



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Επίλυση του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου με Κατανεμημένο Αλγόριθμο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΥΛΟΣ ΣΧΟΙΝΑΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2015



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

Επίλυση του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου με Κατανεμημένο Αλγόριθμο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΥΛΟΥ ΣΧΟΙΝΑ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

Ιουλίου 2015

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

Αθήνα, Ιούνιος 2015

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΥΛΟΣ ΣΧΟΙΝΑΣ

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

© 2015 – All rights reserved

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η επίλυση του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου με κατανεμημένο τρόπο. Οι κατανεμημένες προσεγγίσεις διαφόρων προβλημάτων κερδίζουν το ενδιαφέρον της διεθνούς ερευνητικής κοινότητας και έτσι μία τέτοια προσέγγιση στο Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής φαντάζει υποσχόμενη. Το πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα βελτιστοποίησης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για συγκεκριμένα επίπεδα παραγωγής ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική προτείνεται ένας τρόπος επίλυσης, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα μοντέλο συναίνεσης και λειτουργεί κατανεμημένα. Θεωρείται πολυωνυμική συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης για τη μοντελοποίηση της συνάρτησης κόστους των γεννητριών. Σε αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση κεντρικής επίλυσης του προβλήματος, η παρούσα προσέγγιση επιτρέπει τις γεννήτριες να ενημερώνονται για την υπολειπόμενη ή περισσευούμενη παραγωγή. Η υπολογιζόμενη διαφορά παραγωγής-κατανάλωσης ανατροφοδοτείται στον αλγόριθμο και χρησιμοποιείται ώστε οι γεννήτριες να προσαρμόσουν τα επίπεδα παραγωγής τους με το βέλτιστο οικονομικά τρόπο. Επιλέγοντας το οριακό κόστος κάθε γεννήτριας ως τη μεταβλητή συναίνεσης, ο αλγόριθμος δύναται να λύσει το πρόβλημα με κατανεμημένο τρόπο. Γίνεται χρήση πινάκων για την απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου. Εξηγείται η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου τόσο σε μορφή αλγορίθμου, όσο και σε περιβάλλον MATLAB. Μέσα από προσομοιώσεις δικτύων και διαφόρων σεναρίων εκτιμάται η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου επηρεάζοντας διάφορες παραμέτρους του αλγορίθμου όπως οι διαφορετικές τοπολογίες κ.α., καθώς και διάφορα επιμέρους στοιχεία του. Γίνονται συγκρίσεις με συμβατικές μεθόδους επίλυσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά: Κατανεμημένοι αλγόριθμοι, Οικονομική Κατανομή Φορτίου, Μοντέλο Συναίνεσης, Ευφυή Δίκτυα, Οριακό Κόστος

Abstract

The aim of this dissertation is to solve the Economic Dispatch Problem (EDP) in a distributed manner. On the contrary to the traditional centralized implementations of the EDP, distributed approaches become more and more interesting. The Economic Dispatch Problem is an important optimization problem for the economic operation of the power system. It aims at minimizing the total cost of the generators for a given power output. This dissertation proposes a way of solving the EDP, using a consensus protocol. Quadratic cost function is assumed for the formulation of the generators' cost. Unlike the conventional centralized approach to the ED problem, this approach allows generators to be collectively informed about the power generation and demand mismatch. The estimated mismatch is fed back in the algorithm and is thereafter used so the generators can adjust their power output levels. By selecting the Incremental Cost of each generator as the consensus variable, the algorithm can solve the EDP in a distributed fashion. Matrixes are used to indicate the various network topologies. The process of developing the Incremental Cost Consensus model into an algorithm is demonstrated. Through simulations the algorithm's efficacy and efficiency are estimated, as well as other of its important elements. The sensitivity of the algorithm's performance is studied such as the communication topology and others. Results of the conventionally approached and the distributed ones are compared.

Key Words: Distributed algorithms, Economic Dispatch Problem, Consensus algorithms, Smart Grids, Incremental Cost

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ανάθεση της διπλωματικής, καθώς ήταν και υπεύθυνος για την εκπόνηση της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης τον κ. Ιάσονα Κουβελιώτη-Λυσικάτο, για τη στήριξη, τις συμβουλές καθώς και για τη γενικότερη καλή συνεργασία που είχαμε χωρίς την οποία, η διαδικασία συγγραφής αυτής της διπλωματικής θα ήταν σίγουρα πιο επίπονη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους σε οποιαδήποτε προσπάθεια μου και ιδιαίτερα τον παππού μου, ο οποίος αν και περνάει μία δύσκολη συγκυρία είναι ο πιο σπουδαίος άνθρωπος που έχω γνωρίσει.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| 1. Εισαγωγή..... | 15 |
| 1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..... | 15 |
| 1.2 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)..... | 17 |
| 1.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή..... | 23 |
| 1.3.1 Σύνδεση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο Δίκτυο..... | 29 |
| 1.4 Δίκτυα Διανομής..... | 32 |
| 2. Οικονομική Κατανομή Φορτίου..... | 35 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 35 |
| 2.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες-Όρια Μονάδων Παραγωγής..... | 36 |
| 2.3 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου..... | 40 |
| 2.3.1 Γραφική επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου..... | 42 |
| 2.4 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με λειτουργικά όρια | 42 |
| 2.5 Αλγόριθμος επαναλήψεων Λάμδα | 44 |
| 2.6 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με απώλειες μεταφοράς..... | 45 |
| 2.6.1 Εξίσωση Απωλειών με τη μέθοδο των B-συντελεστών..... | 47 |
| 3. Μοντέλο Consensus..... | 49 |
| 3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο..... | 49 |
| 3.1.1 Θεωρία Γράφων..... | 50 |
| 3.1.2 Αλγόριθμος Συναίνεσης..... | 51 |
| 3.2 Διατύπωση Προβλήματος..... | 52 |
| 3.2.1 Συμβατική Προσέγγιση..... | 53 |
| 3.2.2 Αποκεντρωμένη Προσέγγιση..... | 53 |
| 4. Αλγόριθμος..... | 57 |
| 4.1 Απλή Μορφή-Χωρίς Περιορισμούς Παραγωγής Γεννητριών..... | 57 |
| 4.2 Ολοκληρωμένη Μορφή-Με Περιορισμούς Λειτουργίας Γεννητριών..... | 58 |

| | |
|---|------------|
| 4.3 Αναλυτική Παρουσίαση Αλγορίθμου..... | 59 |
| 4.3.1 Αρχικοποίηση..... | 59 |
| 4.3.2 Κυρίως Αλγόριθμος..... | 60 |
| 4.4 Ανάπτυξη Αλγορίθμου σε περιβάλλον MATLAB..... | 65 |
| 4.5 Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου..... | 66 |
| 5. Παραδείγματα Εφαρμογών..... | 67 |
| 5.1 Παράδειγμα κατανεμημένης επίλυσης προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου..... | 67 |
| 5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Κατανεμημένου Αλγορίθμου με το κλασσικό Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής..... | 70 |
| 5.2.1 Δίκτυο Πλήρους Επικοινωνίας..... | 71 |
| 5.2.2 Δίκτυο Ακτινικής Μορφής..... | 74 |
| 5.3 Απαιτούμενος Αριθμός Επαναλήψεων για Σύγκλιση για διαφορετικές τοπολογίες του Δικτύου Επικοινωνίας..... | 77 |
| 5.4 Μεταβολή Σφάλματος με την αύξηση του φορτίου..... | 86 |
| 5.5 Πολυπλοκότητα..... | 88 |
| 5.6 Μεταβολή Σύγκλισης για Διαφορετικά ε..... | 91 |
| 6. Προσομοίωση Δικτύων..... | 95 |
| 6.1 Εισαγωγή..... | 95 |
| 6.2 Η διαδικασία της προσομοίωσης..... | 95 |
| 6.3 Προσομοίωση Πρώτη..... | 96 |
| 6.4 Προσομοίωση Δεύτερη..... | 100 |
| 7. Συμπεράσματα-Μελλοντική Εργασία..... | 105 |
| 7.1 Εισαγωγή..... | 105 |
| 7.2 Συμπεράσματα..... | 105 |
| 7.3 Μελλοντική εργασία..... | 106 |
| 8. Βιβλιογραφία..... | 107 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ορίζονται ως οι μη ορυκτές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η βιομάζα, τα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, τα βιοαέρια, η γεωθερμική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια που αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (Ν.3468/2006).[1]

Σύμφωνα με τον Ν. 2773/1999, όπως τροποποιήθηκε από τον Ν. 3468/2006, ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ είναι η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από: (α) την εκμετάλλευση αιολικής ή ηλιακής ενέργειας ή βιομάζας ή βιοαερίου, (β) την εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού γεωθερμικού δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, (γ) την εκμετάλλευση ενέργειας από τη θάλασσα, (δ) την εκμετάλλευση υδάτινου δυναμικού με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΥΗΕ) ισχύος μέχρι 15 ΜWe (όπως τροποποιήθηκε η παρ. 4 του άρθρου 27 του Ν. 3468/2006 από το άρθρο 17 του Ν. 3489/2006), (ε) το συνδυασμό των ανωτέρω, (στ) τη συμπαραγωγή, με χρήση των πηγών ενέργειας, των (α), (β) και συνδυασμό τους, (ζ) υβριδικούς σταθμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν κυρίως ΑΠΕ και δευτερευόντως συμβατικές πηγές ενέργειας ή τροφοδοτούνται από το Δίκτυο ή το Σύστημα, κατά το μέρος που η ενέργεια αυτή παράγεται από ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την πλήρωση των συστημάτων αποθήκευσης του σταθμού, εφόσον αυτή παράγεται από ΑΠΕ και εξαιρουμένης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα συστήματα αυτά.

Τα έργα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα έργα δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευής υποσταθμών και εν γένει κάθε κατασκευής που αφορά την υποδομή και εγκατάσταση σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, χαρακτηρίζονται σύμφωνα με το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο (παρ. 9 του άρθρου 2 του Ν. 2941/01), ως εγκαταστάσεις «δημόσιας ωφέλειας».

Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ δεν παράγει ρυπογόνες εκπομπές καθώς δεν προϋποθέτει την καύση ορυκτών καυσίμων. Είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον ήλιο και τα φυσικά φαινόμενα και κατά συνέπεια εξαρτάται από την περιοδικότητα ή την στοχαστικότητα αυτών των φαινομένων. Βασικό ζητούμενο που αφορά τις ΑΠΕ είναι η αύξηση του ποσοστού διείσδυσής τους στην ηλεκτροπαραγωγή, κάτι που παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες και

προαπαιτούμενα: ενδεχόμενη ανάγκη αναβάθμισης του δικτύου, ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλά χρηματικά ποσά για τη δημιουργία μονάδων παραγωγής που εκμεταλλεύονται τις διάφορες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

Το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικό, πολύ μεγαλύτερο από την συνολική παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Η χρήση των ανανεώσιμων ή εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι ακόμη πολύ περιορισμένη σε παγκόσμια κλίμακα (σύμφωνα με εκτιμήσεις του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ενέργειας (WEC) το 2010 οι ΑΠΕ αντιστοιχούσαν στο 18% του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος) αλλά η αξιοποίησή τους και η συνεχώς αυξανόμενη διεύθυνσή.

Το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ σε παγκόσμιο επίπεδο πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των διαδοχικών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων από τη χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας.

Λόγω του ιδιαίτερα υψηλού κόστους τους στην αρχή, ξεκίνησαν ως πειραματικές εφαρμογές. Άρχισαν να περιλαμβάνονται στα ερευνητικά προγράμματα για την ενέργεια των ανεπτυγμένων κρατών. Λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος, της ευρέως διαδεδομένης έρευνας των τεχνολογιών ΑΠΕ και της εξάπλωσής τους, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, το κόστος των ΑΠΕ μειώνεται συνεχώς καθιστώντας κάποιες τεχνολογίες, ειδικά την αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και τη βιομάζα, πλέον ανταγωνιστικές μπροστά στις παραδοσιακές πηγές ενέργειας (όπως τον άνθρακα και την πυρηνική ενέργεια). Πλέον λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στη χάραξη της ενεργειακής πολιτικής και στην ενίσχυση της περαιτέρω αξιοποίησής τους, ώστε να αυξηθεί το μικρό ποσοστό που κατέχουν στη συνολική ενεργειακή παραγωγή: σήμερα οι κυβερνήσεις παγκοσμίως θεσπίζουν εθνικούς στόχους για αύξηση της διεύθυνσης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, την μείωση των αερίων θερμοκηπίου και την εξοικονόμηση ενέργειας.[2]

1.2 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)

Με τον όρο έξυπνο δίκτυο χαρακτηρίζονται σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν παραγωγή, κατανάλωση καθώς και διανομή και μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες μονάδες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων καθώς και ο αυτόνομος και αποκεντρωμένος έλεγχος. Τα υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως το μεγάλο τους μέγεθος, είναι μονής κατεύθυνσης συγκεντρωμένα συστήματα στα οποία η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται από απομακρυσμένους σταθμούς παραγωγής και διανέμεται στους καταναλωτές μέσω ακτινικών δικτύων διανομής. Η τεχνολογική εξέλιξη, όμως, καθώς και περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα θέτουν καινούργιες απαιτήσεις για την αποδοτικότητα και αξιοπιστία των δικτύων, καθιστώντας τα υπάρχοντα παρωχημένα. Αν και το θέμα των έξυπνων δικτύων μπορεί να αντιμετωπιστεί από πολλές οπτικές υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά πρωταρχικής σημασίας όπως:

- Η εγκατάσταση και η αποτελεσματική χρήση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Η χρήση ψηφιακής πληροφορίας για τον έλεγχο, την προστασία και τη βελτιστοποίηση λειτουργίας του δικτύου.
- Η συμμετοχή των καταναλωτών σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας, επιτρέποντας λειτουργίες απόκρισης ζήτησης (demand-response)
- Η χρήση «ευφύων» μετρητικών συστημάτων, για την απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης και λειτουργίας του δικτύου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι αναγκαία η ανάπτυξη «έξυπνων συσκευών» (αισθητήρες, ευφυή μετρητικά συστήματα, ενσωματωμένα συστήματα κλπ.) τα οποία θα συλλέγουν σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των στοιχείων του δικτύου. Αυτός ο μεγάλος όγκος της ετερογενούς πληροφορίας θα πρέπει με ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο να μεταφέρεται στα διάφορα διανεμημένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνα για τη επεξεργασία της ληφθείσας πληροφορίας, για τον εντοπισμό ή πρόβλεψη πιθανών σφαλμάτων και για τον έλεγχο με στόχο τη βελτιστοποίηση λειτουργίας του συστήματος.

Για να γίνουν τα παραπάνω θεωρούμε ότι το σύστημα επικοινωνίας ενός έξυπνου δικτύου αποτελείται από δύο υποσυστήματα [3]:

- 1) Υποδομή επικοινωνίας (communication infrastructure)
- 2) Ενδιάμεση πλατφόρμα (middleware platform)

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η κυρίως υποδομή επικοινωνίας θα περιλαμβάνει δίκτυα και πρωτόκολλα τα οποία θα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του δικτύου καθώς και την αποστολή πληροφοριών και εντολών εντός του δικτύου. Βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος είναι η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία, η ταχύτητα και η ασφάλεια.

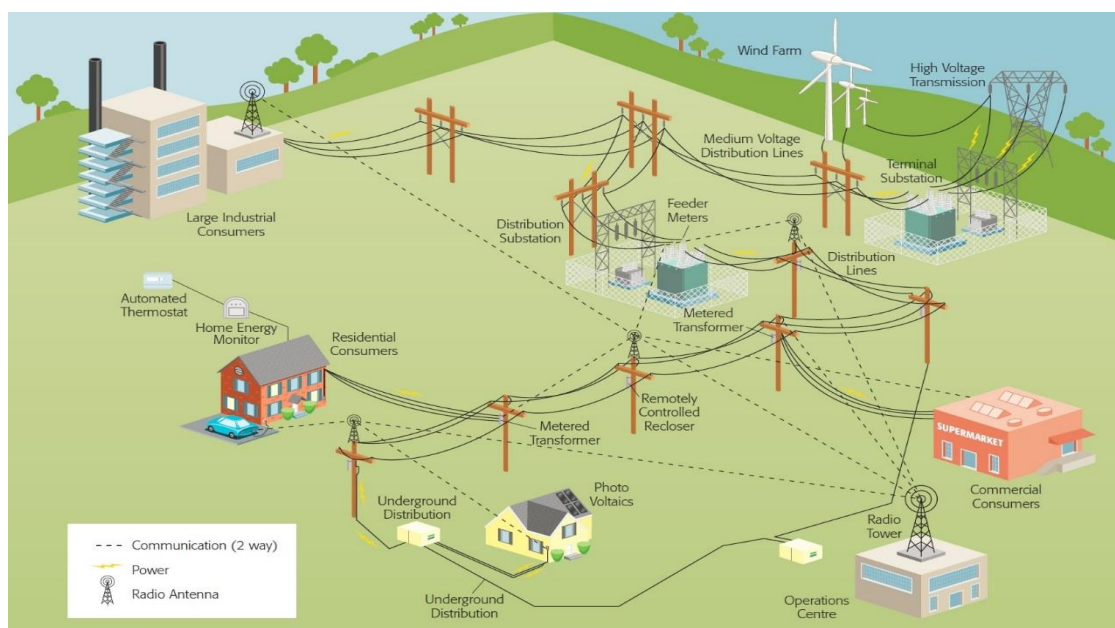
Η ενδιάμεση πλατφόρμα αποτελείται από ένα λογισμικό το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο επίπεδο επικοινωνίας και στην εκάστοτε εφαρμογή, παρέχοντας αναγκαίες υπηρεσίες για την δημιουργία ενός διανεμημένου συστήματος. Συγκεκριμένα, το λογισμικό αυτό υπάρχει σε κάθε «έξυπνη» συσκευή του δικτύου για να παρέχει

- 1) Υπηρεσίες διαχείρισης πληροφορίας(αποθήκευση, διαμοιρασμός, επεξεργασία κλπ.)
- 2) Προφίλ επικοινωνίας για διανεμημένες εφαρμογές
- 3) Δυνατότητες αυτόνομης διαχείρισης

Επιπλέον, βάσει όλων των παραπάνω, προκύπτει ότι ένα σημαντικό ζήτημα, είναι το θέμα της ασφάλειας σε επίπεδο πληροφορίας, συσκευών αλλά και επικοινωνίας, έτσι ώστε να υπάρχει ακεραιότητα και αυθεντικότητα των δεδομένων, ενώ παράλληλα να διασφαλίζεται η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων είναι τα εξής:

- 1) Προχωρημένη Μετρητική υποδομή
- 2) Διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής
- 3) «Έξυπνα » μικροδίκτυα
- 4) Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων



Σχήμα 1.1: Μοντέλο Ευφυούς Δικτύου[4]

Αναλυτικότερα έχουμε:[3]

1) *Προχωρημένη Μετρητική Υποδομή (Advanced Metering Infrastructure-AMI)*

Οι εφαρμογές smart grids απαιτούν έλεγχο σε πραγματικό χρόνο κάθε στοιχείου του δικτύου. Για αυτό το λόγο στα έξυπνα δίκτυα πρέπει να ενσωματωθεί μια εκτεταμένη αμφίδρομη μορφή επικοινωνίας που θα επιτρέπει κατανεμημένες εντολές ελέγχου και διαχείρισης. Ένα από τα βασικά στοιχεία αυτής επικοινωνίας είναι το AMI που χρησιμοποιείται για να διασυνδέσει τα «έξυπνα» μετρητικά συστήματα (smart meters), τα οποία έχουν τη δυνατότητα δικτύωσης και διαχείρισης δεδομένων και είναι εγκατεστημένα στους τελικούς καταναλωτές. Έτσι θα υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής πληροφοριών σχετικά με 1) την ποιότητα ισχύος 2) την παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής 3) την καταναλισκόμενη ενέργεια. Όλος αυτός ο όγκος δεδομένων μπορεί να αξιοποιηθεί για την έγκαιρη πρόγνωση αποτυχίας ώστε να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα (πχ δυναμική τιμολόγηση ενέργειας, προγραμματισμός φορτίων κλπ.) . Γενικότερα, ένα δίκτυο AMI, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για να διασυνδέσει «έξυπνα» μετρητικά συστήματα αλλά και για να διασυνδέσει έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές (intelligent electronic devices-IEDs). Όπως καταλαβαίνει κανείς, υπάρχει μεγάλος όγκος ετερογενών δεδομένων, από πολλές διαφορετικές πηγές και τίθεται το ερώτημα για τον τρόπο ανάλυσης και αποθήκευσης αυτών.

2) *Διεσπαρμένη Παραγωγή*

Τα τελευταία χρόνια το μοντέλο της συγκεντρωμένης παραγωγής κλονίζεται και παραχωρεί τη θέση του σε ένα αποκεντρωμένο μοντέλο παραγωγής, τη διεσπαρμένη παραγωγή. Η τάση αυτή κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος όσο η τεχνολογία των γεννητριών εξελίσσεται και προωθούνται συστήματα αποκεντρωμένης αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας, οι λεγόμενες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Energy Resources- DERs). Θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη διεσπαρμένη παραγωγή παρακάτω.

3) *Έξυπνα Μικροδίκτυα (Smart Micro-Grids-SMGs)*

Ένα μικροδίκτυο είναι ένα ενιαίο, αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο είναι διασυνδεδεμένες διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, που ικανοποιούν διάφορα φορτία, τα οποία βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο. Ένα μικροδίκτυο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι αυτόνομο, δηλαδή, μπορεί να λειτουργήσει είτε διασυνδεδεμένο με το υπόλοιπο δίκτυο διανομής, είτε απομονωμένο (νησιδοποιημένο). Αυτό σημαίνει ότι ένα μικροδίκτυο πρέπει να έχει το δικό του σύστημα διαχείρισης, ώστε πρώτον να υποστηρίξει λειτουργίες ελέγχου της ροής ενέργειας και δεύτερον να συμμετάσχει στην αγορά ενέργειας για την πώληση αυτής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η έννοια του μικροδικτύου δεν είναι εντελώς καινούρια και

υπάρχουν αρκετά παραδείγματα εφαρμογής αυτών. Ένα παράδειγμα είναι τα βιομηχανικά μικροδίκτυα τα οποία παρέχουν ενέργεια υψηλής ποιότητας σε βιομηχανικά φορτία, όπως επίσης και τα «βοηθητικά» μικροδίκτυα, που καλύπτουν ανάγκες για ενέργεια σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή σε αγροτικές περιοχές. Ωστόσο μπορούμε να περιμένουμε σημαντική αύξηση των μικροδικτύων στο μέλλον γιατί από τη μία τα μικροδίκτυα φαίνονται ως η κατάλληλη τεχνολογία για την ανάπτυξη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και από την άλλη, το μοντέλο του μικροδικτύου φαίνεται ως η καλύτερη προσέγγιση για την επιτυχή διαχείριση της πολυπλοκότητας των εφαρμογών ελέγχου και διαχείρισης ενός ηλεκτρικού συστήματος. Πράγματι, ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ένα έξυπνο δίκτυο σε μικρή κλίμακα. Έτσι, πολλοί πιστεύουν ότι ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να προκύψει από την peer-to-peer διασύνδεση πολλών επιμέρους μικροδικτύων.

4) Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων

Η αύξηση της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων, έχει σημαντικές συνέπειες στα ηλεκτρικά δίκτυα, αφού με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται σημαντικά η ζήτηση ενέργειας. Μεγάλο μέρος της έρευνας που γίνεται πάνω σε αυτό το θέμα, επικεντρώνεται πάνω σε στρατηγικές ελέγχου για την επιλογή του τόπου και χρόνου φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος, ώστε να αποφεύγονται αιχμές φορτίου. Από την άλλη, ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε ένα έξυπνο δίκτυο. Συγκεκριμένα πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας τα αυτοκίνητα είναι παρκαρισμένα και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα πλήθος από ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούσαν να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Συνεπώς οι μπαταρίες τους θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως εφεδρικά αποθηκευτικά συστήματα ενέργειας. Έτσι, τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούσαν να παρέχουν στο δίκτυο μέρος της ενέργειας τους για να σταθεροποιήσουν την διακοπτόμενη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η καινούργια μέθοδος είναι γνωστή ως vehicle-to-grid (V2G). Πολλοί θεωρούν ότι η V2G τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής με την ιδιαιτερότητα ότι έχουν παραπάνω πολυπλοκότητα εφόσον είναι κινητές μονάδες.

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στις επικοινωνίες στα έξυπνα δίκτυα καθώς είναι σημαντικό κομμάτι της καινοτομίας που φέρνουν τα ευφυή δίκτυα.

Αρχικά πρέπει να τεθούν οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί ένα σύστημα επικοινωνίας για να καλύψει τις ανάγκες ενός έξυπνου δικτύου. Αυτές συνοψίζονται ως εξής[5]:

- Λανθάνων Χρόνος Φορτίου: Σε γενικές γραμμές οι περισσότερες λειτουργίες προστασίας και ελέγχου στα ΣΗΕ έχουν αυστηρούς περιορισμούς στην καθυστέρηση και απαιτούν γρήγορη διαβίβαση των πληροφοριών. Για παράδειγμα, οι IEDs σε υποσταθμούς πρέπει να στέλνουν διάφορες πληροφορίες σε συσκευές συλλογής δεδομένων σε 4 ms, ενώ οι μετρητικές συσκευές πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους και με τα κέντρα ελέγχου σε

λιγότερο από 8-12 ms. Αντίθετα, άλλες συσκευές έχουν μεγαλύτερη ανοχή σε χρονικές καθυστερήσεις, όπως για παράδειγμα τα περισσότερα smart meters στέλνουν τις μετρήσεις τους περιοδικά σε διαστήματα 15 λεπτών.

- Αξιοπιστία: Οι λειτουργίες ενός έξυπνου δικτύου απαιτούν πολύ υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Συγκεκριμένα το ποσοστό αξιοπιστίας πρέπει να φτάνει το 99,9999%, που αντιστοιχεί σε χρόνο διακοπής λιγότερο από 1 sec ανά έτος και απαιτεί κατάλληλες τεχνολογίες που υποστηρίζουν αξιόπιστες επικοινωνίες. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές δυνατότητες αποτυχίας του δικτύου (αποτυχία κόμβων, ασυνέπειες δρομολόγησης, υπερφόρτωση κλπ.) και έτσι απαιτούνται και διαφορετικές τεχνικές αντιμετώπισης κάθε μίας από αυτές. Ένας άλλος παράγοντας που εξασφαλίζει αξιοπιστία είναι ο «πλεονασμός». Δηλαδή, πολλαπλά αντίγραφα των μηνυμάτων, πολλαπλά μονοπάτια για την ίδια ροή πληροφορίας, πολλοί server για να επιτελεστεί μια εργασία. Τέλος, τα δεδομένα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την κρίσιμότητά τους, σε σημαντικά δεδομένα και δεδομένα που ανέχονται αποτυχίες, και έτσι το επικοινωνιακό σύστημα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση δεδομένων σε διάφορα επίπεδα προτεραιότητας.
- Ρυθμός δεδομένων: Το εύρος ζώνης των smart meters και άλλων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα δεν είναι τυπικά πολύ μεγάλο (κάθε ένα από αυτά απαιτεί περίπου 300 kbs). Όμως, οι ανάγκες του εύρους ζώνης αυξάνονται και έτσι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί κάθε IED κυμαίνεται από 10 kbs έως 100 kbs. Έτσι ο υψηλός ρυθμός δεδομένων του επικοινωνιακού καναλιού γίνεται επιτακτική ανάγκη, λόγω των πολλών IED που αναμένεται να συνδεθούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.
- Επεκτασιμότητα: Ένα ηλεκτρικό δίκτυο εξυπηρετεί κάθε μέρα όλο και πιο μεγάλο αριθμό καταναλωτών και ακόμα μεγαλύτερο αριθμό συσκευών. Έτσι η επεκτασιμότητα του επικοινωνιακού συστήματος αποτελεί πρωταρχική ανάγκη. Η επεκτασιμότητα μπορεί να διακριθεί σε επεκτασιμότητα φορτίων και έτσι το σύστημα πρέπει να υποστηρίξει αυξημένη κίνηση δεδομένων και αιτήσεις υπηρεσιών (service requests), και σε γεωγραφική επεκτασιμότητα γεγονός που απαιτεί δίκτυο ικανό να αναπτύσσεται και να διαμορφώνεται ώστε να είναι λειτουργικό. Κατανεμημένες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για να υποστηρίξουν υπηρεσίες internet, όπως για παράδειγμα peer-to-peer δίκτυα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και στα πλαίσια smart grid. Η δυσκολία για την επεκτασιμότητα του δικτύου επικοινωνίας προκύπτει από περιορισμένες δυνατότητες των συσκευών που απαρτίζουν το έξυπνο δίκτυο, σχετικά με την αποθήκευση, την επεξεργασία της πληροφορίας καθώς και στον επικοινωνιακό τομέα.

- Λειτουργικότητα: Λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών συσκευών, επικοινωνιακών τεχνολογιών και πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται σε ένα έξυπνο δίκτυο, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί λειτουργικότητα μεταξύ τους. Τόσο τα πρότυπα όσο και οι «ανοιχτές» αρχιτεκτονικές επικοινωνίας (πχ IP-based networks), συμβάλλουν στην λειτουργικότητα των διαφορετικών συσκευών και τεχνολογιών επικοινωνίας. Επιπλέον, εμφανίζεται η ανάγκη για στοιχεία του δικτύου που θα μεταφράζουν δεδομένα και υπηρεσίες στα διάφορα πρότυπα. Πρέπει να τονιστεί ότι η λειτουργικότητα είναι σημαντική τόσο σε επικοινωνιακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εφαρμογών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή ανταλλαγή και επεξεργασία δεδομένων.
- Ευελιξία: Η ευελιξία του επικοινωνιακού συστήματος ενός έξυπνου δικτύου, εμφανίζεται σε πολλά επίπεδα. Αρχικά, εμφανίζεται στην ικανότητα που πρέπει να έχει το σύστημα να υποστηρίζει ετερογενείς υπηρεσίες για τις εφαρμογές του smart grid, που έχουν διαφορετική προτεραιότητα και χρονικές απαιτήσεις. Από την άλλη η ευελιξία του συστήματος περιλαμβάνει και την ικανότητα παροχής διαφορετικών μοντέλων επικοινωνίας. Για παράδειγμα, επικοινωνίες Multipoint-to-point (MP2M) χρησιμοποιούνται σε συστήματα παρακολούθησης (monitoring) και απαιτούν την περιοδική και στιγμιαία συλλογή δεδομένων από διάφορους αισθητήρες. Αντίθετα, επικοινωνίες Point-to-Multipoint (P2MP) χρησιμοποιούνται για την αποστολή εντολών ελέγχου και ρύθμισης στις διάφορες συσκευές. Συνοψίζοντας η ευελιξία του επικοινωνιακού συστήματος είναι απαραίτητο χαρακτηριστικό, γιατί η ίδια η επικοινωνιακή υποδομή, καλείται να ανταπεξέλθει σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές.
- Ασφάλεια: Το επικοινωνιακό σύστημα ενός έξυπνου δικτύου πρέπει να χαρακτηρίζεται από ασφάλεια, σε πολλά επίπεδα. Αρχικά πρέπει να εξασφαλίζεται η ιδιωτικότητα των χρηστών όπως επίσης και να αποκλείεται η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στα δεδομένα. Επιπλέον πρέπει να διασφαλίζεται η ακεραιότητα των δεδομένων κατά την μεταφορά τους, δηλαδή να τροποποιούνται ή να χάνονται. Μερικοί μηχανισμοί ασφαλείας είναι η πιστοποίηση, η κρυπτογράφηση και η ανίχνευση εισβολής, και στοχεύουν στη πρόσληψη, ανίχνευση και ελαχιστοποίηση διάφορων επιθέσεων κατά του δικτύου.

1.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 50MW και είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο η ιδέα πίσω από όλο αυτό το σχέδιο δεν είναι καθόλου καινούρια. Η πηγή διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται απευθείας στο δίκτυο διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού στην πλευρά του καταναλωτή. Τις πρώτες μέρες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η διεσπαρμένη παραγωγή ήταν ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος παρείχαν ενέργεια μόνο σε καταναλωτές στην γειτονική τους περιοχή. Τα πρώτα δίκτυα ήταν βασισμένα σε dc τάση και έτσι η παροχή της τάσης ήταν περιορισμένη, όπως περιορισμένη ήταν και η απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον καταναλωτή. Η ζήτηση ενέργειας που υπήρχε σε κάποιες περιπτώσεις καλυπτόταν με τη χρήση τοπικών μέσων αποθήκευσης, όπως μπαταρίες, που μπορούσαν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο dc. Αυτή η μέθοδος μάλιστα τοπικής αποθήκευσης ενέργειας είναι κάτι άλλο, εκτός από τη διεσπαρμένη παραγωγή, το οποίο επανέρχεται στο προσκήνιο. Στη συνέχεια, η τεχνολογική εξέλιξη που σημειώθηκε, όπως η εμφάνιση των ac δικτύων, επέτρεψε τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και η εφαρμογή οικονομιών κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν σε μία μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου, στις μονάδες παραγωγής. Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες ανέσεις και μικρότερα κόστη, ενώ κατασκευάστηκαν μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα, αποτελούμενα από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις. Η ασφάλεια της παροχής αυξανόταν καθώς ενδεχόμενη αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής, ισοσταθμιζόταν από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου. [6]

Την τελευταία δεκαετία, τεχνολογικές καινοτομίες και ένα μεταβαλλόμενο και ρυθμιστικό οικονομικό περιβάλλον, είχαν σαν αποτέλεσμα να ανανεωθεί το ενδιαφέρον για τη διεσπαρμένη παραγωγή. Οι πέντε κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την εξέλιξη ήταν η ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής, οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές, που εκφράστηκε κατά κύριο λόγο μέσω του πρωτόκολλου του Κιότο .

Επίσης, τα τελευταία χρόνια, έχει δημιουργηθεί πολύ μεγάλο ενδιαφέρον γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), τις πηγές δηλαδή εκείνες που χρησιμοποιούν τους ανεξάντλητους φυσικούς πόρους, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ενδιαφέρον αυτό προέκυψε κατά κύριο λόγο από την απαίτηση της Ε.Ε. από τα κράτη μέλη της, για αύξηση του ποσοστού της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο 21% έως το 2010. Οι βασικότερες ΑΠΕ είναι οι:[7]

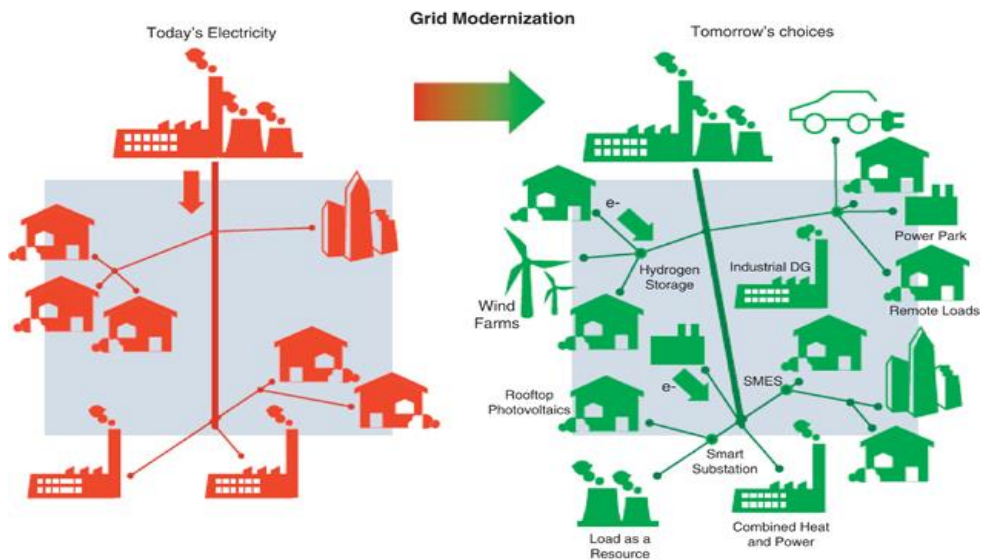
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- Υδροηλεκτρικές πηγές (μικρές πηγές)
- Βιομάζα (καύση δασικών και γεωργικών προϊόντων και άλλων καταλοίπων σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς)
- Αέρας (ανεμογεννήτριες)
- Ήλιος (φωτοβολταϊκά)
- Γεωθερμικές πηγές (παραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που είναι αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης)

Οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές αποτελούν γενικά και συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν και υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά μεγάλης κλίμακας και τα παράκτια αιολικά πάρκα.

Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, που η λειτουργία τους βασίζεται και στη χρήση ορυκτών καυσίμων. Αυτές είναι οι τουρμπίνες και οι μικροτουρμπίνες αερίου, οι εμβολοφόρες μηχανές και οι κυψέλες καυσίμου.

Οι εμβολοφόρες μηχανές είναι θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούν ένα ή περισσότερα έμβολα για να μετατρέψουν την κίνηση σε περιστρεφόμενη κίνηση. Το κάθε έμβολο βρίσκεται μέσα σε έναν κύλινδρο, στον οποίο εισάγεται ένα αέριο, το οποίο είτε είναι ήδη καυτό και υπό πίεση (μηχανή ατμού), ή θερμαίνεται μέσα στον κύλινδρο από ένα μίγμα αερίων καυσίμων (μηχανή εσωτερικής καύσης) ή μέσω επαφής με έναν καυτό εναλλάκτη θερμότητας μέσα στον κύλινδρο (μηχανή stirling).



Σχήμα 1.2: Εκσυγχρονισμός του ηλεκτρικού δικτύου [10]

Οι τυπικές χρήσεις της διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι εξής:

- Οικιακή (ηλεκτρισμός και θέρμανση)

- Εμπορική (ηλεκτρισμός και θέρμανση)
- Θερμοκήπια (ηλεκτρισμός θέρμανση και διοξείδιο του άνθρακα από τη γονιμοποίηση της σοδειάς)
- Βιομηχανική (ηλεκτρισμός και ατμός)
- Περιφερειακή θέρμανση (ηλεκτρισμός και θέρμανση μέσω του δικτύου διανομής θέρμανσης)
- Ισχύς δικτύου (μόνο ηλεκτρισμός που παρέχεται στο δίκτυο)

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ενσωμάτωση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι κυρίως τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά. Συγκεκριμένα [9]:

Περιβαλλοντικά:

■ Η εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αλλά και άλλων επιβλαβών αερίων όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου (SO_x, NO_x), συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τέτοιες μορφές ενέργειας δίνεται η δυνατότητα σε χώρες που έχουν αναλάβει υποχρεώσεις για μείωση των εκπομπών ρύπων, να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις αυτές.

■ Περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την μείωση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς, ένεκα της σωστής χωροθέτησης των σταθμών κατανεμημένης παραγωγής σε σχέση με την τοποθεσία και δυναμικότητα, μπορεί να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο το περιβαλλοντικό ισοζύγιο της κατανεμημένης παραγωγής.

Οικονομικά

■ Η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.

■ Η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταφοράς, όπως επίσης και το κόστος μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.

■ Ένα ακόμα οικονομικό όφελος είναι η αύξηση της σταθερότητας στην τιμή της

ηλεκτρικής ενέργειας, η μείωση της ζήτησης καυσίμου με μία επακόλουθη μείωση και στην τιμή τους και καθυστέρηση των αυξήσεων των τιμών ενέργειας γενικότερα.

■ Η διεσπαρμένη παραγωγή διασφαλίζει απτά οικονομικά οφέλη για τους καταναλωτές, όπως, μικρότερο συνολικό ενεργειακό κόστος ή αποφυγή υψηλών τιμολογίων κατά τη διάρκεια της αιχμής φορτίου.

■ Χρησιμοποιώντας όλο και περισσότεροι καταναλωτές ανανεώσιμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, μειώνεται το συνολικό φορτίο αιχμής της εταιρείας διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι δε χρειάζεται να γίνει καμιά αναβάθμιση του δικτύου (κόστος το οποίο επιβαρύνει τους καταναλωτές), αφού η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των ήδη υπάρχοντων γραμμών.

■ Από την επενδυτική σκοπιά του θέματος είναι πρακτικά πιο εύκολο να βρεθούν τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες παραγωγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

■ Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει επίσης πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που έχουν θερμικά φορτία μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής (αυξάνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος) καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, αλλά και σε εκείνους που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που ζούνε και μπορούν έτσι να αξιοποιήσουν ανανεώσιμες πηγές.

Τεχνικά:

■ Τα σημαντικότερα, οφέλη αξιοπιστίας που προσφέρει η διεσπαρμένη παραγωγή είναι υποστήριξη και σταθερότητα στην παροχή τάσης, αξιοπιστία άεργου ισχύος VAR, εφεδρεία για απρόβλεπτα φαινόμενα και δυνατότητα αυτόνομης εκκίνησης (black start).

■ Πέρα από το γεγονός ότι η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην αποσυμφόρηση των υπάρχοντων δικτύων, αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι υπό προϋποθέσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρική ισχύς, σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, καθώς και σε περιπτώσεις βύθισης τάσης, ώστε να ενισχυθεί η ποιότητα της ισχύος που παρέχεται τοπικά.

■ Βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης των δικτύων δεδομένου ότι πλέον περιορίζονται οι απαιτήσεις για την υπέρ-διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων.

Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα .Η εισαγωγή των αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, είναι πιθανό να οδηγήσει σε μερική αστάθεια του ενεργειακού προφίλ. Η αμφίδρομη ροή ισχύος και η σύνθετη διαχείριση ενέργειας, που απαιτεί η διεσπαρμένη παραγωγή, μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα και να οδηγήσουν σε έντονη διακύμανση της τάσης. Επιπρόσθετα, τα πιθανά βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις στο δίκτυο προέρχονται πλέον από πολλαπλές πηγές, το οποίο προκαλεί δυσκολίες στον εντοπισμό των εκάστοτε σφαλμάτων του δικτύου. Πιο αναλυτικά, τα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι :

■ Το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο για την εγκατάσταση της διεσπαρμένης παραγωγής είναι σχετικά μικρό, λόγω του μικρού μεγέθους, αλλά είναι σημαντικά υψηλό το αρχικό οικονομικό κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής τα κόστη κεφαλαίων μπορεί να ποικίλουν από 1000€/kW έως 20000€/kW στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα.

■ Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή 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 φυσικό αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.

■ Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με την κεντρική παραγωγή.

■ Ένα άλλο πρόβλημα έγκειται στη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων . Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος ή ο ήλιος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς η ισχύς εξόδου των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής εμφανίζει αρκετές δυσκολίες, ως προς την πρόβλεψη της, προκύπτουν επιζήμιες και δυσμενείς συνέπειες στους μετέχοντες σε αυτήν.

■ Όσον αφορά στις επιπτώσεις της διανεμημένης παραγωγής στο περιβάλλον γενικά οι τεχνολογίες κατανεμημένης παραγωγής περιγράφονται ως περιβαλλοντικά φιλικές σε σχέση με τις αντίστοιχες τεχνολογίες ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση όμως των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς, για κάθε τεχνολογία παραγωγής υπάρχουν έμμεσες και άμεσες εκπομπές ρύπων. Οι έμμεσες εκπομπές είναι εκπομπές ρύπων κατά τη διαδικασία κατασκευής της μονάδας, αναζήτησης και μεταφοράς των πηγών ενέργειας. Κάποιοι πιστεύουν πως η μεγάλη διείσδυση και χρήση σταθμών κατανεμημένης παραγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα τη υπολειτουργία των μεγάλων κεντρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι εκπομπές ανά παραγόμενη κιλοβατώρα. Άλλα στοιχεία τα οποία κάνουν δύσκολη την ενιαία περιβαλλοντική εκτίμηση, είναι οι διαφορετικές απόψεις που διατυπώνονται σε διάφορα σχετικά θέματα όπως για παράδειγμα, την επικινδυνότητα των πυρηνικών σταθμών, ή την υψηλή στάθμη θορύβου και την οπτική ρύπανση που μπορεί να προκαλεί μια ανεμογεννήτρια.

■ Η μη μελετημένη ή ανεξέλεγκτη διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει τεχνικά προβλήματα και να δημιουργήσει διαταραχές στην ομαλή λειτουργία του δικτύου.

■ Παρά το γεγονός ότι η εγκατάσταση και σύνδεση μονάδων παραγωγής μπορούν να επηρεάσουν θετικά την ποιότητα ισχύος, ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί και το αντίστροφο, καθώς οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι πιθανό να επηρεάσουν τη συχνότητα του συστήματος, ενώ πολύ συχνά δεν είναι εξοπλισμένες με συστήματα ελέγχου φορτίου – συχνότητας.

■ Η επίδραση στο τοπικό επίπεδο της τάσης εκεί που συνδέεται η διεσπαρμένη παραγωγή στο κεντρικό δίκτυο διανομής μπορεί να είναι αξιοσημείωτη. Ειδικά τα επίπεδα ανύψωσης τάσης σε ακτινικά συστήματα διανομής είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα σύνδεσης των συστημάτων παραγωγής όταν πρόκειται για συστήματα με ασθενές φορτίο, αφού τότε δύναται να έχουμε ανεπιθύμητη αύξηση της τάσης.

1.3.1 Σύνδεση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο Δίκτυο

Η λειτουργία ενός ηλεκτρονικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές ώστε αφενός να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

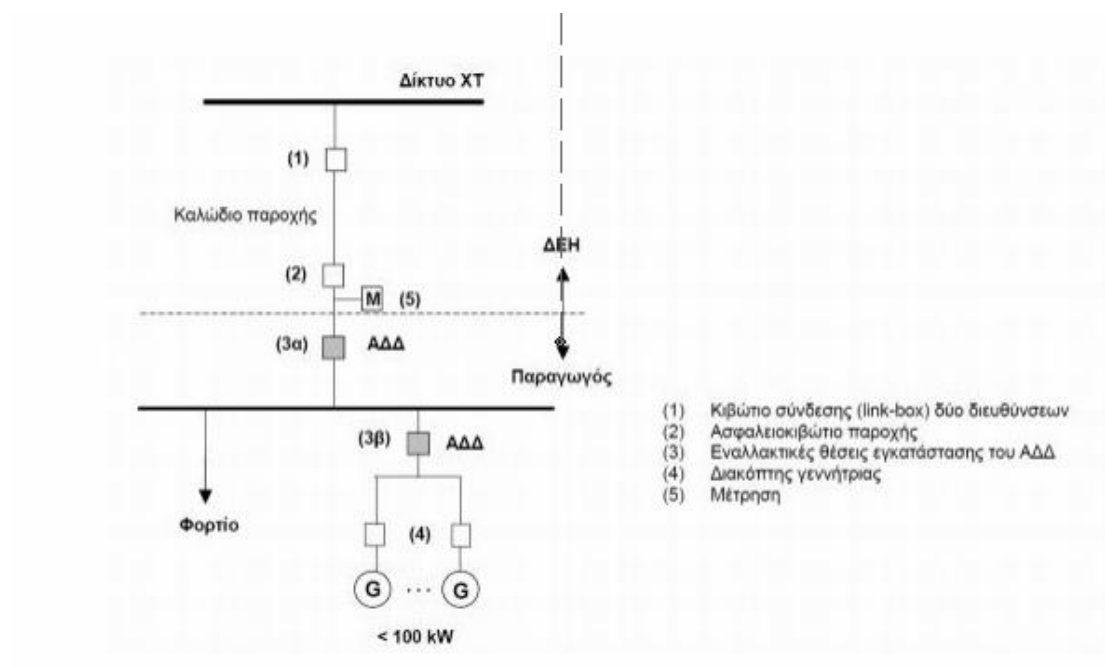
Ο τρόπος σύνδεσης μιας δεδομένης εγκατάστασης παραγωγής δεν προκύπτει μονοσήμαντα από την ονομαστική ισχύ της. Δηλαδή σταθμοί παραγωγής ίδιας ισχύος μπορεί να συνδέονται στο δίκτυο κατά τελείως διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τα ειδικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά, την κατά περίπτωση υφιστάμενη κατάσταση δικτύων και την προβλεπόμενη ανάπτυξή τους. Παρόλα αυτά, υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί ως προς το επίπεδο τάσης στο οποίο μπορεί να συνδεθεί μια εγκατάσταση παραγωγής οι οποίοι εφαρμόζονται κατά την εξέταση, ασχέτως των λοιπών τεχνικών κριτηρίων.

- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 100 KW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο ΧΤ.
- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 20 MW δεν μπορούν να συνδεθούν με δίκτυο ΜΤ.

Γενικά η επιλογή του τρόπου σύνδεσης αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων, χρηματοδότησή τους κλπ.).

Σύνδεση στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης

Η σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο ΧΤ επιτρέπεται για εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος μέχρι 100 KW. Ανάλογα με την ισχύ των γεννητριών που θα συνδεθούν στο δίκτυο ΧΤ, εξετάζεται αν είναι δυνατή η σύνδεση χωρίς επαύξηση της παροχής του παραγωγού. Αν απαιτείται επαύξηση της παροχής γίνεται μελέτη επάρκειας του δικτύου.



Σχήμα 1.3: Τυπική Διάταξη Σύνδεσης Παραγωγού στο Δίκτυο ΧΤ [6]

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται μια τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ. Βασική απαίτηση, για λόγους ασφάλειας είναι η ύπαρξη μέσων διακοπής (με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου) και ορατής απόζευξης, προσιτών ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση του παραγωγού από το δίκτυο όταν αυτό απαιτείται από τη ΔΕΗ. Η απαίτηση ορατής απόζευξης ικανοποιείται τόσο από το κιβώτιο σύνδεσης (1) όσο και από τις ασφάλειες της παροχής (2). Για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος τα μέσα αυτά μπορούν, σε έκτακτες περιπτώσεις, να χρησιμοποιηθούν και για τη διακοπή της εγκατάστασης.

Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος είναι αναγκαία η ύπαρξη διακόπτη φορτίου ή ισχύος. Το μέσο διακοπής (3) είναι ο αυτόματος διακόπτης μιας διασύνδεσης (ΑΔΔ). Μπορεί να τοποθετηθεί εναλλακτικά σε δυο θέσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3, ανάλογα με την επιθυμία του παραγωγού. Εάν επιλεγεί η θέση (3α) τότε είναι εφικτή η απομονωμένη λειτουργία της συνολικής εγκατάστασης (εγκατάσταση παραγωγής και φορτία). Ο παραγωγός θα πρέπει να παρέχει πρόσβαση στον ΑΔΔ και στο σχετικό σύστημα προστασίας στο αρμόδιο προσωπικό της ΔΕΗ. Είναι γενικά αποδεκτό, αλλά απαιτεί προηγούμενη συμφωνία με τη ΔΕΗ, οι λειτουργίες του ΑΔΔ να πραγματοποιούνται από το διακόπτη και το σύστημα προστασίας των γεννητριών, όταν δεν προβλέπεται η απομονωμένη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Το είδος και ο αριθμός των απαιτούμενων μετρητικών διατάξεων και συσκευών ρύθμισης καθορίζονται σύμφωνα με τους όρους της σύμβασης ΔΕΗ – Παραγωγού. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, χρησιμοποιούνται μετρητικές διατάξεις χωρίς δυνατότητα αντίθετης περιστροφής και

πραγματοποιείται ανεξάρτητη μέτρηση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας στις εγκαταστάσεις του παραγωγού.

Εάν η παραγωγή είναι τριφασική, ο μετρητής της παρεχόμενης στο δίκτυο ενέργειας πρέπει να είναι τριφασικός. Αυτό ισχύει ακόμη και για μονοφασικές εγκαταστάσεις παραγωγής.

- Συνθήκες ζεύξης

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς AC/DC, η ζεύξη πρέπει να γίνεται στην πλευρά ΕΡ του μετατροπέα χωρίς τάση.

- Προστασία απόζευξης

Η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να διαθέτει προστασία έναντι βραχυκυκλώματος, έναντι υπερφόρτισης και έναντι άμεσης και έμμεσης επαφής. Επιπλέον, για την προστασία της ίδιας της εγκατάστασης, αλλά και των άλλων εγκαταστάσεων του δικτύου, απαιτείται η ύπαρξη συστήματος προστασίας απόζευξης το οποίο επενεργεί στον ΑΔΔ και εξασφαλίζει την αποσύνδεση της εγκατάστασης από το δίκτυο όταν εμφανιστούν αποκλίσεις τάσεις ή/και συχνότητας άνω των προβλεπόμενων ορίων. Σε εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς AC/DC η επιτήρηση συχνότητας μπορεί να απουσιάζει, εάν ο αντιστροφέας δεν διαθέτει τη δυνατότητα αυτή. Αντίθετα, η επιτήρηση της τάσης (προστασίες υπότασης και υπέρτασης) είναι πάντοτε αναγκαία, η δε συνιστώμενη ρύθμιση για τη προστασία υπέρτασης είναι (όπου η ονομαστική τάση).

- Επιπτώσεις στην τάση του δικτύου

Η σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής σε κάποιο σημείο του δικτύου ΧΤ είναι δυνατή, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία τους δεν προκαλεί υπέρβαση της επιτρεπόμενης στάθμης διαταραχών για δημόσια δίκτυα ΧΤ και άρα δεν παρενοχλεί άλλες εγκαταστάσεις και συσκευές του δικτύου. Διαταραχές οι οποίες εξετάζονται είναι οι προκαλούμενες μεταβολές της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, το flicker και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης εξαιτίας της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Η λειτουργία μιας εγκατάστασης είναι αποδεκτή όταν δεν γίνεται υπέρβαση των ορίων που καθορίζονται από τα θεσπισμένα.

1.4 Δίκτυα Διανομής

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές. Ένα δίκτυο διανομής έχει σημείο έναρξης τον υποσταθμό διανομής, ο οποίος τροφοδοτείται συνήθως από μία ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς, ανάλογα με τη δομή του ΣΗΕ. Κάθε υποσταθμός με τη σειρά του θα εξυπηρετήσει έναν ή περισσότερους κύριους τροφοδότες.

Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής, η διανομή μέσης τάσης ή αλλιώς πρωτεύουσα διανομή και η διανομή χαμηλής τάσης ή αλλιώς δευτερεύουσα διανομή. Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης τροφοδοτούνται από υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, από υψηλή σε μέση, και τροφοδοτούν τους υποσταθμούς της διανομής και τους καταναλωτές μέσης τάσης. Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης έχουν σαν αφετηρία τους υποσταθμούς διανομής, όπου η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή μέσω μετασχηματιστών διανομής. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης αποτελούνται από τρεις αγωγούς φάσεων και διαθέτουν, επιπλέον, και ουδέτερο αγωγό.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής σχετίζεται άμεσα με τη χωροταξική διαμόρφωση κάθε περιοχής. Έχουμε δύο μορφές δικτύων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, εναέρια και υπόγεια. Τα εναέρια δίκτυα είναι οικονομικότερα στο να κατασκευαστούν και είναι ευκολότερη και λιγότερο χρονοβόρα η αποκατάσταση των βλαβών τους. Έχουν όμως το μειονέκτημα ότι χρειάζονται αρκετό χώρο για την εγκατάσταση τους, πράγμα που πολλές φορές καθιστά αδύνατη τη χρήση τους σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Τα υπόγεια δίκτυα από την άλλη έχουν ελάχιστη αισθητική επίπτωση στο περιβάλλον.

Η μορφή των δικτύων διανομής είναι κατά κανόνα ακτινική (radial) ή βροχοειδής (meshed). Στα ακτινικά δίκτυα διανομής όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται μόνο από το ένα άκρο τους. Έτσι οι κλάδοι του δικτύου δε συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας βρόχους, αλλά διαδίδονται ακτινικά από τη κεντρική τροφοδοσία προς τα φορτία. Με λίγα λόγια η μορφή ενός ακτινικού δικτύου διανομής είναι παρόμοια με τη δομή δέντρου όπως είναι γνωστή στην επιστήμη των υπολογιστών. Αντίθετα, στη βροχοειδή λειτουργία τα δίκτυα διανομής είναι κλειστά, μέσω των βρόχων που σχηματίζουν οι γραμμές. Αυτή η μορφή επιτρέπει την εξυπηρέτηση ίδιου αριθμού φορτίων με μικρότερο αριθμό γραμμών, και προσφέρει εύκολα εναλλακτική τροφοδοσία σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική μορφή απλοποιεί και διευκολύνει ζητήματα προστασίας του δικτύου και ροής της ενέργειας. Σημειώνεται ότι πολλά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μετατρέπονται από ακτινικά σε βροχοειδή και αντίστροφα, με τη χρήση κατάλληλων διακοπών ή αποζευκτών, έτσι ώστε να επωφελούνται των πλεονεκτημάτων και των δύο διαμορφώσεων.[11]

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ο εξοπλισμός των δικτύων διανομής αποτελείται από τα «μέσα ζεύξεως» και τα «μέσα προστασίας», των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά επιλέγονται ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και με τα επίπεδα της τάσης του δικτύου.

Τα μέσα ζεύξεως χρησιμεύουν για τη ζεύξη και την απόζευξη τμημάτων του δικτύου. Έχουν την ικανότητα να διαρρέονται συνεχώς από το ονομαστικό τους ρεύμα και όταν είναι σε κλειστή θέση επιτρέπουν τη διέλευση, για μικρό χρονικό διάστημα, μεγάλων ρευμάτων που οφείλονται σε βραχυκυκλώματα. Οι κύριες κατηγορίες των μέσων ζεύξεως είναι:

Οι αποζεύκτες: Ανοίγουν όταν δεν υπάρχει σημαντική διαφορά τάσης ανάμεσα στους δύο πόλους τους ή όταν το ρεύμα που διακόπτεται είναι αμελητέο(π.χ. χωρικά ρεύματα μονωτήρων, ζυγών, μετασχηματιστών τάσεων ή μικρού μήκους καλωδίων)

Διακόπτες φορτίου: Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος για την διακοπή ή την αποκατάσταση εντάσεων ρεύματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως αυτή του βραχυκυκλώματος, χρησιμεύουν για την αποκατάσταση-όχι όμως και τη διακοπή-των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.

Διακόπτες ισχύος: Χρησιμοποιούνται κυρίως για την διακοπή ή την αποκατάσταση εντάσεων ρευμάτων σε κάποιες μη κανονικές συνθήκες, όπως κατά την εξέλιξη ενός βραχυκυκλώματος. Χρησιμεύουν, σπανιότερα βέβαια, για την διακοπή ή την αποκατάσταση ρευμάτων και σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Τα μέσα προστασίας χρησιμεύουν για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων του δικτύου για την πρόληψη βλάβης ή σε περίπτωση βλάβης. Ως μέσα προστασίας χρησιμοποιούνται οι διακόπτες ισχύος, όταν δέχονται εντολές από Ηλεκτρονόμους Προστασίας και οι ασφάλειες. [12]

Κεφάλαιο 2: Οικονομική Κατανομή Φορτίου

2.1 Εισαγωγή

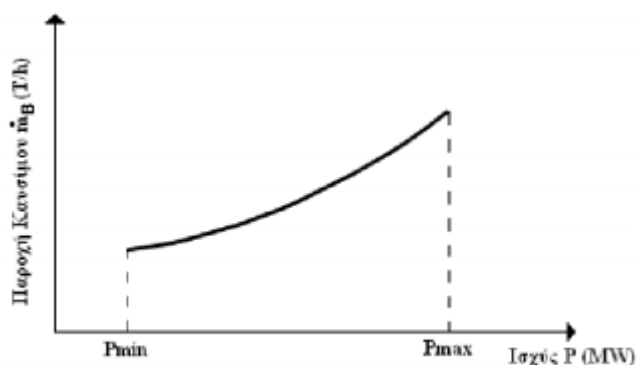
Ένα ζητούμενο φορτίο κατανάλωσης είναι δυνατόν να τροφοδοτηθεί από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς τρόπους. Ο καλύτερος τρόπος τροφοδότησης (βέλτιστος) είναι αυτός που παρέχει την οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Το κριτήριο της βέλτιστης λειτουργίας είναι οικονομικό (πλέον υπεισέρχονται και άλλα κριτήρια, όπως π.χ. περιβαλλοντικά). Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση του καταλληλότερου καυσίμου και κόστους μεταφοράς με τη μείωση των απωλειών του δικτύου.

Η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση για κάθε φορτίο αποτελεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου η οποία βασίζεται στα παρακάτω:

1. Ακριβή πρόβλεψη φορτίου, αφενός βραχυπρόθεσμα, αφετέρου μακροπρόθεσμα.
2. Οικονομικό προγραμματισμό γεννητριών (προγραμματισμό ένταξης μονάδων στο σύστημα).
3. Οικονομική φόρτιση μονάδων σε λειτουργία (οικονομική λειτουργία συστήματος).

Με βραχυπρόθεσμη φόρτιση εννοούμε την πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος κάθε ώρα για κάθε συγκεκριμένη μέρα (day-ahead). Στη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη υπολογίζονται οι πιθανότερες ετήσιες ή εποχιακές αιχμές φορτίου σε μακροχρόνια κλίμακα για το σχεδιασμό του συστήματος. Με την ένταξη των μονάδων αναφερόμαστε στον καθορισμό και τη χρησιμοποίηση του βέλτιστου συνδυασμού γεννητριών για την εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου. Η οικονομική λειτουργία του συστήματος αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της φόρτισης της κάθε μονάδας ενός δεδομένου συνδυασμού μονάδων σε λειτουργία.

Για να γίνει η σωστή ένταξη των μονάδων σε λειτουργία χρειάζεται μια όσο το δυνατόν πιο ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου, διαφορετικά δε θα λειτουργεί το σύστημα στην πιο οικονομική κατάσταση, γεγονός που αποφέρει μεγαλύτερο κόστος. Παράλληλα, αν η πρόβλεψη της ζήτησης δεν είναι ορθή, θα υπάρχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος και κατανάλωση περισσότερου καυσίμου με δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η προμήθεια του καυσίμου απαιτεί μακροπρόθεσμο προγραμματισμό (ανθρακωρυχεία), μεσοπρόθεσμο (πυρηνικό καύσιμο), ή βραχυπρόθεσμο (ετήσιος προγραμματισμός).



Σχήμα 2.1:Ωριαία Κατανάλωση Φορτίου [15]

Το πρόβλημα της οικονομικής εκμετάλλευσης του συστήματος, όταν αυτό περιλαμβάνει πολλών ειδών μονάδες παραγωγής, και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με τη διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διανεμημένης παραγωγής, σε συνδυασμό με υδροηλεκτρικούς, θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, αποτελεί ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα που χρίζει εκτενούς μελέτης.

Συνεπώς, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου σε ένα αυτόνομο σύστημα ενέργειας έγκειται στην εξυπηρέτηση της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος καυσίμου, γεγονός που συμβάλλει στην επίτευξη ελάχιστου κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ελαχιστοποίηση του κόστους σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής παράγοντες[16]:

- Η λειτουργική απόδοση των μονάδων.
- Το κόστος καυσίμου.
- Οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς

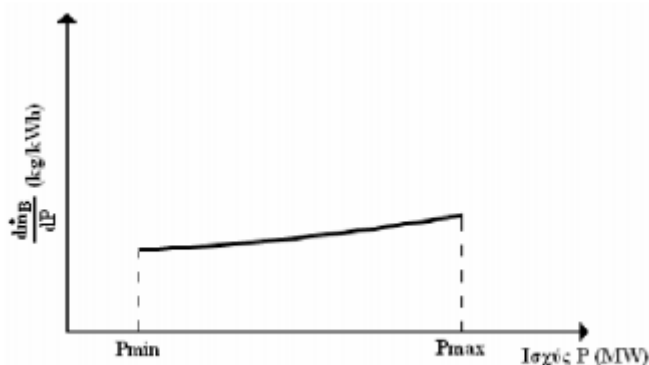
2.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες-Όρια Μονάδων Παραγωγής

Στην ανάλυση της οικονομικής λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες καμπύλες εισόδου-εξόδου. Από αυτές θα σταθούμε στις παρακάτω, που εκφράζουν τη λειτουργία της κάθε μονάδας:

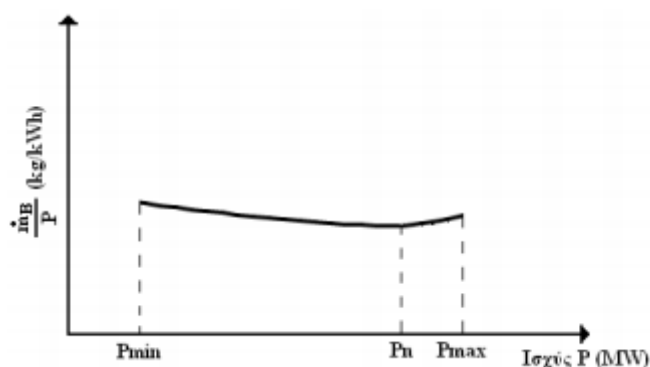
- Η καμπύλη ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου. Εκφράζει την παροχή καυσίμου ως συνάρτηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας σε MW, μετράται σε (T/h) ή σε (m³/h) αν το καύσιμο είναι ντίζελ ή φυσικό αέριο, αντίστοιχα. Σχήμα 2.1.

- Η καμπύλη διαφορικής κατανάλωσης καυσίμου. Προκύπτει από την παράγωγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και εκφράζει την αύξηση στην παροχή του

καυσίμου σε (kg/h) που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά 1kW Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2: Διαφορική Κατανάλωση Καυσίμου [15]



Σχήμα 2.3:Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου [15]

- Η καμπύλη ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Μετράται σε (kg/kW h) και εκφράζει το λόγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου προς την καθαρή έξοδο της μονάδας συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος εξόδου. Σχήμα 2.3.
- Η καμπύλη ωριαίας κόστους λειτουργίας. Εκφράζει το ωριαίο κόστος λειτουργίας σε (€/h) συναρτήσει της ισχύος εξόδου σε MW και προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου με την τιμή του καυσίμου σε (€/T). Στις οικονομικές μελέτες εκφράζεται συνήθως ως πολυωνυμική ή τμηματικά γραμμική κυρτή καμπύλη στο διάστημα $[P_{min}, P_{max}]$. Σχήμα 2.4.
- Η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας. Προκύπτει από την παράγωγο του ωριαίου κόστους λειτουργίας συναρτήσει της ισχύος εξόδου της μονάδας. Εκφράζει την αύξηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε (€/h) που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά 1kW, δηλαδή την αύξηση στο κόστος παραγωγής σε (€) που προέρχεται από την παραγωγή μίας πρόσθετης kW h από τη μονάδα. Συνήθως είναι αύξουσα πολυωνυμική, τμηματικά γραμμική ή βαθμωτή συνάρτηση της ισχύος εξόδου στις οικονομικές μελέτες του συστήματος. Σχήμα 2.5.

- Η καμπύλη ειδικού κόστους λειτουργίας. Είναι ο λόγος του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε (€/h) προς την ισχύ εξόδου σε (MW). Εκφράζει την τιμή παραγωγής της kW h σε (€/kW h) από τη μονάδα. Σχήμα 2.6

Οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν αντικοινομικά σε χαμηλά φορτία, έχουν δηλαδή μεγάλο ειδικό κόστος, ενώ λειτουργούν οικονομικά παράγοντας ισχύ κοντά στην ονομαστική τους τιμή (μικρό ειδικό κόστος).

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερή συχνότητα λέγεται ότι λειτουργεί σε κατάσταση «ισορροπίας ισχύος» εάν η συνολική παραγόμενη ενεργός ισχύς είναι ίση με το φορτίο, περιλαμβάνοντας τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, συν τις συνολικές απώλειες μεταφοράς. Σε μορφή εξίσωσης [13],[14]:

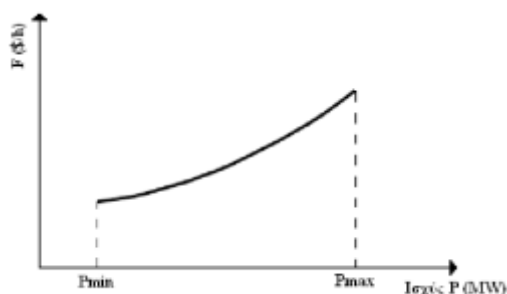
$$P_G = P_L + P_{TL} \quad (2.1)$$

Όπου:

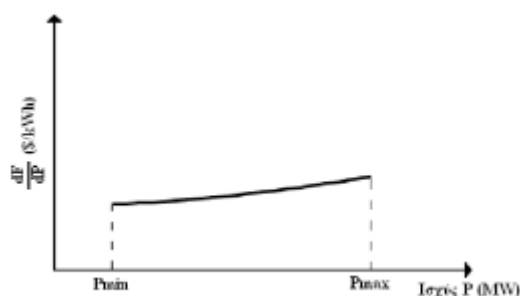
P_G : ηλεκτρική ισχύς εξόδου της μονάδας σε ανά μονάδα τιμές.

P_L : το συνολικό φορτίο του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των διασυνδέσεων, σε α.μ. τιμές.

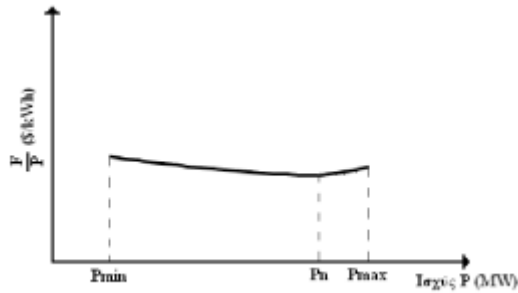
P_{T-L} : οι συνολικές απώλειες μεταφοράς ισχύος, σε α.μ. τιμές.



Σχήμα 2.4: Ωριαίο Κόστος Λειτουργίας [15]



Σχήμα 2.5: Διαφορικό Κόστος Λειτουργίας [15]



Σχήμα 2.6: Ειδικό κόστος λειτουργίας [15]

Αν και η εξίσωση 2.1 προβλέπει τη σωστή τιμή της συνολικής ισχύος P_G που απαιτείται για να καλύψει τη ζήτηση της περιοχής και τις διασυνδέσεις, ωστόσο δεν παρέχει καμία πληροφορία για τον τρόπο που διαμοιράζεται η ισχύς στις n μονάδες που λειτουργούν. Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι μονάδες είναι διαθέσιμες να καλύψουν το φορτίο. Σε συνθήκες μη-αιχμής, δεν είναι αναγκαίο να βρίσκονται όλες οι μονάδες σε λειτουργία (on-line). Ωστόσο, για την εκκίνηση και παύση θερμικών μονάδων από το σύστημα υπεισέρχεται το κόστος εκκίνησης και παύσης αντίστοιχα, (start-up, shut-down cost). Επίσης, εάν μία μονάδα είναι εκτός λειτουργίας, μπορεί να απαιτούνται 8 ώρες ή και περισσότερο για να συνδεθεί στο δίκτυο. Κάποιες μονάδες μπορεί να είναι εκτός λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω βλάβης. Έτσι είναι απαραίτητο να διατηρούνται περισσότερες μονάδες σε λειτουργία από όσες απαιτούνται, ώστε να μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση φορτίου σε περίπτωση κάποιας βλάβης, βραχυκυκλώματος κ.ο.κ. (εφεδρεία συστήματος). Το πρόβλημα ένταξης μονάδων (unit commitment) περιλαμβάνει τον προγραμματισμό της λειτουργίας των μονάδων έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος (συμπεριλαμβάνοντας το κόστος εκκίνησης-παύσης των μονάδων) χωρίς να υπάρχει το ρίσκο της ασφάλειας του συστήματος.

Ένας βασικός περιορισμός που λαμβάνεται υπόψη για κάθε μονάδα είναι:

$$P_{min_i} \leq P_{G_i} \leq P_{max_i}$$

Το άνω όριο σχετίζεται με το όριο του στροβίλου της γεννήτριας, στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει. Το κάτω όριο προκαλείται από θερμικούς περιορισμούς στη λειτουργία του λέβητα-ατμοπαραγωγού για τις θερμικές μονάδες και όταν αυτές τίθενται σε σύνδεση στο δίκτυο, η παραγόμενη ισχύς πρέπει να βρίσκεται άνω του κατώτατου ορίου για να καλύπτουν τις προϋποθέσεις ευστάθειας του συστήματος.

Καλύπτοντας αυτούς τους περιορισμούς, υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες. Έτσι πρέπει να υπολογιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός, με τη διαδικασία που παρουσιάζουμε στις παρακάτω ενότητες.

2.3 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Το κόστος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που καταναλώνεται (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, λιγνίτης), από τις εθνικές και διεθνείς συνθήκες οικονομίας, πολιτική κατάσταση και άλλους παράγοντες, συνεπώς είναι πολύπλοκη σχέση. Η συνάρτηση που περιγράφει εμπειρικά το κόστος των θερμικών μονάδων έχει οριστεί με χρήση πολυωνύμου υψηλού βαθμού. Για τις ανάγκες της διπλωματικής θα θεωρήσουμε δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (2.2)$$

Όπου:

i : i -οστή μονάδα παραγωγής από τις n .

C_i : λειτουργικό κόστος της i -οστής μονάδας σε (€/h).

P_{Gi} : η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος της i -οστής μονάδας σε α.μ. τιμές.

a_i, b_i, c_i : οι συντελεστές σε (€/h).

Αντίστοιχα πολυώνυμα εκφράζουν το κόστος κάθε μονάδα παραγωγής, συνεπώς το συνολικό λειτουργικό κόστος είναι:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \text{ σε μονάδες (€/h)} \quad (2.3)$$

Η συνολική παραγωγή που απαιτείται είναι:

$$P_G = P_L + P_{TL} \quad (2.4)$$

Όπου:

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{Gi} = \eta \text{ συνολική παραγωγή} \quad (2.5)$$

και P_L το συνολικό φορτίο του συστήματος και P_{TL} οι συνολικές απώλειες μεταφοράς.

Έτσι το πρόβλημα ουσιαστικά έγκειται στον υπολογισμό των n $-P_{Gi}$ υπό τους περιορισμούς, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής.

Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μίας γνωστής αντικειμενικής συνάρτησης με σωστό χειρισμό ενός συνόλου μεταβλητών απόφασης, που υπόκειται σε μία ή περισσότερες συναρτήσεις ή περιορισμούς.

Αντικειμενική συνάρτηση: $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Μεταβλητές απόφασης: x_1, x_2, \dots, x_n

m εξισώσεις περιορισμού: $G_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$

$$G_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Ένας γενικός τρόπος επίλυσης είναι η χρησιμοποίηση της μεθόδου των πολλαπλασιαστών Lagrange. Η διαδικασία είναι η εξής:

1. Η διαμόρφωση της Lagrangian εξίσωσης δίνεται από

$$\mathcal{L} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) - \lambda G(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

όπου λ άγνωστη σταθερά.

2. Διαμόρφωση των n μερικών παραγώγων

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_2} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} = 0$$

.

.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} = 0$$

3. Ταυτόχρονη επίλυση για όλες τις $n + 1$ μεταβλητές (x_1, x_2, \dots, x_n και λ) από τις σχέσεις των n μερικών παραγώγων και της $G_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$.

4. Επιβεβαίωση ότι στο βήμα 3 προσεγγίζεται η επιθυμητή λύση (τοπικό μέγιστο, ελάχιστο).

Η μερική παράγωγος ως προς τον πολλαπλασιαστή λ δίνει τον εξισωτικό περιορισμό, ενώ οι μερικές παράγωγοι ως προς τις μεταβλητές απόφασης δίνουν:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} = \frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} - \lambda = 0 \quad i=1, \dots, n \quad (2.6)$$

Διαπιστώνουμε ότι η απαραίτητη συνθήκη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας είναι η εξής: Όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος πρέπει να λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (e/kWh), ίσο με τον πολλαπλασιαστή LaGrange, λ . Οι εξισώσεις 2.6, που ονομάζονται εξισώσεις συνεργασίας, μαζί με την εξίσωση διατήρησης ισχύος από τον εξισωτικό περιορισμό χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

2.3.1 Γραφική επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

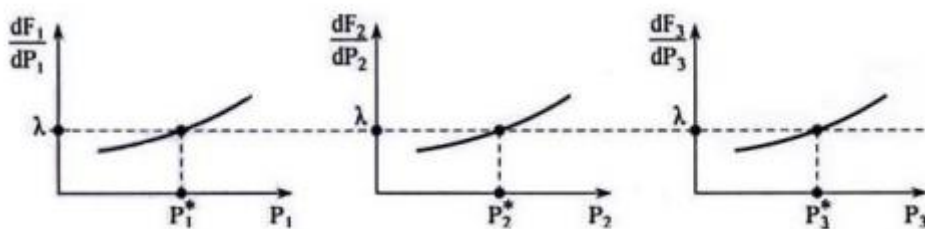
Στη γενική περίπτωση, που το διαφορικό κόστος λειτουργίας των μονάδων δεν είναι γραμμική συνάρτηση της εξόδου, μπορεί να γίνει γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας 2.6, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Για τα διαγράμματα του διαφορικού κόστους λειτουργίας όλων των μονάδων επιλέγεται αρχικά μια τυχαία τιμή για το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων, λ . Από την τομή των καμπυλών διαφορικού κόστους λειτουργίας με την οριζόντια γραμμή που διέρχεται από την τιμή λ υπολογίζονται οι έξοδοι των μονάδων P_1, \dots, P_n . Σε περίπτωση που οι έξοδοι των μονάδων ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης ισχύος μέσα στα πλαίσια κάποιας ανοχής ε , δηλαδή αν ισχύει $|P_D - \sum_{i=1}^n P_i| < \varepsilon$, (όπου P_D η συνολική ζήτηση) τότε έχει λυθεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου διότι:

1. όλες οι μονάδες λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος και
2. ικανοποιείται ο περιορισμός διατήρησης ισχύος στο δίκτυο.

Αντίθετα, αν ισχύει $|P_D - \sum_{i=1}^n P_i| > \varepsilon$, τότε διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

1. Αν $\sum_{i=1}^n P_i > P_D$ τότε σε αυτή την περίπτωση πρέπει να μειωθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μικρότερο από το αρχικό.
2. Αν $\sum_{i=1}^n P_i < P_D$, τότε πρέπει να αυξηθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μεγαλύτερο από το αρχικό. Έτσι, μετά από ορισμένες επαναλήψεις, επιτυγχάνεται η γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας.



Σχήμα 2.7: Σχηματική επίλυση εξισώσεων συνεργασίας [15]

2.4 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με λειτουργικά όρια

Μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση της οικονομικής κατανομής φορτίου λαμβάνει υπόψη και τα όρια λειτουργίας των μονάδων του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι:

$$\text{Min}F(P_1, P_2, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.7)$$

$$\text{Υ.Π.: } \Phi = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (2.8)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i = 1 \dots n \quad (2.9)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης (εξίσωση 2.7) υπό τον εξισωτικό περιορισμό (εξίσωση 2.8) και τους ανισωτικούς περιορισμούς (εξίσωση 2.9) μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή των συνθηκών Kuhn-Tucker. Οι συνθήκες Kuhn-Tucker δίνουν τις παρακάτω απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου :

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (2.10)$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} < \lambda \quad P_i = P_{i,\min}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} > \lambda \quad P_i = P_{i,\max}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (2.11)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (2.12)$$

Παρακάτω δίνεται μια γραφική αιτιολόγηση των συνθηκών βέλτιστου (εξίσωση 2.11) με τη βοήθεια του σχήματος 2.8. Στο σχήμα αυτό έχει υπολογισθεί η βέλτιστη τιμή λ^* που ικανοποιεί τις συνθήκες βέλτιστου (εξισώσεις 2.11, 2.11, 2.12).

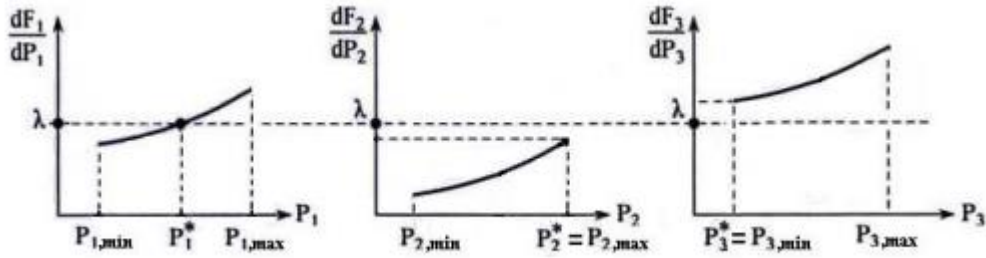
Συγκεκριμένα, ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος:

$$P^*_1 + P^*_2 + P^*_3 = P^*_1 + P_{2,\max} + P_{3,\min}$$

επιπλέον ικανοποιούνται τα λειτουργικά όρια των μονάδων (εξίσωση 2.12) και οι σχέσεις 2.11. Η μονάδα 1, της οποίας το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αυστηρά ανάμεσα στο κάτω και στο πάνω όριο λειτουργίας ($P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}$), λειτουργεί με διαφορικό κόστος $\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda$.

Η μονάδα 2 είναι πολύ πιο οικονομική σε σχέση με τις άλλες δυο. Η καμπύλη διαφορικού κόστους της μονάδας αυτής βρίσκεται ολόκληρη κάτω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Ως εκ τούτου συμφέρει να λειτουργήσει η μονάδα 2 στο ανώτατο όριό της, $P^*_2 = P_{2,\max}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της είναι μικρότερο του λ , δηλαδή $\frac{dF_2}{dP_2} < \lambda$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.

Αντίθετα, η μονάδα 3 είναι αρκετά δαπανηρή, αφού η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας της βρίσκεται ολόκληρη πάνω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Γι' αυτό τη λειτουργούμε στο κατώτατο όριό της, $P^*_3 = P_{3,\min}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της είναι μεγαλύτερο του λ , δηλαδή $\frac{dF_3}{dP_3} > \lambda$.



Σχήμα 2.8 : Σχηματική Επίλυση εξισώσεων συνεργασίας με λειτουργικούς περιορισμούς [15]

2.5 Αλγόριθμος επαναλήψεων Λάμδα

Η επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε Η/Υ γίνεται με τη μέθοδο επαναλήψεων λάμδα. Ο αλγόριθμος δίνεται στο σχήμα 2.9. Υποθέτοντας μια αρχική τιμή για τον πολλαπλασιαστή λ , υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα P_i από τη λύση της εξίσωσης 2.6 $\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda$.

Στη συνέχεια ξεκινούν οι επαναλήψεις. Κατά την πρώτη επανάληψη, η επιλογή της νέας τιμής του λ γίνεται

- με αύξηση, όταν η συνολική παραγωγή των μονάδων δεν καλύπτει τη ζήτηση του φορτίου, δηλαδή $P_D > \sum_{i=1}^n P_i$ ή

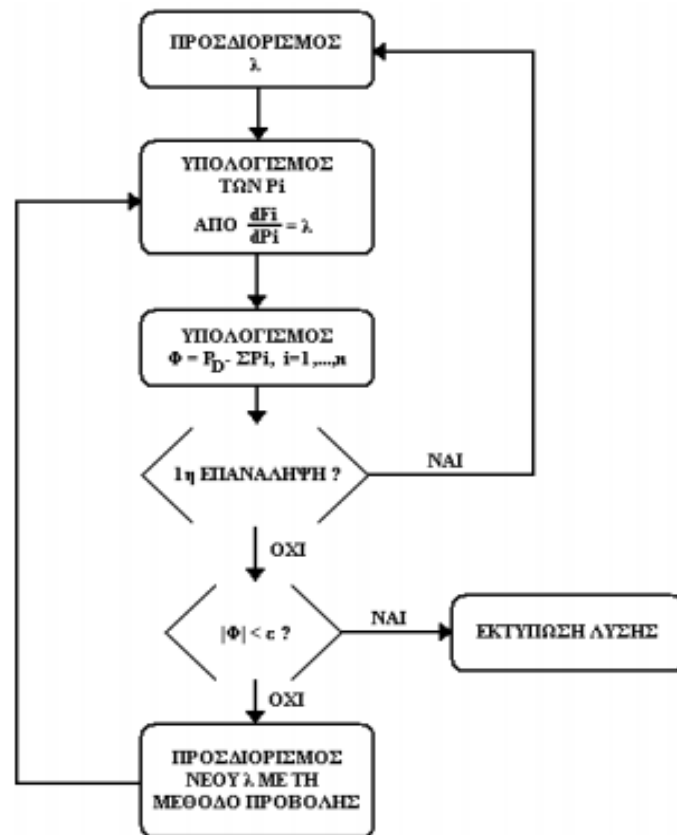
- με μείωση, όταν η συνολική παραγωγή των μονάδων είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης, δηλαδή $P_D < \sum_{i=1}^n P_i$. Έτσι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των προβολών, το νέο λ υπολογίζεται κάθε φορά από τη σχέση $\lambda^{k+1} = \lambda^k - \frac{\lambda^k - \lambda^{k-1}}{\Phi(\lambda^k) - \Phi(\lambda^{k-1})} \Phi(\lambda^k)$ (2.13)

Δεδομένου του νέου λ , υπολογίζονται όλα τα νέα P_i και εξετάζεται αν ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος $\Phi = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0$ εντός κάποιων ορίων ανοχής ϵ .

Στην περίπτωση που ικανοποιείται και ταυτόχρονα ικανοποιούνται και τα όρια λειτουργίας, εκτυπώνονται τα αποτελέσματα που είναι η ισχύς εξόδου όλων των μονάδων καθώς και ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , που είναι το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων που λειτουργούν αυστηρά μεταξύ των ορίων λειτουργίας τους. Το λ εκφράζει το κόστος παραγωγής μιας πρόσθετης kWh από το σύστημα. Αντιθέτως, στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος, υπολογίζεται μια νέα τιμή για το λ με χρήση της σχέσης 2.13 και οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Τέλος, γίνεται έλεγχος των ορίων λειτουργίας των μονάδων. Αν η ισχύς εξόδου όλων των μονάδων βρίσκεται εντός ορίων η διαδικασία τερματίζεται με τελικές τιμές παραγόμενης ισχύος τις ήδη υπολογισμένες. Διαφορετικά, αν για κάποιες μονάδες προκύψει $P_i > P_{i,max}$ ή $P_i < P_{i,min}$, θεωρούμε ότι αυτές λειτουργούν στο ανώτατο ή κατώτατο όριο λειτουργίας τους, δηλαδή $P_i = P_{i,max}$ ή $P_i = P_{i,min}$, αντίστοιχα.

Έπειτα, με τις απομένουσες μονάδες, δηλαδή αυτές που δεν έφθασαν ακόμη στην οριακή τους φόρτιση, επαναλαμβάνεται από την αρχή ο αλγόριθμος.



Σχήμα 2.9 : Αλγόριθμος Επαναλήψεων Λάμδα [16]

2.6 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με απώλειες μεταφοράς

Μέχρι στιγμής κατά τη διατύπωση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου αμελήθηκαν οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς. Είναι γνωστό ότι, κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος, υπάρχουν απώλειες που οφείλονται κυρίως στην ωμική αντίσταση των γραμμών. Άλλες απώλειες στο δίκτυο μεταφοράς είναι αυτές λόγω του φαινομένου Corona των γραμμών και λόγω χαλκού και σιδήρου των μετασχηματιστών.

Σε περίπτωση που ληφθούν υπόψη και οι απώλειες του δικτύου το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου γίνεται πιο σύνθετο, εξαιτίας της συνάρτησης απωλειών που συμμετέχει στο ισοζύγιο της ισχύος. Η εξίσωση διατήρησης ισχύος εκφράζει πλέον το γεγονός ότι η συνολική παραγωγή πρέπει να ισούται με το φορτίο συν τις απώλειες μεταφοράς.

Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου και διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Min} F_T(P_1, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.14)$$

$$\text{Υ.Π.}\Phi = P_D + P_L(P_1, P_2, \dots, P_n) - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (2.15)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (2.16)$$

Το κριτήριο βέλτιστης λειτουργίας υπολογίζεται με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange. Έτσι η συνάρτηση Lagrange είναι:

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda\phi$$

Η συνθήκη ελαχιστοποίησης της FT στο σημείο βέλτιστου είναι:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} + \lambda \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_i} - 1 \right) = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Ο όρος $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ εκφράζει τις διαφορικές απώλειες του ζυγού i και ο παράγοντας $P_{f_i} = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}}$

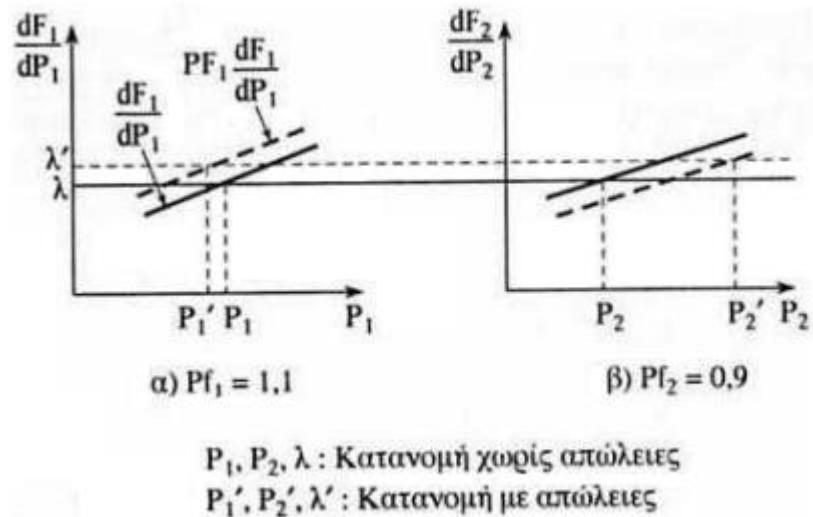
καλείται συντελεστής ποινής του ζυγού i . Επομένως, οι εξισώσεις 2.17 γράφονται ως

$$P_{f_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} = \lambda \quad i = 1, \dots, n \quad (2.18)$$

και καλούνται εξισώσεις συνεργασίας.

Ο συντελεστής ποινής P_{f_i} έχει την εξής επίδραση:

- Όταν $P_{f_i} > 1$ δηλαδή η αύξηση της παραγόμενης ισχύος P_i αυξάνει τις απώλειες, ο όρος $P_{f_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ λειτουργεί με τρόπο που το διαφορικό κόστος $\frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ να αυξάνεται, γεγονός που ισοδυναμεί με μετατόπιση της καμπύλης διαφορικού κόστους προς τα πάνω όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10-α.
- Όταν $P_{f_i} < 1$ δηλαδή η αύξηση της παραγόμενης ισχύος P_i μειώνει τις απώλειες, ο όρος $P_{f_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε το διαφορικό κόστος $\frac{\partial F_i}{\partial P_i}$ να μειώνεται, γεγονός που ισοδυναμεί με μετατόπιση της καμπύλης διαφορικού κόστους προς τα κάτω όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10-β.



Σχήμα 2.10 : Διαφορικό Κόστος καυσίμου με και χωρίς απώλειες [15]

2.6.1 Εξίσωση Απωλειών με τη μέθοδο των B-συντελεστών

Το πρόβλημα, πλέον, έγκειται στον προσδιορισμό της εξίσωσης των απωλειών συναρτήσει της ισχύος των μονάδων παραγωγής, $P_L(P_1 \dots P_n)$. Οι απώλειες εκφράζονται συναρτήσει των συντελεστών απωλειών ή συντελεστών B του δικτύου και της ισχύος από εξισώσεις της μορφής:

$$P_L = [P]^T [B][P] + [P]^T [B]_0 + B_{00} \quad (2.19)$$

Όπου:

- [P]: το διάνυσμα εξόδου των γεννητριών διάστασης $n \times 1$
- [B]: τετραγωνικός πίνακας $n \times n$
- [B]₀: διάνυσμα διάστασης $n \times 1$
- B₀₀: σταθερά

Η εξίσωση απωλειών 2.19 γράφεται σε πιο γενική μορφή και ως:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \quad (2.20)$$

Έτσι η εξίσωση διατήρησης ισχύος, με βάση την 2.20, γίνεται:

$$\Phi = P_D + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.21)$$

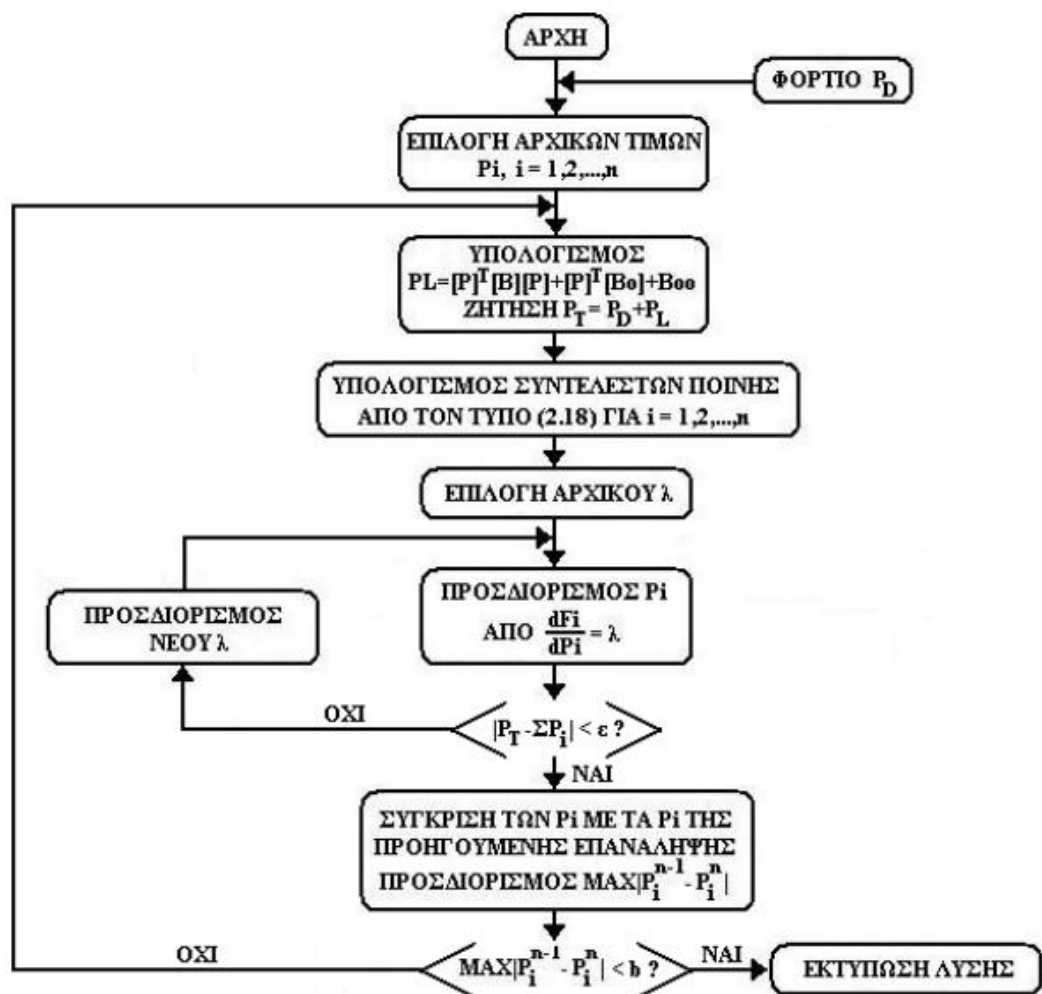
Οπότε:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} + \lambda \left(\sum_{j=1}^n (B_{ij} P_j - B_j) - 1 \right) = 0 \quad (2.22)$$

και οι συντελεστές ποινής γίνονται:

$$Pf_i = \frac{1}{1 - 2 \sum_{j=1}^n B_{ij} P_j - B_j} \quad (2.23)$$

Η παρουσία των διαφορικών απωλειών περιπλέκει την επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας 3.22 καθώς περιέχει αφ' ενός τους όρους P_i και αφετέρου όλους τους όρους P_j . Στο σχήμα 3.11 απεικονίζεται σε διάγραμμα ροής ο αλγόριθμος οικονομικής επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες.



Σχήμα 2.11: Αλγόριθμος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες [16]

Κεφάλαιο 3 : Μοντέλο Consensus

3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το πρόβλημα που καλείται να λυθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι στην ουσία ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν ως αντικείμενο την επιλογή κάποιας τιμής εισόδου από ένα σύνολο, η οποία θα μεγιστοποιεί ή θα ελαχιστοποιεί κάποια δεδομένη συνάρτηση. Η συνάρτηση η οποία καλείται να βελτιστοποιηθεί ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους (ελαχιστοποίηση) ή συνάρτηση χρησιμότητας (μεγιστοποίηση) και η λύση του προβλήματος βέλτιστη λύση. Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και απαιτεί συγκεκριμένη προσέγγιση. Στην παρούσα διπλωματική αναπτύσσεται μία μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, η οποία λειτουργεί αποκεντρωμένα.

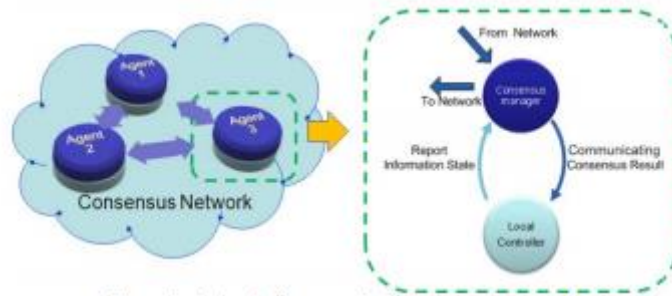
Αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένα πολυπρακτορικό σύστημα που δρα με σκοπό τη σύγκλιση σε μία βέλτιστη τιμή η οποία ελαχιστοποιεί μία δεδομένη αντικειμενική συνάρτηση. Ως πολυπρακτορικό σύστημα εννοείται ένα δικτυωμένο σύστημα αποτελούμενο από οντότητες οι οποίες είναι εξοπλισμένες με αισθητήριες και υπολογιστικές συσκευές καθώς και την ικανότητα να επικοινωνούν και αλληλοεπιδρούν τοπικά, ενώ παράλληλα εξελίσσονται σε ένα περιβάλλον που αντιλαμβάνονται και μέσα στο οποίο δρουν . Κάθε πράκτορας σε ένα σύστημα έχει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά: αυτονομία, τοπική θεώρηση εννοώντας πως κανένας πράκτορας δεν έχει οικουμενική άποψη του συστήματος και τέλος αποκέντρωση καθώς δεν υπάρχει πράκτορας που να ελέγχει το σύστημα. Αυτά ακριβώς τα χαρακτηριστικά είναι που καθιστούν κατάλληλα τα πολυπρακτορικά συστήματα για τη λύση κατανεμημένων προβλημάτων.[18]

Στην παρούσα διπλωματική το πολυπρακτορικό σύστημα που μας αφορά είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο, όπου πράκτορας θεωρείται ότι ελέγχει τις πηγές ενέργειας (γεννήτριες) και τα φορτία. Η αλληλεπίδραση αυτών των πρακτόρων είναι που οδηγεί στη λύση του προβλήματος.

Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί η συναίνεση ως εργαλείο που θα λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης. “Συναίνεση” σημαίνει να επιτευχθεί σύγκλιση μίας συγκεκριμένης ποσότητας σε μία τιμή. Συγκεκριμένα ως μεταβλητή συναίνεσης έχει επιλεγεί το οριακό κόστος. Αυτό σημαίνει πως οι πράκτορες θα ανταλλάσσουν πληροφορίες τοπικά και θα προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους με απώτερο σκοπό να οδηγηθεί το σύστημα στη βέλτιστη τιμή του οριακού κόστους. Η παραδοσιακή προσέγγιση του μοντέλου συναίνεσης είναι ένας απλός κανόνας τοπικού συντονισμού των πρακτόρων, που οδηγεί σε συμφωνία το σύστημα χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για κεντρικό έλεγχο και οργάνωση ,αλλά ούτε για οικουμενική πληροφόρηση. Λόγω της κατανεμημένης προσέγγισης καθώς και της ευκολίας επεκτασιμότητας των αλγορίθμων συναίνεσης, έχουν βρει εφαρμογή σε ποικίλα

προβλήματα, όπως τον συγχρονισμό, την οργάνωση και τη συνάντηση πρακτόρων.[24]

Η εικόνα 3.1 δείχνει ένα απλό μοντέλο ενός δικτύου συναίνεσης(consensus). Τα ελεγχόμενα μέρη είναι μια ομάδα παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Η ομάδα αυτή μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη και στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μία ομάδα τριών πρακτόρων για παράδειγμα . Σε αυτό το δίκτυο κάθε πράκτορας έχει δύο μέρη: το ένα είναι ο τοπικός ελεγκτής και το άλλο ο διαχειριστής συναίνεσης. Ο τοπικός ελεγκτής αναφέρει συνεχώς στον διαχειριστή της πληροφορίες που αφορούν τη σύγκλιση σε κοινή απόφαση. Ο διαχειριστής διαπραγματεύεται με τους γειτονικούς πράκτορες, μεταξύ άλλων, μέσω του δικτύου επικοινωνίας. Ύστερα ο διαχειριστής υπολογίζει το αποτέλεσμα που προκύπτει και μεταφέρει την απόφαση του στον τοπικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής τότε ρυθμίζει τις ενέργειες του βασιζόμενος στο αποτέλεσμα της συναίνεσης και αναφέρει την καινούργια του κατάσταση πάλι στον διαχειριστή. Αυτή είναι μία επαναληπτική διαδικασία.



Σχήμα 3.1: Ένα απλό μοντέλο ενός δικτύου συναίνεσης [20]

3.1.1 Θεωρία Γράφων

Ένας προφανής τρόπος να προσομοιώνουμε την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ πρακτόρων είναι με τη χρήση κατευθυνόμενων / μη κατευθυνόμενων γράφων. Ένας γράφος αποτελείται από ένα ζευγάρι (N, \mathcal{E}) , όπου N είναι ένα πεπερασμένο μη κενό σύνολο κόμβων και $\mathcal{E} \in N^2$ είναι ένα σύνολο από ζευγάρια κόμβων, που ονομάζονται ακμές. Στην περίπτωση μας έχουμε μη κατευθυνόμενο γράφο καθώς έχει γίνει θεώρηση ότι η πληροφορίες μεταδίδονται αμφίδρομα. Ένα μη κατευθυνόμενο μονοπάτι ορίζεται ως (v_{i_j}, v_{i_k}) και είναι ισοδύναμο με (v_{i_k}, v_{i_j}) , όπου $v_{i_k} \in N$. Ένας μη κατευθυνόμενος γράφος ονομάζεται συνδεδεμένος αν υπάρχει μονοπάτι μεταξύ κάθε διακριτού ζευγαριού κόμβων.

Εάν υπάρχει το μονοπάτι (v_{i_j}, v_{i_k}) αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι i, j μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες.

Ο πίνακας γειτνίασης $A = [a_{ij}]$ ενός μη κατευθυνόμενου γράφου ορίζεται για τις ανάγκες του αλγορίθμου μας ως $a_{ii}=1$ και $a_{ij}=1$ αν $(i, j) \in \mathcal{E}$ όπου $i \neq j$. Ο Λαπλασιανός πίνακας ενός μη κατευθυνόμενου γράφου ορίζεται ως $L = [l_{ij}]$, όπου $l_{ii} = \sum_j a_{ij}$ και $l_{ij} = -a_{ij}$ όπου $i \neq j$. Για μη κατευθυνόμενους γράφους ο

Λαπλασιανός πίνακας είναι συμμετρικός θετικά ημιορισμένος πίνακας, έχει δηλαδή μη αρνητικές ιδιοτιμές.[20],[21]

3.1.2 Αλγόριθμος Συναίνεσης

Έστω $x_i \in \mathbb{R}$ η τιμή της κατάστασης του κόμβου i . Αυτή η τιμή μπορεί να είναι οποιαδήποτε φυσική ποσότητα συμπεριλαμβανομένων της τάσης, ισχύος εξόδου και οριακού κόστους. Λέμε ότι οι κόμβοι ενός δικτύου έχουν φτάσει σε συναίνεση όταν και μόνο όταν $x_i = x_j$ για κάθε i, j .

Κάθε κόμβος ανταλλάσσει την τιμή της κατάστασης του με τους γείτονες του. Το μοντέλο consensus δίνεται από το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{x}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j), i = 1, \dots, n \quad (3.1)$$

Όπου a_{ij} είναι το στοιχείο στη θέση (i, j) του πίνακα γειτνίασης A . Το μοντέλο μπορεί να γραφτεί επίσης σε μορφή πινάκων με τον παρακάτω τρόπο

$$\dot{x} = -L_n x \quad (3.2)$$

Όταν οι πληροφορίες των μετρήσεων είναι διαθέσιμες και μπορούν να μεταδοθούν ανά πάσα χρονική στιγμή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του συνεχούς χρόνου. Γενικά αυτή η περίπτωση δεν είναι ρεαλιστική καθώς οι πληροφορίες απαιτούν ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για να μεταδοθούν από κόμβο σε κόμβο. Έτσι υπάρχει η ανάγκη να μοντελοποιηθεί η δυναμική του δικτύου συναίνεσης ως ένα δυναμικό σύστημα διακριτού χρόνου για να διευκολυνθεί η ανάλυση του[25]. Το μοντέλο συναίνεσης διακριτού χρόνου περιγράφεται ως εξής:

$$x_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n d_{ij}x_j[k], i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Όπου k είναι ο δείκτης διακριτού χρόνου, d_{ij} είναι το στοιχείο (i, j) του στοχαστικού κατά σειρά πίνακα d .

Ο πίνακας d ορίζεται ως

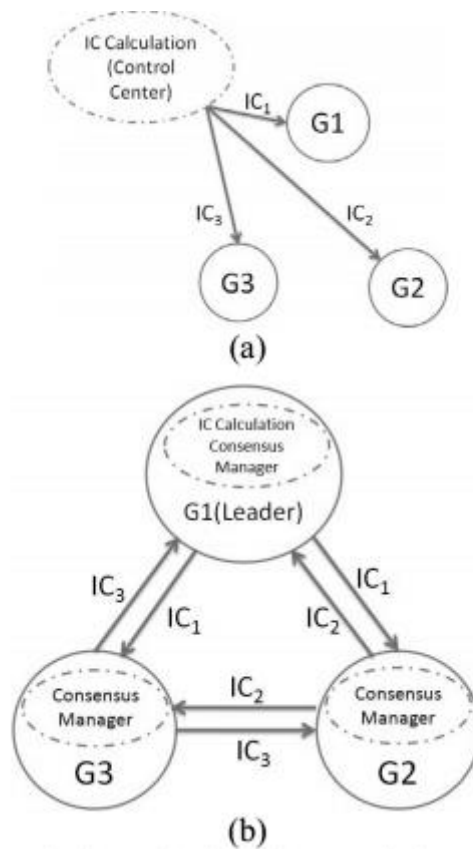
$$d_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sum_{j=1}^n l_{ij}}, i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Εφόσον τα δεδομένα σε ένα δίκτυο επικοινωνίας φτάνουν πάντα σε διακριτά χρονικά διαστήματα, επιλέγεται αλγόριθμος συναίνεσης διακριτού χρόνου για περαιτέρω ανάπτυξη. [19],[23]

3.2 Διατύπωση Προβλήματος

Το πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου είναι ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Οι τρόποι επίλυσης που συναντώνται όπως η μέθοδος χαλάρωσης Lagrange ή η μέθοδος τετραγωνικού προγραμματισμού απαιτούν οικουμενική πληροφόρηση για να καταλήξουν στα βέλτιστα επίπεδα παραγωγής κάθε γεννήτριας. Αυτή η προσέγγιση έχει τα επιπλέον προβλήματα ότι η συλλογή λεπτομερών πληροφοριών για κάθε γεννήτρια οδηγεί σε επιπλέον κόστος καθώς και ότι για κάθε αλλαγή στο δίκτυο απαιτείται επανασχεδιασμός του αλγορίθμου. Η κατακεντρωμένη προσέγγιση του αλγορίθμου που θα λύσει το πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου έχει τα πλεονεκτήματα που έχουν αναφερθεί παραπάνω. [17]

Το ζητούμενο της οικονομικής κατανομής φορτίου είναι να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας του δικτύου. Η συμβατική προσέγγιση που χρησιμοποιείται σήμερα υπαγορεύει πως όλες οι παράμετροι των γεννητριών στέλνονται στο κέντρο ελέγχου. Αυτό με τη σειρά του υπολογίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματος βασιζόμενο στις πληροφορίες που έχει συλλέξει από ολόκληρο το σύστημα.



Σχήμα 3.2: (α) Συμβατική τοπολογία επικοινωνίας κεντρικού ελέγχου συστήματος 3 μονάδων (β) Αποκεντρωμένος έλεγχος [20]

3.2.1 Συμβατική Προσέγγιση

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange για τον προσδιορισμό του σημείου βέλτιστης λειτουργίας, υποθέτοντας πως καμία γεννήτρια δεν έχει ξεπεράσει τα λειτουργικά όρια της, κάθε γεννήτρια θα έχει το ίδιο Οριακό Κόστος (OK) στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Ο κατάλληλος αλγόριθμος συναίνεσης συγκλίνει ασυμπτωτικά σε βέλτιστο σημείο ισορροπίας. Έτσι, το OK (γνωστό και ως λ) έχει επιλεγεί ως η μεταβλητή συναίνεσης.

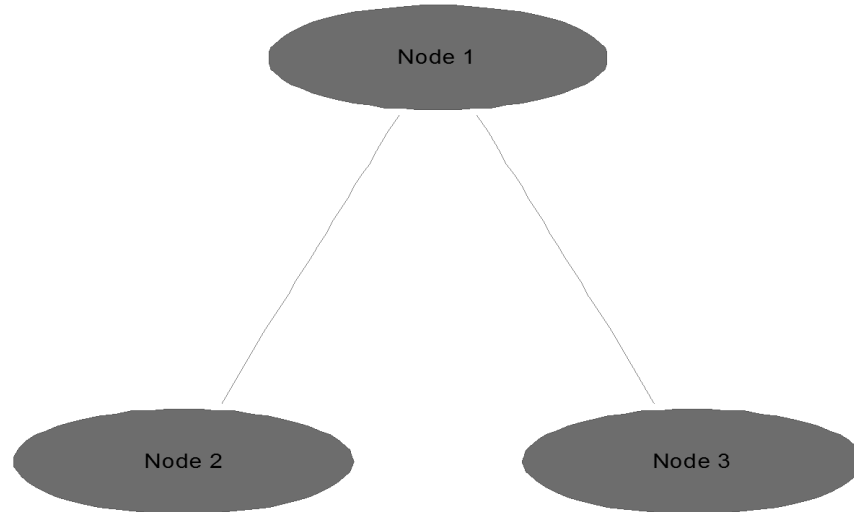
Για παράδειγμα, σε ένα απλό δίκτυο 3 κόμβων, κάθε κόμβος έχει το δικό του φορτίο και γεννήτρια. Στο σχήμα 2(α) φαίνεται η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας όταν χρησιμοποιείται ο συμβατικός κεντρικός έλεγχος. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει όλες τις πληροφορίες (φορτία, ισχύς εξόδου γεννητριών κλπ.) και υπολογίζει τα OK για κάθε γεννήτρια (G_1, G_2, G_3)

3.2.2 Αποκεντρωμένη Προσέγγιση

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εφαρμόζεται το μοντέλο συναίνεσης σε προβλήματα ευφύων δικτύων. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο συναίνεσης και επιλέγοντας το λ ως την μεταβλητή συναίνεσης, το Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής (ΠΟΚ) μπορεί να λυθεί με κατανεμημένο τρόπο και το οριακό κόστος κάθε γεννήτριας να οδηγηθεί στη βέλτιστη τιμή. Για να ικανοποιηθεί και ο περιορισμός της ζήτησης, η διαφορά μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ανατροφοδοτείται στον αλγόριθμο συναίνεσης έτσι ώστε το οριακό κόστος να οδηγηθεί στη βέλτιστη τιμή και η ζήτηση να ικανοποιηθεί.

Στο σχήμα 3.2(α) βλέπουμε το δίκτυο αποκεντρωμένου ελέγχου συναίνεσης : ο τοπικός ελεγκτής (που βρίσκεται μέσα σε κάθε γεννήτρια) θα ενημερώνει το λ του με βάση τα λ των γειτόνων του. Σε μία πρώτη προσέγγιση επιλέγεται και μία γεννήτρια ως "αρχηγός" του δικτύου , ο οποίος θα ελέγχει αν πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί το λ του δικτύου. Αυτό συμβαίνει σε περίπτωση που η συνολική παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από τις ανάγκες του φορτίου, οπότε το λ του δικτύου πρέπει να μειωθεί και αντίστροφα. Στο σχήμα 3.2(α) η γεννήτρια 1 έχει επιλεγεί ως "αρχηγός".
[22]

Απλό Παράδειγμα:



Σχήμα 3.3

Έστω ότι έχουμε το απλό δίκτυο 3 γεννητριών του σχήματος 3.3. Στόχος αυτού του παραδείγματος είναι να παρουσιαστεί πως επιτυγχάνεται η σύγκλιση σε μία κοινή τιμή μέσου όρου .

Θεωρούνται τυχαίες αρχικές τιμές για τα x της κάθε γεννήτριας. Έστω $x_1[0] = 3$, $x_2[0] = 4$, $x_3[0] = 5$. Ο πίνακας γειτνίασης του συστήματος είναι ο εξής

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Οπότε ο Λαπλασιανός Πίνακας ισούται με

$$L = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

και ο πίνακας d , τα στοιχεία του οποίου λειτουργούν ως βάρη για τον αλγόριθμο έχει ως εξής

$$d = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Ακολουθώντας τον κανόνα $x_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n d_{ij}x_j[k]$, ισχύει

$$x_1[1] = \frac{1}{3} * 3 + \frac{1}{3} * 4 + \frac{1}{3} * 5 = 4$$

$$x_2[1] = \frac{1}{2} * 3 + \frac{1}{2} * 4 = 3.5$$

$$x_3[1] = \frac{1}{2} * 3 + \frac{1}{2} * 5 = 4$$

Συνεχίζοντας

$$x_1[2] = \frac{1}{3} * 4 + \frac{1}{3} * 3.5 + \frac{1}{3} * 4 = 3.833$$

$$x_2[2] = \frac{1}{2} * 4 + \frac{1}{2} * 3.5 = 3.75$$

$$x_3[2] = \frac{1}{2} * 4 + \frac{1}{2} * 4 = 4$$

$$x_1[3] = \frac{1}{3} * 3.833 + \frac{1}{3} * 3.75 + \frac{1}{3} * 4 = 3.861$$

$$x_2[3] = \frac{1}{2} * 3.833 + \frac{1}{2} * 3.75 = 3.7915$$

$$x_3[3] = \frac{1}{2} * 3.833 + \frac{1}{2} * 4 = 3.9165$$

$$x_1[4] = \frac{1}{3} * 3.861 + \frac{1}{3} * 3.7915 + \frac{1}{3} * 3.9165 = 3.85633$$

$$x_2[4] = \frac{1}{2} * 3.861 + \frac{1}{2} * 3.7915 = 3.82625$$

$$x_3[4] = \frac{1}{2} * 3.861 + \frac{1}{2} * 3.9165 = 3.88875$$

$$x_1[5] = \frac{1}{3} * 3.85633 + \frac{1}{3} * 3.82625 + \frac{1}{3} * 3.88875 = 3.85711$$

$$x_2[5] = \frac{1}{2} * 3.85633 + \frac{1}{2} * 3.82625 = 3.84129$$

$$x_3[5] = \frac{1}{2} * 3.85633 + \frac{1}{2} * 3.88875 = 3.87254$$

$$x_1[6] = \frac{1}{3} * 3.85711 + \frac{1}{3} * 3.84129 + \frac{1}{3} * 3.87254 = 3.85698$$

$$x_2[6] = \frac{1}{2} * 3.85711 + \frac{1}{2} * 3.84129 = 3.8492$$

$$x_3[6] = \frac{1}{2} * 3.85711 + \frac{1}{2} * 3.87254 = 3.864825$$

$$x[7] = \frac{1}{3} * 3.85698 + \frac{1}{3} * 3.8492 + \frac{1}{3} * 3.864825 = 3.857$$

$$x_2[7] = \frac{1}{2} * 3.85698 + \frac{1}{2} * 3.8492 = 3.853$$

$$x_3[7] = \frac{1}{2} * 3.85698 + \frac{1}{2} * 3.864825 = 3.86$$

$$x_1[8] = \frac{1}{3} * 3.857 + \frac{1}{3} * 3.853 + \frac{1}{3} * 3.86 = 3.8566$$

Κεφάλαιο 3: Μοντέλο Consensus

$$x_2[8] = \frac{1}{2} * 3.857 + \frac{1}{2} * 3.853 = 3.855$$
$$x_3[8] = \frac{1}{2} * 3.857 + \frac{1}{2} * 3.86 = 3.8585$$

Οπότε και ο αλγόριθμος σταματάει, αφού έχει επιτευχθεί σύγκλιση στην τιμή 3,85

Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμος

4.1 Απλή Μορφή-Χωρίς Περιορισμούς Παραγωγής Γεννητριών

Υποτίθεται ότι η συνάρτηση κόστους κάθε γεννήτριας έχει την τετραγωνική μορφή:

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (4.1)$$

Όπως έχει αναφερθεί ο στόχος του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής είναι να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος λειτουργίας για ένα σύστημα n γεννητριών:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (4.2)$$

Υπό τον περιορισμό ζήτησης:

$$P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0 \quad (4.3)$$

Όπου P_{Gi} είναι η ισχύς εξόδου κάθε γεννήτριας i και P_D είναι η συνολική ζήτηση του φορτίου. Φαίνεται εδώ πως έχουν αγνοηθεί οι απώλειες μεταφοράς του δικτύου. Με βάση αυτή τη θεώρηση έχει αναπτυχθεί ο αλγόριθμος. Επίσης έχει αγνοηθεί το κόστος εκκίνησης και παύσης των θερμικών μονάδων. Ας υποτεθεί ότι όλες οι γεννήτριες λειτουργούν μέσα στα όρια λειτουργίας τους. Στον αλγόριθμο, ο ορισμός του οριακού κόστους κάθε γεννήτριας είναι ίδιος με την Οικονομική Κατανομή Φορτίου

$$IC_i = \frac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} = \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

Επιλέγεται το Οριακό Κόστος ως η πληροφορία κατάστασης και χρησιμοποιείται ο Αλγόριθμος Συναίνεσης που περιεγράφηκε παραπάνω

$$\lambda_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j[k], \quad i = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

Όπου d_{ij} είναι το στοιχείο στη θέση (i, j) του πίνακα D .

Η απλούστερη προσέγγιση του προβλήματος ορίζει την σχέση (4.5) ως τη σχέση με την οποία ενημερώνονται όλοι οι κόμβοι πλην του "αρχηγού". Ακολουθώντας αυτόν τον κανόνα για να ενημερώνεται η κατάσταση κάθε κόμβου το σύστημα θα συγκλίνει σε ένα κοινό Οριακό Κόστος ασυμπτωτικά. Ο ρυθμός σύγκλισης εξαρτάται από την τοπολογία του συστήματος. Συγκεκριμένα από τη δεύτερη μικρότερη ιδιοτιμή του Λαπλασιανού πίνακα. Η τιμή αυτή είναι γνωστή και ως αλγεβρική συνδεσιμότητα και είναι ένα μέτρο υπολογισμού της ταχύτητας σύγκλισης του αλγορίθμου.

Προκειμένου να ικανοποιείται και ο περιορισμός (4.3) που αφορά την κάλυψη του ζητούμενου φορτίου, ορίζεται η ποσότητα

$$\Delta P = P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \quad (4.6)$$

που αντιστοιχεί στην περισσευούμενη ή υπολειπόμενη ισχύ του φορτίου. Προκειμένου να εξαλειφθεί αυτή η ποσότητα ορίζεται "αρχηγός" ο οποίος ακολουθεί τον εξής κανόνα ενημέρωσης

$$\lambda_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i \quad (4.7)$$

όπου το ε ένας θετικός αριθμός. Το ε καλείται συντελεστής σύγκλισης και ελέγχει την ταχύτητα σύγκλισης του "αρχηγού". Ο αρχηγός αποφασίζει αν πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί το οριακό κόστος του συστήματος ώστε να ικανοποιηθεί η συνολική ζήτηση ισχύος. Έτσι αν συνολικά παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο να μειώσει το οριακό κόστος του συστήματος και αντίστροφα.

Στην παρούσα διπλωματική έχει γίνει η θεώρηση πως κάθε κόμβος λειτουργεί ως αρχηγός και έτσι όλες οι γεννήτριες ακολουθούν τον κανόνα (4.7). [23], [24]

4.2 Ολοκληρωμένη Μορφή-Με Περιορισμούς Λειτουργίας Γεννητριών

Σε αυτήν την ολοκληρωμένη και πιο σωστή μορφή του αλγορίθμου εκτός από τον περιορισμό της ζήτησης (4.3) λαμβάνονται υπ' όψη και τα λειτουργικά όρια κάθε γεννήτριας

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (4.8)$$

όπου $\bar{x}_i, \underline{x}_i$ είναι το ανώτερο και το κατώτερο όριο, αντίστοιχα, παραγωγής της γεννήτριας i .

Η λύση του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής με περιορισμούς λειτουργίας λοιπόν είναι [22]

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i[k + 1] = \underline{P}_i, \text{ όταν } \lambda_i < \lambda_{i,min} \\ P_i[k + 1] = \frac{\lambda_i - b_i}{2 * a_i}, \text{ όταν } \lambda_{i,max} < \lambda_i < \lambda_{i,max} \\ P_i[k + 1] = \bar{P}_i, \text{ όταν } \lambda_i > \lambda_{i,max} \end{array} \right. \quad (4.9)$$

4.3 Αναλυτική Παρουσίαση Αλγορίθμου

Γίνεται η υπόθεση πως έχουμε ένα δίκτυο n κόμβων με συνολικό φορτίο P_{Load} και k αριθμό γεννητριών. Κάθε γεννήτρια εξυπηρετεί το δικό της φορτίο $P_{Load,i}$ για το οποίο ισχύει $\sum_{i=1}^k P_{Load,i} = P_{Load}$. Στόχος του αλγορίθμου είναι να προσδιορίσει το βέλτιστο επίπεδο παραγωγής κάθε γεννήτριας, ώστε το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος να είναι το ελάχιστο.

Α) Αρχικοποίηση

Προκειμένου να ξεκινήσει ο αλγόριθμος πρέπει να οριστούν τιμές για τα μεγέθη P_{output} , λ , DP (*mismatch*) κάθε γεννήτριας. Πριν όμως ξεκινήσει η διαδικασία της αρχικοποίησης πρέπει να υπολογιστούν τα ανώτερα και κατώτερα όρια για τα λ κάθε κόμβου. Αυτό γίνεται με τον εξής τρόπο.

$$\lambda_{i,min} = 2 * a_i * \underline{P}_i + b_i \quad (4.10)$$

και

$$\lambda_{i,max} = 2 * a_i * \bar{P}_i + b_i \quad (4.11)$$

Για το P_{output} ορίζεται μία τυχαία τιμή εντός των λειτουργικών ορίων κάθε γεννήτριας, καθώς δεν επηρεάζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου. Στην παρούσα διπλωματική επιλέγεται αυθαίρετα η τιμή $P(0)_i = \frac{P_{Load}}{k}$. Με βάση αυτή την τιμή υπολογίζονται και τα $\lambda_i(0)$, $DP_i(0)$ με τον παρακάτω τρόπο. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω

$$\lambda_i = \frac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}}$$

Οπότε

$$\lambda_i(0) = 2 * a_i * P_i(0) + b_i$$

και

$$DP_i(0) = P_{Load,i} - P(0)_i = P_{Load,i} - \frac{P_{Load}}{k}$$

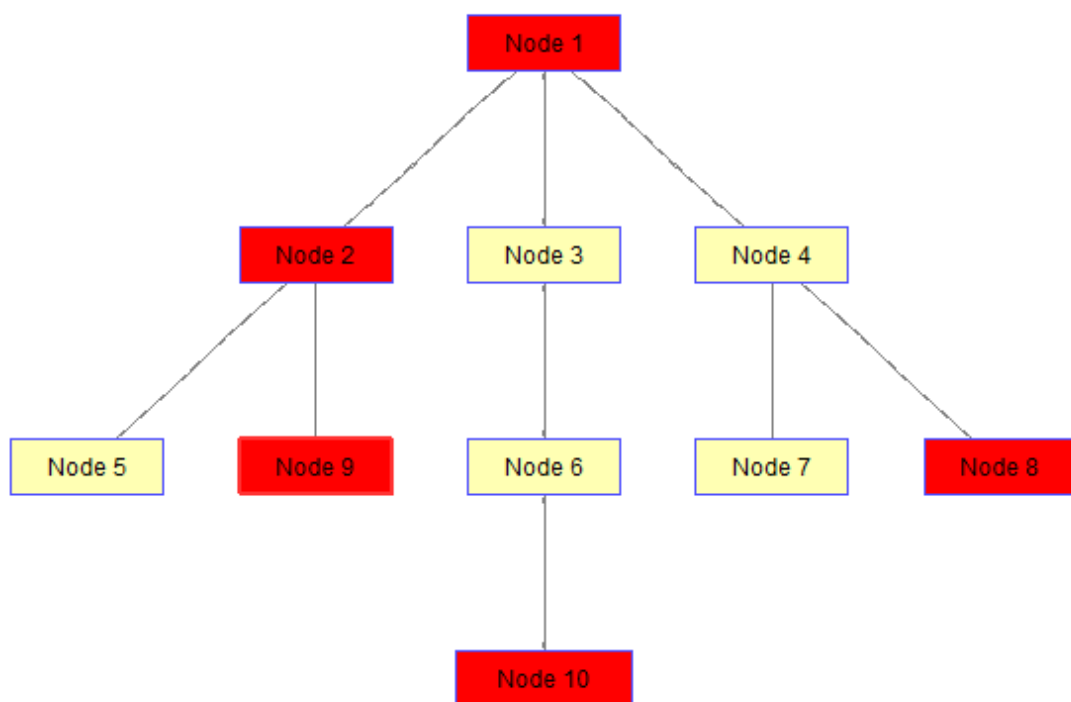
Αφού γίνουν οι υπολογισμοί τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ξεχωριστούς πίνακες για να γίνει χρήση αυτών στο επόμενο βήμα.[23], [27]

Β) Κυρίως Αλγόριθμος

Αφού έχουν τεθεί οι αρχικές τιμές του αλγορίθμου, τα επόμενα βήματα δίνονται παρακάτω

Εδώ πρέπει να επισημανθεί μία σημαντική διάκριση μεταξύ της τοπολογίας του ηλεκτρικού δικτύου και της τοπολογίας του δικτύου επικοινωνίας των κόμβων παραγωγής. Η τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου αναπαρίσταται με τον πίνακα γειτνίασης A με τον τρόπο που έχει αναφερθεί παραπάνω. Στην παρούσα διπλωματική έχει χρησιμοποιηθεί ένας ακόμα πίνακας, ο F . Ο πίνακας αυτός προκύπτει από τον A με το κριτήριο της συντομότερης διαδρομής που με αντίστοιχο τρόπο με τον A (1 στην διαγώνιο και στη θέση (i, j) αν οι κόμβοι i, j επικοινωνούν, 0 διαφορετικά) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι κόμβοι στους οποίους υπάρχουν γεννήτριες. Από τον πίνακα F προκύπτει ο Λαπλασιάνος πίνακας L με τον τρόπο που έχει αναφερθεί παραπάνω. Ο πίνακας L έχει την μόνη χρησιμότητα ότι μέσω αυτού υπολογίζεται ο πίνακας d που είναι και ο μόνος πίνακας που ουσιαστικά ενδιαφέρει τον αλγόριθμο.

Έτσι για παράδειγμα σε ένα δίκτυο 10 κόμβων (Σχήμα 4.1) με 5 γεννήτριες ο πίνακας A θα είναι ένας πίνακας 10×10 που θα παρουσιάζει την τοπολογία του δικτύου μας, ενώ ο πίνακας F θα είναι ένας πίνακας 5×5 που θα δείχνει τον τρόπο που συνδέονται οι γεννήτριες.



Σχήμα 4.1

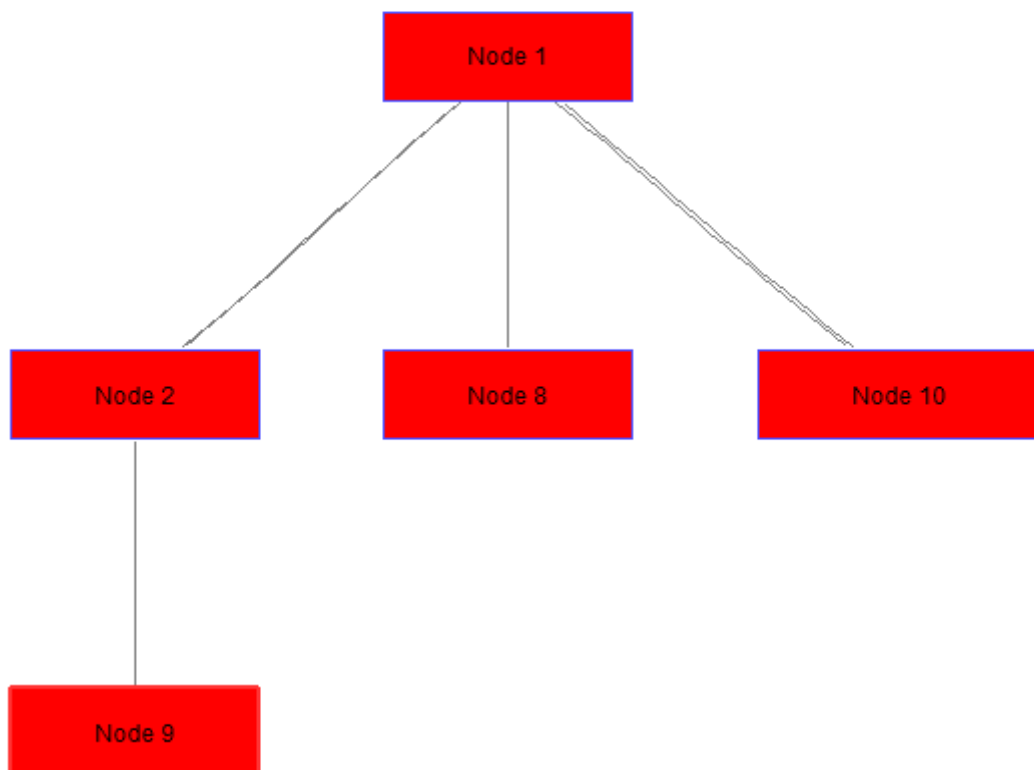
Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμος

Οι γεννήτριες είναι συνδεδεμένες στους κόκκινους κόμβους. Έτσι ο πίνακας γειτνίασης A είναι ο εξής

```
A= 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0
    1 1 0 0 1 0 0 0 1 0
    1 0 1 0 0 1 0 0 0 0
    1 0 0 1 0 0 1 1 0 0
    0 1 0 0 1 0 0 0 0 0
    0 0 1 0 0 1 0 0 0 1
    0 0 0 1 0 0 1 0 0 0
    0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
    0 1 0 0 0 0 0 0 1 0
    0 0 0 0 0 1 0 0 0 1
```

Ενώ ο πίνακας F που δείχνει πως συνδέονται οι γεννήτριες(Σχήμα 4.2) είναι ο εξής

```
F= 1 1 1 0 1
    1 1 0 1 0
    1 0 1 0 0
    0 1 0 1 0
    1 0 0 0 1
```



Σχήμα 4.2

Έτσι ο Λαπλασιανός είναι ο εξής

$$L = \begin{pmatrix} 4 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Για να καταλήξουμε τελικά στον d που μας ενδιαφέρει

$$d = \begin{pmatrix} 1/4 & 1/4 & 1/4 & 0 & 1/4 \\ 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 \\ 1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Αφού έχει γίνει και ο υπολογισμός του πίνακα d ξεκινάει η διαδικασία. Κάθε κόμβος γεννήτριας διαβάσει τις τιμές του $\lambda(k)$ των γειτόνων του πρώτα και μετά υπολογίζει την δικιά του τιμή $\lambda(k + 1)$.

Η τιμή $\lambda(k + 1)$ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (4.7). Στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται αυτό υλοποιείται με τον παρακάτω τρόπο.

Για κάθε κόμβο που στον πίνακα d αντιστοιχεί σε μία γραμμή, πολλαπλασιάζονται τα στοιχεία αυτής της γραμμής ένα προς ένα με τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα που έχουν αποθηκευτεί τα αρχικά λ . Έτσι για το παραπάνω παράδειγμα, ο κόμβος 9 που αντιστοιχεί στην τέταρτη γραμμή του d θα ενημερώσει την τιμή του λ , αφού λάβει υπόψη την προηγούμενη τιμή του λ του κόμβου 2, καθώς και τη δικιά του με βαρύτητα 0.5 αντίστοιχα.

Αφού έχει υπολογίσει την τιμή του λ για την τρέχουσα επανάληψη υπολογίζεται η αντίστοιχη παραγωγή κάθε κόμβου σύμφωνα με τον τύπο (4.9).

Τέλος πρέπει να υπολογιστεί και το mismatch κάθε κόμβου σύμφωνα με τον εξής τύπο

$$DP_i[k + 1] = \sum_{j=1}^k d_{ij} * DP_j[k] - (P_i[k + 1] - P_i[k]) \quad (4.12)$$

Οπότε συνολικά έχουμε τους εξής κανόνες ενημέρωσης του κάθε κόμβου

$$\lambda_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i \quad (\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i[k + 1] = \underline{P}_i, \text{ όταν } \lambda_i < \lambda_{i,min} \\ P_i[k + 1] = \frac{\lambda_i - b_i}{2 * a_i}, \text{ όταν } \lambda_{i,max} < \lambda_i < \lambda_{i,max} \quad (\beta) \\ P_i[k + 1] = \overline{P}_i, \text{ όταν } \lambda_i > \lambda_{i,max} \end{array} \right. \quad \{4.13\}$$

$$DP_i[k + 1] = \sum_{j=1}^k d_{ij} * DP_j[k] - (P_i[k + 1] - P_i[k]) \quad (\gamma)$$

Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και σε κάθε βήμα γίνεται ο έλεγχος

$$\lambda_i[k + 1] - \lambda_i[k] < 0,0001$$

καθώς έχει γίνει η θεώρηση πως μία διαφορά μικρότερη του 0,0001 μεταξύ 2 διαδοχικών τιμών του λ σημαίνει πως έχει επιτευχθεί σύγκλιση.

Όταν η λογική πράξη αυτή επαληθευτεί ο αλγόριθμος σταματάει.

Σχόλιο: Ο επαναληπτικός αλγόριθμος που περιγράφεται παραπάνω απαιτεί μόνο τοπικές πληροφορίες. Συγκεκριμένα ο κανόνας ανανέωσης της κατάστασης της γεννήτριας i απαιτεί μόνο ανταλλαγή πληροφορίας με τους γείτονες του οπότε και θεωρείται πλήρως κατανεμημένος.

Ας παρουσιαστούν τώρα οι σχέσεις 4.13 σε μορφή πινάκων. Εδώ απαιτείται μία μετατροπή των συντελεστών της συνάρτησης κόστους σε μία ελαφρώς διαφορετική μορφή. Συγκεκριμένα η συνάρτηση θα πάρει τη μορφή

$$C_i(x_i) = \frac{(x_i - \alpha_i)^2}{2 * \beta_i} + \gamma_i$$

$$\text{Όπου } \alpha_i = -\frac{b_i}{2a_i}$$

$$\beta_i = \frac{1}{2a_i}$$

$$\gamma_i = c_i - \frac{b_i^2}{4a_i}$$

Οπότε οι σχέσεις (4.11) γράφονται σε μορφή πινάκων με τον εξής τρόπο.

$$\boldsymbol{\lambda} (k+1) = d * \boldsymbol{\lambda}(k) + \boldsymbol{\varepsilon} * \mathbf{DP}(k) \quad (4.13a)$$

$$\mathbf{P} (k+1) = \mathbf{B} * \boldsymbol{\lambda} (k+1) + \boldsymbol{\alpha} \quad (4.13b)$$

$$\mathbf{DP} (k+1) = d * \mathbf{DP} (k) - (\mathbf{P} (k+1) - \mathbf{P} (k)) \quad (4.13c)$$

όπου $\mathbf{P}, \mathbf{DP}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\lambda}$ είναι τα διανύσματα που αποτελούνται από τα $P_i, DP_i, \alpha_i, \lambda_i$ αντίστοιχα και ο $\mathbf{B} =$ διαγώνιος $([\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n])$

Θεώρημα: Στις σχέσεις (4.13), αν ο θετικός σταθερός αριθμός ε είναι επαρκώς μικρός, τότε όλες οι μεταβλητές συγκλίνουν στην λύση του κλασσικού προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου, δηλαδή

$$\lambda_i(k) \rightarrow \lambda^*, P_i(k) \rightarrow P^*, DP_i(k) \rightarrow 0$$

Απόδειξη: Χρησιμοποιείται η μέθοδος διαταραχής ιδιοτιμών (eigenvalue perturbation approach) για να αναλυθούν οι ιδιότητες σύγκλισης. Αντικαθιστώντας το \mathbf{P} στη σχέση (4.13c) με το $\boldsymbol{\lambda}$ χρησιμοποιώντας τις (4.13a), (4.13b), προκύπτει

$$\mathbf{DP} (k+1) = (d - \boldsymbol{\varepsilon} * \mathbf{B}) * \mathbf{DP} (k) + \mathbf{B} * (\mathbf{I} - d) * \boldsymbol{\lambda} (k) \quad (4.14)$$

όπου I είναι ο μοναδιαίος πίνακας κατάλληλων διαστάσεων

Γράφοντας τις σχέσεις (4.13a) και (4.14) σε μορφή πινάκων, προκύπτει το παρακάτω σύστημα

$$\begin{bmatrix} \lambda(k+1) \\ \mathbf{DP}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & \varepsilon I \\ B(I-d) & d - \varepsilon B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda(k) \\ \mathbf{DP}(k) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ορίζεται ως $M \triangleq \begin{bmatrix} d & 0 \\ B(I-d) & d \end{bmatrix}$ και $\Delta \triangleq \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -B \end{bmatrix}$

Το σύστημα των πινάκων (4.15) μπορεί να θεωρηθεί ως το M με τη διαταραχή του διανύσματος $\varepsilon\Delta$. Ο M είναι ένας κάτω block τριγωνικός πίνακας, με τις ιδιοτιμές του M να είναι οι ιδιοτιμές του d . Οπότε ο M έχει μία ιδιοτιμή $\theta_1 = 1$ και οι υπόλοιπες είναι μιγαδικοί αριθμοί μέτρου μικρότερου του 1. Έστω ότι έχει άλλη μία ιδιοτιμή ίση με $\theta_2 = 1$. Κατασκευάζουμε τα διανύσματα u_1, u_2 και v_1^T, v_2^T με τον παρακάτω τρόπο

$$U = [u_1 \quad u_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \mu & -\eta\mu \end{bmatrix}$$

όπου $\eta = \sum_{i=1}^n \beta_i$ και

$$V^T = \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1^T B & 1^T \\ \omega^T & 0^T \end{bmatrix}$$

που είναι δύο γραμμικά ανεξάρτητα ιδιοδιανύσματα του M . Επίσης $V^T U = I$

Όταν το ε είναι μικρό η απόκλιση των θ_1 και θ_2 διαταρασσόμενων από το $\varepsilon\Delta$ μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από τις ιδιοτιμές του $V^T \Delta U$ και

$$V^T \Delta U = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega^T \mu & -\eta\omega^T \mu \end{bmatrix}$$

Οι ιδιοτιμές του $V^T \Delta U$ είναι 0 και $-\eta\omega^T \mu < 0$. Έτσι $\frac{d\theta_1}{d\varepsilon} = 0$ και

$\frac{d\theta_2}{d\varepsilon} = -\eta\omega^T \mu < 0$. Αυτό σημαίνει πως η θ_1 δεν αλλάζει με την μεταβολή του ε , ενώ

όταν το $\varepsilon > 0$, το θ_2 μειώνεται. Έστω δ_1 το ανώτερο όριο του ε τέτοιο ώστε όταν

$\varepsilon < \delta_1$, $|\theta_2| < 1$. Εφόσον οι ιδιοτιμές εξαρτώνται από τα στοιχεία του πίνακα, στη

συγκεκριμένη περίπτωση οι υπόλοιπες ιδιοτιμές του $M + \varepsilon\Delta$ εξαρτώνται από το ε .

Έτσι υπάρχει ένα άνω όριο δ_2 τέτοιο ώστε $\varepsilon < \delta_2$, $|\theta_j| < 1, j = 2, 3, \dots, N$. Έτσι

λοιπόν αν επιλέξουμε $\varepsilon < \min(\delta_1, \delta_2)$ διασφαλίζεται ότι η ιδιοτιμή θ_1 θα είναι μοναδική και όλες οι υπόλοιπες ιδιοτιμές θα έχουν μέτρο μικρότερο του 1.

Μπορεί να επαληθευτεί ότι $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ είναι το ιδιοδιάνυσμα του συστήματος πινάκων του

(4.14) που συνδέεται με την ιδιοτιμή $\theta_1 = 1$. Εφόσον όλες οι υπόλοιπες ιδιοτιμές έχουν μέτρο μικρότερο της μονάδας

$$\begin{bmatrix} \lambda(k) \\ \mathbf{DP}(k) \end{bmatrix} \text{ συγκλίνουν σε εύρος } \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

όσο το $k \rightarrow \infty$. Έτσι $\mathbf{DP} \rightarrow 0$. Από την 4.13c, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $1^T x(k) = D$, δηλαδή ο περιορισμός της ζήτησης ικανοποιείται. Από την 4.13b, $\lambda_i(k)$ συγκλίνει σε μία κοινή τιμή, δηλαδή το κριτήριο του οριακού κόστους ικανοποιείται.[22]

4.4 Ανάπτυξη Αλγορίθμου σε περιβάλλον MATLAB

Το επόμενο βήμα είναι να αναπτυχθεί το μοντέλο σε περιβάλλον MATLAB ώστε να μελετηθούν διάφορα χαρακτηριστικά και δυνατότητες του. Το MATLAB προσφέρει δυνατότητες ανάπτυξης και προσομοίωσης αλγορίθμων.

Ο αλγόριθμος δέχεται ως είσοδο την τοπολογία του δικτύου με τη μορφή του πίνακα A , την τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας με τη μορφή του δικτύου F , έναν πίνακα που περιέχει τους συντελεστές των συναρτήσεων κόστους των γεννητριών, καθώς και δύο πίνακες που περιέχουν τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια παραγωγής των γεννητριών.

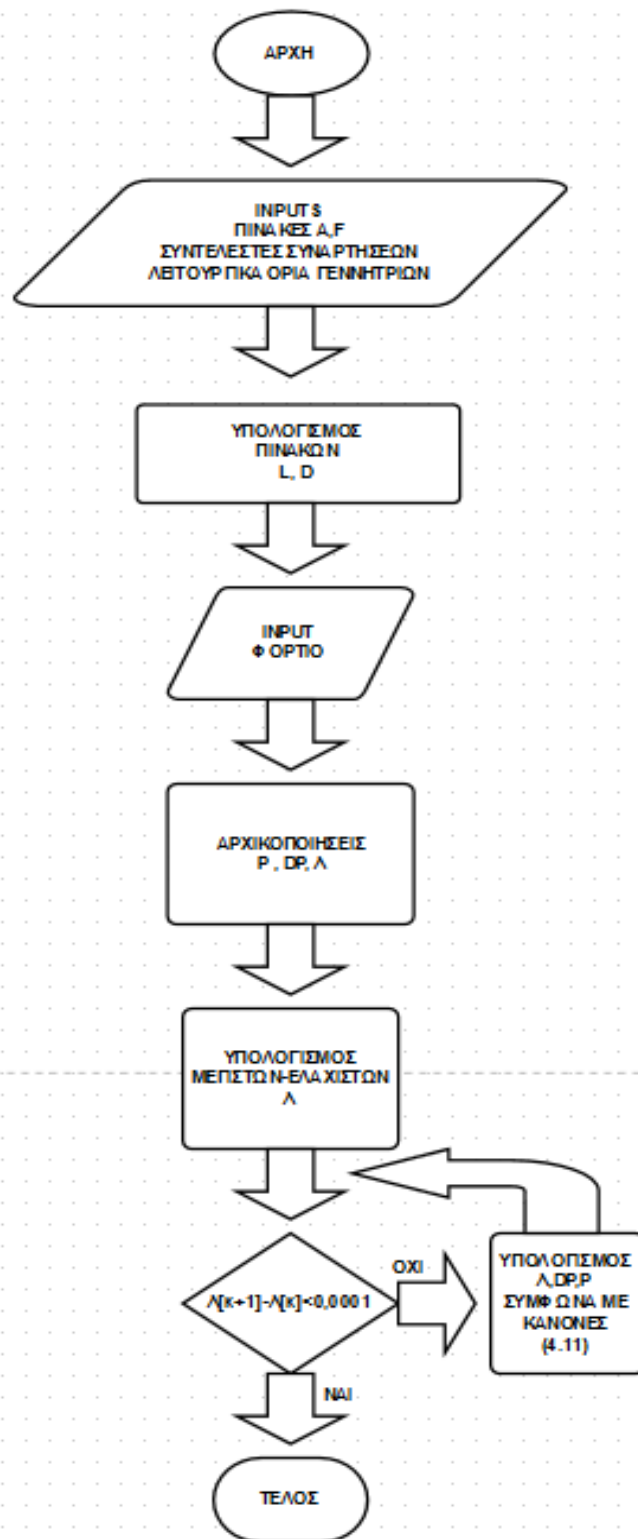
Από τον πίνακα F προκύπτει ο πίνακας D , όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο οποίος περιέχει τα βάρη για τις εξισώσεις υπολογισμού οριακού κόστους και mismatch.

Στη συνέχεια δημιουργούνται δύο πίνακες λ_{\min} και λ_{\max} οι οποίοι περιέχουν τις ανώτερη και τις κατώτερη τιμή του οριακού κόστους για την κάθε γεννήτρια σύμφωνα με τους τύπους (4.10) και (4.11). Γίνεται η αρχικοποίηση των μεταβλητών σύμφωνα με τους κανόνες που αναφέρονται παραπάνω στο σχετικό κεφάλαιο και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στους αντίστοιχους πίνακες λ , P , DP . Στη συνέχεια ξεκινάει το κυρίως κομμάτι του αλγορίθμου όπως έχει περιγραφεί παραπάνω.

Το ενδιαφέρον είναι πως υλοποιήθηκε η διαδικασία της ανταλλαγής πληροφοριών. Αυτό έγινε με τη χρήση κοινών πινάκων για την αποθήκευση των μεταβλητών που αφορούν τον αλγόριθμο (λ , P , DP), η προσπέλαση του οποίου γίνεται μέσω του πίνακα D με τον εξής τρόπο. Ο αλγόριθμος διατρέχει τον πίνακα D και στη θέση κάθε μη μηδενικού στοιχείου, ανατρέχει στην αντίστοιχη στους πίνακες των μεταβλητών και χρησιμοποιεί το στοιχείο που βρίσκεται εκεί για τον υπολογισμό.

Με τον τρόπο αυτό έχει προσομοιωθεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου που είναι η ανταλλαγή πληροφορίας αποκλειστικά μεταξύ γειτόνων.

4.5 Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου



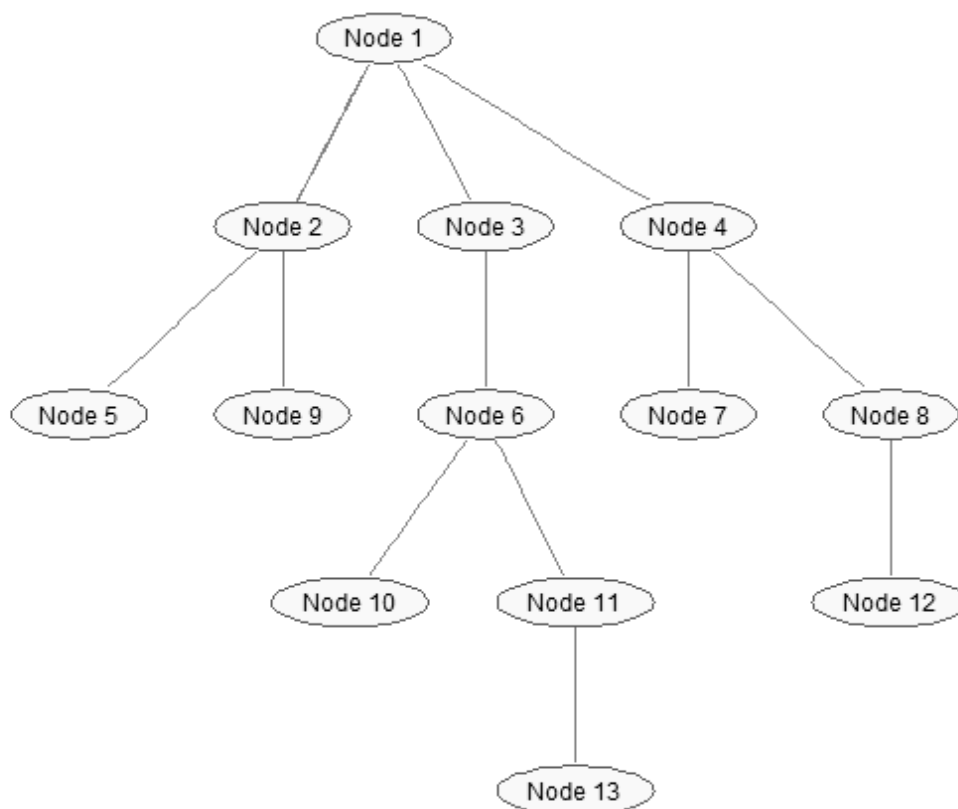
Σχήμα 4.3

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

5.1 Παράδειγμα κατανεμημένης επίλυσης προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η επίλυση του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου σε ένα δίκτυο 13 γεννητριών. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου όσον αφορά τη σύγκλιση στη βέλτιστη τιμή οριακού κόστους, τη κατανομή του φορτίου και τη διαφορά της παραγωγής με τη ζήτηση.

Αρχικά η τοπολογία επικοινωνίας του δικτύου είναι η παρακάτω



Σχήμα 5.1 : Τοπολογία δικτύου

και τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε γεννήτριας (συντελεστές συνάρτησης κόστους και τεχνικοί περιορισμοί) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

| | a_i | b_i | P_{max} | P_{min} |
|-------------|---------|-------|-----------|-----------|
| Γεννήτρια 1 | 0.0015 | 7.91 | 1200 | 75 |
| Γεννήτρια 2 | 0.00194 | 7.845 | 1200 | 50 |
| Γεννήτρια 3 | 0.00482 | 7.8 | 800 | 75 |
| Γεννήτρια 4 | 0.0016 | 7.925 | 400 | 50 |

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

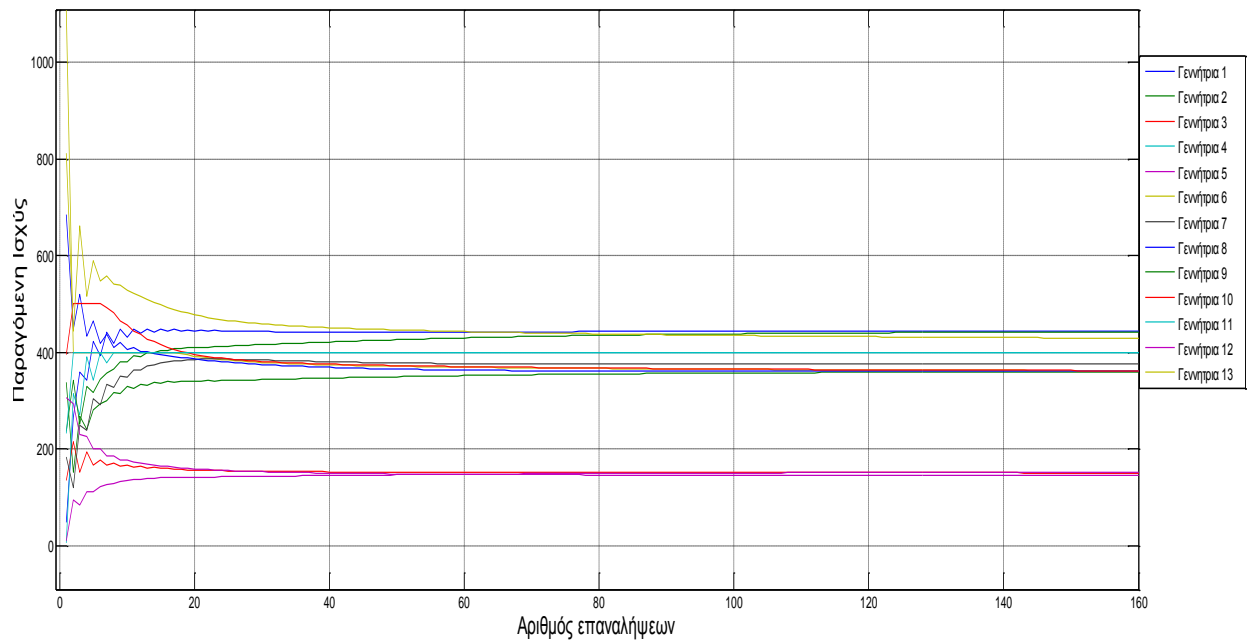
| | | | | |
|--------------|----------|-------|-----|------|
| Γεννήτρια 5 | 0.00472 | 7.81 | 700 | 25 |
| Γεννήτρια 6 | 0.00193 | 7.86 | 400 | 50 |
| Γεννήτρια 7 | 0.001762 | 7.915 | 500 | 42.5 |
| Γεννήτρια 8 | 0.001935 | 7.84 | 600 | 75 |
| Γεννήτρια 9 | 0.001492 | 7.92 | 750 | 25 |
| Γεννήτρια 10 | 0.001944 | 7.85 | 500 | 62.5 |
| Γεννήτρια 11 | 0.001535 | 7.918 | 400 | 75 |
| Γεννήτρια 12 | 0.00485 | 7.82 | 700 | 50 |
| Γεννήτρια 13 | 0.001562 | 7.92 | 800 | 37.5 |

Για ένα φορτίο 4500 MW ο αλγόριθμος κατανέμει το φορτίο με τον παρακάτω τρόπο

| | Φορτίο (MW) |
|--------------|-------------|
| Γεννήτρια 1 | 444,6861 |
| Γεννήτρια 2 | 360,2604 |
| Γεννήτρια 3 | 150,1627 |
| Γεννήτρια 4 | 400 |
| Γεννήτρια 5 | 151,7469 |
| Γεννήτρια 6 | 360,3119 |
| Γεννήτρια 7 | 376,4917 |
| Γεννήτρια 8 | 362,0386 |
| Γεννήτρια 9 | 443,1869 |
| Γεννήτρια 10 | 360,4332 |
| Γεννήτρια 11 | 400 |
| Γεννήτρια 12 | 146,4607 |
| Γεννήτρια 13 | 426,7655 |

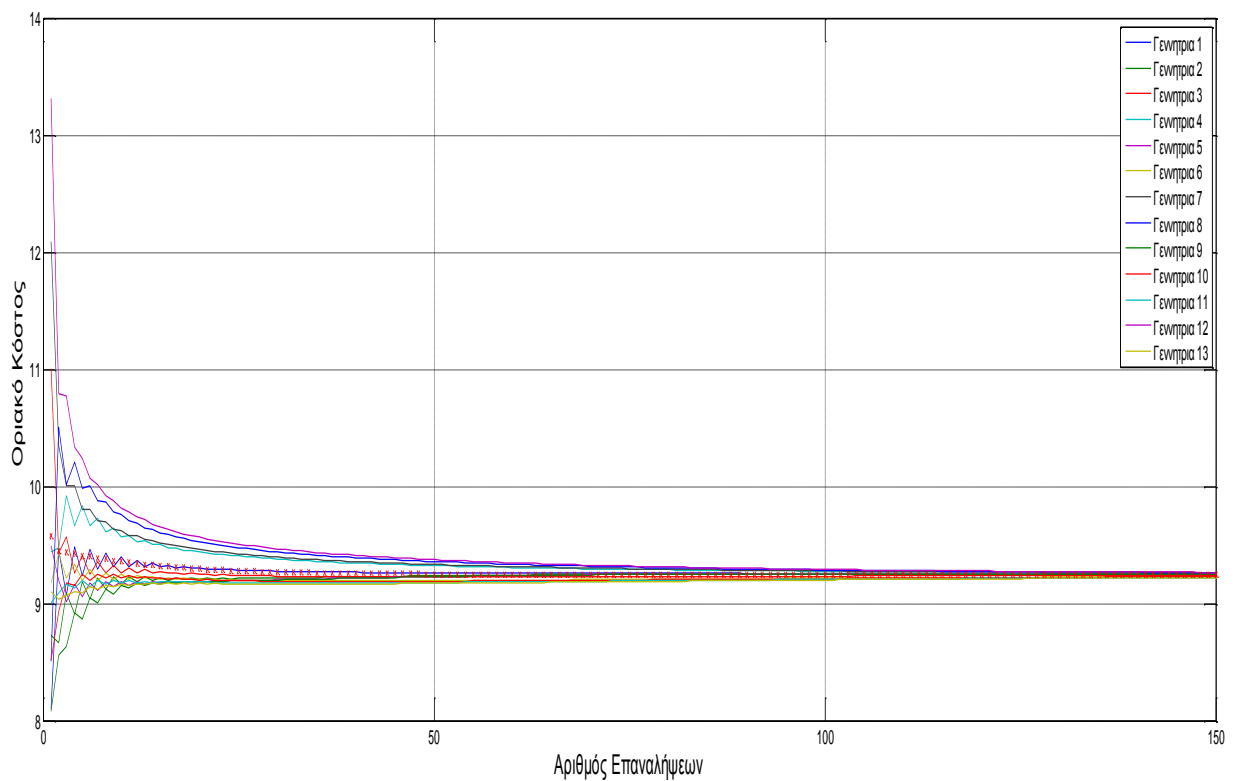
Που αντιστοιχεί στο παρακάτω διάγραμμα κατανομής φορτίου

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών



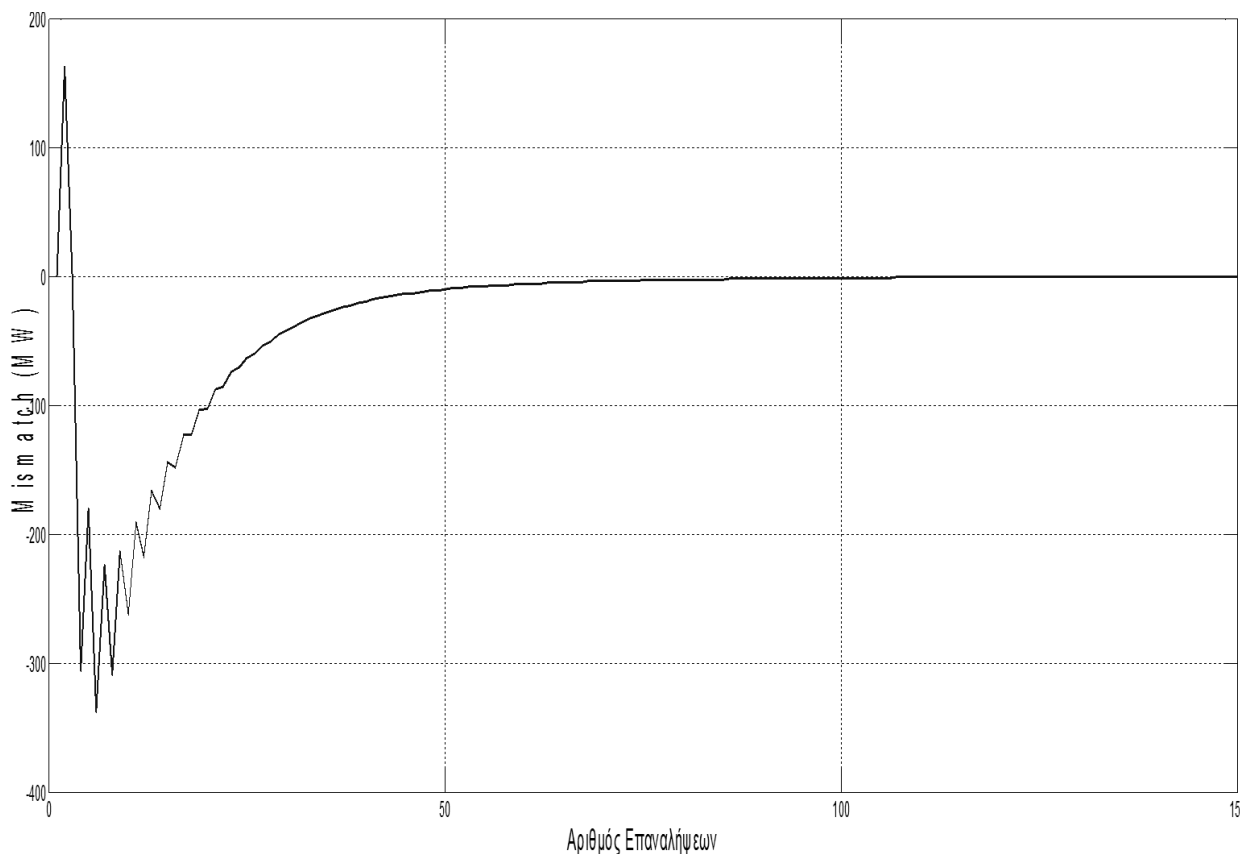
Σχήμα 5.2: Κατανομή Φορτίου

Ενώ το διάγραμμα σύγκλισης οριακού κόστους είναι το παρακάτω. Το δίκτυο συγκλίνει στη τιμή του οριακού κόστους 9.246 \$/MWh.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα Σύγκλισης Οριακού Κόστους

Ένα τελευταίο σημαντικό διάγραμμα που πρέπει να παρουσιαστεί αφορά τη μεταβολή της υπολειπόμενης ισχύος του συστήματος, τη διαφορά, δηλαδή, μεταξύ της ζητούμενης και της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα διαφοράς Ζητούμενης-Παραγόμενης Ισχύος

Φαίνεται πως με το πέρας του αλγορίθμου η διαφορά μεταξύ παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος έχει πρακτικά μηδενιστεί, αφού για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 2,61 %.

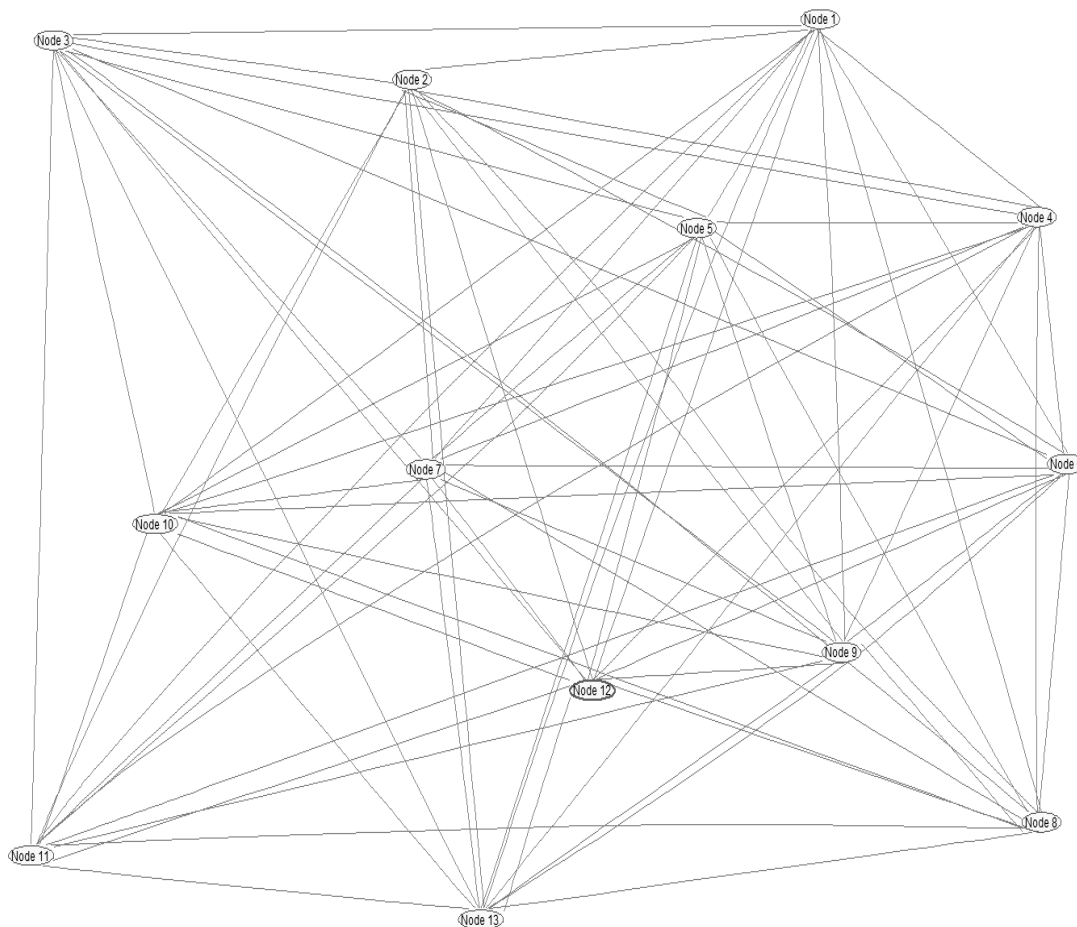
5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Κατανεμημένου Αλγορίθμου με το κλασικό Πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του αλγορίθμου, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κατανεμημένο αλγόριθμο που προσομοιώθηκε σε περιβάλλον MATLAB με τα αποτελέσματα που προκύπτουν με κλασικούς αλγορίθμους.

Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν δύο δίκτυα και έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου με τα αποτελέσματα που παράγει η συνάρτηση `quadprog` του MATLAB. Η συνάρτηση `quadprog` χρησιμοποιείται για την επίλυση του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής υπό τεχνικούς περιορισμούς. [26]

5.2.1 Δίκτυο Πλήρους Επικοινωνίας

Αρχικά επιλέχθηκε ένα δίκτυο 13 γεννητριών οι οποίες επικοινωνούν όλες μεταξύ τους (Σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5

Για ένα συνολικό φορτίο 2000 MW η κατανομή του φορτίου στις γεννήτριες, σύμφωνα με τον καταναμεμημένο αλγόριθμο είναι η εξής:

| | |
|-------------|------------------|
| Γεννήτρια 1 | 185,097110138395 |
| Γεννήτρια 2 | 167,074219763445 |
| Γεννήτρια 3 | 75 |
| Γεννήτρια 4 | 185,097110118406 |
| Γεννήτρια 5 | 72,4334948515485 |

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

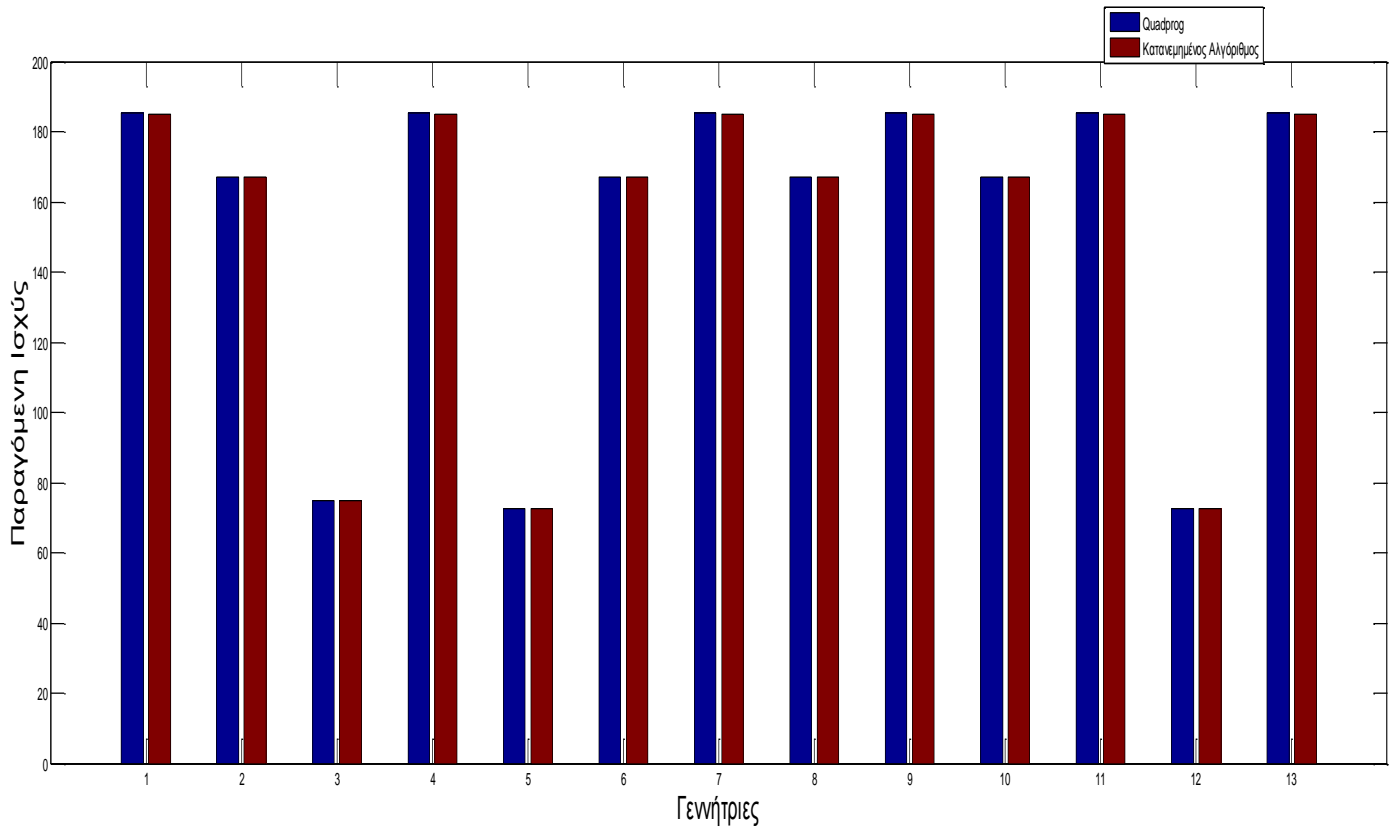
| | |
|--------------|------------------|
| Γεννήτρια 6 | 167,074219763445 |
| Γεννήτρια 7 | 185,097110181537 |
| Γεννήτρια 8 | 167,074219763234 |
| Γεννήτρια 9 | 185,097110170449 |
| Γεννήτρια 10 | 167,074219763462 |
| Γεννήτρια 11 | 185,097110138395 |
| Γεννήτρια 12 | 72,4334948515485 |
| Γεννήτρια 13 | 185,097110174467 |

Ενώ τα αποτελέσματα που υπολογίζει η συνάρτηση quadprog είναι τα εξής

| | |
|--------------|------------------|
| Γεννήτρια 1 | 185,224930800440 |
| Γεννήτρια 2 | 167,175949438291 |
| Γεννήτρια 3 | 75 |
| Γεννήτρια 4 | 185,224930800425 |
| Γεννήτρια 5 | 72,4733074502769 |
| Γεννήτρια 6 | 167,175949438283 |
| Γεννήτρια 7 | 185,224930800428 |
| Γεννήτρια 8 | 167,175949438293 |
| Γεννήτρια 9 | 185,224930800429 |
| Γεννήτρια 10 | 167,175949438289 |
| Γεννήτρια 11 | 185,224930800429 |
| Γεννήτρια 12 | 72,4733074502969 |
| Γεννήτρια 13 | 185,224930800431 |

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

Σε αυτήν την περίπτωση η απόκλιση των αποτελεσμάτων για την παραγόμενη ισχύ κάθε γεννήτριας είναι μικρή αφού κυμαίνεται από 0 % έως 0,069 % (Σχήμα 5.6). Δηλαδή ο κατανεμημένος αλγόριθμος υπολογίζει τιμές παραγωγής για τις γεννήτριες με μικρή απόκλιση από τις αντίστοιχες της συμβατικής λύσης του προβλήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκριτικά στο σχήμα 5.2.

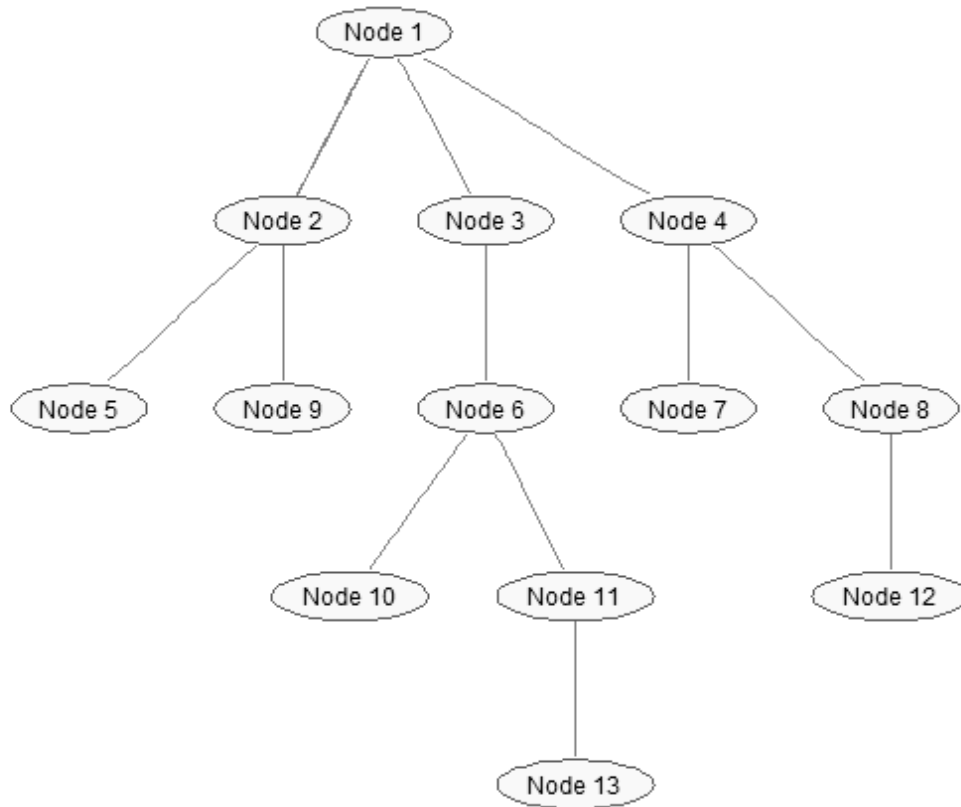


Σχήμα 5.6

Ενώ η απόκλιση στην τιμή του συνολικού κόστους του συστήματος είναι 0,065 %.

5.2.2 Δίκτυο Ακτινικής Μορφής

Σε αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιείται ένα δίκτυο 13 γεννητριών που έχει δενδροειδή μορφή (Σχήμα 5.7)



Σχήμα 5.7

Πάλι για συνολικό φορτίο 2000MW τα αποτελέσματα του κατανεμημένο αλγορίθμου είναι τα εξής.

| | |
|-------------|------------------|
| Γεννήτρια 1 | 180,719584529857 |
| Γεννήτρια 2 | 163,858727045702 |
| Γεννήτρια 3 | 75 |
| Γεννήτρια 4 | 181,435266768252 |
| Γεννήτρια 5 | 71,1630204603413 |
| Γεννήτρια 6 | 161,767741138020 |
| Γεννήτρια 7 | 181,535593711674 |
| Γεννήτρια 8 | 164,384530964532 |
| Γεννήτρια 9 | 181,186553125751 |

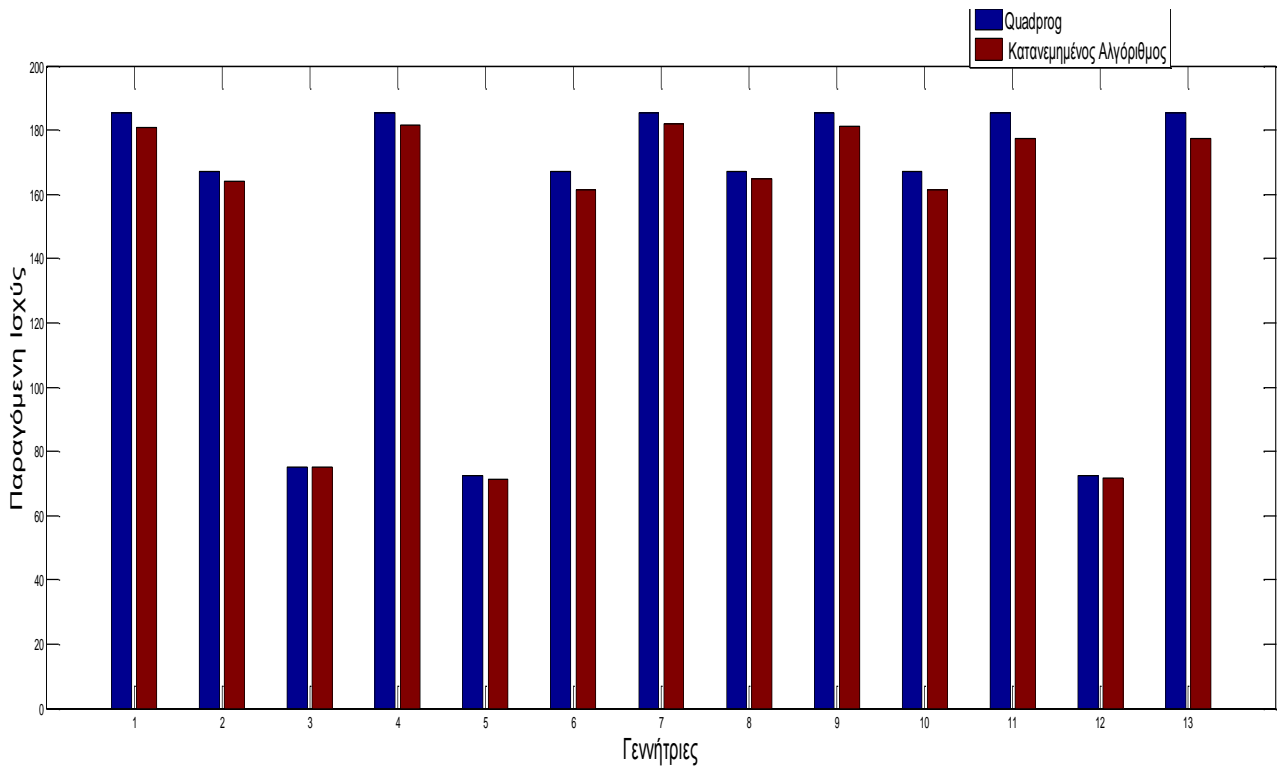
Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

| | |
|--------------|------------------|
| Γεννήτρια 10 | 161,633471607538 |
| Γεννήτρια 11 | 177,944905779228 |
| Γεννήτρια 12 | 71,4002409715929 |
| Γεννήτρια 13 | 177,693867849692 |

Ενώ τα αποτελέσματα που υπολογίζει η συνάρτηση quadprog είναι τα εξής

| | |
|--------------|------------------|
| Γεννήτρια 1 | 185,224930800440 |
| Γεννήτρια 2 | 167,175949438291 |
| Γεννήτρια 3 | 75 |
| Γεννήτρια 4 | 185,224930800425 |
| Γεννήτρια 5 | 72,4733074502769 |
| Γεννήτρια 6 | 167,175949438283 |
| Γεννήτρια 7 | 185,224930800428 |
| Γεννήτρια 8 | 167,175949438293 |
| Γεννήτρια 9 | 185,224930800429 |
| Γεννήτρια 10 | 167,175949438289 |
| Γεννήτρια 11 | 185,224930800429 |
| Γεννήτρια 12 | 72,4733074502969 |
| Γεννήτρια 13 | 185,224930800431 |

Βλέπουμε, δηλαδή, ότι η απόκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ διανεμημένης και συμβατικής λύσης του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής έχει αυξηθεί σε αυτήν την περίπτωση (από 0 % έως -4,0659 %)(Σχήμα 5.4). Η απόκλιση των τιμών του συνολικού κόστους του συστήματος παραμένει σχετικά μικρή(-2,6054 %), έχοντας αυξηθεί όμως σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Πάλι παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκριτικά στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8

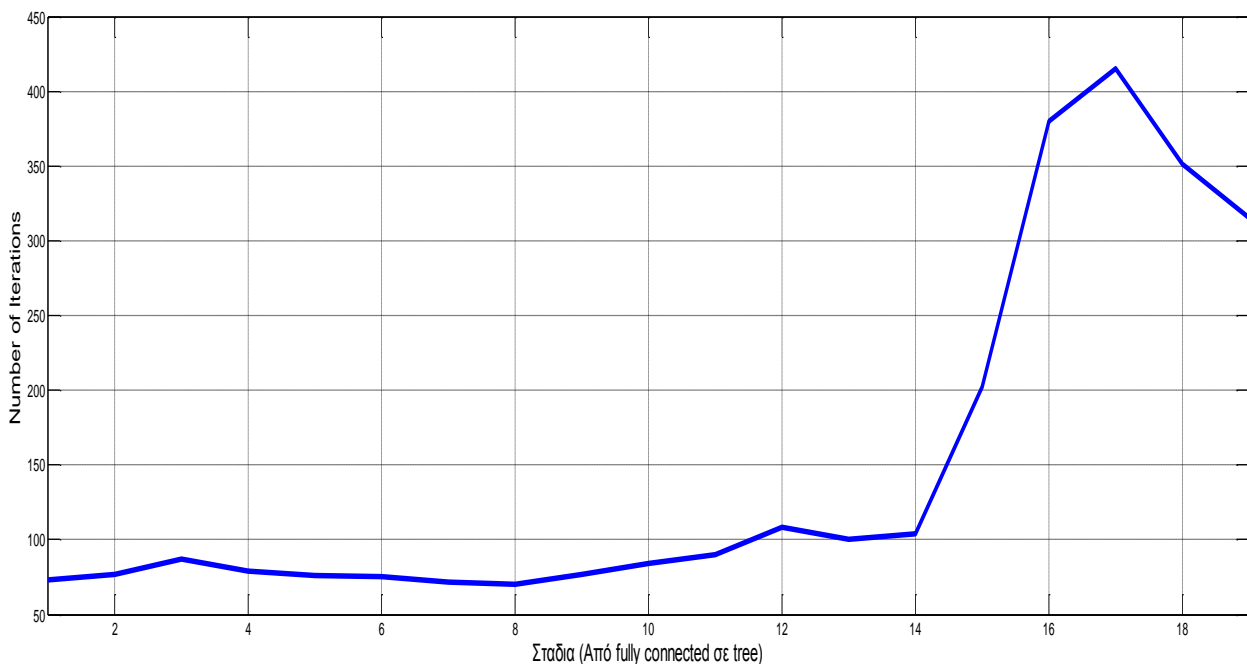
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κατανομημένο αλγόριθμο έχουν μία απόκλιση από τα αποτελέσματα της συμβατικής λύσης του Προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου, η οποία ωστόσο κινείται σε επιτρεπτά πλαίσια. Στην περίπτωση του δενδροειδούς γράφου επικοινωνίας αν και η απόκλιση των αποτελεσμάτων για την παραγόμενη ισχύ είναι αυξημένη, παραμένει κάτω του 5 % και επηρεάζει την απόκλιση του κόστους ελάχιστα, καθώς αυτή είναι περίπου 2,5 %.

5.3 Απαιτούμενος Αριθμός Επαναλήψεων για Σύγκλιση για διαφορετικές τοπολογίες του Δικτύου Επικοινωνίας

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται πως επηρεάζεται η ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση, όσο αλλάζει η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας. Θα εξεταστεί ένα δίκτυο 20 γεννητριών οι οποίες αρχικά επικοινωνούν όλες μεταξύ τους. Σε κάθε στάδιο αφαιρούνται κάποιες συνδέσεις για να καταλήξει σε ακτινική μορφή. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να προσδιοριστεί πως επηρεάζεται η ταχύτητα του αλγορίθμου όσο η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων φθίνει. (Σχήμα 5.9)

Αν ληφθούν υπόψη και τα αποτελέσματα της προηγούμενης εφαρμογής παρατηρείται πως όσο περισσότερο συνδεδεμένοι είναι οι κόμβοι τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια εμφανίζει ο αλγόριθμος. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρατηρήθηκε πως η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του κατανεμημένου αλγορίθμου και των κλασσικών αλγορίθμων ήταν μικρότερη στην περίπτωση του δικτύου πλήρους επικοινωνίας και σε αυτή την εφαρμογή ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση αυξάνει όσο μειώνεται η επικοινωνία. Αυτό είναι ένα λογικό συμπέρασμα αφού από τη δομή του αλγορίθμου φαίνεται πως όσο περισσότερους “γείτονες” έχει ένας κόμβος τόσο περισσότερο επηρεάζονται οι αποφάσεις του με αποτέλεσμα αυτές να συγκλίνουν προς την τιμή της συναίνεσης με μεγαλύτερη ταχύτητα.

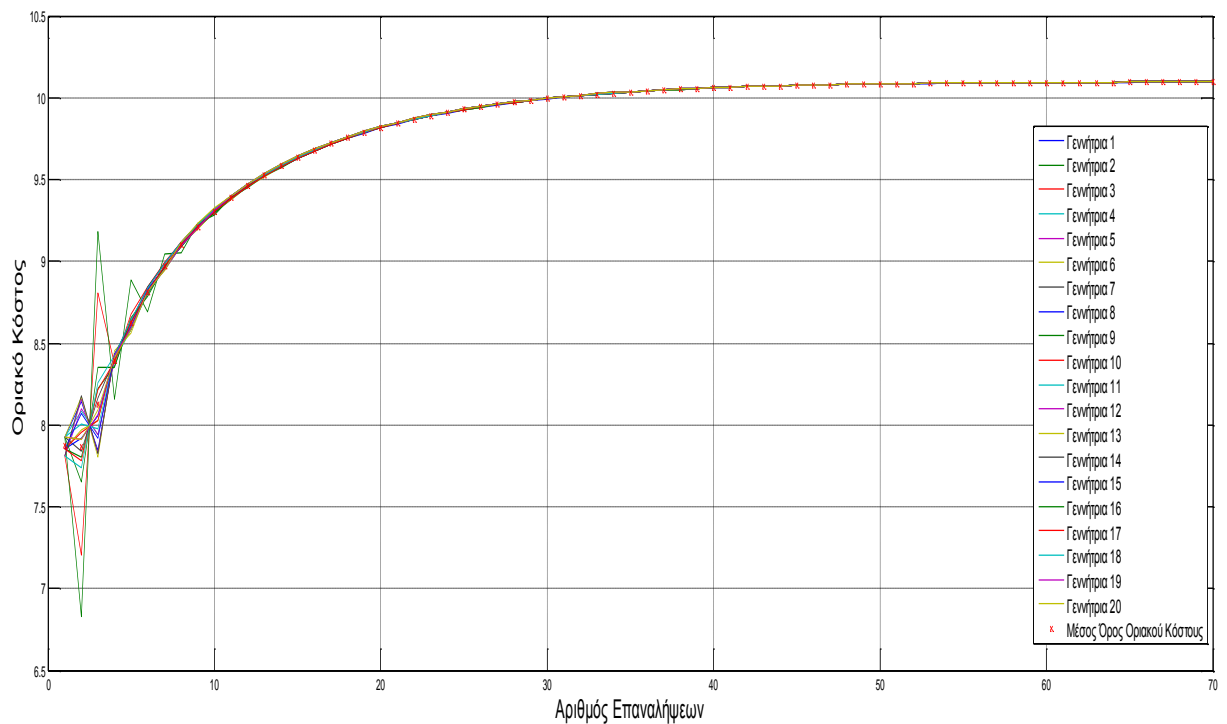
Εκτός από το δίκτυο που παρουσιάζεται παρακάτω, έχουν μελετηθεί κάποιες κλασσικές περιπτώσεις τοπολογιών δικτύων, όπως αστέρα, δαχτυλίδι και άλλες.



Σχήμα 5.9: Η μεταβολή του απαιτούμενου αριθμού επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση όσο αφαιρούνται συνδέσεις σε ένα δίκτυο πλήρους επικοινωνίας

Ενδεικτικά παρατίθενται κάποια διαγράμματα που δείχνουν τη σύγκλιση σε διάφορες φάσεις τις διαδικασίας.

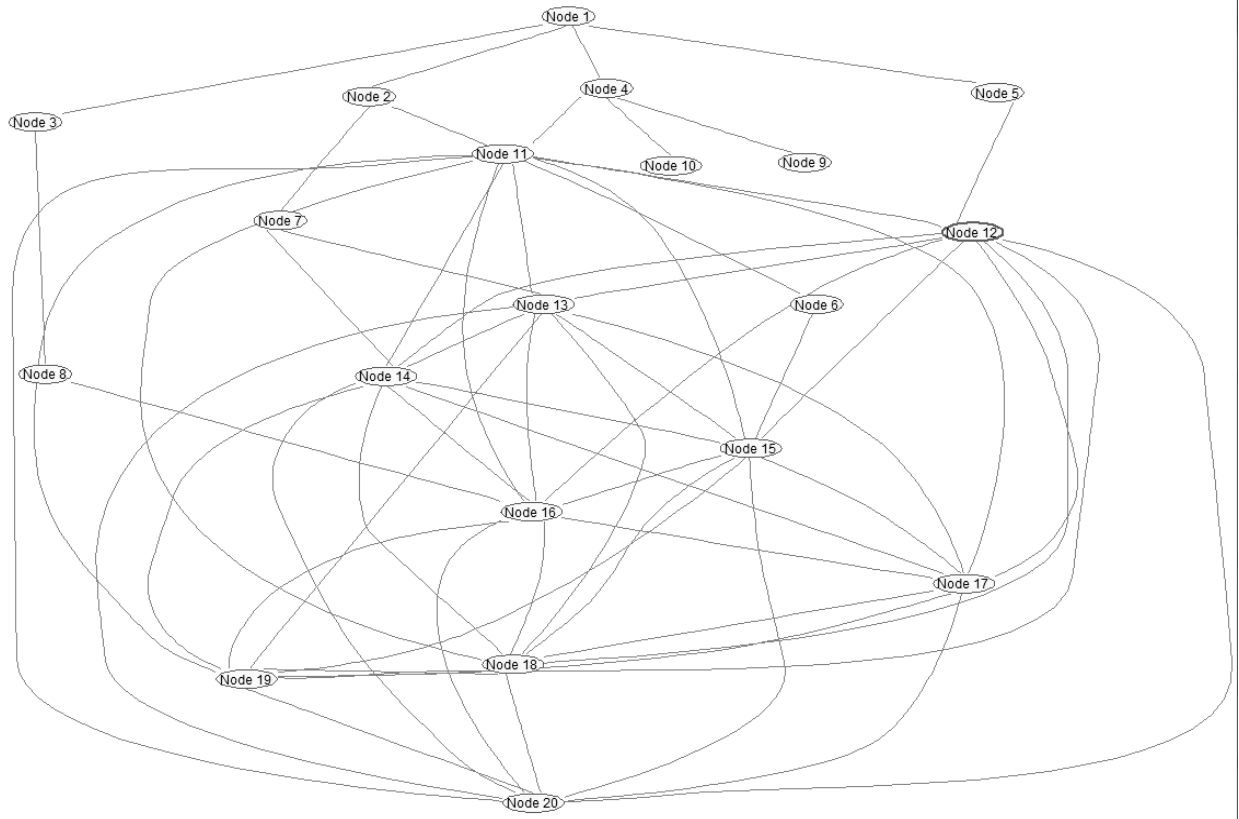
Αρχικά το διάγραμμα που αντιστοιχεί στο δίκτυο πλήρους πληροφορίας, όταν δηλαδή όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους είναι το εξής.



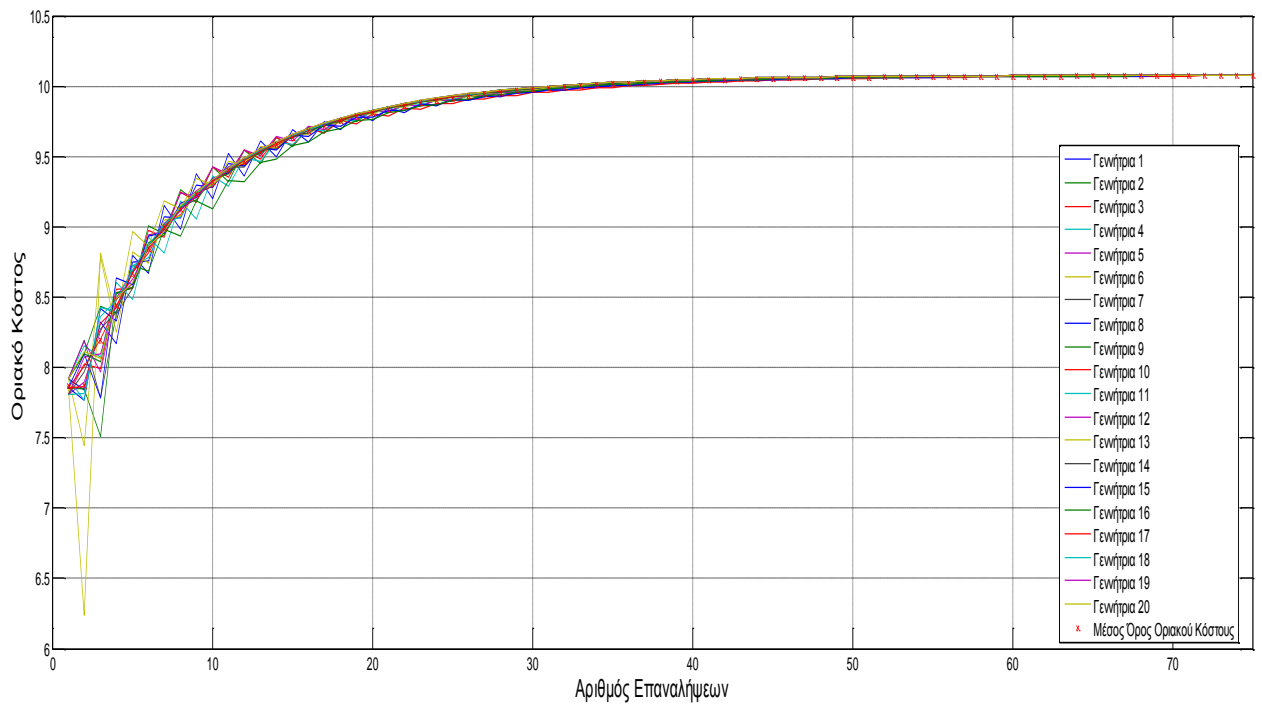
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μεταβολής οριακού κόστους ενός δικτύου πλήρους επικοινωνίας 20 γεννητριών

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, όταν υπάρχει ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των κόμβων η σύγκλιση επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα, καθώς είναι πιο εύκολο να υπάρξει συναίνεση .

Όσο χάνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων η σύγκλιση καθυστερεί. Παρακάτω βλέπουμε ένα διάγραμμα που αντιστοιχεί στο εξής δίκτυο το οποίο αρχίζει να παίρνει την ακτινική μορφή, αλλά ακόμα διατηρεί πολλές συνδέσεις.

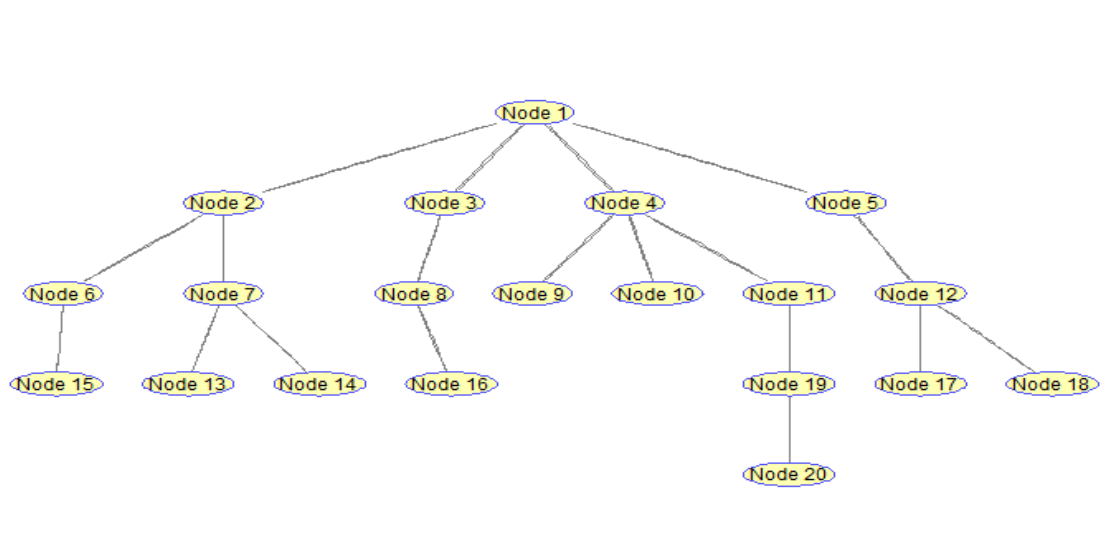


Σχήμα 5.11: Τοπολογία του δικτύου μετά την αφαίρεση κάποιων συνδέσεων

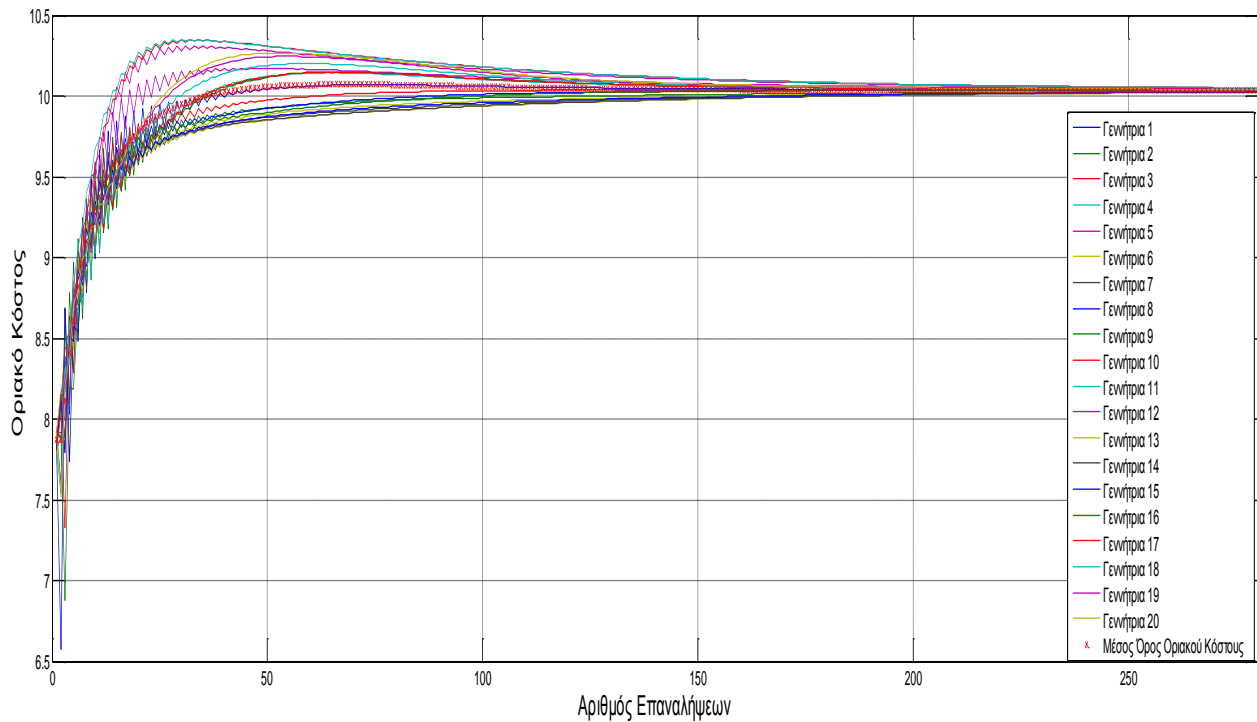


Σχήμα 5.12: Διάγραμμα μεταβολής οριακού κόστους για το δίκτυο του Σχήματος 5.7

Για να καταλήξουμε στην τελική μορφή του δικτύου που είναι η ακτινική (Σχήμα 5.13)



Σχήμα 5.13: Τελική ακτινική μορφή του δικτύου

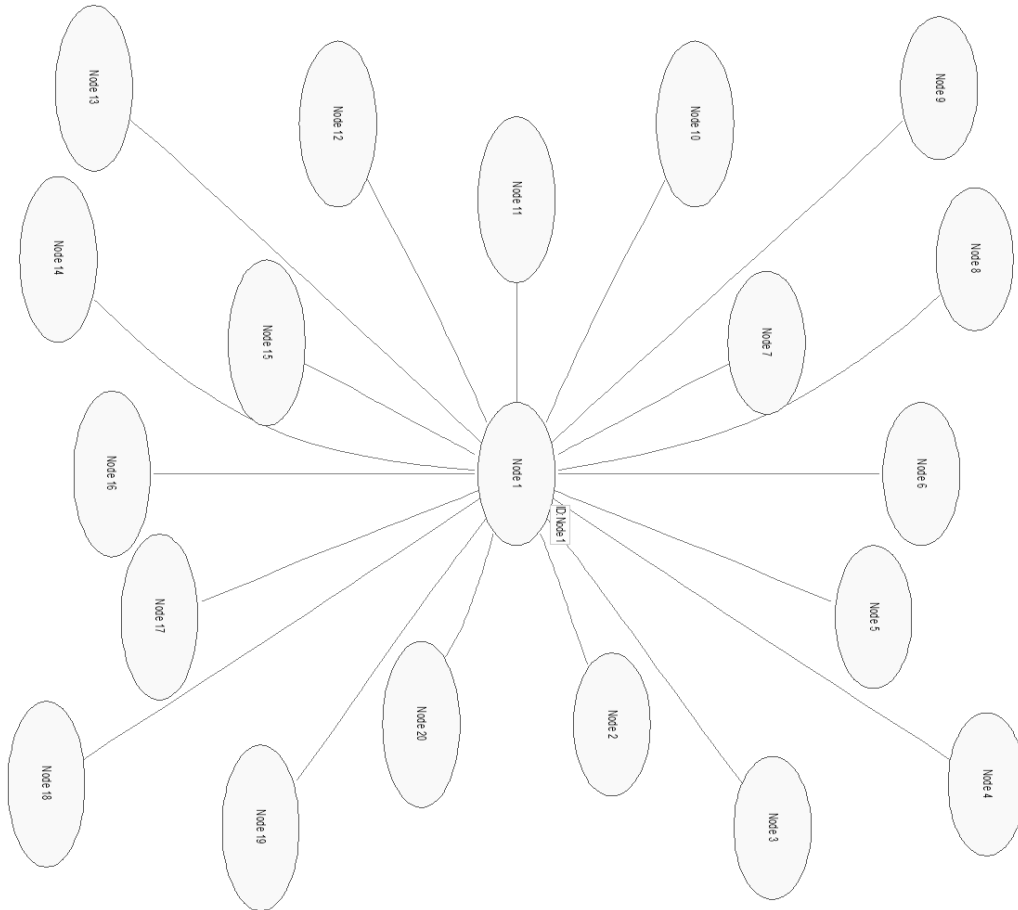


Σχήμα 5.14: Μεταβολή του οριακού κόστους για το δίκτυο του σχήματος 5.13

Για το δίκτυο ακτινικής μορφής προκύπτει το παραπάνω διάγραμμα σύγκλισης

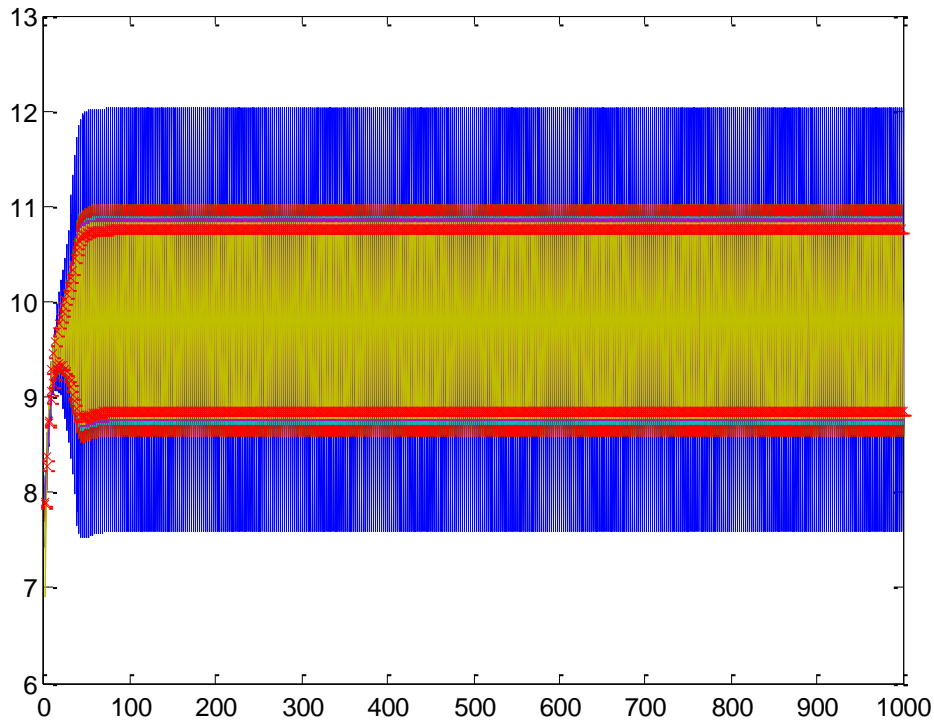
Θα παρουσιαστούν τώρα κάποιες κλασσικές μορφές τοπολογίας δικτύου.

Αρχικά έχουμε την τοπολογία δικτύου 20 γεννητριών του παρακάτω σχήματος



Σχήμα 5.15

Το διάγραμμα σύγκλισης του δικτύου παρουσιάζεται παρακάτω



Σχήμα 5.16

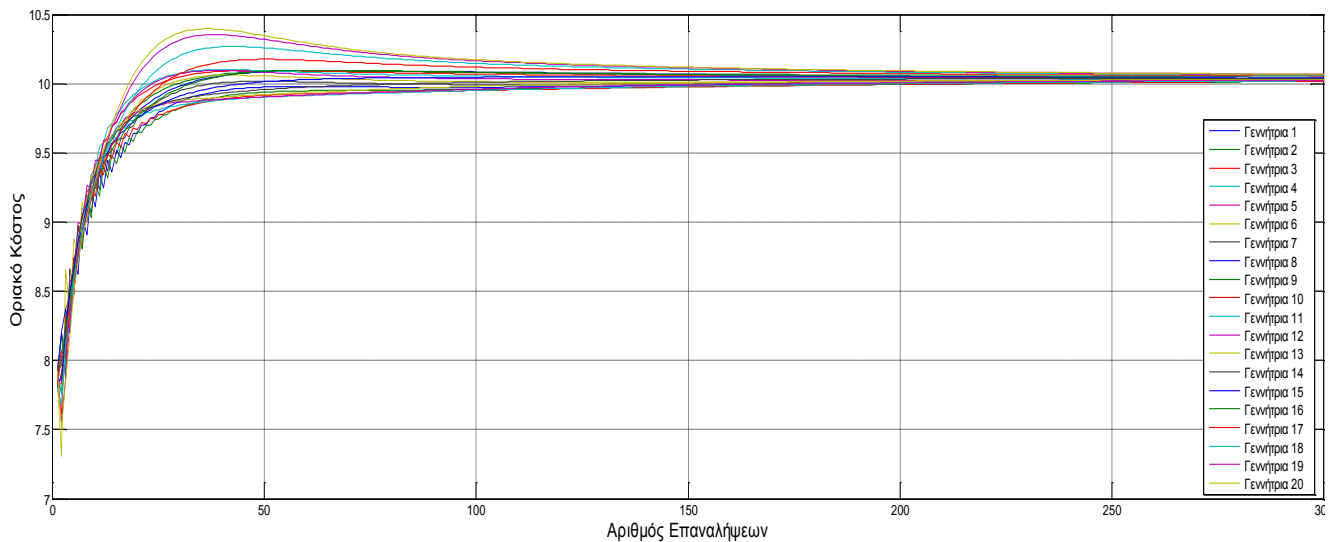
Όπως φαίνεται για μία τέτοια τοπολογία ο αλγόριθμος δεν μπορεί να συγκλίνει σε μία κοινή τιμή, καθώς ταλαντώνεται συνεχώς μεταξύ κάποιων ακραίων τιμών.

Η επόμενη ακραία μορφή δικτύου 20 γεννητριών που θα μελετηθεί είναι η εξής . Εδώ όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν με του δύο διπλανούς τους εκτός από τον πρώτο και τον τελευταίο που επικοινωνούν μόνο με έναν.



Σχήμα 5.17: Τοπολογία αλυσίδα

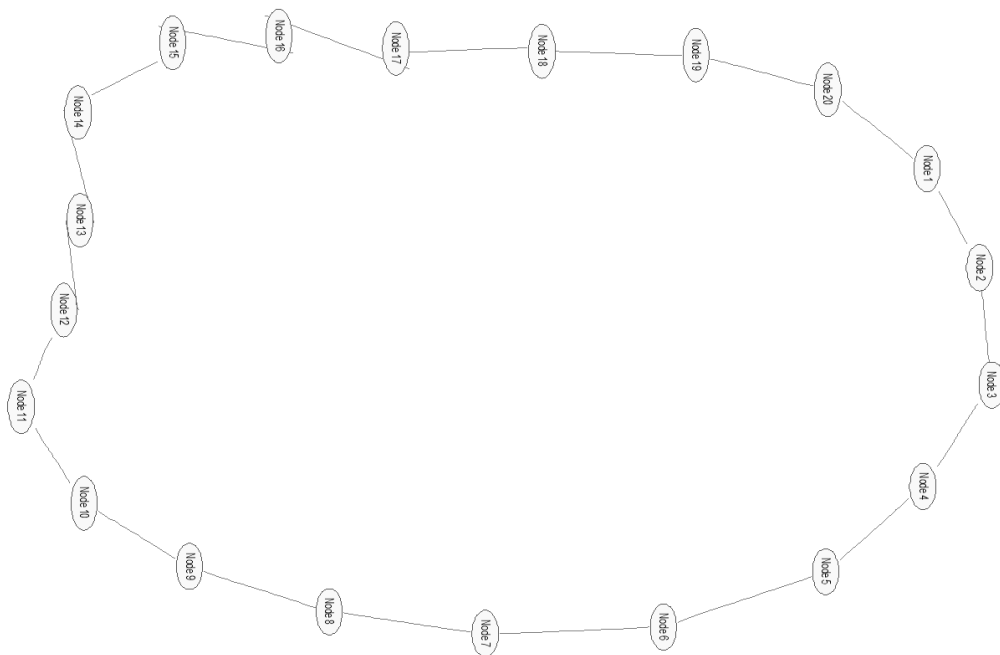
Και το διάγραμμα σύγκλισης που προκύπτει είναι το εξής



Σχήμα 5.18: Μεταβολή οριακού κόστους για το δίκτυο του σχήματος 5.17

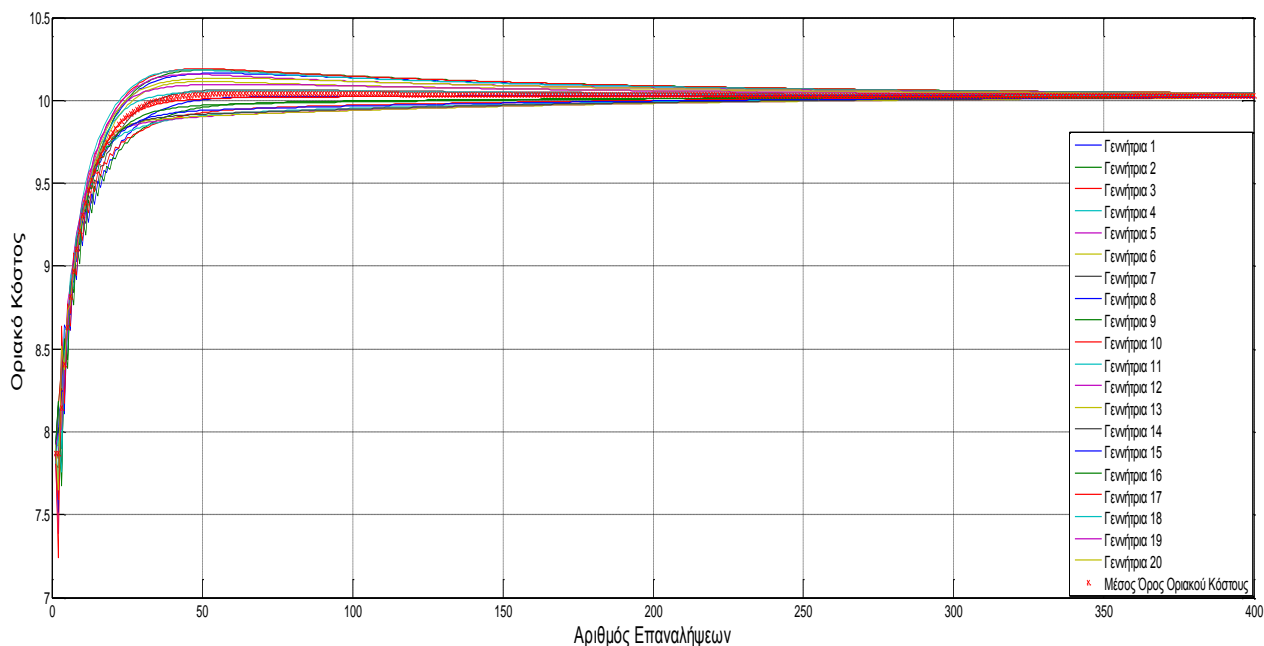
Εδώ επιτυγχάνεται σύγκλιση και μάλιστα σε σύγκριση με την περίπτωση του ακτινικού δικτύου σε ικανοποιητική ταχύτητα.

Ένα τελευταίο σενάριο που θα εξεταστεί είναι οι 20 γεννήτριες να συνδέονται με την παρακάτω τοπολογία.



Σχήμα 5.19: Τοπολογία δαχτυλίδι

Με το διάγραμμα σύγκλισης που προκύπτει να είναι το παρακάτω. Πάλι φαίνεται πως προκύπτει σύγκλιση. Σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο είναι πως η σύγκλιση σε αυτή την περίπτωση είναι πιο αργή από ό,τι πριν παρά το γεγονός πως έχει προστεθεί μία παραπάνω σύνδεση μεταξύ πρώτου και τελευταίου κόμβου



Σχήμα 5.20: Μεταβολή Οριακού Κόστους για το δίκτυο του σχήματος 5.19

5.4 Μεταβολή Σφάλματος με την αύξηση του φορτίου

Ο κατανεμημένος αλγόριθμος παρουσιάζει κάποια μικρή απόκλιση στον υπολογισμό της συνολικά παραγόμενης ισχύος. Παράγεται δηλαδή λιγότερη ή περισσότερη ισχύς από τη ζητούμενη. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να διαπιστωθεί πόσο επηρεάζει η αύξηση του φορτίου το σφάλμα. Αυτό το έχει επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το ακτινικό δίκτυο 13 γεννητριών του σχήματος 5.7.

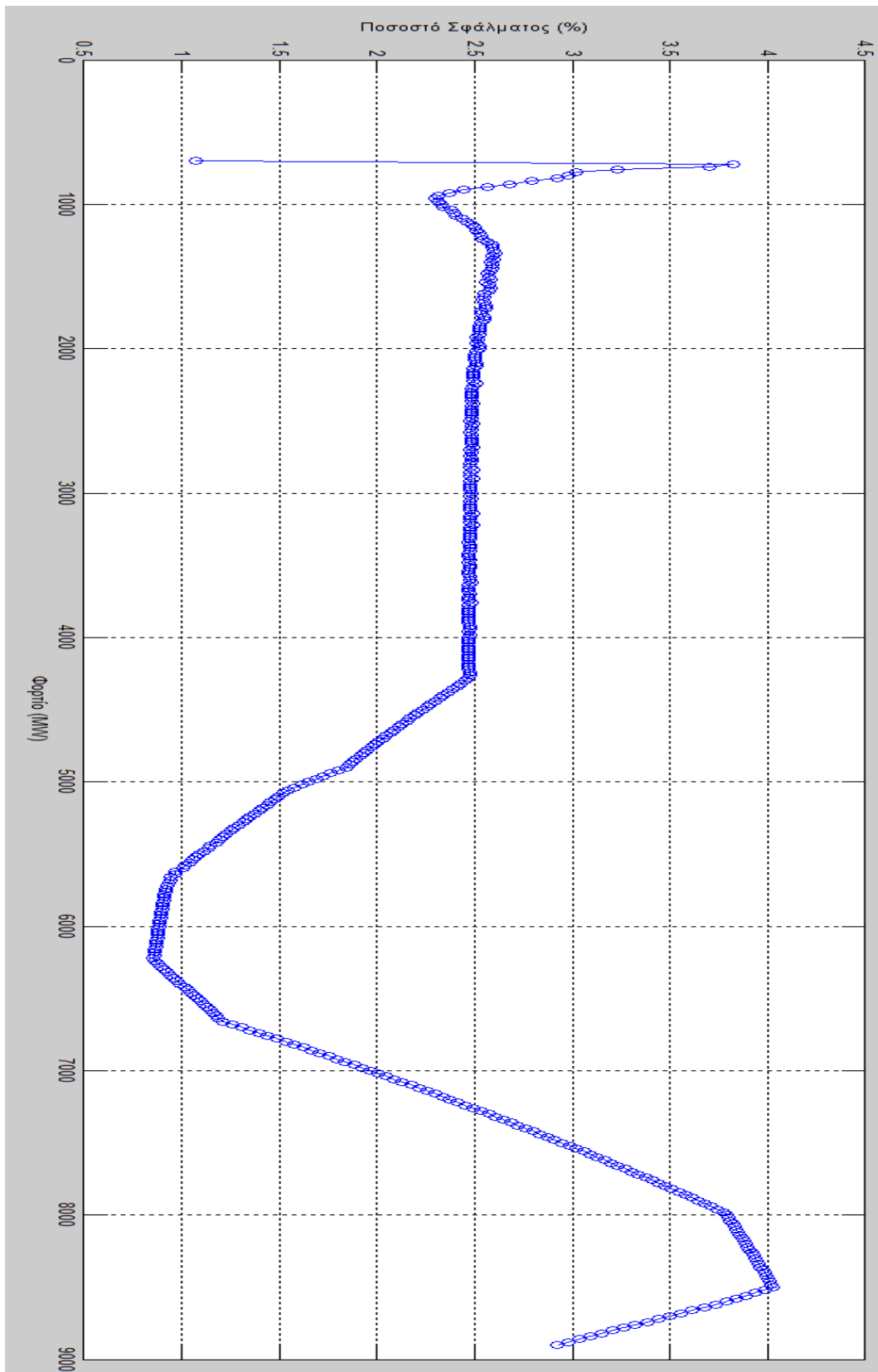
Ξεκινώντας από το κατώτατο όριο παραγωγής του συστήματος, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 700 MW, αυξάνεται η ζήτησή 20 MW σε κάθε βήμα μέχρι να φτάσει το ανώτατο όριο παραγωγής που είναι τα 8900 MW.

Γενικά το σφάλμα κυμαίνεται σε χαμηλά πλαίσια μεταξύ 0,8565 % και 4,027 % .

Επίσης παρατηρείται μία μείωση του σφάλματος για τις τιμές μεταξύ 4280 MW και 7260 MW, που αντιστοιχούν στο 48 % και στο 82 % του μέγιστου επιτρεπτού φορτίου.

Κάτι ακόμα που ξεχωρίζει είναι πως το σφάλμα διατηρείται σχεδόν σταθερό για τις τιμές του φορτίου από 2000 MW έως 4200 MW.

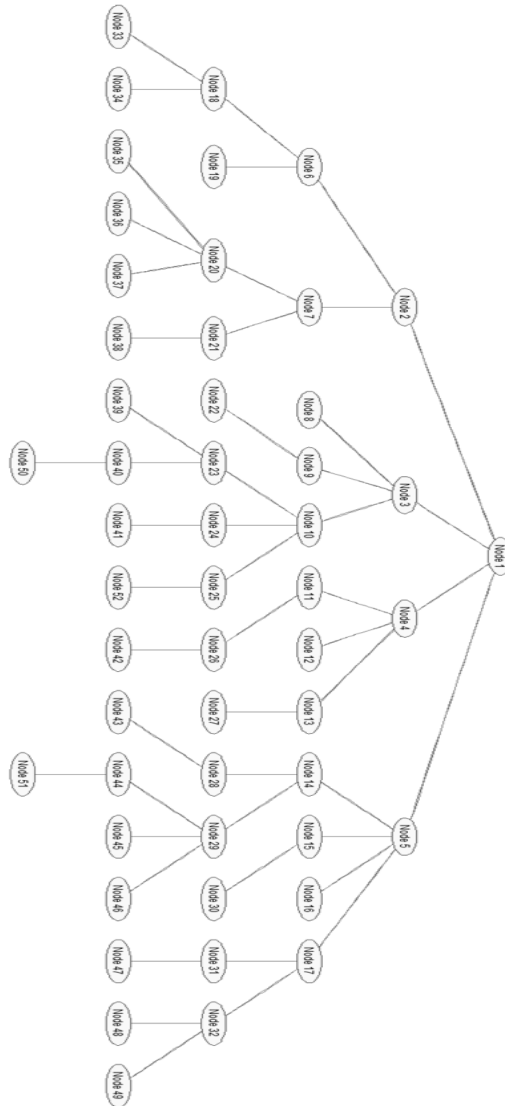
Αναλυτικά το διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21



Σχήμα 5.21: Μεταβολή του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση του φορτίου

5.5 Πολυπλοκότητα

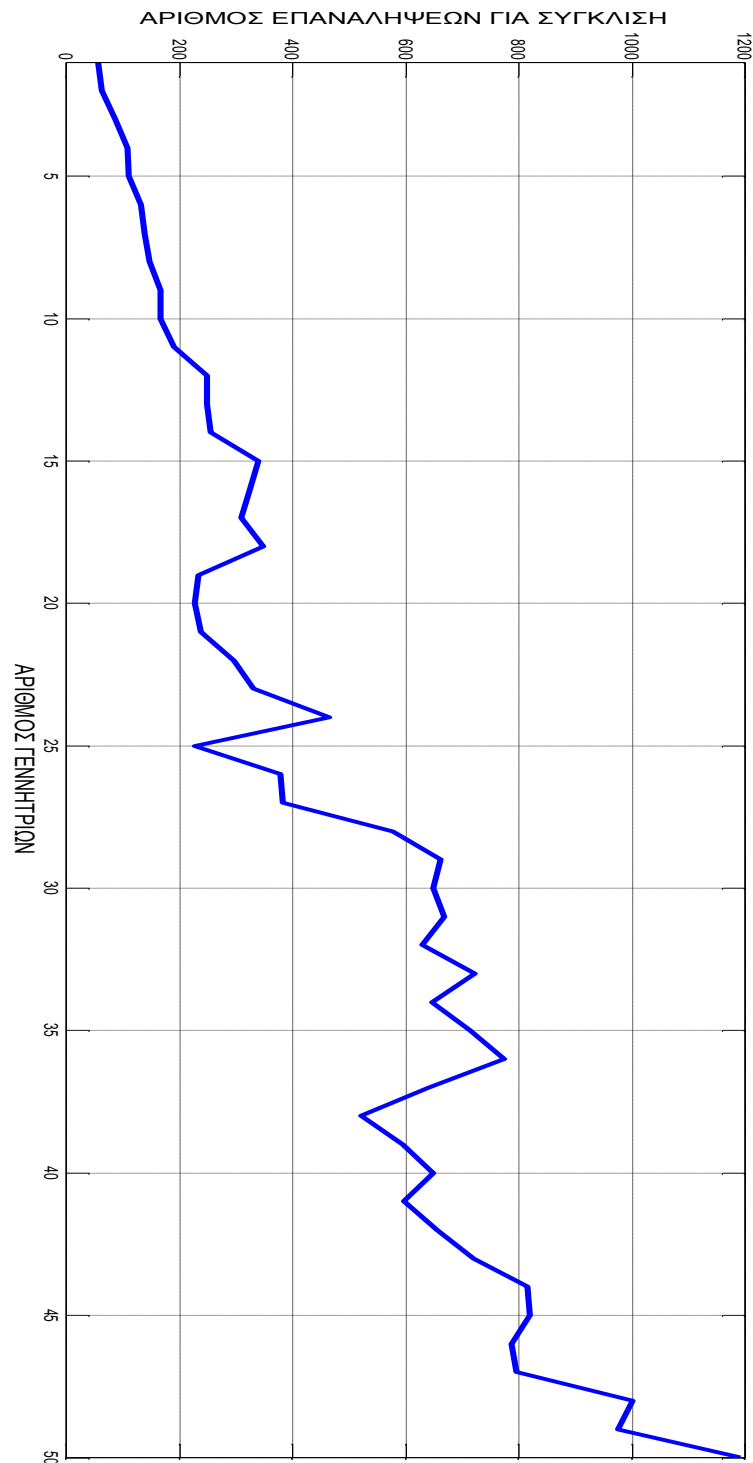
Σε αυτό το κεφάλαιο εκτιμάται πώς επηρεάζει η αύξηση των κόμβων την ταχύτητα σύγκλισης, που αντιστοιχεί στην μελέτη της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου. Ξεκινώντας από το πιο απλό σενάριο 2 γεννητριών σε επικοινωνία, προστίθενται γεννήτριες σχηματίζοντας τελικά το ακτινικό δίκτυο διανομής 52 γεννητριών του σχήματος 5.22



Σχήμα 5.22: Τελική μορφή δικτύου

Η αύξηση των γεννητριών γίνεται ακτινικά. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.23 παρουσιάζεται η αύξηση του χρόνου σύγκλισης με την αύξηση του αριθμού των γεννητριών.

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών



Σχήμα 5.23: Μεταβολή του απαιτούμενου αριθμού επαναλήψεων με την αύξηση των κόμβων

Παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει μη εκθετική μορφή. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα για τον αλγόριθμο καθώς η τάξη της πολυπλοκότητας είναι από τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου. Γενικά η πολυπλοκότητα ενός αλγορίθμου συνδέεται με την αποδοτικότητά του. Κατά πόσο, δηλαδή, αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος με την αύξηση των δεδομένων εισόδου. Με μια

απλουστευμένη προσέγγιση της έννοιας της πολυπλοκότητας αλγορίθμων, μπορούμε να τους κατηγοριοποιήσουμε από τον πλέον αποδοτικό στον λιγότερο με τον εξής τρόπο.[29]

$$\text{Γραμμικός} \leq \text{Πολυωνυμικός} \leq \text{Εκθετικός} \leq \text{Λογαριθμικός}$$

Από το σχήμα 5.23 παρατηρείται ότι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι μη εκθετικής μορφής.

5.6 Μεταβολή Σύγκλισης για διαφορετικά ε

Όπως έχει αναφερθεί και αποδειχτεί σε προηγούμενο κεφάλαιο όταν το ε του τύπου

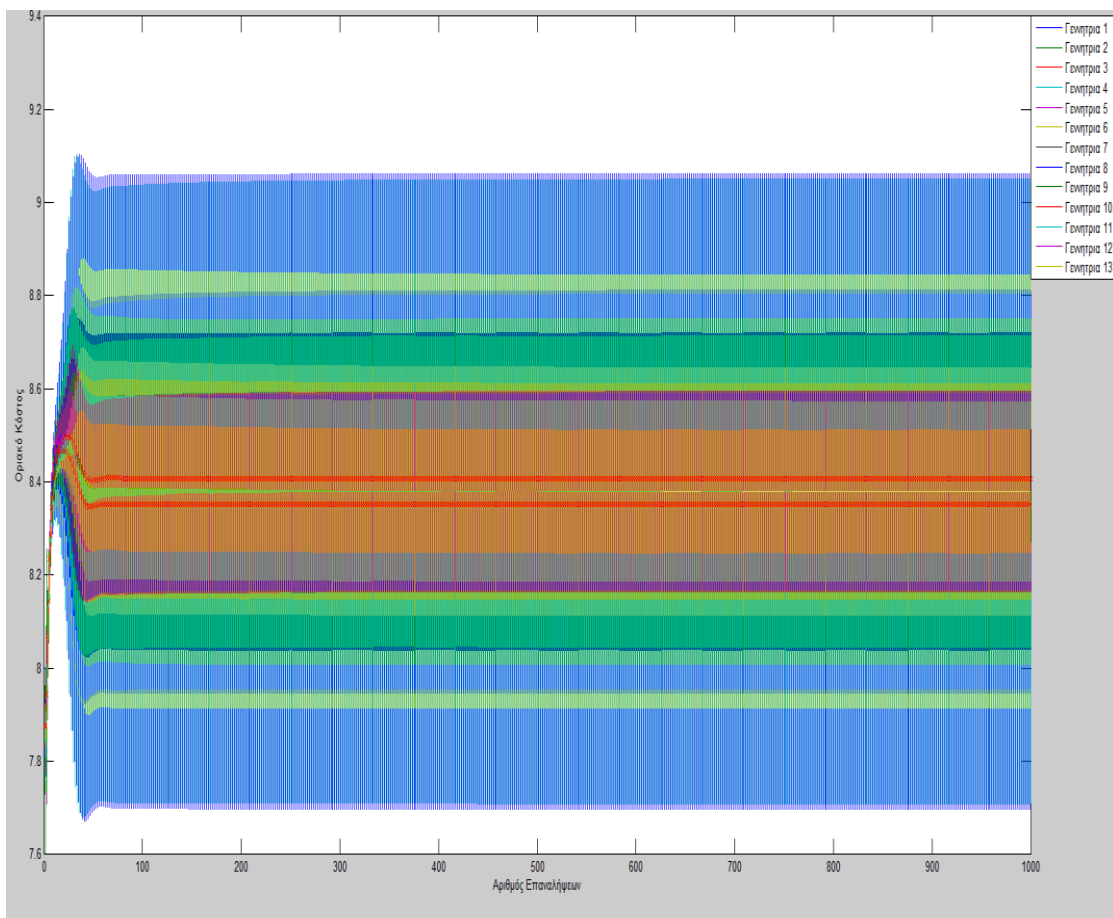
$$\lambda_i[k + 1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i$$

είναι θετικό και επαρκώς μικρό όλες οι μεταβλητές συγκλίνουν.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοκιμαστούν διάφορες τιμές του ε για να παρουσιαστεί πως επηρεάζεται η σύγκλιση.

Το δίκτυο που χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση είναι το δίκτυο του σχήματος (5.7)

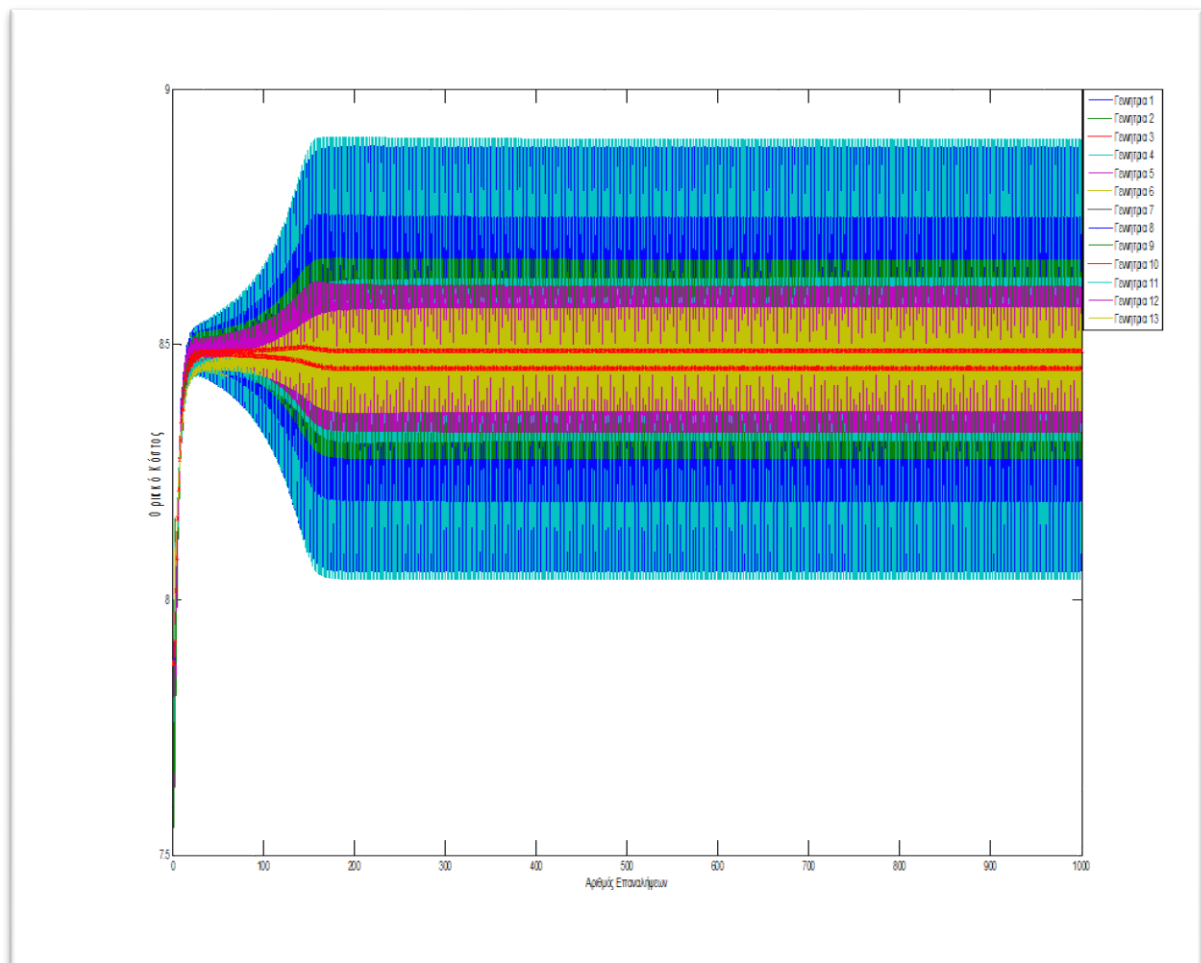
Ξεκινώντας από μία σχετικά μεγάλη τιμή για το $\varepsilon = 10^{-3}$ προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα



Σχήμα 5.24

Φαίνεται πως για τόσο μεγάλη τιμή του ε δεν υπάρχει σύγκλιση

Τίθεται στη συνέχεια το $\varepsilon = 0,8 * 10^{-3}$.

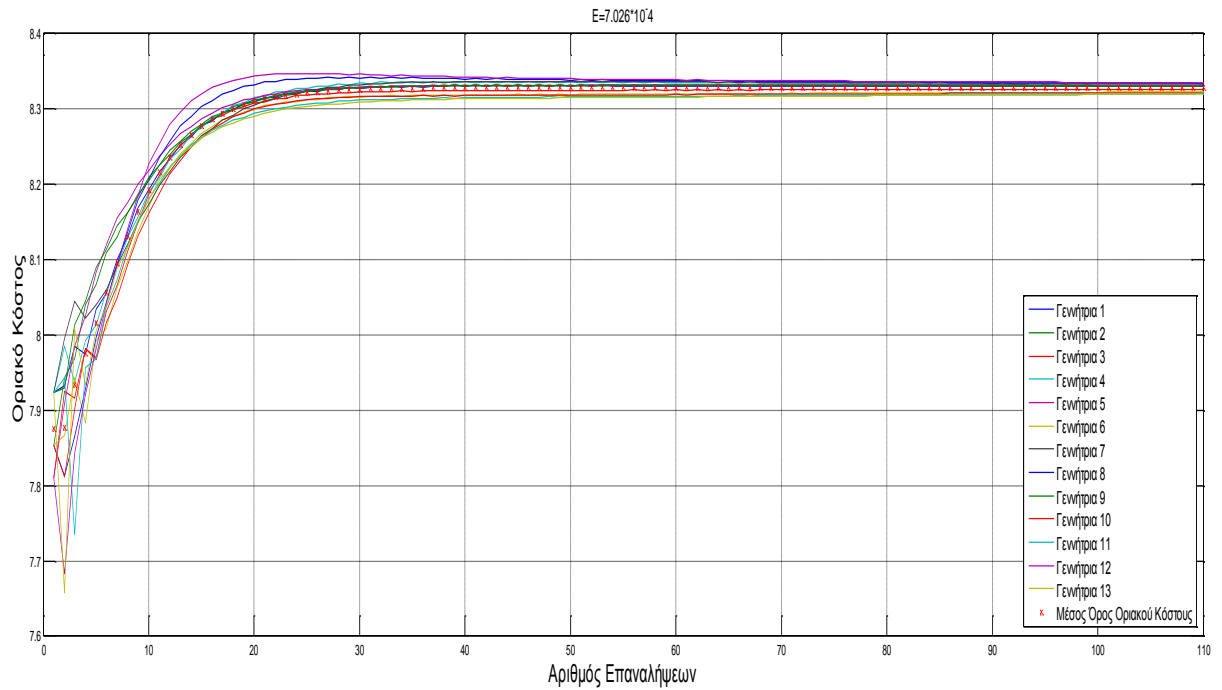


Σχήμα 5.25

Είναι εμφανές πως ακόμα δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση, αλλά η ταλάντωση μεταξύ των ακραίων τιμών έχει μειωθεί κάπως.

Για ακόμα μικρότερο $\varepsilon = 0,7 * 10^{-3}$ προκύπτει:

Κεφάλαιο 5: Παραδείγματα Εφαρμογών

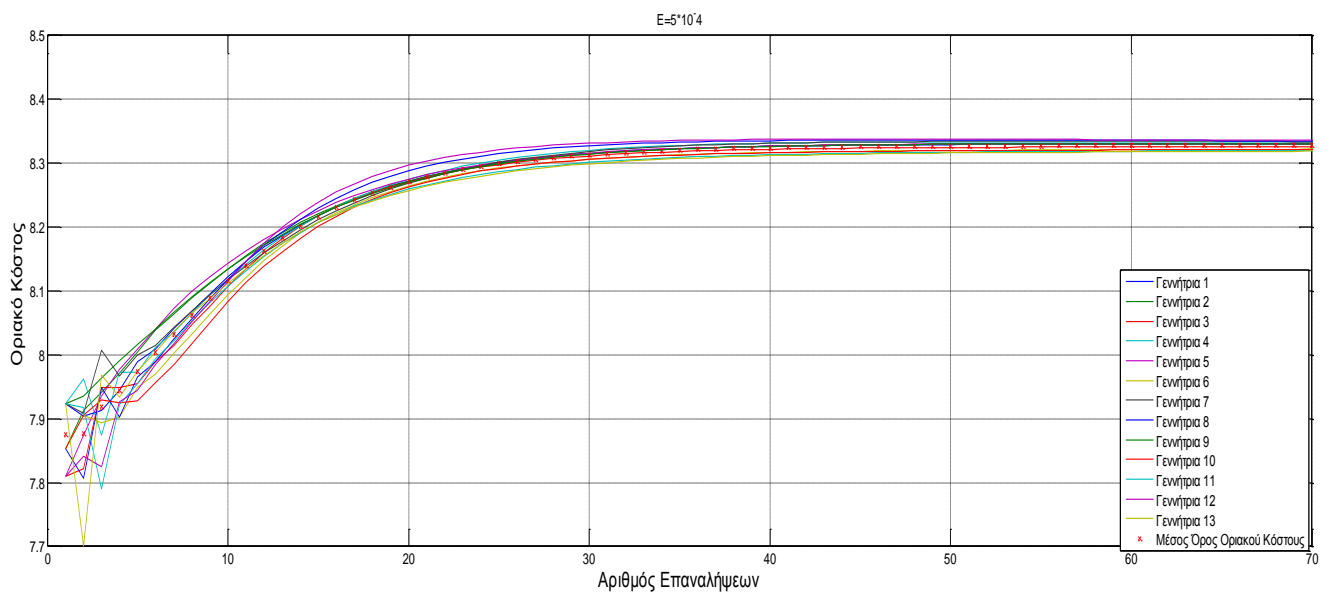


Σχήμα 5.26

Εδώ φαίνεται πως επιτυγχάνεται σύγκλιση και μάλιστα στον αρκετά ικανοποιητικό αριθμό των 140 επαναλήψεων.

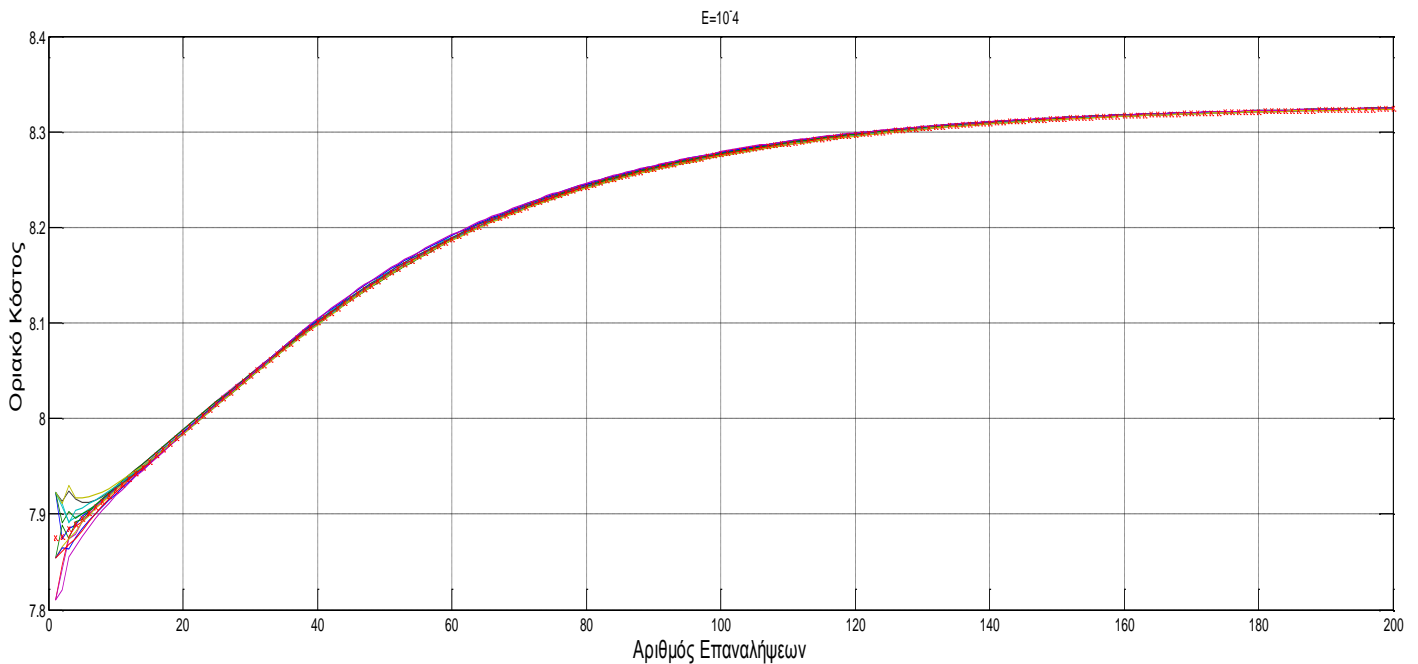
Αν δοκιμαστεί ακόμα μικρότερο $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ προκύπτει:

Σχήμα 5.27



Πάλι επιτυγχάνεται σύγκλιση και μάλιστα στον ακόμα καλύτερο αριθμό των 90 επαναλήψεων. Οπότε συμπεραίνεται πως κινούμαστε ακόμα στα επιτρεπτά όρια του ε .

Τελευταία τιμή που θα δοκιμαστεί είναι $\varepsilon = 0,02 * 10^{-3}$



Σχήμα 5.28

Εδώ υπάρχει διαφορετικής μορφής πρόβλημα από ό,τι πριν για τις μεγάλες τιμές του ε . Εδώ οι τιμές του οριακού κόστους των διάφορων γεννητριών συγκλίνουν γύρω από μία τιμή, η τιμή αυτή όμως αυξάνεται όσο προχωράει ο αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος, λοιπόν, για μικρές τιμές του ε αρχίζει να γίνεται ασταθής. Οπότε και πάλι συμπεραίνεται πως όταν το ε κινείται εκτός κάποιων ορίων ο αλγόριθμος παύει να είναι αποτελεσματικός.

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση Δικτύων

6.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να μελετηθεί ο αλγόριθμος συναίνεσης σε ηλεκτρικά δίκτυα.

Για να επιτευχθεί αυτό γίνεται χρήση του πακέτου MATPOWER που είναι ένα πρόσθετο πακέτο του MATLAB, ειδικά σχεδιασμένο για να προσομοιώνει ηλεκτρικά δίκτυα, να λύνει το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου και να υπολογίζει ροές φορτίου.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται σε αυτήν την διπλωματική έχει ως ζητούμενο να λύσει το πρόβλημα Οικονομικής Κατανομής Φορτίου, το οποίο καθορίζει τα επίπεδα παραγωγής πραγματικής ισχύος κάθε γεννήτριας. Επομένως αγνοείται η παραγωγή άεργου ισχύος. Επιλέγεται, λοιπόν οι προσομοιώσεις των ροών φορτίου σε αυτό το κεφάλαιο να χρησιμοποιούν τη DC ροή φορτίου, η οποία αγνοεί την άεργο ισχύ.

Το πακέτο MATPOWER έχει ενσωματωμένα κάποια πρότυπα ηλεκτρικά δίκτυα με πληροφορίες για τον τύπο των κόμβων (αναφοράς, P-V, P-Q), την τοπολογία του δικτύου, τις γεννήτριες και γενικότερα κάθε στοιχείο που μπορεί να περιλαμβάνει ένα ηλεκτρικό δίκτυο.[28]

6.2 Η διαδικασία της προσομοίωσης

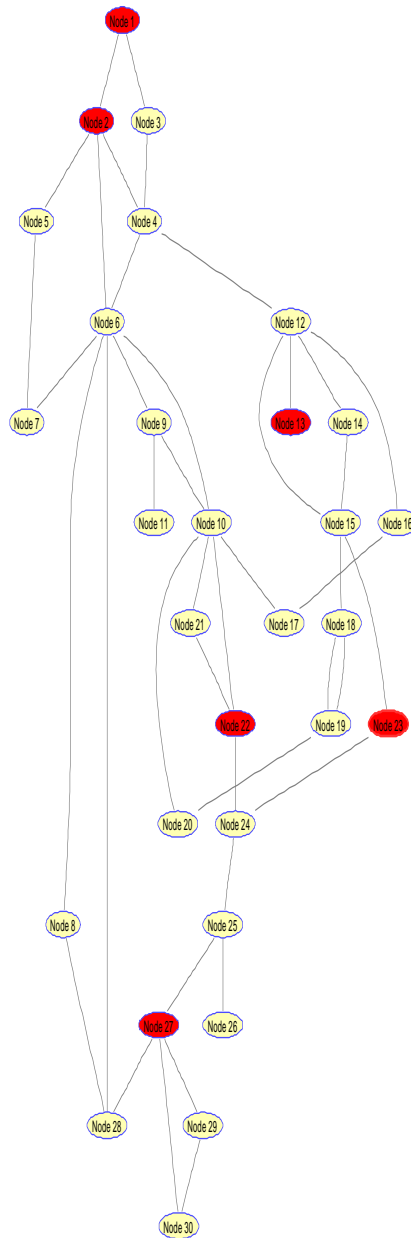
Αρχικά επιλέγεται ένα από τα δίκτυα της βιβλιοθήκης του MATPOWER και φορτώνονται τα δεδομένα του στον αλγόριθμο. Όλα τα δεδομένα του δικτύου καταχωρούνται σε ένα αρχείο στο workspace του MATLAB. Τα δεδομένα που αφορούν τον αλγόριθμο είναι η τοπολογία του δικτύου, οι συντελεστές των συναρτήσεων κόστους κάθε γεννήτριας, το συνολικό φορτίο του συστήματος καθώς και τα λειτουργικά όρια κάθε γεννήτριας.

Αφού έχουν καταχωρηθεί οι απαραίτητες πληροφορίες στη μνήμη, αρχίζει να τρέχει ο αλγόριθμος με τον τρόπο που έχει παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια και σταματάει όταν έχει συγκλίνει στο βέλτιστο οριακό κόστος του συστήματος. Με βάση αυτό το οριακό κόστος υπολογίζει την παραγόμενη πραγματική ισχύ της κάθε γεννήτριας.

Αμέσως μετά ο αλγόριθμος ανατρέχει στο αρχείο που είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα του συστήματος και αποθηκεύει στους ζυγούς που είναι συνδεδεμένες οι γεννήτριες τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ως αρνητικά φορτία. Με βάση τα καινούργια δεδομένα προσομοιώνεται η ροή φορτίου και επιστρέφονται τα αποτελέσματα που αφορούν το μέτρο και τη γωνία της τάσης στους διάφορους κόμβους καθώς και τη ροή φορτίου στις γραμμές του συστήματος.

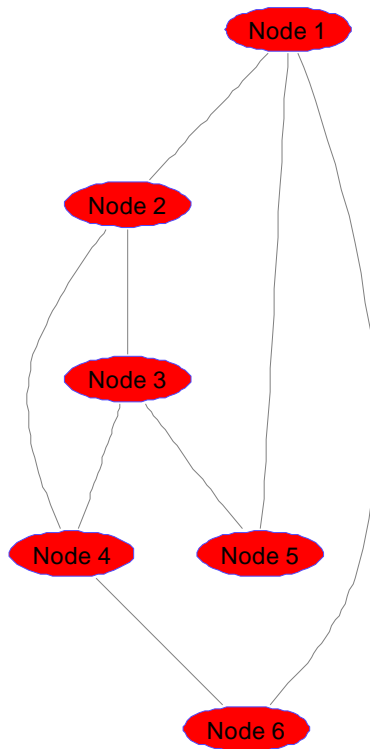
6.3 Προσομοίωση Πρώτη

Σε αυτή την προσομοίωση επιλέγεται το δίκτυο του MATPOWER case30 (Σχήμα 6.1)



Σχήμα 6.1

Το δίκτυο αποτελείται από 30 κόμβους συνδεδεμένους με την τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα. Υπάρχουν 6 ντιζελογεννήτριες συνδεδεμένες στους κόμβους που είναι κόκκινοι. Η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας που προκύπτει είναι η εξής.



Σχήμα 6.2

Οι γεννήτριες του δικτύου έχουν τους εξής συντελεστές συνάρτησης κόστους και όρια λειτουργίας

| | a_i | b_i | P_{Max} | P_{Min} |
|----------------------------|----------|-------|-----------|-----------|
| Γεννήτρια 1 (κόμβος 1) | 0.012500 | 2 | 200 | 0 |
| Γεννήτρια 2 (κόμβος 2) | 0.011850 | 1.75 | 80 | 0 |
| Γεννήτρια 3 (κόμβος 13) | 0.041250 | 1.75 | 50 | 0 |
| Γεννήτρια 4 (κόμβος 22) | 0.028440 | 1.85 | 55 | 0 |
| Γεννήτρια 5 (κόμβος 23) | 0.041250 | 1.75 | 30 | 0 |
| Γεννήτρια 6 (κόμβος 27) | 0.019945 | 1.75 | 40 | 0 |

Ο συντελεστής c της συνάρτησης κόστους δεν εμφανίζεται αφού δεν λαμβάνει μέρος σε κανέναν υπολογισμό. Το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 189,2 MW και πρέπει να εξυπηρετηθεί από τις 6 γεννήτριες.

Τρέχει λοιπόν ο αλγόριθμος και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής.

| | Παραγωγή (MW) |
|-------------------------|---------------|
| Γεννήτρια 1 (κόμβος 1) | 42,9985 |
| Γεννήτρια 2 (κόμβος 2) | 55,9030 |
| Γεννήτρια 3 (κόμβος 13) | 16,0598 |
| Γεννήτρια 4 (κόμβος 22) | 21,5355 |
| Γεννήτρια 5 (κόμβος 23) | 16,0594 |
| Γεννήτρια 6 (κόμβος 27) | 33,2141 |

Οριακό κόστος του συστήματος 3,0749 \$/MWh.

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά του αλγορίθμου θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του MATPOWER. Αυτό υλοποιείται χρησιμοποιώντας την εντολή DCOPF με την οποία το MATPOWER λύνει το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου του συστήματος.

Για το συγκεκριμένο δίκτυο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής

| | Παραγωγή (MW) |
|-------------------------|---------------|
| Γεννήτρια 1 (κόμβος 1) | 44,73 |
| Γεννήτρια 2 (κόμβος 2) | 58,26 |
| Γεννήτρια 3 (κόμβος 13) | 15,78 |
| Γεννήτρια 4 (κόμβος 22) | 22,31 |
| Γεννήτρια 5 (κόμβος 23) | 15,78 |
| Γεννήτρια 6 (κόμβος 27) | 32,33 |

Οριακό κόστος του συστήματος 3,79 \$/MWh.

Τα ποσοστιαία σφάλματα της κάθε γεννήτριας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

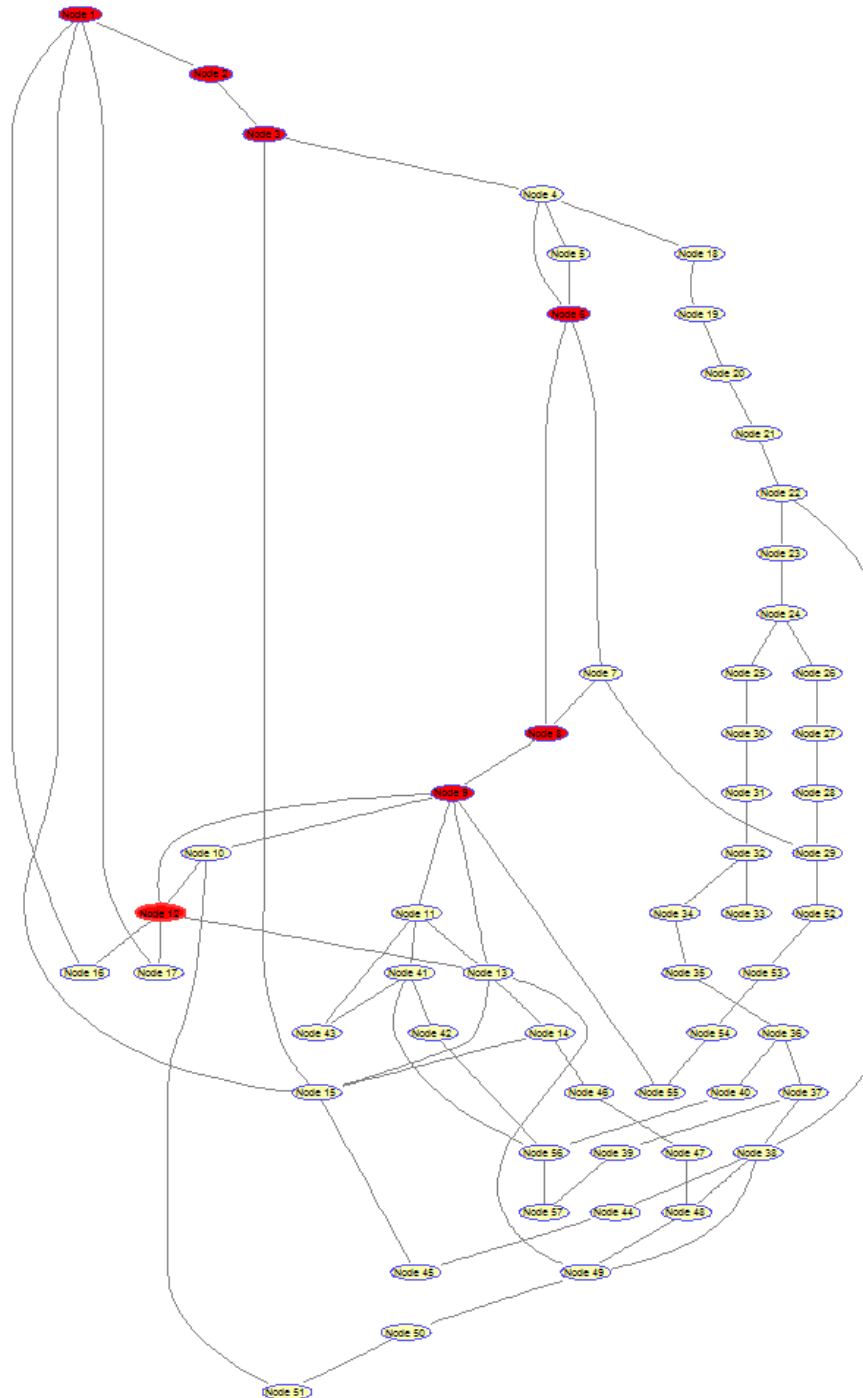
Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση Δικτύων

| | Σφάλμα (%) |
|------------------------|------------|
| Γεννήτρια 1 (Κόμβος 1) | 3,871 |
| Γεννήτρια 2 (Κόμβος 2) | 4,046 |
| Γεννήτρια 3 (Κόμβος 3) | -1,773 |
| Γεννήτρια 4 (Κόμβος 6) | -3,472 |
| Γεννήτρια 5 (Κόμβος 8) | -1,773 |
| Γεννήτρια 6 (Κόμβος 9) | -2,735 |

Παρατηρείται πως τα σφάλματα για την παραγόμενη ισχύ κάθε γεννήτριας κινούνται μέσα σε θεμιτά όρια.

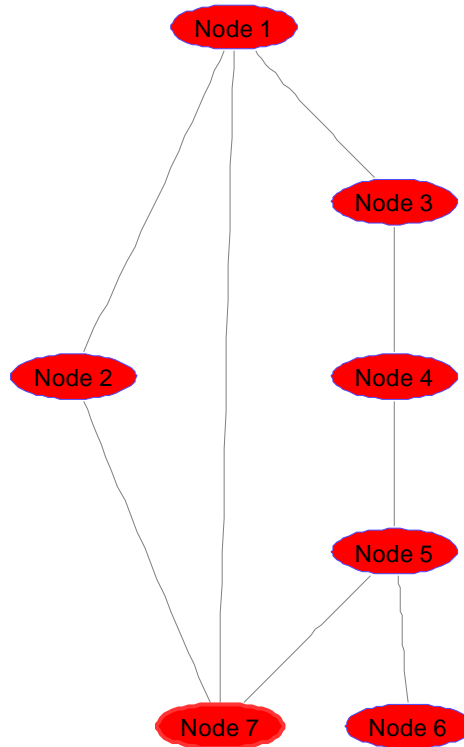
6.4 Προσομοίωση Δεύτερη

Σε αυτήν την προσομοίωση θέλουμε να δούμε αν ο αλγόριθμος μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μία πιο σύνθετη τοπολογία δικτύου όπως η παρακάτω, η οποία αντιστοιχεί στο δίκτυο του MATPOWER case57 και αποτελεί το πρότυπο δοκιμών IEEE 57 κόμβων(Σχήμα 6.2)



Σχήμα 6.3

Το δίκτυο αποτελείται από 57 κόμβους συνδεδεμένους με την τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα. Υπάρχουν 7 ντιζελογεννήτριες συνδεδεμένες στους κόμβους που είναι κόκκινοι. Η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας που προκύπτει είναι η εξής.



Σχήμα 6.4

Οι γεννήτριες του δικτύου έχουν τους εξής συντελεστές συνάρτησης κόστους και όρια λειτουργίας. Το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι 12445 MW.

| | a_i | b_i | P_{Max} | P_{Min} |
|---------------------------|-------------|-------|-----------|-----------|
| Γεννήτρια 1 (Κόμβος 1) | 0.077579519 | 20 | 575,88 | 0 |
| Γεννήτρια 2 (Κόμβος 2) | 0.01 | 40 | 100 | 0 |
| Γεννήτρια 3 (Κόμβος 3) | 0.25 | 20 | 140 | 0 |
| Γεννήτρια 4 (Κόμβος 6) | 0.01 | 40 | 100 | 0 |

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση Δικτύων

| | | | | |
|----------------------------|--------------|----|-----|---|
| Γεννήτρια 5 (Κόμβος 8) | 0.02222 | 20 | 550 | 0 |
| Γεννήτρια 6 (Κόμβος 9) | 0.01 | 40 | 100 | 0 |
| Γεννήτρια 7 (Κόμβος 13) | 0.0322580645 | 20 | 410 | 0 |

Τα αποτελέσματα που επιστρέφει ο αλγόριθμος είναι τα εξής

| | Παραγωγή (MW) |
|-------------------------|------------------|
| Γεννήτρια 1 (Κόμβος 1) | 139,110467141517 |
| Γεννήτρια 2 (Κόμβος 2) | 79,2123128414364 |
| Γεννήτρια 3 (Κόμβος 3) | 43,1684924912740 |
| Γεννήτρια 4 (Κόμβος 6) | 79,2123114366123 |
| Γεννήτρια 5 (Κόμβος 8) | 485,645539798891 |
| Γεννήτρια 6 (Κόμβος 9) | 79,2123086513020 |
| Γεννήτρια 7 (Κόμβος 12) | 334,555817196077 |

Οριακό Κόστος του συστήματος 41,5842 \$/MWh.

Ας γίνει τώρα η σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του MATPOWER τα οποία είναι τα εξής.

| | Παραγωγή (MW) |
|-------------------------|---------------|
| Γεννήτρια 1 (Κόμβος 1) | 139.46 |
| Γεννήτρια 2 (Κόμβος 2) | 81.93 |
| Γεννήτρια 3 (Κόμβος 3) | 43.28 |
| Γεννήτρια 4 (Κόμβος 6) | 81.93 |
| Γεννήτρια 5 (Κόμβος 8) | 486.87 |
| Γεννήτρια 6 (Κόμβος 9) | 81.93 |
| Γεννήτρια 7 (Κόμβος 12) | 335.40 |

Οριακό Κόστος του συστήματος 41,64\$/MWh.

Τα ποσοστιαία σφάλματα της κάθε γεννήτριας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| | Σφάλμα (%) |
|-------------------------|------------|
| Γεννήτρια 1 (Κόμβος 1) | 0,25 |
| Γεννήτρια 2 (Κόμβος 2) | 3,317 |
| Γεννήτρια 3 (Κόμβος 3) | 0,257 |
| Γεννήτρια 4 (Κόμβος 6) | 3,317 |
| Γεννήτρια 5 (Κόμβος 8) | 0,252 |
| Γεννήτρια 6 (Κόμβος 9) | 3,317 |
| Γεννήτρια 7 (Κόμβος 12) | 0,251 |

Ενώ για το οριακό κόστος το σφάλμα είναι 0,134%.

Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί έναν επίλογο για την εργασία αυτή. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται συνοπτικά αποτελέσματα των υπολογισμών των παραπάνω κεφαλαίων και προτείνονται προοπτικές συνέχισης.

7.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάσθηκε μία αποκεντρωμένη προσέγγιση της λύσης του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου. Η συμβατική προσέγγιση του προβλήματος βασίζεται στην ακριβή πρόβλεψη φορτίων τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, στον οικονομικό προγραμματισμό των γεννητριών από έναν κεντρικό ελεγκτή και στην οικονομική φόρτιση των μονάδων σε λειτουργία. Το κομμάτι της πρόβλεψης των φορτίων παραμένει το ίδιο στην προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική, ώστε η λύση να είναι κατάλληλη για το σύστημα. Αυτό που αλλάζει είναι πως η λύση προκύπτει ως αποτέλεσμα συνεννόησης γειτονικών κόμβων παραγωγής. Ανταλλάσσοντας πληροφορίες που αφορούν την παρούσα τιμή οριακού κόστους της κάθε γεννήτριας και χρησιμοποιώντας μία διαδικασία υπολογισμού που χρησιμοποιεί σταθμισμένο μέσο όρο με παράλληλη προσαρμογή στα κατάλληλα επίπεδα παραγωγής, το σύστημα συγκλίνει στην βέλτιστη τιμή οριακού κόστους.

Αναπτύχθηκε κατανεμημένος αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB ο οποίος με χρήση πινάκων υλοποιεί την ανταλλαγή των πληροφοριών και χρησιμοποιώντας βάρη που προκύπτουν από την τοπολογία του δικτύου συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή.

Μέσα από δοκιμές διαφόρων δικτύων και συγκρίσεις με την βέλτιστη λύση τους προκύπτει το συμπέρασμα πως η λύση που προκύπτει από τον αλγόριθμο προσεγγίζει τη βέλτιστη με σφάλμα που κυμαίνεται χαμηλότερα του 5%.

Μελετήθηκε επίσης η ταχύτητα σύγκλισης στη βέλτιστη λύση και πώς αυτή επηρεάζεται ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου. Εξετάσθηκε δίκτυο 20 κόμβων παραγωγής οι οποίοι αρχικά επικοινωνούν όλοι μεταξύ τους και παρατηρήθηκε πως επιδρά η αφαίρεση συνδέσεων μεταξύ τους στην ταχύτητα σύγκλισης. Σύγκλιση παρουσιάζεται σε όλες τις περιπτώσεις με την ταχύτητα να αυξάνεται αργά μέχρι ενός σημείου και πέραν αυτού ραγδαία, για να μειωθεί πάλι όσο προσεγγίζεται η τελική ακτινική μορφή. Εν συνεχεία εξετασθήκαν κάποιες κλασσικές μορφές τοπολογιών δικτύου όπως ο αστέρας, η αλυσιδωτή και δακτυλιοειδής. Μόνο στην πρώτη περίπτωση δεν παρουσιάζεται σύγκλιση, αλλά αντιθέτως ταλάντωση μεταξύ κάποιων ακραίων τιμών.

Σε όλα σχεδόν τα δίκτυα παρουσιάζεται κάποια μικρή απόκλιση στην τελικά παραγόμενη ισχύ από τη ζητούμενη. Μελετήθηκε λοιπόν πως επηρεάζει η αύξηση του φορτίου την απόκλιση αυτή σε ένα ακτινικό δίκτυο 13 γεννητριών. Σε όλες τις περιπτώσεις το σφάλμα κυμαίνεται και εδώ κάτω του 5% με τις μεγαλύτερες τιμές (3,75%-4%) να εμφανίζονται πάνω από το 90% της φόρτισης των γεννητριών και τις μικρότερες (0,75%-2%) να εμφανίζονται στο 50%-80%.

Ένα ακόμα στοιχείο του αλγορίθμου που μελετήθηκε είναι η πολυπλοκότητα του, κατά πόσο δηλαδή η αύξηση του αριθμού των γεννητριών επηρεάζει τη ταχύτητα σύγκλισης. Αυτό εξετάστηκε ξεκινώντας από ένα δίκτυο 3 γεννητριών και αυξάνοντας τον αριθμό τους καθώς και το φορτίο αναλογικά μέχρι τις 50. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως η πολυπλοκότητα παρουσιάζει μία μη εκθετική μορφή. Μία τάξη πολυπλοκότητας, δηλαδή, ικανοποιητική.

Τέλος μελετήθηκε η εφαρμογή του αλγορίθμου σε περιβάλλον πραγματικού δικτύου μέσω της πλατφόρμας MATPOWER που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς ροών φορτίου. Δοκιμάστηκε ο αλγόριθμος σε περιβάλλον δύο διαφορετικών δικτύων. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκλιση στο βέλτιστο επίπεδο παραγωγής των γεννητριών κρίνονται ικανοποιητικά, καθώς το σφάλμα που προκύπτει μεταξύ των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου και της προσομοίωσης του MATPOWER κινούνται σε επιτρεπτά όρια κάτω του 5%.

7.3 Προοπτικές Συνέχισης

Μπορεί να μελετηθεί η καταλληλότητα του αλγορίθμου σε δίκτυα με διαφορετικών ειδών γεννήτριες, καθώς στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε η περίπτωση των ντιζελογεννητριών.

Καθώς στην παρούσα διπλωματική αγνοήθηκαν οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς, καθώς και το κόστος εκκίνησης και παύσης των σταθμών παραγωγής, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία μελέτη των επιπτώσεων τους στα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Τέλος μία προσέγγιση η οποία θα λαμβάνει υπόψη και την παραγωγή αέργου ισχύος, σίγουρα θα έδινε ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

[1] Υπουργείο Εσωτερικών, Γεν. Γραμματεία Πολ. Προστασίας, Δ/νση Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών, Τμήμα Σχεδιασμού, πρόληψης και αντ/σης έκτακτων αναγκών: Δραστηριότητες ηλεκτρικής ενέργειας 2008

[2] Μαριάμου Σταυρούλα: Αξιολόγηση επενδύσεων σε έργα ΑΠΕ και βελτιστοποίηση κινήτρων με χρήση διεπίπεδου προγραμματισμού, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, ΗΜΜΥ, Αθήνα Φεβρουάριος 2014

[3] Αλεξανδρή Νατάσα: Μοντελοποίηση μικροδικτύου χαμηλής τάσης με χρήση του προτύπου IEC-6185, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, ΗΜΜΥ, Αθήνα Μάρτιος 2015

[4] Environmental Commissioner of Ontario: The smart grid: The next step for our electrical grid

[5] Holmberg, David G. and Bushby, Steven T.: BACnet and the smart grid

[6] Πιερή Γεωργία: Η επίδραση των διαφορετικών πολιτικών λειτουργίας στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, ΗΜΜΥ, Αθήνα Ιούλιος 2012

[7] Σ. Παπαθανασίου: Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ

[8] Ackerman T., Andersson G. and Soder L.: Distributed Generation: A definition

[9] El-Khattan W. and Salama M.M.A: Distributed Generation: Technologies, definitions and benefits

[10] greenbusinessguide.co.za: Distributed generation key to SA's energy

[11] Βουρνάς, Κ. Κονταξής Γ. : Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

[12] Παπαδόπουλος Μ.: Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

[13] Wood AJ, Wollenberg BF.: Power generation, operation and Control. New York: John Wiley & Sons; 1994

[14] Jizhang Zhu: Optimization of power system operation

[15] Παπαδιάς Β. και Κονταξής Γ.: Ηλεκτρική Οικονομία

[16] Σταμούλης Μιχαήλ: Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε Σ.Η.Ε. υπό Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς με την χρήση Γενετικών Αλγορίθμων, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, ΗΜΜΥ, Αθήνα Ιούλιος 2009

[17] T. Guo, M. Henwood, and M. van Ooijen: "An algorithm for combined heat and power economic dispatch

- [18] **Robin Roche, Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui, Vincent Hilaire, Abder Koukam:** Multi-Agent Systems For Grid Energy Management: A Short Review, Conference: IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society
- [19] **J.-Y. Fan and L. Zhang:** “Real-time economic dispatch with line flow and emission constraints using quadratic programming”, Power Systems, IEEE Transactions on Volume:13 , Issue: 2
- [20] **Ziang Zhang:** Incremental Cost Consensus Algorithm in a Smart Grid Environment, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE
- [21] **Wei Ren, Randal W. Beard and Ella M. Atkins:** A survey of consensus problems in multiagent coordination, 2005 American Control Conference June 8-10, 2005. Portland, OR, USA
- [22] **Shiping Yang, Sicong Tan and Jian-Xin Xu:** Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEM, Paper no. TPWRS-01327-2012.
- [23] **Reza Olfati Saber and Richard M. Murray:** Consensus problems in networks of agents with switching topology and time delay, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 49, NO. 9, SEPTEMBER 2004
- [24] **Ziang Zhang, Xichun Ying and Mo-xaen Chow:** Decentralising the economic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment, North American Power Symposium (NAPS), 2011
- [25] **Akshay Kashyap, Basar T. and Srikant R.:** Quantized Consensus, ISIT 2006, Seattle, USA, July 9 - 14, 2006
- [26] **Ziang Zhang, Mo-Yuen Chow:** Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 4, NOVEMBER 2012
- [27] **G. Zwe-Lee:** Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints
- [28] **R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-S´anchez, and R. J. Thomas,** “Matpower: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,” Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.
- [29] **Ζάχος Στ., Κοζύρης Ν. :** Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών