



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Διαχείριση ανταπόκρισης στη ζήτηση ηλεκτρικής
ενέργειας σε ευφυή δίκτυα μέσω παιγνιοθεωρητικών
μεθόδων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ ΦΑΒΒΑ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Διαχείριση ανταπόκρισης στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε
ευφυή δίκτυα μέσω παιγνιοθεωρητικών μεθόδων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ ΦΑΒΒΑ

Επιβλέπων : Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΦΑΒΒΑ

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

Copyright © Αναστασία Φάββα, Ιούλιος 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη και ανάλυση της ανταπόκρισης ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου σε ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση δύο επιπέδων. Τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα η διαχείριση ανταπόκρισης ζήτησης, η οποία αποτελεί βασικό συστατικό στοιχείο του μελλοντικού ευφυούς δικτύου, στοχεύουν στη μείωση του μέγιστου φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και στον περιορισμό των έντονων διακυμάνσεων της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφοροποίηση αυτής της διπλωματικής είναι ότι, ενώ η πλειοψηφία από τις υπάρχουσες μελέτες επικεντρώνεται στο πρόβλημα από τη πλευρά των καταναλωτών θεωρώντας μόνο μία εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, εδώ εξετάζεται ένα σενάριο με πολλαπλές εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη μοντελοποίηση αυτού του σεναρίου χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά παιγνιοθεωρητικά μοντέλα, που αντιστοιχούν στις ανάγκες της κάθε περίπτωσης. Αρχικά για τη μοντελοποίηση και στη συνέχεια τη προσομοίωση της συμπεριφοράς των οικιακών χρηστών χρησιμοποιείται ένα εξελικτικό παίγνιο, για να παρουσιαστούν περισσότερα ρεαλιστικά οι συμπεριφορές των καταναλωτών. Αντιθέτως οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μοντελοποιούνται με τη χρήση ενός μη συνεργατικού παιγνίου, που απεικονίζει τις ανταγωνιστικές σχέσεις τους. Τέλος επιδιώκεται σε κάθε χρονική στιγμή να ικανοποιούνται και οι καταναλωτές και οι εταιρείες για αυτό τα παιγνιοθεωρητικά μοντέλα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Στη συνέχεια με τις προσομοιώσεις των διαφορετικών παιγνίων ξεχωριστά αλλά και ταυτόχρονα με τη χρήση επαναληπτικών αλγορίθμων επαληθεύεται ότι με τη χρήση του συγκεκριμένου σεναρίου μπορεί να επιτευχθεί η σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας τους και για τα δύο παίγνια. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές καταναλωτών και εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, για να επαληθευτούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα, από τα οποία προκύπτει ότι το συγκεκριμένο σενάριο οδηγεί στα επιθυμητά αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά: Ευφύες δίκτυο, Διαχείριση Ανταπόκρισης Ζήτησης, Θεωρία Παιγνίων, Έξυπνη τιμολόγηση, Εξελικτικό Παίγνιο, Μη-Συνεργατικό Παίγνιο

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the study and analysis of electric load demand response in smart grid infrastructures utilizing a two-level game-theoretic approach. Smart grids and in particular the demand response management, which is a key component of the future smart grid, aimed at reducing the power peak load and reduce sharp variations in electricity demand. The differentiation of this thesis is that while the majority of the existing studies focus on the problem from the perspective of consumers considering a single utility company, the proposed scenario studies demand response management with multiple utility companies. This scenario is modeled by two different game theoretic models, which correspond to the needs of each case. Initially for modeling and then simulate the behavior of residential users an evolutionary game used to present more realistic the consumer behavior. Instead the competition between the utility companies is formulated as a non-cooperative game. Finally, the game theoretic models interact with each other, in order to satisfy both consumers and companies requirements. Then with the simulations of different games separately but concurrently using iterative algorithms is verified that the using this scenario both games can converge to their own equilibrium. Carried out simulations for different quantity of consumers and utility companies, to verify and compare the results, which show that this scenario leads to the expected results.

Keywords: Smart grid, Demand Response Management, Game Theory, Smart pricing, Evolutionary Game, Non-Cooperative Game

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	4
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής.....	6
1.2	Οργάνωση κειμένου.....	7
2	Ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Smart grid)	8
2.1	Ιδιότητες και πλεονεκτήματα.....	9
2.2	Demand Response Management	9
2.3	Παιγνιοθεωρητικά μοντέλα ανταπόκρισης στη ζήτηση.....	20
3	Αρχιτεκτονική του προτεινόμενου μοντέλου ανταπόκρισης στη ζήτηση.....	24
3.1	Στόχοι του προτεινόμενου πλαισίου	24
3.2	Αρχιτεκτονική του προγράμματος ανταπόκρισης ζήτησης των ευφύων δικτύων	27
3.3	Δικτυακές συνδέσεις των ευφύων δικτύων.....	28
3.3.1	Συνδέσεις δικτύου της συγκεκριμένης μελέτης.....	30
4	Ανταπόκριση στη Ζήτηση μέσω μιας παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης δύο επιπέδων 33	
4.1	Εισαγωγή στα παιγνιοθεωρητικά μοντέλα.....	33
4.2	Εξελικτικό παίγνιο (evolutionary game) οικιακών χρηστών	37
4.3	Μη-συνεργατικό παίγνιο (non-cooperative game) παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας..	43
5	Αριθμητικά αποτελέσματα.....	48
5.1	Εξελικτικό παίγνιο των οικιακών χρηστών	49
5.1.1	Περίπτωση 1: 10 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας 49	
5.1.2	Περίπτωση 2: 10 οικιακοί χρήστες και 5 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας 51	
5.1.3	Περίπτωση 3: 100 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας 52	
5.2	Μη συνεργατικό παίγνιο των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας	54
5.2.1	Περίπτωση 1: 10 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας 54	
5.2.2	Περίπτωση 2: 10 οικιακοί χρήστες και 5 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας 56	

5.2.3	<i>Περίπτωση 3: 100 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας</i>	
	59	
5.3	Σύγκριση μελέτης με την αντίστοιχη χωρίς ανταπόκριση ζήτησης.....	61
6	Επίλογος	65
6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	65
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	67
7	Βιβλιογραφία.....	68

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Ταξινόμηση των προγραμμάτων ανταπόκρισης ζήτησης.....	11
Εικόνα 2: Εννοιολογική σκοπιά της αποτελεσματικότητας και της ανταπόκρισης στη ζήτηση	13
Εικόνα 3:Περιγραφή του συνολικού προβλήματος ανταπόκρισης ζήτησης.....	26
Εικόνα 4: Κύριοι συμμετέχοντες του προγράμματος ανταπόκρισης ζήτησης.....	27
Εικόνα 5:Αρχιτεκτονική της επικοινωνίας για την ανταπόκριση ζήτησης.....	30
Εικόνα 6:Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 1.....	50
Εικόνα 7:Μέση χρησιμότητα δικτύου - Περίπτωση 1.....	50
Εικόνα 8:Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 2.....	51
Εικόνα 9:Μέση χρησιμότητα του δικτύου - Περίπτωση 2.....	52
Εικόνα 10:Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 3.....	53
Εικόνα 11:Μέση χρησιμότητα του δικτύου - Περίπτωση 3.....	53
Εικόνα 12:Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 1.....	54
Εικόνα 13:Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1.....	55
Εικόνα 14:Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1.....	55
Εικόνα 15:Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1.....	56
Εικόνα 16:Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 2.....	57
Εικόνα 17:Τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2.....	57
Εικόνα 18:Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2.....	58
Εικόνα 19:Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2.....	58
Εικόνα 20:Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 3.....	59
Εικόνα 21:Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3.....	60
Εικόνα 22:Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3.....	60
Εικόνα 23:Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3.....	61
Εικόνα 24:Μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας με ανταπόκριση στη ζήτηση.....	62
Εικόνα 25:Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας: (α) με ανταπόκριση στη ζήτηση, (β) χωρίς ανταπόκριση στη ζήτηση.....	64

1

Εισαγωγή

Τα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως τεράστια και ιδιαίτερα περίπλοκα, καθώς αποτελούνται από κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμές μεταφοράς και δίκτυα διανομής που διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και συνεχώς προσπαθούν να εξισορροπούν την προσφορά με τη κυμαινόμενη ζήτηση.

Για αυτό και αντιμετωπίζουν διάφορα προβλήματα, όπως οι επιζήμιες διακοπές ρεύματος και οι διαταραχές στη ποιότητα ισχύος, έντονες δυσκολίες στη διαχείριση των φορτίων αιχμής, αδυναμία ανταλλαγής ισχυρής ροής πληροφοριών και δυσκολίες στην αντιμετώπιση της εισχώρησης μεγάλου πλήθους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση ευφύστερων δικτύων.

Τα ευφυή δίκτυα δεν είναι πλέον μια μελλοντική προοπτική, αλλά μια ελπιδοφόρα εξέλιξη των σημερινών δικτύων. Με τη χρήση των ευφύων δικτύων θα γίνει αποδοτικότερη χρήση της εγκατεστημένης ισχύος, μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά και πιο εύκολη εισαγωγή επιπλέον ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με την ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Ένωσης « Έξυπνα δίκτυα – από την Καινοτομία στην Ανάπτυξη» [14] καθορίζεται η πολιτική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σε αυτό τον τομέα. Από την Επιτροπή ορίζεται ακόμη ότι τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ των νοικοκυριών κατά 9% και την κατανάλωση ενέργειας κατά 10%. Θα διαδραματίσουν ακόμα σημαντικό ρόλο, ώστε οι στόχοι της ΕΕ «20 – 20 – 20», για την ολοκληρωμένη ενέργεια και την κλιματική αλλαγή να επιτευχθούν.

Ταυτόχρονα τα προγράμματα ανταπόκρισης ζήτησης (Demand response) έχουν αποδειχθεί εδώ και δεκαετίες ότι είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τις επιχειρήσεις για τη διαχείριση των αιχμών του δικτύου ελέγχοντας τα φορτία των πελατών. Για τους οικιακούς καταναλωτές, αυτά τα προγράμματα παραδοσιακά συμπεριλαμβάνουν τον άμεσο έλεγχο του φορτίου των μεγάλων οικιακών συσκευών, όπως τα συστήματα κλιματισμού ή θερμοσίφωνες. Στη πλειοψηφία τους αποτελούνται από συστήματα που βασίζονται σε σήματα που αποστέλλονται μέσω τηλεειδοποίησης προς μία μόνο κατεύθυνση (από το δίκτυο προς τους πελάτες) ή επικοινωνίες γραμμής ισχύος. Με αυτό τον τρόπο επωφελήθηκαν αρχικά οι επιχειρήσεις, για να διαχειρίζονται καλύτερα την ζήτηση και τη προσφορά και οι καταναλωτές από τα οικονομικά κίνητρα για να συμμετέχουν στο πρόγραμμα.

Με την εισχώρηση των ευφών δικτύων το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ σύμφωνα με το άρθρο [13] και άλλοι βασικοί παράγοντες στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίζουν την ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών μέσω της ανταπόκρισης ζήτησης ως βασικό χαρακτηριστικό των ευφών δικτύων. Με τα προηγμένα συστήματα μέτρησης και την χρησιμοποίηση νέων τεχνολογιών οι επιχειρήσεις μπορούν να επιτρέψουν στους ενεργειακούς καταναλωτές να διαχειρίζονται ενεργά τη χωρητικότητα του δικτύου.

Επιπλέον, η θεωρία παιγνίων αναμένεται να αποτελέσει ένα βασικό αναλυτικό εργαλείο για το σχεδιασμό του μελλοντικού ευφούς δικτύου. Πρόκειται για ένα επίσημο, αναλυτικό καθώς και εννοιολογικό πλαίσιο με ένα σύνολο μαθηματικών εργαλείων που επιτρέπουν τη μελέτη των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των

ανεξάρτητων παικτών [15], [16]. Για πολλές δεκαετίες η θεωρία παιγνίων είχε υιοθετηθεί σε μία ευρεία σειρά κλάδων, που κυμαίνονται από την οικονομία και την πολιτική μέχρι και τη ψυχολογία. Τελευταία όμως έχει γίνει ένα κεντρικό εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση των επικοινωνιακών συστημάτων σύμφωνα και με τη μελέτη [19]-[20].

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτεταμένη πειραματική αξιολόγηση, μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης, μιας παιγνιοθεωρητικής μεθόδου δύο επιπέδων για την αποτελεσματική προσαρμογή/διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου σε ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της υπό μελέτη παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης είναι ο όσο το δυνατόν μεγαλύτερος περιορισμός της εμφάνισης ακραίων τιμών ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κι η εξισορρόπηση της ζητούμενης από τους καταναλωτές με την προσφερόμενη από τους παραγωγούς ηλεκτρική ενέργεια.

Η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση αυτή διαρθρώνεται σε δύο επίπεδα όπου το ένα αφορά τη μεριά των καταναλωτών/χρηστών της ηλεκτρικής ενέργειας και το δεύτερο τους παραγωγούς/παρόχους της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρώτο επίπεδο, δηλαδή στο επίπεδο των χρηστών, κάθε χρήστης προσαρμόζει τη ζήτηση του για ηλεκτρική ενέργεια από συγκεκριμένο πάροχο, βασιζόμενος στις τιμές διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας από τους διάφορους παρόχους. Η αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ των χρηστών μοντελοποιείται μέσω ενός εξελικτικού στρατηγικού παιγνίου για το οποίο αναζητείται ένα εξελικτικά σταθερό διάνυσμα πιθανοτήτων επιλογής παρόχου από τους χρήστες του δικτύου. Στην προσέγγιση αυτή γίνεται η υπόθεση ότι όλοι οι χρήστες του δικτύου ανήκουν σε έναν πληθυσμό ο οποίος καταλήγει σε ένα κοινό εξελικτικά σταθερό διάνυσμα πιθανοτήτων επιλογής παρόχου. Στο επίπεδο των παρόχων, κάθε πάροχος καλείται να καθορίσει το δικό του επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και την τιμή διάθεσής της. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των παρόχων μοντελοποιείται μέσω ενός μη συνεργατικού παιγνίου για το οποίο αποδεικνύεται η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash.

Το χρονικό παράθυρο μελέτης του προβλήματος διαχείρισης της ζήτησης και της προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε ένα συγκεκριμένο αριθμό από χρονικές σχισμές όπου σε κάθε μια από αυτές ακολουθείται η παραπάνω παιγνιοθεωρητική προσέγγιση δύο επιπέδων. Σε κάθε χρονοσχισμή επιλύεται το παραπάνω πρόβλημα και προσδιορίζονται δηλαδή οι απαιτούμενες προσαρμογές στη ζήτηση και την προσφορά του ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή. Η παραπάνω προτεινόμενη προσέγγιση προϋποθέτει την ύπαρξη μιας έξυπνης δικτυακής υποδομής η οποία θα είναι δυνατόν να συλλέγει σε πραγματικό χρόνο τα απαιτούμενα δεδομένα από τους καταναλωτές και τους παρόχους και να προβαίνει στους απαραίτητους υπολογισμούς για τον καθορισμό των τιμών ισορροπίας για τη ζήτηση, την παραγωγή και τις τιμές διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε πάροχο.

1.2 Οργάνωση κειμένου

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη αναφορά και περιγραφή των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών σχετικών με το θέμα της διπλωματικής εργασίας, στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η παραπάνω παιγνιοθεωρητική προσέγγιση, στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο περιβάλλον προσομοίωσης κι οι απαραίτητες παραμετροποιήσεις του παιγνιοθεωρητικού μοντέλου για να καταστεί δυνατή μια εκτεταμένη πειραματική αξιολόγηση της παραπάνω προσέγγισης, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κι αξιολογούνται τα αριθμητικά αποτελέσματα του παραπάνω πειράματος και τέλος στο 6^ο κεφάλαιο διατυπώνονται τα εξαχθέντα συμπεράσματα κι οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα στην περιοχή αυτή.

2

Ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Smart grid)

Ως smart grids ή ευφυή δίκτυα ορίζονται τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, που βασίζονται στη ψηφιακή τεχνολογία και χρησιμοποιούνται για τη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μέσω αμφίδρομης ψηφιακής επικοινωνίας. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την παρακολούθηση, την ανάλυση, τον έλεγχο και την επικοινωνία διαμέσου της αλυσίδας εφοδιασμού για να βοηθήσει στη βελτίωση της αποδοτικότητας, στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους, και στη μεγιστοποίηση της διαφάνειας και της αξιοπιστίας της ενεργειακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η εισαγωγή των ευφυών δικτύων στοχεύει στην αντιμετώπιση των αδυναμιών των συμβατικών ηλεκτρικών δικτύων με τη χρήση ευφυών συσκευών μέτρησης (smart meters).

Πολλοί οργανισμοί του δημοσίου αλλά κι όχι μόνο, σε όλο τον κόσμο ενθαρρύνουν τη χρήση των έξυπνων δικτύων με τη προοπτική να θέσουν σε έλεγχο και να αντιμετωπίσουν την υπερθέρμανση του πλανήτη, την ανθεκτικότητα σε έκτακτες ανάγκες και τα σενάρια για ενεργειακή ανεξαρτησία. Σύμφωνα και με την ABB [11], το ευφύες δίκτυο είναι το μέλλον για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς έχει σχεδιαστεί για να πληροί τις τέσσερις μεγάλες απαιτήσεις της παγκόσμιας κοινωνίας

για την ηλεκτρική ενέργεια: την χωρητικότητα, την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα.

2.1 Ιδιότητες και πλεονεκτήματα

Οι τεχνολογίες ευφυών δικτύων προσφέρουν διάφορες προοπτικές για οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη σύμφωνα με το [12]:

- Βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Καλύτερη αξιοποίηση των περιουσιακών στοιχείων από τους χρήστες του δικτύου
- Καλύτερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των plug-in ηλεκτρικών οχημάτων
- Μειωμένο λειτουργικό κόστος για τις εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
- Μειωμένες δαπάνες νοικοκυριών και επιχειρήσεων για ηλεκτρική ενέργεια
- Αύξηση αποτελεσματικότητας και διατήρησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Υποστήριξη για νέα στοιχεία και εφαρμογές
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων εκπομπών

2.2 Demand Response Management

Ως διαχείριση ανταποκρινόμενη στη ζήτηση ορίζονται οι αλλαγές που γίνονται στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές σε σχέση με τις κανονικές καταναλωτικές τους συνήθειες και οφείλονται στις αλλαγές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, ή στα κίνητρα πληρωμών που σχεδιάζονται με σκοπό τη πρόκληση χαμηλότερης χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους με υψηλές τιμές αγοράς ή όταν η αξιοπιστία του συστήματος βρίσκεται σε κίνδυνο [17].

Οι κύριοι στόχοι αυτών των αλλαγών είναι:

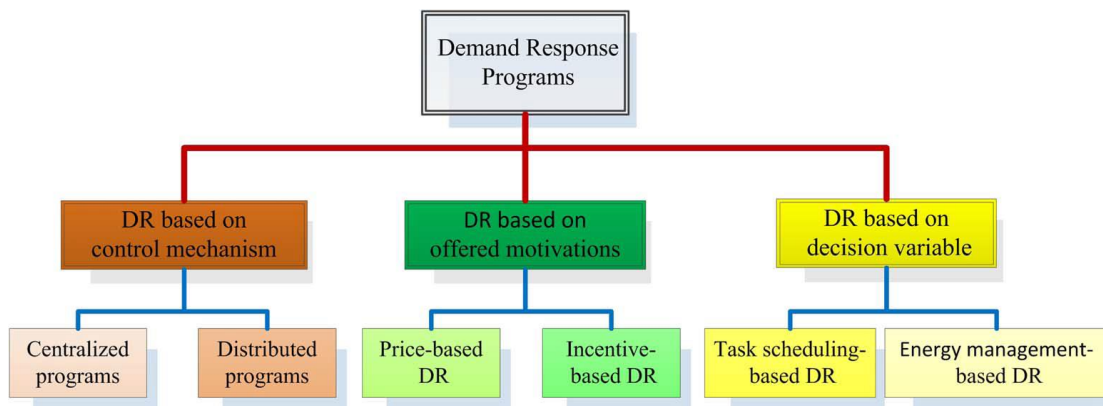
- Μείωση της συνολικής κατανάλωσης, με σκοπό την επίτευξη κέρδους και για τις εταιρείες αλλά και για τους τελικούς καταναλωτές.
- Μείωση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας που χρειάζεται, το οποίο αποτελεί άμεσο αποτέλεσμα του προηγούμενου στόχου. Με την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, εξαλείφεται η ανάγκη για την ακριβή ενεργοποίηση σταθμών παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη φορτίου αιχμής, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις ρύπανσης τους.
- Αλλαγή της ζήτησης για να προσεγγίσει τη διαθέσιμη προσφορά, το οποίο θα μεγιστοποιήσει την αξιοπιστία του συστήματος, κυρίως σε περιοχές με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πάρκα.
- Μείωση ή και σε κάποιες περιπτώσεις εξάλειψη των υπερφορτίσεων στο σύστημα διανομής. Ο συγκεκριμένος στόχος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης διανομής (DMS), το οποίο παρακολουθεί τη λειτουργία του συστήματος διανομής και λαμβάνει αποφάσεις κοντά στο πραγματικό χρόνο που ενισχύουν την αξιοπιστία του συστήματος.

Η σχεδίαση ενός αποτελεσματικού συστήματος ανταπόκρισης ζήτησης είναι κρίσιμης σημασίας για την αποτελεσματικότητα του ευφυούς δικτύου. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστούν, να αξιολογηθούν και να συγκριθούν τα διάφορα είδη των συστημάτων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 από τη μελέτη [3] τα συστήματα ανταπόκρισης ζήτησης διακρίνονται σε 3 βασικές κατηγορίες, στις οποίες τα συστήματα χωρίζονται με βάση:

1. Το μηχανισμό ελέγχου σε κεντρικά και κατακεντρωμένα. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στα κεντρικά συστήματα οι καταναλωτές επικοινωνούν απευθείας με τις εταιρείες παραγωγής, ενώ στα κατακεντρωμένα οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καταναλωτών προμηθεύουν με πληροφορίες τις εταιρείες παραγωγής σχετικά με τη συνολική κατανάλωση.
2. Τα κίνητρα που προσφέρονται στους καταναλωτές, για να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση, τα οποία χωρίζονται σε αυτά που βασίζονται στο

χρόνο (time-based) ή αυτά που βασίζονται σε συγκεκριμένα ερεθίσματα (incentive-based). Στη πρώτη κατηγορία παρέχονται στους χρήστες οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τη χρονική στιγμή και έχουν προσδιοριστεί με βάση το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας εκείνη τη χρονική στιγμή. Αντιθέτως στη δεύτερη κατηγορία χορηγούνται συγκεκριμένες ή εξαρτώμενες από το χρόνο πληρωμές, οι οποίες στοχεύουν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, που το σύστημα βρίσκεται σε έντονη πίεση.

3. Στη μεταβλητή απόφασης και χωρίζονται σε συστήματα που βασίζονται στο προγραμματισμό έργων και σε συστήματα που βασίζονται στη διαχείριση ενέργειας. Στο προγραμματισμό έργων η βασική λειτουργία είναι ο έλεγχος στο χρόνο ενεργοποίησης του αιτούμενου φορτίου, ο οποίος μπορεί να μετατοπίζεται σε περιόδους αιχμής ζήτησης. Διαφορετικά η ενεργειακή κατανάλωση σε ώρες αιχμής ζήτησης επιτυγχάνεται με τα συστήματα που βασίζονται στη διαχείριση ζήτησης μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση συγκεκριμένων φορτίων.



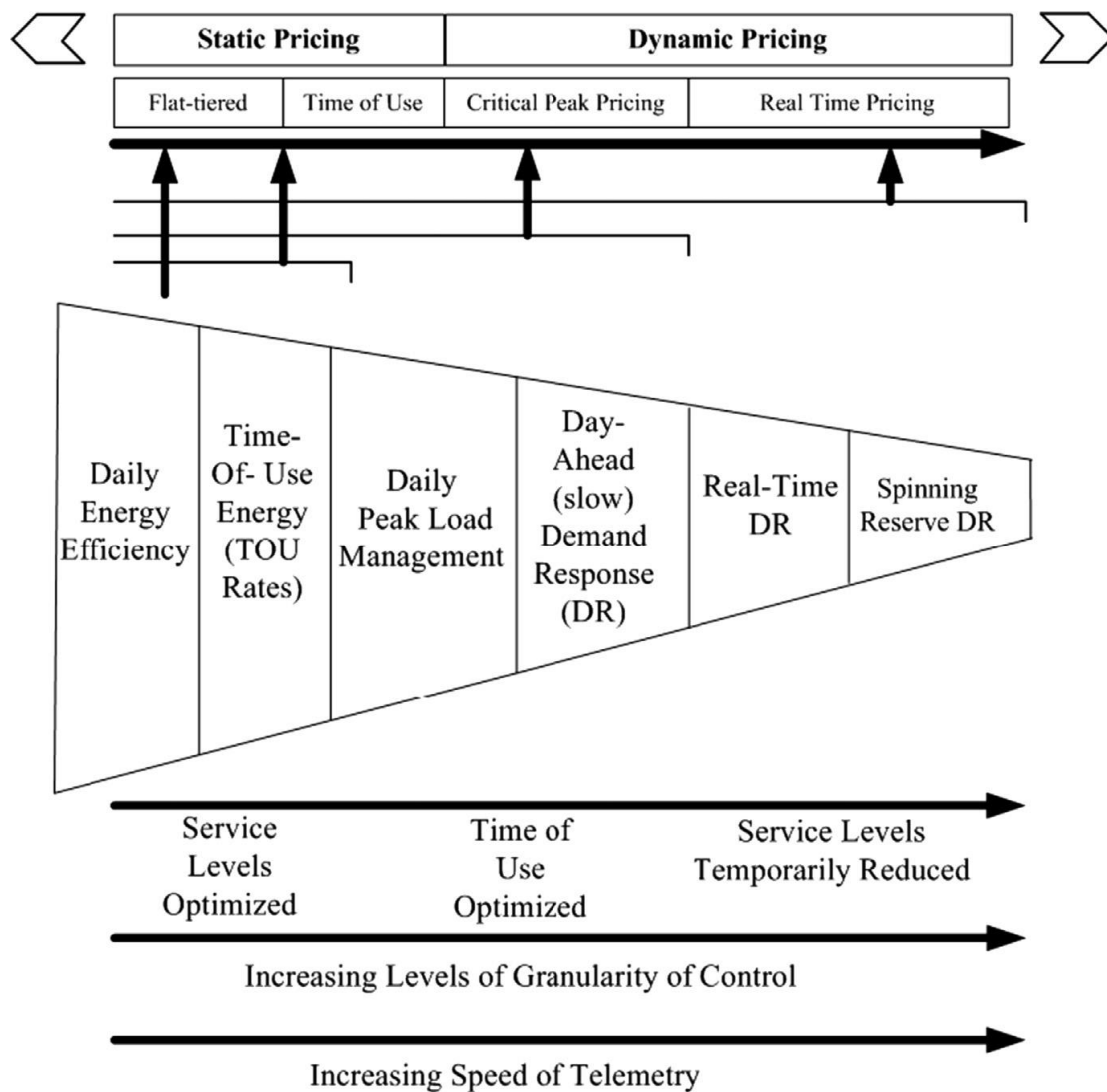
Εικόνα 1: Ταξινόμηση των προγραμμάτων ανταπόκρισης ζήτησης

Από τα πιο συνηθισμένα συστήματα απόκρισης είναι αυτά που βασίζονται στη τιμή (price-based) και με εφαρμογή έξυπνης τιμολόγησης ενθαρρύνουν τους χρήστες να καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια με σύνεση και πιο αποτελεσματικά. Σε αυτά τα προγράμματα οι τιμές καθορίζονται με βάση το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας τις διάφορες χρονικές στιγμές. Οι τελικοί καταναλωτές εφοδιάζονται με αυτές τις

πληροφορίες και παρουσιάζουν την τάση να μειώσουν την κατανάλωση σε χρονικές στιγμές που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή.

Υπάρχουν ποικίλα συστήματα τιμολόγησης τα οποία διαχωρίζονται σε δομές με προκαθορισμένη τιμή ή προγράμματα βασισμένα σε ανταπόκριση ζήτησης με την ενεργή συμμετοχή και των καταναλωτών. Στις δομές προκαθορισμένης τιμής προσφέρονται στους καταναλωτές είτε συγκεκριμένες τιμές είτε τιμές ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την κατανάλωση, με σκοπό να μειώσουν την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούν. Ωστόσο, οι καταναλωτές δεν έχουν συμμετοχή στη διαμόρφωση των τιμών, γιατί δε τους προσφέρονται οικονομικά κίνητρα για να προσαρμόζονται στις ωριαίες μεταβολές των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα στα συστήματα ανταπόκρισης ζήτησης στο καθορισμό των τιμών έχουν ενεργή συμμετοχή και οι τελικοί καταναλωτές, οι οποίοι ανταποκρίνονται στα κίνητρα, που αποστέλλονται από το πάροχο ενέργειας.

Στην εικόνα που ακολουθεί περιγράφονται οι πιθανές επιπτώσεις της αποτελεσματικότητας και της ανταπόκρισης στη ζήτηση και τα μετρά για τα επίπεδα εξυπηρέτησης των πελατών. Οι ευκαιρίες και οι προοπτικές για τόσο την ενεργειακή απόδοση και την ανταπόκριση ζήτησης εξαρτώνται από τον υπάρχον εξοπλισμό των υποδομών του καταναλωτή. Η καθημερινή κατηγορία ενεργειακής απόδοσης των δράσεων στην εικόνα 2 ενσωματώνει δύο δράσεις διατήρησης των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επενδύσεων στην ενεργειακή απόδοση.



Εικόνα 2: Εννοιολογική σκοπιά της αποτελεσματικότητας και της ανταπόκρισης στη ζήτηση

Ξεκινώντας από αυτά που συμμετέχουν λιγότερο οι καταναλωτές και καταλήγοντας σε αυτά που έχουν την πιο ενεργή συμμετοχή παρατίθενται ορισμένες πολιτικές έξυπνης τιμολόγησης σύμφωνα με το [2]:

- Flat pricing, η επίπεδη τιμολόγηση είναι η μορφή τιμολόγηση που χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο στα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα και έχει καθιερωθεί στη συνείδηση των καταναλωτών. Με τη συγκεκριμένη πολιτική οι καταναλωτές κερδίζουν μόνο αν μειώσουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας.
- Time – Of – Use (TOU) τιμολόγηση, είναι η εφαρμογή της επίπεδης τιμολόγησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι τιμές παραμένουν συγκεκριμένες για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, η

οποία θα μπορούσε να είναι συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή συγκεκριμένες μέρες του μήνα. Παρόλα αυτά και πάλι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι περιορισμένη, καθώς και πάλι οι καταναλωτές δε λαμβάνουν συγκεκριμένα πρακτικά κίνητρα για να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους. Η ανταπόκριση των καταναλωτών στις πολιτικές ΤΟΥ, οφείλεται στις χαμηλότερες και δελεαστικές τιμές τις χρονικές στιγμές εκτός αιχμής σε σχέση με τις υψηλές τιμές τις ώρες αιχμής.

- **Critical Peak Pricing (CPP)**, η συγκεκριμένη μέθοδος ενώ παρουσιάζει ομοιότητες με την ΤΟΥ στην ύπαρξη συγκεκριμένων τιμών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, διαφοροποιείται στο γεγονός ότι η τιμή σε τουλάχιστον μία χρονική περίοδο μπορεί να μεταβληθεί, είτε τακτικά είτε στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω πίεσης του συστήματος.
- **Peak Load Pricing (PLP)**, είναι η μέθοδος, όπου η μέρα χωρίζεται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και καθορίζονται διαφορετικές τιμές για κάθε περίοδο. Οι τιμές αυτές ανακοινώνονται στους καταναλωτές μια μέρα πριν. Οι τιμές υπολογίζονται με βάση τη μέση κατανάλωση ισχύος των καταναλωτών σε κάθε χρονική περίοδο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του παρόχου ενέργειας. Επιπρόσθετα, ο καθορισμός των τιμών στοχεύει στη μετατόπιση της ζήτησης από τις περιόδους αιχμής ζήτησης, καθώς περιμένουμε να ανταποκριθούν οι καταναλωτές στις υψηλές τιμές τις ώρες αιχμής.
- **Peak Day Rebates (PDR) ή Peak Time Rebates (PTR)**, αναφέρεται σε μία μέθοδο όπου οι καταναλωτές αποφασίζουν αν θα ανταποκριθούν σε ένα κρίσιμο γεγονός. Πιο συγκεκριμένα, οι πελάτες τιμολογούνται με το βασικό τιμολόγιο, αλλά έχουν και τη δυνατότητα να λαμβάνουν και μία εκπτωτική πληρωμή για κάθε μείωση φορτίου κάτω από ένα υπολογισμένο όριο βάσης του φορτίου.
- **Vickrey-Clare-Groves (VCG)** μηχανισμοί δημοπρασίας, είναι μία ακόμη μέθοδος που βασίζεται στην εθελοντική συμμετοχή των καταναλωτών. Ζητείται από τους καταναλωτές να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται από ένα κεντρικό μηχανισμό για τον υπολογισμό των τιμών στις διάφορες χρονικές στιγμές. Οι πληρωμές παρέχονται στους καταναλωτές με τρόπο, ώστε να τους

παροτρύνουν να δώσουν τις πραγματικές πληροφορίες ζήτησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για να μειώσει τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση ή να τη μεταβάλλει σε ώρες εκτός φορτίου αιχμής.

- Real Time Pricing (RTP), είναι η μέθοδος που απαιτεί τη μεγαλύτερη συμμετοχή των καταναλωτών. Στο πλαίσιο αυτής της μεθόδου ο ενεργειακός πάροχος αναγγέλλει τις τιμές της ενέργειας σε κυλιόμενη βάση, δηλαδή οι τιμές καθορίζονται και ανακοινώνονται πριν από την έναρξη κάθε χρονικής περιόδου. Για αυτό και η επιτυχία της συγκεκριμένης μεθόδου βασίζεται στη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας του ευφυούς δικτύου, η οποία μαζί με την εφαρμογή ενός ελεγκτή διαχείρισης ενέργειας (EMC) στις εγκαταστάσεις του καταναλωτή αυξάνει την ταχύτητα λήψης αποφάσεων. Μία από τις κυριότερες προκλήσεις για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτεί τη συνεχή επικοινωνία μεταξύ του παρόχου ενέργειας και των καταναλωτών, το οποίο δεν είναι ελκυστικό από την οπτική του καταναλωτή. Επιπρόσθετα η μαζική ροή δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ του παρόχου ενέργειας και του ελεγκτή διαχείρισης ενέργειας, η έλλειψη αποτελεσματικών έξυπνων μετρήσεων και η υψηλή πολυπλοκότητα μπορούν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων υπάρχει και η εναλλακτική μέθοδος Day-Ahead RTP, όπου οι πραγματικού χρόνου προβλεπόμενες τιμές της επόμενης ημέρας ανακοινώνονται στους καταναλωτές εκ των προτέρων και χρεώνονται με βάση αυτές για την κατανάλωση τους την επόμενη ημέρα.

Δύο από τις συνηθέστερες πολιτικές τιμολόγησης είναι η TOU και η Real – Time τιμολόγηση. Σε ένα σενάριο **τιμολόγησης πραγματικού χρόνου**(RTP), οι τιμές συχνά ενημερώνονται ανά μία ώρα, και για αυτό το λόγο υπάρχει μια αυστηρή απαίτηση για γρήγορη απόκριση του χρήστη. Όπως περιγράφεται σε αρκετές μελέτες οι καταναλωτές δεν είναι καλά προετοιμασμένοι, για να ανταποκριθούν στις χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές. Συνεπώς η πρόβλεψη τιμών είναι συχνά αναγκαία για την εφαρμογή τιμολόγησης πραγματικού χρόνου και μπορεί επιπλέον να χρειαστεί και μία μονάδα ελέγχου – διαχείρισης ενέργειας για να βοηθήσει του χρήστες να διαχειριστούν την ηλεκτρική ενέργεια. Αντίθετα στο **μοντέλο TOU** οι τιμές παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια ενός σχετικά μεγάλου χρονικού διαστήματος,

εκτός και αν υπάρχει μία έντονη διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά της ζήτησης των χρηστών ή του κόστους παραγωγής. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει το TOU μοντέλο τιμολόγησης πιο εύκολο να εφαρμοστεί στη πράξη.

Ένα χαρακτηριστικό των πολιτικών TOU είναι ότι οι τιμές καθορίζονται ικανοποιητικά εκ των προτέρων και δεν προσαρμόζονται στη συνέχεια για να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες. Συγκριτικά η δυναμική ή η πραγματικού χρόνου τιμολόγηση αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες συνθήκες και παρέχει το καλύτερο δυνατό σήμα για την οριακή τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή. Οι ποικίλες προσεγγίσεις των πολιτικών τιμολόγησης (πχ Critical Peak Pricing, Variable Peak Pricing) μεταφέρουν την πολιτική TOU σε καλύτερες αναπαραστάσεις των πραγματικών συνθηκών και πιο κοντά στην τιμολόγηση πραγματικού χρόνου. Ωστόσο η αποτελεσματικότητα της τιμολόγησης μειώνεται όταν οι τιμές αποκλίνουν από την τιμολόγηση πραγματικού χρόνου. Ενώ κάθε μετατροπή/βελτίωση της πολιτικής TOU αποτελεί ένα θετικό βήμα σε σχέση με την επίπεδη ή προκαθορισμένη τιμολόγηση, όπου οι τιμές διατηρούνται σταθερές όλες τις ώρες, υπάρχει ακόμη μία μεγάλη ποσότητα πληροφοριών που χάνονται στη διαφορά μεταξύ TOU και τιμολόγησης πραγματικού χρόνου. Η μεταβλητότητα των τιμών πραγματικού χρόνου έχει επιπτώσεις στο κόστος της απώλειας απόδοσης για κάθε σχεδιασμό, εκτός από την πολιτική πραγματικού χρόνου.

Σε αρκετές εργασίες που μελετούν τα ευφυή δίκτυα γίνεται χρήση κάποιων εκ των πολιτικών τιμολόγησης που αναλύθηκαν:

Αρχικά στην εργασία [4] εφαρμόζεται TOU πολιτική τιμολόγησης, για να επηρεαστεί η ζήτηση των χρηστών. Ορίζονται συναρτήσεις τιμολόγησης και για τις εταιρείες και για τους χρήστες και αναζητείται το σημείο ισορροπίας στο οποίο υπάρχουν οι βέλτιστες τιμές ενέργειας και οι αποκρίσεις των χρηστών. Υπάρχει η δυνατότητα να προστεθούν και διαφορετικοί τύποι χρηστών και να βελτιστοποιηθούν οι τιμές για κάθε διαφορετικό τύπο. Η στρατηγική τιμολόγησης που χρησιμοποιείται είναι σχετικά ευέλικτη καθώς είτε ορίζονται ωριαίες τιμές είτε χωρίζεται η ημέρα σε πολλαπλά χρονικά τμήματα και ορίζεται διαφορετική τιμή σε κάθε χρονικό τμήμα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου προκύπτει ότι η συγκεκριμένη

στρατηγική μπορεί να εξομαλύνει τη ζήτηση των χρηστών, να αυξήσει τα έσοδα των εταιρειών, να μειώσει τις τιμές μονάδας για τους χρήστες και να εξασφαλίσει συνολικά έσοδα. Ακόμη το σταθμισμένο φορτίο χρήστη θα βοηθήσει πιθανότατα να διασφαλιστεί ένα πιο σταθερό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Αντίστοιχα και στην μελέτη [5] συναντούμε ένα καινοτόμο αλγόριθμο για την εύρεση μια βέλτιστης ΤΟΥ τιμολόγησης σε μονοπωλιακές αγορές χρησιμότητας. Γενικά ένα πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης ωφελεί τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας και πρέπει να βασίζεται στους τελικούς χρήστες για να αλλάξουν σκόπιμα τη χρήση συσκευών και συστημάτων, που γενικά συνεπάγεται αλλαγές στο τρόπο ζωής ή τις ανέσεις τους ή και σε λειτουργικές διαδικασίες. Οι αλλαγές αυτές γίνονται αποδεκτές μόνο εάν οι καταναλωτές έχουν συμφέρον είτε μέσω οικονομικών αποζημιώσεων είτε μέσω της βελτιστοποίησης της αξιοπιστίας στη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Για αυτό στο συγκεκριμένο paper προτείνεται μια μέθοδος για την εύρεση της βέλτιστης τιμολόγησης, που μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του δικτύου και να μειώσει το κόστος. Για τον υπολογισμό της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας τις διάφορες χρονικές στιγμές διατυπώνεται μια μέθοδος επαναληπτικού γραμμικού προγραμματισμού. Το ενδεικτικό παράδειγμα, που παρατίθεται, καταδεικνύει την επίδραση της στρατηγικής απόκρισης ζήτησης στη μείωση της μέγιστης ισχύος. Η απόδοση του προγράμματος ανταπόκρισης ζήτησης αποδεικνύεται από τη μείωση του φορτίου αιχμής και την ελαστικότητα της ζήτησης.

Αντιθέτως στην εργασία [6] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τη βέλτιστη πραγματικού χρόνου τιμολόγηση, που βασίζεται στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας. Στο μοντέλο του συστήματος, οι συνδρομητές και ο ενεργειακός πάροχος αλληλοεπιδρούν αυτόματα μεταξύ τους μέσω ενός περιορισμένου αριθμού ανταλλαγών μηνυμάτων και εκτελώντας ένα κατανεμημένο αλγόριθμο για να βρεθεί το βέλτιστο επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε συνδρομητή, οι βέλτιστες τιμές για να διαφημίζεται από τον πάροχο ενέργειας καθώς επίσης και η βέλτιστη δυνατότητα παραγωγής για τον ενεργειακό πάροχο. Η υλοποίηση του μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα κατανεμημένο τρόπο για να μεγιστοποιηθεί η συνολική χρησιμότητα όλων των χρηστών και να μειωθεί το κόστος που επιβλήθηκε από τον πάροχο ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση

κάτω από το δυναμικό παραγωγής. Μέσα από τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα του paper επιβεβαιώνεται ότι με την εφαρμογή της συγκεκριμένης πολιτικής δεν επωφελείται μόνο ο ενεργειακός πάροχος αλλά και οι καταναλωτές. Σε αυτή τη μελέτη έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των έξυπνων μετρητών και του παρόχου ενέργειας. Οι προτιμήσεις των συνδρομητών και τα πρότυπα ενεργειακής τους κατανάλωσης διαμορφώνονται σε μορφή προσεκτικά επιλεγμένων λειτουργιών χρησιμότητας βασισμένα σε έννοιες της μικροοικονομικής.

Ομοίως με την προηγούμενη μελέτη στην εργασία [7], χρησιμοποιείται ένα μοντέλο με στόχο τη βελτιστοποίηση της χρησιμότητας του καταναλωτή, που υπόκειται όμως σε ένα ελάχιστο ημερήσιο όριο κατανάλωσης φορτίου, σε μέγιστο και ελάχιστο ωριαίο επίπεδο φορτίου και αναδιατασσόμενα όρια σε αυτά τα επίπεδα φορτίου. Για την επιλογή της τιμής χρησιμοποιούνται ισχυρές τεχνικές βελτιστοποίησης. Το μοντέλο αποτελείται από ένα απλό γραμμικό αλγόριθμο, που είναι εφικτό να ενσωματωθεί σε σύστημα διαχείρισης ενέργειας από νοικοκυριά ή μικρές επιχειρήσεις. Η αλληλεπίδραση πραγματοποιείται σε ωριαία βάση χρησιμοποιώντας έναν “rolling window” (κυλιόμενου παράθυρου) αλγόριθμο για να εξετάσει την ενεργειακή κατανάλωση καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Η λειτουργία του αλγορίθμου είναι η εξής:

- Αρχικά ο καταναλωτής έχει ένα σύστημα επικοινωνίας που επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία με τον ενεργειακό προμηθευτή σε ωριαία βάση.
- Λαμβάνει κάθε ωριαία τιμή πριν την αντίστοιχη ώρα (πχ 10 λεπτά πριν)
- Περιλαμβάνει μια ρουτίνα πρόβλεψης τιμής που παρέχει διαστήματα εμπιστοσύνης των τιμών για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας σε μία ωριαία βάση. Εναλλακτικά, λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες από τον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Έχει μια ρουτίνα βελτιστοποίησης για να λύσει το πρόβλημα και να αντλήσει τη βέλτιστη ωριαία κατανάλωση και το βέλτιστο επίπεδο της ζήτησης να σταλεί στον ενεργειακό προμηθευτή πριν την συγκεκριμένη ώρα.

Στην δεύτερη κατηγορία με τα προσφερόμενα κίνητρα ανήκουν ακόμα και τα συστήματα ανταπόκρισης ζήτησης που αποτελούνται από προκαθορισμένα ή

εξαρτώμενα από το χρόνο **κίνητρα (πληρωμές)** που απευθύνονται στους καταναλωτές, για να μειώσουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους που επικρατεί έντονη συμφόρηση. Η εγγραφή και η ανταπόκριση των καταναλωτών είναι εθελοντική, αν και ορισμένα από αυτά τα προγράμματα επιφέρουν ποινές για τους καταναλωτές που αποτυγχάνουν να έχουν τη συμβατική απόκριση, όταν τα γεγονότα έχουν δηλωθεί. Τα προγράμματα ανταπόκρισης ζήτησης με προσφερόμενα κίνητρα μπορούν να διαιρεθούν επιπροσθέτως σε κλασσικά προγράμματα και προγράμματα με βάση την αγορά, ενώ μπορούν να προσφέρονται και σε λιανικές και σε χονδρικές αγορές.

Οι καταναλωτές που συμμετέχουν στα κλασσικά προγράμματα βασισμένα σε κίνητρα λαμβάνουν πληρωμές συμμετοχής, συνήθως ως πιστώσεις λογαριασμών ή ποσοστά έκπτωσης. Ένα από τα συνηθέστερα κλασσικά προγράμματα είναι το πρόγραμμα άμεσου ελέγχου φορτίου, **Direct Load Control (DLC)**, όπου προσφέρονται προκαταβολικές πληρωμές στους καταναλωτές ώστε να επιτρέψει στην εταιρεία να ελέγχει απομακρυσμένα ή να απενεργοποιεί τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό των καταναλωτών. Εφαρμόζεται κυρίως σε οικιακούς καταναλωτές ή σε μικρούς εμπορικούς καταναλωτές, που μπορούν να προσαρμοστούν σχετικά άμεσα. Επιπλέον κλασσικό πρόγραμμα αποτελεί και το διακοπτόμενο φορτίο, **Interruptible/Curtailable (I/C) Load**, όπου δίνονται στους χρήστες προκαταβολικά κίνητρα. Σε αυτό το πρόγραμμα λαμβάνονται υπόψη οι επιλογές περικοπών, όπως περικοπές σε κάποιο συγκεκριμένο κομμάτι του ηλεκτρικού φορτίου ή της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Προσφέρονται ακόμη εκπτώσεις ή πιστώσεις λογαριασμών με αντάλλαγμα περικοπές σε κρίσιμες στιγμές για το δίκτυο, βέβαια σε περίπτωση αποτυχίας να φτάσουν τα επιθυμητά επίπεδα υπάρχουν και πρόστιμα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα απευθύνεται κυρίως σε πιο μεγάλους καταναλωτές.

Στα προγράμματα που βασίζονται στην αγορά, οι καταναλωτές αμείβονται με χρηματικά ποσά για την απόδοσή τους, που εξαρτώνται από την ποσότητα μείωσης χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια κρίσιμων συνθηκών. Για παράδειγμα ένα σύνηθες πρόγραμμα με βάση την αγορά είναι το επείγον πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης, **Emergency DR Program (EDRP)**, το οποίο ταυτίζεται με ένα συνδυασμό του προγράμματος άμεσου ελέγχου φορτίου και του προγράμματος

διακοπτόμενου φορτίου. Επιπροσθέτως το πρόγραμμα χωρητικότητας αγοράς, **Capacity Market Program (CMP)**, απευθύνεται σε καταναλωτές που μπορούν να προσφέρουν προκαθορισμένες μειώσεις φορτίου, για να αντικαταστήσουν τη συμβατική παραγωγή ή τους πόρους παράδοσης.

2.3 Παιγνιοθεωρητικά μοντέλα ανταπόκρισης στη ζήτηση

Το ευφύες δίκτυο του μέλλοντος έχει οραματιστεί σύμφωνα και με τις προηγούμενες παραγράφους σαν ένα σύστημα μεγάλης κλίμακας που περιλαμβάνει προηγμένες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, επικοινωνίας, ελέγχου και πληροφοριακών τεχνολογιών. Για να φιλοξενήσει αυτές τις τεχνολογίες θα πρέπει να αξιοποιήσει στέρεα και αξιόπιστα μαθηματικά εργαλεία που μπορούν να εξασφαλίσουν μια αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων. Σε αυτό το πλαίσιο, εξερευνώνται οι δυνατότητες εφαρμογής παιγνιοθεωρητικών μοντέλων για την αντιμετώπιση ανοιχτών και άμεσων προβλημάτων [18] και στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για το πρόβλημα της ανταπόκρισης στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα υπάρχει η ανάγκη για τη δημιουργία συστημάτων και αλγορίθμων που να μπορεί να συλλάβει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του αναδυόμενου ευφυούς δικτύου:

1. Η ανάγκη για κατανεμημένη λειτουργία των κόμβων του ευφυούς δικτύου για λόγους επικοινωνίας και ελέγχου
2. Η ετερογενής φύση του ευφυούς δικτύου, το οποίο αποτελείται από μία ποικιλία κόμβων, όπως μικρο-δίκτυα, ευφυείς μετρητές, συσκευές και άλλα, το καθένα από τα οποία έχει διαφορετικές ικανότητες και στόχους
3. Η ανάγκη για αποτελεσματικές προηγμένες τεχνικές ενσωμάτωσης των συστήματα ισχύος, επικοινωνιών και επεξεργασίας σήματος
4. Την ανάγκη για χαμηλής πολυπλοκότητας κατανεμημένους αλγορίθμους που μπορούν να εκπροσωπούν αποτελεσματικά ανταγωνιστικά ή συνεργατικά σενάρια μεταξύ των διάφορων οντοτήτων του ευφυούς δικτύου.

Σε αυτό το πλαίσιο η θεωρία παιγνίων θα αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να αντιμετωπίσει πολλές από αυτές τις προκλήσεις, όπως είναι εμφανές και από τις μελέτες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια.

Για παράδειγμα στην εργασία [9] χρησιμοποιείται ένα **μη συνεργατικό (non-cooperative)** παίγνιο για την επίλυση του προβλήματος. Αρχικά προσεγγίζεται ένα πρακτικό σενάριο της πλευράς της διαχείρισης ζήτησης, όπου οι καταναλωτές, δρουν εγωιστικά και ανταγωνίζονται για να ελαχιστοποιήσουν το ατομικό τους ενεργειακό κόστος προγραμματίζοντας το μελλοντικό τους προφίλ κατανάλωσης ενέργειας. Υιοθετείται ένας στιγμιαίος μηχανισμός τιμολόγησης φορτίου για να πεισθούν αποτελεσματικά οι καταναλωτές να μεταβάλλουν την κατανάλωση τους από τις ώρες αιχμής και να χρεωθούν δίκαια οι καταναλωτές για την ενεργειακή τους κατανάλωση. Για αυτό πρώτα εφαρμόζεται ένα παίγνιο για να μοντελοποιησει αθροιστικά τις στρατηγικές συμπεριφορές των εγωιστών καταναλωτών. Στη συνέχεια, για το σενάριο όπου υπάρχει μια κεντρική μονάδα που υπολογίζει και στέλνει το συγκεντρωτικό φορτίο πραγματικού χρόνου σε όλους τους καταναλωτές, αναπτύσσεται ένας χρονικά κλιμακώσιμος, κατανεμημένος, επαναληπτικός αλγόριθμος με αποδείξιμη σύγκλιση για να επιτευχθεί το σημείο ισορροπίας Nash του παιγνίου. Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη την εναλλακτική περίπτωση όπου η κεντρική μονάδα δεν υπάρχει, αλλά οι καταναλωτές συνδέονται και θα ήθελαν να μοιράζονται τις εκτιμώμενες πληροφορίες τους με τους άλλους παρουσιάζεται ένας κατανεμημένος σύγχρονος βασισμένος σε συμφωνίες αλγόριθμος και ένας κατανεμημένος ασύγχρονος gossiping αλγόριθμος (άμεσων συνομιλιών), με τους οποίους οι καταναλωτές μπορούν να επιτύχουν ισορροπία Nash του παιγνίου, μέσα από την ανταλλαγή πληροφοριών με τους άμεσους γείτονες τους. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν μπορούν γρήγορα να συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας Nash του διατυπωμένου παιγνίου και αποτελεσματικά να πείσουν τους καταναλωτές να μεταβάλουν την κατανάλωση τους σε ώρες αιχμής, το οποίο είναι ωφέλιμο τόσο για τους καταναλωτές όσο και για το σύνολο του δικτύου.

Επιπλέον έκτος από τα απλά μη-συνεργατικά παίγνια υπάρχουν και άλλες υποκατηγορίες μη-συνεργατικών παιγνίων που εφαρμόζονται σε προγράμματα

ανταπόκρισης ζήτησης, όπως το παίγνιο συμφόρησης ή το παίγνιο Stackelberg, που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες ευφών δικτύων.

Στην εργασία [8] εφαρμόζεται **παίγνιο συμφόρησης (congestion)** σε επίπεδο δικτύου. Προτείνεται κατανεμημένη διαχείριση φορτίου στις δομές ευφούς δικτύου για τον έλεγχο της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής, με τη βοήθεια δυναμικών στρατηγικών τιμολόγησης. Επειδή πρόσφατα οι κατανεμημένες προσεγγίσεις, όπου οι αποφάσεις παίρνονται σε τοπικό επίπεδο και απευθείας από τον τελικό καταναλωτή, έχουν λάβει πιο έντονο ενδιαφέρον, στην εργασία αυτή προτείνεται ένα παιχνίδι όπου οι παίκτες είναι οι τελικοί πελάτες, οι στρατηγικές είναι η κατανομή της ζήτησης σε όλη την ημέρα και η συνάρτηση κόστους του σκοπού των παικτών για ελαχιστοποίηση είναι η τιμή με την οποία θα χρεώνονται από τον πάροχο, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και τις δικές τους προτιμήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αυτή ασχολείται με το πρόβλημα του ελέγχου του φορτίου με την εφαρμογή κατανεμημένου προγραμματισμού για την κατανάλωση ενέργειας του τελικού χρήστη βασισμένου σε μία δυναμική στρατηγική τιμολόγησης. Ο σκοπός είναι να καταστεί δυνατή μια πιο αποτελεσματική και επεκτάσιμη διαχείριση των διακοπών ρεύματος με την εφαρμογή μηχανισμών εξισορρόπησης φορτίων. Το πρόβλημα διατυπώνεται σε όρους ενός παιχνιδιού συμφόρησης, το οποίο παρέχει ένα πλαίσιο για τη μοντελοποίηση του ανταγωνισμού του δικτύου, όπου το κόστος που προκύπτει είναι μία συνάρτηση του επιπέδου της συμφόρησης, δηλαδή της ζήτησης ισχύος των ενεργών χρηστών. Τα παίγνια συμφόρησης είναι πολύ στενά συνδεδεμένα με τα δυναμικά παίγνια και παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά. Η εύρεση μία λύσης σε ένα παιχνίδι συμφόρησης είναι ισοδύναμο με την εύρεση μιας (τοπικής) βέλτιστης λύσης σε αυτή τη δυναμική συνάρτηση. Συνεπώς παρόλο που το σύστημα είναι αποκεντρωμένο και όλοι οι παίκτες δρουν εγωιστικά, αναζητώντας να βελτιστοποιήσουν τους δικούς τους ατομικούς στόχους καταλήγουν στη βελτιστοποίηση ενός γενικού στόχου, της δυναμικής συνάρτησης (potential function), και μάλιστα σε ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων ανεξάρτητα από την ενήμερη ακολουθία. Τα αποτελέσματα προσομοιώθηκαν για 3 διαφορετικά προφίλ ζήτησης των χρηστών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του διανύσματος βαρών, που εκφράζει τις προτιμήσεις κάθε χρήστη στην ενεργειακή κατανάλωση και καθορίζει πόσο επιθετικά εφαρμόζεται η διαχείριση ζήτησης ως συνάρτηση του

κόστους. Τα βάρη έχουν συσταθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν περισσότερο επιθετικά ή συντηρητικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας, μια επιλογή η οποία υποτίθεται αφήνεται στους χρήστες σύμφωνα με την ανοχή τους σε ένα ευμετάβλητο προφίλ ζήτησης σε αντάλλαγμα με χαμηλότερες τιμές ενέργειας. Τελικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα διαφορετικά προφίλ ζήτησης των χρηστών δείχνουν ότι είναι δυνατό να ληφθεί μια ομαλότερη καμπύλη παραγωγής ενώ ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών.

Στην εργασία [10] εφαρμόζεται ένα **παίγνιο Stackelberg**, όπου διαμορφώνεται από τον ελεγκτή της ενεργειακής διαχείρισης σε κάθε σπίτι και τον πάροχο υπηρεσιών, στο οποίο ο ελεγκτής της ενεργειακής διαχείρισης που προγραμματίζει τη λειτουργία των συσκευών παίζει το παίγνιο στο επίπεδο των ακολούθων και ο πάροχος που καθορίζει τις τιμές πραγματικού χρόνου σύμφωνα με το σημερινό προφίλ ενεργειακής χρήσης παίζει το παίγνιο στο επίπεδο του ηγέτη. Η διαδοχική ισορροπία επιτυγχάνεται μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το σύστημα μας δε μπορεί μόνο να εξοικονομήσει χρήματα για τους καταναλωτές, αλλά και να μειώσει το φορτίο αιχμής και τη διαφορά μεταξύ ζήτησης και προσφοράς, αποφεύγοντας το πρόβλημα ανάκαμψης της αιχμής. Επιπλέον χρησιμοποιώντας ελεγκτές ενεργειακής διαχείρισης οι καταναλωτές μπορούν να εκμεταλλευτούν τις προτεινόμενες πραγματικού χρόνου τιμές, για να μειώσουν τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας.

3

Αρχιτεκτονική του προτεινόμενου μοντέλου ανταπόκρισης στη ζήτηση

3.1 Στόχοι του προτεινόμενου πλαισίου

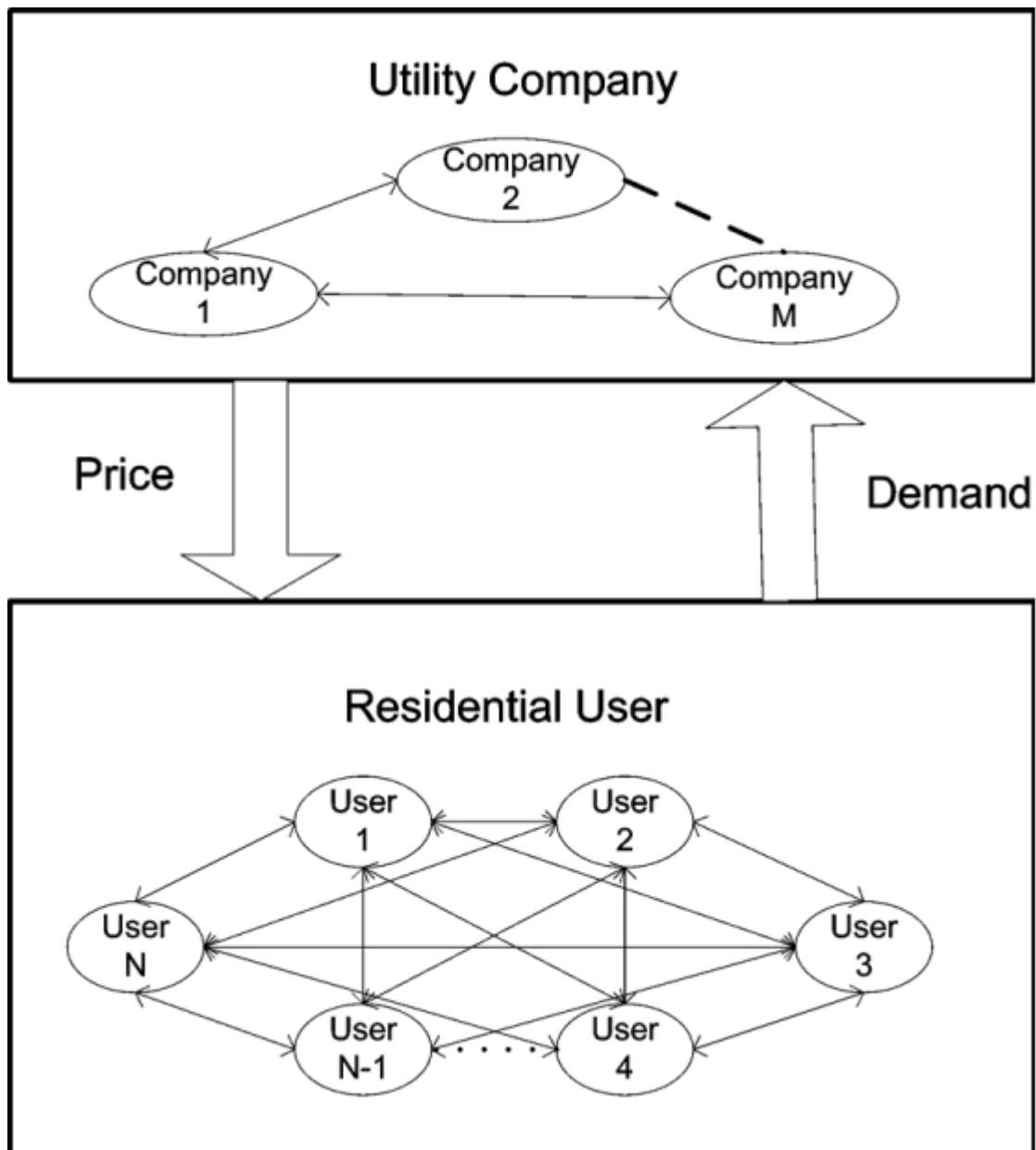
Αρχικά είναι αξιοσημείωτο ότι οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση μόνο μίας πλευράς, είτε της πλευράς των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε της πλευράς των οικιακών χρηστών μη λαμβάνοντας υπόψη την άλλη πλευρά. Στη συγκεκριμένη έρευνα όμως με σκοπό να λάβουμε υπόψη τα συμφέροντα και των δύο πλευρών, κατασκευάζεται μία διαφορετική αναλυτική δομή, η οποία θα μπορεί να συλλάβει τους διαφορετικούς χαρακτήρες και των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και των χρηστών. Άρα με μία τέτοια προοπτική η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται όταν ικανοποιούνται οι στόχοι και των δύο πλευρών ταυτόχρονα.

Οι οικιακοί χρήστες στοχεύουν είναι να εξασφαλίσουν τη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας στη χαμηλότερη τιμή για να βελτιστοποιήσουν τη χρησιμότητα τους. Αντιθέτως οι εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ως στόχο να πουλήσουν την ηλεκτρική ενέργεια στην υψηλότερη δυνατή τιμή. Όπως είναι εμφανές έχουν διαφορετικά και σχεδόν αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα και για αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια κατάλληλη στρατηγική και για τις εταιρείες και για τους χρήστες που να διασφαλίζει την ισορροπία ανάμεσα σε προσφορά και ζήτηση.

Η αλληλεπίδραση όμως μεταξύ των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και των οικιακών καταναλωτών παριστάνεται αναλυτικά από το ακόλουθο διάγραμμα. Από το διάγραμμα και από τη μελέτη [1] είναι πλέον εμφανές ότι εκτός από την αμφίδρομη ροή πληροφοριών μεταξύ των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και των καταναλωτών υπάρχουν σε αυτό το σενάριο δύο επίπεδα ανταγωνισμού, ένα μεταξύ των εταιρειών και ένα μεταξύ των χρηστών:

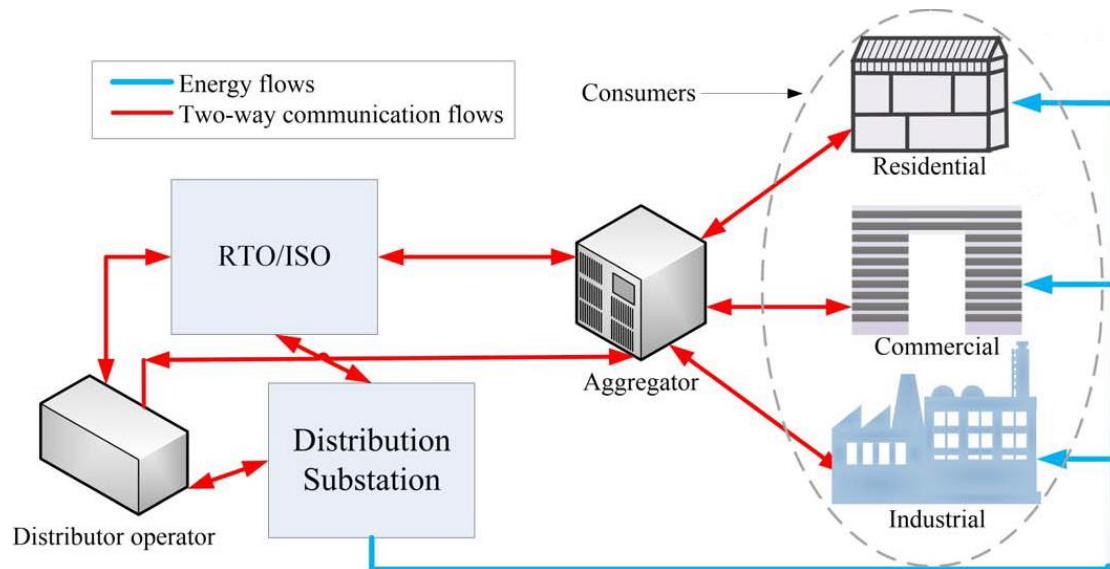
- Το επίπεδο ανταγωνισμού των εταιρειών, που αποτελεί και το υψηλό επίπεδο ανταγωνισμού, και αφορά την προσπάθεια των εταιρειών να επικρατήσουν στην αγορά, ώστε να είναι πιο υψηλά στις προτιμήσεις των καταναλωτών, δηλαδή να πουλήσουν ηλεκτρική ενέργεια στους οικιακούς χρήστες. Βελτιστοποίηση της διαδικασίας επιτυγχάνεται με τη σωστή και προσεκτική επιλογή της ποσότητας παραγωγής και της τιμής, ώστε να μεγιστοποιηθεί η χρησιμότητα της.
- Το επίπεδο ανταγωνισμού των οικιακών χρηστών, που αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο ανταγωνισμού, αναφέρεται στη προσπάθεια των καταναλωτών να τη χρησιμότητα τους επιλέγοντας μία εταιρεία, για να αγοράσουν ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα τους εξασφαλίσει τη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα ενέργειας στη χαμηλότερη τιμή.

Σε αυτή τη μελέτη σκοπός είναι να βελτιστοποιηθούν σε μία χρονική στιγμή και τα δύο επίπεδα ανταγωνισμού και ουσιαστικά να ικανοποιηθούν και οι οικιακοί χρήστες και οι εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3: Περιγραφή του συνολικού προβλήματος ανταπόκρισης ζήτησης

3.2 Αρχιτεκτονική του προγράμματος ανταπόκρισης ζήτησης των ευφυών δικτύων



Εικόνα 4: Κύριοι συμμετέχοντες του προγράμματος ανταπόκρισης ζήτησης

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι κύριοι συμμετέχοντες στο πρόγραμμα απόκρισης ζήτησης, αλλά και ο τρόπος που συνδέονται και γίνεται η εκτέλεση του προγράμματος [2]. Πιο αναλυτικά, όπως είναι γνωστό το πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης στοχεύει στον έλεγχο της καταναλωτικής συμπεριφοράς των πελατών, η οποία στο πέρασμα του χρόνου επηρεάζεται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη λειτουργία αυτή συνεργάζονται τέσσερις κύριοι παράγοντες:

- Οι ενεργειακοί καταναλωτές που συμμετέχουν στο πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης και μπορούν να είναι οικιακοί, εμπορικοί ή βιομηχανικοί καταναλωτές.
- Ένα aggregator (ένα πρόγραμμα που συλλέγει πληροφορίες από όλα τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα μαζί του και επιτρέπει την ανταλλαγή αυτών των πληροφοριών μεταξύ των συνδεδεμένων μερών) ανταπόκρισης ζήτησης, που είναι συνδεδεμένο με όλους τους καταναλωτές και εκτελεί το πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης.
- Ένα διαχειριστή του συστήματος διανομής (Distribution System Operator, DSO), ο οποίος θα ελέγχει το δίκτυο διανομής.

- Ένα ανεξάρτητο διαχειριστή συστήματος (Independent System Operator, ISO) ή ένα περιφερειακό διαχειριστή μεταφοράς (Regional Transmission Operator, RTO).

Σε γενικές γραμμές ένα πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης ξεκινά από το πρότυπο ISO/RTO, όπου καθορίζονται η προτιμώμενη ποσότητα ζήτησης και η διάρκεια χρόνου που προσφέρεται. Αυτές οι πληροφορίες μεταφέρονται στους aggregators του προγράμματος οι οποίοι επιλέγουν τους συμμετέχοντες πελάτες με βάση τη διαθεσιμότητα τους. Λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των πελατών που συμφωνούν με το πρόγραμμα ανταπόκρισης ζήτησης ο aggregator υπολογίζει τη συνολική ζήτηση και επιστρέφει τα δεδομένα στο διαχειριστή ISO/RTO. Για να αποφύγει τα προβλήματα αβεβαιότητας στο σύστημα διανομής, οι aggregators μπορεί να μεταφέρουν τις πληροφορίες για τη συνολική ζήτηση αρχικά στο DSO, ο οποίος στη συνέχεια ενημερώνει τους πλέον διαθέσιμους υποσταθμούς για τη συνολική ζήτηση. Σε αυτή τη περίπτωση οι υπολογισμοί για την ανταπόκριση ζήτησης διενεργούνται στους aggregators της ανταπόκρισης ζήτησης και χρησιμοποιούνται μετέπειτα από τον DSO για την εκτέλεση διαδικασιών βελτιστοποίησης ή για την ανακάλυψη προβλημάτων στο δίκτυο διανομής.

Το παραπάνω μοντέλο με τους τέσσερις συμμετέχοντες αποτελεί ένα γενικό μοντέλο, και μπορεί ενδεχομένως να περιλαμβάνει και διάφορα άλλα μέσα, τα οποία να λειτουργούν συνεργατικά ή ανταγωνιστικά. Η συμπεριφορά του όμως είναι αρκετά παρόμοια με αυτή που περιεγράφηκε προηγουμένως. Σύμφωνα με τη φύση των συστημάτων με τα πολλαπλά μέσα ταιριάζουν περισσότερο σε περιβάλλον με μικροδίκτυα (microgrids).

3.3 Δικτυακές συνδέσεις των ευφύων δικτύων

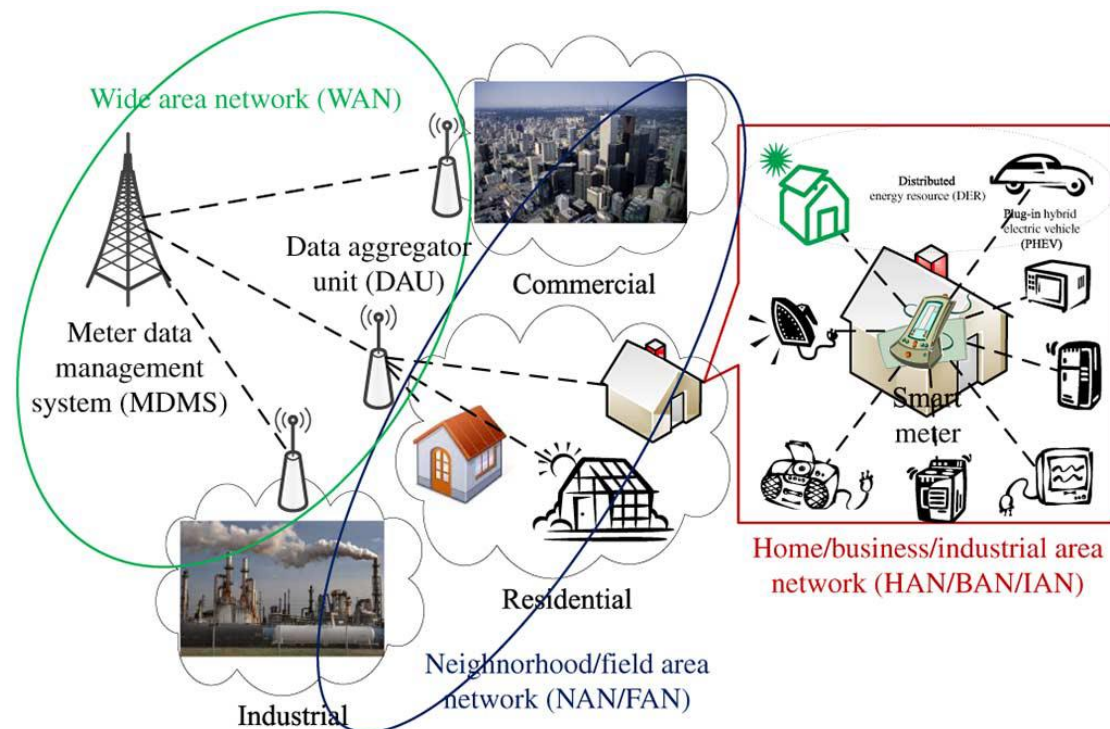
Σύμφωνα και με τα προηγούμενα, η εισαγωγή ευφύων συστημάτων μέτρησης και η διαθεσιμότητα της αμφίδρομης επικοινωνίας είναι δύο βασικές τεχνικές οδήγησης για να ενσωματωθούν τα προγράμματα ανταπόκρισης ζήτησης στα ευφυή δίκτυα. Όπως απεικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα από το [2] υπάρχουν τρεις τύποι

επικοινωνιακών δικτύων, οι οποίοι διαφέρουν σε μέγεθος και τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιούνται για ζήτησης. Μια ποικιλία από επικοινωνιακά πρότυπα και τεχνολογίες συνυπάρχουν στα διαφορετικά επικοινωνιακά δίκτυα του ευφυούς δικτύου.

Τα **οικιακά δίκτυα** (Home Area Networks, HAN), τα δίκτυα επιχειρήσεων (Business Area Network, BAN) και τα βιομηχανικά δίκτυα (Industrial Area Network, IAN) αναπτύσσονται μέσα σε οικιακές μονάδες, εμπορικά κτίρια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις για τη σύνδεση πολλαπλών ηλεκτρικών συσκευών σε έξυπνους μετρητές μέσω IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 802.11 (WiFi) ή επικοινωνία γραμμής ρεύματος (power-line connection, PLC).

Τα **δίκτυα γειτονικής περιοχής** (Neighborhood Area Network, NAN) ή δίκτυα τομέα (Field Area Network, FAN) υποστηρίζουν επικοινωνίες μεταξύ σταθμών διανομής και ηλεκτρικών συσκευών τομέα για το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία του μικροδικτύου. Συνδέουν πολλαπλούς έξυπνους μετρητές στη μονάδα συγκεντρωτικών στοιχείων (Data Aggregation Unit, DAU) μέσω IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16m (παγκόσμια διαλειτουργικότητα για τη πρόσβαση μικροκυμάτων, WiMax) ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (πχ general packet radio service, GPRS, 3G, LTE (μακροπρόθεσμη εξέλιξη)).

Τα **ευρεία δίκτυα** (Wide Area Networks, WAN) διευκολύνουν τις επικοινωνίες μεταξύ ογκωδών παραγωγών, του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και του συστήματος διαχείρισης δεδομένων του μετρητή (MDMS) μέσω οπτικών ινών επικοινωνίας, μετάδοσης μικροκυμάτων ή δικτύων κινητής τηλεφωνίας.



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική της επικοινωνίας για την ανταπόκριση ζήτησης

3.3.1 Συνδέσεις δικτύου της συγκεκριμένης μελέτης

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής χρησιμοποιούνται διάφορες δομές για να επικοινωνούν οι καταναλωτές μεταξύ τους και με τις εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και οι εταιρείες μεταξύ τους.

Αρχικά κάθε οικιακός χρήστης εξοπλίζεται με έξυπνους μετρητές, που του επιτρέπουν να προγραμματίζει την κατανάλωση του σε ηλεκτρική ενέργεια και δημιουργεί ένα οικιακό δίκτυο (Home Area Network, HAN). Το οικιακό δίκτυο είναι ένας τύπος τοπικού δικτύου με σκοπό τη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ των ψηφιακών συσκευών μέσα ή σε κοντινή απόσταση από μία οικία. Συσκευές ικανές να συμμετέχουν σε αυτό το δίκτυο, για παράδειγμα έξυπνες συσκευές αποκομίζουν συχνά βελτιωμένες δυνατότητες μέσα από την ικανότητα τους να αλληλοεπιδρούν. Δεδομένο όμως είναι επιπλέον ότι οι επιχειρήσεις λαμβάνουν μέτρα για να βελτιώσουν την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα με την αναβάθμιση των υποδομών και την προσθήκη της επικοινωνίας σε όλο το δίκτυο. Ένας συγκεκριμένος τομέας εστίασης είναι η λεγόμενη “utility last mile”, το δίκτυο γειτονικής περιοχής

(Neighborhood Area Network, NAN). Τα NAN επιτρέπουν στις υποδομές του ευφυούς δικτύου να συνδέονται στους έξυπνους μετρητές και στον εξοπλισμό αυτοματισμού υποδομής σε πύλες του ευρέως δικτύου. Υπάρχουν αρκετές συγκεκριμένες χρήσεις για την επικοινωνία με τα δίκτυα γειτονικής περιοχής καθώς βοηθούν ιδιαίτερα στη χρήση των έξυπνων μετρητών, στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών και στη βελτίωση της αμφίδρομης επικοινωνίας.

Γενικά πολλές επιχειρήσεις αναγνωρίζουν την αξία ενός διαλειτουργικού δικτύου γειτονικής περιοχής. Ποικίλες αγορές περιφερειών έχουν εκφράσει την επιθυμία να χρησιμοποιήσουν τα πρότυπα, αλλά προς το παρόν αυτές οι αναπτύξεις χρησιμοποιούν ιδιόκτητα πρωτόκολλα δικτύων γειτονικής περιοχής. Η Ιαπωνική αγορά ήταν μία από τις πρώτες που όρισε τη χρήση διαλειτουργικών πρωτοκόλλων στο επίπεδο αυτών των δικτύων, με τις εφαρμογές να ξεκινούν τα επόμενα χρόνια. Η αγορά των ΗΠΑ αναμένεται ακόμα να υιοθετήσει διαλειτουργικά πρωτόκολλα δικτύων γειτονικής περιοχής, με πολλές άλλες αγορές να εκφράζουν το ενδιαφέρον τους. Με μία τέτοια ευρεία κοινή συναίνεση στη παγκόσμια βιομηχανία των ευφών δικτύων στη χρήση ανοιχτών διαλειτουργικών προτύπων, αυτό το πρότυπο μπορεί να βοηθήσει να γίνει το διαλειτουργικό δίκτυο γειτονικής περιοχής πραγματικότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω πλεονεκτήματα, στα πλαίσια της διπλωματικής θεωρούμε ότι οι έξυπνοι μετρητές συνδέουν το κέντρο συγκέντρωσης πληροφοριών (Data Aggregation Unit, DAU) και δημιουργούν ένα δίκτυο γειτονικής περιοχής (NAN).

Στο σύστημα που μελετάται οι οικιακοί χρήστες μια συγκεκριμένης περιοχής τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός σταθμού διανομής και ο σταθμός διανομής συνδέεται σε πολλαπλές εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας με πολλαπλά καλώδια. Το κέντρο συγκέντρωσης πληροφοριών λαμβάνει πρώτα τις πληροφορίες για την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας των διάφορων εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και μεταδίδει την πληροφορία αυτή στους καταναλωτές. Οι καταναλωτές στη συνέχεια κάθε χρονική στιγμή, αφού γνωρίζουν τις τιμές όλων των διαθέσιμων εταιρειών, θα στείλουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από μία συγκεκριμένη εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας πίσω στο

κέντρο συγκέντρωσης πληροφοριών, το οποίο συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες ζήτησης από τους οικιακούς χρήστες και αποφασίζει για τη συνολική ζήτηση από κάθε εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσα από την αλληλουχία αυτή των διαδικασιών είναι εμφανής και η αμφίδρομη επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των οικιακών χρηστών και των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι και βασικό χαρακτηριστικό του ευφυούς δικτύου.

4

Ανταπόκριση στη Ζήτηση μέσω μιας παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης δύο επιπέδων

4.1 Εισαγωγή στα παιγνιοθεωρητικά μοντέλα

Για τη μοντελοποίηση της περιγραφόμενης μελέτης χρησιμοποιούνται παιγνιοθεωρητικά μοντέλα, καθώς αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά και αποτελεσματικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων μερών του συστήματος. Για τη συγκεκριμένη μελέτη προτείνετε παιγνιοθεωρητικό μοντέλο **δύο επιπέδων**, για να αναπαραστήσει πλήρως την αλληλεπίδραση μεταξύ των οικιακών χρηστών και των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα και με τα δύο επίπεδα ανταγωνισμού, που περιεγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα:

- Στο χαμηλότερο επίπεδο ανταγωνισμού των οικιακών χρηστών, χρήστες, οι οποίοι ζουν σε μία γειτονική περιοχή θεωρούνται ένας πληθυσμός. Ο κάθε χρήστης εξελίσσεται σταδιακά για να προσαρμόζει τη ζητούμενη ενέργεια από την εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας ως μία αντίδραση στις τιμές

του ηλεκτρικού ρεύματος. Για αυτό και για τους οικιακούς χρήστες διατυπώνεται ένα **εξελικτικό παίγνιο (evolutionary game)**, για να χαρακτηρίσει την εξελικτική διαδικασία που ακολουθεί ο πληθυσμός.

- Το υψηλότερο επίπεδο ανταγωνισμού, μεταξύ των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, μοντελοποιείται με ένα **μη-συνεργατικό παίγνιο (non-cooperative game)**, στο οποίο η κάθε εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας επιλέγει, με βάση τη ζήτηση των καταναλωτών, την ποσότητα παραγωγής αλλά και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι εταιρείες και οι χρήστες επικοινωνώντας μεταξύ τους, ανταλλάσοντας βασικές πληροφορίες και επιλέγοντας τις κατάλληλες στρατηγικές μπορούν να φτάσουν σε ισορροπία και να ικανοποιηθούν και οι δύο πλευρές.

Για αυτό παρατίθενται κάποιες βασικές γνώσεις σχετικά με τις θεωρίες παιγνίων που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη:

Σχετικά με το **μη-συνεργατικό παίγνιο**:

Το μη-συνεργατικό παίγνιο επικεντρώνεται στις κινήσεις, που πρέπει να κάνουν οι παίκτες ορθολογιστικά και ανεξάρτητα και καθορίζουν την αξία που δημιουργούν.

Ένα μη συνεργατικό παίγνιο $G = \{ N, \{S\}, \{U\} \}$ αποτελείται από τρία στοιχεία:

1. Το πλήθος των παικτών, $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$, όπου με i συμβολίζεται ο κάθε παίκτης.
2. Ο χώρος των στρατηγικών S : όπου ο κάθε παίκτης i μέσα στο παίγνιο επιλέγει μια στρατηγική s_i από τη συλλογή των στρατηγικών S . Το S αντιπροσωπεύει τον στρατηγικό χώρο του παιγνίου. Καθορίζεται $s = (s_i, s_{-i})$ ως το διάνυσμα στρατηγικών, όπου s_i είναι η στρατηγική του i παίκτη και s_{-i} αντιπροσωπεύει τις στρατηγικές όλων των άλλων παικτών.
3. Η συλλογή χρησιμότητων $u = \{u_1, \dots, u_i, \dots, u_n\}$ για όλους τους παίκτες, όπου η χρησιμότητα του παίκτη i καθορίζεται από το διάνυσμα στρατηγικών s .

Το μη-συνεργατικό παίγνιο βελτιστοποιείται όταν επιτυγχάνεται το σημείο ισορροπίας Nash. Αν κάθε παίκτης έχει επιλέξει μια στρατηγική και κανένας παίκτης δε μπορεί να ωφεληθεί αλλάζοντας τη στρατηγική του, ενώ οι υπόλοιποι παίκτες

διατηρούν αμετάβλητες τις δικές τους, τότε το τρέχουν σύνολο (διάνυσμα) στρατηγικών επιλογών και των αντίστοιχων απολαβών (payoffs) αποτελούν το σημείο ισορροπίας Nash.

Ο μαθηματικός ορισμός του σημείου ισορροπίας Nash εκφράζεται ως: το διάνυσμα $s^* = (s_1^*, s_2^*)$ είναι σημείο ισορροπίας Nash αν και μόνο αν για κάθε παίκτη i από το σύνολο των παικτών N και για κάθε διάνυσμα στρατηγικών s_i , που ανήκει στο χώρο των στρατηγικών S , ισχύει:

$$u(s^*) \geq u(s_i, s_{-i}^*)$$

Συγκεκριμένα η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας Nash μπορεί να εξασφαλιστεί με βάση τα παρακάτω:

- Το πλήθος των παικτών είναι πεπερασμένο
- Το πλήθος των στρατηγικών είναι κλειστό, οριοθετημένο και κυρτό.
- Οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι συνεχής και ψευδοκοίλη στο χώρο των στρατηγικών.

Σχετικά με το **εξελικτικό παίγνιο**:

Η κύρια ιδέα ενός εξελικτικού παιγνίου είναι ότι πολλές συμπεριφορές συμπεριλαμβάνουν την αλληλεπίδραση πολλαπλών ατόμων σε ένα πληθυσμό και η επιτυχία οποιουδήποτε από αυτά τα άτομα εξαρτάται από το γεγονός ότι η συμπεριφορά του αντιδρά με εκείνη των άλλων. Ουσιαστικά, λοιπόν, το εξελικτικό παίγνιο επεκτείνει τη μοντελοποίηση του μη-συνεργατικού παιγνίου εισάγοντας την έννοια του πληθυσμού, που αποτελείται από ένα επιμέρους σύνολο των παικτών. Η κύρια διαφορά του όμως από το μη-συνεργατικό παίγνιο είναι ότι το εξελικτικό επικεντρώνεται στη συνολική συμπεριφορά του πληθυσμού.

Στο εξελικτικό παίγνιο για να πετύχουμε τη βελτιστοποίηση αναζητούμε το εξελικτικό σημείο ισορροπίας, το οποίο είναι ανάλογο του σημείου ισορροπίας Nash του μη-συνεργατικού παιγνίου. Καθώς πρόκειται για τη λύση του συστήματος ο πληθυσμός δε θα αποκτήσει κέρδος αν μεταβληθεί από αυτή την κατάσταση, γιατί μεγιστοποιεί σε αυτό το σημείο τη χρησιμότητά του.

Επιπλέον ένα σημαντικό κομμάτι είναι και οι δυναμικές αντιγραφής (replicator dynamics), οι οποίες απεικονίζουν τις δυναμικές επιλογής του πληθυσμού και μπορούν να μοντελοποιηθούν σε ένα σύνολο από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Η έννοια του **αντιγραφέα (replicator)** εισήχθη, για να περιγράψει μια οντότητα, όπως ένα γονίδιο (σε βιολογικό παίγνιο) ή μία στρατηγική, με την ικανότητα να παράγει αντίγραφα του εαυτού της. Σύμφωνα με την εξελικτική θεωρία των παιγνίων ως αντιγραφείς θεωρούμε τις στρατηγικές, οι οποίες αντιγράφονται και διαδίδονται στο πληθυσμό. Για αυτό το λόγο, σχεδιάζοντας ένα κατάλληλο αντιγραφέα, ο πληθυσμός μπορεί σταδιακά να επιτύχει την εξελικτική ισορροπία του. Σημαντικό είναι εξίσου ότι η εξίσωση αντιγραφής διαφέρει από τις άλλες εξισώσεις του μοντέλου καθώς αυτή επιτρέπει στη συνάρτηση καταλληλότητας (fitness) να ενσωματώσει την κατανομή των τύπων πληθυσμού αντί να ρυθμίζει την καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου σταθερού τύπου. Η σημαντική αυτή ιδιότητα επιτρέπει στην εξίσωση αντιγραφής να συλλάβει την ουσία της επιλογής στο σύστημα.

Αξιοσημείωτο είναι ότι, ενώ η εξελικτική θεωρία των παιγνίων είχε αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο, για να εξηγήσει περίπλοκες και δύσκολες πτυχές της βιολογίας, στη συνέχεια αποτέλεσε ενδιαφέρουσα προοπτική και για οικονομολόγους, κοινωνιολόγους και πολλούς άλλους επιστήμονες. Τα τελευταία χρόνια συγκεκριμένα τα εξελικτικά παίγνια έχουν καταλάβει ένα μεγάλο και αυξανόμενο μερίδιο της θεωρίας παιγνίων. Κύρια αιτία για αυτό είναι ότι η εξελικτική θεωρία παιγνίων είναι αρκετά προσιτή και έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής, που διαφέρει σχετικά από αυτό της κλασσικής θεωρίας παιγνίων. Τα πλεονεκτήματα αυτά ώθησαν και τους μηχανικούς να χρησιμοποιήσουν εξελικτικά παίγνια με σκοπό να επωφεληθούν από την αποτελεσματικότητα, κυρίως για τις περιπτώσεις με πολλούς πωλητές και πολλούς αγοραστές, παρόμοιο με αυτό που αντιμετωπίζεται και στη παρούσα διπλωματική.

Με βάση τη περιγραφή του συστήματος οι οικιακοί χρήστες, οι οποίοι συνδέονται μέσω του κέντρου συγκέντρωσης δεδομένων και δημιουργούν ένα δίκτυο γειτονικής περιοχής(NAN), μπορούν να θεωρηθούν ένας πληθυσμός και αυτό επιτρέπει τη

μοντελοποίηση του συστήματος ανταπόκρισης ζήτησης σε εξελικτικό παίγνιο. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου εξελικτικού παιγνίου θα είναι:

- Παίκτες: οι οικιακοί χρήστες i , που ανήκουν στο σύνολο των παικτών I
- Πληθυσμός: το σύνολο των χρηστών μέσα σε ένα δίκτυο γειτονικής περιοχής (NAN)
- Στρατηγικές: η επιλογή των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας
- Χρησιμότητα: η συνάρτηση ικανοποίησης (welfare) των οικιακών χρηστών

4.2 Εξελικτικό παίγνιο (evolutionary game) οικιακών χρηστών

Σε αυτή τη παράγραφο επιδιώκεται η μοντελοποίηση του εξελικτικού παιγνίου των οικιακών χρηστών, ώστε να προσομοιωθούν οι αλληλεπιδράσεις τους και να αποδειχθεί η ύπαρξη του εξελικτικού σημείου ισορροπίας του συστήματος.

Αρχικά πρέπει να τεθούν κάποιες βασικές προϋποθέσεις και παραδοχές για τη συμπεριφορά των οικιακών χρηστών:

- Οι οικιακοί χρήστες χρησιμοποιώντας την αμφίδρομη επικοινωνία, που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των ευφυών δικτύων, συνδέονται μεταξύ τους δημιουργούν δίκτυα γειτονικής περιοχής (NAN). Χωρίς επιπτώσεις στη γενικότητα της μελέτης στα πλαίσια αυτή της διπλωματικής μελετάται σενάριο με **μόνο ένα πληθυσμό**.
- Πιο συγκεκριμένα, για να χαρακτηριστεί η διαδικασία επιλογής ο κάθε χρήστης υιοθετεί κάποιες συγκεκριμένες συμπεριφορές, όπως:
 - Όταν οι οικιακοί χρήστες λαμβάνουν τις πληροφορίες για τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας των διάφορων εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, ο κάθε χρήστης πρέπει να επιλέξει **μία εταιρεία** από την οποία θα αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια.
 - Κάθε οικιακός χρήστης μπορεί σταδιακά να προσαρμόσει τη στρατηγική του στην επιλογή της εταιρείας παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας.

- Κάθε οικιακός χρήστης συμπεριφέρεται ανεξάρτητα.
- Στο εξελικτικό παίγνιο κάθε παίκτης μπορεί να παρατηρήσει και αντιγράψει τη στρατηγική των υπολοίπων όταν ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό. Σα φυσικό επακόλουθο οι στρατηγικές των διαφορετικών χρηστών μέσα στον ίδιο πληθυσμό είναι πανομοιότυπες.

Για αυτό μπορούμε να θέσουμε και το μέγεθος y_h^j , που δείχνει τη πιθανότητα ενός οικιακού χρήστη να επιλέξει την εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας j τη χρονική στιγμή h . Εφόσον πρόκειται για πιθανότητα οι τιμές της κυμαίνονται από 0 έως 1 και ταυτόχρονα το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων είναι ίσο με τη μονάδα, $\sum_{j=1}^J y_h^j = 1$. Τέλος σχετικά με τη πιθανότητα επιλογής ορίζεται και το διάνυσμα πιθανοτήτων, το οποίο απεικονίζει και την κατάσταση του πληθυσμού, $Y_h = [y_h^1, y_h^2, \dots, y_h^j, \dots, y_h^J]$.

Το επόμενο πολύ σημαντικό μέγεθος είναι η **συνάρτηση χρησιμότητας** των οικιακών χρηστών, η οποία ουσιαστικά ποσοτικοποιεί την χρησιμότητα, που ο κάθε οικιακός χρήστης i λαμβάνει καταναλώνοντας τη ζητούμενη ενέργεια $x_{i,h}$ τη χρονική στιγμή h . Θα χρειαστεί για τον ορισμό της συνάρτησης χρησιμότητας να κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- μία παραδοχή για τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία όπως και σε πολλές σύγχρονες μελέτες σχετικά με ανταπόκριση ζήτησης θεωρούμε ντετερμινιστική ή ότι μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό κατανάλωσης
- σχετικά με την επιλογή της εξίσωσης χρησιμότητας, έχει παρατηρηθεί ότι σε πρόσφατες μελέτες χρησιμοποιούνται συχνά τετραγωνικές και λογαριθμικές εξισώσεις χρησιμότητας, γιατί είναι μη-φθίνουσες και τα οριακά οφέλη τους είναι εξίσου μη-φθίνοντα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας στα πλαίσια αυτής της μελέτης υιοθετείται μία τετραγωνική εξίσωση χρησιμότητας.

Η εξίσωση χρησιμότητας είναι της μορφής:

$$u_{i,h}(x_{i,h}) = u_{i,h} x_{i,h} - \frac{a_{i,h}}{2} x_{i,h}^2, \quad x_{i,h_{\min}} \leq x_{i,h} \leq x_{i,h_{\max}}.$$

Στη παραπάνω εξίσωση $u_{i,h}$ και $a_{i,h}$ είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το χρόνο, ενώ $x_{i,h_{\min}}$ και $x_{i,h_{\max}}$ καθορίζουν την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή χωρητικότητας της ηλεκτρικής κατανάλωσης του οικιακού χρήστη i τη χρονική στιγμή h .

Οι διαφορετικές τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι $u_{i,h}$ και $a_{i,h}$ στις διαφορετικές χρονικές στιγμές σε αυτή την εξίσωση χρησιμότητας είναι ικανές να αποτυπώσουν τη δυναμική της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Στη μελέτη μας είναι δυνατό να τεθούν κατάλληλες παραμέτρους, πχ μικρότερες τιμές ή μεγαλύτερες τιμές των $u_{i,h}$ και $a_{i,h}$ ώστε να μπορούν να αντικατοπτριστούν το μεγαλύτερο κενό ανάμεσα στην αναμενόμενη εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία, όπως έχει παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες και οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς οι παράμετροι αυτοί δείχνουν τον αντίκτυπο των περιβαλλοντικών μεταβλητών στην ζήτηση ενέργειας.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση χρησιμότητας των οικιακών χρηστών και υπολογίζοντας ότι ο κάθε χρήστης που επιλέγει την εταιρεία j , για να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια, πρέπει να **πληρώσει**: $p_h^j x_{i,h}$, όπου p_h^j είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από την εταιρεία j τη χρονική στιγμή h και $x_{i,h}$ η ποσότητα της ενέργειας που ζητείται και καταναλώνετε. Συνεπώς η **συνάρτηση ικανοποίησης (welfare function)** του χρήστη προκύπτει ως η διαφορά της εξίσωσης χρησιμότητας (αυτά που κερδίζει) από τα έξοδα του για να αποκτήσει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται. Η μαθηματική της μορφή είναι:

$$w_{i,h}(x_{i,h}) = u_{i,h}(x_{i,h}) - p_h^j x_{i,h}, \quad x_{i,h_{\min}} \leq x_{i,h} \leq x_{i,h_{\max}} \quad (1)$$

Σύμφωνα, λοιπόν με τη συνάρτηση ικανοποίησης (1) μπορεί να υπολογιστεί η βέλτιστη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας ενός οικιακού χρήστη i , οποίος αγοράζει ενέργεια από μία εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας j τη χρονική στιγμή h . Η βέλτιστη ζήτηση προκύπτει αναζητώντας το argmax της συνάρτησης ικανοποίησης, δηλαδή το σημείο όπου μεγιστοποιείται. Και με μαθητικούς τύπους προκύπτει:

$$x_{i,h}^j = \arg \max w_{i,h} (x_{i,h}) = \begin{cases} x_{i,h_{\min}}, & \frac{(u_{i,h} - p_h^j)}{a_{i,h}} < x_{i,h_{\min}} \\ \frac{(u_{i,h} - p_h^j)}{a_{i,h}}, & x_{i,h_{\min}} \leq \frac{(u_{i,h} - p_h^j)}{a_{i,h}} \leq x_{i,h_{\max}} \\ x_{i,h_{\max}}, & \frac{(u_{i,h} - p_h^j)}{a_{i,h}} > x_{i,h_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

Ακόμη προκύπτει η ανάγκη για προσδιορισμό της συνολικής ζήτησης, η οποία ταυτίζεται με το συνολικό άθροισμα των γινομένων της πιθανότητας επιλογής κάθε εταιρείας με τη βέλτιστη ζήτηση της αντίστοιχης, το οποίο οπτικοποιείται ως:

$$D_h^j = y_h^j \sum_{i=1}^I x_{i,h}^j, \quad (3)$$

Ένα επιπλέον σημαντικό μέγεθος είναι η αναλογία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, η οποία θα αποδειχθεί απαραίτητη για να αποτυπωθεί η συσχέτιση των δύο μεγεθών. Προκύπτει λοιπόν ως:

$$r_j^h = \frac{l_j^h}{D_h^j} = \frac{l_j^h}{y_h^j \sum_{i=1}^I x_{i,h}^j} = \frac{Q_j}{y_h^j}, \quad Q_j = \frac{l_j^h}{\sum_{i=1}^I x_{i,h}^j} \quad (4)$$

Είναι εμφανές λοιπόν ότι το μέγεθος Q_j είναι **σταθερό** καθώς αφότου η εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας ανακοινώσει την τιμή και την ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας θα παραμείνουν σταθερές καθόλη τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας των οικιακών χρηστών. Ταυτόχρονα και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας διατηρείται σταθερή στη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας. Συνεπώς η αναλογία παραγωγής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την πιθανότητα επιλογής της κάθε εταιρείας.

Απαραίτητη τέλος για τον ορισμό και τη μοντελοποίηση του εξελικτικού παιχνιδιού είναι η **χρησιμότητα του δικτύου**, η οποία συνδέεται με την εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας j ως η αθροιστική ικανοποίηση των οικιακών χρηστών, που

προμηθεύονται ηλεκτρική ενέργεια από την j εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρησιμότητα του δικτύου διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις ανάλογα αν υπερτερεί η παραγωγή ή η ζήτηση.

1. Στη πρώτη περίπτωση θεωρείται $r_j^h \geq 1$, δηλαδή η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση και συνεπώς οι ανάγκες των καταναλωτών μπορούν να καλυφθούν από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η χρησιμότητα του παρόχου j ορίζεται ως:

$$\pi_h^j = \sum_{i=1}^I \left[(u_{i,h} - p_h^j) x_{i,h}^j - \frac{a_{i,h}}{2} (x_{i,h}^j)^2 \right] = \sum_{i=1}^I \left[a_{i,h} (x_{i,h}^j)^2 - \frac{a_{i,h}}{2} (x_{i,h}^j)^2 \right] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I a_{i,h} (x_{i,h}^j)^2$$

2. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται $r_j^h < 1$, δηλαδή η παραγωγή είναι μικρότερη από τη ζήτηση και πλέον οι ανάγκες των καταναλωτών δεν δύναται να καλυφθούν, αλλά η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία προμηθεύεται ένας καταναλωτής i είναι $r_j^h x_{i,h}^j$. Σε αυτή τη περίπτωση η χρησιμότητα ορίζεται ως:

$$\pi_h^j = \sum_{i=1}^I \left[(u_{i,h} - p_h^j) x_{i,h}^j r_j^h - \frac{a_{i,h}}{2} (x_{i,h}^j r_j^h)^2 \right] = \left(r_j^h - \frac{(r_j^h)^2}{2} \right) \sum_{i=1}^I a_{i,h} (x_{i,h}^j)^2$$

Για διευκόλυνση στους υπολογισμούς και στις διαδικασίες τους εξελικτικού παιγνίου ορίζεται η χρησιμότητα δικτύου ως:

$$\pi_h^j = \Psi_h^j P_j, (5)$$

Όπου $P_j = \sum_{i=1}^I a_{i,h} (x_{i,h}^j)^2$ είναι σταθερό και δε θα μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της

εξελικτικής διαδικασίας, ενώ $\Psi_h^j = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{if } r_j^h \geq 1 \\ r_j^h - \frac{(r_j^h)^2}{2}, & \text{otherwise} \end{cases}$.

Με το νέο ορισμό της χρησιμότητας δικτύου είναι εφικτό πλέον να οριστεί και η μέση χρησιμότητα δικτύου ως:

$$\overline{\pi}_h = \sum_{j=1}^J y_h^j \pi_h^j = \sum_{j=1}^J y_h^j \Psi_h^j \sum_{i=1}^I a_{i,h} (x_{i,h}^j)^2$$

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω μεγέθη και λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες για τον αντιγραφέα επιλέγεται για **συνάρτηση αντιγραφέα**, που δείχνει τις δυναμικές επιλογής στο πληθυσμό είναι η εξής:

$$\frac{\partial y_h^j}{\partial t} = y_h^j (\pi_h^j - \overline{\pi}_h)$$

Για να υπολογιστεί η συνάρτηση αντιγραφέα, η οποία είναι χρονικά συνεχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πιθανότητα επιλογής η διακριτή συνάρτηση αντιγραφέα, που είναι πιο εύκολα υπολογίσιμη και διαχειρίσιμη στα πλαίσια του εξελικτικού αλγορίθμου. Η συνάρτηση αυτή είναι:

$$y_h^j(m+1) = y_h^j(m) + \sigma_1 y_h^j(m) (\pi_h^j(m) - \overline{\pi}_h(m)) \quad (6),$$

Όπου m είναι ο αριθμός των επαναλήψεων και σ_1 το βήμα που χρησιμοποιείται για τη μετάβαση στις επόμενες επαναλήψεις μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση. Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν οι χρησιμότητες του δικτύου για κάθε εταιρεία τείνουν να ταυτιστούν μεταξύ τους, ή διαφορετικά όταν η χρησιμότητα δικτύου κάθε εταιρείας τείνει να ταυτιστεί με τη μέση χρησιμότητα του δικτύου. Το οποίο μαθηματικά γράφεται:

$$|\pi_h^j(m) - \overline{\pi}_h(m)| < \varepsilon_1 \quad (7)$$

Πλέον είναι ορισμένα όλα τα απαραίτητα μεγέθη, για να γίνει κατανοητό και στη συνέχεια να μοντελοποιηθεί το εξελικτικό παίγνιο. Η επαναληπτική διαδικασία που θα ακολουθηθεί για να επιτευχθεί η σύγκλιση του εξελικτικού παιγνίου περιγράφεται από ένα εξελικτικό αλγόριθμο.

Εξελικτικός αλγόριθμος (Αλγόριθμος 1), ο οποίος εκτελείται για κάθε χρήστη i από το σύνολο των χρηστών I περιλαμβάνει τα εξής βήματα.

1. Ο χρήστης επιλέγει υπακούοντας σε ένα διάνυσμα πιθανότητας μία εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, για να αγοράσει την ηλεκτρική ενέργεια, που χρειάζεται
2. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση
3. Υπολογίζεται η χρησιμότητα του δικτύου για την εταιρεία j , από την οποία επέλεξε να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια, το οποίο προϋποθέτει και τον υπολογισμό των υπόλοιπων μεγεθών (ζήτηση, συνολική ζήτηση, αναλογία παραγωγής – ζήτησης και τα λοιπά)
4. Δέχεται τις πληροφορίες και από τις χρησιμότητες δικτύου των υπόλοιπων εταιρειών, για να υπολογίσει τη μέση χρησιμότητα δικτύου
5. Με βάση την πιθανότητα επιλογής εταιρείας $y_h^j(m)$ επιλέγει διαφορετική εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, για να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια
6. Εξετάζει αν επαληθεύεται η συνθήκη σύγκλισης (7), δηλαδή αν οι χρησιμότητες δικτύου ταυτίζονται και αν επιτευχθεί ο αλγόριθμος σταματά
7. Διαφορετικά $m=m+1$, μεταβαίνει στην επόμενη επανάληψη μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση

4.3 Μη-συνεργατικό παίγνιο (non-cooperative game) παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας

Τα μη συνεργατικά παίγνια, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου είναι πολύ πιο απλά, κυρίως σε σχέση με το εξελικτικό παίγνιο.

Αρχικά είναι σημαντικό να οριστούν όλα τα απαραίτητα μεγέθη, για να εξηγηθεί η συμπεριφορά των εταιρειών χρησιμότητας. Το πρώτο και πολύ απαραίτητο μέγεθος είναι το κόστος για κάθε εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια l_j^h . Για τη συνάρτηση κόστους είναι απαραίτητο να κάνουμε τις υποθέσεις ότι είναι αυξανόμενη και αυστηρά κυρτή. Από τις υποθέσεις μπορούμε να

θεωρήσουμε ότι η συνάρτηση κόστους είναι τετραγωνική χωρίς βλάβη της γενικότητας και συγκεκριμένα της μορφής:

$$f_h^j(l_h^j) = a_h^j (l_h^j)^2 + b_h^j l_h^j + c_h^j,$$

Όπου οι a, b και c είναι σταθερές παράμετροι για τις οποίες ισχύει $a > 0$ και $b, c \geq 0$.

Θεωρείται, επιπλέον, ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας συμβολίζεται ως p_h^j και η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται από την εταιρεία j τη χρονική στιγμή h ως s_h^j .

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται προκύπτει από: $s_h^j = \min(l_h^j, D_h^j)$, πωλείται δηλαδή είτε όσο παράγεται όταν η ζήτηση είναι υψηλότερη από την παραγωγή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, όπου η παραγωγή μπορεί να καλύψει τη ζήτηση πωλείται όλη η ποσότητα που ζητείται.

Μπορεί πλέον να οριστεί και η **συνάρτηση ικανοποίησης (welfare)** για κάθε εταιρεία ως:

$$U_h^j(p_h^j, s_h^j) = p_h^j s_h^j - \left(a_h^j (l_h^j)^2 + b_h^j l_h^j + c_h^j \right) \quad (8)$$

Πλέον μπορεί να οριστεί και το μη-συνεργατικό παίγνιο ως εξής:

- Παίκτες: εταιρεία πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας j από το σύνολο των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας J
- Στρατηγική: οι τιμές p_h^j πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρείας j κάθε χρονική στιγμή h
- Χρησιμότητα: η συνάρτηση ικανοποίησης για την εταιρεία j , που από το (8) μπορεί να ξαναγραφεί στη μορφή:

$$U_h^j(p_h^j, s_h^j) = p_h^j s_h^j - \left(a_h^j (l_h^j)^2 + b_h^j l_h^j + c_h^j \right) = \begin{cases} p_h^j l_h^j - \left(a_h^j (l_h^j)^2 + b_h^j l_h^j + c_h^j \right), & \text{if } r_h^j \leq 1 \\ p_h^j D_h^j - \left(a_h^j (l_h^j)^2 + b_h^j l_h^j + c_h^j \right), & \text{otherwise} \end{cases}$$

Είναι σημαντικό να γίνει η παρατήρηση ότι η βέλτιστη τιμή της ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας

τεθεί p_h^j , από τον τύπο:
$$l_h^j = \arg \max_{l_h^j} U_h^j(p_h^j, l_h^j) = \frac{p_h^j - b_h^j}{2a_h^j} \quad (9)$$

Από την έκφραση της συνάρτησης ικανοποίησης και τη διαφορίσιμη μορφή της ως προς τη τιμή, η οποία έχει διαφορετικό πρόσημο ανάλογα με την αναλογία παραγωγής ή ζήτησης, το οποίο από πράξεις είναι εύκολο να προκύψει ότι:

$$\frac{\partial U_h^j}{\partial p_h^j} \begin{cases} > 0, \text{ if } r_h^j \leq 1 \\ < 0, \text{ if } r_h^j > 1 \end{cases}$$

Από τη παραπάνω σχέση προκύπτει το συμπέρασμα ότι και η μειωμένη παραγωγή και η υπερπαραγωγή θα επιφέρουν μείωση στη συνάρτηση ικανοποίησης μιας εταιρείας χρησιμότητας. Οι οικιακοί χρήστες θα ανταποκριθούν στη βέλτιστη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια θα υπολογίσουν τη βέλτιστη ζήτηση τους. Παρόλα αυτά στη πλειοψηφία των περιπτώσεων η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δε ταυτίζεται με την παραγωγή της, για αυτό και οι εταιρείες και οι χρήστες χρειάζεται να αλληλοεπιδρούν καθόλη τη διάρκεια και έκταση του παιγνιοθεωρητικού μοντέλου, για να επέλθει ισορροπία.

Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας j θα πρέπει να αυξήσει την τιμή της όταν $r_h^j \leq 1$, ενώ στην αντίθετη περίπτωση να μειώσει την τιμή της για να αυξηθεί η ικανοποίηση της.

Σύμφωνα με αυτές τις απαραίτητες αλλαγές, που πρέπει να γίνονται για να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης και ουσιαστικά να βελτιστοποιηθεί το μη-συνεργατικό παίγνιο οι στρατηγικές που θα ανανεώνονται για την τιμή και την ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται ως εξής:

$$p_h^j(m+1) = p_h^j(m) + \sigma_2(1 - r_h^j(m)), \quad (10\alpha)$$

$$l_h^j(m+1) = \frac{p_h^j(m+1) - b_h^j}{a_h^j}, \quad (10\beta)$$

Όπου σ_2 είναι μία παράμετρος η οποία προσδίδει την αναλογία προσαρμογής και m είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.

Επιπλέον για τη μοντελοποίηση του μη συνεργατικού παιγνίου είναι απαραίτητος ο ορισμός της συνθήκης σύγκλισης, η οποία επιτυγχάνεται όταν η αναλογία παραγωγής ζήτησης ισούται με 1 (δηλαδή ταυτίζεται η παραγωγή με τη ζήτηση) και μπορεί να γραφεί μαθηματικά ως:

$$|r_h^j(m) - 1| < \varepsilon_2, \text{ όπου } \varepsilon_2 \text{ είναι μία μικρή θετική σταθερά.}$$

Για την επίτευξη της σύγκλισης χρησιμοποιείται μία επαναληπτική διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας ανανεώνονται οι τιμές της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και της ποσότητας παραγωγής μέχρι την επίτευξη της σύγκλισης.

Επαναληπτικός αλγόριθμος (Αλγόριθμος 2) για κάθε εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας:

1. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε χρονική στιγμή μέσα στην ημέρα
2. Αποθηκεύουμε την αρχική τιμή $p_h^j(1) = p_{h-1}^j$ και την ποσότητα παραγωγής $l_h^j(1) = l_{h-1}^j$ της ηλεκτρικής ενέργειας
3. Τα επόμενα βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση (4-5)
4. Υπολογίζεται η αναλογία παραγωγής – ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας $r_j^h(m)$
5. Σύμφωνα με τον υπολογισμό της αναλογίας παραγωγής-ζήτησης και χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που αναλύθηκαν προηγουμένως ανανεώνονται η τιμή και η ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τη (10)
6. Ελέγχεται η συνθήκη σύγκλισης $|r_h^j(m) - 1| < \varepsilon_2$
7. Για την τιμή και την ποσότητα παραγωγής που προέκυψαν εκτελείται ο **Αλγόριθμος 1** για τους οικιακούς χρήστες

Αξιοσημείωτο είναι ότι πλέον είναι εμφανής η αλληλεπίδραση μεταξύ των οικιακών χρηστών και των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας και μέσα από την μοντελοποίηση της διαδικασίας. Όπως είναι εμφανές από τους αλγόριθμους που περιεγράφηκαν για τη λύση των παιγνιοθεωρητικών μοντέλων μία επανάληψη για μία εταιρεία πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζεται από τις γραμμές 4 έως 6 του Αλγορίθμου 2, ενώ μία επανάληψη για ένα οικιακό χρήστη από τις γραμμές 3 έως 6 του Αλγορίθμου 1.

Μέσα από την εφαρμογή, λοιπόν, του Αλγορίθμου 2 θα επιτευχθεί σταδιακά η σύγκλιση και για τις εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο ισορροπίας Nash, αλλά και με την κλήση και την εφαρμογή του Αλγορίθμου 1 θα επιτευχθεί σταδιακά η σύγκλιση για τους οικιακούς χρήστες στο εξελικτικό σημείο ισορροπίας.

5

Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του παιγνιοθεωρητικού μοντέλου, που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται αρχικά για το εξελικτικό παίγνιο των οικιακών χρηστών χρησιμοποιώντας τον Αλγόριθμο 1. Στη συνέχεια για το μη συνεργατικό παίγνιο των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση του Αλγόριθμου 2 και τέλος η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παιγνιοθεωρητικών μοντέλων.

Το χρονικό πλαίσιο H είναι χωρισμένο σε 24 χρονικά διαστήματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις 24 ώρες σε μία ημέρα.

Για τις σταθερές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές:

- Στις εξισώσεις από την πλευρά των οικιακών χρηστών:
 - $u_{i,h}$ κάθε οικιακού χρήστη για κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται τυχαία από το εύρος τιμών $[4,10]$

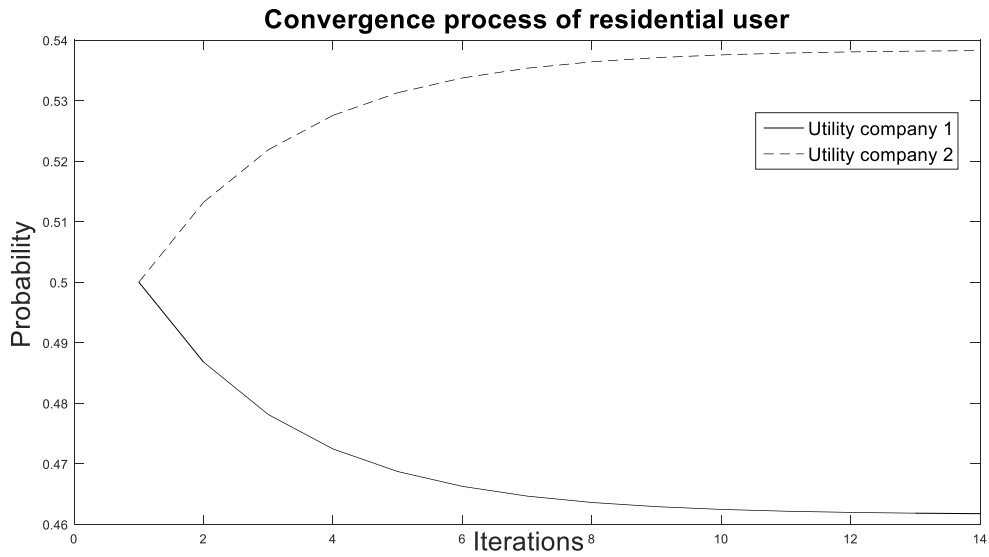
- $\alpha_{i,h} = 0.5$
- Στις εξισώσεις από την πλευρά των εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας
 - $b_h^j = 0.1$
 - $c_h^j = 0$
 - α_h^j επιλέγεται τυχαία από το εύρος τιμών [0.02,0.03]

5.1 Εξελικτικό παίγνιο των οικιακών χρηστών

Για να επαληθεύσουμε την απόδοση της επαναληπτικής διαδικασίας των οικιακών χρηστών προσομοιώνουμε τον αλγόριθμο 1 των οικιακών χρηστών μέχρι να επιτευχθεί η εξελικτική ισορροπία. Για λόγους πληρότητας και σύγκρισης θα προσομοιωθούν τα αποτελέσματα με διαφορετικές τιμές οικιακών χρηστών και εταιρειών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας.

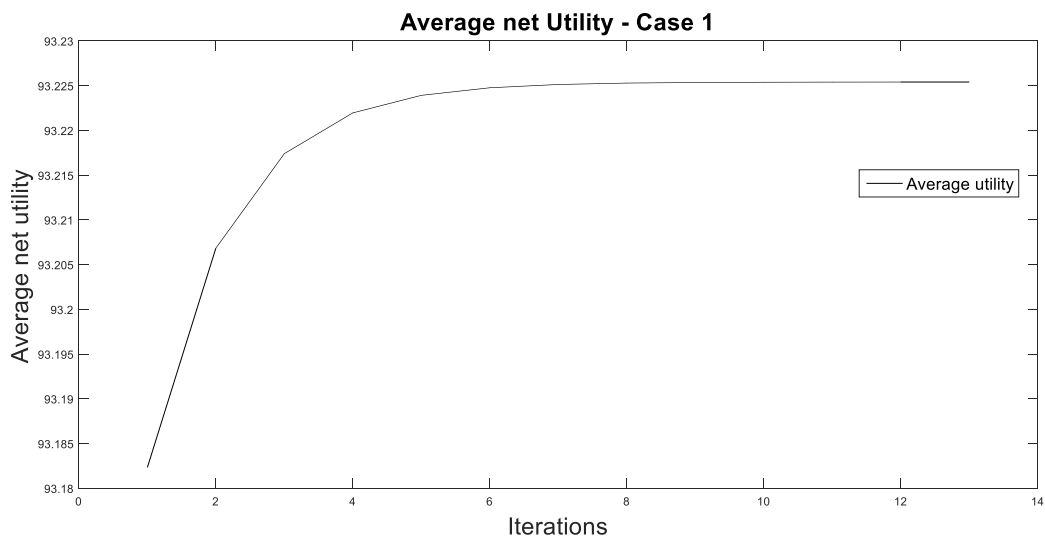
5.1.1 Περίπτωση 1: 10 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Από το ακόλουθο διάγραμμα(εικόνα 6) απεικονίζεται η διαδικασία σύγκλισης των οικιακών χρηστών, η οποία είναι εμφανές ότι η σύγκλιση επιτυγχάνεται μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων.



Εικόνα 6: Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 1

Στην Εικόνα 7 παριστάνεται η διαδικασία της μέσης χρησιμότητας του δικτύου, η οποία είναι δυναμική και όπως είναι εμφανές και από το διάγραμμα οι οικιακοί χρήστες είναι εφικτό να βελτιώνουν την ικανοποίησή τους μέσα από την επαναληπτική διαδικασία, που είναι και ο βασικός τους στόχος από το μοντέλο.

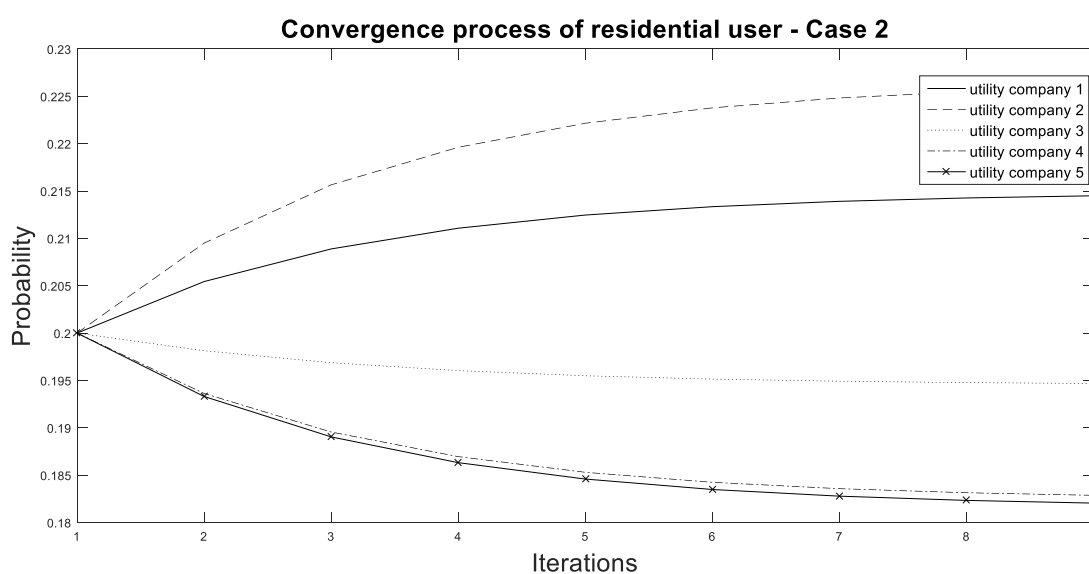


Εικόνα 7: Μέση χρησιμότητα δικτύου - Περίπτωση 1

5.1.2 Περίπτωση 2: 10 οικιακοί χρήστες και 5 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

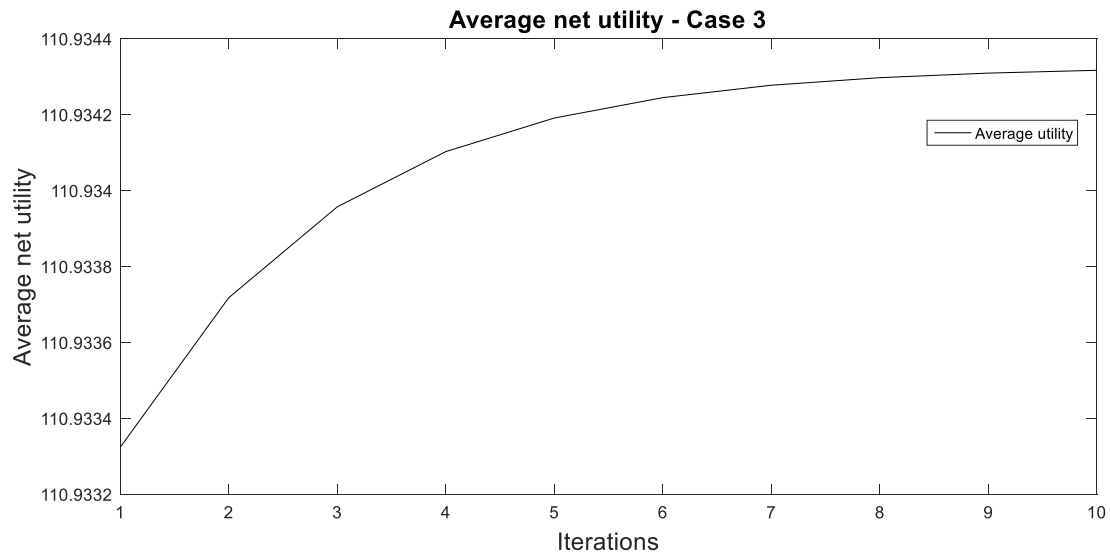
Σε αυτή τη περίπτωση αναζητούμε την αντίστοιχα τη σύγκλιση των οικιακών χρηστών, αλλά τώρα έχοντας περισσότερες εταιρείες από τις οποίες μπορούν να προμηθευτούν ηλεκτρική ενέργεια.

Στην Εικόνα 8 παριστάνεται η διαδικασία σύγκλισης των οικιακών χρηστών, οι οποίοι και πάλι μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων επιτυγχάνουν σύγκλιση.



Εικόνα 8: Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 2

Στην Εικόνα 9 παριστάνεται και πάλι η μέση χρησιμότητα του δικτύου για περισσότερες εταιρείες πλέον, στο οποίο είναι πάλι εμφανής η ανοδική τάση της χρησιμότητας, άρα επιτυγχάνεται ο στόχος των οικιακών χρηστών να αυξάνεται η ικανοποίησή τους. Η μόνη παρατήρηση είναι ότι αυξάνονται οι τιμές της μέσης χρησιμότητας, αλλά η αύξηση τους είναι όχι ιδιαίτερα έντονη και δικαιολογημένη από την αύξηση των εταιρειών και την τυχαιότητα ορισμένων μεταβλητών.

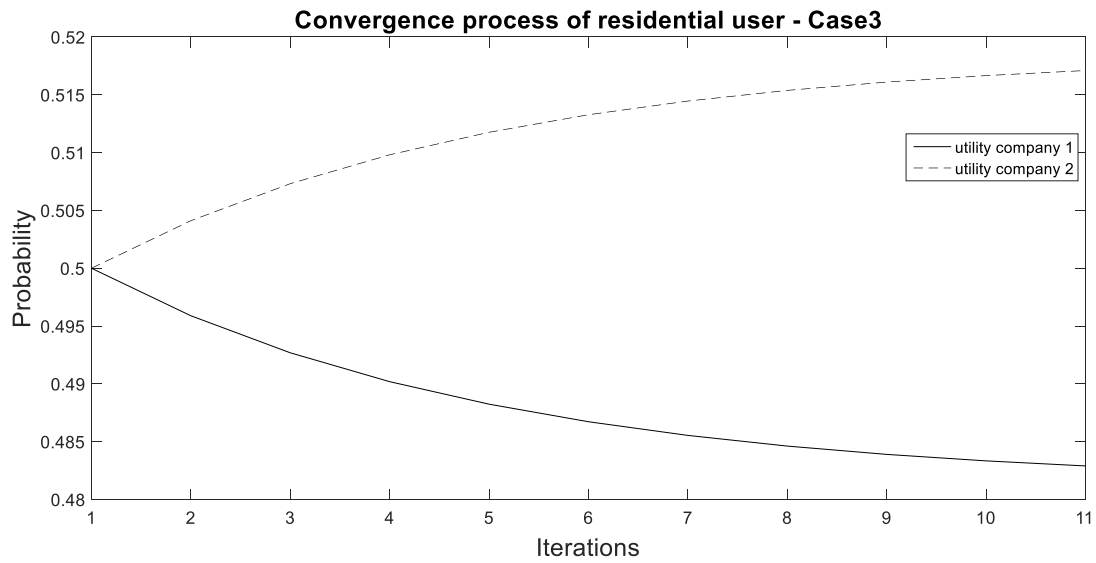


Εικόνα 9: Μέση χρησιμότητα του δικτύου - Περίπτωση 2

5.1.3 Περίπτωση 3: 100 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

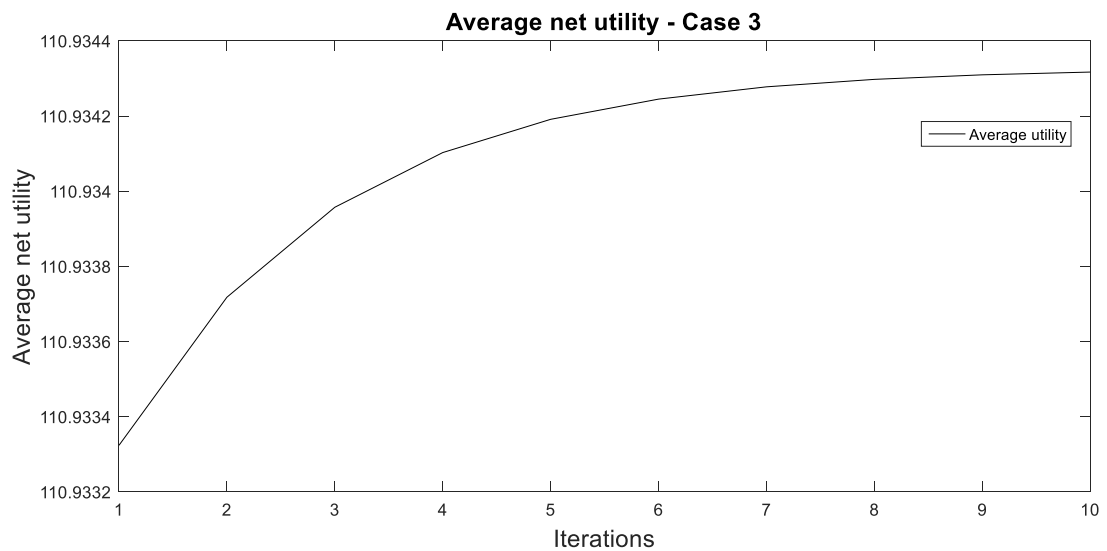
Για να εξεταστεί περαιτέρω η συμπεριφορά των οικιακών χρηστών αυξάνεται το πλήθος τους σε 100, όπου και πάλι αναζητείται η σύγκλιση του Αλγορίθμου 1.

Στην εικόνα 10, που ακολουθεί, φαίνεται η διαδικασία σύγκλισης του εξελικτικού αλγορίθμου για 100 οικιακούς χρήστες, όπου επιτυγχάνεται μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων. Το αξιοσημείωτο σε αυτή την περίπτωση είναι ότι ο αριθμός των επαναλήψεων μειώθηκε με την αύξηση των οικιακών χρηστών. Το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι η χρησιμότητα του δικτύου αυξάνεται με την αύξηση των οικιακών χρηστών. Και κατά επέκταση και η διαφορά της χρησιμότητας του δικτύου από τη μέση χρησιμότητα αλλά και η προσαρμογή της πιθανότητας αυξάνονται με αποτέλεσμα να μειώνονται σταδιακά αλλά όχι ομαλά οι επαναλήψεις.



Εικόνα 10: Διαδικασία σύγκλισης - Περίπτωση 3

Στην εικόνα 11 που ακολουθεί παρατηρείται η μέση χρησιμότητα του δικτύου για περισσότερους οικιακούς χρήστες. Σε σχέση με την περίπτωση 1 με λιγότερους οικιακούς χρήστες υπάρχει αύξηση της τιμής της μέσης χρησιμότητας του δικτύου, αλλά όχι τόσο έντονη, όσο στη περίπτωση 2.



Εικόνα 11: Μέση χρησιμότητα του δικτύου - Περίπτωση 3

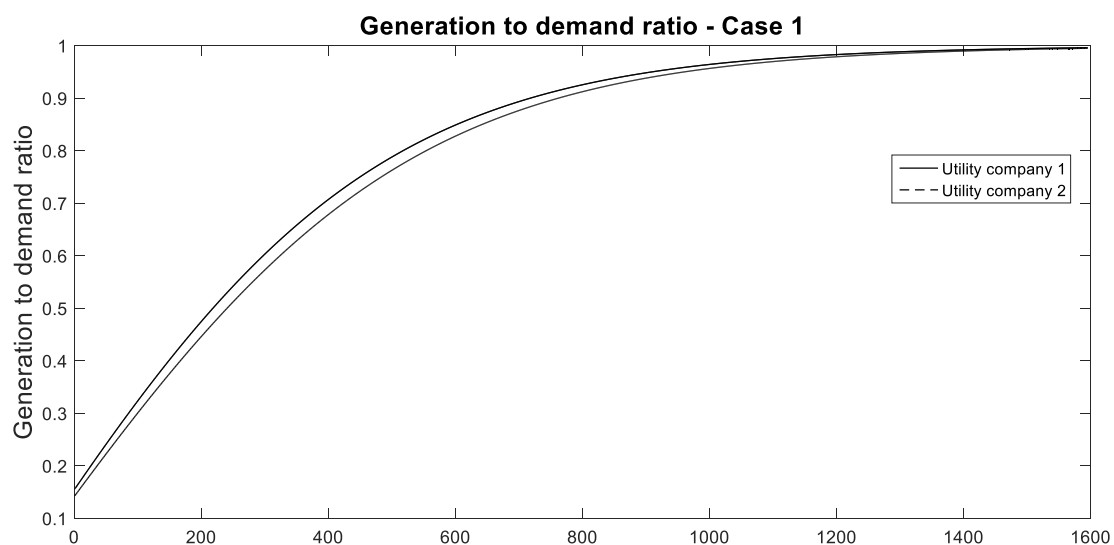
5.2 Μη συνεργατικό παίγνιο των εταιρειών παροχής

ηλεκτρικής ενέργειας

Για να αξιολογηθεί η απόδοση του Αλγόριθμου 2 για τις εταιρείες παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να εξεταστεί ο ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών αλλά και η ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου. Και πάλι για λόγους πληρότητας θα εξεταστούν περιπτώσεις με διαφορετικό αριθμό οικιακών χρηστών και εταιρειών.

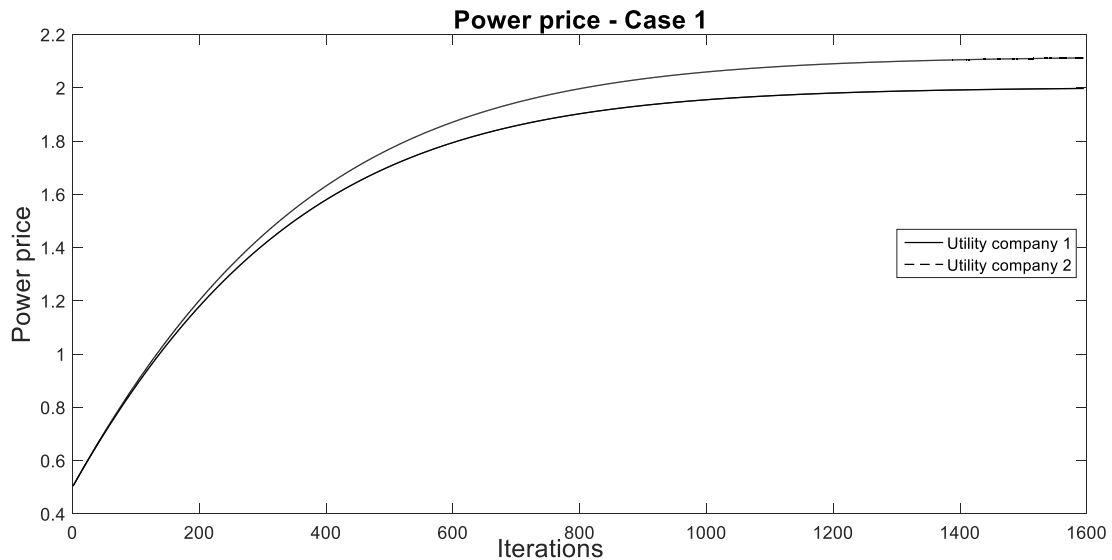
5.2.1 Περίπτωση 1: 10 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η διαδικασία σύγκλισης του Αλγορίθμου 2 για τις εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται όταν η αναλογία παραγωγής και ζήτησης πλησιάζει τη μονάδα, δηλαδή ταυτίζονται σχετικά τα δύο μεγέθη (παραγωγή, ζήτηση) και έχουμε ισορροπία. Όπως είναι εμφανές και από το διάγραμμα η σύγκλιση επιτυγχάνεται μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων.

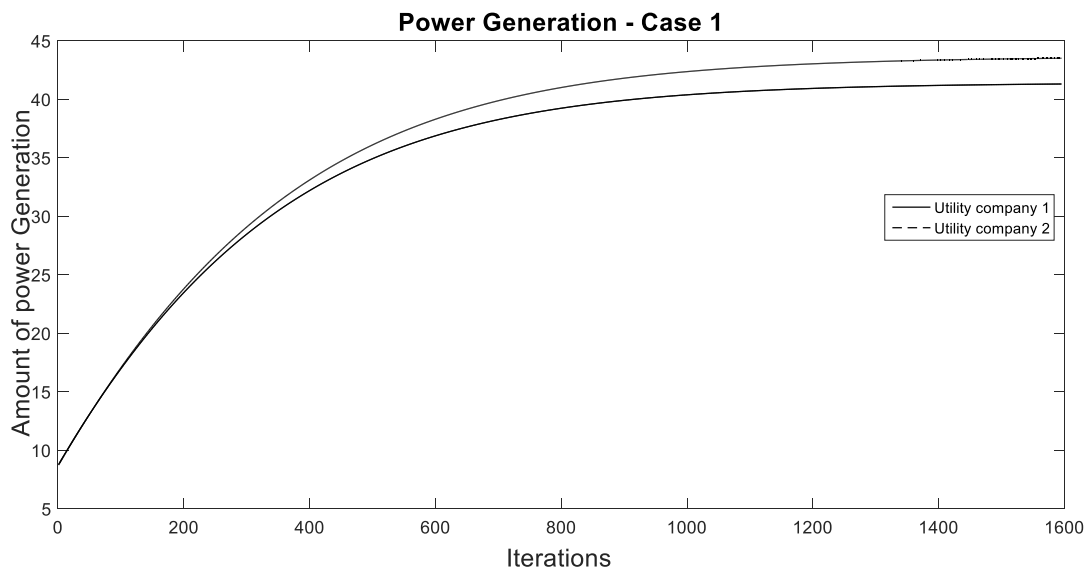


Εικόνα 12: Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 1

Στις εικόνες 13 και 14 που ακολουθούν έχει αναπαρασταθεί η διαδικασία σύγκλισης αλλά μέσα από την ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από την τιμή της. Και τα δύο μεγέθη, η ποσότητα παραγωγής και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας συγκλίνουν μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων.



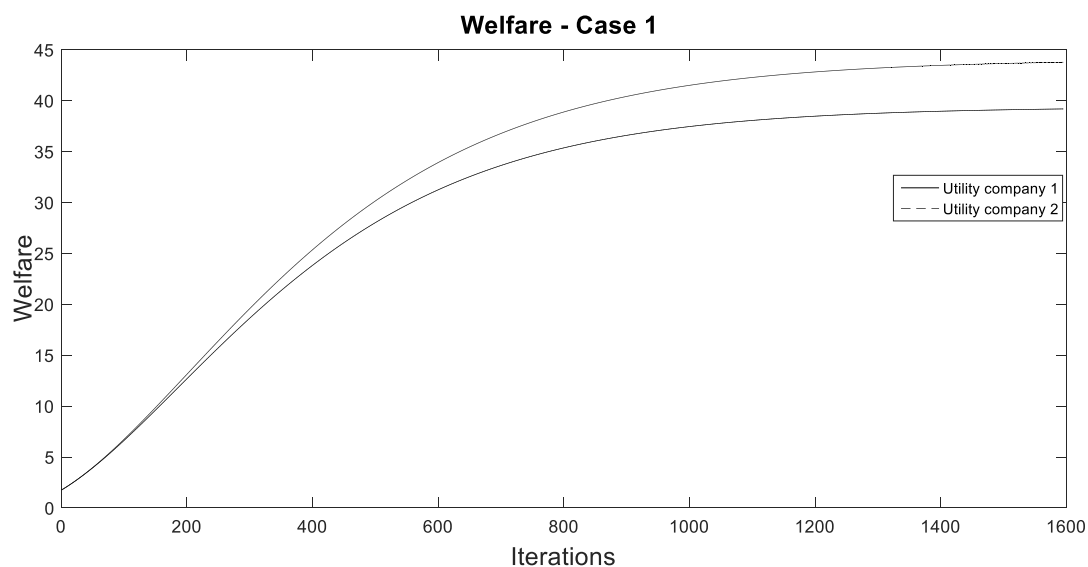
Εικόνα 13: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1



Εικόνα 14: Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1

Τέλος στην Εικόνα 15 αναπαρίσταται η ικανοποίηση (welfare) των χρηστών και για τις δύο εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αυξάνεται σταδιακά και

τελικά επιτυγχάνεται σύγκλιση. Αξιοσημείωτο από αυτό το διάγραμμα είναι ότι η ικανοποίηση των χρηστών αυξάνεται αισθητά από τις αρχικές της τιμές πριν την επαναληπτική διαδικασία.



Εικόνα 15: Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 1

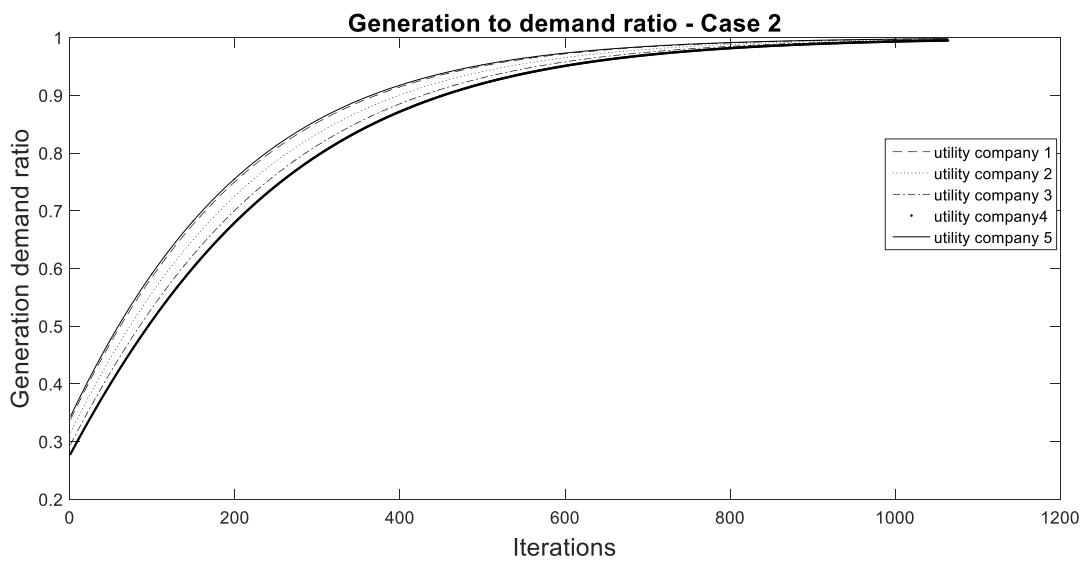
Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να διαπιστωθεί για την επαναληπτική διαδικασία ότι στην αρχή της διαδικασίας οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώνοντας τα δεδομένα ζήτησης συνειδητοποιούν ότι η παραγωγή τους σε ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ χαμηλή. Για αυτό και στη συνέχεια προσπαθούν να προσαρμόσουν την τιμή και της ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να ισορροπήσουν την παραγωγή με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται τελικά η ισορροπία Nash και η ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας φτάνουν στη μέγιστη τιμή τους.

5.2.2 Περίπτωση 2: 10 οικιακοί χρήστες και 5 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

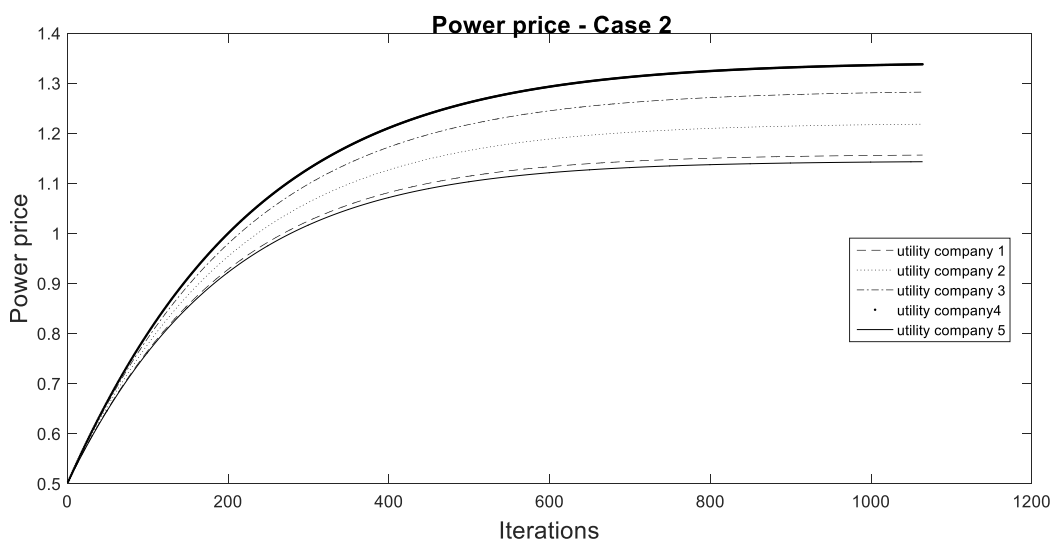
Στη δεύτερη αυτή περίπτωση εξετάζεται η συμπεριφορά και η διαδικασία σύγκλισης των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Αλγόριθμου 2 όταν αυξηθούν

οι εταιρείες στις προσομοιώσεις διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των οικιακών χρηστών.

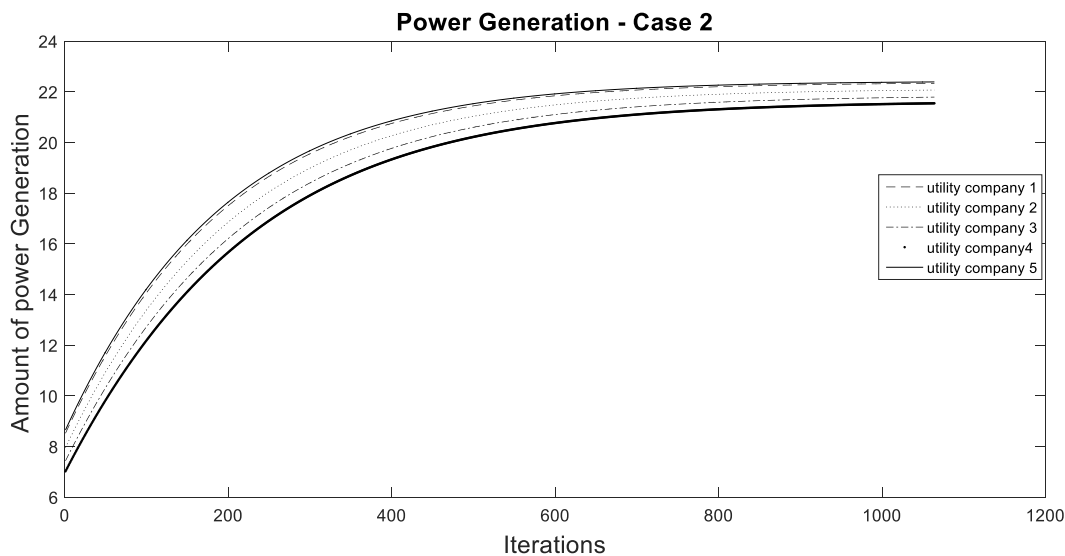
Ξεκινώντας στην εικόνα 16 αναπαρίσταται η αναλογία παραγωγής και ζήτησης, στην εικόνα 17 η τιμή και στην εικόνα 18 η ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος στην εικόνα 19 η ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.



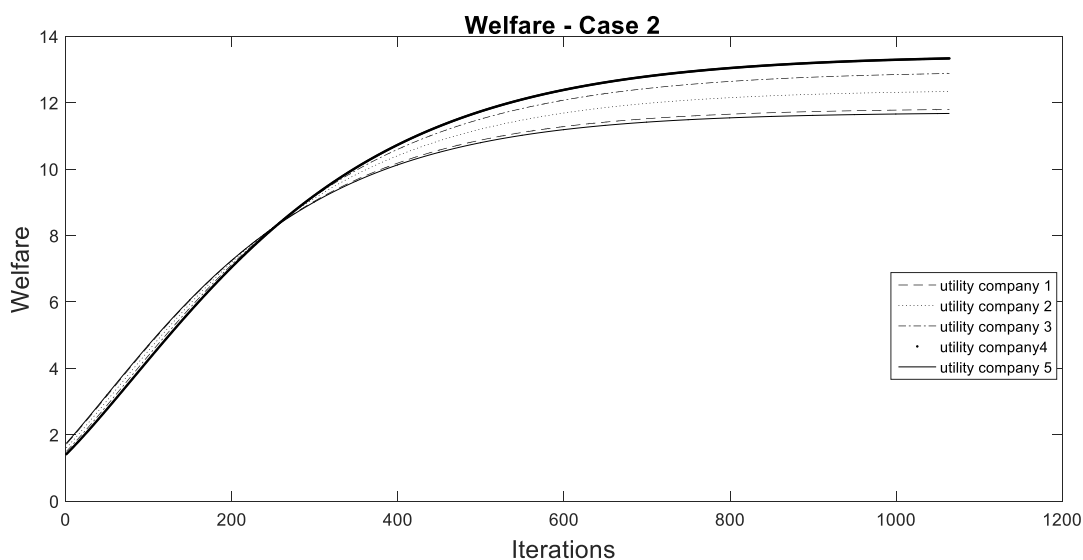
Εικόνα 16: Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 2



Εικόνα 17: Τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2



Εικόνα 18: Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2



Εικόνα 19: Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 2

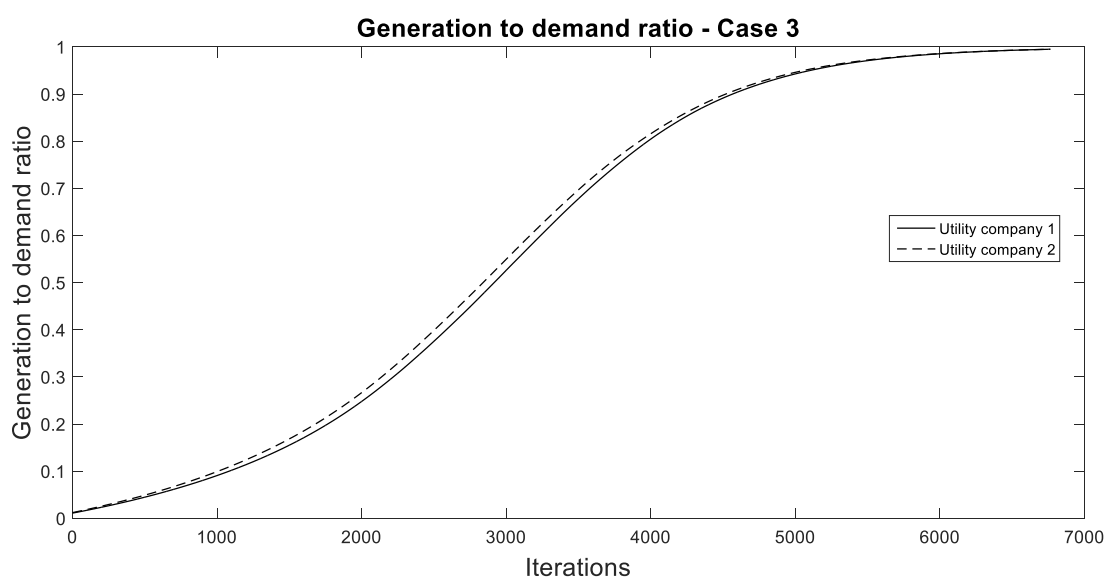
Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι όλα τα μεγέθη έχουν αντίστοιχη τάση με την πρώτη περίπτωση και η διαδικασία σύγκλισης ακολουθείται με τον ίδιο τρόπο. Μια διαφορά που παρατηρείται είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, ο οποίος είναι αισθητά αυξημένος, και το οποίο είναι λογικό καθώς όσο αυξάνονται οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο δύσκολο και ταυτόχρονα πιο αργό (σε αριθμό επαναλήψεων) να επιτευχθεί η ισορροπία. Δηλαδή με την αύξηση των εταιρειών η διαδικασία που περιεγράφηκε για τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης χρειάζεται περισσότερα βήματα, για να υπάρξει σχετική ταύτιση στη

παραγωγή και τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε 5 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ταυτόχρονα.

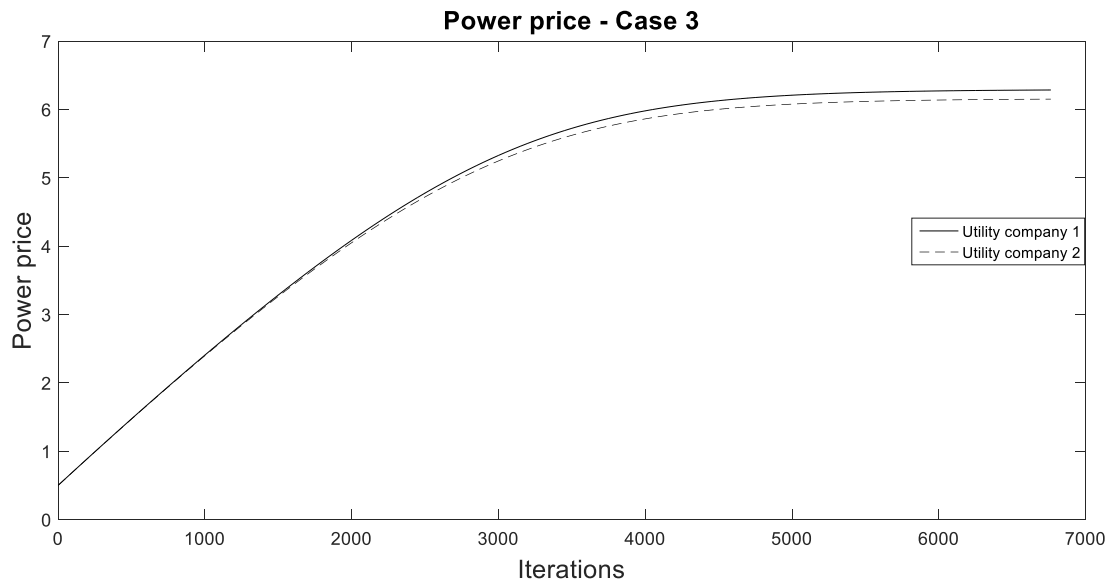
5.2.3 Περίπτωση 3: 100 οικιακοί χρήστες και 2 εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Σε αυτή τη περίπτωση εξετάζουμε την ίδια μελέτη με περισσότερους όμως καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι επηρεάζουν τη ζήτηση. Για να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εκτελούμε τον Αλγόριθμο 2 με τις ίδιες παραμέτρους και διαπιστώνουμε ότι και πάλι επιτυγχάνεται σύγκλιση φτάνοντας στο σημείο ισορροπίας Nash και ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων.

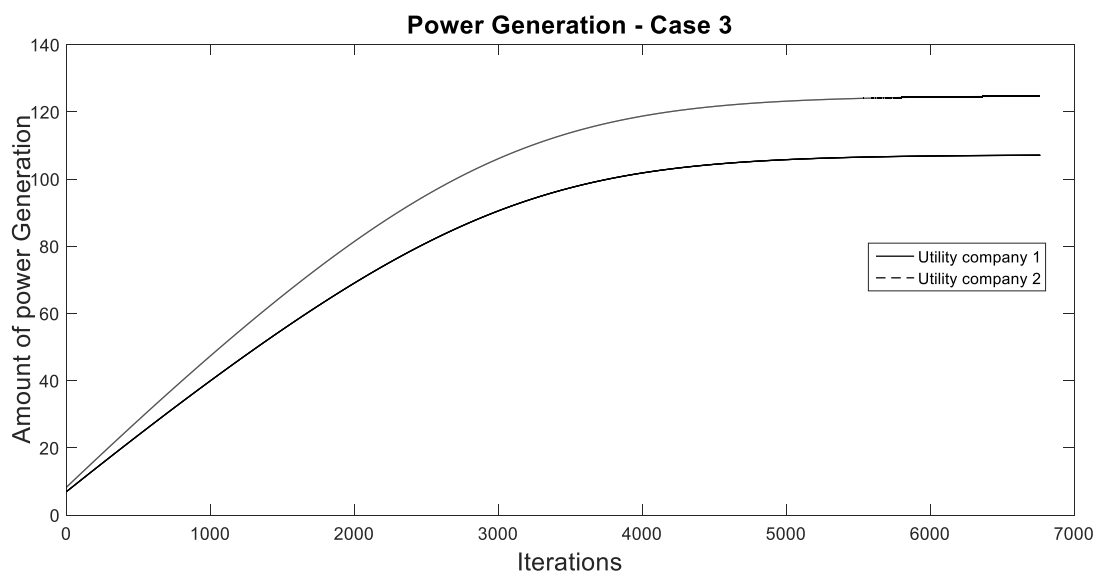
Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται και στις εικόνες 20–23 που ακολουθούν και απεικονίζουν την αναλογία παραγωγής ζήτησης, την τιμή, την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και την ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα.



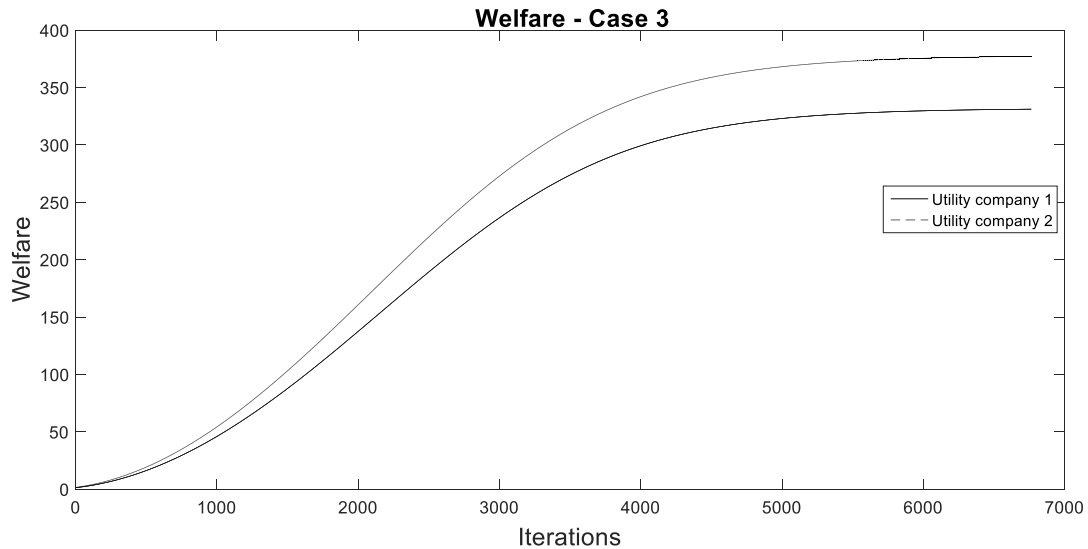
Εικόνα 20: Διαδικασία σύγκλισης αλγορίθμου 2 - Περίπτωση 3



Εικόνα 21: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3



Εικόνα 22: Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3



Εικόνα 23: Ικανοποίηση (welfare) των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας - Περίπτωση 3

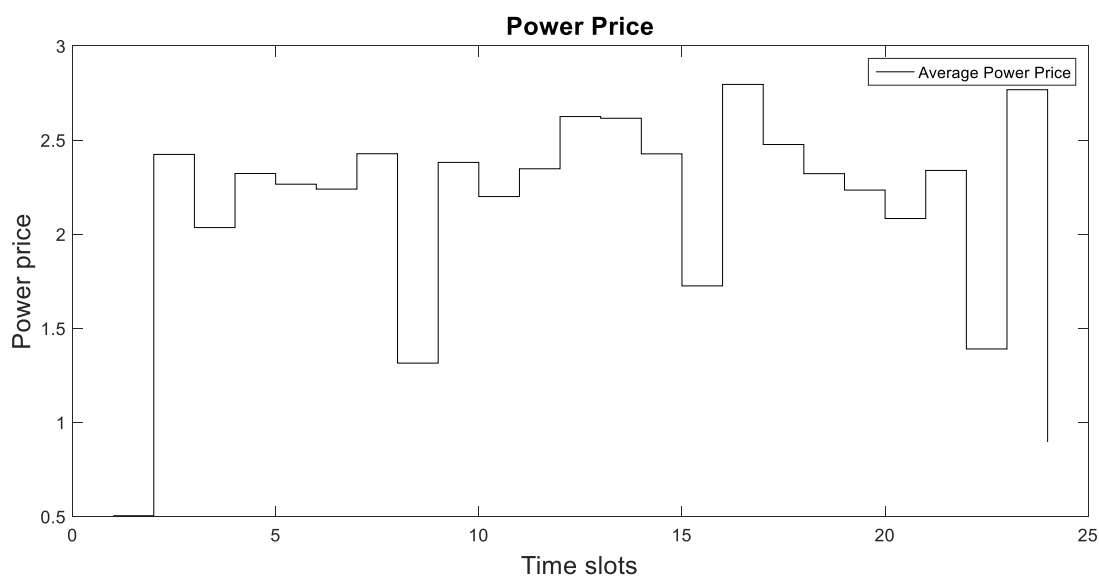
Με την παρατήρηση αυτών των αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι και σε αυτή την περίπτωση μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων επιτυγχάνεται η σύγκλιση και η αναλογία ποσότητας παραγωγής και ζήτησης και των δύο εταιρειών τείνει στη μονάδα. Αυτό που παρατηρείτε είναι ότι πλέον έχει αυξηθεί κατά πολύ ο αριθμός επαναλήψεων που απαιτείται για να επιτευχθεί η σύγκλιση, πολύ περισσότερες και από αυτές που προέκυψαν αυξάνοντας τον αριθμό των εταιρειών. Άρα το πλήθος των οικιακών χρηστών προκαλεί έντονη μεταβολή στο πλήθος των επαναλήψεων καθώς είναι πλέον πιο χρονοβόρα η διαδικασία της αντιγραφής, η οποία θα επιφέρει και τη σύγκλιση.

5.3 Σύγκριση μελέτης με την αντίστοιχη χωρίς ανταπόκριση ζήτησης

Για να αποτιμηθεί και η σημασία της ανταπόκρισης ζήτησης (demand response), δηλαδή ολόκληρης της λογικής που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, αξίζει να γίνει μία σύγκριση της προτεινόμενης προσέγγισης με την αντίστοιχη χωρίς όμως να υπάρχει δυναμική ανταπόκριση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Εισάγετε, λοιπόν, εδώ η μέθοδος χωρίς ανταπόκριση ζήτησης (**No demand response scheme**), στην οποία οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας διατηρούν μια σταθερή τιμή για τη ηλεκτρική ενέργεια καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας, προσομοιάζοντας δηλαδή τις παραδοσιακές δομές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά δε παρέχεται κανένα κίνητρο στους καταναλωτές να αλλάξουν την ζήτηση τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 24) παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες διαμορφώνονται με την ανταπόκριση ζήτησης σύμφωνα με το τρόπο που αναλύθηκε στα πλαίσια της παραπάνω διπλωματικής. Στο ακόλουθο διάγραμμα είναι εμφανής οι τιμές και οι μεταβολές τους στις 24 χρονικές στιγμές της ημέρας σε αντίθεση με τη μέθοδο No – Demand Response, όπου οι τιμές διατηρούνται σταθερές.



Εικόνα 24: Μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας με ανταπόκριση στη ζήτηση

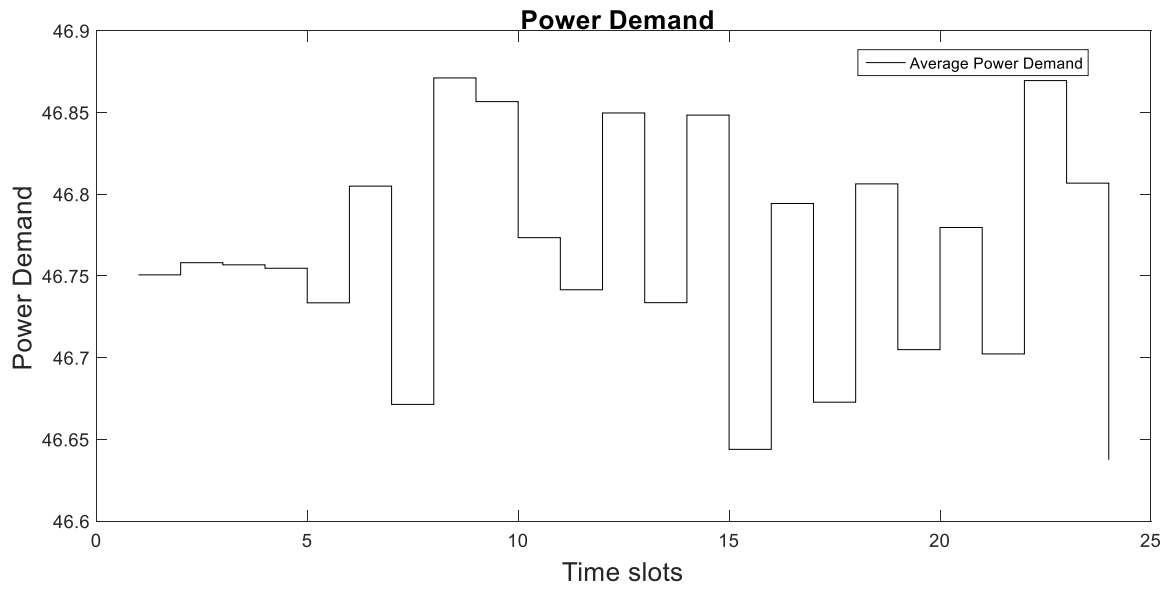
Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 25) γίνεται σύγκριση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας στις δύο διαφορετικές μεθόδους, με και χωρίς ανταπόκριση ζήτησης.

Η διαφορά που παρατηρείται στα διαγράμματα είναι οι αυξομειώσεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες στη περίπτωση χωρίς ανταπόκριση ζήτησης έχουν διακύμανση 30 μονάδων, ενώ όταν εφαρμόζεται ανταπόκριση ζήτησης η απόκλιση

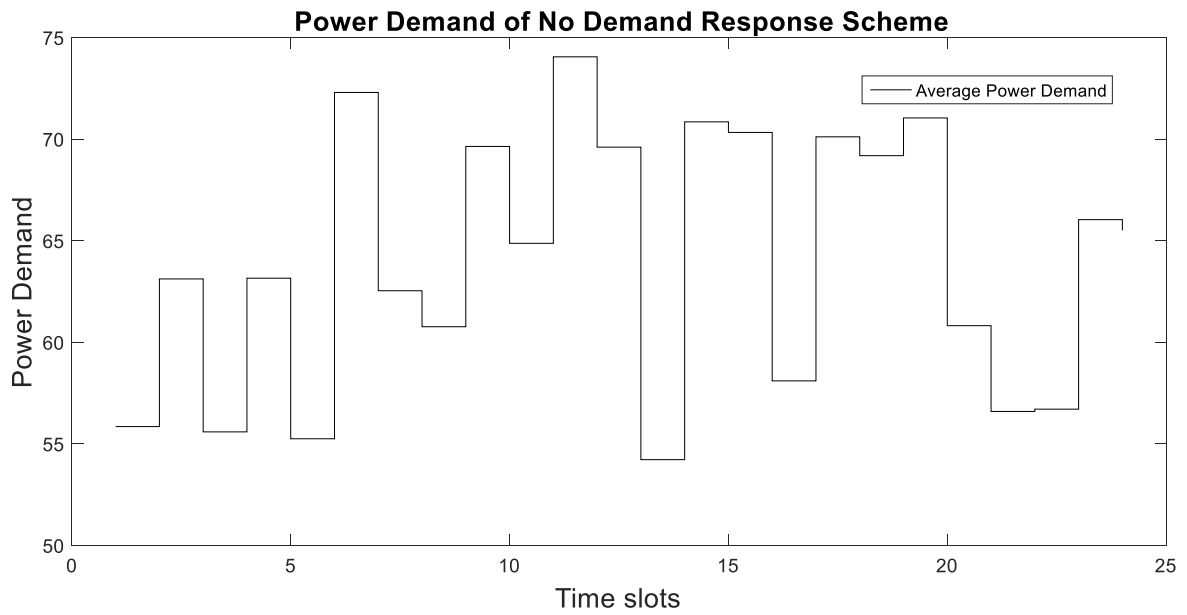
των ακραίων τιμών μειώνεται σε λιγότερο από μία μονάδα. Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου ανταπόκρισης ζήτησης επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η διαμόρφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειώνονται οι ακραίες τιμές και οι έντονες διακυμάνσεις ζήτησης και ταυτόχρονα να υπάρξει και μείωση του μέγιστου φορτίου.

Σύμφωνα και με τον ορισμό της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο (2) και με τη συμπεριφορά των καταναλωτών η ζήτηση είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται / μειώνεται η ζήτηση μειώνεται/ αυξάνεται αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι οικιακοί χρήστες να μεταθέτουν την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες χρονικές στιγμές, που δεν υπάρχουν μέγιστες τιμές αλλά σε χρονικές περιόδους με πιο χαμηλές τιμές για να εξασφαλίσουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας στην χαμηλότερη τιμή, εξοικονομώντας χρήματα σε σχέση με τη μέθοδο χωρίς ανταπόκριση ζήτησης και μεγιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο την ικανοποίηση (welfare) τους.

(α)



(β)



Εικόνα 25: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας: (α) με ανταπόκριση στη ζήτηση, (β) χωρίς ανταπόκριση στη ζήτηση

6

Επίλογος

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετήθηκε το πρόβλημα διαχείρισης της ανταπόκρισης ζήτησης των ευφών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας για πολλαπλούς οικιακούς καταναλωτές αλλά και πολλαπλές εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορετικότητα αυτής της μελέτης βρίσκεται στο γεγονός ότι επιτυγχάνεται ταυτόχρονα σε κάθε χρονική στιγμή η βελτιστοποίηση της ικανοποίησης και των καταναλωτών και των εταιρειών.

Για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των οικιακών χρηστών και των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ένα παιγνιοθεωρητικό μοντέλο δύο επιπέδων, όπου μοντελοποιούνται και τα δύο επίπεδα ανταγωνισμού. Πιο συγκεκριμένα η αλληλεπίδραση μεταξύ των οικιακών χρηστών αναπαρίσταται με ένα εξελικτικό παίγνιο, ενώ παράλληλα η αλληλεπίδραση μεταξύ των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα μη-συνεργατικό παίγνιο.

Στη συνέχεια αποδείχτηκε ότι σε κάθε παίγνιο ξεχωριστά και στις διάφορες περιπτώσεις με διαφορετικό πλήθος οικιακών χρηστών και εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας και φτάνουν όλοι οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι σε κατάσταση ισορροπίας.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα και τις συγκρίσεις των διάφορων περιπτώσεων είναι εμφανές ότι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση και του μέγιστου φορτίου αλλά και των διακυμάνσεων στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Για λόγους πληρότητας σε αυτή τη διπλωματική έχουν εξετασθεί και τα δύο παιγνιοθεωρητικά μοντέλα σε 3 περιπτώσεις με διαφορετικούς συνδυασμούς οικιακών χρηστών και εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, για την επαλήθευση και τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Όπως προέκυψε, σε όλες τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται σύγκλιση και του εξελικτικού και του μη-συνεργατικού παιγνίου, αλλά διαφέρει ο αριθμός των επαναλήψεων.

Στον αλγόριθμο 1, όπου μοντελοποιεί το εξελικτικό παίγνιο, παρατηρείται ότι μετά από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων επιτυγχάνεται η σύγκλιση σε όλες τις περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα όταν αυξάνεται το πλήθος των οικιακών χρηστών μειώνεται και το πλήθος των επαναλήψεων, το οποίο ήταν αναμενόμενο από το γεγονός ότι αυξάνεται η πιθανότητα και η διαφορά μεταξύ της χρησιμότητας του δικτύου και της μέσης χρησιμότητας.

Στον αλγόριθμο 2, όπου μοντελοποιεί το μη-συνεργατικό παίγνιο, επιτυγχάνεται και πάλι σύγκλιση μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Στη συμπεριφορά αυτού του αλγορίθμου παρατηρείτε ότι η αύξηση του πλήθους των εταιρειών δεν επιφέρει έντονη μεταβολή στο πλήθος των επαναλήψεων, αλλά υπάρχει αύξηση της ικανοποίησης των καταναλωτών. Η αύξηση του πλήθους των οικιακών χρηστών επιφέρει έντονη αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις και ταυτόχρονα αύξηση της ικανοποίησης των καταναλωτών.

Τέλος πραγματοποιείται σύγκριση με το σενάριο χωρίς ανταπόκριση ζήτησης στις διάφορες χρονικές στιγμές, όπου παρατηρείται ότι με την εφαρμογή της ανταπόκρισης ζήτησης οι αυξομειώσεις στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται αισθητά και ταυτόχρονα μειώνεται και το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στη συγκεκριμένη μελέτη δεν έγινε πειραματική διερεύνηση της επιλογής των παραμέτρων των εξισώσεων (για παράδειγμα της εξίσωσης χρησιμότητας) αλλά χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές τιμές από αντίστοιχες μελέτες. Έχοντας ως βάση το προτεινόμενο πλαίσιο θα ήταν ενδιαφέρουσα μια έρευνα για τη σωστή και αποτελεσματική σύλληψη της δυναμικής των οικιακών χρηστών αλλά και της επιρροής των περιβαλλοντικών αιτίων.

Επιπλέον στα πλαίσια του προτεινόμενου πλαισίου υπάρχουν κάποιοι χρονικοί περιορισμοί, όπως ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι κάθε χρονική στιγμή η συνολική κατανάλωση θα υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή, οι οποίοι θα μπορούσαν να διερευνηθούν χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο πλαίσιο με πιο αναλυτικό και ολοκληρωμένο τρόπο.

Η προσομοίωση των αποτελεσμάτων έγινε χωρίς βλάβη της γενικότητας στα πλαίσια ενός μόνο πληθυσμού, αλλά σε μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να μελετηθεί και η αλληλεπίδραση περισσότερων πληθυσμών. Όπου θα αξίζει να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των καταναλωτών σε κάθε πληθυσμό αλλά και η μεταβολή στη συμπεριφορά των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, που θα ικανοποιούν όλους τους διαφορετικούς πληθυσμούς.

7

Βιβλιογραφία

- [1] Bo Chai, Jiming Chen, Zaiyue Yang, Yan Zhang, “Demand Response Management with Multiple Utility Companies: A Two-Level Game Approach”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 2, March 2014
- [2] Ruilong Deng, Zaiyue Yang, Mo-Yuen Chow, Jiming Chen, “A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches”, IEEE Transactions on Informatics, June 2015
- [3] John S. Vardakas, Nizar Zorba, Christos V. Verikoukis, “A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms”, IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol.17, No.1, First Quarter 2015
- [4] Peng Yang, Gongguo Tang, Arye Nehorai, “A Game-Theoretic Approach for Optimal Time-of-Use Electricity Pricing”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol.28, No.2, May 2013
- [5] S. Datchanamoorthy, S. Kumar, Y. Ozturk and G. Lee, “Optimal Time-of-Use Pricing For Residential Load Control”

- [6] Pedram Samadi, Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Robert Schober, Vincent W.S. Wong, and Juri Jatskevich, “Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid”
- [7] Antonio J. Conejo, Juan M. Morales, Luis Baringo, “Real-Time Demand Response Model”, IEEE Transactions On Smart Grid, Vol.1, No.3, December 2010
- [8] Christian Ibars Monica Navarro Lorenza Giupponi, “Distributed Demand Management in Smart Grid with a Congestion Game”, Conference Paper, November 2010
- [9] He (Henry) Chen, Yonghui Li, Raymond H. Y. Louie, Branka Vucetic, “Autonomous Demand Side Management based on Energy Consumption Scheduling and Instantaneous Load Billing: An Aggregative Game Approach”, IEEE
- [10] Chen Chen, Shalinee Kishore, Lawrence V. Snyder, “An Innovative RTP-Based Residential Power Scheduling Scheme For Smart Grids”, IEEE 2011
- [11] [online], <http://new.abb.com/smartgrids/what-is-a-smart-grid>
- [12] [online], <http://www.c2es.org/technology/factsheet/SmartGrid>
- [13] [online], <http://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid>
- [14] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, “Smart grids: from innovation to deployment”, April 2011
- [15] Theodore L. Turocy, Bernhard von Stengel, “Game Theory”, CDAM Research Report LSE, October 2001
- [16] Fudenberg, Drew, and Jean Tirole. "Game theory, 1991." Cambridge, Massachusetts 393 (1991)
- [17] Pierluigi Siano, “Demand response and smart grids—A survey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, February 2014
- [18] Walid Saad, Zhu Han, H. Vincent Poor, and Tamer Bas, “Game Theoretic Methods for the Smart Grid”, February 2012

- [19] Lasaulce, Samson, and Hamidou Tembine. "Game theory and learning for wireless networks: fundamentals and applications." Academic Press, 2011
- [20] [16] I. A. Shah, S. Jan, I. Khan and S. Qamar, "An Overview of Game Theory and its Applications in Communication Networks", INTERNATIONAL JOURNAL OF MULTIDISCIPLINARY SCIENCES AND ENGINEERING, APRIL 2012