



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

**Εκτίμηση ευελιξίας Ενεργού και Αέργου ισχύος στο σημείο
διασύνδεσης Δικτύου Μεταφοράς και Δικτύου Διανομής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Γιάσουμας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020



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

**Εκτίμηση ευελιξίας Ενεργού και Αέργου ισχύος στο σημείο
διασύνδεσης Δικτύου Μεταφοράς και Δικτύου Διανομής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Γιάσουμας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Ιουλίου 2020.

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

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

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

Αθήνα, Ιούλιος 2020

.....
Γεώργιος Θ. Γιάσουμας

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

Copyright © Γεώργιος Θ. Γιάσουμας, 2020

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 τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά. Η διείσδυση αυτή έχει προκαλέσει νέα τεχνικά προβλήματα στο δίκτυο διανομής αλλά και στο δίκτυο μεταφοράς. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός του εύρους ευελιξίας ακτινικών δικτύων στο σημείο σύνδεσης του δικτύου διανομής με το δίκτυο μεταφοράς και η γραφική απεικόνιση του. Η απεικόνιση αυτή θα συνδράμει στη γρήγορη πρόβλεψη της επίπτωσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο και θα βοηθήσει τους διαχειριστές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας να παίρνουν αποφάσεις προβλέποντας τις επιπτώσεις που θα έχουν στο δίκτυο.

Ο υπολογισμός της ευελιξίας γίνεται διαμορφώνοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς. Το πρόβλημα αυτό μοντελοποιήθηκε με τρία διαφορετικά μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος το AC Βέλτιστης ροής ισχύος, το DistFlow και μια προσέγγιση του DistFlow το LinDistFlow. Η μοντελοποίηση έγινε σε περιβάλλον Matlab και με χρήση των εργαλειοθηκών Matpower και Yalmip.

Μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύεται η ανάγκη επαναπροσδιορισμού της συνεργασίας των διαχειριστών του δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής. Σκοπός της νέας αυτής συνεργασίας θα είναι η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των τεχνικών προβλημάτων που έχουν εμφανιστεί.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη παραγωγή, βελτιστοποίηση, βέλτιστη ροή ισχύος, ευελιξία, χάρτης ευελιξίας, δίκτυα διανομής, συνεργασία διαχειριστών.

ABSTRACT

In recent years the infiltration of dispersed energy sources in the energy grid has increased significantly. This infiltration has caused new technical problems in both transmission and distribution systems. This diploma thesis focuses in the estimation of the flexibility range at the distribution and transmission system operators boundary nodes and its graphical representation. This graphical representation will help to quickly predict the impact of dispersed energy sources on the grid and therefore help the grid operators make decisions knowing beforehand the incidence they will have on the grid.

The estimation of the flexibility range is calculated by formulating an optimization problem that takes into account technical and financial constraints. The optimization problem was modeled using three different optimal power flow models the AC Optimal Power Flow, DistFlow and a DistFlow approximation LinDistFlow. The modeling of the optimization problem was done in Matlab environment using Matpower and Yalmip toolboxes.

This diploma thesis highlights the need to redefine the cooperation of transmission and distribution system operators. The purpose of this new cooperation will be to exploit all the capabilities of the dispersed energy sources to effectively deal with the technical problems that have arisen.

KEY WORDS

Distributed energy resources, optimization, optimal power flow, flexibility, flexibility map, distribution system, TSO-DSO collaboration.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ που μου εμπιστεύτηκε το συγκεκριμένο θέμα και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με έναν τομέα που βρίσκεται στα ενδιαφέροντα μου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νικόλαο Σαββόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα και ερευνητή του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ για την υποστήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ψυχολογική τους ενθάρρυνση και την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	- 1 -
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	- 2 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	- 3 -
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 3 -
2.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	- 3 -
2.2.1 Ακτινικά Δίκτυα Διανομής	- 3 -
2.2.2 Βροχοειδή Δίκτυα Διανομής	- 4 -
2.3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	- 5 -
2.3.1 Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής	- 5 -
2.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	- 8 -
2.4.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	- 9 -
2.4.2 Διαχειριστές Δικτύου	- 10 -
2.4.3 Συνεργασία Διαχειριστή Δικτύου Διανομής – Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς.....	- 11 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ	- 13 -
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 13 -
3.2 ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	- 14 -
3.3 DC ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	- 16 -
3.4 AC ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	- 17 -
3.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΡΟΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ	- 19 -
3.5.1 DistFlow.....	- 19 -
3.5.2 LinDistFlow	- 20 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΥΡΕΣΗ ΧΑΡΤΗ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ	- 21 -
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 21 -
4.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	- 21 -
4.2.1 AC Βέλτιστη Ροή Ισχύος.....	- 21 -
4.2.2 DistFlow.....	- 22 -
4.2.3 LinDistFlow	- 23 -
4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	- 23 -
4.3.1 Δεδομένα.....	- 23 -
4.3.2 Καθορισμός περιμέτρου χάρτη ευελιξίας.....	- 24 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	- 29 -
5.1 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ 18 ΚΟΜΒΩΝ	- 29 -

5.1.1	Αποτελέσματα Σεναρίου 1.....	- 30 -
5.1.2	Αποτελέσματα Σεναρίου 2.....	- 33 -
5.2	ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ	- 35 -
5.2.1	Αποτελέσματα Σεναρίου 1.....	- 37 -
5.2.2	Αποτελέσματα Σεναρίου 2.....	- 39 -
5.3	ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ 69 ΚΟΜΒΩΝ	- 41 -
5.3.1	Αποτελέσματα Σεναρίου 1.....	- 43 -
5.3.2	Αποτελέσματα Σεναρίου 2.....	- 45 -
5.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ	- 47 -
5.5	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΧΑΡΤΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ	- 48 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		- 49 -
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 49 -
6.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	- 50 -
Παράρτημα Α: Δεδομένα Δικτύων Διανομής		- 51 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		- 69 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον έχει δημιουργήσει παγκόσμια κινητοποίηση των χωρών, οι οποίες μέσα από διεθνής συμφωνίες έχουν διαμορφώσει ολοκληρωμένα εθνικά σχέδια δράσης για το κλίμα με στόχο τη μείωση της εκπομπής ρύπων. Επίκεντρο αυτών των σχεδιασμών είναι ο τομέας της ενέργειας με τις χώρες να έχουν στραφεί σε περιβαλλοντικές πολιτικές που ευνοούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Αποτέλεσμα αυτού είναι η συνεχής διεύδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) ,η πλειονότητα των οποίων είναι ΑΠΕ. Αυτό μπορεί να βοηθά στην επίτευξη των στόχων για τις εκπομπές ρύπων, αλλά έχει δημιουργήσει νέα τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις που απαιτούν εκσυγχρονισμό του εξοπλισμού, του τρόπου λειτουργία και της ανάπτυξης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Κάποιες από τις προκλήσεις που εμφανίζονται οφείλονται στη φύση των ΑΠΕ. Βασικότερος λόγος αυτού είναι η στοχαστικότητα στη λειτουργία τους αφού αυτή εξαρτάται από φυσικά φαινόμενα που δεν μπορούμε να προβλέψουμε χωρίς περιθώρια λάθους. Πρόκληση αποτελεί επίσης και η επιλογή της προστασίας του δικτύου που λόγω των αντίθετων ροών, της μεταβολής της στάθμης βραχυκύκλωσης, την ανύψωση τάσης και τη συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς που προκαλούν οι ΜΔΠ γίνεται πιο περίπλοκη. Επιπλέον η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει κάνει την ανάπτυξη των δικτύων ακόμα πιο σύνθετη αφού πλέον απαιτείται συνεργασία και συντονισμός ανάμεσα στους ιδιώτες παραγωγούς και τους διαχειριστές του δικτύου.

Στα προβλήματα αυτά καλούνται να δώσουν λύσεις οι διαχειριστές του δικτύου με τη δημιουργία νέων αλλά και την εξέλιξη παλαιότερων μεθοδολογιών. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες ενέργειες και λύσεις σε κάποια από τα προβλήματα οι οποίες έχουν ήδη υλοποιηθεί [1]. Σε επίπεδο εξοπλισμού τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και διανομής. Σε επίπεδο λειτουργίας και ελέγχου η χρήση τεχνολογιών από τον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της πληροφορικής. Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν αναπόφευκτα και τον τρόπο ανάπτυξης των δικτύων.

1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός ακόμα εργαλείου που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους διαχειριστές του δικτύου για να μπορέσουν να αντιμετωπίσουν και να διαχειριστούν τη συνεχή διεύδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής . Πιο συγκεκριμένα μέσα από την εκτίμηση των ορίων της ευελιξίας του σημείου λειτουργίας στο σημείο διασύνδεσης δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής ,λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς, θα δημιουργηθούν χάρτες με το εύρος ευελιξίας. Οι χάρτες αυτοί θα βοηθήσουν στην απεικόνιση της επίπτωσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο και θα επιτρέψουν στους

διαχειριστές να παίρνουν άμεσες αποφάσεις. Προϋπόθεση για να μπορέσει να αξιοποιηθεί το εργαλείο αυτό είναι η συνεργασία του διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς και του διαχειριστή του δικτύου διανομής.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια περιγραφή των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ). Αρχικά γίνεται αναφορά στις βασικές τοπολογίες των ΔΔΗΕ και την κατηγοριοποίηση τους με βάση το επίπεδο της τάσης λειτουργίας τους. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της σύνθεσης των ΔΔΗΕ. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται ο κύριος εξοπλισμός τους ο οποίος αποτελείται από τα εργαλεία ρύθμισης τάσης, τους υποσταθμούς, διακοπτικά στοιχεία και μέσα προστασίας. Έπειτα δίνεται ο ορισμός της διεσπαρμένης παραγωγής και γίνεται αναφορά στις βασικές μορφές ΜΔΠ. Τέλος ορίζονται τα βασικά καθήκοντα των διαχειριστών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και πως η συνεργασία τους πρέπει να εξελιχθεί για να επιτύχουν τους στόχους τους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των γενικών μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος DC B.P.I και AC B.P.I. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα προσεγγιστικά μοντέλα εξισώσεων της AC ροής ισχύος DistFlow και LinDistFlow.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του χάρτη ευελιξίας. Αρχικά γίνεται παρουσίαση των μοντέλων βέλτιστης ροής ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν AC B.P.I, DistFlow και LinDistFlow. Έπειτα αναλύονται τα δεδομένα εισόδου και ευελιξίας που χρειάστηκαν καθώς και η μέθοδος εύρεσης των σημείων της περιφέρειας του χάρτη.

Στο Κεφάλαιο 5 έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για 3 διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων διανομής και για δύο σενάρια λειτουργίας. Στο πρώτο σενάριο δεν έχει συμπεριληφθεί περιορισμός κόστους της ευελιξίας ενώ στο δεύτερο έχει καθοριστεί μέγιστο κόστος. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 μέσα από τα αποτελέσματα που έχουμε διατυπώνονται συμπεράσματα για την ακρίβεια των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν και για τη βοήθεια που μπορεί να προσφέρει η γνώση της ευελιξίας στο σημείο διασύνδεσης του συστήματος διανομής και συστήματος μεταφοράς. Τέλος προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως το σύνολο των ενεργειών, των συστημάτων και των δραστηριοτήτων που έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν και να επιβλέπουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ). Μέσο μεταφοράς της ενέργειας αυτής είναι τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ). Τα δίκτυα αυτά ανάλογα με το επίπεδο τάσης που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε δύο βαθμίδες [2]:

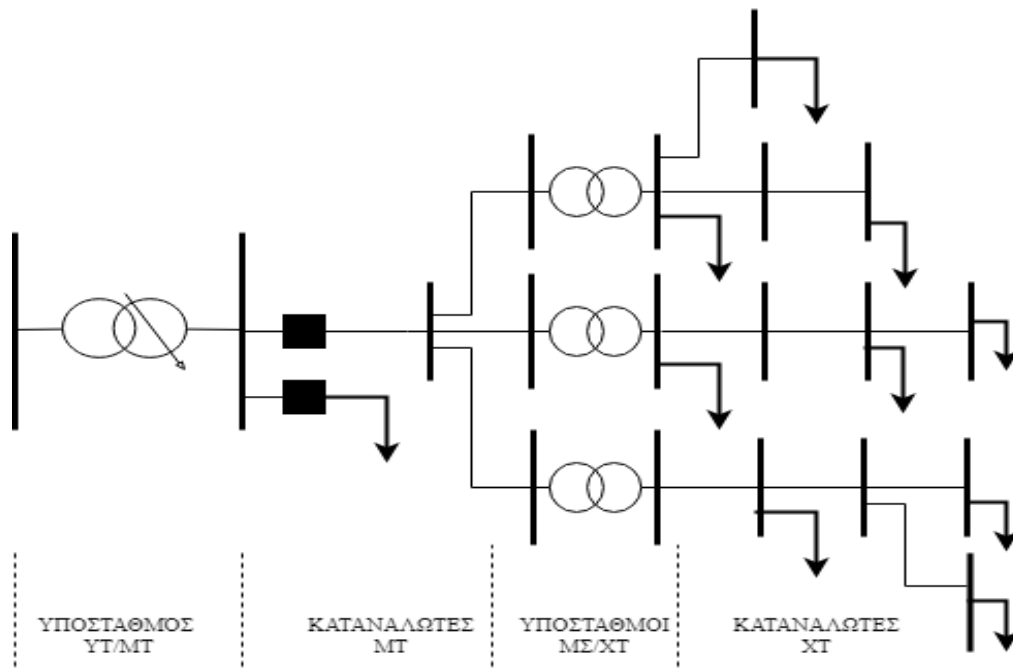
- **Δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ)** ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή. Τροφοδοτούνται από σταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτούν σταθμούς υποβιβασμού ΜΤ/ΧΤ και τις παροχές καταναλωτών ΜΤ. Η ονομαστική τάση λειτουργίας των γραμμών ΜΤ είναι συνήθως 20 kV, ενώ μικρό σχετικά μήκος δικτύου ΜΤ, κυρίως σε νησιά, λειτουργεί στα 15 kV. Επιπλέον, στην Αττική συναντώνται και τάσεις λειτουργίας 22 kV και 6.6 kV. Η τάση λειτουργίας 6.6 kV συναντάται επίσης, σε σπάνιες περιπτώσεις, σε νησιά [3]. Οι καταναλωτές που εξυπηρετούν είναι συνήθως μεγάλες βιομηχανίες.
- **Δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης (ΧΤ)** ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τροφοδοτούνται από σταθμούς υποβιβασμού τάσης ΜΤ/ΧΤ και τροφοδοτούν καταναλωτές ΧΤ. Η ονομαστική τάση λειτουργίας των γραμμών ΧΤ είναι 220/380 V.

2.2 Τοπολογίες Δικτύων Διανομής

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά στις δύο βασικές κατηγορίες των δικτύων διανομής με βάση την τοπολογία τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα διανομής.

2.2.1 Ακτινικά Δίκτυα Διανομής

Η πλειονότητα των δικτύων διανομής είναι ακτινικά. Βασικό χαρακτηριστικό ενός ακτινικού δικτύου είναι ότι ακολουθώντας τη διαδρομή τροφοδότησης ενός καταναλωτή καταλήγουμε μόνο σε ένα υποσταθμό με την ηλεκτρική ροή να είναι πάντα προς την κατεύθυνση του καταναλωτή. Αυτή η διαδρομή αποκλειστικής τροφοδοσίας το καθιστά λιγότερο αξιόπιστο, αφού με τυχόν βλάβη στο δίκτυο ο καταναλωτής παραμένει χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα μέχρι να επιδιορθωθεί. Για το λόγο αυτό τα ακτινικά δίκτυα δεν είναι πολύ διαδεδομένα στη μέση τάση αφού οι συνέπειες απώλειας ηλεκτρικού ρεύματος για τους καταναλωτές της ΜΤ μπορεί να είναι κρίσιμες καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν νοσοκομεία, χημικές βιομηχανίες κ.α. Η ανάπτυξη λοιπόν ακτινικών δικτύων γίνεται περισσότερο στη ΧΤ. Αντίθετα αυτό που καθιστά τα ακτινικά δίκτυα τη βασική

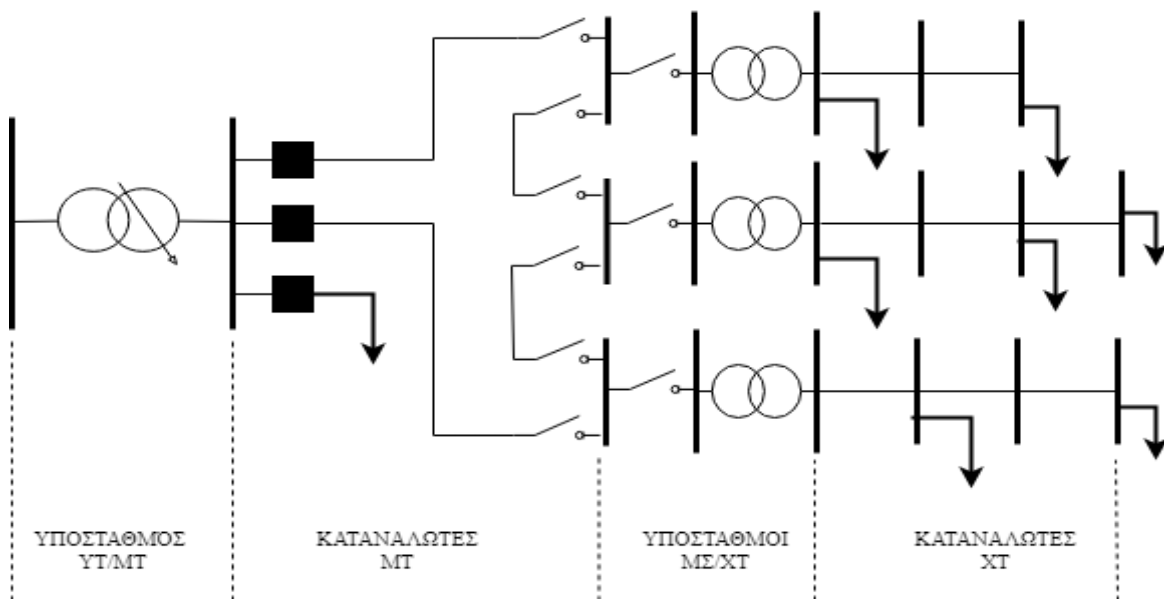


Σχήμα 2.2.1: Παράδειγμα τοπολογίας ακτινικού δικτύου

τοπολογία σε δίκτυα διανομής είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής αλλά και ο απλός σχεδιασμός τους. Στο Σχήμα 2.2.1 δίνεται ένα παράδειγμα τοπολογίας ακτινικού δικτύου.

2.2.2 Βροχοειδή Δίκτυα Διανομής

Τα βροχοειδή δίκτυα διανομής χρησιμοποιούνται κυρίως στη ΜΤ. Κύριο πλεονέκτημα έναντι των ακτινικών δικτύων είναι ότι ο καταναλωτής τροφοδοτείται από περισσότερο από ένα υποσταθμό. Με αυτό τον τρόπο ακόμα και αν υπάρχει βλάβη σε μια από τις γραμμές τροφοδοσίας ο καταναλωτής συνεχίζει να τροφοδοτείται μετά από χειρισμούς του διαχειριστή. Μειονέκτημα τους είναι το μεγάλο κόστος κατασκευής αλλά και η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία τους. Στο Σχήμα 2.2.2 δίνεται ένα παράδειγμα της τοπολογίας ενός βροχοειδούς δικτύου διανομής.



Σχήμα 2.2.2: Παράδειγμα τοπολογίας βροχοειδούς δικτύου

2.3 Σύνθεση Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κάθε χώρα αντιμετωπίζει διαφορετικές προκλήσεις στην ανάπτυξη του δικτύου διανομής της. Η δομή του δικτύου διανομής είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη χωροταξική διαμόρφωση της εκάστοτε χώρας κυρίως των αστικών κέντρων αλλά και τη γεωλογική διαμόρφωση τους κάνοντας το κάθε δίκτυο διανομής διαφορετικό. Λαμβάνοντας κάποιος υπόψη τη γεωλογική διαμόρφωση της Ελλάδας με το μεγάλο αριθμό νησιών, μπορεί να αντιληφθεί τις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες στην ανάπτυξη του δικτύου διανομής.

Με κριτήριο την κατασκευή τους αλλά και τη θέση των αγωγών του δικτύου σε σχέση με το έδαφος, τα ΔΔΗΕ διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες [4]:

- **Εναέρια δίκτυα διανομής:** Είναι φθηνότερα στην κατασκευή για αυτό και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του ΔΔΗΕ. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αραιοκατοικημένες περιοχές που δεν υπάρχουν μεγάλες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας . Οι γραμμές των εναέριων δικτύων είναι γυμνοί αγωγοί οι οποίοι στηρίζονται σε ξύλινους και τσιμεντένιους στύλους.
- **Υπόγεια δίκτυα διανομής:** Έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής καθώς απαιτείται σωστή μόνωση των αγωγών που χρησιμοποιούνται αλλά και συντήρησης αφού αυτή προϋποθέτει εργασίες εκσκαφής για την επιδιόρθωση τους. Τα υπόγεια δίκτυα εγκαθίστανται κυρίως σε αστικές περιοχές και οδεύουν, κατά κανόνα, κάτω από πεζοδρόμια λόγω έλλειψης χώρου αλλά και για λόγους αισθητικής.

2.3.1 Εξοπλισμός Δικτύων Διανομής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται εν συντομία τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός ΔΔΗΕ και η λειτουργία τους.

2.3.1.1 Υποσταθμοί

Οι υποσταθμοί δικτύων διανομής αποτελούν τους κόμβους του δικτύου και έχουν νευραλγική σημασία στη λειτουργία τους. Κάθε υποσταθμός είναι εξοπλισμένος με ένα ή περισσότερους μετασχηματιστές (Μ/Σ) και είναι υπεύθυνος για την ανύψωση ή υποβιβασμό της τάσης. Ανάλογα με τη λειτουργία τους συχνά καλούνται υποσταθμοί ανύψωσης ή υποβιβασμού ενώ σε περιορισμένες περιπτώσεις που το απαιτεί το δίκτυο ,και δεν είναι εξοπλισμένοι με Μ/Σ ,καλούνται υποσταθμοί ζεύξεως [2].Ο αριθμός των υποσταθμών ενός δικτύου μεταβάλλεται συνεχώς και έχει άμεση σχέση με την ανάπτυξη του δικτύου. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.1 στο δίκτυο διανομής συναντούμαι δύο επίπεδα τάσεων ΜΤ και ΧΤ, με βάση αυτά τα επίπεδα τάσεων οι υποσταθμοί κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ:** Είναι υποσταθμοί υποβιβασμού οι οποίοι μετασχηματίζουν την τάση από ΥΤ σε ΜΤ. Τροφοδοτούνται από το δίκτυο μεταφοράς και τροφοδοτούν το δίκτυο διανομής. Σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ για το τέλος του 2019 υπάρχουν 240 υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ στο ελληνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και είναι εξοπλισμένοι με Μ/Σ ισχύος 20/25 ΜVA και 40/50 ΜVA [3].

- **Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ:** είναι υποσταθμοί υποβιβασμού οι οποίοι μετασχηματίζουν την τάση από ΥΤ σε ΜΤ. Τροφοδοτούνται από το δίκτυο διανομής και τροφοδοτούν τους καταναλωτές ΧΤ. Στο ελληνικό δίκτυο σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ για το τέλος του 2019 υπάρχουν 163.220 υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ και είναι εξοπλισμένοι με Μ/Σ ισχύος από 50 έως 1000 kVA [3].

2.3.1.2 Ρύθμιση τάσης

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στη λειτουργία ενός ΔΔΗΕ αλλά και γενικότερα για τα ηλεκτρικά δίκτυα είναι η διατήρηση και ο έλεγχος του επιπέδου τάσης στην επιθυμητή τιμή. Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των μέσων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής για τη ρύθμιση της τάσης [5].

- **Μετασχηματιστές(Μ/Σ):** Θεμελιώδες στοιχείο των ΔΔΗΕ. Η χρήση του έχει βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των ΔΔΗΕ που γνωρίζουμε σήμερα.. Υπάρχουν διάφορα είδη Μ/Σ όπως οι αυτομετασχηματιστές, Μ/Σ δύο τυλιγμάτων και τριών τυλιγμάτων οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως βιομηχανίες, εργαστήρια υψηλών τάσεων κ.α. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται σε όλες τις βαθμίδες των δικτύων μεταφοράς και διανομής για τη ρύθμιση της τάσης αλλά και για τον έλεγχο της ροής ισχύος στο σύστημα [2]. Βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι για να μεταβάλουμε τον λόγο μετασχηματισμού τους πρέπει να τεθούν εκτός δικτύου, η ανάγκη για γρήγορους χειρισμούς οδήγησε στην ανάπτυξη του συστήματος ΣΑΤΥΦ που περιγράφεται αμέσως μετά.
- **Μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ):** Είναι το βασικότερο εργαλείο για τη ρύθμιση της τάσης που διαθέτουν τα σύγχρονα ΔΔΗΕ. Ο Μ/Σ ΣΑΤΥΦ μπορεί να αλλάξει το λόγο μετασχηματισμού ώστε η τάση των ζυγών να μένει εντός προκαθορισμένων ορίων. Συνήθως τον συναντάμε στους υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ αλλά και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ρύθμιση τάσης σε διάφορα σημεία του δικτύου. Μεγάλο πλεονέκτημα του Μ/Σ ΣΑΤΥΦ είναι η δυνατότητα μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού χωρίς τη διακοπή παροχής ισχύος ,αυτό επιτρέπει γρήγορους χειρισμούς που γίνονται μέσω ελέγχου και αυτοματισμών. Η ρύθμιση του επιπέδου τάσης πραγματοποιείται συνήθως στο τύλιγμα ΥΤ του Μ/Σ προκειμένου να ελαχιστοποιείται η ένταση του ρεύματος κατά τους χειρισμούς για λόγους ασφάλειας.
- **Ρυθμιστές τάσης:** Είναι αυτομετασχηματιστές που μπορούν να μεταβάλουν το λόγο μετασχηματισμού τους υπό φορτίο. Σε γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους οι Μ/Σ ΣΑΤΥΦ δεν αρκούν για να έχουμε ίδιο επίπεδο τάσης κατά μήκος των γραμμών. Έτσι γίνεται χρήση ρυθμιστών τάσεως οι οποίοι τοποθετούνται κατά μήκος των γραμμών και εξασφαλίζουν ότι οι καταναλωτές που ενδεχομένως βρίσκονται μακριά από κάποιο υποσταθμό δεν θα αντιμετωπίσουν προβλήματα πτώσης τάσης.

- **Χωρητικές αντισταθμίσεις:** Αποτελούνται από συστοιχίες πυκνωτών οι οποίες τοποθετούνται κατά μήκος του δικτύου ΜΤ σε ζυγούς και σε γραμμές του ΔΔΗΕ. Με την τοποθέτηση τους η οποία μπορεί να είναι είτε μόνιμη είτε αποζεύξιμη επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης για εγκάρσια σύνδεση. Μπορεί επίσης να επιτευχθεί η μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδραση των γραμμών για σύνδεση σε σειρά αυξάνοντας έτσι το όριο της μεταφερόμενης ισχύος[1]. Η χρήση των συστοιχιών μπορεί επίσης να ικανοποιήσει μέρος της ανάγκης παραγωγής αέργου ισχύος ,χρησιμοποιώντας τες σαν ΜΔΠ ,οδηγώντας και σε αποσυμφόρηση των γραμμών μεταφοράς. Η αποσυμφόρηση αυτή μπορεί να επιφέρει με σωστή επιλογή των θέσεων τοποθέτησης και οικονομικά οφέλη λαμβάνοντας πάντα υπόψη το κόστος που μπορεί να έχουν οι συστοιχίες των πυκνωτών [7].

2.3.1.3 Διακοπτικά Στοιχεία

Τα διακοπτικά στοιχεία του ΔΔΗΕ επιτρέπουν στον διαχειριστή του δικτύου να πραγματοποιεί χειρισμούς και έτσι να μεταβάλλει τη τοπολογία του δικτύου για σκοπούς προστασίας, συντήρησης ή και επαναφοράς βλάβης. Οι κύριοι τύποι των διακοπτικών αυτών στοιχείων και κάποιες από τις ιδιότητες τους περιγράφονται πιο κάτω [6]:

- **Αποζεύκτης (disconnector):** είναι συσκευή που μας επιτρέπει την απομόνωση ενός στοιχείου ή και μέρος ενός κυκλώματος. Δεν υπάρχει δυνατότητα να γίνει η απομόνωση αυτή ενώ το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Στα ΔΔΗΕ χρησιμοποιείται για απομόνωση μέρους του δικτύου με σκοπό τη συντήρηση ή επιδιόρθωση βλαβών.
- **Διακόπτης Ισχύος (circuit breaker):** είναι συσκευή που μας επιτρέπει να διακόψουμε αλλά και να επαναφέρουμε το ρεύμα σε ένα κύκλωμα. Στα ΔΔΗΕ δεν χρησιμοποιείται για χειρισμούς αλλά ως μέσο προστασίας αφού έχει τη δυνατότητα να διακόψει το ρεύμα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.
- **Διακόπτης Φορτίου (load switch):** είναι συσκευή που μας επιτρέπει να διακόψουμε αλλά και να επαναφέρουμε το ρεύμα σε ένα κύκλωμα αλλά δεν μπορεί να ανιχνεύσει το βραχυκύκλωμα. Χρησιμοποιείται για χειρισμούς στο δίκτυο και με βάση τη χρήση του διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:
 - **Επαφέας :** χρησιμοποιείται για χειρισμό σε κυκλώματα κινητήρων. Έχει ικανότητα διακοπής πολλαπλάσια της έντασης του φορτίου.
 - **Διακόπτης Ελέγχου:** χρησιμοποιείται για πραγματοποίηση χειρισμών από απόσταση μέσω επαφών. Έχει ευρεία χρήση σε αυτοματισμούς.

2.3.1.4 Μέσα προστασίας

Πολύ σημαντικό κομμάτι για την ασφάλεια και αξιοπιστία των ΔΔΗΕ. Τα τελευταία χρόνια λόγω και της διεύρυνσης της διεσπαρμένης παραγωγής έχει γίνει πιο δύσκολο στο σχεδιασμό του. Η προστασία των ΔΔΗΕ στόχο έχει τη μετατροπή του δικτύου έτσι ώστε να απομονώνει τμήματα του δικτύου που έχουν υποστεί βλάβη. Είναι σημαντικό τα μέσα προστασίας να συντηρούνται και να εξελίσσονται συνεχώς. Οι κύριες κατηγορίες των μέσων προστασίας είναι [5]:

- **Διακόπτες ισχύος:** Όπως έχει περιγραφεί και στην υποενότητα 2.3.1.3 ,οι διακόπτες ισχύος βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στην προστασία των ΔΔΗΕ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών διανομής που αναχωρούν από τους σταθμούς διανομής ΥΤ/ΜΤ . Μέσω ηλεκτρονόμων, οι οποίοι ανιχνεύουν υπερεντάσεις, προστατεύουν τις γραμμές διανομής από βραχυκυκλώματα.
- **Διακόπτες αυτόματης επαναφοράς:** Λειτουργούν όπως και οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούν δηλαδή ηλεκτρονόμους για την ανίχνευση υπερεντάσεων και προστατεύουν γραμμές διανομής από βραχυκυκλώματα. Πλεονέκτημα τους είναι ότι είναι πιο απλοί σε κατασκευή για αυτό και χρησιμοποιούνται σε εναέρια δίκτυα.
- **Ασφάλειες.** Συσκευές οι οποίες λειτουργούν μέσω της τήξης ενός τηκόμενο στοιχείο (χαλκό ή άργυρο) διακόπτοντας έτσι τη ροή ρεύματος στο κύκλωμα στο οποίο τοποθετούνται, όταν αυτό υπερβεί μια ορισμένη τιμή σε καθορισμένο χρόνο.
- **Διακόπτες απομόνωσης:** Χρησιμοποιούνται για να απομονώσουν μέρος του ΔΔΗΕ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και τοποθετούνται στην αρχή μεγάλων διακλαδώσεων γραμμών ΜΤ. Η λειτουργία τους διαφέρει από άλλους διακόπτες που ανιχνεύουν βραχυκύκλωμα αφού οι διακόπτες απομόνωσης δεν διακόπτουν αλλά διεγείρονται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και από τους κύκλους λειτουργίας του διακόπτη ισχύος στην αναχώρηση της γραμμής. Μετράνε με εσωτερικό μηχανισμό, αμέσως μόλις περάσει από αυτούς το ρεύμα βραχυκυκλώματος, τους κύκλους λειτουργίας. Στον τελευταίο κύκλο ανοίγουν, αφού ανοίξει ο διακόπτης ισχύος. Στη συνέχεια ο διακόπτης ισχύος κλείνει και μένει κλειστός ενώ ο διακόπτης απομόνωση μένει ανοικτός. Η επαναφορά τους γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα αφού αποκατασταθεί η βλάβη.

2.4 Εξέλιξη Δικτύων Διανομής

Τα σημερινά δεδομένα στον τομέα της ενέργειας έχουν δημιουργήσει την ανάγκη να εξελιχθεί ο ρόλος των ΔΔΗΕ από παθητικός σε ενεργό[8]. Στόχος αυτής της εξέλιξης είναι να γίνει πιο άμεση και ομαλή η ένταξη μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους στο δίκτυο με τον διαχειριστή του δικτύου διανομής να μπορεί να παίρνει αποφάσεις και να διαχειρίζεται τις μονάδες αυτές. Σημαντικό κομμάτι για να επιτύχει η εξέλιξη των ΔΔΗΕ είναι να αναβαθμιστεί και να αναθεωρηθεί ο θεσμός του διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Ακόμα πρέπει να εξεταστεί και να εξελιχθεί και ο τρόπος ανάπτυξης και τοποθέτησης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με σκοπό να εκμεταλλευτούμε στα μέγιστα τις δυνατότητες τους [10].

2.4.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Ως διεσπαρμένη παραγωγή ορίζουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα. Η εγκατεστημένη ισχύς μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να κυμαίνεται από μερικά kW έως μερικές δεκάδες MW. Κύριοι λόγοι για τη συνεχή αύξηση της διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο είναι η απελευθέρωση της αγοράς αλλά και οι παγκόσμιες περιβαλλοντικές ανησυχίες που οδήγησαν σε συμφωνίες μεταξύ των χωρών που στόχο έχουν τη μείωση της εκπομπής ρύπων. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συναντάμε στο δίκτυο είναι κυρίως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), οι κυριότερες τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής περιγράφονται πιο κάτω[5]:

- **Συστήματα Ανεμογεννητριών:** Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με την απορρόφηση κινητικής ενέργειας από τον άνεμο. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την τοποθέτηση του δρομέα τους σε κατακόρυφου άξονα και σε οριζόντιου άξονα που είναι και η πιο διαδεδομένη μορφή. Οι ανεμογεννήτριες έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες και είναι από τις βασικές μορφές ΑΠΕ που συναντάμε στο δίκτυο. Ο παράγοντας που περιορίζει άμεσα την ανάπτυξη των συστημάτων ανεμογεννητριών είναι η άμεση εξάρτηση της απόδοσης τους από τον άνεμο, αυτό περιορίζει τα υποψήφια σημεία που μπορούν να τοποθετηθούν [11].
- **Συστήματα Φωτοβολταϊκών:** Τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και μετατρέποντας την σε ηλεκτρική. Είναι κατασκευασμένα από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο (Si), και είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ που συναντάμε στο δίκτυο. Λόγω του χαμηλού κόστους και της μερικής χορήγησης του κόστους αυτού από εθνικά περιβαλλοντικά προγράμματα έχουμε πολλές οικιακές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- **Υδροηλεκτρικοί σταθμοί:** Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τη μηχανική ενέργεια του νερού και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια υδροστρόβιλων. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται αποθηκευμένες ποσότητες νερού που βρίσκονται σε υψόμετρο και μέσα από υδατόπτωση ενεργοποιούν τους υδροστρόβιλους που διαθέτουν. Δεν συναντάμε πολλούς σταθμούς αυτού του είδους στο δίκτυο λόγω του μεγάλου κόστους που χρειάζεται για την κατασκευή χώρων αποθήκευσης του νερού αλλά και την περιβαλλοντική επίπτωση που μπορεί να έχουν στην περιοχή κατασκευής τους. Μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η ετοιμότητα να τεθούν σε λειτουργία εφόσον τους ζητηθεί αλλά και η ευκολία στον προγραμματισμό τους αφού γνωρίζουμε τις αποθηκευμένες ποσότητες νερού.
- **Μονάδες βιομάζας:** Είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν καύσιμα βιομάζας ως καύσιμο υλικό. Αν και προκαλούν εκπομπή ρύπων θεωρούνται ως ΑΠΕ, διότι η ποσότητα της βιομάζας που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποκαθίσταται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

- **Γεννήτριες Ντιζελ:** Μέσω της καύσης πετρελαίου μια μηχανή εσωτερικής καύσης κινεί τον δρομέα γεννήτριας με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται σαν εφεδρεία σε μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.
- **Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φυσικού αερίου:** Το φυσικό αέριο αποτελεί την “καθαρότερη” πηγή ενέργειας από το σύνολο των συμβατικών καυσίμων. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φυσικό αέριο αποτελούν τη βιώσιμη εξέλιξη των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως οι λιγνιτικές. Οι μονάδες αυτές έχουν έναν ή περισσότερους αεριοστρόβιλους οι οποίοι κινούν τον δρομέα γεννήτριας με αποτέλεσμα η χημική ενέργεια των καυσίμων να μετατρέπεται σε κινητική και τέλος σε ηλεκτρική.
- **Συστήματα Μπαταριών:** Τα συστήματα μπαταριών περιλαμβάνουν μεγάλες μπαταρίες , οικιακές μπαταρίες ,ηλεκτρικά αυτοκίνητα κ.α. Συνδέοντας τα συστήματα αυτά στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν εύκολα να μεταβάλουν το φορτίο τους δίνοντας ή απορροφώντας ενέργεια από το δίκτυο. Τα συστήματα αυτά δεν έχουν διεισδύσει σημαντικά ακόμα στο δίκτυο, αναμένεται όμως να αυξηθούν κατακόρυφα τα επόμενα χρόνια λόγω των νέων πιο οικονομικών τεχνολογιών για κατασκευή μπαταριών. Ένας από τους λόγους της αύξησης τους είναι και η στροφή της αυτοκινητοβιομηχανίας σε πράσινες λύσεις με την κατασκευή ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Αυτό αποτελεί σημαντική ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν αυτά τα συστήματα σαν ΜΔΠ με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του δικτύου. Ήδη έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας [9].

Η παρουσία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο ΔΔΗΕ έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως τη μείωση των απωλειών, τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και της αξιοπιστίας του δικτύου. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής αποτελούν και θα αποτελέσουν μελλοντικά το αντικείμενο έρευνας στο τομέα της ενέργειας. Κάποιοι τομείς της έρευνας αυτής που έχουν είδη εξεταστεί και που αναμένεται να εξεταστούν αναφέρονται στο [10].

2.4.2 Διαχειριστές Δικτύου

Οι διαχειριστές δικτύου είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικοί στόχοι των διαχειριστών είναι να διατηρούν σε υψηλά επίπεδα την ποιότητα ισχύος του δικτύου, να μειώνουν όπου είναι δυνατό το λειτουργικό κόστος προσαρμοσμένοι πάντα στις νέες περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

2.4.2.1 Διαχειριστής Δικτύου Διανομής

Διαχειριστής δικτύου διανομής λέγεται ο θεσμός που είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του ΔΔΗΕ. Τα καθήκοντα του Διαχειριστή ΔΔΗΕ περιλαμβάνουν την ανάπτυξη, συντήρηση και λειτουργία του ΔΔΗΕ. Ο διαχειριστής δικτύου διανομής οφείλει να εκτελεί αυτά τα καθήκοντα διατηρώντας την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του ΔΔΗΕ λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να υπάρξουν. Ο Διαχειριστής του ΔΔΗΕ της Ελλάδος είναι ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας).

2.4.2.2 Διαχειριστής Δικτύου Μεταφοράς

Δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΜΗΕ) ονομάζουμε το δίκτυο που διασύνδεει τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής με το δίκτυο διανομής. Μεταφέρει

μεγάλα μεγέθη ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις και λειτουργεί στα ψηλότερα δυνατά επίπεδα τάσης που υπάρχουν στο δίκτυο, στην υπερυψηλή τάση (ΥΥΤ) και στην ΥΤ, έτσι ώστε να μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς. Διαχειριστής δικτύου μεταφοράς λέγεται ο θεσμός που είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του ΔΜΗΕ. Τα καθήκοντα του Διαχειριστή ΔΜΗΕ περιλαμβάνουν την ανάπτυξη, συντήρηση και λειτουργία του ΔΜΗΕ, καθώς και των διασυνδέσεών του με δίκτυα άλλων χωρών για να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Ο διαχειριστής δικτύου μεταφοράς οφείλει να εκτελεί αυτά τα καθήκοντα διατηρώντας την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του ΔΜΗΕ λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την οικονομική επιβάρυνση του καταναλωτή. Ο Διαχειριστής του ΔΜΗΕ στην Ελλάδα είναι ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε).

2.4.3 Συνεργασία Διαχειριστή Δικτύου Διανομής– Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς

Η συνεχής διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχει δημιουργήσει προκλήσεις για τους διαχειριστές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας παγκόσμια. Τα νέα δεδομένα που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάγκη των χωρών να επιτύχουν τους νέους ενεργειακούς τους στόχους έχει οδηγήσει στην αναθεώρηση της σχέσης μεταξύ των διαχειριστών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Μια πιο αναβαθμισμένη σχέση μεταξύ των διαχειριστών θα βοηθήσει στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων και της ευελιξίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως η παροχή επικουρικών υπηρεσιών, και θα αναβαθμίσει την αξιοπιστία του δικτύου.

Νέα μοντέλα που έχουν μελετηθεί μέχρι τώρα απαιτούν την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών ανάμεσα στους διαχειριστές και την αναβάθμιση του ρόλου του διαχειριστή ΔΔΗΕ δίνοντας του τη δυνατότητα να λειτουργεί σαν πάροχος, χρησιμοποιώντας την ευελιξία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που έχει συνδεδεμένες στο δίκτυο του. Κάποια μοντέλα που έχουν προταθεί εξετάζονται στο [12]. Ο χάρτης ευελιξίας που έχουμε σαν αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας επηρεάζεται άμεσα από τη συνεργασία των διαχειριστών του δικτύου. Συγκεκριμένα απαιτεί την ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα στους διαχειριστές η ακρίβεια των οποίων επηρεάζει την ακρίβεια του χάρτη ευελιξίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της Βέλτιστης Ροής Ισχύος (B.P.I) διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον J. Carpentier το 1962 [13]. Έκτοτε έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας στο τομέα της ενέργειας, με το πρόβλημα να έχει πάρει αρκετές διαφορετικές μορφές και να θεωρείται βασικό κομμάτι για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελεί την εξέλιξη του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου η οποία αποτελούσε κατά κόρον τον τρόπο επιλογής της πιο οικονομικής λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλέον χρησιμοποιούνται παραλλαγές του προβλήματος B.P.I. Σημαντικότερος λόγος της μετάβασης αυτής είναι η δυνατότητα της B.P.I να λαμβάνει υπόψη τα όρια των γραμμών μεταφοράς, που με τα νέα δεδομένα που επικρατούν και τη συνεχή διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, αποτελεί βασικό περιορισμό.

Η B.P.I στοχεύει στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης καθορίζοντας το σημείο λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που εξετάζει. Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση μπορεί να εκφράζει τις απώλειες του συστήματος, το κόστος παραγωγής ή ακόμα και τις εκπομπές ρύπων του συστήματος. Σημαντικό κομμάτι του προβλήματος είναι να καθοριστούν και ορισμένοι περιορισμοί όπως τα όρια των γραμμών, η δυνατότητα παραγωγής των γεννητριών, τα όρια τάσεων κ.α. Όπως διαφαίνεται και πιο πάνω το πρόβλημα της B.P.I μπορεί να πάρει πολλές μορφές και να προσαρμοστεί σε πολλά διαφορετικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τους στόχους που θέλουμε να επιτύχουμε. Στις εξισώσεις (3.1.1)-(3.1.3) δίνεται η μαθηματική αναπαράσταση του γενικού προβλήματος B.P.I.

$$\min F = \sum_i F_i(x) \quad (3.1.1)$$

$$h(x, y) = 0 \quad (3.1.2)$$

$$g(x, y) \geq 0 \quad (3.1.3)$$

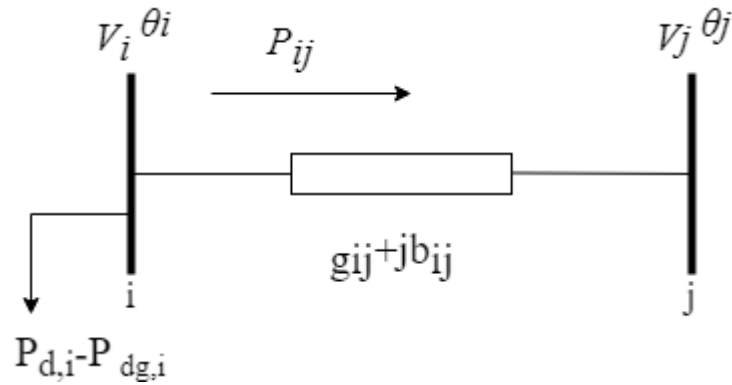
Η εξίσωση (3.1.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος B.P.I και είναι συνάρτηση εξαρτώμενη από την παραγωγή ισχύος, συνήθως για την παραγωγή ισχύος δεν συμπεριλαμβάνουμε την άεργο ισχύ αλλά μόνο την ενεργό ισχύ. Η (3.1.2) εκφράζει τους περιορισμούς ισότητας που θέτουμε και η (3.1.3) τους περιορισμούς ανισοτήτων που θέτουμε. Όπου x είναι το διάνυσμα των παραμέτρων του προβλήματος που πρέπει να καθοριστούν (π.χ. έξοδοι γεννητριών, τάσεις ζυγών) και όπου y το διάνυσμα των παραμέτρων που έχουμε σαν δεδομένα (π.χ. P, Q στους ζυγούς φορτίων).

Το πρόβλημα B.P.I εφαρμοζόταν κυρίως στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αφού αυτά είχαν παραδοσιακά τον έλεγχο της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάγκη για εξέλιξη των ΔΔΗΕ και αναβάθμιση του ρόλου τους όσο αφορά την παραγωγή οδήγησε στην εφαρμογή του B.P.I και στα ΔΔΗΕ. Στο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των γενικών μοντέλων B.P.I από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν εκδοχές τους στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

3.2 Πίνακας Συμβόλων

Σύνολα	
N_{DES}	Σύνολο κόμβων που έχουμε εγκατεστημένη ΜΔΠ
N_{Lines}	Σύνολο των γραμμών του δικτύου
N_{Nodes}	Σύνολο των κόμβων του δικτύου
$N_{Nodes}(j)$	Σύνολο των απόγονων κόμβων του j
N_{HVS}	Σύνολο των υποσταθμών υψηλής τάσης
Παράμετροι	
C_i	Ωριαίο κόστος παραγωγής μονάδας i
g_{ij}	Ωμική αγωγιμότητα γραμμής $i-j$
b_{ij}	Επαγωγική αγωγιμότητα γραμμής $i-j$
r_{ij}	Ωμική αντίδραση σειράς γραμμής $i-j$
x_{ij}	Επαγωγική αντίδραση σειράς γραμμής $i-j$
z_{ij}	Σύνθετη αντίσταση σειράς γραμμής $i-j$
y_{ij}	Σύνθετη αγωγιμότητα σειράς γραμμής $i-j$
$S_{d,i}$	Μιγαδική ισχύς φορτίου στον κόμβο i
$P_{d,i}$	Ενεργός ισχύς φορτίου στον κόμβο i
$Q_{d,i}$	Άεργος ισχύς φορτίου στον κόμβο i
$S_{dg,i}^{max}$	Μέγιστη δυνατότητα παραγωγής μιγαδικής ισχύος της ΜΔΠ στο κόμβο i
$P_{dg,i}^{max}$	Μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος της ΜΔΠ στο κόμβο i
$P_{dg,i}^{min}$	Ελάχιστη δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος της ΜΔΠ στο κόμβο i
$Q_{dg,i}^{max}$	Μέγιστη δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος της ΜΔΠ στο κόμβο i
$Q_{dg,i}^{min}$	Ελάχιστη δυνατότητα παραγωγής άεργου ισχύος της ΜΔΠ στο κόμβο i
S_{ij}^{max}	Ικανότητα (μέγιστη φαινόμενη ισχύς) της γραμμής $i-j$.

P_{ij}^{max}	Ικανότητα (μέγιστη ενεργός ισχύς) της γραμμής i-j.
Q_{ij}^{max}	Ικανότητα (μέγιστη άεργος ισχύς) της γραμμής i-j.
V_{max}	Άνω όριο τάσης για όλους τους κόμβους
V_{min}	Κάτω όριο τάσης για όλους τους κόμβους
Μεταβλητές	
$S_{dg,i}$	Μιγαδική ισχύς ΜΔΠ στον κόμβο i
$P_{dg,i}$	Ενεργός ισχύς ΜΔΠ στον κόμβο i
$Q_{dg,i}$	Άεργος ισχύς ΜΔΠ στον κόμβο i
I_{ij}	Μιγαδικό ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή διανομής i-j.
I_{ij}	Μέτρο του μιγαδικού ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή διανομής i-j.
V_i	Μιγαδικό τάση στον κόμβο i
V_i	Μέτρο τάσης στον κόμβο i.
P_{ij}	Ενεργός ροή ισχύος στη γραμμή i-j.
Q_{ij}	Άεργος ροή ισχύος στη γραμμή i-j.
S_{ij}	Μιγαδική ροή ισχύος στη γραμμή i-j.
P_{HVS}	Ενεργός ισχύς που εγχέεται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ του κόμβου i.
Q_{HVS}	Άεργος ισχύς που εγχέεται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ του κόμβου i.
S_{HVS}	Μιγαδική ισχύς που εγχέεται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ του κόμβου i.
θ_i	Γωνία της τάσης του κόμβου i.



Σχήμα 3.3.1: Δίκτυο 2 κόμβων DC B.P.I

3.3 DC Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Αποτελεί το πιο απλό μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος και είναι μια προσέγγιση του μοντέλου που περιγράφεται στην ενότητα 3.4. Στο Σχήμα 3.3.1 παρουσιάζεται κομμάτι δικτύου N κόμβων όπου απεικονίζονται οι μεταβλητές και οι παράμετροι των εξισώσεων που θα περιγραφούν. Παίρνοντας ως δεδομένες τις εξισώσεις AC ροής ισχύος [14] εφαρμόζουμε τις πιο κάτω γνωστές προσεγγίσεις με σκοπό να γραμματικοποιήσουμε το πρόβλημα:

- Αρχικά θέτουμε το μέτρο της τάσης σε όλους τους κόμβους ίσο με 1.0 α.μ .
- Έπειτα θεωρούμε ότι η διαφορά των γωνιών των τάσεων δύο συνδεδεμένων κόμβων είναι πολύ μικρή, οπότε: $\sin \theta_{ij} = \theta_{ij}$
- Τέλος θεωρώντας την ωμική αγωγιμότητα σειράς των γραμμών πολύ μικρή την αμελούμε.

Τότε το γενικό πρόβλημα B.P.I που περιγράφεται από τις εξισώσεις (3.1.1)-(3.1.3) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\min C = \sum_i C_i \cdot P_{dg,i} \quad (3.3.1)$$

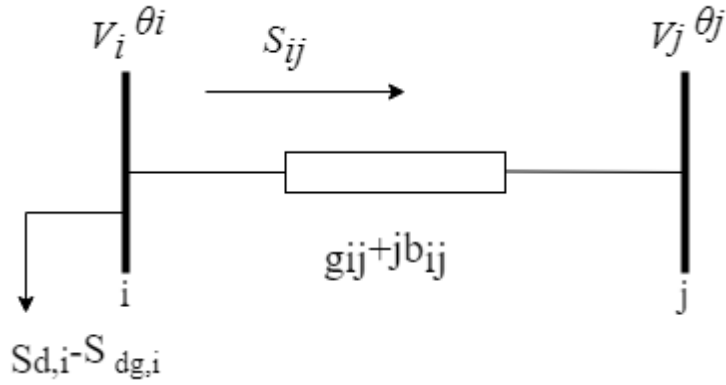
$$P_{d,i} - P_{dg,i} = \sum_{j \in 1:N} P_{ij} \quad (3.3.2)$$

$$P_{ij} = b_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j) \quad (3.3.3)$$

$$-P_{ij}^{max} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{max} \quad (3.3.4)$$

$$P_{dg,i}^{min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{max} \quad (3.3.5)$$

Η εξίσωση (3.3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 3.1, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να αναπτυχθεί με βάση τις απώλειες του συστήματος, το κόστος παραγωγής ,τις εκπομπές ρύπων του συστήματος κ.α. Το πιο συνηθισμένο μοντέλο της αντικειμενικής συνάρτησης αφορά το κόστος παραγωγής. Διαμορφώνοντας την ισότητα στην εξίσωση (3.3.2) εξασφαλίζουμε το



Σχήμα 3.4.1: Δίκτυο 2 κόμβων για AC B.P.I

ισοζύγιο ενεργού ισχύος στον κόμβο i . Η εξίσωση (3.3.3) εκφράζει τη ροή ενεργού ισχύος στον κλάδο $i-j$ μετά και τις προσεγγίσεις της DC ροής ισχύος. Τέλος οι ανισώσεις των εξισώσεων (3.3.4) και (3.3.5) ικανοποιούν τα όρια ισχύος των ΜΔΠ και των γραμμών μεταφοράς του υπό εξέταση δικτύου. Γενικότερα το μοντέλο DC B.P.I βρίσκει εφαρμογές σε δίκτυα που δεν διαρρέονται από μεγάλα μεγέθη ροών ισχύος ή για να δοθεί μια πρώτη ανάλυση των ροών ισχύος ενός δικτύου. Ειδικότερα για τα ΔΔΗΕ λόγω του μεγάλου λόγου r/x των γραμμών που έχουν το DC B.P.I δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τη σωστή ανάλυση τους.

3.4 AC Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Το πρόβλημα AC B.P.I είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του σημείου λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή οφείλεται στη χρησιμοποίηση των εξισώσεων AC ροής ισχύος στην πληρότητα τους. Αποτελεί τη βάση όλων των μοντέλων βελτιστοποίησης που αφορούν συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 3.4.1 παρουσιάζεται ένα κομμάτι δικτύου N κόμβων όπου απεικονίζονται οι μεταβλητές και οι παράμετροι των εξισώσεων που θα περιγραφούν. Θεωρώντας ως δεδομένες τις εξισώσεις AC ροής ισχύος, ακολουθώντας την προσέγγιση με τα ρεύματα κλάδων για τις ροές ισχύος του κλάδου, το γενικό πρόβλημα B.P.I που περιγράφεται από τις εξισώσεις (3.1.1)-(3.1.3) παίρνει την παρακάτω μορφή [5]:

$$\min C = \sum_i C_i \cdot P_{dg,i} \quad (3.4.1)$$

$$S_{d,i} - S_{dg,i} = \sum_{j \in 1:N} S_{ij} \quad (3.4.2)$$

$$S_{ij} = \mathbf{V}_i \cdot \mathbf{V}_i^* \cdot \mathbf{y}_{ij}^* - V_i \cdot \mathbf{V}_j^* \cdot \mathbf{y}_{ij} \quad (3.4.3)$$

$$-S_{ij}^{max} \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \quad (3.4.4)$$

$$S_{dg,i}^{min} \leq S_{dg,i} \leq S_{dg,i}^{max} \quad (3.4.5)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (3.4.6)$$

Θέλοντας να χωρίσουμε τα πραγματικά από τα φανταστικά μέρη των εξισώσεων (3.4.2)-(3.4.4) και γνωρίζοντας ότι ισχύουν οι ισότητες:

$$\mathbf{V}_i = V_i \cdot e^{j\theta_i} \quad (3.4.7)$$

$$S_{dg,i} = P_{dg,i} + jQ_{dg,i} \quad (3.4.8)$$

$$S_{d,i} = P_{d,i} + jQ_{d,i} \quad (3.4.9)$$

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.4.10)$$

οι εξισώσεις παίρνουν την παρακάτω μορφή με τα μεγέθη στις (3.4.11) και (3.4.12) να εκφράζονται στο α.μ. σύστημα και οι γωνίες σε ακτίνια.:

$$P_{ij} = g_{ij} \cdot V_i^2 - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \sin \theta_{ij} \quad (3.4.11)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} \cdot V_i^2 + b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cos \theta_{ij} - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cdot \sin \theta_{ij} \quad (3.4.12)$$

$$P_{d,i} - P_{dg,i} = \sum_{j \in 1:N} P_{ij} \quad (3.4.13)$$

$$Q_{d,i} - Q_{dg,i} = \sum_{j \in 1:N} Q_{ij} \quad (3.4.14)$$

$$-P_{ij}^{max} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{max} \quad (3.4.15)$$

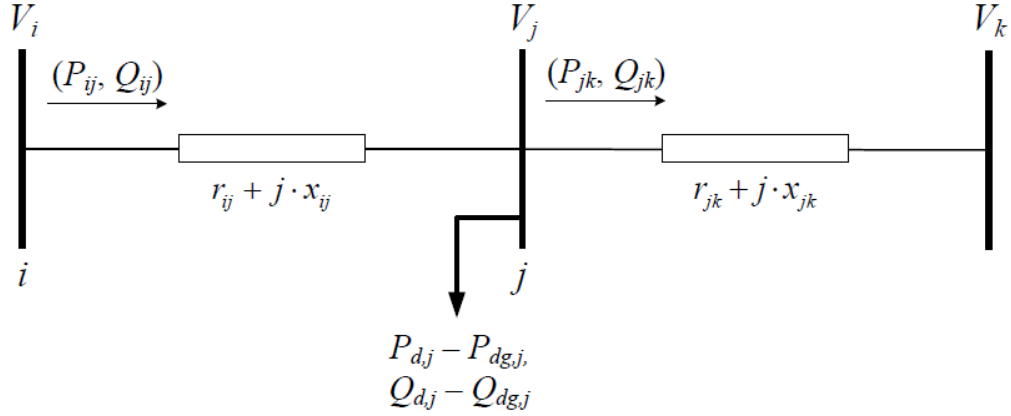
$$-Q_{ij}^{max} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{max} \quad (3.4.16)$$

$$P_{dg,i}^{min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{max} \quad (3.4.17)$$

$$Q_{dg,i}^{min} \leq Q_{dg,i} \leq Q_{dg,i}^{max} \quad (3.4.18)$$

Η (3.4.1) είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Έχει επιλεγεί η εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας με στόχο το ελάχιστο κόστος, καθώς είναι ο συνηθέστερος τύπος αντικειμενικής που συναντάμε για το AC B.P.I. Η (3.4.2) εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό i και αποτελεί τον βασικό περιορισμό ισότητας του προβλήματος. Οι εξισώσεις (3.4.4)-(3.4.6) και (3.4.15)-(3.4.18) είναι περιορισμοί ανισοτήτων που εξασφαλίζουν τα τεχνικά όρια του δικτύου που εξετάζεται.

Τα πλεονεκτήματα του AC B.P.I έναντι του DC B.P.I είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και η δυνατότητα να υπολογίσει τις ροές αέργου ισχύς των γραμμών και τις τάσεις των κόμβων. Μειονέκτημα του AC B.P.I είναι η δυσκολία επίλυσης του προβλήματος λόγω των μη γραμμικών περιορισμών που έχει και πιο συγκεκριμένα της ροής ισχύος με το τετράγωνο της τάσης. Παρόλα αυτά έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες για την επίλυση του AC B.P.I όπως η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα, ο γραμμικός προγραμματισμός, η μέθοδος κλίσης κ.α.



Σχήμα 3.5.1: Μέρος Δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [5].

3.5 Μοντέλα ροών κλάδων φορτίου

Στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγραφή των εξισώσεων του μοντέλου ροών ισχύος κλάδου (DistFlow) καθώς και μια εκδοχή του μοντέλου αυτού (LinDistFlow). Τα μοντέλα ροών κλάδου αποτελούν μια από τις πολλές εκδοχές του προβλήματος AC ροής ισχύος που έχουν εφαρμοστεί πολλές φορές σε προβλήματα βελτιστοποίησης για τη μελέτη ακτινικών δικτύων. Κάποια από τα μοντέλα ροών κλάδου αλλά και αυτά που θα περιγραφούν αναφέρονται στο [5] και στο [15].

3.5.1 DistFlow

Στο Σχήμα 3.5.1 δίνεται κομμάτι από ένα ΔΔΗΕ στο οποίο απεικονίζονται οι μεταβλητές και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των εξισώσεων. Θωρείται ότι ο κόμβος i είναι πρόγονος του κόμβου j και ο κόμβος j πρόγονος του κόμβου k με την κατεύθυνση να μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα αλλά να παραμένει σταθερή. Το DistFlow χρησιμοποιείται για ακτινικά δίκτυα διανομής, για αυτό και κάθε κόμβος έχει μόνο έναν πρόγονο, εκτός από τον κόμβο που συνδέεται ο υποσταθμός τροφοδοσίας που δεν έχει κανέναν πρόγονο. Οι εξισώσεις του DistFlow όπως περιγράφονται στο [5] είναι οι ακόλουθες:

$$P_{ij} - I_{ij}^2 \cdot r_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} P_{jk} = P_{d,j} - P_{dg,j} \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (3.5.1)$$

$$Q_{ij} - I_{ij}^2 \cdot x_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} Q_{jk} = Q_{d,j} - Q_{dg,j} \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (3.5.2)$$

$$P_{HVS,i} = \sum_{j \in N_{Nodes(i)}} P_{ij} \quad \forall i \in N_{HVS} \quad (3.5.3)$$

$$Q_{HVS,i} = \sum_{j \in N_{Nodes(i)}} Q_{ij} \quad \forall i \in N_{HVS} \quad (3.5.4)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2 \cdot (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot I_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in N_{Lines} \quad (3.5.5)$$

$$V_i^2 \cdot I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in N_{Lines} \quad (3.5.6)$$

Η εξίσωση (3.5.1) εκφράζει το ισοζύγιο ενεργού ισχύος στον κόμβο j με τον όρο $I_{ij}^2 \cdot r_{ij}$ να αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενεργού ισχύος που έχουμε κατά μήκος της γραμμής. Η (3.5.2) εκφράζει το ισοζύγιο αέργου ισχύος στον κόμβο j με τον όρο $I_{ij}^2 \cdot x_{ij}$ να εκφράζει τις απώλειες αέργου ισχύος που έχουμε κατά μήκος της γραμμής. Με τις εξισώσεις (3.5.3) και (3.5.4) δίνεται η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από τον υποσταθμό του δικτύου. Με τη βοήθεια της (3.5.5) μπορεί να υπολογιστεί το τετράγωνο του μέτρου της τάσης του κάθε κόμβου και έπειτα με την (3.5.6) ,που γίνεται η συσχέτιση του τετράγωνου του μέτρου της τάσης με το μέτρο της φαινόμενης ισχύος, να υπολογιστεί το μέτρο της φαινόμενης ισχύος που διαρρέει το κλάδο.

3.5.2 LinDistFlow

Αποτελεί ένα προσεγγιστικό μοντέλο του DistFlow. Αποφεύγοντας να χρησιμοποιήσουμε όρους που εκφράζουν τις απώλειες ισχύος των γραμμών μεταφοράς οι εξισώσεις του DistFlow (3.5.1)-(3.5.6) παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$P_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} P_{jk} = P_{d,j} - P_{dg,j} \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (3.5.7)$$

$$Q_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} Q_{jk} = Q_{d,j} - Q_{dg,j} \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (3.5.8)$$

$$P_{HVS,i} = \sum_{j \in N_{Nodes(i)}} P_{ij} \quad \forall i \in N_{HVS} \quad (3.5.9)$$

$$Q_{HVS,i} = \sum_{j \in N_{Nodes(i)}} Q_{ij} \quad \forall i \in N_{HVS} \quad (3.5.10)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2 \cdot (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N_{Lines} \quad (3.5.11)$$

Πλεονέκτημα του LinDistFlow είναι η απλότητα υπολογισμού του. Η μη μοντελοποίηση των απωλειών γραμμής όμως δεν μας δίνει ακριβή αποτελέσματα για αυτό και χρησιμοποιείται συνήθως για να γίνεται μια πρώτη εκτίμηση των ροών ενός δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΥΡΕΣΗ ΧΑΡΤΗ ΕΥΕΛΙΞΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Ευελιξία στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως η δυνατότητα του συστήματος αυτού να μεταβάλλει την παραγωγή και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας του για την αντιμετώπιση προβλημάτων που μπορεί να εμφανιστούν με την παροχή ενέργειας για κατανάλωση ή κάποιου είδους επικουρικής υπηρεσίας. Η διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ευελιξία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εφόσον οι μονάδες αυτές αξιοποιηθούν σωστά από τον διαχειριστή του συστήματος. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός της ευελιξίας του σημείου λειτουργίας στο σημείο σύνδεσης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και η γραφική απεικόνιση του.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μοντελοποιηθεί σε περιβάλλον Matlab με τη χρήση των εργαλείοις Matpower και Yalmip. Συγκεκριμένα το Matpower χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την εισαγωγή των στοιχείων του υπό εξέταση δικτύου, το Yalmip για τη διαμόρφωση του προβλήματος και με τη χρήση του solver Ipopt έγινε ο τελικός υπολογισμός της ευελιξίας.

4.2 Διαμόρφωση του προβλήματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν τα 3 μοντέλα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα οποία είναι εκδοχές των μοντέλων που έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3. Η αντικειμενική συνάρτηση ήταν η ίδια και για τα τρία μοντέλα και περιγράφεται πιο κάτω:

$$\min Z = \alpha \cdot P_{tsodso} + \beta \cdot Q_{tsodso} \quad (4.2.1)$$

Τα P_{tsodso} και Q_{tsodso} αντιπροσωπεύουν την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο διασύνδεσης του δικτύου μεταφοράς και του δικτύου διανομής.

4.2.1 AC Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Οι εξισώσεις (3.4.13) και (3.4.14) που περιγράφουν το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε κόμβο τροποποιούνται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.2.1) και (4.2.2) προσθέτοντας τους όρους $\Delta P_{d,j}$, $\Delta Q_{d,j}$, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την ευελιξία της ενεργού και αέργου ισχύος στα φορτία του εκάστοτε κόμβου, και τους όρους $\Delta P_{dg,j}$, $\Delta Q_{dg,j}$ οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την ευελιξία της ενεργού και αέργου ισχύος στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής του δικτύου.

$$P_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} P_{jk} = (P_{d,j} + \Delta P_{d,j}) - (P_{dg,j} + \Delta P_{dg,j}), \forall j \in N_{Nodes} \quad (4.2.1)$$

$$Q_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} Q_{jk} = (Q_{d,j} + \Delta Q_{d,j}) - (Q_{dg,j} + \Delta Q_{dg,j}), \forall j \in N_{Nodes} \quad (4.2.2)$$

Οι ροές ισχύος στις γραμμές του δικτύου παραμένουν ίδιες με το γενικό πρόβλημα AC B.P.I και δίνονται στη συνέχεια.

$$P_{ij} = g_{ij} \cdot V_i^2 - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \sin \theta_{ij}, \quad \forall (i,j) \in N_{\text{Lines}} \quad (4.2.3)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij} \cdot V_i^2 + b_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \cos \theta_{ij} - g_{ij} \cdot V_i \cdot V_j \sin \theta_{ij}, \quad \forall (i,j) \in N_{\text{Lines}} \quad (4.2.4)$$

Οι περιορισμοί ανισοτήτων (3.4.6), (3.4.17) και (3.4.18) του γενικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν και εδώ ενώ έχουν προστεθεί οι περιορισμοί ανισοτήτων (4.2.8), (4.2.9) που δίνονται πιο κάτω:

$$P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i} \leq P_{dg,i}^{\max}, \quad \forall i \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.5)$$

$$Q_{dg,i}^{\min} \leq Q_{dg,i} \leq Q_{dg,i}^{\max}, \quad \forall i \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.6)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, \quad \forall i \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.7)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq (S_{ij}^{\max})^2, \quad \forall (i,j) \in N_{\text{Lines}} \quad (4.2.8)$$

$$c_{d,i} \cdot \Delta P_{d,i} + c_{dg,i} \cdot \Delta P_{dg,i} \leq C_{\max}, \quad \forall i \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.9)$$

Η εξίσωση (4.2.8) εκφράζει τα όρια ισχύος των γραμμών του δικτύου που εξετάζουμε ενώ η εξίσωση (4.2.9) είναι ένας περιορισμός της επιτρεπόμενης ευελιξίας με βάση το διαθέσιμο κόστος. Τα $c_{d,i}$, $c_{dg,i}$ αποτελούν το κόστος ενεργοποίησης της ευελιξίας των φορτίων και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα, ενώ το C_{\max} είναι το μέγιστο όριο κόστους της συνολικής ευελιξίας.

4.2.2 DistFlow

Από τις εξισώσεις (3.5.1) και (3.5.2) προσθέτοντας τους όρους για την ευελιξία των φορτίων και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καταλήγουμε στις (4.2.10) και (4.2.11) που δίνονται πιο κάτω:

$$P_{ij} - I_{ij}^2 \cdot r_{ij} - \sum_{k \in N_{\text{Nodes}(j)}} P_{jk} = (P_{d,j} + \Delta P_{d,j}) - (P_{dg,j} + \Delta P_{dg,j}), \forall j \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.10)$$

$$Q_{ij} - I_{ij}^2 \cdot x_{ij} - \sum_{k \in N_{\text{Nodes}(j)}} Q_{jk} = (Q_{d,j} + \Delta Q_{d,j}) - (Q_{dg,j} + \Delta Q_{dg,j}), \forall j \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.11)$$

Οι εξισώσεις (3.5.5) και (3.5.6) παραμένουν οι ίδιες και δίνονται στη συνέχεια:

$$V_j^2 = V_i^2 - 2 \cdot (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot I_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in N_{\text{Lines}} \quad (4.2.12)$$

$$V_i^2 \cdot I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in N_{\text{Lines}} \quad (4.2.13)$$

Οι περιορισμοί που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιοι με το AC B.P.I οι οποίοι δίνονται στις εξισώσεις (4.2.5), (4.2.6), (4.2.8) και (4.2.9) ενώ ο (4.2.7) που εκφράζει τα όρια της τάσης κάθε κόμβου τροποποιείται έτσι ώστε να διατηρεί τα όρια του τετραγώνου της τάσης.

$$(V_{\min})^2 \leq (V_i)^2 \leq (V_{\max})^2 \quad \forall i \in N_{\text{Nodes}} \quad (4.2.14)$$

4.2.3 LinDistFlow

Οι εξισώσεις του LinDistFlow που έχουν περιγραφεί στις (3.5.7) και (3.5.8) προσθέτοντας τους όρους για την ευελιξία των φορτίων και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$P_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} P_{jk} = (P_{d,j} + \Delta P_{d,j}) - (P_{dg,j} + \Delta P_{dg,j}), \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (4.2.10)$$

$$Q_{ij} - \sum_{k \in N_{Nodes(j)}} Q_{jk} = (Q_{d,j} + \Delta Q_{d,j}) - (Q_{dg,j} + \Delta Q_{dg,j}), \quad \forall j \in N_{Nodes} \quad (4.2.11)$$

Η εξίσωση (3.5.11) παραμένει η ίδια:

$$V_j^2 = V_i^2 - 2 \cdot (P_{ij} \cdot r_{ij} + Q_{ij} \cdot x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N_{Lines} \quad (4.2.12)$$

Επίσης χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί των εξισώσεων (4.2.5),(4.2.6),(4.2.8) και (4.2.14).

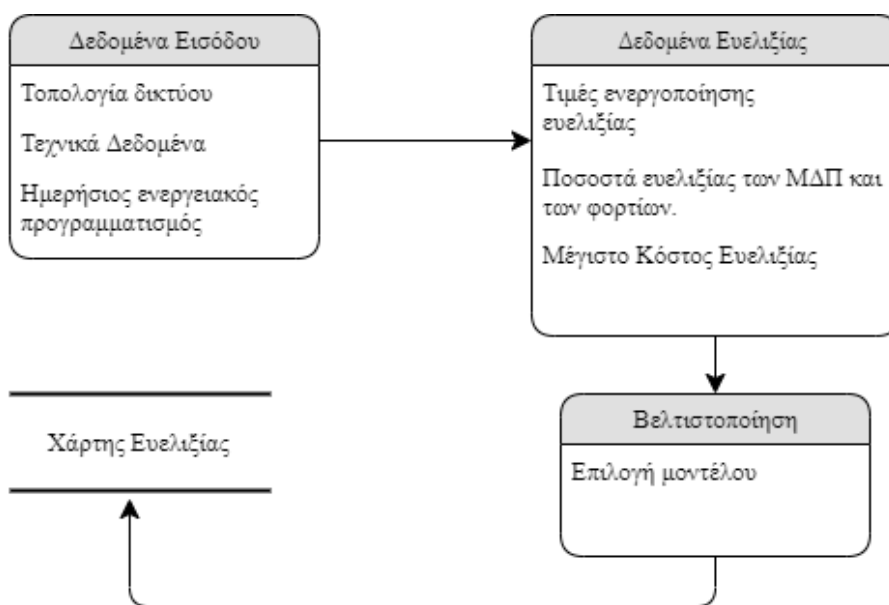
4.3 Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του χάρτη ευελιξίας. Στο Σχήμα 4.3.1 δίνεται το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

4.3.1 Δεδομένα

4.3.1.1 Δεδομένα Εισόδου

Στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας χρειάστηκαν σαν δεδομένα η τοπολογία του υπό εξέταση δικτύου, τα τεχνικά δεδομένα του δικτύου και ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός για τις μονάδες παραγωγής που είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο. Η τοπολογία του δικτύου αφορά τους κόμβους του δικτύου ,τις ζεύξεις μεταξύ τους αλλά



Σχήμα 4.3.1: Διάγραμμα ροής δεδομένων μεθοδολογίας

και τη σύνθετη αντίσταση των γραμμών. Η τοπολογία μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια του Matpower. Τα τεχνικά δεδομένα αφορούν την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του δικτύου και την κατάσταση ετοιμότητας στην οποία βρίσκονται, αν είναι δηλαδή σε περίοδο συντήρησης ή βλάβης. Επίσης στα τεχνικά δεδομένα του δικτύου συμπεριλαμβάνεται και η μέγιστη δυνατότητα ισχύος των γραμμών. Ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός είναι η παραγωγή που έχει καθοριστεί από τον διαχειριστή του δικτύου διανομής για κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και έχει καθοριστεί με τη χρήση του μοντέλου AC B.P.I που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3 βρίσκοντας έτσι και το αρχικό σημείο λειτουργίας του δικτύου .

4.3.1.2 Δεδομένα Ευελιξίας

Τα δεδομένα ευελιξίας συμπεριλαμβάνουν τις τιμές ενεργοποίησης της ευελιξίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ,τη δυνατότητα ευελιξίας τους αλλά και το μέγιστο κόστος ευελιξίας που μπορούμε να έχουμε. Οι τιμές ενεργοποίησης της ευελιξίας των μονάδων και το μέγιστο κόστος καθορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου και μπορεί να μεταβληθούν. Η δυνατότητα ευελιξίας δίνεται σαν ποσοστό επί του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού και δίνεται από τους παραγωγούς. Ακόμα στα δεδομένα ευελιξίας είναι και η ευελιξία των φορτίων και η τιμή ενεργοποίησης τους.

4.3.2 Καθορισμός περιμέτρου χάρτη ευελιξίας

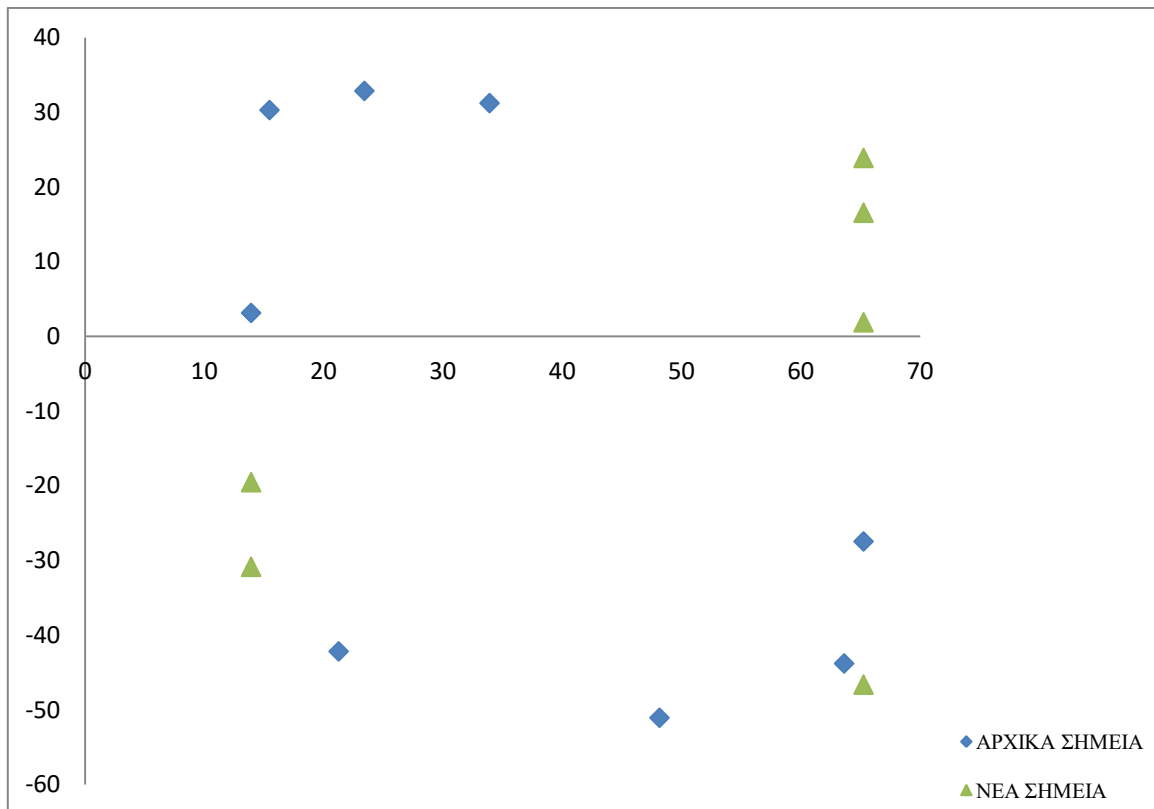
Έχοντας αναλύσει τα δεδομένα εισόδου που χρειάστηκαν στην συνέχεια γίνεται επιλογή ανάμεσα στα 3 μοντέλα που έχουν περιγραφεί στην ενότητα 4.2. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας χρησιμοποιώντας το επιλεγμένο μοντέλο.

4.3.2.1 Εύρεση αρχικών σημείων της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας

Στην ενότητα 4.2 έχουμε καθορίσει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Εναλλάσσοντας τις τιμές των α, β της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2.1) βρίσκουμε τα 8 πρώτα σημεία της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας ως ακολούθως:

- Θέλοντας να βρούμε τις οριακές τιμές της ενεργού ισχύος P_{min} και P_{max} θέτουμε $\alpha=\pm 1$ και $\beta=0$.
- Στη συνέχεια βρίσκουμε τις οριακές τιμές της ενεργού ισχύος Q_{min} και Q_{max} θέτουμε $\alpha=0$ και $\beta=\pm 1$.
- Τέλος θέτοντας $\alpha=\pm 1$ και $\beta=\pm 1$ παίρνουμε ακόμα 4 σημεία της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας.

Έχοντας αυτά τα 8 πρώτα σημεία περνάμε στο επόμενο στάδιο το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια. Στο Σχήμα 4.3.1 απεικονίζονται τα αρχικά σημεία που καθορίζουμε στο αρχικό στάδιο της μεθόδου.



Σχήμα 4.3.1: Απεικόνιση αρχικών και νέων σημείων

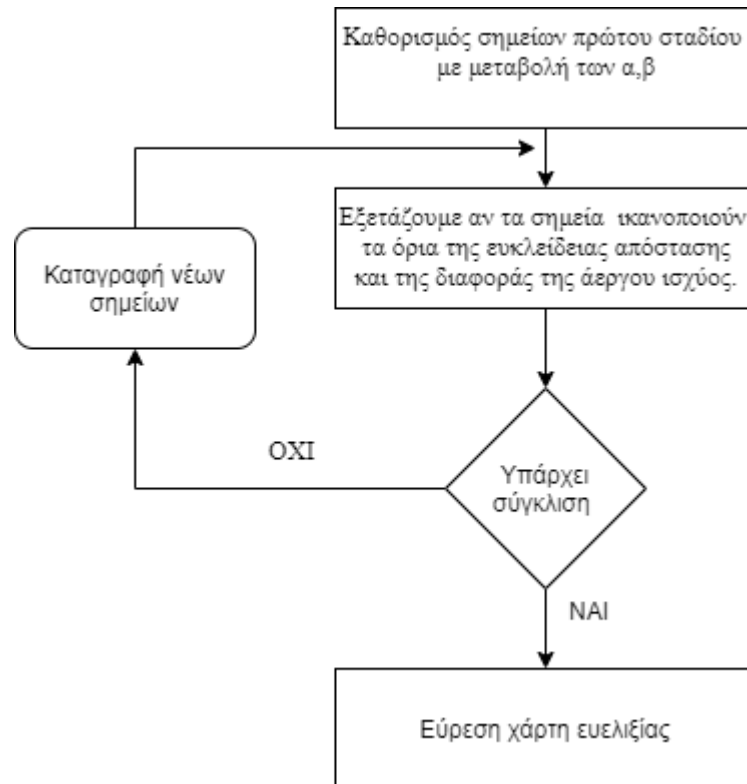
4.3.2.2 Εύρεση Νέων σημείων της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας

Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στο πρώτο στάδιο της μεθόδου καθορίζουν την περίμετρο του χάρτη ευελιξίας που ψάχνουμε. Για την εύρεση περισσότερων σημείων του χάρτη ευελιξίας χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος που περιγράφεται στο [16]. Συγκεκριμένα παίρνοντας ανά δύο συνεχόμενα τα αρχικά σημεία που βρέθηκαν, (P_i, Q_i) και (P_{i+1}, Q_{i+1}) , εξετάζουμε αν αυτά ικανοποιούν τα όρια που περιγράφονται από τις εξισώσεις που φαίνονται πιο κάτω:

$$\left(\frac{P_i - P_{i+1}}{P_{max} - P_{min}}\right)^2 + \left(\frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_{max} - Q_{min}}\right)^2 < \delta^2 \quad (4.3.1)$$

$$\left|\frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_{max} - Q_{min}}\right| < \varepsilon \quad (4.3.2)$$

με την (4.3.1) να αποτελεί την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των δύο σημείων. Εάν τα όρια αυτά ικανοποιούνται θέτουμε $Q_{tsodso} = (Q_i + Q_{i+1}) \times 0.5$ και $\beta=0$. Εάν τα σημεία που χρησιμοποιήσαμε ανήκουν στο δεξιό μέρος του χάρτη τότε θέτουμε $\alpha=-1$ ενώ αν τα σημεία ανήκουν στο αριστερό μέρος του χάρτη θέτουμε $\alpha=+1$. Το δεξί και αριστερό μέρος του χάρτη καθορίζονται από το πρόσημο της μεταβολής της ενεργού ισχύς, δηλαδή αν η μεταβολή της ενεργού ισχύος σε σχέση με το αρχικό σημείο λειτουργίας είναι θετική τότε ανήκει στο δεξί μέρος του χάρτη ενώ αν είναι αρνητική ανήκει το αριστερό. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να σταματήσουν να ικανοποιούνται τα όρια.



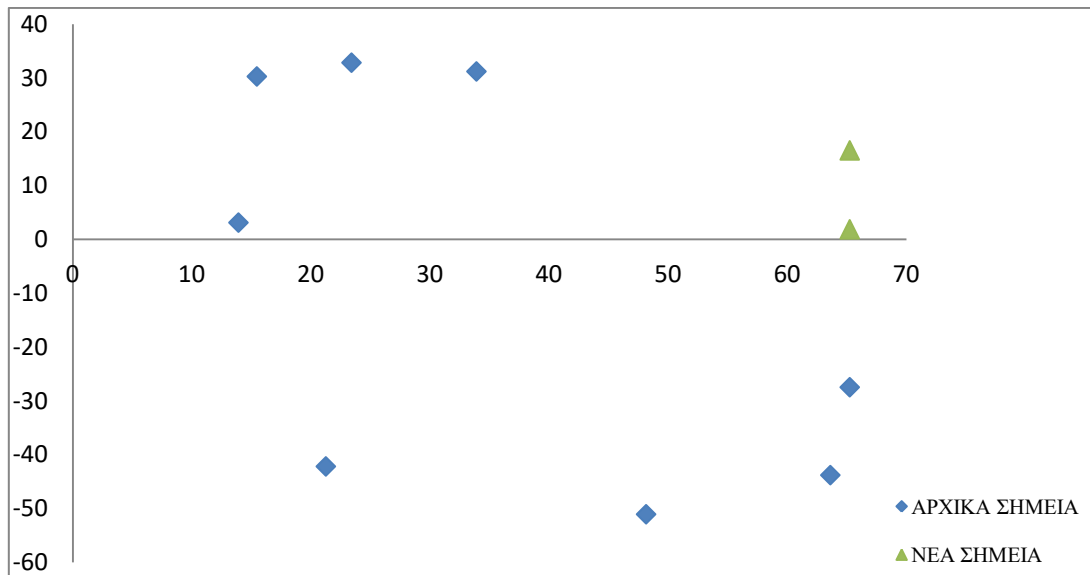
Σχήμα 4.3.2 : Διάγραμμα ροής μεθόδου εύρεσης σημείων του χάρτη ευελιξίας

Στο Σχήμα 4.3.2 δίνεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει και τα δύο στάδια της μεθόδου εύρεσης των σημείων της περιμέτρου του χάρτη ευελιξίας.

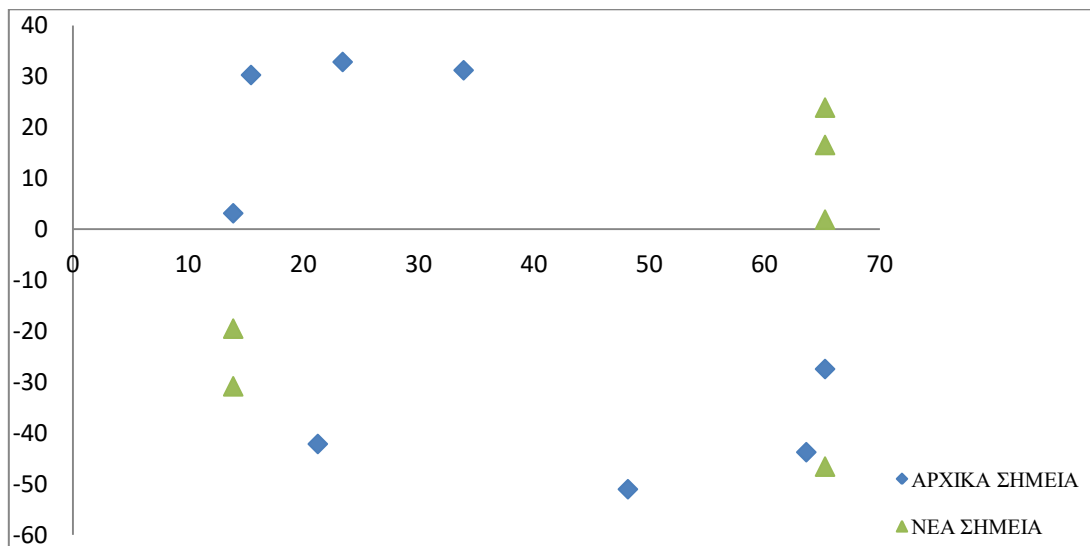
4.3.2.3 Καθορισμός ορίων δ και ϵ

Ο καθορισμός των δ και ϵ που αναφέρονται στις (4.3.1) και (4.3.2) γίνεται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να μην ξοδευτεί υπολογιστικός χρόνος για σημεία που δεν δείχνουν αλλαγές στην περίμετρο του χάρτη ευελιξίας. Μεταβάλλοντας τις τιμές του δ και ϵ σε 0.6 και 0.2 αντίστοιχα η μέθοδος έχει βρει δύο νέα σημεία στο χάρτη ευελιξίας. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.3 είναι φανερό ότι δύο σημεία δεν αρκούν για να καθορίσουμε το χάρτη με ακρίβεια. Στη συνέχεια όταν αλλάξαμε τις τιμές του δ και ϵ σε 0.3 και 0.1 αντίστοιχα η μέθοδος βρίσκει 5 νέα σημεία στο χάρτη ευελιξίας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3.4 ο χάρτης με τη μείωση των ορίων αποκτά καλύτερη μορφή. Τέλος με τις τιμές του δ και ϵ σε 0.15 και 0.05 αντίστοιχα η μέθοδος έχει βρει 11 νέα σημεία στο χάρτη ευελιξίας. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.5. Τα πρόσθετα σημεία που βρήκαμε δεν μεταβάλλουν σημαντικά την περιφέρεια του χάρτη και θεωρούνται αχρείαστα.

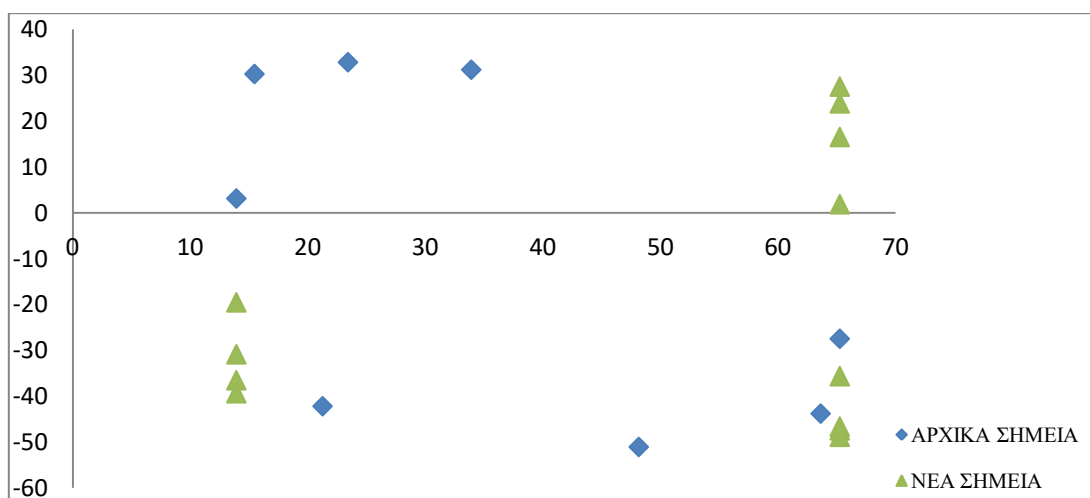
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα με τη μεταβολή του δ και ϵ συμπεραίνουμε ότι υπάρχει ενδεχόμενο να ξοδευτεί αχρείαστα υπολογιστικός χρόνος. Ο χρόνος αυτός για πολύ μεγάλα δίκτυα με περισσότερους περιορισμούς πολλαπλασιάζεται καθυστερώντας σημαντικά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.3.3: Απεικόνιση αρχικών και νέων σημείων για $\delta=0.6$ και $\epsilon=0.2$



Σχήμα 4.3.4: Απεικόνιση αρχικών και νέων σημείων για $\delta=0.3$ και $\epsilon=0.1$



Σχήμα 4.3.5: Απεικόνιση αρχικών και νέων σημείων για $\delta=0.15$ και $\epsilon=0.05$

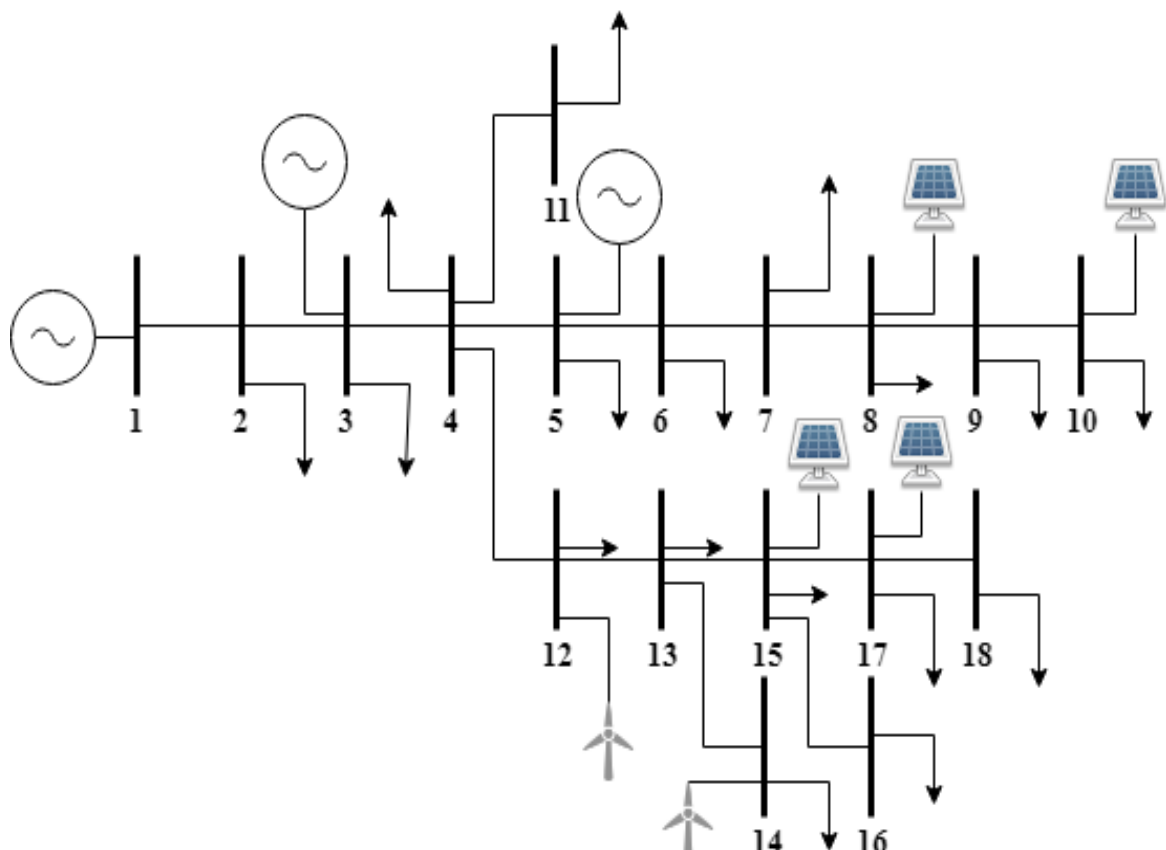
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα μοντέλα βέλτιστης ροής ισχύος που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 εφαρμόστηκαν σε 3 ακτινικά δίκτυα διαφορετικών χαρακτηριστικών. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Όλες οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i5 στα 2.40 GHz και 4 GB RAM. Έχουν δοκιμαστεί δύο σενάρια λειτουργίας για κάθε δίκτυο όπως περιγράφονται στη συνέχεια:

- **Σενάριο 1:** Χωρίς την ύπαρξη περιορισμού κόστους ευελιξίας. Κατά συνέπεια να μην συμπεριληφθεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ο περιορισμός που περιγράφεται από την εξίσωση (4.2.9).
- **Σενάριο 2:** Συμπερίληψη περιορισμού για το κόστος της ευελιξίας.

5.1 Ακτινικό Δίκτυο 18 κόμβων

Χρησιμοποιήθηκε το ακτινικό δίκτυο case18 του MATPOWER [17] το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.1. Τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των φορτίων στους κόμβους δίνονται στον Πίνακα Α.1.1 του Παραρτήματος Α.



Σχήμα 5.1.1: Ακτινικό δίκτυο 18 κόμβων

Πίνακας 5.1.1: Σταθμοί παραγωγής που προστέθηκαν στο δίκτυο 18 κόμβων.

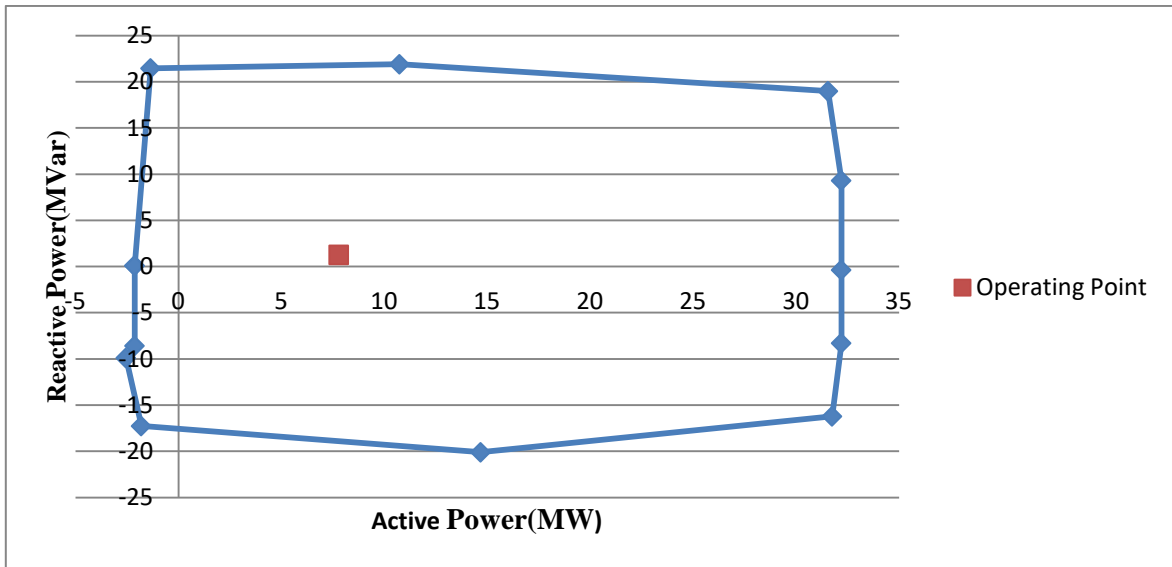
Κόμβος	Τύπος σταθμού παραγωγής	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
3	Θερμικός	5
5	Θερμικός	5
8	Φωτοβολταϊκά	10
10	Φωτοβολταϊκά	5
12	Ανεμογεννητριών	5
14	Ανεμογεννητριών	5
15	Φωτοβολταϊκά	10
17	Φωτοβολταϊκά	5

Στο δίκτυο έχουν προστεθεί οι σταθμοί παραγωγής που αναγράφονται στον Πίνακα 5.1.1. Τα όρια της τάσης στους κόμβους είναι ίσα με $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής της τάσης και σαν σημείο σύνδεσης δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής ορίστηκε ο κόμβος 1. Τα δεδομένα εισόδου δίνονται στον Πίνακα A1.2 του Παραρτήματος Α καθώς επίσης και τα δεδομένα ευελιξίας με τις προσφορές ευελιξίας από τους παραγωγούς. Στον Πίνακα A1.3 δίνονται οι προσφορές ευελιξίας των φορτίων του δικτύου.

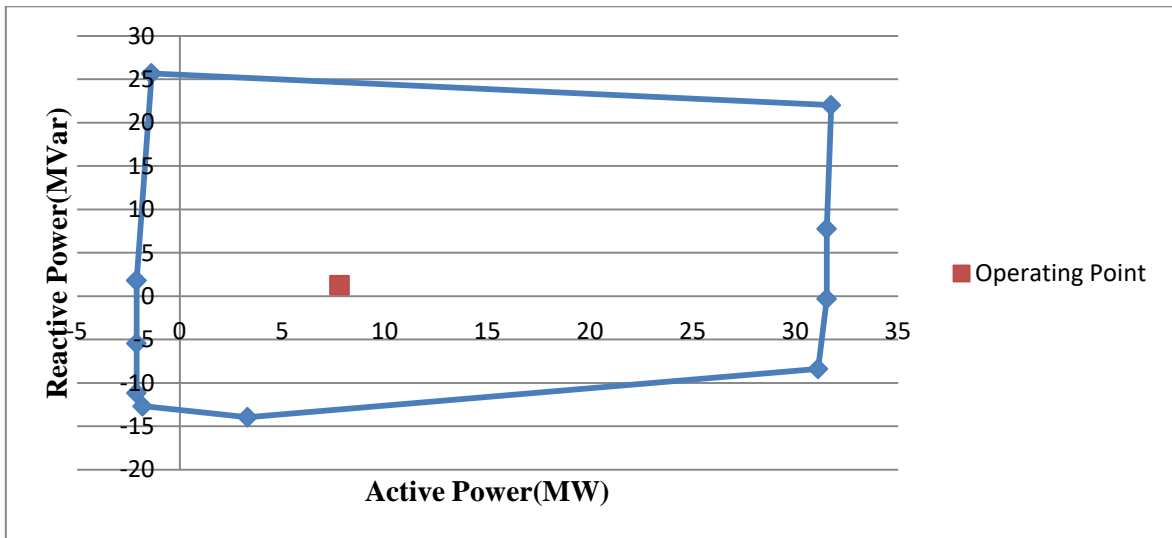
5.1.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1

Σε αυτή την υποενότητα δίνονται τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου για κάθε μοντέλο ξεχωριστά.

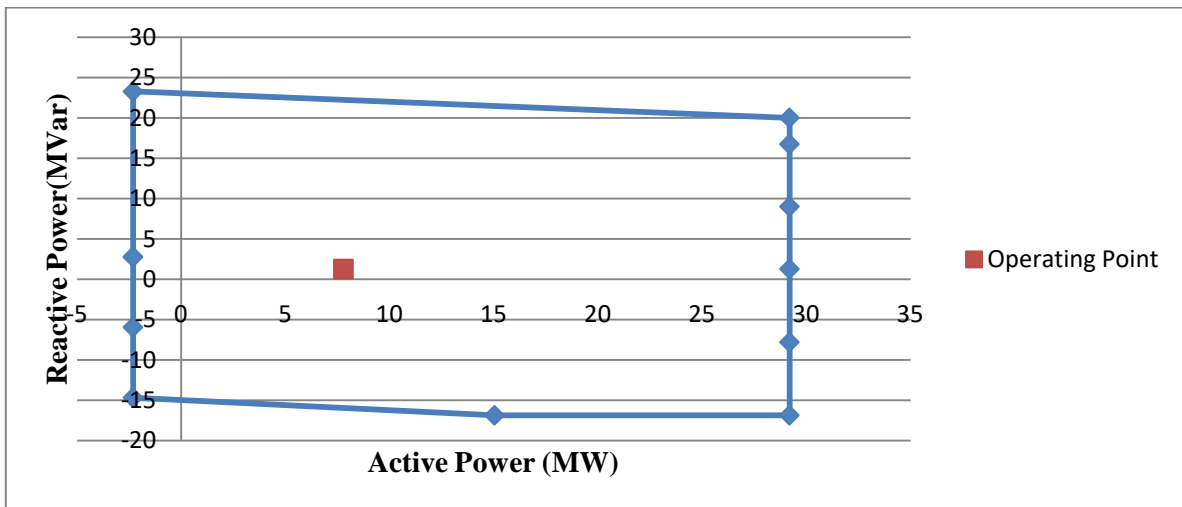
- **AC B.P.I:** Στο Σχήμα 5.1.2 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 18 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow:** Στο Σχήμα 5.1.3 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow:** Στο Σχήμα 5.1.4 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 18 κόμβων για το LinDistFlow.



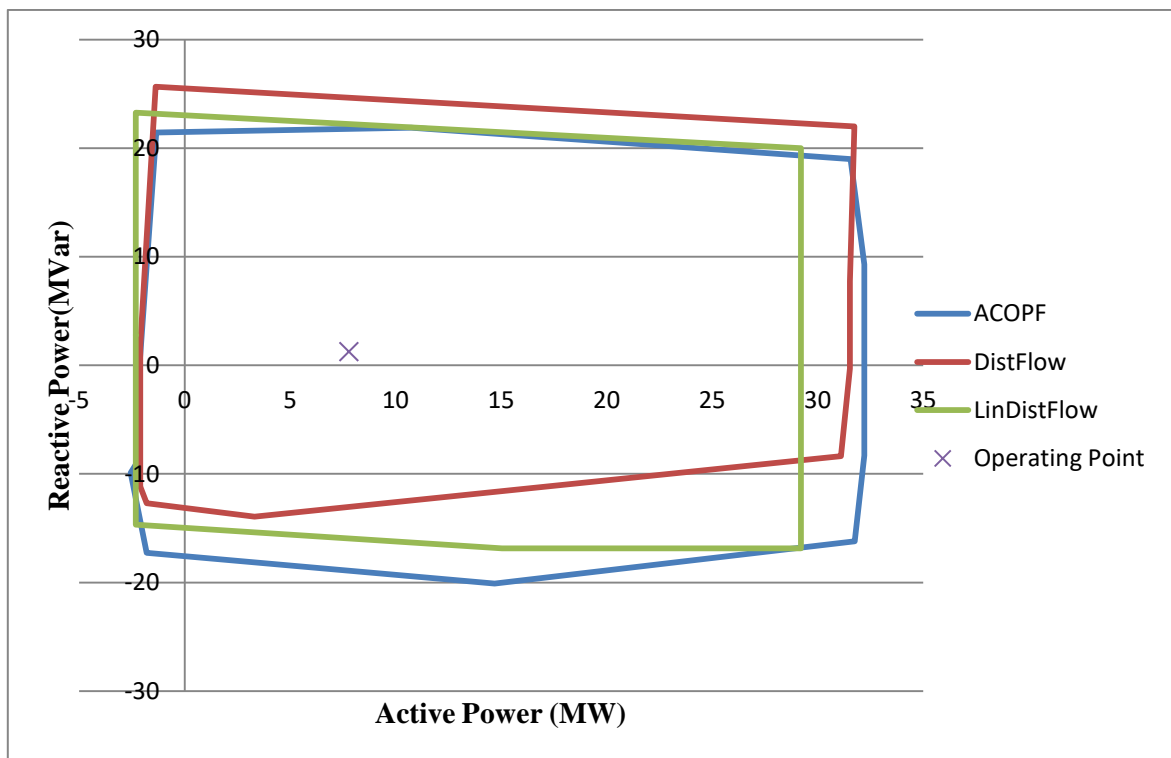
Σχήμα 5.1.2: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.1.3: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.1.3: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το LinDistFlow



Σχήμα 5.1.5: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

5.1.1.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 1

Στο Σχήμα 5.1.5 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα και τα τρία μοντέλα έχουν είναι αρκετά κοντά. Σημαντικό ρόλο για τα αποτελέσματα έχουν οι περιορισμοί για τα όρια της τάσης για κάθε κόμβο. Παρατηρείται ότι το μοντέλο AC B.P.I είχε περισσότερες παραβιάσεις των ορίων του από τα άλλα δύο μοντέλα. Τα μοντέλα DistFlow και LinDistFlow έχουν τις ίδιες παραβιάσεις στους ίδιους κόμβους, συγκεκριμένα για (α, β) ίσα με $(1,1), (-1,-1), (1,-1)$ και $(0,-1)$ έχουμε ίδιες παραβιάσεις στους κόμβους 1,9,10 και 16. Ακόμα για (α, β) ίσα με $(0,1), (-1,1)$ και $(-1,0)$ δεν παρατηρούνται παραβιάσεις των ορίων.

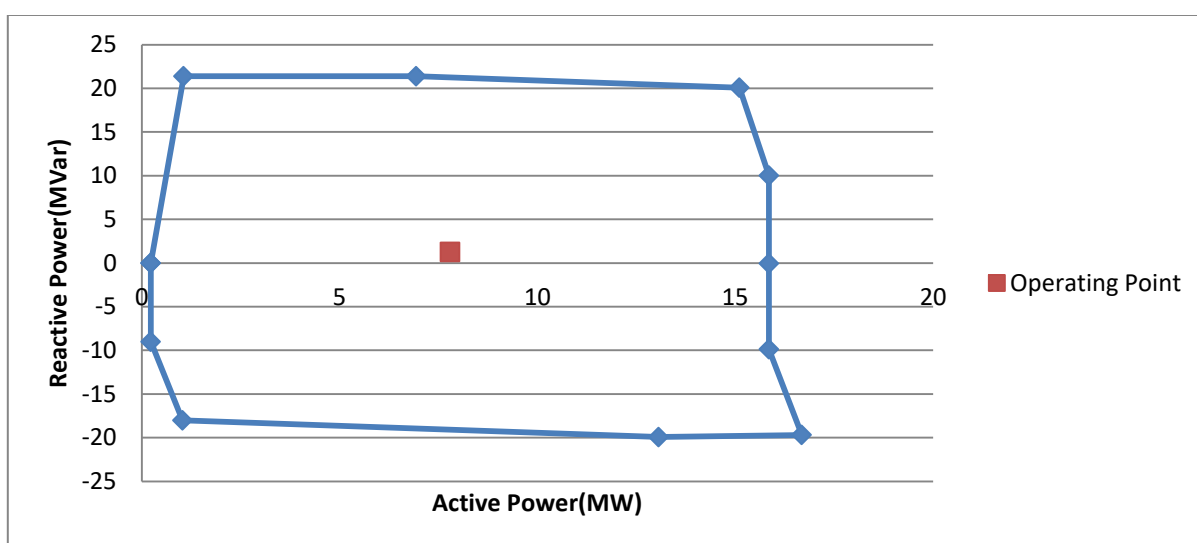
Οι διαφορές που φαίνονται συγκρίνοντας το LinDistFlow με τα άλλα μοντέλα κυρίως όταν το σημείο λειτουργίας κινείται προς τα θετικά οφείλεται στο ότι το LinDistFlow δεν μοντελοποιεί το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς και κατά συνέπεια τις απώλειες των γραμμών. Η μεταβολή του σημείου λειτουργίας προς τα θετικά γίνεται με τη μείωση της χρήσης των ΜΔΠ η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση των απωλειών. Αποτέλεσμα αυτού τα μοντέλα των DistFlow και AC B.P.I να απαιτούν μεγαλύτερη έγχυση ισχύος λόγω των απωλειών στο σημείο διασύνδεσης.

Έχοντας θεωρήσει ότι το μοντέλο AC B.P.I έχει τα πιο ακριβή αποτελέσματα, τα αποτελέσματα του DistFlow είναι καλύτερα από τον LinDistFlow αφού το DistFlow καταφέρνει να υπολογίσει πιο σωστά τα όρια για την ενεργό ισχύ. Τέλος η απόκλιση των μοντέλων AC B.P.I και DistFlow οφείλεται στην εύρεση διαφορετικών σημείων του χάρτη της περιφέρειας από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε αλλά και στον διαφορετικό τρόπο μοντελοποίησης των απωλειών.

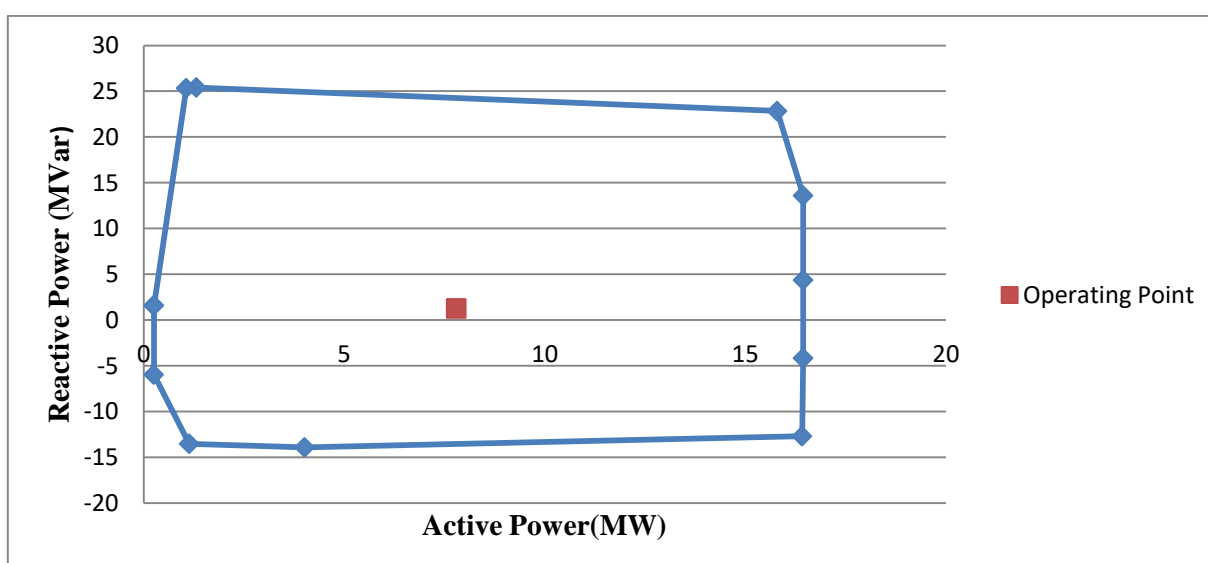
5.1.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2

Προσθέτοντας περιορισμό κόστους ευελιξίας 200€/h έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

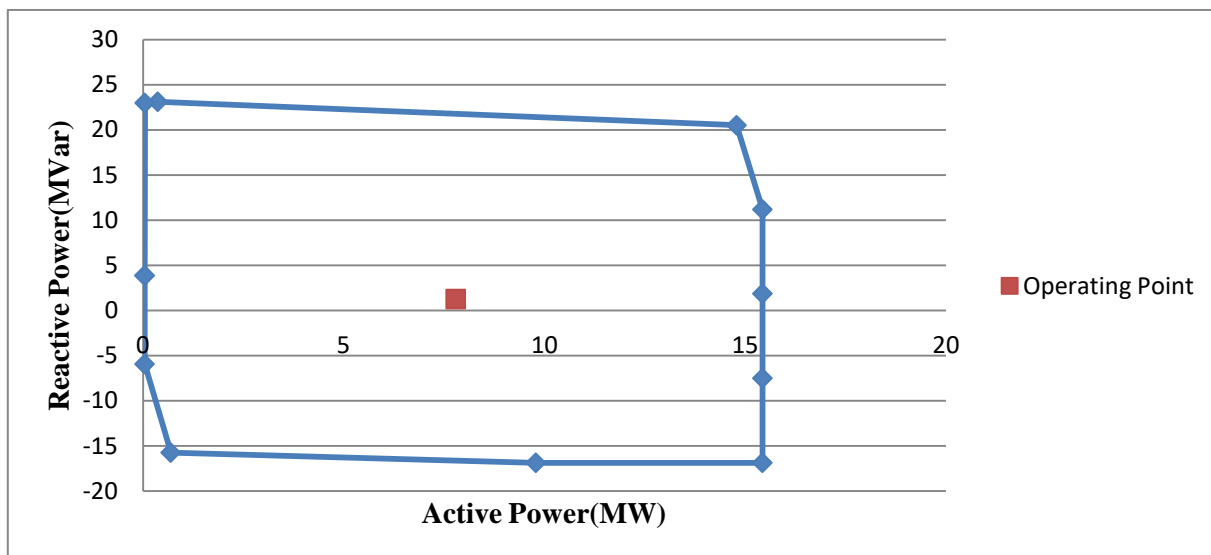
- **AC B.P.I:** Στο Σχήμα 5.1.6 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 18 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow:** Στο Σχήμα 5.1.7 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow:** Στο Σχήμα 5.1.8 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 18 κόμβων για το LinDistFlow .



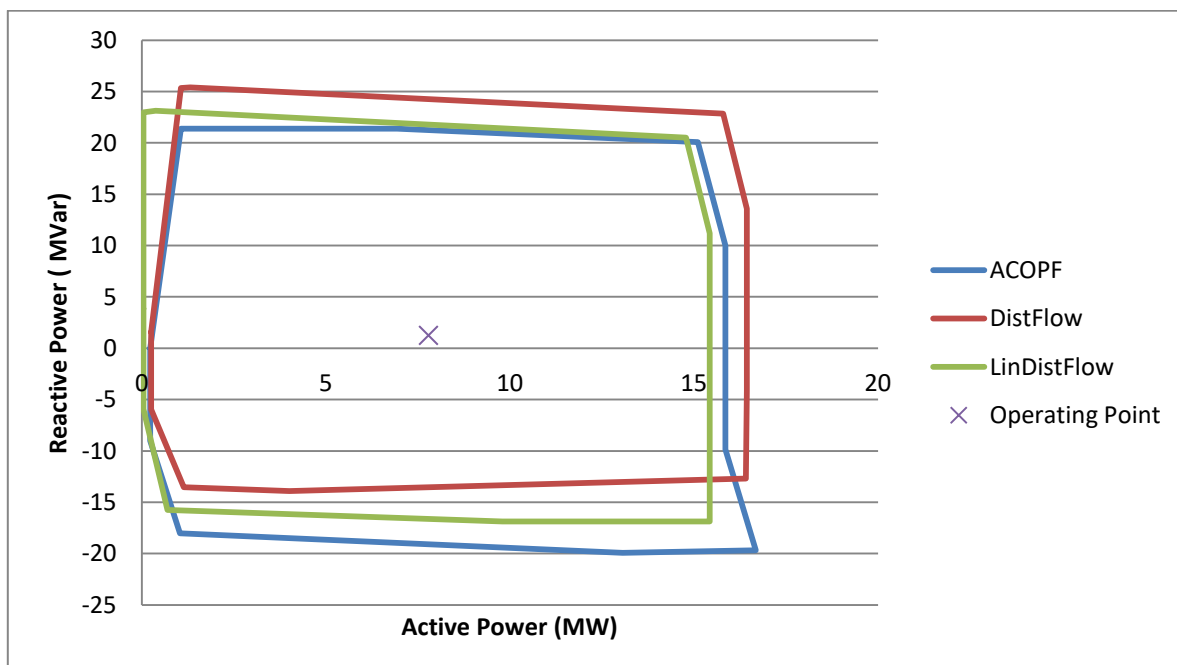
Σχήμα 5.1.6: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.1.7: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.1.8: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων για το LinDistFlow



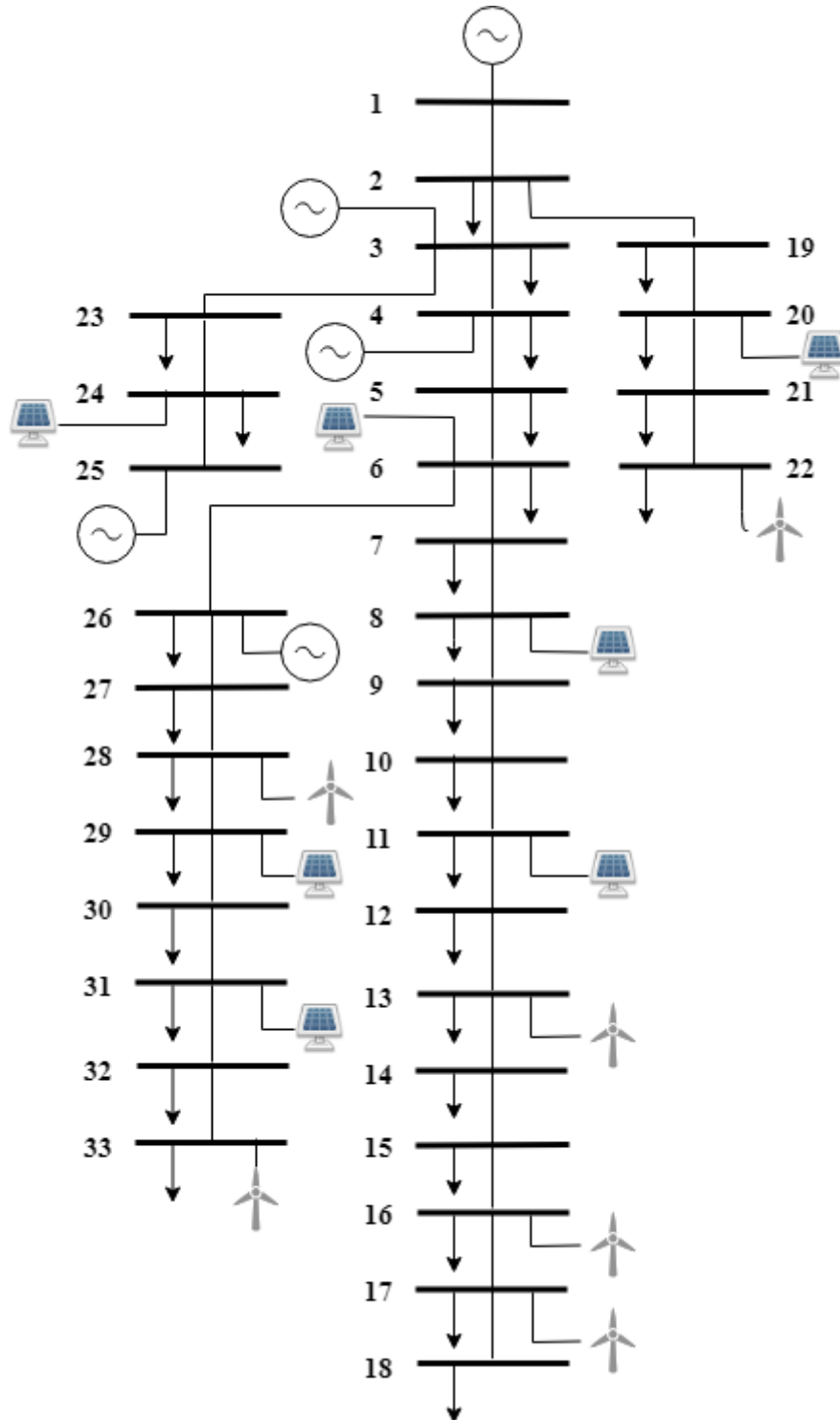
Σχήμα 5.1.9: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 18 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

5.1.2.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 2

Στο Σχήμα 5.1.9 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Οι χάρτες ευελιξίας και για τα 3 μοντέλα έχουν μικρότερο εύρος με τις διαφορές μεταξύ τους να μην σημειώνουν μεγάλες μεταβολές από το σενάριο 1. Παρατηρείται ωστόσο μια μικρή μείωση των διαφορών όσον αφορά την ενεργό ισχύ λόγω του περιορισμού της από τον περιορισμό κόστους.

5.2 Ακτινικό Δίκτυο 33 κόμβων

Χρησιμοποιήθηκε το ακτινικό δίκτυο case33 του MATPOWER [18] το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.1. Τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των φορτίων στους κόμβους δίνονται στο στον Πίνακα Α.2.1 του Παραρτήματος Α.



Σχήμα 5.2.1: Ακτινικό δίκτυο 33 κόμβων

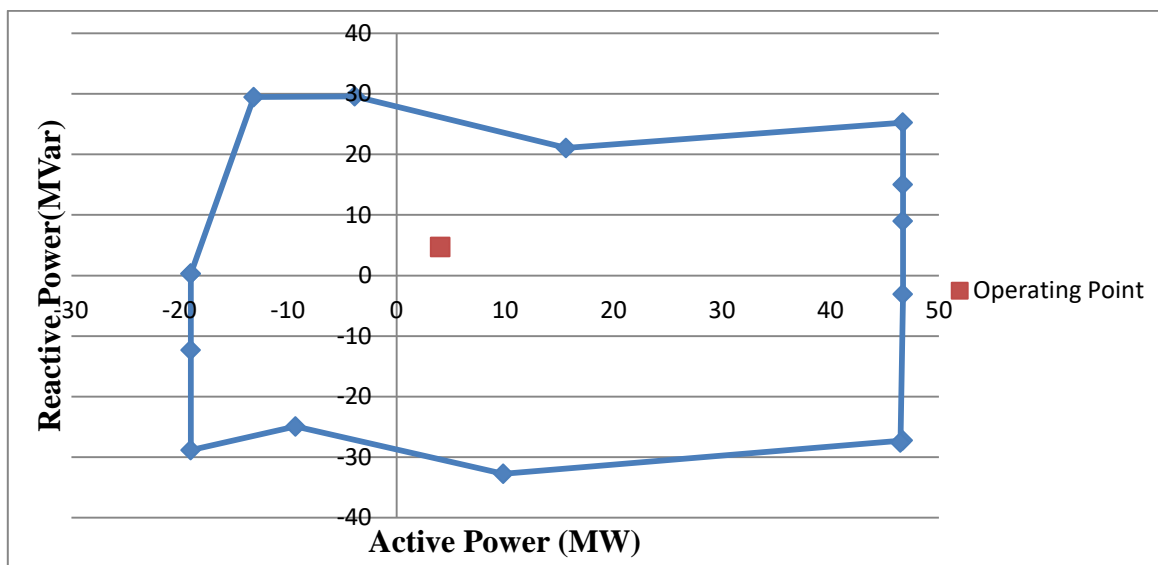
Πίνακας 5.2: Σταθμοί παραγωγής που προστέθηκαν στο δίκτυο 33 κόμβων.

Κόμβος	Τύπος σταθμού παραγωγής	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
3	Θερμικός	5
4	Θερμικός	10
6	Φωτοβολταϊκά	10
8	Φωτοβολταϊκά	5
11	Φωτοβολταϊκά	5
13	Ανεμογεννητριών	10
16	Ανεμογεννητριών	5
17	Ανεμογεννητριών	5
20	Φωτοβολταϊκά	10
22	Ανεμογεννητριών	5
24	Φωτοβολταϊκά	5
25	Θερμικός	10
26	Θερμικός	5
28	Ανεμογεννητριών	10
29	Φωτοβολταϊκά	5
31	Φωτοβολταϊκά	5
33	Ανεμογεννητριών	5

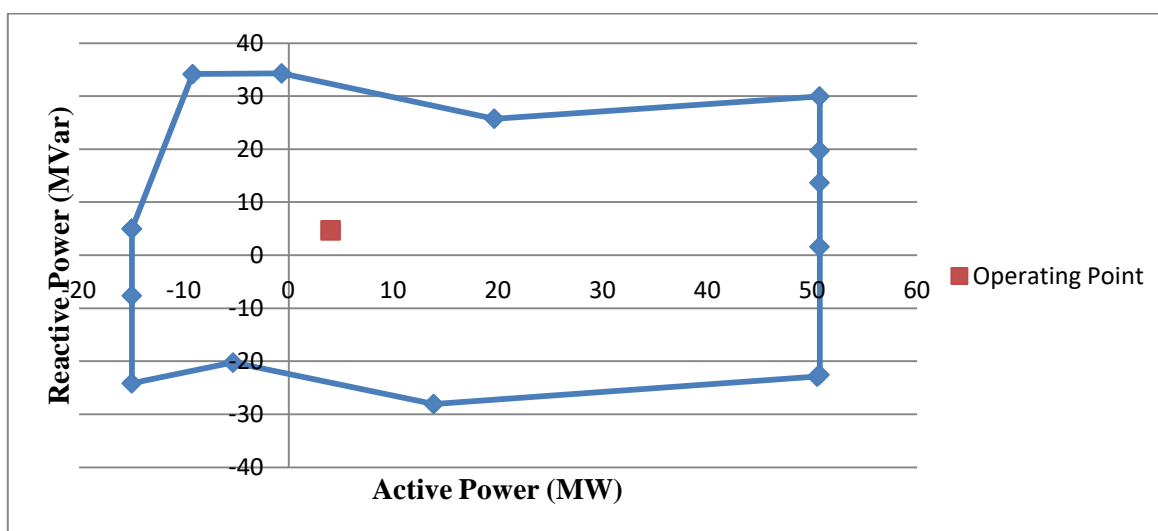
Στο δίκτυο έχουν προστεθεί οι σταθμοί παραγωγής που αναγράφονται στον Πίνακα 5.2. Τα όρια της τάσης στους κόμβους είναι ίσα με $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής της τάσης και σαν σημείο σύνδεσης δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής ορίστηκε ο κόμβος 1. Τα δεδομένα εισόδου δίνονται στον Πίνακα Α.2.1 του Παραρτήματος Α. Επίσης στον Πίνακα Α.2.2 δίνονται τα δεδομένα ευελιξίας και οι προσφορές ευελιξίας από τους παραγωγούς ενώ στον Πίνακα Α.2.3 δίνονται οι προσφορές ευελιξίας των φορτίων του δικτύου.

5.2.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1

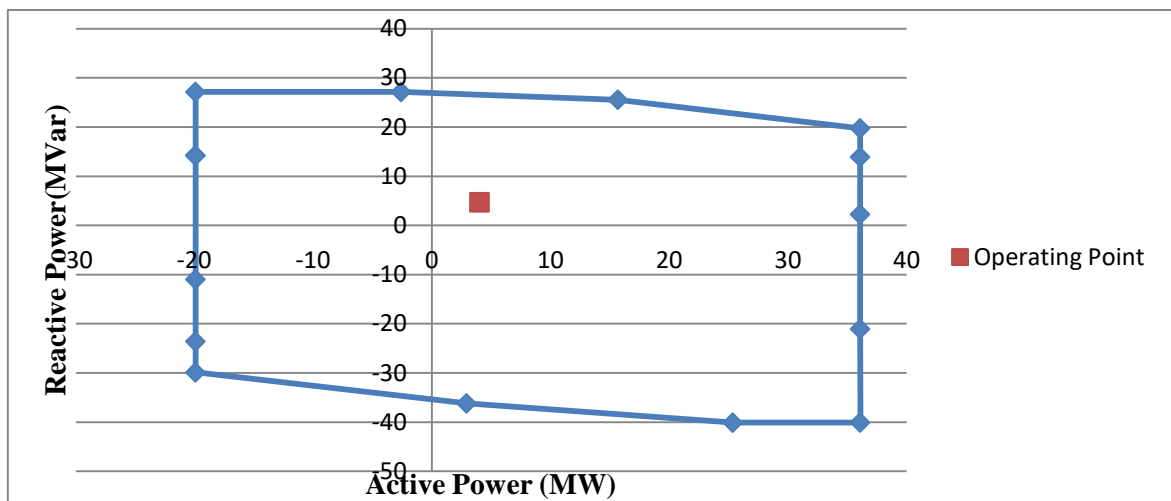
- **AC B.P.I** :Στο Σχήμα 5.2.2 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 33 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow** :Στο Σχήμα 5.2.3 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow** :Στο Σχήμα 5.2.4 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 33 κόμβων για το LinDistFlow.



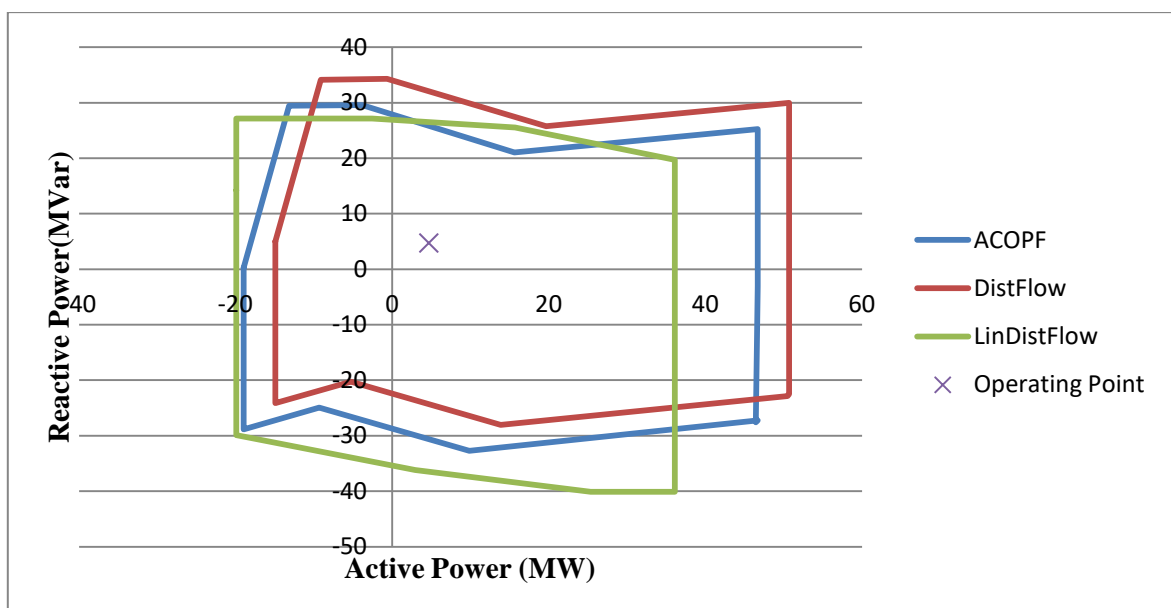
Σχήμα 5.2.2: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.2.3: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.2.4: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το LinDistFlow



Σχήμα 5.2.5: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

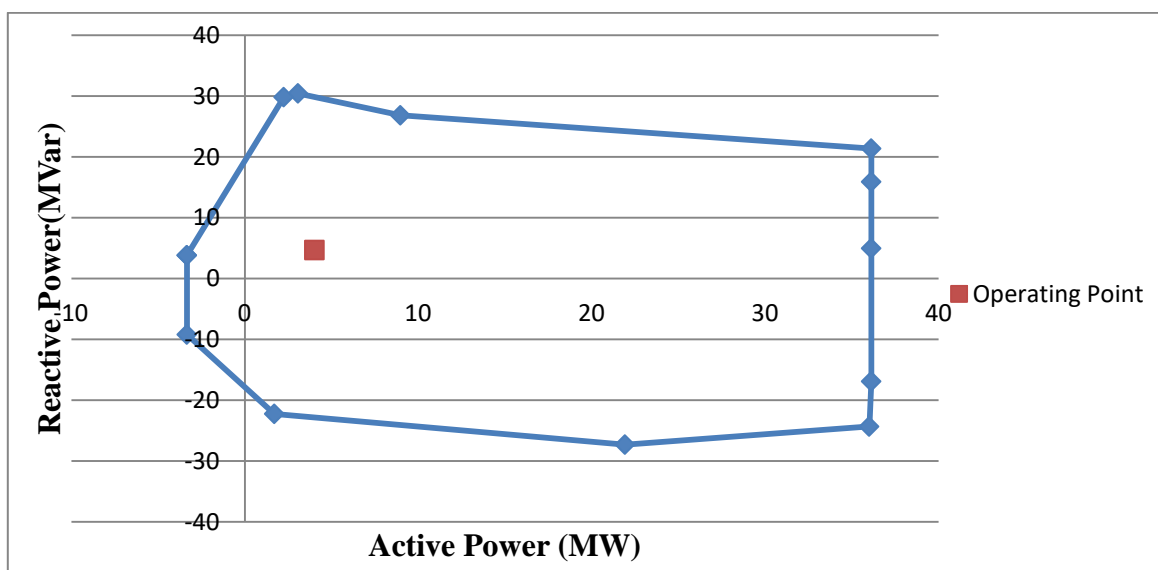
5.2.1.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 1

Στο Σχήμα 5.2.5 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Για το δίκτυο των 33 κόμβων δεν παρατηρείται κάποια συνέπεια των μοντέλων ως προς την παραβίαση των περιορισμών της τάσης όπως παρατηρήθηκε στο δίκτυο των 18 κόμβων. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα έχουν ίδια εξήγηση και ανταποκρίνονται σε αυτά που είχαν αναφερθεί. Λόγο του μεγαλύτερου μεγέθους του δικτύου αλλά και της συνολικά μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος οι διαφορές είναι πιο έντονες. Τα μοντέλα DistFlow και AC B.P.I είναι πιο κοντά ενώ η απόκλιση τους από το LinDistFlow μεγαλώνει. Όπως αναμενόταν με τη μετακίνηση του σημείου λειτουργίας προς τα θετικά το DistFlow και AC B.P.I έχουν μεγαλύτερη απαίτηση ισχύος λόγω των απωλειών που θα έχουν οι γραμμές. Θεωρώντας όπως έχει προαναφερθεί το AC B.P.I το μοντέλο με τα πιο ακριβή αποτελέσματα το DistFlow πετυχαίνει να αναγνωρίσει καλύτερα την περίμετρο του χάρτη από το LinDistFlow.

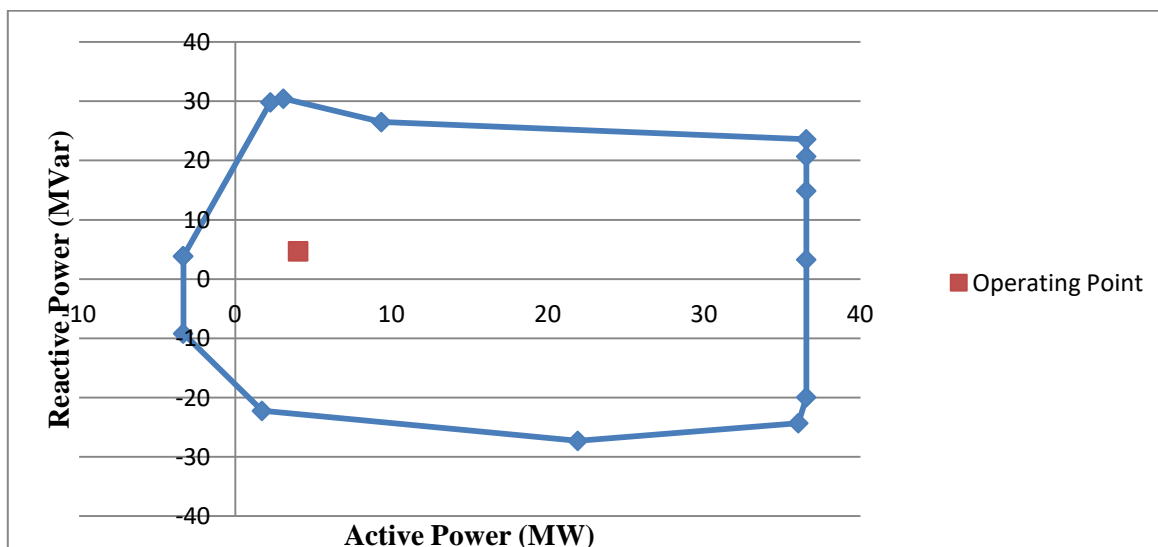
5.2.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2

Προσθέτοντας περιορισμό κόστους ευελιξίας 200€/h έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα

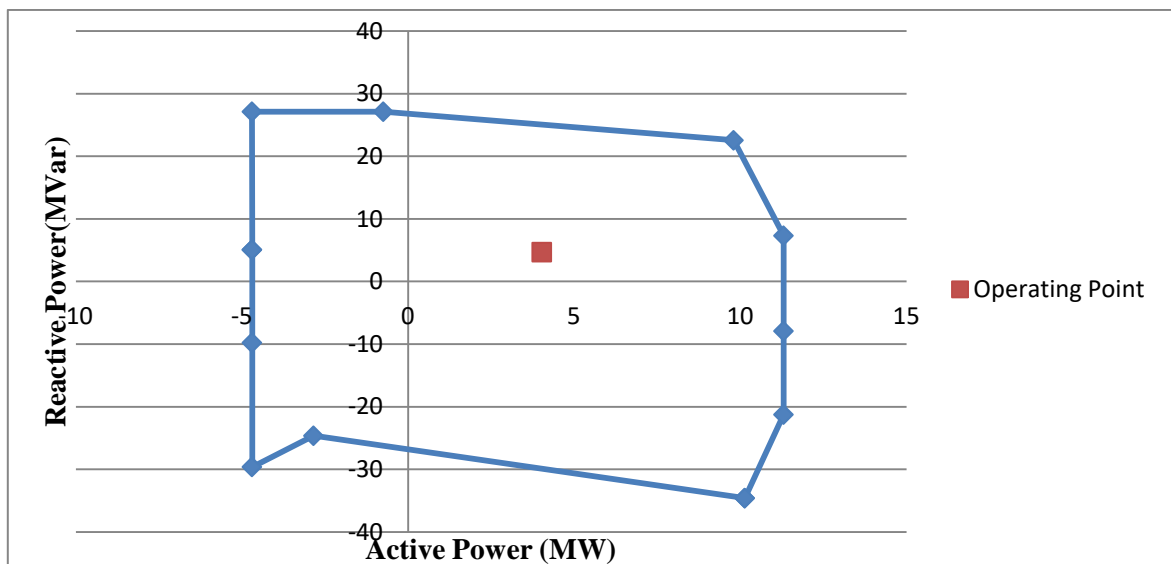
- **AC B.P.I.:** Στο Σχήμα 5.2.6 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 33 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow:** Στο Σχήμα 5.2.7 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow:** Στο Σχήμα 5.2.8 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 33 κόμβων για το LinDistFlow.



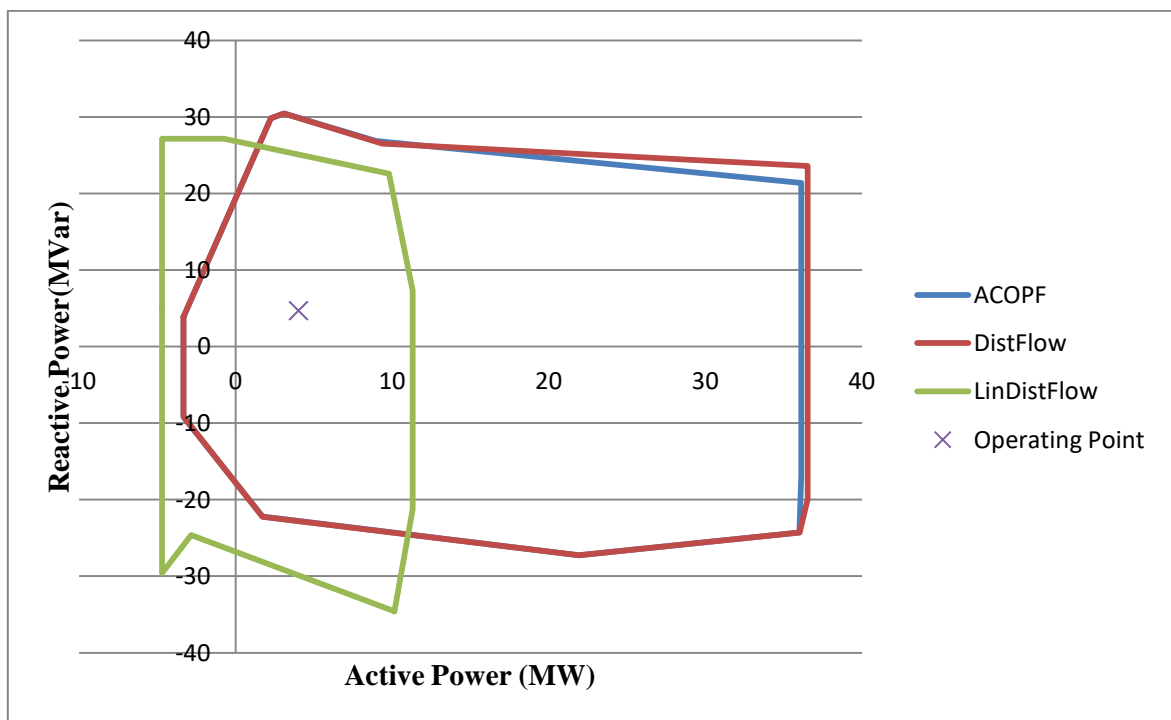
Σχήμα 5.2.6: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.2.7: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.2.8: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων για το LinDistFlow



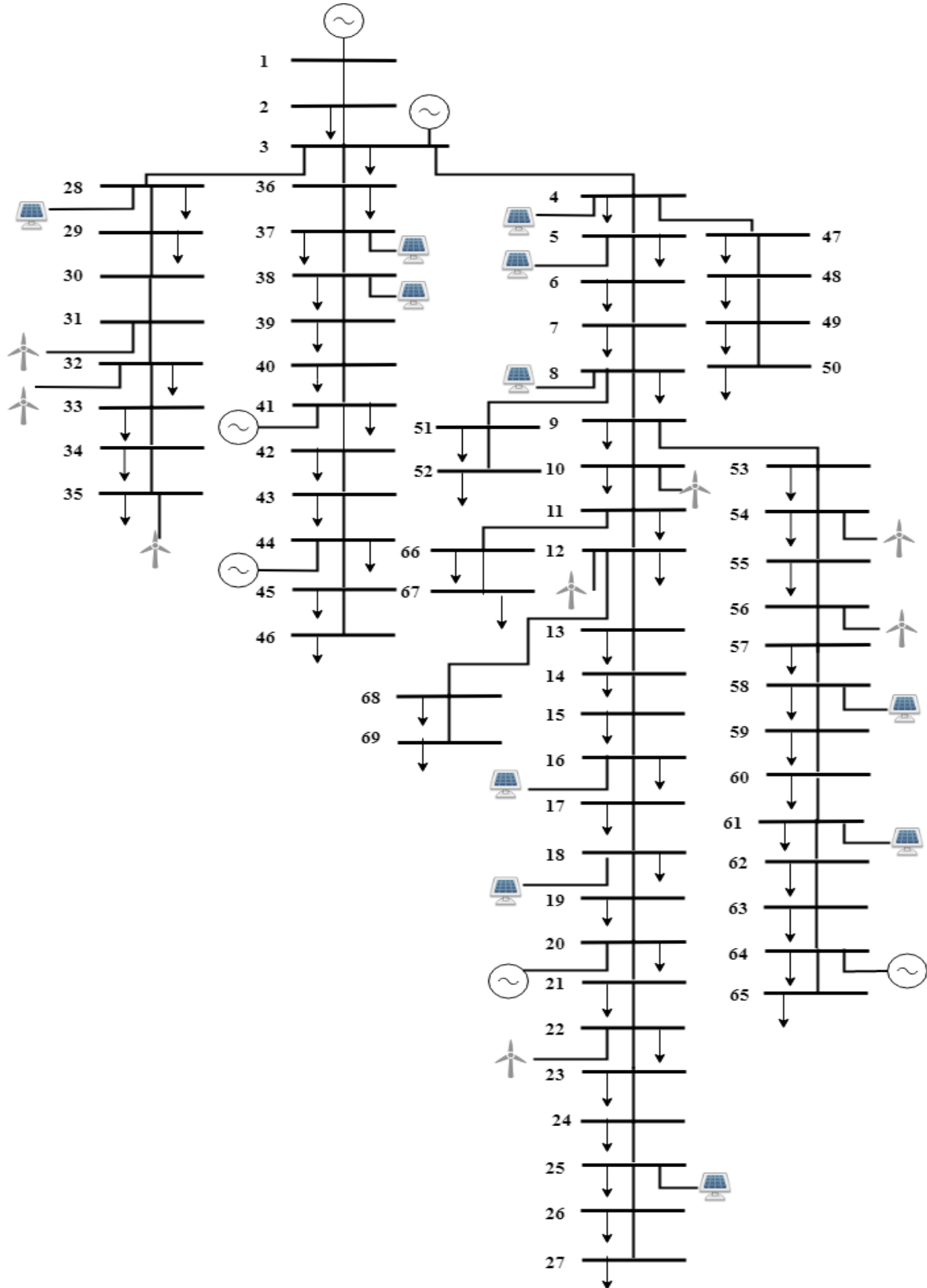
Σχήμα 5.2.9: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 33 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

5.2.2.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 2

Στο Σχήμα 5.2.9 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Με την πρόσθεση του περιορισμού στο κόστος όπως αναμενόταν έχουμε χάρτες με μικρότερο εύρος. Γενικότερα το μοντέλο LinDistFlow έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί περισσότερη ευελιξία λόγω της μη συμπερίληψης των απωλειών γραμμής και άρα του λιγότερου αυστηρού περιορισμού της τάσης. Περιορίζοντας την ευελιξία ενεργού ισχύς καθορίζοντας μέγιστο κόστος τα αποτελέσματα που έχουμε είναι δικαιολογημένα με το LinDistFlow να αποκλίνει σημαντικά στο εύρος ενεργού ισχύος που εντοπίζει. Αντίθετα οι χάρτες ευελιξίας AC B.P.I και DistFlow είναι πάρα πολύ κοντά.

5.3 Ακτινικό Δίκτυο 69 κόμβων

Χρησιμοποιήθηκε το ακτινικό δίκτυο case69 του MATPOWER [19] το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.1. Τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των φορτίων στους κόμβους δίνονται στον Πίνακα Α.3.1 του Παραρτήματος Α.



Σχήμα 5.3.1: Ακτινικό δίκτυο 69 κόμβων

Πίνακας 5.3: Σταθμοί παραγωγής που προστέθηκαν στο δίκτυο 69 κόμβων.

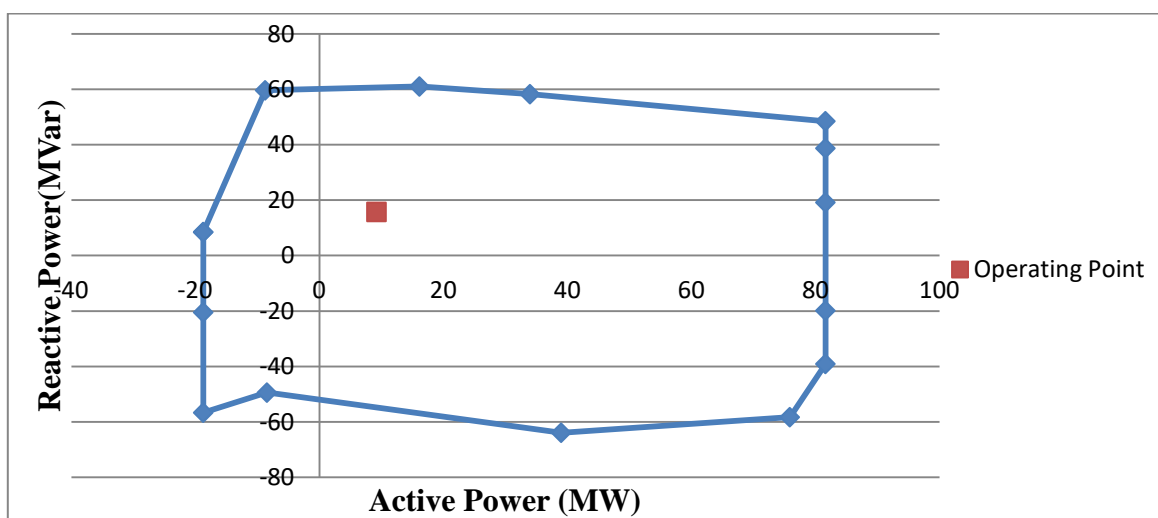
Κόμβος	Τύπος σταθμού παραγωγής	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
3	Θερμικός	5
4	Φωτοβολταϊκά	5
5	Φωτοβολταϊκά	5
8	Φωτοβολταϊκά	5
10	Ανεμογεννητριών	10
12	Ανεμογεννητριών	10
16	Φωτοβολταϊκά	10
18	Φωτοβολταϊκά	5
20	Θερμικός	10
22	Ανεμογεννητριών	5
25	Φωτοβολταϊκά	5
28	Φωτοβολταϊκά	10
31	Ανεμογεννητριών	10
32	Ανεμογεννητριών	5
35	Ανεμογεννητριών	5
37	Φωτοβολταϊκά	10
38	Φωτοβολταϊκά	5
41	Θερμικός	10
44	Θερμικός	10
54	Ανεμογεννητριών	5
56	Ανεμογεννητριών	10
58	Φωτοβολταϊκά	5
61	Φωτοβολταϊκά	5
64	Θερμικός	10

Στο δίκτυο έχουν προστεθεί οι σταθμοί παραγωγής που αναγράφονται στον Πίνακα 5.3. Τα όρια της τάσης στους κόμβους είναι ίσα με $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής της τάσης και σαν σημείο σύνδεσης δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής ορίστηκε ο κόμβος 1. Τα

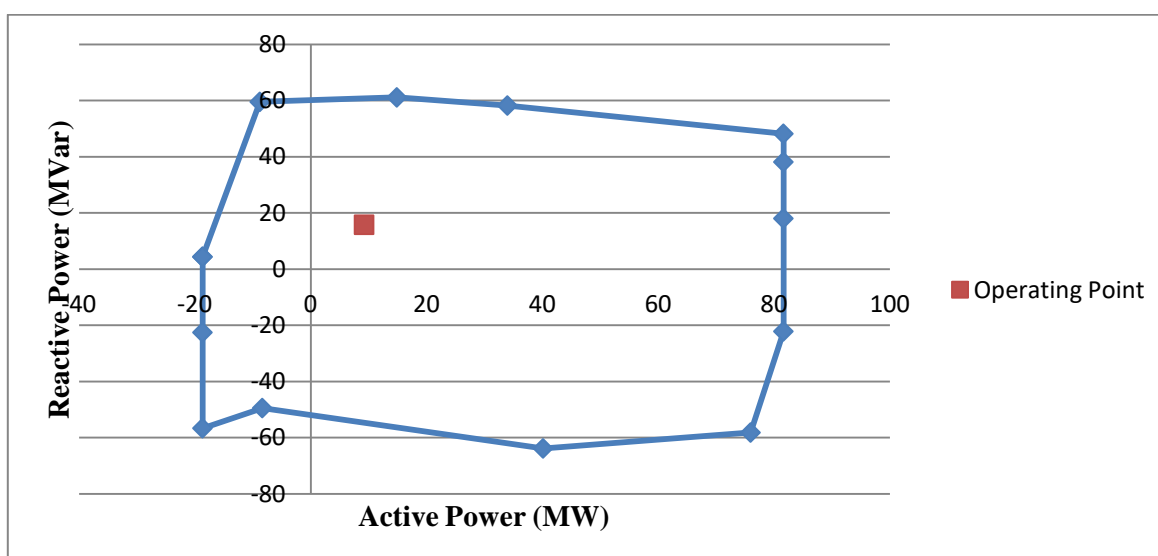
δεδομένα εισόδου δίνονται στον Πίνακα Α.3.2 του Παραρτήματος Α καθώς επίσης και τα δεδομένα ευελιξίας, οι προσφορές ευελιξίας από τους παραγωγούς. Στον Πίνακα Α.3.3 δίνονται οι προσφορές ευελιξίας των φορτίων του δικτύου.

5.3.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1

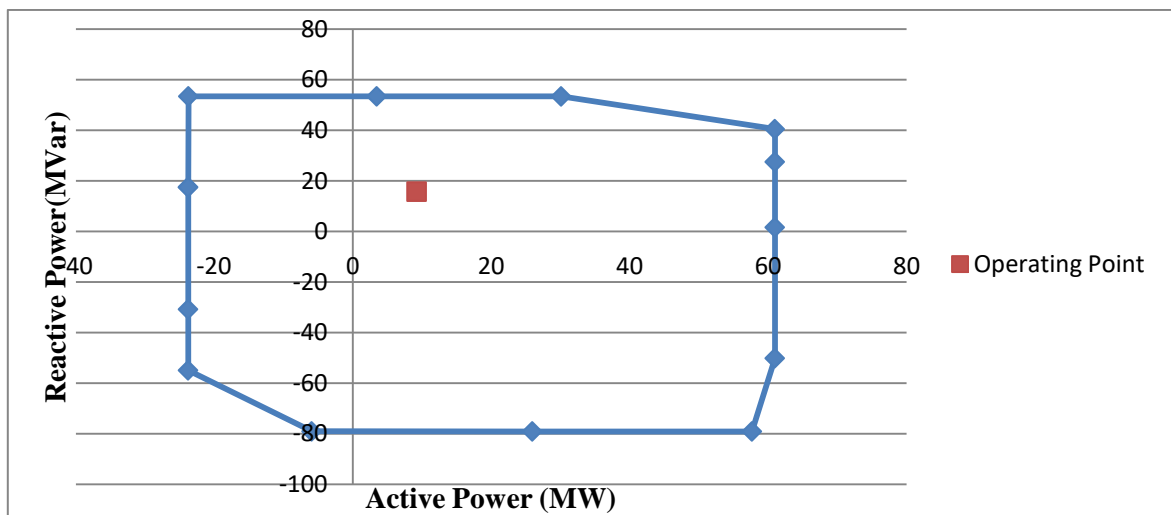
- **AC B.P.I** :Στο Σχήμα 5.3.2 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 69 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow**: Στο Σχήμα 5.3.3 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow** :Στο Σχήμα 5.3.4 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 69 κόμβων για το LinDistFlow.



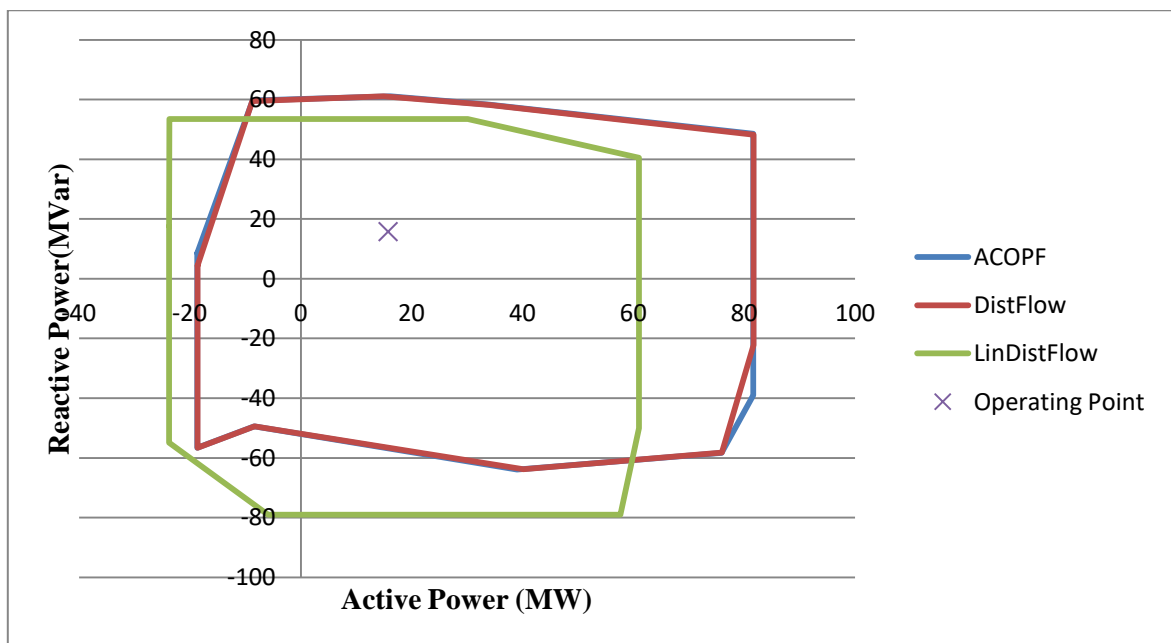
Σχήμα 5.3.2: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.3.3: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.3.4: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το LinDistFlow



Σχήμα 5.3.5: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

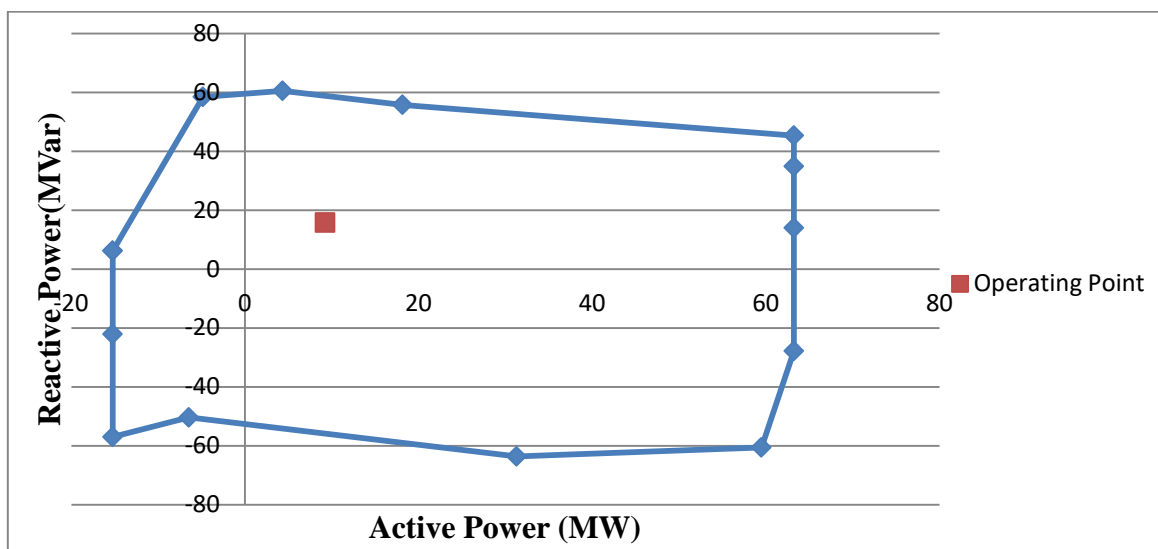
5.3.1.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 1

Στο Σχήμα 5.3.5 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Οι χάρτες ευελιξίας των AC B.P.I και DistFlow σχεδόν συμπίπτουν, ενώ η απόκλιση του LinDistFlow είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις προηγούμενες εφαρμογές. Λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του δικτύου αλλά και της συνολικά μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος οι διαφορές είναι πιο έντονες. Όπως αναμενόταν με τη μετακίνηση του σημείου λειτουργίας προς τα θετικά το DistFlow και AC B.P.I έχουν μεγαλύτερη απαίτηση ισχύος λόγω των απωλειών που θα έχουν οι γραμμές. Θεωρώντας όπως έχει προαναφερθεί το AC B.P.I το μοντέλο με τα πιο ακριβή αποτελέσματα το DistFlow πετυχαίνει να αναγνωρίσει καλύτερα την περίμετρο του χάρτη από το LinDistFlow.

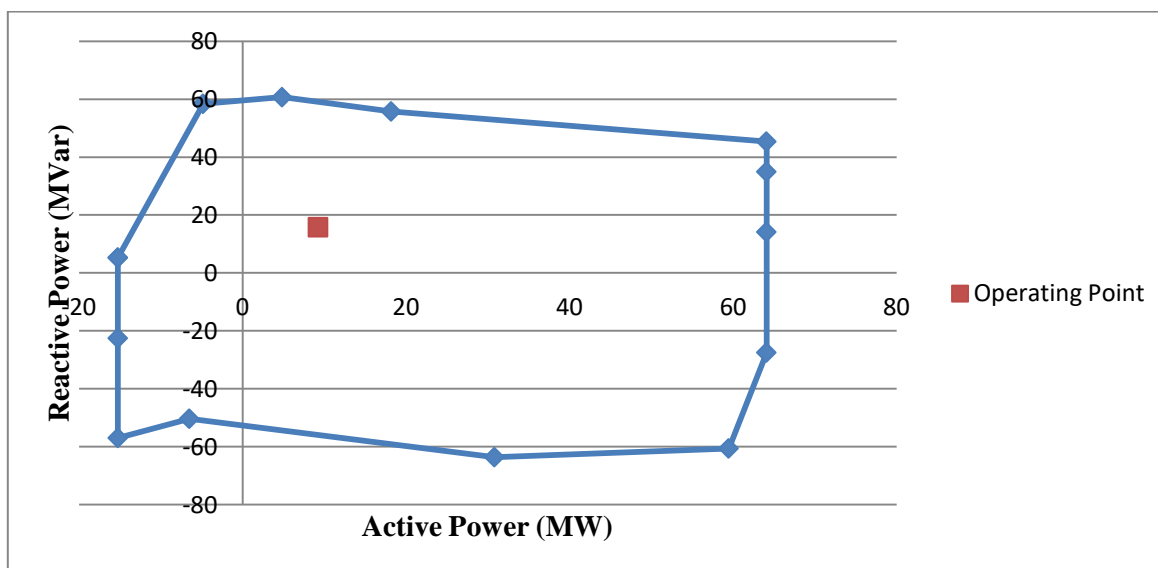
5.3.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2

Προσθέτοντας περιορισμό κόστους ευελιξίας 600€/h έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

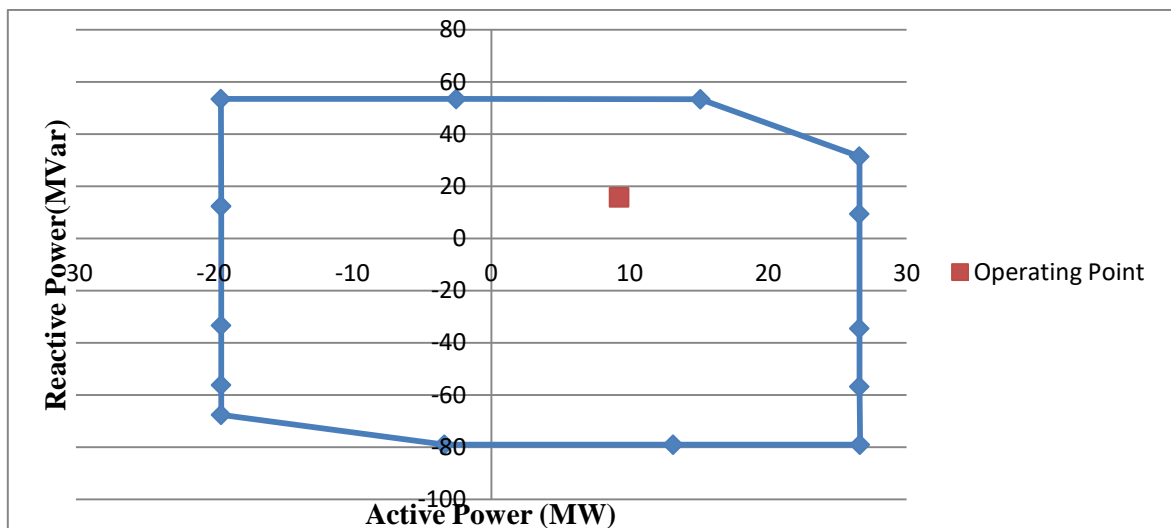
- **AC B.P.I.:** Στο Σχήμα 5.3.6 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 69 κόμβων για το μοντέλο AC B.P.I.
- **DistFlow:** Στο Σχήμα 5.3.7 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το μοντέλο του DistFlow.
- **LinDistFlow:** Στο Σχήμα 5.3.8 δίνεται ο χάρτης ευελιξίας του δικτύου 69 κόμβων για το LinDistFlow.



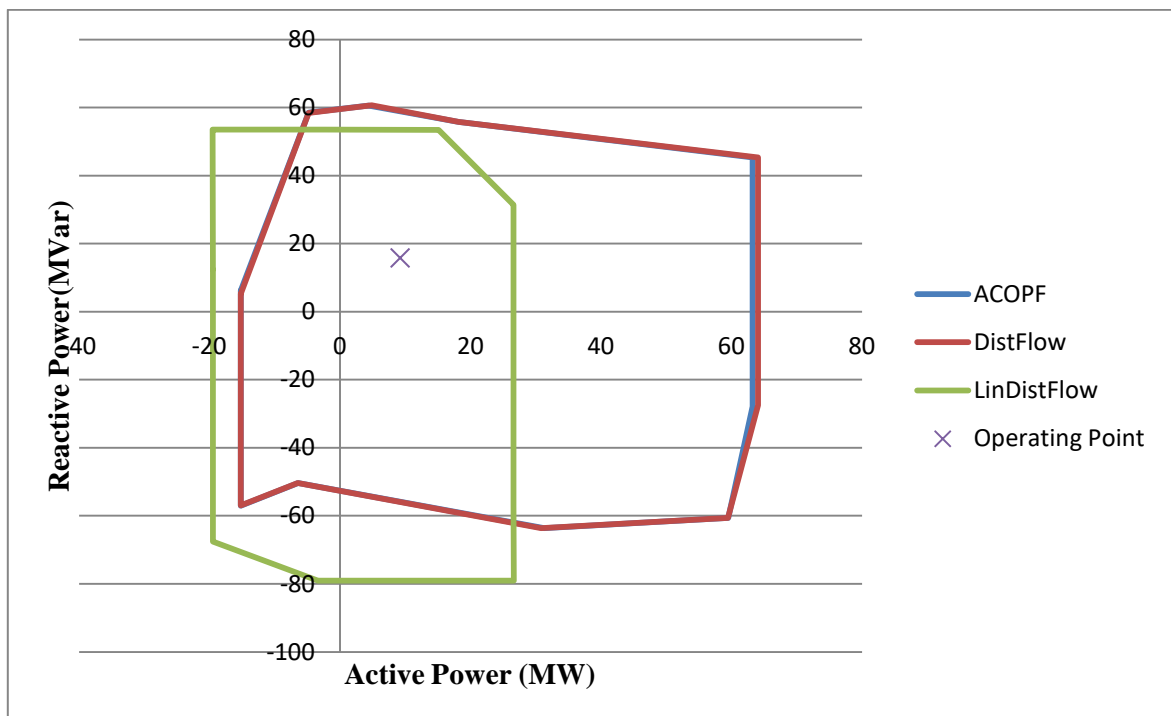
Σχήμα 5.3.6: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το ACOPF



Σχήμα 5.3.7: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το DistFlow



Σχήμα 5.3.8: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων για το LinDistFlow



Σχήμα 5.3.9: Χάρτης ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων και για τα τρία μοντέλα

5.3.2.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 2

Στο Σχήμα 5.3.9 δίνεται το διάγραμμα του χάρτη ευελιξίας και για τα τρία μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε. Με την πρόσθεση του περιορισμού στο κόστους όπως αναμενόταν έχουμε χάρτες με μικρότερο εύρος. Το μοντέλο LinDistFlow έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί περισσότερη ευελιξία λόγω της μη συμπερίληψης των απωλειών γραμμής. Περιορίζοντας την ευελιξία ενεργού ισχύος λόγω κόστους τα αποτελέσματα που έχουμε είναι δικαιολογημένα με το LinDistFlow να αποκλίνει σημαντικά στο εύρος ενεργού ισχύος που εντοπίζει. Αντίθετα οι χάρτες ευελιξίας AC B.P.I και DistFlow είναι πάρα πολύ κοντά.

5.4 Υπολογιστικός Χρόνος

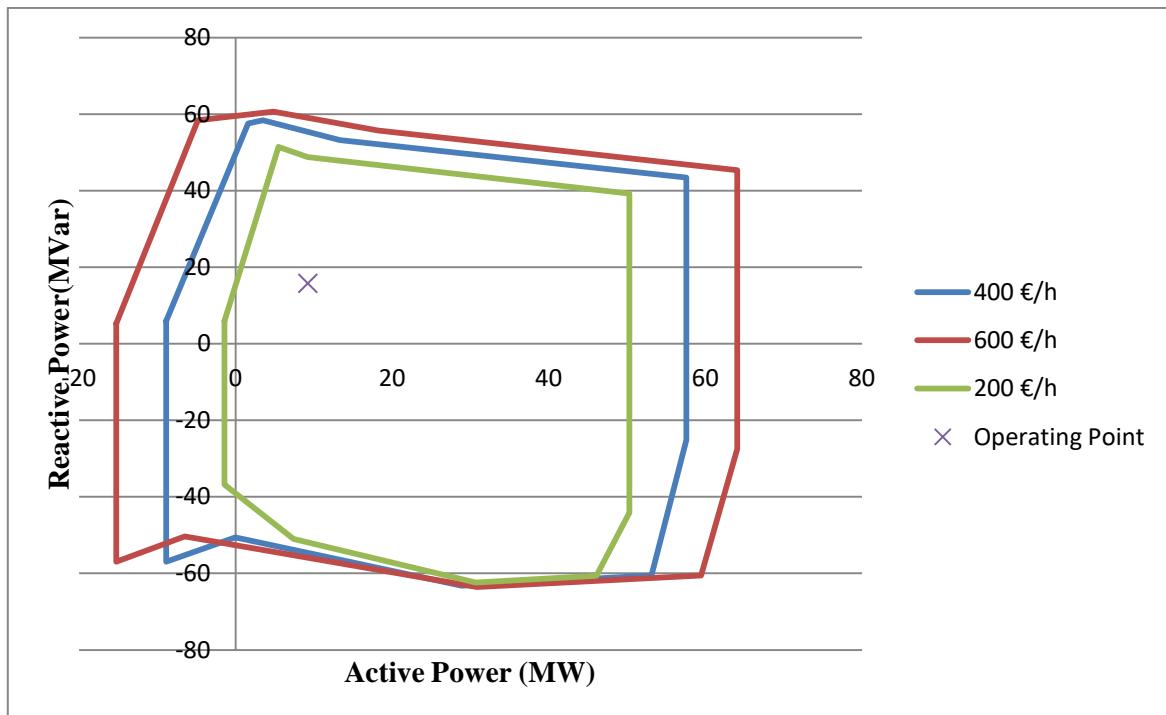
Σε αυτή την ενότητα δίνεται ο υπολογιστικός χρόνος για τα 3 μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ανά δίκτυο. Για τη χρονομέτρηση των μοντέλων έγινε χρήση του χρονομέτρου που διαθέτει η Matlab. Στον πίνακα 5.4.1 δίνονται οι χρόνοι που χρειάστηκαν για την εύρεση του χάρτη ευελιξίας και για τα 3 μοντέλα ανά σενάριο και ανά δίκτυο.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα το AC B.P.I χρειάζεται πολλαπλάσιο χρόνο από τα άλλα δυο μοντέλα για να ολοκληρωθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το AC B.P.I χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών για να μοντελοποιηθεί από τα άλλα μοντέλα. Συγκεκριμένα για τη μοντελοποίηση της τάσης χρειάζονται διπλάσιος αριθμός μεταβλητών (μέτρο τάσης, γωνία) από ότι για τη μοντελοποίηση της τάσης στα άλλα δύο μοντέλα. Συγκρίνοντας τώρα τους χρόνους του σεναρίου 1 και 2 παρατηρούμε ότι το σενάριο 2 χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί και για τα 3 μοντέλα, με τον χρόνο του AC B.P.I να σημειώνει σημαντική αύξηση.

Παρατηρώντας τους χρόνους για τα 3 διαφορετικά δίκτυα όπως αναμενόταν όσο μεγαλύτερο είναι το δίκτυο τόσο μεγαλύτερος είναι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται. Το AC B.P.I για μεγαλύτερο δίκτυο και για τα δύο σενάρια αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται ενώ τα άλλα δύο μοντέλα σημειώνουν αύξηση αλλά όχι τόσο σημαντική.

Πίνακας 5.4.1: Υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκε για τα 2 σενάρια ανά μοντέλο και δίκτυο

Ακτινικό Δίκτυο 18 κόμβων			
AC B.P.I	DistFlow	LinDistFlow	Σενάριο
53.893 sec	10.77 sec	8.59 sec	1
75.37 sec	11.05 sec	10.08 sec	2
Ακτινικό Δίκτυο 33 κόμβων			
AC B.P.I	DistFlow	LinDistFlow	Σενάριο
113.11 sec	10.94 sec	9.37 sec	1
151.02 sec	18.88 sec	16.08 sec	2
Ακτινικό Δίκτυο 69 κόμβων			
AC B.P.I	DistFlow	LinDistFlow	Σενάριο
185.83 sec	15.78 sec	14.82 sec	1
201.91 sec	31.04 sec	30.54 sec	2



Σχήμα 5.5.1: Χάρτης κόστους ευελιξίας ακτινικού δικτύου 69 κόμβων

5.5 Δημιουργία Χάρτη Κόστους Ευελιξίας

Αξιοποιώντας τη μέθοδο της εύρεσης χάρτη ευελιξίας και μεταβάλλοντας τον περιορισμό του κόστους μπορεί κάποιος να δημιουργήσει χάρτη κόστους ευελιξίας. Ένας τέτοιος χάρτης θα μπορεί να βοηθήσει τους διαχειριστές να πάρουν αποφάσεις για την ευελιξίας των ΜΔΠ γνωρίζοντας το κόστος των αποφάσεων αυτών. Στο σχήμα 5.5.1 δίνεται ο χάρτης κόστους ευελιξίας που δημιουργήθηκε για διαφορετικά κόστη. Το μοντέλο που επιλέχθηκε ήταν το DistFlow λόγω των αποτελεσμάτων που είχαμε στις προσομοιώσεις και λόγω του χαμηλού υπολογιστικού χρόνου. Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ακτινικό δίκτυο 69 κόμβων.

Λόγω του ότι ο περιορισμός κόστους της ευελιξίας περιορίζει μόνο την ευελιξίας ενεργού ισχύος οι έντονες μεταβολές που παρατηρούνται είναι μόνο για τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας κατά τον οριζόντιο άξονα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

- Έχοντας θεωρήσει το AC B.P.I ως το μοντέλο αναφοράς για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο DistFlow που χρησιμοποιήθηκε έχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Η χρήση του DistFlow μπορεί να απλοποιήσει αρκετά το πρόβλημα βελτιστοποίησης λόγω του μειωμένου αριθμού μεταβλητών που χρειάζεται να μοντελοποιήσουμε. Συγκεκριμένα δεν υπάρχει ανάγκη για τη χρησιμοποίηση της γωνίας τάσεως σε κάθε κόμβο.
- Η απλοποίηση του προβλήματος φαίνεται παρατηρώντας και τους υπολογιστικούς χρόνους που χρειάστηκαν τα DistFlow και AC B.P.I. Το μοντέλο AC B.P.I χρειάζεται πολλαπλάσιο χρόνο από το DistFlow για να ολοκληρωθεί, ιδιαίτερα στο σενάριο 2 όπου έχουμε προσθέσει τον περιορισμό του κόστους ευελιξίας. Θεωρώντας ότι εάν εφαρμοστούν τα μοντέλα σε πραγματικές συνθήκες, όπου οι τεχνικοί περιορισμοί θα είναι περισσότεροι, η σύγχρονη χρονικά χρήση του AC B.P.I γίνεται ακόμα πιο δύσκολη. Αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του DistFlow έναντι του AC B.P.I.
- Το LinDistFlow με βάση τα αποτελέσματα που έχουμε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ασφαλή υπολογισμό της ευελιξίας. Αποτυγχάνει να υπολογίσει ολόκληρο το εύρος ευελιξίας ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που θέλουμε να αυξήσουμε το σημείο λειτουργίας. Μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται όσο μεγαλύτερο είναι και το δίκτυο.
- Η γνώση της ευελιξίας στο σημείο σύνδεσης του δικτύου μεταφοράς και δικτύου διανομής είναι ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη διαχείριση του δικτύου διανομής και την ομαλότερη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Για παράδειγμα χωρίς τη γνώση της ευελιξίας εάν ο διαχειριστής του δικτύου διανομής ενεργοποιήσει κάποια ευελιξία μέσω μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής του δικτύου διανομής ο διαχειριστής του δικτύου μεταφοράς δεν μπορεί να γνωρίζει τα δικά του περιθώρια στο σημείο διασύνδεσης. Αυτό αναδεικνύει και τη σημαντικότητα της επικοινωνίας των διαχειριστών με την ανταλλαγή πληροφοριών αλλά και την ανάγκη να επαναπροσδιοριστεί η συνεργασία τους.
- Τέλος τα δεδομένα που χρειάζονται για τη δημιουργία του χάρτη ευελιξίας και συγκεκριμένα οι τεχνικοί περιορισμοί μπορούν να αξιοποιηθούν για τον προγραμματισμό της ανάπτυξης και αναβάθμισης του δικτύου. Μια τέτοια αξιοποίηση περιγράφεται στη διδακτορική διατριβή [5].

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

- Μια μελλοντική επέκταση μπορεί να είναι η εξέλιξη του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των σημείων της περιφέρειας του χάρτη ευελιξίας. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος θα μεταβληθεί έτσι ώστε μεταβάλλοντας τα α και β της αντικειμενικής συνάρτησης να εντοπίζει τα ίδια σημεία του χάρτη ευελιξίας και για τα 3 μοντέλα.
- Σαν επέκταση της δημιουργίας του χάρτη ευελιξίας θα μπορούσε να μελετηθεί η βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων παραγωγής πριν τον υπολογισμό του χάρτη ευελιξίας. Η σύγκριση έπειτα των αποτελεσμάτων θα αναδείξει και τη σημασία της τοποθεσίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όσο αφορά το δίκτυο και την ανάγκη μελέτης πριν την τοποθέτησή τους.
- Σε μελλοντική φάση η εφαρμογή της μεθοδολογίας για την εύρεση της ευελιξίας σε αληθινό περιβάλλον ηλεκτρικού δικτύου θα ήταν πολύ χρήσιμη για την αξιολόγηση της και την επισήμανση αδυναμιών και αναγκών για βελτίωση.
- Η μελέτη πρωτοκόλλων συνεργασίας μεταξύ των διαχειριστών του δικτύου και ο εντοπισμός του κατάλληλου πρωτοκόλλου για τη λειτουργία της μεθόδου που αναπτύχθηκε.

Παράρτημα Α: Δεδομένα Δικτύων Διανομής

Στο Πίνακα Α.1.1 δίνονται τα δεδομένα για το ακτινικό δίκτυο 18 κόμβων στο οποίο έγινε αναφοράς στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας Α.1.1: Δεδομένα ακτινικού δικτύου 18 κόμβων.

Βασική τάση : 12.5 kV						
Βασική Ισχύς: 1 MVA						
Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
1	2	0.0004998	0.000354	3	3	60
2	3	0.000312	0.006753	2	2	60
3	4	0.00043098	0.001204	2.2	3.12	60
4	5	0.00060102	0.001677	2.4	3.25	60
5	6	0.00031603	0.000882	2.5	3.93	60
6	7	0.000896	0.002502	3	2.26	60
7	8	0.00029498	0.000824	5.8	3.5	40
8	9	0.00172	0.00212	3.2	2.12	40
9	10	0.00407002	0.003053	5	0.62	40
4	11	0.00170598	0.002209	3.5	3.31	15
3	12	0.00291002	0.003768	2	2.62	15
12	13	0.00222202	0.002877	5.3	1.19	40
13	14	0.00480301	0.006218	3.2	2.12	11
13	15	0.00398502	0.00516	4.8	3.5	40
15	16	0.00291002	0.003768	3.5	3.31	11
15	17	0.00372698	0.004593	3	2.62	40

17	18	0.001104	0.00136	3.2	2.12	15
----	----	----------	---------	-----	------	----

Στο Πίνακα A1.2 δίνονται οι προσφορές που έγιναν από τους παραγωγούς με τα ποσοστά ευελιξίας τους αλλά και οι τιμές που έδωσε ο Διαχειριστής του ΔΔΗΕ για το ακτινικό δίκτυο 18 κόμβων στο οποίο έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας A.2.2: Προσφορές ευελιξίας των παραγωγών

Παραγωγός i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost(€/MWh)
1	0	0	0	0	0
3	30	25	20	10	30
5	25	25	20	10	30
8	20	20	30	30	35
10	30	0	20	20	35
12	10	10	20	20	40
14	30	20	30	20	40
15	20	20	20	10	35
17	30	30	30	30	35

Στο Πίνακα Α1.3 δίνονται τα ποσοστά ευελιξίας των φορτίων που είναι συνδεδεμένα σε κάθε κόμβο για το ακτινικό δίκτυο 18 κόμβων καθώς και το κόστος μεταβολής τους ανά MWh:

Πίνακας Α.3.3: Προσφορές ευελιξίας για τα φορτία

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
1	0	0	0	0	0
2	20	20	20	20	30
3	20	10	20	20	30
4	20	10	20	10	35
5	20	10	20	10	35
6	20	20	20	10	40
7	10	10	20	10	40
8	30	20	20	20	35
9	20	20	20	20	35
10	20	20	20	20	25
11	10	20	20	20	25
12	20	20	20	20	25
13	20	20	20	20	25
14	20	20	20	20	25
15	20	20	20	20	25
16	30	10	30	20	25
17	30	10	10	20	25
18	20	20	10	10	25

Στο Πίνακα Α.2.1 δίνονται τα δεδομένα για το ακτινικό δίκτυο 33 κόμβων στο οποίο έγινε αναφοράς στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας Α.2.1: Δεδομένα ακτινικού δικτύου 33 κόμβων.

Βασική τάση : 12.5 kV						
Βασική Ισχύς: 1 MVA						
Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
1	2	0.00059	0.000301	0	0	100
2	3	0.003155	0.001607	2.1	3.6	100
3	4	0.002342	0.001193	2.9	2.4	100
4	5	0.002439	0.001242	3.12	2.8	100
5	6	0.005242	0.004525	3.66	3.3	100
6	7	0.001198	0.00396	2.6	1.2	60
7	8	0.004553	0.001505	3.2	2.1	60
8	9	0.006592	0.004736	2.2	1.1	60
9	10	0.006682	0.004736	4.6	2.2	60
10	11	0.001258	0.000416	2	2	60
11	12	0.002396	0.000792	3.45	1.3	60
12	13	0.009395	0.007392	3.6	2.35	60
13	14	0.003466	0.004563	1.6	2.35	60
14	15	0.003782	0.003366	3.12	2.8	60
15	16	0.004776	0.003488	1.6	2.11	60
16	17	0.00825	0.011014	2.6	2.2	60
17	18	0.004685	0.003674	2.6	2.2	40
2	19	0.00105	0.001002	3.9	2.4	60
19	20	0.009627	0.008675	2.9	2.4	40

Πίνακας Α.2.1:(Συνέχεια)

Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
20	21	0.002621	0.003062	2.9	1.4	40
21	22	0.004537	0.005999	3.9	1.4	40
3	23	0.002888	0.001973	2.9	2.5	60
23	24	0.005747	0.004538	2.42	2.2	40
24	25	0.005734	0.004487	2.42	2.2	40
6	26	0.001299	0.000662	2.6	2.25	60
26	27	0.001819	0.000926	3.6	2.25	60
27	28	0.006778	0.005976	3.6	2.2	60
28	29	0.005147	0.004484	2.12	1.7	60
29	30	0.003248	0.001654	2.2	1.6	40
30	31	0.006236	0.006163	2.15	1.7	40
31	32	0.001987	0.002316	1.21	2.1	40
32	33	0.002182	0.003393	2.6	2.4	40

Στο Πίνακα Α2.2 δίνονται οι προσφορές που έγιναν από τους παραγωγούς με τα ποσοστά ευελιξίας τους αλλά και οι τιμές που έδωσε ο Διαχειριστής του ΔΔΗΕ για το ακτινικό δίκτυο 33 κόμβων στο οποίο έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας Α.2.2: Προσφορές ευελιξίας των παραγωγών

Παραγωγός i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
1	0	0	0	0	0
3	30	25	20	10	30
4	20	20	20	20	30
6	20	20	20	10	30
8	20	20	30	10	35
11	30	0	30	20	35
13	20	10	20	20	40
16	20	20	20	20	40
17	20	20	20	20	40
20	20	20	20	10	35
22	20	10	20	20	40
24	30	30	20	10	35
25	30	25	20	10	30
26	30	25	20	10	30
28	25	25	30	10	40
29	20	20	20	20	35
31	30	0	20	20	35
33	20	20	20	20	40

Στο Πίνακα Α.2.3 δίνονται τα ποσοστά ευελιξίας των φορτίων που είναι συνδεδεμένα σε κάθε κόμβο για το ακτινικό δίκτυο 33 κόμβων καθώς και το κόστος μεταβολής τους ανά MWh:

Πίνακας Α.2.3: Προσφορές ευελιξίας για τα φορτία

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
1	0	0	0	0	0
2	20	20	20	20	30
3	20	10	20	20	30
4	20	10	20	20	35
5	20	10	20	0	35
6	20	20	20	10	40
7	10	10	20	10	40
8	30	20	20	20	35
9	20	20	20	20	35
10	20	20	20	0	25
11	10	20	20	10	25
12	20	20	20	10	25
13	20	20	20	10	25
14	20	20	20	20	25
15	20	20	20	20	25
16	20	10	20	20	25
17	20	10	10	20	25
18	20	20	10	10	25

Πίνακας Α.2.3: Συνέχεια

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
19	20	20	20	20	40
20	20	10	20	10	40
21	20	10	20	20	35
22	20	10	20	20	35
23	20	20	20	10	25
24	10	10	20	10	25
25	20	20	20	20	25
26	20	20	20	0	25
27	20	20	20	10	25
28	10	20	10	10	25
29	20	20	10	20	30
30	20	10	10	0	30
31	20	10	10	20	35
32	20	10	20	20	25
33	20	20	20	10	25

Στο Πίνακα Α.3.1 δίνονται τα δεδομένα για το ακτινικό δίκτυο 69 κόμβων στο οποίο έγινε αναφοράς στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας Α.3.1: Δεδομένα ακτινικού δικτύου 69κόμβων.

Βασική τάση : 12.5 kV						
Βασική Ισχύς: 1 MVA						
Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
1	2	0.0000312	0.00007487	3	2	100
2	3	0.0000312	0.00007487	5	1.5	100
3	4	0.00009359	0.00022461	2.5	1.5	100
4	5	0.00156605	0.00183434	2	1.5	100
5	6	0.02283567	0.01162997	3.0026	1.0022	100
6	7	0.02377779	0.01211039	4.0404	1.03	100
7	8	0.00575259	0.00293245	4.075	1.054	100
8	9	0.00307595	0.00156605	3.03	2.022	100
9	10	0.05109948	0.01688966	4.028	2.019	100
10	11	0.01167988	0.0038621	3.145	1.104	100
11	12	0.04438605	0.01466848	3.145	2.104	100
12	13	0.0642643	0.02121346	2.008	2.0055	100
13	14	0.0651378	0.02152542	1.008	0.3055	100
14	15	0.0660113	0.02181243	2	0.4	60
15	16	0.01226637	0.00405551	3.0455	2.03	60
16	17	0.02335976	0.0077242	2.06	2.035	60
17	18	0.00029324	0.00009983	0	0	60
18	19	0.02043979	0.00675711	4	2	60
19	20	0.01313987	0.00434252	2.001	0.0006	60

Πίνακας Α.3.1:(Συνέχεια)

Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
20	21	0.02131329	0.00704412	2.114	2.081	60
21	22	0.0008735	0.00028701	2.0053	0.0035	60
22	23	0.00992665	0.00328185	3	3	60
23	24	0.02160653	0.00714394	4.028	0.02	60
24	25	0.04671953	0.01544215	0	0	60
25	26	0.01927305	0.00637028	3.014	2.01	60
26	27	0.01080639	0.00356885	2.014	2.01	15
3	28	0.00027453	0.00067384	3.026	0.0186	100
28	29	0.00399312	0.00976443	3.026	0.0186	100
29	30	0.02481975	0.00820462	2	1	60
30	31	0.00437996	0.00144751	0	0	60
31	32	0.02189978	0.00723753	0	0	60
32	33	0.05234733	0.01756974	2.014	1.01	60
33	34	0.10656644	0.03522682	2.0195	1.014	40
34	35	0.09196659	0.03040388	2.006	2.004	100
3	36	0.00027453	0.00067384	2.026	3.0186	100
36	37	0.00399312	0.00976443	3.026	0.0186	100
37	38	0.00656993	0.00767428	2	1	100
38	39	0.00189673	0.00221493	2.024	1.017	60
39	40	0.00011231	0.00013102	2.024	1.017	60

Πίνακας Α.3.1:(Συνέχεια)

Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
40	41	0.04544048	0.0530898	2.0012	2.001	60
41	42	0.01934168	0.02260481	4	3	60
42	43	0.00255809	0.00298236	4.006	3.0043	60
43	44	0.00057401	0.00072375	0	0	60
44	45	0.00679455	0.00856649	4.0392	2.0263	60
45	46	0.00005615	0.00007487	3.0392	2.0263	40
4	47	0.00021213	0.0005241	3	2	60
47	48	0.0053096	0.01299636	2.079	2.0564	60
48	49	0.01808135	0.04424254	3.3847	3.2745	40
49	50	0.00512867	0.01254714	3.3847	1.2745	40
8	51	0.00579003	0.00295117	2.0405	1.0283	40
51	52	0.02070808	0.00695053	3.0036	2.0027	20
9	53	0.0108563	0.00552798	4.5043	2.0035	100
53	54	0.01266568	0.00645139	2.0264	2.019	100
54	55	0.01773196	0.0090282	3.024	2.0172	60
55	56	0.01755102	0.00894085	0	0	60
56	57	0.09920412	0.03329889	4	2	60
57	58	0.04889702	0.01640924	0	0	60
58	59	0.01897981	0.00627669	4.1	4.072	60
59	60	0.02408976	0.0073124	2	1.5	60

Πίνακας Α.3.1:(Συνέχεια)

Κόμβος i	Κόμβος j	$R_{ij}(\alpha.\mu.)$	$X_{ij}(\alpha.\mu.)$	$P_{d,j}(\text{MW})$	$Q_{d,j}(\text{MVar})$	$S_{line}^{max}(\text{MW})$
60	61	0.03166421	0.01612847	3.244	1.888	60
61	62	0.00607703	0.00309467	2.032	1.023	60
62	63	0.00904692	0.00460457	3	3	40
63	64	0.04432989	0.02257986	4.227	2.162	40
64	65	0.06495062	0.03308052	2.059	2.042	20
11	66	0.01255338	0.00381218	4.018	4.013	40
66	67	0.00029324	0.00008735	5.018	3.013	20
12	68	0.04613304	0.01524873	3.028	3.02	40
68	69	0.00029324	0.00009983	3.028	2.02	20

Στο Πίνακα Α3.2 δίνονται οι προσφορές που έγιναν από τους παραγωγούς με τα ποσοστά ευελιξίας τους αλλά και οι τιμές που έδωσε ο Διαχειριστής του ΔΔΗΕ για το ακτινικό δίκτυο 69 κόμβων στο οποίο έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 5:

Πίνακας Α.3.2: Προσφορές ευελιξίας των παραγωγών

Παραγωγός i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
1	0	0	0	0	0
3	30	25	20	10	30
4	25	25	20	10	25
5	20	20	30	30	20
8	30	0	20	20	30
10	10	10	20	20	10
12	30	20	30	20	30

Πίνακας Α.3.2: Συνέχεια

Παραγωγός i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
3	30	25	20	10	30
4	25	25	20	10	30
6	20	20	30	30	35
8	30	0	20	20	35
11	10	10	20	20	40
13	30	20	30	20	40
16	20	20	20	10	35
18	30	30	30	30	35
20	30	25	20	10	30
22	25	25	30	30	40
25	20	20	20	20	35
28	30	0	20	20	35
31	20	20	30	20	40
32	20	20	20	10	40
35	30	30	20	10	40
37	30	25	30	30	35
38	25	25	20	20	35
41	20	20	20	20	30
44	30	0	30	20	30

Πίνακας Α.3.2: Συνέχεια

Παραγωγός i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
54	20	20	20	10	40
56	20	20	20	10	40
58	30	30	30	30	35
61	30	25	20	20	35
64	25	25	20	20	30

Στο Πίνακα Α.3.3 δίνονται τα ποσοστά ευελιξίας των φορτίων που είναι συνδεδεμένα σε κάθε κόμβο για το ακτινικό δίκτυο 69 κόμβων καθώς και το κόστος μεταβολής τους ανά MWh:

Πίνακας Α.3.3: Προσφορές ευελιξίας για τα φορτία

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
1	0	0	0	0	0
2	20	20	20	20	30
3	20	10	20	20	30
4	20	10	20	10	35
5	20	10	20	10	35
6	20	20	20	10	40
7	10	10	20	10	40
8	30	20	20	20	35
9	20	20	20	20	35
10	20	20	20	20	25
11	10	20	20	20	25

Πίνακας Α.3.3: Συνέχεια

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
12	20	20	20	20	25
13	20	20	20	20	25
14	20	20	20	20	25
15	20	20	20	20	25
16	30	10	30	20	25
17	30	10	10	20	25
18	0	0	0	0	0
19	20	20	20	20	40
20	20	10	20	20	40
21	20	10	20	10	35
22	20	10	20	10	35
23	20	20	20	10	25
24	10	10	20	10	25
25	0	0	0	0	0
26	20	20	20	20	25
27	20	20	20	20	25
28	10	20	20	20	25
29	20	20	20	20	30
30	20	10	20	20	30
31	0	0	0	0	0

Πίνακας Α.3.3: Συνέχεια

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
32	0	0	0	0	0
33	20	20	20	10	25
34	20	20	20	20	25
35	20	10	20	20	25
36	20	10	20	20	25
37	20	10	20	10	25
38	20	20	20	10	30
39	20	20	20	10	30
40	20	10	20	20	35
41	20	10	20	20	25
42	20	10	20	20	25
43	20	20	20	10	25
44	0	0	0	0	0
45	20	10	20	10	25
46	20	10	20	20	25
47	20	10	20	20	30
48	20	20	20	20	30
49	20	10	20	10	35
50	20	20	20	10	25
51	10	10	20	10	25

Πίνακας Α.3.3: Συνέχεια

Κόμβος i	$P_{G,Upper}(\%)$	$P_{G,Down}(\%)$	$Q_{G,Upper}(\%)$	$Q_{G,Down}(\%)$	Cost (€/MWh)
52	30	20	20	20	25
53	20	20	20	20	25
54	20	20	20	20	25
55	20	10	20	10	25
56	0	0	0	0	0
57	10	10	20	10	30
58	0	0	0	0	0
59	20	20	20	20	25
60	20	20	20	20	25
61	20	10	20	10	25
62	20	20	20	10	25
63	10	10	20	10	25
64	30	20	20	20	25
65	20	20	20	20	30
66	20	20	20	20	30
67	20	10	20	10	35
68	20	20	20	10	25
69	10	10	20	10	25

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π.Σ. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα 2015.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας*, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [3] Επίσημη σελίδα ΔΕΔΔΗΕ, <https://www.deddie.gr/>.
- [4] Μ. Π. Παπαδόπουλος, *Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*. ΕΜΠ, Αθήνα, 1994.
- [5] Ν. Χ. Κουτσούκης, *Βελτιστοποίηση Λειτουργίας και Προγραμματισμού Ανάπτυξης Ενεργών Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2019.
- [6] Σ. Α. Παπαθανασίου, *Βιομηχανική διανομή ηλεκτρικής ενέργειας*, Διαφάνειες μαθήματος Βιομηχανικής Ηλεκτρονικής, ΕΜΠ, Αθήνα 2017.
- [7] Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, *Optimal capacitive compensation on radial distribution systems using nonlinear programming*, Electric Power Systems Research, Elsevier, August 1990.
- [8] F. Pilo, S. Jube, F. Silvestro, C. Abbey, A. Baïtch, B. Bak-Jensen, C. Carter-Brown, G. Celli, K. El Bakari, M. Fan, P. Georgilakis, T. Hearne, L. Nando Ochoa, G. Petretto, J. Taylor, *Planning and Optimization Methods for Active Distribution Systems*, CIGRE Brochure number 591, CIGRE, Paris, France, Aug. 2014.
- [9] A. Hermann, J. Kazempour, S. Huang and J. Østergaard, "Congestion Management in Distribution Networks With Asymmetric Block Offers," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 6, pp. 4382-4392, Nov. 2019.
- [10] P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, "Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3420–3428, Aug. 2013.
- [11] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, 2005.
- [12] N. Savvopoulos, T. Konstantinou and N. Hatziargyriou, "TSO-DSO Coordination in Decentralized Ancillary Services Markets," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Porto, Portugal, 2019.
- [13] J. Carpentier, "Contribution to the economic dispatch problem," *Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens*, vol. 3, no. 8, pp.431–447, 1962, in French.

- [14] Spyros Chatzivasileiadis, *Optimization in Modern Power Systems*, Lecture Notes, Technical University of Denmark, September 2018.
- [15] M. Farivar and S. Low, '*Branch flow model: Relaxations and convexification – Part I*,' IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, No. 3, Aug. 2013.
- [16] João Silva, Jean Sumaili, Ricardo J. Bessa, Luís Seca, Manuel A. Matos, Vladimiro M. Mathieu Caujolle, Bel'en Goncer, Maria Sebastian-Viana, *Estimating the Active and Reactive Power Flexibility Area at the TSO-DSO Interface*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.33,no.5, September 2018.
- [17] W. M. Grady, M. J. Samotyj, A. H. Noyola, "*The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1379-1386, Jul 1992.
- [18] M. E. Baran and F. F. Wu, "*Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing*," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.
- [19] D. Das, *Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol 30, pp 361-367, September 2008.