



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Ανάπτυξη συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής
ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τη
χρησιμοποίηση των γραμμών

Διπλωματική Εργασία

του

Ορέστη Βάσιου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
Αθήνα, Ιούλιος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ανάπτυξη συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τη χρησιμοποίηση των γραμμών

Διπλωματική Εργασία

του

Ορέστη Βάσιου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Ιουλίου, 2015.

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

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

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Ορέστης Βάσιος

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

Copyright © – All rights reserved Ορέστης Βάσιος, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Περίληψη

Η αύξηση της συμμετοχής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς δημιουργεί νέες προκλήσεις για τις αρμόδιες αρχές που είναι επιφορτισμένες με το έργο της ανάπτυξης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τρέχουσα προσέγγιση στο πρόβλημα της σχεδίασης επεκτάσεων για το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επιβάλλει τη μελέτη του συστήματος κατά τη μέγιστη φόρτίσή του, καθώς απαιτεί τη μελέτη της δυσμενέστερης λειτουργικής του κατάστασης. Για αυτό το λόγο, κατά τη σχεδίαση μίας γραμμής διασύνδεσης ενός σταθμού παραγωγής λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη παραγωγική του ικανότητα. Στην περίπτωση της ανανεώσιμης παραγωγής, όμως, η μέγιστη παραγωγική ικανότητα μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή για ελάχιστο χρονικό διάστημα κάθε έτος. Με βάση την τρέχουσα πρακτική αυτό μπορεί να οδηγήσει σε επένδυση σε νέα γραμμή, της οποίας η πλήρης μεταφορική ικανότητα θα απαιτείται για ελάχιστο χρονικό διάστημα στο χρόνο. Αυτό αποτελεί μία κακή επένδυση κεφαλαίου.

Η παρούσα διπλωματική επιχειρεί μία νέα προσέγγιση για την επέκταση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση θα δοθεί έμφαση στην καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας των νέων γραμμών που εγκαθίστανται. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία θα γίνει χρήση της έννοιας της εντροπίας κατά Shannon. Στόχος είναι η εύρεση περιπτώσεων που το σχέδιο επέκτασης δεν επαρκεί για την πλήρη απορρόφηση της ανανεώσιμης παραγωγής, αλλά μπορεί να αποδειχτεί οικονομικά συμφέρουσα λύση, καθώς μπορεί να εξοικονομεί περισσότερα χρήματα από όσα θα απαιτηθούν για την αποζημίωση του παραγωγού για την περικοπή ενέργειας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται τρεις διαδοχικές φορές σε τροποποιημένες εκδοχές του δικτύου του Garver με στόχο την καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων της και τον εντοπισμό και διόρθωση μειονεκτημάτων της.

Λέξεις Κλειδιά

επέκταση συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, βέλτιστη ροή φορτίου, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εντροπία, χρησιμοποίηση γραμμών

Abstract

The increased integration of renewable energy sources in the modern power systems sets a new challenge to the authorities responsible for the development of the transmission systems.

The established approach to the transmission expansion planning takes into consideration an extreme loading snapshot of the system, as planning for the worst-case scenario is needed. For this reason, the decision to install a new transmission line in order to connect a new generating station is based on its maximum generation capacity. However, the maximum real power output of renewables can be technically attainable for very short time intervals throughout the year. As a result, the established approach may lead to the installation of a line whose full capacity will not be utilized for a significant amount of time per year, which is a poor way to invest the available budget.

This thesis proposes a new approach for the transmission expansion planning. Emphasis is placed on the better utilization of transmission lines. To achieve this goal the notion of Shannon entropy will be used. The desired outcome is to find expansion plans which will not be able to satisfy the nominal maximum renewables generation, but will lead to saving more funds than those needed to compensate for the lost energy.

The proposed approach will be implemented in three modified editions of the Garver network in order to better understand its strengths and fix its weaknesses.

Keywords

transmission expansion planning, optimal power flow, renewables, entropy, line utilization

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Περιεχόμενα	10
Σχήματα	11
Πίνακες	13
1 Εισαγωγή	15
1.1 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	15
1.2 Σκοπός διπλωματικής	16
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής	17
2 Γενικές γνώσεις	19
2.1 Εντροπία	19
2.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	20
2.3 Βέλτιστη ροή φορτίου	22
2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση	24
2.3.2 Περιορισμοί	25
2.3.3 Τελική διαμόρφωση	28
2.4 Το δίκτυο του Garver	29
3 Μεθοδολογία ενίσχυσης συστήματος μεταφοράς	33
3.1 Κεντρική ιδέα	33
3.2 Πρώτη εφαρμογή της μεθοδολογίας	35
3.2.1 Περιγραφή διαδικασίας	35
3.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	36
3.2.3 Συμπεράσματα	37
3.3 Δεύτερη εφαρμογή της μεθοδολογίας	37
3.3.1 Περιγραφή διαδικασίας	37
3.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	37
3.3.3 Συμπεράσματα	39
3.4 Τρίτη εφαρμογή της μεθοδολογίας	39
3.4.1 Περιγραφή διαδικασίας	39
3.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης	40
3.4.3 Συμπεράσματα	40
4 Επόμενα βήματα	43

Βιβλιογραφία**45**

Σχήματα

2.1	Ισοδύναμο μοντέλο γραμμής	25
2.2	Σχηματικό διάγραμμα του δικτύου του Garver	30
3.1	Παράδειγμα διαχωρισμού εύρους τιμών ροής ισχύος σε διάστημα υψηλής και χαμηλής χρησιμοποίησης	34

Πίνακες

2.1	Παραδείγματα μεγεθών που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς για προβλήματα βέλτιστης ροής φορτίου	23
2.2	Δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης στους ζυγούς του δικτύου του Garver	30
2.3	Δεδομένα γραμμών μεταφοράς του δικτύου του Garver	31
3.1	Πρώτη τροποποίηση του δικτύου του Garver	35
3.2	Δεύτερη τροποποίηση του δικτύου του Garver	37
3.3	Πλήθος νέων γραμμών προς εγκατάσταση	38
3.4	Συνολική χωρητικότητα μετά την προσθήκη των νέων γραμμών προς εγκατάσταση	38
3.5	Δεύτερη τροποποίηση του δικτύου του Garver	40
3.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης για ΔP ίσο με 0.3	41
3.7	Αποτελέσματα προσομοίωσης για ΔP ίσο με 0.4	41

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ως σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εννοείται το σύνολο των στοιχείων που αποτελούν το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής και υπερυψηλής τάσης, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής προς τους καταναλωτές υψηλής τάσης και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που εξυπηρετούν καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης[1]. Η παρούσα διπλωματική θα επιχειρήσει να προσφέρει μία νέα οπτική στο πρόβλημα του σχεδιασμού επεκτάσεων για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρώτα, όμως, κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν ορισμένες πληροφορίες γενικού ενδιαφέροντος για το σύστημα. Αυτό θα συμβεί στην επόμενη ενότητα, ενώ παράλληλα προτείνεται η εισαγωγή του συγγράμματος των Βουρνά και Κονταξή[2] για ακόμη περισσότερες πληροφορίες γενικού ενδιαφέροντος σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα, ακολουθεί μία ενότητα που περιγράφει το βασικό σκοπό της διπλωματικής, ενώ το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία επεξήγηση της διάρθρωσης της παρούσας διπλωματικής.

1.1 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στην παραδοσιακή μορφή του, το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναλαμβάνει τη διασύνδεση μεταξύ των δύο άλλων βασικών λειτουργιών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλους σταθμούς και της διανομής της στους τελικούς καταναλωτές. Αυτή η διασύνδεση οφείλει να είναι αξιόπιστη, ασφαλής και οικονομική, ώστε ο καταναλωτής να λαμβάνει αδιαλείπτως το ποσό ενέργειας που απαιτεί χωρίς κίνδυνο ατυχήματος και με την ελάχιστη δυνατή χρέωση. Η λειτουργία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην παραδοχή ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι τεχνικά αδύνατο να αποθηκευθεί σε σημαντικές ποσότητες, καθώς επίσης και στην παραδοχή ότι παραδοσιακά η ζήτηση των καταναλωτών θεωρείται ανελαστική. Για αυτό το λόγο, απαιτείται κάθε χρονική στιγμή τόσο η παραγωγική όσο και η μεταφορική ικανότητα του δικτύου να επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών κατανάλωσης.

Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει σχεδιασθεί ως ένα καθετοποιημένο σύστημα. Παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο των μεγάλων σταθμών παραγωγής και τη μεταφέρει μέχρι τους καταναλωτές, που μπορεί να απέχουν αρκετά χιλιόμετρα από τα κέντρα παραγωγής. Οι καταναλωτές μπορεί να συνδέονται απευθείας στην υψηλή τάση στην περίπτωση κυρίως μεγάλων βιομηχανικών καταναλωτών, οι οποίοι αναλαμβάνουν τη λειτουργία δικών τους υποσταθμών για την τροφοδοσία των αναγκών τους. Οι περισσότεροι

καταναλωτές, όμως, τροφοδοτούνται μέσω δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης και των αντίστοιχων υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης μεταφοράς σε τάση διανομής. Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί, επίσης, υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων τάσης που χρησιμοποιεί στο εσωτερικό του.

Το παράδειγμα του ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς είναι χαρακτηριστικό, καθώς σύμφωνα με την ιστοσελίδα του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ)[3] περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας παράγεται στη Δυτική Μακεδονία, ενώ περίπου το 65% καταναλώνεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δυτική Μακεδονία προς την Κεντρική και Νότια Ελλάδα γίνεται μέσω τριών γραμμών διπλού κυκλώματος των 400kV.

1.2 Σκοπός διπλωματικής

Η τρέχουσα πρακτική για την ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει υπόψη της τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος. Παραδείγματος χάρη, για τη σχεδίαση μίας νέας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται η μέγιστη παραγωγική ικανότητα των σταθμών παραγωγής. Αυτή η παραδοχή είναι πολύ συντηρητική, αλλά μπορεί να θεωρηθεί λογική για σταθμούς με ελεγχόμενη παραγωγική ικανότητα ενεργού ισχύος, καθώς μπορεί ο υπεύθυνος λειτουργίας του σταθμού να ορίσει την παραγωγική ικανότητα του σταθμού κάθε στιγμή, οπότε είναι εφικτό να αποδώσει τη μέγιστη τη στιγμή που αυτό θα απαιτηθεί από το διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα αιολικά πάρκα, η παραγωγική ικανότητα είναι στοχαστική. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιθανό να είναι τεχνικά ανέφικτη η απόδοση της ονομαστικής μέγιστης παραγωγικής ικανότητας του πάρκου πέρα από ένα μικρό έως ελάχιστο χρονικό διάστημα ανά έτος.

Ουσιαστικά, για την ανάπτυξη του συστήματος λαμβάνεται υπόψη μία ακραία περίπτωση λειτουργίας του δικτύου με μικρή πιθανότητα εμφάνισης ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντί της μέσης περίπτωσης. Αυτός ο τρόπος σχεδίασης οδηγεί σε χαμηλή μέση φόρτιση των γραμμών του δικτύου μεταφοράς για τις περισσότερες ώρες του έτους αν όχι για σχεδόν όλες και προφανώς σε μεγαλύτερες από τις απαραίτητες επενδύσεις στο σύστημα μεταφοράς. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει, καθώς οδηγεί στην εγκατάσταση γραμμών μεγαλύτερης χωρητικότητας συγκριτικά με μία μέθοδο που θα επέτρεπε τη δυνατότητα του δικτύου να ικανοποιεί το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος με περιορισμούς της παραγωγής αιολικών πάρκων.

Με δεδομένη μάλιστα την υψηλή αβεβαιότητα που παρουσιάζουν οι ροές ισχύος στις γραμμές για ένα δίκτυο με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι εμφανές ότι αυτή η λύση απέχει από τη βέλτιστη από την άποψη της αξιοποίησης της επένδυσης για την επέκταση του δικτύου. Αντίθετα, μπορεί να αποδειχθεί καλύτερη επιλογή η εγκατάσταση μίας γραμμής, η οποία δε θα επαρκεί για την πλήρη απορρόφηση ανανεώσιμης παραγωγής, αν η αποζημίωση στον παραγωγό για την αποκοπτόμενη ενέργεια είναι μικρότερη από το κόστος εγκατάστασης μεγαλύτερης γραμμής.

Ο βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η περαιτέρω διερεύνηση αυτού του προβλήματος με χρήση της έννοιας της εντροπίας, δηλαδή ενός στατιστικού δείκτη της εκμετάλλευσης της μεταφορικής ικανότητας της γραμμής εντός κάποιων προκαθορισμένων ορίων.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 2**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι γνώσεις που κρίνονται απαραίτητες ως υπόβαθρο για την κατανόηση της διπλωματικής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συνοπτικά η έννοια της εντροπίας κατά Shannon, το πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η θεωρία της βέλτιστης ροής φορτίου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου του Garver.

- **Κεφάλαιο 3**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το κυρίως σώμα της παρούσας διπλωματικής. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αρχίζει με παρουσίαση της κεντρικής ιδέας της προτεινόμενης μεθοδολογίας, ενώ στη συνέχεια καταγράφονται τρεις δοκιμές εφαρμογής της σε τροποποιημένες εκδοχές του δικτύου του Garver. Από τις συγκεκριμένες δοκιμές εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τόσο τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας όσο και τη διόρθωση των ατελειών που εντοπίζονται.

- **Κεφάλαιο 4**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένες βασικές ιδέες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για πιθανές επεκτάσεις της μεθοδολογίας που προτείνεται από την παρούσα διπλωματική.

Κεφάλαιο 2

Γενικές γνώσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι απαραίτητες έννοιες για την κατανόηση της παρούσας διπλωματικής. Πρώτη περιγράφεται η έννοια της εντροπίας, ενώ ακολουθεί μία σύντομη εισαγωγή στις βασικές έννοιες της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τμήματα της θεωρίας της βέλτιστης ροής φορτίου (Optimal Power Flow ή OPF) που θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενα κεφάλαια. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία συνοπτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου του Garver, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τις απαιτούμενες προσομοιώσεις.

2.1 Εντροπία

Υπάρχουν δύο κύριοι ορισμοί για την έννοια της εντροπίας. Αυτός που προηγήθηκε χρονικά σχετίζεται με τη θερμοδυναμική και δε θα αναλυθεί εδώ. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η εντροπία κατά Shannon[4] ως μέτρο της αβεβαιότητας. Για την κατανόηση της συγκεκριμένης έννοιας απαιτούνται βασικές γνώσεις πιθανοτήτων. Για πιθανές απορίες σχετικά με τις πιθανότητες συστήνεται το σύγγραμμα των Μπερτσεκά και Τσιτσικλή[5], καθώς επίσης και το αντίστοιχο του Ross[6], το οποίο κάνει επίσης μία συνοπτική εισαγωγή στην έννοια της εντροπίας κατά Shannon. Τέλος, για περισσότερες πληροφορίες για την εντροπία και ευρύτερα τη Θεωρία της Πληροφορίας, προτείνεται το σύγγραμμα του MacKay[7].

Ορισμός 1. Έστω η διακριτή τυχαία μεταβλητή X με συνάρτηση μάζας πιθανότητας $p_X(x) = P(\{X = x\})$, η οποία ορίζεται στο σύνολο πιθανών αποτελεσμάτων A_X . Ισχύει, δηλαδή, $\sum_{x \in A_X} p_X(x) = 1$. Ως εντροπία της κατανομής της X ορίζουμε την ποσότητα

$$H(X) = - \sum_{x \in A_X} p_X(x) \log_2 p_X(x) \quad (2.1)$$

Με δεδομένο ότι ισχύει $\lim_{x \rightarrow 0^+} x \log_2 x = 0$, θεωρούμε συμβατικά ότι $0 \log_2 0 = 0$. Η συγκεκριμένη ποσότητα έχει ως μονάδα μέτρησης το *bit*.

Βασικές ιδιότητες:

- $H(X) \geq 0$
Η ισότητα ισχύει αν και μόνο αν υπάρχει $a \in A_X$, ώστε $p_X(a) = 1$ και $p_X(x) = 0$ για κάθε $x \neq a$. Διαισθητικά, αυτό σημαίνει ότι είμαστε βέβαιοι για το αποτέλεσμα, επομένως η αβεβαιότητα είναι μηδενική.

- $H(X) \leq \log_2 |A_X|$, όπου $|A_X|$ είναι ο αριθμός των στοιχείων του A_X . Η ισότητα ισχύει αν και μόνο αν όλα τα ενδεχόμενα του συνόλου A_X είναι ισοπίθανα, δηλαδή $p_X(x) = |A_X|^{-1}$ για κάθε $x \in A_X$. Διαισθητικά, αυτό σημαίνει ότι η αβεβαιότητα μεγιστοποιείται, όταν όλα τα ενδεχόμενα είναι εξίσου πιθανά.

2.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Στα κλασικά προβλήματα βελτιστοποίησης δίνεται μία βαθμωτή συνάρτηση της οποίας η τιμή απαιτείται να ελαχιστοποιηθεί ή μεγιστοποιηθεί τηρώντας παράλληλα τους περιορισμούς του προβλήματος. Από την άλλη πλευρά, στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης απαιτείται να βελτιστοποιηθεί μία διανυσματική συνάρτηση. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται όταν βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα όλες οι συνιστώσες της διανυσματικής συνάρτησης. Αυτό το ενδεχόμενο στην πλειονότητα των περιπτώσεων καθίσταται ανέφικτο λόγω των περιορισμών του προβλήματος, ενώ θα οριστεί και μαθηματικά ως "σημείο ουτοπίας" σε αυτή την ενότητα. Για αυτό το λόγο, η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο έχει περιστραφεί γύρω από τον καθορισμό διαδικασιών για αξιολόγηση και επιλογή ως λύσεων κατάλληλων τιμών της διανυσματικής συνάρτησης. Για μία πιο αναλυτική θεώρηση του αντικειμένου προτείνεται η επισκόπηση των Marler και Arora[8].

Ορισμός 2. Έστω το σύνολο εφικτών λύσεων $\mathbf{X} = \{\mathbf{x} \mid g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, k\}$, όπου \mathbf{x} το διάνυσμα μεταβλητών απόφασης n στοιχείων, k ο αριθμός περιορισμών του προβλήματος και g_j ο j -οστός περιορισμός. Έστω, επίσης, η διανυσματική αντικειμενική συνάρτηση $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ που αποτελείται από m συνιστώσες και της οποίας η i -οστή συνιστώσα συμβολίζεται ως $F_i(\mathbf{x})$. Το πρόβλημα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης συνίσταται στο να βρεθεί $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$, το οποίο να δίνει στην $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ τη βέλτιστη τιμή της.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, σε κάποιες περιπτώσεις προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι πιθανό οι περιορισμοί του προβλήματος να είναι τέτοιοι που να επιτρέπουν την ύπαρξη ενός ολικού βέλτιστου για το αντίστοιχο πρόβλημα. Για το υπόλοιπο της ενότητας θεωρείται χωρίς βλάβη της γενικότητας ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης όλων των συνιστωσών της διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης.

Ορισμός 3. Σημείο ουτοπίας ονομάζεται ένα σημείο \mathbf{F}^0 , αν και μόνο αν για κάθε $i = 1, 2, \dots, m$ ισχύει $F_i^0 = \min\{F_i(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X}\}$.

Συνήθως, το σημείο ουτοπίας βρίσκεται εκτός του συνόλου εφικτών λύσεων. Για αυτό το λόγο, χρειάζεται κάποιος εναλλακτικός τρόπος για να κριθούν ικανοποιητικές ως λύσεις κάποιες πιθανές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Για αυτό το λόγο εισάγεται η έννοια των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων.

Ορισμός 4. Ασθενές βέλτιστο κατά Pareto ονομάζεται ένα σημείο $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$, αν και μόνο αν δεν υπάρχει κάποιο σημείο $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, για το οποίο ισχύει $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, m$.

Ορισμός 5. Βέλτιστο κατά Pareto (ή αυστηρό βέλτιστο κατά Pareto) ονομάζεται ένα σημείο $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$, αν και μόνο αν δεν υπάρχει κάποιο σημείο $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, για το οποίο ισχύει $F_i(\mathbf{x}) \leq F_i(\mathbf{x}^*)$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, m$ με τουλάχιστον μία ανισότητα να είναι αυστηρή.

Το σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων για ένα πρόβλημα λέγεται σύνολο Pareto, ενώ η απεικόνισή του ονομάζεται μέτωπο Pareto. Σημειώνεται ότι στη γενική περίπτωση ο ακριβής υπολογισμός του συνόλου Pareto είναι δύσκολος υπολογιστικά.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η βελτιστοποίηση μίας διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης είναι αρκετά διαφορετική διαδικασία από το αντίστοιχο πρόβλημα για μία βαθμωτή αντικειμενική συνάρτηση. Στη δεύτερη περίπτωση, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά διανύσματα μεταβλητών απόφασης είναι εφικτό να συγκριθούν απευθείας, ώστε να εντοπιστεί η καλύτερη από τις δύο. Αυτό δεν είναι εφικτό με μία διανυσματική αντικειμενική συνάρτηση. Ένα απλό παράδειγμα μπορεί να αποτελέσει η περίπτωση μίας αντικειμενικής συνάρτησης δύο συνιστωσών για δύο πιθανά διανύσματα μεταβλητών απόφασης, αν για καθένα διάνυσμα η αντίστοιχη τιμή υπερτερεί σε μία συνιστώσα έναντι της τιμής που αντιστοιχεί στο άλλο διάνυσμα. Επομένως, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση απαιτεί μία διαδικασία απόφασης, ώστε να επιλέγεται η επιθυμητή λύση από τις διαθέσιμες, με εξαίρεση φυσικά την περίπτωση που το σημείο ουτοπίας ανήκει στο σύνολο εφικτών λύσεων.

Με βάση τα παραπάνω χρειάζεται κάποιο άτομο, το οποίο θα κρίνει κάθε κριτήριο -όπως αυτό εκφράζεται μέσω μίας συνιστώσας της διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης- ως προς το πόσο σημαντικό είναι. Η υποκειμενική εκτίμηση κάποιου παρατηρητή είναι, δηλαδή, βασικό συστατικό της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που τα επιμέρους κριτήρια είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, κατηγοριοποιούνται οι μέθοδοι λήψης απόφασης για ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με βάση το σημείο της διαδικασίας κατά το οποίο εκφράζει τις προτιμήσεις του ο αρμόδιος για τη λήψη της απόφασης.

- *Έκφραση προτίμησης πριν την αναζήτηση λύσεων*

Σε αυτή την κατηγορία μεθόδων, ο αρμόδιος για τη λήψη απόφασης καθορίζει τις επιδιώξεις της διαδικασίας επίλυσης πριν την έναρξή της. Αυτό μπορεί να συμβεί θέτοντας μία τιμή ως στόχο για καθένα από τα κριτήρια του προβλήματος ή κατατάσσοντας τα κριτήρια με βάση το πόσο σημαντικό θεωρεί το καθένα. Παραδείγματα μεθόδων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η μέθοδος βαρών και ο προγραμματισμός στόχων. Σύμφωνα με την πρώτη, κάθε συνιστώσα της διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w_i τέτοιο ώστε $0 \leq w_i \leq 1$ και $\sum_i w_i = 1$. Στη συνέχεια, επιλύεται ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης με τη βαθμωτή αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει το άθροισμα των γινομένων των βαρών επί την καθεμία συνιστώσα. Κατά τον προγραμματισμό στόχων τίθεται μία τιμή-στόχος για κάθε συνιστώσα της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα, επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με βαθμωτή αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ της τιμής κάθε συνιστώσας και του αντίστοιχου στόχου.

- *Έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της αναζήτησης λύσεων*

Σε αυτή την κατηγορία μεθόδων έχουμε επαναληπτικές διαδικασίες κατά τις οποίες εναλλάσσονται στάδια κατά τα οποία ο αρμόδιος για τη λήψη απόφασης εκφράζει τις προτιμήσεις του και στάδια κατά τα οποία γίνονται υπολογισμοί, ώστε να παρουσιαστεί κάποιο σύνολο εναλλακτικών από τις οποίες θα επιλέξει ο παρατηρητής. Συνεπώς, μιλάμε για διαδραστικές διαδικασίες κατά τις οποίες ο αρμόδιος να αποφασίσει επιλέγει μεταξύ λύσεων που του παρουσιάζονται και έτσι καθοδηγεί τη μέθοδο προς την τελική λύση της.

- *Έκφραση προτίμησης μετά την αναζήτηση λύσεων*

Σε αυτή την κατηγορία μεθόδων απαιτείται πρώτα η απεικόνιση του συνόλου Pareto (ή τουλάχιστον ενός τμήματός του), ώστε να μπορεί ο αρμόδιος για τη λήψη απόφασης να επιλέξει το τελικό αποτέλεσμα που βρίσκεται πιο κοντά στις επιθυμίες του. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση δε χρειάζεται εκ των προτέρων κατηγοριοποίηση των κριτηρίων

με βάση τη σημασία τους, αλλά δίνεται μία πλήρης (ή αρκετά πλήρης) εικόνα των τελικών αποτελεσμάτων πριν επιλεγεί το καταλληλότερο. Απαιτείται, όμως, συνήθως αρκετή υπολογιστική ισχύς για την απεικόνιση στοιχείων του συνόλου Pareto, καθώς επίσης και ένας κατάλληλος τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων, ώστε να γίνουν αντιληπτά τα σημεία στα οποία υπερτερεί το κάθε σημείο του συνόλου. Παράδειγμα μεθόδου της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι η χρήση της μεθόδου βαρών, που αναφέρθηκε ήδη, σε διαδοχικές επαναλήψεις με διαφορετικά βάρη για κάθε συνιστώσα, ώστε να αποτυπωθούν βέλτιστα κατά Pareto σημεία αντιπροσωπευτικά του συνόλου Pareto.

2.3 Βέλτιστη ροή φορτίου

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου έγκειται στη βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης που ποσοτικοποιεί διάφορα μεγέθη που αφορούν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα τηρούνται οι περιορισμοί που αφορούν το συγκεκριμένο σύστημα, είτε είναι αμιγώς τεχνικής φύσης είτε αφορούν την επιθυμητή πολιτική λειτουργία του συστήματος. Για περισσότερες πληροφορίες συστήνεται το σύγγραμμα του Momoh[9].

Ορισμός 6. Έστω η βαθμωτή αντικειμενική συνάρτηση $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα εξαρτημένων μεταβλητών, ενώ \mathbf{u} είναι το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου. Έστω, επίσης, οι περιορισμοί $g_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$ για $i = 1, 2, \dots, m$ και $h_j(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$ για $j = 1, 2, \dots, n$ με m τον αριθμό ισοτικών περιορισμών και n τον αριθμό ανισοτικών περιορισμών. Τότε το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου συνίσταται στο να ελαχιστοποιηθεί η $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ τηρώντας όλους τους περιορισμούς.

Το διάνυσμα εξαρτημένων μεταβλητών \mathbf{x} μπορεί να περιλαμβάνει μεγέθη όπως αυτά που παρατίθενται στη συνέχεια.

- Μέτρα τάσης ζυγών φορτίου (PQ)
- Γωνίες φάσης τάσης ζυγών φορτίου (PQ)
- Παραγόμενη άεργος ισχύς σε ζυγούς παραγωγής (PV)
- Παραγόμενη ενεργός ισχύς από μη ελεγχόμενες γεννήτριες

Αντίστοιχα, το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου \mathbf{u} περιλαμβάνει μεγέθη όπως τα ακόλουθα.

- Απορροφούμενη ισχύς (ενεργός και άεργος) από φορτία
- Παραγόμενη ενεργός ισχύς από ελεγχόμενες γεννήτριες
- Ελεγχόμενα μέτρα τάσης ζυγών
- Ροή ισχύος σε γραμμές συνεχούς ρεύματος
- Σχέσεις συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ)
- Σχέσεις μετασχηματιστών αλλαγής φάσης

Αντικειμενικές συναρτήσεις	Περιορισμοί
<ol style="list-style-type: none"> 1. Στόχοι ενεργού ισχύος <ul style="list-style-type: none"> • Οικονομική λειτουργία συστήματος (ελαχιστοποίηση κόστους απωλειών, κόστους παραγωγής ή απωλειών μεταφοράς σε MW) • Περιβαλλοντικά φιλική λειτουργία συστήματος • Μέγιστη μεταφορά ισχύος 2. Στόχοι αέργου ισχύος 3. Γενικοί στόχοι <ul style="list-style-type: none"> • Ελαχιστοποίηση απόκλισης από επιθυμητό πρόγραμμα λειτουργίας • Ελαχιστοποίηση χειρισμών για διόρθωση σφαλμάτων 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Όρια στις τιμές των μεταβλητών ελέγχου <ul style="list-style-type: none"> • Παραγόμενη ενεργός ισχύς γεννήτριας • Αποδεκτές σχέσεις ΣΑΤΥΦ • Παραγόμενη αέργος ισχύς πυκνωτών αντιστάθμισης 2. Λειτουργικά όρια σε: <ul style="list-style-type: none"> • Ροές ισχύος σε γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές (MVA, A, MW, MVA_r) • Ανταλλαγές ισχύος (ενεργού ή αέργου) • Εφεδρείες (ενεργού ή αέργου ισχύος) • Μέτρα και γωνίες τάσεων 3. Λειτουργίες ελέγχου <ul style="list-style-type: none"> • Χρήση κανόνων για μεγαλύτερη διαθεσιμότητα μέσω ελέγχου σε περίπτωση σφάλματος • Αποτελεσματικότητα ελέγχου • Ανάλυση κόστους-οφέλους λειτουργιών ελέγχου • Ρυθμός μεταβολής ελεγχόμενων μεγεθών • Ευστάθεια τάσης 4. Τοπικοί και μη βέλτιστοι έλεγχοι 5. Διαμοιρασμός εξοπλισμού

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα μεγεθών που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς για προβλήματα βέλτιστης ροής φορτίου[9]

Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται κάποια μεγέθη που αφορούν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται συχνά για τη μαθηματική αναπαράστασή του με τη μορφή αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών. Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου είναι στη γενική περίπτωση μη γραμμικό και μη κυρτό πρόβλημα με αρκετά μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Για αυτό το λόγο είναι αρκετά απαιτητικό υπολογιστικά και χρησιμοποιούνται συνήθως απλοποιήσεις για την τελική διαμόρφωσή του πριν τη διαδικασία επίλυσης. Λόγω των απλοποιήσεων κατά τη μοντελοποίηση είναι απαραίτητο το τελικό αποτέλεσμα να ελεγχθεί ως προς το πόσο ικανοποιεί πλήρως όλους τους περιορισμούς του προβλήματος.

Στο υπόλοιπο της ενότητας θα παρουσιαστούν συνοπτικά περισσότερες πληροφορίες για συγκεκριμένες μοντελοποιήσεις προβλημάτων βέλτιστης ροής φορτίου που θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής.

2.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Μάλλον το πιο συνηθισμένο κίνητρο για την επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου είναι η οικονομική λειτουργία του συστήματος, η οποία μπορεί να μεταφραστεί ως κάλυψη της απαίτησης από την πλευρά των καταναλωτών για παροχή ισχύος με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αν και υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα ως προς την εύρεση των κατάλληλων κινήτρων για να προσαρμόζουν οι καταναλωτές τις απαιτήσεις τους, στην πράξη συνήθως οι απαιτήσεις των καταναλωτών θεωρούνται ανελαστικές, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση της καθημερινής λειτουργίας του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, απαραίτητη είναι η κατάλληλη μοντελοποίηση του κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος για κάθε σχετικό στοιχείο του συστήματος, ώστε να ληφθεί η απόφαση κατανομής του φορτίου στις γεννήτριες του συστήματος με τον οικονομικότερο τρόπο.

Για μία συμβατική γεννήτρια, το χρηματικό κόστος ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος που παράγει προσεγγίζεται με μία συνάρτηση που συνήθως ανήκει σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- Τμηματικά γραμμική
- Τετραγωνική
- Τμηματικά τετραγωνική
- Κυβική

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται, όπου είναι απαραίτητη, η τετραγωνική προσέγγιση. Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό κόστος για την παραγωγή της ζητούμενης ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$C = \sum_{i=1}^{n_g} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (2.2)$$

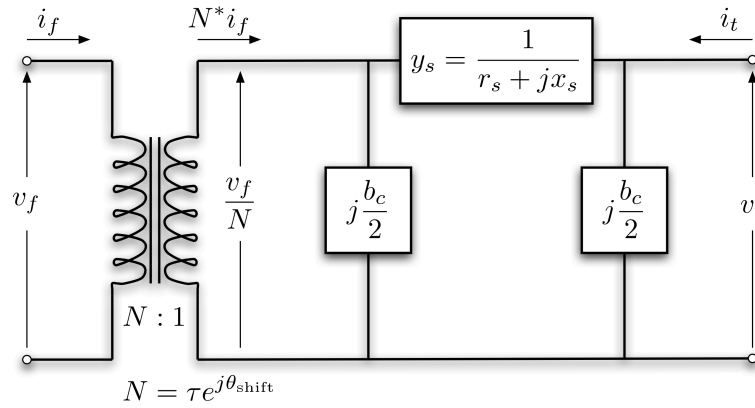
με C το συνολικό κόστος παραγωγής, n_g το συνολικό αριθμό γεννητριών, P_i την παραγωγή ενεργού ισχύος της i -οστής γεννήτριας και κατάλληλες σταθερές a_i , b_i , c_i .

Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου εκφράζεται ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους παραγωγής C τηρώντας όλους τους απαιτούμενους περιορισμούς. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στα συνοδευτικά έγγραφα του MATPOWER[10], το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των προβλημάτων βέλτιστης ροής φορτίου της παρούσας διπλωματικής.

2.3.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελούν τη μαθηματική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών που οφείλει να έχει η τελική λύση, είτε είναι ισωτικό είτε ανισωτικό. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα βασικότερα είδη περιορισμών, αφού πρώτα παρουσιαστεί ο τρόπος μοντελοποίησης βασικών στοιχείων του δικτύου από το MATPOWER.

Για τις γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς επίσης και για τους μετασχηματιστές, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο μοντέλο γραμμής[11]

Το μοντέλο αποτελείται από ένα ιδανικό μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού τ και γωνία αλλαγής φάσης θ_{shift} , ο οποίος συνδέεται σε σειρά με ένα ισοδύναμο Π μοντέλο γραμμής με συνολική χωρητικότητα b_c και σύνθετη αντίσταση $z_s = r_s + jx_s$.

Με βάση το σχήμα 2.1, για πίνακα αγωγιμοτήτων Y_b , εγχύσεις ρεύματος i_f και i_t στα δύο άκρα του ισοδύναμου κυκλώματος και v_f και v_t τις αντίστοιχες τάσεις σχηματίζεται η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{z_s} + j\frac{b_c}{2}\right) \frac{1}{\tau^2} & -\frac{1}{z_s \tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -\frac{1}{z_s \tau e^{j\theta_{shift}}} & \frac{1}{z_s} + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix}}_{Y_b} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Οι γεννήτριες μοντελοποιούνται ως εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό στον οποίο συνδέονται. Αντίστοιχα, κάθε φορτίο σταθερής ισχύος μοντελοποιείται ως καταναλισχόμενη

ισχύς στον αντίστοιχο ζυγό. Για μία γεννήτρια που συνδέεται στο ζυγό i ισχύει:

$$S_{g,i} = P_{g,i} + jQ_{g,i} \quad (2.4)$$

Ενώ για ένα φορτίο που συνδέεται στο ζυγό i ισχύει:

$$S_{d,i} = P_{d,i} + jQ_{d,i} \quad (2.5)$$

Επιπλέον, μία εγχάρσια αγωγιμότητα (ή φορτίο σταθερής σύνθετης αντίστασης) μοντελοποιείται ως μία σύνθετη αντίσταση σταθερής τιμής μεταξύ ζυγού και γείωσης. Αυτό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως:

$$y_i = g_i + jb_i \quad (2.6)$$

Η σχέση (2.3) απλοποιείται περαιτέρω, αν θεωρηθεί η προσέγγιση συνεχούς ρεύματος στο πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου (DC-OPF). Αυτή η προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί στις επόμενες ενότητες. Υπάρχουν 3 βασικές παραδοχές:

- Οι γραμμές θεωρείται ότι δεν παρουσιάζουν απώλειες. Αυτό μεταφράζεται ως $b_c \approx 0$ και $r_s \approx 0$ και η (2.3) γίνεται:

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} \approx \frac{1}{jx_s} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{\tau^2} & -\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_b} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

- Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών θεωρούνται πρακτικά μοναδιαία, δηλαδή $\|v_i\| \approx 1$.
- Οι διαφορές των γωνιών της τάσης μεταξύ των ζυγών είναι αρκετά μικρές, ώστε να είναι αρκετά ακριβής η προσέγγιση $\sin x \approx x$.

Με βάση τις τρεις παραπάνω απλοποιήσεις υπολογίζεται η εγχεόμενη ισχύς στην πλευρά του ισοδύναμου κυκλώματος που συμβολίζεται με f είναι:

$$\begin{aligned} P_f &= \Re \{S_f\} \\ &= \Re \{v_f i_f\} \\ &\approx \Re \left\{ e^{j\theta_f} \frac{j}{x_s \tau} \left(\frac{1}{\tau} e^{-j\theta_f} - e^{-j(\theta_t + \theta_{shift})} \right) \right\} \\ &= \Re \left\{ \frac{1}{x_s \tau} \left[\sin(\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) + j \left(\frac{1}{\tau} - \cos(\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) \right) \right] \right\} \\ &\approx \frac{1}{x_s \tau} (\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Με παρόμοιο τρόπο αποδεικνύεται ότι $P_t = -P_f$, το οποίο επιβεβαιώνει την υπόθεση αμελητέων απωλειών.

Η μιγαδική ισχύς που απορροφά ένα εγκάρσιο στοιχείο συνδεδεμένο στο ζυγό i υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} S_i &= v_i \bar{v}_i \\ &= v_i \overline{(y_i v_i)} \\ &\approx e^{j\theta_i} (g_i - jb_i) e^{-j\theta_i} \\ &= g_i - jb_i \end{aligned} \quad (2.9)$$

Με βάση το παραπάνω ορίζεται το διάνυσμα-στήλη \mathbf{G}_{sh} διάστασης $n_b \times 1$, του οποίου το i -οστό στοιχείο δίνει μία καλή προσέγγιση της ενεργού ισχύος που καταναλώνουν τα εγκάρσια στοιχεία στο ζυγό i .

Αν το δίκτυο αποτελείται από συνολικά n_l γραμμές και n_b ζυγούς, ορίζονται οι αραιοί πίνακες \mathbf{C}_f και \mathbf{C}_t διάστασης $n_l \times n_b$ θέτοντας τα στοιχεία $C_{f,ij}$ και $C_{t,ik}$ ίσα με 1 για κάθε γραμμή i , αν αυτή ξεκινάει από το ζυγό j και καταλήγει στο ζυγό k . Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία αυτών των 2 πινάκων είναι ίσα με 0. Ως n_g έχει ήδη οριστεί ο συνολικός αριθμός γεννητριών του συστήματος. Ορίζεται ο αραιός πίνακας \mathbf{C}_g διάστασης $n_b \times n_g$ θέτοντας το στοιχείο $C_{g,ij}$ ίσο με 1, αν η j -οστή γεννήτρια βρίσκεται στον i -οστό ζυγό, ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του \mathbf{C}_g είναι ίσα με 0.

Ορίζεται το διάνυσμα $\mathbf{P}_{f,shift}$ διάστασης $n_l \times 1$, ώστε το i -οστό του στοιχείο να είναι ίσο με $-\theta_{shift,i}(x_{s,i}\tau_i)^{-1}$. Με βάση αυτά κατασκευάζεται ο πίνακας:

$$\mathbf{P}_{bus,shift} = (\mathbf{C}_f - \mathbf{C}_t)^\top \mathbf{P}_{f,shift} \quad (2.10)$$

Ορίζεται το διάνυσμα \mathbf{B}_{ff} διάστασης $n_l \times 1$, ώστε το i -οστό του στοιχείο να ισούται με $(x_{s,i}\tau_i)^{-1}$. Με βάση αυτά κατασκευάζονται οι πίνακες:

$$\mathbf{B}_f = \text{diag}(\mathbf{B}_{ff})(\mathbf{C}_f - \mathbf{C}_t) \quad (2.11)$$

$$\mathbf{B}_{bus} = (\mathbf{C}_f - \mathbf{C}_t)^\top \mathbf{B}_f \quad (2.12)$$

Ορίζεται, επίσης, το διάνυσμα-στήλη \mathbf{P}_d διάστασης $n_b \times 1$, το οποίο στη θέση i καταγράφει την κατανάλωση ενεργού ισχύος στον i -οστό ζυγό. Επιπλέον, ορίζεται το διάνυσμα-στήλη \mathbf{P}_g διάστασης $n_g \times 1$, το οποίο στη θέση i έχει την παραγωγή ενεργού ισχύος της i -οστής γεννήτριας.

Τέλος ορίζεται το διάνυσμα-στήλη $\mathbf{\Theta}$, το οποίο είναι διάστασης $n_b \times 1$ και στην i -οστή του θέση έχει τη γωνία της τάσης στο ζυγό i . Πλέον, έχουν οριστεί όλα τα μεγέθη που απαιτούνται για την εξίσωση που εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές. Η συγκεκριμένη εξίσωση είναι η ακόλουθη:

$$\mathbf{B}_{bus}\mathbf{\Theta} + \mathbf{P}_{bus,shift} + \mathbf{P}_d + \mathbf{G}_{sh} - \mathbf{C}_g\mathbf{P}_g = \mathbf{0} \quad (2.13)$$

Ένας επιπρόσθετος περιορισμός που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική αφορά το ότι δεν επιτρέπεται να διέρχεται από κάθε γραμμή περισσότερη ισχύς από κάποιο όριο, το

οποίο ονομάζεται μέγιστο όριο φόρτισης της γραμμής. Το όριο αυτό ισχύει και για τις 2 πιθανές κατευθύνσεις ροής ισχύος σε κάθε γραμμή. Ορίζεται το διάνυσμα-στήλη $\mathbf{P}_f(\Theta)$ ως εξής:

$$\mathbf{P}_f(\Theta) = \mathbf{B}_f\Theta + \mathbf{P}_{f,\text{shift}} \quad (2.14)$$

Το μέγιστο όριο φόρτισης στη j -οστή γραμμή συμβολίζεται ως $F_{max,j}$, ενώ το αντίστοιχο στοιχείο του $\mathbf{P}_f(\Theta)$ συμβολίζεται ως $P_{f,j}(\Theta)$. Έτσι, ο συγκεκριμένος περιορισμός μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά με τις δύο επόμενες εξισώσεις, οι οποίες ορίζονται για $j = 1, \dots, n_l$:

$$P_{f,j}(\Theta) - F_{max,j} \leq 0 \quad (2.15)$$

$$-P_{f,j}(\Theta) - F_{max,j} \leq 0 \quad (2.16)$$

Αξίζει να αναφερθεί, ακόμη, ότι επιπλέον περιορισμοί τίθενται για τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα κάθε γεννήτριας του συστήματος, όπως επίσης και για την ελάχιστη, καθώς είναι ανέφικτο για ορισμένους τύπους γεννητριών να βρίσκονται εντός λειτουργίας παράγοντας λιγότερη ισχύ από κάποιο ελάχιστο όριο.

Κλείνοντας τη συγκεκριμένη υποενότητα θα περιγραφεί συνοπτικά η χρήση του ζυγού αναφοράς σε ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου. Η επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου απαιτεί μία γωνία αναφοράς, είτε χρησιμοποιείται η προσέγγιση συνεχούς ρεύματος είτε όχι. Συνήθως, για να ικανοποιηθεί αυτός ο περιορισμός, θεωρείται μηδενική η γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς, αν και αυτό δεν είναι υποχρεωτικό, καθώς το ζητούμενο για τον προσδιορισμό των ροών ισχύος είναι οι διαφορές γωνιών μεταξύ ζυγών και όχι οι απόλυτες τιμές τους σύμφωνα με τους Grainger και Stevenson[12]. Επομένως, αρκεί να θεωρηθεί σταθερή η τιμή της συγκεκριμένης γωνίας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου είναι αδιάφορη η παραγωγική ικανότητα του ζυγού αναφοράς. Αντίθετα, σε ένα πρόβλημα απλής ροής φορτίου ο ζυγός αναφοράς θεωρείται ότι έχει άπειρη δυνατότητα παραγωγής ή απορρόφησης ισχύος εκτός από την σταθερή τιμή γωνίας τάσης. Για την εύρεση της τελικής τιμής ισχύος που αφορά το ζυγό αναφοράς στην περίπτωση της απλής ροής φορτίου απαιτείται πρώτα η επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου και η εύρεση της διαφοράς μεταξύ της συνολικής παραγωγής ενεργού ισχύος των γεννητριών στους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου και της συνολικής κατανάλωσης ισχύος με τη μορφή απωλειών και φορτίων σε όλο το δίκτυο.

2.3.3 Τελική διαμόρφωση

Η ανάλυση που προηγήθηκε επιτρέπει τη συνοπτική μαθηματική καταγραφή της προσέγγισης συνεχούς ρεύματος του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, όπως θα επιλυθεί στην παρούσα διπλωματική, χρησιμοποιώντας μεταξύ άλλων τις σχέσεις 2.2, 2.13, 2.15 και 2.16. Ως $P_{g,i,\min}$ και $P_{g,i,\max}$ ορίζεται αντίστοιχα το ελάχιστο και μέγιστο όριο παραγωγικής ικανότητας στο ζυγό i , ενώ ο ζυγός αναφοράς θεωρείται ότι έχει $i = 1$.

Ως διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου θεωρείται το:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Theta \\ \mathbf{P}_g \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Και το πρόβλημα αναπαρίσταται μαθηματικά ως εξής:

Ελαχιστοποίηση της

$$\sum_{i=1}^{n_g} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (2.18)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\mathbf{B}_{\text{bus}} \boldsymbol{\Theta} + \mathbf{P}_{\text{bus,shift}} + \mathbf{P}_{\text{d}} + \mathbf{G}_{\text{sh}} - \mathbf{C}_{\text{g}} \mathbf{P}_{\text{g}} = \mathbf{0} \quad (2.19)$$

$$P_{f,j}(\boldsymbol{\Theta}) - F_{\text{max},j} \leq 0 \quad (2.20)$$

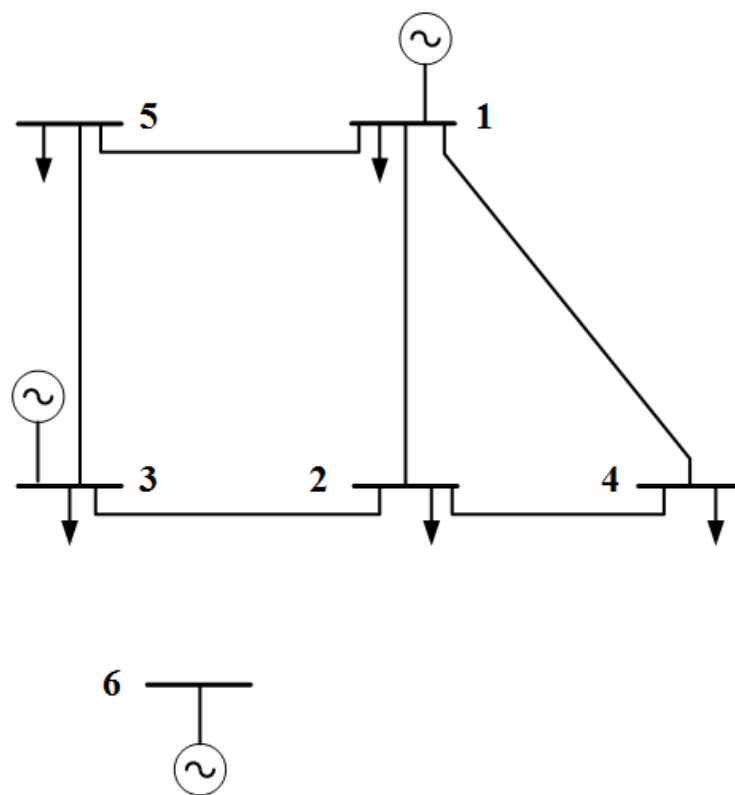
$$-P_{f,j}(\boldsymbol{\Theta}) - F_{\text{max},j} \leq 0 \quad (2.21)$$

$$\Theta_1 = 0 \quad (2.22)$$

$$P_{g,i,\text{min}} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i,\text{max}}, \quad i = 1, \dots, n_b \quad (2.23)$$

2.4 Το δίκτυο του Garver

Η παρούσα διπλωματική περιλαμβάνει εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών για την επέκταση τροποποιημένων εκδοχών του δικτύου του Garver[13]. Για αυτό το λόγο στις επόμενες σελίδες θα παρασταθούν τα αρχικά δεδομένα του δικτύου του Garver, καθώς επίσης και το διάγραμμα του δικτύου.



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα του δικτύου του Garver[13]

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς γεννητριών (MW)	Αιχμή φορτίου (MW)
1	250	80
2	0	240
3	510	40
4	0	160
5	0	240
6	0	0
Σύνολο	760	760

Πίνακας 2.2: Δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης στους ζυγούς του δικτύου του Garver[13]

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (pu)	X (pu)	Όριο γραμμής (MW)	Μήκος (μίλια)	Αρχικές γραμμές
1	2	0.10	0.40	100	40	1
1	3	0.09	0.38	100	38	0
1	3	0.15	0.60	80	60	1
1	5	0.05	0.20	100	20	1
1	6	0.17	0.68	70	68	0
2	3	0.05	0.20	100	20	1
2	4	0.10	0.40	100	40	1
2	5	0.08	0.31	100	31	0
2	6	0.08	0.30	100	30	0
3	4	0.15	0.59	85	59	0
3	5	0.05	0.20	100	20	1
3	6	0.12	0.48	100	48	0
4	5	0.16	0.63	75	63	0
4	6	0.08	0.30	100	30	0
5	6	0.15	0.61	78	61	0

Πίνακας 2.3: Δεδομένα γραμμών μεταφοράς του δικτύου του Garver[13]

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία ενίσχυσης συστήματος μεταφοράς

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μία μεθοδολογία για την επιλογή κατάλληλης ενίσχυσης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία φαίνεται ότι δεν απαντάται στη βιβλιογραφία. Βασικός σκοπός της είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων επέκτασης του δικτύου, τα οποία επιλέγονται από ένα σύνολο σεναρίων που βρίσκονται στη διάθεση της αρμόδιας αρχής για την επέκταση του δικτύου. Απαιτείται, επίσης, γνώση ή εκτίμηση τόσο για τις διαθέσιμες γεννήτριες όσο και για τις απαιτήσεις σε κατανάλωση στους ζυγούς του δικτύου.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόζεται διαδοχικά σε τρεις διαφορετικές τροποποιημένες εκδοχές του δικτύου του Garver και τροποποιείται με βάση τα συμπεράσματα, ώστε να αντιμετωπιστούν οι εντοπιζόμενες ατέλειές της.

3.1 Κεντρική ιδέα

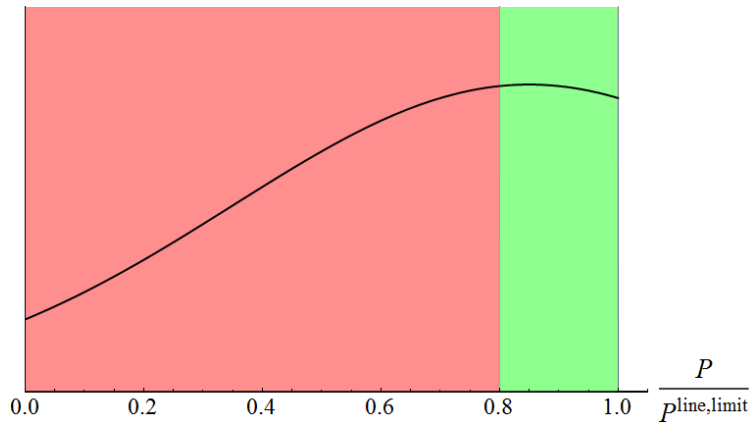
Κάθε διαθέσιμο σενάριο επέκτασης εξετάζεται πρώτα ως προς την ικανότητα της συγκεκριμένης τοπολογίας να τροφοδοτεί τα φορτία υποθέτοντας μηδενική παραγωγή από τις εγκατεστημένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η τοπολογία που προβλέπει το συγκεκριμένο σενάριο και η οποία αποτελείται από τις αρχικές εγκατεστημένες γραμμές συν τις γραμμές προς εγκατάσταση που προβλέπει το συγκεκριμένο σενάριο. Σε περίπτωση που η λειτουργία χωρίς ανανεώσιμη παραγωγή δεν είναι εφικτή, το συγκεκριμένο σενάριο απορρίπτεται.

Το επόμενο στάδιο απαιτεί τη χρήση τιμών παραγωγής για ένα έτος για κάθε εγκατεστημένη μονάδα ανανεώσιμης παραγωγής. Απαιτείται, δηλαδή, η επιλογή κατάλληλου βήματος δειγματοληψίας από την οποία θα προκύψει ένα διάνυσμα με τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα της αντίστοιχης μονάδας ανά χρονικό διάστημα ίσο με το επιλεγμένο βήμα. Συγκεκριμένα παραδείγματα είναι η χρήση ωριαίων τιμών δειγματοληψίας ή τιμών δεκαλέπτου, οπότε προκύπτουν διανύσματα 8.760 και 52.560 θέσεων αντίστοιχα. Με δεδομένες τις συγκεκριμένες τιμές παραγωγής, εφαρμόζεται επαναληπτικά η ακόλουθη διαδικασία για κάθε τιμή παραγωγής. Κάθε μονάδα ανανεώσιμης παραγωγής θεωρείται ότι μπορεί να επιτύχει ως μέγιστο την αντίστοιχη τιμή παραγωγής. Στη συνέχεια, επιλύεται ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου, ώστε να καθοριστούν τα δεδομένα λειτουργίας του δικτύου. Το κύριο στοιχείο ενδιαφέροντος

είναι οι τιμές της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή του δικτύου. Επομένως, αποθηκεύεται η απόλυτη τιμή της ροής ενεργού ισχύος σε κάθε γραμμή για κάθε επανάληψη της μεθόδου.

Στη συνέχεια, απαιτείται η επεξεργασία των στοιχείων για τις ροές ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Με τη διαδικασία της προηγούμενης παραγράφου έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας διάστασης $n_l \times n_s$, όπου n_l είναι ο συνολικός αριθμός γραμμών μεταφοράς που προβλέπει το συγκεκριμένο σενάριο και n_s είναι ο αριθμός διαθέσιμων τιμών παραγωγής. Ορίζεται, επίσης, ένα ποσοστό της μέγιστης μεταφορικής ικανότητας γραμμής, το οποίο συμβολίζεται με f_l και χρησιμεύει στο να διαχωρίσει το εύρος πιθανών τιμών ροής ενεργού ισχύος της γραμμής σε δύο διαστήματα. Το ένα θεωρείται ως χαμηλής χρησιμοποίησης και το άλλο ως υψηλής. Αν το όριο της μεταφορικής ικανότητας της j -οστής γραμμής συμβολιστεί με $P_j^{line,limit}$ η μαθηματική έκφραση του διαχωρισμού είναι η δημιουργία των διαστημάτων $[0, f_l \cdot P_j^{line,limit})$ και $[f_l \cdot P_j^{line,limit}, P_j^{line,limit}]$ αντίστοιχα.

Για μία τυχαία καμπύλη που εκφράζει τη συχνότητα εμφάνισης κάθε τιμής ροής ενεργού ισχύος σε μία γραμμή (κανονικοποιημένης ως προς το όριο της μεταφορικής ικανότητας της γραμμής) και f_l ίσο με 80% η ακόλουθη εικόνα αποδίδει το συγκεκριμένο διαχωρισμό.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα διαχωρισμού εύρους τιμών ροής ισχύος σε διάστημα υψηλής και χαμηλής χρησιμοποίησης

Έστω ότι για τη j -οστή γραμμή n_{low} επαναλήψεις της βέλτιστης ροής φορτίου έδωσαν τιμή ροής ισχύος για τη συγκεκριμένη γραμμή που ανήκει στο διάστημα χαμηλής χρησιμοποίησης και n_{high} στο υψηλής. Υπολογίζεται ο δείκτης:

$$H_j = - \left(\frac{n_{low}}{n_{high} + n_{low}} \log_2 \frac{n_{low}}{n_{high} + n_{low}} + \frac{n_{high}}{n_{high} + n_{low}} \log_2 \frac{n_{high}}{n_{high} + n_{low}} \right) \quad (3.1)$$

Ως συνολική εντροπία για κάθε σενάριο επέκτασης προς εξέταση θεωρείται το άθροισμα των H_j για όλες τις εγκατεστημένες γραμμές που προβλέπονται από το σενάριο.

Τα βασικά κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση κι επιλογή σεναρίων επέκτασης είναι το κόστος της εγκατάστασης των προβλεπόμενων νέων γραμμών και η τιμή της εντροπίας. Επιπλέον, θα υπάρξει κατάλληλη αξιοποίηση του πίνακα με τις τιμές ροής ενεργού ισχύος στις γραμμές.

Όπως αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο 1, η λύση που απαιτείται για τη σχεδίαση επεκτάσεων στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τις τρέχουσες πρακτικές είναι αυτή που

εξασφαλίζει την πλήρη απορρόφηση της μέγιστης παραγωγικής ικανότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με το ελάχιστο κόστος, εφόσον τηρεί προφανώς τους τεχνικούς περιορισμούς. Ωστόσο, είναι ενδιαφέρον να μελετηθούν και τα σενάρια επέκτασης του δικτύου που η προτεινόμενη μεταφορική τους ικανότητα δεν επαρκεί για αυτό το σκοπό με την προϋπόθεση ότι για την υλοποίησή τους απαιτείται μικρότερη δαπάνη από την κλασικά επιλεγόμενη λύση. Τα συγκεκριμένα σενάρια θα αξιολογηθούν με βάση το κόστος τους, την αποκοπτόμενη ανανεώσιμη παραγωγή και τη χρησιμοποίηση των γραμμών τους.

3.2 Πρώτη εφαρμογή της μεθοδολογίας

Σε αυτή την ενότητα θα εξειδικευτεί η μεθοδολογία που μόλις αναπτύχθηκε και θα παρουσιαστεί ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής της με χρήση μίας τροποποιημένης εκδοχής του δικτύου του Garver. Τα αρχικά δεδομένα του δικτύου του Garver τροποποιούνται σύμφωνα με τον πίνακα 3.1, ενώ οι απαιτούμενοι υπολογισμοί γίνονται με χρήση του MATPOWER[10].

3.2.1 Περιγραφή διαδικασίας

Για την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε σε αυτή και τις επόμενες ενότητες θα θεωρηθεί η απλοποιητική παραδοχή της σταθερής ζήτησης των φορτίων. Η ζήτηση θεωρείται συνεχώς ίση με την αιχμή που δίνεται κάθε φορά στα δεδομένα. Οι τιμές εγκατεστημένης ισχύος γεννητριών πρέπει να ερμηνευτούν ως μέγιστες παραγωγικές ικανότητες των αντίστοιχων μονάδων, ενώ θεωρείται ότι οι μονάδες παραγωγής δεν έχουν τεχνικά ελάχιστα όρια λειτουργίας.

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς γεννητριών (MW)		Αιχμή φορτίου (MW)
	Συμβατική παραγωγή	Αιολική παραγωγή	
1	250	0	80
2	0	0	240
3	510	0	40
4	0	0	160
5	0	0	240
6	0	350	0
Σύνολο	760	350	760

Πίνακας 3.1: Πρώτη τροποποίηση του δικτύου του Garver

Για την παραγωγή του συνόλου των σεναρίων επέκτασης που θα εξεταστούν γίνεται η υπόθεση ότι μεταξύ δύο οποιωνδήποτε ζυγών του δικτύου του Garver μπορούν να συνδεθούν το πολύ τέσσερις γραμμές μεταφοράς. Θεωρείται, επίσης, ότι δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στη διασύνδεση δύο οποιωνδήποτε ζυγών μεταξύ τους. Με δεδομένο ότι αρχικά το δίκτυο του Garver έχει 6 εγκατεστημένες γραμμές, προκύπτει εύκολα ότι οι πιθανές γραμμές προς εγκατάσταση είναι 54. Αυτό θεωρητικά σημαίνει ότι οφείλουν να εξεταστούν $4^6 5^9$ διαφορετικά πιθανά σενάρια επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή το υπολογιστικό κόστος για κάτι τέτοιο είναι απαγορευτικό, θα χρησιμοποιηθεί ένα εμπειρικό ανώτατο όριο οικονομικού κόστους εγκατάστασης των νέων γραμμών. Αυτό σημαίνει ότι θα απορριφθούν εκ των προτέρων όσα σενάρια επέκτασης κριθούν υπερβολικά ακριβά. Το

όριο κόστους επιλέγεται κατάλληλα μετά από διαδοχικές δοκιμές, ώστε να μην επιτρέψει υπερβολικά λίγα σενάρια προς εξέταση, τα οποία δε θα επιτρέψουν την εξαγωγή συμπερασμάτων, ενώ παράλληλα ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος να είναι μέσα σε λογικά πλαίσια. Επιπλέον, ο ζυγός 6 του δικτύου του Garver είναι αρχικά ασύνδετος, οπότε πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τη σύνδεσή του. Συνεπώς, όσα σενάρια επέκτασης δεν προβλέπουν σύνδεση του ζυγού 6 με το υπόλοιπο δίκτυο απορρίπτονται αυτόματα.

Αρχικά, ο έλεγχος για την ικανότητα του δικτύου να τροφοδοτήσει τα φορτία χωρίς τη χρήση ανανεώσιμης παραγωγής γίνεται με χρήση της DC-OPF μηδενίζοντας παράλληλα την παραγωγική ικανότητα του ζυγού 6. Εάν η μέθοδος συγκλίνει, το αντίστοιχο σενάριο γίνεται αποδεκτό, ενώ διαφορετικά απορρίπτεται. Σημειώνεται ότι όποτε απαιτείται να λυθεί πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου στην παρούσα διπλωματική, θα ακολουθείται η προσέγγιση συνεχούς ρεύματος (DC-OPF) με την παραδοχή ότι όλες οι συμβατικές γεννήτριες έχουν ακριβώς το ίδιο λειτουργικό κόστος, ενώ η ανανεώσιμη παραγωγή εντάσσεται κατά προτεραιότητα.

Για τις απαιτούμενες τιμές παραγωγικής ικανότητας του αιολικού πάρκου στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές μετρήσεις, διαθέσιμες στο εργαστήριο. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις απεικονίζουν ωριαίες τιμές ικανότητας παραγωγής ενεργού ισχύος από ένα αιολικό πάρκο σε ανά μονάδα τιμές. Επομένως, πριν τη χρήση τους απαιτείται να πολλαπλασιαστούν με τη μέγιστη ονομαστική παραγωγική ικανότητα του αιολικού πάρκου του συγκεκριμένου παραδείγματος, η οποία είναι ίση με 350MW.

Πλέον έχουν οριστεί όλα τα προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτή την τροποποιημένη εκδοχή του δικτύου του Garver. Πρώτα θα αναζητηθεί το φθηνότερο σενάριο που εξασφαλίζει την πλήρη απορρόφηση της μέγιστης ονομαστικής παραγωγικής ικανότητας του αιολικού πάρκου στο ζυγό 6. Αυτό γίνεται δίνοντας ως είσοδο στο MATPOWER τα δεδομένα του πίνακα 3.1 και χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη ρουτίνα για DC-OPF. Τα διαθέσιμα σενάρια επέκτασης διατάσσονται σε σειρά αύξοντος κόστους και επιστρέφεται το φθηνότερο για το οποίο συγκλίνει η DC-OPF.

Το ενδιαφέρον στρέφεται στη μελέτη των σεναρίων που είναι φθηνότερα από τη λύση της προηγούμενης παραγράφου τηρώντας παράλληλα τους προαναφερθέντες περιορισμούς, επομένως μπορούν να αφαιρεθούν με ασφάλεια από το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων επέκτασης όσα έχουν κόστος αυστηρά μεγαλύτερο από την υπάρχουσα λύση. Σε αυτό το στάδιο της εφαρμογής, τα εξεταζόμενα σενάρια θα αξιολογηθούν στη βάση της υψηλής χρησιμοποίησης με τον εξής τρόπο. Για κάθε σενάριο υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός ροών ενεργού ισχύος που εμπίπτουν στο διάστημα υψηλής χρησιμοποίησης για όλες τις εγκατεστημένες γραμμές, είτε ανήκουν στις αρχικά εγκατεστημένες είτε όχι. Απορρίπτονται όσα σενάρια δεν έχουν τουλάχιστον το 80% των τιμών στο διάστημα υψηλής χρησιμοποίησης. Από τα σενάρια που απομένουν επιστρέφεται ως έξοδος εκείνο με την ελάχιστη εντροπία. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται χαλαρώνοντας την απαίτηση του 80% σε 70%.

3.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το αποτέλεσμα του προγράμματος που προσομοίωσε όσα περιγράφηκαν ήταν ένα σενάριο που προέβλεπε προσθήκη δύο νέων γραμμών μεταξύ των ζυγών 2 και 3, μίας νέας γραμμής μεταξύ των 3 και 5 και μίας νέας γραμμής μεταξύ των 3 και 6 και για την επιλογή f_l ίσο με 80% και για f_l ίσο με 70%.

3.2.3 Συμπεράσματα

Το παραπάνω αποτέλεσμα κρίνεται ως αρκετά προβληματικό. Η βασική πηγή προβληματισμού είναι η σύνδεση του απομονωμένου αιολικού πάρκου στο ζυγό 6 με μόλις μία γραμμή μεταφορικής ικανότητας 100MW με το υπόλοιπο δίκτυο. Για σύγκριση παρατίθεται η μέση παραγωγική ικανότητα του πάρκου, η οποία είναι περίπου ίση με 112MW. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρόνο αποκόπτεται αρκετά περισσότερο από το μισό της συνολικής ενέργειας που είναι εφικτό να παραχθεί από το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, το οποίο είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητο. Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται λογικό, καθώς το αιολικό πάρκο είναι η μόνη πηγή στοχαστικής παραγωγής στο δίκτυο. Επομένως, είναι σαφές ότι η μεθοδολογία σε αυτή την περίπτωση κάνει την ασφαλή επιλογή του να προσπαθεί να απορροφάει πρακτικά συνεχώς 100MW αιολικής παραγωγής. Αυτό πράγματι οδηγεί σε σταθερότητα στις ροές ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά θυσιάζει απaráδεκτα πολλή αιολική ενέργεια.

3.3 Δεύτερη εφαρμογή της μεθοδολογίας

Ως πρώτη απόπειρα αντιμετώπισης του προβλήματος που εντοπίστηκε κατά την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου επιλέχθηκε η μετακίνηση του αιολικού πάρκου σε ζυγό εντός του αρχικά συνδεδεμένου δικτύου.

3.3.1 Περιγραφή διαδικασίας

Το δίκτυο του Garver τροποποιείται σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 3.2.

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς γεννητριών (MW)		Αιχμή φορτίου (MW)
	Συμβατική παραγωγή	Αιολική παραγωγή	
1	150	0	80
2	0	0	240
3	10	350	40
4	0	0	160
5	0	0	240
6	600	0	0
Σύνολο	760	350	760

Πίνακας 3.2: Δεύτερη τροποποίηση του δικτύου του Garver

Για να γίνουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί απαιτείται ο συνηθισμένος διαμερισμός κάθε γραμμής σε διάστημα υψηλής και χαμηλής χρησιμοποίησης. Κατόπιν δοκιμών, σε αυτή την ενότητα φαίνεται ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται για εύρος διαστήματος υψηλής χρησιμοποίησης (ΔP) ίσο με 0.4 και f_l ίσο με 60%.

3.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στους πίνακες 3.3 και 3.4 παρατίθενται τα 11 φθηνότερα εφικτά σενάρια θεωρώντας ως κόστος το μήκος της γραμμής σε μίλια. Τα σενάρια παρουσιάζονται διατεταγμένα κατά αύξον κόστος. Σημειώνεται ότι εφικτά ονομάζουμε τα σενάρια στα οποία έχουμε κάλυψη του φορτίου μόνο με

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Νέες γραμμές										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	2	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0
1	6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	6	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2
3	6	0	0	1	0	0	2	1	0	1	1	1
4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	6	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2	2
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κόστος εγκατάστασης		250	250	259	261	261	266	268	268	268	268	268

Πίνακας 3.3: Πλήθος νέων γραμμών προς εγκατάσταση

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Συνολική χωρητικότητα γραμμών (MW)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
1	5	300	200	100	200	100	100	300	200	200	100	100
1	6	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0
2	3	100	200	100	100	200	100	100	100	100	200	100
2	4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	5	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	0
2	6	400	400	400	400	400	300	400	400	400	400	400
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	100	100	100	100	100	200	100	100	200	200	300
3	6	0	0	100	0	0	200	100	0	100	100	100
4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	6	300	300	200	300	300	200	200	200	200	200	200
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κόστος εγκατάστασης		250	250	259	261	261	266	268	268	268	268	268

Πίνακας 3.4: Συνολική χωρητικότητα μετά την προσθήκη των νέων γραμμών προς εγκατάσταση

χρήση συμβατικής παραγωγής. Ο πρώτος από τους 2 πίνακες καταγράφει πόσες νέες γραμμές (με μέγιστο τις 4) πρέπει να τοποθετήσουμε μεταξύ 2 ζυγών. Ο δεύτερος καταγράφει τις συνολικές χωρητικότητες των γραμμών του δικτύου μετά τις αντίστοιχες προσθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, το σενάριο ελάχιστης εντροπίας είναι το δεύτερο, ενώ το ένατο σενάριο είναι το φθηνότερο που διαθέτει αρκετή χωρητικότητα γραμμών, ώστε να μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιήσει και τα 350MW αιολικής παραγωγής. Επομένως, μένει να αξιολογηθεί το δεύτερο σενάριο ως προς την αποκοπτόμενη ανανεώσιμη ενέργεια.

3.3.3 Συμπεράσματα

Και σε αυτή την περίπτωση το σενάριο στο οποίο καταλήγει η μέθοδος αποδεικνύεται προβληματικό, καθώς η μέγιστη απορρόφηση ενεργού ισχύος από το αιολικό πάρκο στο ζυγό 3 είναι ίση με 54MW. Τα δεδομένα αιολικής παραγωγής που χρησιμοποιήθηκαν ταυτίζονται με αυτά της πρώτης εφαρμογής της μεθοδολογίας, επομένως η μέση τιμή της παραγωγικής ικανότητας του αιολικού πάρκου συνεχίζει να είναι περίπου ίση με 112MW. Αυτό οδηγεί και σε αυτή την περίπτωση σε απαράδεκτα μεγάλη περικοπή της αιολικής παραγωγής του πάρκου.

Η μέγιστη απορρόφηση ενεργού ισχύος σε αυτή την εφαρμογή μπορεί εκ πρώτης όψεως να μοιάζει παράδοξα μικρή, καθώς φαινομενικά η μεταφορική ικανότητα των γραμμών που συνδέονται στο ζυγό 3 είναι αρκετά μεγαλύτερη. Ωστόσο, αξίζει να υπενθυμιστεί ότι η μεταφορική ικανότητα των διαφορετικών γραμμών δεν αθροίζεται, αλλά υπολογίζονται οι ισοδύναμες αντιστάσεις του δικτύου και με βάση αυτές προκύπτει η ισοδύναμη μεταφορική χωρητικότητα που συνδέεται στο ζυγό 3.

Συνεπώς, φαίνεται ότι η συγκέντρωση της ανανεώσιμης παραγωγής σε ένα ζυγό είναι πιθανό να οδηγεί τη μεθοδολογία σε επιλογή σεναρίων που περικόπτουν δραστικά την ικανότητα απορρόφησης ανανεώσιμης ενέργειας.

3.4 Τρίτη εφαρμογή της μεθοδολογίας

Με βάση όσα προηγήθηκαν σε αυτή την ενότητα κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία δοκιμή με την αιολική παραγωγή να μη συγκεντρώνεται σε ένα ζυγό του δικτύου, ενώ παράλληλα το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αντί προβλήματος ελαχιστοποίησης της εντροπίας.

3.4.1 Περιγραφή διαδικασίας

Η κύρια διαφοροποίηση της διαδικασίας σε αυτό το σκέλος της εφαρμογής είναι ότι δε θα απορριφθούν τα σενάρια που έχουν ποσοστό τιμών ροής ισχύος στο διάστημα υψηλής χρησιμοποίησης μικρότερο από κάποιο όριο. Αντίθετα, θα υπολογιστούν κάποιοι δείκτες για όλα τα σενάρια που ικανοποιούν την απαίτηση όχι μεγαλύτερου κόστους από το σενάριο επέκτασης που εμφανίζει πλήρη απορρόφηση της ονομαστικής ικανότητας των αιολικών πάρκων. Τα σενάρια αυτά είναι 46. Οι δείκτες που θα υπολογιστούν είναι το κόστος εκφρασμένο σε μιλια εγκατεστημένων γραμμών, το ποσοστό των τιμών ροής ισχύος που εμπίπτουν στο διάστημα υψηλής χρησιμοποίησης, η συνολική εντροπία του σεναρίου, η συνολική αποκοπτόμενη ενέργεια (σε MWh) και η μέση φόρτιση των γραμμών.

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς γεννητριών (MW)		Αιχμή φορτίου (MW)
	Συμβατική παραγωγή	Αιολική παραγωγή	
1	0	400	80
2	0	0	240
3	160	250	40
4	0	0	160
5	0	0	240
6	600	0	0
Σύνολο	760	650	760

Πίνακας 3.5: Δεύτερη τροποποίηση του δικτύου του Garver

Το δίκτυο του Garver τροποποιείται σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 3.5.

Για να γίνουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί απαιτείται ο συνηθισμένος διαμερισμός κάθε γραμμής σε διάστημα υψηλής και χαμηλής χρησιμοποίησης. Κατόπιν δοκιμών, σε αυτή την ενότητα φαίνεται ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται για εύρος διαστήματος υψηλής χρησιμοποίησης (ΔP) ίσο με 0.3 ή 0.4.

3.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στους πίνακες 3.6 και 3.7 παρατίθενται τα βέλτιστα κατά Pareto σενάρια που ελέγχθηκαν. Υπενθυμίζεται ότι βέλτιστο κατά Pareto είναι ένα σενάριο για το οποίο δεν υπάρχει κάποιο άλλο σενάριο το οποίο είναι σε όλα τα χαρακτηριστικά καλύτερο ή ίσο και σε τουλάχιστον ένα γνησίως καλύτερο.

Κάθε γραμμή είναι ένα διαφορετικό σενάριο. Η πρώτη στήλη παρουσιάζει τις τιμές κόστους (βέλτιστο το μικρότερο), η δεύτερη το ποσοστό "επιθυμητών" τιμών (βέλτιστο το μεγαλύτερο), η τρίτη τη συνολική εντροπία (βέλτιστη η μικρότερη), η τέταρτη τη συνολική απώλεια ενέργειας (βέλτιστη η μικρότερη) και η πέμπτη τη μέση φόρτιση (βέλτιστη η μεγαλύτερη). Ένα σενάριο δεν είναι απαραίτητο να εμφανίζεται και στους δύο πίνακες, καθώς μπορεί να είναι βέλτιστο κατά Pareto μόνο για τη μία από τις 2 επιλογές ΔP . Επομένως, η παράθεση και των δύο πινάκων είναι απαραίτητη, ώστε να εντοπιστεί κάποιο πιθανώς ικανοποιητικό σενάριο, το οποίο εμφανίζεται μόνο στη μία από τις δύο περιπτώσεις.

3.4.3 Συμπεράσματα

Αρχικά, φαίνεται ότι η παρουσίαση των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων οδηγεί σε καλύτερη επισκόπηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου σε σχέση με την εκ των προτέρων απόρριψη σεναρίων, που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Αυτός ο τρόπος παρουσίασης επιτρέπει την εύρεση σεναρίων που δεν περικλύπτουν την αιολική παραγωγή σχεδόν καθόλου, ενώ παρουσιάζουν υψηλή χρησιμοποίηση γραμμών και χαμηλή εντροπία. Τέλος, σημειώνεται ότι το κόστος του σεναρίου της περίπτωσης A είναι ίσο με 490.

Σε πιο συγκεκριμένες παρατηρήσεις, στον πίνακα για $\Delta P = 0.4$ φαίνεται ότι το δεύτερο σενάριο με κόστος 468 έχει στη 2η γραμμή πρακτικά τη βέλτιστη δυνατή τιμή (για την ακρίβεια, έχει τη 2η βέλτιστη, αλλά η διαφορά με την 1η είναι στα όρια της ακρίβειας των πράξεων). Έχει, επίσης, την 4η καλύτερη τιμή εντροπίας με τη διαφορά από την

Κόστος	Ποσοστό υψηλής χρησιμοποίησης	Εντροπία	Απώλεια ενέργειας	Μέση φόρτιση
430	0.38946	8.2194	556.712	0.5723
450	0.27672	8.9355	0.000729	0.53671
450	0.21156	8.3495	0.000888	0.5284
460	0.30679	5.9369	853.2931	0.53836
468	0.36023	8.0363	0.00086	0.53794
468	0.40656	7.8698	0.0013	0.55377
470	0.31494	6.7676	0.00129	0.52253
470	0.25552	9.1508	0.00072	0.50437
470	0.17148	6.9804	0.00078	0.49834
470	0.18906	7.8788	0.00093	0.49479
479	0.3584	7.5156	620.352	0.51093
480	0.19767	6.6108	0.00073	0.50808
480	0.15216	5.9645	0.00084	0.50001
481	0.20368	8.1856	0.0007	0.48508
481	0.22951	7.9593	0.00079	0.49321
486	0.41749	7.0393	0.000795	0.54663
488	0.23261	8.3582	0.00075	0.48411
490	0.29831	6.6123	0.00087	0.49478

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για ΔP ίσο με 0.3

Κόστος	Ποσοστό υψηλής χρησιμοποίησης	Εντροπία	Απώλεια ενέργειας	Μέση φόρτιση
430	0.51795	9.8643	556.7117	0.57238
450	0.44489	10.9364	0.000731	0.5368
460	0.37683	6.9769	853.2931	0.53844
461	0.45421	9.4989	1144.0293	0.51632
468	0.48144	8.9309	0.000856	0.53809
468	0.51735	7.1039	0.001303	0.55392
470	0.44116	7.9257	0.0012993	0.5227
470	0.39348	10.367	0.00072031	0.50447
479	0.48889	6.8163	253.1567	0.52561
480	0.31725	9.2221	0.00073302	0.50816
481	0.38098	10.3895	0.00070366	0.4852
481	0.31881	8.2633	0.00078222	0.49333
486	0.51504	6.6216	0.00080406	0.54667
488	0.37182	9.6157	0.00075013	0.48422
490	0.41849	10.9209	0.00073118	0.50567

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για ΔP ίσο με 0.4

1η καλύτερη τιμή, που αντιστοιχεί στο σενάριο με κόστος 486, να είναι μικρή. Τέλος, η αποκοπή ενέργειάς του είναι πολύ μικρή. Ομοίως, και το σενάριο κόστους 486, που ήδη αναφέρθηκε, δείχνει υποσχόμενο. Συνδυάζει τη βέλτιστη τιμή εντροπίας με την 3η καλύτερη τιμή στη δεύτερη γραμμή (η οποία απέχει από την 1η καλύτερη κατά διαφορά που είναι στα όρια της ακρίβειας των πράξεων) και με αμελητέα αποκοπή φορτίου. Επομένως, φαίνεται ότι αυτά τα δύο σενάρια είναι τα καλύτερα δυνατά και επαφίεται στον υπεύθυνο για τη λήψη απόφασης να κρίνει αν το ελαφρύ προβάδισμα του ακριβότερου από τα δύο αξίζει την επιπλέον χρηματική δαπάνη. Σημειώνεται ότι ως πιο ενδιαφέρον κριτήριο υψηλής χρησιμοποίησης κρίθηκε το ποσοστό των προσομοιώσεων που δίνουν τιμή στο διάστημα υψηλής χρησιμοποίησης. Ωστόσο, παρατίθεται ως κριτήριο και η μέση φόρτιση των γραμμών για να έχει τη δυνατότητα σύγκρισης ο αναγνώστης.

Σύμφωνα με τον πίνακα για $\Delta P = 0.3$ παρατηρείται ότι αυτά τα δύο σενάρια είναι τα δύο καλύτερα με βάση τη δεύτερη στήλη του πίνακα. Ωστόσο, πλέον υπάρχουν περισσότερα σενάρια και αρκετά από αυτά παρουσιάζουν καλύτερη τιμή εντροπίας. Τα συγκεκριμένα σενάρια θεωρούνται ανεπιθύμητα, καθώς εμφανίζουν αρκετά χαμηλότερη χρησιμοποίηση, το οποίο ερμηνεύεται ως "σιγουριά για χαμηλή χρησιμοποίηση".

Κεφάλαιο 4

Επόμενα βήματα

Στο καταληκτικό κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής θα γίνουν ορισμένες προτάσεις για επόμενα βήματα που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν ερευνητικά με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.

Το προφανές πρώτο βήμα θα ήταν η χρήση πιο περίπλοκων δικτύων από το δίκτυο του Garver, ώστε να εξαχθούν περισσότερα αποτελέσματα για ανάλυση και ερμηνεία. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να εντοπιστούν πιθανές ατέλειες της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, αλλά και να κατανοηθεί καλύτερα το πρόβλημα της ανάπτυξης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στην υψηλότερη χρησιμοποίηση των γραμμών μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να ληφθεί μέριμνα και για τροποποιήσεις της μεθοδολογίας, ώστε να κλιμακώνεται ομαλά με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου που εξετάζεται κάθε φορά.

Η πιο σημαντική επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας έχει να κάνει με την άρση της υπόθεσης για μόνιμη σταθερή ζήτηση ενέργειας από τα φορτία του συστήματος ίση με την αιχμή του αντίστοιχου φορτίου. Στην κλασική θεώρηση του προβλήματος της ανάπτυξης ενός συστήματος μεταφοράς λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη φόρτιση του δικτύου, καθώς το σύστημα πρέπει να ανταποκρίνεται στη χειρότερη πιθανή κατάσταση λειτουργίας. Εξηγήθηκε ήδη γιατί αυτός δεν είναι ο βέλτιστος τρόπος σχεδίασης επεκτάσεων του συστήματος με δεδομένη την ύπαρξη στοχαστικής παραγωγής, οπότε η προφανής γενίκευση έχει να κάνει με τη χρήση μεταβλητών τιμών για τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Συνεπώς, η εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική με παράλληλη χαλάρωση του αντίστοιχου περιορισμού για τη ζήτηση των καταναλωτών μπορεί να δώσει καλύτερη εικόνα της μέσης κατάστασης λειτουργίας του συστήματος.

Λιγότερο προφανής επιλογή για επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας είναι η χρήση διαφορετικής διακριτοποίησης της μεταφορικής ικανότητας των γραμμών. Θα είχε ενδιαφέρον η δοκιμή διαχωρισμού της μεταφορικής ικανότητας σε περισσότερα από δύο διαστήματα και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Γιώργος Ορφανός. *Συμβολή στο Σχεδιασμό Επέκτασης και στην Κατανομή του Κόστους Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2013.
- [2] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [3] ΑΔΜΗΕ. Περιγραφή Συστήματος Μεταφοράς. <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/perigrifi-systimatos-metaforas/>. [Accessed 26 June 2015].
- [4] C.E. Shannon and W. Weaver. *The Mathematical Theory of Communication*. Illini books. University of Illinois Press, 1963.
- [5] D.P. Bertsekas and J.N. Tsitsiklis. *Introduction to Probability*. Athena Scientific books. Athena Scientific, 2002.
- [6] S.M. Ross. *A First Course in Probability*. Pearson Prentice Hall, 8th edition, 2010.
- [7] D.J.C. MacKay. *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge University Press, 2003.
- [8] R.T. Marler and J.S. Arora. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6):369–395, 2004.
- [9] J.A. Momoh. *Electric Power System Applications of Optimization*. Power Engineering (Willis). Taylor & Francis, 2nd edition, 2008.
- [10] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, and R.J. Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(1):12–19, Feb 2011.
- [11] R.D. Zimmerman and C.E. Murillo-Sánchez. *MATPOWER 5.0b1 User's Manual*, July 2014.
- [12] J.J. Grainger and W.D. Stevenson. *Power system analysis*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Power and energy. McGraw-Hill, 1994.
- [13] L.L. Garver. Transmission network estimation using linear programming. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-89(7):1688–1697, September 1970.

