



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

**Κατανεμημένος αλγόριθμος για προγραμματισμό μονάδων
αποθήκευσης σε μικροδίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Α. Γάτος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Αθήνα, Μάρτιος 2018



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

Κατανεμημένος αλγόριθμος για προγραμματισμό μονάδων αποθήκευσης σε μικροδίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Α. Γάτος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Μαρτίου 2018.

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

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2018

Ανδρέας Α. Γάτος

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

Copyright © Ανδρέας Γάτος, 2018.

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

Η συνεχής επέκταση των ηλεκτρικών δικτύων με σκοπό την ένταξη όλο και περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποθηκευτικών μονάδων, καθώς και η ανάπτυξη τεχνικών διεσπαρμένης παραγωγής, δημιούργησε την ανάγκη ύπαρξης ευφυών δικτύων που να επιλύουν βέλτιστα το πρόβλημα του προγραμματισμού της παραγωγής. Ο προγραμματισμός της παραγωγής έχει ως σκοπό το βέλτιστο καθορισμό της εξόδου για ένα συγκεκριμένο αριθμό γεννητριών με σκοπό την ικανοποίηση της ζήτησης, με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τηρώντας τους περιορισμούς του συστήματος (π.χ. να μην παραβιάζεται το μέγιστο όριο παραγωγής των γεννητριών).

Για τη βελτιστοποίηση του εν λόγω κόστους, αφού κατασκευάστηκε η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange, επιλύθηκε με πολλαπλασιαστές Lagrange (ο αριθμός των οποίων είναι ανάλογος της ποσότητας των περιορισμών). Στη συνέχεια διαφορίζεται η συνάρτηση αυτή συναρτήσει των πολλαπλασιαστών Lagrange καθώς και των μεταβλητών που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, χρησιμοποιείται η μέθοδος βελτιστοποίησης Gradient Descent, για την επίλυση του προβλήματος. Η επαναληπτική μέθοδος βελτιστοποίησης Gradient Descent έχει ως σκοπό την εύρεση του ελαχίστου σε μία αντικειμενική συνάρτηση. Στη Gradient Descent, κάθε μεταβλητή (που τίθεται προς ελαχιστοποίηση), ανανεώνει την τιμή της αφαιρώντας σε κάθε βήμα την παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης. Η επαναληπτική μέθοδος συγκλίνει, ή αλλιώς τερματίζει, όταν η διαφορά της προηγούμενης και της ανανεωμένης μεταβλητής φτάσει σε μία ελάχιστη τιμή.

Στην παρούσα διπλωματική, ο πολλαπλασιαστής Lagrange που αφορά τον περιορισμό ισότητας (η παραγωγή να είναι ίση με τη ζήτηση – έστω λ) υπολογίζεται με δύο τρόπους και στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Στον πρώτο τρόπο, το λ υπολογίζεται από έναν κεντρικό διαχειριστή, ο οποίος κατέχει όλες τις πληροφορίες για όλους τους κόμβους και λαμβάνει τις δέουσες αποφάσεις. Στον μεν δεύτερο, χρησιμοποιείται το μοντέλο συναίνεσης (consensus model) για την εύρεση του λ . Πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία στην οποία οι γειτονικοί κόμβοι ανταλλάζουν πληροφορίες μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ιδιωτικότητα στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο πίνακας γειτνίασης του δικτύου, από τον οποίο υπολογίζεται ο πίνακας βαρών, ο οποίος με τη σειρά του χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο συναίνεσης. Έτσι, οι κόμβοι ανταλλάζουν τιμές μόνο με τους γειτονικούς τους, υπολογίζοντας ένα σταθμισμένο μέσο όρο για τη ζητούμενη μεταβλητή.

Η ανάπτυξη και οι αντίστοιχες προσομοιώσεις των αλγορίθμων έγιναν με τη χρήση του προγράμματος MATLAB. Για την υλοποίηση του αλγορίθμου Gradient Descent θεωρήθηκαν αμελητέες οι απώλειες μεταφοράς των γραμμών του δικτύου. Θεωρήθηκε ότι γίνεται πεντάωρος προγραμματισμός του φορτίου σε έξι ζυγούς. Στη συνέχεια έγινε επέκταση του προγραμματισμού της παραγωγής για εικοσιτέσσερις ώρες. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για διάφορες περιπτώσεις με μεταβολή των δεδομένων (π.χ. μείωση της ζήτησης) και μελετήθηκαν οι επιπτώσεις τους στην ισχύ του δικτύου καθώς και στο συνολικό κόστος. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε υλοποιείται με τους δύο παραπάνω τρόπους που περιγράφηκαν, πρώτα υπολογισμός του πολλαπλασιαστή με κεντρικό ελεγκτή και ύστερα με την τεχνική της διεσπαρμένης παραγωγής. Για την υλοποίηση της δεύτερης τεχνικής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο συναίνεσης. Τέλος, μετά το πέρας των προσομοιώσεων και με τις δύο τεχνικές έγινε σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων, εξάχθηκαν συμπεράσματα και υπολογίστηκε το μεταξύ τους σφάλμα.

Λέξεις Κλειδιά: Προγραμματισμός Παραγωγής, Πολλαπλασιαστές Lagrange, Αλγόριθμος Gradient Descent, Μοντέλο Συναίνεσης, Ευφυή Δίκτυα, Μέσα Αποθήκευσης Ενέργειας, Κατανεμημένος Αλγόριθμος.

Abstract

The continuous growth of electrical grids for the purpose of integrating more renewable energy resources, storage devices and the development of distributed production techniques, created the need for smart grids, which will solve optimally the problem of production scheduling. The purpose of production scheduling is to determinate the optimal output of a number of electricity generators, to meet the system load, at the lowest possible cost, subject to transmission and operational constraints (for instance not to violate the maximum production limit of the generators).

For the optimization of this particular cost, the augmented Lagrangian function was constructed and then it was solved with the Lagrangian multipliers (the number of which is proportional to the quantity of the constraints). After that, this function is differentiated subject to the Lagrangian multipliers and the variables that need to be minimized. After this procedure is completed, the optimization technique of Gradient Descent is used to solve the problem. Gradient Descent is defined as the iterative optimization algorithm for finding the minimum of an objective function. In order to find the minimum using Gradient Descent, one takes steps proportional to the negative of the gradient of the function at the current point. The iterative procedure converges, or else it is terminated, when the difference between the previous and the new variable reaches a minimum value.

In the current dissertation, the Lagrangian multiplier that refers to the equality constraint (production must be equal to the demand – λ) is calculated using two approaches and then the results are compared. In the first case, λ is calculated by a central operator, who gathers all the information about all the nodes and makes the appropriate decisions. In the second case however, the consensus model is used in order to find the variable λ . This model is an iterative procedure where all the neighboring nodes exchange information with each other. For this purpose, the adjacency matrix of the grid is used, for the calculation of the weight matrix, which will be used by the consensus algorithm. Consequently, the nodes need only to exchange values with their neighbors, calculating a weighted average for the requested value.

The development and the simulations of the algorithms were made using the MATLAB environment. In order to execute the Gradient Descent algorithm, the transmission losses of the lines of the grid were not taken into account. A five-hour load scheduling was studied in a six-node distribution grid. Then, the simulation horizon was extended to calculate the daily scheduling. Simulations were conducted for different scenarios by modifying various parameters (e.g. reduction of demand). The effects of each parameter to the final schedule and the total cost were studied. The developed algorithm was tested with the two previous approaches, firstly by calculating the Lagrangian multiplier with a central controller and secondly by employing distributed energy management. Finally, the results were compared, errors were computed and conclusions were drawn.

Key words: Production Scheduling, Lagrange Multipliers, Gradient Descent Algorithm, Consensus Model, Smart Grids, Storage Devices, Distributed Algorithm.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της εν λόγω 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.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον ερευνητή κ. Ιάσονα Κουβελιώτη Λυσικάτο για την προθυμία του να βοηθήσει καθώς και τη συνεχή του καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για την αμέριστη στήριξη, αγάπη και τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου για την απεριόριστη υποστήριξη που μου παρείχαν τόσο υλικά όσο και ψυχολογικά σε όλα τα βήματα της ζωής μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract.....	5
Ευχαριστίες.....	6
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός και αντικείμενο.....	10
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	10
Κεφάλαιο 2 – Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	13
2.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	13
2.1.2 Δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	14
2.1.3 Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	14
2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
2.3 Εγκαταστάσεις Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	19
2.4 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids).....	20
Κεφάλαιο 3 – Κεντρική και Κατανεμημένη Διαχείριση Ενέργειας.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	24
3.2 Κεντρική Ενεργειακή Διαχείριση (CEMS).....	24
3.3 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων - ΣΠΠ (Multi-Agent Systems - MAS).....	26
3.3.1 Εισαγωγή.....	26
3.3.2 Σύστημα Πολλαπλών Πρακτόρων στο μικροδίκτυο.....	27
3.4 Κατανεμημένη Ενεργειακή Διαχείριση (DEMS).....	28
Κεφάλαιο 4 - Προγραμματισμός Παραγωγής.....	30
4.1 Εισαγωγή.....	31
4.2 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλασιαστές Lagrange και συνθήκες Karush Kuhn Tucker (KKT).....	31
4.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης Gradient Descent.....	32
4.4 Το πρόβλημα του προγραμματισμού παραγωγής στο μικροδίκτυο.....	33
4.5 Προγραμματισμός ημέρας για τις μονάδες αποθήκευσης του μικροδικτύου.....	34
4.6 Κατανεμημένος αλγόριθμος για προγραμματισμό ημέρας στις μονάδες αποθήκευσης.....	35
4.7 Η Lagrangian του προβλήματος.....	37
4.8 Επίλυση των εξισώσεων του προβλήματος με χρήση του αλγορίθμου Gradient Descent.....	38
4.9 Αλγόριθμος συναίνεσης (Consensus Algorithm).....	40
4.10 Χρήση αλγορίθμου συναίνεσης για εκτίμηση ολικών πληροφοριών.....	41
Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση δικτύων – Αποτελέσματα.....	43
5.1 Προγραμματισμός παραγωγής με κεντρική διαχείριση ενέργειας με χρήση Gradient Descent.....	44
5.2 Προγραμματισμός παραγωγής με κατανεμημένη διαχείριση ενέργειας με χρήση Gradient Descent.....	90
5.3 Προγραμματισμός παραγωγής για εικοσιτέσσερις ώρες με κεντρικό ελεγκτή.....	135
5.4 Προγραμματισμός παραγωγής για εικοσιτέσσερις ώρες με κατανεμημένο αλγόριθμο.....	139
5.5 Σύγκριση αλγορίθμου με κεντρικό ελεγκτή και κατανεμημένου αλγορίθμου.....	142
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα – Προοπτικές.....	144
6.1 Συμπεράσματα.....	145

6.2 Προοπτικές – Μελλοντική εργασία.....	146
Βιβλιογραφία.....	148

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και αντικείμενο

Τα ηλεκτρικά δίκτυα είναι ένα από τα μεγαλύτερα τεχνολογικά επιτεύγματα της ανθρωπότητας, τα οποία για αυτό το λόγο έχουν την ανάγκη συνεχούς ανάπτυξης και αναβάθμισης. Στα δίκτυα αυτά πραγματοποιείται η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και για αυτό κρίνεται αναγκαία η αξιοποίηση όλο και περισσότερων καθαρών μορφών ενέργειας, όπως είναι η αιολική και η ηλιακή. Παρατηρείται με αυτό τον τρόπο η αυξανόμενη διεξόδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταριών), αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του δικτύου. Η πολυπλοκότητα αυτή δημιουργεί με τη σειρά της την ανάγκη ανάπτυξης «έξυπνων», αυτόνομων δικτύων, τα οποία να έχουν τη δυνατότητα να παίρνουν ανά πάσα στιγμή τις βέλτιστες για το δίκτυο αποφάσεις. Το συγκεκριμένο εγχείρημα αποδεικνύεται δύσκολο, γιατί το δίκτυο αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, καθώς όλο και περισσότερες συσκευές εισέρχονται, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η εύρεση της βέλτιστης λύσης για την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.

Συνεπώς, τα κύρια προβλήματα που καλούνται να επιλυθούν είναι η διαχείριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ο προγραμματισμός της παραγωγής. Η όλο και μεγαλύτερη διεξόδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ωστόσο καθώς και η διεσπαρμένη παραγωγή δημιουργούν την ανάγκη άμεσης προσαρμογής και ευελιξίας από τη μεριά του δικτύου με τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα. Δημιουργείται δηλαδή η ανάγκη γρήγορης αντίδρασης του δικτύου στις τυχαίες αλλαγές με γνώμονα την ικανοποίηση της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής λοιπόν είναι η επίλυση του προβλήματος του προγραμματισμού της παραγωγής με συμβατικό δίκτυο αρχικά που ελέγχεται από κεντρικό ελεγκτή και στη συνέχεια επίλυση σε δίκτυο με αποκεντρωμένο έλεγχο θέτοντας τη βάση για την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα κεφάλαια και τα περιεχόμενά τους:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή του προβλήματος που καλείται να επιλυθεί από τη συγκεκριμένη διπλωματική.

Κεφάλαιο 2: Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που απαρτίζουν ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των μονάδων παραγωγής που συνδέονται σε αυτό. Εισάγονται και οι έννοιες του ευφυούς δικτύου και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας που είναι σημαντικές για το θέμα της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 3: Κεντρική και Κατανομημένη Διαχείριση Ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δύο τρόποι με τον οποίο το ευφύες δίκτυο διαχειρίζεται την ενεργειακή παραγωγή, η κεντρική και η κατανομημένη.

Κεφάλαιο 4: Προγραμματισμός Παραγωγής

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η έννοια καθώς και η ανάγκη του προγραμματισμού παραγωγής σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο και αναλύονται οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση δικτύων - Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό επιλύεται το πρόβλημα του προγραμματισμού της παραγωγής εκτελώντας διάφορα σενάρια μέσω αλλαγής των δεδομένων και μελετάται η επίδρασή τους στο συνολικό κόστος και στις μονάδες του δικτύου.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προοπτικές

Με βάση τις δοκιμές που έγιναν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Γίνεται αναφορά επίσης στις μελλοντικές προοπτικές έρευνας από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το διασυνδεδεμένο δίκτυο το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Η εξέλιξη του σύγχρονου πολιτισμού μας είναι συνυφασμένη με την ενέργεια, και μάλιστα την ηλεκτρική. Κανένα από τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα δεν δύναται να λειτουργήσει χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα από τα σπουδαιότερα κοινωνικά αγαθά που παράγει και καταναλώνει ο σύγχρονος άνθρωπος. Συνεπώς, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται έτσι ώστε να είναι αξιοποιήσιμη, και τα αποτελέσματα της αξιοποίησης αυτής να είναι ωφέλιμα στο κοινωνικό σύνολο.

Ο δρόμος αυτός που διανύει η ηλεκτρική ενέργεια είναι μακρύς, και περιλαμβάνει πολλά επιμέρους στάδια μετασχηματισμού του επιπέδου της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η λειτουργία του συστήματος, να ελαχιστοποιούνται οι τεχνικές απώλειες και να τηρούνται οι κανονισμοί ασφαλείας για το περιβάλλον και τους οργανισμούς.

Οι καταναλωτές, ανάλογα με το μέγεθος και τις απαιτήσεις της ηλεκτρικής τους εγκατάστασης, μπορεί να είναι πελάτες χαμηλής, μέσης ακόμα και υψηλής εναλλασσόμενης τάσης.

2.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους Ενεργειακούς Πόρους, την Ενεργειακή Πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες αυτής. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται στις συμβατικές που βασίζονται σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο, στην πυρηνική ενέργεια και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που χρησιμοποιούν ανεξάντλητες πηγές (άνεμος, ήλιος, νερό κλπ) και δεν καταναλώνουν τα περιορισμένα ενεργειακά ορυκτά αποθέματα.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην εγγύτητά τους στις περιοχές που υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αυτούς τους σταθμούς. Στη χώρα μας υπάρχουν τέσσερις περιοχές με σημαντικά αποθέματα λιγνίτη, στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στη Μεγαλόπολη. Σύμφωνα με στοιχεία του 2011 για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (National Report PAE 2012), το 66.5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμικοί σταθμοί, εκ των οποίων με λιγνίτη 4930 MW, με πετρέλαιο 730 MW και με φυσικό αέριο 4579 MW. Το 19.6% είναι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13.9% είναι μονάδες ΑΠΕ.

Ο λιγνίτης είναι η σημαντική εγχώρια ενεργειακή πηγή, συνεισφέροντας το 53.15% της εγχώριας παραγωγής για το 2011. Το φυσικό αέριο συνεισφέρει το 28.3%. Ταυτόχρονα η ανάδειξη της προστασίας του περιβάλλοντος ως στόχου υψηλής προτεραιότητας της

ελληνικής πολιτείας, οδηγεί σε προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, θέτοντας ως στόχο την αύξηση συμμετοχής τους στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 34% μέχρι το 2020. Στο ίδιο πλαίσιο δίνεται έμφαση στην επιτάχυνση της διείσδυσης του φυσικού αερίου στο ενεργειακό ισοζύγιο. Επειδή η χρονική διάρκεια ζωής των ήδη γνωστών εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων λιγνίτη δεν υπερβαίνει τα 35 χρόνια, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι θα πρέπει να μπου στο ελληνικό ισοζύγιο ηλεκτρισμού νέα καύσιμα, όπως ο λιθάνθρακας, ώστε να παραταθεί η διαθεσιμότητα και η χρήση του λιγνίτη σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου. Οι ανθρακικές μονάδες επιτυγχάνουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από τις λιγνιτικές και κατά συνέπεια εκπέμπουν μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά στις εκπομπές διοξειδίου του θείου, αυτές αντιμετωπίζονται με αντιρρυπαντικές εγκαταστάσεις όπως η αποθείωση καυσαερίων. Επιπλέον ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του άνθρακα είναι ότι, ενώ το φυσικό αέριο θα είναι διαθέσιμο για τα επόμενα 50 – 60 χρόνια, ο άνθρακας θα είναι διαθέσιμος τουλάχιστον για 200 χρόνια ακόμη. Ωστόσο η μελλοντική αξιοποίηση του άνθρακα θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων άνθρακα να υιοθετήσουν με χαμηλό κόστος καθαρές και αποδοτικές τεχνολογίες καύσης, ώστε να προσαρμοστούν στο αυστηρό πλαίσιο των περιβαλλοντικών απαιτήσεων του «Πρωτοκόλλου του Κιότο» και των αυστηρών Ευρωπαϊκών προδιαγραφών για νέες εγκαταστάσεις καύσης. [1]

2.1.2 Δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ο William Stanley κατασκεύασε το πρώτο επαγωγικό πηνίο, που αποτέλεσε τον προάγγελο του σύγχρονου (ηλεκτρικού) μετασχηματιστή καθώς και το πρώτο πλήρες σύστημα υψηλής τάσης μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές και υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς, που αποτέλεσε τη βάση της σύγχρονης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές που μετατρέπουν τη χαμηλή τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από μεγάλα αστικά κέντρα. Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, στους οποίους μετατρέπεται η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας από υψηλή σε μέση και χαμηλή τάση, προκειμένου με τη βοήθεια εναέριων γραμμών να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε σπίτια που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση.

Έχουμε δύο τύπους δικτύου, ανάλογα με την τάση της ηλεκτρικής ισχύος που διακινεί, το δίκτυο (Σύστημα) Μεταφοράς και το δίκτυο Διανομής. [2]

2.1.3 Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από το δίκτυο Μεταφοράς, το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές Μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα

20 kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Το δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές. [3]

2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης της σχολής των οικολογικών οικονομικών, η οποία έχει κάποια επιρροή στο οικολογικό κίνημα.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται κατ' ουσίαν στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια απ' τις παλίρροιες που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία ήπιες πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δεκαετομύρια χρόνια. Ουσιαστικά είναι ηλιακή ενέργεια «συσκευασμένη» κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπο: η βιομάζα είναι ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης, η αιολική εκμεταλλεύεται τους ανέμους που προκαλούνται απ' τη θέρμανση του αέρα ενώ αυτές που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανανεώσιμη, εφόσον δεν γίνεται υπεράντληση.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος στάτους κβο στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού.

Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απαντών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α. ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία 2001/77/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου επιδιώκεται το 20% των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτεται από εναλλακτικές πηγές μέχρι το 2020.

Σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ άρθρο 5 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές υπολογίζεται διαιρώντας την ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές διά της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας από όλες τις ενεργειακές πηγές και εκφράζεται ως ποσοστό. Σύμφωνα με το άρθρο 6 της ίδιας οδηγίας τα κράτη μέλη μπορούν να συμφωνούν και να προβαίνουν σε ρυθμίσεις για τη στατιστική μεταβίβαση συγκεκριμένης ποσότητας από ΑΠΕ από ένα κράτος μέλος σε άλλο. Η μεταβιβαζόμενη ποσότητα αφαιρείται από το μεταβιβάζον και προστίθεται στο κράτος που δέχεται τη μεταβίβαση. Η στατιστική μεταβίβαση δεν επηρεάζει την επίτευξη του εθνικού στόχου του μεταβιβάζοντος κράτους μέλους. [4]

Πλεονεκτήματα:

- 1) Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- 2) Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.

- 3) Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- 4) Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- 5) Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
- 6) Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Μειονεκτήματα

- 1) Έχουν ένα αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- 2) Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- 3) Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- 4) Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
- 5) Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Είδη ήπιων μορφών ενέργειας:

- 1) **Αιολική ενέργεια:** Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- 2) **Ηλιακή ενέργεια:** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- 3) **Υβριδικό αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας,** αποτελούμενο από φωτοβολταϊκή συστοιχία, ανεμογεννήτρια, εφεδρικό Η/Ζ και συσσωρευτές

- 4) **Υδραυλική ενέργεια:** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- 5) **Βιομάζα:** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.
- 6) **Γεωθερμική ενέργεια:** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια. Η επιστημονική κοινότητα ταξινομεί συνήθως τη γεωθερμία στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το υπόγειο νερό ή ο ατμός που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη θερμικών αναγκών (άμεσες χρήσεις γεωθερμίας), με την κατάλληλη διαχείριση, δεν θα ελαττωθούν, επειδή η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων θα συνεχίσει να επανατροφοδοτεί τους γεωθερμικούς ταμιευτήρες και δε χρειάζονται μεγάλοι γεωλογικοί χρόνοι (περίοδοι) για αναγέννηση. Αρκεί να μη γίνεται υπεράντληση. Όμως, επειδή οι δεξαμενές γεωθερμίας είναι τεράστιες σε μέγεθος συγκριτικά με τις ανάγκες του ανθρώπου, η γεωθερμική ενέργεια είναι πρακτικά ανανεώσιμη.
- 7) **Ενέργεια από τη θάλασσα.**
- 8) **Ενέργεια από παλίρροιες:** Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
- 9) **Ενέργεια από κύματα:** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
- 10) **Ενέργεια από τους ωκεανούς:** Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.
- 11) **Ωσμωτική ενέργεια:** Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής. [5]

2.3 Εγκαταστάσεις Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Χρησιμοποιούνται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο όταν η παραγωγή (ειδικά όταν σε αυτό το δίκτυο υπάρχουν διακοπτόμενες πηγές ενέργειας, όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) υπερβαίνει την κατανάλωση αποθηκεύοντας ενέργεια, την οποία εν συνεχεία επιστρέφουν πίσω στο δίκτυο όταν η κατανάλωση ξεπερνάει την παραγωγή.

Οι ενεργειακές αυτές αποθήκες χρησιμοποιούνται τις ώρες κατά τις οποίες η κατανάλωση δε δύναται να αναβληθεί ή να καθυστερήσει και υπερβαίνει την παραγωγή. Με αυτό τον τρόπο, η ηλεκτρική παραγωγή δε χρειάζεται να αυξομειώνεται δραματικά για να ικανοποιήσει τη στιγμιαία κατανάλωση, διατηρώντας σε σταθερό επίπεδο την ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται από τις γεννήτριες και τις αποθηκευτικές εγκαταστάσεις.

Κάθε ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να προσαρμόζει την παραγωγή του για να ικανοποιεί την εκάστοτε ζήτηση, τα οποία μπορεί να διαφέρουν δραματικά αναλόγως του καιρού. Συνεπώς τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης της ενέργειας είναι τα εξής:

- 1) Οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί που στηρίζονται σε συμβατικές πηγές ενέργειας (π.χ. άνθρακας, πετρέλαιο) έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αποδοτικά σε σταθερά επίπεδα.
- 2) Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από διαλείπουσες πηγές αποθηκεύονται για να χρησιμοποιηθούν σε αργότερο χρόνο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε η είτε ενέργεια αυτή να μεταφερθεί αλλού είτε η μονάδα να κλείσει.
- 3) Οι σταθμοί που λειτουργούν σε ώρες αιχμής ή η μέγιστη χωρητικότητα μεταφοράς μειώνονται από τη δυνατότητα ενεργειακής αποθήκευσης, εξοικονομώντας τα έξοδα συντήρησης της εν λόγω χωρητικότητας.
- 4) Σταθερότερες χρεώσεις, αφού το κόστος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνεται στην τιμή, οπότε δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο κόστος λόγω εισαγόμενης ενέργειας (της οποίας σκοπός είναι να ικανοποιήσει τα φορτία αιχμής).
- 5) Έτοιμότητα σε περίπτωση ανάγκης, ικανοποιώντας ζωτικές ανάγκες του δικτύου χωρίς μεταφορά ή παραγωγή ενέργειας.

Στα ηλεκτρικά δίκτυα, που δε χρησιμοποιεί αποθηκευτικές εγκαταστάσεις, η παραγωγή στηρίζεται σε καύσιμα και πρέπει να αυξομειώνεται για να ταιριάζει στις απαιτήσεις των καταναλωτών. Παρόλο που υδροηλεκτρική παραγωγή καθώς και η παραγωγή φυσικού αερίου προσαρμόζονται γρήγορα σε αυξομειώσεις του φορτίου, δε συμβαίνει το ίδιο και με την παραγωγή μέσω άνθρακα και την πυρηνική ενέργεια, τα οποία χρειάζονται αρκετό χρόνο για να προσαρμοστούν.

Οι μορφές που με την οποία αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια είναι οι εξής:

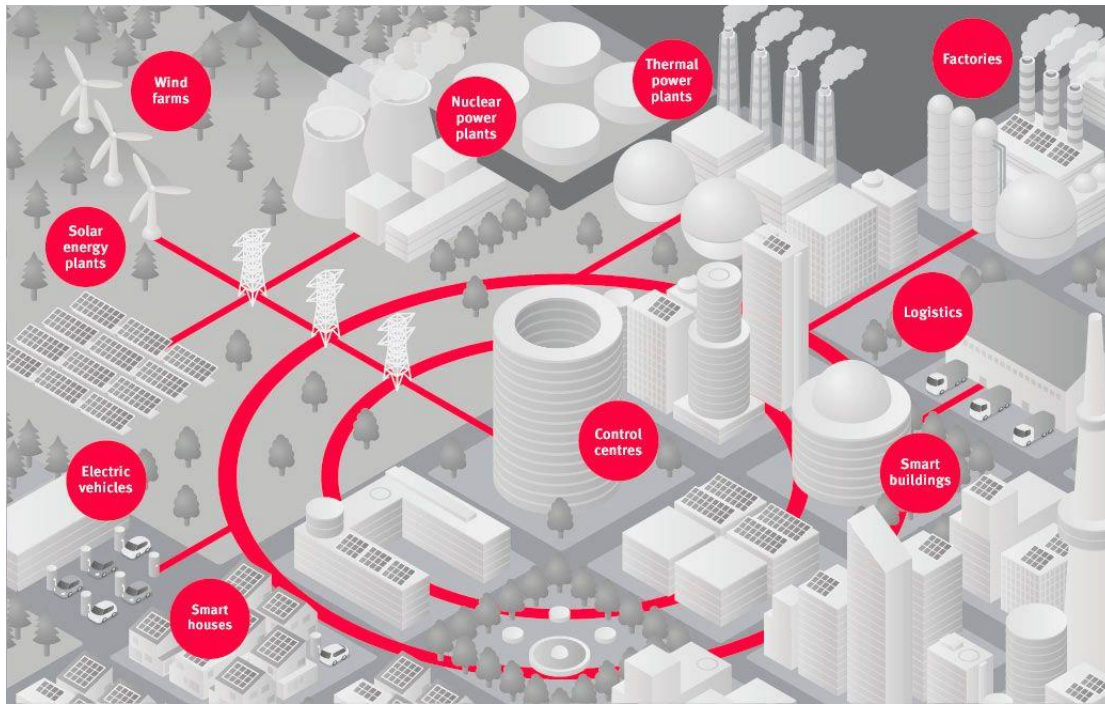
- 1) **Πεπιεσμένος αέρας:** Η μέθοδος χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια εκτός ωρών αιχμής για να συμπιέσει και να αποθηκεύσει αέρα σε αεροστεγή υπόγεια σπήλαια. Όταν υπάρξει ανάγκη ο αποθηκευμένος αέρας απελευθερώνεται, θερμαίνεται και εκτονώνεται μέσω αεριοστροβίλου. Η τεχνική έχει υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας συγκρινόμενη με τις εναλλακτικές μεθόδους. Η αποθηκευόμενη ενέργεια είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη ανά m³ από την άντληση νερού. Σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν μονάδες από 5 μέχρι 350 MW. Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι έχει υψηλή απόδοση (της τάξης του 80%), δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και ότι έχει μεγάλο χρόνο ζωής. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει απώλειες με το χρόνο.

- 2) **Υγρός αέρας:** Όταν το κόστος του ηλεκτρισμού είναι πιο φτηνό (συνήθως τη νύχτα), χρησιμοποιείται για την ψύξη του ατμοσφαιρικού αέρα στους $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο σημείο που υγροποιείται. Ο υγρός αέρας, ο οποίος καταλαμβάνει εκατό φορές τον όγκο του αερίου, μπορεί να διατηρηθεί για αρκετό καιρό σε μεγάλη φιάλη κενού αέρος στην ατμοσφαιρική πίεση. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης, ο υγρός αέρας διοχετεύεται με υψηλή πίεση σε ανταλλάκτη θερμότητας, ο οποίος λειτουργεί ως βραστήρας. Ο αέρας από την ατμόσφαιρα σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία ή το ζεστό νερό από βιομηχανική θερμική πηγή, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση για τη θέρμανση του υγρού αέρα και τη μετατροπή του πίσω σε αέριο. Η έντονη αυτή αύξηση στον όγκο και την πίεση χρησιμοποιείται για την οδήγηση μία τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- 3) **Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (Μπαταρίες):** Η μπαταρία ή ηλεκτρικός συσσωρευτής (ενίοτε και απλά συσσωρευτής) είναι η συσκευή η οποία αποθηκεύει χημική ενέργεια και την αποδεσμεύει με τη μορφή ηλεκτρισμού.

Μία εναλλακτική και συμπληρωματική προσέγγιση να επιτευχθεί παρόμοιο αποτέλεσμα με την ενεργειακή αποθήκευση είναι η χρήση έξυπνων δικτύων (smart grid). [6]

2.4 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)

Έξυπνο δίκτυο (Εικόνα 1) ορίζεται το ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο περιέχει μία ποικιλία λειτουργικών και έξυπνων ενεργειακών μετρητών, συσκευών, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και πηγών ενέργειας. Τα έξυπνα δίκτυα είναι η εξέλιξη των σημερινών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, αφού επιτρέπουν την αποδοτικότερη χρήση της υπάρχουσας εγκατεστημένης ισχύος και της υποδομής μεταφοράς και διανομής ενέργειας, με χαμηλότερη ένταση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, διευκολύνουν την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών. Με τα έξυπνα δίκτυα, θα μπορούμε να συνδέσουμε περιοχές με μεγάλη ζήτηση, όπως η Κεντρική Ευρώπη, με περιοχές με μεγάλο δυναμικό σε ανανεώσιμη ενέργεια, όπως η Νότια Ευρώπη ή η Βόρεια Αφρική και να προσφέρουμε μία πιο βιώσιμη παραγωγή ενέργειας και κέρδη για όλους τους λαούς του πλανήτη. [7]



Εικόνα 1 (Έξυπνο Δίκτυο) [8]

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα έξυπνα δίκτυα σε σχέση με τα υπόλοιπα είναι τα εξής:

- 1) **Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της μείωσης της κατανάλωσης:** Με χρήση έξυπνων μετρητών, γίνεται γνωστή η κατανάλωση σε οποιαδήποτε στιγμή, αφού οι καταναλωτές είναι καλύτερα ενημερωμένοι για την ουσιαστική κατανάλωσή τους. Επιπροσθέτως, με βελτιωμένη παρακολούθηση της κατανάλωσης, η ενέργεια προσαρμόζεται για να ικανοποιήσει τις πραγματικές ανάγκες κάθε καταναλωτή. Αυτοί οι δύο παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνουν οι χρήστες την κατανάλωσή τους, προσαρμόζοντας τη χρήση της ενέργειας που τους αναλογεί στις εκάστοτε ανάγκες τους.
- 2) **Βελτιωμένη εξυπηρέτηση πελατών και πιο ακριβείς λογαριασμοί:** Άλλο ένα ουσιαστικό πλεονέκτημα είναι ότι οι πληρωτέοι λογαριασμοί γίνονται πιο ακριβείς, αφού αντανακλούν την πραγματική κατανάλωση κάθε μήνα αντί να στηρίζονται σε προβλέψεις, μειώνοντας το κόστος των παραδοσιακών δικτύων που στηρίζονται σε χειροκίνητους ενεργειακούς μετρητές. Ακόμη, έχοντας τη δυνατότητα πρόσβασης από απόσταση σε πληροφορίες σχετικά με την εγκατάσταση, τα προβλήματα που προκύπτουν γίνεται πιο εύκολο να διαγνωστούν και να λυθούν, συμβάλλοντας σε καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών.
- 3) **Καλύτερος εντοπισμός εξαπάτησης και τεχνικών απωλειών:** Σύμφωνα με έρευνες από την Εθνική Ισπανική Επιτροπή Αγοράς και Ανταγωνισμού, οι ηλεκτρικές απάτες φτάσανε τα εκατόν πενήντα εκατομμύρια ευρώ, ισοδύναμη με την κατανάλωση της Βαλένθια και της Σεβίλλης. Το γεγονός αυτό ωστόσο δεν επηρεάζει αρνητικά τις υπηρεσίες κοινής ωφελείας, αλλά αυξάνει τους ηλεκτρικούς λογαριασμούς των χρηστών. Τα συστήματα τηλεελέγχου μπορούν να εντοπίσουν τις

απάτες με περισσότερη ακρίβεια, αφού οι μονάδες δεν περιέχουν μέρη που να υπόκεινται σε απομάκρυνση (mechanical wear). Μονάδες με τεχνολογία PLC (τεχνολογία που χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες ηλεκτρικές γραμμές για μετάδοση πληροφοριών) πραγματοποιούν ενεργειακή ισορροπία. Το σύστημα προσθέτει την ενέργεια όλων των εγκατεστημένων ενεργειακών μετρητών και συγκρίνει το αποτέλεσμα με τη μέτρηση που έχει υπολογιστεί από έναν αθροιστή που βρίσκεται στην κορυφή της γραμμής για να εντοπιστούν τυχόν απώλειες (ή κλοπές) σε οποιοδήποτε σημείο, για τις οποίες η εταιρία δε γνωρίζει.

- 4) **Μειωμένο κόστος ισορροπίας:** Τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να συλλέξουν πολύ περισσότερες πληροφορίες από τους χειροκίνητους ενεργειακούς μετρητές. Επιτρέπεται έτσι η χρήση τεχνικών ανάλυσης δεδομένων και η προετοιμασία για ακριβείς ρεαλιστικές προβλέψεις, αφού λαμβάνονται υπόψη περισσότερες μεταβλητές. Συνεπώς, οι υπηρεσίες κοινής ωφελείας αντιστοιχίζουν την παραγωγή με την κατανάλωση και μειώνονται τα ενεργειακά πλεονάσματα.
- 5) **Αυξημένος ανταγωνισμός:** Έχοντας δεδομένα για την αληθινή καμπύλη φορτίου, προκαλεί τις εταιρίες να προσαρμόσουν τις τιμές τους με βάση τη ζήτηση. Όταν οι ανταγωνιστικές εταιρίες έχουν περισσότερα δεδομένα, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν καλύτερες προσφορές που ανταποκρίνονται περισσότερο στις ανάγκες των πελατών τους, αυξάνοντας τις επιλογές μέσα από ευρεία ποικιλία προσφορών (π.χ. ωριαίες χρεώσεις, ενεργειακά πακέτα κλπ.).
- 6) **Εξισορρόπηση καμπύλης ζήτησης (μείωση φορτίου αιχμής):** Μέσα από τη χρήση διαφορετικών προφίλ κόστους, οι μονάδες εξισορροπούν την καθημερινή καμπύλη ζήτησης, μετατοπίζοντας το φορτίο αιχμής των καταναλωτών σε ώρες με μικρότερη ζήτηση, βελτιστοποιώντας έτσι τη χρήση του ηλεκτρικού δικτύου. Κατά συνέπεια, οι καταναλωτές χρησιμοποιούν εν γνώσει τους φορτία εκτός των ωρών αιχμής, όταν η τιμή της KWh είναι πιο φτηνή. Για παράδειγμα, ο καταναλωτής μπορεί να αποφασίσει να αλλάξει τις καταναλωτικές του συνήθειες και να χρησιμοποιεί το πλυντήριο ρούχων εκτός των ωρών αιχμής (π.χ. το βράδυ) , εξοικονομώντας χρήματα για τον ίδιο και βοηθώντας το δίκτυο να εξισορροπήσει τη ζήτηση καθώς και να αποφύγει τον κορεσμό των γραμμών σε ώρες αιχμής. Το δίκτυο έχοντας σωστή κατανάλωση δε χρειάζεται να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τις μονάδες παραγωγής τόσο συχνά, μειώνοντας το κόστος των γεννητριών.
- 7) **Μείωση των εκπομπών άνθρακα:** Όλα τα παραπάνω οφέλη συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης, άρα και της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Μπορεί να ειπωθεί δηλαδή ότι τα έξυπνα δίκτυα οδηγούν σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Όλα αυτά επίσης συμβάλλουν στην ενσωμάτωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Τέλος, η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται πιο εύκολη, αφού υπάρχει καλύτερος έλεγχος του δικτύου. [9]

Κεφάλαιο 3

Κεντρική και Κατανεμημένη Διαχείριση Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε, η επέκταση του παραδοσιακού ηλεκτρικού δικτύου είναι η ανάπτυξη έξυπνων δικτύων, τα οποία προσφέρουν μία πληθώρα πλεονεκτημάτων. Το κύριο πρόβλημα στην ενεργειακή διαχείριση ενός μικροδικτύου έγκειται στην εύρεση της βέλτιστης (ή προσέγγιση της βέλτιστης) δέσμευσης μονάδων και αποστολή των διαθέσιμων γεννητριών έτσι ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένοι στόχοι. Ένας στόχος σε κατάσταση ανεξάρτητης λειτουργίας (stand-alone operation mode) μπορεί να είναι η οικονομικότερη παροχή στο τοπικό φορτίο, ενώ σε κατάσταση διασυνδεδεμένης λειτουργίας (under grid-connected mode of operation) αναζητείται η μεγιστοποίηση του κέρδους. Επιπρόσθετοι στόχοι όπως η ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχουν επίσης προταθεί με την εφαρμογή ευρετικών τεχνικών βελτιστοποίησης.

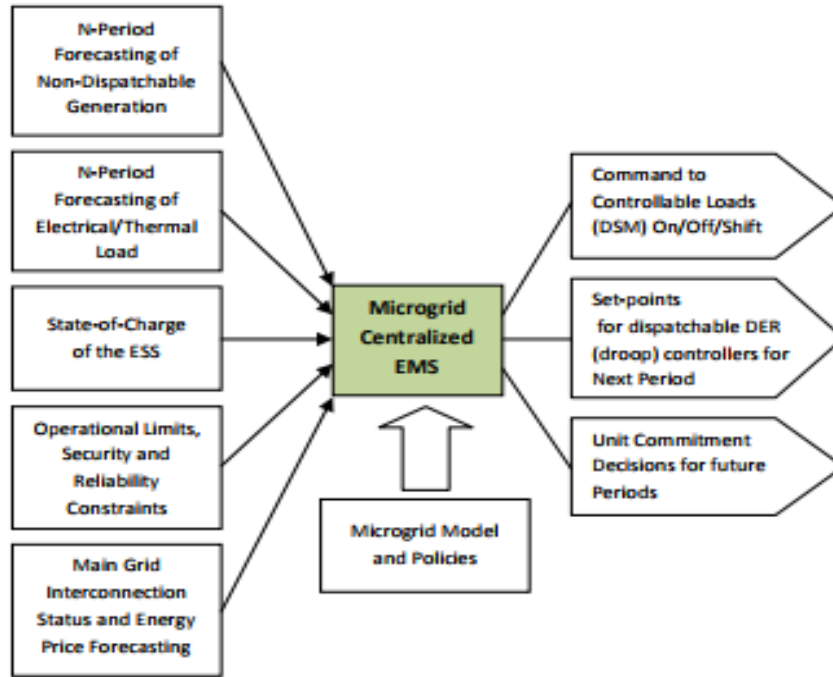
Ανάλογα την αρχιτεκτονική του συστήματος της ενεργειακής διαχείρισης, έχουν προταθεί δύο προσεγγίσεις: (i) Κεντρική Ενεργειακή Διαχείριση και (ii) Αποκεντρωμένη Ενεργειακή Διαχείριση.

Η αρχιτεκτονική της κεντρικής ενεργειακής διαχείρισης αποτελείται από έναν κεντρικό ελεγκτή στον οποίο παρέχονται οι σχετικές πληροφορίες για κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής που περιέχονται στο μικροδίκτυο καθώς και για το ίδιο το μικροδίκτυο (π.χ. συναρτήσεις κόστους, τεχνικά χαρακτηριστικά/περιορισμοί, παράμετροι του δικτύου και κατάσταση λειτουργίας), όπως και πληροφορίες από τα συστήματα πρόβλεψης (π.χ. τοπικό φορτίο, ταχύτητα του ανέμου, ηλιακή εκπομπή), με σκοπό τον καθορισμό της κατάλληλης δέσμευσης των μονάδων και την αποστολή πόρων για την ικανοποίηση συγκεκριμένου στόχου. Ο κεντρικός αυτός ελεγκτής είναι υπεύθυνος για κάθε κόμβο που είναι συνδεδεμένο σε αυτόν και φροντίζει για την αποδοτική λειτουργία τους.

Από την άλλη, η διεσπαρμένη ενεργειακή διαχείριση παρέχει ένα περιβάλλον μέσα από ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (Multi-Agent System), όπου κάθε πράκτορας του μικροδικτύου στέλνει προσφορές αγοράς ή/και πώλησης σε έναν κεντρικό χειριστή του μικροδικτύου (Central Microgrid Operator) σύμφωνα με τις συγκεκριμένες ανάγκες τους και τις δομές κόστους. Εν συνεχεία, ο κεντρικός αυτός διαχειριστής εκτελεί μία δεσμευτική διαδικασία για να καθορίσει τη λειτουργία του μικροδικτύου για την επόμενη περίοδο. Σε αυτή την περίπτωση, μία ξεχωριστή δέσμευση μονάδων πρέπει να πραγματοποιηθεί για να καθορίσει τους κόμβους που θα λειτουργούν την κάθε περίοδο.

3.2 Κεντρική Ενεργειακή Διαχείριση (CEMS)

Μία τυπική διάταξη αρχιτεκτονικής με κεντρικό διαχειριστή περιγράφεται στην Εικόνα 2, όπου ο κεντρικός «πράκτορας» συλλέγει όλες τις σχετικές πληροφορίες από διαφορετικούς κόμβους του μικροδικτύου για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης και τον προσδιορισμό των εισόδων του συστήματος ελέγχου για την επόμενη περίοδο.



Εικόνα 2: Ενεργειακή Διαχείριση με Κεντρικό Ελεγκτή

Ανάλογα τις πηγές που είναι παρούσες σε ένα μικροδίκτυο, οι μεταβλητές εισόδου του CEMS μπορεί να είναι:

- Πρόβλεψη ισχύος εξόδου των διακοπτόμενων γεννητριών για τις N συνεχόμενες περιόδους που ακολουθούν.
- Πρόβλεψη τοπικού φορτίου για τις N επόμενες περιόδους που ακολουθούν
- Κατάσταση φόρτισης των αποθηκευτικών συστημάτων ενέργειας.
- Λειτουργικά όρια των γεννητριών και των αποθηκευτικών συστημάτων ενέργειας.
- Περιορισμοί ασφαλείας και αξιοπιστίας του μικροδικτύου.
- Κατάσταση διασύνδεσης.
- Πρόβλεψη ενεργειακών τιμών.

Όταν συγκεντρωθούν όλες οι μεταβλητές εισόδου στον κεντρικό ελεγκτή, εκτελείται μία πολυσταδιακή βελτιστοποίηση με σκοπό τον καθορισμό της βέλτιστης δέσμευσης μονάδων σύμφωνα με την καθορισμένη συνάρτηση κόστους σε ένα προκαθορισμένο πλαίσιο χρόνου. Οι μεταβλητές εξόδου της κεντρικής ενεργειακής διαχείρισης είναι οι τιμές αναφοράς του συστήματος ελέγχου (π.χ. ισχύ εξόδου ή/και τερματική τάση) για κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής μαζί με δυαδικές αποφάσεις μεταβλητών για σύνδεση ή αποσύνδεση φορτίου για τη μεταφορά του φορτίου. Μία επιπρόσθετη μεταβλητή εξόδου είναι η απόφαση για τη δέσμευση μονάδων που αφορούν τις καταναεμημένες γεννήτριες (αν απαιτείται). Το πρόβλημα αυτό ωστόσο μπορεί να λυθεί ξεχωριστά και σε χαμηλότερη συχνότητα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της κεντρικής προσέγγισης είναι η δυνατότητα της εξ αποστάσεως ελέγχου του μικροδικτύου και η παροχή κατάλληλου περιβάλλοντος για εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης. Μερικά από τα μειονεκτήματα είναι η μειωμένη ευελιξία μικροδικτύου, αφού χρειάζεται να τροποποιηθεί για να ενσωματώσει επιπλέον γεννήτριες και απαιτεί εκτενείς υπολογισμούς για τη βελτιστοποίηση. [10]

3.3 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων - ΣΠΠ (Multi-Agent Systems - MAS)

3.3.1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι ένα υπολογιστικό σύστημα αποτελούμενο από πολλαπλούς «ευφυείς» πράκτορες οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσα σε ένα περιβάλλον. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων που είναι δύσκολο ή ανέφικτο να λυθούν από έναν ξεχωριστό πράκτορα. Με τον όρο πράκτορας εννοείται μία υπολογιστική οντότητα όπως ένα πρόγραμμα ή ένα ρομπότ.

Οι πράκτορες μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τύπους οι οποίοι έχουν εύρος από απλούς σε σύνθετους. Μερικές κατηγορίες είναι οι παρακάτω:

- **Παθητικοί πράκτορες** ή πράκτορες χωρίς σκοπούς.
- **Ενεργοί πράκτορες** με απλούς σκοπούς.
- **Ευφυείς πράκτορες** που εκτελούν πολύπλοκους υπολογισμούς.

Το περιβάλλον των πρακτόρων μπορεί να χωριστεί σε:

- **Εικονικό περιβάλλον**
- **Διακριτό περιβάλλον**
- **Συνεχές περιβάλλον**

Γενικά, το περιβάλλον των πρακτόρων μπορεί να οργανωθεί σύμφωνα με διάφορες ιδιότητες όπως: προσβασιμότητα (εξαρτάται από το είναι δυνατό να συγκεντρωθούν πλήρεις πληροφορίες για το περιβάλλον), ντετερμινιστικότητα (αν μια πράξη που εκτελείται έχει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα), δυναμικότητα (πόσες οντότητες επηρεάζουν το περιβάλλον τη δεδομένη στιγμή), διακριτότητα (αν ο αριθμός των δυνατών πράξεων είναι πεπερασμένος), επεισοδιακότητα (αν οι πράξεις των πρακτόρων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους επηρεάζουν άλλες περιόδους) και διαστατότητα (αν τα χωρικά χαρακτηριστικά είναι σημαντικός παράγοντας του περιβάλλοντος και ο πράκτορας καταλαμβάνει χώρο στη λήψη αποφάσεών του). Για τις αποφάσεις των πρακτόρων μεσολαβεί ένα ενδιάμεσο λογισμικό (middleware). Το λογισμικό αυτό προσφέρει ένα πρώτης τάξης αφηρημένο σχέδιο για σύστημα πολλαπλών πρακτόρων, παρέχοντας τα μέσα για διαχείριση της πρόσβασης στους πόρους και συντονισμό των πρακτόρων.

Οι πράκτορες σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων έχουν ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά:

- **Αυτονομία:** οι πράκτορες τουλάχιστον εν μέρει ανεξάρτητοι, με επίγνωση, αυτόνομοι.
- **Τοπική εμβέλεια:** Είτε κανένας πράκτορας δεν έχει πλήρη εικόνα του συστήματος ή το σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο για τον πράκτορα, οπότε δεν μπορεί να το εκμεταλλευτεί.
- **Αποκέντρωση:** Δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός ελεγκτής. [11]

3.3.2 Σύστημα Πολλαπλών Πρακτόρων στο μικροδίκτυο

Το κύριο στοιχείο ενός ΣΠΠ είναι ο πράκτορας. Πράκτορας μπορεί να είναι μία φυσική οντότητα που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον ή μία εικονική οντότητα. Στην περίπτωση του μικροδικτύου η φυσική οντότητα είναι μία μικροπηγή (π.χ. μικροτουρμπίνα) και η εικονική ένα κομμάτι λογισμικού που κάνει προσφορές στην ενεργειακή αγορά. Ένα τυπικό ΣΠΠ σε μικροδίκτυο περιγράφεται στην Εικόνα 3.

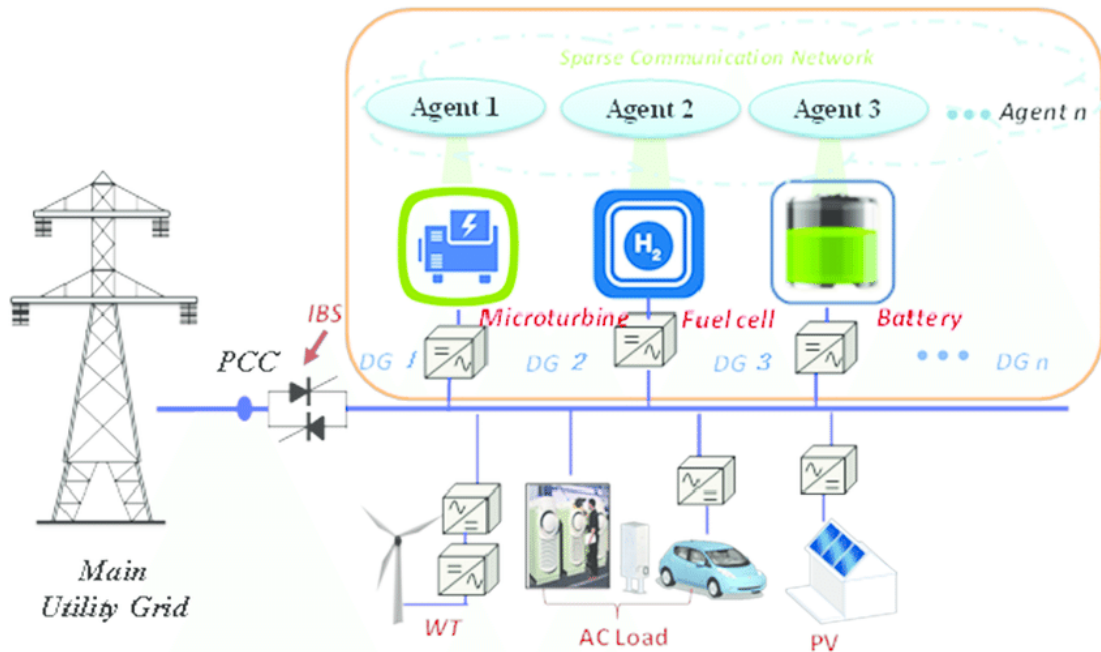
Ο πράκτορας έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, το οποίο σημαίνει ότι ο πράκτορας αλλάζει το περιβάλλον του με τις πράξεις του. Ένας κινητήρας diesel με αλλαγή της παραγωγής του αλλάζει το επίπεδο παραγωγής των άλλων μονάδων, αλλάζει το επίπεδο τάσης των γειτονικών ζυγών και συνολικά, αλλάζει το σύστημα ασφαλείας του συστήματος (π.χ. επηρεάζει τη σταθερότητα του συστήματος σε περίπτωση βραχυκυκλώματος).

Μία ικανότητα των πρακτόρων είναι να επικοινωνούν μεταξύ τους. Θεωρούμε ένα σύστημα το οποίο περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια και ένα σύστημα μπαταριών: το σύστημα μπαταριών λαμβάνει μερική ισχύ από την ανεμογεννήτρια για να φορτίσει και την επιστρέφει στο σύστημα σε περίοδο που δεν έχει αέρα. Για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας, οι δύο πράκτορες πρέπει να ανταλλάξουν αρκετά μηνύματα, η οποία δε θα ήταν δυνατή να επιτευχθεί αν οι δύο πράκτορες δρούσαν χωρίς κανέναν συντονισμό.

Οι πράκτορες έχουν συγκεκριμένο επίπεδο αυτονομίας, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να παίρνουν αποφάσεις χωρίς κάποιον κεντρικό ελεγκτή ή διαχειριστή. Για ένα σύστημα μπαταριών, η ροπή αυτή θα μπορούσε να είναι: «Φόρτισε τις μπαταρίες όταν η τιμή της KWh είναι χαμηλή και η κατάσταση φόρτισης είναι επίσης χαμηλή». Το σύστημα αποφασίζει πότε να ξεκινήσει τη φόρτιση βασισμένο σε δικούς του κανόνες και σκοπούς και όχι από έναν εξωτερικό διαχειριστή. Επιπρόσθετα, η αυτονομία κάθε πράκτορα σχετίζεται με τους πόρους που κατέχει και χρησιμοποιεί. Οι πόροι αυτοί θα μπορούσαν να είναι το καύσιμο για έναν κινητήρα ντίζελ, ο ρυθμός των μεταφερόμενων δεδομένων στο κανάλι επικοινωνίας ή ο χρόνος επεξεργασίας.

Ακόμα ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των πρακτόρων είναι ότι έχουν μερική ή καθόλου γνώση για το περιβάλλον στο οποίο αλληλεπιδρούν. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα ισχύος ο πράκτορας της γεννήτριας γνωρίζει μόνο το επίπεδο τάσης του ζυγού του και ενδέχεται να μπορεί να δώσει εκτιμήσεις για το τι συμβαίνει σε μερικούς ζυγούς, αλλά δεν ξέρει τι συμβαίνει σε όλο το σύστημα. Αυτός είναι ο πυρήνας της θεωρίας του ΣΠΠ, ο σκοπός είναι ο έλεγχος ενός πολύπλοκου συστήματος με ελάχιστη ανταλλαγή δεδομένων και ελάχιστες υπολογιστικές διαδικασίες.

Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός πράκτορα είναι ότι έχει συγκεκριμένη συμπεριφορά και τείνει να ικανοποιεί συγκεκριμένους σκοπούς χρησιμοποιώντας τους πόρους του, ικανότητες (π.χ. παραγωγή ή αποθήκευση ενέργειας) και υπηρεσίες (π.χ. πώληση ενέργειας στην αγορά). Ο τρόπος με τον οποίο ο πράκτορας χρησιμοποιεί τους πόρους, τις ικανότητες και τις υπηρεσίες παρουσιάζει τη συμπεριφορά του. Ως αποτέλεσμα, είναι προφανές ότι η συμπεριφορά κάθε πράκτορα διαμορφώνεται από τους σκοπούς του. Ένας πράκτορας που ελέγχει ένα σύστημα μπαταριών και ο σκοπός του είναι η παροχή αδιάλειπτης ισχύος σε ένα φορτίο θα έχει διαφορετική συμπεριφορά από ένα παρόμοιο σύστημα μπαταριών που έχει σαν πρωταρχικό σκοπό την αύξηση του κέρδους με τη συμμετοχή του στην ενεργειακή αγορά. [12]

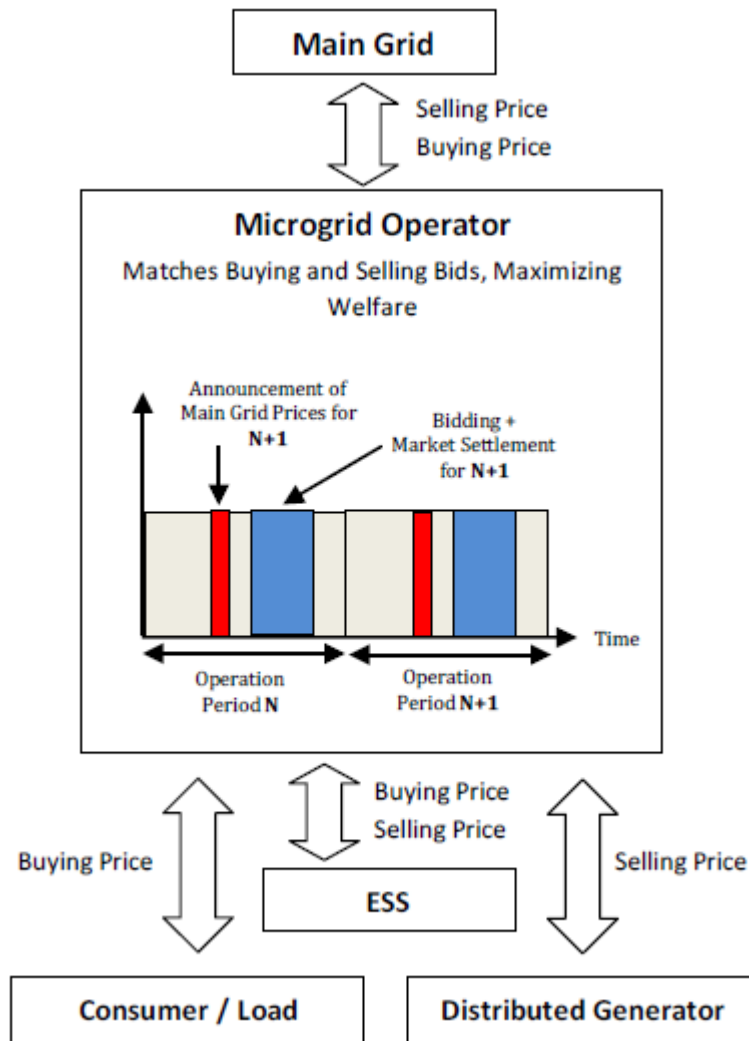


Εικόνα 3: Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων σε μικροδίκτυο [13]

3.4 Καταναμημένη Ενεργειακή Διαχείριση (DEMS)

Η καταναμημένη ενεργειακή διαχείριση με σύστημα πολλαπλών πρακτόρων προτάθηκε ως εναλλακτική για τη συντονισμένη λειτουργία των μικροδικτύων σε ένα περιβάλλον ανταγωνιστικής αγοράς και πολλαπλούς ιδιοκτήτες γεννητριών. Με αυτό τον τρόπο, οι καταναλωτές, οι γεννήτριες, το ενεργειακό αποθηκευτικό σύστημα και το κυρίως δίκτυο συμμετέχουν στην αγορά στέλνοντας προσφορές αγοράς και πώλησης στον κεντρικό διαχειριστή του μικροδικτύου βασισμένοι στις συγκεκριμένες ανάγκες, τη διαθεσιμότητα, τις συναρτήσεις κόστους, τους τεχνικούς περιορισμούς τις προσδοκίες και τις προβλέψεις τους. Ο κεντρικός διαχειριστής είναι υπεύθυνος για το διακανονισμό της αγοράς του μικροδικτύου με την αντιστοίχιση τις προσφορές αγοραπωλησίας μεγιστοποιώντας την κοινωνική ευημερία, διασφαλίζοντας παράλληλα την εφαρμοσιμότητα του λειτουργικού πλάνου. Ένα παρόμοιο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων έχει προταθεί, όπου σε επιπρόσθετους κόμβους ανατίθενται διαφορετικές εργασίες όπως η μετατόπιση του φορτίου και ο περιορισμός του φορτίου για τη διαχείριση της ζήτησης.

Η καταναμημένη παραγωγή πολλαπλών πρακτόρων επιτρέπει σχεδόν αυτόνομη λειτουργία των μονάδων παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο και μειώνει τις ανάγκες διαχείρισης μεγάλης ποσότητας δεδομένων, οπότε μειώνεται και ο υπολογιστικός χρόνος. Άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευελιξία του μικροδικτύου, αφού παρέχει ικανότητα εύκολης σύνδεσης, διευκολύνοντας την εγκατάσταση και το συντονισμό επιπρόσθετων ενεργειακών μονάδων στο μικροδίκτυο. Από την άλλη, οι ενεργειακές μονάδες που βασίζονται σε σύστημα πολλαπλών πρακτόρων παρουσιάζουν μειονέκτημα συγκριτικά με το σύστημα κεντρικής ενεργειακής διαχείρισης όταν εφαρμόζονται σε μικροδίκτυο που απαιτεί ισχυρή συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών μονάδων με σκοπό την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Ένα τυπικό μοντέλο διεσπαρμένης ενεργειακής διαχείρισης για το μικροδίκτυο φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Μοντέλο Κατανεμημένης Ενεργειακής Διαχείρισης

Στην περίπτωση απομονωμένων μικροδικτύων που λειτουργούν ανεξάρτητα, ο μικρός αριθμός γεννητριών στο μικροδίκτυο και η άνιση κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος, όπως και η μη τακτική ειδοποίηση για τις τρέχουσες τιμές από το κεντρικό δίκτυο κάνουν δύσκολη την εφαρμογή του συστήματος διεσπαρμένης παραγωγής.

Κεφάλαιο 4

Προγραμματισμός Παραγωγής

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, δίνεται ολοένα και περισσότερη βάση στην εφαρμογή των μικροδικτύων στο σύστημα ισχύος. Το μικροδίκτυο χαρακτηρίζεται από ευελιξία, ευφυΐα και συμβατότητα. Δεν είναι μόνο ικανό να ενσωματώνει μικρής κλίμακας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά συνδράμει και στη βελτίωση της αξιοπιστίας και αποδοτικότητας του συστήματος.

Το μικροδίκτυο αποτελείται από αιολικές τουρμπίνες, φωτοβολταϊκές μονάδες, τουρμπίνες αερίου, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα και φορτία. Για την παροχή λοιπόν υψηλής ποιότητας και οικονομικού ηλεκτρισμού, η λειτουργία του μικροδικτύου δημιουργείται η ανάγκη λογικού προγραμματισμού. Το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης είναι υπεύθυνο για το συντονισμό της ισχύος εξόδου των ενεργειακών μονάδων και την ανταλλαγή ενέργειας με το κυρίως δίκτυο για την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους ή τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους, σύμφωνα με τις πληροφορίες για την πρόβλεψη φορτίου, πρόβλεψη της ισχύος για τις ανανεώσιμες πηγές και την τιμή του ηλεκτρισμού.

4.2 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης με πολλαπλασιαστές Lagrange και συνθήκες Karush Kuhn Tucker (KKT)

Σε πρόβλημα βελτιστοποίησης, η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange αποτελεί μία στρατηγική εύρεσης του τοπικού μεγίστου και ελαχίστου μία συνάρτησης που υπόκειται σε ισοτικούς περιορισμούς. Θεωρούμε το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου υπάρχει ένας περιορισμός και δύο μεταβλητές:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } f(x, y) \\ & \text{subject to } g(x, y) = 0 \end{aligned}$$

Υποθέτουμε ότι και οι δύο συναρτήσεις f και g έχουν συνεχείς πρώτες παραγώγους. Εισάγεται μία νέα μεταβλητή λ , η οποία ονομάζεται πολλαπλασιαστής Lagrange και μελετάται η συνάρτηση Lagrange που ορίζεται:

$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda * g(x, y)$$

όπου ο όρος λ μπορεί είτε να προστεθεί είτε να αφαιρεθεί. Αν $f(x_0, y_0)$ είναι το μέγιστο σημείο της $f(x, y)$ για το αρχικό πρόβλημα περιορισμών, τότε υπάρχει λ_0 τέτοιο ώστε το σημείο (x_0, y_0, λ_0) είναι κρίσιμο σημείο για τη συνάρτηση Lagrange (κρίσιμο σημείο είναι το σημείο όπου η μερική παράγωγος της συνάρτησης L είναι 0). Όμως, δεν αποδίδουν όλα τα κρίσιμα σημεία λύση στο αρχικό πρόβλημα. Συνεπώς, η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange αποδίδει την απαραίτητη προϋπόθεση για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος περιορισμών. Υπάρχουν επίσης επαρκείς συνθήκες για ελάχιστο ή μέγιστο.

Για τη γενική περίπτωση ενός ορισμένου αριθμού n μεταβλητών και ενός ορισμένου αριθμού M περιορισμών η Lagrangian παίρνει τη μορφή:

$$L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_M) = f(x_1, \dots, x_n) - \sum_{k=1}^M \lambda_k g_k(x_1, \dots, x_n),$$

ξανά το βέλτιστο σημείο της f συμπίπτει με το κρίσιμο σημείο της L .

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, οι συνθήκες Karush Kuhn Tucker (KKT), είναι απαραίτητες συνθήκες πρώτου βαθμού για να είναι η λύση του μη γραμμικού προγραμματισμού βέλτιστη, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται κάποιες περιοριστικές συνθήκες. Επιτρέποντας την ύπαρξη ανισοτικών περιορισμών, οι συνθήκες KKT στο μη γραμμικό προγραμματισμό γενικεύουν τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange, η οποία επιτρέπει την ύπαρξη μόνο ισοτικών περιορισμών.

Έστω το παρακάτω μη γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης:

$$\begin{aligned} & \text{optimize } f(x) \\ & \text{subject to} \\ & g_i(x) \leq 0, \\ & h_j(x) = 0, \end{aligned}$$

όπου x είναι η μεταβλητή βελτιστοποίησης, f είναι η αντικειμενική συνάρτηση, g_i ($i = 1, \dots, m$) είναι οι ανισοτικοί περιορισμοί και h_j ($j = 1, \dots, l$) είναι οι ισοτικοί περιορισμοί. Ο αριθμός των ανισοτικών και ισοτικών περιορισμών συμβολίζονται με m και l αντίστοιχα. [14]

4.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης Gradient Descent

Ο gradient descent είναι ένας πρώτης τάξης επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την εύρεση του ελαχίστου σε μία συνάρτηση. Για την εύρεση του τοπικού ελαχίστου σε μία συνάρτηση με τη χρήση της gradient descent, κάνει βήματα ανάλογα με την αρνητική κλίση της συνάρτησης σε εκείνο το σημείο. Αν αντί αυτού κάνει βήματα ανάλογα με τη θετική κλίση, τότε πλησιάζει το τοπικό μέγιστο αυτής της συνάρτησης και η διαδικασία τότε είναι γνωστή ως gradient ascent. Η gradient descent βασίζεται στην παραδοχή ότι η συνάρτηση πολλών μεταβλητών $F(x)$ ορίζεται και είναι διαφορίσιμη σε ένα χώρο του σημείου α , τότε η $F(x)$ μειώνεται γρηγορότερα αν πάει από το σημείο α στην κατεύθυνση της αρνητικής κλίσης της F στο α , $-\nabla F(\alpha)$. Αυτό συνεπάγεται ότι αν:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \gamma \nabla F(\alpha_n)$$

για αρκετά μικρό λ , τότε $F(\alpha_n) \geq F(\alpha_{n+1})$. Με άλλα λόγια, ο όρος $\gamma \nabla F(\alpha)$ αφαιρείται από το α επειδή επιθυμούμε μετακίνηση αντίθετα από την κλίση, προς το ελάχιστο. Με αυτή την παρατήρηση, ξεκινάει η διαδικασία με ένα τυχαίο x_0 για ένα τοπικό ελάχιστο της F και θεωρείται η ακολουθία x_0, x_1, x_2, \dots τέτοιο ώστε:

$$x_{n+1} = x_n - \gamma_n \nabla F(x_n), n \geq 0$$

άρα έχουμε:

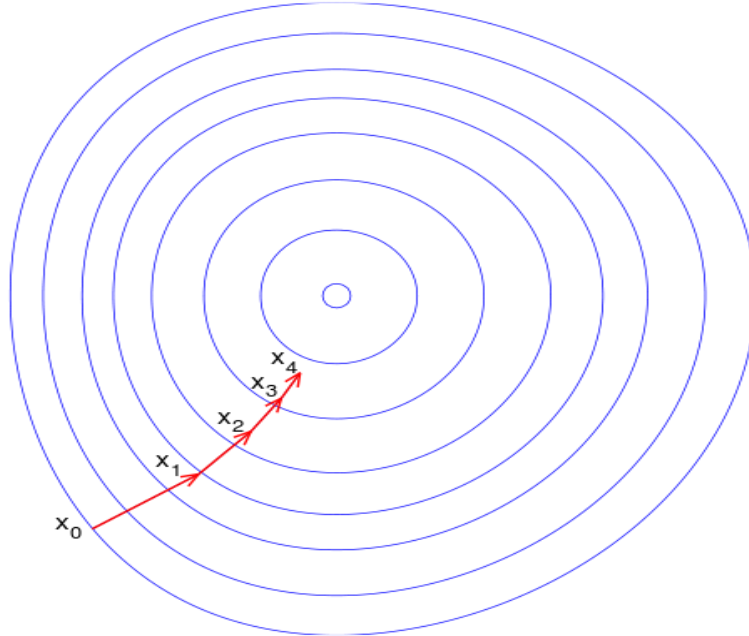
$$F(x_0) \geq F(x_1) \geq F(x_2) \geq \dots,$$

οπότε η ακολουθία (x_n) συγκλίνει στο επιθυμητό τοπικό ελάχιστο. Να σημειωθεί ότι η τιμή του γ επιτρέπεται να αλλάξει σε κάθε βήμα. Με συγκεκριμένες υποθέσεις για τη συνάρτηση F και συγκεκριμένες επιλογές για το γ :

$$\gamma_n = \frac{(x_n - x_{n-1})^T [\nabla F(x_n) - \nabla F(x_{n-1})]}{\|\nabla F(x_n) - \nabla F(x_{n-1})\|}$$

η σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο μπορεί να εγγυηθεί. Όταν η συνάρτηση F είναι κυρτή, τότε όλα τα τοπικά ελάχιστα είναι επίσης καθολικά ελάχιστα, οπότε σε αυτή την περίπτωση η gradient descent μπορεί να συγκλίνει σε μία καθολική λύση.

Στην Εικόνα 5 αποτυπώνεται η όλη διαδικασία.



Εικόνα 5: Απεικόνιση του αλγορίθμου gradient descent

Εδώ η F θεωρείται ότι μπορεί να περιγραφεί στο επίπεδο. Οι μπλε γραμμές είναι οι γραμμές περιγράμματος, όπου στις περιοχές αυτές η τιμή της F είναι σταθερή. Ένα κόκκινο βέλος προερχόμενο από ένα σημείο δείχνει την κατεύθυνση της αρνητικής κλίσης στο σημείο αυτό. Σημειώνεται ότι η (αρνητική) κλίση σε ένα σημείο είναι κάθετο στη γραμμή περιγράμματος που περνάει από το σημείο αυτό. Παρατηρείται ότι η gradient descent οδηγεί τα σημεία όπου η τιμή της συνάρτησης F είναι ελάχιστη. [15]

4.4 Το πρόβλημα του προγραμματισμού παραγωγής στο μικροδίκτυο

Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου, ένα από τα πιο σημαντικά μέρη ενός μικροδικτύου που χρησιμοποιείται, υλοποιείται σε τρία ιεραρχικά επίπεδα, το πρωτοβάθμιο, το δευτεροβάθμιο και το τριτοβάθμιο. Τα δύο πρώτα επίπεδα ελέγχου ασχολούνται με προσαρμογές συχνότητας/τάσης και επαναφορά όταν υπάρχει αλλαγή στην ποσότητα του φορτίου του μικροδικτύου/ ή της παραγωγής, όπως και με τις μεταβάσεις διαχωρισμού (islanding mode). Το τρίτο επίπεδο ωστόσο προγραμματίζει τις συσκευές του μικροδικτύου ώστε να αποκτήσουν μία οικονομική κατανομή των διαθέσιμων πηγών λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις με το κυρίως δίκτυο. Το πρόβλημα του προγραμματισμού του μικροδικτύου στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των τοπικών διεσπαρμένων ενεργειακών πηγών, καθώς και στην ανταλλαγή ενέργειας με το κυρίως δίκτυο για την παροχή του προβλεπόμενου φορτίου ζήτησης σε μια συγκεκριμένη περίοδο χρόνου (τυπικά μία μέρα). Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την

επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού στο μικροδίκτυο, οι οποίες περιλαμβάνουν ντετερμινιστικές, ευριστικές και στοχαστικές μεθόδους. Ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός χρησιμοποιείται ευρέως για το σχηματισμό του προβλήματος του προγραμματισμού στο μικροδίκτυο.

Η αυξανόμενη ελαστικότητα από την πλευρά της ζήτησης και η ενεργή συμμετοχή των φορτίων στο σύστημα ισχύος σε απάντηση στις αποκλίσεις της τιμής του ηλεκτρισμού δημιουργεί την ανάγκη για πιο αποδοτική λειτουργία του συστήματος και αποφυγής των υψηλών τιμών στα ανελαστικά φορτία. Τα μικροδίκτυα επιτρέπουν την αποδοτική ενσωμάτωση και έλεγχο μεγάλων φορτίων που αυξάνουν την ελαστικότητα από την πλευρά της ζήτησης. Ακόμα, οι διεσπαρμένες γεννήτριες και οι ενεργειακές αποθήκες επιτρέπουν ένα γρήγορο και ελεγχόμενο φορτίο. Οι πηγές αυτές ωστόσο βασίζονται σε τιμολογιακό σενάριο, στο οποίο για παράδειγμα ο ελεγκτής του μικροδικτύου καθορίζει το πρόγραμμα με το ελάχιστο κόστος των διαθέσιμων διεσπαρμένων μονάδων και φορτίων, όπως και η ροή ισχύος στο κυρίως δίκτυο, βασιζόμενο στην τιμή ημέρας της αγοράς (η οποία προβλέπεται από το μικροδίκτυο ή το ηλεκτρικό δίκτυο). Με αυτό το σενάριο, η χρήση προβλέπει μία εκτίμηση των φορτίων του μικροδικτύου στην περιοχή που εξυπηρετεί και προσαρμόζεται στην αγορά μέσω των διαθέσιμων μηχανισμών. Με το που καθοριστεί η τιμή του ηλεκτρισμού μέσα από την αγορά, το δίκτυο στέλνει τις τιμές στο μικροδίκτυο. Παρόλο που μπορεί να φαίνεται αποδοτικό, η προσέγγιση αυτή έχει την πιθανότητα να προκαλέσει διάφορα μειονεκτήματα, όταν η συμμετοχή του μικροδικτύου στο διεσπαρμένο δίκτυο είναι υψηλή, όπως για παράδειγμα τη μεταφορά των ωρών των φορτίων αιχμής. Η μέθοδος αυτή είναι ευάλωτη στο να προκαλέσει καινούριες αιχμές αφού υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το μικροδίκτυο να ακολουθεί ένα διαφορετικό πρόγραμμα από αυτό που προβλέπεται από τις μονάδες μόλις λάβουν τις τιμές, αφού η ζήτηση των αντίστοιχων φορτίων είναι αντιστρόφως ανάλογη των ηλεκτρικών τιμών. Η αύξηση του αριθμού των οντοτήτων με γρήγορα ανταποκρινόμενα φορτία που λειτουργούν με μεθόδους βασιζόμενες στην τιμή θα ενίσχυαν το πρόβλημα αυτό. Με άλλα λόγια, καθορίζοντας την τιμή κεντρικά από τις μονάδες και στέλνοντάς τη στο μικροδίκτυο, έτσι ώστε να προγραμματίσουν ανάλογα τις πηγές τους, μπορεί πιθανώς να οδηγήσει σε σημαντική αβεβαιότητα στο προφίλ φορτίου του συστήματος. [16]

4.5 Προγραμματισμός ημέρας για τις μονάδες αποθήκευσης του μικροδικτύου

Ο προγραμματισμός των μονάδων αποθήκευσης με πολλαπλές ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές είναι κρίσιμος για τη βέλτιστη και αξιόπιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Με το σωστό προγραμματισμό, οι συσκευές αποθήκευσης μπορούν να αποθηκεύουν την ενέργεια όταν η ανανεώσιμη παραγωγή είναι υψηλή ή η ενεργειακή τιμή χρήσεως είναι χαμηλή και την απελευθερώνουν όταν η ζήτηση είναι μεγάλη ή η ενεργειακή τιμή είναι ακριβή. Ο προγραμματισμός αυτός είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών βημάτων, όπου οι διαφορετικοί χρόνοι-βήματα εξαρτώνται ο ένας από τον άλλο. Συμβατικά, το πρόβλημα αυτό λύνεται κεντρικά. Ο κεντρικός ελεγκτής έχει πρόσβαση σε αληθινό χρόνο στο σύστημα, καθώς και στο προβλεπόμενο φορτίο και στις πληροφορίες για την ανανεώσιμη παραγωγή. Έχει επίσης τη δυνατότητα να στείλει εντολές σε κάθε μονάδα αποθήκευσης. Ωστόσο, όσο ο αριθμός των συσκευών αυξάνεται, η μέθοδος της κεντρικής προσέγγισης δεν μπορεί να αναπτυχθεί και είναι ευάλωτο σε ατομική αποτυχία. Για αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια έχουν τραβήξει την προσοχή οι καταναμημένες λύσεις. Για παράδειγμα, η καταναμημένη αποθήκευση φορτίου, η καταναμημένη οικονομική κατανομή φορτίου για τις

ενεργειακές πηγές, η κατανεμημένη παραγωγή για ανταπόκριση της ζήτησης και η βελτιστοποίηση της κατανεμημένης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. [17]

4.6 Κατανεμημένος αλγόριθμος για προγραμματισμό ημέρας στις μονάδες αποθήκευσης

Σε αυτή τη διπλωματική παρέχεται ένας καινοτόμος συνεργατικός αλγόριθμος για το βέλτιστο προγραμματισμό των μονάδων αποθήκευσης στο μικροδίκτυο. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυάζει τις έννοιες των δυναμικών συνθηκών Karush Kuhn Tucker (KKT) και των δικτύων συναίνεσης. Σε αυτή την προσέγγιση, κάθε ενεργειακή συσκευή του μικροδικτύου είναι εξοπλισμένη με έναν κατανεμημένο ελεγκτή. Οι κατανεμημένοι ελεγκτές έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες με τους γείτονές τους. Με την προϋπόθεση ότι το δίκτυο επικοινωνιών μεταξύ των ελεγκτών είναι συνδεδεμένο, κάθε ελεγκτής μπορεί να βρει το βέλτιστο προγραμματισμό για τις συνδεδεμένες συσκευές του με μία επαναληπτική διαδικασία. Τα τρία κύρια χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- 1) Λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης με παροδικά και χωρικά ζεύγη περιορισμών με έναν πλήρως κατανεμημένο τρόπο χωρίς να απαιτεί κανέναν κεντρικό ελεγκτή/συντονιστή/ηγέτη.
- 2) Οι κόμβοι χρειάζεται να επικοινωνούν μόνο με τους γείτονές τους. Σε αντίθεση με κάποιες κατανεμημένες προσεγγίσεις, οι συσκευές δε χρειάζεται να επικοινωνούν με όλες τις συσκευές που μοιράζονται τους ίδιους δεσμευτικούς περιορισμούς.
- 3) Οι συσκευές δε χρειάζεται να φανερώνουν πληροφορίες για την κατανάλωση/παραγωγή τους σε άλλες συσκευές. Οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται είναι μόνο οι εκτιμήσεις των ολικών πρωτευόντων/διπλών μεταβλητών.

Το μικροδίκτυο που μας ενδιαφέρει αποτελείται από διεσπαρμένες ανανεώσιμες πηγές, μονάδες αποθήκευσης και τοπικά φορτία. Ο προγραμματισμός των αποθηκευτικών συσκευών σε αυτό τον τύπο του μικροδικτύου μπορεί να διατυπωθεί ως ένα διακριτού χρόνου πρόβλημα βελτιστοποίησης ελέγχου. Για αυτό το λόγο ορίζουμε τις ελεγχόμενες/ μη ελεγχόμενες εισόδους, τους περιορισμούς, την αντικειμενική συνάρτηση και τις καταστάσεις. Για την παρούσα εργασία υποθέτουμε ότι σε όλες τις συσκευές του μικροδικτύου ανατίθεται ένας ξεχωριστός δείκτης και το σετ δεικτών όλων των συσκευών περιγράφεται με το σύμβολο I .

A. Ελεγχόμενες εισοδοί:

Το διάνυσμα των ελεγχόμενων εισόδων περιγράφεται από τη συνάρτηση $u(t)$, η οποία αποτελείται από:

- 1) **Εντολές ισχύος στις μονάδες αποθήκευσης:** Οι εντολές ισχύος στις μονάδες αποθήκευσης με δείκτη i στο χρονικό βήμα t περιγράφεται με το $P_{i,B}(t)$, όπου $i \in B$ και το B είναι το σετ των δεικτών των αποθηκευτικών συσκευών. Μία θετική ποσότητα υποδηλώνει την έγχυση ισχύος στο μικροδίκτυο.

2) **Εντολές ισχύος στο περιβάλλον του μικροδικτύου:** Η ισχύς που τραβιέται από το δίκτυο τη χρονική στιγμή t περιγράφεται από τη συνάρτηση $P_{i,grid}(t)$, όπου $i \in grid$ είναι ο δείκτης που ανατίθεται στο περιβάλλον του δικτύου και το σετ που περιέχει αυτό το δείκτη περιγράφεται από το $grid$.

B. Μη ελεγχόμενες εισοδοι: Το διάνυσμα των μη ελεγχόμενων εισόδων περιγράφεται από τη συνάρτηση $w(t)$, η οποία αποτελείται από:

1) **Ανανεώσιμη παραγωγή:** Η ισχύς που παράγεται από την ανανεώσιμη μονάδα παραγωγής με δείκτη i στο χρονικό βήμα συμβολίζεται με $P_{i,R}(t)$, όπου $i \in R$ και R είναι το σετ των δεικτών των ανανεώσιμων μονάδων.

2) **Ζήτηση:** Η ισχύς που καταναλώνεται από τη μονάδα φορτίου με δείκτη i στο χρονικό βήμα t συμβολίζεται με $P_{i,D}(t)$, όπου $i \in D$ και D είναι το σετ των δεικτών των μονάδων ζήτησης.

3) **Ενεργειακή τιμή:** Η τιμή της ενέργειας στο ανάντι δίκτυο τη χρονική στιγμή t συμβολίζεται με $p(t)$.

C. Καταστάσεις του συστήματος: Οι καταστάσεις του μικροδικτύου είναι οι τιμές της αποθηκευμένης ενέργειας στις μονάδες αποθήκευσης. Η αποθηκευμένη ενέργεια στη συσκευή με δείκτη i τη χρονική στιγμή t συμβολίζεται με $x(t)$, το οποίο έχει την ακόλουθη δυναμικότητα:

$$\forall i \in B: x_i(t+1) = x_i(t) - P_{i,B}(t)\Delta t, \quad (1)$$

όπου Δt είναι το διάστημα μεταξύ δύο χρονικών βημάτων (για παράδειγμα μία ώρα). Το διάνυσμα καταστάσεων συμβολίζεται με $x(t) = [x_i(t): i \in B]$.

D. Αντικειμενική συνάρτηση: Ο σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του μικροδικτύου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα.

$$\min_{u(t), t=1, \dots, T} \left(J = \sum_{t=1}^T \gamma^{t-1} C(x(t), u(t), w(t)) \right), \quad (2)$$

όπου $C(x(t), u(t), w(t))$ είναι το λειτουργικό κόστος του μικροδικτύου τη χρονική στιγμή t . Εδώ το γ είναι εκπτώτικος συντελεστής ($0 < \gamma \leq 1$) για να δώσει λιγότερο βάρος σε μελλοντικές τιμές του κόστους. Επίσης, θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν θερμικές μονάδες παραγωγής εγκατεστημένες στο μικροδίκτυο, οπότε το μόνο λειτουργικό κόστος είναι η ενέργεια που αγοράζεται από τις εγκαταστάσεις. Άρα έχουμε:

$$C(x(t), u(t), w(t)) = p(t)P_{i,grid}(t)\Delta t \quad (3)$$

E. Περιορισμοί: Πρέπει να ικανοποιούνται τριών ειδών περιορισμοί:

1) **Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος:** Οποιαδήποτε στιγμή, η ποσότητα της παραγωγής πρέπει να ισούται με την ποσότητα της ζήτησης:

$$\begin{aligned} \forall 1 \leq t \leq T, i \in B: & \sum_{i \in B} P_{i,B}(t) + \sum_{i \in R} P_{i,R}(t) + P_{i,grid}(t) \\ & = \sum_{i \in D} P_{i,D}(t) \quad (4) \end{aligned}$$

Αγνοούνται οι απώλειες.

- 2) **Ενεργειακοί περιορισμοί για τις μονάδες αποθήκευσης:** Οποιαδήποτε στιγμή, η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μονάδες αποθήκευσης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα των συσκευών αυτών η αρνητική:
- $$\forall 1 \leq t \leq T, i \in B: 0 \leq x_i(t) \leq E_{i,full} \quad (5)$$

όπου $E_{i,full}$ είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε κάθε συσκευή με δείκτη i . Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (5) προκύπτει ότι:

$$\forall 1 \leq s \leq T, i \in B: x_{i0} - E_{i,full} \leq \sum_{t=1}^s P_{i,B}(t) \Delta t \leq x_{i0} \quad (6)$$

όπου x_{i0} είναι η αρχική ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας της συσκευής με δείκτη i .

- 3) **Περιορισμός μέγιστης/ελάχιστης ισχύος:** Οποιαδήποτε στιγμή, η ισχύς που στέλνεται στις μονάδες αποθήκευσης η στο περιβάλλον του δικτύου πρέπει να είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια:

$$\forall 1 \leq t \leq T: \begin{cases} P_{i,Bmin} \leq P_{i,B}(t) \leq P_{i,Bmax} \\ P_{gridmin} \leq P_{i,grid}(t) \leq P_{gridmax} \end{cases} \quad (7)$$

όπου $P_{i,Bmin}$ και $P_{i,Bmax}$ είναι τα ελάχιστα και μέγιστα όρια της συσκευής αποθήκευσης με δείκτη i και $P_{gridmin}, P_{gridmax}$ είναι η ελάχιστη και μέγιστη ισχύς που μπορεί να τραβηχτεί από το δίκτυο. [18]

4.7 Η Lagrangian του προβλήματος

Η επαυξημένη Lagrangian του προβλήματος με την προσθήκη των συνθηκών KKT, των περιορισμών και των όρων σφάλματος στην αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$\begin{aligned}
J = & \sum_{t=1}^T \gamma^{t-1} p(t) P_{i,grid}(t) + \sum_{t=1}^T \lambda(t) \left(\sum_{i \in D} P_{i,D}(t) - \sum_{i \in B} P_{i,B}(t) - \sum_{i \in R} P_{i,R}(t) - P_{i,grid}(t) \right) \\
& + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B} \mu_i(t) \left(x_{i0} - E_{i,full} - \sum_{s=1}^t P_{i,B}(s) \Delta t \right) \\
& + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B} \xi_i(t) \left(\sum_{s=1}^t P_{i,B}(s) \Delta t - x_{i0} \right) \\
& + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i \in D} P_{i,D}(t) - \sum_{i \in B} P_{i,B}(t) - \sum_{i \in R} P_{i,R}(t) - P_{i,grid}(t) \right)^2 \\
& + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B} \left(\left[x_{i0} - E_{i,full} - \sum_{s=1}^t P_{i,B}(s) \Delta t \right]^+ \right)^2 \\
& + \frac{\rho}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B} \left(\left[\sum_{s=1}^t P_{i,B}(s) \Delta t - x_{i0} \right]^+ \right)^2
\end{aligned}$$

όπου $\lambda(t)$, $\xi_i(t)$ και $\mu_i(t)$ είναι οι πολλαπλασιαστές KKT για τους περιορισμούς και το όρισμα $[\]^+$ προβάλλει το όρισμά του στις θετικές τιμές. Οι τελευταίοι τρεις όροι είναι οι όροι του σφάλματος για τους περιορισμούς και βελτιώνουν τις ιδιότητες της σύγκλισης για την επαναληπτική διαδικασία των αλγορίθμων και ρ ο συντελεστής του σφάλματος. [19]

4.8 Επίλυση των εξισώσεων του προβλήματος με χρήση του αλγορίθμου Gradient Descent

Η λύση στο πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου μπορεί να βρεθεί σε μία επαναληπτική διαδικασία μετακινώντας τις πρωταρχικές μεταβλητές (ελεγχόμενοι εισοδοί) στην αντίθετη κατεύθυνση και τις δευτερεύουσες μεταβλητές στην κατεύθυνση της κλίσης της Lagrangian [20]. Επομένως, οι εξισώσεις είναι:

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}:$$

$$P_{i,grid}^{k+1}(t) = P_{i,grid}^k(t) - n \left(\gamma^{k-1} p(t) - \lambda^k(t) - \rho \Delta P^k(t) \right) \quad (9)$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in B:$$

$$\begin{aligned}
P_{i,B}^{k+1}(t) = & P_{i,B}^k(t) \\
& - n \left(-\lambda^k(t) - \rho \Delta P^k(t) - \sum_{l=t}^T \mu_i^k(l) \Delta t + \sum_{l=t}^T \xi_i^k(l) \Delta t \right. \\
& - \rho \Delta t \sum_{l=t}^T \left[x_{i0} - E_{i,full} - \sum_{s=1}^l P_{i,B}^k(s) \Delta t \right]^+ \\
& \left. + \rho \Delta t \sum_{l=t}^T \left[\sum_{s=1}^l P_{i,B}^k(s) \Delta t - x_{i0} \right]^+ \right) \quad (10)
\end{aligned}$$

$\forall t \in \{1, \dots, T\}$:

$$\lambda^{k+1}(t) = \lambda^k(t) + n \Delta P^k(t) \quad (11)$$

$\forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in B$:

$$\mu_i^{k+1}(t) = \left[\mu_i^k(t) + n \left(x_{i0} - E_{i,full} - \sum_{s=1}^j P_{i,B}(s) \Delta t \right) \right]^+ \quad (12)$$

$\forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in B$:

$$\xi_i^{k+1}(t) = \left[\xi_i^k(t) + n \left(\sum_{s=1}^j P_{i,B}^k(s) \Delta t - x_{i0} \right) \right]^+ \quad (13)$$

όπου $\forall t \in \{1, \dots, T\}$:

$$\Delta P^k = \sum_{i \in D} P_{i,D}^k(t) - \sum_{i \in B} P_{i,B}^k(t) - \sum_{i \in R} P_{i,R}^k(t) - P_{i,grid}^k(t) \quad (14)$$

Διαλέγοντας κατάλληλες μικρές τιμές για το n και ρ , οι ανανεωμένες εξισώσεις (9)-(13) θα συγκλίνουν στο κρίσιμο σημείο της Lagrangian, το οποίο είναι το βέλτιστο σημείο του προβλήματος. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (9)-(11) απαιτείται κάθε κόμβος να έχει πρόσβαση σε συγκεκριμένες πληροφορίες του μικροδικτύου, οι οποίες είναι το προβλεπόμενο φορτίο για τις μονάδες ζήτησης, η προβλεπόμενη παραγωγή για όλες τις ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής και οι καθορισμένες ελεγχόμενες εισοδοί για όλους τους καταναμημένους κόμβους. [21]

4.9 Αλγόριθμος συναίνεσης (Consensus Algorithm)

Έστω ότι στο δίκτυο υπάρχει ένα σύστημα αισθητήρων τα οποία ανιχνεύουν τις τοπικές τιμές. Έχει αποδειχθεί ότι με απλούς και καταναμημένους αλγορίθμους που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο κάθε κόμβος με τις τιμές αυτού και των γειτόνων του στους υπολογισμούς επιτυγχάνεται σύγκλιση σε μία κοινή τιμή. Τέτοιος αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος συναίνεσης. Αν θεωρηθεί ότι οι μονάδες παραγωγής εξοπλίζονται με τέτοιους αισθητήρες (πράκτορες) μπορεί να επιτευχθεί αποκεντρωμένος έλεγχος στο σύστημα καθώς και επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου των μονάδων. Με αυτό τον τρόπο κάθε μονάδα αξιοποιεί μόνο τις δικές της πληροφορίες και των γειτόνων της για την ανανέωση της μεταβλητής συναίνεσης, καταλήγοντας μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία στο ίδιο αποτέλεσμα που θα προέκυπτε αν γινόταν χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή, ο οποίος θα λάμβανε και θα επεξεργαζόταν δεδομένα από όλες τις μονάδες. [22]

Η διαδικασία επίλυσης είναι η ακόλουθη, Έστω ότι ένας κόμβος i του συστήματος βρίσκεται σε μία κατάσταση $x_i \in \mathcal{R}$, η οποία τιμή μπορεί να συμβολίζει οποιαδήποτε φυσική ποσότητα του συστήματος, όπως η παραγόμενη ισχύς. Υποθέτουμε ότι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του συστήματος γίνεται σε διακριτό χρόνο και η δειγματοληψία του χρόνου πραγματοποιείται με τη μεταβλητή k . Για να θεωρήσουμε ότι το σύστημα έφτασε σε συναίνεση πρέπει όλοι οι κόμβοι να έχουν φτάσει στην ίδια κατάσταση, δηλαδή:

$$x_i = x_j \quad \forall \text{ στοιχείο } i, j \text{ του δικτύου}$$

Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών μόνο με τους γείτονές του. Έτσι, ο κανόνας για την ανανέωση κατάστασης 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 . Ο πίνακας γειτνίασης εκφράζει το αν υπάρχει ή όχι ακμή μεταξύ δύο στοιχείων. Τα στοιχεία αυτού του πίνακα ορίζονται ως:

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

Από τον πίνακα αυτόν προκύπτει ένας ακόμα σημαντικός πίνακας, ο Λαπλασιανός πίνακας L , του οποίου τα στοιχεία ορίζονται:

$$l_{ii} = \sum_j a_{ij}$$

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

Οι παραπάνω σχέσεις μας δίνουν την παρακάτω δυναμική σχέση:

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

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

$$d_{ij} = \begin{cases} 1/n_i, & \text{αν τα στοιχεία } i, j \text{ συνδέονται} \\ 0, & \text{αν δε συνδέονται} \end{cases}$$

Με αυτό τον τρόπο, ο κάθε κόμβος καταλήγει στο σταθμισμένο μέσο της δικής του παρούσης κατάστασης και της παρούσης κατάστασης των γειτόνων του. Τελικά, όλο το σύστημα συγκλίνει θα συγκλίνει στην ίδια τιμή, χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές πληροφορίες. [23]

4.10 Χρήση αλγορίθμου συναίνεσης για εκτίμηση ολικών πληροφοριών

Για να γίνει ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται από τις εξισώσεις (9)-(13) του κεφαλαίου 5.6 πλήρως κατανοητός, αντί για τη χρήση ολικών πληροφοριών, χρησιμοποιούνται τοπικές εκτιμήσεις για τις ολικές πληροφορίες κάθε κόμβου και επιτρέπουν στους κόμβους να συντονίσουν τις εκτιμήσεις τους με τους γείτονές τους μέσα από δίκτυα συναίνεσης. Οπότε οι εξισώσεις (9) και (10) γίνονται:

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}:$$

$$P_{i,grid}^{k+1}(t) = P_{i,grid}^k(t) - n \left(\gamma^{k-1} p(t) - \hat{\lambda}_i^k(t) - \rho \Delta \hat{P}_i^k(t) \right) \quad (15)$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in B:$$

$$\begin{aligned} P_{i,B}^{k+1}(t) = & P_{i,B}^k(t) \\ & - n \left(-\hat{\lambda}_i^k(t) - \rho \Delta \hat{P}_i^k(t) - \sum_{l=t}^T \mu_i^k(l) \Delta t + \sum_{l=t}^T \xi_i^k(l) \Delta t \right. \\ & - \rho \Delta t \sum_{l=t}^T \left[x_{i0} - E_{i,full} - \sum_{s=1}^l P_{i,B}^k(s) \Delta t \right]^+ \\ & \left. + \rho \Delta t \sum_{l=t}^T \left[\sum_{s=1}^l P_{i,B}^k(s) \Delta t - x_{i0} \right]^+ \right) \quad (16) \end{aligned}$$

όπου $\Delta \hat{P}_i^k(t)$ και $\hat{\lambda}_i^k(t)$ είναι η εκτιμήσεις του κόμβου i στο βήμα k από το μέσο ισοζύγιο ισχύος στο δίκτυο $\Delta P^k(t)$ και τη δευτερεύουσα μεταβλητή $\lambda^k(t)$, αντίστοιχα. Η εκτιμώμενες μεταβλητές ανανεώνονται σε όλους τους κόμβους ακολούθως:

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}, i \in B \cup D \cup R \cup grid, j \in \{B, D, R, grid\}:$$

$$\hat{\lambda}_i^{k+1}(t) = \hat{\lambda}_i^k + \sum_{j \in N_i} w_{ij}(\hat{\lambda}_j^k - \hat{\lambda}_i^k(t)) + n\Delta\hat{P}_i^k(t)$$

(17)

$$\Delta\hat{P}_i^{k+1}(t) = \Delta\hat{P}_i^k(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij}(\Delta\hat{P}_j^k(t) - \Delta\hat{P}_i^k(t)) + P_{i,j}^k(t) - P_{i,j}^{k+1}(t)$$

όπου N_i είναι το σετ των γειτόνων του κόμβου i του δικτύου επικοινωνιών και $w_{ij} = w_{ji}$ είναι η δύναμη συνεκτικότητας μεταξύ του κόμβου i και του κόμβου j διαλέγονται έτσι ώστε $0 < w_{ij} < (\min_{i=1, \dots, N} |N_i|)^{-1}$ και να ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης για το δίκτυο συναίνεσης. [24]

Συσκευές όπως μετασηματιστές/μετατροπείς στο μικροδίκτυο δεν παράγουν/καταναλώνουν ενεργά ισχύ. Από την πλευρά των επικοινωνιών ωστόσο ενδέχεται να συμμετέχουν στη διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών. Άρα για όλες αυτές τις συσκευές, οι εκτιμώμενες μεταβλητές ανανεώνονται ακολούθως:

$\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in I \setminus (B \cup R \cup D \cup \text{grid})$:

$$\hat{\lambda}_i^{k+1}(t) = \hat{\lambda}_i^k(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij}(\hat{\lambda}_j^k(t) - \hat{\lambda}_i^k(t)) + n\Delta\hat{P}_i^k(t), \quad (18)$$

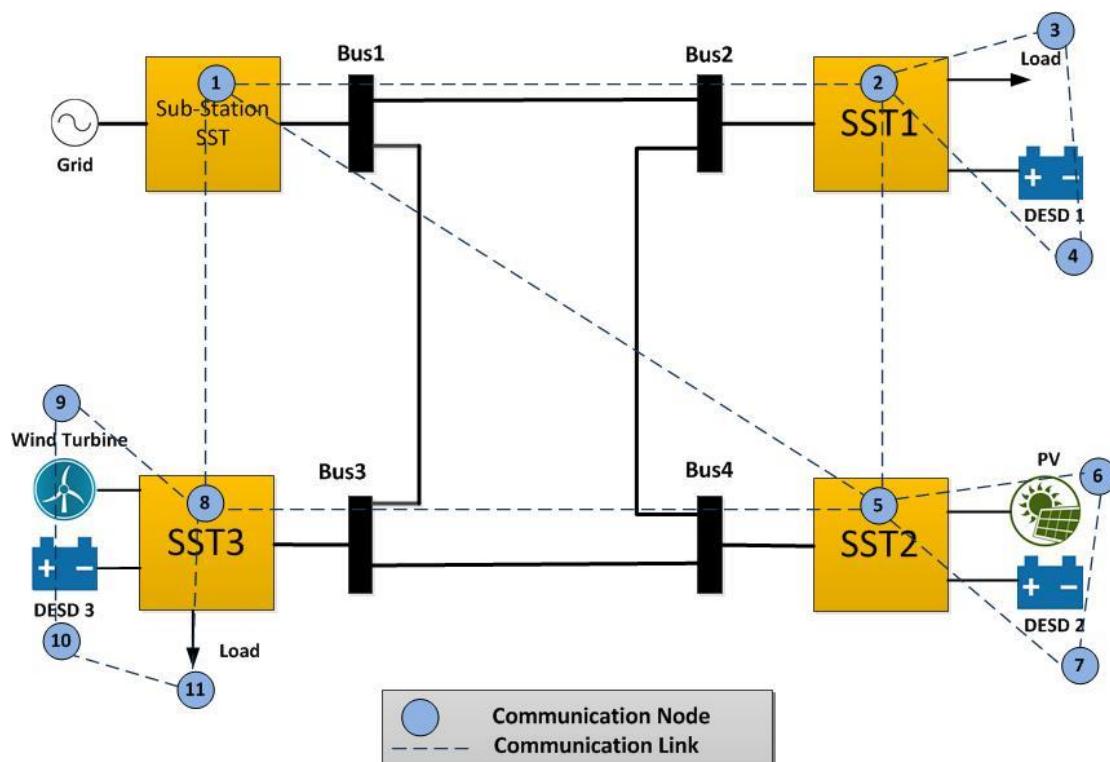
$$\Delta\hat{P}_i^{k+1}(t) = \Delta\hat{P}_i^k(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij}(\Delta\hat{P}_j^k(t) - \Delta\hat{P}_i^k(t))$$

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση δικτύων - Αποτελέσματα

5.1 Προγραμματισμός παραγωγής με κεντρική διαχείριση ενέργειας με χρήση Gradient Descent

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε, υλοποιήθηκε με χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η περίπτωση στην οποία υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής στο μικροδίκτυο, ο οποίος επιτελεί το έργο της βελτιστοποίησης για τις επόμενες πέντε ώρες και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Η τοπολογία του δικτύου περιγράφεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Τοπολογία δικτύου

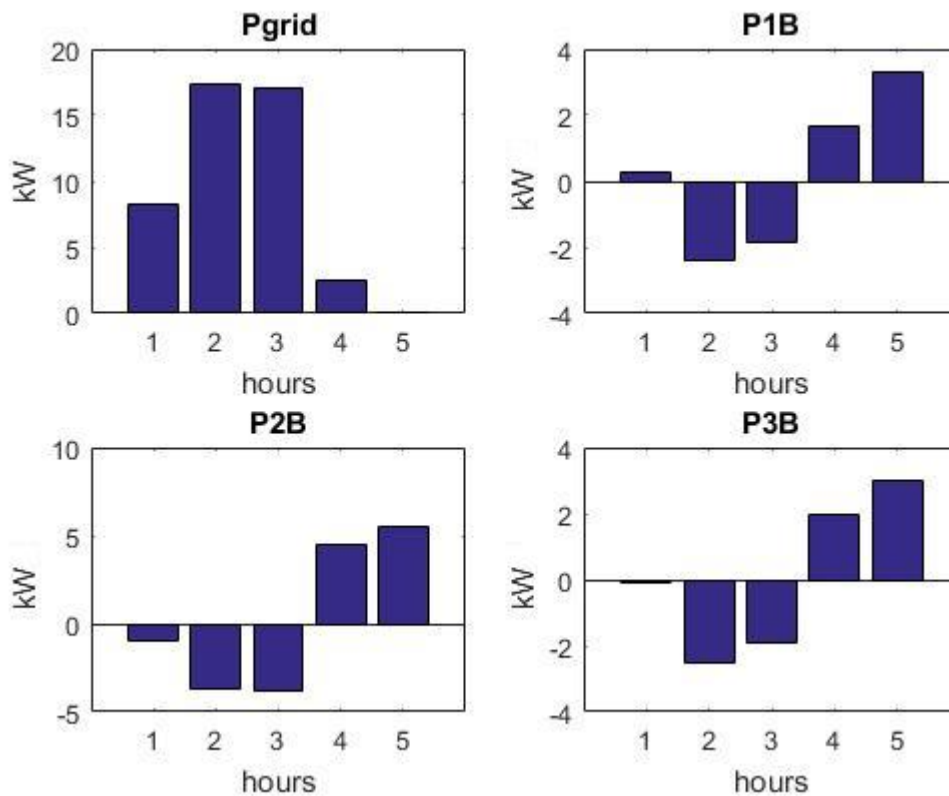
Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το προς μελέτη δίκτυο αποτελείται από τέσσερις ζυγούς στους οποίους είναι συνδεδεμένες συσκευές αποθηκευτικής ενέργειας, μονάδες ΑΠΕ και φορτία.

Οι μεταβλητές που επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε είναι οι ακόλουθες: η ισχύς του δικτύου (P_{grid}) και ισχύς των μπαταριών (P_{1B}, P_{2B}, P_{3B}). Ο κεντρικός ελεγκτής λαμβάνει τις πληροφορίες που χρειάζεται για τη βελτιστοποίηση αυτών των μεταβλητών (πολλαπλασιαστές Lagrange, ισοζύγιο ισχύος και συνθήκες KKT). Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου gradient descent παρουσιάζονται τα ακόλουθα αποτελέσματα κατά περίπτωση.

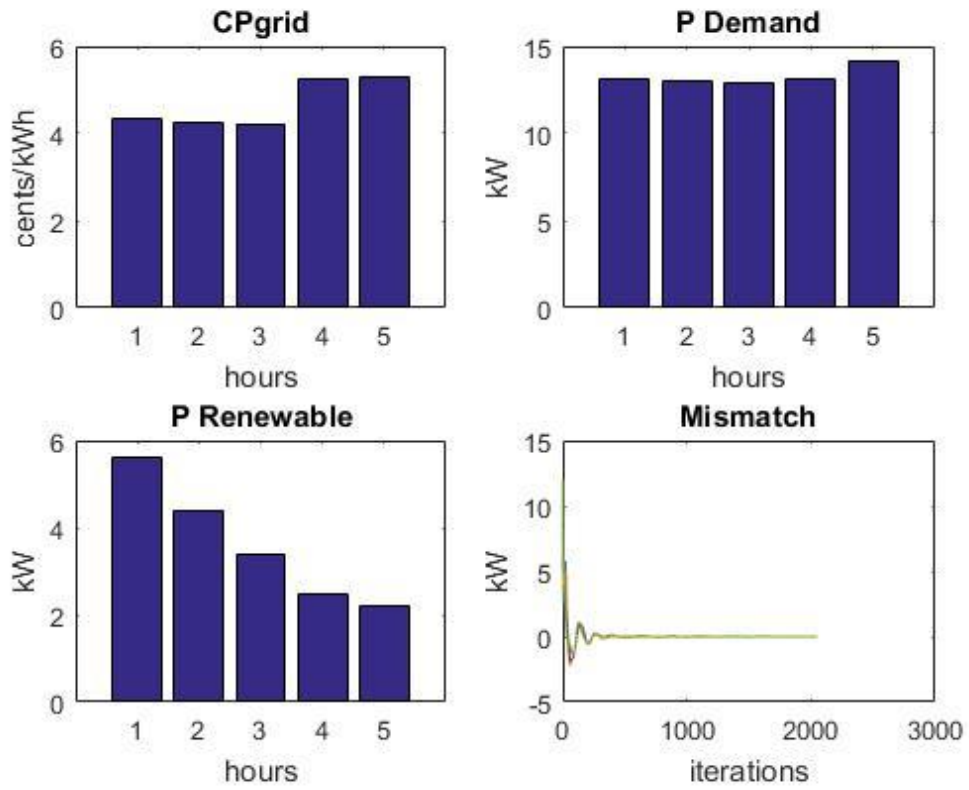
Περίπτωση 1: Τα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου δίνονται από τον Πίνακα 1 και στις εικόνες που ακολουθούν αποτελούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα τα μπαταριών (kWh)	Αρχική Φόρτιση Μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	1
4.24	13	4.4	10	1.5
4.22	12.9	3.4	5	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

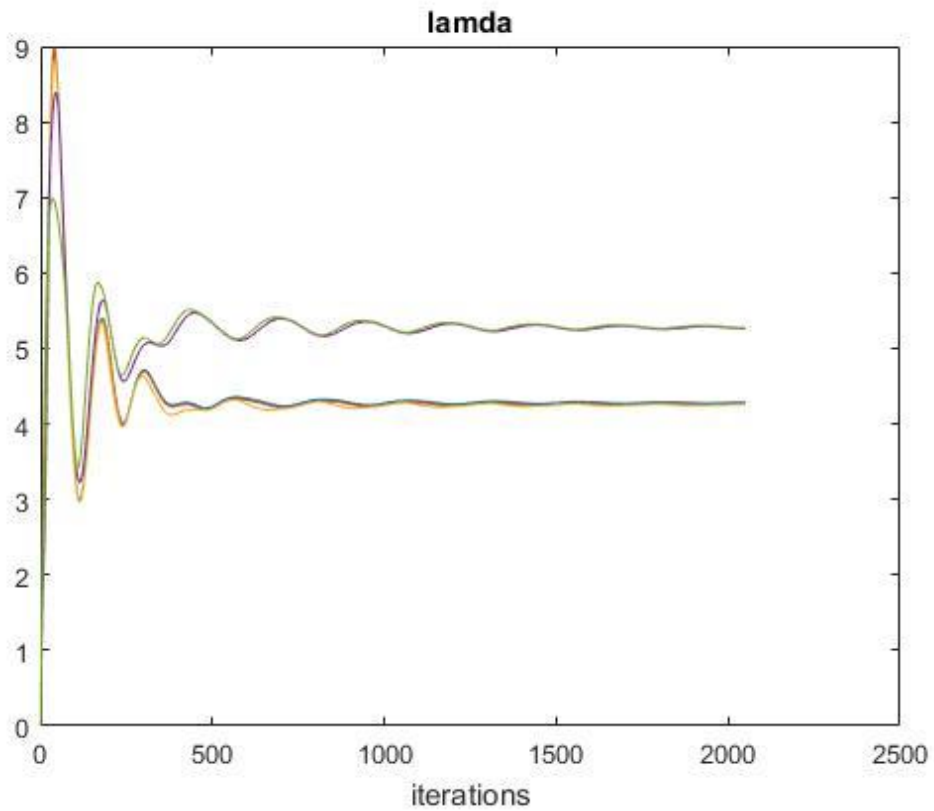
Πίνακας 1



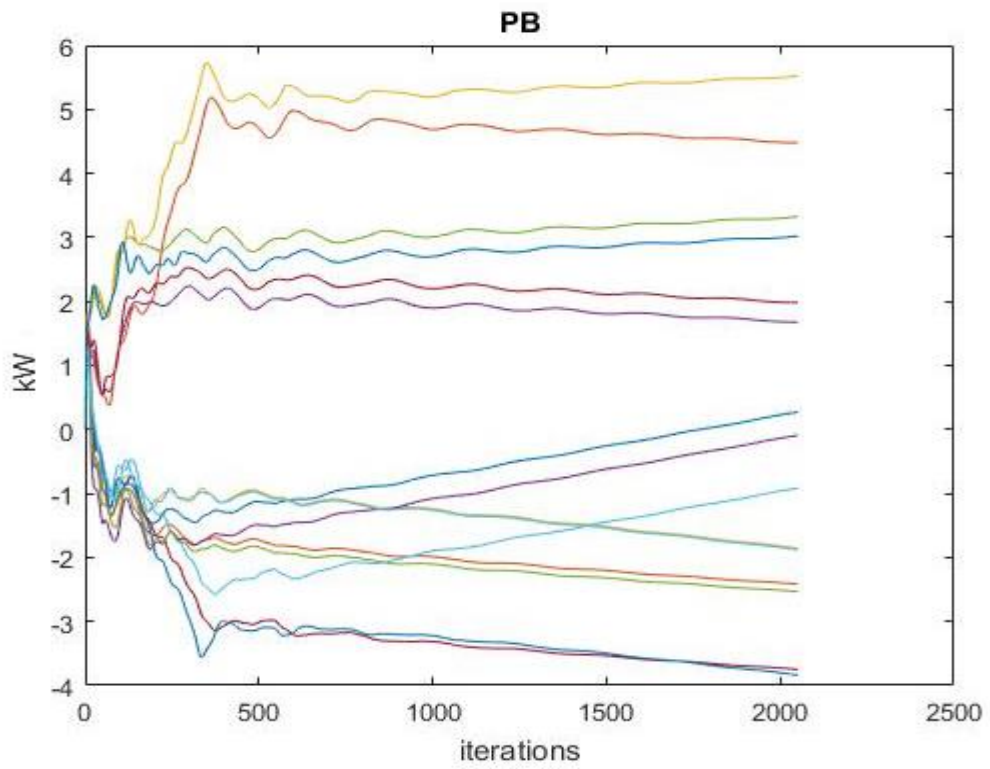
Εικόνα 7: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



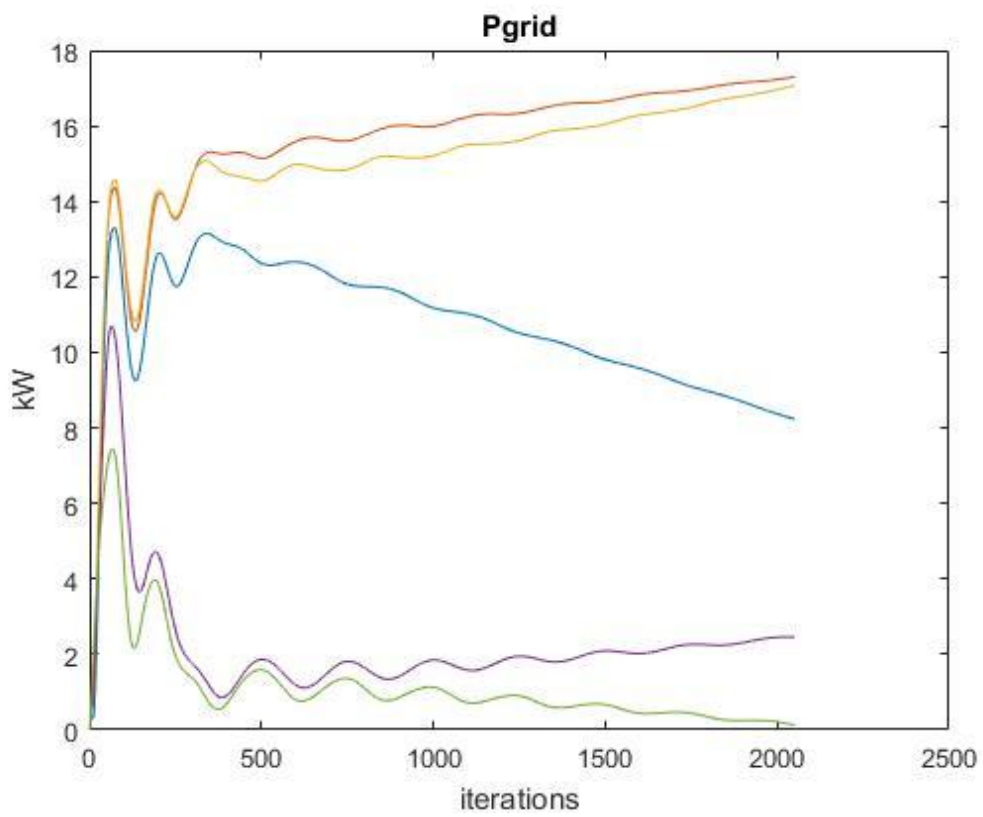
Εικόνα 8: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 9: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 10: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 11: Ισχύς δικτύου

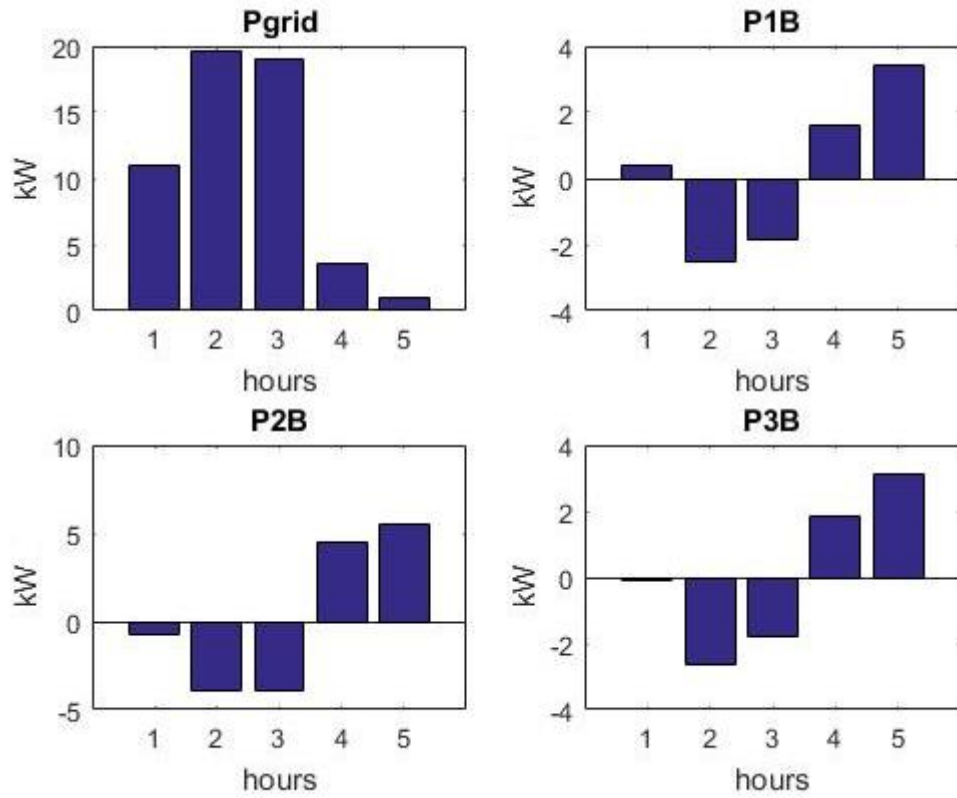
- **Εικόνα 7:** Παρουσιάζονται οι μεταβλητές που έχουν βελτιστοποιηθεί μέσω του αλγορίθμου gradient descent. Αναλυτικότερα, για τη μεταβλητή P_{grid} παρατηρείται ότι στα χρονικά βήματα 2 και 3 όπου η τιμή είναι χαμηλότερη έχει υψηλότερες τιμές από ότι στα χρονικά βήματα που η τιμή είναι υψηλότερη. Η ισχύς των μπαταριών στα χρονικά βήματα όπου η ζήτηση είναι χαμηλή είναι αρνητική, επειδή αποθηκεύουν ενέργεια την οποία εν συνεχεία απελευθερώνουν στο δίκτυο (θετική ισχύς μπαταριών) όταν η ζήτηση είναι υψηλή.
- **Εικόνα 8:** Περιγράφεται το ισοζύγιο ισχύος του συστήματος το οποίο όπως και η μεταβλητή λ εκτελεί μία ταλάντωση στα αρχικά βήματα και συγκλίνει μετά από κάποιο σημείο σε μία σταθερή τιμή, τη μηδενική, η οποία αποτελεί επίσης λύση του προβλήματος.
- **Εικόνα 9:** Παρουσιάζεται ο πολλαπλασιαστής Lagrange λ κάθε ώρας που αφορά τον εξισωτικό περιορισμό του προβλήματος. Στα αρχικά βήματα παρατηρείται ταλάντωση στις τιμές του πολλαπλασιαστή μέχρι τη σύγκλισή του σε μία σταθερή τιμή, η οποία αποτελεί και τη λύση του προβλήματος Lagrange.
- **Εικόνα 10:** Περιγράφεται η ισχύς των μπαταριών και η εύρεση της βέλτιστης φόρτισής τους μέσα από την επαναληπτική διαδικασία.
- **Εικόνα 11:** Περιγράφεται η ισχύς που τραβιέται από το δίκτυο και η εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσα από την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Το συνολικό κόστος με κεντρικό ελεγκτή ανέρχεται στα 194.67 cents.

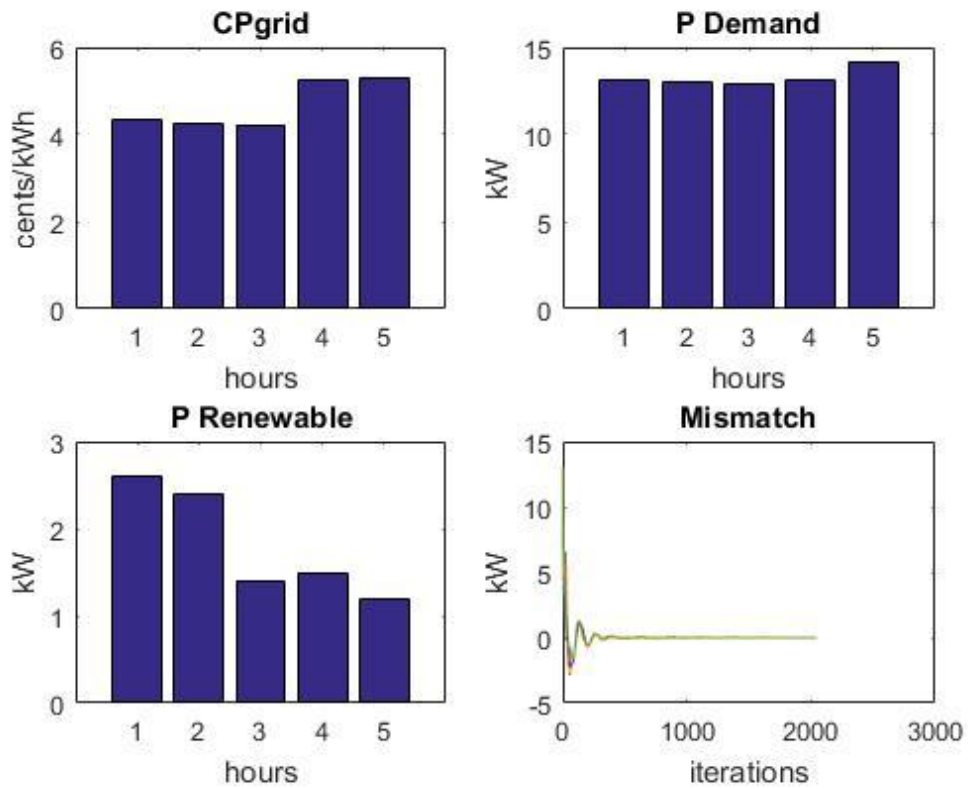
Περίπτωση 2: Σε αυτή την περίπτωση αλλάζουμε (μειώνουμε) την παραγωγή των ΑΠΕ και κρατάμε όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	2.6	5	1
4.24	13	2.4	10	1.5
4.22	12.9	1.4	5	0.5
5.26	13.1	1.5		
5.3	14.2	1.2		

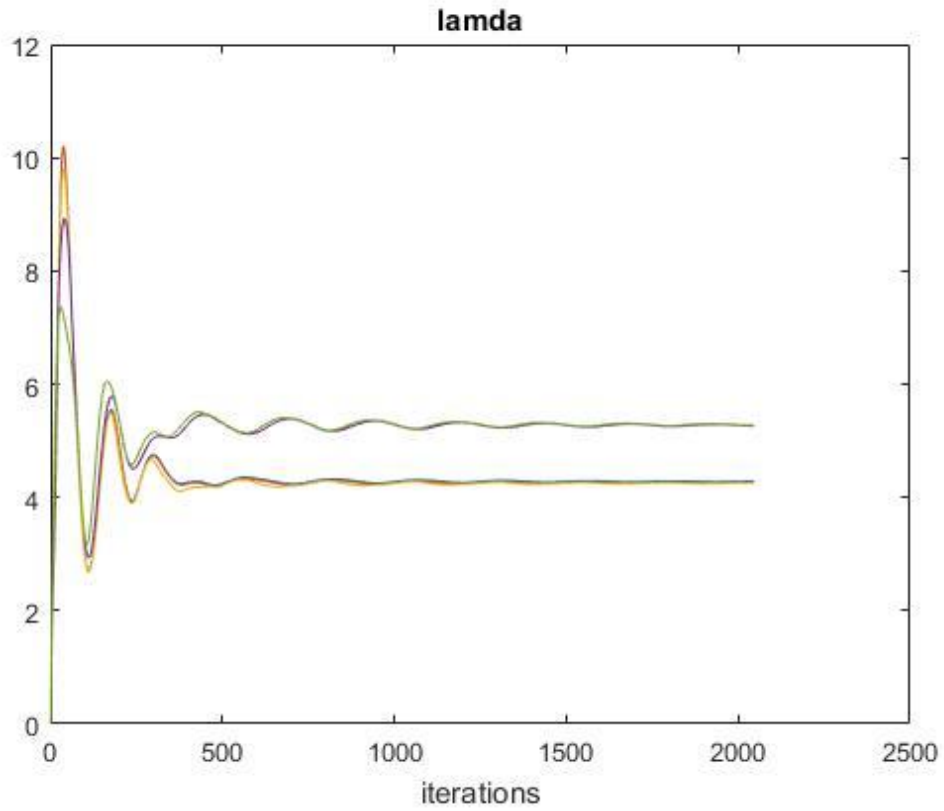
Πίνακας 2



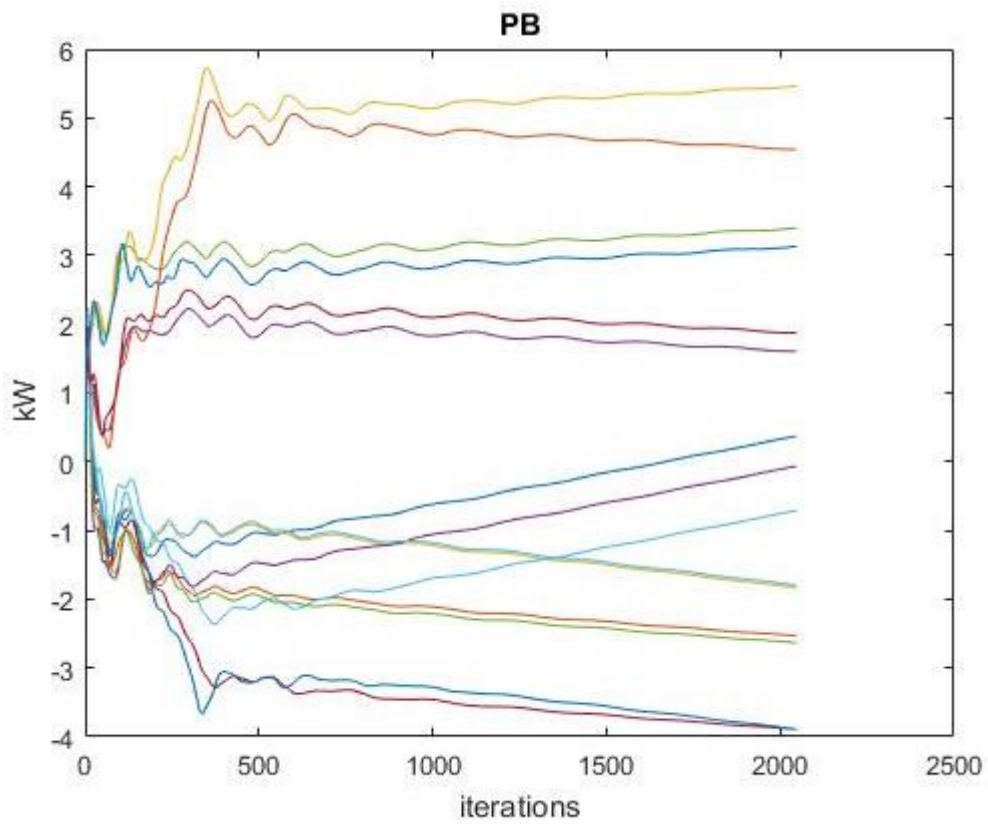
Εικόνα 12: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



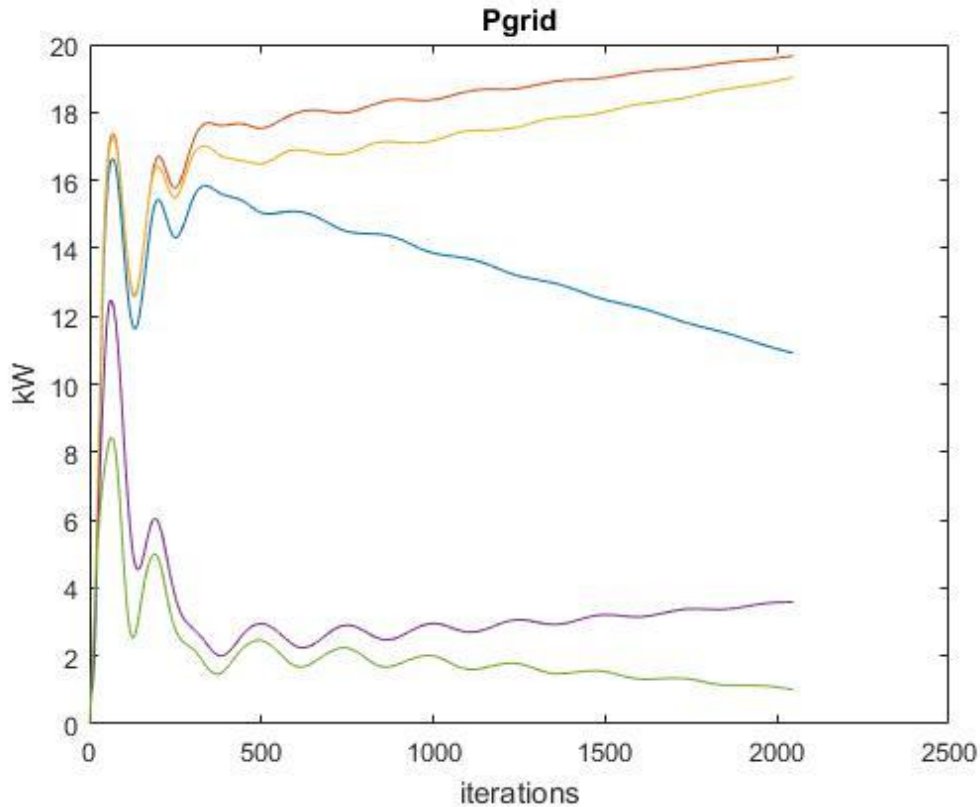
Εικόνα 13: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 14: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 15: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 16: Ισχύς δικτύου

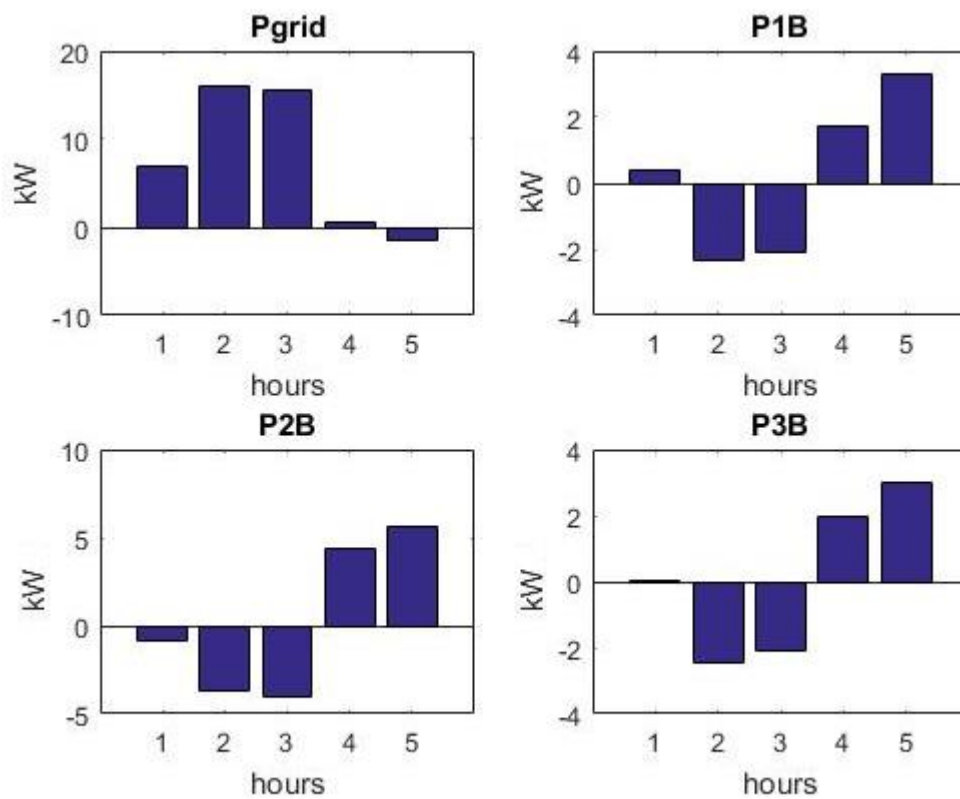
- **Εικόνα 12:** Παρατηρείται ότι με τη μείωση των παραγόμενων φορτίων από ΑΠΕ αυξάνεται αρκετά η ισχύς που τραβάμε από το δίκτυο, το οποίο είναι λογικό επειδή το δίκτυο προσπαθεί να καλύψει τη ζήτηση.
- **Εικόνα 13:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη σταθερή τιμή τη μηδενική που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 14:** Ο πολλαπλασιαστής κάθε ώρας συγκλίνει και πάλι σε μία σταθερή τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 15,16:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν σε μία σταθερή τιμή.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 235,11 cents, μεγαλύτερο από την περίπτωση 1 το οποίο είναι λογικό εφόσον με λιγότερη παραγωγή από ΑΠΕ, το δίκτυο για να καλύψει τις ανάγκες της ζήτησης αγοράζει περισσότερη ενέργεια.

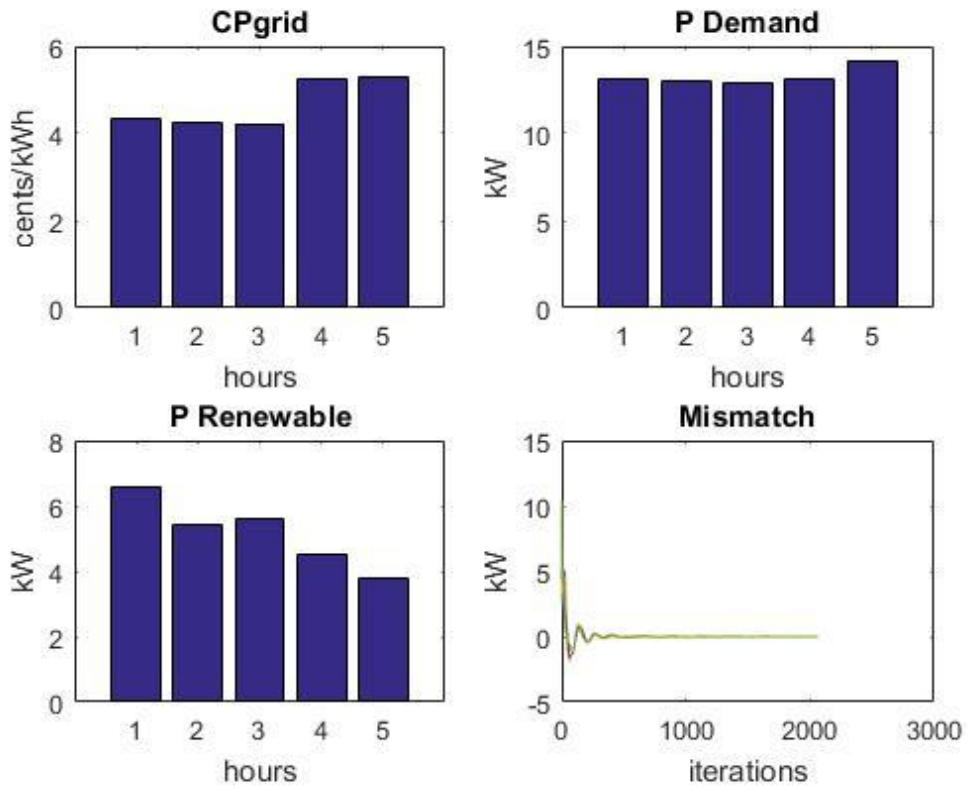
Περίπτωση 3: Ίδια περίπτωση με την παραπάνω με τη διαφορά ότι αντί να μειώσουμε, αυξάνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	6.6	5	1
4.24	13	5.4	10	1.5
4.22	12.9	5.6	5	0.5
5.26	13.1	4.5		
5.3	14.2	3.8		

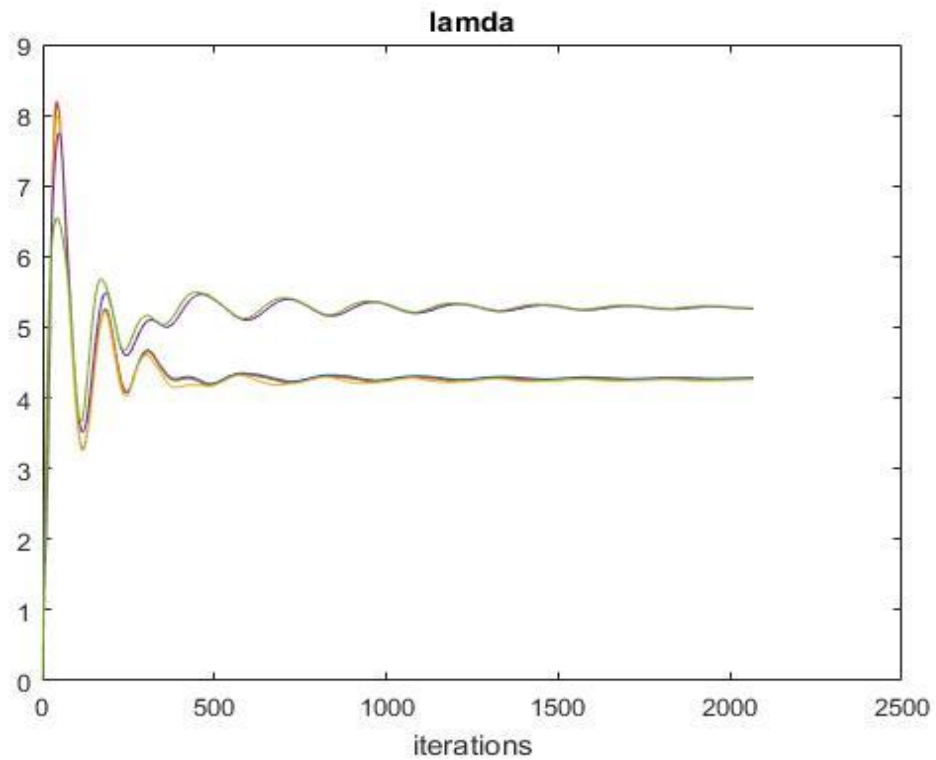
Πίνακας 3



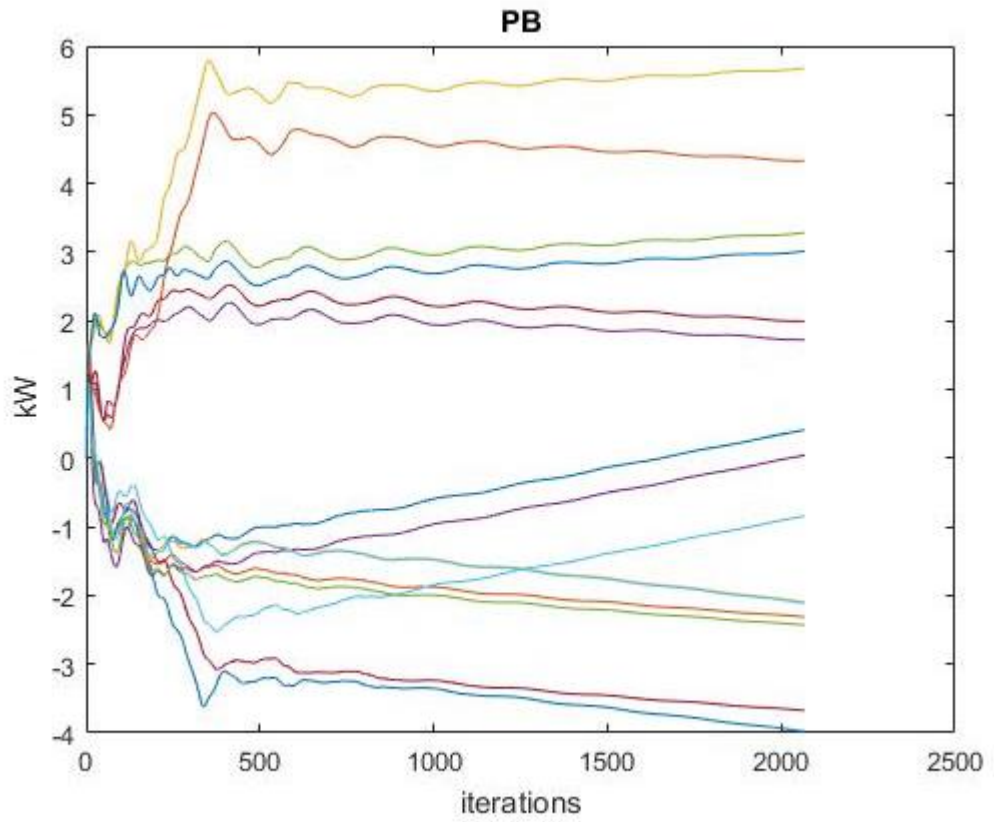
Εικόνα 17: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



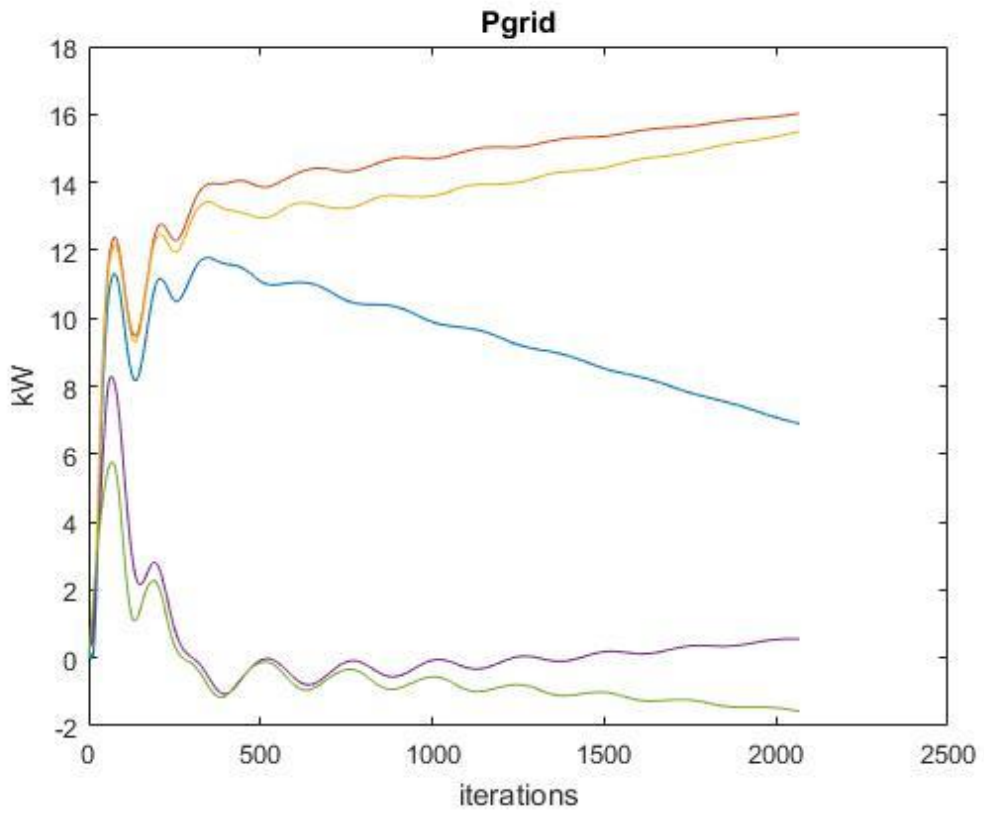
Εικόνα 18: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 19: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 20: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 21: Ισχύς δικτύου

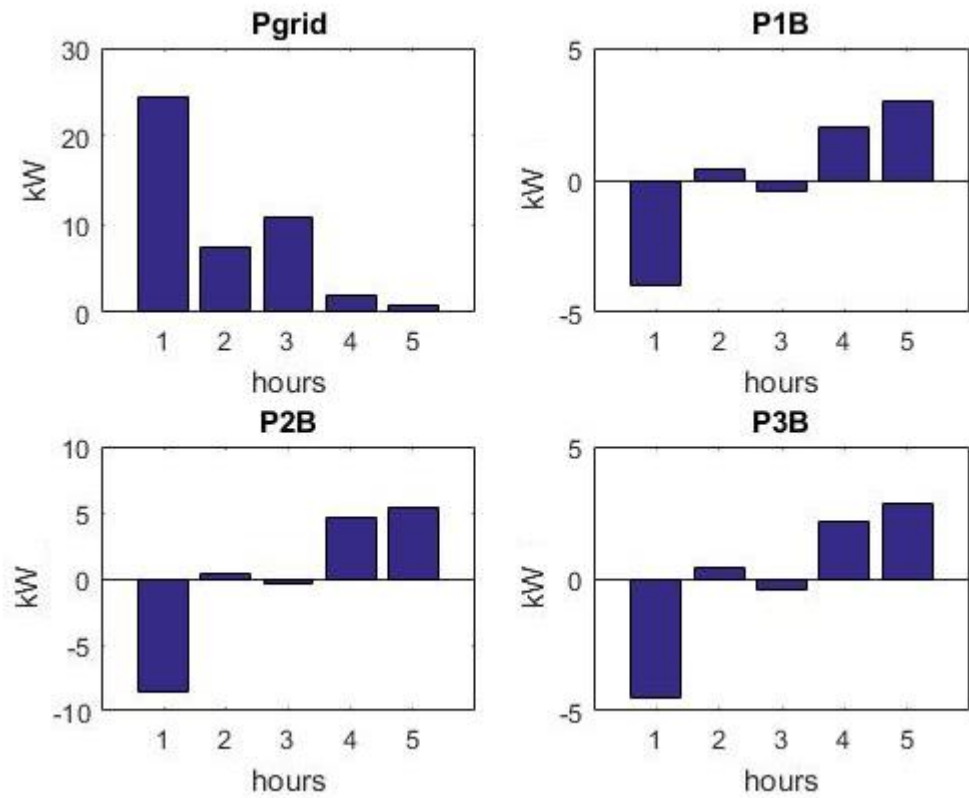
- **Εικόνα 17:** Παρατηρείται ότι η ισχύς του δικτύου σε αυτή την περίπτωση μειώνεται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αφού το φορτίο των ΑΠΕ έχει αυξηθεί με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται λιγότερη ισχύ από το δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών.
- **Εικόνα 18:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 19:** Ο πολλαπλασιαστής λ συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή για κάθε χρονικό βήμα, το οποίο είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 20,21:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη λύση του προβλήματος.

Το συνολικό κόστος στην περίπτωση αύξησης της παραγωγής των ΑΠΕ είναι 157.77 cents, μείωση που δικαιολογείται από το γεγονός ότι το δίκτυο καλύπτει σε μεγαλύτερο βαθμό τις ανάγκες του χωρίς την αγορά ενέργειας χρησιμοποιώντας την ανανεώσιμη ενέργεια.

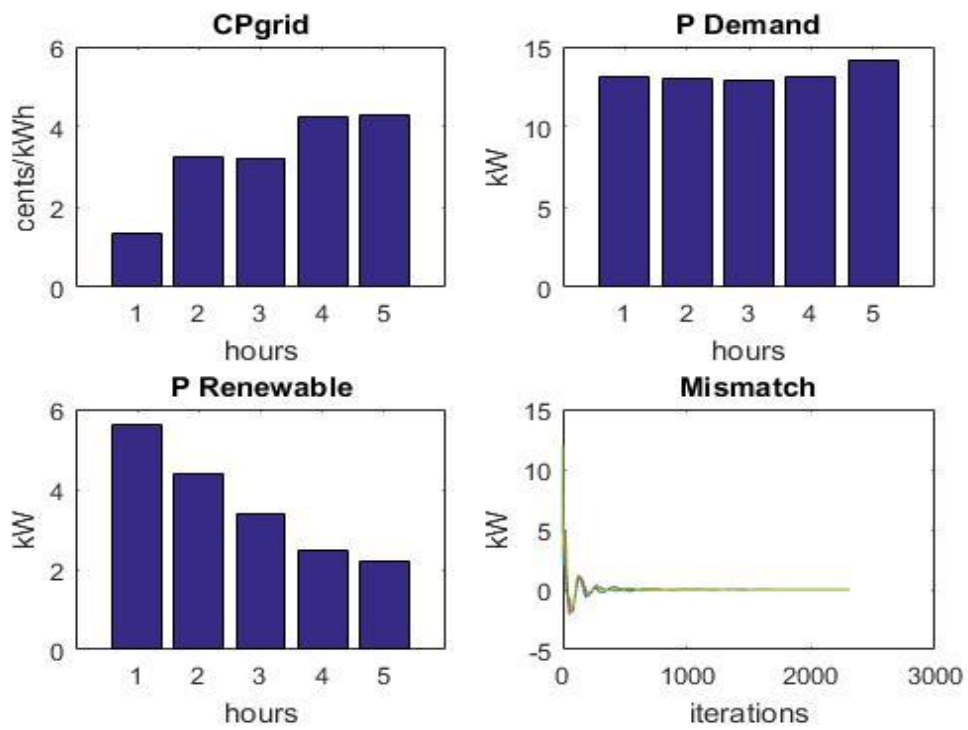
Περίπτωση 4: Σε αυτή την περίπτωση αλλάζουμε (μειώνουμε) την τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, με δεδομένα που φαίνονται στον Πίνακα 4:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
1.33	13.1	5.6	5	1
3.24	13	4.4	10	1.5
3.22	12.9	3.4	5	0.5
4.26	13.1	2.5		
4.3	14.2	2.2		

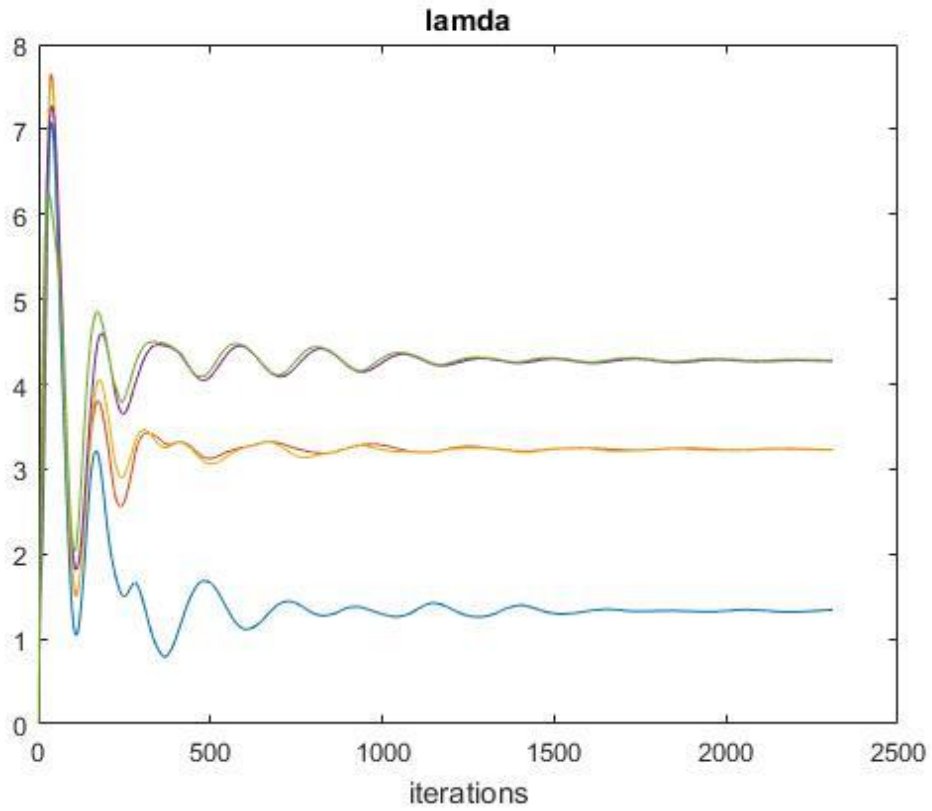
Πίνακας 4



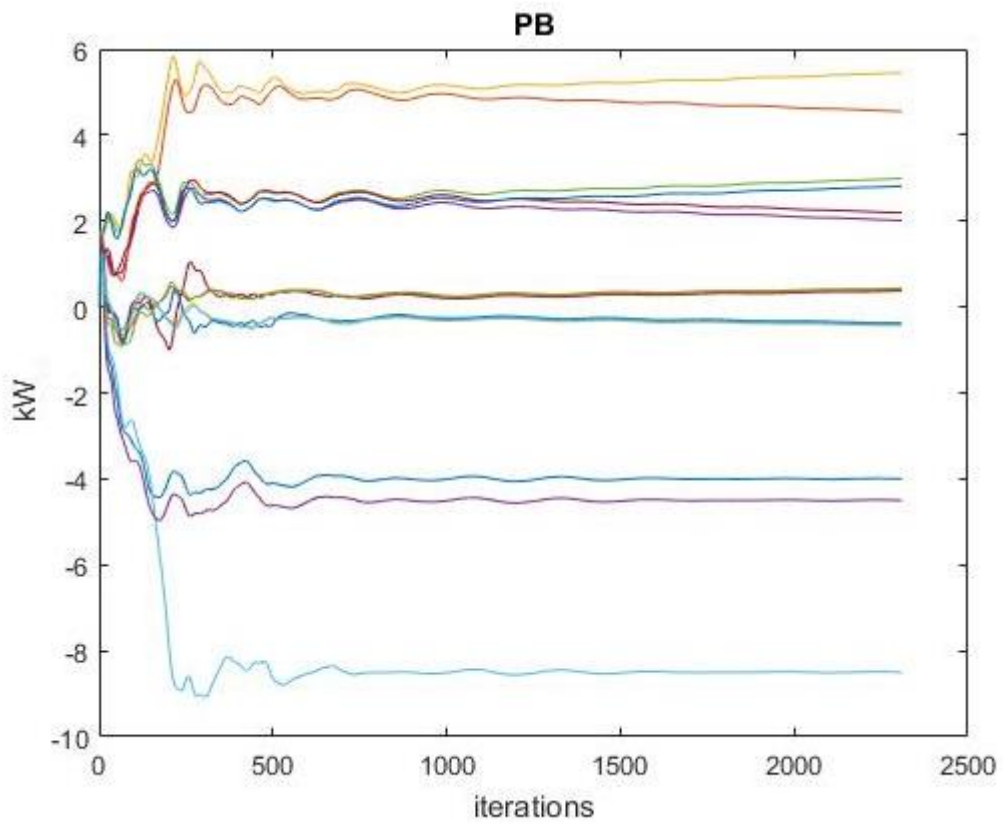
Εικόνα 22: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



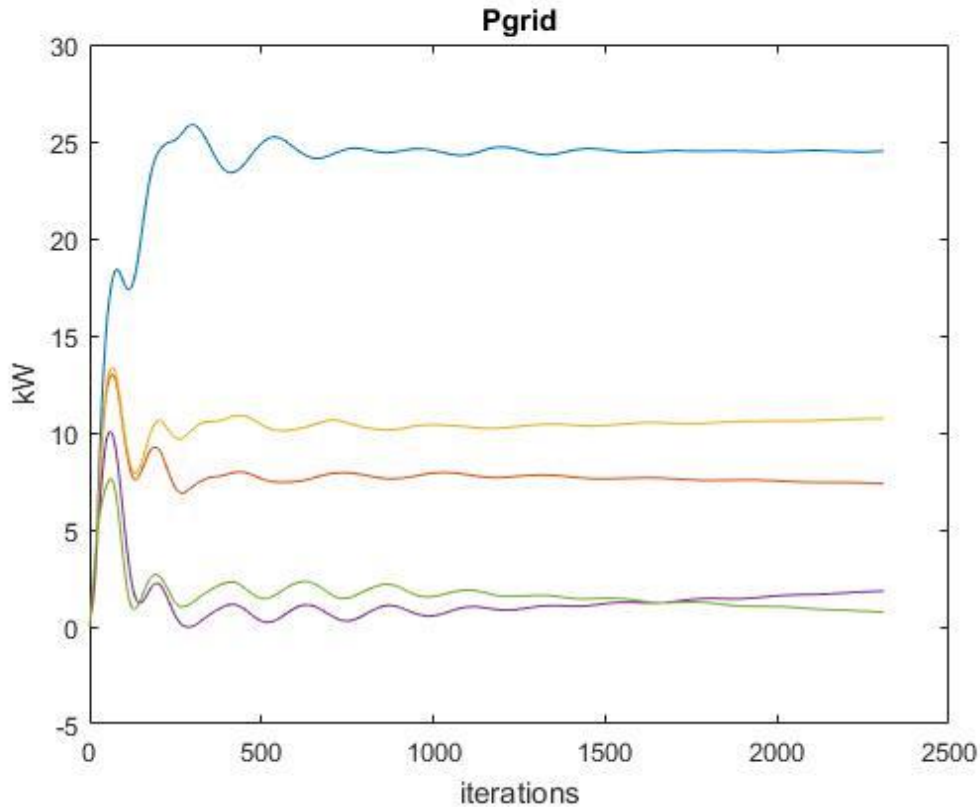
Εικόνα 23: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 24: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 25: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 26: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 22:** Παρατηρείται ότι η ισχύς που ρέει στο δίκτυο αυξάνεται (ειδικά την 1^η ώρα που η τιμή είναι αρκετά χαμηλότερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες ώρες). Παρατηρείται επίσης ότι τις ώρες που είναι χαμηλότερη η τιμή (ειδικά την 1^η ώρα) οι μπαταρίες φορτίζουν, παίρνουν δηλαδή ισχύ από το δίκτυο και την επιστρέφουν στη συνέχεια όταν η ζήτηση αυξάνεται ή όταν η τιμή αγοράς της ενέργειας είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 23:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στο μηδέν, που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 24:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 25,26:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν σε μία σταθερή τιμή, τη λύση του προβλήματος.

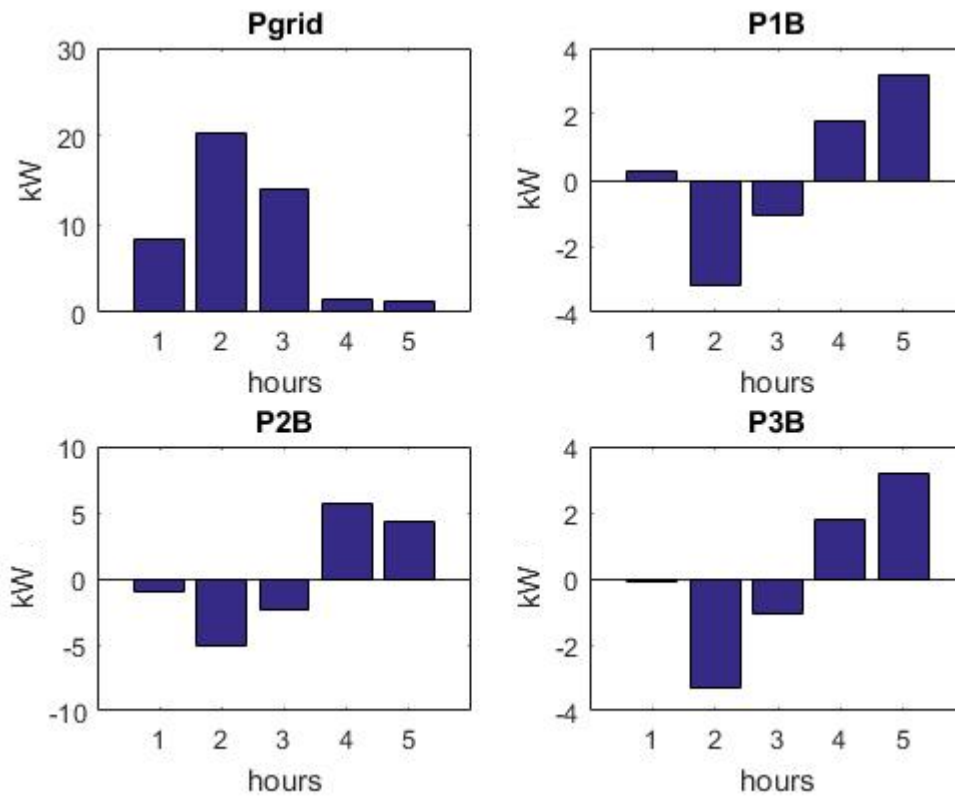
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 102.1 cents, συνέπεια της μείωσης του κόστους αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο.

Περίπτωση 5: Παρόμοια περίπτωση με παραπάνω, με τη διαφορά ότι αυξάνουμε την τιμή αγοράς ενέργειας (Πίνακας 5):

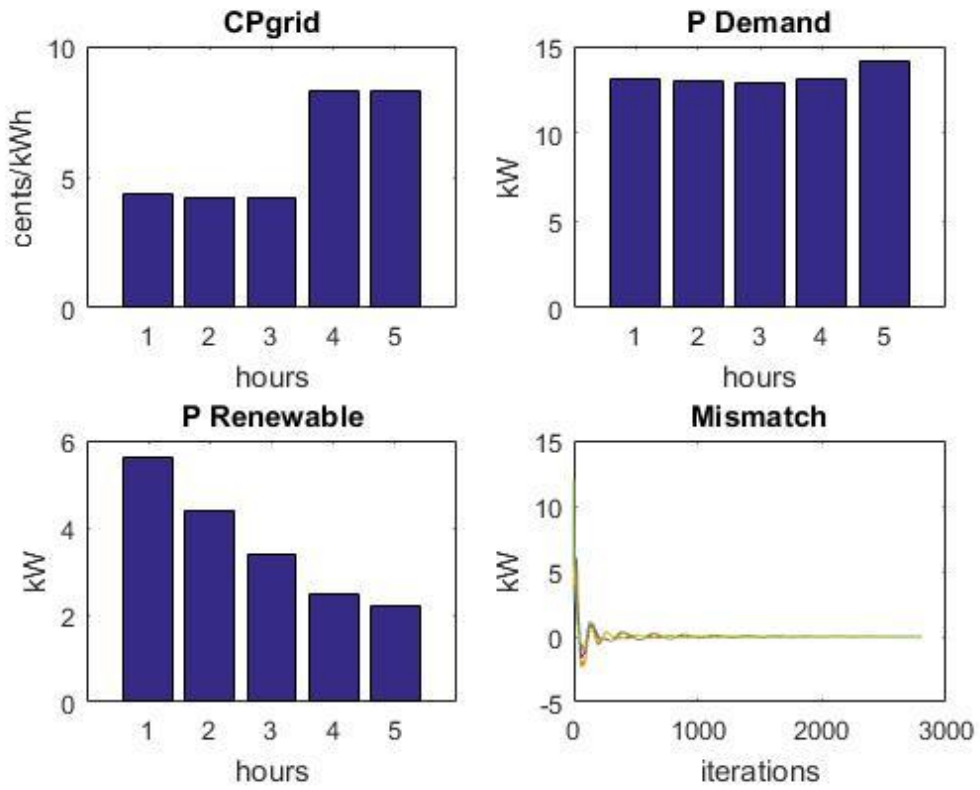
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	1

4.24	13	4.4	10	1.5
4.22	12.9	3.4	5	0.5
8.26	13.1	2.5		
8.3	14.2	2.2		

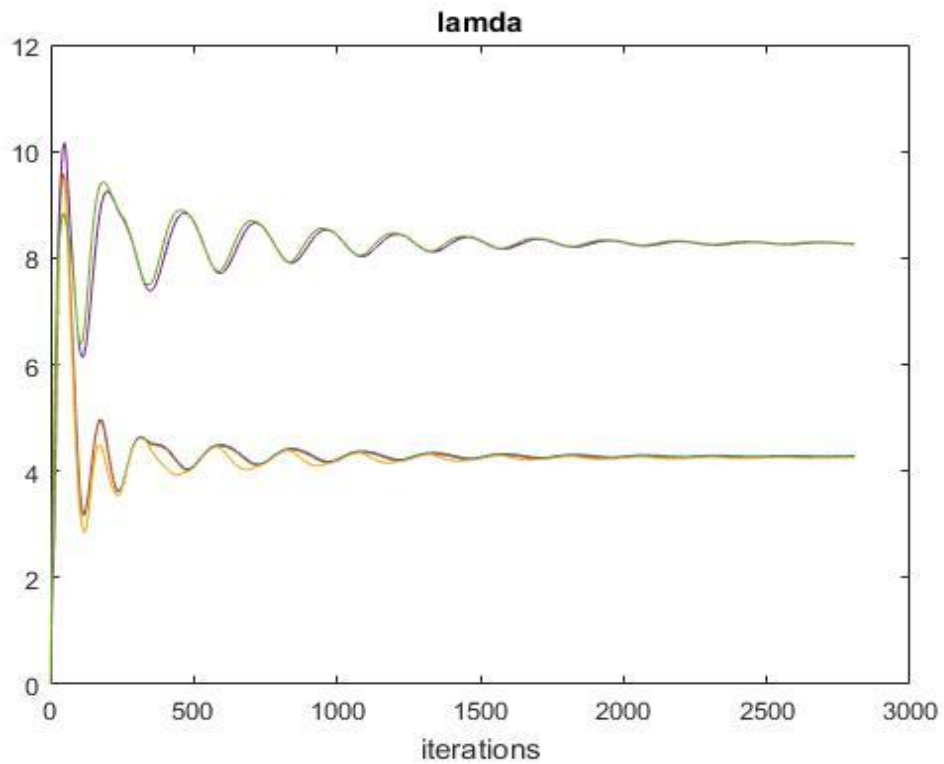
Πίνακας 5



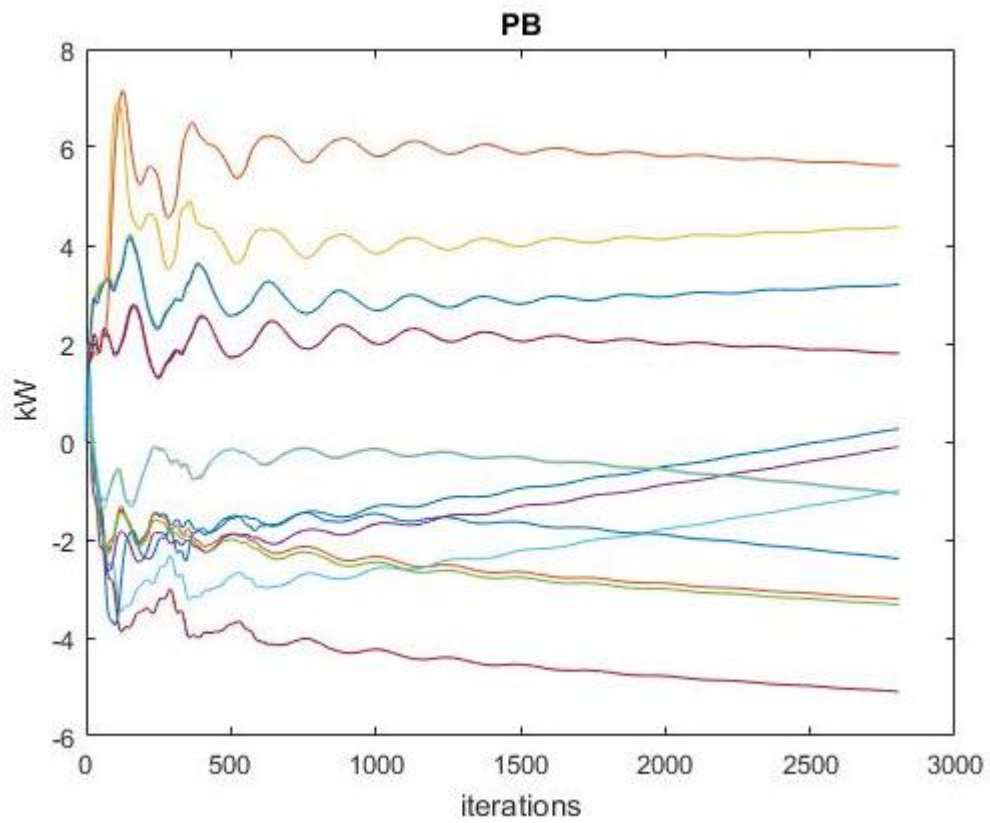
Εικόνα 27: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



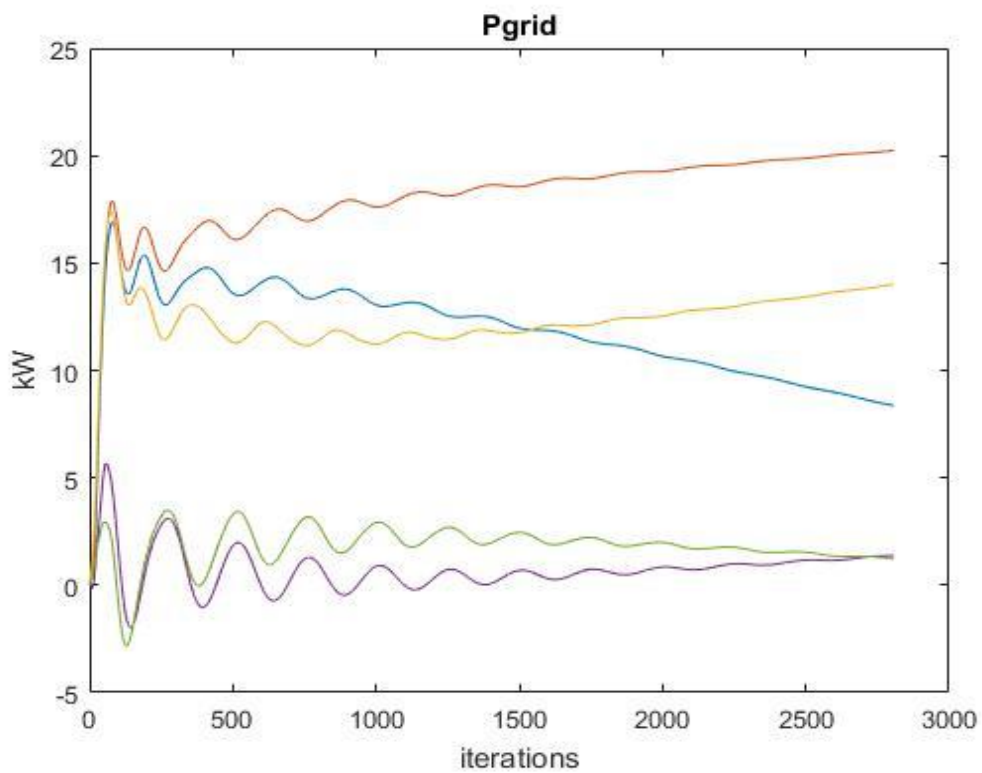
Εικόνα 28: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 29: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 30: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 31: Ισχύς δικτύου

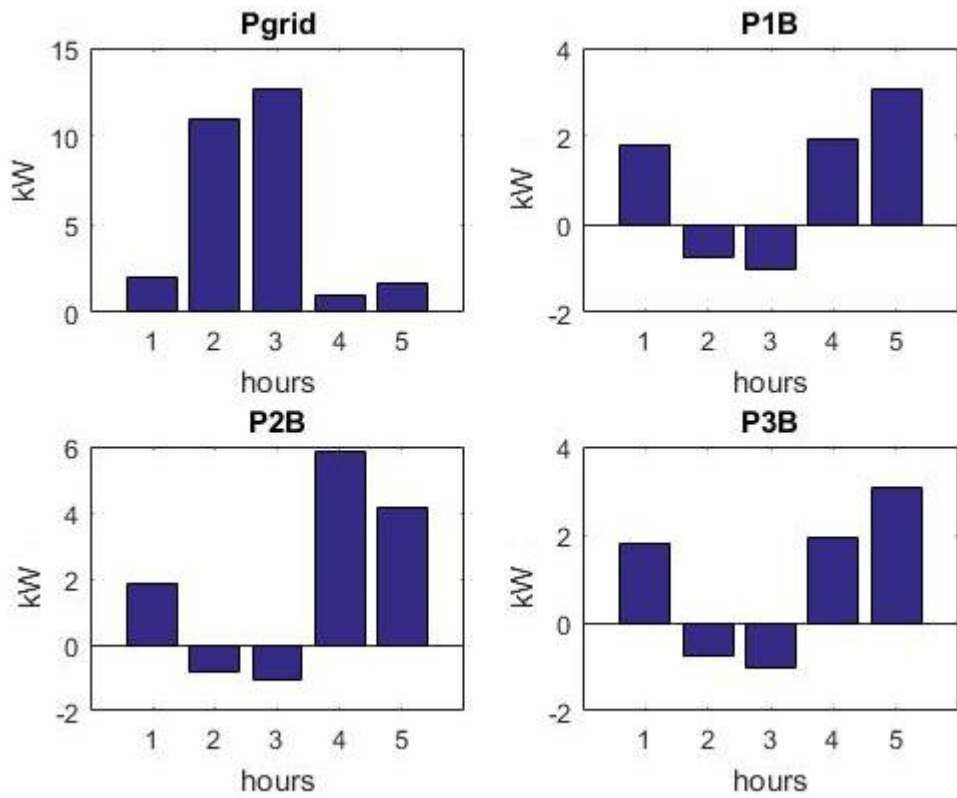
- **Εικόνα 27:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η ισχύς που αγοράζεται από το δίκτυο, ειδικά τις δύο τελευταίες χρονικές ώρες που η τιμή αγοράς είναι υψηλότερη. Αντίστοιχα τις δύο αυτές ώρες οι μπαταρίες δίνουν ισχύ στο δίκτυο για να καλύψουν τη ζήτηση.
- **Εικόνα 28:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 29:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή, τη λύση του προβλήματος.
- **Εικόνα 30,31:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 202.55 cents, αυξημένο αφού αυξήθηκε και η τιμή αγοράς της ενέργειας για την ισχύ του δικτύου.

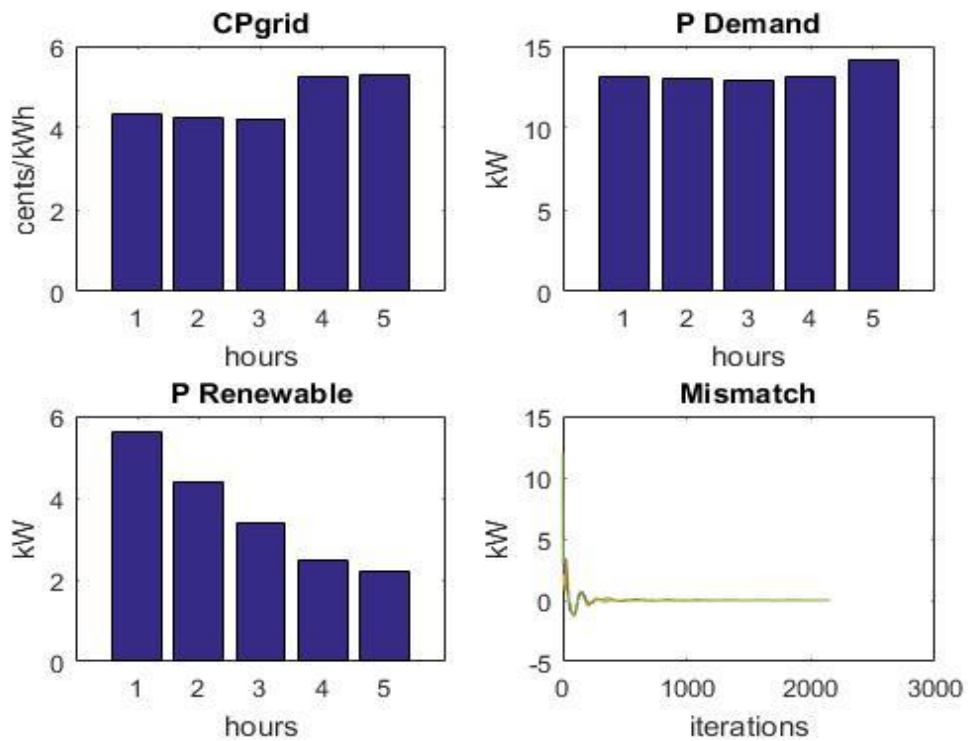
Περίπτωση 6: Κρατάμε σταθερά όλα τα δεδομένα και αλλάζουμε την αρχική φόρτιση των μπαταριών στη μέγιστη τιμή τους (Πίνακας 6):

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	5
4.24	13	4.4	10	10
4.22	12.9	3.4	5	5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

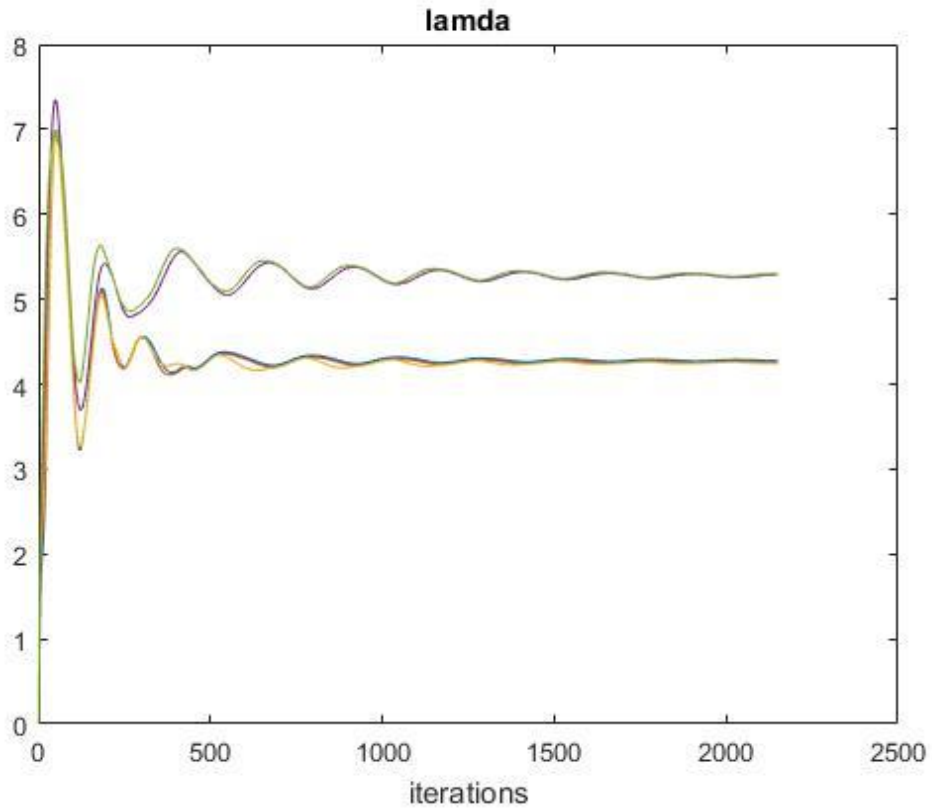
Πίνακας 6



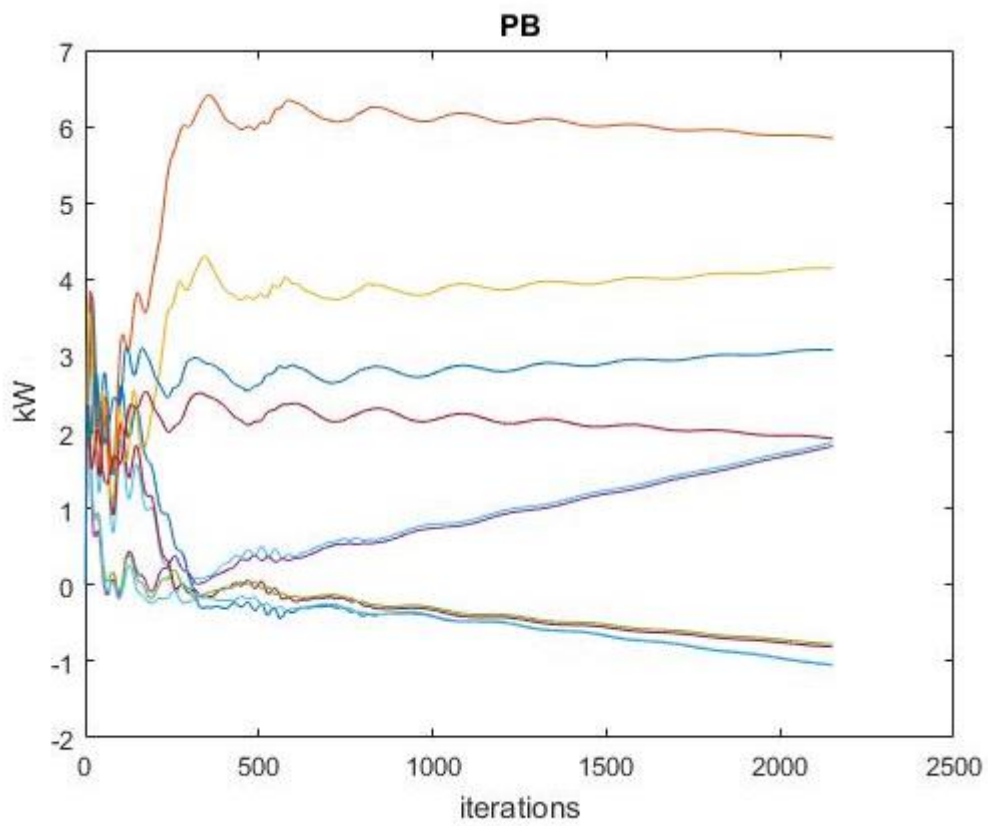
Εικόνα 32: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



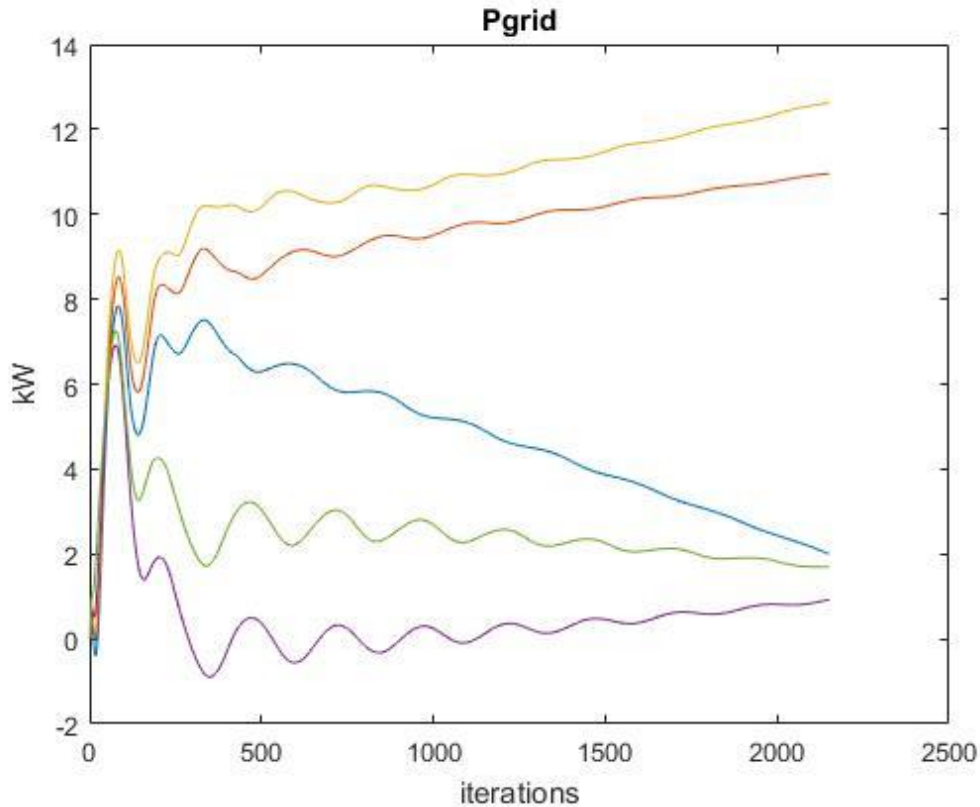
Εικόνα 33: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 34: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 35: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 36: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 32:** Παρατηρείται ότι με αύξηση της αρχικής φόρτισης των μπαταριών, τις ώρες που η τιμή αγοράς της ενέργειας είναι υψηλότερη οι μπαταρίες δίνουν ενέργεια στο δίκτυο (για αυτό το λόγο η ισχύς P_{grid} είναι χαμηλότερη εκείνες τις ώρες) και αντίστοιχα όταν η τιμή είναι χαμηλότερη οι μπαταρίες φορτίζουν και χρησιμοποιείται περισσότερο ισχύς από το δίκτυο.
- **Εικόνα 33:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 34:** Οι πολλαπλασιαστές λ όλων των ωρών συγκλίνουν στη λύση του προβλήματος Lagrange.
- **Εικόνα 35,36:** Η ισχύς δικτύου και μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση τους.

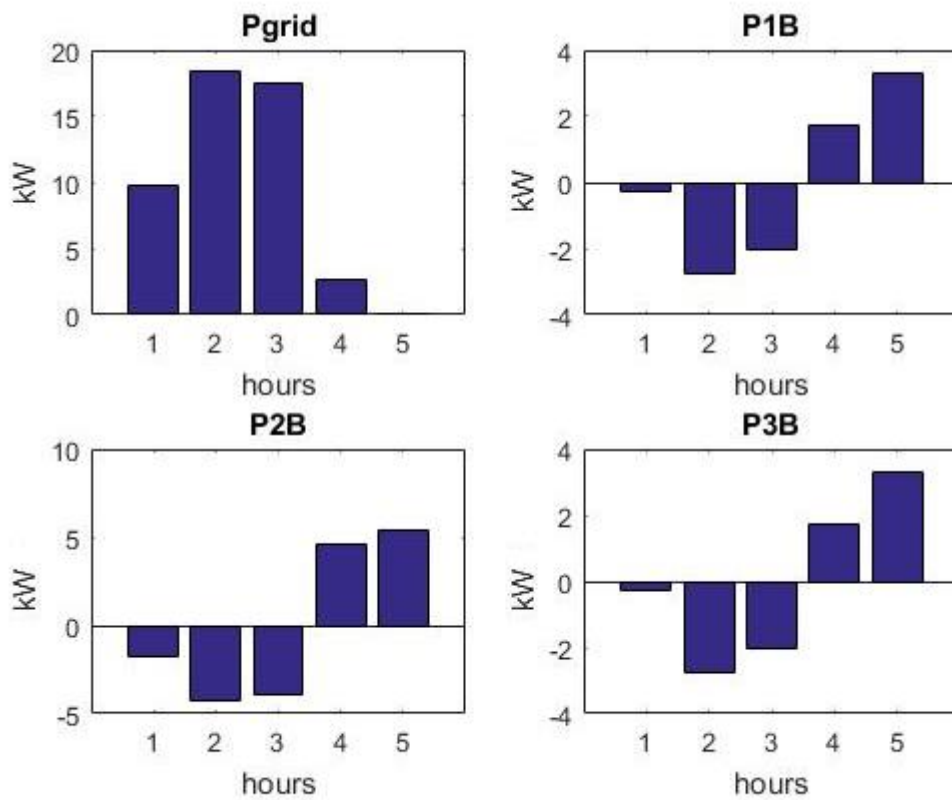
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση μελέτης ανέρχεται στα 122.28 cents, δηλαδή μειώνεται αφού χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η αποθηκευμένη ενέργεια από τις μπαταρίες για τις ανάγκες του δικτύου ειδικά τις χρονικές ώρες που η τιμή αγοράς ενέργειας είναι υψηλότερη.

Περίπτωση 7: Παρόμοια περίπτωση με την παραπάνω στην οποία οι μπαταρίες είναι αφόρτιστες (Πίνακας 7):

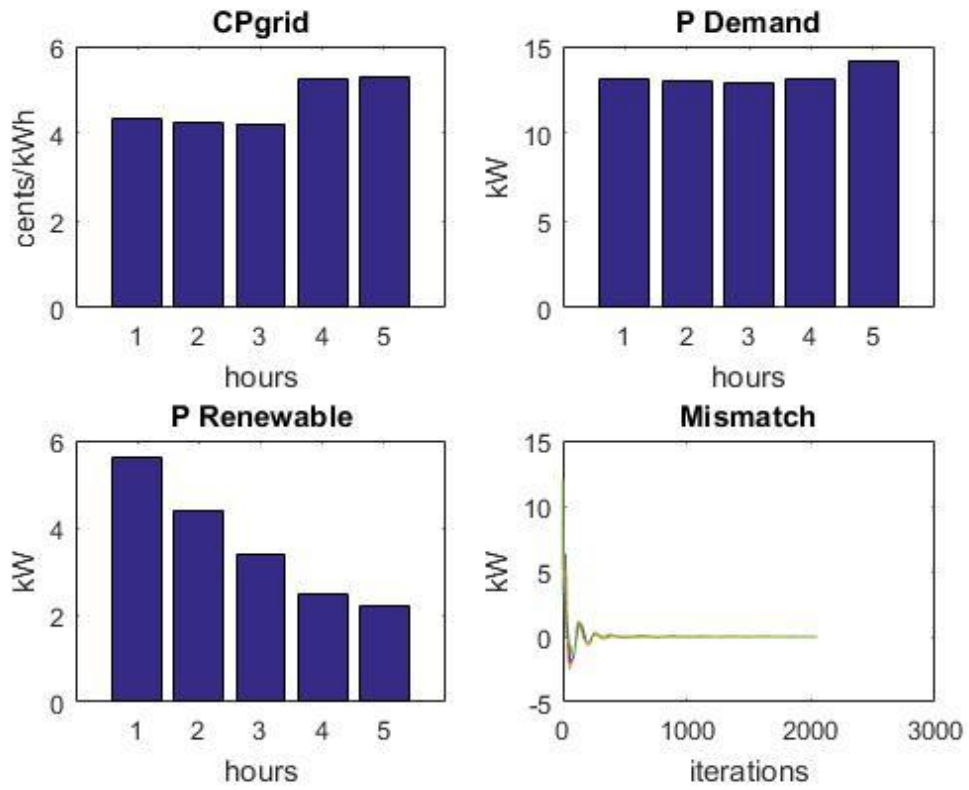
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)

4.33	13.1	5.6	5	0
4.24	13	4.4	10	0
4.22	12.9	3.4	5	0
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

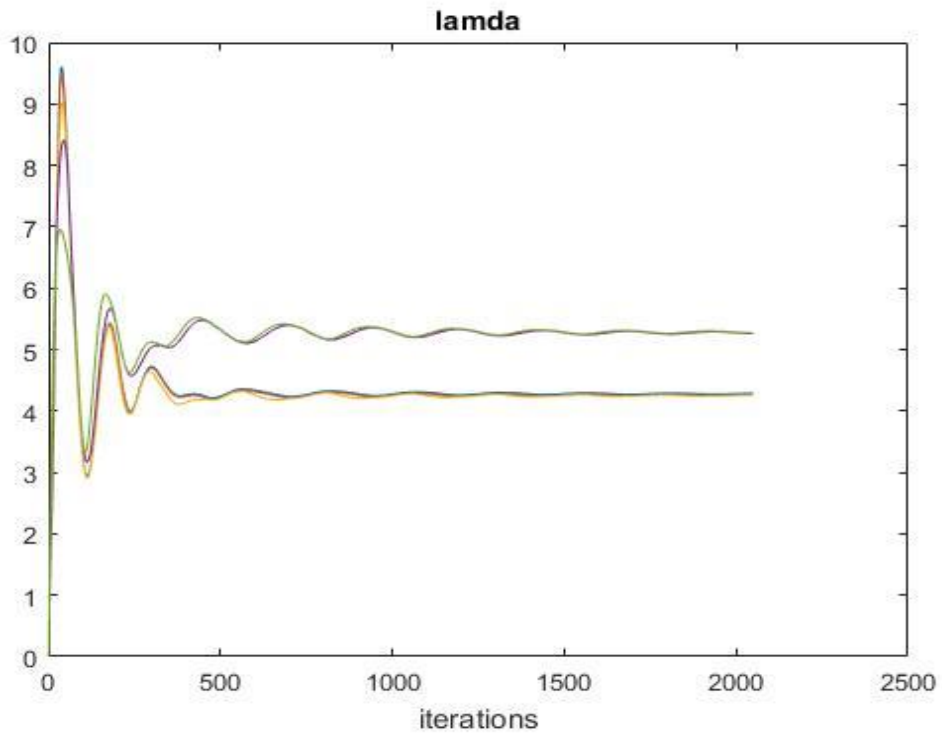
Πίνακας 7



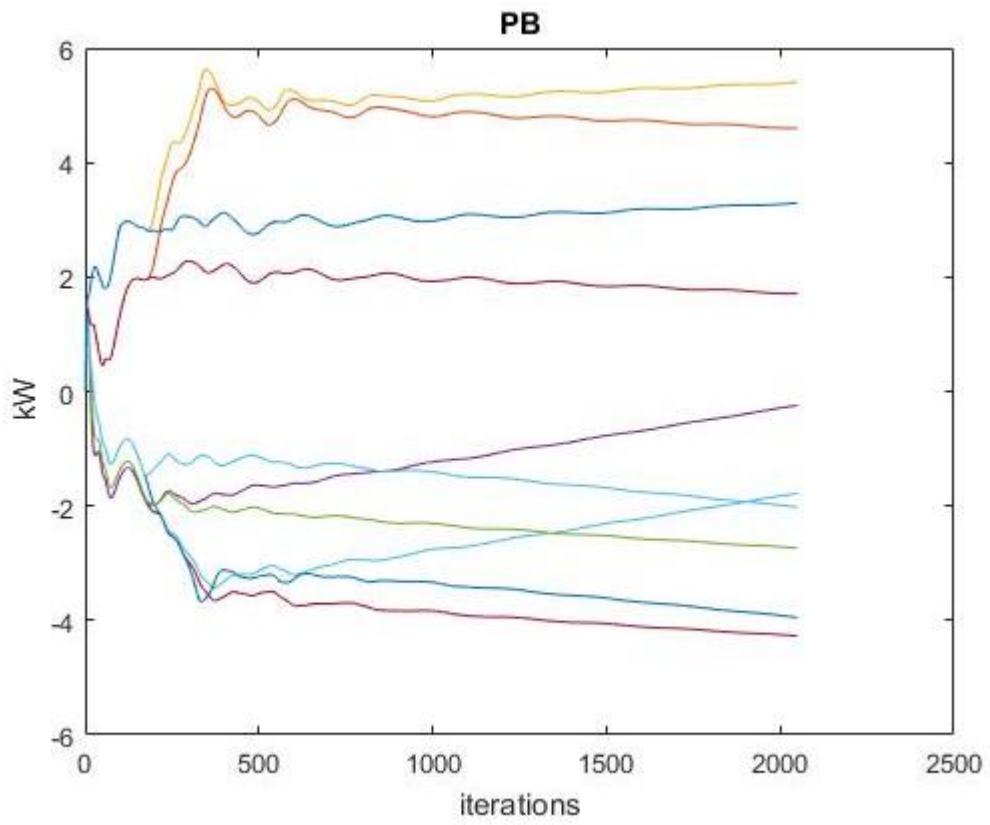
Εικόνα 37: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



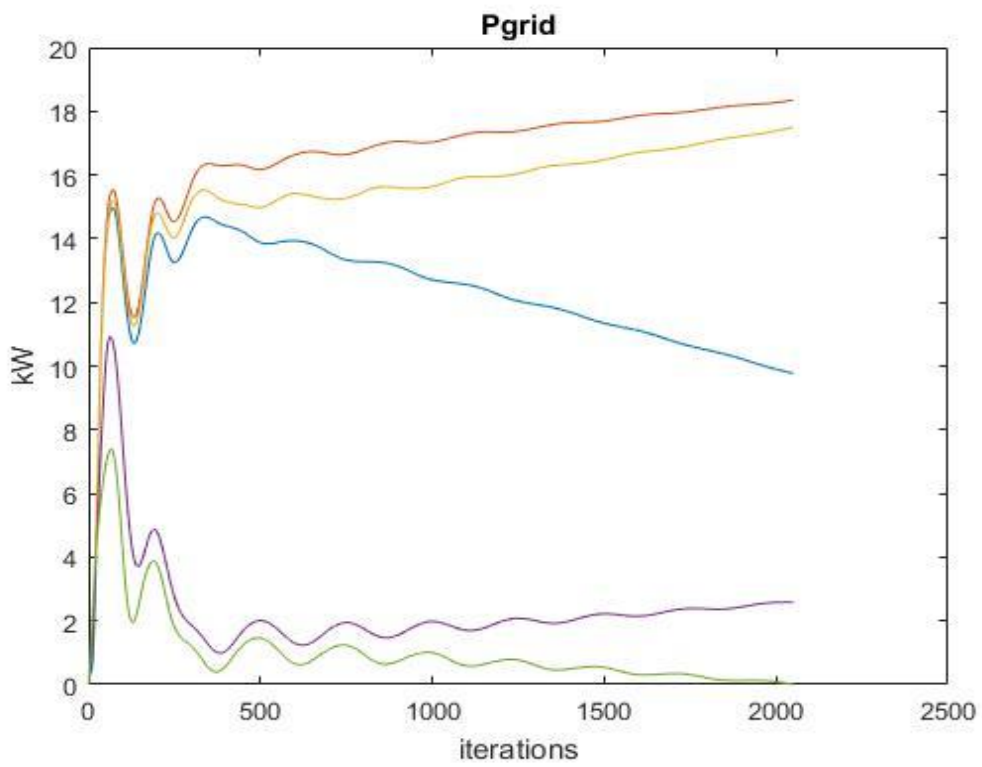
Εικόνα 38: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 39: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 40: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 41: Ισχύς δικτύου

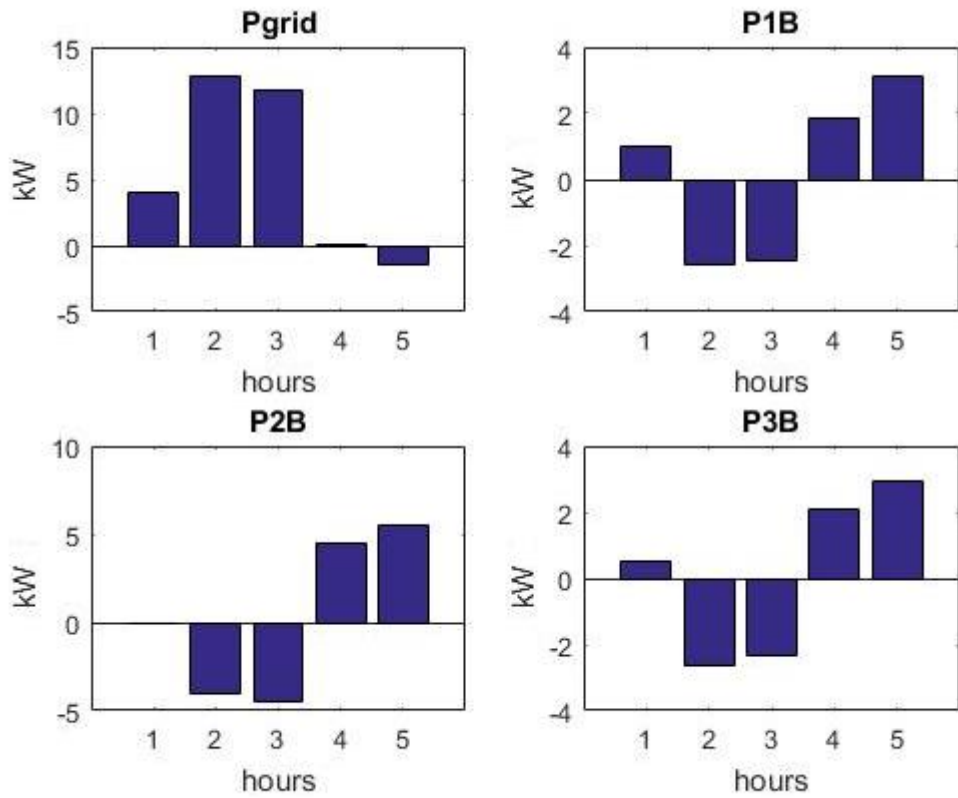
- **Εικόνα 37:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται η ισχύς του δικτύου (αφού οι αφόρτιστες μπαταρίες δε δίνουν ενέργεια στο δίκτυο) και οι μπαταρίες φορτίζουν τις πρώτες χρονικές ώρες για να προσφέρουν ισχύ όταν η τιμή αγοράς ενέργειας είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 38:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 39:** Ο πολλαπλασιαστής λ του εξισωτικού περιορισμού κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 40,41:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 207.51 cents, υψηλότερο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση εφόσον οι μπαταρίες αρχικά είναι αφόρτιστες και οι ανάγκες των καταναλωτών καλύπτονται από την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο και την παραγωγή των ΑΠΕ.

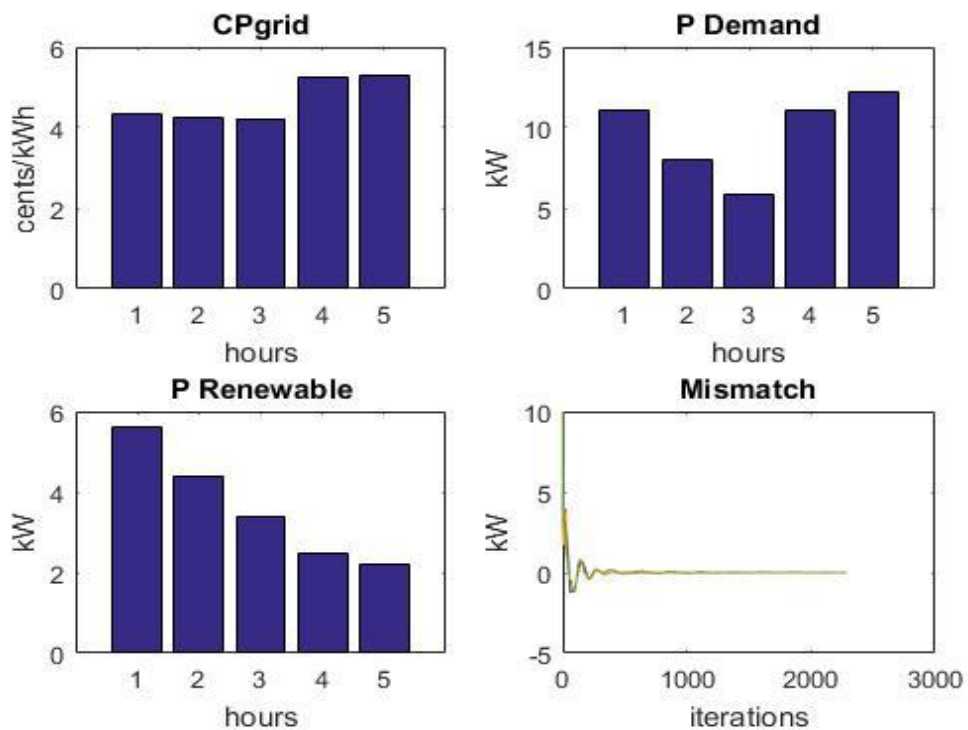
Περίπτωση 8: Μεταβάλλουμε (μειώνουμε σε αυτή την περίπτωση τη ζήτηση, όπως περιγράφεται από τον Πίνακα 8:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	11.1	5.6	5	1
4.24	8	4.4	10	1.5
4.22	5.9	3.4	5	0.5
5.26	11.1	2.5		
5.3	12.2	2.2		

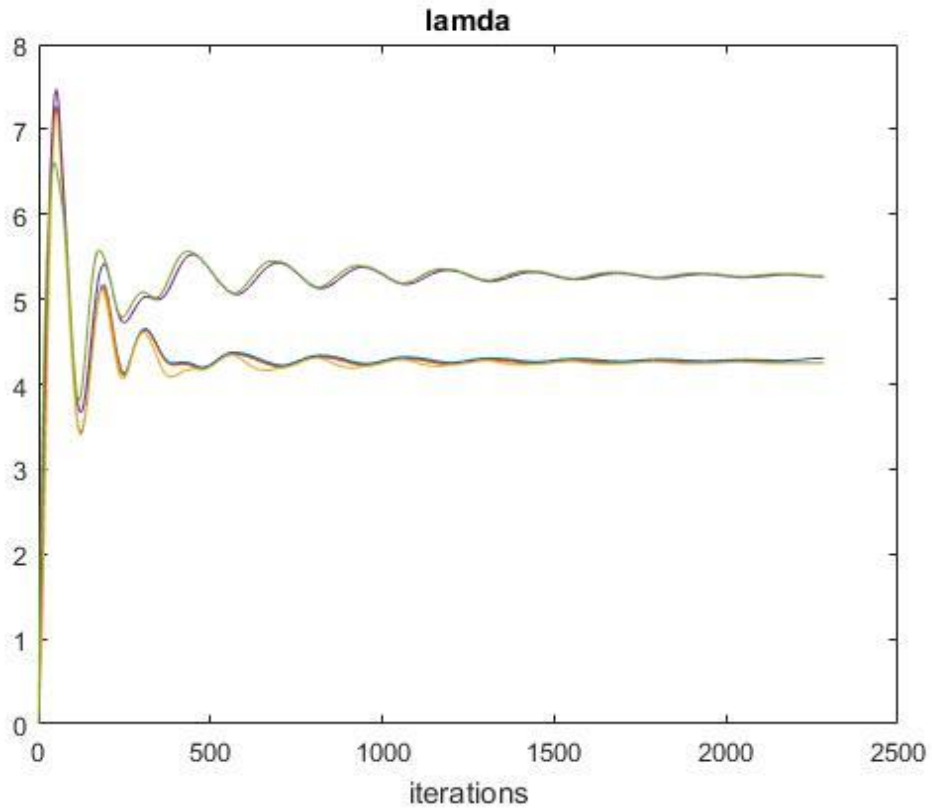
Πίνακας 8



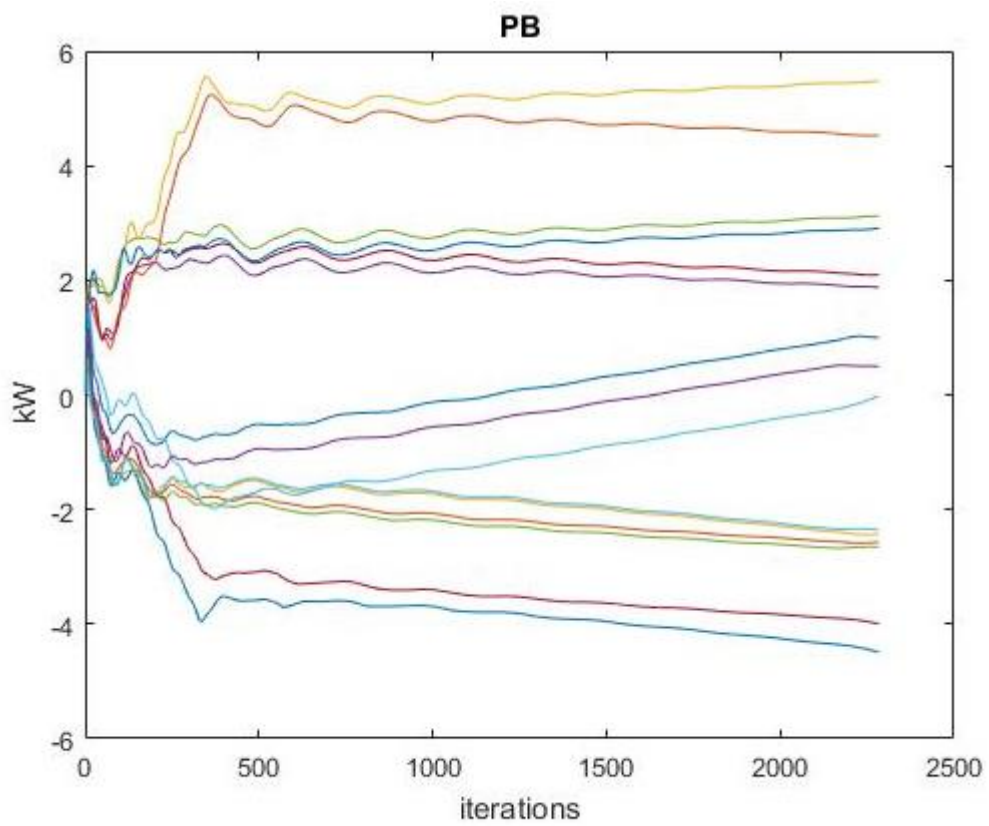
Εικόνα 42: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



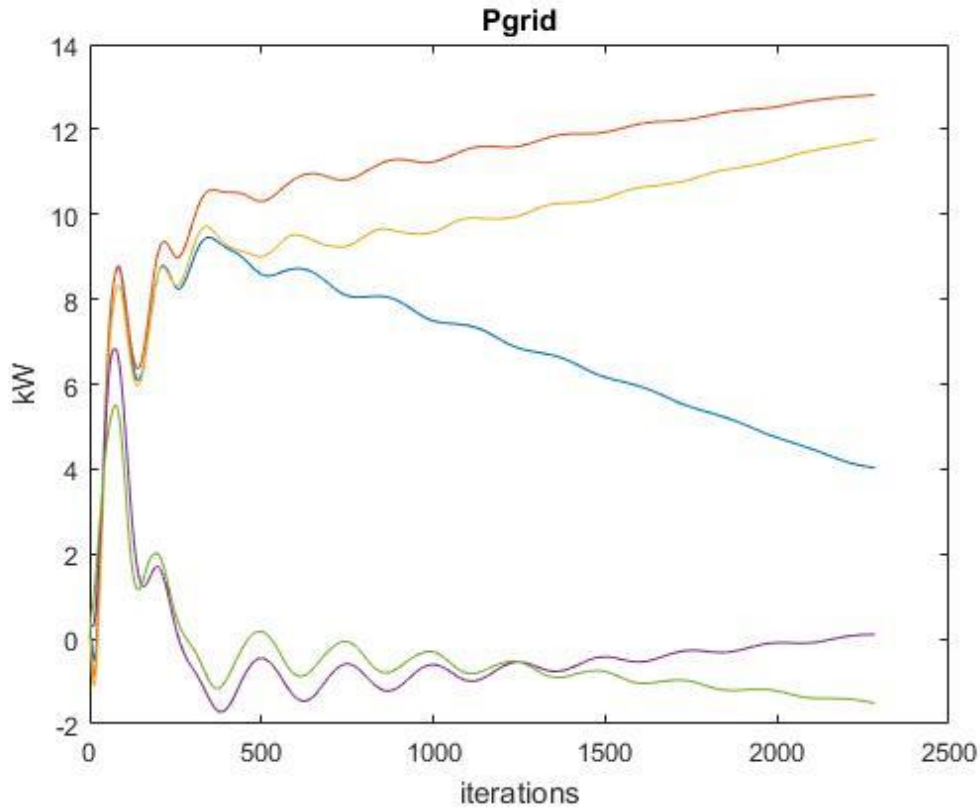
Εικόνα 43: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 44: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 45: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 46: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 42:** Παρατηρείται ότι με τη μείωση της ζήτησης μειώνεται (όπως είναι επόμενο) και η ισχύς του δικτύου. Επίσης τις ώρες που η ζήτηση είναι αρκετά χαμηλότερη (2^η και 3^η χρονική ώρα) οι μπαταρίες αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια. Η ισχύς που αγοράζει το δίκτυο δεν επηρεάζεται από τη χαμηλή ζήτηση των δύο αυτών χρονικών ωρών, αλλά από την τιμή αγοράς της.
- **Εικόνα 43:** Το ισοζύγιο συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 44:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει στη λύση του προβλήματος Lagrange.
- **Εικόνα 45,46:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή του προβλήματος.

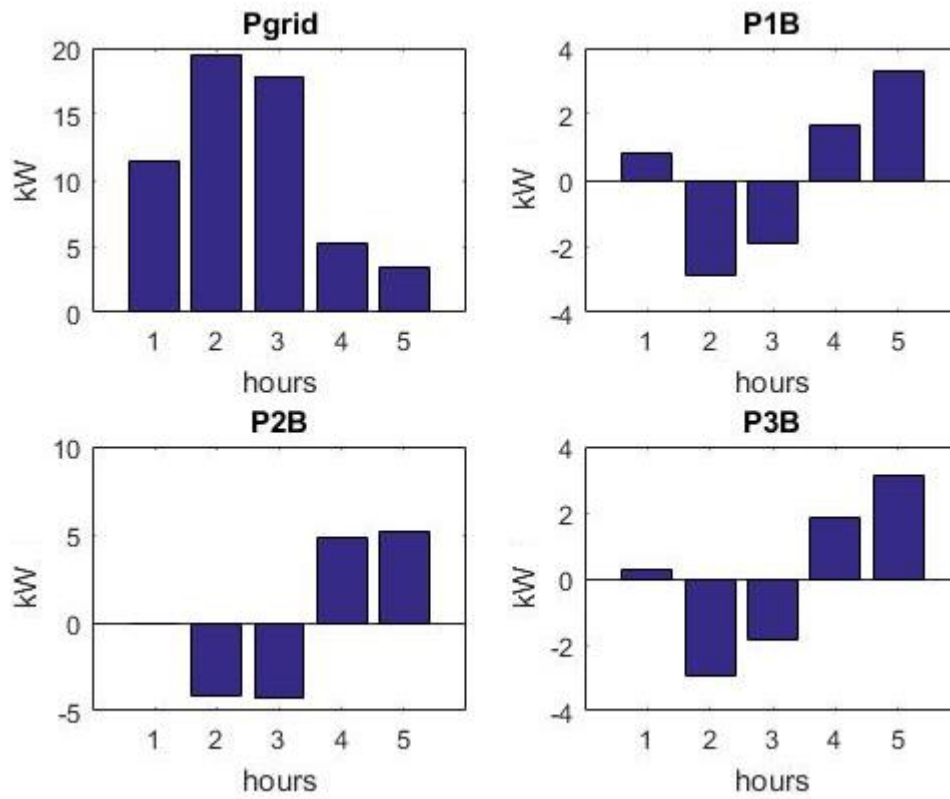
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 113.94 cents, γεγονός αναμενόμενο αφού μειώνουμε τη ζήτηση, οπότε στο δίκτυο ρέει λιγότερη ισχύ για την κάλυψη των αναγκών.

Περίπτωση 9: Παρόμοια με την παραπάνω περίπτωση με τη διαφορά ότι αυξάνουμε τη ζήτηση (Πίνακας 9):

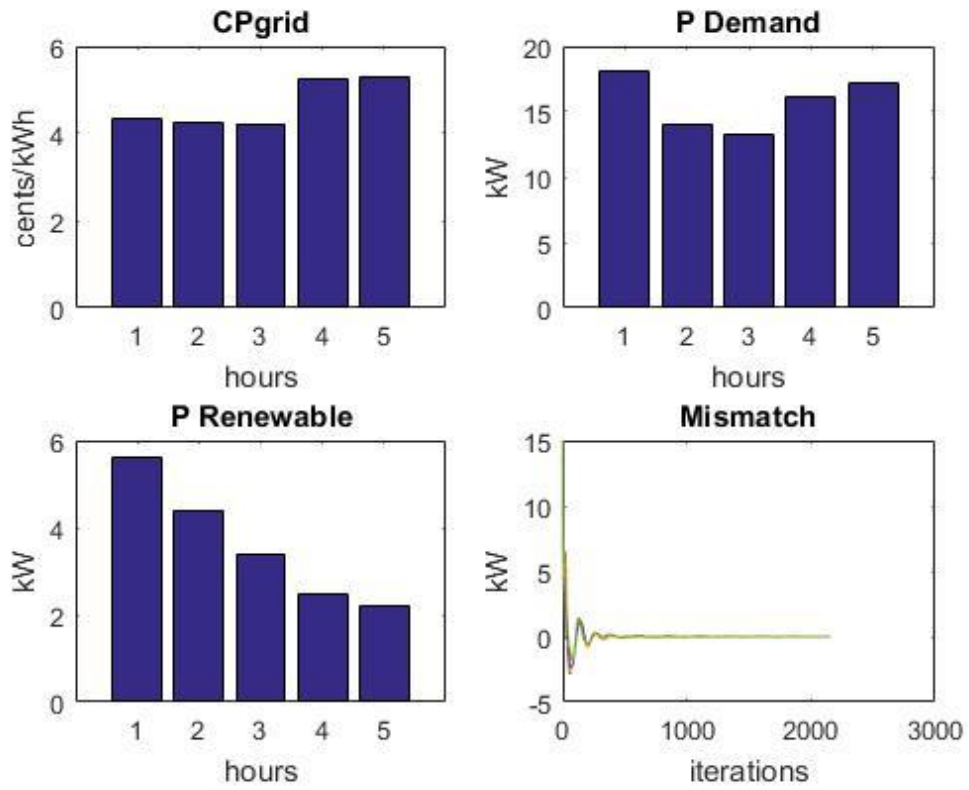
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	18.1	5.6	5	1

4.24	14	4.4	10	1.5
4.22	13.2	3.4	5	0.5
5.26	16.1	2.5		
5.3	17.2	2.2		

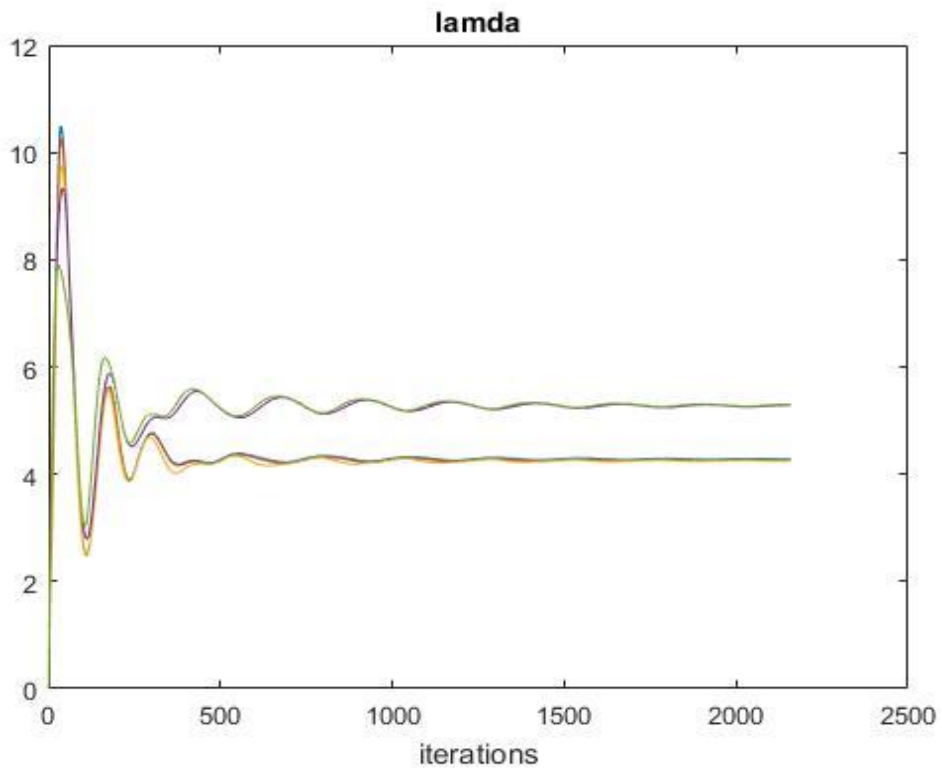
Πίνακας 9



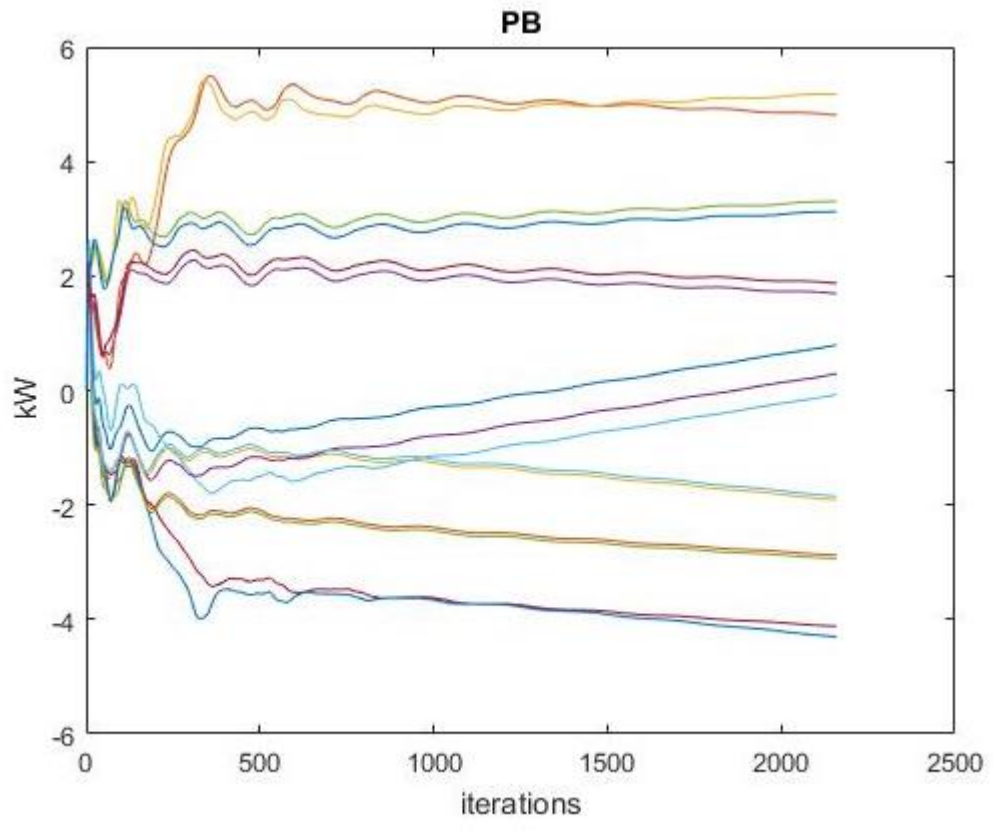
Εικόνα 47: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



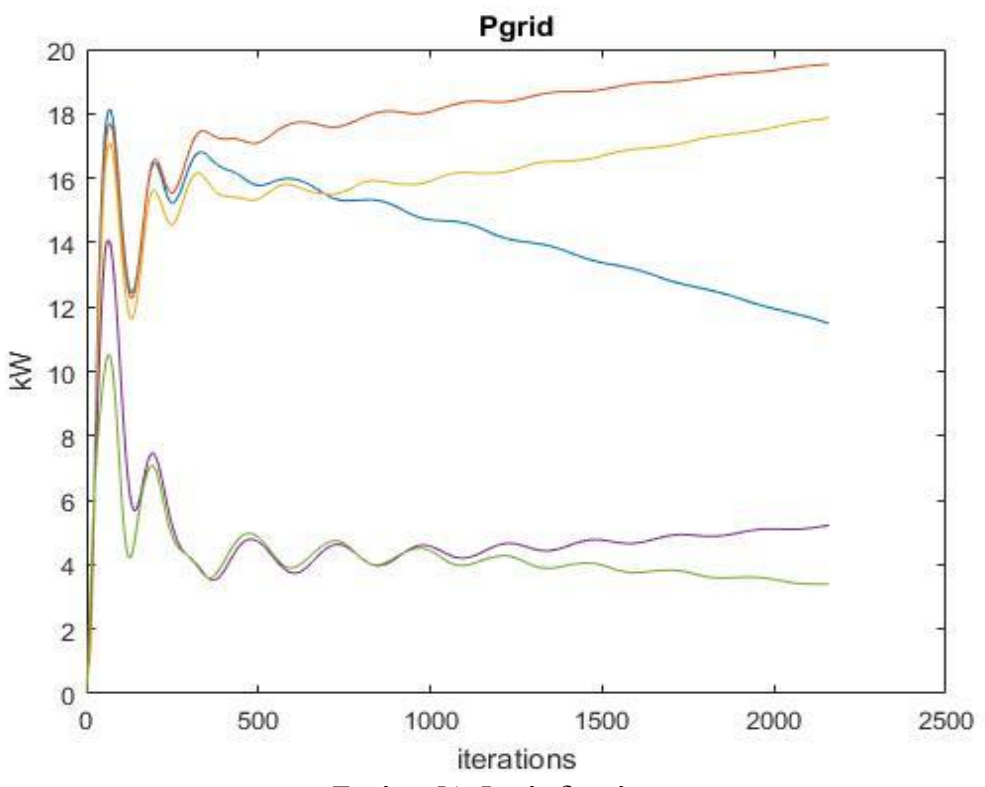
Εικόνα 48: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 49: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 50: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 51: Ισχύς δικτύου

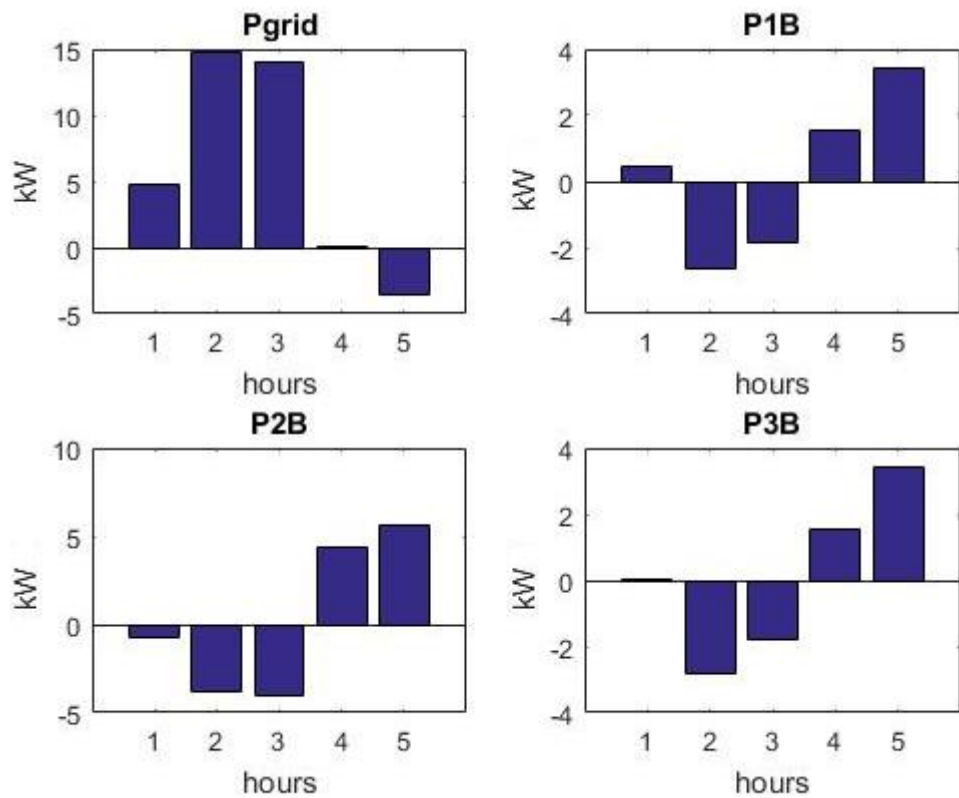
- **Εικόνα 47:** Με την αύξηση της ζήτησης αυξάνεται η ισχύς του δικτύου όπως ήταν αναμενόμενο. Οι μπαταρίες φορτίζουν όταν η τιμή είναι χαμηλότερη και αποφορτίζονται όταν η τιμή και η ζήτηση είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 48:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στο μηδέν που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 49:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει μετά από κάποιο σημείο σε ένα σταθερό αριθμό.
- **Εικόνα 50,51:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 253.45 cents, το οποίο οφείλεται στο ότι με την αύξηση της ζήτησης αυξάνεται και η ισχύς του δικτύου για την κάλυψη των επιπλέον αναγκών.

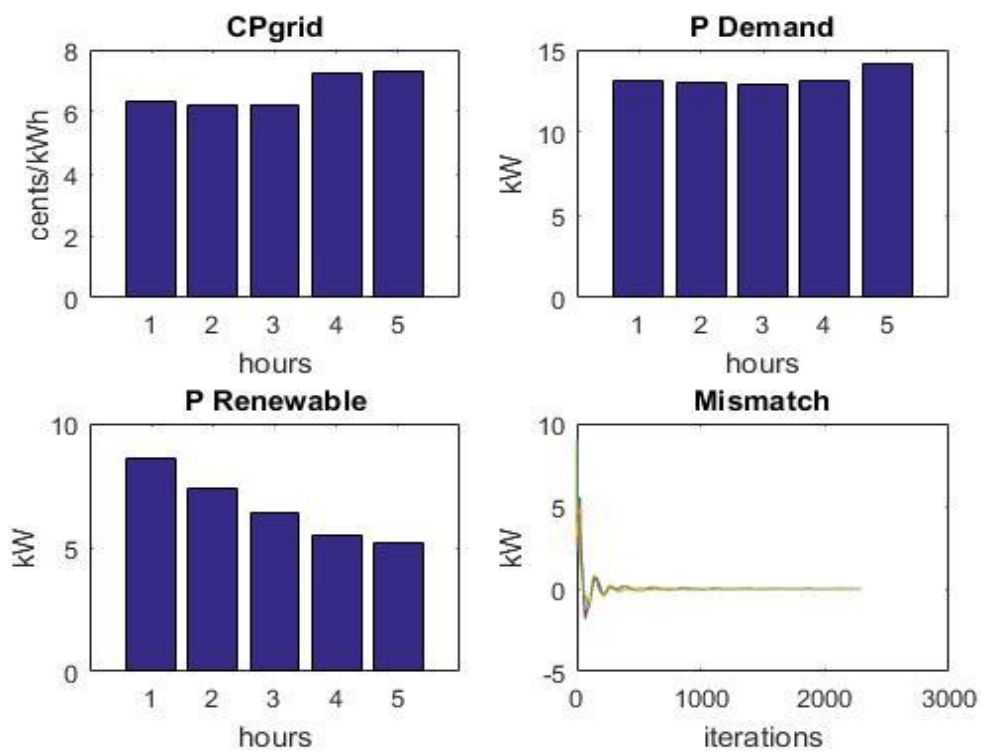
Περίπτωση 10: Συνδυάζουμε τις παραπάνω περιπτώσεις και συγκεκριμένα αυξάνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ και την τιμή αγοράς ενέργειας (Πίνακας 10):

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
6.33	13.1	8.6	5	1
6.24	13	7.4	10	1.5
6.22	12.9	6.4	5	0.5
7.26	13.1	5.5		
7.3	14.2	5.2		

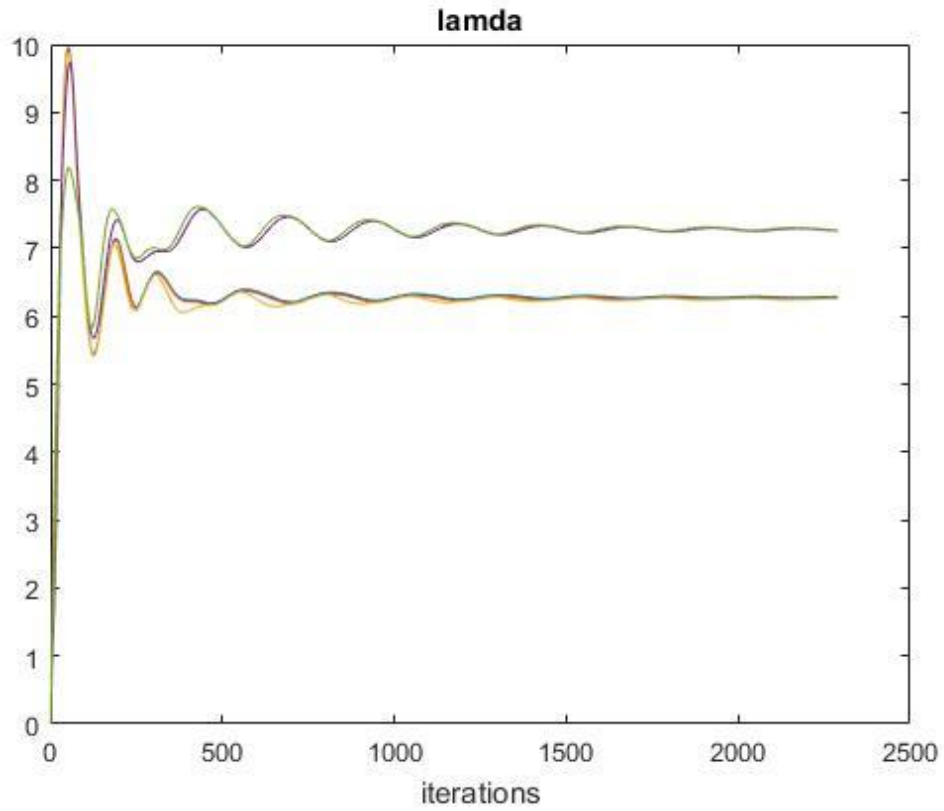
Πίνακας 10



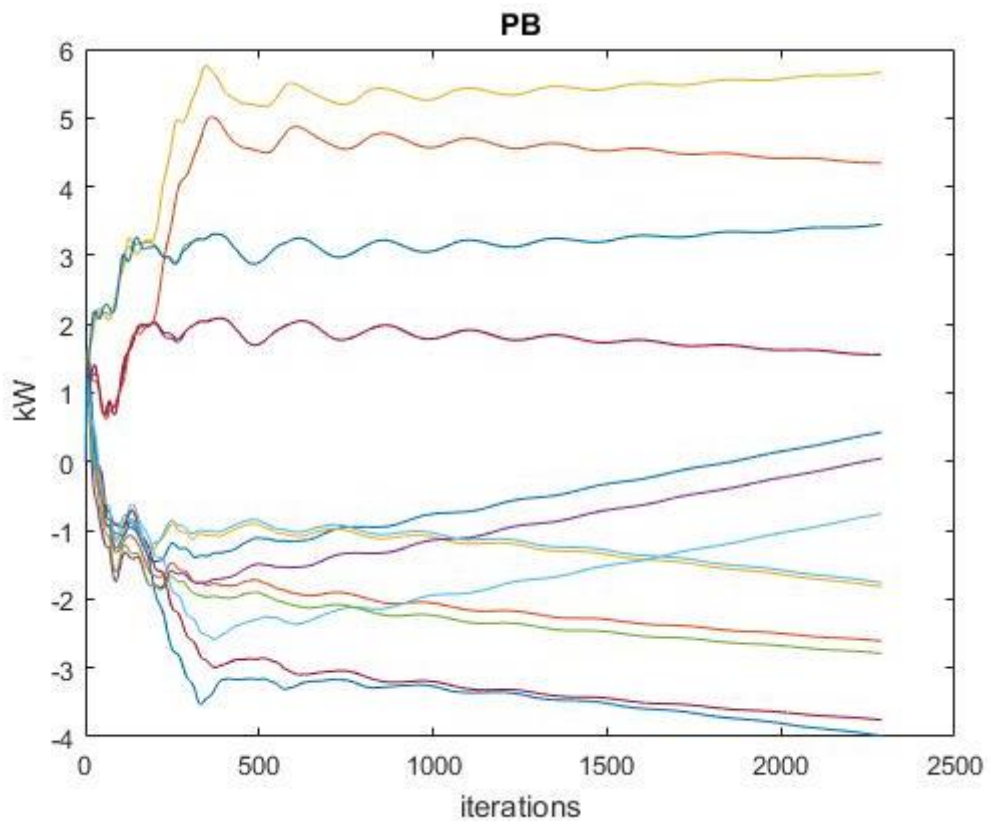
Εικόνα 52: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



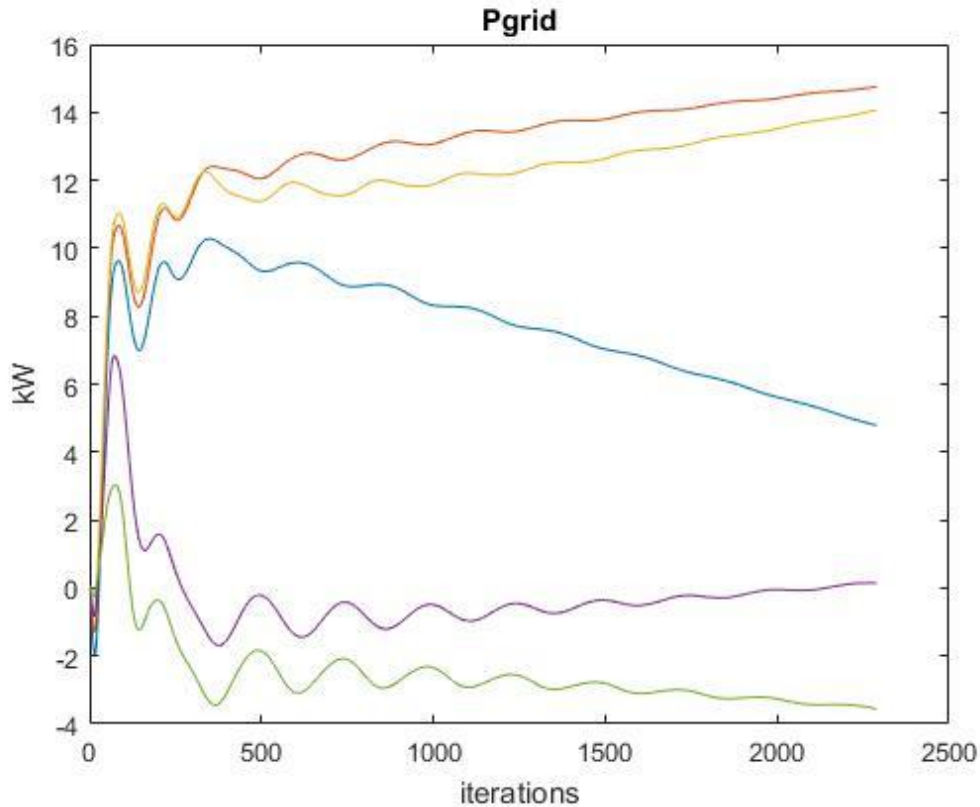
Εικόνα 53: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 54: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 55: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 56: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 52:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται σημαντικά η ισχύς του δικτύου τις ώρες που η τιμή είναι χαμηλότερη και αντίστοιχα μειώνεται σημαντικά η ισχύς του δικτύου τις ώρες που η τιμή είναι υψηλότερη. Οι μπαταρίες φορτίζουν τις χρονικές ώρες που η ισχύς του δικτύου είναι υψηλότερη και προσφέρουν ενέργεια όταν η ισχύς του δικτύου είναι χαμηλότερη.
- **Εικόνα 53:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 54:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 55,56:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

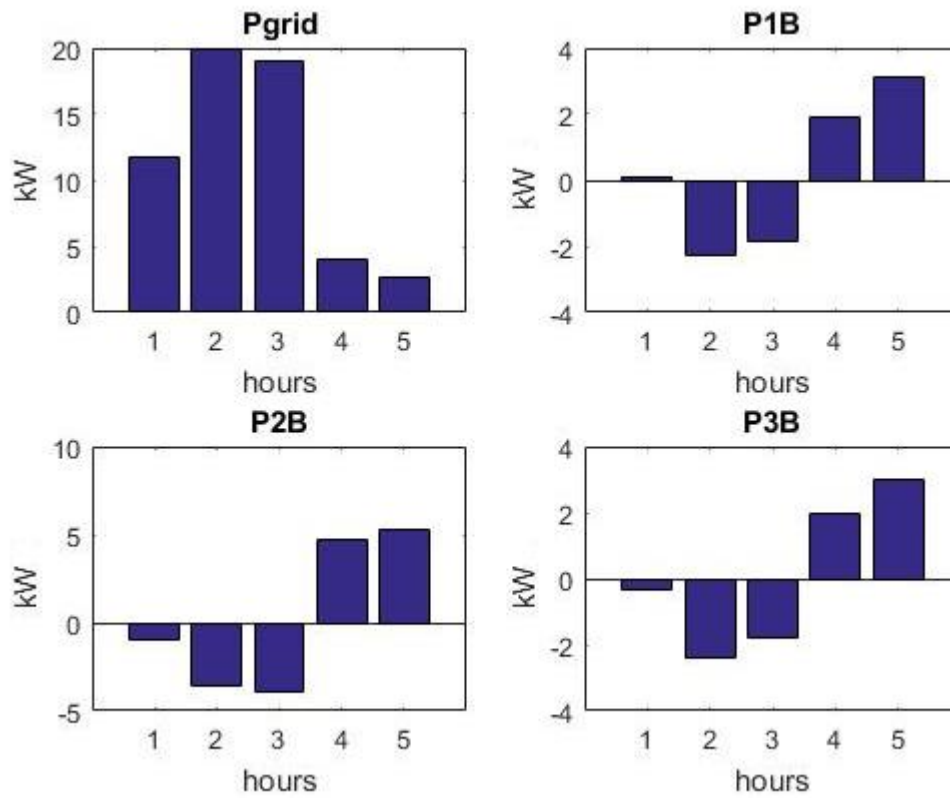
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 184.94 cents, κόστος μικρότερο από την Περίπτωση 1 το οποίο δικαιολογείται από την σημαντική αύξηση της παραγωγής των ΑΠΕ.

Περίπτωση 11: Σε αυτή την περίπτωση μειώνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ καθώς και την τιμή, όπως περιγράφεται στον πίνακα 11:

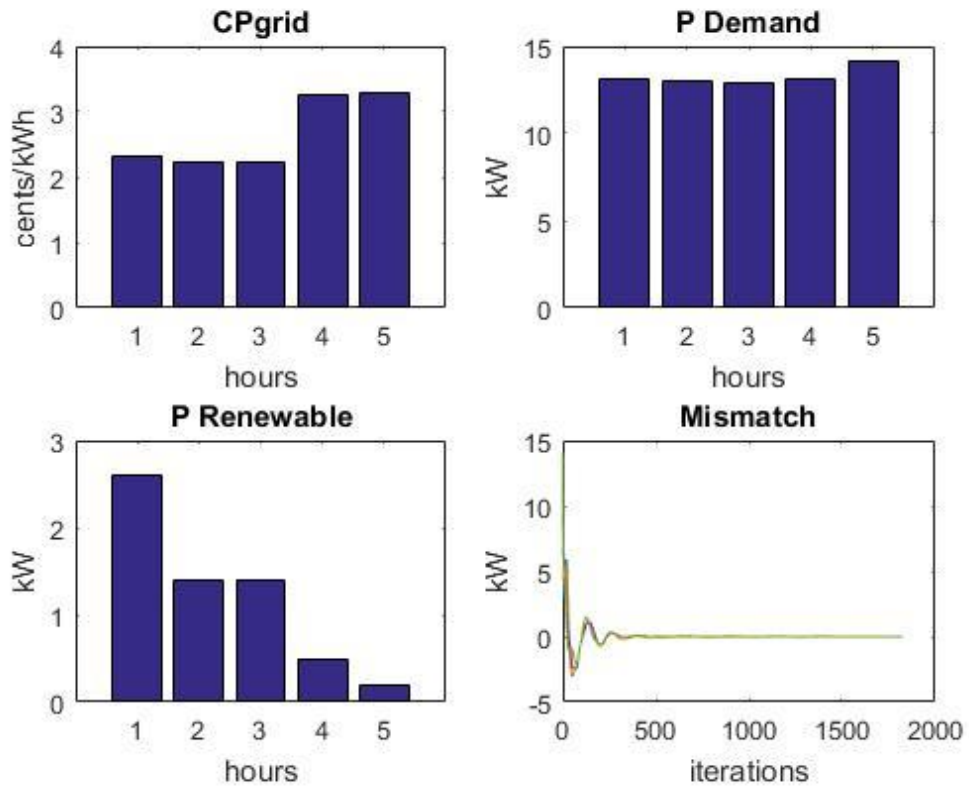
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
2.33	13.1	2.6	5	1

2.24	13	1.4	10	1.5
2.22	12.9	1.4	5	0.5
3.26	13.1	0.5		
3.3	14.2	0.2		

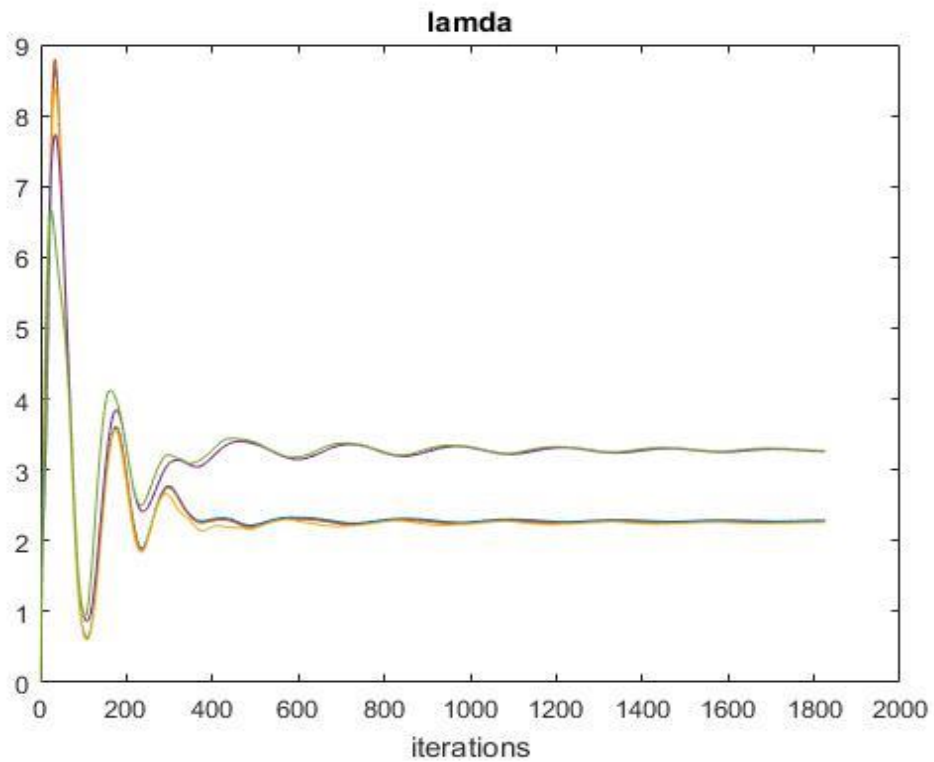
Πίνακας 11



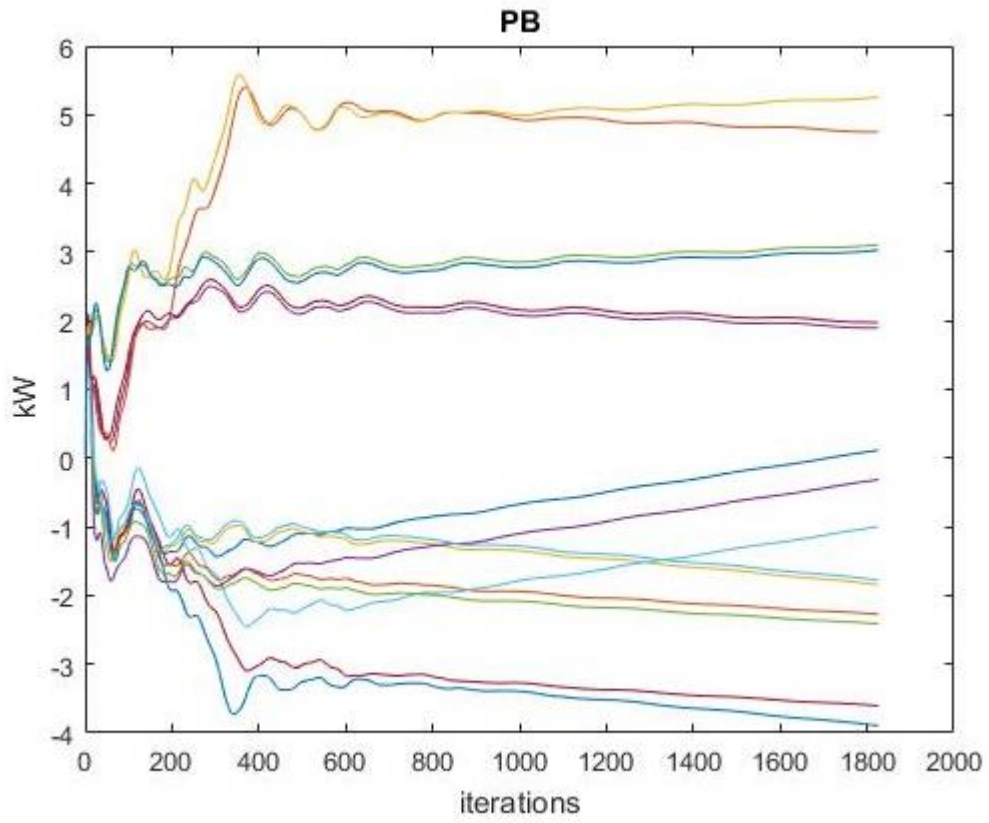
Εικόνα 57: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



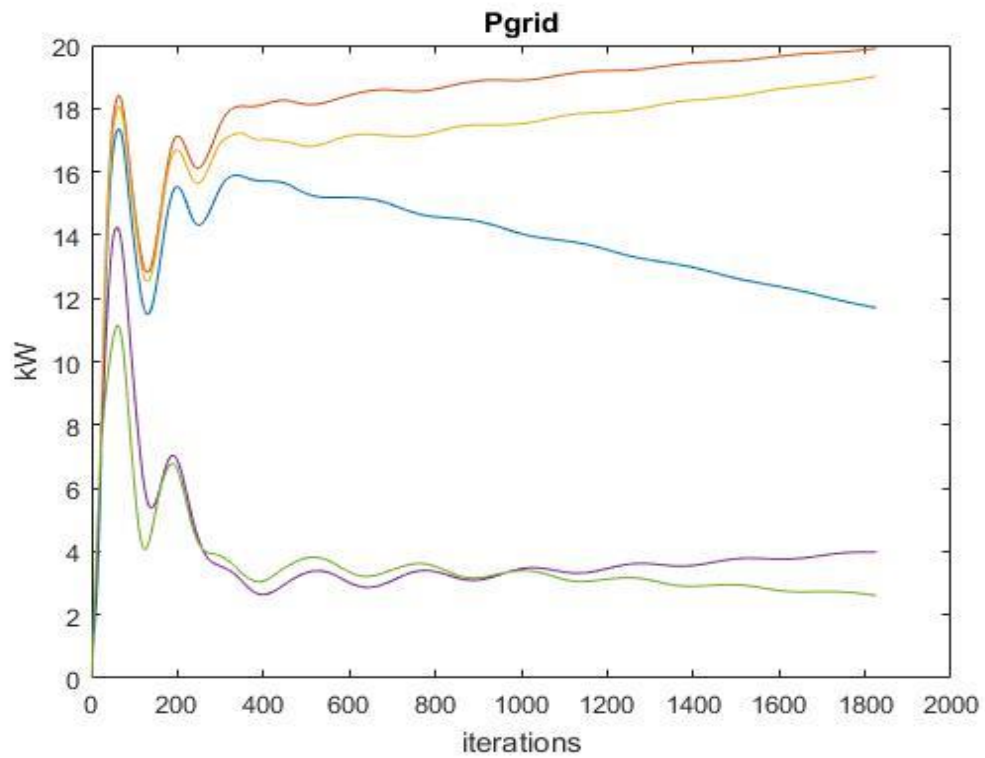
Εικόνα 58: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 59: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 60: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 61: Ισχύς δικτύου

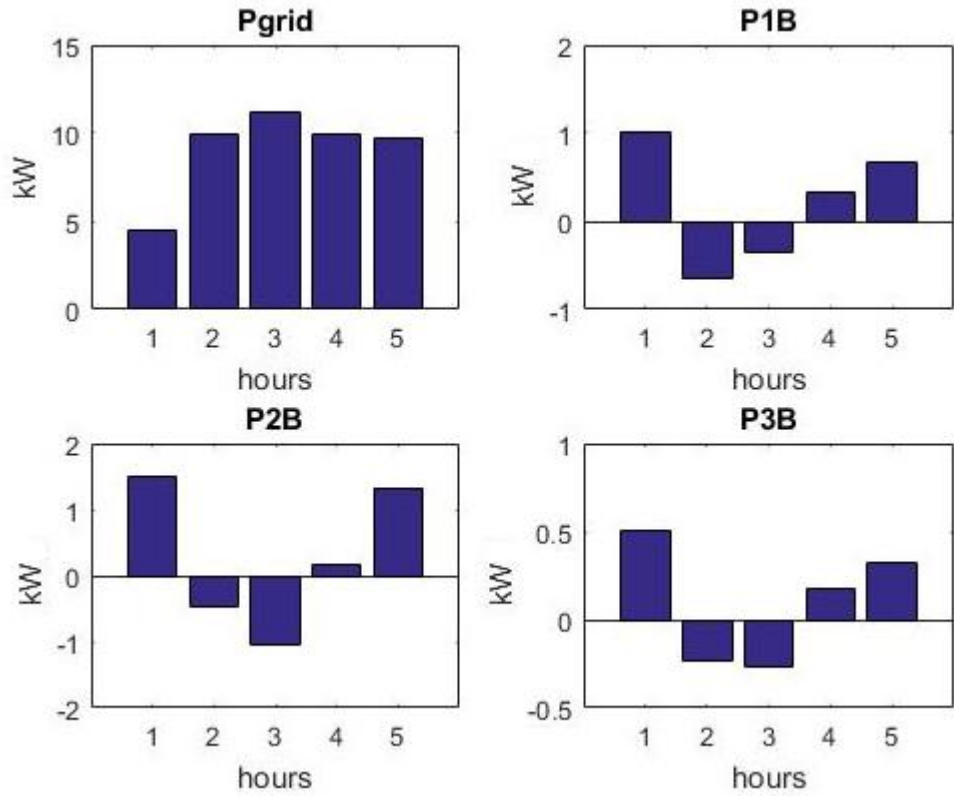
- **Εικόνα 57:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται σημαντικά η ισχύς του δικτύου όπως ήταν αναμενόμενο αφού η τιμή αγοράς ενέργειας μειώθηκε καθώς και η παραγωγή των ΑΠΕ. Οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια τις χρονικές ώρες που η ισχύς του δικτύου είναι υψηλή.
- **Εικόνα 58:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 59:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 60,61:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν σε μία σταθερή τιμή.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 135.61 cents, φυσικό επόμενο της μείωσης της τιμής.

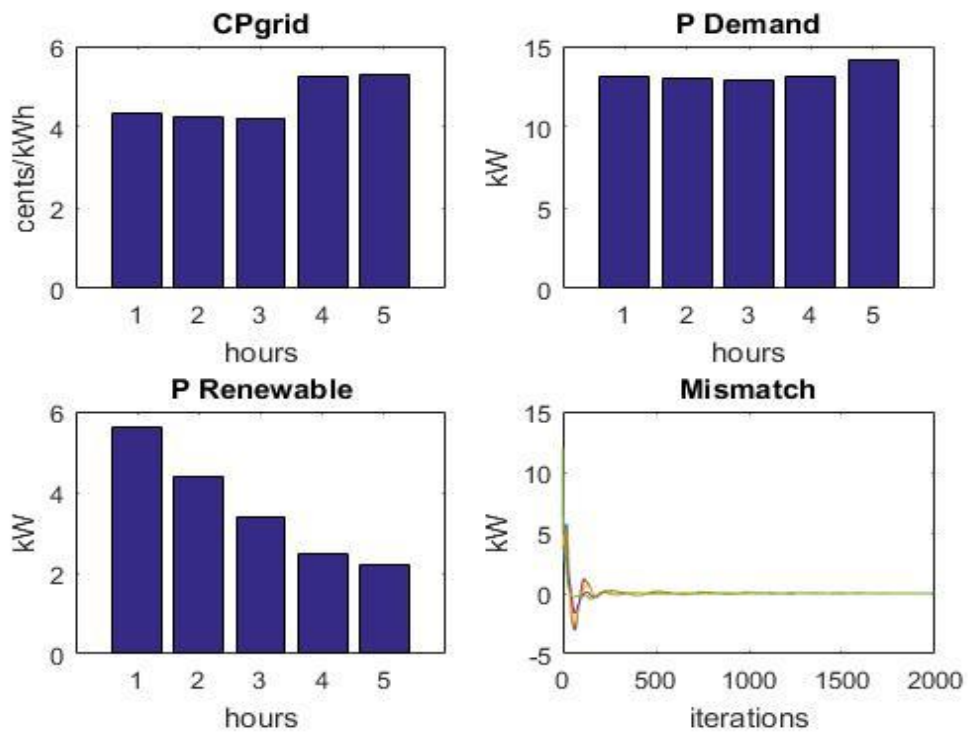
Περίπτωση 12: Σε αυτή την περίπτωση μειώνουμε τη χωρητικότητα των μπαταριών, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 12:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kWh)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	1	1
4.24	13	4.4	1.5	1.5
4.22	12.9	3.4	0.5	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

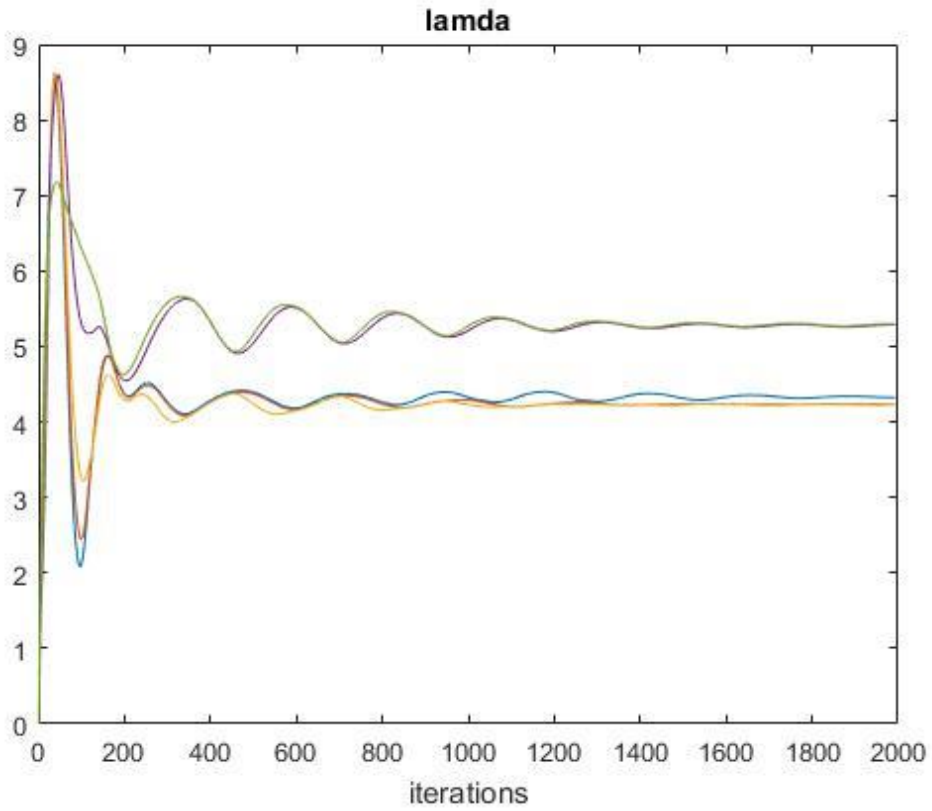
Πίνακα 12



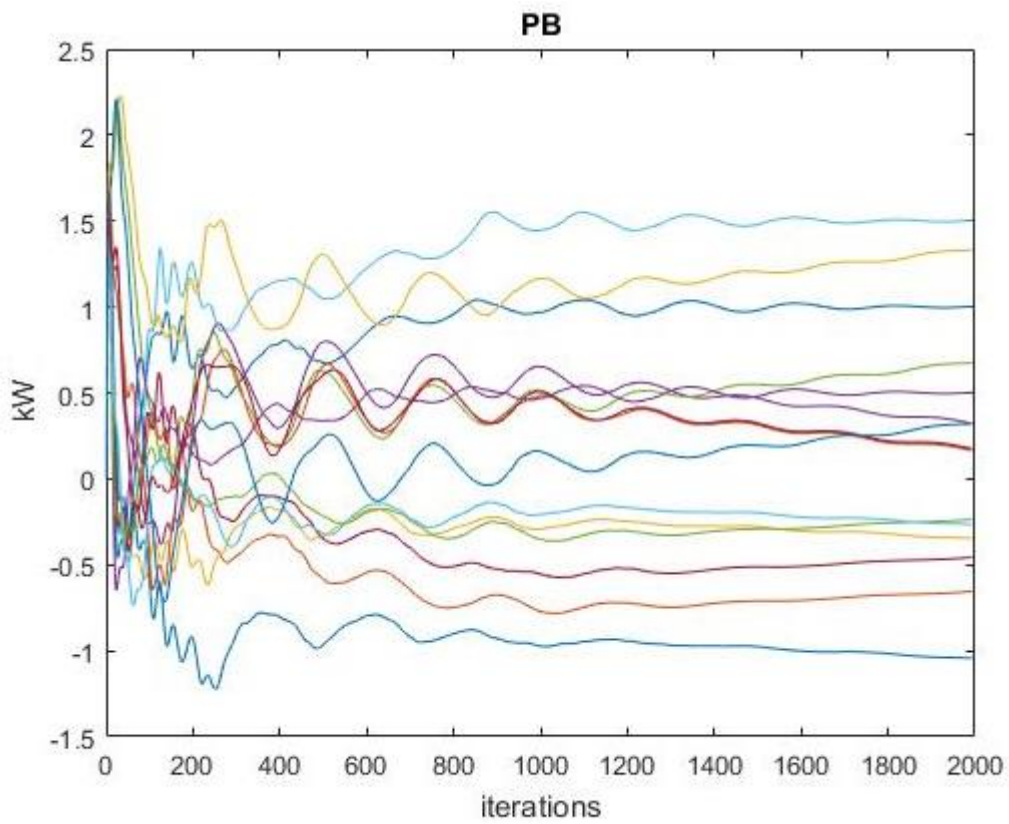
Εικόνα 62: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



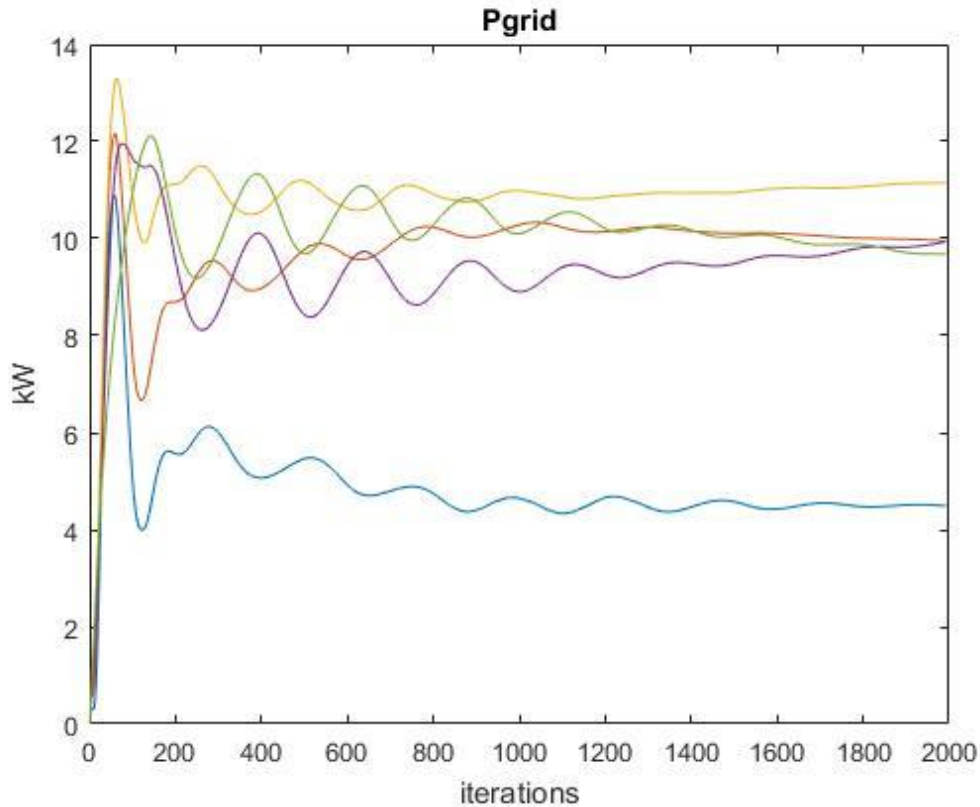
Εικόνα 63: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 64: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 65: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 66: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 62:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται η ισχύς του δικτύου ακόμα και τις ώρες που τιμή αγοράς είναι υψηλότερη, εφόσον οι μπαταρίες αποθηκεύουν λιγότερη ενέργεια, άρα δίνουν λιγότερη ενέργεια στο δίκτυο.
- **Εικόνα 63:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή ικανοποιώντας τον εξισωτικό περιορισμό.
- **Εικόνα 64:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 65,66:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν σε μία σταθερή τιμή.

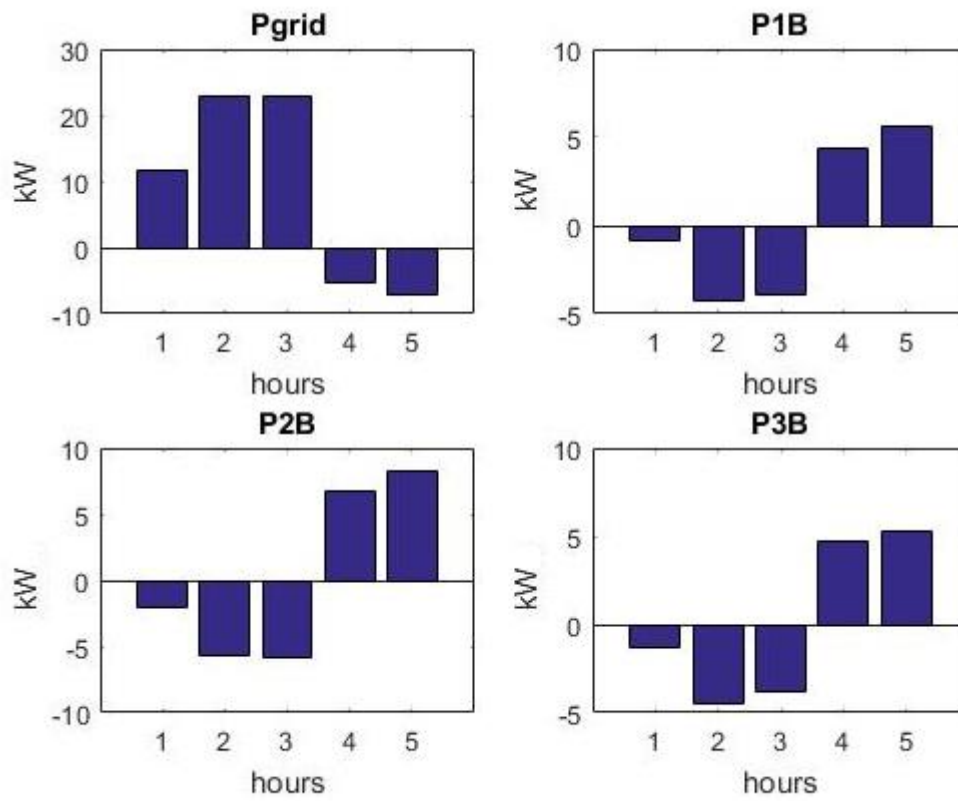
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 212.26 cents, αυξάνεται δηλαδή αφού οι μπαταρίες λόγω της μικρότερης χωρητικότητας προσφέρουν εν δυνάμει λιγότερη ισχύ στο δίκτυο, οπότε αγοράζεται μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών.

Περίπτωση 13: Παρόμοια περίπτωση με παραπάνω με τη διαφορά ότι αυξάνουμε τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών (Πίνακας13):

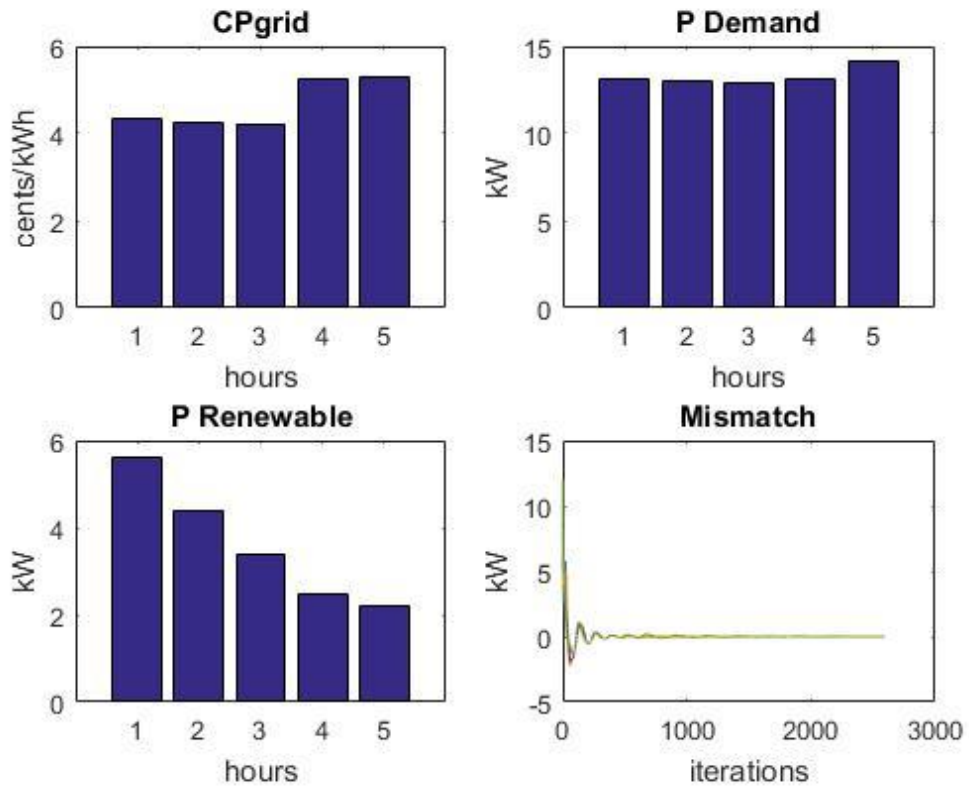
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	10	1
4.24	13	4.4	15	1.5

4.22	12.9	3.4	10	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

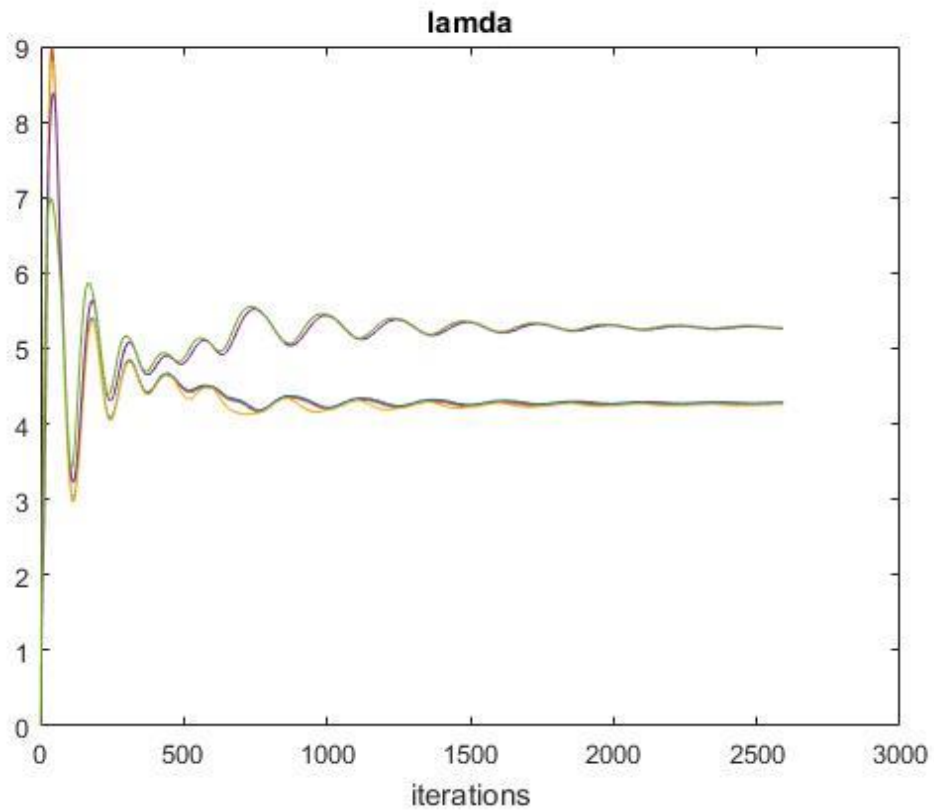
Πίνακας 13



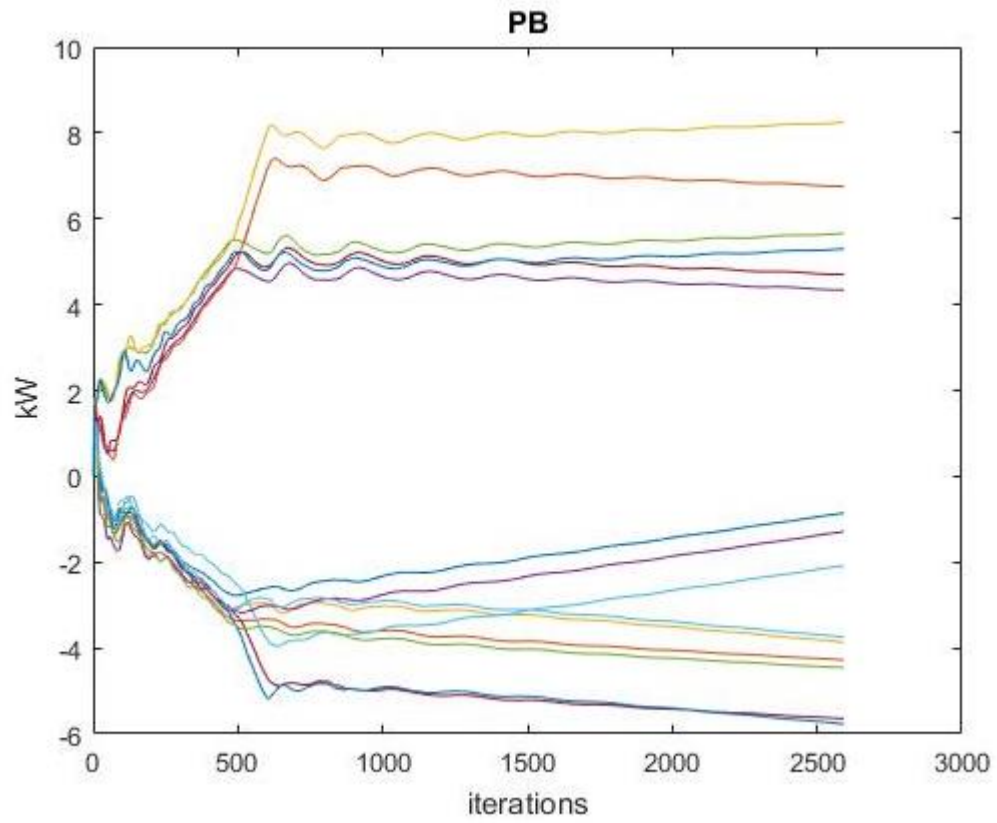
Εικόνα 67: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



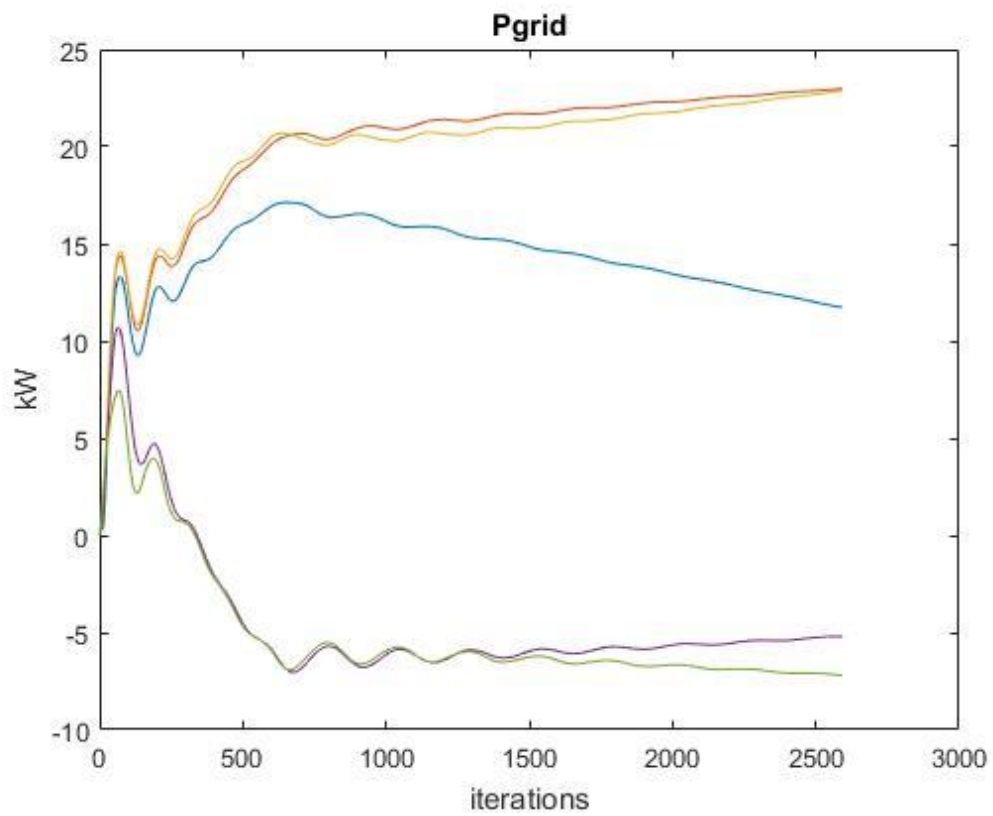
Εικόνα 68: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 69: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 70: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 71: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 67:** Παρατηρείται ότι με την αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών μειώνεται η ισχύς του δικτύου ειδικά τις ώρες που η τιμή είναι υψηλότερη, αφού οι μπαταρίες είναι ικανές να αποθηκεύσουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και να την προσφέρουν στη συνέχεια για τις ανάγκες του δικτύου.
- **Εικόνα 68:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 69:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 70,71:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν σε μία σταθερή τιμή.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 179.28 cents, μειωμένο αφού οι μπαταρίες προσφέρουν περισσότερη ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης.

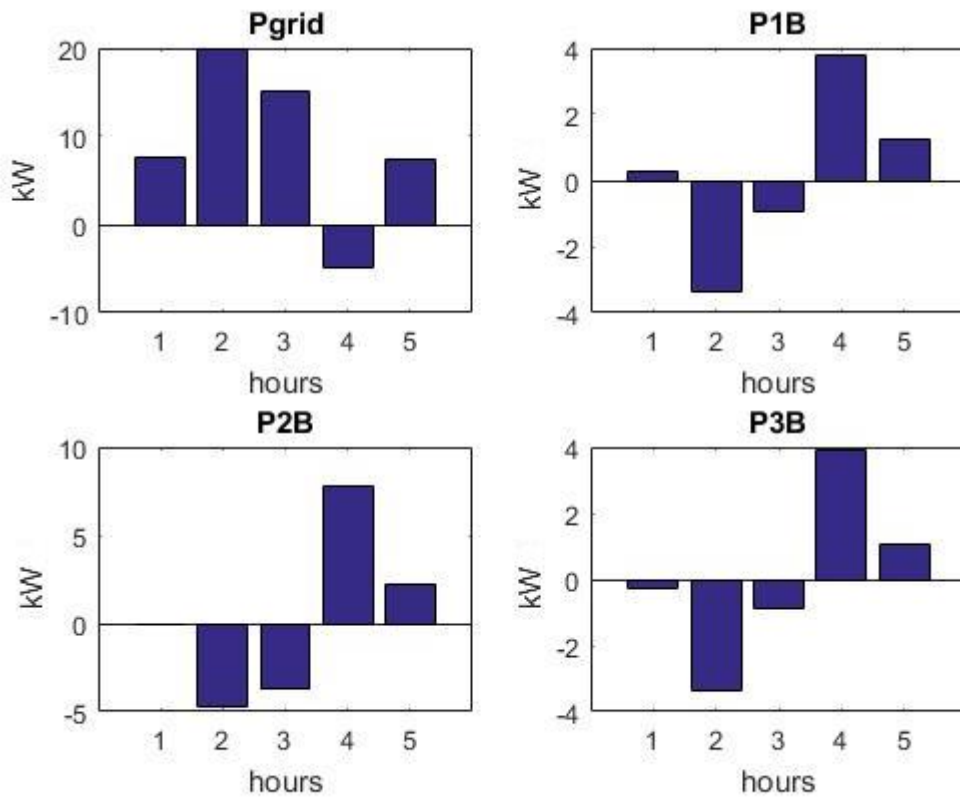
5.2 Προγραμματισμός παραγωγής με κατανεμημένη διαχείριση ενέργειας με χρήση Gradient Descent

Στην περίπτωση όπου υπάρχει διεσπαρμένη διαχείριση ενέργειας, δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής και όλες οι πληροφορίες που χρειάζονται για τη βελτιστοποίηση γίνεται με ανταλλαγή των απαραίτητων δεδομένων μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Στον αλγόριθμο χρησιμοποιείται η μέθοδος του αλγορίθμου συναίνεσης (consensus) για την εύρεση των απαραίτητων πολλαπλασιαστών και του ισοζυγίου ισχύος. Στις παρακάτω εικόνες καθώς και τον Πίνακα 14 περιγράφονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της διεσπαρμένης παραγωγής.

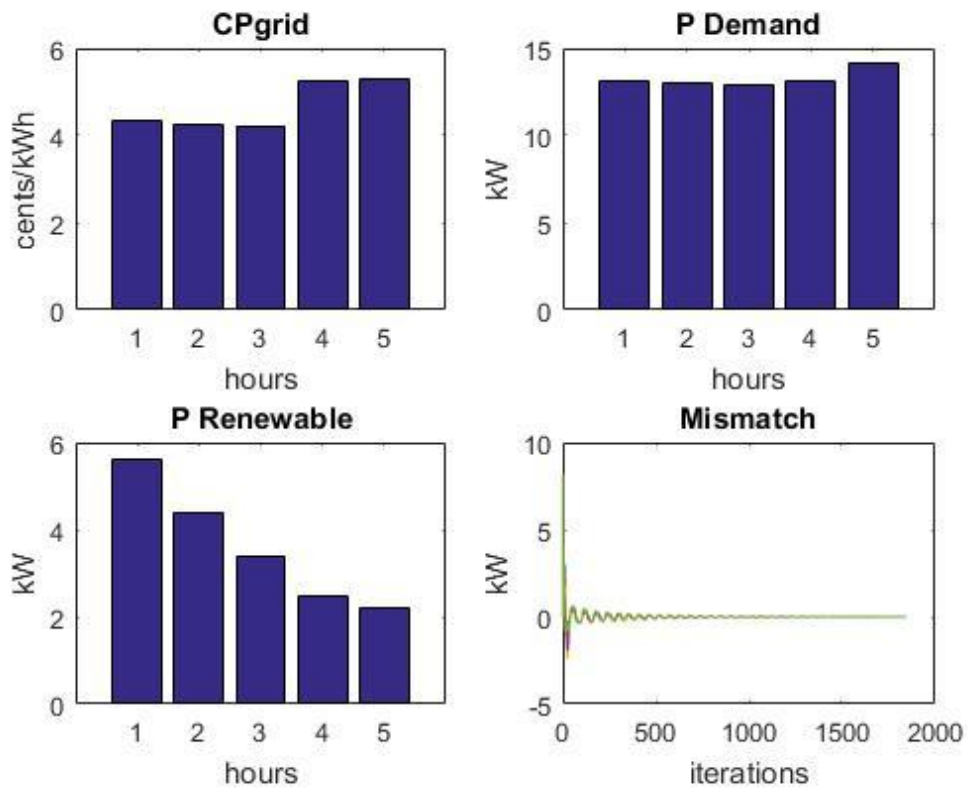
Περίπτωση 1: Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	1
4.24	13	4.4	10	1.5
4.22	12.9	3.4	5	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

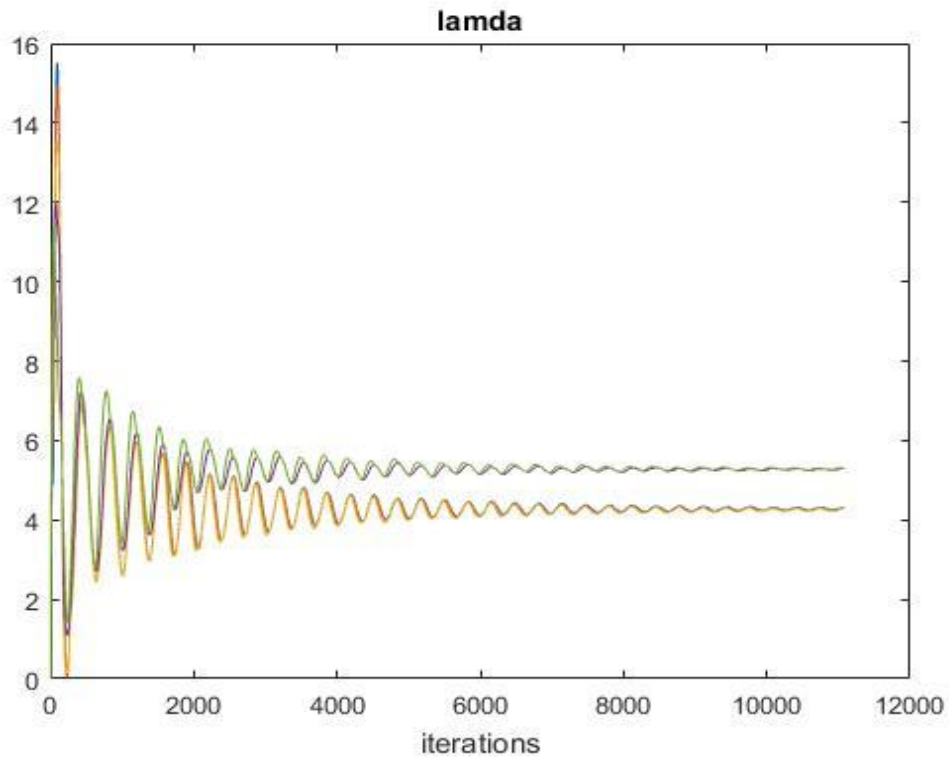
Πίνακας 14



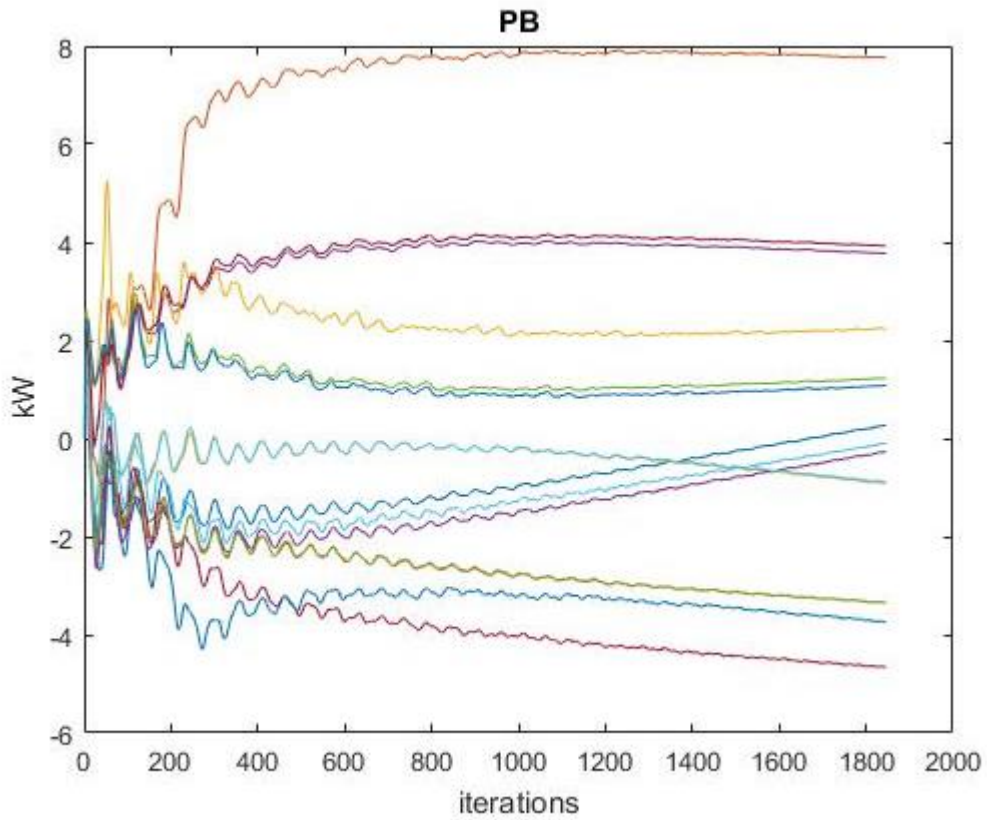
Εικόνα 72: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



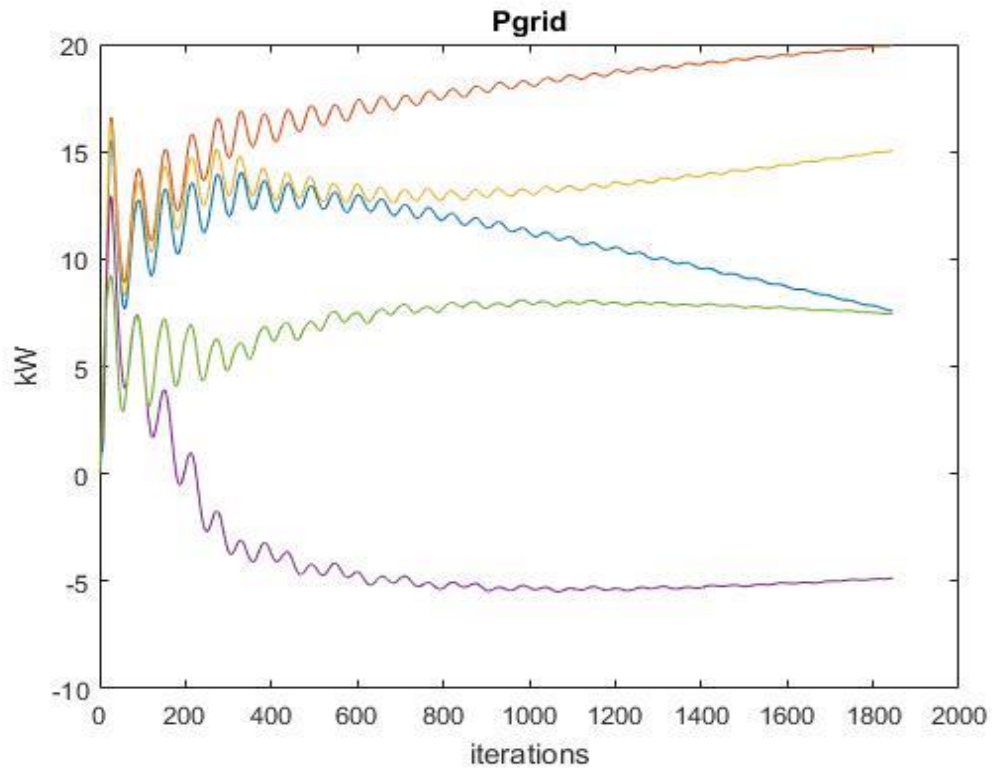
Εικόνα 73: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 74: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 75: Ισχύς μπαταριών



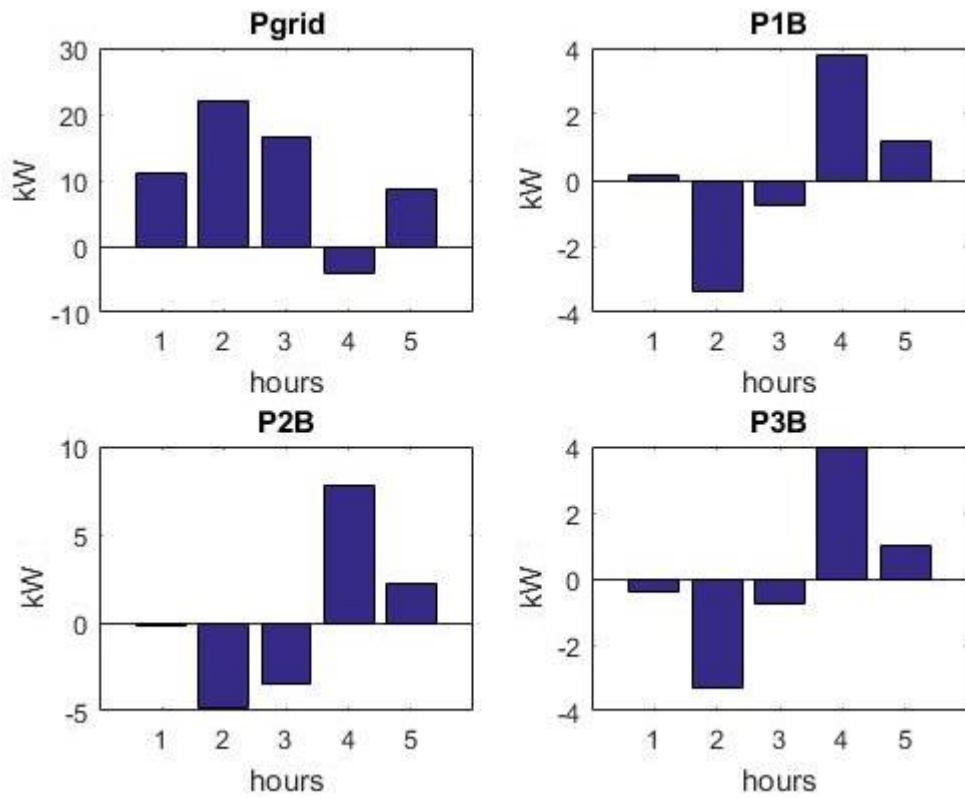
Εικόνα 76: Ισχύς δικτύου

Το συνολικό κόστος με διεσπαρμένη παραγωγή ανέρχεται στα 195.02 cents, πολύ κοντά δηλαδή στο συνολικό κόστος με κεντρικό ελεγκτή.

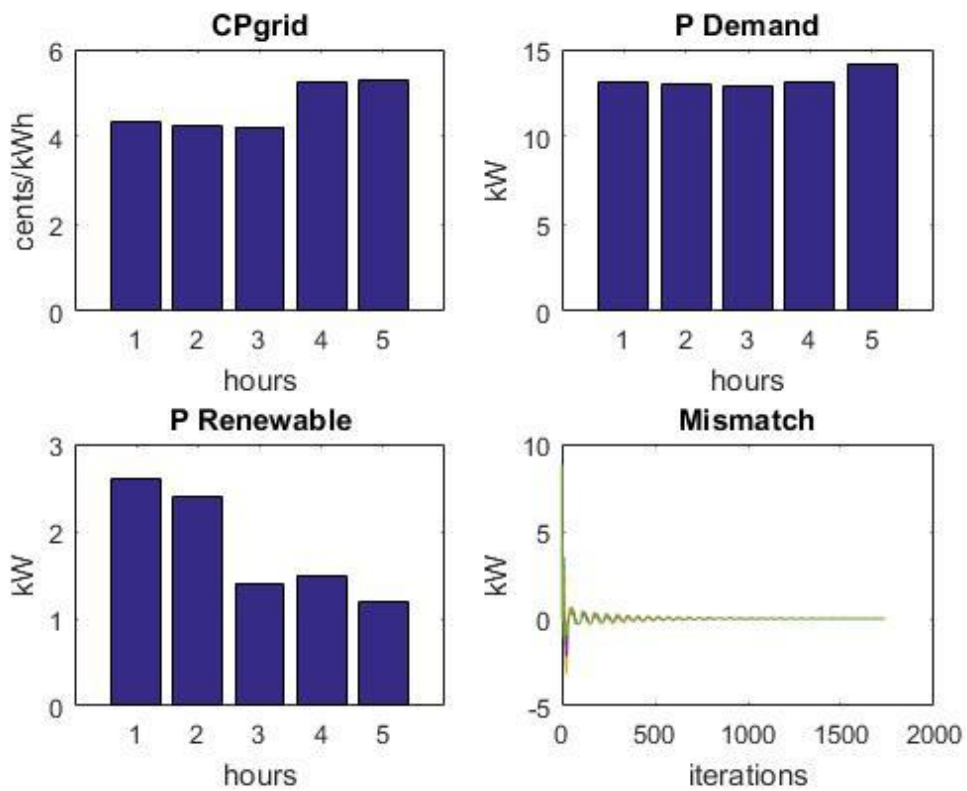
Περίπτωση 2: Σε αυτή την περίπτωση μειώνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ, τοποθετώντας τα δεδομένα στον Πίνακα 15:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	2.6	5	1
4.24	13	2.4	10	1.5
4.22	12.9	1.4	5	0.5
5.26	13.1	1.5		
5.3	14.2	1.2		

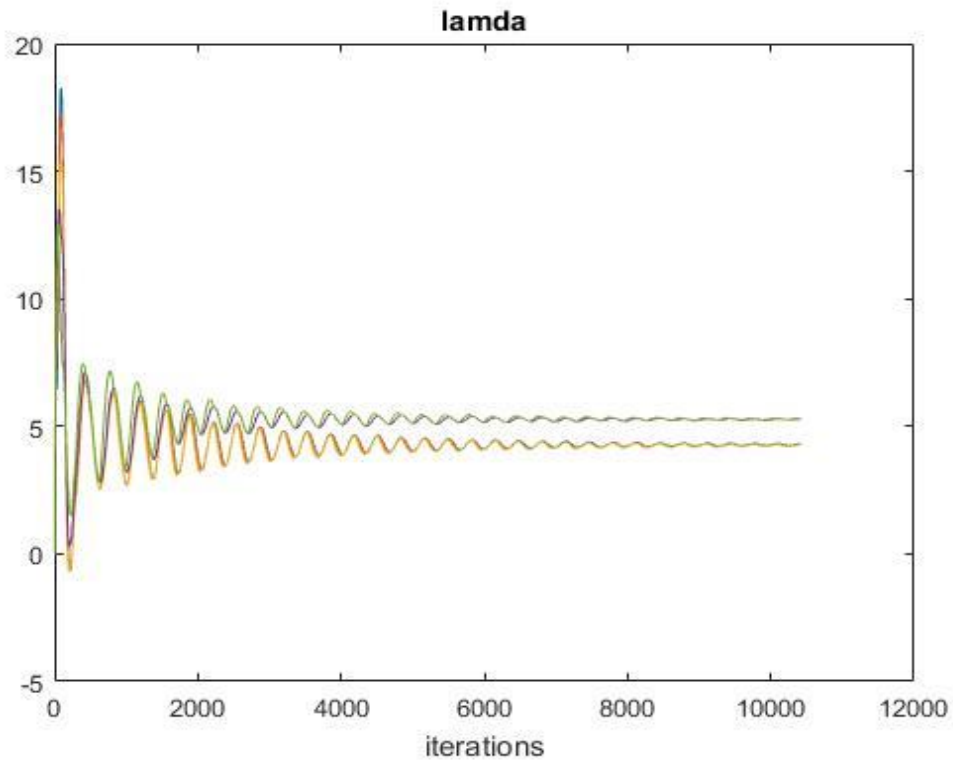
Πίνακα 15



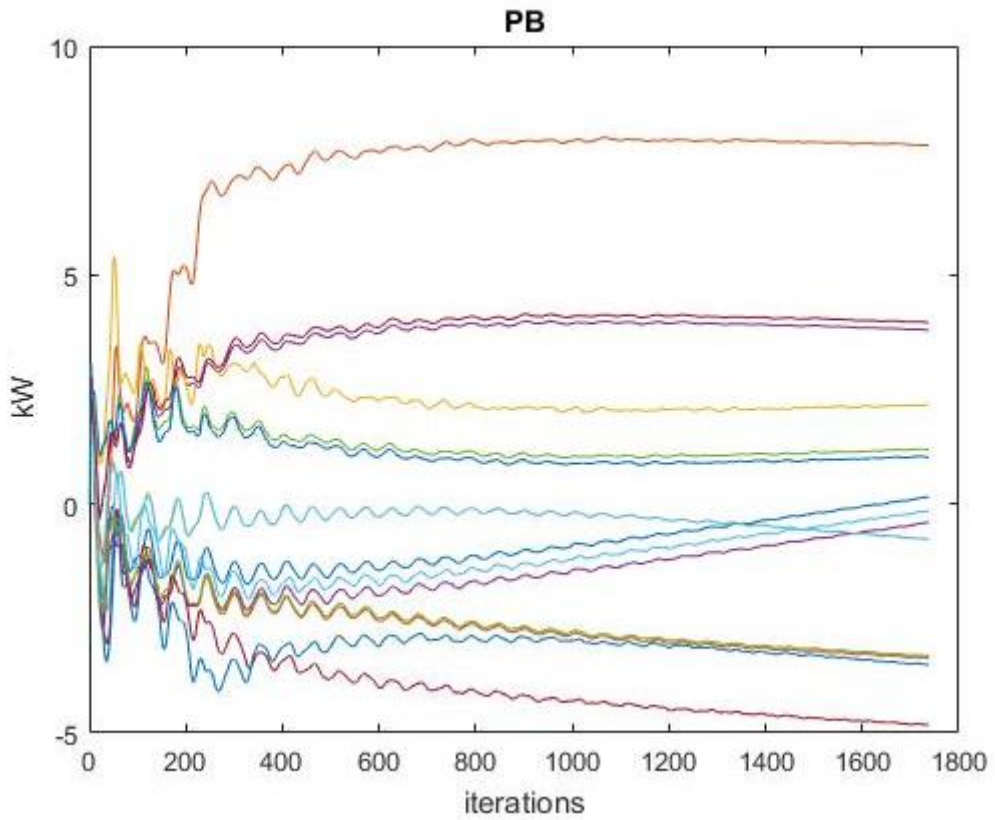
Εικόνα 77: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



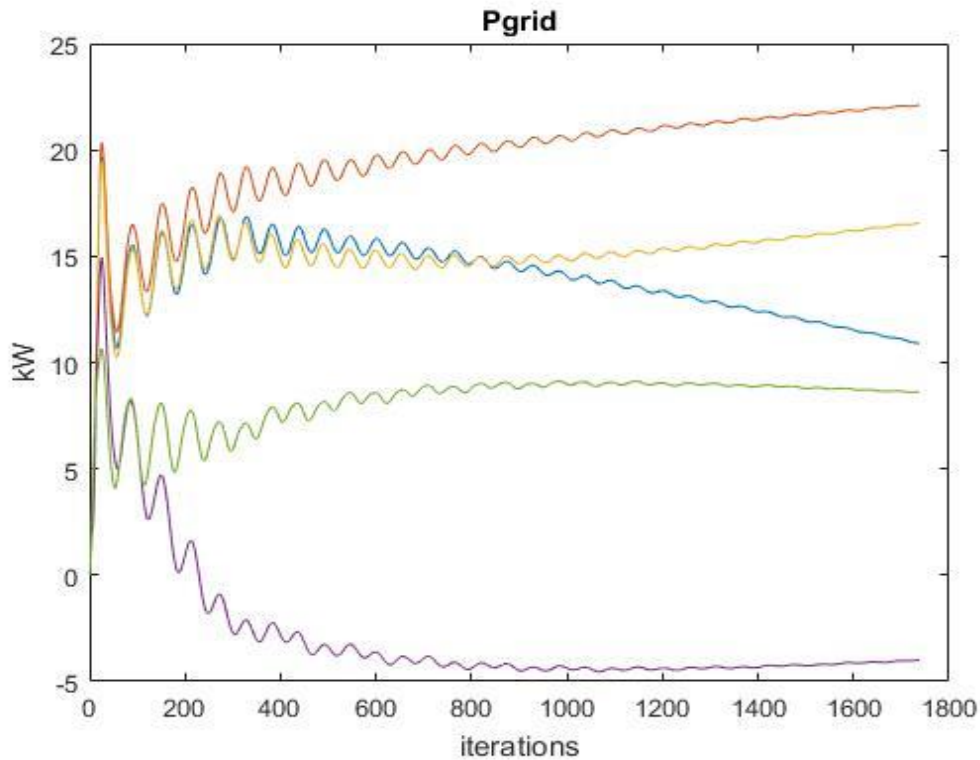
Εικόνα 78: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 79: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 80: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 81: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 77:** Παρατηρείται ότι με τη μείωση των φορτίων ΑΠΕ αυξάνεται η ισχύς του δικτύου και μάλιστα περισσότερο από την Περίπτωση 2 του κεφαλαίου 6.2.
- **Εικόνα 78:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 79:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 80,81:** Η ισχύς των μπαταριών και του δικτύου συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση τους.

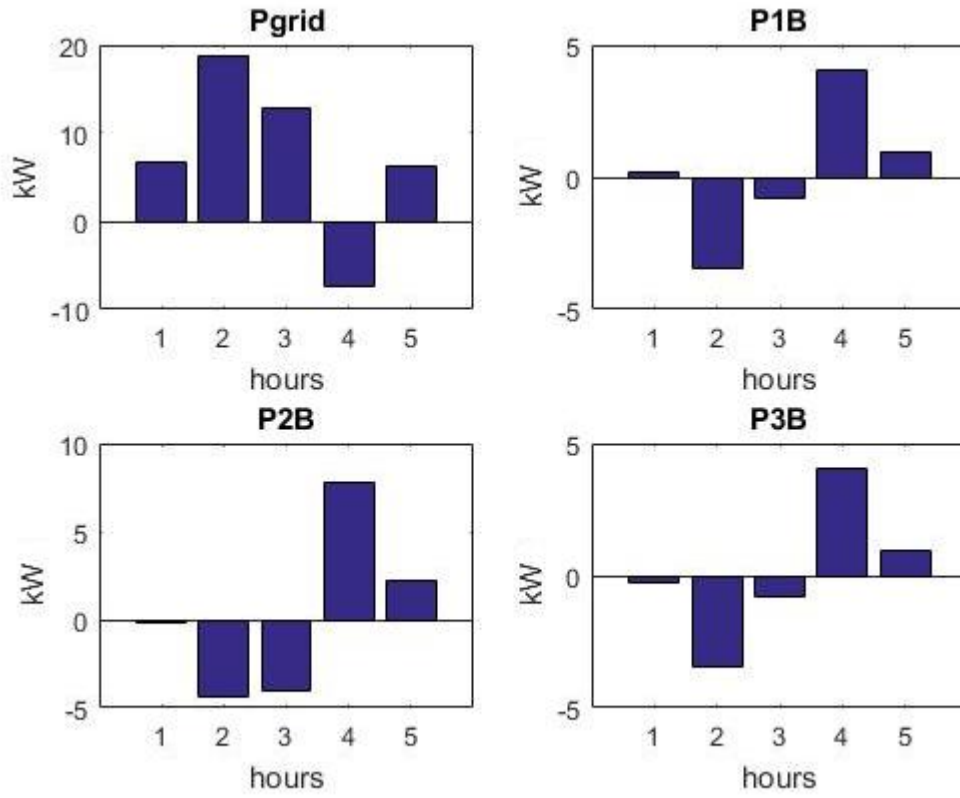
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 235.69 cents, αύξηση δηλαδή λόγω της μείωσης παραγωγής των ΑΠΕ.

Περίπτωση 3: Ίδια περίπτωση με πριν απλά αυξάνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ, τοποθετώντας τα αποτελέσματα στον Πίνακα 16:

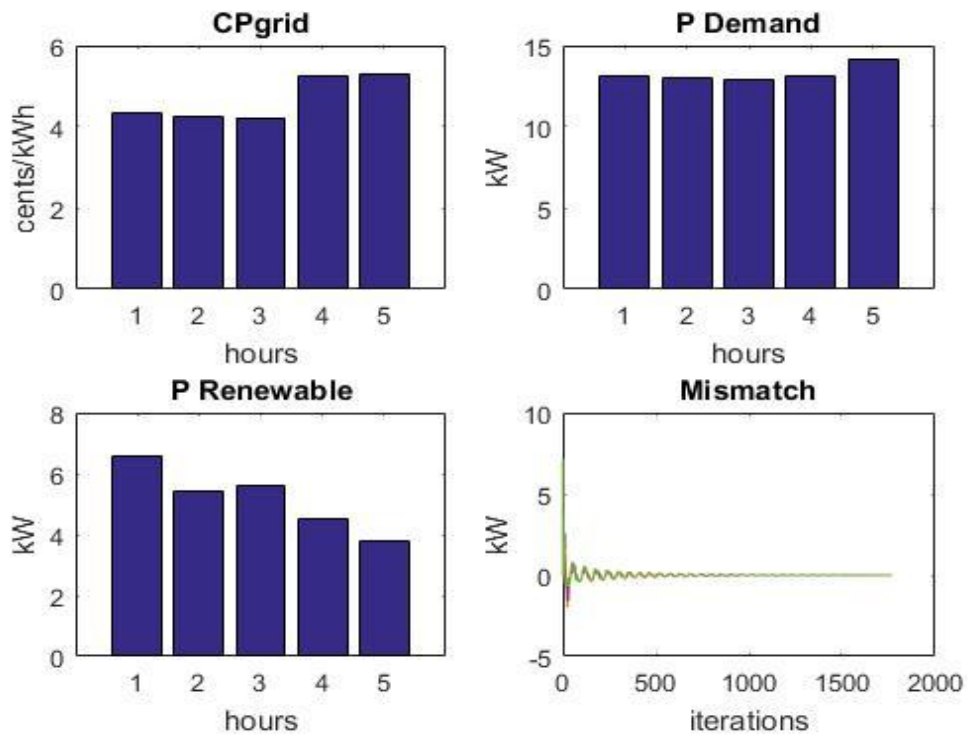
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	6.6	5	1
4.24	13	5.4	10	1.5
4.22	12.9	5.6	5	0.5
5.26	13.1	4.5		

5.3	14.2	3.8		
-----	------	-----	--	--

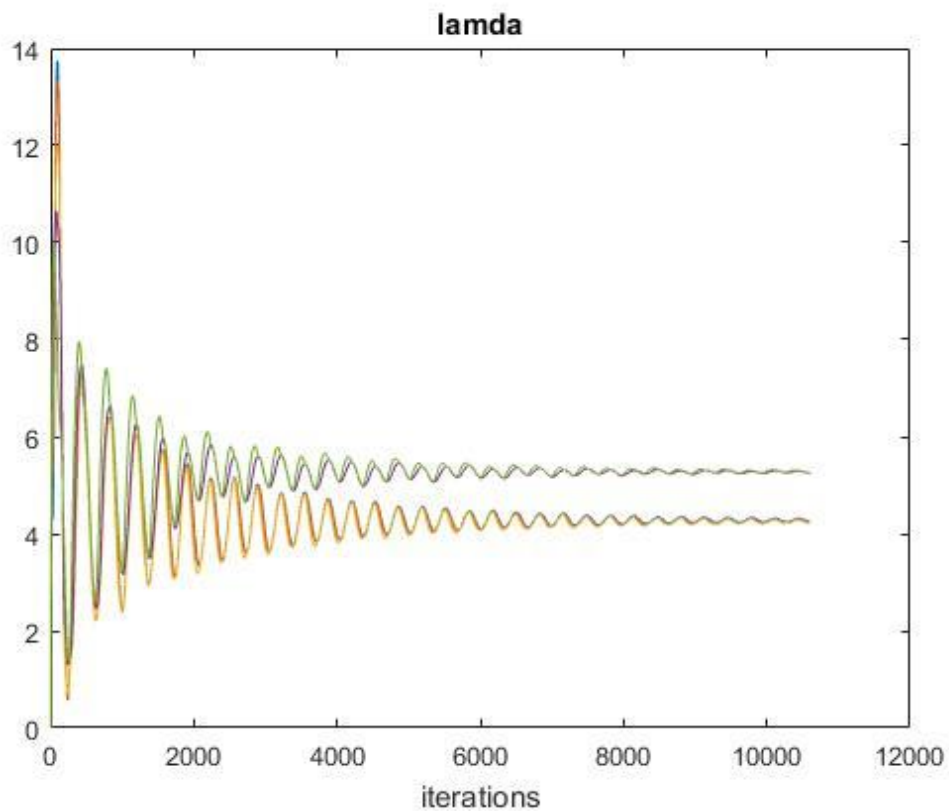
Πίνακας 16



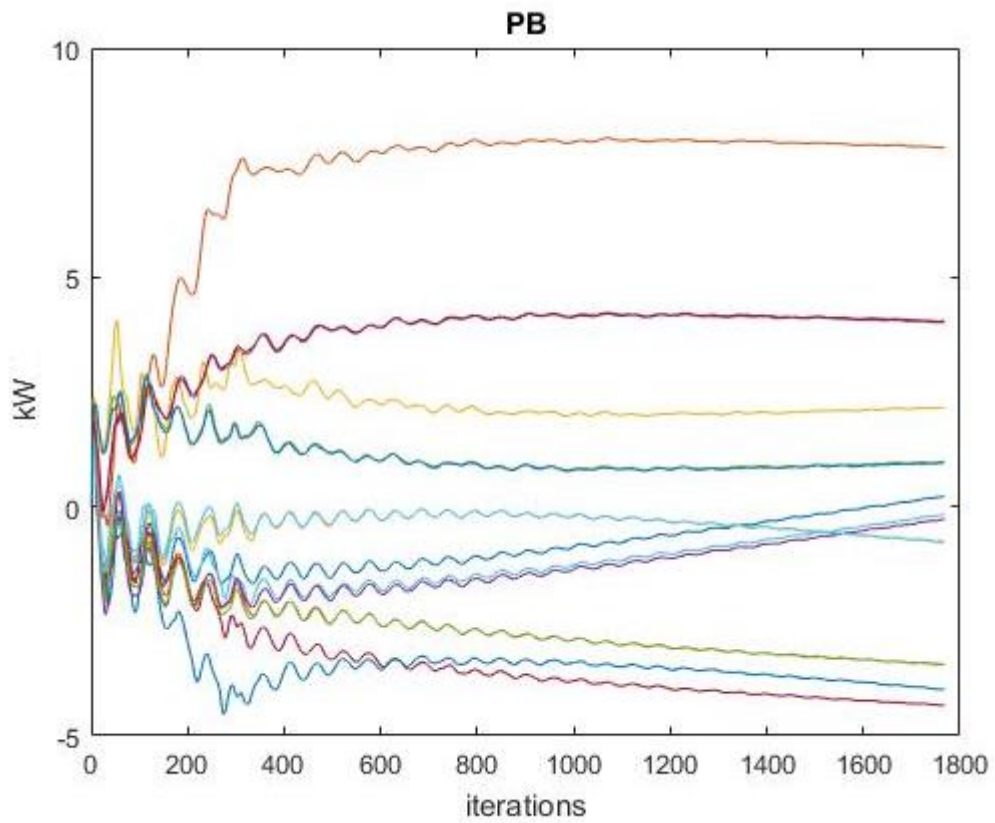
Εικόνα 82: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



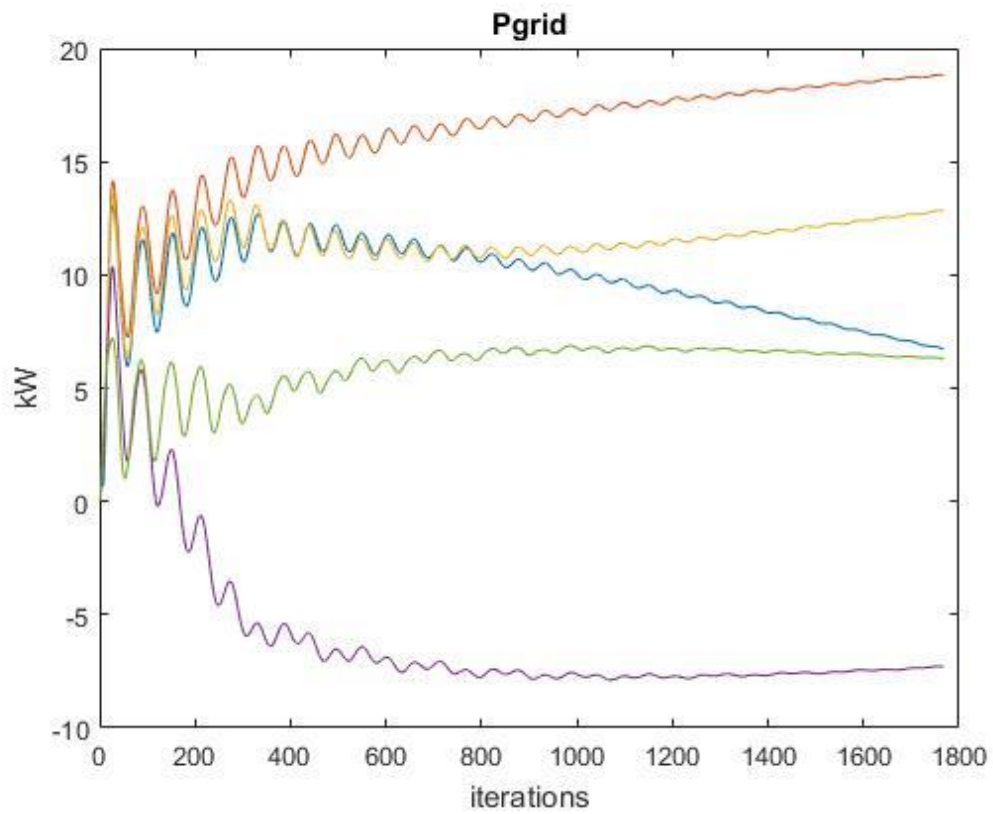
Εικόνα 83: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 84: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 85: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 86: Ισχύς δικτύου

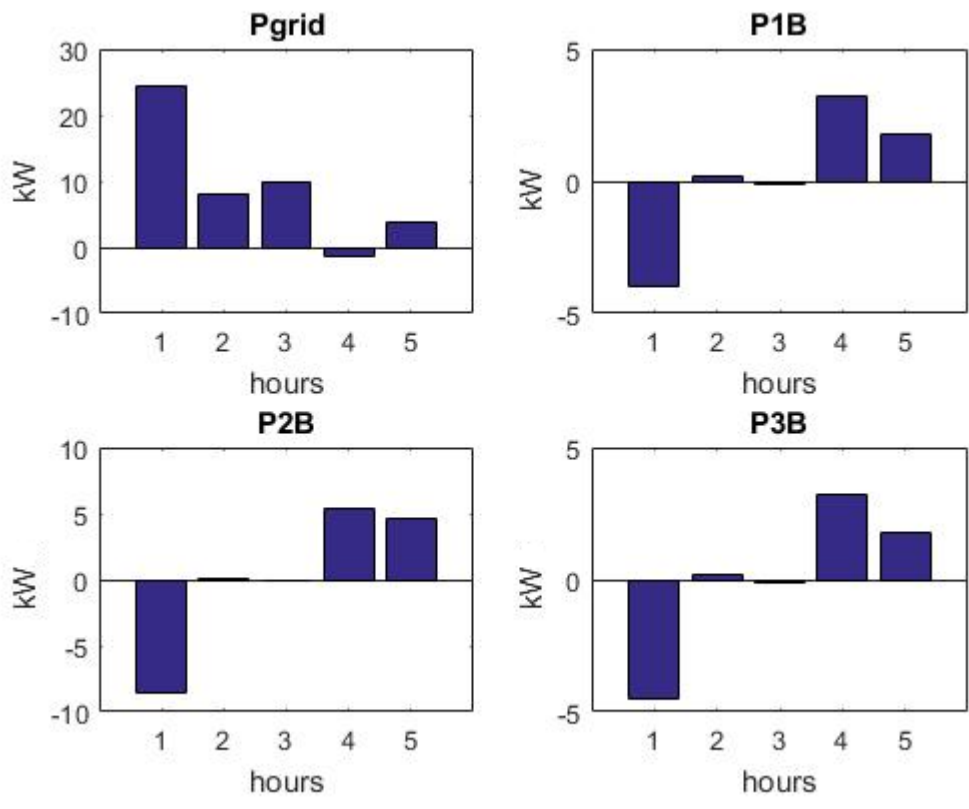
- **Εικόνα 82:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η ισχύς του δικτύου, εφόσον αυξάνεται η παραγωγή ΑΠΕ και οι μπαταρίες φορτίζουν τις ώρες που η τιμή είναι χαμηλότερη και την προσφέρουν όταν η τιμή είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 83:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 84:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει στη λύση της Lagrangian.
- **Εικόνα 85,86:** Η ισχύς των μπαταριών και του δικτύου συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 158.08 cents, μειωμένο σε σχέση με την Περίπτωση 1 και προσεγγίζει κατά πολύ το κόστος του προηγούμενου κεφαλαίου (157.77 cents) που είναι και το ζητούμενο.

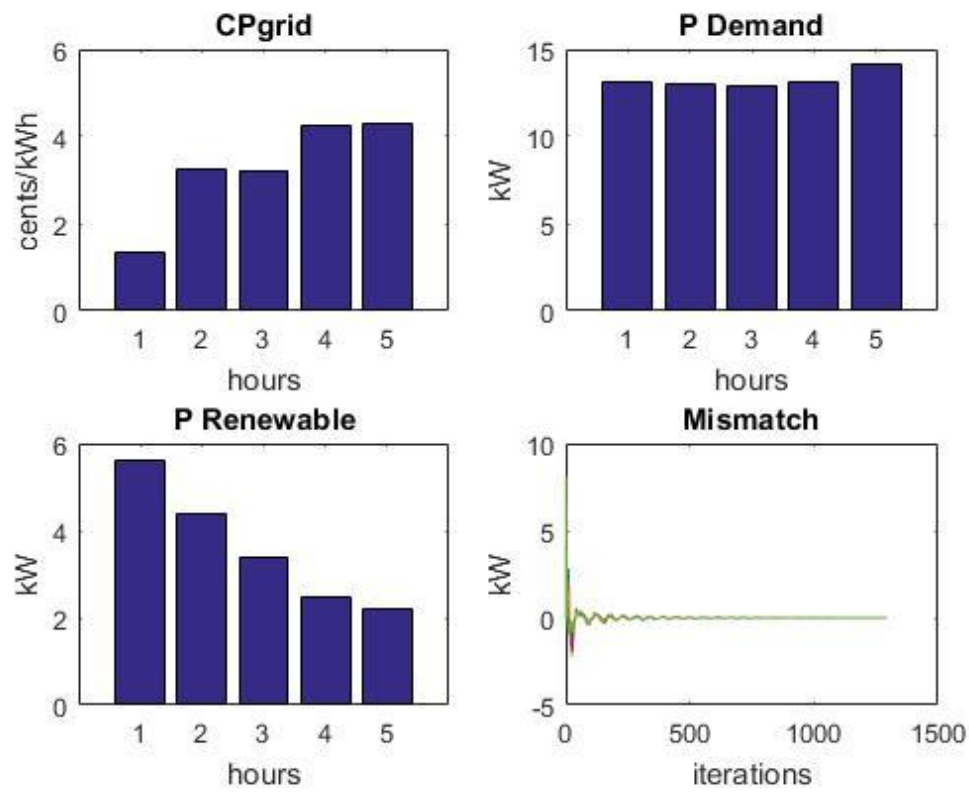
Περίπτωση 4: Σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλουμε (μειώνουμε) την τιμή αγοράς για την ισχύ του δικτύου, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 17:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
1.33	13.1	5.6	5	1
3.24	13	4.4	10	1.5
3.22	12.9	3.4	5	0.5
4.26	13.1	2.5		
4.3	14.2	2.2		

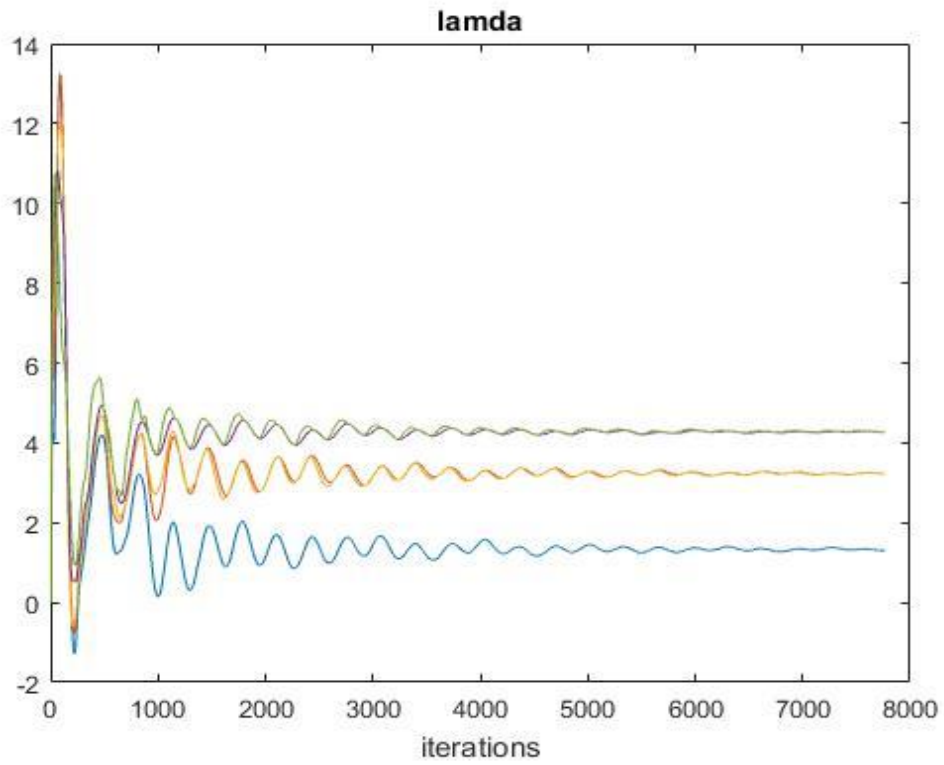
Πίνακας 17



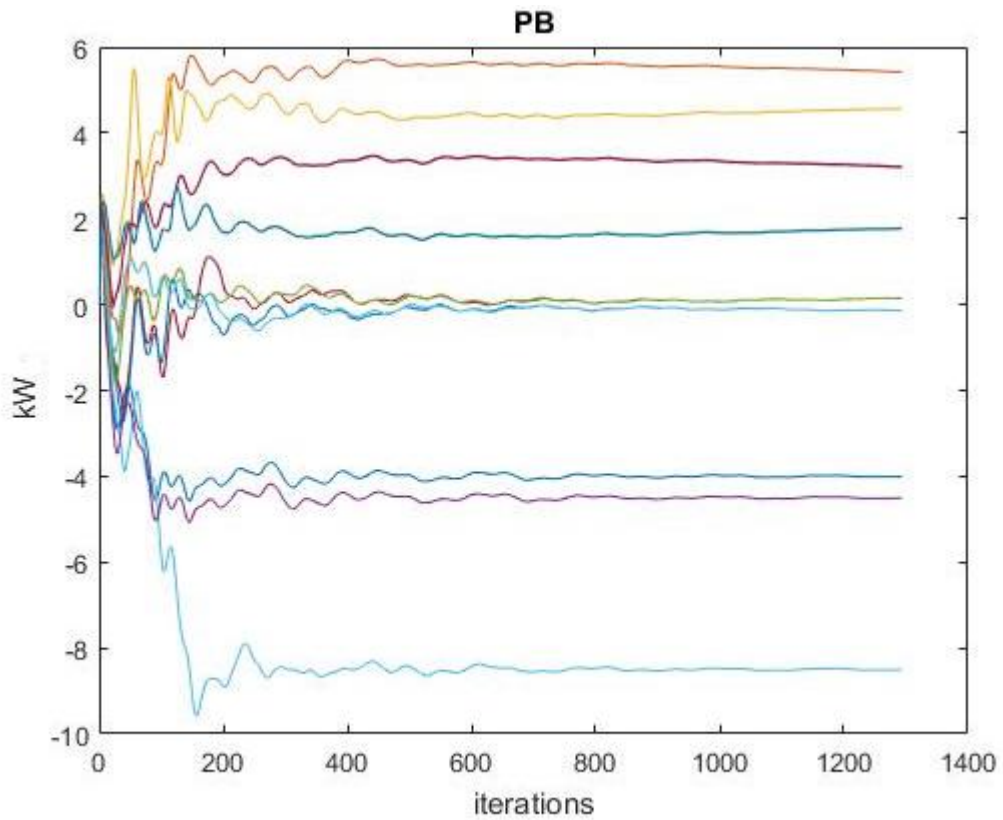
Εικόνα 87: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



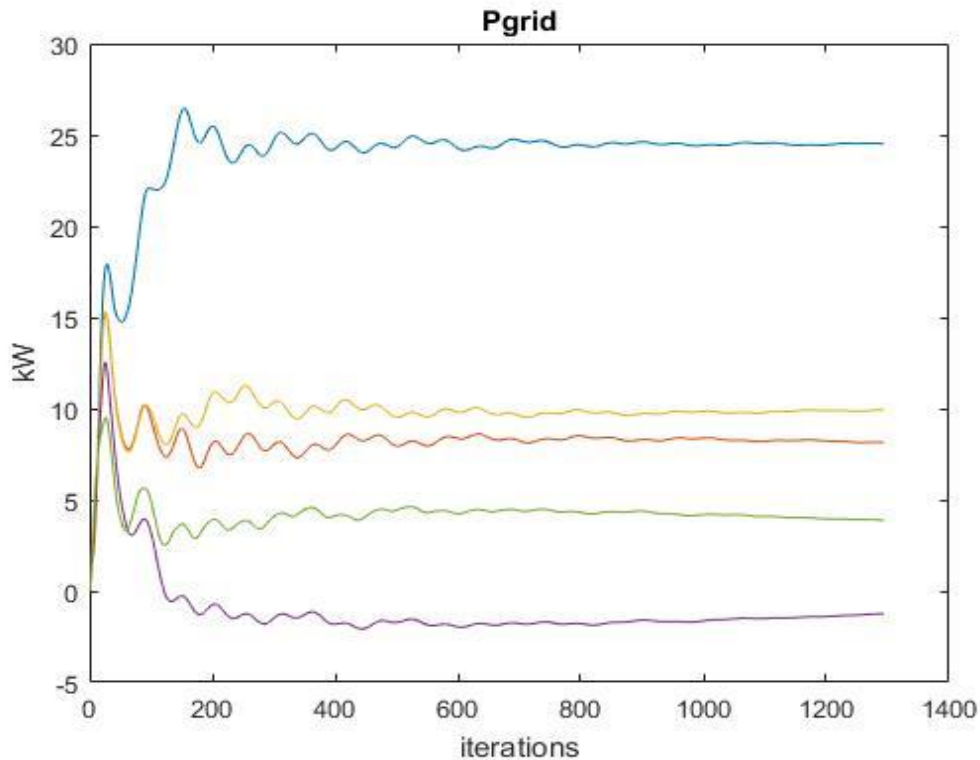
Εικόνα 88: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 89: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 90: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 91: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 87:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται η ισχύς που ρέει στο δίκτυο και ιδιαίτερα την 1^η χρονική ώρα που η ώρα είναι αρκετά φτηνότερη. Αντίστοιχα οι μπαταρίες αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια κατά την 1^η χρονική ώρα αφού χρησιμοποιείται περισσότερο ισχύς δικτύου.
- **Εικόνα 88:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 89:** Ο πολλαπλασιαστής Lagrange του εξισωτικού περιορισμού κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 90,91:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

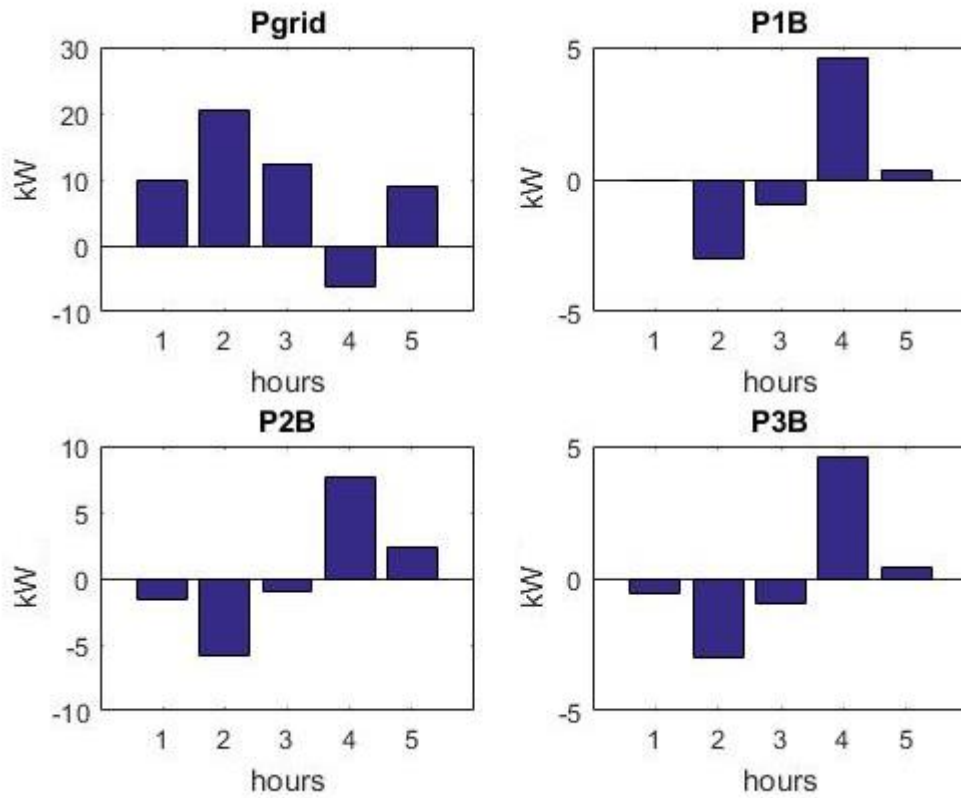
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 102.31 cents, αρκετά μειωμένο αφού μειώθηκε σημαντικά η τιμή αγοράς ενέργειας και πλησίον της τιμής στην Περίπτωση 4 με κεντρικό ελεγκτή (102,1 cents).

Περίπτωση 5: Παρόμοια περίπτωση με παραπάνω, με τη διαφορά ότι αυξάνουμε την τιμή αγοράς της ενέργειας (Πίνακας 18):

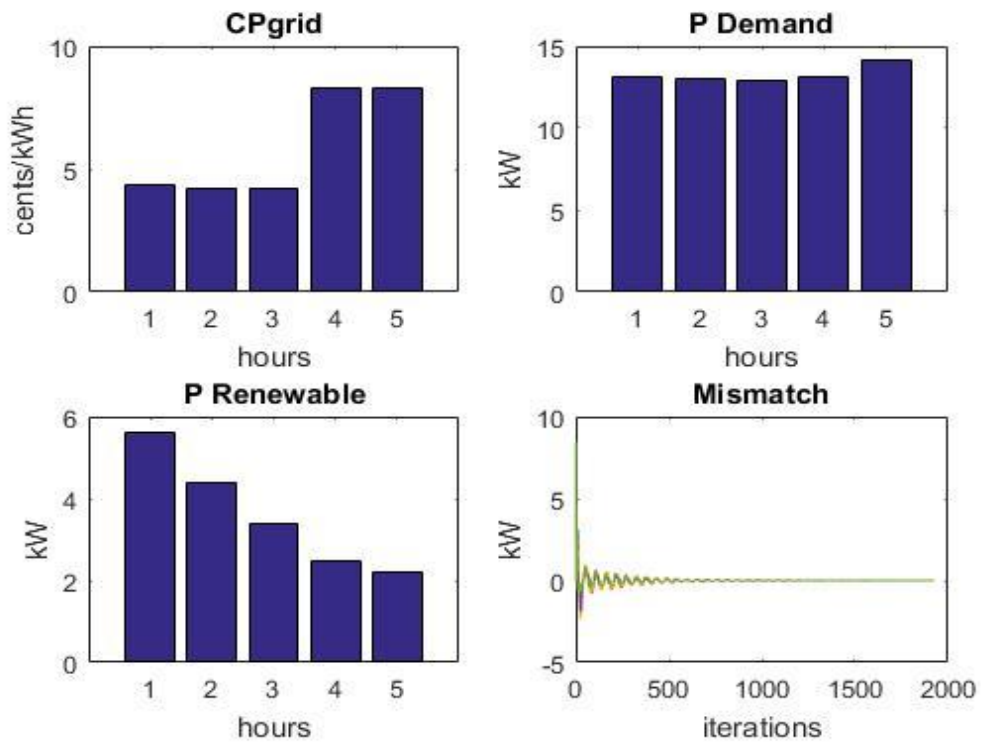
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	1
4.24	13	4.4	10	1.5

4.22	12.9	3.4	5	0.5
8.26	13.1	2.5		
8.3	14.2	2.2		

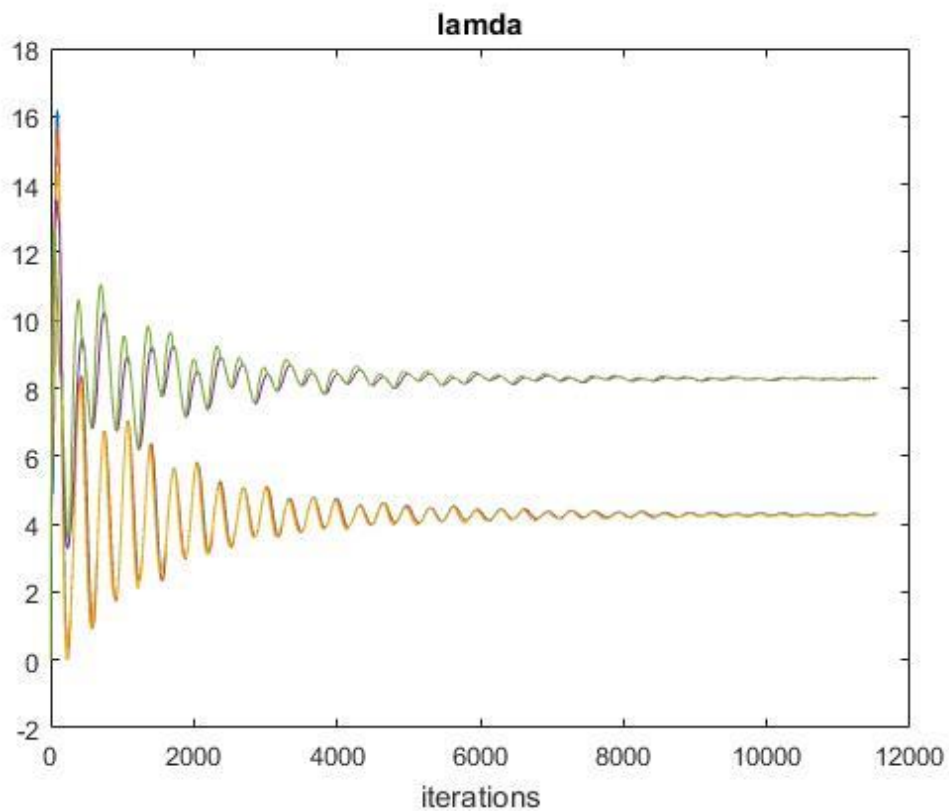
Πίνακας 18



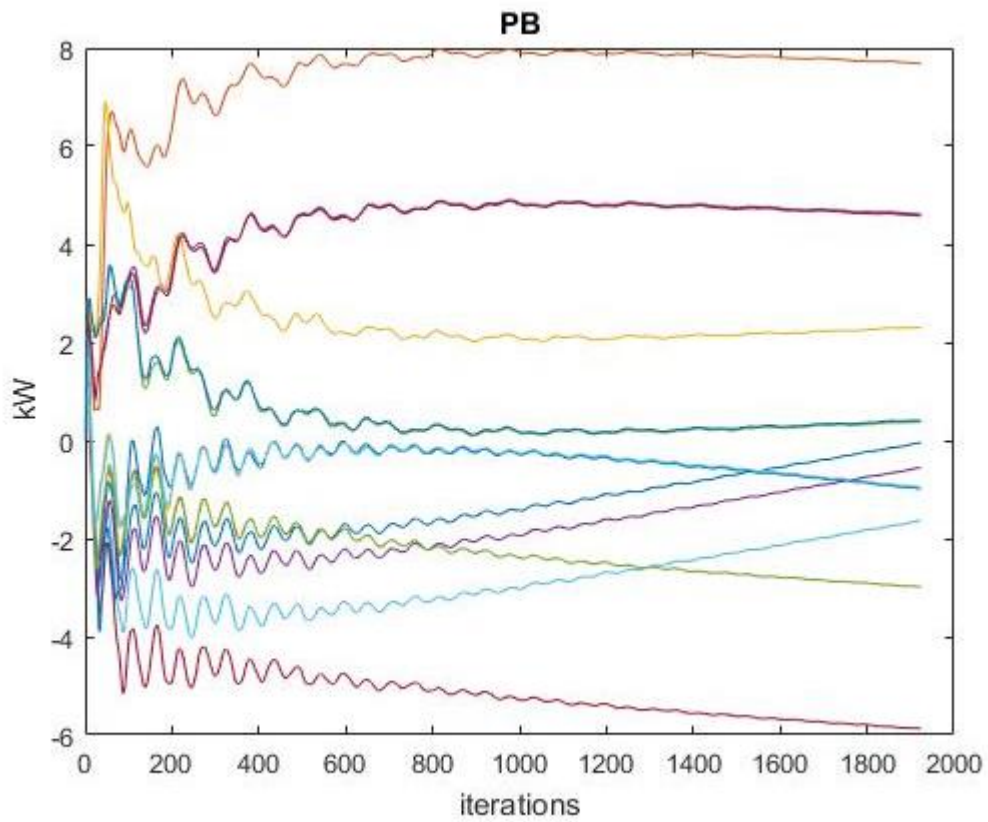
Εικόνα 92: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



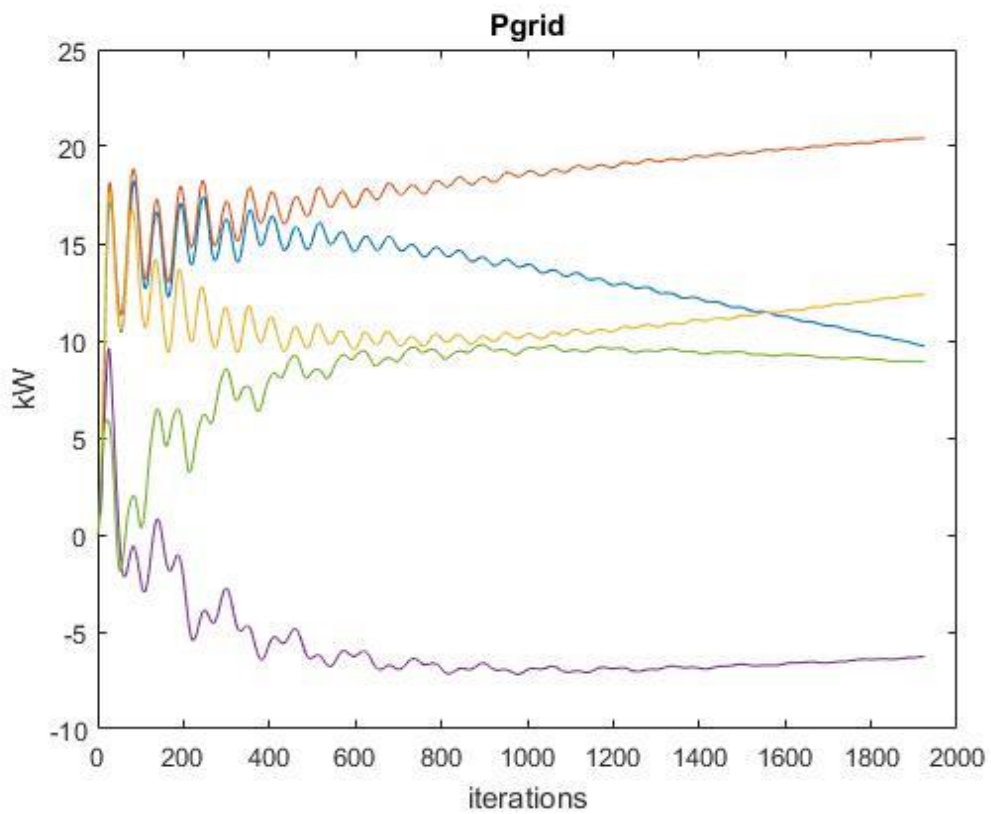
Εικόνα 93: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 94: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 95: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 96: Ισχύς δικτύου

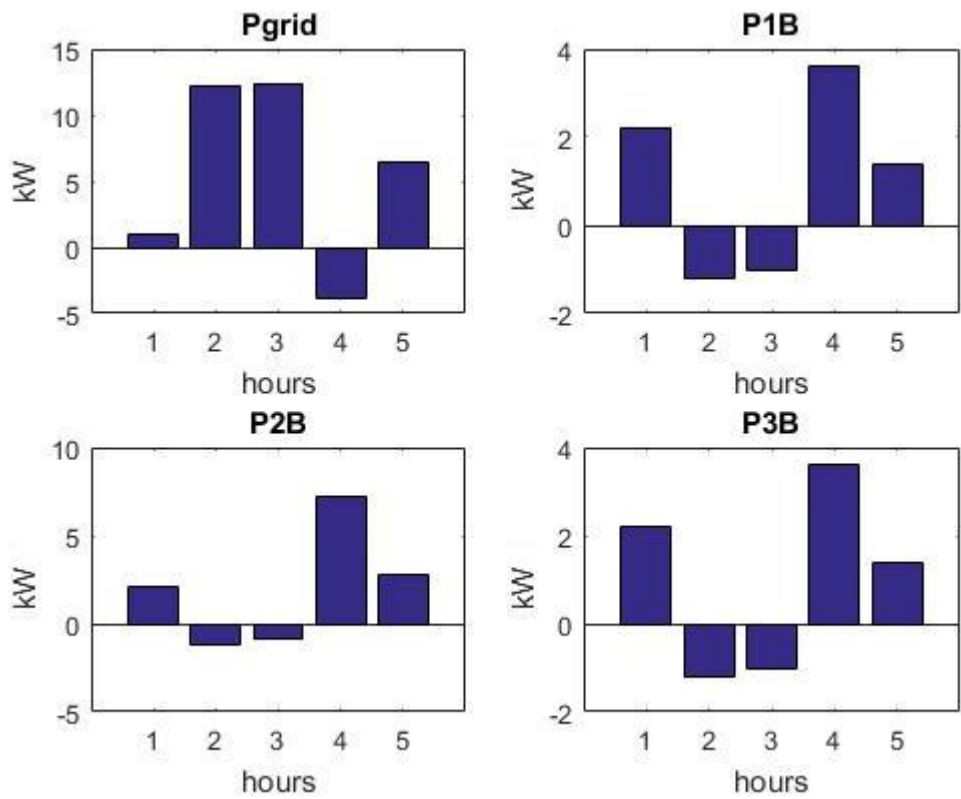
- **Εικόνα 92:** Παρατηρείται ότι οι μπαταρίες φορτίζουν όταν η τιμή είναι χαμηλότερη και αποφορτίζονται όταν η τιμή είναι υψηλότερη, προσφέροντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο.
- **Εικόνα 93:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 94:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 95,96:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση τους.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 203.42 cents, αυξημένο αφού αυξήσαμε την τιμή αγοράς της ενέργειας.

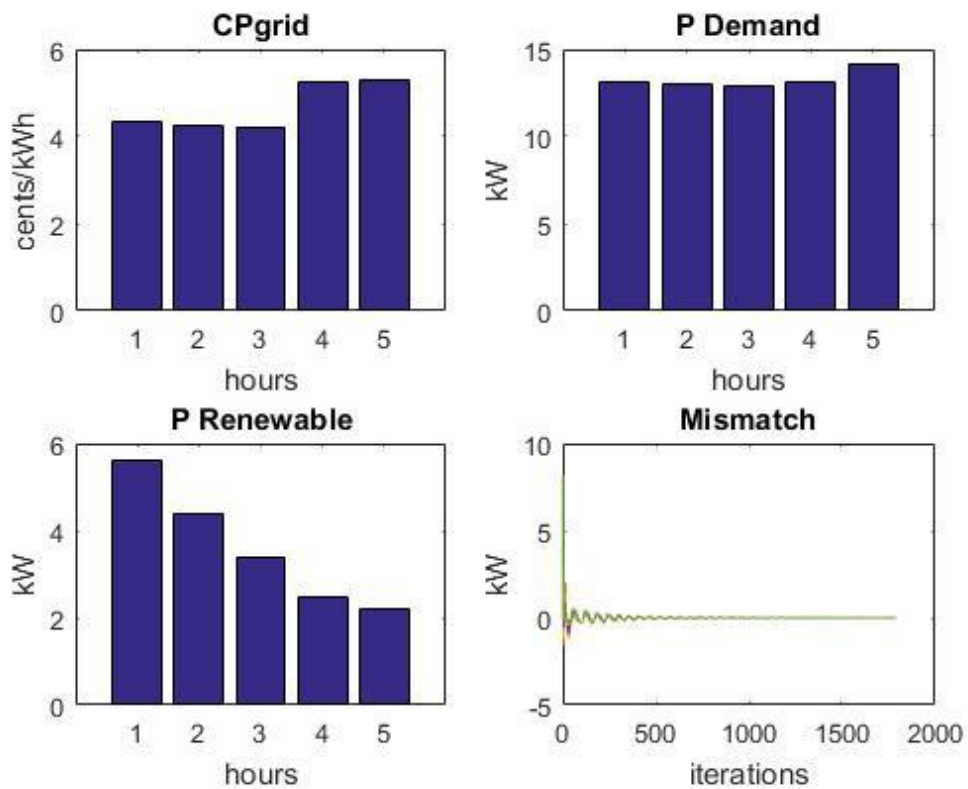
Περίπτωση 6: Αλλάζουμε την αρχική φόρτιση των μπαταριών σε αυτή την περίπτωση και συγκεκριμένα τις φορτίζουμε στη μέγιστη τιμή τους (Πίνακας 19):

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	5
4.24	13	4.4	10	10
4.22	12.9	3.4	5	5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

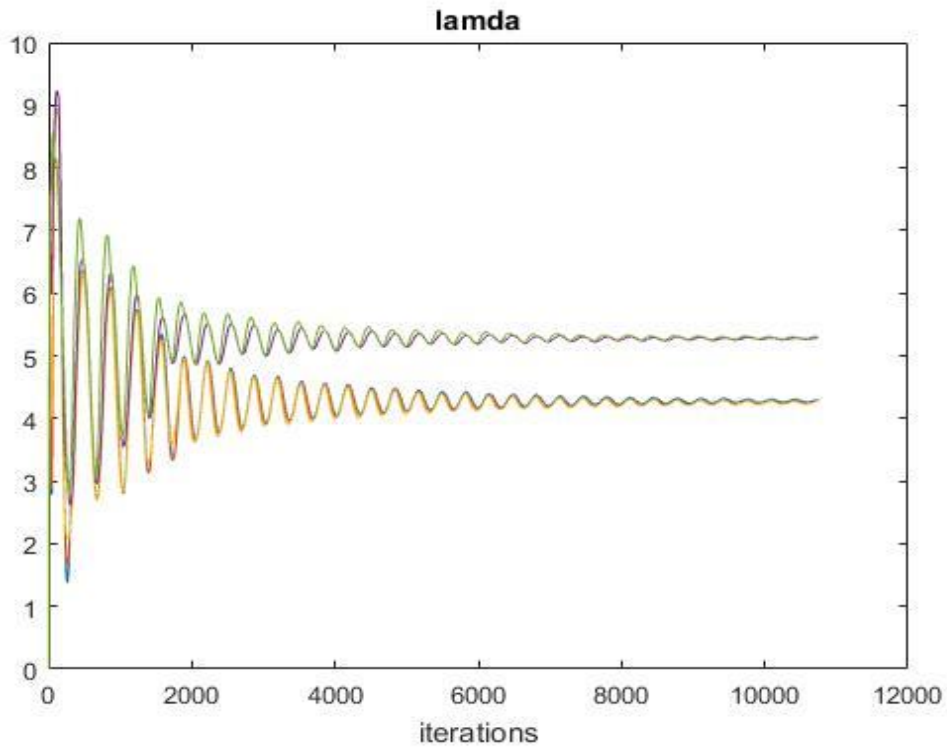
Πίνακας 19



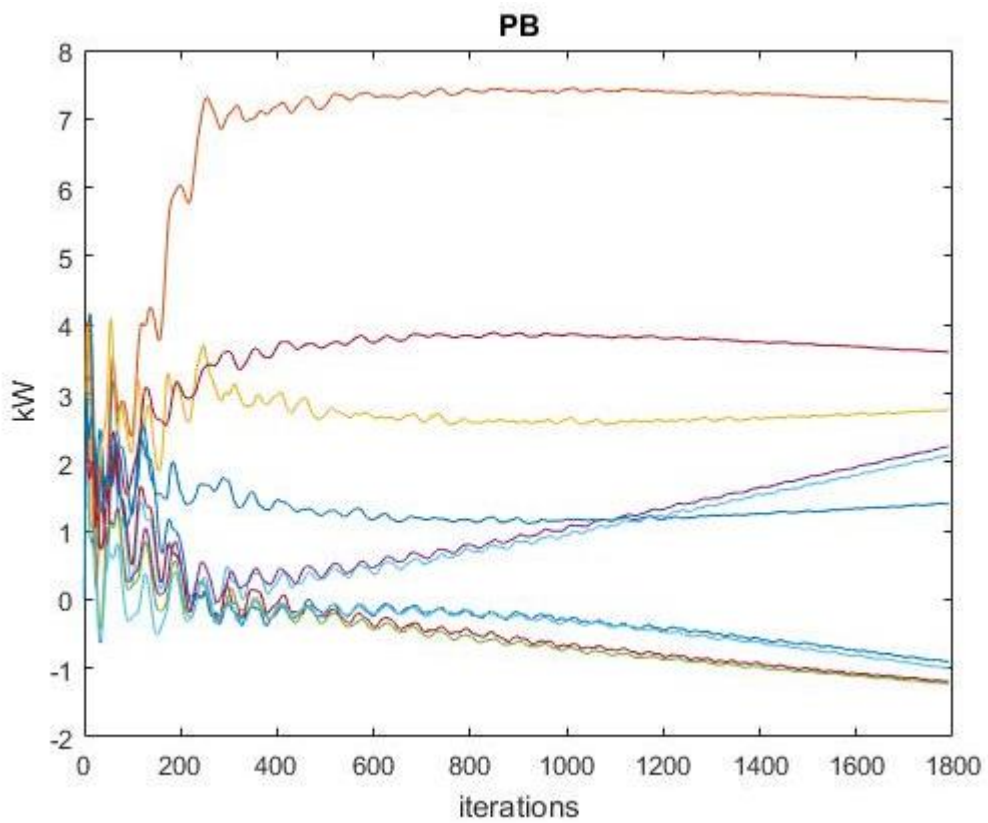
Εικόνα 97: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



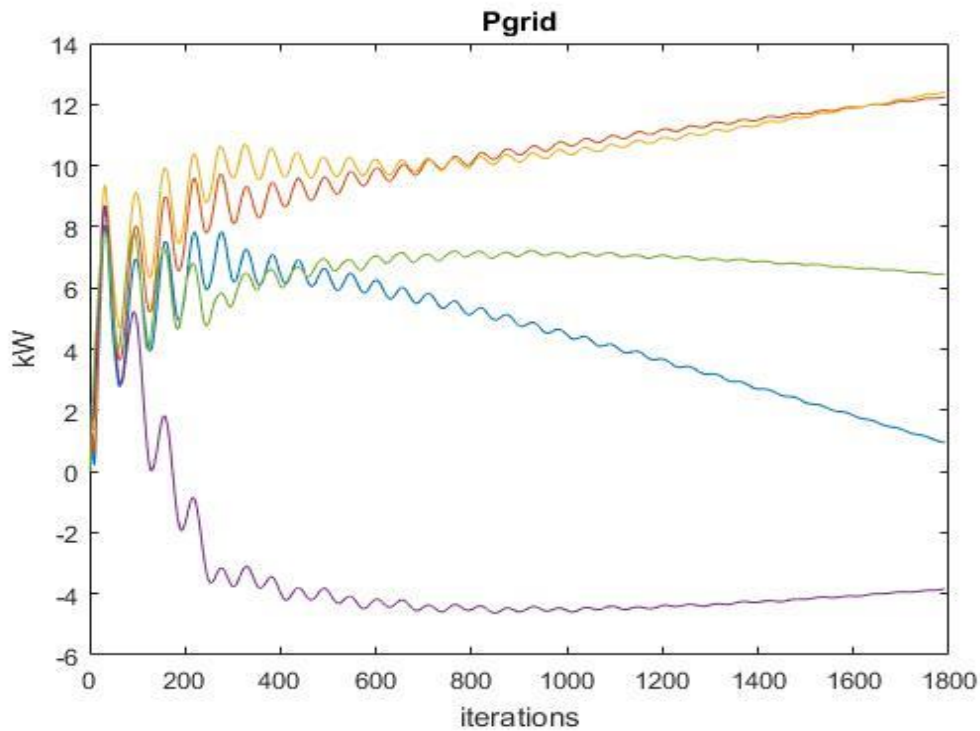
Εικόνα 98: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 99: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 100: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 101: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 97:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύουν οι μπαταρίες καθώς και ότι αυξάνεται η ποσότητα της ενέργειας που προσφέρουν στο δίκτυο ειδικότερα τις ώρες που η τιμή αγοράς είναι υψηλότερη (4^η και 5^η χρονική ώρα).
- **Εικόνα 98:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 99:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 100,101:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

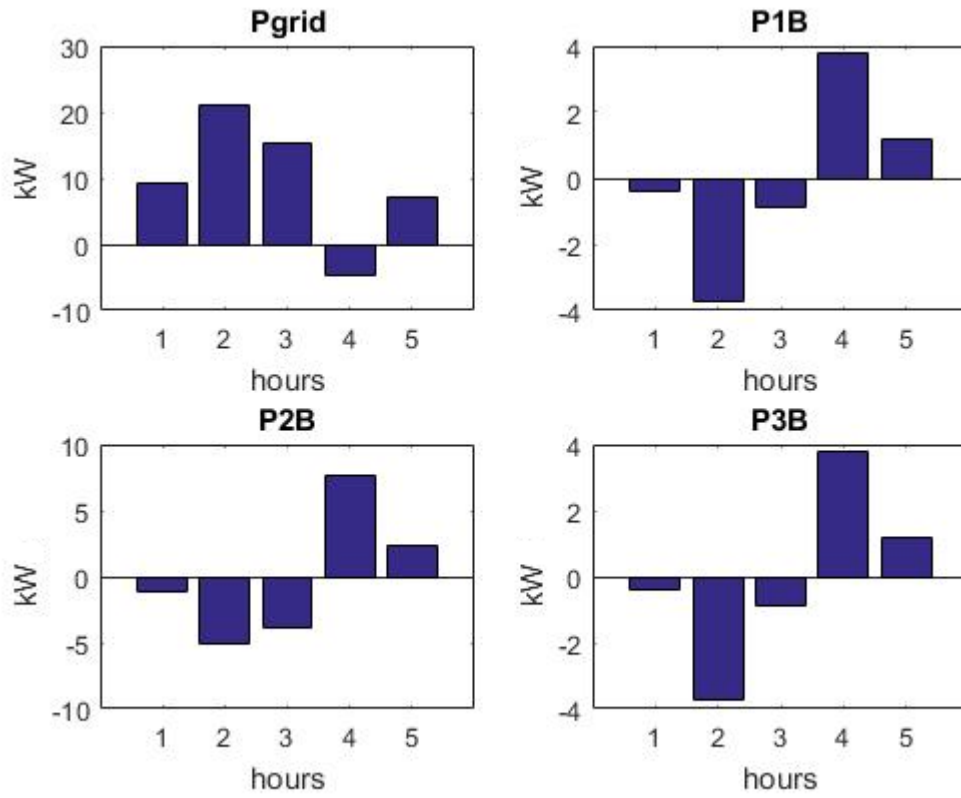
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 122.37 cents, αναμενόμενα μειωμένο αφού οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες, άρα έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν περισσότερη δωρεάν ενέργεια στο δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών.

Περίπτωση 7: Παρόμοια δεδομένα με πριν με τη διαφορά ότι οι μπαταρίες αρχικά είναι αφόρτιστες (Πίνακας 20):

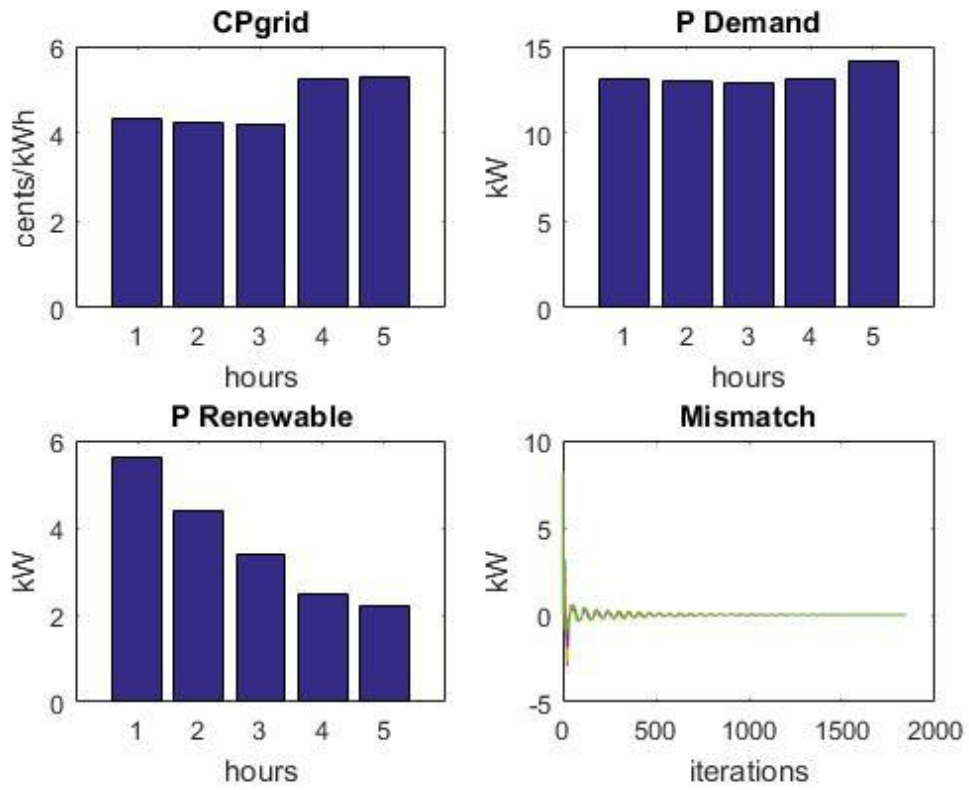
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	5	0
4.24	13	4.4	10	0
4.22	12.9	3.4	5	0

5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

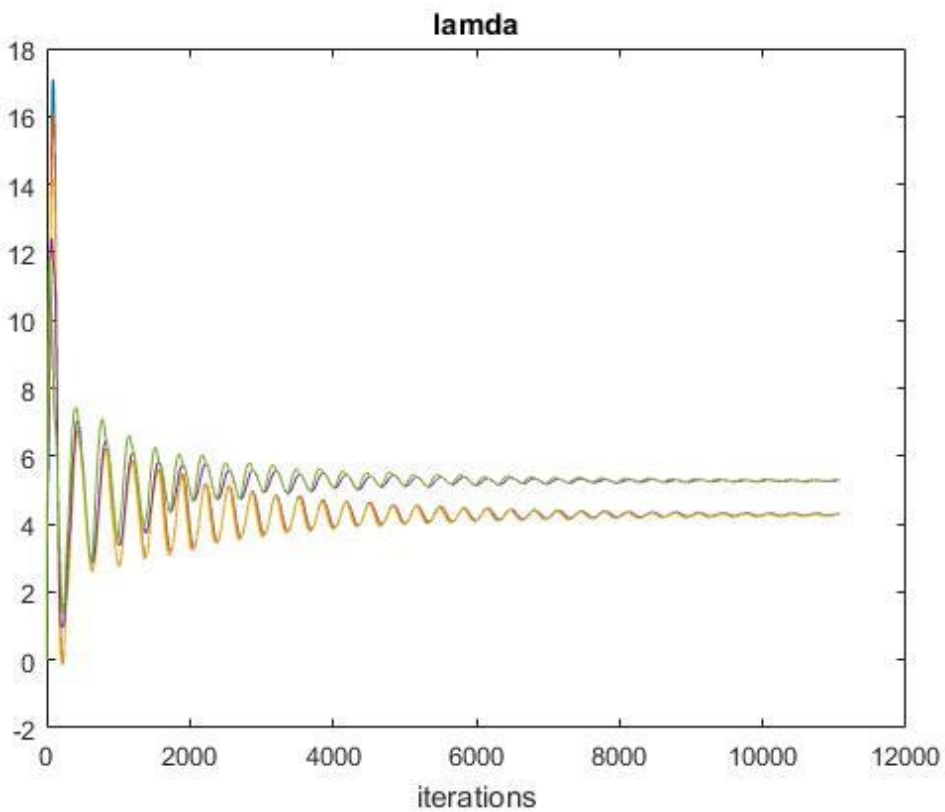
Πίνακας 20



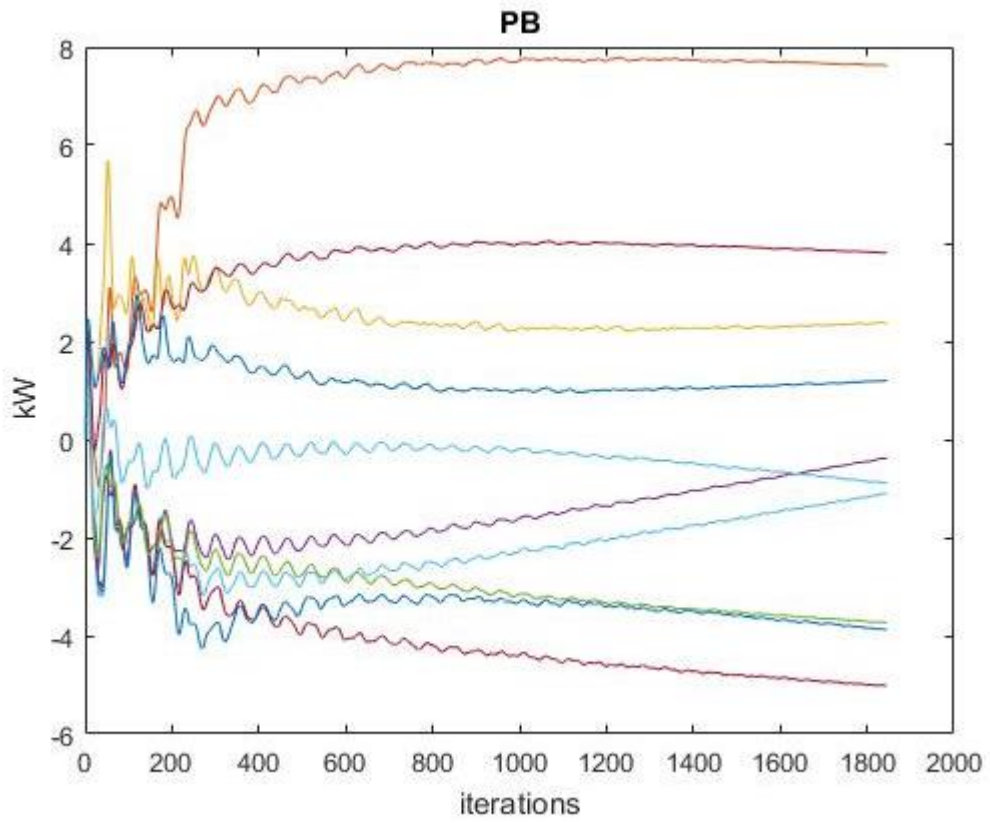
Εικόνα 102: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



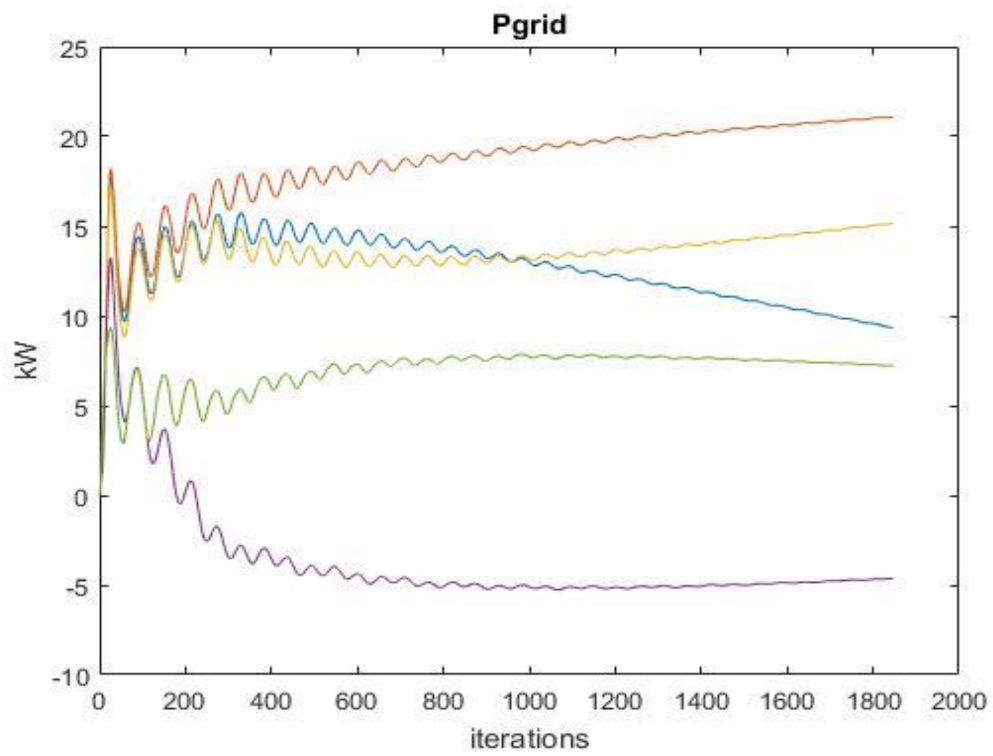
Εικόνα 103: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 104: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 105: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 106: Ισχύς δικτύου

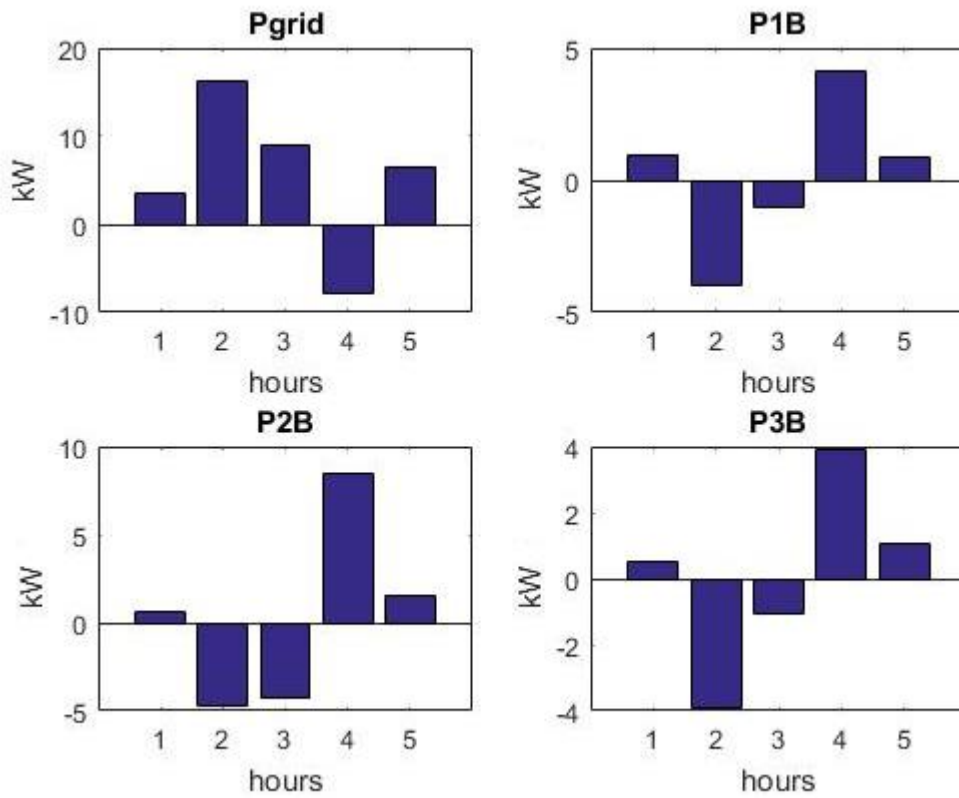
- **Εικόνα 102:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται η ροή ισχύος του δικτύου για την κάλυψη των αναγκών, αφού οι μπαταρίες αρχικά δεν προσφέρουν ενέργεια στο δίκτυο (αφόρτιστες).
- **Εικόνα 103:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 104:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 105,106:** Η ισχύς των μπαταριών και του δικτύου συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 207.92 cents, αυξημένο λόγω του γεγονότος ότι οι μπαταρίες αρχικά είναι αφόρτιστες, οπότε οι ανάγκες καλύπτονται σε μεγαλύτερο βαθμό από την ενέργεια που αγοράζεται. Στην περίπτωση με κεντρικό ελεγκτή το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 207.51 cents.

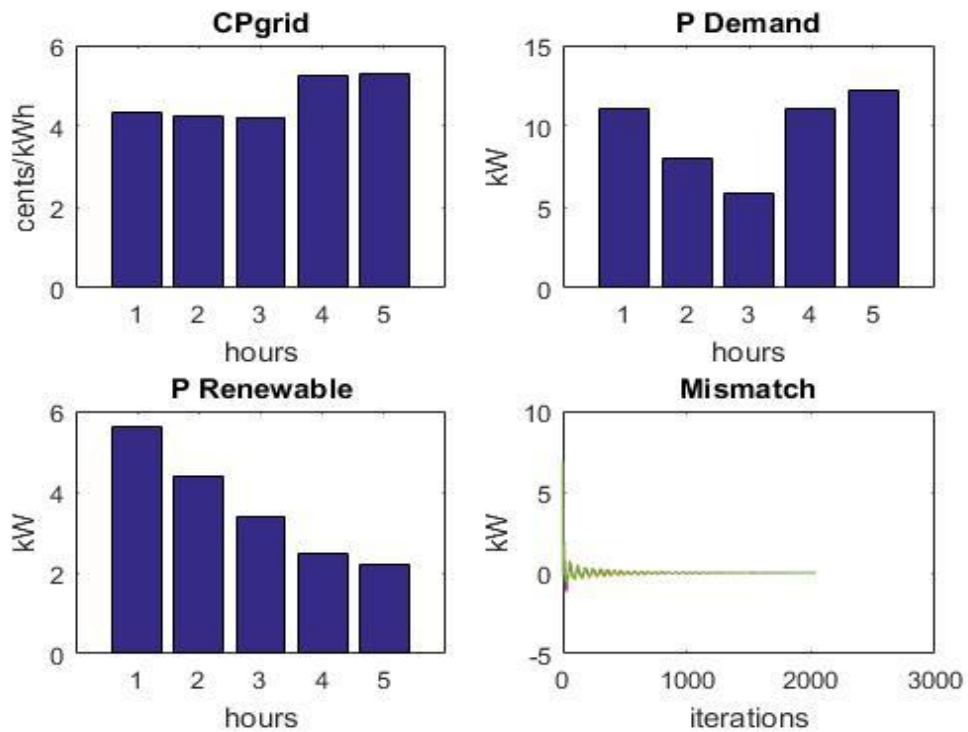
Περίπτωση 8: Μειώνουμε σε αυτή την περίπτωση τη ζήτηση, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 21:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	11.1	5.6	5	1
4.24	8	4.4	10	1.5
4.22	5.9	3.4	5	0.5
5.26	11.1	2.5		
5.3	12.2	2.2		

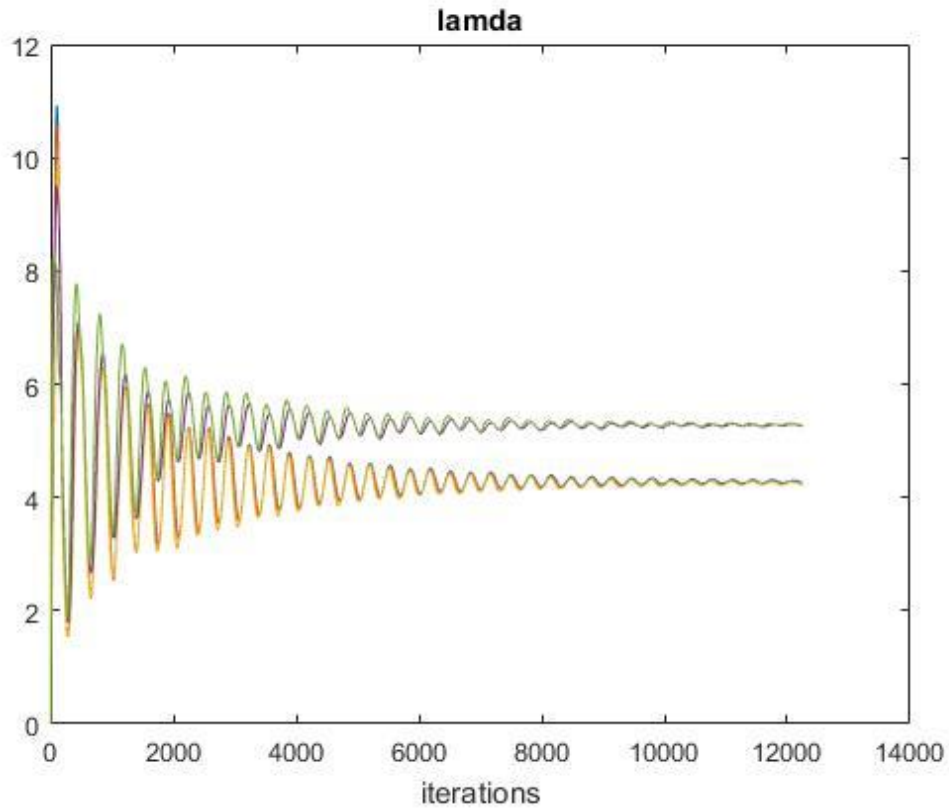
Πίνακας 21



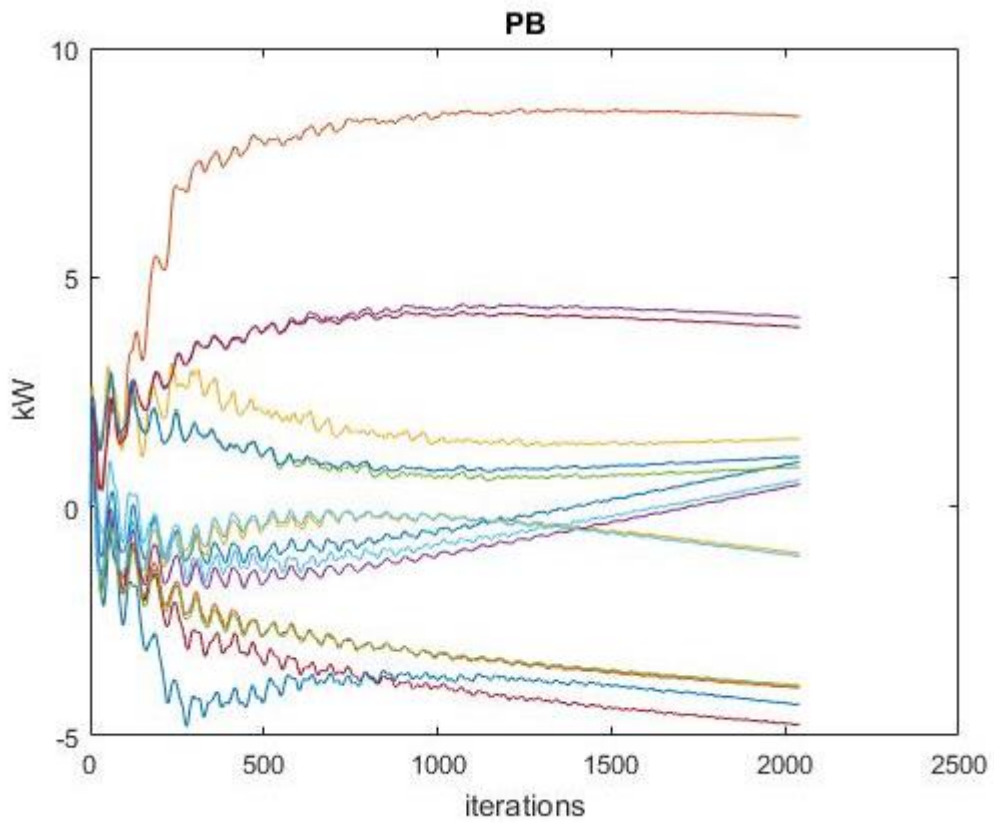
Εικόνα 107: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



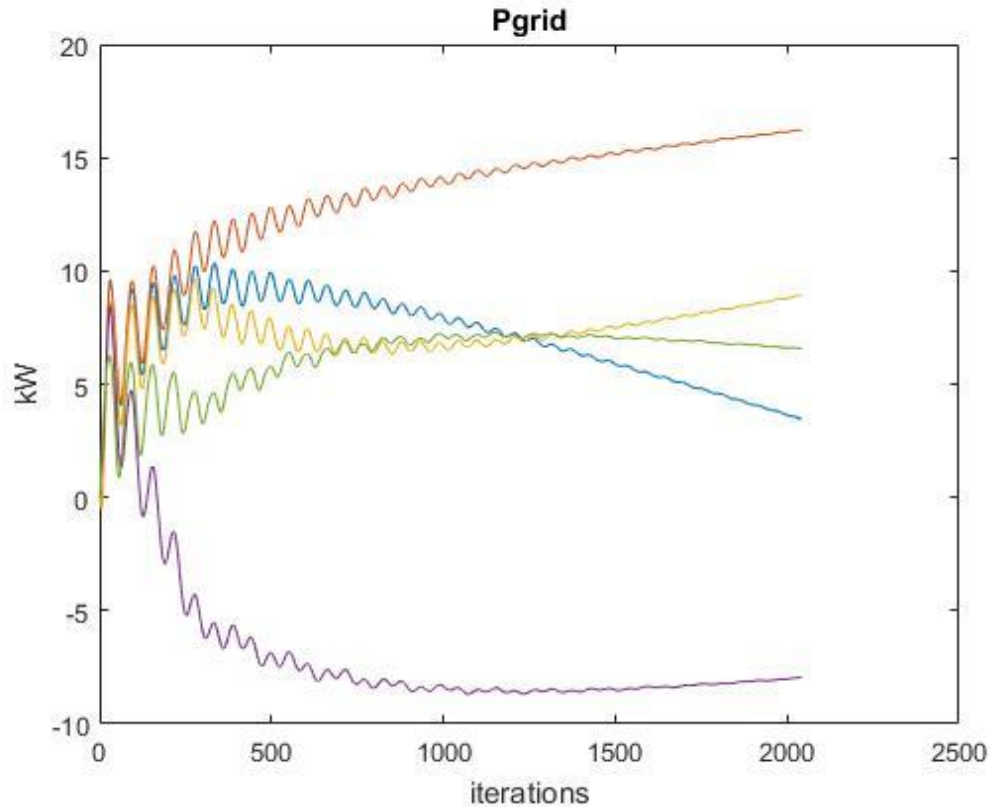
Εικόνα 108: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 109: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 110: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 111: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 107:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από το δίκτυο, γεγονός αναμενόμενο εφόσον μειώνεται η συνολική ζήτηση, δηλαδή μειώνονται οι ανάγκες που χρειάζεται να καλυφθούν. Οι μπαταρίες φορτίζουν τις ώρες που η τιμή αγοράς είναι χαμηλότερη και προσφέρουν ενέργεια όταν η τιμή είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 108:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 109:** Ο πολλαπλασιαστής Lagrange κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 110,111:** Η ισχύς των μπαταριών και του δικτύου συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

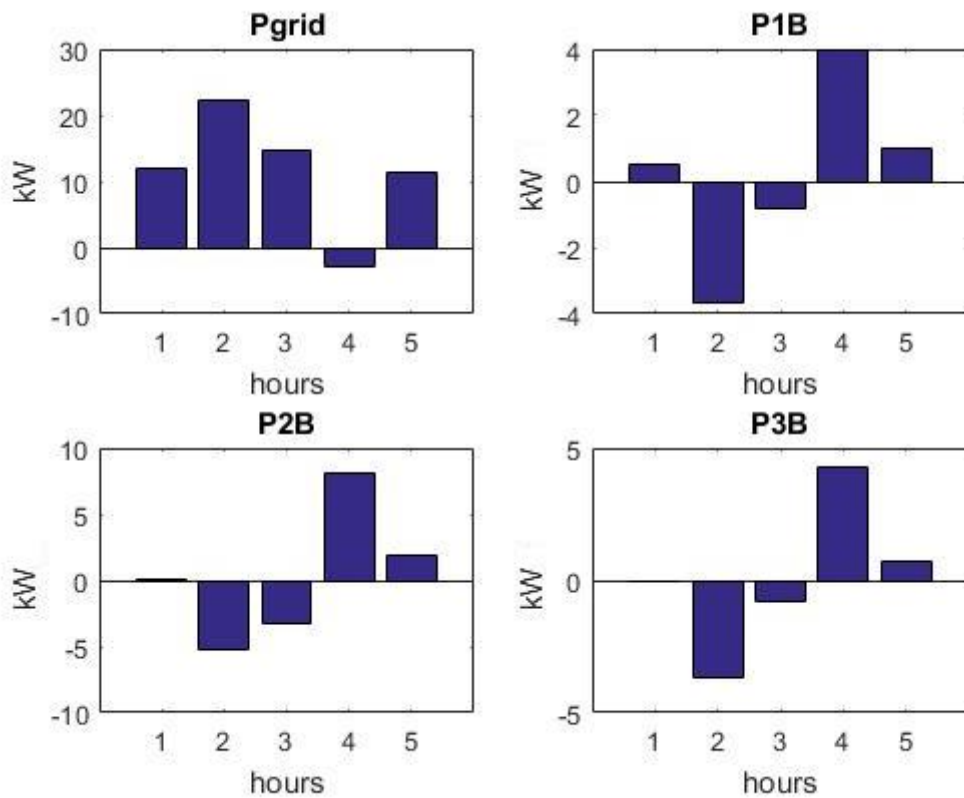
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 114.32 cents, μειωμένο αφού οι ανάγκες του δικτύου που πρέπει να ικανοποιηθούν είναι λιγότερες, άρα αγοράζεται λιγότερη ποσότητα ενέργειας. Στην περίπτωση κεντρικού ελεγκτή το συνολικό κόστος είναι 113.94 cents, πολύ κοντά δηλαδή στην περίπτωση με τον κατανεμημένο αλγόριθμο.

Περίπτωση 9: Παρόμοια με την παραπάνω περίπτωση με τη διαφορά ότι αυξάνουμε τη ζήτηση (Πίνακας 22):

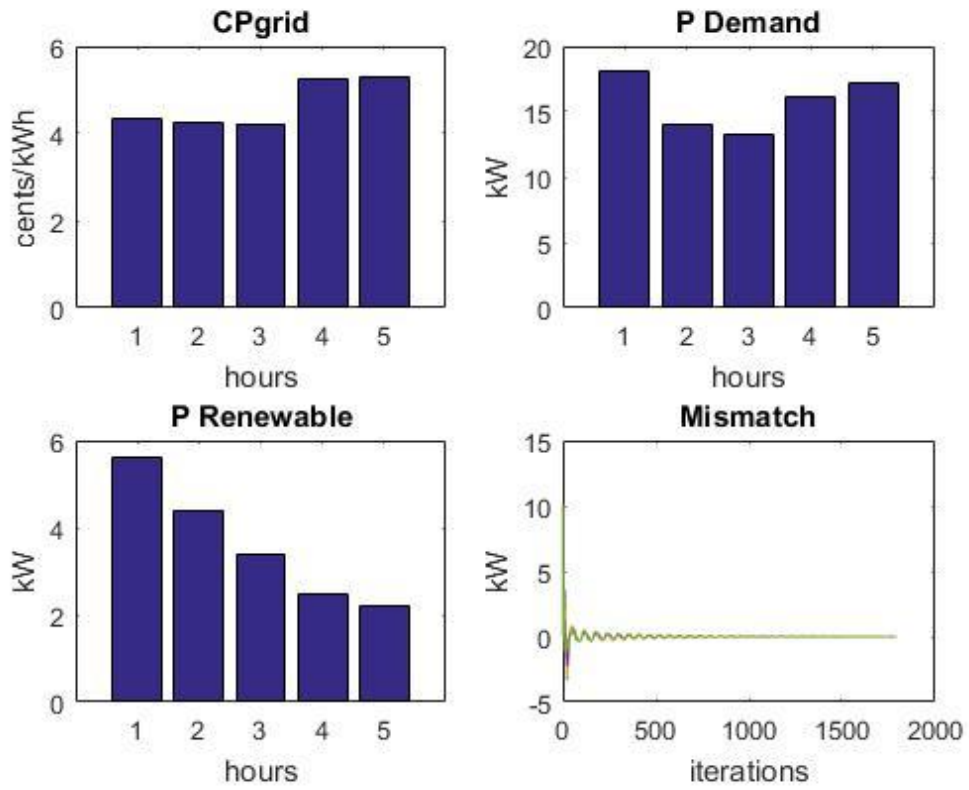
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
------------------	-------------	-------------------	--------------------------------------	--------------------------------

4.33	18.1	5.6	5	1
4.24	14	4.4	10	1.5
4.22	13.2	3.4	5	0.5
5.26	16.1	2.5		
5.3	17.2	2.2		

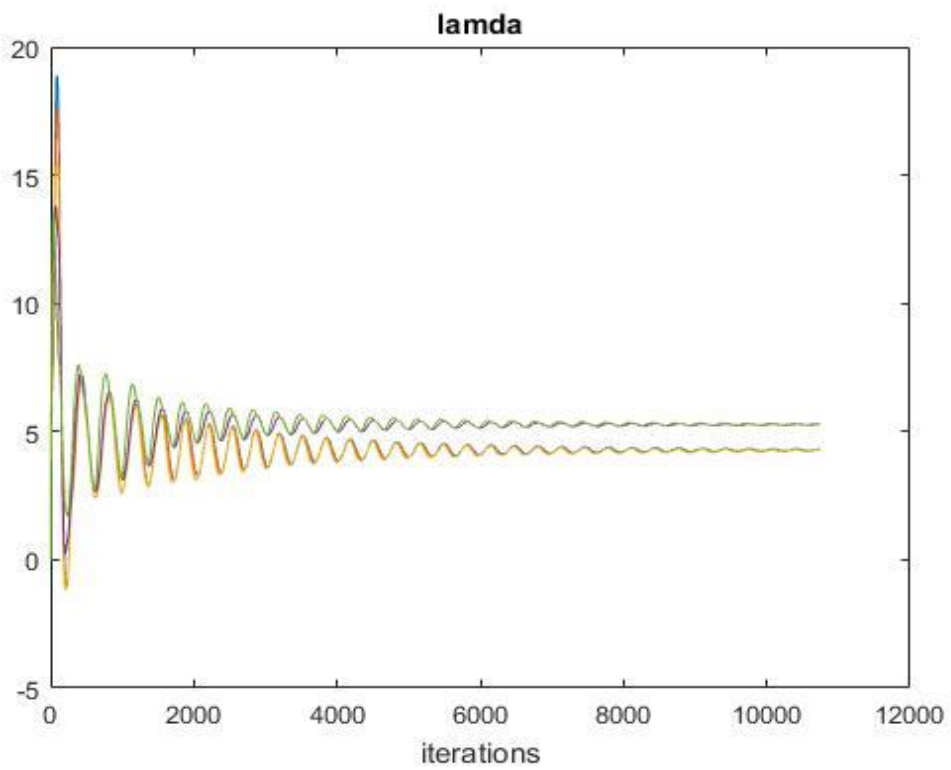
Πίνακας 22



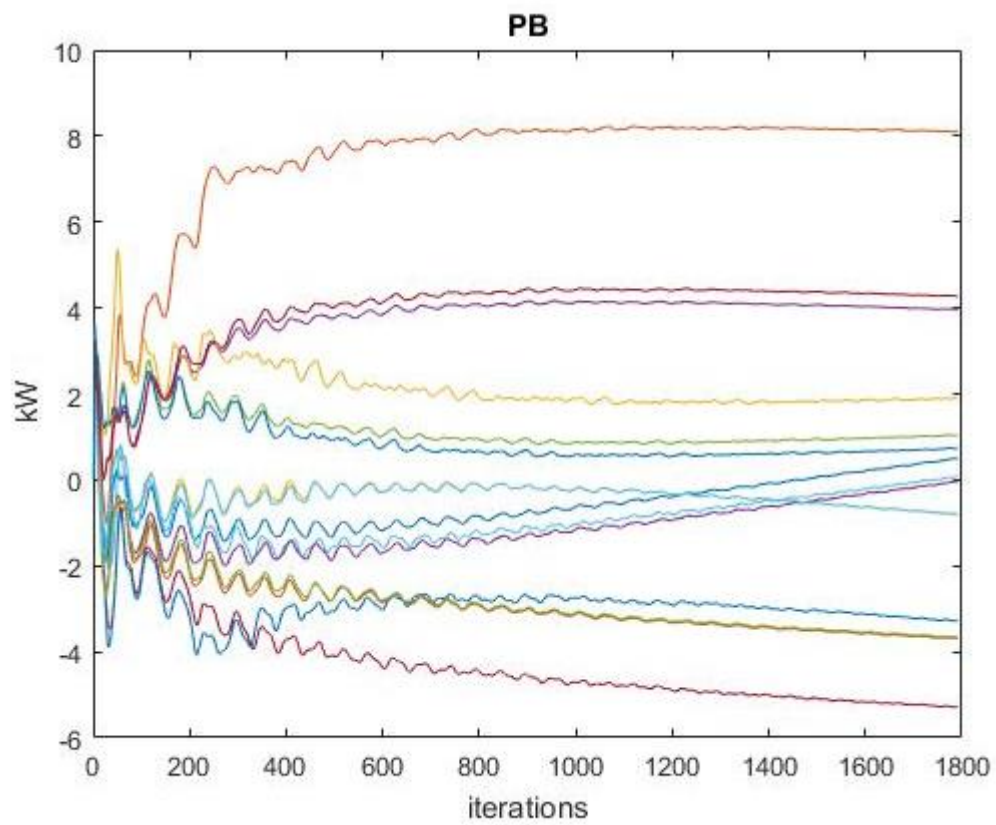
Εικόνα 112: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



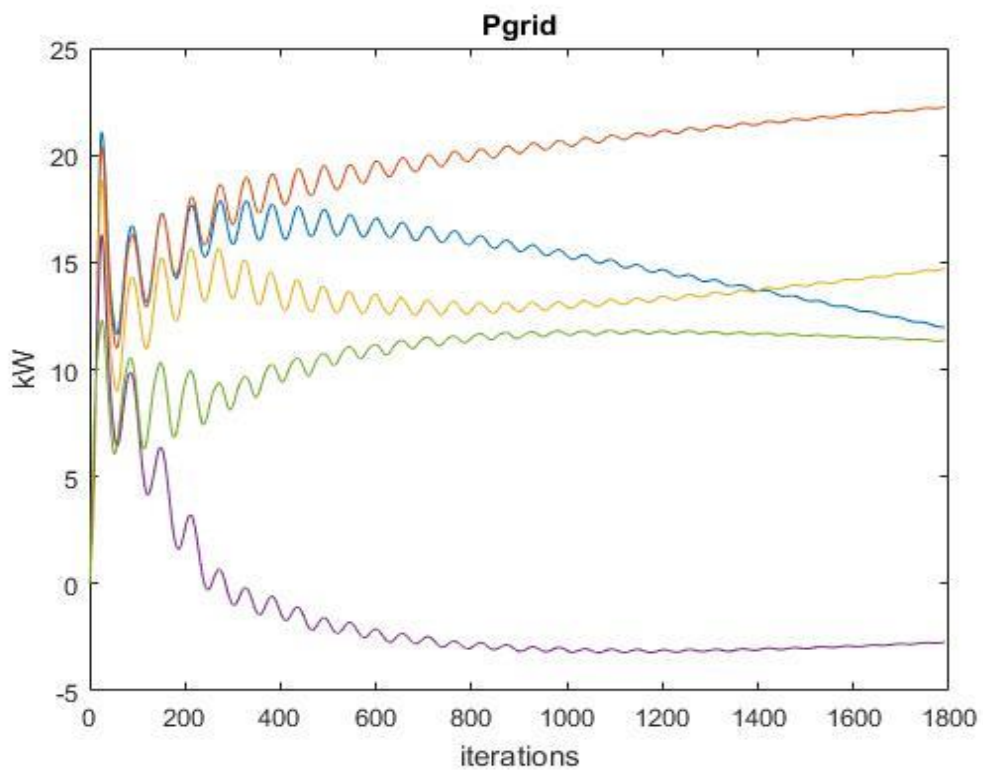
Εικόνα 113: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 114: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 115: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 116: Ισχύς δικτύου

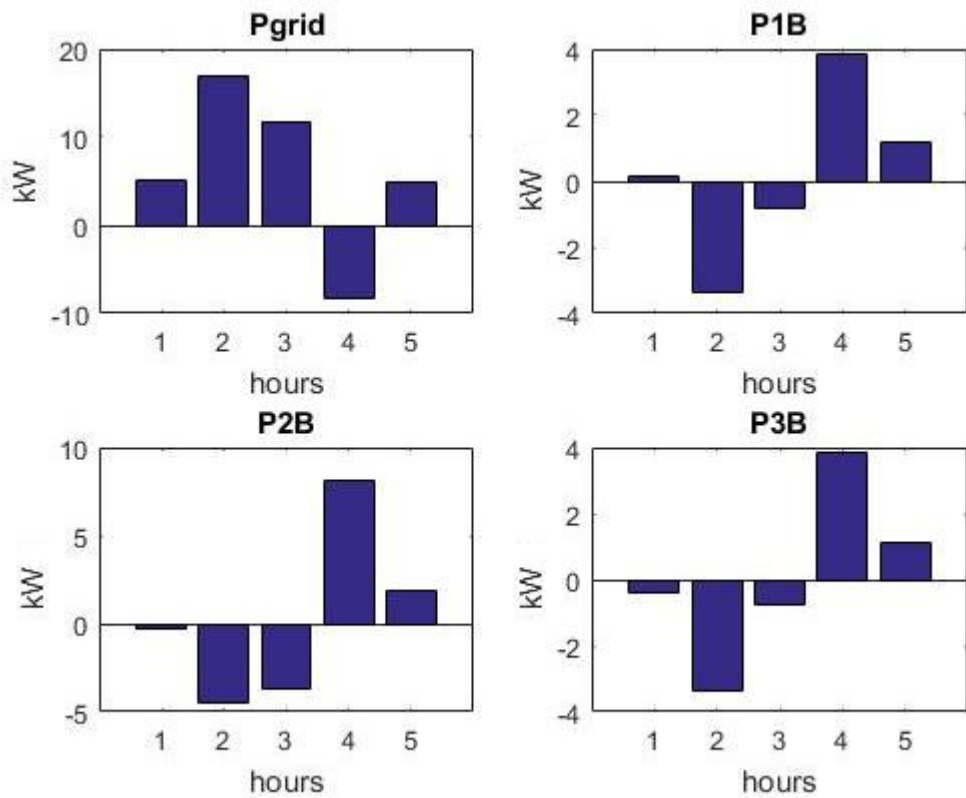
- **Εικόνα 112:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται γενικά η ισχύς του δικτύου, αφού η ζήτηση αυξάνεται. Οι μπαταρίες έχουν την ίδια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή φορτίζουν όταν η τιμή είναι χαμηλότερη και δίνουν ενέργεια στο δίκτυο όταν η τιμή είναι υψηλότερη.
- **Εικόνα 113:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 114:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 115,116:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 253.91 cents, αυξημένο, άμεση συνέπεια της αύξησης της ζήτησης αφού το δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών αγοράζει περισσότερη ενέργεια. Το κόστος αυτό προσεγγίζει πάλι την περίπτωση με κεντρικό ελεγκτή (253.45 cents) που είναι και το ζητούμενο.

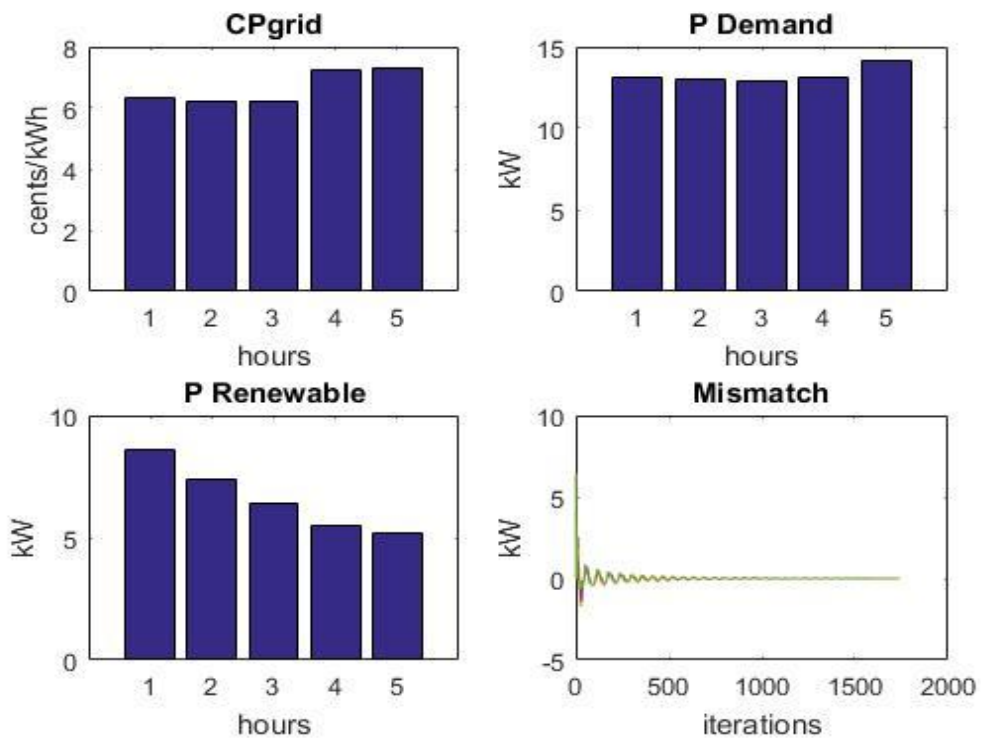
Περίπτωση 10: Συνδυάζονται οι περιπτώσεις, όπου αυξάνεται η παραγωγή των ΑΠΕ καθώς και η τιμή αγοράς ενέργειας (Πίνακας 23):

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
6.33	13.1	8.6	5	1
6.24	13	7.4	10	1.5
6.22	12.9	6.4	5	0.5
7.26	13.1	5.5		
7.3	14.2	5.2		

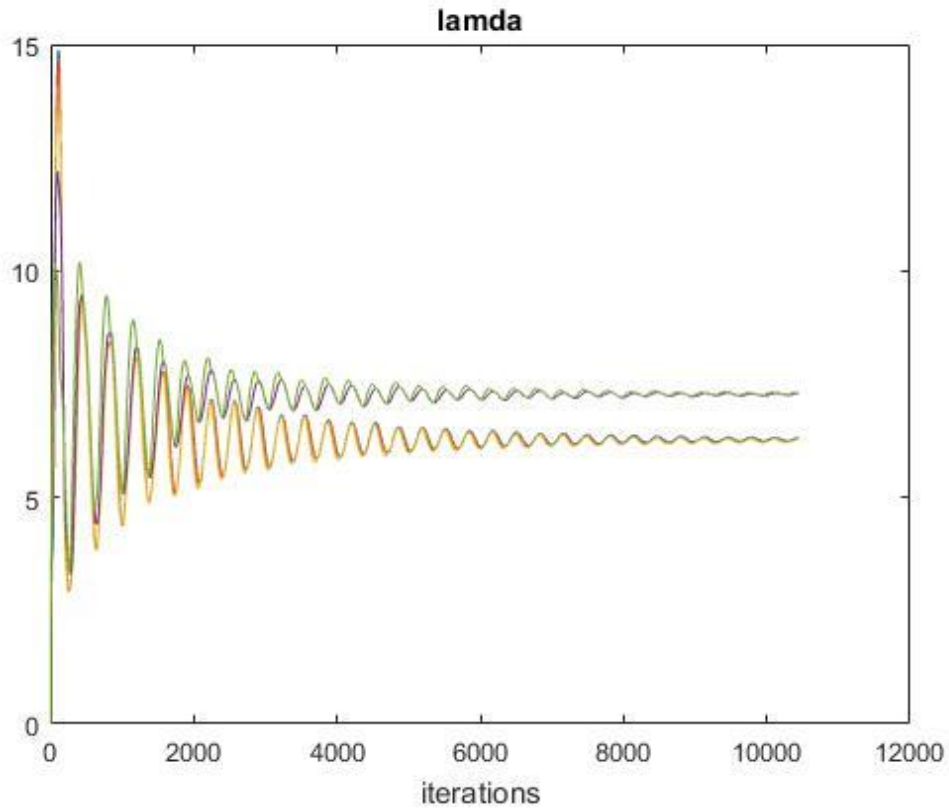
Πίνακας 23



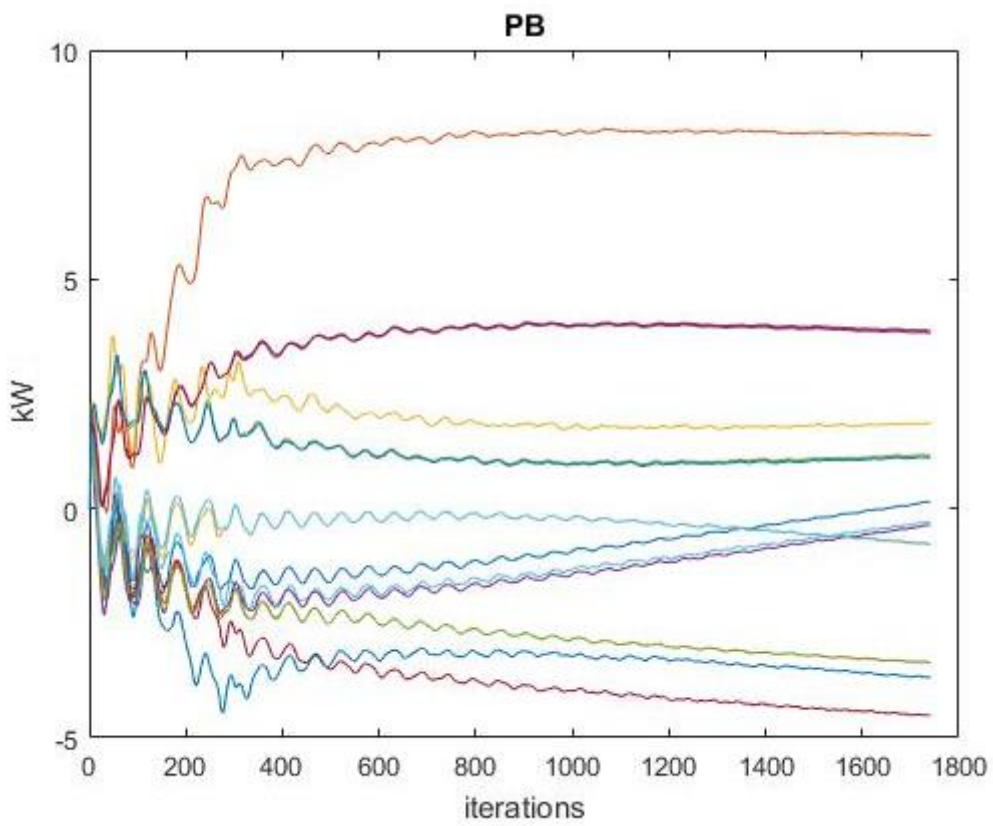
Εικόνα 117: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



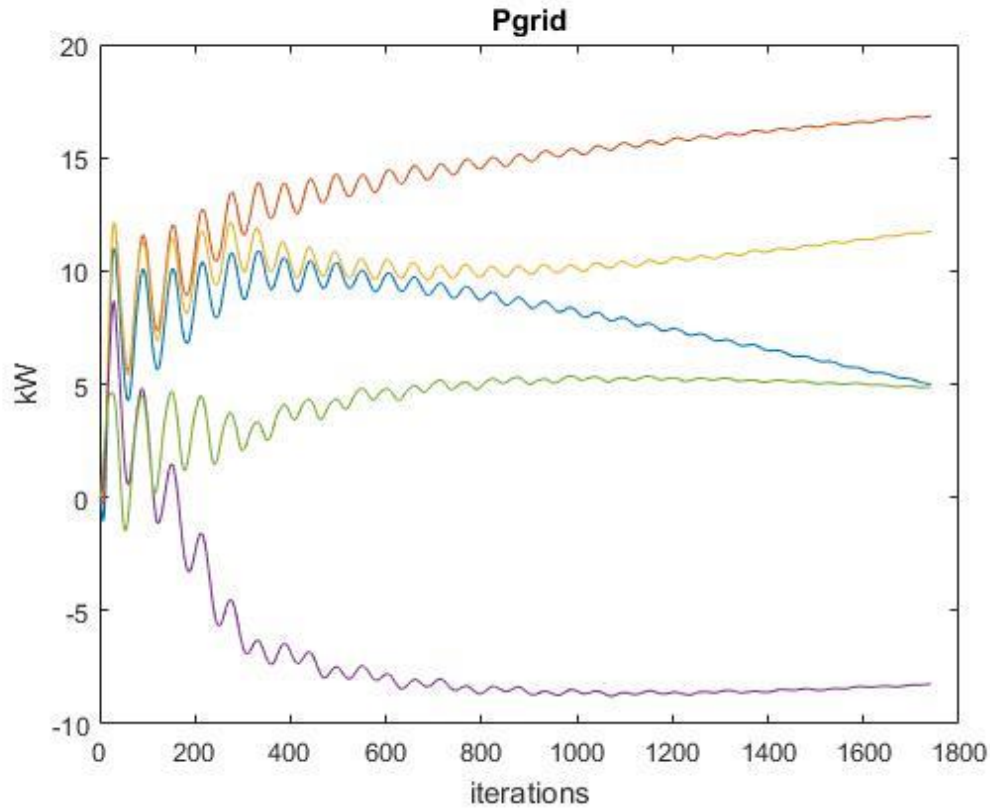
Εικόνα 118: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 119: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 120: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 121: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 117:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο, αφού αυξάνεται η ποσότητα ενέργειας από ΑΠΕ και αυξάνεται η τιμή αγοράς, άρα καλύπτεται μεγαλύτερο ποσοστό αναγκών από δωρεάν ενέργεια.
- **Εικόνα 118:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι και το ζητούμενο.
- **Εικόνα 119:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρα συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 120,121:** Η ισχύς των μπαταριών και του δικτύου συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

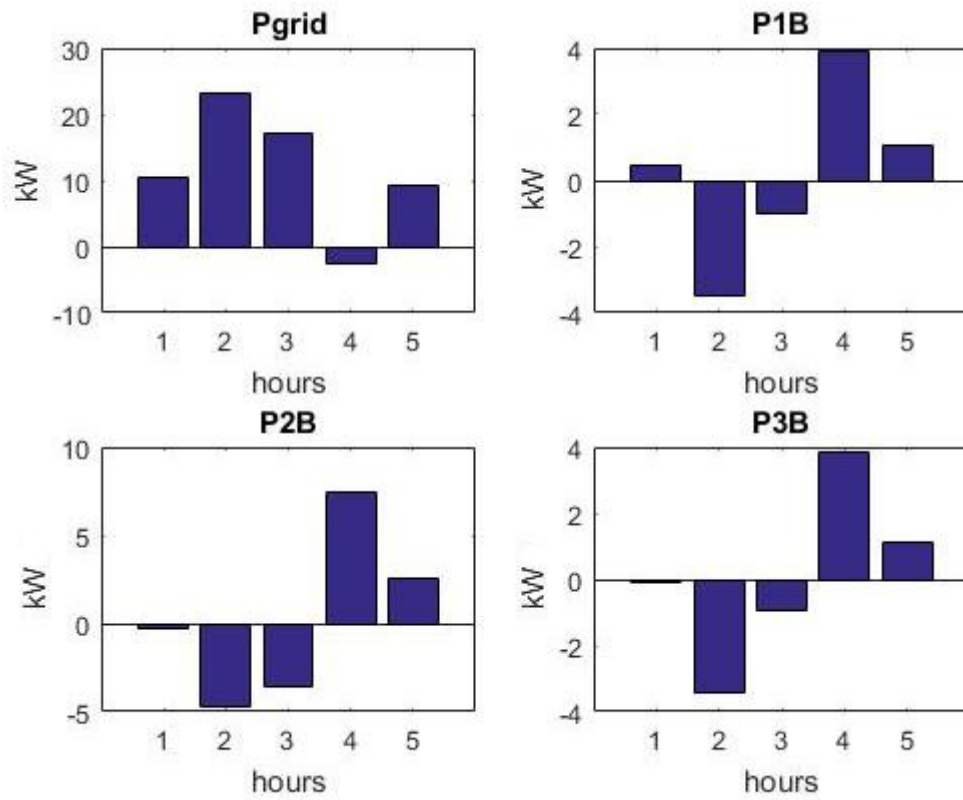
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 185.64 cents, μειωμένο παρά την αύξηση της τιμής αγοράς της ενέργειας, αφού αυξάνεται σημαντικά η παραγωγή των ΑΠΕ. Στην περίπτωση κεντρικού ελεγκτή το συνολικό κόστος είναι 184.94 cents, δηλαδή οι δύο τιμές κυμαίνονται αρκετά κοντά.

Περίπτωση 11: Σε αυτή την περίπτωση μειώνουμε την παραγωγή των ΑΠΕ και την τιμή αγοράς της ενέργειας (Πίνακας 24):

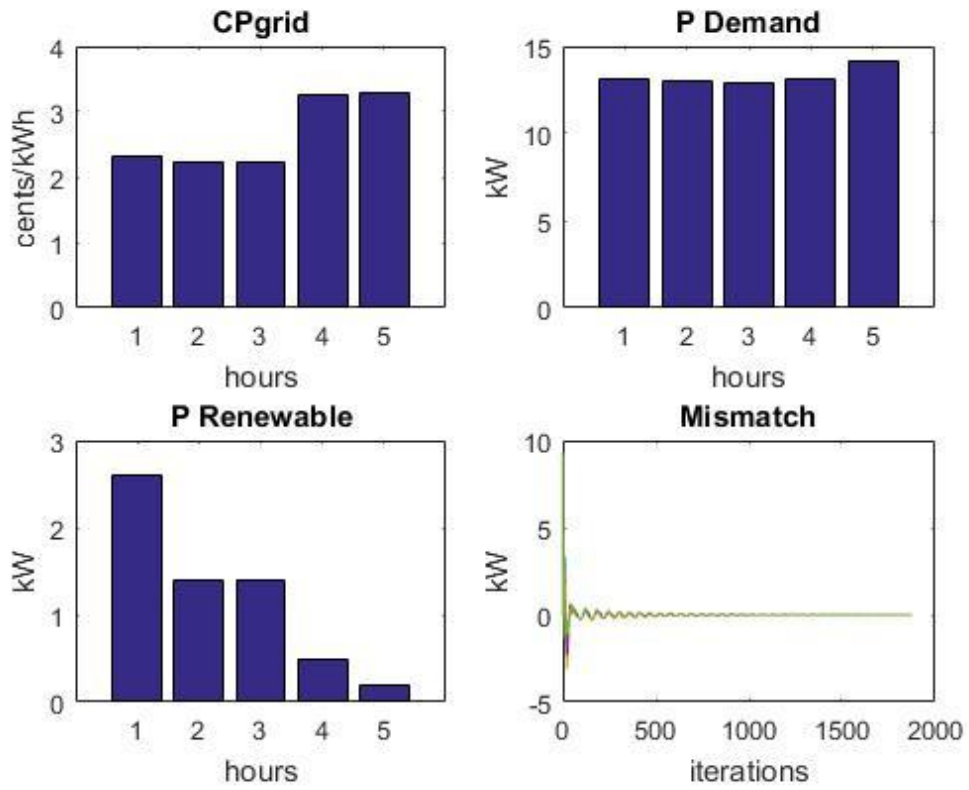
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
2.33	13.1	2.6	5	1
2.24	13	1.4	10	1.5

2.22	12.9	1.4	5	0.5
3.26	13.1	0.5		
3.3	14.2	0.2		

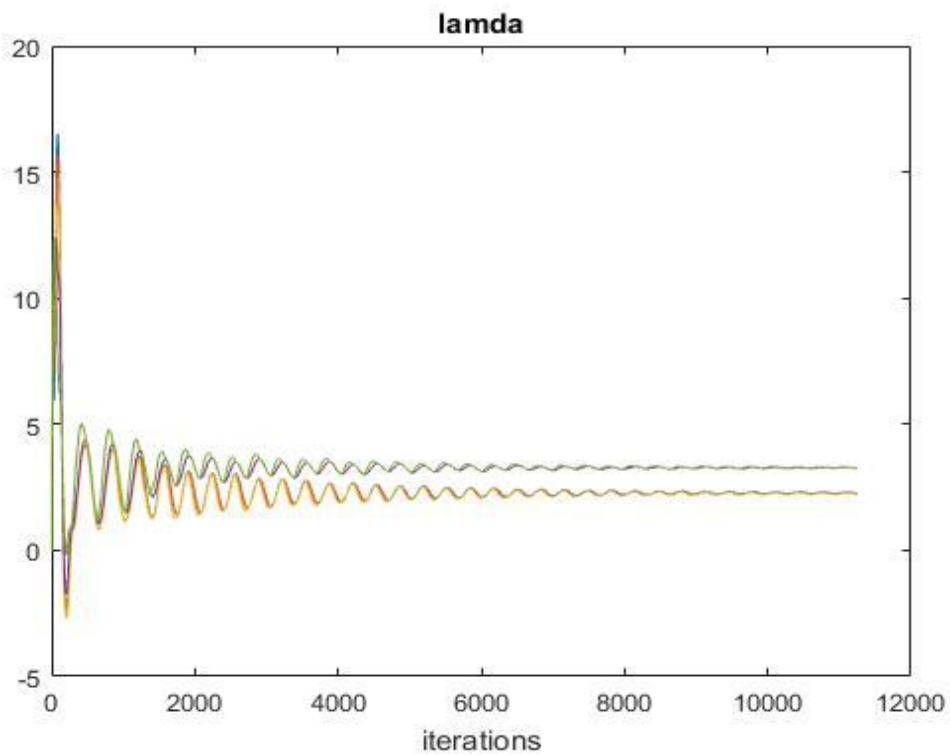
Πίνακας 24



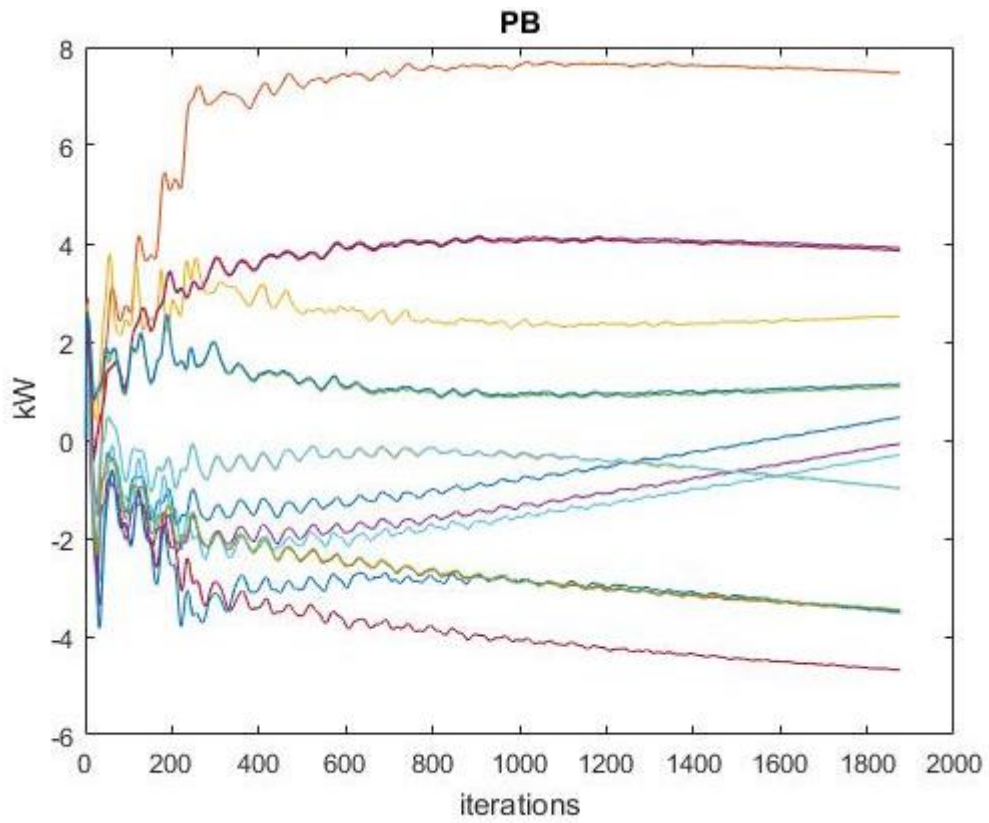
Εικόνα 122: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



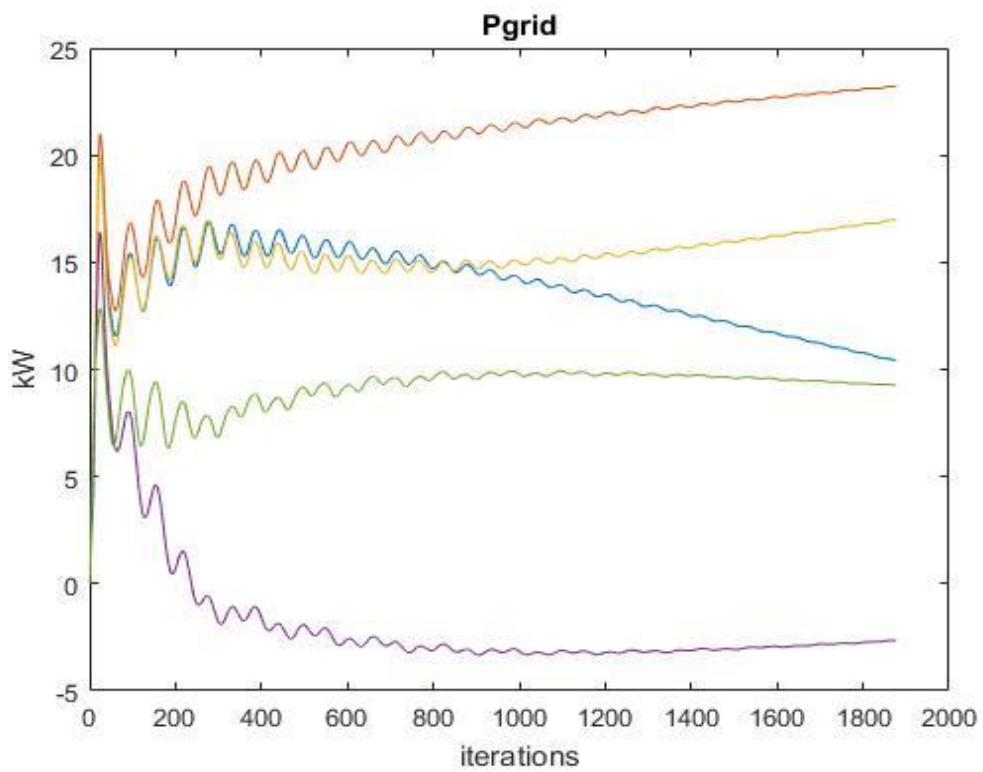
Εικόνα 123: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 124: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 125: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 126: Ισχύς δικτύου

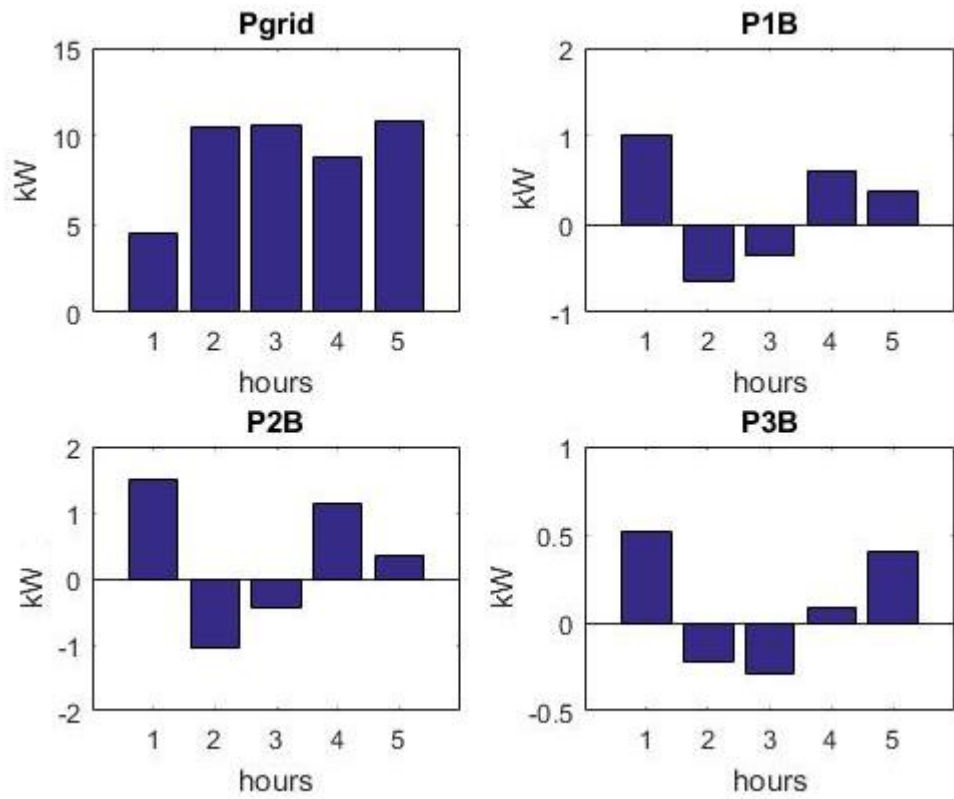
- **Εικόνα 122:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται η ισχύς του δικτύου, απόρροια της μείωσης της παραγωγής των ΑΠΕ και της ανάγκης κάλυψης των αναγκών από το δίκτυο.
- **Εικόνα 123:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 124:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 125,126:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 135.82 cents, αρκετά μειωμένο παρά τη μείωση της παραγωγής των ΑΠΕ, αφού το δίκτυο αγοράζει ενέργεια σε τιμή αρκετά χαμηλότερη. Στην αντίστοιχη περίπτωση του προηγούμενου κεφαλαίου το κόστος είναι 135.61 cents.

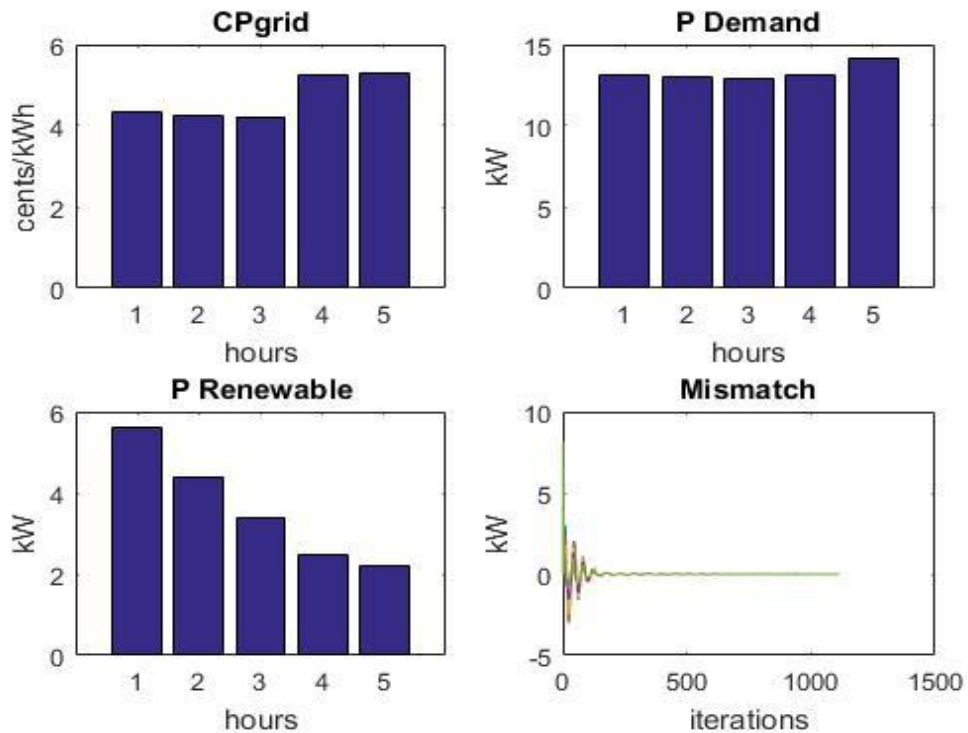
Περίπτωση 12: Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται η μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, όπως περιγράφεται στον Πίνακα 25:

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kWh)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	1	1
4.24	13	4.4	1.5	1.5
4.22	12.9	3.4	0.5	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

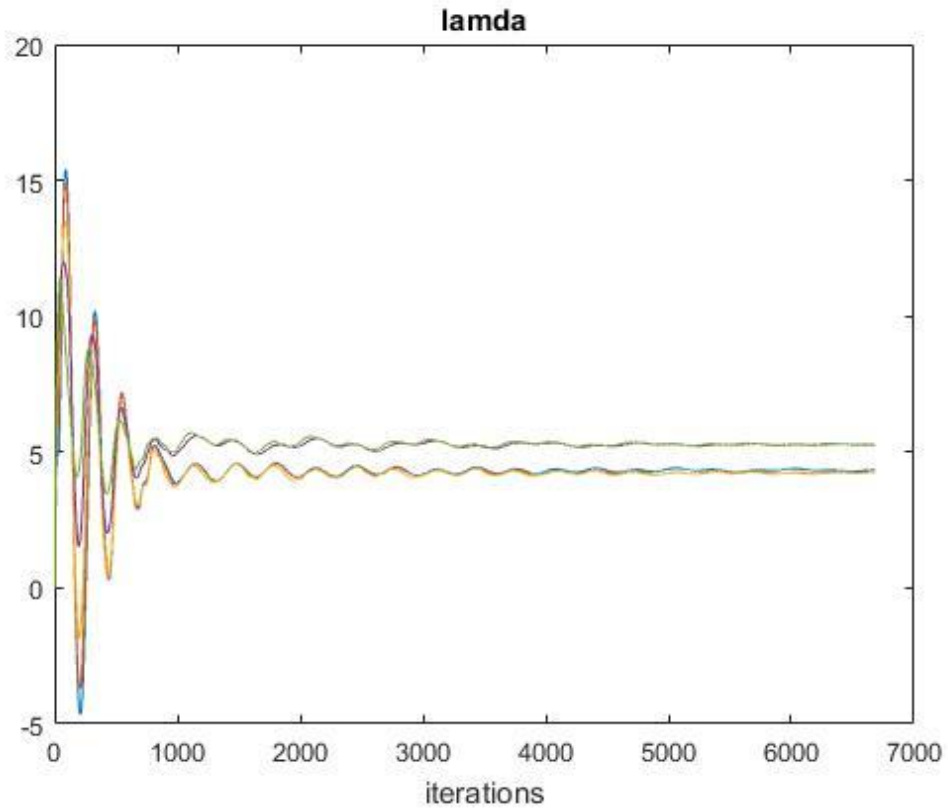
Πίνακας 25



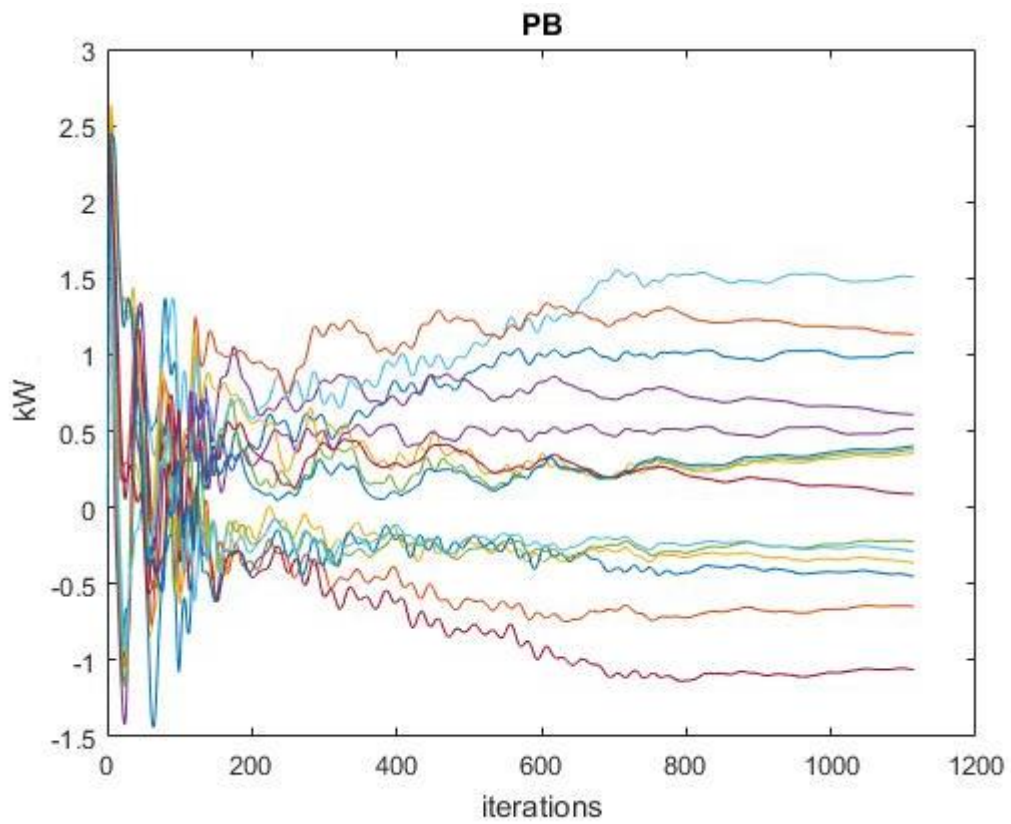
Εικόνα 127: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



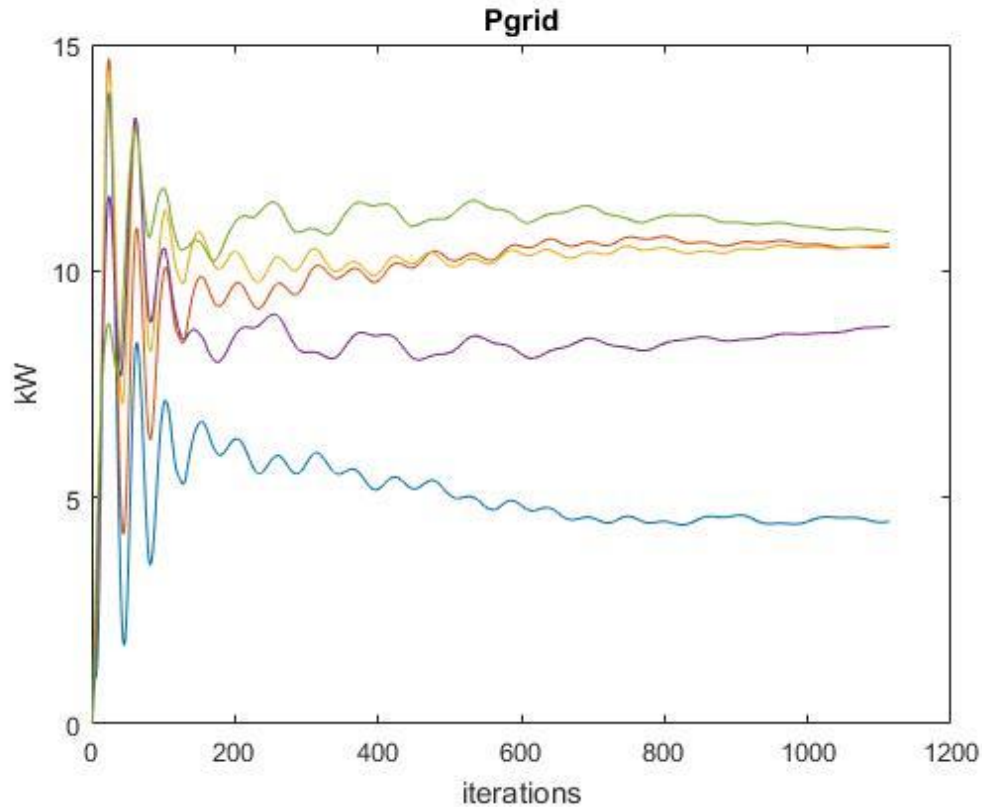
Εικόνα 128: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 129: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 130: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 131: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 127:** Παρατηρείται ότι αυξάνεται σημαντικά η ροή ισχύος του δικτύου, αφού οι μπαταρίες έχοντας μικρότερη χωρητικότητα αδυνατούν να προσφέρουν την ίδια ποσότητα ενέργειας με πριν.
- **Εικόνα 128:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη ζητούμενη μηδενική τιμή.
- **Εικόνα 129:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 130,131:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

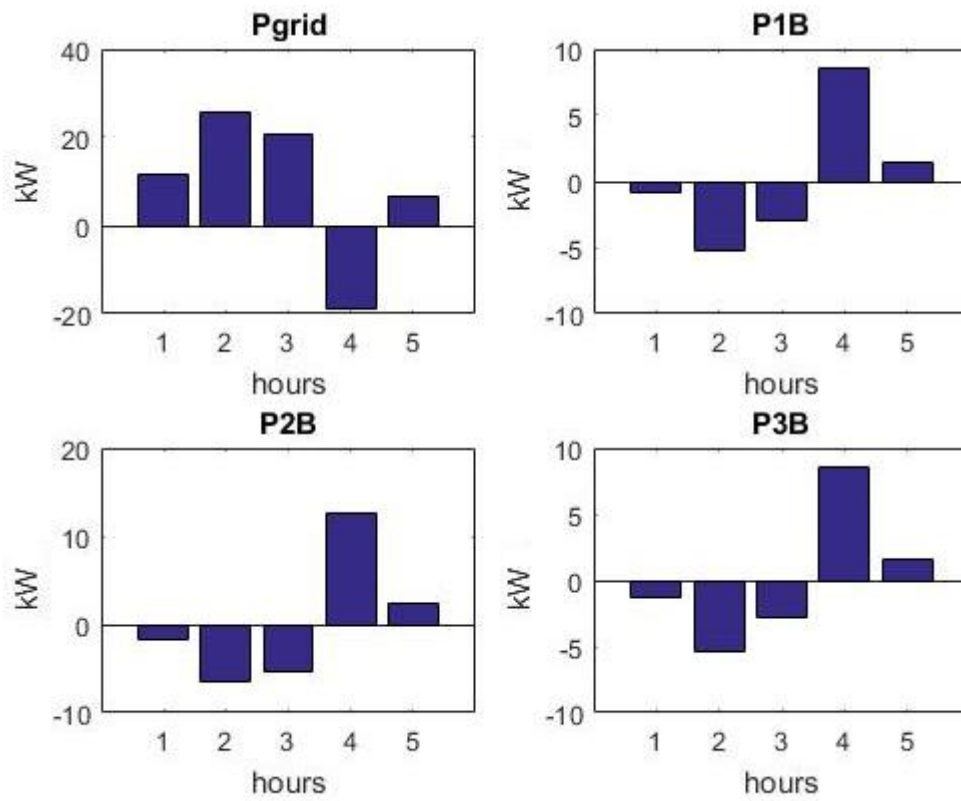
Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 212.46 cents, αυξημένο επειδή η χωρητικότητα των μπαταριών έχει μειωθεί με αποτέλεσμα να μην προσφέρουν την ίδια ενέργεια στο δίκτυο, το οποίο αναγκάζεται να αγοράσει περισσότερη ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών. Σε περίπτωση με κεντρικό ελεγκτή το συνολικό κόστος είναι 212.26 cents.

Περίπτωση 13: Παρόμοια περίπτωση με πριν με τη διαφορά ότι αυξάνουμε τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών (Πίνακας 26):

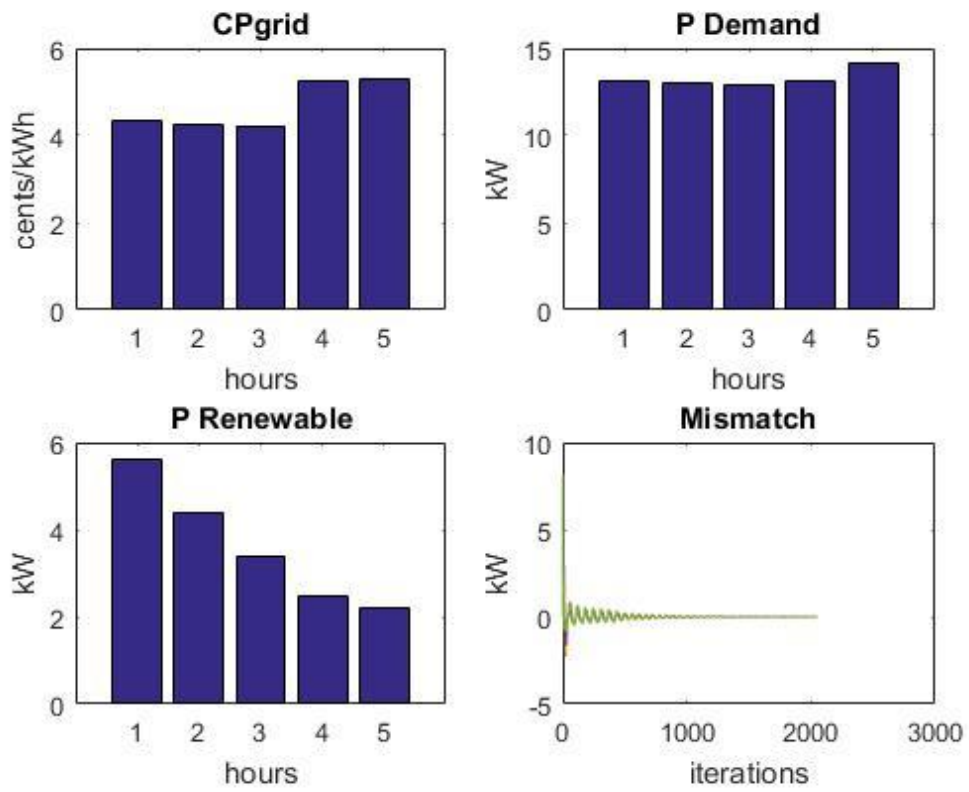
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
4.33	13.1	5.6	10	1
4.24	13	4.4	15	1.5

4.22	12.9	3.4	10	0.5
5.26	13.1	2.5		
5.3	14.2	2.2		

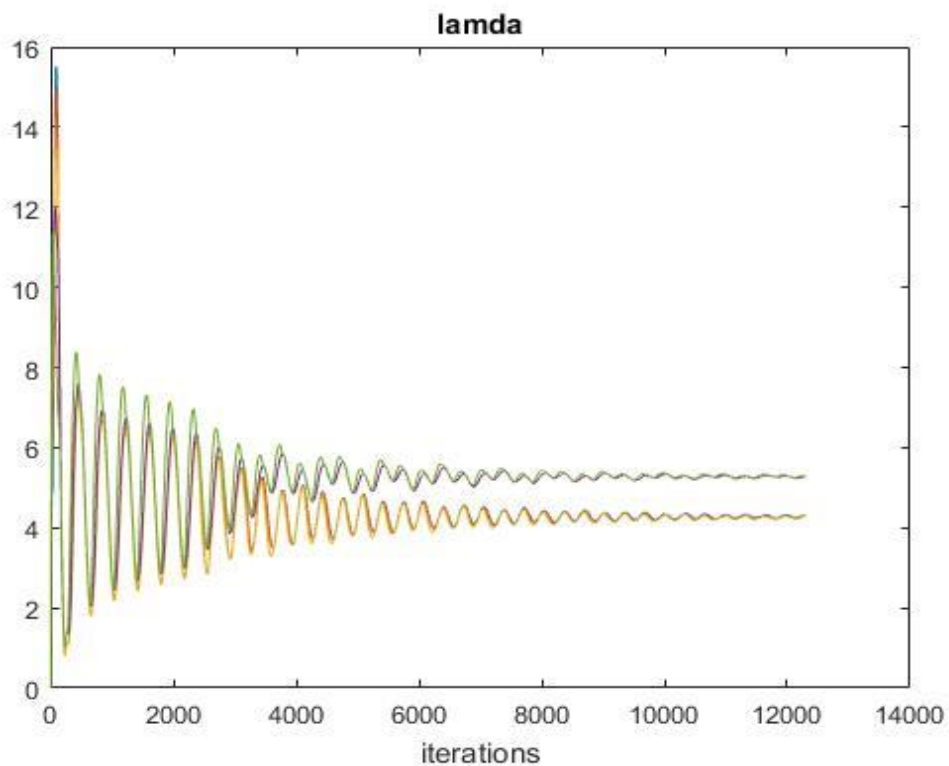
Πίνακας 26



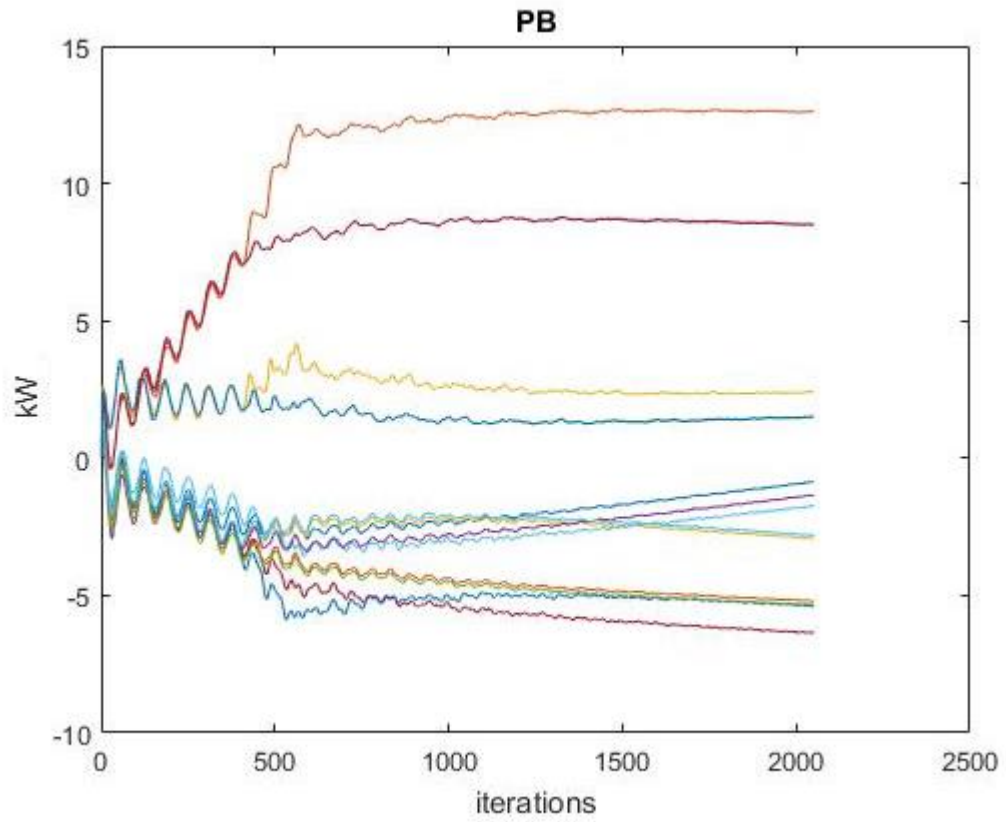
Εικόνα 132: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



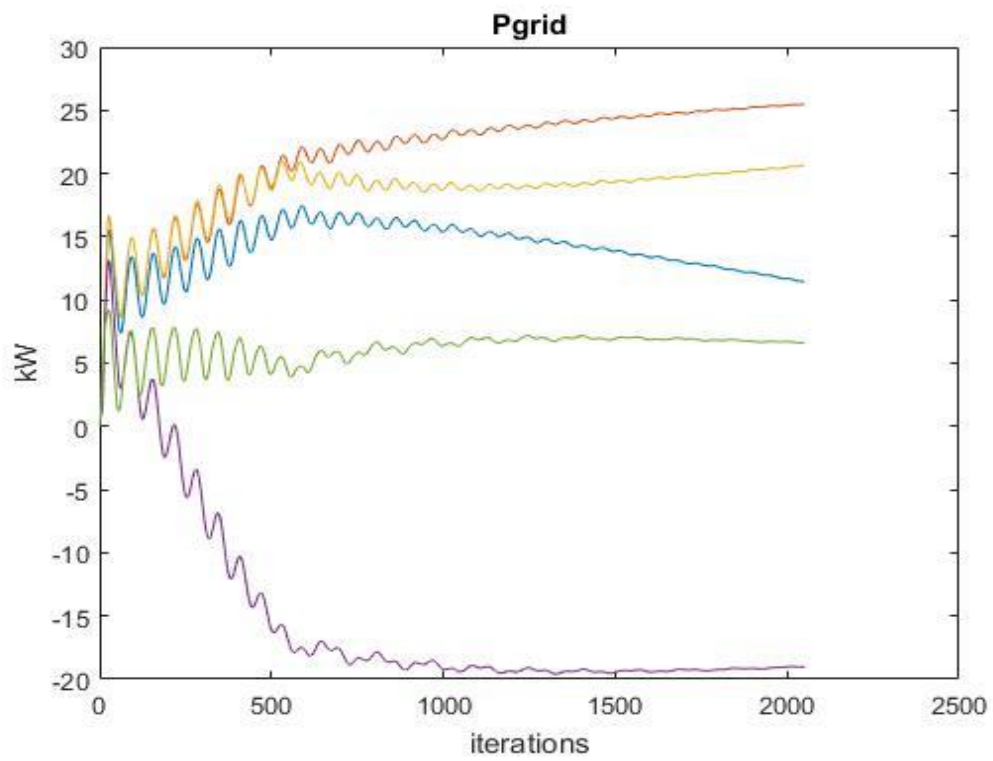
Εικόνα 133: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 134: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 135: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 136: Ισχύς δικτύου

- **Εικόνα 132:** Παρατηρείται ότι μειώνεται η ροή ισχύος του δικτύου, αφού αυξάνεται η μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών και μπορούν με αυτό τον τρόπο να αποθηκεύσουν και να προσφέρουν εν συνεχεία περισσότερη ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου.
- **Εικόνα 133:** Το ισοζύγιο ισχύος συγκλίνει στη μηδενική τιμή που είναι το ζητούμενο.
- **Εικόνα 134:** Ο πολλαπλασιαστής λ κάθε ώρας συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.
- **Εικόνα 135,136:** Η ισχύς του δικτύου και των μπαταριών συγκλίνουν στη βέλτιστη τιμή τους.

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 179.88 cents, μειωμένο αφού οι μπαταρίες προσφέρουν περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο χωρίς να χρειάζεται αγορά ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Το συνολικό κόστος με κεντρικό ελεγκτή είναι 179.28 cents.

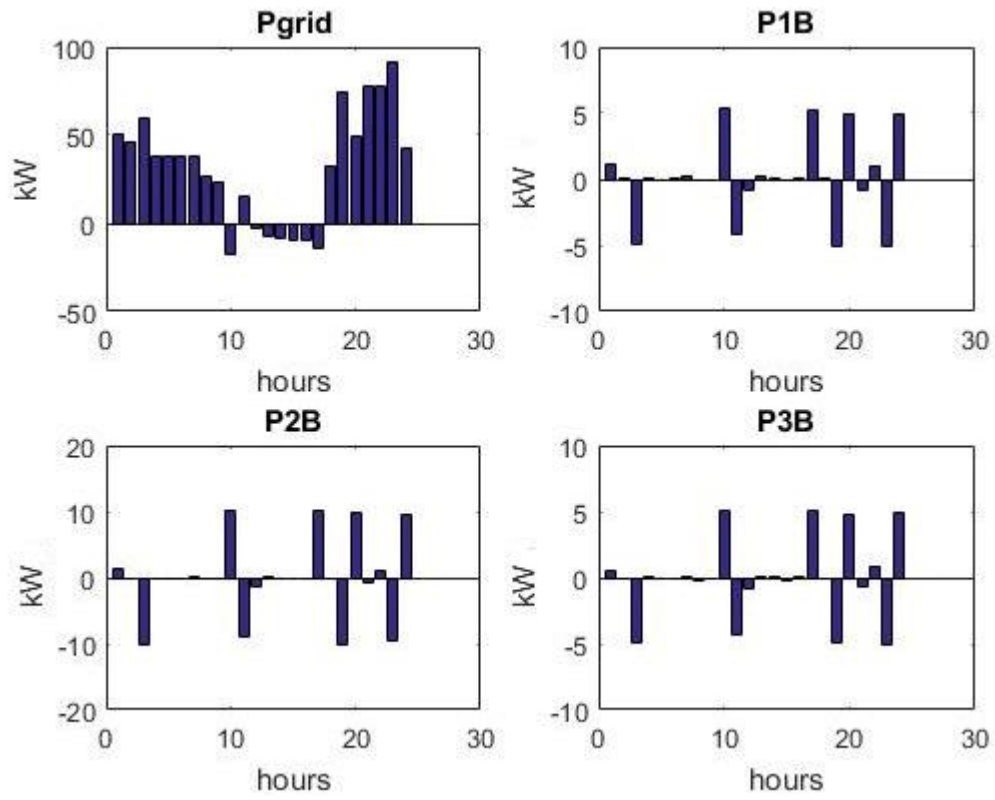
5.3 Προγραμματισμός παραγωγής για εικοσιτέσσερις ώρες με κεντρικό ελεγκτή

Με κεντρικό ελεγκτή πάλι, υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού και σε 24ωρη βάση (έχοντας τα κατάλληλα δεδομένα για 24 ώρες), της οποίας τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 27):

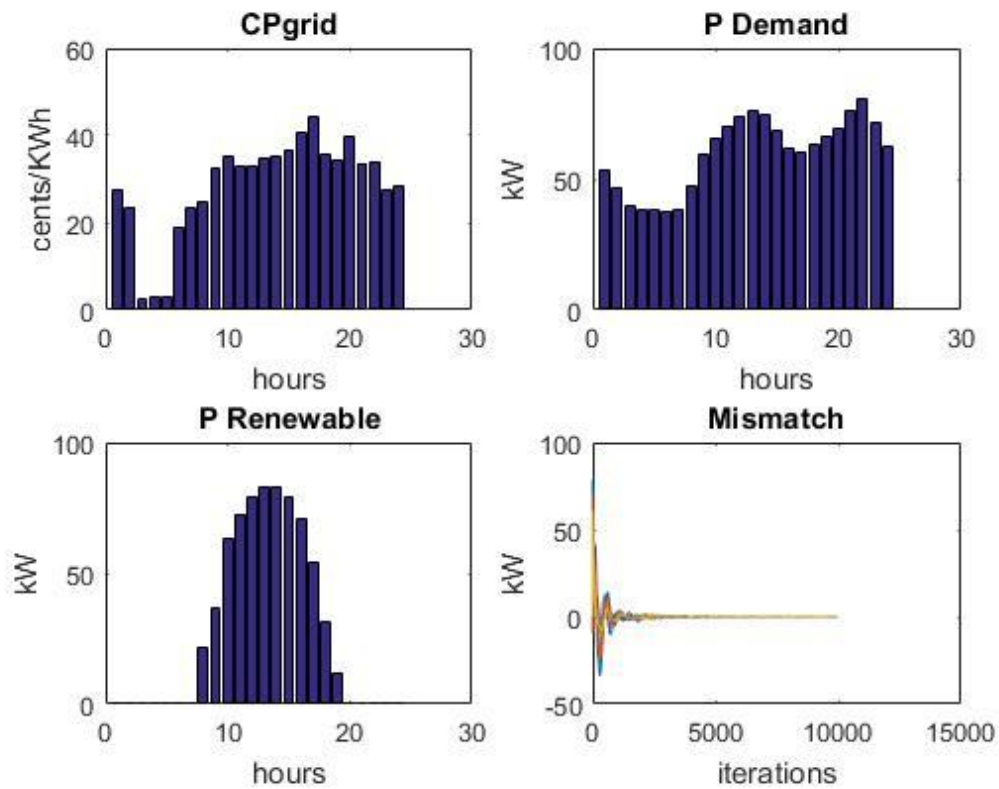
Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
27.28	53.17	0	5	1
23.61	46.51	0	10	1.5
2.36	39.82	0	5	0.5
2.75	38.33	0		
2.75	38.05	0		
19.06	37.69	0		
23.29	38.62	0		
24.76	47.61	21.46		
32.39	59.43	36.65		
35.01	65.67	62.88		
33.13	70.39	72.21		
33.1	74.22	79.54		
34.87	76.31	83.33		
35.12	74.76	83.33		
36.43	68.92	79.02		
40.77	61.61	70.95		
44.18	60.14	54.41		
35.87	62.98	31.24		
34.1	66.43	12.01		
39.85	69.17	0		
33.62	75.82	0		

33.75	80.46	0		
27.37	71.36	0		
28.27	62.17	0		

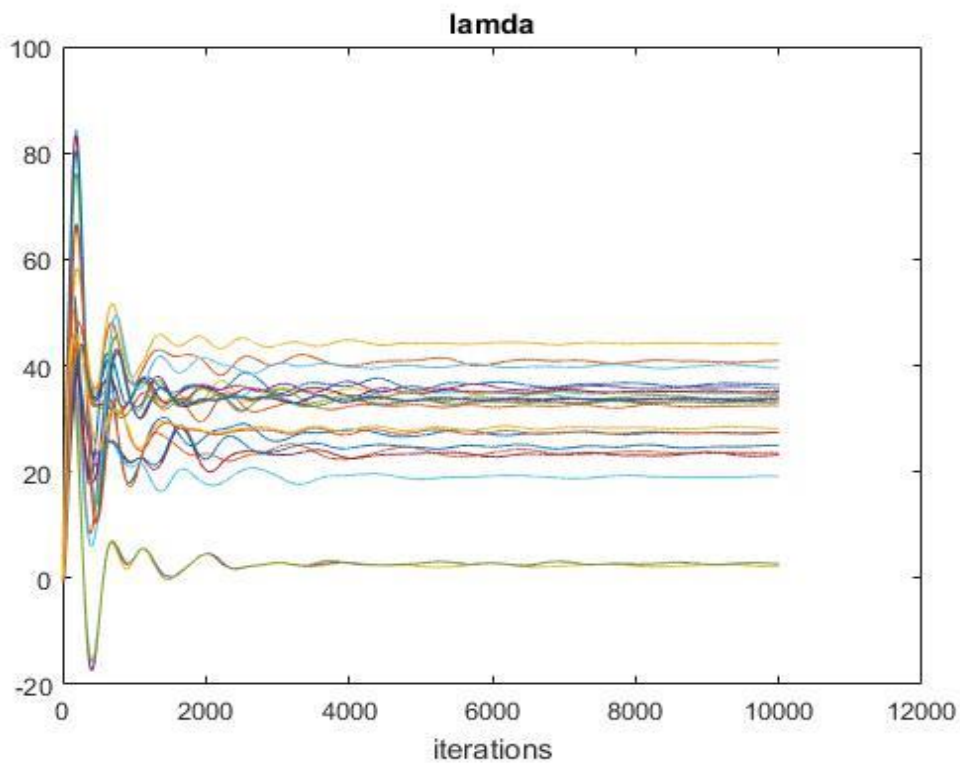
Πίνακας 27



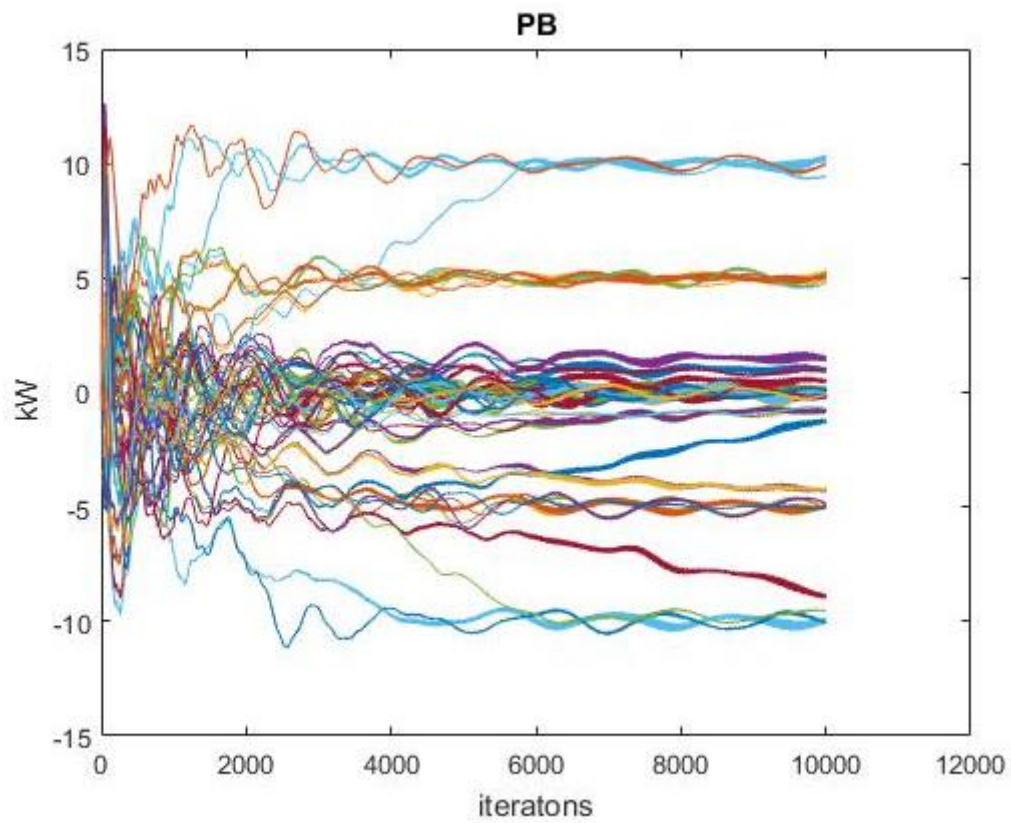
Εικόνα 137: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



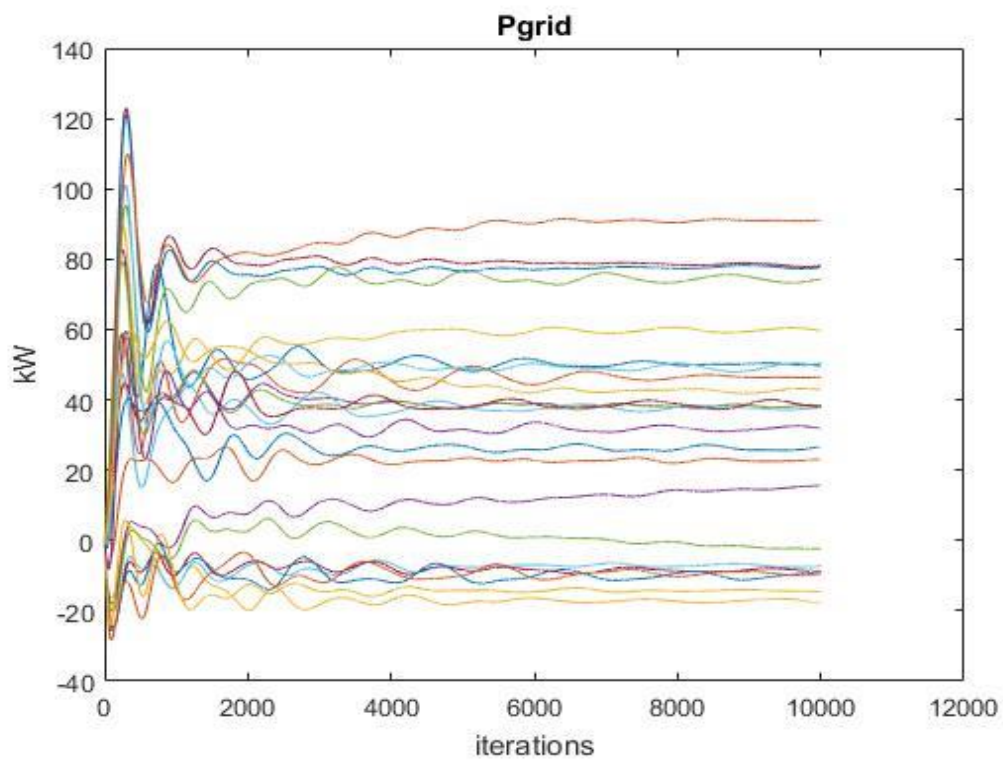
Εικόνα 138: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 139: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 140: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 141: Ισχύς δικτύου

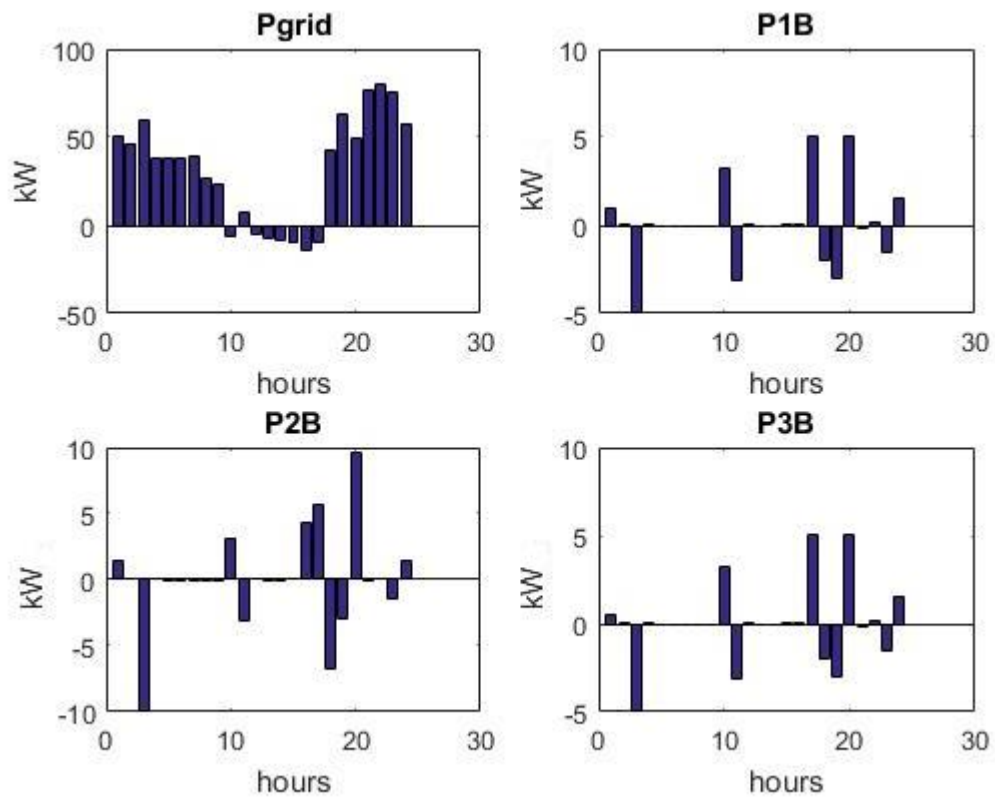
Το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 18308 cents.

5.4 Προγραμματισμός παραγωγής για εικοσιτέσσερις ώρες με κατανεμημένο αλγόριθμο

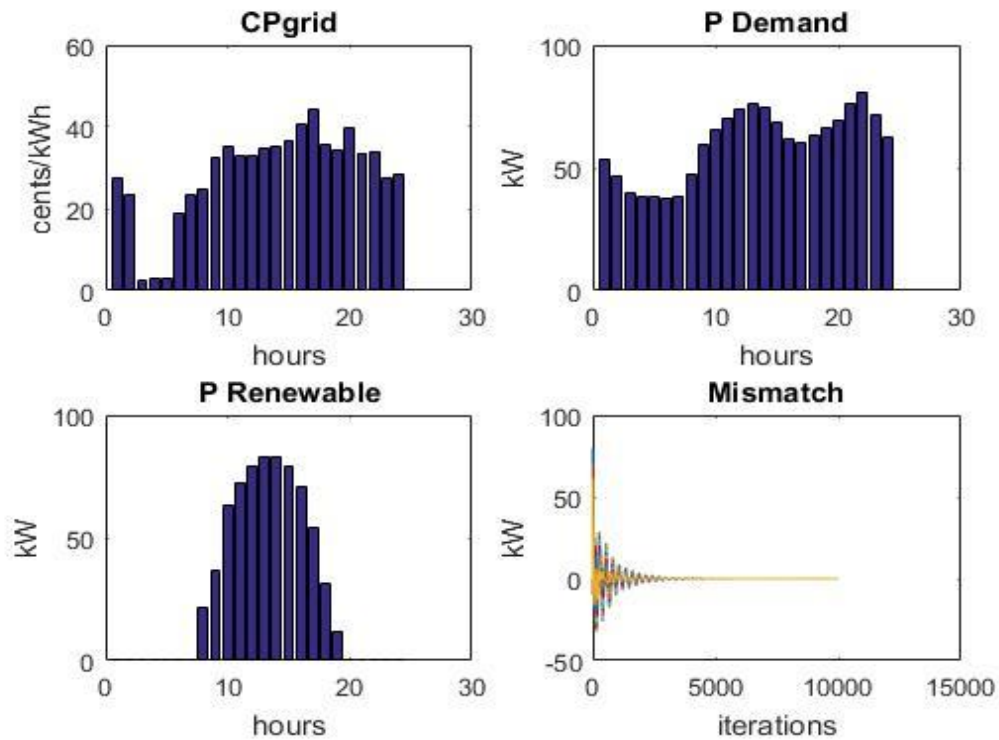
Με τη χρήση του ίδιου αλγορίθμου καθώς και με τη χρήση του αλγορίθμου συναίνεσης μπορεί να γίνει και προγραμματισμός για το ίδιο δίκτυο για 24 ώρες, όπως περιγράφεται παρακάτω (Πίνακας 28):

Τιμή (cents/kWh)	Ζήτηση (kW)	Παραγωγή ΑΠΕ (kW)	Μέγιστη χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	Αρχική φόρτιση μπαταριών (kWh)
27.28	53.17	0	5	1
23.61	46.51	0	10	1.5
2.36	39.82	0	5	0.5
2.75	38.33	0		
2.75	38.05	0		
19.06	37.69	0		
23.29	38.62	0		
24.76	47.61	21.46		
32.39	59.43	36.65		
35.01	65.67	62.88		
33.13	70.39	72.21		
33.1	74.22	79.54		
34.87	76.31	83.33		
35.12	74.76	83.33		
36.43	68.92	79.02		
40.77	61.61	70.95		
44.18	60.14	54.41		
35.87	62.98	31.24		
34.1	66.43	12.01		
39.85	69.17	0		
33.62	75.82	0		
33.75	80.46	0		
27.37	71.36	0		
28.27	62.17	0		

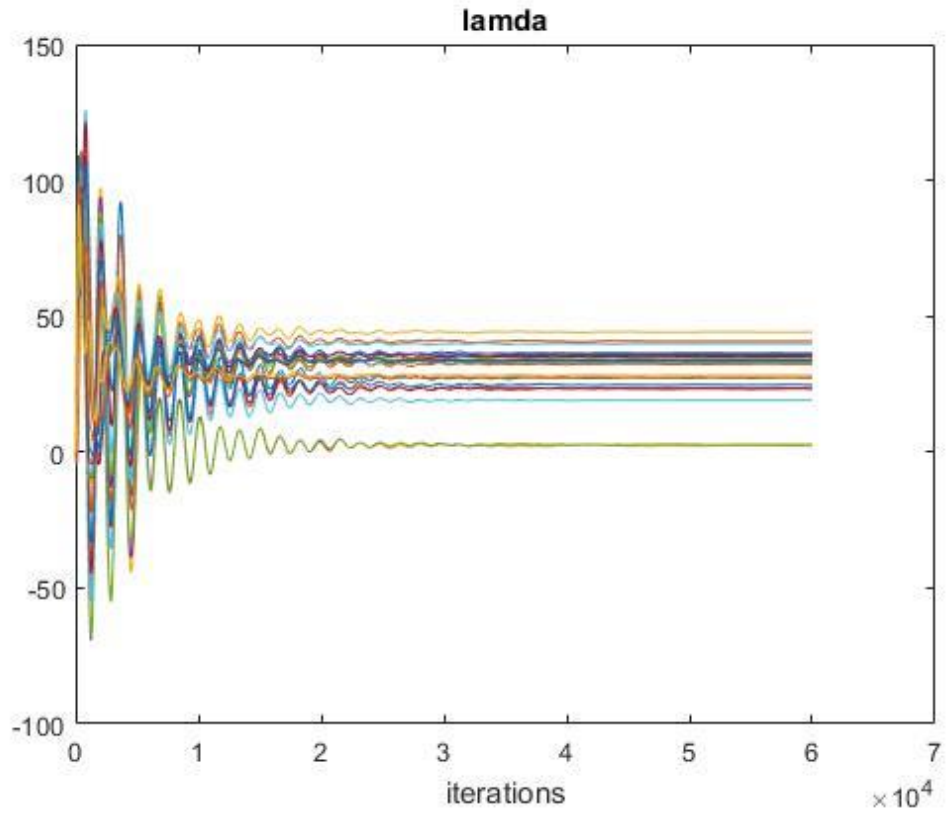
Πίνακας 28



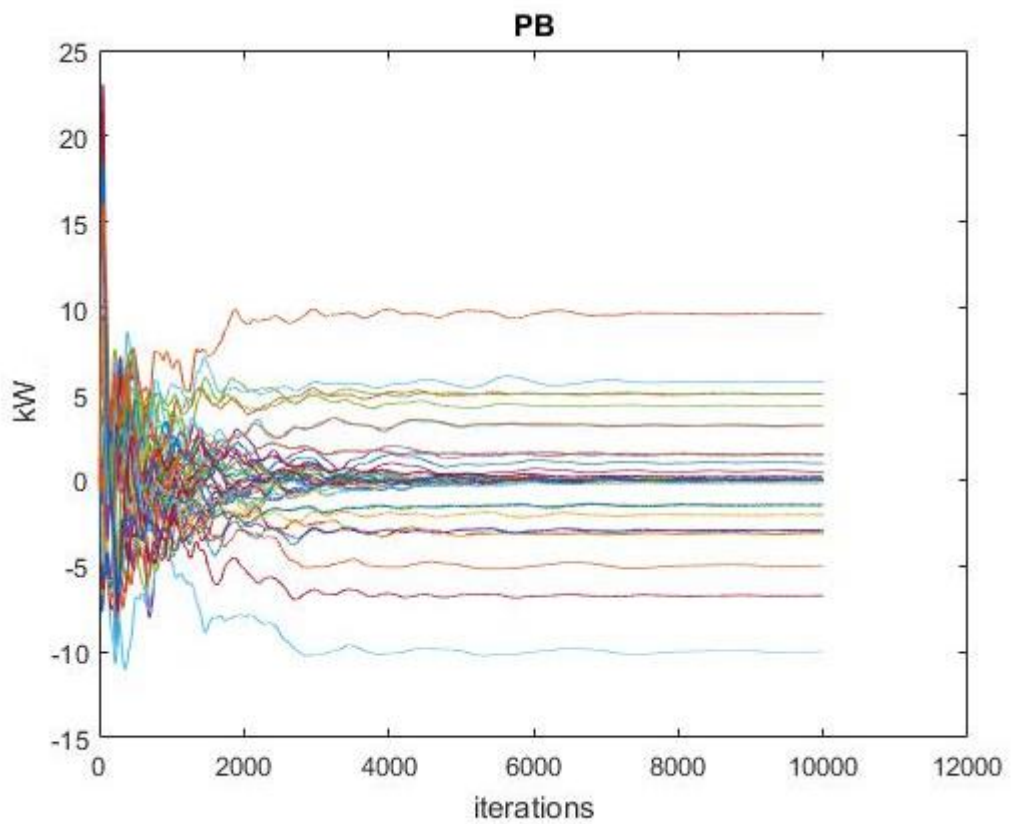
Εικόνα 142: Ισχύς δικτύου και μπαταριών



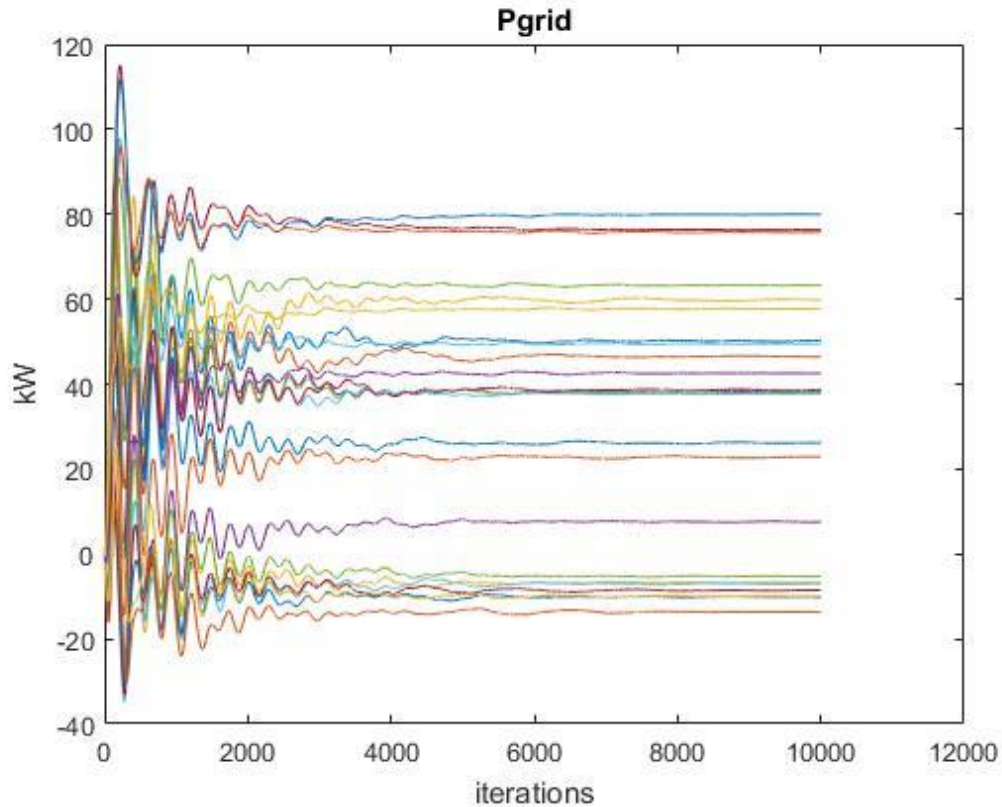
Εικόνα 143: Τιμή δικτύου, ζήτηση, παραγωγή ΑΠΕ και ισοζύγιο ισχύος



Εικόνα 144: Πολλαπλασιαστής Lagrange - λ



Εικόνα 145: Ισχύς μπαταριών



Εικόνα 146: Ισχύς δικτύου

Το συνολικό κόστος σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα 18384 cents, τιμή η οποία προσεγγίζει το αντίστοιχο συνολικό κόστος με κεντρικό ελεγκτή (18308 cents).

5.5 Σύγκριση αλγορίθμου με κεντρικό ελεγκτή και κατανεμημένου αλγορίθμου

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα συνολικά κόστη των δύο μεθόδων καθώς και υπολογίζεται το μεταξύ τους σφάλμα (Πίνακας 29):

Περίπτώσεις	Αλγόριθμος με κεντρικό ελεγκτή	Κατανεμημένος αλγόριθμος	Διαφορά	Ποσοστιαίο Σφάλμα
1	194.67	195.02	0.35	0.18
2	235.11	235.69	0.58	0.25
3	157.77	158.08	0.31	0.2
4	102.1	102.31	0.21	0.21
5	202.55	203.41	0.86	0.42
6	122.28	122.37	0.09	0.07
7	207.51	207.92	0.41	0.2
8	113.94	114.32	0.38	0.33
9	253.45	253.91	0.46	0.18
10	184.94	185.64	0.7	0.38
11	135.61	135.82	0.21	0.15
12	212.26	212.46	0.2	0.09

13	179.28	179.88	0.6	0.33
24ωρος προγραμματισμός	18308	18384	76	0.41

Πίνακας 29

Παρατηρείται ότι γενικά σε όλες τις περιπτώσεις το ποσοστιαίο σφάλμα δεν ξεπερνάει το 0.42%. Αυτό σημαίνει ότι ο κατανεμημένος αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα αποδοτικός και δίνει σε μεγάλη προσέγγιση τα ίδια αποτελέσματα με τον αλγόριθμο με κεντρικό ελεγκτή που είναι και το ζητούμενο.

Κεφάλαιο 6
Συμπεράσματα – Προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εισάγεται ένας αλγόριθμος όπου η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου καθώς και η βέλτιστη φόρτιση των μπαταριών πραγματοποιείται με κεντρικό ελεγκτή αλλά και κατανεμημένα. Όλοι οι αλγόριθμοι πραγματοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Αναπτύχθηκαν συνολικά δύο αλγόριθμοι, ένας για δίκτυο με κεντρικό ελεγκτή και ένας για το ίδιο δίκτυο με δεσπαρμένη παραγωγή για πέντε ώρες αρχικά και στη συνέχεια επεκτάθηκε για εικοσιτέσσερις ώρες. Οι δύο αλγόριθμοι εκτελούν την επαναληπτική διαδικασία gradient descent, η οποία μετά την εκτέλεσή της αποδίδει τη βέλτιστη φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης (μπαταριών) του δικτύου καθώς και την ελάχιστη (βέλτιστη) ισχύ που ρέει στο δίκτυο, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος. Σε κάθε περίπτωση, αμελούνται οι απώλειες μεταφοράς, οι αντιστάσεις και οι αγωγιμότητες των γραμμών μεταφοράς και οι γωνίες της τάσης του δικτύου.

Στην περίπτωση δικτύου με κεντρική παραγωγή, όλες οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση του συστήματος συγκεντρώνονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή (π.χ. οι πολλαπλασιαστές Lagrange κάθε κόμβου). Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος gradient descent με κριτήρια διακοπής τις 10000 επαναλήψεις ή το ισοζύγιο ισχύος να είναι μικρότερο ή ίσο του 0.001. Η εκτέλεση αυτή έγινε για διάφορα σενάρια, αλλάζοντας κάθε φορά τα δεδομένα εισόδου (π.χ. τιμή, παραγωγή ΑΠΕ κλπ.) είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά (π.χ. ταυτόχρονη μείωση παραγωγής ΑΠΕ και τιμής) και μελετήθηκαν οι επιδράσεις στη φόρτιση των μπαταριών, στην ισχύ του δικτύου καθώς και στο τελικό κόστος για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών.

Στην περίπτωση της κατανεμημένης διαχείρισης, γίνεται η χρήση του μοντέλου συναίνεσης όπου κάθε κόμβος ανανεώνει τις τιμές του ανταλλάσσοντας και αναλύοντας δεδομένα μόνο με τους γειτονικούς του κόμβους. Η επίλυση αυτή γίνεται χωρίς τη χρήση κεντρικού ελεγκτή με πλήρως κατανεμημένο τρόπο, προσφέροντας στο δίκτυο μεγαλύτερη ιδιωτικότητα, ευελιξία καθώς και δυνατότητα άμεσης οργάνωσης, αφού οι κόμβοι απαιτείται να έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μόνο με τους γείτονές τους. Το δίκτυο δηλαδή έχει μεγαλύτερη αυτονομία, διευκολύνει την εγκατάσταση και συντονισμό νέων μονάδων και μειώνει τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων πληροφοριών (άρα μειώνεται και ο υπολογιστικός χρόνος). Και σε αυτή την περίπτωση μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής των δεδομένων στο δίκτυο καθώς και η επίδραση στο συνολικό κόστος.

Παρατηρήθηκε ότι η φόρτιση - αποφόρτιση των μπαταριών του δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή αγοράς ενέργειας κάθε ώρας σε συνδυασμό με την αρχική τους φόρτιση αλλά και τη μέγιστη χωρητικότητά τους. Τις ώρες δηλαδή όπου η τιμή αγοράς ισχύος είναι χαμηλότερη, στο δίκτυο ρέει (όπως είναι λογικό) περισσότερη ισχύ και οι μπαταρίες αντίστοιχα αποθηκεύουν ενέργεια. Συνεπώς, τις ώρες όπου η τιμή αγοράς ενέργειας είναι υψηλότερη, στο δίκτυο ρέει λιγότερη ισχύς (άρα είναι και πιο οικονομικό ως προς την αγορά ενέργειας), αφού οι μπαταρίες προσφέρουν με τη σειρά τους ενέργεια στο δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά το συνολικό κόστος, επηρεάζεται από όλα τα δεδομένα του δικτύου (π.χ. παραγωγή ΑΠΕ, αρχική φόρτιση μπαταριών, τιμή αγοράς ενέργειας κλπ.). Αύξηση ή μείωση του κόστους αγοράς, της παραγωγής των ΑΠΕ, της ζήτησης, της αρχικής φόρτισης των μπαταριών και της μέγιστης χωρητικότητας των μπαταριών συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση ή μείωση στο συνολικό κόστος.

6.2 Προοπτικές – Μελλοντική εργασία

Η κατανεμημένη προσέγγιση στην επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στο δίκτυο σε σχέση με την κεντρική παραγωγή, όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τις μονάδες αποθήκευσης και γενικά την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων. Ενδιαφέρον θέμα μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη αρχιτεκτονικών και αλγορίθμων που θα αξιοποιούν κατάλληλα τους έξυπνους μετρητές του μικροδικτύου και γενικά τον τρόπο επικοινωνίας των δικτύων για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των πληροφοριών και δεδομένων που προσφέρουν.

Άλλο ένα βασικό θέμα μελέτης για το μέλλον αποτελεί η εύρεση του κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων ή τεχνολογιών που να μειώνουν ακόμα περισσότερο την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου.

Τέλος, μελλοντικό θέμα μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου που να λαμβάνει υπόψη περισσότερα δεδομένα του δικτύου (π.χ. τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς του συστήματος και της τάσης του δικτύου), καθώς και τους αντίστοιχους περιορισμούς (π.χ. για τη μεταφορά ισχύος και για τη μέγιστη γωνία και τάση των ζυγών). Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος θα δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα σε λιγότερο χρόνο και γενικά, θα υπάρχει πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Βιβλιογραφία

- [1] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp.
- [2] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/distribution.csp.
- [3] Λάζαρος Κ. Γεωργίου «ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ & ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ».
- [4] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας.
- [5] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
<http://www.allaboutenergy.gr/Pages23.html>
- [6] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://en.wikipedia.org/wiki/Grid_energy_storage
- [7] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html
- [8] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
<http://circutor.com/en/documentation/articles/4162-advantages-of-smart-grids>
- [9] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
<http://www.whatissmartgrid.org/smart-grid-101/consumer-benefits>
- [10] Daniel E. Olivares, Claudio A. Cañizares, Fellow, IEEE, Mehrdad Kazerani, Senior Member, IEEE, “A Centralized Optimal Energy Management System for Microgrids”.
- [11] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system
- [12] Ghezlane Halhouli Merabet, Mohammed Essaaidi, Hanaa Talei, Mohamed Riduan Abid, Nacer Khalil*1, Mohcine Madkour and Driss Benhaddou “Applications of Multi-Agent Systems in Smart Grids: A Survey”.
- [13] Muhammad Waseem Khan and Jie Wang “Renewable and Sustainable Energy Reviews”.
- [14] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://en.wikipedia.org/wiki/Karush%E2%80%93Kuhn%E2%80%93Tucker_conditions
- [15] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://en.wikipedia.org/wiki/Gradient_descent
- [16] Yuan Zhang, Navid Rahbari-Asr, Jie Duan and Mo-Yuen Chow “Day-ahead Smart Grid Cooperative Distributed Energy Scheduling with Renewable and Storage Integration”.
- [17] Navid Rahbari-Asr and Mo-Yuen Chow “Cooperative Distributed Demand Management for Community Charging of PHEV/PEVs Based on KKT Conditions and Consensus Networks”.

- [18] Chongxin Huang, Dong Yue, Song Deng and Jun Xie “Optimal Scheduling of Microgrid with Multiple Distributed Resources Using Interval Optimization”.
- [19] Jizhong Zhu “OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION”.
- [20] Navid Rahbari-Asr, Yuan Zhang and Mo-Yuen Chow “Cooperative Distributed Scheduling for Storage Devices in Microgrids using Dynamic KKT Multipliers and Consensus Networks”.
- [21] Ruilong Deng, Zaiyue Yang, Jiming Chen, Navid Rahbari Asr and Mo-Yuen Chow “Residential Energy Consumption Scheduling: A Coupled-Constraint Game Approach”.
- [22] [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο]
https://en.wikipedia.org/wiki/Consensus_algorithm
- [23] G. Binetti, A. Davoudi, F. L. Lewis, D. Naso and B. Turchiano, "Distributed Consensus-Based Economic Dispatch With Transmission Losses".
- [24] Gabriela Hug, Soumya Kar and Chenye Wu “Consensus + Innovations Approach for Distributed Multi-Agent Coordination in a Microgrid”.