεργής ισχύος στο δίκτυο διανομής από τις Φ/Β μονάδες και στη δίκαιη μεταχείριση των αποκοπών τους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, μετά την εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων, υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς η οποία επιτρέπεται να εγχυθεί στο δίκτυο χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του. Στο δεύτερο μέρος υπολογίζεται ο ποσοστιαίος χρόνος αποκοπής της εκάστοτε Φ/Β μονάδας λαμβάνοντας υπόψιν τη δίκαιη μεταχείριση των αποκοπών και την μέγιστη θυσία εγγεόμενης ενεργούς ισχύος συγκριτικά με τη μέγιστη δυνατή τιμή της, η οποία υπολογίστηκε στο πρώτο μέρος, που διατίθεται να κάνει ο διαχειριστής του δικτύου. Κάθε φορά που απαιτείται η λήψη απόφασης για τις αποκοπές των Φ/Β μονάδων λαμβάνονται υπόψιν οι προηγούμενες αποφάσεις, προσπαθώντας να αποφευχθεί η συχνή αποκοπή των ίδιων Φ/Β μονάδων. Το πρώτο μέρος αποτελεί ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και το δεύτερο ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τέλος παρουσιάζονται δύο βασικά σενάρια πάνω στα οποία έγιναν Monte Carlo προσομοιώσεις εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του κατασκευασμένου αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται και αξιολογούνται ώστε να επαληθευτεί η εγκυρότητα της μεθοδολογίας.

Λέξεις Κλειδιά:

MILP Programming, έλεγχος αποκοπών φωτοβολταϊκών μονάδων (Φ/Β), παραβιάσεις τάσης, δίκαιη μεταχείριση αποκοπών Φ/Β μονάδων, μοντέλο βελτιστοποίησης

Η σελίδα αυτή αφέθηκε σκόπιμα κενή

Abstract

In recent years, the need for increasing penetration of more and more photovoltaic (PV) units into distribution networks has been growing steadily. However, the integration of PV units is limited by the available capacity, or "**hosting capacity**," of each distribution network. The acceptable capacity for integrating distributed generation units in a distribution network depends on its electrical hosting capacity. When the network's hosting capacity is saturated, investments are required to upgrade the existing infrastructure and support the integration of additional distributed generation units. As an alternative solution, the installation of more distributed generation units, with the condition of implementing curtailments on the generated energy, can allow for an increase in the network's hosting capacity. Therefore, it is imperative to develop an appropriate methodology for controlling the curtailment of PV units when operational limits are about to be violated.

In this thesis, a methodology is proposed for controlling PV units, focusing simultaneously on maximizing the active power injected into the distribution network from the PV units and ensuring fair treatment of curtailments. The proposed methodology consists of two main parts. In the first part, after the necessary data is inputted, the maximum generated power that can be injected into the network without violating its operational limits is calculated. In the second part, the percentage of curtailment time for each PV unit is calculated, taking into account the fair treatment of curtailments and the maximum sacrifice of injected active power compared to the maximum possible value, as calculated in the first part, that the network operator is willing to make. Each time a decision is made regarding the curtailments of the PV units, previous decisions are considered, aiming to avoid frequent curtailment of the same PV units. The first part represents a linear optimization problem, while the second part represents a nonlinear optimization problem.

Finally, two main scenarios are presented, upon which Monte Carlo simulations were performed using the methodology to investigate the behavior of the constructed algorithm. The simulation results are used and evaluated to verify the validity of the methodology.

Key Words:

MILP Programming, curtailment control of photovoltaic (PV) units, voltage violations, fair treatment of PV unit curtailments, optimization model

Η σελίδα αυτή αφέθηκε σκόπιμα κενή

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με τη συμβολή του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημέα για την ευκαιρία που μου έδωσε, να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, σε ένα θέμα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες στο μεταδιδακτορικό ερευνητή Αθανάσιο Λαγό και στον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Γάτο για την εξαιρετική συνεργασία και τη συνεχή καθοδήγηση τους κατά τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής. Η συμβολή τους στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής ήταν μείζονος σημασίας. Από καρδίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους – συμφοιτητές μου για τη συμπαράσταση και συνεργασία τους, κατά τα χρόνια φοίτησης. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη και την υπομονή που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια

Η σελίδα αυτή αφέθηκε σκόπιμα κενή

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα	11
Σύνοψη	14
1 Εισαγωγή.....	16
1.1 Στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	18
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	18
1.3 Ακρωνύμια και βασικοί συμβολισμοί	19
2 Ανάλυση χρησιμοποιούμενης μεθόδου σύνδεσης των Φ/Β μονάδων στο δίκτυο και μεθόδου διαστασιολόγησης τους.....	20
2.1 Εισαγωγή δεδομένων, επεξεργασία και εξαγωγή δειγμάτων	20
2.1.1 Προσέγγιση των οριακών κατανομών των τυχαίων μεταβλητών	21
2.1.2 Παραγωγή συσχετισμένων δειγμάτων.....	21
2.1.3 Εύρεση της από κοινούς κατανομής των τυχαίων μεταβλητών	22
2.1.4 Δειγματοληψία Monte Carlo	22
2.1.5 Μετασχηματισμός πραγματικών δεδομένων ώστε να αντιστοιχούν στο υπό εξέταση δίκτυο	23
2.1.6 Γραμμικοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος (ανά δείγμα)	23
2.1.7 Monte Carlo ολοκλήρωση.....	24
2.2 Μεγιστοποίηση του <<ηλεκτρικού χώρου>> του δικτύου διανομής μέσω κατάλληλης εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων σε συγκεκριμένους ζυγούς	25
2.2.1 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης	25
2.2.2 Βελτιστοποίηση με χρήση υποκατάστατης συνάρτησης (surrogate optimization)	25
3 Μοντέλα Βελτιστοποίησης για τον έλεγχο των περικοπών των Φ/Β μονάδων	26
3.1 Μοντέλο μεγιστοποίησης	27
3.2 Μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης.....	29
4 Περιγραφή του πραγματικού δικτύου και των παραμέτρων των προσομοιώσεων	31
4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη δικτύου	31
4.2 Ανάλυση σεναρίων υπό τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις	32
5 Ανάλυση συμπεριφοράς αλγορίθμου στα υπό εξέταση σενάρια.....	35
5.1 Candlesticks Διαγράμματα Τάσεων	35
5.2 Σύγκριση συχνότητων χρόνου(<i>f_i</i>) κατά τον οποίο οι Φ/Β μονάδες εγχέουν ενεργό ισχύ στο δίκτυο.....	45
5.3 Σύγκριση Εγχεόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας από τις Φ/Β μονάδες παραγωγής στο δίκτυο	55

6	Συμπεράσματα.....	56
6.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	56
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	57
	Βιβλιογραφία.....	57

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1	Προσαρμογή εμπειρικών κατανομών στα δεδομένα	21
Εικόνα 2	Τοπολογία δικτύου Case 33bw Pandapower	31
Εικόνα 3	Κανονικοποιημένη Καμπύλη φορτίου	34
Εικόνα 4	Κανονικοποιημένη καμπύλη παραγωγής Φ/Β μονάδας.....	34
Εικόνα 5	Εξήγηση μερών στοιχείων των διαγραμμάτων candlestick.....	35
Εικόνα 6	Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους χωρίς έλεγχο	36
Εικόνα 7	Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους για το μοντέλο μεγιστοποίησης.....	36
Εικόνα 8	Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης.....	37
Εικόνα 9	Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα χωρίς έλεγχο.....	37
Εικόνα 10	Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα για το μοντέλο μεγιστοποίησης.....	38
Εικόνα 11	Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης ..	38
Εικόνα 12	Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης χωρίς έλεγχο.....	39
Εικόνα 13	Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης για το μοντέλο μεγιστοποίησης	39
Εικόνα 14	Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης ...	40
Εικόνα 15	Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού χωρίς έλεγχο.....	40
Εικόνα 16	Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού για το μοντέλο μεγιστοποίησης.....	41
Εικόνα 17	Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης	41
Εικόνα 18	Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου χωρίς έλεγχο	42
Εικόνα 19	Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου για το μοντέλο μεγιστοποίησης	42
Εικόνα 20	18 Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης	43
Εικόνα 21	Διάγραμμα candlestick (14:00) χωρίς έλεγχο	44
Εικόνα 22	Διάγραμμα candlestick (14:00) για το μοντέλο μεγιστοποίησης.....	44
Εικόνα 23	Διάγραμμα candlestick (14:00) για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης.....	45
Εικόνα 24	Διάγραμμα σύγκρισης ετήσιων συχνοτήτων	47
Εικόνα 25	Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων χειμώνα	48
Εικόνα 26	Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων άνοιξης.....	50
Εικόνα 27	Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων καλοκαιριού	51
Εικόνα 28	Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων φθινοπώρου.....	53
Εικόνα 29	Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων 14:00 η ώρα.....	54

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:	Ακρωνύμια	19
Πίνακας 2	Μεταβλητές απόφασης και Παράμετροι των μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού.....	19
Πίνακας 3	Ονομαστικές τιμές Ενεργής Ισχύος των εγκαταστημένων Φ/Β μονάδων και φορτίων στο υπό μελέτη δίκτυο	32
Πίνακας 4	Σύγκριση ετήσιων συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα	46

Πίνακας 5 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων σε βάθος έτους.....	46
Πίνακας 6 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους χειμερινούς μήνες.....	47
Πίνακας 7 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το χειμώνα.....	48
Πίνακας 8 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες της άνοιξης.....	49
Πίνακας 9 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για την άνοιξη.....	49
Πίνακας 10 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες του καλοκαιριού.....	50
Πίνακας 11 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το καλοκαίρι.....	51
Πίνακας 12 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες του φθινοπώρου.....	51
Πίνακας 13 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το φθινόπωρο.....	52
Πίνακας 14 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα για τις 14:00.....	53
Πίνακας 15 Σύγκριση Συνολικής Παραγόμενης ενέργειας των Φ/Β μονάδων των δύο μοντέλων.....	55

Σύνοψη

Ο προσανατολισμός προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχει καταστεί κεντρικό θέμα στις ενεργειακές πολιτικές πολλών χωρών, καθώς η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η ενεργειακή ανεξαρτησία γίνονται όλο και πιο επιτακτικές. Η αύξηση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) μονάδων τα τελευταία χρόνια αποτελεί σημαντικό βήμα προς τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση και τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Τα Φ/Β συστήματα, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, έχουν γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη λόγω της μείωσης του κόστους των τεχνολογιών, των κυβερνητικών επιδοτήσεων και της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης για τις περιβαλλοντικές προκλήσεις.

Το ηλεκτρικό δίκτυο ωστόσο έχει περιορισμένη δυνατότητα υποδοχής Φ/Β μονάδων, κυρίως λόγω της διακύμανσης της παραγωγής και της ανάγκης για σταθερότητα τάσης και συχνότητας. Σε κορεσμένα δίκτυα, η προσθήκη επιπλέον Φ/Β μονάδων μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, όπως αυξημένη ανάγκη για διαχείριση της ισχύος ή ακόμη και σε περικοπές της παραγόμενης ενέργειας (curtailment). Συνεπώς η σημασία ενός δίκαιου και ορθού ελέγχου περικοπών των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) μονάδων από το δίκτυο είναι θεμελιώδης για τη διατήρηση της σταθερότητας και της απόδοσης του δικτύου διανομής. Η διαχείριση των περικοπών (curtailments) θα ήταν θεμιτό να είναι δίκαιη και τεχνικά σωστή, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ της μέγιστης αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας, της προστασίας του δικτύου και της ισότιμης μεταχείρισης των παραγωγών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά μία νέα μεθοδολογία ελέγχου της έγχυσης ενεργούς ισχύος Φ/Β μονάδων παραγωγής στο δίκτυο μέσω ενός κατάλληλου αλγορίθμου. Ο έλεγχος αυτός προτείνεται να υλοποιείται με στόχο τη μεγιστοποίηση της έγχυσης ενεργής ισχύος στο δίκτυο από τις Φ/Β μονάδες, αποφεύγοντας τη συνεχή αποκοπή των ίδιων Φ/Β μονάδων και τηρώντας τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου. Με τον όρο **αποκοπή** εννοούμε την παρεμπόδιση της έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο από μια Φ/Β μονάδα, όταν οι συνθήκες του δικτύου το απαιτούν, προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα και η ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο διανομής 33 ζυγών του IEEE. Οι Φ/Β μονάδες μέσω ενός διακόπτη **ON/OFF** ο οποίος ελέγχεται μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου ορίζει ποιες Φ/Β μονάδες πρέπει να αποκοπούν από το δίκτυο ώστε να μην παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του. Θεωρούμε δηλαδή ότι οι Φ/Β μονάδες ή θα αποδίδουν στο δίκτυο όλη την παραγόμενη ενεργό ισχύ τους ή καθόλου. Μία επιπλέον παραδοχή η οποία έγινε είναι ότι θεωρούμε ότι η διαστασιολόγηση των Φ/Β μονάδων και η σύνδεση τους σε συγκεκριμένους ζυγούς του δικτύου έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται ο ηλεκτρικός χώρος του δικτύου και να υπάρχουν παραβιάσεις των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου, κατά την απουσία ελέγχου, το πολύ για 5% του χρόνου παραγωγής των Φ/Β μονάδων.

Επιπροσθέτως, για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι οι παραγόμενες ενεργές ισχύεις των Φ/Β μονάδων καθώς και τα φορτία του κάθε ζυγού τα οποία προέρχονται από τεχνητά δεδομένα (Synthetic data) τα οποία δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο των Copulas.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, μετά την εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων, υπολογίζεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς η οποία επιτρέπεται να εγχυθεί στο δίκτυο χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του. Στο δεύτερο μέρος υπολογίζεται ο ποσοστιαίος χρόνος αποκοπής της εκάστοτε Φ/Β μονάδας λαμβάνοντας υπόψιν τη δίκαιη μεταχείριση των αποκοπών και την μέγιστη θυσία εγχεόμενης ενεργούς ισχύος συγκριτικά με τη μέγιστη δυνατή τιμή της, η οποία υπολογίστηκε στο πρώτο μέρος, που διατίθεται να κάνει ο διαχειριστής του δικτύου. Κάθε φορά που απαιτείται η λήψη

απόφασης για τις αποκοπές των Φ/Β μονάδων λαμβάνονται υπόψιν οι προηγούμενες αποφάσεις, προσπαθώντας να αποφευχθεί η συχνή αποκοπή των ίδιων Φ/Β μονάδων. Το πρώτο μέρος αποτελεί ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και το δεύτερο ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Για την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας δημιουργήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος. Για την επίλυση και των δύο προβλημάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μεικτού γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Επειδή όμως το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας δεν είναι γραμμικό, λόγω της εκθετικής αντικειμενικής συνάρτησης, υλοποιήθηκε γραμμικοποίηση της μετατρέποντας το πρόβλημα σε γραμμικό. Ο μετασχηματισμός αυτός υλοποιήθηκε για την αποδοτικότερη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. Για τη μοντελοποίηση των δύο προβλημάτων βελτιστοποίησης εισήχθησαν οι παράμετροι, οι μεταβλητές, οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση τους με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης Pyomo. Τέλος ο επιλύτης (solver) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι ο Gurobi.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση δύο σεναρίων. Το πρώτο σενάριο αφορά τη λήψη απόφασης για τις περικοπές των Φ/Β μονάδων για κάθε ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους ενώ το δεύτερο τη λήψη απόφασης για την ώρα κατά την οποία οι Φ/Β μονάδες παρουσιάζουν μέγιστη παραγωγή. Αρχικά για να επαληθευτεί η ορθότητα της μεθοδολογίας ελέγχθηκε αν παραβιάζονται τα λειτουργικά όρια του δικτύου κατά την εφαρμογή της. Τέλος για την ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων για την προτεινόμενη μεθοδολογία έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας αυτής με τα αποτελέσματα που προκύπτουν αν μοναδικός στόχος ήταν η μεγιστοποίηση της εγγεόμενης ενεργής ισχύος στο δίκτυο. Τα βασικά κριτήρια σύγκρισης ήταν η συνολική εγγεόμενη ισχύ που επιτρέπει η κάθε μεθοδολογία καθώς και η διακύμανση των συχνοτήτων αποκοπής των Φ/Β μονάδων ώστε να διερευνηθεί αν η θυσία της εγγεόμενης ενεργής ισχύος δικαιολογείται από τη βελτίωση της ομοιομορφίας της κατανομής των αποκοπών.

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν επιβεβαίωσαν την ορθότητα της μεθοδολογίας αφού κατά την εφαρμογή της δεν παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου. Επίσης φάνηκε πως με θυσία μικρού ποσοστού της μέγιστης δυνατής εγγεόμενης ισχύος (μικρότερο του 1%) επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση στην ομοιομορφία της κατανομής των αποκοπών (μείωση διακύμανσης περίπου 70%).

1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική απειλή [1]. Η αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σχετίζεται με την παγκόσμια θέρμανση. Οι επιστήμονες αναφέρουν ότι η συγκέντρωση διοξειδίου στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τον τελευταίο αιώνα, σε σύγκριση με τα σχετικά σταθερά επίπεδα της εποχής πριν από τη βιομηχανική επανάσταση [2]. Οι ανησυχίες αυτές για την κλιματική αλλαγή προωθούν την καινοτομία για τη σταθεροποίηση και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [3]. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μείζονος σημασίας για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Οι Φ/Β μονάδες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με μικρό οικονομικό κόστος και χωρίς εκπομπές αερίων τα οποία είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή ενέργειας από Φ/Β μονάδες σχεδόν πάντα προτιμάται από την ενέργεια που παράγεται μέσω της αξιοποίησης ορυκτών καυσίμων [4]. Λόγω των παραπάνω αυξάνεται ο αριθμός διείσδυσής Φ/Β μονάδων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Μελέτες σχετικά με την ενσωμάτωση ανανεώσιμης ενέργειας στα δίκτυα έχουν δείξει ότι τα επίπεδα περικοπής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενδέχεται να αυξηθούν καθώς αυξάνεται η διείσδυση της αιολικής και ηλιακής παραγωγής ενέργειας [5]. Η περικοπή της ηλιακής ενέργειας είναι ένα από τα κύρια ζητήματα για την ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β [6].

Με τον όρο «περικοπή» (curtailment) ενέργειας αναφερόμαστε στη χρήση μικρότερης ποσότητας αιολικής ή ηλιακής ενέργειας από αυτή που είναι δυνατή διαθέσιμη σε μια δεδομένη στιγμή. Οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου μεταφοράς αποτελούν μία συνηθισμένη αιτία αποκοπής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [7]. Η έγχυση περισσότερης ισχύος στο δίκτυο από όση δύναται να αντέξει αυξάνει τον κίνδυνο βλάβης των στοιχείων του δικτύου (γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί, μετασχηματιστές κ.λ.π) [8]. Επίσης, περικοπές μπορεί να γίνουν για την εξασφάλιση της ευστάθειας του δικτύου. Η έγχυση μεγάλης ποσότητας ενεργής ισχύος στο δίκτυο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να οδηγήσουν σε διαταραχές στη συχνότητα του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές μπορούν με τη σειρά τους να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος καθώς και βλάβες στις ηλεκτρικές συσκευές [9].

Η αποδεκτή χωρητικότητα ενσωμάτωσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ενός δικτύου διανομής εξαρτάται από τον ηλεκτρικό χώρο του δικτύου. Όταν κορεστεί ο ηλεκτρικός χώρος του δικτύου απαιτούνται επενδύσεις για την αναβάθμιση της υφιστάμενης υποδομής και την υποστήριξη μεγαλύτερων δυνατοτήτων ενσωμάτωσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Ως εναλλακτική λύση, η εγκατάσταση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με την προϋπόθεση ύπαρξης περικοπών της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να επιτρέψει την αύξηση του ηλεκτρικού χώρου του δικτύου. Μέσω περιορισμένων αποκοπών της ηλιακής παραγωγής, η χωρητικότητα του δικτύου διανομής μπορεί να αξιοποιηθεί πιο αποτελεσματικά και οι αναβαθμίσεις του ενδέχεται να αναβληθούν [10].

Για τον περιορισμό των αποκοπών των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχουν εκπονηθεί και υλοποιηθεί διάφορες μεθοδολογίες. Οι μεθοδολογίες στοχεύουν στην καλύτερη ευελιξία του δικτύου ως προς την διείσδυση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αλλαγών στη λειτουργία του δικτύου και με την υιοθέτηση τεχνολογιών που διευκολύνουν τη διαδικασία. Μέσω πόρων μετατόπισης ενέργειας (energy-shifting resources), μπορεί να διατηρηθεί η σημασία των Φ/Β μονάδων και να αυξηθεί η δυναμική οικονομική διείσδυσή τους [11]. Συγκεκριμένα έχουν προταθεί λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι οποίες αφορούν την κατάλληλη εγκατάσταση και αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Αντί να περικόπτεται η παραγωγή κατά τις περιόδους αιχμής, η ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται και να χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται [12]. Η συμβολή της αποθήκευσης ενέργειας στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών [13]. Επίσης

κάποιες μεθοδολογίες βασίζονται στην περικοπή ενεργής ισχύος (APC) παραγωγών που δε βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η (APC) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διατηρήσει τη λειτουργία των γραμμών εντός των ορίων φόρτισης, μειώνοντας προσωρινά την παραγωγή ορισμένων γεννητριών κατά τις ώρες αιχμής διατηρώντας την απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου και μειώνοντας της περικοπές ηλιακής ενέργειας. [14]. Επίσης υπάρχουν μεθοδολογίες που αφορούν τη χρήση ευέλικτων Φ/Β (flexible PVs). Τα Φ/Β αυτά είναι ικανά να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες μέσω προληπτικής περικοπής παραγωγής και έγχυσης αποθηκευμένης ενέργειας και μπορούν να διαχειρίζονται ακριβώς όπως η δευτερογενής εφεδρεία που χρησιμοποιείται σήμερα. [15]

Άλλες βασικές μεθοδολογίες οι οποίες έχουν ως στόχο τη μείωση των περικοπών ενέργειας ,οι οποίες οφείλονται στη διαλείπουσα φύση της παραγόμενης από τα Φ/Β ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιούν ρυθμιστές τάσεις (Voltage regulators), On-Load Tap Changer(OLTC), Στατικούς Συγχρονισμένους Αντισταθμιστές(STATCOM). Αυτές οι μεθοδολογίες έχουν ως σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη διαλείπουσα φύση της ισχύος των Φ/Β (SPV) όταν ενσωματώνονται στο δίκτυο διανομής.[16]

Επιπροσθέτως αναφέρεται στη βιβλιογραφία πως η περικοπή της ηλιακής ενέργειας μπορεί να μειωθεί μέσω της μετατόπισης της ζήτησης ενέργειας(load shifting) και της οικονομικής διανομής. Η μεθοδολογία αυτές αποσκοπούν στην κατάλληλη μετατόπιση του φορτίου ,μέσω κατάλληλου αλγορίθμου και ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε να ταιριάζει καλύτερα η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας κατά τις ώρες ηλιοφάνειας δίνοντας προτεραιότητα στην χαμηλού κόστους ηλιακή ενέργεια. [17]

Παρά τις μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία αποκόπτεται από το δίκτυο διανομής θα υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες δε θα είναι εφικτή η αξιοποίηση της. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η εύρεση κατάλληλης μεθοδολογίας η οποία θα αφορά τον τρόπο περικοπής των Φ/Β μονάδων από το δίκτυο. Με γνώμονα την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης των περικοπών των Φ/Β μονάδων έχουν προταθεί και υλοποιηθεί διάφορες μεθοδολογίες. Κάποιες μεθοδολογίες οι οποίες έχουν εκδοθεί και υλοποιηθεί επικεντρώνονται στην χορήγηση αποζημιώσεων από τον διαχειριστή του δικτύου στους ιδιοκτήτες της Φ/Β μονάδας η οποία αποσυνδέεται από το δίκτυο αναλογικά του χρόνου αποσύνδεσης της. Βασικός στόχος των μεθοδολογιών αυτών είναι η μείωση του κόστους των αποζημιώσεων [18]. Άλλες μέθοδοι, όταν η εύρυθμη λειτουργία του δικτύου απαιτεί την περικοπή των Φ/Β μονάδων, εστιάζουν στην ομοιόμορφη περικοπή των Φ/Β μονάδων ως προς το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που δύναται να παράγει η κάθε Φ/Β μονάδα κατά τη διάρκειας περικοπής της προς την συνολική έγχυση ενεργής ισχύος στο ζυγό που είναι συνδεδεμένη [19]. Επιπροσθέτως υπάρχουν μεθοδολογίες οι οποίες εφαρμόζονται και σε μεγάλο βαθμό σε συστήματα διανομής χωρών οι οποίες έχουν ως σκοπό τον περιορισμό της απώλειας ηλεκτρικής ενέργειας η οποία οφείλεται στις περικοπές των Φ/Β μονάδων από το δίκτυο μέσω του ελέγχου τήρησης των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου. [20]

Στην παρούσα διπλωματική προτείνεται ένας τρόπος βελτιστοποίησης του ελέγχου αποκοπής των Φ/Β μονάδων από το δίκτυο διανομής με στόχο την μείωση της απώλειας ενέργειας λόγω περικοπής των Φ/Β μονάδων μέσω ενός δίκαιου, για τους ιδιοκτήτες των Φ/Β μονάδων τρόπου. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στις υπάρχουσες μεθοδολογίες για τον περιορισμό των περικοπών

1.1 Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται σε δύο κύριους στόχους, που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω αναλύονται αυτοί οι στόχοι:

1. **Μεγιστοποίηση της Ισχύος που Εκχέεται στο Δίκτυο τηρώντας τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου:** Ο πρώτος στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος από τις Φ/Β μονάδες που εγχέεται στο δίκτυο, σύμφωνα με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από την ανάγκη διατήρησης της ποιότητας ισχύος για την εξασφάλιση της ομαλής και βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου. Σκοπός είναι η αξιοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερης ισχύος η οποία παράγεται από τις Φ/Β μονάδες, μειώνοντας την ανάγκη για αποκοπή ή περιορισμό της παραγωγής των Φ/Β μονάδων. Οι τάσεις σε κάθε ζυγό (ή κόμβο) του δικτύου υποθέτουμε ότι πρέπει να παραμένουν εντός προκαθορισμένων ορίων ($\pm 10\%$ από την ονομαστική τάση). Η υπέρβαση αυτών των ορίων μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση εξοπλισμού ή βλάβες σε ευαίσθητες συσκευές.
2. **Δίκαιη Κατανομή του Χρόνου Αποκοπής των Φ/Β Μονάδων:** Ο δεύτερος στόχος είναι η διασφάλιση ότι ο χρόνος αποκοπής των Φ/Β μονάδων κατανέμεται δίκαια μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε στιγμή απόφασης θα αποφεύγετε η συνεχόμενη αποκοπή των ίδιων Φ/Β μονάδων, λαμβάνοντας υπόψιν το ιστορικό αποκοπής τους, προκειμένου να υπάρχει ισοτιμία στη λειτουργία των μονάδων που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Στην παρούσα διπλωματική θεωρούμε ότι οι ιδιοκτήτες των Φ/Β μονάδων, έχουν προσυμφωνήσει με τον διαχειριστή του δικτύου, ότι μπορεί να αποκοπούν από το δίκτυο για ένα μικρό ποσοστό του χρόνου παραγωγής (5%). Ωστόσο, αυτό πρέπει να εφαρμόζεται με δικαιοσύνη. Η μείωση της διακύμανσης των συχνοτήτων αποκοπής συμβάλει στην πιο ομοιόμορφη κατανομή των αποκοπών των Φ/Β μονάδων με αποτέλεσμα τη δικαιότερη μεταχείριση τους.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει οργανωθεί σε 5 βασικές ενότητες.

Η ενότητα (2) αφορά την αναλυτική περιγραφή της στοχαστικής διαδικασίας μέσω της οποίας διαστασιολογούνται οι Φ/Β μονάδες οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο καθώς και τρόπος με τον οποίο συνδέονται σε συγκεκριμένους ζυγούς του δικτύου καθώς και την τρέχουσα μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο ΔΕΔΔΗΕ για την υλοποίηση του ίδιου προβλήματος.

Στην ενότητα (3) περιγράφεται το προτεινόμενο Μοντέλο Βελτιστοποίησης για την επίτευξη των στόχων της διπλωματικής εργασίας το οποίο αφορά την δίκαιη και αποδοτική διαχείριση των Φ/Β μονάδων τα οποία είναι εγκατεστημένα στο δίκτυο.

Στην ενότητα (4) αναλύονται τα σενάρια που υλοποιήθηκαν για την ανάλυση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου σε βάθος ενός έτους για τις ώρες παραγωγής (6:00-20:00) και σε βάθος ενός έτους για την ώρα μέγιστης παραγωγής (13:00).

Στην ενότητα (5), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων για κάθε υπομοντέλο και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Τέλος στην ενότητα (6) αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των υπό μελέτη σεναρίων καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου .

1.3 Ακρωνύμια και βασικοί συμβολισμοί

Πίνακας 1: Ακρωνύμια

Φ/B	Φωτοβολταϊκά στοιχεία
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
PDF	Probability Distribution Function
CDF	Cumulative Distribution Function

Μεταβλητές απόφασης	
a_i	Δυαδική μεταβλητή η οποία καθορίζει την περικοπή της Φ/B μονάδας η οποία είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i
P_k	Η ενεργός ισχύς που απορρέει ζυγών k οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν
P_i	Η συνολική ενεργός ισχύς η οποία εισέρχεται στο ζυγό i
Q_k	Η άεργος ισχύς που απορρέει στο σύνολο των ζυγών k οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν
Q_i	Η συνολική άεργος ισχύς η οποία εισέρχεται στο ζυγό i
v_i	Η τιμή του τετραγώνου του μέτρου της τάσης του ζυγού i
Παράμετροι εισόδου	
p_i^l	Η ζήτηση ενεργούς ισχύος στο ζυγό i
p_i^g	Η παραγόμενη ενεργός ισχύς της Φ/B μονάδας η οποία είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i
q_i^l	Η ζήτηση άεργης ισχύος στο ζυγό i
r_i	Το μέτρο της ωμικής αντίστασης της γραμμής που εισέρχεται στο ζυγό i
x_i	Το μέτρο της επαγωγικής αντίστασης της γραμμής που εισέρχεται στο ζυγό i

Πίνακας 2 Μεταβλητές απόφασης και Παράμετροι των μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού

2 Ανάλυση χρησιμοποιούμενης μεθόδου σύνδεσης των Φ/B μονάδων στο δίκτυο και μεθόδου διαστασιολόγησης τους

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο έγινε η διαστασιολόγηση των Φ/B μονάδων καθώς και ο ορισμός των ζυγών του δικτύου στους οποίους συνδέθηκαν.

Για τη διαστασιολόγηση και τον ορισμό των ζυγών εγκατάστασης των Φ/B μονάδων χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ερευνητικό έργο **EnergyS** του Ενεργειακού Κέντρου Ικανοτήτων (ΕΚΙ). Πρόκειται για ένα κέντρο το οποίο συντονίζεται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο(ΕΜΠ) και του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών (ΕΠΙΣΕΥ).

Η μέθοδος η οποία ακολουθήθηκε αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου μέσω της στοχαστικής διαστασιολόγησης των υπό εγκατάσταση Φ/B μονάδων σε έναν ή και σε παραπάνω ζυγούς, αποδεχόμενοι ένα όριο παραβιάσεων. Πρόκειται για μία στοχαστική μεθοδολογία που βασίζεται στην επεξεργασία ιστορικών δεδομένων για την ισχύ των φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής δημιουργούνται συσχετισμένα δείγματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις ωριαίες κατανομές των ισχύων του φορτίου και των Φ/B μονάδων παραγωγής. Θεωρούμε αποδεκτό ένα όριο παραβιάσεων των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου, όπως τα όρια τάσεων, το οποίο καθορίζεται στο 5%. Αυτή η χρονική περίοδος παραβίασης συνδέεται με την πιθανότητα παραβιάσεων που προκύπτει από την ανάλυση του δικτύου μέσω πιθανοτικών ροών ισχύος. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στη σωστή μοντελοποίηση των κατανομών ανά ώρα της ημέρας, την αντιπροσωπευτικότητα των ημερών που μελετώνται και το δείγμα των Monte Carlo (MC), το οποίο εξαρτάται από το μέγεθός του, υπό την προϋπόθεση ότι τα προηγούμενα έχουν τηρηθεί. Με βάση αυτό το όριο, σχεδιάζεται η βέλτιστη (μέγιστη) διείσδυση Φ/B στο υπό μελέτη δίκτυο.

Η διαστασιολόγηση των Φ/B μονάδων καθώς και η διασύνδεση τους σε συγκεκριμένους ζυγούς του δικτύου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης σε κάθε ζυγό να μην υπερβαίνει το 5% και να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του ηλεκτρικού χώρου του δικτύου.

Η υλοποίηση της μεθόδου χωρίζεται σε 5 στάδια:

1. Εισαγωγή χρονοσειρών πραγματικών μετρήσεων των ισχύων των Φορτίων και των Φ/B μονάδων
2. Την εκτίμηση της από κοινού κατανομής των τυχαίων μεταβλητών (ενεργών και άεργων ισχύων)
3. Την παραγωγή συσχετισμένων δειγμάτων
4. Την επίλυση των γραμμικοποιημένων εξισώσεων ροής ισχύος (LinDistFlow), ανά δείγμα
5. Την υλοποίηση Monte Carlo ολοκλήρωσης των ουρών της κατανομής της τάσης που προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων LinDistFlow

2.1 Εισαγωγή δεδομένων, επεξεργασία και εξαγωγή δειγμάτων

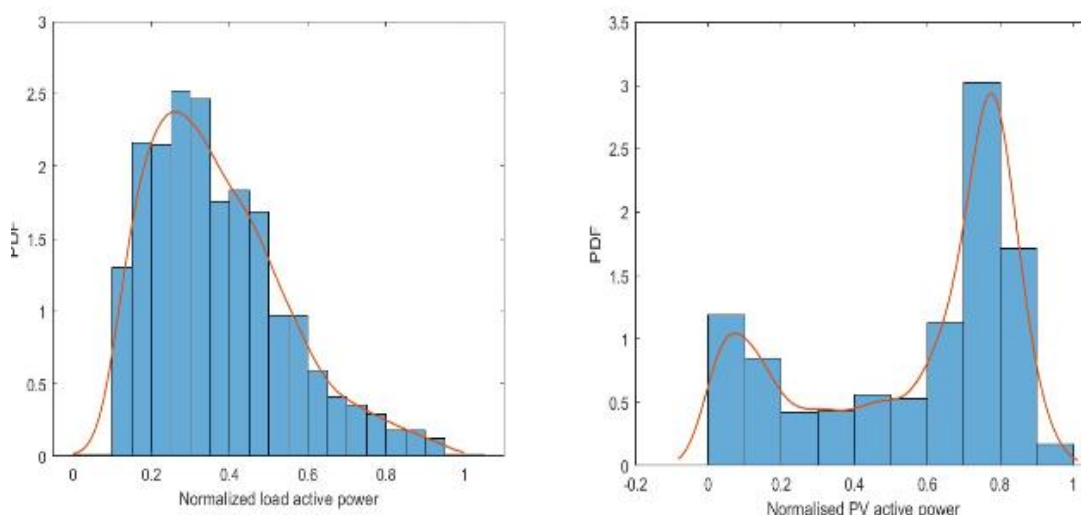
Για τη δημιουργία των δειγμάτων των ισχύων των φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής απαιτείται η είσοδος πραγματικών χρονοσειρών των ισχύων κατά τη διάρκεια ενός έτους και να αφορούν μετρήσεις οι οποίες υλοποιήθηκαν, τουλάχιστον για κάθε ώρα της μέρας για ένα χρόνο. Η απαίτηση αυτή οφείλεται στο ότι πρέπει να υπάρχει ένα επαρκές δείγμα μετρήσεων ώστε οι παραγόμενες πιθανοτικές κατανομές να είναι αρκετά ακριβείς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τη δημιουργία των συσχετισμένων δειγμάτων ισχύος χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές μετρήσεις των φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής

από το δίκτυο της Ξάνθης. Αυτές οι μετρήσεις τροποποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να προσαρμοστούν στα φορτία και στις Φ/Β μονάδες του υπό μελέτη δικτύου, το οποίο είναι το δίκτυο των 33 ζυγών που χρησιμοποιείται στην [21]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κάθε 15 λεπτά για μία ολόκληρη χρονιά.

2.1.1 Προσέγγιση των οριακών κατανομών των τυχαίων μεταβλητών

Αρχικά, για την εκτίμηση της από κοινού κατανομής των τυχαίων μεταβλητών πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των μετρήσεων ανά μία ώρα. Στη συνέχεια προσεγγίζονται οι οριακές κατανομές των ομαδοποιημένων δεδομένων με τη χρήση εμπειρικών κατανομών βασισμένες σε συναρτήσεις Gaussian Kernels. Η Gaussian kernel είναι μία συνάρτηση η οποία εκφράζει την απόσταση ενός σημείου x από κάποιο κέντρο x_i (μέτρηση) και προσδιορίζει το βάρος που αποδίδεται στην τυχαία μεταβλητή x από τη μέτρηση x_i . Οι εμπειρικές κατανομές προκύπτουν έπειτα από τη βέλτιστη προσαρμογή των Gaussian Kernels στα ιστογράμματα των πραγματικών δεδομένων.

Παραδείγματα εύρεσης της εμπειρικής κατανομής της ενεργού ισχύος ενός φορτίου και μίας Φ/Β μονάδας παραγωγής, για την ώρα 15:00



Εικόνα 1 Προσαρμογή εμπειρικών κατανομών στα δεδομένα

Ο οριζόντιος άξονας στα παραπάνω σχήματα έχει αδιαστατοποιηθεί (μετασχηματίζεται στο $[0,1]$), ενώ ο κάθετος άξονας είναι επίσης κανονικοποιημένος ($[0,1]$) αλλά παρουσιάζεται μεγεθυμένος ($\times 10$).

2.1.2 Παραγωγή συσχετισμένων δειγμάτων

Μετά την εύρεση της εμπειρικής κατανομής των ισχύων υπολογίζονται οι συντελεστές συσχέτισης Kendall μεταξύ των διάφορων τυχαίων μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης Kendall τ εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ δύο κατανομών X και Y εν την προκειμένη περίπτωση εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ:

- Ενεργού ισχύος Φ/Β μονάδας i - Ενεργού ισχύος Φ/Β μονάδας j
- Ενεργού ισχύος φορτίου i – Ενεργού ισχύος φορτίου j
- Η άεργος ισχύς των φορτίων θεωρείται ότι έχει την ίδια συσχέτιση με την ενεργό ισχύ τους

Η κατανομή του συντελεστή Kendall δεν εξαρτάται από την κατανομή των μεταβλητών αφού είναι ανεξάρτητες και συνεχείς [22]. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να ερμηνευθεί μέσω των πιθανοτήτων με τις οποίες παρατηρούμε συσχετισμένα ή μη, ζεύγη τιμών. Ο συντελεστής Kendall εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau = \frac{(C - D)}{\frac{1}{2}n(n - 1)} \quad (1)$$

Όπου:

- C είναι ο αριθμός των εναρμονισμένων (concordant) ζευγών.
- D είναι ο αριθμός των μη εναρμονισμένων (discordant) ζευγών.
- n είναι το πλήθος των παρατηρήσεων.

Δύο παρατηρήσεις (X_i, Y_i) και (X_j, Y_j) ονομάζονται εναρμονισμένες εάν $X_i > X_j$ (αντίστοιχα $X_i < X_j$), τότε $Y_i > Y_j$ (αντίστοιχα $Y_i < Y_j$) σε αντίθετη περίπτωση ονομάζονται μη εναρμονισμένες. Δηλαδή ο συντελεστής τ εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των ποσοστών των εναρμονισμένων και μη εναρμονισμένων ζευγών παρατηρήσεων. Η επιλογή χρήσης αυτού του συντελεστή έγκειται στο γεγονός η προσέγγιση της κατανομής του από την κανονική κατανομή είναι καλύτερη από την αντίστοιχη προσέγγιση άλλων συντελεστών όπως του Pearson. Ο συντελεστής Kendall είναι καταλληλότερος από άλλους rank coefficient για την ανάλυση δεδομένων που δεν ακολουθούν απαραίτητα γραμμικές σχέσεις και για την εφαρμογή της μεθόδου των copulas, όπου η διατήρηση της μονοτονικής σχέσης είναι κρίσιμη. Ο συντελεστής Kendall, λοιπόν, παραμένει σταθερός και αξιόπιστος όταν οι τυχαίες μεταβλητές μετασχηματίζονται από τον χώρο των PDFs (Probability Density Functions) στον χώρο των CDFs (Cumulative Distribution Functions).

Ακολούθως της εύρεσης των συντελεστών συσχέτισης, για κάθε ζεύγος κατανομών, οι συντελεστές ομαδοποιούνται σε έναν πίνακα συσχέτισης.

2.1.3 Εύρεση της από κοινούς κατανομής των τυχαίων μεταβλητών

Στη συνέχεια με βάση τον κατασκευασμένο πίνακα συσχέτισης και με τη χρήση της μεθόδου των **copulas** παράγεται ένα κατάλληλο συσχετισμένο τυχαίο δείγμα στο χώρο των αθροιστικών κατανομών (CDFs). Τα copulas είναι μαθηματικές συναρτήσεις οι οποίες μας επιτρέπουν να περιγράψουμε την από κοινού κατανομή πολλαπλών τυχαίων μεταβλητών αναλύοντας τις εξαρτήσεις μεταξύ των οριακών τους κατανομών. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η **Gaussian Copula** η οποία κατασκευάζεται από μία πολυμεταβλητή κανονική κατανομή.

2.1.4 Δειγματοληψία Monte Carlo

Έχοντας βρει τις CDFs των συσχετισμένων τυχαίων δειγμάτων βρίσκουμε τις αντίστροφες αθροιστικές κατανομές (ICDFs) με βάση τις εμπειρικές κατανομές των δεδομένων εισόδου οι οποίες είχαν προσδιορισθεί σε προηγούμενα βήματα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απεικόνιση των συσχετισμένων δειγμάτων πίσω στο χώρο των τυχαίων μεταβλητών επιτρέποντας μας την πραγματοποίηση προσομοιώσεων Monte Carlo. Χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες ICDFs παράγουμε κατάλληλο συσχετισμένα δείγματα για τις ενεργές ισχύεις των φορτίων και του Φ/Β μονάδων παραγωγής. Το δείγμα των άεργων ισχύων των φορτίων

υπολογίζεται από τα παραγόμενα δείγματα των ενεργών ισχύων των φορτίων με βάση το συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$) ο οποίος στο υπό μελέτη δίκτυο θεωρείται 0,87. Το μέγεθος των παραγόμενων δειγμάτων, από την παραπάνω διαδικασία, πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλα ώστε να επιτευχθεί μια στοιχειώδης ακρίβεια στα αποτελέσματα των Monte Carlo προσομοιώσεων που ακολουθούν στη συνέχεια. Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια τεχνική προσομοίωσης η οποία βασίζεται σε τυχαία δειγματοληψία για να υπολογίσει τα αποτελέσματα μαθηματικών ή φυσικών συστημάτων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση αριθμητικών τιμών και κατανομών πιθανότητας. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των κατανομών των μεταβλητών (π.χ. τάσεων) που προκύπτουν από την επίλυση των γραμμικοποιημένων εξισώσεων ροής ισχύος που ακολουθούν στο επόμενο βήμα.

2.1.5 Μετασχηματισμός πραγματικών δεδομένων ώστε να αντιστοιχούν στο υπό εξέταση δίκτυο

Η εισαγωγή των δεδομένων ισχύων καθώς και η εξαγωγή των τυχαίων δειγμάτων για την εκτέλεση της παραπάνω περιγραφόμενης στοχαστικής μεθοδολογίας βασίστηκαν σε πραγματικά δεδομένα από ένα δίκτυο στην περιοχή της Ξάνθης με κατάλληλη τροποποίηση των δεδομένων για να αντιστοιχούν στο υπό εξέταση δίκτυο.

Η μετατροπή αυτή των χρονοσειρών των πραγματικών ομαδοποιημένων μετρήσεων (x_s) του δικτύου της Ξάνθης έγιναν με τον ακόλουθο τρόπο:

- Αδιαστατοποίηση των πραγματικών ομαδοποιημένων μετρήσεων σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$n = \frac{1}{x^M - x^m} x_s - \frac{x^m}{x^M - x^m} \quad (2)$$

Όπου $x^M = \max\{x_s\}$, $x^m = \min\{x_s\}$, $\bar{x}_s = \text{mean}\{x_s\}$

Η αδιαστατοποίηση αυτή των δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την απεξάρτηση της κατανομής τους από την εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας και την απεικόνιση των δεδομένων στο διάστημα $[0,1]$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση του σχήματος της κατανομής η οποία ~~επηρεάζεται~~ επηρεάζεται μόνο από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα μέτρησης.

- Παραγωγή τυχαίου δείγματος προσαρμοσμένο στο υπό μελέτη δίκτυο. Μετά την εύρεση των αδιαστατοποιημένων χρονοσειρών προχωράμε στη δημιουργία κατάλληλου δείγματος που να αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη δικτύου με τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$y = \frac{\overline{p}_i^{gen}(x^M - x_m)}{\bar{x}_s} n + \frac{\overline{p}_i^{gen} x_m}{\bar{x}_s} \quad (3)$$

Όπου $\overline{p}_i^{gen}$ η μέση αναμενόμενη ενεργός ισχύς των Φ/B μονάδων.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για όλες τις ώρες, για όλα τα φορτία και τις παραγωγές ισχύος των Φ/B μονάδων τα οποία μέσω της μεθοδολογίας των Copulas, όπως έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, οδήγησαν στην παραγωγή τυχαίων συσχετισμένων δειγμάτων ισχύων των φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής.

2.1.6 Γραμμικοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος (ανά δείγμα)

Τα παραγόμενα δείγματα των ισχύων των φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής χρησιμοποιούνται για την επίλυση της ροής ισχύος (power flow) του δικτύου ανά δείγμα. Η επίλυση των ροών ισχύος για κάθε δείγμα έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση των διανυσμάτων τάσεων των ζυγών τα οποία αντιστοιχούν σε σημεία της από κοινού κατανομής των τάσεων

των ζυγών ($f_V(v)$). Παρακάτω περιγράφονται οι εξισώσεις των γραμμικοποιημένων μοντέλων DistFlow και LinDistFlow το οποίο δεν λαμβάνει υπόψιν τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς.

DistFlow

$$U_i = V_i \overline{V_i} = |V_i|^2 \quad (4)$$

$$l_{ik} = \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{U_i} \quad (5)$$

$$P_{ik} = r_{ik} l_{ik} - P_k + \sum_{m_i: k \rightarrow m_i} P_{kmi} \quad (6)$$

$$Q_{ik} = x_{ik} l_{ik} - Q_k + \sum_{m_i: k \rightarrow m_i} Q_{kmi} \quad (7)$$

$$U_k = U_i - 2(r_{ik} P_{ik} + x_{ik} Q_{ik}) + (r_{ik}^2 + x_{ik}^2) l_{ik} \quad (8)$$

Με αντικατάσταση $l_{ik} = 0$ στις εξισώσεις του DistFlow, το οποίο αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος των γραμμών διανομής, καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις του LinDistFlow:

LinDistFlow

$$U_i = V_i \overline{V_i} = |V_i|^2 \quad (4)$$

$$P_{ik} = -P_k + \sum_{m_i: k \rightarrow m_i} P_{kmi} \quad (9)$$

$$Q_{ik} = -Q_k + \sum_{m_i: k \rightarrow m_i} Q_{kmi} \quad (10)$$

$$U_k = U_i - 2(r_{ik} P_{ik} + x_{ik} Q_{ik}) \quad (11)$$

Στην περιγραφόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις LinDistFlow λόγω του χαμηλότερου υπολογιστικού φόρτου του αλγορίθμου και αφού οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με τα υπόλοιπα μεγέθη

2.1.7 Monte Carlo ολοκλήρωση

Για κάθε διάνυσμα τάσης μετρίεται ο αριθμός των συντεταγμένων του που παραβιάζουν τα όρια τάσης που έχει θέσει ο διαχειριστής του δικτύου για την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία του δικτύου όπου στην προκειμένη περίπτωση για την τάση του κάθε ζυγού (V_i) υποθέτουμε

ότι ισχύει: $0.9 \text{ p.u.} \leq V_i \leq 1.1 \text{ p.u.}$. Έπειτα, ο αριθμός παραβιάσεων των ορίων της τάσης για κάθε ζυγό διαιρείται με το συνολικό αριθμό των δειγμάτων ώστε να βρεθεί η πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου. Ουσιαστικά πρόκειται για την Monte Carlo ολοκλήρωση των ουρών της από κοινού κατανομής των τάσεων του δικτύου διανομής.

2.2 Μεγιστοποίηση του <<ηλεκτρικού χώρου>> του δικτύου διανομής μέσω κατάλληλης εγκατάστασης των Φ/B μονάδων σε συγκεκριμένους ζυγούς

Η διαστασιολόγηση των Φ/B μονάδων καθώς και η διασύνδεση τους σε συγκεκριμένους ζυγούς του δικτύου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα παραβίασης των ορίων της τάσης σε κάθε ζυγό να μην υπερβαίνει το 5% και να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του ηλεκτρικού χώρου του δικτύου.

2.2.1 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης

Αφού έχουν βρεθεί οι κατανομές των τάσεων των ζυγών ($f_v(v)$) μέσω τις επίλυσης των γραμμικοποιημένων ροών ισχύος επιλύεται το κάτωθεν πρόβλημα βελτιστοποίησης :

$$\begin{aligned} \max \sum_{i \in G} p_i^{\text{gen}} \\ \text{s.t.} \\ P(|V_i - V^{\text{nom}}| \leq 0.1, \forall i) = P(0.9 \leq V_i \leq 1.1, \forall i) = \int_{V_{\text{acc}}} f_v(v) dv \geq 95\% \quad (12) \end{aligned}$$

Όπου $V_{\text{acc}} = \{0.9 \leq V_i \leq 1.1, \forall i\}$ είναι ο υπερκύβος των αποδεκτών τιμών των τάσεων ανα ζυγό του δικτύου και $f_v(v)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τάσεων των ζυγών του δικτύου.

Δεν λαμβάνεται υπόψιν ο περιορισμός για την ένταση ρεύματος των ζυγών καθώς τα θερμικά όρια των γραμμών του δικτύου διανομής είναι αρκετά υψηλά σε σχέση με τα διερχόμενα εξ αυτών ρεύματα με αποτέλεσμα να μην παραβιάζονται τα λειτουργικά όρια του δικτύου ως προς την ένταση του ρεύματος. Στον παραπάνω περιορισμό έχει θεωρηθεί αποδεκτό όριο παραβιάσεων το 5% του χρόνου λειτουργίας και αποδεκτό όριο διακύμανσης της τάσης στους ζυγούς του δικτύου το 10% της ονομαστικής της τιμής.

2.2.2 Βελτιστοποίηση με χρήση υποκατάστατης συνάρτησης (surrogate optimization)

Λόγω αυτών των δύο χαρακτηριστικών -μη γραμμικότητα και συνέχεια- των ολοκληρωτικών περιορισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης και λόγω του υψηλού υπολογιστικού φόρτου χρησιμοποιήθηκε η εξής μεθοδολογία (βασισμένη σε υποκατάστατη συνάρτηση) για την εύρεση των ονομαστικών ισχύων των Φ/B μονάδων παραγωγής και διασύνδεση τους στους κατάλληλους ζυγούς στο δίκτυο. Η μεθοδολογία χρήσης της υποκατάστατης συνάρτησης είναι η εξής:

1. **Κατασκευή υποκατάστατου μοντέλου:** Αντί να αξιολογείται συνεχώς η ακριβής, χρονικά δαπανηρή αντικειμενική συνάρτηση, δημιουργείται ένα απλούστερο, υποκατάστατο μοντέλο (surrogate model), που προσεγγίζει την αρχική συνάρτηση. Συνηθισμένα υποκατάστατα μοντέλα περιλαμβάνουν:
 - **Gaussian Processes (GPs)**
 - **Radial Basis Functions (RBFs)**
 - **Neural Networks**
2. **Βελτιστοποίηση του υποκατάστατου μοντέλου:** Αφού κατασκευαστεί το μοντέλο, αυτό χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και την εκτέλεση της βελτιστοποίησης. Το υποκατάστατο μοντέλο είναι πολύ πιο γρήγορο στην αξιολόγηση σε σχέση με την πραγματική συνάρτηση.
3. **Ενημέρωση του υποκατάστατου μοντέλου:** Το υποκατάστατο μοντέλο βελτιώνεται συνεχώς με δεδομένα από πραγματικές εκτιμήσεις της αρχικής συνάρτησης (δηλαδή, ο υπολογισμός της ακριβούς τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται σε επιλεγμένα σημεία).
4. **Αναζήτηση ισορροπίας:** Το surrogate optimization προσπαθεί να ισορροπήσει μεταξύ της **εκμετάλλευσης** των δεδομένων (εκεί που η συνάρτηση έχει ήδη δώσει καλές τιμές) και της **εξερεύνησης** νέων περιοχών του χώρου των παραμέτρων, όπου η συνάρτηση δεν έχει ακόμα υπολογιστεί.

Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος της υποκατάστατης συνάρτησης διακρίνεται σε δύο βασικά στάδια:

1. Αρχικά, ο αλγόριθμος δημιουργεί τυχαία σημεία εντός των ορίων των μεταβλητών. Σε αυτά τα σημεία, υπολογίζονται η αντικειμενική συνάρτηση και οι μη γραμμικοί περιορισμοί, διαδικασία που συνήθως απαιτεί πολύ χρόνο. Για την εκτίμηση αυτών των συναρτήσεων, χρησιμοποιούνται ακτινικές συναρτήσεις βάσης (RBF), δημιουργώντας ένα μοντέλο που προσεγγίζει την αντικειμενική συνάρτηση με ομαλό και αποτελεσματικό τρόπο.
2. Στη συνέχεια, αναζητά το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης, αξιολογώντας τυχαία σημεία και λαμβάνοντας υπόψη την απόστασή τους από σημεία όπου έχουν ήδη γίνει υπολογισμοί. Με βάση αυτά τα κριτήρια, επιλέγεται το πιο κατάλληλο σημείο για περαιτέρω υπολογισμούς και το μοντέλο προσαρμόζεται με τα νέα δεδομένα. Η αναζήτηση συνεχίζεται επαναληπτικά, προσαρμόζοντας δυναμικά την κλίμακα αναζήτησης με βάση την πρόοδο του αλγορίθμου

Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων στο δίκτυο.

3 Μοντέλα Βελτιστοποίησης για τον έλεγχο των περικοπών των Φ/Β μονάδων

Για τη λήψη απόφασης σχετικά με το υπό μελέτη πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν 2 μοντέλα MILP για κάθε παραγόμενο δείγμα (P_L, Q_L, P_{PV}) το καθένα για διαφορετικό λόγο. Το πρώτο μοντέλο αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο, το οποίο θα αναφέρεται ως μοντέλο μεγιστοποίησης (maximization), ενώ το δεύτερο στη λήψη δίκαιης απόφασης, ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι απαιτήσεις των ιδιοκτητών των Φ/Β μονάδων καθώς και του διαχειριστή και θα αναφέρεται ως μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης (fairness). Η σημασία ύπαρξης του δεύτερου μοντέλου έγκειται στο γεγονός ότι λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τη μεγιστοποίηση της εγχεόμενης ενεργού ισχύος στο δίκτυο είναι πιθανόν να υπάρχουν μεγαλύτερες διαφορές στον αριθμό περικοπών μεταξύ των Φ/Β μονάδων. Η

παραγόμενη αυτή ανισότητα μεταφράζεται σε απώλεια εισοδήματος ορισμένων ιδιοκτητών σε σχέση με άλλους (αναλογικά πάντα ως προς το μέγεθος της Φ/B μονάδας). Εν ολίγοις, προσπαθεί να περιορισθεί η συνεχής περικοπή των ίδιων Φ/B μονάδων. Στην παρούσα διπλωματική έχει γίνει η παραδοχή ότι η κάθε Φ/B μονάδα παραγωγής είτε θα εγγχεί στο δίκτυο όλη την παραγόμενη ισχύ της την δεδομένη στιγμή-προσομοίωση.

Η βασική μεταβλητή ελέγχου των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου είναι η συχνότητα f_i η οποία εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$f_i = \sum_{j=1}^k \frac{a_i^g}{k} \quad (13)$$

Όπου f_i το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η Φ/B μονάδα i εγγχεί ισχύ στο δίκτυο και k το σύνολο των επαναλήψεων της μεθόδου Monte Carlo.

Η μεταβλητή αυτή εκφράζει το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο κάθε Φ/B μονάδα παράγει και εγγχεί στο δίκτυο ενεργό ισχύ. Ουσιαστικά πρόκειται για την πιθανότητα αποκοπής της εκάστοτε Φ/B μονάδας η οποία, όπως και στην περίπτωση της πιθανότητας παραβίασης λειτουργικών περιορισμών του δικτύου, ταυτίζεται με το χρόνο αποκοπής της Φ/B μονάδας από το δίκτυο.

Ο σκοπός του παρόν αλγορίθμου είναι να μειώσει τη διακύμανση των f_i , που αρχικά υπολογίζονται με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της εγγεόμενης ενεργού ισχύος από τις Φ/B μονάδες παραγωγής, με μικρή μείωση στη συνολική εγγεόμενη ισχύ. Η επιδίωξη είναι να επιτευχθεί καλύτερη ομοιομορφία στο ποσοστό περικοπών κάθε Φ/B μονάδας, ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες της πλειονότητας των ιδιοκτητών.

Η μείωση της διακύμανσης αντιπροσωπεύει και τη μείωση των συνολικών διαφορών των f_i . Δηλαδή εξομαλύνει την κατανομή των f_i μειώνοντας η αυξάνοντας τις τιμές τους αναλόγως, όταν αυτό επιτρέπεται από τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου και την επικείμενη μείωση της εγγεόμενης ισχύος.

3.1 Μοντέλο μεγιστοποίησης

Στο μοντέλο αυτό ασχολούμαστε μόνο με τη μεγιστοποίηση της εγγεόμενης ισχύος στο δίκτυο χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ροής ισχύος LinDistFlow και τα αποδεκτά όρια τάσης των ζυγών του δικτύου.

Το μοντέλο βελτιστοποίησης περιγράφεται με τις κάτωθεν εξισώσεις:

$$\max \sum_{i \in G} a_i^g p_i^g \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad a_i^g \in \{0,1\}, \forall i \in G \quad (15)$$

$$\sum_{k:i \rightarrow k} P_k = P_i - p_i^l + a_i^g p_i^g, \forall i \quad (16)$$

$$\sum_{k:i \rightarrow k} Q_k = Q_i - q_i^l, \forall i \quad (17)$$

$$v_i = v_{pi} - 2r_i P_i - 2x_i Q_i, \forall i \quad (18)$$

$$0.81 \leq v_i \leq 1.21, \forall i \quad (19)$$

Όπου το σύνολο G είναι το σύνολο των ζυγών του ακτινικού δικτύου στα οποία είναι εγκατεστημένες οι Φ/Β μονάδες και η αλλαγή των μεταβλητών $v_i = V_i^2$ έχει υλοποιηθεί για τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων της ροής ισχύος. Υποθέτουμε την ίδια αρίθμηση (i) για ένα ζυγό και τη μοναδική εισερχόμενη σε αυτόν γραμμή. Τέλος χρησιμοποιείται (πι) για τον πρόγονο του ζυγού (i). Η αντικειμενική συνάρτηση αντιπροσωπεύει τη συνολική παραγόμενη ενεργό ισχύ η οποία εγχέεται στο σύνολο του δικτύου.

Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την εύρεση της μέγιστης ισχύος παραγόμενης από Φ/Β μονάδες και εγχεόμενης στο δίκτυο για κάθε υπό εξέταση ώρα σύμφωνα με τους λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου. Το παραπάνω μοντέλο εφαρμόζεται για κάθε παραγόμενο ωριαίο δείγμα ισχύος από την μεθοδολογία δειγματοληψίας. Συνεπώς οι παραπάνω εξισώσεις για να καλύπτουν το σύνολο των δημιουργημένων δειγμάτων και να καλύπτουν τη στοχαστικότητα του παρόντος προβλήματος βελτιστοποίησης μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\max J_k^1 = \sum_{i \in G} a_{i,k}^g p_{i,k}^g \quad (20)$$

s.t.

$$a_{i,k}^g \in \{0,1\} \forall i \in G, \forall k \quad (21)$$

$$\sum_{j:i \rightarrow j} P_{j,k} = P_{i,k} - p_{i,k}^l + a_{i,k}^g p_{i,k}^g, \forall i, k \quad (22)$$

$$\sum_{j:i \rightarrow j} Q_{j,k} = Q_{i,k} - q_{i,k}^l, \forall i, k \quad (23)$$

$$v_{i,k} = v_{\pi i,k} - 2r_i P_{i,k} - 2x_i Q_{i,k}, \forall i, k \quad (24)$$

$$0.81 \leq v_{i,k} \leq 1.21, \forall i, k \quad (25)$$

Όπου J_k^1 είναι η βέλτιστη λύση και ο δείκτης k αντιπροσωπεύει το στοιχείο του δείγματος (το οποίο αφορά μια χρονική στιγμή.

3.2 Μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται μετέπειτα της επίλυσης και της εύρεσης της βέλτιστης λύσης του αρχικού προβλήματος μεγιστοποίησης. Οι εξισώσεις του Lindist flow χρησιμοποιούνται ξανά ως περιορισμοί, προκειμένου η νέα λύση να συμμορφώνεται στους περιορισμούς του δικτύου. Επίσης, εισάγεται ένας επιπρόσθετος περιορισμός, ο οποίος εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος μεγιστοποίησης και διασφαλίζει ότι η απώλεια στη μέγιστη ισχύ θα είναι εντός των ορίων που επιτρέπει ο διαχειριστής του δικτύου. Στην προκειμένη περίπτωση επιτρέπουμε μείωση της εγγερόμενης ισχύος στο δίκτυο έως 10%, για κάθε χρονική στιγμή λήψης απόφασης, λαμβάνοντας υπόψιν τις προηγούμενες αποφάσεις. Το μοντέλο fairness εκφράζεται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\min J_k^2 = \sum_{i \in G} e^{(k - \sum_{t=1}^k a_{i,t}^g)} \quad (26)$$

s.t.

$$a_{i,k}^g \in \{0,1\}, \forall i \in G, \forall k$$

$$\sum_{j:i \rightarrow j} P_{j,k} = P_{i,k} - p_{i,k}^l + a_{i,k}^g p_{i,k}^g, \forall i, k \quad (22)$$

$$\sum_{j:i \rightarrow j} Q_{j,k} = Q_{i,k} - q_{i,k}^l, \forall i, k \quad (23)$$

$$v_{i,k} = v_{pi,k} - 2r_i P_{i,k} - 2x_i Q_{i,k}, \forall i, k \quad (24)$$

$$0.81 \leq v_{i,k} \leq 1.21, \forall i, k \quad (25)$$

$$\sum_{i \in G} a_{i,k}^g p_{i,k}^g \geq \beta J_k^{1*}, \beta \in [0,1] \quad (27)$$

Όπου η παράμετρος β καθορίζει το μέγιστο ποσοστό μέγιστης ενεργής ισχύος το οποίο είναι πρόθυμος να θυσιάσει ο διαχειριστής του δικτύου, ώστε να κατανείμει πιο ομοιόμορφα τις συχνότητες με τις οποίες ανοίγουν οι Φ/Β μονάδες.

Συγκεκριμένα η σχέση: $1 - \beta = x$ ορίζει το μέγιστο ποσοστό θυσίας (x) ενεργού ισχύος που διατίθεται να κάνει ο διαχειριστής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το ανώτερο ποσοστό θυσίας εγγερόμενης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες παραγωγής είναι 10% για κάθε επανάληψη προσομοίωσης. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου fairness δεν είναι γραμμική με αποτέλεσμα να παραβιάζει τους κανόνες του γραμμικού προγραμματισμού, για το λόγω αυτό μετασχηματίζεται σε γραμμική. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η αντικειμενική συνάρτηση στηρίζεται στο γεγονός ότι επιτρέπει μία γενική εποπτεία του χρόνου έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο προσπαθώντας να επιλέξει όταν οι περιορισμοί το επιτρέπουν τη Φ/Β με τις λιγότερες φορές έγχυσης μέχρι τη δεδομένη στιγμή απόφασης. Ο κύριος λόγος επιλογής της είναι η ικανότητά της να επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων με βάση τις προηγούμενες, επιλέγοντας την καλύτερη απόφαση για την εκάστοτε στιγμή.

Η εκθετική συνάρτηση προσεγγίζεται τμηματικά, μέσω γραμμικών συναρτήσεων με τον ακόλουθο τρόπο:

- Θεωρώντας τον όρο $k - \sum_{t=1}^k a_{i,t}^g = x$ ως την ανεξάρτητη μεταβλητή για κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή, χωρίζουμε το x σε διαφορετικά διαστήματα $[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n]$
- Σε κάθε ένα από τα παραπάνω διαστήματα, προσεγγίζουμε την εκθετική συνάρτηση με μια γραμμική συνάρτηση της μορφής:

$$y \approx m_i \cdot x + c_i \quad \forall x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (28)$$

Όπου:

- m_i είναι η κλίση της γραμμής στο διάστημα $[x_{i-1}, x_i]$.
- c_i είναι η σταθερά (τομή με τον άξονα y)

Η κλίση m_i και η σταθερά c_i καθορίζονται από την τιμή της συνάρτησης $y = e^x$

- Υπολογίζουμε τη κλίση m_i και τη σταθερά c_i , σε κάθε διάστημα χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$m_i = \frac{e^{x_i} - e^{x_{i-1}}}{x_i - x_{i-1}} \quad (29)$$

$$c_i = e^{x_{i-1}} - m_i \cdot x_{i-1} \quad (30)$$

Καταλήγουμε λοιπόν στη γραμμική προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης εφαρμόζοντας την παραπάνω μέθοδο για διάφορα μικρά διαστήματα του πεδίου ορισμού του x . Προφανώς όσο περισσότερα είναι τα διαστήματα τόσο πιο ακριβής θα είναι η προσέγγιση.

Η πρώτη παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης του fairness (J_k^2) ως προς τη μεταβλητή απόφασης ($a_{i,k}^g$) είναι:

$$\frac{\partial J_k^2}{\partial a_{i,k}^g} = -e^{-a_{i,k}^g} e^{(k - \sum_{t=1}^{k-1} a_{i,t}^g)} \quad (31)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η πρώτη παράγωγος μειώνεται εκθετικά εξαρτώμενη από τη μεταβλητή $a_{i,t}^g$ οπότε όταν η διαφορά $(k - \sum_{t=1}^{k-1} a_{i,t}^g)$ είναι αρκετά μεγάλη τότε προτιμάται να επιλέγεται ως τιμή της δυαδικής χρονοεξαρτώμενης μεταβλητής $a_{i,t}^g$ το 1 ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιπροσθέτως όσων αφορά τις δεύτερες παραγώγους της :

$$\text{➤ } \frac{\partial^2 J_k^2}{\partial^2 a_{i,k}^g} = e^{(k - \sum_{t=1}^k a_{i,t}^g)} > 0 \quad (32)$$

$$\text{➤ } \frac{\partial^2 J_k^2}{\partial a_{i,k}^g \partial a_{j,k}^g} = 0 \quad (33)$$

Όπου k η εξεταζόμενη χρονική στιγμή

Άρα ο πίνακας Hessian είναι θετικά ορισμένος και η συνάρτηση αυστηρά κυρτή :

$$H_k = \text{Diag} \{ e^{(k - \sum_{t=1}^k a_{i,t}^g)} \} \quad (34)$$

Συνεπώς η αντικειμενική συνάρτηση έχει ολικό ελάχιστο το οποίο στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μεταφράζεται ότι υπάρχει μοναδική λύση του προβλήματος σε κάθε βήμα.

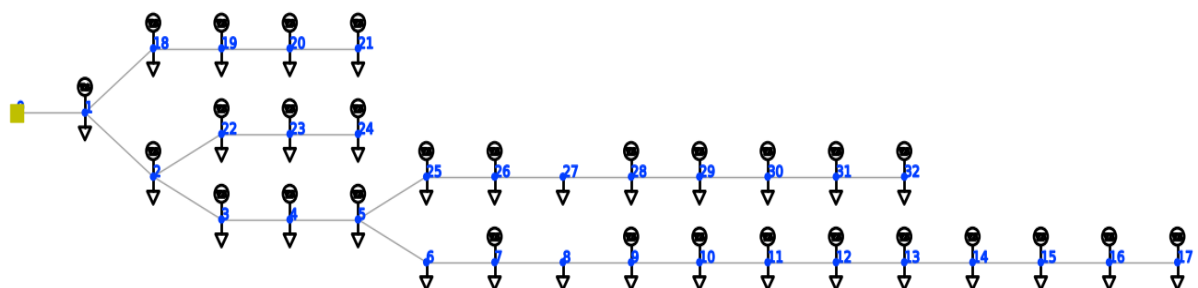
4 Περιγραφή του πραγματικού δικτύου και των παραμέτρων των προσομοιώσεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην τοπολογία του δικτύου πάνω στο οποίο εφαρμόστηκε ο υπό εξέταση αλγόριθμος και θα αναλυθούν οι παραδοχές που έγιναν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη δικτύου

Στην παρούσα διπλωματική για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την υπό ανάλυση μεθοδολογία βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το Case study 33bw του pandapower. Συνδέθηκαν 29 Φ/Β μονάδες στο δίκτυο κάθε μία σε ξεχωριστό ζυγό, για λόγους απλοποίησης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το δίκτυο είναι ακτινικό και αποτελείται από 33 ζυγούς και 32 γραμμές με ωμικές και επαγωγικές αντιστάσεις.

Εικόνα 2 Τοπολογία δικτύου Case 33bw Pandapower



Το υπό μελέτη δίκτυο αποτελείται από:

- 33 ζυγούς
- 29 Φ/Β μονάδες
- 33 φορτία
- Εγκατεστημένη Ισχύς φορτίων: 4270 kVA
- Συντελεστής Ισχύος: 0,87
- Εγκατεστημένη Ισχύς Φ/Β μονάδων: 26312 kW

Πίνακας 3 Ονομαστικές τιμές Ενεργής Ισχύος των εγκαταστημένων Φ/Β μονάδων και φορτίων στο υπό μελέτη δίκτυο

Ζυγός	Ονομαστική τιμή Ενεργούς Ισχύος Φ/Β μονάδας (MW)	Ονομαστική τιμή Ισχύος Φορτίου (MVA)
0	-	0,115
1	2,490	0,103
2	2,048	0,138
3	3,825	0,069
4	0,114	0,069
5	0,616	0,230
6	-	0,230
7	0,761	0,069
8	-	0,069
9	0,286	0,052
10	0,048	0,069
11	0,229	0,069
12	0,042	0,138
13	0,068	0,069
14	0,190	0,069
15	0,016	0,069
16	0,055	0,103
17	0,033	0,103
18	1,000	0,103
19	1,861	0,103
20	2,453	0,103
21	2,857	0,103
22	1,951	0,483
23	1,382	0,483
24	3,046	0,069
25	0,026	0,069
26	0,112	0,069
27	-	0,138
28	0,108	0,230
29	0,029	0,172
30	0,015	0,241
31	0,013	0,069
32	0,640	0,115

4.2 Ανάλυση σεναρίων υπό τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του παραπάνω μοντέλου βελτιστοποίησης ακολουθήθηκαν 2 βασικά σενάρια :

- Χρήση μοντέλου σε διάστημα ενός έτους για τις ώρες παραγωγής των Φ/Β συγκεκριμένα από τις 6:00 μέχρι και τις 20:00 για κάθε μέρα ενός έτους
- Χρήση μοντέλου στο χειρότερο σενάριο – μεγάλη παραγωγή ισχύος των Φ/Β μονάδων. Συγκεκριμένα αναλύθηκε η ώρα 14:00 σε διάστημα ενός έτους

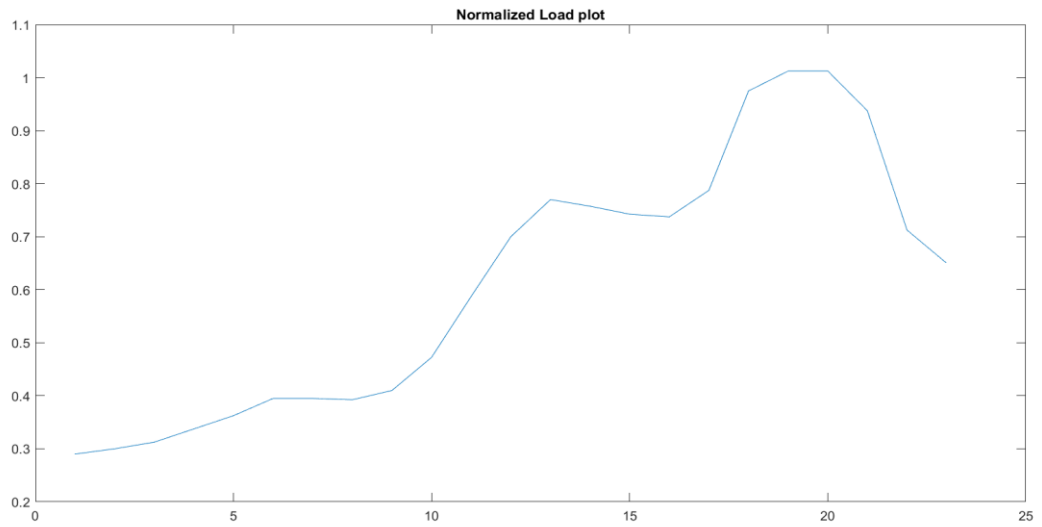
Για τη δειγματοληψία των δεδομένων εισόδου των ισχύων των Φορτίων και των Φ/B μονάδων παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν δείκτες εποχικότητας βάση των οποίων τα παραγόμενα δεδομένα τροποποιήθηκαν ώστε να παραχθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα ανά εποχή. Η συγκεκριμένη ενέργεια έγινε ώστε ο αλγόριθμος να εξεταστεί σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες, καθώς είναι γνωστό πως η παραγωγή των Φ/B και τα φορτία παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις τιμές τους λόγω των εποχών. Τέλος, λήφθηκε υπόψιν και ένας δεύτερος παράγοντας για τη δειγματοληψία, η κατανομή της παραγωγής των Φ/B μονάδων ως προς την ώρα μέσα στην ίδια ημέρα. Η παραγωγή των Φ/B μονάδων εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας φτάνοντας στο μέγιστο επίπεδο τις μεσημεριανές ώρες. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι συντελεστές της καμπύλης παραγωγής των Φ/B μονάδων για την δημιουργία δειγμάτων οι οποίοι αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ώρες. Οι συντελεστές αυτοί είναι διαστατοποιημένοι στο $[0,1]$ και η κατανομή τους στις ώρες παραγωγής (ύπαρξη επαρκούς ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή) ομοιάζει στην κανονική κατανομή. Για την διεξαγωγή του συγκεκριμένου σεναρίου δημιουργήθηκαν 38500 δείγματα για κάθε ομάδα δεδομένων εισόδου $(p_i^{gen}, p_i^{load}, q_i^{load})$. Για την διενέργεια της συγκεκριμένης προσομοίωσης ο αριθμός των δημιουργημένων δειγμάτων ποικίλει αναλόγως της εποχής που το κάθε σύνολο δειγμάτων αφορά. Η διάρκεια της ύπαρξης επαρκούς ακτινοβολίας για παραγωγή ανεξαρτήτως καιρικών εξαρτάται από την εποχή, δηλαδή τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 8400 ομάδες δειγμάτων για τους χειμερινούς μήνες, 10500 για τους μήνες της άνοιξης, 10500 για τους μήνες του καλοκαιριού και 9100 για το Φθινόπωρο. Οι ώρες παραγωγής των Φ/B μονάδων είναι :

- 6:00-20:00 για το καλοκαίρι και την άνοιξη
- 7:00-19:00 για το φθινόπωρο
- 7:00-18:00 για το χειμώνα

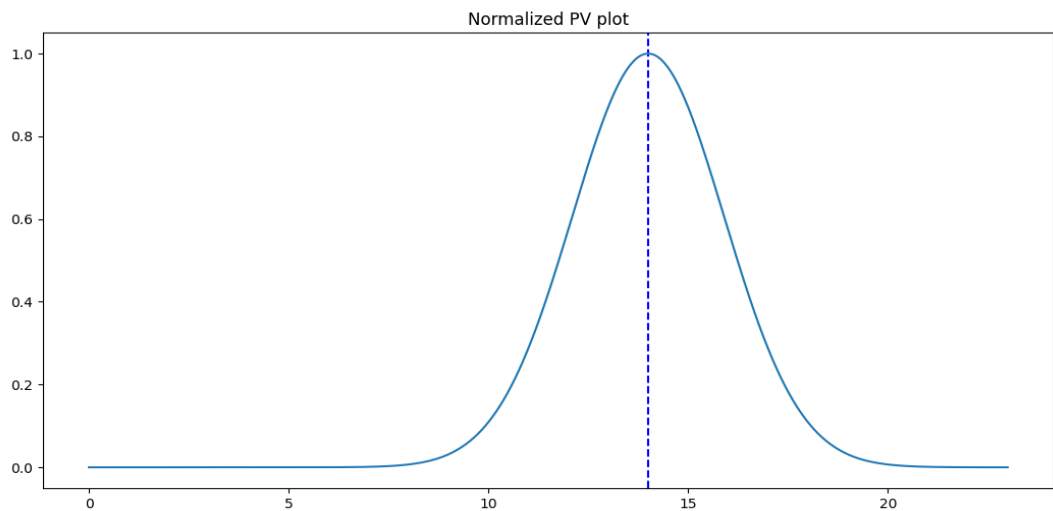
Να σημειωθεί ότι λόγω της ομαδοποίησης των δεδομένων, με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1, ουσιαστικά τα παραγόμενα δείγματα περιέχουν δεδομένα ανά 15 λεπτά μέσα σε κάθε ώρα.

Να σημειωθεί ότι στην δημιουργία των δεδομένων εισόδου λήφθηκαν υπόψιν η εποχική και χρονική σειρά τους. Συγκεκριμένα πρώτα εισήχθησαν τα δεδομένα που αφορούν το χειμώνα ταξινομημένα ως προς την ώρα στην οποία αντιστοιχούν μετά με τον ίδιο τρόπο της άνοιξης έπειτα του καλοκαιριού και τέλος του φθινοπώρου. Ο όρος χρονική σειρά αναφέρεται στη διαδοχή των ωρών παραγωγής, ξεκινώντας από την ώρα έναρξης της παραγωγής για κάθε εποχή και καταλήγοντας στην ολοκλήρωση της παραγωγής μέσα στην ημέρα. Στη συνέχεια, η διαδικασία συνεχίζεται με την επόμενη προσομοίωση ημέρας.

Παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες που απεικονίζουν την παραγωγή των Φ/B μονάδων ανάλογα με την ώρα παραγωγής, καθώς και την κατανάλωση των φορτίων ως προς την ώρα



Εικόνα 3 Κανονικοποιημένη Καμπύλη φορτίου



Εικόνα 4 Κανονικοποιημένη καμπύλη παραγωγής Φ/Β μονάδας

Από τις παραπάνω καμπύλες παρατηρείται πως η αιχμή της παραγωγής είναι στις 14:00 και του φορτίου στις 20:00. Συνεπώς θα ήταν χρήσιμη η μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου για την ώρα που συναντάται η μέγιστη παραγωγή των Φ/Β μονάδων και συνεπώς είναι πιθανότερο να υπάρχουν παραβιάσεις. Για το λόγο αυτό θα διεξάχθηκαν προσομοιώσεις που αφορούν τις 14:00 η ώρα κάθε μέρας σε διάστημα ενός χρόνου. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων δημιουργημένων δειγμάτων είναι 10000 για κάθε μεταβλητή εισόδου ($p_i^{gen}, p_i^{load}, q_i^{load}$). Η διαστασιολόγηση των Φ/Β μονάδων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η πιθανότητα παραβίασης να είναι 5%.

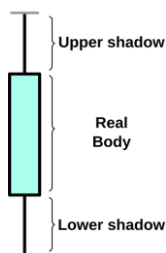
5 Ανάλυση συμπεριφοράς αλγορίθμου στα υπό εξέταση σενάρια

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε στα παραπάνω σενάρια. Για κάθε σενάριο είχαν παραχθεί συνθετικά δεδομένα με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα (2) με τη μέθοδο των gaussian copulas. Στη συνέχεια κάθε ομάδα δειγμάτων (P_L, Q_L, P_{PV}) , τα οποία είναι συσχετισμένα ως προς την ώρα και την εποχή που αντιπροσωπεύουν, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο προτεινόμενο αλγόριθμο. Η ομάδα δειγμάτων στην οποία αναφερόμαστε περιέχει μία τιμή για κάθε ένα από τα P_L, Q_L, P_{PV} . Ο αλγόριθμος έτρεξε σε επανάληψη για 38500 φορές στο ετήσιο σενάριο και 10000 φορές στο σενάριο για τις 14:00 η ώρα. Αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα των f_i για κάθε Φ/Β μονάδα και μοντέλο βελτιστοποίησης ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ των 2 μοντέλων αλλά και να επαληθευτεί η ορθότητα του αλγορίθμου. Επίσης αποθηκεύτηκαν οι τάσεις των ζυγών που προκύπτουν μετά από τον έλεγχο τήρησης των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου για κάθε προσομοίωση και σενάριο. Έπειτα τα ίδια δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των τάσεων των ζυγών χωρίς έλεγχο τήρησης των περιορισμών του δικτύου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα candlesticks των τάσεων των ζυγών χωρίς την ύπαρξη ελέγχου για κάθε σενάριο αλλά και με τη χρήση των δύο μοντέλων ώστε να ελεγχθεί η ορθότητα του αλγορίθμου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα και οι πίνακες σύγκρισης των f_i και για τα δύο μοντέλα βελτιστοποίησης. Τέλος, συγκρίνονται οι συνολικές απορριπτόμενες ενέργειες κάθε Φ/Β μονάδας κατά την διάρκεια των περικοπών τους.

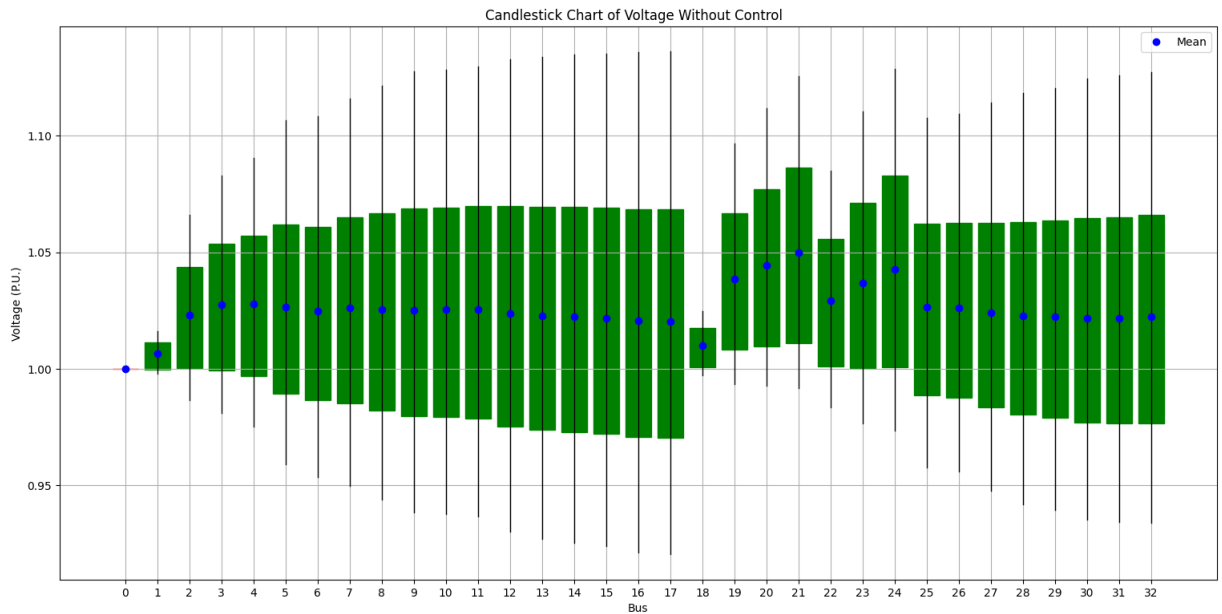
5.1 *Candlesticks Διαγράμματα Τάσεων*

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Candlesticks των τάσεων κάθε ζυγού για τα μοντέλα Βελτιστοποίησης (Μεγιστοποίησης και Fairness) καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα έλλειψης ελέγχου που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων ροής ισχύος χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν τα επιτρεπτά όρια των τάσεων των ζυγών. Τα δεδομένα που εισήχθησαν για την παραγωγή των διαγραμμάτων που αφορούν την απουσία ελέγχου δημιουργήθηκαν από την επίλυση των εξισώσεων ροών ισχύος DistFlow(4)-(8) μέσω της βιβλιοθήκης της Python Pandapower. Οι τιμές των εισόδων για τη επίλυση των ροών ισχύος είναι τα παραγόμενα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στο προτεινόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης.

Στα παρακάτω διαγράμματα candlestick η άνω σκιά(upper shadow) δείχνει τη μέγιστη τιμή της τάσης του ζυγού ενώ η κάτω σκιά(lower shadow) δείχνει την ελάχιστη τιμή της τάσης κάθε ζυγού. Το πραγματικό σώμα (real body) αναπαριστά την κατανομή των τάσεων κάθε ζυγού των προσομοιώσεων. Εν ολίγοις το άνω μέρος του real body αναπαριστά την τιμή $\mu_i + \sigma$ όπου σ η τυπική απόκλιση των τιμών των τάσεων του ζυγού i και μ_i η μέση τιμή τους. Το κάτω μέρος του real body προκύπτει από την τιμή $\mu_i - \sigma_i$.

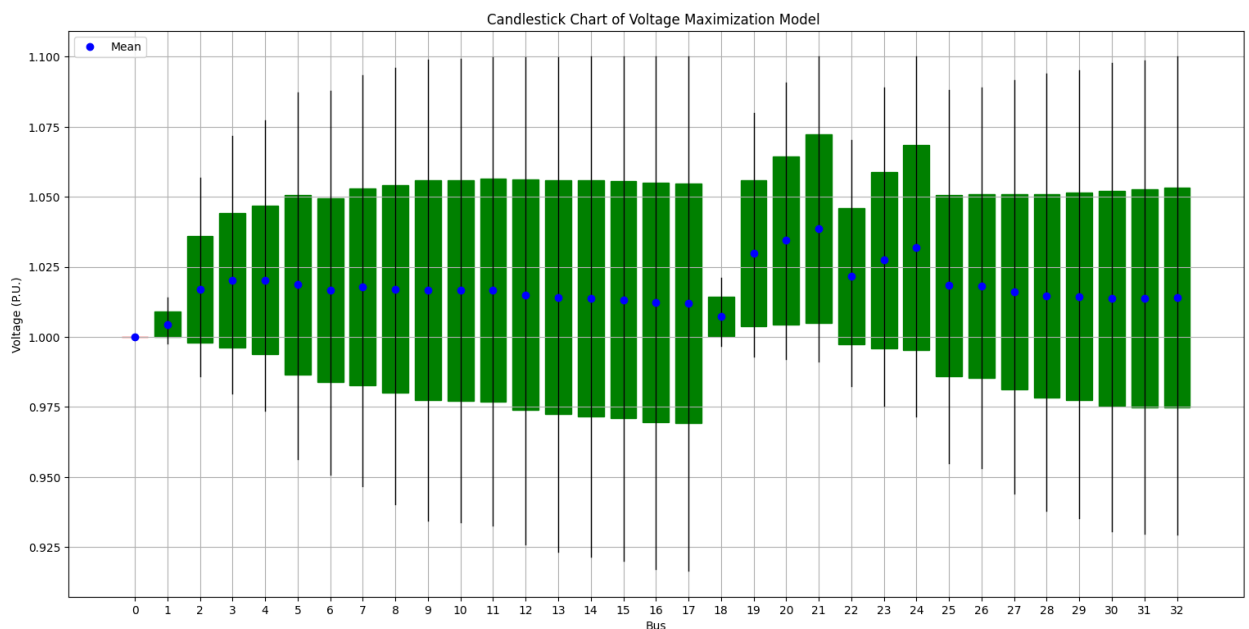


Εικόνα 5 Εξήγηση μερών στοιχείων των διαγραμμάτων candlestick



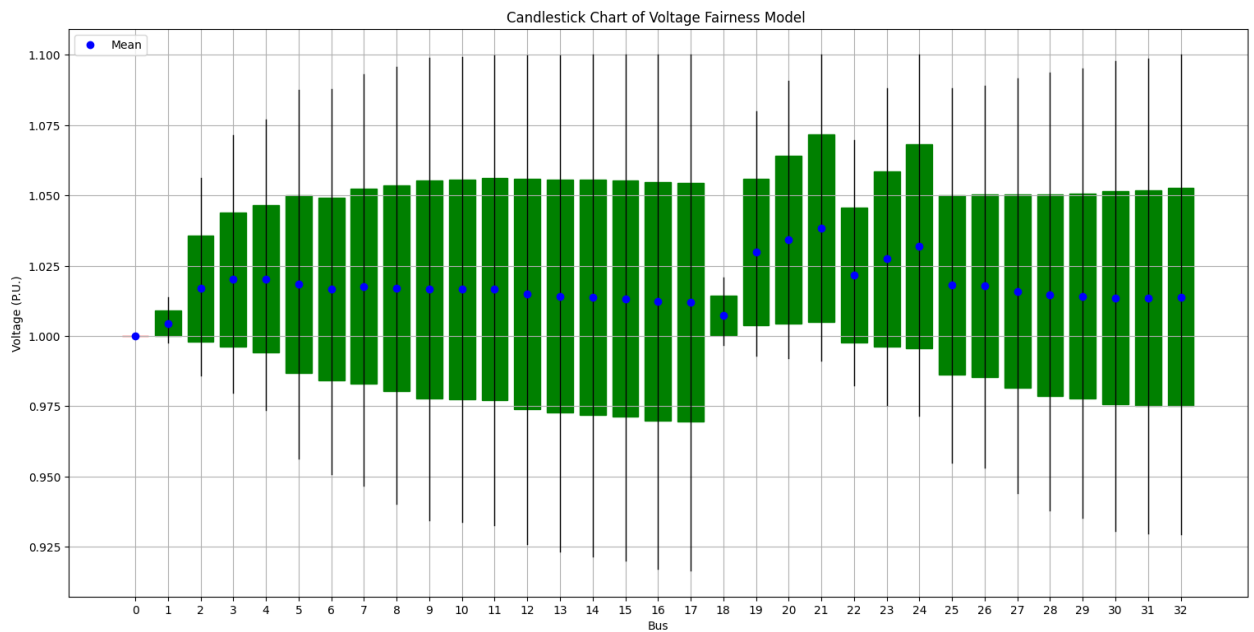
Εικόνα 6 Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών



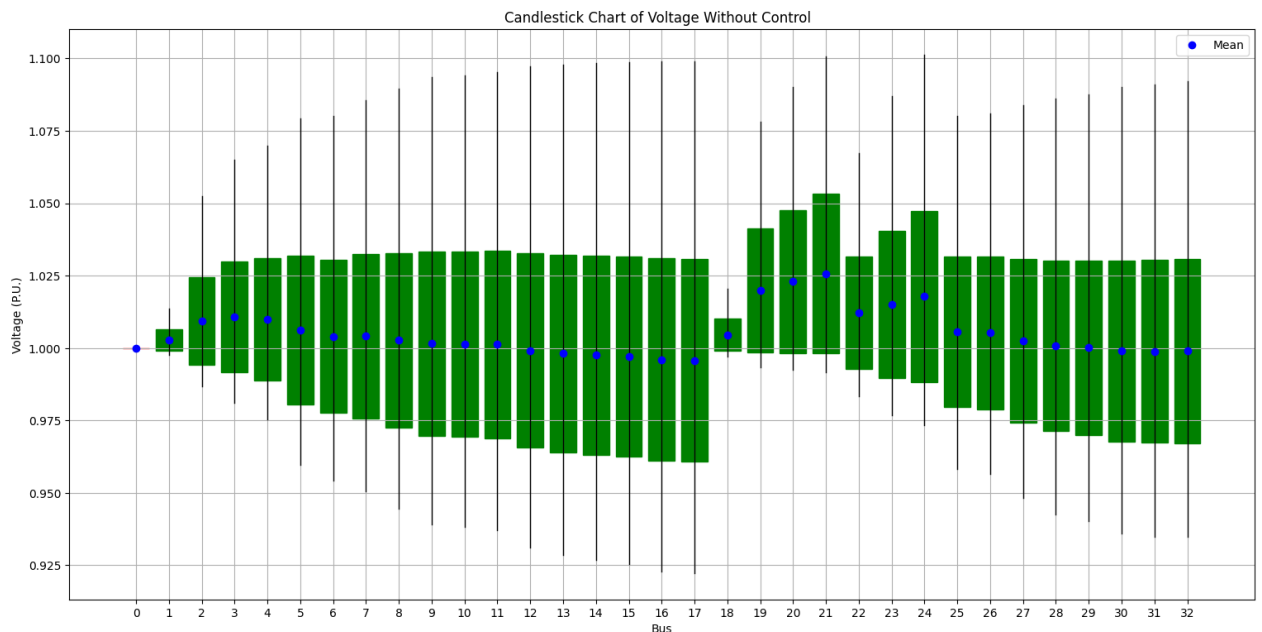
Εικόνα 7 Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



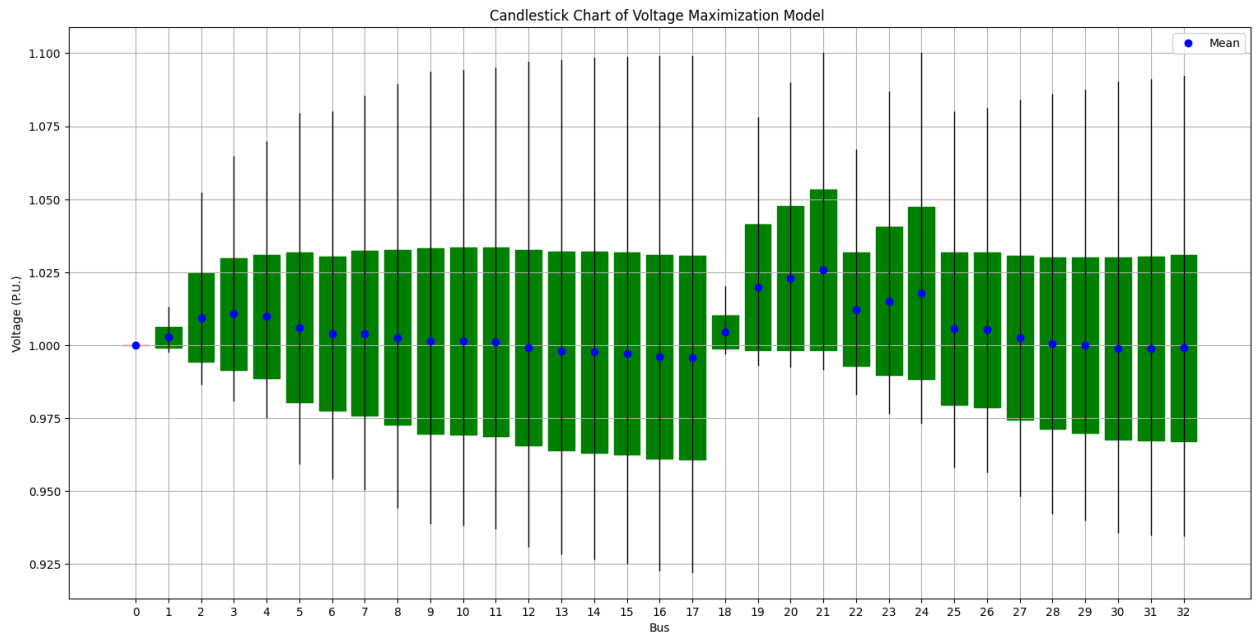
Εικόνα 8 Διάγραμμα Candlestick τάσεων έτους για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



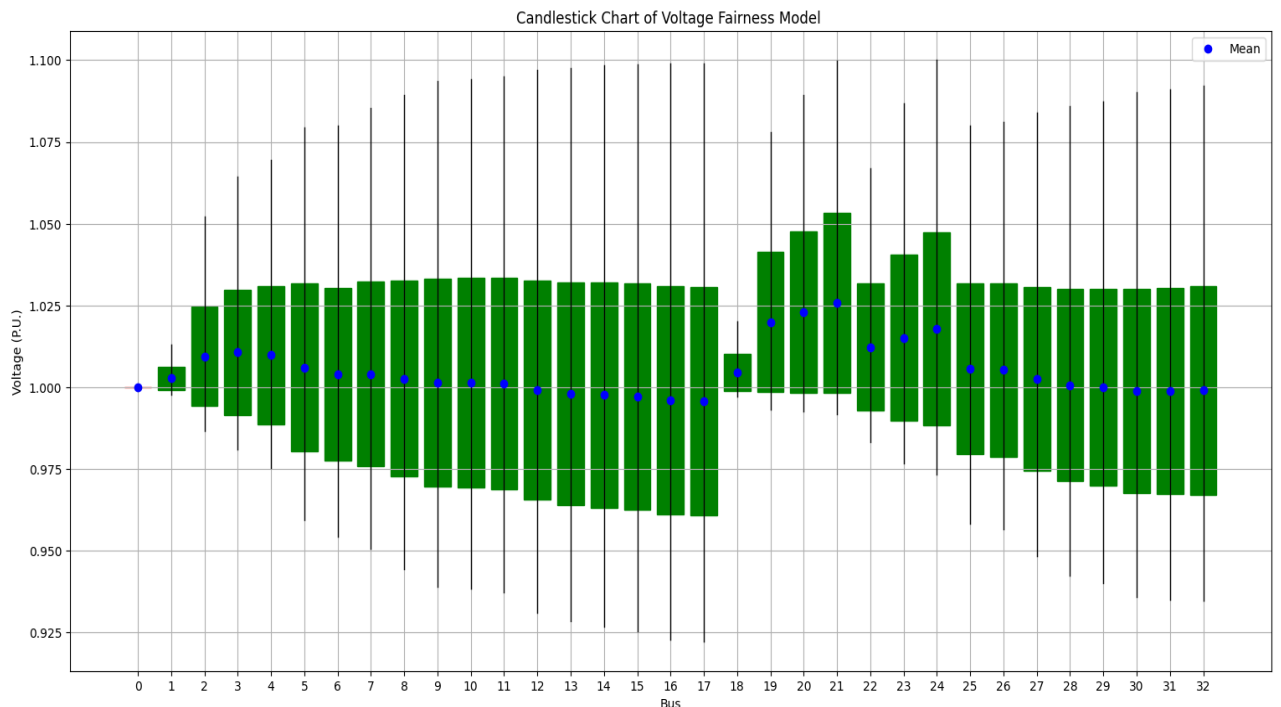
Εικόνα 9 Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών.



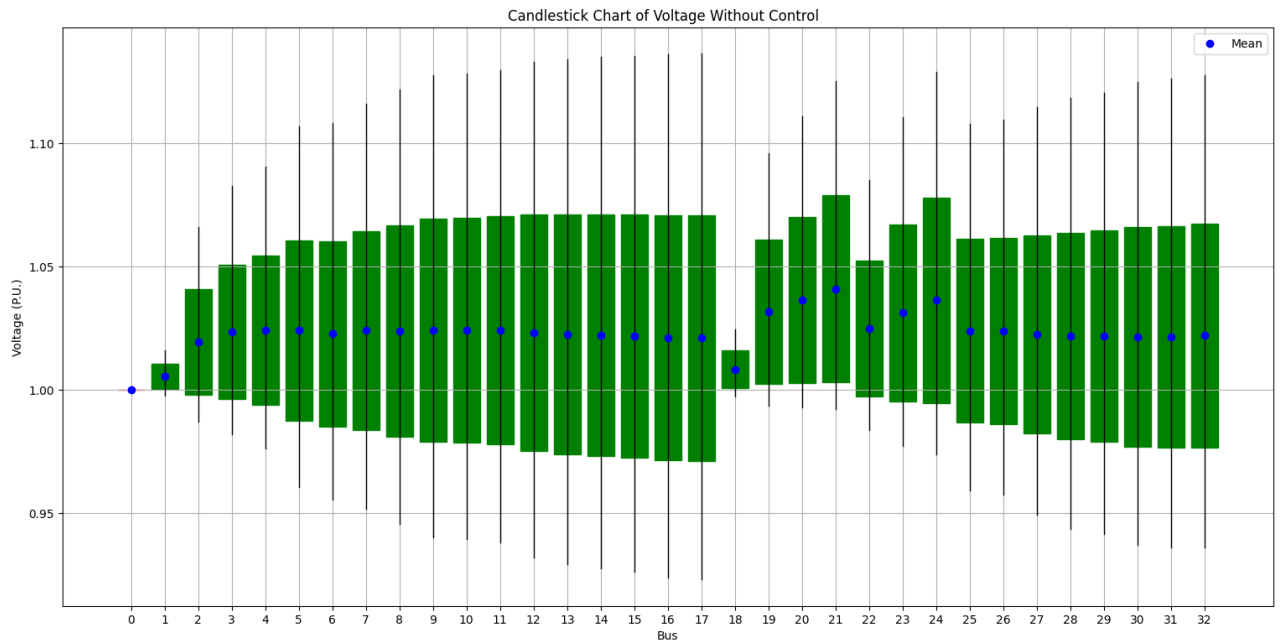
Εικόνα 10 Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τους χειμερινούς μήνες, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



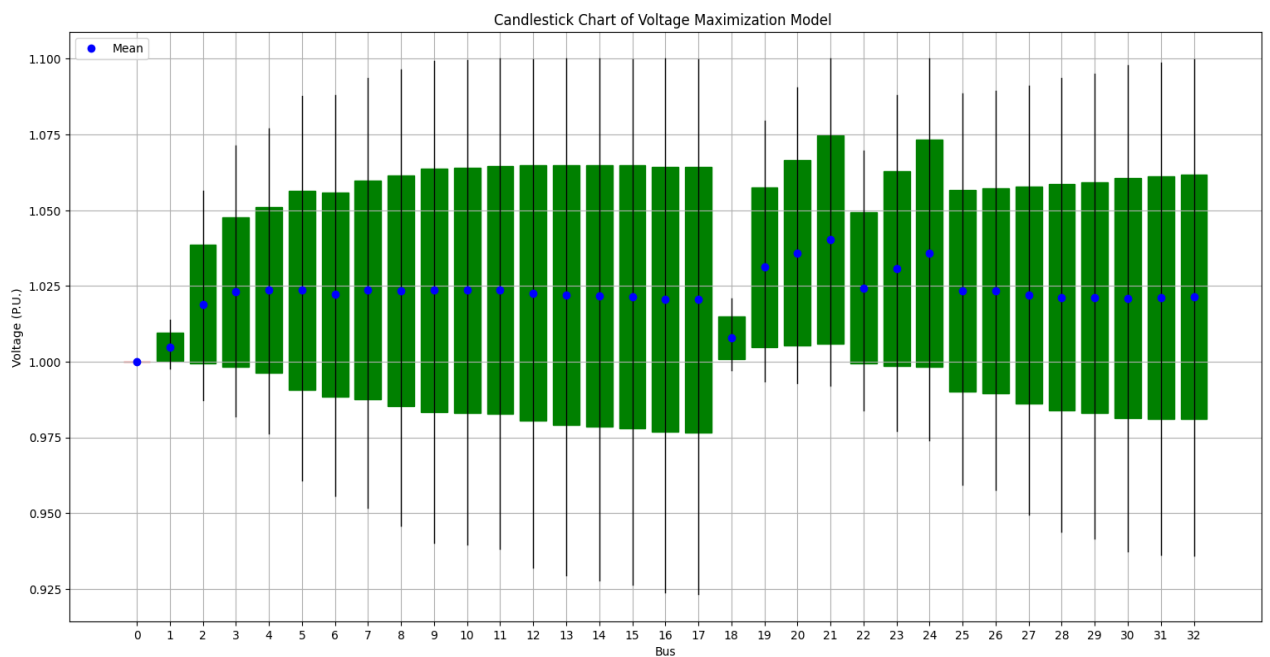
Εικόνα 11 Διάγραμμα Candlestick τάσεων χειμώνα για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τους χειμερινούς μήνες, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



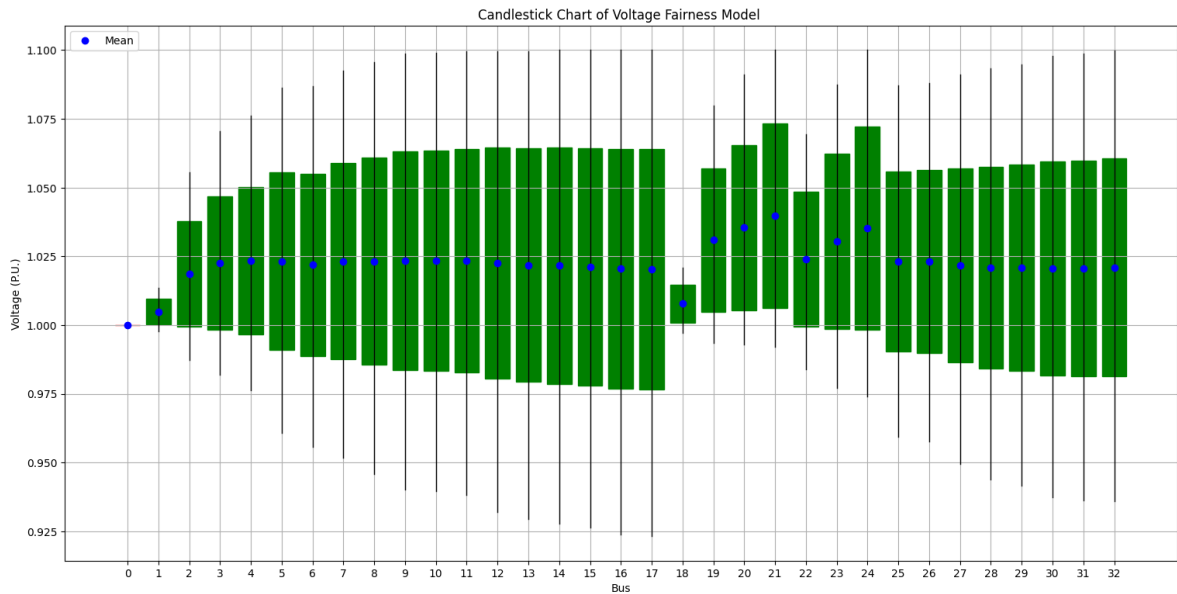
Εικόνα 12 Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια των μηνών της άνοιξης, χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών.



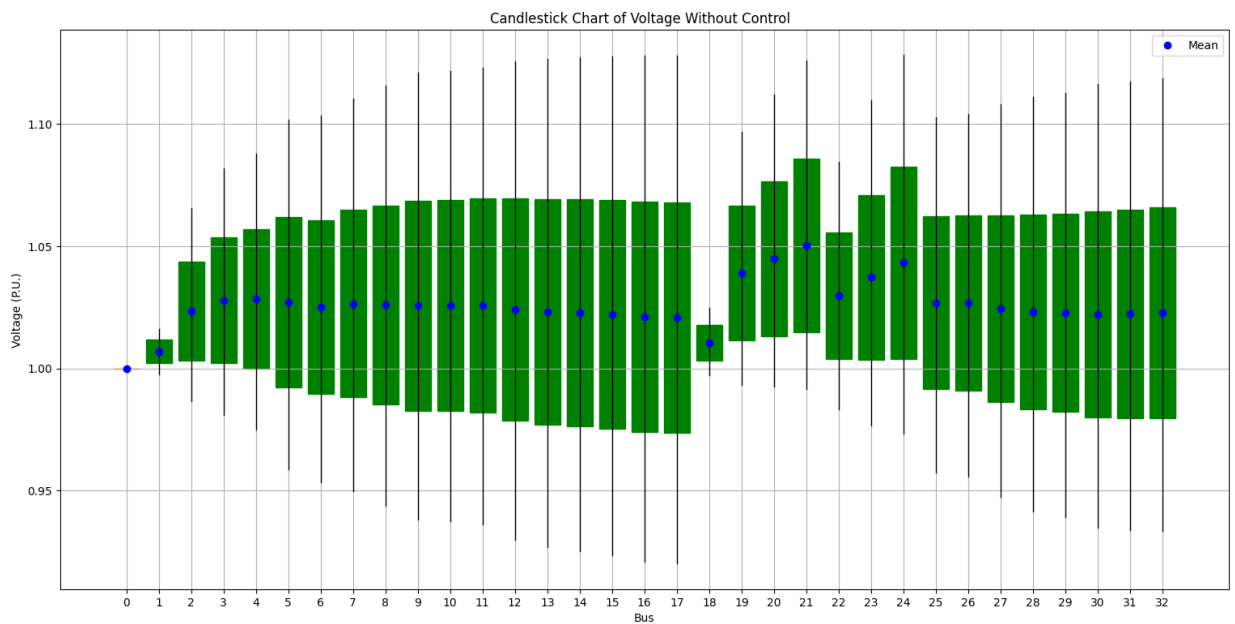
Εικόνα 13 Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τους μήνες της άνοιξης, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



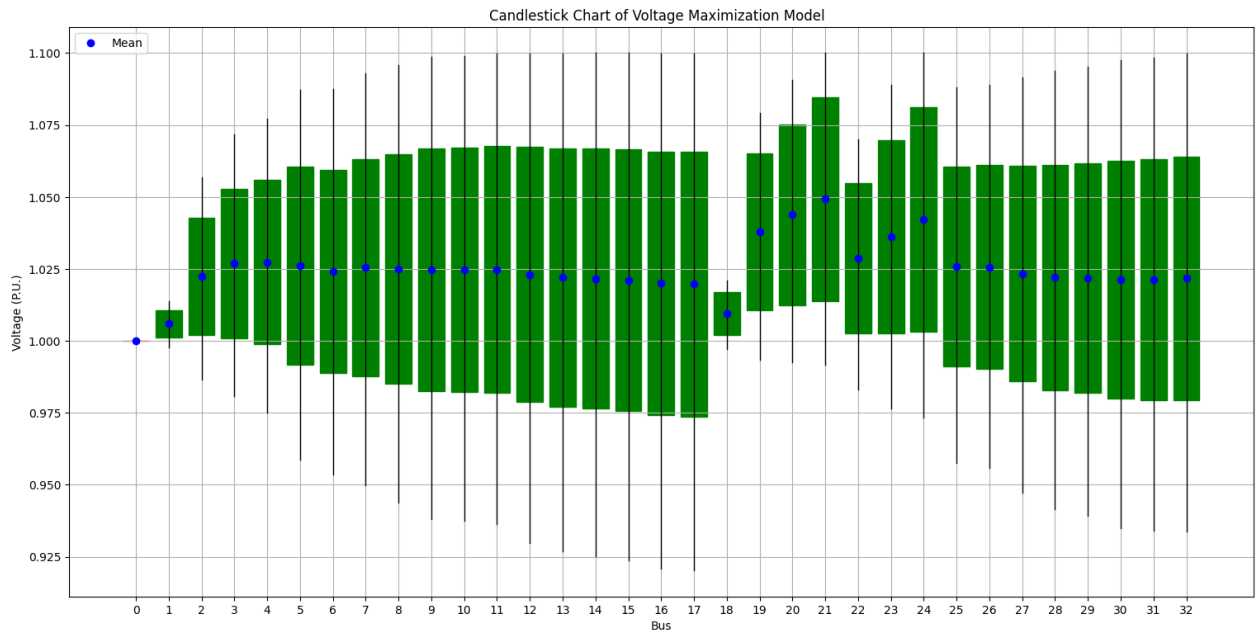
Εικόνα 14 Διάγραμμα Candlestick τάσεων άνοιξης για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τους μήνες της άνοιξης, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



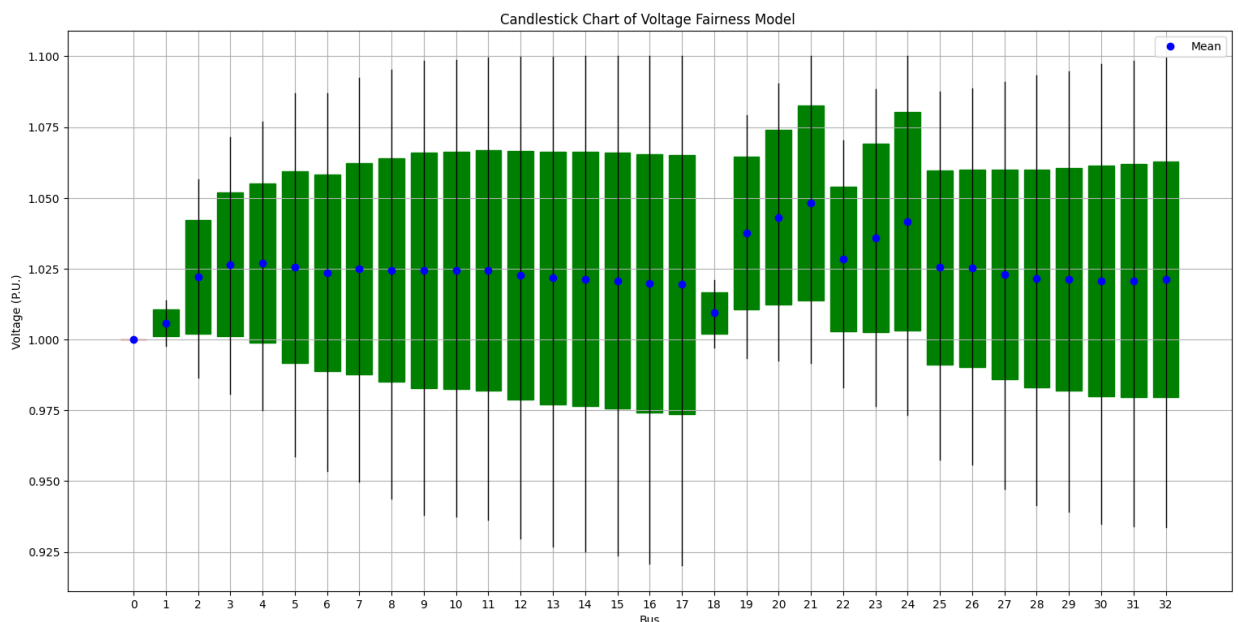
Εικόνα 15 Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών.



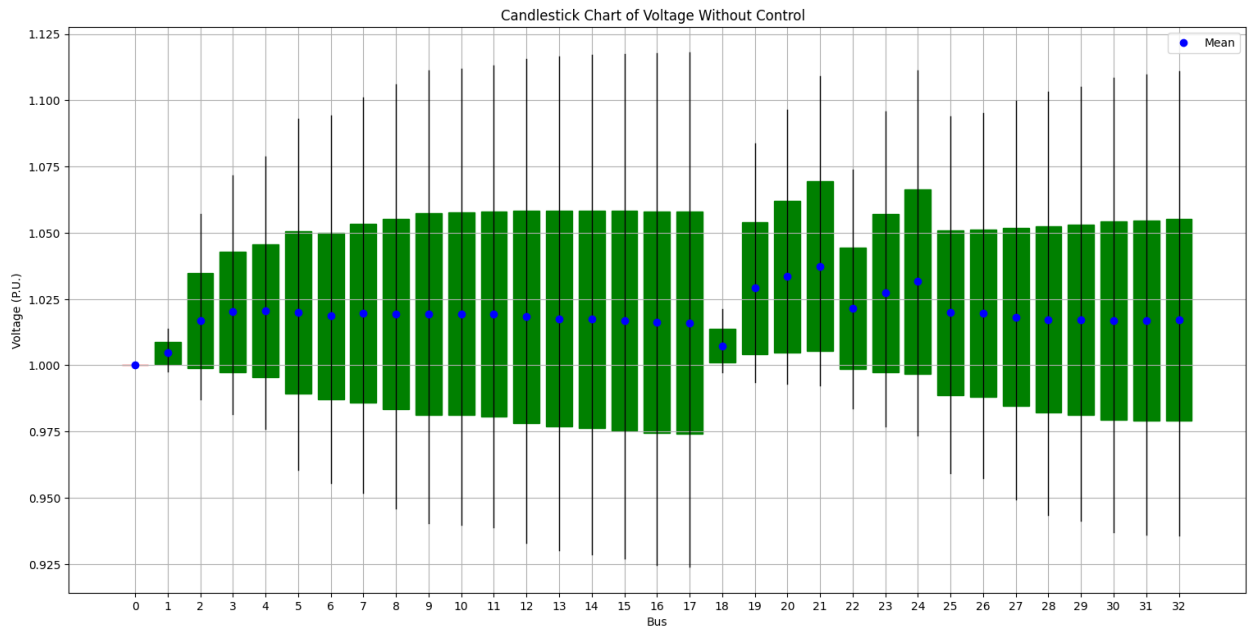
Εικόνα 16 Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



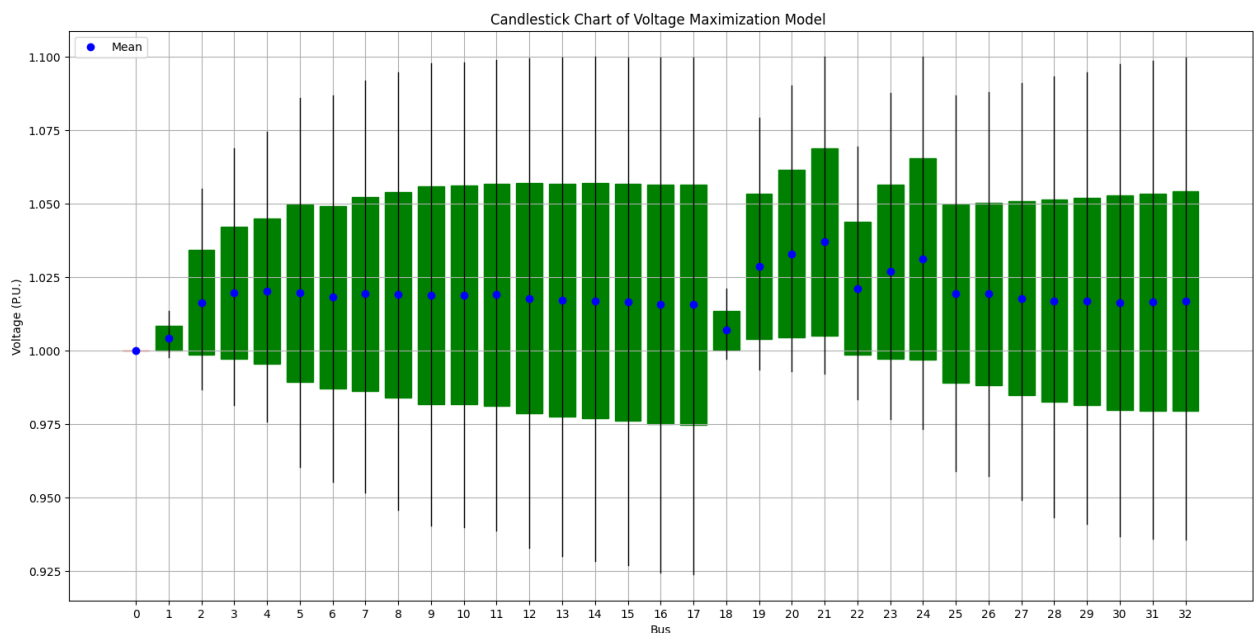
Εικόνα 17 Διάγραμμα Candlestick τάσεων καλοκαιριού για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



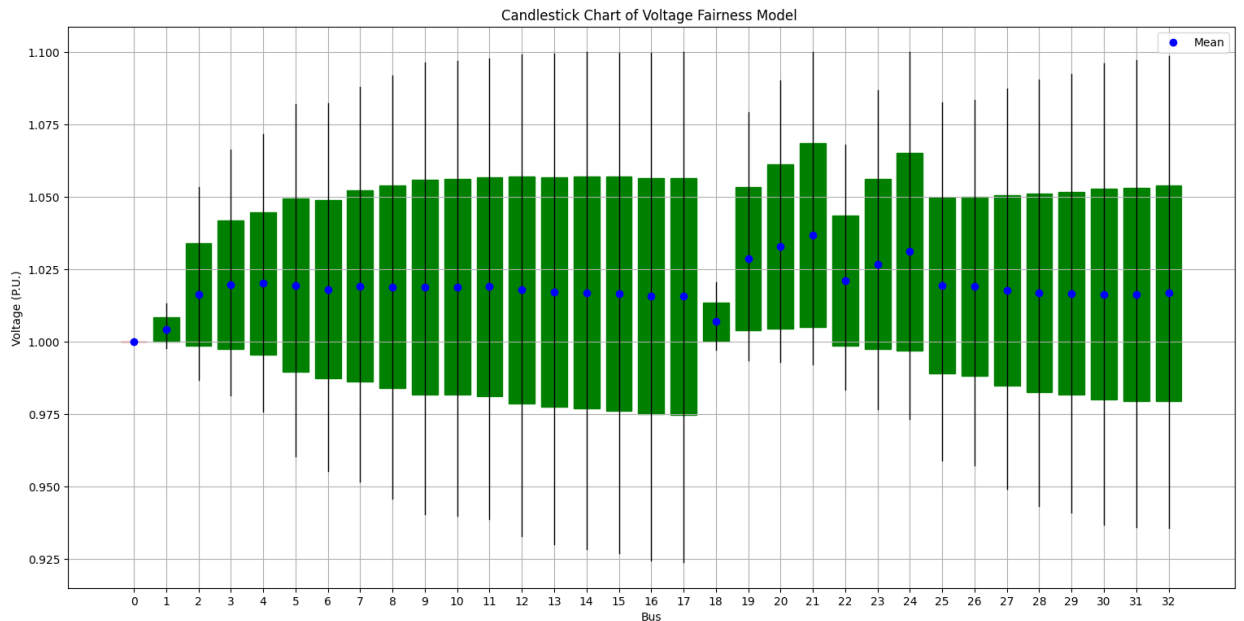
Εικόνα 18 Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών.



Εικόνα 19 Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



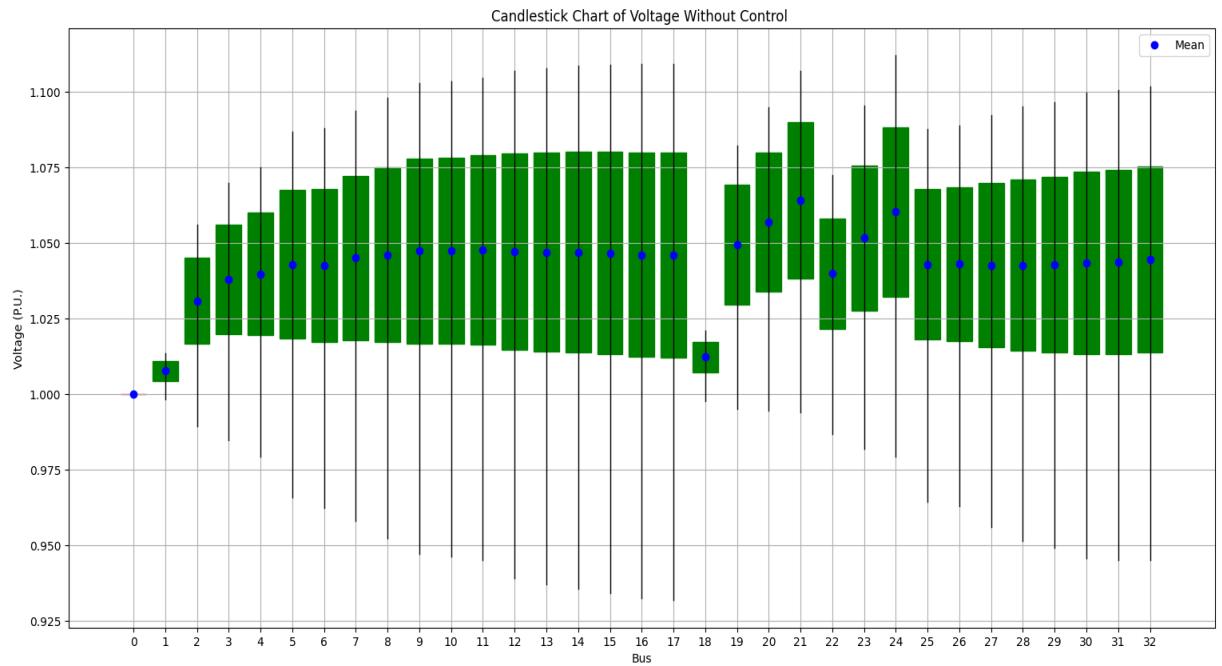
Εικόνα 20 18 Διάγραμμα Candlestick τάσεων φθινοπώρου για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το ετήσιο σενάριο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.

Παρατηρούνται από τα παραπάνω διαγράμματα candlesticks τα παρακάτω:

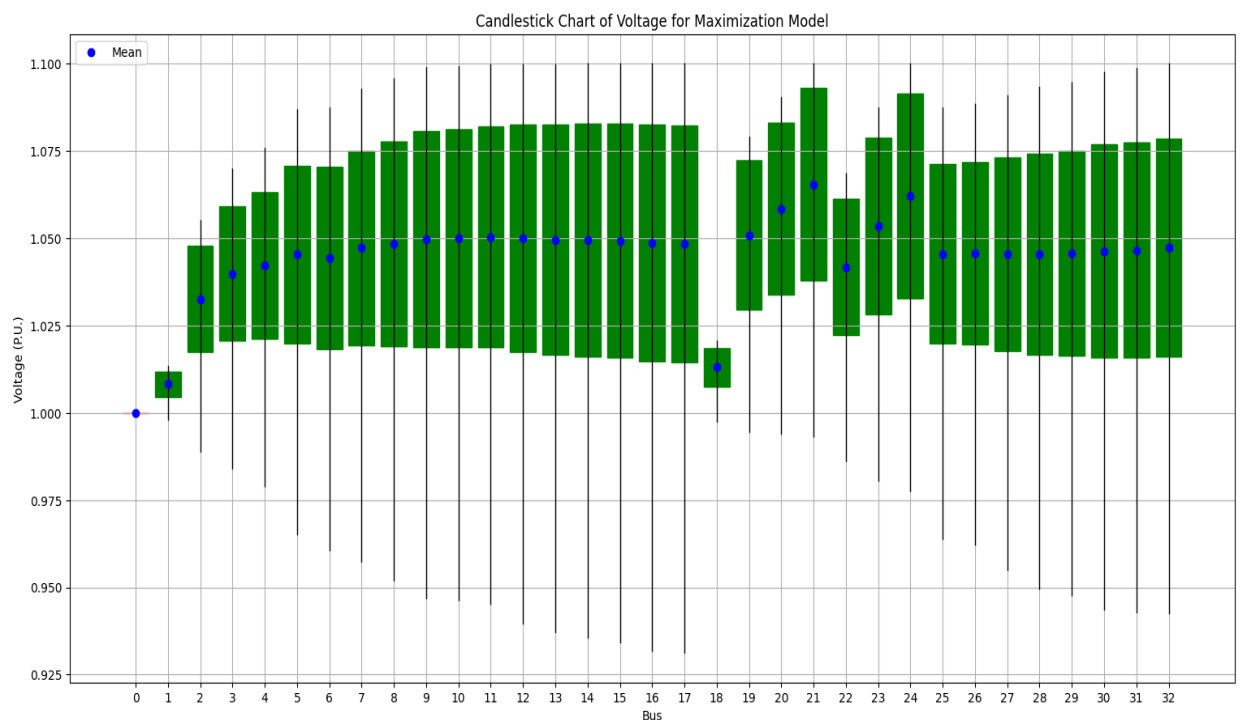
1. Οι περισσότερες παραβιάσεις τάσεων στους ζυγούς ($V_i > 1.1$ p.u.) χωρίς την ύπαρξη ελέγχου γίνονται κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών πράγμα το οποίο δικαιολογείται από την αυξημένη παραγωγή των Φ/Β μονάδων, λόγω αύξησης στους ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι σχετικά με στους υπόλοιπες εποχές.
2. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος φαίνεται ότι λειτουργεί ορθά αφού και στα δύο προτεινόμενα μοντέλα δεν υπάρχουν παραβιάσεις τάσεων στους ζυγούς άρα επιτυγχάνει το σωστό έλεγχο του δικτύου μέσω αποκοπών των Φ/Β μονάδων
3. Η κατανομή των τάσεων στους ζυγούς έχει παρόμοια μορφή σε όλα τα διαγράμματα το οποίο οφείλεται στην ευαισθησία του κάθε ζυγού στην έγχυση ισχύος.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα candlesticks τα οποία αφορούν τα σενάρια στις 14:00 η ώρα



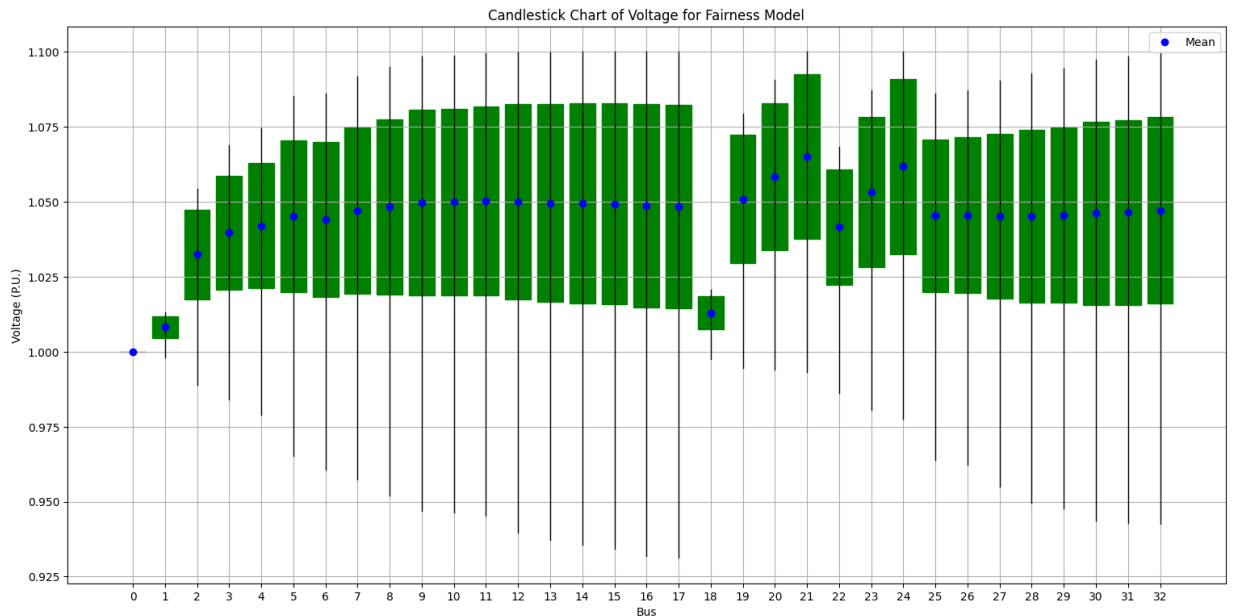
Εικόνα 21 Διάγραμμα candlestick (14:00) χωρίς έλεγχο

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το σενάριο στις 14:00 η ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους, χωρίς την ύπαρξη κάποιου ελέγχου. Παρατηρείται η ύπαρξη παραβιάσεων των ορίων τάσης των ζυγών.



Εικόνα 22 Διάγραμμα candlestick (14:00) για το μοντέλο μεγιστοποίησης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το σενάριο στις 14:00 η ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο μόνο το μοντέλο μεγιστοποίησης. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.



Εικόνα 23 Διάγραμμα candlestick (14:00) για το μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης

Το παραπάνω διάγραμμα αναφέρεται στις τάσεις των ζυγών του δικτύου κάθε προσομοίωσης για το σενάριο στις 14:00 η ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους, χρησιμοποιώντας ως έλεγχο τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι ο έλεγχος αποτρέπει την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών.

Για το χειρίστο σενάριο παρατηρείται πάλι ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί ορθά αφού εξαλείφει τις παραβιάσεις των τάσεων των ζυγών, όπως και στο ετήσιο σενάριο. Επίσης παρατηρείται ότι οι κατανομές έχουν θετική ασυμμετρία: ο μέσος όρος είναι συχνά χαμηλότερος από τη διάμεσο και την επικρατούσα τιμή, εξαιτίας των λίγων πολύ μικρών παρατηρήσεων. Έτσι, η κατανομή κεντροβαρεί προς τα πάνω.

5.2 Σύγκριση συχνότητων χρόνου(f_i) κατά τον οποίο οι Φ/Β μονάδες εγχέουν ενεργό ισχύ στο δίκτυο

Για την μελέτη του αλγορίθμου όσον αφορά την μείωση των διαφορών των f_i εξετάζονται οι διαφορετικές αποφάσεις των 2 μοντέλων ώστε να μελετηθεί αν η θυσία ενεργού ισχύος στο δίκτυο δικαιολογείται από τη μείωση των ανισοτήτων στον χρόνο έγχυσης ενεργού ισχύος της εκάστοτε Φ/Β μονάδας που επιφέρει το δεύτερο μοντέλο. Ακολουθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν πίνακες οι οποίοι περιέχουν τις συχνότητες f_i για κάθε ζυγό i και για τα δύο μοντέλα καθώς για διαγράμματα που απεικονίζουν τις τιμές των f_i τους ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση και συνεπώς η δημιουργία συμπερασμάτων. Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν τις προσομοιώσεις που έγιναν για το σενάριο ενός έτους και τις 14:00. Από την πραγματοποίηση των ετήσιων προσομοιώσεων εξήχθησαν τα αποτελέσματα που αφορούν τους μήνες.

Πίνακας 4 Σύγκριση ετήσιων συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα

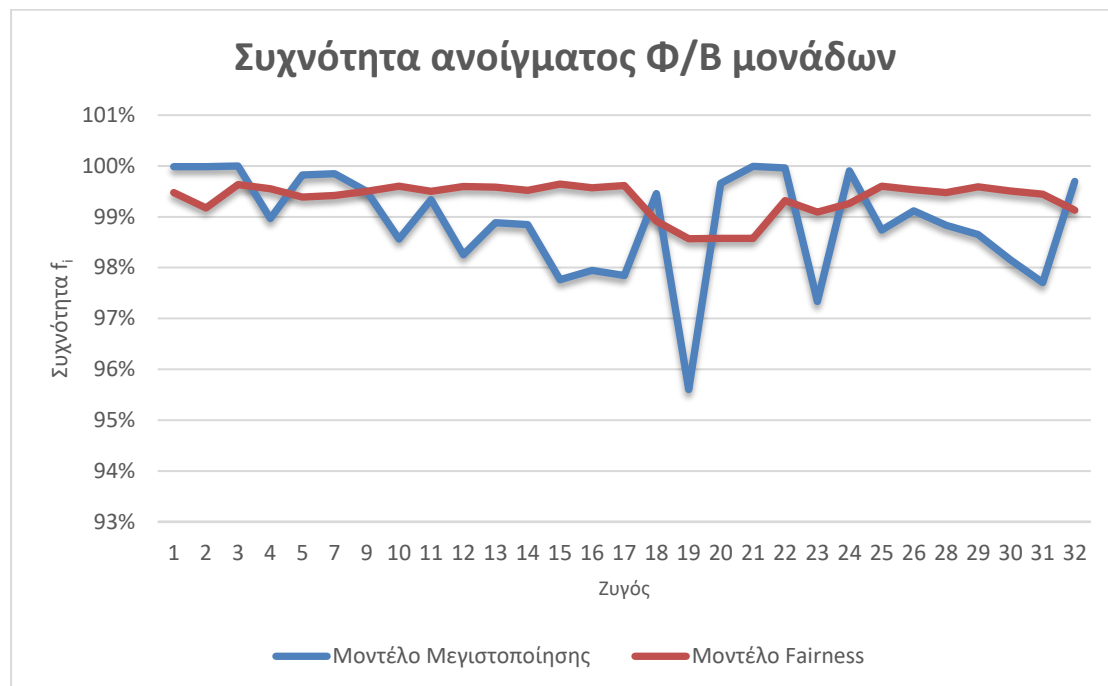
Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
Ζυγος	f_i (Maximization)	f_i (Fairness)
1	99,99%	99,48%
2	99,99%	99,18%
3	100%	99,64%
4	98,96%	99,55%
5	99,82%	99,39%
7	99,85%	99,42%
9	99,50%	99,50%
10	98,57%	99,60%
11	99,34%	99,50%
12	98,26%	99,60%
13	98,88%	99,58%
14	98,85%	99,52%
15	97,77%	99,64%
16	97,95%	99,57%
17	97,84%	99,62%
18	99,46%	98,92%
19	95,60%	98,57%
20	99,66%	98,57%
21	99,99%	98,57%
22	99,96%	99,32%
23	97,34%	99,09%
24	99,90%	99,26%
25	98,74%	99,61%
26	99,12%	99,54%
28	98,83%	99,48%
29	99,99%	99,59%
30	99,99%	99,51%
31	100%	99,45%
32	98,96%	99,13%

Πίνακας 5 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων σε βάθος έτους

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	95,60%	98,57%
Μέγιστη τιμή f_i	100%	99,64%
Διακύμανση f_i	0,003254	0,010352
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-68,57%	

Παρατηρείται πως οι περισσότερες περικοπές συμβαίνουν στη Φ/Β μονάδα η οποία είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 19, και από τα δύο μοντέλα. Στο μοντέλο μεγιστοποίησης παρατηρείται πως υπάρχουν δύο Φ/Β μονάδες με 0 περικοπές σε αντίθεση με το μοντέλο της δίκαιης μεταχείρισης όπου δεν υπάρχει Φ/Β μονάδα με 0 περικοπές. Επίσης διακρίνεται πως μετά την

εφαρμογή του μοντέλου δίκαιης μεταχείρισης μειώνεται ο συνολικός αριθμός περικοπών των Φ/Β μονάδων. Η διακύμανση των f_i μειώνεται σε σύγκριση με το μοντέλο μεγιστοποίησης, οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη κατανομή των περικοπών ανάμεσα στις Φ/Β μονάδες



Εικόνα 24 Διάγραμμα σύγκρισης ετήσιων συχνοτήτων

Παρατηρείται ομαλότερη κατανομή των συχνοτήτων στο μοντέλο δίκαιης μεταχείρισης όπου ήταν και το ζητούμενο. Επίσης διακρίνεται πως μετά την εφαρμογή του μοντέλου δίκαιης μεταχείρισης ο αριθμός των Φ/Β μονάδων.

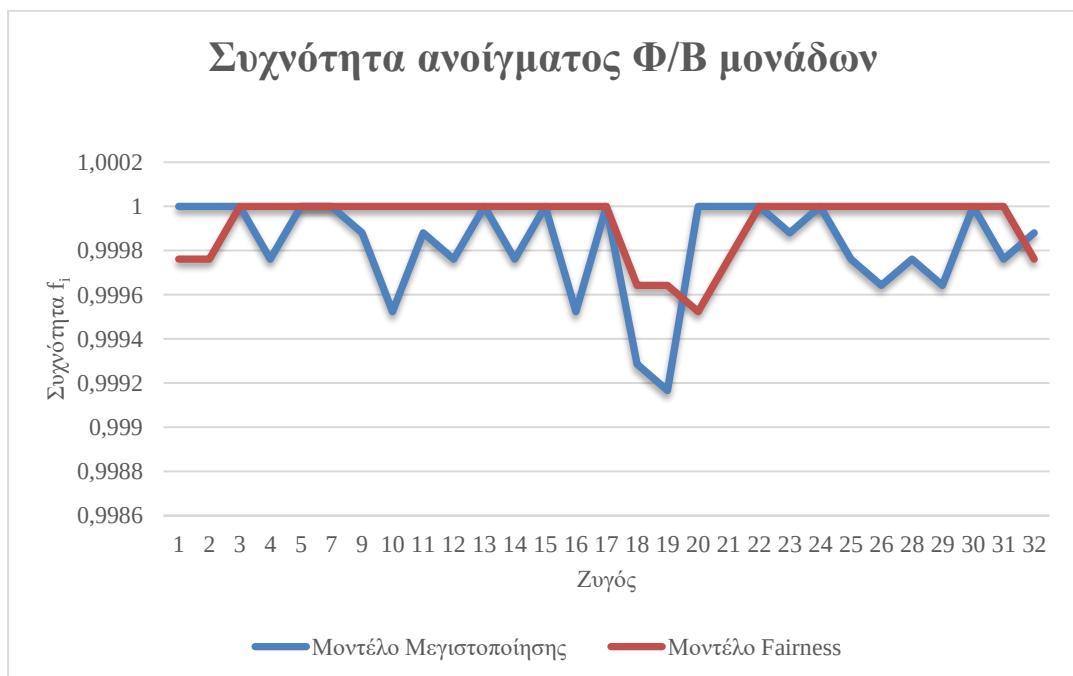
Πίνακας 6 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους χειμερινούς μήνες

Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
Ζυγός	$f_i(\text{Maximization})$	$f_i(\text{Fairness})$
1	100%	99,98%
2	100%	99,98%
3	100%	100%
4	99,98%	100%
5	100%	100%
7	100%	100%
9	99,99%	100%
10	99,95%	100%
11	99,99%	100%
12	99,98%	100%
13	100%	100%

14	99,98%	100%
15	100%	100%
16	99,95%	100%
17	100%	100%
18	99,93%	99,96%
19	99,92%	99,96%
20	100%	99,95%
21	100%	99,98%
22	100%	100%
23	99,99%	100%
24	100%	100%
25	99,98%	100%
26	99,96%	100%
28	99,98%	100%
29	99,96%	100%
30	100%	99,98%
31	100%	99,98%
32	100%	100%

Πίνακας 7 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το χειμώνα

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	99,92%	99,95%
Μέγιστη τιμή f_i	1	1
Διακύμανση f_i	8,59282E-05	6,28E-06
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-37,45%	



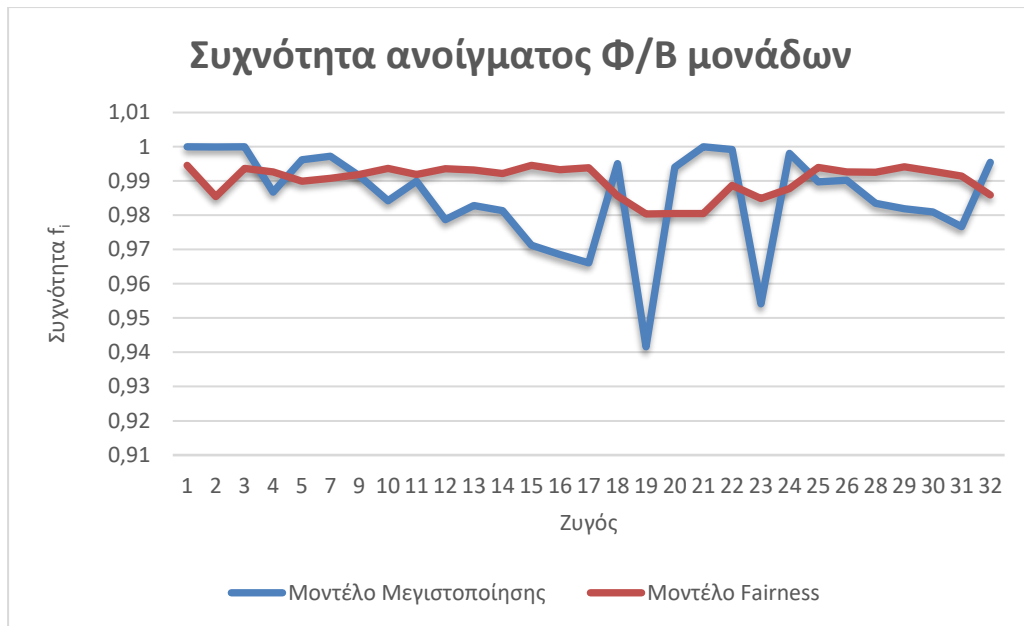
Εικόνα 25 Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων χειμώνα

Πίνακας 8 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες της άνοιξης

Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
Ζυγος	f_i (Maximization)	f_i (Fairness)
1	100%	99,46%
2	99,99%	98,54%
3	100%	99,37%
4	98,68%	99,27%
5	99,62%	98,99%
7	99,72%	99,08%
9	99,15%	99,19%
10	98,43%	99,37%
11	98,99%	99,19%
12	97,88%	99,36%
13	98,29%	99,32%
14	98,13%	99,22%
15	97,12%	99,46%
16	96,86%	99,33%
17	96,61%	99,39%
18	99,50%	98,56%
19	94,16%	98,04%
20	99,41%	98,05%
21	100%	98,05%
22	99,92%	98,88%
23	95,42%	98,49%
24	99,81%	98,78%
25	98,97%	99,40%
26	99,02%	99,27%
28	98,35%	99,26%
29	98,19%	99,42%
30	98,10%	99,29%
31	97,67%	99,14%
32	99,54%	98,59%

Πίνακας 9 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για την άνοιξη

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	99,92%	99,95%
Μέγιστη τιμή f_i	94,16%	98,04%
Διακύμανση f_i	0,014339	0,004465
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-68,86%	



Εικόνα 26 Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων άνοιξης

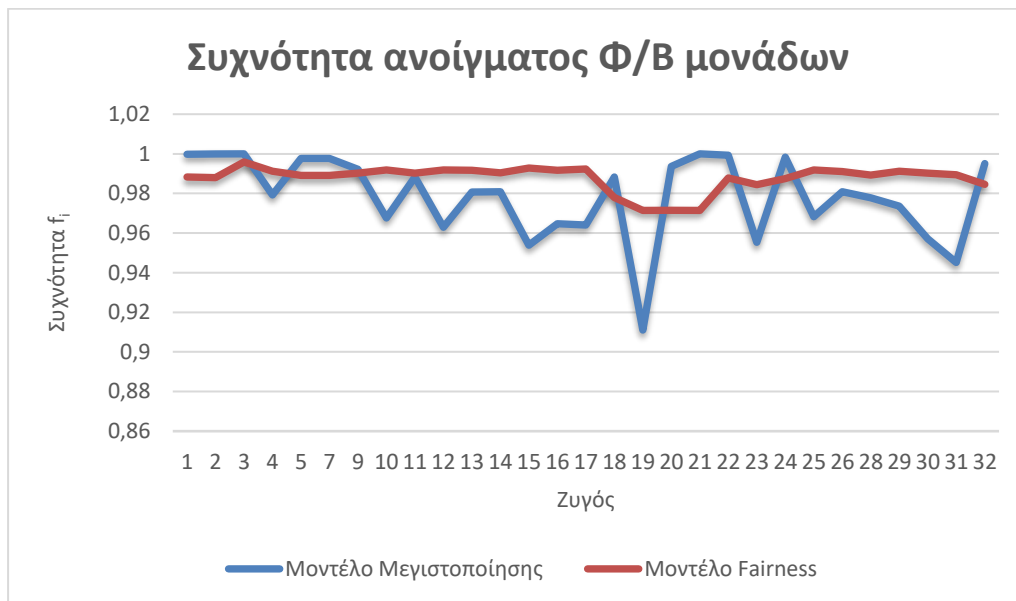
Πίνακας 10 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες του καλοκαιριού

Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
bus	$f_i(\text{Maximization})$	$f_i(\text{Fairness})$
1	99,98%	98,83%
2	99,99%	98,80%
3	100%	99,59%
4	97,93%	99,11%
5	99,76%	98,91%
7	99,77%	98,90%
9	99,22%	99,02%
10	96,76%	99,19%
11	98,84%	99,03%
12	96,30%	99,19%
13	98,08%	99,16%
14	98,10%	99,05%
15	95,38%	99,29%
16	96,48%	99,16%
17	96,40%	99,24%
18	98,83%	97,79%
19	91,10%	97,14%
20	99,37%	97,15%
21	100%	97,14%
22	99,93%	98,78%
23	95,53%	98,45%
24	99,84%	98,75%
25	96,82%	99,18%

26	98,10%	99,10%
28	97,78%	98,93%
29	97,35%	99,11%
30	95,70%	99,02%
31	94,52%	98,94%
32	99,51%	98,47%

Πίνακας 11 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το καλοκαίρι

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	91,10%	97,14%
Μέγιστη τιμή f_i	100%	99,59%
Διακύμανση f_i	0,021096	0,006484
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-69,26%	



Εικόνα 27 Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων καλοκαιριού

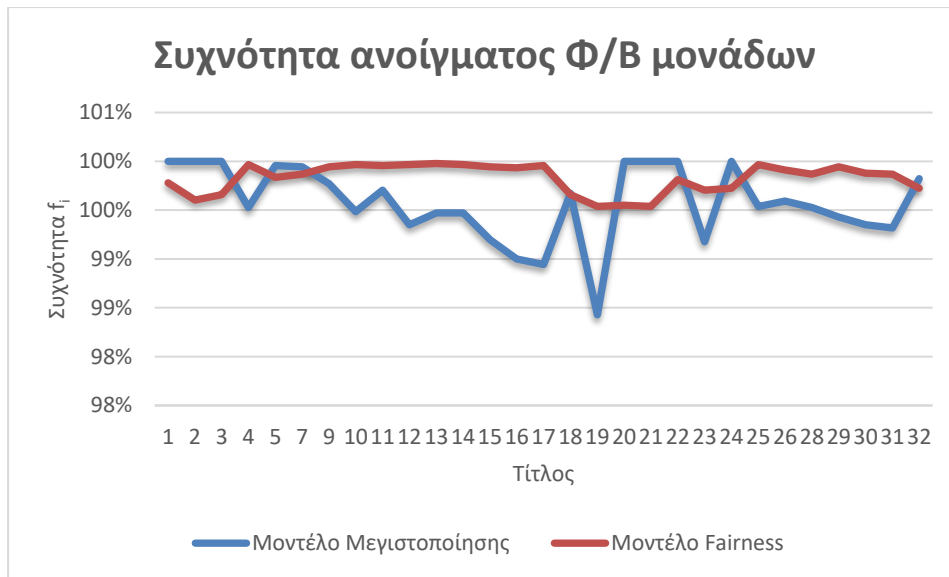
Πίνακας 12 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα κατά τους μήνες του φθινοπώρου

Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
bus	$f_i(\text{Maximization})$	$f_i(\text{Fairness})$
1	100%	99,78%
2	100%	99,60%

3	100%	99,66%
4	99,53%	99,97%
5	99,96%	99,84%
7	99,95%	99,87%
9	99,77%	99,95%
10	99,48%	99,97%
11	99,70%	99,96%
12	99,35%	99,97%
13	99,47%	99,98%
14	99,47%	99,97%
15	99,20%	99,95%
16	99,00%	99,93%
17	98,95%	99,96%
18	99,67%	99,66%
19	98,43%	99,54%
20	100%	99,55%
21	100%	99,54%
22	100%	99,81%
23	99,18%	99,70%
24	100%	99,73%
25	99,54%	99,97%
26	99,59%	99,91%
28	99,53%	99,87%
29	99,43%	99,95%
30	99,35%	99,88%
31	99,32%	99,87%
32	99,82%	99,73%

Πίνακας 13 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για το φθινόπωρο

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	98,43%	99,54%
Μέγιστη τιμή f_i	100%	99,98%
Διακύμανση f_i	0,00389	0,001476
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-62,05%	



Εικόνα 28 Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων φθινοπώρου

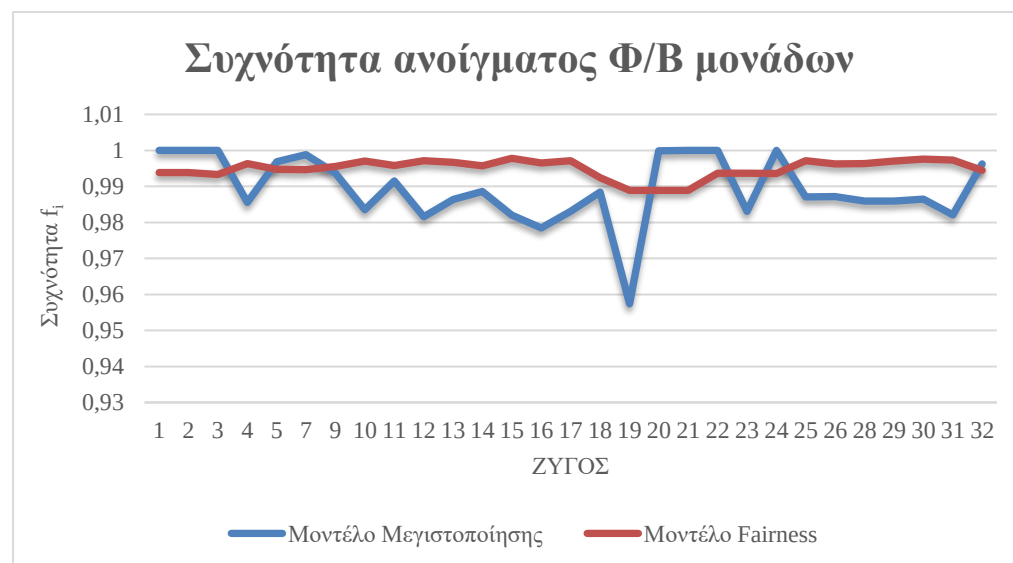
Πίνακας 14 Σύγκριση συχνοτήτων έγχυσης ενεργούς ισχύος από τις Φ/Β μονάδες για τα δημιουργημένα μοντέλα για τις 14:00

Ποσοστό χρόνου συνεισφοράς ενεργής Ισχύος στο δίκτυο ανά Φ/Β μονάδα		
bus	$f_i(\text{Maximization})$	$f_i(\text{Fairness})$
1	1	0,9938
2	1	0,9938
3	1	0,9933
4	0,9856	0,9963
5	0,9969	0,9947
7	0,9988	0,9946
9	0,9937	0,9955
10	0,9835	0,997
11	0,9915	0,9958
12	0,9816	0,9971
13	0,9864	0,9967
14	0,9886	0,9957
15	0,982	0,9978
16	0,9785	0,9965
17	0,9831	0,9971
18	0,9884	0,9924
19	0,9574	0,9889
20	0,9999	0,9889

21	1	0,9889
22	1	0,9937
23	0,9831	0,9937
24	1	0,9936
25	0,9871	0,9971
26	0,9872	0,9962
28	0,9859	0,9963
29	0,9859	0,997
30	0,9865	0,9976
31	0,9821	0,9973
32	0,9962	0,9945

Πίνακας 13 Μελέτη κατανομής της σύγκρισης των συχνοτήτων των 2 μοντέλων για τις 14:00

	Maximization Model	Fairness Model
Ελάχιστη τιμή f_i	0,9574	0,9889
Μέγιστη τιμή f_i	1	0,9978
Διακύμανση f_i	8,59282E-05	6,28E-06
Μεταβολή διακύμανσης f_i	-92,69%	



Εικόνα 29 Διάγραμμα σύγκρισης συχνοτήτων 14:00 η ώρα

Από τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην παρούσα ενότητα παρατηρούμε πως τη μεγαλύτερη μεταβολή της διακύμανσης των f_i μετά την εφαρμογή του μοντέλου δίκαιης μεταχείρισης την παρουσιάζουν οι περιπτώσεις με τις περισσότερες περικοπές. Επίσης από τα παραπάνω παρατηρείται πως τα καλύτερα αποτελέσματα αφορούν το σενάριο στις 14:00 κατά την οποία παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή των Φ/Β μονάδων.

5.3 Σύγκριση Εγγεόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας από τις Φ/Β μονάδες παραγωγής στο δίκτυο

Ακολουθούν πίνακες οι οποίοι συγκρίνουν την εγγεόμενη ενέργεια στο δίκτυο από τις Φ/Β μονάδες. Η σύγκριση αυτή θα μας επιτρέψει να αποφασίσουμε αν είναι αποδεκτή η μείωση της εγγεόμενης ισχύος προς επίτευξη μιας δικαιότερης μεταχείρισης των παραγωγών. Να διευκρινιστεί ότι η έγχυση ενέργειας στο δίκτυο για το έτος και τους μήνες αφορά όλες τις ώρες παραγωγής των Φ/Β μονάδων, ενώ για τη περίπτωση της 14:00 αφορά την ώρα μεταξύ 14:00 και 15:00 για κάθε μέρα του έτους.

Πίνακας 15 Σύγκριση Συνολικής Παραγόμενης ενέργειας των Φ/Β μονάδων των δύο μοντέλων

Χρονική περίοδος	$E_{el}(GWh)$ <i>Maximization Model</i>	$E_{el}(GWh)$ <i>Fairness Model</i>	Ποσοστιαία Μεταβολή Ηλεκτρικής Ενέργειας
Έτος	50,409	50,034	-0,743%
Χειμώνας	7,451	7,450	-0,017%
Άνοιξη	14,262	14,109	-1,074%
Καλοκαίρι	17,649	17,466	-1,038%
Φθινόπωρο	11,045	11,009	-0,332%
Ωρα 14:00	5,941	5,919	-0,378%

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται μεγαλύτερη ποσότητα έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις Φ/Β μονάδες στο δίκτυο διανομής κατά τους θερινούς μήνες και η μικρότερη κατά τους χειμερινούς μήνες το οποίο δικαιολογείται τόσο από την ηλιακή ακτινοβολία αφού σχετίζεται με τον καιρό και τις εποχές αλλά και από τον αριθμό των ωρών παραγωγής των Φ/Β μονάδων. Συγκεκριμένα 15 ώρες για τους καλοκαιρινούς μήνες και 12 ώρες για τους χειμερινούς. Η μεγαλύτερες μεταβολές της εγγεόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο παρουσιάζονται την άνοιξη και το καλοκαίρι όπου έχουμε τις περισσότερες παραβιάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι και για τα δύο μοντέλα βελτιστοποίησης η εγκατάσταση των Φ/Β μονάδων έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μέγιστη πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου 95% κάτι το οποίο δεν εφαρμόζεται τη δεδομένη στιγμή από το ΔΕΔΔΗΕ. Συνεπώς η συνολική εγγεόμενη ισχύς στο δίκτυο από τις Φ/Β μονάδες είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τρέχουσα κατάσταση. Επομένως, η εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου σε συνδυασμό με τη μέθοδο εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων οδηγούν σε μεγαλύτερη έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Δηλαδή παρά την ετήσια ποσοστιαία διαφορά (-0,743%) της ενέργειας έγχυσης στο δίκτυο που προκύπτει από την πλήρη εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου συγκριτικά με την εφαρμογή μόνο του μοντέλου μεγιστοποίησης η συνολική εγγεόμενη ενέργεια στο δίκτυο είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που εκχύνεται επί του παρόντος.

6 Συμπεράσματα

Στο τελευταίο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από την υλοποίηση των προσομοιώσεων και αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στη συνέχεια αναφέρονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία προτάθηκε μία μεθοδολογία σχετικά με τον τρόπο επιλογής Φ/Β μονάδων που θα περικλύπτονται σε περίπτωση που οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου το απαιτούν. Η επιλογή αυτή έχει ως στόχο τη δίκαιη μεταχείριση των Φ/Β μονάδων ενώ ταυτόχρονα προσπαθεί να συμμορφώνεται στις απαιτήσεις του διαχειριστή για μεγιστοποίηση της έγχυσης ενεργούς ισχύος στο δίκτυο. Έπειτα, η μεθοδολογία εξετάστηκε και αξιολογήθηκε βάσει προσομοιώσεων σε δύο βασικά σενάρια:

1. Σενάριο έτους, το οποίο αφορά την υλοποίηση της μεθοδολογίας για κάθε ώρα της ημέρας όπου υπάρχει παραγωγή των Φ/Β μονάδων σε διάστημα ενός έτους
2. Σενάριο μέγιστης παραγωγής, το οποίο αφορά την υλοποίηση της μεθοδολογίας για τις 14:00 η ώρα κάθε μέρας, όπου παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή των Φ/Β μονάδων, σε διάστημα ενός έτους

Αρχικά και για τα δύο σενάρια επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία του αλγορίθμου εξαλείφοντας τυχόν παραβιάσεις των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου μέσω του ελέγχου των Φ/Β μονάδων. Στη συνέχεια διερευνήθηκε το βασικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας το οποίο είναι δίκαιη μεταχείριση των Φ/Β μονάδων αποφεύγοντας τη συνεχή αποκοπή των ίδιων Φ/Β μονάδων. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος καταφέρνει τελικά να περιορίσει με επιτυχία τις περικοπές των Φ/Β μονάδων που αποκόπτονταν συχνότερα από τη μέθοδο μεγιστοποίησης της εγχεόμενης ισχύς στο δίκτυο, από τις Φ/Β μονάδες παραγωγής, με μικρή θυσία συνολικής ισχύος. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τα πλεονεκτήματα όσο και για τις αδυναμίες της προτεινόμενης μεθόδου.

Η μέθοδος λειτουργεί καλύτερα σε περιπτώσεις μέγιστης παραγωγής, καταφέροντας να κατανείμει πιο ομοιόμορφα τις περικοπές των Φ/Β μονάδων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εξετάστηκε σε συνθετικά δεδομένα τα οποία βασίστηκαν για τη δημιουργία τους σε πραγματικά δεδομένα. Τέλος, επιτρέπει την υλοποίηση προγραμματισμού βέλτιστης λειτουργίας του δικτύου (operational scheduling) αφού επιτρέπει τη λήψη απόφασης αξιοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου (real-time data) με μικρή καθυστέρηση.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθούν μερικές αδυναμίες του προτεινόμενου αλγορίθμου. Λόγω της εκθετικής φύσης της αντικειμενικής συνάρτησης όταν η κατανομή των περικοπών των Φ/Β μονάδων παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση και ο αριθμός των περικοπών είναι μεγάλος μέχρι τη στιγμή λήψης απόφασης τότε η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει μεγάλες τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρησιμοποιούμενος επιλύτης (solver) να δυσκολεύεται ή να αργεί να βρει εφικτή (feasible) λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επίσης, η γραμμικοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου δίκαιης μεταχείρισης και η ευριστική μέθοδος που ακολουθεί ο επιλύτης σε συνδυασμό με τη χρήση των εξισώσεων LinDistFlow ως περιορισμούς αυξάνουν το σφάλμα στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς όμως να επηρεάζουν την ορθότητα των αποφάσεων.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω αδυναμίες αλλά και δυνατότητες του αλγορίθμου προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου:

- Η βασική επέκταση η οποία προτείνεται σχετίζεται με την άμεση γενίκευση της διατύπωσης του προβλήματος, μετατρέποντας τις μεταβλητές απόφασης σε συνεχείς για τις περικοπές, οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν ποσοστό της απορριπτόμενης ενέργειας αντί για έλεγχο on-off. Συγκεκριμένα προτείνεται η συνδυασμένη χρήση μετατροπέων (inverters), ενός αλγορίθμου Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking) [23] και του προτεινόμενου αλγορίθμου. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν εφικτό τα f_i να αντιστοιχούν στο ποσοστό απορριπτόμενης ενέργειας και όχι στο ποσοστό χρόνου περικοπής, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα πιο ρεαλιστικό διατηρώντας το νόημα του και αλγόριθμος να έχει πιο αποδοτικά αποτελέσματα.
- Για την αντιμετώπιση ενδεχόμενης αδυναμίας του αλγορίθμου να βρει δυνατή (feasible) λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Μία λύση θα ήταν χρήση του αλγορίθμου για συγκεκριμένες περιόδους όπου μετά το πέρας τους θα μηδενίζονται οι τιμές των συχνοτήτων αποκοπής, μέχρι πριν τη στιγμή της απόφασης, έγχυσης της εκάστοτε Φ/Β μονάδας στο δίκτυο.
- Επιπροσθέτως θα ήταν θεμιτό να μελετηθεί περαιτέρω η ικανότητα και ταχύτητα λήψης απόφασης του αλγορίθμου για real time data και η εφαρμογή του σε πρακτικό επίπεδο.
- Τέλος προτείνεται η διερεύνηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας λαμβάνοντας υπόψιν τις απώλειες των γραμμών διανομής και ο συνδυασμός της με μεθόδους ελέγχου τάσης. Οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να χρησιμοποιούν On-Load Tap changer (OLTC) [24], συνδυασμό ρυθμιστών τάσης (Voltage Regulators) και inverters [25].

Βιβλιογραφία

- [1] A. Bell, B. Cook, K. Anchukaitis, B. Buckley και E. Cook, «Repurposing climate reconstructions for drought prediction in Southeast Asia: A letter.,» *Clim. Chang.*, τόμ. 106, p. 691–698, 2011.
- [2] J. Canadell, M. Kirschbaum, W. Kurz, M. Sanz, B. Schlamadinger και Y. Yamagata, «Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks.,» *Environ. Sci. Policy*, τόμ. 10, p. 370–384, 2007.
- [3] L. Canbing, S. Haiqing, C. Yijia, W. Jianhui, K. Yonghong, T. Yi και W. Jing, «Comprehensive review of renewable energy curtailment and avoidance: A specific example in China.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 41, pp. 1067–1079, 2015.
- [4] E. O'Shaughnessy, J. R. Cruce και K. Xu, «Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV.,» *Solar Energy*, τόμ. 208, pp. 1068–1077, 2020.

- [5] L. Bird, D. Lew, M. Milligan, E. M. Carlini, A. Estanqueiro, D. Flynn, E. Gomez-Lazaro, H. Holttinen, N. Menemenlis, A. Orth, P. B. Eriksen, J. C. Smith, L. Soder, P. Sorensen, A. Altiparmakis, Y. Yasuda και J. Miller, «Wind and solar energy curtailment: A review of international experience,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 65, pp. 577-586, 2016.
- [6] N. Tang, Y. Zhang, Y. Niu και X. Du, «Solar energy curtailment in China: Status quo, reasons and solutions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, τόμ. 97, pp. 509-528, 2018.
- [7] G. Y. και X. L., «Fast sensitivity analysis approach to assessing congestion induced wind curtailment,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 101 - 110, 2014.
- [8] L. Bird, J. Cochran και X. Wang, «Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States,» *NREL*, 2014.
- [9] M. P. Musau, T. L. Chepkania, A. N. Odero and C. W. Wekesa, "Effects of renewable energy on frequency stability: A proposed case study of the Kenyan grid," *PowerAfrica*, pp. 12-15, 2017.
- [10] S. Kahrobaee, V. Salehi και A. Ioan, «PV Curtailment Analysis to Improve Utilization of Hosting Capacity in California,» *46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 2060-2063, 2019.
- [11] E. T. Hale, B. L. Stoll και J. E. Novacheck, «Integrating solar into Florida's power system: Potential roles for flexibility,» *Solar Energy*, τόμ. 170, pp. 741-751, 2018.
- [12] R. Basmadjian και D. M. H. A., «Heuristics-Based Policy to Reduce the Curtailment of Solar-Power Generation Empowered by Energy-Storage Systems,» *Electronics*, τόμ. 7, αρ. 349, 2018.
- [13] M. Arbabzadeh, S. R. και J. Johnson, «The role of energy storage in deep decarbonization of electricity production,» *Nat Commun*, τόμ. 10, αρ. 3413, 2019.
- [14] R. Bolgarny, Z. Wang, A. Scheidler και M. Braun, «Active Power Curtailment in Power System Planning,» *Open Access Journal of Power and Energy*, τόμ. 8, pp. 399-408, 2021.
- [15] M. Pierro, R. Perez, M. Perez, D. Moser και C. Cornaro, «Imbalance mitigation strategy via flexible PV ancillary services: The Italian case study,» *Renewable Energy*, τόμ. 179, pp. 1694-1705, 2021.
- [16] P. Chaudhary and M. Rizwan, "Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vols. 82, Part 3, pp. 3279-3287, 2018.
- [17] B. Sambasivam and Y. Xu, "Reducing solar PV curtailment through demand-side management and economic dispatch in Karnataka, India," *Energy Policy*, vol. 172, 2023.
- [18] M. Andrychowicz, «Comparison of the Use of Energy Storages and Energy Curtailment as an Addition to the Allocation of Renewable Energy in the Distribution System in Order to Minimize Development Costs,» *Energies*, 2020.
- [19] M. Zeraati, M. E. H. Golshan και J. M. Guerrero, «A Consensus-Based Cooperative Control of PEV Battery and PV Active Power Curtailment for Voltage Regulation in Distribution Networks,» *Transactions on Smart Grid*, τόμ. 10, pp. 670-680, Jan 2019.
- [20] H. Schermeyer, C. Vergara και W. Fichtner, «Renewable energy curtailment: A case study on today's and tomorrow's congestion management,» *Energy Policy*, τόμ. 112, pp. 427-436, 2018.
- [21] M. E. Baran και F. F. Wu, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,» *Transactions on Power Delivery*, τόμ. 4, αρ. 2, pp. 1401-1407, April 1989.

- [22] M. G. KENDALL, «A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION,» *Biometrika*, τόμ. 30, αρ. 1-2, pp. 81-93, 1938.
- [23] R. A. Mastromauro, M. Liserre και A. Dell'Aquila, «Control Issues in Single-Stage Photovoltaic Systems: MPPT, Current and Voltage Control,» *Transactions on Industrial Informatics*, τόμ. 8, αρ. 2, pp. 241-254, May 2012.
- [24] J. Liu, Y. Li, C. Rehtanz, Y. Cao, X. Qiao, G. Lin, Y. Song και C. Sun, «An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, τόμ. 113, pp. 991-1001, 2019.
- [25] A. Bedawy, K. Mahmoud, Y. Sasaki, Y. Zoka, N. Yorino και M. Lehtonen, «A Cooperative Voltage Control Approach for Distribution Systems Based on Voltage Regulators and PV Inverters,» σε *22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Assiut, Egypt, 2021.