



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ
ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PCLONALG ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ
ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Α. Τζώρας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



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

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PCLONALG ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Α. Τζώρας

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

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

.....
Γεωργιάκης Πάυλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....
Βασίλειος Α. Τζώρας

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

Copyright © Βασίλειος Τζώρας, 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

Σε έναν κόσμο όπου τα ζητήματα της προστασίας του περιβάλλοντος και της εξοικονόμησης ενέργειας προκαλούν εντεινόμενες ανησυχίες, η ανάπτυξη των ηλεκτρικών και των υβριδικών οχημάτων συντελείται με συνεχώς επιταχυνόμενο ρυθμό. Το όνειρο της ύπαρξης εμπορικά βιώσιμων ηλεκτρικών/υβριδικών οχημάτων γίνεται πραγματικότητα καθώς αυτά γίνονται σταδιακά διαθέσιμα. Οι προηγμένες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται με σκοπό την αύξηση της αυτονομίας αυτών των οχημάτων και τη μείωση του κόστους τους. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται απαραίτητη και η εγκατάσταση των κατάλληλων υποδομών φόρτισης ώστε να επιτευχθεί η αυξημένη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης ενός αριθμού σταθμών ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής, με τεχνικά κριτήρια, και η παραγωγή των διεσπαρμένων μονάδων του δικτύου στη βέλτιστη περίπτωση. 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 και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PCLONALG ο οποίος είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος που συνδυάζει στοιχεία από τον αλγόριθμο επιλογής των κλώνων (Clonal Selection Algorithm) και τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ατόμων σμήνους (Particle Swarm Optimization Algorithm).

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 διείσδυσής τους στην αγορά. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα και περιγράφονται αναλυτικά η θεωρία επιλογής των κλώνων και η βελτιστοποίηση ατόμων σμήνους μαζί με τους αντίστοιχους αλγορίθμους. Στη συνέχεια, αναλύεται ο υβριδικός αλγόριθμος PCLONALG 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 επεξηγείται το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία καθώς και το πώς δομείται ο τροποποιημένος αλγόριθμος PCLONALG. Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν ενώ στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας του αλγορίθμου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

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

ABSTRACT

In a world where environment protection and energy conservation are growing concerns, the development of EVs/HEVs has taken on an accelerated pace. The dream of having commercially viable electric/hybrid vehicles is becoming a reality as EVs/HEVs are gradually becoming available. Many advanced technologies are employed to extend driving range of electric vehicles and reduce their cost. In this context, the installation of the appropriate charging infrastructure becomes necessary in order to achieve increased market penetration of electric vehicles.

The purpose of the present thesis is to find the optimal location of a specific number of electric vehicle fast charging stations in a distribution network, considering technical criteria, and the corresponding production of network's dispersed units at this optimal case. 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 thesis, the algorithm that has been used is the PCLONALG algorithm which was previously properly modified. The PCLONALG algorithm is a hybrid algorithm that combines elements of the clonal selection algorithm and the particle swarm optimization algorithm.

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 artificial immune systems and there is a detailed description of clonal selection theory and particle swarm optimization theory with the corresponding algorithms. Then, an overview of the PCLONALG hybrid 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 specific problem of the present thesis and explains the way the modified PCLONALG algorithm is structured. Chapter 5 contains the results of the simulations performed while in Chapter 6 a sensitivity analysis of the algorithm is performed.

KEYWORDS

Distributed generation, electric vehicles, fast charging stations, optimal power flow, clonal selection algorithm, particle swarm optimization, PCLONALG hybrid algorithm, electric vehicle charging, active power losses, voltage fluctuation

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

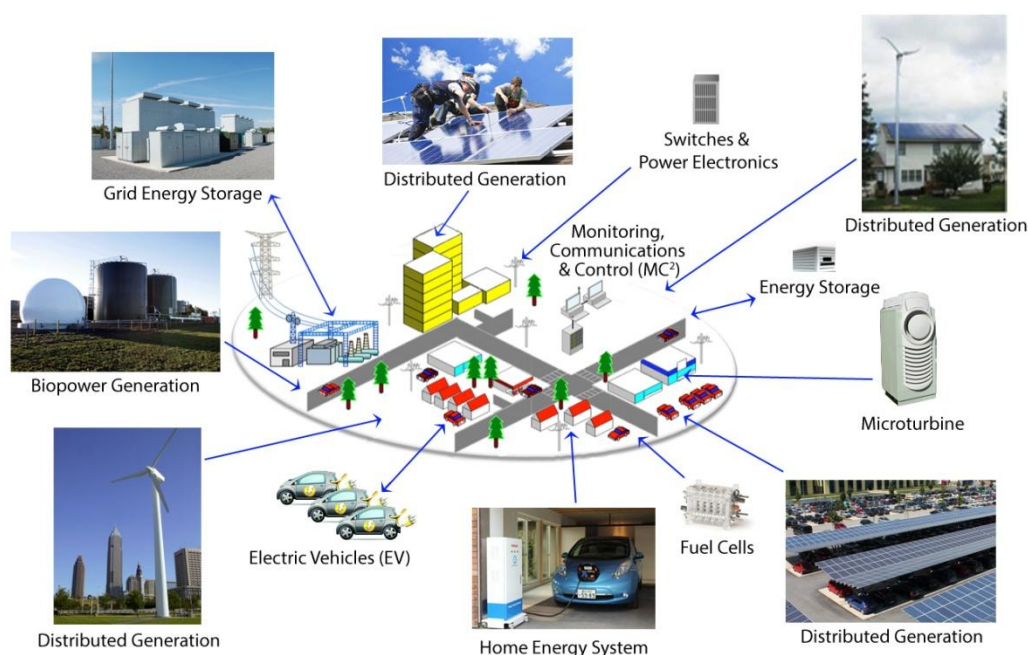
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	16
1.1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	17
1.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	23
1.1.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	24
1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	25
1.2.1 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	25
1.2.2 ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	28
1.2.2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	28
1.2.2.2 ΕΠΙΠΕΔΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	28
1.2.2.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	30
1.2.2.4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	30
1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	32
1.2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	33
1.2.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	36
2.1 ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	36
2.2 ΤΕΧΝΗΤΑ ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	37
2.3 ΑΡΧΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΚΛΩΝΩΝ	38
2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
2.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΚΛΩΝΩΝ	41
2.3.3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	45
2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΤΟΜΩΝ ΣΜΗΝΟΥΣ	46
2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	46
2.4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΤΟΜΩΝ ΣΜΗΝΟΥΣ	46
2.4.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	50
2.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG	50
2.6 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	54
2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	54
2.6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ	55
2.6.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATPOWER	63
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	63
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	64
3.3 ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	68
3.3.1 ΑΣ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	68
3.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	70
3.4.1 ΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	70
3.4.2 ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	71
3.4.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	77
4.1 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	77
4.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	77
4.3 ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PCLONALG	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	82
5.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	82
5.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	82
5.1.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	93
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	93
6.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....	93
6.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΛΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	95
6.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΕΡΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ.....	97
6.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας από πολλές διεσπαρμένες μονάδες, που συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αναφέρονται ως διεσπαρμένη παραγωγή (Distributed Generation – DG). Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής βρίσκονται κοντά στο φορτίο και δίνουν τη δυνατότητα στους καταναλωτές να παράγουν ένα μέρος ή το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική ζήτηση. Σε αντίθεση με τη χρήση των μεγάλων συμβατικών μονάδων παραγωγής, που είναι μικρές σε αριθμό και μακριά από τα φορτία, τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής χρησιμοποιούν πολυάριθμες αλλά μικρές μονάδες που μπορούν να παρέχουν ισχύ με μικρή εξάρτηση από τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να παράγουν ισχύ που κυμαίνεται από λίγα kW μέχρι και 100MW. Στο ακόλουθο σχήμα (1.1) παρουσιάζεται ένα σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο που περιλαμβάνει διεσπαρμένη παραγωγή.



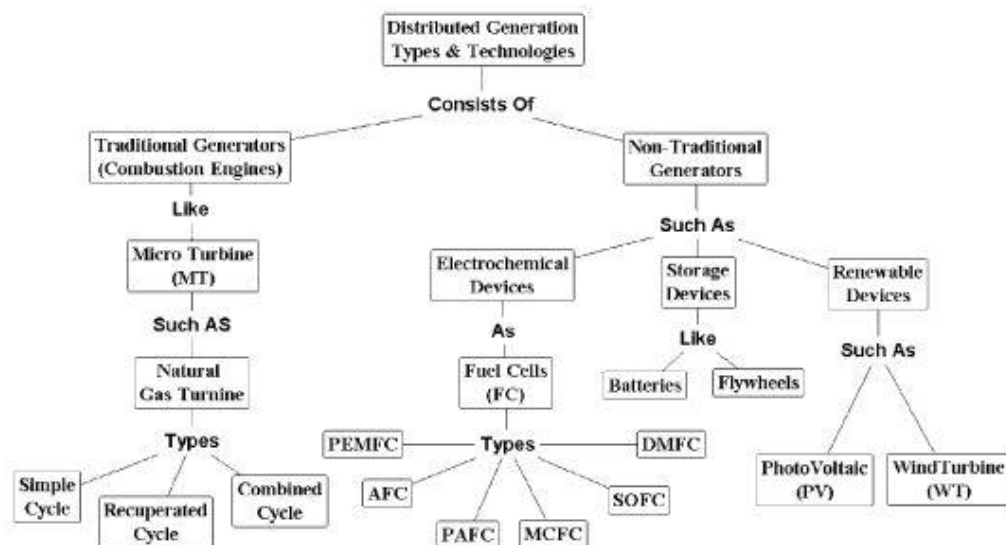
Σχήμα 1.1: Ηλεκτρικό δίκτυο με διεσπαρμένη παραγωγή

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες σχεδόν, παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα της διεσπαρμένης παραγωγής. Πολλοί λόγοι συνετέλεσαν ώστε να αυξηθεί το ενδιαφέρον για

τη DG. Σημαντικό ρόλο διατέλεσε ο παράγοντας περιβάλλον, καθώς με τη χρήση των μονάδων DG επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου και αποφεύγεται επίσης η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς και μεγάλων συμβατικών μονάδων. Ωστόσο, η διείδυση της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί απλά να καθυστερήσει και όχι να αποτρέψει την κατασκευή νέων γραμμών διότι το δίκτυο θα πρέπει πάντα να είναι διαθέσιμο ως εφεδρεία. Επιπλέον, η γενική αβεβαιότητα στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ευνοεί την παραγωγή από μικρές μονάδες, οι οποίες έχουν μικρότερο οικονομικό ρίσκο σε σχέση με τις μεγάλες μονάδες παραγωγής. Οι DG είναι, επίσης, ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για την επίτευξη βελτιωμένης ποιότητας ισχύος και ενός πιο αξιόπιστου συστήματος. Ένας ακόμη παράγοντας είναι το γεγονός ότι οι σύγχρονες κοινωνίες είναι εξαρτημένες σε τέτοιο βαθμό από τους ενεργειακούς πόρους, που έτσι και υπάρξει κάποια διαταραχή στον εφοδιασμό τους οι επιπτώσεις θα είναι τρομερές σε οικονομικό, κοινωνικό και πολιτικό επίπεδο. Έτσι, η ενεργειακή πολιτική των χωρών, με τη διείδυση της διεσπαρμένης παραγωγής, στοχεύει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και την αειφορία. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται τα διάφορα είδη τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής.

1.1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής εντάσσονται οι συμβατικές γεννήτριες, όπως είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι μικροτουρμπίνες, καθώς και μη-συμβατικές όπως είναι για παράδειγμα οι κυψέλες καυσίμου, διάφορες συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διάφοροι τύποι και τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι εξής:

- ηλιακή ενέργεια
- αιολική ενέργεια
- βιομάζα-βιοενέργεια
- γεωθερμική ενέργεια
- υδροηλεκτρική ενέργεια

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των παραπάνω πηγών ενέργειας.

Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη και ήπια μορφή ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί έναν ενεργειακό πόρο που παρέχει προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Αξιοποιείται με τρεις τρόπους κυρίως:

- μέσω των ηλιοθερμικών συστημάτων (ενεργητικά ηλιακά συστήματα) για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό
- μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων παράγοντας ηλεκτρισμό
- με την κατασκευή βιοκλιματικών κτιρίων (παθητικά ηλιακά συστήματα)

Αιολική ενέργεια

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία μάλιστα παρέχεται δωρεάν. Η αιολική ενέργεια ενισχύει την ενεργειακή ανεξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας και συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Βιομάζα – Βιοενέργεια

Με τον όρο βιομάζα αποκαλείται οποιαδήποτε οργανική ύλη παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως ξύλο από τα δάση, υπολείμματα από γεωργικές ή δασικές διαδικασίες και βιομηχανικά ή ζωικά απόβλητα. Αντιθέτως, βιομάζα δεν είναι τα ορυκτά οργανικά υλικά (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο) – η βιομάζα είναι φρέσκια οργανική ύλη. Βιοενέργεια είναι η χημική ενέργεια που αποθηκεύεται σε φυτά και ζώα ή στα απόβλητα που αυτά παράγουν. Κατά τη διάρκεια διαδικασιών μετατροπής όπως η καύση, η βιομάζα

απελευθερώνει την ενέργειά της υπό τη μορφή θερμότητας ενώ παράλληλα εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, η ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά κανόνα μέσω ενδιάμεσων προϊόντων και έτσι το κόστος της παραμένει αρκετά υψηλό.

Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η αποθηκευμένη ενέργεια, υπό μορφή θερμότητας, κάτω από τη σταθερή επιφάνεια της γης. Η εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ υπεδάφους και επιφάνειας μπορεί να γίνει με τη χρήση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ) και δικτύου σωληνώσεων εντός του υπεδάφους με σκοπό τη χρήση της για θέρμανση και ψύξη.

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται με δύο τρόπους: ο ένας είναι μέσω των υδατοπτώσεων που περιλαμβάνει κατασκευή φραγμάτων και λοιπών αποθηκευτικών έργων και ο δεύτερος είναι η ενέργεια από τη θάλασσα. Όσον αφορά στον πρώτο τρόπο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες δε θεωρούνται διεσπαρμένη παραγωγή. Οι μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες αντίθετα ανήκουν στη διεσπαρμένη παραγωγή και δε χρειάζονται μεγάλα έργα αποθήκευσης. Όσον αφορά τώρα στον δεύτερο τρόπο υπάρχουν τρεις βασικοί μέθοδοι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια από τη θάλασσα:

- ενέργεια των κυμάτων: εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων, η οποία περιστρέφει μία τουρμπίνα και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.
- παλιρροϊκή ενέργεια: εκμεταλλεύεται την ανύψωση της στάθμης του νερού, το οποίο αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Προς το παρόν πολύ λίγες μονάδες είναι σε λειτουργία για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε όλες τις συνέπειες που έχουν στο περιβάλλον.
- ενέργεια από θερμοκρασιακές διαφορές του νερού των ωκεανών: εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Η θερμική ενέργεια των ωκεανών μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα. Βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της έρευνας.

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι διάφοροι τύποι μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής:

Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500 kW. Οι μικροτουρμπίνες προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών.



Σχήμα 1.3.: Μικροτουρμπίνα

Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης

Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW για διεσπαρμένη παραγωγή, και μέχρι 250 MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ένας συνδυασμός καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες μονού κύκλου τυπικά έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20-45% στο πλήρες φορτίο

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 για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

Μηχανές Stirling

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. 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.

Κυψέλες καυσίμου

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- 40%. Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμων χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC).
- Φωσφορικού Οξέος (PAFC),
- Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC),
- Στερεών Οξειδίων (SOFC)
- Αλκαλικές (AFC)
- Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)

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 Αδιαλείπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διασπαρμένης παραγωγής

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV), ή αλλιώς ηλιακά κελιά, μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς

να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές και δεν απαιτούν μεγάλη συντήρηση.



Σχήμα 1.4.: Φωτοβολταϊκό πάνελ

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 5 MW.



Σχήμα 1.5.: Αιολικό πάρκο

Υβριδικά συστήματα

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διασπαρμένης παραγωγής. Κάποια παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι τα ακόλουθα:

- 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

1.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει μια σειρά από οφέλη σε τομείς όπως η οικονομία, το περιβάλλον και η λειτουργικότητα του δικτύου.

Οικονομικά οφέλη

- Οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.
- Προσφέρει πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος (μικρότερο ρίσκο) εισάγοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Καθυστερεί ή αναβάλλει την ανάγκη για πρόωρη κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς λόγω αύξησης του φορτίου

Λειτουργικά οφέλη

- Προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές ή όπου η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη.
- Συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης του εξοπλισμού διεσπαρμένης παραγωγής όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με εξοπλισμό συμπαραγωγής π.χ. θέρμανσης.
- Προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν είναι δυνατό να φτάσουν οι γραμμές διανομής του δικτύου. Τέτοιες περιοχές είναι, για παράδειγμα, πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό.
- Μειώνει την υπερφόρτωση των γραμμών διανομής.

- Προσφέρει επίσης κάποια δευτερεύοντα οφέλη όπως η δυνατότητα «black start» (η δυνατότητα μιας μονάδας παραγωγής κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του συστήματος να μεταβεί από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα).
- Ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια – εφεδρική ενέργεια.

Οφέλη στην παραγωγή

- Ανταποκρίνεται γρηγορότερα το σύστημα σε νέες απαιτήσεις ισχύος.
- Βασικό χαρακτηριστικό της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις, σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση, σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων μονάδων παραγωγής.

Οφέλη στο περιβάλλον

- Προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές για ορισμένες από τις τεχνολογίες (π.χ. αυτές που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, τον άνεμο και οι κυψέλες καυσίμου).
- Μειώνει ή αναβάλλει τις αναβαθμίσεις των έργων υποδομής (γραμμές, υποσταθμοί).
- Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική οικονομική διαχείριση ενέργειας και φορτίου.

1.1.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή παρουσιάζει, ωστόσο, και ορισμένα μειονεκτήματα σε θέματα τεχνικής και οικονομικής φύσεως κυρίως.

- Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τη διεσπαρμένη παραγωγή θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διεσπαρμένες γεννήτριες λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου.
- Σε μερικές περιπτώσεις όπου οι διεσπαρμένες γεννήτριες παραμένουν συνδεδεμένες σε μια ελαττωματική γραμμή, θα μπορούσαν να διατηρήσουν τη γραμμή διεγερμένη και να αποτρέψουν την αυτό-απόσβεση σφαλμάτων με την μορφή τόξου.
- Μπορεί να γίνει αυτόματη επανάζευξη της γραμμής ενώ οι γεννήτριες έχουν χάσει το συγχρονισμό τους με το δίκτυο, με ενδεχόμενες καταστροφικές συνέπειες για τις γεννήτριες.
- Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που προκύπτουν είναι το υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι το σημαντικότερο είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια

παραγωγής. Επίσης, μεγάλες διακυμάνσεις, όσον αφορά το κόστος, παρατηρούνται και για τις διάφορες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, με τιμές που κυμαίνονται από 1000€/kW μέχρι 20000€/kW.

- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι η αυξανόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται να υπάρξει αυξημένη ζήτηση, αλλά και εξάρτηση από αυτό.

1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Νέα καύσιμα και εναλλακτικά οχήματα θα απαιτηθούν ώστε να μειωθεί σημαντικά η εξάρτηση των χωρών από το πετρέλαιο καθώς και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Βιοκαύσιμα όπως είναι το βιοντίζελ, η αιθανόλη ή η βουτανόλη, ειδικά αν προέρχονται από κυτταρινικές πρώτες ύλες είναι πολλά υποσχόμενα. Το φυσικό αέριο μπορεί να μειώσει την κατανάλωση πετρελαίου και να οδηγήσει σε μία μέτρια μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά αποτελεί ένα προσωρινό καύσιμο μετάβασης στην καλύτερη περίπτωση. Το υδρογόνο και η ηλεκτρική ενέργεια μπορούν τελικώς να γίνουν τα κύρια καύσιμα κίνησης με μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτό υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων και των τεχνολογιών που σχετίζονται με αυτά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διάφορα είδη ηλεκτρικών οχημάτων που έχουν αναπτυχθεί.

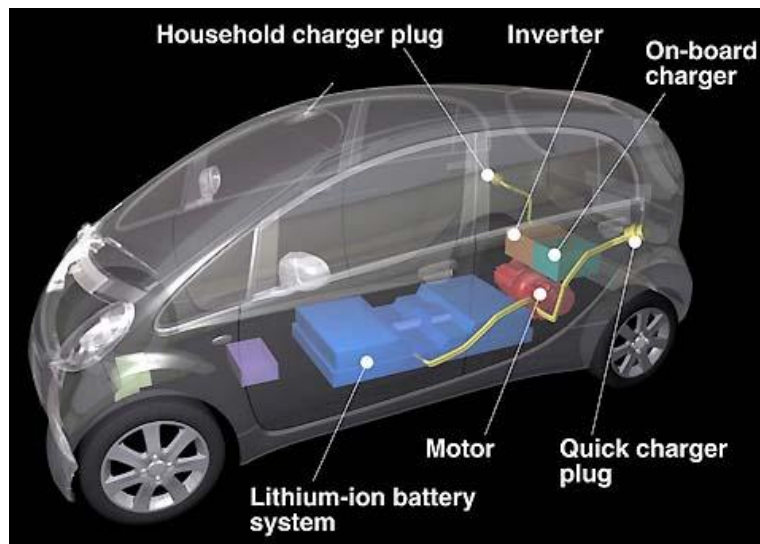
1.2.1 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles-EVs) διακρίνονται, ανάλογα με τις τεχνολογίες κίνησης που χρησιμοποιούν, στις ακόλουθες κατηγορίες:

I. Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery EVs)

Τα οχήματα μπαταρίας αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια στις μπαταρίες και εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους κατά την κίνησή τους. Αυτή τη στιγμή οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead- acid) αποτελούν τη φθηνότερη επιλογή, ωστόσο οι νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH), ιόντων λιθίου (Li- ion) και πολυμερών ιόντων λιθίου γίνονται όλο και πιο ανταγωνιστικές λόγω του ότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μικρότερο μέγεθος και είναι πιο ελαφριές. Οι μπαταρίες φορτίζονται με σύνδεση στο δίκτυο καθώς και με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», που είναι στην ουσία η χρησιμοποίηση μέρους της θερμότητας που παράγεται κατά το φρενάρισμα για την επαναφόρτιση της

μπαταρίας. Σήμερα, ορισμένοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα χαμηλής ταχύτητας, τα ηλεκτρικά οχήματα γειτονιάς (NEVs), τα οχήματα που αποτελούν τον εξοπλισμό εδάφους των αεροδρομίων, καθώς και οχήματα βιομηχανικού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα περνοφόροι ανυψωτές.



Σχήμα 1.6.: Παράδειγμα BEV

II. 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 (O_2), παράγοντας ηλεκτρισμό με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, με μόνα παραπροϊόντα θερμότητα και νερό. Ούτε κι αυτά επομένως εκπέμπουν ρύπους. Διάφοροι τρόποι βελτίωσής τους είναι σε ερευνητικό στάδιο όπως είναι η συμπίεση του αερίου H_2 , η δέσμευσή του σε μέταλλα, καθώς και η παραγωγή του επί του οχήματος από φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη ή άλλο καύσιμο. Σήμερα, ένας αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου κυκλοφορεί στους δρόμους παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων επιβατικών αυτοκινήτων, φορτηγών διανομής, λεωφορείων και στρατιωτικών οχημάτων. Ωστόσο, η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του H_2 , η επί του οχήματος αποθήκευσή του H_2 και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σοβαρά ζητήματα που πιθανώς να καταστήσουν δύσκολη την ευρεία χρήση των συγκεκριμένων οχημάτων στο μέλλον.

III. Υβριδικά οχήματα (Hybrid EVs)

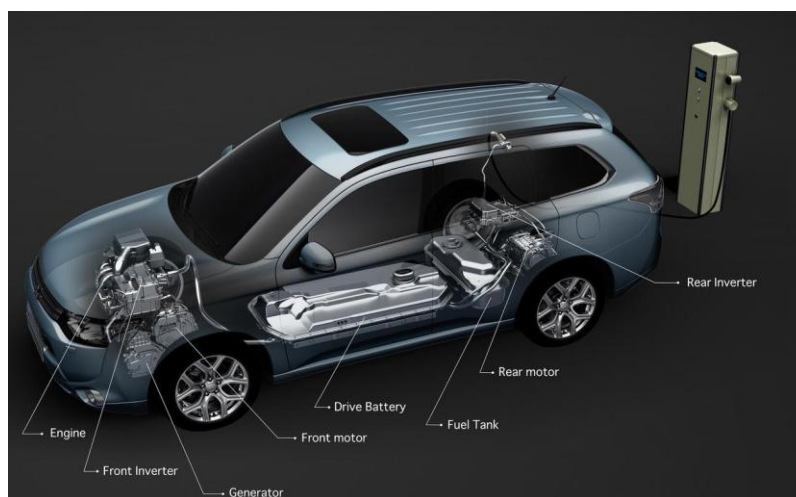
Τα σύγχρονα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν και ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση τους. Κάθε υβριδικό όχημα είναι με τρόπο τέτοιο σχεδιασμένο ώστε να φορτίζει τις μπαταρίες του μέσω του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος» όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Την ενέργεια αυτή τη χρησιμοποιεί 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. Τα υβριδικά οχήματα που παράγονται μαζικά μέχρι τώρα έχουν μεγαλύτερη μηχανική παρά ηλεκτρική ισχύ κίνησης (περίπου 75-25%), μικρές μπαταρίες (1-2kWh), και δε διαθέτουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο.

IV. 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).



Σχήμα 1.7.: Plug-in Hybrid EV

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.

1.2.2 ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

1.2.2.1 Κατηγορίες φόρτισης

Ένα από τα σοβαρότερα ζητήματα που σχετίζεται με την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι υποδομές για τη φόρτισή τους. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κατηγορίες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Οι σταθμοί φόρτισης, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Αγώγιμη φόρτιση

Τα συστήματα φόρτισης αγώγιμης επαφής χρησιμοποιούν ένα καλώδιο για την άμεση σύνδεση μεταξύ του οχήματος και του ηλεκτρικού δικτύου. Το καλώδιο μπορεί να τροφοδοτηθεί από μια συνηθισμένη πρίζα ή από ένα σταθμό φόρτισης. Η σύνδεση αυτή είναι τόσο απλή όσο η σύνδεση οποιασδήποτε συσκευής στο δίκτυο. Το σύστημα ελέγχου της φόρτισης είναι τοποθετημένο εντός του ηλεκτρικού οχήματος.

- Επαγωγική φόρτιση

Το σύστημα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρει ισχύ μέσω του μαγνητικού πεδίου. Το σαφές πλεονέκτημα της φόρτισης χωρίς επαφή είναι η άνεση που παρέχει στο χρήστη. Τα καλώδια σύνδεσης έχουν εξαλειφθεί με αποτέλεσμα να προσδίδει άνεση και γαλβανική απομόνωση. 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. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η σχετικά χαμηλή απόδοση και πυκνότητα ισχύος, η πολυπλοκότητα κατασκευής και το υψηλό κόστος.

1.2.2.2 Επίπεδα φόρτισης

Τα επίπεδα φόρτισης αντανακλούν την ισχύ, το χρόνο φόρτισης και την τοποθεσία, το κόστος, τον εξοπλισμό και την επίδραση στο δίκτυο. Η εγκατάσταση των υποδομών φόρτισης και του εξοπλισμού παροχής ενέργειας στο όχημα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα λόγω των πολλών θεμάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως είναι ο χρόνος φόρτισης, η διανομή, οι πολιτικές περιορισμού της ζήτησης, η τυποποίηση των σταθμών φόρτισης και άλλες ρυθμιστικές διαδικασίες. Η διαθεσιμότητα υποδομών φόρτισης μπορεί

να μειώσει τόσο τις απαιτήσεις αποθήκευσης ενέργειας στο όχημα όσο και το κόστος. Τα καλώδια φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, οι στάσεις φόρτισης (κατοικιών ή δημόσιες), τα βύσματα σύνδεσης, οι πρίζες, οι υποδοχές του οχήματος και η προστασία αποτελούν βασικά στοιχεία του εξοπλισμού παροχής ενέργειας.

Τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα εξής:

- Επίπεδο 1: Το επίπεδο αυτό αφορά σε μονοφασική AC παροχή. Για τις κατοικίες ή τους χώρους εργασίας δεν απαιτείται κάποια πρόσθετη υποδομή. Η μονοφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
 - 230V/16A ~ 3 kW , Διάρκεια φόρτισης: 6-8 ώρες
 - 230V/32A ~ 7 kW , Διάρκεια φόρτισης: 4-6 ώρες
- Επίπεδο 2: Το επίπεδο αυτό αποτελεί τριφασική AC παροχή, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ισχύος χωρίς να απαιτούνται μεγάλες τιμές ρεύματος. Έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
 - 400V/16A ~ 11 kW , Διάρκεια φόρτισης: 2-4 ώρες
 - 400V/32A ~ 22 kW , Διάρκεια φόρτισης: 1-2 ώρες
- Επίπεδο 3: Το επίπεδο φόρτισης αυτό είναι γνωστό και ως «ταχεία φόρτιση» και αφορά σε DC παροχή. 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_{dc}) και πολύ υψηλά ρεύματα (έως 125 A), 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.



Σχήμα 1.8: Παράδειγμα DC σταθμού φόρτισης

1.2.2.3 Διαθεσιμότητα σημείων φόρτισης

Τα σημεία φόρτισης που θα χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα:

- **Ιδιωτικά ή δημόσια σημεία αργής φόρτισης:** Αυτή η λύση είναι η καταλληλότερη για ελεγχόμενη φόρτιση, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι σταθμευμένα σε αυτά τα σημεία θα παραμείνουν εκεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα (είτε όλη τη διάρκεια της νύχτας αν πρόκειται για μια κατοικία είτε όλη τη διάρκεια του ωραρίου εργασίας αν πρόκειται για βιομηχανική/ εμπορική περιοχή). Αυτά τα σημεία φόρτισης αναμένεται να χρησιμοποιούν φόρτιση επιπέδου 1.
- **Σημεία φόρτισης αφιερωμένα στους «στόλους» των ηλεκτρικών οχημάτων:** Αυτή η λύση παρέχει μεγάλες δυνατότητες ελέγχου εάν τα οχήματα μπορούν να φορτίσουν στο επίπεδο 1 της φόρτισης, καθώς οι «στόλοι» ηλεκτρικών οχημάτων (όπως τα λεωφορεία ή τα φορτηγά) έχουν γενικώς συγκεκριμένα μοτίβα κινητικότητας. Εάν χρησιμοποιούνται τα επίπεδα 2 ή 3 της φόρτισης, τότε η διαχείρισή της είναι αδύνατη.
- **Δημόσια σημεία φόρτισης για μέτριους ρυθμούς φόρτισης:** Η λύση αυτή δεν είναι η κατάλληλη για ελεγχόμενη φόρτιση, καθώς τα σταθμευμένα σε αυτές τις θέσεις ηλεκτρικά οχήματα θα παραμείνουν εκεί για μικρές χρονικές περιόδους (σε δημόσια parking ή σε εμπορικές περιοχές όπως ένα μεγάλο εμπορικό κέντρο). Τα σημεία αυτά αναμένεται να χρησιμοποιούν φόρτιση επιπέδου 2.
- **Σταθμοί αλλαγής μπαταρίας:** Για αυτό το είδος λύσης, οι διαδικασίες ελεγχόμενης φόρτισης καθορίζονται από το διαθέσιμο απόθεμα μπαταριών στο σταθμό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο φόρτιση επιπέδου 1 όσο και επιπέδου 2 ή 3 ανάλογα με τα συγκεκριμένα μοτίβα ζήτησης και του διαθέσιμου αποθέματος στο σταθμό.
- **Σταθμοί ταχείας φόρτισης:** Όσον αφορά στα συγκεκριμένα σημεία, είναι αδύνατη η ελεγχόμενη φόρτιση εξαιτίας της ανάγκης να υπάρξει πλήρης φόρτιση των οχημάτων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Οι σταθμοί ταχείας φόρτισης αναμένεται να χρησιμοποιήσουν φόρτιση επιπέδου 3.

1.2.2.4 Πολιτικές φόρτισης

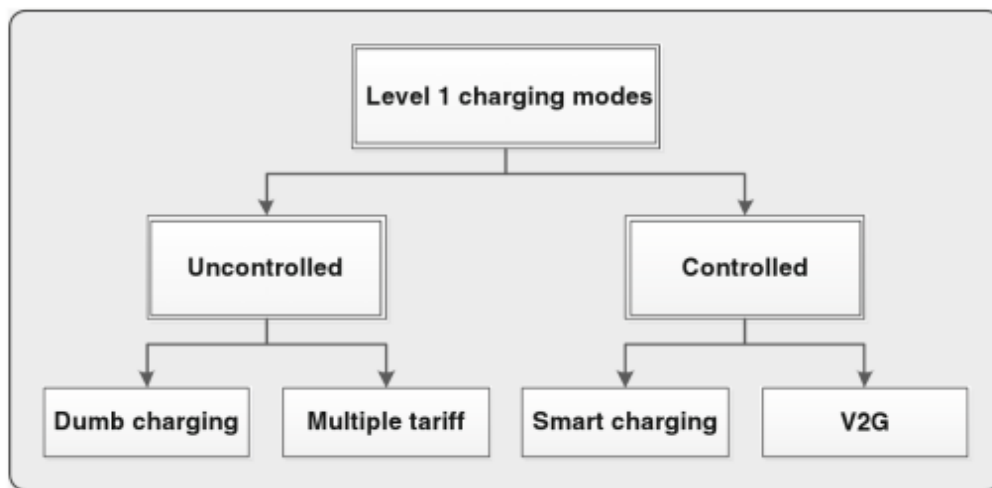
Οι χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να επιλέξουν ανάμεσα σε τέσσερις στρατηγικές φόρτισης, δύο παθητικές ή μη ελεγχόμενες (dumb charging και multiple tariff charging) και δύο ενεργητικές ή ελεγχόμενες (smart charging και V2G). Ειδικότερα:

- **Dumb charging:** Πρόκειται για ένα είδος μη ελεγχόμενης φόρτισης όπου το ηλεκτρικό όχημα μπορεί να λειτουργεί ελεύθερα χωρίς να έχει περιορισμούς και κίνητρα ώστε να διαμορφώσει τη φόρτισή του. Οι χρήστες των οχημάτων μπορούν

να συνδέσουν το όχημα τους στο δίκτυο για φόρτιση όποτε το θελήσουν. Η φόρτιση ξεκινά αυτόματα όταν τα οχήματα συνδέονται στο δίκτυο και διαρκεί μέχρι την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας ή μέχρι να την διακόψει ο χρήστης. Επιπροσθέτως, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για αυτό το είδος φόρτισης είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, πράγμα που σημαίνει ότι δεν δίνονται στους χρήστες κίνητρα ώστε να μεταφέρουν τη φόρτιση του οχήματος κάποια ώρα χαμηλής ζήτησης. Αν υπάρξουν πολλοί χρήστες που υιοθετήσουν το συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης, είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν πολλά τεχνικά προβλήματα στο δίκτυο όπως πτώσεις τάσης ή υπερφόρτωση των γραμμών.

- Multiple Tariff charging (Φόρτιση πολλαπλής χρέωσης): Όπως και στο προηγούμενο είδος φόρτισης, οι χρήστες είναι ελεύθεροι να φορτίσουν τα οχήματά τους όποτε το θελήσουν. Ωστόσο, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, καθώς υπάρχουν κάποιες περίοδοι που το κόστος είναι μειωμένο. Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στην ήδη υπάρχουσα προσέγγιση, κατά την οποία τις ώρες χαμηλής ζήτησης (κυρίως τη νύχτα) η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένη. Παρ' όλα αυτά, αυτή δεν είναι μια στρατηγική ενεργητικής διαχείρισης της φόρτισης, καθώς η επιτυχία της βασίζεται στην θέληση του εκάστοτε χρήστη να εκμεταλλευτεί τη συγκεκριμένη πολιτική. Τα οικονομικά αυτά κίνητρα μπορεί να έχουν, όμως, και αρνητικές συνέπειες καθώς είναι πιθανό να συνδεθεί μεγάλος αριθμός οχημάτων στο δίκτυο στην αρχή των περιόδων χαμηλής χρέωσης με αποτέλεσμα να φτάσει το δίκτυο στα τεχνικά όρια του.
- Smart charging: Η στρατηγική αυτή οραματίζεται ένα ενεργητικό σύστημα διαχείρισης όπου υπάρχει μια ιεραρχική δομή με επικεφαλής ένα ρυθμιστή της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος ελέγχει τους ρυθμούς φόρτισής τους. Η βασική λειτουργία των ρυθμιστών αυτών είναι η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να εκμεταλλευτούν ορισμένες ευκαιρίες στην αγορά ενέργειας, πάντοτε λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμίες φόρτισης των χρηστών. Θα έχουν όλα τα ηλεκτρικά οχήματα υπό την εποπτεία τους και θα παρέχουν ή θα ζητούν ενέργεια από αυτά με σκοπό την αντιμετώπιση διάφορων καταστάσεων. Αυτού του είδους η διαχείριση φόρτισης είναι πιθανό να παρέχει την πιο αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων κάθε στιγμή, καθώς οι ρυθμιστές συνήθως θα αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης ώστε να την παρέχουν στους χρήστες με μικρότερο κόστος. Αυτή η στρατηγική φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να συμβάλει και σε ορισμένες βοηθητικές λειτουργίες, όπως η εφεδρεία, μιας και μπορούν να αυξήσουν/ μειώσουν το ρυθμό φόρτισής τους ώστε να προσφέρουν αυξημένη ή μειωμένη εφεδρεία.
- Vehicle-to-Grid (V2G): Η προσέγγιση αυτή είναι μια επέκταση της προηγούμενης πολιτικής όπου, εκτός από τη φόρτιση, οι ρυθμιστές των ηλεκτρικών οχημάτων ελέγχουν επίσης την ισχύ που θα παρέχουν τα οχήματα στο δίκτυο. Η μέθοδος V2G εκμεταλλεύεται τόσο την ελεγχσιμότητα του φορτίου του οχήματος όσο και τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειάς που παρέχει. Από την πλευρά του δικτύου,

χρησιμοποιούνται πλήρως οι δυνατότητες των οχημάτων καθώς, εκτός από τη συμβολή τους στη διαχείριση των υπερφορτίσεων των γραμμών και των προβλημάτων της τάσης, παρέχουν επίσης ισχύ κατά την αιχμή του φορτίου με σκοπό να γίνει ομοιόμορφη η ζήτηση ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την αλλοίωση των μπαταριών. Οι μπαταρίες αντέχουν ένα συγκεκριμένο αριθμό φορτίσεων/ εκφορτίσεων και η χρήση τους κατά τη διαδικασία V2G αποτελεί ένα επιθετικότερο καθεστώς λειτουργίας με τις συνεχείς εναλλαγές μεταξύ έγχυσης και απορρόφησης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο, τα οικονομικά κίνητρα που πρέπει να παρέχονται στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να είναι ακόμη υψηλότερα από τα αντίστοιχα στην πολιτική smart charging ώστε να καλύψουν το κόστος λόγω της υπερβολικής χρήσης των μπαταριών.



Σχήμα 1.9.: Πολιτικές φόρτισης

1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε τομείς όπως το περιβάλλον, η οικονομία και σε καθαρά τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου:

- Μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση: Μειώνεται η ζήτηση των συμβατικών καυσίμων κίνησης (πετρέλαιο) με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενεργειακή εξάρτηση των χωρών.
- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον: δεν εκπέμπουν ρύπους κι έτσι δε συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακόμα και αν προσθέσουμε τις εκπομπές CO₂ της

ηλεκτροπαραγωγής για τη φόρτιση των μπαταριών, οι εκπομπές είναι αρκετά μικρότερες (το ένα τρίτο σχεδόν) από αυτές των συμβατικών οχημάτων. Επίσης τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν πολύ λιγότερη ηχορύπανση από ένα όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

- Ενεργειακή απόδοση: Με τα υπάρχοντα δεδομένα οι ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν το 75% της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες σε κίνηση των τροχών, ενώ αντίθετα οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη βενζίνη.
- 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.

1.2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν μια σειρά από προβλήματα σε τεχνικά χαρακτηριστικά κυρίως, τα οποία πιθανώς να επιλυθούν με περαιτέρω έρευνα στον τομέα του εξοπλισμού τους:

- Περιορισμένος χρόνος ζωής των μπαταριών: Η διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι συνήθως 3-4 χρόνια ή περίπου 1500 κύκλοι λειτουργίας.
- 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.
- Περιορισμό στις αποστάσεις μεταξύ επαναφορτίσεων: Τα παλιότερα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων χρειαζόντουσαν επαναφόρτιση κάθε 60 km. Ορισμένα πιο σύγχρονα μοντέλα έχουν αυτονομία ως και 160 km για αυτοκίνητα πόλης και έως 300 km για αυτοκίνητα μεγάλης ισχύος.
- Χρόνος επαναφόρτισης: Η πλήρης επαναφόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος είναι μια χρονοβόρα διαδικασία (4-8 ώρες) για μια απλή φόρτιση. Αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμό για τις αποστάσεις καθιστά τα ηλεκτρικά οχήματα απαγορευτικά

για μεγάλα ταξίδια. Λύση σε αυτό το πρόβλημα φαίνεται να αποτελούν οι σταθμοί ταχείας φόρτισης που τοποθετούνται κατά μήκος των αυτοκινητόδρομων.

- 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.

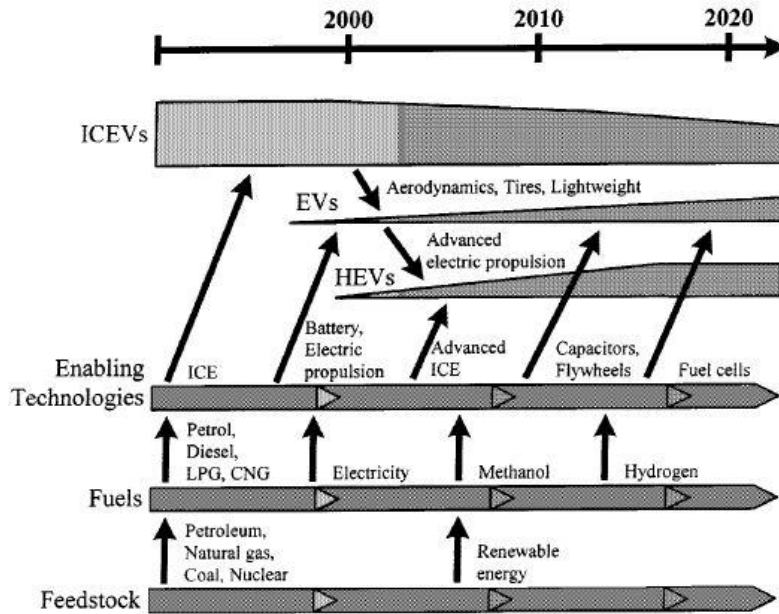
1.2.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Στην επιτυχημένη ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων μέσα στην επόμενη δεκαετία μπορούν να συμβάλουν τα ακόλουθα:

- Η ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης και του σχετικού εξοπλισμού που είναι ίσως το σημαντικότερο ζήτημα. Στα απαραίτητα μέρη περιλαμβάνονται οι αγωγοί, οι συνδέσεις του EV, πρίζες ή άλλες συσκευές που εγκαθίστανται ειδικά για την ασφαλή μεταφορά ενέργειας από την εγκατάσταση στο όχημα.
- Ζητήματα αξιοπιστίας, αντοχής και ασφάλειας των φορτιστών που θα συμβάλουν στην αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων από τους καταναλωτές.
- Απόδοση των φορτιστών και μείωση του κόστους τους.
- Καταλληλότητα για V2G- αμφίδρομη ροή ισχύος, επικοινωνία και μέτρηση.
- Εγκατάσταση σταθμών ταχείας φόρτισης που θα παρέχουν στους καταναλωτές μεγαλύτερη ευελιξία και περισσότερες επιλογές.
- Στρατηγικές φόρτισης και καθορισμός ορίων για το χρόνο φόρτισης και τους κανόνες πρόσβασης
- Μια διεθνής συμφωνία για την τυποποίηση των σταθμών φόρτισης. Ερευνητικά ιδρύματα, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και οι αυτοκινητοβιομηχανίες πρέπει να συνεργαστούν και να θεσπίσουν κάποια πρότυπα για την αποτελεσματική διαχείριση των προγραμμάτων φόρτισης που θα ενίσχυαν μεν τους χρήστες των EVs, θα ωφελούσαν δε και το ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα επόμενα χρόνια, τα επίπεδα 1 και 2 της αργής φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι αυτά που θα χρησιμοποιούνται κατά κόρον λόγω της ευκολίας τους και του χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αν βελτιωθεί η χωρητικότητα των συσσωρευτών και κάποια οχήματα χρειαστούν ταχεία φόρτιση ώστε να αυξήσουν την αυτονομία τους, θα υπάρξει μια αυξημένη ανάγκη για εγκατάσταση σταθμών φόρτισης εκτός του οχήματος. Το επίπεδο 3 της φόρτισης απαλλάσσει τους οδηγούς από το άγχος του περιορισμένου εύρους κίνησης των οχημάτων. Ωστόσο, το υψηλό κόστος εγκατάστασης των σταθμών ταχείας φόρτισης διασφαλίζει ότι η απλή φόρτιση θα παραμείνει η πιο συνηθισμένη μέθοδος φόρτισης. Η εγκατάσταση σταθμών ταχείας επαναφόρτισης στους αυτοκινητοδρόμους είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί η μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά. Περιορισμοί που αφορούν την αποθήκευση ενέργειας μπορούν να εκλείψουν με συστήματα επαγωγικής φόρτισης στους δρόμους.

Όσον αφορά στα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEVs), έχουν την προοπτική να εξελιχθούν στην επικρατούσα τάση των οχημάτων εξαιτίας των σχεδόν μηδενικών ρύπων που εκπέμπουν αλλά και τη μεγάλη αυτονομία που παρέχουν, που είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη ενός οχήματος εσωτερικής καύσης. Η μεγαλύτερη πρόκληση σε αυτόν τον τομέα είναι η ανάπτυξη μιας κυψέλης καυσίμου μικρού κόστους και ενός αποτελεσματικού επεξεργαστή καυσίμου και συστήματος ανεφοδιασμού. Στο σχήμα 1.9 που ακολουθεί φαίνεται η αυξανόμενη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά τα επόμενα χρόνια και η αντίστοιχη μείωση των οχημάτων εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 1.10.: Επικρατούσες τάσεις στις μεταφορές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

2.1 Ανοσοποιητικό Σύστημα

Με μια απλοποιημένη περιγραφή το ανοσοποιητικό σύστημα είναι ένα σύστημα οργάνων που έχει ως σκοπό να προστατέψει τον οργανισμό-ξενιστή από διάφορους κινδύνους στους οποίους εκτίθεται λόγω παθογόνων και τοξικών ουσιών. Τα παθογόνα περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών όπως τα βακτήρια, οι ιοί, τα παράσιτα και η γύρη. Η παραδοσιακή οπτική όσον αφορά στο ρόλο του ανοσοποιητικού συστήματος διακρίνεται σε δύο βασικές διαδικασίες: την ανίχνευση και την εξάλειψη των παθογόνων. Αυτή η συμπεριφορά τυπικά αναφέρεται στο διαχωρισμό των «ιδίων» (μορίων και κυττάρων που ανήκουν στους οργανισμούς-ξενιστές) από τα δυνητικά επιβλαβή «ξένα». Πιο πρόσφατες οπτικές για το ρόλο του συστήματος περιλαμβάνουν την ύπαρξη ενός συστήματος συντήρησης και ενός γνωστικού συστήματος.

Η αρχιτεκτονική του ανοσοποιητικού συστήματος είναι τέτοια ώστε μια σειρά αμυντικών στοιβάδων προστατεύουν τον ξενιστή. Όταν ένα παθογόνο εισέλθει στον ξενιστή, πρέπει να αντιμετωπίσει το έμφυτο (innate) και το επίκτητο (acquired) ανοσοποιητικό σύστημα. Αυτά τα αλληλένδετα ανοσολογικά υποσυστήματα αποτελούνται από πολλούς τύπους κυττάρων και μορίων που παράγονται από εξειδικευμένα όργανα και διαδικασίες για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των «ιδίων- ξένων» στο χαμηλότερο επίπεδο με τη χρήση χημικής σύνδεσης, ενώ οι επιφάνειες των κυττάρων και των μορίων αλληλεπιδρούν με τις επιφάνειες του παθογόνου.

Το προσαρμοστικό ανοσοποιητικό σύστημα (adaptive), που αναφέρεται επίσης και ως επίκτητο, ονομάστηκε έτσι επειδή είναι υπεύθυνο για την εξειδίκευση της άμυνας του οργανισμού στο συγκεκριμένο παθογόνο που αυτός εκτέθηκε. Σε αντίθεση με το έμφυτο ανοσοποιητικό σύστημα, το επίκτητο υπάρχει μόνο σε σπονδυλωτούς οργανισμούς. Το σύστημα διατηρεί στη μνήμη τα παθογόνα στα οποία έχει εκτεθεί. Αυτή η μνήμη ανακαλείται όταν ο οργανισμός επαναπροσβάλλεται από ένα παθογόνο προσφέροντας την άμεση ταυτοποίησή του. Αυτή η διαδικασία εκμάθησης μπορεί να διακριθεί σε δύο τύπους απόκρισης. Η πρώτη ή πρωτοβάθμια αντίδραση συμβαίνει όταν το σύστημα συναντά ένα νέο παθογόνο. Το σύστημα καθυστερεί να αντιδράσει και χρειάζεται ενδεχομένως κάποιες εβδομάδες για να καθαρίσει απ' τη μόλυνση. Στην περίπτωση που συναντά ξανά ένα παθογόνο, το σύστημα παρουσιάζει μια δευτερεύουσα αντίδραση, εφαρμόζοντας ό,τι είχε αποθηκευτεί στη μνήμη από την πρώτη αντίδραση και εξαφανίζοντας ραγδαία τη μόλυνση. Η μνήμη που αποκτά το σύστημα στην πρώτη απόκριση είναι συνήθως μακράς διάρκειας, παρέχοντας στον οργανισμό ανοσία στα παθογόνα για το σύνολο της ζωής του. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ανεμοβλογιά και η ιλαρά. Λευκά αιμοσφαίρια που ονομάζονται λεμφοκύτταρα (ή λευκοκύτταρα) είναι τα πιο σημαντικά κύτταρα στο επίκτητο ανοσοποιητικό σύστημα. Τα λεμφοκύτταρα εμπλέκονται τόσο στην αναγνώριση

όσο και στην εξάλειψη των παθογόνων, και επανακυκλοφορούν στο σώμα του ξενιστή μέσω του αίματος και της λέμφου (το υγρό που διαποτίζει τους ιστούς).

2.2 Τεχνητά Ανοσοποιητικά Συστήματα

Τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα (ΤΑΣ) είναι ένα υποπεδίο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης που δημιουργήθηκε λόγω της εξέλιξης της ανοσολογίας (κυρίως των θηλαστικών) στις αρχές του 1990, βασιζόμενο στην πρόταση που έγινε στα τέλη του 1980 για εφαρμογή των θεωρητικών ανοσολογικών μοντέλων στη μηχανική μάθηση και στην αυτοματοποιημένη επίλυση προβλημάτων. Τα πρώτα έργα στον τομέα αυτό ήταν εμπνευσμένα από θεωρητικά μοντέλα (θεωρία ανοσοποιητικού δικτύου) και εφαρμόστηκαν σε προβλήματα μηχανικής μάθησης, ελέγχου και βελτιστοποίησης. Οι προσεγγίσεις θύμιζαν παραδείγματα όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι και η ενισχυτική μάθηση. Τα πιο σημαντικά έργα που έδωσαν και ταυτότητα στον τομέα αυτό ήταν αυτά που πρότειναν το ανοσοποιητικό σύστημα ως μια αναλογία για τα συστήματα προστασίας πληροφοριών στον τομέα της ασφάλειας των υπολογιστών.

Τα σύγχρονα τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα είναι εμπνευσμένα από τα εξής πεδία: αλγόριθμοι επιλογής κλώνων (clonal selection), αρνητικής επιλογής (negative selection) και ανοσοποιητικού δικτύου (immune network). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος αλγόριθμος ΤΑΣ αλλά με τον όρο ΤΑΣ αναφερόμαστε σε οποιονδήποτε αλγόριθμο ή δομή η οποία έχει εμπνευστεί από τον τρόπο λειτουργίας του ανοσοποιητικού συστήματος. Οι τεχνικές συνήθως χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση, την αναγνώριση προτύπων, την ταξινόμηση, τη βελτιστοποίηση και άλλους παρόμοιους τομείς μηχανικής μάθησης. Ο βασικός διαχωρισμός των αλγορίθμων ΤΑΣ που γίνεται είναι στις εξής κατηγορίες:

- Αλγόριθμοι που βασίζονται στην επιλογή των κλώνων (Clonal Selection Algorithm)
- Αλγόριθμοι που βασίζονται στην αρνητική επιλογή (Negative Selection Algorithm)
- Αλγόριθμοι που βασίζονται σε ανοσοποιητικά δίκτυα (Immune Network Algorithm, Artificial immune recognition system)
- Αλγόριθμοι που βασίζονται στη θεωρία κινδύνου του ανοσοποιητικού συστήματος των θηλαστικών (Danger Theory) όπου ανήκει ο αλγόριθμος δενδριτικών κυττάρων (Dendritic Cell Algorithm)

2.3 Αρχή Επιλογής των Κλώνων (Clonal Selection Theory)

2.3.1 Εισαγωγή

Η αρχή επιλογής των κλώνων διατυπώθηκε από τον Burnet (1959) και χρησιμοποιείται για την περιγραφή της λειτουργίας της επίκτητης ανοσίας και ειδικότερα την ποικιλομορφία των αντισωμάτων που συμμετέχουν στην υπεράσπιση του οργανισμού από κάποια αντιγονική διέγερση. Ένα αντίσωμα είναι ένα μόριο που παράγεται από Β-λεμφοκύτταρα και μπορεί να εξουδετερώσει ένα συγκεκριμένο αντιγόνο. Κάθε Β-λεμφοκύτταρο παράγει μοναδικά ή προσαρμοσμένα αντισώματα ενός συγκεκριμένου τύπου. Η θεωρία, όταν προτάθηκε αρχικά, αποτέλεσε σημείο διαφωνίας και διαμάχης με ένα άλλο μοντέλο που ονομάζεται θεωρία προτύπων (template theory). Σήμερα η θεωρία επιλογής των κλώνων θεωρείται γεγονός λόγω του υπερβολικά μεγάλου αριθμού εμπειρικών στοιχείων.

Η θεωρία ορίζει ότι ο οργανισμός έχει μια προϋπάρχουσα δεξαμενή ετερογενών (ατομικά μοναδικών) αντισωμάτων που μπορούν να αναγνωρίσουν όλα τα αντιγόνα με κάποιο επίπεδο εξειδίκευσης. Όταν ένα αντιγόνο εισέλθει στον οργανισμό, κάποια από τα Β-λεμφοκύτταρα που έχουν τους κατάλληλους υποδοχείς προσδένονται στο αντιγόνο. Ορισμένα από αυτά αναγνωρίζουν καλύτερα ένα αντιγόνο με αποτέλεσμα να διαφέρει η ποιότητα σύνδεσης του. Εκτός από τα Β-λεμφοκύτταρα, στο αντιγόνο προσδένονται και κάποια άλλα βοηθητικά κύτταρα, τα Τ-λεμφοκύτταρα, τα οποία παράγοντας κάποιες ουσίες, τις κυτοσίνες, προκαλούν τον πολλαπλασιασμό των Β-λεμφοκυττάρων και τη διαφοροποίησή τους σε τελικά μη διαιρούμενα κύτταρα τα οποία εκκρίνουν αντισώματα και αποκαλούνται πλασματοκύτταρα (plasma cells). Κατά το στάδιο πολλαπλασιασμού των κυττάρων, λαμβάνουν χώρα γενετικές μεταλλάξεις στους κλώνους των κυττάρων που προωθούν τη συγγένεια σύνδεσης με ένα συγκεκριμένο αντιγόνο. Αυτό επιτρέπει στα κύτταρα να βελτιώσουν τη συγγένεια σύνδεσης με το χρόνο και την έκθεση στο αντιγόνο. Η επιλογή αυτών των κυττάρων θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ενός είδους «δαρβινικός μικρόκοσμος» όπου τα ισχυρότερα κύτταρα (αυτά με την καλύτερη ποιότητα σύνδεσης με τα αντιγόνα) επιλέγονται να επιβιώσουν, ενώ οι γενετικές μεταλλάξεις παρέχουν κυτταρική ποικιλότητα.

Στην πορεία της εξέλιξης του ανοσοποιητικού συστήματος, ο οργανισμός αναμένεται να συναντήσει ένα δεδομένο αντιγόνο αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η αρχική έκθεση σε ένα αντιγόνο που προκαλεί μια ανοσολογική αντίδραση χειρίζεται από ένα αριθμό κλώνων Β-λεμφοκυττάρων καθένας από τους οποίους παράγει αντισώματα διαφορετικής συγγένειας. Η αποτελεσματικότητα επόμενων συναντήσεων με το συγκεκριμένο αντιγόνο ενισχύεται σημαντικά με την αποθήκευση κυττάρων υψηλής συγγένειας από την πρώτη μόλυνση (κύτταρα μνήμης) έτσι ώστε να παράγονται βελτιωμένοι κλώνοι σε επόμενες συναντήσεις. Επομένως, αντί να «ξεκινάμε από το μηδέν» κάθε φορά, αυτή η στρατηγική διασφαλίζει ότι τόσο η ταχύτητα όσο και η αποτελεσματικότητα του ανοσοποιητικού συστήματος βελτιώνεται σε κάθε μόλυνση. Θα μπορούσαμε έτσι να πούμε ότι το ανοσοποιητικό σύστημα λειτουργεί ως ένα σύστημα ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning system).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ανοσοποιητικής μνήμης είναι ότι είναι προσηταιριστική: Β κύτταρα προσαρμοσμένα σε ένα τύπο αντιγόνου Α1 παρουσιάζουν πιο γρήγορη και πιο αποτελεσματική αντίδραση όχι μόνο σε τύπου Α1, αλλά και σε οποιοδήποτε δομικά σχετικό αντιγόνο τύπου Α2. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ανοσολογική διασταυρούμενη αντίδραση (Smith et al., 1997).

Τα κύτταρα μνήμης έχουν, κατά μέσο όρο, μεγαλύτερη συγγένεια σύνδεσης από τα κύτταρα της πρωτογενούς ανοσολογικής απόκρισης. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο περιορίζεται σε αποκρίσεις που οφείλονται στα Τ-λεμφοκύτταρα, ονομάζεται ωρίμανση σύνδεσης.

Η διαφοροποίηση των Β-λεμφοκυττάρων γίνεται με δύο μηχανισμούς:

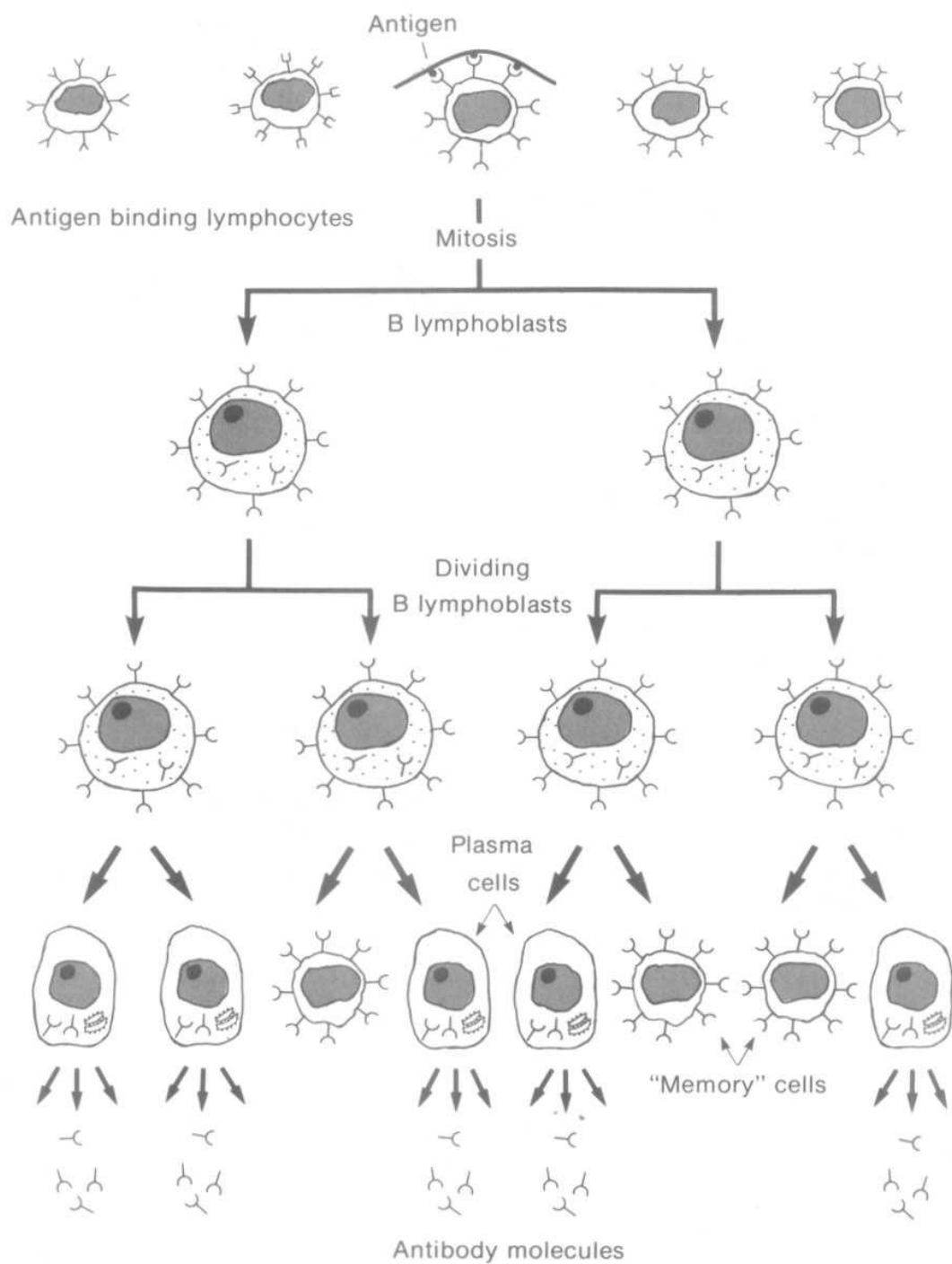
- Την υπερμετάλλαξη (hypermutation)
- Τη διόρθωση των υποδοχέων (receptor editing)

Κατά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης το γενετικό υλικό των Β-λεμφοκυττάρων υφίσταται μεγάλες γονιδιακές αλλαγές με ταχείς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να παράγεται ένα πλήθος αντισωμάτων με διαφορετική ποιότητα σύνδεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάποια από τα μεταλλαγμένα Β-λεμφοκύτταρα θα έχουν καλύτερους υποδοχείς από τα αρχικά. Επομένως θα πρέπει να γίνει μία επιλογή των καλύτερων Β-λεμφοκυττάρων έτσι ώστε να εισάγονται στη μνήμη του ανοσοποιητικού συστήματος τα λεμφοκύτταρα εκείνα που έχουν καλύτερη ποιότητα σύνδεσης. Θα είναι καλό βέβαια να υπάρχει και ένας επιπλέον έλεγχος κατά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης έτσι ώστε τα Β-λεμφοκύτταρα που έχουν επιτύχει πολύ καλή ποιότητα σύνδεσης να μεταλλάσσονται λιγότερο ή και καθόλου σε σχέση με αυτά που έχουν υποδεέστερους υποδοχείς, για να αποφύγουμε την πιθανότητα να προκύψουν Β-λεμφοκύτταρα με υποδεέστερους υποδοχείς σε σχέση με προηγούμενως.

Η διαδικασία της διόρθωσης των υποδοχέων αφορά τα Β-λεμφοκύτταρα που διαθέτουν υποδοχείς χαμηλής ποιότητας καθώς και αυτά που είναι εχθρικά απέναντι στον ίδιο τον οργανισμό. Λαμβάνει χώρα μετά τη διαδικασία της υπερμετάλλαξης και πριν την επιλογή των κλώνων. Η διόρθωση των υποδοχέων δεν είχε προβλεφθεί από τον Burnet αλλά προτάθηκε αργότερα μετά από έρευνες (Nussenzweig 1998).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η υπερμετάλλαξη μπορεί να μας οδηγήσει στην ανακάλυψη τοπικών ακρότατων ενώ η διόρθωση των υποδοχέων είναι αυτή που μπορεί να μας οδηγήσει στην ανακάλυψη ολικών ακρότατων, καθώς τα «άλματα» στο πεδίο των περιοχών σύνδεσης είναι μεγάλα με συνέπεια να μπορούμε να ανακαλύψουμε καλύτερα Β-λεμφοκύτταρα.

Το παρακάτω σχήμα (2.1) παρέχει μια καλή σύνοψη της διαδικασίας επιλογής των κλώνων. Η εικόνα δείχνει στην κορυφή κάποια Β-λεμφοκύτταρα που προσδένονται σε συγκεκριμένα αντιγόνα. Αφού έχουν προσδεθεί, τα κύτταρα πολλαπλασιάζονται (διαίρεση ή μίτωση) και παράγουν πολλούς Β-λεμφοβλαστούς που διαφοροποιούνται είτε σε κύτταρα πλάσματος είτε σε μακρόβια κύτταρα μνήμης.



Σχήμα 2.1.: Διαδικασία επιλογής των κλώνων

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα πτυχή της επίκτητης ανοσίας είναι της το σύστημα αναπτύσσει την ικανότητα να διακρίνει μεταξύ «ιδίου» και «ξένου». Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανοχή και περιγράφει την αδυναμία του συστήματος να ξεκινήσει μια ανοσολογική αντίδραση ενάντια σε ένα δεδομένο αντιγόνο, της τα «ίδιο»- αντιγόνα. Αυτή

η ικανότητα αποκτάται πριν τη γέννηση του οργανισμού, καθώς αναπτύσσεται το ανοσοποιητικό του σύστημα.

2.3.2 Αλγόριθμος Επιλογής των Κλώνων (Clonal Selection Algorithm)

Της αλγόριθμος τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος που είναι εμπνευσμένος από την αρχή επιλογής των κλώνων είναι ο CLONALG (CLONal selection ALGorithm) ο οποίος προτάθηκε από της Leandro de Castro και Fernando Von Zuben. Ο αλγόριθμος προτάθηκε αρχικά για χρήση σε διεργασίες μηχανικής μάθησης και αναγνώρισης προτύπων και στη συνέχεια προσαρμόστηκε κατάλληλα για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Ειδικότερα, ο CLONALG είναι εμπνευσμένος από τα ακόλουθα στοιχεία της αρχής επιλογής των κλώνων:

- Διατήρηση της αριθμού κυττάρων μνήμης
- Επιλογή και κλωνοποίηση των πιο διεγερμένων κυττάρων
- Εξάλειψη των μη-διεγερμένων κυττάρων
- Ωρίμανση συγγένειας (μετάλλαξη)
- Επανεπιλογή των κλώνων ανάλογα με την ποιότητα σύνδεσης της με το αντιγόνο
- Δημιουργία και διατήρηση της ποικιλομορφίας

Ο σκοπός του αλγορίθμου είναι η δημιουργία μιας δεξαμενής αντισωμάτων που αντιπροσωπεύει τη λύση σε ένα μηχανικό πρόβλημα. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα αντισώμα αναπαριστά ένα στοιχείο της λύσης ή μια μοναδική λύση στο πρόβλημα, ενώ ένα αντιγόνο αναπαριστά ένα στοιχείο ή μια εκτίμηση του χώρου του προβλήματος. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ουσιαστικά σε αυτόν τον αλγόριθμο δεν γίνεται διάκριση μεταξύ αντισωμάτων και Β-λεμφοκυττάρων καθώς από υπολογιστικής άποψης είναι ισοδύναμα, διότι όποια αλλαγή γίνεται στα αντισώματα αντικατοπτρίζεται στα Β-λεμφοκύτταρα και το αντίστροφο.

Ο αλγόριθμος προβλέπει δύο μηχανισμούς για την αναζήτηση της επιθυμητής τελικής δεξαμενής αντισωμάτων μνήμης. Ο πρώτος είναι μία τοπική αναζήτηση που παρέχεται μέσω της ωρίμανσης συγγένειας (hypermutation) των κλώνων των αντισωμάτων. Περισσότεροι κλώνοι παράγονται για αντισώματα με μεγαλύτερη συγγένεια σύνδεσης, αν και η έκταση της τοπικής αναζήτησης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την κατάταξη των επιλεγμένων αντισωμάτων. Αυτό προσφέρει στα αντισώματα με χαμηλή ποιότητα σύνδεσης μεγαλύτερο χώρο για να ωριμάσουν. Ο δεύτερος μηχανισμός αναζήτησης έχει συνολική εμβέλεια και περιλαμβάνει την εισαγωγή στον πληθυσμό τυχαία παραγόμενων

αντισωμάτων έτσι ώστε να αυξηθεί η ποικιλομορφία και να παρέχει πιθανώς μια δίοδο διαφυγής από κάποιο τοπικό ακρότατο.

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου CLONALG:

1. Αρχικοποίηση: Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η αρχικοποίηση, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας δεξαμενής αντισωμάτων σταθερού μεγέθους N . Στη συνέχεια η δεξαμενή χωρίζεται σε δύο τομείς, έναν τομέα αντισωμάτων μνήμης που αναπαριστά τελικά τη λύση του αλγορίθμου και έναν τομέα με τα υπολειπόμενα αντισώματα της δεξαμενής που θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μεγαλύτερης ποικιλομορφίας στο σύστημα.

2. Βρόχος (Loop): Ο αλγόριθμος προχωρά στη συνέχεια με την εκτέλεση της αριθμού επαναλήψεων εκθέτοντας το σύστημα σε όλα τα γνωστά αντιγόνα. Μια ολόκληρη επανάληψη αναφέρεται ως γενιά. Ο αριθμός των γενεών G ρυθμίζεται από τον χρήστη, αν και το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει μια συγκεκριμένη συνθήκη τερματισμού.

a. Επιλογή αντιγόνου: ένα συγκεκριμένο αντιγόνο επιλέγεται τυχαία χωρίς αντικατάσταση (για την τρέχουσα γενιά) από τη δεξαμενή αντιγόνων.

b. Εκθεση: το σύστημα εκτίθεται στο συγκεκριμένο αντιγόνο και υπολογίζονται οι τιμές συγγένειας όλων των αντισωμάτων με αυτό το αντιγόνο (υπολογίζεται δηλαδή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης).

c. Επιλογή: τα αντισώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά συγγένειας σύνδεσης και επιλέγονται αυτά με τη μεγαλύτερη συγγένεια σύνδεσης με το αντιγόνο (μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης).

d. Κλωνοποίηση: το σύνολο των επιλεγμένων αντισωμάτων στη συνέχεια κλωνοποιούνται ανάλογα με τη συγγένεια της (βάση της κατάταξης). Ο αριθμός των κλώνων που παράγονται για κάθε αντίσωμα προκύπτει από τον εξής τύπο:

$$N_c = \text{round}\left(\frac{\beta * N}{i}\right)$$
, όπου β η παράμετρος κλωνοποίησης, i η θέση του γονιού-αντίσωμα και N ο συνολικός αριθμός των αντισωμάτων.

Σε της προσεγγίσεις δεν επιλέγεται της συγκεκριμένος αριθμός των καλύτερων αντισωμάτων για κλωνοποίηση, αλλά κλωνοποιούνται όλα τα αντισώματα, αφοτου έχουν ταξινομηθεί, με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$N_c = \text{round}\left(\frac{\beta * n}{i}\right)$$
, όπου το n είναι μία ακόμη παράμετρος του αλγορίθμου.

e. Ωρίμανση συγγένειας (Υπερμετάλλαξη): Οι κλώνοι στη συνέχεια υποβάλλονται σε μια διαδικασία ωρίμανσης συγγένειας έτσι ώστε να βελτιώσουν την ποιότητα σύνδεσης με το εν λόγω αντιγόνο. Ο βαθμός ωρίμανσης είναι αντιστρόφως ανάλογος με την συγγένεια του γονέα-αντίσωματος (βάσει της ταξινόμησης), πράγμα που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγγένεια τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός της μετάλλαξης.

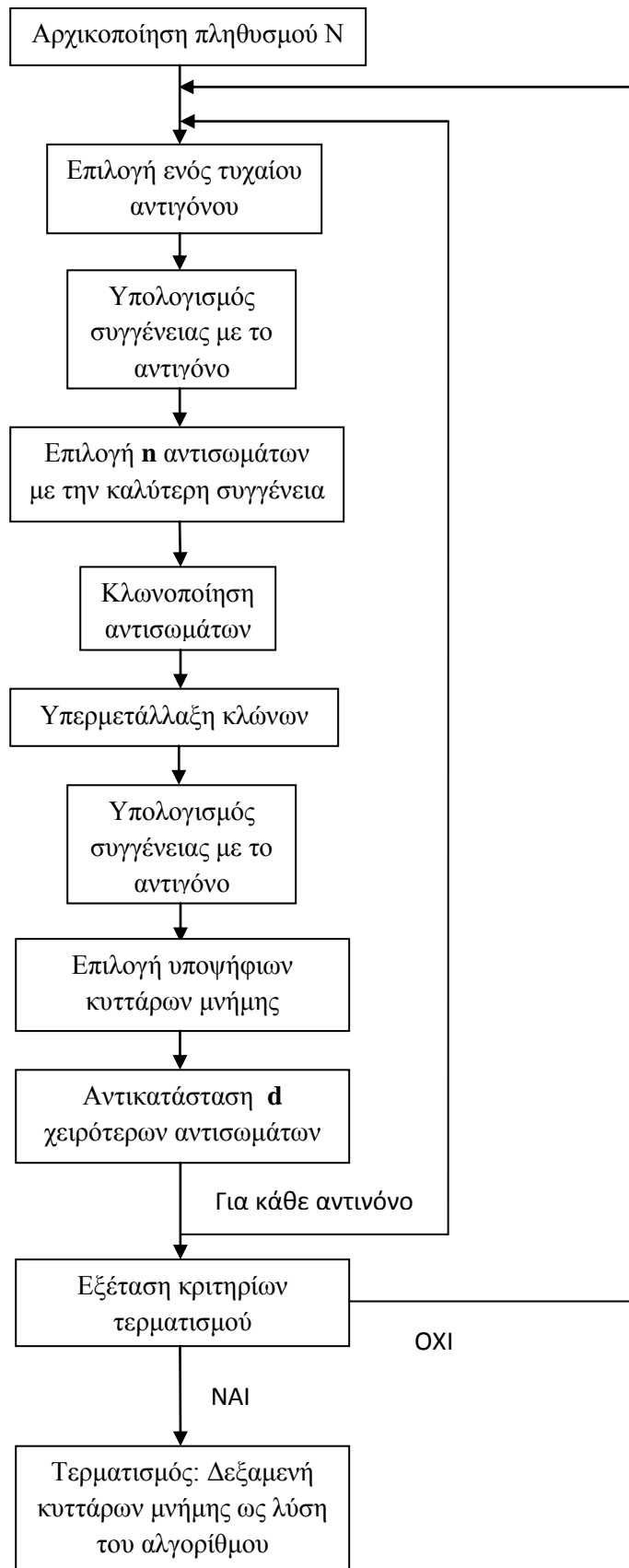
f. Έκθεση των κλώνων: Οι κλώνοι στη συνέχεια εκτίθενται στο αντιγόνο και υπολογίζεται ξανά η συγγένεια (τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης).

g. Αντισώματα μνήμης: Τα αντισώματα με τη μεγαλύτερη τιμή συγγένειας επιλέγονται ως υποψήφια κύτταρα μνήμης και τοποθετούνται σε μια δεξαμενή m . Εάν η συγγένεια σύνδεσης της υποψήφιου κυττάρου μνήμης είναι μεγαλύτερη από το αντίσωμα της δεξαμενής m με τη μεγαλύτερη συγγένεια τότε το αντικαθιστά σε αυτήν.

h. Αντικατάσταση: τέλος, ένα σύνολο d αντισωμάτων με τη μικρότερη συγγένεια από τα υπόλοιπα r αντιγόνα της δεξαμενής αντικαθίστανται από καινούρια εντελώς τυχαία αντισώματα.

3. Τέλος: μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, η μνήμη m της δεξαμενής των αντιγόνων θεωρείται η λύση του αλγορίθμου. Αναλόγως με το είδος του προβλήματος, η λύση μπορεί να είναι ένα συγκεκριμένο αντιγόνο ή το σύνολο των αντιγόνων στη δεξαμενή.

Το παρακάτω σχήμα (2.2) παρέχει μια διαγραμματική απεικόνιση των εργασιών και της ροής του αλγορίθμου CLONALG:



Σχήμα 1.1.: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου CLONALG

2.3.3 Ρύθμιση παραμέτρων

Η τεχνική CLONALG έχει σχετικά μειωμένη πολυπλοκότητα και μικρότερο αριθμό παραμέτρων καθοριζόμενων από το χρήστη σε σχέση με άλλες παρόμοιες τεχνικές (ΤΑΣ). Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα ρυθμιζόμενα από το χρήστη στοιχεία και η επίδρασή τους στο σύστημα. Ο αλγόριθμος CLONALG έχει επτά καθοριζόμενες από το χρήστη παραμέτρους οι οποίες είναι οι εξής: μέγεθος πληθυσμού αντισωμάτων, μέγεθος δεξαμενής κυττάρων μνήμης, μέγεθος δεξαμενής επιλογής, το υπολειπόμενο μέγεθος αντικατάστασης, παράμετρος κλωνοποίησης, αριθμός γενεών, γεννήτρια τυχαίου αριθμού σπόρων (απαιτείται για όλες τις τεχνικές με στοχαστικό χαρακτήρα).

Μέγεθος πληθυσμού αντισωμάτων (N): Καθορίζει το συνολικό αριθμό των αντισωμάτων που πρέπει να διατηρούνται από το σύστημα. Περιλαμβάνει τόσο τη δεξαμενή αντισωμάτων μνήμης όσο και τη δεξαμενή υπολειπόμενων αντισωμάτων. Έστω m ο αριθμός των αντισωμάτων που μετατρέπονται σε αντισώματα μνήμης, όπου $m \leq N$. Επομένως, ο αριθμός των υπολειπόμενων αντισωμάτων αντιστοιχεί σε $r = N - m$.

Μέγεθος δεξαμενής επιλογής (n): Καθορίζει το συνολικό αριθμό αντισωμάτων με την καλύτερη συγγένεια τα οποία θα επιλεγθούν για κλωνοποίηση, $n \leq N$. Η τιμή του n προσδιορίζει το μέγεθος της πίεσης στον πληθυσμό των αντισωμάτων ώστε να πετύχουν μεγάλες τιμές συγγένειας και να πολλαπλασιαστούν. Μικρές τιμές του n αυξάνουν την πίεση και μειώνουν την ποικιλομορφία του πληθυσμού, εξασφαλίζοντας ότι μόνο τα καλύτερα αντισώματα κλωνοποιούνται και αντικαθιστούν στοιχεία της δεξαμενής μνήμης.

Υπολειπόμενο μέγεθος αντικατάστασης (d): Καθορίζει το συνολικό αριθμό αντισωμάτων με τη χειρότερη συγγένεια που θα αντικατασταθούν από τυχαία αντισώματα σε κάθε έκθεση στο αντιγόνο, όπου $d \leq r$. Παρέχει ένα μηχανισμό για την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερης ποικιλομορφίας (περισσότερη από την τοπική ποικιλομορφία της μετάλλαξης) στον πληθυσμό των αντισωμάτων. Η επιπλέον ποικιλομορφία μπορεί να εξαλειφθεί θέτοντας την τιμή του d ίση με το μηδέν.

Παράμετρος κλωνοποίησης (β): Καθορίζει ένα συντελεστή κλίμακας για τον αριθμό των κλώνων που δημιουργούνται για τα επιλεγμένα αντισώματα. Όσο μικρότερη η τιμή του β , τόσο μεγαλύτερη η αναζήτηση που γίνεται από τον αλγόριθμο στην τοπική περιοχή (σε σχέση με τα τρέχοντα αντισώματα).

Αριθμός γενεών (G): Καθορίζει το συνολικό αριθμό επαναλήψεων που θα εκτελεστούν, όπου σε μια επανάληψη εκτίθεται το σύστημα σε όλα τα γνωστά αντιγόνα. Μεγάλες τιμές της παραμέτρου μπορεί να οδηγήσουν τον αλγόριθμο στο να «εγκλωβιστεί» σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΤΟΜΩΝ ΣΜΗΝΟΥΣ

2.4.1 Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση ατόμων σμήνους (Particle Swarm Optimization) είναι μία εξελικτική υπολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους J. Kennedy και R. Eberhart το 1995. Η αρχική τους ιδέα είχε ως στόχο την δημιουργία υπολογιστικής νοημοσύνης με την αξιοποίηση απλών αναλόγων της κοινωνικής αλληλεπίδρασης και όχι καθαρά τις ατομικές γνωστικές ικανότητες. Η μέθοδος είναι βασισμένη στην έρευνα της συμπεριφοράς της κίνησης ενός σμήνους πουλιών ή ψαριών. Στην αναζήτησή τους για τροφή από το ένα μέρος στο άλλο, πάντα ένα από τα άτομα του σμήνους των πτηνών θα έχει τη μεγαλύτερη ικανότητα στο να εντοπίσει την τροφή. Επομένως, καθώς τα άτομα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μεταδίδουν αυτές τις πληροφορίες, το σμήνος θα κατευθυνθεί τελικά στην τοποθεσία εκείνη στην οποία μπορεί να βρεθεί τροφή. Σε αντιπαράθεση με την μέθοδο ατόμων σμήνους, το «σμήνος- λύση» αντιστοιχεί στο σμήνος των πτηνών, η μετακίνηση του σμήνους από μία τοποθεσία σε μία άλλη αντιστοιχεί στην εξέλιξη του «σμήνους- λύσης», οι πληροφορίες για την τροφή αντιστοιχούν στην πιο αισιόδοξη λύση, ενώ η τροφή αντιστοιχεί στην πιο αισιόδοξη λύση σε όλη τη διάρκεια της αναζήτησης.

Στη μέθοδο της PSO μια σειρά από σωματίδια (particles) 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 βασισμένο 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.

Η PSO έχει εφαρμοστεί σε συνεχείς πολυτροπικές συναρτήσεις αλλά υπάρχουν επίσης ορισμένες εφαρμογές πάνω σε προβλήματα που διαθέτουν τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές. Σε αυτήν την περίπτωση παραδοσιακά επιλέγονται ως λύση είτε διακριτές τιμές που προκύπτουν από στρογγυλοποίηση της βέλτιστης λύσης είτε αυτές που βρίσκονται κοντά στη βέλτιστη λύση. Σε πιο σύγχρονες προσεγγίσεις χρησιμοποιείται μία διευρυμένη αντικειμενική συνάρτηση η οποία περιλαμβάνει μια συνάρτηση ποινής (penalty function) και όλες οι μεταβλητές χειρίζονται ως συνεχείς.

2.4.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης ατόμων σμήνους

Κάθε άτομο του σμήνους αποτελείται από τρία d - διάστατα διανύσματα, όπου d είναι η διάσταση του χώρου του προβλήματος. Αυτά είναι η τρέχουσα θέση x_i , η προηγούμενη καλύτερη θέση p_i και η ταχύτητα v_i . Κάθε σωματίδιο διατηρεί εκείνες τις συντεταγμένες του χώρου του προβλήματος οι οποίες σχετίζονται με την καλύτερη λύση που έχει

επιτευχθεί μέχρι στιγμής. Η καλύτερη λύση αποθηκεύεται και αυτή σε μια μεταβλητή με όνομα *pbest*. Επίσης αποθηκεύεται και η βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί από το σύνολο των σωματιδίων, ολόκληρου του σμήνους δηλαδή, καθώς και οι αντίστοιχες συντεταγμένες σε μια μεταβλητή που ονομάζεται *gbest*. Η μέθοδος ατόμων σμήνους (PSO) μεταβάλλει, σε κάθε βήμα, την ταχύτητα (επιτάχυνση) κάθε σωματιδίου ώστε αυτό να προσεγγίσει τις καλύτερες τιμές *pbest* και *gbest* (global version of PSO). Υπάρχει και μία επιπλέον εκδοχή της PSO στην οποία κάθε σωματίδιο, εκτός από το *pbest*, διατηρεί και την καλύτερη λύση (*lbest*) η οποία έχει επιτευχθεί από τα γειτονικά του σωματίδια (partial version of PSO).

Η διαδικασία που ακολουθεί η global version της PSO συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποίηση ενός πληθυσμού (διάνυσμα) σωματιδίων με τυχαίες θέσεις και ταχύτητες στις *d* διαστάσεις του χώρου του προβλήματος.
2. Για κάθε σωματίδιο, υπολογισμός της επιθυμητής αντικειμενικής συνάρτησης για τις *d* μεταβλητές.
3. Σύγκριση της τρέχουσας τιμής του σωματιδίου με την βέλτιστη λύση που αυτό έχει επιτύχει (*pbest*). Εάν η τρέχουσα τιμή είναι καλύτερη από την *pbest*, τότε ορίζεται ως βέλτιστη τιμή η τρέχουσα και ως βέλτιστη θέση η αντίστοιχη τρέχουσα θέση στον *d*- διάστατο χώρο.
4. Σύγκριση της τρέχουσας τιμής του σωματιδίου με την βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει συνολικά ο πληθυσμός. Εάν η τρέχουσα τιμή είναι καλύτερη από την *gbest*, τότε ορίζεται ως βέλτιστη τιμή του πληθυσμού η τρέχουσα τιμή του σωματιδίου και ως βέλτιστη θέση η αντίστοιχη τρέχουσα θέση.
5. Μεταβολή της ταχύτητας και της θέσης του σωματιδίου σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) αντίστοιχα:

$$v_{id} = v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand() * (p_{gd} - x_{id}) \quad (2.1)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2.2)$$

6. Επιστροφή βρόχου στο βήμα 2) μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού που έχει τεθεί, το οποίο μπορεί να είναι μια αρκετά καλή λύση ή ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (γενεών).

Οι ταχύτητες των σωματιδίων σε κάθε διάσταση έχουν ως ανώτατο όριο μια ταχύτητα V_{max} . Αν το άθροισμα των επιταχύνσεων σε μία διάσταση ξεπεράσει αυτό το όριο, που καθορίζεται από το χρήστη, τότε η ταχύτητα περιορίζεται αυτόματα σε V_{max} . Το όριο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς καθορίζει τις περιοχές μεταξύ της τρέχουσας και της βέλτιστης θέσης στις οποίες θα γίνει η αναζήτηση. Αν το V_{max} είναι πολύ μεγάλο, τα

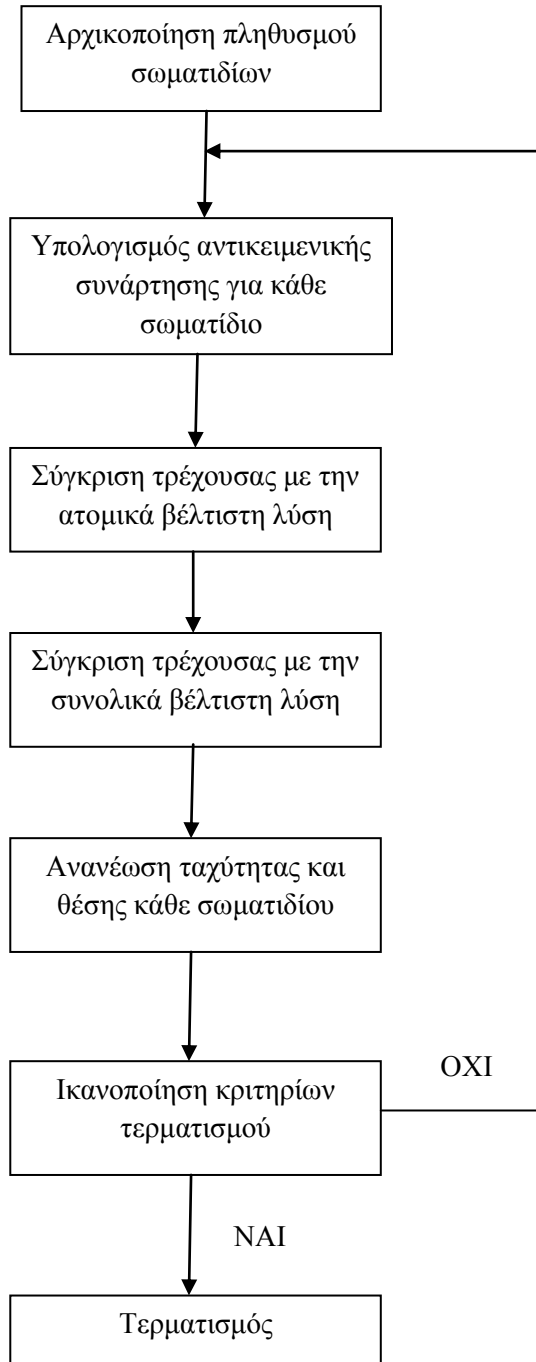
σωματίδια μπορεί να προσπεράσουν ορισμένες καλές λύσεις, ενώ αν είναι πολύ μικρό τα σωματίδια μπορεί να μην εξερευνήσουν αποτελεσματικά ορισμένες καλές περιοχές ή μπορεί να μείνουν παγιδευμένα σε τοπικά ακρότατα χωρίς να μπορούν να αναζητήσουν καλύτερες λύσεις στο χώρο του προβλήματος. Οι σταθερές c_1 και c_2 στην εξίσωση (2.1) αποτελούν τους συντελεστές βαρύτητας των στοχαστικών όρων της επιτάχυνσης που οδηγούν κάθε σωματίδιο προς τις θέσεις p_{best} και g_{best} . Επομένως, η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μεταβάλλει την «ένταση» στο σύστημα.

Η μέγιστη ταχύτητα V_{max} λειτουργεί περιοριστικά στον έλεγχο της συνολικής ικανότητας αναζήτησης του σμήνους. Έτσι αναπτύχθηκε μια μεταβλητή w με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της αναζήτησης λύσης και την εξάλειψη της ανάγκης για την V_{max} . Η παράμετρος w ονομάζεται βάρος αδράνειας (inertia weight) και ελέγχει το αντίκτυπο που έχουν οι προηγούμενες ταχύτητες στις τρέχουσες. 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. Με την προσθήκη του βάρους αδράνειας προκύπτουν από τις (2.1),(2.2) οι εξής εξισώσεις:

$$v_{id} = w * v_{id} + c_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + c_2 * rand() * (p_{gd} - x_{id}) \quad (2.3)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2.4)$$

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου PSO:



Σχήμα 2.2.: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO

2.4.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ PSO

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Βασίζεται στη νοημοσύνη και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην επιστημονική έρευνα όσο και για μηχανική χρήση με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων. Μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη-παραγωγίσιμα προβλήματα επειδή δεν χρησιμοποιεί την ευαισθησία της συνάρτησης (gradient).
- Δεν περιλαμβάνει διασταυρώσεις μεταξύ των γονιδίων και μεταλλάξεις. Η αναζήτηση εκτελείται βασιζόμενη στην ταχύτητα του σωματιδίου. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των γενεών, μόνο το πιο αισιόδοξο σωματίδιο (αυτό με τη βέλτιστη λύση) μπορεί να μεταδώσει πληροφορίες στα υπόλοιπα σωματίδια με αποτέλεσμα η ταχύτητα αναζήτησης να είναι πολύ μεγάλη.
- Οι υπολογισμοί είναι πολύ απλοί. Σε σύγκριση με άλλες αναπτυσσόμενες μεθόδους, η PSO κατέχει την μεγαλύτερη ικανότητα βελτιστοποίησης. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης που μπορεί να ψάχνει λύση σε μια πολύπλοκη περιοχή.
- Πιο δύσκολο σε σχέση με άλλες μεθόδους να εγκλωβιστεί σε τοπικά ελάχιστα καθώς χρησιμοποιεί έναν ολόκληρο πληθυσμό στην αναζήτηση της λύσης και όχι ένα μεμονωμένο άτομο δίνοντας έτσι μεγαλύτερο εύρος σε αυτήν. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης δεν εξαρτάται από τον αρχικό πληθυσμό.

2.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ PCLONALG

Συνδυάζοντας το μηχανισμό επιλογής κλώνων του ανοσοποιητικού συστήματος (CLONALG) με τις εξισώσεις εξέλιξης της βελτιστοποίησης ατόμων σμήνους (PSO), προέκυψε ένας εξελιγμένος αλγόριθμος για βελτιστοποίηση συναρτήσεων (PCLONALG). Ο υβριδικός αυτός αλγόριθμος παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα. Μέσω της λειτουργίας της ανοσίας διατηρήθηκε η ποικιλομορφία των αντισωμάτων και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των ατόμων σμήνους βελτιώθηκε η ταχύτητα σύγκλισης. Βασικό πλεονέκτημα του υβριδικού αλγορίθμου σε σχέση με τους δύο αρχικούς αποτελεί η σύγκλιση σε μια βέλτιστη λύση σε μικρότερο χρονικό διάστημα και η σημαντική βελτίωση της απόδοσης της βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος PCLONALG διαθέτει τέσσερις τελεστές: έναν τελεστή κλωνοποίησης (cloning operator), έναν τελεστή υπερμετάλλαξης (hypermutation operator), έναν τελεστή βελτίωσης (improvement operator) και έναν τελεστή διόρθωσης υποδοχέων (receptor editing operator).

Όπως προαναφέρθηκε, ο τελεστής βελτίωσης είναι εμπνευσμένος από την PSO. Πιο συγκεκριμένα, αφού υπολογιστεί η συγγένεια σύνδεσης (affinity), ή αλλιώς η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, για όλα τα αντισώματα, επιλέγονται τα μισά που πέτυχαν την καλύτερη συγγένεια. Στη συνέχεια βελτιώνεται η συγγένεια σύνδεσης των επιλεγμένων αντισωμάτων πριν την κλωνοποίησή τους. Έτσι χειριζόμαστε το πλήθος των επιλεγμένων αντισωμάτων σαν ένα σμήνος (swarm) και το κάθε ένα από αυτά σαν ένα σωματίδιο (particle) του σμήνους. Έτσι αρχικά ανανεώνεται η ταχύτητα των αντισωμάτων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$V_{i,new} = V_{i,old} + c_1 * rand() * (p_{i,best} - x_i) + c_2 * rand() * (p_{g,best} - x_i) \quad (2.5)$$

, όπου $V_{i,new}$ και $V_{i,old}$ η καινούργια και η παλιά ταχύτητα αντίστοιχα των αντισωμάτων, c_1 και c_2 δύο θετικές σταθερές, x_i η θέση των αντισωμάτων, $p_{i,best}$ η βέλτιστη λύση για κάθε ένα από τα αντισώματα και $p_{g,best}$ η συνολική βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί. Στη συνέχεια ανανεώνεται η θέση των αντισωμάτων σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$x_i = x_i + V_{i,new} \quad (2.6)$$

, δηλαδή η καινούργια θέση των αντισωμάτων προκύπτει από το άθροισμα της παλιάς τους θέσης και της καινούργιας τους ταχύτητας.

Ακολούθως, τα αντισώματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά ανάλογα με την τιμή της συγγένειας σύνδεσης την οποία έχουν επιτύχει και εφαρμόζεται ο τελεστής κλωνοποίησης. Τα αντισώματα-κλώνοι ή αντισώματα-απόγονοι (offspring antibodies) έχουν ταυτόσημα χαρακτηριστικά με τα αντισώματα από τα οποία προέκυψαν, δηλαδή με τα αντισώματα-γονείς (parents). Ο αριθμός των κλώνων που παράγονται για κάθε ένα από τα αντισώματα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$n_c = round(\frac{b*n}{i})$, όπου b μια θετική σταθερά, i η θέση του αντισώματος-γονιού και n μια παράμετρος που ελέγχει τον αριθμό των κλώνων. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγγένεια τόσο περισσότερους κλώνους παράγει το αντίστοιχο αντίσωμα.

Στη συνέχεια τα αντισώματα-κλώνοι υπόκεινται στον τελεστή υπερμετάλλαξης, ο οποίος είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη συγγένεια σύνδεσης κάθε αντισώματος και βασίζεται στις δύο παρακάτω σχέσεις:

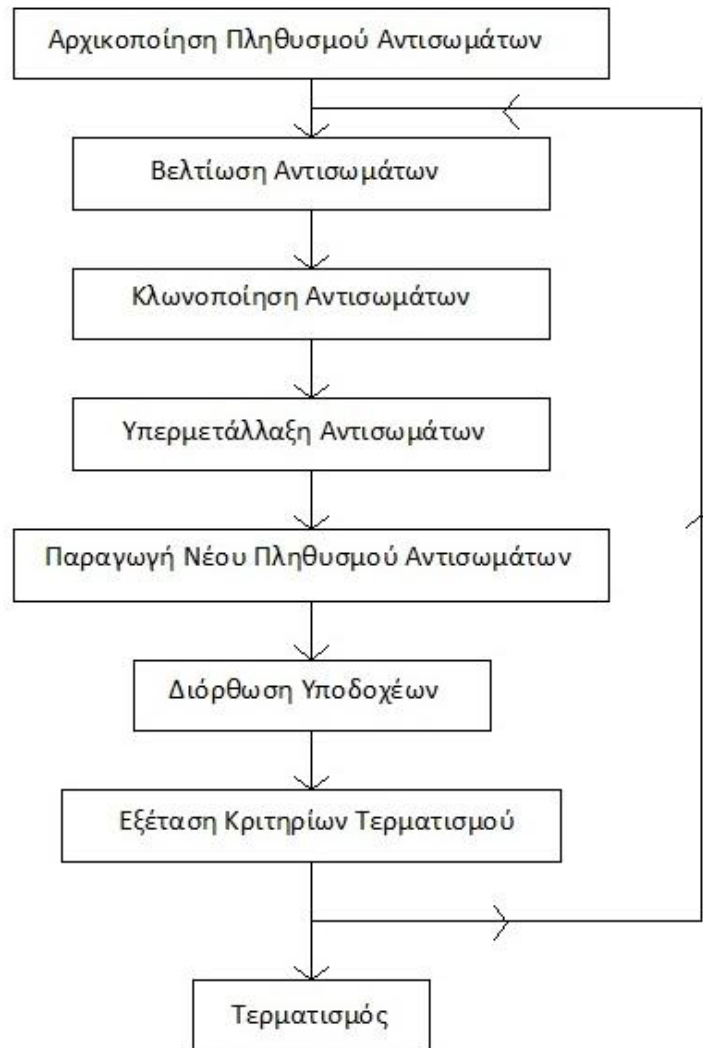
$$x_{i,new} = x_{i,old} + a * N(0,1) \quad (2.7)$$

$$a = \frac{1}{b_1} * \exp(-F) \quad (2.8)$$

Με το $N(0,1)$ συμβολίζεται μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα., με το σύμβολο F η αντικειμενική συνάρτηση (συγγένεια σύνδεσης) κάθε αντισώματος και η b_1 είναι μια θετική σταθερά.

Με σκοπό να αυξηθεί η ποικιλομορφία των αντισωμάτων, εφαρμόζεται ένας ακόμα τελεστής, ο τελεστής διόρθωσης υποδοχέων. Έτσι αν ο αρχικός πληθυσμός των αντισωμάτων που έχει επιλεγεί είναι μεγέθους N , θα δημιουργηθούν $N/10$ καινούργια αντισώματα τα οποία θα αντικαταστήσουν τον αντίστοιχο αριθμό των παλιών αντισωμάτων που είχαν τη χειρότερη συγγένεια σύνδεσης και τα οποία επομένως δεν μας ενδιαφέρουν στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Δε σημαίνει όμως κατά ανάγκη ότι τα καινούργια αντισώματα θα επιτύχουν κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα από τα αντισώματα που αντικατέστησαν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα του αλγορίθμου PCLONALG με τη βοήθεια ενός διαγράμματος:



Σχήμα 2.4.: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PCLONALG

Στο παρόν πρόβλημα, πριν τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, σε κάθε σημείο του αλγορίθμου, χρειαζόταν να «τρέξει» μία βέλτιστη ροή φορτίου, με σκοπό να υπολογιστούν μεγέθη όπως οι απώλειες των γραμμών, οι τάσεις των ζυγών και άλλα στοιχεία τα οποία ήταν απαραίτητα για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφεται η λογική της βέλτιστης ροής φορτίου, η μαθηματικοποιημένη μορφή της, καθώς και οι τρόποι επίλυσης αυτής.

2.6 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου διατυπώθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1960 (J. Carpentier 1962) ως οικονομική κατανομή φορτίου, αλλά αποδείχθηκε ότι είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα για επίλυση. Η επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου αποτελεί αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος και έχει χαρακτηριστεί ως μία από τις πιο λειτουργικές ανάγκες, καθώς είναι σημαντικό εργαλείο στη διαχείριση των συστημάτων ισχύος. Η λύση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση μιας δεδομένης αντικειμενικής συνάρτησης μέσω της κατάλληλης ρύθμισης κάποιων μεταβλητών ελέγχου του συστήματος ισχύος, ενώ παράλληλα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας του συστήματος. Οι περιορισμοί ισότητας περιλαμβάνουν το ενεργειακό ισοζύγιο, ενώ οι περιορισμοί ανισότητας τα όρια των τάσεων των ζυγών και τα θερμοικά όρια των γραμμών. Οι μεταβλητές ελέγχου περιλαμβάνουν την ενεργό παραγωγή των γεννητριών, τις τάσεις του ζυγού παραγωγής, τη ρύθμιση των μετασχηματιστών (TAPS) και διάφορες μεταγωγικές πηγές αέργου ισχύος (MVAR). Αντίθετα, οι εξαρτώμενες από το πρόβλημα μεταβλητές περιλαμβάνουν τις τάσεις των ζυγών φορτίου, την άεργο παραγωγή των γεννητριών και τις ροές ισχύος στις γραμμές.

Σε γενικές γραμμές, το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου είναι ένα μεγάλης κλίμακας μη-γραμμικό, μη-κυρτό και με πολλούς περιορισμούς πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για την επίλυση της ΒΡΦ έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μαθηματικοποιημένες προγραμματιστικές τεχνικές, ενώ πέρασαν πολλές δεκαετίες μέχρι οι ερευνητές να καταλήξουν σε προγραμματιστικούς κώδικες που μπορούν να λύσουν το πρόβλημα με αξιοπιστία. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: τις συμβατικές (κλασικές) και τις ευφυείς μεθόδους. Στις συμβατικές μεθόδους ανήκουν ο μη-γραμμικός προγραμματισμός, η μέθοδος κλίσης, ο γραμμικός προγραμματισμός, τεχνικές βασισμένες στη μέθοδο Newton, η μέθοδος επαναλήψεων λάμδα και η μέθοδος εσωτερικού σημείου. Οι ευφυείς τεχνικές βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (Α.Ι) και αναπτύχθηκαν πρόσφατα. Σε αυτές ανήκουν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA), η βελτιστοποίηση ατόμων σμήνους (PSO) και ο αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (Ant colony).

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 ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ

Ο βασικός σκοπός της ΒΡΦ είναι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βελτιστοποίηση (είτε μεγιστοποιώντας είτε ελαχιστοποιώντας) μιας επιλεγμένης αντικειμενικής συνάρτησης η οποία εξαρτάται από έναν αριθμό μεταβλητών, προϋποθέτοντας ωστόσο ότι τηρούνται κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά στις τιμές των μεταβλητών αυτών. Επομένως, το πρόβλημα της ΒΡΦ διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_x f(x) \quad (2.9)$$

Με τους περιορισμούς: $g(x) = 0 \quad (2.10)$

$$h(x) \leq 0 \quad (2.11)$$

$$l \leq Ax \leq u \quad (2.12)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.13)$$

Όπου:

- x ένα διάνυσμα βελτιστοποίησης το οποίο περιλαμβάνει τις εξαρτώμενες από το πρόβλημα μεταβλητές, δηλαδή τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών του εκάστοτε συστήματος καθώς και την ενεργό και άεργο παραγωγή των γεννητριών

του συστήματος. Έχει την εξής μορφή: $x = \begin{pmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{pmatrix}$, όπου θ , V_m οι γωνίες και τα

μέτρα των τάσεων των ζυγών και P_g , Q_g οι παραγωγές ενεργού και άεργου ισχύος των γεννητριών αντίστοιχα. Δηλαδή αν ο αριθμός των ζυγών του συστήματος είναι n_b και ο αριθμός των γεννητριών που υπάρχουν σε αυτό είναι n_g , τότε το διάνυσμα x θα έχει διαστάσεις $(2 * n_b + 2 * n_g) \times 1$.

- Ο περιορισμός (2.10) αφορά στο ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος
- Ο περιορισμός (2.11) αφορά στα θερμικά όρια των γραμμών
- Ο περιορισμός (2.12) αφορά στα επιτρεπτά όρια των τάσεων των ζυγών ή της παραγωγής των γεννητριών
- Διάφοροι επιπλέον περιορισμοί που μπορούμε να εισάγουμε

2.6.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΦ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επίλυση του προβλήματος της ΒΡΦ:

- Μέθοδος κλίσης (Gradient method)

Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι η ύπαρξη μεταβλητών κατάστασης και μεταβλητών ελέγχου, με τις εξισώσεις της ροής φορτίου να παρέχουν μια κομβική βάση για την εξάλειψη των μεταβλητών κατάστασης. Η μέθοδος περιλαμβάνει ένα διάλυμα κλίσης το οποίο καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί η τρέχουσα λύση έτσι ώστε να βελτιωθεί. Βασικά μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι η δυσκολία που αντιμετωπίζει με περιορισμούς ανισότητας και η αρκετά αργή σύγκλιση στη βέλτιστη λύση.

- Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton είναι ένας πολύ ισχυρός αλγόριθμος επίλυσης λόγω της πολύ γρήγορης σύγκλισης στη λύση. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη για τις εφαρμογές των συστημάτων ισχύος καθώς επιτυγχάνεται μια αρχική εικασία αρκετά κοντά στη λύση. Μπορεί να χειριστεί ικανοποιητικά διάφορους ανισωτικούς περιορισμούς και μπορεί να δώσει αποτελεσματικές λύσεις και σε προβλήματα οποιουδήποτε μεγέθους πρακτικά. Αντίθετα, παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα καθώς η μέθοδος είναι αρκετά ευαίσθητη στις αρχικές συνθήκες με αποτέλεσμα αν έχουν οριστεί ακατάλληλες αρχικές συνθήκες, η τεχνική να μην καταφέρει να συγκλίνει σε κάποια λύση.

- Μέθοδος Επαναλήψεων Λάμδα

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στους πολλαπλασιαστές Lagrange και παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, καθώς η άγνωστη μεταβλητή λάμδα λαμβάνει την επόμενη τιμή της ενστικτωδώς. Οι απώλειες αναπαρίστανται σε έναν πίνακα B και οι παράγοντες ποινής μπορούν να υπολογίζονται έξω από μία ροή φορτίου. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δυσκολίες στη ρύθμιση και προσαρμογή της μεταβλητής λάμδα όταν έχει να αντιμετωπίσει σύνθετες αντικειμενικές συναρτήσεις. Αυτή η τεχνική αποτελεί τη βάση για πολλά online προγράμματα οικονομικής κατανομής φορτίου.

- Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού

Η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (Linear programming method) είναι μία πολύ αποτελεσματική τεχνική καθώς μπορεί να χειρίζεται αποτελεσματικά προβλήματα με ανισωτικούς περιορισμούς, με την προϋπόθεση όμως η αντικειμενική συνάρτηση να μπορεί να γραμμικοποιηθεί χωρίς να υπάρξει σημαντική απώλεια ακρίβειας.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

1. Αρχικές συνθήκες ροής ισχύος.
2. Επίλυση εξισώσεων ροής ισχύος.
3. Δημιουργία γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης.
4. Υπολογισμός γραμμικών συντελεστών ανάλυσης ευαισθησίας.
5. Κατάστρωση και επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για τις νέες μεταβλητές ελέγχου.
6. Εξέταση της σύγκλισης της μεθόδου.
7. Τερματισμός ή επιστροφή στο βήμα 2) μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Οι εξισώσεις ροής ισχύος μπορεί να γραφούν για την DC αναπαράσταση, τις αποσυνδεδεμένες AC εξισώσεις ή το σύνολο των εξισώσεων ροής ισχύος. Αναλόγως με την επιλογή διαφέρει και η δυσκολία υπολογισμού των συντελεστών ανάλυσης ευαισθησίας και της δοκιμής 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 μη γραμμική συνάρτηση μπορεί να προσεγγιστεί με μια σειρά ευθύγραμμων τμημάτων τα οποία παριστάνονται ως P_{i1}, P_{i2}, P_{i3} με αντίστοιχες κλίσεις s_{i1}, s_{i2} και s_{i3} .

Επομένως, η συνάρτηση κόστους παίρνει την εξής μορφή:

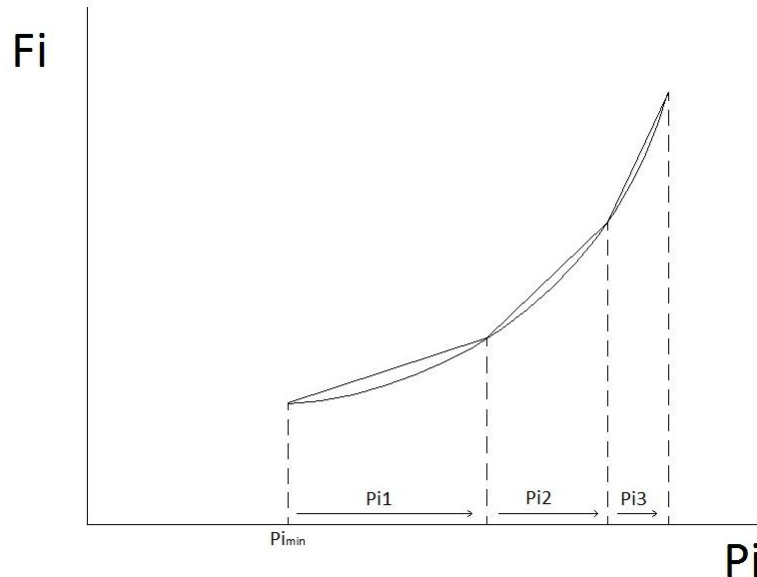
$$F_i(P_i) = F_i(P_i^{min}) + s_{i1}P_{i1} + s_{i2}P_{i2} + s_{i3}P_{i3} \quad (2.14)$$

με περιορισμό: $0 \leq P_{ik} \leq P_{ik}^+$, για $k = 1,2,3$. (2.15)

Τελικά προκύπτει:

$$P_i = P_i^{min} + P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \quad (2.16)$$

Έτσι η συνάρτηση κόστους αποτελείται πλέον από μία γραμμική έκφραση των P_{ix} και στο επόμενο σχήμα (2.5) φαίνεται η γραφική της αναπαράσταση.



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

Σε αυτή την τεχνική επίλυσης, οι μεταβλητές σχεδίασης του διανύσματος \mathbf{x} διακρίνονται σε μεταβλητές κατάστασης και μεταβλητές ελέγχου και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι μεταβλητές ελέγχου. 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} .

Ο επόμενος περιορισμός που πρέπει να επιβληθεί σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού βέλτιστης ροής φορτίου αφορά στο ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος και της ισχύος που καταναλώνεται στα φορτία και σε απώλειες. Επομένως προκύπτει ο εξής περιορισμός:

$$P_{gen} - P_{load} - P_{loss} = 0 \quad (2.17)$$

όπου:

- P_{gen} : η παραγόμενη ισχύς από τις γεννήτριες του συστήματος
- P_{load} : η καταναλισκόμενη ισχύς στα φορτία
- P_{loss} : οι ωμικές απώλειες ($I^2 * R$) στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος και οι απώλειες στους μετασχηματιστές

Η παραγωγή της σχέσης (2.17) γίνεται ως προς τις μεταβλητές ελέγχου \mathbf{u} , οπότε προκύπτει:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{gen}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{load}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (2.18)$$

Θεωρώντας ότι $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}^0$ η εξίσωση του ισοζυγίου γίνεται:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{gen}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{load}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} = K_p \quad (2.19)$$

όπου:

$$K_p = \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{gen}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u}^0 - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{load}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u}^0 - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial \mathbf{u}} \right) \mathbf{u}^0 \quad (2.20)$$

Ομοίως προκύπτει η αντίστοιχη εξίσωση για το ισοζύγιο αέργου ισχύος:

$$\sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial Q_{gen}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial Q_{load}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} - \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial Q_{loss}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (2.21)$$

όπου ο όρος Q_{loss} περιλαμβάνει τις απώλειες $I^2 * X$ καθώς και τη φόρτιση από πυκνωτές γραμμών και τις αντιδράσεις των διακλαδώσεων.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο οι μεταβλητές ελέγχου πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν καθοριστεί, αλλά δεν είναι αναγκαίο κατά την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου η συνάρτηση κόστους να βελτιστοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των γραμμών μεταφοράς ή τα όρια των τάσεων των ζυγών. Επομένως, για να εξασφαλιστεί ότι το βέλτιστο κόστος θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς πρέπει να γίνει προσθήκη ενός ακόμα περιορισμού.

Έστω ότι η γραμμή nm που ενώνει έναν οποιοδήποτε ζυγό n με έναν άλλο ζυγό m έχει ένα ανώτατο θερμικό όριο $MVA_{flow,nm,MAX}$, οπότε ισχύει:

$$MVA_{flow,nm} \leq MVA_{flow,nm,MAX} \quad (2.22)$$

Ο περιορισμός (2.23) μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση σειρών Taylor και διατηρώντας μόνο τους γραμμικούς όρους προκύπτει:

$$MVA_{flow,nm} = MVA_{flow,nm}^0 + \sum_{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} MVA_{flow,nm} \right) \Delta \mathbf{u} \leq MVA_{flow,nm}^{max} \quad (2.24)$$

Θεωρώντας, όπως προηγουμένως, ότι ισχύει $\Delta u = u - u^0$, η σχέση (2.24) γίνεται:

$$\sum_u \left(\frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) u \leq MVA_{flow,nm}^{max} - K_f \quad (2.25)$$

όπου:
$$K_f = MVA_{flow,nm}^0 + \sum_u \left(\frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) u^0 \quad (2.26)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να εισαχθούν και άλλοι περιορισμοί, όπως τα όρια των τάσεων. Για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού πρέπει να προστεθούν όλοι οι απαραίτητοι περιορισμοί ώστε το σύστημα να παραμείνει εντός των προκαθορισμένων ορίων.

- Μέθοδος εσωτερικού σημείου

Η μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior point method) δεν ήταν πολύ δημοφιλής μέχρι την εκπληκτική δημοσίευση του N.Karmarkar(1984). Ο τελευταίος απέδειξε ότι η μέθοδος αυτή υπερτερεί σε πολύ μεγάλο βαθμό της κλασικής απλής μεθόδου για μεγάλα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Επομένως, το επόμενο λογικό βήμα ήταν η εφαρμογή της τεχνικής αυτής στον μη γραμμικό προγραμματισμό. Για αυτό το λόγο, η μέθοδος εσωτερικού σημείου (IPM) έχει πολλαπλές εφαρμογές στα συστήματα ισχύος, όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, η ελαχιστοποίηση των ενεργών απωλειών, ελαχιστοποίηση της διακοπής φορτίου, μεγιστοποίηση του επιτρεπόμενου φορτίου, ελαχιστοποίηση του κόστους συμφόρησης και μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους. Τα βασικά χαρακτηριστικά της IPM αφορούν στην ταχεία σύγκλιση και στην ικανοποιητικό χειρισμό των ανισωτικών περιορισμών των λογαριθμικών φραγμένων συναρτήσεων.

Η βέλτιστη ροή φορτίου μπορεί να γραφεί συνοπτικά ως ένα γενικό πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού ως εξής:

$$\min_x f(x) \quad (2.27)$$

Με τους περιορισμούς: $g(\mathbf{x}) = 0$ (2.28)

$$\mathbf{h}_l \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}_u \quad (2.29)$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u \quad (2.30)$$

Όπου $\mathbf{x}_l, \mathbf{h}_l$ τα κατώτατα και $\mathbf{x}_u, \mathbf{h}_u$ τα ανώτατα όρια των περιορισμών αντίστοιχα.

Η μέθοδος εσωτερικού σημείου περιλαμβάνει τέσσερα βήματα:

1. Μετατρέπει τους περιορισμούς ανισότητας σε περιορισμούς ισότητας προσθέτοντας στους πρώτους κάποιες ελεύθερες μεταβλητές. Έτσι προκύπτει:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (2.31)$$

Με τους περιορισμούς: $g(\mathbf{x}) = 0$ (2.32)

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{h}_l - \mathbf{s}_l = 0 \quad (2.33)$$

$$-\mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{h}_u - \mathbf{s}_u = 0 \quad (2.34)$$

$$\mathbf{s}_l, \mathbf{s}_u \geq 0 \quad (2.35)$$

2. Οι συνθήκες μη αρνητικότητας εντάσσονται στην επίλυση με την προσθήκη της λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης στην αντικειμενική. Η συνάρτηση που προκύπτει είναι μια μορφή συνάρτησης σφάλματος, που γίνεται πολύ μεγάλη όσο η συνάρτηση ή η μεταβλητή πλησιάζει κοντά στο μηδέν. Έτσι προκύπτει:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) - \mu(\ln \mathbf{s}_l + \ln \mathbf{s}_u) \quad (2.36)$$

Με τους περιορισμούς: $g(\mathbf{x}) = 0$ (2.37)

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{h}_l - \mathbf{s}_l = 0 \quad (2.38)$$

$$-\mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{h}_u - \mathbf{s}_u = 0 \quad (2.39)$$

όπου μ ένας θετικός αριθμός που ονομάζεται παράμετρος φραγής και πλησιάζει το μηδέν καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στο βέλτιστο.

3. Μετατρέπει το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς ισότητας σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος βελτιστοποίησης του προηγούμενου βήματος είναι η εξής:

$$L_\mu = f(x) - \mu(\ln s_l + \ln s_u) - \lambda^T g(x) - \pi_l^T (\mathbf{h}(x) - \mathbf{h}_l - \mathbf{s}_l) - \pi_u^T (-\mathbf{h}(x) + \mathbf{h}_u - \mathbf{s}_u) \quad (2.40)$$

Όπου τα διανύσματα των πολλαπλασιαστών Lagrange λ , π_l και π_u ονομάζονται διπλές μεταβλητές.

4. Επιλύει τις συνθήκες βελτιστοποίησης πρώτης τάξης της διαταραγμένης Karush-Kuhn-Tucker (KKT) με τη χρήση της μεθόδου Newton. Το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει είναι το εξής:

$$\nabla_{s_l} L_\mu = -\mu S_l^{-1} \mathbf{e} + \pi_l = \mathbf{0} \quad (2.41)$$

$$\nabla_{s_u} L_\mu = -\mu S_u^{-1} \mathbf{e} + \pi_u = \mathbf{0} \quad (2.42)$$

$$\nabla_{\pi_l} L_\mu = -\mathbf{h}(x) + \mathbf{h}_l + \mathbf{s}_l = \mathbf{0} \quad (2.43)$$

$$\nabla_{\pi_u} L_\mu = \mathbf{h}(x) - \mathbf{h}_u + \mathbf{s}_u = \mathbf{0} \quad (2.44)$$

$$\nabla_{\lambda} L_\mu = -\mathbf{g}(x) = \mathbf{0} \quad (2.45)$$

$$\nabla_x L_\mu = \nabla f(x) - \nabla g(x) \lambda^T - \nabla h(x) (\pi_l^T - \pi_u^T) = \mathbf{0} \quad (2.46)$$

όπου: $\mathbf{e} = [1, \dots, 1]^T$, $S_l = \text{diag}(s_{l1}, \dots, s_{lp})$, $S_u = \text{diag}(s_{u1}, \dots, s_{up})$.

Η συγκεκριμένη τεχνική συνδυάζει τρεις έννοιες: τη λογαριθμική φραγμένη συνάρτηση για να διαχειριστεί τους ανισοτικούς περιορισμούς, τη θεωρία βελτιστοποίησης Lagrange που υπόκειται στους περιορισμούς ισότητας και τη μέθοδο Newton.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATPOWER

3.1 Εισαγωγή

Το MATPOWER είναι ένα πακέτο προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ανοικτού-κώδικα και βασισμένο στο MATLAB. Χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και την εκπαίδευση για προσομοιώσεις AC και DC ροής φορτίου καθώς και βέλτιστης ροής φορτίου(OPF). Περιλαμβάνει επίσης εργαλεία για την προσομοίωση δημοπρασιών ενέργειας βασισμένες στη βέλτιστη ροή φορτίου και για την από κοινού βελτιστοποίηση αποθεμάτων και ενέργειας. Το MATPOWER αποτελείται από ένα σύνολο m-αρχείων του MATLAB που είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση διατηρώντας παράλληλα τον κώδικα απλό τόσο στην κατανόηση όσο και σε διάφορες τροποποιήσεις. Το MATLAB έχει μετατραπεί σε ένα πολύ δημοφιλές εργαλείο για επιστημονικούς υπολογισμούς, συνδυάζοντας μια γλώσσα υψηλού επιπέδου κατάλληλη για υπολογισμούς πινάκων και διανυσμάτων, εκτέλεση ανεξαρτήτου πλατφόρμας με «δυνατές» μαθηματικές βιβλιοθήκες, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης και ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) με εξαιρετικές δυνατότητες απεικόνισης, καθώς και μια ενεργή κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών.

Το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη του, βασισμένου στο MATLAB, κώδικα για τη ροή φορτίου και τη βέλτιστη ροή φορτίου, που τελικά εξελίχθηκε στο MATPOWER, προέκυψε από τις υπολογιστικές απαιτήσεις της πλατφόρμας POWERWEB. Ως μια διαδικτυακή πλατφόρμα προσομοίωσης της αγοράς που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των αγορών ενέργειας, το POWERWEB απαιτεί ένα λογισμικό εκκαθάρισης δημοπρασίας «έξυπνης αγοράς» που χρησιμοποιεί μια ΒΡΦ για να υπολογίσει τη διανομή και την τιμολόγηση. Το λογισμικό αυτό διανεμήθηκε το 1997 μέσω του Internet ως ένα ανοικτού κώδικα λογισμικό προσομοιώσεων ηλεκτρικών δικτύων. Ακόμη και μετά την αρχική του διανομή, η ανάπτυξη του MATPOWER εξακολούθησε να καθοδηγείται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες του πρότζεκτ POWERWEB.

Ενώ συχνά χρησιμοποιείται σαν ένα εργαλείο τελικής χρήσης, 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 \mathbf{Y}_{bus} και \mathbf{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 ΒΡΦ 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 βέλτιστης ροής φορτίου 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 και τετραγωνικού προγραμματισμού.

3.2 Μοντελοποίηση

Το MATPOWER χρησιμοποιεί όλα τα συνηθισμένα μοντέλα σταθερής κατάστασης που εφαρμόζονται για την ανάλυση της ροής ισχύος. Στην περίπτωση αυτή, θα περιγραφούν μόνο τα AC μοντέλα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημα. Τα μέτρα όλων των τιμών εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα και οι γωνίες σε rad. Λόγω της ικανότητας του MATLAB να χειρίζεται πίνακες και διανύσματα, τα μοντέλα και οι εξισώσεις παρουσιάζονται σε αυτές τις μορφές.

A. Μορφές δεδομένων

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο MATPOWER είναι m-αρχεία ή MAT-αρχεία του MATLAB που ορίζουν και επιστρέφουν μια δομή MATLAB. Η μορφή του αρχείου m είναι απλό κείμενο το οποίο μπορεί να εισαχθεί χρησιμοποιώντας ένα συνηθισμένο πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου. Τα πεδία αυτής της δομής είναι τα εξής: SbaseMVA (βάση ισχύος), bus (ζυγός), branch (κλάδος), gen (γεννήτρια) και προαιρετικά gencost, όπου το SbaseMVA είναι βαθμωτό και τα υπόλοιπα είναι μήτρες. Στις μήτρες, κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ζυγό, κλάδο ή γεννήτρια. Ο αριθμός των γραμμών στους πίνακες bus, branch και gen είναι \mathbf{n}_b , \mathbf{n}_l και \mathbf{n}_g αντίστοιχα.

B. Κλάδοι

Όλες οι γραμμές μεταφοράς, οι μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές φάσης διαμορφώνονται με βάση ένα κοινό μοντέλο κλάδου, το οποίο αποτελείται από ένα συνηθισμένο μοντέλο γραμμής, με αντίσταση σειράς $\mathbf{z}_s = \mathbf{r}_s + \mathbf{j}\mathbf{x}_s$ 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 τ και γωνία αλλαγής φάσης θ_{shift} , βρίσκεται στο αριστερό άκρο του κλάδου (*from end*), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

Οι μιγαδικές εγχύσεις ρεύματος \mathbf{i}_f και \mathbf{i}_t στην αναχώρηση (*from*) και στην άφιξη (*to*) του κλάδου αντίστοιχα, μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια μιας 2x2 μήτρας αγωγιμοτήτων \mathbf{Y}_{br} και τις αντίστοιχες τερματικές τάσεις \mathbf{u}_f και \mathbf{u}_t :

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

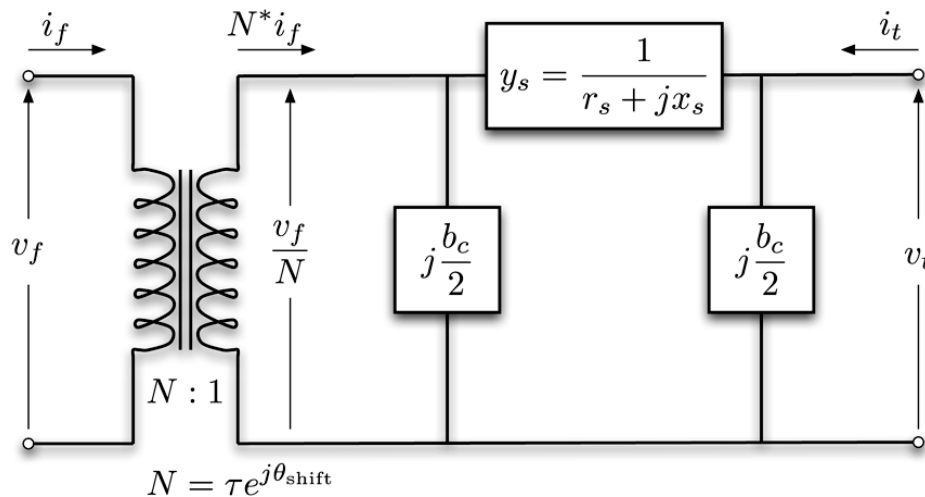
Με την εν σειρά αγωγιμότητα να ισοδυναμεί με $y_s = 1/z_s$ στο μοντέλο π , ο πίνακας αγωγιμοτήτων του κλάδου μπορεί να γραφεί:

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right)\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Αν τα τέσσερα στοιχεία αυτού του πίνακα για τον κλάδο i συμβολιστούν ως εξής:

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

τότε μπορούν να κατασκευαστούν τέσσερα $n_i \times 1$ διανύσματα Y_{ff}, Y_{ft}, Y_{tf} και Y_{tt} , όπου το i -οστό στοιχείο του καθενός προέρχεται από το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα Y_{br}^i . Επιπλέον, οι διαστάσεων $n_i \times n_b$ αραιοί πίνακες σύνδεσης C_f και C_t που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία των πινάκων αγωγιμοτήτων του συστήματος μπορούν να οριστούν ως εξής. Το στοιχείο (i, j) του πίνακα C_f και το στοιχείο (i, k) του πίνακα C_t ισούνται με 1 για κάθε κλάδο i , όπου ο κλάδος i συνδέει το ζυγό j με το ζυγό k . Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία των πινάκων C_f και C_t είναι μηδέν.



Σχήμα 3.1.: Μοντέλο κλάδου

C. Γεννήτριες

Μια γεννήτρια μοντελοποιείται ως μια μιγαδική έγχυση ισχύος σε ένα συγκεκριμένο ζυγό. Για μια γεννήτρια i , η έγχυση είναι

$$s_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad (3.4)$$

Έστω $S_g = P_g + jQ_g$ το $\mathbf{n}_g \times 1$ διάνυσμα αυτών των εγχύσεων της γεννήτριας. Ένας αραιός πίνακας σύνδεσης των γεννητριών \mathbf{C}_g , διαστάσεων $\mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_g$, μπορεί να οριστεί έτσι ώστε το στοιχείο (i, j) είναι ίσο με 1 αν η γεννήτρια j είναι συνδεδεμένη στο ζυγό i , διαφορετικά ισούται με μηδέν. Το $\mathbf{n}_b \times 1$ διάνυσμα όλων των εγχύσεων στους ζυγούς από τις γεννήτριες μπορεί να εκφραστεί ως:

$$S_{g,bus} = C_g * P_g \quad (3.5)$$

D. Φορτία

Τα σταθερά φορτία ισχύος μοντελοποιούνται ως μια συγκεκριμένη ποσότητα ενεργού και άεργου ισχύος που καταναλώνεται σε ένα ζυγό. Για το ζυγό i , το φορτίο είναι

$$s_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad (3.6)$$

και $S_d = P_d + jQ_d$ υποδηλώνει το $\mathbf{n}_b \times 1$ διάνυσμα των μιγαδικών φορτίων σε όλους τους ζυγούς. Σταθερή σύνθετη αντίσταση και σταθερά φορτία ρεύματος δεν εφαρμόζονται απευθείας, αλλά τα τμήματα της σταθερής αντίστασης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως εγκάρσια στοιχεία. Τα ελεγχόμενα φορτία μοντελοποιούνται ως γεννήτριες με αρνητική παραγωγή.

E. Εγκάρσια στοιχεία

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:

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

και $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ υποδηλώνει το $\mathbf{n}_b \times 1$ διάνυσμα των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων σε όλους τους ζυγούς.

F. Εξισώσεις δικτύου

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 εγγεόμενο 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:

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

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

Οι μήτρες αγωγιμοτήτων του συστήματος μπορούν να τροποποιηθούν 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 σχέσεων (3.8)-(3.10) μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες εγχύσεις ισχύος ως εξής:

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

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

$$S_t(V) = [C_t V]I_t^* = [C_t V]Y_t^*V^* \quad (3.16)$$

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:

$$g_s(V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g S_g = 0 \quad (3.17)$$

3.3 Ροή φορτίου

Το πρόβλημα της ροής ισχύος ή ροής φορτίου περιλαμβάνει την επίλυση για το σύνολο των τάσεων και των ροών σε ένα δίκτυο, που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής και φορτίου. Το MATPOWER περιλαμβάνει επιλυτές τόσο για AC όσο και για DC προβλήματα ροής φορτίου, που αμφότερα περιλαμβάνουν επίλυση εξισώσεων της μορφής

$$g(x) = 0 \quad (3.18)$$

οι οποίες κατασκευάζονται εκφράζοντας ένα υποσύνολο των εξισώσεων του ισοζυγίου ισχύος στους κόμβους σαν συνάρτηση των άγνωστων τάσεων.

3.3.1 AC Ροή Φορτίου

Στο MATPOWER, κατά σύμβαση, ένας ζυγός παραγωγής επιλέγεται συνήθως ως αναφορά ώστε να χρησιμεύσει σαν ζυγός αναφοράς για τις γωνίες των τάσεων και για την ενεργό ισχύ. Η γωνία της τάσης στο ζυγό αναφοράς είναι γνωστή, αλλά η παραγωγή ενεργού ισχύος θεωρείται άγνωστη ώστε να αποφευχθεί ο υπερβολικός ορισμός του προβλήματος. Οι υπόλοιποι ζυγοί παραγωγής χαρακτηρίζονται ως PV ζυγοί, με τις τιμές του μέτρου της τάσης και της έγχυσης ενεργού ισχύος να δίνονται. Δεδομένου ότι τα φορτία P_d και Q_d επίσης δίνονται, όλοι οι ζυγοί μη-παραγωγής είναι PQ ζυγοί, με τις εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος πλήρως ορισμένες. Έστω ότι I_{ref} , I_{PV} και I_{PQ} αποτελούν τους δείκτες για τον ζυγό αναφοράς, τους PV ζυγούς και τους PQ ζυγούς αντίστοιχα.

Στην τυπική διατύπωση του προβλήματος της AC ροής φορτίου, η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου (3.17) διακρίνεται στο ενεργό και στο άεργο μέρος της, που εκφράζονται σαν συνάρτηση των γωνιών θ και των μέτρων V_m των τάσεων καθώς και των εγχύσεων των γεννητριών P_g και Q_g , ενώ τα φορτία θεωρούνται δεδομένα και σταθερά:

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0 \quad (3.19)$$

$$g_Q(\theta, V_m, Q_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0 \quad (3.20)$$

Για το πρόβλημα της AC ροής φορτίου, η εξίσωση (3.18) σχηματίζεται παίρνοντας το αριστερό μέρος του ισοζυγίου ενεργού ισχύος (3.19) για όλους τους ζυγούς, εκτός του ζυγού αναφοράς, και του ισοζυγίου άεργου ισχύος (3.20) για όλους τους PQ ζυγούς και εισάγοντας τη γωνία αναφοράς, τα φορτία και τις γνωστές εγχύσεις ισχύος από τις γεννήτριες καθώς και τα μέτρα των τάσεων:

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

Το διάνυσμα \mathbf{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:

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

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων με $n_{PV} + 2n_{PQ}$ εξισώσεις και αγνώστους, όπου n_{PV} και n_{PQ} ο αριθμός των PV και PQ ζυγών αντίστοιχα. Μετά την επίλυση ως προς \mathbf{x} , η εναπομένουσα εξίσωση ισοζυγίου ενεργού ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της έγχυσης ενεργού ισχύος στο ζυγό αναφοράς. Ομοίως, οι υπόλοιπες $n_{PV} + 1$ εξισώσεις ισοζυγίου άεργου ισχύος παρέχουν τις εγχύσεις άεργου ισχύος των γεννητριών.

Το MATPOWER περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικούς αλγορίθμους για την επίλυση της AC ροής φορτίου. Η προεπιλεγμένη μέθοδος επίλυσης βασίζεται στην πρότυπη μέθοδο του Νεύτωνα, χρησιμοποιώντας μια πολική μορφή και έναν ιακωβιανό πίνακα που ανανεώνεται σε κάθε επανάληψη. Κάθε βήμα της μεθόδου περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αναντιστοιχίας $\mathbf{g}(\mathbf{x})$, το σχηματισμό του ιακωβιανού με βάση την ευαισθησία των αναντιστοιχιών στις αλλαγές στο \mathbf{x} και την επίλυση για την ανανεωμένη τιμή του \mathbf{x} με την παραγοντοποίηση του ιακωβιανού πίνακα.

Επίσης περιλαμβάνονται επιλυτές βασισμένοι σε διάφορες παραλλαγές της ταχείας αποξευγμένης μεθόδου, ειδικά οι μέθοδοι XB και BX. Αυτές οι μέθοδοι μειώνουν σημαντικά το πλήθος των υπολογισμών ανά 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. Αυτή η λογική όμως έχει ως κόστος μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων. Ο τέταρτος αλγόριθμος είναι η συνηθισμένη μέθοδος Gauss-Seidel, η οποία έχει πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με τη μέθοδο του Νεύτωνα.

Εξ ορισμού, οι μέθοδοι επίλυσης των AC ροών φορτίου απλά επιλύουν το πρόβλημα που περιγράφηκε προηγουμένως, αγνοώντας οποιαδήποτε όρια όσον αφορά στις γεννήτριες, στις ροές στους κλάδους, στα μέτρα των τάσεων και πολλά άλλα. Ωστόσο, υπάρχει μια δυνατότητα που επιτρέπει να τηρούνται τα όρια άεργου ισχύος των γεννητριών σε βάρος της επιθυμητής τιμής τάσης. Αυτό γίνεται με την προσθήκη ενός εξωτερικού βρόχου στην επίλυση της AC ροής φορτίου. Αν κάποια γεννήτρια υπερβεί το όριο της άεργου ισχύος, η έγχυση άεργου 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 Βέλτιστη ροή φορτίου

Το MATPOWER περιλαμβάνει κώδικα για την επίλυση του προβλήματος τόσο της AC όσο και της DC βέλτιστης ροής φορτίου. Η μορφή καθενός προβλήματος είναι η εξής:

$$\min_x f(x) \quad (3.23)$$

με περιορισμούς:

$$g(x) = 0 \quad (3.24)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3.25)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.26)$$

3.4.1 AC βέλτιστη ροή φορτίου

Το διάνυσμα βελτιστοποίησης x για το πρόβλημα της AC ροής φορτίου αποτελείται από τα $n_b \times 1$ διανύσματα των γωνιών Θ και των μέτρων V_m των τάσεων και από τα $n_g \times 1$ διανύσματα παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος των γεννητριών P_g και Q_g :

$$x = \begin{bmatrix} \Theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.23) είναι απλά ένα άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων πολυωνυμικού κόστους f_P^i και f_Q^i των εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος, αντίστοιχα, για κάθε γεννήτρια:

$$\min_{\Theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) + f_Q^i(q_g^i) \quad (3.28)$$

Οι περιορισμοί ισότητας στη σχέση (3.24) είναι το σύνολο των $2 * n_b$ μη γραμμικών εξισώσεων του ισοζυγίου ενεργού και άεργου ισχύος από τις (3.19) και (3.20). Οι περιορισμοί ανισότητας (3.25) 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:

$$h_f(\Theta, V_m) = F_f(\Theta, V_m) - F_{max} \leq 0 \quad (3.29)$$

$$h_t(\Theta, V_m) = F_t(\Theta, V_m) - F_{max} \leq 0 \quad (3.30)$$

Οι ροές είναι συνήθως ροές φαινόμενης ισχύος εκφρασμένες σε MVA, αλλά μπορεί να είναι και ροές ενεργού ισχύος ή ροές ρεύματος, παρέχοντας έτσι τις εξής τρεις πιθανές μορφές για τους περιορισμούς ροής:

$$F_f(\Theta, V_m) = \begin{cases} S_f(\Theta, V_m), \text{ φαινόμενη ισχύς} \\ P_f(\Theta, V_m), \text{ ενεργός ισχύς} \\ I_f(\Theta, V_m), \text{ ρεύμα} \end{cases} \quad (3.31)$$

όπου το I_f ορίζεται στην (3.9), το S_f στη (3.15), $P_f = \Re\{S_f\}$ και το διάνυσμα των ορίων ροής F_{max} έχει τις κατάλληλες μονάδες ανάλογα με το είδος του περιορισμού. Παρόμοια διαμορφώνεται και το $F_t(\Theta, V_m)$.

Οι περιορισμοί των μεταβλητών (3.26) περιλαμβάνουν έναν περιορισμό ισότητας στη γωνία οποιουδήποτε ζυγού αναφοράς και ανώτατα και κατώτατα όρια στα μέτρα των τάσεων όλων των ζυγών καθώς και στις παραγωγές ενεργού και άεργου ισχύος των γεννητριών:

$$\theta_i^{ref} \leq \theta_i \leq \theta_i^{ref}, \quad i \in I_{ref} \quad (3.32)$$

$$v_m^{i,min} \leq v_m^i \leq v_m^{i,max}, \quad i = 1..n_b \quad (3.33)$$

$$p_g^{i,min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,max}, \quad i = 1..n_g \quad (3.34)$$

$$q_g^{i,min} \leq q_g^i \leq q_g^{i,max}, \quad i = 1..n_g \quad (3.35)$$

3.4.2 Εκτεταμένη διατύπωση της ΒΡΦ

Το MATPOWER χρησιμοποιεί μια επεκτάσιμη δομή της ΒΡΦ ώστε να επιτρέψει στο χρήστη να τροποποιήσει το πρόβλημα χωρίς να χρειαστεί να ξαναχρησιμοποιήσει τμήματα κοινά με την κανονική ΒΡΦ. Αυτό κατορθώνεται μέσω προαιρετικών παραμέτρων εισόδου, διατηρώντας τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί προ-μεταγλωττισμένους επιλυτές. Η τυπική διατύπωση έχει τροποποιηθεί με την εισαγωγή από το χρήστη επιπρόσθετων κοστών f_u , περιορισμών και μεταβλητών z και μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\min_x f(x) + f_u(x, z) \quad (3.36)$$

με περιορισμούς:

$$g(x) = 0 \quad (3.37)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3.38)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.39)$$

$$l \leq A \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \leq u \quad (3.40)$$

$$z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.41)$$

3.4.3 Συνήθειες επεκτάσεις

Εκτός από το να παρέχει στους τελικούς χρήστες αυτή την επεκτάσιμη μορφή της ΒΡΦ, το MATPOWER έχει τη δυνατότητα να παρέμβει στο εσωτερικό της ώστε να εκμεταλλευθεί ορισμένες επιπρόσθετες δυνατότητες.

1) Τμηματικά γραμμικά κόστη (Piecewise Linear Costs): Η διατύπωση της κανονικής ΒΡΦ (3.23)-(3.26) δεν μπορεί να διαχειριστεί άμεσα τις μη-ομαλές συναρτήσεις τμηματικού γραμμικού κόστους που προκύπτουν συνήθως από διακριτές προσφορές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν τέτοιες συναρτήσεις κόστους, όμως, είναι κυρτές, τότε μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας μια μέθοδο περιορισμένου μεταβλητού κόστους (CCV). Η συνάρτηση τμηματικά γραμμικού κόστους $c(x)$ αντικαθίσταται από μια βοηθητική μεταβλητή και ένα σύνολο περιορισμών που σχηματίζουν μια κυρτή «δεξαμενή» που απαιτεί το μεταβλητό κόστος να βρίσκεται πάνω από τη γραφική παράσταση της συνάρτησης $c(x)$.

Μια κυρτή συνάρτηση τμηματικά γραμμικού κόστους n τμημάτων

$$c(x) = \begin{cases} m_1(x - x_1) + c_1, & x \leq x_1 \\ m_2(x - x_2) + c_2, & x_1 < x \leq x_2 \\ \vdots \\ m_n(x - x_n) + c_n, & x_{n-1} \leq x \end{cases} \quad (3.42)$$

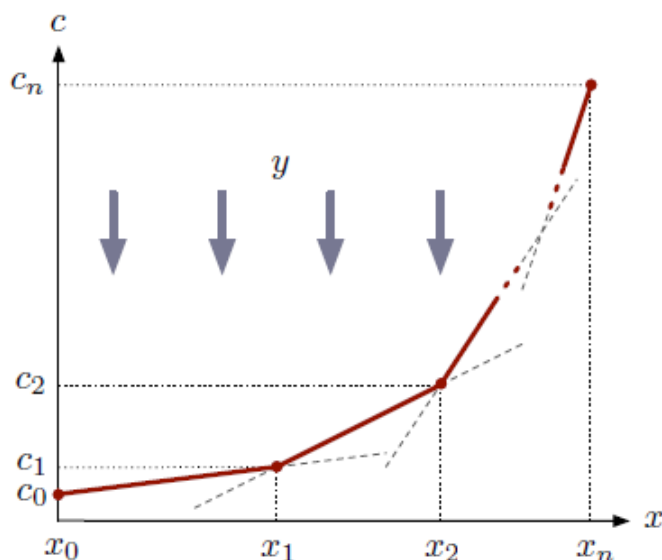
μπορεί να οριστεί από μια ακολουθία σημείων (x_j, c_j) , $j = 0 \dots n$, όπου το m_j δηλώνει την κλίση του j -οστού στοιχείου

$$m_j = \frac{c_j - c_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}, \quad j = 1 \dots n \quad (3.43)$$

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

Η «δεξαμενή» που αντιστοιχεί σε αυτήν την συνάρτηση κόστους σχηματίζεται από τους ακόλουθους περιορισμούς στη βοηθητική μεταβλητή κόστους:

$$y \geq m_j(x - x_j) + c_j, \quad j = 1 \dots n \quad (3.44)$$



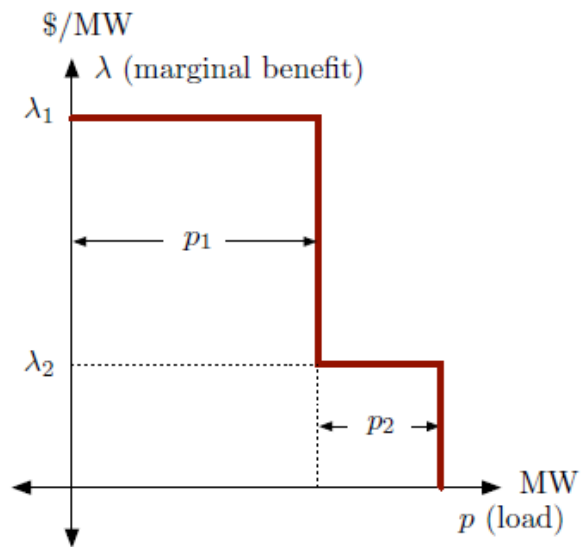
Σχήμα 3.2: Περιορισμένη μεταβλητή κόστους

Ο όρος κόστους που προστέθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση στη θέση του $c(x)$ είναι απλά η μεταβλητή y . Για μια AC ή DC βέλτιστη ροή φορτίου, το MATPOWER χρησιμοποιεί αυτή την προσέγγιση CCV εσωτερικά για να δημιουργήσει αυτόματα την κατάλληλη βοηθητική μεταβλητή, τον όρο του κόστους και το αντίστοιχο σύνολο περιορισμών για οποιαδήποτε τμηματικά γραμμικά κόστη των γεννητριών.

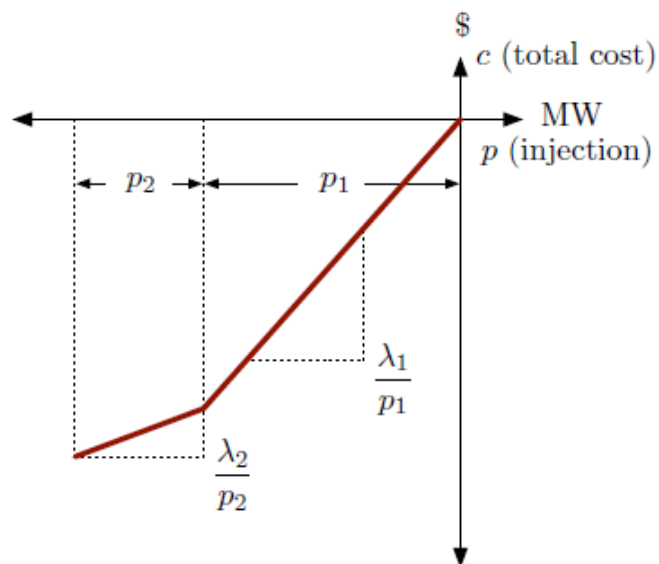
2) Ελεγχόμενα φορτία (Dispatchable Loads): Μια απλή προσέγγιση για τα καταναμεημένα ή τα ευαίσθητα στην τιμή φορτία είναι να μοντελοποιηθούν ως αρνητικές εγχύσεις ενεργού ισχύος με τα σχετικά αρνητικά κόστη. Αυτό γίνεται ορίζοντας μια γεννήτρια με αρνητική παραγωγή, της οποίας η ελάχιστη δυνατή παραγωγή είναι ίση με την αντίθετη τιμή του μέγιστου δυνατού φορτίου (αρνητικό) και η μέγιστη δυνατή είναι ίση με μηδέν. Με αυτό το μοντέλο, αν το αρνητικό κόστος αντιστοιχεί σε όφελος για την κατανάλωση, ελαχιστοποιώντας το κόστος $f(x)$ της παραγωγής ισοδυναμεί με μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας. Με ένα μοντέλο AC δικτύου, υπάρχει επίσης το ζήτημα της αποσύνδεσης λόγω άεργου ισχύος για τέτοια φορτία. Στο MATPOWER, θεωρείται ότι τα ελεγχόμενα φορτία διατηρούν σταθερό συντελεστή ισχύος και προστίθεται αυτόματα ένας περιορισμός ισότητας ώστε να ενισχύσει αυτήν την απαίτηση για κάθε γεννήτρια με

αρνητική παραγωγή που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ενός ρυθμιζόμενου φορτίου.

Έστω ένα παράδειγμα φορτίου ευαίσθητου στην τιμή, του οποίου η συνάρτηση οριακού οφέλους φαίνεται στο σχήμα (3.3). Η ζήτηση p_d του φορτίου θα είναι μηδέν για τιμές πάνω από λ_1 , p_1 για τιμές μεταξύ λ_1 και λ_2 , και $p_1 + p_2$ για τιμές μικρότερες από λ_2 . Αυτό αντιστοιχεί σε μια αρνητική γεννήτρια με καμπύλη τμηματικά γραμμικού κόστους που φαίνεται στο σχήμα (3.4). Η προσέγγιση αυτή υποθέτει ότι τα τμήματα της ζήτησης μπορούν να αποσυνδεθούν εν μέρει ή να χωριστούν.

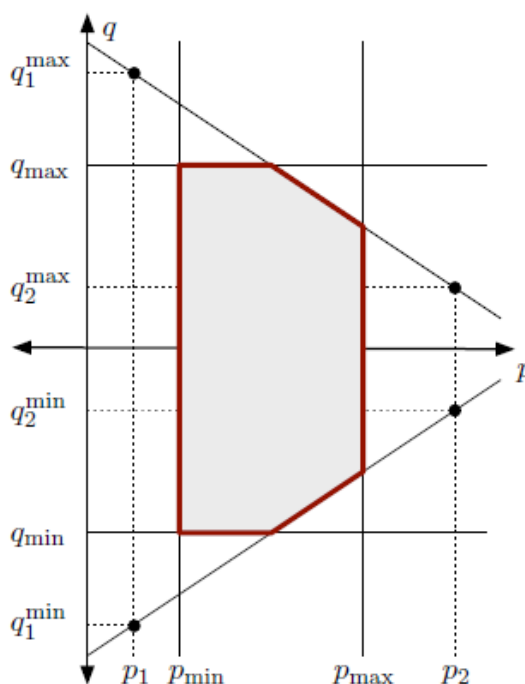


Σχήμα 3.3.: Οριακό όφελος



Σχήμα 3.4.: Συνάρτηση συνολικού κόστους για αρνητική έγχυση

3) Διαγράμματα P-Q γεννητριών (capability curves): Η τυπική διατύπωση της AC ΒΡΦ περιλαμβάνει απλούς περιορισμούς όσον αφορά στις εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος. Παρόλα αυτά, τα πραγματικά διαγράμματα P-Q των φυσικών γεννητριών περιλαμβάνουν συνήθως ένα συμβιβασμό μεταξύ της ικανότητας ενεργού και άεργου ισχύος, έτσι ώστε δεν μπορεί ταυτόχρονα να έχουν μέγιστη παραγωγή ενεργού και μέγιστη (ή ελάχιστη) παραγωγή άεργου ισχύος. Αν ο χρήστης παρέχει τις παραμέτρους που καθορίζουν αυτόν το συμβιβασμό για μια γεννήτρια, το MATPOWER κατασκευάζει αυτόματα τους αντίστοιχους περιορισμούς. Στο σχήμα (3.5) η σκιασμένη περιοχή αποτελεί την εφικτή περιοχή λειτουργίας της μονάδας.



Σχήμα 3.5.: Διάγραμμα P-Q γεννήτριας

4) Όρια διαφοράς γωνιών των κλάδων(Branch Angle Difference Limits): Η διαφορά μεταξύ της γωνίας της τάσης του ζυγού θ_f στο ένα άκρο του κλάδου και της γωνίας θ_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.

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το MATPOWER γεννήθηκε από την ανάγκη ύπαρξης ενός μηχανισμού εκκαθάρισης των δημοπρασιών ηλεκτρικής ενέργειας, βασισμένου σε μια βέλτιστη ροή φορτίου, για μια «έξυπνη αγορά». Σε αυτό το πλαίσιο, προσφορές για πώληση και προσφορές για αγορά ενέργειας από γεννήτριες και φορτία καθορίζουν τα κόστη για τη ΒΡΦ που καθορίζει τη διανομή και τις τιμές που χρησιμοποιούνται για την εκκαθάριση της δημοπρασίας. Το MATPOWER περιλαμβάνει κώδικα που λαμβάνει τις προσφορές για ενεργό και άεργο ισχύ, σχεδιάζει και εκτελεί την αντίστοιχη ΒΡΦ και επιστρέφει τις εκκαθαρισμένες προσφορές για αγορά και πώληση. Η κανονική ΒΡΦ που περιγράφηκε προηγουμένως δεν περιλαμβάνει μηχανισμό που να της επιτρέπει να απενεργοποιεί εντελώς γεννήτριες των οποίων η λειτουργία κοστίζει αρκετά. Αντ' αυτού, αυτές περιορίζονται στην ελάχιστη δυνατή παραγωγή τους. Το MATPOWER έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει μια ΒΡΦ σε συνδυασμό με αποσύνδεση κάποιας μονάδας για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, το οποίο του επιτρέπει να απενεργοποιήσει τις ακριβές μονάδες και να βρει μια λύση με μικρότερο κόστος, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο παρόμοιο με δυναμικό προγραμματισμό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι θεμιτός ο περαιτέρω περιορισμός της λύσης της ΒΡΦ με την απαίτηση να διατηρηθεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό της παραγωγικής ικανότητας σαν εφεδρεία για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων αναγκών. Το MATPOWER περιλαμβάνει επίσης επεκτάσεις της ΒΡΦ που του επιτρέπουν την από κοινού βελτιστοποίηση ενέργειας και αποθεματικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.1 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

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.

4.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

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:

$$F = k_1 * \frac{P_{losses}^{\muετά}}{P_{losses}^{\alphaρχικά}} + k_2 * \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{\muετά} - V_{ref}|}{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{\alphaρχικά} - V_{ref}|} \quad (4.1)$$

Οι παράμετροι k_1 και k_2 αποτελούν δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι καθορίζουν σε ποιον από τους δύο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης θα δίνεται μεγαλύτερη σημασία σε κάθε πρόβλημα. Το άθροισμα τους ισούται με τη μονάδα, δηλαδή ισχύει $k_1 + k_2 = 1$.

4.3 Εύρεση της βέλτιστης λύσης με χρήση του τροποποιημένου αλγορίθμου PCLOALG

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

$$A = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6] \quad (4.2)$$

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 N 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 $V_i^{\alphaρχικά}$ και οι απώλειες ενεργού ισχύος $P_{losses}^{\alphaρχικά}$ 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 βέλτιστη ροή φορτίου για κάθε particle ξεχωριστά και υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης F_{off} με βάση τη σχέση (4.1). Έπειτα αυτά ταξινομούνται με βάση το ποιο έχει πετύχει καλύτερη λύση, δηλαδή την μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Από το σύνολο των particles διατηρούνται τα μισά που έχουν πετύχει την καλύτερη λύση. Μετά την ταξινόμηση ανανεώνεται η ταχύτητα και η θέση των particles σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

$$v_{i,new} = v_{i,old} + c_1 * rand() * (A_{x,best} - A_{pop2,i}) + c_2 * rand() * (A_{g,best} - A_{pop2,i}) \quad (4.3)$$

$$A_{pop2,i} = A_{pop2,i} + v_{i,new} \quad (4.4)$$

, όπου $v_{i,new}$ και $v_{i,old}$ η καινούργια και η παλιά ταχύτητα αντίστοιχα, c_1 και c_2 δύο θετικές σταθερές, $A_{pop2,i}$ ο ταξινομημένος πίνακας που περιέχει τα $N/2$ particles, $A_{x,best}$ η βέλτιστη λύση για κάθε ένα από τα αντισώματα και $A_{g,best}$ η συνολική βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί. Αμέσως μετά, πραγματοποιείται ξανά μετατόπιση των ζυγών των particles, όπου αυτό χρειάζεται, έτσι ώστε να βρίσκονται εντός των ορίων των αντίστοιχων ζωνών. Στη συνέχεια, εκτελείται μία βέλτιστη ροή φορτίου με τις νέες θέσεις των αντισωμάτων και υπολογίζονται οι τάσεις, οι απώλειες και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης F_{pop2} με χρήση της σχέσης (4.1), με βάση τις οποίες γίνεται ξανά ταξινόμηση.

Μετά την ταξινόμηση, τα αντισώματα υπόκεινται σε ένα τελεστή κλωνοποίησης και έτσι για κάθε ένα από αυτά παράγεται ένας αριθμός κλώνων με βάση την παρακάτω σχέση:

$n_c = round(\frac{b*n}{i})$, όπου b μια θετική σταθερά, i η θέση του αντισώματος-γονιού και n μια παράμετρος που ελέγχει τον αριθμό των κλώνων.

Έτσι δημιουργείται ένας πίνακας $A_{pop2clone}$ που περιέχει το σύνολο των κλώνων. Όπως και προηγουμένως, εκτελείται η αντίστοιχη βέλτιστη ροή φορτίου και υπολογίζονται οι τάσεις, οι απώλειες και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης $F_{pop2clone}$ από τη σχέση (4.1).

Στη συνέχεια, στα αντισώματα-κλώνους εφαρμόζεται ο συντελεστής υπερμετάλλαξης με τις εξής σχέσεις:

$$A_{mut_1} = A_{mut_1} + a * N(0,1) \quad (4.5)$$

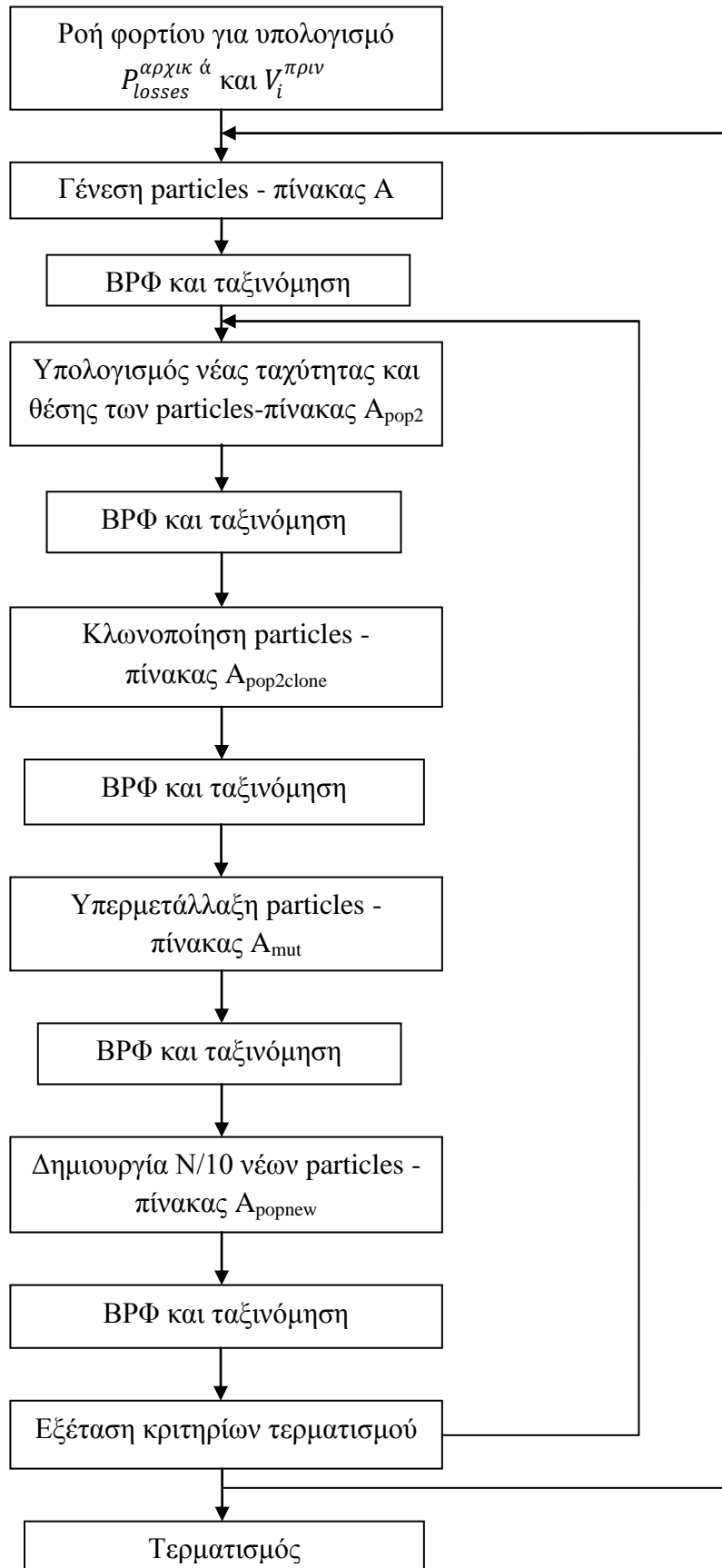
$$a = \frac{1}{b_1} * \exp(-F_{pop2clone}) \quad (4.6)$$

Με το $N(0,1)$ συμβολίζεται μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με μονάδα, με $F_{pop2clone}$ η αντικειμενική συνάρτηση κάθε αντισώματος και η b_1 είναι μια θετική σταθερά. Εισάγεται ξανά το τμήμα που μετατοπίζει, αν είναι απαραίτητο, τους ζυγούς στα particles ώστε αυτοί να βρίσκονται εντός των ορίων των αντίστοιχων ζωνών. Εκτελείται μία ακόμη βέλτιστη ροή φορτίου για τα νέα particles, υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης F_{mut} από τη σχέση (4.1) και ακολουθεί ταξινόμηση με βάση τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου εφαρμόζεται στα σωματίδια ο τελεστής διόρθωσης υποδοχέων. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται $N/10$ νέα particles τα οποία αντικαθιστούν τον αντίστοιχο αριθμό των παλιών που είχαν τη χειρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Παρόμοια με τα προηγούμενα στάδια, οι ζυγοί μετατοπίζονται, όπου είναι απαραίτητο, ώστε να βρίσκονται εντός των ορίων των ζυγών. Έτσι δημιουργείται ένας πίνακας $A_{propnew}$ που περιλαμβάνει τα προηγούμενα $9 \cdot N/10$ particles συν τα $N/10$ που προέκυψαν μετά την αντικατάσταση. Τελικά, υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών, οι απώλειες και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης $F_{propnew}$ με τη σχέση (4.1) για τον πίνακα αυτόν με την εκτέλεση μιας βέλτιστης ροής φορτίου και ταξινομούνται.

Η καλύτερη λύση που πέτυχε το κάθε particle αποθηκεύεται στον πίνακα $A_{x,best}$ ενώ η ολική βέλτιστη λύση που πέτυχε ο αλγόριθμος αποθηκεύεται στον πίνακα $A_{g,best}$. Ο αλγόριθμος εκτελεί ένα συγκεκριμένο αριθμό εξωτερικών επαναλήψεων που καθορίζεται από το χρήστη και έναν επίσης καθορισμένο αριθμό εσωτερικών επαναλήψεων ο οποίος όμως μπορεί να διακοπεί αν ο αλγόριθμος ικανοποιεί ορισμένα κριτήρια τερματισμού.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής που περιλαμβάνει συνοπτικά τα βήματα του τροποποιημένου αλγορίθμου:



Σχήμα 4.1.: Διάγραμμα ροής τροποποιημένου αλγορίθμου PCLONALG

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

5.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για το πρόβλημα που θα εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρείται το δίκτυο διανομής που απεικονίζεται στο σχήμα 5.1. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από έναν ζυγό τροφοδοσίας, 69 ζυγούς συνολικά και 68 κλάδους. Το συνολικό του φορτίο είναι 4.014 MW και 2.845 MVAR και η φόρτιση των γραμμών διανομής είναι 10 MVA. 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 5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα του δικτύου.

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:

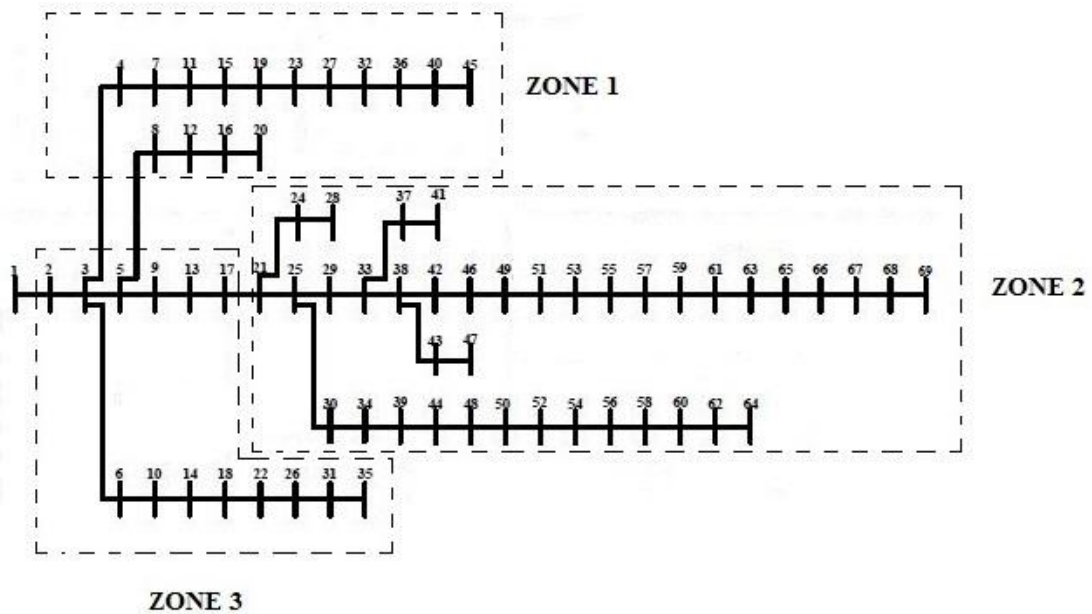
[4,7,8,11,12,15,16,19,20,23,27,32,36,40,45]

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 διανομής 69 ζυγών

Στο παραπάνω δίκτυο συνδέονται επίσης τέσσερις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DG), με δεδομένη και κοινή για όλες τις μονάδες μέγιστη παραγωγή και σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.9 επαγωγικό, στους ζυγούς 35,45,64 και 69. 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 p.u. αντίστοιχα, οι γωνίες των τάσεων κυμαίνονται από -360° έως 360° , ενώ τα θερμικά όρια των γραμμών είναι ίσα με 3MVA.

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

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 5.1.: Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών

Η αντικειμενική συνάρτηση που θα βελτιστοποιηθεί, όπως τονίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η ακόλουθη:

$$F = k_1 * \frac{P_{losses}^{\muετα}}{P_{losses}^{\alphaρχικα}} + k_2 * \frac{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{\muετα} - V_{ref}|}{\sum_{i=1}^{69} |V_i^{\alphaρχικα} - V_{ref}|} \quad (5.1)$$

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση του υβριδικού αλγορίθμου PCLONALG. Ο αλγόριθμος τερματίζει μετά από 400 εξωτερικές επαναλήψεις. Εσωτερικά τερματίζει είτε σε 30 επαναλήψεις είτε εάν επί 15 συνεχόμενες φορές η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτυγχάνεται διαφέρει με την αμέσως προηγούμενη τιμή λιγότερο από 0.01.

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε κάθε προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 400 αντισώματα, ενώ οι τιμές των παραμέτρων ορίστηκαν ως $c_1=c_2=1.7$, $b=3$ και $b_1=1000$.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση Η/Υ που έχει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: Intel® Core (TM) i3-3120M CPU @ 2.50 GHz- 2.50 GHz
- Μνήμη RAM: 4 GB
- Λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows 8.1

5.1.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για το δίκτυο του σχήματος (5.1) για διάφορα σενάρια. Σε κάθε σενάριο αυτά που μεταβάλλονται είναι οι τιμές των k_1 , k_2 της αντικειμενικής συνάρτησης, το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης και η μέγιστη παραγόμενη ενεργός ισχύς των DG. Οι συνδυασμοί κάθε σεναρίου είναι οι ακόλουθοι:

- $k_1 = k_2 = 0.5$ για $P_{DGmax} = 1.2/1.5$ MW
- $k_1 = 0.2$, $k_2 = 0.8$ για $P_{DGmax} = 1.2/1.5$ MW
- $k_1 = 0.8$, $k_2 = 0.2$ για $P_{DGmax} = 1.2/1.5$ MW

Ο καθένας από τους παραπάνω συνδυασμούς εκτελέστηκε για καθεμία από τις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης (0.12 MW / 0.21 MW / 0.5 MW) και έτσι εκτελέστηκαν συνολικά 18 προσομοιώσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά με τη βοήθεια πινάκων τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου:

Σενάριο 1

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=k_2=0.5$
- $P_{DGmax}=1.2 \text{ MW}$

Σε κάθε πίνακα φαίνονται κατά σειρά: το φορτίο των σταθμών ταχείας φόρτισης, οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησής τους, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, οι ενεργές απώλειες και η παραγωγή των γεννητριών στη βέλτιστη περίπτωση. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου:

$P_{DGmax}=1.2 \text{ MW}$				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[27,32,68,69,3, 5]	0.25463	0.05784	$P_{gσταθ.}=2.4430$ $P_{DG(35)}=0.0284$ $P_{DG(45)}=0.2465$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=0.8748$
0.21	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$
0.5	[40,45,21,69,31,35]	0.36429	0.07375	$P_{gσταθ.}=2.8785$ $P_{DG(35)}=0.7908$ $P_{DG(45)}=1.0556$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.1637$

Πίνακας 5.2.: Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου

Σενάριο 2

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=k_2=0.5$
- $P_{DGmax}=1.5 \text{ MW}$

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης:

$P_{DGmax}=1.5 \text{ MW}$				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[4,8,68,69,2,3]	0.21526	0.05276	$P_{gσταθ.}=2.3594$ $P_{DG(35)}=0.0272$ $P_{DG(45)}=0.1007$ $P_{DG(64)}=1.4578$ $P_{DG(69)}=0.8430$
0.21	[4,8,68,69,3,35]	0.21894	0.05361	$P_{gσταθ.}=2.5734$ $P_{DG(35)}=0.2008$ $P_{DG(45)}=0.1113$ $P_{DG(64)}=1.4573$ $P_{DG(69)}=0.9858$
0.5	[40,45,68,69,2,35]	0.26814	0.06378	$P_{gσταθ.}=2.8547$ $P_{DG(35)}=0.4339$ $P_{DG(45)}=0.8560$ $P_{DG(64)}=1.4888$ $P_{DG(69)}=1.4453$

Πίνακας 5.3.: Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου

Σενάριο 3

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=0.2$, $k_2=0.8$
- $P_{DGmax}=1.2$ MW

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης:

$P_{DGmax}=1.2$ MW				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[27,32,68,69,3,5]	0.26886	0.05784	$P_{gσταθ.}=2.4430$ $P_{DG(35)}=0.0284$ $P_{DG(45)}=0.2465$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=0.8748$
0.21	[7,23,68,69,31,35]	0.27368	0.05957	$P_{gσταθ.}=2.5747$ $P_{DG(35)}=0.3318$ $P_{DG(45)}=0.2062$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0218$
0.5	[40,45,21,69,31,35]	0.40620	0.07374	$P_{gσταθ.}=2.8785$ $P_{DG(35)}=0.7908$ $P_{DG(45)}=1.0556$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.1637$

Πίνακας 5.4.: Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου

Σενάριο 4

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=0.2$, $k_2=0.8$
- $P_{DGmax}=1.5$ MW

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης:

$P_{DGmax}=1.5$ MW				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[4,8,68,69,2,5]	0.21807	0.05276	$P_{gσταθ.}=2.3594$ $P_{DG(35)}=0.0272$ $P_{DG(45)}=0.1007$ $P_{DG(64)}=1.4572$ $P_{DG(69)}=0.8431$
0.21	[4,8,68,69,3,35]	0.22192	0.05361	$P_{gσταθ.}=2.5737$ $P_{DG(35)}=0.2007$ $P_{DG(45)}=0.1110$ $P_{DG(64)}=1.4573$ $P_{DG(69)}=0.9858$
0.5	[19,45,68,69,31,35]	0.27045	0.06746	$P_{gσταθ.}=2.8783$ $P_{DG(35)}=0.7281$ $P_{DG(45)}=0.5492$ $P_{DG(64)}=1.4783$ $P_{DG(69)}=1.4484$

Πίνακας 5.5.: Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου

Σενάριο 5

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=0.8$, $k_2=0.2$
- $P_{DGmax}=1.2$ MW

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης:

$P_{DGmax}=1.2$ MW				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[4,45,68,69,2,35]	0.24041	0.05781	$P_{gσταθ.}=2.4092$ $P_{DG(35)}=0.1249$ $P_{DG(45)}=0.1855$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=0.8730$
0.21	[40,45,68,69,2,35]	0.24481	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5479$ $P_{DG(35)}=0.1977$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0144$
0.5	[40,45,21,69,2,35]	0.32222	0.07144	$P_{gσταθ.}=2.8784$ $P_{DG(35)}=0.6081$ $P_{DG(45)}=1.2000$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.1999$

Πίνακας 5.6.: Αποτελέσματα πέμπτου σεναρίου

Σενάριο 6

Οι τιμές των μεταβλητών σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- $k_1=0.8$, $k_2=0.2$
- $P_{DGmax}=1.5$ MW

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις τρεις τιμές του φορτίου των σταθμών ταχείας φόρτισης:

$P_{DGmax}=1.5$ MW				
$P_{Dcharger}$ (MW)	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)
0.12	[4,45,64,69,2,3]	0.21015	0.05162	$P_{gσταθ.}=2.3154$ $P_{DG(35)}=0.0251$ $P_{DG(45)}=0.1864$ $P_{DG(64)}=1.5000$ $P_{DG(69)}=0.7595$
0.21	[4,45,64,69,3,35]	0.21465	0.05192	$P_{gσταθ.}=2.5437$ $P_{DG(35)}=0.1982$ $P_{DG(45)}=0.2428$ $P_{DG(64)}=1.5000$ $P_{DG(69)}=0.8421$
0.5	[40,45,68,69,2,35]	0.26004	0.06378	$P_{gσταθ.}=2.8541$ $P_{DG(35)}=0.4340$ $P_{DG(45)}=0.8564$ $P_{DG(64)}=1.4889$ $P_{DG(69)}=1.4453$

Πίνακας 5.7.: Αποτελέσματα έκτου σεναρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PCLONALG

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ορισμένων προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, στις οποίες μεταβάλλοντας τις βασικές παραμέτρους του αλγορίθμου PCLONALG, έγινε προσπάθεια να καταγραφεί η επίδραση της κάθε μεταβλητής στο αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ανάλυση ευαισθησίας είναι οι παράμετροι των τριών βασικών σταδίων του αλγορίθμου, δηλαδή:

- οι δύο θετικές παράμετροι c_1 και c_2 του σταδίου ανανέωσης της ταχύτητας των particles
- οι παράμετροι b και n του σταδίου παραγωγής των κλώνων των particles
- ο συντελεστής b_1 του σταδίου της υπερμετάλλαξης

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Για την ανάλυση της ευαισθησίας επιλέχθηκε ένα από τα σενάρια που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ειδικότερα, επιλέχθηκε η περίπτωση όπου:

- $k_1=k_2=0.5$, $P_{DGmax}=1.2$ MW και $P_{Dcharger}=0.21$ MW

6.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Όσον αφορά στο πρώτο σκέλος εκτελέστηκαν τρεις προσομοιώσεις με κοινές τις εξής τιμές παραμέτρων:

- 400 αντισώματα
- $b=3$
- $n=50$
- $b_1=1500$

Σε κάθε μία από αυτές τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί c_1 και c_2 :

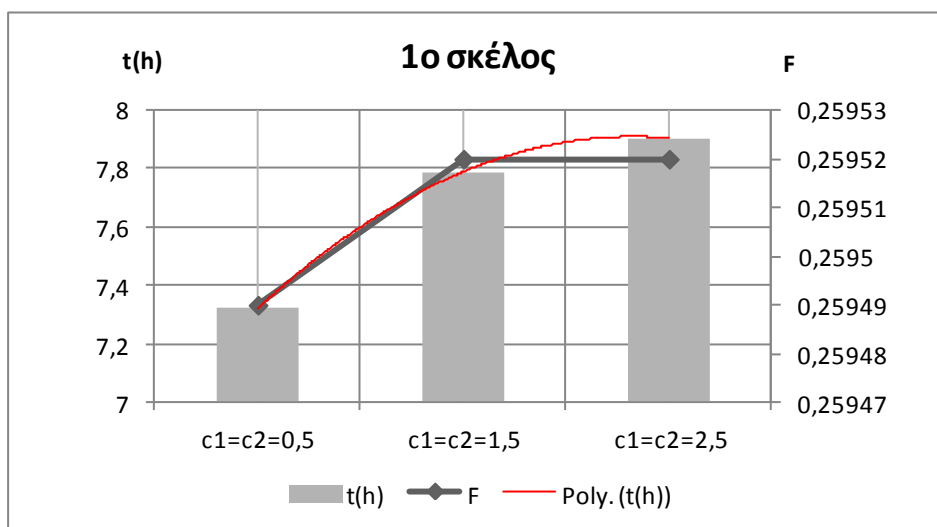
- $c_1=c_2=2.5$

- $c_1=c_2=1.5$
- $c_1=c_2=0.5$

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και στο σχήμα 6.1:

$P_{DGmax}=1.2 \text{ MW}$, $P_{Dcharger}=0.21 \text{ MW}$					
	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση F	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)	Χρόνος t(s)
$c_1=c_2=2.5$	[40,45,68,69,2,35]	0.25952	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5479$ $P_{DG(35)}=0.1977$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0144$	28455
$c_1=c_2=1.5$	[40,45,68,69,2,35]	0.25952	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5479$ $P_{DG(35)}=0.1977$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0144$	28040
$c_1=c_2=0.5$	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	26357

Πίνακας 6.1.: Αποτελέσματα πρώτου σκέλους προσομοιώσεων



Σχήμα 6.1.: Γραφική παράσταση ($F, t(h)$) – c_1, c_2)

Παρατηρείται ότι στην τρίτη περίπτωση ($c_1=c_2=0.5$) ο αλγόριθμος πετυχαίνει καλύτερη λύση, καθώς έχει μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία είναι και η βέλτιστη και πετυχαίνει και μικρότερο χρόνο σύγκλισης. Αυτό είναι λογικό γιατί με τις μεγαλύτερες τιμές των c_1 και c_2 είναι πιθανόν ο αλγόριθμος κατά την μετατόπιση των particles να προσπεράσει ορισμένες καλές λύσεις και να μην καταφέρει να συγκλίνει στη βέλτιστη.

6.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΛΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για το δεύτερο σκέλος διατηρείται ο συνδυασμός που πέτυχε την καλύτερη λύση στο πρώτο σκέλος. Επομένως εκτελέστηκαν τρεις προσομοιώσεις με κοινές τις εξής τιμές παραμέτρων:

- 400 αντισώματα
- $c_1=c_2=0.5$
- $b_1=1500$

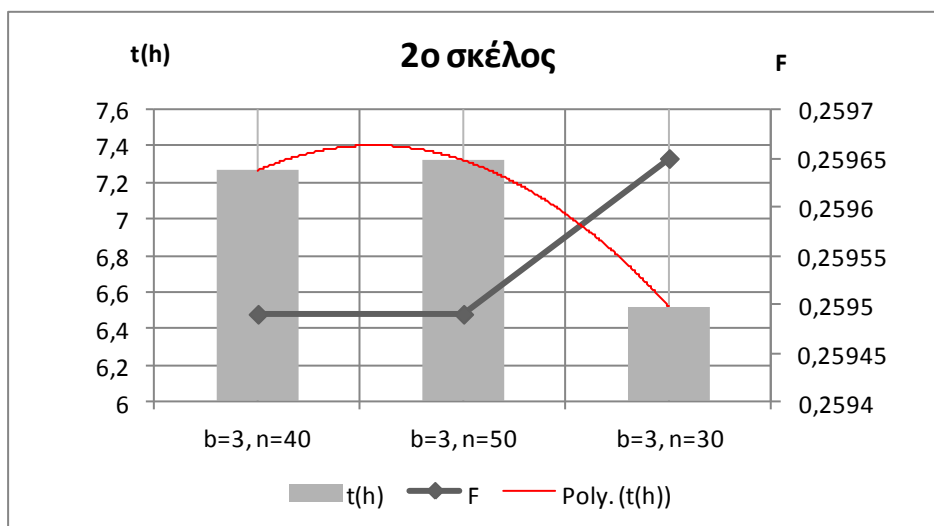
Σε κάθε μία από τις προσομοιώσεις του δεύτερου σκέλους χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί b και n :

- $b=3$ και $n=30$
- $b=3$ και $n=40$
- $b=3$ και $n=50$

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2 και στο σχήμα 6.2:

$P_{DGmax}=1.2 \text{ MW} , P_{Dcharger}=0.21 \text{ MW}$					
	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση F	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)	Χρόνος t(s)
b=3, n=30	[40,45,68,69,10,35]	0.25965	0.05891	$P_{gσταθ.}=2.5449$ $P_{DG(35)}=0.2005$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	23467
b=3, n=40	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	26157
b=3, n=50	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	26357

Πίνακας 6.2.: Αποτελέσματα δεύτερου σκέλους προσομοιώσεων



Σχήμα 6.2.: Γραφική παράσταση (F, t(h) – b,n)

Παρατηρείται ότι στην δεύτερη περίπτωση (b=3, n=40) ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση και πετυχαίνει μικρότερο χρόνο σε σχέση με την τρίτη περίπτωση (b=3,

$n=50$) η οποία και αυτή συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Οπότε επιλέγεται ο δεύτερος συνδυασμός των b , n για να χρησιμοποιηθεί στο τρίτο σκέλος των προσομοιώσεων.

6.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΥΠΕΡΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ

Για το τρίτο σκέλος διατηρείται ο συνδυασμός που πέτυχε την καλύτερη λύση στο δεύτερο σκέλος. Επομένως εκτελέστηκαν τρεις προσομοιώσεις με κοινές τις εξής τιμές παραμέτρων:

- 400 αντισώματα
- $c_1=c_2=0.5$
- $b=3$, $n=40$

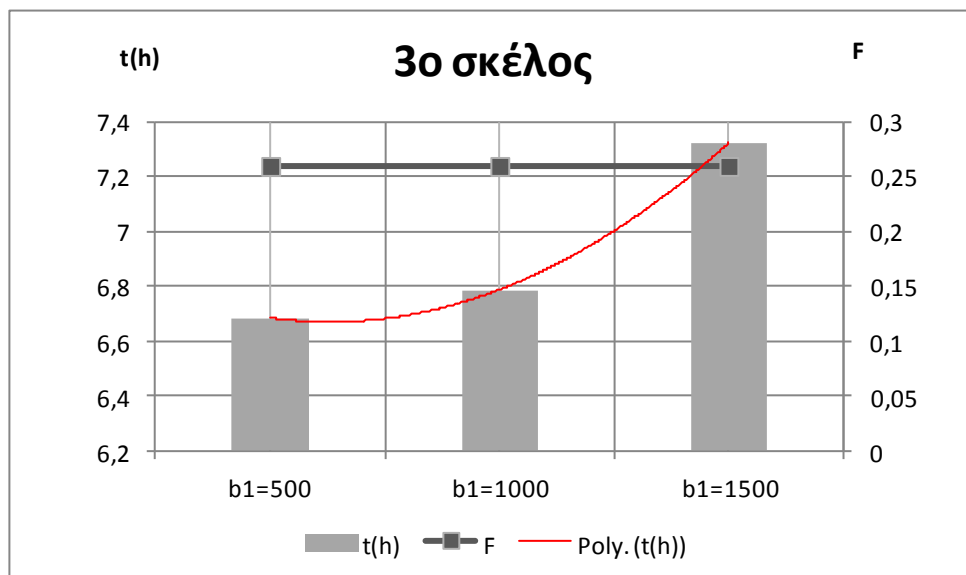
Σε κάθε μία από τις προσομοιώσεις του τρίτου σκέλους χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές της παραμέτρου b_1 :

- $b_1=500$
- $b_1=1000$
- $b_1=1500$

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3 και στο σχήμα 6.3:

$P_{DGmax}=1.2 \text{ MW} , P_{Dcharger}=0.21 \text{ MW}$					
	Βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης	Αντικειμενική συνάρτηση F	Ενεργές απώλειες (MW)	Παραγωγή γεννητριών (MW)	Χρόνος t(s)
$b_1=500$	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	24067
$b_1=1000$	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	24435
$b_1=1500$	[40,45,68,69,3,35]	0.25949	0.05887	$P_{gσταθ.}=2.5473$ $P_{DG(35)}=0.1981$ $P_{DG(45)}=0.3738$ $P_{DG(64)}=1.2000$ $P_{DG(69)}=1.0146$	26357

Πίνακας 6.3.: Αποτελέσματα τρίτου σκέλους προσομοιώσεων



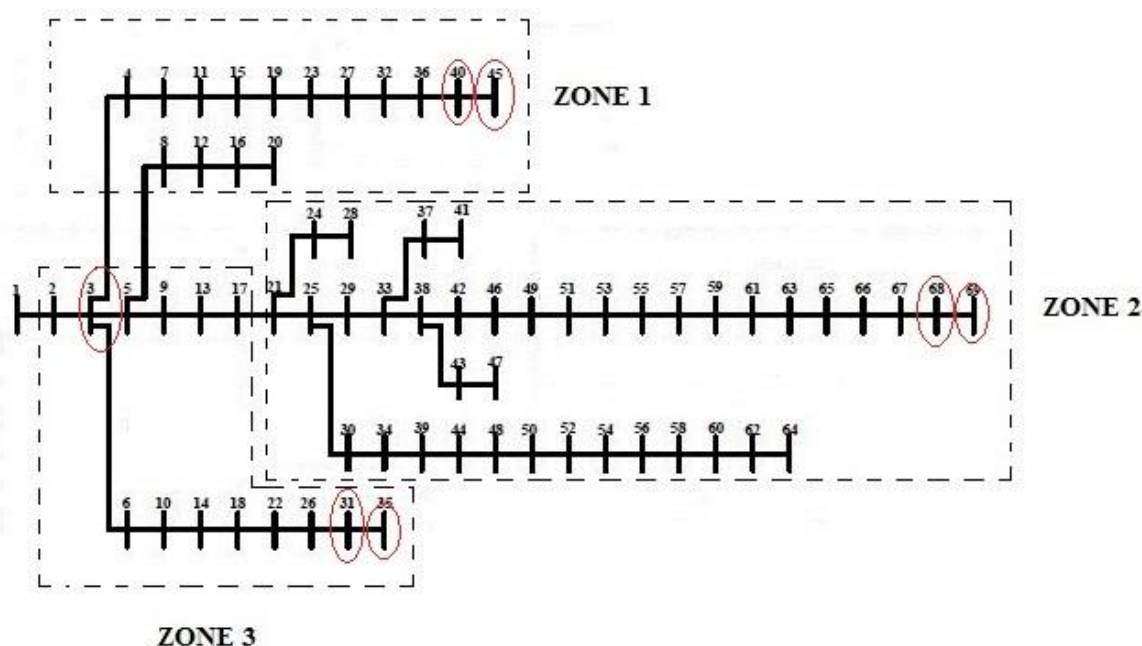
Σχήμα 6.3.: Γραφική παράσταση (F, t(h) – b_1)

Και στις τρεις περιπτώσεις, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3, ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση, απλά υπάρχει μια μικρή διαφορά στο χρόνο σύγκλισης. Παρατηρείται ότι με μικρότερη τιμή του b_1 ο χρόνος σύγκλισης είναι μικρότερος αντίστοιχα.

Οι παράμετροι c_1 , c_2 και b, n έχουν μεγάλη επίδραση στη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση και στο χρόνο τον οποίο αυτή επιτυγχάνεται αντίστοιχα. Ειδικότερα, οι παράμετροι κλωνοποίησης b, n είναι αυτοί που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τόσο την επιτυχία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, όσο και το χρόνο σύγκλισης στη λύση. Αυτό συμβαίνει διότι οι παράμετροι αυτές καθορίζουν το πλήθος των κλώνων που παράγονται για κάθε particle, ανάλογα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του. Επομένως, μεγάλες τιμές των παραμέτρων κλωνοποίησης εξασφαλίζουν περισσότερους κλώνους για τα αντισώματα εκείνα που επιτυγχάνουν τις καλύτερες λύσεις και αντίστοιχα περισσότερες πιθανότητες εύρεσης της ολικής βέλτιστης λύσης. Παράλληλα όμως, τέτοιες τιμές αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό τον υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος, διότι χρειάζεται να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλοι υπολογισμοί για ένα μεγαλύτερο πλήθος αντισωμάτων. Ωστόσο, τα ποσοστά επιτυχίας και ο υπολογιστικός χρόνος κάθε προβλήματος εξαρτώνται και από την πολυπλοκότητα αυτού, ενώ ιδιαίτερα ο χρόνος εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως ο υπολογιστής στον οποίον εκτελείται ο αλγόριθμος.

6.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στο σχήμα 6.4 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 6.4.: Ηλεκτρικό δίκτυο 69 ζυγών

Είναι προφανές ότι οι ζυγοί στους οποίους τοποθετούνται οι σταθμοί ταχείας φόρτισης συμπίπτουν τις περισσότερες φορές είτε με τους ζυγούς στους οποίους είναι εγκατεστημένες οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είτε σε ζυγούς κοντινούς στο ζυγό ταλάντωσης. Λόγω του μεγάλου φορτίου που έχουν οι σταθμοί, τοποθετούνται είτε σε ζυγούς όπου υπάρχει παραγωγή είτε σε πολύ κοντινούς σε αυτούς ώστε να ικανοποιούνται τα τεχνικά κριτήρια του δικτύου, δηλαδή οι ελάχιστες απώλειες ενεργού ισχύος και οι τάσεις των ζυγών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαιο 1

- [1] W. El-Khattam, M.M.A. Salama, “Distributed generation technologies, definitions and benefits”, Electric Power Systems Research, 2004
- [2] A. F. Zobaa, C. Cecati, “A Comprehensive Review on Distributed Power Generation”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006
- [3] J. A. Pecas Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins, “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities”, Electric Power Systems Research, 2007
- [4] Ευδοκία Ν. Καφφέ, “Εφαρμογή του μοντέλου DER-CAM για διεσπαρμένη παραγωγή με μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού και επίδραση της φορολογίας άνθρακα», Διπλωματική Εργασία Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου, 2009
- [5] University of Cyprus, Department of Electrical And Computer Engineering, “ΗΜΥ 445/681 Εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή”
- [6] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, M. Suter, “Network integration of distributed power generation”, Journal of Power Sources, 2002
- [7] <http://www.dg.history.vt.edu/ch1/introduction.html>
- [8] C.C. Chan, Y.S. Wong, “Electric Vehicles Charge Forward”, IEEE power & energy magazine, 2004
- [9] C.E. (Sandy) Thomas, “Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared”, International Journal of Hydrogen Energy 34, 2009
- [10] C.C. Chan, “The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles, Proceedings of the IEEE vol. 90, 2002
- [11] Απόστολος Β. Μπελόκας, Διπλωματική Εργασία “Ανάλυση της ενσωμάτωσης των διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων ως διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης στα συστήματα διαχείρισης ενέργειας των κτιρίων με χρήση του λογισμικού GAMS”, Διπλωματική Εργασία Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου, 2011
- [12] C. Botsford, A. Szczepanek, “Fast charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles”, EVS24, 2009
- [13] Mehdi Etezadi-Amoli, Kent Choma, Jason Stefani, “Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations”, IEEE transactions on power delivery, 2010
- [14] Murat Yilmaz, Philip T. Krein, “Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles”, IEEE transactions on power delivery, 2012
- [15] H. Hoimoja, A. Rufer, G. Dzielichiaruk, A. Vezzini, “An Ultrafast EV Charging Station Demonstrator, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012
- [16] Rodrigo Garcia- Valle, Joao A. Pecas Lopes, “Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks”, Springer, 2013

- [17] Κ. ΒΕΛΙΤΣΙΚΑΚΗΣ, Δ. ΚΑΠΑΡΟΣ-ΤΣΑΦΟΣ, “V2G: Τα ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά ενέργειας”, Διπλωματική εργασία Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 2010
- [18] Daan Bakker, “Battery Electric Vehicles: Performance, CO₂ emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development”, Thesis, Universiteit Utrecht, 2010
- [19] Αλεξάνδρα Σ. Ζίγκηρη, “ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ PSO ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ”, Διπλωματική εργασία Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 2012

Κεφάλαιο 2

- [20] Δ. Περδίκης, “Τεχνητά Ανοσοποιητικά Συστήματα”, Διπλωματική Εργασία Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 2006
- [21] Leandro Nunes de Castro, Fernando J. Von Zuben, “The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications, Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications, 2000
- [22] Jason Brownlee, “CLONAL SELECTION THEORY & CLONALG: THE CLONAL SELECTION CLASSIFICATION ALGORITHM (CSCA)”, Technical Report, 2005
- [23] Leandro Nunes de Castro, Fernando J. Von Zuben, “Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems, 2002
- [24] Jason Brownlee, “Clonal Selection Algorithms”, Technical Report, 2007
- [25] Qinghai Bai, “Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithm”, Computer and Information Science, 2010
- [26] Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, “Particle Swarm Optimization: Developments, Application and Resources”, IEEE, 2001
- [27] Ricardo Poli, James Kennedy, Tim Blackwell, “Particle Swarm Optimization: An overview”, Springer Science + Business Media, LLC 2007
- [28] LIU Li-jue, CAI Zi-xing, CHEN Hong, “Immunity clone algorithm with particle swarm evolution”, Springer, 2006
- [29] <http://www.cleveralgorithms.com/nature-inspired/immune.html>
- [30] Leandro Nunes de Castro, Fernando J. Von Zuben, “Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems, 2002
- [31] K.S. Pandya, S.K. Joshi, “A SURVEY OF OPTIMAL POWER FLOW METHODS”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2008
JATIT

- [32] R.V. AMARNATH, Dr. N. V. RAMANA, “STATE OF ART IN OPTIMAL POWER FLOW SOLUTION METHODOLOGIES”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2011
- [33] M.A. Abido, “Optimal power flow using particle swarm optimization”, Electrical Power and Energy Systems, 2002
- [34] Florin Capitanescu, Mevludin Glavic, Louis Wehenkel, “An interior- point method based optimal power flow”, Third International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering, 2005

Κεφάλαιο 3

- [35] 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
- [36] Daniel Zimmerman, Carlos Edmundo Murillo- Sanchez, “MATPOWER 4.1 User’s Manual”, 2011