



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

# ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Hybrid PSO

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δροσιά Η. Πάσχου

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2014





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

## ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Hybrid PSO

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δροσιά Η. Πάσχου

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Απριλίου 2014.

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

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

.....  
Γεωργιάκης Παύλος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....  
Δροσιά Η. Πάσχου

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

Copyright © Δροσιά Πάσχου, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης και της βέλτιστης ονομαστικής ισχύος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής, με τεχνικά και με οικονομικά κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η συμβολή της βέλτιστης διαστασιολόγησης, κατά θέση και κατά μέγεθος, των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος καθώς και στην ελαχιστοποίηση των μεταβολών της τάσης των ζυγών. Επίσης, μελετάται η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης ενός αριθμού σταθμών ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής, με τεχνικά κριτήρια. Ειδικότερα, μελετάται η βέλτιστη τοποθέτηση των σταθμών φόρτισης στο δίκτυο ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος καθώς και η ελαχιστοποίηση των μεταβολών της τάσης των ζυγών.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, τροποποιήθηκε κατάλληλα ένας υβριδικός αλγόριθμος (HPSO) που συνδυάζει στοιχεία από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ατόμων σμήνους (Particle Swarm Optimization Algorithm) και ένα κανόνα χειρισμού των περιορισμών (The feasibility-based rule).

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στη διεσπαρμένη παραγωγή και τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφοροι τύποι τεχνολογίας της και παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα ηλεκτρικά οχήματα και την είσοδό τους στην αγορά, παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι οχημάτων και τα είδη φόρτισής τους και παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης και της διεξόδυσής τους στην αγορά. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην βελτιστοποίηση ατόμων σμήνους και ενός κανόνα χειρισμού των περιορισμών μαζί με τους αντίστοιχους αλγόριθμους. Στη συνέχεια, αναλύεται ο υβριδικός αλγόριθμος HPSO και εξηγείται λεπτομερώς το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου καθώς και οι μέθοδοι επίλυσής του. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το λογισμικό MATPOWER το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των απλών ροών και των βέλτιστων ροών φορτίου του προβλήματος. Στο κεφάλαιο 4 εξηγείται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης ΜΔΠ, το πώς δομείται ο τροποποιημένος αλγόριθμος HPSO καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Στο κεφάλαιο 5 εξηγείται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης των σταθμών ταχείας φόρτισης, το πώς δομείται ο τροποποιημένος αλγόριθμος HPSO καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη παραγωγή, ηλεκτρικά οχήματα, σταθμοί ταχείας φόρτισης, βέλτιστη ροή φορτίου, αλγόριθμος επιλογής κλώνων, βελτιστοποίηση ατόμων σμήνους, HPSO, φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, απώλειες ενεργού ισχύος, προφίλ τάσης.





## **ABSTRACT**

The aim of the present thesis is to find the optimal location and optimal capacity of distributed generation units in a distribution network, considering technical and financial criteria. More precisely, this thesis examines the contribution of optimal placement of distributed generation units in minimizing active power losses and bus voltage fluctuation. Also, this thesis is to find the optimal location of a specific number of electric vehicle fast charging stations in a distribution network, considering technical criteria. In particular, this thesis examines the optimal placement of electric vehicle charging station in order to achieve minimum active power losses and to minimize bus voltage fluctuation.

As part of this study, a suitable software was developed in MATLAB, solving these problems by implementing a hybrid algorithm that combines elements from the Particle Swarm Optimization Technique and the feasibility-based rule.

Chapter 1 gives an introduction to distributed generation and renewable energy sources, summarizes the main types of distribution technology and lists its advantages and disadvantages. Furthermore, reference is made in electric vehicles and their entry to the market, the various vehicle types and their charging methods. The advantages and disadvantages of their usage and their market penetration are also listed. Chapter 2 refers to the particle swarm optimization theory and the feasibility-based rule with the corresponding algorithms. Then, an overview of the HPSO algorithm is given and the optimal power flow problem and its solving methods are explained in detail. Chapter 3 presents the MATPOWER software which was used for the execution of simple and optimal power flows of the problem. Chapter 4 presents the problem of the optimal location of distributed generation units, explains the way the modified HPSO algorithm is structured and contains the results of the simulations performed. Chapter 5 presents the problem of the optimal location of fast charging stations, explains the way the modified HPSO algorithm is structured and contains the results of the simulations performed. Finally, chapter 6 summarizes the main conclusions drawn from this analysis.

## **KEYWORDS**

Distributed generation, electric vehicles, optimal power flow, particle swarm optimization, feasibility-based rule, HPSO, active power losses, voltage profiles



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 υπό την επίβλεψη του κ. Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Σημαντική ήταν και η συμβολή του υποψήφιου διδάκτορα Ευάγγελου Καρφόπουλου, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την άψογη συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη και τη βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>-15-</b>
<b>1.1. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>-15-</b>
1.1.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	-15-
1.1.2. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	-15-
1.1.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	-17-
1.1.4. ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	-22-
1.1.5. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	-23-
1.1.6. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	-25-
<b>1.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>-26-</b>
1.2.1. ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	-26-
1.2.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	-29-
1.2.3. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	-29-
1.2.4. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	-30-
1.2.5. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	-32-
1.2.6. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΩΣ ΦΟΡΤΙΑ.....	-32-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....</b>	<b>-35-</b>
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-35-
2.2. PSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....	-36-
2.3. THE FEASIBILITY-BASED RULE.....	-39-
2.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ-SIMULATED ANNEALING(SA).....	-39-
2.5. HPSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....	-40-
2.6. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-44-
2.6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-44-
2.6.2. ΜΑΘΗΜΑΜΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ.....	-44-
2.6.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ.....	-45-
2.6.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	-46-
2.6.3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ.....	-51-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΑΤPOWER.....</b>	<b>-53-</b>
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-53-
3.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	-53-

3.2.1. ΜΟΡΦΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	-53-
3.2.2. ΚΛΑΔΟΙ.....	-54-
3.2.3. ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	-55-
3.2.4. ΦΟΡΤΙΑ.....	-55-
3.2.5. ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	-56-
3.2.6. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	-56-
3.3. ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-57-
3.3.1. ΑC ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-57-
3.4. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-59-
3.4.1. ΑC ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-59-
3.4.2. ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	-60-
3.4.2.1. ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ..	-61-
3.4.3. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	-63-
3.4.3.1. ΤΜΗΜΑΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΟΣΤΗ.....	-63-
3.4.3.2. ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	-64-
3.4.3.3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ P-Q ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	-65-
3.4.3.4. ΟΡΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΚΛΑΔΩΝ.....	-66-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....</b>	<b>-67-</b>
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-67-
4.1.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	-68-
4.1.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	-72-
4.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	-75-
4.2.1. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	-75-
4.2.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	-77-
4.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	-78-
4.3. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	-80-
4.3.1. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	-80-
4.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	-81-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....</b>	<b>-84-</b>
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-84-
5.2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	-84-

<b>5.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....</b>	<b>-85-</b>
<b>5.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....</b>	<b>-86-</b>
<b>5.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>-89-</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>-92-</b>
<b>6.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....</b>	<b>-92-</b>
<b>6.1.1. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ     ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....</b>	<b>-92-</b>
<b>6.1.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ     ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....</b>	<b>-93-</b>
<b>6.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....</b>	<b>-94-</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>-97-</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

### 1.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις βασικές λειτουργίες: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή δεν μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που γίνεται η κατανάλωση της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς και από εκεί ξεκινούν τα δίκτυα διανομής που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.[1]

### 1.1.2 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η διεσπαρμένη παραγωγή (distributed generation-DG) ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, από μονάδες που βρίσκονται κοντά στο φορτίο και είναι διασυνδεδεμένες με το σύστημα διανομής. Η ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής δεν είναι καθόλου καινούργια. Τις πρώτες μέρες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η διεσπαρμένη παραγωγή ήταν ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος παρείχαν ενέργεια μόνο σε καταναλωτές στην γειτονική τους περιοχή. Τα πρώτα δίκτυα ήταν βασισμένα σε dc τάση και έτσι η παροχή της τάσης ήταν περιορισμένη, όπως περιορισμένη ήταν και η απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον καταναλωτή. Η ζήτηση ενέργειας που υπήρχε σε κάποιες περιπτώσεις καλυπτόταν με τη χρήση τοπικών μέσων αποθήκευσης, όπως μπαταρίες, που μπορούσαν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο dc. Αυτή η μέθοδος μάλιστα αποθήκευσης ενέργειας είναι κάτι άλλο, εκτός από τη διεσπαρμένη παραγωγή, το οποίο επανέρχεται στο προσκήνιο. Στη συνέχεια, η τεχνολογική εξέλιξη που σημειώθηκε, όπως η εμφάνιση των ac δικτύων, επέτρεψε τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και η εφαρμογή οικονομικών κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν σε μία μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου, στις μονάδες παραγωγής. Όλα αυτά είχαν σαν



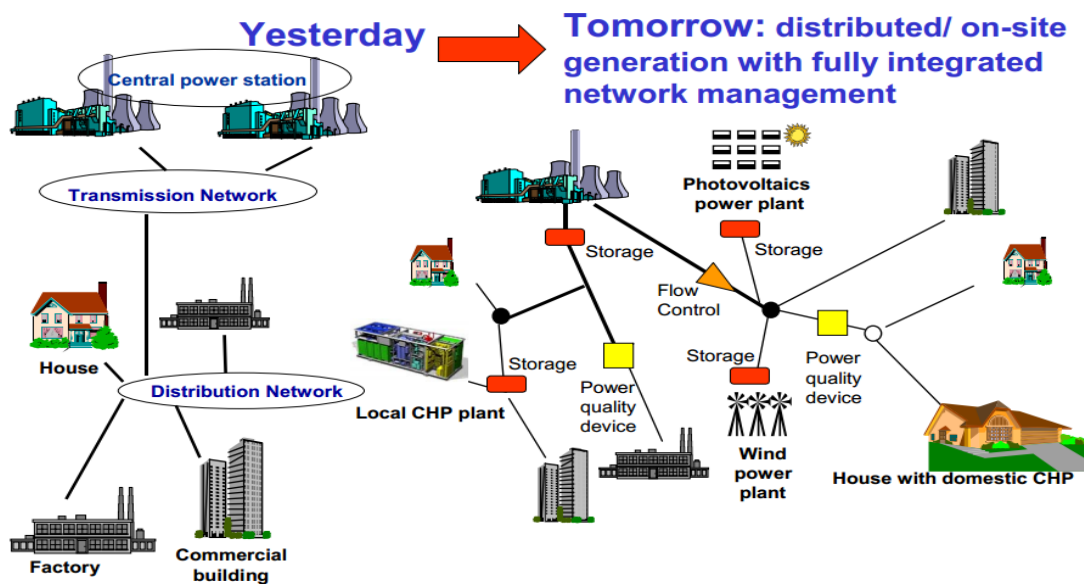
αποτέλεσμα μεγαλύτερες ανέσεις και μικρότερα κόστη, ενώ κατασκευάστηκαν μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα, αποτελούμενα από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις. Η ασφάλεια της παροχής αυξανόταν καθώς ενδεχόμενη αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής, ισοσταθμιζόταν από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου. [2],[3]

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρείται μεγάλη αύξηση στο ενδιαφέρον για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Οι κυριότεροι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό το ενδιαφέρον όπως τους απαριθμεί ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας-International Energy Agency(IEA) είναι πέντε και είναι οι εξής:

- Η ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής
- Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς,
- Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια,
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και
- Οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές

Όσον αφορά την απόδοση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας-Electric Power Research Institute(ERPI) ορίζει ότι οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής παράγουν από μερικά kW μέχρι 50MW, ενώ το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίου-Gas Research Institute(GRI) ορίζει ότι παράγουν μέχρι 25MW και το Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Συστημάτων-International Council on Large High Voltage Electric Systems(CIGRE) ορίζει ότι η παραγόμενη ενέργεια των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δεν υπερβαίνει τα 50-100MW.

Η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας έχει διάφορες επιπτώσεις στη λειτουργία των συστημάτων ισχύος. Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής στους πελάτες μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας όμως από διεσπαρμένες πηγές μετέτρεψε τα συστήματα διανομής από παθητικά σε ενεργητικά με ροές ισχύος και τάσεις που καθορίζονται τόσο από την παραγωγή όσο και από τα φορτία. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μελλοντική εξέλιξη ενός δικτύου διανομής με πλήρη διεξόδου ΜΔΠ.

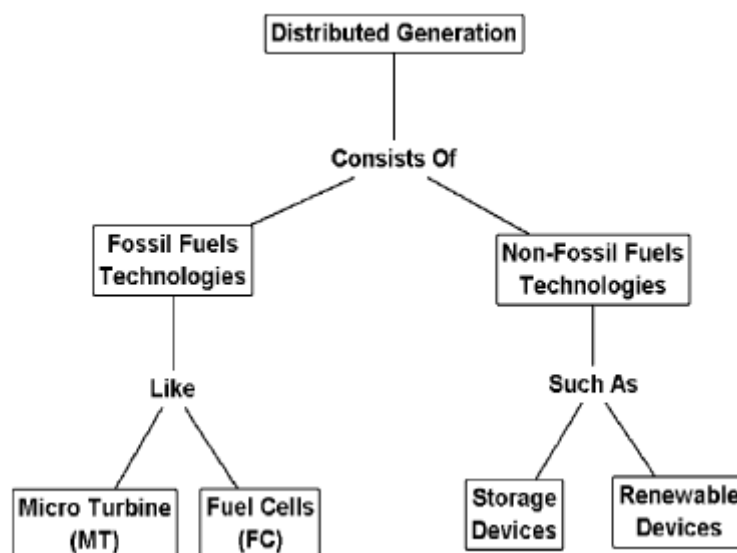


Σχήμα 1.1 Μελλοντική εξέλιξη των δικτύων διανομής[4]

### 1.1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ(DER)

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής αποτελούνται κυρίως από συστήματα παραγωγής ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών όπως κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες, εμβολοφόρους μηχανές και άλλες τεχνολογίες διαχείρισης ενέργειας. Επίσης διαθέτουν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου για την αποδοτική λειτουργία των ανεξάρτητων μονάδων παραγωγής και του μακροδικτύου. Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και ο άνεμος είναι επίσης διαδεδομένες. [5]

Στο σχήμα που παρατίθεται παρακάτω φαίνονται οι διάφοροι τύποι και τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής:



Σχήμα 1.2 Τύποι και τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [5]

Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές κατηγορίες τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής.

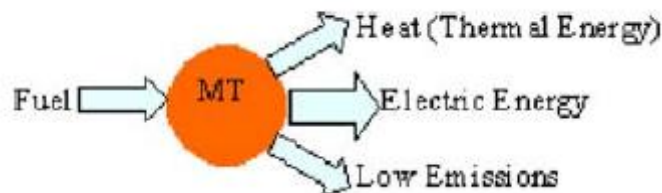
#### Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Υπάρχουν μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν:

- Χρησιμοποιώντας τον κύκλο diesel (ντιζελογεννήτριες). Το χαρακτηριστικό τους είναι η χρήση ανάφλεξης υπό πίεση για την καύση του καυσίμου, το οποίο εισάγεται στο θάλαμο καύσης κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου της συμπίεσης.
- Με βενζίνη, χρησιμοποιώντας τον κύκλο του Otto. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι ένα μίγμα καυσίμου και αέρα αναφλέγεται από ένα σπινθηριστήρα (μπουζί).
- Με φυσικό αέριο. Χρησιμοποιήθηκαν 5 διαφορετικά είδη μηχανών εσωτερικής καύσης φυσικού αερίου με ονομαστική ισχύ κυμαινόμενη από 25 έως 500 kW.

### Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Αποτελούνται από έναν συμπιεστή που συνδέεται με μια τουρμπίνα μέσω ενός θαλάμου καύσης. Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, μέσα στον καυστήρα προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου, αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο και αναφλέγεται. Η καύση αυξάνει την θερμοκρασία, την πτητικότητα και τον όγκο του αερίου. Αυτό κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, περιστρέφοντάς τη και ενεργοποιώντας το συμπιεστή. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας. Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας από φύλλα μετάλλου, που ανακτά τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθέρμαντος αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα, μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στρόβιλου.



Σχήμα 1.3 Τυπική λειτουργία μικροτουρμπίνας[5]

### Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή

άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα. Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία – όχι καύση – για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.

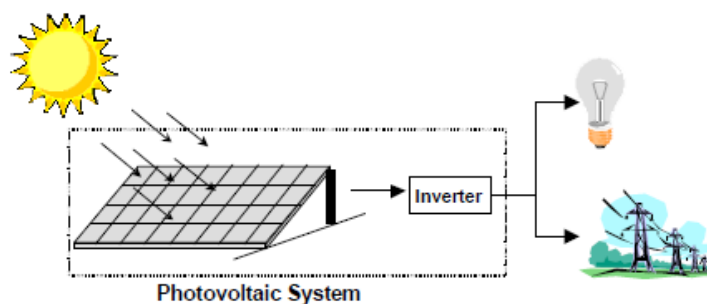
### Μηχανές Stirling

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή. Χάρη στην εξωτερική καύση και στον κλειστό κύκλο λειτουργίας, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης με αποτέλεσμα οι φθορές να είναι περιορισμένες. Όμως, απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει τη χρήση διαφόρων καυσίμων: υγρά ή αέρια καύσιμα, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμη και απορρίμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, είναι δυνατή η αλλαγή καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή των ρυθμίσεων του κινητήρα. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.

### Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Αποτελούνται από κατάλληλα επεξεργασμένους δίσκους πυριτίου (ηλιακά στοιχεία ή solar cells) που βρίσκονται ερμητικά σφραγισμένοι μέσα σε πλαστική ύλη

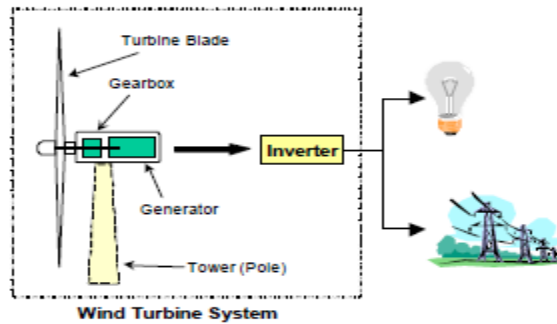
για να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες και κυρίως την υγρασία. Η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί. Η κατασκευή αυτή, που δεν ξεπερνά σε πάχος τα 4 με 5 χιλιοστά του μέτρου, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο αλουμινίου, όπως στους υαλοπίνακες των κτιρίων. Τα εσωτερικά είναι διασυνδεδεμένα εν σειρά και εν παραλλήλω ανάλογα με την εφαρμογή.



**Σχήμα 1.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα[6]**

### Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5MW. Η κυριότερη εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Στήνονται λοιπόν, αιολικά πάρκα, συστοιχίες δηλαδή ανεμογεννητριών σε περιοχές όπου το αιολικό δυναμικό είναι ικανό να καταστήσει μία τέτοια επένδυση βιώσιμη, και συνδέονται στο δίκτυο με την βοήθεια υποσταθμών. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρεται στο δίκτυο η συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Μία άλλη εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι σε αυτόνομα συστήματα, τα οποία δεν ηλεκτροδοτούνται από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης ακόμα και συσσωρευτών, στους οποίους αποθηκεύεται η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιείται σε συνθήκες άπνοιας. Συστοιχίες ανεμογεννητριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μικροδίκτυα. Η λειτουργία τους στα πλαίσια ενός τέτοιου δικτύου σε συνεργασία με άλλες τεχνολογίες τοπικής παραγωγής, συστήματα συσσωρευτών και συμπαραγωγής ή ακόμα και το μακροδίκτυο συνεισφέρει στην οικονομικότερη κάλυψη των φορτίων.



Σχήμα 1.5 Σύστημα ανεμογεννήτριας[6]

### Αποθήκευση ενέργειας/Συστήματα UPS

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιάλειπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.

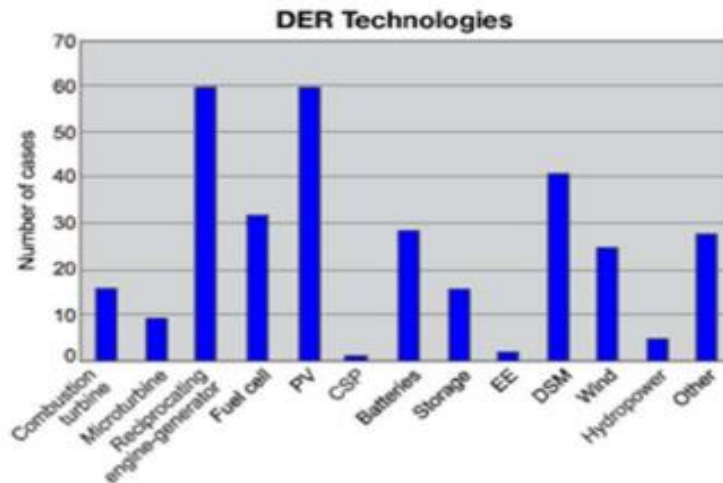
### Υβριδικά Συστήματα

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διεσπαρμένης παραγωγής. Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται ταυτόχρονα την ηλιακή & την αιολική ενέργεια. Διαθέτουν φωτοβολταϊκούς συλλέκτες και ανεμογεννήτρια ώστε να παράγουν ρεύμα και από τον ήλιο και από τον άνεμο ταυτόχρονα. Το πλεονέκτημα των υβριδικών συστημάτων είναι ότι όταν υστερεί η μία πηγή ενέργειας, συνήθως πλεονεκτεί η άλλη. Και αναφερόμαστε στον συνηθισμένο συνδυασμό, ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ αρκετά δημοφιλής είναι και ο συνδυασμός ηλιακού θερμικού συλλέκτη με καυστήρα πετρελαίου ή βιομάζας. Ο συνδυασμός ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε απομονωμένες κατοικίες και οικισμούς όπου η πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο είναι πολύ δαπανηρή ή ακόμα και αδύνατη. Συνήθως στο σύστημα προστίθεται και μία ηλεκτρογεννήτρια με συμβατικά καύσιμα για μεγαλύτερη αξιοπιστία, ενώ η χρήση των μπαταριών (ή και κυψελών καύσιμου με υδρογόνο) είναι σχεδόν απαραίτητη σαν η πιο εύκολη και απλή λύση παροχής σταθερής τάσης στο σύστημα, αλλά και εφεδρείας. Κάποια επιπλέον παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι:

- Μηχανή Stirling συνδυασμένη με ένα ηλιακό πιάτο.
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα.

- Ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες diesel.
- Μηχανές συνδυασμένες με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας

Σε μια έρευνα που διεξήγαγε το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. το 1999 με τίτλο "Distributed Utility Perspectives," εξετάστηκαν 275 έργα διασπαρμένης παραγωγής στις Η.Π.Α. υπό τη διαχείριση 121 διαφορετικών εταιριών για να αναλυθεί ποιες τεχνολογίες DER χρησιμοποιούνται συχνότερα και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 1.6.

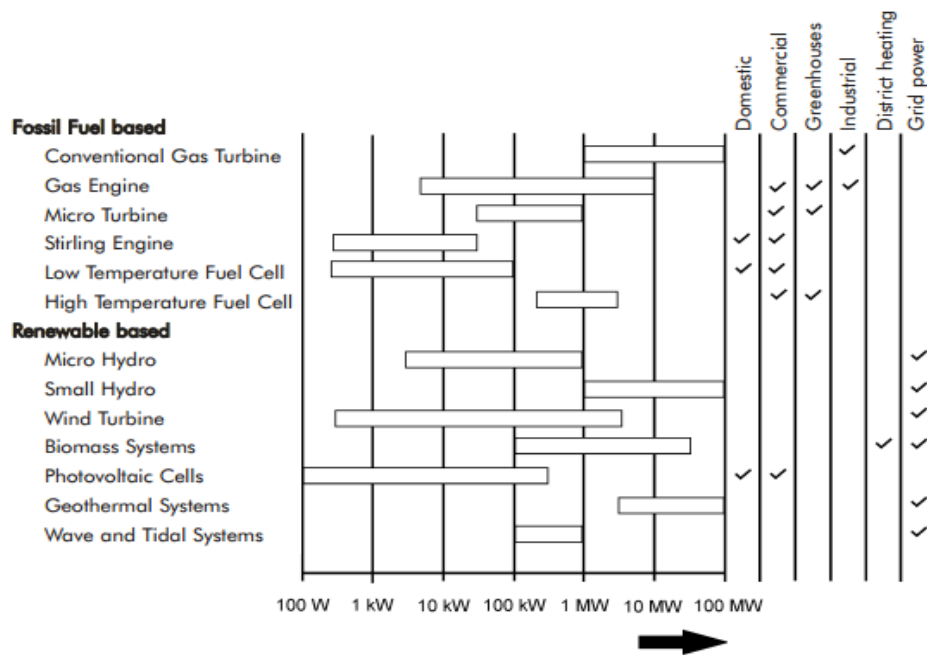


Σχήμα 1.6 Συχνότητα χρησιμοποίησης τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής

#### 1.1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι τυπικές χρήσεις των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι:

- Οικιακή( παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Εμπορική(παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Θερμοκήπια(παροχή ηλεκτρισμού, θέρμανσης και )
- Βιομηχανική(παροχή ατμού, ηλεκτρισμού και θέρμανσης)
- Περιφερειακή θέρμανση(παροχή ηλεκτρισμού και θέρμανσης μέσω του δικτύου θέρμανσης)
- Ισχύς δικτύου(παροχή ηλεκτρισμού στο δίκτυο)



Σχήμα 1.7 Τυπικές χρήσεις και εύρος ισχύος μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής[7]

### 1.1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

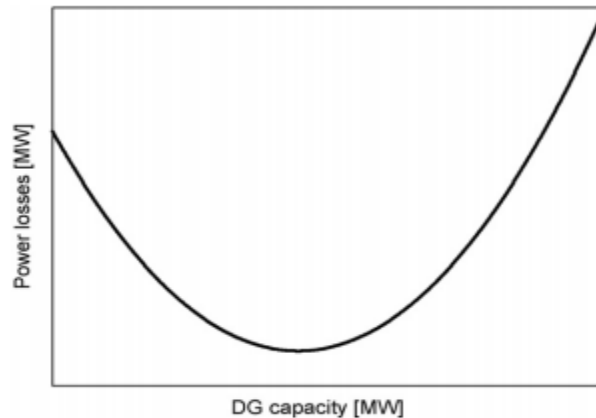
Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής περιλαμβάνουν μια πληθώρα από οφέλη και όσον αφορά τη λειτουργία του δικτύου αλλά και περιβαλλοντικά και οικονομικά.

#### Οφέλη για τη λειτουργία του δικτύου

- ❖ Μείωση των ηλεκτρικών απωλειών: Αυτό συμβαίνει διότι οι ΜΔΠ τροφοδοτούν το φορτίο με μια ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος. Έτσι το ρεύμα που ρέει από την πηγή μέχρι τη θέση των ΜΔΠ μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι ηλεκτρικές απώλειες του δικτύου. Εδώ όμως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή γιατί αν η τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των ΜΔΠ δε γίνει σωστά, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.8. Η κατάλληλη διαστασιολόγηση των ΜΔΠ σε ένα δίκτυο εξαρτάται από το μέγεθος και την κατανομή του φορτίου μέσα στο δίκτυο. Γενικά, όσο υψηλότερο είναι το φορτίο τόσο μεγαλύτερη διείδυση των ΜΔΠ μπορεί να γίνει χωρίς να προκαλέσει αύξηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου. Επίσης, όσο πιο κοντά στο φορτίο εγκαθίστανται οι ΜΔΠ τόσο περισσότερο μειώνονται οι απώλειες του δικτύου. Αυτό βέβαια προϋποθέτει να έχει οριστεί κατάλληλα η παραγόμενη ισχύς των ΜΔΠ, γιατί αν η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη βέλτιστη τιμή της τότε όσο πιο κοντά στο φορτίο εγκαθίστανται οι ΜΔΠ τόσο υψηλότερες είναι οι απώλειες του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο δεν μπορεί να καταναλώσει όλη την ισχύ που παράγεται από τις ΜΔΠ και έτσι η ισχύς που παραμένει ρέει προς την πηγή μέσω του δικτύου διανομής έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.[8],[9]



Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου με το μέγεθος των ΜΔΠ.



**Σχήμα 1.8** Εξάρτηση μεγέθους ΜΔΠ με τις ηλεκτρικές απώλειες[10]

- ❖ Βελτίωση της τάσης: Η διείσδυση των ΜΔΠ έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των διακυμάνσεων της τάσης σε ένα δίκτυο. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ένα μέρος του φορτίου τροφοδοτείται από τη διεσπαρμένη παραγωγή, έτσι μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από την πηγή μέχρι τη θέση των ΜΔΠ και άρα μειώνονται και οι πτώσεις τάσεις στους ζυγούς κατά μήκος των γραμμών.[8]
- ❖ Αξιοπιστία συστήματος: Η διεσπαρμένη παραγωγή συμβάλλει στη συνέχεια και την αξιοπιστία του συστήματος καθώς υπάρχουν πολλές μονάδες παραγωγής κατανομημένες στο δίκτυο και όχι μία κεντρική. Επίσης, προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν είναι δυνατό να φτάσουν οι γραμμές διανομής του δικτύου. [3]
- ❖ Μείωση ισχύος αιχμής: Οι ΜΔΠ εξυπηρετούν ένα μέρος του φορτίου με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς αιχμής του συστήματος.[3]
- ❖ Μειώνει την υπερφόρτωση γραμμών διανομής.[3]

#### Οικονομικά οφέλη

- ❖ Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει τις αυξημένες ανάγκες του φορτίου με την εγκατάστασή της σε συγκεκριμένες θέσεις με αποτέλεσμα την καθυστέρηση ή αποφυγή κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής.
- ❖ Είναι πολύ πιο εύκολο να βρεθούν ποικίλες τοποθεσίες για την εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από ότι για την κατασκευή ενός μεγάλου, κεντρικού εργοστασίου παραγωγής ενέργειας, ενώ οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται ενώ αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- ❖ Οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.

- ❖ Με τη χρήση μονάδων ΑΠΕ ως διεσπαρμένη παραγωγή, προκαλείται μείωση της ζήτησης καυσίμου με μία επακόλουθη μείωση στην τιμή τους και μια γενική καθυστέρηση στις αυξήσεις των τιμών ενέργειας. [3]

#### Οφέλη στο περιβάλλον

- ❖ Η χρήση των ΑΠΕ έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων αλλά και την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων επιβλαβών ρύπων. Επομένως, κάτι τέτοιο συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην προστασία του περιβάλλοντος και στον περιορισμό του προβλήματος που αφορά τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

### **1.1.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

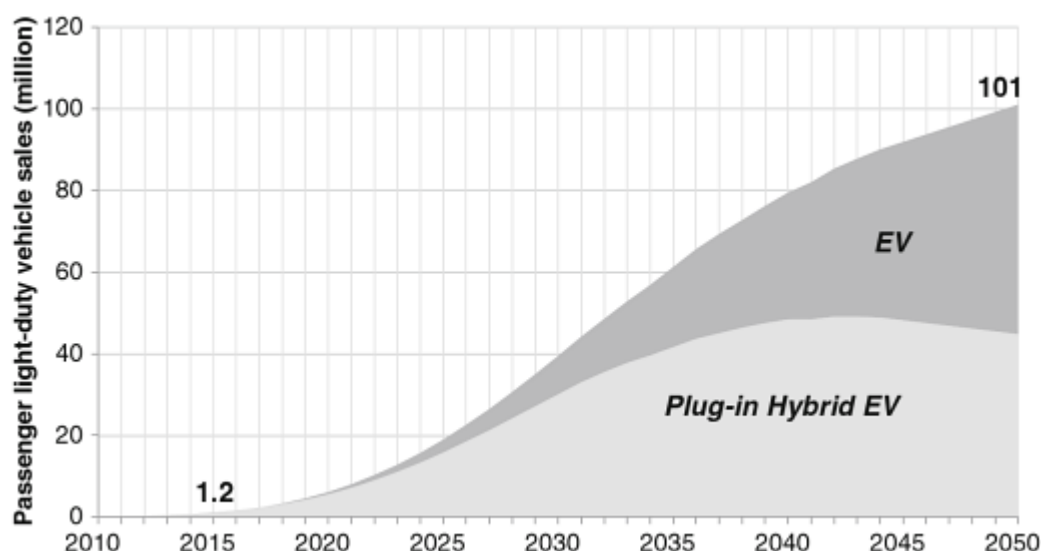
Στο προηγούμενο μέρος παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα τόσο οικονομικά όσο και τεχνικά. Ορισμένα παρουσιάζονται παρακάτω.

- ❖ Υψηλό κόστος εγκατάστασης: Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι το πολύ υψηλό κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Επιπρόσθετα, διαφορές εντοπίζονται σε σχέση με το κόστος ανάλογα με τις διάφορες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.
- ❖ Επιλογή μεταξύ βασικών καυσίμων: Μια αυξημένη διείσδυση ΜΔΠ θα προκαλέσει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Έχοντας υπόψη ότι οι περισσότερες ΜΔΠ εξαρτώνται από το αέριο αναμένεται αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό. Επίσης, το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- ❖ Αλλαγή στη ροή ισχύος: Η διείσδυση αυξημένων ΜΔΠ μπορεί να προκαλέσει ροή ισχύος από τη χαμηλή στη μέση τάση. Έτσι χρειάζεται διαφορετικό σύστημα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης.
- ❖ Προστασία: Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της προστασίας του εξοπλισμού. Οι καταναλωτές που θέλουν να λαμβάνουν ενέργεια σε μια πιθανή διακοπή παροχής τάσης πρέπει να λάβουν υπόψη τους κάποια τεχνικά θέματα όπως επίσης και θέματα ασφάλειας. Μόλις το δίκτυο διανομής επανέλθει σε λειτουργία, οι ΜΔΠ πρέπει να συγχρονιστούν ξανά με την τάση του δικτύου.
- ❖ Συχνότητα συστήματος: Η ανισορροπία στη προσφορά και τη ζήτηση ενέργειας προκαλούν τη συχνότητα του συστήματος να παρεκκλίνει από την τιμή των 50Hz. Αυτές οι αποκλίσεις πρέπει να διατηρηθούν σε πολύ στενά περιθώρια καθώς η καλή λειτουργία από πολλές βιομηχανικές και οικιακές συσκευές εξαρτώνται από αυτό. Η εγκατάσταση και σύνδεση επίσης των ΜΔΠ μπορεί να επηρεάσει τη συχνότητα του συστήματος.
- ❖ Επίπεδο τάσης: Ένα σημαντικό ζήτημα της διείσδυσης των ΜΔΠ σ' ένα ακτινικό δίκτυο διανομής είναι η αύξηση στα επίπεδα της τάσης. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα όταν το δίκτυο αντιμετωπίζει δυσκολίες με χαμηλές τάσεις, γιατί σε

αυτή την περίπτωση συμβάλλει στην ενίσχυση της τάσης. Αλλά σε άλλες περιπτώσεις προκαλεί επιπρόσθετα προβλήματα.[3]

## 1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Η παγκόσμια ανησυχία για ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον, όπως η έντονη αύξηση των αέριων ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την έλλειψη των ορυκτών καυσίμων έδωσε ώθηση στην υιοθέτηση εναλλακτικών μέσων μεταφοράς φιλικότερων προς το περιβάλλον. Ιδανική λύση στο ζήτημα των μεταφορών αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον, η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και των μπαταριών προμηνύει ότι η βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων θα έχει μια αξιοσημείωτη επίδραση στην παγκόσμια αγορά αυτοκινήτου. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας-International Energy Agency(IEA) οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα ενισχυθούν από το 2020 και μπορεί να φτάσουν περισσότερες από 100 εκατομμύρια πωλήσεις το χρόνο παγκοσμίως μέχρι το 2050.



Σχήμα 1.9 Πωλήσεις οχημάτων μικρού μεικτού βάρους[11]

### 1.2.1 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα ηλεκτρικά οχήματα ανάλογα με τις τεχνολογίες κίνησης που υιοθετούν χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

#### 1. Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery EVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας αποθηκεύουν την ηλεκτροχημική ενέργεια στην μπαταρία. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος(lead acid) αποτελούν αυτή τη στιγμή τη φθηνότερη επιλογή. Όμως οι μπαταρίες υδριδίου μετάλλων νικελίου(NiMH), ιόντος λιθίου(Li-ion) και λιθίου ιόντων πολυμερών αρχίζουν να

γίνονται πιο ανταγωνιστικές χάρη στο μεγαλύτερο χρόνο ζωής, στο μικρότερο μέγεθος και στο ότι είναι πιο ελαφριές.



Σχήμα 1.10 Ηλεκτρικό όχημα μπαταρίας[12]

## 2. Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου(Fuel cell EVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου ( $H_2$ ), η οποία τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο, παράγοντας ηλεκτρισμό με παραπροϊόντα θερμότητα και νερό. Διάφοροι τρόποι για την αποθήκευση ή την παραγωγή υδρογόνου πάνω στο ίδιο το όχημα μελετώνται, στους οποίους περιλαμβάνεται η συμπίεση του αερίου  $H_2$ , η δέσμευσή του σε μέταλλα, καθώς και η παραγωγή επί του οχήματος από φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη ή άλλο καύσιμο. Σήμερα, ένας αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου κυκλοφορεί στους δρόμους παγκοσμίως. Ωστόσο, η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του  $H_2$ , η επί του οχήματος αποθήκευσή του  $H_2$  και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σημαντικά προβλήματα που αφήνουν ανοιχτό το ερώτημα κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου θα αποτελέσουν μια πρακτική και συμφέρουσα λύση στο μέλλον.

## 3. Υβριδικά οχήματα (Hybrid EVs)

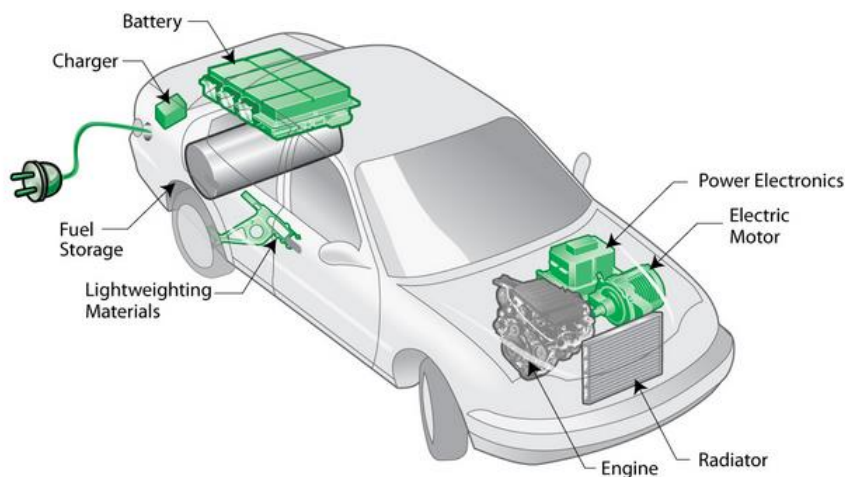
Τα σύγχρονα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν και ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση τους. Κάθε υβριδικό όχημα είναι με τρόπο τέτοιο σχεδιασμένο ώστε να φορτίζει τις μπαταρίες του μέσω του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος», δηλαδή χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται κατά το φρενάρισμα για τη φόρτιση της μπαταρίας. Την ενέργεια

αυτή τη χρησιμοποιεί στη συνέχεια για τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα χωρίς να χρειάζεται να συνδεθεί στο δίκτυο.

Ένα υβριδικό όχημα «παράλληλης» λειτουργίας χρησιμοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα ή τη μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση του οχήματος. Ένα υβριδικό «σειριακής» λειτουργίας χρησιμοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα για να παράγει την επιπλέον ενέργεια στη μηχανή εσωτερικής καύσης όταν τη χρειάζεται, για παράδειγμα κατά την εκκίνηση ή την επιτάχυνση. Όλα έχουν τη δυνατότητα να πετύχουν μεγαλύτερη οικονομία καυσίμων σε σχέση με τα συμβατικά βενζινοκίνητα οχήματα. Η αγορά υβριδικών οχημάτων μεγαλώνει συνεχώς, με όλο και περισσότερα μοντέλα να διατίθενται στους καταναλωτές.

#### 4. Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EVs)

Με τον όρο 'Plug-in EVs' εννοούμε τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται στο δίκτυο και να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Κάθε ένας από τους τύπους οχημάτων που προαναφέρθηκαν μπορεί με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού να αποκτήσει αυτή τη δυνατότητα. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας έχουν από κατασκευής τους τον εξοπλισμό που απαιτείται για σύνδεση στο δίκτυο καθώς έτσι φορτίζουν τις μπαταρίες τους (ή τις εκφορτίζουν σε περίπτωση που το δίκτυο έχει ανάγκη την αποθηκευμένη σε αυτές ενέργεια). Τα υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο έχουν μεγαλύτερη μπαταρία από τα απλά υβριδικά και χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, ενέργειας από το «αναπαραγωγικό φρενάρισμα» καθώς και ενέργειας από μηχανή εσωτερικής καύσης ή κυψέλη καυσίμου για να κινηθούν. Στην ουσία, φορτίζουν όσο είναι σταθμευμένα κι έτσι για μικρές διαδρομές δε χρειάζεται να χρησιμοποιήσουν καθόλου καύσιμο.[14]



**Σχήμα 1.11 Plug-in hybrid ηλεκτρικό όχημα[13]**

## 1.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα εξής:

- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον: δεν εκπέμπουν ρύπους και επομένως δεν συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτισή τους προέρχεται για παράδειγμα από την καύση ορυκτών καυσίμων, τότε εκπέμπονται ρύποι κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού που τροφοδοτεί τα οχήματα αυτά. Επομένως, ιδανικά, θα πρέπει ο ηλεκτρισμός να προέρχεται από πυρηνική, υδροηλεκτρική, ηλιακή ή αιολική ενέργεια.
- Είναι ενεργειακά αποδοτικότερα: Οι ηλεκτροκινητήρες μετατρέπουν το 75% της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες για την κίνηση των τροχών, ενώ αντίθετα οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη βενζίνη.
- Μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση καθώς ο ηλεκτρισμός είναι μια εγχώρια πηγή ενέργειας.
- Οι ηλεκτροκινητήρες παρέχουν αθόρυβη, ομαλή λειτουργία και καλύτερη επιτάχυνση κι απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Μεταφορά ενέργειας προς το δίκτυο (V2G): Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία θα μπορούν να φορτίζουν κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης ισχύος και να εκφορτίζουν τις χρονικές περιόδους που η ζήτηση είναι υψηλή. Η διάρθρωση των ενεργειακών συστημάτων είναι τέτοια, που θα πρέπει κάθε χρονική στιγμή να ισχύει το ισοζύγιο ισχύος ανάμεσα στην παραγωγή και το φορτίο. Έτσι εξασφαλίζεται η σταθερότητα των τιμών τάσης και συχνότητας που καθορίζουν την ποιότητα προσφερόμενης ισχύος. Με τα ηλεκτρικά οχήματα θα συγκεντρώνεται ένα σημαντικό ποσό ισχύος προς εφεδρεία για τις αιφνίδιες αιχμές του συστήματος.

## 1.2.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Ωστόσο για την καθιέρωση των ηλεκτρικών οχημάτων χρειάζεται περαιτέρω έρευνα ώστε να αντιμετωπιστούν σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με την τεχνολογία των συσσωρευτών:

- Μέγιστη διανυόμενη απόσταση: Στο παρελθόν κάθε 60 χιλιόμετρα χρειάζονταν επαναφόρτιση. Ωστόσο, τα πιο σύγχρονα μοντέλα επιτυγχάνουν αυτονομία που ξεκινάει από 100 έως 120 χιλιόμετρα στα αυτοκίνητα πόλης και φτάνει τα 250-300 χιλιόμετρα σε αυτοκίνητα μεγάλης ισχύος.
- Διάρκεια ζωής μπαταριών: Η διάρκεια ζωής μπαταριών είναι συνήθως 3 - 4 χρόνια ή περίπου 1500 κύκλοι λειτουργίας (300-400 κύκλοι λειτουργίας ανά έτος).
- Μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης: Πλήρης επαναφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών μπορεί να διαρκέσει από 4 έως 8 ώρες για μια τυπική φόρτιση. Αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμό στη διανυόμενη απόσταση καθιστά το

ηλεκτρικό όχημα απαγορευτικό για μεγάλες αποστάσεις ή ταξίδια. Λύση σε αυτό το πρόβλημα φαίνεται να αποτελούν οι σταθμοί ταχείας φόρτισης που τοποθετούνται κατά μήκος των αυτοκινητόδρομων.

- Όγκος μπαταριών: Οι συστοιχίες των συσσωρευτών έχουν μεγάλο βάρος και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο όχημα. Σε αυτές πρέπει να προστεθεί και ο χώρος που καταλαμβάνουν τα διάφορα συστήματα ασφαλείας για την προστασία έναντι πυρκαγιάς λόγω υπερθέρμανσης ή βραχυκυκλώματος των μπαταριών.
- Υψηλό κόστος: Το κόστος κατασκευής των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αρκετά υψηλό λόγω του εξοπλισμού τους και κυρίως των συσσωρευτών. Λόγω της μικρής διείσδυσης τους στην αγορά, είναι φυσιολογικό το κόστος πώλησής τους να παραμένει σε υψηλά επίπεδα προς το παρόν.

## 1.2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Οι σταθμοί φόρτισης ανάλογα με τρόπο σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

### I. Αγώγιμη φόρτιση

Σ' αυτή τη φόρτιση χρησιμοποιείται ένα καλώδιο για τη σύνδεση μεταξύ του οχήματος και του ηλεκτρικού δικτύου. Το καλώδιο μπορεί να τροφοδοτηθεί από μία συγκεκριμένη πρίζα ή από ένα σταθμό φόρτισης. Το σύστημα ελέγχου της φόρτισης είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του ηλεκτρικού οχήματος.

### II. Επαγωγική φόρτιση

Στο σύστημα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρεται ισχύς μέσω μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση αυτή έχουν εξαλειφθεί εντελώς τα καλώδια και το σύστημα ελέγχου φόρτισης βρίσκεται εκτός του οχήματος. Είναι επίσης δυνατή η κατασκευή λωρίδων φόρτισης σε αυτοκινητόδρομους που θα επιτρέπουν τη φόρτιση κατά την οδήγηση. Ως εκ τούτου, η επαγωγική φόρτιση μπορεί να ελαττώσει σημαντικά την ανάγκη για υποδομές ταχείας φόρτισης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο τεχνολογιών φόρτισης.

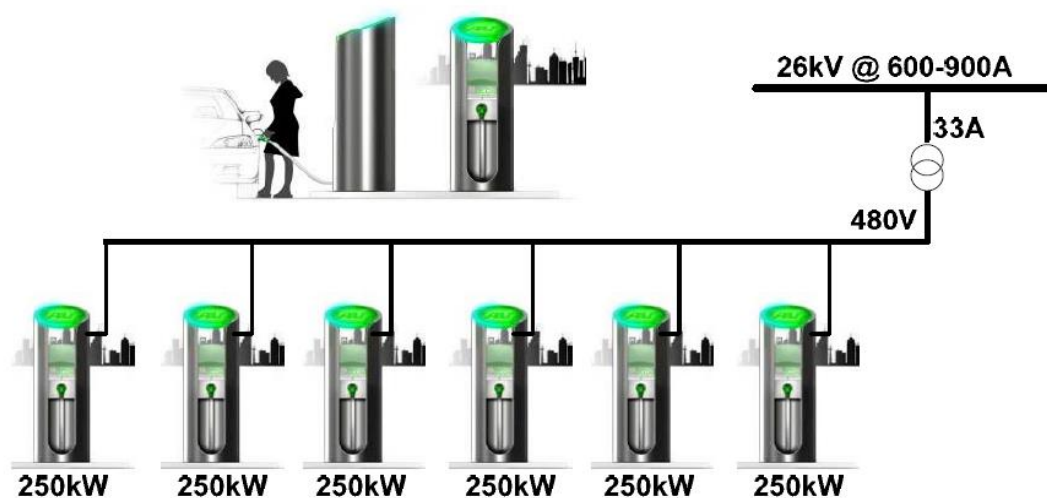
	<i>Επαγωγική φόρτιση</i>	<i>Αγώγιμη Φόρτιση</i>
<b>ΚΟΣΤΟΣ</b>	ακριβότερη	φθηνότερη
<b>ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ</b>	πολύπλοκη	πιο απλή
<b>ΑΣΦΑΛΕΙΑ</b>	ασφαλής/καλύτερη μόνωση	αρκετά ασφαλής λόγω μεθόδων ανίχνευσης σφάλματος
<b>ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ</b>	λιγότερο αποδοτική	πιο αποδοτική

**Σχήμα 1.12 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επαγωγικής και αγώγιμης φόρτισης**



Οι σταθμοί φόρτισης αγωγίμης φόρτισης χωρίζονται σε περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της ισχύος της φόρτισης. Υπάρχουν σταθμοί φόρτισης που παρέχουν AC σύνδεση (μονοφασική ή τριφασική) αλλά και σταθμοί φόρτισης με DC σύνδεση. Ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να φορτιστούν οι μπαταρίες, είναι πολύ σημαντικός. Για αυτό το λόγο συνηθίζεται ανάλογα με το χρόνο και την παρεχόμενη ισχύ να αναφερόμαστε σε φόρτιση επιπέδου 1,2 και 3.

- **Μονοφασική AC παροχή(Επίπεδο 1):** Αντίστοιχες παροχές υπάρχουν και στις οικιακές κατοικίες για την ηλεκτροδότηση καθημερινών συσκευών. Η φόρτιση από μονοφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
  - 230V/16A ~ 3 kW , Διάρκεια φόρτισης: 6-8 ώρες
  - 230V/32A ~ 7 kW , Διάρκεια φόρτισης: 4-6 ώρες
- **Τριφασική AC παροχή(Επίπεδο 2):** Παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ισχύος χωρίς να απαιτούνται μεγάλες τάσεις ή ρεύματα. Η φόρτιση από τριφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
  - 400V/16A ~ 11 kW , Διάρκεια φόρτισης: 2-4 ώρες
  - 400V/32A ~ 22 kW , Διάρκεια φόρτισης: 1-2 ώρες
- **DC παροχή(Επίπεδο 3):** Το επίπεδο φόρτισης αυτό είναι γνωστό και ως «ταχεία φόρτιση»(fast charging). Για να επιτευχθεί πολύ μικρός χρόνος φόρτισης (15-30 λεπτά) οι σταθμοί φόρτισης αυτού του επιπέδου παρέχουν ισχύ (μεγαλύτερη από 40kW) σε πολύ υψηλές DC τάσεις (έως 500 V<sub>dc</sub>) και πολύ υψηλά ρεύματα (έως 125A), σύμφωνα με τη μέθοδο ChAdeMO. Οι σταθμοί φόρτισης με φορτιστές τύπου ChAdeMO συνήθως εγκαθίστανται κατά μήκος οδικών αξόνων ή σε άλλα σημεία στα οποία η ανάγκη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να ικανοποιηθεί στο συντομότερο χρονικό διάστημα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται 6 σταθμοί ταχείας φόρτισης που ο καθένας έχει μέγεθος 250kW.[15]



Σχήμα 1.13 Σταθμοί ταχείας φόρτισης 250 kW[15]



## 1.2.5 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Όσον αφορά την επίδραση που θα έχει η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πολιτική φόρτισης που θα επιλεγεί από τους χρήστες. Οι στρατηγικές φόρτισης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

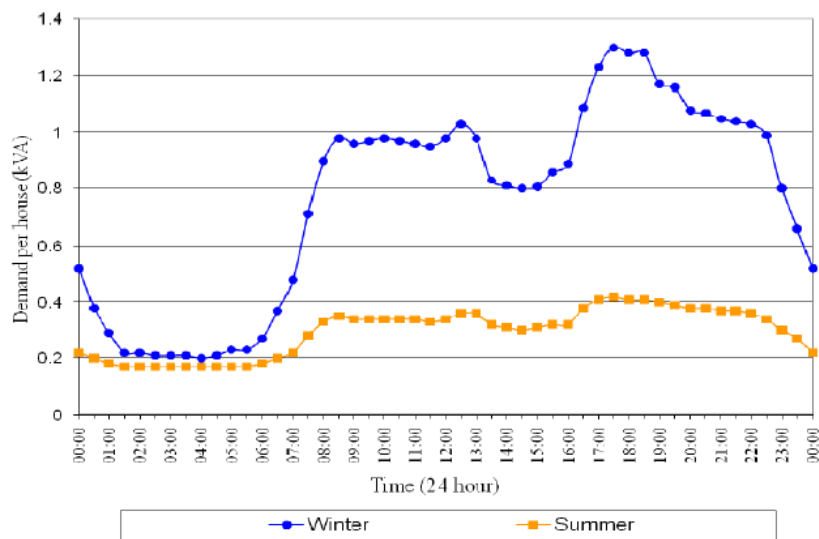
- Μη ελεγχόμενη φόρτιση(Dumb charging): Αποτελεί τη μη σχεδιασμένη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ελεύθεροι να φορτίσουν τα οχήματα τους οποιαδήποτε στιγμή χωρίς κανένα είδος ελέγχου ή χωρίς να τους δοθεί κάποιο κίνητρο να φορτίσουν τα οχήματα τους σε ώρα χαμηλής ζήτησης. Η φόρτιση ξεκινά αυτόματα τη στιγμή που το αυτοκίνητο θα συνδεθεί στο δίκτυο μέχρι να φορτιστεί πλήρως ή ο ιδιοκτήτης να διακόψει τη φόρτιση. Σε περίπτωση που πολλοί χρήστες επιλέξουν αυτόν τον τρόπο φόρτισης ενδέχεται να υπάρξουν προβλήματα στο δίκτυο όπως πτώσεις τάσεις ή υπερφορτώσεις γραμμών.
- Φόρτιση πολλαπλής χρέωσης(Multiple Tariff charging): Στην περίπτωση αυτή, όπως και στην προηγούμενη, ο χρήστης είναι ελεύθερος να φορτίσει το όχημά του οποιαδήποτε στιγμή. Στην περίπτωση αυτή όμως η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερή όλη τη μέρα αλλά τις ώρες με χαμηλή ζήτηση ενέργειας το κόστος είναι μειωμένο.
- Εξυπνη φόρτιση(Smart charging): Σε αυτό το σενάριο, το φορτίο μετακινείται από τις περιόδους αιχμής στις περιόδους μη αιχμής. Αυτή η στρατηγική φόρτισης τοποθετεί τη ζήτηση ισχύος εκ μέρους των οχημάτων σε ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή. Τυπικά, η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια των ωρών μη αιχμής είναι περιορισμένη και αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση της φόρτισης.
- Από το όχημα στο δίκτυο(Vehicle-to-Grid V2G): Αυτή η στρατηγική μπορεί να θεωρηθεί σαν μία επέκταση της έξυπνης φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ροή φορτίου όχι μόνο από το δίκτυο στα οχήματα, αλλά και το αντίστροφο. Καθώς η ημερήσια κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων διαρκεί 2 με 4 ώρες και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις καταναλώνουν ένα μικρό κομμάτι της μπαταρίας του, η επιπλέον ισχύ της μπαταρίας θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως πηγή ενέργειας ή ως παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, συμβάλλοντας σε μια πιο σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.[11]

## 1.2.5 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΩΣ ΦΟΡΤΙΑ

Όταν τα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται στο δίκτυο με σκοπό τη φόρτιση των μπαταριών τους λειτουργούν ως φορτία. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω με τη λήψη κατάλληλων ρυθμιστικών μέτρων σε κάθε χώρα είναι δυνατόν να πραγματοποιείται η φόρτιση κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης, έτσι ώστε να μην αυξάνεται η ισχύς του

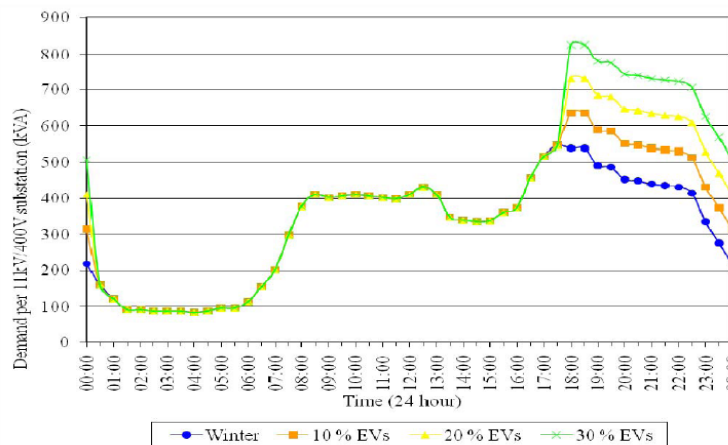
συστήματος. Με τον τρόπο αυτό τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ένα ελεγχόμενο φορτίο και μέσω της μείωσης των διακυμάνσεων της ζήτησης, συμβάλλουν στην εξομάλυνση της καμπύλης της ζήτησης, δηλαδή στην προσέγγιση της ιδανικής της μορφής.

Σαν παράδειγμα των παραπάνω αναφέρεται μια έρευνα που έχει γίνει για το σύστημα της Βρετανίας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική καμπύλη ζήτησης οικιακών καταναλωτών για μια χειμωνιάτικη και μία καλοκαιρινή μέρα. Για την υπόλοιπη μελέτη θεωρήθηκε μόνο η χειμερινή μέρα γιατί σε αυτή παρατηρείται η μέγιστη ζήτηση.



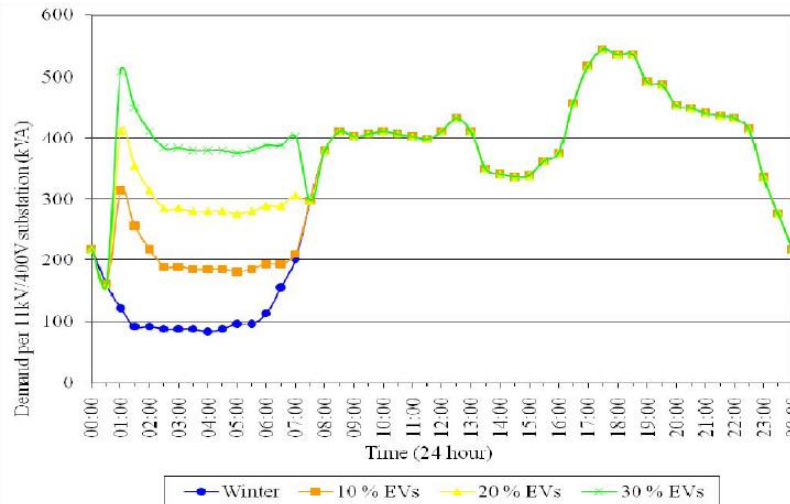
**Σχήμα 1.14** Τυπική καμπύλη φορτίου για οικιακό καταναλωτή[16]

Στο πρώτο σενάριο που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη έρευνα θεωρήθηκε μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging). Επομένως, σε αυτή την περίπτωση οι καταναλωτές πιθανότατα να φορτίζουν το αυτοκίνητό τους όταν επιστρέφουν από τη δουλειά τους, για παράδειγμα στις 6μ.μ. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της αιχμής του φορτίου όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, για διάφορα ποσοστά διείσδυσης οχημάτων.



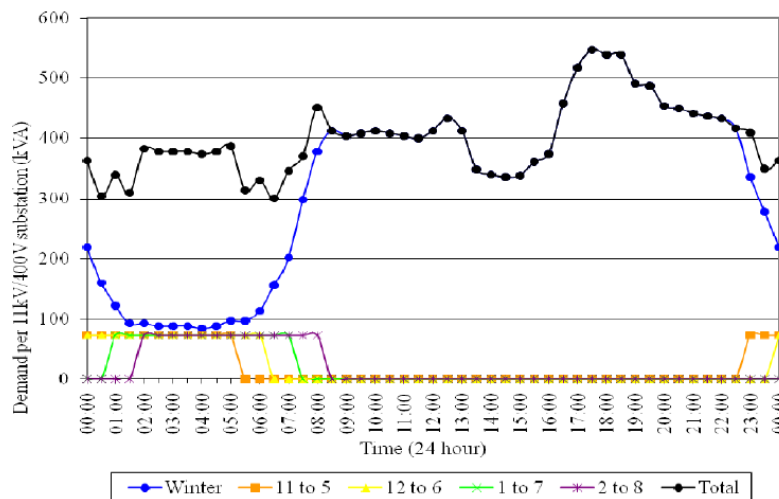
**Σχήμα 1.15** Χειμερινή καμπύλη φορτίου, μη ελεγχόμενη φόρτιση[16]

Σύμφωνα με το επόμενο σενάριο, απλά πραγματοποιείται φόρτιση κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης απλά με την τοποθέτηση ενός χρονισμένου ελεγκτή στο κύκλωμα φόρτισης, ο οποίος προγραμματίζει την έναρξη φόρτισης στη 1 π.μ. και τη λήξη της στις 7 π.μ. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η βελτίωση στην καμπύλη φορτίου του δικτύου και η απουσία επίδρασης στην αιχμή του.



Σχήμα 1.16 Χειμερινή καμπύλη φορτίου, ελεγχόμενη φόρτιση[16]

Και βέβαια με περαιτέρω έλεγχο(έξυπνη φόρτιση-smart charging) για παράδειγμα με διαμερισμό των οχημάτων μεταξύ των ωραρίων 11μμ-5πμ, 12-6πμ, 1πμ-7πμ,2πμ-8πμ εξομαλύνεται ακόμα περισσότερο η καμπύλη ζήτησης καθώς αποφεύγεται μια αιχμή μετά τα μεσάνυχτα και μια βύθιση στις 7πμ όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.17.[16]



Σχήμα 1.17 Χειμερινή καμπύλη φορτίου, έξυπνη φόρτιση[16]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν έναν αριθμό περιορισμών που η λύση πρέπει να ικανοποιεί. Έτσι, ο σκοπός των βελτιστοποιήσεων με περιορισμούς είναι να ψάξει για εφικτές λύσεις με καλύτερες αντικειμενικές τιμές. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Ζητείται η εύρεση του  $\mathbf{x}$  έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  και να υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

$$\mathbf{h}_j(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2.2)$$

όπου  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_d]^T$  συμβολίζει το διάνυσμα της λύσης,  $n$  είναι ο αριθμός των ανισοτικών περιορισμών και  $p$  ο αριθμός των ισοτικών περιορισμών. Πρακτικά, ένας ισοτικός περιορισμός  $h_j(\mathbf{x})=0$  μπορεί να αντικατασταθεί από δύο μη ανισοτικούς περιορισμούς  $h_j(\mathbf{x}) \leq \delta$  και  $h_j(\mathbf{x}) \geq -\delta$  ( $\delta$  είναι μια πολύ μικρή ποσότητα). Επομένως όλοι οι περιορισμοί μπορούν να μετασχηματιστούν σε  $N=2n+p$  ανισοτικούς περιορισμούς. Καλούμε το  $\mathbf{x}$  εφικτή(feasible) λύση αν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

Παραδοσιακοί μαθηματικοί μέθοδοι προγραμματισμού όπως η μέθοδος του πολλαπλασιαστή Lagrange συνήθως απαιτούν πληροφορίες της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης. Παράλληλα, η λύση που προκύπτει συνήθως τείνει να είναι τοπικό(local) βέλτιστο. Τα τελευταία χρόνια, διάφοροι εξελικτικοί αλγόριθμοι(Evolutionary algorithms-EAs) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μια σειρά από προβλήματα βελτιστοποίησης χάρη στα πλεονεκτήματά τους υπέρ των παλαιότερων μεθόδων. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν η αντικειμενική συνάρτηση να είναι παραγωγίσιμη-ούτε καν συνεχής- και λόγω του ότι εξερευνούν όλο το εύρος της περιοχής που βρίσκεται η λύση παρουσιάζουν ολικό(global) βέλτιστο. Το 1995 αναπτύχθηκε μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης από τους Kennedy και Eberhart, η μέθοδος των ατόμων σμήνους(Particle Swarm Optimization-PSO). Η ανάπτυξη της PSO βασίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς ατόμων σμήνους, όπως για παράδειγμα ένα σμήνος πουλιών ή ψαριών. Στην αναζήτησή τους για τροφή από το ένα μέρος στο άλλο, πάντα υπάρχει κάποιο μέλος του σμήνους που έχει μεγαλύτερη ικανότητα στο να εντοπίσει την τροφή. Καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση και μετάδοση πληροφορίας μεταξύ των ατόμων του σμήνους, το σμήνος τελικά θα μετακινηθεί προς την περιοχή όπου υπάρχει τροφή. Στη μέθοδο της PSO υπάρχει ένας αριθμός ατόμων(particles) τα οποία τοποθετούνται στο χώρο αναζήτησης ενός προβλήματος ή μιας συνάρτησης και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην τρέχουσα θέση. Κάθε σωματίδιο καθορίζει στη συνέχεια την κίνησή του στο χώρο αναζήτησης βασιζόμενο τόσο στη δική του

εμπειρία (τρέχουσα και καλύτερη θέση) όσο και στην εμπειρία των υπόλοιπων ατόμων του πληθυσμού. Η επόμενη επανάληψη λαμβάνει χώρα αφού έχουν κινηθεί όλα τα σωματίδια. Τελικά, το σμήνος ως σύνολο θα προσεγγίσει τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης.

Χάρη στην γρήγορη σύγκλιση και στην εύκολη εφαρμογή της η PSO έχει κερδίσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και έχει εφαρμοστεί επιτυχημένα σε πολλούς τομείς κυρίως για προβλήματα βελτιστοποίησης συνεχών μεταβλητών χωρίς περιορισμούς. Όσον αφορά τα προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς έχουν προταθεί διάφορες υβριδικές μέθοδοι. Εμείς θα ασχοληθούμε με μια υβριδική PSO (Hybrid PSO) η οποία χρησιμοποιεί έναν κανόνα που βασίζεται στο αν η λύση υπακούει στους περιορισμούς (feasibility-based rule). [18]

### Πλεονεκτήματα PSO

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της PSO συνοψίζονται:

- ❖ Η PSO βασίζεται στη νοημοσύνη. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην επιστημονική έρευνα όσο και για βιομηχανική χρήση.
- ❖ Δεν περιλαμβάνει μεταλλάξεις και διασταυρώσεις σωματιδίων. Η αναζήτηση εξαρτάται από την ταχύτητα των ατόμων. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των γενεών, μόνο το άτομο με τη βέλτιστη λύση μπορεί να μεταδώσει πληροφορίες στα υπόλοιπα άτομα και η ταχύτητα αναζήτησης είναι πολύ μεγάλη.
- ❖ Ο υπολογισμός της PSO είναι πολύ απλός. Σε σύγκριση με άλλους αναπτυσσόμενες μεθόδους, η PSO έχει τη μεγαλύτερη ικανότητα βελτιστοποίησης και μπορεί να ολοκληρωθεί εύκολα.
- ❖ Η ποιότητα της λύσης δεν εξαρτάται από τον αρχικό πληθυσμό αλλά ξεκινώντας από οποιοδήποτε σημείο στο χώρο, η μέθοδος εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση.
- ❖ Χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μπορεί να ψάχνει λύση σε μία πολύπλοκη περιοχή. Αυτό προσδίδει στην PSO μεγαλύτερη ευελιξία από τις συμβατικές μεθόδους. [18]

## **2.2 PSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ**

Η PSO έχει ως σκοπό την εύρεση βέλτιστης λύσης, δηλαδή τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, διεξάγοντας μια στοχαστική αναζήτηση βασισμένη σε έναν πληθυσμό. Ο πληθυσμός αποτελείται από άτομα (particles), το κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μια πιθανή λύση (candidate solution). Αρχικά ο πληθυσμός αρχικοποιείται κατά τυχαίο τρόπο, αλλά έτσι ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας στους οποίους υπόκειται το πρόβλημα, και τα άτομα κινούνται ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου

αναζήτησης με κάποια ταχύτητα(velocity) η οποία μαθηματικά έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τα άτομα. Κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων τα άτομα διορθώνουν τόσο την ταχύτητά τους όσο και τη θέση τους(position) βασιζόμενα στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το κάθε ένα από αυτά(pbest) αλλά και στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει ο συνολικός πληθυσμός(gbest).

Ο κύριος κορμός της PSO είναι δύο σχέσεις ταχύτητας και θέσης του κάθε ατόμου οι οποίες ανανεώνονται συνεχώς όπως ειπώθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, η θέση και η ταχύτητα του κάθε ατόμου αναπαρίστανται από ένα διάνυσμα  $d$  διαστάσεων, όπου  $d$  ο αριθμός των παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Δηλαδή, η θέση και η ταχύτητα του  $i$ -οστού ατόμου έχουν την εξής μορφή:

$\mathbf{X}_i=[\mathbf{X}_{i,1},\mathbf{X}_{i,2},\dots,\mathbf{X}_{i,d}]^T$  και  $\mathbf{V}_i=[\mathbf{V}_{i,1},\mathbf{V}_{i,2},\dots,\mathbf{V}_{i,d}]^T$  αντίστοιχα.

Η βέλτιστη λύση του  $i$ -οστού ατόμου(pbest) συμβολίζεται με  $\mathbf{p}_i=[\mathbf{p}_{i,1},\mathbf{p}_{i,2},\dots,\mathbf{p}_{i,d}]^T$  και η βέλτιστη λύση του συνολικού πληθυσμού(gbest) συμβολίζεται με  $\mathbf{p}_g=[\mathbf{p}_{g,1},\mathbf{p}_{g,2},\dots,\mathbf{p}_{g,d}]^T$ .

Η σχέση σύμφωνα με την οποία ανανεώνεται η ταχύτητα του κάθε ατόμου υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{V}_{i,j}(\mathbf{k} + 1) = w\mathbf{V}_{i,j}(\mathbf{k}) + c_1\mathbf{r}_1 (\mathbf{p}_{i,j} - \mathbf{X}_{i,j}(\mathbf{k})) + c_2\mathbf{r}_2 (\mathbf{p}_{g,j} - \mathbf{X}_{i,j}(\mathbf{k})), j = 1, 2, \dots, d \quad (2.3)$$

Οι  $c_1$  και  $c_2$  είναι δύο θετικές σταθερές που ονομάζονται συντελεστές βαρύτητας, ενώ οι  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  είναι δύο τυχαίες μεταβλητές που παίρνουν τιμή στο διάστημα  $[0,1]$  προσδίδοντας στον αλγόριθμο στοχαστικό χαρακτήρα. Η παράμετρος  $w$  ονομάζεται παράγοντας αδράνειας(inertia factor) και ελέγχει πως επηρεάζουν οι προηγούμενες ταχύτητες τις καινούριες. Όσον αφορά τα πρώτα στάδια της αναζήτησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μεγάλες τιμές του  $w$  ενώ όταν πρόκειται για τις τελευταίες επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος έχει ήδη προσεγγίσει την περιοχή της βέλτιστης λύσης, είναι αποδοτικότερο να χρησιμοποιούνται μικρές τιμές του  $w$  έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη και πιο λεπτομερής τοπική αναζήτηση. Έτσι το  $w$  παρουσιάζεται να μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$w = w_{\max} - \left( \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iterations}} \right) G_{\max} \quad (2.4)$$

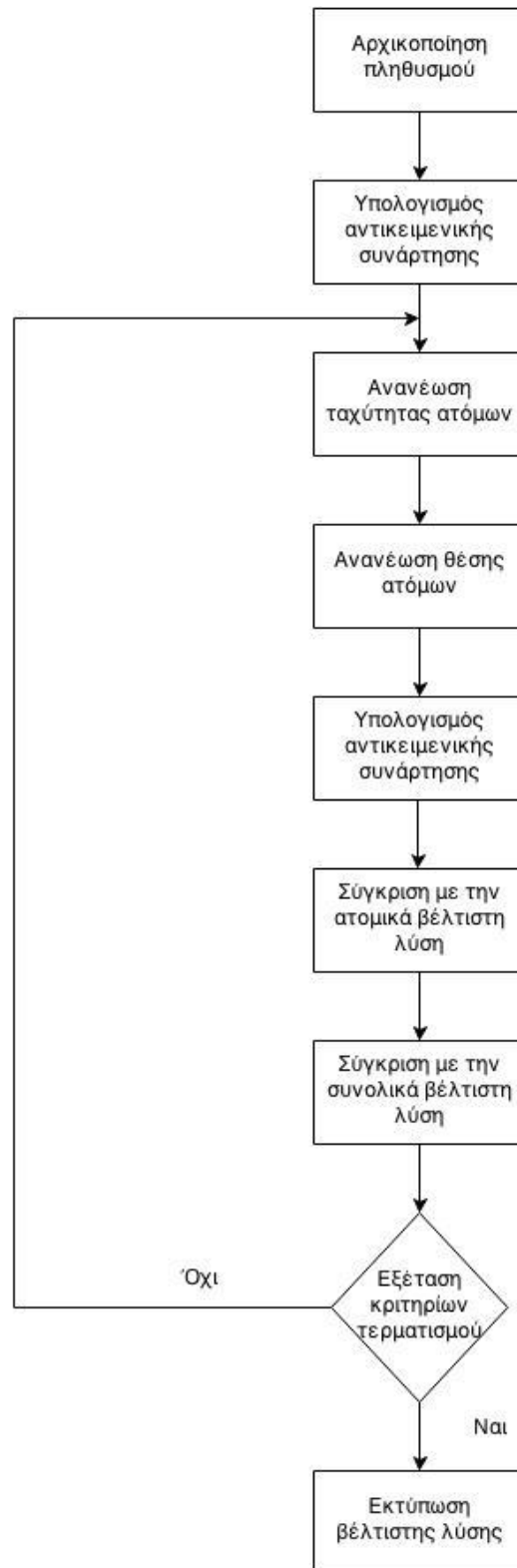
όπου iterations ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης,  $G_{\max}$  οι συνολικές επαναλήψεις και  $w_{\max}$  και  $w_{\min}$  η μέγιστη και η ελάχιστη αντίστοιχα τιμή που έχουμε ορίσει.

Μετά την ανανέωση της ταχύτητας, η νέα θέση του κάθε ατόμου για την επόμενη γενιά ανανεώνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{X}_{i,j}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{X}_{i,j}(\mathbf{k}) + \mathbf{V}_{i,j}(\mathbf{k} + 1), j = 1, 2, \dots, d \quad (2.5)$$

Αφού γίνει ο υπολογισμός της νέας θέσης και ταχύτητας, ανανεώνονται τα pbest και gbest στην περίπτωση που το άτομο ή ο πληθυσμός έχει επιτύχει κάποια καλύτερη λύση. Μετά από αυτό το βήμα εξετάζεται αν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού. Αν αυτές ικανοποιούνται ο αλγόριθμος τερματίζεται ενώ αν όχι, αυτός

προχωράει στην επόμενη επαναληπτική διαδικασία. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου PSO.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής PSO[17]

## 2.3 THE FEASIBILITY-BASED RULE

Χάρη στην απλή και εύκολη εφαρμογή της, η συνάρτηση ποινής (penalty function) έχει καθιερωθεί ως η πιο γνωστή τεχνική για το χειρισμό των περιορισμών. Μία συνάρτηση ποινής μπορεί να σχηματιστεί ως εξής:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^N \mathbf{w}_j \times \mathbf{G}_j \quad (2.6)$$

όπου  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση, η  $\mathbf{G}_j$  συμβολίζει την παραβίαση των περιορισμών (constraint violation) για τον  $j$ -οστό περιορισμό και το  $\mathbf{w}_j$  αποτελεί τον παράγοντα ποινής (penalty factor). Από τη στιγμή που η παραβίαση των περιορισμών είναι ενσωματωμένη στην αντικειμενική συνάρτηση, αυτή η προσέγγιση επηρεάζεται σημαντικά από τον παράγοντα ποινής. Αυτοί οι παράγοντες ποινής όμως είναι συνήθως δύσκολο να καθοριστούν.

Για να χειριστούμε τους περιορισμούς ενός προβλήματος μπορούμε να θεωρήσουμε έναν κανόνα ο οποίος μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- (1) Ανάμεσα σε δύο λύσεις που η μία υπακούει στους περιορισμούς (εφικτή-feasible) και η άλλη (μη εφικτή-infeasible) όχι, επιλέγουμε την εφικτή.
- (2) Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει την καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση.
- (3) Μεταξύ δύο μη εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει τη μικρότερη παραβίαση περιορισμών.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω κριτήρια, η παραβίαση των περιορισμών δεν είναι ενσωματωμένη στην αντικειμενική συνάρτηση. Συνεπώς, ο παράγοντας ποινής δε θα χρησιμοποιηθεί καθόλου. Επιπρόσθετα, στις περιπτώσεις (1) και (3) η αναζήτηση τείνει στην εφικτή περιοχή (feasible region) παρά στη μη εφικτή, ενώ στην περίπτωση (2) η αναζήτηση τείνει στην εφικτή περιοχή με την καλύτερη λύση. Εν συντομία, ένας τόσο απλός κανόνας σκοπεύει στην εύρεση μιας λύσης η οποία υπακούει στους περιορισμούς.[17]

## 2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ-SIMULATED ANNEALING(SA)

Ο Kickpatrich το 1983 πρότεινε έναν στοχαστικό αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στην αναλογία μεταξύ της σκλήρυνσης των στερεών και του προβλήματος της λύσης συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η διαδικασία annealing αποτελεί τη φυσική διεργασία της έντονης θέρμανσης (heating up) ενός στερεού και κατόπιν της ψύξης του (cooling it down) ωσότου αυτό κρυσταλλώσει. Τα άτομα μέσα στο υλικό έχουν υψηλές ενέργειες σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως έχουν



περισσότερη ελευθερία. Ενώ η θερμοκρασία μειώνεται, μειώνονται παράλληλα και οι ατομικές ενέργειες. Ένας κρύσταλλος με ομαλή δομή επιτυγχάνεται στην κατάσταση όπου το σύστημα έχει ελάχιστη ενέργεια. Στην αναλογία μεταξύ ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης και της annealing διαδικασίας, οι καταστάσεις του στερεού αντιπροσωπεύουν εφικτές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι ενέργειες των καταστάσεων αντιστοιχούν στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που υπολογίζεται γι' αυτές τις λύσεις και η ελάχιστη ενέργεια αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Ο αλγόριθμος αποτελείται από μία ακολουθία επαναλήψεων. Κάθε επανάληψη αποτελείται από τυχαία αλλαγή της τρέχουσας λύσης ώστε να δημιουργήσει μια νέα λύση μέσα στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης. Μια νέα λύση που δημιουργήθηκε αντιπροσωπεύει μια αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση που υπολογίστηκε για να αποφασιστεί το κατά πόσον η νέα παραγόμενη λύση μπορεί να γίνει αποδεκτή ως η τρέχουσα λύση. Εάν η αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση είναι αρνητική η νέα παραγόμενη λύση θεωρείται άμεσα η τρέχουσα λύση. Εάν η διαφορά μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης της τρέχουσας και της νέας παραγόμενης λύσης είναι ίση ή μεγαλύτερη από 0, ένας τυχαίος αριθμός που ανήκει στο διάστημα [0,1] γεννιέται από μία ομοιόμορφη κατανομή και εάν είναι μικρότερος του  $\exp(-\Delta E/t)$  τότε η νέα παραγόμενη λύση γίνεται αποδεκτή ως η τρέχουσα λύση. Εάν όχι, τότε η τρέχουσα λύση παραμένει αμετάβλητη. Η παράμετρος  $t$  είναι μια παράμετρος ελέγχου που συμβολίζει τη θερμοκρασία της προσομοίωσης. Η SA παρέχει ένα μηχανισμό όπου στοχαστικά οδηγεί στην απομάκρυνση από το τοπικό βέλτιστο. Έχει αποδειχτεί θεωρητικά ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες η SA συγκλίνει με πιθανότητα 1.[17],[19]

## 2.5 HPSO ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

### ➤ Ανανέωση pbest και gbest

Η παραβίαση των περιορισμών μιας μη εφικτής λύσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{viol}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N [\max(\mathbf{g}_j(\mathbf{x}), 0)] \quad (2.7)$$

Υποθέτουμε ότι  $\mathbf{P}_i(\mathbf{k})$  είναι η καλύτερη λύση του  $i$ -οστού ατόμου(pbest) στην επανάληψη  $k$  και  $\mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)$  είναι η ανανεωμένη θέση του  $i$ -οστού ατόμου στην επανάληψη  $k+1$ . Στην κανονική PSO η ανανεωμένη θέση της νέας επανάληψης καταχωρείται ως η καλύτερη λύση του ατόμου μόνο αν έχει καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση. Στην υβριδική PSO όμως υπάρχει και ο κανόνας που υπόκειται στους περιορισμούς. Έτσι το  $\mathbf{P}_i(\mathbf{k})$  θα αντικατασταθεί από τη θέση  $\mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)$  σε καθένα από τα ακόλουθα σενάρια:

- (1) Το  $\mathbf{P}_i(\mathbf{k})$  είναι μη εφικτή, ενώ το  $\mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)$  εφικτή.

- (2) Τα  $\mathbf{P}_i(\mathbf{k}), \mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)$  αποτελούν και οι δύο εφικτές λύσεις αλλά η ανανεωμένη θέση του ατόμου έχει καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή  $f(\mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)) < f(\mathbf{P}_i(\mathbf{k}))$ .
- (3) Τα  $\mathbf{P}_i(\mathbf{k}), \mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)$  αποτελούν και οι δύο μη εφικτές λύσεις αλλά η ανανεωμένη θέση του ατόμου έχει μικρότερη παραβίαση περιορισμών, δηλαδή  $\text{viol}(\mathbf{X}_i(\mathbf{k}+1)) < \text{viol}(\mathbf{P}_i(\mathbf{k}))$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω σενάρια σε κάθε επανάληψη ανανεώνεται και το  $\mathbf{g}_{\text{best}}$ .

➤ Τοπική αναζήτηση του  $\mathbf{g}_{\text{best}}$  σύμφωνα με την SA

Σύμφωνα με τον feasibility-based rule οι εφικτές λύσεις θεωρούνται καλύτερες από τις μη εφικτές. Το γεγονός αυτό της επιλογής εφικτών λύσεων μπορεί να προκαλέσει την πρόωρη σύγκλιση. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται η simulated annealing, όπου με την ιδιότητά της να ανανεώνει το  $\mathbf{g}_{\text{best}}$  σε γειτονικές περιοχές βοηθάει την αναζήτηση να “ξεφεύγει” από τοπικό βέλτιστο. Υποθέτοντας ότι με  $\mathbf{P}_g(\mathbf{k})$  συμβολίζεται η ολική βέλτιστη λύση ( $\mathbf{g}_{\text{best}}$ ) στην επανάληψη  $k$  και με  $\mathbf{p}_a$  η αποδεκτή πιθανότητα μιας νέας λύσης, τότε η διαδικασία αναζήτησης  $\mathbf{g}_{\text{best}}$  περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1

Θέτουμε  $\mathbf{m}=1$  και  $\mathbf{P}_g' = \mathbf{P}_g(\mathbf{k})$

Βήμα 2

Παράγουμε μια νέα λύση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_{g'} + \boldsymbol{\eta} \times (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \times \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1}) \quad (2.8)$$

όπου η μεταβλητή  $\boldsymbol{\eta}$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει το βήμα,  $\mathbf{X}_{\max}$  και  $\mathbf{X}_{\min}$  τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των λύσεων που ορίζονται από το πρόβλημα και  $\mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$  συμβολίζει μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα συμβολίζει έναν τυχαίο αριθμό ομαλής κατανομής με μέσο 0 και διασπορά 1.

Βήμα 3

Υπολογίζουμε την  $\mathbf{p}_a$  σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

- (1) Αν το  $\mathbf{x}'$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{P}_g'$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{1}$ .
- (2) Αν το  $\mathbf{P}_g'$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{x}'$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{0}$ .
- (3) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_g'$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι εφικτές λύσεις τότε το  $\mathbf{p}_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{p}_a = \min \left\{ \mathbf{1}, \exp \left[ \frac{f(\mathbf{P}_{g'}) - f(\mathbf{x}')}{t(\mathbf{k})} \right] \right\} \quad (2.9)$$

- (4) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_g'$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι μη εφικτές λύσεις τότε το  $\mathbf{p}_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{\text{viol}(P_{g'}) - \text{viol}(x')}{t(k)} \right] \right\} \quad (2.10)$$

όπου  $t(k)$  αποτελεί τη θερμοκρασία της επανάληψης  $k$ .

#### Βήμα 4

Αν  $p_a \geq U[0,1]$ , τότε  $P_{g'} = x'$ ,

όπου η  $U[0,1]$  αντιπροσωπεύει έναν τυχαίο αριθμό που ανήκει στην ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0,1]$ .

#### Βήμα 5

Θέτουμε  $m=m+1$ . Αν  $m > L$  τότε σταματάμε τη διαδικασία και το  $P_g$  καταχωρείται ως το νέο gbest. Αλλιώς πηγαίνουμε στο βήμα 2,

Όπου  $L$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που ορίζεται για να σταματήσει η αναζήτηση του gbest.

Η αρχική θερμοκρασία υπολογίζεται από την εμπειρική φόρμουλα:

$$t_0 = - \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\ln(0.1)} \quad (2.11)$$

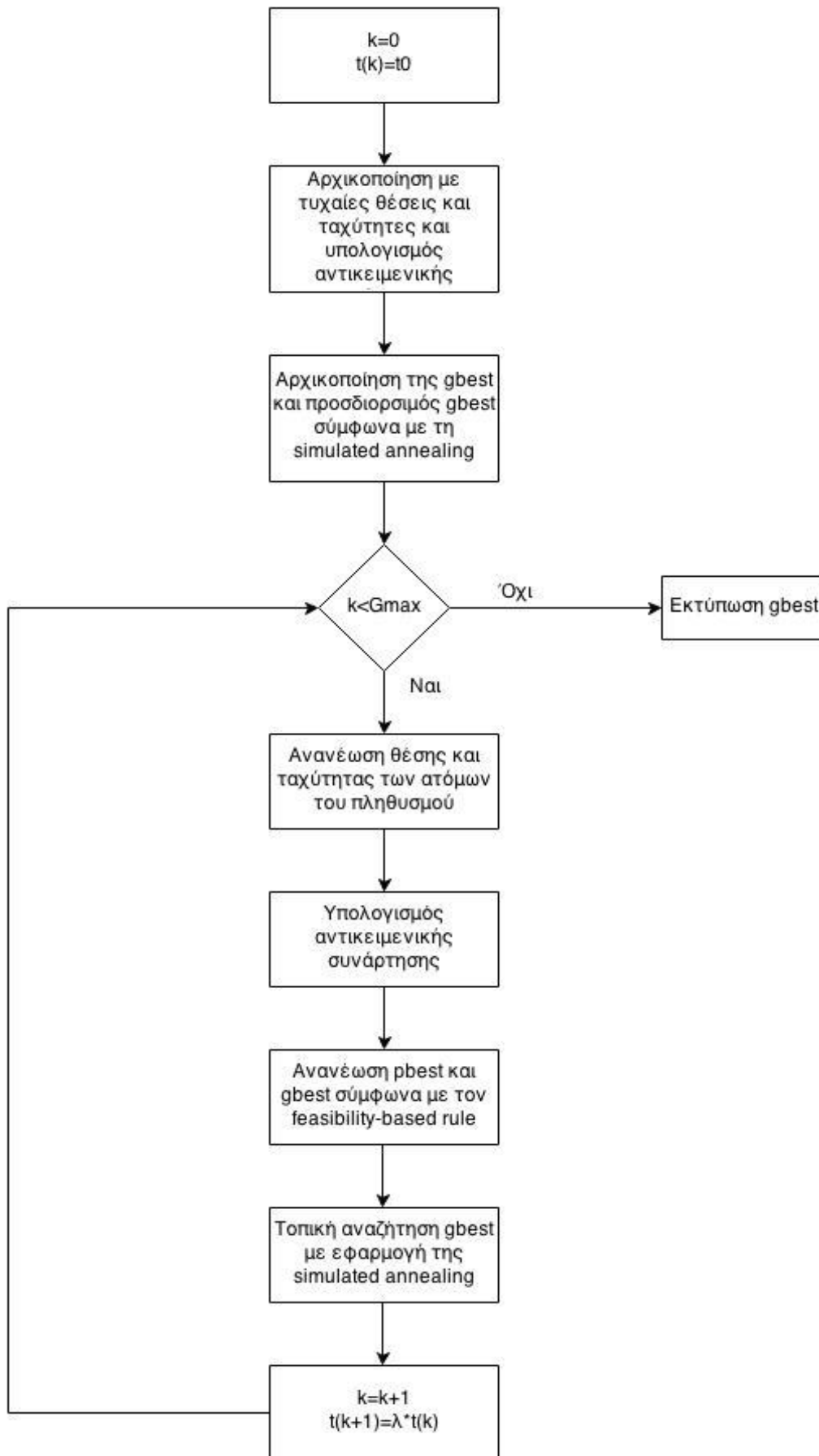
όπου  $f_{\max}$ ,  $f_{\min}$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού πληθυσμού.

Παράλληλα, η θερμοκρασία σε κάθε επανάληψη  $k$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t(k+1) = \lambda \cdot t(k) \quad (2.12)$$

όπου  $\lambda$  ο βαθμός απόπτωσης.[17]

Το διάγραμμα ροής της υβριδικής PSO αναπαρίσταται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής HPSO[17]

## 2.6 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

### 2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Βέλτιστη Ροή Φορτίου (Optimal Power Flow-OPF) έχει μια μεγάλη ιστορία στην ανάπτυξή της. Ο όρος πρώτη φορά εισήχθη από τον Carpentier το 1962. Η Βέλτιστη Ροή φορτίου (ΒΡΦ) είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων. Ο σκοπός των προβλημάτων αυτών είναι ο καθορισμός των μεταβλητών ελέγχου ενός ηλεκτρικού δικτύου για τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα ένα σύνολο φυσικών και λειτουργικών περιορισμών όπως το ενεργειακό ισοζύγιο, τα όρια τάσης των ζυγών, τις εξισώσεις ροής φορτίου, τα όρια ενεργού και αέργου ισχύος για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Επειδή η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα σύνθετο, μη γραμμικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, έχουν αναπτυχθεί αποδοτικοί αλγόριθμοι για τη λύση του. Τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά για την επίλυση του προβλήματος είναι η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα, η μέθοδος κλίσης, η μέθοδος Newton, ο γραμμικός προγραμματισμός, και η μέθοδος εσωτερικού σημείου.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου αρχικά (θα ασχοληθούμε με AC ΒΡΦ), στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΡΦ και αναλύονται εκτενέστερα οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές οι οποίες είναι ο γραμμικός προγραμματισμός και η μέθοδος εσωτερικού σημείου.

### 2.6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ

Η ΒΡΦ βελτιστοποιεί την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, είτε ελαχιστοποιώντας την είτε μεγιστοποιώντας την, ενώ ταυτόχρονα φροντίζει ώστε να ισχύει ένα σύνολο περιορισμών, οι οποίοι μεταφράζονται ως ισότητες και ανισότητες. Έτσι το πρόβλημα της ΒΡΦ διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (2.13)$$

και υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{x}_{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{max} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{Ax} \leq \mathbf{u} \quad (2.17)$$

Στη AC ΒΡΦ με την οποία θα ασχοληθούμε, το  $\mathbf{x}$  αποτελεί ένα διάνυσμα βελτιστοποίησης, το οποίο περιέχει τις γωνίες και τα μέτρα των τάσεων κάθε ζυγού,

όπως και την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος κάθε γεννήτριας που υπάρχει στο σύστημα.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Theta \\ \mathbf{Vm} \\ \mathbf{Pg} \\ \mathbf{Qg} \end{bmatrix} \quad (2.18),$$

όπου  $\Theta$  και  $\mathbf{Vm}$  είναι οι γωνίες και τα μέτρα των τάσεων του κάθε ζυγού του συστήματος, ενώ  $\mathbf{Pg}$  και  $\mathbf{Qg}$  είναι η παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος της κάθε γεννήτριας του συστήματος αντίστοιχα. Με δεδομένο ότι ο αριθμός των ζυγών ενός συστήματος είναι  $n_b$  και ο αριθμός των γεννητριών  $n_g$ , τότε το διάνυσμα  $\mathbf{x}$  θα έχει διαστάσεις  $(2*n_b+2*n_g) \times 1$ .

Όσον αφορά τους παραπάνω περιορισμούς, ο (2.14) αφορά το ισοζύγιο ενεργού και αέργου, ο (2.15) τα θερμικά όρια των γραμμών, ο (2.16) τα επιτρεπτά όρια των τάσεων των ζυγών ή της παραγωγής των γεννητριών. Μπορούμε όμως και να εισάγουμε και επιπλέον περιορισμούς μέσω της σχέσης (2.17), όπως η απαίτηση κάποια από τις γεννήτριες να λειτουργεί με συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες προγραμματιστικές τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου.[18]

### 2.6.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τις τελευταίες δεκαετίες μετά από εκτεταμένες έρευνες, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μεθόδων για την επίλυση του σύνθετου προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, όπως η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα(lambda iteration method), η μέθοδος εσωτερικού σημείου(interior point method), η οποία είναι τεχνική μη γραμμικού προγραμματισμού, η μέθοδος κλίσης(gradient methods), η μέθοδος Newton(Newton's method) και ο γραμμικός προγραμματισμός(linear programming-LP). Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων.

#### Μέθοδος κλίσης

Η μέθοδος αυτή έχει αργή επίλυση και είναι δύσκολο να επιλυθεί όταν υπάρχουν ανισοτικοί περιορισμοί.

#### Μέθοδος επαναλήψεων λάμδα

Σε αυτή τη μέθοδο επίλυσης οι απώλειες αναπαρίστανται σε έναν πίνακα [B]. Επίσης, οι παράγοντες σφάλματος(penalty factors) μπορούν να υπολογιστούν εξωτερικά από μία ροή ισχύος. Η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα χρησιμοποιείται ως βάση σε πολλά on-line προβλήματα οικονομικής κατανομής φορτίου.

### Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton έχει πολύ γρήγορη σύγκλιση. Παρ' όλα αυτά στην περίπτωση ανισοτικών περιορισμών μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα.

### Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού

Είναι μία από τις πλήρως ανεπτυγμένες μεθόδους με ευρεία εφαρμογή. Χειρίζεται εύκολα μη ανισοτικούς περιορισμούς. Μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί μπορούν να επεξεργαστούν μετά από γραμμικοποίηση.

### Μέθοδος εσωτερικού σημείου

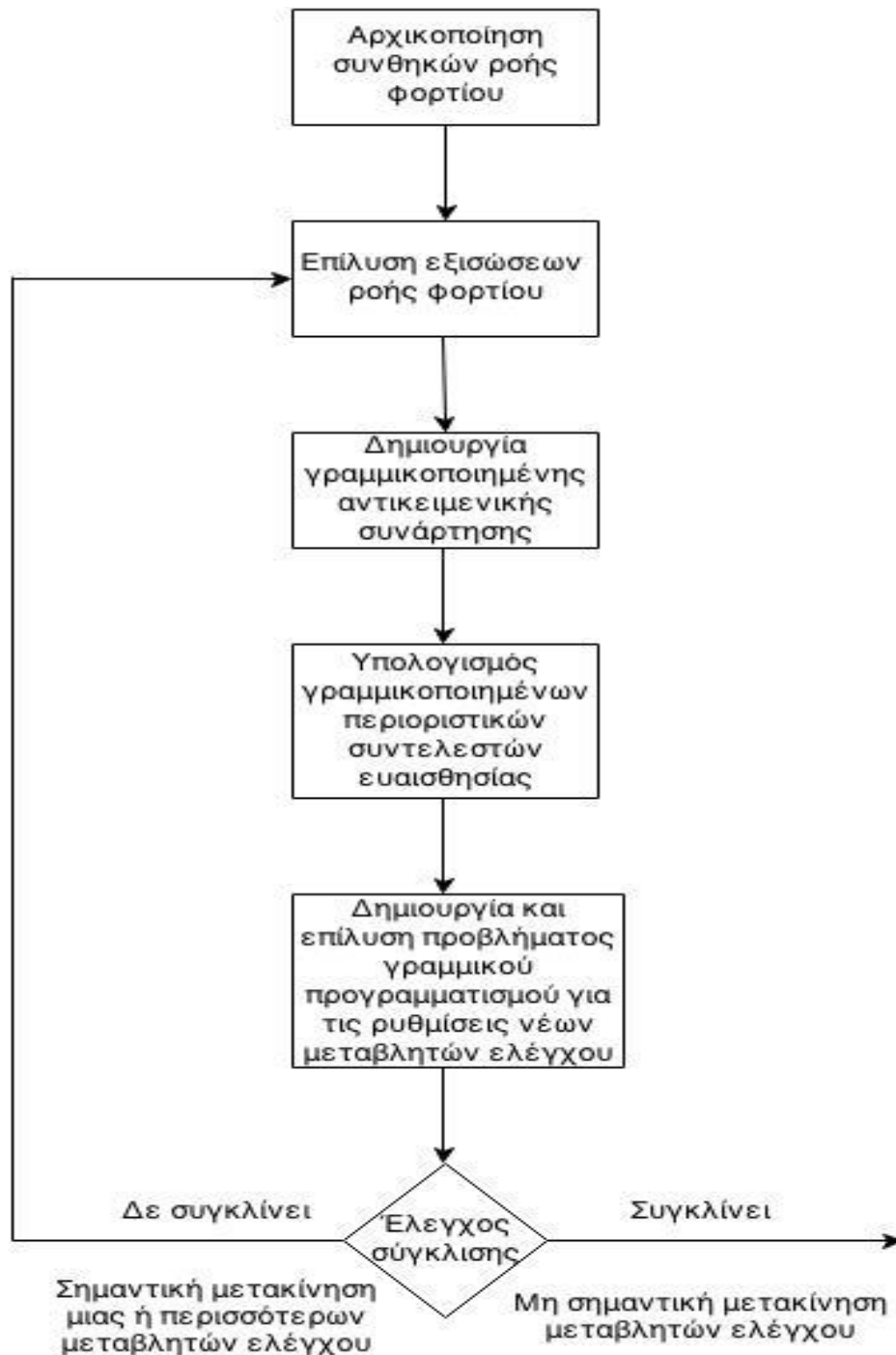
Εκτός από τη μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού και αυτή η μέθοδος είναι πλήρως ανεπτυγμένη και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα Βέλτιστης Ροής Φορτίου καθώς επεξεργάζεται εύκολα ανισοτικούς περιορισμούς.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού καθώς και η μέθοδος εσωτερικού σημείου, καθώς αυτές οι μέθοδοι είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες για την επίλυση της ΒΡΦ.[21]

#### **2.6.3.1 Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού(LPOPF)**

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η μέθοδος αυτή είναι πολύ ικανή στο να χειρίζεται ανισοτικούς περιορισμούς, εφόσον το πρόβλημα μπορεί να γραμμικοποιηθεί χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας.

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου γραμμικού προγραμματισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.



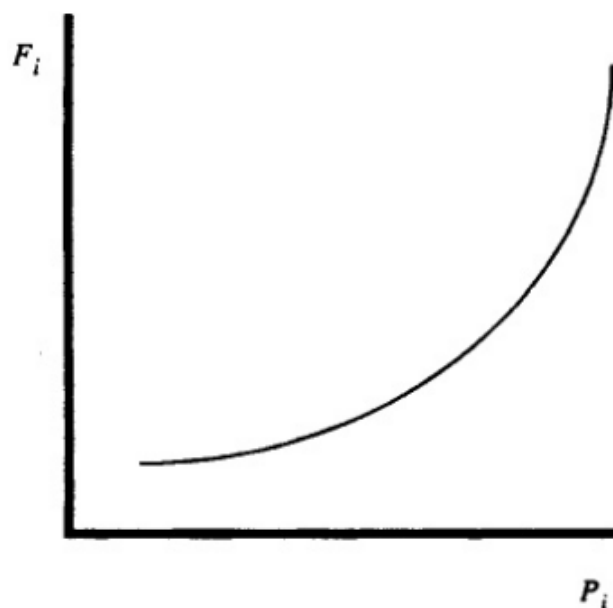
**Σχήμα 2.3 Διάγραμμα ροής LPOPF**

Οι εξισώσεις ροής ισχύος μπορεί να γραφούν για την DC αναπαράσταση, τις αποσυνδεδεμένες AC εξισώσεις ή το σύνολο των AC εξισώσεων ροής ισχύος. Η επιλογή των εξισώσεων θα επηρεάσει τη δυσκολία υπολογισμού των γραμμικοποιημένων συντελεστών ανάλυσης ευαισθησίας και τη δοκιμή του κριτηρίου σύγκλισης που χρησιμοποιείται.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή της μεθόδου γραμμικού προγραμματισμού. Αρχικά εκφράζονται οι μη γραμμικές είσοδοι και έξοδοι καθώς



και οι συναρτήσεις κόστους ως σύνολο γραμμικών συναρτήσεων. Έστω η συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$  η οποία αναπαρίσταται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Η μη γραμμική συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$

Μπορούμε να προσεγγίσουμε αυτή τη μη γραμμική συνάρτηση χρησιμοποιώντας τρία ευθύγραμμα τμήματα  $P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}$ , όπου καθένα από αυτά έχει κλίση  $s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}$  αντίστοιχα.

Έτσι η συνάρτηση κόστους γράφεται ως εξής:

$$F_i(P_i) = F_i(P_{imin}) + s_{i1}P_{i1} + s_{i2}P_{i2} + s_{i3}P_{i3} \quad (2.19)$$

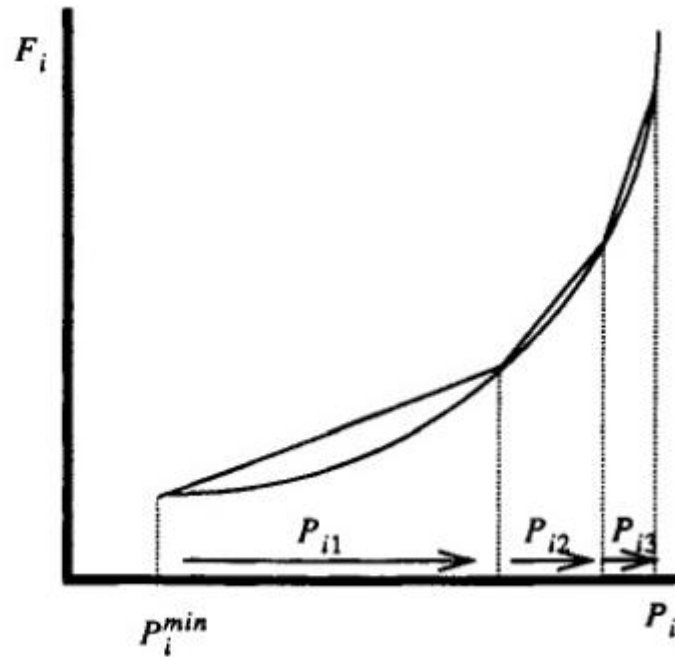
$$0 \leq P_{ik} \leq P_{ik}^+, \quad \text{για } k = 1, 2, 3 \quad (2.20)$$

Και τελικά έχουμε:

$$P_i = P_{imin} + P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \quad (2.21)$$

Έτσι τελικά η συνάρτηση κόστους έχει μετατραπεί σε μια γραμμικοποιημένη έκφραση των  $P_{ik}$ .

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γραφική της παράσταση.



Σχήμα 2.5 Η γραμμικοποιημένη συνάρτηση κόστους  $F_i(P_i)$

Σε αυτή τη μέθοδο επίλυσης, οι μεταβλητές σχεδίασης χωρίζονται σε μεταβλητές κατάστασης και μεταβλητές ελέγχου. Οι μεταβλητές κατάστασης δεν περιλαμβάνονται ούτε στη συνάρτηση γραμμικού προγραμματισμού, ούτε στις εξισώσεις ροής ισχύος. Οι περιορισμοί που εισάγονται στο γραμμικό προγραμματισμό αντικατοπτρίζουν την επίδραση των αλλαγών μόνο στις μεταβλητές ελέγχου. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος περιορίζονται στην ενεργό ισχύ που παράγουν οι γεννήτριες, καθώς και στα μέτρα της τάσης κάθε ζυγού. Έτσι, οι περιορισμοί που εισάγονται στον γραμμικό προγραμματισμό αντικατοπτρίζουν την επίδραση των αλλαγών μόνο στις μεταβλητές ελέγχου. Αυτές οι μεταβλητές ελέγχου ορίζονται με ένα διάνυσμα  $\mathbf{u}$ .

Οι επόμενοι περιορισμοί που θεωρούνται σε ένα πρόβλημα LPOPF είναι οι περιορισμοί που αφορούν το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της ενεργού και αέργου ισχύος που παράγεται και αυτής που καταναλώνεται στα φορτία και τις απώλειες. Το ισοζύγιο ενεργού ισχύος λοιπόν είναι:

$$\mathbf{P}_{\text{gen}} - \mathbf{P}_{\text{load}} - \mathbf{P}_{\text{loss}} = \mathbf{0} \quad (2.22)$$

Οι απώλειες  $\mathbf{P}_{\text{loss}}$  αφορούν τις ωμικές απώλειες  $I^2R$  που καταναλώνονται στις γραμμές μεταφοράς και τις απώλειες στους μετασχηματιστές.

Παραγωγίζοντας τη σχέση (9) ως προς τις μεταβλητές ελέγχου έχουμε:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial \mathbf{P}_{\text{gen}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial \mathbf{P}_{\text{load}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial \mathbf{P}_{\text{loss}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.23)$$

Θεωρώντας ότι  $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^0$  η σχέση (2.23) γίνεται:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial P_{\text{gen}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial P_{\text{load}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u} = \mathbf{K}_p \quad (2.24)$$

Όπου,

$$\mathbf{K}_p = \sum_{\mathbf{u}} \frac{\partial P_{\text{gen}}}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{u}^0 - \sum_{\mathbf{u}} \frac{\partial P_{\text{load}}}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{u}^0 - \sum_{\mathbf{u}} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{u}^0 \quad (2.25)$$

Με την ίδια λογική το ισοζύγιο αέργου ισχύος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial Q_{\text{gen}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial Q_{\text{load}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.26)$$

όπου ο όρος των απωλειών περιλαμβάνει τις απώλειες  $I^2X$ , καθώς και την φόρτιση από τους πυκνωτές των γραμμών και τις αντιδράσεις των διακλαδώσεων. Η αντικατάσταση  $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^0$  μπορεί να γίνει και εδώ.

Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού περιορίζει τις μεταβλητές ελέγχου έτσι ώστε αυτές να βρίσκονται πάντα μέσα στο εύρος των επιτρεπτών ορίων τους, ωστόσο δεν βελτιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των γραμμών μεταφοράς, ή τα όρια της τάσης των ζυγών. Για να προστεθούν οι τελευταίοι περιορισμοί, πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον περιορισμός σε αυτή τη μέθοδο.

Έστω για παράδειγμα ότι επιθυμούμε να περιορίσουμε τη θερμική ισχύ των γραμμών σε ένα ανώτατο όριο., δηλαδή για μία γραμμή του δικτύου με ζυγό αναχώρησης  $n$  και ζυγό άφιξης  $m$  θα ισχύει:

$$\mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}} \leq \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}}^{\text{max}} \quad (2.27)$$

Μοντελοποιώντας αυτόν τον περιορισμό με σειρές Taylor και κρατώντας μόνο τους γραμμικούς όρους έχουμε:

$$\mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}} = \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}}^0 + \sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}} \right) \Delta \mathbf{u} \leq \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}}^{\text{max}} \quad (2.28)$$

Με αντικατάσταση όπως προηγουμένως της σχέσης  $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^0$  στην σχέση (2.28) προκύπτει:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}} \right) \mathbf{u} \leq \mathbf{MVA}_{\text{flow}_{nm}}^{\text{max}} - \mathbf{K}_f \quad (2.29)$$

Όπου,

$$\mathbf{K}_f = \mathbf{MVAflow}_{nm}^0 + \sum_u \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{MVAflow}_{nm} \mathbf{u}^0 \quad (2.30)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να προστεθούν και άλλοι περιορισμοί όπως τα όρια των τάσεων του συστήματος. Για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, θα πρέπει να γίνει προσθήκη όσων περιορισμών είναι απαραίτητοι ώστε το σύστημα ισχύος να παραμείνει μέσα στα προκαθορισμένα όρια.[21]

### 2.6.3.2 Μέθοδος εσωτερικού σημείου

Το 1984, ο Karmarkar παρουσίασε έναν καινούριο αλγόριθμο ο οποίος επιλύει προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και ονομάζεται μέθοδος εσωτερικού σημείου. Ο αλγόριθμος αυτός δεν αναζητά τη βέλτιστη λύση ακολουθώντας μια σειρά σημείων που βρίσκονται στο όριο των περιορισμών, αλλά την αναζητά σε ένα μονοπάτι που βρίσκεται στο εσωτερικό των περιορισμών και το οποίο οδηγεί κατευθείαν στη βέλτιστη λύση. Αυτή η λύση είναι κατά πολύ γρηγορότερη από ότι οι λύσεις των συμβατικών μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού.

Το 1986, ο Gill απέδειξε τη σχέση μεταξύ του αλγορίθμου του Karmarkar και του λεγόμενου “αλγόριθμου λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης”. Αυτός ο αλγόριθμος έχει αποτελέσει τη βάση για την επίλυση πολλών αλγορίθμων ΒΡΦ.

Σε αυτή η τεχνική δε γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης και των μεταβλητών ελέγχου. Όλες οι μεταβλητές σχεδίασης περιλαμβάνονται στο διάνυσμα  $\mathbf{x}$ . Τότε η αντικειμενική συνάρτηση θα είναι η  $f(\mathbf{x})$ . Επίσης, οι περιορισμοί διαχωρίζονται σε περιορισμούς ισότητας και περιορισμούς ανισότητας.

Οι ισοτικοί περιορισμοί θα είναι της μορφής:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (2.31)$$

ενώ οι ανισοτικοί της μορφής:

$$\mathbf{h}^- \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}^+ \quad (2.32)$$

όπου  $\mathbf{h}^-, \mathbf{h}^+$  αποτελούν τα κατώτερα και τα ανώτερα όρια των ανισοτικών περιορισμών. Τέλος, οι μεταβλητές σχεδίασης περιορίζονται με τη σειρά τους σε ένα κατώτερο και ανώτερο όριο:

$$\mathbf{x}^- \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^+ \quad (2.34)$$

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος είναι η προσθήκη κάποιων νέων μεταβλητών έτσι ώστε όλες οι εξισώσεις να μετατραπούν σε ισοτικούς περιορισμούς. Επομένως, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{s}_h = \mathbf{h}^- \\ & \mathbf{s}_h + \mathbf{s}_{sh} = \mathbf{h}^+ + \mathbf{h}^- \\ & \mathbf{x} + \mathbf{s}_x = \mathbf{x}^+ \\ & \mathbf{x} - \mathbf{x}^- \geq \mathbf{0} \\ & \mathbf{s}_x, \mathbf{s}_h, \mathbf{s}_{sh} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Έτσι προέκυψε ένα σύνολο εξισώσεων μόνο με ισοτικούς περιορισμούς εκτός από τις τελευταίες συνθήκες μη αρνητικότητας του  $x-x^-$  και των ελεύθερων μεταβλητών  $s_x, s_h, s_{sh}$ . Αυτές οι συνθήκες μη αρνητικότητας μπορούν να εξαλειφθούν προσθέτοντας τη λογαριθμική φραγμένη συνάρτηση στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή αποτελεί μια μορφή συνάρτησης ποινή που η τιμή της μεγαλώνει όσο η συνάρτηση και οι μεταβλητές πλησιάζουν στο μηδέν. Έτσι, η μορφή της νέας αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ακόλουθη:

$$f_\mu = f(x) - \mu \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \sum_j \ln(s_x)_j - \mu \sum_i \ln(s_x)_i - \mu \sum_i \ln(s_{sh})_i \quad (2.36)$$

Η παράμετρος  $\mu$  ονομάζεται παράμετρος φραγής και είναι ένας θετικός αριθμός που αναγκάζεται να πλησιάσει στο μηδέν όσο η συνάρτηση συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Αυτό παρουσιάζεται στην εξίσωση Langrange που παρουσιάζεται στην εξίσωση (19).

$$\begin{aligned} L_\mu = f(x) - \lambda^T g(x) - \lambda_h^T [h^+ - s_h - h(x)] - \lambda_{sh}^T (h^+ - h^- - s_h - s_{sh}) - \lambda_x^T (x^+ \\ - x - s_x) - \mu \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \sum_j \ln(s_x)_j - \mu \sum_i \ln(s_x)_i \\ - \mu \sum_i \ln(s_{sh})_i \end{aligned} \quad (2.37)$$

Η λύση στην εξίσωση (2.37) προκύπτει θέτοντας την κλίση ίση με το μηδέν. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \nabla_x L_\mu &= \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \lambda + \nabla h(x)^T \lambda_h + \lambda_x - \mu(x - x^-)^{-1} e = 0 \\ \nabla_{s_h} L_\mu &= \lambda_h + \lambda_{sh} - \mu h^{-1} e = 0 \\ \nabla_{s_{sh}} L_\mu &= \lambda_{sh} - \mu s_{sh}^{-1} e = 0 \\ \nabla_{s_x} L_\mu &= \lambda_x - \mu s_x^{-1} e = 0 \\ \nabla_{s_x} L_\mu &= -g(x) \\ \nabla_{\lambda_{sh}} L_\mu &= h(x) + s_h - h^+ \\ \nabla_{\lambda_x} L_\mu &= x + s_x - x^+ \\ \nabla_{\lambda_h} L_\mu &= s_h + s_{sh} - h^- + h^+ \end{aligned} \quad (2.38)$$

Αυτές οι μη γραμμικές εξισώσεις λύνονται επαναληπτικά με τη μέθοδο Newton, ενώ η παράμετρος  $\mu$  προσαρμόζεται να τείνει στο μηδέν όταν η μέθοδος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση.[21]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 MATPOWER

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Matpower είναι ένα πακέτο προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με λογισμικό ανοικτού κώδικα που βασίζεται στο Matlab. Το Matpower χρησιμοποιείται ευρέως στην εκπαίδευση και στην έρευνα για την επίλυση προβλημάτων AC και DC Ροής Φορτίου(Power Flow-PF) και Βέλτιστης Ροής Φορτίου(Optimal Power Flow-OPF). Ενώ συχνά χρησιμοποιείται σαν ένα εργαλείο για την απλή εκτέλεση προσομοιώσεων που ορίζονται μέσω ενός αρχείου εισόδου, το λογισμικό αυτό είναι πολύτιμο ως μια βιβλιοθήκη λειτουργιών για χρήση σε προσαρμοσμένο κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια κάποιας έρευνας. Σε αυτό το χαμηλότερο επίπεδο, το MATPOWER παρέχει εύκολες στη χρήση λειτουργίες για τη διαμόρφωση πινάκων **Ybus** και **B** ενός συνηθισμένου δικτύου, τον υπολογισμό της μεταφοράς ισχύος και διάφορων συντελεστών διακοπής της διανομής (PTDFs, LODFs) και τον αποτελεσματικό υπολογισμό πρώτων και δεύτερων παραγώγων των εξισώσεων ροής ισχύος, ανάμεσα σε άλλα. Σε υψηλότερο επίπεδο, η δομή της BPF έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι επεκτάσιμη, επιτρέποντας στο χρήστη να εισάγει μεταβλητές, κόστη και γραμμικούς περιορισμούς ανάλογα με τις ανάγκες του.

Η προεπιλεγμένη μέθοδος επίλυσης της BPF είναι μία μέθοδος επίλυσης εσωτερικού σημείου υψηλής απόδοσης (primal-dual interior point solver) που εφαρμόζεται στο MATLAB. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης γενικώς αλλά περιλαμβάνει και μια συνάρτηση η οποία την καθιστά ικανή να διαμορφώνει και να επιλύει προβλήματα γραμμικού(Linear Programming-LP) και τετραγωνικού(Quadratic Programming-QP) προγραμματισμού.[22]

### 3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το Matpower χρησιμοποιεί όλα τα μοντέλα σταθερής κατάστασης που τυπικά εφαρμόζονται για τη ανάλυση της ροής φορτίου. Επειδή στο πρόβλημά μας θα χρησιμοποιήσουμε τα AC μοντέλα, θα περιγράψουμε μόνο αυτά στη συνέχεια. Τα μέτρα όλων των μεγεθών εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα και οι γωνίες σε rad. Τα μοντέλα και οι εξισώσεις παρουσιάζονται σε πίνακες και διανυσματικές μορφές λόγω της ικανότητας του Matlab να τους χειρίζεται αποτελεσματικά.

#### 3.2.1 ΜΟΡΦΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το Matpower είναι τα M-αρχεία ή MAT-αρχεία του Matlab που ορίζουν και επιστρέφουν μια δομή του Matlab. Η μορφή του M-αρχείου είναι ένα κείμενο το οποίο μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου. Τα πεδία αυτής της δομής είναι η βάση ισχύος(baseMVA),ο ζυγός(bus),ο κλάδος(branch),η

γεννήτρια(gen) και προαιρετικά το κόστος της γεννήτριας(gencost) από τα οποία το baseMVA είναι βαθμωτό ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι μήτρες. Στις μήτρες η κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ζυγό, κλάδο ή γεννήτρια ενώ ο αριθμός των γραμμών στους ζυγούς, κλάδους και γεννήτριες συμβολίζεται με  $n_b, n_l$  και  $n_g$  αντίστοιχα.

### 3.2.2 ΚΛΑΔΟΙ

Όλες οι γραμμές μεταφοράς, οι μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές φάσης μοντελοποιούνται με ένα κοινό μοντέλο κλάδου, το οποίο αποτελείται από ένα συνηθισμένο μοντέλο γραμμής μεταφοράς με μία αντίσταση σειράς  $\mathbf{z}_s = \mathbf{r}_s + j\mathbf{x}_s$  και ολική χωρητικότητα φόρτισης  $\mathbf{b}_c$  σε σειρά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή φάσης. Ο μετασχηματιστής του οποίου η αναλογία ρύθμισης(tap ratio) έχει μέτρο  $\tau$  και γωνία αλλαγής φάσης  $\theta_{\text{shift}}$  βρίσκεται στο αριστερό άκρο του κλάδου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.

Τα διανυσματικά ρεύματα  $\mathbf{i}_f, \mathbf{i}_t$  στην αναχώρηση(from) και στην άφιξη(to) του κλάδου αντίστοιχα, εκφράζονται με τη βοήθεια μιας μήτρας αγωγιμοτήτων  $\mathbf{Y}_{br}$   $2 \times 2$  και των αντίστοιχων τερματικών τάσεων  $\mathbf{v}_f$  και  $\mathbf{v}_t$ .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_f \\ \mathbf{i}_t \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{br} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_f \\ \mathbf{v}_t \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Στο αντίστοιχο ισοδύναμο  $\pi$  η εν σειρά αγωγιμότητα συμβολίζεται με  $\mathbf{y}_s = \frac{1}{\mathbf{z}_s}$ , η μήτρα αγωγιμοτήτων του κλάδου μπορεί να γραφεί ως εξής:

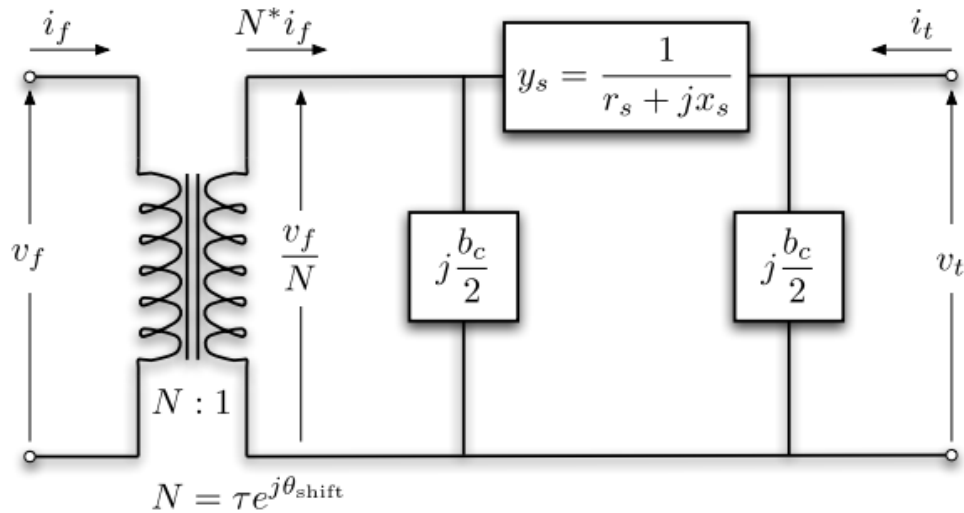
$$\mathbf{Y}_{br} = \begin{bmatrix} (\mathbf{y}_s + i \frac{\mathbf{b}_s}{2}) \frac{1}{r^2} & -\mathbf{y}_s \frac{1}{r e^{-j\theta_{\text{shift}}}} \\ -\mathbf{y}_s \frac{1}{r e^{j\theta_{\text{shift}}}} & \mathbf{y}_s + i \frac{\mathbf{b}_s}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Αν τα τέσσερα στοιχεία του κλάδου  $\mathbf{i}$  συμβολιστούν ως εξής:

$$\mathbf{Y}_{br}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ff}^i & \mathbf{y}_{ft}^i \\ \mathbf{y}_{tf}^i & \mathbf{y}_{tt}^i \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

τότε μπορούν να κατασκευαστούν τέσσερα διανύσματα  $\mathbf{Y}_{ff}, \mathbf{Y}_{ft}, \mathbf{Y}_{tf}, \mathbf{Y}_{tt}$  όπου το  $i$ -οστό στοιχείο του καθενός προέρχεται από το αντίστοιχο στοιχείο του  $\mathbf{Y}_{br}^i$ .

Ακόμη, οι  $n_l \times n_b$  αραιοί πίνακες σύνδεσης  $\mathbf{C}_f$  και  $\mathbf{C}_t$  που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία των πινάκων αγωγιμοτήτων του συστήματος μπορούν να οριστούν ως εξής. Το στοιχείο( $i, j$ ) του πίνακα  $\mathbf{C}_f$  και το στοιχείο( $i, k$ ) του πίνακα  $\mathbf{C}_t$  ισούνται με τη μονάδα για κάθε κλάδο  $i$ , όπου ο κλάδος  $i$  συνδέει το ζυγό  $j$  με το ζυγό  $k$ . Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία των πινάκων  $\mathbf{C}_f$  και  $\mathbf{C}_t$  είναι μηδέν.



Σχήμα 3.1 Μοντέλο κλάδου[20]

### 3.2.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Μία γεννήτρια μπορεί να μοντολεποιηθεί ως μια μιγαδική έγχυση ισχύος σε ένα συγκεκριμένο ζυγό. Για τη γεννήτρια  $i$  η έγχυση ισχύος είναι:

$$\mathbf{S}_g^i = \mathbf{P}_g^i + j\mathbf{Q}_g^i \quad (3.4)$$

Έστω ότι  $\mathbf{S}_g = \mathbf{P}_g + j\mathbf{Q}_g$  είναι το  $n_g \times 1$  διάνυσμα της γεννήτριας. Ένας αραιός πίνακας  $n_b \times n_g$  σύνδεσης των γεννητριών  $\mathbf{C}_g$  μπορεί να οριστεί έτσι ώστε το στοιχείο  $(i,j)$  να ισούται με 1 όταν η γεννήτρια  $j$  είναι συνδεδεμένη στο ζυγό  $i$ . Διαφορετικά να είναι ίσο με μηδέν. Τα  $n_b \times 1$  διανύσματα όλων των εγχύσεων ισχύος από της γεννήτριες στους ζυγούς μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{S}_{g,bus} = \mathbf{C}_g \cdot \mathbf{S}_g \quad (3.5)$$

### 3.2.4 ΦΟΡΤΙΑ

Τα σταθερά φορτία ισχύος μοντελοποιούνται ως μια συγκεκριμένη ποσότητα ενεργού και αέργου ισχύος που καταναλώνεται σε έναν ζυγό. Για παράδειγμα για το ζυγό  $i$  το φορτίο είναι:

$$\mathbf{S}_d^i = \mathbf{P}_d^i + j\mathbf{Q}_d^i \quad (3.6)$$

Και  $\mathbf{S}_d = \mathbf{P}_d + j\mathbf{Q}_d$  συμβολίζει το  $n_b \times 1$  διάνυσμα όλων των μιγαδικών φορτίων σε όλους τους ζυγούς. Σταθερή σύνθετη αντίσταση και σταθερά φορτία ρεύματος δεν εφαρμόζονται κατευθείαν, αλλά ένα μέρος της σταθερής σύνθετης αντίστασης μπορεί



να μοντελοποιηθεί ως εγκάρσιο στοιχείο όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Τα ελεγχόμενα φορτία μοντελοποιούνται σαν γεννήτριες με αρνητική παραγωγή.

### 3.2.5 ΕΓΚΑΣΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ένα εγκάρσια συνδεδεμένο στοιχείο όπως ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο μοντελοποιείται ως μια σταθερή σύνθετη αντίσταση προς γη σε ένα ζυγό. Η αγωγιμότητα ενός εγκάρσιου στοιχείου σε ένα ζυγό  $i$  δίνεται από:

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + j b_{sh}^i \quad (3.7)$$

και  $Y_{sh} = G_{sh} + j B_{sh}$  υποδηλώνει το  $n_b \times 1$  διάνυσμα των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων σε όλους τους ζυγούς.

### 3.2.6 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για ένα δίκτυο με  $n_b$  ζυγούς, όλες οι σταθερές σύνθετες αντιστάσεις του μοντέλου ενσωματώνονται σε έναν πίνακα αγωγιμοτήτων  $Y_{bus}$ , διαστάσεων  $n_b \times n_b$ , που συσχετίζει το εγχρόμο ρεύμα στους ζυγούς  $I_{bus}$  με τις αντίστοιχες τάσεις  $V$ :

$$I_{bus} = Y_{bus} V \quad (3.8)$$

Ομοίως για ένα δίκτυο με  $n_l$  κλάδους, οι  $n_l \times n_b$  πίνακες αγωγιμοτήτων  $Y_f$  και  $Y_t$  συσχετίζουν τις τάσεις των ζυγών με τα  $n_l \times 1$  διανύσματα  $I_f$  και  $I_t$  ως εξής:

$$I_f = Y_f \cdot V \quad (3.9)$$

$$I_t = Y_t \cdot V \quad (3.10)$$

Οι μήτρες αγωγιμοτήτων μπορούν να σχηματιστούν ως εξής:

$$Y_f = [Y_{ff}]C_f + [Y_{ft}]C_t \quad (3.11)$$

$$Y_t = [Y_{tf}]C_f + [Y_{tt}]C_t \quad (3.12)$$

$$Y_{bus} = C_f^T Y_f + C_t^T Y_t + [Y_{sh}] \quad (3.13)$$

Μέσω των παραπάνω σχέσεων μπορούν να υπολογιστούν οι εγχύσεις ισχύος ως συναρτήσεις της μιγαδικής ισχύος  $V$ .

$$S_{bus}(V) = [V]I_{bus}^* = [V]Y_{bus}^* V^* \quad (3.14)$$

$$S_f(V) = [C_f V]I_f^* = [C_f V]Y_f^* V^* \quad (3.15)$$

$$\mathbf{S}_t(\mathbf{V}) = [\mathbf{C}_t \mathbf{V}] \mathbf{I}_t^* = [\mathbf{C}_t \mathbf{V}] \mathbf{Y}_t^* \mathbf{V}^* \quad (3.16)$$

Οι εγχύσεις στους ζυγούς-κόμβους αντιστοιχίζονται στη συνέχεια στις εγχύσεις από τα φορτία και τις γεννήτριες και με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται οι AC εξισώσεις του ενεργειακού ισοζυγίου, οι οποίες εκφράζονται σαν συνάρτηση των τάσεων των ζυγών και των εγχύσεων των γεννητριών σε μία μήτρα ως εξής:

$$\mathbf{g}_s(\mathbf{V}, \mathbf{S}_g) = \mathbf{S}_{bus}(\mathbf{V}) + \mathbf{S}_d - \mathbf{C}_g \mathbf{S}_g = \mathbf{0} \quad (3.17)$$

### 3.3 ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το πρόβλημα της ροής φορτίου συμπεριλαμβάνει την επίλυση για το σύνολο των τάσεων και των ροών σε ένα δίκτυο που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ροής και φορτίου. Το Matpower περιλαμβάνει μεθόδους για την επίλυση τόσο των AC όσο και των DC προβλημάτων ροής φορτίου, όπου και τα δύο περιλαμβάνουν για την επίλυση ένα σύνολο εξισώσεων της μορφής:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.18)$$

οι οποίες κατασκευάζονται εκφράζοντας ένα υποσύνολο εξισώσεων ισοζυγίου ισχύος στους κόμβους σαν συναρτήσεις αγνώστων τάσεων.

#### 3.3.1 AC ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στο Matpower, κατά σύμβαση, ένας ζυγός επιλέγεται συνήθως ως ζυγός αναφοράς για να παίξει το ρόλο της αναφοράς των γωνιών των τάσεων και της ενεργού ισχύος. Η γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς είναι γνωστή, αλλά η παραγωγή ενεργού ισχύος θεωρείται άγνωστη έτσι ώστε να αποφευχθεί ο υπερβολικός ορισμός του προβλήματος. Οι υπόλοιποι ζυγοί παραγωγής του δικτύου χαρακτηρίζονται ως ζυγοί παραγωγής (PV buses), με δεδομένα τα μέτρα των τάσεων και την παραγωγή ενεργού ισχύος. Από τη στιγμή που δίνονται τα  $P_d$  και  $Q_d$ , όλοι οι ζυγοί μη παραγωγής χαρακτηρίζονται ως ζυγοί φορτίου (PQ buses), με δεδομένα τις εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος. Αν ορίσουμε  $I_{ref}$ ,  $I_{PV}$ ,  $I_{PQ}$  τους δείκτες των ζυγών αναφοράς, των ζυγών PV και των ζυγών PQ αντίστοιχα.

Στην κλασική μορφή της προβλήματος της AC ροής φορτίου, η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου (3.17) χωρίζεται σε ενεργό και άεργο μέρος, που εκφράζεται ως συνάρτηση των γωνιών των τάσεων  $\Theta_m$  και του μέτρου των τάσεων  $V_m$  καθώς και των εγχύσεων των γεννητριών  $P_g$  και  $Q_g$ , ενώ τα φορτία θεωρούνται σταθερά και είναι δεδομένα.

$$\mathbf{g}_p(\Theta, \mathbf{V}_m, \mathbf{P}_g) = \mathbf{P}_{bus}(\Theta, \mathbf{V}_m) + \mathbf{P}_d - \mathbf{C}_g \mathbf{P}_g \quad (3.19)$$

$$\mathbf{g}_q(\Theta, \mathbf{V}_m, \mathbf{Q}_g) = \mathbf{Q}_{bus}(\Theta, \mathbf{V}_m) + \mathbf{Q}_d - \mathbf{C}_g \mathbf{Q}_g \quad (3.20)$$

Για το πρόβλημα της AC ροής φορτίου, η συνάρτηση  $g(x)$  της εξίσωσης (3.18) σχηματίζεται από το αριστερό μέρος της εξίσωσης του ισοζυγίου ενεργού ισχύος (3.19) για όλους τους ζυγούς εκτός από τον ζυγό αναφοράς και του ισοζυγίου αέργου ισχύος (3.20) για όλους τους PQ ζυγούς εισάγοντας στις εξισώσεις τη γωνία του ζυγού αναφοράς, καθώς και όλα τα γνωστά μεγέθη (εγχύσεις ισχύος, μέτρα τάσεων κτλ.):

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_p^{\{i\}}(\theta, V_m, P_g) \\ g_q^{\{j\}}(\theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix} \quad \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ}, \quad \forall j \in I_{PQ} \quad (3.21)$$

Το διάνυσμα  $x$  αποτελείται από τις υπόλοιπες άγνωστες τάσεις, και συγκεκριμένα τις γωνίες των τάσεων σε όλους τους ζυγούς, εκτός του ζυγού αναφοράς, και τα μέτρα των τάσεων στους PQ ζυγούς:

$$x = \begin{bmatrix} \theta^{\{i\}} \\ V_m^{\{j\}} \end{bmatrix} \quad \forall i \notin I_{ref}, \forall j \in I_{PQ} \quad (3.22)$$

Έστω ότι  $n_{PV}$ ,  $n_{PQ}$  ο αριθμός των ζυγών PV και PQ αντίστοιχα. Τότε παράγεται ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων με  $n_{PV} + 2n_{PQ}$  εξισώσεις και αγνώστους. Αφού υπολογιστεί το  $x$ , η εναπομείνουσα εξίσωση του ενεργού ισοζυγίου ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η έγχυση ροής ισχύος στο ζυγό αναφοράς. Παρόμοια, οι υπόλοιπες  $n_{PV} + 1$  εξισώσεις του αέργου ισοζυγίου ισχύος δίνουν τις εγχύσεις αέργου ισχύος των γεννητριών.

Το Matpower διαθέτει τέσσερις διαφορετικούς αλγορίθμους για την επίλυση των προβλημάτων της AC ροής φορτίου. Η προκαθορισμένη μέθοδος επίλυσης βασίζεται στην κλασική μέθοδο του Newton χρησιμοποιώντας μια πολική μορφή και έναν ιακωβιανό πίνακα σε κάθε επανάληψη. Κάθε βήμα στη μέθοδο Newton περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αναντιστοιχίας  $g(x)$ , το σχηματισμό του ιακωβιανού με βάση τις ευαισθησίες των αντιστοιχιών σε αυτές τις αλλαγές του  $x$  και την επίλυση για την ανανεωμένη τιμή του  $x$  με την παραγοντοποίηση του ιακωβιανού πίνακα.

Επίσης, περιλαμβάνονται εκτός από τη μέθοδο Newton και άλλες μέθοδοι επίλυσης που βασίζονται σε παραλλαγές της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου, όπως η XB και η XB μέθοδοι. Αυτές οι μέθοδοι μειώνουν αισθητά το πλήθος των υπολογισμών που γίνονται σε κάθε επανάληψη, ανανεώνοντας τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων ξεχωριστά με βάση τη συνεχή προσέγγιση των ιακωβιανών που παραγοντοποιούνται μόνο μία φορά στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης. Αυτός ο τρόπος επίλυσης όμως έχει ως μειονέκτημα το μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων.

Ο τέταρτος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση της AC ροής φορτίου είναι η κλασική μέθοδος του Gauss-Siedel, ο οποίος αναπτύχθηκε από τους

Glimm και Stagg. Αυτή η μέθοδος έχει μια πληθώρα μειονεκτημάτων σε σχέση με τη μέθοδο Newton και περιλαμβάνεται κυρίως για ακαδημαϊκό ενδιαφέρον.

Οι μέθοδοι επίλυσης της AC ροής φορτίου λύνουν, εξ ορισμού, το πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω αγνοώντας οποιαδήποτε όρια αφορά τις γεννήτριες, τη ροή ισχύος στις γραμμές, τα μέτρα των τάσεων κτλ. Υπάρχει βέβαια μια επιλογή που επιτρέπει να τηρούνται τα όρια αέργου ισχύος των γεννητριών. Έτσι προσθέτουμε έναν εξωτερικό βρόχο η λειτουργία του οποίου είναι η εξής: Αν κάποια γεννήτρια υπερβεί το όριο της αέργου ισχύος, η έγχυση αέργου ισχύος γίνεται αυτόματα ίση με το όριο, ο αντίστοιχος ζυγός μετατρέπεται σε PQ ζυγό και η ροή φορτίου εκτελείται ξανά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν πλέον παραβιάσεις των ορίων.

### 3.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το Matpower περιλαμβάνει κώδικα για την επίλυση (AC και DC) του προβλήματος ροής φορτίου. Η τυπική μορφή του κάθε προβλήματος είναι η εξής:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (3.22)$$

Και υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{x}_{min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{max} \quad (3.25)$$

#### 3.4.1 AC ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το διάνυσμα βελτιστοποίησης  $\mathbf{x}$  για το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου αποτελείται από  $n_b \times 1$  διανύσματα των μέτρων  $V_m$  και των γωνιών των τάσεων  $\Theta$  και από  $n_g \times 1$  διανύσματα παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος των γεννητριών  $P_g, Q_g$  αντίστοιχα. Έτσι η μορφή του διανύσματος  $\mathbf{x}$  είναι:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.22) αποτελεί ένα άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων πολυωνυμικού κόστους  $f_P^i$  και  $f_Q^i$  των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα, για κάθε γεννήτρια:

$$\min_{\theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) + f_Q^i(q_g^i) \quad (3.27)$$

Οι περιορισμοί ισότητας στη σχέση (3.23) είναι το σύνολο των  $2n_b \times 1$  μη γραμμικών εξισώσεων του ενεργού και αέργου ισοζυγίου ισχύος (3.19) και (3.20). Οι μη ισοτικοί περιορισμοί (3.24) αποτελούνται από δύο σύνολα  $n_l$  ορίων ροής στους κλάδους ως μη γραμμικές συναρτήσεις των γωνιών και των μέτρων των τάσεων, ένα για το άκρο αναχώρησης και ένα για το άκρο άφιξης του κλάδου:

$$\mathbf{h}_f(\Theta, \mathbf{V}_m) = |\mathbf{F}_f(\Theta, \mathbf{V}_m)| - \mathbf{F}_{\max} \leq \mathbf{0} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{h}_t(\Theta, \mathbf{V}_m) = |\mathbf{F}_t(\Theta, \mathbf{V}_m)| - \mathbf{F}_{\max} \leq \mathbf{0} \quad (3.29)$$

Οι ροές είναι συνήθως ροές φαινόμενης ισχύος εκφρασμένες σε MVA, αλλά μπορεί να είναι και ροές ενεργού ισχύος ή ροές ρεύματος. Προκύπτουν έτσι οι τρεις παρακάτω πιθανοί σχηματισμοί για τους περιορισμούς ροής:

$$\mathbf{F}_f(\Theta, \mathbf{V}_m) = \begin{cases} \mathbf{S}_f(\Theta, \mathbf{V}_m), & \text{φαινόμενη ισχύς} \\ \mathbf{P}_f(\Theta, \mathbf{V}_m), & \text{ενεργός ισχύς} \\ \mathbf{I}_f(\Theta, \mathbf{V}_m), & \text{ρεύμα} \end{cases} \quad (3.30)$$

Στην παραπάνω σχέση το ρεύμα  $\mathbf{I}_f$  έχει προσδιοριστεί στην (3.9), το  $\mathbf{S}_f$  στην (3.15), ενώ το  $\mathbf{P}_f$  αποτελεί το πραγματικό μέρος της  $\mathbf{S}_f$  και το διάνυσμα των ορίων ροής  $F_{max}$  έχει τις κατάλληλες μονάδες ανάλογα με το είδος του περιορισμού. Παρόμοια διαμορφώνεται και το  $\mathbf{F}_t(\Theta, \mathbf{V}_m)$ .

Τέλος, οι περιορισμοί των μεταβλητών στην εξίσωση (3.25) περιλαμβάνουν έναν περιορισμό ισότητας στη γωνία οποιουδήποτε ζυγού αναφοράς καθώς και ανώτερα και κατώτερα όρια για όλα τα μέτρα των τάσεων και την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος.

$$\theta_i^{\text{ref}} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\text{ref}}, \quad i \in \mathbf{I}_{\text{ref}} \quad (3.31)$$

$$v_m^{i,\text{min}} \leq v_m^i \leq v_m^{i,\text{max}}, \quad i = 1 \dots n_b \quad (3.32)$$

$$p_g^{i,\text{min}} \leq p_g^i \leq p_g^{i,\text{max}}, \quad i = 1 \dots n_g \quad (3.32)$$

$$q_g^{i,\text{min}} \leq q_g^i \leq q_g^{i,\text{max}}, \quad i = 1 \dots n_g \quad (3.33)$$

### 3.4.2 ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΒΡΦ

Το Matpower χρησιμοποιεί μια εκτεταμένη δομή της ΒΡΦ, για να επιτρέψει στο χρήστη να τροποποιήσει ή ενδεχομένως να επεκτείνει το πρόβλημα χωρίς να χρειαστεί να ξαναγράψει τα τμήματα που είναι κοινά με την τυπική ΒΡΦ. Η τυπική μορφή, επομένως, της ΒΡΦ τροποποιείται δίνοντας την ευκαιρία στο χρήστη να εισάγει επιπρόσθετη κόστη  $f_u$ , περιορισμούς και μεταβλητές  $z$  και μπορεί να γραφεί στην κάτωθι μορφή:

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{z}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (3.34)$$

Και υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \quad (3.37)$$

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \leq \mathbf{u} \quad (3.38)$$

$$\mathbf{z}_{\min} \leq \mathbf{z} \leq \mathbf{z}_{\max} \quad (3.39)$$

### 3.4.2.1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΙΣΑΓΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ

Η συνάρτηση κόστους που εισάγεται από το χρήστη  $f_u$  καθορίζεται από τις παραμέτρους  $H, C, N, \hat{r}, k, d$  και  $m$ . Όλες οι παράμετροι είναι  $n_w \times 1$  διανύσματα εκτός από τη συμμετρική  $n_w \times n_w$  μήτρα  $H$  και τη  $n_w \times (n_x + n_z)$  μήτρα  $N$ . Έτσι το κόστος παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{f}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{H} \mathbf{w} + \mathbf{C}^T \mathbf{w} \quad (3.40)$$

Όπου η μεταβλητή  $w$  καθορίζεται σε διαδοχικά βήματα όπως φαίνεται παρακάτω:

Αρχικά, ένα νέο διάνυσμα  $\mathbf{u}$  δημιουργείται από το γραμμικό μετασχηματισμό  $N$  και τη μετατόπιση  $\hat{r}$  στο σύνολο των μεταβλητών βελτιστοποίησης.

$$\mathbf{r} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{r} - \hat{\mathbf{r}} \quad (3.42)$$

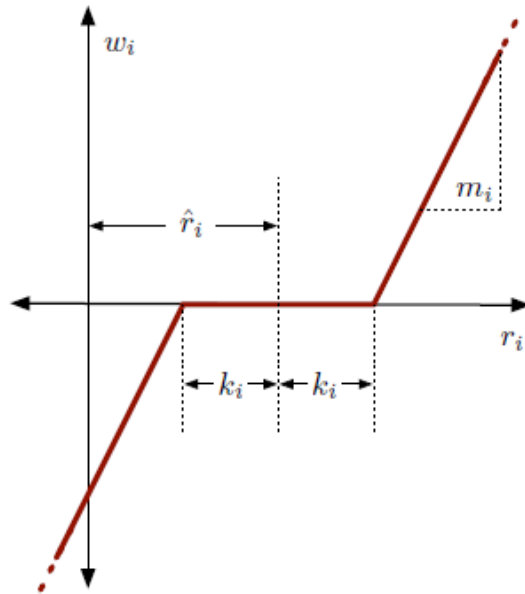
Και στη συνέχεια μια συνάρτηση κλιμακωτής μορφής με μια «μηδενική ζώνη» εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο  $\mathbf{u}$  για να παράγει το αντίστοιχο στοιχείο  $\mathbf{w}$ .

$$\mathbf{w}_i = \begin{cases} \mathbf{m}_i \mathbf{f}_{d_i}(\mathbf{u}_i + \mathbf{k}_i), & \mathbf{u}_i < -\mathbf{k}_i \\ \mathbf{0}, & -\mathbf{k}_i \leq \mathbf{u}_i \leq \mathbf{k}_i \\ \mathbf{m}_i \mathbf{f}_{d_i}(\mathbf{u}_i - \mathbf{k}_i), & \mathbf{u}_i > \mathbf{k}_i \end{cases} \quad (3.43)$$

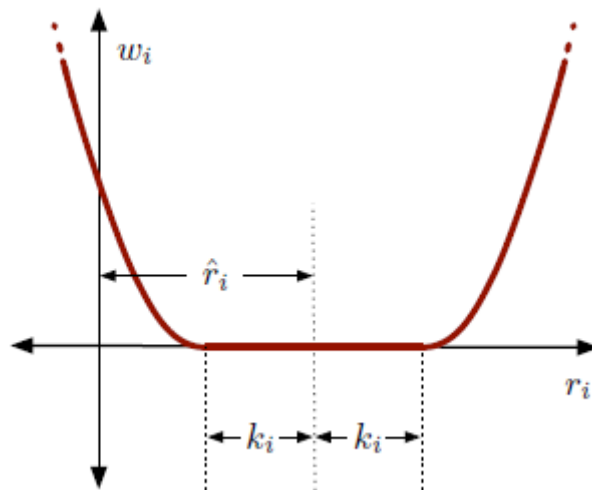
Εδώ, το  $\mathbf{k}_i$  συμβολίζει το εύρος όπου η συνάρτηση είναι μηδενική,  $\mathbf{m}_i$  είναι ένας απλός παράγοντας κλιμάκωσης και  $\mathbf{f}_{d_i}$  συνάρτηση επίσης κλιμακωτής μορφής που ορίζεται από την τιμή  $d_i$ . Το Matpower προς το παρόν εφαρμόζει μόνο γραμμικές και τετραγωνικές επιλογές:

$$\mathbf{f}_{d_i}(\mathbf{a}) = \begin{cases} \mathbf{a}, & \text{αν } d_i = 1 \\ \mathbf{a}^2, & \text{αν } d_i = 2 \end{cases} \quad (3.44)$$

όπως φαίνονται στα σχήματα 3.1 και 3.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1  $w_i(r_i)$  για  $d_i=1$ (γραμμική επιλογή)[20]



Σχήμα 3.2  $w_i(r_i)$  για  $d_i=2$ (τετραγωνική επιλογή)[20]

Αυτή η μορφή της  $f_u$  παρέχει την ευελιξία να χειρίζεται διάφορα κόστη, από απλές γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών βελτιστοποίησης, ως κλιμακωτές τετραγωνικές ποινές πάνω σε διάφορα μεγέθη, όπως οι τάσεις που βρίσκονται έξω από ένα επιθυμητό εύρος τιμών και συναρτήσεις γραμμικών συνδυασμών μεταβλητών προερχόμενοι από τις απαιτήσεις τις αγοράς.

### 3.4.3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

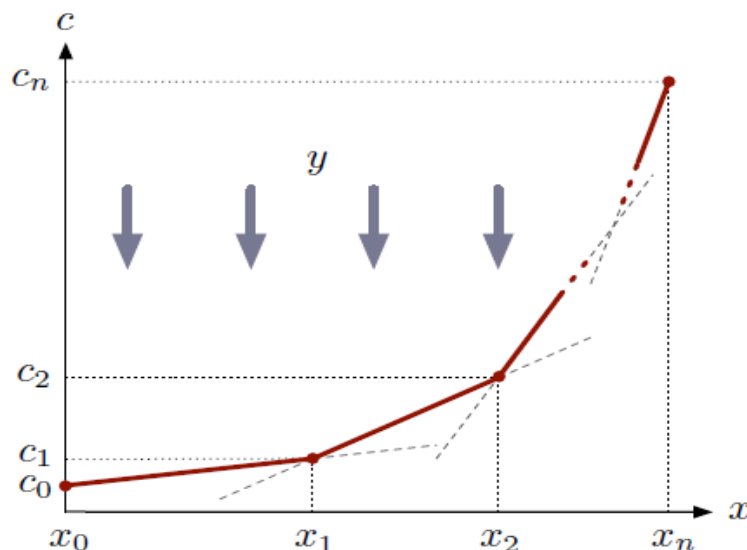
Εκτός από το γεγονός ότι παρέχει αυτή την εκτεταμένη δομή της ΒΡΦ διαθέσιμη στο χρήστη, το Matpower εκμεταλλεύεται αυτή τη δομή εσωτερικά για να εφαρμόσει διάφορες επιπρόσθετες δυνατότητες.

#### 3.4.3.1 ΤΜΗΜΑΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΟΣΤΗ (PIECEWISE LINEAR COSTS)

Η τυπική μορφή της ΒΡΦ [(3.22)-(3.25)] δεν μπορεί να χειριστεί άμεσα τις μη-ομαλές συναρτήσεις τμηματικά γραμμικού κόστους που προκύπτουν από διακριτές προσφορές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν όμως αυτές οι συναρτήσεις κόστους είναι κυρτές τότε μπορούν να μοντελοποιηθούν μια μέθοδο περιορισμένου μεταβλητού κόστους (CCV). Η συνάρτηση τμηματικά γραμμικού κόστους  $c(x)$  μπορεί να αντικατασταθεί από μία βοηθητική μεταβλητή κόστους  $y$  και ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών που σχηματίζουν μια κυρτή “δεξαμενή” απαιτώντας η μεταβλητή  $y$  να βρίσκεται πάνω από τη συνάρτηση  $c(x)$ .

Έστω η κυρτή συνάρτηση γραμμικού κόστους  $n$  τμημάτων:

$$c(x) = \begin{cases} m_1(x - x_1) + c_1, & x \leq x_1 \\ m_2(x - x_2) + c_2, & x_1 < x \leq x_2 \\ \vdots \\ m_n(x - x_n) + c_n, & x_{n-1} < x \end{cases} \quad (3.45)$$



Σχήμα 3.3 Περιορισμένη μεταβλητή κόστους [20]

Η συνάρτηση αυτή μπορεί να οριστεί από μία σειρά σημείων  $(x_j, c_j), j = 0 \dots n$ , όπου το  $m_j$  συμβολίζει την κλίση του  $j$ -οστού τμήματος:

$$m_j = \frac{c_j - c_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}, \quad j = 1 \dots n \quad (3.46)$$

Και  $x_0 < x_1 < \dots < x_n$  και  $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_n$ .



Η “δεξαμενή” που αντιστοιχεί σε αυτή τη συνάρτηση κόστους μπορεί να σχηματιστεί από τους ακόλουθους περιορισμούς στη βοηθητική μεταβλητή κόστους  $y$ .

$$y \geq m_j(x - x_j) + c_j, \quad j = 1 \dots n \quad (3.47)$$

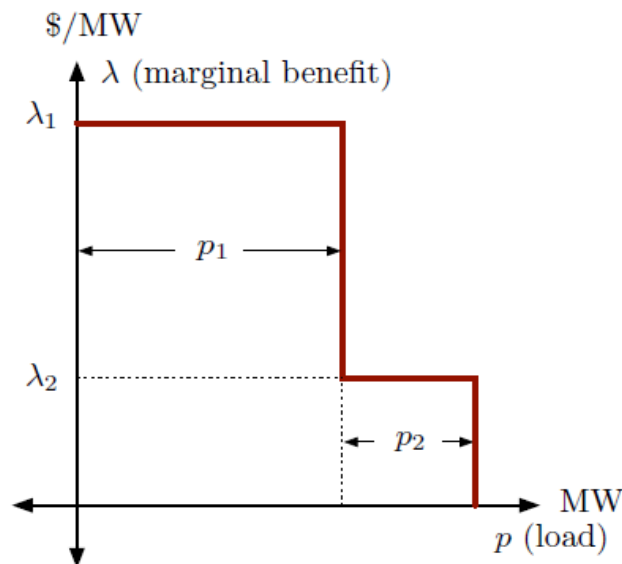
Ο όρος κόστους που προστέθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση στη θέση του  $c(x)$  είναι απλά η μεταβλητή  $y$ .

Το Matpower χρησιμοποιεί τη μέθοδο CCV εσωτερικά έτσι ώστε να παράγει αυτόματα την κατάλληλη βοηθητική μεταβλητή, τον όρο κόστους και το αντίστοιχο σύνολο περιορισμών για οποιαδήποτε τμηματικά γραμμικά κόστη στην ενεργό ή στην άεργο παραγωγή.

### 3.4.3.2 ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ(DISPATCHABLE LOADS)

Μια απλή προσέγγιση για τα κατανεμημένα ή ευαίσθητα στην τιμή φορτία είναι να μοντελοποιηθούν σαν αρνητικές εγχύσεις ενεργού ισχύος με αντίστοιχα αρνητικά κόστη. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας μια γεννήτρια με αρνητική παραγωγή, η τιμή της οποίας κυμαίνεται από μία ελάχιστη παραγωγή ίση με το αρνητικό του μέγιστου δυνατού φορτίου έως μια μέγιστη παραγωγή να είναι ίση με μηδέν.

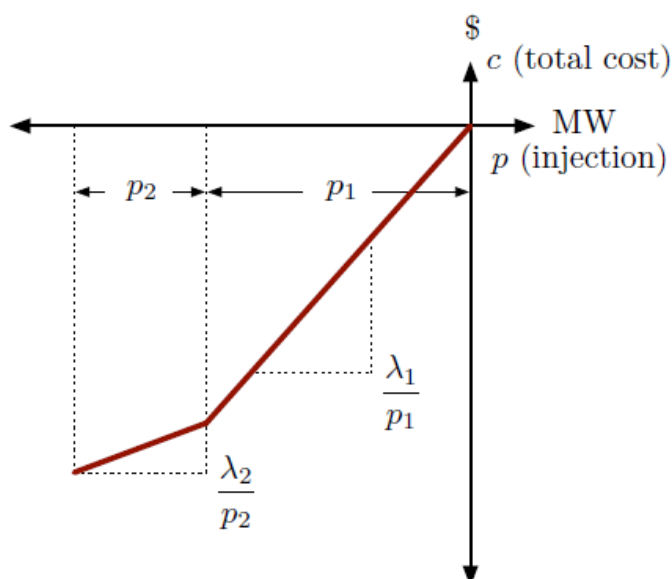
Έστω ότι έχουμε το παράδειγμα ενός φορτίου με ευαισθησία στην τιμή, όπου η συνάρτηση οριακού οφέλους φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Συνάρτηση οριακού οφέλους[20]

Η ζήτηση  $p_a$  του φορτίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα θα είναι μηδέν για τιμές πάνω από  $\lambda_1$ ,  $p_1$  για τιμές μεταξύ  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  και  $(p_1+p_2)$  για τιμές κάτω από  $\lambda_2$ .

Αυτό αντιστοιχεί σε μία αρνητική γεννήτρια με καμπύλη τμηματικά γραμμικού κόστους η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.5. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει ότι τα τμήματα της ζήτησης μπορεί να χωριστούν.



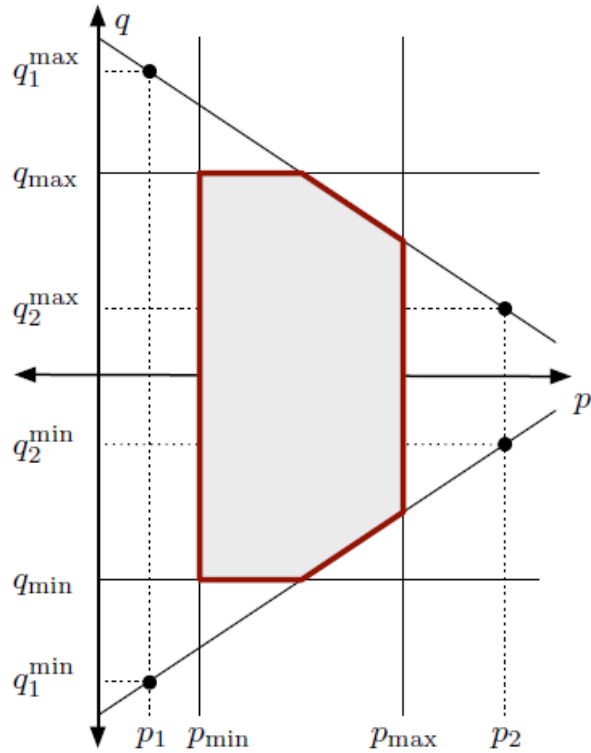
Σχήμα 3.5 Συνολική συνάρτηση κόστους για αρνητική έγχυση[20]

Όσον αφορά ένα μοντέλο AC δικτύου, υπάρχει επίσης το θέμα της αέργου ισχύος. Θεωρητικά, η έγχυση αέργου ισχύος για μια γεννήτρια μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή βρίσκεται μέσα στα προκαθορισμένα όρια. Από τη στιγμή που αυτή δε συμβαίνει με τα φορτία, το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο Matpower θεωρεί ότι τα καταναμημένα φορτία διατηρούν σταθερό συντελεστή ισχύος. Έτσι, σε κάθε πρόβλημα AC ΒΡΦ προστίθεται ένας επιπλέον περιορισμός ισότητας που απαιτεί ένα σταθερό συντελεστή ισχύος για κάθε “αρνητική” γεννήτρια που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει ένα καταναμημένο φορτίο.

Τέλος, εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι με τον ορισμό των καταναμημένων φορτίων ως αρνητικές γεννήτριες, αν το αρνητικό κόστος αντιστοιχεί σε όφελος για την κατανάλωση, ελαχιστοποιώντας το κόστος  $f(x)$  της παραγωγής ισοδυναμεί με μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας.

### 3.4.3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ(GENERATOR CAPABILITY CURVES)

Η τυπική διατύπωση της AC ΒΡΦ περιλαμβάνει περιορισμούς όσον αφορά τις εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος μεταξύ ενός ανώτατου και ενός κατώτατου ορίου ( $P_{min} \leq P \leq P_{max}$  και  $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$ ). Από την άλλη πλευρά, τα P-Q διαγράμματα των φυσικών γεννητριών περιλαμβάνουν έναν συμβιβασμό μεταξύ της ενεργού και αέργου ισχύος: δεν μπορούν να παράγουν ταυτόχρονα τη μέγιστη ενεργό ισχύ και τη μέγιστη (ή την ελάχιστη) αέργο ισχύ. Για να προσεγγίσει αυτό το συμβιβασμό, το Matpower προσθέτει δύο τμήματα κλίσης στο διάγραμμα P-Q όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, όπου το σκιασμένο μέρος δείχνει την εφικτή περιοχή λειτουργίας της μονάδας.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα P-Q γεννήτριας[20]

#### 3.4.3.4 ΟΡΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΚΛΑΔΩΝ(BRANCH ANGLE DIFFERENCE LIMITS)

Η διαφορά μεταξύ της γωνίας της τάσης του ζυγού  $\theta_f$  στο ένα άκρο του κλάδου και της γωνίας  $\theta_t$  στο άλλο άκρο μπορεί να οριοθετηθεί πάνω και κάτω ώστε να λειτουργήσει ως υποκατάστατο για ένα παροδικό όριο σταθερότητας, για παράδειγμα. Αν παρέχονται αυτά τα όρια, το Matpower δημιουργεί τους αντίστοιχους περιορισμούς για τις μεταβλητές των γωνιών των τάσεων.[20]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

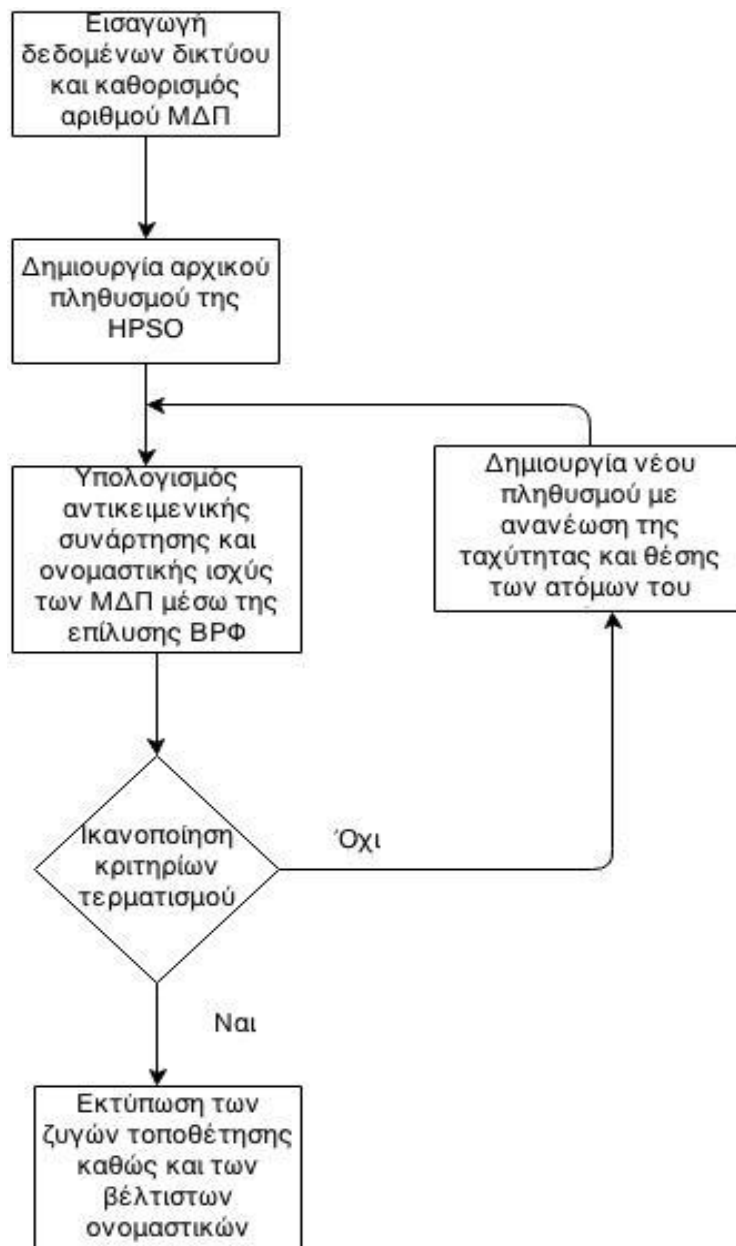
Η εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) προσφέρει πολλά θετικά στοιχεία στη διαχείριση των δικτύων διανομής και γι' αυτό το λόγο πρέπει να δοθούν κίνητρα ώστε να εγκατασταθούν όσο το δυνατόν περισσότερες. Οι διαχειριστές των δικτύων διανομής έχουν την δυνατότητα να κάνουν καλύτερη χρήση του δικτύου με την ύπαρξη ΜΔΠ σε αυτό και γι αυτό το λόγο επιθυμούν να βρουν την βέλτιστη διαστασιολόγηση των ΜΔΠ στα δίκτυά τους, ώστε να έχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα και να μην χρειάζεται να ενισχυθεί επιπλέον το δίκτυο και έτσι να ανέβει το κόστος εγκατάστασης ΜΔΠ. Επομένως οι διαχειριστές των δικτύων διανομής επιθυμούν να αναπτύξουν μεθόδους, οι οποίες θα βρίσκουν τη βέλτιστη τοποθέτηση των ΜΔΠ καθώς και την ονομαστική ισχύς τους χωρίς να απαιτείται να ενισχυθεί επιπλέον το δίκτυο.

Το γεγονός αυτό έχει προσελκύσει ένα σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον και διάφορες μέθοδοι, στόχοι και περιορισμοί εφαρμόζονται έχοντας σαν βάση δύο θεμελιώδεις προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση σκοπεύει να τοποθετήσει ΜΔΠ, των οποίων οι ονομαστικές ισχύες τους είναι προκαθορισμένες, στη βέλτιστη δυνατή θέση απαιτώντας τη χρήση μεθόδων όπως την PSO. Η δεύτερη προσέγγιση που χρησιμοποιείται απαιτεί να είναι προκαθορισμένη η θέση τοποθέτησης των ΜΔΠ και με την χρήση διάφορων αλγορίθμων υπολογίζεται η βέλτιστη δυνατή ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση αυτού του προβλήματος περιλαμβάνουν τη βέλτιστη ροή φορτίου (ΒΡΦ), τη μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού, τη μέθοδο κλίσης.

Οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις απαιτούν να είναι προκαθορισμένες, είτε η ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ, είτε η θέση τοποθέτησης των ΜΔΠ. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια μέθοδος, η οποία ξεπερνάει αυτούς τους περιορισμούς. Πρόκειται για μια μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί μια υβριδική PSO να ψάξει για ένα μεγάλο αριθμό συνδυασμών θέσεων τοποθέτησης των ΜΔΠ και για κάθε ένα από αυτούς τους συνδυασμούς επιστρατεύεται η ΒΡΦ με σκοπό να καθοριστεί η βέλτιστη ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ. Παρόλα αυτά, στη μέθοδο αυτή απαιτείται να έχει προκαθοριστεί ο αριθμός των ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο.[10] Η ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ που πρόκειται να διεισδύσουν στο δίκτυο διανομής ορίζεται από ένα σύνολο περιορισμών που επιβάλλονται από τη νομοθεσία(π.χ. όρια των τάσεων), από τις προδιαγραφές του εξοπλισμού(π.χ. τα θερμικά όρια μεταξύ των γραμμών και των μετασχηματιστών) καθώς και από άλλους παράγοντες διαχείρισης. Επίσης, η μέγιστη ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο λαμβάνεται στο μικρότερο φορτίο στο στιγμιότυπο της καμπύλης φορτίου, όπου η ανύψωση τάσης και η μείωση των απωλειών θα είναι η μέγιστη δυνατή.

### 4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Η μέθοδος αυτή απαιτεί από τον χρήστη να καθορίσει τον αριθμό των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο. Η υβριδική PSO παράγει διάφορες συνδυασμούς πιθανών θέσεων τοποθέτησης ζυγών σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Για κάθε συνδυασμό των θέσεων, εφαρμόζεται μια Βέλτιστη Ροή Φορτίου η οποία υπολογίζει την παραγωγή ενεργού και αέργου ισχύος των ΜΔΠ. Αυτή η πληροφορία ανατροφοδοτείται στην HPSO η οποία ψάχνει τη βέλτιστη λύση με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση. Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής HPSO και ΒΡΦ

## Αρχικοποίηση πληθυσμού

Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση του πληθυσμού. Κάθε σωματίδιο (particle) του αλγορίθμου έχει ένα διάνυσμα  $1 \times n_{dg}$ , όπου  $n_{dg}$  ο αριθμός των ΜΔΠ που θέλουμε να εγκαταστήσουμε στο δίκτυο:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{ndg}],$$

όπου κάθε στοιχείο του διανύσματος συμβολίζει το ζυγό του δικτύου όπου θα εγκατασταθεί η κάθε ΜΔΠ. Η δημιουργία των  $M$  particles γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης *rand* η οποία παράγει τυχαίους αριθμούς στο διάστημα το οποίο απαιτείται (όσοι είναι οι ζυγοί). Στη συνέχεια, τοποθετούνται οι ΜΔΠ στους αντίστοιχους ζυγούς του δικτύου, εκτελείται μία βέλτιστη ροή φορτίου για κάθε particle ξεχωριστά και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες, οι ισχύες των γεννητριών και η τιμή της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης  $F_{obj}$ . Για κάθε σωματίδιο η τιμή της  $F_{obj}$  αποθηκεύεται αυτόματα ως  $F_{rbest}$  δηλαδή ως η καλύτερη τιμή που έχει πετύχει το κάθε particle μέχρι εκείνη τη στιγμή. Και, συγκρίνοντας τις τιμές όλου του πληθυσμού βρίσκουμε ποιο particle έχει επιτύχει την καλύτερη λύση ( $g_{best}$ ).

## Υπολογισμός βέλτιστης λύσης ( $g_{best}$ ) με την εφαρμογή της Simulated Annealing (SA)

Στη συνέχεια, μέσω της Simulated Annealing, μετατοπίζεται η βέλτιστη λύση  $g_{best}$  σύμφωνα με τη σχέση (2.8).

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_{g'} + \eta \times (\mathbf{X}_{max} - \mathbf{X}_{min}) \times \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$$

Όπου  $\mathbf{P}_{g'}$  η προϋπάρχουσα  $g_{best}$ , η μεταβλητή  $\eta$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει το βήμα,  $\mathbf{X}_{max}$  και  $\mathbf{X}_{min}$  τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των λύσεων που ορίζονται από το πρόβλημα και  $\mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$  συμβολίζει μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα. Οι ΜΔΠ τοποθετούνται στους αντίστοιχους ζυγούς του δικτύου, εκτελείται μία βέλτιστη ροή φορτίου και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης  $F_{obj}$ . Στη συνέχεια ελέγχεται αν η συνάρτηση είναι εφικτή, δηλαδή αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος. Συγκεκριμένα, το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. αντίστοιχα, και τα θερμικά όρια στις γραμμές να μην ξεπερνάνε τα 3MVA. Ελέγχουμε αν η υποψήφια τιμή του  $g_{best}$  ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών. Για να λάβει το  $g_{best}$  την ανανεωμένη τιμή ή όχι ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, υπολογίζουμε μια μεταβλητή  $\mathbf{p}_a$  όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 2.

- (1) Αν το  $\mathbf{x}'$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{P}_{g'}$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{1}$ .
- (2) Αν το  $\mathbf{P}_{g'}$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{x}'$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{0}$ .
- (3) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι εφικτές λύσεις τότε το  $\mathbf{p}_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{f(\mathbf{P}_{g'}) - f(\mathbf{x}')}{t_0} \right] \right\}$$

(4) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι μη εφικτές λύσεις τότε το  $p_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{\text{viol}(\mathbf{P}_{g'}) - \text{viol}(\mathbf{x}')}{t_0} \right] \right\}$$

Όπου  $t_0 = -\frac{f_{\max} - f_{\min}}{\ln(0.1)}$  και  $f_{\max}, f_{\min}$  η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην αρχικοποίηση του πληθυσμού.

Τέλος, αν η μεταβλητή  $p_a$  είναι μεγαλύτερη από ένα τυχαίο αριθμό στο διάστημα (0,1) τότε το gbest λαμβάνει την ανανεωμένη τιμή  $\mathbf{x}'$ .

Αφού έχει γίνει λοιπόν η αρχικοποίηση πραγματοποιείται το κύριο σώμα του αλγορίθμου όπου ακολουθείται η εξής διαδικασία σε 300 εξωτερικές επαναλήψεις:

Ανανέωση βέλτιστης λύσης κάθε ατόμου (pbest) και συνολικής βέλτιστης λύσης (gbest)

Ανανεώνεται η ταχύτητα και η θέση των particles σύμφωνα με τις σχέσεις (2.3) και (2.5) αντίστοιχα:

$$\mathbf{V}_{i,j,\text{new}} = w\mathbf{V}_{i,j,\text{old}} + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{i,j} - \mathbf{X}_{i,j,\text{old}}) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_{g,j} - \mathbf{X}_{i,j,\text{old}}), j = 1, 2, \dots, n_{dg}$$

$$\mathbf{X}_{i,j,\text{new}} = \mathbf{X}_{i,j,\text{old}} + \mathbf{V}_{i,j,\text{new}}, j = 1, 2, \dots, n_{dg}$$

Όπου  $n_{dg}$  ο αριθμός των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγουμε στο δίκτυο,  $\mathbf{V}_{i,j,\text{new}}$  και  $\mathbf{V}_{i,j,\text{old}}$  η καινούρια και η παλιά ταχύτητα αντίστοιχα,  $c_1$  και  $c_2$  δύο θετικές σταθερές,  $\mathbf{p}_{i,j}$  η καλύτερη λύση που έχει πετύχει το κάθε particle,  $\mathbf{p}_{g,j}$  η καλύτερη λύση που έχει πετύχει συνολικά ο πληθυσμός και  $r_1, r_2$  δύο τυχαίες τιμές στο διάστημα (0,1).

Στη συνέχεια, εκτελείται μία βέλτιστη ροή φορτίου με τις νέες θέσεις των particles και υπολογίζονται οι τιμές της νέας αντικειμενικής συνάρτησης για όλα τα άτομα του πληθυσμού.

Ανανέωση pbest και gbest σύμφωνα με τον feasibility-based rule

Αφού γίνουν οι παραπάνω υπολογισμοί, ελέγχουμε αν κάθε particle ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών, έτσι ώστε όταν δεν παραβιάζεται κανένας περιορισμός η μεταβλητή viol να παίρνει την τιμή μηδέν. Έτσι η βέλτιστη τιμή του κάθε particle (pbest) ανάμεσα στην παλιά και ανανεωμένη τιμή επιλέγεται σύμφωνα με τον feasibility-based rule ως εξής:

- (1) Αν η μία υπακούει στους περιορισμούς(εφικτή-feasible) και η άλλη όχι(μη εφικτή-infeasible), επιλέγουμε την εφικτή.
- (2) Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει την καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση(Fopf).
- (3) Μεταξύ δύο μη εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει τη μικρότερη παραβίαση περιορισμών(viol).

Με παρόμοιο τρόπο επιλέγεται και η βέλτιστη τιμή του συνόλου του πληθυσμού (gbest).

### Υπολογισμός του νέου gbest με εφαρμογή της Simulated Annealing(SA)

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε 20 εσωτερικές επαναλήψεις. Στο κομμάτι αυτό του κώδικα ανανεώνεται η βέλτιστη λύση όλου του πληθυσμού(gbest) με σκοπό να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση. Η ανανεωμένη τιμή του gbest συμβολίζεται με  $\mathbf{x}'$  και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.8):

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_{g'} + \boldsymbol{\eta} \times (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \times \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$$

Όπου  $\mathbf{P}_{g'}$  η προϋπάρχουσα gbest, μεταβλητή  $\boldsymbol{\eta}$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει το βήμα,  $\mathbf{X}_{\max}$  και  $\mathbf{X}_{\min}$  τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των λύσεων που ορίζονται από το πρόβλημα και  $\mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$  συμβολίζει μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα. Για τις ανανεωμένες τιμές του gbest εκτελείται πάλι μία βέλτιστη ροή φορτίου και υπολογίζονται οι τάσεις, οι απώλειες και οι τιμές της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συνέχεια ελέγχουμε αν η υποψήφια τιμή του gbest ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών. Για να λάβει το gbest την ανανεωμένη τιμή ή όχι ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε και παραπάνω με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό του  $p_a$  δε χρησιμοποιούμε την αρχική θερμοκρασία  $t_0$  αλλά μια θερμοκρασία  $t$  η τιμή της οποίας αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Έτσι έχουμε:

Αρχικά, υπολογίζουμε τη μεταβλητή  $p_a$ .

- (1) Αν το  $\mathbf{x}'$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{P}_{g'}$  μη εφικτή, τότε  $p_a=1$ .
- (2) Αν το  $\mathbf{P}_{g'}$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{x}'$  μη εφικτή, τότε  $p_a=0$ .
- (3) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι εφικτές λύσεις τότε το  $p_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{f(\mathbf{P}_{g'}) - f(\mathbf{x}')}{t(\mathbf{k})} \right] \right\}$$

- (4) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι μη εφικτές λύσεις τότε το  $p_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{\text{viol}(\mathbf{P}_{g'}) - \text{viol}(\mathbf{x}')}{t(\mathbf{k})} \right] \right\}$$

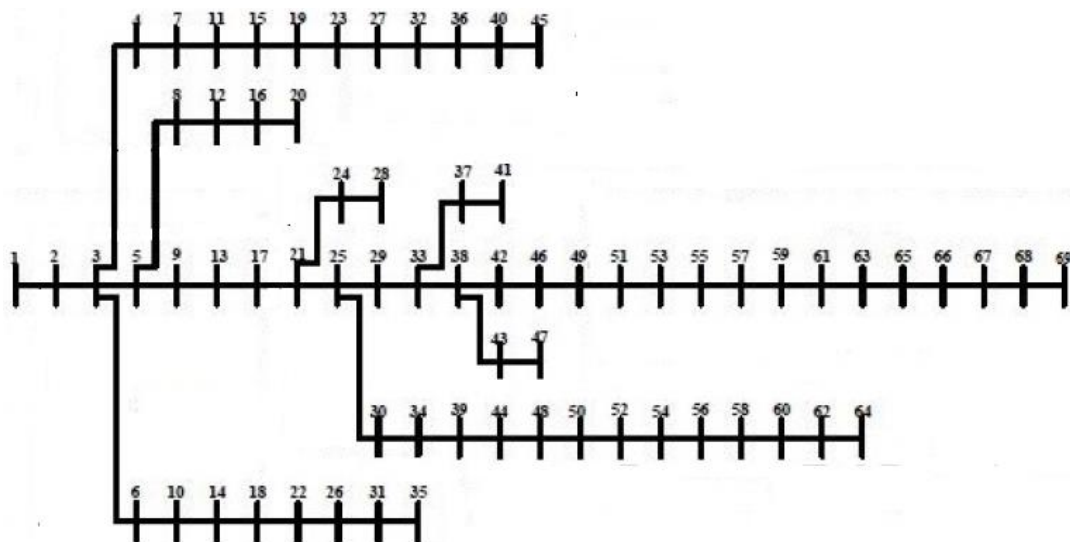


όπου  $t(\mathbf{k} + 1) = \lambda \cdot t(\mathbf{k})$ .

Τελικά, αν η μεταβλητή  $p_a$  είναι μεγαλύτερη από ένα τυχαίο αριθμό στο διάστημα  $(0,1)$  τότε το gbest λαμβάνει την τιμή  $x'$ .

#### 4.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για το πρόβλημα που θα εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρείται το δίκτυο διανομής που απεικονίζεται στο σχήμα (4.2). Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από έναν ζυγό τροφοδοσίας, 69 ζυγούς συνολικά και 68 κλάδους. Η βασική του ισχύς ισούται με 10MVA, ενώ η βασική του τάση είναι ίση με 12.8 kV. Ο ζυγός 1 θεωρείται ζυγός ταλάντωσης άρα δεν μπορεί να συνδεθεί σε αυτόν σταθμός ταχείας φόρτισης, ενώ όλοι οι υπόλοιποι ζυγοί χαρακτηρίζονται ως ζυγοί φορτίου. Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα του δικτύου. Στο δίκτυο πρόκειται να συνδεθούν ΜΔΠ και ζητείται να βρεθούν ποιοι είναι οι βέλτιστοι ζυγοί στους οποίους θα συνδεθούν καθώς και ποια είναι η παραγωγή των γεννητριών του δικτύου στη βέλτιστη περίπτωση. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. αντίστοιχα, οι γωνίες των τάσεων κυμαίνονται από  $-360^\circ$  έως  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών είναι ίσα με 3MVA.



Σχήμα 4.2 Δίκτυο Διανομής 69 ζυγών

Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R(p.u.)	X(p.u.)	Ζυγός	Pd(MW)	Qd(MVar)
1	2	0,0000205	0,0000632	1	0	0
2	3	0,0000305	0,0000732	2	0	0
3	5	0,0000916	0,0002197	3	0	0
3	6	0,0002686	0,0006592	4	0	0
3	4	0,0002686	0,0006592	5	0	0
4	7	0,0039063	0,009552	6	0,026	0,0186
5	9	0,001532	0,0017944	7	0,026	0,0186
5	8	0,0002075	0,0005127	8	0	0
6	10	0,0039063	0,009552	9	0	0
7	11	0,006427	0,0075073	10	0,026	0,0186
8	12	0,0051941	0,0127136	11	0	0
9	13	0,0223389	0,011377	12	0,079	0,0564
10	14	0,0242798	0,0080261	13	0,0026	0,0022
11	15	0,0018555	0,0021667	14	0	0
12	16	0,017688	0,04328	15	0,024	0,017
13	17	0,0232605	0,0118469	16	0,3847	0,2745
14	18	0,0042847	0,001416	17	0,0404	0,03
15	19	0,0001099	0,0001282	18	0	0
16	20	0,0050171	0,0122742	19	0,024	0,017
17	21	0,0056274	0,0028687	20	0,3847	0,2745
18	22	0,0214233	0,0070801	21	0,075	0,054
19	23	0,0444519	0,0519348	22	0	0
21	25	0,003009	0,001532	23	0,0012	0,001
21	24	0,0056641	0,002887	24	0,0405	0,0283
22	26	0,0512085	0,0171875	25	0,03	0,022
23	27	0,0189209	0,022113	26	0,014	0,01
24	28	0,0202576	0,0067993	27	0	0
25	29	0,0499878	0,0165222	28	0,0036	0,0027
25	30	0,0106201	0,0054077	29	0,028	0,019
26	31	0,104248	0,0344604	30	0,0044	0,0035
27	32	0,0025024	0,0029175	31	0,0195	0,014
29	33	0,0114258	0,0037781	32	0,006	0,0043
30	34	0,0123901	0,006311	33	0,145	0,104
31	35	0,0899658	0,0297424	34	0,0264	0,019
32	36	0,0005615	0,000708	35	0,006	0,004
33	38	0,0434204	0,0143494	36	0	0
33	37	0,0122803	0,0037292	37	0,018	0,013
34	39	0,0173462	0,0088318	38	0,145	0,104
36	40	0,0066467	0,0083801	39	0,024	0,0172
37	41	0,0002869	0,0000854	40	0,0392	0,0263
38	42	0,0628662	0,020752	41	0,018	0,013
38	43	0,0451294	0,014917	42	0,008	0,005
39	44	0,0171692	0,0087463	43	0,028	0,02

40	45	0,0000549	0,0000732	44	0	0
42	46	0,0637207	0,0210571	45	0,0392	0,0263
43	47	0,0002869	0,0000977	46	0,008	0,0055
44	48	0,0970459	0,0325745	47	0,028	0,02
46	49	0,0645752	0,0213379	48	0	0
48	50	0,048053	0,0160522	49	0	0
49	51	0,0119995	0,0039673	50	0	0
50	52	0,0185669	0,0061401	51	0,0455	0,03
51	53	0,0228516	0,0075562	52	0,1	0,072
52	54	0,0235657	0,0071533	53	0,06	0,035
53	55	0,0002869	0,0000977	54	0	0
54	56	0,0309753	0,0157776	55	0,06	0,035
55	57	0,0199951	0,0066101	56	1,244	0,888
56	58	0,0059448	0,0030273	57	0	0
57	59	0,012854	0,0042114	58	0,032	0,023
58	60	0,0088501	0,0045044	59	0,001	0
59	61	0,0208496	0,0068909	60	0	0
60	62	0,0433655	0,0220886	61	0,114	0,081
61	63	0,0008545	0,0002808	62	0,227	0,162
62	64	0,0635376	0,0323608	63	0,005	0,0035
63	65	0,0097107	0,0032104	64	0,059	0,042
65	66	0,0211365	0,0069885	65	0,059	0,042
66	67	0,0457031	0,0151062	66	0,059	0,042
67	68	0,0457031	0,0151062	67	0,059	0,042
68	69	0,0457031	0,0151062	68	0,059	0,042
				69	0,059	0,042

**Πίνακας 4.1 Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών**

## 4.2 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

### 4.2.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ θεωρείται ότι εξετάζεται από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου διανομής. Προφανώς η στάση των διαχειριστών απέναντι στην εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο εξαρτάται από τα κέρδη ή τα κόστη που συνδέονται με αυτήν την επένδυση. Όμως τα κόστη και τα κέρδη που θα έχει ο διαχειριστής με την ένταξη ΜΔΠ στο δίκτυο διαμορφώνονται από τους ρυθμιστικούς κανόνες και τα χρηματικά κίνητρα που συνδέονται με την εγκατάσταση ΜΔΠ.

Σύμφωνα με τη νομοθεσία δίνονται στους διαχειριστές δύο ειδών κίνητρα για να εγκαταστήσουν ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής που απεικονίζεται στο σχήμα (4.2). Το ένα από αυτά υποχρεώνει τους ιδιοκτήτες των ΜΔΠ να πληρώνουν στο διαχειριστή κάθε χρόνο ένα ποσό για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίσταται στο δίκτυο και η χρέωση αυτή αφορά τις τυχόν ενισχύσεις που μπορεί να χρειαστεί το δίκτυο (π.χ. στις γραμμές) καθώς και τη συντήρηση του δικτύου. Επομένως, σε περίπτωση που συνδεθούν ΜΔΠ στο δίκτυο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μη χρειάζεται ενίσχυση, τότε το ποσό αυτό είναι κέρδος για το διαχειριστή.

Ακόμα για το διαχειριστή τίθεται το κίνητρο να μειώσει τις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου. Έτσι η ρυθμιστική αρχή θέτει ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος για κάθε δίκτυο και ο διαχειριστής επιβραβεύεται αν οι απώλειες του δικτύου του είναι λιγότερες από αυτό το όριο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση που οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από το όριο που έχει τεθεί, τότε ο διαχειριστής υποχρεούται να πληρώσει πρόστιμο. Επομένως ο διαχειριστής κερδίζει ένα ποσό για κάθε MW απωλειών που μειώνονται σε σχέση με το όριο που έχει τεθεί και αντίστοιχα υποχρεούται να πληρώσει αυτό το ποσό για κάθε MW απωλειών που αυξάνεται σε σχέση με το όριο. Με αυτό τον τρόπο λοιπόν, αν ο διαχειριστής εγκαταστήσει με κατάλληλο τρόπο τις ΜΔΠ, τότε μπορεί να μειώσει τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου και έτσι να επωφεληθεί οικονομικά.

Για ένα δοσμένο σύνολο ζυγών τοποθέτησης των ΜΔΠ, η ονομαστική ισχύς της κάθε ΜΔΠ μπορεί να βρεθεί κάνοντας χρήση της ΒΡΦ. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί η βέλτιστη αυτή ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ, οι ΜΔΠ μοντελοποιούνται σαν γεννήτριες με αρνητικούς συντελεστές κόστους. Έτσι, με αυτό τον τρόπο, ελαχιστοποιώντας τα (αρνητικά) κόστη αυτών των γεννητριών μεγιστοποιείται η ονομαστική ισχύς των ΜΔΠ και το οικονομικό κέρδος με την εγκατάστασή τους στο δίκτυο. Όμως ο καθορισμός αυτής της βέλτιστης ονομαστικής ισχύς των ΜΔΠ υπαγορεύεται από κάποιους περιορισμούς που τίθενται είτε από το δίκτυο, ή από άλλους παράγοντες.

Μερικοί από αυτούς τους περιορισμούς είναι τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να είναι κοντά στην ονομαστική τους τιμή, δηλαδή:

$$V_b^{min} \leq V_b \leq V_b^{max} \quad (4.1)$$

όπου  $V_b^{min}$  και  $V_b^{max}$  είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο αντίστοιχα για το μέτρο της τάσης  $V_b$  σε όλους τους ζυγούς. Ακόμα ένας άλλος περιορισμός που τίθεται από το δίκτυο είναι να μην ξεπερνιούνται τα θερμικά όρια στις γραμμές και στους μετασχηματιστές του δικτύου. Έτσι για κάθε γραμμή και για κάθε μετασχηματιστή ροή φαινόμενης ισχύος που μεταφέρεται,  $S_t$ , δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο θερμικό όριο  $S_t^{max}$ . Δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$|S_t| \leq S_t^{max} \quad (4.2)$$

Εκτός από αυτούς τους περιορισμούς που τίθενται από το δίκτυο, μπορούν να προκύψουν και άλλοι περιορισμοί, όπως για παράδειγμα ο περιορισμός ότι οι ΜΔΠ έχουν σταθερό συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi_{dg}$ , δηλαδή:

$$\cos\varphi_g = \frac{P_g}{\sqrt{P_g^2 + Q_g^2}} = \text{σταθερό} \quad (4.3)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ΒΡΦ θα δίνεται από την σχέση (4.4):

$$f_{opf} = -c_L(P_L^{BM} - P_L^{ACT}) - \sum_{g=1}^{n_{dg}} c_g(P_g) \quad (4.4)$$

όπου  $C_g$  είναι το χρηματικό κίνητρο που έχει ο διαχειριστής να συνδέσει ΜΔΠ ονομαστικής ισχύος  $P_g$  και  $C_L$  είναι το χρηματικό κίνητρο που κερδίζει ο διαχειριστής, αν οι απώλειες του δικτύου μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ,  $P_L^{ACT}$ , είναι μικρότερες από το όριο που έχει τεθεί από την ρυθμιστική αρχή,  $P_L^{BM}$ , και γίνεται η υπόθεση ότι αυτό το όριο είναι οι απώλειες του δικτύου πριν την εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο.

Για το δίκτυο που εξετάζεται, σχήμα (4.2), το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. αντίστοιχα, οι γωνίες των τάσεων κυμαίνονται από  $-360^\circ$  έως  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών είναι ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι η ΜΔΠ έχει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός.

## 4.2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου και φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\max_x f_{\text{opf}} = \max_x (c_L (P_L^{\text{BM}} - P_L^{\text{ACT}}) + \sum_{g=1}^{n_{\text{dg}}} C_g P_g) \quad (4.5)$$

και είναι ουσιαστικά τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης της ΜΔΠ και μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος αντίστοιχα εκφρασμένα σε \$/MWh.

Οι κανονισμοί που ισχύουν, συμφωνούν με την νομοθεσία η οποία υποχρεώνει τον κάθε επενδυτή ΜΔΠ να καταβάλει στον διαχειριστή του δικτύου διανομής 2.5 \$/year για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίσταται στο δίκτυο. Το ποσό αυτό δικαιολογεί τη χρήση του δικτύου από την ΜΔΠ, καθώς και τις τυχόν βελτιώσεις που μπορεί να χρειαστεί το δίκτυο μετά την εισαγωγή της ΜΔΠ. Επομένως:

$$C_g = 2.5 \frac{\$}{kW \cdot yr} = 2.5 \frac{\$}{kW \cdot yr} \cdot \frac{1000 kW}{1 MW} \cdot \frac{1 yr}{8760h} = 0.2854 \frac{\$}{MW \cdot h}$$

Ακόμα ο κανονισμός θέτει ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος, το οποίο είναι ίσο με τις απώλειες του δικτύου χωρίς καθόλου ΜΔΠ, και αν μειωθούν οι απώλειες σε σχέση με αυτό το όριο τότε ο διαχειριστής επιβραβεύεται από τον ρυθμιστή με 48 \$/MWh για κάθε MW απωλειών που μειώνεται. Στην αντίθετη περίπτωση που οι απώλειες αυξηθούν σε σχέση με το όριο που έχει τεθεί, τότε ο διαχειριστής υποχρεούται να πληρώσει πρόστιμο 48 \$/MWh για κάθε MW απωλειών που αυξάνεται. Επομένως:

$$C_L = 48 \frac{\$}{MWh}$$

Ακόμα λαμβάνοντας υπόψη ότι οι απώλειες μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο δίνονται από την σχέση (4.5):

$$P_L^{\text{ACT}} = P_1 - P_{\text{load}} + \sum_{g=1}^{n_{\text{dg}}} P_g \quad (4.6)$$

όπου  $P_1$  είναι η ενεργός ισχύς του υποσταθμού και αντικαθιστώντας τη σχέση (4.6) στη σχέση (4.4), η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να γραφεί όπως φαίνεται στην σχέση (4.7):

$$f_{\text{opf}} = c_L \cdot P_1 - c_L (P_L^{\text{BM}} + P_{\text{load}}) + (c_L - c_g) \sum_{g=1}^{n_{\text{dg}}} P_g \quad (4.7)$$

Από τα δεδομένα του δικτύου προκύπτει ότι το φορτίο είναι:

$$P_{load} = 4.0149MW$$

Επίσης, επιλύοντας με το Matpower μια απλή ροή φορτίου προκύπτει ότι οι απώλειες του δικτύου πριν την εισαγωγή των ΜΔΠ είναι:

$$P_L^{BM} = 0.123481MW$$

Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση θα μπορούσε να γραφεί και ως εξής:

$$\min_x f_{opf} = \min_x (c_L \cdot P_1 - c_L(P_L^{BM} + P_{load}) + (c_L - c_g) \sum_{g=1}^{n_{dg}} P_g) = \min_x (48 * P_1 - 204.763 + 47.71461P_g) \quad (4.8)$$

Η  $f_{opf}$  έχει ως μονάδα μέτρησης το \$/MWh, αρκεί τα  $P_1$  και  $P_g$  να είναι εκφρασμένα σε MW, όπου το  $-f_{opf}$  εκφράζει το οικονομικό κέρδος για τον διαχειριστή του δικτύου διανομής από την εγκατάσταση των ΜΔΠ.

### 4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για το δίκτυο του σχήματος (4.2). Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου HPSO. Ο αλγόριθμος τερματίζεται μετά από 300 επαναλήψεις. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 250 particles ενώ οι τιμές των παραμέτρων  $c_1=c_2=2$ . Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις. Η εγκατάσταση 2,3 και 4 Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια H/Y με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: Intel®Pentium®CPU B950 @2.10GHz 2.10GHz
- Μνήμη RAM: 4GB
- Λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows 7 Home Premium

#### 1<sup>η</sup> περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η εγκατάσταση δύο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κατά σειρά οι ζυγοί τοποθέτησης των ΜΔΠ, η παραγωγή της κάθε μονάδας παραγωγής, οι απώλειες ενεργού ισχύος, τα οικονομικά κίνητρα για την εγκατάσταση των ΜΔΠ καθώς και η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

#### Εγκατάσταση δύο Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	55
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	56
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	0,928
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,021

Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	91,6168
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ(\$/MWh)	0,6909
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/MWh)	11,04
Συνολικό χρηματικό κίνητρο(\$/MWh)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	11,7346

**Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα για τοποθέτηση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο**

### 2<sup>η</sup> περίπτωση

Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης τριών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της τοποθέτησης δύο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, όπως ίδια παραμένει και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση της υβριδικής HPSO και στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

#### Εγκατάσταση τριών Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	25
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	56
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Γ)	61
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	1,4047
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,5
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Γ	0,6918
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,016
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	93,6128
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ(\$/MWh)	1,0264
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/MWh)	11,28
Συνολικό χρηματικό κίνητρο(\$/MWh)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	12,3069

**Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα για τοποθέτηση τριών ΜΔΠ στο δίκτυο**

### 3<sup>η</sup> περίπτωση

Στη συνέχεια βρίσκεται η λύση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης τεσσάρων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο των 69 ζυγών. Τα δεδομένα του προβλήματος παραμένουν τα ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπως ίδια παραμένει και η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα επιλύθηκε και αυτή τη φορά με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου HPSO, ενώ ο Πίνακας 4.4 περιλαμβάνει τα τελικά αποτελέσματα.

#### Εγκατάσταση τεσσάρων Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	16
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	56
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Γ)	61
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Δ)	62



Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	1,32
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,5
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Γ	0,8005
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Δ	0,4062
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,0117
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	95,3293
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ(\$/MWh)	1,1492
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/MWh)	11,4864
Συνολικό χρηματικό κίνητρο(\$/MWh)-Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	12,6355

**Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα για τοποθέτηση πέντε ΜΔΠ στο δίκτυο**

### 4.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

#### 4.3.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην περίπτωση αυτή σκοπός είναι η βέλτιστη τοποθέτηση των ΜΔΠ έτσι ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου καθώς και βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου. Δηλαδή, η επένδυση έχει στόχο να αποφέρει τεχνικά οφέλη στο δίκτυο και όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνηση αυτού. Επομένως, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του λόγου των απωλειών ενεργού ισχύος μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής προς τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εγκατάσταση της ΜΔΠ, καθώς και η ελαχιστοποίηση του λόγου της απόκλισης της τάσης των ζυγών του δικτύου από μία τάση αναφοράς, μετά τη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής, προς την απόκλιση της τάσης των ζυγών από την τάση αναφοράς, πριν τη διείσδυση. Η τάση αναφοράς ορίζεται ως η τάση του ζυγού αναφοράς. Επομένως με τον τρόπο αυτό, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος προσεγγίζουν την τάση του ζυγού αναφοράς, δηλαδή του ζυγού 1, με αποτέλεσμα τη μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών του δικτύου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$F_{opf} = k_p f_p + k_v f_v = k_p \frac{P_{losses}^{with DG}}{P_{losses}^{without DG}} + k_v \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i - V_{i,ref}|}{\sum_{i=1}^{69} |V_{i,no DG} - V_{i,ref}|} \quad (4.9)$$

Οι παράμετροι  $k_v$  και  $k_p$  αποτελούν δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι καθορίζουν το πόσο μεγάλη σημασία δίνεται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ή στη διακύμανση της τάσης των ζυγών, και ποιος από τους δύο αυτούς παράγοντες έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στο εκάστοτε πρόβλημα. Το άθροισμα των δύο αυτών παραμέτρων είναι ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$k_v + k_p = 1$$

Για το δίκτυο που εξετάζεται, σχήμα (4.2), το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. αντίστοιχα, οι γωνίες των τάσεων κυμαίνονται από  $-360^\circ$  έως  $360^\circ$ , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών είναι ίσα με 3MVA. Θεωρείται επίσης ότι η ΜΔΠ έχει έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι ίσος με 0.9 επαγωγικός.

### 4.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για το δίκτυο του σχήματος (4.1) για διάφορα σενάρια. Σε καθένα από αυτά τα σενάρια τα στοιχεία που μεταβάλλονται είναι οι τιμές των  $k_p, k_v$  της αντικειμενικής συνάρτησης και ο αριθμός των ΜΔΠ  $n_{dg}$  που θα διεισδύσουν στο δίκτυο. Επομένως τα σενάρια που θα μελετηθούν είναι τα εξής: Η εγκατάσταση δύο, τριών ή τεσσάρων ΜΔΠ για καθένα από τα τρία ζεύγη των συντελεστών βαρύτητας  $k_p$  και  $k_v$ :

- $k_p = k_v = 0.5$
- $k_p = 0.75, k_v = 0.25$
- $k_p = 0.25, k_v = 0.75$

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου HPSO. Ο αλγόριθμος τερματίζεται μετά από 300 επαναλήψεις. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν 250 particles ενώ οι τιμές των παραμέτρων  $c_1=c_2=2$ . Τα τελικά αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακα που ακολουθούν.

#### 1<sup>η</sup> περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση ο αριθμός των Μονάδων Διεισπαρμένης Παραγωγής (Distributed Generation) είναι δύο:

$$\triangleright n_{dg} = 2$$

Σε κάθε πίνακα παρουσιάζονται κατά σειρά: οι θέσεις των ΜΔΠ, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ , όπως ειπώθηκαν παραπάνω.

#### Εγκατάσταση δύο Μονάδων Διεισπαρμένης Παραγωγής

<b>2 Μονάδες Διεισπαρμένης Παραγωγής</b>	<b><math>k_p=0,25</math> <math>k_v=0,75</math></b>	<b><math>k_p=0,5</math> <math>k_v=0,5</math></b>	<b><math>k_p=0,75</math> <math>k_v=0,25</math></b>
Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	55	55	56
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	60	56	61
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	0,8806	0,8796	1,5

Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,5	1,5	0,8267
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505	0,2505	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,0232	0,0208	0,0205
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	90,73852	91,69661	91,81637
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	2,0657	2,0657	2,0657
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	0,3004	0,3093	0,3004
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	85,45771	85,02687	85,45771
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,1323	0,1163	0,0995

**Πίνακας 4.5 Εγκατάσταση δύο ΜΔΠ**

### 2<sup>η</sup> περίπτωση

Στην δεύτερη περίπτωση ο αριθμός των Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (Distributed Generation) είναι τρεις:

$$\rightarrow n_{dg} = 3$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κατά σειρά: οι θέσεις των ΜΔΠ, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ , όπως ειπώθηκαν παραπάνω.

Εγκατάσταση τριών Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

<b>3 Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής</b>	<b><math>k_p=0,25</math> <math>k_v=0,75</math></b>	<b><math>k_p=0,5</math> <math>k_v=0,5</math></b>	<b><math>k_p=0,75</math> <math>k_v=0,25</math></b>
Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	52	56	56
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	58	61	61
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Γ)	61	62	62
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	0,4361	1,499	1,499
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,4997	0,7784	0,7784
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Γ	0,771	0,3801	0,3801
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505	0,2505	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,0147	0,0132	0,0132
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	94,13174	94,73054	94,73054
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	2,0657	2,0657	2,0657
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	0,1464	0,1522	0,1522
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	92,91281	92,63204	92,63204
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,0678	0,0632	0,0579

**Πίνακας 4.6 Εγκατάσταση τριών ΜΔΠ**

### 3<sup>η</sup> περίπτωση

Στην τρίτη περίπτωση ο αριθμός των Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (Distributed Generation) είναι τέσσερις:

➤  $n_{dg} = 4$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κατά σειρά: οι θέσεις των ΜΔΠ, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ , όπως ειπώθηκαν παραπάνω.

Εγκατάσταση τεσσάρων Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής

<b>4 Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής</b>	<b><math>k_p=0,25</math> <math>k_v=0,75</math></b>	<b><math>k_p=0,5</math> <math>k_v=0,5</math></b>	<b><math>k_p=0,75</math> <math>k_v=0,25</math></b>
Πρώτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Α)	33	33	33
Δεύτερος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Β)	56	56	56
Τρίτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Γ)	61	61	62
Τέταρτος βέλτιστος ζυγός εγκατάστασης ΜΔΠ(Ζυγός Δ)	62	62	63
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Α	0,5783	0,5783	0,5791
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Β	1,4965	1,4965	1,4965
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Γ	0,6305	0,6305	0,3216
Ονομαστική Ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό Δ	0,3217	0,3217	0,6297
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,2505	0,2505	0,2505
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ	0,0098	0,0098	0,0098
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	96,08782	96,08782	96,08782
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	2,0657	2,0657	2,0657
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ(α.μ.)	0,0823	0,0823	0,0823
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	96,01588	96,01588	96,01588
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,0397	0,0395	0,0393

**Πίνακας 4.7 Εγκατάσταση τεσσάρων ΜΔΠ**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γενικότερο πρόβλημα προς επίλυση αφορά στην βέλτιστη τοποθέτηση ενός αριθμού σταθμών ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV fast chargers) στους ζυγούς ενός δικτύου. Η τοποθέτηση των σταθμών φόρτισης σε ένα δίκτυο διανομής θα πρέπει να καλύπτει κοινωνικές ανάγκες (εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών με τον αποδοτικότερο τρόπο) αλλά και να αποτρέπει την ανάγκη για πρόωρες επενδύσεις αναβάθμισης του δικτύου διανομής.

Για την εξυπηρέτηση των κοινωνικών αναγκών, ένα δίκτυο διανομής στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθούν σταθμοί ταχείας φόρτισης χωρίζεται σε ζώνες εξυπηρέτησης ανάλογα με τον πληθυσμό και την κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι ζώνες εξυπηρέτησης έχουν σκοπό την προσανατολισμένη εξυπηρέτηση ενός αριθμού χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων που κατοικούν γύρω από την ζώνη αυτή, χωρίς αυτό να αποκλείει και τη χρήση τους από ουδέτερους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων. Ο αριθμός των σταθμών ταχείας φόρτισης εξαρτάται από τον προβλεπόμενο αριθμό εξυπηρετούμενων ηλεκτρικών οχημάτων.

Αφού ορισθούν οι ζώνες εξυπηρέτησης, στη συνέχεια η επιλογή του ζυγού σύνδεσης στο δίκτυο γίνεται με τεχνικά κριτήρια. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης των δικτύων διανομής από την ενσωμάτωση σταθμών ταχείας φόρτισης στα ηλεκτρικά δίκτυα. Τα κριτήρια επιλογής του ζυγού επιλέχθηκαν για την παρούσα ανάλυση να είναι η διακύμανση της τάσης και οι απώλειες του δικτύου. Τέλος, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι η ομαλή λειτουργία του δικτύου δεν διαταράσσεται από το επιπρόσθετο φορτίο όσον αφορά τα θερμικά όρια των γραμμών και τα όρια της τάσης.

## 5.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο σκοπός είναι, με την τοποθέτηση των σταθμών, να έχει το δίκτυο τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ενεργού ισχύος και τις ελάχιστες δυνατές μεταβολές στην τάση. Επομένως, επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του λόγου των απωλειών ενεργού ισχύος μετά την τοποθέτηση των σταθμών προς τις αντίστοιχες απώλειες πριν την τοποθέτησή τους, καθώς και η ελαχιστοποίηση του λόγου της απόκλισης της τάσης των ζυγών του δικτύου από μια τάση αναφοράς μετά, προς την απόκλιση της τάσης των ζυγών από την τάση αναφοράς πριν την τοποθέτηση. Η τάση αναφοράς ορίζεται ως η τάση του ζυγού αναφοράς (ζυγός 1). Επομένως με τον τρόπο αυτό, οι τάσεις των ζυγών του συστήματος προσεγγίζουν την τάση του ζυγού αναφοράς, με αποτέλεσμα τη μείωση της πτώσης τάσης κατά μήκος των γραμμών του δικτύου. Με βάση τα παραπάνω, διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση που έχει την ακόλουθη μορφή:

$$F_{\text{opf}} = k_p f_p + k_v f_v = k_p \frac{P_{\text{losses}}^{\text{with FCS}}}{P_{\text{losses}}^{\text{without FCS}}} + k_v \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_{i,\text{with FCS}} - V_{i,\text{ref}}|}{\sum_{i=1}^{69} |V_{i,\text{no FCS}} - V_{i,\text{ref}}|} \quad (5.1)$$

Οι παράμετροι  $k_v$  και  $k_p$  αποτελούν δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι καθορίζουν το πόσο μεγάλη σημασία δίνεται στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ή στη διακύμανση της τάσης των ζυγών, και ποιος από τους δύο αυτούς παράγοντες έχει μεγαλύτερη βαρύτητα στο εκάστοτε πρόβλημα. Το άθροισμα των δύο αυτών παραμέτρων είναι ίσο με τη μονάδα. Δηλαδή ισχύει η σχέση:  $k_v+k_p = 1$ .

### 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για το πρόβλημα που θα εξεταστεί θεωρούμε το δίκτυο με τα στοιχεία του πίνακα 4.1. Με βάση κοινωνικά κριτήρια, το συγκεκριμένο δίκτυο χωρίζεται σε τρεις ζώνες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, σε κάθε μία από τις οποίες θα τοποθετηθούν δύο σταθμοί φόρτισης. Οι ζώνες αυτές περιλαμβάνουν τους ακόλουθους ζυγούς:

Ζώνη 1:

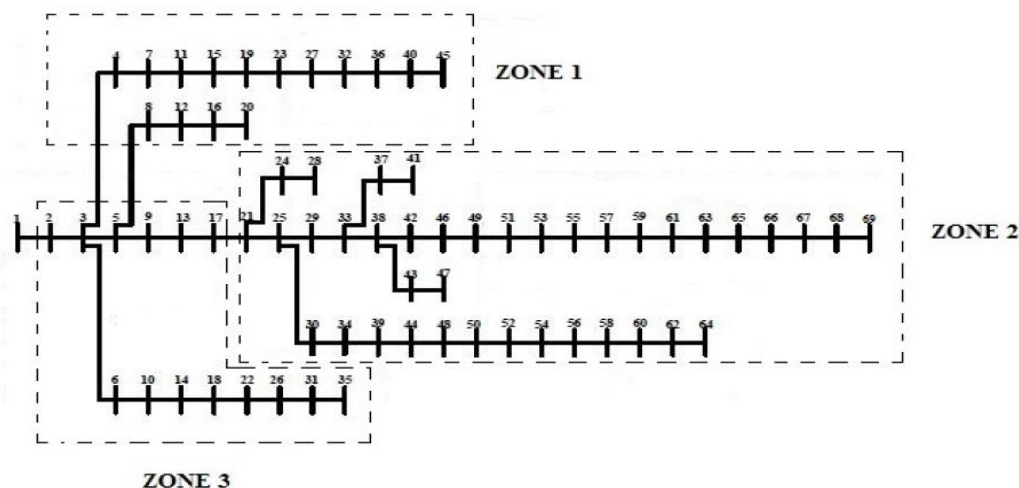
[4,7,8,11,12,15,16,19,20,23,27,32,36,40,45]

Ζώνη 2:

[21,24,25,28,29,30,33,34,37,38,39,41,42,43,44,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69]

Ζώνη 3:

[2,3,5,6,9,10,13,14,17,18,22,26,31,35]



Σχήμα 5.1 Το δίκτυο 69 ζυγών χωρισμένο σε ζώνες

Στο παραπάνω δίκτυο συνδέονται επίσης τέσσερις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DG), με σταθερή παραγωγή και σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.9 επαγωγικό, στους ζυγούς 27,35,60 και 61. Συγκεκριμένα, στους ζυγούς 27 και 35 η παραγωγή των ΜΔΠ είναι 0.3MW, η παραγωγή στο ζυγό 60 είναι 0.5MW και στο ζυγό 61 η παραγωγή της μονάδας είναι 1.6MW. Στο δίκτυο πρόκειται να συνδεθούν έξι σταθμοί

ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και ζητείται να βρεθούν ποιοι είναι οι βέλτιστοι ζυγοί στους οποίους θα συνδεθούν καθώς και ποια είναι η παραγωγή των γεννητριών του δικτύου στη βέλτιστη περίπτωση. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. αντίστοιχα, οι γωνίες των τάσεων κυμαίνονται από  $-360^\circ$  έως  $360^\circ$ , ενώ τα θερμοκά όρια των γραμμών είναι ίσα με 3MVA.

## 5.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

### Αρχικοποίηση

Κάθε σωματίδιο (particle) του αλγορίθμου είναι ένα διάνυσμα έξι θέσεων:

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]$$

στο οποίο τα  $x_1$  και  $x_2$  αποτελούν ζυγούς της πρώτης ζώνης του δικτύου, τα  $x_3$  και  $x_4$  της δεύτερης και τα  $x_5$  και  $x_6$  της τρίτης. Αυτές είναι οι θέσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν οι σταθμοί φόρτισης σε κάθε ζώνη. Η γένεση των M particles γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης *rand* η οποία παράγει τυχαίους αριθμούς στο διάστημα το οποίο απαιτείται (0-69 στη συγκεκριμένη περίπτωση, όσοι είναι και οι ζυγοί).

Αρχικά, μετά την τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, εκτελείται μία απλή ροή φορτίου ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις των ζυγών  $V_{i,noFCS}$  και οι απώλειες ενεργού ισχύος  $P_{losses}^{without FCS}$  πριν την τοποθέτηση των σταθμών ταχείας φόρτισης. Στη συνέχεια, μετά τη γένεση των particles, εισάγεται ένα κομμάτι κώδικα το οποίο μετατοπίζει, αν αυτό είναι απαραίτητο, τους ζυγούς των particles ώστε να βρίσκονται μέσα στα όρια των αντίστοιχων ζωνών. Έπειτα, τοποθετούνται οι σταθμοί στους αντίστοιχους ζυγούς του δικτύου, εκτελείται μία ροή φορτίου για κάθε particle ξεχωριστά και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης *Fpf* με βάση τη σχέση (5.1).

### Υπολογισμός βέλτιστης λύσης(gbest) με την εφαρμογή της Simulated Annealing(SA)

Στη συνέχεια, μέσω της Simulated Annealing, μετατοπίζεται η βέλτιστη λύση gbest σύμφωνα με τη σχέση (2.8).

$$x' = P_g + \eta \times (X_{max} - X_{min}) \times N(0, 1)$$

Όπου  $P_g$  η προϋπάρχουσα gbest, μεταβλητή  $\eta$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει το βήμα,  $X_{max}$  και  $X_{min}$  τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των λύσεων που ορίζονται από το πρόβλημα και  $N(0,1)$  συμβολίζει μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα. Στο σημείο αυτό γίνεται έλεγχος αν ο ζυγός που θα τοποθετηθεί κάθε σταθμός βρίσκεται εντός ζώνης. Αν δε βρίσκεται, τότε πραγματοποιείται κατάλληλη μετατόπιση. Μετά, οι σταθμοί τοποθετούνται στους αντίστοιχους ζυγούς του δικτύου, εκτελείται μία ροή φορτίου και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης *Fpf*.

Στη συνέχεια ελέγχεται αν η συνάρτηση είναι εφικτή, δηλαδή αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος. Συγκεκριμένα, το ελάχιστο και το μέγιστο όριο των μέτρων των τάσεων είναι 0.9-1 α.μ. και τα θερμικά όρια στις γραμμές να μην ξεπερνάνε τα 3MVA. Ελέγχουμε αν η υποψήφια τιμή του gbest ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών. Για να λάβει το gbest την ανανεωμένη τιμή ή όχι ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά, υπολογίζουμε μια μεταβλητή  $\mathbf{p}_a$  όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 2.

- (1) Αν το  $\mathbf{x}'$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{P}_{g'}$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{1}$ .
- (2) Αν το  $\mathbf{P}_{g'}$  είναι εφικτή λύση και το  $\mathbf{x}'$  μη εφικτή, τότε  $\mathbf{p}_a = \mathbf{0}$ .
- (3) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι εφικτές λύσεις τότε το  $\mathbf{p}_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{p}_a = \min \left\{ \mathbf{1}, \exp \left[ \frac{f(\mathbf{P}_{g'}) - f(\mathbf{x}')}{t_0} \right] \right\}$$

- (4) Αν και οι δύο ( $\mathbf{P}_{g'}$  και  $\mathbf{x}'$ ) είναι μη εφικτές λύσεις τότε το  $\mathbf{p}_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{p}_a = \min \left\{ \mathbf{1}, \exp \left[ \frac{\text{viol}(\mathbf{P}_{g'}) - \text{viol}(\mathbf{x}')}{t_0} \right] \right\}$$

Όπου  $t_0 = -\frac{f_{\max} - f_{\min}}{\ln(0.1)}$  και  $f_{\max}, f_{\min}$  η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην αρχικοποίηση του πληθυσμού.

Τέλος, αν η μεταβλητή  $\mathbf{p}_a$  είναι μεγαλύτερη από ένα τυχαίο αριθμό στο διάστημα (0,1) τότε το gbest λαμβάνει την ανανεωμένη τιμή  $\mathbf{x}'$ .

Αφού έχει γίνει λοιπόν η αρχικοποίηση πραγματοποιείται το κύριο σώμα του αλγορίθμου όπου ακολουθείται η εξής διαδικασία σε 300 εξωτερικές επαναλήψεις:

Ανανέωση βέλτιστης λύσης κάθε ατόμου (pbest) και συνολικής βέλτιστης λύσης (gbest)

Ανανεώνεται η ταχύτητα και η θέση των particles σύμφωνα με τις σχέσεις (2.3) και (2.5) αντίστοιχα:

$$\mathbf{V}_{i,j,new} = \mathbf{w}\mathbf{V}_{i,j,old} + \mathbf{c}_1\mathbf{r}_1(\mathbf{p}_{i,j} - \mathbf{X}_{i,j,old}) + \mathbf{c}_2\mathbf{r}_2(\mathbf{p}_{g,j} - \mathbf{X}_{i,j,old}), j = 1, 2, \dots, n_{dg}$$

$$\mathbf{X}_{i,j,new} = \mathbf{X}_{i,j,old} + \mathbf{V}_{i,j,new}, j = 1, 2, \dots, n_{dg}$$

Όπου  $n_{dg}$  ο αριθμός των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που εισάγουμε στο δίκτυο,  $\mathbf{V}_{i,j,new}$  και  $\mathbf{V}_{i,j,old}$  η καινούρια και η παλιά ταχύτητα αντίστοιχα,  $\mathbf{c}_1$  και  $\mathbf{c}_2$  δύο θετικές σταθερές,  $\mathbf{p}_{i,j}$  η καλύτερη λύση που έχει πετύχει το κάθε particle,  $\mathbf{p}_{g,j}$  η καλύτερη λύση που έχει πετύχει συνολικά ο πληθυσμός και  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  δύο τυχαίες τιμές στο διάστημα (0,1). Κάθε φορά που υπολογίζεται η ανανεωμένη θέση των particles



υπάρχει ένα κομμάτι κώδικα που ελέγχει μετατοπίζει κατάλληλα τους ζυγούς σε περίπτωση που δε βρίσκονται εντός ζώνης.

Στη συνέχεια, εκτελείται μία ροή φορτίου με τις νέες θέσεις των particles και υπολογίζονται οι τιμές της νέας αντικειμενικής συνάρτησης για όλα τα άτομα του πληθυσμού.

#### Ανανέωση pbest και gbest σύμφωνα με τον feasibility-based rule

Αφού γίνουν οι παραπάνω υπολογισμοί, ελέγχουμε αν κάθε particle ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών, έτσι ώστε όταν δεν παραβιάζεται κανένας περιορισμός η μεταβλητή viol να παίρνει την τιμή μηδέν. Έτσι η βέλτιστη τιμή του κάθε particle(pbest) ανάμεσα στην παλιά και ανανεωμένη τιμή επιλέγεται σύμφωνα με τον feasibility-based rule ως εξής:

- (1) Αν η μία υπακούει στους περιορισμούς(εφικτή-feasible) και η άλλη όχι(μη εφικτή-infeasible), επιλέγουμε την εφικτή.
- (2) Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει την καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση(Fpf).
- (3) Μεταξύ δύο μη εφικτών λύσεων, επιλέγεται εκείνη που έχει τη μικρότερη παραβίαση περιορισμών(viol).

Με παρόμοιο τρόπο επιλέγεται και η βέλτιστη τιμή του συνόλου του πληθυσμού (gbest).

#### Υπολογισμός του νέου gbest με εφαρμογή της Simulated Annealing(SA)

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε 20 εσωτερικές επαναλήψεις. Στο κομμάτι αυτό του κώδικα ανανεώνεται η βέλτιστη λύση όλου του πληθυσμού(gbest) με σκοπό να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση. Η ανανεωμένη τιμή του gbest συμβολίζεται με  $\chi'$  και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.8):

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_{g'} + \eta \times (\mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}) \times \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$$

Όπου  $\mathbf{P}_{g'}$  η προϋπάρχουσα gbest, μεταβλητή  $\eta$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει το βήμα,  $\mathbf{X}_{\max}$  και  $\mathbf{X}_{\min}$  τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια των λύσεων που ορίζονται από το πρόβλημα και  $\mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$  συμβολίζει μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα. Για τις νέες τιμές ( $\chi'$ ) πραγματοποιείται ο έλεγχος αν οι ζυγοί βρίσκονται εντός ζώνης. Για τις ανανεωμένες τιμές του gbest εκτελείται πάλι μία ροή φορτίου και υπολογίζονται οι τάσεις, οι απώλειες και οι τιμές της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συνέχεια ελέγχουμε αν η υποψήφια τιμή του gbest ικανοποιεί τους περιορισμούς ή όχι αποθηκεύοντας στη μεταβλητή **viol** την παραβίαση των περιορισμών. Για να λάβει το gbest την ανανεωμένη τιμή ή όχι ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε και παραπάνω με τη διαφορά ότι στην

περίπτωση αυτή για τον υπολογισμό του  $p_a$  δε χρησιμοποιούμε την αρχική θερμοκρασία  $t_0$  αλλά μια θερμοκρασία  $t$  η τιμή της οποίας αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Έτσι έχουμε:

Αρχικά, υπολογίζουμε τη μεταβλητή  $p_a$ .

(1) Αν το  $x'$  είναι εφικτή λύση και το  $P_{g'}$  μη εφικτή, τότε  $p_a=1$ .

(2) Αν το  $P_{g'}$  είναι εφικτή λύση και το  $x'$  μη εφικτή, τότε  $p_a=0$ .

(3) Αν και οι δύο ( $P_{g'}$  και  $x'$ ) είναι εφικτές λύσεις τότε το  $p_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{f(P_{g'}) - f(x')}{t(k)} \right] \right\}$$

(4) Αν και οι δύο ( $P_{g'}$  και  $x'$ ) είναι μη εφικτές λύσεις τότε το  $p_a$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_a = \min \left\{ 1, \exp \left[ \frac{\text{viol}(P_{g'}) - \text{viol}(x')}{t(k)} \right] \right\}$$

όπου  $t(k) = \lambda^{\text{iterations}} * t_0$ , και  $\text{iterations}$ =αριθμός εξωτερικής επανάληψης.

Τελικά, αν η μεταβλητή  $p_a$  είναι μεγαλύτερη από ένα τυχαίο αριθμό στο διάστημα (0,1) τότε το gbest λαμβάνει την τιμή  $x'$ .

## 5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για το δίκτυο του σχήματος (4.2) για διάφορα σενάρια. Σε κάθε σενάριο αυτά που μεταβάλλονται είναι οι συντελεστές βαρύτητας  $k_p, k_v$  της αντικειμενικής συνάρτησης και το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης. Οι συνδυασμοί κάθε σεναρίου είναι οι ακόλουθοι:

- $k_p = k_v = 0.5$ , για σταθμούς φόρτισης 0.12/0.21/0.3MW
- $k_p = 0.75$ ,  $k_v = 0.25$ , για σταθμούς φόρτισης 0.12/0.21/0.3MW
- $k_p = 0.25$ ,  $k_v = 0.75$ , για σταθμούς φόρτισης 0.12/0.21/0.3MW

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά με τη βοήθεια πινάκων τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου:

### 1<sup>η</sup> Περίπτωση

Στην πρώτη περίπτωση το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης (Fast Charging Stations) είναι 0.12MW:

$$\triangleright P_{fcs} = 0.12MW$$

Σε κάθε πίνακα παρουσιάζονται κατά σειρά: οι θέσεις των σταθμών ταχείας φόρτισης σε κάθε ζώνη, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ , όπως ειπώθηκαν παραπάνω.

<b>P<sub>fcs</sub>=0,12MW</b>	<b>k<sub>p</sub>=0,25</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,5</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,75</b>	
	<b>k<sub>v</sub>=0,75</b>		<b>k<sub>v</sub>=0,5</b>		<b>k<sub>v</sub>=0,25</b>	
Θέσεις των δύο Σταθμών Ταχείας Φόρτισης στη ζώνη 1(ζυγοί)	40	45	27	36	27	32
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 2(ζυγοί)	68	69	61	65	61	63
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 3(ζυγοί)	31	35	31	35	31	35
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,123481		0,123481		0,123481	
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,112059		0,11031		0,110232	
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	9,250006074		10,66641832		10,72958593	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,974991		0,974991		0,974991	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,848796		0,858572		0,859197	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	12,9431964		11,94052048		11,87641732	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,879801		0,886965		0,889835	

**Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα για σταθμούς ταχείας φόρτισης 0.12MW**

## 2<sup>η</sup> Περίπτωση

Στη δεύτερη περίπτωση το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης(Fast Charging Stations) είναι 0.21MW:

$$\triangleright P_{fcs} = 0.21MW$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θέσεις των σταθμών ταχείας φόρτισης σε κάθε ζώνη, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ .

<b>P<sub>fcs</sub>=0,21MW</b>	<b>k<sub>p</sub>=0,25</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,5</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,75</b>	
	<b>k<sub>v</sub>=0,75</b>		<b>k<sub>v</sub>=0,5</b>		<b>k<sub>v</sub>=0,25</b>	
Θέσεις των δύο Σταθμών Ταχείας Φόρτισης στη ζώνη 1(ζυγοί)	19	45	36	19	27	4
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 2(ζυγοί)	68	69	61	63	61	63
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 3(ζυγοί)	26	35	22	35	35	18
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,123481		0,123481		0,123481	
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,109257		0,104949		0,104794	
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	11,51918109		15,00797694		15,13350232	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,974991		0,974991		0,974991	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,777898		0,796755		0,798309	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	20,21485327		18,28078413		18,12139804	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,819581		0,833556		0,841194	

**Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα για σταθμούς ταχείας φόρτισης 0.21MW**

### 3<sup>η</sup> Περίπτωση

Στην τρίτη περίπτωση το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης(Fast Charging Stations) είναι 0.3MW:

$$\rightarrow P_{fcs} = 0.3MW$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θέσεις των σταθμών ταχείας φόρτισης σε κάθε ζώνη, οι απώλειες ενεργού ισχύος, η απόκλιση της τάσης των ζυγών, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τους τρεις συνδυασμούς των συντελεστών βαρύτητας  $k_p, k_v$ .

<b>Pfcs=0,3MW</b>	<b>k<sub>p</sub>=0,25 k<sub>v</sub>=0,75</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,5 k<sub>v</sub>=0,5</b>		<b>k<sub>p</sub>=0,75 k<sub>v</sub>=0,25</b>	
Θέσεις των δύο Σταθμών Ταχείας Φόρτισης στη ζώνη 1(ζυγοί)	4	27	27	4	27	4
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 2(ζυγοί)	65	67	61	63	61	63
Θέσεις των δύο σταθμών ταχείας φόρτισης στη ζώνη 3(ζυγοί)	2	35	2	35	2	35
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,123481		0,123481		0,123481	
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ	0,104032		0,101942		0,101942	
Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος(%)	15,75060131		17,44316939		17,44316939	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών πριν την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,974991		0,974991		0,974991	
Απόκλιση της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΣΤΦ(α.μ.)	0,729006		0,739205		0,739205	
Ποσοστό μείωσης της απόκλισης της τάσης των ζυγών(%)	25,22946366		24,18340272		24,18340272	
Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,771403		0,833556		0,808717	

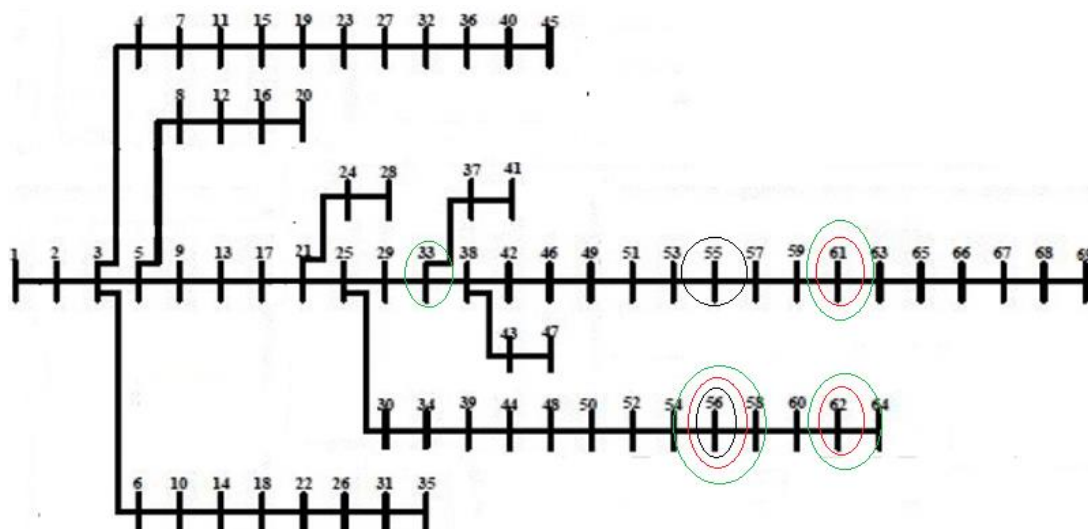
**Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα για σταθμούς ταχείας φόρτισης 0.3MW**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

#### 6.1.1. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Στο σχήμα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται δύο ΜΔΠ, με κόκκινο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται τρεις ΜΔΠ, με πράσινο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται τέσσερις ΜΔΠ για συντελεστές βαρύτητας  $k_p=k_v=0.5$ .



Σχήμα 6.1 Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση τεχνικά κριτήρια

Είναι φανερό από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ότι ο ζυγός 56 ή οι 2 γειτονικοί του επιλέγονται σε όλες τις περιπτώσεις για την τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο κομμάτι του δικτύου που περιλαμβάνει τους ζυγούς 30 έως 64 χρειάζεται υπόσתיριξη. Το συγκεκριμένο κομμάτι εξυπηρετεί σχετικά μεγάλο φορτίο και ιδίως ο ζυγός 56 ο οποίος εξυπηρετεί το ένα τέταρτο του συνολικού φορτίου του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο τοποθετούνται σε αυτό το κομμάτι ακόμα και δύο μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην περίπτωση μελέτης των τριών μονάδων και πάνω.

Το κομμάτι του δικτύου που περιλαμβάνει τους ζυγούς 33 έως 69 εξυπηρετεί επίσης ένα μεγάλο κομμάτι του φορτίου. Αυτό προκύπτει με το άθροισμα των φορτίων

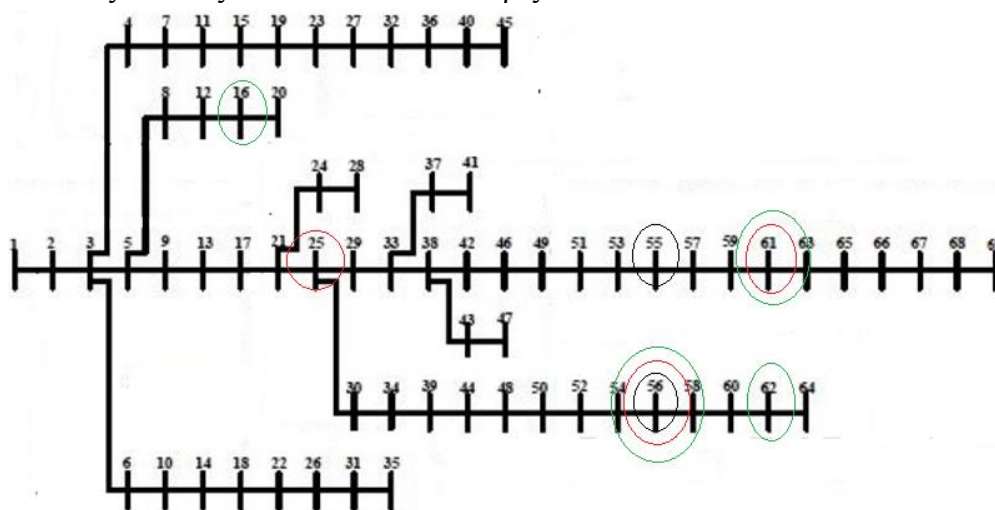
των συγκεκριμένων ζυγών. Έτσι και σε αυτό το κομμάτι του δικτύου τοποθετείται σίγουρα μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και στην περίπτωση εγκατάστασης τεσσάρων ΜΔΠ, τοποθετούνται δύο μονάδες στο συγκεκριμένο κομμάτι.

Ακόμη, τις περισσότερες φορές οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης ΜΔΠ βρίσκονται κοντά στο κέντρο των γραμμών. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς οι ΜΔΠ θα τείνουν να τροφοδοτούν με ισχύ τα φορτία που βρίσκονται στο τέλος των γραμμών, ενώ τα φορτία που βρίσκονται πιο κοντά στον υποσταθμό θα εξυπηρετούνται καλύτερα από αυτόν. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση των απωλειών, αφού η φόρτιση των γραμμών θα είναι μικρότερη.

Τέλος, αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με βάση τους συντελεστές βαρύτητας  $k_p, k_v$  παρατηρούμε το εξής: όταν η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται περισσότερο από τη μείωση των απωλειών τότε οι ΜΔΠ μετακινούνται προς το τέλος των γραμμών, ενώ αν εξαρτάται περισσότερο από τη βελτίωση του προφίλ της τάσης μετακινούνται προς τον υποσταθμό (ζυγό αναφοράς). Συγκεκριμένα, όταν οι ΜΔΠ τοποθετούνται προς το τέλος των γραμμών τείνουν να εξυπηρετούν τα φορτία που βρίσκονται εκεί κοντά. Έτσι μικρότερη ροή ισχύος θα ρέει από τον υποσταθμό προς τα φορτία που βρίσκονται προς το τέλος των γραμμών, με αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών. Όσον αφορά τη βελτίωση της τάσης, όταν οι ΜΔΠ τοποθετούνται πιο κοντά στον υποσταθμό, τότε μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από το ζυγό αναφοράς μέχρι τις ΜΔΠ και άρα μειώνονται και οι πτώσεις τάσης κατά μήκος των γραμμών.

### 6.1.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Στο σχήμα 6.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται δύο ΜΔΠ, με κόκκινο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται τρεις ΜΔΠ, με πράσινο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται τέσσερις ΜΔΠ.



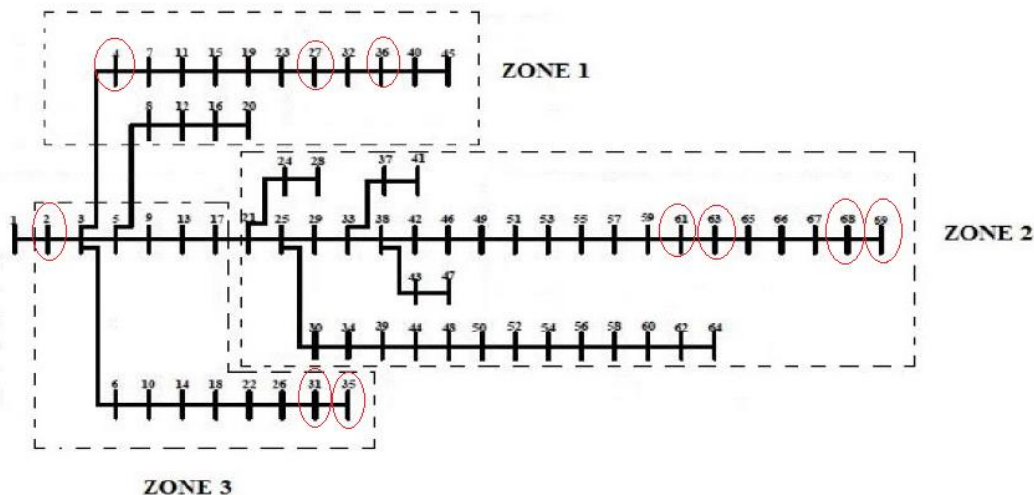
Σχήμα 6.2 Τοποθέτηση ΜΔΠ με βάση οικονομικά κριτήρια

Αν ο χρήστης επιλέξει σαν αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματός του την μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου, τότε στα αποτελέσματα θα δει πιο μεγάλο συνολικό οικονομικό κίνητρο και πιο μικρή ποσοστιαία μείωση των απωλειών σε σχέση με την επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποίησης των απωλειών του δικτύου. Παρόλα αυτά οι διαφορές που προκύπτουν σε αυτές τις τιμές είναι πολύ μικρές και αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στην αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης του χρηματικού κέρδους, η τιμή του οικονομικού κινήτρου ελαχιστοποίησης των απωλειών είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτό της εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο. Επομένως οι ζυγοί αυτοί επιλέγονται λόγω των παραγόντων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.1.1.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ισχύες εξόδου των ΜΔΠ που επιλέγονται είναι μεγαλύτερες από αυτές του προβλήματος της τοποθέτησης ΜΔΠ με βάση τεχνικά χαρακτηριστικά, διότι σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει ένα επιπλέον κίνητρο για εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής. Υπάρχει επίσης μία μεγαλύτερη σταθερότητα στους επιλεγόμενους βέλτιστους ζυγούς καθώς δεν εμπλέκονται οι τάσεις των ζυγών και η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι μικρότερη.

## 6.2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στο σχήμα 6.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα οι ζυγοί του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται περισσότερες φορές οι σταθμοί ταχείας φόρτισης στα διάφορα σενάρια που προσομοιώθηκαν.



Σχήμα 6.3 Τοποθέτηση σταθμών ταχείας φόρτισης στο δίκτυο 69 ζυγών

Αρχικά στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η θέση και το μέγεθος των ΜΔΠ. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής έχουν τοποθετηθεί στους ζυγούς 27,35,60,61 με μέγεθος 0.3,0.3,0.5 και 1.6MW αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό πολλοί από τους σταθμούς φόρτισης έχουν επιλεγεί να τοποθετηθούν στους ζυγούς αυτούς (ή σε

γειτονικούς τους) ή κοντά στον υποσταθμό ούτως ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια ελαχιστοποίησης των απωλειών ή βελτίωσης του προφίλ της τάσης. Μόνο κοντά στο ζυγό 60 δεν έχουν τοποθετηθεί λόγω του ότι σε αυτό το κομμάτι του δικτύου υπάρχει ήδη μεγάλο φορτίο και θα επιβαρυνόταν εάν τοποθετούνταν εκεί και σταθμός φόρτισης.

Από τα αποτελέσματα γίνεται επίσης φανερό ότι όσο αυξάνεται το φορτίο των σταθμών τόσο οι σταθμοί φόρτισης μετακινούνται προς τον υποσταθμό. Αυτό είναι λογικό αφού θα εξυπηρετούνται καλύτερα τα μεγαλύτερα φορτία κοντά στον υποσταθμό.

Τέλος, αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με βάση τους συντελεστές βαρύτητας  $k_p, k_v$ , παρατηρούμε το εξής: όταν η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται περισσότερο από τη μείωση των απωλειών τότε η τοποθέτηση των σταθμών ταχείας φόρτισης μετακινείται προς τον υποσταθμό, ενώ αν εξαρτάται περισσότερο από τη βελτίωση του προφίλ της τάσης μετακινείται προς το τέλος των γραμμών. Συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά τοποθετηθεί ο σταθμός ταχείας φόρτισης στο ζυγό ταλάντωσης τόσο μικρότερη ροή ισχύος θα ρέει από τον υποσταθμό προς τους σταθμούς φόρτισης, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών. Όσον αφορά τη βελτίωση της τάσης, αν ο σταθμός μετακινηθεί προς το τέλος των γραμμών τότε θα προκαλέσει μία πτώση τάσης που θα επηρεάσει μόνο τους ζυγούς που βρίσκονται μετά το σταθμό και άρα θα μειώνονται και οι πτώσεις τάσεις κατά μήκος των γραμμών.





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. κονταξή, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας,” Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ 2006
- [2] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder, “Distributed Generation: a definition,” Electric Power Systems Research 2001
- [3] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., D’haeseleer W., Belmans R., “Distributed generation: definition, benefits and issues”, Energy Policy, In Press 2003
- [4] [http://www.ppcr.gr/ClientFiles/PDFs/Greek/Parousiaseis/19102007\\_2.pdf](http://www.ppcr.gr/ClientFiles/PDFs/Greek/Parousiaseis/19102007_2.pdf)
- [5] W. El-Khattam\*, M.M.A. Salama “Distributed generation technologies, definitions and benefits,” Electric Power Systems Research 2004
- [6] “Assessment of Distributed Generation Technology Applications,” Resource Dynamics Corporation, 2001
- [7] Rob van Gerwent, “Distributed Generation and Renewables”, 8.1 Introduction, Power Quality and Utilisation Guide, November 2006
- [8] Ashoke Kumar Basu, S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, S. Paul, Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs-A comprehensive survey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 9, December 2011
- [9] P. Chiradeja, “Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, 2005
- [10] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano and A. R. Wallace, “Hybrid GA and OPF evaluation of networks capacity for distributed generation connections,” Electric Power System Research
- [11] Garcia-Valle, Rodrigo, Peças Lopes, João A., “Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks”, Chapter 3, Springer, 2012
- [12] [http://www.electricdrive.org/index.php?ht=d/Articles/cat\\_id/5602/pid/9676](http://www.electricdrive.org/index.php?ht=d/Articles/cat_id/5602/pid/9676)
- [13] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plug-in\\_hybrid\\_electric\\_vehicle\\_\(PHEV\)\\_diagram.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plug-in_hybrid_electric_vehicle_(PHEV)_diagram.jpg)
- [14] “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, W.Kempton, J.Tomic, University of Delaware, December 2004
- [15] “Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles,” Charles Botsford, Adam Szczepanek, Stavanger, Norway, 2009
- [16] G. A. Putrus, P. Suwanapongkarl, D. Johnston, E. C. Bentley, M. Narayana, “Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks,” Northumbria University, UK
- [17] Qie He, Ling Wang, “A hybrid particle swarm optimization with a feasibility-based rule for constrained optimization”, Tsinghua University, China, 2007
- [18] M. A. Abido, “Optimal Design of Power-System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.17, NO.3, SEPTEMBER 2002

- [19] Darrall Henderson, Sheldon H. Jacobson, Alan W. Johnson, “The theory and practice of simulated annealing,”chapter 10,
- [20] R. D. Zimmerman, MATPOWER4.0b4- A MATLAB Power System Simulation Package, User’s Manual Cornell Univ., Shc. Elect. Eng., Ithaca, NY, 2010. [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>
- [21] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, 2nd edition, John Willey & Sons, INC, 1996.
- [22] Ray Daniel Zimmerman, Carlos Edmundo Murillo- Sanchez, Robert John Thomas, “MATPOWER: Steady- State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education”, IEEE Transactions on Power Systems, 2011