



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλα Α. Λοκόση

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

Επόπτευση: Ιάσοντας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός University of Louvain

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



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

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλα Α. Λοκόση

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

Επόπτευση: Ιάσωνας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός University of Louvain

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21 Οκτωβρίου 2024

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

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Νικόλα Α. Λοκόση

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

Copyright © Νικόλα Λοκόση, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπό πιθανοτικούς περιορισμούς. Η εργασία εξετάζει πως η αβεβαιότητα από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως η αιολική ενέργεια, επηρεάζει τα συστήματα ισχύος, απαιτώντας νέες μεθόδους βελτιστοποίησης. Εφαρμόζεται ένα στοχαστικό μοντέλο βασισμένο στη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με πιθανοτικούς περιορισμούς (CC – OPF), το οποίο διασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του δικτύου, ενώ πληρούνται τα όρια εμπιστοσύνης για την ικανοποίηση των περιορισμών.

Η διπλωματική εργασία εστιάζει στη συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, διεξάγοντας ανάλυση ευαισθησίας για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του συστήματος σε μεταβολές της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές. Χρησιμοποιώντας εργαλεία, όπως το GAMS για βελτιστοποίηση και τη γλώσσα Python για την επεξεργασία δεδομένων, η μελέτη εντοπίζει κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την ευστάθεια και την αποδοτικότητα του συστήματος. Επιπλέον, αξιολογεί τη συμβατότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε πραγματικά συστήματα, προσφέροντας χρήσιμα συμπεράσματα για τους διαχειριστές δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα ενόψει της διαρκώς αυξανόμενης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

βελτιστοποίηση ροής ισχύος, πιθανοτικοί περιορισμοί, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συστήματα αιολικής ενέργειας, ανάλυση ευαισθησίας, πιθανοτικά περιορισμένη βελτιστοποίηση ροής ισχύος (CC – OPF)

ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is the optimization of the power flow of power transmission systems under probabilistic constraints. The study examines how uncertainty from renewable energy sources, mainly wind energy, affects power systems, requiring new optimization methods. A stochastic model based on the Chance-Constrained Optimal Power Flow (CC – OPF) methodology is adopted, which ensures the safe operation of the grid while meeting confidence limits for constraint satisfaction.

The thesis focuses on the behavior of a power system, conducting sensitivity analysis to evaluate the system's resilience to variations in renewable energy production. Using tools, such as GAMS for optimization and the Python programming language for data processing, the study identifies critical parameters that influence the system's stability and efficiency. Additionally, it assesses the compatibility of the proposed methodology with real-world systems, offering valuable insights for power grid operators, particularly in light of the increasing integration of renewable energy sources.

KEY WORDS

power flow optimization, probabilistic constraints, renewable energy, wind power systems, sensitivity analysis, Chance-Constrained OPF (CC – OPF)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς και σύντροφό μου Χριστιάνα για την πολύτιμη στήριξη που μου προσφέρει σε κάθε στιγμή της σχέσης μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

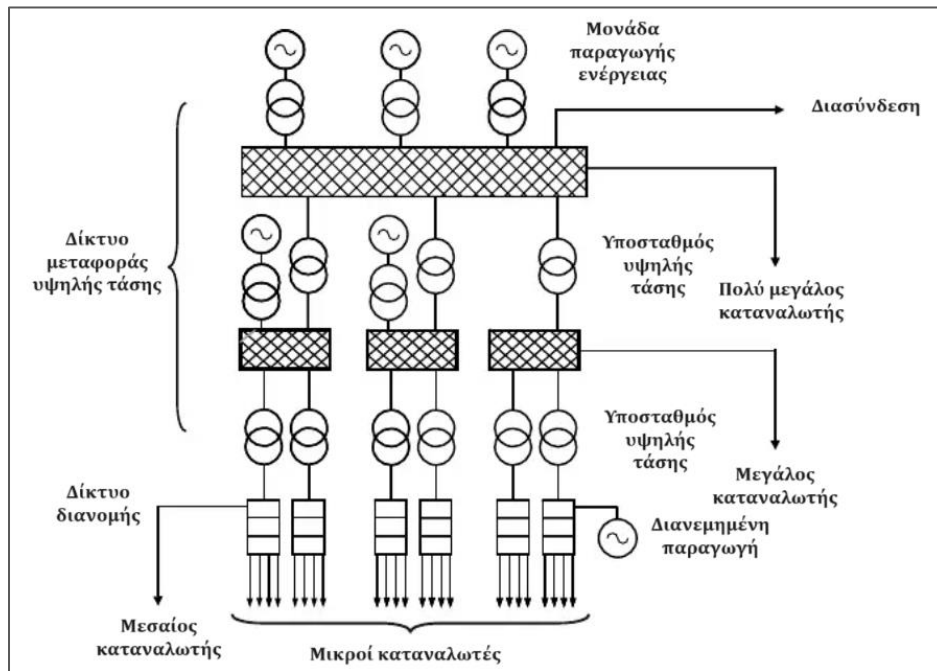
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2 Αβεβαιότητα στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	5
1.3 Σκοπός και στόχοι διπλωματικής εργασίας	5
1.4 Δομή της Εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος	8
2.3 Μέθοδοι βελτιστοποίησης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με πιθανοτικούς περιορισμούς	9
2.4 Στατιστική ανάλυση του προβλήματος στα πλαίσια της αβεβαιότητας	11
2.4.1 Από κοινού πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	15
3.1 Εισαγωγή	15
3.2 Σχεδίαση μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης ροής ισχύος για τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	15
3.2.1 Αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί προβλήματος	18
3.2.2 Γραμμικοποίηση ροών ισχύος και σχετικών περιορισμών	19
3.3 Αλγόριθμος της προτεινόμενης διατύπωσης του προβλήματος βελτιστοποίησης με από κοινού πιθανότητες	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ	41
4.1 Εισαγωγή	41
4.1.1 Εργαλεία και εντολές του GAMS	41
4.1.2 Σύνταξη κώδικα στο λογισμικό GAMS και προσομοίωση του προβλήματος βελτιστοποίησης ροής ισχύος	44
4.2 Επεξεργασία και διαμόρφωση δεδομένων στο λογισμικό Anaconda-Spyder	48
4.2.1 Η γλώσσα προγραμματισμού Python και οι βιβλιοθήκες της	49
4.2.2 Υπολογισμός τιμής παραβίασης και βαθμού εμπιστοσύνης	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
5.1	Εισαγωγή	53
5.2	Εφαρμογή στο δίκτυο 10 ζυγών	53
5.2.1	Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ροής ισχύος και προσομοίωση σεναρίων	54
5.2.2	Στατιστική ανάλυση συμπεριφοράς του συστήματος	55
5.2.3	Εξαγωγή αποτελεσμάτων σύμφωνα με την προτεινόμενη διατύπωση	57
5.3	Ανάλυση ευαισθησίας και απόδοσης του συστήματος	60
5.3.1	Εξέταση μη επιθυμητών καταστάσεων	60
5.3.2	Ανάλυση ευαισθησίας συστήματος ως προς τον βαθμό εμπιστοσύνης και απόδοση αλγορίθμου	63
5.4	Συμβατότητα διατύπωσης στην ανάλυση πραγματικών ΣΗΕ	66
5.4.1	Προοπτική ενσωμάτωσης της μεθοδολογίας στον υπάρχοντα αλγόριθμο του διαχειριστή συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	67
6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων	67
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής [1] όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1:

- Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται η ηλεκτρική ισχύς.
- Το σύστημα μεταφοράς είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές καταναλώσεως.
- Τα δίκτυα διανομής είναι υπεύθυνα για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στις μικρότερες περιοχές φορτίου, η οποία παρέχεται στους καταναλωτές μέσω χαμηλής τάσεως.



Σχήμα 1.1 : Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [1]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη και έρευνα πάνω στα συστήματα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου θα γίνει αναφορά μόνο σε αυτά. Τα συστήματα μεταφοράς ενέργειας περιλαμβάνουν τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσεως, τους υποσταθμούς ζεξέως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής[1].

Το δίκτυο μεταφοράς συνδέει τα μεγάλα και γεωγραφικά διάσπαρτα κέντρα παραγωγής με τα αντίστοιχα κέντρα κατανάλωσης, τα οποία βρίσκονται κοντά σε πόλεις και βιομηχανικές περιοχές, διατηρώντας το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλήρως διασυνδεδεμένο και σε συγχρονισμένη λειτουργία. Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, απαιτεί την λειτουργία του σε υψηλές τάσεις ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ένταση του ρεύματος που κυκλοφορεί και, ως εκ τούτου, οι απώλειες γραμμής. Η διασύνδεση όλων των σημαντικών κέντρων παραγωγής και κατανάλωσης δημιουργούν σε γενικά πλαίσια ένα πολύ πυκνό δίκτυο διασφαλίζοντας παράλληλα ένα μεγάλο επίπεδο αξιοπιστίας, με εναλλακτικές διαδρομές για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής ισχύος σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας σε κάποιες από τις υφιστάμενες γραμμές. Οι διαδρομές όπου μεταφέρεται η ηλεκτρική ισχύς, διασυνδέονται μέσω των ηλεκτρικών υποσταθμών από όπου και αναχωρούν οι γραμμές για τα δίκτυα μικρότερης κλίμακας, τα οποία καταλήγουν να τροφοδοτούν τα τοπικά δίκτυα διανομής. Ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο αποτελείται από τους ζυγούς ή κόμβους καθώς και τις αιχμές που ενώνουν αυτούς τους ζυγούς. Οι ζυγοί αναπαριστούν τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσεως ενώ αντίστοιχα οι αιχμές τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεως.

Ιδανικά το σύστημα θα ισοδυναμούσε με έναν ζυγό όπου θα συνδεόταν όλη η παραγωγή και όλη η κατανάλωση του συστήματος. Κάθε ζυγός στο δίκτυο υποστηρίζεται από όλους τους υπόλοιπους μέσω της δυναμικής εξισορρόπησης μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, ώστε να αποτραπούν οι συνέπειες κάποιου πιθανού σφάλματος. Οι εναλλακτικές διαδρομές που σχηματίζουν το δίκτυο αλληλεξαρτούνται σε υψηλό βαθμό, με τέτοιο τρόπο ώστε μια μεταβολή στην λειτουργία του συστήματος μεταφοράς να επιφέρει μια ακαριαία αλλαγή στην ροή ισχύος, η οποία με την σειρά της μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο σε άλλα σημεία του δικτύου. Τα διάφορα σφάλματα που θέτουν σε κίνδυνο την κανονική λειτουργία του συστήματος όπως βραχυκυκλώματα, έκθεση σε καιρικά φαινόμενα, σφάλματα στον σχεδιασμό παραγωγής και αστοχίες εξοπλισμού, αντιμετωπίζονται μέσω των διάφορων ειδικών υποσυστημάτων που παίρνουν μετρήσεις, ελέγχουν και προστατεύουν το δίκτυο. Υπεύθυνος για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου, καθώς και για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την προσθήκη νέων υποδομών ή την αναβάθμιση των υπάρχοντων είναι ο εκάστοτε ανεξάρτητος φορέας διαχείρισης του δικτύου (Transmission System Operator – TSO).

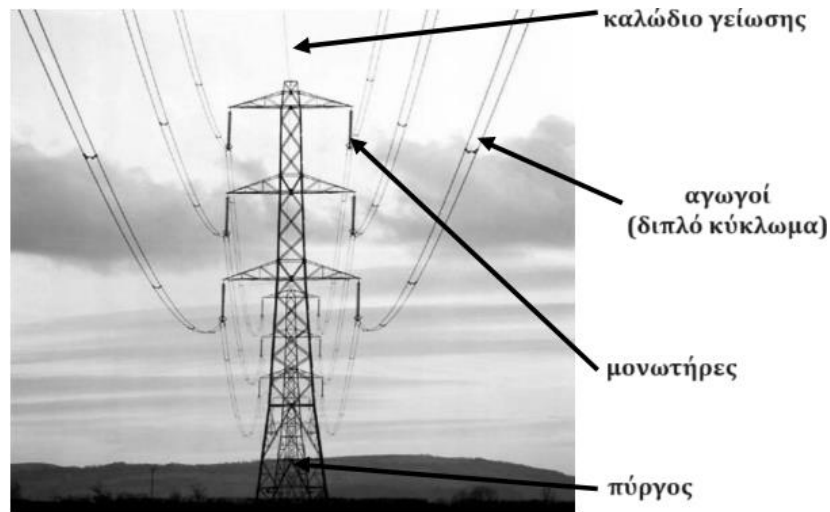
Στην Ελλάδα ο αντίστοιχος TSO είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) και είναι υπεύθυνος για την σύνδεση των σταθμών παραγωγής (Συμβατικών ή ΑΠΕ) και την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης (Αστικά Κέντρα, Βιομηχανίες). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, με τον βέλτιστο και αποδοτικότερο τρόπο, η τάση ανυψώνεται στους υποσταθμούς σύνδεσης των σταθμών παραγωγής στα επίπεδα των 400 kV και 150 kV και υποβιβάζεται στους υποσταθμούς σύνδεσης με το Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Τα βασικά στοιχεία του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς είναι:

- Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς 400kV, 150kV και 66kV
- Υπόγειες και Υποβρύχιες Καλωδιακές Γραμμές 150kV και 400kV
- Υποσταθμοί 150/20kV
- Κέντρα Υπερύψηλης Τάσης (KYT) 400/150kV

Το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E. Η παράλληλη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών γραμμών μεταφοράς (Γ.Μ.), κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας και της Τουρκίας. Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος τάσης 400 kV) με την Ιταλία.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο αποτελείται από τους ζυγούς ή κόμβους καθώς και τις αιχμές που ενώνουν αυτούς τους ζυγούς. Οι ζυγοί αναπαριστούν τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς ανύψωσης ή υποβιβασμού τάσεως ενώ αντίστοιχα οι αιχμές τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεως. Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσεως είναι κυρίως εναέριου τύπου ενώ η δομή τους αποτελείται από έναν αριθμό συνεστραμμένων κλώνων αλουμινίου στο εξωτερικό του κάθε αγωγού καθώς και σύρματα χάλυβα στο εσωτερικό (Aluminium Conductor Steel Reinforced – ACSR). Για τον σχεδιασμό των γραμμών λαμβάνονται υπόψιν τόσο οι μηχανικές όσο και οι ηλεκτρικές απαιτήσεις. Οι πύργοι στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικοί για να αντέξουν το βάρος των καλωδίων καθώς και ότι συνεπάγεται με το μεγάλο επίπεδο τάσης στα καλώδια διατηρώντας την ελάχιστη ασφαλή απόσταση μεταξύ των καλωδίων, μεταξύ των καλωδίων και των πύργων και μεταξύ των καλωδίων και του εδάφους. Τα καλώδια προσαρτώνται στους πύργους μέσω μιας αλυσίδας μονωτήρων, ο αριθμός των οποίων μεταβάλλεται σύμφωνα με το επίπεδο της τάσης στην γραμμή. Ένα παράδειγμα γραμμής μεταφοράς και συγκεκριμένα διπλού κυκλώματος απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 : Γραμμή διπλού κυκλώματος (400 kV) [1]

Η διατομή των καλωδίων ορίζει τη μέγιστη ένταση ρεύματος που μπορούν να μεταφέρουν και συνεπώς συμβάλλει στη μέγιστη χωρητικότητα μεταφοράς της γραμμής. Μεγαλύτερη ένταση ρεύματος συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες γραμμής λόγω του φαινομένου Joule, το οποίο με την σειρά του μπορεί να φέρει άλλες δυσλειτουργίες. Για τη μείωση των απωλειών Corona (διάσπαση της μονωτικής ικανότητας του αέρα γύρω από τα καλώδια λόγω υψηλών ηλεκτρικών πεδίων, προκαλώντας απώλειες γραμμής και ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές που μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές στα συστήματα επικοινωνίας) κάθε φάση της γραμμής συνήθως χωρίζεται σε δύο, τρία ή περισσότερα καλώδια, δημιουργώντας διπλά ή τριπλά κυκλώματα. Εκτός της ωμικής αντίστασης που έχει μια γραμμή μεταφοράς ως αγωγός εμφανίζονται

και άλλες δύο σημαντικές παράμετροι όπως η αυτεπαγωγή, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη σχετική γεωμετρική θέση των τριών φάσεων στον πύργο, και η εγκάρσια χωρητικότητα, που εμφανίζεται ως προς την γη. Τα μεγέθη και οι συνέπειες των παραπάνω παραμέτρων γίνονται πιο αισθητά στα υπόγεια συστήματα υψηλής τάσης, τα οποία έχουν μεγάλες απαιτήσεις ως προς την μόνωση των αγωγών και αποτελεί τον κύριο λόγο που έχουν επικρατήσει οι εναέρια γραμμές.

Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα όπως το δίκτυο μεταφοράς η ροή ισχύος ακολουθεί τους νόμους του Kirchhoff. Συνεπώς η ροή ισχύος σε κάθε γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη της σύνθετης αντίστασης που την χαρακτηρίζει. Οι μεγάλες αποστάσεις και τα μεγάλα μεγέθη της μεταδιδόμενης ισχύος μπορεί να μειώσουν την ικανότητα του δικτύου να διατηρήσει την ομαλή λειτουργία του συστήματος, ευνοώντας την εμφάνιση αστάθειας που είναι επιζήμια για τη δυναμική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Τα παραπάνω είναι μερικά εκ των ζητημάτων που προκύπτουν σε ένα τυπικό σύστημα μεταφοράς, το οποίο αντιμετωπίζει σε πολλές χώρες δυσκολία στην επέκταση και την ενίσχυση των υφιστάμενων υποδομών είτε λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών είτε γραφειοκρατικών εμποδίων. Ως αποτέλεσμα, έγκειται η ανάγκη οι αντίστοιχοι διαχειριστές να κάνουν την βέλτιστη χρήση του εξοπλισμού ελέγχει το σύστημα μεταφοράς. Πλέον όμως τεχνολογίες όπως τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems – FACTS), που αναπτύχθηκαν μέσω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος, ενισχύουν τη δυνατότητα ελέγχου και αυξάνουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος.[2]

Οι υποσταθμοί αποτελούν το δεύτερο βασικό συστατικό του συστήματος μεταφοράς ως οι διασυνδετικοί κόμβοι για τις γραμμές. Ένας υποσταθμός μπορεί είτε να ανυψώσει το επίπεδο τάσης της ισχύος που παράγεται από μια μονάδα παραγωγής ενέργειας και διαχέεται στο σύστημα μεταφοράς, είτε να υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της ισχύος που εισέρχεται σε αυτόν ώστε να τροφοδοτήσει το σύστημα διανομής και τους πελάτες μέσης και χαμηλής τάσης. Σε αυτούς εκτός από τους μετασχηματιστές ανύψωσης ή υποβιβασμού βρίσκονται μετρητικά όργανα, προστατευτικός εξοπλισμός, αποζεύκτες ισχύος καθώς και τα σημεία άφιξης και αναχώρησης των γραμμών μεταφοράς. Ο εξοπλισμός ζεύξης και απόζευξης των υποσυστημάτων του υποσταθμού διασφαλίζουν τους κατάλληλους χειρισμούς ώστε να γίνει η αντίστοιχη έγχυση ισχύος σε μια γραμμή είτε η απομόνωση των γραμμών με κάποιο σφάλμα. Μια αναβάθμιση του εξοπλισμού του υποσταθμού ενισχύει την ασφάλεια στους χειρισμούς και κάνει πιο ευέλικτο το σύστημα το οποίο εξυπηρετεί επιτρέποντας παράλληλα πιο αποτελεσματική μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα σύγχρονο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στους ζυγούς (υποσταθμοί) και στις αιχμές (γραμμές μεταφοράς) που το απαρτίζουν. Οι διαχειριστές του συστήματος είναι υπεύθυνοι για την αξιοπιστία του συστήματος καθώς και για την ικανοποίηση του ηλεκτρικού φορτίου με τον λιγότερο κοστοβόρο τρόπο. Οι γραμμές μεταφοράς χαρακτηρίζονται από τις θερμικές απώλειες τους, οι οποίες ορίζουν την μέγιστη ικανότητα μεταφοράς τους που δεν πρέπει να ξεπεραστεί ενώ οι υποσταθμοί, οι οποίοι βρίσκονται στα σημεία αναχώρησης και άφιξης των γραμμών πρέπει να διατηρούν την τάση που ανυψώνουν είτε υποβιβάζουν όσο πιο κοντά στην ονομαστική τιμή. Αυτές αποτελούν τις βασικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να υπάρξει ασφαλή μεταφορά της ενέργειας σε ένα Σ.Η.Ε.

1.2 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ανέκαθεν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιείχαν έναν βαθμό αβεβαιότητας ως προς την λειτουργία τους. Η αβεβαιότητα κυρίως εκφραζόταν μέσω των τυχαίων διακυμάνσεων των δεδομένων του συστήματος (ηλεκτρικό φορτίο, δυναμικό υδροηλεκτρικών σταθμών, κόστη πρώτης ύλης), των αστοχιών του δικτύου αλλά και των σφαλμάτων στις προβλέψεις[3]. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων και η πρόοδος της παραγωγής ενέργειας μέσα από έξυπνα δίκτυα, τα αυτόνομα δίκτυα και οι πηγές ανανεώσιμης ενέργειας (ΑΠΕ) με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, έχουν δημιουργήσει πολλές νέες ευκαιρίες για τη λειτουργία και τον έλεγχο των ενεργειακών συστημάτων. Παράλληλα έχουν δημιουργήσει πολλές προκλήσεις αυξάνοντας την πολυπλοκότητα των τρεχουσών δικτυακών συστημάτων. Η αυξανόμενη χρήση των ΑΠΕ, κυρίως φωτοβολταϊκών (PV) και μετατροπέων αιολικής ενέργειας (WECs) μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην υποστήριξη τάσης, τη ρύθμιση συχνότητας, τη σταθερή ροή ισχύος, τη σταθερότητα μικρών σημάτων και τη μεταβατική σταθερότητα.

Αστοχίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η απώλεια γραμμών μεταφοράς, σύντομα σφάλματα και απώλεια μονάδων παραγωγής, βάζουν σε άμεσο κίνδυνο την σταθερότητα του. Σε ένα σύστημα με υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας, αν όλο το αιολικό πάρκο αποσυνδεθεί ενώ λειτουργεί σε πλήρης παραγωγή, μπορεί να ακολουθήσει μια σημαντική διαταραχή ισχύος ακολουθούμενη από πλήρη κατάρρευση του συστήματος. Σε περίπτωση σφάλματος σε μια τοποθεσία με σημαντική διείσδυση αιολικής ενέργειας, η μεταβατική σταθερότητα επηρεάζεται σε πολύ υψηλό βαθμό.

Η απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες και την αβεβαιότητα που τις συνοδεύει. Αυτή δεν λαμβάνεται επαρκώς υπόψη από την αιτιοκρατική διατύπωση της ροής ισχύος (Deterministic Power Flow - DPF), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, το DPF δεν μπορεί να αποκαλύψει με ακρίβεια την κατάσταση του συστήματος δίνοντας μια σχετικά συντηρητική λύση. Επομένως, οι μέθοδοι που βασίζονται στην αξιολόγηση της αβεβαιότητας έχουν αποκτήσει σημαντικό ενδιαφέρον. Η πιθανοτική διατύπωση της ροής ισχύος ενσωματώνει στους υπολογισμούς της την αβεβαιότητα και περιγράφει την κατάσταση του συστήματος με έναν βαθμό εμπιστοσύνης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει καλύτερος προγραμματισμός του μείγματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο αλλά και καλύτερη ανάλυση ασφάλειας του συστήματος μεταφοράς που εξυπηρετεί τα σημεία παραγωγής αλλά και κατανάλωσης.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή της διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος με πιθανοτικούς περιορισμούς, όπου εγγυάται η κανονική λειτουργία του συστήματος με έναν βαθμό εμπιστοσύνης. Μέσω αυτής της διατύπωσης μπορεί να γίνει εξαγωγή χρήσιμων δεδομένων σχετικά με την ασφάλεια και την κρισιμότητα στοιχείων του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα δώσει την κατάλληλη καθοδήγηση σχετικά με τις όποιες παρεμβάσεις χρειάζεται να γίνουν από τους TSOs ώστε να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας, τη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης ροής ισχύος και τις μεθόδους βελτιστοποίησης του συστήματος μεταφοράς με πιθανότητες περιορισμών.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** σχεδιάζεται το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης ροής ισχύος, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος ενώ στην συνέχεια γίνεται η γραμμικοποίηση των εξισώσεων των ροών ισχύος και των σχετικών περιορισμών, καθώς και αναλύεται ο αλγόριθμος της προτεινόμενης διατύπωσης του προβλήματος με από κοινού πιθανότητες.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται μια εισαγωγή στα εργαλεία και τις εντολές του GAMS, αναλύεται ο κώδικας που γράφτηκε στο λογισμικό GAMS ώστε να λυθεί το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος. Επίσης αναλύεται η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python και των βιβλιοθηκών της για την επεξεργασία και διαμόρφωση δεδομένων και τον υπολογισμό της τιμής παραβίασης και του βαθμού εμπιστοσύνης του προβλήματος στο λογισμικό Anaconda-Spyder.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε ένα δίκτυο 10 ζυγών, η ανάλυση συμπεριφοράς του συστήματος μέσω σεναρίων, η εξαγωγή αποτελεσμάτων σύμφωνα με την προτεινόμενη διατύπωση, η ανάλυση ευαισθησίας και απόδοσης του συστήματος καθώς και η συμβατότητα της διατύπωσης στην ανάλυση πραγματικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται η σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται αναφορά στην βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως στόχο την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία τους, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους που τα επηρεάζουν. Συνεπώς, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εξασφαλίζεται με αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο τηρώντας όλους τους λειτουργικούς περιορισμούς. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με τη χρήση προηγμένων τεχνικών και αλγορίθμων, τα οποία περιλαμβάνουν την ανάλυση των δεδομένων, την πρόβλεψη της ζήτησης και της παραγωγής, την δυναμική προσαρμογή του δικτύου, και την αυτόματη διαχείριση των φορτίων.

Μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι η Βέλτιστη Ροή Ισχύος (Optimal Power Flow – OPF). Αποτελεί μια προηγμένη εφαρμογή της ανάλυσης ροής ισχύος, η οποία στοχεύει στην εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η τάση, η ισχύς και άλλες παράμετροι, που εξασφαλίζουν την αξιοπιστία, την οικονομικότητα και την ασφάλεια της λειτουργίας του. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει την ανάλυση του δικτύου και την επίλυση προβλημάτων όπως υπερφόρτωση γραμμών, υπέρταση ή υπόταση στους ζυγούς και διάφορα άλλα προβλήματα ευστάθειας. Στην Βέλτιστη Ροή Ισχύος λαμβάνονται υπόψη διάφοροι περιορισμοί και παράγοντες, όπως η μέγιστη χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς, οι περιορισμοί στις γεννήτριες, οι απαιτήσεις φορτίου και η διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου. Η σημασία του OPF βρίσκεται στα μεγάλα και σύνθετα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι αποφάσεις που λαμβάνονται μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αξιοπιστία, την οικονομική λειτουργία και την αποδοτικότητα του δικτύου[4].

Η βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφοράς γίνεται από τους ανεξάρτητους φορείς διαχείρισης του δικτύου (Transmission System Operators – TSO). Αυτοί οι φορείς είναι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου, καθώς και για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την προσθήκη νέων υποδομών ή την αναβάθμιση των υπαρχόντων. Στην Ελλάδα ο αντίστοιχος TSO είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ).

Η επίδραση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή και αιολική ενέργεια, στη βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφοράς είναι σημαντική. Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στην μείωση της εξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα, ωστόσο η διαθέσιμη παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό είτε από την ηλιακή ακτινοβολία στα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, αντίστοιχα, και δεν ανταποκρίνεται στο ηλεκτρικό φορτίο όπως κάνουν οι συμβατικές μονάδες.

Η ένταξη των ΑΠΕ επηρεάζει τη λειτουργία των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η παραγωγή από αυτές τις πηγές είναι μη προβλέψιμη και ασταθής. Οι φορείς διαχείρισης πρέπει να προσαρμόσουν τις λειτουργίες του δικτύου και να αναπτύξουν νέες τεχνολογίες για να υποστηρίξουν την ομαλή ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο και να διασφαλίσουν την αξιοπιστία και τη σταθερότητά του [2].

2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) είναι ένα βασικό πρόβλημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και αναφέρεται στην εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που θα ελαχιστοποιήσουν το κόστος ή την απώλεια ισχύος, ενώ ταυτόχρονα θα πληρούνται όλοι οι περιορισμοί και οι προδιαγραφές του δικτύου. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα αυτό απαιτεί την εύρεση των τιμών της ισχύος σε κάθε μονάδα παραγωγής, καθώς και των τάσεων και γωνιών φάσης σε κάθε ζυγό του δικτύου, ώστε να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, να αυξηθεί η απόδοση και η αξιοπιστία, και να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές του δικτύου. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται σύμφωνα με το μέγεθος και την τοπολογία του δικτύου καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως τα φορτία, οι γεννήτριες, οι περιορισμοί στις γραμμές μεταφοράς και άλλοι περιορισμοί του δικτύου.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται τεχνικές, όπως οι αλγόριθμοι γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού και άλλες προηγμένες τεχνικές ανάλυσης που ενσωματώνουν την τεχνητή νοημοσύνη[10].

Η εύρεση της βέλτιστης ροής ισχύος σε ένα δίκτυο AC (παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση εναλλασσόμενου ρεύματος) γίνεται μέσω ανάλυσης φορτίου είτε χρησιμοποιώντας το AC μοντέλο είτε το DC μοντέλο. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε το AC μοντέλο αν και το DC μοντέλο αποτελεί την πιο διάσημη προσέγγιση λόγω του μικρότερου βαθμού πολυπλοκότητας. Η ανάλυση φορτίου περιλαμβάνει την εκτίμηση της κατανάλωσης ισχύος σε διάφορα σημεία του δικτύου και την αξιολόγηση των επιπτώσεών της στην απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου.

Τα βασικά βήματα για την εύρεση της βέλτιστης ροής μέσω ανάλυσης φορτίου περιλαμβάνουν:

1. **Συγκέντρωση δεδομένων:** Αναλύονται τα δεδομένα του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των φορτίων, των γεννητριών, των γραμμών μεταφοράς και των υποσταθμών.
2. **Ανάλυση φορτίου:** Υπολογίζεται η κατανάλωση ισχύος σε κάθε σημείο του δικτύου, με βάση τις προβλεπόμενες ή πραγματικές ανάγκες των καταναλωτών.
3. **Υπολογισμός ροής ισχύος:** Υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών του δικτύου, όπως τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών καθώς και η ροή ενεργού και άεργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, με βάση τις δεδομένες τιμές των φορτίων και την παραγωγή των μονάδων του συστήματος. Οι παραπάνω τιμές των μεταβλητών πρέπει παράλληλα να βρίσκονται εντός των λειτουργικών ορίων που έχουν οριστεί από τους διαχειριστές του συστήματος.
4. **Αξιολόγηση του δικτύου:** Αξιολογείται η απόδοση του δικτύου με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης φορτίου και εντοπίζονται πιθανά προβλήματα σχετικά με τους περιορισμούς και την οικονομία της λύσης.

Συνολικά, η εύρεση της βέλτιστης ροής ισχύος είναι μια πολύτιμη τεχνική για την αντιμετώπιση πολλών προκλήσεων και προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως η υπερφόρτωση γραμμών, η ευστάθεια του δικτύου, η ενεργειακή απόδοση και η ενσωμάτωση των ΑΠΕ, καθιστώντας το δίκτυο πιο αποδοτικό και προσαρμοστικό.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Η βελτιστοποίηση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με πιθανοτικούς περιορισμούς είναι μια προηγμένη τεχνική που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου με βάση την πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών του συστήματος. Χρησιμοποιεί στατιστική ανάλυση και μεθόδους προσομοίωσης γεγονότων για να αντιμετωπίσει τις διακυμάνσεις στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές του δικτύου καθώς και την αβεβαιότητα που εισάγουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, είναι απρόβλεπτες και εξαρτώνται από φυσικές συνθήκες όπως ο καιρός και η εποχή. Αυτό δημιουργεί αβεβαιότητα στην παραγωγή ενέργειας, και επηρεάζει την απόδοση και την ευστάθεια του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω της βελτιστοποίησης με πιθανοτικούς περιορισμούς, συνυπολογίζεται αυτή η αβεβαιότητα και προσαρμόζεται στη λειτουργία του δικτύου ώστε να αντιμετωπιστούν οι πιθανές αποκλίσεις από την προβλεπόμενη επιθυμητές καταστάσεις και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν [3].

Η στατιστική ανάλυση και οι μέθοδοι προσομοίωσης γεγονότων βοηθούν στο να γίνει η αξιολόγηση της πιθανότητας εκδήλωσης διάφορων γεγονότων, όπως αλλαγές στη ζήτηση ή στις συνθήκες λειτουργίας των γεννητριών, και να προσδιοριστούν οι βέλτιστες λύσεις για την αντιμετώπισή τους. Αυτό επιτρέπει την λήψη αποφάσεων που θα εξασφαλίσουν την ομαλή, ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου, παρά την αβεβαιότητα που προκαλούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης με χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων [6]:

1. Στοχαστική βελτιστοποίηση (Stochastic Optimization): Σε αντίθεση με την αιτιοκρατική βελτιστοποίηση, η στοχαστική βελτιστοποίηση δεν έχει μία λύση αλλά ένα σύνολο λύσεων. Η αβεβαιότητα μοντελοποιείται ως μια τυχαία μεταβλητή, η οποία ακολουθεί κάποια κατανομή πιθανότητας. Σημαντικό εργαλείο σε αυτή την μέθοδο βελτιστοποίησης είναι οι τεχνικές που βασίζονται στην δειγματοληψία σε περίπτωση που δεν μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή της μεταβλητής που εκπροσωπεί την αβεβαιότητα. Η χρήση μεγαλύτερου δείγματος βοηθάει στο να επιτευχθεί μεγαλύτερη εγγύηση ως προς την λύση με αντίτιμο την αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Η συγκεκριμένη βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει είτε σε ένα στάδιο όπου δίνεται μια λύση στο πρόβλημα είτε να γίνει σε πολλά στάδια με αναδρομικό τρόπο, η οποία τείνει να είναι πιο περίπλοκη σαν διαδικασία. Ουσιαστικά η εφαρμογή πολλών σταδίων έχει ως βάση την λύση που δόθηκε σε κάθε προηγούμενο στάδιο και ενημερώνει την κατάσταση της λύσης, κάτι που αντικατοπτρίζει περισσότερο την πραγματικότητα όπου τα δεδομένα αλλάζουν σε κάθε στιγμή.

2. Εύρωστη βελτιστοποίηση (Robust Optimization): Είναι μια σχετικά νέα τεχνική βελτιστοποίησης στα πλαίσια της αβεβαιότητας, η οποία δεν χρησιμοποιεί κάποιο στοχαστικό μοντέλο αλλά ένα αιτιοκρατικό μοντέλο αβεβαιότητας βασισμένο σε ένα σύνολο. Αυτή η μέθοδος εγγυάται πως το χειρότερο σενάριο μπορεί να πραγματοποιηθεί, θέτοντας έτσι την βέλτιστη λύση για κάθε αβεβαιότητα που εξετάζεται. Αποτελεί μια συντηρητική προσέγγιση και εφαρμόζεται περισσότερο σε προβλήματα που ασχολούνται με την αξιοπιστία ενός συστήματος.

3. Κατανεμημένη εύρωστη βελτιστοποίηση (Distributionally Robust Optimization): Αποτελεί συνδυασμό της στοχαστικής βελτιστοποίησης και της εύρωστης βελτιστοποίησης, με αποτέλεσμα να έχει μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα και λιγότερη συντηρητική προσέγγιση. Παίρνει την βέλτιστη απόφαση για το χειρότερο σενάριο με βάση την πιθανότητα κατανομής ενός συνόλου πιθανών κατανομών. Συγκριτικά με την στοχαστική βελτιστοποίηση, η μέθοδος εξαρτάται λιγότερο από την ακρίβεια στον υπολογισμό των κατανομών.

4. Βελτιστοποίηση με πιθανοτικούς περιορισμούς (Chance Constrained Optimization): Μέθοδος που επιλύει προβλήματα με περιορισμούς, οι οποίοι παραβιάζονται με κάποια συγκεκριμένη πιθανότητα. Δεν υπάρχει κάποια γενική λύση για την βελτιστοποίηση με πιθανοτικούς περιορισμούς, καθώς αυτή βασίζεται στη σχέση μεταξύ μεταβλητών απόφασης και τυχαίων μεταβλητών στους περιορισμούς ανισότητας του μοντέλου που έχει κατασκευαστεί. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατηγοριοποιείται με βάση τους περιορισμούς. Μπορεί να απαιτείται ο κάθε περιορισμός να ικανοποιείται με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης, όπου στην προκειμένη περίπτωση γίνεται λόγος για ένα επιμέρους πιθανοτικά περιορισμένο πρόβλημα (Individual Chance Constrained Problem). Στην άλλη μορφή του απαιτείται όλοι οι περιορισμοί να ικανοποιούνται ταυτόχρονα με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης όπου και γίνεται λόγος για ένα από κοινού πιθανοτικά περιορισμένο πρόβλημα (Joint Chance Constrained Problem).

Σε αυτή την διπλωματική εργασία η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης γίνεται με την τέταρτη μέθοδο, όπου απαιτείται η ικανοποίηση όλων των περιορισμών του μοντέλου ταυτόχρονα με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε, αυτή η μέθοδος δεν έχει κάποια γενική λύση και αποτελεί μια δύσκολη από άποψη πολυπλοκότητας διατύπωση, ειδικά για ένα πρόβλημα όπως η Βέλτιστη Ροή Ισχύος σε ένα Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί, είναι η προσέγγιση του Chance Constrained προβλήματος μέσω προσομοίωσης πολλών σεναρίων ώστε να γίνει μοντελοποίηση των πιθανοτήτων που χρειάζεται να υπολογιστούν για να εκφράσουν την αβεβαιότητα στο σύστημα. Η διατύπωση του προβλήματος με την από κοινού πιθανότητα ικανοποίησης όλων των λειτουργικών περιορισμών εγγυάται την κανονική λειτουργία του συστήματος με κάποια συγκεκριμένη πιθανότητα. Ο TSO θα πρέπει να γνωρίζει τί συμβαίνει σε κάθε παράμετρο του συστήματος, που και πώς αυτή επηρεάζεται από την όποια αβεβαιότητα υπάρχει. Εφόσον έχει την κατάλληλη πληροφορία, θα μπορεί να κάνει τις κατάλληλες ενέργειες από άποψη σχεδιασμού της λειτουργίας των συνιστωσών του συστήματος ώστε να εγγυηθεί τον βαθμό εμπιστοσύνης που έχει θέση για την κανονική λειτουργία του συστήματος.

2.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων και της στατιστικής ανάλυσης στην εύρεση λύσης βέλτιστης ροής ισχύος στα πλαίσια της αβεβαιότητας, όπως της διακύμανσης παραγωγής των ΑΠΕ, αποτελεί ισχυρό εργαλείο ώστε να ληφθούν αποτελεσματικές αποφάσεις για την διαχείριση σύνθετων ηλεκτρικών δικτύων στα πλαίσια αντιμετώπισης των αποκλίσεων από την προβλεπόμενη συμπεριφορά των συνιστωσών του δικτύου.

Στη θεωρία των πιθανοτήτων, η αβεβαιότητα εκφράζεται μέσω των τυχαίων μεταβλητών και των παραμέτρων τους. Οι τυχαίες μεταβλητές είναι μεταβλητές που λαμβάνουν τιμές από ένα σύνολο δυνατών αποτελεσμάτων με κάποια πιθανότητα. Κάθε τιμή που λαμβάνει μια τυχαία μεταβλητή αποκαλείται "παρατήρηση" ή "πραγματοποίηση". Οι παράμετροι των τυχαίων μεταβλητών καθορίζουν τη μορφή της πιθανολογικής κατανομής αυτών των μεταβλητών. Για παράδειγμα, σε μια κανονική κατανομή, οι παράμετροι είναι ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Η χρήση των τυχαίων μεταβλητών και των παραμέτρων τους, επιτρέπει την εξέταση της αβεβαιότητας σε διάφορα φαινόμενα καθώς και την πρόβλεψη των πιθανών ενδεχομένων. Στο πλαίσιο της ευρείας εφαρμογής της στατιστικής ανάλυσης, μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων αποτελεσμάτων καθώς και η καλύτερη κατανόηση της αβεβαιότητας που επηρεάζει τις μεταβλητές και τις διαδικασίες σε ένα σύστημα [3].

Για τον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων μιας τυχαίας μεταβλητής, όπως η διακύμανση ή ο μέσος όρος, χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις πολλών σεναρίων. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τη δημιουργία ενός μοντέλου που περιγράφει το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τους πιθανούς περιορισμούς και τις μεταβλητές που επηρεάζουν το δίκτυο. Στη συνέχεια, υλοποιείται η προσομοίωση πολλών σεναρίων για διάφορες καταστάσεις του συστήματος, άρα και τιμές των μεταβλητών που το επηρεάζουν. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε μια διαφορετική πιθανή κατάσταση του δικτύου, όπως διαφορετικά επίπεδα φορτίου ή παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές. Καταγράφονται οι τιμές των ενδιαφερόμενων παραμέτρων σε κάθε σενάριο, και συλλέγονται δεδομένα μέσω των οποίων γίνεται ο υπολογισμός των στατιστικών παραμέτρων, όπως ο μέσος όρος και η διακύμανση. Σημαντικό εργαλείο για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων αποτελεί η αριθμητική μέθοδος Monte Carlo, όπου γίνεται στατιστική δειγματοληψία των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί.

Η διαδικασία υπολογισμού πιθανοτήτων εκδήλωσης ενδεχομένων, όπως η τήρηση ή η παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου, ακολουθεί μια παρόμοια προσέγγιση. Πραγματοποιούνται πολλαπλές προσομοιώσεις, όπου καταγράφονται οι επιδόσεις του συστήματος κάτω από διάφορες συνθήκες. Στη συνέχεια, αναλύονται τα δεδομένα ώστε να γίνει η προσέγγιση των πιθανοτήτων εκδήλωσης των ενδεχομένων και των περιορισμών που θέτουν οι λειτουργίες του δικτύου [6].

2.4.1 ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Η μορφή που παίρνει το πρόβλημα για την περίπτωση όπου η αβεβαιότητα δεν λαμβάνεται υπόψη και οι περιορισμοί παραμένουν αιτιοκρατικοί, είναι η εξής:

$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{minimize/maximize}} & f(x) \\ \text{subject to} & g_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & h_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \end{array} \quad (2.1)$$

όπου:

- διάνυσμα των μεταβλητών $x \in \mathbb{R}^n$
- αντικειμενική συνάρτηση $f : \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$
- περιορισμοί ανισότητας $g_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$
- περιορισμοί ισότητας $h_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, p$

Η βελτιστοποίηση του πραγματικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του μαθηματικού μοντέλου γίνεται μέσω της παρακάτω αντιστοίχισης:

1. **διάνυσμα των μεταβλητών x** : Το διάνυσμα μεταβλητών του συστήματος αποτελείται από τις λειτουργικές παραμέτρους, όπως τα μέτρα και γωνίες τάσεων ζυγών, η παραγωγή των μονάδων παραγωγής ενέργειας και οι ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.
2. **αντικειμενική συνάρτηση f** : Η αντικειμενική συνάρτηση περιγράφει τον στόχο της βελτιστοποίησης και πρέπει να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται, ανάλογα με την περίπτωση. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της ροής ισχύος, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος ή η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου.
3. **περιορισμοί ισότητας g_i** : Αποτελούνται από τις εξισώσεις ροής ισχύος, οι οποίες περιγράφουν τις συνθήκες ισορροπίας ισχύος σε κάθε ζυγό του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτές οι εξισώσεις μοντελοποιούν τη ροή ισχύος μέσα στο δίκτυο και περιλαμβάνουν τις άγνωστες μεταβλητές, όπως οι ροές ισχύος και οι τάσεις.
4. **περιορισμοί ανισότητας h_i** : Αποτελούνται από τους περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται κατά τη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος. Αυτοί περιλαμβάνουν τις μέγιστες φόρτισεις γραμμών, τις μέγιστες τιμές τάσης σε ζυγούς και τους περιορισμούς παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Για να λυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της ροής ισχύος, πρέπει να επιλυθούν οι εξισώσεις ροής ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς, και να βρεθούν οι τιμές των αγνώστων μεταβλητών που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης και η χρήση στατιστικών παραμέτρων μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματική λύση του προβλήματος, ειδικά όταν υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με την παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η προσπάθεια το πρόβλημα να λυθεί λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις ΑΠΕ. Αυτό γίνεται μέσω της διατύπωσης του προβλήματος ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με από κοινού πιθανοτικούς περιορισμούς. Η σχεδίαση ενός συστήματος

μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται γύρω από την κανονική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Τα ιστορικά δεδομένα που συλλέγει ο διαχειριστής καθώς και τα μοτίβα που προκύπτουν σχετικά με την ενεργειακή ζήτηση σε συνδυασμό με τις τεχνικές προβλέψεων που έχουν αναπτυχθεί δημιουργούν ένα ημερήσιο πλάνο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά οι αποκλίσεις της παραγωγής των ΑΠΕ αλλά και του ηλεκτρικού φορτίου από την μέση τιμή τους κατά την διάρκεια της ημέρας δημιουργούν καταστάσεις που δεν καλύπτονται από τον προγραμματισμένο σχεδιασμό με αποτέλεσμα σε αυτές τις περιπτώσεις να μην υπάρχουν εγγυήσεις σχετικά με την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Η βελτιστοποίηση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με πιθανοτικούς περιορισμούς γίνεται δίνοντας την εγγύηση πως όλοι οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος ικανοποιούνται με ένα βαθμό εμπιστοσύνης που ορίζει ο διαχειριστής. Ο βαθμός εμπιστοσύνης εκφράζει την από κοινού πιθανότητα ικανοποίησης όλων των λειτουργικών περιορισμών του συστήματος. Η από κοινού πιθανότητα εκδήλωσης ενός ενδεχομένου αναφέρεται στην πιθανότητα να συμβούν ταυτόχρονα δύο ή περισσότερα ενδεχόμενα. Αυτή η πιθανότητα είναι σημαντική στο πλαίσιο πολλών εφαρμογών, όπου υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ διαφορετικών γεγονότων, ειδικά σε ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μορφή που παίρνει το πρόβλημα για την περίπτωση όπου η αβεβαιότητα λαμβάνεται υπόψη και οι περιορισμοί πλέον είναι πιθανοτικοί, είναι η εξής [5]:

$$\begin{aligned} & \underset{\xi}{\text{minimize/maximize}} && f(\xi) \\ & \text{subject to} && g_i(\xi) = 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & && \mathbb{P} \left[\bigcap_i h_i(\xi) \leq 0 \right] \geq \alpha, \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου:

- διάνυσμα των μεταβλητών του συστήματος υπό αβεβαιότητα $\xi \in \mathbb{R}^n$
- αντικειμενική συνάρτηση $f : \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$
- περιορισμοί ισότητας $g_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$
- περιορισμοί ανισότητας $h_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, p$

Έστω Y_i είναι το ενδεχόμενο ένας εκ των περιορισμών ανισότητας του συστήματος να ικανοποιείται. Ορίζεται αυτό το ενδεχόμενο ως εξής:

$$Y_i := \{h_i(\xi) \leq 0\}, \quad i = 1, \dots, p \quad (2.3)$$

$$\mathbb{P} \left[\bigcap_i Y_i \right] \geq \alpha \quad (2.4)$$

α = βαθμός εμπιστοσύνης (%)

Σύμφωνα με τη θεωρία των πιθανοτήτων, γίνεται αντιληπτό πως απαιτείται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης, η πιθανότητα ένωσης όλων των ενδεχομένων Y_i για $i = 1, \dots, p$ να είναι ίση ή μεγαλύτερη του μεγέθους α . Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ο διαχειριστής του συστήματος εγγυάται πως οι λειτουργικοί περιορισμοί ανά πάσα στιγμή θα ικανοποιούνται όλοι ταυτόχρονα με ένα βαθμό εμπιστοσύνης της τάξης του α .

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο τρίτο κεφάλαιο, η προσοχή μεταφέρεται στη σχεδίαση ενός πιο συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα ανταποκρίνεται ακριβέστερα στα πραγματικά δεδομένα ενός συστήματος μεταφοράς ενέργειας [7]. Η διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος αποτελεί το πιο σημαντικό εργαλείο κατά την μελέτη και διαχείριση ενός συστήματος μεταφοράς ενέργειας, καθώς μέσω αυτού εξάγονται σημαντικές αποφάσεις σχετικά με την ασφαλή αλλά και οικονομική λειτουργία του δικτύου. Η πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τα συστήματα μεταφοράς εξαρτάται ευθέως από την τοπολογία του και αυξάνει όσο κλιμακώνεται το μέγεθος του συστήματος. Η αύξηση του αριθμού των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς που τους συνδέουν αντιστοιχεί σε αύξηση των άγνωστων μεταβλητών του συστήματος καθώς και των συναρτήσεων ισότητας και ανισότητας. Επομένως, η βασική πρόκληση στην βελτιστοποίηση του συστήματος είναι η σχεδίαση ενός μοντέλου που θα στοχεύει στη μείωση της πολυπλοκότητας των εξισώσεων, καθιστώντας το πρόβλημα πιο προσιτό για ανάλυση και προσομοίωση μέσω αλγορίθμων. Η γραμμικοποίηση είναι κρίσιμη για την αποδοτική εκτέλεση σε προγράμματα προσομοίωσης και για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων [7]. Πέραν της σχεδίασης του μοντέλου, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται επίσης έναν αλγόριθμος για τη μετατροπή του γραμμικοποιημένου μοντέλου από αιτιοκρατικό σε πιθανοτικό, στα πλαίσια της αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και της δυναμικής φύσης των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας [8], [9]. Η πιθανοτική προσέγγιση επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφόρων σεναρίων και παραμέτρων, προσφέροντας καλύτερη εικόνα σχετικά με την συμπεριφορά του συστήματος και ως αποτέλεσμα θα κάνει το σύστημα πιο ευέλικτο. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, ο αναγνώστης θα έχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του πώς το μαθηματικό μοντέλο και ο αντίστοιχος αλγόριθμος μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μαθηματική μοντελοποίηση της ροής ενέργειας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της ανάλυσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το μοντέλο υπολογίζει την ροή ισχύος από τον έναν ζυγό προς τους γειτονικούς του και σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που επιβάλλονται πάνω στις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος αποφασίζει την παραγωγή ισχύος από τις μονάδες που συνδέονται στο δίκτυο. Σκοπός λοιπόν του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους, διαφυλάσσοντας την ισορροπία του ευρύτερου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς βασίζονται πάνω σε αυτούς τους υπολογισμούς για τον μακροπρόθεσμο και βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό της συμμετοχής των μονάδων παραγωγής στο καθημερινό ενεργειακό μείγμα.

Αν και αποτελεί το βασικό εργαλείο στην ανάλυση των Σ.Η.Ε, το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) παραμένει ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα στην επίλυση [7]. Η

πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει την λύση του προβλήματος συνδέεται άρρηκτα όπως αναφέρθηκε με το μέγεθος του συστήματος υπό ανάλυση αλλά και με τους μη γραμμικούς όρους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό διάφορων μεταβλητών. Η αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας του OPF κατά την επίλυση αποτελεί μια από τις λειτουργικές προδιαγραφές για έναν διαχειριστή που καλείται να πάρει όσο πιο ακριβής και γρήγορες αποφάσεις. Συνηθίζεται, στα πλαίσια της αντιμετώπισης αυτής της πολυπλοκότητας, να θυσιάζεται η ακρίβεια στον υπολογισμό των μεταβλητών του μοντέλου που λύνουν της εξισώσεις ώστε να βρεθεί εφικτή λύση του προβλήματος. Εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας αποτελεί το μοντέλο συνεχούς ρεύματος (Direct Current – DC), όπου οι εξισώσεις γραμμικοποιούνται αγνοώντας την ύπαρξη της άεργου ισχύος (Reactive Power – Q) καθώς και θεωρώντας ίσα όλα τα μεγέθη των τάσεων σε όλους τους ζυγούς, μειώνοντας την πολυπλοκότητα της επίλυσης των εξισώσεων. Στα πλαίσια του DC μοντέλου, διατηρείται η αλληλεξάρτηση μεταξύ της διαφοράς γωνίας τάσεως μεταξύ δύο ζυγών(θ_{ij}) και της ροής ενεργού ισχύος(P_{ij}) στην γραμμή μεταφοράς που τους συνδέει.

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος συνεχούς ρεύματος (DC – OPF – Direct Current Optimal Power Flow) έχει επικρατήσει σαν μεθοδολογία, λόγω της υπολογιστικής ικανότητας του. Όμως δεν παύει να υπεραπλουστεύει το μοντέλο του δικτύου με αποτέλεσμα να χάνεται σημαντική πληροφορία σχετικά με την άεργο ισχύ (Q) και το μέγεθος της τάσης ζυγού (V), ενώ δεν υπολογίζεται το αντίκτυπο της ροής άεργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς ως συνιστώσα της φαινόμενης ισχύος που ρέει σε αυτές. Οι προσεγγίσεις αυτό του μοντέλου μπορεί να παρέχουν μη ασφαλείς και μη οικονομικές λύσεις, ειδικά σε συστήματα όπου η άεργος ισχύς είναι συγκρίσιμη με την ενεργό. Αυτό όμως δεν αποτρέπει τους διαχειριστές του συστήματος να χρησιμοποιούν αυτή την μέθοδο, καθώς όπως αναφέρθηκε η αποδοτικότητα του απλουστευμένου μοντέλου προσφέρει πρακτικές και γρήγορες λύσεις που αντισταθμίζουν την έλλειψη ακρίβειας στους υπολογισμούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόβλημα OPF έχει επιλεγεί να λυθεί μέσω του μοντέλου εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternative Current – AC), το οποίο θα αναφέρεται ως AC – OPF. Η εστίασή στο μοντέλο AC συνάδει με την ανάγκη για λεπτομερή και ακριβή ανάλυση στα σύγχρονα ηλεκτρικά συστήματα, ιδίως όταν βελτιστοποιείται η μεταφορά για αποδοτικότητα και αξιοπιστία αντιμετωπίζοντας τις αυξανόμενες απαιτήσεις και τις εξελισσόμενες τοπολογίες του δικτύου. Λόγω του όσα αναφέρθηκαν σχετικά με το βαθμό πολυπλοκότητας και την δυσκολία της σύγκλισης του μοντέλου σε εφικτή λύση σε πρακτικό χρόνο, γίνεται μια διαφορετική προσέγγιση του AC – OPF γραμμικοποιώντας τους μη γραμμικούς όρους των εξισώσεων όπως αναφέρεται στην [6]. Σε αυτή την προσέγγιση του AC – OPF η λύση του μοντέλου, οι εξισώσεις ροής ενεργού και άεργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος υπολογίζονται μέσω μιας αρχικής κατάστασης λειτουργίας του και η ανάλυση τους περιλαμβάνει γραμμικούς όρους, οι οποίοι αναπαριστούν και τις απώλειες.

Παρακάτω περιγράφονται οι ορισμοί των συνόλων, με τους οποίους κατασκευάζονται οι εξισώσεις του AC – OPF:

- N: σύνολο των ζυγών του δικτύου
- G: σύνολο των συμβατικών μονάδων παραγωγής του δικτύου
- L: σύνολο των γραμμών μεταφοράς του δικτύου
- W: σύνολο των Α.Π.Ε (αιολικά πάρκα)

Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον κάθε ζυγό $i \in N$ είναι τα εξής:

- Τάση του ζυγού i : $\hat{v}_i = v_i \angle \theta_i$, $i \in N$ (3.1)

όπου v_i και θ_i το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού i .

- Παραγωγή ισχύος στο ζυγό i : $\hat{S}_{g,i} = (P_{g,i} + P_{w,i}) + j \cdot (Q_{g,i} + Q_{w,i})$, $i \in \{G \cup W\} \subseteq N$ (3.2)

Όπου είτε $P_{g,i}$ και $Q_{g,i}$ η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα στο ζυγό i από συμβατικές μονάδες είτε $P_{w,i}$ και $Q_{w,i}$ η έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα στο ζυγό i από τις Α.Π.Ε.

- Κατανάλωση ισχύος στο ζυγό i : $\hat{S}_{d,i} = P_{d,i} + j \cdot Q_{d,i}$, $i \in N$ (3.3)

όπου $P_{d,i}$ και $Q_{d,i}$ η κατανάλωση ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα στο ζυγό i .

Έστω η γραμμή του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , όπου i -ζυγός αναχώρησης και j -ζυγός άφιξης και αναφέρεται ως γραμμή μεταφοράς $(i,j) \in L$. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την κάθε γραμμή $(i,j) \in L$ είναι τα εξής:

- r_{ij} και x_{ij} : η αντίσταση και η αντίδραση αντίστοιχα της γραμμής (i,j)
- g_{ij} : πραγματικό μέρος της αγωγιμότητας της γραμμής (i,j)
- b_{ij} : φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας της γραμμής (i,j)
- P_{ij} : η ροή ενεργού ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j
- P_{ji} : η ροή ενεργού ισχύος από το ζυγό j στο ζυγό i
- Q_{ij} : η ροή άεργου ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j
- Q_{ji} : η ροή άεργου ισχύος από το ζυγό j στο ζυγό i

Το AC μοντέλο του προβλήματος περιλαμβάνει τις εξισώσεις που περιγράφουν πώς η ηλεκτρική ισχύς (ενεργός και άεργος) μεταφέρεται μέσα στο δίκτυο. Η ροή ενεργού και άεργου ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς εξαρτώνται από το μέγεθος της τάσης στους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης, τη διαφορά των γωνιών φάσης τάσεων μεταξύ αυτών των ζυγών καθώς και από τις φυσικές ιδιότητες της γραμμής όπως η αντίσταση και η αντίδραση. Το πλήθος αυτών των εξισώσεων είναι $|L|$ για τις εξισώσεις της ενεργού ισχύος και $|L|$ για τις εξισώσεις της άεργου ισχύος.

Οι ροές ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς (i,j) εκφράζονται ως ακολούθως:

$$P_{ij} = (v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij})g_{ij} - v_i v_j b_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (3.4)$$

$$Q_{ij} = -(v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij})b_{ij} - v_i v_j g_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (3.5)$$

Οι εισροές/εκροές ισχύος σε/από κάθε ζυγό, οι οποίοι μπορεί να είναι παραγωγής, κατανάλωσης ή μεταφοράς, αποτελούν το αλγεβρικό άθροισμα της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας και εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου. Το πλήθος αυτών των εξισώσεων είναι $|N|$ για τις εξισώσεις της ενεργού ισχύος και $|N|$ για τις εξισώσεις της άεργου ισχύος.

Το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στον ζυγό i εκφράζονται ως ακολούθως :

$$P_{g,i} + P_{w,i} - P_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} P_{ij} + v_i^2 \cdot \sum_{j=1}^N G_{ij} \quad (3.6)$$

$$Q_{g,i} + Q_{w,i} - Q_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} Q_{ij} + v_i^2 \cdot \sum_{j=1}^N -B_{ij} \quad (3.7)$$

- G_{ij} : πραγματικό μέρος του στοιχείου (i,j) της μήτρας αγωγιμοτήτων Y
- B_{ij} : φανταστικό μέρος του στοιχείου (i,j) της μήτρας αγωγιμοτήτων Y

Ο δεύτερος όρος στις (3.6) και (3.7) , ο οποίος αντιπροσωπεύει την ροή ισχύος που προκύπτει από την σύνδεση των επαγωγικών ή χωρητικών στοιχείων αντιστάθμισης στον ζυγό όπου μελετάται το ισοζύγιο ισχύος. Η έγχυση ή απορρόφηση ισχύος από αυτά τα στοιχεία υπολογίζεται από το γινόμενο της αγωγιμότητας του στοιχείου και του τετραγώνου του μεγέθους της τάσης που αντιστοιχούν σε αυτόν τον ζυγό. Ο υπολογισμός των G_{ij} και B_{ij} γίνεται μέσω της μήτρας αγωγιμοτήτων Y .

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \dots & Y_{1,|N|} \\ Y_{1,1} & Y_{1,2} & \dots & Y_{1,|N|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{|N|,1} & Y_{|N|,2} & \dots & Y_{|N|,|N|} \end{bmatrix}, |Y| = |N| \times |N| \quad (3.8)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} y_i + \sum_{j=1,2,\dots,N} y_{ij}, & i = j \\ -y_{ij}, & i \neq j \end{cases}, y_{ij} = g_{ij} + j \cdot b_{ij} \quad (3.9)$$

3.2.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου του προβλήματος AC – OPF που προτείνεται εκφράζεται ως συνάρτηση ενός πολυώνυμου της παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

$$f_{OPF} = \min \left\{ \sum_{g \in G} [(c_{g,2}^P \cdot P_g^2 + c_{g,1}^P \cdot P_g + c_{g,0}^P) + (c_{g,2}^Q \cdot P_g^2 + c_{g,1}^Q \cdot P_g + c_{g,0}^Q)] \right\} \quad (3.10)$$

$c_{g,2}^P, c_{g,1}^P, c_{g,0}^P$: συντελεστές κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος

$c_{g,2}^Q, c_{g,1}^Q, c_{g,0}^Q$: συντελεστές κόστους παραγωγής άεργου ισχύος

Στόχος της αντικειμενική συνάρτησης στο AC – OPF είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ισχύος στο συνολικό σύστημα. Κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας έχει τον δικό της συντελεστή κόστους παραγωγής ισχύος, ο οποίος εκφράζεται ως μονάδα χρήματος ανά μονάδα ισχύος και πολλαπλασιάζοντάς τον με την παραγωγή ισχύος προκύπτει το συνολικό κόστος παραγωγής για την συγκεκριμένη μονάδα. Οι Α.Π.Ε έχουν επιλεχθεί να έχουν μηδενικούς συντελεστές.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει επίσης να λάβει υπόψη διάφορους περιορισμούς. Αυτοί περιλαμβάνουν τη μέγιστη και ελάχιστη ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τις συνδεδεμένες μονάδες παραγωγής, την διατήρηση των επιπέδων τάσης εντός ασφαλών ορίων σε κάθε ζυγό καθώς και την εξασφάλιση ότι οι γραμμές μεταφοράς λειτουργούν εντός των θερμικών τους ορίων. Επιπλέον, περιορίζεται και η διαφοράς των γωνιών φάσης τάσεων μεταξύ των ζυγών, η οποία δεν αναλύεται στην προτεινόμενη διατύπωση.

Ο περιορισμός της ροής φαινόμενης ισχύος στην γραμμή μεταφοράς (i,j) εκφράζεται ως εξής:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{ij,max}^2 \quad (3.11)$$

Οι λειτουργικοί περιορισμοί που αντιστοιχούν στις μονάδες παραγωγής και στις χαρακτηριστικές τιμές των ζυγών εκφράζονται ως εξής:

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3.12)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (3.13)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (3.14)$$

3.2.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση του νέου μοντέλου δικτύου καθώς και η ανάλυση της διαδικασίας γραμμικοποίησης των εξισώσεων σύμφωνα με την [7]. Το προτεινόμενο μοντέλο βελτιώνει την ακρίβεια των λύσεων DC – OPF χωρίς να απαιτείται πρόσθετη πληροφορία, αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου DC – OPF. Η μέθοδος αυτή προσφέρει μια αποδοτική προσέγγιση για τη διαχείριση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας σημαντικούς παράγοντες όπως η άεργος ισχύς και το μέτρο τάσης, και βελτιώνει τη συνολική ακρίβεια και αποδοτικότητα του συστήματος. Το αρχικό μαθηματικό μοντέλο δικτύου αποτελείται από γραμμικούς όρους που αντιπροσωπεύουν την ροή ισχύος καθώς και τους μη γραμμικούς όρους που αντιπροσωπεύουν τις απώλειες.

➤ Έκφραση ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.

Οι ροές ισχύος στην γραμμή μεταφοράς (i,j) εκφράζονται στις (3.4) και (3.5). Για να διατηρηθεί η πληροφορία που περιέχουν τόσο οι γραμμικοί αλλά και οι μη γραμμικοί, χρησιμοποιείται ως εργαλείο γραμμικοποίησης το ανάπτυγμα σε σειρά Taylor δεύτερης τάξης των συναρτήσεων ημίτονου και συνημίτονου [10]. Η σειρά Taylor είναι μια μαθηματική αναπαράσταση μιας συνάρτησης ως άθροισμα άπειρων όρων που υπολογίζονται από τις τιμές των παραγώγων της σε ένα μόνο σημείο. Συγκεκριμένα, για μια συνάρτηση $f(x)$ η σειρά Taylor γύρω από ένα σημείο a δίνεται από:

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \dots \quad (3.15)$$

Αυτή η σειρά επιτρέπει την προσέγγιση πολύπλοκων συναρτήσεων με πολυώνυμα, τα οποία είναι πολύ απλούστερα στη χρήση. Στο πλαίσιο της γραμμικοποίησης, η σειρά Taylor είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Η γραμμικοποίηση περιλαμβάνει την προσέγγιση μιας συνάρτησης κοντά σε ένα σημείο a χρησιμοποιώντας τον πρώτο όρο (την τιμή της συνάρτησης στο σημείο a) και τον όρο της πρώτης

παραγώγου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια γραμμική συνάρτηση που προσεγγίζει στενά την αρχική συνάρτηση κοντά στο σημείο a .

Μαθηματικά, η γραμμική προσέγγιση της $f(x)$ κοντά στο $x = a$ είναι:

$$f(x) \approx f(a) + f'(a)(x - a) \quad (3.16)$$

Υποθέτοντας ότι η τιμή της γωνίας θ_{ij} , όπου $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$, είναι κανονικά ένας μικρός αριθμός και σε συνδυασμό με την γραμμική προσέγγιση στην (3.16) κοντά στο $x = 0$ προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\sin(\theta_{ij}) \approx \theta_{ij}, \quad \cos(\theta_{ij}) \approx 1 - \frac{\theta_{ij}^2}{2} \quad (3.17)$$

Η προσέγγιση γραμμικοποίησης εκμεταλλεύεται το γεγονός πως το μέγεθος της τάσης στους ζυγούς του δικτύου v_i βρίσκεται κοντά στο 1 α.μ, $v_i \approx 1, \forall i \in N$, με βάση το ανά μονάδα σύστημα ώστε να διαχωρίσει τους όρους που προκύπτουν από τα γινόμενα μεταξύ του μεγέθους και της γωνίας τάσης. Με αυτόν τον τρόπο :

$$v_i v_i \theta_{ij} \approx \theta_{ij}, \quad v_i v_i \theta_{ij}^2 \approx \theta_{ij}^2 \quad (3.18)$$

Με την αντικατάσταση των (3.17) και (3.18) στις (3.4) και (3.5), προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_{ij} = g_{ij}(v_i^2 - v_i v_j) - b_{ij} \theta_{ij} + \frac{1}{2} g_{ij} \theta_{ij}^2 \quad (3.19)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}(v_i^2 - v_i v_j) - g_{ij} \theta_{ij} + \frac{1}{2} (-b_{ij}) \theta_{ij}^2 \quad (3.20)$$

Το τετράγωνο του μεγέθους της τάσης ζυγού v_i^2 αναλογίζεται πλέον ως ανεξάρτητη μεταβλητή ενώ χρησιμοποιείται και ένας μαθηματικός μετασχηματισμός ($v_{ij} = v_i - v_j$) για τον μη γραμμικό όρο μεγέθους τάσης, ως παρακάτω:

$$v_i^2 - v_i v_j = v_i^2 - \left(\frac{v_i^2 + v_j^2}{2} - \frac{v_{ij}^2}{2} \right) = \frac{v_i^2 - v_j^2}{2} + \frac{v_{ij}^2}{2} \quad (3.21)$$

Με την αντικατάσταση του (3.21) στις (3.19) και (3.20) προκύπτουν οι νέες εξισώσεις ροής ισχύος για το γραμμικοποιημένο μοντέλο όπου οι εξισώσεις ροής ισχύος είναι γραμμικές, εκτός από τις απώλειες :

$$P'_{ij} = g_{ij} \frac{v_i^2 - v_j^2}{2} - b_{ij} \theta_{ij} + P^L_{ij} \quad (3.22)$$

$$Q'_{ij} = -b_{ij} \frac{v_i^2 - v_j^2}{2} - g_{ij} \theta_{ij} + Q^L_{ij} \quad (3.23)$$

Ο τρίτος όρος των εξισώσεων εκφράζει τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς ενώ αποτελείται από δύο μέρη, τον όρο της γωνίας της τάσης και τον όρο του μεγέθους της τάσης.

$$P_{ij}^L = P_{ij,\theta}^L + P_{ij,v}^L = \frac{g_{ij}}{2} \theta_{ij}^2 + \frac{g_{ij}}{2} v_{ij}^2 \quad (3.24)$$

$$Q_{ij}^L = Q_{ij,\theta}^L + Q_{ij,v}^L = -\frac{b_{ij}}{2} \theta_{ij}^2 - \frac{b_{ij}}{2} v_{ij}^2 \quad (3.25)$$

Βασισμένες σε μια αρχική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, όπου οι τιμές των v και θ είναι $(v_{i,0}, \theta_{ij,0})$, οι απώλειες γραμμικοποιούνται ως εξής:

$$P_{ij}^L \approx LF_{P,\theta}^T \cdot \theta_{ij} + LF_{P,v^s}^T \cdot (v_i^2 - v_j^2) + \text{offset}_{P,ij} \quad (3.26)$$

$$Q_{ij}^L \approx LF_{Q,\theta}^T \cdot \theta_{ij} + LF_{Q,v^s}^T \cdot (v_i^2 - v_j^2) + \text{offset}_{Q,ij} \quad (3.27)$$

Οι συντελεστές $LF_{P,\theta}^T$, LF_{P,v^s}^T , $LF_{Q,\theta}^T$, LF_{Q,v^s}^T είναι οι παράγοντες απωλειών για το προτεινόμενο μοντέλο. Συγκριτικά με τη συνήθως χρησιμοποιούμενη μέθοδο DC – OPF, η εκτίμηση των απωλειών είναι πιο ακριβής επειδή η αλλαγή στις απώλειες που προκαλείται από διαφορετικά επίπεδα τάσης αναπαρίσταται από τους παράγοντες LF_{P,v^s}^T και LF_{Q,v^s}^T . Οι συντελεστές $\text{offset}_{P,ij}$ και $\text{offset}_{Q,ij}$ εξαρτώνται από την αρχική κατάσταση του συστήματος. Σύμφωνα με την ανάπτυξη της πρώτης τάξης της ακολουθίας Taylor (3.16), οι όροι $P_{ij,\theta}^L, P_{ij,v}^L, Q_{ij,\theta}^L, Q_{ij,v}^L$ μπορεί να γραμμικοποιηθούν ως εξής:

$$P_{ij,\theta}^L \approx g_{ij} \theta_{ij,0} \theta_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} \theta_{ij,0}^2 \quad (3.28)$$

$$P_{ij,v^s}^L \approx \frac{g_{ij} (v_{i,0} - v_{j,0})}{2 (v_{i,0} + v_{j,0})} (v_i^2 - v_j^2) - \frac{g_{ij}}{2} (v_{i,0} - v_{j,0})^2 \quad (3.29)$$

$$Q_{ij,\theta}^L \approx -b_{ij} \theta_{ij,0} \theta_{ij} + \frac{b_{ij}}{2} \theta_{ij,0}^2 \quad (3.30)$$

$$Q_{ij,v^s}^L \approx -b_{ij} \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})} (v_i^2 - v_j^2) + \frac{b_{ij}}{2} (v_{i,0} - v_{j,0})^2 \quad (3.31)$$

Συντελεστής	Έκφραση
$LF_{P,\theta}^T$	$g_{ij} \theta_{ij,0}$
LF_{P,v^s}^T	$\frac{g_{ij} (v_{i,0} - v_{j,0})}{2 (v_{i,0} + v_{j,0})}$
$LF_{Q,\theta}^T$	$-b_{ij} \theta_{ij,0}$
LF_{Q,v^s}^T	$-b_{ij} \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})}$
$\text{offset}_{P,ij}$	$-\frac{1}{2} g_{ij} \theta_{ij,0}^2 - \frac{g_{ij}}{2} (v_{i,0} - v_{j,0})^2$
$\text{offset}_{Q,ij}$	$\frac{b_{ij}}{2} \theta_{ij,0}^2 + \frac{b_{ij}}{2} (v_{i,0} - v_{j,0})^2$

Πίνακας 3.1 : Έκφραση των συντελεστών απώλειας σύμφωνα με το ανάπτυγμα 1^{ης} τάξης ακολουθίας Taylor

Επομένως η πλήρης έκφραση της γραμμικής προσέγγισης της ροής ενεργού και άεργου ισχύος στην γραμμή μεταφοράς (i,j) έχει ως εξής:

$$P'_{ij} = g_{ij} \left[\frac{1}{2} + \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})} \right] (v_i^2 - v_j^2) + (g_{ij}\theta_{ij,0} - b_{ij})\theta_{ij} - \frac{g_{ij}}{2} [\theta_{ij,0}^2 + (v_{i,0} - v_{j,0})^2] \quad (3.32)$$

$$Q'_{ij} = -b_{ij} \left[\frac{1}{2} + \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})} \right] (v_i^2 - v_j^2) - (b_{ij}\theta_{ij,0} + g_{ij})\theta_{ij} + \frac{b_{ij}}{2} [\theta_{ij,0}^2 + (v_{i,0} - v_{j,0})^2] \quad (3.33)$$

Το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στον ζυγό i εκφράζονται ως ακολούθως :

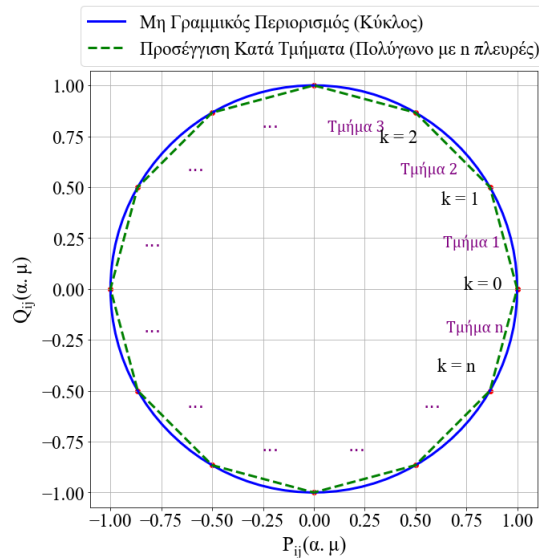
$$P_{g,i} + P_{w,i} - P_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} P'_{ij} + v_i^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^N G_{ij} \right) \quad (3.34)$$

$$Q_{g,i} + Q_{w,i} - Q_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} Q'_{ij} + v_i^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^N -B_{ij} \right) \quad (3.35)$$

Τέλος γίνεται η γραμμικοποίηση του περιορισμού που επιβάλλεται στην ροή φαινόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς[10]. Ο αρχικός περιορισμός είναι μη γραμμικός και δίνεται από την ανισότητα (3.11):

$$P'_{ij}{}^2 + Q'_{ij}{}^2 \leq S_{ij,max}^2 \quad (3.36)$$

Αυτή η εξίσωση αναπαριστά έναν κύκλο στον χώρο P-Q με ακτίνα $S_{ij,max}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση της (3.11) είναι κυρτή και το βασικό ζήτημα στον μαθηματικό προγραμματισμό είναι η κυρτοποίηση, όχι η γραμμικοποίηση. Ωστόσο, για να δημιουργηθεί ένα γραμμικό μοντέλο και να αποκτήσει η εξίσωση γραμμικούς όρους χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικοποίησης κατά τμήματα. Συγκεκριμένα, ο κύκλος προσεγγίζεται από ένα πολυγωνικό περίγραμμα με n πλευρές. Με αυτόν τον τρόπο, ο αρχικός μη γραμμικός περιορισμός μετατρέπεται σε n γραμμικούς περιορισμούς.



Σχήμα 3.1: Γραμμική προσέγγιση κατά τμήματα του μη γραμμικού περιορισμού

Για να προσεγγιστεί ο κύκλος με n γραμμικά τμήματα, χρησιμοποιείται ένα κανονικό πολύγωνο n πλευρών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Οι κορυφές του πολυγώνου έχουν συντεταγμένες:

$$\left(S_{ij,max} \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right), S_{ij,max} \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \text{ για } k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3.37)$$

Κάθε πλευρά του πολυγώνου ορίζεται από μια ευθεία που συνδέει δύο διαδοχικές κορυφές. Για δύο διαδοχικές κορυφές k και $k+1$, οι συντεταγμένες είναι:

$$\left(S_{ij,max} \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right), S_{ij,max} \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) \quad (3.38)$$

$$\left(S_{ij,max} \cos\left(\frac{2\pi(k+1)}{n}\right), S_{ij,max} \sin\left(\frac{2\pi(k+1)}{n}\right) \right) \quad (3.39)$$

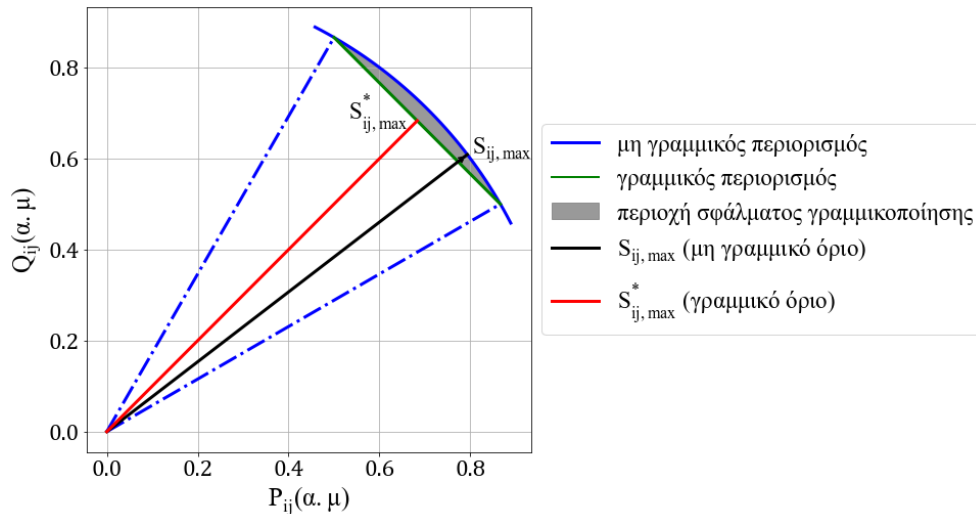
Ένα γραμμικό τμήμα του πολυγώνου που συνδέει τις δύο διαδοχικές κορυφές μπορεί να γραφτεί ως:

$$\left(\sin\left(\frac{2\pi(k+1)}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) P'_{ij} - \left(\cos\left(\frac{2\pi(k+1)}{n}\right) - \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right) \right) Q'_{ij} \leq S_{ij,max} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \quad (3.40)$$

Τα n τμήματα συνθέτουν τη γραμμική προσέγγιση του κυκλικού περιορισμού, επιτρέποντας την εφαρμογή γραμμικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος. Μετά την γραμμικοποίηση προκύπτουν $n \times |L|$ γραμμικοί περιορισμοί με την τελική εξίσωση κάθε γραμμικού περιορισμού να είναι:

$$\left(\sin\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi(l-1)}{n}\right) \right) P'_{ij} - \left(\cos\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \cos\left(\frac{2\pi(l-1)}{n}\right) \right) Q'_{ij} \leq S_{ij,max} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \quad (3.41)$$

- l : πλευρά του πολυγώνου.
- n : συνολικός αριθμός πλευρών του πολύγωνα
- $S_{ij,max}$: μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της ροής φαινόμενης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς.
- P_{ij}, Q_{ij} : Οι τιμές της πραγματικής και άεργης ισχύος αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2: Γραφική παράσταση σφάλματος γραμμικοποίησης

Το βασικό μειονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι η αύξηση του χρόνου υπολογισμού και της πολυπλοκότητας καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πλευρών $\mathbf{n}$. Ο αριθμός των τμημάτων $\mathbf{n}$ επιλέγεται με τέτοιον τρόπο ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Περισσότερα τμήματα αυξάνουν την ακρίβεια αλλά αυξάνουν και τον αριθμό των γραμμικών περιορισμών, οδηγώντας σε μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2 μεταξύ της καμπύλης αντιπροσωπεύει τον κυκλικό περιορισμό που ορίζεται από την εξίσωση (3.36) και ενός εκ των γραμμικών τμημάτων του πολυγώνου που προσεγγίζουν τον κυκλικό περιορισμό βρίσκεται η σκιασμένη περιοχή που αντιπροσωπεύει το σφάλμα γραμμικοποίησης μεταξύ του κύκλου και του πολυγώνου. Στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα γραμμικοποίησης, ενώ διατηρείται ο αριθμός των γραμμικών περιορισμών σε υπολογιστικά χαμηλό επίπεδο. Το σφάλμα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ως η μέγιστη απόσταση μεταξύ του κύκλου και του πολυγώνου, η οποία μειώνεται καθώς αυξάνεται το $\mathbf{n}$. Ο ελάχιστος αριθμός τμημάτων μπορεί να μέσω ανάλυσης ευαισθησίας ορίζοντας ένα ανεκτό όριο σφάλματος ϵ .

Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος παίρνει την εξής μορφή:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$f_{\text{OPF}} = \min \left\{ \sum_{g \in G} [(c_{g,2}^P \cdot P_g^2 + c_{g,1}^P \cdot P_g + c_{g,0}^P) + (c_{g,2}^Q \cdot P_g^2 + c_{g,1}^Q \cdot P_g + c_{g,0}^Q)] \right\} \quad (3.10)$$

Ροή ενεργού και άεργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς (i,j) :

$$P'_{ij} = g_{ij} \left[\frac{1}{2} + \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})} \right] (v_i^2 - v_j^2) + (g_{ij}\theta_{ij,0} - b_{ij})\theta_{ij} - \frac{g_{ij}}{2} [\theta_{ij,0}^2 + (v_{i,0} - v_{j,0})^2] \quad (3.32)$$

$$Q'_{ij} = -b_{ij} \left[\frac{1}{2} + \frac{(v_{i,0} - v_{j,0})}{(v_{i,0} + v_{j,0})} \right] (v_i^2 - v_j^2) - (b_{ij}\theta_{ij,0} + g_{ij})\theta_{ij} + \frac{b_{ij}}{2} [\theta_{ij,0}^2 + (v_{i,0} - v_{j,0})^2] \quad (3.33)$$

Ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στους ζυγούς i :

$$P_{g,i} + P_{w,i} - P_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} P'_{ij} + v_i^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^N G_{ij} \right) \quad (3.34)$$

$$Q_{g,i} + Q_{w,i} - Q_{d,i} = \sum_{(i,j) \in L} Q'_{ij} + v_i^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^N -B_{ij} \right) \quad (3.35)$$

Περιορισμοί μεγέθους τάσεως ζυγών i και ροής φαινόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς (i,j) :

$$\left(\sin\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi(l-1)}{n}\right) \right) P'_{ij} - \left(\cos\left(\frac{2\pi l}{n}\right) - \cos\left(\frac{2\pi(l-1)}{n}\right) \right) Q'_{ij} \leq S_{ij,\max} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \quad (3.41)$$

$$(\underline{v}_i)^2 \leq v_i^2 \leq (\bar{v}_i)^2 \quad (3.42)$$

Λειτουργικοί περιορισμοί συμβατικών μονάδων παραγωγής:

$$p_g^{\min} \leq p_g \leq p_g^{\max} \quad (3.12)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (3.13)$$

3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ

Οι παραδοσιακές αιτιοκρατικές προσεγγίσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος (OPF), όπως αυτή που αναλύθηκε παραπάνω, συχνά δεν επαρκούν για την κατάλληλη αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που εισάγουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η ενσωμάτωση πιθανοτικών περιορισμών στη διατύπωση του OPF εξασφαλίζει ότι πολλαπλοί περιορισμοί ικανοποιούνται ταυτόχρονα με υψηλή πιθανότητα, λαμβάνοντας υπόψη τη στοχαστική φύση του συστήματος. Ωστόσο, η επίλυση των προβλημάτων OPF με κοινούς πιθανοτικούς περιορισμούς είναι υπολογιστικά απαιτητική και συχνά μη εφικτή για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τη μετατροπή του προβλήματος με κοινό πιθανοτικό περιορισμό σε αιτιοκρατικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που προσεγγίζει τους πιθανολογικούς περιορισμούς [8]. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται σύγκλιση προς μια εφικτή λύση του προβλήματος OPF καθώς η προσομοίωση γίνεται από αιτιοκρατικά εργαλεία επίλυσης μαθηματικών μοντέλων συμπεριλαμβάνοντας ταυτόχρονα και το αντίκτυπο της αβεβαιότητας. Παράλληλα γίνεται χρήση και μιας άλλης μεθόδου [9] η οποία που μειώνει την πολυπλοκότητα της επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος μέσω προβλεπτικών μοντέλων. Η διαδικασία εκτέλεσης του αλγόριθμου μπορεί να αναλυθεί μέσω των παρακάτω βημάτων:

➤ Προσομοιώσεις Monte Carlo για την δημιουργία στατιστικών δεδομένων:

Σημαντικό βήμα του αλγόριθμου αποτελούν οι προσομοιώσεις Monte Carlo [11]. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo είναι μια υπολογιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για την κατανόηση της επίδρασης της αβεβαιότητας σε ένα σύστημα ή μια διαδικασία. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την εκτίμηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης συστημάτων που επηρεάζονται από τυχαίες μεταβλητές. Η μέθοδος βασίζεται στη δειγματοληψία τυχαίων αριθμών από κατανομές πιθανότητας για τις εισόδους του συστήματος. Αυτές οι κατανομές μπορούν να αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα στις παραμέτρους του συστήματος, όπως η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή η ζήτηση φορτίου. Η προσομοίωση σεναρίων γίνεται ώστε να εκτελεστούν δύο από τα επόμενα βήματα στην μέθοδο που προτείνεται.

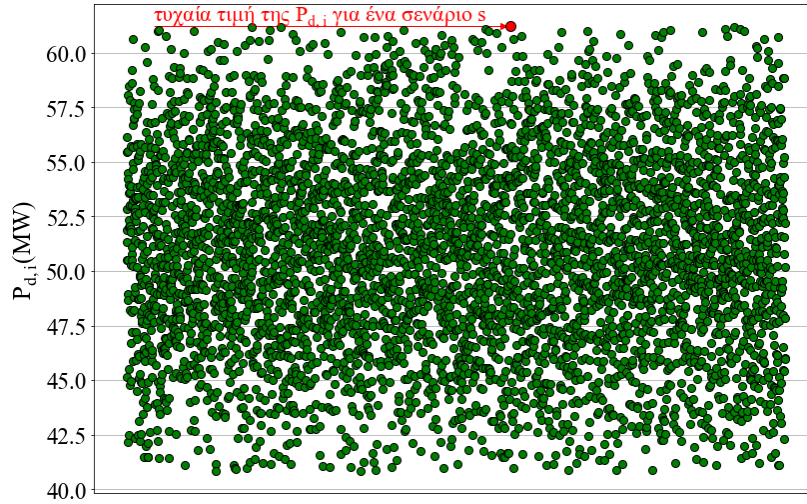
Μια προσομοίωση Monte Carlo προκύπτει από μια επίλυση του μοντέλου του προβλήματος OPF, που γραμμικοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, απενεργοποιώντας τους περιορισμούς μεγέθους τάσης ζυγού και ροής φαινόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Ως αποτέλεσμα λαμβάνεται μια εικόνα σχετικά με το πότε παραβιάζεται ένας οποιοσδήποτε περιορισμός είτε παραπάνω από έναν ταυτόχρονα καθώς μπορεί να γίνει έλεγχος του αποτελέσματος.

Για ένα δίκτυο δημιουργείται ένας πίνακας δεδομένων ζήτησης $\mathbf{D_d}$ που αντιστοιχεί στην ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος $(P_{d,i}, Q_{d,i})$ για κάθε ζυγό $i \in \mathbf{N}$ αλλά και ένας πίνακας δεδομένων των ΑΠΕ $\mathbf{D_w}$ που αντιστοιχεί στην δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος $(P_{w,i})$ από τις Α.Π.Ε για κάθε ζυγό $i \in \mathbf{W}$.

$$[D_d] := \begin{bmatrix} P_{d,1}^{s_1} & \dots & P_{d,|N|}^{s_1} & | & Q_{d,1}^{s_1} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{d,1}^{s_{|S|}} & \dots & P_{d,|N|}^{s_{|S|}} & | & Q_{d,1}^{s_{|S|}} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_{|S|}} \end{bmatrix}_{(|S| \times 2|N|)} \quad (3.43)$$

$$[D_w] := [P_{w,i}^s]_{(|S| \times |W|)}, \quad i \in W, \quad s \in S \quad (3.44)$$

- S : σύνολο των σεναρίων που θα προσομοιωθούν, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$



Σχήμα 3.3 : Γραφική παράσταση συνόλου πιθανών τιμών της $P_{d,i} \sim \mathcal{N}(\mu_{P,i}, \sigma_{P,i}^2)$

Αυτός ο μεγάλος αριθμός πιθανών τιμών, όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 3.4 για ένα εκ των μεγεθών σε ένα ζυγό i , αναπαριστά το σύνολο όλων των πιθανών που αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό φορτίο του δικτύου και την έγχυση ισχύος από τις ΑΠΕ. Τα μεγέθη $P_{d,i}$, $Q_{d,i}$ και $P_{w,i}$ μπορούν να οριστούν ως τυχαίες συνεχείς μεταβλητές καθώς σύμφωνα με την θεωρία των πιθανοτήτων [10] μια τυχαία μεταβλητή είναι μια μεταβλητή που παίρνει τιμές από ένα πεδίο ορισμού ως αποτέλεσμα τυχαίων φαινομένων. Η πιθανότητα μια συνεχής τυχαίας μεταβλητής να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή ορίζεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – P.D.F), η οποία περιγράφει την κατανομή των πιθανοτήτων της.

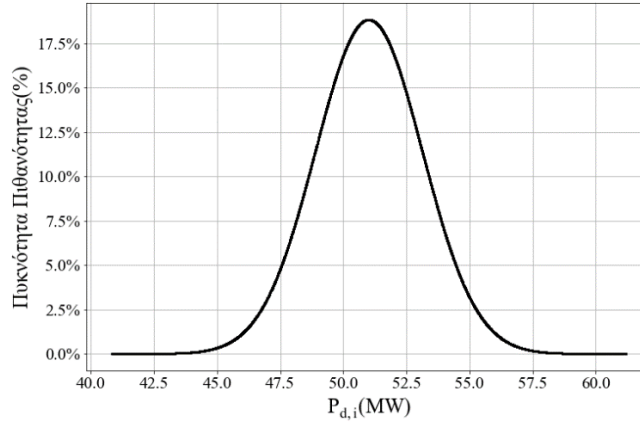
Η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το αιολικό δυναμικό στην τοποθεσία του, η κατανομή του οποίου προσεγγίζεται από μια κατανομή Weibull. Επομένως επιλέγεται έτσι ώστε οι $P_{d,i}$ και $Q_{d,i}$ να ακολουθούν κανονική κατανομή ενώ η $P_{w,i}$ να ακολουθεί κατανομή Weibull. Η κανονική κατανομή είναι θεμελιώδης στη στατιστική λόγω των ιδιοτήτων της και της ευκολίας με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή διάφορων μεγεθών. Είναι μια συμμετρική κατανομή που έχει το σχήμα καμπάνας, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.4, και περιγράφεται από την εξής συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.45)$$

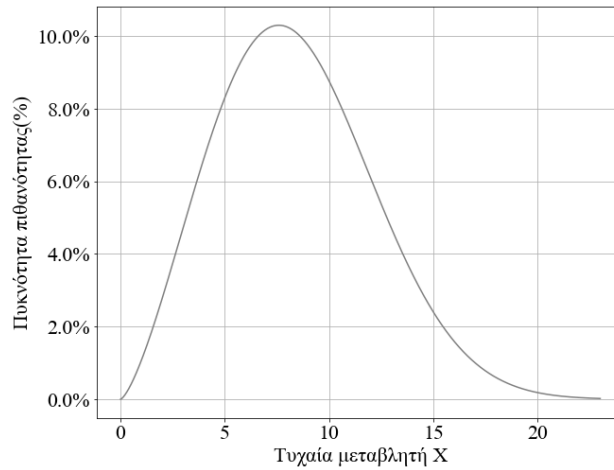
- μ : μέση τιμή (ή αναμενόμενη τιμή) της κατανομής
- σ : τυπική απόκλιση
- σ^2 : διακύμανση.

$$\begin{aligned} P_{d,i} &\sim \mathcal{N}(\mu_{P,i}, \sigma_{P,i}^2), & i \in N \\ Q_{d,i} &\sim \mathcal{N}(\mu_{Q,i}, \sigma_{Q,i}^2), & i \in N \end{aligned}$$

- $\mu_{P,i}, \sigma_{P,i}^2$: μέση τιμή και διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής ζήτησης ενεργού ισχύος στον ζυγό i
- $\mu_{Q,i}, \sigma_{Q,i}^2$: μέση τιμή και διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής ζήτησης άεργου ισχύος στον ζυγό i



Σχήμα 3.4 : Γραφική παράσταση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής της $P_{d,i}$



Σχήμα 3.5 : Γραφική παράσταση πυκνότητας πιθανότητας τυχαίας μεταβλητής X

Από την άλλη, η κατανομή Weibull είναι μια μη-συμμετρική κατανομή και απεικονίζεται στο σχήμα 3.5 ενώ περιγράφεται από την εξής συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-(x/\lambda)^k} \quad (3.46)$$

- k : παράμετρος κλίμακας
- λ : παράμετρος σχήματος

➤ **Αποσύνθεση της από κοινού πιθανότητας παραβίασης περιορισμών:**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διατύπωση με από κοινού πιθανοτικούς περιορισμούς (Joint Chance Constraint - JCC) του προβλήματος OPF να μεν εκφράζει την ύπαρξη της αβεβαιότητας στην λειτουργία του δικτύου, όμως η επίλυσή της είναι υπολογιστικά απαιτητική και συγχρόνως χρονοβόρα. Η προσέγγιση αυτής της διατύπωσης ξεκινάει από την αποσύνθεση της από κοινού πιθανότητας παραβίασης όλων των περιορισμών του OPF σε επιμέρους πιθανοτικούς περιορισμούς (Single Chance Constraint – SCC) μέσω των στατιστικών δεδομένων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις Monte Carlo. Κάθε επιμέρους πιθανοτικός περιορισμός περιγράφει την πιθανότητα μια λειτουργική παράμετρος του συστήματος να βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο διαχειριστής του δικτύου. Αυτή η πιθανότητα υπολογίζεται και εκφράζεται ποσοστιαία με ένα συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης α που προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Στην ενότητα 2.2.1 παρουσιάστηκε η διατύπωση ενός JCC προβλήματος βελτιστοποίησης όπου ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί ισότητας καθώς και οι περιορισμοί ανισότητας. Επίσης ορίστηκε και η κοινή πιθανότητα παραβίασης των περιορισμών ανισότητας, όπου:

$$\mathbb{P} \left[\bigcap_m h_m(\xi) \leq 0 \right] \geq \alpha = 1 - \varepsilon, \quad m \in \{1, \dots, p\} \quad (3.47)$$

- ε : τιμή παραβίασης κοινής πιθανότητας

Στο διάνυσμα περιορισμών ανισότητας συμπεριλαμβάνονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των μεγεθών των ζυγών i και των γραμμών μεταφοράς (i,j) :

$$\vec{h}(\xi) := \left[\left[h_{\bar{V}_1}(\xi), \dots, h_{\bar{V}_{|N|}}(\xi) \right] \left[h_{\underline{V}_1}(\xi), \dots, h_{\underline{V}_{|N|}}(\xi) \right] \left[h_{L_{(i,j)_1}^1}(\xi), \dots, h_{L_{(i,j)_{|L|}}^n}(\xi) \right] \right] \quad (3.48)$$

- ξ : διάνυσμα των μεταβλητών καταστάσεως
- $\vec{h}(\xi)$: διάνυσμα περιορισμών ανισότητας με m στοιχεία, $m = 1, \dots, p$ όπου $p = 2 \times |N| + n \times |L|$
- $h_{\bar{V}_i}(\xi)$: περιορισμός άνω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i , $i = 1, \dots, |N|$
- $h_{\underline{V}_i}(\xi)$: περιορισμός κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i , $i = 1, \dots, |N|$
- $h_{L_{(i,j)_1}^1}(\xi)$: περιορισμός ροής φαινόμενης ισχύος στην γραμμή μεταφοράς (i,j) για το γραμμικό τμήμα l , $(i,j) \in L := \{(i,j)_1, \dots, (i,j)_{|L|}\}$, $l \in \{1, \dots, n\}$

Έστω Y_m είναι το ενδεχόμενο ένας εκ των περιορισμών ανισότητας $h_m(\xi)$ του συστήματος να ικανοποιείται. Ορίζεται αυτό το ενδεχόμενο ως εξής:

$$Y_m := \{h_m(\xi) \leq 0\}, \quad m \in \{1, \dots, p\} \quad (3.49)$$

$$B_m := Y_m = \text{το ενδεχόμενο να ικανοποιείται ο περιορισμός } \mathbf{m} \quad (3.50)$$

$$A_m := B_m^c := \text{το ενδεχόμενο να μην ικανοποιείται ο περιορισμός } \mathbf{m} \quad (3.51)$$

Γίνεται μια αρχική ανάλυση ως προς την συμβατική προσέγγιση του υπολογισμού των επιμέρους τιμών παραβίασης των SCC προβλημάτων που μπορούν να προσεγγίσουν το αρχικό JCC πρόβλημα του OPF για ένα Σ.Η.Ε σύμφωνα με την [7]. Συνδυάζοντας την (3.46) με τις (3.48) και (3.49) προκύπτει η:

$$\mathbb{P} \left[\bigcap_{m=1}^p B_m \right] \geq \alpha = 1 - \varepsilon \quad (3.52)$$

Από την θεωρία των συνόλων είναι γνωστό πως το συμπληρωματικό ενός ενδεχομένου είναι να μην συμβεί αυτό το ενδεχόμενο κάτι που εφαρμόζεται και στην (3.50) σχετικά με την κοινή πιθανότητα ικανοποίησης των ενδεχομένων B_m .

$$\mathbb{P} \left[\bigcap_{m=1}^p B_m \right] = 1 - \mathbb{P} \left[\left(\bigcap_{m=1}^p B_m \right)^c \right] \quad (3.53)$$

Επίσης το συμπληρωματικό της τομής των ενδεχομένων B_m αντιστοιχεί στην ένωση των ενδεχομένων A_m . Σύμφωνα με τους νόμους του De Morgan, το συμπληρωματικό της τομής είναι ίσο με την ένωση των συμπληρωματικών από όπου και προκύπτει και η (3.52).

$$\mathbb{P} \left[\bigcap_{m=1}^p B_m \right] = 1 - \mathbb{P} \left[\bigcup_{m=1}^p A_m \right] = 1 - \varepsilon \quad (3.54)$$

Από την αρχή εγκλεισμού-αποκλεισμού [8] προκύπτει η (3.51). Αυτή η αρχή διορθώνει την υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση των πιθανοτήτων που εμφανίζονται όταν υπολογίζεται την πιθανότητα της ένωσης πολλών γεγονότων.

$$\mathbb{P} \left[\bigcup_{m=1}^p A_m \right] := \sum_{m=1}^p \mathbb{P}[A_m] - \mathbb{P}[A_1 \cap A_2] - \dots + (-1)^{p-1} \cdot \mathbb{P} \left[\bigcap_{m=1}^p A_m \right] := \sum_{m=1}^p \mathbb{P}[A_m] + P_c \quad (3.55)$$

- P_c : η πιθανότητα της τομής των ενδεχομένων A_m , δηλαδή το άθροισμα των πιθανοτήτων παραβίασης δύο, τριών έως και όλων των περιορισμών ταυτόχρονα

Η (3.51) χρησιμοποιείται για τον ακριβή υπολογισμό της πιθανότητας της ένωσης των γεγονότων διασφαλίζοντας την σωστή έκφραση της της κοινής πιθανότητας παραβίασης ε . Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια όσο πιο ακριβής εκτίμηση των επιμέρους τιμών παραβίασης ε_m κατά την διαδικασία αποσύνθεσης της κοινής πιθανότητας παραβίασης ε που ζητείται να επιτευχθεί [8]. Οι (3.52) και (3.53) δίνουν το εξής:

$$\varepsilon := \sum_{m=1}^p \mathbb{P}[A_m] + P_c = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_p + P_c \quad (3.56)$$

Οι τιμές παραβίασης ε_m , που προκύπτουν από την (3.52), περιγράφουν την συχνότητα με την οποία κάθε περιορισμός θα παραβιαζόταν εάν ο περιορισμός για κάθε λειτουργική μεταβλητή του OPF οριζόταν ως πιθανοτικός και αποδοθούν το JCC σε επιμέρους SCC προβλήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.

Joint Chance Constraint	Single Chance Constraints
$P \left[\bigcap_{m=1}^p B_m \right] \geq 1 - \varepsilon$	$\xrightarrow{\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_p + P_c} \begin{cases} P[B_1] \geq 1 - \varepsilon_1 \\ P[B_2] \geq 1 - \varepsilon_2 \\ \vdots \\ P[B_p] \geq 1 - \varepsilon_p \end{cases}$

Σχήμα 3.6 : Αποσύνθεση του προβλήματος JCC σε επιμέρους προβλήματα SCC

Στην συνέχεια θα πρέπει να εκτελεστούν προσομοιώσεις Monte Carlo του αιτιοκρατικού προβλήματος βελτιστοποίησης που διατυπώθηκε στην Ενότητα 3.2, όπου οι λειτουργικές μεταβλητές δεν περιορίζονται. Μέσα στο πλήθος των εφικτών λύσεων που δίνονται στο πρόβλημα υπάρχουν περιπτώσεις(ή σενάρια) όπου έστω μια είτε περισσότερες από αυτές τις λειτουργικές μεταβλητές παίρνουν μη εφικτές τιμές σύμφωνα με τους πραγματικούς περιορισμούς του συστήματος.

Καταγράφοντας το δείγμα που προκύπτει από τις προσομοιώσεις, μπορεί να γίνει στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων ώστε να εκτιμηθεί η συχνότητα παραβίασης κάθε επιμέρους περιορισμού αλλά και η συχνότητα παραβίασης δύο ή και περισσότερων περιορισμών. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, εξετάζεται το ακόλουθο παράδειγμα.

Γίνεται η υπόθεση για ένα δίκτυο ισχύος με τρεις ζυγούς και τρεις γραμμές μεταφοράς. Στους περιορισμούς που επιβάλλονται σε αυτό το δίκτυο είναι η διατήρηση των επιπέδων των μεγεθών των τάσεων στους ζυγούς $i \in N$ και της ροής φαινόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς $(i,j) \in L$ εντός αποδεκτών. Οι συνολικοί περιορισμοί που εφαρμόζονται είναι :

- $h_{\overline{V}_i}(\xi)$: περιορισμός άνω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i , $i = 1, \dots, |N|$
- $h_{\underline{V}_i}(\xi)$: περιορισμός κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i , $i = 1, \dots, |N|$
- $h_{L_{(i,j)}}^l(\xi)$: περιορισμός ροής φαινόμενης ισχύος στην γραμμή μεταφοράς (i,j) για το γραμμικό τμήμα l , $(i,j) \in L := \{(i,j)_1, \dots, (i,j)_{|L|}\}$, $l \in \{1, \dots, n\}$

Σύμφωνα με τις (3.46-3.50) για την διατύπωση του προβλήματος OPF δικτύου του παραδείγματος σαν JCC, προκύπτουν τα εξής:

- $\{A_1, \dots, A_3\}$: ενδεχόμενα παραβίασης $h_{\overline{V}_i}$, $i = \{1, \dots, 3\}$
- $\{A_4, \dots, A_6\}$: ενδεχόμενα παραβίασης $h_{\underline{V}_i}$, $i = \{1, \dots, 3\}$
- $\{A_7, \dots, A_{42}\}$: ενδεχόμενα παραβίασης $h_{L_{(i,j)}}^l$, $(i,j) \in L := \{(i,j)_1, \dots, (i,j)_6\}$, $l \in \{1, \dots, 6\}$

Έστω πως τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι το γεγονός $[A_1 \cap A_2]$ (υπέρταση στους ζυγούς 1 και 2 ταυτόχρονα) καταγράφηκε σε 3 από τα 1.000 σενάρια που προσομοιώθηκαν ή ότι το γεγονός $[A_4]$ (υπόταση στον ζυγό 1) καταγράφηκε σε 25 από τα 1.000 σενάρια. Έχοντας αυτά τα δεδομένα μπορούν να εκτιμηθούν οι πιθανότητες τα εξής:

$$\mathbb{P}[A_1 \cap A_2] = \frac{3}{1000} = 0,3\%, \quad \mathbb{P}[A_4] = \frac{25}{1000} = 2,5\%$$

Να σημειωθεί πως οι παραπάνω είναι απλές εκτιμήσεις των αντίστοιχων γεγονότων και πως χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία τους όπως θα αναλυθεί παρακάτω όπου παρουσιάζεται η ακολουθία

των βημάτων για την διαδικασία αποσύνθεσης σε επιμέρους πιθανοτικούς περιορισμούς. Η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Εκτελούνται οι προσομοιώσεις Monte Carlo όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για ένα μεγάλο πλήθος σεναρίων. Ορίζεται για την διατύπωση του JCC προβλήματος μια τιμή παραβίασης ε .
2. Αξιολογείται ο κάθε περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης με βάση τις προδιαγραφές του δικτύου και καταγράφεται για κάθε σενάριο ποιοι περιορισμοί ικανοποιήθηκαν και ποιοι παραβιάστηκαν.
3. Υπολογίζεται η εκτιμώμενη τιμή παραβίασης $\tilde{\varepsilon}_m$, $m \in \{1, \dots, p\} \forall$ περιορισμό m και η κοινή τιμή παραβίασης όλων των πιθανών ενώσεων P_c των περιορισμών

$$\tilde{\varepsilon}_1 = \mathbb{P}[A_1], \dots, \tilde{\varepsilon}_m = \mathbb{P}[A_m], \dots, \tilde{\varepsilon}_p = \mathbb{P}[A_p] \quad (3.57)$$

$$\mathbb{P}[A_m] = \frac{\text{\#σεναρίων όπου δεν ικανοποιείται ο περιορισμός } m}{\text{\#συνολικά σενάρια}} \quad (3.58)$$

$$P_c = -\mathbb{P}[A_1 \cap A_2] - \mathbb{P}[A_1 \cap A_3] - \dots + (-1)^{p-1} \cdot \mathbb{P}\left[\bigcap_{m=1}^p A_m\right] \quad (3.59)$$

4. Σε περίπτωση που όλοι οι περιορισμοί παραβιάζονταν με την ίδια πιθανότητα $\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varepsilon}_2 = \dots = \tilde{\varepsilon}_p$ και έχει υπολογιστεί η τιμή της P_c τότε η αποσύνθεση της κοινής παραβίασης θα γινόταν με τον εξής τρόπο:

$$\varepsilon = \sum_{m=1}^p \mathbb{P}[A_m] + P_c = p \cdot \varepsilon_m + P_c \quad (3.60)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon - P_c}{p} \quad (3.61)$$

Πολύ πιθανών όμως η παραβίαση των περιορισμών του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος να μην γίνεται με την ίδια συχνότητα για όλους τους επιμέρους περιορισμούς. Σύμφωνα με την (3.54) και για μη-ισοπίθανα ενδεχόμενα παραβίαση των περιορισμών A_m :

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_p = \varepsilon - P_c = \hat{\varepsilon} \quad (3.62)$$

Η νέα συνολική πιθανότητα παραβίασης $\hat{\varepsilon}$ θα πρέπει να κατανέμεται με τρόπο που να αντικατοπτρίζει την αναλογία μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών παραβίασης $\tilde{\varepsilon}_m$, $m \in \{1, \dots, p\}$. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται βάρη w_m , $m \in \{1, \dots, p\}$ για να γίνει η κατανομή πιθανότητας παραβίασης μεταξύ των επιμέρους περιορισμών που θέτονται για τις μεταβλητές του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση βοηθάει στην προσαρμογή των επιπέδων των επιμέρους τιμών παραβάσεων ε_m για την επίτευξη μιας επιθυμητής πιθανότητας κοινής παραβίασης ε μέσω μιας κανονικοποιημένης κατανομής. Ο ορισμός των βαρών γίνεται με τον παρακάτω τρόπο, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με την μονάδα:

$$w_m = \frac{\tilde{\varepsilon}_m}{\sum_{m=1}^p \tilde{\varepsilon}_m}, \quad m \in \{1, \dots, p\} \quad (3.63)$$

Τέλος γίνεται η κατανομή της συνολικής πιθανότητας παραβίασης $\hat{\mathbf{e}}$ στις επιμέρους τιμές παράβασης $\mathbf{e}_m$ προσαρμόζοντας τες πάνω τα βάρη w_m και τα υποσύνολα κοινών παραβιάσεων.

$$\mathbf{e}_m = w_m \cdot \left(\hat{\mathbf{e}} + \sum_{\substack{U \subseteq \{1, \dots, p\} \\ m \in U}} \frac{(-1)^{|U|+1}}{\sum_{m \in U} w_m} \cdot \mathbb{P} \left[\bigcap_{k \in U} A_k \right] \right), m \in \{1, \dots, p\}, |U| \geq 2 \quad (3.64)$$

- $U \subseteq \{1, \dots, p\}$, όπου $|U| = k$

Στον τύπο (3.62) το πρώτο μέρος κάνει τον αρχικό υπολογισμό του $\mathbf{e}_m$ με βάση το ζητούμενο $\hat{\mathbf{e}}$ και το βάρος που του αντιστοιχεί ενώ στο δεύτερο μέρος υπολογίζει τη συνεισφορά των κοινών πιθανοτήτων παραβίασης στις οποίες συμμετέχει ο περιορισμός $\mathbf{h}_m$. Συγκεκριμένα, λαμβάνει υπόψη όλα τα υποσύνολα των περιορισμών που περιέχουν τον $\mathbf{h}_m$ και έχουν τουλάχιστον δύο στοιχεία. Για κάθε τέτοιο υποσύνολο, υπολογίζει την κοινή πιθανότητα παραβίασης όλων των περιορισμών του υποσυνόλου και προσαρμόζει το αποτέλεσμα με βάση την αρχή της εγκλεισμού-αποκλεισμού [8]. Προκύπτουν οι τιμές παραβίασης $\mathbf{e}_m$ των επιμέρους SCC προβλημάτων.

➤ Ταξινόμηση Σεναρίων και Φιλτράρισμα Μη Ενεργών Περιορισμών:

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.), η πολυπλοκότητα των υπολογισμών αυξάνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς της [9]. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) εξαρτάται άμεσα από την τοπολογία του δικτύου υπό εξέταση, δηλαδή από τον αριθμό των ζυγών και των γραμμών μεταφοράς που τους συνδέουν. Σε κάθε ζυγό $i \in N$ αντιστοιχούν δύο περιορισμοί για τα άνω και κάτω όρια του μεγέθους της τάσης του ζυγού v_i , ενώ κάθε γραμμή μεταφοράς $(i, j) \in L$ μπορεί να έχει πολυάριθμους περιορισμούς, όπως στην περίπτωση της τμηματικής γραμμικοποίησης του κυκλικού ορίου που εκφράζεται από την εξίσωση (3.41).

Επιπλέον, η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης ως πιθανοτικό, δηλαδή η χρήση πιθανοτικών περιορισμών (chance constraints), προωθεί τις τεχνικές που παρουσιάστηκαν έως τώρα σε αυτό το κεφάλαιο, οι οποίες εισάγουν έναν βαθμό πολυπλοκότητας ως προς τους υπολογισμούς. Ο συνολικός αριθμός των υπολογισμών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό όλων των επιμέρους ποσοστών παραβίασης με βάση τον τύπο (3.62) αυξάνεται εκθετικά με τον συνολικό αριθμό p των περιορισμών, όπως επισημαίνεται και στην [8].

Στην [9] δίνεται μεγάλη σημασία στις δυνατότητες δύο εκ των μοντέλων που προσφέρει η τεχνητή νοημοσύνη ως εργαλεία στην προσπάθεια μείωσης της πολυπλοκότητας του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος. Το πρώτο είναι η κατασκευή ενός μοντέλου παλινδρόμησης (Regression Model) και ενός μοντέλου ταξινόμησης (Classification Model). Αυτά τα δύο μοντέλα συνδυαστικά προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια το εάν ένας περιορισμός του OPF πρόκειται να παραβιαστεί ή όχι σε κάποια κατάσταση του δικτύου έχοντας ως βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Οι περιορισμοί $\{h_m(\xi) \leq 0\}$ που έχουν μη-μηδενική πιθανότητα ορίζονται ως ενεργοί ενώ σε περίπτωση που το μοντέλο πρόβλεψης κρίνει πως δεν υπάρχει πιθανότητα να παραβιαστούν ορίζονται ως ανενεργοί.

Ο εντοπισμός ενεργών και ανενεργών περιορισμών μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα δυαδικής ταξινόμησης, όπου δ_m είναι μια δυαδική μεταβλητή. Σύμφωνα με την (3.48):

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & \mathbb{P}[A_m] \neq 0 \rightarrow h_m(\xi) \text{ είναι ΕΝΕΡΓΟΣ} \\ 0, & \mathbb{P}[A_m] = 0 \rightarrow h_m(\xi) \text{ είναι ΑΝΕΝΕΡΓΟΣ} \end{cases}, \quad h_m(\xi) \in \vec{h}_m \quad (3.65)$$

Εφόσον το μοντέλο ταξινόμησης αποφασίσει πως κάποιος περιορισμός είναι ανενεργός τότε θα πρέπει να παραλειφθεί από το πρόβλημα βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας τους υπολογισμούς που θα κληθεί να κάνει το πρόγραμμα μοντελοποίησης. Επίσης, όσον αναφορά την διαδικασία αποσύνθεσης της κοινής πιθανότητας παραβίασης, ο όρος P_c στον τύπο (3.62), που συμβάλλει στην επιμέρους τιμή παραβίασης του εκάστοτε περιορισμού, αποτελείται εξ ολοκλήρου από τομές των ενδεχομένων A_m . Η παράλειψη των περιορισμών που θα ταξινομηθούν ως ανενεργοί θα μειώσει σε μεγάλο βαθμό το σύνολο των τομών που πρόκειται να υπολογιστούν ώστε να γίνει η αποσύνθεση της JCC σε επιμέρους SCC.

Χωρίς απώλεια γενικότητας, επικεντρωνόμαστε στην αναγνώριση της κατάστασης των περιορισμών μεγέθους τάσης ζυγών και της ροής φαινόμενης ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Αυτές οι δύο ομάδες ανισοτήτων έχουν υψηλές επιπτώσεις στο υπολογιστικό κόστος του OPF. Ο συνολικός αριθμός των περιορισμών μεγέθους τάσης και ροής κλάδων είναι υψηλότερος από αυτόν άλλων ανισοτήτων του OPF, π.χ., ανώτερα και κατώτερα όρια γεννητριών. Η πλειονότητα αυτών των δύο ομάδων περιορισμών είναι ανενεργοί. Αυτό δεν αποτελεί έγκυρο επιχείρημα για τα όρια των συμβατικών μονάδων, καθώς πολλοί από τους περιορισμούς τους μπορεί να είναι ενεργοί υπό πολλές συνθήκες του ηλεκτρικού φορτίου [9].

Ο στόχος είναι να προβλεφθεί η τιμή δ_m που αντιστοιχεί στον κάθε περιορισμό $h_m(\xi)$ πριν γίνει η διαδικασία αποσύνθεσης της κοινής πιθανότητας παραβίασης.

Για το δίκτυο υπό εξέταση δημιουργείται ένας πίνακας δεδομένων ζήτησης $\mathbf{D_d}$ όπως ορίζεται στην (3.43), που αντιστοιχεί στην ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος $(P_{d,i}, Q_{d,i})$ για κάθε ζυγό $\mathbf{i} \in \mathbf{N}$, αλλά και ένας πίνακας δεδομένων των ΑΠΕ $\mathbf{D_w}$ όπως ορίζεται στην (3.44), που αντιστοιχεί στην δυνατότητα έγχυσης ενεργού ισχύος $(P_{w,i})$ από τις Α.Π.Ε για κάθε ζυγό $\mathbf{i} \in \mathbf{W}$. Δημιουργούνται δύο διαφορετικά σύνολα δεδομένων όπου:

$$[D_{d1}]_1 := \left[\begin{array}{ccc|ccc} P_{d,1}^{s_1} & \dots & P_{d,|N|}^{s_1} & Q_{d,1}^{s_1} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{d,1}^{s_{|S_1|}} & \dots & P_{d,|N|}^{s_{|S_1|}} & Q_{d,1}^{s_{|S_1|}} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_{|S_1|}} \end{array} \right]_{(|S_1| \times 2|N|)} \quad (3.66)$$

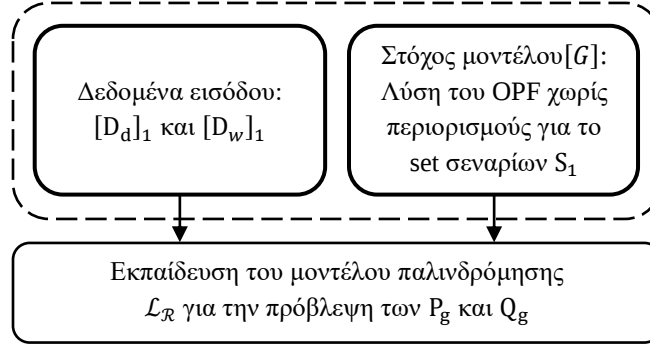
$$[D_d]_2 := \left[\begin{array}{ccc|ccc} P_{d,1}^{s_1} & \dots & P_{d,|N|}^{s_1} & Q_{d,1}^{s_1} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{d,1}^{s_{|S_2|}} & \dots & P_{d,|N|}^{s_{|S_2|}} & Q_{d,1}^{s_{|S_2|}} & \dots & Q_{d,|N|}^{s_{|S_2|}} \end{array} \right]_{(|S_2| \times 2|N|)} \quad (3.67)$$

$$[D_w]_1 := [P_{w,i}^s]_{(|S_1| \times |W|)}, \quad i \in W, \quad s \in S_1 \quad (3.68)$$

$$[D_w]_2 := [P_{w,i}^s]_{(|S_2| \times |W|)}, \quad i \in W, \quad s \in S_2 \quad (3.69)$$

$$S_1 = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S_1|}\}, \quad S_2 = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S_2|}\}$$

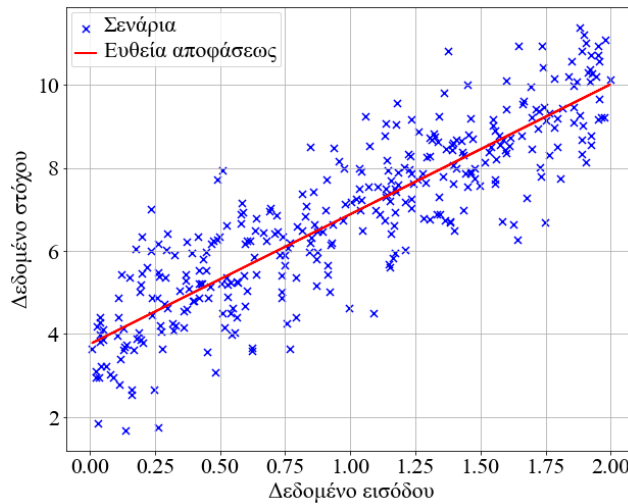
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, το σύνολο δεδομένων εισόδου $[D_d]_1$ και $[D_w]_1$ χρησιμοποιείται ως η είσοδος στην διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου παλινδρόμησης $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$. Ενώ σύμφωνα με το Σχήμα 3.9, το σύνολο δεδομένων εισόδου $[D_d]_2$ και $[D_w]_2$, μαζί με τις προβλεπόμενες τιμές $\tilde{P}_{g,i}$ και $\tilde{Q}_{g,i}$, $i \in G$ που λαμβάνονται από το $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$, είναι το σύνολο εκπαίδευσης για το μοντέλο ταξινόμησης $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\bar{\mathcal{V}}}$ και $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\mathcal{V}}$ για τους περιορισμούς $h_{\bar{\mathcal{V}}_i}$ και $h_{\mathcal{V}_i}$, $i \in N$ και το μοντέλο ταξινόμησης $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\mathcal{B}}$ για τους περιορισμούς $h_{L(i,j)}^1$, $(i,j) \in L$.



Σχήμα 3.7 : Διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου παλινδρόμησης

Η κατάσταση των περιορισμών h_m όλου του προβλήματος εξαρτάται από το ηλεκτρικό φορτίο και την παραγωγή ισχύος των συμβατικών μονάδων παραγωγής και των Α.Π.Ε. Η συμβολή των συμβατικών μονάδων στην παραγωγή ισχύος δεν είναι γνωστή πριν από την επίλυση του OPF. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, ο $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$ εκπαιδεύεται μέσω των δεδομένων $[D_d]_1$ και των τιμών του $[G]$. Ο πίνακας G αποτελείται από τις τιμές της παραγωγής των συμβατικών μονάδων που δίνουν την λύση του OPF χωρίς περιορισμούς για τα δεδομένα εισόδου $[D_d]_1$ και $[D_w]_1$ που αντιστοιχούν στο σύνολο σεναρίων S_1 .

Το μοντέλο παλινδρόμησης δημιουργεί την καλύτερη ευθεία γραμμή που περιγράφει την σχέση μεταξύ των δεδομένων εισόδου και των δεδομένων στόχου. Με αυτό τον τρόπο σε μεταγενέστερο βήμα να προβλέψει την παραγωγή $[\tilde{P}_g; \tilde{Q}_g]$. Η διαδικασία εκπαίδευσης που εξηγείται στο Σχήμα 3.6, απεικονίζεται καλύτερα στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.8 : Γραφική αναπαράσταση ενός μοντέλου παλινδρόμησης

Σε αυτή την περίπτωση ο $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$ θα χρειαστεί εκπαιδευτεί μόνο για τους ζυγούς στους οποίους συνδέεται κάποια μονάδα παραγωγής, δηλαδή για $i \in G$.

$$[G] := \left[[P_{g,i}^s] \middle| [Q_{g,i}^s] \right]_{(|S_1| \times 2|G|)}, \quad i \in G, \quad s \in S_1 \quad (3.70)$$

Οι προβλεπόμενες τιμές $\tilde{P}_{g,i}$ και $\tilde{Q}_{g,i}$ εμφανίζονται μόνο στους ζυγούς όπου $i \in G$, ενώ υπάρχουν ζυγοί στους οποίους συνδέεται μια Α.Π.Ε με ικανότητα έγχυσης ισχύος $P_{w,i}$ όπου $i \in W$, που είναι γνωστά από το σύνολο δεδομένα εισόδου 2. Η συνολική έγχυση στον αντίστοιχο ζυγό $i \in N$ θα εκφραστεί μέσω του μεγέθους $\tilde{P}_i$ και $\tilde{Q}_i$, όπου:

- $\tilde{P}_i, \tilde{Q}_i$: Συνολική προβλεπόμενη παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς στον κόμβο $i \in N$
- $\tilde{P}_{g,i}, \tilde{Q}_{g,i}$: Συστατικό της προβλεπόμενης παραγόμενης ισχύος από τις συμβατικές μονάδες στον κόμβο $i \in G$
- $P_{w,i}$: Συστατικό της παραγόμενης ενεργού ισχύος από ΑΠΕ στον κόμβο $i \in W$

$$\tilde{P}_i = \begin{cases} \tilde{P}_{g,i}, & i \in G \\ P_{w,i}, & i \in W \\ 0, & i \notin G \cup W \end{cases} \quad (3.71)$$

$$\tilde{Q}_i = \begin{cases} \tilde{Q}_{g,i}, & i \in G \\ 0, & i \notin G \end{cases} \quad (3.72)$$

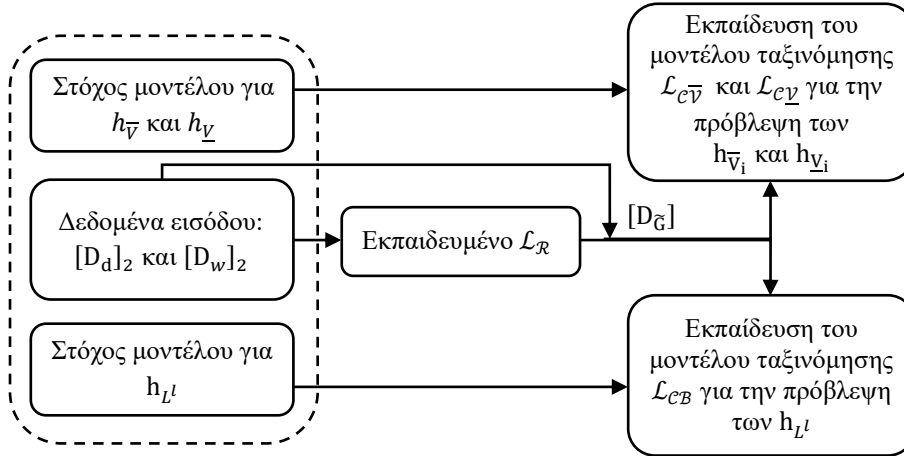
Σύμφωνα με την (3.70) και (3.71) ο $D_{\tilde{G}}$ θα πάρει την μορφή:

$$[D_{\tilde{G}}] := \left[\begin{array}{ccc|ccc} \tilde{P}_1^{s_1} & \dots & \tilde{P}_{|N|}^{s_1} & \tilde{Q}_1^{s_1} & \dots & \tilde{Q}_{|N|}^{s_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{P}_1^{s_{|S_2|}} & \dots & \tilde{P}_{|N|}^{s_{|S_2|}} & \tilde{Q}_1^{s_{|S_2|}} & \dots & \tilde{Q}_{|N|}^{s_{|S_2|}} \end{array} \right]_{(|S_2| \times 2|N|)} \quad (3.73)$$

Ο εκπαιδευμένος $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$ θα μπορεί πλέον να προβλέψει την ενεργό $\tilde{P}_g$ και άεργο $\tilde{Q}_g$ ισχύ που παράγονται από κάθε συμβατική μονάδα για κάθε σενάριο ζήτησης του συνόλου δεδομένων $[D_d]_2$. Οι προβλεπόμενες τιμές παραγωγής $D_{\tilde{G}}$ χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν ένα διάνυσμα ισοζυγίου έγχυσης ενεργού και άεργου ισχύος για τον κάθε ζυγό του δικτύου, το οποίο για $|S_2|$ σενάρια ορίζεται από τις (3.73) και (3.74).

$$[\tilde{N}_P] := [\tilde{P}_i^s - P_{d,i}^s]_{(|S_2| \times |N|)}, \quad i \in N, \quad s \in S_2 \quad (3.74)$$

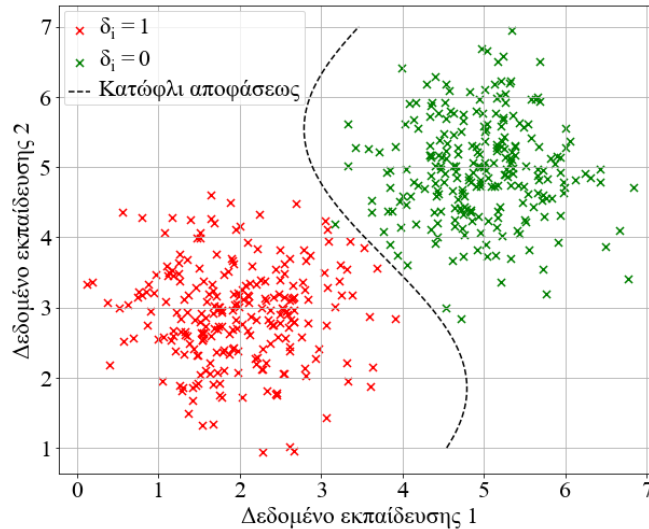
$$[\tilde{N}_Q] := [\tilde{Q}_i^s - Q_{d,i}^s]_{(|S_2| \times |N|)}, \quad i \in N, \quad s \in S_2 \quad (3.75)$$



Σχήμα 3.9 : Διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου παλινδρόμησης

Σε αυτό το σημείο λύνεται το OPF χωρίς περιορισμούς για τα δεδομένα εισόδου $[D_d]_2$ και $[D_w]_2$ που αντιστοιχούν στο σύνολο σεναρίων S_2 . Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι τιμές δ_m , οι οποίες αποτελούν δεδομένα στόχου για την εκπαίδευση των μοντέλων ταξινόμησης και αντιστοιχούν στον κάθε περιορισμό $h_m(\xi)$ ορίζοντας των ως ενεργό ($\delta_m = 1$) ή ανενεργό ($\delta_m = 0$). Αυτές οι τιμές συνδυάζονται με δύο δεδομένα εκπαίδευσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9 ώστε να ορίσουν ένα κατώφλι απόφασης (Decision Threshold), μέσω του οποίου θα παίρνονται οι αποφάσεις για την πρόβλεψη της κατάστασης των περιορισμών. Τα συνολικά μοντέλα ταξινόμησης που εκπαιδεύονται είναι:

- $|N|$ μοντέλα ταξινόμησης $\mathcal{L}_{C\bar{v}}$ (περιορισμού άνω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού)
- $|N|$ μοντέλα ταξινόμησης $\mathcal{L}_{Cv}$ (περιορισμού κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού)
- $|L| \times n$ μοντέλα ταξινόμησης $\mathcal{L}_{CB}$ (περιορισμού ροής φαινόμενης ισχύος γραμμής μεταφοράς)



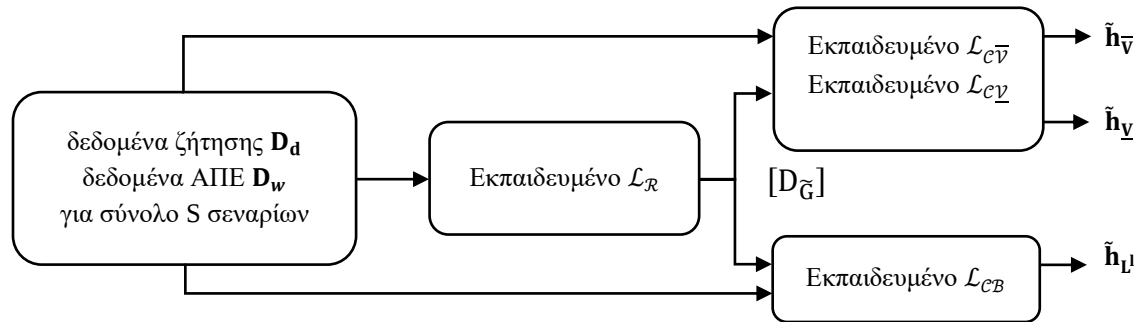
Σχήμα 3.10 : Γραφική αναπαράσταση ενός μοντέλου ταξινόμησης

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα εκπαίδευσης και στόχου και τα χαρακτηριστικά για τους τρεις τύπους μοντέλων ταξινόμησης :

Μοντέλο ταξινόμησης	Περιορισμοί	Δεδομένο εκπαίδευσης 1	Δεδομένο εκπαίδευσης 2	Δεδομένα στόχου
$\mathcal{L}_{\mathcal{C}\bar{\mathcal{V}}}$	$h_{\bar{\mathcal{V}}_i}(\xi), i \in \mathcal{N}$	$P_{d,i}^s, s \in S_2$	$\tilde{P}_i^s, s \in S_2$	$\delta_m = 1(\text{ενεργός})$ $\delta_m = 0(\text{ανενεργός})$
$\mathcal{L}_{\mathcal{C}\underline{\mathcal{V}}}$	$h_{\underline{\mathcal{V}}_i}(\xi), i \in \mathcal{N}$	$P_{d,i}^s, s \in S_2$	$\tilde{P}_i^s, s \in S_2$	$\delta_m = 1(\text{ενεργός})$ $\delta_m = 0(\text{ανενεργός})$
$\mathcal{L}_{\mathcal{C}\mathcal{B}}$	$h_{L_{(i,j)}}^1(\xi)$ $(i,j) \in \mathcal{L}$ $, l \in \{1, \dots, n\}$	$[\tilde{P}_i^s - P_{d,i}^s] - [\tilde{P}_j^s - P_{d,j}^s]$ $s \in S_2$	$[\tilde{Q}_i^s - Q_{d,i}^s] - [\tilde{Q}_j^s - Q_{d,j}^s]$ $s \in S_2$	$\delta_m = 1(\text{ενεργός})$ $\delta_m = 0(\text{ανενεργός})$

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικά μοντέλων ταξινόμησης

Η εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου, ο οποίος μειώνει την πολυπλοκότητα του βήματος αποσύνθεσης της από κοινού πιθανότητας παραβίασης όλων των περιορισμών σε επιμέρους πιθανότητες παραβίασης των περιορισμών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.

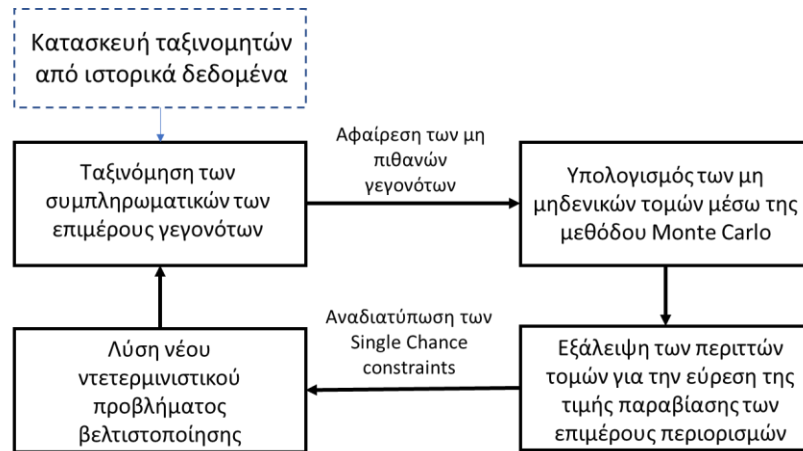


Σχήμα 3.11 : Εφαρμογή εκπαιδευμένων μοντέλων

Για τον δεδομένο αριθμό σεναρίων $|S|$ που θα χρειαστούν για να γίνουν οι προσομοιώσεις Monte Carlo, το μοντέλο παλινδρόμησης με δεδομένα εισόδου την ζήτηση φορτίου $\mathbf{D}_d$, προβλέπει τις τιμές παραγωγής $\mathbf{D}_g$. Τα εκπαιδευμένα μοντέλα $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\bar{\mathcal{V}}}$, $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\underline{\mathcal{V}}}$ και $\mathcal{L}_{\mathcal{C}\mathcal{B}}$ παίρνουν σαν είσοδο των συνδυασμό του συνόλου ζήτησης φορτίου σε κάθε ζυγό i , την παραγωγή ισχύος από κάθε ΑΠΕ και την προβλεπόμενη παραγωγή των συμβατικών μονάδων από τον $\mathcal{L}_{\mathcal{R}}$ για κάθε σενάριο, όπως ορίζεται στον Πίνακα 3.2, και προβλέπουν τους ενεργούς περιορισμούς του συστήματος για το κάθε σενάριο. Προκύπτει ένα νέο σύνολο περιορισμών $\{1, \dots, m, \dots, \tilde{p}\}$ μικρότερο του αρχικού $\{1, \dots, m, \dots, p\}$ λόγω της απαλοιφής των μη ενεργών, πράγμα που σημαίνει λιγότεροι άσκοποι υπολογισμοί της τομής των ενδεχομένων παραβίασης των περιορισμών όπως ορίζονται στην (3.62).

➤ Αναδιατύπωση των επιμέρους πιθανοτικών περιορισμών σε αιτιοκρατικούς περιορισμούς

Στο πλάνο εργασίας της μεθοδολογίας, Σχήμα 3.11, που παρουσιάζει αυτή η διπλωματική εργασία παραμένει ένα τελευταίο βήμα. Έγινε η αποσύνθεση της από κοινού πιθανότητας παραβίασης όλων των περιορισμών (Joint Chance Constraint – JCC) του OPF σε επιμέρους πιθανοτικούς περιορισμούς (Single Chance Constraint – SCC). Κάθε επιμέρους πιθανοτικός περιορισμός περιγράφει την πιθανότητα μια λειτουργική παράμετρος του συστήματος να βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο διαχειριστής του δικτύου. Αυτή η πιθανότητα υπολογίζεται και εκφράζεται ποσοστιαία με ένα συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης $\alpha_m = 1 - \varepsilon_m$ που προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.



Σχήμα 3.12 : Πλάνο εργασίας της μεθοδολογίας

Όπως και η διατύπωση του προβλήματος του OPF με JCC, έτσι και η προσέγγισή του με επιμέρους SCC παραμένει υπολογιστικά πολύ δύσκολη από τους υπάρχοντες λύτες (solvers). Σύμφωνα όμως με την [8], η πληροφορία σχετικά με τον βαθμό εμπιστοσύνης της κάθε παραμέτρου που παραβιάζεται σε συνδυασμό με το μεγάλο δείγμα που προκύπτει από τις προσομοιώσεις Monte Carlo, κάνει εφικτή την μετατροπή των SCC σε αιτιοκρατικούς. Στόχος είναι η τροποποίηση, εφόσον χρειάζεται, κάθε αντίστοιχου ορίου της παραμέτρου, της οποίας ο επιμέρους πιθανοτικός περιορισμός ορίζεται με ένα βαθμός εμπιστοσύνης α_m , με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα τροποποιημένα όρια να εγγυούνται την τήρηση όλων των περιορισμών ταυτόχρονα με το επίπεδο εμπιστοσύνης α , που ορίζεται για το συνολικό σύστημα.

Η όλη μεθοδολογία θεωρείται επιτυχημένη εφόσον μετά τον ορισμό των νέων ορίων για τους περιορισμούς του αιτιοκρατικού προβλήματος OPF, προκύπτει βαθμός εμπιστοσύνης ίσος ή μεγαλύτερος από αυτόν που έχει οριστεί. Για την διατύπωση των πιθανοτικών περιορισμών σε αιτιοκρατικούς, γίνεται χρήση του Νόμου των Μεγάλων Αριθμών και του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος [11].

Η λύση του OPF για ένα μεγάλο πλήθος καταστάσεων του δικτύου υπό εξέταση δημιουργεί και ένα πλήθος πιθανών τιμών για τις παραμέτρους του δικτύου που περιορίζονται, στις οποίες συγκαταλέγονται η φαινόμενη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τα μεγέθη των τάσεων στους ζυγούς. Ορίζεται η κάθε παράμετρος ως μια τυχαία μεταβλητή και μέσω ανάλυσης του δείγματος τους, υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους όπως η μέση τιμή μ και η διασπορά σ^2 , $\sigma^2 < +\infty$. Η κάθε λύση του OPF είναι ανεξάρτητη από την προηγούμενη καθώς το διάνυσμα εισόδου της ζήτησης και της ικανότητας παραγωγής των ΑΠΕ δεν σχετίζονται από σενάριο σε σενάριο.

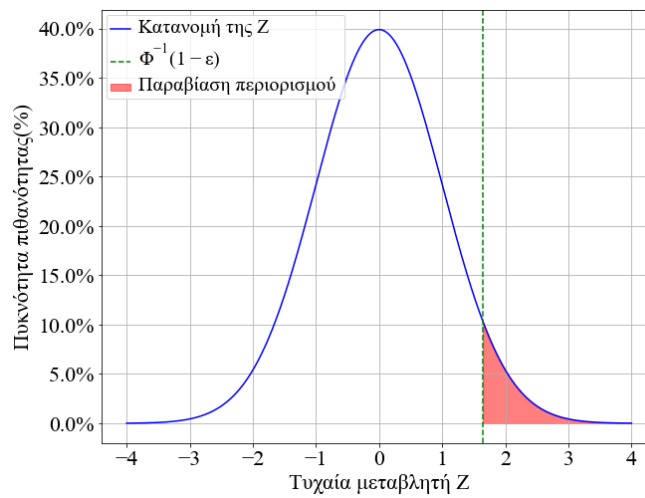
Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών ακολουθεί μία κατανομή η οποία προσεγγίζει την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και η διασπορά σ^2/n , όπου n είναι το σύνολο των τυχαίων μεταβλητών. Στην κανονική κατανομή που προσεγγίζει το πλήθος των τιμών της κάθε παραμέτρου αντιστοιχεί η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Φ , η οποία ορίζει την τιμή που παίρνει μια τυχαία μεταβλητή Z , όπου $\alpha = 1 - \varepsilon$.

Για την συνάρτηση κατανομής της $Z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2/n)$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.12, ισχύει:

$$\mathbb{P}\left[Z \leq \frac{z - \mu}{\sigma\sqrt{n}}\right] = \mathbb{P}[Z \leq \dot{z}] = \Phi(\dot{z}) = \alpha = 1 - \varepsilon \quad (3.76)$$

$$\Phi^{-1}(\alpha) = \dot{z} \quad (3.77)$$

Η σχέση (3.75) ορίζει την αθροιστική συνάρτηση κατανομής Φ ως την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητής Z να πάρει τιμή μικρότερη της $\dot{z}$ που προκύπτει για μέση τιμή μ και η διασπορά σ^2/n . Αυτή η πιθανότητα δηλώνει το βαθμό εμπιστοσύνης της κατανομής της Z για να πάρει τιμή μικρότερη της $\dot{z}$. Στην σχέση (3.76) ορίζεται η αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής Φ^{-1} , η οποία εκδηλώνει ποια τιμή της τυχαίας μεταβλητής Z αντιστοιχεί στον βαθμό εμπιστοσύνης α .



Σχήμα 3.13 : Γραφική παράσταση κατανομής τυχαίας μεταβλητής Z_m

Προηγουμένως ορίστηκε από την (3.47) το διάνυσμα περιορισμών ανισότητας, όπου συμπεριλαμβάνονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των μεγεθών των ζυγών i και των γραμμών μεταφοράς (i,j) , όπου για κάθε περιορισμό $h_m, m \in \{1, \dots, \tilde{p}\}$ η αντίστοιχη παράμετρος εκφράζεται μέσω της $Z_m \sim \mathcal{N}(\mu_m, \sigma_m^2/n)$

Μετά την ταξινόμηση των περιορισμών και την αποσύνθεση του JCC σε SCC, προκύπτουν $\tilde{p}$ επιμέρους πιθανοτικοί περιορισμοί με υπολογισμένες τιμές παραβίασης $\varepsilon_m, m \in \{1, \dots, \tilde{p}\}$. Γίνεται χρήση της σχέσης (3.76) ώστε να υπολογιστεί ποια τιμή της τυχαίας μεταβλητής Z_m της παραμέτρου που περιορίζεται αντιστοιχεί στον βαθμό εμπιστοσύνης α_m . Αυτή η τιμή θα αποτελέσει το νέο όριο που θα δοθεί στον εκάστοτε αιτιοκρατικό περιορισμό ώστε να επιτευχθεί η κοινή πιθανότητα παραβίασης που ορίζεται αρχικά.

Στον Πίνακα 3.3 περιγράφεται πως υπολογίζεται το νέο όριο για κάθε παράμετρο εφόσον χρειαστεί.

Περιορισμός $\mathbf{h_m}$	Παράμετρος	Νέο όριο $\mathbf{z_m}$	Επιμέρους Πιθανοτικός Περιορισμός	Αιτιοκρατικός Περιορισμός
$\mathbf{h_{\bar{V}_i}}$	$V_i, i = 1, \dots, N $	$\Phi^{-1}(1 - \varepsilon_m)$	$\mathbb{P}[V_i \leq \bar{V}_i] \geq 1 - \varepsilon_m$	$V_i \leq \Phi^{-1}(1 - \varepsilon_m)$
$\mathbf{h_{V_i}}$	$V_i, i = 1, \dots, N $	$\Phi^{-1}(\varepsilon_m)$	$\mathbb{P}[V_i \leq V_i] \geq 1 - \varepsilon_m$	$\Phi^{-1}(\varepsilon_m) \leq V_i$
$\mathbf{h_{L^l_{(i,j)}}}$	$L^l_{(i,j)}, (i,j) \in L$ $L := \{(i,j)_1, \dots, (i,j)_{ L }\}$ $l \in \{1, \dots, n\}$	$\Phi^{-1}(1 - \varepsilon_m)$	$\mathbb{P}[L^l_{(i,j)} \leq 0] \geq 1 - \varepsilon_m$	$L^l_{(i,j)} \leq \Phi^{-1}(1 - \varepsilon_m)$

Πίνακας 3.3 : Προσαρμογή περιορισμών

- $\mathbb{Z}_m$: τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στην παράμετρο που περιορίζει ο περιορισμός $\mathbf{h_m}$
- $\mu_m, \frac{\sigma_m^2}{n}$: μέση τιμή και διακύμανση της τυχαίας μεταβλητής $\mathbb{Z}_m$
- $\tilde{p}$: αριθμός ενεργών περιορισμών
- $\mathbf{z_m}$: νέο όριο για τον περιορισμό $\mathbf{m}$
- n : αριθμός των συνολικών σεναρίων
- α_m : βαθμός εμπιστοσύνης του επιμέρους πιθανοτικού περιορισμού $\mathbf{h_m}$
- ε_m : τιμή παραβίασης του επιμέρους πιθανοτικού περιορισμού $\mathbf{h_m}$

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο OPF και μέσω της επίλυσης του εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με την ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ώστε αυτό να λειτουργήσει με αποδοτικά και αξιόπιστα. Το General Algebraic Modeling System (General Algebraic Modeling System - GAMS) αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση και επίλυση αυτών των περίπλοκων μαθηματικών μοντέλων που υπολογίζουν την αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία στην οποία έγινε αναφορά[12]. Η υπολογιστική δύναμη του προγράμματος αυτού επιτρέπει την λεπτομερή ανάλυση συστημάτων διάφορων επιπέδων πολυπλοκότητας. Χρησιμοποιώντας το GAMS σε επίπεδο έρευνας γίνεται ο υπολογισμός των άγνωστων μεταβλητών που επιλύουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης και μέσω αυτής της επίλυσης αναλύεται η συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος. Συμπληρωματικά, γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python έρχονται να ενταχθούν πλέον στην διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων που συλλέγονται από τις βελτιστοποιήσεις και να συνεισφέρουν στην μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών. Η πολυμορφία και το εύρος των εφαρμογών της Python στην ανάλυση δεδομένων κυρίως λόγω των ισχυρών και πολλών βιβλιοθηκών της, διευκολύνουν τη διαχείριση μεγάλων σετ δεδομένων που είναι συχνό φαινόμενο στα ΣΗΕ. Τεχνικές όπως οι αλγόριθμοι ταξινόμησης στη Python συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της πολυπλοκότητας των προσομοιώσεων, καθιστώντας την ανάλυση δικτύων ισχύος με πολλούς κόμβους πιο εφικτή και αποτελεσματική. Αυτός ο συνδυασμός του GAMS για προσομοίωση και βελτιστοποίηση, μαζί με τη Python για ανάλυση δεδομένων και μείωση πολυπλοκότητας, αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που παρουσιάζει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα.

4.1.1 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΝΤΟΛΕΣ ΤΟΥ GAMS

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την περιγραφή του προβλήματος και των εξισώσεων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3 είναι το GAMS (General Algebraic Modeling System). Αντιπροσωπεύει ένα προηγμένο σύστημα λογισμικού που εξυπηρετεί ως υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού και περιβάλλον σχεδίασης μοντέλων για προβλήματα βελτιστοποίησης. Η κύρια λειτουργία του είναι η διευκόλυνση της διαδικασίας δημιουργίας, περιγραφής και λύσης μαθηματικών μοντέλων που αφορούν προβλήματα βελτιστοποίησης.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι:

1. Εύχρηστη Μοντελοποίηση Πολύπλοκων Συστημάτων

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) παρέχει ένα περιβάλλον όπου οι χρήστες μπορούν να μοντελοποιήσουν πολύπλοκα μαθηματικά προβλήματα χρησιμοποιώντας μια γλώσσα που μοιάζει με την αλγεβρική σημειογραφία. Αυτό καθιστά τη διαδικασία μοντελοποίησης πιο διαισθητική και προσιτή, ακόμη και για όσους δεν έχουν βαθιά γνώση προγραμματισμού. Με την αφαιρετική του προσέγγιση, επιτρέπει την εστίαση στη μαθηματική δομή του προβλήματος παρά στις λεπτομέρειες της υλοποίησης. Οι χρήστες μπορούν να αναπαραστήσουν μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας αλγεβρικές εξισώσεις, γεγονός που διευκολύνει τη διατύπωση και επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς.

2. Υποστήριξη Πολλαπλών Επιλυτών

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του GAMS είναι η συμβατότητά του με μια πληθώρα επιλυτών για διάφορους τύπους προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως γραμμικός, μη γραμμικός, ακέραιος και μεικτός-ακέραιος προγραμματισμός. Οι χρήστες μπορούν εύκολα να αλλάξουν μεταξύ επιλυτών για να βρουν αυτόν που αποδίδει καλύτερα για το συγκεκριμένο τους πρόβλημα, χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στο μοντέλο τους.

3. Ευελιξία και Επεκτασιμότητα

Το GAMS είναι σχεδιασμένο να διαχειρίζεται μοντέλα διαφόρων μεγεθών και πολυπλοκότητας. Μπορεί να χειριστεί μεγάλα σύνολα δεδομένων και πολύπλοκες δομές, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές σε βιομηχανίες όπως η ενέργεια, οι μεταφορές και η οικονομία. Η ευελιξία του επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν και να επεκτείνουν τα μοντέλα τους καθώς εξελίσσονται οι ανάγκες τους.

4. Διαχωρισμός Δεδομένων και Μοντέλου

Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του GAMS είναι ο διαχωρισμός μεταξύ του μοντέλου και των δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν νέα δεδομένα ή να τροποποιούν υπάρχοντα χωρίς να αλλάζουν τον κώδικα του μοντέλου. Ο διαχωρισμός αυτός διευκολύνει την ανάλυση ευαισθησίας και τη δοκιμή διαφόρων σεναρίων, καθιστώντας τη διαδικασία πιο αποδοτική.

5. Ενσωμάτωση με Άλλα Συστήματα και Δεδομένα

Το GAMS υποστηρίζει την ενσωμάτωση με διάφορα άλλα συστήματα, βάσεις δεδομένων και μορφές αρχείων. Μπορεί να ανταλλάσσει δεδομένα με εξωτερικές εφαρμογές, διευκολύνοντας τη συνεργασία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών τμημάτων ενός οργανισμού ή μεταξύ διαφορετικών οργανισμών. Συγκεκριμένα στην διπλωματική αυτή καθιστά δυνατή την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ Python και GAMS.

6. Εκτενής Τεκμηρίωση και Υποστήριξη Κοινότητας

Το GAMS συνοδεύεται από μια εκτενή τεκμηρίωση, παραδείγματα και οδηγούς χρήσης που βοηθούν τους νέους χρήστες να ξεκινήσουν και τους έμπειρους να εκμεταλλευτούν πλήρως τις δυνατότητες του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχει μια ενεργή κοινότητα χρηστών και ένα δίκτυο υποστήριξης που προσφέρει βοήθεια, ανταλλαγή γνώσεων και βέλτιστων πρακτικών.

Οι κυριότερες από τις εντολές που χρησιμοποιούνται και αποτελούν μέρος ενός προβλήματος βελτιστοποίησης στο GAMS είναι:

- **Sets (Σύνολα):** Τα σύνολα στο GAMS αποτελούν τη βάση για την οργάνωση και τη δομή του μοντέλου. Αντιπροσωπεύουν συλλογές δεικτών που καθορίζουν τις διαστάσεις των μεταβλητών, των παραμέτρων και των εξισώσεων. Χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση και την οργάνωση των οντοτήτων που εμπλέκονται στο μοντέλο, όπως προϊόντα, τοποθεσίες, χρονικές περιόδους κ.λπ.
- **Parameters (Παράμετροι):** Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό σταθερών τιμών που σχετίζονται με το μοντέλο. Μπορεί να είναι κόστη, συντελεστές παραγωγής, ζήτηση, αποθέματα κ.λπ. Αντιπροσωπεύουν δεδομένα εισόδου ή σταθερές παραμέτρους που δεν αλλάζουν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.
- **Variables (Μεταβλητές):** Οι μεταβλητές απόφασης είναι τα μεγέθη ή οι τιμές που επιδιώκει να προσδιορίσει η διαδικασία βελτιστοποίησης. Αποτελούν τους άγνωστους του μαθηματικού μοντέλου και είναι το αντικείμενο της βελτιστοποίησης. Μπορεί να είναι ποσότητες παραγωγής, ροές μεταφοράς, επίπεδα αποθεμάτων κ.λπ.
- **Scalars (Σταθερές):** Τα scalars είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν μεμονωμένες τιμές στο μοντέλο. Χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση του κώδικα, κρατώντας σταθερές αριθμητικές τιμές, όπως συνολική χωρητικότητα, προϋπολογισμός ή άλλες γενικές παραμέτρους.
- **Equations (Εξισώσεις):** Οι εξισώσεις αντιπροσωπεύουν μαθηματικές σχέσεις ή περιορισμούς στο μοντέλο. Περιλαμβάνουν τη συνάρτηση στόχο και τους περιορισμούς που αντικατοπτρίζουν τους περιορισμούς ή τις απαιτήσεις του συστήματος που μοντελοποιείται. Μπορούν να περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, παραμέτρους και άλλες μαθηματικές εκφράσεις.
- **Model (Μοντέλο):** Η δομή του μοντέλου περιλαμβάνει τον καθορισμό όλων των παραπάνω στοιχείων και τη συγκέντρωσή τους σε ένα μοντέλο προς επίλυση. Το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης τον καθορισμό του τύπου της βελτιστοποίησης (π.χ., ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση).
- **Tables (Πίνακες):** Οι πίνακες χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων σε μορφή πινάκων, ιδανικοί για δεδομένα που εξαρτώνται από δύο ή περισσότερες διαστάσεις.
- **Loop (Βρόχος):** Οι βρόχοι χρησιμοποιούνται για την επαναληπτική εκτέλεση εντολών είτε εκτέλεση του μοντέλου επαναλαμβανόμενα στα πλαίσια προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων.
- **Display (Εμφάνιση):** Η εντολή DISPLAY χρησιμοποιείται για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων ή των τιμών των μεταβλητών και των παραμέτρων μετά την επίλυση του μοντέλου.
- **Solve (Επίλυση):** Με την εντολή αυτή καθορίζεται το μοντέλο που θέλουμε να επιλυθεί, το είδος του προγραμματισμού που επιθυμούμε να εφαρμοστεί καθώς και τον στόχο της επίλυσης.

4.1.2 ΣΥΝΤΑΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η σύνταξη του GAMS είναι σχεδιασμένη ώστε να μοιάζει με τη μαθηματική σημειογραφία, καθιστώντας τη μοντελοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων πιο προσιτή και κατανοητή. Η γλώσσα του GAMS επιτρέπει τον εύκολο ορισμό συνόλων, παραμέτρων, μεταβλητών και εξισώσεων, διευκολύνοντας τη δομή και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η σύνταξη του κώδικα βελτιστοποίησης για το πρόβλημα που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 βασίζεται στις κύριες εντολές που προσφέρει το λογισμικό όπως αναφέρθηκαν παραπάνω σε συνδυασμό με άλλες ελαφρά πιο σύνθετες εντολές που σχετίζονται κυρίως με την αποθήκευση από και προς άλλα προγράμματα, τα οποία θα αναφερθούν παρακάτω.

Η σύνταξη του προβλήματος βελτιστοποίησης έχει μια συγκεκριμένη ακολουθία, η οποία αντικατοπτρίζεται και στον κώδικα που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση των σεναρίων του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος για το σύστημα υπό εξέταση.

```

*==OPTIMAL POWER FLOW PROBLEM FOR LINEARIZED AC MODEL OF 10 BUS POWER SYSTEM

sets i      'network buses'           /1*10/
     slack(i) 'slack bus'             /5/
     s        'scenarios to be simulated' /1*8000/
     k        'linearization sections'  /1*12/
     Gen(i)   'buses-conventional power units' /1,5,10/
     wind(i)  'buses-wind parks'       /4,8,9/ ;

scalars S_base      'Base of Apparent Power Flow' /100/
        pi          'number pi'                 /3.141592654/
        N           'total number of sections'   /12/
        coef_ratio  'ratio of costs P_gen/Q_gen' /0.1/;

*DECLARE THE SETS (j) AND (l) AS THE SAME SETS TO (i)
alias(i,j,l);

```

Σχήμα 4.1 : Κώδικας στο GAMS

Αρχικά γίνεται η δήλωση των διάφορων συνόλων που ορίζουν τα μεγέθη του προβλήματος, όπως οι ζυγοί (i), ο αριθμός σεναρίων προσομοίωσης (s) καθώς και η τοποθεσία των συμβατικών μονάδων παραγωγής (Gen(i)) και των ΑΠΕ (wind(i)), που αποτελούν υποσύνολα του συνόλου των ζυγών. Επίσης ορίζονται κάποιες σταθερές τιμές του προβλήματος ενώ γίνεται χρήση και της εντολής **alias** που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα σύνολο με τις ίδιες ιδιότητες , διευκολύνοντας τη σύγκριση ή τη συσχέτιση στοιχείων μέσα στο ίδιο σύνολο.

```

table G Data(i,*)
      a      b      c      p_min  p_max  q_min  q_max
5      0.11   1.7   78      0     2000  -1000  1000
1      0.14   2.1   83      0     380   -260   260
10     0.16   2.2   88      0     400   -260   260
;

```

Σχήμα 4.2 : Κώδικας στο GAMS

```

*IMPORT THE VALUE OF THE POWER DEMAND AT EACH BUS
Parameter p_d, q_d;
$gdxIn DEMAND_TRAIN_10.gdx
$load p_d, q_d
$gdxIn

*IMPORT AVAILANBLE ACTIVE POWER GNEERATED FROM WIND FARM AT EACH BUS
Parameter p_w;
$gdxIn WIND_TRAIN_10.gdx
$load p_w
$gdxIn

*IMPORT THE INITIAL VOLTAGE ANGLE FOR EACH SCENARIO AT EACH BUS
Parameter delta0;
$gdxIn delta_training_10.gdx
$load delta0
$gdxIn

```

Σχήμα 4.3 : Κώδικας στο GAMS

Στην πορεία γίνεται η φόρτωση διάφορων δεδομένων του συστήματος σχετικά με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, την ζήτηση ισχύος στους ζυγούς του συστήματος αλλά και την διαθέσιμη ικανότητα παραγωγής ισχύος από τις ΑΠΕ. Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται δυο διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να γίνει η φόρτιση δεδομένων, είτε χειροκίνητα μέσω πίνακα στο κώδικα του GAMS είτε χρησιμοποιώντας τις γραμμές “**gdxIn**” και “**load**”. Ο δεύτερος τρόπος διευκολύνει την διαδικασία σε περιπτώσεις που τα δεδομένα των παραμέτρων είναι ογκώδης.

```

*RESISTANCE AND REACTANCE OF THE TRANSMISSION LINES ( Z = R +j*X )
table BranchData(i,j,*)
  r_ij  x_ij
1.2    0.006  0.05
1.3    0.006  0.05
2.4    0.008  0.07
2.5    0.006  0.05
3.6    0.004  0.03
3.7    0.008  0.07
4.8    0.006  0.05
5.6    0.006  0.05
5.8    0.008  0.07
6.10   0.008  0.07
7.10   0.008  0.07
8.9    0.004  0.03
9.10   0.004  0.03
;

parameter r_ij 'Resistance(p.u)'
          x_ij 'Reactance(p.u)';

BranchData(i,j,'r_ij')$(BranchData(i,j,'r_ij')=0) = BranchData(j,i,'r_ij');
BranchData(i,j,'x_ij')$(BranchData(i,j,'x_ij')=0) = BranchData(j,i,'x_ij');
r_ij(i,j) = BranchData(i,j,'r_ij');
x_ij(i,j) = BranchData(i,j,'x_ij');

```

Σχήμα 4.4 : Κώδικας στο GAMS

Άλλη μια περίπτωση φόρτισης δεδομένων μέσω της εντολής “**table**” διαπιστώνεται στο Σχήμα 4.3, όπου συμπληρώνονται οι πληροφορίες σχετικά με τις γραμμές μεταφοράς του συστήματος. Παρακάτω φαίνεται και η δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων μέσω της οποίας υπολογίζονται και οι παράμετροι “**r_ij**” και “**x_ij**”.

```

*MODEL VARIABLES
Variables
OF          'Objective Function'
P_ij        'Active power flow from bus i to bus j'
Q_ij        'Reactive power flow from bus i to bus j'
P_g         'Active power generated from units on bus i'
Q_g         'Reactive power generated from units on bus i'
Pw          'Active power generated from wind farms on bus i'
Qw          'Reactive power generated from wind farms on bus i'
delta       'Voltage Angle on bus i'
V_square    'Square of Magnitude of Voltage on bus i'
;

*PARAMETERS WHERE THE RESULTS WILL BE STORED
Parameter
Pgen(i,s)   'Active power generated from units on bus i for senario s'
Qgen(i,s)   'Reactive power generated from units on bus i for senario s'
Pdem(i,s)   'Demand of Active Power on bus i for senario s'
Qdem(i,s)   'Demand of Reactive Power on bus i for senario s'
Pd(i)       'Demand of Active Power on bus i for senario s'
Qd(i)       'Demand of Reactive Power on bus i for senario s'

```

Σχήμα 4.5 : Κώδικας στο GAMS

Σημαντικό κομμάτι του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι μεταβλητές του, οι οποίες ορίζουν τα μεγέθη των παραμέτρων του συστήματος. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται το πως ορίζονται οι μεταβλητές καθώς και οι παράμετροι όπου και θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης για την αντίστοιχη μεταβλητή.

```

*MODEL EQUATIONS
Equations
eq1 'Active power flow from bus i to bus j'
eq2 'Rective power flow from bus i to bus j'
eq3 'Active Power Balance on bus i'
eq4 'Rective Power Balance on bus i'
eq5 'Voltage Magnitude on bus i upper level constraint'
eq6 'Voltage Magnitude on bus i lower level constraint'
eq7 'Thermal limit upper constraint on transmission line (i,j)'
eq8 'Thermal limit lower constraint on transmission line (i,j)'
OBJ;

```

Σχήμα 4.6 : Κώδικας στο GAMS

Η εντολή “equation”, ορίζει τον μαθηματικό τύπο και τον τρόπο που συνδυάζονται οι μεταβλητές και οι παράμετροι του μοντέλου και μπορεί να είναι είτε εξίσωση ισότητας είτε ανισότητας.

```

*OPERATING RESTRICTIONS ON POWER GENERATION FOR THE CONVENTIONAL UNITS

*ACTIVE POWER*
P_g.lo(i) = G_Data(i,'p_min')/S_base;
P_g.up(i) = G_Data(i,'p_max')/S_base;

*REACTIVE POWER*
Q_g.lo(i) = G_Data(i,'q_min')/S_base;
Q_g.up(i) = G_Data(i,'q_max')/S_base;

*SLACK BUS VOLTAGE MAGNITUDE AND ANGLE
delta.fx(slack) = 0.0;
V_square.fx(slack) = 1.0;

```

Σχήμα 4.7 : Κώδικας στο GAMS

Εκτός από τις εξισώσεις που υπολογίζουν τις μεταβλητές του συστήματος γίνεται και ο περιορισμός των μεταβλητών στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή τους μέσω των εντολών “**up**” και “**lo**” αντίστοιχα ενώ ο ορισμός της γωνίας και του μεγέθους τάσης του ζυγού αναφοράς γίνεται αυθαίρετα μέσω της εντολής “**fx**”, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7

```
*CALCULATE THE ACTIVE POWER FLOW ON THE TRANSMISSION LINE (I,J) AND (J,I)
eq1(i,j)$(conex_ac(i,j) and ord(i) <> ord(j))..

P_ij(i,j) =e= (V_square(i) - V_square(j))*g_ij(i,j)*(1/2 + (a(i,j)/br(i,j)))
              + (delta(i) - delta(j))*(g_ij(i,j)*c(i,j) - b_ij(i,j))
              - (g_ij(i,j)/2)*(power(c(i,j),2) + power(a(i,j),2));

*CALCULATE THE REACTIVE POWER FLOW ON THE TRANSMISSION LINE (I,J) AND (J,I)
eq2(i,j)$(conex_ac(i,j) and ord(i) <> ord(j))..

Q_ij(i,j) =e= - (V_square(i) - V_square(j))*b_ij(i,j)*(1/2 + (a(i,j)/br(i,j)))
              - (delta(i) - delta(j))*(b_ij(i,j)*c(i,j) + g_ij(i,j))
              + (b_ij(i,j)/2)*(power(c(i,j),2) + power(a(i,j),2));
```

Σχήμα 4.8 : Κώδικας στο GAMS

Στα πλαίσια της διατύπωσης των εξισώσεων χρησιμοποιούνται και εντολές συνθήκης, η οποίες δηλώνονται μέσω του χαρακτήρα “\$” σε συνδυασμό με το μέγεθος που βρίσκεται υπό συνθήκη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

```
*CALCULATE THE OBJECTIVE FUNCTION
OBJ..
OF =e= sum((Gen), (P_g(Gen)*P_g(Gen)*G_Data(Gen,'a')*S_base
                  + (Q_g(Gen)*Q_g(Gen)*coef_ratio*G_Data(Gen,'a')*S_base
                  + P_g(Gen)*G_Data(Gen,'b')*S_base
                  + Q_g(Gen)*coef_ratio*G_Data(Gen,'b')*S_base
                  ));

*DECLARE THE MODEL
Model AC_OPF / eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8, OBJ /;
```

Σχήμα 4.9 : Κώδικας στο GAMS

```
*START THE LOOP OF THE SCENARIOS
loop(s,

*DEMAND OF ACTIVE AND REACTIVE POWER AT BUS I FOR SCENARIO S
Pd(i) = p_d(i,s)/S_base;
Qd(i) = q_d(i,s)/S_base;

*AVAILANBLE ACTIVE POWER GNEERATED FROM WIND FARM AT BUS I FOR SCENARIO S
Pw.fx(i) = p_w(i,s)/S_base;

*AVAILANBLE REACTIVE POWER GNEERATED FROM WIND FARM AT BUS I FOR SCENARIO S
Qw.up(i) = ((0.5)*p_w(i,s))/S_base;
Qw.lo(i) = ((-0.5)*p_w(i,s))/S_base;

*LOAD THE INITIAL VOLTAGE ANGLE ON EACH BUS i FOR EVERY SCENARIO s
dg(i) = delta0(i,s);

*LOAD THE INITIAL VOLTAGE MAGNITUDE ON EACH BUS i FOR EVERY SCENARIO s
vg(i) = 1.0;

a(i,j)$(conex_ac(i,j) and ord(i) <> ord(j)) = vg(i) - vg(j);
br(i,j)$(conex_ac(i,j) and ord(i) <> ord(j)) = vg(i) + vg(j);
c(i,j)$(conex_ac(i,j) and ord(i) <> ord(j)) = dg(i) - dg(j);

Solve AC_OPF minimizing OF using nlp;
```

Σχήμα 4.10 : Κώδικας στο GAMS

Τέλος η διαδικασία σύνταξης του κώδικα ολοκληρώνεται με την εντολή **model**, μέσω της οποίας γίνεται η συγκρότηση των εξισώσεων που αποτελούν το πρόβλημα προς επίλυση, και με την εντολή **solve**. Σε αυτή την περίπτωση για το μοντέλο που θα επιλυθεί, ζητείται ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης **OBJ**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, χρησιμοποιώντας έναν μη γραμμικό επιλυτή. Στο συγκεκριμένο κώδικα γίνεται και η χρήση της εντολής **loop**, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει πολλαπλές καταστάσεις του μοντέλου προς επίλυση. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η προσομοίωση των πολλών σεναρίων που χρειάζονται για την διατύπωση του προβλήματος με πιθανοτικούς περιορισμούς.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΩΔΙΚΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΠΟ ΚΟΙΝΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ

Σε κάθε επανάληψη, παράμετροι όπως η διαθέσιμη παραγωγή ισχύος των ΑΠΕ και η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος ανανεώνονται και με αυτό τον τρόπο επιλύεται μια νέα κατάσταση του συστήματος. Ανανεώνεται επίσης και το διάνυσμα αρχικών τιμών της γωνίας τάσεως του κάθε ζυγού καθώς χρειάζεται για τον υπολογισμό των εξισώσεων ροής ενεργού και άεργου ισχύος.

```
execute_unload "TRAIN_10.gdx" Pgen, Qgen, Pdem, Qdem, Pwin, Qwin, Pij, Qij, Sij, V_sq;
display obj_func, Pgen, Qgen, Pdem, Qdem, Pwin, Qwin, V_sq, delta.1, Pij, Qij, Sij;
```

Σχήμα 4.11 : Κώδικας στο GAMS

Η καταγραφή και η ανάγνωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων γίνεται δυνατή μέσω δυο εντολών, των **display** και **execute_unload**. Η εντολή **display** μας επιτρέπει την ανάγνωση των αποτελεσμάτων σε ένα ξεχωριστό παράθυρο ενώ η εντολή **execute_unload** αποθηκεύει τις μεταβλητές και τις παραμέτρους που επιλέγει ο χρήστης σε ένα αρχείο τύπου “.gdx”, το οποίο αναγνωρίζεται μέσω μιας βιβλιοθήκης της Python. Αυτό επιτρέπει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

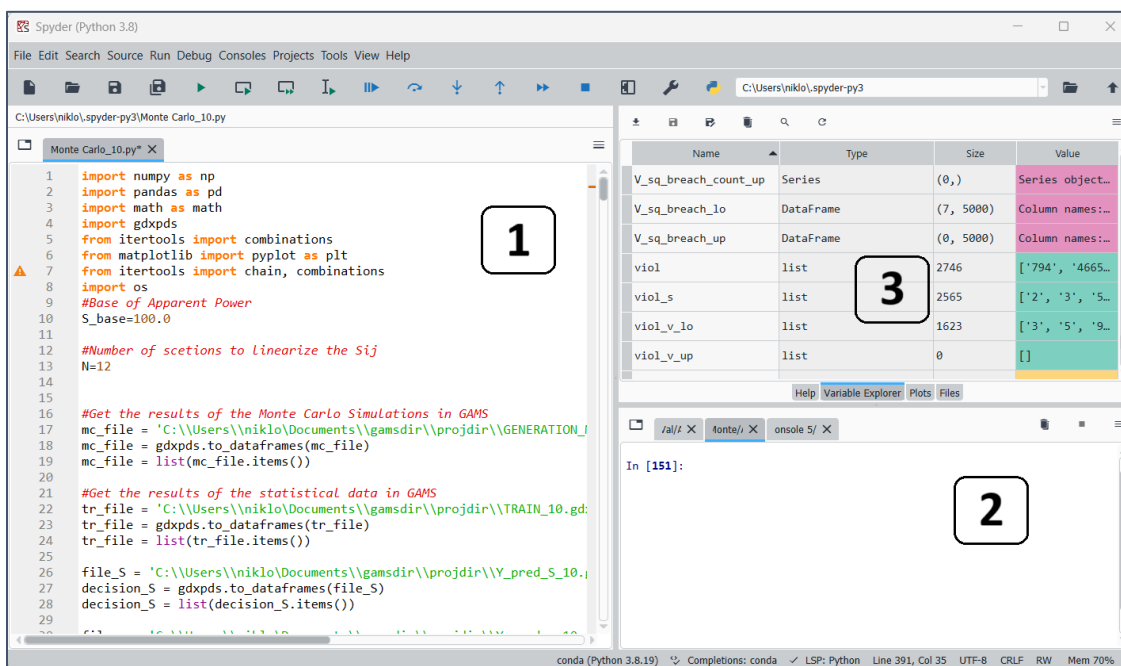
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANACONDA-SPYDER

Η επεξεργασία και διαμόρφωση δεδομένων μέσω του λογισμικού Anaconda-Spyder είναι μια διαδικασία που απαιτεί σαφήνεια και ακρίβεια. Το Anaconda προσφέρει ένα πλούσιο περιβάλλον για την επεξεργασία δεδομένων μέσω του Spyder, ενός προγραμματιστικού εργαλείου IDE που υποστηρίζει γλώσσες όπως η Python. Το Spyder (Scientific PYthon Development EnviRonment) είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) για την γλώσσα προγραμματισμού Python, σχεδιασμένο ειδικά για επιστημονικό υπολογισμό και ανάλυση δεδομένων[13]. Το περιβάλλον εργασίας του Spyder, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11, είναι φιλικό προς τον χρήστη και παρέχει ένα σύνολο εργαλείων που διευκολύνουν την ανάπτυξη, τον έλεγχο και την ανάλυση κώδικα. Παρακάτω αναλύονται τα κύρια στοιχεία του περιβάλλοντος εργασίας:

1. Επεξεργαστής κώδικα (Editor):

- Πολυπαράθυρος Επεξεργαστής: Υποστηρίζει πολλαπλές καρτέλες, επιτρέποντας το άνοιγμα και την επεξεργασία πολλών αρχείων ταυτόχρονα.
- Σύνταξη Κώδικα με Χρωματισμό (Syntax Highlighting): Διευκολύνει την ανάγνωση και την κατανόηση του κώδικα μέσω του χρωματισμού της σύνταξης.
- Αυτόματη Συμπλήρωση και Υποδείξεις (Autocomplete & Introspection): Προσφέρει προτάσεις κώδικα και πληροφορίες για συναρτήσεις και μεταβλητές καθώς πληκτρολογεί ο χρήστης.

- Εντοπισμός και Διόρθωση Λαθών (Error Detection): Επισημαίνει συντακτικά λάθη και πιθανά προβλήματα στον κώδικα.
2. Διαδραστική Κονσόλα (Console):
- IPython Console: Παρέχει μια ισχυρή διαδραστική κονσόλα με προηγμένες δυνατότητες όπως η εκτέλεση εντολών σε πραγματικό χρόνο, η πρόσβαση στο ιστορικό εντολών και η ενσωμάτωση γραφημάτων.
 - Υποστήριξη Πολλαπλών Κονσολών: Δυνατότητα εκτέλεσης πολλών διαδικασιών ταυτόχρονα.
3. Εξερευνητής Μεταβλητών (Variable Explorer):
- Προβολή και Διαχείριση Μεταβλητών: Εμφανίζει όλες τις μεταβλητές που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη κατά την εκτέλεση του κώδικα.
 - Δυνατότητα Επεξεργασίας: Δυνατότητα επεξεργασίας των τιμών των μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένων των arrays (πινάκων), των DataFrames (βάσεις δεδομένων) κ.λπ.



Σχήμα 4.12 : Περιβάλλον Εργασίας Spyder-IDE

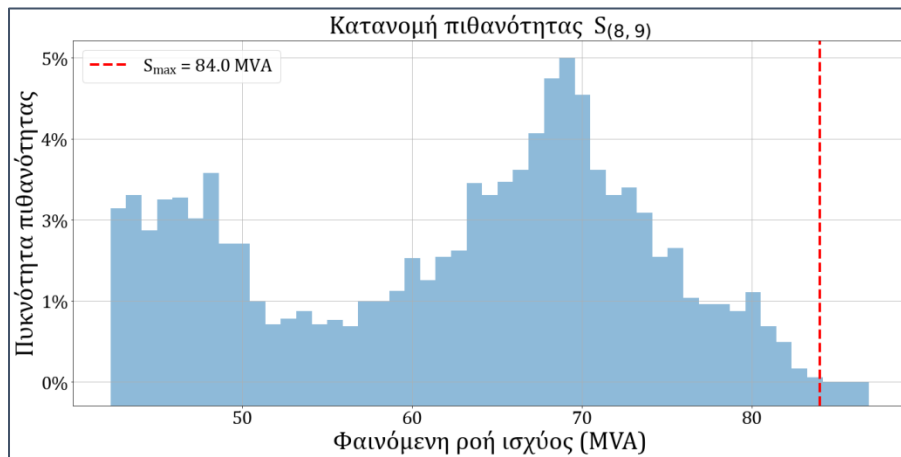
4.2.1 Η ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ PYTHON ΚΑΙ ΟΙ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ ΤΗΣ

Η Python είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα προγραμματισμού για επεξεργασία δεδομένων λόγω της αποτελεσματικότητας και ευελιξίας της [14]. Στην διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε σε συνδυασμό με το λογισμικό Spyder το εργαλείο επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος του συστήματος υπό εξέταση. Στην συνέχεια γίνεται μια αναφορά στις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων.

- **GDXPDS:** Επιτρέπει την ανάγνωση και εγγραφή αρχείων GDX χρησιμοποιώντας το pandas. Το GDX (GAMS Data Exchange) είναι μια μορφή αρχείου που χρησιμοποιείται από το λογισμικό GAMS για την αποθήκευση δεδομένων. Η βιβλιοθήκη gdxpds γεφυρώνει το GAMS με το pandas, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Η χρήση της έγινε κυρίως κατά την ανάγνωση δεδομένων από τα αποτελέσματα του GAMS και έπειτα στην δημιουργία “.gdx” αρχείων ώστε να φορτωθούν δεδομένα σε μετέπειτα στάδια του αλγόριθμου.
- **MATPLOTLIB:** Βοηθάει στην δημιουργία στατικών, κινούμενων και διαδραστικών γραφημάτων. Το υποπακέτο **pyplot** παρέχει μια διεπαφή παρόμοια με αυτή της MATLAB για τη σχεδίαση γραφημάτων. Χρησιμοποιήθηκε εντατικά στην εξαγωγή γραφημάτων τα οποία απεικονίζουν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων κάνοντας πιο σαφή την κατανόηση της λειτουργίας του προτεινόμενου αλγόριθμου.
- **PANDAS:** Εξειδικεύεται στην ανάλυση και τον χειρισμό δεδομένων. Παρέχει δομές δεδομένων όπως DataFrame και Series, οι οποίες διευκολύνουν την εργασία με δομημένα δεδομένα. Βρίσκει εφαρμογή στην ανάλυση και καθαρισμό δεδομένων, στην προετοιμασία δεδομένων για μηχανική μάθηση και στην εργασία με μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο λόγω της δυνατότητας να βάζει ετικέτες στις στήλες και τις γραμμές των DataFrames, πράγμα πολύ χρήσιμο στην ανάγνωση πραγματικών μεγεθών ενός ΣΗΕ.
- **SCIKIT-LEARN:** Είναι μια ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκη μηχανικής μάθησης για τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Παρέχει μια ευρεία γκάμα εργαλείων για την προεπεξεργασία δεδομένων, την επιλογή μοντέλων, την ταξινόμηση, την παλινδρόμηση, την ομαδοποίηση (clustering), τη μείωση διαστάσεων και πολλά άλλα. Η scikit-learn είναι χτισμένη πάνω στις βιβλιοθήκες NumPy, SciPy και matplotlib, εκμεταλλευόμενη τις δυνατότητές τους για αποδοτικούς υπολογισμούς και οπτικοποίηση. Ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία της βιβλιοθήκης, τα οποία και εφαρμόστηκαν κατά την διπλωματική εργασία είναι οι αλγόριθμοι επιβλεπόμενης μάθησης (Supervised Learning) στην προσπάθεια να γίνει μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών. Ο πρώτος ήταν ο Random Forest Regressor (Random Forest Regressor - RFR), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο παλινδρόμησης, και ο δεύτερος ήταν ο Decision Tree Classifier (Decision Tree Classifier – DTC), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο ταξινόμησης.
- **ITERTOOLS:** Παρέχει εργαλεία για αποτελεσματικούς βρόχους και συνδυασμούς. Οι συναρτήσεις **chain** και **combinations** χρησιμοποιούνται για τη χειραγώγηση και τον συνδυασμό διαδοχών. Αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο στην αποσύνθεση της κοινής πιθανότητας παραβίασης των περιορισμών σε επιμέρους.

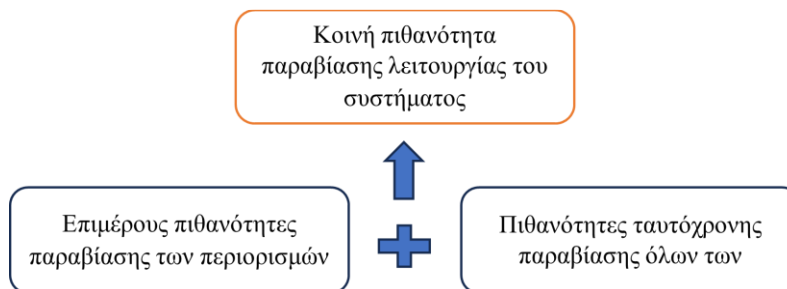
4.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΙΜΗΣ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΥ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία της αποσύνθεσης της κοινής πιθανότητας παραβίασης των περιορισμών όλου του συστήματος σε επιμέρους πιθανότητες των περιορισμών της κάθε λειτουργικής παραμέτρου ξεκινάει από την μέθοδο Monte Carlo. Η επίλυση ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος δημιουργεί ένα σύνολο αποτελεσμάτων για κάθε μεταβλητή κατάσταση του προβλήματος, δηλαδή για κάθε λειτουργική παράμετρο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που αναλύεται. Ο κώδικας που καταστρώνεται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων υπολογίζει την συχνότητα με την οποία παραβιάζεται ο περιορισμός της κάθε παραμέτρου. Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων οι περιορισμοί των παραμέτρων παραλείπονται ώστε να συλλεχθούν πλήρης δεδομένα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12 για την κάθε παράμετρο μπορεί να γίνει υπολογισμός της πιθανότητας εκδήλωσης κάποιας τιμής της αλλά και της πιθανότητας να παίρνει τιμές μεγαλύτερες μιας συγκεκριμένης.



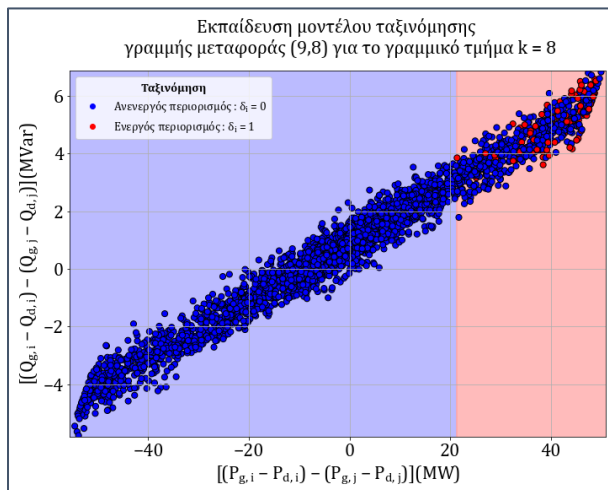
Σχήμα 4.13 : Κατανομή πιθανότητας της ροής φαινόμενης ισχύος για την γραμμή μεταφοράς (8,9)

Προηγουμένως, έχει γίνει το φιλτράρισμα των σεναρίων όπου προβλέπεται να μην υπάρξει παραβίαση σύμφωνα με το αποτέλεσμα της πρόβλεψης των μοντέλων ταξινόμησης. Το εκπαιδευμένο μοντέλο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13 η γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας του, δημιουργεί δύο πεδία μέσω ενός κατωφλιού απόφασης και εάν ο συνδυασμός των δεδομένων εισόδου βρίσκεται σε κάποια από αυτές τις περιοχές, τότε η απόφαση του μοντέλου δίνει στην δυαδική μεταβλητή δ_m την τιμή που αντιστοιχεί. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας πίνακας απόφασης Y_{DECISION} για την πρόβλεψη τόσο της παραβίασης των περιορισμών μεγέθους τάσης ζυγού αλλά και για τους περιορισμούς ροής φαινόμενης ισχύς γραμμής μεταφοράς.



Σχήμα 4.14 : Γράφημα σχέσης μεταξύ των στατιστικών μεγεθών

Αφότου έχει γίνει η διαδικασία απαλοιφής των μη προβλεπόμενων σεναρίων έρχεται το βήμα υπολογισμού όλων των πιθανών ενδεχομένων παραβίασης περιορισμών, συνυπολογισμένων των ενδεχομένων παραβίασης του κάθε περιορισμού αλλά και της παραβίασης ενός έως όλων ταυτόχρονα. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω των εργαλείων της βιβλιοθήκης **ITERTOOLS** και ο χρόνος εκτέλεσής της μειώνεται αρκετά λόγω της ταξινόμησης των γεγονότων. Η διαδικασία υπολογισμού του βαθμού εμπιστοσύνης λειτουργίας όλου του συστήματος γίνεται μέσω του υπολογισμού των σεναρίων που έστω ένας περιορισμός παραβιάστηκε ενώ ο υπολογισμός του βαθμού εμπιστοσύνης λειτουργίας της κάθε επί μέρους παραμέτρου γίνεται μέσω των (3.61) και (3.62) που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, ενώ η σχέση μεταξύ των στατιστικών μεγεθών φαίνεται και στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.15 : Γραφική απεικόνιση πεδίου αποφάσεως ταξινόμησης

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

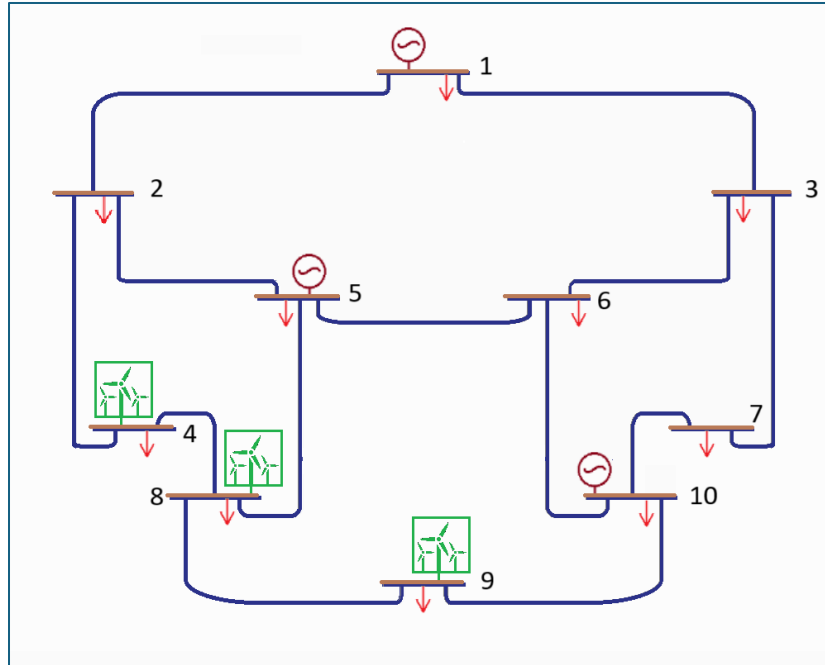
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η εφαρμογή της διατύπωσης του προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος (OPF) με πιθανοτικούς περιορισμούς στο δίκτυο 10 ζυγών που χρησιμοποιείται για την έρευνα. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη λειτουργία του συστήματος υπό διάφορα σενάρια αβεβαιότητας.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η στατιστική ανάλυση που ακολουθεί εξετάζει την απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος, προσδιορίζοντας πιθανολογικές παραβιάσεις περιορισμών και την αντίδραση του συστήματος σε ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Τέλος, θα παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα της εφαρμογής της διατύπωσης του προβλήματος, καθώς και η ευαισθησία και η αποδοτικότητα του αλγόριθμου που εφαρμόστηκε. Παράλληλα, θα εξεταστεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης της μεθοδολογίας σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στην πρακτική εφαρμογή από τους διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 10 ΖΥΓΩΝ

Το δίκτυο στο οποίο βασίστηκε η διπλωματική εργασία (Σχήμα 5.1) περιλαμβάνει 10 ζυγούς. Σε όλους τους ζυγούς υπάρχει συνδεδεμένο ηλεκτρικό φορτίο ενώ ζυγός αναφοράς είναι ο ζυγός νούμερο 5. Συνολικά υπάρχουν 3 συμβατικές μονάδες παραγωγής συμπεριλαμβανομένου του ζυγού αναφοράς ενώ σε τρεις γειτονικούς ζυγούς έχουν επιλεγεί να εγγέουν ισχύ τρία αιολικά πάρκα. Έχει επιλεγεί ώστε τα πάρκα να έχουν την δυνατότητα έγχυσης ή απορρόφησης άεργου ισχύος, ενώ δεν εξετάζεται η επιλογή του περιορισμού παραγωγής ισχύος την στιγμή που τα κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται μηδενικά. Γεωγραφικά τα πάρκα διαθέτουν διαφορετικό αιολικό δυναμικό επομένως και διαφορετική ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ τους ενώ δεν υπάρχει συσχέτιση της ταχύτητας του αέρα στα πλαίσια των σεναρίων που προσομοιώνονται. Η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος επιλέγεται έτσι ώστε να ακολουθεί κανονική κατανομή γύρω από την μέση τιμή. Οι προσομοιώσεις γίνονται γύρω από το μέση τιμή της ζήτησης ενεργού και άεργου ισχύος και μεταβλητή παραγωγή ισχύος από της ΑΠΕ. Η παραγωγή των συμβατικών μονάδων ορίζεται από το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος για μέση τιμή ζήτησης ισχύος και μέση τιμή παραγωγής ισχύος από τις ΑΠΕ.



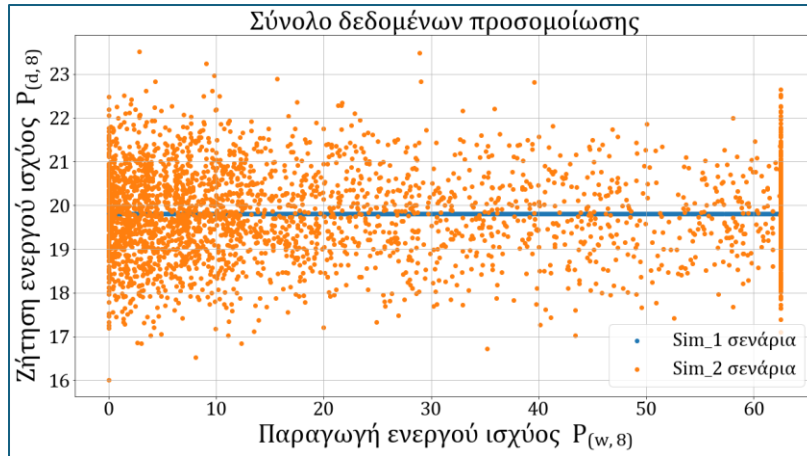
Σχήμα 5.1 : Σύστημα 10 ζυγών

5.2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Η έρευνα της διπλωματικής εργασίας βασίστηκε σε μια σειρά από προσομοιώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος, μέσω του GAMS και το μοντέλο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπό διάφορες συνθήκες. Οι προσομοιώσεις μπορούν να αναπτυχθούν σε τρία διακριτά στάδια με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την εκτέλεση και τα δεδομένα εισόδου τους σύμφωνα και με τον Πίνακα 5.1.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ	ΣΚΟΠΟΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ	ΖΗΤΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ
Sim_1	Ανενεργοί	κατασκευή των μοντέλων παλινδρόμησης και ταξινόμησης	Μεταβλητή	Μεταβλητή	8000
Sim_2	Ανενεργοί	διεξαγωγή των πειραμάτων Monte Carlo	Σταθερή	Σταθερή	5000
Sim_3	Ενεργοί	εξέταση και εξαγωγή αποτελεσμάτων της διατύπωσης	Σταθερή	Σταθερή	1000

Πίνακας 5.1 : Σύγκριση χαρακτηριστικών προσομοιώσεων



Σχήμα 5.2 : Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για παραγωγή ΑΠΕ

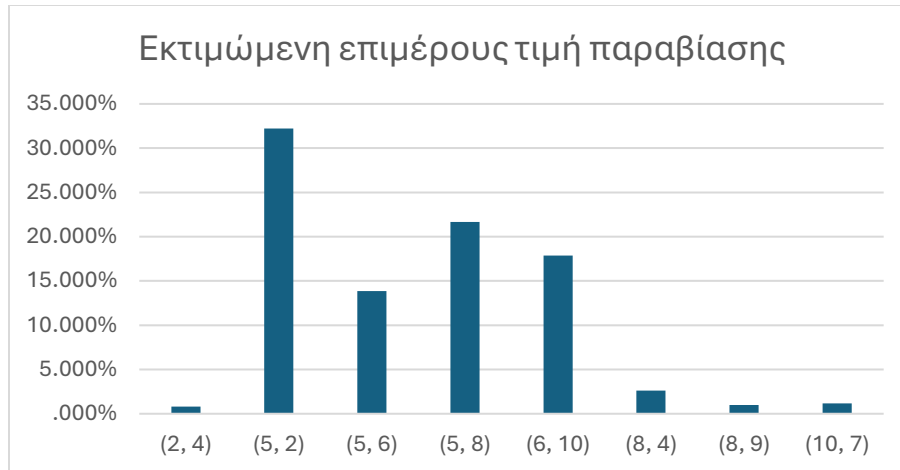
Ένα δείγμα από τα σύνολα δεδομένων προσομοίωσης για έναν ζυγό όπου συνδέεται μια ΑΠΕ, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, δείχνει την διαφορά στο πως προσεγγίζεται το σύστημα και η λειτουργία του για το κάθε στάδιο του αλγόριθμου. Αρχικά υπάρχει ανάγκη να συλλεχθεί πληροφορία σχετικά με την «αντίδραση» των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος για οποιονδήποτε πιθανό συνδυασμό ηλεκτρικού φορτίου και έγχυσης ισχύος από τις ΑΠΕ για να δημιουργηθεί ένα πλήρες δείγμα αποτελεσμάτων. Αυτό το πλήρες δείγμα θα είναι η βάση για την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών στο επόμενο βήμα της μεθόδου, όπου πλέον ζητείται η ανάλυση της αντίδρασης του συστήματος για ένα συγκεκριμένο επίπεδο ζήτησης.

5.2.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός συστήματος όπου δεν έχουν ενταχθεί ΑΠΕ αποτελεί αν όχι εύκολη και περπατημένη διαδικασία σίγουρα όμως μια διαδικασία που δίνει ξεκάθαρα και μη αμφισβητήσιμα αποτελέσματα. Οι αιτιοκρατικοί περιορισμοί είναι ικανοί να οδηγήσουν το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος σε μια εφικτή λύση για μια συγκεκριμένη κατάσταση του δικτύου. Εφόσον όμως στην εξίσωση εισάγεται και η αβεβαιότητα με την οποία προβλέπεται η συμβολή των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας, οι αιτιοκρατικοί περιορισμοί παύουν να έχουν την ίδια επίδραση στον έλεγχο συμπεριφοράς του συστήματος. Στα πλαίσια ανάλυσης της μέσης τιμής κατάστασης ηλεκτρικού φορτίου, οι υπολογισμοί των ροών φορτίου θα γινόντουσαν για την αντίστοιχη μέση τιμή ικανότητας παραγωγής εκ μέρους των ΑΠΕ. Επομένως χρειάζεται να γίνει στατιστική ανάλυση ως προς την συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε απόκλιση των δεδομένων από την προβλεπόμενη. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά στατιστικά που συλλέχθηκαν από την διαδικασία εκτέλεσης προσομοιώσεων Monte Carlo.

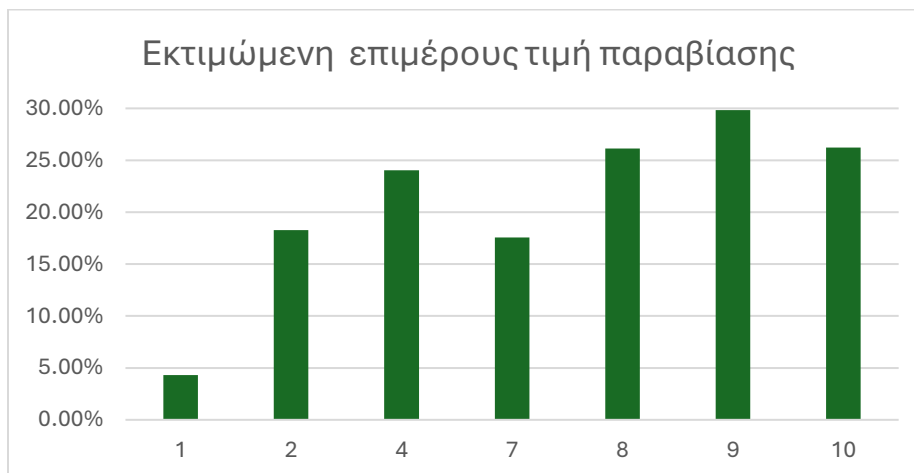
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ	$\sum P_{w,i} > \sum \bar{P}_{w,i}$	$\sum P_{w,i} < \sum \bar{P}_{w,i}$
Ροής Φαινόμενης Ισχύος Γραμμής	51,30%	18,93%	32,37%
Άνω όριο Μεγέθους Τάσης Ζυγού	0%	0%	0%
Κάτω όριο Μεγέθους Τάσης Ζυγού	32,46%	0%	32,46%
Έστω ένας	54,92%	18,92%	36,00%

Πίνακας 5.2 : Στατιστικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.3 : Εκτιμώμενες τιμές παραβίασης των SCC των περιορισμών ροής φαινόμενης ισχύος

Εκτός από την κοινή πιθανότητα παραβίασης μπορεί να υπολογιστεί και μια αρχική τιμή παραβίασης των επιμέρους περιορισμών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα : 5.3 οι περισσότερες παραβιάσεις προκύπτουν στις γραμμές μεταφοράς όπου συμπεριλαμβάνεται ο ζυγός αναφοράς 5, ο οποίος σε οποιαδήποτε κατάσταση όπου η παραγωγή των αιολικών δεν είναι η αναμενόμενη θα πρέπει να υποστηρίξει την ζήτηση μιας και η παραγωγή των συμβατικών μονάδων είναι προϋπολογισμένη.



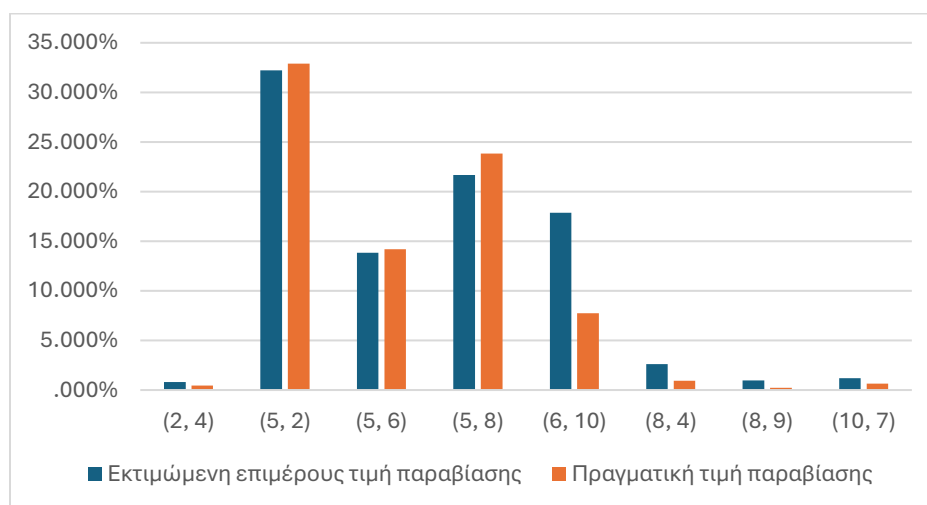
Σχήμα 5.4 : Εκτιμώμενες τιμές παραβίασης των SCC των περιορισμών κάτω ορίου μεγέθους τάσης

Επίσης εξαρτώμενη από τις αυξομειώσεις της παραγωγής των ΑΠΕ είναι και η παραβίαση των κάτω ορίου του μεγέθους τάσεις ζυγού, όπως διακρίνεται και στο Σχήμα : 5.4. Στον πίνακα 5.2 συμπεριλαμβάνεται και το ποσοστό των παραβιάσεων που η παραγωγή των ΑΠΕ δεν ήταν η αναμενόμενη. Όπως φαίνεται και από τα ποσοστά, η συνολική παραγωγή των ΑΠΕ είναι χαμηλότερη της μέσης αναμενόμενης, η παραβίαση των περιορισμών του συστήματος γίνεται πιο συχνά σε σχέση με τα σενάρια όπου η συνολική παραγωγή των ΑΠΕ είναι υψηλότερη της μέσης αναμενόμενης. Υποψήφιο αίτιο αυτού του στατιστικού είναι το γεγονός πως σε αυτές τις καταστάσεις, η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς που συνδέουν τον ζυγό αναφοράς με τους διάφορους ζυγούς του συστήματος αυξάνεται ώστε να ικανοποιηθεί το ηλεκτρικό φορτίο. Συγκεκριμένα οι γραμμές μεταφοράς (5,2) , (5,6) και (5,8) παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές παραβίασης του περιορισμού τους.

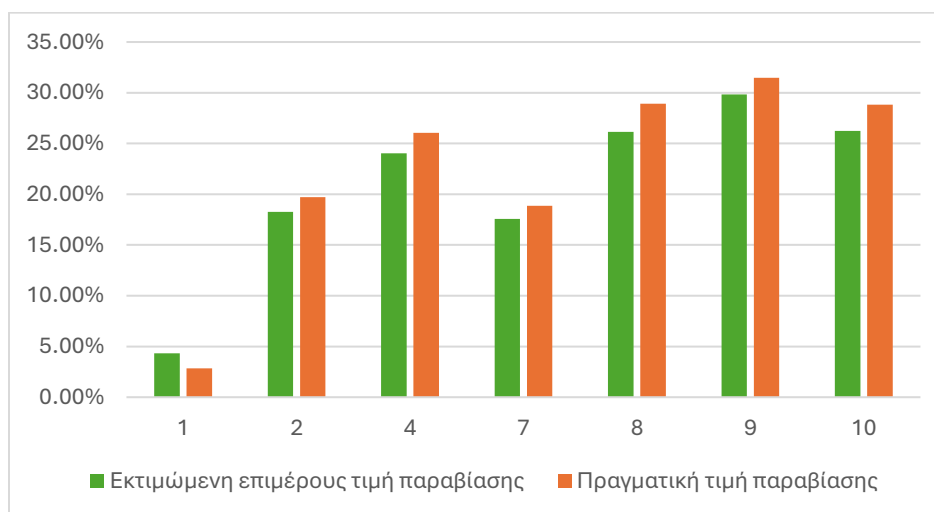
5.2.3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, οι εκτιμήσεις παραβίασης των περιορισμών χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία ώστε να προκύψει η διατύπωση του προβλήματος σε πιθανοτικούς περιορισμούς, οι οποίοι θα περιγράφουν με ακρίβεια την τιμή παραβίασης της κάθε λειτουργικής παραμέτρου. Η αποσύνθεσης σε επιμέρους πιθανοτικούς περιορισμούς παίρνει ως ορίσματα την τιμή παραβίασης του συνολικού συστήματος καθώς και το άθροισμα όλων των πιθανών ενώσεων των επιμέρους τιμών παραβίασης. Στόχος είναι η απαλοιφή της συσχέτισης μεταξύ της συχνότητας παραβίασης δύο έως όλων των περιορισμών ταυτόχρονα ώστε να βρεθεί η πραγματική τιμή παραβίασης της κάθε παραμέτρου ανεξάρτητα.

Στα Σχήματα 5.5 και 5.6 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των αρχικών εκτιμήσεων και του τελικού αποτελέσματος, το οποίο προκύπτει από τη χρήση της σχέσης 3.62.



Σχήμα 5.5 : Σύγκριση των εκτιμώμενων και πραγματικών SCC των περιορισμών ροής φαινόμενης ισχύος

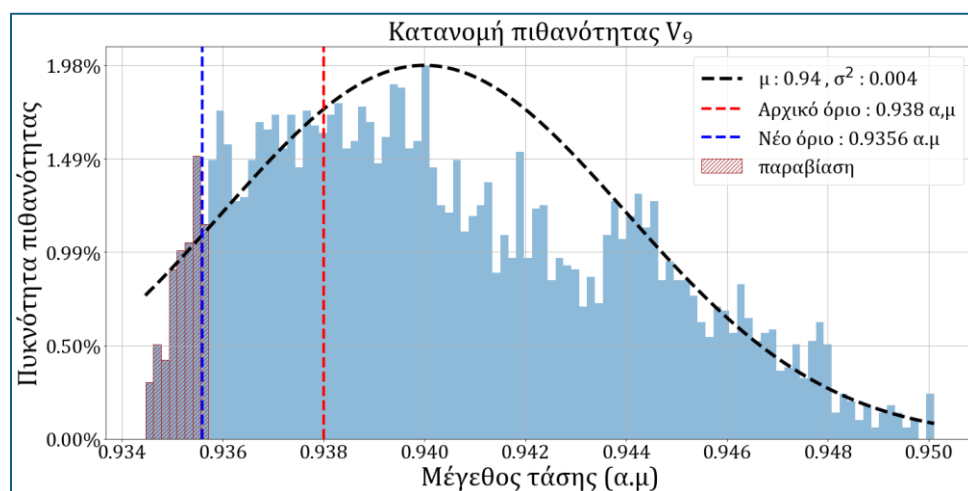


Σχήμα 5.6 : Σύγκριση των εκτιμώμενων και πραγματικών SCC των περιορισμών κάτω ορίου μεγέθους τάσης

Ζητείται λειτουργία του συστήματος με πιθανότητα παραβίασης έστω και ενός περιορισμού στο επίπεδο 10%. Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται οι τιμές των SCC (Single – Chance – Constraints) που ορίζονται από τον αλγόριθμο ώστε να επιτευχθεί η JCC (Joint – Chance – Constraint) της τάξης του 10% καθώς και η προσαρμογή του εκάστοτε περιορισμού όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.

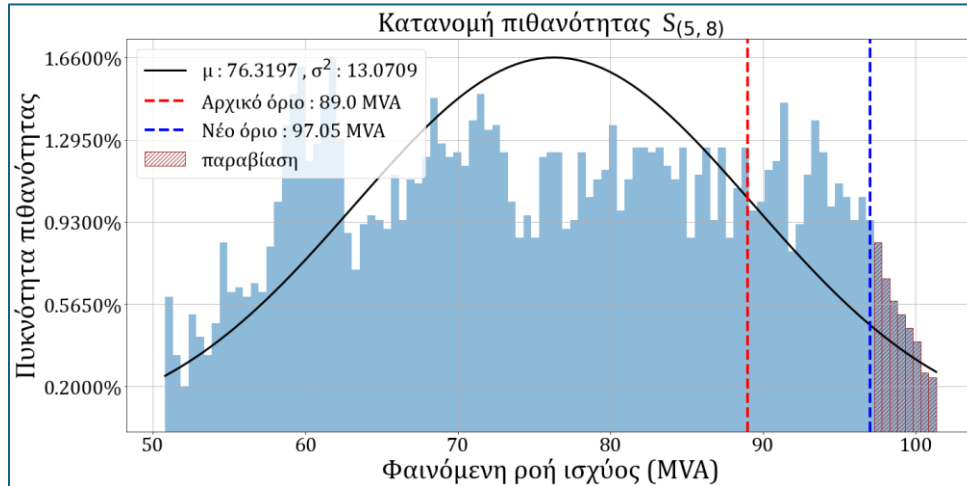
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΝΕΑ ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ (%)	ΠΑΛΙΟ ΟΡΙΟ (α.μ)	ΝΕΟ ΟΡΙΟ (α.μ)
Φαινόμενης ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς (i,j)			
(2, 4)	0,08	0,309	0,3354
(5, 2)	5,99	1,0978	1,1752
(5, 6)	2,59	1,7891	1,8241
(5, 8)	4,34	0,8797	0,9705
(6, 10)	1,41	0,2907	0,3311
(8, 4)	1,70	0,3396	0,3643
(8, 9)	0,04	0,8628	0,869
(10, 7)	0,12	0,6346	0,6431
Κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i			
1	0,52	0,947	0,9466
2	3,59	0,96	0,9593
4	4,74	0,952	0,9502
7	3,43	0,908	0,907
8	5,26	0,954	0,952
9	5,73	0,938	0,9356
10	5,25	0,925	0,9233

Πίνακας 5.3 : Μετατροπή σε πιθανοτικούς περιορισμούς



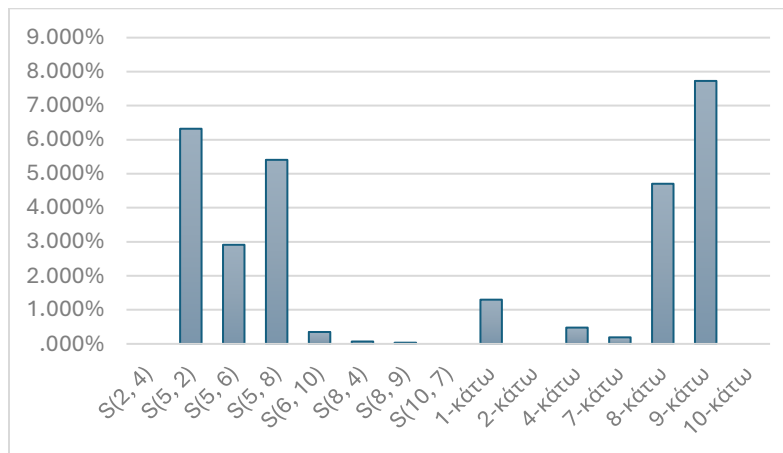
Σχήμα 5.7 : Γραφική απεικόνιση νέου ορίου μεγέθους τάσης ζυγού 9

Η ζητούμενη τιμή παραβίασης του συνολικού συστήματος είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει για τα υφιστάμενα όρια των λειτουργικών παραμέτρων που περιορίζονται. Ως αποτέλεσμα οι επιμέρους τιμές παραβίασης πρέπει και αυτές να μειωθούν, ενώ πρέπει να γίνει η κατάλληλη προσαρμογή του ορίου ώστε να τηρεί αυτές τις νέες τιμές. Στην περίπτωση του περιορισμού φαινόμενης ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς (i,j), το όριο θα χρειαστεί να μεγαλώσει ώστε να μειωθεί ο αριθμός των πιθανών τιμών που βρίσκονται κάτω από αυτό. Όσον αφορά τους περιορισμούς κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i, το όριο θα χρειαστεί να μικρύνει ώστε να μειωθεί αντίστοιχα ο αριθμός των πιθανών τιμών που βρίσκονται κάτω από αυτό. Στα σχήματα 5.7 και 5.8 φαίνεται η “μετακίνηση” του ορίου προς την τιμή η οποία συμπεριλαμβάνει λιγότερο ποσοστό από την κατανομή της.



Σχήμα 5.8 : Γραφική απεικόνιση νέου ορίου φαινόμενης ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς (5,8)

Η προσομοίωση της διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος με πιθανοτικούς περιορισμούς γίνεται λύνοντας το πρόβλημα για διάφορα σενάρια και ενεργοποιημένους τους περιορισμούς με τα νέα όρια. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο έδωσε παραβίαση του συνολικού συστήματος της τάξης του 10,3%. Αυτό σημαίνει ότι, για το συγκεκριμένο ηλεκτρικό φορτίο, η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος με τους νέους αιτιοκρατικούς περιορισμούς μπορεί να προσεγγίσει πολύ καλά τη λύση του ίδιου προβλήματος με πιθανοτικούς περιορισμούς, λαμβάνοντας υπόψη τη ζητούμενη τιμή παραβίασης.



Σχήμα 5.9 : Επιμέρους τιμές παραβίασης (SCC) για συνολικές τιμές παραβίασης (JCC) 10,3%

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην υποενότητα 5.2 έγινε παρουσίαση μερικών αποτελεσμάτων σχετικά με την διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση πάνω στα αποτελέσματα της εφαρμογής και συγκεκριμένα στο τί συμβαίνει στο σύστημα και πως αλληλοεπιδρούν τα μεγέθη του στις μη επιθυμητές καταστάσεις. Επίσης γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της λειτουργίας του συστήματος ως προς το συνολικό βαθμό εμπιστοσύνης αλλά και ως προς τον βαθμό εμπιστοσύνης των επιμέρους περιορισμών του Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, θα προσδιοριστούν οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα του συστήματος, εξετάζοντας τον βαθμό εμπιστοσύνης και ανθεκτικότητας του συστήματος σε διαταραχές.

Παράλληλα, θα αξιολογηθεί η απόδοση του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια, την ταχύτητα και την αποδοτικότητά του υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Οι αναλύσεις αυτές θα παρέχουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος και την ικανότητά του να ανταποκρίνεται στις προκλήσεις που παρουσιάζονται λόγω των μεταβλητών παραγόντων.

5.3.1 ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Μια προσέγγιση της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον μεγάλο αριθμό των σεναρίων είναι η εξέταση του τι συμβαίνει στις καταστάσεις όπου υπάρχει είτε μια παραβίαση ενός περιορισμού είτε όλες οι παραβιάσεις, δηλαδή σε μια μη επιθυμητή κατάσταση από πλευράς ακεραιότητας της λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω γίνεται εξέταση των μη επιθυμητών καταστάσεων όπου συμμετέχει ο κάθε ζυγός του συστήματος είτε σε παραβίαση περιορισμού μεγέθους τάσης είτε σε παραβίαση περιορισμού ροής φαινόμενης ισχύος γραμμής μεταφοράς.

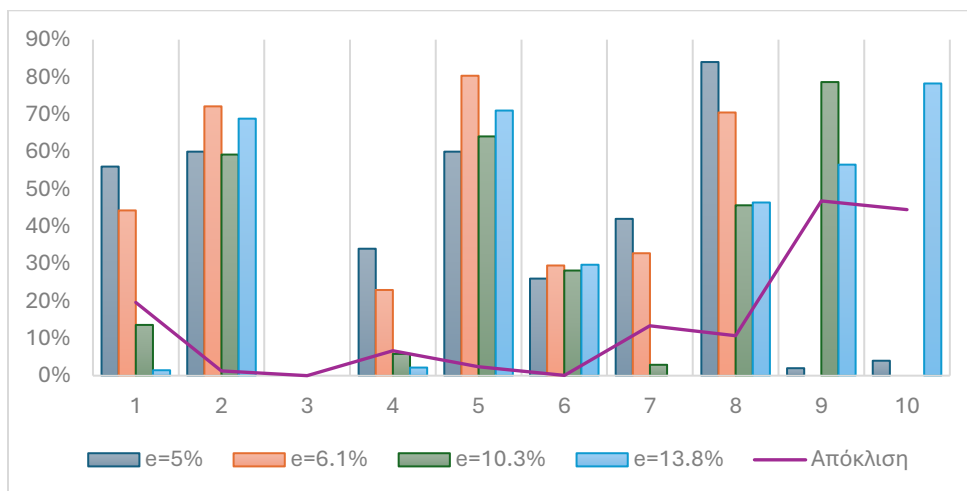
Ζυγός	Συνολική τιμή παραβίασης			
	$\varepsilon = 5\%$	$\varepsilon = 6.1\%$	$\varepsilon = 10.3\%$	$\varepsilon = 13.8\%$
1	56.00%	44.26%	13.59%	1.45%
2	60.00%	72.13%	59.22%	68.84%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4	34.00%	22.95%	5.83%	2.17%
5	60.00%	80.33%	64.08%	71.01%
6	26.00%	29.51%	28.16%	29.71%
7	42.00%	32.79%	2.91%	0.00%
8	84.00%	70.49%	45.63%	46.38%
9	2.00%	0.00%	78.64%	56.52%
10	4.00%	0.00%	0.00%	78.26%

Πίνακας 5.4 : Επίδρασης της μικρότερης από την εκτιμώμενη παραγωγή των ΑΠΕ

Οι μη επιθυμητές καταστάσεις του συστήματος εξαρτώνται αποκλειστικά από την συμβολή των ατομικών πάγκων, που συνδέονται στους ζυγούς 4,8 και 9, στην ικανοποίηση του ηλεκτρικού φορτίου. Η ρύθμιση παραγωγής των συμβατικών μονάδων γίνεται πάνω στην μέση ικανότητα παραγωγής των ΑΠΕ και ως εκ τούτου οποιαδήποτε απόκλιση από αυτήν την μέση τιμή θα δημιουργήσει και μη επιθυμητές καταστάσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό, οι παραβιάσεις προκύπτουν

για μικρότερη παραγωγή από την αναμενόμενη ενώ σε μικρότερο ποσοστό για μεγαλύτερη παραγωγή. Στους πίνακες 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται αναλυτικά το ποσοστό των μη επιθυμητών καταστάσεων στο οποίο συμμετέχει ο κάθε ζυγός του συστήματος για διάφορα επίπεδα συνολικής παραβίασης στην περίπτωση μικρότερης είτε αντίστοιχα μεγαλύτερης παραγωγής από την αναμενόμενη. Τα σχήματα 5.10 και 5.11 αποτελούν γραφικές απεικονίσεις των δεδομένων των πινάκων. Η απόκλιση που παρουσιάζεται στη γραφική παράσταση αντιπροσωπεύει τη διαφορά του ποσοστού συμμετοχής κάθε ζυγού στις μη επιθυμητές καταστάσεις σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα παραβίασης που αναλύονται για τον κάθε ζυγό. Συγκεκριμένα, η γραμμή δείχνει πώς η ευαισθησία του κάθε ζυγού μεταβάλλεται καθώς το επίπεδο της συνολικής παραβίασης αυξάνεται ή μειώνεται.

Αυτή η απόκλιση είναι ενδεικτική της ικανότητας του συστήματος να διαχειρίζεται τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις μεταβολές στην παραγωγή των ΑΠΕ, με αποτέλεσμα κάποιες ζυγοί να εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα, ενώ άλλοι παραμένουν περισσότερο ευάλωτοι στις αλλαγές. Έτσι, η γραμμή της απόκλισης λειτουργεί ως ένας δείκτης της αστάθειας ή σταθερότητας που παρατηρείται σε κάθε ζυγό καθώς αλλάζουν τα επίπεδα παραβίασης.



Σχήμα 5.10 : Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της μικρότερης από την εκτιμώμενη παραγωγή των ΑΠΕ

Στις καταστάσεις του συστήματος όπου η συμβολή των ΑΠΕ δεν είναι η αναμενόμενη, παρατηρείται πως ζυγοί όπως ο 2,5 και 6 παρουσιάζουν παρόμοια ποσοστά συμμετοχής για διάφορες τιμές συνολικής παραβίασης. Αυτό δείχνει πως ναι μεν μέσω της διατύπωσης και των προσαρμογών που γίνονται στις παραμέτρους του συστήματος επιτυγχάνεται μείωση των μη επιθυμητών καταστάσεων, όμως οι συγκεκριμένοι ζυγοί παραμένουν το ίδιο ευάλωτοι ως προς την αβεβαιότητα που εισάγουν οι ΑΠΕ.

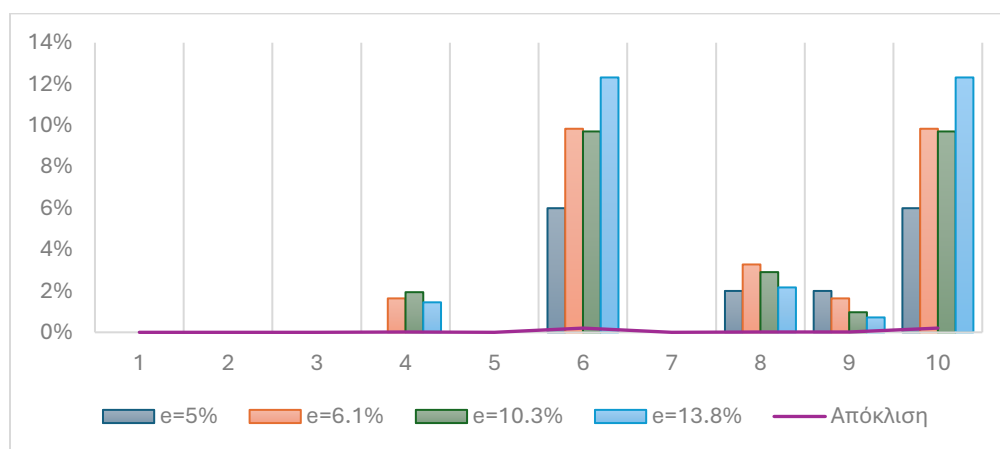
Παράλληλα οι ζυγοί 1 και 4 είναι πιο ευάλωτοι σε μικρές παραβιάσεις και δείχνουν σημάδια σταθεροποίησης σε μεγαλύτερες παραβιάσεις, ενώ οι ζυγοί 8 και 9 αντιπροσωπεύουν τους δύο πόλους της ευπάθειας, με τον ζυγό 8 να είναι σταθερά ευαίσθητος και τον ζυγό 9 να επηρεάζεται έντονα μόνο σε μεγάλες αποκλίσεις.

Ζυγός	Συνολική τιμή παραβίασης			
	$\varepsilon = 5\%$	$\varepsilon = 6.1\%$	$\varepsilon = 10.3\%$	$\varepsilon = 13.8\%$
1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4	0.00%	1.64%	1.94%	1.45%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
6	6.00%	9.84%	9.71%	12.32%
7	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
8	2.00%	3.28%	2.91%	2.17%
9	2.00%	1.64%	0.97%	0.72%
10	6.00%	9.84%	9.71%	12.32%

Πίνακας 5.5 : Επίδρασης της μεγαλύτερης από την εκτιμώμενη παραγωγή των ΑΠΕ

Στις καταστάσεις του συστήματος όπου η συμβολή των ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη της αναμενόμενης, παρατηρείται πως οι ζυγοί 1, 2, 3, 5 και 7 δεν παρουσιάζουν ποσοστά συμμετοχής για διάφορες τιμές συνολικής παραβίασης. Αυτό σημαίνει ότι οι ζυγοί αυτοί δεν επηρεάζονται σημαντικά από τη μεγαλύτερη παραγωγή των ΑΠΕ και διατηρούν τη σταθερότητά τους ανεξάρτητα από το επίπεδο παραβίασης. Πρόκειται για σταθερούς ζυγούς που δεν συνεισφέρουν σε μη επιθυμητές καταστάσεις υπό αυτές τις συνθήκες.

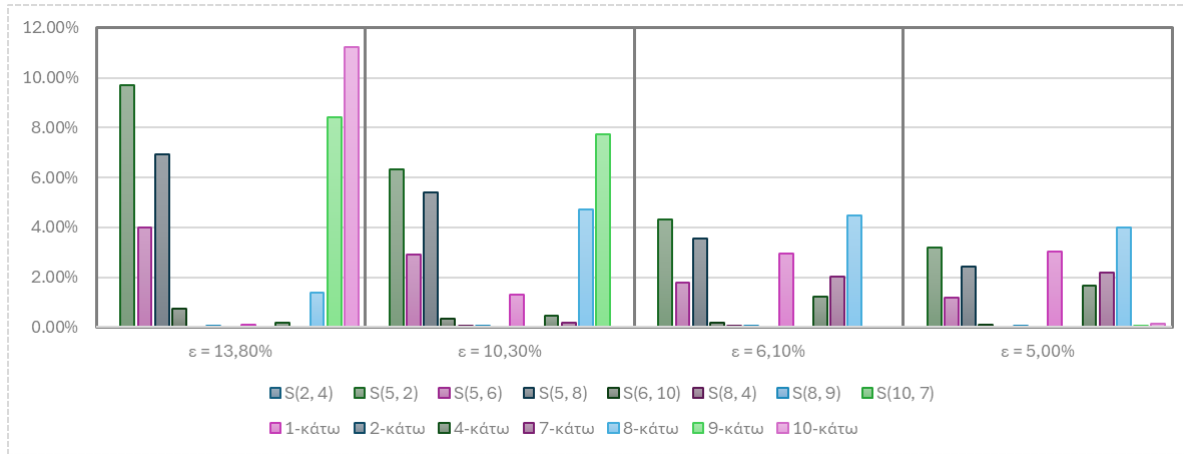
Οι ζυγοί 6 και 10 παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη παραγωγή των ΑΠΕ, ενώ οι ζυγοί 4, 8 και 9, όπου και συνδέονται τα αιολικά πάρκα, έχουν μικρότερη αλλά ακόμα σημαντική συμμετοχή στις μη επιθυμητές καταστάσεις.



Σχήμα 5.11 : Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της μεγαλύτερης από την εκτιμώμενη παραγωγή των ΑΠΕ

5.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΒΑΘΜΟ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με το πώς επηρεάζεται ο συνολικός βαθμός εμπιστοσύνης για διαφορετικές επεμβάσεις και προσαρμογές στους επιμέρους βαθμούς εμπιστοσύνης του συστήματος. Αρχικά, έγινε μια κλιμακωτή αύξηση του βαθμού εμπιστοσύνης για κάθε περιορισμό, με στόχο την επίτευξη συνολικού βαθμού παραβίασης του συστήματος της τάξης του 15,00%, 10,00%, 7,50% και 5,00%.



Σχήμα 5.12 : Επιμέρους τιμές παραβίασης (SCC) για διάφορες συνολικές τιμές παραβίασης (JCC)

“ $S(x,y)$ ”: περιορισμός ροής φαινόμενης ισχύος γραμμής μεταφοράς (x,y)

“ x -κάτω”: περιορισμός κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού x

Η γραφική παράσταση του σχήματος 5.12 δείχνει πώς οι επιμέρους παραβιάσεις κάθε περιορισμού συμβάλλουν στο συνολικό ποσοστό παραβίασης του συστήματος.

- Επίπεδο παραβίασης $\varepsilon = 13.80\%$: Σε αυτό το επίπεδο, παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση παραβιάσεων στους περιορισμούς « $S(5,2)$ », « $S(5,8)$ » και «10-κάτω». Αυτό υποδηλώνει ότι έχουν σημαντική συμμετοχή στις μη επιθυμητές καταστάσεις για υψηλότερα επίπεδα συνολικής παραβίασης.
- Επίπεδο παραβίασης $\varepsilon = 10.30\%$: Σε αυτήν την περίπτωση, ο περιορισμός « $S(5,2)$ » εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντική συμμετοχή στις μη επιθυμητές καταστάσεις, ενώ παρατηρείται μείωση στη συμβολή των παραβιάσεων για άλλους περιορισμούς.
- Επίπεδο παραβίασης $\varepsilon = 6.10\%$: Η συνολική εικόνα των παραβιάσεων μειώνεται σημαντικά. Οι περιορισμοί « $S(5,2)$ » και « $S(5,8)$ » παραμένουν σχετικά σταθεροί σε συμμετοχή.
- Επίπεδο παραβίασης $\varepsilon = 5.00\%$: Σε αυτό το επίπεδο, οι παραβιάσεις είναι πολύ χαμηλές για τις περισσότερες κατηγορίες. Ενδεικτικό πως όλες οι πιθανότητες παραβίασης των περιορισμών είναι μικρότερες της συνολικής πιθανότητας.

Οι περιορισμοί «S(5,2)», «S(5,8)» είναι οι πιο ευαίσθητοι και κρίσιμοι σε υψηλότερα επίπεδα συνολικής παραβίασης, υποδεικνύοντας ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτούς για τη βελτίωση νέου ευστάθειας του συστήματος. Περιορισμοί όπως ο «9-κάτω» και «10-κάτω» είναι πιο διαχειρίσιμοι ως προς την ρύθμιση της τιμής παραβίασης τους για χαμηλότερα επίπεδα συνολικής παραβίασης. Ο περιορισμός «8-κάτω» φαίνεται να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα για μείωση του επιπέδου συνολικής παραβίασης, κάτι που μπορεί να εξηγείται και από τον κοινό συντελεστή με τον περιορισμό «S(5,8)» που είναι ο ζυγός 8.

Στον πίνακα 5.6 καταγράφονται οι αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων τιμών παραβίασης για την κάθε ζητούμενη συνολική τιμή παραβίασης και των πραγματικών τιμών παραβίασης που υπολογίστηκαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	Συνολική ζητούμενη τιμή παραβίασης			
	$\varepsilon = 15\%$	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 7,5\%$	$\varepsilon = 5\%$
Φαινόμενη ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς (i,j)				
(2, 4)	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
(5, 2)	8.141%	5.582%	-3.813%	960.673%
(5, 6)	2.939%	12.654%	-6.953%	822.588%
(5, 8)	6.590%	24.555%	9.250%	1014.843%
(6, 10)	-65.586%	-75.211%	-83.181%	18.331%
(8, 4)	0.000%	-58.888%	-76.755%	0.000%
(8, 9)	-47.889%	-15.355%	-4.284%	1246.825%
(10, 7)	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
Κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i				
1	-85.796%	151.571%	660.159%	11639.849%
2	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
4	-97.307%	-89.914%	-65.320%	601.559%
7	0.000%	-94.408%	-21.528%	1184.619%
8	-82.651%	-10.615%	13.513%	1417.672%
9	-2.068%	34.851%	0.000%	-78.273%
10	42.512%	0.000%	0.000%	-45.998%
Μέση τιμή αποκλίσης	29.432%	38.240%	62.984%	1268.749%

Πίνακας 5.6 : Απόδοση αλγόριθμου

Παρατηρείται ότι σε αρκετούς περιορισμούς οι αποκλίσεις είναι αρκετά μεγάλες, ειδικά για τις χαμηλές ζητούμενες συνολικές τιμές παραβίασης, όπως $\varepsilon = 5\%$. Οι μεγάλες αυτές αποκλίσεις μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι για χαμηλές ζητούμενες τιμές παραβίασης, όπως $\varepsilon = 5\%$, τα όρια των παραμέτρων είναι πολύ κοντά στην ουρά της κατανομής κάθε παραμέτρου. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και μικρές αποκλίσεις στις πραγματικές τιμές των παραμέτρων μπορούν να οδηγήσουν σε δυσανάλογα μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές παραβίασης. Όταν οι παραβιάσεις βρίσκονται στα άκρα της κατανομής, ακόμα και μικρές διακυμάνσεις στις τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις, όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα του πίνακα.

- Γίνεται ανάλυση του πως συμπεριφέρεται το σύστημα για βαθμό εμπιστοσύνης της τάξης του 100% για τους περιορισμούς «S(5,2)», «S(5,8)» και «8-κάτω» και τους υπόλοιπους περιορισμούς ως έχουν.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΝΕΑ ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ (%)	ΠΑΛΙΟ ΟΡΙΟ (α.μ)	ΝΕΟ ΟΡΙΟ (α.μ)
Φαινόμενης ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς (i,j)			
(2, 4)	0.44%	0,309	0.3090
(5, 2)	0.00%	1,0978	1.2071
(5, 6)	0.00%	1,7891	1.8429
(5, 8)	0.00%	0,8797	1.0136
(6, 10)	7.74%	0,2907	0.2907
(8, 4)	0.93%	0,3396	0.3396
(8, 9)	0.23%	0,8628	0.8628
(10, 7)	0.65%	0,6346	0.6346
Κάτω ορίου μεγέθους τάσης ζυγού i			
1	2.84%	0,9469	0.9469
2	19.71%	0,9601	0.9601
4	26.05%	0,9522	0.9522
7	18.86%	0,9081	0.9081
8	0.00%	0,951	0.951
9	31.47%	0,938	0.9382
10	28.82%	0,9252	0.9252

Πίνακας 5.7 : Νέα όρια με βάση τα ζητούμενα του πειράματος.

Το πείραμα είχε σαν αποτέλεσμα μια μείωση της συνολικής τιμής παραβίασης από το αρχικό 54,92% σε 38,40%. Τα μεγέθη, των οποίων οι περιορισμοί ορίστηκαν με βαθμό εμπιστοσύνης 100%, παρουσίασαν σχεδόν 0% τιμή παραβίασης. Ωστόσο τα άλλα μεγέθη, τα όρια των οποίων και ως εκ τούτου οι περιορισμοί δεν προσαρμόστηκαν, κατέγραψαν την ίδια συχνότητα παραβίασης με το αρχικό. Αυτό δείχνει πως πολλοί περιορισμοί παραβιάζονται ταυτόχρονα και υπάρχει ένας μεγάλος βαθμός εξάρτησής μεταξύ τους σε φυσικό επίπεδο, πράγμα το οποίο δεν δημιουργεί ερωτήματα, καθώς είναι λογικό να υπάρχει ένας μεγάλος βαθμός εξάρτησης μεταξύ των περιορισμών, δεδομένου ότι αναλύεται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο όλα τα μεγέθη και οι παράμετροι συνδυάζονται και αλληλοεπηρεάζονται. Η ροή ισχύος, η τάση στους ζυγούς και η λειτουργία των γραμμών μεταφοράς είναι στενά συνδεδεμένα μεγέθη, και οποιαδήποτε μεταβολή σε έναν από αυτούς τους παράγοντες μπορεί να επηρεάσει άμεσα τη λειτουργία του συστήματος στο σύνολό του.

5.4 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΣΗΕ

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στα πραγματικά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) παρουσιάζει μια σειρά από προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας βασίζεται σε πιθανοτικούς περιορισμούς, οι οποίοι έχουν ως στόχο να διαχειριστούν αβεβαιότητες που εισάγονται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και τις διακυμάνσεις στη ζήτηση. Τα πραγματικά ΣΗΕ χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας και από πολλές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφόρων μεγεθών που περιλαμβάνουν τη ροή ισχύος, την τάση στους ζυγούς, και τη φαινόμενη ισχύ στις γραμμές μεταφοράς. Ένα βασικό ζήτημα που αντιμετωπίζουν είναι η εξασφάλιση σταθερότητας κάτω από συνθήκες διαταραχών, καθώς και η διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος χωρίς σημαντικές αποκλίσεις στην τάση και τη ροή ισχύος.

Επιπλέον, τα πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται συχνά σε καταστάσεις υπερφόρτωσης ή χαμηλής απόδοσης, ιδίως όταν οι ΑΠΕ δεν παράγουν την αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας ή όταν η ζήτηση ξεπερνά τα προβλεπόμενα όρια. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να προσφέρει βελτιώσεις στην απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες αυτές, προσαρμόζοντας τους περιορισμούς ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

5.4.1 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΟΝ ΥΠΑΡΧΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΤΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενσωμάτωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στους υπάρχοντες αλγορίθμους που χρησιμοποιούν οι διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση της διαχείρισης των σύγχρονων ενεργειακών δικτύων. Οι διαχειριστές αντιμετωπίζουν καθημερινά την πρόκληση της διαχείρισης πολύπλοκων δικτύων με πολλαπλές πηγές ενέργειας, περιλαμβάνοντας συμβατικές πηγές αλλά και ΑΠΕ. Η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ, όπως τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, καθιστά απαραίτητη την αναβάθμιση των αλγορίθμων ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες και τις διακυμάνσεις που εισάγονται στο σύστημα.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε πιθανοτικά μοντέλα για τον καθορισμό περιορισμών ροής ισχύος και τάσης, και μπορεί να ενσωματωθεί στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς για την εκτέλεση της βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power – OPF). Η προσέγγιση της βελτιστοποίησης ενός ΣΗΕ, που παρουσιάζεται σε αυτή την διπλωματική εργασία, με πιθανοτικούς περιορισμούς μπορεί να αποτελέσει θεμελιώδη βήμα που εκτελεί ο διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας κατά την έρευνα και μελέτη που κάνει για την ένταξη νέων αιολικών πάρκων στο δίκτυο. Σημαντικά σημεία αυτού αποτελούν:

- Η ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον βαθμό εμπιστοσύνης και η εξέταση μη επιθυμητών καταστάσεων δίνουν χρήσιμη πληροφορία σχετικά με το πώς επιδρά η αβεβαιότητα που εισάγει μια ΑΠΕ στο σύστημα για κάθε μέγεθος του.
- Τα μοντέλα παλινδρόμησης και ταξινόμησης μπορούν να συνδυαστούν ώστε να κάνουν μια καλή αρχική ανάλυση των πιθανών καταστάσεων που θα αντιμετωπίσει το σύστημα.
- Η προσαρμογή των ορίων πάνω στο απαιτούμενο βαθμό εμπιστοσύνης είτε του συνολικού συστήματος είτε του κάθε μεμονωμένου περιορισμού, μπορεί να αποτελέσει καλό εργαλείο στον ακριβή υπολογισμό υλικών όσον αναφορά την προστασία του συστήματος και την αναβάθμιση του εξοπλισμού του.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη και ανάλυση της βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) με χρήση πιθανοτικών περιορισμών, με στόχο τη διασφάλιση της ευσταθούς και αξιόπιστης λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε επιδίωξε να αντιμετωπίσει την αυξημένη διεξόδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα σύγχρονα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, όπου η παραγωγή ενέργειας είναι συχνά απρόβλεπτη και ευμετάβλητη.

Ένα από τα κύρια επιτεύγματα της εργασίας ήταν η εισαγωγή και εφαρμογή μιας μεθοδολογίας που χρησιμοποιεί πιθανοτικούς περιορισμούς, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες στη ροή ισχύος και στην ευστάθεια των τάσεων. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις και τα σενάρια που αναλύθηκαν έδειξαν ότι με την προσθήκη πιθανοτικών παραμέτρων και την κατάλληλη προσαρμογή ρυθμίσεων του συστήματος, το σύστημα κατάφερε να μειώσει σημαντικά τις παραβιάσεις των περιορισμών, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ακραίας μεταβλητότητας από τις ΑΠΕ.

Για να καταλήξει η διπλωματική εργασία σε αυτό το σημείο, έγιναν κάποιες διαδικασίες όπως:

- η γραμμικοποίηση του μαθηματικού μοντέλου που δίνει την λύση του OPF
- ανάπτυξη και κατασκευή μοντέλων παλινδρόμησης και ταξινόμησης
- στατιστική ανάλυση προσομοιώσεων της λειτουργίας του συστήματος
- διατύπωση του OPF με πιθανοτικούς περιορισμούς και προσαρμογή του πάνω στο υφιστάμενο OPF με αιτιοκρατικούς περιορισμούς.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση είναι τα εξής:

Αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος: Μέσω της εφαρμογής πιθανοτικών περιορισμών, το σύστημα κατάφερε να προσαρμοστεί καλύτερα στις μεταβολές της παραγωγής από τις ΑΠΕ, πράγμα που κάνει πιο εύκολη την πρόβλεψη της συμπεριφοράς στα πλαίσια της εισαγόμενης αβεβαιότητας.

Αναγνώριση μη επιθυμητών καταστάσεων: Η στατιστική ανάλυση που συνοδεύει μια διατύπωση με πιθανοτικούς περιορισμούς προσφέρει μια καλή εικόνα του τι εξελίσσεται στο σύστημα στις στιγμές όπου υπάρχει μη ομαλή λειτουργία. Επομένως, μπορεί να παραχθεί πληροφορία όπως το ποιοι ζυγοί του συστήματος είναι πιο ευάλωτοι στις αποκλίσεις της έγχυσης ισχύος των ΑΠΕ από την αναμενόμενη.

Ποσοτικοποίηση της επίδρασης των ΑΠΕ: Η μεθοδολογία απέδειξε ότι μπορεί να υπολογίσει τον αντίκτυπο της διεξόδυσης των ΑΠΕ σε ένα ΣΗΕ και να το εκφράσει μέσω της τιμής παραβίασης χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές για να την προσεγγίσει.

Γενικά, η εργασία προσέφερε μια ρεαλιστική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνοδεύουν την υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα για τη βελτίωση της διαχείρισης αβεβαιότητας σε μελλοντικά δίκτυα.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ

Η παρούσα έρευνα ανοίγει τον δρόμο για μελλοντικές εργασίες, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, με στόχο τη βελτίωση της διαχείρισης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση:

Διερεύνηση μεγαλύτερων συστημάτων: Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα μεταφοράς ενέργειας, όπου οι αβεβαιότητες και οι περιορισμοί είναι περισσότερες και πιο περίπλοκες. Η εφαρμογή σε συστήματα με περισσότερους ζυγούς και γραμμές μεταφοράς θα επιτρέψει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθοδολογίας σε πιο πολύπλοκα δίκτυα.

Εφαρμογή σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ: Ειδικότερα για συστήματα με ακόμη υψηλότερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει και άλλες μορφές αβεβαιότητας εκτός αυτής της αιολικής ενέργειας.

Ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης: Η εφαρμογή της διατύπωσης μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις σε συστήματα πάρα πολλών ζυγών όπου η πολυπλοκότητα αυξάνεται ραγδαία. Εξετάζοντας τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ή τεχνητής νοημοσύνης (AI), θα μπορούσε να βελτιώσει την απόδοση των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ανάλυση κόστους-οφέλους της προτεινόμενης μεθοδολογίας: Μια μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ανάλυση του κόστους και των οφελών από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε ευρύτερα συστήματα. Η ενσωμάτωση πιθανοτικών παραμέτρων συμπεριλαμβάνει επεμβατικές κινήσεις στα υφιστάμενα συστήματα, το οποίο συνεπάγεται πρόσθετα κόστη, τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν σε σχέση με τα οφέλη στη βελτίωση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας του συστήματος.

Δοκιμή της μεθοδολογίας σε πραγματικές συνθήκες: Ένα επόμενο βήμα θα ήταν η πραγματική εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πιλοτικά έργα ή πραγματικά δίκτυα, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοσή της σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας. Τα δεδομένα από τέτοιες δοκιμές θα προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για περαιτέρω βελτιώσεις και προσαρμογές της μεθοδολογίας.

Η μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στην περαιτέρω βελτιστοποίηση της μεθοδολογίας, ώστε να διασφαλιστεί η αποδοτικότερη χρήση των ενεργειακών πόρων και η αύξηση της αξιοπιστίας των συστημάτων, με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων από τις αβεβαιότητες που εισάγονται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gomez-Exposito, Ed. *Electric Energy Systems: Analysis and Operation, 2nd ed.* Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021.
- [2] Π. Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>. Προσπελάστηκε στις 12 Οκτωβρίου 2024.
- [3] M. Ebeed and S. Abdel Aleem, "Overview of uncertainties in modern power systems: uncertainty models and methods," in *Uncertainties in Modern Power Systems*, pp. 1–34. Academic Press, 2021.
- [4] Π. Γεωργιλάκης, *Οικονομική και Αξιόπιστη Λειτουργία Σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα, 2023. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-213>. Προσπελάστηκε στις 12 Οκτωβρίου 2024.
- [5] A. Khaled, N. Badra, and A. Abdelaziz, "Optimal power flow methods: A comprehensive survey," *International Electrical Engineering Journal*, vol. 7, pp. 2228–2239, 2016.
- [5] M. Riaz, S. Ahmad, I. Hussain, M. Naeem, and L. Mihet-Popa, "Probabilistic optimization techniques in smart power system," *Energies*, vol. 15(3), 825, 2022.
- [7] Z. Yang, H. Zhong, A. Bose, T. Zheng, Q. Xia, and C. Kang, "A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: A pathway to improve the MW-only DC OPF," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1734–1745, Mar. 2018.
- [8] K. Baker and A. Bernstein, "Joint chance constraints in AC optimal power flow: Improving bounds through learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6376–6385, Nov. 2019.
- [9] F. Hasan, A. Kargarian, and J. Mohammadi, "Hybrid learning aided inactive constraints filtering algorithm to enhance AC OPF solution time," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 2, pp. 1325–1334, Mar./Apr. 2021.
- [10] T. Akbari and M. Tavakoli Bina, "Linear approximated formulation of AC optimal power flow using binary discretisation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 1117–1123, Apr. 2016.
- [11] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method, 3rd ed.* Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [12] GAMS Development Corporation. *GAMS User's Guide*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.gams.com/46/docs/UG_MAIN.html. Προσπελάστηκε στις 7 Οκτωβρίου 2024.

- [13] Spyder Development Team (n.d.). *Spyder IDE: The Scientific Python Development Environment*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.spyder-ide.org/>. Προσπελάστηκε στις 7 Οκτωβρίου 2024.
- [14] Python Software Foundation (n.d.). *Python Documentation: Release 3.x*. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://docs.python.org/3/>. Προσπελάστηκε στις 7 Οκτωβρίου 2024.