



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

Ανάπτυξη Κατανεμημένων Αλγορίθμων για Κατανεμημένη Οικονομική Κατανομή Φορτίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όλγα Κάγιαλη

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

Ανάπτυξη Κατανεμημένων Αλγορίθμων για Κατανεμημένη Οικονομική Κατανομή Φορτίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όλγα Κάγιαλη

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτώβριο του 2016.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Όλγα Κάγιαλη

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

Copyright © Όλγα Κάγιαλη, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελούν σύνθετα και δυναμικά συστήματα τα οποία μεταβάλλονται και εξελίσσονται συνεχώς με γνώμονα την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διεσπαρμένης παραγωγής. Για την υλοποίηση αυτών, απαραίτητη φαίνεται η ανάπτυξη τεχνολογιών έξυπνων δικτύων ενώ ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα παρουσιάζουν οι αποκεντρωμένες τεχνικές ελέγχου, οι οποίες μπορούν να καθιστούν αποτελεσματικότερη την εποπτεία και τον έλεγχο του δικτύου και συμβάλλουν στην ευελιξία, την επεκτασιμότητα και τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής αυτού σε διαταραχές.

Στα πλαίσια αυτά, μελετάται η χρήση τέτοιων μεθόδων ελέγχου για την επίλυση του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου με κατανεμημένο τρόπο. Η Οικονομική Κατανομή Φορτίου αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στόχο τον υπολογισμό των επιπέδων παραγωγής των μονάδων για την κάλυψη της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος καυσίμου (για συμβατικές μονάδες). Θεωρούμε ότι το κόστος κάθε μονάδας παραγωγής εκφράζεται ως μία πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρας τάξης. Το συνολικό κόστος (άθροισμα του κόστους κάθε μονάδας) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που μελετάμε και τίθεται προς ελαχιστοποίηση υπό τους περιορισμούς που θέτει το σύστημα. Διαφορίζοντας αυτή τη συνάρτηση, προκύπτει και η συνάρτηση του οριακού κόστους. Αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη λύση για την οικονομική κατανομή του φορτίου επιτυγχάνεται όταν όλες οι μονάδες λειτουργούν υπό το ίδιο οριακό κόστος (κριτήριο οικονομικής κατανομής φορτίου).

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κατανεμημένα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συναίνεσης (consensus). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η μεταβλητή συναίνεσης ανανεώνει την τιμή της με χρήση μόνο τοπικών μεταβλητών και μέχρις ότου η μεταβλητή συναίνεσης να συγκλίνει σε μία κοινή τιμή για όλους τους κόμβους. Θεωρώντας ως μεταβλητή συναίνεσης το οριακό κόστος μπορούμε, αντίστοιχα, να επιτύχουμε σύγκλιση του οριακού κόστους όλων των μονάδων σε μία κοινή τιμή, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς του προβλήματος (τεχνικοί περιορισμοί των μονάδων και κάλυψη συνολικού φορτίου).

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, γίνεται ανταλλαγή των απαραίτητων πληροφοριών μόνο μεταξύ γειτονικών μονάδων. Έτσι, καταλήγουμε στη βέλτιστη λύση χωρίς την ανάγκη κεντρικού ελέγχου, με χρήση μόνο τοπικών πληροφοριών του συστήματος. Η επικοινωνία αυτή των μονάδων μοντελοποιείται κάνοντας χρήση του πίνακα γειτνίασης του δικτύου, από τον οποίο προκύπτει ένας πίνακας βαρών που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβλητής συναίνεσης. Με αυτό τον τρόπο, οι μονάδες ανταλλάσσουν τις τιμές των μεταβλητών τους μόνο με τις γειτονικές τους και με τη χρήση μίας επαναληπτικής διαδικασίας ανανεώνουν κατάλληλα τις μεταβλητές τους, ώστε να καταλήξουν σε ένα σταθμισμένο μέσο όρο για τις συναρτήσεις οριακού κόστους τους και κατά συνέπεια στη λύση του προβλήματος.

Για την κατανεμημένη επίλυση αυτού του προβλήματος στην παρούσα διπλωματική, προτάθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι βασισμένοι στο μοντέλο συναίνεσης, οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανανέωση των μεταβλητών. Αναλυτικότερα, μελετώνται: ένας Γραμμικός Αλγόριθμος, με τη χρήση μίας γραμμικής σχέσης για την ανανέωση των μεταβλητών συναίνεσης, ένας αλγόριθμος βασισμένος στο μοντέλο Kuramoto, που κάνει χρήση ημιτονοειδών και τέλος ένας Μη Γραμμικός Αλγόριθμος, όπου η σχέση ανανέωσης είναι μη γραμμικής μορφής με χρήση εκθετικών όρων. Σε κάθε μοντέλο χρησιμοποιείται ακόμα μία επιπλέον μεταβλητή συναίνεσης η οποία αναπαριστά την υπολειπόμενη ή περισσευούμενη ισχύ στο επίπεδο κάθε κόμβου (power

mismatch). Μέσω αυτής γίνεται διόρθωση του οριακού κόστους ώστε τελικά το σύστημα να καταλήξει με μηδενική διαφορά ισχύος μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή και η δυναμική προσαρμογή των μονάδων σε τυχούσες αλλαγές του φορτίου.

Η ανάπτυξη των αλγορίθμων καθώς και η προσομοίωσή τους έγινε σε περιβάλλον MATLAB. Για την υλοποίηση των παραπάνω αλγορίθμων, αρχικά, μελετήθηκαν 2 προσεγγίσεις. Στην πρώτη, αμελήθηκαν οι απώλειες μεταφοράς των γραμμών του συστήματος, ενώ στη δεύτερη εισήχθησαν και αυτές στο πρόβλημα και συγκρίθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις διαφόρων δικτύων και περιπτώσεων ώστε να γίνει πλήρης μελέτη της συμπεριφοράς των αλγορίθμων. Εκτιμήθηκε η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα τους και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τα αντίστοιχα της κλασικής επίλυσης. Μελετήθηκαν, ακόμα, η ταχύτητα σύγκλισης των αλγορίθμων σε διαφορετικές τοπολογίες ή τρόπους διασύνδεσης των μονάδων καθώς και η πολυπλοκότητα τους, η οποία εκφράζει την επίδραση των αριθμών των κόμβων στον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Ακόμα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε ρεαλιστικά δίκτυα μεταφοράς με τη χρήση του πακέτου MATPOWER, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για την αποδοτικότητα του κάθε αλγορίθμου. Τέλος, ο αποδοτικότερος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε μία ημερήσια καμπύλη φορτίου, για να μελετηθεί η δυνατότητα προσαρμογής της παραγωγής των μονάδων στις αλλαγές του φορτίου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας για την κάλυψη της ωριαίας ζήτησης. Ακόμα, μελετήθηκε πώς επηρεάζεται η λύση αυτού του προβλήματος όταν λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός με τον οποίο κάθε μονάδα δύναται να αυξήσει ή να μειώσει την παραγωγή της σε μία μονάδα χρόνου.

Λέξεις Κλειδιά: Οικονομική Κατανομή Φορτίου, Αποκεντρωμένος Έλεγχος, Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι, Ευφυή Δίκτυα, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων, Μοντέλο Συναίνεσης, Συντελεστές Lagrange, Οριακό Κόστος

Abstract

Electrical grids are complex and dynamic systems that constantly change and evolve, in order to increase the penetration of renewable energy and distributed generation. To achieve these, the development of smart grid technologies seems necessary while decentralized control techniques offer interesting advantages that can make the supervision and control of the grid more effective and contribute to its ability to dynamically adapt to disturbances.

In this context, we study the use of such decentralized control methods to solve the Economic Dispatch problem in a distributed manner. Economic Dispatch is an optimization problem that aims at calculating the levels of the units' power generation in order to meet the power demand at the lowest fuel cost possible (for conventional units). We assume that the units' costs are expressed by second order polynomial functions. The sum of the previous is the objective function of the problem, that is subjected to minimization under the various system's constraints. By taking the derivative of this function we can express the function of the marginal cost for each unit. It has been proven that the solution for the economic dispatch is reached when all units operate with the same marginal cost (economic dispatch criterion).

This problem of economic dispatch is solved in a distributed manner using the consensus method. This method is an iterative process during which the consensus variable renews its value by using only local variables and until it converges to a common value for all nodes. Considering the function of the marginal cost of each unit as the consensus variable, we can achieve convergent of all units' marginal costs at a common value while at the same time taking into account the constraints of the problem (units' technical constraints and serving the total load).

According to this model, exchange of information only between neighboring units is necessary. Thus, the optimal solution is calculated without the need of a central fusion center and by using only local interactions. This units' communication is modeled by using the grid's adjacency matrix, from which derives a weight matrix which is used in the calculation of the consensus variable. In this way, the units exchange the values of their variables only with their neighbors, and converge to a weighted average for their marginal cost functions and thereafter to the solution of the problem.

For the distributed solution of the problem of the economic dispatch, three different algorithms were proposed based on the consensus model, which use different approaches for renewing the consensus variables. In more detail: a Linear Algorithm using a linear relation for updating the consensus variables, an algorithm based on the Kuramoto model that makes use of sinusoidal functions and finally a Nonlinear Algorithm, wherein the update rule is nonlinear using exponential terms. In each model, one more consensus variable is used which represents the power mismatch of each node. This is used as a correction factor to the marginal cost aiming at reaching a zero power mismatch between generation and consumption. In this way it becomes possible for the units to dynamically adjust to any load changes.

The development of the algorithms and their simulations were made using the MATLAB environment. For the implementation of the above algorithms, two approaches were firstly studied. In the first approach the lines' transmission losses were neglected whereas in the

second they were incorporated into the problem and then the obtained results were compared. Then, simulations of different networks were performed and different cases were studied so as to make a full analysis of the algorithms' behavior. Their efficiency and effectiveness were assessed and the obtained results were compared to those of conventional methods. Furthermore, we studied the convergent speed of the algorithms in different topologies or the different units' interconnections as well as the algorithms' complexity, which expresses the influence of the number of nodes to the number of iterations needed. Furthermore, simulations of realistic transmission grids were performed, using the MATPOWER package, leading to conclusions on the efficiency of each algorithm. Finally, the most efficient algorithm is simulated with the use of a daily load curve, to observe the ability of the units' generation to adapt to load changes during the course of a day to cover the hourly demand. We also examined how the solution of this problem is influenced when we take into account the rate at which each unit has the ability to increase or to decrease their power generation in a given period of time.

Keywords: Economic Dispatch, Decentralized Control, Distributed Algorithms, Smart Grids, Distributed Generation, Renewable Energy Sources, Multi Agent Systems, Consensus Model, Lagrange Multipliers, Marginal Cost

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου γύρω από αυτό.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον ερευνητή κ. Ιάσονα Κουβελιώτη-Λυσικάτο για την προθυμία του να βοηθήσει σε ό,τι χρειαστώ, χαρίζοντάς μου τις συμβουλές του και τη συνεχή καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για την αγάπη, τη συμπαράσταση και τη στήριξή τους, κάνοντας το ταξίδι μου προς την ολοκλήρωση των σπουδών μου ευκολότερο και ομορφότερο.

Τέλος, τη μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη την οφείλω στην οικογένεια μου η οποία βρίσκεται πάντα δίπλα μου τόσο στις σπουδές όσο και σε κάθε βήμα της ζωής μου, δείχνοντάς μου την αμέριστη αγάπη και υποστήριξή της και πιστεύοντας σε εμένα και στις δυνατότητές μου. Ευχαριστώ, λοιπόν, τη μητέρα μου, Αφροδίτη, τα αδέρφια μου, Γιώργο, Κορίνα και Δημήτρη και, τέλος, τον πατέρα μου, Μιχάλη, την αγάπη του οποίου δε θα ξεχάσω ποτέ και στον οποίο θέλω να αφιερώσω αυτή την εργασία.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract.....	5
Ευχαριστίες	7
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	11
1.1 Σκοπός και Αντικείμενο.....	12
1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	14
Κεφάλαιο 2 – Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
2.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	17
2.1.2 Δίκτυα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
2.1.3 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	21
2.3 Κεντρική Παραγωγή Ενέργειας.....	23
2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας.....	24
2.5 Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids).....	26
Κεφάλαιο 3 – Οικονομική Κατανομή Φορτίου	29
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Κλασικό Μοντέλο Οικονομικής Κατανομής Φορτίου	31
3.3 Μέθοδος Συντελεστή Λάμδα (Lagrange) Αμελώντας τις Απώλειες	36
3.4 Μέθοδος Συντελεστή Λάμδα (Lagrange) με Απώλειες.....	39
3.5 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με Περιορισμούς Μονάδων.....	41
3.6 Άλλες Προσεγγίσεις στην Επίλυση της Οικονομικής Κατανομής Φορτίου	42
3.6.1 Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming).....	42
3.6.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)	43
3.6.3 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)	43
3.6.4 Αλγόριθμοι Monte-Carlo.....	44
Κεφάλαιο 4 – Αποκεντρωμένος Έλεγχος στην Οικονομική Κατανομή Φορτίου.....	45
4.1 Εισαγωγή.....	46
4.2 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems)	47
4.3 Θεωρία Γράφων και Πρωτόκολλα Consensus.....	47
4.3.1 Θεωρία Γράφων.....	48
4.3.2 Αλγόριθμος Συναίνεσης (Consensus).....	48
4.3.3 Εφαρμογή Αλγορίθμου Συναίνεσης	50
4.4 Εφαρμογή στην Οικονομική Κατανομή Φορτίου	54

Κεφάλαιο 5 – Αποκεντρωμένη Οικονομική Κατανομή Φορτίου - Αλγόριθμοι.....	57
5.1 Βασικός Αλγόριθμος.....	58
5.2 Μελέτη Προβλήματος Χωρίς Απώλειες Μεταφοράς.....	61
5.2.1 Γραμμικός Αλγόριθμος (Linear Algorithm).....	65
5.2.2 Αλγόριθμος Kuramoto (Kuramoto Algorithm).....	67
5.2.3 Μη Γραμμικός Αλγόριθμος (Non-Linear Algorithm).....	70
5.2.4 Σύγκριση Αλγορίθμων.....	73
5.3 Μελέτη Προβλήματος Με Απώλειες Μεταφοράς.....	74
5.3.1 Γραμμικός Αλγόριθμος (Linear Algorithm).....	75
5.3.2 Αλγόριθμος Kuramoto (Kuramoto Algorithm).....	78
5.3.3 Μη Γραμμικός Αλγόριθμος (Non-Linear Algorithm).....	80
5.3.4 Σύγκριση Αλγορίθμων.....	82
5.4 Αποτελέσματα.....	83
Κεφάλαιο 6 – Προσομοίωση Δικτύων – Μελέτη Περιπτώσεων.....	84
6.1 Μελέτη Τοπολογίας Δικτύου.....	85
6.2 Επίδραση Μεταβολής Σταθεράς Σύγκλισης ϵ	95
6.3 Πολυπλοκότητα Αλγορίθμων.....	98
6.4 Προσομοίωση σε Δίκτυα με Χρήση του MATPOWER.....	99
6.4.1 Μελέτη Δικτύου 30 Ζυγών.....	100
6.4.2 Άλλα Δίκτυα.....	108
Κεφάλαιο 7 – Εφαρμογή Αλγορίθμου σε Καμπύλη Φορτίου.....	117
7.1 Καμπύλες Φορτίου.....	118
7.2 Μελέτη Αλγορίθμου με Χρήση Καμπύλης Φορτίου.....	118
7.3 Εφαρμογή Με Περιορισμούς Γεννητριών.....	123
Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα – Προοπτικές.....	126
8.1 Συμπεράσματα.....	127
8.2 Προοπτικές – Μελλοντική Εργασία.....	129
Βιβλιογραφία.....	130

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Αντικείμενο

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα δίκτυα για την ανάπτυξη του τεχνολογικού μας πολιτισμού. Αποτελούν το μεγαλύτερο και πιο σύνθετο δυναμικό σύστημα που ανέπτυξε ο άνθρωπος, μέσω των οποίων γίνεται η μεταφορά και διανομή της ενέργειας όπου και όταν αυτή χρειάζεται και φυσικά αξιοποιώντας όσο περισσότερο γίνεται καθαρές μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική. Τα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά θέματα με σκοπό την βελτιστοποίησή και αναβάθμισή τους σε ένα έξυπνο, αυτόνομο και αξιόπιστο δίκτυο. Αυτό όμως εμφανίζει πολλά προβλήματα λόγω της πολυπλοκότητας και του μεγέθους τους. Λαμβάνοντας υπόψη, δε, ότι η ανάπτυξη του δικτύου τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξημένης ζήτησης ενέργειας γίνεται με τεράστιους ρυθμούς, καταλαβαίνουμε πόσο αυτό επηρεάζει και την πολυπλοκότητα του δικτύου και τα προβλήματα που αυτό γεννά. Η πολυπλοκότητά του έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλές συνιστώσες που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν μελετάται ένα δίκτυο, μερικές από τις οποίες είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Ο σημαντικότερος παράγοντας που κυρίως καθορίζει τη δομή του είναι το μέγεθός του και προσαρμόζεται ανάλογα με την περιοχή που πρέπει να εξυπηρετήσει, είτε είναι μία εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή είτε μία μικρή. Έτσι, το κάθε σύστημα δομείται με βάση τις ιδιαιτερότητες που καλείται να εξυπηρετήσει. Ακόμα, όμως, και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα δίκτυο με πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε όλο και μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διεσπαρμένης παραγωγής σε συνδυασμό με τους ήδη διαδεδομένους υδροηλεκτρικούς, θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής καθώς και διασυνδέσεις με άλλα συστήματα προσθέτουν σε όλο το σύστημα ακόμα περισσότερες παραμέτρους προς μελέτη και μοντελοποίηση.

Μεταξύ των πιο σημαντικών θεμάτων, λοιπόν, που ζητούν επίλυση είναι η διαχείριση των συστημάτων ενέργειας και ο προγραμματισμός της λειτουργίας τους. Όμως, η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που επιφέρει μη σταθερή παραγωγή στην πάροδο του χρόνου, και η διασκορπισμένη χωροταξικά παραγωγή απαιτούν από το ηλεκτρικό δίκτυο τη δυνατότητα να προσαρμόζεται δυναμικά και με ευελιξία ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα. Συνεπώς, τα δίκτυα πρέπει να μπορούν να αντιδρούν στις τυχούσες αλλαγές γρήγορα και σε πραγματικό χρόνο ώστε να μπορούν να ανταποκρίνονται στη δεδομένη ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων χρειάζονται τεχνολογικές και επιστημονικές εξελίξεις, η χρήση έξυπνων πρακτόρων και αισθητήρων και η ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη μελέτης αυτών των πολύπλοκων δικτύων ως προς τη δυναμική τους και τον έλεγχό τους. Η ευστάθεια του δικτύου, η μελέτη της ροής ισχύος, ο συγχρονισμός τους, η ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης, ο προγραμματισμός της παραγωγής και η βέλτιστη οικονομική κατανομή είναι από τα βασικά στοιχεία για τον έλεγχο και τη λειτουργία του δικτύου. [1] Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε βελτίωση στα δίκτυα ενέργειας είναι ταυτόσημη με την εύρεση πιο αποδοτικών και έξυπνων τρόπων για τη μελέτη αυτών.

Εδώ έγκειται και ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα γίνει εισαγωγή

στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου. Έπειτα, παρουσιάζεται η επίλυση του προβλήματος αυτού όπως αυτή επιτυγχάνεται στο συμβατικό δίκτυο, το οποίο ελέγχεται κεντρικά. Τέλος, στόχος είναι να προταθούν και να συγκριθούν διαφορετικές μέθοδοι με κατανομημένη βάση για την ανάπτυξη ενός δικτύου όπου ο έλεγχος θα γίνεται αποκεντρωμένα και να τεθούν οι βάσεις για την ανάπτυξη ευφυών δικτύων.

1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των κεφαλαίων και του περιεχομένου τους.

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται περιεκτικά το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας και το πρόβλημα το οποίο καλείται να επιλύσει.

Κεφάλαιο 2ο: Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανάλυση των βασικών αρχών που διέπουν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και της σύνδεσης των μονάδων παραγωγής σε αυτά. Παράλληλα, αναλύονται όροι, όπως το έξυπνο δίκτυο και η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας, έννοιες στενά συνδεδεμένες με το κύριο θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 3ο: Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μια σε βάθος παρουσίαση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου και των αρχών που διέπουν την επίλυσή του. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση των παραδοχών που δεχόμαστε και των περιπτώσεων που εξετάζουμε κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.

Κεφάλαιο 4ο: Αποκεντρωμένος Έλεγχος στην Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι λόγοι που καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη ενός αποκεντρωμένου μοντέλου για την οικονομική κατανομή φορτίου. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένες από τις βασικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του αποκεντρωμένου ελέγχου.

Κεφάλαιο 5ο: Αποκεντρωμένη Οικονομική Κατανομή Φορτίου – Αλγόριθμοι

Με βάση τα μοντέλα που αναφέρθηκαν και μέσω της ανάπτυξης κατανεμημένων αλγορίθμων, προτείνονται λύσεις για το μελετώμενο πρόβλημα και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και της αποδοτικότητας των αλγορίθμων. Παράλληλα, μελετούνται μέσω διαφόρων παραδοχών τόσο απλοποιημένα όσο και πιο πολύπλοκα προβλήματα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται ύστερα από εκτέλεση των αλγορίθμων χρησιμοποιώντας το περιβάλλον MATLAB.

Κεφάλαιο 6ο: Προσομοίωση Δικτύων – Μελέτη Περιπτώσεων

Με βάση τους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν, διενεργήθηκαν ορισμένες προσομοιώσεις δικτύων και μελέτη διαφόρων περιπτώσεων. Έτσι, γίνεται μελέτη της επίδρασης της μεταβολής της τοπολογίας στην απόδοση του αλγορίθμου καθώς και της πολυπλοκότητας αυτού.

Κεφάλαιο 7ο: Εφαρμογή Αλγορίθμου σε Καμπύλες Φορτίου

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εφαρμογή του αλγορίθμου σε ένα δίκτυο το οποίο μεταβάλλει το φορτίο του, χρησιμοποιώντας μια δεδομένη καμπύλη φορτίου για να επιτύχουμε μία όσο γίνεται ρεαλιστική προσομοίωση.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα που προέκυψαν, εξάγονται συμπεράσματα για την προσέγγιση που ακολουθήθηκε καθώς και για το σύνολο της εργασίας. Παράλληλα, αναφέρονται μελλοντικές προοπτικές έρευνας που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη.

Κεφάλαιο 2

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελεί το σύνολο των εγκαταστάσεων και των βασικών δομών που απαιτούνται ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να φτάνει τις περιοχές εξυπηρέτησης ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλλασσομένου ρεύματος (AC) εκτός ειδικών περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται κατ' εξαίρεση συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η καλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον και ταυτοχρόνως, εξασφαλίζοντας σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης και ασφάλειας. Ακόμα, λόγω των τεχνικών δυσκολιών που παρουσιάζει η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται συνεχής ροή της στο σύστημα και παραγωγή της ακριβώς τη στιγμή που χρειάζεται για κατανάλωση. Για να φτάσει όμως η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης, διαμεσολαβούν επιμέρους συστήματα τα οποία συνδυασμένα αποτελούν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα συστήματα είναι το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1.1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τη διαδικασία όπου μία μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας που αξιοποιούνται εμφανίζουν διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα ανάλογα με το τι πηγές υπάρχουν διαθέσιμες. Η διαδικασία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν, οι σταθμοί διακρίνονται σε ατμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς, πυρηνικούς ή σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [2]

Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς γίνεται αξιοποίηση της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο που χρησιμοποιείται ανά περίπτωση (λιθάνθρακα, λιγνίτη, φυσικό αέριο, πετρέλαιο). Με την καύση του καυσίμου απελευθερώνεται θερμική ενέργεια, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού στο λέβητα. Ο ατμός διοχετεύεται, έπειτα, στον ατμοστρόβιλο όπου παρέχει μέρος της ενέργειάς του σε μηχανική μορφή. Ο στρόβιλος με τη σειρά του περιστρέφει τη γεννήτρια όπου η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται, τελικά, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αντίστοιχα, στους πυρηνικούς σταθμούς ο ελεγχόμενος πυρηνικός αντιδραστήρας αντικαθιστά το συμβατικό λέβητα σαν πηγή θερμικής ενέργειας, όπου η θερμική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της σχάσης. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αξιοποιείται η δυναμική και κινητική ενέργεια των υδάτων, η οποία έπειτα μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρήση υδροστροβίλων και γεννητριών.

Άλλες πηγές που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για την παραγωγή ηλεκτρικής είναι η αιολική, η γεωθερμία και η ηλιακή ενέργεια οι οποίες αποτελούν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) που αξιοποιούν τις ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και όχι τα περιορισμένα ενεργειακά ορυκτά αποθέματα. Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι άμεσα συνδεδεμένη με

την ηλιακή ακτινοβολία και διάφορα φυσικά φαινόμενα, όπως ο αέρας και η παλίρροια και, κατά συνέπεια, εξαρτάται από την περιοδικότητα ή τη στοχαστικότητα αυτών των φαινομένων οπότε δεν προσφέρουν εγγυημένη παραγωγή. Η παραγωγή βασισμένη σε ΑΠΕ, όμως, αποτελεί ένα μόνο μικρό κομμάτι της συνολικής παραγωγής στην Ελλάδα. Το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκατεστημένης ηλεκτροπαραγωγικής ισχύος είναι βασισμένο στο λιγνίτη, διότι βρίσκεται σε αφθονία σε πολλά κοιτάσματα στην ηπειρωτική Ελλάδα. Τα τελευταία χρόνια, όμως, υπάρχει συνεχής αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων μετατροπής αιολικής και ηλιακής ενέργειας που σηματοδοτεί τη νέα εποχή για τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή.

Οι εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής σε κάθε περιοχή μελέτης θα πρέπει να επαρκούν ώστε να καλύπτεται η ζήτηση ανά πάσα στιγμή σε όλους τους καταναλωτές όπου και αν αυτοί βρίσκονται. Όμως, η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται εντός ευρέων ορίων τόσο σε ημερήσια βάση όσο και εποχιακά σε ετήσια βάση. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε ήδη, η παραγωγή από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι εγγυημένη. Για τους λόγους αυτούς πρέπει να υπάρχουν και σημαντικά περιθώρια εφεδρείας ισχύος προκειμένου να καλύπτεται η ζήτηση ακόμα και σε περιόδους μεγάλης ζήτησης φορτίου. Η εφεδρεία ακόμα απαιτείται για να μπορεί το σύστημα να ανταποκριθεί σε δυναμικά φαινόμενα που θα προκληθούν από μία σειρά διαταραχών και να εξασφαλίζεται έτσι τόσο η στατική όσο και η δυναμική ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος και να βοηθά στη ρύθμιση της συχνότητας.

2.1.2. Δίκτυα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μέσω του δικτύου μεταφοράς διασυνδέονται όλοι οι μεγάλοι σταθμοί παραγωγής καθώς και διαφορετικά συστήματα μεταξύ τους και μεταφέρονται μεγάλα μεγέθη ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις προς τα κέντρα κατανάλωσης. Το δίκτυο μεταφοράς αποτελεί τη σπονδυλική στήλη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί στα μέγιστα δυνατά επίπεδα τάσης. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υπερ-υψηλής και υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης που χρησιμοποιούνται.

Όποτε, λοιπόν, απαιτείται μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις αυτή γίνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς, που μπορεί να είναι εναέριες ή σπανιότερα υπόγειες. Το επίπεδο τάσης των γραμμών μεταφοράς είναι αυτό που καθορίζει το όριο της ηλεκτρικής ισχύος που μπορούν αυτές να μεταφέρουν. Έτσι, η επίτευξη υψηλών τάσεων μεταφοράς έκανε δυνατή τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ανάλογα με το επίπεδο της τάσης μεταφοράς επιτυγχάνονται χωρητικότητες των γραμμών μεταφοράς που εκτείνονται από 100 MW μέχρι και πάνω από 4000 MW.

Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί απομονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων και προσφέρει τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Στην Ελλάδα, τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα μας ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής

Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, που καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας. Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400kV καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, την Κέρκυρα, τη Λευκάδα, την Κεφαλονιά και την Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66kV.[3]

Τα περισσότερα νησιά σήμερα στην Ελλάδα (κυρίως στο Αιγαίο) ηλεκτροδοτούνται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο, βαρύ (μαζούτ) ή και ελαφρύ (ντίζελ), και τους σταθμούς ΑΠΕ (αιολικούς και φωτοβολταϊκούς). Τα νησιά αυτά δεν έχουν διασυνδεθεί μέχρι σήμερα με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα, λόγω κυρίως τεχνικών και τεχνολογικών δυσκολιών, που υφίσταντο μέχρι πρότινος, αλλά και λόγω οικονομικών δυσκολιών καθώς οι διασυνδέσεις είναι έργα μεγάλης έντασης κεφαλαίου.

Τέλος, το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει διασυνδέσεις με την Αλβανία, την ΠΓΔΜ, τη Βουλγαρία, την Τουρκία και την Ιταλία.

Τα σημερινά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν αξιόπιστα και αποδοτικά. Όμως, οι διαθέσιμες νέες τεχνολογίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος, προσφέροντας βελτιωμένη αξιοπιστία, αυξημένη ικανότητα μεταφοράς και δυνατότητα για καλύτερη ενσωμάτωση των μονάδων μεταβλητής παραγωγής (για παράδειγμα, των μονάδων ηλιακής και αιολικής παραγωγής). Ο συνδυασμός πολλών τέτοιων τεχνολογιών σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων, υποδομών επικοινωνιών, εξοπλισμού ελέγχου και έξυπνων συστημάτων διαχείρισης θα παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στα μελλοντικά δίκτυα.

Στα πλαίσια της ανάπτυξης του Συστήματος ο Διαχειριστής του Συστήματος [4] εκπονεί και δημοσιοποιεί, κάθε έτος, σχέδιο Μελέτης για την Ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ), σύμφωνα με τον Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος. Στη ΜΑΣΜ εντάσσονται τα έργα ανάπτυξης του Συστήματος, τα οποία ο Διαχειριστής κρίνει αναγκαία με σκοπό να επιτυγχάνονται οι εξής στόχοι:

- η βελτίωση της ασφάλειας τροφοδοσίας, η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς και της ευστάθειας του Συστήματος και η μείωση των τεχνικών περιορισμών του Συστήματος
- η αντιμετώπιση των αναγκών σύνδεσης νέων χρηστών σε αυτό
- η ενίσχυση της διασύνδεσης με άλλα συστήματα και με το Δίκτυο
- η μείωση των απωλειών μεταφοράς στο Σύστημα

2.1.3. Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

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.

Τα θέματα που άπτονται της ανάπτυξης του Δικτύου Διανομής αντιμετωπίζονται με τον Κώδικα Διαχείρισης του Δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω [4]:

- την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας
- τη σύνδεση νέων Χρηστών στο Δίκτυο ή ανάγκη τροποποίησης υφιστάμενων συνδέσεων Χρηστών
- τη βελτίωση της ποιότητας και της ασφάλειας λειτουργίας του Δικτύου
- τις μεταβολές στα χαρακτηριστικά του φορτίου ή της παραγωγής, στην τεχνολογία και στις απαιτήσεις αξιοπιστίας
- τη μείωση του συνολικού μακροχρόνιου κόστους του Δικτύου

2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Αποτελούν τις πηγές ενέργειας που δίνονται από τη φύση, δεν προέρχονται από ορυκτές πηγές και είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Τέτοιες είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική, η παλιρροϊκή και η βιομάζα. Βασικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό ως ΑΠΕ αποτελεί το ότι δεν αλλοιώνουν το ισοζύγιο του CO₂ και, επιπλέον, δεν παράγουν τοξικά καυσαέρια, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου. Η ηλεκτρική ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την εκμετάλλευση αυτών των πηγών, κυρίως της αιολικής ενέργειας (ανεμογεννήτριες) ή της ηλιακής (φωτοβολταϊκά) και την εκμετάλλευση υδάτινου δυναμικού σε μικρούς όμως μόνο υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Άλλες αξιοποιήσιμες πηγές είναι η βιομάζα ή το βιοαέριο, η γεωθερμική ενέργεια, η εκμετάλλευση της ενέργειας από τη θάλασσα, η συμπαραγωγή και οι υβριδικοί σταθμοί, 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.

Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ δεν συνεπάγεται 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.

Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί αποτελούνται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία είναι συστοιχίες πάνελ πυριτίου που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική υπό συνεχή τάση (DC) και κυκλώματα ισχύος - αντιστροφείς (inverters) που μετατρέπουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (AC), κατάλληλη για το δίκτυο. Συνήθως, η εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β συστημάτων κυμαίνεται συνήθως από μερικά KW έως μερικές εκατοντάδες MW στα πολύ μεγάλα Φ/Β πάρκα. Περιλαμβάνουν, ακόμα, τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και τον έλεγχο και τη διαχείρισή της.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στον ίδιο ζυγό δικτύου. Αρχικά, μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική μέσω ενός ρότορα με πτερύγια και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας. Η ονομαστική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται συνήθως από 200 KW μέχρι 2MW, αλλά κατασκευάζονται και ανεμογεννήτριες για υπεράκτια αιολικά πάρκα, με ονομαστική ισχύ έως και 8MW. Η εγκατεστημένη ισχύς ενός αιολικού πάρκου κυμαίνεται από μερικά MW μέχρι 1-2 GW. Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο και
2. τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα που παραμένει σταθερός.

Ο επικρατέστερος τύπος ανεμογεννήτριας είναι οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια. Με αυτόν τον τύπο θεωρείται ότι επιτυγχάνεται μεγάλος βαθμός απόδοσης, αλλά και μικρό κόστος παραγωγής.

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του νερού μετατρέποντας τη σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, οι μικροί σταθμοί εκμεταλλεύονται την φυσική ροή και τις φυσικές υδατοπτώσεις του νερού χωρίς την κατασκευή τεχνητών λιμνών και μεγάλων φραγμάτων. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύς τους φθάνει μέχρι τα 300KW.

Όσον αφορά τη βιομάζα, αποτελεί οργανική ύλη από φυτικά υπολείμματα, όπως από αγροτικές εργασίες, τον πυρήνα της ελιάς και τη δασοκομία, από ζωικά απόβλητα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Από τη βιομάζα παράγονται τα βιοκαύσιμα τα οποία έχουν υγρή ή αέρια μορφή. Τα κυριότερα αυτών είναι το βιοντίζελ, προερχόμενο από φυτικά ή ζωικά λίπη και είναι ποιότητας ντίζελ πετρελαίου, η βιοαιθανόλη παραγόμενη μέσω αλκοολικής ζύμωσης βιομάζας πλούσιας σε ζάχαρη και το βιοαέριο, π.χ. το αέριο που παράγεται σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και είναι ποιότητας φυσικού αερίου. Πλεονέκτημά τους είναι ότι για την παραγωγή τους διατίθενται άφθονες πρώτες ύλες, με αποδοτική αξιοποίηση πολλών ανεκμετάλλευτων ως τώρα πρώτων υλών για τη δημιουργία ενός καθαρού καυσίμου που μπορεί να αντικαταστήσει τη χρήση συμβατικών καυσίμων.

Στις περισσότερες χώρες του κόσμου, οι ΑΠΕ λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στη χάραξη της ενεργειακής πολιτικής και καταβάλλεται προσπάθεια ενίσχυσης της περαιτέρω αξιοποίησής τους, ώστε να αυξηθεί το μικρό ποσοστό που κατέχουν στη συνολική ενεργειακή παραγωγή. Οι κυβερνήσεις και οι οργανώσεις παγκοσμίως θεσπίζουν εθνικούς και παγκόσμιους στόχους για την αύξηση της διείσδυσης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, την μείωση των αερίων θερμοκηπίου και την εξοικονόμηση ενέργειας. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξή τους παίζει και το ότι 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).

Η χρήση των ΑΠΕ έχει πολλά πλεονεκτήματα. Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται και είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Ακόμα, αποτελούν εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο. Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων. Μέσω της ανάπτυξής τους μπορεί να δοθεί ώθηση στην τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).

Παρά τα παραπάνω σημαντικά πλεονεκτήματα, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους. Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί. Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις. Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών με δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης. Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους. Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.

Γενικά, η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ και στην Ελλάδα αποτελεί ένα από τα βασικότερα σχέδια ανάπτυξης των συστημάτων ενέργειας. Ένας από τους βασικούς άξονες που διαμορφώνουν τις απαιτήσεις του ρυθμιστικού πλαισίου για το Σύστημα Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής είναι η έγκαιρη υλοποίηση απαραίτητων αλλαγών ώστε να καταστεί δυνατή η πρόσβαση και η μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Η Ρυθμιστή Αρχή Ενέργειας [4] παρακολουθεί και αναλύει τα θέματα που αφορούν τις υποδομές στα δίκτυα, τις τεχνικές απαιτήσεις σύνδεσης και το κόστος πρόσβασης/χρήσης αυτών, με έμφαση στις απαραίτητες ενισχύσεις που απαιτούνται, όχι μόνο σε στοιχεία δικτύων, αλλά και σε νέα εργαλεία και τεχνολογίες που θα δημιουργήσουν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την επίτευξη των εθνικών στόχων για τις ΑΠΕ καθώς επίσης και στην ορθολογική κατανομή του σχετικού κόστους στους χρήστες των υποδομών .

2.3 Κεντρική Παραγωγή Ενέργειας

Όπως αναλύσαμε και νωρίτερα, η παραγωγή της ενέργειας γίνεται από μεγάλες μονάδες οι οποίες καλύπτουν την ανάγκη σε ηλεκτρική ενέργεια και καταλήγει στους καταναλωτές μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Αυτό αποτελεί το μοντέλο της κεντρικής παραγωγής. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου αποτελεί το ότι επιτυγχάνεται με σχετικά απλό και εύκολο τρόπο ένα καλό επίπεδο ευστάθειας στο σύστημα. Οι βασικότερες παράμετροι της ευστάθειας ενός συστήματος είναι τα επίπεδα τάσης στο δίκτυο και η ευστάθεια της γωνίας και της συχνότητας στο δίκτυο. [1] Οι μεγάλες μονάδες παραγωγής είναι εξοπλισμένες αποκλειστικά με σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος, οι οποίες είναι ο κύριος ρυθμιστής των ανωτέρω παραμέτρων.

Η κεντρική παραγωγή όμως παρουσιάζει και ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Κάθε στιγμή οι μονάδες παραγωγής πρέπει να καλύπτουν την συνολική ενεργειακή ζήτηση. Για να επιτευχθεί αυτό όμως απαιτούνται επεκτάσεις ή αναβαθμίσεις του δικτύου παραγωγής, μεταφορά της ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές και επένδυση γενικά σε ακριβό και μεγάλης έκτασης εξοπλισμό.

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης απαιτεί και επενδύσεις για νέες μονάδες ή για αναβάθμιση των ήδη υπάρχουσών με πολύ υψηλό κόστος. Η εγκατάσταση μιας μεγάλης θερμικής μονάδας (άνω των 500MW) πρέπει να εντάσσεται στο μακροχρόνιο ενεργειακό προγραμματισμό σε επίπεδο κράτους αφού απαιτεί υψηλές επενδύσεις (κρατικές και

ιδιωτικές) και ο χρόνος κατασκευής της είναι της τάξης των 3-5 χρόνων ενώ ενός πυρηνικού σταθμού απαιτεί ακόμη περισσότερο.

Ακόμα, οι μονάδες πρέπει να λειτουργούν σε ισχύ χαμηλότερη από την ονομαστική τους, περίπου στο 90%. Έτσι, υπάρχει στρεφόμενη εφεδρεία ώστε να μπορεί να καλυφθεί μια ενδεχόμενη στιγμιαία αύξηση της ζήτησης που δεν μπορεί να προβλεφθεί ή μια απότομη μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως λόγω της μη εγγυημένης παραγωγής των ΑΠΕ. Όμως, η βέλτιστη απόδοση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου επιτυγχάνεται στα επίπεδα της ονομαστικής ισχύος κάθε γεννήτριας, οπότε αυτή η λειτουργία επιφέρει μια μείωση της απόδοσης.

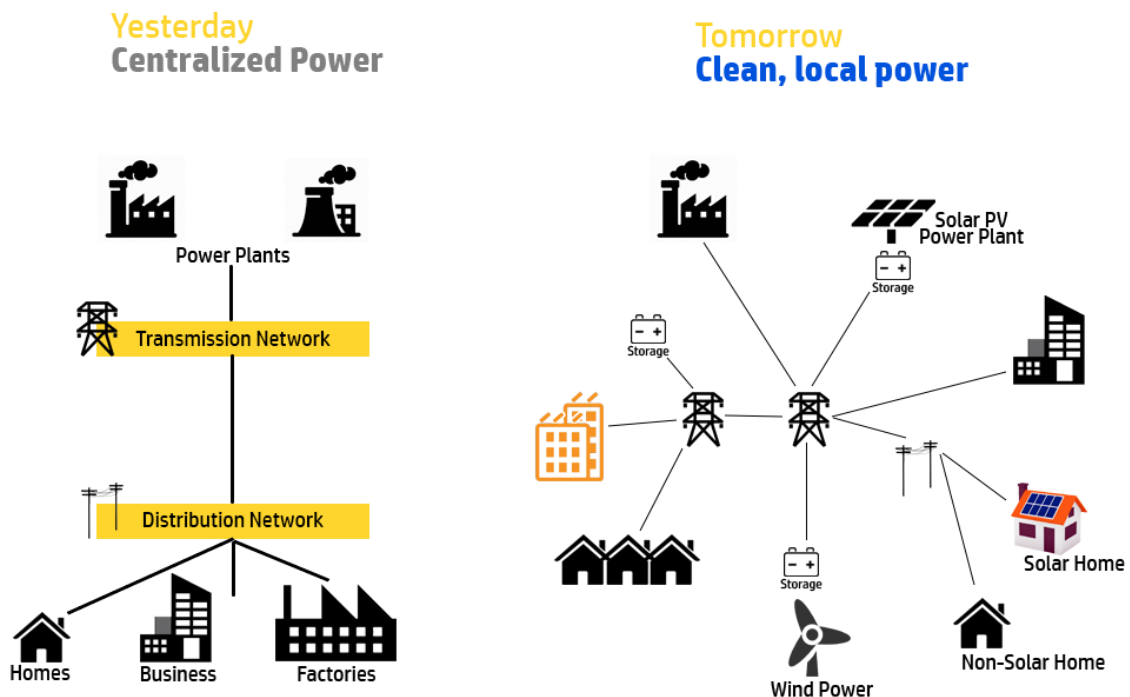
Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ότι το δίκτυο μεταφοράς είναι αρκετά εκτεταμένο, με γραμμές μήκους πολλών χιλιομέτρων. Ο εξοπλισμός των επιπέδων ΥΤ και ΥΥΤ που απαιτούνται για τη μεταφορά όμως είναι πολύ ακριβός. Έτσι, η επέκταση και η συντήρηση του συστήματος αποτελεί πολύ δαπανηρή αλλά και δύσκολη διαδικασία, μιας και η εποπτεία και η αποκατάσταση ενός τόσο μεγάλου δικτύου δεν είναι εύκολη. Εκτός αυτού, οι αποστάσεις επιφέρουν και μεγάλες θερμικές απώλειες. Παρά τη λειτουργία υπό ΥΤ ή ΥΥΤ, δεν είναι δυνατό να αποφευχθούν οι απώλειες και σε περιπτώσεις αυξημένης ροής ηλεκτρικής ισχύος, αυξάνονται δραματικά οι θερμικές απώλειες, λόγω της έστω και μικρής αύξησης της έντασης του ρεύματος.

2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας

Με τον όρο Διεσπαρμένη Παραγωγή εννοούμε τη χρήση αυτόνομων ή διασυνδεδεμένων στο δίκτυο μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μικρής και μεσαίας εγκατεστημένης ισχύος κοντά στο σημείο της κατανάλωσης. Η βασική διαφορά από την κεντρική παραγωγή έγκειται στο ότι οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Energy Resources- DERs) συνδέονται είτε στο δίκτυο διανομής, είτε απευθείας στο επίπεδο της χαμηλής τάσης άρα βρίσκονται ακριβώς ή δίπλα στον τελικό καταναλωτή. Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί την εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαφαίνεται ότι είναι ικανή να αποτελέσει την απάντηση στα μειονεκτήματα της κεντρικής παραγωγής. Από άποψη ισχύος, η διεσπαρμένη παραγωγή κυμαίνεται κατά κανόνα σε ένα εύρος 1KW έως 100MW, ανά εγκατάσταση.

Η στροφή προς τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής γίνεται στο πλαίσιο του εκμοντερνισμού του δικτύου, προκειμένου η παραγωγή ενέργειας να γίνεται με τρόπο που να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να βελτιώσει την αξιοπιστία και τη γενική λειτουργία του δικτύου, με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και μικρότερο κόστος, βελτιώνοντας συνολικά και την αγορά ενέργειας. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων ενέργειας κατέστησαν αναγκαία την έρευνα γύρω από τη διεσπαρμένη παραγωγή και την στροφή σε τέτοιου είδους δομές.

Στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συγκαταλέγονται οι μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με εξαιρέσεις, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά μεγάλης κλίμακας και τα παράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, όπως οι τουρμπίνες και οι μικροτουρμπίνες αερίου, οι αεριοστρόβιλοι, οι εμβολοφόρες μηχανές και οι κυψέλες καυσίμου.



Εικόνα 2.1: Κεντρική και Διεσπαρμένη Παραγωγή[5]

Η διεσπαρμένη παραγωγή λοιπόν, παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μείωση της συνολικής πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης
- Ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό των αιχμών του καταναλωτή
- Αυξημένη αξιοπιστία και βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος σε τοπικό επίπεδο
- Μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αφού μικραίνει σημαντικά η απόσταση που διανύει η ενέργεια
- Αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων για φθηνά, τοπικά παραγόμενα καύσιμα και η επιτόπου αξιοποίησή τους
- Εξοικονόμηση αρχικού κόστους κεφαλαίου και χρόνου από τη δημιουργία ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα) με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξευγενισμένων καυσίμων
- Δυνατότητα για απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού και συμμετοχή ιδιωτών στην παραγωγή

Από την άλλη πλευρά παρουσιάζονται και ορισμένα προβλήματα κατά την εφαρμογή της διεσπαρμένης παραγωγής και για αυτό μέχρι σήμερα έχει μειωμένη διείσδυση, διότι προσκρούει στους περιορισμούς και τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την ευστάθεια των συστημάτων και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας. Από οικονομική άποψη η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές δεν έχει φτάσει ακόμα στο σημείο να μπορεί να ανταγωνιστεί τις μεγάλες μονάδες παραγωγής, με αποτέλεσμα να απαιτείται επιχορήγηση από το κράτος για να καταστεί βιώσιμη η επένδυση σ' αυτές. Εκτός του οικονομικού, έχει

αποδειχθεί ότι ευρεία εφαρμογή διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου. Συγκεκριμένα, μπορεί να δημιουργήσει αντίστροφη ροή ενέργειας στα δίκτυα διανομής, η οποία ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος, στα επίπεδα της τάσης (αργές και γρήγορες μεταβολές της τάσης), στην ποιότητα της τάσης (αρμονική παραμόρφωση). Γενικά, η παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνει την τάση στην περιοχή όπου εγκαθίσταται. Άλλα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν λόγω της διεσπαρμένης παραγωγής είναι αυξημένα ρεύματα βραχυκύκλωσης, δυσλειτουργία των διατάξεων προστασίας του δικτύου και ασυμμετρία φάσεων. Στη Μέση Τάση ο κρίσιμος παράγοντας για τη σύνδεση νέων διεσπαρμένων πηγών είναι συνήθως οι μεταβολές της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης στο δίκτυο. Στη Χαμηλή Τάση ένα από τα πιο βασικά ζητήματα είναι η ποιότητα της τάσης που παρέχεται στους καταναλωτές ιδιαίτερα όσον αφορά φαινόμενα υπερτάσεων που προκαλούνται από συνδέσεις πηγών. Επίσης, η τήρηση των ορίων της μέγιστης τάσης και της χωρητικότητας των γραμμών είναι απαραίτητη και πραγματοποιείται με τον έλεγχο μέσω πραγματοποίησης ροής φορτίου στο δίκτυο.

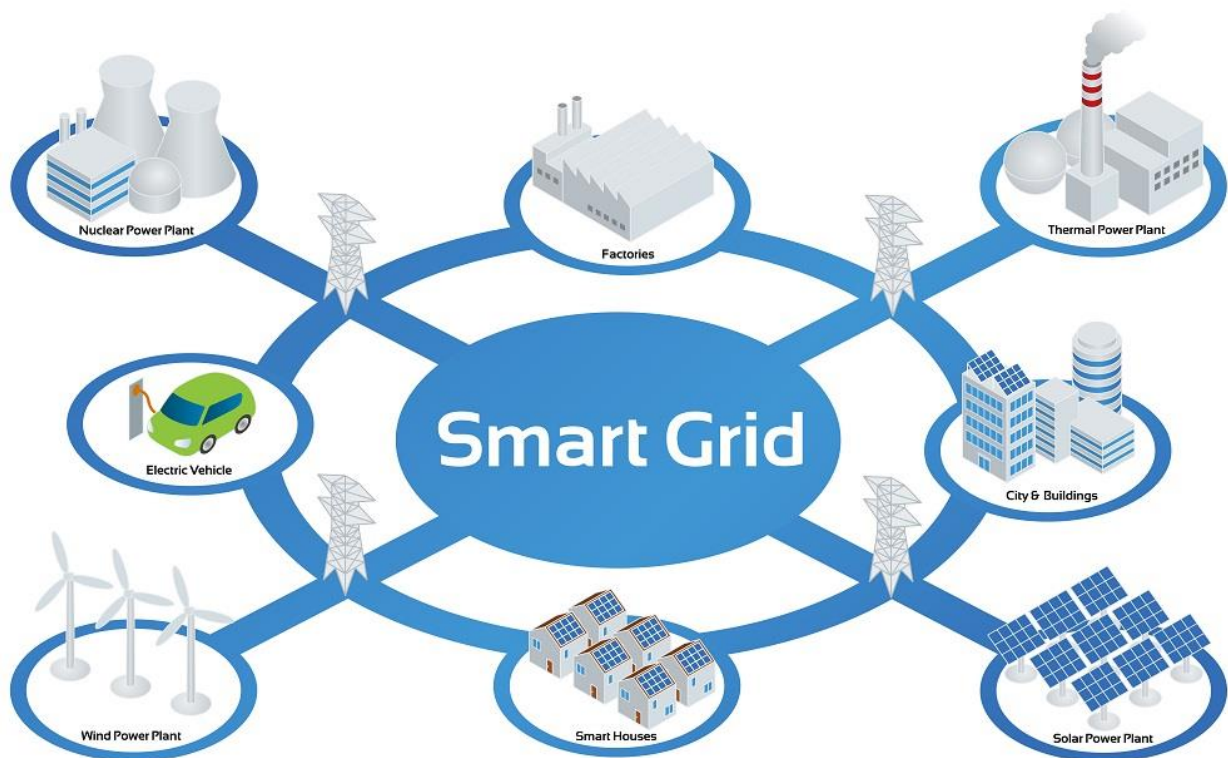
Προκειμένου να αυξηθεί η διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει πρώτα και κύρια να υπάρχει καλύτερη εποπτεία και έλεγχος στα δίκτυα, ώστε να καταστεί εφικτή η αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων ευστάθειας. Τα δίκτυα ενέργειας, σήμερα, χαρακτηρίζονται από τον παθητικό τρόπο λειτουργίας τους, το χαμηλό επίπεδο αυτοματισμού και τις μειωμένες δυνατότητες κεντρικής διαχείρισης. Ακόμα, θα πρέπει να υπάρχει ευελιξία στην παραγωγή της ενέργειας, αλλά και κατά το δυνατόν έλεγχος της ζήτησης για το δυναμικό έλεγχο του ισοζυγίου παραγωγής και ζήτησης, που είναι κρίσιμος για την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (energy storage) και μικρών μονάδων παραγωγής με ικανότητα παροχής σταθερής ισχύος (π.χ. γεννήτριες ΣΥΘ, βιοκαυσίμων), για άμεση ανταπόκριση στη ζήτηση.

2.5 Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids)

Με τον όρο ευφύες δίκτυο εννοούμε το σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο χαρακτηρίζεται από την αμφίδρομη ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ καταναλωτών και προμηθευτών καθώς και τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου με τρόπο αυτόματο ώστε να βελτιστοποιείται η λειτουργία των διασυνδεδεμένων στοιχείων του. Τα στοιχεία του περιλαμβάνουν από τη συγκεντρωτική και διεσπαρμένη παραγωγή μέχρι και καταναλωτές, βιομηχανικούς και μη, συστήματα διαχείρισης σπιτιών και οικιακές συσκευές, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθώς και ηλεκτρικά οχήματα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, δημιουργώντας έτσι παράλληλα με το επίπεδο της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ενέργειας (power layer), ένα επίπεδο επικοινωνιών (communications layer). Επομένως, απαιτείται η ύπαρξη αποδοτικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών, οι οποίες θα είναι ικανές να συλλέγουν, να μεταφέρουν και να διαχειρίζονται τον τεράστιο όγκο πληροφοριών του δικτύου, με συνεχή και αμφίδρομη ροή τους σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και να εξασφαλίζεται έτσι ένα υψηλό επίπεδο εποπτείας και ελέγχου του δικτύου. Η επανάσταση που έχει συντελεστεί στις

τεχνολογίες επικοινωνίας, ειδικά όσον αφορά το Διαδίκτυο, παρέχει τη δυνατότητα για πολύ καλύτερη εποπτεία και έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας τη λειτουργία τους αποδοτικότερη, οικονομικότερη και περισσότερο ευέλικτη.

Για να γίνουν τα παραπάνω απαιτείται υποδομή επικοινωνίας η οποία 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. Ακόμα, χρησιμοποιείται μια ενδιάμεση πλατφόρμα η οποία αποτελείται από ένα λογισμικό το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο επίπεδο επικοινωνίας και στην εκάστοτε εφαρμογή, παρέχοντας αναγκαίες υπηρεσίες για την δημιουργία ενός διανεμημένου συστήματος. 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.



Εικόνα 2.2: Ευφυές Δίκτυο (Smart Grid)[6]

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός ευφυούς δικτύου περιλαμβάνουν:

- Τα ευφυή δίκτυα μπορούν να αποκαθιστούν αυτόματα τις βλάβες έχοντας δηλαδή δυνατότητα αυτοϊασης (self-healing). Αυτό καθίσταται δυνατό μέσω ειδικών αισθητήρων και ευφύων ηλεκτρικών συσκευών (Intelligent Electronic Devices - IEDs) μέσω των οποίων το δίκτυο μπορεί να προβλέπει ή να ανιχνεύει τυχόν σφάλματα και να αποκρίνεται γρήγορα σε αυτά, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης εποπτείας. Έτσι, εγγυάται μια αδιάλειπτη παροχή ενέργειας και μειώνεται και ο κίνδυνος για κατάρρευση του συστήματος.

- Προσφέρει εύκολη εποπτεία στους καταναλωτές, οι οποίοι θα μπορούν να ελέγχουν την κατανάλωσή τους και να μπορεί να διαχειρίζεται σε πραγματικό χρόνο τις καταναλώσεις του σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου, θα μπορεί να έχει ευκολότερη εποπτεία της ζήτησης και να διαχειρίζεται την ηλεκτρική ενέργεια πιο ορθολογικά, εφόσον πλέον το δίκτυο είναι ευέλικτο και προσαρμοστικό.
- Έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν την πιο αποδοτική αξιοποίηση των πόρων του συστήματος για την μεταφορά και διανομή της ενέργειας, βρίσκοντας τη βέλτιστη ροή του φορτίου και μειώνοντας τελικά και τις απώλειες.
- Επιτρέπουν ακόμα την υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και διεσπαρμένης παραγωγής, μιας και η αμφίδρομη επικοινωνία, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας, εξαλείφουν τον κίνδυνο μη αξιοπιστίας και εγγυώνται την ευστάθεια του δικτύου.
- Δυνατότητα ανάπτυξης ευφών μικροδικτύων τα οποία αποτελούν ενιαία, αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία είναι διασυνδεδεμένες διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, που ικανοποιούν διάφορα φορτία, τα οποία βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο. Ένα μικροδίκτυο 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 υποστηρίζει λειτουργίες ελέγχου της ροής ενέργειας και δεύτερον να συμμετάσχει στην αγορά ενέργειας για την πώληση αυτής. Τα μικροδίκτυα φαίνονται ως η κατάλληλη τεχνολογία για την ανάπτυξη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και ως η καλύτερη προσέγγιση για την επιτυχή διαχείριση της πολυπλοκότητας των εφαρμογών ελέγχου και διαχείρισης ενός ηλεκτρικού συστήματος.
- Μεγαλύτερη ανάπτυξη και καλύτερη διαχείριση των τεχνολογιών των ηλεκτρικών οχημάτων. Ως τώρα, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούσε μεγάλο πρόβλημα ως προς την επιλογή του τόπου και του χρόνου στα οποία θα γίνει για να αποφευχθούν πιθανές αιχμές στο φορτίο. Όμως μέσα σε ένα έξυπνο δίκτυο, ένα ηλεκτρικό όχημα όχι μόνο δεν αποτελεί πρόβλημα αλλά έχει και μεγάλη χρησιμότητα. Αν αναλογιστούμε ότι τα αυτοκίνητα το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας είναι παρκαρισμένα, την ίδια ώρα θα μπορούσαν να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Συνεπώς, οι μπαταρίες τους θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως εφεδρικά αποθηκευτικά συστήματα ενέργειας ή να παρέχουν στο δίκτυο μέρος της ενέργειας τους για να σταθεροποιήσουν την διακοπτόμενη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό το μοντέλο σύνδεσης ονομάζεται vehicle-to-grid (V2G).

Κεφάλαιο 3

Οικονομική Κατανομή Φορτίου

3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διέπονται από κάποιες βασικές αρχές για να καθοριστεί η βέλτιστη λειτουργία τους. Η πρώτη είναι σαφώς να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση φορτίου από το σύστημα εντάσσοντας ικανό αριθμό μονάδων για να καλύψουν το φορτίο αυτό. Η δεύτερη είναι να εντάσσει τις μονάδες με τον όσο γίνεται οικονομικότερο τρόπο. Εδώ εισέρχεται και ο όρος της οικονομικής κατανομής του φορτίου. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση της οικονομικότερης μονάδας και του καταλληλότερου καυσίμου και τη μείωση του κόστους μεταφοράς και των απωλειών του δικτύου.

Ο οικονομικός προγραμματισμός του συστήματος βασίζεται στα επόμενα βασικά στάδια:

1. Στην πρόβλεψη φορτίου με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Έτσι γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη ζήτηση και μπορεί να γίνει αποδοτικότερη ανάλυση για τον τρόπο εξυπηρέτησης του φορτίου.

2. Στον προγραμματισμό λειτουργίας των γεννητριών, ανάλογα με το προβλεπόμενο φορτίο, ώστε κάθε στιγμή να έχει προγραμματιστεί η ένταξη και λειτουργία των πιο συμφερούσων μονάδων του συστήματος για την κάλυψη της ζήτησης.

3. Τέλος, ενώ έχει γίνει ο προγραμματισμός για το ποιες μονάδες θα είναι ενταγμένες στο σύστημα, θα πρέπει να γίνει και σωστή κατανομή του φορτίου στις εν λειτουργία μονάδες και να οριστεί η ακριβής φόρτιση τους για να επιτευχθεί η πιο οικονομική λειτουργία του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Αυτό το στάδιο αποτελεί και την οικονομική κατανομή του φορτίου που αποτελεί και το κεντρικό θέμα μελέτης σε αυτή τη διπλωματική.

Ας αναλύσουμε συνοπτικά τα παραπάνω στάδια. Αρχικά, υπάρχουν δύο είδη προβλέψεων φορτίου. Η πρώτη είναι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη η οποία αφορά την πρόβλεψη για την ωριαία κατανάλωση φορτίου, δηλαδή στον ημερήσιο προγραμματισμό του συστήματος. Ο δεύτερος τύπος πρόβλεψης είναι η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη κατά την οποία υπολογίζονται οι πιθανότερες ετήσιες ή εποχιακές αιχμές φορτίου σε μακροχρόνια κλίμακα για το σχεδιασμό του συστήματος. Έτσι, έχοντας μια πρόβλεψη για τις ανάγκες του συστήματος κάθε στιγμή γίνεται ο σχεδιασμός της ένταξης των μονάδων. Σκοπός να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός γεννητριών για την εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα το χαμηλότερο κόστος. Για το λόγο αυτό απαιτείται και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την πρόβλεψη, γιατί σε διαφορετική περίπτωση δεν θα επιτύχουμε την οικονομικότερη δυνατή λειτουργία. Ανακρίβεια στην πρόβλεψη του φορτίου, όμως, δεν σημαίνει μόνο οικονομικές επιπτώσεις. Μπορεί να δημιουργηθούν και θέματα αξιοπιστίας και ασφάλειας του δικτύου καθώς και δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της κατανάλωσης περισσότερου καυσίμου.

Η ένταξη των μονάδων (Unit Commitment) αναφέρεται στη βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής για να ικανοποιηθεί η ζήτηση φορτίου με το ελάχιστο κόστος. Η ελαχιστοποίηση του κόστους γίνεται με τη δέσμευση των λιγότερο ακριβών μονάδων, ενώ ταυτόχρονα καλύπτεται ολόκληρη η ζήτηση φορτίου και ικανοποιούνται οι αντίστοιχοι περιορισμοί του συστήματος. Το πρόβλημα αναφέρεται στον προσδιορισμό των μονάδων που πρέπει να βρίσκονται σε λειτουργία για κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα στον οποίο απευθύνεται ο προγραμματισμός, καθώς και στον προσδιορισμό του φορτίου των εν λόγω μονάδων για το

ίδιο χρονικό διάστημα. Ορίζεται, έτσι, το ποιες μονάδες θα ξεκινήσουν ή θα σταματήσουν τη λειτουργία τους και με ποια σειρά. Η εύρεση μιας καλής λύσης σε εύλογο χρονικό διάστημα είναι ουσιώδης, καθώς δίνει τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν με βέλτιστο τρόπο οι πόροι παραγωγής και να μειωθεί το κόστος παραγωγής της ενέργειας. Κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνονται υπόψη και οι περιορισμοί φορτίου και οι απαιτήσεις εφεδρείας του συστήματος, καθώς και οι περιορισμοί μέγιστης και ελάχιστης ικανότητας παραγωγής των μονάδων και οι χρόνοι για την ένταξη και την αποσύνδεσή τους.

Η οικονομική κατανομή φορτίου αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος μέσω της ρύθμισης της φόρτισης των μονάδων που είναι προγραμματισμένες κάθε στιγμή για λειτουργία, ώστε να μπορούν σε συνδυασμό να καλύπτουν την πραγματική ζήτηση φορτίου που προκύπτει ανά πάσα στιγμή με τον οικονομικότερο τρόπο. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει και το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος καυσίμου, μιας και αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι του κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοπτικά, λοιπόν για την ελαχιστοποίηση του κόστους παίζουν ρόλο η λειτουργική απόδοση των μονάδων, το κόστος καυσίμου και οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς.

3.2 Κλασικό Μοντέλο Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Ο στόχος της οικονομικής κατανομής φορτίου (Economic Dispatch) όπως είπαμε είναι να ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος του συστήματος ή ισοδύναμα το κόστος κατανάλωσης καυσίμου ικανοποιώντας το φορτίο υπό τους περιορισμούς του συστήματος με δεδομένες μονάδες παραγωγής σε λειτουργία. Θέλουμε να αξιοποιείται λοιπόν η οικονομικότερη μονάδα για την κάλυψη του φορτίου. Θεωρώντας μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης, οι μονάδες θα πρέπει να προσαρμόσουν την παραγωγή τους με τον αποτελεσματικότερο τρόπο προκειμένου να επιτευχθεί το ελάχιστο δυνατό κόστος και η συνολική παραγωγή να καλύπτει τη ζήτηση. Έτσι, θα πρέπει να εξυπηρετηθεί από την οικονομικότερη μονάδα έως ότου φθάσουμε τα όρια απόδοσης της μονάδας. Έπειτα, η αμέσως επόμενη οικονομικότερη μονάδα θα πρέπει να αναλάβει την κάλυψη της αύξησης του φορτίου κοκ. [7] Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι, οι οποίοι περιέχουν επαναληπτικές διαδικασίες, δυναμικό προγραμματισμό, εξελικτικούς αλγορίθμους και άλλες τεχνικές, μερικές από τις οποίες θα αναλυθούν και στη συνέχεια.

Όμως για να γίνει η παραπάνω διαδικασία αποδοτικά και να επιτύχουμε τελικά ελαχιστοποίηση του κόστους, θα πρέπει να εκφραστεί σωστά η συνάρτηση του κόστους σε σχέση με την παραγωγή της κάθε μονάδας. Όπως θα δούμε, το κριτήριο για τη διανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες βασίζεται στο κατά πόσο μία αύξηση του φορτίου σε μια μονάδα και ισόποση μείωση του φορτίου στην άλλη θα φέρει αύξηση ή μείωση του συνολικού κόστους. Δηλαδή, αυτό που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε είναι το *διαφορικό κόστος* της κάθε μονάδας, δηλαδή να μελετήσουμε την καμπύλη κόστους καυσίμου – παραγωγής ισχύος της κάθε μονάδας. Το κόστος της παραγωγής περιέχει μέσα και το κόστος εργασίας, της συντήρησης, της μεταφοράς του καυσίμου κτλ. Επειδή όμως είναι δύσκολο να εκφραστούν όλα αυτά ως συνάρτηση συμπεριλαμβάνονται συνήθως στο σταθερό όρο του κόστους λειτουργίας της μονάδας. [8]

Η κάθε μονάδα παραγωγής έχει όρια ως προς την παραγωγή της έχοντας μια ελάχιστη και μια μέγιστη δυνατή τιμή παραγόμενης ενέργειας. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι η παραγόμενη ισχύς της μονάδας είναι P_{Gi} , έχουμε:

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad (3.1)$$

όπου P_{Gimin} και P_{Gimax} η ελάχιστη και μέγιστη δυνατή φόρτιση της γεννήτριας αντίστοιχα.

Γενικά, η συνάρτηση κόστους των μονάδων είναι μη γραμμική συνάρτηση. Εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που καταναλώνεται (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, λιγνίτης), από τις εθνικές και διεθνείς συνθήκες οικονομίας, την πολιτική κατάσταση κ.α. Η συνάρτηση κόστους της κάθε μονάδας είναι της μορφής:

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + |e_i \sin(f_i(P_{imin} - P_i))| \quad (3.2)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί την μη ομαλή συνάρτηση του κόστους η οποία συμπεριλαμβάνει τους συντελεστές e_i και f_i που εκφράζουν την μη ομαλότητα της καμπύλης του κόστους. Η συνάρτηση όμως αυτή δεν είναι τόσο χρηστική. Έτσι, για τον προσδιορισμό του κόστους χρησιμοποιείται ευρέως η τετραγωνική συνάρτηση κόστους (Quadratic Function) της μορφής:

$$C_i = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (3.3)$$

όπου,

i : i -οστή μονάδα παραγωγής από τις n του συστήματος

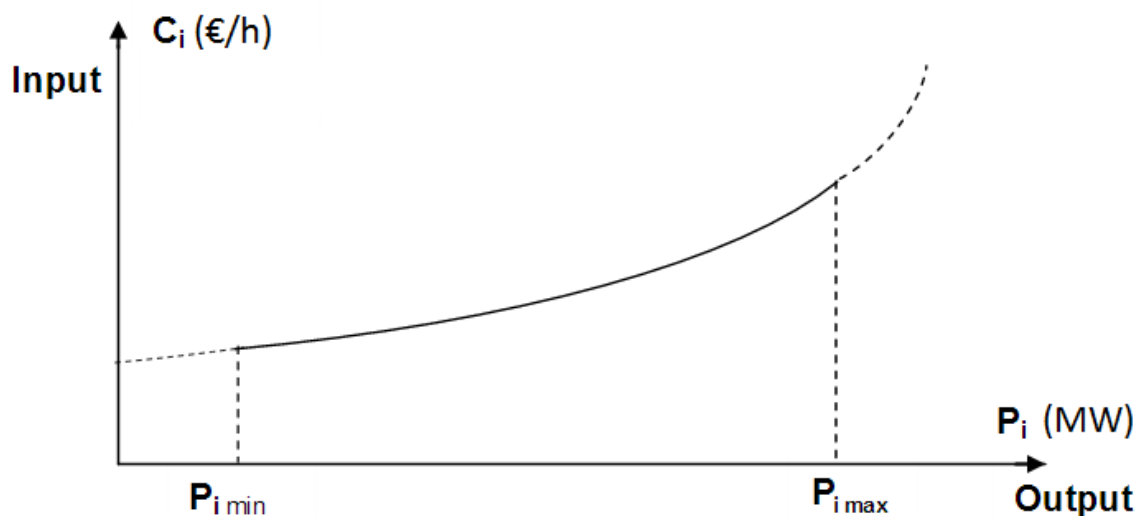
C_i : το λειτουργικό κόστος της i -οστής μονάδας σε (€/h)

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

a_i, b_i, c_i : οι συντελεστές της χαρακτηριστικής κόστους της κάθε μονάδας σε (€/h)

Ο συντελεστής c_i , όπως αναφέραμε και νωρίτερα, ισοδυναμεί με το λειτουργικό κόστος της μονάδας όταν έχει μηδενική παραγωγή.

Γραφικά η συνάρτηση του κόστους, όπως εκφράζεται μέσω της σχέσης (3.3) δίνεται στο σχήμα 3.1.

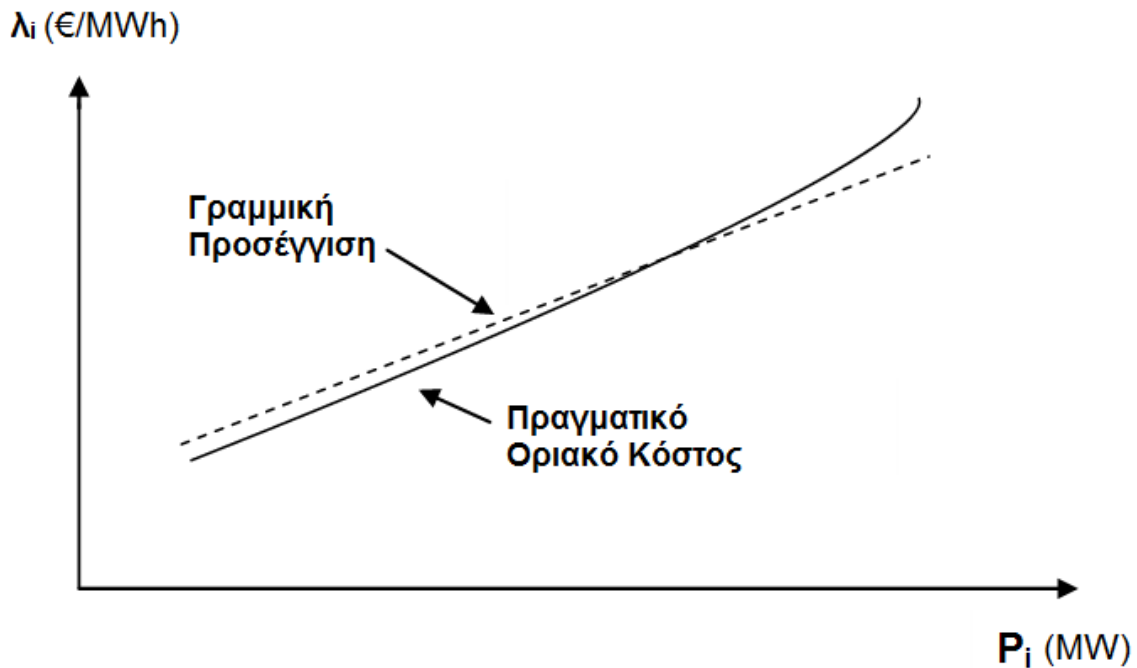


Σχήμα 3.1: Συνάρτηση Κόστους - Παραγωγής

Με βάση τον παραπάνω τύπο μπορούμε να προσδιορίσουμε και το διαφορικό κόστος της μονάδας, έστω λ_i , το οποίο θα είναι η κλίση της παραπάνω καμπύλης και θα ορίζεται ως:

$$\lambda_i = \frac{dC_i}{dP_{Gi}} = 2a_i P_{Gi} + b_i \quad (3.4)$$

Όπως αναφέραμε ήδη, το διαφορικό κόστος της μονάδας εκφράζει το πόσο θα αυξηθεί το κόστος ανά ώρα σε περίπτωση αύξησης του φορτίου κατά 1MW, δηλαδή θα έχει μονάδες €/MWh. Η τυπική γραφική παράσταση του οριακού κόστους δίνεται στο σχήμα 3.2. [7]



Σχήμα 3.2: Συνάρτηση Οριακού Κόστους λ - Παραγωγής

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το διαφορικό κόστος είναι αρκετά γραμμικό για μεγάλο εύρος της εξόδου ισχύος. Όταν χρησιμοποιείται σε αναλύσεις, προσεγγίζεται από μία ευθεία γραμμή η οποία, όπως φαίνεται, αποτελεί πολύ καλή αναπαράσταση, της πραγματικής εικόνας.

Θεωρώντας τώρα ότι το σύστημα αποτελείται από μονάδες οι οποίες έχουν αντίστοιχες συναρτήσεις κόστους, το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος θα είναι:

$$C_{tot} = \sum_i C_i \quad (3.5)$$

Αντίστοιχα, η συνολική παραγωγή του συστήματος θα δίνεται ως:

$$P_{Gtot} = \sum_i P_{Gi} \quad (3.6)$$

Η συνολική παραγωγή, όμως, πρέπει να είναι τόση ώστε να καλύπτεται το συνολικό φορτίο, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και τις απώλειες κατά τη μεταφορά της ενέργειας. Δηλαδή να λειτουργεί σε ισορροπία ισχύος και να ικανοποιείται η σχέση:

$$P_{Gtot} = P_D + P_L \quad (3.6)$$

όπου,

P_D : η συνολική ζήτηση, δηλαδή το συνολικό φορτίο του συστήματος

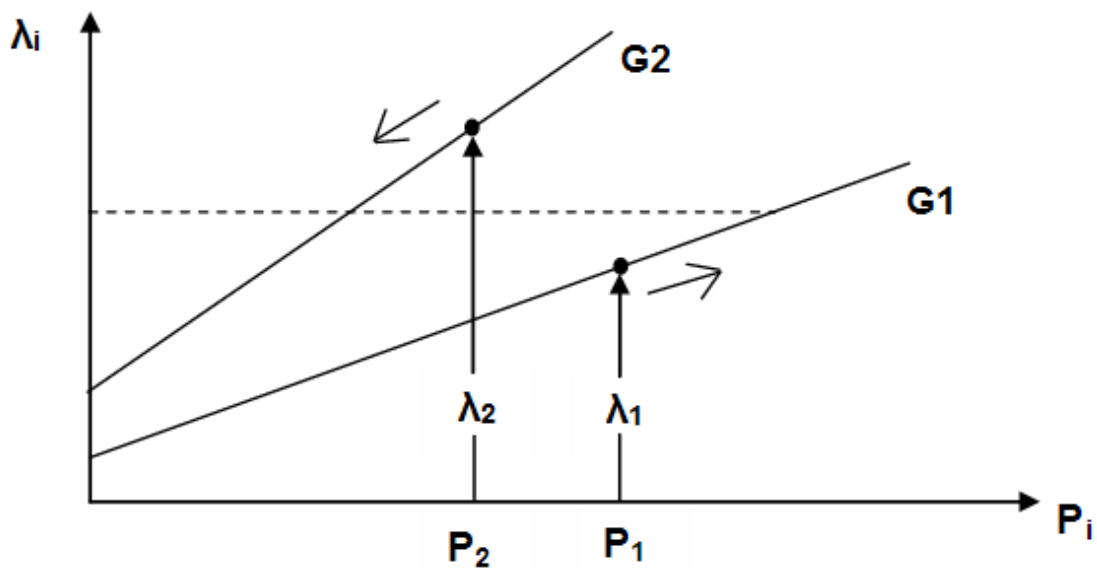
P_L : οι συνολικές απώλειες μεταφοράς

Ουσιαστικά, λοιπόν, η λύση του προβλήματος έγκειται στον υπολογισμό του P_{Gi} για τις n γεννήτριες του συστήματος ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω σχέσεις με το ελάχιστο συνολικό κόστος παραγωγής C_{tot} , δηλαδή:

$$P_{Gi} : \min C_{tot} \quad (3.8)$$

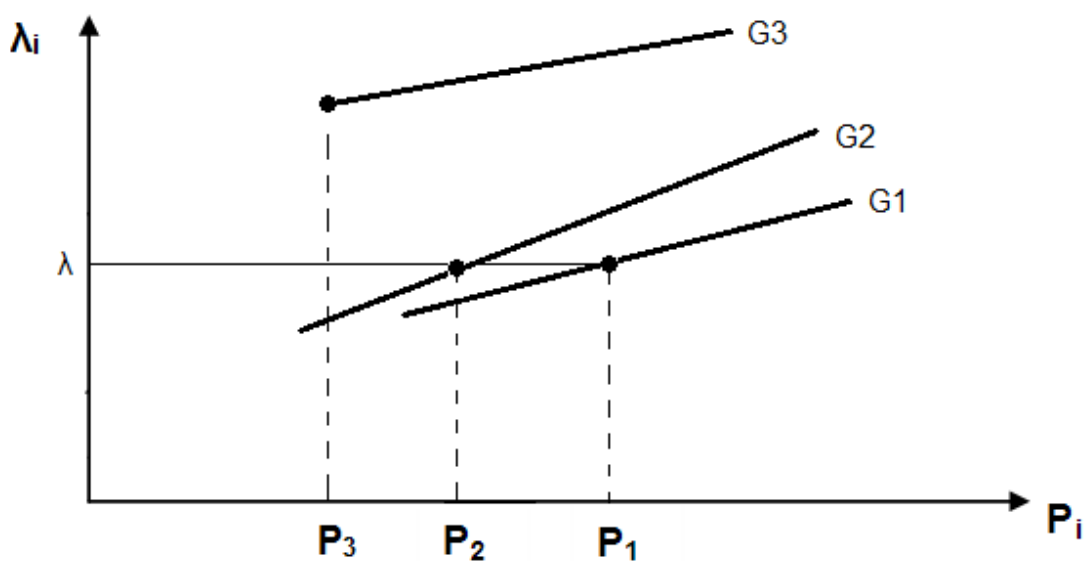
Οπότε το πρόβλημα βελτιστοποίησής μας έγκειται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης με γνώμονα ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης, έχοντας ταυτόχρονα έναν ή παραπάνω περιορισμούς προς ικανοποίηση. Εδώ ως αντικειμενική συνάρτηση έχουμε το κόστος με μεταβλητές την παραγωγή των γεννητριών και περιορισμούς την κάλυψη της ζήτησης, τα όρια φόρτισης των γεννητριών κτλ.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω, ας δούμε πώς μπορεί να γίνει η κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες. Ας υποθέσουμε αρχικά ότι έχουμε δύο μόνο μονάδες με διαφορετικά οριακά κόστη η κάθε μία και παράγουν P_1 και P_2 αντίστοιχα για την κάλυψη της ζήτησης. Ας υποθέσουμε τώρα ότι ένα ποσό της παραγωγής μεταφέρεται από τη γεννήτρια με το μεγαλύτερο οριακό κόστος στη γεννήτρια με το μικρότερο οριακό κόστος. Το να μειώσουμε την παραγωγή στη μονάδα με το μεγαλύτερο οριακό κόστος θα φέρει μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους σε σχέση με την αύξηση που θα επιφέρει η αντίστοιχη αύξηση του φορτίου στη μονάδα με το χαμηλότερο οριακό κόστος. Αυτό θα ισχύει μέχρις ότου τα οριακά κόστη των δύο μονάδων να είναι ίσα. [8] Το ίδιο σκεπτικό ισχύει και για περισσότερες των 2 μονάδων. Έτσι προκύπτει και το κριτήριο σύμφωνα με το οποίο έχουμε τη βέλτιστη οικονομική κατανομή μεταξύ των μονάδων. Θα πρέπει όλες οι μονάδες να λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος λ . Η παραπάνω διαδικασία παρίσταται γραφικά και στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Γραφική απεικόνιση της κατανομής φορτίου

Ταυτόχρονα θα πρέπει όμως να ικανοποιούνται και οι περιορισμοί που δώσαμε παραπάνω. Η κάθε γεννήτρια, όπως είδαμε, έχει ένα ελάχιστο και μέγιστο παραγωγή. Αν όλες οι μονάδες μπορούν να λειτουργήσουν με το οριακό κόστος που καθορίστηκε και ταυτόχρονα να είναι εντός των ορίων λειτουργίας τους τότε έχουμε τη βέλτιστη λύση για το κόστος. Αν όμως κάποια γεννήτρια δεν μπορεί να λειτουργήσει με αυτό το οριακό κόστος ενώ είναι εντός των ορίων λειτουργίας της τότε αυτή τίθεται στο κοντινότερο όριο και οι υπόλοιπες μονάδες μοιράζονται το υπολειπόμενο φορτίο με το κριτήριο του οριακού κόστους, όπως είδαμε. Αυτό μπορεί να φανεί και γραφικά στο επόμενο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Οικονομική κατανομή μεταξύ 3 μονάδων

Εδώ παρατηρούμε ότι η τρίτη μονάδα έχει υψηλότερο οριακό κόστος, δηλαδή είναι και η πιο δαπανηρή. Έτσι επιλέγουμε να λειτουργεί στο χαμηλότερο δυνατό, ενώ οι άλλες δύο μοιράζονται το υπολειπόμενο φορτίο έχοντας το ίδιο οριακό κόστος. Αντίστοιχα, αν κάποια μονάδα ήταν πιο φθηνή με μικρότερο οριακό κόστος, τότε εκείνη θα λειτουργούσε στο μέγιστο των δυνατοτήτων της και οι άλλες θα μοιράζονταν πάλι το υπόλοιπο φορτίο με κοινό οριακό κόστος.

Συνολικά λοιπόν κατά την επίλυση της οικονομικής κατανομής του φορτίου ακολουθούμε τις εξής συνθήκες (Kuhn-Tucker) [8]:

$$\sum_i P_{Gi} = P_D + P_L$$

$$\lambda = \frac{dC_i}{dP_{Gi}}, \quad P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad (3.9)$$

$$\text{εάν } \frac{dC_i}{dP_{Gi}} < \lambda : P_{Gi} = P_{Gimax}$$

$$\text{εάν } \frac{dC_i}{dP_{Gi}} > \lambda : P_{Gi} = P_{Gimin}$$

Βέβαια, με τον τρόπο που ακολουθήθηκε δεν έχουν ληφθεί όλες οι παράμετροι υπόψη για την κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες, μιας και στο κόστος κάθε μονάδας θα έπρεπε να υπολογίζεται και το κόστος των απωλειών της γραμμής που την εξυπηρετεί. Για παράδειγμα, αν μια μονάδα είναι αρκετά μακριά από το κέντρο κατανάλωσης, ακόμα και αν είναι αυτή με το μικρότερο οριακό κόστος, θα μπορούσαν οι απώλειες να είναι τόσο μεγάλης τάξης που τελικά να προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση του κόστους, από ότι θα προκαλούσε μία άλλη μονάδα με μεγαλύτερο οριακό κόστος αλλά με μικρότερες απώλειες. Αυτό, το κομμάτι όμως για απλούστευση, θα αμεληθεί στην παρούσα μελέτη.

3.3 Μέθοδος Συντελεστή Λάμδα (Lagrange) Αμελώντας τις Απώλειες

Ένας διαδεδομένος τρόπος επίλυσης της οικονομικής κατανομής φορτίου είναι η χρησιμοποίηση της μεθόδου των πολλαπλασιαστών Lagrange. Για να λυθεί το κλασσικό πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου πρέπει αρχικά να κατασκευαστεί η συνάρτηση Lagrange. Η μορφή αυτής είναι [9]:

$$L = C(x_1, x_2, \dots, x_n) - \lambda G(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) + \lambda \left(P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \right) \quad (3.10)$$

Το διαφορικό της συνάρτησης Lagrange θα δίνεται από τη σχέση (3.11) ως

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial P_{G1}} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{G2}} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial P_{Gn}} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1(P_{G1})}{\partial P_{G1}} - \lambda \\ \frac{\partial C_2(P_{G2})}{\partial P_{G2}} - \lambda \\ \vdots \\ \frac{\partial C_n(P_{Gn})}{\partial P_{Gn}} - \lambda \\ P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Η σχέση του διαφορικού θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος και την εύρεση των $n + 1$ μεταβλητών ($P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}$ και λ). Για να καταστεί όμως αυτό δυνατό θα πρέπει να δοθούν οι αρχικές τιμές $P_{G1}^0, P_{G2}^0, \dots, P_{Gn}^0$ και λ_0 . Έπειτα οι καινούριες τιμές τους θα υπολογιστούν από τη σχέση:

$$x^1 = x^0 - \varepsilon \nabla L \quad (3.12)$$

Όπου τα διανύσματα x^1, x^0 είναι

$$x^0 = \begin{bmatrix} P_{G1}^0 \\ P_{G2}^0 \\ \vdots \\ P_{Gn}^0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} \quad x^1 = \begin{bmatrix} P_{G1}^1 \\ P_{G2}^1 \\ \vdots \\ P_{Gn}^1 \\ \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Η γενική επαναληπτική έκφραση θα είναι:

$$x^k = x^{k-1} - \varepsilon \nabla L \quad (3.14)$$

Όπου k είναι ο αριθμός της επανάληψης.

Τα βήματα λύσης θα είναι:

- (1) Επιλογή των αρχικών τιμών $P_{G1}^0, P_{G2}^0, \dots, P_{Gn}^0$, όπου $P_{G1}^0 + P_{G2}^0 + \dots + P_{Gn}^0 = P_D$
- (2) Υπολογισμός της αρχικής τιμής λ_i^0 για κάθε γεννήτρια ως

$$\lambda_i^0 = \left. \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} \right|_{P_{Gi}^0}, \quad i = 1, \dots, n$$

- (3) Υπολογισμός της αρχικής τιμής του μέσου οριακού κόστους λ_0

$$\lambda_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i^0$$

(4) Υπολογισμός του διαφορικού

$$\nabla L^1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1(P_{G1}^0)}{\partial P_{G1}} - \lambda^0 \\ \frac{\partial C_2(P_{G2}^0)}{\partial P_{G2}} - \lambda^0 \\ \vdots \\ \frac{\partial C_n(P_{Gn}^0)}{\partial P_{Gn}} - \lambda^0 \\ P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi}^0 \end{bmatrix}$$

(5) Αν το διαφορικό ισούται με το μηδέν τότε η λύση συγκλίνει και σταματάει η επαναληπτική διαδικασία, διαφορετικά συνεχίζουμε.

(6) Υπολογίζουμε τις νέες τιμές $P_{G1}^1, P_{G2}^1, \dots, P_{Gn}^1$ και λ_1 , εξετάζοντας αν ικανοποιούνται τα όρια λειτουργίας των γεννητριών και προσαρμόζοντας τις μεταβλητές κατάλληλα.

(7) Επαναλαμβάνουμε από το βήμα (4)

Από τα παραπάνω, βλέπουμε πάλι ότι η απαραίτητη προϋπόθεση για να βρούμε το σημείο λειτουργίας με το χαμηλότερο κόστος είναι όλες οι μονάδες παραγωγής να λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος και αυτό να είναι ίσο με την μεταβλητή Λάμδα (λ), γνωστή και ως πολλαπλασιαστής Lagrange.

Δηλαδή, θέλουμε για όλες τις μονάδες να ισχύει:

$$\lambda = \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}}, i = 1, \dots, n \quad (3.15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη και τα όρια λειτουργίας των μονάδων η σχέση επεκτείνεται σε:

$$\begin{aligned} \text{αν } \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} = \lambda \text{ τότε } P_{Gi}, P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \\ \text{αν } \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} \leq \lambda \text{ τότε } P_{Gi} = P_{Gimax} \\ \text{αν } \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} \geq \lambda \text{ τότε } P_{Gi} = P_{Gimin} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.4 Μέθοδος Συντελεστή Λάμδα (Lagrange) με Απώλειες

Η μελέτη μας ως τώρα όμως δέχεται βελτίωσης μιας και ως τώρα έχουν αμεληθεί οι απώλειες του συστήματος. Όμως αν θέλουμε να λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος στο σύστημα μεταφοράς υπάρχουν απώλειες, κυρίως λόγω της ωμικής αντίστασης των γραμμών, τότε το πρόβλημα και ο υπολογισμός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας γίνονται πιο πολύπλοκα. Για αυτό θα πρέπει να γίνει κατάλληλη προσαρμογή του μελετώμενου προβλήματος. [10]

Αρχικά οι σχέσεις που μελετάμε πλέον θα πάρουν τη μορφή:

$$P_D + P_L - \sum_i^n P_{Gi} = 0 \quad (3.17)$$

Και η συνάρτηση Lagrange που αντιστοιχεί σε αυτό το πρόβλημα θα είναι:

$$L = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) + \lambda \left(P_D + P_L - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \right) \quad (3.18)$$

Οπότε το κριτήριο ελαχιστοποίησης του κόστους θα εκφράζεται από την εξίσωση :

$$\frac{dL}{dP_{Gi}} = \frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{dP_L}{dP_{Gi}} \right) = 0, i = 1, \dots, n \leftrightarrow$$

$$\frac{dC_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{dP_L}{dP_{Gi}} \right)} = \lambda, i = 1, \dots, n \quad (3.19)$$

όπου $a_i = \frac{1}{\left(1 - \frac{dP_L}{dP_{Gi}} \right)}$ είναι ο συντελεστής διόρθωσης των απωλειών του δικτύου και λ το νέο οριακό κόστος στο οποίο θα πρέπει να λειτουργούν όλες οι μονάδες για την επίτευξη του βέλτιστου σημείου λειτουργίας.

Για να συμπεριλάβουμε στο πρόβλημα, όμως, τον παράγοντα των απωλειών πρέπει αρχικά να εκφράσουμε τις απώλειες αποκλειστικά ως συνάρτηση της παραγωγής των μονάδων. Υπάρχουν 2 τρόποι για να επιτευχθεί αυτό. Ο ένας είναι μέσω των εξισώσεων ροής φορτίου και ο άλλος βασίζεται στη μέθοδο συντελεστών B.

Οι εξισώσεις ροής φορτίου του συστήματος μπορούν να εκφραστούν με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_{ij}), i = 1, \dots, NB \quad (3.20)$$

όπου

P_{Di} η συνολική ζήτηση ενεργού ισχύος στο ζυγό i (MW)
 P_{Gi} η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος στο ζυγό i (MW)
 Q_{Di} η συνολική ζήτηση άεργου ισχύος στο ζυγό i (MVA)
 Q_{Gi} η συνολική παραγωγή άεργου ισχύος στο ζυγό i (MVA)
 θ_{ij} η γωνία του στοιχείου y_{ij} του πίνακα αγωγιμοτήτων Y (rad)
 δ_{ij} η γωνία της τάσης μεταξύ των ζυγών i και j (rad)
 $|y_{ij}|$ το μέτρο του στοιχείου y_{ij} του πίνακα αγωγιμοτήτων Y (Ω^{-1})
 $|V_i|$ το μέτρο της τάσης του ζυγού i (kV)
 NB ο συνολικός αριθμός ζυγών

Υστερα οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$P_L = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} [a_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + b_{ij}(Q_i P_j + P_i Q_j)] \quad (3.21)$$

Όπου

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{|V_i||V_j|} \cos(\delta_i - \delta_j)$$

$$b_{ij} = \frac{R_{ij}}{|V_i||V_j|} \sin(\delta_i - \delta_j)$$

P_i η πραγματική έγχυση ενεργού ισχύος στο ζυγό i , $P_i = P_{Gi} - P_{Di}$
 Q_i η πραγματική έγχυση άεργου ισχύος στο ζυγό i , $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$
 $R_{ij} + jX_{ij}$ το στοιχείο ij του πίνακα αντιστάσεων

Αυτή η μέθοδος όμως είναι περίπλοκη υπολογιστικά και όχι τόσο εύχρηστη. Μια πιο απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να προσεγγίσουμε τις απώλειες μεταφοράς αποτελεί η χρήση των συντελεστών B ή αλλιώς γνωστή ως φόρμουλα του Kron. Αυτή δίνεται ως:

$$P_L = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^{NB} B_{i0} P_{Gj} + B_{00} \quad (3.22)$$

όπου B_{ij} , B_{i0} , B_{00} είναι σταθεροί συντελεστές απωλειών υπό συγκεκριμένες συνθήκες του συστήματος. Για λόγους απλότητας η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$P_L = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} \quad (3.23)$$

3.5 Οικονομική Κατανομή Φορτίου με Περιορισμούς Μονάδων

Στην ανάλυση της οικονομικής κατανομής φορτίου μέχρι αυτό το σημείο, δεχόμαστε ότι οι μονάδες παραγωγής έχουν τη δυνατότητα να αυξάνουν ή να μειώνουν την παραγωγή τους στο επιθυμητό επίπεδο σε κάθε βήμα χωρίς κάποιο περιορισμό. Όμως, οι θερμικές μονάδες εκτός των ορίων ελάχιστης και μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος παρουσιάζουν και ορισμένους άλλους θερμικούς περιορισμούς στη λειτουργία τους, όπως αυτοί στην ταχύτητα μεταβολής της ισχύος εξόδου τους. Πρακτικά, λοιπόν, οι μονάδες έχουν κάποια όρια για τη δυνατότητα αύξησης ή μείωσης της παραγωγής τους, δηλαδή μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μπορούν να αλλάξουν την τιμή τους μόνο κατά ένα συγκεκριμένο ποσό. Όταν λοιπόν η μονάδα καλείται να αυξήσει την παραγωγή της ο ρυθμός αυτής της αύξησης χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση ράμπας που ονομάζεται ramp-up, ενώ όταν καλείται να τη μειώσει, ο ρυθμός της αύξησης περιορίζεται από μια αντίστοιχη συνάρτηση ράμπας, την ramp-down. Για να έχουμε λοιπόν μια πιο σωστή και πλήρη εικόνα κατά την οικονομική κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις μονάδες, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε στη μελέτη μας και τα παραπάνω όρια που χαρακτηρίζουν τις γεννήτριες. Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή και ως δυναμική οικονομική κατανομή. [10]

Οι σχέσεις που εκφράζουν αυτούς τους έξτρα περιορισμούς είναι:

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Gi}^0 &\leq UR_i, \text{ για αύξηση της παραγωγής} \\ P_{Gi}^0 - P_{Gi} &\leq DR_i, \text{ για μείωση της παραγωγής} \end{aligned} \quad (3.24)$$

όπου

P_{Gi}^0 είναι τιμή της παραγόμενης ισχύος από την τελευταία ώρα λειτουργίας της μονάδας i που λαμβάνεται ως αρχική τιμή

UR_i το όριο αύξησης της παραγωγής της μονάδας i σε μία μονάδα χρόνου (ramp-up)

DR_i το όριο μείωσης της παραγωγής της μονάδας i σε μία μονάδα χρόνου (ramp-down)

Αυτοί οι περιορισμοί κατά την οικονομική κατανομή μας δείχνουν το ανώτατο όριο μεταβολής της ισχύος σε κάθε βήμα χρόνου, το οποίο δεν μπορεί να ξεπεραστεί. Έτσι μπορεί να προκαλέσει λίγο υψηλότερο κόστος λειτουργίας κατά την εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας.

Στον αλγόριθμο της οικονομικής κατανομής τα όρια αυτά εισέρχονται αλλάζοντας τους περιορισμούς που θέσαμε για τα μέγιστα και ελάχιστα όρια λειτουργίας των μονάδων. Έτσι, τώρα, σε κάθε βήμα θα γίνεται έλεγχος για το αν η παραγόμενη ισχύς που προκύπτει για κάθε μονάδα από το κοινό οριακό κόστος για το οποίο έχουμε ελαχιστοποίηση του κόστους, ως προς τα καινούρια όρια:

$$\begin{aligned} P_{Gi}^{high} &= \min\{P_{Gimax}, P_{Gi}^0 + UR_i\} \\ P_{Gi}^{low} &= \max\{P_{Gimin}, P_{Gi}^0 - DR_i\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

και

$$P_{Gi}^{low} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{high}$$

3.6 Άλλες Προσεγγίσεις στην Επίλυση της Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Για την επίλυση της οικονομικής κατανομής φορτίου, εκτός της μεθόδου που αναλύσαμε ως τώρα, έχουν αναπτυχθεί και αρκετές άλλες σύνθετες αριθμητικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. [11] Τέτοιες είναι για παράδειγμα ο εξελικτικός προγραμματισμός, οι γενετικοί αλγόριθμοι, η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων ή μέθοδος Monte-Carlo. Στις παρακάτω υποπαραγράφους θα αναλύσουμε τα βασικά στοιχεία αυτών των μεθόδων.

3.6.1 Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming)

Ο εξελικτικός προγραμματισμός αποτελεί μία στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, που ανέπτυξε ο Lawrence J. Fogel, το 1960. [12] Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EAs) βασίζονται σε αρχές που προέρχονται από την εξέλιξη φυσικών διαδικασιών. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων: οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), οι στρατηγικές εξέλιξης (Evolution Strategies) και ο γενετικός προγραμματισμός. [13]

Για την υλοποίησή του, αρχικά, επιλέγεται ένας τυχαίος πληθυσμός μονάδων (δοκιμαστικές λύσεις). Ύστερα, η κάθε μονάδα μεταλλάσσεται προκειμένου να δημιουργήσει καινούριες μονάδες. Έπειτα, οι μονάδες υποβάλλονται σε ένα είδος μεταξύ τους αγώνα για να προκύψει ποια μονάδα έχει την μεγαλύτερη δυνατότητα εξέλιξης και πρέπει να επιβιώσει στον πληθυσμό. Ως εξέλιξη χαρακτηρίζεται η διαδικασία προσαρμογής μιας μονάδας στο περιβάλλον του. Έτσι, οι μονάδες που επιβιώνουν είναι αυτές που έχουν τις περισσότερες πιθανότητες αναπαραγωγής και έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν καλύτερα στο περιβάλλον τους. Στους εξελικτικούς αλγορίθμους οι μονάδες (υποψήφιες λύσεις) που είναι καλύτερα προσαρμοσμένες στο περιβάλλον είναι αυτές που εμφανίζουν τη μικρότερη τιμή της συνάρτησης στόχου. Η λογική αυτή είναι βασισμένη στη θεωρία του Δαρβίνου σχετικά με τις αρχές εξέλιξης των ειδών.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των EA είναι η ευκολία με την οποία μπορούν να τρέχουν παράλληλα σε ένα πολυεπεξεργαστικό σύστημα. Κάθε μέλος του πληθυσμού δηλαδή μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από τα άλλα στο δικό του επεξεργαστή. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν ευκολία στο να προσαρμόζονται σε νέα προβλήματα (προσαρμόζοντας τη συνάρτηση στόχου) και έχουν τη δυνατότητα να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα (ως στοχαστική μέθοδος).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση απλοποιημένων βέλτιστων ροών φορτίων, του κλασικού προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου, και προβλήματα βελτιστοποίησης ενεργού ισχύος καθώς και αναδιαμόρφωσης του συστήματος μεταφοράς. [8]

3.6.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης που στηρίζονται στις αρχές της γενετικής. Η πρώτη τους εισαγωγή έγινε από τον John Holland στις αρχές της δεκαετίας του 1970 [14], και επεκτάθηκαν από τον David Goldberg. Οι αλγόριθμοι αυτοί εξελίσσονται συνεχώς σε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο της τεχνητής νοημοσύνης και της βελτιστοποίησης συναρτήσεων. Αποτελούν ένα πιθανοτικό αλγόριθμο ο οποίος ξεκινά με έναν τυχαίο πληθυσμό υποψηφίων και εξελίσσεται προς την βέλτιστη λύση με τη χρήση γενετικών τελεστών οι οποίοι αναπτύχθηκαν βασιζόμενοι στις διαδικασίες που συμβαίνουν στη φύση. Με τη χρήση των γενετικών τελεστών δημιουργούνται απόγονοι, δημιουργώντας μια καινούρια γενιά η οποία ναι μεν διαφέρει από τους προγόνους της, αλλά διατηρεί τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Ο τύπος των τελεστών που χρησιμοποιείται διαφέρει ανάλογα με το πρόβλημα που καλούνται να επιλύσουν. Η επίτευξη την βέλτιστης λύσης επιτυγχάνεται με την αξιολόγηση τυχαίων οργανωμένων ανταλλαγών γενετικής πληροφορίας. Επιπρόσθετα, βρίσκει ταυτοχρόνως πολλαπλές λύσεις του προβλήματος σε αντίθεση με του συμβατικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Έτσι, η πιθανότητα να βρεθεί τελικώς η βέλτιστη λύση αυξάνεται. Ακόμα, έχουν το πλεονέκτημα ότι η εύρεση της λύσης γίνεται σε μικρό χρόνο σε σχέση με μεθόδους τυχαίας αναζήτησης. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι προσφέρουν πολλές δυνατότητες εφαρμογών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων, όπως της οικονομικής κατανομής του φορτίου [15], τον προγραμματισμό ένταξης των μονάδων, κτλ.

3.6.3 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)

Στη συνέχεια των γενετικών αλγορίθμων εμφανίστηκαν αλγόριθμοι που μιμούνται την νοημοσύνη που εμφανίζεται σε διάφορα είδη σμηνών, αναπτύσσοντας έτσι μια νέα μορφή νοημοσύνης, τη Νοημοσύνη των Σμηνών (Swarm Intelligence – SI). Αυτή αποτελεί ένα είδος τεχνητής νοημοσύνης και βασίζεται στην οργανωμένη συμπεριφορά κατανεμημένων, αυτό-οργανώσιμων συστημάτων που μιμούνται την συμπεριφορά οργανισμών. Μελετώντας, έτσι πλήθη ζώων ή και εντόμων προσομοιώνοντας την κοινωνική τους δράση και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν αυτοί οι οργανισμοί για να ανταλλάσσουν πληροφορίες και να σχηματίζουν οργανωμένους οικισμούς. Σε αυτούς βασίζονται διάφοροι αλγόριθμοι με πιο γνωστούς εκπροσώπους τους την Αποικία των Μυρμηγκιών (Ant Colony), την Αποικία των Μελισσών (Bee Colony Algorithm), την Αναζήτηση της Μαϊμούς (Monkey Search) και τέλος τη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization).

Ο αλγόριθμος PSO χαρακτηρίζεται ως ένας στοχαστικός, εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, που βασίζεται στη θεωρία των πληθυσμών και στην κοινή συμπεριφορά ομάδων, όπως την συγκέντρωση των πτηνών σε σμήνη ή των ψαριών σε κοπάδια και την κοινή τους δράση. Με μία παρουσίασή τους με τίτλο Particle Swarm Optimization, οι James Kennedy και Russell Eberhart, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, σε συνέδριο του IEEE το 1995 [16] περιγράφουν τη διαδικασία που ακολούθησαν για να καταλήξουν εν αγνοία τους στην δημιουργία μιας γρήγορης και αποτελεσματικής μεθόδου βελτιστοποίησης. Αρχικός σκοπός

ήταν η εξομοίωση και η γραφική αναπαράσταση της κίνησης ενός σμήνους πουλιών ή των κοινωνικών εντόμων, πουλιών, ψαριών και άλλων ζώων που χρησιμοποιούν την αυτό-οργάνωση και την κατανομή της εργασίας για την επίλυση προβλημάτων.

Έτσι, κατέληξαν σε έναν αλγόριθμο (PSO) που βασίζει την λειτουργία του στην από κοινού προσπάθεια όλου του σμήνους για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Η κάθε μονάδα του σμήνους στη μελέτη αυτή θεωρείται ένα σωματίδιο (particle) το οποίο μπορεί και προβλέπει τη δική του λύση καθώς τα σωματίδια όλου του σμήνους εξελίσσονται ή αλλάζουν θέσεις στο χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας κάθε σωματίδιο την κατάστασή του και τη θέση του ανάλογα με τη δική του εμπειρία και αναλύοντας τις καταστάσεις των γειτόνων του, έχοντας μνήμη της βέλτιστης θέσης τους. Τελικά, υπολογίζονται αυτόνομα τόσο οι τοπικές μεταβλητές κατάστασης όσο και σε συνολικό επίπεδο του σμήνους. [17] Έτσι, χρησιμοποιείται με μεγάλη επιτυχία σαν αλγόριθμος βελτιστοποίησης, καθώς το εικονικό σμήνος που δημιουργεί έχει την ικανότητα να βρίσκει τις βέλτιστες ανάλογα με το πως καταφέρνουν να οργανώνονται οι διάφορες ομάδες ζώων. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση περίπλοκων και μη γραμμικών προβλημάτων. Στον PSO που εφαρμόζεται στην οικονομική κατανομή του φορτίου, η ισχύς των γεννητριών σε κάθε ζυγό θεωρούνται τα σωματίδια στον αλγόριθμο PSO. [10]

3.6.4 Αλγόριθμοι Monte-Carlo

Η μέθοδος Monte-Carlo είναι μια αριθμητική τεχνική επίλυσης μαθηματικών, φυσικών, οικονομικών και λοιπών προβλημάτων που χρησιμοποιεί τυχαίες μεταβλητές, όταν είναι αδύνατο να λυθεί το πρόβλημα με κάποιο ντετερμινιστικό αλγόριθμο. Βρίσκει πολλές εφαρμογές στο επιστημονικό πεδίο των βελτιστοποιήσεων. Στους αλγορίθμους Monte-Carlo επιλέγεται ως εισόδος μια τυχαία τιμή βασισμένη στο εύρος των εκτιμήσεων ή την πιθανοτική κατανομή, αν είναι διαθέσιμη. Το μοντέλο υπολογίζεται βασισμένο σε αυτήν την τυχαία τιμή. Το αποτέλεσμα καταγράφεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μια τυπική προσομοίωση Monte-Carlo υπολογίζει το μοντέλο εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική τυχαία επιλεγμένη τιμή, οπότε εμφανίζει αρκετά μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Όταν η επαναληπτική αυτή διαδικασία ολοκληρωθεί, έχουμε έναν μεγάλο αριθμό αποτελεσμάτων, βασιζόμενο πάντοτε σε τυχαίες τιμές εισόδου.

Η μέθοδος Monte-Carlo παρέχει προσεγγιστικές λύσεις σε μεγάλο εύρος μαθηματικών προβλημάτων. Για τη χρήση αυτής της μεθόδου απαιτείται να εκφράσουμε το υπό μελέτη σύστημα με τη χρήση πιθανοτικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (probability density functions). [18] Αυτή η τεχνική, περιλαμβάνει μια επαναλαμβανόμενη επιλογή της τιμής των μεταβλητών εισόδου από την κατανομή πιθανότητάς τους, και στη συνέχεια για μια επιλεγμένη τιμή αυτών των μεταβλητών εισόδου, λαμβάνονται τα διανύσματα κατάστασης, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως στην ντετερμινιστική ανάλυση. Το τελικό βήμα είναι να λάβουμε την πιθανοτική περιγραφή του διανύσματος κατάστασης από τα αποτελέσματα των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων.

Η χρήση αυτής της μεθόδου στην οικονομική κατανομή φορτίου γίνεται γνωρίζοντας την έκφραση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών του συστήματος ως πιθανοτικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. [19]

Κεφάλαιο 4

Αποκεντρωμένος Έλεγχος στην Οικονομική Κατανομή Φορτίου

4.1 Εισαγωγή

Τα μελλοντικά δίκτυα θα σχεδιάζονται για να έχουν ευφυή τρόπο λειτουργίας, με αποκεντρωμένη παραγωγή φορτίου και όσο το δυνατόν υψηλότερη διείσδυση ΑΠΕ. Αυτό συνεπάγεται και μη εγγυημένη παραγωγή από τις ΑΠΕ, μιας και οι ηλιακές και αιολικές μονάδες παραγωγής έχουν στοχαστική συμπεριφορά, απαιτώντας έτσι από το δίκτυο να προσαρμόζεται δυναμικά στις αλλαγές της παραγωγής και της ζήτησης. Όπως είδαμε, τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχονται κεντρικά μέσω ενός κέντρου ελέγχου το οποίο είναι υπεύθυνο να συλλέγει και να αναλύει τα δεδομένα του συστήματος και τελικά να καθορίζει τη λειτουργία των μονάδων. Αυτή η κεντρική όμως προσέγγιση, θα πρέπει να επανεξεταστεί για την υλοποίηση των καινούριων αυτών δικτύων. Μία τέτοια προσέγγιση θα δημιουργούσε προβλήματα σε σχέση με την επεκτασιμότητα, την αξιοπιστία, την διαχείριση και γενικά την εξέλιξη του δικτύου. Ειδικά όταν πρόκειται για την ανάπτυξη των ευφών δικτύων οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν βασικά και αναπόσπαστα κομμάτια, μιας και τα ευφυή δίκτυα πρόκειται να ενσωματώνουν πολυάριθμους κόμβους και στοιχεία πολύ διαφορετικά μεταξύ τους. Ακόμα, θα αυξηθεί η πολυπλοκότητα του συστήματος και η ανάγκη ανταλλαγής πληροφοριών και πλέον τα κεντρικά συστήματα ελέγχου δε θα μπορούν να ανταποκριθούν στις καινούριες ανάγκες.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και των υπολογιστικών συστημάτων μας δίνουν τη δυνατότητα μιας μη ιεραρχικής αρχιτεκτονικής του δικτύου όπου ο έλεγχος πλέον θα γίνεται αποκεντρωμένα. Η κάθε μονάδα θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζει την παραγωγή της αυτόνομα και ανεξάρτητα από τις άλλες μονάδες και να καταφέρνει να βρίσκει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας αυτόματα. Για να γίνεται αυτό θα υπάρχουν ειδικοί ελεγκτές, οι οποίοι θα βρίσκονται σε κάθε ζυγό και θα αλληλεπιδρούν με το σύστημα. Κάθε ένας από αυτούς θα έχει ένα σύνολο βασικών στοιχείων για να μπορεί να επεξεργάζεται τις διάφορες μεταβλητές του συστήματος και δυναμικά να μπορεί το σύστημα να αλλάζει την κατάστασή του. Αρχικά, θα έχει ένα σύνολο αισθητήρων οι οποίοι θα μπορούν να μετράνε τις τοπικές μεταβλητές του συστήματος. Ύστερα, θα υπάρχουν ενσωματωμένοι ταλαντωτές, οι οποίοι θα αρχικοποιούνται σύμφωνα με τις τοπικές μεταβλητές και θα αλλάζουν την κατάστασή τους ανάλογα με τις καταστάσεις των ταλαντωτών κοντινών του κόμβων. Τέλος, θα υπάρχει μια προγραμματιστική μονάδα για την επεξεργασία των πληροφοριών και ένα περιβάλλον επικοινωνίας το οποίο θα διασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ των ελεγκτών.

Η χρησιμοποίηση τέτοιων στοιχείων θα έκανε τον υπολογισμό των μεταβλητών του συστήματος, όπως τη ζήτηση ενεργούς ισχύος χωρίς την ανάγκη για κέντρο ελέγχου. Έτσι θα είναι γνωστές και οι μεταβλητές που χρειάζονται για να λυθεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής του φορτίου από τους ελεγκτές με έναν τελείως αποκεντρωμένο τρόπο και όχι βασιζόμενο στο κέντρο ελέγχου με πληροφορίες που έχει συλλέξει από ολόκληρο το σύστημα.

Γενικά, μία αρχιτεκτονική αποκεντρωμένου ελέγχου θα βελτιώσει τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την αποτελεσματικότητά τους, κάνοντάς τα πιο ανεξάρτητα και ενισχύοντας τη δυνατότητα του συστήματος να παραμένει σε λειτουργία ακόμα και μετά από διαταραχές ή/και βλάβες στον εξοπλισμό. Εξάλλου, τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται από σταθεροποιητικές και αυτοθεραπευτικές ικανότητες.

4.2 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi-Agent Systems)

Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων αποτελούν ένα υπολογιστικό σύστημα στο οποίο ευφυείς πράκτορες δουλεύουν, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μαζί παίρνουν αποφάσεις για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων. Οι πράκτορες έχουν ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Μπορούν να αντιλαμβάνονται το τοπικό τους περιβάλλον, να αλληλεπιδρούν με άλλους πράκτορες, να έχουν συγκεκριμένα καθήκοντα και να αντιδρούν στις αλλαγές όποτε αυτές συμβαίνουν. Οι πράκτορες λειτουργούν αυτόνομα αλλά ταυτόχρονα δημιουργούν ένα σύστημα συνεργασίας προκειμένου να φτάσουν τόσο τους ξεχωριστούς όσο και οικουμενικούς στόχους.[20]

Οι εφαρμογές τέτοιων πρακτόρων είναι πολλές και σε διάφορους τομείς. Στη δική μας περίπτωση, μας ενδιαφέρει η χρήση τους στην επίλυση προβλημάτων ως εναλλακτική ενός κεντρικού τρόπου επίλυσης. Χρησιμοποιείται, είτε γιατί τα προβλήματα από μόνα τους είναι καταναμημένα είτε διότι η κατανομή του προβλήματος στους πράκτορες κάνει την επίλυσή του πιο αποδοτική. Είναι ευέλικτοι και μπορούν να ανταποκριθούν σε σφάλματα στο σύστημα.

Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτής της μελέτης, τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί το αποκεντρωμένο μοντέλο ελέγχου και να αντιμετωπιστούν προβλήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των ευφύων δικτύων. Αυτό συμβαίνει, μιας και η χρήση καταναμημένων και συνεργατικών πρακτόρων βελτιώνει τις λειτουργικές αποδόσεις πολύπλοκων συστημάτων.

4.3 Θεωρία Γράφων και Πρωτόκολλα Consensus

Όπως είδαμε, το ζητούμενο είναι να μπορούν οι μονάδες από μόνες τους να λύσουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την οικονομική κατανομή του φορτίου και να καταλήξουν όλες αυτόνομα στην ίδια βέλτιστη λύση. Αυτό γίνεται μέσω ενός αλγορίθμου συναίνεσης (consensus). Τέτοιου είδους αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να υπάρξει σύγκλιση μιας μεταβλητής σε μια κοινή τιμή, δηλαδή εδώ στο ίδιο οριακό κόστος. Έτσι, 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. Το σύστημα, τελικά, οδηγείται σε συμφωνία με τρόπο αποκεντρωμένο, χωρίς την ανάγκη ιεραρχικής αρχιτεκτονικής και κεντρικού ελέγχου. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι, λόγω του καταναμημένου χαρακτήρα τους και της εύκολης επεκτασιμότητάς τους, εφαρμόζονται σε μεγάλο εύρος προβλημάτων, ειδικά όταν πρόκειται για τον συγχρονισμό, την οργάνωση και την αλληλεπίδραση πρακτόρων σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως η μηχανική και φυσική. Με την οργάνωσή τους και τη μελέτη της τοπολογίας τους, καθώς και για την πρακτική εφαρμογή του αλγορίθμου consensus θα ασχοληθούμε στις επόμενες παραγράφους.

4.3.1 Θεωρία Γράφων

Η θεωρία δικτύων χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση μεγάλων συστημάτων, τη μελέτη της τοπολογίας και άλλων χαρακτηριστικών τους. Έτσι, και το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί τοπολογικά με τη χρήση ενός απλού μη κατευθυνόμενου γράφου G που ορίζεται ως ένα ζευγάρι (V, E) , όπου V είναι ένα πεπερασμένο σύνολο κόμβων που αποτελούν τα στοιχεία του συστήματος - στην περίπτωσή μας τους ζυγούς του συστήματος - και E είναι το σύνολο των ακμών που αναπαριστούν τις συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του δικτύου, δηλαδή εδώ τις γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου. Ο μη κατευθυνόμενος γράφος εκφράζει τη δυνατότητα των κόμβων του να επικοινωνούν αμφίδρομα και να ανταλλάσσουν πληροφορίες εφόσον υπάρχει μεταξύ τους σύνδεση, δηλαδή ακμή. Για την αναπαράσταση αυτών των διασυνδέσεων χρησιμοποιείται ο πίνακας γειννίασης A , ο οποίος εκφράζει με άλλα λόγια το αν υπάρχει ή όχι ακμή μεταξύ δύο στοιχείων. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα ορίζονται ως [21]:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των στοιχείων } i \text{ και } j \\ 1, & \text{αν } i = j \\ 0, & \text{αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των στοιχείων } i \text{ και } j \end{cases} \quad (4.1)$$

Αυτός ο πίνακας είναι πολύ σημαντικός για την τοπολογία του δικτύου μιας και εκφράζει με έναν απλό μαθηματικό ορισμό τις διασυνδέσεις του δικτύου. Από αυτόν προκύπτει ένας ακόμα πολύ σημαντικός πίνακας, ο Λαπλασιανός πίνακας L . Τα στοιχεία αυτού ορίζονται ως

$$l_{ii} = \sum_j a_{ij} \quad (4.2)$$

$$l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$$

4.3.2 Αλγόριθμος Συναίνεσης (Consensus)

Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύουν μόνο τις τοπικές τιμές ενός γενικού φαινομένου. Έχει αποδειχθεί ότι μέσω απλών και κατανεμημένων αλγορίθμων, όπου η κάθε μονάδα μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο τις τιμές της ίδιας και των γειτόνων της στους υπολογισμούς της, μπορούμε να καταφέρουμε να έχουμε σύγκλιση σε μία κοινή τιμή. Τέτοιοι αλγόριθμοι είναι και οι αλγόριθμοι συναίνεσης (Consensus). Έτσι αν θεωρήσουμε ότι οι μονάδες παραγωγής εξοπλιστούν με τέτοιους αισθητήρες (πράκτορες) θα μπορεί να επιτευχθεί αποκεντρωμένος έλεγχος του συστήματος και αντίστοιχα επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής του φορτίου μεταξύ των μονάδων με κατανεμημένο τρόπο. Έτσι, η κάθε μονάδα με αξιοποίηση μόνο των δικών της και γειτονικών πληροφοριών ανανεώνει τη μεταβλητή συναίνεσης, δηλαδή το οριακό κόστος, καταλήγοντας τελικά ύστερα από μια επαναληπτική διαδικασία, στο ίδιο αποτέλεσμα που θα προέκυπτε και με τη χρήση ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου, το οποίο θα έπρεπε να λάβει και να επεξεργαστεί τα στοιχεία από όλες τις μονάδες. [22]

Η διαδικασία επίλυσης που ακολουθεί ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι πολύ απλή. Έστω, ότι ένας κόμβος i του συστήματος βρίσκεται σε μία κατάσταση με τιμή $x_i \in \mathbb{R}$, η οποία τιμή μπορεί να αναπαριστά οποιαδήποτε φυσική ποσότητα του συστήματος, όπως η παραγόμενη ισχύς, το οριακό κόστος, η διαφορά μεταξύ παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος κτλ. Ας υποθέσουμε ότι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του συστήματος γίνεται σε χρόνο διακριτό και η δειγματοληψία του χρόνου γίνεται μέσω της φυσικής μεταβλητής k . Για να πούμε ότι το σύστημα έφτασε σε συναίνεση θα πρέπει όλοι οι κόμβοι του να έχουν φτάσει στην ίδια κατάσταση, δηλαδή:

$$x_i = x_j, \text{ για κάθε στοιχείο } i, j \text{ του δικτύου}$$

Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να ανταλλάσει πληροφορίες μόνο με τους γειτονικούς του, δηλαδή μόνο με κόμβους που συνδέονται μέσω μιας ακμής. Έτσι, ο κανόνας που διέπει την ανανέωση της κατάστασης του κάθε κόμβου θα είναι:

$$x_i[k + 1] = x_i[k] + u_i[k]$$

$$u_i[k] = \sum_j a_{ij}(x_j[k] - x_i[k])$$

όπου a_{ij} είναι τα στοιχεία του πίνακα γειτνίασης A , όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Οι παραπάνω σχέσεις μπορεί να μας δώσει την αντίστοιχη δυναμική σχέση:

$$x_i[k + 1] = \sum_j d_{ij} x_j[k] \quad (4.3)$$

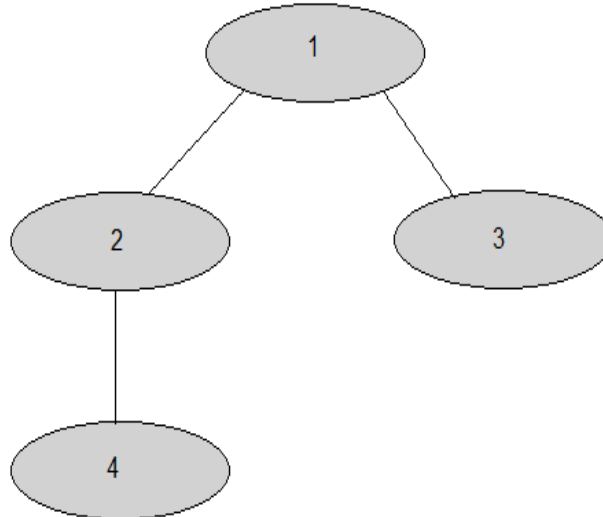
όπου d_{ij} αποτελούν τα στοιχεία του πίνακα d που προκύπτει από την τοπολογία του δικτύου, γνωρίζοντας τον αριθμό των γειτόνων του κάθε κόμβου n_i , ως [23]:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1/n_i, & \text{αν τα στοιχεία } i, j \text{ συνδέονται} \\ 0, & \text{αν δεν συνδεόνται} \end{cases} \quad (4.4)$$

Με αυτό τον τρόπο, ο κάθε κόμβος καταλήγει τελικά στο σταθμισμένο μέσο της δικής του παρούσης κατάστασης και της παρούσης κατάστασης των γειτόνων του. Τελικά, όλο το σύστημα θα καταφέρει να συγκλίνει στην ίδια τιμή, χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές πληροφορίες.

4.3.3 Εφαρμογή Αλγορίθμου Συναίνεσης

Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του αλγορίθμου, ας δούμε αναλυτικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε με ένα απλό παράδειγμα ενός μικρού δικτύου. Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα που αποτελείται από 4 στοιχεία διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο γράφο του επόμενου σχήματος.



Σχήμα 4.1: Γράφος δικτύου 4 κόμβων

Από τον παραπάνω γράφο μπορούμε εύκολα, να εξάγουμε και τον πίνακα γειτνίασης του δικτύου, ο οποίος θα είναι:

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

Από τον πίνακα γειτνίασης προκύπτει, όπως δείξαμε και σε προηγούμενη παράγραφο, ο Λαπλασιανός πίνακας:

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

Αντίστοιχα προκύπτει και ο πίνακας d με τα βάρη που θα χρησιμοποιηθεί κατά τον αλγόριθμο:

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

Εδώ, μπορούμε να παρατηρήσουμε και μια χαρακτηριστική ιδιότητα των γραμμών του d , ότιστα στοιχεία κάθε γραμμής έχουν άθροισμα 1 (row stochastic matrix).

Αφού ορίσαμε την τοπολογία του δικτύου, θα πρέπει να δοθούν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης του κάθε κόμβου του δικτύου που θα αρχικοποιήσουν τον αλγόριθμο. Τυχαία, έστω ότι οι αρχικές τιμές της μεταβλητής κατάστασης x_i του δικτύου είναι

$$x_1[0] = 2, x_2[0] = 3, x_3[0] = 5, x_4[0] = 4$$

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι ο κανόνας ανανέωσης της κατάστασης των κόμβων ανά κάθε διακριτή στιγμή, δίνεται από την (4.3) και είναι:

$$x_i[k + 1] = \sum_j d_{ij}x_j[k]$$

οπότε μπορούμε να ξεκινήσουμε την επαναληπτική διαδικασία.

Επανάληψη 1

$$x_1[1] = d_{11}x_1[0] + d_{12}x_2[0] + d_{13}x_3[0] + d_{14}x_4[0] = \frac{1}{3} * 2 + \frac{1}{3} * 3 + \frac{1}{3} * 5 + 0 * 4 = 3,333$$

$$x_2[1] = d_{21}x_1[0] + d_{22}x_2[0] + d_{23}x_3[0] + d_{24}x_4[0] = \frac{1}{3} * 2 + \frac{1}{3} * 3 + 0 * 5 + \frac{1}{3} * 4 = 3$$

$$x_3[1] = d_{31}x_1[0] + d_{32}x_2[0] + d_{33}x_3[0] + d_{34}x_4[0] = \frac{1}{2} * 2 + 0 * 3 + \frac{1}{2} * 5 + 0 * 4 = 3,5$$

$$x_4[1] = d_{41}x_1[0] + d_{42}x_2[0] + d_{43}x_3[0] + d_{44}x_4[0] = 0 * 2 + \frac{1}{2} * 3 + 0 * 5 + \frac{1}{2} * 4 = 3,5$$

Επανάληψη 2

$$x_1[2] = \dots = \frac{1}{3} * 3,333 + \frac{1}{3} * 3 + \frac{1}{3} * 3,5 + 0 * 3,5 = 3,278$$

$$x_2[2] = \dots = \frac{1}{3} * 3,333 + \frac{1}{3} * 3 + 0 * 3,5 + \frac{1}{3} * 3,5 = 3,278$$

$$x_3[2] = \dots = \frac{1}{2} * 3,333 + 0 * 3 + \frac{1}{2} * 3,5 + 0 * 3,5 = 3,417$$

$$x_4[2] = \dots = 0 * 3,333 + \frac{1}{2} * 3 + 0 * 3,5 + \frac{1}{2} * 3,5 = 3,25$$

Επανάληψη 3

$$x_1[3] = \dots = \frac{1}{3} * 3,278 + \frac{1}{3} * 3,278 + \frac{1}{3} * 3,417 + 0 * 3,25 = 3,324$$

$$x_2[3] = \dots = \frac{1}{3} * 3,278 + \frac{1}{3} * 3,278 + 0 * 3,417 + \frac{1}{3} * 3,25 = 3,269$$

$$x_3[3] = \dots = \frac{1}{2} * 3,278 + 0 * 3,278 + \frac{1}{2} * 3,417 + 0 * 3,25 = 3,347$$

$$x_4[3] = \dots = 0 * 3,278 + \frac{1}{2} * 3,278 + 0 * 3,417 + \frac{1}{2} * 3,25 = 3,264$$

Επανάληψη 4

$$x_1[4] = \dots = \frac{1}{3} * 3,324 + \frac{1}{3} * 3,269 + \frac{1}{3} * 3,347 + 0 * 3,264 = 3,313$$

$$x_2[4] = \dots = \frac{1}{3} * 3,324 + \frac{1}{3} * 3,269 + 0 * 3,347 + \frac{1}{3} * 3,264 = 3,285$$

$$x_3[4] = \dots = \frac{1}{2} * 3,324 + 0 * 3,269 + \frac{1}{2} * 3,347 + 0 * 3,264 = 3,336$$

$$x_4[4] = \dots = 0 * 3,324 + \frac{1}{2} * 3,269 + 0 * 3,347 + \frac{1}{2} * 3,264 = 3,266$$

Επανάληψη 5

$$x_1[5] = \dots = \frac{1}{3} * 3,313 + \frac{1}{3} * 3,285 + \frac{1}{3} * 3,336 + 0 * 3,266 = 3,311$$

$$x_2[5] = \dots = \frac{1}{3} * 3,313 + \frac{1}{3} * 3,285 + 0 * 3,336 + \frac{1}{3} * 3,266 = 3,288$$

$$x_3[5] = \dots = \frac{1}{2} * 3,313 + 0 * 3,285 + \frac{1}{2} * 3,336 + 0 * 3,266 = 3,324$$

$$x_4[5] = \dots = 0 * 3,313 + \frac{1}{2} * 3,285 + 0 * 3,336 + \frac{1}{2} * 3,266 = 3,276$$

Επανάληψη 6

$$x_1[6] = \dots = \frac{1}{3} * 3,311 + \frac{1}{3} * 3,288 + \frac{1}{3} * 3,324 + 0 * 3,276 = 3,308$$

$$x_2[6] = \dots = \frac{1}{3} * 3,311 + \frac{1}{3} * 3,288 + 0 * 3,324 + \frac{1}{3} * 3,276 = 3,292$$

$$x_3[6] = \dots = \frac{1}{2} * 3,311 + 0 * 3,288 + \frac{1}{2} * 3,324 + 0 * 3,276 = 3,318$$

$$x_4[6] = \dots = 0 * 3,311 + \frac{1}{2} * 3,288 + 0 * 3,324 + \frac{1}{2} * 3,276 = 3,282$$

Επανάληψη 7

$$x_1[7] = \dots = \frac{1}{3} * 3,308 + \frac{1}{3} * 3,292 + \frac{1}{3} * 3,318 + 0 * 3,282 = 3,306$$

$$x_2[7] = \dots = \frac{1}{3} * 3,308 + \frac{1}{3} * 3,292 + 0 * 3,318 + \frac{1}{3} * 3,282 = 3,294$$

$$x_3[7] = \dots = \frac{1}{2} * 3,308 + 0 * 3,292 + \frac{1}{2} * 3,318 + 0 * 3,282 = 3,313$$

$$x_4[7] = \dots = 0 * 3,308 + \frac{1}{2} * 3,292 + 0 * 3,318 + \frac{1}{2} * 3,282 = 3,287$$

Επανάληψη 8

$$x_1[8] = \dots = \frac{1}{3} * 3,306 + \frac{1}{3} * 3,294 + \frac{1}{3} * 3,313 + 0 * 3,287 = 3,304$$

$$x_2[8] = \dots = \frac{1}{3} * 3,306 + \frac{1}{3} * 3,294 + 0 * 3,313 + \frac{1}{3} * 3,287 = 3,296$$

$$x_3[8] = \dots = \frac{1}{2} * 3,306 + 0 * 3,294 + \frac{1}{2} * 3,313 + 0 * 3,287 = 3,310$$

$$x_4[8] = \dots = 0 * 3,306 + \frac{1}{2} * 3,294 + 0 * 3,313 + \frac{1}{2} * 3,287 = 3,291$$

Επανάληψη 9

$$x_1[9] = \dots = \frac{1}{3} * 3,304 + \frac{1}{3} * 3,296 + \frac{1}{3} * 3,310 + 0 * 3,291 = 3,303$$

$$x_2[9] = \dots = \frac{1}{3} * 3,304 + \frac{1}{3} * 3,296 + 0 * 3,310 + \frac{1}{3} * 3,291 = 3,297$$

$$x_3[9] = \dots = \frac{1}{2} * 3,304 + 0 * 3,296 + \frac{1}{2} * 3,310 + 0 * 3,291 = 3,307$$

$$x_4[9] = \dots = 0 * 3,304 + \frac{1}{2} * 3,296 + 0 * 3,310 + \frac{1}{2} * 3,291 = 3,293$$

Επανάληψη 10

$$x_1[10] = \dots = \frac{1}{3} * 3,303 + \frac{1}{3} * 3,297 + \frac{1}{3} * 3,307 + 0 * 3,293 = 3,302$$

$$x_2[10] = \dots = \frac{1}{3} * 3,303 + \frac{1}{3} * 3,297 + 0 * 3,307 + \frac{1}{3} * 3,293 = 3,298$$

$$x_3[10] = \dots = \frac{1}{2} * 3,303 + 0 * 3,297 + \frac{1}{2} * 3,307 + 0 * 3,293 = 3,305$$

$$x_4[10] = \dots = 0 * 3,303 + \frac{1}{2} * 3,297 + 0 * 3,307 + \frac{1}{2} * 3,293 = 3,295$$

Επανάληψη 11

$$x_1[11] = \dots = \frac{1}{3} * 3,302 + \frac{1}{3} * 3,298 + \frac{1}{3} * 3,305 + 0 * 3,295 = 3,302$$

$$x_2[11] = \dots = \frac{1}{3} * 3,302 + \frac{1}{3} * 3,298 + 0 * 3,305 + \frac{1}{3} * 3,295 = 3,298$$

$$x_3[11] = \dots = \frac{1}{2} * 3,302 + 0 * 3,298 + \frac{1}{2} * 3,305 + 0 * 3,295 = 3,304$$

$$x_4[11] = \dots = 0 * 3,302 + \frac{1}{2} * 3,298 + 0 * 3,305 + \frac{1}{2} * 3,295 = 3,296$$

Επανάληψη 12

$$x_1[12] = \dots = \frac{1}{3} * 3,302 + \frac{1}{3} * 3,298 + \frac{1}{3} * 3,304 + 0 * 3,296 = 3,301$$

$$x_2[12] = \dots = \frac{1}{3} * 3,302 + \frac{1}{3} * 3,298 + 0 * 3,304 + \frac{1}{3} * 3,296 = 3,299$$

$$x_3[12] = \dots = \frac{1}{2} * 3,302 + 0 * 3,298 + \frac{1}{2} * 3,304 + 0 * 3,296 = 3,303$$

$$x_4[12] = \dots = 0 * 3,302 + \frac{1}{2} * 3,298 + 0 * 3,304 + \frac{1}{2} * 3,296 = 3,297$$

Παρατηρούμε, έτσι, ότι επιτυγχάνεται τελικά σύγκλιση στην τιμή 3,3. Ακόμα, βλέπουμε ότι ο υπολογισμός της νέας τιμής κατάστασης κάθε κόμβου γίνεται με χρήση μόνο των τιμών κατάστασης του κόμβου και των γειτονικών του, χωρίς την ανάγκη γνώσης όλων των τιμών του δικτύου, αφού όσοι κόμβοι δε γειτονεύουν δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό. Έτσι, αποδεικνύεται και πρακτικά ότι χρησιμοποιώντας έναν τέτοιο αλγόριθμο με τελείως αποκεντρωμένη λογική, επιτυγχάνεται σύγκλιση σε μία κοινή τιμή για όλο το σύστημα.

4.4 Εφαρμογή στην Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και να χρησιμοποιηθεί στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου που μελετάμε. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που μας ενδιαφέρει, έχουμε ήδη αναφέρει ότι το κριτήριο ελαχιστοποίησης του κόστους είναι να έχουν όλες οι μονάδες το ίδιο οριακό κόστος λειτουργίας. Έτσι, η μεταβλητή συναίνεσης που θέλουμε τελικά να συγκλίνει σε μία τιμή στο τέλος της εκτέλεσης του αλγορίθμου θα είναι το οριακό κόστος. Ακόμα, αφού όπως είδαμε ο αλγόριθμος συναίνεσης έχει εντελώς αποκεντρωμένη λογική, όταν χρησιμοποιείται για την οικονομική κατανομή φορτίου, η κάθε μονάδα, με αξιοποίηση μόνο των δικών της καταστάσεων και των γειτονικών της, θα μπορεί να υπολογίζει το οριακό κόστος στο οποίο θα πρέπει να λειτουργεί, χωρίς την ανάγκη ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου.

Για να χρησιμοποιηθεί όμως ο παραπάνω αλγόριθμος, θα πρέπει το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου που παρουσιάστηκε νωρίτερα να προσαρμοστεί ούτως ώστε να μπορούν οι μεταβλητές του να εισέλθουν στον αλγόριθμο. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε ως μεταβλητή κατάσταση του κάθε κόμβου θα επιλεγεί το οριακό του κόστος. Έτσι, ο κανόνας που διέπει τη μεταβλητή κατάσταση θα προσαρμοστεί στον:

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

Έτσι, ακολουθώντας τον παραπάνω κανόνα, η κάθε μονάδα θα ανανεώνει την κατάστασή του έως ότου συγκλίνουν οι καταστάσεις όλων των μονάδων σε μια κοινή τιμή, δηλαδή να επιτευχθεί ένα κοινό οριακό κόστος.

Αφού υπολογιστεί το λ_i σε κάθε επανάληψη, θα πρέπει να υπολογίζεται και σε τι παραγωγή ισχύος αντιστοιχεί αυτό για κάθε μονάδα. Αυτή θα υπολογιστεί μέσω της συνάρτησης του οριακού κόστους, αφού

$$\lambda_i = \frac{dC_i}{dP_i} = 2a_i P_i + b_i \quad (1) \quad (4.6)$$

και άρα ο τύπος με τον οποίο θα γίνεται η ανανέωση της παραγωγής των μονάδων σε κάθε επανάληψη θα είναι

$$P_i[k+1] = \frac{\lambda_i[k+1] - b_i}{2a_i} \quad (4.7)$$

Όμως, ο στόχος που πρέπει να επιτύχει το σύστημα είναι η κάλυψη του συνολικού φορτίου. Όπως αναφέρθηκε ήδη, αυτό σημαίνει ότι το σύνολο της παραγωγής πρέπει να καλύπτει τη ζήτηση, δηλαδή η διαφορά τους να είναι μηδενική. Γι' αυτό, πρέπει να εισαχθεί μία ακόμα μεταβλητή που να εκφράζει αυτή τη διαφορά στην ισχύ, ως:

$$\Delta P = P_D - \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.8)$$

το οποίο στο τέλος των επαναλήψεων θα πρέπει να συγκλίνει στο μηδέν. Αυτή η μεταβλητή είναι γνωστή ως power mismatch. Για να ληφθεί όμως υπόψη στον υπολογισμό θα πρέπει και αυτή να υπολογίζεται με τρόπο καταναμημένο και όχι στο σύνολο της παραγωγής. Για να

γίνει αυτό, θα πρέπει να εκφραστεί για κάθε κόμβο – μονάδα, αντίστοιχα, το mismatch με τρόπο αντίστοιχο του υπολογισμού του οριακού κόστους. Έτσι, παράλληλα θα υπολογίζονται 2 μεταβλητές συναίνεσης, μια για τη σύγκλιση του οριακού κόστους και μια για τον υπολογισμό του power mismatch. Η μορφή της τελευταίας θα είναι:

$$DP_i[k+1] = \sum_j d_{ij} DP_j[k] - (P_i[k+1] - P_i[k]) \quad (4.9)$$

Αυτή η μεταβλητή θα χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας διόρθωσης του οριακού κόστους, ώστε τελικά με την τιμή που θα προκύψει να μην έχουμε ούτε περίσσεια ούτε έλλειψη ισχύος. Η διόρθωση θα γίνεται σύμφωνα με τον τύπο

$$\lambda_i[k+1] = \sum_j d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i[k] \quad (4.10)$$

όπου το ε είναι μια θετική σταθερά, που αποτελεί το συντελεστή σύγκλισης. Έτσι, αν έχουμε περίσσεια ισχύος ($\Delta P < 0$) θα μειωθεί το οριακό κόστος του συστήματος δηλαδή θα μειωθεί η παραγωγή και αντίστοιχα όταν υπάρχει έλλειψη ισχύος ($\Delta P > 0$) θα αυξηθεί το οριακό κόστος δηλαδή θα αυξηθεί η παραγωγή και να καλυφθεί το φορτίο. Τελικά, το λ θα αλλάζει έως ότου το power mismatch στο σύστημα να εξαλειφθεί. Εδώ καλό είναι να υπενθυμίσουμε ότι για $\Delta P > 0$ οι μονάδες με χαμηλότερο οριακό κόστος θα αυξήσουν την παραγωγή τους με μεγαλύτερο ρυθμό για να καλυφθεί η ζήτηση από ότι αυτές με υψηλότερο, ενώ αν $\Delta P < 0$ τότε οι μονάδες με μεγαλύτερο οριακό κόστος θα μειώσουν την παραγωγή τους με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τις μονάδες χαμηλότερου οριακού κόστους.

Για να γίνει ολοκληρωμένη μελέτη του προβλήματος θα πρέπει, όμως, ακόμη να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς και τα λειτουργικά όρια των μονάδων. Όπως ήδη αναφέραμε για κάθε γεννήτρια ισχύει:

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}$$

Έτσι, σε κάθε βήμα των υπολογισμών θα πρέπει να ισχύει:

$$P_{imin} \leq P_i[k+1] \leq P_{imax}$$

Για να μην παραβιαστούν αυτά τα όρια, θα εξετάσουμε σε τι οριακό κόστος αντιστοιχούν τα όρια λειτουργίας των μονάδων, δηλαδή τα ανώτατα και κατώτατα όρια του οριακού κόστους της κάθε μονάδας. Αυτά σύμφωνα με τον τύπο (4.6) θα είναι

$$\begin{aligned} \lambda_{imin} &= 2a_i P_{imin} + b_i \\ \lambda_{imax} &= 2a_i P_{imax} + b_i \end{aligned} \quad (4.11)$$

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, αν το οριακό κόστος των μονάδων που προκύψει κατά την επίλυση αντιστοιχεί σε μη αποδεκτή τιμή σύμφωνα με την καμπύλη του οριακού κόστους, τότε η παραγωγή προσαρμόζεται στο κοντινότερο όριο. Έτσι, η παραγωγή θα υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω εκφράσεις:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i[k+1] = P_{imin}, \text{ όταν } \lambda_i < \lambda_{imin} \\ P_i[k+1] = \frac{\lambda_i[k+1] - b_i}{2a_i}, \text{ όταν } \lambda_{imin} < \lambda_i < \lambda_{imax} \\ P_i[k+1] = P_{imax}, \text{ όταν } \lambda_i > \lambda_{imax} \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

Τέλος, εκτός από τους επαναληπτικούς κανόνες που αναπτύξαμε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προκειμένου να τρέξουμε τον αλγόριθμο συναίνεσης θα πρέπει να αρχικοποιήσουμε τις μεταβλητές του προβλήματος. Η αρχικοποίηση μπορεί να γίνει τυχαία, αλλά εδώ ας θεωρήσουμε ότι αρχικά στις γεννήτριες το φορτίο ισοκατανέμεται, δηλαδή:

$$P_i[0] = \frac{P_D}{n}$$

όπου, n ο αριθμός των μονάδων στο σύστημα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει έλεγχος ότι η προκύπτουσα τιμή βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων της γεννήτριας, αλλιώς θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη προσαρμογή. Έπειτα, σύμφωνα με αυτή την τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε και τις αρχικές τιμές για τα $\lambda_i[0]$, $DP_i[0]$, σύμφωνα με τους τύπους

$$\lambda_i[0] = 2a_i P_i[0] + b_i$$

και

$$DP_i[0] = P_{Di} - P_i[0]$$

Παρατηρούμε, πάλι, ότι για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιούνται μόνο τοπικές πληροφορίες, με ανταλλαγή τους μόνο μεταξύ των γειτονικών μονάδων, και έτσι έχουμε επιτύχει έναν πλήρως κατανεμημένο αλγόριθμο. Τώρα, έχουμε ότι χρειάζεται για την ανάπτυξη και εφαρμογή του αλγορίθμου, όπως αυτή θα εξηγηθεί στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 5

Κατανεμημένη Οικονομική Κατανομή Φορτίου - Αλγόριθμοι

5.1 Βασικός Αλγόριθμος

Για τη μελέτη και υλοποίηση του αλγορίθμου, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Προσαρμόζοντας το πρόβλημά μας ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση ενός αλγορίθμου συναίνεσης, επετεύχθη η επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής του φορτίου, αποκεντρωμένα, με χρήση μόνο τοπικών πληροφοριών σε κάθε μονάδα. Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου και την προσομοίωση δικτύων χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον MATLAB. Έτσι, έχοντας ως είσοδο οποιαδήποτε τοπολογία δικτύου και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του, καταλήγουμε στο κοινό οριακό κόστος στο οποίο θα πρέπει να λειτουργούν οι γεννήτριες για την ελαχιστοποίηση του κόστους και σε τι παραγωγή για την κάθε μονάδα αντιστοιχεί αυτό.

Για τη μελέτη μας αναπτύχθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι θα βασιστούν στη μεθοδολογία που αναπτύσσουμε παρακάτω. Ο κάθε ένας από αυτούς θα παρουσιαστεί αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Η τοπολογία του δικτύου είναι το πρώτο βασικό στοιχείο που πρέπει να γνωρίζουμε για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής. Το δίκτυο περιέχει πολλά στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε ζυγούς και κατ' επέκταση μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας. Αυτή η σύνδεση αναπαρίσταται με τη χρήση γράφου και εκφράζεται μέσω ενός πίνακα γειτνίασης του δικτύου C . Από αυτόν τελικά προκύπτει ο πίνακας γειτνίασης των μονάδων παραγωγής A χρησιμοποιώντας το κριτήριο της συντομότερης διαδρομής στο γράφο του συνολικού δικτύου. Τα στοιχεία του πίνακα αυτού, όπως αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εκφράζονται μέσω της (4.1), δηλαδή:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των μονάδων } i \text{ και } j \\ 1, & \text{αν } i = j \\ 0, & \text{αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των μονάδων } i \text{ και } j \end{cases}$$

Μέσω του πίνακα γειτνίασης προκύπτει, με τρόπο που έχει ήδη παρουσιαστεί, ο Λαπλασιανός πίνακας L και τελικά ο πίνακας d που περιέχει τα βάρη για τον υπολογισμό των μεταβλητών συναίνεσης και χρησιμοποιείται στην επίλυση του προβλήματος που εξετάζουμε.

Επίσης, πρέπει να γνωρίζουμε τα βασικά στοιχεία του δικτύου και των μονάδων, τα οποία απαιτούνται για τους υπολογισμούς μας. Αυτά είναι οι συντελεστές κόστους a_i , b_i και c_i για κάθε μονάδα, τα όρια λειτουργίας τους P_{imin} και P_{imax} , η ζήτηση φορτίου P_D , καθώς και οι απώλειες μεταφοράς των γραμμών P_L . Τα στοιχεία αυτά είναι γνωστά σε κάθε μονάδα τοπικά και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον κατανεμημένο αλγόριθμο που αναπτύσσουμε.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε τα ανώτατα και κατώτατα όρια του οριακού κόστους της κάθε μονάδας ως:

$$\lambda_{imin} = 2a_i P_{imin} + b_i$$

$$\lambda_{imax} = 2a_i P_{imax} + b_i$$

καθώς και να αρχικοποιήσουμε και τον αλγόριθμο στις τιμές:

$$\begin{aligned}
 P_i[0] &= \frac{P_D}{n} \\
 \lambda_i[0] &= 2a_i P_i[0] + b_i \\
 DP_i[0] &= P_{Di} - P_i[0]
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Ξεκινώντας από αυτές τις τιμές ο ελεγκτής κάθε μονάδας θα υπολογίζει τις νέες τιμές της ισχύος, την οποία πρέπει να παράγει κάθε μονάδα. Έτσι, ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό των λ_i , P_i και DP_i , σύμφωνα με τους κανόνες:

1. $\lambda_i[k + 1] = \sum_j d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i[k]$
2. $P_i[k + 1] = \begin{cases} P_{imin}, & \text{όταν } \lambda_i < \lambda_{imin} \\ \frac{\lambda_i[k+1] - b_i}{2a_i}, & \text{όταν } \lambda_{imin} < \lambda_i < \lambda_{imax} \\ P_{imax}, & \text{όταν } \lambda_i > \lambda_{imax} \end{cases}$
3. $DP_i[k + 1] = \sum_j d_{ij} DP_j[k] - (P_i[k + 1] - P_i[k])$

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ο συντελεστής ε αποτελεί μια θετική σταθερά, η οποία όταν είναι αρκετά μικρή μπορεί να εγγυηθεί τη σύγκλιση του αλγορίθμου στη λύση που θα προέκυπτε από την επίλυση του προβλήματος της κλασικής οικονομικής κατανομής. Αργότερα, κατά την υλοποίηση των αλγορίθμων θα αναπτύξουμε και αναλυτικότερα πώς γίνεται η επιλογή της σταθεράς σύγκλισης ε .

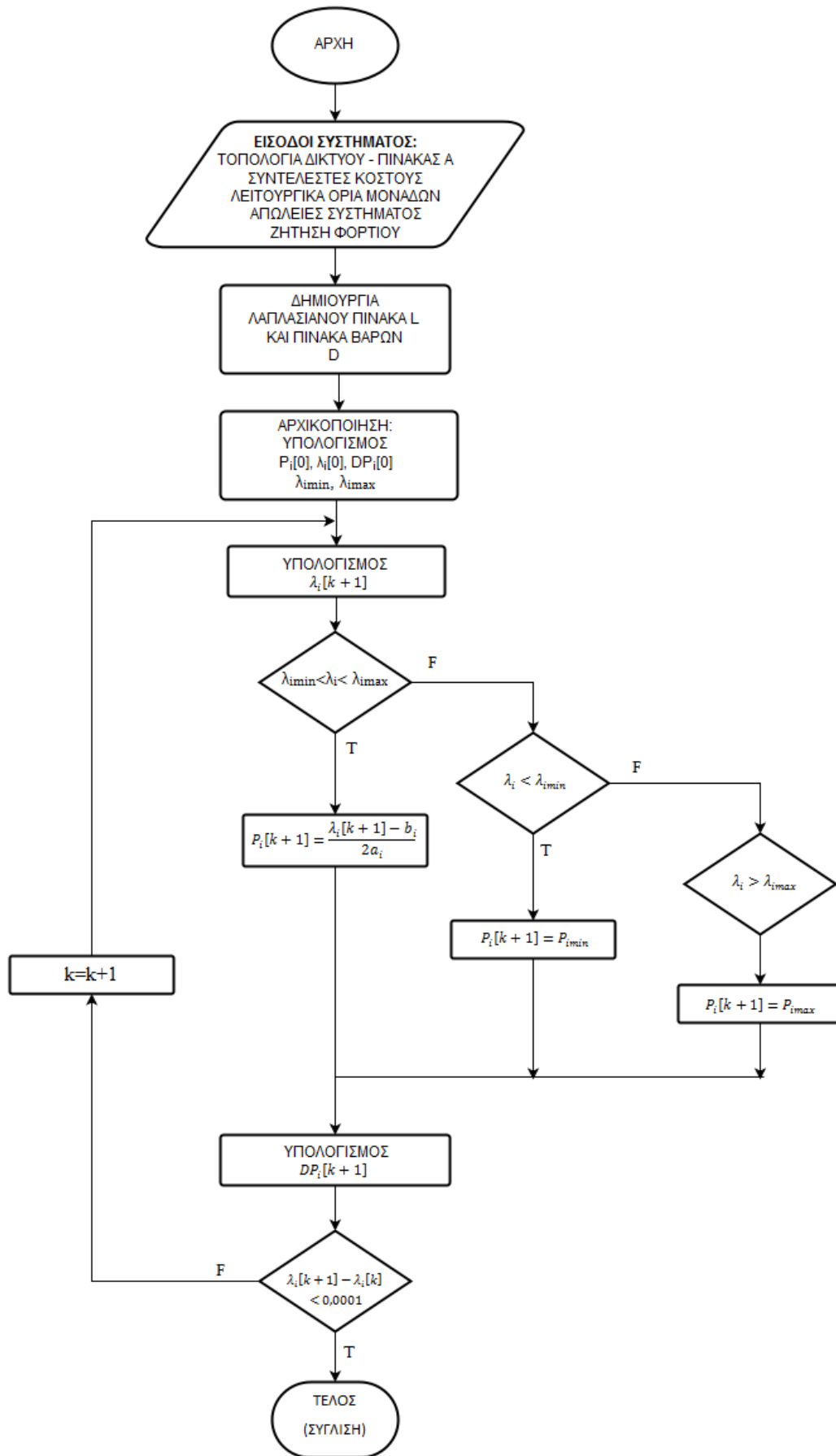
Η επαναληπτική αυτή διαδικασία θα τερματιστεί όταν θα καλύπτεται το συνολικό φορτίο από την παραγωγή των μονάδων του δικτύου και το οριακό κόστος θα έχει φτάσει να συγκλίνει σε μία κοινή τιμή λ για όλες τις μονάδες. Ο έλεγχος αυτός θα γίνεται μέσω του κριτηρίου:

$$\lambda_i[k + 1] - \lambda_i[k] < 0,0001
 \tag{5.2}$$

Δηλαδή θεωρούμε ότι όταν δύο διαδοχικές τιμές του οριακού κόστους σε όλες τις μονάδες έχουν ικανοποιητικά μικρή διαφορά μεταξύ τους, τότε έχει επιτευχθεί σύγκλιση.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία αποθηκεύονται σε κάθε επανάληψη με τη χρήση πινάκων, τους οποίους η κάθε μονάδα προσπελαύνει με τη χρήση του πίνακα d , ο οποίος έχει μη μηδενικά στοιχεία μόνο σε θέσεις, όπου οι αντίστοιχες μονάδες έχουν δυνατότητα επικοινωνίας, δηλαδή γειτνιάζουν. Έτσι, έχουμε ανταλλαγή πληροφοριών αποκλειστικά μεταξύ γειτόνων και ο αλγόριθμός μας είναι τελείως κατανεμημένος.

Συνοπτικά, μπορούμε να εκφράσουμε την παραπάνω διαδικασία μέσω του ακόλουθου διαγράμματος ροής.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου

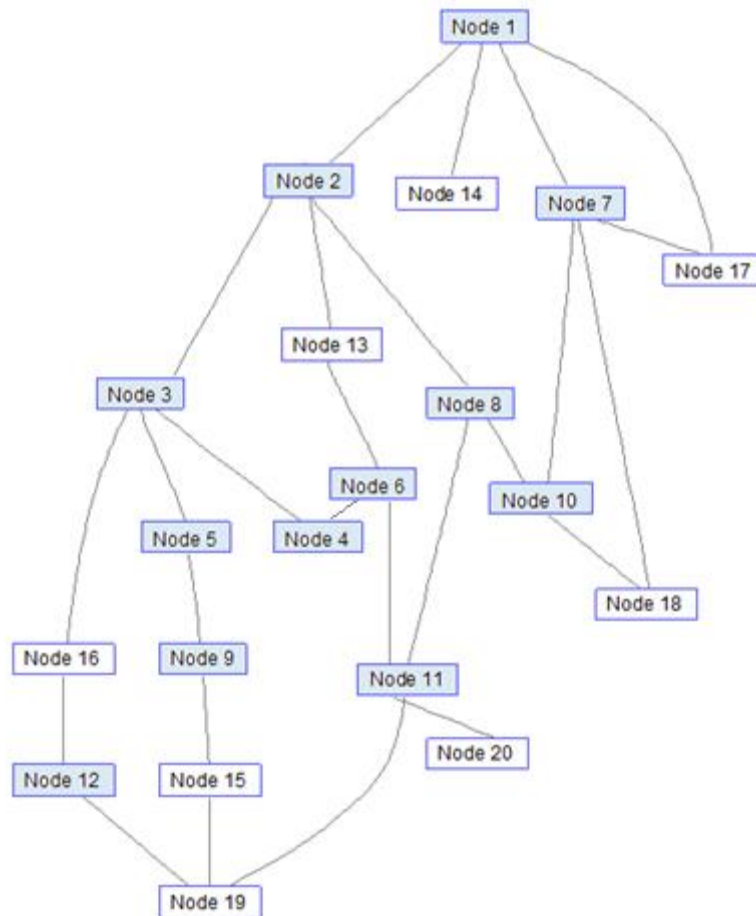
5.2 Μελέτη Προβλήματος Χωρίς Απώλειες Μεταφοράς

Αρχικά, θα μελετήσουμε το πρόβλημα αμελώντας τις απώλειες μεταφοράς. Έτσι, θεωρούμε ότι οι μονάδες καλούνται να καλύψουν μόνο την εκάστοτε ζήτηση φορτίου. Δηλαδή, θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$$P_D = \sum_i^n P_{Gi} \quad (5.3)$$

Αυτή η σχέση επηρεάζει τον υπολογισμό του power mismatch και με αυτό τον τρόπο υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μας. Όταν δεν έχουμε απώλειες, το DP_i υπολογίζεται όπως δείξαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου ας θεωρήσουμε ένα απλουστευμένο δίκτυο μεταφοράς 20 ζυγών, μεταξύ των οποίων υπάρχουν 12 θερμικές μονάδες παραγωγής. Οι γραμμές που συνδέουν τους ζυγούς του συστήματος θεωρούνται ότι έχουν μηδενική αντίσταση και άρα δεν επιφέρουν απώλειες κατά τη μεταφορά. Οι άλλοι ζυγοί θα αποτελούν υποσταθμούς ζεύξης με άλλα τέτοια δίκτυα και υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων. Τέλος, ας θεωρήσουμε ότι το συνολικό φορτίο που καλείται να καλύψει το σύστημα είναι $P_D = 2000MW$. Η τοπολογία του δικτύου αυτού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου οι μονάδες παραγωγής βρίσκονται στους επισημασμένους κόμβους.

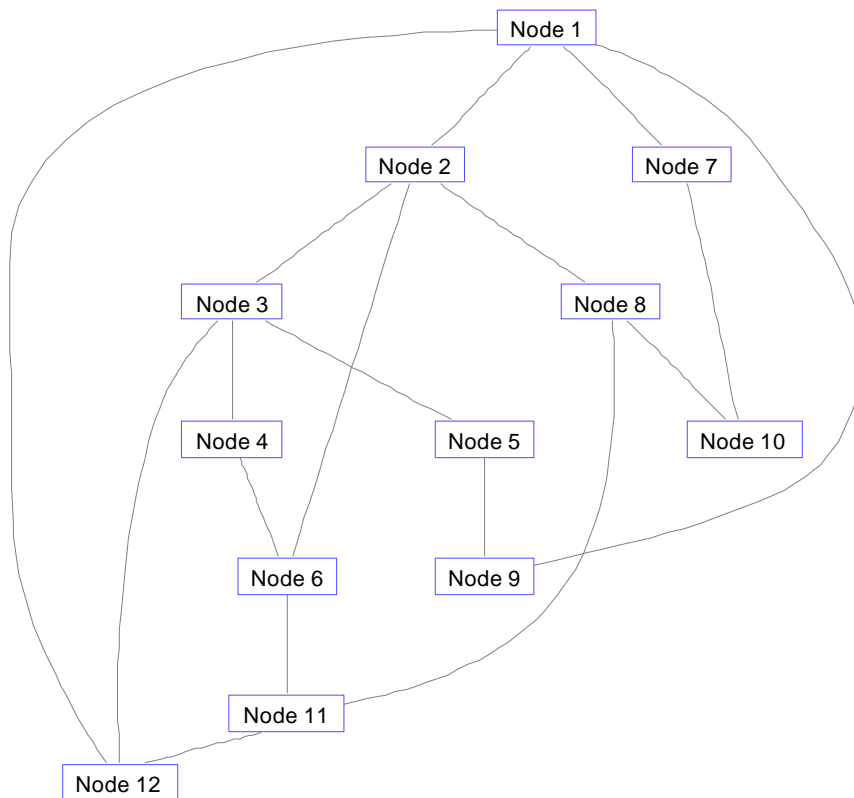


Σχήμα 5.2: Γράφος Δικτύου 20 κόμβων

Έτσι, ο πίνακας γειτνίασης του παραπάνω δικτύου σύμφωνα με τον γράφο του σχήματος 5.2 θα είναι:

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

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο της συντομότερης διαδρομής στο γράφο του δικτύου μπορούμε να καταλήξουμε στο γράφο των γεννητριών, ο οποίος θα είναι:



Σχήμα 5.2: Γράφος Γεννητριών Δικτύου 20 κόμβων

Τώρα, μπορούμε να εκφράσουμε και τον πίνακα γειτνίασης των μονάδων, ως:

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

Από αυτόν προκύπτει και ο Λαπλασιανός πίνακας, σύμφωνα με όσα έχουμε ήδη περιγράψει, ως:

$$L = \begin{bmatrix} 5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 5 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 5 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 4 \end{bmatrix}$$

Τελικά, μπορούμε να υπολογίσουμε και τον πίνακα d που χρειαζόμαστε για την αποκεντρωμένη επίλυση του προβλήματος. Αυτός θα είναι

$$d = \begin{bmatrix} 1/5 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 1/5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/5 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 \\ 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 1/3 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 0 & 1/4 & 1/4 \\ 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix}$$

Βλέπουμε ότι ο πίνακας d περιέχει βάρη μόνο στις θέσεις όπου οι γεννήτριες επικοινωνούν και έτσι κατά την επαναληπτική διαδικασία θα λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τοπικές πληροφορίες του συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε γραμμή του πίνακα d πολλαπλασιάζεται με μία στήλη του πίνακα λ στην σχέση (4.10) για τον υπολογισμό του οριακού κόστους κάθε μονάδας σε κάθε επανάληψη. Ακόμα παρατηρούμε ότι το άθροισμα κάθε γραμμής, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ισούται με τη μονάδα.

Ακόμα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία των γεννητριών που χρειάζονται για την επίλυση. Έστω ότι οι γεννήτριές μας έχουν συντελεστές κόστους οι οποίοι εκφράζονται μέσω των παρακάτω πινάκων και επιλέχθηκαν τυχαία με γνώμονα το σύνηθες εύρος αυτών.[13]

$$a = \begin{bmatrix} 0,0021 \\ 0,0019 \\ 0,0035 \\ 0,0015 \\ 0,0041 \\ 0,00193 \\ 0,0022 \\ 0,0034 \\ 0,0012 \\ 0,0039 \\ 0,0018 \\ 0,0015 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 7,5 \\ 8,1 \\ 7,92 \\ 7,23 \\ 7,67 \\ 7,352 \\ 7,642 \\ 8,01 \\ 7,912 \\ 7,85 \\ 7,852 \\ 7,658 \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 550 \\ 309 \\ 307 \\ 240 \\ 240 \\ 240 \\ 240 \\ 240 \\ 240 \\ 126 \\ 126 \\ 126 \end{bmatrix}$$

Ακόμα, απαραίτητα είναι και τα όρια λειτουργίας των γεννητριών, τα οποία θα εκφράσουμε πάλι μέσω πινάκων. Έστω ότι είναι:

$$P_{min} = \begin{bmatrix} 50 \\ 25 \\ 35 \\ 22,5 \\ 55 \\ 25 \\ 35 \\ 42,5 \\ 27,5 \\ 40 \\ 25 \\ 30 \end{bmatrix}, \quad P_{max} = \begin{bmatrix} 450 \\ 350 \\ 400 \\ 225 \\ 400 \\ 375 \\ 300 \\ 500 \\ 200 \\ 275 \\ 350 \\ 250 \end{bmatrix}$$

Αυτά εκφράζουν τα δυνατά όρια παραγωγής ισχύος των γεννητριών και είναι σε MW.

Έχοντας ορίσει τα παραπάνω, μπορούμε ώρα να δούμε αναλυτικά πως επιλύει ο κάθε αλγόριθμος το πρόβλημα που αναπτύξαμε.

5.2.1 Γραμμικός Αλγόριθμος (Linear Algorithm)

Ο γραμμικός αλγόριθμος αποτελεί ακριβώς τη μεθοδολογία που αναπτύξαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Ονομάζεται γραμμικός γιατί ο κανόνας ανανέωσης του οριακού κόστους εκφράζεται ως γραμμική σχέση ως προς τα οριακά κόστη των γειτόνων, μέσω της σχέσης (4.10), δηλαδή:

$$\lambda_i[k + 1] = \sum_j d_{ij} \lambda_j[k] + \varepsilon DP_i[k]$$

και το power mismatch θα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.9):

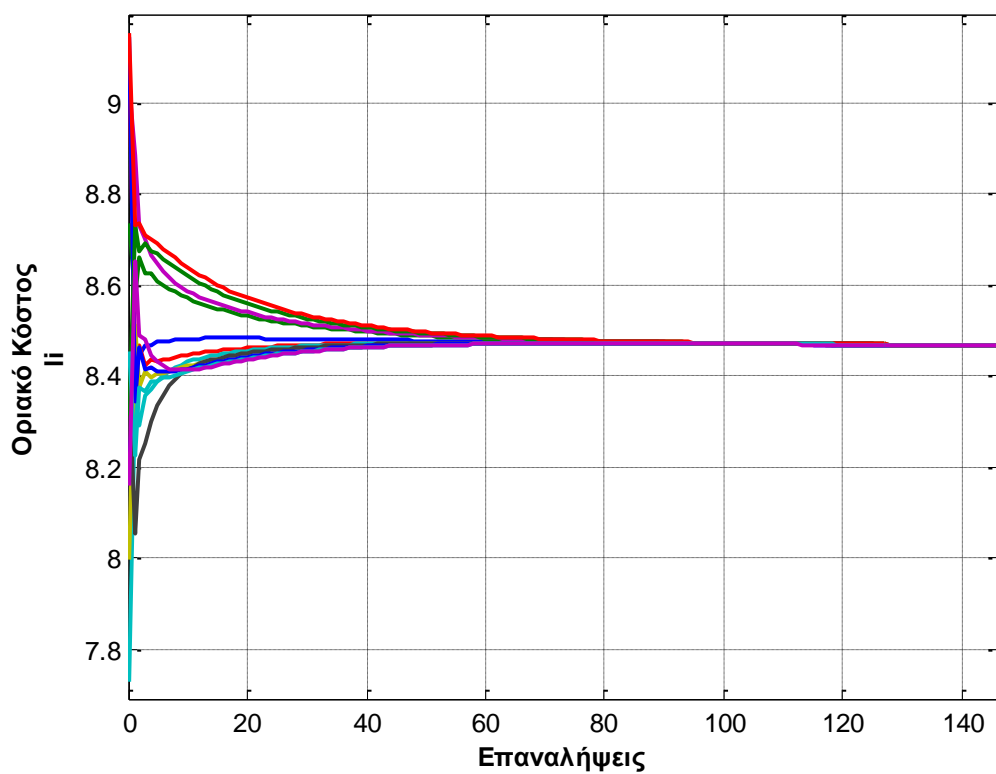
$$DP_i[k + 1] = \sum_j d_{ij} DP_j[k] - (P_i[k + 1] - P_i[k])$$

Με αυτή την υλοποίηση προκύπτει η παρακάτω κατανομή φορτίου:

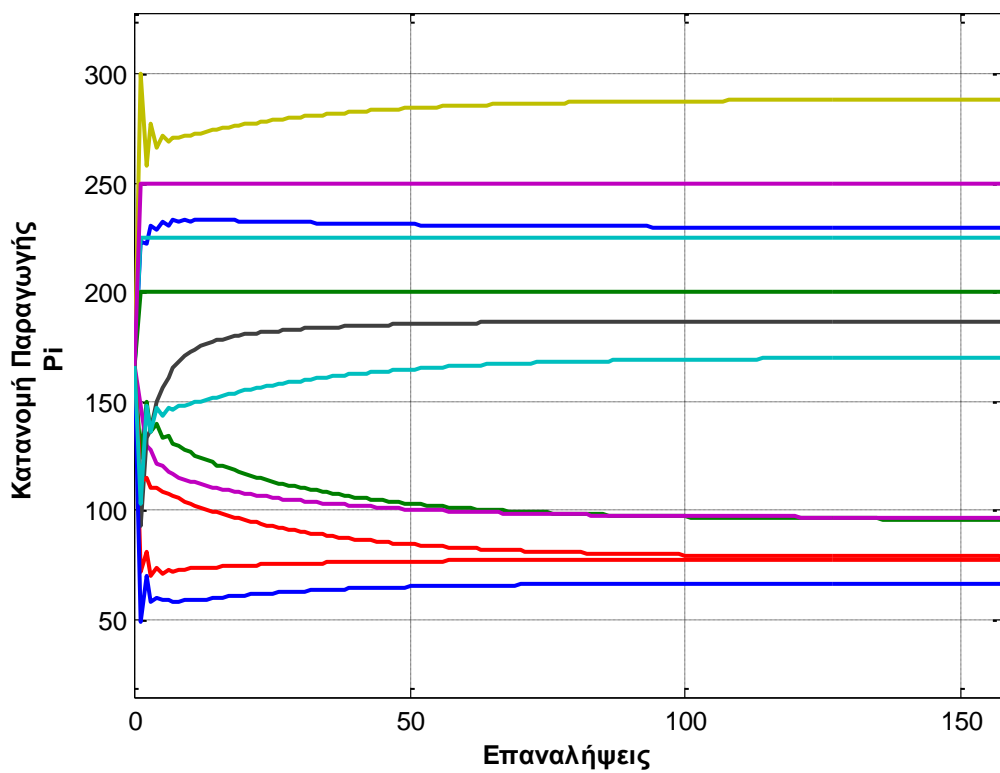
$$P_G = \begin{bmatrix} 229,6655 \\ 95,9546 \\ 77,7965 \\ 225 \\ 96,9064 \\ 288,2281 \\ 186,95 \\ 66,8493 \\ 200 \\ 78,8016 \\ 170,1539 \\ 250 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι γεννήτριες 4, 9 και 12 έχουν καταλήξει στα άνω επιτρεπτά όρια λειτουργίας.

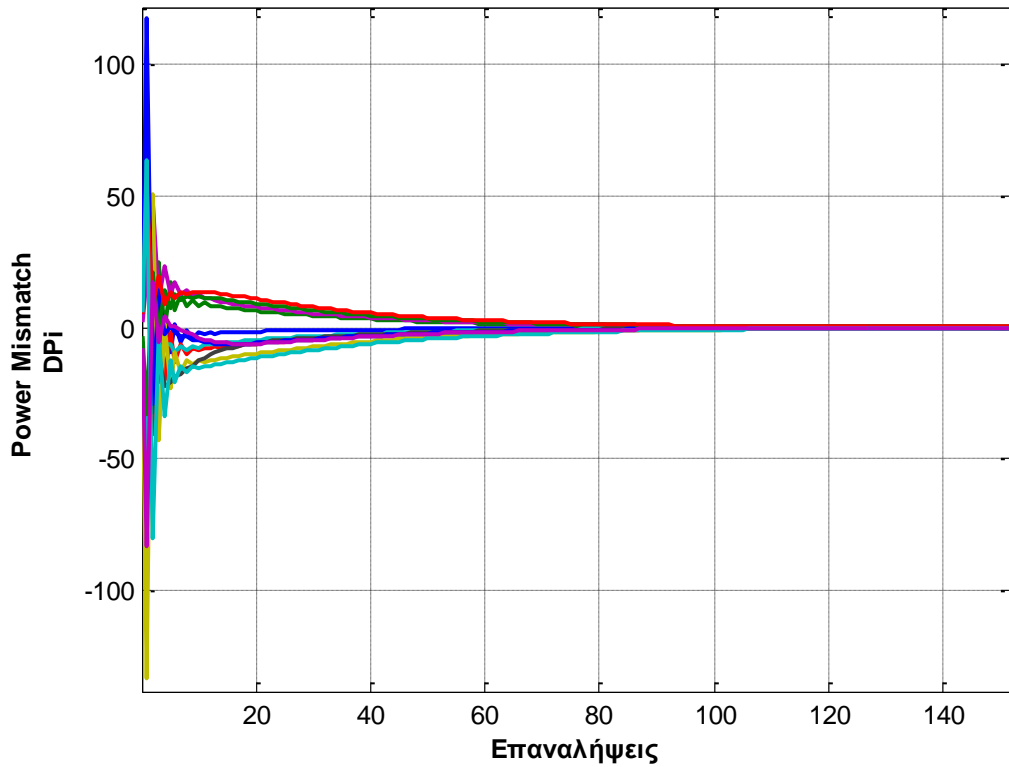
Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου και της επαναληπτικής διαδικασίας προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου. Όπως παρατηρούμε σε αυτά, ουσιαστικά μετά την εκατοστή επανάληψη επιτυγχάνεται σύγκλιση του οριακού κόστους στην τιμή 8,4646€/MWh, με την παραπάνω κατανομή φορτίου στις γεννήτριες. Ακόμα, βλέπουμε ότι δεν έχουμε έντονα φαινόμενα ταλάντωσης των τιμών που υπολογίζουμε και τελικά η λύση προσεγγίζεται ομαλά. Τέλος, το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει στο μηδέν, όπως απαιτείται για την κάλυψη της παραγωγής.



Σχήμα 5.3: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.4: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.5: Power Mismatch Κόμβων

Τώρα, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος παραγωγής το οποίο προκύπτει μέσω των συναρτήσεων κόστους κάθε γεννήτριας ως $C_{tot} = \sum C_i = 2737\text{€/h}$.

Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα υπολογιστεί μέσω του τύπου:

$$DP_{tot} = \frac{(\sum P_{Gi} - P_d)}{P_d} * 100\% \quad (5.4)$$

Έτσι στην περίπτωση μας έχουμε ένα power mismatch της τάξεως του 1,7%.

5.2.2 Αλγόριθμος Kuramoto (Kuramoto Algorithm)

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στο μοντέλο που ανέπτυξε ο Yoshiki Kuramoto για τον συγχρονισμό ενός συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση συζευγμένων ταλαντωτών, ο καθένας από τους οποίους λειτουργεί σε μία φυσική συχνότητα ω_i . Η εξέλιξη αυτών των ταλαντωτών περιγράφεται με τη χρήση των ακόλουθων διαφορικών εξισώσεων[24]:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij} \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \quad (5.5)$$

όπου $\theta_i(t)$ είναι η παρούσα κατάσταση του i -οστού ταλαντωτή και $\omega_i = \theta_i(0)$. Οι συντελεστές a_{ij} εκφράζουν την σύζευξη των ταλαντωτών i και j μεταξύ τους. Με τη χρήση αυτής της σχέσης μπορεί τελικά να επιτευχθεί συγχρονισμός όλων των ταλαντωτών σε μία κοινή τιμή συχνότητας ίση με το σταθμισμένο μέσο όρο των μεταβλητών κατάστασης, χωρίς την ανάγκη κέντρου ελέγχου. Έτσι, αν θεωρήσουμε ως την υπό μελέτη μεταβλητή το οριακό κόστος λ_i αντί για τη συχνότητα, θα μπορούσαμε να προσαρμόσουμε την παραπάνω σχέση στο πρόβλημα που μελετάμε.

Για να κάνουμε χρήση όμως της σχέσης στην επαναληπτική μας διαδικασία θα πρέπει από το συνεχή χρόνο να την μετατρέψουμε σε σχέση διακριτού χρόνου. Για να επιτευχθεί αυτό θα κάνουμε χρήση του κανόνα Euler για μετατροπή από συνεχή στο διακριτό χρόνο. [25] Σύμφωνα με αυτόν ισχύει:

$$\dot{x}_i \rightarrow \frac{x_i(k+1) - x_i(k)}{T} \quad (5.6)$$

Εφαρμόζοντας λοιπόν αυτόν στον κανόνα αυτό στην (5.5), θεωρώντας τώρα ως μεταβλητή το οριακό κόστος, τότε ο κανόνας ανανέωσης του οριακού κόστους προκύπτει ως μία σχέση ημιτονοειδής μορφής ως προς τα οριακά κόστη των γειτόνων και της εκάστοτε μονάδας της μορφής:

$$\lambda_i[k+1] = \sum_j \{d_{ij} \sin(\lambda_j[k] - \lambda_i[k])\} + \lambda_i[k] + \varepsilon DP_i[k] \quad (5.7)$$

και αντίστοιχα η έκφραση υπολογισμού του power mismatch γίνεται:

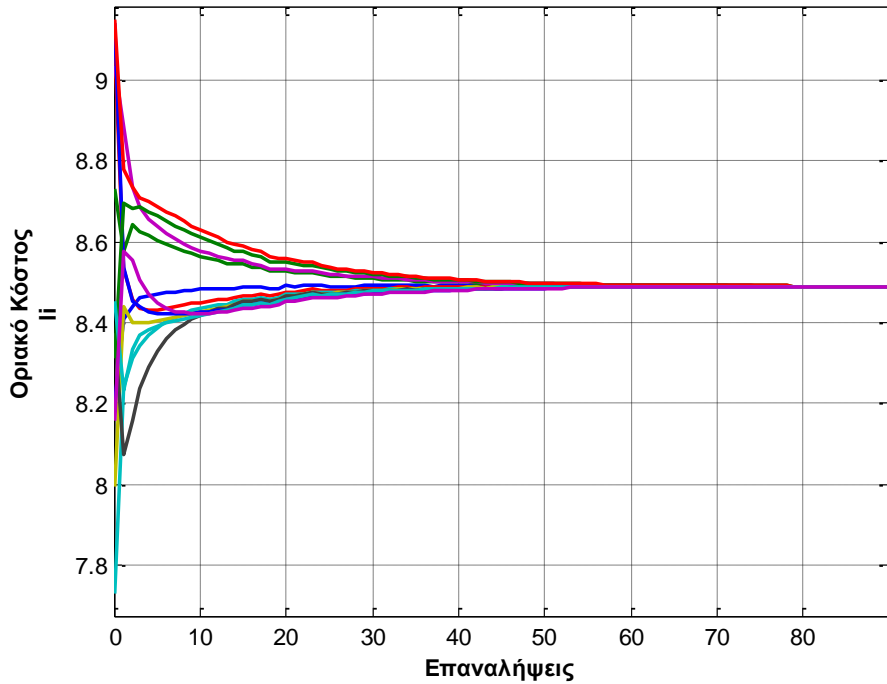
$$DP_i[k+1] = \sum_j \{d_{ij} \sin(DP_j[k] - DP_i[k])\} + DP_i[k] - (P_i[k+1] - P_i[k]) \quad (5.8)$$

Με αυτή την υλοποίηση, ο αλγόριθμος καταλήγει στην παρακάτω κατανομή φορτίου:

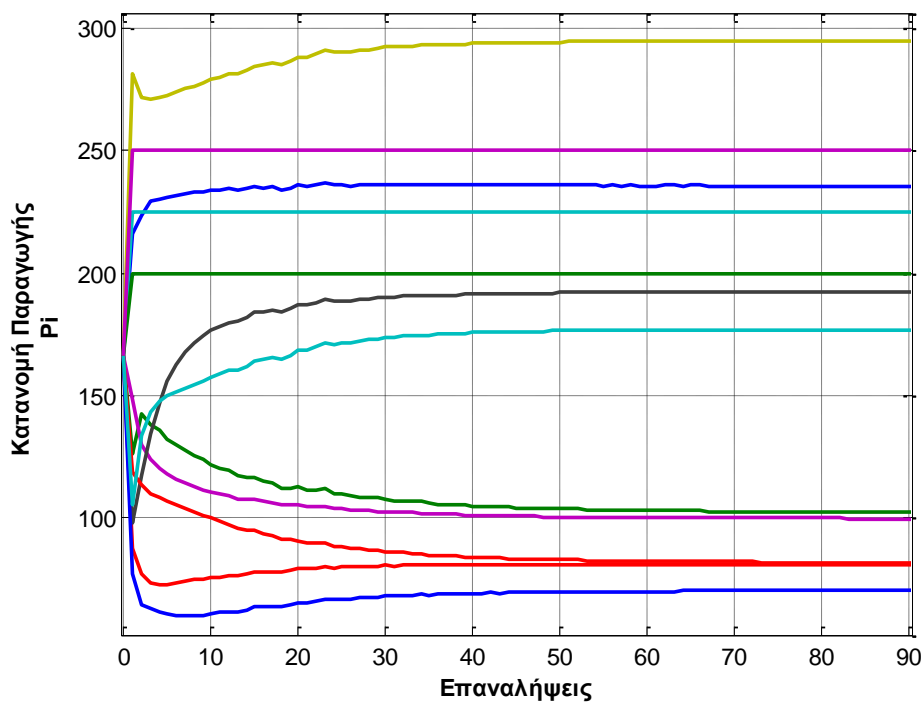
$$P_G = \begin{bmatrix} 235,4693 \\ 102,3687 \\ 81,2807 \\ 225 \\ 99,8788 \\ 294,5494 \\ 192,4869 \\ 70,4313 \\ 200 \\ 81,9264 \\ 176,9330 \\ 250 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW.

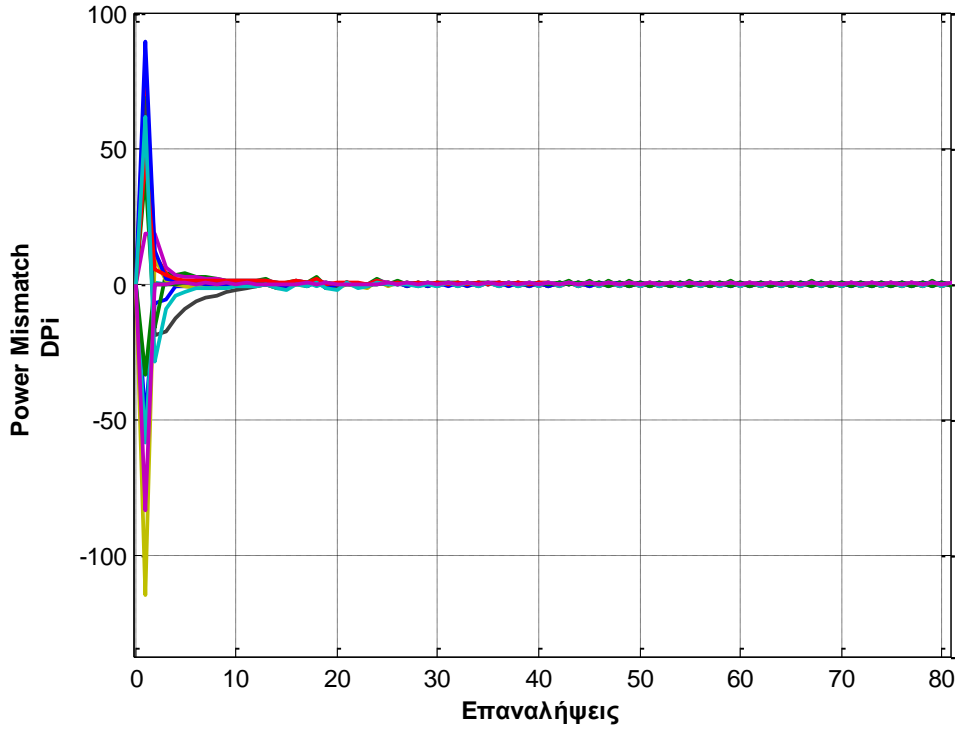
Αντίστοιχα με πριν, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου. Σε αυτή την υλοποίηση η σύγκλιση του οριακού κόστους επιτυγχάνεται μετά την 60^{στη} περίπου επανάληψη στην τιμή 8,489€/MWh, με την παραπάνω κατανομή φορτίου στις γεννήτριες. Τέλος, το power mismatch κάθε κόμβου βλέπουμε ότι συγκλίνει πάλι στο μηδέν, οπότε επιτυγχάνεται κάλυψη της παραγωγής.



Σχήμα 5.6: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.7: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.8: Power Mismatch Κόμβων

Αντίστοιχα, το συνολικό κόστος παραγωγής προκύπτει στην περίπτωση αυτή:

$$C_{tot} = \sum C_i = 19112\text{€/h.}$$

Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.4) της τάξεως του 0,5%.

5.2.3 Μη Γραμμικός Αλγόριθμος (Non-Linear Algorithm)

Ο μη γραμμικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε δοκιμάζοντας πως συμπεριφέρεται ο αλγόριθμος στην περίπτωση μιας μη γραμμικής σχέσης για τον κανόνα ανανέωσης του οριακού κόστους. Θεωρήσαμε έναν κανόνα ανανέωσης ο οποίος εκφράζεται με χρήση εκθετικών όρων ως προς τα οριακά κόστη των γειτόνων και της εκάστοτε μονάδας, καθώς στην εργασία των V. Loia και A. Vaccaro [9] χρησιμοποιείται μία εκθετική συνάρτηση για τον υπολογισμό της συναίνεσης. Ύστερα από δοκιμές, καταλήξαμε στον παρακάτω τύπο ανανέωσης:

$$\lambda_i[k+1] = \sum_j \{d_{ij} [\exp(\lambda_j[k] - \lambda_i[k]) - 1] / [\exp(\lambda_j[k] - \lambda_i[k]) + 1]\} + \varepsilon DP_i[k] \quad (5.9)$$

και αντίστοιχα η έκφραση υπολογισμού του power mismatch θα είναι:

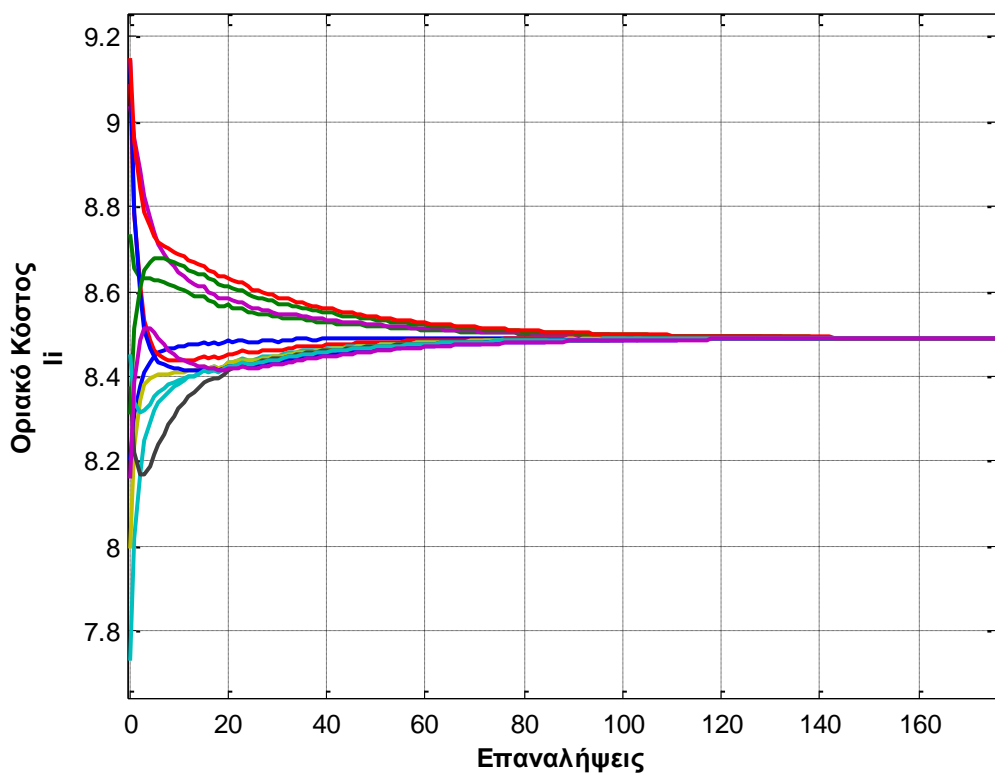
$$DP_i[k+1] = \sum_j \{d_{ij} [\exp(DP_j[k] - DP_i[k]) - 1] / [\exp(DP_j[k] - DP_i[k]) + 1]\} - (P_i[k+1] - P_i[k]) \quad (5.10)$$

Με αυτή την υλοποίηση προκύπτει η παρακάτω κατανομή φορτίου:

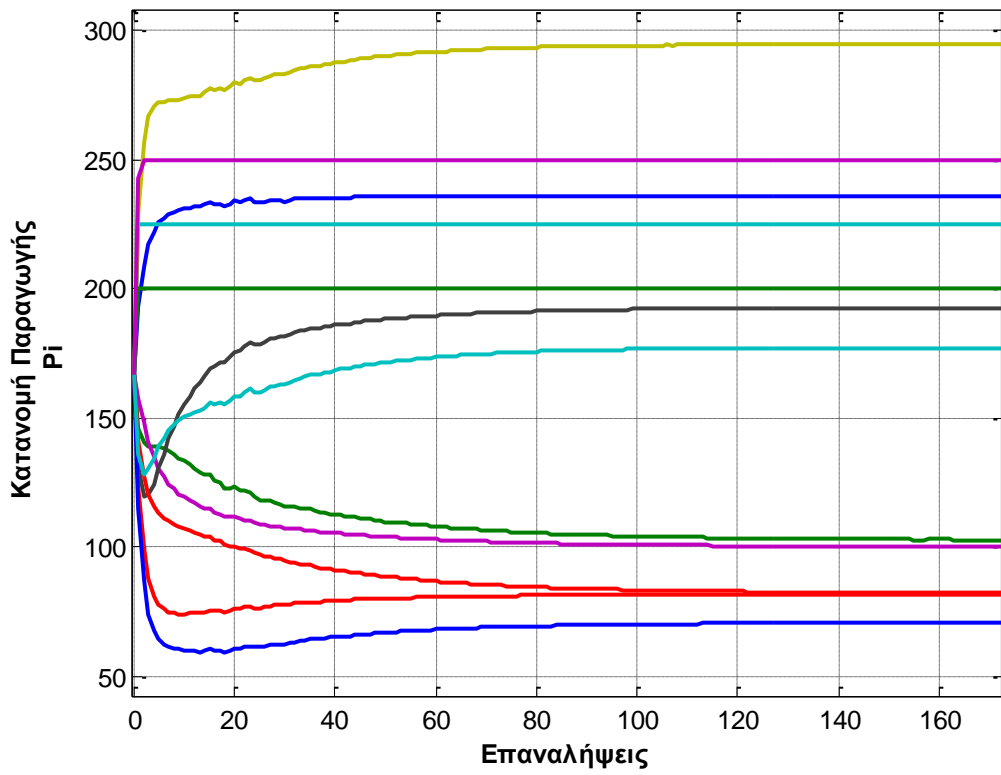
$$P_G = \begin{bmatrix} 235,3706 \\ 102,2596 \\ 81,2216 \\ 225 \\ 99,8282 \\ 294,4422 \\ 192,3927 \\ 70,3703 \\ 200 \\ 81,8732 \\ 176,8181 \\ 250 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW.

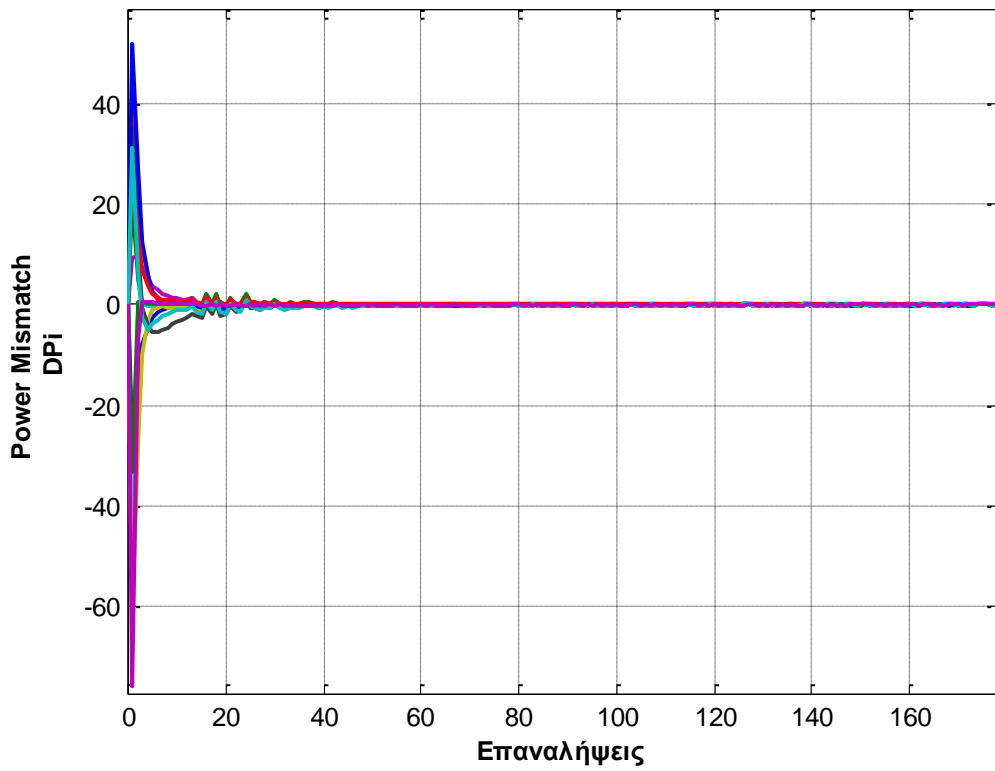
Τα διαγράμματα που προκύπτουν σε αυτή την περίπτωση για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου φαίνονται στη συνέχεια. Η σύγκλιση του οριακού κόστους επιτυγχάνεται μετά την 120^{στη} επανάληψη στην τιμή 8,4886€/MWh, με την παραπάνω κατανομή φορτίου στις γεννήτριες και το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει πάλι στο μηδέν, οπότε επιτυγχάνεται η κάλυψη της παραγωγής.



Σχήμα 5.9: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.10: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.11: Power Mismatch Κόμβων

Το συνολικό κόστος παραγωγής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει:

$$C_{tot} = \sum C_i = 19106\text{€}/h.$$

Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.4) της τάξεως του 0,5%.

5.2.4 Σύγκριση Αλγορίθμων

Για να δούμε κατά πόσο οι υλοποιήσεις που πραγματοποιήσαμε προσεγγίζουν τη λύση που θα προέκυπτε αν λύναμε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την ως τώρα γνωστή κεντρική μεθοδολογία, θα χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση *quadprog*. Αυτή αποτελεί μία συνάρτηση του MATLAB, η οποία εκτελεί κεντρική βελτιστοποίηση τετραγωνικού προγραμματισμού και χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Θέτοντας ως εισόδους της συνάρτησης τη δική μας αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του προβλήματός μας, θα μπορέσει να μας δώσει τη λύση του προβλήματος που μελετάμε.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το παραπάνω δίκτυο για την παραγωγή των μονάδων μέσω της *quadprog* και των αλγορίθμων που υλοποιήσαμε, καθώς και ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για τον τερματισμό του αλγόριθμου.:

Παραγωγή Γεννητριών (MW)				
Γεννήτρια	quadprog	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	234,0224	229,6655	235,4693	235,3706
2	100,3456	95,9546	102,3687	102,2596
3	80,2135	77,7965	81,2807	81,2216
4	225	225	225	225
5	100,67	96,9064	99,8788	99,8282
6	293,4559	288,2281	294,5494	294,4422
7	191,976	186,95	192,4869	192,3927
8	69,1544	66,8493	70,4313	70,3703
9	200	200	200	200
10	79,1916	78,8016	81,9264	81,8732
11	175,9706	170,1539	176,9330	176,8181
12	250	250	250	250

Πίνακας 1: Παραγωγή Γεννητριών

	quadprog	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
Επαναλήψεις	-	152	119	243
Λάμδα	8,1237	8,4646	8,489	8,4886

Πίνακας 2: Απαιτούμενες Επαναλήψεις - Λάμδα

Από την παραπάνω μελέτη μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και οι 3 τρόποι προσεγγίζουν τη λύση με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και προκύπτει ένα ικανοποιητικά μικρό power mismatch στο δίκτυο. Από τους 3 αυτός με τις πιο ομαλές μεταβολές είναι ο μη γραμμικός αλγόριθμος, ενώ με τις πιο έντονες είναι ο αλγόριθμος Kuramoto. Ακόμα, αυτός που απαιτεί το μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση είναι ο μη γραμμικός αλγόριθμος.

Παρακάτω βλέπουμε και το μέγεθος των σφαλμάτων των αλγορίθμων. Το μικρότερο σφάλμα στην κάλυψη της παραγωγής το παρουσιάζει ο μη γραμμικός αλγόριθμος.

Σχετικά Σφάλματα (%)			
Γεννήτρια	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	-1,86%	0,62%	0,58%
2	-4,38%	2,02%	1,91%
3	-3,01%	1,33%	1,26%
4	0,00%	0,00%	0,00%
5	-3,74%	-0,79%	-0,84%
6	-1,78%	0,37%	0,34%
7	-2,62%	0,27%	0,22%
8	-3,33%	1,85%	1,76%
9	0,00%	0,00%	0,00%
10	-0,49%	3,45%	3,39%
11	-3,31%	0,55%	0,48%
12	0,00%	0,00%	0,00%
Σύνολο	-1,68%	0,52%	0,48%

Πίνακας 3: Σχετικά Σφάλματα

5.3 Μελέτη Προβλήματος Με Απώλειες Μεταφοράς

Για να γίνει ακριβέστερη μελέτη της οικονομικής κατανομής του φορτίου, είναι ανάγκη να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς, μιας και οι μονάδες καλούνται να καλύψουν και αυτές προκειμένου να έχουμε σωστό ισοζύγιο ισχύος. Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση (3.17) θα πρέπει για την παραγωγή των μονάδων να ισχύει:

$$P_D + P_L - \sum_i^n P_{Gi} = 0$$

Όπως αναλύθηκε και στην παράγραφο 3.4 αυτής της εργασίας, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό των απωλειών των γραμμών. Ο υπολογισμός τους γίνεται κατανεμημένα, εφόσον για αυτόν απαιτείται μόνο τοπική γνώση των γραμμών και των μονάδων στις οποίες καταλήγουν. Στην παρούσα εργασία οι απώλειες υπολογίζονται μέσω της χρήσης του MATPOWER και της δυνατότητάς του για υπολογισμό της ροής φορτίου στις γραμμές και κατ' επέκταση των απωλειών. Αυτές τις τιμές τις αποθηκεύουμε σε έναν τετραγωνικό πίνακα P_L διαστάσεων $n \times n$, όπου n ο αριθμός των μονάδων στο σύστημα. Τα στοιχεία του πίνακα αυτού θα είναι 0 στη θέση (i,j) όταν τα στοιχεία i,j δεν επικοινωνούν, αλλιώς θα περιέχουν τις απώλειες της γραμμής που τα διασυνδέει. Έτσι, τώρα το άθροισμα κάθε γραμμής περιέχει το ποσό των απωλειών στις γραμμές που συνδέονται στον αντίστοιχο κόμβο και το άθροισμα των στοιχείων άνω ή αντίστοιχα κάτω της διαγωνίου του πίνακα ισούται με το σύνολο των απωλειών του συστήματος.

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς των μεγεθών μας πρέπει να εισαχθούν στην επαναληπτική διαδικασία. Αυτό θα γίνει ενσωματώνοντας τις απώλειες των γραμμών που συνδέονται σε κάθε κόμβο στο power mismatch του. Έτσι, συμμετέχουν τώρα στον αλγόριθμο συναίνεσης όλοι οι κόμβοι του δικτύου, και όχι μόνο των γεννητριών,

χρησιμοποιώντας αντίστοιχους ελεγκτές, ώστε να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους για τον κατανομημένο υπολογισμό των απωλειών. Έτσι η αρχικοποίηση αυτού κατά την έναρξη του αλγορίθμου θα δίνεται από την σχέση [23]:

$$\Delta P_i[0] = P_{Di}[0] + P_{Li} - P_{Gi}[0] \quad (5.11)$$

Με αυτό τον τρόπο, η παραγωγή θα προσαρμοστεί προκειμένου να εξαλείψει την διαφορά ισχύος ΔP και τελικά θα καλύψει και τις απώλειες. Όμως το δίκτυο περιέχει και ζυγούς στους οποίους δεν υπάρχουν μονάδες παραγωγής και έτσι αυτοί οι ζυγοί δε συμμετέχουν στον αλγόριθμο της οικονομικής κατανομής. Έτσι, για τις απώλειες των γραμμών που δε συνδέονται με κάποια μονάδα, θα υπολογίζονται κανονικά στους αντίστοιχους ζυγούς οι οποίοι θα έχουν και εκείνοι ένα σύστημα επικοινωνίας και θα στέλνουν τις δικές τους τιμές αντίστοιχα στους γειτονικούς κόμβους, για να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς.

Διατηρώντας τα στοιχεία του δικτύου που μελετήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το δίκτυο καλείται να καλύψει πάλι ένα συνολικό φορτίο της τάξεως των $P_D = 2000MW$ και τις απώλειες. Ακόμα με τα στοιχεία των γραμμών και για τη δεδομένη παραγωγή προκύπτει ο πίνακας απωλειών, με συνολικές απώλειες δικτύου $P_{Ltot} = 11,95MW$ οι οποίες θα πρέπει να καλυφθούν από την παραγωγή. Ας δούμε αναλυτικά πως επιλύει ο κάθε αλγόριθμος, αυτό το πιο πλήρες πρόβλημα.

5.3.1 Γραμμικός Αλγόριθμος (Linear Algorithm)

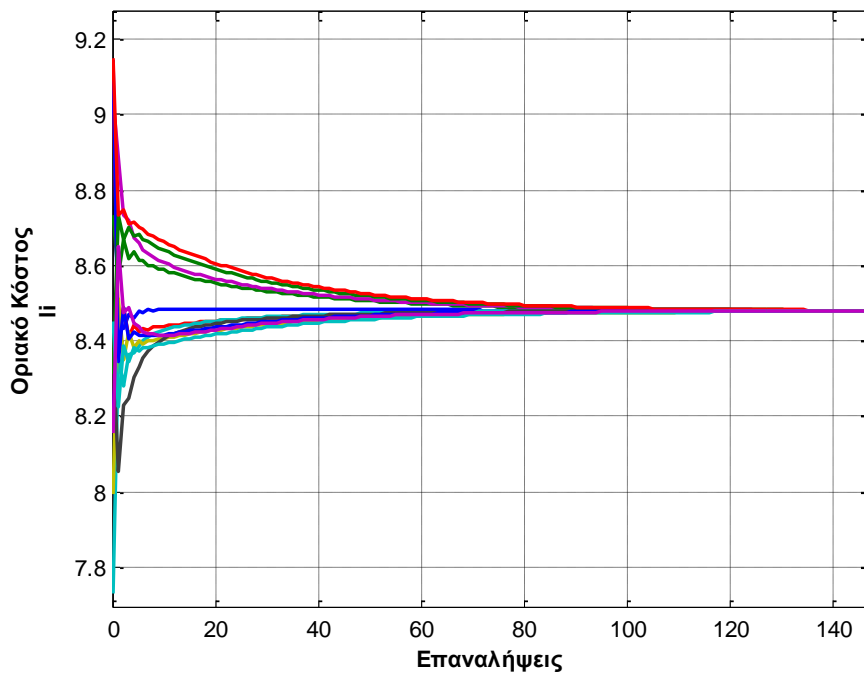
Αντίστοιχα με την εφαρμογή όπου αμελήσαμε τις απώλειες ο αλγόριθμος τώρα καταλήγει στην παρακάτω κατανομή φορτίου:

$$P_G = \begin{bmatrix} 233,0972 \\ 99,7474 \\ 79,8554 \\ 225 \\ 98,6641 \\ 291,9617 \\ 190,2261 \\ 68,9691 \\ 200 \\ 80,6494 \\ 174,1571 \\ 250 \end{bmatrix}$$

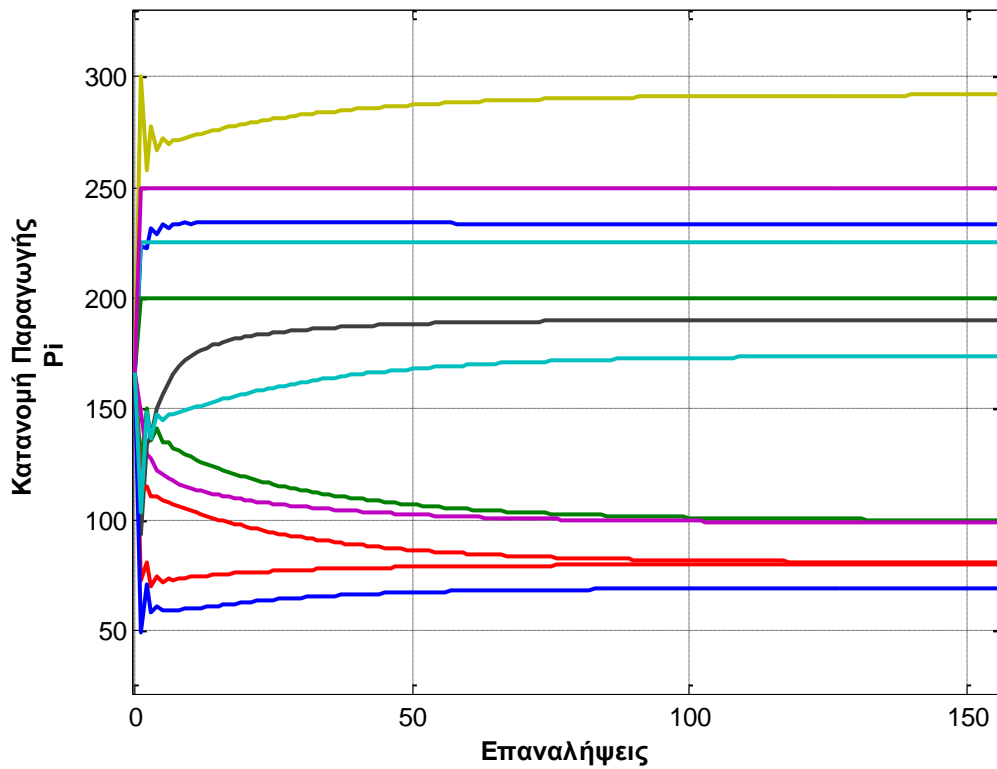
όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW. Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα που πήραμε από τον αλγόριθμο αμελώντας τις απώλειες, μπορούμε εύκολα να δούμε ότι η παραγωγή κάθε μονάδας έχει αυξηθεί λίγο προκειμένου να καλυφθούν σε αυτή την περίπτωση και οι απώλειες μεταφοράς.

Τα διαγράμματα για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου που προκύπτουν, παρουσιάζονται παρακάτω. Επιτυγχάνεται σύγκλιση του οριακού κόστους στην τιμή 8,479€/MWh, η οποία είναι λίγο πιο αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση χωρίς απώλειες, το οποίο είναι λογικό λόγω της αύξησης της

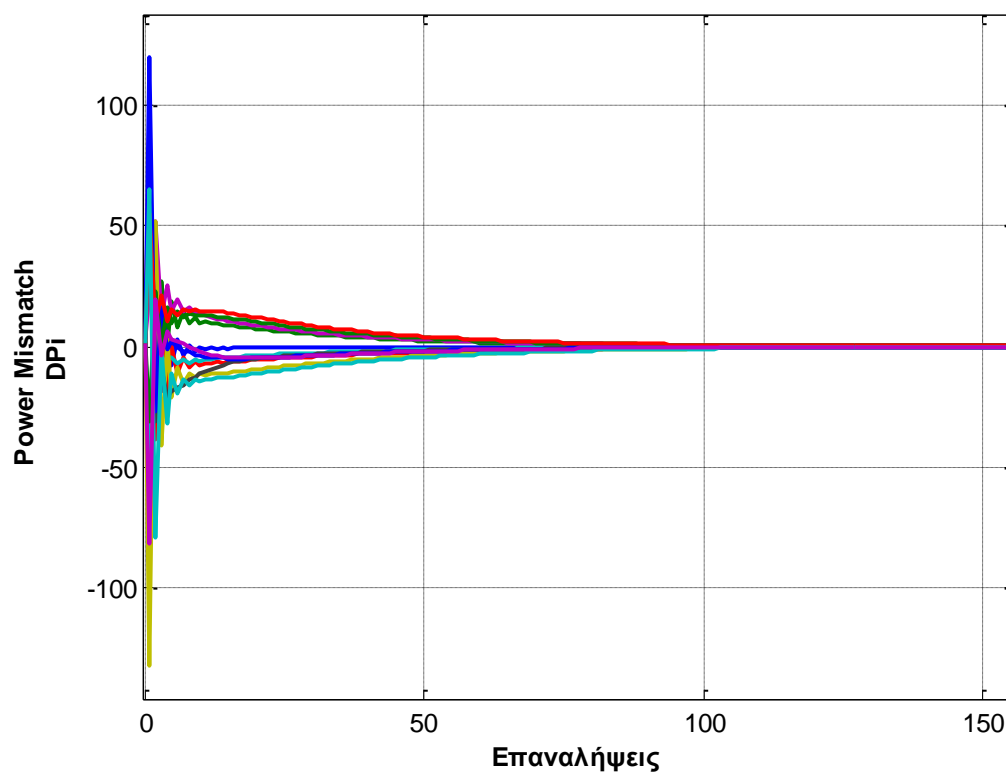
παραγωγής το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα θα λειτουργεί σε υψηλότερο οριακό κόστος. Ακόμα, το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει στο μηδέν, όπως απαιτείται για την κάλυψη της παραγωγής και των απωλειών.



Σχήμα 5.12: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.13: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.14: Power Mismatch Κόμβων

Το συνολικό κόστος παραγωγής το οποίο προκύπτει μέσω των συναρτήσεων κόστους κάθε γεννήτριας θα είναι $C_{tot} = \sum C_i = 18959\text{€/h}$.

Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος σε αυτή την περίπτωση θα υπολογιστεί μέσω του τύπου:

$$DP_{tot} = \frac{(\sum P_{Gi} - P_d - P_L)}{P_d + P_L} * 100\% \quad (5.12)$$

Έτσι στην περίπτωσή μας έχουμε ένα power mismatch της τάξεως του 0,2%, μικρότερο μάλιστα από την αντίστοιχη επίλυση αμελώντας τις απώλειες.

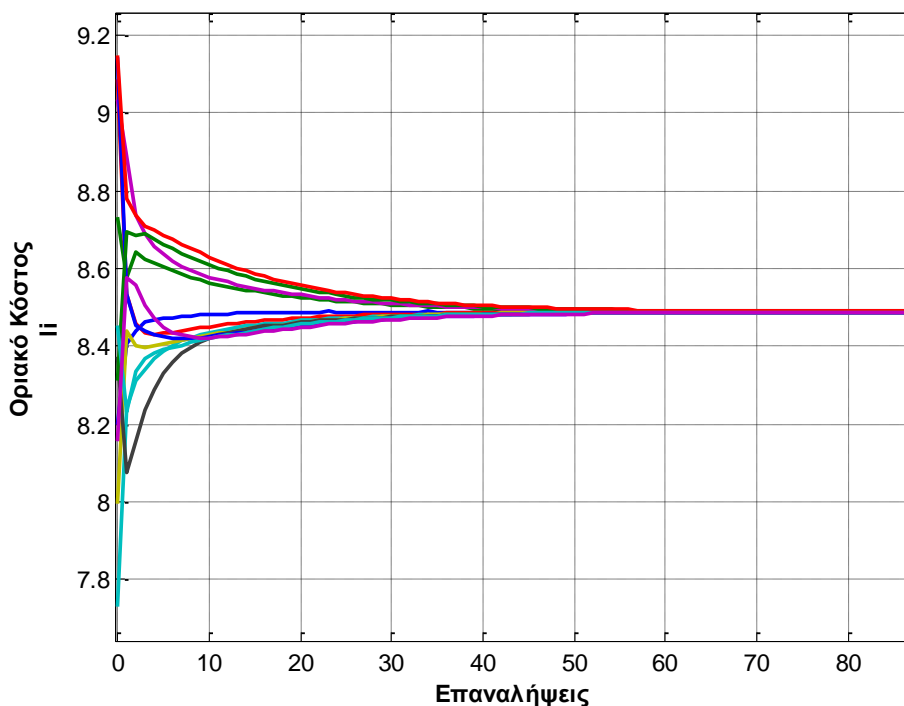
5.3.2 Αλγόριθμος Kuramoto (Kuramoto Algorithm)

Αντίστοιχα με αυτή την υλοποίηση καταλήγουμε τώρα στην παρακάτω κατανομή φορτίου:

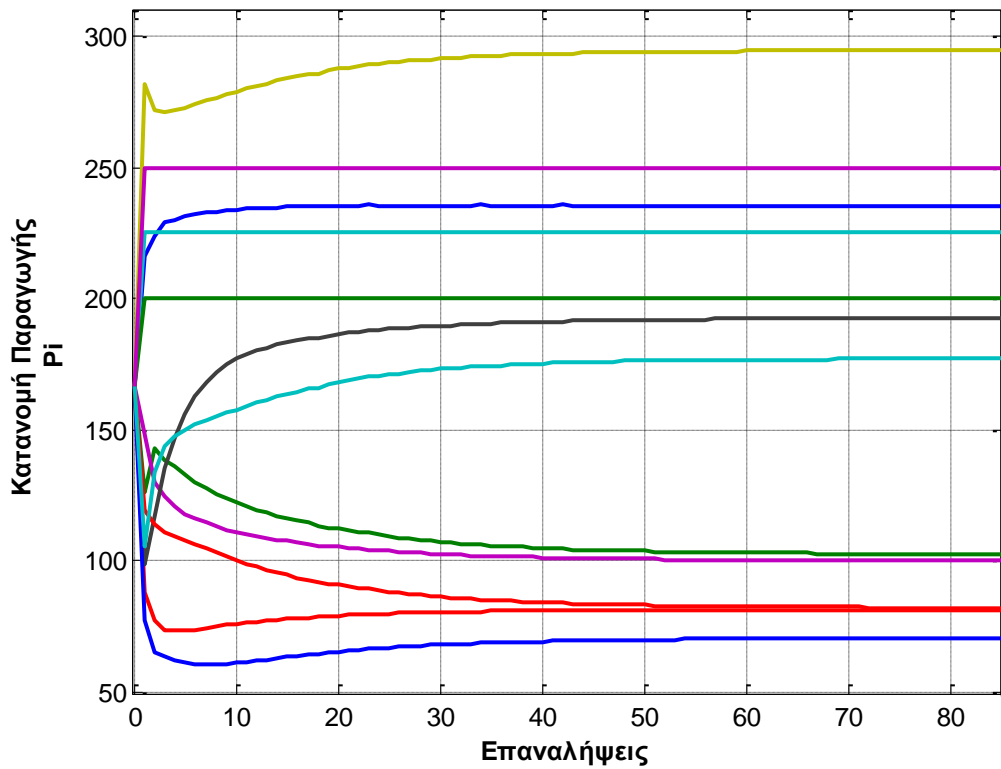
$$P_G = \begin{bmatrix} 235,4406 \\ 102,3371 \\ 812636 \\ 225 \\ 99,8641 \\ 2945183 \\ 192,4596 \\ 70,4136 \\ 200 \\ 81,9110 \\ 176,8996 \\ 250 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW. Παρατηρούμε ξανά ότι έχουμε μια μικρή αύξηση της παραγωγής κάθε μονάδας σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, προκειμένου να καλυφθούν και οι απώλειες μεταφοράς.

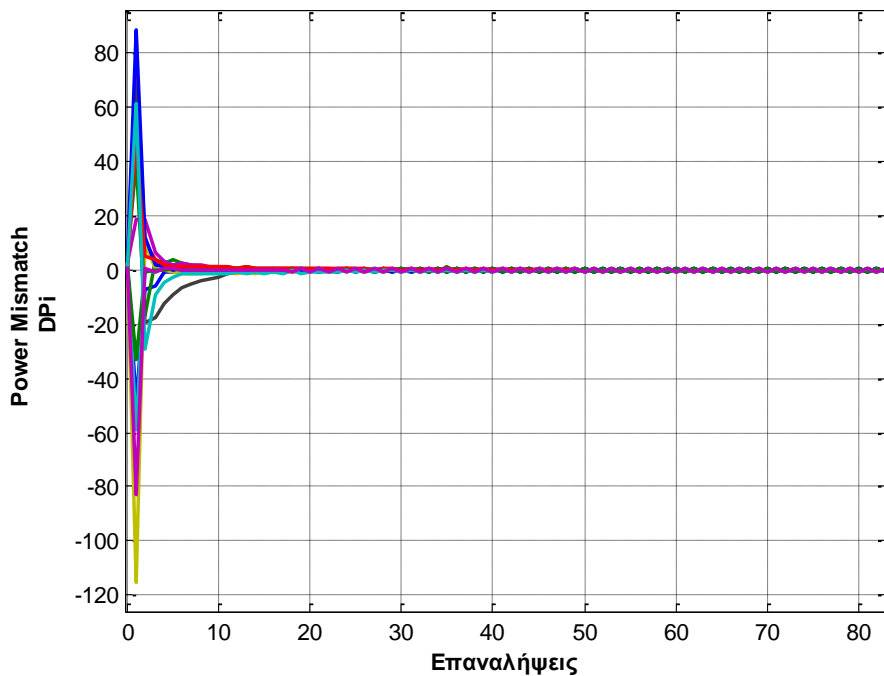
Ακολουθούν τα διαγράμματα για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου που προκύπτουν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου και της επαναληπτικής διαδικασίας. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται σύγκλιση του οριακού κόστους στην τιμή 8,4889€/MWh, η οποία είναι ελάχιστα πιο αυξημένη σε σχέση με την μελέτη χωρίς απώλειες, όπως αναμέναμε. Ακόμα, το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει στο μηδέν, όπως απαιτείται για την κάλυψη της παραγωγής και των απωλειών.



Σχήμα 5.15: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.16: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.17: Power Mismatch Κόμβων

Αντίστοιχα, το συνολικό κόστος παραγωγής προκύπτει στην περίπτωση αυτή:

$$C_{tot} = \sum C_i = 1910\text{€/h.}$$

Το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.12) της τάξεως του 1,1%.

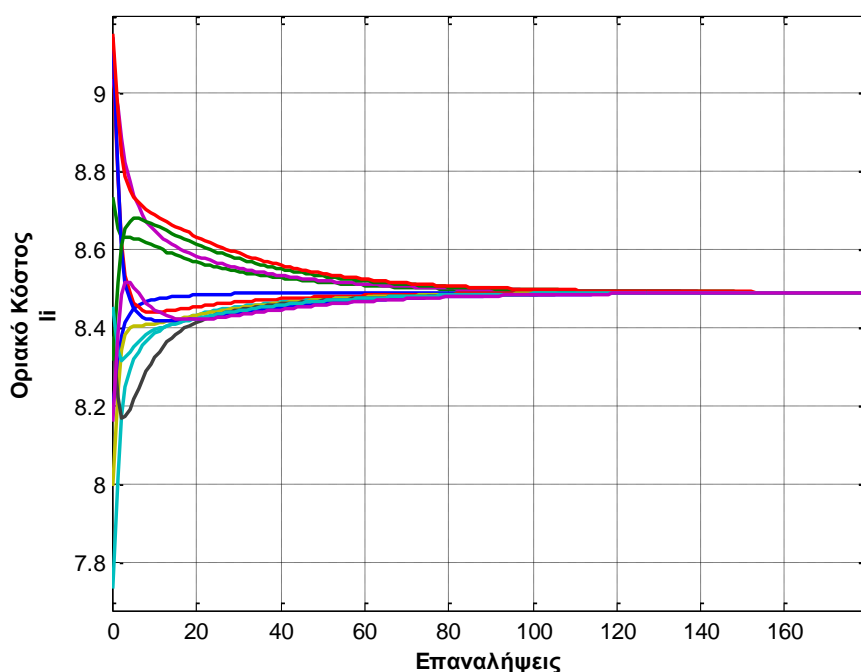
5.3.3 Μη Γραμμικός Αλγόριθμος (Non-Linear Algorithm)

Με αυτή την υλοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μεταφοράς προκύπτει η παρακάτω κατανομή φορτίου:

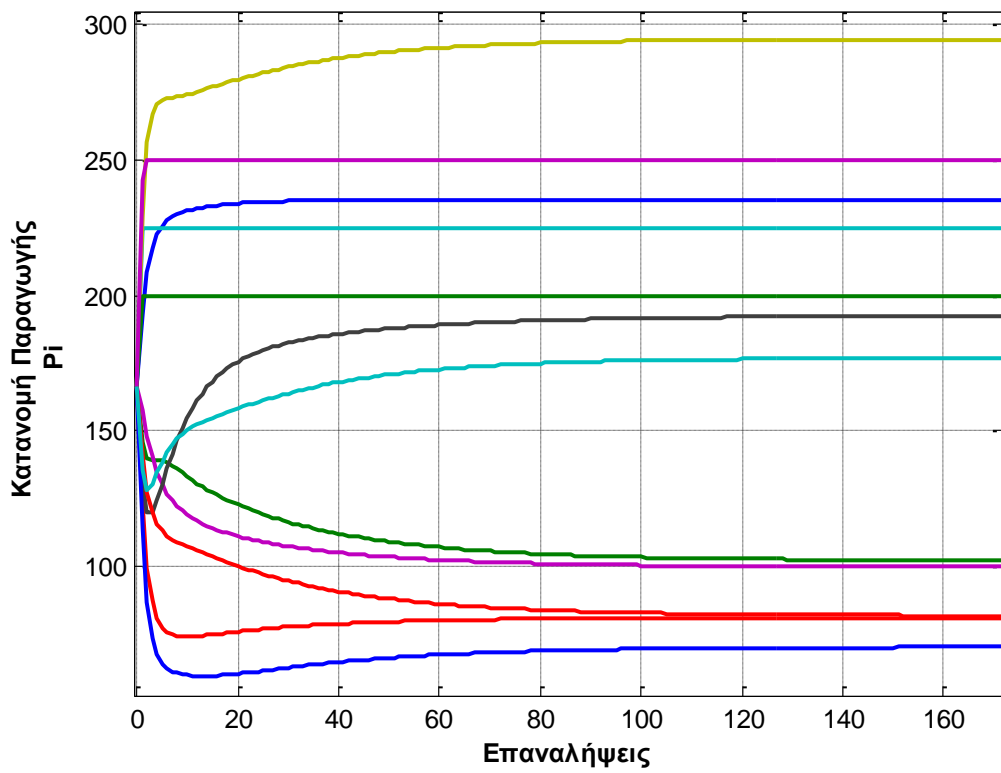
$$P_G = \begin{bmatrix} 235,3674 \\ 102,2561 \\ 81,2197 \\ 225 \\ 99,8266 \\ 294,4388 \\ 192,3897 \\ 70,3683 \\ 200 \\ 81,8715 \\ 176,8144 \\ 250 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW. Πάλι, έχουμε μια αύξηση της παραγωγής κάθε μονάδας σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, προκειμένου να καλυφθούν και οι απώλειες μεταφοράς.

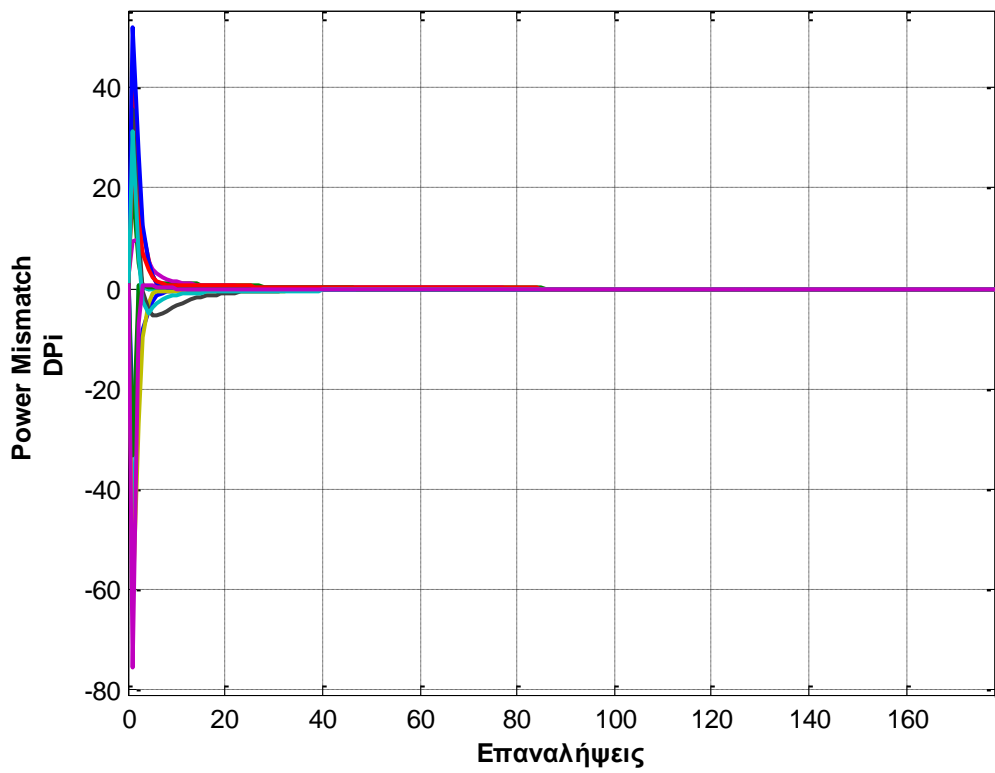
Ακολουθούν τα διαγράμματα για την κατανομή του φορτίου, το οριακό κόστος και το power mismatch κάθε κόμβου που προκύπτουν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου και της επαναληπτικής διαδικασίας. Η σύγκλιση του οριακού κόστους έγινε στην τιμή 8,4886€/MWh, η οποία είναι πάλι, όπως αναμέναμε, ελάχιστη πιο αυξημένη σε σχέση με την μελέτη χωρίς απώλειες. Τέλος, το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει στο μηδέν, όπως απαιτείται για την κάλυψη της παραγωγής και των απωλειών.



Σχήμα 5.18: Οριακό Κόστος



Σχήμα 5.19: Κατανομή Παραγωγής στις Μονάδες



Σχήμα 5.20: Power Mismatch Κόμβων

Το συνολικό κόστος παραγωγής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει:

$$C_{tot} = \sum C_i = 19106\text{€}/h.$$

και το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με την (5.12) της τάξεως του 1,06%.

5.3.4 Σύγκριση Αλγορίθμων

Αντίστοιχα με τη μελέτη όπου οι απώλειες αμελήθηκαν θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των 3 αλγορίθμων με τα αποτελέσματα που παίρνουμε μέσω της συνάρτησης *quadprog* και θα δούμε τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων για τον τερματισμό του αλγορίθμου. Συγκεντρωτικά, λοιπόν, έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για το δίκτυο που μελετήσαμε.

Παραγωγή Γεννητριών (MW)				
Γεννήτρια	quadprog	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	238,8547	233,0972	235,4406	235,3674
2	100,6624	99,7474	102,3371	102,2561
3	80,7328	79,8554	81,2636	81,2197
4	225	225	225	225
5	100,6085	98,6641	99,8641	99,8266
6	290,5069	291,9617	294,5183	294,4388
7	197,755	190,2261	192,4596	192,3897
8	69,5432	68,9691	70,4136	70,3683
9	200	200	200	200
10	80,1782	80,6494	81,911	81,8715
11	178,1083	174,1571	176,8996	176,8144
12	250	250	250	250

Πίνακας 4: Παραγωγή Γεννητριών

	quadprog	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
Επαναλήψεις	-	152	119	243
Λάμδα	8,1276	8,479	8,4889	8,4886

Πίνακας 5: Απαιτούμενες Επαναλήψεις - Λάμδα

Βλέπουμε ξανά ότι και για τα αποτελέσματα μέσω της *quadprog* η παραγωγή της κάθε μονάδας είναι αυξημένη σε σχέση με τη μελέτη αμελώντας τις απώλειες. Ακόμα, παρατηρούμε ότι η ενσωμάτωση των απωλειών στον αλγόριθμο με αυτό τον τρόπο δεν επηρεάζει τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση. Όπως και πριν συμπεραίνουμε ότι και οι 3 τρόποι προσεγγίζουν τη λύση με μεγάλη ακρίβεια και προκύπτει ένα ικανοποιητικά μικρό power mismatch στο δίκτυο όπως είδαμε αναλυτικά σε κάθε υλοποίηση. Τέλος, στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα σχετικά σφάλματα των αλγορίθμων.

Σχετικά Σφάλματα (%)			
Γεννήτρια	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	-2,41%	-1,43%	-1,46%
2	-0,91%	1,66%	1,58%
3	-1,09%	0,66%	0,60%
4	0,00%	0,00%	0,00%
5	-1,93%	-0,74%	-0,78%
6	0,50%	1,38%	1,35%
7	-3,81%	-2,68%	-2,71%
8	-0,83%	1,25%	1,19%
9	0,00%	0,00%	0,00%
10	0,59%	2,16%	2,11%
11	-2,22%	-0,68%	-0,73%
12	0,00%	0,00%	0,00%
Σύνολο	-0,98%	-0,09%	-0,12%

Πίνακας 6: Σχετικά Σφάλματα

5.4 Αποτελέσματα

Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη βλέπουμε ότι με έναν τελείως αποκεντρωμένο τρόπο μπορούμε να καταφέρουμε καλή προσέγγιση της λύσης. Και οι τρεις αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν την προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό, με σφάλμα της τάξεως του 1-4% ανά περίπτωση. Γενικά, όπως συμπεραίνουμε ύστερα από σύγκριση με τα αποτελέσματα που θα παίρναμε χρησιμοποιώντας κεντρική επίλυση, βλέπουμε ότι η λύση προσεγγίζεται ακριβέστερα από το γραμμικό αλγόριθμο, επιτυγχάνοντας τη μικρότερη τιμή για το οριακό κόστος. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι προσεγγίσεις βρίσκουν τις γεννήτριες που φτάνουν τα όρια της δυνατής παραγωγής τους και δεν μπορούν να τη μεταβάλλουν άλλο.

Όσον αφορά τη σύγκριση με τη μελέτη με υπολογισμό των απωλειών κατά την επίλυση βλέπουμε ότι οι αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν και σε αυτή την παράμετρο και να καταλήξουν σε λύση που καλύπτει τόσο τη ζήτηση του φορτίου όσο και τις απώλειες. Είχαμε έτσι αύξηση της παραγωγής των γεννητριών για το σκοπό αυτό, με την αναμενόμενη αντίστοιχη αύξηση του οριακού κόστους. Η αλλαγή αυτή επέφερε μόνο μια μικρή αύξηση στον αριθμό των επαναλήψεων, οπότε δεν επηρέασε ιδιαίτερα το ρυθμό σύγκλισης του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 6

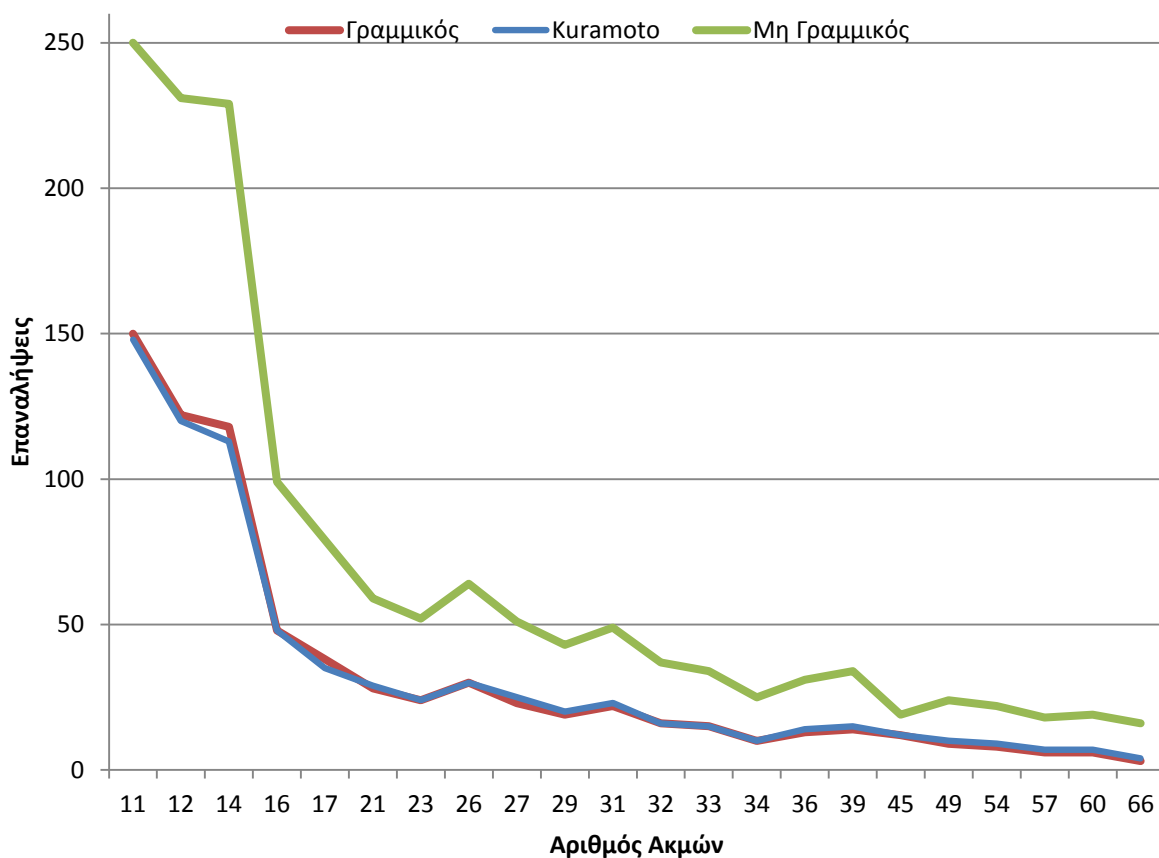
Προσομοίωση Δικτύων – Μελέτη Περιπτώσεων

6.1 Μελέτη Τοπολογίας Δικτύου

Η τοπολογία του δικτύου αποτελεί το πρώτο βασικό στοιχείο που πρέπει να γνωρίζουμε για την εκτέλεση των αλγορίθμων. Έτσι, είναι σημαντικό να εξετάσουμε, πώς αυτή επηρεάζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου και τον απαιτούμενο για αυτή αριθμό επαναλήψεων. Θεωρώντας το δίκτυο που μελετήσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μελετήσουμε πώς η διαφορετική συνδεσμολογία των κόμβων επηρεάζει τα αποτελέσματα των αλγορίθμων.

Έτσι θα μελετήσουμε πώς αντιδρά ο αλγόριθμος στην αλλαγή της πυκνότητας διασύνδεσης των στοιχείων του δικτύου. Για το λόγο αυτό, εκτελέσαμε τον κάθε αλγόριθμο δημιουργώντας κάθε φορά έναν τυχαίο πίνακα γειτνίασης των γεννητριών, με χρήση της συνάρτησης *rand* και επιλέγοντας κάθε φορά την επιθυμητή πυκνότητα του πίνακα. Στο τέλος κάθε εκτέλεσης, αποθηκεύεται ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάστηκαν για να τερματιστεί ο αλγόριθμος και ο αριθμός των ακμών που είχε το δίκτυο σε κάθε περίπτωση. Από τα στοιχεία αυτά, προκύπτει το παρακάτω γράφημα για κάθε αλγόριθμο. Σύμφωνα με αυτό παρατηρούμε ότι όσο πιο πυκνά συνδεδεμένοι είναι οι κόμβοι του δικτύου, δηλαδή όσες περισσότερες ακμές έχει το δίκτυο μεταξύ των κόμβων του, τόσο πιο γρήγορα συγκλίνουν και οι αλγόριθμοι που μελετάμε.

Ακόμα βλέπουμε ότι ο Γραμμικός και ο αλγόριθμος Kuramoto παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στις επαναλήψεις που απαιτούνται για να τερματιστεί ο αλγόριθμος (δηλαδή μεταξύ 2 επαναλήψεων να ισχύει $\lambda_i[k + 1] - \lambda_i[k] < 0,0001$), ενώ ο Μη Γραμμικός απαιτεί αισθητά μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων.

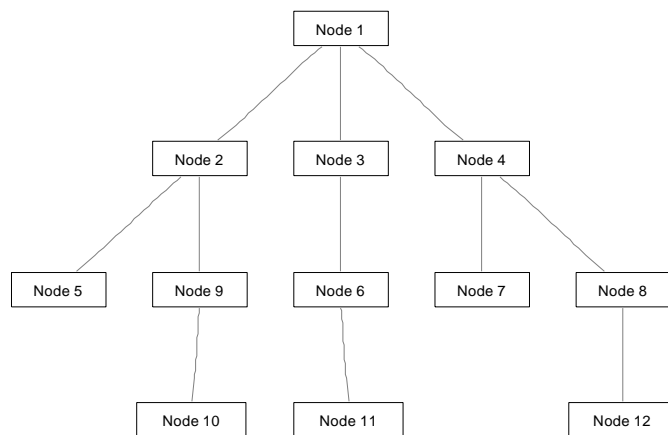


Σχήμα 6.1: Επίδραση αριθμού ακμών στην ταχύτητα σύγκλισης

Από τα παραπάνω σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, μπορούμε να καταλήξουμε ότι ο αλγόριθμος με την καλύτερη απόδοση είναι ο γραμμικός. Απαιτεί το μικρότερο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση και η προσέγγισή της γίνεται μέσω ομαλών μεταβολών χωρίς έντονες ταλαντώσεις. Ο Kuramoto που παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τον γραμμικό στην ταχύτητα σύγκλισης παρουσιάζει ταυτόχρονα και έντονες μεταβολές κατά την πάροδο των επαναλήψεων και δεν προσεγγίζει τη λύση ομαλά. Έτσι θα μελετήσουμε το γραμμικό αλγόριθμο για διαφορετικές συνδεσμολογίες, αλλάζοντας κατάλληλα τον πίνακα γειτνίασης των γεννητριών A, για να δούμε αναλυτικότερα τη συμπεριφορά του.

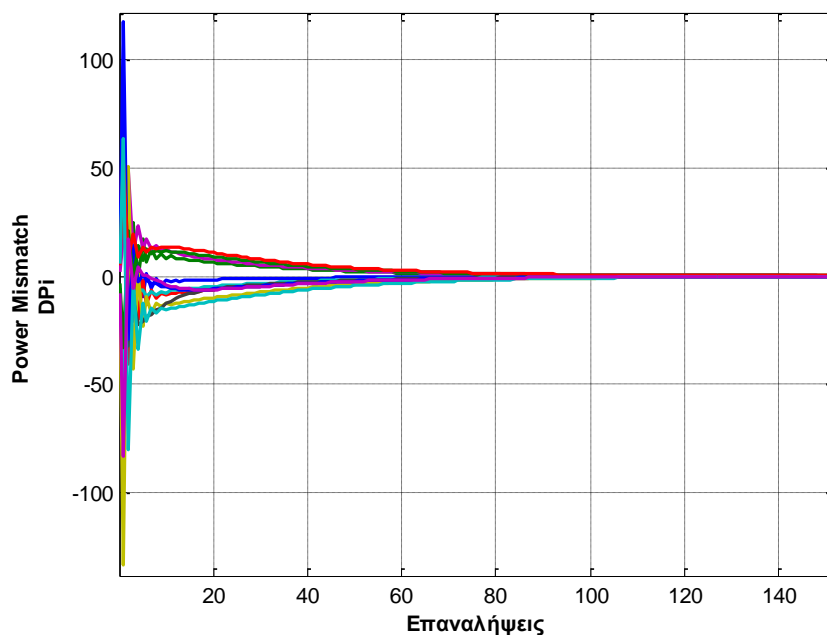
1. Δίκτυο Ακτινικής Μορφής

Αρχικά ας μελετήσουμε μία συνδεσμολογία δενδροειδούς-ακτινικής μορφής. Συγκεκριμένα, έστω ο γράφος των γεννητριών:



Σχήμα 6.2: Δίκτυο Ακτινικής Μορφής

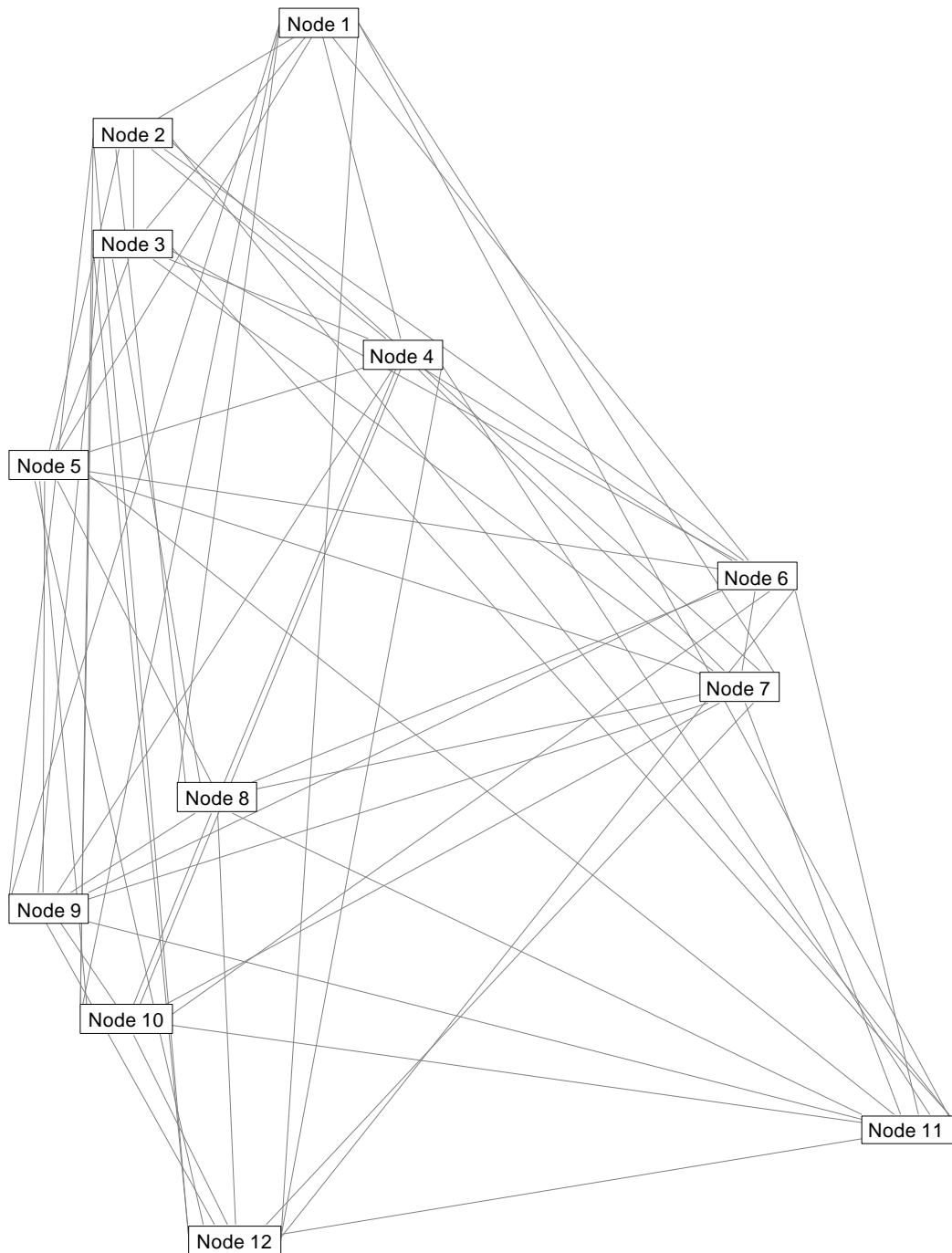
Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους μετά την 100^{στη} επανάληψη, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 6.3: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Ακτινικής Μορφής

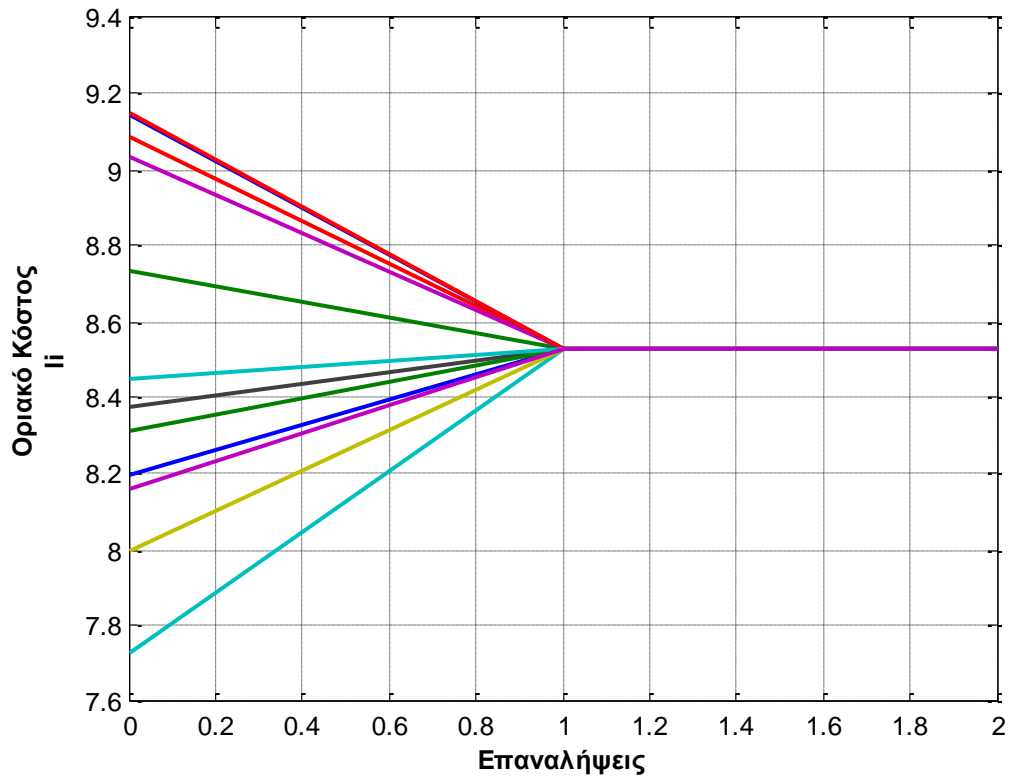
2. Δίκτυο Πλήρους Επικοινωνίας

Ας δούμε τη συμπεριφορά τώρα του αντίστοιχου δικτύου, εάν αυτό ήταν πλήρως συνδεδεμένο, δηλαδή αναπαριστανόταν από τον ακόλουθο γράφο



Σχήμα 6.4: Δίκτυο Πλήρους Επικοινωνίας

Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

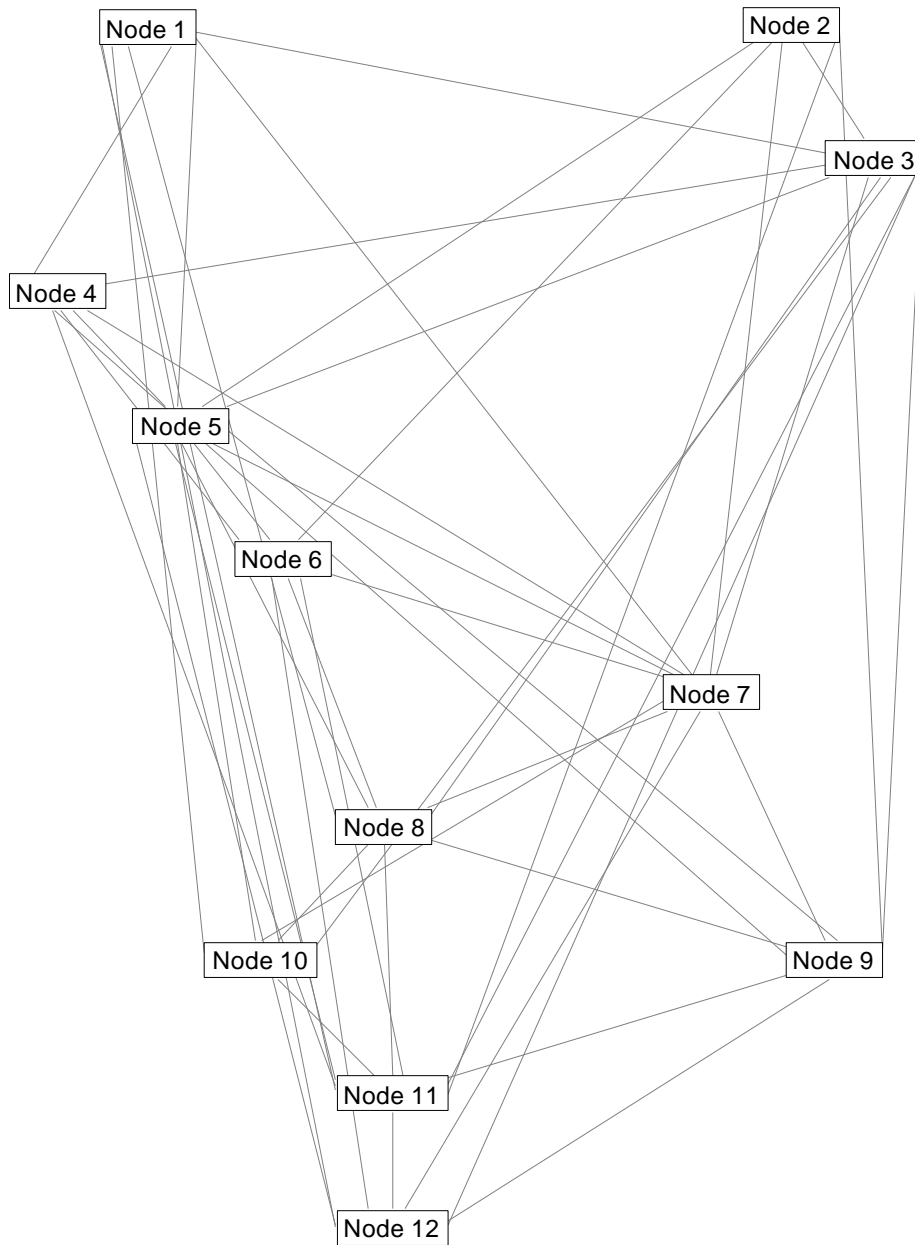


Σχήμα 6.5: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Πλήρους Επικοινωνίας

Παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση κοντά στην ίδια τιμή οριακού κόστους όμως τώρα μόλις στην πρώτη επανάληψη.

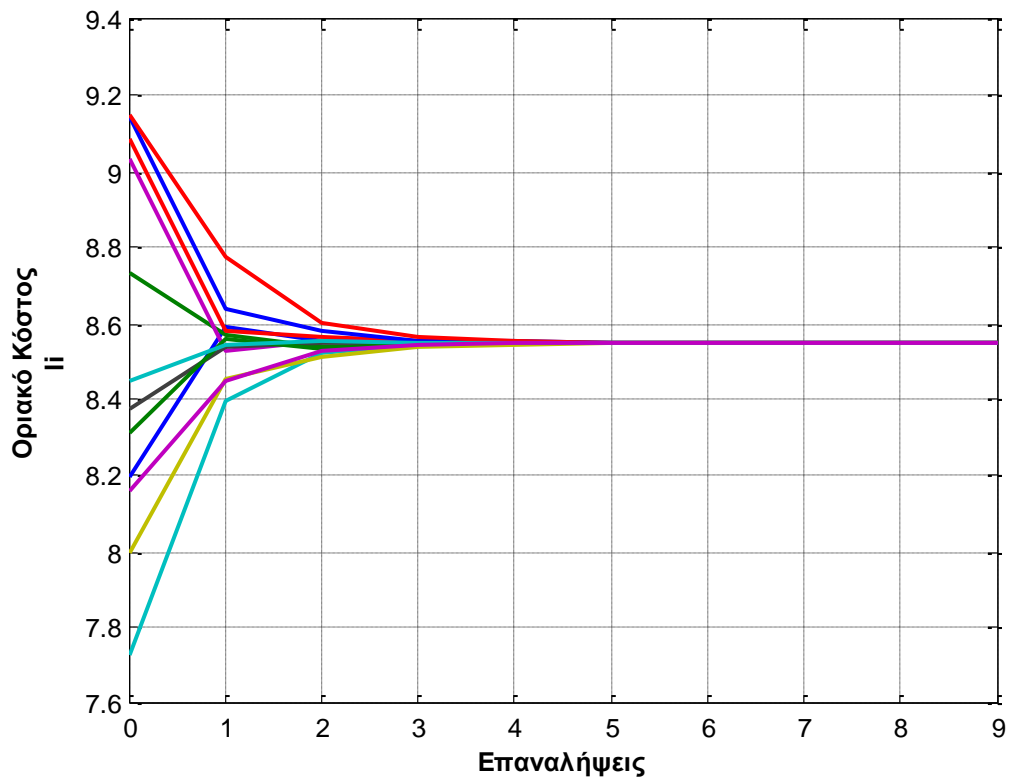
3. Δίκτυο Τυχαίας Επικοινωνίας

Το επόμενο δίκτυο προς μελέτη θα προκύψει αφαιρώντας ορισμένες διασυνδέσεις από το δίκτυο πλήρους επικοινωνίας, ώστε να μην έχει μεγάλη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων του αλλά όχι πλήρη. Ο γράφος που το περιγράφει θα είναι:



Σχήμα 6.6: Δίκτυο Τυχαίας Επικοινωνίας

Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

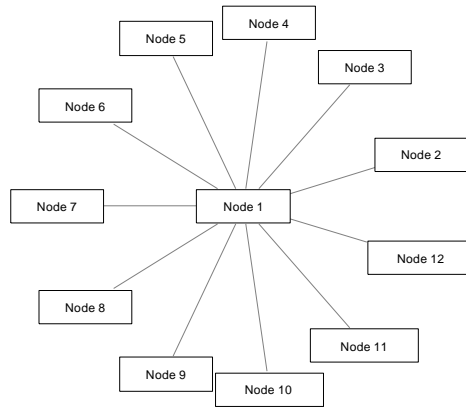


Σχήμα 6.7: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Τυχαίας Επικοινωνίας

Παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση στην ίδια τιμή με πριν μετά την 7^η επανάληψη.

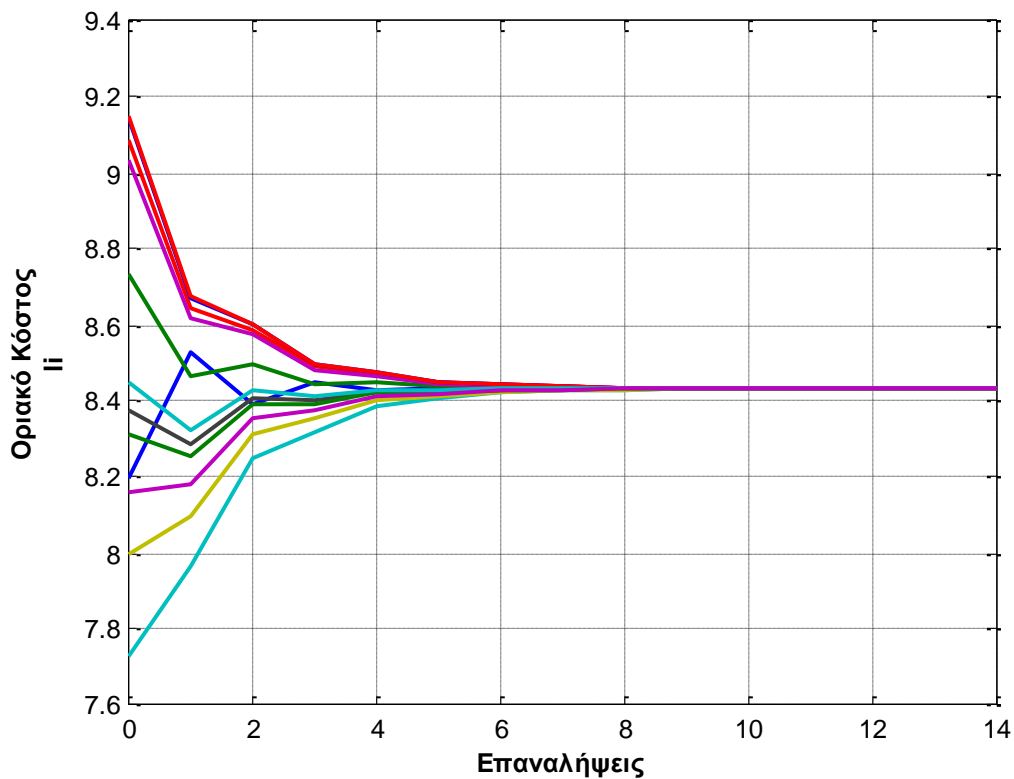
4. Δίκτυο Μορφής Αστέρα

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε ένα δίκτυο το οποίο έχει τη μορφή αστέρα, δηλαδή υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος και όλοι οι άλλοι συνδέονται μόνο με αυτόν. Ο γράφος που το περιγράφει θα είναι:



Σχήμα 6.8: Δίκτυο Μορφής Αστέρα

Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

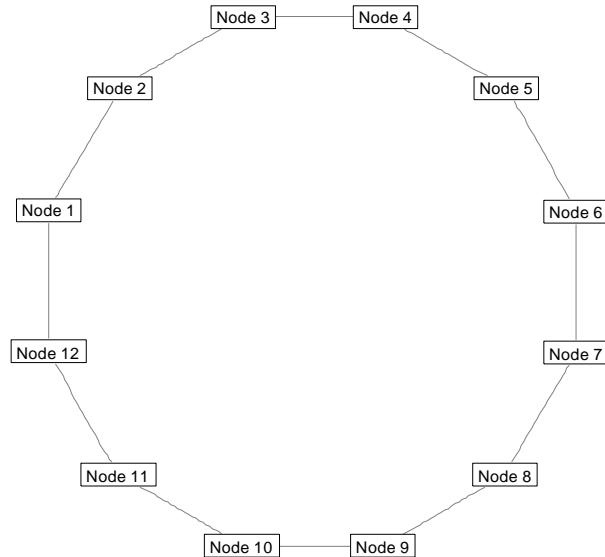


Σχήμα 6.9: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Μορφής Αστέρα

Παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση στην ίδια τιμή με πριν μετά την $10^{\text{η}}$ επανάληψη.

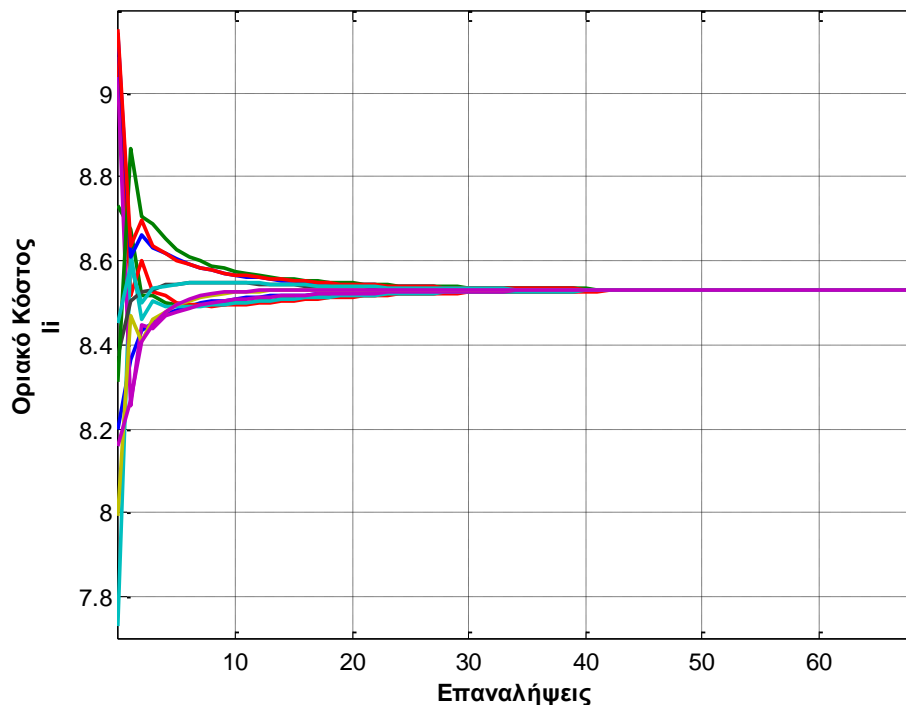
5. Δίκτυο Μορφής Δαχτυλιδιού

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε ένα δίκτυο το οποίο έχει τη μορφή δαχτυλιδιού, δηλαδή όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι στη σειρά σχηματίζοντας ένα δαχτυλίδι. Ο γράφος που το περιγράφει θα είναι:



Σχήμα 6.10: Δίκτυο Μορφής Δαχτυλιδιού

Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

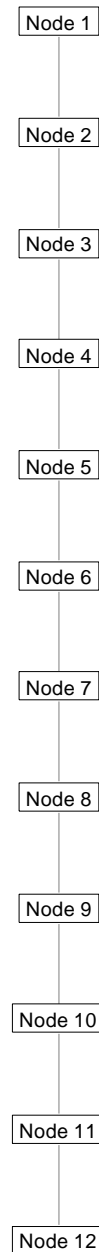


Σχήμα 6.11: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Μορφής Δαχτυλιδιού

Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται σύγκλιση στην ίδια τιμή με πριν μετά την 40^η επανάληψη.

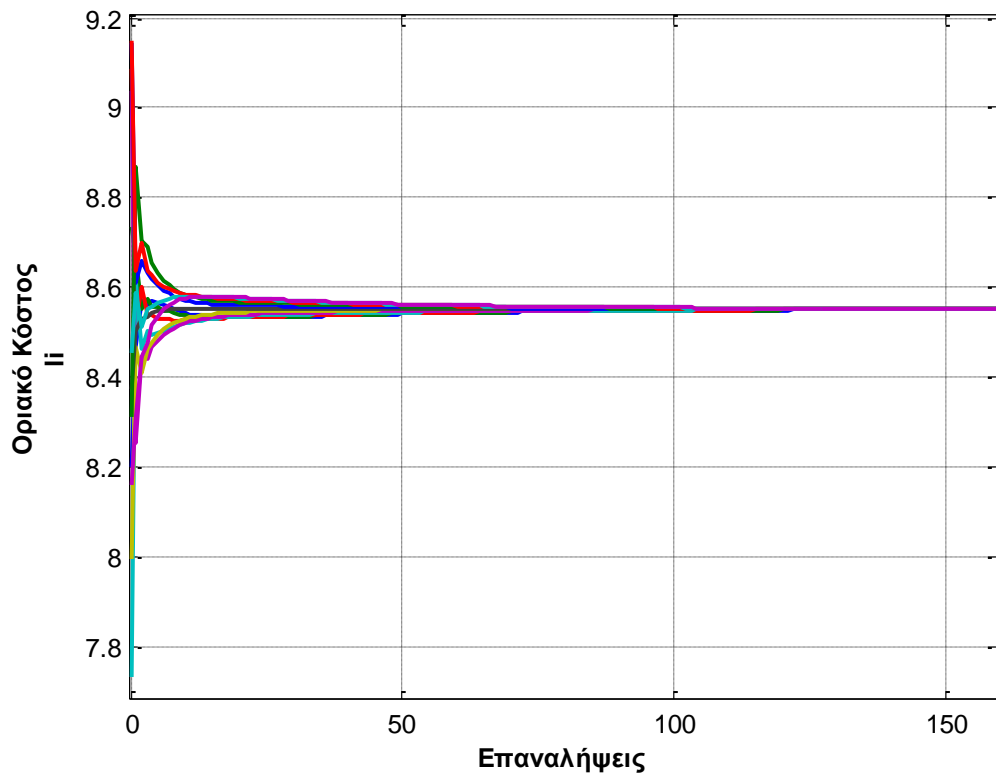
6. Δίκτυο Αλυσοειδούς Μορφής

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε ένα δίκτυο το οποίο έχει τη μορφή αλυσίδας, δηλαδή ο κάθε κόμβος συνδέεται στη σειρά με τον επόμενό του. Ο γράφος που το περιγράφει θα είναι:



Σχήμα 6.12: Δίκτυο Αλυσοειδούς Μορφής

Από αυτό προέκυψε σύγκλιση του οριακού κόστους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



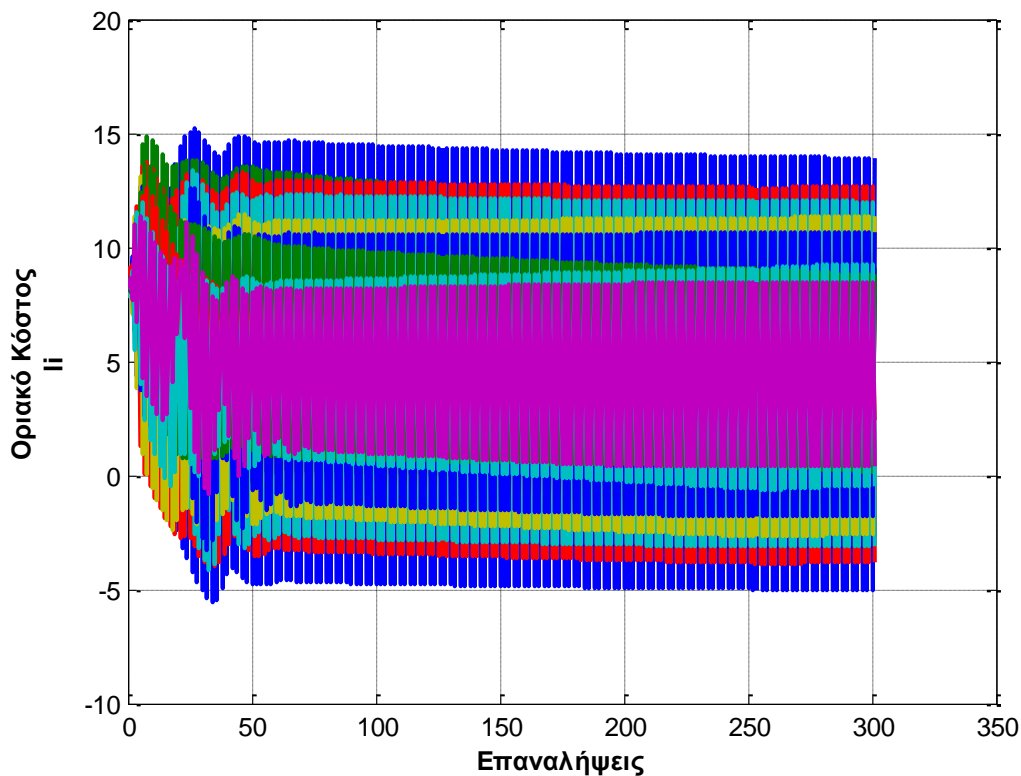
Σχήμα 6.13: Οριακό Κόστος για Δίκτυο Αλυσοειδούς Μορφής

Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται σύγκλιση στην ίδια τιμή με πριν μετά την 100^η επανάληψη.

6.2 Επίδραση Μεταβολής Σταθεράς Σύγκλισης ϵ

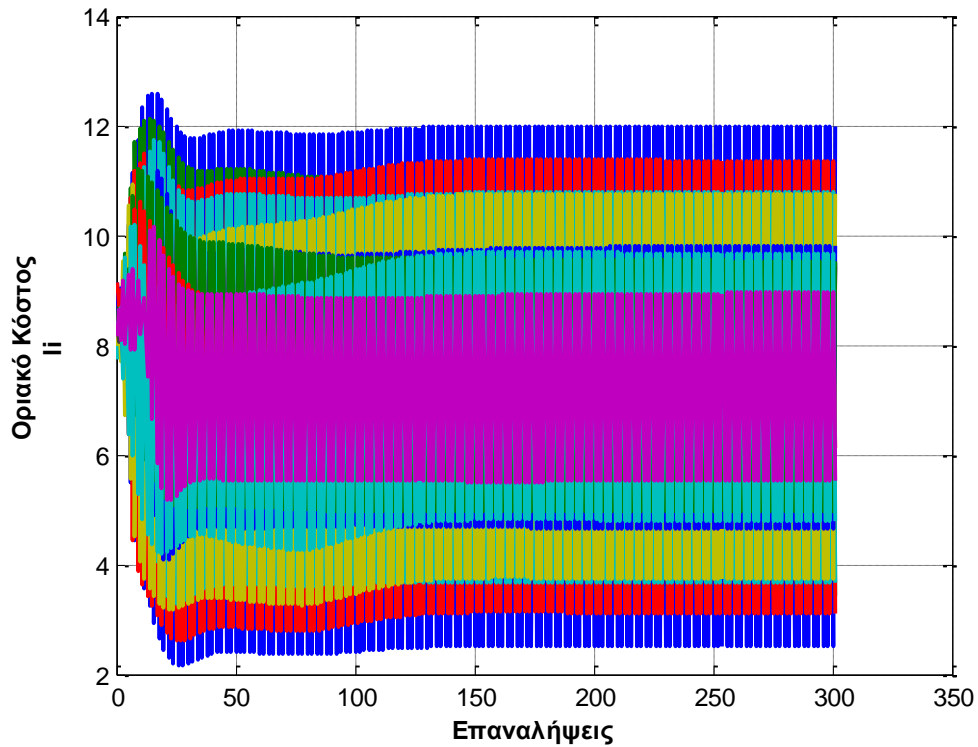
Η επίλυση του προβλήματος, όπως την είδαμε, βασίζεται στον καταναμημένο υπολογισμό του οριακού κόστους και ταυτόχρονα το μηδενισμό της διαφοράς μεταξύ της παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος. Για την επίτευξη αυτού, εισαγάγαμε έναν όρο διόρθωσης του οριακού κόστους ως προς το power mismatch, με τη χρήση ενός συντελεστή ϵ , σύμφωνα με τη σχέση (4.10). Οπότε, όσο πιο μεγάλο το ϵ τόσο πιο μεγάλος θα είναι και ο όρος διόρθωσης που επιβάλλεται στο οριακό κόστος. Όμως, αν ο συντελεστής ϵ είναι αρκετά μεγάλος τότε αυτό σημαίνει ότι το οριακό κόστος θα έχει πολύ μεγάλες μεταβολές σε κάθε επανάληψη και άρα ταλαντωτική συμπεριφορά. [23] Άρα, θέλουμε το ϵ να είναι τόσο μικρό ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν πιο γρήγορη σύγκλιση με λιγότερα ταλαντωτικά φαινόμενα. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου, εκτελέσαμε τον αλγόριθμο στο ίδιο δίκτυο με αυτό που μελετούσαμε στο κεφάλαιο 5, αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή του ϵ , παίρνοντας τα ακόλουθα αποτελέσματα. Βλέπουμε και πρακτικά έτσι ότι μεγάλες τιμές του ϵ οδηγούν σε αστάθεια, ενώ επαρκώς μικρές κάνουν τον αλγόριθμο να συγκλίνει.

- Για $\epsilon=0,01$, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 6.14, έχουμε μεγάλες μεταβολές του οριακού κόστους και δε συγκλίνει.



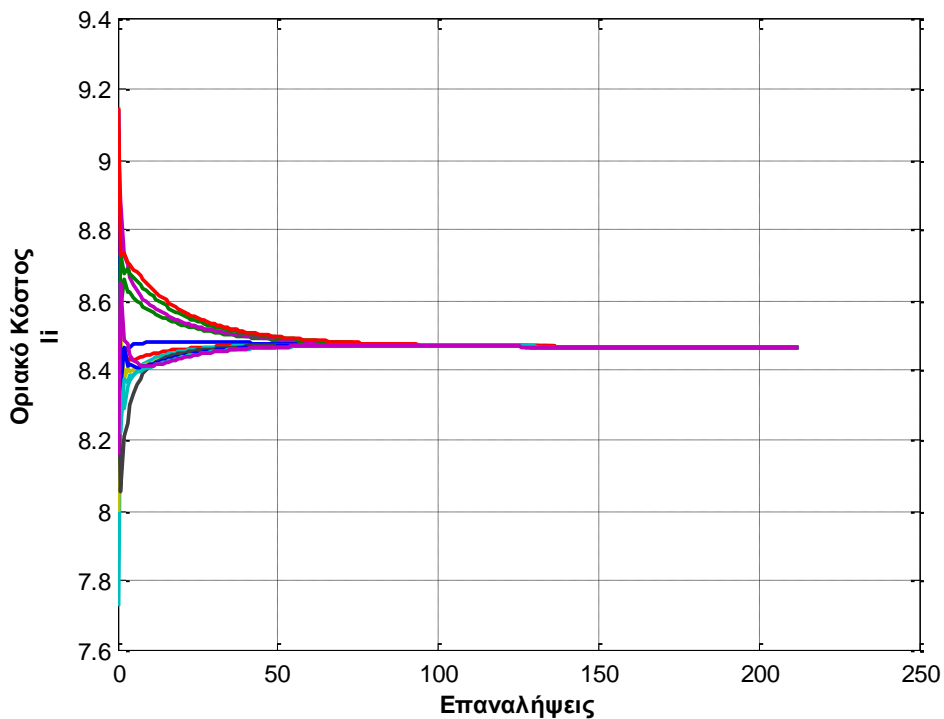
Σχήμα 6.14: Σύγκλιση Οριακού Κόστους για $\epsilon=0,01$

- Αν μικρύνουμε λίγο το ε στην τιμή $\varepsilon=0,005$, τότε ακόμα παρατηρούμε ότι δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση.



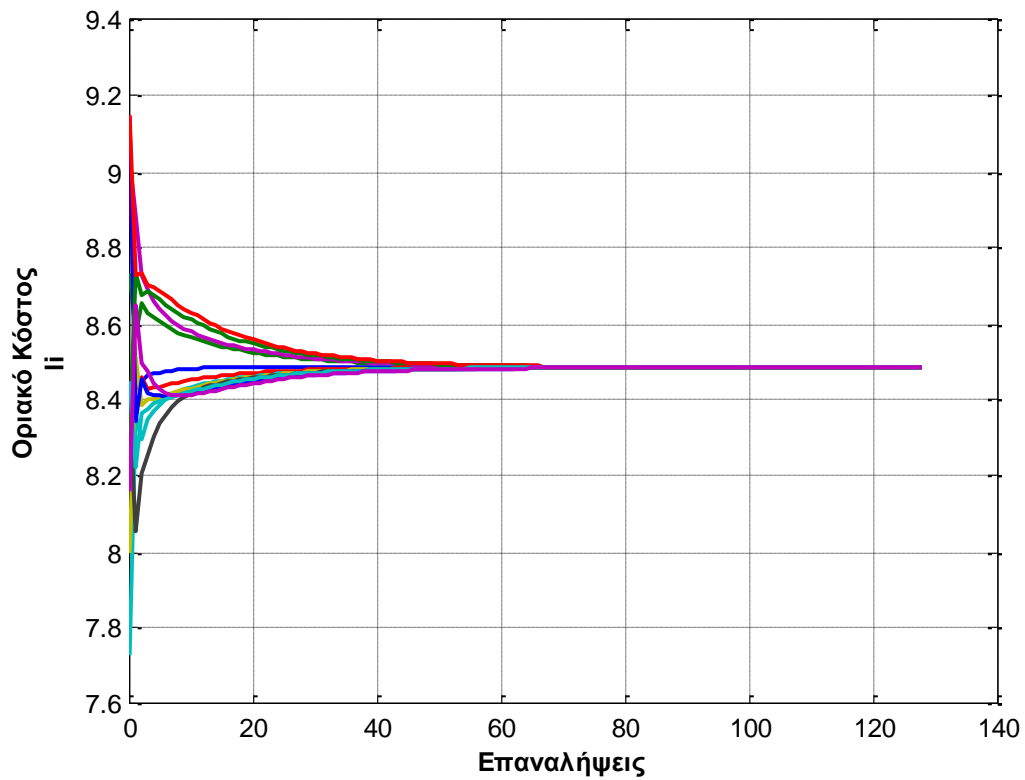
Σχήμα 6.15: Σύγκλιση Οριακού Κόστους για $\varepsilon=0,005$

- Σε επόμενη φάση δοκιμάζουμε μια ακόμα μικρότερη τιμή του ε με $\varepsilon=0,001$ και βλέπουμε ότι έτσι επετεύχθη σύγκλιση.



Σχήμα 6.16: Σύγκλιση Οριακού Κόστους για $\varepsilon=0,001$

- Τέλος, για μία ακόμα μικρότερη τιμή, έστω $\epsilon=0,0001$, βλέπουμε ότι διατηρείται η σύγκλιση στην ίδια τιμή και μάλιστα με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων.



Σχήμα 6.17: Σύγκλιση Οριακού Κόστους για $\epsilon=0,0001$

6.3 Πολυπλοκότητα Αλγορίθμων

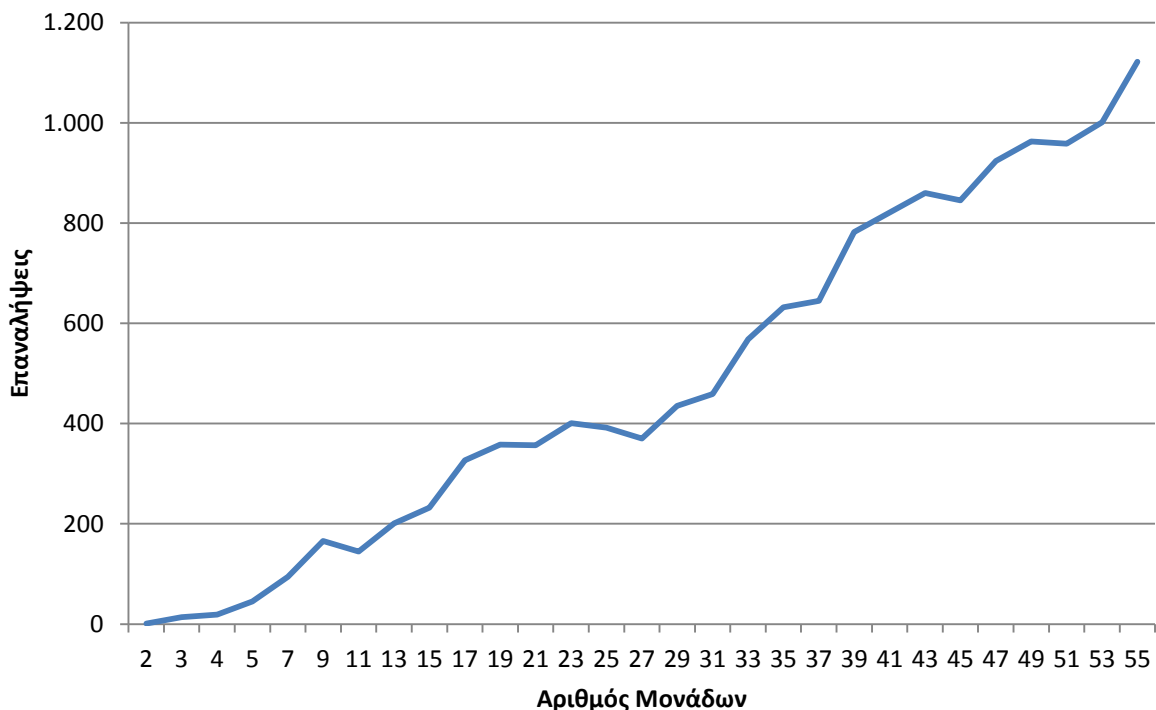
Όσον αφορά την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, εξαρτάται κυρίως από το πόσες επαναλήψεις απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση. [26] Αυτό επηρεάζεται κυρίως από τα πρωτόκολλα σύζευξης των ταλαντωτών των κόμβων και από την τοπολογία του δικτύου και συγκεκριμένα από τη δεύτερη μικρότερη ιδιοτιμή του Λαπλασιανού πίνακα. [9] Έτσι, αύξηση των κόμβων ενός συστήματος σημαίνει και αύξηση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου μιας και όσο πιο μεγάλο το δίκτυο τόσο μεγαλύτερος ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για την επίτευξη της σύγκλισης.

Προκειμένου να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο σε δίκτυα οποιασδήποτε μορφής, με διαφορετικό αριθμό γεννητριών σε αυτά, και να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του αλγορίθμου για διάφορες τοπολογίες, θα πρέπει μόνο να προσαρμόζουμε τη σταθερά σύγκλισης ε ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να συγκλίνει σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, για την επίτευξη σύγκλισης το ε θα πρέπει να εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων στο σύστημα. Ύστερα από δοκιμές καταλήξαμε σε έναν τύπο της μορφής:

$$\varepsilon = 0,00000005 * (10^{(n/20)})$$

δηλαδή, έχουμε μία αρκετά μικρή σταθερά η οποία όμως αυξάνεται με τον αριθμό των ζυγών του συστήματος.

Τώρα, μπορούμε να μελετήσουμε δίκτυα διαφόρων μορφών, ξεκινώντας από ένα απλό δίκτυο 2 μονάδων και καταλήγοντας σε πιο περίπλοκο δίκτυο που περιλαμβάνει 55 μονάδες. Η ανάπτυξη του δικτύου γίνεται ακτινικά. Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα για τη μεταβολή του ρυθμού σύγκλισης με την αύξηση των μονάδων του συστήματος.



Σχήμα 6.18: Μεταβολή αριθμού επαναλήψεων σε σχέση με τον αριθμό των μονάδων

Από αυτό μπορούμε να δούμε εύκολα ότι η καμπύλη μας έχει μη εκθετική μορφή και άρα η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου μας είναι μη εκθετική.

6.4 Προσομοίωση σε Δίκτυα με Χρήση του MATPOWER

Για την πληρέστερη μελέτη των αλγορίθμων, μελετήσαμε την απόδοση αυτών και σε ανεπτυγμένα πρότυπα δίκτυα μέσω του πακέτου MATPOWER για το MATLAB. Το MATPOWER αποτελεί ένα πακέτο για την προσομοίωση ηλεκτρικών δικτύων. Περιέχει μια βιβλιοθήκη με αρκετά διαφορετικά ηλεκτρικά δίκτυα με τα χαρακτηριστικά τους, τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στις προσομοιώσεις μας, και, τέλος, δίνει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων του δικτύου, όπως της ροής φορτίου και βελτιστοποίησής της μέσω έτοιμων συναρτήσεων.

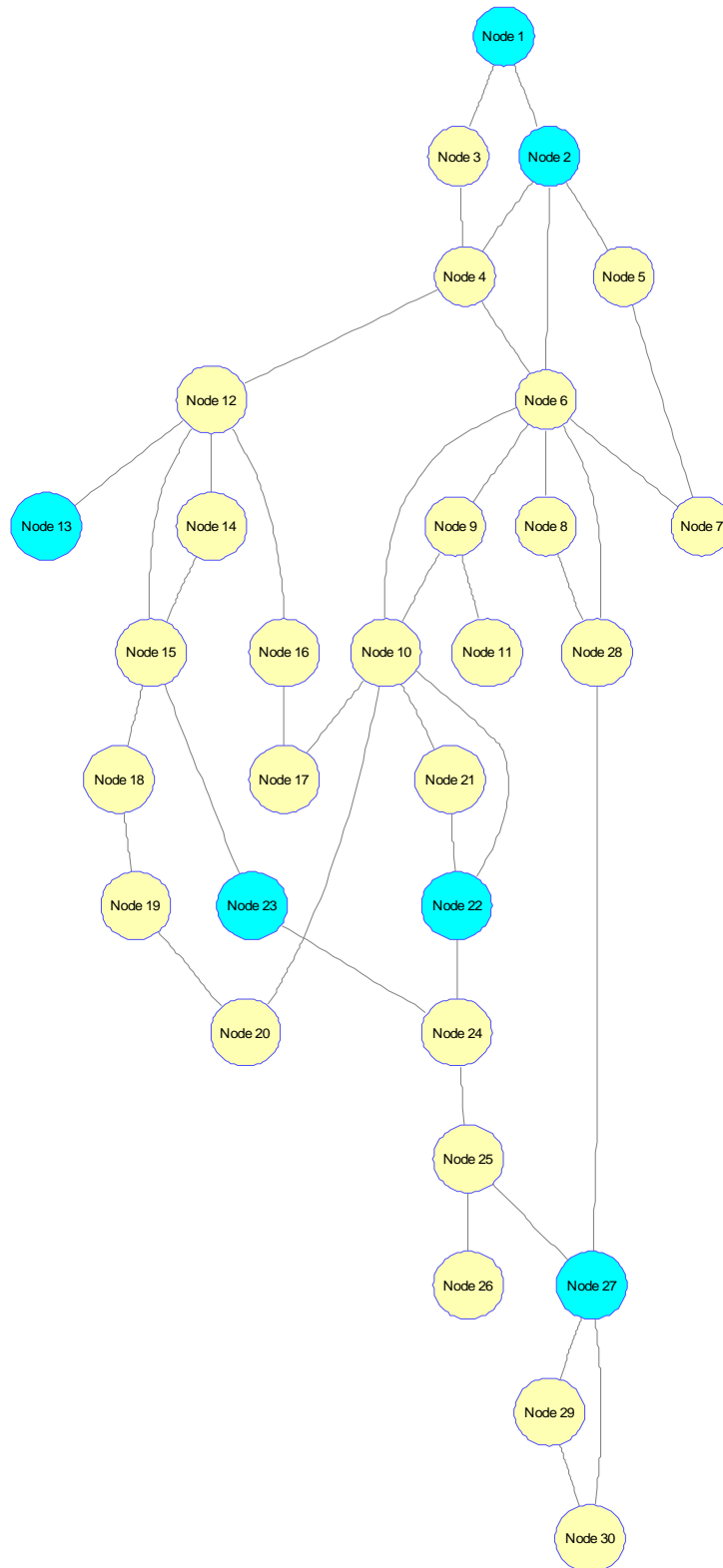
Τα αρχεία αυτά περιέχουν πίνακες για τα χαρακτηριστικά και το είδος των ζυγών του δικτύου (PV – PQ – αναφοράς) και γενικά όλων των πληροφοριών που είναι αναγκαίες για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής του φορτίου, όπως τον αριθμό των μονάδων, τους συντελεστές κόστους τους, τα όρια λειτουργίας τους κτλ. Αυτές τις πληροφορίες μπορούμε να τις προσπελάσουμε με τη χρήση πινάκων και να τις αποθηκεύσουμε προσωρινά σε αυτούς. Ακόμα, προσομοιώνει τη ροή φορτίου και δίνει δεδομένα, όπως οι τάσεις και γωνίες στους ζυγούς, οι απώλειες, η παραγωγή των γεννητριών, τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην επίλυση του προβλήματος. Τέλος, με χρήση της συνάρτησης *biograph* μπορέσαμε να αναπαραστήσουμε το δίκτυο καθώς και το γράφο επικοινωνίας των γεννητριών.

Τα στοιχεία για τους συντελεστές κόστους και τα όρια λειτουργίας των γεννητριών, την τοπολογία του δικτύου, καθώς και το ζητούμενο φορτίο μπορούμε να τα εξάγουμε κάθε φορά από ένα αρχείο της μορφής *.m*. Συγκεκριμένα το ολικό ζητούμενο φορτίο το υπολογίζουμε ως το άθροισμα όλων των φορτίων των ζυγών του συστήματος.

Στα επόμενα παραδείγματα θα δούμε αναλυτικά τις προσομοιώσεις για 3 διαφορετικά δίκτυα.

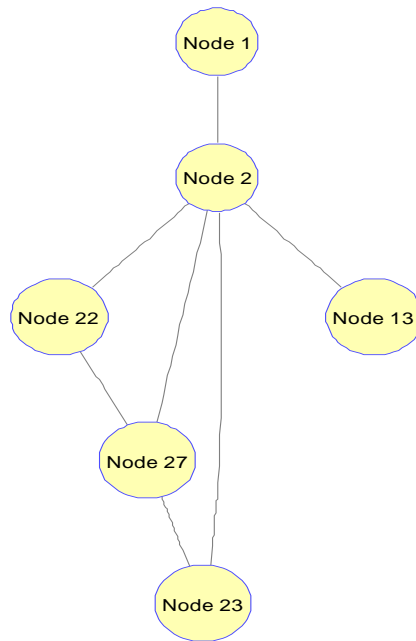
6.4.1 Μελέτη Δικτύου 30 Ζυγών

Αρχικά, επιλέξαμε το δίκτυο *case30.m* το οποίο αποτελείται από 30 ζυγούς με 6 από αυτούς να αντιστοιχούν σε γεννήτριες. Αυτό έχει την παρακάτω τοπολογία, όπου με έντονο μπλε τονίζονται οι θέσεις των γεννητριών:



Σχήμα 6.19: Γράφος δικτύου 30 κόμβων

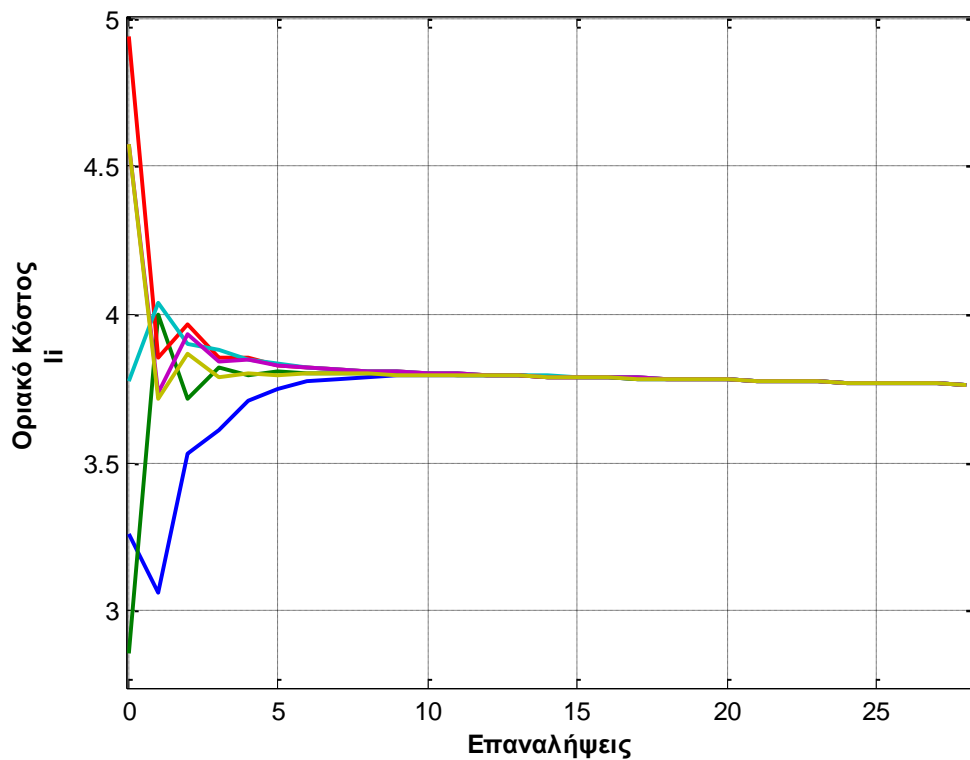
Από αυτό προκύπτει και ο γράφος των γεννητριών μέσω του κριτηρίου συντομότερης διαδρομής, ως:



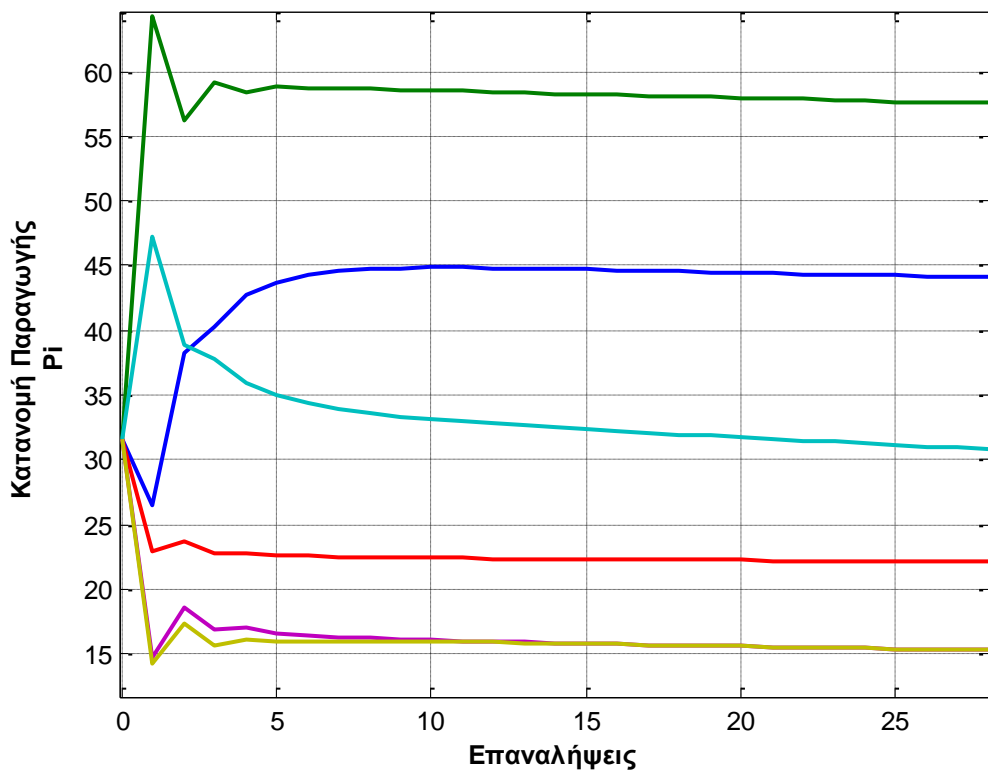
Σχήμα 6.20: Γράφος γεννητριών δικτύου 30 κόμβων

1. Γραμμικός Αλγόριθμος

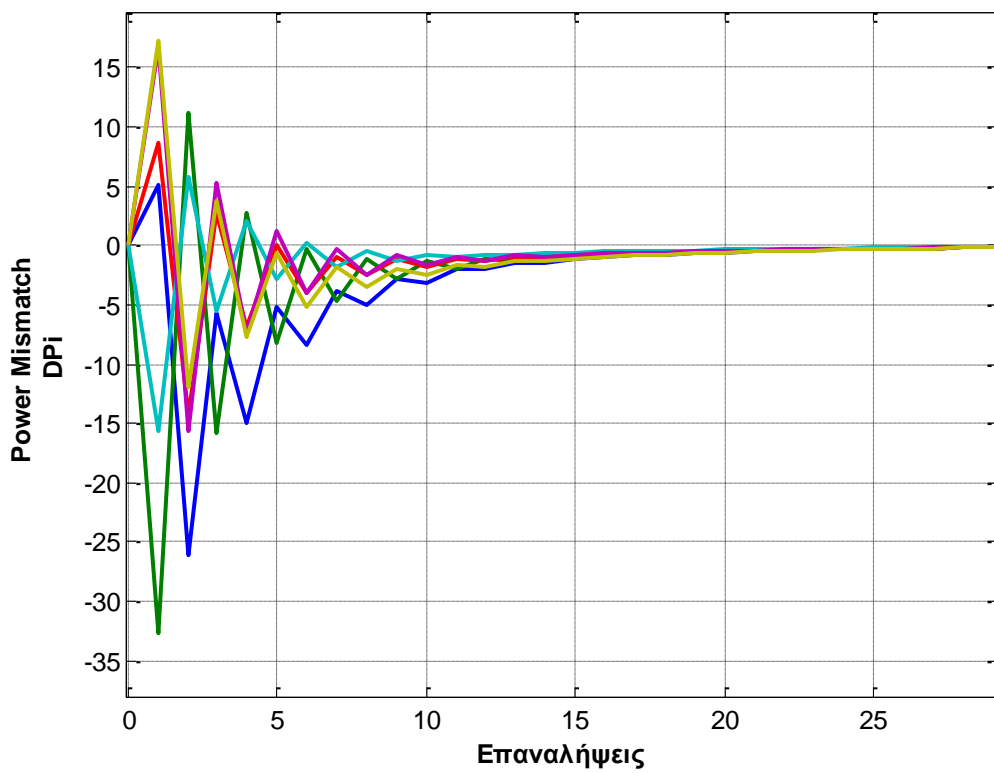
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή του γραμμικού αλγορίθμου στο παραπάνω δίκτυο αναπαρίστανται μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.21: Οριακό Κόστος για γραμμικό αλγόριθμο



Σχήμα 6.22: Παραγωγή γεννητριών για γραμμικό αλγόριθμο



Σχήμα 6.23: Power Mismatch για γραμμικό αλγόριθμο

Βλέπουμε, λοιπόν, στο σχήμα 6.21, ότι το οριακό κόστος συγκλίνει στην τιμή 3,8183€/MWh, μόλις μετά την 10^η επανάληψη, με αντίστοιχη κατανομή φορτίου στις γεννήτριες όπως φαίνεται στο σχήμα 6.22, με:

$$P_G = \begin{bmatrix} 45,4585 \\ 59,0967 \\ 22,5473 \\ 34,0780 \\ 16,3683 \\ 16,3669 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW.

Το power mismatch κάθε κόμβου συγκλίνει στο μηδέν, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.23, οπότε επιτυγχάνεται η κάλυψη της παραγωγής.

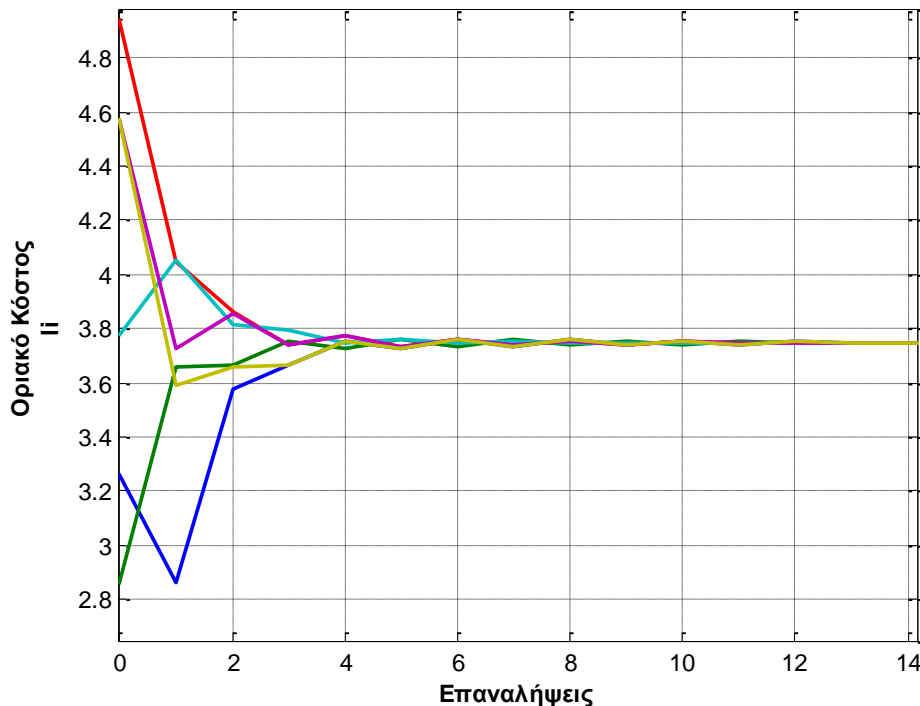
Το συνολικό κόστος παραγωγής που προκύπτει για αυτό το δίκτυο σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας θα είναι:

$$C_{tot} = \sum C_i = 583,1440\text{€/h.}$$

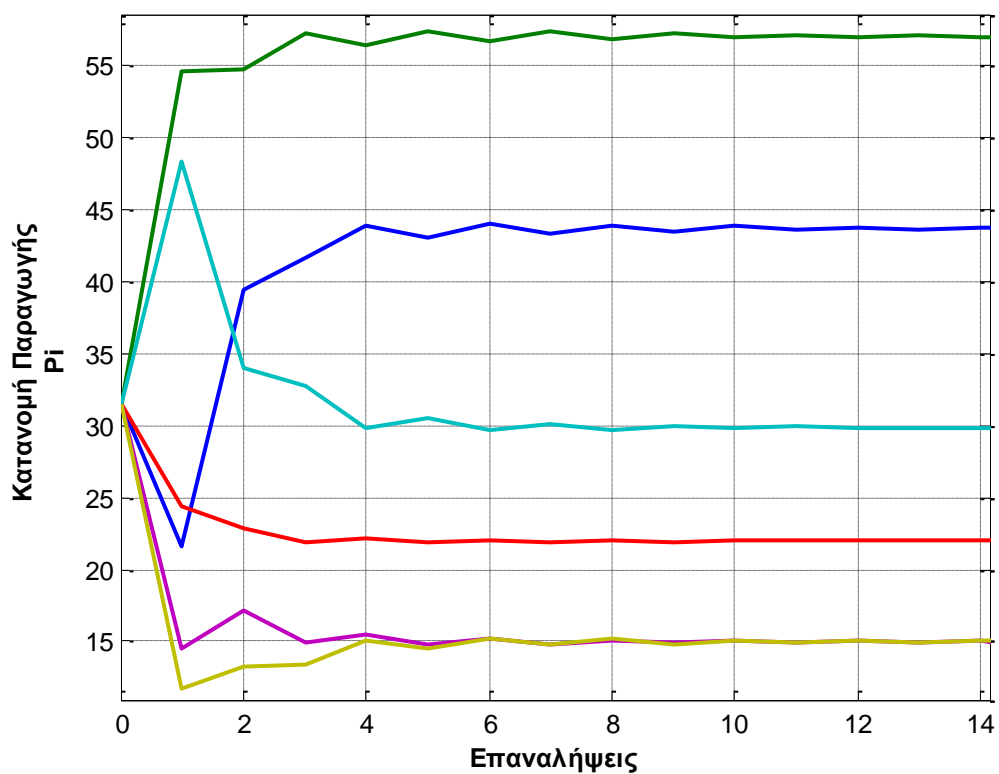
Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.12) της τάξεως του 2,5%.

2. Αλγόριθμος Kuramoto

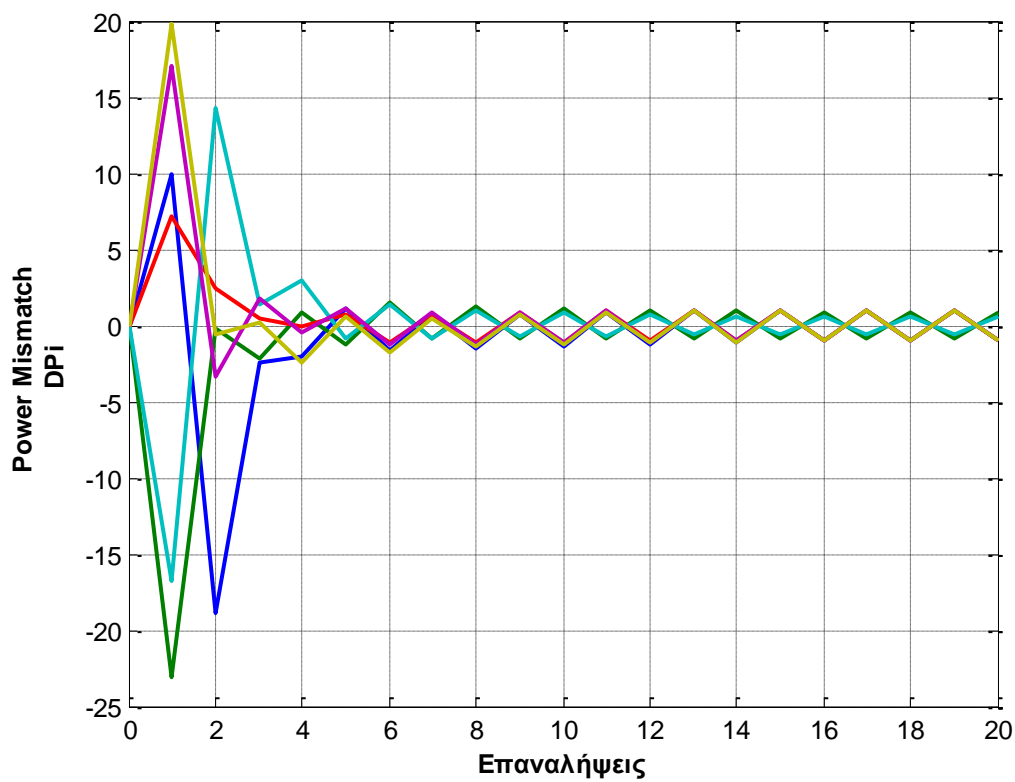
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Kuramoto στο ίδιο δίκτυο αναπαρίστανται μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.24: Οριακό Κόστος για αλγόριθμο Kuramoto



Σχήμα 6.25: Παραγωγή γεννητριών για αλγόριθμο Kuramoto



Σχήμα 6.26: Power Mismatch για αλγόριθμο Kuramoto

Βλέπουμε, λοιπόν ότι το οριακό κόστος συγκλίνει στην τιμή 3,7475€/MWh, πάλι μετά την 10^η επανάληψη, με αντίστοιχη κατανομή φορτίου στις γεννήτριες:

$$P_G = \begin{bmatrix} 43,7109 \\ 57,0721 \\ 21,9860 \\ 29,8452 \\ 14,9649 \\ 14,9687 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW.

Παρατηρούμε ότι αυτός ο τρόπος παρουσιάζει ταλαντώσεις και το power mismatch ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν, αλλά και πάλι επιτυγχάνεται σύγκλιση του οριακού κόστους και σταθεροποίηση των μονάδων σε μία τιμή παραγωγής.

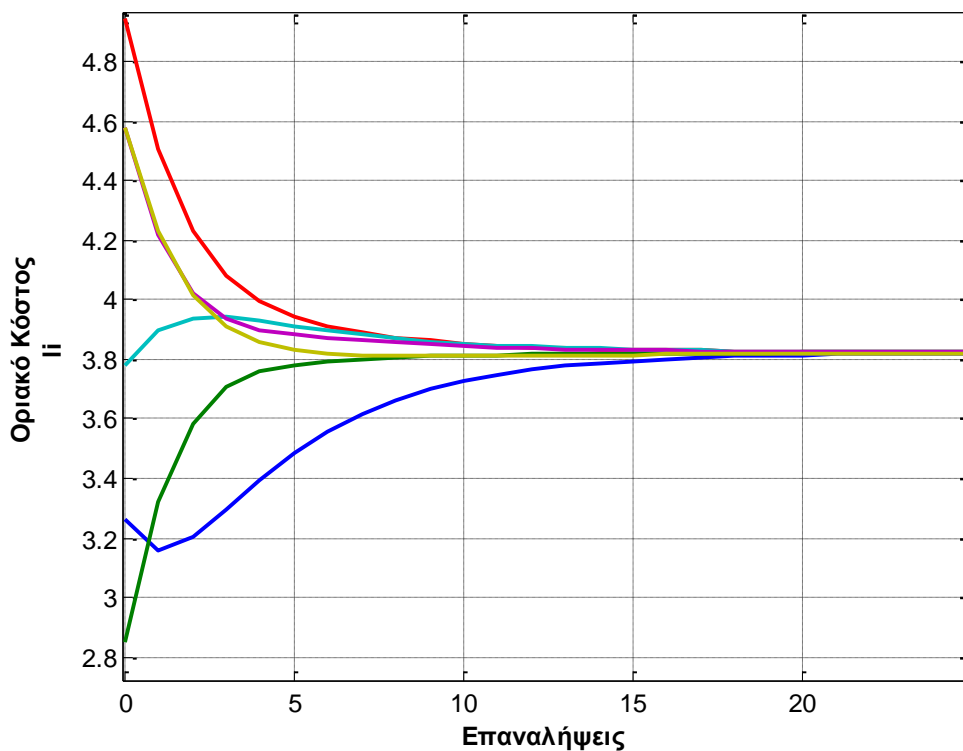
Το συνολικό κόστος παραγωγής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει:

$$C_{tot} = \sum C_i = 540,1366\text{€/h.}$$

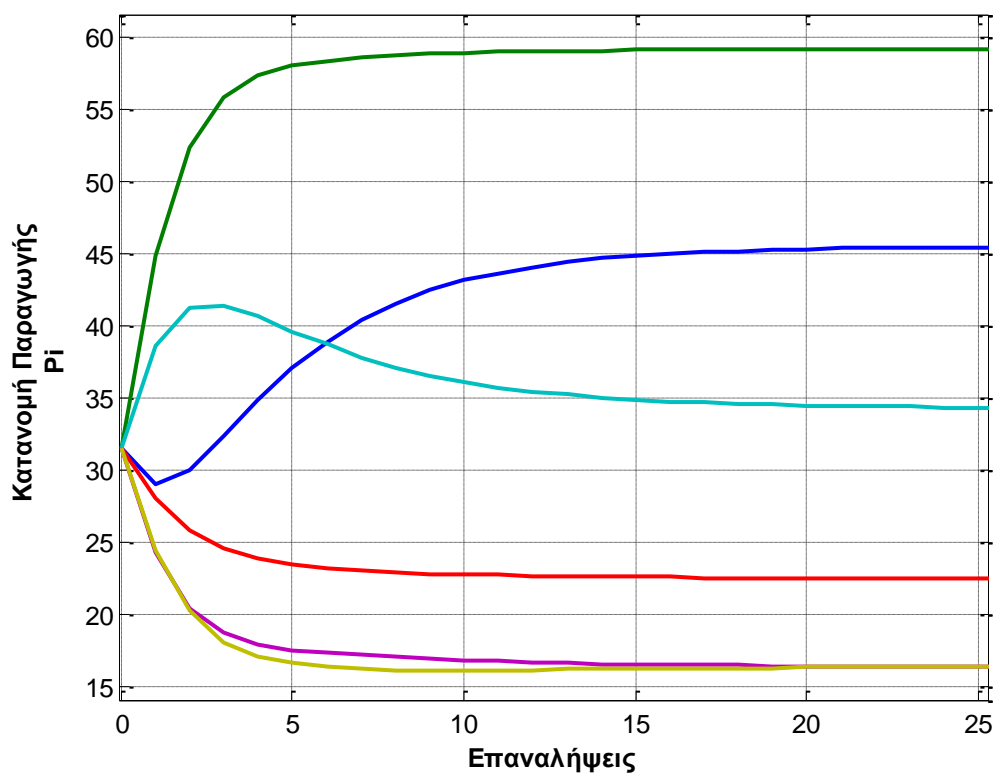
Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.12) της τάξεως του 3,5%.

3. Μη Γραμμικός Αλγόριθμος

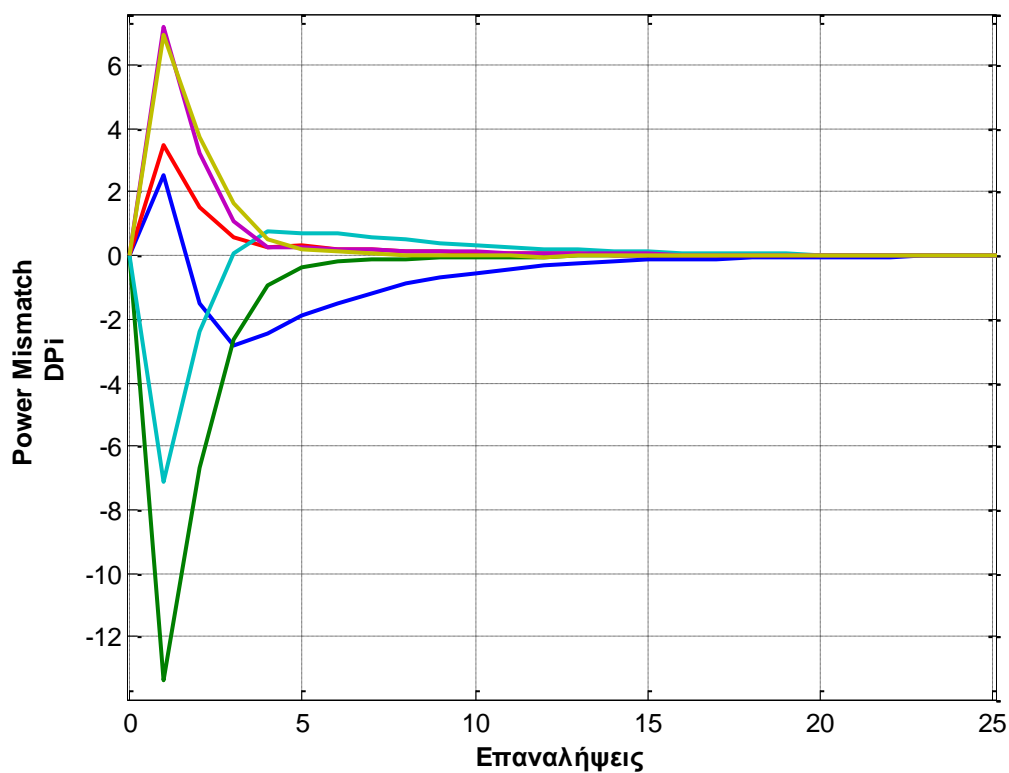
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή του μη γραμμικού αλγορίθμου στο δίκτυο αναπαρίστανται μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων.



Σχήμα 6.27: Οριακό κόστος για μη γραμμικό αλγόριθμο



Σχήμα 6.28: Παραγωγή γεννητριών για μη γραμμικό αλγόριθμο



Σχήμα 6.27: Power Mismatch για μη γραμμικό αλγόριθμο

Εδώ παρατηρούμε ότι το οριακό κόστος συγκλίνει στην τιμή 3,8223€/MWh, μετά την 20^η επανάληψη, και βλέπουμε ξανά ότι ο μη γραμμικός αλγόριθμος απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση του, όπως ήδη είδαμε στην πρώτη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου. Η κατανομή φορτίου στις γεννήτριες που προκύπτει μετά το πέρας του αλγορίθμου είναι:

$$P_G = \begin{bmatrix} 45,5567 \\ 59,2212 \\ 22,5843 \\ 34,3577 \\ 16,4609 \\ 16,4493 \end{bmatrix}$$

όπου το P_{Gi} εκφράζεται σε MW.

Παρατηρούμε, ακόμα, ότι αυτός ο τρόπος παρουσιάζει μεγάλη ομαλότητα στις μεταβολές των τιμών κατά την εκτέλεση των επαναλήψεων. Το power mismatch συγκλίνει στο μηδέν και επιτυγχάνεται σύγκλιση του οριακού κόστους και σταθεροποίηση των μονάδων σε μία τιμή παραγωγής.

Το συνολικό κόστος παραγωγής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει:

$$C_{tot} = \sum C_i = 585,8727\text{€/h.}$$

Τέλος, το ολικό power mismatch του συστήματος θα είναι τώρα σύμφωνα με τον τύπο (5.12) της τάξεως του 2,9%.

4. Σύγκριση με τα Αποτελέσματα του MATPOWER

Τώρα, ας δούμε συγκεντρωτικά σε ένα πίνακα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους αλγόριθμους που υλοποιήσαμε καθώς και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα που προκύπτουν μέσω τη συνάρτησης *runopf* του MATPOWER, η οποία λύνει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου για το συγκεκριμένο δίκτυο. Κατά την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου λαμβάνονται υπόψη και άλλοι περιορισμοί τους οποίους εμείς αγνοούμε κατά την επίλυση του προβλήματος, όπως όρια γραμμών και τάσεων στους κόμβους. Έτσι, η λύση της μπορεί να διαφέρει από αυτήν της απλής οικονομικής κατανομής του φορτίου. Προκειμένου να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από αυτούς τους παράγοντες και να προσεγγίσουμε τη λύση της οικονομικής κατανομής του φορτίου, χαλαρώσαμε τους περιορισμούς στις τάσεις και στις ροές των γραμμών που δίνονται στο αρχείο του matpower. Ακόμα, αναφέρεται και ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για τον τερματισμό του αλγορίθμου.

Παραγωγή Γεννητριών (MW)				
Γεννήτρια	MATPOWER	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	44,73	45,4585	43,7109	45,5567
2	58,26	59,0967	57,0721	59,2212
13	21,78	22,5473	21,9860	22,5843
22	32,31	34,0780	29,8452	34,3577
23	15,78	16,3683	14,9649	16,4609
27	16,33	16,3669	14,9687	16,4493
Σύνολο	189,19	193,9157	182,5478	194,6301

Πίνακας 7: Παραγωγή Γεννητριών

	MATPOWER	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
Επαναλήψεις	-	28	20	31
Λάμδα	3,789	3,8183	3,7475	3,8223

Πίνακας 8: Απαιτούμενες Επαναλήψεις - Λάμδα

Σχετικά Σφάλματα (%)			
Γεννήτρια	Γραμμικός	Kuramoto	Μη Γραμμικός
1	1,63%	-2,28%	1,85%
2	1,44%	-2,04%	1,65%
13	3,52%	0,95%	3,69%
22	5,47%	-7,63%	6,34%
23	3,73%	-5,17%	4,31%
27	0,23%	-8,34%	0,73%
Σύνολο	2,50%	-3,51%	2,88%

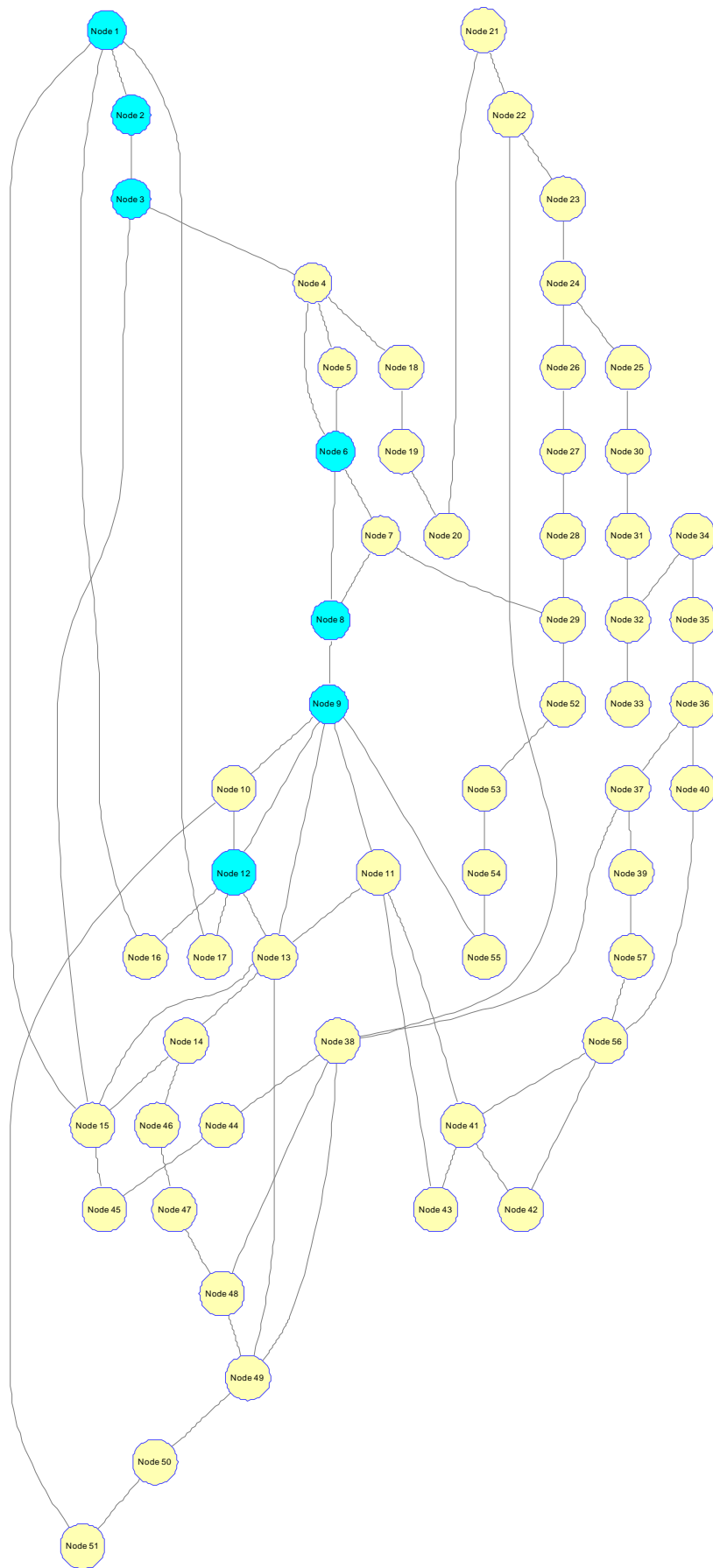
Πίνακας 9: Σχετικά Σφάλματα

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι και οι τρεις αλγόριθμοι προσεγγίζουν τη λύση που δίνεται από το MATPOWER, με το μικρότερο σφάλμα να το παρουσιάζει ο γραμμικός αλγόριθμος.

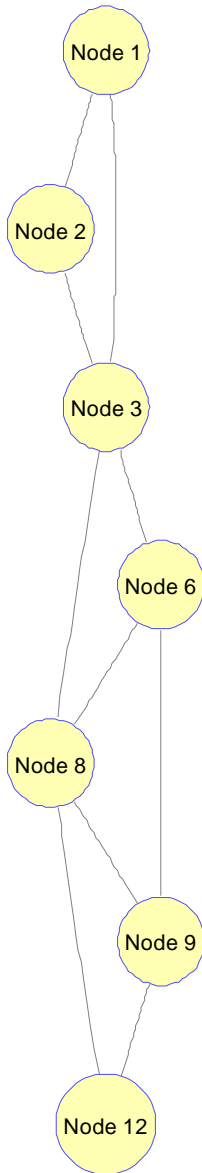
6.4.2 Άλλα Δίκτυα

Ακολούθως, επιλέξαμε να εξετάσουμε και ορισμένες άλλες τοπολογίες δικτύων, αυτή τη φορά όμως μόνο για τον γραμμικό αλγόριθμο ο οποίος είδαμε και ότι έχει τα καλύτερα αποτελέσματα από τους 3.

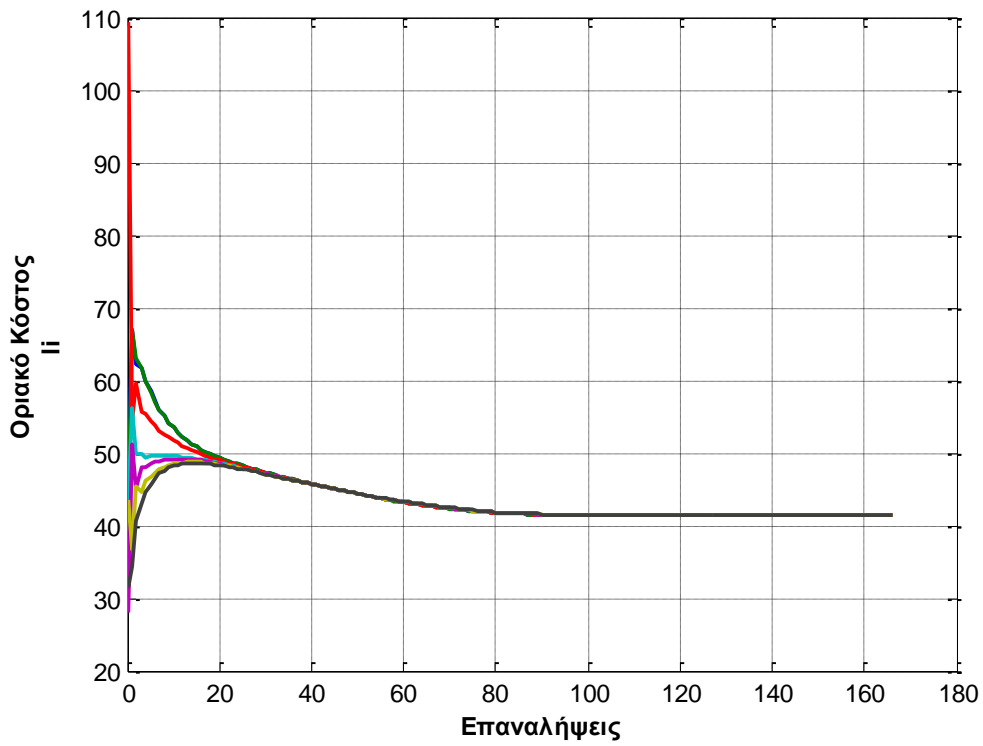
Ας δούμε αρχικά το δίκτυο *case57.m* το οποίο αποτελείται από 57 ζυγούς με 7 εκ των οποίων να αντιστοιχούν σε γεννήτριες. Αυτό έχει την τοπολογία που φαίνεται ακολούθως στο σχήμα (6.28), όπου με έντονο μπλε τονίζονται οι θέσεις των γεννητριών. Ο γράφος γεννητριών που προκύπτει είναι της μορφής του σχήματος (6.29). Για αυτό το δίκτυο προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα. Παρατηρούμε ότι το οριακό κόστος συγκλίνει στην τιμή 51,93€/MWh, με την παραγωγή στις μονάδες να είναι αυτή του σχήματος (6.31) και τέλος το power mismatch των μονάδων να συγκλίνει στο μηδέν.



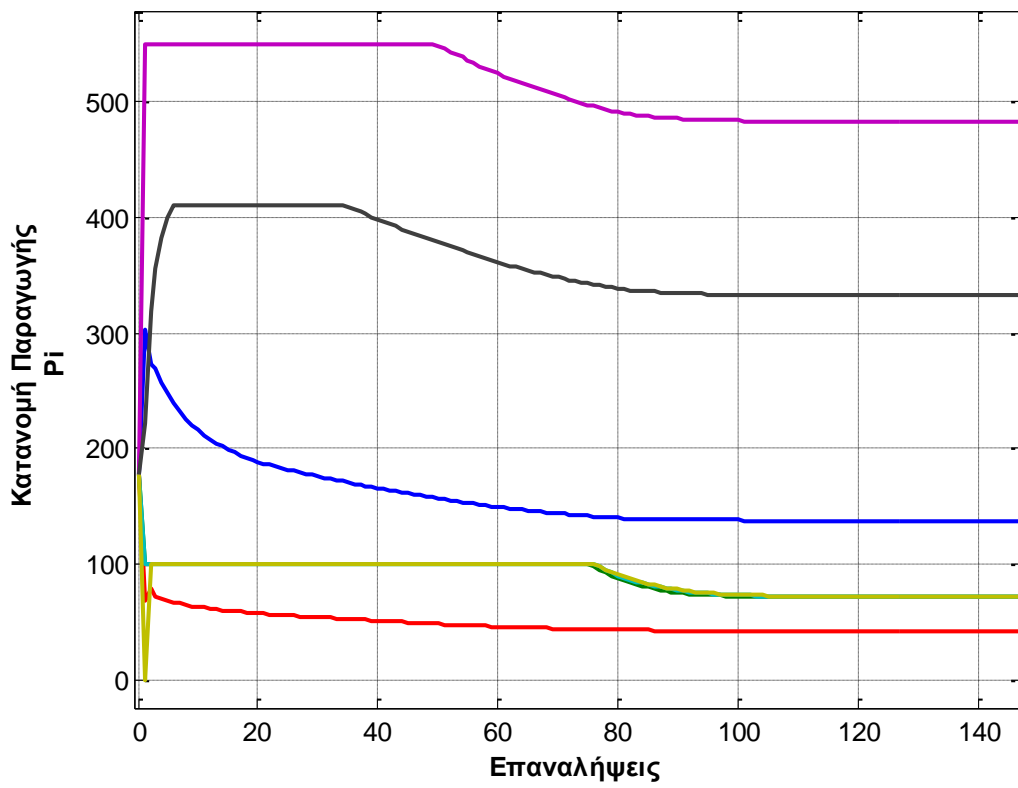
Σχήμα 6.28: Γράφος δικτύου 57 ζυγών



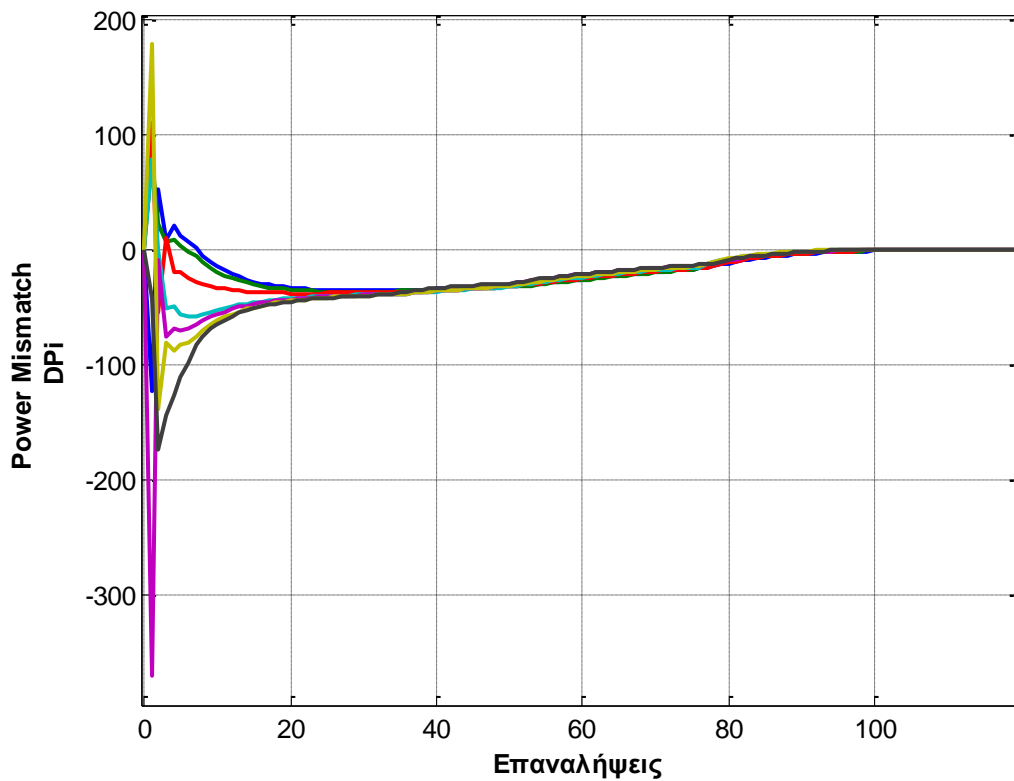
Σχήμα 6.29: Γράφος γεννητριών δικτύου 57 ζυγών



Σχήμα 6.30: Οριακό κόστος δικτύου 57 ζυγών

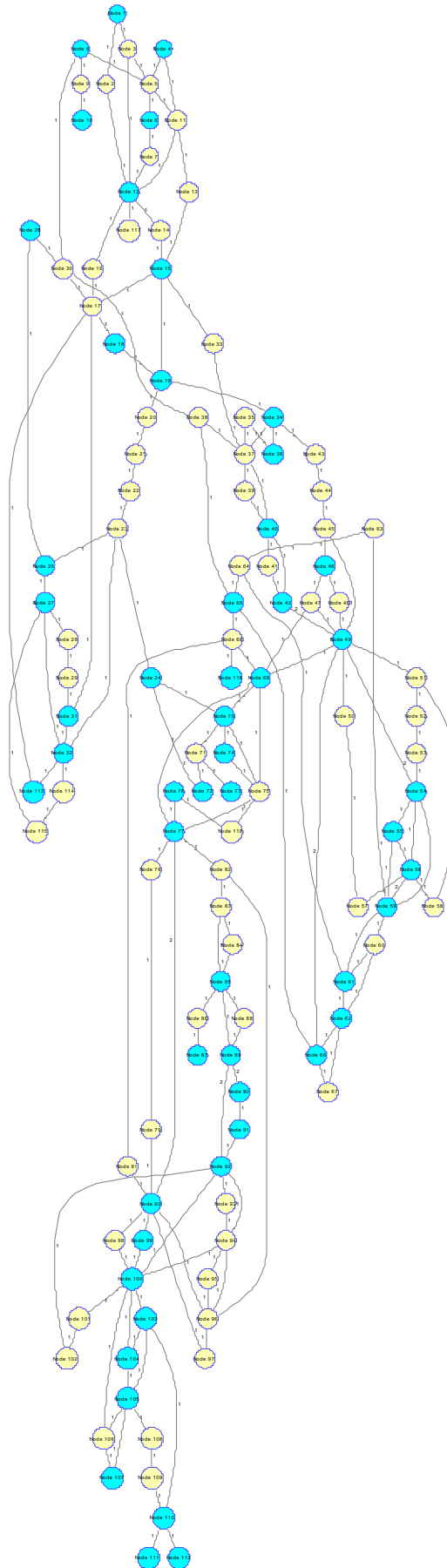


Σχήμα 6.31: Power Mismatch δικτύου 57 ζυγών

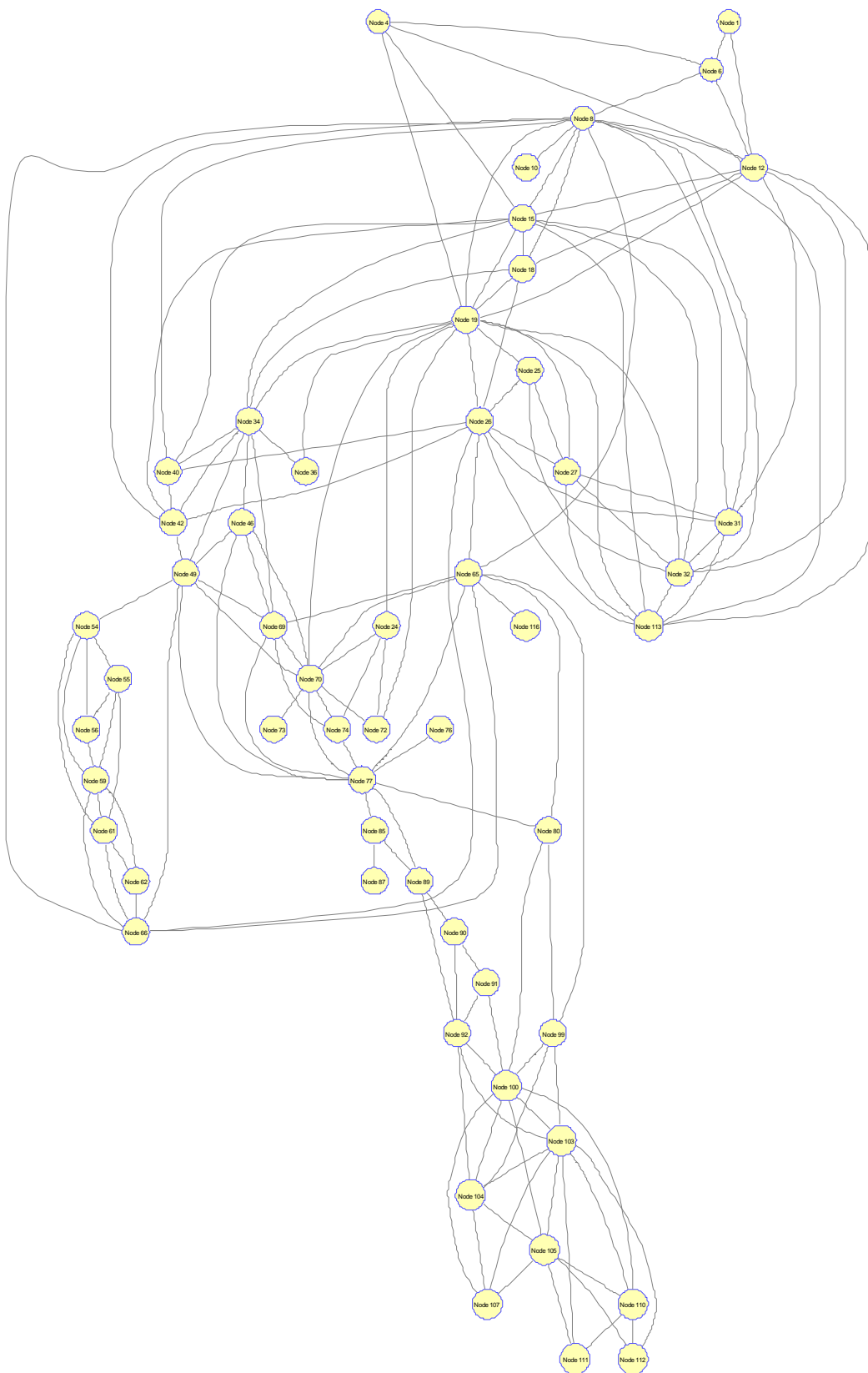


Σχήμα 6.30: Power Mismatch δικτύου 57 ζυγών

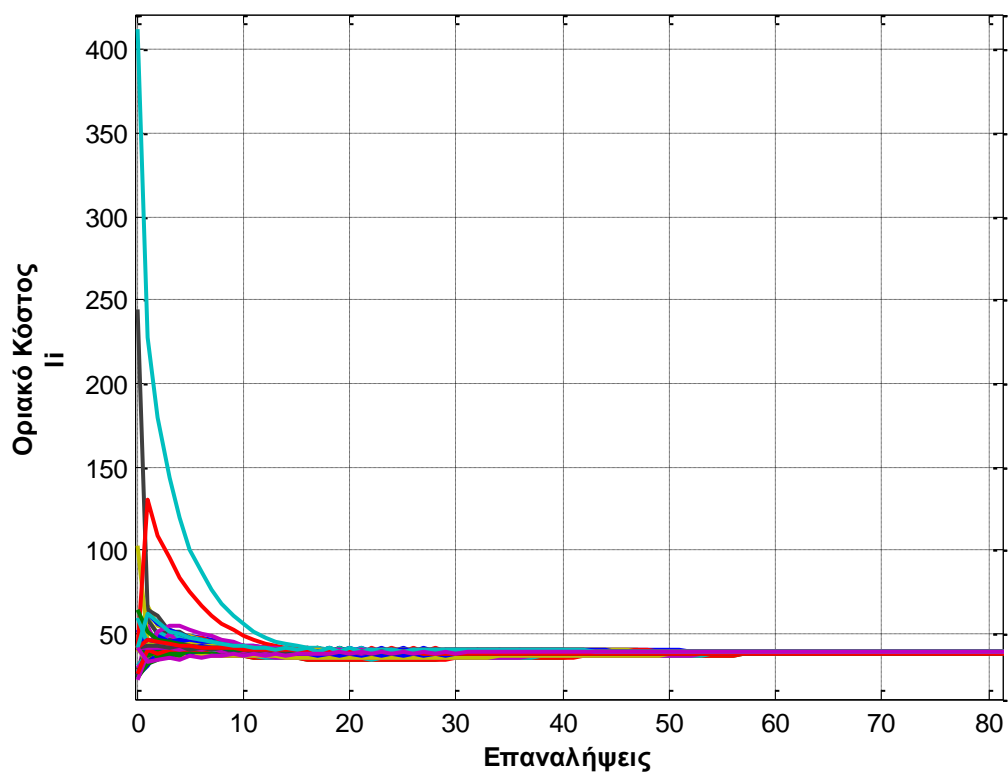
Αντίστοιχα τώρα θα μελετήσουμε το δίκτυο *case118.m* το οποίο αποτελείται από 118 ζυγούς με 54 από αυτούς να αντιστοιχούν σε γεννήτριες. Αυτό έχει την τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα (6.33), όπου με έντονο μπλε τονίζονται οι θέσεις των γεννητριών. Ο γράφος γεννητριών που προκύπτει είναι της μορφής του σχήματος (6.34). Για το δίκτυο αυτό ύστερα από την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψε πάλι σύγκλιση στην τιμή 38,4€/MWh όπως φαίνεται και στο σχήμα (6.35). Ακόμα στο σχήμα (6.36) φαίνεται η κατανομή του φορτίου στις γεννήτριες, ενώ στο σχήμα (6.37) φαίνεται ότι επιτυγχάνεται σύγκλιση του power mismatch στο μηδέν.



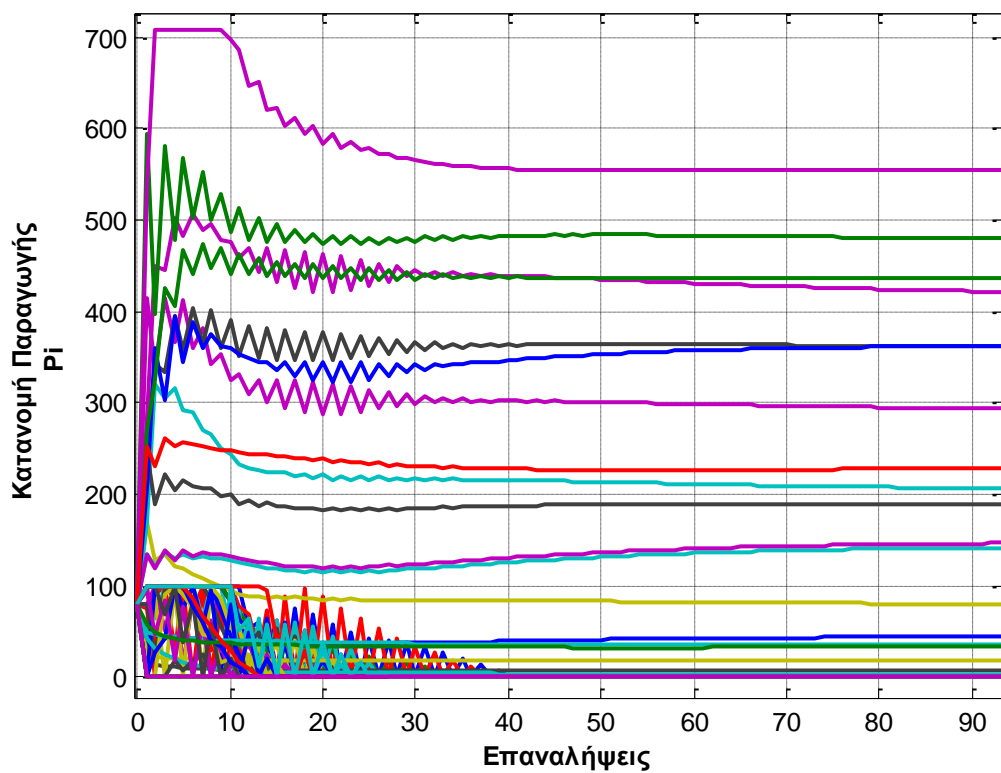
Σχήμα 6.33: Γράφος δικτύου 118 ζυγών



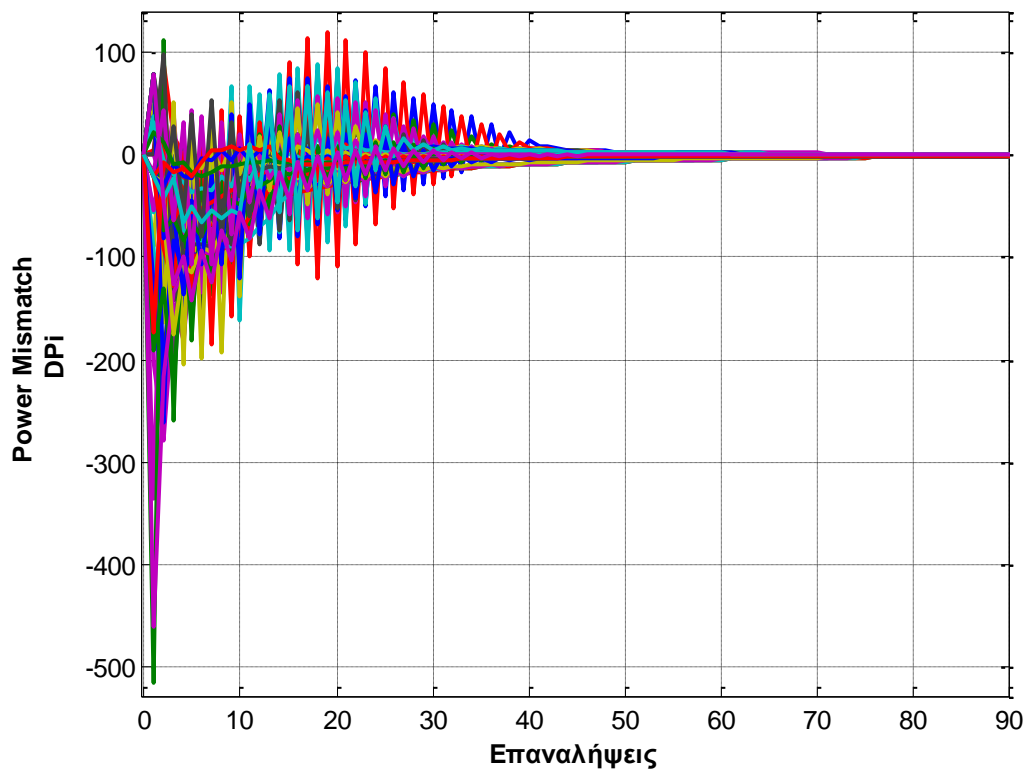
Σχήμα 6.34: Γράφος γεννητριών δικτύου 118 ζυγών



Σχήμα 6.35: Οριακό κόστος δικτύου 118 ζυγών



Σχήμα 6.36: Παραγωγή γεννητριών δικτύου 118 ζυγών



Σχήμα 6.37: Power Mismatch δικτύου 118 ζυγών

Κεφάλαιο 7

Εφαρμογή Αλγορίθμου σε Καμπύλη Φορτίου

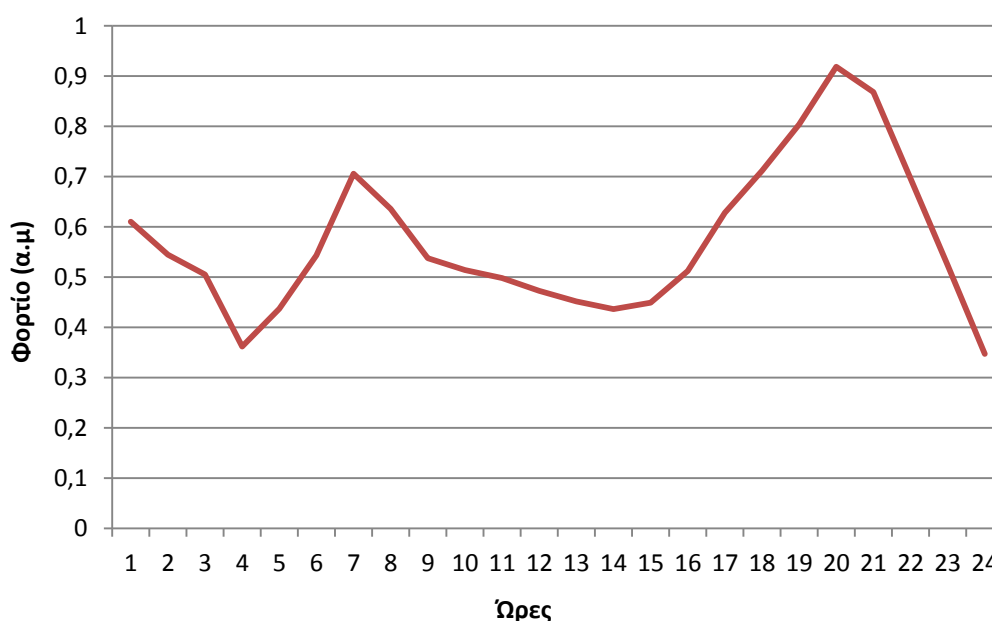
7.1 Καμπύλες Φορτίου

Για την σωστή λειτουργία του συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 απαιτείται μια σωστή πρόβλεψη του φορτίου. Πρώτη είναι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, προκειμένου να γίνει σωστός προγραμματισμός του συστήματος. Για την έκφραση και τη μελέτη της πρόβλεψης της ζήτησης φορτίου χρησιμοποιούνται οι καμπύλες φορτίου. Ο συνηθέστερος διαχωρισμός τους είναι σε χρονολογικές καμπύλες φορτίου και σε καμπύλες διάρκειας φορτίου. Οι πρώτες εκφράζουν το φορτίο ως προς την μελετώμενη χρονική περίοδο (ημέρες, ώρες κτλ) ενώ οι δεύτερες παριστάνουν το φορτίο διατεταγμένα κατά σειρά μεγέθους στη διάρκεια της μελετώμενης περιόδου.[27]

Για το πρόβλημα που μελετάμε είναι χρήσιμη η ημερήσια χρονολογική καμπύλη φορτίου, η οποία εκφράζει το προβλεπόμενο φορτίο του συστήματος κάθε ώρα για το διάστημα μίας ημέρας. Σκοπός μας είναι να καταφέρει ο αλγόριθμος να προσαρμόζει κάθε ώρα την παραγωγή των γεννητριών προκειμένου να επιτευχθεί η εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης. Στις επόμενες παραγράφους θα μελετηθεί αναλυτικά πώς θα καταστεί αυτό δυνατό.

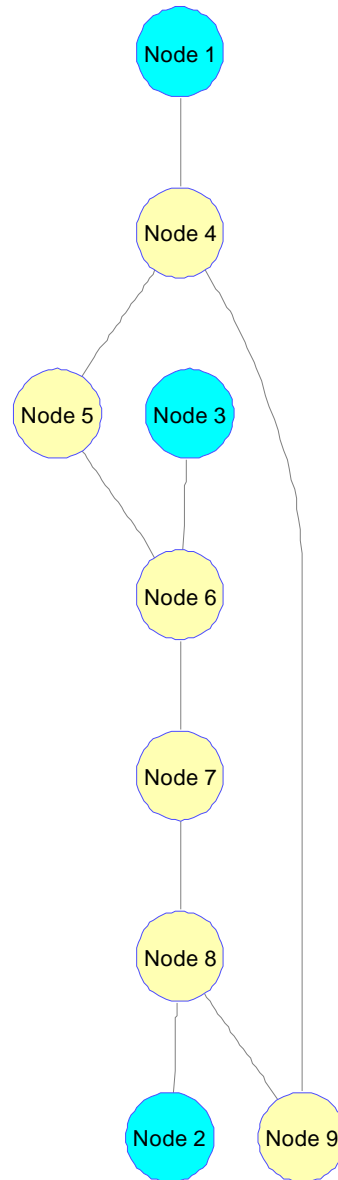
7.2 Μελέτη Αλγορίθμου με Χρήση Καμπύλης Φορτίου

Έχοντας μία δεδομένη καμπύλη φορτίου για το διάστημα μίας ημέρας, δηλαδή 24^{ωv} ωρών, πρέπει να κάνουμε τις κατάλληλες προσαρμογές, προκειμένου ο αλγόριθμός μας να τη διαβάζει και να μπορεί να αλλάζει κάθε ώρα το φορτίο που καλείται να καλύψει. Η καμπύλη φορτίου εκφράζεται με μία τιμή φορτίου για κάθε ώρα της ημέρας. Αυτές τις τιμές τις αποθηκεύουμε προσωρινά σε ένα πίνακα προκειμένου να μπορούν να προσπελαστούν από τον αλγόριθμό μας. Έτσι τώρα θα τρέχουμε τον αλγόριθμο κάθε φορά για μία τιμή του πίνακα μέχρι να προσπελαστεί όλος. Έστω ότι έχουμε την ανηγμένη καμπύλη φορτίου του σχήματος 7.1.

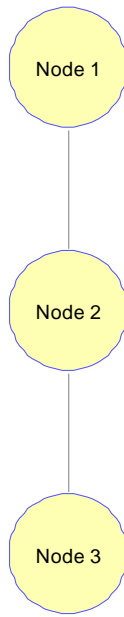


Σχήμα 7.2: Ημερήσια Καμπύλη Φορτίου

Ας μελετήσουμε το δίκτυο *case9.m* του MATPOWER, το οποίο αποτελείται από 9 ζυγούς με 3 εκ των οποίων να αντιστοιχούν σε γεννήτριες. Θέλουμε να δούμε για τη διάρκεια μίας ημέρας πως προσαρμόζεται ο αλγόριθμος στις αλλαγές του φορτίου. Ο γράφος του δικτύου και των γεννητριών παρουσιάζονται στα σχήματα 7.2 και 7.3 αντίστοιχα. Προκειμένου, όμως, να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε την καμπύλη φορτίου θα πρέπει να την εκφράσουμε σε φυσικά μεγέθη. Θεωρώντας ότι η ονομαστική ισχύς του δικτύου αντιστοιχεί στο 0,7 της καμπύλης φορτίου και γνωρίζοντας την τιμή αυτής από το αρχείο του δικτύου, θα δημιουργήσουμε έναν πίνακα με τα αντίστοιχα φυσικά μεγέθη των φορτίων.

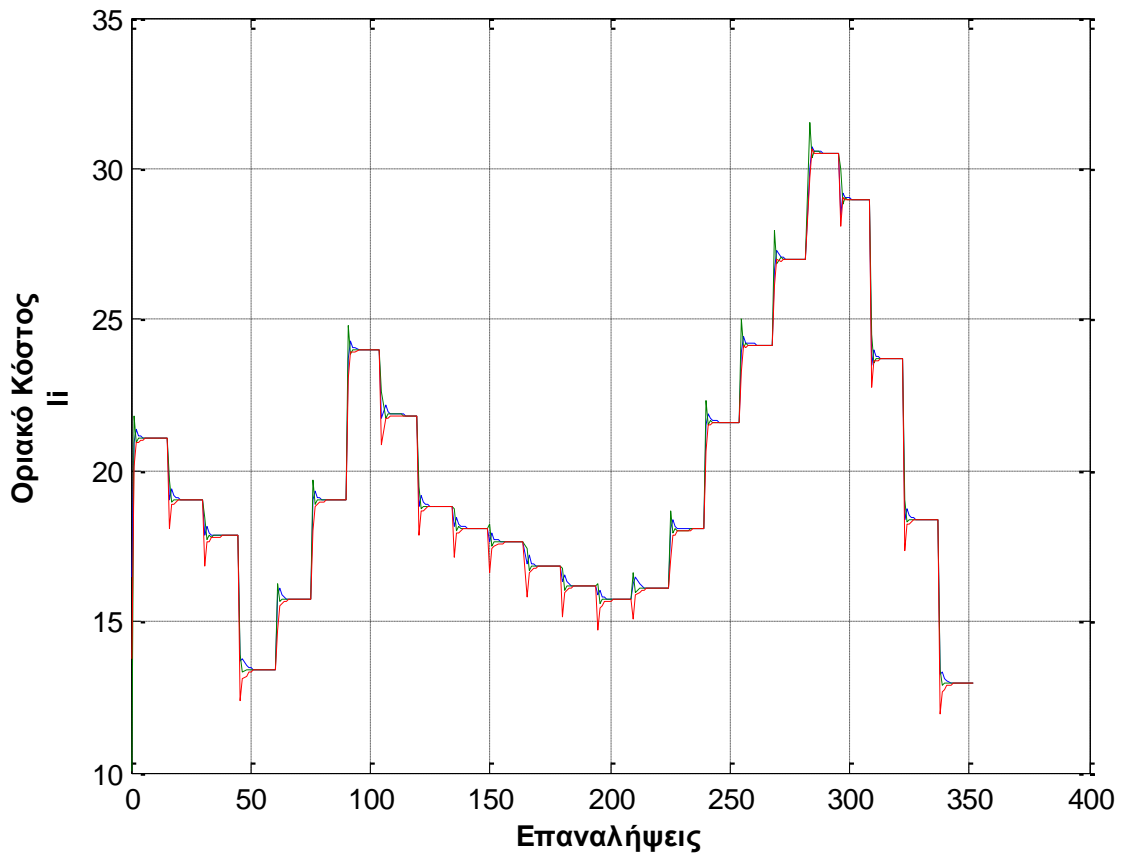


Σχήμα 7.2: Γράφος δικτύου 9 ζυγών

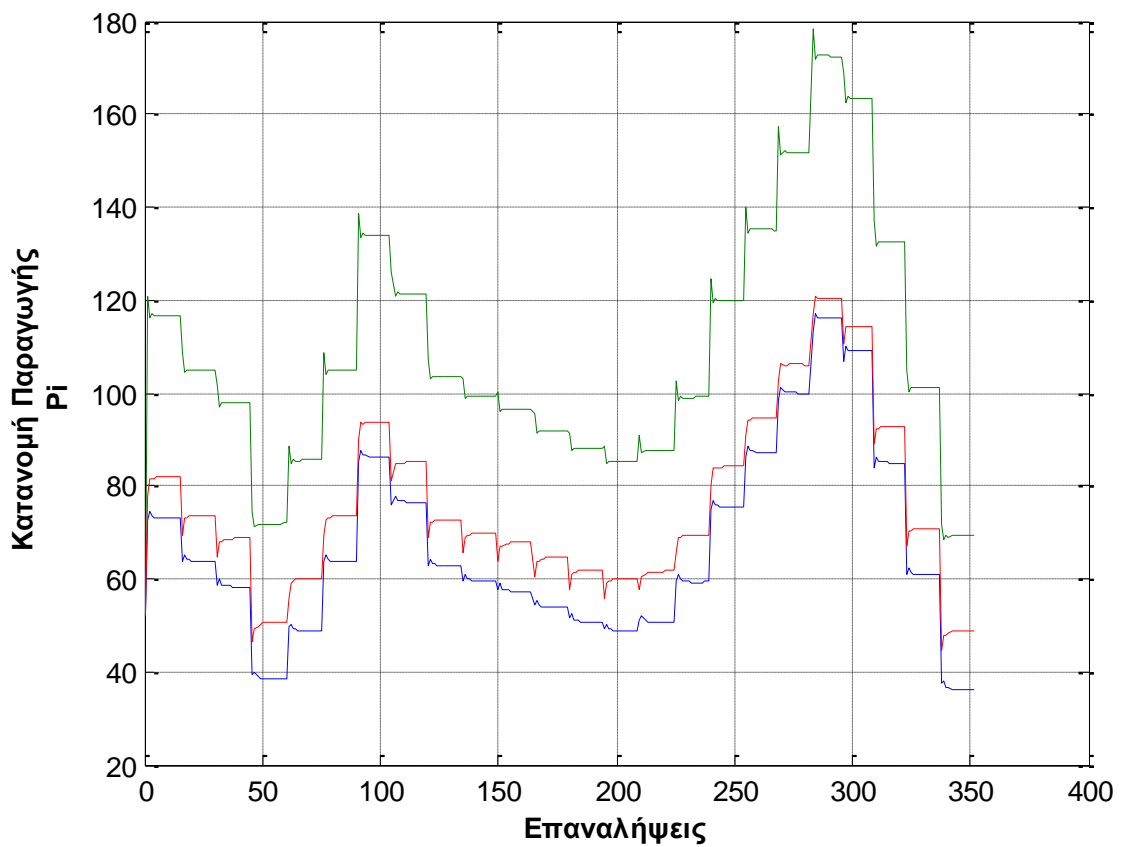


Σχήμα 7.3: Γράφος γεννητριών δικτύου 9 ζυγών

Έχοντας τα παραπάνω, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου με τη χρήση αυτής της καμπύλης προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.

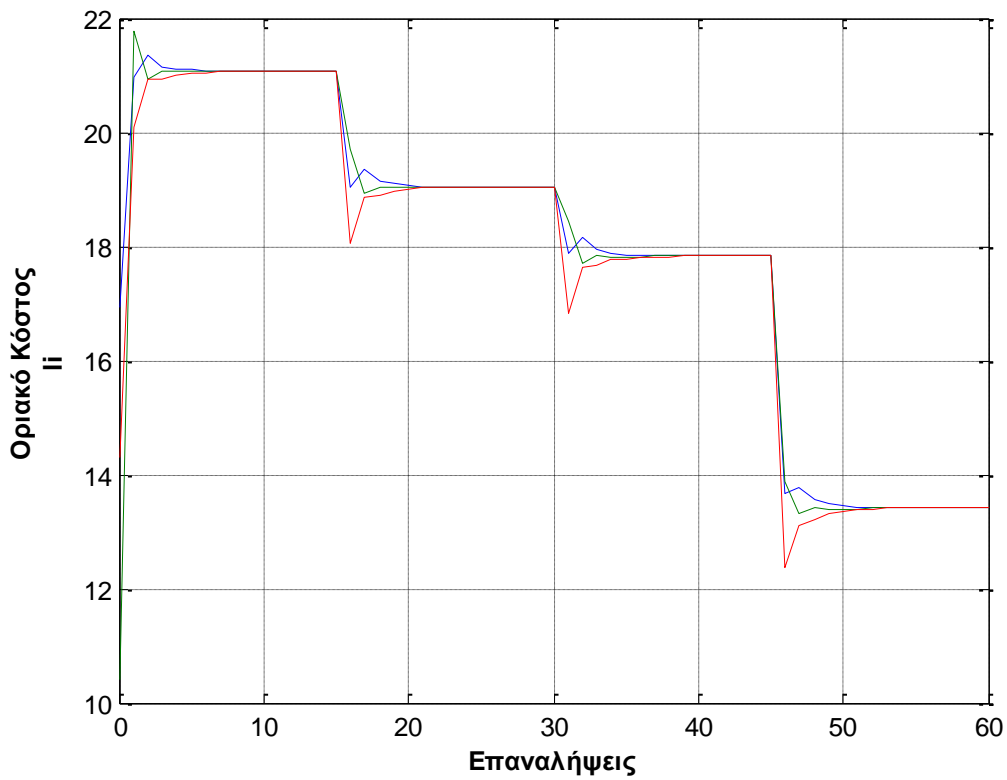


Σχήμα 7.4: Οριακό κόστος στη διάρκεια μίας ημέρας

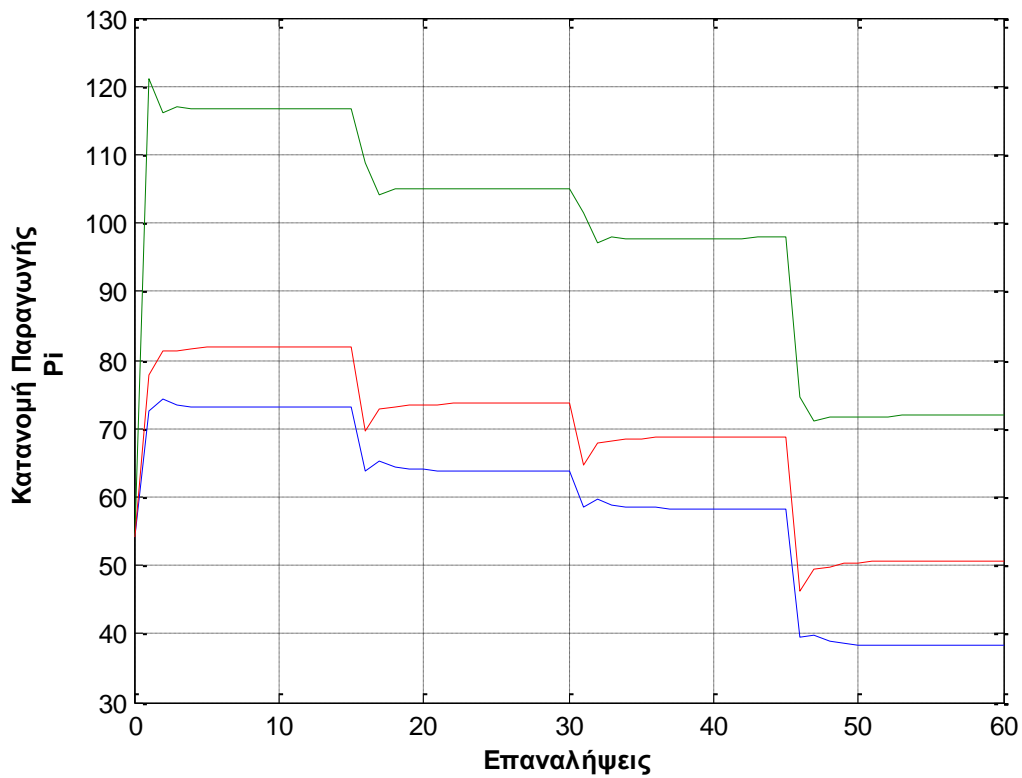


Σχήμα 7.5: Παραγωγή γεννητριών στη διάρκεια μίας ημέρας

Έτσι βλέπουμε ότι το οριακό κόστος σε κάθε διαφορετικό φορτίο συγκλίνει μετά την πάροδο λίγων επαναλήψεων και καταλήγουμε στην παραγωγή του σχήματος 7.5. Ακόμα το ολικό power mismatch στο σύστημα διατηρείται πάντα γύρω από το 1%. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι τόσο η παραγωγή, όσο και το οριακό κόστος ακολουθούν την μορφή της καμπύλης φορτίου, όπως αναμέναμε. Για να δούμε ακόμα πιο καθαρά την σύγκλιση του αλγορίθμου αξίζει να δούμε τα παρακάτω διαγράμματα και για μικρότερο αριθμό ωρών. Όπως θα δούμε λοιπόν στα σχήματα 7.6 και 7.7, μετά από μόλις 5 επαναλήψεις το οριακό κόστος συγκλίνει και η παραγωγή των γεννητριών σταθεροποιείται στην τελική τους τιμή.



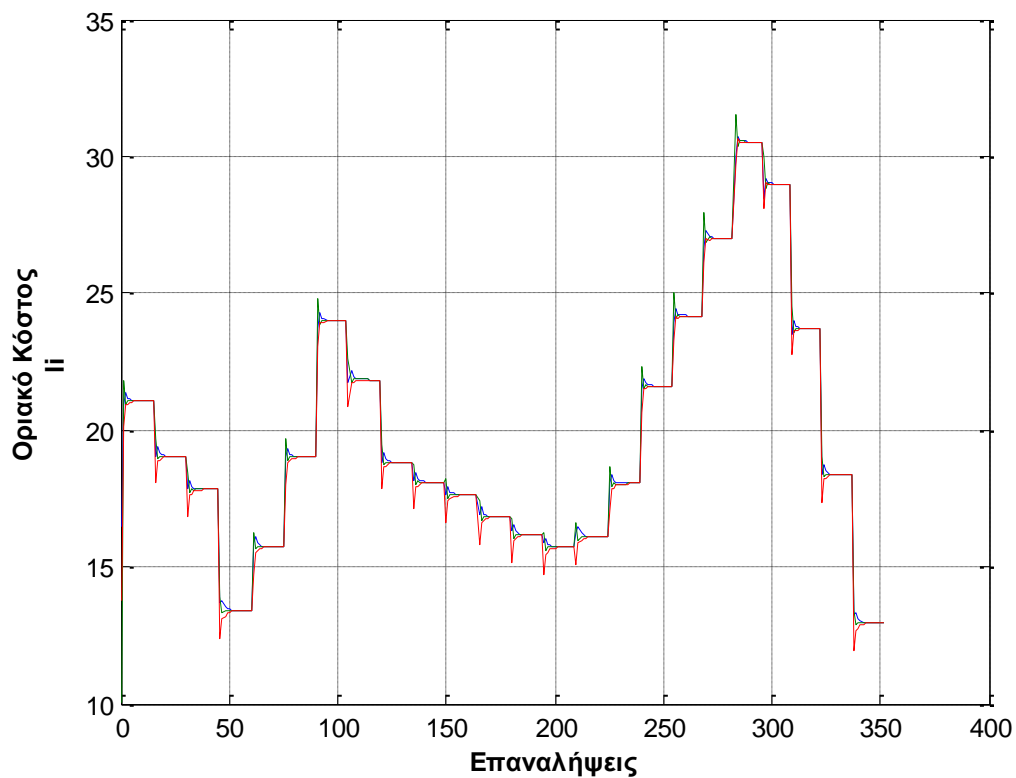
Σχήμα 7.6: Οριακό κόστος για τις 4 πρώτες ώρες της ημερήσιας καμπύλης φορτίου



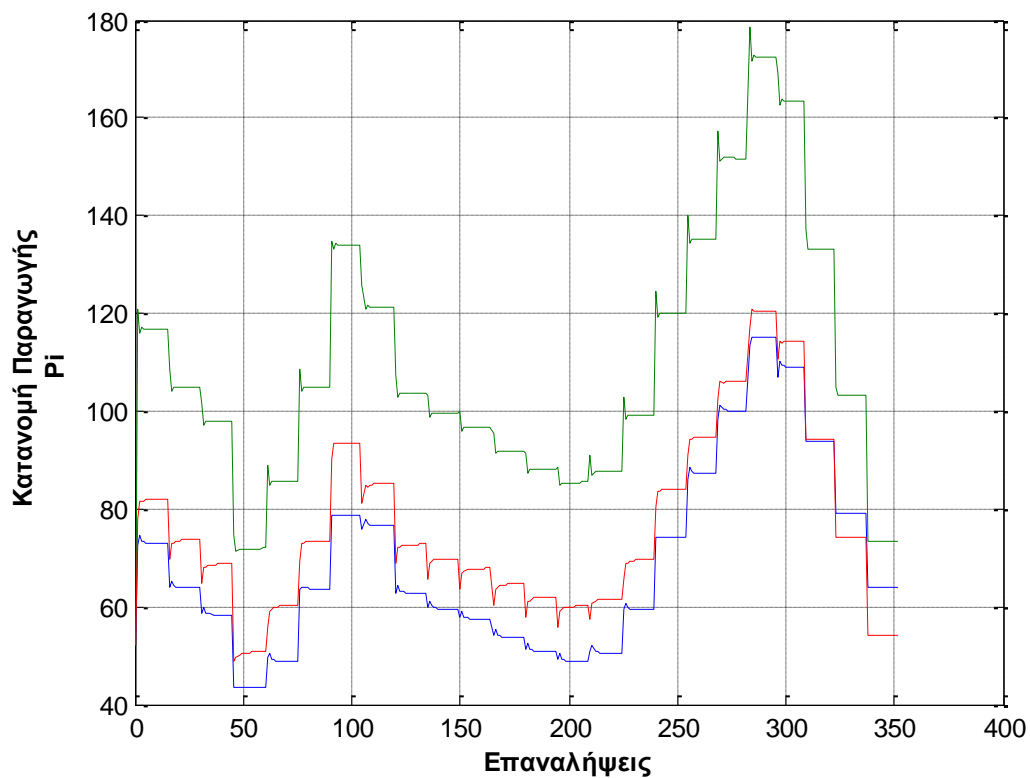
Σχήμα 7.7: Παραγωγή γεννητριών για τις 4 πρώτες ώρες της ημερήσιας καμπύλης φορτίου

7.3 Εφαρμογή Με Περιορισμούς Γεννητριών

Για να έχουμε μία πληρέστερη μελέτη, τέλος, θα συμπεριλάβουμε στο παραπάνω πρόβλημα και τους περιορισμούς των γεννητριών όπως αυτοί αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 3.5 αυτής της εργασίας. Τώρα, θα γίνεται έλεγχος και για την ικανότητα των γεννητριών να καλύψουν αυτό το φορτίο μέσα στην επόμενη ώρα. Τα αρχεία του MATPOWER μας δίνουν πληροφορίες τόσο για τη δυνατότητα αύξησης όσο και μείωσης του φορτίου για κάθε γεννήτρια. Έτσι, διαβάζοντας αυτές τις πληροφορίες και εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.25) για την ανανέωση των τιμών της παραγωγής, προκύπτουν τα αποτελέσματα που ακολουθούν.

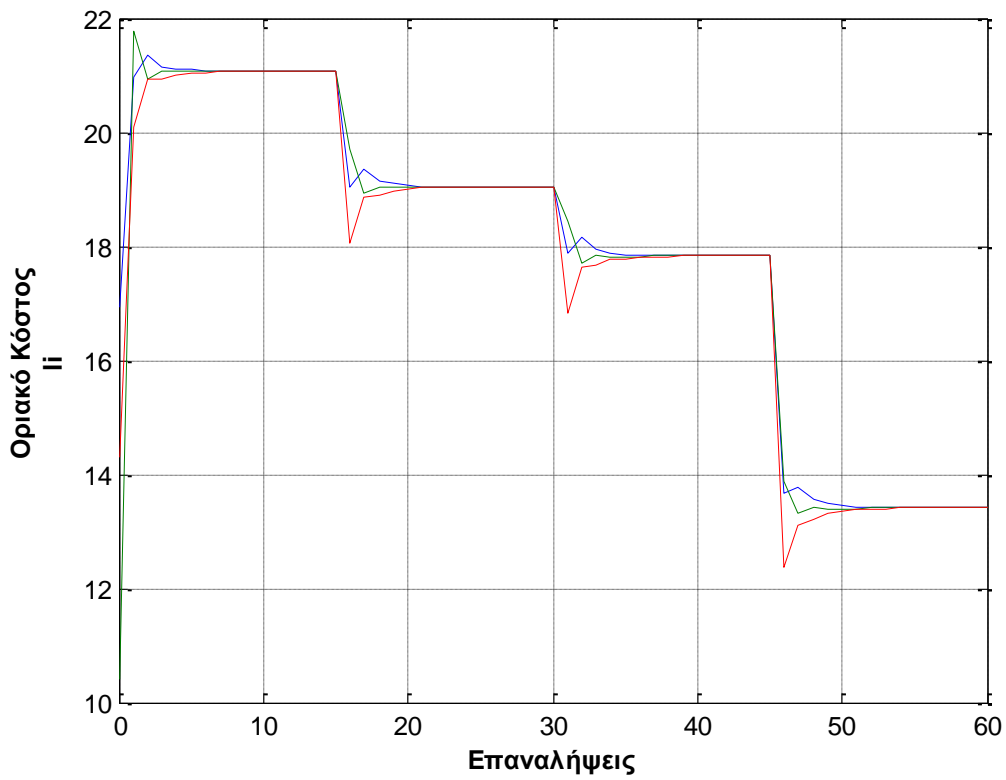


Σχήμα 7.8: Οριακό κόστος με περιορισμούς γεννητριών

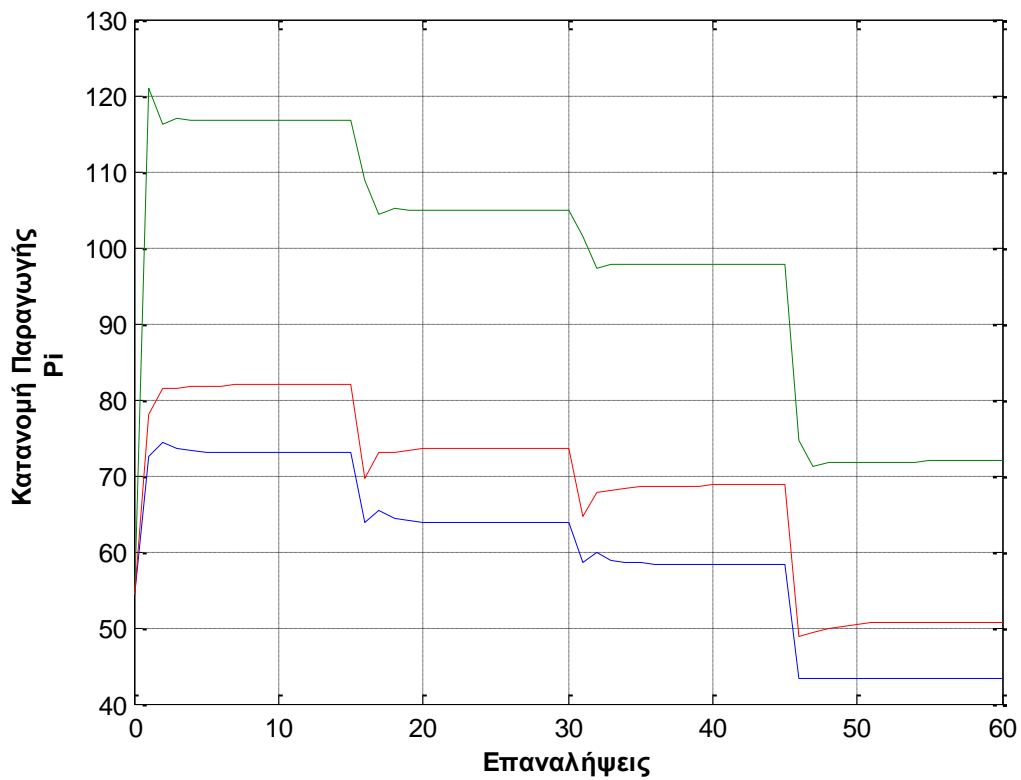


Σχήμα 7.9: Παραγωγή γεννητριών με περιορισμούς γεννητριών

Παρατηρούμε, ότι ακόμα επιτυγχάνεται σύγκλιση και ότι τα παραπάνω διαγράμματα και σε αυτή την περίπτωση ακολουθούν τη μορφή της καμπύλης φορτίου. Η διαφορά έγκειται στην τελική τιμή της παραγωγής των γεννητριών μιας και τώρα δεν μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν απεριόριστα αλλά περιορίζονται από μία συνάρτηση ράμπας. Έτσι παρουσιάζεται διαφορά μεταξύ των 2 κατανομών. Εδώ το ολικό mismatch του συστήματος λόγω αυτού του περιορισμού είναι λίγο πιο αυξημένο ανά περιπτώσεις και φτάνει το 2,5%. Αντίστοιχα για τις 4 πρώτες ώρες της καμπύλης φορτίου προκύπτουν τα διαγράμματα:



Σχήμα 7.10: Οριακό κόστος για τις 4 πρώτες ώρες της ημερήσιας καμπύλης φορτίου



Σχήμα 7.11: Παραγωγή γεννητριών για τις 4 πρώτες ώρες της ημερήσιας καμπύλης φορτίου

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα - Προοπτικές

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν αποκεντρωμένες προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου. Αναπτύχθηκαν και προτάθηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι και έγινε εκτέλεση διαφόρων προσομοιώσεων με τη χρήση του περιβάλλοντος MATLAB. Ύστερα από ανάλυση όλων των συμπερασμάτων των επιμέρους κεφαλαίων, μπορούμε να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητα τέτοιου είδους αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους λογική. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με μία τελείως κατανεμημένη, μη ιεραρχική προσέγγιση, αφού οι μεταβλητές κάθε κόμβου προσαρμόζουν την κατάστασή τους ανταλλάσσοντας και αναλύοντας μόνο τοπικές μεταβλητές, χωρίς την ανάγκη κέντρου ελέγχου. Έτσι ο προτεινόμενος αυτός τρόπος λύσης προσφέρει δυνατότητες επεκτασιμότητας, ευελιξίας και αυτό-οργάνωσης του δικτύου.

Η προσέγγιση των λύσεων έγινε με τη χρήση του μοντέλου συναίνεσης, όπου ο κάθε κόμβος ανανεώνει την τιμή του βάσει ενός κανόνα με τη χρήση βαρών που προκύπτουν από την τοπολογία του δικτύου, ώστε να καταλήξουν τελικά όλοι οι κόμβοι σε ένα σταθμισμένο μέσο όρο που θα αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ακόμα, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής διόρθωσης του οριακού κόστους ο οποίος εγγυάται την εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης ισχύος.

Για αυτή τη διαδικασία προτάθηκαν τρεις διαφορετικοί κανόνες και κατά συνέπεια αλγόριθμοι. Ένας γραμμικός κανόνας για την ανανέωση των τιμών του οριακού κόστους, ένας βασισμένος στο μοντέλο του Kuramoto και ένας μη γραμμικός με χρήση εκθετικών όρων. Η απόδοση των τριών προτεινόμενων αλγορίθμων εκτιμάται μέσω διαφόρων προσομοιώσεων, όπου παρατηρήθηκε ότι όλοι συγκλίνουν με ικανοποιητική ακρίβεια στη βέλτιστη λύση με σφάλμα μικρότερο του 5%. Αναλύοντας την κάθε προσέγγιση ξεχωριστά καταλήγουμε στον πιο αποδοτικό αλγόριθμο ο οποίος είναι ο γραμμικός αφού έχει το μικρότερο χρόνο σύγκλισης και ταυτόχρονα συγκλίνει ομαλότερα στην λύση του προβλήματος (δηλαδή χωρίς την εμφάνιση ταλαντώσεων για την προσέγγιση της λύσης). Από την άλλη, ο αλγόριθμος Kuramoto είναι εξίσου γρήγορος αλλά εμφανίζει ταλαντωτικά φαινόμενα στην προσέγγιση της λύσης, και τέλος ο μη γραμμικός, ενώ παρουσιάζει πολύ ομαλές μεταβολές στην προσέγγιση της λύσης, απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων για τη σύγκλιση.

Ακόμα, μελετήθηκαν οι παραπάνω προτεινόμενες υλοποιήσεις τόσο αμελώντας όσο και λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στους υπολογισμούς και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα. Είδαμε έτσι ότι όλοι οι αλγόριθμοι μπόρεσαν να ανταποκριθούν και στην κάλυψη των απωλειών των γραμμών μεταφοράς με κατανεμημένο τρόπο, καταλήγοντας σε λίγο πιο υψηλή παραγωγή – και αντίστοιχα πιο υψηλό οριακό κόστος – για κάθε γεννήτρια.

Αναλύθηκε, επίσης, η επίδραση της τοπολογίας του δικτύου στην ταχύτητα σύγκλισης των αλγορίθμων. Αρχικά, δημιουργήσαμε τυχαίους πίνακες γειτνίασης για τις 12 μονάδες του δικτύου που μελετάμε και είδαμε το πώς επηρεάζει η συνδεσιμότητά τους την ταχύτητα σύγκλισης. Καταλήξαμε έτσι στο ότι όλες οι τοπολογίες συγκλίνουν στη λύση και ότι όσες περισσότερες ακμές (διασυνδέσεις) υπάρχουν μεταξύ των κόμβων (μονάδων) του δικτύου τόσο γρηγορότερα επιτυγχάνεται σύγκλιση στην επιθυμητή λύση. Ακόμα, δείξαμε

αναλυτικά τα αποτελέσματα ορισμένων κλασικών τοπολογιών δικτύου, όπως ακτινικό, πλήρους επικοινωνίας, αλυσίδας, αστέρα κτλ.

Σε επόμενη φάση, μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής του συντελεστή σύγκλισης ϵ στην επίτευξη της σύγκλισης. Είδαμε έτσι ότι όσο αυτός μεγαλώνει δημιουργεί αστάθεια και ταλαντωτική συμπεριφορά του οριακού κόστους, λόγω των μεγάλων μεταβολών που αυτό του επιβάλλει.

Άξια μελέτης θεωρήθηκε και η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση. Ο αριθμός αυτός επηρεάζεται κυρίως από τα πρωτόκολλα σύζευξης των ταλαντωτών των κόμβων καθώς και από την τοπολογία του δικτύου και συγκεκριμένα από τη δεύτερη μικρότερη ιδιοτιμή του Λαπλασιανού πίνακα. Έτσι, μελετήθηκε το πώς επηρεάζει ο αριθμός των κόμβων του συστήματος τον αριθμό επαναλήψεων. Η μελέτη έγινε ξεκινώντας από ένα απλό δίκτυο 2 μονάδων και καταλήγοντας σε πιο περίπλοκο δίκτυο που περιλαμβάνει 55 μονάδες, αναπτύσσοντάς το σε ακτινική μορφή. Δείχθηκε λοιπόν ότι αύξηση των κόμβων ενός συστήματος σημαίνει και αύξηση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου, μιας και όσο πιο μεγάλο το δίκτυο τόσο μεγαλύτερος ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για την επίτευξη της σύγκλισης. Η πολυπλοκότητα που προέκυψε σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα βλέπουμε ότι παρουσιάζει μη εκθετική μορφή.

Σε επόμενη φάση εφαρμόσαμε τον αλγόριθμο σε ρεαλιστικά δίκτυα μεταφοράς χρησιμοποιώντας το πακέτο MATPOWER, το οποίο προσφέρει έτοιμα δίκτυα και συναρτήσεις που καθιστούν τη μελέτη τους ευκολότερη. Μελετήσαμε έτσι δίκτυα 30, 57 και 118 ζυγών και είδαμε ότι καταλήγουμε πάντα σε σύγκλιση και μάλιστα σε πολύ καλή προσέγγιση της λύσης που προσφέρεται από το MATPOWER, με πολύ μικρό σφάλμα πάλι τάξεως μικρότερου του 5%.

Τέλος, εφαρμόσαμε τον αλγόριθμό μας με τη χρήση μίας ημερήσιας καμπύλης φορτίου ως είσοδο για τη ζήτηση ισχύος. Είδαμε, έτσι, ότι τόσο η παραγωγή όσο και το οριακό κόστος ακολουθούν τη μορφή της δεδομένης καμπύλης φορτίου και καλύπτουν την αντίστοιχη ζήτηση με πολύ μικρό σφάλμα. Ακόμα, εισήχθησαν τα όρια των μονάδων που αφορούν την ταχύτητα αύξησης ή μείωσης της παραγόμενης ισχύος τους. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα οι μονάδες έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν την τιμή της εξόδου τους μόνο κατά ένα συγκεκριμένο ποσό. Τα όρια αυτά εκφράζονται ως συναρτήσεις ράμπας, μία που αφορά το ρυθμό αύξησης της παραγωγής και μία αντίστοιχα για το ρυθμό μείωσης. Έτσι, μελετήθηκε πώς επηρεάζει αυτός ο περιορισμός την κατανομή του φορτίου στις γεννήτριες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Προέκυψε, λοιπόν ότι η λύση προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε κατά την κατανομή του φορτίου στις γεννήτριες να λαμβάνονται υπόψη τα όρια αυτά και να μην επιτρέπονται απότομες αλλαγές της ισχύος των μονάδων παραγωγής στη μονάδα του χρόνου.

8.2 Προοπτικές – Μελλοντική Εργασία

Η καταναεμημένη προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων του ηλεκτρικού δικτύου προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα ειδικά όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την καταναεμημένη παραγωγή και την υλοποίηση έξυπνων συστημάτων, δημιουργώντας πολλά ενδιαφέροντα ερωτήματα προς μελλοντική μελέτη. Ένα βασικό θέμα μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη κατάλληλων αρχιτεκτονικών και αλγορίθμων, τα οποία να αξιοποιούν τους ευφυείς μετρητές, την αποθήκευση ενέργειας και γενικά τη νέα μορφή επικοινωνίας των μελλοντικών δικτύων, για καλύτερη και αποδοτικότερη αξιοποίηση των πληροφοριών που αυτά προσφέρουν. Ειδικά, όσον αφορά την ανάπτυξη του ευφυούς δικτύου, πρέπει να τεθούν οι προδιαγραφές που πρέπει να διέπουν το δίκτυο επικοινωνίας των διαφόρων στοιχείων του δικτύου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και ομαλή και συνεχής ανταλλαγή των πληροφοριών.

Ενδιαφέρον, επίσης προκαλεί και η μελέτη για την μείωση του απαιτούμενου χρόνου σύγκλισης τέτοιων μεθόδων, εξελίσσοντας τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, εκμεταλλευόμενοι νέες τεχνολογίες.

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής της εργασίας μπορούν να υπάρξουν βελτιώσεις, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερους περιορισμούς του δικτύου και χρησιμοποιώντας πιο ακριβείς σχέσεις υπολογισμού των μεταβλητών, ώστε να γίνει δυνατή και μετέπειτα υλοποίηση και δοκιμή τέτοιων αλγορίθμων σε πραγματικά δίκτυα. Για παράδειγμα παράγοντες που μπορεί να ληφθούν υπόψη είναι οι περιορισμοί μεταφοράς των γραμμών, οι εκπομπές καυσαερίων των μονάδων [10], αλλά και χρήση ακριβέστερης σχέσης για τον υπολογισμό του κόστους.

Το πρόβλημα, ακόμα, μπορεί να επεκταθεί με ενσωμάτωση στην ανάλυσή του και μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μονάδων αποθήκευσης, υδροηλεκτρικών και μονάδων συμπαραγωγής, οι οποίες περιγράφονται με διαφορετικές συναρτήσεις κόστους από τις συμβατικές θερμικές μονάδες που χρησιμοποιούν καύσιμα όπως αναλύθηκαν σε αυτή την εργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] Kundur, P., Balu, N. and Lauby, M. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.
- [2] Γιαννακόπουλος, Γ. and Βοβός, Ν. (2008). *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Ζήτη.
- [3] Admie.gr. (2016). *Περιγραφή Συστήματος Μεταφοράς | ΑΔΜΗΕ*. [online] Available at: <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/perigrifi-systimatos-metaforas/>
- [4] Rae.gr. (2016). *ΠΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. [online] Available at: http://www.rae.gr/site/categories_new/electricity.csp
- [5] ILSR.org. (2011). *The Challenge of Reconciling a Centralized v. Decentralized Electricity System*. [online] Available at: <https://ilsr.org/challenge-reconciling-centralized-v-decentralized-electricity-system/>
- [6] Smartgrids.eu. (2016). *News 2014 and before | SmartGrids*. [online] Available at: http://www.smartgrids.eu/News_2014_and_before
- [7] Grainger, J., Stevenson, W. and Stevenson, W. (1994). *Power system analysis*.
- [8] Zhu, J. (2009). *Optimization of power system operation*. Piscataway, N.J.: Wiley-IEEE.
- [9] V. Loia and A. Vaccaro, "Decentralized Economic Dispatch in Smart Grids by Self-Organizing Dynamic Agents," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 44, no. 4, pp. 397-408, April 2014.
- [10] Ongsakul, W. and Vo, D. (2013). *Artificial intelligence in power system optimization*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis.
- [11] R. Mudumbai, S. Dasgupta and B. B. Cho, "Distributed control for optimal economic dispatch of power generators: The heterogenous case," *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, FL, 2011, pp. 7123-7128.
- [12] Kit Po Wang and J. Yuryevich, "Evolutionary-programming-based algorithm for environmentally-constrained economic dispatch," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 301-306, May 1998.
- [13] Senthil, K. (2010). Combined Economic Emission Dispatch using Evolutionary Programming Technique. *International Journal of Computer Applications*, ecot(2), pp.62-66.
- [14] Goldberg DE. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley; 1989.
- [15] Won, J. and Park, Y. (2003). Economic dispatch solutions with piecewise quadratic cost functions using improved genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(5), pp.355-361.
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, Perth, WA, 1995, pp. 1942-1948 vol.4.
- [17] Kumar, R., Sharma, D. and Sadu, A. (2011). A hybrid multi-agent based particle swarm optimization algorithm for economic power dispatch. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(1), pp.115-123.

- [18] Wen, F. and David, A. (2001). Optimal bidding strategies for competitive generators and large consumers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23(1), pp.37-43.
- [19] Indulkar, C. S., Ramalingam, K. (2008). Monte Carlo analysis applied to economic power dispatch. XXXII National Systems Conference, NSC
- [20] Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems*. Harlow [etc.]: Addison-Wesley.
- [21] Gensollen, N., Gauthier, V., Marot, M. and Becker, M. (2013). Modeling and optimizing a distributed power network : A complex system approach of the prosumer management in the smart grid. *Cornell University*. [online] Available at: <https://arxiv.org/abs/1305.4096>
- [22] A. Vaccaro, D. Villacci and R. Marotta, "A bio inspired computing paradigm for decentralized economic dispatch," *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*, Florence, 2012, pp. 663-667.
- [23] G. Binetti, A. Davoudi, F. L. Lewis, D. Naso and B. Turchiano, "*Distributed Consensus-Based Economic Dispatch With Transmission Losses*," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1711-1720, July 2014.
- [24] Dorfler, F., Chertkov, M. and Bullo, F. (2013). Synchronization in complex oscillator networks and smart grids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(6), pp.2005-2010.
- [25] Oppenheim, A., Willsky, A. and Nawab, S. (1997). *Signals & systems*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- [26] S. Barbarossa and G. Scutari, "*Decentralized Maximum-Likelihood Estimation for Sensor Networks Composed of Nonlinearly Coupled Dynamical Systems*," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 7, pp. 3456-3470, July 2007.
- [27] Παπαδιάς, Β., Κονταξής, Γ. (2003). *Ηλεκτρική Οικονομία*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.