



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ  
ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΩΩΝ ΠΡΑΚΤΩΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σπυρίδων Ι. Χατζηβασιλειάδης

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007





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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ  
ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΥΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σπυρίδων Ι. Χατζηβασιλειάδης

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2007.

.....  
Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σ. Παπαθανασίου  
Λέκτορας ΕΜΠ

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

.....  
Σπυρίδων Ι. Χατζηβασιλειάδης

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

Copyright © Σπυρίδων Χατζηβασιλειάδης, 2007.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η δομή του μικροδικτύου και εφαρμόστηκε η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων όσον αφορά τις τεχνικές ελέγχου. Οι στόχοι της εργασίας συνοψίζονται στην κατασκευή ενός ευφυούς ελεγκτή για τον έλεγχο των φορτίων καθώς και τη χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης ώστε να δώσουμε τη δυνατότητα στον ελεγκτή να μαθαίνει από το περιβάλλον του.

Το μικροδίκτυο αποτελεί μια νέα μορφή ηλεκτρικών συστημάτων που εντάσσονται στα έξυπνα δίκτυα. Παρομοιάζεται συχνά με μικρογραφία ενός ηλεκτρικού δικτύου στη χαμηλή τάση – ή ακόμη και στη μέση τάση – όπως το γνωρίζουμε σήμερα, το οποίο αποτελείται από φορτία και μικροπηγές, κυρίως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP) μικρής ισχύος, κυψέλες καυσίμου κ.α. Σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι ότι ως προς το συνολικό δίκτυο φαίνεται ως μία οντότητα, η οποία άλλοτε απορροφά ενέργεια από το δίκτυο και άλλοτε αποδίδει σε αυτό.

Η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων αποτελεί μία νέα προσέγγιση στον έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων η οποία εστιάζει στον κατανεμημένο έλεγχο. Αναλυτικότερα, προσφέρει ένα βαθμό αυτονομίας στις μονάδες που απαρτίζουν το σύστημα ενώ προϋποθέτει την επικοινωνία μεταξύ των μονάδων για την επίτευξη αποτελεσματικού ελέγχου. Οι ευφείς πράκτορες διακρίνονται από νοημοσύνη και κοινωνικότητα. Ως εκ τούτου έχουν τη δυνατότητα να πάρουν τοπικά αποφάσεις που αφορούν τη μονάδα που αντιπροσωπεύουν, αλλά έχουν παράλληλα τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με άλλους πράκτορες για να επιτύχουν στόχους που αφορούν ολόκληρο το σύστημα, όπως είναι για παράδειγμα η επάρκεια σε αποθέματα ενέργειας του μικροδικτύου σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Η αναμενόμενη αύξηση των μικρών μονάδων παραγωγής με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και πολύ πιθανώς των μικροδικτύων θα εισάγει σημαντική πολυπλοκότητα στον κεντρικό έλεγχο του συστήματος. Ο κατανεμημένος έλεγχος που υλοποιείται με τους ευφείς πράκτορες προβλέπεται να αποδειχθεί ιδιαίτερα ελκυστική λύση.

Στην παρούσα εργασία μελετάται αρχικά ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός ευφυούς ελεγκτή φορτίου, ο οποίος θα εγκατασταθεί στο πιλοτικό μικροδίκτυο της Κύθνου. Παράλληλα περιγράφονται οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν με σκοπό την επικοινωνία των πρακτόρων, τον συντονισμό των ενεργειών αλλά και την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων όπως περιπτώσεις υπέρτασης, υπότασης και υπερέντασης. Σκοπός είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανομή φορτίου, ώστε η τροφοδότηση του δικτύου να γίνεται από τα φωτοβολταϊκά και τις μπαταρίες με παράλληλη ελαχιστοποίηση της χρησιμοποίησης της γεννήτριας diesel. Για τις ανάγκες της εφαρμογής, ο ευφής ελεγκτής είναι εφοδιασμένος με ηλεκτρονικούς διακόπτες οι οποίοι σε περίπτωση ανάγκης διακόπτουν την παροχή σε μη σημαντικά φορτία. Σημειώνεται ακόμα ότι αυτή είναι η πρώτη πρακτική εφαρμογή τεχνολογίας ευφυών πρακτόρων σε μικροδίκτυο σε παγκόσμια κλίμακα.

Επίσης, αναπτύσσεται αλγόριθμος για τη βέλτιστη οικονομική λειτουργία ενός μικροδικτύου σε περιβάλλον αγοράς ενέργειας. Χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση, και συγκεκριμένα την τεχνική Q-learning, σκοπός είναι η δυνατότητα του πράκτορα να μαθαίνει από το περιβάλλον του. Οι πράκτορες που ελέγχουν το σύστημα θα πρέπει αυτόνομα να προσδιορίσουν το βέλτιστο σύνολο ενεργειών (αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο) ώστε να μεγιστοποιήσουν το κέρδος. Περιγράφεται αναλυτικά η τεχνική Q-learning, ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε, καθώς και ένα παράδειγμα εφαρμογής του με πραγματικά στοιχεία τιμών αγοράς-πώλησης.

Λέξεις-Κλειδιά: μικροδίκτυο, ευφείς πράκτορες, συστήματα πολλαπλών πρακτόρων, Κύθνος, ευφής ελεγκτής φορτίου, μηχανική μάθηση, Q-learning

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the development of a control system for power systems. Specifically, the structure of a microgrid and the intelligent agents' technology are being studied. The main objectives of this thesis are the design of an intelligent load controller as well as the implementation of machine learning in order to enable the controller to learn through his environment.

The microgrid is a new form of a power system, part of the wider concept of smartgrids. It can be considered as a small-scale electricity grid in low voltage – or even in medium voltage – and it is consisted of loads and microsources such as renewable energy sources, combined heat and power units, fuel cells, among others. An important characteristic of the microgrid is that it interacts with the main grid as one entity, absorbing or supplying power to the grid.

The intelligent agents' technology is a new approach to the control of power systems, which mainly focuses on distributed control. The control units are given a degree of autonomy and are able to interact in order to achieve best performance. The intelligent agents are characterized from intelligence and sociability. Thus, they are able to take decisions locally, in order to control one unit, but they can also interact with other agents in order to accomplish goals set for the whole system, such as power availability in case of islanded operation.

The expected boost in small production units – and most possibly in microgrids – after the liberalization of the energy market will increase the complexity of the grid control. Distributed control, realized in the form of intelligent agents, might prove to be an effective solution.

Within this context, the design and the construction of an intelligent load controller, which will be implemented in the pilot microgrid of Kythnos, is initially studied. The algorithms developed are described. Main objectives have been to enable the interaction among the agents, the coordination of their actions as well as to achieve an effective behavior of the agents in emergency situations such as voltage sag, overvoltage or overcurrent events. Optimized load allocation is required, so that the power supply provided from the photovoltaics and the batteries can be maximized, while the use of the diesel genset will be minimized. To this end, the intelligent load controller is equipped with electronic switches, which in case of emergency cut the power in non-important loads. It should be noted that this is the first worldwide field test of the intelligent agents' technology in a microgrid.

Additionally, an algorithm for the optimization of the economic operation of a microgrid in a liberalized energy market is developed. Based on machine learning, and specifically Q-learning, our objective is to enable the agent to learn through his environment. The agents, who control the system, are required to determine a set of actions (buying or selling electric power to the grid) which will maximize their profit. The Q-learning technique, the algorithm developed as well as an example of its implementation with real data of buying/selling prices are presented.

Key-words: microgrid, intelligent agents, multi-agent systems, Kythnos, intelligent load controller, machine learning, Q-learning

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και μαζί με αυτή τον κύκλο σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, θα ήθελα με την ευκαιρία αυτή να ευχαριστήσω μια σειρά από ανθρώπους που στάθηκαν στο πλευρό μου όλο αυτό το διάστημα.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας καθ. κ. Νίκο Χατζηαργυρίου, όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αλλά και για την άριστη συνεργασία μας σε πολλούς τομείς, το ενδιαφέρον του για μένα καθώς και για τις συμβουλές του στις όποιες ανησυχίες μου. Είναι ο άνθρωπος που με μύησε σε νέα ερευνητικά αντικείμενα και αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση των ερευνητικών και επαγγελματικών μου ενδιαφερόντων.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τον Δρ. Άρη Δημέα, ερευνητή στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ, για την καθοδήγησή του σε όλα τα βήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τις συμβουλές του όποτε τις χρειαζόμουν καθώς και για τις ιδιαίτερα ενδιαφέροντες συζητήσεις που είχαμε, οι οποίες άνοιξαν το δρόμο για την ενασχόλησή μου με νέα ερευνητικά πεδία. Χωρίς τη βοήθειά του, η διπλωματική εργασία δε θα μπορούσε να περατωθεί. Ελπίζω η συνεργασία μας να συνεχιστεί στο ίδιο άριστο επίπεδο.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Δρ. Φ. Ψωμαδέλλη, προϊστάμενο του τμήματος Έρευνας και Ανάπτυξης της ANKO A.E. για την άριστη συνεργασία μας. Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τους κ.κ. Κώστα Γιαννακάκη, Ηλιάνα Παπαδογούλα και Δημήτρη Ζαχαριάδη, εργαζόμενους στην ANKO A.E. για την υπομονή τους, τις συμβουλές τους και τις απαντήσεις που μου παρείχαν στα προβλήματα που αντιμετώπισα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα όλους τους φίλους μου, συμφοιτητές και μη, που είναι δίπλα μου για να με στηρίξουν και να με συμβουλέψουν, καθώς και για τις όμορφες αναμνήσεις, τις οποίες συν-δημιουργήσαμε τα πέντε τελευταία χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη και τη συμπαράσταση που μου έδωσε όποτε τη χρειαζόμουν. Ελπίζω με αυτόν τον τρόπο να ανταποδίδω σε ένα μικρό βαθμό όλους τους κόπους που έκαναν για μένα.

*Στους γονείς μου για την υποστήριξή τους  
αυτά τα τελευταία 23 χρόνια...*

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : ΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

1.1. Εισαγωγή.....	12
1.2. Το Μικροδίκτυο.....	13
1.3. Τεχνολογίες Παραγωγής και Αποθήκευσης Ενέργειας για τα Μικροδίκτυα.....	16
1.4. Λειτουργία και Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου.....	18
1.5. Δομή και Έλεγχος του Μικροδικτύου.....	21
1.6. Εισαγωγή της Έννοιας των Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων για τον Έλεγχο του Μικροδικτύου.....	23

### Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΥΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ

2.1. Ο ευφυής πράκτορας.....	27
2.2. Χαρακτηριστικά των Ευφυών Πρακτόρων.....	29
2.3. Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων.....	32
2.4. Επικοινωνία των Πρακτόρων.....	34
2.4.1. Agent Communication Language.....	35
2.5. Αλληλεπίδραση των Πρακτόρων.....	36
2.5.1. Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων.....	37
2.6. Πολυεπίπεδη Μάθηση.....	38
2.7. Εφαρμογές.....	42
2.8. Εφαρμογή των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων στον έλεγχο των μικροδικτύων.....	44
2.8.1. Η δομή του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC).....	44
2.8.2. Η δομή του τοπικού ελεγκτή.....	46
2.8.3. Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος.....	47
2.8.4. Εφαρμογή στο μικροδίκτυο.....	48

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΚΥΘΝΟΥ**

3.1. Εισαγωγή.....	51
3.2. Η εγκατάσταση στην Κύθνο.....	51
3.3. Ευφυής Ελεγκτής Φορτίου.....	56
3.4. Λειτουργίες του Ευφυούς Ελεγκτή Φορτίου.....	65
3.4.1. Συχνότητα.....	65
3.4.2. RMS Τάσης.....	66
3.4.3. RMS Ρεύματος.....	66
3.4.4. Υπόταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του.....	67
3.4.5. Υπέρταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του.....	67
3.4.6. Υπερένταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του.....	68
3.5. Αλγόριθμοι για τον Έλεγχο των ILC και του MGCC.....	69
3.5.1. Αλγόριθμος για τον Ευφυή Ελεγκτή Φορτίου (ILC).....	69
3.5.2. Αλγόριθμος για τον Microgrid Central Controller (MGCC).....	72
3.6. Σχόλια πάνω στην Αξιοπιστία του Συστήματος.....	75
3.7. Ανάπτυξη λογισμικού για συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων.....	76
3.7.1. Εισαγωγή.....	76
3.7.2. JADE.....	76
3.7.3. Το σύστημα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο μικροδικτύων.....	78
3.7.3.1 Εισαγωγή.....	78
3.7.3.2 Συμπεριφορές.....	78
3.7.3.3. Οντολογίες.....	79
3.7.4. JADE-LEAP.....	79

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ**

4.1. Εισαγωγή.....	81
4.2. Ενισχυτική Μάθηση.....	84
4.3. Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων.....	86
4.4. Q-learning.....	88
4.5. Αλγόριθμος – Σκοποί και Στόχοι.....	89
4.6. Αλγόριθμος – Περιγραφή.....	92
4.7. Εφαρμογές του Αλγορίθμου.....	100

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....**

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>106</b>
--------------------------	------------

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΑΗΣ:	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ:	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΣΜΗΕ:	Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.
ΥΥΤ:	Υπερυψηλή Τάση
CHP:	Μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Θερμότητας (Combined Heat and Power)
DILC:	Κατανεμημένος Ευφυής Ελεγκτής Φορτίου (Distributed Intelligent Load Controller)
DNO:	Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (Distribution Network Operator)
FIPA:	Foundation of Intelligent Physical Agents
ILC:	Ευφυής Ελεγκτής Φορτίου – Intelligent Load Controller
JADE:	Java Agent DEvelopment
LAN:	Τοπικό Δίκτυο – Local Area Network
LC:	Τοπικός Ελεγκτής Μονάδας Παραγωγής ή Μονάδας Αποθήκευσης Ενέργειας Μικροδικτύου (Local Controller)
MAS:	Σύστημα Πολλαπλών Ευφών Πρακτόρων (Multi-Agent System)
MDP:	Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων (Markov Decision Process)
MGCC:	Κεντρικός Ελεγκτής Μικροδικτύου (Microgrid Central Controller)
MO:	Διαχειριστής της Αγοράς (Market Operator)
PLC:	Επικοινωνία μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας – Power Line Communication
Wi-Fi:	Ασύρματο Δίκτυο – Wireless Fidelity

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> :

## Το Μικροδίκτυο

### 1.1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων βασίστηκε σε ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής. Σύμφωνα με αυτό κατασκευάζονταν μεγάλοι σταθμοί παραγωγής (1.000 – 2.000 MW ή και παραπάνω), οι οποίοι συνδέονταν στο δίκτυο μεταφοράς υπερυψηλής τάσης (ΥΥΤ) και να φτάσει στους καταναλωτές. Η ερευνητική δραστηριότητα αυτή τη στιγμή στον ενεργειακό τομέα, καθώς και σύμφωνα με προβλέψεις επιστημόνων, δείχνουν ότι στο μέλλον θα κινηθούμε προς ένα διαφορετικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, βασισμένο στο μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής.

Η εφαρμογή του μοντέλου της διεσπαρμένης παραγωγής στα ηλεκτρικά συστήματα δεν είναι νέο φαινόμενο. Πριν την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος και των μεγάλων ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ), κατά τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα όλες οι ανάγκες για ενέργεια, όπως οι ανάγκες για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και κίνηση, ικανοποιούνταν από μονάδες παραγωγής πολύ κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Η τεχνολογική πρόοδος, οι οικονομίες κλίμακας στην παραγωγή ενέργειας και τη διανομή της, ο δημόσιος χαρακτήρας της ηλεκτρικής επιχείρησης (η Δ.Ε.Η. όσον αφορά τα ελληνικά δεδομένα) καθώς και ο συνεχώς σημαντικότερος ρόλος που παίζει ο ηλεκτρισμός στη ζωή μας, συνέβαλαν σταδιακά στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου όπως το γνωρίζουμε σήμερα: με μεγάλες μονάδες παραγωγής μακριά από τα αστικά κέντρα και μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των γραμμών υπερυψηλής, υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης σε κάθε επιχείρηση και νοικοκυριό της χώρας.

Ενώ το ηλεκτρικό δίκτυο εξελισσόταν, κάποιοι μεγάλοι καταναλωτές – κυρίως βιομηχανίες – θεώρησαν οικονομικά πιο συμφέρον να εγκαταστήσουν και να λειτουργήσουν ιδιόκτητα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Παράλληλα καταναλωτές οι οποίοι απαιτούσαν αδιάλειπτη παροχή ενέργειας όπως τα νοσοκομεία, συχνά εγκαθιστούσαν ιδιόκτητες γεννήτριες παραγωγής για παροχή ενέργειας σε επείγοντα φορτία. Αυτές οι «παραδοσιακές» μορφές διεσπαρμένης παραγωγής, αν και δεν ήταν υπό τον έλεγχο κάποιας ηλεκτρικής επιχείρησης, παρείχαν πολλά πλεονεκτήματα στο συνολικό ηλεκτρικό δίκτυο, προσφέροντας υπηρεσίες στους καταναλωτές, τις οποίες δεν ήταν απαραίτητο να παρέχει η ηλεκτρική επιχείρηση. Έτσι, η τελευταία είχε ελεύθερους πόρους τους οποίους μπορούσε να χρησιμοποιήσει για τη χρηματοδότηση έργων με σκοπό την ενίσχυση του δικτύου και τον πλήρη εξηλεκτρισμό της χώρας.

Σήμερα, η πρόοδος που έχει γίνει όσον αφορά τα νέα υλικά και τον σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων, των μικροτουρμπίνων, των κυψελών καυσίμου, των κινητήρων, του ψηφιακού ελέγχου και της παρακολούθησης των συστημάτων εξ αποστάσεως έχουν αυξήσει το εύρος των εφαρμογών για τα σύγχρονα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος, σε συνδυασμό με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες των καταναλωτών και την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας έχουν δημιουργήσει νέες δυνατότητες για τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής τόσο για τους καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέξουν να καλύψουν μόνοι τους τις δικές τους ανάγκες, όσο και για τις ηλεκτρικές εταιρείες, οι οποίες μπορούν να εξερευνήσουν τις δυνατότητες της διεσπαρμένης παραγωγής για την κάλυψη της ζήτησης.

Το Μικροδίκτυο αποτελεί έναν τρόπο υλοποίησης του μοντέλου της διεσπαρμένης παραγωγής, αφού ενσωματώνει όλες τις νέες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – και ιδιαίτερα τις ανανεώσιμες πηγές – συνδεδεμένο σε δίκτυα χαμηλής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι πολλά τέτοια δίκτυα μπορούν να δημιουργηθούν είτε από ηλεκτρικές εταιρείες, είτε ακόμα και από μικρές ομάδες καταναλωτών για να καλύπτουν τοπικά τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια. Αναλυτικότερη περιγραφή του μικροδικτύου, το οποίο αποτελεί και αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δίνεται στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου.

## 1.2. Το Μικροδίκτυο

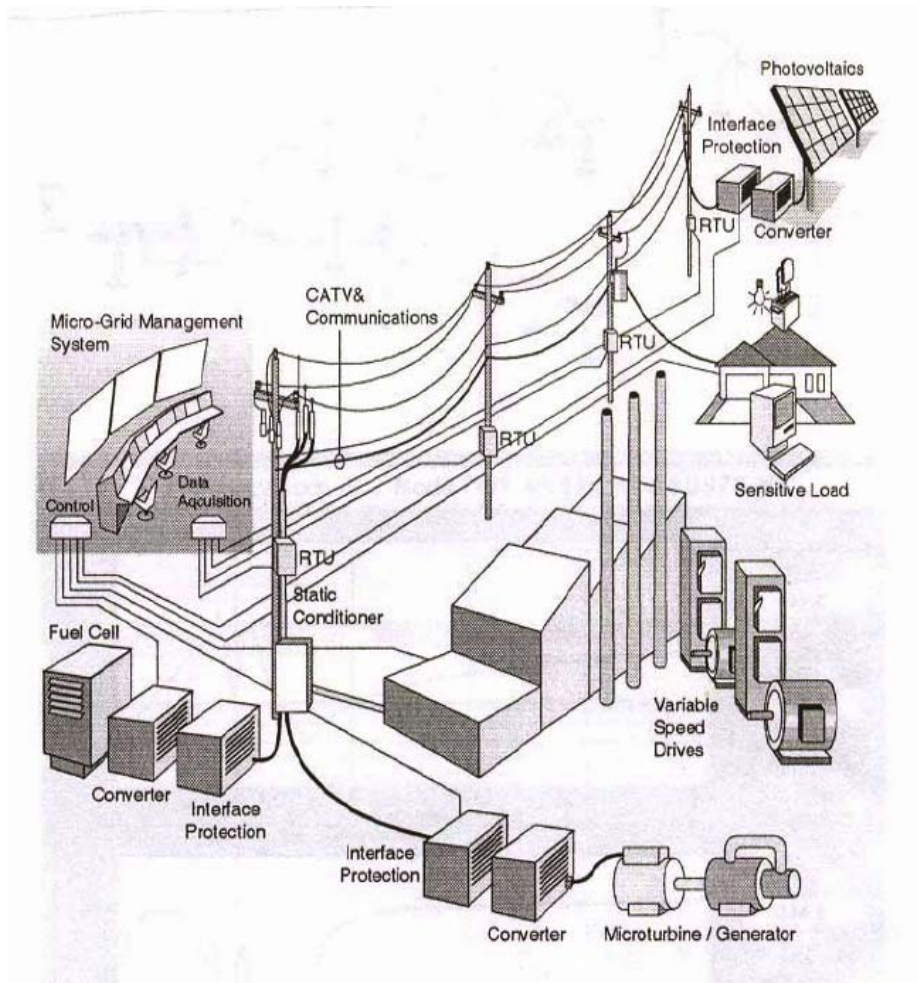
Το Μικροδίκτυο αποτελεί μία νέα προσέγγιση όσον αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα. Ένα Μικροδίκτυο αποτελείται από μικρές μονάδες παραγωγής οι οποίες συνήθως δεν ξεπερνούν τα 500 kW, όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκά κύτταρα, σε συνδυασμό με συσκευές αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες, σφονδύλους, κ.α.) καθώς και ελεγχόμενα φορτία, τα οποία συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αυτού του είδους τα συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν είτε διασυνδεδεμένα στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, είτε απομονωμένα σε κατάσταση νησιδοποίησης. Η παρουσία των μικροδικτύων εισάγει σημαντική πολυπλοκότητα όσον αφορά στη λειτουργία του δικτύου, προσφέρει παρόλα αυτά σημαντικά πλεονεκτήματα στη συνολική επίδοση του συστήματος, εφόσον εφαρμόζεται ο κατάλληλος έλεγχος.

Ένα Μικροδίκτυο, αποτελεί ουσιαστικά μικρογραφία των μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων. Τα πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει στη συνολικότερη λειτουργία του συστήματος συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών, όπως:

- την αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος, με την ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP), καθώς και με την εγκατάσταση αυτών κοντά στους καταναλωτές,

- τη μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό – εκτός των CHP – ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον,
- τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες
- τη μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το Μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας
- από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου από το Μικροδίκτυο προσφέρει πλεονεκτήματα όπως τη δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς επίσης μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση.



Σχ. 1.1: Παράδειγμα Μικροδικτύου

Ένα τυπικό παράδειγμα Μικροδικτύου παρουσιάζεται στο Σχ.1.1.

Σημαντική έρευνα συντελείται αυτή τη στιγμή για τη λειτουργία και τον έλεγχο των μικροδικτύων και τον καθορισμό των χαρακτηριστικών τους που θα τα καταστήσουν ανταγωνιστικά σε σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Ερευνητικά προγράμματα σε Ευρώπη και Αμερική έχουν ήδη προχωρήσει προς αυτήν την κατεύθυνση ενώ πιλοτικά μικροδίκτυα έχουν αναπτυχθεί σε πολλά σημεία της Ευρώπης, όπως για παράδειγμα στο Mannheim της Γερμανίας, στη νήσο Bornholm της Δανίας, καθώς στις ΗΠΑ. Στη Ελλάδα, ένα πιλοτικό μικροδίκτυο έχει υλοποιηθεί στην Κύθνο. Το συγκεκριμένο σύστημα θα μελετηθεί διεξοδικότερα σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

### 1.3. Τεχνολογίες Παραγωγής και Αποθήκευσης Ενέργειας για τα Μικροδίκτυα

Οι περισσότερες μικροπηγές του Μικροδικτύου συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπέων. Οι αυξημένες δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονοι αντιστροφείς καθιστούν δυνατό τον έλεγχο της παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος και κατά συνέπεια της τάσης και της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία. Οι τεχνολογίες παραγωγής που εμπλέκονται σε ένα μικροδίκτυο είναι σε γενικές γραμμές οι εξής:

- Μικροτουρμπίνες (Micro-turbines)

Οι μικροτουρμπίνες κυμαίνονται σε ισχείς από 20 έως 100 kW. Η τεχνολογία τους προέρχεται από τις βοηθητικές μονάδες ισχύος (auxiliary power unit – APU) και η μηχανολογική τους λειτουργία είναι απλή, με ό,τι αυτό συνεπάγεται σε θέματα διάρκειας ζωής και απαιτήσεων συντήρησης. Το καύσιμό τους είναι κυρίως το φυσικό αέριο, ωστόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και πετρέλαιο ή προπάνιο.

- Κυψέλες Καυσίμου (fuel cells)

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία τόσο για τα μικροδίκτυα όσο και για το γενικότερο χώρο της διεσπαρμένης παραγωγής. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική διάταξη που μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Το καύσιμο που τροφοδοτεί τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να είναι υδρογόνο ή θεωρητικά οποιοδήποτε άλλο συμβατικό καύσιμο αποτελούμενο από υδρογονάνθρακες. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας αλλά το βασικό τους πρόβλημα αυτή την στιγμή είναι το υψηλό τους κόστος.

- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν σημαντικό τμήμα ενός μικροδικτύου. Η παραγωγή βασίζεται κυρίως σε φωτοβολταϊκά στοιχεία αλλά και μικρές ανεμογεννήτριες. Επιπλέον θα μπορούσαν να περιληφθούν και συμβατικές μονάδες που λειτουργούν με βιοκαύσιμα.

- Μονάδες συμπαραγωγής

Μία βασική τεχνολογία που είναι οικονομικά συμφέρουσα είναι αυτή της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Πιο συγκεκριμένα, από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού που χρησιμοποιούν καύσιμα αξιοποιείται η θερμότητα της καύσης. Τυπικά, σε μία συμβατική μηχανή σχεδόν τα τρία τέταρτα της ενέργειας του καυσίμου είναι θερμική ενέργεια, η οποία αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στις μονάδες συμπαραγωγής χρησιμοποιείται η θερμότητα αυτή προκειμένου να καλύψει τοπικές ανάγκες σε θέρμανση με άμεσο αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι είναι πολύ δύσκολη η μεταφορά θερμότητας. Για το μέγεθος των μονάδων που μελετάμε εδώ η μεταφορά θερμότητας καθίσταται δυνατή εφόσον η μονάδα παραγωγής είναι δίπλα στο φορτίο.

- Αποθήκευση ενέργειας

Το βασικό πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε εκτεταμένη κλίμακα. Σχεδόν όλη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων, εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή – συγκριτικά με το μέγεθός τους – από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Οι βασικές μέθοδοι αποθήκευσης είναι:

- η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτή της ηλεκτροχημικής μετατροπής και αποθήκευσης της ενέργειας σε συσκευές που ονομάζονται ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς *μπαταρίες* και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος
- με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) όπου ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια.
- με σφονδύλους (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα – γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- με υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- με διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν ζητηθεί με έναν υδροστρόβιλο.

## 1.4. Λειτουργία και Πλεονεκτήματα του Μικροδικτύου

Το Μικροδίκτυο λειτουργεί στην ουσία ως μία οντότητα, η οποία, ως προς το υπόλοιπο δίκτυο, συμπεριφέρεται άλλοτε ως καταναλωτής (όταν η παραγωγή του μικροδικτύου δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών του σε ενέργεια) και άλλοτε ως παραγωγός. Είτε με τη μία είτε με την άλλη ιδιότητα, στην περίπτωση μίας πλήρως απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας, το Μικροδίκτυο μπορεί να συμμετέχει καθορίζοντας την τιμή στην οποία θα αγοράσει ή θα πουλήσει ηλεκτρική ενέργεια. Στο μέλλον προβλέπεται ακόμα και η δυνατότητα να επιλέξει από ποιον παραγωγό θα αγοράσει ενέργεια, αναλόγως με την αξιοπιστία αυτού.

Με την εισαγωγή του Μικροδικτύου ως μοντέλο για τα ηλεκτρικά συστήματα του άμεσου μέλλοντος, βασικό θέμα συζήτησης αποτελεί τα πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει στους καταναλωτές, τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις και στη συνολική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς επίσης κι αν είναι οικονομικά συμφέρον. Ας αναλύσουμε πρώτα τα πλεονεκτήματα ενός Μικροδικτύου για να προχωρήσουμε στη συνέχεια σε ορισμένα – λίγα – βασικά στοιχεία όσον αφορά στην οικονομική ανάλυση.

Το Μικροδίκτυο εξ ορισμού αποτελείται από ένα σύνολο μικροπηγών, οι οποίες βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τους καταναλωτές τους οποίους τροφοδοτούν. Αυτό το βασικό χαρακτηριστικό τους, αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη λειτουργία του δικτύου, αφού επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών που προκύπτουν από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπως το γνωρίζουμε σήμερα, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από μεγάλες μονάδες παραγωγής και «ταξιδεύει» πολλά χιλιόμετρα μέχρι τον τελικό καταναλωτή, με αποτέλεσμα μέρος αυτής να χάνεται στη «διαδρομή» υπό τη μορφή θερμότητας. Επιπλέον, η μικρή απόσταση βοηθάει και στην παροχή καλύτερης ποιότητας ισχύος, αφού δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί ενδιάμεσοι καταναλωτές, οι οποίοι αλλοιώνουν με τη χωρητική (ή επαγωγική αν πρόκειται για φορτία) συμπεριφορά τους τον συντελεστή ισχύος.

Το Μικροδίκτυο προσφέρει ακόμα πολλά περιβαλλοντικά οφέλη. Ενσωματώνοντας πολλές νέες τεχνολογίες και αποτελούμενο σε μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει αν όχι με μηδαμινή, τότε με πολύ μικρή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Το Μικροδίκτυο αποτελεί ιδιαίτερα πρόσφορο έδαφος για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.3 μπορεί να συμπεριλαμβάνει και κυψέλες καυσίμου και μικρές ανεμογεννήτριες. Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Combined Heat & Power – CHP). Το γεγονός ότι οι καταναλωτές βρίσκονται πολύ κοντά στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, τους δίνει τη δυνατότητα να επωφεληθούν από τη θερμότητα των καυσαερίων για τη θέρμανση (ή και την ψύξη

ακόμα, για την οποία σημειωτέον απαιτούνται μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας) των σπιτιών και των επιχειρήσεων τους. Σε περίπτωση κεντρικής – και όχι διεσπαρμένης – παραγωγής κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μονάδες παραγωγής ιδιαίτερα μεγάλης ισχύος, ενώ θα υπήρχαν και σημαντικές απώλειες κατά τη μεταφορά της θερμότητας. Με την παράλληλη παραγωγή θερμότητας οι CHP επιτυγχάνουν συντελεστή απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 60% και 70%. Αν αυτός συγκριθεί με το συντελεστή απόδοσης των μεγάλων μονάδων παραγωγής που λειτουργούν με λιγνίτη ή με πετρέλαιο, ο οποίος δεν ξεπερνά συνήθως το 30%, το ενεργειακό, οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος γίνεται αμέσως εμφανές.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προσδιορίσει τις ενεργειακές απώλειες, ως βασικό στόχο για τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης, αναγνωρίζοντας ότι πρόκειται για μια από τις προτεραιότητες για βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα με σκοπό τη συμβολή στο μετριασμό της αλλαγής του κλίματος. Σε ευρωπαϊκή κλίμακα, η γενική αύξηση στην αποδοτικότητα του συνδυασμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσε να οδηγήσει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα περισσότερο από 65 εκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ανά έτος. Παράλληλα, η μείωση των απωλειών στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής που επιτυγχάνεται με τη λειτουργία των Μικροδικτύων κυμαίνεται από 2 έως 4%, συμβάλλοντας σε ετήσια μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 20 εκατομμύρια τόνους περίπου [1].

Όσο αυξάνει η απαίτηση για πιο αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, καταναλωτές για τους οποίους είναι σημαντική η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας, όπως τα νοσοκομεία, τα αεροδρόμια, οι τράπεζες και οι βιομηχανίες θα μπορούν να επωφεληθούν από το Μικροδίκτυο. Σε περίπτωση σφάλματος που θα οδηγήσει στην αποκοπή μέρος του κεντρικού δικτύου, το Μικροδίκτυο μπορεί να επιτρέπει την παροχή ενέργειας στα φορτία από τις μικροπηγές του, ακόμα και αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο δίκτυο. Επιπλέον, εισάγοντας το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής και των πολλών μικροπηγών σε διάφορα σημεία του δικτύου, επιτυγχάνονται δύο ακόμα σημαντικά πλεονεκτήματα. Αφενός, είναι σχεδόν απίθανο να υπάρξουν ταυτόχρονα σφάλματα σε τόσες μικροπηγές ώστε το σύστημα να οδηγηθεί σε σβέση. Αντίθετα, σφάλμα σε κάποιον κεντρικό σταθμό παραγωγής είναι πιθανό να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα. Αφετέρου, η διασπορά των μονάδων παραγωγής βοηθά ιδιαίτερα στην αξιοπιστία παροχής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές. Όσο μεγαλύτερη η διασπορά τους, τόσο λιγότερο πιθανή είναι η ταυτόχρονη αδυναμία τους για παραγωγή ενέργειας λόγω ανέμου ή έλλειψης ηλιοφάνειας. Και αυτό με τη σειρά του ίσως οδηγήσει σε πιο ελαστικά όρια όσον αφορά τη διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα, με συνέπεια την αποτελεσματικότερη αξιοποίησή τους.

Επιπλέον με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη συμμετοχή του Μικροδικτύου σε αυτή, αναμένεται ότι το οικονομικό όφελος από την αγορά ή την πώληση

ενέργειας σύμφωνα με τους όρους και τις τιμές που συμφέρει το τελευταίο, θα είναι σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικό.

Οφέλη προκύπτουν και για τους διαχειριστές των Δικτύων Διανομής Μέσης Τάσης και τις επιχειρήσεις Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας<sup>1</sup>. Αντίθετα με τα δίκτυα μεταφοράς, όπου υπάρχει δυνατότητα ελέγχου με τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος και τους ελεγκτές ροής ισχύος, τα δίκτυα διανομής μέχρι σήμερα, σχεδιάζονταν με φιλοσοφία παθητικής λειτουργίας. Με την εισαγωγή όμως των Μικροδικτύων, προσφέρονται μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου του δικτύου χαμηλής τάσης, με αποτέλεσμα κατά περιπτώσεις να μπορεί να αποφευχθεί η ενίσχυση του δικτύου για την αντιμετώπιση προβλημάτων συμφόρησης. Για παράδειγμα το Μικροδίκτυο γίνεται ιδιαίτερα χρήσιμο για την κάλυψη των αιχμών του συστήματος. Αποφεύγοντας έτσι τη επιβάρυνση του δικτύου μεταφοράς και διανομής με την απαραίτητη ενέργεια για την κάλυψη των αιχμών από τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, καθίσταται δυνατή η σύνδεση επιπλέον φορτίων στο δίκτυο χωρίς να απαιτείται ενίσχυση της γραμμής. Με την κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια από τοπικούς παραγωγούς επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία στο έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος κατά τους χειρισμούς μετά από σβέση (blackout). Το τίμημα όμως είναι βέβαια η αυξημένη πολυπλοκότητα, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται ο έλεγχος, που εισάγεται από το Μικροδίκτυο.

Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό, το Μικροδίκτυο δεν είναι μια παθητική οντότητα, η οποία απλώς καταναλώνει ενέργεια (ή προσφέρει σε ορισμένες περιπτώσεις). Αντιθέτως, μπορεί να τροφοδοτήσει επείγοντα φορτία σε περίπτωση σβέσης, και μπορεί να προσφέρει βοηθητικές υπηρεσίες (ancillary services) όπως έλεγχο ενεργού-αέργου ισχύος και κατ' επέκταση έλεγχο τάσης και συχνότητας, μεγαλύτερη αξιοπιστία, καλύτερη ποιότητα ισχύος και πολλά περιβαλλοντικά οφέλη. Ένας χαρακτηρισμός που επαναλαμβάνεται ιδιαίτερα στο αμερικανικό σύστημα είναι αυτός του «καλού πολίτη» (good citizen) καθώς το μικροδίκτυο επικουρεί την λειτουργία του κεντρικού δικτύου και η χρήση των πηγών γίνεται με ορθολογικό τρόπο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι εκτός από τα οικονομικά οφέλη που ίσως επιτυγχάνει το Μικροδίκτυο με κατά περιπτώσεις μικρότερο κόστος παραγωγής ενέργειας, υπάρχουν κι άλλα ιδιαίτερα σημαντικά οφέλη τα οποία πρέπει σίγουρα να ληφθούν υπόψη. Η σύγκριση όσον αφορά το κόστος παραγωγής των μικροπηγών δε θα ήταν δίκαιο να γίνει με τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, εφόσον δε συνυπολογίζουμε το κόστος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στον τελικό καταναλωτή και τις απώλειες σε ενέργεια που αυτή συνεπάγεται. Οικονομικά οφέλη είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα προκύψουν από τις μονάδες συμπαραγωγής (CHP) καθώς και μακροπρόθεσμα από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αφού έχουν μηδενικό κόστος «καυσίμου».

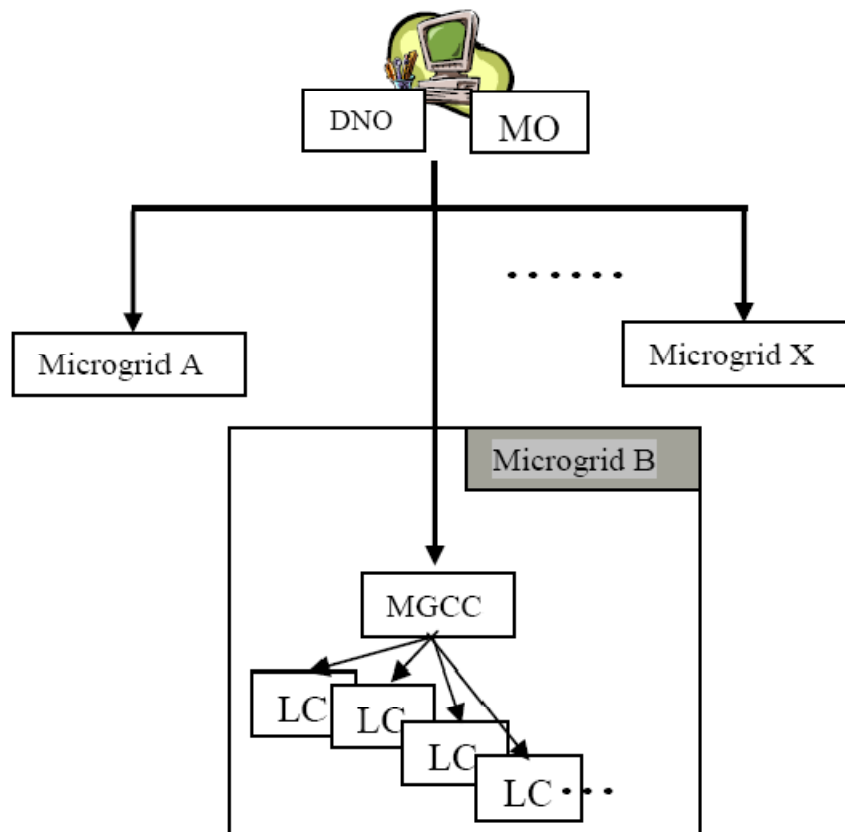
---

<sup>1</sup> Τον ρόλο αυτό για την Ελλάδα τον έχει προς το παρόν η ΔΕΗ Α.Ε. Μελλοντικά προβλέπεται ότι ο τομέας αυτός θα αυτονομηθεί από τη ΔΕΗ και θα προκύψει μία (ή και παραπάνω) ανεξάρτητη επιχείρηση που θα αναλάβει τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας μέσης και χαμηλής τάσης.

Όσον αφορά τη συμμετοχή του Μικροδικτύου στην αγορά ενέργειας, είναι αναγκαίο βέβαια να σημειώσουμε ότι αυτή θα πρέπει να γίνεται με μία μέθοδο που περιλαμβάνει τις ιδιαιτερότητες του συστήματος και ειδικά το μέγεθός του, αφού τα μικροδίκτυα των λίγων δεκάδων kW δεν μπορούν να σταθούν με την ίδια βαρύτητα με μία μονάδα πολλών MW σε μία αγορά ενέργειας και σίγουρα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι τοπικές ανάγκες Αν μαζί με τα παραπάνω οικονομικά οφέλη λάβουμε υπόψη τη δυνατότητα που δίνεται στον καταναλωτή να αποφασίζει για τον εαυτό του το επίπεδο της τιμής αγοράς, της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος που θα του παρασχεθεί, καθώς και τα επιπλέον πλεονεκτήματα που προσφέρει, το Μικροδίκτυο αναμένεται να αποτελέσει ιδιαίτερα ελκυστική εφαρμογή για το μέλλον.

### 1.5. Δομή και Έλεγχος του Μικροδικτύου

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε σε γενικές γραμμές τα βασικά μέρη με τα οποία επιτελείται ο έλεγχος του μικροδικτύου. Σε αυτή την εργασία, όπως παρουσιάζεται και στο Σχ. 1.2, υιοθετούμε ένα ιεραρχικό μοντέλο ελέγχου του μικροδικτύου.



Σχ. 1.2: Βασική δομή ελέγχου ενός μικροδικτύου

Αυτό το μοντέλο λειτουργίας του συστήματος έχει τρία βασικά επίπεδα λειτουργίας:

- τον διαχειριστή του δικτύου (Distribution Network Operator – DNO) και τον διαχειριστή της αγοράς (Market Operator – MO) από την πλευρά της μέσης τάσης
- τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller – MGCC)
- τους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων παραγωγής και των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (Local Controllers – LC)

Ο διαχειριστής του δικτύου (DNO) είναι υπεύθυνος για την τεχνική λειτουργία του συστήματος στην χαμηλή και μέση τάση. Στο κομμάτι αυτό του δικτύου μπορεί να υπάρχουν πλέον του ενός μικροδίκτυα. Ο διαχειριστής της αγοράς (MO) είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της αγοράς ενέργειας<sup>2</sup> στην συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου διανομής. Είναι προφανές ότι ανάλογα με το μοντέλο της αγοράς ενέργειας μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός MO. Αυτές οι δύο οντότητες δεν ανήκουν στο Μικροδίκτυο αλλά αποτελούν τους εκπροσώπους του δικτύου με τους οποίους επικοινωνεί το κάθε Μικροδίκτυο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρά την αυτονομία του τελευταίου, εφόσον είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο θα πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού με τους DNO/MO και αυτό θα γίνει πιο απαραίτητο στο μέλλον θεωρώντας ότι ο αριθμός των μικροδικτύων θα αυξηθεί κατακόρυφα.

Οι DNO/MO επικοινωνούν με το Μικροδίκτυο μέσω του Κεντρικού ελεγκτή (*Microgrid Central Controller – MGCC*). Ο τελευταίος σε ένα παραδοσιακό μοντέλο κεντρικού ελέγχου θα είναι υπεύθυνος για την βέλτιστη λειτουργία του Μικροδικτύου τόσο από την οικονομική όσο και από την τεχνική πλευρά στέλνοντας απλές εντολές στους τοπικούς ελεγκτές. Στο μοντέλο όμως που υιοθετείται στην εργασία αυτή ο MGCC απλά αναλαμβάνει να συντονίσει τους τοπικούς ελεγκτές. Οι τελευταίοι έχουν την ευφυΐα και κατόπιν διαπραγμάτευσης ή βασισμένοι σε άλλους εξελιγμένους αλγόριθμους μπορούν να φτάσουν στην επιθυμητή λύση.

Στο χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου ανήκουν οι τοπικοί ελεγκτές. Οι τοπικοί ελεγκτές μπορούν να ελέγχουν μονάδες παραγωγής, μονάδες αποθήκευσης της ενέργειας αλλά και κάποια από τα φορτία. Ανάλογα με το μοντέλο λειτουργίας έχουν και ένα βαθμό ευφυΐας, ωστόσο ένα μεγάλο ποσοστό των αποφάσεων για πρακτικούς λόγους μπορεί να ληφθεί μόνο τοπικά. Για παράδειγμα η παρακολούθηση και συντήρηση των μπαταριών (εφόσον έχουμε τέτοια μονάδα) είναι μία λειτουργία που μπορεί να γίνει τοπικά.

---

<sup>2</sup> Ο MO αναμένεται να έχει σημαντικό διαχειριστικό ρόλο, όταν υπάρξει η πλήρης απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας. Ο ρόλος του, αναλόγως με το μοντέλο που υιοθετείται, μπορεί να είναι είτε του απλού συντονιστή, επιβλέποντας π.χ. ότι τηρούνται οι σωστές διαδικασίες, είτε έχοντας μεγαλύτερες δικαιοδοσίες, να ορίζει για παράδειγμα τη μέγιστη τιμή πώλησης και την ελάχιστη τιμή αγοράς μίας κιλοβατώρας.

## 1.6. Εισαγωγή της Έννοιας των Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων για τον Έλεγχο του Μικροδικτύου

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να γίνεται ο έλεγχος του Μικροδικτύου. Κάποιες προτείνουν όλες οι λειτουργίες να ελέγχονται κεντρικά από τον MGCC, άλλες ο έλεγχος να είναι πλήρως αποκεντρωμένος και ορισμένες βρίσκονται κάπου στο ενδιάμεσο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα υιοθετήσουμε το μοντέλο που προτείνει τον πλήρως αποκεντρωμένο έλεγχο. Σύμφωνα με αυτόν, σημαντικές δυνατότητες ελέγχου δίνονται στους τοπικούς ελεγκτές (LCs), οι οποίοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους ώστε να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή τους και να επιτύχουν το μέγιστο δυνατό οικονομικό όφελος. Παράλληλα, οι LCs θα πρέπει να λαμβάνουν όλα τα απαραίτητα μέτρα ώστε να εξασφαλίσουν την ασφαλή και ομαλή λειτουργία των μονάδων που ελέγχουν.

Η οργάνωση μιας ελεγχόμενης ευφυούς οντότητας (ολόκληρο το Μικροδίκτυο) η οποία αποτελείται από αρκετές λιγότερο ευφυείς οντότητες (τους τοπικούς ελεγκτές) μπορεί να βασιστεί σε ένα σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων (Multi-Agent System – MAS). Η τεχνολογία πολλαπλών πρακτόρων αποτελεί εξέλιξη της τεχνολογίας που βασίζεται στην κατανεμημένη νοημοσύνη, κι έχει ήδη προταθεί για τον έλεγχο μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για τον έλεγχο μηχανών.

Η χρήση του κατανεμημένου ελέγχου σε ένα Μικροδίκτυο παρέχει αποτελεσματικές λύσεις για ορισμένα λειτουργικά προβλήματα. Για παράδειγμα, τα τοπικά φορτία και οι μονάδες παραγωγής ή αποθήκευσης μπορεί να έχουν διαφορετικούς ιδιοκτήτες με αποτέλεσμα αρκετές αποφάσεις να πρέπει να λαμβάνονται τοπικά και όχι συνολικά για το δίκτυο. Ο πράκτορας λοιπόν, που θα υλοποιήσει τον τοπικό ελεγκτή θα πρέπει να έχει ορισμένο βαθμό ευφυΐας.

Όμως τι ακριβώς είναι ο ευφυής πράκτορας και γιατί να επιλέξουμε να υλοποιήσουμε τον έλεγχο του Μικροδικτύου βασιζόμενοι στην τεχνολογία πολλαπλών πρακτόρων, και μάλιστα ακολουθώντας το μοντέλο του κατανεμημένου ελέγχου; Αναλυτική περιγραφή αυτής της τεχνολογίας θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο, όμως θα παραθέσουμε αμέσως παρακάτω λίγα στοιχεία ως απαντήσεις σε στοιχειώδεις ερωτήσεις.

Ο πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και εκείνη της ικανότητας να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες. Οι δύο αυτές ιδιότητες του δίνουν τη δυνατότητα να συνεργάζεται ή να ανταγωνίζεται με άλλους πράκτορες και όλοι μαζί να διαμορφώνουν μία κοινωνία πρακτόρων. Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να δώσει ένα μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού το οποίο θα μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς την πολυπλοκότητα των προβλημάτων. Όταν υιοθετούμε μία λογική χρήσης ευφυών πρακτόρων στο σύστημά μας γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι απαιτείται η παρουσία πλέον του ενός πρακτόρων. Το

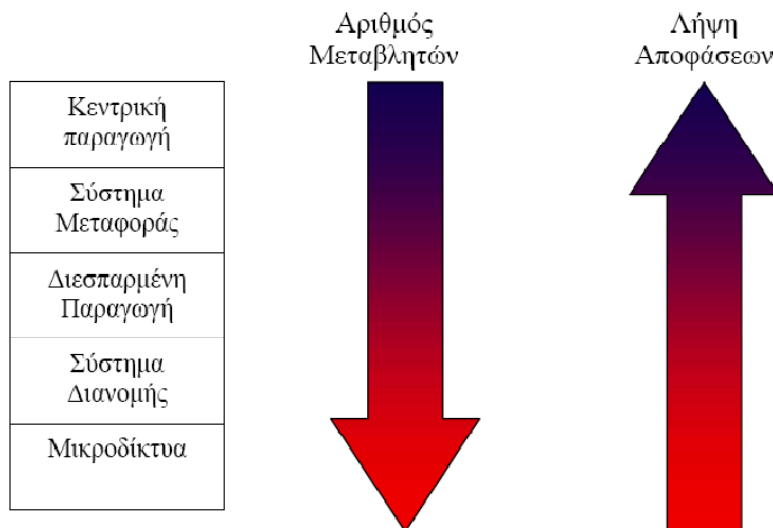
γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της λογικής της διάσπασης (decomposition), όπου το κεντρικό σύνθετο πρόβλημα διασπάται σε πολλά υπο-προβλήματα και προφανώς ο κάθε πράκτορας αναλαμβάνει ένα αντίστοιχο κομμάτι.

Οι πράκτορες λοιπόν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου είτε να ικανοποιήσουν τους εσωτερικούς τους στόχους είτε τους στόχους του συστήματος συνολικά. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την προσέγγιση αυτή από τις παραδοσιακές αντιλήψεις. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ότι οι πράκτορες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία υψηλού επιπέδου γλώσσα προκειμένου να επικοινωνήσουν. Με τον τρόπο αυτό η επικοινωνία των πρακτόρων γίνεται σε επίπεδο γνώσης, δηλαδή δεν ανταλλάσσουν προσυμφωνημένες εντολές και δεδομένα, αλλά πραγματοποιούν διαλόγους καθορίζοντας για παράδειγμα τι θέλει ο καθένας και πότε. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι οι πράκτορες ουσιαστικά καλούνται να επιλύσουν το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν για το τμήμα εκείνο του περιβάλλοντος που αντιλαμβάνονται. Η τοπική αυτονομία αλλά και η ευφυΐα είναι δυνατόν να τους δώσει την δυνατότητα να επιλύσουν καταστάσεις οι οποίες πιθανόν να μην είχαν προβλεφθεί ή να μην μπορούσαν να προβλεφθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης.

Κι εδώ τίθεται το ερώτημα: γιατί να δώσουμε στις μονάδες μας τοπική ευφυΐα μέσω των τοπικών ελεγκτών και των πρακτόρων και να μην ακολουθήσουμε τη συνηθισμένη για τα σημερινά δεδομένα λογική που επιτάσσει κεντρικό έλεγχο;

Η πρώτη απάντηση σχετίζεται με το διαχρονικό θέμα του κόστους. Μία μονάδα που πιθανόν να στοιχίζει λιγότερο από 10 χιλιάδες ευρώ απαιτεί να έχει το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας. Η παρουσία ενός συστήματος κεντρικού ελέγχου στην καλύτερη περίπτωση συνεπάγεται ενός κόστους συγκρίσιμου με την τιμή του εξοπλισμού και σίγουρα αυτό δεν θα είναι εύκολο να αποσβεστεί. Αντίθετα, η λειτουργία με τους πράκτορες μπορεί να βασιστεί σε πολύ φτηνούς μικροεπεξεργαστές πλακέτας κρατώντας το κόστος κάτω από τα διακόσια ευρώ.

Εμμένοντας στο θέμα του κόστους θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και το θέμα του προσωπικού. Στα μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα η παρουσία ειδικευμένου προσωπικού δεν έχει τρομερό αντίκτυπο στο κόστος λειτουργίας. Αντίθετα στα μικρά συστήματα δεν είναι εφικτό να υπάρχει προσωπικό που να επιτηρεί συνεχώς το σύστημα. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η τοπική ευφυΐα προκειμένου να υποκαταστήσουμε τις ανάγκες σε προσωπικό.



Σχ. 1.3: Πολυπλοκότητα Συστήματος

Επιπλέον η τεχνολογία ευφών πρακτόρων θα μπορούσε να παρέχει στο σύστημά μας την ικανότητα «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» (plug 'n' play), περιορίζοντας ακόμη περισσότερο το κόστος. Με τον όρο άμεση λειτουργία δεν εννοούμε απλά να αρχίζει το σύστημα να παράγει ενέργεια αλλά να καταλάβει ποιες ακριβώς μονάδες έχει δίπλα του και στη συνέχεια να συνεργαστεί μαζί τους.

Ένα ακόμα σημείο που θα πρέπει να αντιληφθούμε είναι ότι ο τρόπος λειτουργίας των πρακτόρων είναι πιο κοντά στο φυσικό μέσο που ελέγχουν. Έχοντας την δυνατότητα να λειτουργούν με διαφορετικές συμπεριφορές ανά περίπτωση σημαίνει ότι έχουν εσωτερικά τη δυνατότητα να φιλοξενούν διαφορετικές μοντελοποιήσεις του περιβάλλοντος. Αυτή η δυνατότητα τους καθιστά ικανούς να λειτουργούν αποτελεσματικά σε διαφορετικές καταστάσεις του συστήματος. Για παράδειγμα άλλη συμπεριφορά θα έχουν στα ίδια ερεθίσματα κατά την διάρκεια μιας αγοράς ενέργειας και άλλη κατά την διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας.

Επιπλέον, η δυνατότητά τους να χρησιμοποιούν μια υψηλού επιπέδου γλώσσα τους επιτρέπει να διαχειρίζονται καλύτερα την πληροφορία. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σε ένα βιομηχανικό σύστημα πέρα από τις μετρήσεις στο σύστημα ελέγχου μεταφέρονται πληροφορίες που αφορούν συναγερμούς, γεγονότα ή εντολές. Η φύση του πράκτορα είναι τέτοια που του επιτρέπει να διαχειρίζεται πληροφορία διαφορετικής βαρύτητας.

Μία άλλη παράμετρος έχει να κάνει με την αξιοπιστία του συστήματος ελέγχου και κατά συνέπεια πάλι με το κόστος αυτού. Η παρουσία εφεδρικών (redundant) συστημάτων ελέγχου σημαίνει περαιτέρω αύξηση του κόστους λειτουργίας. Αντίθετα σε ένα μικροδίκτυο η απώλεια ενός ελεγκτή

θα συνεπάγεται την απώλεια μόνο της μονάδας αυτής και όχι ολόκληρου του συστήματος. Επιπλέον το σύστημα είναι πιο εύρωστο λόγω της μερικής αυτονομίας που έχουν οι πράκτορες. Αυτή η μερική αυτονομία επιτρέπει στους πράκτορες στην περίπτωση που κάποιος πράκτορας αποτύχει να τους απαντήσει να λειτουργήσουν με βάση τις υπάρχουσες γνώσεις.

Στο ίδιο μήκος κύματος θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε και τον όγκο της πληροφορίας όπου στην περίπτωση που έχουμε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου θα πρέπει να συλλέγεται ένας σημαντικός όγκος πληροφορίας και στην συνέχεια αυτός να επεξεργάζεται. Αυτό το μοντέλο λειτουργίας απαιτεί σίγουρα ένα ενισχυμένο σύστημα επικοινωνίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο, όπως προαναφέραμε, θα μελετήσουμε διεξοδικότερα τους ευφυείς πράκτορες καθώς και τον τρόπο με τον οποίο θα τους εντάξουμε στη λογική του Μικροδικτύου για να επιτύχουμε τον αποτελεσματικό έλεγχό του.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> :

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΥΦΥΩΝ ΠΡΑΚΤΟΡΩΝ

### 2.1. Ο ευφυής πράκτορας

Η τεχνολογία που αναφέρεται στους ευφυείς πράκτορες αποτελεί ένα αυτόνομο επιστημονικό πεδίο με εξαιρετική τα τελευταία χρόνια ερευνητική δραστηριότητα. Συνδυάζει στοιχεία από την τεχνητή νοημοσύνη, τον αντικειμενοστραφή και τον παράλληλο προγραμματισμό και βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και ο έλεγχος των ηλεκτρικών δικτύων. Ίσως το δυσκολότερο πρόβλημα σε κάθε εισαγωγή που αναφέρεται στα συστήματα ευφύων πράκτορων είναι η παράθεση ενός ενιαίου ορισμού κοινώς αποδεκτού από ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα. Ερευνώντας στη βιβλιογραφία [1, 4-6] παρατηρεί κάποιος ότι έχουν γίνει πολλές προσπάθειες, οι οποίες όμως καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι κάθε ορισμός εξαρτάται από τη σκοπιά από την οποία εξετάζει τους πράκτορες κάθε ερευνητής.

Ας ξεκινήσουμε λοιπόν πρώτα αναφέροντας λίγα λόγια για τους σκοπούς που επιθυμεί να επιτελέσει η τεχνολογία πρακτόρων, επιχειρώντας παράλληλα και μια μικρή ιστορική αναδρομή.

Ο Alan Key [6] αναφέρει: «Η ιδέα του πράκτορα (agent) προέρχεται από τον John McCarthy στα μέσα του 1950 και ο όρος agent επινοήθηκε λίγα χρόνια αργότερα από τον Oliver G. Selfridge, όταν ήταν και οι δύο στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασσαχουσέτης (MIT). Στο μυαλό τους είχαν ένα σύστημα το οποίο, όταν του δινόταν ένας στόχος, θα μπορούσε να διεκπεραιώσει μόνο του τις υπολογιστικές λειτουργίες που ήταν απαραίτητες καθώς και να ζητήσει και να λάβει συμβουλές, όταν δεν μπορούσε να προχωρήσει. Ένας πράκτορας θα ήταν ένα «ρομπότ λογισμικού» (soft robot) το οποίο θα ζούσε και θα λειτουργούσε στον κόσμο των υπολογιστών.»

Αν επιθυμούσαμε να δώσουμε μια ελαφρώς διαφορετική υπόσταση στον πράκτορα, την οποία επίσης μπορεί να ενσαρκώσει, θα αναφερόμασταν στον Nicholas Negreonte, σύμφωνα με τον οποίο, ένας πράκτορας εκπληρώνει τον ρόλο μιας ψηφιακής ξαδέλφης<sup>3</sup> [6]: «Όταν θέλω να πάω σινεμά, αντί να διαβάσω τις κριτικές, ρωτάω την ξαδέλφη μου. Όλοι έχουμε κάποιο ανάλογο άτομο, το οποίο γνωρίζει πολλά από ταινίες, αλλά παράλληλα γνωρίζει καλά κι εμάς. Στην πραγματικότητα, η έννοια του πράκτορα όταν αυτή αναφέρεται σε ανθρώπους συνοψίζεται στη μείξη της καλής γνώσης για ένα θέμα με τη γνώση για μία ομάδα ανθρώπων. Για παράδειγμα, ένας

---

<sup>3</sup> Στο πρωτότυπο ο N.Negreonte αναφέρεται στη νύφη του (sister-in-law). Για λόγους καλύτερης απόδοσης στα ελληνικά επιλέξαμε τον όρο της ξαδέλφης.

καλός ταξιδιωτικός πράκτορας, προτείνει στον πελάτη του ένα πακέτο το οποίο αφενός θα συνδυάζει καλής ποιότητας ξενοδοχεία και φαγητό και αφετέρου θα είναι προσαρμοσμένο στις ανάγκες του πελάτη του.[...] Αυτό λοιπόν που έχουν όλοι οι πράκτορες κοινό είναι η ικανότητα να ανταποκρίνονται στις ανάγκες σου (the ability to model you).»

Όσον αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία, ο γενικότερος ρόλος που επιθυμούμε από έναν πράκτορα να επιτελέσει, είναι η δυνατότητα να αναλάβει με ίδια πρωτοβουλία όλες εκείνες τις απαραίτητες ενέργειες, ώστε να εκπληρώσει τον στόχο που του έχουμε θέσει. Αυτό σημαίνει ότι εμείς απλώς θέτουμε στον πράκτορα έναν συγκεκριμένο στόχο, για παράδειγμα αν αναφερόμαστε σε μία μονάδα παραγωγής στο περιβάλλον του Μικροδικτύου, ένας στόχος θα ήταν «πούλα την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια με το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος». Ο πράκτορας θα πρέπει λοιπόν να έχει αντίληψη του περιβάλλοντός του, ώστε να γνωρίζει ποιες άλλες μονάδες παραγωγής και ποια φορτία υπάρχουν αυτή τη στιγμή στο δίκτυο. Θα πρέπει ακόμα να έχει δυνατότητα επικοινωνίας με άλλους πράκτορες ώστε στη συνέχεια να διαπραγματευτεί με τα φορτία, ανταγωνιζόμενος τις άλλες μονάδες παραγωγής, προσπαθώντας να πουλήσει την ηλεκτρική ενέργεια σε τιμή που θα του αποφέρει το μέγιστο δυνατό κέρδος. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες θα πρέπει να επιτελούνται χωρίς παρέμβαση από τον χρήστη.

Επιχειρώντας να ορίσουμε τι είναι ένας ευφυής πράκτορας, λαμβάνοντας υπόψη και τον τρόπο με τον οποίο αυτός υλοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα επιλέγαμε να πούμε ότι: Ευφυής πράκτορας είναι μία οντότητα η οποία χαρακτηρίζεται από νοημοσύνη και κοινωνικότητα [1]. Αν θέλουμε να αναλύσουμε περαιτέρω την παραπάνω έννοια, τότε θα μπορούσαμε να παραθέσουμε τους εξής ορισμούς:

Σύμφωνα με τους συγγραφείς του [4], ένας πράκτορας είναι μια οντότητα που αντιλαμβάνεται το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται με τη βοήθεια αισθητήρων (sensors), είναι μέρος του περιβάλλοντος αυτού, κάνει συλλογισμούς και δρα πάνω σε αυτό με τη βοήθεια μηχανισμών δράσης (effectors), για την επίτευξη κάποιων στόχων.

Παράλληλα η Hayes-Roth [4], δίνοντας έμφαση στη συλλογιστική ορίζει τον ευφυή πράκτορα ως εξής: «Οι ευφυείς πράκτορες κάνουν συνεχώς τις εξής τρεις λειτουργίες: (α) αντιλαμβάνονται τις δυναμικές συνθήκες του περιβάλλοντος, (β) δρουν πάνω στο περιβάλλον άλλωστε να το αλλάξουν και (γ) συλλογίζονται ώστε να ερμηνεύσουν αυτά που αντιλαμβάνονται, να λύσουν προβλήματα, να συμπεράνουν και να καθορίσουν τη δράση τους.

Με λίγα λόγια, όπως προκύπτει από τους παραπάνω ορισμούς, ένας πράκτορας είναι μια ευφυής οντότητα, η οποία έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και με άλλους πράκτορες προκειμένου να ικανοποιήσει έναν στόχο.

## 2.2. Χαρακτηριστικά των Ευφυών Πρακτόρων

Το να ορίσουμε τι είναι ένας πράκτορας με κοινώς αποδεκτό τρόπο είναι μάλλον δύσκολο. Παρόλα αυτά, αν θέλουμε να περιγράψουμε τι είναι ένας ευφυής πράκτορας, μεγάλη μερίδα ερευνητών συγκλίνουν στο ότι ένας πράκτορας έχει κάποια κύρια χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με τους Wooldridge και Jennings [4], πράκτορας είναι ένα σύστημα υλικού (hardware) ή λογισμικού που έχει τις εξής ιδιότητες:

- **Αυτονομία (autonomy):** οι πράκτορες λειτουργούν χωρίς την άμεση παρέμβαση των χρηστών ή άλλων πρακτόρων και έχουν αυτοέλεγχο, δηλαδή έλεγχο της εσωτερικής τους κατάστασης και αυτενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να επιδιώκουν τους στόχους τους χωρίς να δέχονται συνεχώς εντολές από τον χρήστη ή κάποια άλλη εξωτερική πηγή, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να αφήνει στον χρήστη μόνο τον προσδιορισμό του γενικού στόχου και να τον απελευθερώνει από το βάρος της λήψης των επιμέρους αποφάσεων.
- **Κοινωνικότητα (social ability):** Οι πράκτορες επικοινωνούν με άλλους πράκτορες και χρήστες μέσω μιας κοινά κατανοητής γλώσσας, έτσι ώστε να μπορούν να συνεργαστούν για την επίτευξη των στόχων τους. Υπάρχει δηλαδή αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων είτε για την επίτευξη των ανεξάρτητων στόχων των πρακτόρων ή για την επίτευξη ενός κοινού στόχου.
- **Αντιδραστικότητα (reactiveness):** Οι πράκτορες αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους και αντιδρούν μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια στις αλλαγές που επέρχονται σε αυτό.
- **Προνοητικότητα (pro-activeness):** Οι πράκτορες δεν αντιδρούν απλά στο περιβάλλον αλλά είναι ικανοί να επιδείξουν και συμπεριφορά που βασίζεται σε στόχους, λαμβάνοντας ουσιαστικά πρωτοβουλία ανάλογα με τις συνθήκες οι οποίες εμφανίζονται στο περιβάλλον τους. Τόσο η προνοητικότητα όσο και η αντιδραστικότητα απαιτούν σε κάποιο βαθμό τη δυνατότητα συλλογισμού (νοημοσύνης) από τον πράκτορα.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι το γεγονός πως ο ευφυής πράκτορας δεν αντιδρά μόνο στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος (αντιδραστικότητα) αλλά παράλληλα έχει τη δυνατότητα να αναλαμβάνει δράσεις (προνοητικότητα) – οι οποίες θα επηρεάσουν το περιβάλλον του και κατά συνέπεια τις μελλοντικές του αποφάσεις – αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο των πολυπρακτορικών συστημάτων και ουσιαστική διαφορά από τα κλασσικά συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Ακόμα, η αυτονομία του πράκτορα δεν περιορίζεται μόνο στη συμπεριφορά αλλά και στον τρόπο που θα διαχειριστεί τους πόρους που του διατίθενται [5]. Για να μπορέσει να δράσει ο πράκτορας χρειάζεται κάποιους πόρους, όπως έναν επεξεργαστή, ηλεκτρική ισχύ, πρόσβαση σε πληροφορίες

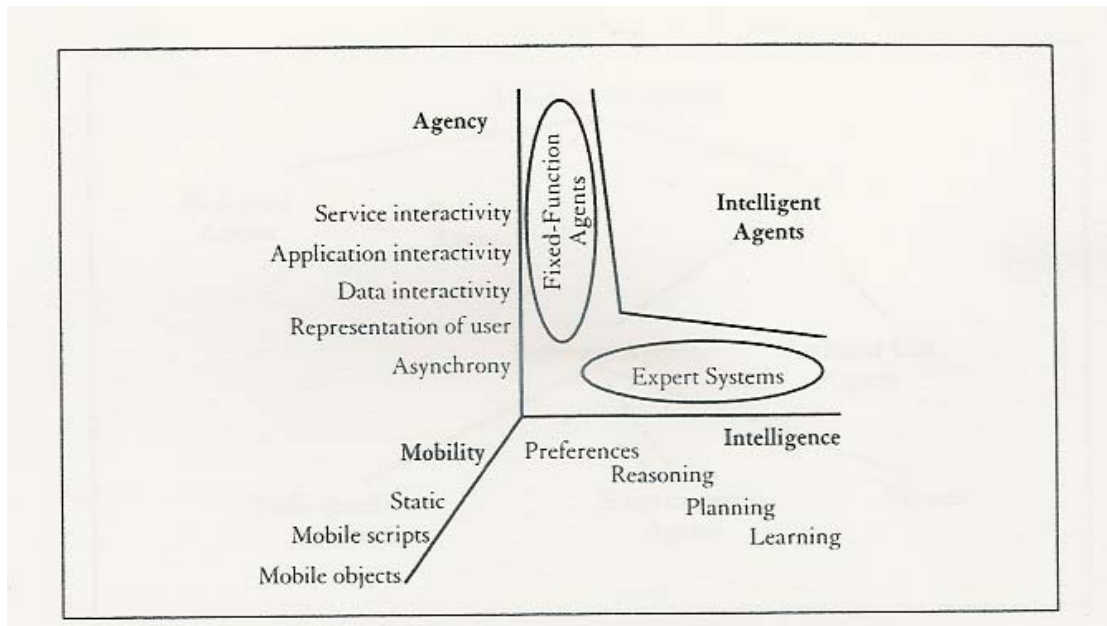
κ.α. Ο πράκτορας εξαρτάται μερικώς από το περιβάλλον του αφού αυτό του παρέχει τους πόρους αλλά είναι και ανεξάρτητος από αυτό στο βαθμό του τρόπου με τον οποίο θα τους διαχειριστεί.

Υπάρχουν ακόμη μερικά δευτερεύοντα χαρακτηριστικά που αποδίδονται στους πράκτορες, όπως:

- Κινητικότητα (mobility): Οι πράκτορες δεν είναι πάντα στατικοί, αλλά μπορούν να κινηθούν σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον.
- Προσαρμοστικότητα (adaptivity): Οι πράκτορες προσαρμόζονται διαρκώς στο περιβάλλον τους, ή τις απαιτήσεις του χρήστη, έχουν δηλαδή ικανότητα για μάθηση.
- Ειλικρίνεια (veracity): Οι πράκτορες δε δίνουν εσκεμμένα λάθος πληροφορίες
- Αγαθή προαίρεση (benevolence): Οι πράκτορες προσπαθούν να επιτύχουν πάντα τους στόχους που τους έχουν ανατεθεί
- Λογικότητα (rationality): Οι πράκτορες δρουν για να πετύχουν τους στόχους τους, δηλαδή δεν κάνουν αναίτιες ενέργειες και δε λειτουργούν εναντίον της επίτευξης των στόχων τους.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, συγκλίνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα χαρακτηριστικά που αναφέρουν οι Etzioni και Weld (1995) και Franklin και Graesser (1996) [6] καθώς και ο Jacques Ferber (1999) [5]. Ο τελευταίος αναφέρεται στον πράκτορα ως μια φυσική ή εικονική οντότητα (physical or virtual entity) και καταλήγει ότι θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε τον πράκτορα ως «ζώντα οργανισμό».

Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν οι πράκτορες επιτρέπουν την κατηγοριοποίησή τους σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, που εισήχθη από τον Gilbert κ.α. το 1995 σε ένα white paper της IBM [6]. Σύμφωνα με αυτό οι ευφυείς πράκτορες περιγράφονται στα πλαίσια ενός χώρου που ορίζεται από τρεις άξονες: agency (στα ελληνικά αποδίδεται με τον όρο «συνεργασία»), intelligence (νοημοσύνη) και mobility (κινητικότητα).



Σχήμα 2.1: Οι άξονες προσδιορισμού των χαρακτηριστικών των πρακτόρων

Σύμφωνα με τον Gilbert, οι τρεις άξονες περιγράφονται ως εξής:

- Συνεργασία (agency) ορίζεται ως ο βαθμός της αυτονομίας και της αυτενέργειας που έχει ένας πράκτορας και μπορεί να μετρηθεί, τουλάχιστον ποιοτικά, από τη φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του πράκτορα και άλλων οντοτήτων στο σύστημα
- Νοημοσύνη (intelligence) είναι ο βαθμός της δυνατότητας συλλογισμού και της ικανότητας για να διδαχθούν συμπεριφορές που έχουν οι πράκτορες. Πιο συγκεκριμένα δείχνει την ικανότητα του πράκτορα να δέχεται τους στόχους που του έχει αναθέσει ο χρήστης και να αναλαμβάνει τις απαραίτητες ενέργειες για την επίτευξή τους.
- Κινητικότητα (mobility) είναι ο βαθμός κατά τον οποίο οι ίδιοι οι πράκτορες κινούνται σε ένα δίκτυο.

Κλείνοντας την ενότητα αυτή θα πρέπει να σταθούμε σε ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των πρακτόρων, το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω. Ένας ευφυής πράκτορας μπορεί να είναι μία φυσική ή εικονική οντότητα, ένα σύστημα υλικού ή λογισμικού. Η ενσωμάτωση των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων στα Μικροδίκτυα εκμεταλλεύεται και τις δύο υποστάσεις των πρακτόρων ώστε να πετύχει τον βέλτιστο έλεγχο. Έτσι, ο «φυσικός πράκτορας» μπορεί να ελέγχει απευθείας μια μικροτουρμπίνα, ενώ ο «εικονικός πράκτορας» μπορεί να είναι το πρόγραμμα που συμμετέχει σε μια αγορά ενέργειας. Στη συνέχεια αυτής της εργασίας, οι «φυσικοί πράκτορες» θα ονομάζονται από το φυσικό μέσο που ελέγχουν.

## 2.3. Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων

Όπως αναφέρει ο M.Wooldridge [7] “There is no such thing as a single agent system”. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι αποτελεί συνηθισμένο πια φαινόμενο να συναντούμε τους πράκτορες όχι μεμονωμένους, αλλά οργανωμένους σε μια κοινωνία πρακτόρων, τα πολυπρακτορικά συστήματα (Multi-Agent Systems). Η καινοτομία που εισάγουν οι πράκτορες εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι η αλληλεπίδραση στα συστήματα αυτά είναι δυναμική και όχι στατικά καθορισμένη. Το σύστημα αποκτά με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να συμπεριφερθεί με σωστό τρόπο ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είχαν αρχικά προβλεφθεί.

Γενικότερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι ένα σύστημα που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ως ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν, δηλαδή συνεργάζονται, συντονίζονται, διαπραγματεύονται κλπ. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα δίκτυο από «χαλαρά συνδεδεμένους» πράκτορες, οι οποίοι δρουν μαζί για να επιλύσουν προβλήματα που είναι πέραν των δυνατοτήτων και της γνώσης ενός μόνο πράκτορα. Η συνεργασία μεταξύ τους είναι δυναμική με την έννοια ότι οι οντότητες που αλληλεπιδρούν είναι αυτόνομες και άρα αποφασίζουν οι ίδιες για το πότε και το πώς θα συνεργαστούν. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι πράκτορες να επιλέγουν είτε να εργαστούν αυτόνομα ανταλλάσσοντας υπηρεσίες ή/και πληροφορίες προσπαθώντας να επιτύχουν τους δικούς τους ανεξάρτητους στόχους, είτε να συνεργάζονται επιλύοντας υποπροβλήματα ώστε ο συνδυασμός των επιμέρους λύσεων που θα προκύψουν να αποτελέσουν την τελική λύση.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ένας ευφυής πράκτορας μπορεί να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι βέβαια προσδιορίζουν και τη λειτουργία του μέσα στο σύστημα. Έτσι μπορούμε να τους διακρίνουμε στους πράκτορες με αντίληψη (cognitive agents) του περιβάλλοντος και στους πράκτορες που αντιδρούν στο περιβάλλον (reactive agents). Στη πρώτη κατηγορία οι πράκτορες χαρακτηρίζονται από αυξημένη ευφυΐα και η επίλυση του προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του περιβάλλοντος (έχουν αντίληψη). Οι πράκτορες αυτοί έχουν ορισμένες προθέσεις, δηλαδή κάποιους στόχους που προσπαθούν να επιτύχουν, καταστρώνοντας τον τρόπο δράσης για τη δεδομένη χρονική στιγμή αλλά και για τα μελλοντικά στάδια. Όσον αφορά τον τρόπο οργάνωσής τους, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι οργανωμένοι με τρόπο ανάλογο με αυτόν της ανθρώπινης κοινωνίας όπου η δομή της βασίζεται σε μεμονωμένα ευφυή άτομα.

Οι πράκτορες της δεύτερης κατηγορίας (reactive agents – αντιδραστικοί πράκτορες) έχουν σαν κυρίαρχο χαρακτηριστικό την απουσία μιας εσωτερικής συμβολικής αναπαράστασης του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται. Για το λόγο αυτό βασίζουν τη συμπεριφορά τους μόνο σε

αντιδράσεις στα ερεθίσματα τα οποία λαμβάνουν από το περιβάλλον. Οι υποστηρικτές αυτής της θεώρησης είναι της άποψης ότι δεν είναι απαραίτητο κάθε μεμονωμένος πράκτορας να είναι ευφυής για να παρουσιάζει το συνολικό σύστημα ευφυΐα. Η οργάνωση μιας κοινωνίας με αντιδραστικούς πράκτορες κατηγορίας μοιάζει με αυτή των μυρμηγκιών στα οποία η ευφυΐα του κάθε μέλους είναι περιορισμένη, ωστόσο σχηματίζοντας ομάδες, καταφέρνουν να επιτελέσουν σύνθετες λειτουργίες όπως η συλλογή τροφής ή η φύλαξη της φωλιάς.

Κύριο χαρακτηριστικό των συνεργαζόμενων πρακτόρων – είτε αυτοί είναι cognitive είτε reactive agents – είναι η δυνατότητα συντονισμού μέσω κάποιας γλώσσας επικοινωνίας, έτσι ώστε να φτάσουν σε κοινά αποδεκτές συμφωνίες και να επιλύσουν ενδεχόμενες συγκρούσεις οι οποίες προκύπτουν από την επίτευξη των επιμέρους στόχων τους. Οι πράκτορες μπορούν να συντονίζουν τη δράση τους είτε για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο (συνεργασία – cooperation) ή για να επιτύχουν τους «προσωπικούς» τους ανεξάρτητους στόχους (διαπραγμάτευση – negotiation). Άλλα χαρακτηριστικά ενός πολυπρακτορικού συστήματος είναι:

- Κανένας πράκτορας δεν έχει πλήρη πληροφορία.
- Δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος του συστήματος, υπό την έννοια ότι δεν παρεμβαίνει κάποιος χρήστης ή πράκτορας με αυξημένες αρμοδιότητες στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων ώστε να ευνοήσει τον έναν ή τον άλλο ή να αποφασίσει εκ μέρους αυτών πώς θα δράσουν.
- Τα δεδομένα είναι συνήθως καταναμημένα.
- Οι υπολογισμοί γίνονται με ασύγχρονο τρόπο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, στη σχεδίαση και υλοποίηση του πολυπρακτορικού συστήματος υπάρχουν μερικά κρίσιμα σημεία, στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Αυτά αφορούν κυρίως την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους. Όσον αφορά στην επικοινωνία, ένα ερώτημα το οποίο τίθεται είναι το ποιες γλώσσες και πρωτόκολλα θα χρησιμοποιηθούν, δηλαδή το πώς θα δοθεί η δυνατότητα στους πράκτορες να επικοινωνήσουν. Όσον αφορά την αλληλεπίδραση, το πρόβλημα εστιάζεται κυρίως στο πώς θα τυποποιηθεί, περιγραφεί και διαμοιραστεί το πρόβλημα, ώστε να συντεθούν οι λύσεις του σε μια ομάδα ευφυών πρακτόρων. Οι ενότητες που ακολουθούν θα περιγράψουν αναλυτικότερα τις λύσεις που έχουν προταθεί για τα παραπάνω προβλήματα.

## 2.4. Επικοινωνία των Πρακτόρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ικανότητα για επικοινωνία αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό του ευφυούς πράκτορα και είναι αυτό που επιτρέπει τη δημιουργία πολυπρακτορικών συστημάτων. Το γεγονός ότι οι πράκτορες επικοινωνούν τους δίνει τη δυνατότητα να μαθαίνουν, να συνεργάζονται αλλά και να συντονίζονται. Η επικοινωνία μπορεί να είναι πολύ απλή, βασιζόμενη σε σήματα, όπως για παράδειγμα οι φερομόνες στην κοινωνία των μυρμηγκιών ή μια σύνθετη γλώσσα βασισμένη σε γραμματική, συντακτικό και λεξιλόγιο. Το μόνο δεδομένο είναι ότι όσο πιο σύνθετη είναι μια γλώσσα τόσο πιο εξελιγμένες λειτουργίες μπορεί να επιτελέσει το σύστημα.

Όσον αφορά τώρα τις επικοινωνίες, υπάρχουν πάρα πολλές θεωρίες, ωστόσο η πλέον βασική είναι η θεωρία των Shannon και Weaver [7]. Κατά την θεωρία αυτή, το μοντέλο της επικοινωνίας αποτελείται από έναν αποστολέα και έναν δέκτη. Ο αποστολέας στέλνει την πληροφορία κωδικοποιημένη με βάση μία γλώσσα και ο δέκτης την αποκωδικοποιεί όταν την λαμβάνει. Το μοντέλο αυτό είναι πολύ απλό και ουσιαστικά περιγράφει τον τρόπο αποστολής δεδομένων.

Στις ανθρώπινες κοινωνίες η επικοινωνία είναι μία εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία και δεν βασίζεται μόνο στον προφορικό ή γραπτό λόγο αλλά και στις χειρονομίες, στο ύφος και την ένταση του λόγου και τέλος στις εκφράσεις του προσώπου και του σώματος. Επιπλέον, ένα κύριο χαρακτηριστικό είναι το περιεχόμενο του ανθρώπινου λόγου. Οι άνθρωποι δεν ανταλλάσσουν απλά δεδομένα και πληροφορίες αλλά γνώσεις και περιγραφή διαδικασιών.

Τα συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων προκειμένου να μπορούν να αναπτύξουν την συλλογική ευφυΐα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με ένα εργαλείο που θα τους επιτρέπει να πραγματοποιούν σύνθετους διαλόγους παρόμοιους με τους ανθρώπους. Η επικοινωνία των πρακτόρων θα πρέπει να έχει τα εξής τρία [5] χαρακτηριστικά:

- Μία κοινή γλώσσα
- Μία κοινή παράσταση της γνώσης και των εννοιών
- Να υπάρχει τρόπος να ανταλλάξουν οτιδήποτε ανήκει και στις δύο προηγούμενες κατηγορίες

Το πρώτο χαρακτηριστικό αφορά τον τρόπο σύνταξης των μηνυμάτων. Στην περίπτωση των πρακτόρων τα μηνύματα αυτά θα είναι συμβολοακολουθίες. Συνεπώς θα πρέπει να είναι δομημένα με ένα κοινό τρόπο έτσι ώστε να εξαχθεί η πληροφορία από αυτά.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό αφορά την σημασία των λέξεων η οποία πρέπει να είναι κοινή σε όλους τους πράκτορες του συστήματος προκειμένου να βγαίνει νόημα από την συζήτηση. Για παράδειγμα,

αν σύμφωνα με το περιεχόμενο ενός μηνύματος ένας πράκτορας ζητά πληροφορίες για την ενέργεια που καταναλώθηκε σε ένα σημείο του δικτύου θα πρέπει να είναι κατανοητό από όλους ότι η ερώτηση αφορά την ηλεκτρική ενέργεια και όχι την χημική.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι σχετικά σύνθετο ωστόσο πρέπει να αναφερθεί για την πληρότητα του κειμένου. Για να γίνει κατανοητό αυτό το σημείο επανερχόμαστε στην μορφή της ανθρώπινης γλώσσας όπου υπάρχει ένα εξαιρετικό χαρακτηριστικό: μπορεί να περιγράψει οτιδήποτε αντιλαμβανόμαστε. Αυτό είναι ένα κρίσιμο σημείο για τον τρόπο επικοινωνίας των πρακτόρων. Θα πρέπει η γλώσσα τους να έχει την δομή ώστε να περιγράφει σύνθετες και πολύπλοκες έννοιες όπως για παράδειγμα την διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθήσουν οι πράκτορες με βάση την δεδομένη κατάσταση του συστήματος. Μία γλώσσα που έχει την δυνατότητα για την περιγραφή σύνθετων εννοιών είναι η KIF (Knowledge Interchange Format) – [8].

#### **2.4.1. Agent Communication Language**

Η FIPA [9] που είναι ο οργανισμός για τα πρότυπα των ευφυών πρακτόρων έχει ορίσει μία γλώσσα για την επικοινωνία των πρακτόρων την οποία ονομάζει Agent Communication Language. Το κάθε μήνυμα που ανταλλάσσουν οι πράκτορες έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τον αποστολέα (sender) του μηνύματος
- Μία λίστα από τους αποδέκτες (receivers) του μηνύματος
- Μία ένδειξη για τον σκοπό του μηνύματος που ονομάζεται “performative”. Η ένδειξη αυτή μπορεί να πάρει τις εξής τιμές: REQUEST, εάν απαιτείται ο αποδέκτης να εκτελέσει μία πράξη, INFORM, εάν ο αποστολέας θέλει να ανακοινώσει ένα γεγονός στον αποδέκτη, QUERY\_IF, εάν ο αποστολέας θέλει να πληροφορηθεί για την ισχύ ενός γεγονότος, CFP αίτηση για προσφορές σε μία δημοπρασία ή επίλυση ενός προβλήματος και PROPOSE, ACCEPT\_PROPOSAL, REJECT\_PROPOSAL, για χρήση σε μία διαπραγμάτευση.
- Το περιεχόμενο (content) δηλαδή την πραγματική πληροφορία που περιέχεται στο μήνυμα.
- Την γλώσσα του περιεχομένου (content language) δηλαδή το συντακτικό που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το περιεχόμενο.
- Την οντολογία (ontology) δηλαδή το λεξικό που περιγράφει τις λέξεις και τις έννοιες που χρησιμοποιούνται μέσα στο περιεχόμενο του μηνύματος.

- Μια σειρά από ενδείξεις προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση ταυτόχρονα πλέον του ενός διαλόγων όπως για παράδειγμα ο κωδικός της συζήτησης (conversation-id) ή το σε ποιο μήνυμα απαντά το τρέχον μήνυμα (reply-with, in-reply-to, reply-by).

## 2.5. Αλληλεπίδραση των Πρακτόρων

Το βασικό στοιχείο της συμπεριφοράς ενός πράκτορα σε ένα γενικότερο σύστημα είναι η αλληλεπίδραση που έχει με τους άλλους πράκτορες. Η αλληλεπίδραση αυτή σχετίζεται τόσο με τις πράξεις του πράκτορα όσο και με την δυνατότητα που έχει για επικοινωνία και είναι το ανώτερο στοιχείο για την δημιουργία μίας ολοκληρωμένης λειτουργίας. Το ερώτημα που τίθεται είναι πώς ακριβώς μπορεί να καθοριστεί ο τρόπος που αλληλεπιδρούν οι πράκτορες μεταξύ τους.

Το πρώτο κριτήριο αφορά τους στόχους που θέτουν οι πράκτορες. Οι στόχοι αυτοί μπορεί να είναι συμβατοί μεταξύ τους οπότε έχουμε πράκτορες που συνεργάζονται, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ανταγωνίζονται. Για παράδειγμα διαφορετική συμπεριφορά θα έχουν πράκτορες που συνεργάζονται στα πλαίσια μίας αγοράς ενέργειας σε σχέση με άλλους που τους ανταγωνίζονται.

Το δεύτερο κριτήριο αφορά τους πόρους που διαθέτει το σύστημα συνολικά και ο κάθε πράκτορας ξεχωριστά. Οι πόροι που συνήθως δεν είναι απεριόριστοι, είναι πάντα ένα θέμα προς διαπραγμάτευση ή αντιδικία ανάλογα με το αν συνεργάζονται οι πράκτορες ή όχι. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος με τον οποίο θα διαχειριστούν τους πόρους του συστήματος οι πράκτορες αποτελεί σημαντικό στοιχείο της συμπεριφοράς τους.

Το τρίτο κριτήριο σχετίζεται με τις ικανότητες του κάθε πράκτορα για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων του συστήματος. Το ερώτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι εάν μπορεί να το επιλύσει από μόνος του ή αν απαιτείται μία συλλογική προσπάθεια. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε τον έλεγχο της τάσης και τον έλεγχο της συχνότητας. Ο έλεγχος της τάσης είναι κυρίως τοπικό φαινόμενο και ένας πράκτορας που ελέγχει μία μονάδα παραγωγής μπορεί να ελέγξει την τάση στο ζυγό που βρίσκεται. Αντίθετα η συχνότητα αφορά ολόκληρο το σύστημα και απαιτείται μια συντονισμένη προσπάθεια για τον έλεγχο της.

Στο μεγαλύτερο μέρος αυτής της εργασίας θα ασχοληθούμε με πράκτορες που κατά βάση συνεργάζονται και δεν είναι αντίπαλοι. Για αυτόν το λόγο θα εστιάσουμε περισσότερο στον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να συνεργαστούν.

### 2.5.1. Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων

Η έννοια της συνεργασίας δύο ή περισσότερων πρακτόρων είναι σύνθετη δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι για να επιτευχθεί. Επειδή αναφερόμαστε σε πολύπλοκα συστήματα αυτή θα πρέπει να μελετηθεί και να κατηγοριοποιηθεί. Οι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσαν να συνεργαστούν οι πράκτορες είναι:

#### A) Ομαδοποίηση

Ο τρόπος αυτός είναι ο πλέον προφανής και στον οποίο όμοιοι πράκτορες σχηματίζουν ομάδες μέσα στο σύστημα προκειμένου να επιτελέσουν από κοινού μία εργασία. Για παράδειγμα σε ένα μικροδίκτυο οι πράκτορες που ελέγχουν τις μπαταρίες μπορούν να συνεργαστούν προκειμένου από κοινού να εξασφαλίσουν την απαιτούμενη εφεδρεία στο σύστημα.

#### B) Επικοινωνία

Η επικοινωνία είναι ένας προφανής τρόπος για την συνεργασία των πρακτόρων αφού με αυτόν τον τρόπο ανταλλάσσουν δεδομένα, γνώσεις και συντονίζουν τις πράξεις τους.

#### Γ) Ειδίκευση

Μια σημαντική λειτουργία σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι η ειδίκευση και ειδικότερα η ανάθεση συγκεκριμένων καθηκόντων στον κάθε πράκτορα. Για παράδειγμα, εάν έχουμε έναν αριθμό από πράκτορες που ελέγχουν μπαταρίες, κάποιος μπορεί να αναλάβει τον έλεγχο της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία ενώ κάποιος άλλος την διαχείριση της εφεδρείας του συστήματος.

#### Δ) Συνεργασία στο μοίρασμα καθηκόντων και πόρων

Ένας αρκετά σύνθετος τρόπος συνεργασίας είναι η από κοινού ανάληψη από μία ομάδα πρακτόρων κάποιων καθηκόντων με παράλληλη κοινή χρήση των διαθέσιμων πόρων. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας συνεργασίας θα μπορούσε να είναι μια ομάδα αποτελούμενη από έναν πράκτορα που ελέγχει μία ανεμογεννήτρια και έναν πράκτορα που ελέγχει μία μπαταρία. Οι δύο πράκτορες χρησιμοποιούν από κοινού τους πόρους τους: ο πρώτος την στοχαστική παραγωγή της

ανεμογεννήτριας και ο δεύτερος την ικανότητα αποθήκευσης. Το αποτέλεσμα είναι η σταθερή απόδοση ενέργειας προς το σύστημα.

#### Ε) Συντονισμός πράξεων

Ο συντονισμός των πράξεων είναι μία σύνθετη λειτουργία του συστήματος και ειδικά εφόσον αναφερόμαστε σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει μία πληθώρα πράξεων που θα πρέπει να γίνουν σε συντονισμό με άλλους πράκτορες του συστήματος. Παραδείγματα τέτοιων πράξεων είναι το κλείσιμο ενός διακόπτη ή η διακοπή της λειτουργίας μίας μονάδας. Οι πράξεις αυτές μπορεί να επηρεάσουν την ευστάθεια του συστήματος και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να γίνουν συντονισμένα με άλλους πράκτορες.

#### ΣΤ) Διαπραγμάτευση

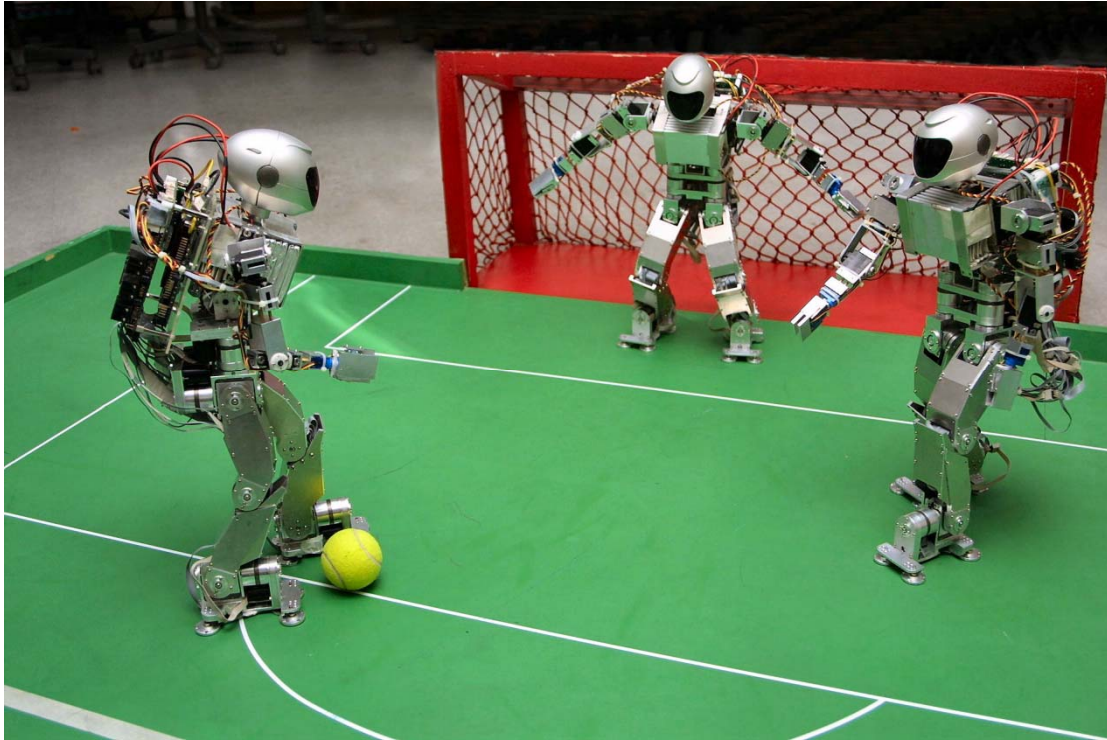
Μία σημαντική μέθοδος συνεργασίας είναι η διαπραγμάτευση, ειδικά σε ότι αφορά την κατανομή των πόρων του συστήματος ή καθηκόντων. Οι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να γίνει η διαπραγμάτευση είναι πάρα πολλοί αλλά το ερώτημα που τίθεται σε αυτή την περίπτωση είναι εάν το αποτέλεσμα είναι το σωστό και το βέλτιστο για το σύστημα.

#### Ζ) Πολλαπλασιασμός

Η μέθοδος του πολλαπλασιασμού αναφέρει ότι ένα πρόβλημα μπορεί να λυθεί αυξάνοντας τον αριθμό των πρακτόρων. Η μέθοδος αυτή έχει ενδιαφέρον εφόσον μπορεί να εφαρμοστεί. Στα μικροδίκτυα προφανώς δεν θα μπορούσαμε να αυξήσουμε αυτόματα τον αριθμό των μικροπηγών.

## 2.6. Πολυεπίπεδη Μάθηση

Η ιδέα για την οργάνωση του τρόπου λειτουργίας των πρακτόρων σε ένα μικροδίκτυο προήλθε από την εργασία των Stone και Veloso [10] που αφορούσε τον έλεγχο μίας ομάδας ρομπότ που παίζουν ποδόσφαιρο (βλ. Σχ.2.2). Το συνολικό πρόβλημα που αντιμετώπισαν στον έλεγχο της ομάδας των ρομπότ παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες σε σχέση με το αντικείμενο της εργασίας αυτής.



Σχήμα 2.2: Ρομπότ που παίζουν ποδόσφαιρο

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η έννοια της πολυεπίπεδης μάθησης θα παρουσιαστεί πρώτα ο τρόπος λειτουργίας της ομάδας των ρομπότ. Κάθε ένα από τα ρομπότ έχει να επιτελέσει μια σειρά από λειτουργίες κάποιες από τις οποίες είναι συνθέτες ενώ άλλες είναι πολύ απλές. Μερικές λοιπόν από αυτές τις λειτουργίες σε σειρά πολυπλοκότητας είναι:

- Μετάβαση σε συγκεκριμένη τοποθεσία του γηπέδου
- Κλωτσιά στην μπάλα με συγκεκριμένο στόχο
- Μεταβίβαση της μπάλας προς έναν συμπαίκτη
- Κλέψιμο της μπάλας από έναν αντίπαλο
- Στρατηγική για επίτευξη τέρματος
- Στρατηγική για νίκη στο παιχνίδι

Η πολυεπίπεδη μάθηση είναι ένα μοντέλο προκειμένου να οργανωθούν όλοι αυτοί οι διαφορετικοί τύποι πράξεων και λειτουργιών. Το μοντέλο εισάγει τρία επίπεδα συμπεριφοράς του πράκτορα και κάθε ένα από αυτά περιλαμβάνει κάποιες από τις προηγούμενες πράξεις και λειτουργίες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Το πρώτο επίπεδο αφορά πράξεις και λειτουργίες του πράκτορα σε τοπικό επίπεδο οι οποίες δεν απαιτούν την συνεργασία με άλλους πράκτορες. Απλά θα πρέπει το ρομπότ να μάθει να πηγαίνει σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία ή να κλωτσά την μπάλα. Στο δεύτερο επίπεδο έχουμε απλές πράξεις και λειτουργίες οι οποίες απαιτούν την παρουσία τουλάχιστον δύο ρομπότ όπως είναι η μεταβίβαση της μπάλας. Τέλος, το τρίτο επίπεδο αφορά το σύνολο της ομάδας και τον τρόπο που θα μπορέσει να φέρει σε πέρας το στόχο του, δηλαδή τη νίκη στο παιχνίδι.

Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία του πράκτορα σε ένα μικροδίκτυο. Ο κάθε πράκτορας ελέγχει μία μονάδα παραγωγής-αποθήκευσης και καλείται να οργανώσει όλες τις λειτουργίες που πρέπει να επιτελέσει. Η αντιστοίχιση των λειτουργιών του μικροδικτύου σε σχέση με τα ρομπότ φαίνεται επίσης στον Πίνακα 2.1.

<b>Επίπεδο</b>	<b>Πράκτορες</b>	<b>Συμπεριφορά</b>	<b>Ποδόσφαιρο</b>	<b>Μικροδίκτυο</b>
1	1	Ατομική	Σουτ της μπάλας	Διαχείριση Μπαταριών
2	Πολλοί	Πολλών Πρακτόρων	Μεταβίβαση σε συμπαίκτη	Διαχείριση Πόρων, Άνοιγμα Διακόπτη
3	Πολλοί/Όλοι	Ομαδική	Νίκη στο παιχνίδι	Συμμετοχή σε αγορά ενέργειας

Πίνακας 2.1: Τα επίπεδα της μάθησης



Σχήμα 2.3: Τα επίπεδα της μάθησης στον πράκτορα που ελέγχει την μπαταρία

Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες και διαδικασίες που απαιτούνται προκειμένου να ελεγχθεί τοπικά η μονάδα. Για παράδειγμα στην λειτουργία που αφορά την διαχείριση μίας μπαταρίας ο πράκτορας θα πρέπει να παρατηρεί το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Στην περίπτωση που η φόρτιση είναι κάτω από ένα όριο τότε θα πρέπει να σταματήσει την ενδεχόμενη παροχή ενέργειας προς το δίκτυο. Αυτή είναι μία τοπική απόφαση για την οποία δεν απαιτείται να διαπραγματευτεί με κανέναν άλλο πράκτορα. Αντίθετα, όμως, η διαδικασία της φόρτισης δεν είναι τοπική απόφαση αφού σε διασυνδεδεμένη λειτουργία συσχετίζεται με την οικονομική λειτουργία του συστήματος ενώ σε απομονωμένη λειτουργία του συστήματος επηρεάζει την παραγωγή των άλλων μονάδων. Για αυτόν τον λόγο η απόφαση για το πότε πρέπει να ξεκινήσει η φόρτιση των μπαταριών πρέπει να ληφθεί σε ανώτερο επίπεδο. Υλοποίηση ενός αλγορίθμου που αφορά στη βέλτιστη οικονομική λειτουργία των μπαταριών θα εξετάσουμε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Το δεύτερο επίπεδο αφορά απλές λειτουργίες για τις οποίες απαιτείται η συμμετοχή πολλών πρακτόρων. Τέτοιες λειτουργίες θα μπορούσαν να είναι η απόφαση για το πώς θα καταναμηθεί η εφεδρεία του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες ή το πώς θα παραχθεί μία συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας.

Στο ανώτερο επίπεδο ουσιαστικά περικλείεται η στρατηγική του συστήματος και οι πραγματικοί στόχοι που αφορούν την οικονομική αλλά και ασφαλή λειτουργία. Σε αυτό το επίπεδο εμφανίζονται πολλές προκλήσεις που συνοψίζονται στα εξής:

- Η συνολική κατάσταση του συστήματος καθορίζει τις αποφάσεις χωρίς όμως να είναι πλήρως γνωστή.
- Θα πρέπει να γίνει επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών με περιορισμένα υπολογιστικά μέσα.
- Το περιβάλλον είναι στοχαστικό.
- Οι αποφάσεις δεν είναι τοπικές αλλά τα αποτελέσματα μπορεί να φανούν μετά από πολλά βήματα.

Ένα παράδειγμα λειτουργίας σε αυτό το επίπεδο είναι η συμμετοχή σε μία αγορά ενέργειας. Η απόφαση για την πώληση ή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να περικλείει τις ανάγκες όλων των πρακτόρων και σίγουρα ο ορίζοντας της απόφασης πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος.

## 2.7. Εφαρμογές

Η τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων είναι σχετικά νέα στον χώρο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και στον έλεγχο των διεργασιών. Σε σχέση με τα ηλεκτρικά συστήματα οι τομείς στους οποίους υπάρχει ερευνητική δραστηριότητα είναι:

### *A) Παρακολούθηση Κατάστασης*

Στην περιοχή αυτή οι πράκτορες έχουν σαν στόχο:

- 1) Συλλογή δεδομένων από διάφορους αισθητήρες
- 2) Αξιολόγηση των δεδομένων και εξαγωγή γνώσης και πληροφορίας
- 3) Μετάδοση των δεδομένων σε άλλα υποσυστήματα ή πράκτορες

Οι πληροφορίες που διαχειρίζονται οι εφαρμογές αυτές αφορούν τόσο μετρήσεις για την κατάσταση του δικτύου (τάση , ρεύμα) όσο και για την κατάσταση του εξοπλισμού. Παραδείγματα εφαρμογών στην περιοχή είναι το [11-13] που αφορά την παρακολούθηση της κατάστασης μετασχηματιστών, αλλά και το [14] που αφορά την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων.

#### *B) Εφαρμογές στα δίκτυα διανομής*

Οι εφαρμογές των συστημάτων ευφυών πρακτόρων στα δίκτυα διανομής εμφανίζονται σαν εναλλακτικές λύσεις του κεντρικού ελέγχου. Οι πράκτορες λαμβάνουν αποφάσεις για την διαδικασία αναδιαμόρφωσης του δικτύου ή αποκατάστασής του μετά από βλάβη. Σημαντική έρευνα γίνεται ακόμα σε ότι αφορά τα αυτοθεραπευόμενα (self - healing) δίκτυα στις ΗΠΑ μετά τα τρομοκρατικά χτυπήματα. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη του [15] για την απόρριψη φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής. Τέλος, ένα μέρος της έρευνας αφορά το καθαρά πληροφοριακό κομμάτι και ειδικότερα τον τρόπο με τον οποίο θα υλοποιηθούν οι πράκτορες και θα ενσωματωθούν στο υπάρχον σύστημα ελέγχου. Από τις εργασίες αυτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η [16] που αφορά την ενσωμάτωση ενός συστήματος πολλαπλών πρακτόρων στο σύστημα διαχείρισης δικτύου διανομής της Iberdrola.

#### *Γ) Μοντελοποίηση των δικτύων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και εφαρμογές στην αγορά ενέργειας*

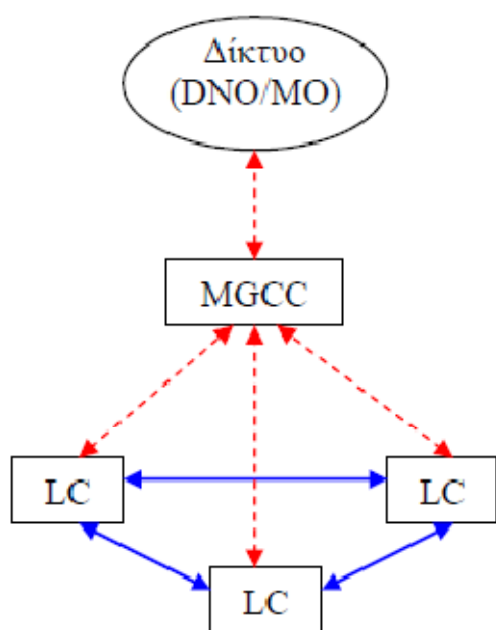
Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση σύνθετων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία τεχνολογική πρόκληση στην οποία η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων μπορεί να προσφέρει σημαντικά. Στην περιοχή αυτή οι διάφορες οντότητες αντιπροσωπεύονται από πράκτορες. Η προσομοίωση βασίζεται στην αυτόνομη λειτουργία των πρακτόρων και έτσι μπορεί το σύστημα να προσεγγίσει καλύτερα την πραγματικότητα. Οι προσομοιώσεις μπορούν να αφορούν την εσωτερική λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας μέχρι την λειτουργία της αγοράς ενέργειας. Σημαντική έρευνα λαμβάνει χώρα και στην περιοχή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα για την λειτουργία των αγορών ενέργειας η τεχνική των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογηθούν κάποιες πολιτικές και η διαδικασία μπορεί να βασιστεί στην θεωρία παιγνίων και την ενισχυτική μάθηση [17-18]. Ένα μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας αφορά αυτό ακριβώς το κομμάτι.

#### *Δ) Εφαρμογές στα δίκτυα πλοίων*

Μία περιοχή στην οποία η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων έχει διεξόδυση είναι αυτή των ηλεκτρικών συστημάτων των πλοίων. Τα συστήματα αυτά μοιάζουν σημαντικά με τα μικροδίκτυα. Ωστόσο ο κύριος όγκος της εφαρμογής αφορά αμυντικές εφαρμογές και για την ακρίβεια την δυνατότητα των ηλεκτρικών συστημάτων να επιβιώσουν μετά από ένα πλήγμα. Η έρευνα σε αυτήν την περιοχή αφορά κυρίως αυτοθεραπευόμενα δίκτυα και την δυνατότητά τους να αλλάζουν τοπολογία πολύ γρήγορα σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης.

## 2.8. Εφαρμογή των συστημάτων πολλαπλών ευφών πρακτόρων στον έλεγχο των μικροδικτύων

Σε αυτήν την παράγραφο θα δοθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του μικροδικτύου, βασικές αρχές του οποίου παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Στο πλαίσιο της περιγραφής αυτής θεωρούμε ότι ο έλεγχος του συστήματος είναι κατανεμημένος και ο κεντρικός ελεγκτής απλά συντονίζει την λειτουργία του συστήματος. Το μοντέλο λειτουργίας περιγράφεται σχηματικά στο Σχ. 2.4.

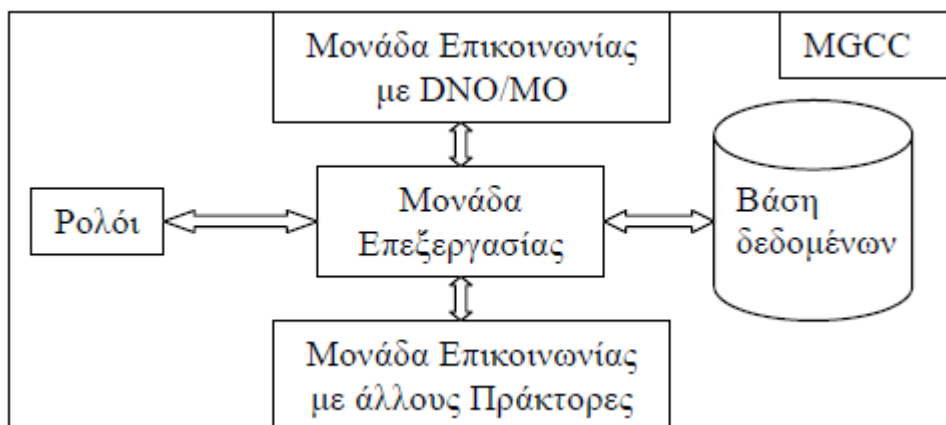


Σχήμα 2.4: Μοντέλο λειτουργίας του κατανεμημένου συστήματος ελέγχου

Στο σχήμα αυτό φαίνονται πάλι κάποια από τα τμήματα του Σχ. 1.2 αλλά τονίζεται η ροή πληροφορίας και ελέγχου του συστήματος. Με τονισμένη γραμμή έχουμε τα σήματα ελέγχου και διαπραγμάτευσης των τοπικών ελεγκτών ενώ με διακεκομμένη γραμμή τα σήματα συγχρονισμού και επικοινωνίας με το κυρίως δίκτυο (DNO/MO).

### 2.8.1. Η δομή του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC)

Η αρχιτεκτονική του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller - MGCC) παρουσιάζεται στο Σχ. 2.5.



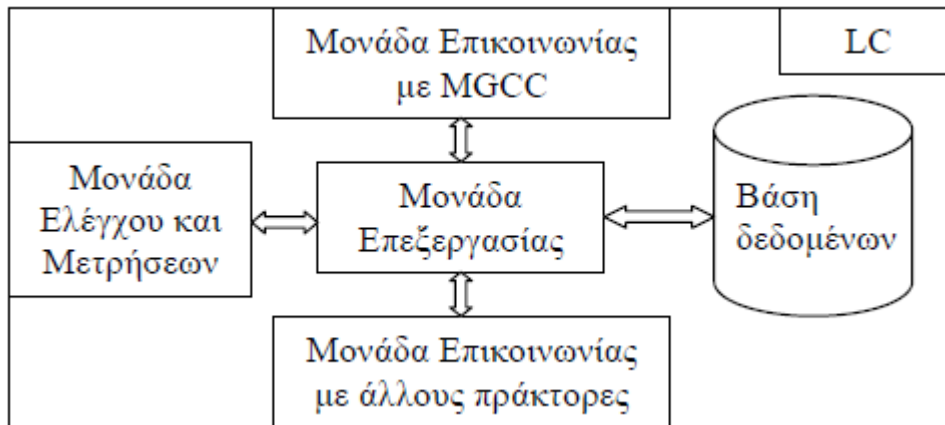
Σχήμα 2.5: Η αρχιτεκτονική του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC)

Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική τα κύρια τμήματα που συνθέτουν τον MGCC είναι:

1. Οι μονάδες επικοινωνίας, δηλαδή τα υποσυστήματα που τον βοηθούν να επικοινωνεί τόσο με το δίκτυο (DNO/MO) αλλά και με τους τοπικούς ελεγκτές (LC). Στο σχήμα θεωρούμε δύο διαφορετικές μονάδες διότι έχουμε διαφορετικούς χρόνους ανταλλαγής δεδομένων καθώς και διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας.
2. Το ρολόι είναι μία βασική μονάδα η οποία απαιτείται για την δημιουργία των σημάτων συγχρονισμού. Για παράδειγμα ένα σήμα συγχρονισμού θα μπορούσε να είναι η εκκίνηση της διαδικασίας διαπραγμάτευσης για την πώληση ή αγορά ενέργειας. Η εμφάνιση του υποσυστήματος αυτού στο σχήμα δεν είναι υπερβολική αφού για πολλές λειτουργίες απαιτείται υψηλής ακρίβειας συγχρονισμός.
3. Η βάση δεδομένων περιέχει τόσο τεχνικά όσο και λειτουργικά δεδομένα. Τεχνικά δεδομένα είναι για παράδειγμα οι τεχνικές δυνατότητες των LC ενώ λειτουργικά δεδομένα είναι για παράδειγμα η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Η βάση δεδομένων ουσιαστικά απλοποιεί πολλές διαδικαστικές διεργασίες του συστήματος. Για παράδειγμα ένα φορτίο θέλει να βρει ποιες μονάδες παραγωγής υπάρχουν στο σύστημα. Η μία δυνατότητα είναι να ρωτήσει όλους τους LCs εάν είναι διαθέσιμη μονάδα παραγωγής ή όχι. Η δεύτερη δυνατότητα είναι να απευθυνθεί στον MGCC και να ρωτήσει ποιες μονάδες έχουν δηλώσει ότι μπορούν να παράγουν ενέργεια.
4. Η μονάδα επεξεργασίας είναι η μηχανή που διαχειρίζεται τα δεδομένα και τα μηνύματα του MGCC.

## 2.8.2. Η δομή του τοπικού ελεγκτή

Η αρχιτεκτονική του τοπικού ελεγκτή (Local Controller) LC παρουσιάζεται στο Σχ. 2.6.



Σχήμα 2.6: Η αρχιτεκτονική του τοπικού ελεγκτή

Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική ο LC αποτελείται τις εξής μονάδες:

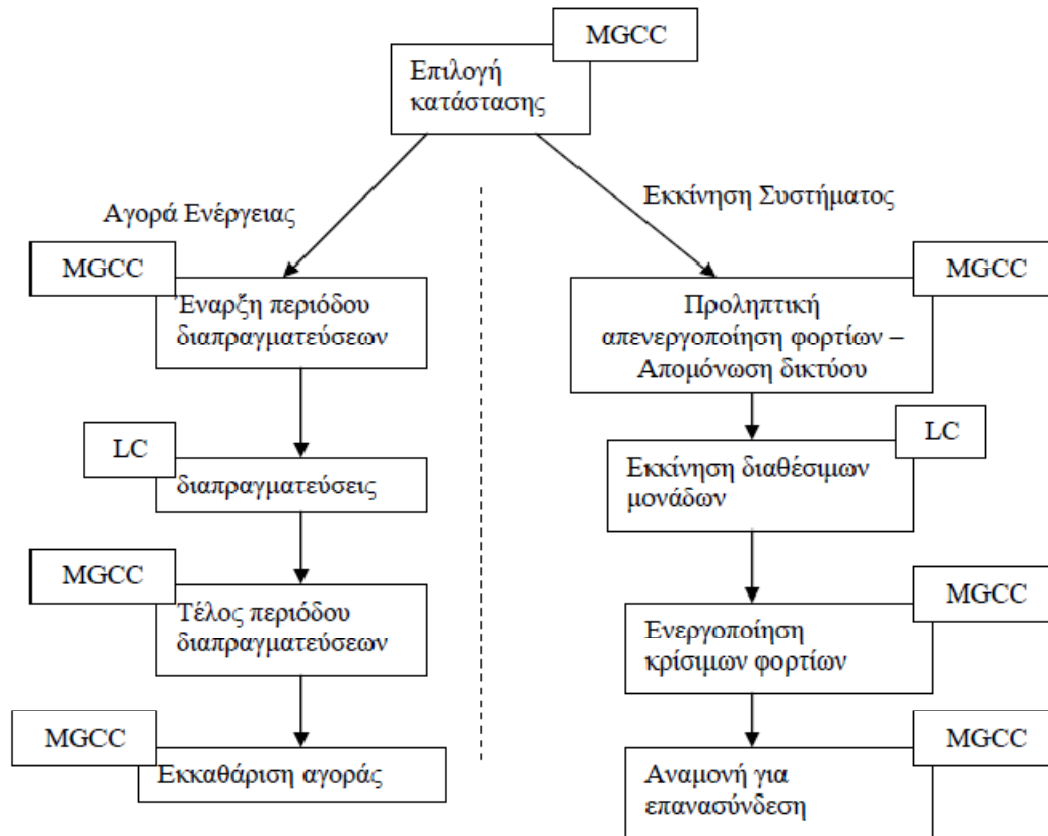
- Οι μονάδες επικοινωνίας είναι τα υποσυστήματα που τον βοηθούν να επικοινωνεί τόσο με το κεντρικό ελεγκτή (MGCC) όσο και με άλλους τοπικούς ελεγκτές (LC). Θεωρούμε δύο διαφορετικές μονάδες διότι έχουμε διαφορετική πληροφορία που ανταλλάσσεται στις δύο περιπτώσεις.
- Η μονάδα ελέγχου και μετρήσεων ουσιαστικά αποτελεί το κομμάτι με το οποίο ο τοπικός ελεγκτής (LC) ενώνεται με τον φυσικό κόσμο και δίνει εντολές στην μονάδα που ελέγχει αλλά και παίρνει μετρήσεις.
- Η βάση δεδομένων περιέχει τόσο τεχνικά όσο και λειτουργικά δεδομένα. Τεχνικά δεδομένα είναι για παράδειγμα οι τεχνικές δυνατότητες των LC ενώ λειτουργικά δεδομένα είναι για παράδειγμα η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος.
- Η μονάδα επεξεργασίας είναι η μηχανή που διαχειρίζεται τα δεδομένα και τα μηνύματα του τοπικού ελεγκτή (LC). Προφανώς σε ένα πλήρως καταναμημένο σύστημα οι αλγόριθμοι που ενσωματώνονται στο σύστημα αυτό είναι αρκετά προηγμένοι.

Σύμφωνα με το [1], οι προηγμένες τεχνικές επικοινωνίας που παρέχει η τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών ευφών πρακτόρων όχι μόνο δικαιολογεί την ύπαρξη ανεξάρτητων τμημάτων σε ότι αφορά την επικοινωνία αλλά και το ότι ο τρόπος επικοινωνίας που υιοθετήθηκε στο [1] ενισχύει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την ευφυΐα του συστήματος.

### **2.8.3. Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος**

Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί μια βασική περιγραφή του διαγράμματος ροής του κατανεμημένου συστήματος ελέγχου. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του συστήματος θα αναφέρουμε ως παραδείγματα μόνο δύο βασικές λειτουργίες, αυτή της αγοράς ενέργειας και της εκκίνησης μετά από διακοπή ισχύος. Το απλοποιημένο διάγραμμα ροής φαίνεται στο Σχ. 2.7 που ακολουθεί. Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι διάφορες φάσεις του συστήματος και το ποιος είναι ο κύριος υπεύθυνος να περατώσει κάθε μία από αυτές. Όσον αφορά τα πλήρη διαγράμματα ροής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι είναι εξαιρετικά σύνθετα και εκτεταμένα για να εμφανιστούν σε μία σελίδα.

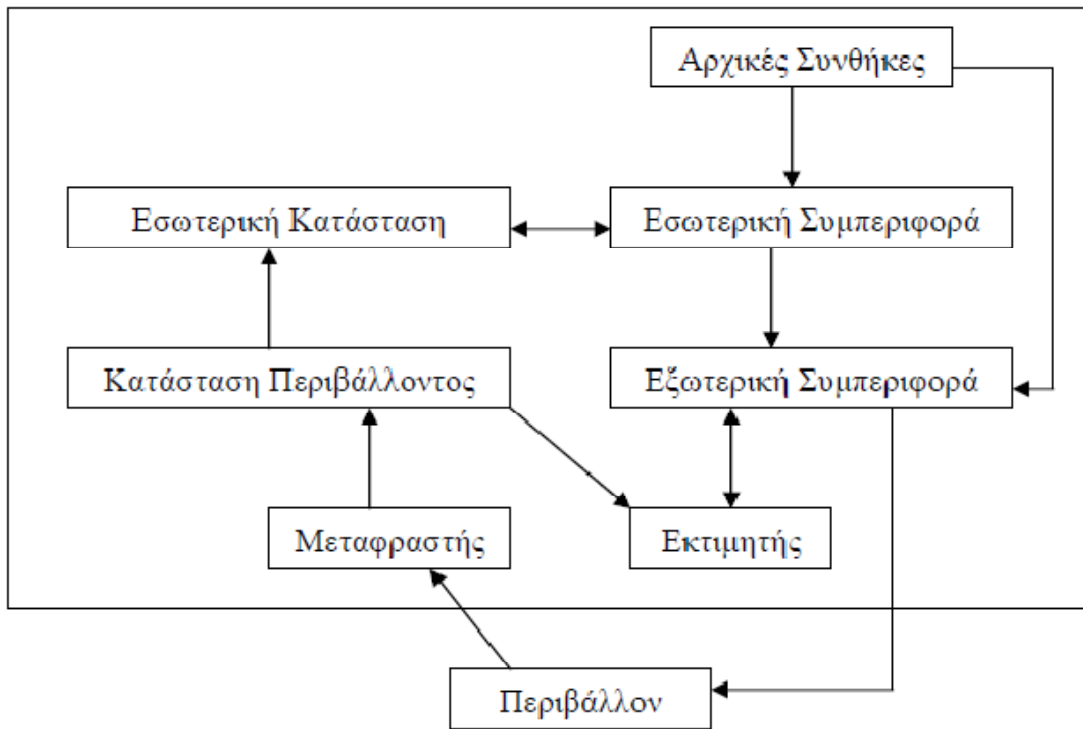
Ο MGCC καλείται κάθε στιγμή να επιλέξει σε ποια κατάσταση είναι το σύστημα. Εάν βρισκόμαστε σε κανονική κατάσταση λειτουργίας και είναι η στιγμή που θα πρέπει να αρχίσουν οι διαπραγματεύσεις για την διαχείριση της παραγωγής και του φορτίου θα πρέπει να στείλει τα κατάλληλα μηνύματα στους τοπικούς ελεγκτές. Αντίθετα, εάν διαγνώσει ότι το σύστημα έχει διακοπή τάσης θα πρέπει να απομονώσει το δίκτυο (islanding) και να προχωρήσει στους αναγκαίους χειρισμούς για την ταχεία εκκίνηση του. Αυτό που μας λέει αυτό το σχήμα είναι ότι ο ευφυής πράκτορας καλείται να πραγματοποιήσει πολλές λειτουργίες. Το πρόβλημα λοιπόν που είναι προς επίλυση δεν είναι η λύση σε κάθε ένα από αυτά αλλά το πώς θα υλοποιηθεί μία αρχιτεκτονική που θα συνδυάζει όλες αυτές τις λειτουργίες.



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος

#### 2.8.4. Εφαρμογή στο μικροδίκτυο

Σε ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο στην τεχνητή νοημοσύνη ο βασικός πυρήνας είναι ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα θα μάθει να διαχειρίζεται την γνώση του συστήματος συνολικά. Όταν αναφερόμαστε στη συνολική λειτουργία του συστήματος εννοούμε τόσο τις χαμηλού επιπέδου λειτουργίες όπως για παράδειγμα την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των μπαταριών όσο και τις πολύ υψηλού επιπέδου λειτουργίες όπως αυτή της συμμετοχής στην αγορά ενέργειας. Για αυτό τον λόγο προτείνεται το παρακάτω μοντέλο λειτουργίας του ευφυή πράκτορα όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονική του Ευφυούς Πράκτορα

Αναλυτικά έχουμε:

**Αρχικές συνθήκες:** οι αρχικές συνθήκες είναι οι στοιχειώδεις κανόνες που διέπουν την συμπεριφορά του ευφυούς πράκτορα. Για παράδειγμα αν αυτός συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας τότε μία αρχική συνθήκη είναι ότι θα συνεργάζεται με τους υπόλοιπους ευφυείς πράκτορες (agents). Μία άλλη αρχική συνθήκη θα ήταν να τους ανταγωνίζεται. Σε ό,τι αφορά την εσωτερική λειτουργία θα μπορούσαμε να ορίσουμε ως αρχική συνθήκη να μη τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο αν η τάση πέσει κάτω από το 10% της ονομαστικής.

**Εσωτερική κατάσταση:** η εσωτερική κατάσταση αφορά τις εσωτερικές λειτουργίες και τους ελέγχους του συστήματος. Για παράδειγμα σε μία μικροτουρμπίνα, τμήμα της εσωτερικής κατάστασης είναι οι στρόφες του άξονα, ο έλεγχος των οποίων καθορίζει τη ροπή του συστήματος αλλά και τον ρυθμό αλλαγής του φορτίου.

**Μεταφραστής :** ο μεταφραστής είναι το τμήμα που λαμβάνει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και τις μετατρέπει σε πληροφορία για την κατάσταση του εξωτερικού περιβάλλοντος.

**Εξωτερική κατάσταση:** η εξωτερική κατάσταση είναι η αντίληψη που έχει το σύστημα για τον εξωτερικό κόσμο. Ο ευφυής πράκτορας δεν έχει πλήρη γνώση του περιβάλλοντος αλλά μόνο το κομμάτι που αντιλαμβάνεται από τους αισθητήρες του.

**Εσωτερική συμπεριφορά:** η εσωτερική συμπεριφορά αφορά τις ενέργειες που πραγματοποιεί ο ευφυής πράκτορας για τον έλεγχο του συστήματος.

**Εκτιμητής:** ο εκτιμητής είναι ένα υποσύστημα το οποίο εκτιμά με βάση την συμπεριφορά του ευφυή πράκτορα την κατάσταση του περιβάλλοντος στο μέλλον.

**Εξωτερική συμπεριφορά:** η εξωτερική συμπεριφορά αφορά τις αποφάσεις του ευφυή πράκτορα που λαμβάνονται σε συνδυασμό με τους άλλους ευφυείς πράκτορες.

Η αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε στο Σχ.2.7 υποδηλώνει ότι ο έλεγχος θα κινείται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο είναι το εσωτερικό επίπεδο, όπου ο ευφυής πράκτορας θα ελέγχει είτε μία μονάδα παραγωγής ή αποθήκευσης ενέργειας είτε ένα φορτίο. Το δεύτερο επίπεδο του ελέγχου αφορά την ομαδική συμπεριφορά όλων των ευφύων πρακτόρων κι έχει σαν σκοπό τον συνολικό έλεγχο του μικροδικτύου.

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:**

### **ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΚΥΘΝΟΥ**

#### **3.1. Εισαγωγή**

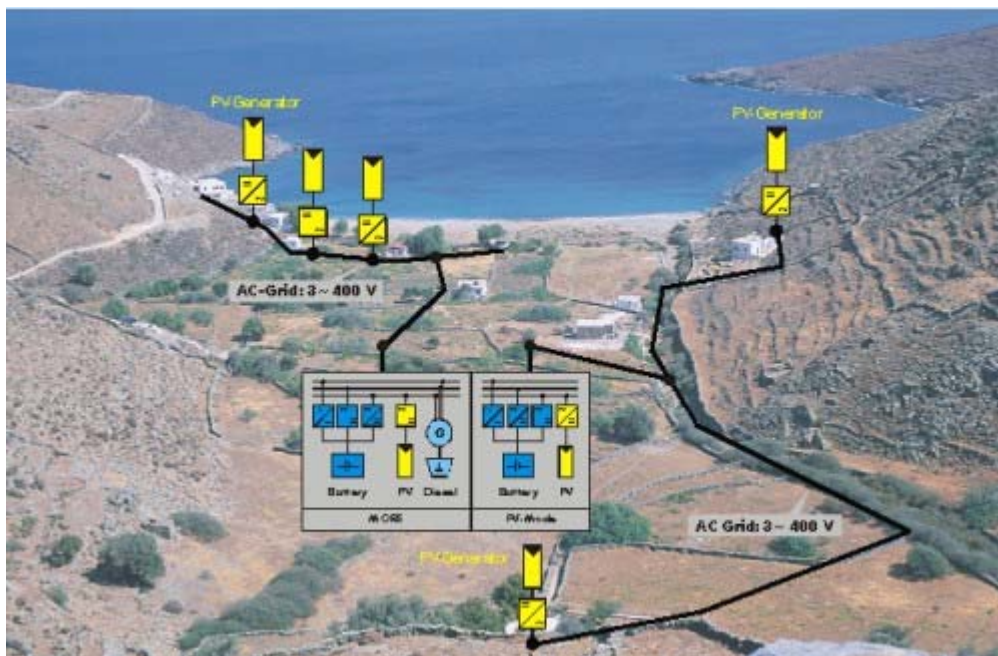
Στα πρώτα δύο κεφάλαια, εξετάσαμε μερικά θεωρητικά στοιχεία πάνω στα οποία βασίζεται κατά ένα μεγάλο βαθμό η παρούσα διπλωματική εργασία. Περιγράψαμε τη δομή ενός Μικροδικτύου και αναλύσαμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας ευφών πρακτόρων, καθώς και πώς μπορούν να βρουν εφαρμογή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλύσουμε μία από αυτές τις εφαρμογές, εξετάζοντας ένα πραγματικό πιλοτικό μικροδίκτυο που έχει κατασκευαστεί στην Κύθνο. Το μικροδίκτυο αυτό έχει στηθεί για ερευνητικούς σκοπούς, και χρησιμοποιείται κυρίως από το ΕΜΠ καθώς και το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.). Θα πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι τροφοδοτεί 12 σπίτια, στα οποία διαμένουν κάτοικοι της Κύθνου. Οπότε οποιαδήποτε δοκιμή επιχειρείται επηρεάζει τον τρόπο ζωής των κατοίκων. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα αναλύσουμε τον σχεδιασμό και κατασκευή ενός νέου ευφούς ελεγκτή φορτίου, ο οποίος θα εγκατασταθεί σε κάθε ένα από τα 12 σπίτια στην Κύθνο. Σκοπός μας είναι αφενός να αναβαθμίσουμε τις δυνατότητες ελέγχου που μας προσφέρουν οι έως αυτή τη στιγμή τοπικοί ελεγκτές. Αφετέρου, έχουμε σαν στόχο με βάση αυτόν τον νέο ελεγκτή, να υλοποιήσουμε στο μικροδίκτυο μία κοινωνία ευφών πρακτόρων. Το εγχείρημα αυτό θα αποτελέσει πιθανότατα την πρώτη πρακτική εφαρμογή πολυπρακτορικών συστημάτων σε πραγματικό μικροδίκτυο και για αυτό πρέπει να διασφαλίσουμε την απαραίτητη αξιοπιστία. Θα ξεκινήσουμε περιγράφοντας το μικροδίκτυο στην Κύθνο και στη συνέχεια θα εστιάσουμε στον ευφυή ελεγκτή φορτίου, στα τεχνικά χαρακτηριστικά του, στις δυνατότητες που προσφέρει αλλά και στους αλγορίθμους που υλοποιήσαμε.

#### **3.2. Η εγκατάσταση στην Κύθνο**

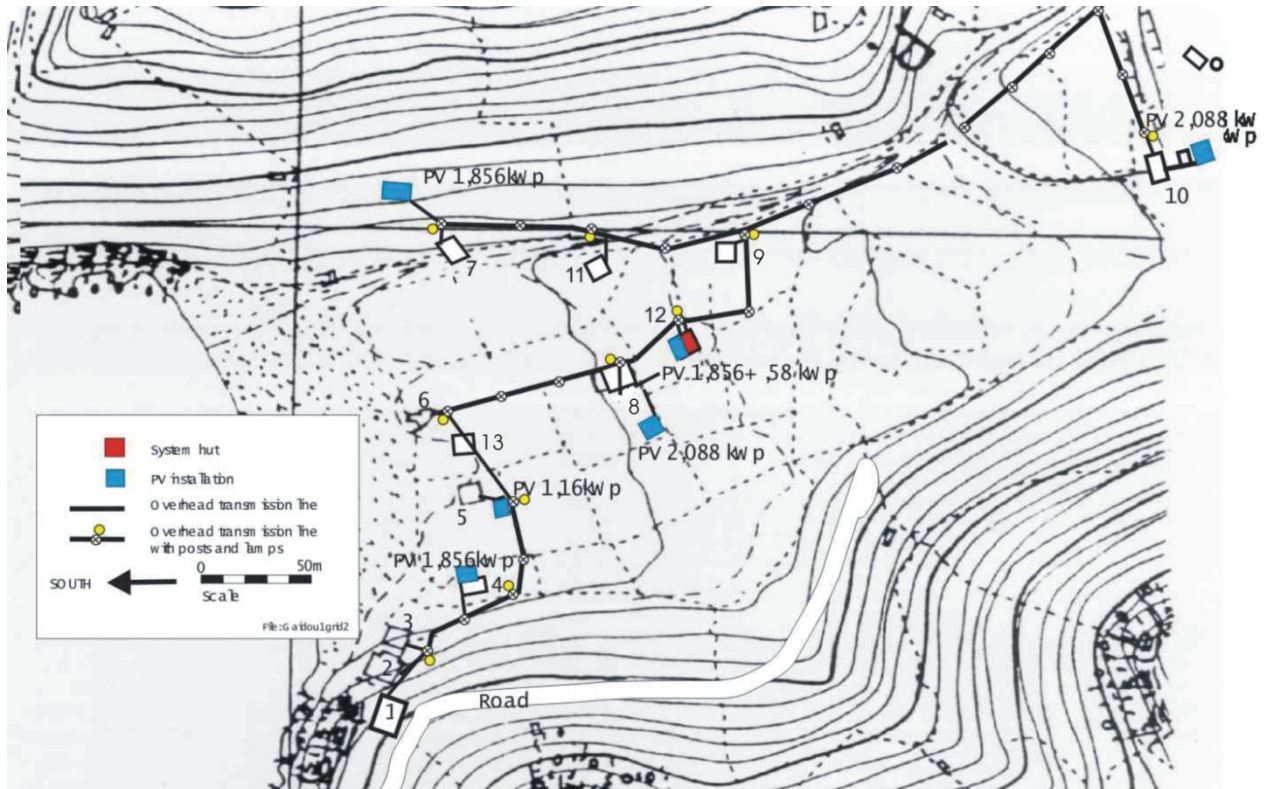
Το πιλοτικό μονοφασικό Μικροδίκτυο, στο οποίο αναφερθήκαμε, έχει εγκατασταθεί στη Γαϊδουρομάντρα, μία μικρή παραθαλάσσια πεδιάδα στην Κύθνο. Το μικροδίκτυο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, τάσης 230 V και αποτελείται από εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς κι ένα καλώδιο επικοινωνίας (RS 485) που διατρέχει το δίκτυο παράλληλα με τις ηλεκτρικές γραμμές. Το μικροδίκτυο ηλεκτροδοτεί 12 σπίτια. Το δίκτυο και οι προδιαγραφές ασφάλειας για τη διασύνδεση με τα σπίτια είναι σύμφωνες με τις προδιαγραφές της ΔΕΗ, η οποία

είναι και ο πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας στο υπόλοιπο νησί. Ο λόγος για τον οποίο επελέγη το μικροδίκτυο να είναι συμβατό με το δίκτυο της ΔΕΗ στο νησί συνίσταται στην πιθανότητα στο μέλλον το μικροδίκτυο να συνδεθεί με το υπόλοιπο δίκτυο. Σε κάθε σπίτι, το ρεύμα που παρέχεται περιορίζεται από μία ασφάλεια των 6 Α. Η όλη εγκατάσταση βρίσκεται σε απόσταση τεσσάρων χιλιομέτρων από την πλησιέστερο κόμβο παροχής μέσης τάσης του νησιού. Στο κέντρο της εγκατάστασης οικοδομήθηκε οίκημα συνολικής επιφάνειας 20 m<sup>2</sup> για να στεγάσει τις συστοιχίες των μπαταριών, τους αντιστροφείς για τις μπαταρίες, τη γεννήτρια diesel και τη δεξαμενή πετρελαίου της, το hardware για την επικοινωνία καθώς και τον υπόλοιπο εξοπλισμό από υπολογιστικά συστήματα για την εποπτεία του μικροδικτύου.

Στα Σχ.3.1 και Σχ.3.2 παρουσιάζεται το πιλοτικό μικροδίκτυο της Κύθνου (πραγματική φωτογραφία και τοπογραφικός χάρτης αντίστοιχα).



Σχήμα 3.1: Το πιλοτικό μικροδίκτυο στην Κύθνο



Σχήμα 3.2: Τοπογραφικός χάρτης της κοιλάδας της Γαϊδουρομάντρας, με επισημασμένες τις τοποθεσίες των ηλεκτροδοτούμενων σπιτιών, των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του οικήματος ελέγχου

Το δίκτυο που ηλεκτροδοτεί τους καταναλωτές τροφοδοτείται από τρεις αντιστροφείς μπαταριών Sunny-island συνδεδεμένους παράλληλα ώστε να σχηματίζουν ένα ισχυρό μονοφασικό δίκτυο σε διαμόρφωση master-slave (master-slave configuration). Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπουν τη λειτουργία άνω του ενός αντιστροφέων μόνο όταν απαιτείται παραπάνω ισχύς από τους καταναλωτές. Συγκεκριμένα, γίνεται δυνατή η αυτόνομη κατανομή φορτίου χωρίς την ανάγκη γρήγορων συστημάτων επικοινωνίας, εφόσον μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες στατισμού ενεργού ισχύος/συχνότητας από τα συστήματα ελέγχου των αντιστροφέων. Κάθε αντιστροφέας μπορεί να παρέχει στην έξοδό του μέγιστη ισχύ ίση με 3.6 kW. Οι αντιστροφείς στο σύστημα της Κύθνου έχουν την ικανότητα να λειτουργούν και σε συγχρονισμένη λειτουργία και με βάση τις καμπύλες στατισμού. Το σύστημα, στη λειτουργία frequency droop [λειτουργία με βάση την καμπύλη στατισμού ενεργού ισχύος/συχνότητας], επιτρέπει τη μεταφορά πληροφορίας στους ελεγκτές για την ένταξη των φορτίων, σε περίπτωση που η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι χαμηλή. Παράλληλα, σε αυτή λειτουργία, το σύστημα επιτρέπει τον περιορισμό της ισχύος εξόδου των αντιστροφέων των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όταν η συστοιχία μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένη, αυξάνοντας τη συχνότητα του δικτύου από τα 50 Hz στα 51,5 Hz. Οι αντιστροφείς Sunny Boy, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στα φωτοβολταϊκά έχουν τη δυνατότητα να

μετρούν τη συχνότητα του δικτύου, οπότε αναγνωρίζοντας την παραπάνω μεταβολή, περιορίζουν την ισχύ εξόδου τους.

Κάθε σπίτι, στο σημείο σύνδεσής του με το μικροδίκτυο, έχει ήδη εξοπλιστεί με έναν Κατανεμημένο Ευφυή Ελεγκτή Φορτίου (DILC), κατασκευασμένο από την εταιρεία Econnect Ltd. Αυτοί οι ελεγκτές λειτουργούν με βάση τη συχνότητα του δικτύου· έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να μετρούν τη συχνότητα του δικτύου και να αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν η συχνότητα πέσει κάτω από μία ορισμένη τιμή (49,14 Hz), καθώς ο αντιστροφέας Sunny Island – ο οποίος στην ουσία δημιουργεί το δίκτυο – αντιλαμβάνεται είτε ότι η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι σε χαμηλό επίπεδο είτε ότι υπάρχει υπερφόρτιση από την πλευρά των καταναλωτών. Σε μία τέτοια περίπτωση ο αντιστροφέας Sunny Island μιμείται τη συμπεριφορά μίας υπερφορτισμένης γεννήτριας, η οποία επιβραδύνεται κι έτσι μειώνεται και η συχνότητα του συστήματος. Όταν ο ελεγκτής φορτίου ανιχνεύσει τη μείωση της συχνότητας και αποσυνδεθεί από το δίκτυο, εισέρχεται σε μία περίοδο διακοπής (time-out period) πριν από την επανασύνδεση. Το χρονικό διάστημα αυτής της περιόδου τίθεται τυχαία σε μια τιμή μεταξύ 2 και 4 λεπτών, συμπεριλαμβάνοντας έναν τυχαίο παράγοντα. Αυτό επιτρέπει στα σπίτια να επανασυνδεθούν σταδιακά στο δίκτυο, και να αποφευχθεί η περίπτωση επανασύνδεσης όλων μαζί, οδηγώντας πάλι το δίκτυο σε υπερφόρτιση.

Το σύστημα των καταναλωτών αποτελείται συγκεκριμένα από:

- φωτοβολταϊκά ισχύος 10 kWp, τα οποία είναι διαμερισμένα σε μικρότερα υποσυστήματα,
- μια συστοιχία μπαταριών μέγιστης αποδιδόμενης ενέργειας 53 kWh και
- μία γεννήτρια diesel ονομαστικής ισχύος 5 kW

Ένα δεύτερο σύστημα φωτοβολταϊκών, ισχύος περίπου 2 kWp, έχει εγκατασταθεί στην οροφή του οικήματος και είναι συνδεδεμένο με έναν αντιστροφή Sunny Island και μία συστοιχία μπαταριών 32 kWh. Αυτό το δεύτερο σύστημα παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για την εμπορεία του μικροδικτύου καθώς και την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια για τα συστήματα επικοινωνίας.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ενσωματωμένα ως υπόστεγα στα σπίτια που περιλαμβάνει η εγκατάσταση. Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο ότι η εγκατάσταση του δικτύου και των συστημάτων που περιλαμβάνει πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια δύο Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων (PV-MODE και MORE).

Το παραπάνω δίκτυο χρησιμοποιείται γενικότερα για την εξέταση στρατηγικών κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου σε μη διασυνδεδεμένο σύστημα, πράγμα το οποίο αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα μικροδίκτυα. Θα χρησιμοποιηθεί ακόμα για την εξέταση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Για να επιτύχουμε αυτές τις λειτουργίες είναι απαραίτητο να επεκτείνουμε τις δυνατότητες λειτουργίας των αντιστροφέων (όπως αναφέρεται, είναι πιθανώς απαραίτητη η

αντικατάσταση τους). Επιπλέον, θεωρείται ιδιαίτερα ωφέλιμη για το μικροδίκτυο η ενσωμάτωση μιας ανεμογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος, ισχύος από 2 μέχρι 3 kW έτσι ώστε να ενισχυθεί η παραγωγή ενέργειας, να ελαχιστοποιηθεί η χρήση της γεννήτριας diesel, αλλά και να διευρύνουμε περαιτέρω το φάσμα διαφορετικών πηγών παροχής ενέργειας. Ακόμα δεν έχει εγκατασταθεί μονάδα ανεμογεννήτριας στο μικροδίκτυο, προβλέπεται όμως να γίνει μέσα στα επόμενα έτη. Ένα από τα αντικείμενα με τα οποία ασχολείται ως ένα βαθμό, η παρούσα διπλωματική εργασία και αφορά στο πιλοτικό μικροδίκτυο της Κύθνου περιλαμβάνει το νέο σύστημα εποπτείας, το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί. Αυτό θα δώσει τη δυνατότητα απομακρυσμένης επικοινωνίας μέσω κινητής τηλεφωνίας με το οίκημα ελέγχου, το οποίο θα ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας ενώ θα είναι ακόμα ικανό να μεταφέρει αρχεία και δεδομένα.

Σύμφωνα με τις νέες στρατηγικές ελέγχου που πρόκειται να εξεταστούν, έχει προταθεί να διατηρηθεί ο έλεγχος του φορτίου από τους ελεγκτές E-connect στο σημείο σύνδεσης του καταναλωτή με το μικροδίκτυο, ενώ παράλληλα να διαχωριστεί η ευέλικτη (flexible) λειτουργία των οικιακών συσκευών, οι οποίες θα εφοδιαστούν με μία συσκευή που όταν κρίνεται απαραίτητο θα τους αποκόπτει από το δίκτυο πριν φτάσουμε στο σημείο όπου είναι απαραίτητη η συνολική αποσύνδεση του σπιτιού από το δίκτυο. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της συγκεκριμένης στρατηγικής αποτελεί το κύριο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτός ο ευφυής ελεγκτής φορτίου, ο οποίος αναπτύσσεται από την ANKO A.E και το ΕΜΠ, και είναι βασισμένος συστήματα πολλαπλών πρακτόρων, θα δοκιμαστεί για πρώτη φορά στην πράξη – σε παγκόσμια κλίμακα – στο πιλοτικό μικροδίκτυο της Κύθνου.

Επιχειρώντας μια πιο αναλυτική περιγραφή των απαιτήσεων που θα πρέπει να καλύπτει η παραπάνω συσκευή (ευφυής ελεγκτής φορτίου) και το σύστημα που θα εγκατασταθεί γενικότερα, μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- ο ελεγκτής θα πρέπει να είναι ικανός να ελέγχει το σπίτι όχι εξ ολοκλήρου – θέτοντας ολόκληρη την οικιακή εγκατάσταση εντός κι εκτός λειτουργίας – αλλά ελέγχοντας μεμονωμένα φορτία που ανήκουν σε αυτό (π.χ. η αντλία νερού)
- θα εγκατασταθεί ένας κεντρικός προσωπικός υπολογιστής (Personal Computer – PC) στο οίκημα ελέγχου. Αυτό το PC θα παίζει τον ρόλο του MGCC, και συνεπώς ο συγκεκριμένος υπολογιστής θα πρέπει να μπορεί να αποστέλλει τις στρατηγικές που θα ακολουθηθούν κάθε χρονική στιγμή (setpoints) στους τοπικούς ελεγκτές. Επιπλέον θα πρέπει να είναι ικανός να συλλέγει τις μετρήσεις τάσεως, ρεύματος και συχνότητας που θα του στέλνουν οι τοπικοί ελεγκτές καθώς και οι αντιστροφείς. Τέλος, θα πρέπει να κοινοποιεί τα δεδομένα που συνέλεξε σε διαπιστευμένους απομακρυσμένους χρήστες, όπως για παράδειγμα το ΕΜΠ, στις εγκαταστάσεις του στην Αθήνα.

- Η παρέμβαση στην εσωτερική εγκατάσταση κάθε σπιτιού θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, ώστε να γίνει εύκολα αποδεκτή από τους ιδιοκτήτες των σπιτιών. Υπό αυτή την έννοια, ίσως ο πιο συμφέρων τρόπος είναι η εγκατάσταση του ευφυούς ελεγκτή έξω από το σπίτι, ο οποίος θα επικοινωνεί μέσω Power Line Communication (PLC) με ελεγχόμενους διακόπτες οι οποίοι θα έχουν εγκατασταθεί στα φορτία που επιθυμούμε να ελέγξουμε εντός του σπιτιού.

Ο τρόπος που υλοποιήθηκαν όλες οι παραπάνω απαιτήσεις καθώς και ο σχεδιασμός των αλγορίθμων που υλοποιούν τους πράκτορες περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν. Θεωρούμε όμως σκόπιμο να αναφερθούμε και στην υπολογιστική πλατφόρμα που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των πρακτόρων, καθώς και τις δυνατότητες που αυτή μας πρόσφερε. Η πλατφόρμα αυτή ονομάζεται JADE (Java Agent DEvelopment Framework). Προτρέπουμε λοιπόν τον αναγνώστη – αν επιθυμεί να έχει μια πληρέστερη εικόνα – να ανατρέξει στην παράγραφο XX του παρόντος κεφαλαίου, πριν συνεχίσει με την ανάγνωση των παραγράφων που αναφέρονται στους ευφυείς ελεγκτές φορτίου και των αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν.

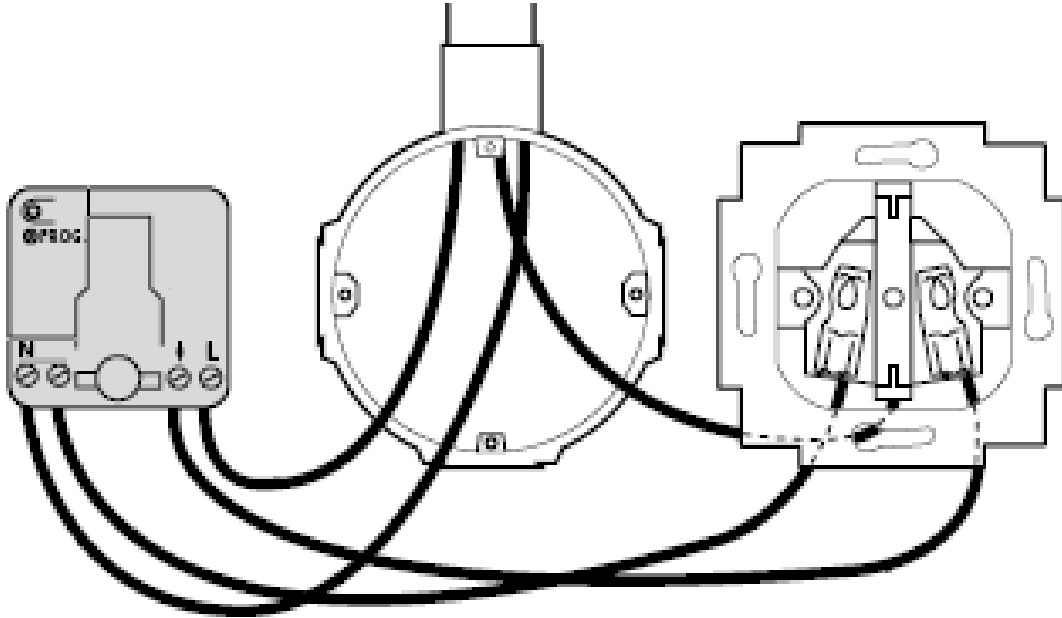
### **3.3. Ευφυής Ελεγκτής Φορτίου**

Προχωρώντας στην υλοποίηση όσων αναφέρουμε στην προηγούμενη παράγραφο, θα ξεκινήσουμε περιγράφοντας αναλυτικά το πρώτο συστατικό στοιχείο: τον ευφυή ελεγκτή φορτίου.

Η εταιρεία ANKO A.E. σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ανέπτυξε το hardware καθώς και το λογισμικό για την υλοποίηση ενός ευφυούς ελεγκτή φορτίου. Ο ευφυής ελεγκτής φορτίου (Intelligent Load Controller – ILC) είναι μία συσκευή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση και καταγραφή της κατάστασης μιας γραμμής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα μέτρησης της τάσης, της έντασης και της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος που τη διαρρέει. Επιπλέον, μπορεί να ελέγξει από απόσταση μέχρι 256 συσκευές PLC A10, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στην γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος.

Η συσκευή PLC A10 είναι στην ουσία ένας διακόπτης, ο οποίος ελεγχόμενα μεταβαίνει από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF και αντίστροφα. Ο διακόπτης αυτός παρεμβάλλεται μεταξύ της εξόδου του ευφυούς ελεγκτή φορτίου (ILC) και του φορτίου που επιθυμούμε να ελέγξουμε (βλ. Σχ.3.3 και 3.4). Το φορτίο προς έλεγχο μπορεί να είναι είτε απευθείας συνδεδεμένο πάνω στον διακόπτη PLC A10, ή αντίθετα η έξοδος του διακόπτη μπορεί να είναι συνδεδεμένη σε έναν ρευματοδότη (πρίζα). Έτσι όποια συσκευή συνδεθεί στον ρευματοδότη μπορεί να ελέγχεται μέσω του διακόπτη. Όσον αφορά στον τρόπο ελέγχου, αυτός καθίσταται εφικτός με τη βοήθεια του

πρωτοκόλλου επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος (Power Line Communication - PLC). Πιο συγκεκριμένα, ο PLC παράγει τα κατάλληλα σήματα, τα οποία υπερτίθενται στην κυματομορφή του ηλεκτρικού ρεύματος και μεταφέρει τις επιθυμητές εντολές στους διακόπτες PLC A10. Ανάλογα λοιπόν με την εντολή ο διακόπτης μπορεί να κλείνει ή να ανοίγει.



Σχήμα 3.3: Λεπτομέρειες σύνδεσης του διακόπτη PLC A10 στο οικιακό δίκτυο του σπιτιού



Σχήμα 3.4: Ο διακόπτης PLC A10 (φωτογραφία)

Γενικότερα, επιχειρώντας να δώσουμε λίγες επιπλέον πληροφορίες για το Power Line Communication, αναφέρουμε ότι οι PLC συσκευές οικιακού ελέγχου λειτουργούν εκπέμποντας

κυματομορφές συχνότητας μεταξύ 20 και 200 kHz μέσω της καλωδίωσης του οικιακού ρεύματος. Το κύμα είναι διαμορφωμένο σε ψηφιακά σήματα. Κάθε δέκτης του συστήματος – στη δική μας περίπτωση αυτοί είναι οι διακόπτες PLC A10 – έχει μια διεύθυνση και μπορεί να δεχτεί αποκλειστικές εντολές απ' τα σήματα που στέλνει ο πομπός και αποκωδικοποιεί ο δέκτης. Με αυτόν τον τρόπο, ο ευφυής ελεγκτής που υλοποιήσαμε σε συνεργασία με την ANKO A.E. έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει εντολές σε 256 διαφορετικούς διακόπτες φορτίου.

Προχωρώντας στην παρουσίαση του ευφυούς ελεγκτή, ο ILC υποστηρίζει επικοινωνία μέσω ασύρματου δικτύου (Wireless Fidelity – Wi-Fi), που του επιτρέπει να συνδέεται ασύρματα σε ένα τοπικό δίκτυο (Local Area Network – LAN). Η δυνατότητα αυτή εξαλείφει την ανάγκη για ύπαρξη υποδομής καλωδιώσεων και απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό την εγκατάσταση των ελεγκτών.

Όσον αφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά του ILC, ο πυρήνας του συστήματος είναι μία υπολογιστική μονάδα στην οποία έχει εγκατασταθεί το λειτουργικό σύστημα Windows CE 5.0. Η υπολογιστική μονάδα αποτελείται από τον ισχυρό επεξεργαστή Intel® Xscale™ PXA255 στα 400 MHz και διαθέτει 64 MB RAM και 32 MB μνήμη FLASH (η οποία στην ουσία αντικαθιστά τον σκληρό δίσκο). Συνεπώς θεωρείται ο ελεγκτής θεωρείται ικανός να ανταπεξέλθει σε απαιτητικές εφαρμογές.

Στο λειτουργικό σύστημα Windows CE μπορεί να εγκατασταθεί η Java Virtual Machine δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα να υλοποιήσουμε εφαρμογές με βάση το λογισμικό JADE-LEAP (βλ. παράγραφο 3.7). Η ANKO ανέπτυξε μία βιβλιοθήκη σε Java, η οποία επιτρέπει την πρόσβαση στον έλεγχο και την παρακολούθηση της ηλεκτρικής γραμμής καθώς και την καταγραφή των απαραίτητων μετρήσεων τάσης, ρεύματος και συχνότητας σε περίπτωση που το επιθυμούμε.

Στα Σχ. 3.5 και Σχ.3.6 παρουσιάζονται φωτογραφίες του ελεγκτή ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τις εργαστηριακές δοκιμές στο ΕΜΠ αλλά και στην ANKO A.E. Οι ελεγκτές που θα εγκατασταθούν στην Κύθνο θα έχουν διαφορετική θήκη, η οποία θα μπορεί να τους προστατεύει από ακραίες θερμοκρασίες αλλά και από την υγρασία ή τη βροχή. Όσον αφορά το κύκλωμα θα είναι πανομοιότυπο με αυτό που φαίνεται στο Σχ. 3.6 με μόνη τη διαφορά ότι μέσα στη συσκευή θα έχει εγκατασταθεί κι ένας μικροαυτόματος 16 A, για την προστασία του ελεγκτή.



Σχήμα 3.5: Ο ILC που χρησιμοποιήθηκε για τις εργαστηριακές δοκιμές. Διακρίνεται η κόκκινη ενδεικτική λυχνία καλής λειτουργίας, ο PLC διακόπτης καθώς και το καλώδιο δικτύου για σύνδεση με υπολογιστή



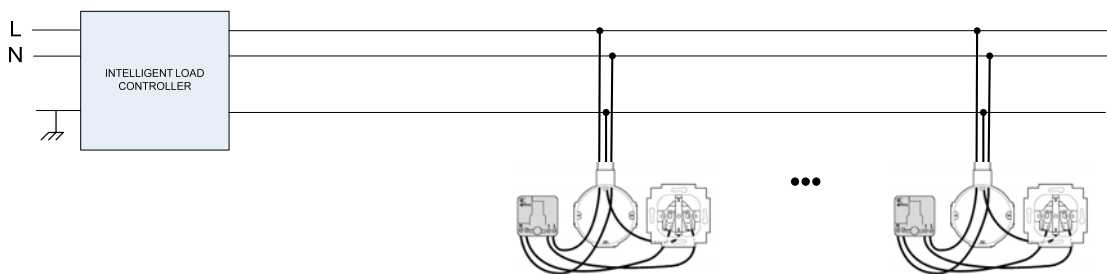
Σχήμα 3.6: Η ηλεκτρονική πλακέτα του ευφυούς ελεγκτή φορτίου. Από την κάτω μεριά της πλακέτας βρίσκεται ενσωματωμένος ο επεξεργαστής.

Κάθε μονάδα ILC αποτελείται από το κουτί του ελεγκτή, όπου περιέχει όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα, δύο διακόπτες PLC τύπου PLC A10 και μία εξωτερική κεραία για τη σύνδεση στο

ασύρματο δίκτυο. Μία τέτοια μονάδα θα εγκατασταθεί σε κάθε ένα από τα 12 σπίτια στον οικισμό Γαϊδουρομάντρα, και θα ελέγχουν κατά κύριο λόγο τη λειτουργία της αντλίας νερού που διαθέτει κάθε σπίτι. Ο δεύτερος διακόπτης πιθανώς να ελέγχει κάποια φορτία φωτισμού, στα οποία όμως θα παρεμβαίνει, δίνοντας εντολή να ανοιγοκλείνουν σε εξαιρετικά ακραίες περιπτώσεις. Το κουτί κάθε μονάδας περιλαμβάνει κι έναν μικροαυτόματο 16 A, για την προστασία των εσωτερικών κυκλωμάτων. Έχοντας υπόψη ότι σε κάθε σπίτι υπάρχει ασφάλεια των 6 A καθώς και οι συσκευές E-connect είναι επόμενο ότι ο μικροαυτόματος θα λειτουργήσει μόνο σε πολύ μεγάλες υπερεντάσεις, κι εφόσον οι υπόλοιπες προστασίες παρουσιάσουν βλάβη.

Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης στο δίκτυο, ο ελεγκτής παρεμβάλλεται μεταξύ της γραμμής που τροφοδοτεί κάθε καταναλωτή και του μετρητή. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη των συσκευών με φορά από το ηλεκτρικό δίκτυο προς τον καταναλωτή είναι: Γραμμή Παροχής Ρεύματος → Ευφυής Ελεγκτής Φορτίου → Μετρητής Ρεύματος → Πίνακας/Ασφάλειες Καταναλωτή.

Ένας τυπικός τρόπος σύνδεσης – χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι θέσεις του μετρητή και του πίνακα – του ILC παρουσιάζεται στο Σχ. 3.7. Όπως παρατηρούμε, ο ελεγκτής συνδέεται στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο. Στην έξοδο του συνδέονται παράλληλα από 1 μέχρι 256 διακόπτες PLC, οι οποίοι μπορούν να ελέγχουν την παροχή ρεύματος προς διάφορα φορτία. Στο Σχ. 3.7 τα φορτία παρουσιάζονται υπό τη μορφή εξόδου ρευματοδοτών (πριζών). Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο, ότι κάθε διακόπτης PLC που είναι συνδεδεμένος στην ίδια συσκευή ILC θα πρέπει να φέρει μία μοναδική διεύθυνση, ώστε να μπορεί να δεχτεί τις κατάλληλες εντολές.

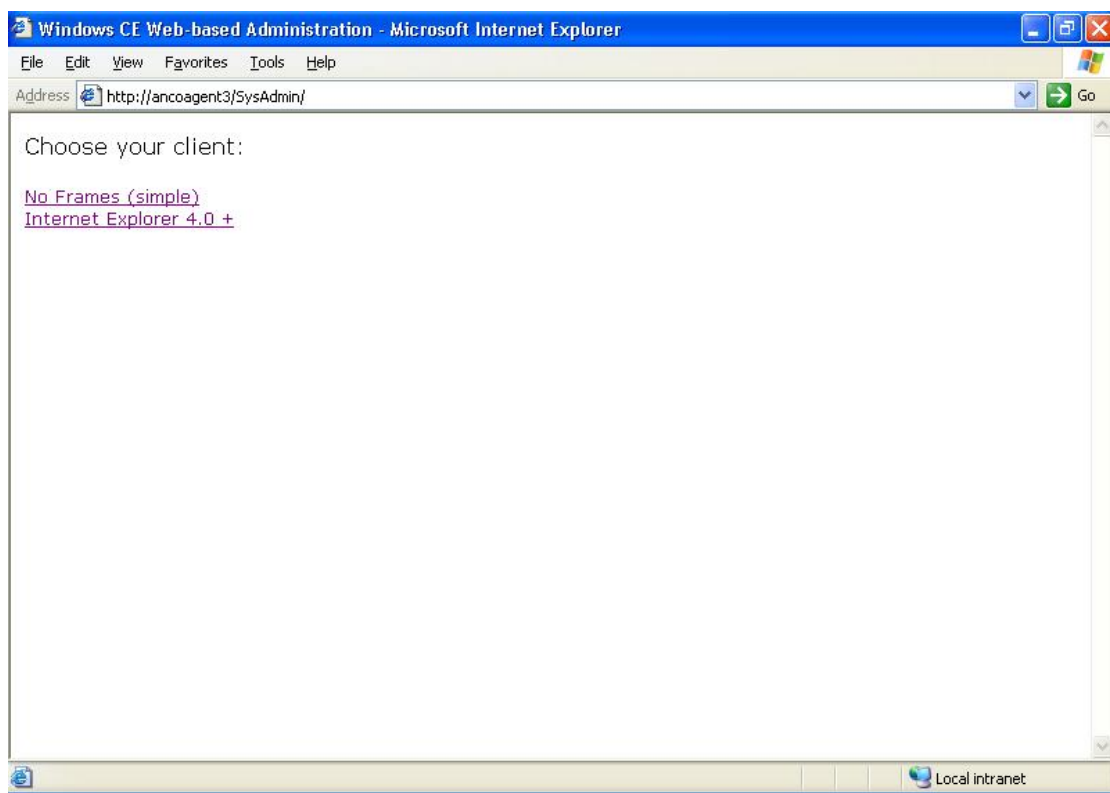


Σχήμα 3.7: Τυπική Εγκατάσταση μίας μονάδας ILC

Όσον αφορά τον τρόπο που μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στο λογισμικό του ελεγκτή, αυτό καθίσταται δυνατό μέσω ενός Web Server που έχει εγκατασταθεί πάνω στα Windows CE. Μέσα από τον browser MS Internet Explorer ενός υπολογιστή, μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στην υπολογιστική πλατφόρμα του ILC, μεταφέροντας κώδικα – αλγορίθμους που επιτελούν νέες λειτουργίες – καθώς επίσης να τροποποιήσουμε αρχεία, ενώ παράλληλα μας δίνεται η δυνατότητα

να επέμβουμε στις διάφορες ρυθμίσεις του ελεγκτή. Έτσι όπως σχεδιάζεται αυτή τη στιγμή ολόκληρο το δίκτυο των ελεγκτών, σκοπός μας είναι να δημιουργήσουμε ένα εικονικό ιδιωτικό δίκτυο (VPN – Virtual Private Network), στο οποίο, μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης από ελληνική εταιρεία κινητής τηλεφωνίας, θα μπορούμε να έχουμε απομακρυσμένη πρόσβαση από την Αθήνα ή από οποιοδήποτε άλλο σημείο. Ως εκ τούτου, δεν είναι απαραίτητη η μετάβασή μας στην Κύθνο για την παρατήρηση της καλής λειτουργίας του συστήματος και την επέμβασή μας στις διάφορες λειτουργίες του. Η όποια αλλαγή μπορεί να γίνει το ίδιο εύκολα και από τις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου στην Αθήνα.

Παρακάτω παρουσιάζουμε στιγμιότυπα από τις οθόνες οι οποίες εμφανίζονται στον browser μας δίνοντάς μας τη δυνατότητα να ελέγξουμε διαφορετικές λειτουργίες του ILC.

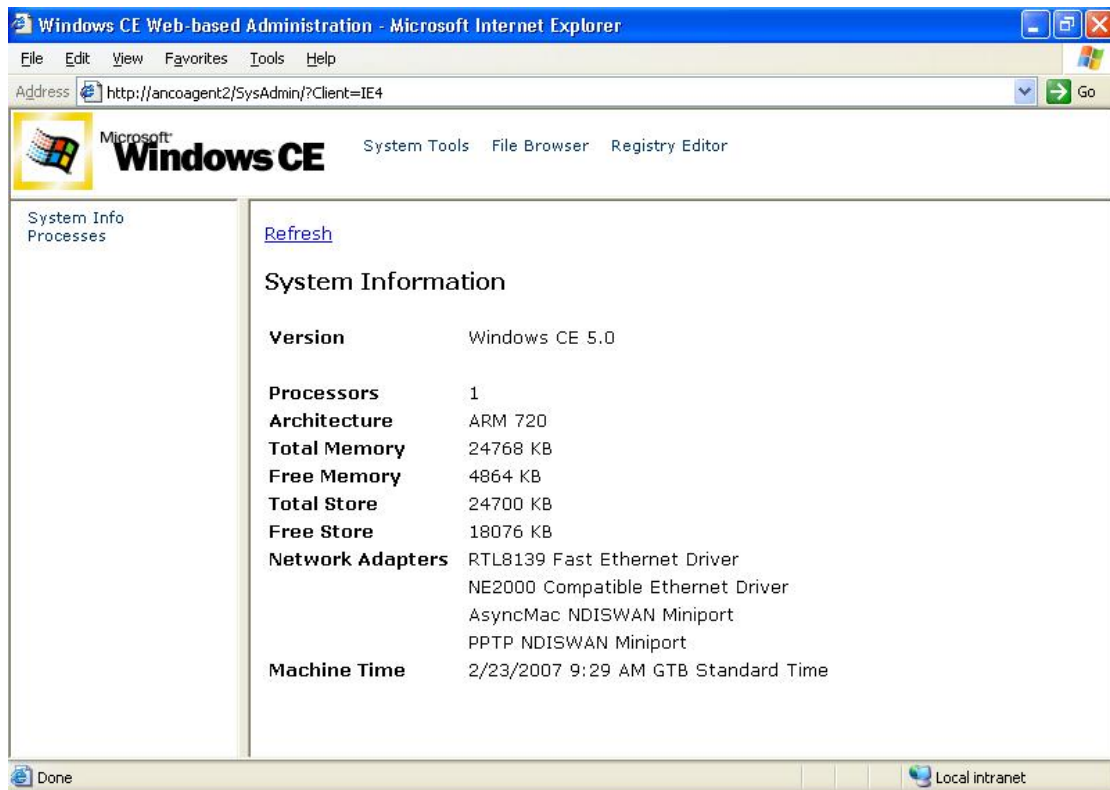


Σχήμα 3.8: Με την πληκτρολόγηση <http://AncoAgent3/SysAdmin> στη γραμμή διευθύνσεων έχουμε τη δυνατότητα πρόσβασης στον Web Server του ILC με ID=3

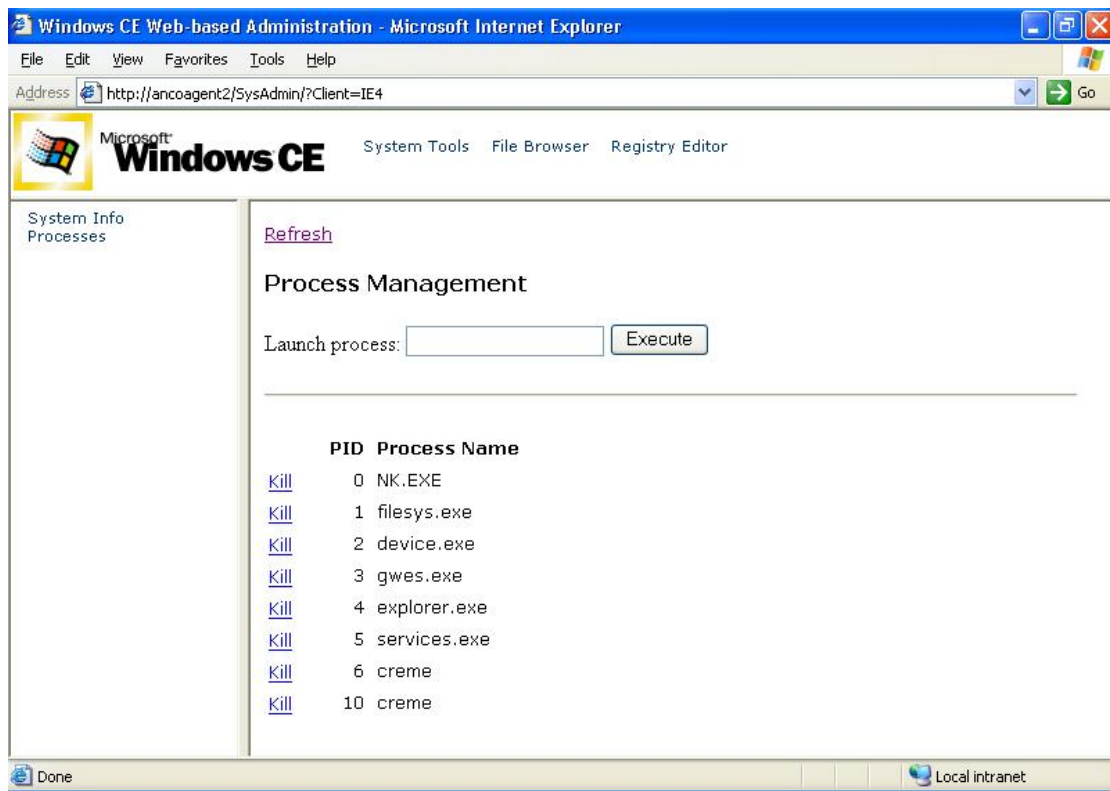
Μέσω του Web Server μας παρέχονται τρεις ομάδες εργαλείων:

- 1) System Tools
- 2) File Browser
- 3) Registry Editor

Τα System Tools, μέσω των συνδέσμων System Info και Processes, μας δίνουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του λογισμικού και του hardware του ILC και για τις διεργασίες που «τρέχουν» την παρούσα χρονική στιγμή αντίστοιχα.



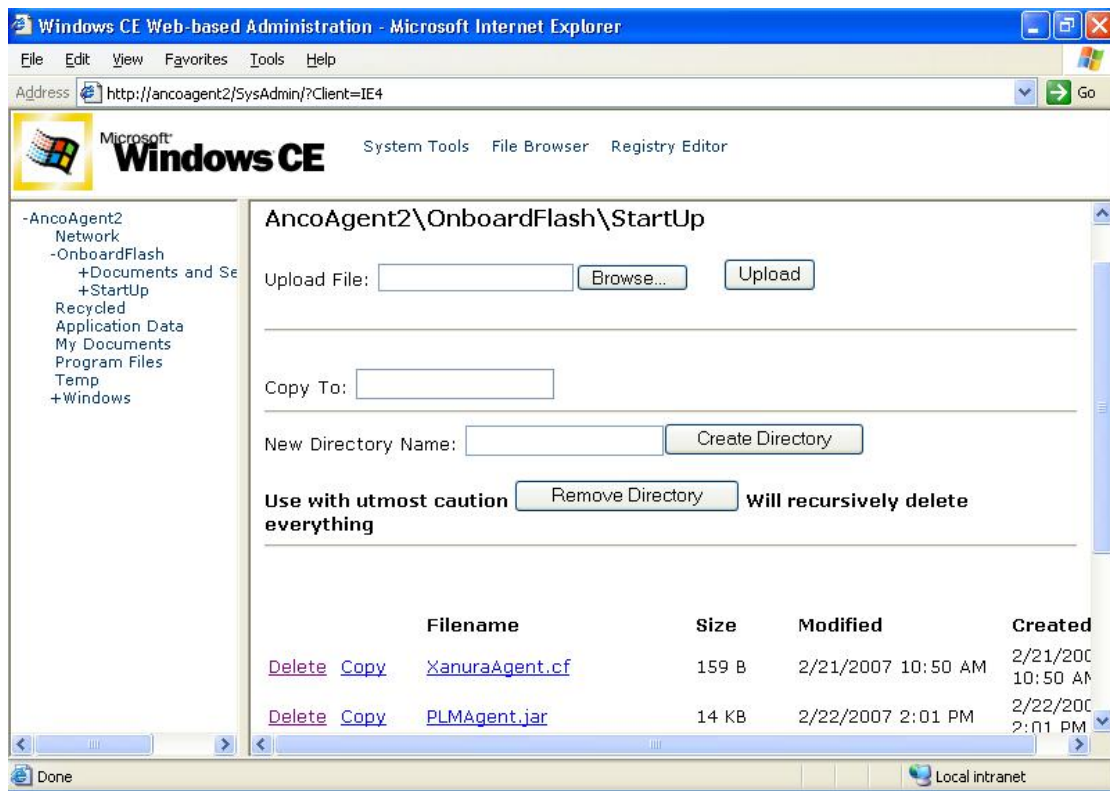
Σχήμα 3.9: System Tools/System Info



Σχήμα 3.10: System Tools/Processes

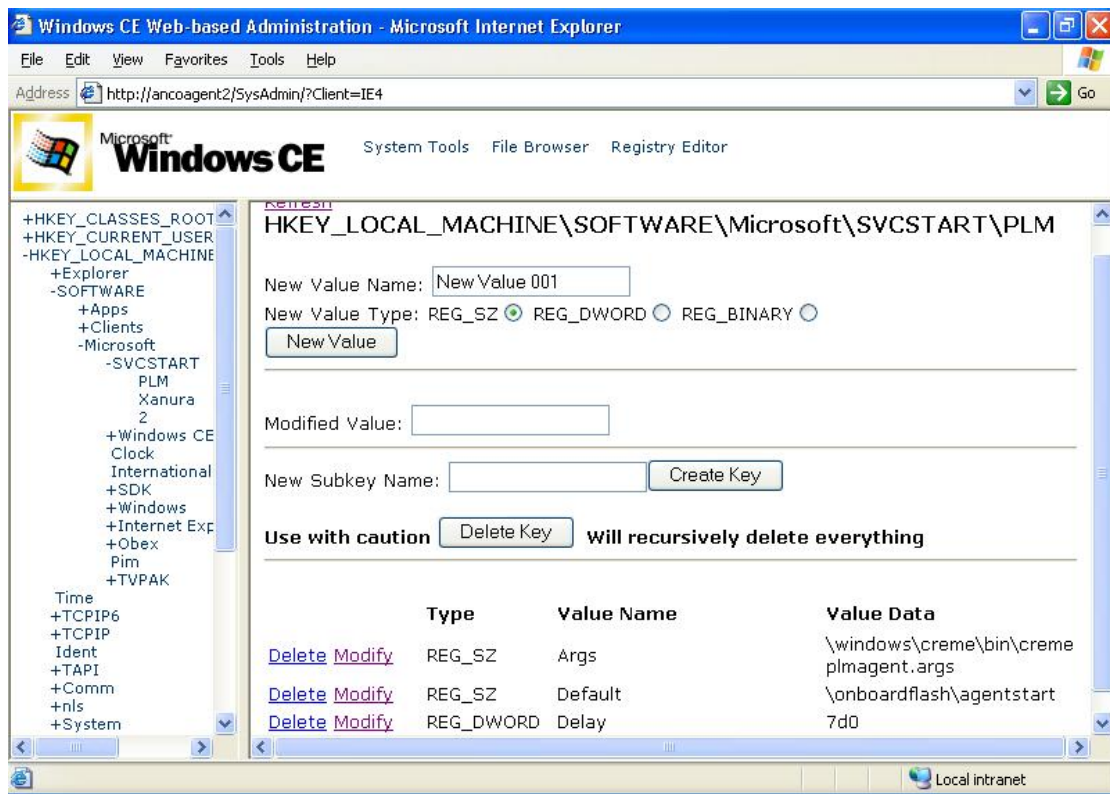
Στον σύνδεσμο Processes μπορούμε να τερματίσουμε κάποια διεργασία με «κλικ» στον σύνδεσμο “Kill” αλλά και να εκκινήσουμε όποια διεργασία εμείς επιθυμούμε πληκτρολογώντας την κατάλληλη εντολή στο πλαίσιο κειμένου “Launch Process”. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι έχουμε αποθηκεύσει στη μνήμη Flash ή RAM του ελεγκτή τα απαραίτητα αρχεία κώδικα.

Στον σύνδεσμο File Browser μπορούμε να έχουμε πρόσβαση σε όλο το σύστημα αρχείων του ελεγκτή. Μέσω αυτού του συνδέσμου, μπορούμε να αποθηκεύσουμε αρχεία στην μνήμη του ελεγκτή, είτε αυτά είναι εκτελέσιμα αρχεία κώδικα είτε άλλου είδους. Ακόμα, όποια πιθανή έξοδος κάποιου προγράμματος, που προορίζεται για να εμφανιστεί στην οθόνη του υπολογιστή που τρέχει το πρόγραμμα, αποθηκεύεται αντ’αυτού σε αρχείο το οποίο είναι προσβάσιμο μέσω του File Browser.



Σχήμα 3.11: File Browser

Ο σύνδεσμος Registry Editor δίνει πρόσβαση στο registry (μητρώο) του συστήματος. Το registry είναι χαρακτηριστικό κάθε λειτουργικού συστήματος που βασίζεται στην πλατφόρμα Windows. Τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα σε αυτόν τον σύνδεσμο είναι απολύτως απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, οπότε κάθε τροποποίηση μεταβλητής πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή.



Σχήμα 3.12: Registry Editor

### 3.4. Λειτουργίες του Ευφυούς Ελεγκτή Φορτίου

Το λογισμικό του ευφυούς ελεγκτή φορτίου μας παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες:

- Μέτρηση Συχνότητας
- Μέτρηση RMS τάσης
- Μέτρηση RMS ρεύματος
- Υπόταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του
- Υπέρταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του
- Υπερένταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του

#### 3.4.1. Συχνότητα

Ο ILC μπορεί να μετρήσει τη στιγμιαία συχνότητα της τάσης ανά διαστήματα που ορίζουμε εμείς όπως επιθυμούμε. Η τιμή που επιστρέφεται είναι σε Hz. Η μέτρηση πραγματοποιείται σε χρόνο 2,2 μς.

### 3.4.2. RMS Τάσης

Ο ILC μπορεί να μετρήσει την RMS τιμή της τάσης ανά διαστήματα που ορίζουμε εμείς όπως επιθυμούμε. Η τιμή που επιστρέφεται είναι σε Volts.

Η RMS τιμή της τάσης υπολογίζεται ύστερα από δειγματοληψία στη γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος με συχνότητα 3.500 δείγματα/δευτερόλεπτο. Ο υπολογισμός της τελικής τιμής προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N V^2(i)}, \quad \text{όπου } N \text{ ο αριθμός των δειγμάτων για τα οποία έγινε μέτρηση της τάσης}$$

Για να μειώσουμε την επίδραση του θορύβου, το σημείο όπου αρχίζει η δειγματοληψία συγχρονίζεται με ένα σημείο μηδενισμού της κυματομορφής της τάσης. Παράλληλα, το λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε εμείς τον αριθμό των δειγμάτων από τα οποία θα υπολογιστεί η RMS τιμή. Οι δυνατές τιμές που μπορούμε να ορίσουμε είναι από 1 μέχρι 100 δείγματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των φορών που η κυματομορφή της τάσης τέμνει τον οριζόντιο άξονα.

### 3.4.3. RMS Ρεύματος

Ο ILC μπορεί να μετρήσει την RMS τιμή του ρεύματος ανά διαστήματα που ορίζουμε εμείς όπως επιθυμούμε. Η τιμή που επιστρέφεται είναι σε Ampere.

Η RMS τιμή του ρεύματος υπολογίζεται ύστερα από δειγματοληψία στη γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος με συχνότητα 3.500 δείγματα/δευτερόλεπτο. Ο υπολογισμός της τελικής τιμής, όπως και κατά τη μέτρηση της τάσης, προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I^2(i)}, \quad \text{όπου } N \text{ ο αριθμός των δειγμάτων για τα οποία έγινε μέτρηση του ρεύματος}$$

Για να μειώσουμε την επίδραση του θορύβου, το σημείο όπου αρχίζει η δειγματοληψία συγχρονίζεται με ένα σημείο μηδενισμού της κυματομορφής του ρεύματος. Παράλληλα, το λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε εμείς τον αριθμό των δειγμάτων από τα οποία θα

υπολογιστεί η RMS τιμή. Οι δυνατές τιμές που μπορούμε να ορίσουμε είναι από 1 μέχρι 100 δείγματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των φορών που η κυματομορφή της ρεύματος τέμνει τον οριζόντιο άξονα.

#### 3.4.4. Υπόταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του

Το λογισμικό του Ευφυούς Ελεγκτή Φορτίου μας δίνει τη δυνατότητα να αναγνωρίζουμε περιπτώσεις υπότασης, τις οποίες τις ανακοινώνει υπό τη μορφή μηνύματος στον MGCC – στην περίπτωση της υλοποίησης στην Κύθνο. Η υπόταση (Voltage Sag) έχει οριστεί μέσα από το λογισμικό σαν την κατάσταση όπου η απόλυτη τιμή της τάσης της γραμμής πέφτει κάτω από ένα όριο που έχουμε θέσει για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων.

Εφόσον έχουμε ενεργοποιήσει τη λειτουργία ανίχνευσης συμβάντων υπότασης, τότε θα πρέπει να ορίσουμε τις εξής παραμέτρους:

- *Vnom*: Η ονομαστική τιμή της τάσης στην οποία λειτουργεί το δίκτυο
- *Voltage Reduction*: Ορίζεται ως ο συντελεστής μείωσης της τιμής τάσης, κάτω από την οποία θεωρείται ότι έχουμε υπόταση. Επιτρεπτές τιμές είναι από 0 μέχρι 1. Η προκαθορισμένη τιμή από το λογισμικό είναι 0.9, το οποίο σημαίνει ότι εφόσον η RMS τιμή της τάσης γίνει μικρότερη από  $0.9 \cdot V_{nom}$ , το λογισμικό θα θεωρήσει ότι έχουμε υπόταση και θα ανακοινώσει το συμβάν (Sag Event Announcement)
- *SagCycle*: Καθορίζει τον αριθμό των συνεχόμενων κύκλων (1 κύκλος = 1 περίοδος της τάσης) για τους οποίους η τιμή της τάσης είναι μικρότερη από π.χ το 90% της *Vnom* ( $=0.9 \cdot V_{nom}$ ).

Το λογισμικό ανακοινώνει στον MGCC τη χρονική στιγμή που άρχισε το συμβάν και τη χρονική στιγμή που τερματίστηκε, στέλνοντας τα κατάλληλα μηνύματα. Όταν ένα Sag Event παύει να υφίσταται, τα παρακάτω στοιχεία αποστέλλονται στον MGCC:

- *SagDuration*: Η διάρκεια του Sag Event σε ms.
- *SagDepth*: Καθορίζει τη διαφορά μεταξύ της μικρότερης RMS τιμής της τάσης που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια της υπότασης σε σχέση με την ονομαστική  $V_{RMS}$ .

#### 3.4.5. Υπέρταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του

Το λογισμικό του Ευφυούς Ελεγκτή Φορτίου μας δίνει τη δυνατότητα να αναγνωρίζουμε περιπτώσεις υπέρτασης, τις οποίες τις ανακοινώνει υπό τη μορφή μηνύματος στον MGCC – στην περίπτωση της υλοποίησης στην Κύθνο. Η υπέρταση (Overvoltage) έχει οριστεί μέσα από το

λογισμικό σαν την κατάσταση όπου η απόλυτη τιμή της τάσης της γραμμής υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή που έχουμε ορίσει.

Εφόσον έχουμε ενεργοποιήσει τη λειτουργία ανίχνευσης συμβάντων υπέρτασης, τότε θα πρέπει να ορίσουμε τις εξής παραμέτρους:

- *Vpeak\_level*: Καθορίζει το κατώφλι, άνω του οποίου το λογισμικό θα θεωρήσει ότι έχουμε υπέρταση. Σημειώνουμε εδώ ότι το κατώφλι αυτό αναφέρεται στο πλάτος της τάσης και όχι στην RMS τιμή της.

Το λογισμικό ανακοινώνει στον MGCC τη χρονική στιγμή που άρχισε το συμβάν και τη χρονική στιγμή που τερματίστηκε, στέλνοντας τα κατάλληλα μηνύματα. Όταν ένα Overvoltage Event παύει να υφίσταται, τα παρακάτω στοιχεία αποστέλλονται στον MGCC:

- *OvervoltageDuration*: Η διάρκεια του Overvoltage Event σε ms.
- *Voltage\_Peak*: Καθορίζει τη μέγιστη απόλυτη τιμή της τάσης που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του Overvoltage Event. (σημειώνουμε και πάλι ότι η τιμή αυτή αναφέρεται στο πλάτος της τάσης και όχι στην RMS τιμή)

### **3.4.6. Υπερένταση: Ανίχνευση Συμβάντος και Ανακοίνωσή του**

Το λογισμικό του Ευφυούς Ελεγκτή Φορτίου μας δίνει τη δυνατότητα να αναγνωρίζουμε περιπτώσεις υπερέντασης, τις οποίες τις ανακοινώνει υπό τη μορφή μηνύματος στον MGCC – στην περίπτωση της υλοποίησης στην Κύθνο. Η υπερένταση (Overcurrent) έχει οριστεί μέσα από το λογισμικό σαν την κατάσταση όπου η απόλυτη τιμή του ρεύματος γραμμής υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή που έχουμε ορίσει.

Εφόσον έχουμε ενεργοποιήσει τη λειτουργία ανίχνευσης συμβάντων υπερέντασης, τότε θα πρέπει να ορίσουμε τις εξής παραμέτρους:

- *Ipeak\_level*: Καθορίζει το κατώφλι, άνω του οποίου το λογισμικό θα θεωρήσει ότι έχουμε υπερένταση ρεύματος. Σημειώνουμε εδώ ότι το κατώφλι αυτό αναφέρεται στο πλάτος της έντασης του ρεύματος και όχι στην RMS τιμή του.

Το λογισμικό ανακοινώνει στον MGCC τη χρονική στιγμή που άρχισε το συμβάν και τη χρονική στιγμή που τερματίστηκε, στέλνοντας τα κατάλληλα μηνύματα. Όταν ένα Overcurrent Event παύει να υφίσταται, τα παρακάτω στοιχεία αποστέλλονται στον MGCC:

- *OvercurrentDuration*: Η διάρκεια του Overcurrent Event σε ms.

- *Current\_Peak*: Καθορίζει τη μέγιστη απόλυτη τιμή του ρεύματος που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του Overcurrent Event. (σημειώνουμε και πάλι ότι η τιμή αυτή αναφέρεται στο πλάτος της ρεύματος και όχι στην RMS τιμή)

### **3.5. Αλγόριθμοι για τον Έλεγχο των ILC και του MGCC**

Υλοποιήθηκε κατά βάση ένα σύνολο από αλγορίθμους οι οποίοι είχαν ως σκοπό τον έλεγχο των Ευφυών Ελεγκτών Φορτίου και τον συντονισμό τους από τον Microgrid Central Controller (MGCC). Τα προγράμματα υλοποιήθηκαν σε γλώσσα Java, ενώ βασίστηκαν πάνω στην πλατφόρμα JADE. Το JADE (Java Agent DEvelopment Framework)[19-20] είναι μία πλατφόρμα λογισμικού πλήρως υλοποιημένη στην γλώσσα JAVA. Απλοποιεί την ανάπτυξη πολυπρακτορικών συστημάτων (MAS) μέσω μιας σειράς βιβλιοθηκών οι οποίες είναι πλήρως συμβατές με τις προδιαγραφές της FIPA όπως επίσης και με τα εργαλεία που παρέχει για την ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση (debugging) του λογισμικού. Η αρχιτεκτονική του JADE επιτρέπει την λειτουργία του συστήματος ταυτόχρονα σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα αρκεί αυτά να υποστηρίζουν την γλώσσα JAVA. Περισσότερα στοιχεία για το JADE και τους τρόπους με τους οποίους το χρησιμοποιήσαμε αναφέρουμε στην παράγραφο 3.7, που ακολουθεί.

Το σύνολο των αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προορίζονται για την εφαρμογή του πρώτου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με συστήματα πολλαπλών πρακτόρων στην Κύθνο. Ως εκ τούτου, κύριος σκοπός μας ήταν η αξιοπιστία της υλοποίησης και λιγότερο η ικανότητα να επιτελεί πλήθος διαφορετικών λειτουργιών. Έχοντας ακόμα υπόψη ότι η εφαρμογή δε γίνεται σε εργαστήριο, αλλά σε πραγματικές συνθήκες επηρεάζοντας την ποιότητα και τον τρόπο ζωής ενός μέρους του πληθυσμού της Κύθνου, θα έπρεπε να μεριμνήσουμε για όλα εκείνα τα μέτρα που θα αποτρέψουν δυσάρεστα ενδεχόμενα.

#### **3.5.1. Αλγόριθμος για τον Ευφυή Ελεγκτή Φορτίου (ILC)**

Σε πρώτη φάση υλοποιήθηκαν δύο κύρια προγράμματα που βασίστηκαν ως ένα βαθμό πάνω στην εργασία που είχε γίνει από πλευράς ανάπτυξης λογισμικού του Δρ. Άρη Δημέα [1]. Το πρώτο αφορά την ανάπτυξη ενός πράκτορα, ο οποίος προορίζεται για τους Ευφυείς Ελεγκτές Φορτίου (ILC). Σχεδόν όμοια αντίγραφα του ίδιου κώδικα θα εκτελούνται σε κάθε ILC. Σημειώνουμε ότι τα αντίγραφα θα είναι σχεδόν όμοια, διότι είναι αναγκαίο να τονιστεί η διαφορά που θα έχουν όσον αφορά τις διευθύνσεις τους. Κάθε πράκτορας σε κάθε ILC θα επιτελεί ακριβώς τις ίδιες λειτουργίες σε σχέση με τους πράκτορες στα υπόλοιπα ILC, θα φέρει όμως μοναδική διεύθυνση, έτσι ώστε να μπορεί να εντοπίζεται από τον MGCC και να δέχεται εντολές που αφορούν μόνον εκείνον. Οι

λειτουργίες, τις οποίες έχουμε ορίσει να επιτελούν οι πράκτορες που είναι εγκατεστημένοι στα ILCs αφορούν τη μέτρηση της συχνότητας και του μέτρου της τάσης καθώς και της μέτρησης του ρεύματος. Σύμφωνα με τις δυνατότητες του ILC, οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι θα μπορούσαμε με τον κώδικά μας να επιτελέσουμε επιπλέον λειτουργίες. Πράγματι, σε εργαστηριακό επίπεδο δοκιμάσαμε με επιτυχία την ανίχνευση συμβάντων υπέρτασης, υπότασης και υπερέντασης. Ο ελεγκτής ανταποκρίνεται γρήγορα και σύμφωνα με τις εντολές που του έχουν δοθεί σε όλες τις διακυμάνσεις τάσης και ρεύματος. Αναφέρει στο πρόγραμμά μας την εκκίνηση ενός συμβάντος π.χ. υπερέντασης, τη στιγμή που αυτό λαμβάνει χώρα, στέλνοντας το κατάλληλο μήνυμα. Όταν πια το συμβάν πάψει να υφίσταται, αποστέλλεται νέο μήνυμα στο πρόγραμμά μας, επισημαίνοντας τη λήξη του συμβάντος, τη διάρκειά του καθώς και τη μέγιστη τιμή ρεύματος – αν πρόκειται για συμβάν υπερέντασης – που μετρήθηκε. Με το λογισμικό που έχει κατασκευαστεί έχουμε τη δυνατότητα να επεξεργαζόμαστε τα στοιχεία που μας παρέχονται από την ανίχνευση συμβάντων. Έτσι, το πρόγραμμά μας δε δέχεται απλώς ένα μήνυμα που – αν το επιλέξουμε – το εμφανίζει στην οθόνη. Αντιθέτως έχει την ικανότητα να «κατανοήσει» τα μεγέθη τάσεως, ρεύματος και χρόνου που του αποστέλλονται. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, αν αναλογιστούμε τις δυνατότητες που μας προσφέρει. Ο προγραμματιστής μπορεί με αυτόν τον τρόπο να συντάξει κατάλληλες εντολές, ώστε ο πράκτορας του ILC να αναλαμβάνει συγκεκριμένες πρωτοβουλίες, όταν για παράδειγμα μετρηθεί τάση ίση με μία συγκεκριμένη τιμή για κάποιο διάστημα. Ένα απλό παράδειγμα είναι το εξής: σε περίπτωση που σημάνει συμβάν υπερέντασης που διαρκέσει για ~1-2s και φτάσει σε τιμή που ξεπερνάει και ~6 φορές την ονομαστική του ρεύματος, τότε με το κατάλληλο if-clause μέσα στον κώδικα, ο πράκτορας μπορεί να αναγνωρίσει ότι είναι πιθανό να εκκινείται ένας κινητήρας. Υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα, τα οποία δείχνουν ότι το σύστημά μας έχει δυνατότητες για να φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα νοημοσύνης. Παρόλα αυτά, τέτοιες λειτουργίες εισάγουν σημαντική πολυπλοκότητα με αποτέλεσμα να μειώνεται η αξιοπιστία. Για αυτό το λόγο στο σύστημα της Κύθνου αποφασίσαμε να εφαρμόσουμε απλές λειτουργίες, αποσκοπώντας στην επιτυχία αυτής της πρώτης εφαρμογής.

Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε και εγκαταστάθηκε σε κάθε ILC επιτελεί συνοπτικά τις παρακάτω λειτουργίες:

- Εγγράφεται στην Υπηρεσία Χρυσού Οδηγού (DF Agent – βλ. παρ. 3.7)
- Στέλνει εντολές για μέτρηση ρεύματος, τάσης και συχνότητας
- Ανατρέχει στον «Χρυσό Οδηγό» για να βρει τους agents που επιτελούν λειτουργία MGCC (στην περίπτωση της Κύθνου οι πράκτορες των ILC θα βρουν μόνον έναν τέτοιο agent)
- Εφόσον πάρει τις μετρήσεις, τις στέλνει σε μήνυμα υπό τη μορφή συμβολοακολουθίας (string) στον MGCC
- Υπακούει σε εντολές που πιθανόν δέχεται από τον MGCC

Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο, ότι η υπηρεσία του «Χρυσού Οδηγού», όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.7 αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό της πλατφόρμας JADE. Με βάση τη λειτουργία αυτή οι agents δεν είναι υποχρεωμένοι να γνωρίζουν εκ των προτέρων ποιος είναι ο πράκτορας/πράκτορες που επιτελούν μια συγκεκριμένη εργασία. Αντ' αυτού μπορούν απλώς να ανατρέξουν στην υπηρεσία του «Χρυσού Οδηγού» (η οποία υλοποιείται από τον DF Agent) υποβάλλοντας το κατάλληλο ερώτημα κι εκείνη θα τους παρέχει όλους εκείνους τους πράκτορες που επιτελούν τη συγκεκριμένη λειτουργία. Για να γίνει πιο κατανοητό ας αναφέρουμε εν συντομία το παράδειγμα που ακολουθεί:

Θεωρούμε πρώτα από όλα εξ αρχής ότι κάθε agent που δημιουργείται εγγράφεται στην υπηρεσία του «Χρυσού Οδηγού». Έτσι, ο DF Agent, ο οποίος έχει εκκινήσει μαζί με την πλατφόρμα JADE, έχει κάθε χρονική στιγμή σε μία λίστα όλους τους agents που είναι ενεργοί, καθώς επίσης και ποια λειτουργία επιτελούν. Όταν λοιπόν θέλει ένας πράκτορας να στείλει ένα μήνυμα σε όλους τους agents που επιτελούν τη λειτουργία MGCC (επί της ουσίας οι πράκτορες αυτοί αντιπροσωπεύουν εικονικά όλες τις υπηρεσίες που εκτελεί ο Microgrid Central Controller), στέλνει στην υπηρεσία «Χρυσού Οδηγού» το ερώτημα-εντολή: «Στείλε μου τα ονόματα-διευθύνσεις όλων των πρακτόρων που επιτελούν λειτουργία MGCC». Ο πράκτορας αυτός, αφού λάβει την απάντηση από τον DF agent, αποθηκεύει προσωρινά τα ονόματα-διευθύνσεις, και στη συνέχεια τα τοποθετεί στη θέση του Παραλήπτη στο μήνυμα που θέλει να στείλει. Έτσι, χωρίς να έχει προγραμματιστεί εκ των προτέρων, ο πράκτορας αποστέλλει το μήνυμα που πρέπει σε όλους τους παραλήπτες που τους αφορά. Επιπλέον, πριν ένας πράκτορας τερματίσει τη λειτουργία του, στέλνει εντολή για διαγραφή από την Υπηρεσία του «Χρυσού Οδηγού». Με αυτόν τον τρόπο δε θα είναι πια ανιχνεύσιμος από άλλους πράκτορες. Επισημαίνουμε παρόλα αυτά, πως ακόμα και αν δε γίνει η διαγραφή κανονικά, η πλατφόρμα JADE εποπτεύει συνεχώς τους πράκτορες, οπότε όταν κάποιος πράκτορας τεθεί εκτός λειτουργίας («σκοτωθεί» - kill agent), τον διαγράφει από μόνη της από τον «Χρυσό Οδηγό».

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η παραπάνω λειτουργία που προσφέρει το JADE γίνεται ιδιαίτερα σημαντική όταν αναφερόμαστε σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Agents μπορούν να δημιουργούνται και να σκοτώνονται συνεχώς, εφόσον για παράδειγμα, νέες υπηρεσίες προσφέρονται στο δίκτυο (μονάδες που σε συγκεκριμένα διαστήματα αποφασίζουν να προσφέρουν ancillary services), νέες μονάδες παραγωγής ή νέα φορτία εισέρχονται στο δίκτυο ενώ άλλα αποσυνδέονται από αυτό. Συνεπώς, ο προγραμματιστής δεν μπορεί να προβλέψει εκ των προτέρων ποιοι πράκτορες θα βρίσκονται κάθε χρονική στιγμή εν λειτουργία, για να αποστείλει σε αυτούς τα ερωτήματα ή τα μηνύματα που θέλει. Με την υπηρεσία του «Χρυσού Οδηγού», όπως έγινε κατανοητό από τα παραπάνω, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο.

### 3.5.2. Αλγόριθμος για τον Microgrid Central Controller (MGCC)

Κύριος σκοπός του αλγορίθμου του Microgrid Central Controller ήταν η υλοποίηση ενός πράκτορα που θα έχει την εποπτεία ολόκληρου του δικτύου. Ως εκ τούτου, ο πράκτορας αυτός θα παίρνει πληροφορίες από τους τοπικούς ελεγκτές των φωτοβολταϊκών στοιχείων και της μπαταρίας για το διαθέσιμο ποσό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο. Ακόμα θα πληροφορείται από τα ILCs που θα έχουν εγκατασταθεί σε κάθε σπίτι για την κατανάλωση κάθε σπιτιού, καθώς και για το ποια είναι τα φορτία που ζητούν ισχύ. Κάθε σπίτι, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, περιλαμβάνει δύο ήδη φορτίων:

1. Την αντλία νερού, η οποία παρέχει στο σπίτι την απαραίτητη ποσότητα νερού. Γίνεται αντιληπτό, ότι εφόσον οι ένοικοι καταναλώνουν καθημερινώς κάποια ποσότητα νερού, είναι λοιπόν αναγκαίο να λειτουργεί και η αντλία νερού καθημερινώς
2. Τα φορτία φωτισμού

Όσο για την εύλογη απορία τι συμβαίνει με φορτία όπως οι ηλεκτρικές εστίες ή τη θέρμανση του νερού, αυτές δεν τροφοδοτούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο του μικροδικτύου. Όσον αφορά τις ηλεκτρικές εστίες, λειτουργούν με υγραέριο.

Σκοπός λοιπόν του MGCC είναι ο έλεγχος των Local Controllers (τα ILCs όσον αφορά στην Κύθνο) για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Τι εννοούμε όμως με τον όρο βέλτιστη λειτουργία του συστήματος; Όσον αφορά στο μικροδίκτυο στην Κύθνο, αποσκοπούμε στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αυτάρκεια του συστήματος από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και τη διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών. Αυτό λοιπόν συνεπάγεται τη μικρότερη δυνατή διάρκεια λειτουργίας της γεννήτριας diesel. Με αυτό θέλουμε πρώτα από όλα να μειώσουμε στον μέγιστο βαθμό την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από διοξείδιο του άνθρακα και άλλους βλαβερούς ρύπους. Θέλουμε όμως ακόμα να δείξουμε πως με την εφαρμογή της τεχνολογίας ευφυών πρακτόρων, ένα μικροδίκτυο αποκτά τη «νοημοσύνη» ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του με τους πόρους που του διατίθενται, κατανέμοντας με κατάλληλο τρόπο τη διαθέσιμη ενέργεια στα φορτία του.

Ας έχουμε υπόψη ότι η εφαρμογή στην Κύθνο αποτελεί το πρώτο βήμα για μελλοντικές μεγαλύτερες εφαρμογές που πιθανότατα θα ακολουθήσουν. Με την ευαισθησία που πρέπει να μας διακατέχει όλους όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος, είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να αποφύγουμε στην εφαρμογή μας όσο μπορούμε περισσότερο τη λειτουργία της γεννήτριας diesel. Αν το επιτύχουμε αυτό, τότε θα έχουμε επιτύχει κι εμείς μια μικρή συμβολή για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τις ρυπογόνες μονάδες παραγωγής ενέργειας στα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα.

Όπως γίνεται αντιληπτό, το φορτίο το οποίο δε θεωρείται τόσο σημαντικό και στο οποίο μπορεί να διακοπεί η παροχή ενέργειας είναι η αντλία νερού. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, ότι νερό προς χρήση από τους κατοίκους υπάρχει ήδη συσσωρευμένο στη δεξαμενή κάθε σπιτιού. Η αντλία επιτελεί απλώς το έργο της συμπλήρωσης του νερού στη δεξαμενή, έτσι ώστε να μην εξαντλείται το απόθεμα. Συνεπώς, είναι επόμενο πως αν παραστεί ιδιαίτερη ανάγκη μπορούμε να διακόψουμε την λειτουργία της αντλίας για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς να επηρεάσουμε σε σημαντικό βαθμό τις εργασίες των κατοίκων. Σημειώνουμε ακόμα πως η ονομαστική ισχύς των αντλιών που έχουν εγκατασταθεί σε κάθε σπίτι είναι περίπου στα 1 kW. Η ισχύς τους είναι λοιπόν κάθε άλλο παρά αμελητέα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φορτία κάθε σπιτιού, και αυτό συνεπάγεται πως ενδεχόμενη αποσύνδεσή τους από το δίκτυο δίνει αρκετά μεγάλα περιθώρια στις μονάδες παραγωγής για να καλύψουν άλλα πιο επείγοντα φορτία.

Όταν λοιπόν τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών είναι σε χαμηλό επίπεδο και η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση, θα πρέπει είτε να εκκινήσει η γεννήτρια diesel είτε να απορρίψουμε κάποια από τα φορτία. Σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύξαμε παραπάνω, κι εφόσον δεν υπάρχουν πολλές δεξαμενές νερού με κρίσιμα επίπεδα στάθμης νερού, θα προτιμήσουμε να διακόψουμε τη λειτουργία της αντλίας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο ρόλος του πράκτορα που θα αναλάβει τον ρόλο του MGCC μπορεί να περιγραφεί ως εξής: ο πράκτορας ελέγχει κάθε χρονική στιγμή τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών και την παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Σε περίπτωση που οι μπαταρίες βρίσκονται σε ικανοποιητικό επίπεδο φόρτισης και η ζήτηση από τα φορτία μπορεί να καλυφθεί τότε ο MGCC αναλαμβάνει είτε να δρομολογήσει όση ενέργεια είναι απαραίτητη από τα φωτοβολταϊκά στα φορτία και την υπόλοιπη τη χρησιμοποιεί για τη φόρτιση των μπαταριών, είτε εφόσον η ζήτηση είναι μεγαλύτερη, τροφοδοτεί τα φορτία και από τις μπαταρίες και από τα φωτοβολταϊκά. Το ποια από τις δύο αποφάσεις θα πάρει ο MGCC εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών, την ενέργεια που μπορούν να συνεισφέρουν εκείνο το διάστημα τα φωτοβολταϊκά, καθώς και τη ζήτηση ενέργειας από τους καταναλωτές. Σε περίπτωση τώρα που μπαταρίες και φωτοβολταϊκά δεν μπορούν να καλύψουν τη συνολική ζήτηση, ο MGCC βρίσκεται αντιμέτωπος με δύο το ίδιο δυσάρεστες εναλλακτικές λύσεις. Η πρώτη είναι να θέσει σε λειτουργία τη γεννήτρια diesel. Άλλωστε αυτός είναι και ο λόγος ύπαρξης της γεννήτριας diesel στο μικροδίκτυο: να μπορεί να καλύπτει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις που δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα οι υπόλοιπες μονάδες, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις μακράς διάρκειας μειωμένης ηλιοφάνειας. Η δεύτερη εναλλακτική λύση είναι να αποκόψει φορτία. Επειδή, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σκοπεύουμε στην ελάχιστη δυνατή λειτουργία της γεννήτριας diesel, ο αλγόριθμος είναι έτσι κατασκευασμένος, ώστε ο πράκτορας να προτιμήσει να αποκόψει από το δίκτυο τις αντλίες νερού.

Ο τρόπος με τον οποίο αποφασίζει ο πράκτορας να αποσυνδέσει τις αντλίες νερού έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο αλγοριθμικά ώστε ο πράκτορας να επεμβαίνει όσο το δυνατόν λιγότερο στις αποφάσεις των κατοίκων. Είναι άλλωστε κατανοητό πως όταν ένας κάτοικος έχει αποφασίσει να λειτουργήσει την αντλία νερού, σίγουρα δε θα τον ευχαριστούσε κάποιος «υπολογιστής» να αποφασίσει πως αυτή τη στιγμή δεν είναι η κατάλληλη ώρα για να τη λειτουργήσει και θα πρέπει να περιμένει. Πριν αναλύσουμε περαιτέρω το παραπάνω σκεπτικό, ας περιγράψουμε πρώτα τον τρόπο με τον οποίο επεμβαίνει ο MGCC σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχει μία συνεχής επικοινωνία μεταξύ των τοπικών ευφυών ελεγκτών φορτίου (ILCs) και του MGCC. Όταν λοιπόν δεν μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση, ο MGCC επιλέγει ποιο φορτίο θα μπορούσε να αποκόψει (στην περίπτωση της Κύθνου έχουμε πάντα υπόψη μας ότι πρόκειται για αντλίες νερού που πρόκειται να αποσυνδεθούν). Εφόσον πάρει αυτήν την απόφαση, στέλνει στη συνέχεια το κατάλληλο μήνυμα στον αντίστοιχο τοπικό ελεγκτή, στον οποίο ανήκει το φορτίο, και τον ειδοποιεί ότι θα πρέπει να ανοίξει το διακόπτη – να διακόψει την παροχή ενέργειας – που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη αντλία νερού. Ο τοπικός ελεγκτής δίνει λοιπόν με τη σειρά του εντολή στον διακόπτη PLC να ανοίξει. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις περιπτώσεις που επιθυμούμε το κλείσιμο κάποιου διακόπτη. Το μόνο που αλλάζει είναι το περιεχόμενο της εντολής.

Ας εστιάσουμε τώρα λίγο παραπάνω στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η επιλογή για το ποιο φορτίο θα αποσυνδεθεί. Εφόσον μόνο μία αντλία νερού βρίσκεται εντός λειτουργίας το διάστημα που οι μονάδες παραγωγής δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση, τότε αναγκαστικά δίνεται εντολή η συγκεκριμένη αντλία να τεθεί εκτός λειτουργίας. Ο MGCC συνεχώς παρακολουθεί ολόκληρο το σύστημα. Μόλις ανιχνεύσει ότι υπάρχει η δυνατότητα για να καλυφθούν οι ανάγκες της αντλίας σε ενέργεια την επαναφέρει εντός λειτουργίας. Σημειώνουμε βέβαια ότι ένα τέτοιο σενάριο – να μην μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες μίας μόνο αντλίας – δεν είναι εξαιρετικά πιθανό να συμβεί, αν λάβουμε υπόψη τις δυνατότητες που έχουμε για παροχή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις μπαταρίες, καθώς επίσης και το γεγονός ότι κάθε σπίτι περιορίζεται στην κατανάλωσή του από μία ασφάλεια των 6 Α. Ένα αρκετά πιθανότερο σενάριο είναι όταν παραπάνω από μία αντλίες βρίσκονται εντός λειτουργίας, τη χρονική στιγμή που η ζήτηση δεν μπορεί να καλυφθεί. Σε αυτήν την περίπτωση ο MGCC επιλέγει αρχικά τυχαία μία αντλία και δίνει εντολή για να τεθεί εκτός λειτουργίας. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμός είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να υπάρχει μία κυκλική εναλλαγή μεταξύ των αντλιών που βρίσκονται εντός κι εκτός λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο, ανά δεκάλεπτα διαστήματα, κάποιες αντλίες τίθενται εκ νέου εντός λειτουργίας, ενώ κάποιες άλλες αποσυνδέονται από το δίκτυο. Γίνεται προσπάθεια λοιπόν ώστε να ενοχλήσουμε σε ελάχιστο βαθμό τους κατοίκους, επιτρέποντάς τους τη λειτουργία της αντλίας τους ανά 10-20 λεπτά, ενώ παράλληλα επιτυγχάνουμε και τον σκοπό μας. Σε περιπτώσεις που η αποσύνδεση κάποιων αντλιών δε συνεισφέρει σημαντικά στην ευστάθεια του συστήματος και την κάλυψη της ζήτησης, τότε κρίνεται αναγκαία και η ένταξη της γεννήτριας diesel. Η γεννήτρια diesel είναι πιθανό ακόμα να τεθεί εντός

λειτουργίας όταν για ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό είμαστε αναγκασμένοι να αποκόπτουμε φορτία και δεν προβλέπεται σε σύντομο χρόνο αύξηση της παραγωγής (ή μείωση της ζήτησης).

Τέλος, ο MGCC εκτός από τις παραπάνω αποφάσεις, είναι υπεύθυνος και για την πλήρη εποπτεία του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι σε χρονικά διαστήματα που έχουμε ορίσει δέχεται μηνύματα από τους τοπικούς ελεγκτές (ILCs) που αφορούν στην κατάσταση του ελεγκτή καθώς και σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος που έχει πραγματοποιήσει. Με ανάλογο τρόπο επικοινωνεί και με τους αντιστροφείς που είναι συνδεδεμένοι με τις μπαταρίες και τα φωτοβολταϊκά.

### **3.6. Σχόλια πάνω στην Αξιοπιστία του Συστήματος**

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η αξιοπιστία που πρέπει να έχει το σύστημά μας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα. Για αυτό το λόγο διενεργήσαμε tests στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ, που αφορούσαν σε πρώτη φάση τον αριθμό των μηνυμάτων που μπορούν να ανταλλάσσονται μεταξύ των τοπικών ελεγκτών και του MGCC. Για την εφαρμογή στην Κύθνο θα είμαστε ικανοποιημένοι αν μπορεί να γίνεται απροβλημάτιστα η ανταλλαγή 10 μηνυμάτων ανά δευτερόλεπτο (messages/second – msg/sec). Στο εργαστήριο εξετάσαμε τους ελεγκτές για ανταλλαγή 10 msg/sec καθώς και για 100 msg/sec. Η εφαρμογή λειτούργησε χωρίς προβλήματα.

Για την αποφυγή αναπάντεχων προβλημάτων, τα οποία συνήθως εμφανίζονται σε προϊόντα λογισμικού που είναι ακόμα στο στάδιο ανάπτυξης, αποφασίσαμε να ρυθμίσουμε τους ILCs ώστε να εκτελούν μία πλήρη επανεκκίνηση κάθε ημέρα (restart). Με αυτόν τον τρόπο «καθαρίζει» η μνήμη RAM από μεταβλητές-σκουπίδια, όπως είναι για παράδειγμα η ανεξέλεγκτη αύξηση των διαστάσεων μιας μεταβλητής-πίνακα. Μία τέτοια περίπτωση είναι πιθανό να οφείλεται σε σφάλμα του λογισμικού και μπορεί να δημιουργήσει ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα αν δεν υπάρξει η κατάλληλη πρόληψη. Με το restart του ελεγκτή αποφεύγουμε πολλά τέτοιου είδους προβλήματα. Ο χρόνος που απαιτείται για μία τέτοια ενέργεια είναι της τάξης του 1 λεπτού. Το πιθανότερο είναι βέβαια να περάσει σχεδόν απαρατήρητο από τον καταναλωτή, αφού κατά τη διάρκεια του 1 λεπτού όλοι οι PLC διακόπτες έχουν ρυθμιστεί για να βρίσκονται στη θέση ON, ενώ η παροχή ρεύματος συνεχίζεται. Επομένως όσες συσκευές βρίσκονταν σε λειτουργία θα συνεχίσουν να λειτουργούν. Το πιθανότερο είναι ο καταναλωτής να αντιληφθεί το restart από μία στιγμιαία πτώση τάσης στο οικιακό του δίκτυο. Αν όμως αυτή η επανεκκίνηση προγραμματιστεί να λαμβάνει χώρα κάθε μέρα στις 3 π.μ. τότε μειώνονται ακόμα περισσότερο οι πιθανότητες να γίνει αντιληπτή από τους καταναλωτές.

Τέλος, σημειώνουμε την αναγκαιότητα να ελεγχθεί ολόκληρο το σύστημα κάτω από επίπονες συνθήκες λειτουργίας για ένα εύλογο χρονικό διάστημα, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του. Πράγματι κάτι τέτοιο έχει προγραμματιστεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα, με όλο το υλικό να έχει μεταφερθεί στην Κύθνο, και τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου μέσω VPN και κινητής τηλεφωνίας. Έχουμε τη δυνατότητα για κάτι τέτοιο, διότι οι περισσότεροι κάτοικοι δε διαμένουν στα σπίτια αυτά κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

### **3.7. Ανάπτυξη λογισμικού για συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων**

#### **3.7.1. Εισαγωγή**

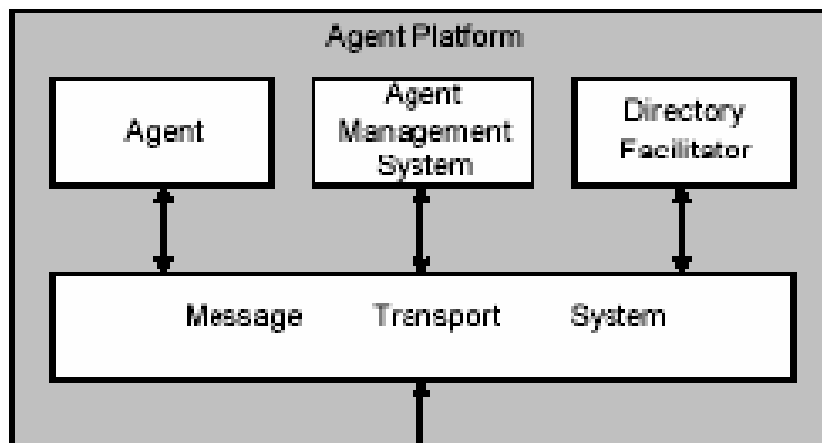
Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα δοθεί μία τεχνική περιγραφή του τρόπου υλοποίησης των ευφυών πρακτόρων. Η υλοποίηση είναι συμβατή με τα πρότυπα που θέτει η FIPA (Foundation of Intelligent Physical Agents) [9]. Η FIPA είναι μια IEEE Computer Society που σαν σκοπό έχει να δημιουργήσει πρότυπα πάνω στην λειτουργία των ευφυών πρακτόρων καθώς και την διασύνδεση αυτών με άλλες τεχνολογίες.

Το βασικό στοιχείο της ανάπτυξης είναι η πλατφόρμα λειτουργίας των ευφυών πρακτόρων η οποία ουσιαστικά είναι μία βιβλιοθήκη από κατάλληλο λογισμικό και μια σειρά από υλοποιημένους πράκτορες που στόχο έχουν τον βασικό συντονισμό των πρακτόρων που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Για τις ανάγκες του λογισμικού μας χρησιμοποιήσαμε σαν πλατφόρμα το σύστημα JADE.

#### **3.7.2. JADE**

Το JADE (Java Agent DEvelopment Framework)[19-20] είναι μία πλατφόρμα λογισμικού πλήρως υλοποιημένη στην γλώσσα JAVA. Απλοποιεί την ανάπτυξη MAS μέσω μιας σειράς βιβλιοθηκών οι οποίες είναι πλήρως συμβατές με τις προδιαγραφές της FIPA όπως επίσης και με τα εργαλεία που παρέχει για την ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση (debugging) του λογισμικού. Η αρχιτεκτονική του JADE επιτρέπει την λειτουργία του συστήματος ταυτόχρονα σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα αρκεί αυτά να υποστηρίζουν την γλώσσα JAVA. Η αρχιτεκτονική του συστήματος επικοινωνίας είναι ευέλικτη και επαρκής για την διαχείριση ACL (Agent Communication Language) μηνυμάτων στο οποίο έχει ενσωματωθεί το πλήρες πρότυπο επικοινωνίας της FIPA.

Το μοντέλο λειτουργίας του JADE παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.13: Η αρχιτεκτονική μια πλατφόρμας MAS συμβατή με τα πρότυπα της FIPA

Το Agent Management System (AMS) είναι ένας ευφυής πράκτορας ο οποίος επιτηρεί και ελέγχει την πρόσβαση και την χρήση της πλατφόρμας. Σε κάθε πλατφόρμα μπορεί να υπάρχει μόνο ένα AMS.

Το AMS παρέχει υπηρεσίες καταλόγου και διαχείρισης των ευφυών πρακτόρων (agents), διατηρώντας ένα κατάλογο με τους κωδικούς και την κατάσταση των agents της πλατφόρμας. Ο κάθε ευφυής πράκτορας με την εκκίνηση του θα πρέπει να καταχωρηθεί στο AMS προκειμένου να αποκτήσει ένα μοναδικό AID (Agent IDentification).

Ο Directory Facilitator (DF) είναι ο πράκτορας που παρέχει υπηρεσίες «Χρυσού Οδηγού» στην πλατφόρμα. Ο κάθε agent μπορεί να καταχωρίσει στον DF τις υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει στο σύστημα. Για παράδειγμα αν ο ευφυής πράκτορας (agent) ελέγχει μία μπαταρία τότε μπορεί να ανακοινώσει ότι «αποθηκεύει ή παράγει ενέργεια». Ομοίως για όλους τους άλλους ευφυείς πράκτορες (agents) του συστήματος.

Το Σύστημα μεταφοράς μηνυμάτων (Message Transport System) το οποίο λέγεται και ACC (Agent Communication Channel – Κανάλι επικοινωνίας Agents) είναι το λογισμικό το οποίο ελέγχει όλα τα μηνύματα που διακινούνται στην πλατφόρμα.

### 3.7.3. Το σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο μικροδικτύων

#### 3.7.3.1 Εισαγωγή

Κάθε στιγμιότυπο του JADE που τρέχει ονομάζεται κιβώτιο (Container) και κάθε ένα εξ αυτών μπορεί να περιέχει πολλούς πράκτορες. Το σύνολο των ενεργών containers ονομάζεται πλατφόρμα (Platform). Επιπλέον υπάρχει ένα βασικό container το οποίο ονομάζεται Main Container και περιέχει όλους του βασικούς πράκτορες που προαναφέραμε (π.χ. τον DF). Όλα τα νέα container που θα υποδεχτούν τους πράκτορές μας δηλώνονται κατά την δημιουργία τους στο κυρίως container.

#### 3.7.3.2 Συμπεριφορές

Όπως έχει αναφερθεί το κύριο στοιχείο της λειτουργίας και του σχεδιασμού των πρακτόρων είναι η συμπεριφορά. Η πλατφόρμα JADE παρέχει μια βιβλιοθήκη για την υλοποίηση των συμπεριφορών. Ουσιαστικά μία συμπεριφορά κατασκευάζεται με την δημιουργία του αντικειμένου που επεκτείνει την κλάση `jade.core.behaviours.Behaviour`. Προκειμένου να εισάγουμε την συμπεριφορά απλά χρειάζεται να καλέσουμε την μέθοδο `addBehaviour()`.

Επιπλέον κάθε κλάση συμπεριφοράς θα πρέπει να επεκταθεί υλοποιώντας την μέθοδο `action()` όπου ουσιαστικά εισάγεται ο κώδικας μας καθώς και την μέθοδο `done()` που εκτελείται κατά το πέρας της συμπεριφοράς.

Ο κάθε πράκτορας μπορεί να εκτελέσει πολλές συμπεριφορές ταυτόχρονα. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή διότι οι συμπεριφορές δεν λειτουργούν όπως τα νήματα αλλά σαν ανεξάρτητα προγράμματα που συνεργάζονται. Οπότε είναι στην ευχέρεια του προγραμματιστή να επιλέξει την σειρά εκτέλεσης.

Αυτό έχει γίνει για τους εξής λόγους:

- Ο πράκτορας να μπορεί να τρέχει σε υπολογιστικές πλατφόρμες με μικρή υπολογιστική ισχύ όπως τα κινητά τηλέφωνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται η παρουσία ενός νήματος.
- Η εναλλαγή μεταξύ συμπεριφορών είναι ταχύτερη από ότι σε νήματα
- Δεν απαιτείται συγχρονισμός και πολύπλοκοι αλγόριθμοι ελέγχου
- Είναι δυνατή η λήψη-καταγραφή της εικόνας του πράκτορα με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφορά του σε άλλη πλατφόρμα.

Από το σύστημα μπορούν να οριστούν τρεις τύποι συμπεριφορών:

1. “One-shot” όπου εκτελούνται μία φορά
2. “Cyclic” όπου η συμπεριφορά εκτελείται περιοδικά
3. Generic συμπεριφορά που εκτελεί κάποιο κώδικα ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος

Επιπλέον το Jade έχει την δυνατότητα να υλοποιήσει πιο σύνθετες συμπεριφορές συνδυάζοντας απλές συμπεριφορές· ωστόσο κάτι τέτοιο δεν υλοποιήθηκε στον κώδικα αφού δεν απαιτήθηκε.

### 3.7.3.3. Οντολογίες

Μια οντολογία ορίζεται ως το απαραίτητο εκείνο λεξιλόγιο να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων. Σε μια οντολογία ορίζονται στην ουσία κάποιες έννοιες, αναφέροντας τα μηνύματα στα οποία αντιστοιχούν. Για παράδειγμα, μπορεί να οριστεί ότι όταν ο πράκτορας στέλνει μήνυμα με το περιεχόμενο «SELL» επιθυμεί να πουλήσει ενέργεια. Κάθε φορά που εκκινείται ένας agent ορίζει και την οντολογία με την οποία θα επικοινωνεί. Έτσι τα μηνύματα τα οποία στέλνει θα αποκτούν το νόημα που ορίζει η συγκεκριμένη οντολογία. Για παράδειγμα, το μήνυμα «SELL», σε μία άλλη οντολογία μπορεί να εννοεί την πώληση βιβλίων. Με τον ορισμό της οντολογίας, ο παραλήπτης μπορεί να αναγνωρίσει το «context» στο οποίο αναφέρεται ο αποστολέας του μηνύματος.

Στο JADE μια οντολογία υλοποιείται χρησιμοποιώντας τη βασική κλάση `jade.content.onto.Ontology` στην οποία καθορίζονται τα στοιχεία της οντολογίας που είναι:

- Predicates = δηλώσεις όπως «ανήκω» ή «προέρχομαι»
- agent actions= πράξεις όπως «πουλώ»
- concepts= δεδομένα όπως «γεννήτρια» ή «πωλητής»

Με χρήση της βιβλιοθήκης του Jade ο χρήστης μπορεί να δηλώσει την δική του οντολογία. Για αναλυτική τεχνική περιγραφή της υλοποίησης ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο [19].

### 3.7.4. JADE-LEAP

Για την υλοποίηση των πρακτόρων για τους τοπικούς ελεγκτές φορτίου, βασιστήκαμε σε μεγάλο βαθμό στην πλατφόρμα JADE-LEAP, η οποία αποτελεί μία παραλλαγή του JADE. Η JADE-LEAP αποτελεί επιπρόσθετη εφαρμογή, η οποία εγκαθίσταται πάνω στο JADE, χρησιμοποιεί πολλά από τα χαρακτηριστικά του, παρόλα αυτά εισάγει ορισμένες τροποποιήσεις οι οποίες κρίθηκαν απαραίτητες για την υλοποίησή μας.

Το λογισμικό LEAP αναπτύχθηκε στα πλαίσια του LEAP-IST project [XX.1] με κύριο σκοπό να βοηθήσει τους χρήστες του JADE να αναπτύξουν εφαρμογές πολλαπλών πρακτόρων σε συσκευές χωρίς πολύ μεγάλες δυνατότητας επεξεργαστή και μνήμης, όπως αυτές που προσφέρει ένας υπολογιστής. Τέτοιες συσκευές είναι για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα και τα PDAs. Το JADE δυστυχώς δεν μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά – ή και καθόλου – σε τέτοιες συσκευές, καθώς έχει συγκριτικά αρκετά μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη (~10 Mbytes), ενώ δεν μπορεί να υποστηρίξει σωστά τις ασύρματες συνδέσεις οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις ενσύρματες, για τις οποίες έχει σχεδιαστεί (ασύρματα δίκτυα: μεγαλύτερες καθυστερήσεις, μικρό εύρος ζώνης, δυναμική διευθυνσιοδότηση, κ.α.). Το λογισμικό LEAP δημιουργήθηκε με σκοπό να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα.

Το JADE με το JADE-LEAP όσον αφορά την ανάπτυξη εφαρμογών – όπως τους αλγορίθμους που υλοποιήσαμε εμείς – δεν έχουν πρακτικά καμία διαφορά στον τρόπο με τον οποίο θα γίνει ο προγραμματισμός. Επομένως κανένα από τα σημεία που αναφέρουμε και αφορούν στο JADE δεν αναιρείται με την ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον JADE-LEAP. Γίνεται αντιληπτό ότι ο λόγος που επιλέξαμε την πλατφόρμα JADE-LEAP για την ανάπτυξη του αλγορίθμου για τους ILC agents έγινε με σκοπό να εκμεταλλευτούμε τις ευκολίες που προσέφερε όσον αφορά στην ασύρματη δικτύωση καθώς και στις μειωμένες απαιτήσεις μνήμης.

**Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> :**  
**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ**  
**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ**

#### **4.1. Εισαγωγή**

Όπως θα πρέπει να έχει γίνει ήδη αντιληπτό, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή και ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου για τα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα. Η καινοτομία που εισάγει βασίζεται στις νέες τεχνικές τις οποίες αναλύει και χρησιμοποιεί. Η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων αποτελεί ένα ιδιαίτερα νέο κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης, η οποία έχει κερδίσει σημαντικό έδαφος τα τελευταία χρόνια και βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές. Όπως είναι βέβαια αναμενόμενο, οι πρώτες εφαρμογές ξεκίνησαν από τομείς που άπτονται στην τεχνητή νοημοσύνη και δεν είναι άλλοι από αυτούς που αναφέρονται στα ρομπότ και τον τρόπο συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους. Με τον όρο ρομπότ εννοούμε προφανώς νοήμονες οντότητες, είτε αυτές είναι εικονικές – για παράδειγμα ένα υπολογιστικό πρόγραμμα – είτε πραγματικές – όπως μία αυτοματοποιημένη οικιακή σκούπα καθαρισμού, και όχι αποκλειστικά ανθρωπόμορφα τεχνητά όντα. Συστήματα πολλαπλών/ευφυών πρακτόρων βρήκαν αμέσως εφαρμογή σε κοινωνίες ρομπότ που μάθαιναν να παίζουν ποδόσφαιρο. Παράλληλα όμως άρχισαν να εφαρμόζονται και σε συστήματα που σκοπός τους ήταν η βέλτιστη κατανομή πόρων κι εργασιών στα μέλη τους. Εμπνεόμενοι από τη δυναμική που φαίνεται να παρουσιάζουν οι ευφυείς πράκτορες – και όχι απαραίτητα από το γεγονός ότι μπορούν να παίζουν ποδόσφαιρο... – επιστήμονες αποφάσισαν να πειραματιστούν με εφαρμογές τους στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ θεωρείται από τους πρωτοπόρους στον τομέα αυτό. Έχοντας πάντα υπόψη την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και από την πλευρά των παραγωγών – νομικά αυτό έχει ήδη υλοποιηθεί – αλλά και από την πλευρά των καταναλωτών, όπου κάθε καταναλωτής θα μπορεί να επιλέγει την επιχείρηση που θα του παρέχει ηλεκτρική ενέργεια – κάτι παρόμοιο γίνεται ήδη όσον αφορά στους παρόχους κινητής και σταθερής τηλεφωνίας – είναι επόμενο ότι θα πρέπει να υπάρξει ένας αυτοματοποιημένος έλεγχος όσον αφορά στη βέλτιστη αντιστοίχιση παραγωγών σε καταναλωτές με γνώμονα πάντα το μέγιστο κέρδος (ή αλλιώς το ελάχιστο κόστος). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο θεωρούμε πως ένας ιδιαίτερα αποδοτικός τρόπος θα ήταν με την εισαγωγή των ευφυών πρακτόρων στο σύστημά μας. Με αυτόν τον τρόπο οι επιμέρους μονάδες αποκτούν νοημοσύνη, και τους δίνεται ένας βαθμός ελευθερίας ώστε να δράσουν αυτόνομα με τρόπο που θα τους αποφέρει τη μέγιστη ανταμοιβή. Το πώς ορίζεται αυτή η ανταμοιβή εξαρτάται από τον τρόπο που εμείς έχουμε σχεδιάσει τον αλγόριθμο και τον σκοπό που θέλουμε να επιτύχει ο κάθε πράκτορας. Είναι λοιπόν, σα να έχουμε βάλει έναν εξειδικευμένο

«εργάτη», στον οποίο του έχουμε αναθέσει ένα έργο και του έχουμε δείξει μερικές τεχνικές για να το επιτύχει χωρίς όμως να έχουμε ορίσει πλήρως τον τρόπο δράσης που θα ακολουθήσει. Εκείνος θα πρέπει να εκτιμήσει την κατάσταση, να αξιολογήσει ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος δράσης από αυτούς που έχει διαθέσιμους και να αναλάβει δράση – είτε αυτό σημαίνει να επιχειρήσει να επιτύχει το στόχο μόνος του είτε να επικοινωνήσει με άλλους πράκτορες και να συνεργαστεί μαζί τους. Παρατηρούμε λοιπόν ότι με την εισαγωγή του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων στα ηλεκτρικά δίκτυα, δίνουμε μια αυτονομία στις υπολογιστικές μονάδες, και με αυτόν τον τρόπο δεν επιβαρυνόμαστε από το κόστος μιας ιδιαίτερα επίπονης προσπάθειας προγραμματισμού, προσπαθώντας να προβλέψουμε δράσεις για όλα τα πιθανά σενάρια που είναι πιθανό να συμβούν. Αντίθετα, έχοντας εξοπλίσει κάθε πράκτορα με μερικές γενικές γραμμές δράσης, και με την – περιορισμένη – νοημοσύνη που του έχουμε δώσει, έχουμε την αυτοπεποίθηση ότι ο πράκτορας θα έχει την ικανότητα να αντιδράσει με τον σωστό τρόπο σε όποια κατάσταση κι αν βρεθεί. Άλλωστε θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η περίπτωση πρόβλεψης από μέρος μας όλων των δυνατών καταστάσεων στην οποία μπορεί να βρεθεί ο πράκτορας είναι σχεδόν αδύνατη. Κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατό μόνο αν μελετούσαμε ένα πολύ μικρό δίκτυο με λίγους καταναλωτές και ακόμα λιγότερους παραγωγούς. Όμως σε ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από χιλιάδες καταναλωτές και πολύ πιθανώς στο μέλλον να έχουμε ίσο πλήθος – μικρών – παραγωγών η πρόβλεψη είναι πρακτικά αδύνατη. Πρόκειται για ένα αμιγώς στοχαστικό περιβάλλον, εφόσον κάθε χρονική στιγμή φορτία και παραγωγοί μπορούν να εντάσσονται και να αποσυνδέονται από το δίκτυο για λόγους που πιθανώς βασίζονται σε κριτήρια τέτοια, ώστε το σύστημα να μην μπορεί εύκολα να μοντελοποιηθεί. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που ένας παραγωγός, που διαθέτει ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάρκο, αποφάσισε να μην παρέχει το ρεύμα που παράγει στο δίκτυο, για προσωπικούς του λόγους, οι οποίοι δεν αφορούν ούτε λόγους συντήρησης ούτε λόγους κόστους, αυτή είναι μια κατάσταση η οποία δεν μπορεί εύκολα να προβλεφθεί. Το σύστημα των πρακτόρων όμως με τη νοημοσύνη που έχει θα καταλήξει στη βέλτιστη δυνατή λύση – μία απλή λύση θα ήταν να αγοράσει ρεύμα από κάποιον άλλο παραγωγό – ώστε να επαναφέρει το σύστημα σε ισορροπία.

Οι παραπάνω τεχνικές που αφορούν στα συστήματα των πολλαπλών πρακτόρων έχουν εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια με αρκετά σημαντική επιτυχία σε ρομπότ προκειμένου να αναγνωρίσουν και να προσπεράσουν εμπόδια, ή να συνεργαστούν για να επιτύχουν ένα στόχο είτε τέλος σε ρομπότ που ανταγωνίζονται και θέλουν να επιτύχουν το μέγιστο δυνατό κέρδος για τον εαυτό τους. Ένα ιδιαίτερα προσφιλές παράδειγμα σε αυτό το σημείο είναι τα ρομπότ που παίζουν ποδόσφαιρο, αφενός διότι σε μία τέτοια εφαρμογή ελέγχονται όλες οι παραπάνω λειτουργίες και αφετέρου διότι το ποδόσφαιρο είναι μία δραστηριότητα που εντάσσεται με τον έναν ή τον άλλο τρόπο στα καθημερινά ερεθίσματα που δεχόμαστε από το περιβάλλον μας. Έτσι μία ομάδα ποδοσφαιρού από ρομπότ θα πρέπει να συνεργαστεί για να μπορέσουν να πετύχουν όλοι μαζί ένα τέρμα, ενώ

παράλληλα κάθε ρομπότ θα πρέπει να αναγνωρίσει και να προσπεράσει έναν αντίπαλο, και να προσπαθήσει να φτάσει στο αντίπαλο τέρμα υλοποιώντας έτσι τον προσωπικό του στόχο.

Το ερώτημα που γεννιέται όμως σε αυτό το σημείο είναι πώς θα μπορέσουμε να εκπαιδεύσουμε τους πράκτορες ώστε να αντιδρούν σωστά στα ερεθίσματα που δέχονται από το περιβάλλον. Προφανώς θα πρέπει να εφοδιάσουμε τους πράκτορες με κάποιους στόχους, τους οποίους θα πρέπει κάθε φορά να επιτύχουν, όμως αυτό από μόνο του δεν επαρκεί. Ο πράκτορας θα πρέπει να μάθει τον σωστό τρόπο για το πώς θα μπορούσε να επιτύχει έναν τέτοιο στόχο. Ως προς αυτό το ζήτημα υπάρχουν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προτείνει να παρέχουμε στον πράκτορα μία λεπτομερή αναπαράσταση του περιβάλλοντός του καθώς και των βέλτιστων τρόπων με τους οποίους μπορεί να αντιδράσει σε καταστάσεις που πιθανώς προκύψουν. Έτσι όταν ο πράκτορας βρεθεί αντιμέτωπος με ένα πρόβλημα, ανατρέχει στη μνήμη του και προσπαθεί να βρει μία κατάσταση όσο το δυνατόν πιο όμοια με αυτή που αντιμετωπίζει. Όταν τη βρει, επιλέγει τη βέλτιστη λύση, την οποία εμείς του έχουμε δώσει, και αντιδρά με αυτόν τον τρόπο. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι εφόσον ο πράκτορας αντιμετωπίζει μία κατάσταση όμοια – όχι απαραίτητα ίδια – με αυτή που έχουμε προβλέψει, τότε είναι σίγουρο ότι θα ανταποκριθεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Τι γίνεται όμως σε περίπτωση που προκύψει κατάσταση, η οποία δεν εντάσσεται σε καμία από τις ομάδες με τις οποίες έχουμε εφοδιάσει τον πράκτορά μας; Απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν μπορεί να δοθεί πάντα, εφόσον ο πράκτορας μπορεί τυχαία να διαλέξει μία σωστή αντίδραση, μπορεί όμως να επιλέξει και κάποια που να είναι εντελώς λανθασμένη.

Η δεύτερη προσέγγιση, η οποία τα τελευταία χρόνια κερδίζει όλο και σημαντικότερο έδαφος, προέρχεται μέσα από τις τεχνικές ενισχυτικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στα νευρωνικά δίκτυα και την τεχνητή νοημοσύνη. Το σκεπτικό που κρύβεται πίσω από αυτή τη προσέγγιση είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να εφοδιάσουμε τον πράκτορα με όλα όσα πρέπει να ξέρει για το περιβάλλον του. Αντίθετα θα πρέπει να τον εκπαιδεύσουμε κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε όποια κατάσταση του παρουσιαστεί.

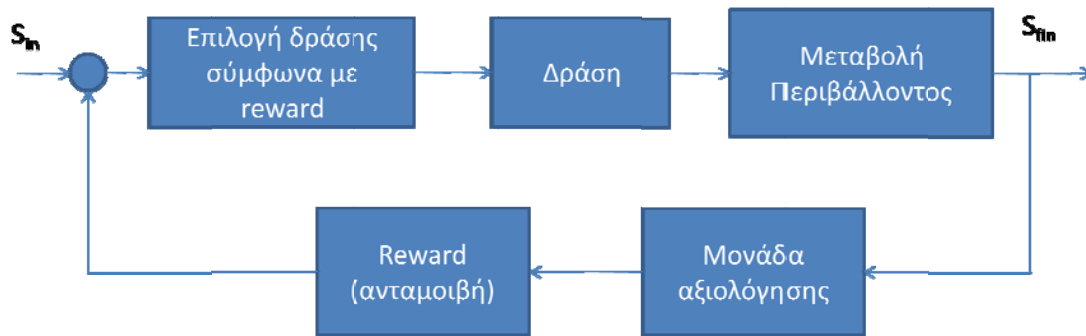
Μέχρι εδώ δώσαμε ένα μικρό ερέθισμα για το αντικείμενο με το οποίο καταπιάνεται το παρόν κεφάλαιο. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα μελετήσουμε αναλυτικότερα την ενισχυτική μάθηση κάνοντας αναφορά και στο θεωρητικό υπόβαθρο που την υποστηρίζει. Θα εστιάσουμε σε έναν από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους ενισχυτικής μάθησης, τον αλγόριθμο Q-learning. Τέλος, θα παρουσιάσουμε μία εφαρμογή που υλοποιήσαμε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και αφορά την βέλτιστη συμπεριφορά ενός συστήματος πρακτόρων που ελέγχουν ένα μικροδίκτυο, η εκπαίδευση του οποίου βασίστηκε στις αρχές του Q-learning.

## 4.2. Ενισχυτική Μάθηση

Ο όρος «ενισχυτική μάθηση» αναφέρθηκε για πρώτη φορά στην τεχνητή νοημοσύνη από τον Minski, το 1961, και ανεξάρτητα στη θεωρία ελέγχου από τους Waltz και Fu το ίδιο έτος. Εισερχόμενοι στη θεωρητική σκέψη με τη βοήθεια της οποίας αναπτύχθηκε η ενισχυτική μάθηση, ως θεωρήσουμε ένα σύστημα το οποίο δίνει μία απόκριση με βάση τις παρούσες συνθήκες. Τότε η αρχή της ενίσχυσης (reinforcement) αναφέρεται στην αύξηση της πιθανότητας να λάβουμε την ίδια απόκριση κάτω από παρόμοιες συνθήκες. Σήμερα, η ενισχυτική μάθηση θεωρείται ως μία κατηγορία μεθόδων και αλγορίθμων μάθησης που βασίζονται στην αρχή αυτή [22].

Επιχειρώντας να αναλύσουμε περαιτέρω τις παραπάνω έννοιες θα αναφερθούμε πάλι στα γνωστά μας ρομπότ. Στη θέση ενός ρομπότ θα μπορούσε να ήταν ένα νευρωνικό δίκτυο, ένα σύστημα πρακτόρων, όπως θα δούμε παρακάτω, ή μία άλλη μονάδα τεχνητής νοημοσύνης. Κάθε ενέργεια που εκτελεί ένα ρομπότ οδηγεί σε τροποποίηση κάποιων μεταβλητών που συνιστούν το περιβάλλον του. Για παράδειγμα το γεγονός ότι ένα ρομπότ μετακινήθηκε από ένα σημείο A σε ένα σημείο B, σημαίνει ότι βρίσκεται πιθανώς πιο κοντά σε ορισμένα αντικείμενα κι έχει απομακρυνθεί από κάποια άλλα. Επιπλέον, πιθανότατα με αυτήν την μετακίνηση μπορεί να εμποδίζει (ή να μην εμποδίζει πια) κάποιο άλλο ρομπότ να εκτελέσει τη δική του ενέργεια. Όλα τα παραπάνω μοντελοποιούνται στο λογισμικό του ρομπότ υπό τη μορφή μεταβλητών, κάποιες από τις οποίες μετά από μία ενέργεια μπορεί να αλλάζουν την τιμή τους. Με βάση την ενισχυτική μάθηση, μια μονάδα κριτικής (ή αξιολόγησης) στέλνει πίσω στο ρομπότ ένα ενισχυτικό σήμα (ανατροφοδότησης) πληροφορώντας το ρομπότ για το πόσο καλή ήταν η συμπεριφορά του. Για παράδειγμα αν το ρομπότ βρίσκεται μέσα σε ένα δωμάτιο και σκοπός του είναι να φτάσει μέχρι την πόρτα, αν το σημείο B βρίσκεται πιο κοντά στην πόρτα από ό,τι το σημείο A, τότε θα έχει κινηθεί σωστά και η συμπεριφορά του θα επιβραβευθεί από τη μονάδα αξιολόγησης. Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτό το σήμα ανατροφοδότησης, το ρομπότ προσαρμόζει τον κανόνα παραγωγής των δράσεών του και παράγει μια νέα δράση/ενέργεια. Με λίγα λόγια, αν η συμπεριφορά του ρομπότ επιβραβεύθηκε θα συνεχίσει προς αυτή την κατεύθυνση προκειμένου να φτάσει την πόρτα. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να αξιολογήσει εκ νέου την πολιτική που ακολουθεί για να επιτύχει το στόχο του και να επιλέξει μια νέα ενέργεια που πιθανώς θα φέρει την επιβράβευση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος.

Στο Σχ.4.1 παρουσιάζεται η παραπάνω διαδικασία σχηματικά.



Σχήμα 4.1: Ενισχυτική Μάθηση

Το σημαντικό χαρακτηριστικό της ενισχυτικής μάθησης είναι πως αντί να λαμβάνει την ορθή απόκριση από έναν «δάσκαλο» όπως συμβαίνει σε άλλες εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης, λαμβάνει μόνο μία αξιολόγηση (αποτίμηση ή βαθμολογία) της συμπεριφοράς του, για να δει πόσο καλά έχει αντιδράσει σε μία κατάσταση. Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου μάθησης είναι ότι το σύστημά μας δε χρειάζεται να γνωρίζει επακριβώς και εξαρχής τη βέλτιστη αντίδραση σε κάθε κατάσταση. Αντίθετα επιτρέπει την εκμάθηση συμπεριφορών, ορισμένων τρόπων αντίδρασης δηλαδή, χωρίς να προαπαιτεί την ακριβή γνώση του περιβάλλοντος στο οποίο θα λειτουργήσει το σύστημα (είτε πρόκειται για ρομπότ είτε για πράκτορες).

Δίνοντας ένα σύντομο παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι δίνουμε σε ένα ρομπότ ένα σύνολο από καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί (έστω 10 σημεία,  $\Sigma 1 \dots \Sigma 10$ ), καθώς ακόμα και ποιες ενέργειες επιτρέπεται να εκτελέσει σε κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις. Δηλαδή, από το  $\Sigma 1$  μπορεί να μεταβεί μόνο στο  $\Sigma 2$  και το  $\Sigma 3$ , ενώ από το  $\Sigma 4$  μπορεί να πάει στο  $\Sigma 9$ , κ.ο.κ. Ακόμα το ρομπότ γνωρίζει τις ανταμοιβές που θα πάρει για κάθε ενέργεια που θα εκτελέσει. Έστω ότι σκοπός του ρομπότ είναι να μεταβεί από το σημείο  $\Sigma 1$  στο  $\Sigma 10$  συλλέγοντας τη μέγιστη δυνατή ανταμοιβή. Είναι λοιπόν προφανές ότι το ρομπότ θα επιλέξει εκείνο το σύνολο ενεργειών που θα του αποφέρει τη μέγιστη δυνατή ανταμοιβή. Μπορεί στην πρώτη επανάληψη να επιλέξει τυχαία την πρώτη ενέργεια που θα εκτελέσει, στην δεύτερη επανάληψη όμως θα γνωρίζει ποια είναι αυτή που προσφέρει τη μέγιστη ανταμοιβή. Μετά από έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων, το ρομπότ θα είναι σε θέση να γνωρίζει ποιο είναι το ιδανικό σύνολο ενεργειών που πρέπει να εκτελέσει για να επιτύχει τον σκοπό του.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι σκοπός της ενισχυτικής μάθησης είναι να μάθει το σύστημα πώς να αντιδρά σε ένα δυναμικό περιβάλλον μέσα από την εμπειρία που αποκτά, μεγιστοποιώντας κάποιες συναρτήσεις κέρδους ή αντίστροφα ελαχιστοποιώντας κάποιες συναρτήσεις κόστους. Η εκπαίδευση του συστήματος προκύπτει μέσω επαναλήψεων, με τη μέθοδο

δοκιμής-λάθους (trial-and-error method) και με τη βοήθεια ενισχυτικών σημάτων, που βασίζονται στην ήδη αποκτηθείσα εμπειρία από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.

Αυτή η ανάγκη για αυτοματοποιημένη σύνθεση μια βάσης εκμάθησης [23], χωρίς δηλαδή να υπάρχει κάποιος «δάσκαλος», μας οδήγησε σε τεχνικές ενισχυτικής μάθησης, από τις οποίες ξεχωρίζει η τεχνική Q-learning. Η τεχνική Q-learning, η οποία επινοήθηκε από τον Watkins, το 1989, επιτρέπει την εκμάθηση συμπεριφορών χωρίς να προαπαιτεί πλήρη γνώση του μοντέλου του περιβάλλοντος στο οποίο θα βρεθεί το σύστημα, γενικότερα, και ο πράκτορας, ειδικότερα, όσον αφορά το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Κύριο χαρακτηριστικό της αποτελούν οι τριπλέτες <κατάσταση, δράση, Q-value>, με μία συγκεκριμένη τιμή-Q (Q-value) να αντιστοιχεί σε κάθε ζεύγος κατάστασης-δράσης. Η Q-value προκύπτει από τις ανταμοιβές που παίρνει το σύστημα για τη συμπεριφορά του, καθώς και από άλλους παράγοντες που θα αναλυθούν διεξοδικότερα σε παράγραφο που ακολουθεί. Θεωρούμε όμως απαραίτητο πριν αναφερθούμε στην τεχνική Q-learning, να κάνουμε αναφορά στη Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων (Markov Decision Process), πάνω στην οποία στηρίζεται η Q-learning αλλά και γενικότερα όλο το οικοδόμημα γνώσης που προήλθε από την ενισχυτική μάθηση.

### 4.3. Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων

Η Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων (Markov Decision Process – MDP) παρέχει το μαθηματικό πλαίσιο για τη μοντελοποίηση του τρόπου λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις όπου η έκβασή τους είναι ως ένα βαθμό τυχαία και ως ένα βαθμό ελέγχεται από τον αποφασίζοντα. Οι MDPs αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες για τη μελέτη ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία λύνονται με δυναμικό προγραμματισμό και ενισχυτική μάθηση. Το ενδιαφέρον για έρευνα σε αυτό το πεδίο πολλαπλασιάστηκε ύστερα από το βιβλίο του Ronald A. Howard, *Dynamic programming and Markov Processes*, το 1960. Σήμερα, οι MDPs χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα πεδίων όπως η ρομποτική, ο αυτόματος έλεγχος, τα οικονομικά και σε διαδικασίες παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι μια Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων είναι ένας μηχανισμός στοχαστικού ελέγχου διακριτού χρόνου, ο οποίος χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο καταστάσεων. Σε κάθε κατάσταση, είναι δυνατές ένα σύνολο από δράσεις, από τις οποίες ο αποφασίζων πρέπει να επιλέξει ποια θα εκτελέσει. Για κάθε ζεύγος κατάστασης  $S$  και δράσης  $A$ , η συνάρτηση  $T$  (ή αλλιώς  $P_a(s)$ ) καθορίζει την πιθανότητα μετάβασης στην επόμενη δυνατή κατάσταση. Ο αποφασίζων κερδίζει μία ανταμοιβή για κάθε κατάσταση που έχει επισκεφτεί. Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο ότι όλες οι καταστάσεις που ανήκουν σε μία Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων διακρίνονται από την ιδιότητα Μαρκοβ (Markov property). Αυτό σημαίνει

ότι αν η παρούσα κατάσταση μίας MDP είναι γνωστή στον χρόνο  $t$ , οι μεταβάσεις σε μία νέα κατάσταση στον χρόνο  $t+1$  είναι ανεξάρτητες από όλες τις προηγούμενες καταστάσεις στις οποίες βρεθήκαμε πριν τον χρόνο  $t$ .

Η Μαρκοβιανή Διαδικασία Αποφάσεων είναι ο πυρήνας της θεμελίωσης του προβλήματος της ενισχυτικής μάθησης σε περιβάλλον ενός ευφυούς πράκτορα. Στις πεπερασμένες Μαρκοβιανές Διαδικασίες Αποφάσεων, τις οποίες θα μελετήσουμε, το σύστημα έχει πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων αλλά και πεπερασμένο αριθμό δυνατών πράξεων. Τυπικά ο ορισμός δίδεται ως εξής [24-25]:

Μια Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης είναι ένα σύνολο μεταβλητών

$$\langle \mathbf{S}, \mathbf{A}, \mathbf{T}, \mathbf{R}, \gamma \rangle$$

Όπου

- $\mathbf{S}$  είναι ένα πεπερασμένο διακριτό σύνολο καταστάσεων του περιβάλλοντος
- $\mathbf{A}$  είναι ένα πεπερασμένο διακριτό σύνολο από ενέργειες τις οποίες μπορεί να πραγματοποιήσει ο πράκτορας
- $\gamma$  ( $0 \leq \gamma < 1$ ) είναι μία παράμετρος μείωσης (discount factor)
- $\mathbf{R} : \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \mathfrak{R}$  είναι μία συνάρτηση επιβράβευσης του πράκτορα η οποία αποδίδει μία επιβράβευση για την πράξη που επιλέγει ο πράκτορας σε μία δεδομένη κατάσταση
- $\mathbf{T} : \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \Pi(\mathbf{S})$  είναι η συνάρτηση μεταβάσεων η οποία για κάθε ζεύγος κατάστασης και επιλεγμένης πράξης δίνει την πιθανοτική κατανομή των καταστάσεων που μπορεί να μεταβεί ο πράκτορας.

Επιπλέον μια πολιτική  $\pi$  θεωρείται ως μία περιγραφή της συμπεριφοράς του πράκτορα. Μια stationary πολιτική  $\pi : \mathbf{S} \rightarrow \Pi(\mathbf{A})$  είναι η πιθανοτική κατανομή των πράξεων που είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε κάθε κατάσταση. Μια αιτιοκρατική πολιτική είναι αυτή όπου για κάθε κατάσταση υπάρχει μία πράξη που θα επιλεγεί με πιθανότητα 1.

Κάθε Markov Decision Process έχει μία αιτιοκρατικά σταθερή βέλτιστη πολιτική [25]. Επιπλέον σε μία Markov Decision Process ο πράκτορας λειτουργεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει το μακροπρόθεσμο κέρδος του. Για το σκοπό αυτό η παράμετρος  $\gamma$  αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα που θα έχουν μελλοντικές επιβραβεύσεις στις επιλογή των αποφάσεων κατά την παρούσα κατάσταση. Συμβολίζοντας ως  $Q^{\pi}(s,a)$  την αναμενόμενη discounted μελλοντική επιβράβευση για τον πράκτορα που ξεκινά από την κατάσταση  $s$  και επιλέγοντας την πράξη  $a$  σύμφωνα με την

πολιτική  $\pi$ , μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σύνολο από ταυτόχρονες γραμμικές εξισώσεις της οποίες ονομάζουμε συναρτήσεις  $Q$  για την πολιτική  $\pi$ :

$$Q^\pi(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') \cdot \sum_{a' \in A} \pi(s', a') Q^\pi(s', a')$$

Όπου  $s'$  και  $a'$  είναι η επόμενη κατάσταση και επιλεγόμενη πράξη αντίστοιχα. Η συνάρτηση  $Q^*$  για την αιτιοκρατικά σταθερή πολιτική  $\pi^*$  η οποία είναι βέλτιστη για κάθε αρχική κατάσταση ορίζεται από το ακόλουθο σύνολο συναρτήσεων:

$$Q^*(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') V^*(s)$$

Όπου

$$V^*(s) = \max_{a' \in A} Q^*(s', a')$$

Τέλος μία πολιτική  $\pi$  ονομάζεται άπληστη αν δίνει πιθανότητα 1 στην πράξη  $\operatorname{argmax}_a(Q^*(s, a))$  στην κατάσταση  $s$  δηλαδή για την πράξη που μεγιστοποιεί το  $Q^*$ .

#### 4.4. Q-learning

Το Q-Learning [26] είναι μία έκδοση μάθησης τιμών της ενισχυτικής μάθησης στην οποία ο πράκτορας προσπαθεί να μάθει τις utility values (Q-values) των ζευγών κατάστασης πράξης. Είναι μία μορφή ενισχυτικής μάθησης στην οποία δεν απαιτείται η γνώση του μοντέλου του συστήματος και συνεπώς παρέχει ένα απλό τρόπο προκειμένου οι πράκτορες να μάθουν να δρουν βέλτιστα σε ένα μαρκοβιανό χώρο. Η μέθοδος προέρχεται από την μέθοδο TD (χρονικών διαφορών temporal differences). Ο αντικειμενικός στόχος του Q-learning είναι να εκτιμήσει τις Q-τιμές (Q-values) για μία βέλτιστη πολιτική. Κατά την διάρκεια της μάθησης ο αλγόριθμος προσπαθεί να βελτιώσει την απόδοσή του εισάγοντας νέα πληροφορία στην υπάρχουσα γνώση. Αποδεικνύεται δε ότι παρόλο που μπορεί να υπάρχουν παραπάνω από μία βέλτιστες πολιτικές, οι  $Q^*$  - τιμές είναι μοναδικές.

Στο Q-learning η εμπειρία του πράκτορα σχηματίζεται από μία ακολουθία διακριτών επεισοδίων. Ο πίνακας 4.1 δίνει τα βασικά βήματα του Q-learning:

Βήμα	Περιγραφή
1	Επιλογή και εκτέλεση μίας δράσης $a$ για την κατάσταση $s$ για την χρονική τιμή $t$ .
2	Λήψη άμεσης επιβράβευσης $r$ για την νέα κατάσταση $s'$ .

---

3 Ανανέωση των τιμών του πίνακα Q σύμφωνα με την σχέση  $Q(s, a) = (1 - \epsilon)Q(s, a) + \epsilon(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'))$  όπου  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής μάθησης και  $\gamma$  είναι ο παράγοντας μείωσης (discount factor).

---

Πίνακας 4.1 Τα βασικά βήματα του Q-learning.

Ο αλγόριθμος συγκλίνει στην βέλτιστη κατάσταση εάν το κάθε ζεύγος κατάστασης πράξης το επισκεφτούμε άπειρες φορές και ο ρυθμός μάθησης παράλληλα μειώνεται.

## 4.5. Αλγόριθμος – Σκοποί και Στόχοι

Όπως αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, αυτό που ουσιαστικά επιτυγχάνουμε με το Q-learning είναι να εκπαιδεύσουμε το σύστημά μας να ανταποκρίνεται με τον βέλτιστο τρόπο σε ένα σύνολο καταστάσεων επιλέγοντας τον καλύτερο τρόπο δράσης, χωρίς όμως να του δώσουμε πληροφορίες για το πώς πρέπει να δράσει. Αυτό που του παρέχουμε είναι απλώς κάποια στοιχεία για το περιβάλλον του. Εκείνο, στη συνέχεια, μέσω της μεθόδου trial-and-error αποφασίζει ποιος είναι ο καταλληλότερος τρόπος δράσης – ποια είναι η βέλτιστη πολιτική – για να αποκομίσει το μεγαλύτερο κέρδος από το περιβάλλον του. Αυτό που είναι σημαντικό όσον αφορά στον τρόπο που υλοποιήσαμε τον αλγόριθμό μας, είναι ότι με την εισαγωγή της τεχνικής Q-learning, το σύστημα λαμβάνει υπόψη του όχι μόνο το κέρδος που θα αποκομίσει μόνο από την αμέσως επόμενη ενέργειά του, αλλά «προβλέπει» και το κέρδος που θα έχει στο μέλλον. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό να μην επιλέξει να μεταβεί στη αμέσως επόμενη βέλτιστη κατάσταση, προς όφελος της συνολικότερης στρατηγικής που μελλοντικά θα το οδηγήσει σε ευνοϊκότερες καταστάσεις. Με την ανάλυση που θα ακολουθήσει, και την αναφορά μας στο συγκεκριμένο πρόβλημα που μας απασχόλησε, θα προσπαθήσουμε να αποσαφηνίσουμε περαιτέρω τις παραπάνω έννοιες.

Ας αρχίσουμε περιγράφοντας το πρόβλημα του οποίου τη λύση επιζητήσαμε. Πρόκειται για ένα σύστημα ευφυών πρακτόρων, οι οποίοι ελέγχουν ένα μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και μπορεί να λειτουργήσει (ως προς το κεντρικό δίκτυο φαίνεται σαν μία οντότητα) άλλοτε ως φορτίο και άλλοτε ως παραγωγός. Ανάλογα με τις ανάγκες των φορτίων που ανήκουν στο μικροδίκτυο και ανάλογα με τις ανάγκες του κεντρικού δικτύου, το μικροδίκτυο μπορεί να παράσχει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (παραγωγός) ή να απορροφήσει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο (καταναλωτής).

Για να διευκολύνουμε τη θεώρηση του προβλήματος, θεωρήσαμε πρώτα από όλα ότι την απόφαση για το αν το μικροδίκτυο θα απορροφήσει ή θα αποδώσει ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο λαμβάνεται

από έναν μοναδικό πράκτορα. Ο πράκτορας αυτός θα μπορούσε να είναι για παράδειγμα ο MGCC, ο οποίος αφού αποφασίσει ποια είναι η βέλτιστη ενέργεια για να αποκομίσει συνολικά το μικροδίκτυο το μέγιστο δυνατό κέρδος, στη συνέχεια θα δώσει τις κατάλληλες εντολές στους τοπικούς ελεγκτές για να παράγουν την απαραίτητη ενέργεια. Αντίστοιχα, θα μπορούσε να δώσει και εντολή σε ορισμένα φορτία για να αποσυνδεθούν – για παράδειγμα σε ώρες αιχμής.

Θεωρούμε λοιπόν ότι το μικροδίκτυο μπορεί να εκτελέσει κατά τη διάρκεια της ημέρας οποιαδήποτε από τις παρακάτω λειτουργίες:

- 1) Μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο
- 2) Μπορεί να απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, προκειμένου να φορτιστεί
- 3) Μπορεί να μην εκτελεί καμία από τις δύο παραπάνω λειτουργίες

Όπως γίνεται κατανοητό, όταν το μικροδίκτυο προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, αποκομίζει κέρδος για την υπηρεσία που προσφέρει, αφού ο διαχειριστής του δικτύου (DNO) πληρώνει για την ενέργεια που αγοράζει. Αντίστοιχα, όταν το μικροδίκτυο αποφασίζει να απορροφήσει ενέργεια από το δίκτυο, αυτό συνεπάγεται ένα κόστος για το μικροδίκτυο, αφού θα πρέπει να αγοράσει ενέργεια από το δίκτυο. Όταν, τέλος, δεν εκτελεί καμία από τις δύο παραπάνω ενέργειες, τότε το μικροδίκτυο δεν κερδίζει αλλά ούτε και ζημιώνεται οικονομικά.

Σε μία αγορά ενέργειας, το κόστος της κιλοβατώρας μεταβάλλεται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η τιμή της εξαρτάται από τα ποσά της ενέργειας που προσφέρονται και ζητούνται αντίστοιχα κάθε χρονική στιγμή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση σε ενέργεια και όσο μικρότερη η προσφορά, τόσο αυξάνει η τιμή της κιλοβατώρας. Αντίστροφα, όταν η ζήτηση μειώνεται και η προσφορά σε ενέργεια αυξάνεται, τότε η τιμή της κιλοβατώρας μειώνεται αντιστοίχως.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε και ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο. Το μικροδίκτυο αγοράζει και πουλά ενέργεια στο δίκτυο, το οποίο εκπροσωπείται από τον DNO. Ο DNO δεν είναι παρά μία εταιρεία, η οποία διαχειρίζεται το δίκτυο, και έχει προφανώς σκοπό το κέρδος. Συγκεκριμένα, ο διαχειριστής του δικτύου, όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, είναι υπεύθυνος για την καλή λειτουργία του δικτύου και είναι υποχρεωμένος να παρέχει ενέργεια στα φορτία που τη ζητούν. Σε μία ελεύθερη αγορά ενέργειας κάθε φορτίο μπορεί να συμβάλλεται με τον DNO της επιλογής του, όπως γίνεται αυτή τη στιγμή με τις εταιρείες σταθερής και κινητής τηλεφωνίας. Θα έχει ακόμα τη δυνατότητα κάθε φορτίο να ζητά στο συμβόλαιό του την παροχή ενέργειας συγκεκριμένης ποιότητας – για παράδειγμα μπορεί να απαιτεί ισχύ με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος με πολύ μικρό αρμονικό περιεχόμενο (μικρό συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης – THD), πληρώνοντας βεβαίως το αντίστοιχο τίμημα. Αντίστοιχα, αποτελεί υποχρέωση του DNO να συμβληθεί με παραγωγούς ενέργειας, οι οποίοι θα του παρέχουν την ενέργεια που χρειάζεται για να τροφοδοτήσει τα φορτία. Επειδή λοιπόν ο DNO είναι συνήθως ο

μεσολαβητής μεταξύ φορτίων και παραγωγών και έως ένα βαθμό ελέγχει την αγορά ενέργειας, το σύνηθες είναι να αγοράζει ενέργεια από τους παραγωγούς σε φθηνότερη τιμή από αυτή που πουλάει στα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο έχει κέρδος, απαραίτητο για να τη βιωσιμότητά του.

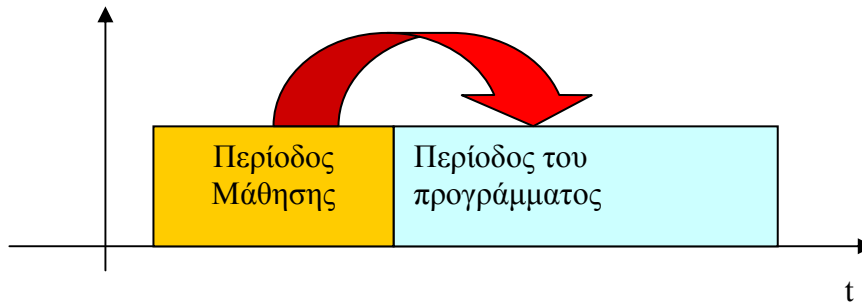
Σκοπός μας είναι λοιπόν να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος του μικροδικτύου, επιλέγοντας να απορροφήσουμε ενέργεια από το δίκτυο όταν το κόστος το κιλοβατώρας είναι το μικρότερο δυνατό, και αντίστοιχα να πουλήσουμε ενέργεια στο δίκτυο όταν το κέρδος που θα αποκομίσουμε θα είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο.

Ο αλγόριθμος που κατασκευάσαμε υλοποιεί αυτόν ακριβώς τον σκοπό και μάλιστα με αρκετά μεγάλη επιτυχία. Παράλληλα, αν ο αναγνώστης αναζητά τους λόγους που επιλέξαμε τη συγκεκριμένη μεθοδολογία για την κατασκευή του αλγορίθμου, θεωρούμε αναγκαίο σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε τους στόχους που θέσαμε και τους οποίους θα πρέπει επίσης να ικανοποιούσε ο αλγόριθμος. Προκύπτει λοιπόν ότι ο αλγόριθμος θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Να μπορεί να μαθαίνει και να προσαρμόζεται στη μορφή που θα έχει το σύστημα κάθε φορά.
- 2) Η διαδικασία της μάθησης να γίνεται σε πραγματικό χρόνο.
- 3) Να λειτουργεί σε περιβάλλον συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων στο οποίο η μεταφορά δεδομένων να είναι περιορισμένη.
- 4) Το περιβάλλον που λειτουργεί είναι στοχαστικό αφού για παράδειγμα δεν είναι εύκολο να προβλέψουμε τις αποφάσεις των άλλων πρακτόρων αλλά και την συμπεριφορά των μη ελεγχόμενων στοιχείων.
- 5) Η αποτίμηση για την ορθότητα μίας πράξης δεν γίνεται στην αμέσως επόμενη κατάσταση αλλά μετά από πολλές διαδοχικές καταστάσεις.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές προσπάθειες χρήσης της τεχνολογίας των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων αλλά δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα από την σκοπιά που το έχουμε παρουσιάσει. Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε προκειμένου να εφαρμοστεί στο επίπεδο αυτό, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ανήκει στο πεδίο της ενισχυτικής μάθησης όπου οι πράκτορες μέσα από μία διαδικασία επιβραβεύσεων προσπαθούν να επιλύουν τα προβλήματα που τους έχουν αναθέσει. Με τη χρήση της ενισχυτικής μάθησης και της τεχνικής Q-learning, ικανοποιούνται σε μεγάλο βαθμό οι παραπάνω στόχοι, αφού δεν απαιτείται να δώσουμε πολλές πληροφορίες στο σύστημά μας για το περιβάλλον του, η μάθηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο (σε λιγότερο από ~1s) και οι πράκτορες μέσα από διαδοχική μάθηση έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στο νέο περιβάλλον όποτε απαιτείται. Παράλληλα, με το Q-learning έχουν τη δυνατότητα να αποτιμήσουν την ορθότητα της πράξης τους σε βάθος χρόνου και όχι μόνο ως προς την επόμενη κατάσταση λειτουργίας τους.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να διασαφηνίσουμε το εξής σε σχέση με την υλοποίηση ενός αλγορίθμου που βασίζεται στην ενισχυτική μάθηση. Για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος θα πρέπει σε πρώτη φάση ο πράκτορας να εκπαιδευθεί σύμφωνα με τα στοιχεία για τις ανταμοιβές που θα του δώσουμε. Στη συνέχεια, έχοντας εφαρμόσει τη συνάρτηση Q και έχοντας υπολογίσει τον πίνακα τιμών με τις Q-values, είναι έτοιμος να περάσει στην πραγματική λειτουργία του προγράμματος. Σε αυτή τη δεύτερη φάση, επιλέγει ποια δράση θα εκτελέσει σε κάθε στιγμή σύμφωνα με τον πίνακα με τις Q-values που έχει ήδη υπολογίσει. Τα παραπάνω παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.2: Φάσεις Λειτουργίας του Αλγορίθμου

Θα συνεχίσουμε με την αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου, ενώ σε επόμενη παράγραφο θα αναλύσουμε και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να ενσωματωθεί ένας τέτοιος αλγόριθμος στην αγορά ενέργειας καθώς και σε συστήματα ευφών πρακτόρων που ελέγχουν συστοιχίες μπαταριών.

## 4.6. Αλγόριθμος – Περιγραφή

Συνοπτικά ο αλγόριθμος ακολουθεί τα βήματα που προτείνει η τεχνική Q-learning με κάποιες μικρές τροποποιήσεις ώστε να προσαρμοστεί στο σύστημα του μικροδικτύου. Σκοπός του αλγορίθμου είναι να επιλέξει ποια λειτουργία θα επιτελέσει κάθε χρονική στιγμή με στόχο το μέγιστο κέρδος. Όπως έχει προαναφερθεί, μπορεί είτε να πουλήσει ενέργεια στο δίκτυο, είτε να αγοράσει από αυτό, είτε να αδρανήσει (ούτε να αγοράσει, ούτε να πουλήσει). Ως κατάλληλα χρονικά διαστήματα θεωρήσαμε τις 24 ώρες μίας ημέρας. Συνεπώς ο πράκτορας θα μπορεί να αποφασίζει ποια από τις τρεις λειτουργίες θα επιτελέσει την επόμενη ώρα.

Πρώτα από όλα, θεωρούμε λοιπόν ότι έχουμε 24 διαφορετικές καταστάσεις  $s_i$ , με καθεμία να αντιπροσωπεύει και την αντίστοιχη ώρα της ημέρας. Επίσης σε κάθε κατάσταση  $s_i$  ο πράκτορας έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει τις τρεις δυνατές λειτουργίες-δράσεις που έχουμε αναφέρει:

- 1) Να πουλήσει ηλεκτρική ενέργεια
- 2) Να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια

### 3) Να αδρανήσει

Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζουμε σχηματικά το διάγραμμα για τρεις από τις καταστάσεις καθώς και τις πιθανές μεταβάσεις του προγράμματος. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η βέλτιστη διαδρομή.

Σχήμα 4.3: Πιθανές μεταβάσεις του προγράμματος

Υπενθυμίζουμε ότι η συνάρτηση για το Q-learning είναι η εξής:

$$Q(s, a) = (1 - \epsilon)Q(s, a) + \epsilon(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')),$$

όπου  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής μάθησης και  $\gamma$  είναι ο παράγοντας μείωσης (discount factor).

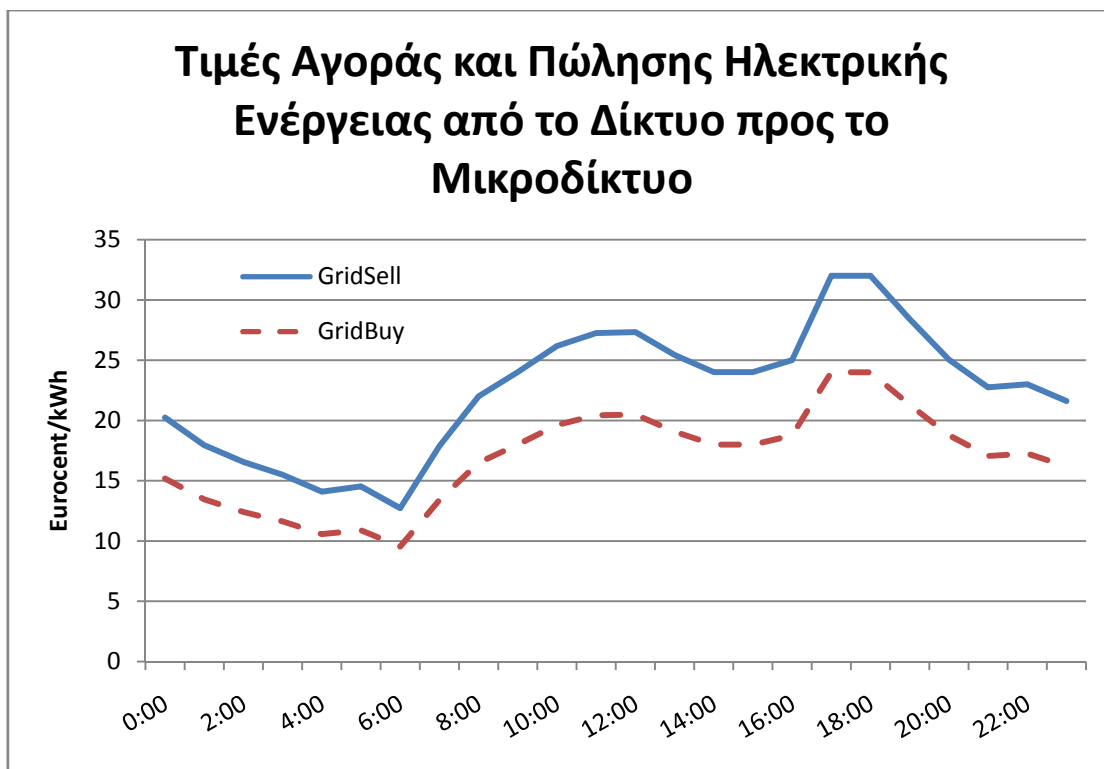
Όπως προκύπτει, αυτό που θα πρέπει ακόμα να ορίσουμε είναι οι ανταμοιβές  $r$  που θα λαμβάνει ο πράκτορας για κάθε κατάσταση στην οποία μεταβαίνει. Αυτές θεωρήσαμε ότι θα πρέπει να καθορίζονται από τις τιμές της κίλοβατώρας που ισχύουν σε κάθε ώρα. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο πράκτορας πουλάει ενέργεια στο δίκτυο, η ανταμοιβή του θα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή στην οποία πουλάει την ενέργεια. Αντίστοιχα, όταν ο πράκτορας αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο, η ανταμοιβή του θα αυξάνει όσο πετυχαίνει να αγοράζει σε φθηνή τιμή.

Χρειαζόμαστε λοιπόν αρχικά κάποιες ρεαλιστικές τιμές για την κίλοβατώρα. Οι τιμές που λάβαμε για την εφαρμογή μας είναι από το Amsterdam Power Exchange για το έτος 2003 [27] και αφορούν τις τιμές πώλησης ενέργειας από το δίκτυο προς το μικροδίκτυο. Οι τιμές αγοράς του δικτύου από το μικροδίκτυο θεωρούμε ότι είναι το 75% της τιμής πώλησης.

Στη συνέχεια, για να κατασκευάσει τον πίνακα των ανταμοιβών το πρόγραμμα εργάζεται ως εξής: Όσον αφορά τις ανταμοιβές για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας από το μικροδίκτυο στο κεντρικό δίκτυο, ο αλγόριθμος θέτει τις τιμές που προκύπτουν από τις τιμές που έχουμε υπολογίσει σύμφωνα με το Amsterdam Power Exchange (τιμή 75% χαμηλότερη από την τιμή πώλησης ενέργειας από το δίκτυο στο μικροδίκτυο). Όσον αφορά την τιμή αγοράς από το δίκτυο, έχει γίνει κατανοητό ότι ο πράκτορας πρέπει να αποφεύγει να αγοράζει ενέργεια σε υψηλές τιμές. Από την άλλη όμως ο αλγόριθμος λειτουργεί προσπαθώντας να επιτύχει τη μέγιστη ανταμοιβή. Οπότε για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος, αυτό που υλοποιήσαμε είναι το εξής: βρίσκουμε τη μέγιστη τιμή αγοράς από το δίκτυο και τη στρογγυλοποιούμε στη αμέσως μεγαλύτερη δυνατή μονάδα. Δηλαδή έστω ότι η μέγιστη τιμή αγοράς που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια μίας ημέρας είναι 32,5 Eurocents/kWh. Επιλέγουμε τιμή ίση με 33 Eurocents/kWh (στρογγυλοποίηση προς τα πάνω). Στη συνέχεια αφαιρούμε από το 33 όλες τις τιμές αγοράς που εμφανίζονται μέσα στην ημέρα. Η διαφορά που προκύπτει αποτελεί την ανταμοιβή μας. Οπότε για τιμή αγοράς 32,5 Eurocents/kWh η ανταμοιβή μας θα είναι μόλις ίση με 0,5, ενώ για τιμή αγοράς ίση με 22 Eurocents/kWh η ανταμοιβή μας θα είναι ίση με 11. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι με αυτόν τον τρόπο όσο μειώνεται η τιμή τόσο αυξάνεται η ανταμοιβή.

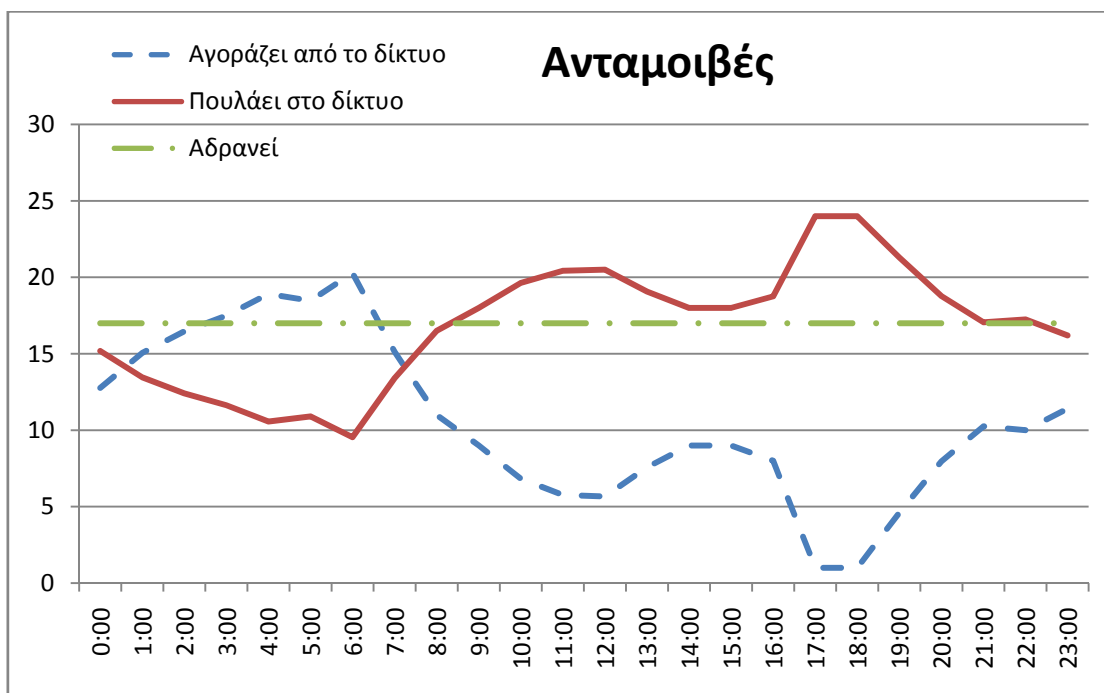
Τέλος η ανταμοιβή όταν ο πράκτορας επιλέγει να αδρανήσει υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών αγοράς από το δίκτυο, μειωμένος κατά 87,5%. Ένας ισοδύναμος τρόπος υπολογισμού θα ήταν να υπολογίσουμε αρχικά τη μέση τιμή της τιμής αγοράς και της τιμής πώλησης για κάθε ώρα. Η τιμή που προκύπτει θα είναι προφανώς μεγαλύτερη από την τιμή πώλησης στο δίκτυο και μικρότερη από την τιμή αγοράς από αυτό. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον μέσο όρο αυτών τιμών. Αυτή είναι και η ανταμοιβή μας, την οποία θεωρούμε ίδια σε όλες τις χρονικές στιγμές. Με αυτόν τον τρόπο σε κάποιες χρονικές στιγμές είναι πιο ευνοϊκό να αδρανήσεις από το να αγοράσεις ενέργεια, άλλες χρονικές στιγμές είναι πιο ευνοϊκό να πουλήσεις από το να αδρανήσεις κ.ο.κ. Είναι προφανές ότι υπάρχουν κι άλλοι τρόποι για να υπολογιστούν οι ανταμοιβές.

Στο Σχ. 4.4 παρουσιάζουμε τις τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο στο μικροδίκτυο, όπως δίνονται από τα στοιχεία του Amsterdam Power Exchange.



Σχήμα 4.4: Τιμές Αγοράς και Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας από το Δίκτυο στο μικροδίκτυο

Στο Σχ.4.5 παρουσιάζουμε τις σχηματικά τις ανταμοιβές για κάθε δράση, έτσι όπως υπολογίστηκαν.



Σχήμα 4.5: Οι ανταμοιβές οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του πίνακα με τις Q-values

Από το Σχ.4.4 γίνεται εμφανές ότι σύμφωνα με τις ανταμοιβές, κάποιες φορές συμφέρει το μικροδίκτυο να αγοράσει ενέργεια από το δίκτυο, κάποιες φορές να πουλήσει, ενώ κάποιες φορές το

συμφέρει να μείνει αδρανής. Όπως όμως θα γίνει κατανοητό, οι ανταμοιβές μπορεί να επηρεάζουν τις τιμές Q-values, όμως οι Q-values δε συμπίπτουν πάντα με τις τιμές των ανταμοιβών. Αυτό συμβαίνει, επειδή σύμφωνα με τη συνάρτηση του Q-learning, οι τιμές Q-values διαμορφώνονται έτσι ώστε να λαμβάνουν τη βέλτιστη στρατηγική σε βάθος χρόνου. Οπότε ακόμα κι αν κάποια χρονική στιγμή η ανταμοιβή για κάποια ενέργεια είναι μεγάλη, αν αυτή η ενέργεια δεν μπορεί να οδηγήσει στη βέλτιστη συνολική στρατηγική, τότε δε θα επιλεγεί.

Εφόσον λοιπόν έχουμε ορίσει και τις ανταμοιβές, ορίζουμε τις τιμές για τον συντελεστή μάθησης  $\epsilon$  και τον discount factor  $\gamma$ . Ύστερα από δοκιμές βρέθηκε ότι καταλληλότερες τιμές για το πρόβλημά μας είναι  $\epsilon=0,3$  και  $\gamma=0,1$  αντίστοιχα.

Επιπλέον, για να διευκολύνουμε τη θεώρησή μας, υποθέσαμε ότι σε κάθε ώρα το μικροδίκτυο αποδίδει ή απορροφάει σταθερή ποσότητα ενέργειας. Δυστυχώς επειδή δεν έχουμε πραγματικά στοιχεία για το μικροδίκτυο δεν μπορούμε να γνωρίζουμε πότε υπάρχει ζήτηση και πόση είναι αυτή καθώς και τι δυνατότητες παραγωγής ενέργειας έχουμε. Οπότε αποφασίσαμε να υποθέσουμε ότι το μικροδίκτυο περιορίζει τον ρυθμό που απορροφά ή αποδίδει ενέργεια σε μία σταθερή τιμή. Κύριος στόχος αυτής της υλοποίησης είναι να αποδείξουμε σε πρώτη φάση ότι ο αλγόριθμος έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις απώλειες που υπάρχουν κατά την απορρόφηση ή προσφορά της ενέργειας, αυτές λαμβάνονται εμμέσως υπόψη στις τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι οι τιμές με τις οποίες κάνουμε τους υπολογισμούς μας, έχουν τροποποιηθεί έτσι ώστε να αφορούν στα καθαρά ποσά ενέργειας που απορροφούνται και αποδίδονται από το μικροδίκτυο στο δίκτυο.

Τέλος, πραγματοποιήσαμε μία τελευταία θεώρηση. Για να αποδείξουμε ότι ο αλγόριθμός μας μπορεί να εκπαιδεύσει το μικροδίκτυο να αποκομίσει κέρδος, ακόμα κι αν δεν έχει καθόλου ενέργεια να διαθέσει, θεωρήσαμε ότι την ώρα 0:00 το μικροδίκτυο ξεκινάει με μηδενική διαθέσιμη ενέργεια. Αυτή βέβαια είναι μία θεώρηση που μας βολεύει, αφενός επειδή συνήθως τις πρώτες πρωινές ώρες η ενέργεια είναι σχετικά φθηνότερη οπότε το μικροδίκτυο μπορεί να αγοράσει ενέργεια χωρίς να εμποδίσει τη βέλτιστη οικονομική λειτουργία που θέλουμε να επιτύχουμε. Επιπλέον υποχρεώσαμε το μικροδίκτυο να πουλήσει τόσο ενέργεια μόνο όση έχει απορροφήσει από το μικροδίκτυο. Σε αυτό το σημείο θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε το μικροδίκτυο με μία μπαταρία, την οποία θεωρούμε στις 0:00 αφόρτιστη. Συνεπώς για να μπορέσει να προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο θα πρέπει πρώτα να φορτιστεί με το ανάλογο ποσό ενέργειας. Το γεγονός ότι το μικροδίκτυο υποχρεούται να πουλήσει όση ενέργεια έχει αγοράσει αποκτά σημασία, αν σκεφτούμε τι θα γινόταν αν ο πράκτορας είχε ξεκινήσει με ένα ποσό υπολειπόμενης ενέργειας προς διάθεση. Τότε, αν δεν τεθούν οι κατάλληλοι περιορισμοί, στο τέλος της ημέρας μπορεί να κατέληγε έχοντας πουλήσει όλη τη διαθέσιμη ενέργεια. Οπότε την επόμενη ημέρα, η υπολειπόμενη ενέργεια δε θα αντιστοιχεί στο αρχικό ποσό σύμφωνα με το οποίο είχε εκπαιδευθεί να αντιδρά στα ερεθίσματα του

περιβάλλοντός του. Συνεπώς χωρίς τους κατάλληλους περιορισμούς την επόμενη ημέρα θα έχει αποτύχει όσον αφορά τον τρόπο δράσης του.

Θέτοντας στο σύστημα ότι ξεκινάει με μηδενική ενέργεια είναι πιο εύκολο να εισάγουμε τον περιορισμό ότι θα πρέπει μέχρι το τέλος της ημέρας να έχει πουλήσει όλη την ενέργεια που έχει αγοράσει. Αν κάτι τέτοιο δε συμβεί, τότε υπό την προϋπόθεση ότι θα ακολουθεί τον ήδη διαμορφωμένο αλγόριθμο για ένα σχετικά μεγάλο διάστημα, κάθε βράδυ θα καταλήγει με περίσσειμα ενέργειας. Οπότε σε βάθος χρόνου η ενέργειά του θα αυξάνεται με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να φτάσει να μην μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια που έχει καθοριστεί οπότε να αδυνατεί να λειτουργήσει.

Εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη όλα τα προαναφερθέντα, ο αλγόριθμος είναι έτοιμος να υπολογίσει τον πίνακα τιμών Q-values, οι οποίες είναι αρχικοποιημένες σε μηδενικές τιμές. Το πρόγραμμα επιλέγει να μεταβεί τυχαία σε μία κατάσταση και επιλέγει μία τυχαία ενέργεια. Στη συνέχεια υπολογίζει την Q-value που αντιστοιχεί σε αυτό το ζεύγος κατάστασης/ενέργειας. Από αυτό το σημείο συνεχίζει επιλέγοντας τυχαίες ενέργειες μέχρι να φτάσει στην τελική κατάσταση (ώρα 23:00), υπολογίζοντας παράλληλα τις Q-values. Μόλις τερματίσει επιλέγει πάλι μία τυχαία αρχική κατάσταση στο διάστημα [0:00, 23:00] και επαναλαμβάνει τα ίδια βήματα. Με αυτόν τον τρόπο, μετά από αρκετές επαναλήψεις έχουμε πετύχει να εξερευνήσουμε όλα τα πιθανά ενδεχόμενα στο περιβάλλον του πράκτορα και να αξιολογήσουμε ποια είναι τα καταλληλότερα για να επιλέξουμε.

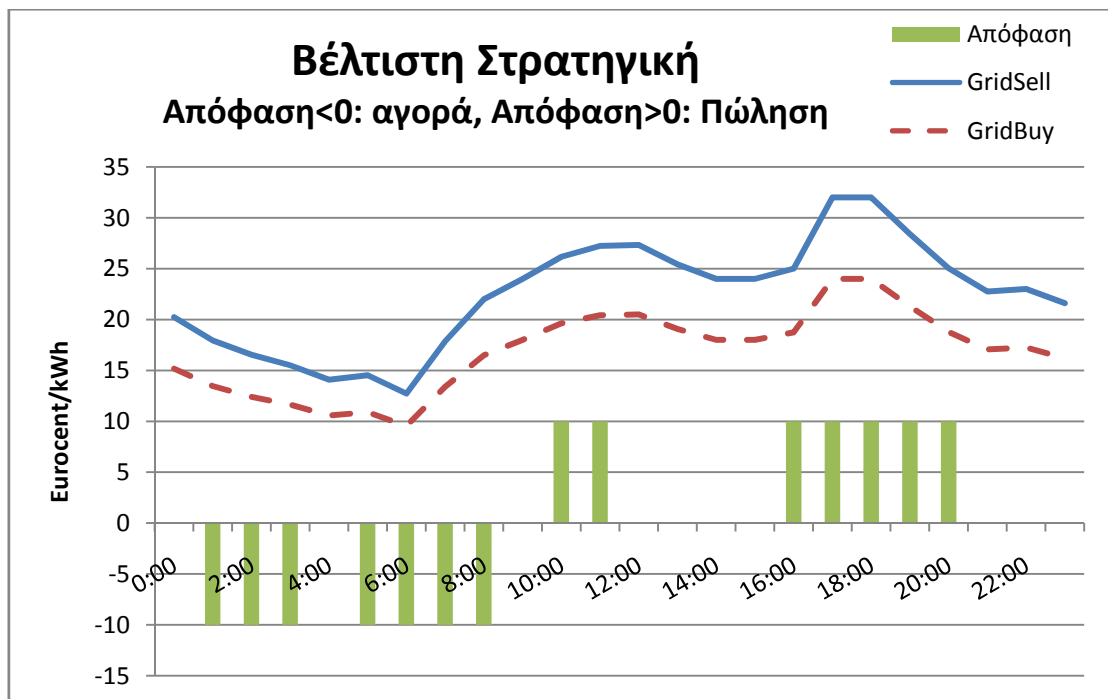
Αυτό που πετυχαίνουμε με τις Q-values, είναι στην ουσία να κατατάξουμε σε σειρά προτίμησης τη βέλτιστη δυνατή δράση σε κάθε κατάσταση. Ο αλγόριθμός μας θα είχε σταματήσει εδώ αν είχαμε άπειρη ενέργεια να δώσουμε ή να πάρουμε. Δυστυχώς, με τις Q-values ο αλγόριθμος δεν μπορεί να λάβει υπόψη του τις περιορισμένες δυνατότητες του μικροδικτύου όσον αφορά την απορρόφηση και την προσφορά ενέργειας. Για αυτό το λόγο, εισάγουμε ένα επιπλέον κομμάτι κώδικα.

Ο κώδικας αυτός διασφαλίζει ότι κρατείται η ισορροπία απορρόφησης/απόδοσης, μην επιτρέποντας στο μικροδίκτυο να απορροφήσει ενέργεια πάνω από το 100% των δυνατοτήτων του (π.χ. μπαταρίες 100% φορτισμένες) αλλά παράλληλα να μην αποδώσει παραπάνω ενέργεια από όση έχει διαθέσιμη. Μέσα από διαδοχικές επαναλήψεις μειώνουμε τις τιμές Q-values που δεν επιθυμούμε, μέχρι να παρουσιαστεί η επόμενη βέλτιστη επιλογή. Εφόσον αυτή μας ικανοποιεί τη δεχόμαστε.

Ακόμα για να είναι επιτυχημένος ο αλγόριθμός μας θα πρέπει στο τέλος της ημέρας να έχουμε αποκομίσει κέρδος από την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας. Οπότε στο τέλος υπολογίζεται μία ανταμοιβή η οποία αυξάνεται όσο αυξάνει και το κέρδος που έχουμε αποκομίσει. Αν έχουμε ζημία, τότε η ανταμοιβή παίρνει πολύ μικρές τιμές. Η έννοια της ανταμοιβής σε αυτό το σημείο έχει νόημα όταν για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πολιτικής χρησιμοποιούμε σύνολα τιμών πολλών ημερών του ίδιου μήνα για παράδειγμα. Θα πρέπει να καταλήξουμε τότε σε έναν ενιαίο πίνακα τιμών Q-

values για ολόκληρο τον μήνα. Σε αυτήν την περίπτωση, αυτή η συνολική ανταμοιβή παίζει το ρόλο του βάρους που θα έχει η πολιτική κάθε ημέρας στην ημερήσια πολιτική (στρατηγική) που θα καθοριστεί για ολόκληρο τον μήνα. Στην περίπτωσή μας όμως επειδή μελετήσαμε στοιχεία μόνο για μία ημέρα, σε περίπτωση που το σύστημά μας εμφάνιζε ζημία, τότε δίναμε εντολή να επαναληφθεί ολόκληρος ο αλγόριθμος. Εδώ προφανώς τίθεται το ζήτημα της διάρκειας που χρειάζεται για να τρέξει ο αλγόριθμος για να παρουσιάσει μία ικανοποιητική στρατηγική. Επαναλάβαμε αρκετές φορές την εκτέλεση του αλγορίθμου και παρατηρήσαμε ότι στη χειρότερη περίπτωση δεν ξεπερνά το συνολικό χρόνο των 2s. Ακόμα λοιπόν κι αν έπρεπε να υπολογίζουμε μία νέα πολιτική κάθε ημέρα, ο χρόνος παραμένει αμελητέος για την εκπαίδευση του πράκτορα.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε στο Σχ.4.6 τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου που κατασκευάσαμε.



Σχήμα 4.6: Βέλτιστη Στρατηγική που προκύπτει σύμφωνα με τον αλγόριθμο. Όταν η απόφαση είναι αρνητική, σημαίνει ότι το μικροδίκτυο απορροφά (αγοράζει) ενέργεια και φορτίζεται. Όταν η απόφαση είναι θετική σημαίνει ότι το μικροδίκτυο αποδίδει (πουλάει) ενέργεια στο δίκτυο

Παρατηρούμε από το Σχ.4.5 πως όση ενέργεια αγόρασε κατά τη διάρκεια της ημέρας, την πούλησε αργότερα σε υψηλότερη τιμή. Ακόμα το πρόγραμμα υπολογίζει και το κέρδος που θα έχουμε από την αγοραπωλησία ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι έστω X το πόσο της ενέργειας που απορροφά ή αποδίδει στο δίκτυο κάθε ώρα. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις ενέργειες του πράκτορα σε μία ημέρα και το κόστος/κέρδος από αυτές κάθε ώρα.

<b>Χρονική Στιγμή (ώρες)</b>	<b>Ενέργεια</b>	<b>Κόστος/Κέρδος (Eurocent/Kwh για διάρκεια 1 h)</b>
0:00	Αδρανεί	0
1:00	Αγορά	-17,94
2:00	Αγορά	-16,54
3:00	Αγορά	-15,5
4:00	Αδρανεί	0
5:00	Αγορά	-14,53
6:00	Αγορά	-12,72
7:00	Αγορά	-17,87
8:00	Αγορά	-22
9:00	Αδρανεί	0
10:00	Πώληση	19,63
11:00	Πώληση	20,43
12:00	Αδρανεί	0
13:00	Αδρανεί	0
14:00	Αδρανεί	0
15:00	Αδρανεί	0
16:00	Πώληση	18,75
17:00	Πώληση	24
18:00	Πώληση	24
19:00	Πώληση	21,3
20:00	Πώληση	18,78
21:00	Αδρανεί	0
22:00	Αδρανεί	0
23:00	Αδρανεί	0
	<b>Σύνολο</b>	<b>29,79 Eurocent/Kwh</b>

Πίνακας 4.2: Κέρδος που προκύπτει σύμφωνα με τη βέλτιστη στρατηγική που επέλεξε ο πράκτορας

Αν λοιπόν θεωρήσουμε ότι το μικροδίκτυο κάθε ώρα μπορεί να απορροφήσει/αποδώσει το 100 kWh, προκύπτει ότι ημερησίως έχουμε κέρδος ίσο με περίπου 30 €. Σε ένα μήνα θα έχουμε κέρδος περίπου ίσο με 900 €.

Επιχειρώντας μία τελευταία επισήμανση, κάποιος θα μπορούσε να αναρωτηθεί γιατί για τόσες ώρες ο πράκτορας παραμένει αδρανής, ενώ θα μπορούσε να απορροφήσει ενέργεια και να την πουλήσει αργότερα. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά το Σχ.4.4 θα δούμε ότι πιθανότατα δεν υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης της στρατηγικής που ακολουθεί ο πράκτορας. Το γεγονός ότι ο πράκτορας πουλάει την ενέργεια 75% φθηνότερα από ό,τι την αγοράζει δεν του επιτρέπει να αποκομίσει μεγάλα κέρδη. Για αυτό και για ορισμένα διαστήματα προτιμά να μείνει αδρανής ώστε να πουλήσει την ενέργεια που έχει συσσωρεύσει αργότερα σε καλύτερη τιμή. Ας έχουμε υπόψη πως σκοπό έχουμε το μέγιστο κέρδος και όχι τη μέγιστη απορρόφηση και απόδοση ενέργειας στο δίκτυο. Πράγματι όταν δοκιμάσαμε να αποθαρρύνουμε τον πράκτορα να παραμείνει αδρανής, καταλήξαμε τελικά με ζημιά και όχι με κέρδος στο τέλος της ημέρας.

#### **4.7. Εφαρμογές του Αλγορίθμου**

Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί με ελάχιστες τροποποιήσεις να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές που περιλαμβάνουν τεχνολογίες ευφυών πρακτόρων και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Πρώτα από όλα, ο κύριος σκοπός που υλοποιήθηκε το παραπάνω σύστημα ήταν για να αποδείξουμε πως με την κατάλληλη εκπαίδευση το μικροδίκτυο μπορεί να προσδιορίσει μια τέτοια στρατηγική, ώστε να αγοράζει ενέργεια σε φθηνή τιμή και να την αποδίδει πάλι στο δίκτυο σε ακριβότερη, αποκομίζοντας έτσι κέρδος.

Παράλληλα, ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσουμε πότε συμφέρει το μικροδίκτυο να αγοράσει ενέργεια. Συνεπώς, αν προβλέπεται πως για την επόμενη ημέρα το μικροδίκτυο θα χρειαστεί επιπλέον ποσά ενέργειας, με τη βοήθεια του παραπάνω αλγορίθμου το μικροδίκτυο μπορεί να αποφασίσει πότε το συμφέρει να αγοράσει αυτή την ενέργεια, να την αποθηκεύσει και να τη χρησιμοποιήσει κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αντίστοιχα, το μικροδίκτυο με τον παραπάνω αλγόριθμο έχει τη δυνατότητα να αποφασίσει πότε το συμφέρει να πουλήσει ενέργεια. Συνεπώς αν έχει διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να την προσφέρει στο δίκτυο, έχοντας εκπαιδευτεί από τον αλγόριθμο, μπορεί ο πράκτορας να αποφασίσει ποιες χρονικές στιγμές θα αποδώσει αυτήν την ενέργεια στο δίκτυο.

Ακόμα, η υλοποίηση του παραπάνω συστήματος μπορεί να διευκολύνει την εισαγωγή συστοιχιών μπαταριών στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας. Τη θέση του μικροδικτύου μπορεί πολύ εύκολα να την πάρει μία συστοιχία μπαταριών, αφού και η συστοιχία μπαταριών μπορεί να θεωρηθεί ότι άλλοτε λειτουργεί ως φορτίο και άλλοτε ως παραγωγός. Η μπαταρία μπορεί να είναι συνδεδεμένη στο Μικροδίκτυο – ή σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο γενικότερα – και προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια όταν της ζητηθεί, εφόσον βεβαίως είναι επαρκώς φορτισμένη. Θεωρούμε ότι η μπαταρία λειτουργεί αυτόνομα και όχι υποστηρικτικά σε πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά ή οι ανεμογεννήτριες. Ως εκ τούτου, δεν εξαρτάται από ανανεώσιμες πηγές για τη φόρτισή της και μπορεί κατά τη διάρκεια μίας ημέρας να εκτελέσει κάθε χρονική στιγμή οποιαδήποτε από τις τρεις λειτουργίες που έχουμε αναφέρει: αγορά, πώληση, αδράνεια. Επιπλέον, οι υποθέσεις που έχουμε κάνει στον αλγόριθμό μας ισχύουν στο ακέραιο και για τις μπαταρίες. Συνεπώς, με τη βοήθεια του παραπάνω αλγόριθμου, ο πράκτορας μπορεί να έχει προαποφασίσει – για παράδειγμα από την προηγούμενη ημέρα ή από τον προηγούμενο μήνα – τη στρατηγική αγοραπωλησίας που θα ακολουθήσει η μπαταρία τη συγκεκριμένη ημέρα.

Οι τιμές στις οποίες αγοράζονται και πωλούνται ποσά ενέργειας συνήθως δεν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση κατά τη διάρκεια ενός μήνα ή μίας εποχής, αν βεβαίως κάνουμε τον διαχωρισμό μεταξύ εργάσιμων ημερών και Σαββατοκύριακου. Το ίδιο ισχύει και όταν μελετάμε την περίπτωση της βέλτιστης οικονομικής λειτουργίας του μικροδικτύου. Συνεπώς ο πράκτορας θα πρέπει να έχει εκπαιδευθεί κατάλληλα για τη συγκεκριμένη εποχή, κατασκευάζοντας δύο μοντέλα στρατηγικών, ένα για τις εργάσιμες ημέρες και ένα για τα Σαββατοκύριακα. Με το εσωτερικό ρολόι που θα έχει το σύστημα, ή με ένα μήνυμα από κάποιον ελεγκτή, μπορεί να αναγνωρίζει αν είναι εργάσιμη ημέρα ή Σαββατοκύριακο και να επιλέγει το κατάλληλο μοντέλο στρατηγικής. Γνωρίζοντας λοιπόν πότε θα αγοράσει και πότε θα πουλήσει ηλεκτρική ενέργεια τη συγκεκριμένη ημέρα, αυτό που μένει να διαπραγματευτεί είναι η τιμή στην οποία θα πραγματοποιήσει την αγορά/πώληση. Αυτό μπορεί να γίνει με τον αλγόριθμο δημοπρασίας για μικροδίκτυα με συστήματα πολλαπλών πρακτόρων όπως περιγράφεται στο [1]. Το σημαντικό είναι ότι με τον αλγόριθμο που περιγράψαμε, αποφεύγουμε σημαντικό υπολογιστικό φόρτο κατά τη διάρκεια της ημέρας, εφόσον ο πράκτορας δεν είναι υποχρεωμένος πια να αποφασίζει κάθε στιγμή μέσα στη ημέρα ποια δράση θα εκτελέσει. Ακόμα περισσότερο δε, όταν δεν γνωρίζει πώς είναι πιθανό να εξελιχθούν οι τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, με τον παραπάνω αλγόριθμο δίνουμε τη δυνατότητα στον πράκτορα να έχει μία εικόνα των τιμών στις οποίες θα κινηθεί η αγοραπωλησία ενέργειας μέσα στην ημέρα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να κατασκευάσει ένα εσωτερικό μοντέλο στρατηγικής το οποίο θεωρεί ότι αν το ακολουθήσει θα αποκομίσει το μέγιστο δυνατό κέρδος, ενώ παράλληλα αποφεύγει πληθώρα υπολογισμών για την επιλογή της κατάλληλης δράσης κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Είναι δεδομένο ότι ο πράκτορας, με πολύ μεγάλη πιθανότητα, θα επιλέξει τη βέλτιστη στρατηγική για τα στοιχεία που του παρέχουμε. Μένει λοιπόν να διασφαλίσουμε ότι τα στοιχεία αυτά είναι

αρκετά αντιπροσωπευτικά για το διάστημα που εξετάζουμε. Η περιγραφή του αλγορίθμου που έγινε πιο πάνω θεωρούμε ότι απλώς αποδεικνύει τη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου για κάποια σύνολα τιμών. Θεωρούμε όμως πως για να είναι αποδοτική μια εφαρμογή δεν αρκεί μόνο ένα σύνολο τιμών. Ο πράκτορας θα πρέπει να εκπαιδευτεί σε πολλά διαφορετικά σύνολα τιμών, αντιπροσωπευτικά της συγκεκριμένης εποχής. Στη συνέχεια θα πρέπει να προσδιορίσει ποια είναι η κατάλληλη στρατηγική συνδυάζοντας τις επιμέρους στρατηγικές στις οποίες έχει καταλήξει σύμφωνα με βάρη, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο (παρ. 4.6). Τα βάρη αυτά θα προκύπτουν από τις ανταμοιβές που θα λαμβάνει κάθε στρατηγική ανάλογα με το κέρδος που θα αποκομίζει. Προσεγγιστικά μπορούμε να πούμε ότι μία αρκετά ικανοποιητική εκπαίδευση για τον επόμενο μήνα δε θα διαρκέσει πάνω από περίπου 10-20s.

Ακόμα, αν και δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα αποδοτικό σαν πρακτική, λόγω του μικρού πραγματικού χρόνου εκπαίδευσης, ο πράκτορας θα μπορούσε να εκπαιδεύεται κάθε ημέρα για την προηγούμενη. Ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπου και η επικοινωνία με τους υπόλοιπους πράκτορες αναμένεται μειωμένη μπορεί να διαθέσει μερικά δευτερόλεπτα για την εκπαίδευσή του. Το δύσκολο σε αυτό το σημείο είναι πού θα βρίσκει τα στοιχεία για να εκπαιδευτεί. Αυτά θα μπορούν να είναι είτε αποθηκευμένα στη μνήμη του, είτε να αποστέλλονται από κάποια βάση δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, αν υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρικό δίκτυο αποτελείται από πολλές διαφορετικά μικροδίκτυα, είτε θα επιβαρύνουμε το σύστημα επικοινωνίας με μεταφορά δεδομένων η οποία δε θεωρείται απαραίτητα αμελητέα, είτε αυτή την επιβάρυνση θα την υποστεί η μνήμη κάθε υπολογιστικής μονάδας. Για αυτό το λόγο, είναι ίσως προτιμότερο να γίνεται μια καλύτερης ποιότητας εκπαίδευση (με διάφορα σύνολα τιμών) σε αραιότερα χρονικά διαστήματα.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> :

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου για τον αποτελεσματικό έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όπως τα μικροδίκτυα. Περιγράψαμε και αναλύσαμε τον ευφυή ελεγκτή φορτίου, ο οποίος στην ουσία επιτρέπει την εισαγωγή της τεχνολογίας ευφυών πρακτόρων στο μικροδίκτυο. Οι αλγόριθμοι που αναπτύξαμε συμβάλουν στον καταναμημένο έλεγχο του συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα στους πράκτορες να αναλάβουν πρωτοβουλίες σε τοπικό επίπεδο και να επικοινωνήσουν με άλλους πράκτορες μόνο για να επιτύχουν στόχους που απαιτούν τη συνεργασία μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στο σύστημα να ανταλλάσσεται μικρότερος όγκος πληροφοριών. Παράλληλα σε σύγκριση με τον κεντρικό έλεγχο, ο οποίος εισάγει πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα όταν το σύστημά μας αποτελείται από πολλές διαφορετικές μονάδες, ο καταναμημένος έλεγχος επιτρέπει τη λήψη ορισμένων αποφάσεων σε τοπικό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο δεν επιβαρύνει τον κεντρικό ελεγκτή με διεργασίες, οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν τοπικά.

Θεωρούμε ότι με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που επιχειρείται, θα αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό ο αριθμός των μικρών παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, όπως αναλύσαμε στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, τα μικροδίκτυα προσφέρουν πλήθος πλεονεκτημάτων όσον αφορά την οικονομική λειτουργία, την αυτονομία, την καλύτερη ποιότητα ισχύος και τη μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ώστε είναι πιθανό να αποτελέσουν μία νέα μορφή ηλεκτρικού συστήματος η οποία θα ενταχθεί στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Ως εκ τούτου τα συστήματα ευφυών πρακτόρων μπορεί να αποτελέσουν μια καλή εναλλακτική λύση σε σύγκριση με τον κεντρικό έλεγχο, εφόσον δίνουν μερικά νέα, ιδιαίτερα χρήσιμα χαρακτηριστικά όσον αφορά τον έλεγχο του δικτύου. Πρώτα από όλα, οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα μια σειρά από προβλήματα, τα οποία μπορούν να επιλύσουν προσαρμοζόμενοι στις εκάστοτε συνθήκες. Βασιζόμενοι στην ευφυΐα που διαθέτουν οι πράκτορες και στην ικανότητά τους για επικοινωνία, μπορούμε να τους εκπαιδεύσουμε/προγραμματίσουμε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε ένα πλήθος διαφορετικών προβλημάτων, χωρίς να χρειάζεται να μεριμνήσουμε εμείς για καθένα από αυτά ξεχωριστά. Παράλληλα ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα στοιχεία που ελέγχονται από τους πράκτορες αποκτούν δυνατότητα «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» (plug'n'play). Η ιδιότητα αυτή θα αποδειχθεί ιδιαίτερα σημαντική στα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα, όπου προβλέπεται ότι παραγωγοί και φορτία μπορεί να εντάσσονται και να αποσυνδέονται από το δίκτυο με στοχαστικό τρόπο. Το γεγονός ότι δεν είναι απαραίτητος ο επαναπρογραμματισμός του ελέγχου με κάθε σύνδεση ή αποσύνδεση ενός παραγωγού αποτελεί στοιχείο ιδιαίτερα θετικό. Ο τρόπος τον οποίο παρουσιάσαμε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο

για την υλοποίηση του plug'n'play αναφερόταν στην πλατφόρμα JADE και τον πράκτορα DF, ο οποίος εκτελεί χρέη «υπηρεσίας Χρυσού Οδηγού». Αναφερθήκαμε εκτεταμένα στην πλατφόρμα JADE, διότι αποτελεί ίσως το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο λογισμικό για ανάπτυξη περιβάλλοντος ευφυών πρακτόρων και είναι πιθανό να επικρατήσει ως πρότυπο στο μέλλον.

Όσον αφορά τον ευφυή ελεγκτή φορτίου, προβλέπεται ότι στο μέλλον πιθανώς να αποδειχθεί απαραίτητο στοιχείο για τον έλεγχο των μικροδικτύων. Οι δυνατότητες που έχει για μέτρηση και ανίχνευση συμβάντων, καθώς και η νοημοσύνη από την οποία διακρίνεται τον καθιστούν ικανό όχι μόνο να μπορεί να απολαμβάνει μια σχετική αυτονομία, αλλά και να ενημερώνει τις γειτονικές μονάδες σε περίπτωση σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στον αποδοτικότερο έλεγχο. Επιπλέον, εφοδιασμένος με διακόπτες που μπορούν να αποκόπτουν φορτία, η συμβολή μπορεί να είναι καθοριστική σε περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας του μικροδικτύου, όπου σκοπός είναι η επάρκεια της ισχύος με αποτέλεσμα που μερικές φορές οδηγεί στην αποκοπή μη σημαντικών φορτίων.

Παράλληλα αποδείξαμε τη χρησιμότητα τεχνικών που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στον χώρο της τεχνητής νοημοσύνης και της ρομποτικής, όταν εφαρμόζονται για τον έλεγχο των ηλεκτρικών δικτύων. Με την τεχνική Q-learning δε χρειάζεται να περιγράψουμε στον πράκτορα με αναλυτικό τρόπο το περιβάλλον του. Αντίθετα αρκεί να του δώσουμε μερικά στοιχεία. Εκείνος με βάση αυτά τα στοιχεία και χρησιμοποιώντας την τεχνική Q-learning θα μπορέσει να προσαρμοστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στο περιβάλλον του. Σημειώνουμε ότι το σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνικής Q-learning, εκτός από το ότι δεν απαιτεί μοντελοποίηση του περιβάλλοντος, είναι ότι λαμβάνει υπόψη της όχι μόνο το άμεσο κέρδος αλλά το συνολικό κέρδος που θα αποκομίσει ο πράκτορας από τις ενέργειές του σε βάθος χρόνου. Δείξαμε με την εφαρμογή που υλοποιήσαμε ότι ο πράκτορας πράγματι μπορεί να προσαρμόσει τις ενέργειές του με πολύ ικανοποιητικό τρόπο στις τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που του δόθηκαν, ώστε να επιλέξει μία στρατηγική με το μέγιστο δυνατό κέρδος σε βάθος χρόνου. Σε άλλη περίπτωση, για να επιτευχθεί η βέλτιστη στρατηγική είναι πιθανό να απαιτούνταν συνάρτηση κέρδους από την οποία θα προκύπτει η τιμή αγοράς και πώλησης κάθε χρονική στιγμή. Σε μια απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όμως, όπου οι τιμές διαμορφώνονται ύστερα από διαπραγμάτευση, υπεισέρχεται το στοιχείο της στοχαστικότητας. Συνεπώς μπορεί να αποδειχθεί πολύ επίπονο να εξάγουμε μία συνάρτηση κόστους. Τη δυσκολία μιας τέτοιας περίπτωσης μπορούμε να την αποφύγουμε με τη χρήση της τεχνικής Q-learning.

Αποτελεί ακόμα σημαντικό σημείο το γεγονός ότι μπορέσαμε να δείξουμε ότι ένα μικροδίκτυο μπορεί να εκπαιδευθεί με κατάλληλο τρόπο, ώστε να προσδιορίσει στρατηγικές αγοράς και πώλησης ενέργειας οι οποίες θα του αποφέρουν κέρδος. Επομένως, εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων του, οι τεχνικές ελέγχου που πιθανώς να ενσωματώνει ένα μικροδίκτυο μπορεί να

το οδηγήσουν στη βέλτιστη οικονομική του λειτουργία, η οποία μπορεί σίγουρα να είναι κερδοφόρα. Θα πρέπει να σημειώσουμε τη συμβολή της τεχνικής Q-learning και γενικότερα της ενισχυτικής μάθησης όταν μελετάμε το μικροδίκτυο σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας. Το γεγονός ότι δίνουμε τη δυνατότητα στο μικροδίκτυο να προσαρμοστεί σε ένα ιδιαίτερα στοχαστικό περιβάλλον είναι κάθε άλλο παρά αμελητέο. Σε αυτό το σημείο επισημαίνουμε ακόμη το γεγονός ότι ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος επιτρέπει την πλήρως αυτόματη λειτουργία του μικροδικτύου, χωρίς να απαιτείται προσωπικό ελέγχου. Αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για την περίπτωση μικρών παραγωγών που συζητάμε, όπου το κόστος της λειτουργίας πρέπει να παραμένει σε λογικά πλαίσια. Επιπλέον ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε μπορεί να βοηθήσει ιδιαίτερα στην καλύτερη αξιοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συμπίπτει συνήθως με τις υψηλές τιμές στην πώληση ενέργειας. Οπότε το μικροδίκτυο θα μπορούσε να αποφασίσει να διαθέσει την ενέργεια αυτή στο κεντρικό δίκτυο, και για να καλύψει τις ανάγκες του να αγοράσει την αντίστοιχη ενέργεια από το δίκτυο όταν η τιμή αγοράς είναι χαμηλή. Επομένως, σε συνδυασμό με ένα μοντέλο πρόβλεψης της παραγωγής για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ο αλγόριθμος καθίσταται όχι μόνο πιο αποδοτικός αλλά και πιο πλήρης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει πώς μπορούμε να εισάγουμε καινοτόμες τεχνικές ελέγχου στα υπάρχοντα και τα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα. Αποτελεί άποψη του γράφοντα, ότι ο αυτόματος έλεγχος των ηλεκτρικών δικτύων με νέες τεχνικές που ενσωματώνουν εφαρμογές λογισμικού και επικοινωνία μεταξύ των μονάδων θα αποτελέσει σημαντικό και πιθανώς απαραίτητο βήμα προς την αναμόρφωση των ήδη παλαιωμένων ηλεκτρικών δικτύων. Λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία των υπάρχοντων ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία συνήθως ξεπερνούν τα 40 έτη ζωής, είναι ίσως η κατάλληλη στιγμή για να επιλέξουμε τις τεχνολογίες εκείνες που θα τα αντικαταστήσουν. Τα συστήματα ευφών πρακτόρων και τα μικροδίκτυα μπορεί να αποδειχθούν ως συστατικά στοιχεία αυτών των τεχνολογιών. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η δομή του μικροδικτύου όπως περιγράφεται στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο είναι πιθανό να συνεισφέρει εκτός των άλλων και στη μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος από βλαβερούς ρύπους, στοιχείο οπωσδήποτε επιθυμητό, αν σκοπεύουμε να ζήσουμε για αρκετά ακόμα χρόνια στον συγκεκριμένο πλανήτη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Άρης Ευάγγελος Λ. Δημέας, «Συμβολή στον Καταναμημένο Έλεγχο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής στην Χαμηλή Τάση», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ 2006
2. <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/>
3. Dan Krotz (2003, February 28). *Microgrids: Reliable Power in a Small Package* [Online]. Available: <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/EETD-microgrids.html>
4. Βλαχάβας Ιωάννης, Κεφαλάς Πέτρος, Βασιλειάδης Νικόλαος, Κόκκορας Φώτης, Σακελλαρίου Ηλίας, *Τεχνητή Νοημοσύνη*, Β' Έκδοση, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γαρταγάνη, 2005
5. Jacques Ferber, *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Great Britain, Addison-Wesley, 1999
6. Jeffrey M. Bradshaw (Ed.), *Software Agents*, Menlo Park, CA, USA, AAAI Press/ The MIT Press, 1997
7. M. Wooldridge, *An Introduction to Multi-Agent Systems*, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2002
8. M. Genesereth, R. Fikes, Knowledge Interchange Format Version 3.0, Technical Report Stanford University, 1992
9. The Foundation for Intelligent Physical Agents, Available: <http://www.fipa.org>
10. Peter Stone, Manuela Veloso, “A Layered Approach to Learning Client Behaviours in RoboCup Soccer Server”, *Applied Artificial Intelligence Journal*, vol.12, 1998
11. S. D. J. McArthur, S. M. Strachan, G. Jahn, “The design of a multiagent transformer condition monitoring system”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 19, Issue 4, Nov. 2004, pp.1845 – 1852.
12. J.A. Hossack, J. Menal, S.D.J. McArthur, J.R. McDonald, “A Multi-Agent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance”, *IEEE Trans. on Power Systems*, 2003
13. M. D. Judd, S. D. J. McArthur, J. R. McDonald, O. Farish. “Intelligent Condition Monitoring and Asset Management: Partial Discharge Monitoring for Power Transformers”, *IEE Power Engineering Journal*, Vol. 16, No. 6, pp. 297-304, December 2002
14. J. Q. Feng, D. P. Buse, Q. H. Wu, and J. Fitch, “Distributed mobile communication base station diagnosis and monitoring using multi-agents”, *IDEAL2002*, number LNCS 2412 in *Lecture Notes in Computer Science*, pages 267-272, Manchester, UK, Springer Verlag
15. H. You, V. Vittal, J. Jung, C. C. Liu, M. Amin, R. Adapa, “An Intelligent Adaptive Load Shedding Scheme”, *Proc. 2002 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Seville, Spain, June 2002

16. T. Wittig, N.R. Jennings, E.H. Mamdani, “ARCHON: framework for intelligent co-operation”, *IEEE Trans. Intelligent Systems Engineering*, vol. 3, issue 3, pp. 168-179, 1994
17. D. Koesrindartoto, Sun Junjie, L. Tesfatsion, “An agent-based computational laboratory for testing the economic reliability of wholesale power market designs”, *IEEE Power Engineering Society General Meetin*, Volume 1. June 12-16, 2005, pp. 931 – 936
18. A. J. Bagnall and G. D. Smith, “Using an adaptive agent to bid in a simplified model of the UK market in electricity”, In W. Banzhaf, J. Daida, A. E. Eiben, M. H. Garzon, V. Honavar, M. Jakiela, and R. E. Smith, editors, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-99)*, page 774, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1999
19. Fabio Bellifemine, Giovanni Caire, Tiziana Trucco, Giovanni Rimassa, *JADE Programmer’s Guide* [Online]. Available: <http://jade.tilab.com/>
20. Fabio Bellifemine, Giovanni Caire, Tiziana Trucco, Giovanni Rimassa, Roland Mungenast, *JADE User’s Guide* [Online]. Available: <http://jade.tilab.com/>
21. Erfu Yang, Dongbing Gu, *Multiagent Reinforcement Learning for Multi-Robot Systems: A Survey*, University of Essex Technical Report CSM-404
22. Σπύρος Γ. Τζαφέστας, *Υπολογιστική Νοημοσύνη, Τόμος Α: Μεθοδολογίες*, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2002
23. Claude F. Touzet, Q-learning for Robots, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks (Second Edition)*, M. Arbib editor, MIT Press, 2003, pp. 934-937
24. R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998
25. M. L. Littman, “Value function reinforcement learning in markov games,” *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 55–66, 2001
26. C. J. Watkins and P. Dayan, “Qlearning,” *Machine Learning*, vol. 8, pp. 279–292, 1992
27. Amsterdam Power Exchange, Online: [www.apx.nl](http://www.apx.nl)