



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

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άρης Ευάγγελος Α. Δημέας
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2006



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

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άρης Ευάγγελος Α. Δημέας
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2006



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

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΕΛΕΓΧΟ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ
ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Άρης Ευάγγελος Λ. Δημέας

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Ευάγγελος Διαλυνάς
Γεώργιος Κορρές

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την2006.

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

.....
Ευάγγελος Διαλυνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

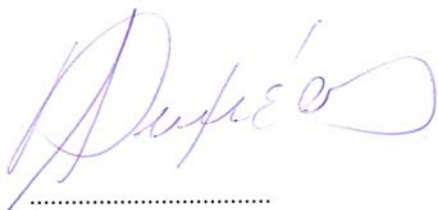
.....
Αναστάσιος Μπακιρτζής
Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ανδρέας Γεώργιος
Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Τιμοθέων Σελλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2006



.....
Άρης Ευάγγελος Α. Δημέας

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

Copyright © Άρης Ευάγγελος Α. Δημέας, 2006
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.

Στους γονείς μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή άρχισε να εκπονείται το Φεβρουάριο του 2002 και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2006, στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή μου κ. Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου:

Στον Καθηγητή μου και επιβλέποντα μου κ. Νίκο Χατζηαργυρίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Επιπλέον θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την αμέριστη συμπαράσταση, ενθάρρυνση και καθοδήγησή του, καθ' όλη την διάρκεια της διατριβής, καθώς και για την μοναδική ευκαιρία που μου έδωσε να γνωρίσω από κοντά σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις που έλαβαν χώρα διεθνώς.

Επίσης τους Καθηγητές μου κ. Ευάγγελο Διαλυνά, κ. Γεώργιο Κορρέ, και κ. Κώστα Βουρνά για την συμπαράσταση και την βοήθεια τους σε διάφορα επιμέρους επιστημονικά θέματα.

Επιθυμώ επιπλέον, να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου και υποψήφιους διδάκτορες από το Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για την άπογη και εποικοδομητική μεταξύ μας σχέση και ειδικότερα θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους Αντώνη Τσικαλάκη, Κυριάκο Παπαδογιάννη, Ανδρέα Καμαρινόπουλο και την Ελένη Αυλωνίτου. Ακόμα από τον ευρύτερο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Ιωάννη Παπαλεωνιδόπουλο.

Τέλος οι πλέον σημαντικές ευχαριστίες ανήκουν σίγουρα στους γονείς μου για την σημαντική υποστήριξη και συμπαράσταση που έλαβα όχι μόνο κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, αλλά και καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Άρης Ευάγγελος Λ. Δημέας
Αθήνα, 2006

Περίληψη

Η Διατριβή αυτή πραγματεύεται την αρχιτεκτονική του ευφυούς πράκτορα λογισμικού με σκοπό τον έλεγχο ενός μικροδίκτυο. Ο ευφυής πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και της ικανότητας για κοινωνική συμπεριφορά δηλαδή να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες.

Τα μικροδίκτυα είναι ένα νέο είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής όπως μικροτουρμπίνες ή φωτοβολταϊκά σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, σφόνδυλοι) αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στην χαμηλή τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ισχύος είτε αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο σχηματίζοντας μία νησίδα. Το βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων είναι ότι μπορούν να λειτουργούν με ελεγχόμενο τρόπο.

Για τον έλεγχο των μικροδικτύων εισάγουμε την έννοια της πολυεπίπεδης μάθησης όπου η διαχείριση της γνώσης χωρίζεται σε πολλαπλά επίπεδα. Οι λειτουργίες του πράκτορα ομαδοποιούνται σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά τις τοπικές καθαρά λειτουργίες του πράκτορα σε σχέση με την μονάδα ή το φορτίο που ελέγχει. Το επόμενο επίπεδο αφορά απλές πράξεις και ενέργειας που απαιτούν όμως την συμμετοχή πλέον του ενός πράκτορες ενώ στο τελευταίο επίπεδο το σύνολο των πρακτόρων καλείται να λειτουργήσει σαν ομάδα προκειμένου να φέρει εις πέρας τους πραγματικούς στόχους του συστήματος.

Αρχικά δίδεται μία σύντομη περιγραφή της τεχνολογίας των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων καθώς επίσης και αναφορά στο θέμα της πολυεπίπεδης μάθησης. Επιπλέον δίδονται κάποια βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του πράκτορα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πρώτο επίπεδο της πολυεπίπεδης μάθησης και περιγράφονται κάποιες από τις λειτουργίες που μπορεί να επιτελέσει ο πράκτορας τοπικά. Οι λειτουργίες αυτές πρακτικά είναι πάρα πολλές και για αυτόν τον λόγο δίδεται βαρύτητα στις ανάγκες του εργαστηριακού μικροδικτύου και για την ακρίβεια στις μπαταρίες και στον έλεγχο των φορτίων.

Μετά το πρώτο επίπεδο μάθησης ακολουθεί το δεύτερο επίπεδο και για την ακρίβεια περιγράφονται μέθοδοι με τις οποίες δύο ή περισσότεροι πράκτορες συντονίζονται με σκοπό να φέρουν εις πέρας ένα συγκεκριμένο στόχο. Στο επίπεδο αυτό η βασική απαίτηση για το αποτέλεσμα είναι να είναι σωστό αλλά και βέλτιστο. Δεδομένου ότι δεν θεωρούμε ακόμη στοχαστικό περιβάλλον η ορθότητα της λύσης είναι μονόδρομος οπότε και οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να την εξασφαλίζουν.

Στο τρίτο και τελευταίο επίπεδο της μάθησης πολλαπλών επιπέδων οι πράκτορες καλούνται να ολοκληρώσουν τους πραγματικούς στόχους του συστήματος, είτε πρόκειται για την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας είτε για τον έλεγχο σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας από το κεντρικό δίκτυο. Οι γνώσεις τους αλλά και βασικές δυνατότητες για εκτέλεση διαφόρων πράξεων προέρχεται από το προηγούμενα επίπεδα της οργάνωσης. Στο επίπεδο αυτό γίνεται χρήση ενός

αλγορίθμου που βασίζεται στην θεωρία της ενισχυτικής μάθησης για περιβάλλον πολλαπλών πρακτόρων.

Τέλος γίνεται μία αναφορά σε πρακτικά θέματα του ελέγχου των μικροδικτύων και κυρίως σε εφαρμογές πληροφορικής. Ο ενδιαμέσος κρίκος μεταξύ του κλασικού κεντρικού ελέγχου και των συστημάτων ευφύων πρακτόρων είναι τα καταναμημένα SCADA σε περιβάλλον διαδικτύου. Ως σκοπός της αναφοράς αυτής είναι να παρουσιάσει βασικές τεχνικές λεπτομέρειες των SCADA αλλά και της συστημάτων υλοποίησης πολλαπλών ευφύων πρακτόρων.

Λέξεις κλειδιά: Πράκτορας, μικροδίκτυο, Συστήματα ευφύων Πρακτόρων, Συμμετρική Ανάθεση, Πολυεπίπεδη Μάθηση, Ενισχυτική Μάθηση

Summary

«Contribution to the distributed control of power systems with distributed energy resources in low voltage»

In this Thesis the architecture of an intelligent software agent that is capable to control a Microgrid is investigated. The intelligent agent is a software entity with two main characteristics, it has artificial intelligence and has the ability to communicate with other agents, presenting a social ability.

A Microgrid is a possible future energy system paradigm, formed by the interconnection of small, modular generation (micro-turbines, fuel cells, PV, etc.), together with storage devices (flywheels, energy capacitors and batteries) and controllable loads at low voltage distribution systems. Such systems can be operated interconnected to the power grid, or islanded, if disconnected from the grid. The main characteristic of Microgrids is that they are controllable.

For the control of Microgrids the concept of multi layer learning is introduced, in which the knowledge management is separated in three levels. The various functionalities of the agents are organized in three levels. The first level includes the local functionalities of the agent and the unit that is controlled by the agent. The next level includes simple actions that require the participation of more than one agent. In the third level all the agents are behaving as a team that is trying to accomplish the real goals of the system.

Initially a short description of the multi agent system technology is presented as well an introduction to the multilayer learning. Furthermore some basic characteristics of the agent architecture are presented.

Next, the first level of the multi layer learning architecture is presented in detail and more specific some of the functionalities of the agent, regarding the local control of the unit, are analyzed. Since the functionalities are too many, the Thesis focuses mainly to needs of the Microgrid that is installed in the power system laboratory of NTUA.

In the second level of multi layer learning two or more agents cooperate in order to achieve a specific target. The main requirement in this level is that the solution should be correct and optimal. Since in this level the environment is not considered stochastic the algorithms that are used should ensure the correctness of the solution.

In the third level of control the agents should fulfill the real targets of the system. Two main cases are considered, the market participation and the operation in isolated mode. The agents should use all the knowledge and capabilities that derive from the previous levels of control in order to schedule their actions in a stochastic environment. In this level a multi agent reinforcement learning algorithm was developed.

Finally in this Thesis practical issues regarding the information technology applications in the control of Microgrids are investigated. The connection between the traditional centralized control and the solution presented here is the distributed SCADA in Internet environment. More specific the technologies for developing control applications in the internet environment are investigated as well the main technologies for developing software agents.

Key Word: Agent, Microgrid, Multi Agent System, Symmetrical Assignment , Multi Layer Learning, Reinforcement Learning

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Τα μικροδίκτυα	17
1.3 Περιγραφή των μικροδικτύων	17
1.3.1 Τεχνολογίες παραγωγής	19
1.3.2 Τεχνική λειτουργία του μικροδικτύου	21
1.3.3 Οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου	22
1.3.4 Οικολογικά πλεονεκτήματα των μικροδικτύων	23
1.4 Συστήματα ελέγχου που βασίζονται στην τεχνολογία των ευφύων πρακτόρων	24
1.4.1 Η ανάπτυξη λογισμικού με βάση την λογική των πρακτόρων	25
1.4.2 Καταναεμημένος Έλεγχος που βασίζεται στους ευφυείς πράκτορες	27
1.5 Οργάνωση του κειμένου	30
1.6 Βιβλιογραφική επισκόπηση	32
Κεφάλαιο 2 Συστήματα Πολλαπλών Ευφύων Πρακτόρων	35
2.1 Εισαγωγή	35
2.2 Περί Νοημοσύνης	36
2.2 Χρησιμότητα της καταναεμημένης νοημοσύνης	38
2.3 Ο ευφυής πράκτορας	39
2.4 Η κοινωνία των πρακτόρων	40
2.5 Επικοινωνία των πρακτόρων	40
2.5.1 Agent Communication Language	41
2.6 Η αλληλεπίδραση των πρακτόρων	43
2.6.1 Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων	43
2.7 Μηχανική Μάθηση	45
2.8 Πολυεπίπεδη Μάθηση	45
2.9 Ο έλεγχος των μικροδικτύων	48
2.9.1 Αναλυτική περιγραφή του τρόπου ελέγχου	49
2.9.2 Η Δομή του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC)	50
2.9.3 Η Δομή του τοπικού ελεγκτή	51
2.9.3. Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος	51
2.10 Εφαρμογή των συστημάτων πολλαπλών ευφύων πρακτόρων στον έλεγχο των μικροδικτύων	53

Κεφάλαιο 3 Ατομική Συμπεριφορά	55
Επίπεδο Πρώτο	55
3.1 Εισαγωγή	55
3.2 Έλεγχος συστοιχίας μπαταριών	56
3.2.1 Εισαγωγή	56
3.2.2 Θεωρία Μπαταριών	56
3.2.2.1 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Pb-acid)	57
3.2.2.2 Βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις μπαταρίες	57
3.2.3 Θεωρία αντιστροφών	60
3.2.3.1 Εισαγωγή	60
3.2.3.2 Αντιστροφείς πηγής τάσης	60
3.2.3.3 Έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού των αντιστροφών	64
3.2.4 Ο αντιστροφέας του εργαστηρίου	66
3.2.5 Πρακτικές εφαρμογές	68
3.2.5.1 Εφαρμογή πρώτη έλεγχος ενεργού ισχύος	68
3.3 Αποτελέσματα του αλγορίθμου	70
3.2.5.2 Διαχείριση μπαταρίας	72
3.3 Έλεγχος φορτίων	75
3.3.1 Εισαγωγή	75
3.3.2 Πρακτικές Εφαρμογές	75
3.3.2.1 Το φίλτρο Κάλμαν	75
3.3.2.1.1 Η προέλευση του φίλτρου	76
3.3.2.1.2 Το διακριτό φίλτρο Κάλμαν	77
3.3.2.1.3 Οι παράμετροι του φίλτρου και η ρύθμιση του	78
3.3.2.1.4 Η υλοποίηση του φίλτρου Κάλμαν	78
3.3.3.2 Εύρεση της τοπολογίας δικτύου	81
3.3.3 Αναγνώριση τύπου φορτίου με χρήση Ασαφούς λογικής	84
3.3.3.1 Εισαγωγή	84
3.3.3.2 Ασαφής Λογική	84
Στοιχεία – βασικοί όροι των ασαφών συνόλων	84
3.3.3.2 ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε	90
3.4 Συμπεράσματα	92
Κεφάλαιο 4 Συμπεριφορά Πολλαπλών Πρακτόρων	93
4.1 Εισαγωγή	93
4.2 Κατανομή πόρων συστήματος ελέγχου στα μικροδίκτυα	94
4.2.1 Εισαγωγή	94
4.2.2 Ο μαθηματικός αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί	94
4.2.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	98
4.2.5 Το πρόβλημα της κατανομής φορτίου	98
4.2.5.1 Το περιβάλλον της αγοράς	98
4.2.5.2 Ο αλγόριθμος	100
4.3.4 Η επέκταση της μεθόδου στα υπόλοιπα προβλήματα	101
4.3 Εύρεση συνεκτικότητας του δικτύου	103
4.3.1 Εισαγωγή	103
4.3.2 Θεωρία Γράφων	103
4.3.3 Εφαρμογή	104
4.4 Συμπεράσματα	106

Κεφάλαιο 5 Επίπεδο Τρίτο_Ομαδική Συμπεριφορά	107
5.1 Εισαγωγή	107
5.2 Θεμελίωση του προβλήματος	108
5.3. Ενισχυτική μάθηση σε περιβάλλον πολλαπλών ευφύων πρακτόρων	109
5.3.1 Εισαγωγή	109
5.3.2 Βασική θεωρία	109
5.3.2.1 Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης	109
5.3.3.1 Ενισχυτική Μάθηση	110
5.3.3.2 Q-Learning	110
5.3.3.3 Παιχνίδια πινάκων	111
5.3.3.4 Στοχαστικά Παιχνίδια	111
5.3.4.1 Ενισχυτική μάθηση για συστήματα πολλαπλών πρακτόρων	112
5.3.4.2 Εικονικά παιχνίδια	112
5.3.4.3 Bayesian Framework	113
5.3.5 Αλγόριθμοι για ενισχυτική μάθηση σε περιβάλλον πολλαπλών ευφύων πρακτόρων	113
5.3.5.1 Minimax-Q Learning	114
5.3.5.2 Nash-Q Learning	114
5.3.5.4 Ο αλγόριθμος TPOT-RL	115
5.4 Η ενισχυτική μάθηση για τους ευφυείς πράκτορες που ελέγχουν το μικροδίκτυο	118
5.4.1 Αγορά ενέργειας	120
5.4.1.1 Αποτελέσματα από την λειτουργία σε αγορά ενέργειας	123
5.4.2 Λειτουργία σε κατάσταση αποσύνδεσης από το κεντρικό δίκτυο	127
5.4.2.1 Εκκίνηση μετά από σφάλμα στο δίκτυο	127
5.4.2.2 Απομονωμένη λειτουργία	129
5.4.2.3 ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε	129
5.4.2.4 Αποτελέσματα από την απομονωμένη λειτουργία	132
5.5 Συμπεράσματα	134
Κεφάλαιο 6 Από τον κεντρικό έλεγχο στα έξυπνα δίκτυα	135
6.1 Εισαγωγή	135
6.2 Η τεχνολογία της πληροφορικής στα έξυπνα δίκτυα και στα μικροδίκτυα	136
6.3 Συστήματα εποπτείας και ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (SCADA)	136
6.3.1 Εισαγωγή	136
6.3.2 Συστήματα εποπτείας και ελέγχου στο περιβάλλον του διαδικτύου	137
6.3.2.1 Εισαγωγή	137
6.3.2.2 XML και Web services	137
6.3.2.3 UCA και UCA-DER	139
6.3.2.4 IEC 61850 UCA-SA	140
6.3.2.5 CIM	141
6.3.2.6 OPC	145
6.3.3 Πρακτικές εφαρμογές	148
6.3.2.1 Ανάπτυξη συστήματος SCADA	148
6.3.2.2 Επικοινωνία του SCADA e-terra με το EMS MORE CARE	150
6.4 Ανάπτυξη λογισμικού για συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων	153
6.4.1 Εισαγωγή	153
6.4.2 Jade	153

6.4.3 Το σύστημα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο μικροδικτύων	154
6.4.3.1 Εισαγωγή	154
6.4.3.2 Συμπεριφορές	154
6.4.3.3 Οντολογίες	155
6.4.4 Πρακτικές εφαρμογές	155
6.4.4.1 Οντολογίες	155
6.4.4.2 Συμπεριφορές	156
6.4.4.3 Η λειτουργία του πράκτορα DF	157
6.4.4.4 Οι πράκτορες που δημιουργήθηκαν	159
6.5 Συμπεράσματα	163
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	165
7.1 Εισαγωγή	165
7.2 Σύνοψη διατριβής	165
7.3 Συμβολή διατριβής	167
7.4 Μελλοντικές Επεκτάσεις	168
 Παράρτημα Α Το πειραματικό μικροδίκτυο του ΕΜΠ	169
 Παράρτημα Β Υλοποίηση λογικής καμπύλων στατισμού σε αντιστροφέα	175
 Παράρτημα Γ Αποδείξεις σύγκλισης αλγορίθμου συμμετρικής ανάθεσης	177
 Παράρτημα Δ Θεωρία μπαταριών	181
Δ.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία μίας μπαταρίας	181
Δ.2 Μοντέλα μπαταριών	183
Δ.3 Μηχανισμοί γήρανσης των μπαταριών	183
 Βιβλιογραφία	<u>187</u>

1.1 Εισαγωγή

Για πολλές δεκαετίες το ηλεκτρικό σύστημα όλων των χωρών βασιζόταν σε ένα κεντρικό σύστημα παραγωγής. Η ροή της ενέργειας ήτο από τους παραγωγούς προς τους καταναλωτές και για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μεγάλοι σταθμοί παραγωγής που βασίζονταν κυρίως σε στερεά καύσιμα ή πυρηνική ενέργειας. Την λειτουργία αυτού του μοντέλου επικουρούσαν εκτεταμένα δίκτυα μεταφοράς.

Όμως το σκηνικό πλέον αλλάζει για πολλούς σημαντικούς λόγους. Η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση πλέον ζητά περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και παράλληλα είναι αρνητική στην δημιουργία νέων πυρηνικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον οι καταναλωτές γίνονται ολοένα και πιο απαιτητικοί σε ότι αφορά την ποιότητα της ενέργειας αλλά και με την δυνατότητα να έχουν τοπική παραγωγή καθίστανται πλέον ενεργές οντότητες στο δίκτυο και όχι απλά παθητικά φορτία. Τέλος η παρουσία των σύγχρονων αγορών ενέργειας δημιουργεί ένα εξαιρετικά σύνθετο περιβάλλον λειτουργίας για τα ηλεκτρικά δίκτυα όχι μόνο σε εθνικό επίπεδο αλλά θεωρώντας και τις διεθνείς διασυνδέσεις.

Συνοπτικά ζητείται πλέον από τα δίκτυα ενέργειας να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ευελιξία προκειμένου να ικανοποιήσουν τις σύνθετες ανάγκες του σύγχρονου καταναλωτή.
- Να είναι προσβάσιμα σε όλους του παραγωγούς και ειδικά τους μικρούς καθώς και στις μονάδες που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Να είναι αξιόπιστα προσφέροντας ασφαλή και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας
- Να είναι λειτουργούν χρησιμοποιώντας αποδοτικά την ενεργεία σε όλα τα επίπεδα

Σχολιάζοντας τα παραπάνω θα πρέπει να αναφερθεί ότι πλέον τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζουν και λειτουργούν με βάση τις απαιτήσεις και τις ανάγκες του καταναλωτή και αυτό αποτελεί ένα βασικό άξονα που δημιουργήθηκε από την εισαγωγή του θεσμού των αγορών ενέργειας. Η ενεργή συμμετοχή του καταναλωτή σε μία αγορά ενέργειας χωρίς μονοπώλια ή ολιγοπώλια τον καθιστά πρωταγωνιστή της λειτουργίας του συστήματος αφού πλέον οι τιμές διαμορφώνονται ελεύθερα. Στα προηγούμενα θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και το γεγονός ότι εισάγεται και η δυνατότητα να υπάρχει μικρή τοπική παραγωγή καθιστώντας τον καταναλωτή ακόμα πιο ενεργό.

Θα πρέπει επιπλέον να γίνουν αντιληπτές και μία σειρά από κοινωνικοπολιτικές αλλαγές που συμβαίνουν γύρω μας και φυσικά αναφερόμαστε στην ευρωπαϊκή ένωση. Ο στόχος της

δημιουργίας μιας πιο ισχυρής ένωσης, σε όλα τα επίπεδα σίγουρα περιλαμβάνει και την διασύνδεση των ηλεκτρικών δικτύων. Σε αυτά θα πρέπει να προστεθεί και η προσπάθεια για κοινή πολιτική σε θέματα περιβάλλοντος αλλά και προστασίας του καταναλωτή. Τέλος θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου δημιουργεί πρόσθετες ανάγκες και απαιτήσεις στην λειτουργία του συστήματος.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι προς ένα έξυπνο δίκτυο του μέλλοντος θα πρέπει να γίνουν μία σειρά από σημαντικά βήματα. Τα κύρια εξ' αυτών είναι:

1. Επίλυση των τεχνικών προβλημάτων προκειμένου να μπορούν να ενταχθούν απρόσκοπτα στο δίκτυο μικρές μονάδες παραγωγής. Οι τεχνολογίες που θα προκύψουν σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι αξιόπιστες, φτηνές, προσβάσιμες σε όλους και φυσικά να μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα. Αυτό επιπλέον συνεπάγεται και την δημιουργία μίας σειράς προτύπων και πρωτοκόλλων κοινά αποδεκτών.
2. Δημιουργία ενός κοινού πλαισίου λειτουργίας της αγοράς ενέργειας αλλά και της λειτουργίας του συστήματος προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν απρόσκοπτα οι διεθνείς διασυνδέσεις.
3. Ανάπτυξη των πληροφοριακών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που θα αποτελέσουν την βάση για τον έλεγχο και την λειτουργία των έξυπνων δικτύων του μέλλοντος.

Για να επιτευχθούν όλα αυτά απαιτείται η συμμετοχή όλων των φορέων, οργανισμών αλλά και εταιρειών που σχετίζονται με την λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και το αντικείμενο της διατριβής αυτής σχετίζεται με τα μικροδίκτυα σε καμία περίπτωση δεν θα θεωρηθεί ότι αυτά αποτελούν μία μεμονωμένη λειτουργία ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα θεωρούμε ότι αυτά αποτελούν τους λίθους που θα συνθέσουν το μελλοντικό οικοδόμημα που ονομάζεται έξυπνο δίκτυο.

Η διατριβή αυτή εστιάζει λοιπόν σε μία νέα μορφή ηλεκτρικών συστημάτων που εντάσσονται στα έξυπνα δίκτυα και ονομάζονται μικροδίκτυα με βασικό χαρακτηριστικό ότι λειτουργούν στην χαμηλή τάση. Αυτό που προτείνει η διατριβή αυτή είναι ένα μοντέλο ελέγχου των μικροδικτύων τελείως αποκεντρωμένο το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών ευφών πρακτόρων.

1.2 Τα μικροδίκτυα.

Τα μικροδίκτυα (Microgrids) είναι ένα νέο είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής (μικροπηγές) όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου ή φωτοβολταϊκά κύτταρα σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, σφόνδυλοι) αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στην χαμηλή τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ισχύος είτε αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο σχηματίζοντας μία νησίδα [1.2.1,1.2.2].

Ο σκοπός της διατριβής αυτής είναι να παρουσιάσει μία μέθοδο ελέγχου στην μόνιμη κατάσταση των μικροδικτύων. Ο έλεγχος αυτός θα βασίζεται στην τεχνική των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε ότι ο πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και της ικανότητας να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες. Εντάσσοντας τον έλεγχο των στοιχείων του μικροδικτύου σε ένα σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων ουσιαστικά η κάθε μονάδα συμμετέχει στον μηχανισμό λήψης αποφάσεων για λειτουργικά θέματα. Έτσι οι πράκτορες θα καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας ή την συμπεριφορά των μονάδων κατά την διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας. Στην εργασία αυτή ωστόσο δεν θα εστιάσουμε μόνο στα μικροδίκτυα που λειτουργούν στην χαμηλή τάση αλλά θα ληφθεί υπ' όψιν και η ευρύτερη περιοχή των δικτύων διανομής με εγκατεστημένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

Ουσιαστικά αυτό που προτείνει η διατριβή αυτή είναι η απόλυτα αποκεντρωμένη λειτουργία του συστήματος. Οι αρμοδιότητες ενός κεντρικού ελεγκτή θα περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό και οι αποφάσεις θα λαμβάνονται στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο. Αυτός είναι ο βασικός λόγος που σύμφωνα με την αρχιτεκτονική αυτή ο κάθε πράκτορας και κατά συνέπεια η μονάδα που αυτός ελέγχει θα πρέπει να διαθέτει ευφυΐα και προηγμένες ικανότητες επικοινωνίας. Με τον όρο προηγμένη επικοινωνία δεν αναφερόμαστε κατ' ανάγκην σε γρήγορες και μεγάλου όγκου επικοινωνίες αλλά σε ποιοτική επικοινωνία που σχετίζεται με την ανταλλαγή γνώσεων και εννοιών. Η διατριβή αυτή εστιάζει επιπλέον στην δομή που θα πρέπει να έχει ο πράκτορας προκειμένου να μπορεί να ενσωματώσει πολλές λειτουργίες.

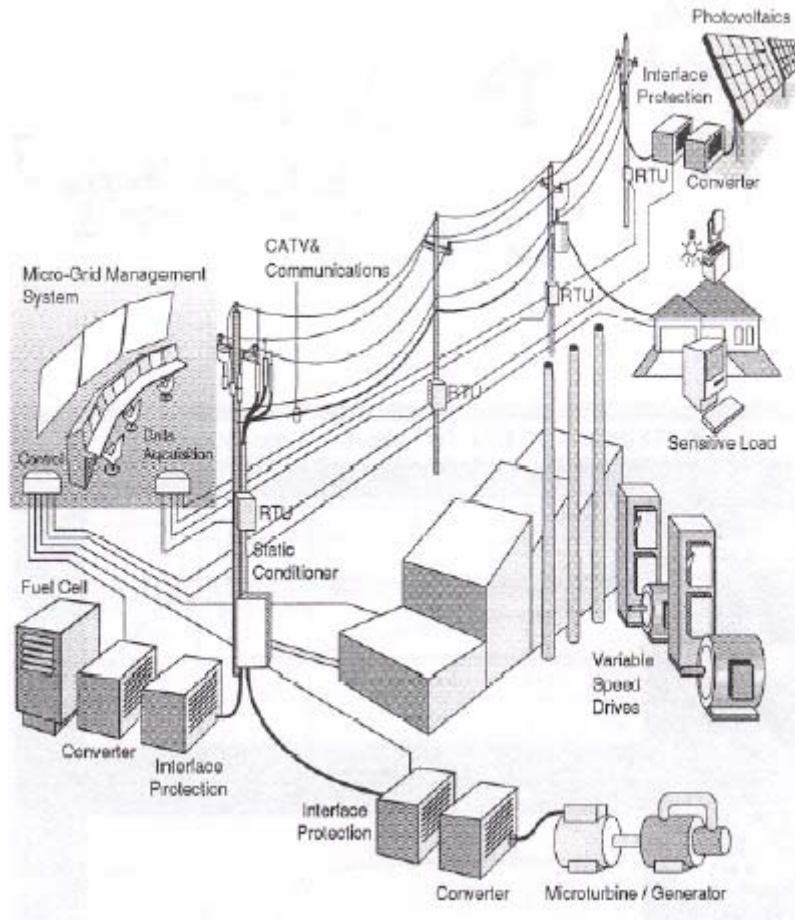
Το κεφάλαιο αυτό είναι δομημένο ως εξής: στην αρχή δίδεται μία γενική περιγραφή της τεχνολογίας των μικροδικτύων ενώ στην συνέχεια παρατίθενται ο σκοπός και κάποια από τα πλεονεκτήματα του αποκεντρωμένου ελέγχου και κλείνει με την σύντομη περιγραφή των επόμενων κεφαλαίων.

1.3 Περιγραφή των μικροδικτύων

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μονάδες παραγωγής και ελεγχόμενα φορτία συνδεδεμένα στην πλευρά της χαμηλής τάσης. Ουσιαστικά τα μικροδίκτυα είναι μικρογραφίες των μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρουσία των μικροδικτύων παρ' όλη την πολυπλοκότητα που εισάγει σε ότι αφορά την λειτουργία του δικτύου χαμηλής τάσης, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι περισσότερες μικροπηγές συνδέονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω μετατροπών οι οποίοι τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντική εξέλιξη λόγω της σχετικής έρευνας τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι σύγχρονοι αντιστροφείς (Inverters)

δίνουν την δυνατότητα να ελεγχθούν πάρα πολλές λειτουργίες όπως η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος, και έτσι η τάση και η συχνότητα του δικτύου σε απομονωμένη λειτουργία. Τα παραδοσιακά μεγάλα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αντίθετα βασίζονται αποκλειστικά σε στρεφόμενες μάζες οι οποίες θεωρούνται απαραίτητες για την ευστάθεια του δικτύου.



Σχήμα 1.1 Παράδειγμα μικροδικτύου.

Τα μικροδίκτυα αποτελούν τμήμα μίας γενικότερης τάσης για αλλαγή του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων ανά τον κόσμο που ουσιαστικά οφείλεται στην γενικότερη έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής. Ωστόσο τα μικροδίκτυα, όπως εξετάζονται στην διατριβή αυτή, περιλαμβάνουν κυρίως πολύ μικρές μονάδες, μικρότερες του 1MW, σε αντίθεση με τον όρο διεσπαρμένη παραγωγή που περιλαμβάνει μονάδες 1-50MW.

Η δυνατότητα εγκατάστασης μικρών μονάδων συμπαραγωγής, ακόμα και για οικιακή χρήση, αυξάνει την αποδοτικότητα της παροχής ηλεκτρισμού και θέρμανσης ταυτόχρονα και σε συνδυασμό με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε τοπικό επίπεδο συμβάλλει στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων ρύπων. Από την πλευρά του καταναλωτή, παραγωγή σε τοπικό επίπεδο μπορεί να σημαίνει αύξηση της αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος της παρεχόμενης ενέργειας και σε περιβάλλον πλήρως απελευθερωμένης αγοράς, την μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών του αναγκών με ευέλικτους τρόπους διαχείρισης της τοπικής παραγωγής, όταν οι τιμές στην ελεύθερη αγορά ενέργειας την καθιστούν

οικονομικά συμφέρουσα. Η δυνατότητα οργάνωσης της τοπικής παραγωγής του καταναλωτή και συμμετοχής της στην ελεύθερη αγορά ενέργειας μέσω κάποιου παροχέα ενεργειακών υπηρεσιών ανοίγει περαιτέρω δυνατότητες αύξησης του εισοδήματος του και συνεισφέρει στο άνοιγμα της αγοράς. Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου ή μέρους του προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως αναβολή επενδύσεων κεφαλαίου για την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και των κεντρικών σταθμών παραγωγής, μείωση των απωλειών και μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα στον χειρισμό των συμφορήσεων και στην επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση.

Η ευρεία διασύνδεση μικροπηγών συνδεδεμένων μέσω ηλεκτρονικών ισχύος προσφέρει σημαντική ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, αλλά και εισάγει σημαντική πολυπλοκότητα στην λειτουργία του μικροδικτύου, ιδιαίτερα σε νησιδοποιημένη κατάσταση, δεδομένου ότι οι πηγές αυτές στην πλειονότητα τους δεν διαθέτουν στρεφόμενες μάζες (αδράνεια) για τον έλεγχο της συχνότητας. Έτσι, με τον κατάλληλο συντονισμό και διαχείριση μικροπηγών, συστημάτων αποθήκευσης και φορτίων είναι δυνατή η αποδοτική λειτουργία του συνολικού συστήματος.

1.3.1 Τεχνολογίες παραγωγής.

Το βασικό στοιχείο των μικροδικτύων είναι οι μονάδες παραγωγής και στο σημείο αυτό θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή των βασικών τεχνολογιών παραγωγής που εμπλέκονται στα συστήματα που μελετάμε.

- Μικροτουρμπίνες.

Οι μικροτουρμπίνες κυμαίνονται σε ισχείς από 20 έως 100kW. Η τεχνολογία τους προέρχεται από τις βοηθητικές μονάδες ισχύος (auxiliary power unit -APU) και η μηχανολογική τους λειτουργία είναι απλή με ότι 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.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία τεχνολογία που υπόσχεται πολλά τόσο στα μικροδίκτυα όσο και στον γενικότερο χώρο της διεσπαρμένης παραγωγής. Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική διάταξη που μετατρέπει απευθείας την 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 είναι σημαντικό τμήμα ενός μικροδικτύου και η παραγωγή βασίζεται κυρίως σε φωτοβολταϊκά στοιχεία αλλά και μικρές ανεμογεννήτριες. Επιπλέον θα

μπορούσαν να περιληφθούν και συμβατικές μονάδες που λειτουργούν με βιοκαύσιμα.

- **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 για 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.
- **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 και ειδικά για το μέγεθος των μονάδων που μελετάμε είναι αδύνατη, οπότε απαιτείται η μονάδα παραγωγής να είναι δίπλα στο φορτίο.

1.3.2 Τεχνική λειτουργία του μικροδικτύου

Η εισαγωγή μονάδων παραγωγής στο επίπεδο την χαμηλής και μέσης τάσης δεν είναι απλό θέμα από τεχνικής πλευράς ειδικά αν αυτή ενταθεί στο μέλλον. Δημιουργούνται μία σειρά από τεχνικά ζητήματα που θα πρέπει να μελετηθούν με προσοχή τα οποία όμως δεν είναι άμεσο αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Μεταβολές στην τάση του δικτύου

Για κάθε δίκτυο διανομής έχουν τεθεί συγκεκριμένα όρια για την τάση. Αυτά τα όρια σε κάθε περίπτωση είναι σημαντική παράμετρος τόσο για την επέκταση του δικτύου όσο και για το κόστος που αυτό συνεπάγεται.

Το πλέον επικίνδυνο σενάριο από την παρουσία μικροπηγών στο επίπεδο της χαμηλής και μέσης τάσης είναι η πιθανότητα η τάση να υπερβεί τα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Το σενάριο αυτό θα συμβεί στην περίπτωση που το φορτίο τοπικά είναι στο ελάχιστο και παράλληλα έχουμε σημαντική παραγωγή από την μονάδα. Το πρόβλημα εντείνεται στην χαμηλή τάση δεδομένου ότι εκεί ο τιμή της αντίστασης των καλωδίων είναι σχετικά μεγάλη οπότε στην τιμή της τάσης εμπλέκεται και η ενεργός ισχύς. Μία προτεινόμενη λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι η αύξηση της ζήτησης αέργου ισχύος από την πλευρά της μονάδας ενώ μία άλλη λύση είναι η χρήση με αντισταθμιστικό τρόπο των λήψεων του μετασχηματιστή (tap changer) [1.2.4].

Αύξηση στη στάθμη βραχυκυκλώσεως του δικτύου.

Η χρήση στρεφόμενων κυρίως μηχανών στις μονάδες παραγωγής προφανώς θα έχει επίπτωση στο επίπεδο του σφάλματος. Η αύξηση του επιπέδου του σφάλματος πιθανών να απαιτεί αλλαγές στους διακόπτες του δικτύου κάτι που συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους ειδικά αν τις όποιες αναβαθμίσεις είναι υποχρεωμένος να τις αναλάβει ο ιδιοκτήτης της μονάδας. Μια λύση είναι η εγκατάσταση μίας αντίδρασης (μετασχηματιστή ή πηνίο) μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου με αύξηση όμως των απωλειών και των μεταβολών στην τάση.

Ποιότητα ισχύος.

Η ποιότητα της ισχύος είναι ένα σημαντικό θέμα στην εισαγωγή των μικρομονάδων στο δίκτυο. Η ποιότητα ισχύος περιλαμβάνει μία σειρά από φαινόμενα:

- Μεταβολή της τάσης (Voltage variation)
- Απότομη αλλαγή της τάσης (Rapid voltage change)
- Διακύμανση της τάσης (Voltage fluctuation)
- Φλίκερ (Flicker)
- Προσωρινή υπέρταση (Temporary power frequency overvoltage or swell)
- Αρμονικές στην τάση (Harmonic voltage)
- Ασυμμετρία στην τάση (Voltage unbalance)

Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να προέλθουν από την παρουσία στρεφόμενων μηχανών, ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και από απότομη σύνδεση ή αποσύνδεση μονάδων.

Προστασία

Η προστασία των συσκευών του μικροδικτύου είναι ένα σύνθετο θέμα αφού αφορά τόσο την λειτουργία των υπαρχόντων προστασιών αλλά και των αλλαγών που θα πρέπει να γίνουν στο σύστημα διανομής. Ειδικότερα θα πρέπει να μελετηθεί το θέμα των γειώσεων, των προστασιών που θα πρέπει να έχουν οι μονάδες αλλά και τη λειτουργία του συστήματος σε κατάσταση νησίδιας.

Ευστάθεια του δικτύου

Το θέμα της ευστάθειας του συστήματος αφορά κυρίως την περίπτωση που η εκτεταμένη χρήση της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και των μικρομονάδων χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ασφάλειας του δικτύου. Το βασικό πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι η συμπεριφορά των διεσπαρμένων μονάδων μετά από μία απώλεια μίας μεγάλης μονάδος ή μίας μεγάλης γραμμής μεταφοράς.

1.3.3 Οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου

Ο σκοπός της ύπαρξης των μικροδικτύων είναι να χρησιμοποιηθούν από ένα ή περισσότερους καταναλωτές με σκοπό να εξυπηρετήσουν το δικό τους οικονομικό όφελος. Παρόλο που πιθανόν να υπάρχει ενδιαφέρον και για λειτουργικά θέματα όπως περιβαλλοντικά ή επαρκείας ισχύος σε κάθε περίπτωση το βασικό στοιχείο παραμένει το κόστος. Το κόστος παραγωγής των μικροδικτύων θα πρέπει να συγκριθεί με το κόστος της ενέργειας στο επίπεδο της χαμηλής τάσης. Ευθεία σύγκριση με το κόστος παραγωγής των μεγάλων μονάδων δεν είναι δίκαιη αφού αγνοούνται κόστη για την μεταφορά της ενέργειας από ένα απομακρυσμένο σημείο στον καταναλωτή. Αντίθετα τεχνολογίες που αφορούν την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη.

Ωστόσο το θέμα της οικονομικής λειτουργίας δεν μπορεί να μείνει μόνο στο θέμα του κόστους παραγωγής αφού υπεισέρχονται και άλλοι παράμετροι στο πρόβλημα όπως αυτό της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος. Στα παλαιότερα συστήματα η λειτουργία βασιζόταν σε ένα κεντρικό σύστημα όπου η πολιτική σε σχέση με την αξιοπιστία και την ποιότητα της ισχύος ήταν κοινή για όλους του πελάτες. Αντίθετα η σύγχρονη αντίληψη θέλει το κάθε καταναλωτή να αποφασίζει για τον εαυτό του το επίπεδο της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος γνωρίζοντας βέβαια ότι υπάρχει και ένα αντίστοιχο κόστος.

Τέλος ένα βασικό θέμα σε σχέση με τα οικονομικά των μικροδικτύων αφορά την σχέση τους με το κυρίως δίκτυο και αν η λειτουργία ξεπεράσει την απλή σχέση της αγοραπωλησίας ενέργειας. Ένας χαρακτηρισμός που επαναλαμβάνεται ιδιαίτερα στο αμερικανικό σύστημα είναι αυτός του «καλού πολίτη» δηλαδή αν το μικροδίκτυο επικουρεί την λειτουργία του κεντρικού δικτύου και η χρήση των πηγών γίνεται με ορθολογικό τρόπο. Ωστόσο και η συμμετοχή στην αγορά ενέργειας θα πρέπει να γίνεται με μία μέθοδο που περικλείει τις ιδιαιτερότητες του συστήματος και ειδικά το μέγεθος 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 υπ' όψιν και οι τοπικές ανάγκες.

1.3.4 Οικολογικά πλεονεκτήματα των μικροδικτύων

Οι μονάδες παραγωγής που είδαμε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μικροδίκτυα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών όπως είναι αυτές των μικρο-τουρμπινών, των συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP), μηχανών εσωτερικής καύσης, κυψελών καυσίμου, κλπ. Το κύριο καύσιμο για αυτές τις διασπαρμένες πηγές είναι το φυσικό αέριο, αλλά και το ντίζελ, βιοντίζελ, βιοαέριο, αέριο από βιολογικούς καθαρισμούς κλπ. Το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο μέλλον και μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα στρέφεται προς αυτό. Περιλαμβάνει επίσης τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακή (φωτοβολταϊκά) και αιολική (μικρές ανεμογεννήτριες), ιδιαίτερα σε χώρες, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες το ευνοούν[1.2.1].

Σημαντικό πλεονέκτημα των Μικροδικτύων είναι η χρησιμοποίηση τοπικά της θερμότητας που αποβάλλεται κατά την μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση αυτής της θερμότητας μειώνει τις εκπομπές αερίων ρύπων και αυξάνει την αποδοτικότητα της χρήσης πρωτογενών πηγών ενέργειας κατά 30% περίπου. Σήμερα, συναντώνται μεσαίου μεγέθους εφαρμογές συμπαραγωγής σε βιομηχανικά συστήματα σε διάφορες χώρες και έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη μικρότερης κλίμακας εφαρμογών συμπαραγωγής, ακόμα και για οικιακή χρήση. Αυτά τα συστήματα αναμένεται να διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο στα Μικροδίκτυα των Βορείων χωρών της ΕΕ. Αντίστοιχα, οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες αναμένεται να γίνουν όλο και περισσότερο δημοφιλείς στις Νότιες χώρες της ΕΕ. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως μπαταρίες, πυκνωτές και σφόνδυλοι αποτελούν επίσης αναγκαία συστατικά των Μικροδικτύων, συμβάλλοντας στην αξιοπιστία της τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια διαταραχών.

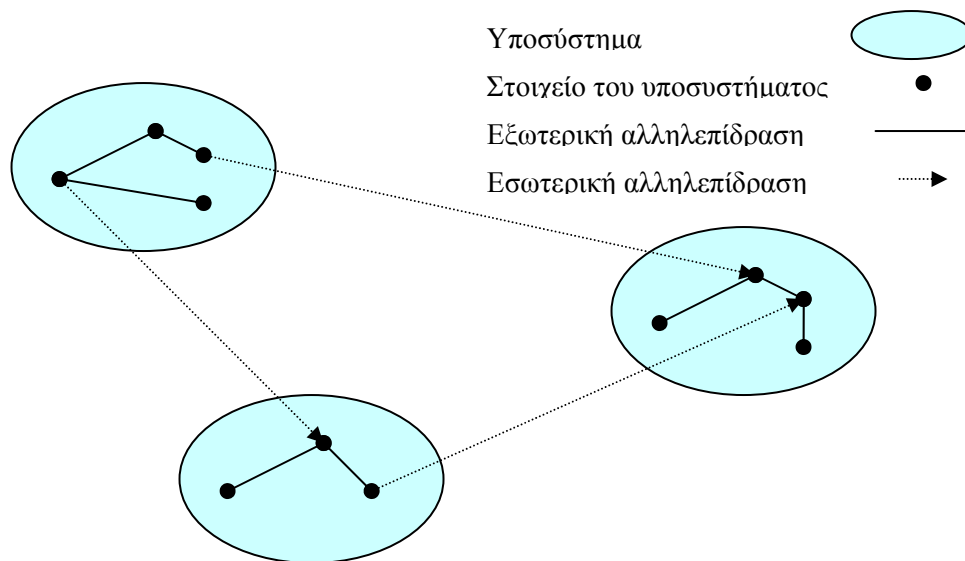
Η ανάπτυξη Μικροδικτύων και η ευρεία χρήση συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και το μετριασμό της αλλαγής του κλίματος[1.2.8]. Αυτό συμβαίνει επειδή η λειτουργία των Μικροδικτύων είναι βασισμένη σε μεγάλο βαθμό στις ανανεώσιμες πηγές και σε μικρές μονάδες παραγωγής που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές εκπομπές καυσαερίων. Παραδείγματος χάριν, οι μικροτουρμπίνες αποτελούνται από μια γεννήτρια και έναν μικρό αεροστρόβιλο σε κοινό άξονα. Αυτοί οι στρόβιλοι λειτουργούν με υψηλή ταχύτητα περιστροφής και παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας. Η αποδοτικότητα αυτών των μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 25% και 30%. Η χρησιμοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων μπορεί να αυξήσει τη γενική αποδοτικότητα των συστημάτων (ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα) στα επίπεδα 70% έως και 80%. Έτσι, τα συστήματα αυτά, διακρίνονται για τη συνολικά, χαμηλή εκπομπή ρύπων. Σε ευρωπαϊκή κλίμακα, η γενική αύξηση στην αποδοτικότητα του συνδυασμού παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής, θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη μείωση περισσότερων από 65 εκατομμύριο τόνων CO₂ ανά έτος.

Επιπλέον, η λειτουργία των Μικροδικτύων συμβάλει στη μείωση των απωλειών και επομένως στην περαιτέρω ορθολογική διαχείριση της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προσδιορίσει τις απώλειες, ως βασικό στόχο για τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης, αναγνωρίζοντας ότι πρόκειται για μια από τις προτεραιότητες για τη βελτιωμένες ενεργειακή αποδοτικότητα και τη συμβολή στο μετριασμό της αλλαγής του κλίματος. Η λειτουργία των Μικροδικτύων μπορεί να μειώσει τις απώλειες στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής από 2 έως 4%, συμβάλλοντας σε μια μείωση 20 εκατομμυρίων τόνων ετησίως του CO₂.

1.4 Συστήματα ελέγχου που βασίζονται στην τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων.

Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου ηλεκτρικών συστημάτων αλλά και γενικότερα συστημάτων ελέγχου οι νέες προκλήσεις σχετίζονται κυρίως με το αριθμό των μεταβλητών, την υπολογιστική πολυπλοκότητα των προβλημάτων, την ανάγκη για προσαρμοστικότητα στις συνεχείς αλλαγές αλλά και το βασικότερο της λειτουργίας με αβεβαιότητα σε ένα δυναμικό περιβάλλον που συνεχώς μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει ότι πλέον το λογισμικό που αναπτύσσεται για τις εφαρμογές αυτές γίνεται ολοένα και πιο πολύπλοκο έχοντας σημαντικό αριθμό υποσυστημάτων. Στην διατριβή αυτή εισάγουμε την έννοια του ευφυή πράκτορα αλλά και την τεχνολογία της ανάπτυξης λογισμικού για έλεγχο ηλεκτρικών συστημάτων με βάση τους ευφυείς πράκτορες. Όπως προαναφέρθηκε ο πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και της ικανότητας να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες. Η αναλυτική περιγραφή του πράκτορα αλλά και του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους πράκτορες του συστήματος είναι αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου. Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να δώσει ένα μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού το οποίο θα μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς την πολυπλοκότητα των προβλημάτων. Θα πρέπει να αντιληφθούμε ότι η πολυπλοκότητα αυτή σε πολλά από τα προβλήματα έχει κάποια βασικά χαρακτηριστικά [1.4.6-7].

Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ότι η πολυπλοκότητα είναι ιεραρχικά δομημένη που σημαίνει ότι αποτελείται από ένα σύνολο δομημένων υποσυστημάτων. Για παράδειγμα ένα παραδοσιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής. Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές και ούτω καθ' εξής. Τα υποσυστήματα δημιουργούν μια ιεραρχική δομή για το σύστημα από τα ανώτερα στρώματα της διαχείρισης ενέργειας μέχρι την χαμηλότερου επιπέδου πληροφορία όπως είναι η κατάσταση μία προστασίας ενός μετασχηματιστή διανομής.



Σχήμα 1.2 Μορφή ενός πολύπλοκου και ιεραρχικά δομημένου συστήματος.

Το επόμενο χαρακτηριστικό στον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων αφορά ποιά στοιχεία μας ενδιαφέρουν πρωτίστως και αυτό εξαρτάται κυρίως από την οπτική γωνία που καθορίζουν οι στόχοι μας. Για παράδειγμα επανερχόμενοι πάλι στον έλεγχο ενός συμβατικού συστήματος ενέργειας κύριος στόχος είναι η κάλυψη του φορτίου ή η ευστάθεια της τάσης και όχι η κατάσταση κάποιου μετασχηματιστή της διανομής.

Ένα άλλο γενικό χαρακτηριστικό που αναφέρεται στην βιβλιογραφία είναι ότι τα ιεραρχημένα πολύπλοκα συστήματα εξελίσσονται ταχύτερα από τα μη ιεραρχημένα[1.4.6]. Τα πολύπλοκα συστήματα που βασίζονται σε ένα συνδυασμό απλών συστημάτων μπορούν να εξελιχθούν ευκολότερα σε σχέση με συστήματα που η πολυπλοκότητα δεν βασίζεται σε δομημένα απλά υποσυστήματα. Ένα πρόβλημα που η πολυπλοκότητα δεν προέρχεται από σύνθεση υποσυστημάτων είναι για παράδειγμα η μελέτη της ροής ενός ρευστού και στο οποίο προφανώς οι κανόνες συμπεριφορά δεν εξελίσσονται παρά μόνο αν γίνει μία σημαντική ανακάλυψη. Αντίθετα ένα σύστημα ιεραρχικά δομημένο που η πολυπλοκότητά του αυξάνεται ραγδαία είναι το ηλεκτρικό σύστημα. Η αύξηση της πολυπλοκότητας είναι εμφανής αν δούμε την λειτουργία του πριν και μετά την εισαγωγή της έννοιας της διεσπαρμένης παραγωγής και των αγορών ενέργειας.

Τέλος ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ιεραρχικών συστημάτων είναι ότι είναι ευδιάκριτες οι εσωτερικές αλληλεπιδράσεις στα υποσυστήματα σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει την εύκολη διάκριση και καθορισμό των υποσυστημάτων. Για παράδειγμα είναι πολύ εύκολο να διαχωρίσουμε σε τμήματα το δίκτυο διανομής με βάση τους μετασχηματιστές με τους οποίους συνδέονται στο δίκτυο μεταφοράς. Σίγουρα κάποιες από τις αλληλεπιδράσεις αυτές μπορούν να εντοπιστούν κατά την σχεδίαση του συστήματος ενώ κάποιες όχι.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παρατηρήσεις αυτές, οι μηχανικοί ανέπτυξαν μία σειρά από μεθόδους προκειμένου να αντιμετωπίσουν την πολυπλοκότητα [1.4.6-7]:

- Η διάσπαση (decomposition) των προβλημάτων σε μία σειρά από λιγότερο σύνθετα προβλήματα.
- Η αφαίρεση όπου δημιουργούνται απλοποιημένα προβλήματα κρύβοντας την λιγότερο σχετική πληροφορία.
- Η οργάνωση της πληροφορίας καθορίζοντας με σαφήνεια τον τρόπο που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους τα υποσυστήματα.

Αυτά είναι πολύ συνοπτικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά και έννοιες που αφορούν τα πολύπλοκα συστήματα.

1.4.1 Η ανάπτυξη λογισμικού με βάση την λογική των πρακτόρων

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 που προαναφέραμε όπου το κεντρικό σύνθετο πρόβλημα διασπάται σε πολλά υπο-προβλήματα και προφανώς ο κάθε πράκτορας αναλαμβάνει ένα αντίστοιχο κομμάτι.

Το επόμενο θέμα είναι ότι οι πράκτορες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου είτε να ικανοποιήσουν του 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 [1.4.6-7] δηλαδή δεν ανταλλάσσουν προσυμφωνημένες εντολές και δεδομένα, αλλά πραγματοποιούν διαλόγους καθορίζοντας για παράδειγμα τι θέλει ο καθένας και πότε.

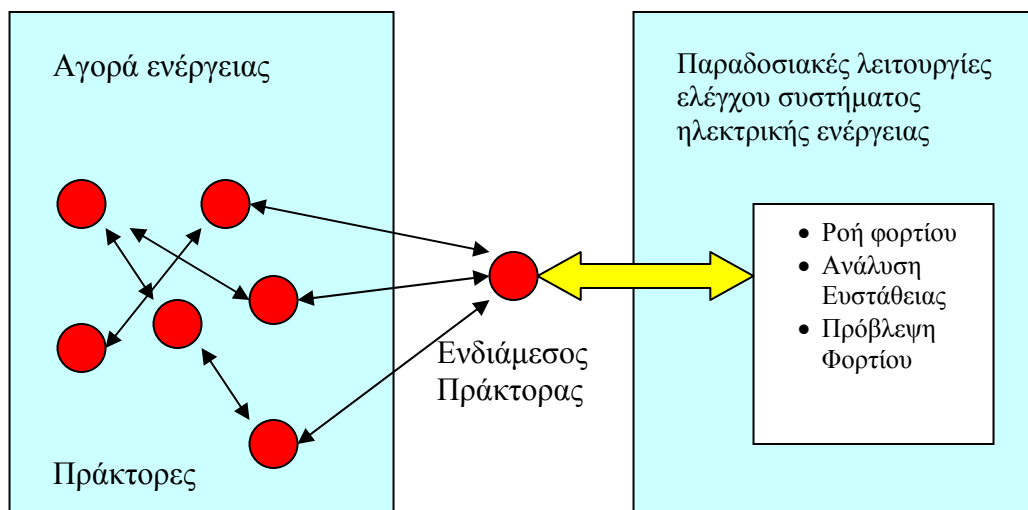
Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι οι πράκτορες ουσιαστικά καλούνται να επιλύσουν το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν για το τμήμα εκείνο του περιβάλλοντος που αντιλαμβάνονται. Η τοπική αυτονομία αλλά και η ευφυΐα είναι δυνατόν να τους δώσει την δυνατότητα να επιλύσουν καταστάσεις οι οποίες πιθανόν να μην είχαν προβλεφθεί ή να μην μπορούσαν να προβλεφθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης.

Το βασικό ερώτημα πάντα που προκύπτει σε σχέση με την ανάπτυξη λογισμικού που βασίζεται σε ευφυείς πράκτορες αφορά την διαφορά του από τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό. Παρόλο που υπάρχουν σημαντικές ομοιότητες με τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό όπως η αφαίρεση αλλά και οι διάφορες σχέσεις υπάρχουν παράλληλα και σημαντικές διαφορές [1.4.6]:

- Τα αντικείμενα συνήθως είναι παθητικές οντότητες και απλά αντιδρούν σε μηνύματα και εντολές.
- Τα αντικείμενα παρόλο που πιθανόν να περιλαμβάνουν παράσταση του περιβάλλοντος αλλά και συμπεριφορές δεν έχουν δυνατότητα επιλογής της συμπεριφοράς αλλά και της όποιας πράξης. Από την στιγμή που θα επιλεγεί μια προσβάσιμη (public) μέθοδος το αποτέλεσμα είναι δεδομένο. Αντίθετα ένας πράκτορας από την φύση μπορεί να αλλάξει την επιλογή της πράξης.
- Πολλές φορές ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός δεν είναι επαρκής στην μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων. Αυτό συμβαίνει διότι ενώ μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τα στοιχεία και τους μηχανισμούς λειτουργίας ενός συστήματος, υστερεί σημαντικά στην περιγραφή και την μοντελοποίηση του αλληλεπιδράσεων σε ένα σύστημα[1.4.2].
- Τέλος ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός υστερεί σημαντικά στην μοντελοποίηση και την διαχείριση των σχέσεων αφού οι τελευταίες είναι μάλλον στατικές.

Το επόμενο βασικό ερώτημα είναι κατά πόσο η τεχνολογία των ευφύων πρακτόρων μπορεί να έχει την ανάλογη διάδοση με αυτήν που έχει μέχρι τώρα ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός. Η απάντηση δεν είναι εύκολη και σίγουρα το μέλλον θα αποκαλύψει το αποτέλεσμα. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά που καθιστούν το μέλλον αισιόδοξο [1.4.7].

Το πρώτο χαρακτηριστικό σχετίζεται με τον τρόπο που εξελίσσεται ο προγραμματισμός των υπολογιστών. Η κοινότητα της πληροφορικής στρέφεται από τις γλώσσες που καθορίζονταν από την αρχιτεκτονική των υπολογιστών σε γλώσσες προγραμματισμού που καθορίζονται από την φύση του προβλήματος [π.χ. Matlab]. Η φύση λοιπόν των πρακτόρων είναι συνδεδεμένη άμεσα με το μοντέλο του προβλήματος. Επιπλέον η δομή των πρακτόρων δίνει σημαντικά νέα εργαλεία στην ανάπτυξη λογισμικού και κυρίως με τον τρόπο που αυτοί αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.



Σχήμα 1.3 Ενσωμάτωση των ευφύων πρακτόρων στα υπάρχοντα συστήματα.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι η εισαγωγή των πρακτόρων δεν απαιτεί επαναστατικές αλλαγές στα υπάρχοντα υπολογιστικά συστήματα αλλά με χρήση ενδιάμεσων πρακτόρων μπορούν οι νέοι πράκτορες να επικοινωνήσουν με το υπάρχον σύστημα. Ουσιαστικά οι ενδιάμεσοι αυτοί πράκτορες θα χρησιμοποιηθούν σαν μεσάζοντες μεταξύ του νέου συστήματος και του υπάρχοντος. Παράδειγμα μίας τέτοιας εφαρμογής είναι σε μία αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι πράκτορες καταλήγουν σε μία συμφωνία. Ο ενδιάμεσος πράκτορας θα αναλάβει να μεταφέρει τα αποτελέσματα στον υπολογιστή που εκτελεί την ροή φορτίου προκειμένου να εξετασθεί η λύση του προτάθηκε.

1.4.2 Κατανεμημένος Έλεγχος που βασίζεται στους ευφυείς πράκτορες

Ο κατανεμημένος έλεγχος έρχεται ουσιαστικά σαν εξέλιξη του κλασικού κεντρικού ελέγχου με τα κεντρικά συστήματα εποπτείας και ελέγχου (SCADA Supervisor Control and Data Acquisition). Το μοντέλο αυτό του ελέγχου βασίζεται στο παλαιότερο μοντέλο λειτουργίας του συστήματος που αποτελούνταν από έναν μικρό σχετικά αριθμό κεντρικών μονάδων οι οποίες ελέγχονταν από μία (δημόσια) εταιρία. Η λειτουργία της αγοράς ενέργειας αλλά και η εισαγωγή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, έξυπνων στοιχείων ελέγχου στο επίπεδο της μεταφοράς και της διανομής όπως και των μικροδικτύων έχει αυξήσει τρομερά την πολυπλοκότητα του συστήματος.

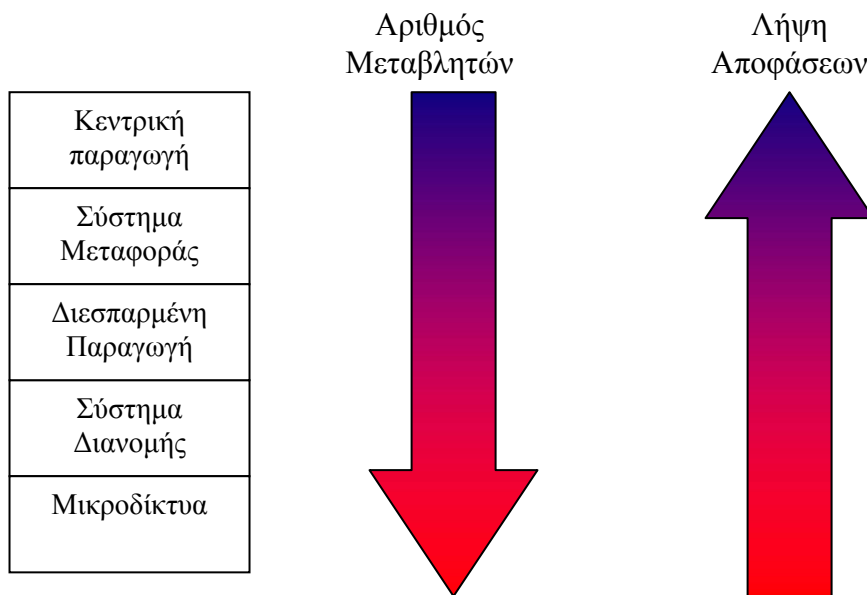
Ένα βασικό θέμα είναι η διαδικασία λήψης των αποφάσεων η οποία με βάση τον κεντρικό έλεγχο ήταν από πάνω προς τα κάτω. Αυτό το μοντέλο πλέον θεωρείται απαρχαιωμένο τόσο λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος όσο και του τρόπου λειτουργίας στα πλαίσια της αγοράς ενέργειας. Το θέμα λοιπόν είναι να μεταφερθούν σημαντικά τμήματα του μηχανισμού λήψης αποφάσεων σε κατώτερα επίπεδα. Ωστόσο η πολυπλοκότητα του συστήματος παραμένει.

Το επόμενο βασικό ερώτημα αφορά τα μικροδίκτυα και ειδικότερα ποια είναι τα πλεονεκτήματα από την χρήση της τεχνολογίας των ευφών πρακτόρων. Ειδικότερα γιατί θα πρέπει να δώσουμε τοπική ευφυΐα στην μονάδα και με βάση την ευφυΐα αυτή να συντονίζει την λειτουργία της με τις γειτονικές μονάδες χωρίς την παρεμβολή ενός κεντρικού συστήματος;

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 υπ' όψιν 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.

Επιπλέον κατά την εγκατάσταση μίας νέας μονάδας, εάν το σύστημά μας έχει ικανότητες «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» (plug n' play) τότε περιορίζεται ακόμη περισσότερο το κόστος. Αυτή είναι μία σημαντική δυνατότητα που θα πρέπει να έχει το σύστημα. Όταν αναφέρεται άμεση λειτουργία δεν σημαίνει απλά να αρχίζει να παράγει ενέργεια αλλά να καταλάβει το σύστημα ποιες ακριβώς μονάδες έχει δίπλα του και στη συνέχεια να συνεργαστεί μαζί τους.



Σχήμα 1.4 Πολυπλοκότητα Συστήματος .

Μια άλλη σημαντική λεπτομέρεια έχει να κάνει με το πραγματικό όφελος από την χρήση μικρομονάδων παραγωγής αλλά και ελεγχόμενων φορτίων. Είναι προφανές ότι αυτός που θα

εγκαταστήσει ένα τέτοιο σύστημα δεν έχει μόνο στόχο το να κερδίσει χρήματα από την πώληση ενέργειας. Ίσως η πώληση να είναι απλά ένας στόχος για να αποσβέσει το κόστος κτίσης. Άλλοι στόχοι για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων είναι η εξυπηρέτηση εσωτερικών αναγκών όπως η θέρμανση ή η επάρκεια ισχύος. Η κάλυψη και εξυπηρέτηση των εσωτερικών αναγκών είναι ένα πρόβλημα που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί και να αντιμετωπιστεί από ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου. Η αρχιτεκτονική του συστήματος πολλαπλών ευφύων πρακτόρων βασίζεται στην εξυπηρέτηση των εσωτερικών στόχων (goal) του κάθε πράκτορα οπότε το σύστημα αυτό προσαρμόζεται άμεσα στις ανάγκες του μικροδίκτυου.

Αναλύοντας περαιτέρω την προηγούμενη παράγραφο θα πρέπει ακόμα να αντιληφθούμε ότι ο τρόπος λειτουργίας των πρακτόρων είναι πιο κοντά στο φυσικό μέσο του ελέγχου. 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 σε διάφορες 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 συναγεμμούς, 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 μονάδος 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.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου. Όπως προαναφέραμε το μικροδίκτυο είναι ουσιαστικά μια μικρογραφία ενός μεγάλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου θα πρέπει να λαμβάνουν χώρα μία σειρά από ανάλογες λειτουργίες. Μία λοιπόν από τις προκλήσεις αυτής της διατριβής είναι να δοθεί μία αρχιτεκτονική πάνω στην οποία θα μπορούμε να ενσωματώσουμε πάρα πολλές λειτουργίες του συστήματος.

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. Ένας από τους στόχους της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι να παρουσιάσουμε ένα σύστημα που θα ελαχιστοποιεί τις ανάγκες για ανταλλαγή δεδομένων.

Ένα σημαντικό θέμα είναι η συμβατότητα των συστημάτων και ουσιαστικά αυτός είναι ο στόχος του τελευταίου κεφαλαίου. Ένας βασικός στόχος της διατριβής αυτής είναι να προτείνει μία αρχιτεκτονική που να μπορεί να είναι ανοιχτή στον οποιονδήποτε. Δηλαδή να μπορεί οποιοσδήποτε που απλά συμμορφώνεται με κάποιους βασικούς κανόνες να εντάξει το σύστημά του στο υπάρχον μικροδίκτυο χωρίς ιδιαίτερο κόπο. Σε αντίθετη περίπτωση ο κάθε κατασκευαστής θα μπορούσε να αναπτύσσει μικροδίκτυα μόνο για τον εαυτό του αυξάνοντας τελικά το κόστος και μειώνοντας παράλληλα την ευελιξία του συστήματος.

1.5 Οργάνωση του κειμένου

Η διατριβή αυτή εστιάζει στην αρχιτεκτονική του πράκτορα προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει μέσα σε ένα μικροδίκτυο. Για τον λόγο αυτό εισάγουμε την έννοια της πολυεπίπεδης μάθησης όπου η διαχείριση της γνώσης χωρίζεται σε πολλαπλά επίπεδα. Οι λειτουργίες του πράκτορα ομαδοποιούνται σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά τις τοπικές καθαρά λειτουργίες του πράκτορα σε σχέση με την μονάδα ή το φορτίο που ελέγχει. Το επόμενο επίπεδο αφορά απλές πράξεις και ενέργειας που απαιτούν όμως την συμμετοχή πλέον του ενός πράκτορες ενώ στο τελευταίο επίπεδο το σύνολο των πρακτόρων καλείται να λειτουργήσει σαν ομάδα προκειμένου να φέρει εις πέρας τους πραγματικούς στόχους του συστήματος. Αυτό είναι το μοντέλο στο οποίο κινείται η διατριβή αυτή και ειδικότερα τα κεφάλαια που ακολουθούν είναι τα εξής:

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μία σύντομη περιγραφή της τεχνολογίας των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων καθώς επίσης και αναφορά στο θέμα της πολυεπίπεδης μάθησης. Επιπλέον δίδονται κάποια βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του πράκτορα που καλείται να ελέγξει μία μονάδα στα πλαίσια του μικροδικτύου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρώτο επίπεδο της πολυεπίπεδης μάθησης και περιγράφονται κάποιες από τις λειτουργίες που μπορεί να επιτελέσει ο πράκτορας τοπικά. Οι λειτουργίες αυτές πρακτικά είναι πάρα πολλές και για αυτόν τον λόγο δίδεται βαρύτητα στις ανάγκες του εργαστηριακού μικροδικτύου και για την ακρίβεια στις μπαταρίες και στον έλεγχο των φορτίων. Θα παρουσιαστούν για την ακρίβεια εφαρμογές που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες του συστήματος των πολλαπλών ευφυών πρακτόρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το δεύτερο επίπεδο της μάθησης και για την ακρίβεια μέθοδοι με τις οποίες μία ομάδα πρακτόρων συντονίζεται με σκοπό να φέρει εις πέρας ένα συγκεκριμένο στόχο. Στο επίπεδο αυτό η βασική απαίτηση για το αποτέλεσμα είναι να είναι σωστό αλλά και βέλτιστο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το τρίτο και τελευταίο επίπεδο της μάθησης πολλαπλών επιπέδων όπου οι πράκτορες καλούνται να ολοκληρώσουν τους πραγματικούς στόχους του συστήματος, είτε πρόκειται για την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας είτε για την ολοκλήρωση μια σύνθετης λειτουργίας όπως είναι η απομονωμένη λειτουργία από το κεντρικό δίκτυο. Οι πράκτορες θα πρέπει να αξιοποιήσουν όλη την δυνατή γνώση προκειμένου να φέρουν σε πέρας τους στόχους τους. Η κρίσιμη απαίτηση στο επίπεδο αυτό είναι οι πράκτορες να μπορούν να συντονίζονται και να προγραμματίζουν ενέργειες για το μέλλον. Ο κύριος όγκος των γνώσεων τους αλλά και βασικές δυνατότητες για εκτέλεση διαφόρων πράξεων προέρχεται από το προηγούμενα επίπεδα της οργάνωσης.

Στο έκτο κεφάλαιο εστιάζει σε πρακτικά θέματα του ελέγχου των μικροδικτύων και κυρίως σε εφαρμογές πληροφορικής. Ο ενδιαμέσος συνδετικός κρίκος μεταξύ του κλασικού κεντρικού ελέγχου και των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων είναι τα καταναμημένα SCADA σε περιβάλλον διαδικτύου. Ως σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι κυρίως να παρουσιάσει κάποιες ενδιαφέρουσες τεχνικές λεπτομέρειες των συστημάτων SCADA με έμφαση στο τομέα της πληροφορικής και των επικοινωνιών αλλά και της υλοποίησης πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Το δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου, αυτού αφορά το τεχνικό κομμάτι της υλοποίησης των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων και θα εστιάζει κυρίως σε θέματα λογισμικού. Ειδικότερα

παρουσιάζονται κάποιες βασικές τεχνικές λεπτομέρειες της εφαρμογής των αλγορίθμων των προηγούμενων κεφαλαίων σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την διατριβή αυτή καθώς και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις. Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία.

Επιπλέον παρατίθενται και τέσσερα παραρτήματα. Στο πρώτο γίνεται περιγραφή του εργαστηριακού μικροδικτύου που είναι εγκατεστημένο στο ΕΜΠ. Στο δεύτερο παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίηση των καμπύλων στατισμού σε ένα αντιστροφέα, στο τρίτο δίδονται οι θεωρητικές αποδείξεις για το κεφάλαιο 4 και τέλος στο τέταρτο αναφέρονται κάποιες βασικές έννοιες για τις μπαταρίες.

1.6 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η λειτουργία των μικροδικτύων αποτελεί πεδίο έρευνας τα τελευταία χρόνια από αρκετά ερευνητικά ιδρύματα και η έρευνα εστιάζεται σε όλες τις πτυχές της λειτουργίας τους [1.2.1-1.2.5] όπως η οικονομική λειτουργία[1.2.8-1.2.9], θέματα προστασιών[1.2.7], επικοινωνιών[1.2.6], ελέγχου και ηλεκτρονικών ισχύος[1.2.10].

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 [1.7.1-2]. Παραδείγματα εφαρμογών στην περιοχή είναι το [1.7.3-5] που αφορά την παρακολούθηση της κατάστασης μετασχηματιστών, αλλά και το [1.7.6] 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[1.7.7-12]. Σημαντική έρευνα γίνεται σε ότι αφορά τα αυτοθεραπευόμενα (self - healing) δίκτυα στις ΗΠΑ μετά τα τρομοκρατικά χτυπήματα[1.7.13 -15]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη του [1.7.16] για την απόρριψη φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής. Τέλος ένα κομμάτι της έρευνας αφορά το καθαρά πληροφοριακό τμήμα[1.7.17 -26] και ειδικότερα τον τρόπο που θα υλοποιηθούν οι πράκτορες και θα ενσωματωθούν στο υπάρχον σύστημα ελέγχου[1.7.27 -28]. Από τις εργασίες αυτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η [1.7.24] 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[1.7.29]. Σημαντική έρευνα λαμβάνει χώρα στην περιοχή των αγορών ηλεκτρικής

ενέργειας [1.7.30-31].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 των παιγνίων και την ενισχυτική μάθηση [1.7.31-32].

Δ) Εφαρμογές στα δίκτυα πλοίων

Μία περιοχή στην οποία η τεχνολογία των ευφυών πρακτόρων έχει διείσδυση 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[1.7.33-40].

Κεφάλαιο 2

Συστήματα Πολλαπλών Ευφυών Πρακτόρων

2.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας όλες οι πολύπλοκες διεργασίες όπως είναι βιομηχανική παραγωγή, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και οι εγκαταστάσεις παραγωγής χημικών χρησιμοποιούν σύνθετα υπολογιστικά συστήματα για τον έλεγχο και την εποπτεία. Καθώς όμως οι διαδικασίες αυτές αυξάνουν σε πολυπλοκότητα ανάλογα αυξάνουν και οι υπολογιστικές απαιτήσεις. Τα παραδοσιακά μοντέλα κεντρικού ελέγχου αρχίζουν και φτάνουν στα υπολογιστικά τους όρια. Η λειτουργία και το ερευνητικό ενδιαφέρον στρέφεται πλέον στον καταναεμημένο έλεγχο και στην καταναεμημένη νοημοσύνη.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας των συστημάτων πολλαπλών παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον δεδομένου ότι πολλά χαρακτηριστικά των πρακτόρων τους φέρνουν λειτουργικά πιο κοντά στην διεργασία που ελέγχουν.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα την έννοια του ευφυούς πράκτορα, την λειτουργία του με βάση την συμπεριφορά του αλλά και την έννοια της πολυεπίπεδης μάθησης. Η πολυεπίπεδη μάθηση είναι ένας τρόπος οργάνωσης των λειτουργιών του πράκτορα με σκοπό να επιτελέσει σύνθετες λειτουργίες σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον. Τέλος θα καταλήξουμε με τις βασικές ιδέες του τρόπου λειτουργίας του κάθε πράκτορα που ελέγχει το μικροδίκτυο.

2.2 Περί Νοημοσύνης

Η θεωρία των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να τυγχάνει της προσοχής ολοένα και περισσότερων ερευνητών. Αυτή η στροφή του ενδιαφέροντος οφείλεται και σε μία διαφορετική αντίληψη σε σχέση με τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού.

Μέχρι πριν λίγα χρόνια το λογισμικό θεωρούνταν σαν ανεξάρτητα και αυτοτελή προγράμματα που καλούνταν να βοηθήσουν τον χειριστή ή να τον υποκαταστήσουν σε συγκεκριμένες λειτουργίες. Το λογισμικό και οι υπολογιστές εξελίχθηκαν τόσο που μπορούν πλέον να διαχειρίζονται την λειτουργία μίας επιχείρησης ή να περατώνουν μία κάποια σύνθετη διαδικασία ελέγχου όπως είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα όμως με την διαχείριση πολύπλοκων διεργασιών άρχισε μία «υποσυνείδητη» διαδικασία αλλά και αντιδικία, αντιστοιχίζοντας ανθρώπινα χαρακτηριστικά στους υπολογιστές. Δύο είναι τα βασικά χαρακτηριστικά: η νοημοσύνη και η κοινωνικότητα[2.1-6].

Η νοημοσύνη ίσως είναι το πλέον αμφιλεγόμενο χαρακτηριστικό είτε λόγω του ότι δεν υπάρχει σαφής ορισμός της νοημοσύνης είτε λόγω του φόβου των ανθρώπων απέναντι σε αυτά τα μηχανήματα που αυξάνουν την υπολογιστική τους ικανότητα με απίστευτες ταχύτητες. Όταν κάποιος ασθενής συμβουλευτεί ένα γιατρό, ο οποίος έχει την νοημοσύνη και την γνώση να κατανοήσει το πρόβλημα του ασθενούς. Στην συνέχεια ο ασθενής ακολουθεί κατά γράμμα τις οδηγίες του αφού τον θεωρεί ειδικό στο είδος του. Αντίστοιχα ένας χειριστής σε κάποιο κέντρο ελέγχου ενέργειας για να πάρει μία απόφαση θα συμβουλευτεί τον «ειδικό» δηλαδή τον υπολογιστή που εκτελεί το πρόγραμμα της ροής φορτίου, εκτίμησης κατάστασης ή της οικονομικής ένταξης των μονάδων και συνήθως θα ακολουθήσει τις υποδείξεις του υπολογιστή. Και φυσικά το ερώτημα παραμένει: έχει νοημοσύνη ένα μηχάνημα; Ο Alan Turing έθεσε ένα κριτήριο προκειμένου να καθοριστεί αν ένας υπολογιστής έχει νοημοσύνη ή όχι. Στο κριτήριο αυτό υπάρχει ένας υπολογιστής που επικοινωνεί με έναν άνθρωπο μέσω ενός τερματικού. Αν ο τελευταίος είναι αδύνατον να διαπιστώσει αν αυτός που του απαντά στο τερματικό είναι άνθρωπος ή υπολογιστής τότε ο υπολογιστής αυτός πληροί τα κριτήρια και θεωρείται ότι έχει τεχνητή νοημοσύνη. Η κριτική στον ισχυρισμό αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η δοκιμή αυτή το μόνο που μας αποκαλύπτει είναι το αν ένας υπολογιστής έχει την ικανότητα να μιμηθεί την ανθρώπινη συμπεριφορά. Και ένα δεύτερο δεδομένο είναι ότι σύμφωνα με τις αρχές της ψυχολογίας, υπάρχουν πολλές κατηγορίες νοημοσύνης όπως η μαθηματική, η συναισθηματική ή η μουσική νοημοσύνη και άρα η ανθρώπινη νοημοσύνη έχει πλέον της μίας εκφράσεις.

Παρόλα αυτά αν δούμε το θέμα λίγο πιο ανοιχτά ο Turing μάλλον έχει δίκιο στον τρόπο του θέτει το πρόβλημα. Η απάντηση έρχεται ανατρέχοντας στο παρελθόν και στην εξέλιξη της φιλοσοφίας και των επιστημών. Κατά τον μεσαίωνα η διανόηση ήταν εγκλωβισμένη σε θεοκρατικές αντιλήψεις που προσπαθούσαν να απαντήσουν σε ερωτήματα που είχε θέσει πρώτος ο Αριστοτέλης, όπως το τι είναι ενέργεια. Η μεγάλη στροφή που σηματοδότησε την έναρξη της αναγέννησης και την πορεία προς το σήμερα προήλθε από ανθρώπους σαν τον Νεύτωνα, που προσπαθούσαν να απαντήσουν σε ερωτήματα που απλά περιγράφουν τον τρόπο που λειτουργούν τα πράγματα γύρω τους, αλλά δεν τον εξηγούσαν: ποιες είναι οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν την κίνηση των πλανητών ή με τι ταχύτητα πέφτει ένα μήλο στο κεφάλι σου και όχι το τι είναι η βαρύτητα (και κατά συνέπεια τι είναι νοημοσύνη). Αυτό θα είναι το πνεύμα αυτού του κειμένου και θα θεωρούμε ότι ένα πρόγραμμα έχει τεχνητή νοημοσύνη αν μπορεί να επιτελέσει μία σειρά από εργασίες, πολύπλοκες ή μη, μιμούμενο τους ανθρώπους και τον τρόπο που αυτοί λειτουργούν.

Το επόμενο χαρακτηριστικό του ανθρώπου είναι η κοινωνικότητα το οποίο ουσιαστικά είναι και αυτό μία έκφραση αλλά και τμήμα της νοημοσύνης. Ο άνθρωπος αναπτύσσει και

εξελίσσει την νοημοσύνη του ξεκινώντας από την οικογένεια και συνεχίζοντας στο σχολείο αλλά και τις άλλες κοινωνικές δραστηριότητες. Μήπως όμως κάτι ανάλογο δεν συμβαίνει και με τους υπολογιστές σήμερα; Μπορεί κάποιος να θεωρήσει εξελιγμένο έναν υπολογιστή που δεν μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο και να ανταλλάξει δεδομένα με άλλους υπολογιστές, να αναβαθμίσει τις δικές του λειτουργίες ή και να επιλύσει ένα πρόβλημα μαζί με άλλους υπολογιστές;

Η κοινωνία λοιπόν είναι ο χώρος στον οποίο ο άνθρωπος ανταλλάσσει πληροφορίες, γνώσεις, ιδέες, συναισθήματα και στην συνέχεια εξελίσσεται ή προσαρμόζεται και με ανάλογη διαδικασία εξελίσσει και τους γύρω του. Ο τρόπος που δρα ο άνθρωπος μέσα στην κοινωνία έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών κλάδων της επιστήμης και δεν είναι στόχος του παρόντος κειμένου να τον αναλύσουμε. Ωστόσο υπάρχει ένα βασικό χαρακτηριστικό το οποίο αποτελεί βασική παράμετρο του προβλήματος της παρούσας εργασίας και το οποίο δεν του αντιλαμβανόμαστε εύκολα. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ότι το περιβάλλον που σχηματίζει μία ανθρώπινη κοινωνία είναι έντονα στοχαστικό και για την ακρίβεια θα το χαρακτηρίσαμε χαοτικό. Ο κάθε άνθρωπος σκέφτεται και δρα σχετικά ανεξάρτητα μέσα στην κοινωνία με αποτέλεσμα να είναι αδύνατον να προβλέψουμε με ακρίβεια τα μελλοντικά γεγονότα. Αυτή είναι η κλάση προβλημάτων που αρχίζει να αντιμετωπίζεται στα δίκτυα υπολογιστών. Για παράδειγμα ένας υπολογιστής που αποφασίζει να εντάξει μία μονάδα στο δίκτυο ενέργειας θα πρέπει να επικοινωνήσει με τον τοπικό υπολογιστή της μονάδας και αν ο τελευταίος αποφασίσει ότι δεν υπάρχει κάποιο λειτουργικό πρόβλημα τότε θα ξεκινήσει η μονάδα. Ο κεντρικός υπολογιστής δεν είναι σίγουρος για την έκβαση της απόφασής του παρά μόνο όταν δει την μονάδα να ξεκινά.

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μία πρώτη αναφορά στην έννοια της κατανεμημένης νοημοσύνης. Στην κατανεμημένη νοημοσύνη πολλές νοήμονες και σχετικά ανεξάρτητες οντότητες σχηματίζουν μία κοινωνία. Μέσα σε αυτήν την κοινωνία μπορούν να λύνουν προβλήματα. Αυτή είναι μία εισαγωγική περιγραφή των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Ο ευφυής πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού η οποία σχηματίζει μία κοινωνία με άλλους αντίστοιχους πράκτορες με βάση κάποιους κανόνες και στόχο έχει να λύσει ένα ή περισσότερα προβλήματα.

2.2 Χρησιμότητα της κατανεμημένης νοημοσύνης

Στην εισαγωγή έγινε αναφορά στην γενική έννοια της νοημοσύνης αλλά και της κοινωνικότητας. Το θέμα που πραγματεύεται αυτή η διατριβή σχετίζεται με την χρήση της κατανεμημένης νοημοσύνης για την επίλυση κάποιων συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων. Ωστόσο ένα κρίσιμο ερώτημα αφορά το σε ποιες περιοχές θα μπορούσε η κατανεμημένη νοημοσύνη να δώσει αποτελεσματικά εργαλεία.

Κατηγορίες τέτοιων προβλημάτων είναι:

- Προβλήματα τα οποία είναι από την φύση του κατανεμημένα όπως για παράδειγμα ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ένα τέτοιο σύστημα ένα μεγάλο κομμάτι των ελέγχων και των λειτουργιών γίνεται τοπικά.
- Σύνθετα προβλήματα τα οποία αποτελούνται από ετερογενή υποπροβλήματα. Επανερχόμενοι με ένα παράδειγμα πάνω σε ένα σύστημα ηλεκτρική ενέργειας έστω ότι θέλουμε να ελέγξουμε στο δίκτυο παράλληλα την τάση αλλά και την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας. Οι δύο αυτές λειτουργίες δεν είναι απλά ανόμοιες αλλά είναι δυνατόν να είναι και αντικρουόμενες αφού ο έλεγχος της τάσης μπορεί να συνεπάγεται μη οικονομική λειτουργία.
- Εξαιρετικά πολύπλοκα από άποψη μεγέθους προβλήματα όπως ο έλεγχος της εναέριας κυκλοφορίας. Ο αριθμός των μεταβλητών καθιστά σχεδόν αδύνατη την επίλυσή τους από ένα κεντρικό υπολογιστή και για αυτόν τον λόγο επιλέγεται η λύση της διάσπασης του αρχικού προβλήματος σε πολλά μικρότερα.
- Προβλήματα στα οποία το περιβάλλον δεν είναι απλά στοχαστικό αλλά και μεταβλητό. Για παράδειγμα σε ένα μικροδίκτυο η στοχαστικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε τον τρόπο που θα λειτουργήσει μία μονάδα ή ένα φορτίο. Αντίστοιχα η μεταβλητότητα έγκειται στο γεγονός ότι ανά πάσα στιγμή μπορεί να εγκατασταθεί μία νέα μονάδα. Το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να αντιληφθεί τις αλλαγές που γίνονται στο περιβάλλον του και να προσαρμοστεί κατάλληλα.

Σε πολλά προβλήματα η υπάρχουσα υποδομή υποδεικνύει τον τρόπο επίλυσης τους. Η τρομερή διάδοση του διαδικτύου αλλά και το σχεδόν μηδενικό κόστος των μικροεπεξεργαστών χαμηλής υπολογιστικής ισχύος καθιστούν την χρήση τους στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων εξαιρετικά ελκυστική.

Το πρόβλημα του ελέγχου των μικροδικτύων ανήκει σε όλες τις παραπάνω κατηγορίες οπότε η χρήση κατανεμημένων μεθόδων ελέγχου είναι μονόδρομος.

2.3 Ο ευφυής πράκτορας.

Παρόλο που στην βιβλιογραφία [2.5-2.6] δεν υπάρχει σαφής περιγραφή για τους ευφυείς πράκτορες και τα συστήματα πολλαπλών ευφυνών πρακτόρων ωστόσο υπάρχουν κάποια γενικώς αποδεκτά χαρακτηριστικά. Πρώτα από όλα ένας ευφυής πράκτορας είναι μία φυσική οντότητα η οποία δρα στο περιβάλλον ή μία εικονική οντότητα. Στην περίπτωση των ενεργειακών συστημάτων ο φυσικός πράκτορας μπορεί να ελέγχει απευθείας μία μικροτουρμπίνα ενώ ο εικονικός πράκτορας μπορεί να είναι το πρόγραμμα που συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας. Στην συνέχεια του κειμένου αυτού, στην περίπτωση των φυσικών ευφυνών πρακτόρων αυτοί θα ονομάζονται από το φυσικό μέσο που ελέγχουν.

Ένας ευφυής πράκτορας όπως προαναφέραμε έχει την δυνατότητα να δρα στο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι έχει την δυνατότητα να αλλάζει το περιβάλλον του εξαιτίας των πράξεών του. Ο πράκτορας ουσιαστικά δρα στο περιβάλλον του με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με τις άμεσες αποφάσεις του. Για παράδειγμα αν ο πράκτορας είναι μία γεννήτρια diesel τότε η απόφαση για την αύξηση της παραγωγής επηρεάζει την τάση στους γύρω ζυγούς, τις παραγωγές στις άλλες μονάδες του συστήματος αλλά και σε γενικότερο οπτικό πεδίο την συνολική ευστάθεια και ασφάλεια του συστήματος.

Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με την επικοινωνία του με του άλλους πράκτορες όπου επηρεάζοντας τις αποφάσεις τους αλλάζει έμμεσα την κατάσταση του περιβάλλοντος. Η επικοινωνία είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό σε ένα ευφυνές σύστημα αφού οι πράκτορες καλούνται πλέον να ανταλλάξουν όχι απλά δεδομένα ή εντολές αλλά γνώση. Ο τρόπος που γίνεται αυτό περιγράφεται σε ξεχωριστή ενότητα στην συνέχεια του κειμένου.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι ευφυείς πράκτορες έχουν ένα βαθμό αυτονομίας το οποίο σημαίνει ότι έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν αποφάσεις τοπικά χωρίς την ύπαρξη ενός κεντρικού ελεγκτή. Προκειμένου να το πετύχουν αυτό οδηγούνται από διάφορες τάσεις (tendencies). Για ένα σύστημα μπαταριών η τάση αυτή θα μπορούσε να είναι: «φόρτισε τις μπαταρίες όταν η kWh είναι φτηνή και η κατάσταση φόρτιση είναι χαμηλή». Σε αυτή την περίπτωση ο ευφυής πράκτορας επιλέγει το πότε θα δράσει, όχι βάση εξωτερικών εντολών αλλά με βάση τις εσωτερικές του τάσεις, κανόνες και στόχους. Επιπλέον άμεσα συσχετιζόμενο με την αυτονομία και αλλά και την δυνατότητα να δρα στο περιβάλλον είναι το γεγονός ότι οι πράκτορες έχουν στην κατοχή τους πόρους. Στην περίπτωση μας οι πόροι μπορεί να είναι τα αποθέματα σε καύσιμα ή το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει για να πραγματοποιήσει τους στόχους του.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα του να έχουν μερική ή καθόλου αναπαράσταση του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ο ευφυής πράκτορας που ελέγχει μία γεννήτρια γνωρίζει μόνο την τάση στον δικό του ζυγό αλλά δεν ξέρει πότε τις τάσεις σε όλο το δίκτυο.

Τέλος ο κάθε ευφυής πράκτορας έχει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά και προσπαθεί να ικανοποιήσει κάποιους στόχους χρησιμοποιώντας τους πόρους, τις ικανότητες του αλλά και τις υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει. Ο τρόπος με τον οποίο ο ευφυής πράκτορας χρησιμοποιεί τα παραπάνω καθορίζει την συμπεριφορά του. Για να γίνουν τα παραπάνω πιο κατανοητά ας θεωρήσουμε μια μικρή μονάδα diesel. Τα καύσιμα της είναι οι πόροι που διαθέτει, η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος είναι δύο από τις ικανότητές της και τέλος η συμμετοχή σε επικουρικές εργασίες του ηλεκτρικού συστήματος (ancillary services) για την διατήρηση της τάσης είναι μία υπηρεσία που μπορεί να προσφέρει.

2.4 Η κοινωνία των πρακτόρων

Ο ευφυής πράκτορας λειτουργεί στα πλαίσια μία κοινωνίας που αποτελείται από πολλούς άλλους πράκτορες. Η οργάνωση της κοινωνίας των πρακτόρων μπορεί να διακριθεί σε τρία επίπεδα ανάλογα με αυτά που ορίζει η κοινωνιολογία[2.5]:

1. το μικρο-κοινωνιολογικό επίπεδο το οποίο αφορά την αλληλεπίδραση δύο ή ενός πολύ μικρού αριθμού πρακτόρων. Οι περισσότερες μελέτες σε συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων αφορούν αυτόν τον τρόπο οργάνωσης.
2. το επίπεδο των ομάδων οι οποίες είναι το συστατικό μιας ολοκληρωμένης κοινωνίας. Σε αυτό το επίπεδο οι πράκτορες μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά και προσπαθούν να επιτελέσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα στην ανθρώπινη κοινωνία μια ομάδα είναι το σχολείο όπου ο στόχος είναι η διαπαιδαγώγηση και η εκπαίδευση των μαθητών στις βασικές γνώσεις. Σε ένα μικροδίκτυο μία ομάδα πρακτόρων μπορεί να είναι οι πράκτορες που ελέγχουν τους διακόπτες.
3. το τελευταίο επίπεδο είναι το σύνολο της κοινωνίας. Στο επίπεδο αυτό ανήκουν όλοι οι πράκτορες και δημιουργούνται πολύπλοκες σχέσεις και αλληλεπιδράσεις.

Το βασικό θέμα είναι που προκύπτει αφορά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ένας πράκτορας μέσα στην κοινωνία. Οι πράκτορες σε σχέση με τον τρόπο που επιλύουν ένα πρόβλημα μπορούν να διακριθούν σε πράκτορες με αντίληψη (cognitive agents) του περιβάλλοντος και σε πράκτορες που αντιδρούν στο περιβάλλον (reactive agents). Στη πρώτη κατηγορία οι πράκτορες έχουν αυξημένη ευφυΐα και η επίλυση του προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του περιβάλλοντος αλλά και κατάστροφης σχεδίου για τα μελλοντικά στάδια. Στην δεύτερη κατηγορία οι πράκτορες απλά ξέρουν να αντιδρούν στα διάφορα ερεθίσματα χωρίς να έχουν κάποιο σύνθετο τρόπο σκέψης. Στην πρώτη κατηγορία οργάνωσης οι πράκτορες είναι οργανωμένοι με τρόπο ανάλογο με αυτόν της ανθρώπινης κοινωνίας όπου η δομή της βασίζεται σε μεμονωμένα ευφυή άτομα. Αντίθετα η οργάνωση της δεύτερης 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.

Η αντίληψη του περιβάλλοντος επιτρέπει στον πράκτορα να διαχειρίζεται την γνώση του και να προσαρμόζει την συμπεριφορά του ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Η συμπεριφορά του δηλαδή είναι μετασχηματίζεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Επιπλέον μπορεί, όπως προαναφέρθηκε να προγραμματίζει τις μελλοντικές του κινήσεις και αυτό είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό σημείο. Το όποιο σύστημα ευφύων πρακτόρων εάν θέλει να μπορεί να έχει ένα σχέδιο για το μέλλον θα πρέπει να κατανοεί το περιβάλλον του.

Ωστόσο ο κάθε πράκτορας ξεχωριστά όπως προαναφέραμε έχει περιορισμένη ή και καθόλου αντίληψη του περιβάλλοντος, οπότε το πρόβλημα της κατανόησης του περιβάλλοντος είναι συνολικό πρόβλημα του συστήματος των ευφύων πρακτόρων αλλά και του τρόπου με τον οποίο αυτοί αντιδρούν μεταξύ τους.

2.5 Επικοινωνία των πρακτόρων.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό όλων των κοινωνιών ευφύων οντοτήτων είναι η ικανότητα για επικοινωνία. Η επικοινωνία είναι η βάση για οποιαδήποτε λειτουργία αλλά και κοινωνική συμπεριφορά. Το γεγονός ότι οι πράκτορες επικοινωνούν τους δίνει την δυνατότητα να μαθαίνουν, να συνεργάζονται αλλά και να συντονίζονται. Οι επικοινωνία μπορεί να είναι πολύ απλή βασιζόμενη σε σήματα όπως για παράδειγμα οι φερομόνες στην κοινωνία των

μυρμηγκιών ή μία σύνθετη γλώσσα βασισμένη σε γραμματική, συντακτικό αλλά και λεξιλόγιο. Το μόνο δεδομένο είναι ότι όσο πιο σύνθετη είναι η γλώσσα των ευφυών πρακτόρων τόσο πιο εξελιγμένες λειτουργίες μπορεί να επιτελέσει το σύστημα.

Υπάρχουν πάρα πολλές θεωρίες πάνω στις επικοινωνίες ωστόσο η πλέον βασική είναι η θεωρία των Shannon και Weaver [2.8]. 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 ευφυών 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 [2.5] 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 που αυτά θα είναι συμβολοακολουθίες οπότε 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 που την συζητήση. Για παράδειγμα 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 2.8].

2.5.1 Agent Communication Language

Η FIPA [6.22] 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**).

Περισσότερα στοιχεία για την υλοποίηση των πρακτόρων αλλά και του τρόπου επικοινωνίας τους θα δοθεί στο κεφάλαιο 4.

2.6 Η 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 πως 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.

Στην εργασία αυτήν θα ασχοληθούμε με πράκτορες που συνεργάζονται και δεν είναι αντίπαλοι. Για αυτόν το λόγο θα εστιάσουμε περισσότερο στον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαν να συνεργαστούν.

2.6.1. Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων

Η έννοια της συνεργασίας δύο ή περισσοτέρων πρακτόρων είναι σύνθετη δεδομένου ότι υπάρχουν πολύ 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 η ειδικότερα η ανάθεση συγκεκριμένων καθηκόντων στο κάθε πράκτορα. Για παράδειγμα εάν έχουμε ένα αριθμό από πράκτορες που ελέγχουν μπαταρίες κάποιοι μπορεί να αναλάβουν τον έλεγχο της συχνότητας σε απομονωμένη λειτουργία ενώ κάποιοι άλλοι τον 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 ένα πράκτορα που ελέγχει μία ανεμογεννήτρια και ένα 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 ο 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 ένα 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. Ωστόσο στο κεφάλαιο 6 αναφέρεται μία μέθοδος που ανήκει στην κατηγορία αυτή.

2.7 Μηχανική Μάθηση

Η μηχανική μάθηση αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης αφού ένα σύστημα προκειμένου να αποκτήσει νοημοσύνη θα πρέπει αρχικά να εκπαιδευτεί. Η μηχανική μάθηση περιλαμβάνει μεθόδους όπου χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα ή δεδομένα από προσομοιώσεις προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την λειτουργία του υπό μελέτη συστήματος και να βελτιστοποιήσουν την λειτουργία του. Το πρόβλημα που τίθεται στην εργασία αυτή είναι η εύρεση του τρόπου που ο κάθε πράκτορας θα μαθαίνει τι πρέπει να κάνει έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την λειτουργία του συστήματος.

Υπάρχει όμως ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό στο σύστημα μας. Ο έλεγχος του μικροδίκτυου αποτελείται από μία σειρά από μικρότερα προβλήματα τα οποία πιθανόν να είναι και αντικρουόμενα. Για παράδειγμα ο πράκτορας που διαχειρίζεται μία μπαταρία θα πρέπει να αναλάβει την διαχείριση της μπαταρίας, την παρακολούθηση της τάσης και της συχνότητας στο σύστημα και σίγουρα την συμμετοχή σε μία αγορά ενέργειας.

Θα πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μία αρχιτεκτονική που να επιτρέπει την ομαλή συνύπαρξη όλων αυτών των δυνατοτήτων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι αυτή της πολυεπίπεδης μάθησης η οποία παρουσιάζεται στην συνέχεια.

2.8 Πολυεπίπεδη Μάθηση

Η ιδέα για την οργάνωση του τρόπου λειτουργίας των πρακτόρων σε ένα μικροδίκτυο προήλθε από την εργασία των Stone και Veloso[2.16] που αφορούσε τον έλεγχο μίας ομάδας ρομπότ που παίζουν ποδόσφαιρο. Το συνολικό πρόβλημα που αντιμετώπισαν στον έλεγχο της ομάδας των ρομπότ παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες σε σχέση με το αντικείμενο της εργασίας αυτής.

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 εισαγάγει τρία επίπεδα συμπεριφοράς του πράκτορα και κάθε ένα από αυτά περιλαμβάνει κάποιες από τις προηγούμενες πράξεις και λειτουργίες, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1.

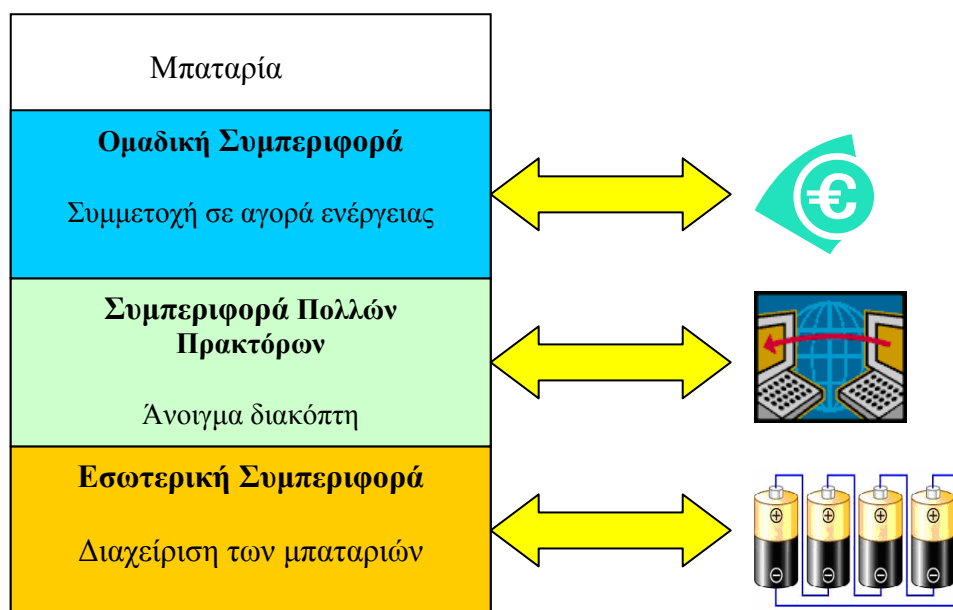
Το πρώτο επίπεδο αφορά πράξεις και λειτουργίες του πράκτορα σε τοπικό επίπεδο οι οποίες δεν απαιτούν την συνεργασία με άλλους πράκτορες. Απλά θα πρέπει το ρομπότ να μάθει να πηγαίνει σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία ή να κλωτσά την μπάλα. Στο δεύτερο επίπεδο έχουμε απλές πράξεις και λειτουργίες οι οποίες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

Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία του πράκτορα σε ένα μικροδίκτυο. Ο κάθε πράκτορας ελέγχει μία μονάδα παραγωγής-αποθήκευσης είναι κάποια φορτία 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.

Επίπεδο	Πράκτορες	Συμπεριφορά	Ποδόσφαιρο	Μικροδίκτυο
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 2.1 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 και 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.

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 καταναμευθεί 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:

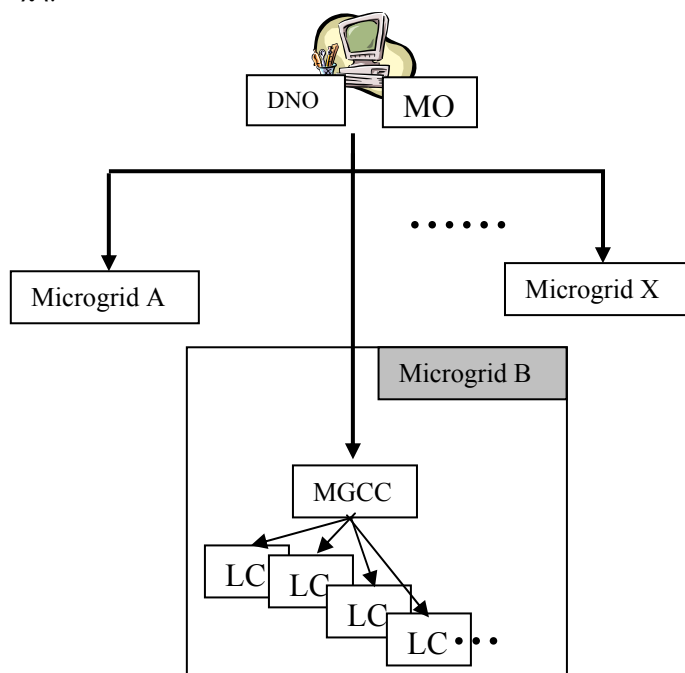
- Η συνολική κατάσταση του συστήματος καθορίζει τις αποφάσεις χωρίς όμως να είναι πλήρως γνωστή.
- Θα πρέπει να γίνει επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών με περιορισμένα υπολογιστικά μέσα.
- Το περιβάλλον είναι στοχαστικό.
- Οι αποφάσεις δεν είναι τοπικές αλλά τα αποτελέσματα μπορεί να φανούν μετά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

Τα τρία επίπεδα που παρουσιάστηκαν στην αρχιτεκτονική της πολυεπίπεδης μάθησης ουσιαστικά αναλύονται ανεξάρτητα σε κάθε ένα από τα τρία επόμενα κεφάλαια της εργασίας αυτής.

2.9 Ο έλεγχος των μικροδικτύων

Στην διατριβή αυτή θεωρούμε ότι έχουμε ένα ιεραρχικό μοντέλο λειτουργίας [7] όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.2 Το μοντέλο ελέγχου των μικροδικτύων.

Το μοντέλο αυτό λειτουργίας του συστήματος έχει τρία βασικά επίπεδα λειτουργίας:

- Ο διαχειριστής του δικτύου (Distribution Network Operator -DNO) και ο διαχειριστής της αγοράς (Market Operator - MO) στην πλευρά της μέσης τάσης.
- Ο κεντρικός ελεγκτής του Microgrid (Microgrid Central Controller -MGCC)
- Οι τοπικοί ελεγκτές των μονάδων παραγωγής / αποθήκευσης ενέργειας (Local Controllers -LC)

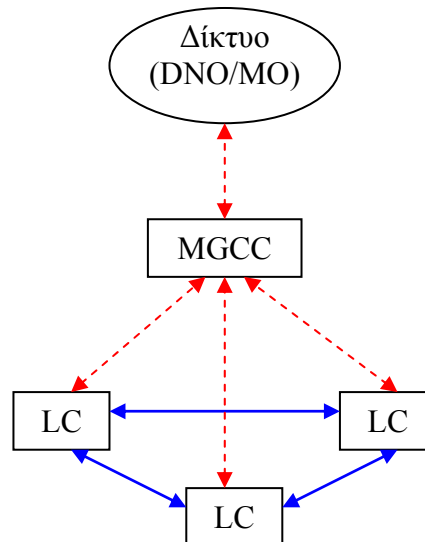
Ο διαχειριστής του δικτύου (DNO) είναι υπεύθυνος για την τεχνική λειτουργία του συστήματος στην χαμηλή και μέση τάση. Στο κομμάτι αυτό του δικτύου μπορεί να υπάρχουν πλέον του ενός μικροδικτύου. Ο διαχειριστής της αγοράς (MO) είναι υπεύθυνος για την λειτουργία της αγοράς ενέργειας στην συγκεκριμένη περιοχή 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 Microgrid αλλά αποτελούν τους εκπροσώπους του δικτύου με τους οποίους επικοινωνεί το κάθε Microgrid. Θα πρέπει να τονιστεί ότι παρά την αυτονομία του Microgrid, εφόσον είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο θα πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού με τους DNO/MO και αυτό είναι γίνεται πιο απαραίτητο θεωρώντας ότι ο αριθμός των μικροδικτύων στο μέλλον θα αυξηθεί κατακόρυφα.

Οι DNO/MO επικοινωνούν με το Microgrid μέσω του Κεντρικού ελεγκτή (**Microgrid Central Controller -MGCC**). Ο τελευταίος σε ένα παραδοσιακό μοντέλο κεντρικού ελέγχου θα είναι υπεύθυνος για την βέλτιστη λειτουργία του Microgrid 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 αλγορίθμους 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.

2.9.1 Αναλυτική περιγραφή του τρόπου ελέγχου

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί μια πιο αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργία του μικροδικτύου. Στο πλαίσιο της περιγραφής αυτής θεωρούμε ότι ο έλεγχος του συστήματος είναι κατακεκομμένος και ο κεντρικός ελεγκτής απλά συντονίζει την λειτουργία του συστήματος. Το μοντέλο λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 2.2.

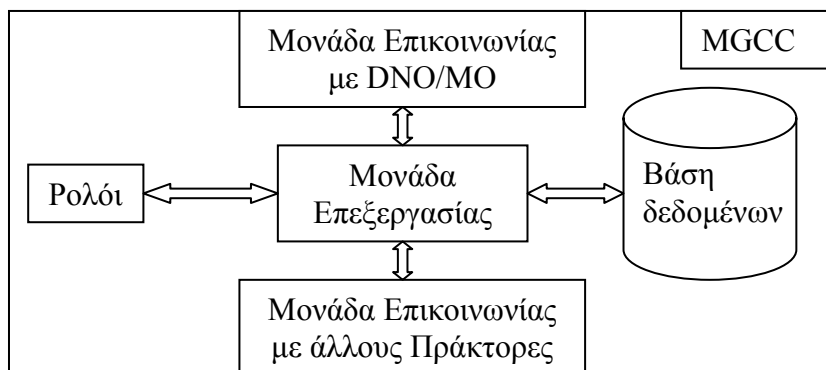


Σχήμα 2.3 Μοντέλο λειτουργίας του κατακεκομμένου συστήματος ελέγχου

Στο σχήμα αυτό φαίνονται πάλι κάποια από τα τμήματα του σχήματος 2.2 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).

2.9.2 Η Δομή του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC)

Η αρχιτεκτονική του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller - MGCC) παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.4 Η αρχιτεκτονική του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC).

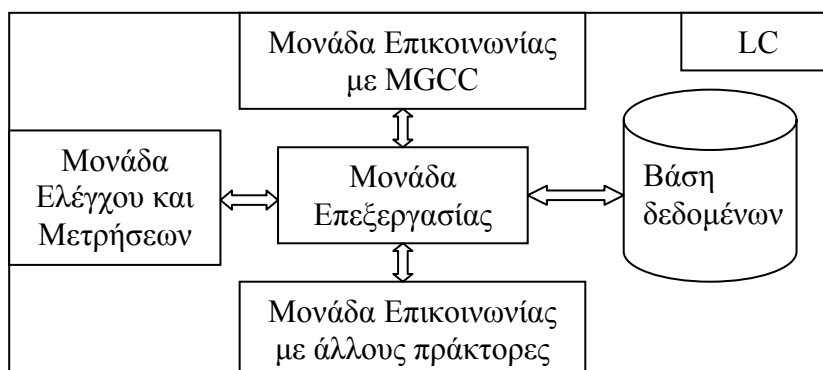
Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική τα κύρια τμήματα που συνθέτουν τον MGCC είναι:

1. Οι μονάδες επικοινωνίας που είναι 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.

Προοικονομώντας την συνέχεια, θα δούμε ότι στην πράξη ο MGCC δεν είναι μία οντότητα αλλά δύο τουλάχιστον ανεξάρτητα τμήματα.

2.9.3 Η Δομή του τοπικού ελεγκτή.

Η αρχιτεκτονική του τοπικού ελεγκτή (Local Controller) LC παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Η αρχιτεκτονική του τοπικού ελεγκτή.

Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική ο LC αποτελείται από:

- Οι μονάδες επικοινωνίας είναι τα υποσυστήματα που τον βοηθούν να επικοινωνεί τόσο με το κεντρικό ελεγκτή (MGCC) αλλά 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 καταναεμημένο σύστημα οι αλγόριθμοι που ενσωματώνονται στο σύστημα αυτό είναι αρκετά προηγμένοι.

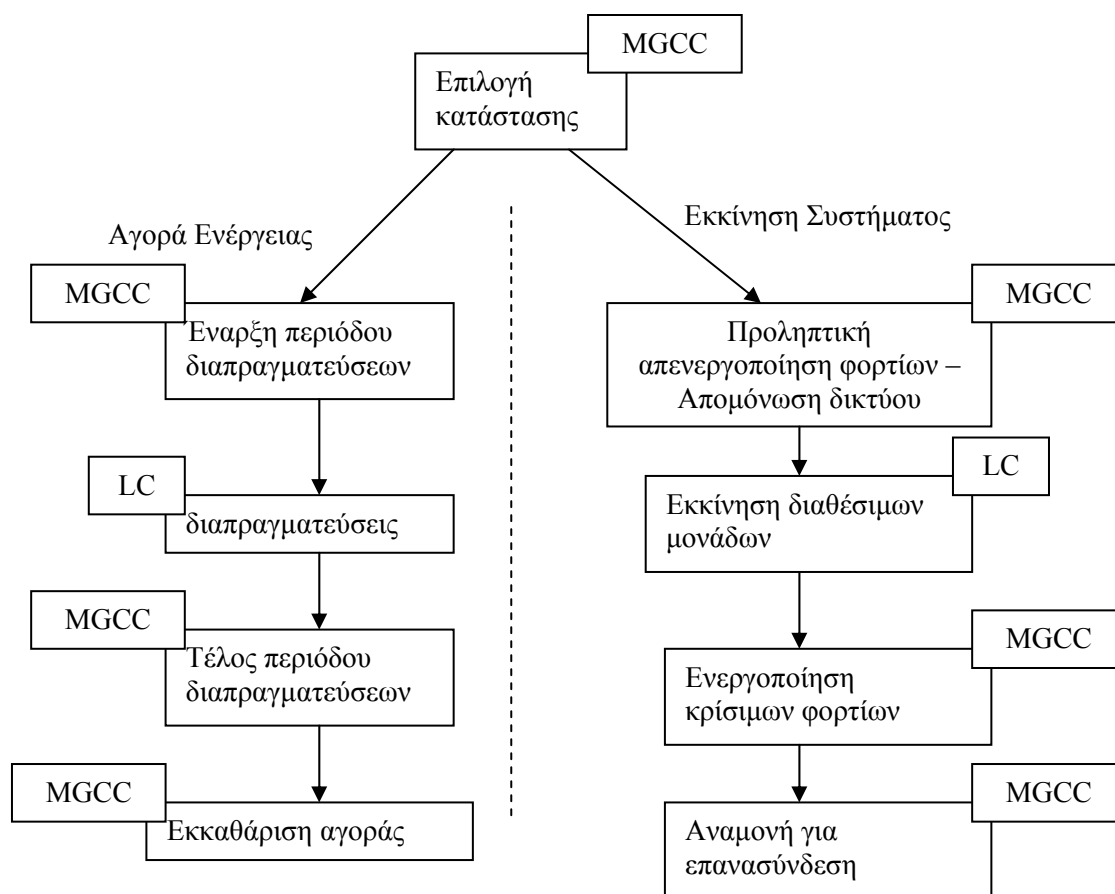
Και στην περίπτωση του τοπικού ελεγκτή (LC) η πλήρης κατανόηση της λειτουργίας του θα γίνει αφού δοθούν κάποιες βασικές αρχές των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Στην περίπτωση του τοπικού ελεγκτή (LC) όμως το καίριο σημείο είναι η λειτουργία της μονάδας επεξεργασίας. Επιπλέον θα δούμε ότι οι προηγμένες τεχνικές επικοινωνίας που παρέχει η τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων όχι μόνο δικαιολογεί την ύπαρξη ανεξάρτητων τμημάτων σε ότι αφορά την επικοινωνία αλλά και το ότι ο τρόπος επικοινωνίας που θα υιοθετηθεί ενισχύει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την ευφυΐα του συστήματος.

2.9.3. Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος.

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί μια βασική περιγραφή του διαγράμματος ροής του καταναεμημένου συστήματος ελέγχου. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του συστήματος θα περιοριστούμε σαν παράδειγμα σε δύο βασικές λειτουργίες, αυτή της αγοράς ενέργειας και της εκκίνησης μετά από διακοπή ισχύος. Το απλοποιημένο διάγραμμα ροής φαίνεται στο

σχήμα 2.5 που ακολουθεί. Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι διάφορες φάσεις του συστήματος και το ποιος είναι ο κύριος υπεύθυνος να περατώσει κάθε μία από αυτές. Τα πλήρη διαγράμματα ροής είναι προφανές ότι είναι εξαιρετικά σύνθετα και εκτεταμένα για να εμφανιστούν σε μία σελίδα.

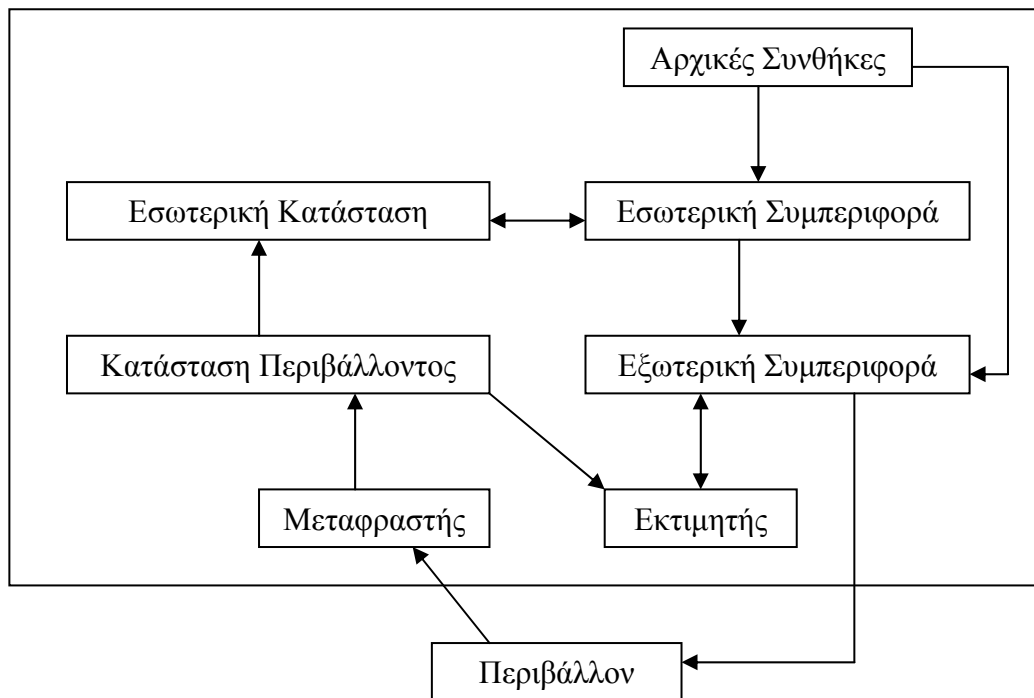
Ο MGCC καλείται κάθε στιγμή να επιλέξει σε πια κατάσταση είναι το σύστημα. Εάν βρισκόμαστε σε κανονική κατάσταση λειτουργίας και είναι η στιγμή που θα πρέπει να αρχίσουν οι διαπραγματεύσεις για την διαχείριση της παραγωγής και του φορτίου θα πρέπει να στείλει τα κατάλληλα μηνύματα στους τοπικούς ελεγκτές. 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 προσπαθούμε να επιλύσουμε δεν είναι η λύση σε κάθε ένα από αυτά αλλά το πώς θα υλοποιηθεί μία αρχιτεκτονική που θα συνδυάζει όλες αυτές τις λειτουργίες.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος

2.10 Εφαρμογή των συστημάτων πολλαπλών ευφυών πρακτόρων στον έλεγχο των μικροδικτύων

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. Αναφέροντας την λειτουργία του συστήματος συνολικά εννοούμε τόσο τις πολύ χαμηλές 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 2.6.



Σχήμα 2.6 αρχιτεκτονική του ευφυή πράκτορα

Αναλυτικά έχουμε:

Αρχικές συνθήκες: οι αρχικές συνθήκες είναι οι στοιχειώδεις κανόνες που διέπουν την συμπεριφορά του ευφυή πράκτορα. Για παράδειγμα αν αυτός συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας τότε μία αρχική συνθήκη είναι ότι θα συνεργάζεται με τους υπόλοιπους ευφυείς πράκτορες (agents) ή αν τους ανταγωνίζεται. Σε ότι αφορά την εσωτερική λειτουργία μία αρχική συνθήκη θα μπορούσε να είναι να κλείνει αν η τάση πέσει κάτω από το 10% της ονομαστικής.

Εσωτερική κατάσταση: η εσωτερική κατάσταση αφορά τις εσωτερικές λειτουργίες και ελέγχους του συστήματος. Για παράδειγμα σε μία μικροτουρμπίνα, τμήμα της εσωτερικής κατάστασης είναι οι στροφές του άξονα, των οποίων ο έλεγχος καθορίζει την 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 από παρουσιάστηκε στο σχήμα αυτό υποδηλώνει ότι ο έλεγχος θα κινείται σε δύο επίπεδα. Στο εσωτερικό όπου ο ευφυής πράκτορας θα ελέγχει μία μονάδα παραγωγής ή αποθήκευσης ενέργειας ή ένα φορτίο. Το άλλο επίπεδο του ελέγχου αφορά την ομαδική συμπεριφορά όλων των ευφύων πρακτόρων με σκοπό τον συνολικό έλεγχο του μικροδικτύου. Το βασικό θέμα που προκύπτει είναι ο τρόπος με τον οποίο θα μάθει να διαχειρίζεται την γνώση ήτοι θα συμπεριφέρεται και αυτό είναι το αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 3

Ατομική Συμπεριφορά

Επίπεδο Πρώτο

3.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε κάποιες από τις λειτουργίες που μπορεί να έχει ο πράκτορας τοπικά. Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο στο πρώτο επίπεδο της μάθησης ο πράκτορας ελέγχει τις τοπικές λειτουργίες της συσκευής στην οποία είναι συνδεδεμένος. Οι λειτουργίες αυτές στην πραγματικότητα είναι πάρα πολλές αλλά το κείμενο θα έχει σαν κεντρικό άξονα τις ανάγκες του εργαστηριακού μικροδικτύου και για την ακρίβεια τις μπαταρίες και τον έλεγχο των φορτίων.

Το πρώτο μέρος αφορά τον έλεγχο των μπαταριών. Ο ευφυής πράκτορας καλείται να διαχειριστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις μπαταρίες. Ο στόχος είναι να αποκτήσει γνώση της λειτουργίας της μπαταρίας με σκοπό οι αποφάσεις του να είναι οι πλέον ρεαλιστικές. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στόχος είναι να κατασκευάσουμε ένα συνολικό σύστημα στο οποίο να μπορούν να ολοκληρωθούν πολλές λειτουργίες. Δεν είναι όμως ο στόχος μας να περιλάβουμε όλες τις δυνατές λειτουργίες αφού κάτι τέτοιο απαιτεί ομαδική εργασία και ξεφεύγει από τους σκοπούς της εργασίας αυτής.

Το δεύτερο μέρος αφορά τον έλεγχο των φορτίων. Ο σκοπός δεν είναι απλά να ανοίξουμε ή να κλείσουμε κάποιο φορτίο αλλά να δημιουργήσουμε μία σειρά εργαλείων και μεθόδων που θα υποστηρίξουν τον μηχανισμό λήψης των αποφάσεων. Κύρια εφαρμογή στο κεφάλαιο αυτό είναι η αναγνώριση του τύπου του φορτίου. Η εφαρμογή αυτή είναι κρίσιμη διότι όπως θα εξηγήσουμε στην συνέχεια στο επίπεδο των μικροδικτύων είναι πρακτικά αδύνατη η πρόβλεψη του φορτίου. Οι αλγόριθμοι στο τρίτο επίπεδο της μάθησης βασίστηκαν στην έννοια αυτή.

3.2 Έλεγχος συστοιχίας μπαταριών

3.2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή ο ευφυής πράκτορας καλείται να διαχειριστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις μπαταρίες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να έχει την καλύτερη δυνατή γνώση της λειτουργίας τόσο των μπαταριών όσο και των ηλεκτρονικών ισχύος του μεσολαβούν για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Προκειμένου να αναλύσουμε την λειτουργία του πράκτορα θα προηγηθεί μία σύντομη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των μπαταριών αλλά και των αντιστροφών. Ειδικά σε ότι αφορά τους αντιστροφείς θα επιμείνουμε στην λειτουργία ελέγχου μέσω των καμπύλων στατισμού.

3.2.2 Θεωρία Μπαταριών

Σαν μπαταρία θεωρούμε μία διάταξη η οποία έχει την δυνατότητα να μετατρέπει την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη με την μορφή χημικών ενώσεων απευθείας σε ηλεκτρική [3.2.1-12] μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων. Ειδικότερα αυτή η μετατροπή της ενέργειας γίνεται μέσω της γνωστής αντίδρασης μεταφοράς φορτίου που ονομάζεται οξειδοαναγωγή. Σαν οξειδοαναγωγή θεωρούμε την μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα σώμα (το οποίο λέμε ότι οξειδώνεται) σε ένα άλλο (το οποίο λέμε ότι ανάγεται). Τυπική παράδειγμα μίας αντίδρασης αυτού του τύπου είναι η καύση. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση της καύσης έχουμε παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι μία μορφής ενέργειας με υψηλό βαθμό εντροπίας και η εκμετάλλευσή της υπόκειται στους περιορισμούς του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει όμως στην περίπτωση των μπαταριών στις οποίες η χημική ενέργεια μετατρέπεται από αυτές απευθείας σε ηλεκτρισμό.

Το βασικά δομικά στοιχεία μίας μπαταρίας είναι τα ηλεκτροχημικά στοιχεία ή απλώς στοιχεία. Κάθε στοιχείο αποθηκεύει ενέργεια σε σχετικά χαμηλό δυναμικό, της τάξης των μερικών Volts, παρόλα αυτά οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές απαιτούν τις συνήθως υψηλότερα δυναμικά. Έτσι κάθε μπαταρία αποτελείται από περισσότερα του ενός στοιχεία συνδεδεμένα σε διάφορους συνδυασμούς σειράς-παραλληλίας προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και ισχύς λειτουργίας για κάθε ενεργειακή εφαρμογή.

Ανάλογα με την φύση την δυνατότητα επαναφόρτισής τους οι μπαταρίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές ομάδες: τις πρωτογενείς και τις δευτερογενείς. Ως πρωτογενείς χαρακτηρίζονται εκείνες οι μπαταρίες που δεν έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης μετά την χρήση, είτε γιατί ο τύπος της ηλεκτροχημείας τους δεν το επιτρέπει, είτε γιατί η επαναφόρτιση δεν μπορεί να γίνει με αξιόλογο βαθμό απόδοσης. Οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται, εκφορτίζονται μία μόνο φορά και στην συνέχεια κατ' ανάγκη απορρίπτονται.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μπαταρίες στις οποίες υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης. Η ηλεκτροχημική αντίδραση σε αυτού του είδους τις μπαταρίες είναι αντιστρεπτή. Μετά την αποφόρτιση μπορούν να επαναφορτιστούν με χρήση συνεχούς ρεύματος από μια εξωτερική πηγή. Στην φάση φόρτισης μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική ενώ στην φάση της εκφόρτισης συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο. Ωστόσο και στις δύο φάσεις, ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα που μεταφέρεται στο μέσον που περιβάλλει την μπαταρία. Ο συντελεστής απόδοσης για έναν κύκλο φόρτισης εκφόρτισης είναι μεταξύ 70% και 80% (~0,9 για τη φόρτιση και ~0,9 για την εκφόρτιση). Με

αυτού του τύπου τις μπαταρίες θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία δίνοντας έμφαση κυρίως στις μπαταρίες μολύβδου οξέος.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να θεωρηθούν σαν μπαταρίες δεδομένου ότι πληρούν τις προϋποθέσεις του “ορισμού” της μπαταρίας και αυτό εφόσον παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω αντιδράσεων οξειδοαναγωγής και είναι δυνατή μέσω αυτών η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική.

3.2.2.1 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Pb-acid)

Πρόκειται για τον πλέον διαδεδομένο τύπο επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι μπαταρίες αυτές θεωρούνται οι πλέον διαδεδομένες λόγω της ωριμότητας της τεχνολογίας τους και της πολύ καλής σχέσης απόδοσης τιμής που παρουσιάζουν, παρόλο που η αποθηκεύσιμη ενέργεια ανά μονάδα μάζας είναι χαμηλότερη από αυτή των άλλων μπαταριών. Κατά την εκφόρτιση καταναλώνεται μολύβδος και οξείδιο του μολύβδου και σχηματίζεται νερό και θειικός μολύβδος. Ο ηλεκτρολύτης τους είναι υδατικό διάλυμα θειικού οξέος. Η λειτουργία τους θα περιγραφεί εκτενώς και στην συνέχεια της εργασίας. Εν γένει βρίσκουν εφαρμογή τόσο στην αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (τύπος βαθιάς εκφόρτισης) και στην αυτοκίνηση (μπαταρίες μικρής εκφόρτισης). Επίσης έχουν αναπτυχθεί και μπαταρίες στις οποίες ο ηλεκτρολύτης μετατρέπεται σε gel με την προσθήκη διάφορων χημικών ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να χυθεί και να υπάρχει μεγαλύτερη ευχέρεια μετακίνησης της μπαταρίας. Αυτός ο τύπος λόγω υψηλού κόστους χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές.

3.2.2.2 Βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις μπαταρίες.

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις μπαταρίες και την λειτουργία τους.

Τάση

Γενικά η τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια δεν είναι σταθερή κατά την διάρκεια της εκφόρτισης μιας μπαταρίας. Μπορούμε λοιπόν να αναφερθούμε στα ακόλουθα μεγέθη:

Θεωρητική τάση. Είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο δέσμιες καταστάσεις των ηλεκτρονίων, ή διαφορετικά η μέγιστη τάση που θεωρητικά μπορεί να εμφανιστεί σε ένα στοιχείο. Εξαρτάται από το υλικό των ηλεκτροδίων, την σύσταση του ηλεκτρολύτη και την θερμοκρασία.

Τάση ανοιχτού κυκλώματος. Είναι η τάση που παρουσιάζεται όταν δεν έχουμε φορτίο. Συνήθως προσεγγίζει πολύ καλά την θεωρητική.

Τάση κλειστού κυκλώματος, η τάση υπό φορτίο. Εξαρτάται από την ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα το οποίο διαρρέει την μπαταρία. Η τιμή της είναι εκείνη που μας απασχολεί ιδιαίτερα κατά την λειτουργία της μπαταρίας

Ονομαστική τάση. Πρόκειται ουσιαστικά για την τιμή της τάσης η οποία γίνεται δεκτή για ένα είδος στοιχείων. Για παράδειγμα οι μπαταρίες του εργαστηρίου έχουν ονομαστική τάση 2 V.

Μέση τάση. Η μέση τιμή της τάσης κατά την διάρκεια μιας εκφόρτισης.

Τάση αποκοπής. Είναι η μικρότερη τάση για την οποία αφήνουμε την μπαταρία σε λειτουργία. Εν γένει η τάση κλειστού κυκλώματος πέφτει καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται. Σταματάμε να εκφορτίζουμε την μπαταρία όταν η τάση της πέσει κάτω από την τάση αποκοπής. Συνήθως ως τάση αποκοπής ορίζεται αυτή για την οποία έχει αποδοθεί το μεγαλύτερο μέρος του αποθηκευμένου φορτίου. Η τιμή της εξαρτάται επίσης και από την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται.

Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα είναι ουσιαστικά το φορτίο το οποίο μπορεί να συγκρατήσει και να αποδώσει η μπαταρία κατά την διάρκεια της εκφόρτισής της. Η χωρητικότητα κάθε στοιχείου, η οποία συμβολίζεται με στη διεθνή βιβλιογραφία με C , μετράται σε Ah (αμπερώρια). Μία μπαταρία έχει χωρητικότητα C Ah αν μπορεί να αποδώσει ρεύμα C Amperes για μία ώρα ή ρεύμα C/n Amperes για n ώρες. Είναι προφανές ότι η χωρητικότητα ουσιαστικά εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο έχει αποθηκευτεί.

Στην πράξη η μπαταρία σταματά την λειτουργία της αρκετά πριν εκφορτιστεί πλήρως (όταν η τάση της πέσει κάτω από την τάση αποκοπής) οπότε δεν μπορεί να αποδώσει όλο το φορτίο το οποίο έχει αποθηκεύσει. Για αυτό το λόγο μπορούμε να διακρίνουμε ανάμεσα στην θεωρητική χωρητικότητα η οποία είναι το μέγιστο φορτίο το οποίο μπορεί να αποδοθεί και την πραγματική χωρητικότητα η οποία αναφέρεται στο ωφέλιμο φορτίο. Στην πράξη φυσικά αναφερόμαστε μόνο στην πραγματική χωρητικότητα η οποία εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό εκφόρτισης, την θερμοκρασία και άλλους παράγοντες.

Ενέργεια

Είναι η ενέργεια την οποία αποδίδει η μπαταρία κατά την διάρκεια μίας πλήρους εκφόρτισής της. Καθορίζεται όπως γνωρίζουμε από την τάση εκφόρτισης και το φορτίο το οποίο έχει αποδώσει. Εξαρτάται βέβαια από όλους τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την τάση και το αποθηκευμένο φορτίο (χωρητικότητα).

Με την ενέργεια σχετίζεται και το μέγεθος της ειδικής ενέργειας ή ενεργειακής πυκνότητας της μπαταρίας. Πρόκειται για την ενέργεια που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία ανά μονάδα μάζας ή όγκου της. Προκειμένου να γίνεται διάκριση ανάμεσα στα δύο συνηθίζεται ο όρος ειδική ενέργεια για την ενέργεια ανά μονάδα βάρους και ενεργειακή πυκνότητα γ για την ενέργεια ανά μονάδα όγκου. Στην πράξη ωστόσο ο όρος ενεργειακή πυκνότητα απαντάται στην βιβλιογραφία για να περιγράψει και τα δύο. Τα μεγέθη αυτά είναι εξαιρετικά σημαντικά για τις εφαρμογές και κυρίως αυτές στις οποίες είναι απαραίτητη η μετακίνηση της μπαταρίας όπως για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα (όπου είναι πιο σημαντική η μείωση του όγκου της μπαταρίας) και τα ηλεκτρικά οχήματα στα οποία είναι σημαντικό το βάρος των μπαταριών.

Ρυθμός φόρτισης (ή εκφόρτισης)

Πρόκειται για το ρυθμό με τον οποίο λαμβάνεται ή εισάγεται ρεύμα στην μπαταρία, δηλαδή το ρεύμα το οποίο ρέει από αυτήν ή προς αυτήν.

Προφανώς ο ρυθμός θα μετράται σε Amp. Προκειμένου ωστόσο να μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών μπαταριών ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας μπορεί να δοθεί και ως κλάσμα της χωρητικότητάς της. Έτσι “ρυθμός φόρτισης (ή εκφόρτισης) C/n ” σημαίνει ότι στην μπαταρία μπαίνει (ή από την μπαταρία αποδίδεται) ρεύμα σε amperes αριθμητικά ίσο με το $1/n$ της χωρητικότητας σε Ah, με άλλα λόγια φορτίζεται με ρυθμό τέτοιο ώστε να φτάσει σε πλήρη φόρτιση (ή να αποφορτιστεί) σε n ώρες.

Κατάσταση φόρτισης – βάθος εκφόρτισης

Η κατάσταση φόρτισης (state of charge) κάθε στιγμή συμβολίζεται ως SOC και ορίζεται ως το πηλίκο του αποθηκευμένου στην μπαταρία φορτίου σε Ah προς την ονομαστική χωρητικότητα.

$$SOC = \frac{\text{αποθηκευμένο στην μπαταρία φορτίο}}{\text{ονομαστική χωρητικότητα}}$$

Συνήθως δίνεται ως ποσοστό επί τοις εκατό της ονομαστικής χωρητικότητας. Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge, DOC) είναι το επί τοις εκατό ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, το οποίο έχει αποδοθεί από την μπαταρία

$$DOC = \frac{\text{αποδοθέν από την μπαταρία φορτίο}}{\text{ονομαστική χωρητικότητα}}$$

3.2.3 Θεωρία αντιστροφών

Τα ηλεκτρονικά ισχύος και ειδικότερα οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται με αυξανόμενο ρυθμό στην διασύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι εξελίξεις στον τομέα των αντιστροφών ευνοούνται από τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και στην εξέλιξη των μικροελεγκτών και των επεξεργαστών ψηφιακού σήματος. Μία προφανής λειτουργία των αντιστροφών είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που προέρχεται από μία συστοιχία μπαταριών ή μία κυψέλη καυσίμου σε εναλλασσόμενη. Επιπλέον μία άλλη σημαντική εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος είναι στην διασύνδεση στρεφόμενων μηχανών στο δίκτυο επιτυγχάνοντας έτσι την λειτουργία των τελευταίων στην ιδανική περιοχή. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας των αντιστροφών εστιάζοντας κυρίως στην τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM Pulse Width Modulation) αλλά και των έλεγχου αυτών μέσω καμπυλών στατισμού.

3.2.3.1 Εισαγωγή

Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε δύο κυρίες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της πηγής εισόδου: τους αντιστροφείς πηγής τάσης και τους αντιστροφείς πηγής ρεύματος. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης (voltage-source inverters) τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης, ιδανικά με μηδενική εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Η τάση της πηγής εισόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος (current-source inverters) τροφοδοτούνται από μια μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος, ιδανικά με άπειρη εσωτερική σύνθετη αντίσταση.

Οι αντιστροφείς διακρίνονται ακόμη σε μονοφασικούς και πολυφασικούς, ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εξόδου. Σε όλους τους αντιστροφείς υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας εξόδου. Η ρύθμιση του πλάτους των τάσεων (ρευμάτων) εξόδου επιτυγχάνεται είτε με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών του αντιστροφέα ή εξωτερικά, με έλεγχο της συνεχούς τάσης (ρεύματος) εισόδου.

Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως στον έλεγχο κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος πολύ μεγάλης ισχύος και είναι πέρα από τον στόχο του κειμένου αυτού για αυτό τον λόγο θα μελετήσουμε τους αντιστροφείς πηγής τάσης.

3.2.3.2 Αντιστροφείς πηγής τάσης

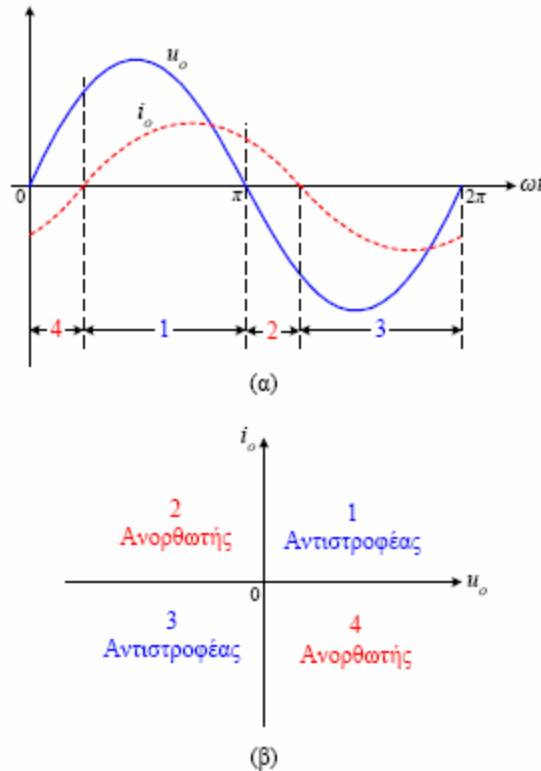
Όπως προαναφέρθηκε οι αντιστροφείς πηγής τάσης τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης και η τάση της πηγής εισόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή. Η έξοδος των αντιστροφών πηγής τάσης εμφανίζει χαρακτηριστικά πηγής τάσης[3.2.13-20].

Η ρύθμιση του πλάτους της τάσης εξόδου βασίζεται σε δύο μεθόδους:

Ο έλεγχος των διακοπών του αντιστροφέα πηγής τάσης με την τεχνική PWM. Με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών και ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτελείται εντός του αντιστροφέα. Σε αυτόν τον τρόπο η συνεχής τάση στην είσοδο των PWM αντιστροφών είναι σταθερή. Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου των αντιστροφών έχουν παρουσιαστεί αρκετές PWM τεχνικές. Η ημιτονοειδής PWM τεχνική (sinusoidal PWM) είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε περιληπτικά στην ημιτονοειδή PWM τεχνική.

Ο έλεγχος της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Στην περίπτωση αυτή ο

αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η πλάτος της ac τάσης εξόδου καθορίζεται από τη dc τάση εισόδου. Οι διακόπτες του αντιστροφέα στην περίπτωση αυτή λειτουργούν σε χαμηλή συχνότητα, ίση με τη συχνότητα της ac τάσης εξόδου. Αντίθετα, στους PWM αντιστροφείς η συχνότητα μετάβασης των διακοπών είναι πολύ μεγαλύτερη της συχνότητας εξόδου. Επειδή η τάση εξόδου έχει τετραγωνική μορφή, οι μετατροπείς αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή (square-wave inverters).

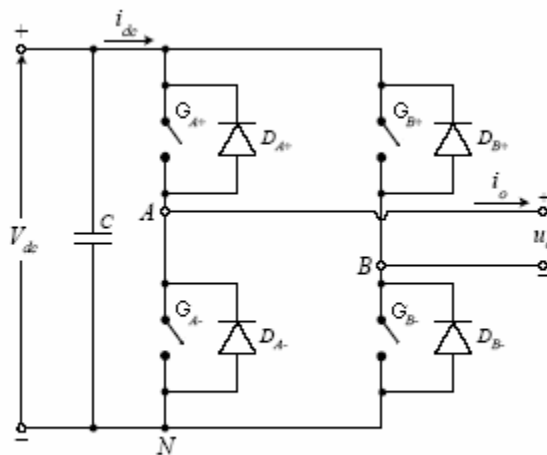


Σχήμα 3.2.1 Οι κυματομορφές στην έξοδο του αντιστροφέα και οι περιοχές λειτουργίας του.

Ως αντιστροφείς πηγής τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημώριων. Αυτή η απαίτηση είναι φανερή από το Σχήμα 3.2.1(α) όπου, εικονίζεται η ιδανική τάση και το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου ενός μονοφασικού αντιστροφέα, ο οποίος τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο. Διακρίνουμε τέσσερα χρονικά διαστήματα 3.2.1(β)

1. το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι θετικό και η στιγμιαία ισχύς ρέει από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα (λειτουργία αντιστροφέα)
2. το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι αρνητικό και η στιγμιαία ισχύς ρέει από την έξοδο προς την είσοδο του μετατροπέα (λειτουργία ανορθωτή)
3. ο γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι θετικό και η στιγμιαία ισχύς ρέει από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα (λειτουργία αντιστροφέα)
4. το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος είναι αρνητικό και η στιγμιαία ισχύς ρέει από την έξοδο προς την είσοδο του μετατροπέα (λειτουργία ανορθωτή)

Η απαίτηση για λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου $u-i$, επιβάλλει τη χρήση του μετατροπέα πλήρους γέφυρας στους μονοφασικούς αντιστροφείς όπως αυτός του σχήματος 3.2.2



Σχήμα 3.2.2 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας

Η κυκλωματική δομή του μονοφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης εικονίζεται στο Σχήμα 3.2.2. Στην περίπτωση αυτή μία σταθερή τάση ελέγχου συγκρίνεται με μια περιοδική τριγωνική κυματομορφή, για την παραγωγή των παλμών έναυσης των διακοπών της γέφυρας. Οι διακόπτες της πλήρους γέφυρας ελέγχονται από τους παλμούς που προκύπτουν από τη σύγκριση της ίδιας τριγωνικής κυματομορφής, με μια ημιτονοειδή τάση ελέγχου (Σχήμα 3.2.3).

$$u_c = V_c \sin(\omega_\pi t) \quad 3.2.1$$

Η συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσης ελέγχου καθορίζει τη κύρια συχνότητα της τάσης εξόδου, η οποία έχει και πάλι παλμική μορφή (Σχήμα 3.2.3). Η τάση εξόδου δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει αρμονικές οι οποίες είναι ελάχιστες. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται *φέρουσα συχνότητα* f_c (*carrier frequency*). Ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς τη θεμελιώδη ονομάζεται *συντελεστής διαμόρφωσης* συχνότητας k_f

$$k_f = \frac{f_c}{f_\omega} \quad 3.2.2$$

Ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος του τριγωνικού σήματος, ονομάζεται *συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους* k_α

$$k_\alpha = \frac{V_c}{V_\omega} \quad 3.2.3$$

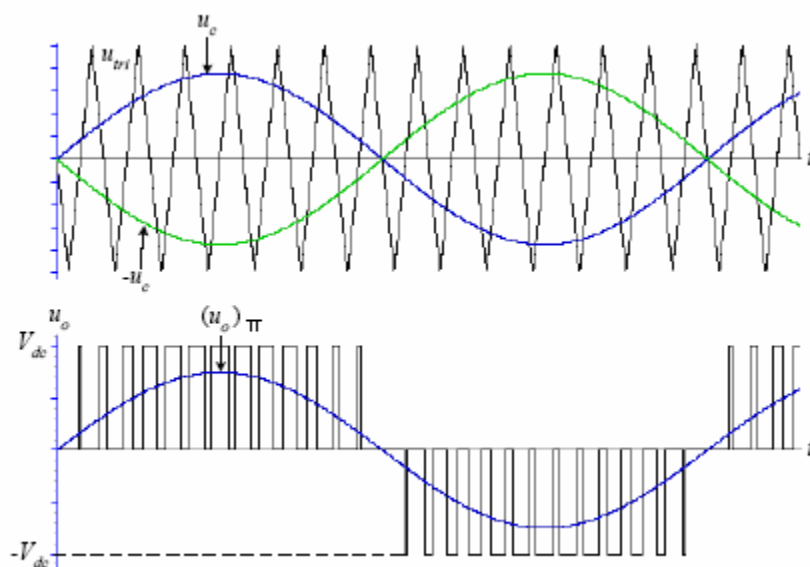
Στην ημιτονοειδή PWM τεχνική η τριγωνική κυματομορφή συγκρίνεται με την τάση ελέγχου u_c και το αρνητικό της $-u_c$. Στην διαδικασία υπάρχουν δύο σκέλη με το πρώτο να αφορά την πρώτη ημιπερίοδο και αντίστοιχα το δεύτερο. Από τη σύγκριση της ημιτονοειδούς τάσης u_c με την *utri* προκύπτουν οι παλμοί οδήγησης των διακοπών του κάθε σκέλους.

Σκέλος Α

$$\begin{aligned} -u_c > u_{tri} & \quad G_{A+} \rightarrow ON \quad \text{και} \quad G_{A-} \rightarrow OFF \\ -u_c < u_{tri} & \quad G_{A+} \rightarrow OFF \quad \text{και} \quad G_{A-} \rightarrow ON \end{aligned} \quad 3.2.4$$

Σκέλος Β

$$\begin{aligned} -u_c > u_{tri} & \quad G_{B+} \rightarrow ON \quad \text{και} \quad G_{B-} \rightarrow OFF \\ -u_c < u_{tri} & \quad G_{B+} \rightarrow OFF \quad \text{και} \quad G_{B-} \rightarrow ON \end{aligned} \quad 3.2.5$$



Σχήμα 3.2.3 Η τάση εξόδου του PWM αντιστροφέα.

Η τάση εξόδου έχει τη μορφή που εικονίζεται στο Σχήμα 3.2.3 Στα χρονικά διαστήματα που η τάση εξόδου είναι μηδέν, άγουν είτε οι διακόπτες $GA+$, $GB+$ είτε οι $GA-$, $GB-$. Οι διακόπτες αυτοί βραχυκυκλώνουν το φορτίο, οπότε το ρεύμα εισόδου είναι μηδέν. Στη PWM τεχνική η συχνότητα των αρμονικών στην τάση εξόδου, σε σχέση με τη φέρουσα συχνότητα δίδεται από την σχέση

$$f_{harmonics} = 2f_c \pm (2n+1) \quad 3.2.6$$

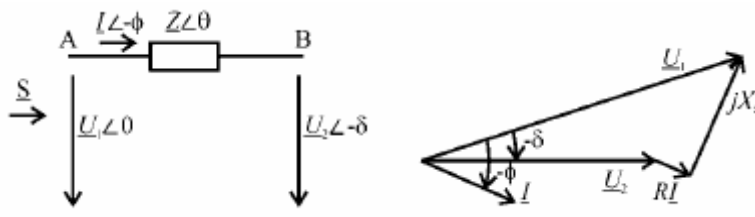
Στην εξίσωση 3.2.6 δίδει την συχνότητα των αρμονικών στην τάση εξόδου και οι οποίες είναι αποκλειστικά περιττές αρμονικές.

Η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου

$$V_\pi = k_\alpha V_{dc} \text{ με } k_\alpha \leq 1 \quad 3.2.7$$

3.2.3.3 Έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού των αντιστροφών.

Στο προηγούμενο τμήμα του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας των αντιστροφών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής. Το βασικό πρόβλημα που τίθεται είναι πως γίνεται ο έλεγχος της ισχύος ειδικά σε περιβάλλον απομονωμένης λειτουργίας με παρουσία πλέον του ενός αντιστροφών. Η βασική μέθοδος είναι αυτή των καμπυλών στατισμού [3.2.4-3.2.7].



Σχήμα 3.2.4 Ισοδύναμο κύκλωμα και ανυσματικό διάγραμμα.

Η ροή ισχύος στο σημείο Α του σχήματος 3.2.4 δίδεται από την σχέση:

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{V}_1 \bar{I}^* = \bar{V}_1 \left(\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{Z} \right)^* = V_1 \left(\frac{V_1 - V_2 e^{-j\delta}}{Z e^{-j\theta}} \right) = \frac{V_1^2}{Z} e^{j\theta} - \frac{V_1 V_2}{Z} e^{j(\delta+\theta)} \quad 3.2.7$$

Οπότε η ενεργός ισχύς που εισέρχεται στον κόμβο δίδεται από την σχέση:

$$P = \frac{V_1^2}{Z} \cos \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\delta + \theta) \quad 3.2.8$$

Ενώ η άεργος ισχύς είναι

$$Q = \frac{V_1^2}{Z} \sin \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \sin(\delta + \theta) \quad 3.2.9$$

Θεωρώντας ότι $Z e^{j\theta} = R + jX$ οι προηγούμενες σχέσεις γράφονται ως εξής:

$$P = \frac{V_1}{R^2 + X^2} [R(V_1 - V_2 \cos \delta) + X V_2 \sin \delta] \quad 3.2.10$$

$$Q = \frac{V_1}{R^2 + X^2} [-R V_2 \sin \delta + X(V_1 - V_2 \cos \delta)] \quad 3.2.11$$

Και

$$V_2 \sin \delta = \frac{XP - RQ}{V_1} \quad 3.2.12$$

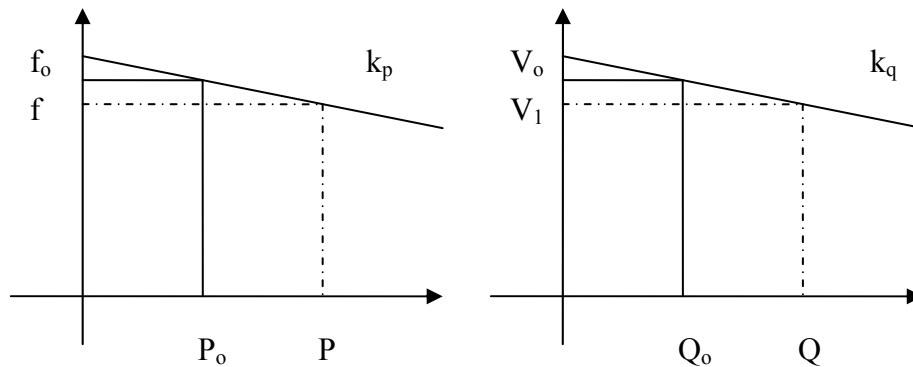
$$V_1 - V_2 \cos \delta = \frac{RP + XQ}{V_1} \quad 3.2.13$$

Στις γραμμές μεταφοράς κάνουμε την υπόθεση ότι $X \gg R$ οπότε το R μπορεί να παραληφθεί. Επιπλέον αν η γωνία ισχύος δ είναι μικρή τότε $\sin \delta = \delta$ και $\cos \delta = 1$. οπότε οι εξισώσεις πλέον γίνονται:

$$\delta = \frac{XP}{V_1 V_2} \quad 3.2.14$$

$$V_1 - V_2 = \frac{XQ}{V_1} \quad 3.2.15$$

Θεωρώντας λοιπόν ότι το $X \gg R$ και ότι το δ είναι πολύ μικρό οι προηγούμενες εξισώσεις μας λένε ότι η ενεργός ισχύς εξαρτάται κυρίως από το δ ενώ η άεργος ισχύς από το Q . Ο έλεγχος της συχνότητας δυναμικά φέρνει και έλεγχο στην γωνία ισχύος δ . Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος και καταλήγουμε στις γνωστές εξισώσεις του στατισμού δύο γεννητριών που παριστάνεται γραφικά στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.2.5 οι καμπύλες στατισμού.

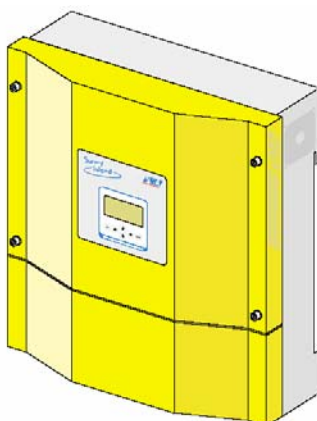
Οι καμπύλες αυτές περιγράφονται από τις γνωστές μας σχέσεις:

$$f - f_o = -k_p (P - P_o) \quad 3.2.14$$

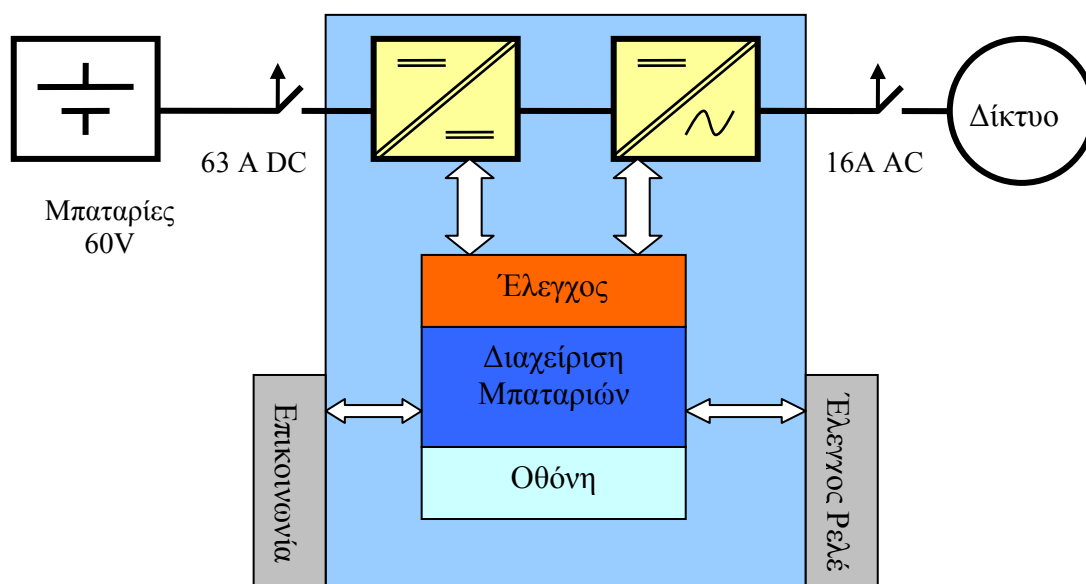
$$V_1 - V_o = -k_q (Q - Q_o) \quad 3.2.15$$

3.2.4 Ο αντιστροφέας του εργαστηρίου

Το βασικό στοιχείο του μικροδικτύου που είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του ΕΜΠ είναι ο αντιστροφέας Sunny Island 3300 της SMA[3.2.21] ο οποίος ρυθμίζει την τάση και την συχνότητα όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται ελέγχοντας την ενεργό και άεργο ισχύ. Το σύστημα όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.2.7 αποτελείται από ένα μετατροπέα Cuk DC/DC και από ένα αντιστροφέα PWM τεσσάρων τεταρτημόριων ο οποίος επιτρέπει τόσο την φόρτιση όσο και την εκφόρτιση των μπαταριών. Ο μετατροπέας DC/DC ανυψώνει την DC τάση των μπαταριών στα 380V DC προκειμένου να τροφοδοτήσει τον αντιστροφέα. Ο τεσσάρων τεταρτημόριων αντιστροφέας αποτελείται από μία μονοφασική γέφυρα IGBT, φίλτρα εξόδου και πηνίο σύνδεσης με το δίκτυο.



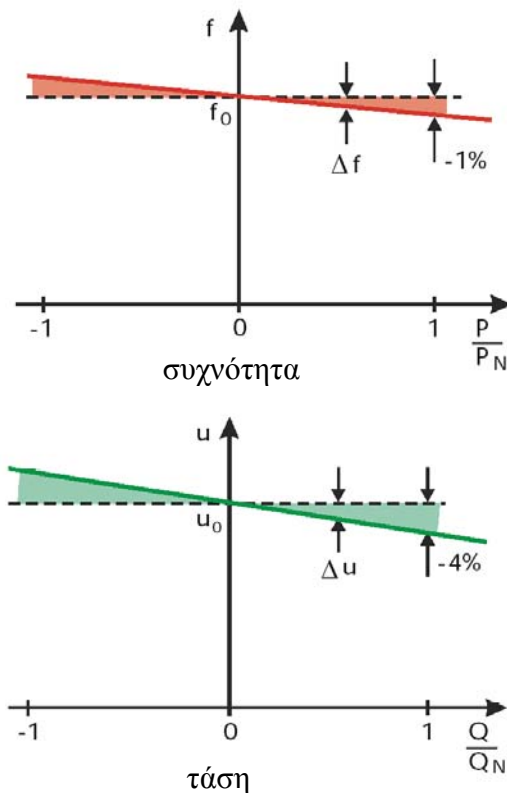
Σχήμα 3.2.6 Ο μετατροπέας Sunny Island 3300



Σχήμα 3.2.7 Τα βασικά τμήματα του μετατροπέα Sunny Island 3300

Ο αντιστροφέας της μπαταρίας μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας σαν “grid-forming” μονάδα δηλαδή σαν μονάδα που ελέγχει την τάση και την συχνότητα του μικροδίκτυου. Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο τότε ο αντιστροφέας λειτουργεί ακολουθώντας την συχνότητα του δικτύου.

Ένα μικροδίκτυο, όπου πολλές πηγές ενέργειας και μονάδες αποθήκευσης συνυπάρχουν, ουσιαστικά αποτελεί ένα μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύστημα αυτό γεννήτριες συμμετέχουν στον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης όπως επίσης και μοιράζονται το ενεργό και άεργο φορτίο. Στις συμβατικές μονάδες ο έλεγχος αυτός μοντελοποιείται με την μορφή των καμπύλων στατισμού στις οποίες έγινε αναφορά προηγουμένως. Οι καμπύλες αυτές έχουν υλοποιηθεί στο σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα και παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Ουσιαστικά είναι η καμπύλη ενεργού ισχύος- συχνότητας και η καμπύλη αέργου ισχύος – τάσης.



Σχήμα 3.3.8 οι καμπύλες στατισμού του αντιστροφέα όπως τις δίνει ο κατασκευαστής.

Σε αυτές τις καμπύλες παρουσιάζονται δύο βασικές ποσότητες:

- η “idle” συχνότητα και τάση που αντιστοιχεί στην τιμή της συχνότητας και της τάσης όταν η ενεργός ισχύ και αντίστοιχα η άεργος ισχύ είναι μηδέν.
- Η “droop” τιμή που αντιστοιχεί στις κλίσεις $\Delta f/\Delta P$ και $\Delta V/\Delta Q$ αντίστοιχα.

Όταν μία μονάχα μονάδα τροφοδοτεί το μικροδίκτυο η συχνότητα και η τάση καθορίζονται από τις καμπύλες αυτές ανάλογα με την ενεργό και άεργο ισχύ. Όταν πολλαπλές μονάδες συνυπάρχουν μέσα στο ίδιο σύστημα, ο έλεγχος δεν γίνεται από μία μονάδα αλλά όλες συμμετέχουν σε αυτόν ανάλογα με τις καμπύλες στατισμού κάθε μίας.

Όταν το σύστημα είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο τότε πρακτικά η συχνότητα και σε μικρότερο βαθμό η τάση δεν ελέγχονται. Στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες αυτές ορίζουν την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο.

3.2.5 Πρακτικές εφαρμογές

3.2.5.1 Εφαρμογή πρώτη έλεγχος ενεργού ισχύος

Η πρώτη εφαρμογή αφορά τον έλεγχο της ενεργού ισχύος της συστοιχίας των μπαταριών σε κατάσταση διασύνδεσης. Το σύστημα όταν θα κλιθεί να λειτουργήσει στα πλαίσια μία αγοράς ενέργειας απαιτείται να παρέχει στο δίκτυο συγκεκριμένα ποσά ενέργειας ή να λαμβάνει. Ωστόσο δημιουργούνται μία σειρά από τεχνικά προβλήματα σε σχέση με τον τρόπο απόδοσης της ενέργειας. Αυτά συνοπτικά είναι:

1. λαμβάνοντας υπ' όψιν τον τρόπο λειτουργίας του αντιστροφέα όπως αυτός έχει δοθεί στις προηγούμενες παραγράφους η παροχή ενεργού ισχύος εξαρτάται άμεσα από την idle συχνότητα, την κλίση της καμπύλης στατισμού καθώς και την τρέχουσα συχνότητα του δικτύου.
2. η επικοινωνία με τον αντιστροφέα παρουσιάζει σημαντικές ασύμμετρες καθυστερήσεις με την έννοια ότι η παραγωγή μπορεί να έχει διαφορετικό χρονικό στίγμα με την συχνότητα. Επιπλέον μπορεί να έχουμε μικρές μεταβολές στους χρόνους ολοκλήρωσης όπως αυτοί ορίζονται στην συνέχεια.
3. η πραγματική παραγωγή και κατάσταση φόρτιση περιέχουν ρυθμίσεις από τον κεντρικό σύστημα διαχείρισης μπαταριών που είναι εγκατεστημένο στον αντιστροφέα.

Πέραν από τις τεχνικές αυτές δυσκολίες κάνουμε και μία υπόθεση, ότι το σύστημα καλείτε να αποδώσει συγκεκριμένες kWh αλλά όχι με σταθερή ισχύ. Η απόδοση της ενέργειας βασίζεται στο εξής ολοκλήρωμα:

$$E_{\text{ενεργός}} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \sum_{t_1}^{t_2} (P(t) \Delta t) \rightarrow E_{\text{ζητούμενη}} \quad 3.2.9$$

Δηλαδή θεωρούμε το ολοκλήρωμα της ενέργειας κατά το ζητούμενο χρονικό διάστημα. Επειδή τα δείγματα λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα της τάξεως των 5 δευτερολέπτων και θεωρώντας ότι στο χρονικό αυτό διάστημα η ισχύς παραμένει σταθερή, το ολοκλήρωμα ανάγεται σε άθροισμα γινομένου ισχύος-χρόνου. Από το ολοκλήρωμα αυτό δεν προσπαθούμε να υπολογίσουμε το πόση ενέργεια πέρασε αλλά το επίπεδο της ισχύος στο επόμενο χρονικό διάστημα προκειμένου να συγκλίνουμε στην σωστή μέτρηση. Μία επιπλέον διόρθωση γίνεται με βάση την μέτρηση ενέργειας του επεξεργαστή του αντιστροφέα έτσι ώστε η τελική μέτρηση να συμπίπτει με την πραγματική ενέργεια θεωρώντας ότι οι ενδείξεις του αντιστροφέα είναι σωστές.

Το επόμενο ερώτημα είναι πώς γίνεται ο υπολογισμός των ρυθμίσεων της καμπύλης στατισμού και ειδικά της idle συχνότητας. Όπως αναφέρθηκε υπάρχει χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τον υπολογισμό του στατισμού. Επιπλέον το σύστημα διαχείρισης επεμβαίνει για λόγους ασφαλείας στις ρυθμίσεις των παραμέτρων στατισμού. Για τον λόγο αυτό επιλέξαμε αντί της ευθείας μεθόδου να χρησιμοποιηθεί μία πιο απλή αλλά απόλυτα λειτουργική μέθοδος. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην αλλαγή της idle συχνότητας κατά βήματα. Έχουμε αναλυτικά:

Βήμα	Ενέργεια
1	Υπολογισμός της ισχύος P_{set} για το επόμενο χρονικό διάστημα
2	Υπολογισμός της μεταβολής της idle συχνότητας f_o για το επόμενο χρονικό διάστημα με βάση και τη τρέχουσα παραγωγή και τις σχέσεις: A) Αν $P_{set}-P>200$ τότε $f_o = f_o+0.1$ B) Αν $P_{set}-P>0$ και $P_{set}-P<200$ τότε $f_o = f_o+0.02$ Γ) Αν $P_{set}-P<-200$ τότε $f_o = f_o-0.1$ Δ) Αν $P_{set}-P<0$ και $P_{set}-P>-200$ τότε $f_o = f_o-0.02$

Πίνακας 3.1 έλεγχος της ενεργού ισχύος

Βήμα	Ενέργεια
1	Υπολογισμός της ισχύος Q_{set} για το επόμενο χρονικό διάστημα
2	Υπολογισμός της μεταβολής της idle τάσης V_o για το επόμενο χρονικό διάστημα με βάση και τη τρέχουσα παραγωγή και τις σχέσεις: A) Αν $Q_{set}-Q>100$ τότε $V_o = V_o+1$ B) Αν $Q_{set}-Q>0$ και $Q_{set}-Q<100$ τότε $V_o = V_o+0.1$ Γ) Αν $Q_{set}-Q<-100$ τότε $V_o = V_o-1$ Δ) Αν $Q_{set}-Q<0$ και $Q_{set}-Q>-100$ τότε $V_o = V_o-0.1$

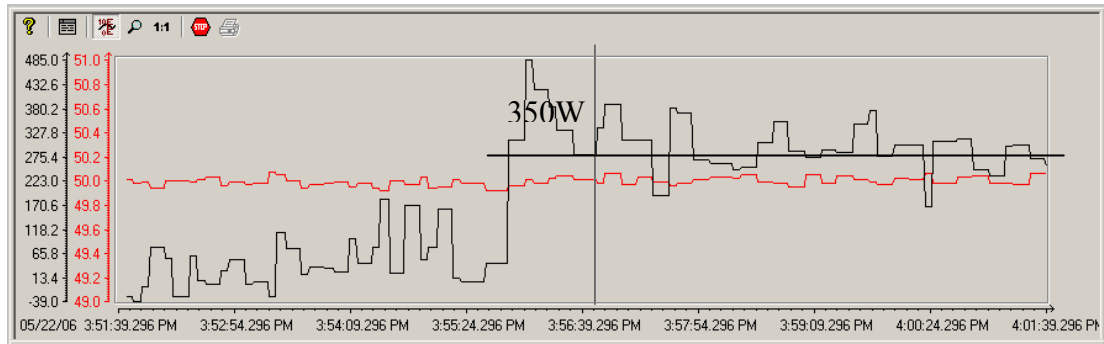
Πίνακας 3.2 έλεγχος της άεργου ισχύος

Η βασική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι τα βήματα μπορεί να είναι περισσότερα για καλύτερη απόκριση του αλγορίθμου ωστόσο για λόγους ασφαλείας των μπαταριών λειτουργούσαμε στο φάσμα ισχύος $\pm 500W$ και το εύρος συχνοτήτων 50 ± 0.5 Hz. Οπότε τα επιλεγμένα βήματα ήταν κάτι παραπάνω από αρκετά.

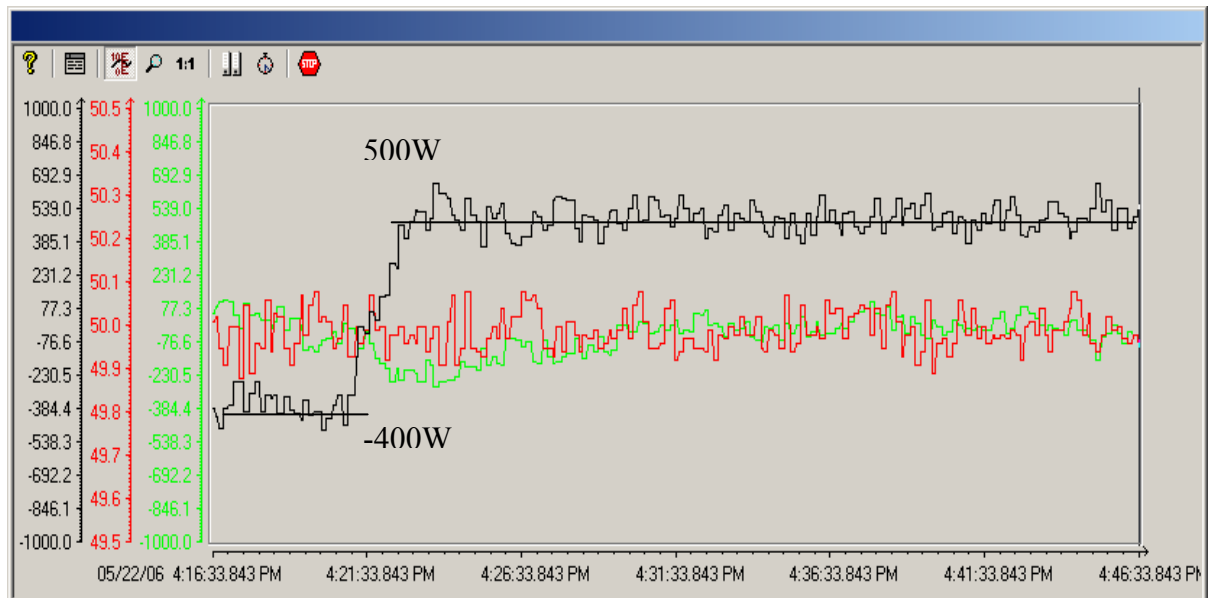
Στην συνέχεια δίδονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με βάση πεντάλεπτα διαστήματα. Στα διαστήματα αυτά το σφάλμα στην τελική ενέργεια είναι μικρότερο του 0.05 % και επειδή αυτό σχετίζεται με τα τελευταία δευτερόλεπτα λειτουργίας σε σχέση με το σύνολο της ενέργειας που αποδίδεται ή απορροφάται. Άρα σε πρακτικά χρονικά διαστήματα της μίας ώρας το σφάλμα θα είναι ουσιαστικά μηδενικό.

3.3. Αποτελέσματα του αλγορίθμου.

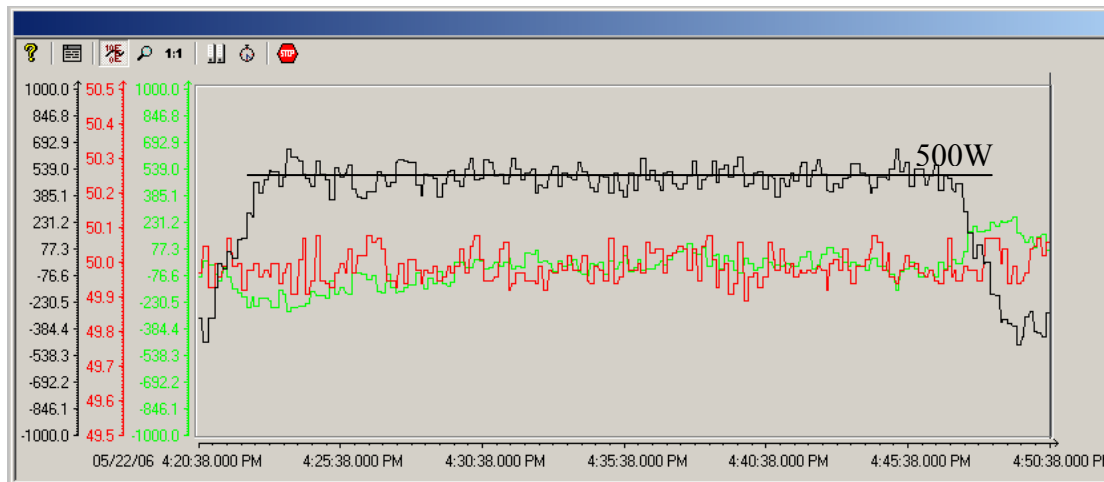
Στην συνέχεια παρατίθενται επιλεκτικά αποτελέσματα για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Το σημείο αναφοράς στο χρονικό διάστημα που θεωρήσαμε ήταν 350W.



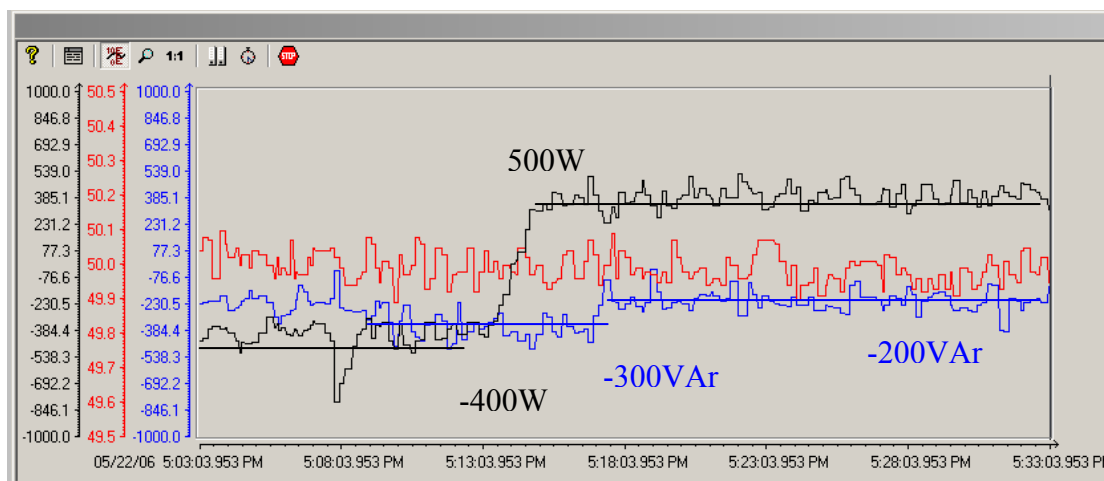
Σχήμα 3.5.7 Ο αλγόριθμος με αναφορά τα 350W (ενεργός ισχύ μαύρη γραμμή και αναφορά συχνότητας κόκκινη γραμμή).



Σχήμα 3.5.8 Ο αλγόριθμος με αναφορά από τα -400W (απορρόφηση ισχύος) στα 500W (ενεργός ισχύ μαύρη γραμμή, αναφορά συχνότητας κόκκινη γραμμή και άεργος ισχύ μπλε γραμμή).



Σχήμα 3.5.9 Ο αλγόριθμος με αναφορά από τα 500W (απορρόφηση ισχύος) στα -400W (ενεργός ισχύ μαύρη γραμμή, αναφορά συχνότητας κόκκινη γραμμή και άεργος ισχύ μπλε γραμμή).



Σχήμα 3.5.10 Ο αλγόριθμος με ταυτόχρονο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος. Για την ενεργό ισχύ αναφορά από τα -400W (απορρόφηση ισχύος) στα 500W και για την άεργο από τα -300Var στα -200Var (ενεργός ισχύ μαύρη γραμμή, αναφορά συχνότητας κόκκινη γραμμή και άεργος ισχύ μπλε γραμμή).

Ανάλογοι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν και για την περίπτωση της αέργου ισχύος όπως επίσης και για τον παράλληλο έλεγχο ενεργού – αέργου ισχύος.

3.2.5.2 Διαχείριση μπαταρίας

Το επόμενο θέμα της λειτουργίας του συστήματος αφορά την διαχείριση των μπαταριών. Ο αντιστροφέας των μπαταριών έχει ένα πολύ εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης όμως αυτό δεν επαρκεί για την λειτουργία του πράκτορα. Ο λόγος είναι ότι προκειμένου να λειτουργήσει ο πράκτορας και να λάβει αποφάσεις σε σχέση με την κατάσταση των μπαταριών θα πρέπει να γνωρίζει μία σειρά από παραμέτρους. Για παράδειγμα πρέπει να γνωρίζει ότι στις επόμενες μέρες θα χρειαστεί να γίνει κύκλος εκφόρτισης των μπαταριών.

Το σύστημα διαχείρισης των μπαταριών επιτηρεί τις τιμές του ρεύματος, τάσης και θερμοκρασίας και κατόπιν υπολογίζει την κατάσταση των μπαταριών και ελέγχει την διαδικασία φόρτισης. Οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση την ιστορία των μπαταριών.

Ο κατασκευαστής του αντιστροφέα έχει θέσει έντεκα πιθανά επίπεδα λειτουργίας του αντιστροφέα όπως αυτά φαίνονται στο Πίνακα 3.5.7. Η βασική παράμετρος που λαμβάνει υπ' όψιν είναι το επίπεδο φόρτισης αλλά στους υπολογισμούς περιλαμβάνονται και μεταβλητές που αφορούν την συνολική κατάσταση των μπαταριών αλλά και την γήρανσή τους.

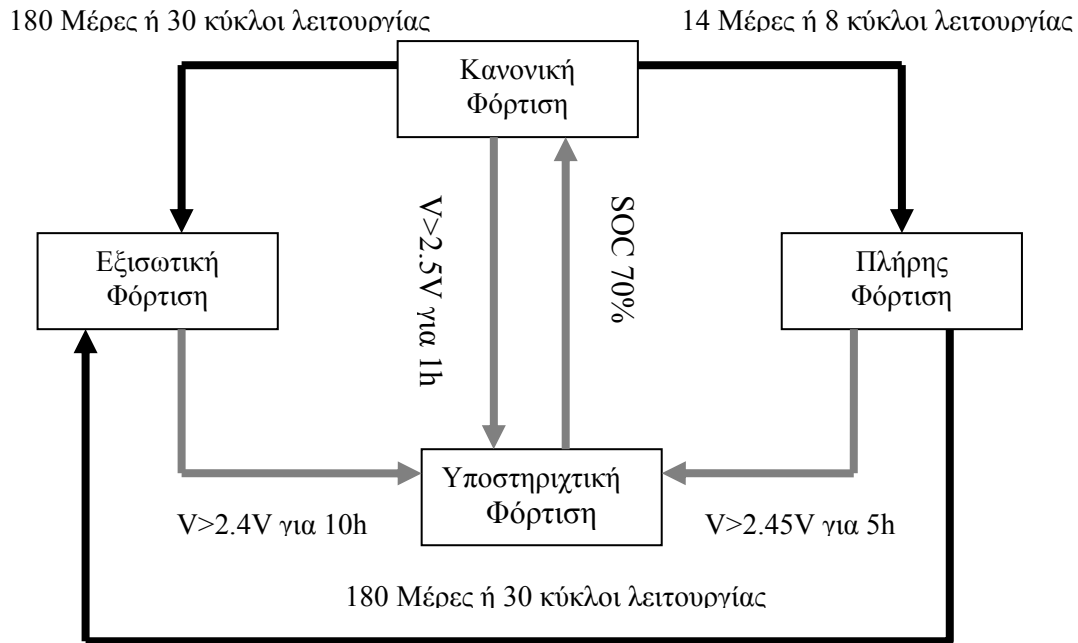
	ΧΑΜΗΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗ				ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ				ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗ		
Κατάσταση Φόρτισης	0%	10%	20%	30%	40%	60%	80%	100%			
Κατάσταση Μπαταρίας	L4	L3	L3	L1	N4	N3	N2	N1	01	02	03

Πίνακας 3.5.7 Καταστάσεις των μπαταριών

Ο κατασκευαστής του Sunny Island καθορίζει τέσσερις διαδικασίες φόρτισης των μπαταριών. Τα επίπεδα φόρτισης και τάσης κάθε φορά καθορίζονται από τον τύπο της μπαταρίας και την θερμοκρασία λειτουργίας. Οι τέσσερις τρόποι φόρτισης είναι οι εξής:

1. κανονική φόρτιση που πρέπει να γίνεται όσο πιο συχνό γίνεται.
2. πλήρης φόρτιση που πρέπει να γίνεται τουλάχιστον μία φορά τον μήνα.
3. Εξισωτική φόρτιση που πρέπει να γίνεται κάθε δύο ή τρεις μήνες.
4. Υποστηρικτική φόρτιση που πρέπει να γίνεται μετά από κάθε διαδικασία φόρτισης

Στο σχήμα 3.5.7 φαίνονται γραφικά οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας μαζί με τις ανάλογες τάσεις κάθε κελιού.



Σχήμα 3.5.7 Οι κύκλοι φόρτισης της μπαταρίας.

Ο ευφυής πράκτορας θα πρέπει στην διαδικασία λήψης των αποφάσεών του να γνωρίζει τις φορτίσεις που θα πρέπει να γίνουν και αυτό θα είναι βασικό τμήμα της λειτουργίας του. Από το σύστημα ελέγχου των μπαταριών διαβάζει μία σειρά από παραμέτρους όπως τάσης και κατάσταση φόρτισης προκειμένου να αποφασίσει για τις μελλοντικές του πράξεις.

Οι παράμετροι που διαβάζει το σύστημα είναι :

Παράμετρος	Ενέργεια
Κατάσταση Μπαταρίας	Προγραμματισμός φόρτισης εκφόρτισης στο προσεχές μέλλον
Κατάσταση Φόρτισης Μπαταρίας	Επιλογή για φόρτιση - εκφόρτιση
Τάση μπαταρίας	Καθορισμός μελλοντικών συντηρήσεων

Πίνακας 3.5.8 Παράμετροι που επιτηρεί ο πράκτορας,

Σε σχέση λοιπόν με την διαχείριση των μπαταριών κατευθείαν από τον αντιστροφέα διαβάζονται οι εξής παράμετροι:

Παράμετρος	Επεξήγηση
SOC act	Κατάσταση Φόρτισης
Ubat mean	Τάση μπαταρίας
Uchrg act	Καθορισμός μελλοντικών συντηρήσεων

lbat mean	Ρεύμα μπαταρίας
t Uconst chg	Χρόνος που απαιτείται να μείνει η μπαταρία σε κατάσταση κανονικής φόρτισης
t Uconst full	Χρόνος που απαιτείται να μείνει η μπαταρία σε κατάσταση πλήρους φόρτισης
t Uconst equal	Χρόνος που απαιτείται να μείνει η μπαταρία σε κατάσταση εξισωτικής φόρτισης
Tbat mean	Θερμοκρασία μπαταριών
Pconv	Ενεργός ισχύς του αντιστροφέα
Qconv	Αεργός ισχύς του αντιστροφέα
tpast full	Χρόνος από την τελευταία πλήρη φόρτιση
tpast equal	Χρόνος από την τελευταία εξισωτική φόρτιση

Πίνακας 3.5.9 Παράμετροι που επιτηρεί ο πράκτορας,

Γνωρίζοντας τα δεδομένα αυτά ο πράκτορας είναι σε θέση να γνωρίζει ακριβώς τα εξής:

- Χρόνος που απομένει για την επόμενη φόρτιση-εκφόρτιση.
- Χρόνος που απαιτείται για την επόμενη φόρτιση-εκφόρτιση.
- Βάθος για την επόμενη φόρτιση-εκφόρτιση (ελάχιστο SOC)
- Υπόλοιπες διαθέσιμες kWh

Η σύνδεση με τον αντιστροφέα γίνεται με χρήση XML-RPC (XML remote procedure call). Το XMLRPC είναι ένα πρότυπο και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες φτιαγμένο σε Java που επιτρέπει την απομακρυσμένη κλήση συναρτήσεων μέσω του Internet. Χρησιμοποιεί το HTTP για μεταφορά των δεδομένων και XML για την κωδικοποίηση. Το XML-RPC έχει κατασκευαστεί προκειμένου να είναι απλό και παράλληλα να επιτρέπει την μετάδοση και διαχείριση πολύπλοκων δομών δεδομένων.

3.3 Έλεγχος φορτίων

3.3.1 Εισαγωγή

Ένας από τους στόχους του επιπέδου αυτού είναι να δημιουργήσουμε μία σειρά εργαλείων και μεθόδων που θα υποστηρίζουν τον μηχανισμό λήψης των αποφάσεων σε σχέση με τα φορτία. Το βασικό πρόβλημα βρίσκεται στο γεγονός της έντονης στοχαστικότητας των φορτίων. Σε επίπεδο καταναλωτή χαμηλής τάσης είναι αδύνατη η πρόβλεψη της ζήτησης. Μπορούμε ωστόσο να αναγνωρίσουμε την συμπεριφορά των φορτίων.

Επιπλέον θα λάβουμε υπ' όψιν ότι για λόγους περιορισμού κόστους θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε φτηνά υλικά του εμπορίου για τον λόγο αυτό θα δοθούν και κάποιες πρακτικές εφαρμογές που απαιτούνται για την λειτουργία του συστήματος.

3.3.2 Πρακτικές Εφαρμογές

3.3.2.1 Το φίλτρο Κάλμαν

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε σε λειτουργικό επίπεδο ήταν η παρουσία θορύβου στις μετρήσεις τάσεως και ισχύος. Ο λόγος ήταν η παρουσία και δοκιμή κάποιων χαμηλής τεχνολογίας ηλεκτρονικών που εισήγαγαν στο δίκτυο αρμονικές και επηρέαζαν τα συστήματα λήψης μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η εισαγωγή ενός φίλτρου λογισμικού για την επεξεργασία των μετρήσεων. Το φίλτρο αυτό βασίστηκε στην θεωρία των φίλτρων Κάλμαν.

Το 1960 ο Ρ. Κάλμαν δημοσίευσε το περίφημο άρθρο του όπου περιγράφει μία αναδρομική λύση του προβλήματος του διακριτού γραμμικού φίλτρου [3.3.1-3]. Από εκείνη την στιγμή και δεδομένου των εξελίξεων στους ψηφιακούς υπολογιστές, το φίλτρο Κάλμαν αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας ειδικά στην περιοχή της αυτόνομης ή υποβοηθούμενης πλοήγησης.

Το φίλτρο Κάλμαν είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες παρέχουν μία αποτελεσματική υπολογιστική λύση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Το φίλτρο είναι πολύ ισχυρό από πολλές πλευρές: παρέχει εκτίμηση των παρελθόντων παρόντων και μελλοντικών καταστάσεων, και μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και αν η ακριβής φύση του μοντέλου δεν είναι γνωστή.

Το φίλτρο Κάλμαν αφορά το γενικό πρόβλημα του να εκτιμηθεί η κατάσταση $x \in \mathbb{R}^n$ μίας διακριτής διαδικασίας ελέγχου η οποία περιγράφεται από μία στοχαστική εξίσωση διαφορών:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$

με μία μέτρηση

$$z \in \mathbb{R}^n$$

όπου

$$z_k = Hx_{k-1} + v_k$$

οι τυχαίες μεταβλητές w_k και v_k αφορούν τον θόρυβο της διαδικασίας και των μετρήσεων αντίστοιχα. Υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ότι ο θόρυβος είναι λευκός με κανονικές κατανομές:

$$\begin{aligned} p(w) &\sim N(O, Q), \\ p(v) &\sim N(O, R). \end{aligned}$$

Στην πράξη οι πίνακες διασποράς θορύβου διαδικασίας Q και διασποράς θορύβου μέτρησης R μπορεί να αλλάζουν σε κάθε χρονικό βήμα της μέτρησης ωστόσο εδώ θεωρούμε ότι είναι σταθερές.

Ο $n \times n$ πίνακας A στην παραπάνω εξίσωση διαφορών συσχετίζει την κατάσταση του προηγούμενου βήματος $k-1$ με την κατάσταση του τρέχοντος βήματος. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο πίνακας A μπορεί να αλλάξει σε κάθε βήμα αλλά εδώ θεωρούμε ότι είναι σταθερός. Ο $n \times 1$ πίνακας B συνδέει την είσοδο ελέγχου $u \in \mathbb{R}^l$ με την κατάσταση x . Ο $m \times n$ πίνακας H στην εξίσωση μέτρησης συνδέει την κατάσταση x με την μέτρηση z_k , και ο πίνακας H μπορεί να αλλάξει σε κάθε βήμα αλλά εδώ θεωρούμε ότι είναι σταθερός.

3.3.2.1.1 Η προέλευση του φίλτρου

Ορίζουμε ως

$$\hat{x}_k^- \in \mathcal{R}^n$$

να είναι η εκ των προτέρων (a priori) εκτίμηση κατάστασης στο βήμα k με δεδομένη την γνώση για την διαδικασία πριν το βήμα k και

$$\hat{x}_k \in \mathcal{R}^n$$

την εκ των υστέρων (a posteriori) εκτίμηση στο βήμα k για την μέτρηση z_k . Έτσι μπορούμε να ορίσουμε τα σφάλματα για την εκ των προτέρων και εκ των υστέρων εκτίμηση αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} e_k^- &\equiv x_k - \hat{x}_k^- \\ e_k &\equiv x_k - \hat{x}_k \end{aligned}$$

Η εκ των προτέρων εκτίμηση της διακύμανσης του σφάλματος είναι

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}]$$

Η εκ των υστέρων εκτίμηση της διακύμανσης του σφάλματος είναι

$$P_k = E[e_k e_k^T]$$

Για την κατασκευή των εξισώσεων για το φίλτρο Κάλμαν ξεκινάμε με τον στόχο να βρούμε μία εξίσωση που να υπολογίζει την εκ των υστέρων εκτίμηση κατάστασης της μέτρησης σαν ένας γραμμικός συνδυασμός της εκ των προτέρων εκτίμησης και την διαφορά μεταξύ της πραγματικής μέτρησης και της εκτίμησης αυτής όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

Η διαφορά

$$(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

εκφράζει την απόκλιση μεταξύ της πρόβλεψης της μέτρησης και της πραγματικής μέτρησης. Μηδενική τιμή αυτής σημαίνει πλήρης ταύτιση.

Ο πίνακας K πχm αποκαλείται το κέρδος ή ο συντελεστής διόρθωσης που ελαχιστοποιεί την εκ των υστέρων διακύμανση του σφάλματος.

Ένας από τους τύπους που δίνουν την τιμή του K που ελαχιστοποιεί την διακύμανση είναι:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

Από την εξίσωση αυτή βλέπουμε ότι όταν η διακύμανση του σφάλματος μέτρησης R τείνει στο μηδέν τότε

$$\lim_{R_k \rightarrow 0} K_k = H^{-1}$$

Από την άλλη πλευρά όταν η διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης τείνει στο μηδέν τότε

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K_k = 0$$

3.3.2.1.2 Το διακριτό φίλτρο Κάλμαν

Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί μία γενική θεώρηση της λειτουργίας του διακριτού φίλτρου Κάλμαν. Το φίλτρο Κάλμαν εκτιμά μία διαδικασία χρησιμοποιώντας ένα είδος ανατροφοδότησης. Το φίλτρο εκτιμά την κατάσταση της διαδικασίας σε κάποιο σημείο και μετά παίρνει την ανατροφοδότηση με την μορφή των μετρήσεων (οι οποίες έχουν θόρυβο). έτσι προκύπτουν δύο ειδών εξισώσεις: αυτές που ανανεώνονται από τον χρόνο και αυτές από ανανεώνονται από τις μετρήσεις. Οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τον χρόνο αφορούν τις προβλέψεις για την τρέχουσα κατάσταση στο μέλλον ενώ οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τις μετρήσεις είναι υπεύθυνες την εκ των υστέρων βελτίωση της εκτίμησης.

Έτσι οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τον χρόνο μπορούν να θεωρηθούν ως εξισώσεις προβλέψεων ενώ οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τις μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν ως διορθωτικές εξισώσεις.

Οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τον χρόνο είναι:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

και

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τις μετρήσεις είναι

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (1 - K_k H)P_k^-$$

Ο πρώτος στόχος κατά την διάρκεια της ανανέωσης των μετρήσεων είναι να υπολογιστεί το κέρδος K_k . Το επόμενο βήμα είναι να μετρήσουμε την διεργασία και να λάβουμε το z_k και να υπολογίσουμε την εκ των υστέρων εκτίμηση. Το τελικό βήμα είναι να υπολογίσουμε την εκτίμηση της διακύμανση του σφάλματος.

Μετά από κάθε μέτρηση η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τις προηγούμενες εκ των υστέρων εκτιμήσεις να χρησιμοποιούνται για τις νέες εκ των προτέρων εκτιμήσεις. Η αναδρομική φύση του φίλτρου Κάλμαν είναι ένα από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά του αφού καθιστά την εφαρμογή του πολύ εύκολη.

3.3.2.1.3 Οι παράμετροι του φίλτρου και η ρύθμιση του.

Στην πραγματική εφαρμογή του η διακύμανση του θορύβου R συνήθως μετριέται πριν την εφαρμογή του φίλτρου. Η μέτρηση της R είναι συνήθως δυνατή διότι αφού έχουμε τις μετρήσεις μπορούμε να λάβουμε δεδομένα εκτός διεργασίας.

Σε ότι αφορά την μέτρηση της διακύμανσης Q του θορύβου της διαδικασίας είναι γενικώς πιο δύσκολο δεδομένου ότι γενικά δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε απευθείας την διαδικασία που. Πολλές φορές ένα σχετικά φτωχό μοντέλο της διεργασίας δημιουργεί σημαντική αβεβαιότητα στην επιλογή του Q . σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε κάποιος να ελπίζει ότι οι μετρήσεις της διαδικασίας είναι αξιόπιστες.

Υπό συνθήκες τα Q και R είναι σταθεροί αριθμοί οπότε τα K_k και P_k θα σταθεροποιηθούν πολύ γρήγορα. Σε αυτήν την περίπτωση αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν εκ των προτέρων μία φορά.

3.3.2.1.4 Η υλοποίηση του φίλτρου Κάλμαν.

Στην εφαρμογή που αναπτύξαμε προσπαθούμε να εκτιμήσουμε μία βαθμωτή μεταβλητή. Ειδικότερα ο μετρητής τάσης (transducer) μετράει μία σχεδόν σταθερή τάση (~220V) και βγάζει μία DC τάση στην έξοδο 17.6V. Η τάση αυτή οδηγείται στην αναλογική κάρτα εισόδου που είναι εγκατεστημένη σε ένα υπολογιστή. Η μετρητική διάταξη επηρεάζεται έντονα από την παρουσία Inverter κακής ποιότητας οι οποίοι προσθέτουν ένα θόρυβο +/- 0.25V. Το φίλτρο Κάλμαν υλοποιήθηκε σε γλώσσα VB και εκτελείται με συχνότητα 10Hz.

Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} = x_{k-1} + w_{k-1}$$

Με μία μέτρηση z η οποία είναι

$$z_k = Hx_k + v_k = x_k + v_k$$

Οι εξισώσεις ανανέωσης του χρόνου είναι:

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}$$

$$P_k^- = P_{k-1} + Q$$

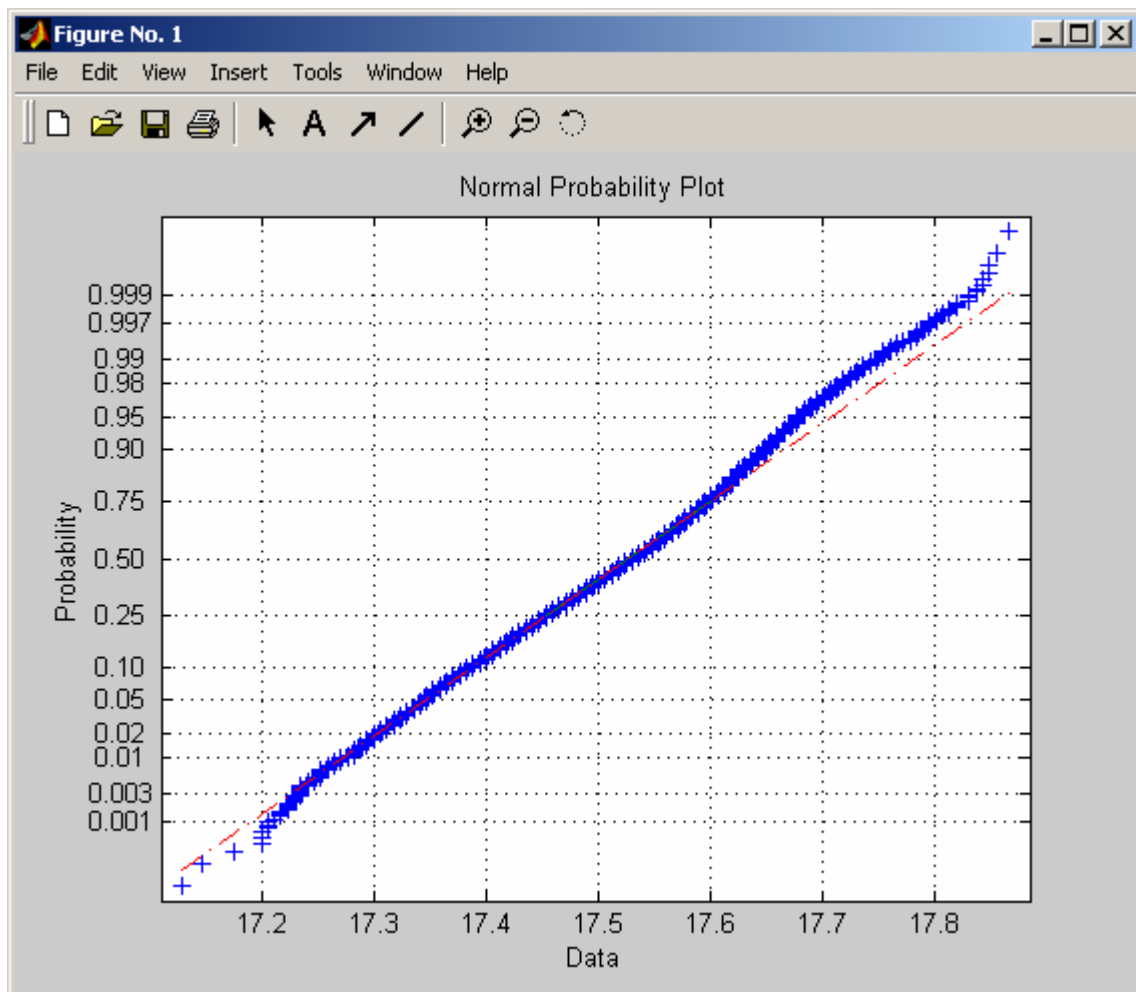
Ενώ οι εξισώσεις που ανανεώνονται από τις μετρήσεις γίνονται:

$$K_k = P_k^- (P_k^- + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (1 - K_k)P_k^-$$

Θεωρούμε μία πολύ μικρή διακύμανση της διαδικασίας βάζουμε $Q=0.001$. οι μετρήσεις της τάσης ακολουθούν κανονική κατανομή όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.3.1 Η κανονική κατανομή των μετρήσεων.

Οπότε θεωρούμε σαν αρχική συνθήκη ότι

$$\hat{x}_0 = 0$$

Ανάλογα θα πρέπει να επιλέξουμε την αρχική τιμή για το P την οποία θα ονομάσουμε P_0 . Αυτή θα πρέπει να έχει μία τιμή διάφορη του μηδενός διότι σε άλλη περίπτωση το φίλτρο θα βγάζει ότι

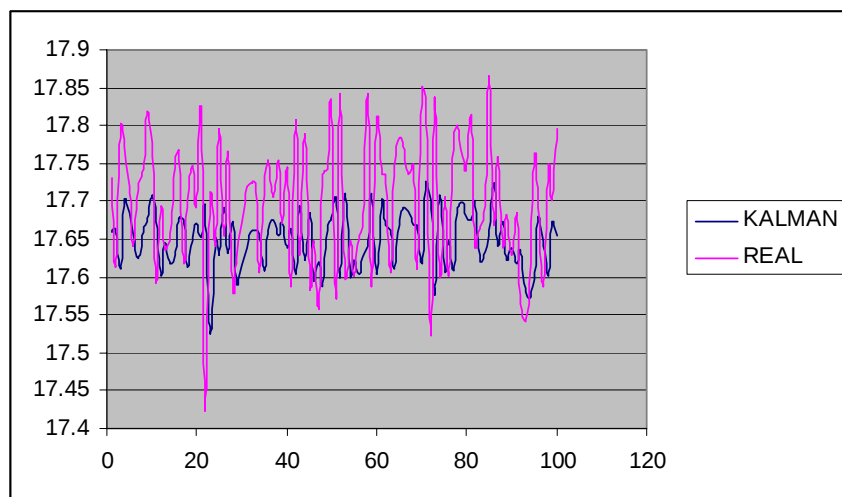
Θα εκκινήσουμε το φίλτρο με την τιμή $P_0=1$.

Η τιμή της διακύμανσης $R=0.011$ και υπολογίστηκε από μια σειρά μετρήσεων με την βοήθεια

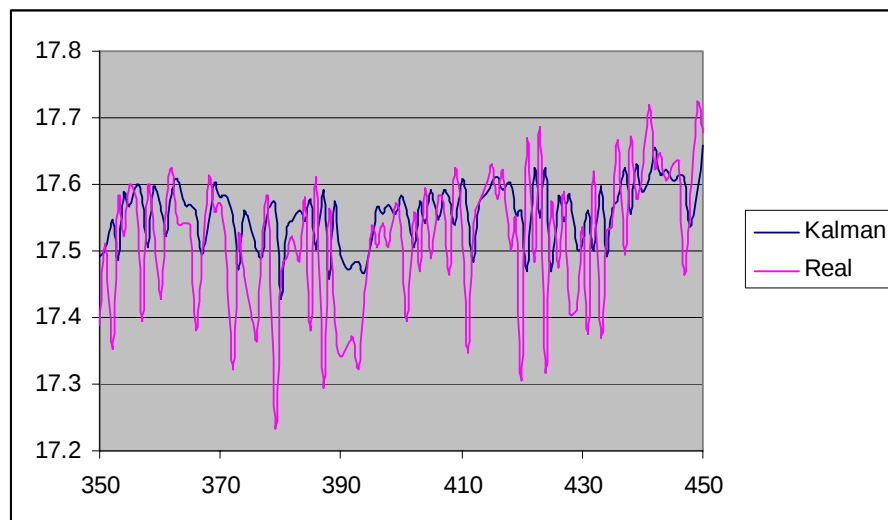
$$\hat{x}_k = 0$$

του excel.

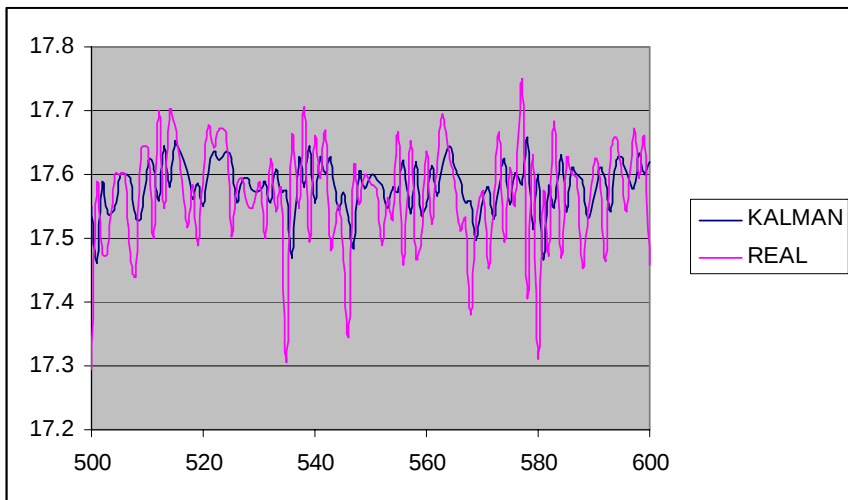
Στην συνέχεια παρατίθενται γραφήματα με τις μετρήσεις τάσεως και την έξοδο του φίλτρου. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση transducer με έξοδο 0-24V. Η τάση 220 αντιστοιχεί σε 17.5V στην έξοδο του transducer.



Σχήμα 3.3.2 Αποτελέσματα του φίλτρου.



Σχήμα 3.3.3 Αποτελέσματα του φίλτρου



Σχήμα 3.3.3 Αποτελέσματα του φίλτρου.

Από τα γραφήματα βλέπουμε ότι όσο περνάει η ώρα το φίλτρο συγκλίνει προς την σωστή τιμή. Σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου όμως έχουμε συνεχείς αλλαγές δεδομένου ότι η τάση του δικτύου δεν μένει ποτέ σταθερή.

3.3.3.2 Εύρεση της τοπολογίας δικτύου.

Το πρόβλημα που μας απασχολεί εάν με εργαλεία της πιθανοτικής - στατιστικής ανάλυσης μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα για την τοπολογία ενός δικτύου. Ο πράκτορας προσπαθεί να κατανοήσει ποιους πράκτορες έχει διπλά του ηλεκτρολογικά. Η μέθοδος χρησιμοποιεί την έννοια του συντελεστή συσχέτισης.

Ο συντελεστής συσχέτισης $r = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{V[X]V[Y]}}$ μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών X και Y

εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μπορούμε να προβλέψουμε μία τυχαία μεταβλητή όταν γνωρίσουμε την τιμή της άλλης. Όταν $r=0$ σημαίνει ότι η τιμή της X δεν υποβοηθάει την πρόβλεψη της Y ενώ αντίθετα όταν $|r|=1$ τότε γνωρίζοντας την τιμή της τυχαίας μεταβλητής X γνωρίζουμε με βεβαιότητα και την τιμή της Y .

Όταν ο συντελεστής συσχέτισης είναι άγνωστος, όπως συνήθως συμβαίνει στην πράξη, θα πρέπει να εκτιμηθεί από ζεύγη παρατηρήσεων (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, n$). Αποδεικνύεται ότι αν τα ζεύγη (x_i, y_i) προέρχονται από διμεταβλητό κανονικό πληθυσμό τότε η τιμή του r δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

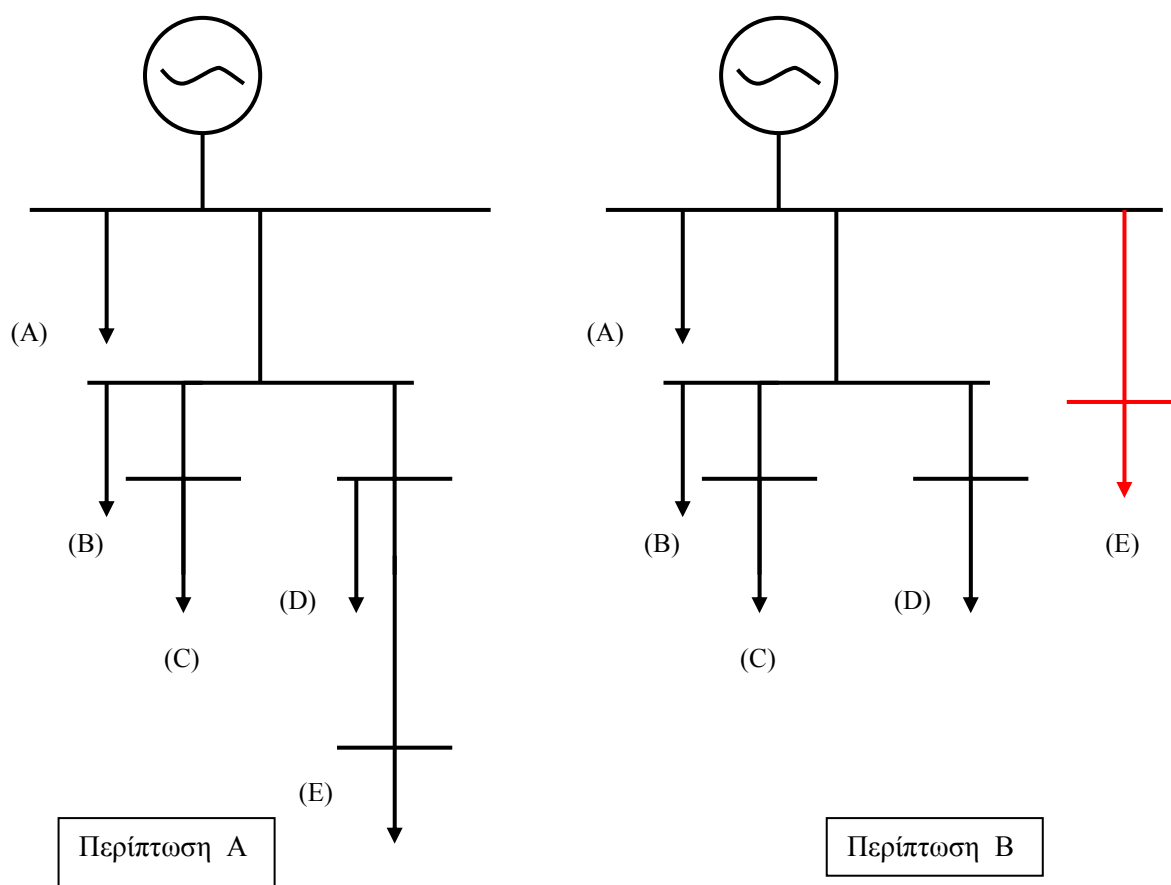
και ονομάζεται δειγματικός γραμμικός συντελεστής συσχέτισης. Αποδεικνύεται ότι οι ακραίες τιμές ± 1 λαμβάνονται όταν και μόνο όταν τα σημεία (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, n$) βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή.

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον παράγοντα προσπαθεί ο πράκτορας να εντοπίσει ως προς κάποια μεταβλητή αν συσχετίζεται με κάποιο άλλον πράκτορα.

Αναλυτικότερα επιλέξαμε να μελετήσουμε την μεταβολή της τάσης σε ένα μικροδίκτυο. Το σκεπτικό για την εφαρμογή είναι ότι οι μεταβολές της τάσης είναι τοπικό φαινόμενο. Οι όποιες μεταβολές οφείλονται στην φόρτιση των γραμμών και επηρεάζουν τους γειτονικούς αγωγούς και ζυγούς. Το βασικό πρόβλημα είναι στην εφαρμογή αυτή είναι ότι τα καλώδια δεν έχουν καθαρά επαγωγικό χαρακτήρα και αντίστοιχα τα φορτία είναι καθαρά ωμικά. Για την εφαρμογή ωστόσο επιλέξαμε να αγνοήσουμε το πρόβλημα αυτό με το σκεπτικό ότι σε πρακτικό επίπεδο η μέτρηση των χαρακτηριστικών του φορτίου ή των καλωδίων είναι φύση αδύνατα.

Για την εφαρμογή μας έχουμε τα παρακάτω δίκτυα τα οποία κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση τροφοδοσίας είναι του δικτύου, οι αγωγοί είναι από συμβατικό $2,5\text{mm}^2$ καλώδιο ενώ τα φορτία ανοιγοκλείνουν με τυχαίο τρόπο (με την βοήθεια ενός PLC). Φροντίσαμε να φορτία να έχουν τέτοια τιμή ώστε να μπορούν να προκαλούν μια πτώση τάσης της τάξεως των 5V. Εναλλακτικά θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε πολύ μακρύτερους αγωγούς.

Η διαφορά των δύο δικτύων είναι η αλλαγή τοπολογικά της θέσης του φορτίου E. Ο σκοπός είναι να μελετήσουμε την επίδραση στο συντελεστή συσχέτισης της αλλαγής αυτής.



Οι μετρήσεις των τάσεων γίνονται με την χρήση μορφοτροπέων (transducers) και η δειγματοληψία είναι 0.5Hz. Ο συντελεστής συσχέτισης και στις δύο περιπτώσεις υπολογίστηκε σε ένα παράθυρο 100 δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις δύο περιπτώσεις στα διάφορα σημεία του δικτύου που φαίνονται στο σχήμα είναι:

Περίπτωση Α

r	A	B	C	D	E
A	-	0.95	0.95	0.95	0.94
B	0.95	-	1	1	1
C	0.95	1	-	1	1
D	0.95	1	1	-	1
E	0.94	1	1	1	-

Περίπτωση Β

r	A	B	C	D	E
A	-	0.95	0.95	0.95	0.96
B	0.95	-	1	1	0,8
C	0.95	1	-	1	0,8
D	0.95	1	1	-	0,8
E	0.96	0,8	0,8	0,8	-

Από τους πίνακες βλέπουμε ότι αλλάζοντας την θέση του φορτίου Ε αλλάζει σημαντικά ο συντελεστής συσχέτισής του. Ωστόσο τα συμπεράσματα δεν μπορούν να γενικευτούν ακόμα διότι

- Χρησιμοποιήσαμε μικρά μήκη καλωδίων που σημαίνει ότι έχουμε μικρότερες πτώσης τάσεως.
- Δεν γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά των καλωδίων και των φορτίων.

Ωστόσο τα πειραματικά δεδομένα μας δίνουν την δυνατότητα να έχουμε ένα εργαλείο για την αναγνώριση κάποιων βασικών χαρακτηριστικών της τοπολογίας. Στην περίπτωση που θέλαμε να περιλάβουμε γνώση των χαρακτηριστικών των καλωδίων και των φορτίων πλέον ο αλγόριθμός χάνει την πρακτική του αξία αφού στην περίπτωση αυτή είναι ευκολότερο να μελετήσουμε το ηλεκτρολογικό σχέδιο και στην συνέχεια να εισάγουμε χειροκίνητα την τοπολογία του δικτύου.

3.3.3 Αναγνώριση τύπου φορτίου με χρήση Ασαφούς λογικής

3.3.3.1 Εισαγωγή

Στα συστήματα που μελετάμε η πρόβλεψη του φορτίου είναι σχεδόν αδύνατη. ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η έντονη στοχαστικότητα των συστημάτων αυτών. Για παράδειγμα σε ένα σπίτι είναι αδύνατον να προβλέψουμε με ακρίβεια πότε θα ανοίξει ο θερμοσίφωνας ή η ηλεκτρική κουζίνα. Αυτό που μπορεί να μας δώσει χρήσιμη πληροφορία είναι ο τύπος του φορτίου. Αυτό που ψάχνουμε πρακτικά είναι να δούμε την συμπεριφορά του φορτίου και ειδικότερα αν αυτό είναι σταθερό ή αλλάζει με συγκεκριμένο τρόπο ή τέλος είναι τελείως τυχαίο.

3.3.3.2 Ασαφής Λογική

Στοιχεία – βασικοί όροι των ασαφών συνόλων

Πριν αναλύσουμε την εφαρμογή παραθέτουμε μία σειρά από βασικά στοιχεία της θεωρίας των ασαφών συνόλων.

Ο ορισμός ενός ασαφούς συνόλου (fuzzy set)[3.3.4-5] Α βασίζεται στην αντίστοιχη συνάρτηση συμμετοχής $\mu_A(x)$, η οποία μας δίνει το βαθμό που συμμετέχει ένα αντικείμενο x στο A .

Ειδικότερα ορίζεται ως εξής:

$$A = \int \{ \mu_A(x) / x \}$$

για την συνεχή περίπτωση. Οι τιμές της $\mu_A(x)$ βρίσκονται στο σύνολο $[0,1]$ που δηλώνουν κατά πόσο το κάθε x συμμετέχει στην στο ασαφές σύνολο A . Η τιμή $\mu_A(x)=0$ σημαίνει πως το x δεν συμμετέχει καθόλου, ενώ το $\mu_A(x)=1$ δείχνει πως συμμετέχει πλήρως. Ακόμη τα κλασικά σύνολα μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις ασαφών συνόλων με την αντίστοιχη συνάρτηση συμμετοχής να έχει τις τιμές 0 ή 1.

Για τις ανάγκες τις σύγκρισης και του χαρακτηρισμού των ασαφών συνόλων χρησιμοποιούμε κάποιες χαρακτηριστικές τιμές – έννοιες. Μία τέτοια είναι το *σύνολο στήριξης* (support set) , το οποίο ορίζεται ως

$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$$

πρόκειται δηλαδή για τα στοιχεία του ασαφούς συνόλου A για τα οποία η συνάρτηση συμμετοχής έχει θετικές τιμές.

Άλλη μία χαρακτηριστική τιμή είναι το *ύψος* (height), πρόκειται για την μέγιστη (sup ή supremum) τιμή από τις τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής,

$$\text{htg}(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$$

Τα ασαφή σύνολα με ύψος ίσο με τη μονάδα ονομάζονται *κανονικά* (ή κανονικοποιημένα) , ενώ ονομάζονται *υποκανονικά* αυτά των οποίων το ύψος δεν φτάνει τη μονάδα. Το κανονικοποιήσουμε ένα σύνολο A σημαίνει πως κανονικοποιούμε την συνάρτηση συμμετοχής του μ_A , για παράδειγμα διαιρούμε με το ύψος δηλαδή $\frac{\mu_A(x)}{\max \mu_A(x)}$.

Πράξεις στα ασαφή σύνολα

Ένα ασαφές σύνολο A θεωρείται *κενό* εάν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι μηδενική παντού:

$$A = \emptyset \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0 \quad \forall \quad x \in A$$

Ας θεωρήσουμε τα ασαφή σύνολα A και B τα οποία βρίσκονται σε ένα υπερσύνολο U ,

$$A = \{(x, \mu_A(x))\} , \mu_A(x) \in [0,1]$$

$$B = \{(x, \mu_B(x))\} , \mu_B(x) \in [0,1] .$$

Οι πράξεις μεταξύ των A και B ορίζονται ως πράξεις μεταξύ των συναρτήσεών τους συμμετοχής, $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$.

Ισότητα

Λέμε πως τα δύο σύνολα A και B είναι ίσα και γράφουμε $A=B$ αν και μόνο αν για κάθε $x \in U$ ισχύει:

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) .$$

Υποσύνολο

Λέμε πως το ασαφές σύνολο A είναι υποσύνολο του ασαφούς συνόλου B και γράφουμε $A \subseteq B$ αν για κάθε $x \in U$ ισχύει:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) .$$

Συμπλήρωμα

Τα ασαφή σύνολα A και $\bar{A}$ είναι συμπληρωματικά αν

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \text{ή} \quad \mu_A(x) + \mu_{\bar{A}}(x) = 1$$

Η συνάρτηση συμμετοχής της $\mu_{\bar{A}}(x)$ είναι συμμετρική με την $\mu_A(x)$ ως προς τον άξονα $\mu=0.5$.

Τομή

Η πράξη της τομής μεταξύ των A και B συμβολίζεται με $A \cap B$ και ορίζεται από τον τύπο

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad , \quad x \in U$$

Διαφορά

Η πράξη της διαφοράς συμβολίζεται με $A-B$ και ορίζεται από το

$$\mu_{A-B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_{\bar{B}}(x)) \quad , x \in U$$

οπότε μπορούμε να γράψουμε και

$$\mu_{A-B}(x) = \mu_A \cap \bar{B}(x)$$

και ακόμη μπορούμε να γράψουμε

$$\mu_{B-A}(x) = \min(\mu_B(x), \mu_{\bar{A}}(x)) = \mu_{\bar{A}-B}(x)$$

Ένωση

Η πράξη της ένωσης μεταξύ των A και B συμβολίζεται με $A \cup B$ και ορίζεται από τον τύπο

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad , x \in U$$

Ιδιότητες των ασαφών συνόλων

Θεωρώντας τα ασαφή σύνολα A , B και Γ ισχύουν οι εξής ιδιότητες

$$\left. \begin{array}{l} A \cup A = A \\ A \cap A = A \end{array} \right\} \text{ Αδύναμη πράξη}$$

$$\overline{\overline{A}} = A \quad \text{Νόμος της διπλής άρνησης}$$

$$\left. \begin{array}{l} A \cap (U \times [0,1]) = A \\ A \cap \emptyset = \emptyset \\ A \cup (U \times [0,1]) = U \end{array} \right\} \text{ Ταυτοποίηση}$$

$$\left. \begin{array}{l} A \cup B = B \cup A \\ A \cap B = B \cap A \end{array} \right\} \text{ Μεταθετική ιδιότητα}$$

$$\left. \begin{array}{l} (A \cup B) \cup \Gamma = A \cup (B \cup \Gamma) \\ (A \cap B) \cap \Gamma = A \cap (B \cap \Gamma) \end{array} \right\} \text{ Προσεταιριστική ιδιότητα}$$

$$\left. \begin{array}{l} A \cup (B \cap \Gamma) = (A \cup B) \cap (A \cup \Gamma) \\ A \cap (B \cup \Gamma) = (A \cap B) \cup (A \cap \Gamma) \end{array} \right\} \text{ Επιμεριστική ιδιότητα}$$

$$\left. \begin{array}{l} \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \end{array} \right\} \text{ Νόμος του De Morgan}$$

Αλγεβρικό γινόμενο και άθροισμα των ασαφών συνόλων*Αλγεβρικό Γινόμενο*

Το αλγεβρικό γινόμενο των ασαφών συνόλων A και B συμβολίζεται με $A \cdot B$ και ορίζεται από τον τύπο

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x) , \quad x \in U$$

Αλγεβρικό Άθροισμα

Το αλγεβρικό άθροισμα των A και B συμβολίζεται $A \hat{+} B$ και ορίζεται από

$$\mu_{A \hat{+} B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x) , \quad x \in U$$

Εξαρτημένες δηλώσεις και ασαφείς αλγόριθμοι

Οι τιμές μιας *ασαφούς μεταβλητής* (fuzzy variable) μπορούν να θεωρηθούν ως ετικέτες (labels) ασαφών συνόλων. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ένα μέγεθος όπως η ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ως ασαφή μεταβλητή και αυτή να πάρει *λεκτικές τιμές*, όπως *υψηλή*, *μέτρια χαμηλή*. Οι τιμές αυτές περιγράφονται από τα ασαφή σύνολα.

Στις τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορούμε να εφαρμόσουμε κάποιους λεκτικούς τελεστές ώστε να παράγουμε λεκτικούς όρους που να προσδιορίζουν ακριβέστερα την μεταβλητή μας. Τέτοιοι είναι οι τροποποιητές (modifiers) και οι φράκτες (hedges). Αν δηλαδή στην μεταβλητή ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ έχουμε την τιμή *υψηλή*, μπορούμε να παράγουμε τις τιμές

‘πολύ υψηλή
‘πάρα πολύ υψηλή
‘ελαφρώς υψηλή

Η εξάρτηση μιας λεκτική μεταβλητής από μια άλλη (ανεξάρτητη) περιγράφεται από μια *ασαφή εξαρτημένη δήλωση* (fuzzy conditional statement) που έχει τη μορφή :

$$R : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } \Delta_2$$

ή συμβολικά

$$\Delta_1 \rightarrow \Delta_2$$

όπου Δ_1 και Δ_2 είναι *ασαφείς δηλώσεις* της μορφής

$$\Delta: X \text{ είναι } A$$

με A να είναι ένα ασαφές υποσύνολο.

Δύο ή περισσότερες ασαφείς εξαρτημένες δηλώσεις μπορούν να συνδυαστούν ώστε να σχηματίσουν μια ασαφή εξαρτημένη δήλωση της μορφής :

$$R : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } (\text{EAN } \Delta_2 \text{ TOTE } \Delta_3) .$$

Η παραπάνω δήλωση μπορεί να εκφραστεί και ως δύο επιμέρους δηλώσεις :

$$R^1 : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } R^2$$

και

$$R^2 : \text{EAN } \Delta_2 \text{ TOTE } \Delta_3 .$$

Έτσι δύο ή περισσότερες ασαφείς εξαρτημένες δηλώσεις μπορούν να συνδυαστούν με ένα συνδετικό H και να σχηματίσουν ένα ασαφή αλγόριθμο (fuzzy algorithm) R^N της μορφής :

$$R^N : R^1 \text{ H } R^2 \text{ H } R^1 \dots\dots\dots \text{H } R^n .$$

Συνδετικά

Η άρνηση OXI και τα συνδετικά ΚΑΙ και H μπορούν να οριστούν μέσω των πράξεων του συμπληρώματος, της τομής και της ένωσης αντίστοιχα. Συνήθως το ΚΑΙ χρησιμοποιείται με μεταβλητές που έχουν διαφορετικά υπερσύνολα αναφοράς (universe of discourse). Έτσι αν θεωρήσουμε τα ασαφή σύνολα

$$A = \{\mu_A(x) \mid x \in X\}$$

$$B = \{\mu_B(y) \mid y \in Y\}$$

τότε

$$A \text{ ΚΑΙ } B = \mu_{A \cap B}(x, y)$$

Το συνδετικό H συνδέει λεκτικές τιμές της ίδιας μεταβλητής, προφανώς οι δύο μεταβλητές ανήκουν στο ίδιο υπερσύνολο αναφοράς, αν έχουμε

$$A = \{\mu_A(x) \mid x \in X\}$$

$$B = \{\mu_B(x) \mid x \in X\}$$

τότε

$$A \text{ H } B = \mu_{A \cup B}(x)$$

Η λογική πράξη OXI είναι συνώνυμη με την άρνηση στη φυσική γλώσσα, οπότε για το

$$A = \{\mu_A(x) \mid x \in X\}$$

έχουμε το

$$\text{OXI } A = \overline{A} = \{1 - \mu_A(x)\}$$

Έτσι μπορούμε να δημιουργήσουμε επιπλέον ασαφή σύνολα με τη χρήση των συνδετικών και των τροποποιητών.

Υπολογισμός ασαφών συνεπαγωγών

Η ασαφής εξαρτημένη σχέση ορίζεται ως εξής :

$$R : \text{EAN } A \text{ TOTE } B \quad \equiv \quad A \times B$$

Όπου $A \times B$ είναι το καρτεσιανό γινόμενο των δύο υπερσυνόλων αναφοράς $X \times Y$ και ορίζεται για την περίπτωση του τελεστή τομής ως :

$$A \times B = \int_{X \times Y} \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

και για την περίπτωση του αλγεβρικού γινομένου από την πράξη :

$$A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$$

Αναφέρουμε πάλι ότι το σύμβολο $\int$ δεν αναφέρεται στο μαθηματικό ολοκλήρωμα, αλλά στη συλλογή των επιμέρους συνόλων.

Η συνεπαγωγή του Zadeh με τελεστές $\max$ και $\min$, ορίζεται ως :

$$R = (A \times B) \cup (\bar{A} \times X)$$

και

$$\mu_R(x,y) = \max(\min(\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x))$$

Η συνεπαγωγή αυτή είναι δύσχρηστη υπολογιστικά και για αυτόν τον λόγο ο Mamdani παρουσίασε μια απλούστευσή του.

Η συνεπαγωγή του Mamdani χρησιμοποιεί μόνο τον τελεστή $\min$ και ορίζεται ως :

$$R = A \times B$$

και

$$\mu_R(x,y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Ο συνδυασμός N εξαρτημένων σχέσεων γίνεται με το συνδετικό $\cap$, δηλαδή

$$R^N = \bigcap_{k=1}^N R^k \quad \text{όπου } k=1, 2, \dots, N$$

και

$$\mu_R^N(x, y) = \min_k (\max(\mu_A^k(x), \mu_B^k(y)))$$

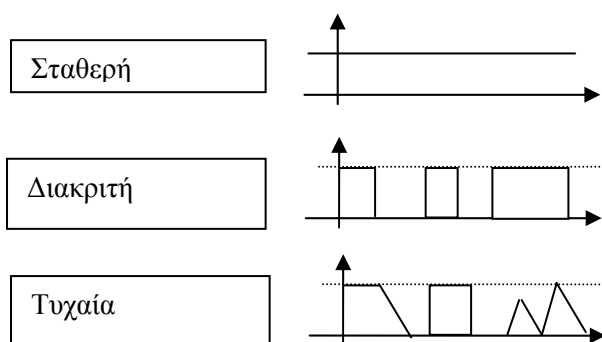
3.3.3.2 ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε με ιδέα από την εργασία του [3.3.6-7] όπου οι πράκτορες μαθαίνουν την βέλτιστη συμπεριφορά που πρέπει να ακολουθήσουν για την επίλυση ενός προβλήματος. Οι συμπεριφορές εκφράζονται στην εργασία αυτή με χρήση ασαφούς λογικής και στην συνέχεια με ένα εξελικτικό αλγόριθμο για δεδομένη κατάσταση του συστήματος και σκοπό του πράκτορα επιλέγει την βέλτιστη συμπεριφορά.

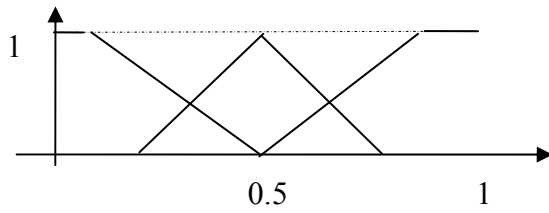
Στο πρόβλημα της εύρεσης της συμπεριφοράς του φορτίου χρησιμοποιούμε μία διαφοροποιημένη μορφή του αλγορίθμου. Έχουμε δημιουργήσει εκφράσεις που περιγράφουν τον τύπο του φορτίου και προσπαθούμε να δούμε ποιο από τα δεδομένα πιο ταιριάζει καλύτερα. Δεν χρησιμοποιούμε δηλαδή κάποιο εξελικτικό αλγόριθμο για να εξερευνήσουμε την περιοχή των πιθανών λύσεων.

Το πρώτο θέμα είναι η περιγραφή μέσω ασαφών μεταβλητών του μεγέθους που θέλουμε να μελετήσουμε και που στην περίπτωση μας είναι η συνολική κατανάλωση. Για να περιγράψουμε το μέγεθος χρησιμοποιούμε τρεις βασικές μεταβλητές όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.4. Στο σχήμα 3.3.5 δίδεται η ασαφής παράσταση της κάθε μεταβλητής η οποία αποτελείται από τρεις συναρτήσεις: κοντά στο μηδέν (S-function) όπου σημαίνει ότι η μεταβλητή δεν είναι του αυτού τύπου, στην μέση (triangle function) που σημαίνει ότι δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπέρασμα και τέλος κοντά στο 1 (Z-function) όπου έχουμε βεβαιότητα για το συμπέρασμα.

Ο αλγόριθμος λαμβάνει δεδομένα για κάθε φορτίο που μελετάμε ανα τακτά διαστήματα (π.χ. ανά πέντε λεπτά) και μετρά πόσες φορές το κάθε φορτίο παίρνει την μέγιστη τιμή του (*RateMaxPower*) και πόσες την ελάχιστη (*RateMinPower*). Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή υπολογίζονται ανάλογα με τις καταγραφές και στην συνέχεια οι λόγοι του μέγιστο αριθμού εμφανίσεων της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής προς τα συνολικά δείγματα εκφράζονται με ασαφείς μεταβλητές όπως αυτές του σχήματος 3.3.5.



Σχήμα 3.3.4 Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούμε.



Σχήμα 3.3.5 Η παράσταση κάθε μεταβλητής.

Για κάθε μία από τις μεταβλητές του σχήματος 3.3.4 σχηματίζονται εννέα κανόνες του τύπου:

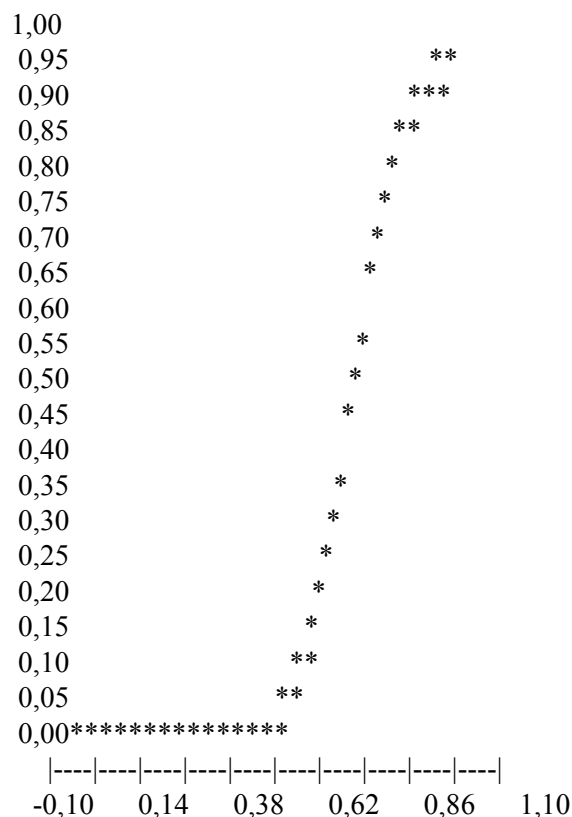
IF *RateMaxPower* IS VERY HIGH AND *RateMinPower* IS VERY LOW THEN *STEADY* IS HIGH.

Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις τιμές των μεταβλητών *RateMaxPower* και *RateMinPower* για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα στο παρελθόν και στην συνέχεια επιλέγει τον κανόνα που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα. Είναι σημαντικό το δείγμα που μελετάμε να είναι ενδεικτικό του φορτίου και να περιέχει πληροφορία για την πραγματική συμπεριφορά του αλλιώς δεν θα καταλήξουμε σε σωστό συμπέρασμα. Σε ένα πιο εξελιγμένο αλγόριθμο μπορούμε να δημιουργήσουμε πίνακες μεταβλητών αντίστοιχα για ειδικές μέρες και μέρες εργάσιμες. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε με βάση μία ελεύθερη βιβλιοθήκη σε Java[3.3.8].

	Μεταβλητή	Αποτέλεσμα
1	Σταθερή	100%
2	Διακριτή	97%
3	Τυχαία	90%

Πίνακας 3. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται συνολικά αποτελέσματα του αλγορίθμου. Οι δοκιμές έγιναν με βάση μία προσομοίωση του φορτίου. Παρατηρούμε ότι για την αναγνώριση της σταθερής κατάστασης ο αλγόριθμος έχει 100% επιτυχία ενώ για τις άλλες δύο καταστάσεις σε κάποιες περιπτώσεις θεωρεί ότι το τυχαίο φορτίο είναι διακριτό και αντίστροφα.



Σχήμα 3.3.6 Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου όπως φαίνονται στο παράθυρο αποσφαλμάτωσης της Java.

3.4 Συμπεράσματα

Το βασικό στοιχείο που θα πρέπει να αντιληφθούμε είναι ότι ο πράκτορας που θα κληθεί να ελέγξει ένα σύστημα σε πραγματική λειτουργία είναι αναγκασμένος να λάβει μία σειρά από σημαντικές παραμέτρους υπ' όψιν. Σε καμία περίπτωση ο έλεγχος δεν είναι απλά μία αναφορά (setpoint) σε μία μονάδα ή άνοιγμα και κλείσιμο ενός διακόπτη. Η βασική του λειτουργία είναι να επεξεργαστεί τα δεδομένα που λαμβάνει και στην συνέχεια να εκτελέσει τις εντολές ή να τροφοδοτήσει με γνώση τα επόμενα επίπεδα του συστήματος.

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν παρουσιάστηκαν μία σειρά από εφαρμογές που καλούνται να επικουρήσουν την λειτουργία του μικροδικτύου. Από τις εφαρμογές αυτές μπορούμε να ξεχωρίζουμε τον έλεγχο των μπαταριών που επιτρέπει στα επόμενα επίπεδα ελέγχου να στείλουν απλά μία αναφορά στις μπαταρίες. Η δεύτερη σημαντική εφαρμογή είναι αυτή της αναγνώρισης του τύπου του φορτίου που ουσιαστικά περιγράφει και τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν τα φορτία οι πράκτορες. Οι πράκτορες δεν θεωρούν απλά ότι δεν έχουμε πρόβλεψη φορτίου στην διάθεσή μας αλλά ότι το τελευταίο είναι τελείως στοχαστικό.

Κεφάλαιο 4

Συμπεριφορά Πολλαπλών Πρακτόρων

4.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο επίπεδο της μάθησης οι πράκτορες καλούνται να επιτελέσουν απλές λειτουργίες του συστήματος για τις οποίες όμως απαιτείται ο συντονισμός τουλάχιστον δύο πρακτόρων. Τέτοιες λειτουργίες μπορεί να είναι πολύ απλές όπως για παράδειγμα η εντολή για την μεταφορά του συστήματος σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας όπου ο πράκτορας που χειρίζεται τον διακόπτη καλείται να εξασφαλίσει ότι τα πλεονάζοντα φορτία έχουν τεθεί εκτός προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Η μέθοδος με την οποία οι πράκτορες καλούνται να συντονιστούν στο επίπεδο αυτό πρέπει να εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει περίπτωση σφάλματος. Στο τρίτο επίπεδο που αφορά τους τελικούς στόχους του συστήματος μία εσφαλμένη πολιτική μπορεί να οδηγήσει μακροπρόθεσμα σε μειωμένα κέρδη ή στην μη ικανοποίηση όλων των καταναλωτών. Αντίθετα στο επίπεδο αυτό ένας εσφαλμένος συντονισμός των πρακτόρων μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση το σύστημα. Ως εκ τούτου οι αλγόριθμοι που θα εκτελούνται στο επίπεδο και αφορούν κρίσιμες λειτουργίες του συστήματος δεν θα πρέπει να αφήνουν περιθώρια για σφάλματα.

Βέβαια στο επίπεδο του μικροδικτύου η λειτουργία της μετάβασης σε απομονωμένη κατάσταση είναι μάλλον απλή διαδικασία και για τον λόγο αυτό θα παρουσιάσουμε κάποιες άλλες πιο σύνθετες λειτουργίες. Ειδικότερα στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο βασικές εφαρμογές. Η πρώτη εφαρμογή αφορά την κατανομή της ενέργειας του συστήματος πόρων στο σύστημα με την μέθοδο της δημοπρασίας. Οι αλγόριθμοι αυτού του τύπου είναι πολύ κρίσιμοι για την ανάπτυξη ενός συστήματος πολλαπλών πρακτόρων αφού εξασφαλίζουν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Η κατανομή πόρων αλλά και ίσως εργασιών θα πρέπει να γίνεται με τρόπο ισότιμο αλλά και ασφαλή ως προς το αποτέλεσμα, πάντα βέβαια με βάση προκαθορισμένες παραμέτρους και βάρη.

Η δεύτερη εφαρμογή αφορά την συνεκτικότητα του δικτύου όπου οι πράκτορες καλούνται στην περίπτωση που λειτουργούν σε απομονωμένη λειτουργία να εξετάσουν αν βρίσκονται στην ίδια νησίδα ή σε διαφορετικές.

4.2 Κατανομή πόρων συστήματος ελέγχου στα μικροδίκτυα

4.2.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή αυτή αφορά μια σύνθετη διεργασία που καλούνται να αντιμετωπίσουν από κοινού οι ευφυείς πράκτορες με τον καλύτερο δυνατό (βέλτιστο) τρόπο. Στα κλασικά κεντρικά συστήματα ελέγχου υπάρχουν μία σειρά από μέθοδοι που οδηγούν με ακρίβεια σε μία βέλτιστη λύση. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν τα κατανεμημένα συστήματα όπως είναι τα συστήματα πολλαπλών ευφυνών πρακτόρων μπορούν και αυτά να δώσουν μια σωστή και βέλτιστη λύση.

Το πρόβλημα που γενικά αντιμετωπίζουμε είναι αυτό της ανάθεσης κάποιων πόρων. Οι πόροι αυτά θα μπορούσαν να είναι:

1. Κατανομή Ενέργειας (kWh)
2. Διαχείριση Θερμότητας
3. Κατανομή της εφεδρείας

Τα παραπάνω προβλήματα όπως και μια σειρά άλλων προβλημάτων είναι ισοδύναμα μεταξύ τους με την έννοια ότι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα από αυτά μπορεί με μικρές παραλλαγές να χρησιμοποιηθεί και στα υπόλοιπα. Για τον σκοπό αυτό θα εστιάσουμε στο πρόβλημα της κατανομής της ενέργειας μεταξύ των πρακτόρων. Πριν όμως παρουσιάσουμε το πρόβλημα θα δοθεί μια περιγραφή του μαθηματικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε, για την επίλυση του προβλήματος.

4.2.2 Ο μαθηματικός αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί

Ο πυρήνας του αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται στην επίλυση του προβλήματος της συμμετρικής ανάθεσης αντικειμένων με χρήση ενός αλγορίθμου δημοπρασίας[4.1-4.2]. Η μέθοδος αυτή, βελτιστοποιεί το εσωτερικό όφελος του συστήματος. Το πρόβλημα της συμμετρικής ανάθεσης περιγράφεται ως εξής:

Θεωρούμε ότι έχουμε n άτομα και n αντικείμενα και ο σκοπός είναι να τα δημιουργήσουμε ζεύγη. Επιπλέον δίδεται ένα **όφελος** a_{ij} για το ταίριασμα του ατόμου i με το αντικείμενο j . Στην εργασία αυτή το όφελος για κάθε άτομο είναι το κέρδος από την απόκτηση του αντικειμένου j , δηλαδή το κέρδος από την παραγωγή και πώληση ενός ποσού ενέργειας. Ο κύριος σκοπός είναι να προκύψει μία ανάθεση αντικειμένων στα άτομα έτσι ώστε να μεγιστοποιείτε το συνολικό όφελος:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \quad 4.2.1$$

Επιπλέον ορίζεται ένα νέο μέγεθος, το οποίο το ονομάζουμε τιμή p του αντικειμένου και διαμορφώνεται από τις προσφορές όλων των ατόμων προς το συγκεκριμένο αντικείμενο και προφανώς εκφράζει την συνολική επιθυμία του συστήματος. Οι **τιμές** για τα αντικείμενα σχηματίζουν ένα **διάνυσμα τιμών**. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές αυτές είναι εσωτερικές μεταβλητές του συστήματος και δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις τιμές της αγοράς. Επιπλέον η **διαφορά μεταξύ του οφέλους και της τιμής** του αντικειμένου που έχει το συγκεκριμένο άτομο για το συγκεκριμένο αντικείμενο ονομάζεται **πραγματική αξία**. Προφανώς το ίδιο αντικείμενο θα έχει διαφορετική αξία για διαφορετικά άτομα αφού στην γενική περίπτωση τα οφέλη είναι διαφορετικά. Στην αρχή κάθε επανάληψης του

αλγορίθμου λαμβάνουμε το διάνυσμα τιμών αρχικοποιημένο στο μηδέν και ως εκ τούτου η πραγματική αξία κάθε αντικειμένου συμπίπτει με το όφελος που έχει το άτομο για το αντικείμενο αυτό. Η αρχικοποίηση στο μηδέν είναι η αρχική έκδοση του αλγορίθμου ωστόσο κάποιες παραλλαγές προτείνουν συγκεκριμένες αρχικοποιήσεις προκειμένου να επιτευχθεί ταχύτερη σύγκλισή του.

Προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι παραπάνω έννοιες θα δοθεί ένα παράδειγμα όπου έχουμε δύο άτομα και δύο αντικείμενα που ανήκουν σε ένα μεγαλύτερο σύνολο ατόμων και αντικειμένων. Έστω ότι το πρώτο άτομο έχει όφελος για την απόκτηση των δύο αντικειμένων το διάνυσμα $\{a_{11}, a_{12}\} = \{10, 9\}$ και αντίστοιχα το δεύτερο άτομο έχει $\{a_{21}, a_{22}\} = \{7, 10\}$. Αν λάβουμε υπ' όψιν μόνο τα οφέλη τότε το πρώτο άτομο έχει μεγαλύτερο όφελος για το πρώτο αντικείμενο ενώ το δεύτερο για το άλλο αντικείμενο. Θεωρούμε τώρα ότι έχουμε ένα διάνυσμα τιμών $p = \{1, 8\}$ που όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι κοινό και για τα δύο αντικείμενα, οπότε οι πραγματικές αξίες των αντικειμένων διαμορφώνονται ως εξής: $\{9, 1\}$ για τον πρώτο άτομο και $\{6, 2\}$ για το δεύτερο. Από τις πραγματικές αξίες φαίνεται ότι και τα δύο άτομα επιθυμούν περισσότερο το πρώτο αντικείμενο από ότι το δεύτερο παρόλο που το δεύτερο άτομο έχει μεγαλύτερο όφελος από το δεύτερο αντικείμενο. Όπως έχει προαναφερθεί το όφελος αντιπροσωπεύει την τοπική πληροφορία ενώ η καθαρή αξία την συνολική πληροφορία του συστήματος. Σε κάθε σύστημα δημοπρασιών η τιμή του αντικειμένου αυξάνει εωσότου μείνει ένας μόνο πλειοδότης. Άρα με τον τρόπο που διαμορφώθηκαν οι τιμές προκύπτει ότι στο σύνολο των ατόμων υπάρχει τουλάχιστον ένα άλλο άτομο για το οποίο το όφελος του δευτέρου αντικειμένου είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το όφελος που έχουν τα δύο άτομα για το αυτό αντικείμενο.

Στον αλγόριθμο δημοπρασίας υπολογίζεται κάθε φορά το νέο διάνυσμα τιμών p με στόχο να πληροί στο τέλος την συνθήκη της ε-συμπληρωματικής αδιαφορίας (ε-complementary slackness) [4.1, 4.2]. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

Στην αρχή κάθε επανάληψης ελέγχεται η συνθήκη της ε-συμπληρωματικής αδιαφορίας για κάθε ζεύγος ατόμων αντικειμένων (i, j_i) . Όπου j_i είναι το αντικείμενο το οποίο το πρόσωπο i επιθυμεί. Με αυτόν τον τρόπο η συνθήκη διαμορφώνεται ως εξής:

$$a_{ij_i} - p_{j_i} \geq \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - p_j\} - \varepsilon \quad 4.2.2$$

Στην συνθήκη αυτή του $A(i)$ είναι το σύνολο των αντικειμένων τα οποία μπορούν να ταιριάξουν με το άτομο i . Αυτή η ανισότητα έχει δύο τμήματα: το $a_{ij} - p_j$ είναι η πραγματική αξία του αντικειμένου j για το άτομο i , όπως έχει γίνει περιγραφή παραπάνω. Το δεξί τμήμα της ανισότητας αναφέρεται στο αντικείμενο που δίνει την μεγαλύτερη δυνατή αξία στο άτομο i μειωμένη κατά ε . Ο ε είναι ένα θετικό βαθμωτό μέγεθος που προστίθεται στην προσφορά που γίνεται σε κάποιο αντικείμενο. Ο σκοπός το ε είναι να αποφύγουμε ατέρμονες επαναλήψεις στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα αντικείμενα προσφέρουν μέγιστο όφελος στο ίδιο άτομο και είναι μία περίπτωση που θα εξεταστεί στην συνέχεια.

Στην περίπτωση που όλα τα άτομα έχουν ταιριάσει με ξεχωριστά αντικείμενα τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται. Στην αντίθετη περίπτωση σχηματίζεται ένα μη άδαιο υποσύνολο I από τα άτομα i τα οποία έχουν μείνει χωρίς ταίρι. Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζεται ένα μη άδαιο σύνολο $P(j)$ από τα διαθέσιμα αντικείμενα. Τα επόμενα βήματα που περιγράφονται πραγματοποιούνται μόνο από τα άτομα που ανήκουν στον σύνολο I .

Το πρώτο βήμα είναι η φάση της προσφοράς όπου κάθε άτομο επιλέγει ένα αντικείμενο j το οποίο του προσφέρει την μέγιστη αξία η οποία είναι:

$$j_i \in \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - p_j\} \quad 4.2.3$$

Μετά την επιλογή του αντικειμένου το άτομο υπολογίζει την αύξηση της προσφοράς σύμφωνα με την σχέση:

$$\gamma_i = u_i - w_i + \varepsilon \quad 4.2.4$$

Όπου u_i είναι η πραγματική αξία το καλύτερου αντικειμένου (ως προς τις πραγματικές αξίες και όχι το όφελος) δηλαδή:

$$u_i = \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - p_j\} \quad 4.2.5$$

Και w_i είναι η αξία του δεύτερου κατά σειρά αντικειμένου

$$w_i = \max_{j \in A(i), j \neq j_i} \{a_{ij} - p_j\} \quad 4.2.6$$

Σύμφωνα με τις προηγούμενες εξισώσεις, η αύξηση στην προσφορά βασίζεται στην αξία των δυο καλύτερων αντικειμένων για κάθε άτομο. Η τιμή του αντικειμένου αυξάνεται αν υπάρχουν δύο ή περισσότερες προσφορές για το αυτό αντικείμενο και η αύξηση γίνεται με βάση την υψηλότερη προσφορά στην σχέση [4.2.4] είναι προφανής ο ρόλος του ε . Στην περίπτωση που τα άτομα είναι ίδιο όφελος για τα δύο καλύτερα αντικείμενα τότε η αύξηση της προσφοράς θα ήταν μηδενική και κατ' επέκταση ο αλγόριθμος θα οδηγούνταν σε ατέρμονες επαναλήψεις. Ο βαθμωτός αριθμός ε εξασφαλίζει ότι η ελάχιστη προσφορά και κατ' επέκταση η αύξηση της τιμής θα είναι $\gamma_i = \varepsilon$.

Η επόμενη φάση είναι η φάση της ανάθεσης, όπου το κάθε αντικείμενο j του συνόλου $P(j)$ που έχει επιλεγεί σαν βέλτιστο αντικείμενο από τα άτομα του I επιλέγει τον καλύτερο πλειοδότη σύμφωνα με την σχέση:

$$i_j = \max_{i \in P(j)} \{\gamma_i\} \quad 4.2.7$$

Το αντικείμενο j αυξάνει την τιμή του κατά την καλύτερη προσαύξηση προσφοράς $\max_{i \in P(j)} \{\gamma_i\}$ και ανατίθεται στο άτομο που έκανε αυτήν την προσφορά. Το άτομο στο οποίο είχε ανατεθεί το συγκεκριμένο αντικείμενο μένει ελεύθερο.

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται εωσότου όλα τα άτομα έχουν ταιριάξει με κάποιο αντικείμενο. Αποδεικνύεται [4.1-4.2] ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει στην βέλτιστη λύση εφόσον αυτή υπάρχει. Ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων είναι:

$$\frac{\max_{(i,j)} |a_{ij}|}{\varepsilon} \quad 4.2.8$$

Και ο αλγόριθμος τερματίζεται μετά από πεπερασμένα βήματα αν ισχύει η εξής συνθήκη:

$$\varepsilon < \frac{1}{n} \quad 4.2.9$$

Επιπλέον η λύση όπως έχει δειχθεί στο [4.1-4.2] απέχει $n\varepsilon$ το πολύ από την βέλτιστη λύση.

Θα πρέπει να γίνουν δύο σχόλια στο σημείο αυτό. Το πρώτο σχόλιο είναι ότι σε περίπτωση που ένα αντικείμενο λάβει την ίδια προσφορά αύξησης από δύο ή περισσότερα άτομα τότε η επιλογή μπορεί να γίνει με τυχαίο τρόπο χωρίς να επηρεάζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου. Το δεύτερο θέμα είναι ότι σε περίπτωση που το πρόβλημα δεν είναι συμμετρικό μπορεί να μετατραπεί σε συμμετρικό προσθέτοντας άτομα ή αντικείμενα με μηδενικό αντίστοιχο όφελος.

Για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου θεωρούμε ένα παράδειγμα με τρία άτομα και τρία αντικείμενα. Όλα τα άτομα έχουν μηδενικό όφελος για το τρίτο αντικείμενο. Αντίστοιχα για τα υπόλοιπα αντικείμενα είναι μία σταθερά $C > 0$. Έτσι λοιπόν τα οφέλη για τα αντικείμενα αναλυτικά είναι $a_{ij}=0$ για $i=1,2,3$ και $j=3$ ενώ όλα τα άλλα $a_{ij}=C > 0$. Οι αρχικές τιμές θεωρούνται μηδενικές. Οπότε για το παράδειγμα αυτό οι τέσσερις πρώτες επαναλήψεις του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.1.

Επανάληψη	Τιμές	Ζεύγη	Πλειοδότης / Αντικείμενο	Αύξηση
1	0, 0, 0	(1,1)(2,1)(3,1)	3/1	ε
2	ε , 0, 0	(1,1)(2,2)(3,1)	2/2	2ε
3	ε , 2ε , 0	(1,1)(2,2)(3,1)	1/1	2ε
4	3ε , 2ε , 0	(1,1)(2,2)(3,2)	3/2	2ε

Πίνακας 4.2.1. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δημοπρασίας για τις τέσσερις πρώτες επαναλήψεις.

Η δεύτερη στήλη με το όνομα «Τιμές» δίδει την τιμή του κάθε αντικειμένου στην αρχή της κάθε επανάληψης. Η στήλη «Ζεύγη» παρουσιάζει τα ζεύγη (άτομο, αντικείμενο) που έχουν αντιστοιχηθεί στο τέλος κάθε επανάληψης. Η τέταρτη στήλη που ονομάζεται «Πλειοδότης / Αντικείμενο» μας λέει πιο άτομο ήταν ο πλειοδότης στο τέλος κάθε επανάληψης καθώς και για πιο αντικείμενο πλειοδότησε. Δεδομένου ότι στο παράδειγμα αυτό υπάρχουν τρία μόνο άτομα ο πλειοδότης κάθε φορά μπορεί να είναι μόνο ένας, ενώ στην γενική περίπτωση μπορεί να είναι περισσότεροι. Η τελευταία στήλη παρουσιάζει την αύξηση της προσφοράς στο τέλος της κάθε επανάληψης.

Κατά την πρώτη επανάληψη όλα τα άτομα επιθυμούν το αντικείμενο 1 και έτσι γίνονται προσφορές για το αντικείμενο αυτό. Θα πρέπει να επαναληφθεί ότι σε περίπτωση που υπάρχουν κοινές προσφορές τότε κάποιες επιλογές μπορούν να γίνουν τυχαία ή με βάση κανόνες. Η αρχική επιλογή θα μπορούσε κάλλιστα να είναι το δεύτερο αντικείμενο ή τα δύο άτομα να δώσουν προσφορές για το δεύτερο αντικείμενο. Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί σε αυτήν την περίπτωση δεν επηρεάζει την σύγκλιση του αλγορίθμου [4.1-4.2]. Σύμφωνα με τα οφέλη όλα τα άτομα σε αυτήν την επανάληψη έχουν την ίδια αύξηση στην προσφορά και είναι :

$$\gamma_i = (u_i - w_i) + \varepsilon = (C - C) + \varepsilon = \varepsilon \quad 4.2.10$$

Και θεωρούμε νικητή το τρίτο άτομο. Στην δεύτερη επανάληψη η αύξηση της προσφοράς είναι 2ε διότι:

$$\gamma_i = (u_i - w_i) + \varepsilon = \varepsilon + \varepsilon = 2\varepsilon \quad 4.2.11$$

Σε αυτό το παράδειγμα φαίνεται καθαρά η ανάγκη της ύπαρξης του ε διότι σε διαφορετική περίπτωση θα παραμέναμε στην ανάθεση της πρώτης επανάληψης. Στην τελευταία επανάληψη οι τιμές για το αντικείμενο 1 ή το 2 θα είναι μεγαλύτερες από το C οπότε το αντικείμενο 3 λαμβάνει μία προσφορά και έτσι σχεδόν τελειώνει ο αλγόριθμος αφού το άτομο που θα πλειοδοτήσει στην συγκεκριμένη επανάληψη δεν θα συνεχίσει στις επόμενες δύο επαναλήψεις.

4.2.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προκειμένου να ερευνήσουμε την απόδοση του αλγορίθμου κατασκευάσαμε ένα πρόγραμμα που θα τρέχει σε απλό υπολογιστή με σχεδόν τυχαίες τιμές αρχικά για τα οφέλη των αντικειμένων. Ο βασικός σκοπός ήταν να διερευνήσουμε την απόδοση του αλγορίθμου και κυρίως να προσδιορίσουμε τον μέσο αλλά και τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων και κυρίως κατά πόσο επαληθεύεται η σχέση 4.2.8 σε ότι αφορά τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Δεδομένου ότι ο κώδικας θα τρέχει σε κατανεμημένο περιβάλλον ο αριθμός των επαναλήψεων είναι ένα κρίσιμο δεδομένο αφού εμπλέκεται η καθυστέρηση στην επικοινωνία. Κατά την διάρκεια και την ανάπτυξη του κώδικα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι δεν θα είναι πρακτικό για τις δοκιμές μας να έχουμε πλέον των 100 επαναλήψεων διότι όπως θα δούμε στην συνέχεια η κάθε διαπραγμάτευση θα μπορούσε να διαρκεί πάρα πολύ. Σε ένα κεντρικό επεξεργαστή η εκτέλεση του αλγορίθμου είναι πολύ γρήγορη ωστόσο σε ένα περιβάλλον πολλαπλών ευφών πρακτόρων σε κάθε κύκλο λειτουργίας υπάρχει μία σημαντική καθυστέρηση λόγω της επικοινωνίας.

Στον πίνακα 4.2.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα από τις διάφορες εκτελέσεις του αλγορίθμου.

Αριθμός Αντικειμένων	10	20	30	40
Μέσος αριθμός επαναλήψεων	11	47	80	110
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	15	80	105	250
Ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων	8	17	22	34

Πίνακας 4.2.2 Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα βλέπουμε ότι προκειμένου να καλύψουμε την απαίτηση για 100 περίπου επαναλήψεις θα πρέπει να μην χρησιμοποιήσουμε παραπάνω από 30 αντικείμενα. Αυτό θα τεκμηριωθεί καλύτερα στην συνέχεια. Επιπλέον αυτό σημαίνει ότι $\max|a_{ij}|/\epsilon < 150$.

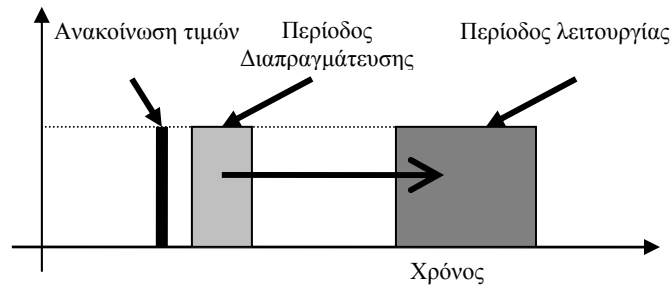
Η ορθότητα της λύσης επιβεβαιώθηκε με ένα ευριστικό αλγόριθμο ο οποίος εξέτασε όλες τις δυνατές αναθέσεις. Για τα αποτελέσματα που φαίνονται στο πίνακα 4.2.2 εξετάστηκαν όλες οι περιπτώσεις για 10 αντικείμενα και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις μόνο ορισμένες τυχαίες περιπτώσεις.

4.2.5 Το πρόβλημα της κατανομής φορτίου

4.2.5.1 Το περιβάλλον της αγοράς

Προκειμένου να αναλύσουμε τον αλγόριθμο θα πρέπει να περιγράψουμε το μοντέλο της αγοράς στο οποίο θα λειτουργεί το μικροδίκτυο. Ο αλγόριθμος αφορά την βέλτιστη συμμετοχή στην αγορά ενέργειας αλλά δεδομένων των τιμών να επιλέξει τον καλύτερο τρόπο σε ότι αφορά την εσωτερική του λειτουργία. Η διαπραγμάτευση των τιμών σε μία ενδεχόμενη αγορά ενέργειας αφορά κυρίως των κεντρικό ελεγκτή ο οποίος πραγματοποιεί όλες τις διαπραγματεύσεις με την εταιρία πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (market operator). Ο αλγόριθμος που θα παρουσιάσουμε δεν αλλάζει την ζήτηση ενέργειας από το δίκτυο αλλά την κατανέμει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο χρησιμοποιώντας σαν βάση των προηγούμενο αλγόριθμο. Οι μονάδες καθορίζουν την παραγωγή σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό. Με απλά λόγια το ποσό ενέργειας που μπορεί να παραχθεί και το ποσό της ενέργειας που θα ζητηθεί

και με βάση την απόφαση αυτή το σύστημα καθορίζει εσωτερικά πως θα καταναείμει τις παραγωγές.

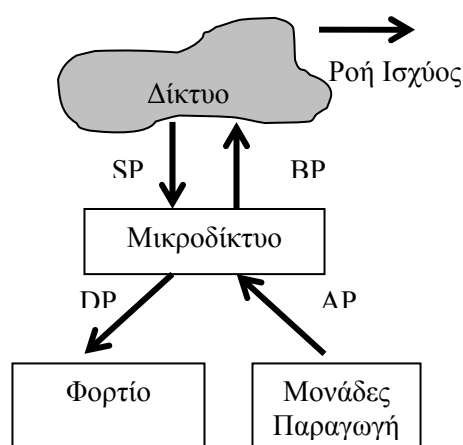


Σχήμα 4.1. Η ακολουθία των πράξεων

Η συνολική ακολουθία των πράξεων είναι η εξής:

1. Ο εταιρία πώλησης της ενέργειας (Market Operator MO) ανακοινώνει τις τιμές για την πώληση (SP) ή την αγορά (BP) ενέργεια από το μικροδίκτυο. Προφανώς $SP > BP$.
2. Τα τοπικά φορτία σε συνδυασμό με τον κεντρικό ελεγκτή ανακοινώνουν τις απαιτήσεις του για την επόμενη χρονική περίοδο που εδώ θεωρούμε ότι είναι 15 λεπτά καθώς και μία τιμή (DP) για κάθε kWh. Ισχύει $DP > BP$ και $DP < SP$.
3. Οι μονάδες παραγωγής αποδέχονται ή απορρίπτουν την προσφορά σύμφωνα με την τιμή της διαπραγμάτευσης..
4. Η διαπραγμάτευση διαρκεί για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (5 λεπτά)
5. Μετά το πέρας της διαπραγμάτευσης όλες οι μονάδες καθορίζουν τα επίπεδα λειτουργίας τους. Εάν δεν επαρκεί η εσωτερική παραγωγή ή υπάρχει πλεόνασμα ισχύος τότε έχουμε ανταλλαγή με το δίκτυο.

Για αυτό το μοντέλο της αγοράς θεωρείται ότι το σύστημα των ευφυών πρακτόρων προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το εσωτερικό όφελος του συστήματος και φυσικά μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του εκάστοτε μοντέλου της αγοράς.



Σχήμα 4.2 Ροές ισχύος και προσφορές στο μικροδίκτυο.

Προσπαθεί λοιπόν το σύστημα να επιλέξει την σωστή λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Να επισημάνουμε δε ότι δεν προσπαθούμε να κάνουμε οικονομική μελέτη της λειτουργίας

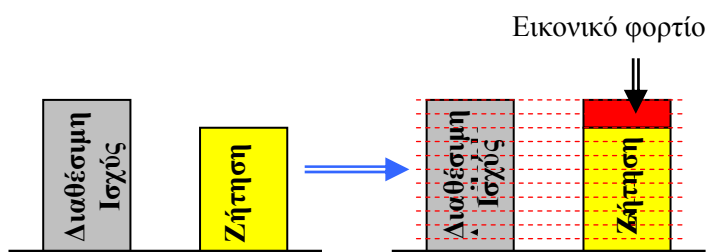
του μικροδικτύου αλλά αυτό που προσπαθούμε είναι να δώσουμε για συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας της αγοράς ένα μοντέλο λειτουργίας του συστήματος.

4.2.5.2 Ο αλγόριθμος

Για τις ανάγκες του αλγορίθμου εισάγουμε στο σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων δυο νέου τύπου πράκτορες. Το πράκτορα Production Unit και τον πράκτορα Load Unit. Οι πράκτορες αυτού είναι φυσικοί πράκτορες (physical) με την έννοια ότι ελέγχουν απευθείας μία μονάδα παραγωγής ή ένα φορτίο. Επιπλέον εισάγουμε έναν τρίτο τύπο πράκτορα, τον Grid Agent ο οποίος εκπροσωπεί το δίκτυο. Ο πράκτορας αυτός είναι εικονικός με την έννοια ότι απλά ανακοινώνει τις τιμές αγοράς και πώλησης της ενέργειας. Όλοι οι άλλοι πράκτορες που θα περιγραφούν στην συνέχεια είναι εικονικοί.

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε x μονάδες παραγωγής με δυνατότητα να παράγουν X ενέργειας και y φορτία που συνολικά απαιτούν Y ενέργεια. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο της συμμετρικής ανάθεσης καταρχήν θα πρέπει να είναι $X=Y$. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε αυτήν την ισότητα εισάγουμε την έννοια του εικονικού φορτίου όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.3 το εικονικό φορτίο είναι ουσιαστικά το ποσό της ενέργειας που θα ανταλλάξουμε με το δίκτυο. Όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενους η ανταλλαγή ενέργειας με το δίκτυο είναι απεριόριστη.

Προκειμένου να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο της συμμετρικής ανάθεσης, το φορτίο διαιρείται σε «πακέτα» ίσης ενέργειας και σε αντίστοιχα πακέτα η παραγωγή. Προφανών πακέτα που ανήκουν στο ίδιο φορτίο έχουν κοινό όφελος δεδομένου ότι θα πρέπει να καλυφθεί όλο το φορτίο ή τίποτα. Για παράδειγμα αν το συγκεκριμένο φορτίο είναι ένας θερμοσίφωνας που ζητά 500Wh για τα επόμενα 15 λεπτά τότε θα πρέπει το σύστημα να δώσει όλη την ενέργεια ή τίποτα.

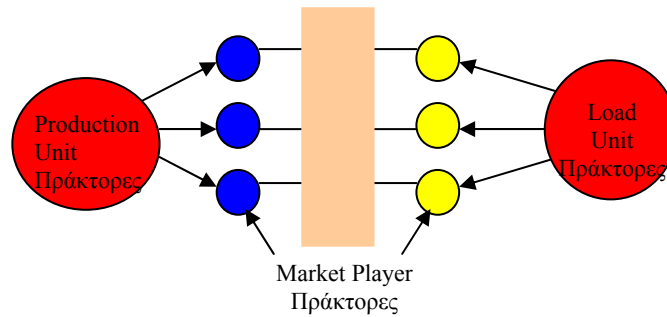


Σχήμα 4.3 Τα πακέτα ενέργειας του αλγορίθμου.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω το σύστημα προκειμένου να εκτελέσει το πολύ 100 επαναλήψεις σε κάθε διαπραγμάτευση θα πρέπει να έχουμε ένα αριθμό το πολύ 30 πακέτων συμπεριλαμβανομένου και του εικονικού φορτίου. Προφανώς για τις ανάγκες του αλγορίθμου θεωρούμε ότι τα άτομα είναι τα πακέτα που αντιστοιχούν στην παραγομένη ενέργεια ενώ τα αντικείμενα είναι η ενέργεια που ζητούν τα φορτία. Επιπλέον εισάγουμε δύο νέου τύπου πράκτορες. Τους ονομάζουμε Market Player Agents και εμφανίζονται με δύο τύπους: Seller και Buyer. Αυτοί οι πράκτορες ουσιαστικά εκπροσωπούν τα άτομα και τα αντικείμενα του αλγορίθμου και σε κάθε ένα από αυτούς, του έχει ανατεθεί ένα πακέτο ενέργειας.

Αντίστοιχοι πράκτορες δημιουργούνται και από τον πράκτορα που εκπροσωπεί το δίκτυο και ανάλογα αν υπάρχει πλεόνασμα ή έλλειμα ισχύος τότε οι πράκτορες που δημιουργεί το δίκτυο είναι Seller ή Buyer. Ο τελικός συνολικός αριθμός Seller και Buyer πρέπει να είναι ίδιος.

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε επίπεδο εργαστηρίου με την χρήση της γλώσσας Java και του Jade που είναι μία πλατφόρμα ανάπτυξης πρακτόρων. Στην υλοποίηση κάθε κύκλου λειτουργίας του αλγορίθμου είδαμε ότι απαιτούνται ένας μέγιστος αριθμός 5 ομάδων μηνυμάτων προκειμένου να ολοκληρωθεί. Έχοντας ένα χρόνο περίπου στα 200ms για την αποστολή και λήψη των μηνυμάτων, στον οποίο χρόνο έχουμε συμπεριλάβει τις αναμονές για πιθανές καθυστερήσεις, έχουμε επιτύχει ένα χρόνο ~2.5sec για κάθε κύκλο λειτουργίας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο θέλουμε μέγιστο αριθμό επαναλήψεων της τάξεως των 100 κύκλων. Τα διάφορα βήματα σε κάθε κύκλο φαίνονται στον πίνακα 4.2.3.



Σχήμα 4.4 Οι εικονικοί πράκτορες για τις ανάγκες του αλγορίθμου.

Βήμα	Επεξήγηση
1	Έναρξη κύκλου
2	Μήνυμα προσφοράς (ή μη) από τα άτομα
3	Τα αντικείμενα ανακοινώνουν μεταξύ τους τις προσφορές
4	Το αντικείμενο που πλειοδοτεί ανακοινώνει τον πλειοδότη, την νέα τιμή.
5	Μήνυμα τέλους

Πίνακας 4.2.3. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δημοπρασίας για τις τέσσερις πρώτες επαναλήψεις.

4.3.4 Η επέκταση της μεθόδου στα υπόλοιπα προβλήματα.

Η συλλογιστική για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων στον πρόλογο υπόλοιπων προβλημάτων είναι να εντοπίσουμε τα κοινά χαρακτηριστικά των προβλημάτων αυτών. Ο κοινός τύπος όλων των προβλημάτων που αναφέρθηκαν στην αρχή είναι ότι απαιτούν την διαχείριση μίας ποσότητας ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος τους.

Για την διαχείριση θερμότητας το πρόβλημα είναι ισοδύναμο αρχικά με την διαχείριση φορτίου με δύο βασικές για την εφαρμογή μας διαφορές. Η πρώτη διαφορά είναι ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα ο καταναλωτής να αγοράσει από έξω θερμότητα οπότε μία αρχική συνθήκη είναι $X > Y$. στην περίπτωση όπου $X < Y$ τότε δουλεύουμε πάλι με εικονικό φορτίο και η πλεονάζουσα ισχύς είναι τα φορτία που δεν θα τροφοδοτηθούν. Το δεύτερο σημαντικό σημείο είναι ότι υπάρχει μια καθυστέρηση στην απόδοση της θερμότητας (μέχρι να ζεσταθεί το νερό, να κυκλοφορήσει και να ζεσταθεί ο αέρας) ενώ αντίθετα στο ηλεκτρικό φορτίο η

ζήτηση καλύπτεται άμεσα. Ως εκ τούτου ο κύκλος λειτουργίας θα πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον μία ώρα. Σημαντικό ενδιαφέρον θα έχει η μελέτη της περίπτωσης συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Το τελευταίο πρόβλημα, αυτό της διατήρησης εφεδρείας είναι παρόμοιο με αυτό της διαχείρισης φορτίου. Η διαφορά είναι ότι πλέον οι μονάδες διαπραγματεύονται την κέρδος που θα είχαν αν την οποία παραγωγή την κρατούν σαν εφεδρεία την πουλούσαν.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα αντιμετώπιση αναφέρεται στο [4.3] όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή προκειμένου να κατανεμηθούν οι διάφορες αρμοδιότητες σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων. Η εργασία αυτή που δημοσιεύτηκε ταυτόχρονα με την σχετική εργασία του γράφοντος [4.4] που αφορά το προαναφερθέντα μπορεί να δώσει βάση για επέκταση της μεθόδου σε μία γενικότερη διαχείριση των εργασιών μέσα στο μικροδίκτυο. Για παράδειγμα θα μπορούσε να αποτιμηθεί το κόστος για την διατήρηση της τάσης ή της εφεδρείας και στην συνέχεια οι πράκτορες να κάνουν προσφορές προκειμένου να αναλάβουν κάποιους ρόλους στο σύστημα.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην διατριβή αυτή δεν γίνεται οικονομική μελέτη, οπότε δεν προσπαθούμε να υπολογίσουμε πιο είναι το κόστος παραγωγής της κάθε μονάδος αλλά το θεωρούμε δεδομένο. Επίσης δεν μελετάμε το ποια θα ήταν η ιδανικότερη μορφή λειτουργίας της αγοράς ενέργειας.

4.3 Εύρεση συνεκτικότητας του δικτύου

4.3.1 Εισαγωγή

Η εύρεση της συνεκτικότητας ενός δικτύου είναι μια απαραίτητη διαδικασία για τα μικροδίκτυα δεδομένου ότι θα μπορούν να σχηματίζουν ανά πάσα στιγμή νησίδες. Το ερώτημα σε κάθε περίπτωση είναι ο κάθε πράκτορας σε πια νησίδα ανήκει. Η λύση που προτείνουμε βασίζεται σε ένα θεμελιώδη αλγόριθμο της θεωρίας των γράφων[4.3-4.7] που ονομάζεται αναζήτηση με προτεραιότητα βάθους.

4.3.2 Θεωρία Γράφων

Ένας φυσικός τρόπος αναπαράστασης των δικτύων είναι γραφήματα τα οποία ως ακμές έχουν τις γραμμές και ως κόμβους τους διάφορους ζυγούς. Στην συνέχεια παρατίθενται εν συντομία κάποιοι βασικοί ορισμοί από την θεωρία των γράφων.

Ένας γράφος $G(V, E)$ αποτελείται από δύο σύνολα αντικειμένων. Το σύνολο V των κόμβων του και το σύνολο E των ακμών του. Κάθε ακμή ορίζεται ως ένα μη διατεταγμένο ζεύγος δύο κόμβων. Οι γράφοι σχεδιάζονται αναπαριστώντας τους κόμβους με σημεία ή κύκλους και τις ακμές ως γραμμές που συνδέονται τα σημεία.

Το μέγεθος ενός γράφου χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των κόμβων του $|V|$ που ονομάζεται τάξη του G καθώς και τον αριθμό των ακμών $|E|$ που ονομάζεται μέγεθος του G .

Επίσης ένας γράφος μπορεί να αναπαρασταθεί με έναν πίνακα, που ονομάζεται πίνακας γειτνίασης (adjacency matrix). Ο πίνακας έχει μέγεθος $V \times V$ και ορίζεται ως εξής:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν } (i, j) \in E \\ 0 & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Το 1 δηλαδή εμφανίζεται όπου υπάρχει ακμή που συνδέει τους δύο κόμβους.

Οι κόμβοι αυτοί ονομάζονται γειτονικοί μεταξύ τους. Η ακμή (i, j) είναι προσπίπτουσα στους κόμβους i και j . Δύο ακμές προσπίπτουσες στο ίδιο ζεύγος κόμβων ονομάζονται παράλληλες. Όταν ένα σύνολο ακμών κλείνουν κύκλο σε ένα γράφο αυτός ονομάζεται βρόγχος. Ένας γράφος χωρίς βρόγχους και παράλληλες ακμές ονομάζεται απλός γράφος. Ένα μονοπάτι (path), από τον κόμβο i στον κόμβο j είναι ένα σύνολο κόμβων και ακμών που ξεκινά από τον κόμβο i και καταλήγει στον j με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ακμή να είναι προσπίπτουσα στον προηγούμενο και τον επόμενο κόμβο. Όταν το μονοπάτι περνάει μία μόνο φορά από κάθε κόμβο και ακμή ονομάζεται απλό μονοπάτι. Σε απλό γράφο, ένα μονοπάτι μπορεί να οριστεί απλά ως αλληλουχία κόμβων με τέτοιο τρόπο που κάθε κόμβος να είναι γειτονικός στον προηγούμενο και τον επόμενο. Κυκλικό είναι το μονοπάτι που ξεκινά και καταλήγει στον ίδιο κόμβο. Τέλος, ένας γράφος λέγεται συνδεδεμένος (connected) αν υπάρχει μονοπάτι μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων του και επίπεδος αν μπορεί να σχεδιαστεί σε ένα επίπεδο χωρίς να τέμνεται καμιά ακμή του από κάποια άλλη.

Ένας κατευθυνόμενος γράφος $G(V, E)$ αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων V και ένα σύνολο ακμών E , όπου κάθε ακμή ορίζεται ως ένα διατεταγμένο ζεύγος κόμβων. Οι κατευθυνόμενοι γράφοι απεικονίζονται αναπαριστώντας τους κόμβους με τελείες ή κύκλους και τις ακμές ως βέλη. Η φορά του βέλους δείχνει τη φορά της ακμής. Είναι δυνατή η ύπαρξη παράλληλων ακμών υπό την προϋπόθεση ότι δείχνουν σε αντίθετες φορές. Είναι προφανής η χρησιμότητα τους στην αναπαράσταση τηλεπικοινωνιακών ή ηλεκτρικών δικτύων δικτύων, όπου κάθε ακμή αναπαριστά τη ροή των δεδομένων/ενέργειας προς μία διεύθυνση μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Τα δέντρα είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υποσύνολα των γράφων. Ένας απλός γράφος N κόμβων είναι δέντρο αν έχει $N-1$ ακμές και καθόλου κύκλους.

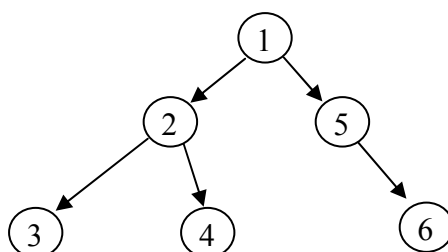
Ένας από τους κόμβους του δέντρου ορίζεται ως ρίζα. Συνήθως τοποθετείται στην κορυφή του γραφήματος. Κάτω από τη ρίζα και στο ίδιο επίπεδο μεταξύ τους, τοποθετούνται οι κόμβοι που είναι προσκείμενοι στη ρίζα. Αυτοί οι κόμβοι απέχουν προφανώς από τη ρίζα απόσταση 1. Κάτω από αυτούς τοποθετούνται οι κόμβοι που είναι γειτονικοί με τους κόμβους του 1ου επιπέδου και απέχουν από τη ρίζα απόσταση 2. η διαδικασία αυτή συνεχίζεται ανάλογα με το μέγεθος του δέντρου. Κάθε κόμβος, εκτός από τη ρίζα, έχει ένα μόνο κόμβο γονέα, που είναι ο γειτονικός κόμβος κοντύτερα στη ρίζα. Κάθε κόμβος έχει κανένα ή περισσότερους κόμβους παιδιά, που είναι οι γειτονικοί του κομβόι καθώς απομακρυνόμαστε από τη ρίζα. Ένας κόμβος χωρίς παιδιά καλείται φύλλο. Κατά σύμβαση η ρίζα θεωρείται ότι είναι το επίπεδο μηδέν.

4.3.3 Εφαρμογή

Ο πυρήνας του αλγορίθμου βασίζεται σε έναν θεμελιώδη αλγόριθμο της θεωρίας των γράφων που ονομάζεται αναζήτηση με προτεραιότητα βάθους (Depth First Search DFS). Αποτελεί έναν αλγόριθμο διάσχισης όλων των κόμβων ενός γράφου. Με δεδομένο τον πίνακα γειτνίασης η περιγραφή του αλγορίθμου σε ψευδο γλώσσα είναι:

```
DFS (κόμβος x)
{
  Σημαία_ κόμβος_Εξετασμένος(x)
  Για κάθε γειτονικό κόμβο y του x
    Αν ο y δεν είναι εξετασμένος
    {
      DFS (y);
    }
}
```

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ένας γράφος με τους κόμβους του αριθμημένους σύμφωνα με τον αλγόριθμο διάσχισης DFS.

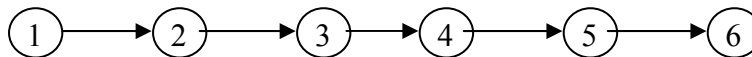


Σχήμα 4.6 Παράδειγμα διάσχισης γράφου.

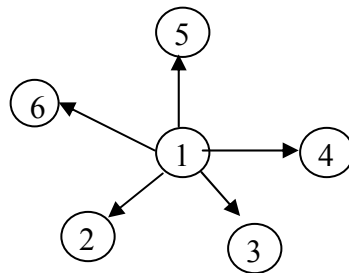
Η υλοποίηση του αλγορίθμου σε ένα περιβάλλον πολλαπλών ευφυών πρακτόρων βασίζεται σε σκυτάλες. Η μόνη γνώση που απαιτείται είναι ο κάθε πράκτορας να γνωρίζει τους γειτονικούς του πράκτορες. Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος που βασίζεται στο DFS είναι τα εξής:

- Ένας πράκτορας ξεκινά τον αλγόριθμο στέλνοντας την σκυτάλη στους πράκτορες με τους οποίους συνορεύει.
- Ο πράκτορας που λαμβάνει την σκυτάλη στέλνει μια νέα σκυτάλη σε όλους του πράκτορες που συνορεύει πλην αυτού που του έστειλε αρχικά την σκυτάλη υπό τον όρο ότι είναι η πρώτη φορά που λαμβάνει σκυτάλη (προκειμένου να αποφύγουμε ατέρμονες επαναλήψεις).
- Ο αλγόριθμος σταματά όταν σταματούν οι μεταβιβάσεις της σκυτάλης.

Αν μετά το πέρας της διαδικασίας τουλάχιστον ένας πράκτορας δεν έχει λάβει την σκυτάλη τότε το δίκτυο δεν είναι συνεκτικό δηλαδή υπάρχουν πλέον της μίας νησίδες.



Σχήμα 4.7. Η δύσκολη τοπολογία



Σχήμα 4.8. Η εύκολη τοπολογία.

Σε σχέση με τον αλγόριθμο αυτό το βασικό σημείο που χρήζει μελέτης είναι ποια είναι η χειρότερη τοπολογία και ποια η ευκολότερη που πρόκειται να αντιμετωπίσει το σύστημα. Η τοπολογία του σχήματος 4.7 είναι η δυσκολότερη με δεδομένο ότι χρειάζονται $n-1$ βήματα από n είναι ο συνολικός αριθμός των πρακτόρων. Αντίθετα η τοπολογία του σχήματος 4.8 είναι η ευκολότερη περίπτωση με δεδομένο ότι σε ένα ακριβώς βήμα το σύστημα έχει αποφανθεί για την τοπολογία. Σε ένα ανεξάρτητο πρόγραμμα που βασίζεται στο Jade και αναπτύχθηκε σε δύο διαφορετικούς υπολογιστές επιτύχαμε την ανταλλαγή της σκυτάλης με μέση ταχύτητα $\sim 200\text{ms}$. Στο πρόγραμμα αυτό οι πράκτορες γνώριζαν εσωτερικά τον γείτονά τους και δεν παρεμβαλλόταν ο πράκτορας DF στα ερωτήματα και επιπλέον οι πράκτορες δεν επιτελούσαν άλλη εργασία. Στοιχεία για τον τρόπο ανάπτυξης των πρακτόρων με το πρόγραμμα Jade υπάρχουν στο κεφάλαιο 6.

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάσαμε μεθόδους με τις οποίες οι πράκτορες μπορούν να συντονιστούν με σκοπό να πραγματοποιήσουν κάποιες δευτερεύουσες λειτουργίες. Ο στόχος μας εδώ ήταν η διαδικασία να εξασφαλίζει την λύση σε κάθε περίπτωση.

Η πρώτη εφαρμογή που παρουσιάστηκε, αυτή του τρόπου κατανομής της ενέργειας αναπτύχθηκε κυρίως σαν εργαλείο με σκοπό οι πράκτορες να μπορούν να επιλύουν εσωτερικά την ομάδα εκείνων των προβλημάτων που αφορούν την συνολική χρήση κάποιων πόρων του συστήματος ή την ανάθεση διεργασιών. Η εφαρμογή αυτή είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος αφού περιγράφει ένα σαφή τρόπο με τον οποίο μπορούν να κατανεμηθούν διάφορες λειτουργίες στο σύστημα.

Η δεύτερη εφαρμογή επιτρέπει να ελεγχθεί η συνεκτικότητα ενός ηλεκτρικού δικτύου από το σύστημα των ευφύων πρακτόρων. Μία τέτοια εφαρμογή μπορεί να αποτελεί την βάση για την δημιουργία μίας διαδικασίας για την εξέταση της κατάστασης του μικροδικτύου συνολικά.

Κεφάλαιο 5 Επίπεδο Τρίτο

Ομαδική Συμπεριφορά

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε το τρίτο και τελευταίο επίπεδο της μάθησης πολλαπλών επιπέδων. Στο επίπεδο αυτό οι πράκτορες καλούνται να ολοκληρώσουν τους πραγματικούς στόχους του συστήματος, είτε πρόκειται για την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας είτε για την ολοκλήρωση κάποιας άλλης σύνθετης λειτουργίας όπως είναι η απομονωμένη λειτουργία από το κεντρικό δίκτυο. Οι πράκτορες θα πρέπει να αξιοποιήσουν όλη την δυνατή γνώση προκειμένου να φέρουν σε πέρας τους στόχους τους. Ο κύριος όγκος των γνώσεων τους αλλά και βασικές δυνατότητες για εκτέλεση διαφόρων πράξεων προέρχεται από το προηγούμενα επίπεδα της οργάνωσης.

Η βασική διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο επίπεδο είναι ότι οι πράκτορες δεν αποφασίζουν μόνο για το παρόν αλλά πρέπει να προγραμματίσουν τις μελλοντικές τους πράξεις. Η λειτουργία αυτή σε ένα περιβάλλον πολλαπλών πρακτόρων εμπεριέχει την δυσκολία του να ληφθεί υπό όψιν η συμπεριφορά όλων των πρακτόρων.

Στο επίπεδο αυτό λοιπόν της λειτουργίας εμπλέκεται και μία πολύ βασική παράμετρος, αυτή της στοχαστικότητας του περιβάλλοντος. Στα προηγούμενα επίπεδα το αποτέλεσμα των όποιων αποφάσεων ήταν δεδομένο όπως επίσης και η γνώση. Στο σημείο αυτό το περιβάλλον πλέον δεν είναι αιτιοκρατικό με την έννοια ότι αφού ο κάθε πράκτορας μπορεί να λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις δεν είναι δυνατόν να προβλέψουμε την επόμενη κατάσταση του συστήματος.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι ο όγκος των πληροφοριών. Τα μικροδίκτυα αλλά και τα δίκτυα διανομής με εγκατεστημένη τοπική παραγωγή, παρόλο που δεν έχουν την πολυπλοκότητα ενός μεγάλου κεντρικού δικτύου περικλείουν ένα σημαντικό όγκο πληροφοριών. Το σύστημα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων καλείται να λάβει υπ' όψιν του όλες τις δυνατές πληροφορίες από τις γενικότερες όπως είναι η συχνότητα και το ισοζύγιο ισχύος του συστήματος μέχρι τις πιο ειδικές όπως είναι η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών.

Συνεχίζοντας θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το σύστημα θα πρέπει να μαθαίνει και να προσαρμόζεται στις όποιες αλλαγές. Με άλλα λόγια στην περίπτωση που εγκατασταθεί μία νέα μονάδα είναι πρακτικά αδύνατο να έχουμε ειδικευμένο προσωπικό που να επανακαθορίζει τον τρόπο λειτουργίας των υπόλοιπων μονάδων. Η μάθηση θα πρέπει να γίνεται αυτόματα και το σύστημα να καθορίζει την πολιτική του.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ένα αλγόριθμο που βασίζεται στην ενισχυτική μάθηση και ο οποίος θα δίνει την δυνατότητα στο σύστημά μας να μαθαίνει και να αντιμετωπίζει από μόνο τις όποιες δυσκολίες προκύπτουν. Με χρήση αυτού του αλγορίθμου θα παρουσιάσουμε δύο πρακτικά παραδείγματα, ένα που αφορά την λειτουργία στα πλαίσια μίας αγοράς ενέργειας και ένα παράδειγμα που αφορά την κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας.

5.2 Θεμελίωση του προβλήματος

Τα προβλήματα που θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους απαιτούν για την αντιμετώπισή τους ένα αλγόριθμο ο οποίος να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Να μπορεί να διαχειρίζεται μεγάλο όγκο δεδομένων και μεταβλητών.
2. Να μπορεί να μαθαίνει και να προσαρμόζεται στη μορφή που θα έχει το σύστημα κάθε φορά.
3. Η διαδικασία της μάθησης να γίνεται σε πραγματικό χρόνο.
4. Να λειτουργεί σε περιβάλλον συστημάτων πολλαπλών ευφύων πρακτόρων στο οποίο η μεταφορά δεδομένων να είναι περιορισμένη.
5. 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.
6. 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 ευφύων πρακτόρων αλλά δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα από την σκοπιά που το παρουσιάσαμε. Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε προκειμένου να εφαρμοστεί στο επίπεδο αυτό ανήκει στο πεδίο της ενισχυτικής μάθησης όπου οι πράκτορες μέσα από μία διαδικασία επιβραβεύσεων προσπαθούν να επιλύουν τα προβλήματα που τους έχουν αναθέσει.

Το πρώτο πρόβλημα που θα αντιμετωπίσουμε αφορά την λειτουργία σε πλαίσια μίας αγοράς ενέργειας. Στο πρόβλημα αυτό ο κάθε πράκτορας καλείται να αποφασίσει πότε θα δώσει προς το σύστημα ενέργεια. Η απόφασή του λαμβάνεται σε κάθε περίπτωση ανάλογα και με την συμπεριφορά των λοιπών πρακτόρων αφού σαν βασική προϋπόθεση θεωρούμε ότι στα συστήματα που μελετάμε οι πράκτορες συνεργάζονται μεταξύ τους.

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά την λειτουργία σε απομονωμένη κατάσταση από το κεντρικό δίκτυο. Στη λειτουργία αυτή οι πράκτορες σαν βασικό στόχο έχουν την ομαλή τροφοδότηση του συστήματος για συγκεκριμένο αριθμό ωρών. Στη λειτουργία αυτή ο βασικό στόχο είναι να εξασφαλιστεί η επάρκεια πόρων (καύσιμα και kWh στις μπαταρίες) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Στο επόμενο τμήμα του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί η θεωρία της ενισχυτικής μάθησης σε περιβάλλον πολλαπλών ευφύων πρακτόρων καθώς και οι δύο εφαρμογές που προαναφερθήκαν.

5.3. Ενισχυτική μάθηση σε περιβάλλον πολλαπλών ευφυών πρακτόρων

5.3.1 Εισαγωγή

Η ενισχυτική μάθηση είναι ένα νέο πεδίο έρευνας στην περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης και το οποίο προσελκύει το ενδιαφέρον σε θεωρητικό αλλά και σε πρακτικό επίπεδο. Σε ότι αφορά το πρακτικό επίπεδο ειδικά οι εφαρμογές περιλαμβάνουν Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles –UAVs), διαστημικά σκάφη (Pathfinder), αυτόνομα υποβρύχια σκάφη (autonomous underwater vehicles AUVs) αλλά και συστήματα πολλαπλών ρομπότ και σημαντική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί στον τομέα αυτό [5.1-5.16]. Στο τμήμα αυτό του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν οι βασικές εξελίξεις στον τομέα σε σχέση κυρίως με τα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων.

5.3.2 Βασική θεωρία

5.3.2.1 Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης

Η Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης είναι ο πυρήνας της θεμελίωσης του προβλήματος της ενισχυτικής μάθησης σε περιβάλλον ενός ευφυούς πράκτορα. Η Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης είναι ένα μαθηματικό μοντέλο μίας διαδικασίας καθώς και μίας σειράς αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν. Στην διαδικασία αυτή η πληροφορία για την κατάσταση του συστήματος λαμβάνεται υπ' όψιν για την επιλογή της επόμενης πράξης. Στις πεπερασμένες μαρκοβιανές διαδικασίες απόφασης τις οποίες θα μελετήσουμε, το σύστημα έχει πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων αλλά και αριθμό δυνατών πράξεων.

Τυπικά ο ορισμός δίδεται ως εξής [5.17,5.18]:

Μια Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης είναι ένα σύνολο

$$\langle S, A, T, R, \gamma \rangle$$

5.3.2.1

Όπου

- S είναι ένα πεπερασμένο διακριτό σύνολο καταστάσεων του περιβάλλοντος.
- A είναι ένα πεπερασμένο διακριτό σύνολο από ενέργειες τις οποίες μπορεί να πραγματοποιήσει ο πράκτορας.
- γ ($0 \leq \gamma < 1$) είναι μία discount παράμετρος.
- $R : S \times A \rightarrow \mathcal{R}$ είναι μία συνάρτηση επιβράβευσης του πράκτορα η οποία δίδει μία επιβράβευση για την πράξη που επιλέγει ο πράκτορας σε μία δεδομένη κατάσταση.
- $T : S \times A \rightarrow \Pi(S)$ 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.

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 5.3.1 δίδει τα βασικά βήματα του Q-learning:

Βήμα	Περιγραφή
1	Επιλογή και εκτέλεση μίας πράξης 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 $Q(s, a) = (1 - \varepsilon)Q(s, a) + \varepsilon(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'))$ όπου ε είναι ο παράγοντας εκμάθησης και γ είναι ο παράγοντας μείωσης (discount factor).

Πίνακας 5.3.1 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 μειώνεται.

5.3.3.3 Παιχνίδια πινάκων

Τα παιχνίδια πινάκων είναι ένας στοιχειώδης τύπος παιχνιδιού πολλαπλών παιχτών και κυρίως δύο παιχτών [5.20]. στα παιχνίδια πινάκων ο κάθε παίχτης επιλέγει μία πράξη από τον δικό του χώρο δράσης και στην συνέχεια λαμβάνει μία επιβράβευση που συσχετίζεται με τις πράξεις όλων των άλλων παικτών.

Ένα παιχνίδι πινάκων ορίζεται από την tuple $\langle n, A_1, \dots, A_n, R_1, \dots, R_n \rangle$, όπου A_i είναι ο χώρος των πράξεων για τον παίχτη i και R_i είναι η συνάρτηση payoff αντίστοιχα. Στα παιχνίδια πινάκων οι κοινές πράξεις αντιστοιχούν σε ειδικές παραμέτρους στους πίνακες payoff. Για τις ανάγκες της ενισχυτικής μάθησης οι πράκτορες παίζουν τα ίδια παιχνίδια πολλές φορές. Για αυτήν την διαδικασία και ειδικά σε περιβάλλον πολλαπλών ευφύων πρακτόρων θα πρέπει να ορίζεται με σαφή τρόπο το payoff αλλά για την κλάση προβλημάτων που αντιμετωπίζουμε εδώ αυτό είναι πολύ δύσκολο.

5.3.3.4 Στοχαστικά Παιχνίδια

Η ενισχυτική μάθηση για συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων έχει δώσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ένα θεωρητικό πλαίσιο που ονομάζεται στοχαστικά παιχνίδια γνωστά και ως μαρκοβιανά παιχνίδια. Τα στοχαστικά παιχνίδια ουσιαστικά επεκτείνουν στον χώρο τον πολλαπλών καταστάσεων τα μαρκοβιανά παιχνίδια. Αυτό επιτυγχάνεται μοντελοποιώντας τις μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων μέσω μαρκοβιανών διαδικασιών απόφασης. Κάθε κατάσταση σε ένα στοχαστικό παιχνίδι μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μαρκοβιανό παιχνίδι και ένα στοχαστικό παιχνίδι με ένα παίχτη που ακολουθεί μαρκοβιανή διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Μια πολιτική θεωρείται ως η καλύτερη απάντηση στην αντιμετώπιση των άλλων παιχτών όταν είναι βέλτιστη γνωρίζοντας τις πολιτικές των αντιπάλων. Η ισορροπία κατά Nash είναι ένα σύνολο από πολιτικές για τους παίκτες του παιχνιδιού στην οποία για κάθε παίκτη η στρατηγική του είναι η καλύτερη απάντηση στις πολιτικές των άλλων.

Σε μία ισορροπία κατά Nash ένας παίκτης δεν μπορεί να έχει όφελος αλλάζοντας την πολιτική του δεδομένου όμως ότι οι υπόλοιποι παίκτες ακολουθούν στρατηγικές βέλτιστες κατά Nash.

5.3.4.1 Ενισχυτική μάθηση για συστήματα πολλαπλών πρακτόρων

Το θεωρητικό πλαίσιο των στοχαστικών παιγνιδιών έχει υιοθετηθεί από πολλούς ερευνητές προκειμένου να μοντελοποιήσουν συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων με πεπερασμένες καταστάσεις και πράξεις[5.21, 5.3.22, 5.3.23]. Ειδικότερα το πλαίσιο των στοχαστικών παιγνιδιών χρησιμοποιήθηκε για την επέκταση του Q-Learning στα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Σε ένα στοχαστικό παιχνίδι όλοι οι πράκτορες λαμβάνουν μία απόφαση ταυτόχρονα, και ανάλογα με τις πράξεις τους λαμβάνουν μία άμεση επιβράβευση. Για την ενισχυτική μάθηση σε περιβάλλον πολλαπλών ευφυών πρακτόρων δίδονται οι εξής ορισμοί[5.21, 5.3.22, 5.3.23].

Το πλαίσιο μάθησης ενός στοχαστικού παιχνιδιού δίδεται από την tuple : $\langle S, A_1, \dots, A_n, T, R_1, \dots, R_n, \gamma \rangle$ όπου:

- S είναι ο πεπερασμένος χώρος των καταστάσεων του συστήματος.
- $A_1, \dots, A_n$ είναι ο αντίστοιχος πεπερασμένος χώρος των διαθέσιμων πράξεων του κάθε πράκτορα.
- $T : S \times A_1 \times \dots \times A_n \rightarrow \mathcal{P}(S)$ είναι η συνάρτηση μεταβάσεων η οποία για κάθε ζεύγος κατάστασης και επιλεγμένης πράξης δίνει την πιθανοτική κατανομή των καταστάσεων στον χώρο.
- $R : S \times A_1 \times \dots \times A_n \rightarrow \mathcal{R}$ είναι μία συνάρτηση επιβράβευσης του κάθε πράκτορα η οποία δίνει μία επιβράβευση για την πράξη που επιλέγει ο πράκτορας σε μία δεδομένη κατάσταση.
- $0 \leq \gamma < 1$ είναι ο discount factor.

Σε ένα τέτοιο πλαίσιο λειτουργίας οι ευφυείς πράκτορες προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το αναμενόμενο άθροισμα discounted επιβραβεύσεων. Αντίστοιχα μπορεί να οριστεί ένα σύνολο που αποτελείται από Q- συναρτήσεις για κάθε πράκτορα i οι οποίοι έχουν αντίστοιχα σταθερές πολιτικές π_i .

Αντίθετα με τα συστήματα ενός πράκτορα, στα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων οι συνδυασμένες πράξεις καθορίζουν την επόμενη κατάσταση του συστήματος καθώς και τις επιβραβεύσεις.

5.3.4.2 Εικονικά παιχνίδια.

Η κατηγορίας παιγνιδιών που ονομάζεται εικονικά παιχνίδια είναι μία τεχνική προκειμένου να εντοπισθεί η ισορροπία κατά Nash[5.23]. σε αυτήν την τεχνική παρουσιάζεται ένα σχετικά απλό μοντέλο μάθησης στο οποίο ο αλγόριθμος κρατά ένα μέσο όρο του αθροίσματος των επιβραβεύσεων. Σύμφωνα με τις Q συναρτήσεις οι πράκτορες επιλέγουν αιτιοκρατικά τις πράξεις οι οποίες στο παρελθόν είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Για τον υπολογισμό των μελλοντικών επιβραβεύσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία απλή μέθοδος προσωρινών διαφορών.

Το κύριο χαρακτηριστικό των εικονικών παιχνιδιών είναι ότι είναι ικανά να βρουν την ισορροπία τόσο σε zero-sum game όσο και σε κάποιες κλάσεις από general-sum games [5..23]. Ωστόσο ένα προφανές μειονέκτημα είναι ότι δεδομένου ότι υιοθετούν αιτιοκρατικές πολιτικές είναι αδύνατον να λειτουργήσουν με στοχαστικές πολιτικές. Για αυτό τον λόγο είναι σχετικά δύσκολο να εφαρμοστούν σε zero-sum game. Επιπλέον υπάρχει και ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα: δεδομένου ότι λειτουργούν σε ένα περιβάλλον κληρονομούμενης ασυνέχειας (inherent discontinuity), μία μικρή μεταβολή στα δεδομένα θα μπορούσε να διακόψει την συμπεριφορά[5..24].

5.3.4.3 Bayesian Framework.

Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για την ενισχυτική μάθηση για συστήματα πολλαπλών πρακτόρων με βάση τις αρχές των στοχαστικών παιχνιδιών χρειάζεται να συγκλίνουν σε μία επιθυμητή ισορροπία. Επιπλέον οι λύσεις στο περιβάλλον των πολλαπλών ευφυών πρακτόρων απαιτούν αυτήν την ισορροπία. Το αποτέλεσμα είναι ότι προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη πολιτική, είναι αναγκαίο οι πράκτορες να εντοπίσουν και να αναγνωρίσουν πρώτα την κατάσταση ισορροπίας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση προτάθηκε το Bayesian Framework [5.24,5.3.25]. Το πλαίσιο αυτό λειτουργεί βασίζεται στην ύπαρξη μοντέλου για το περιβάλλον. Με άλλα λόγια ο κάθε πράκτορας θα πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων τον τρόπο με τον οποίο οι πράξεις του επηρεάζουν την συμπεριφορά των άλλων πρακτόρων. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Μία βασική παραδοχή στο Bayesian Framework είναι ότι ο πράκτορας θα πρέπει να γνωρίζει τις πράξεις των λοιπών πρακτόρων, την τελική κατάσταση του συστήματος αλλά και των επιβραβεύσεων που θα λάβει από τους υπόλοιπους πράκτορες. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας προφανώς δεν επηρεάζει την λειτουργία ενός συστήματος με συνεργαζόμενους πράκτορες αλλά προφανώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση που υπάρχουν αντίπαλοι πράκτορες οι οποίοι δεν πρόκειται να δώσουν πληροφορίες για την κατάσταση τους πόσο μάλλον επιβραβεύσεις.

5.3.5 Αλγόριθμοι για ενισχυτική μάθηση σε περιβάλλον πολλαπλών ευφυών πρακτόρων.

Η βασική διαφορά μεταξύ συστημάτων ενός πράκτορα και πολλαπλών πρακτόρων βρίσκεται στο περιβάλλον. Στην περίπτωση των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων το περιβάλλον δεν είναι σταθερό δεδομένου ότι οι πράκτορες αλλάζουν την κατάσταση του συστήματος ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, με συνέπεια να μην ισχύει η ιδιότητα του μαρκοβιανού περιβάλλοντος. Η διαδικασία μάθησης του παραδοσιακού μονού πράκτορα βασιζόταν σε αυτήν την θεώρηση.

Για ανεξάρτητους πράκτορες η απλή θεωρία του Q-learning εφαρμόζεται επιτυχώς σε πολλά παραδείγματα. Πολλοί ερευνητές επιπλέον εφαρμόζουν το Q-learning κατευθειάν σε κάθε πράκτορα του συστήματος, αγνοώντας το γεγονός ότι πλέον το περιβάλλον δεν είναι σταθερό. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποιους αλγορίθμους οι οποίοι λαμβάνουν υπ' όψιν ότι το περιβάλλον δεν είναι σταθερό.

η έννοια του χρόνου, το πότε δηλαδή θα έχουμε την τελική κατάσταση και αυτό προφανώς σχετίζεται με την επάρκεια των καυσίμων.

- Χρησιμοποιείται μία συνάρτηση γενίκευσης των καταστάσεων με βάση τις πράξεις του κάθε ευφυή πράκτορα σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους RL όπου αθροίζονται οι καταστάσεις προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός όγκος. Ο σκοπός της συνάρτησης αυτής είναι να μειωθεί το μέγεθος του προβλήματος μετασχηματίζοντας το διάνυμα κατάσταση σε ένα μικρότερο που περιέχει μεγαλύτερη πληροφορία.

Ο αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο για συστήματα που έχουν πάρα πολλές καταστάσεις και η βασική διαφορά με τους κλασικούς RL αλγόριθμους είναι ότι ο ευφυής πράκτορας προσπαθεί να βοηθήσει την ομάδα του στην επίτευξη του στόχου της και δεν αποσκοπεί στην επίτευξη ενός προσωπικού του στόχου.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου θα πρέπει να ορίσουμε κάποιες έννοιες. Καταρχήν η **πολιτική** που ακολουθεί το σύστημα είναι μία χαρτογράφηση από τον χώρο καταστάσεων S στο χώρο των πράξεων A . Στο τελικό στάδιο όπου χρησιμοποιούμε το εκπαιδευμένο σύστημα ο κάθε ευφυής πράκτορας στην κατάσταση s που βρίσκεται, επιλέγει μία πράξη a που ανήκει στο χώρο A ανάλογα με την μακροπρόθεσμη επιβράβευση που θα έχει.

Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

Γενίκευση της κατάστασης:

Όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιείται μια συνάρτηση γενίκευσης f του χώρου προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα χώρο V μικρότερης διάστασης. Δηλαδή:

$$f : S \rightarrow V \quad (5.4.1)$$

Η πρωτοτυπία της μεθόδου έγκειται στο ότι αντί να χρησιμοποιηθεί μια συνάρτηση διακριτοποίησης του S , δημιουργούμε μία συνάρτηση f που βασίζεται στις συσχετίσεις e των διαφόρων καταστάσεων με το αποτέλεσμα των πράξεων:

$$e : S \times A \rightarrow V \quad (5.4.2)$$

Το e δεν περιέχει πληροφορία για το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα της κάθε πράξης αλλά για το βραχυπρόθεσμο. Για παράδειγμα εάν δεν είναι γνωστές οι πιθανότητες των μεταβάσεων από το μία κατάσταση στην άλλη το e μπορεί να είναι η πρόβλεψη του τι θα συμβεί αν ο ευφυής πράκτορας στην δεδομένη κατάσταση s που βρίσκεται, πραγματοποιήσει την πράξη a .

Η μέθοδος επιπλέον προβλέπει τον κατακερματισμό του S σε τμήματα ανάλογα με τον ρόλο του κάθε ευφυή πράκτορα. Ο κάθε ευφυής πράκτορας απαιτείται να μάθει μόνο το αποτέλεσμα των πράξεών του για τις καταστάσεις που τον αφορούν.

Η συνάρτηση αξίας:

Ο κάθε ευφυής πράκτορας στην δεδομένη κατάσταση u που βρίσκεται λαμβάνει μία επιβράβευση r για την πράξη a που επιλέγει και ανανεώνει την τιμή της συνάρτησης αξίας $Q(u,a)$ σύμφωνα με την σχέση:

$$Q(u, a) = Q(u, a) + \gamma(r - Q(u, a)) \quad (5.4.3)$$

Όπου γ είναι ο ρυθμός εκπαίδευσης.

Δεδομένου ότι ο χώρος δεν είναι πλήρως γνωστός (ο κάθε ευφυής πράκτορας γνωρίζει μόνο ένα κομμάτι της πληροφορίας) δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί δυναμικός προγραμματισμός. Η επιβράβευση βασίζεται σε κάποιο παρατηρήσιμο μέγεθος του περιβάλλοντος και τον μέγιστο αριθμό των βημάτων που θα πρέπει να πραγματοποιήσει. Για να γίνει αυτό κατανοητό θα επανέλθουμε στο πρόβλημα που μας αφορά, αυτό της εκκίνησης του συστήματος. Οι διάφορες μονάδες παραγωγής δεν γνωρίζουν πλήρως τι κάνει η κάθε μία αλλά μπορούν να παρατηρήσουν την τάση του συστήματος. Αν η τάση γίνει μηδέν μετά από κάποια ώρα προφανώς το σύστημα απέτυχε οπότε η τάση είναι το μέγεθος που παρατηρούμε. Επιπλέον ο μέγιστος αριθμός των βημάτων συσχετίζεται με τον χρονικό ορίζοντα που θα πρέπει το σύστημα να λειτουργεί απομονωμένα.

Επιλογή των πράξεων:

Ένα σημαντικό σημείο στο οποίο που θα πρέπει να σταθούμε είναι ότι από την φύση του συστήματος δεν είναι εφικτό να εκπαιδεύουμε σε πραγματικές συνθήκες τους ευφυείς πράκτορες. Η εκπαίδευση θα γίνεται κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του συστήματος που ο MGCC θα αναλαμβάνει να πει πότε αρχίζει η εικονική κατάσταση σφάλματος και πότε αυτή τελειώνει. Επιπλέον θα πρέπει να καθορίζει με συγκεκριμένους κανόνες αν το σύστημα θα λειτουργούσε σε κατάσταση εκκίνησης με την δεδομένη διαμόρφωση των μονάδων (τιμή τάσης 1 α.μ) ή όχι (τιμή τάσης 0 α.μ).

Ένα άλλο σημείο το οποίο θα μειώσει αρκετά την πολυπλοκότητα του συστήματος είναι η δημιουργία φίλτρων όπου θα αποκλείονται πράξεις που σίγουρα θα δημιουργήσουν πρόβλημα ή δεν θα προσφέρουν τίποτα στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Για παράδειγμα ένας τέτοιος κανόνας θα ήταν εάν άσχετα από την παραγωγή των ανανεώσιμων μονάδων θα έπρεπε μία τουλάχιστον συμβατική μονάδα να είναι οπωσδήποτε σε λειτουργία.

5.4 Η ενισχυτική μάθηση για τους ευφυείς πράκτορες που ελέγχουν το μικροδίκτυο.

Στις προηγούμενες παραγράφους δόθηκε μία γενική περιγραφή μίας σειράς αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης για περιβάλλον πολλαπλών ευφών πρακτόρων. Το βασικό πρόβλημα της ενισχυτικής μάθησης είναι ο καθορισμός του περιβάλλοντος αλλά και της συνάρτησης Q . Ο στόχος στον αλγόριθμο που θα παρουσιάσουμε πιο κάτω είναι να μειώσουμε το μέγεθος του πίνακα Q . Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί είναι ουσιαστικά το Q – Learning τροποποιημένο κατάλληλα με βάση κάποιες ιδέες που προήλθαν από το TPOT-RL.

Ο βασικός μας στόχος είναι να αποφύγουμε να εισαγάγουμε σαν μεταβλητές του πίνακα Q τις πράξεις των πρακτόρων. Έστω ότι οι πράκτορες που ελέγχουν φορτία να μπορούν να εκτελέσουν δύο πράξεις (άνοιγμα και κλείσιμο του φορτίου) και αντίστοιχα οι πράκτορες που ελέγχουν τις μονάδες παραγωγής εκτελούν τις πράξεις (παραγωγή και σταμάτημα) ενώ οι πράκτορες που ελέγχουν μονάδες αποθήκευσης τις πράξεις (παραγωγή, αποθήκευση και σταμάτημα). Οι πράξεις παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

	Τύπος	Πράξη
1	φορτίο	Άνοιγμα
		Κλείσιμο
2	μονάδες αποθήκευσης	Παραγωγή
		Παύση
		Αποθήκευση
3	μονάδες παραγωγής	Παύση
		Παραγωγή

Πίνακας 5.3 Οι δυνατές πράξεις των πρακτόρων.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε ένα αλγόριθμο σαν τον NashQ-Learning και είχαμε 10 φορτία και 10 μονάδες παραγωγής το μέγεθος του πίνακα Q θα ήταν $2^{10} * 2^{10} * N = 1048576 * N$ όπου N ο αριθμός που θα προέκυπτε από τις δυνατές καταστάσεις του περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος και οι όμοιοι του είναι αδύνατον να εφαρμοστούν στην πράξη για τα προβλήματα που θέλουμε να αντιμετωπίσουμε.

Όπως προαναφέρθηκε ο πυρήνας της μεθόδου που θα ακολουθήσουμε βασίζεται στο Q-Learning. Το βασικό θέμα που ανακύπτει είναι ότι ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί σε αιτιοκρατικό περιβάλλον. Αντίθετα το περιβάλλον των πολλαπλών ευφών πρακτόρων για μικροδίκτυα είναι στοχαστικό δεδομένου ότι το αποτέλεσμα μία πράξης ενός πράκτορα εξαρτάται άμεσα και από τις πράξεις των υπολοίπων μελών της ομάδας. Ωστόσο προκειμένου να αντιμετωπίσουμε το θέμα του μεγέθους του προβλήματος στον πίνακα Q δεν θα έχουμε σαν μεταβλητή τις πράξεις των πρακτόρων. Η μέθοδος που θα ακολουθηθεί βασίζεται στην εισαγωγή μιας επιπλέον μεταβλητής που θα περιγράφει της μεταβάσεις του συστήματος. Η ιδέα προήλθε από την διαδικασία της γενίκευσης των καταστάσεων του TPOT-RL και βασίζεται σε μια απλή σκέψη. Το σύστημα θέλουμε να μάθει την αξία μίας πράξης που έχει σαν αποτέλεσμα την μετάβαση από μία κατάσταση s σε μία νέα κατάσταση s' . Στο σύστημά μας η νέα μεταβλητή περιγράφει όλες τις δυνατές μεταβάσεις.

Έτσι λοιπόν το σύστημά μας αυτό που μαθαίνει είναι την αξία μίας πράξης για κάθε πιθανή μετάβαση.

$$Q(s, \underbrace{a1, a2, a3, \dots, an}_{Q(s, a1, tr)}) \quad (5.4.4)$$

Το τελευταίο θέμα που προκύπτει είναι πως γίνεται η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων της εκπαίδευσης των πρακτόρων. Για την ακρίβεια με ποιον τρόπο οι πράκτορες αποφασίζουν τις πράξεις τους; Όπως έχει αναφερθεί ο κύριος άξονας του αλγορίθμου είναι η μεταβλητή μετάβασης η οποία αποκαλύπτει τις πιθανές μεταβάσεις του συστήματος. Κατά την διάρκεια λοιπόν της χρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων οι πράκτορες καλούνται να αποφασίσουν συλλογικά την επιθυμητή μετάβαση. Για την ακρίβεια η επιλογή γίνεται με βάση την σχέση:

$$\text{Επιλεγόμενη Μετάβαση} = \underset{tr=1,2,3}{\operatorname{argmax}} \left(\sum_{tr} \max_a (Q(s, a, tr)) \right) \quad (5.4.5)$$

Δηλαδή για κάθε μετάβαση επιλέγεται οι πράξεις των πρακτόρων που μεγιστοποιούν τα αντίστοιχα Q και στην συνέχεια οι τιμές αυτές αθροίζονται. Από τις δυνατές μεταβάσεις επιλέγεται τελικά εκείνη που έχει την μέγιστη τιμή. Η χρήση της σχέσης αυτής θα φανεί στα παραδείγματα που ακολουθούν.

Ο αλγόριθμος αυτός θα γίνει πιο κατανοητός στην συνέχεια που θα παρουσιάσουμε τις δύο εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στην διατριβή αυτή. Η πρώτη εφαρμογή αφορά την αγορά ενέργειας και η δεύτερη την απομονωμένη λειτουργία του συστήματος.

5.4.1 Αγορά ενέργειας.

Στην εφαρμογή αυτή οι πράκτορες καλούνται να λειτουργήσουν σε μια αγορά ενέργειας. Το μοντέλο της αγοράς αυτής είναι πολύ απλό. Θεωρούμε ότι υπάρχει μία εταιρία πώλησης – αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (market operator) η οποία ανακοινώνει τιμές για την αγορά και την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πράκτορες καλούνται να συντονιστούν στην αγορά αυτή με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του συστήματος. Το μικροδίκτυο αγοράζει και πουλά συνολικά ενέργεια από το κεντρικό δίκτυο.

Το βασικό χαρακτηριστικό στην εφαρμογή αυτή είναι ότι η ζήτηση φορτίου δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί και αυτό διότι λειτουργούμε στην χαμηλή τάση. Στο επίπεδο αυτό το πότε ακριβώς ένας καταναλωτής θα ενεργοποιήσει τον θερμοσίφωνα του ή θα αρχίσει να μαγειρεύει δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο της κεντρικής παραγωγής ενός μεγάλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον να επισημάνουμε ότι δεν προχωρούμε σε οικονομική μελέτη του συστήματος και εύρεση μίας βέλτιστης λύσης. Στόχος μας είναι να εξετάσουμε αν οι πράκτορες συντονιζόμενοι μεταξύ τους μπορούν να λειτουργήσουν καλύτερα σε σχέση με το αν ο καθένας λειτουργούσε τελείως ανεξάρτητα.

Οι τιμές που λάβαμε για την εφαρμογή μας είναι το Amsterdam Power Exchange για το έτος 2003 [5.31] και αφορούν τις τιμές πώλησης ενέργειας από το δίκτυο προς το μικροδίκτυο. Οι τιμές αγοράς του δικτύου από το μικροδίκτυο θεωρούμε ότι είναι το 80% της τιμής πώλησης. Το πρώτο θέμα που ανακύπτει είναι το πώς εκφράζεται με μεταβλητές κατάσταση το περιβάλλον το περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκε μία μεταβλητή που εκφράζει την γενικότερη κατάσταση του περιβάλλοντος με τρεις καταστάσεις { Αγορά από το Δίκτυο, Μηδενική Ανταλλαγή με το δίκτυο , Πώληση προς το δίκτυο} και οι οποία περιγράφει τις τρεις αντίστοιχες δυνατές καταστάσεις. Για τον ίδιο τον πράκτορα εισάγεται και μία εσωτερική μεταβλητή που εκφράζει την εσωτερική κατάσταση του συστήματος και η οποία είναι το επίπεδο καυσίμων (ή κατάσταση φόρτισης αν αναφερόμαστε στις μπαταρίες) για τις μονάδες παραγωγής και ο υπολειπόμενος χρόνος λειτουργίας για τα φορτία. Για τα φορτία πρέπει να εξηγήσουμε ότι δεν μπορούμε να ελέγξουμε την ακριβή συμπεριφορά τους, δηλαδή όταν δοθεί εντολή για άνοιγμα δεν είναι απαραίτητο να ζητηθεί η εγκατεστημένη ισχύς. Για παράδειγμα εάν έχουμε ένα θερμοσίφωνα η μεταβλητή αυτή μας λέει ότι θα επιτρέψουμε την λειτουργία της συσκευής για κάποιο αριθμό ωρών. Όμως την ώρα που θα επιτρέψουμε την λειτουργία στον θερμοσίφωνα δεν είναι απαραίτητο ότι ο καταναλωτής θα τον ενεργοποιήσει. Το αυτό και για όλα τα φορτία που ελέγχουμε.

Επιπλέον έχουμε τις μεταβλητές μετάβασης που φαίνονται στον πίνακα 5.6. όπως έχουμε προαναφέρει για λόγους απλοποίησης έχουμε κρατήσει τις λογικές μεταβάσεις. Η διαδικασία για την απόρριψη κάποιων μεταβάσεων βρίσκεται στο γεγονός ότι κάποιες αυτές δεν έχουν λογική στην λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα θέλουμε να αποτρέψουμε την περίπτωση ανοιγοκλεισίμων μονάδων.

Περιβάλλον	
1	Αγορά από το δίκτυο
2	Μηδενική ανταλλαγή με το δίκτυο
3	Πώληση προς το δίκτυο

Πίνακας 5.4. Οι μεταβλητές του περιβάλλοντος.

Πράκτορας		Πράξεις
1	Μπαταρία	Παραγωγή
		Αποθήκευση
		Σταμάτημα
2	Μονάδα παραγωγής (diesel)	Παραγωγή
		Σταμάτημα
3	Φορτίο	Λειτουργία
		Σταμάτημα

Πίνακας 5.5 Οι δυνατές πράξεις του κάθε πράκτορα.

Περιβάλλον		Μετάβαση	Επιτρεπόμενες Μεταβάσεις
1	Αγορά από το δίκτυο	Ουδέτερη	A ($\rightarrow A$)
		Κάτω	B ($\rightarrow E$)
		Πολύ κάτω	C ($\rightarrow H$)
2	Μηδενική ανταλλαγή με το δίκτυο	Πάνω	D ($\rightarrow A$)
		Ουδέτερη	E ($\rightarrow E$)
		Κάτω	F ($\rightarrow I$)
3	Πώληση προς το δίκτυο	Πολύ πάνω	G ($\rightarrow C$)
		Πάνω	H ($\rightarrow E$)
		Ουδέτερη	I ($\rightarrow I$)

Πίνακας 5.6 Οι μεταβλητές του περιβάλλοντος και οι δυνατές μεταβάσεις.

Οπότε ο πίνακας Q του προβλήματος έχει τα εξής στοιχεία:

- Μονάδες αποθήκευσης.

$Q(\text{Ορίζοντας}\{24\}, \text{Καύσιμα}\{3\}, \text{Περιβάλλον}\{3\}, \text{Μετάβαση}\{3\}, \text{Πράξη}\{3\}) = 1944$ στοιχεία.

- Μονάδες Παραγωγής.

$Q(\text{Ορίζοντας}\{24\}, \text{Καύσιμα}\{3\}, \text{Περιβάλλον}\{3\}, \text{Μετάβαση}\{3\}, \text{Πράξη}\{2\}) = 1296$ στοιχεία.

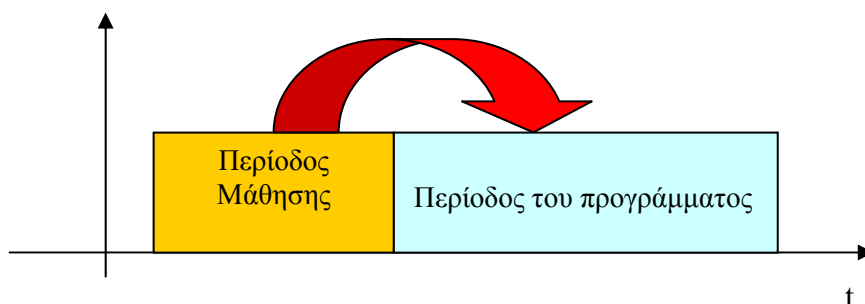
- Φορτία.

$Q(\text{Ορίζοντας}\{24\}, \text{Περιβάλλον}\{3\}, \text{Υπολειπομένη Ενέργεια}\{3\}, \text{Μετάβαση}\{3\}, \text{Πράξη}\{2\}) = 1296$ στοιχεία.

Η μεταβλητή { Υπολειπομένη Ενέργεια} στα φορτία παρουσιάζει την ενέργεια που θα πρέπει να προσφερθεί στα φορτία κατά την διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα καλείται να μάθει την αξία των πράξεων στις διάφορες μεταβάσεις του συστήματος. Η ενδιάμεση επιβράβευση r περιγράφεται από την σχέση:

$$r = \text{Έσοδο-Κόστος- ποινή} \quad (5.4.1)$$

Όπου Έσοδο είναι το κέρδος από την πώληση ενέργειας ή με αρνητικό πρόσημο από την αγορά ενέργειας. Το Έσοδο υπολογίζεται από την συνολική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή αν το μικροδίκτυο παρέχει ενέργεια προς το κυρίως δίκτυο τότε η τιμή αυτή υπολογισμών είναι η τιμή με την οποία πουλάει προς το δίκτυο και αντίστοιχα συμβαίνουν όταν ζητάει από το δίκτυο ενέργεια. Το κόστος είναι το κόστος λειτουργίας της μονάδος που σε ότι αφορά τις μπαταρίες το θεωρούμε μηδενικό. Η ποινή είναι με τιμή ποινής που λαμβάνει το σύστημα για κάποιες μη επιθυμητές καταστάσεις. Οι τιμές του γ είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέγιστη τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο.



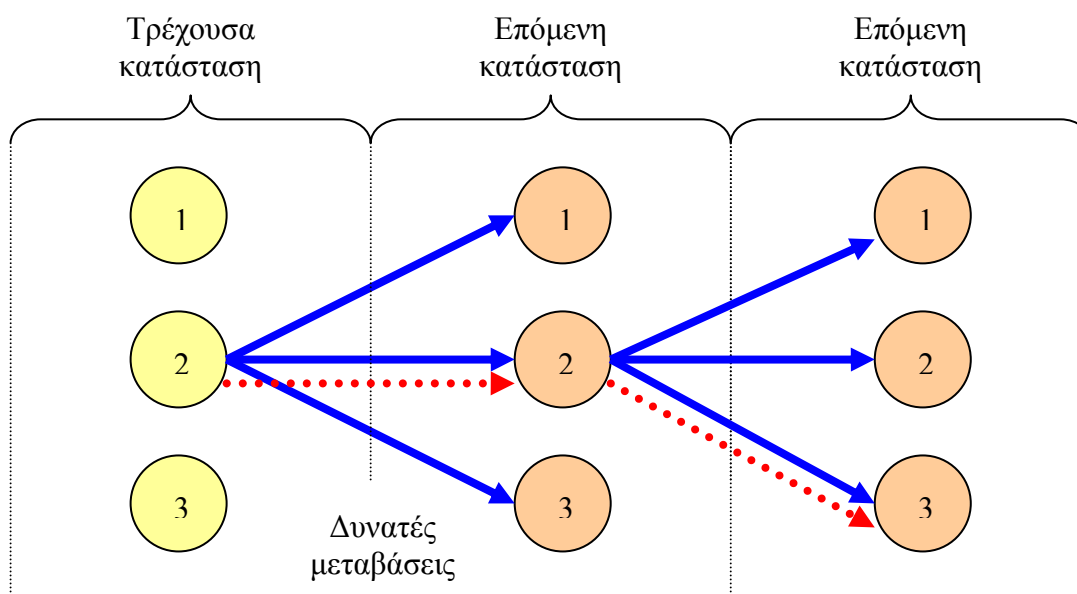
Σχήμα 5.1 Πρόγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου.

Στο σχήμα 5.4.1 φαίνεται συνοπτικά ο χρόνος στον οποίο λειτουργεί ο αλγόριθμος. Η περίοδος μάθησης λαμβάνει χώρα πριν από την χρονική περίοδο για την οποία αντιστοιχούν οι τιμές που ανακοινώνει ο εταιρία πώλησης ενέργειας (market operator).

Το επόμενο θέμα που προκύπτει είναι ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα. Η απάντηση έρχεται αφού τεθεί πρώτα η εξής ερώτηση:

«Τι έχουν μάθει οι πράκτορες;»

Δηλαδή ποια πληροφορία περιέχουν οι πίνακες Q .



Σχήμα 5.2 Πιθανές μεταβάσεις του προγράμματος.

Σε κάθε κατάσταση του συστήματος οι πράκτορες έχουν να επιλέξουν μεταξύ τριών δυνατών μεταβάσεων. Η επιλεγόμενη μετάβαση είναι συλλογική απόφαση και επιλέγεται η μετάβαση που μεγιστοποιεί το άθροισμα των αντίστοιχων τιμών των πινάκων Q των πρακτόρων. Δηλαδή

$$\text{Επιλεγόμενη Μετάβαση} = \operatorname{argmax}_{tr} \left(\sum_{tr=1,2,3} \max_a (Q(s, a, tr)) \right) \quad (5.4.2)$$

Με τον τρόπο αυτό εισάγεται στο σύστημα η συνολική γνώση των πρακτόρων. Οι πράκτορες πηγαίνουν προς την κατεύθυνση η οποία θα τους μεγιστοποιήσει το κέρδος. Να επισημάνουμε ότι οι τιμές κάθε πίνακα Q περιλαμβάνουν και τις επιβραβεύσεις από τα μελλοντικά μονοπάτια που θα ακολουθήσει ο πράκτορας.

5.4.1.1 Αποτελέσματα από την λειτουργία σε αγορά ενέργειας.

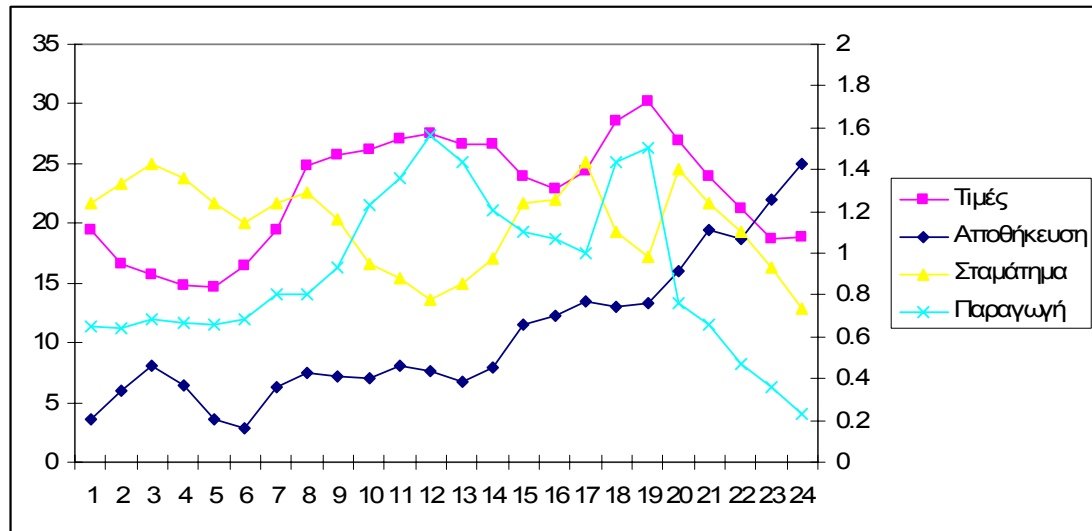
Στα επόμενα γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για μία συγκεκριμένη μέρα. Το σύστημα μας έχει

- 2 μονάδες diesel 3kW
- 2 μονάδες diesel 10kW
- 2 συστοιχίες μπαταριών 3kW με 50kWh μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια
- 2 συστοιχίες μπαταριών 10kW με 150kWh μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια
- 10 φορτία από 1kW έως 10kW (συνολική ζήτηση 1000-1500kWh)
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 5kW (μέγιστη παραγωγή 50kWh)

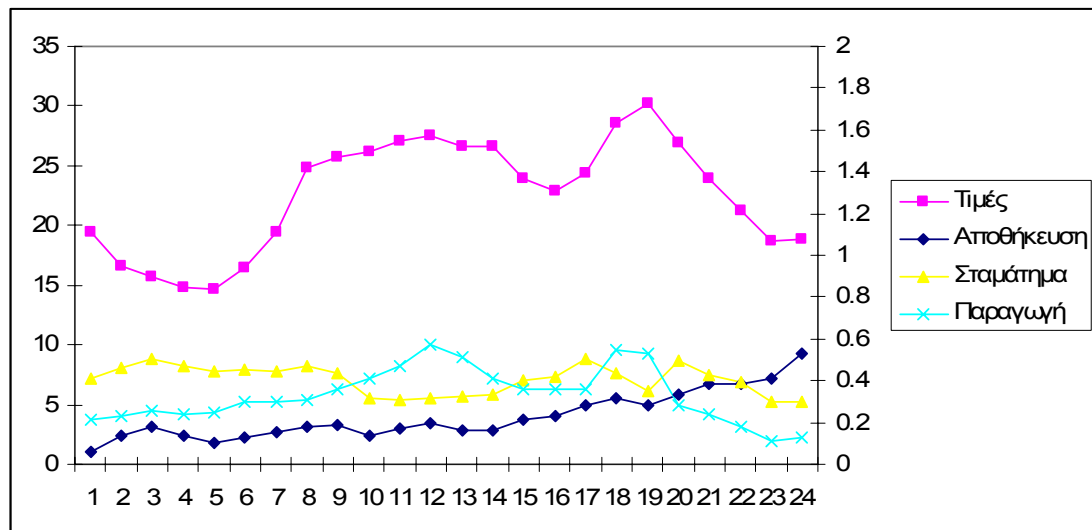
Τα κόστη λειτουργίας ελήφθησαν ενδεικτικά από αντίστοιχο πίνακα του [1.2.3] και ουσιαστικά μας αφορά η μονάδα diesel που θεωρούμε κόστος παραγωγή 6c€/kWh. Για τις μπαταρίες δεν υπάρχει κόστος λειτουργίας αλλά θεωρούμε ένα συντελεστή απωλειών στον κύκλο φόρτισης εκφόρτισης που είναι 90% της kWh.

Για το παράδειγμά μας ο αρχικός ρυθμός μάθησης ήταν $k=0.95$ και ο παράγοντας μείωσης (discount factor) $\gamma=0.1$. Ο αλγόριθμος συγκλίνει στην τελική λύση μετά από 20000 επαναλήψεις το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στον πίνακα Q . Προκειμένου να ελέγξουμε ότι όντως συγκλίνει ο αλγόριθμος έγιναν πολλαπλές επαναλήψεις με διαφορετικές αρχικοποιήσεις του πίνακα Q όπως επίσης και πολλαπλές επαναλήψεις για το αυτό πρόγραμμα. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων κατά την διάρκεια της μάθησης ο αλγόριθμος για κάθε πράκτορα απαιτεί περί τα 40 δευτερόλεπτα σε ένα υπολογιστή PC 3GHz για να ολοκληρωθεί.

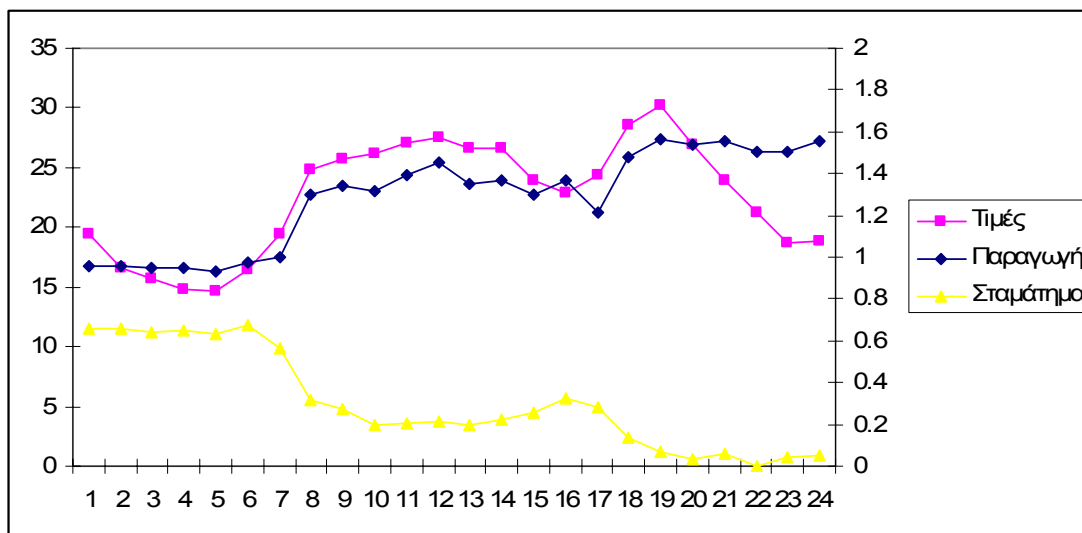
Για την εκτέλεση του αλγορίθμου αναπτύχθηκε κώδικας σε VB.NET. Ενδεικτικά αποτελέσματα είναι τα εξής:



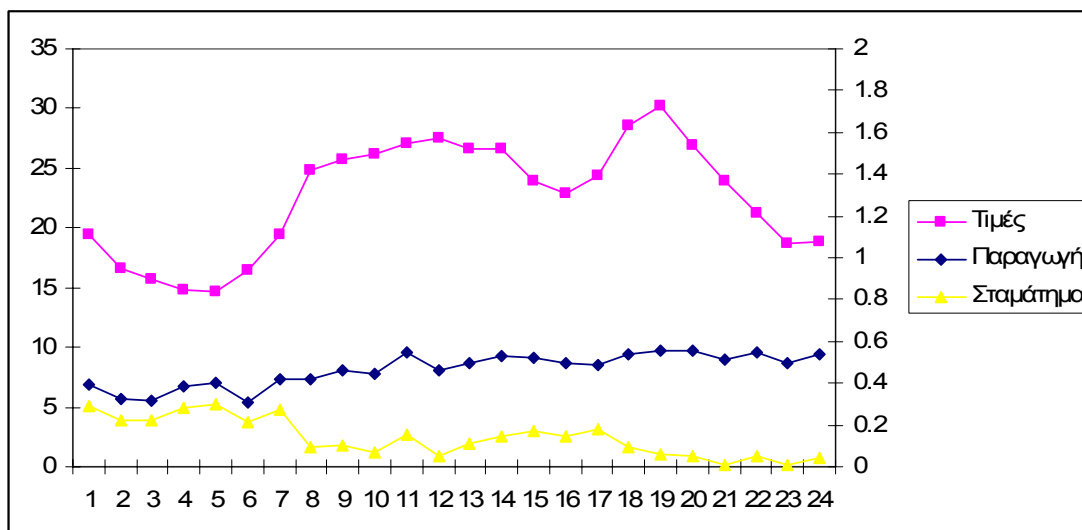
Γράφημα 5.3 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για 30 Ιανουαρίου 2003 και μία μπαταρία 10kW (αρχικό SOC=100%).



Γράφημα 5.4 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για 30 Ιανουαρίου 2003 και μία μπαταρία 3kW (αρχικό SOC=100%).



Γράφημα 5.5 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για 30 Ιανουαρίου 2003 και μία μονάδα diesel 10kW.



Γράφημα 5.6 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για 30 Ιανουαρίου 2003 και μία μονάδα diesel 3kW.

Τα αποτελέσματα αυτά προφανώς από μόνα του δεν δίνουν εύκολα κάποια σημαντική πληροφορία. Για τον σκοπό αυτό προχωρήσαμε σε μία επιπλέον αξιολόγηση. Προχωρήσαμε σε μία προσομοίωση του συστήματος σε κατάσταση λειτουργίας μετά την εκμάθηση για διάφορες ημερομηνίες (30 Ιανουαρίου έως 10 Φεβρουαρίου). Το φορτίο μεταβαλλόταν με τυχαίο τρόπο ανάλογα με τον τύπο του χωρίς να υπερβαίνει την εγκατεστημένη μέγιστη ισχύ. Επιπλέον λάβαμε σαν ξεχωριστές περιπτώσεις την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Η βαθμός απόδοσης των μπαταριών όπως έχουμε αναφέρει θεωρείται 0.9. Επιπλέον στην τρέχουσα ώρα η κατανομή της ισχύος και της ενέργειας γίνεται με μία απλή μέθοδο που βασίζεται στην λίστα προτεραιότητας. Τέλος αναπτύχθηκε και ένα ανεξάρτητο πρόγραμμα που βγάζει για κάθε μονάδα την ένα προγραμματισμό για την παραγωγή της και ο σκοπός ήταν να αντιπαραβάλουμε αυτήν την διαδικασία σε σχέση με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε. Ουσιαστικά προσπαθούμε να κατανοήσουμε τι έμαθαν οι πράκτορες κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης τους.

Πέρα από τα καθαρά οικονομικά δεδομένα αυτό που ελέγχουμε περισσότερο και μας δίνει πληροφορίες για το τι έμαθαν οι πράκτορες είναι αν στο τέλος της ημέρας είχαμε κέρδος από την πώληση. Το αποτέλεσμα κάθε προσομοίωσης ήταν θετικό αν στο τέλος της ημέρας είχαμε κέρδος από πώληση ενέργειας για το σύστημα ενώ αρνητικό εάν το σύστημα πλήρωσε για να αγοράσει ενέργεια από το δίκτυο. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

	Κατάσταση Φόρτισης Μπαταριών	Αγορά Ενέργειας	Ποσοστά	Κέρδος
1	Υψηλή	Πώληση	95% (91%)	4.1%
		Αγορά	5% (9%)	
2	Μέτρια	Πώληση	82% (77%)	6.3%
		Αγορά	18% (23%)	
3	Χαμηλή	Πώληση	47% (42%)	6.8%
		Αγορά	53% (58%)	

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Εντός παρενθέσεως είναι τα αποτελέσματα του απλού αλγορίθμου για τον προγραμματισμό των μονάδων ενώ στην τρίτη στήλη φαίνονται το σχετικό κέρδος από την εφαρμογή του αλγορίθμου. Να επισημάνουμε πάλι ότι δεν κάνουμε οικονομική μελέτη του συστήματος.

Από τα αποτελέσματα αυτά ενδιαφέρον έχει η τρίτη περίπτωση που μας λέει ότι όταν το σύστημα ξεκινά από χαμηλή φόρτιση τότε στις περισσότερες περιπτώσεις αναγκάζομαστε να αγοράσουμε ενέργεια από το δίκτυο. Το σενάριο αυτό είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον. Ο λόγος είναι ότι την πρώτη μέρα το σύστημα θα λειτουργήσει με αρχική κατάσταση φόρτισης 100% ωστόσο στο τέλος της μέρας κατά πάσα πιθανότητα η κατάσταση φόρτισης θα είναι χαμηλά οπότε την επόμενη μέρα το σύστημα ξεκινά με χαμηλή φόρτιση. Προφανώς ξεκινώντας με χαμηλή φόρτιση τα περιθώρια να κινηθεί το σύστημα είναι περιορισμένα.

Για τον λόγο αυτό τρέξαμε ξανά τον αλγόριθμο βάζοντας μία ποινή στην περίπτωση που καταλήγουμε σε χαμηλή φόρτιση στο τέλος της ημέρας. Τα αποτελέσματα από αυτές τις προσομοιώσεις φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

	Κατάσταση Φόρτισης Μπαταριών	Αγορά Ενέργειας	Ποσοστά
1	Υψηλή	Πώληση	81%
		Αγορά	19%
2	Μέτρια	Πώληση	77%
		Αγορά	23%

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς χειρότερα δεδομένου ότι το σύστημα προσπαθεί να φορτίσει τις μπαταρίες στο τέλος της ημέρας ωστόσο είναι σαφώς καλύτερα σε βάθος χρόνου αφού για όλες σχεδόν τις μέρες πλέον το σύστημα κινείται σε αυτές τις καταστάσεις. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε συγκριτικά στοιχεία.

Το βασικό σχόλιο πλέον είναι ότι το σύστημα μπορεί να μαθαίνει τον τρόπο που θα συμπεριφερθεί σε κάθε κατάσταση. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η γνώση του περιβάλλοντος συνολικά αλλά και ο συντονισμός των πρακτόρων έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία του συστήματος.

Το επόμενο βεβαία ερώτημα είναι σε τι είναι καλύτερος ο αλγόριθμος αυτός από έναν συμβατικό «κεντρικό» αλγόριθμο με γενετικούς αλγορίθμους ή κάποια άλλη μέθοδο

βελτιστοποίησης και προφανώς γιατί δεν έγινε απ' ευθείας σύγκριση με μία τέτοια μέθοδο. Η απάντηση έγκειται στην στοχαστικότητα του φορτίου. Ένας συμβατικός αλγόριθμος θα έδινε την βέλτιστη λύση αν ξέραμε εκ των προτέρων το φορτίο κάτι που είναι φύση αδύνατο στα προβλήματα που μελετάμε. Για παράδειγμα σε ένα σπίτι δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί το πότε θα ανοίξει ο καταναλωτής τον θερμοσίφωνα. Η σύγκριση θα μπορούσε να γίνει μόνο με αλγορίθμους που λαμβάνουν υπ' όψιν την πιθανοτική υφή του συστήματος.

Τέλος σε καμία περίπτωση δεν θεωρούμε ότι η λύση αυτή είναι η βέλτιστη. Η χρήση ενός εργαλείου που θα βασίζεται στην πιθανοτική οικονομική κατανομή και προγραμματισμό θα μας επιτρέπει να ξέρουμε ποια είναι η βέλτιστη λύση. Στην συνέχεια επαναπρογραμματίζοντας τις επιβραβεύσεις και τις ποινές πιθανόν να μπορούμε να προσεγγίσουμε την λύση αυτή.

5.4.2 Λειτουργία σε κατάσταση αποσύνδεσης από το κεντρικό δίκτυο.

Η δεύτερη εφαρμογή που θα παρουσιαστεί στην εργασία αυτή είναι η λειτουργία του συστήματος σε κατάσταση αποσύνδεσης από το κεντρικό δίκτυο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα δύο πιθανών σεναρίων:

1. Εκκίνηση μετά από σφάλμα στο δίκτυο.
2. Αποσύνδεση από το κυρίως δίκτυο.

Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια αφορούν και τις δύο περιπτώσεις.

5.4.2.1 Εκκίνηση μετά από σφάλμα στο δίκτυο.

Στα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης το φαινόμενο της διακοπής της ισχύος μετά από ένα σφάλμα είναι ένα πιθανό φαινόμενο. Στην περίπτωση μας δεν μας ενδιαφέρει η προέλευση του σφάλματος και αν αυτό είναι εκτεταμένο ή μη, αφού αυτό που μας αφορά είναι εάν ο ζυγός στον οποίο είναι συνδεδεμένο το μικροδίκτυο έχει τάση ή όχι.

Ο στόχος του συστήματος μετά το σφάλμα είναι να ανοίξει ο διακόπτης του σημείου ζεύξης με το δίκτυο και στην συνέχεια να τεθούν σε εκκίνηση οι μονάδες και να τροφοδοτηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα φορτία. Το σύστημα των μικρών διεσπαρμένων μονάδων έχει διαφορετικές δυσκολίες στην εκκίνηση του σε σχέση με την εκκίνηση ενός μεγάλου δικτύου [5.32-35].

Η πρώτη δυσκολία είναι ότι δεν υπάρχει εκπαιδευμένος χειριστής προκειμένου να κρίνει ποιοι είναι οι κατάλληλοι χειρισμοί κάθε φορά. Στα μεγάλα συστήματα οι χειριστές εκπαιδεύονται τακτικά για το πώς θα αντιμετωπίσουν ένα σφάλμα και επιπλέον υπάρχει ένα επιτελείο μηχανικών που προσομοιώνει το σύστημα για διάφορα σενάρια σφαλμάτων προκειμένου εκ των προτέρων να γνωρίζουν ποιες θα πρέπει να είναι οι κατάλληλες κινήσεις. Δεν αγνοούμε σε καμία περίπτωση βέβαια ότι η πολυπλοκότητα των δικτύων που μελετάμε δεν συγκρίνεται σε καμία περίπτωση με αυτή ενός μεγάλου συστήματος.

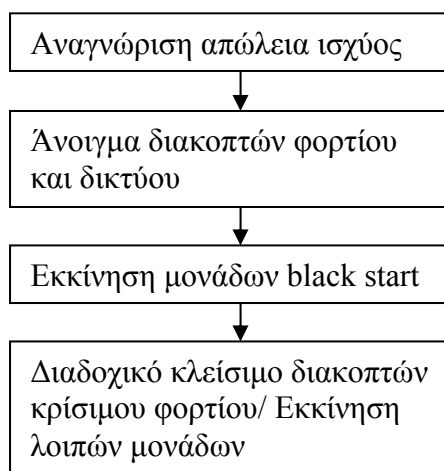
Η δεύτερη δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι δεν έχουμε πλήρη πληροφορία για το τι συμβαίνει σε διάφορα εσωτερικά μέρη του δικτύου. Ενώ σε ένα μεγάλο δίκτυο έχουμε μετρήσεις σε κάθε ένα μεγάλο υποσταθμό, αντίθετα σε πολλά φορτία και υποσταθμούς στην χαμηλή τάση είναι πιθανόν να μην έχουμε μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Αυτό δημιουργεί μία ασάφεια σε σχέση με το τι θα συμβεί αν κλείσουν κάποιοι διακόπτες. Σαν σύμβαση από

εδώ και μπρος θα θεωρούμε ότι διαχειριζόμαστε μόνο τα φορτία που έχουν μετρήσεις και ελέγχονται πλήρως ενώ τα υπόλοιπα θα μπαίνουν στο σύστημα μόνο εάν αποκατασταθεί η τάση στον ζυγό του κυρίως δικτύου. Μία επιπλέον ασάφεια προέρχεται από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών όπου η ισχύς τους δεν είναι προκαθορισμένη αλλά στοχαστικό μέγεθος. Μια άλλη παράμετρος την οποία αγνοούν πλήρως οι διαδικασίες αποκατάστασης του δικτύου στην μέση και την υψηλή τάση είναι ότι στα μικρά δίκτυα δεν μας απασχολεί μόνο το θέμα της διαθέσιμης ισχύος ή της φόρτισης των γραμμών αλλά και αυτό της διαθέσιμης ενέργειας. Τα καύσιμα ή τα αμπερώρια κάποιων μπαταριών δεν είναι άπειρα αλλά πεπερασμένα και πιθανόν πολύ περιορισμένα. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική εάν υπάρχει η απαίτηση το σύστημα να μπορεί να δουλέψει απομονωμένα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Ως εκ τούτου προκύπτουν τρεις σημαντικές απαιτήσεις:

1. Κάθε στιγμή πριν το σφάλμα θα πρέπει να υπάρχει επάρκεια πόρων προκειμένου σε περίπτωση που αυτό συμβεί να μπορεί να τροφοδοτηθεί το σύστημα για μία προσυμφωνημένη χρονική περίοδο.
2. Θα πρέπει να γίνεται σωστή χρήση των μονάδων παραγωγής έτσι ώστε να μπορούμε να παρέχουμε στο σύστημα την μέγιστη δυνατή ενέργεια. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι μία μονάδα diesel θα πρέπει να λειτουργεί στο οικονομικό επίπεδο που πιθανόν να μην είναι το μέγιστο. Ανάλογα ισχύουν με το ρυθμό εκφόρτισης των μπαταριών ή την χρήση κυψελών καυσίμου.
3. Μία σημαντική απαίτηση είναι η διαχείριση των αλλαγών του συστήματος. Σε ένα μεγάλο δίκτυο μεταφοράς η εγκατάσταση μίας νέας μονάδας ή ενός υποσταθμού ακολουθείται από μία σειρά από προσομοιώσεις σε ότι αφορά τις επιπτώσεις στο σύστημα. Στα δίκτυα που μελετάμε κάτι τέτοιο δεν είναι πρακτικά εφικτό για λόγους κυρίως που σχετίζονται με το κόστος. Θα πρέπει λοιπόν το σύστημα από μόνο του να καταλαβαίνει την αλλαγή και να προσαρμόζεται στα νέα δεδομένα.

Στην συνέχεια στο σχήμα 5.4.3 δίδεται το βασικό διάγραμμα ροής της απλής διαδικασίας εκκίνησης του συστήματος.



Σχήμα 5.7 Βήματα διαδικασίας εκκίνησης συστήματος.

Αναλυτικά έχουμε:

- Αναγνώριση απώλειας ισχύος: Στη φάση αυτή το σύστημα θα πρέπει να διαπιστώσει ότι όντως έχει συμβεί διακοπή τάσης, το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν τις ενδείξεις όχι μόνο ενός οργάνου μέτρησης αλλά περισσότερων του ενός. Σε διαφορετική περίπτωση είναι πιθανόν να παραπλανηθούμε από βλάβη στο όργανο. Επιπλέον στην φάση αυτή θα πρέπει να δοθούν εντολές για παύση των λοιπών δραστηριοτήτων του συστήματος (π.χ. αγορά ενέργειας).
- Άνοιγμα διακοπών φορτίου και δικτύου: Στη φάση αυτή δίδονται εντολές για δύο βασικές ενέργειες οι οποίες στοχεύουν στον να μην υπάρξει μεγάλη ζήτηση ισχύος κατά την εκκίνηση των μονάδων.
- Εκκίνηση μονάδων black start: Στην φάση αυτή εκκινούν οι μονάδες που έχουν την δυνατότητα να ξεκινήσουν με μηδενική τάση στην έξοδο. Αντίθετα άλλες μονάδες όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να ξεκινήσουν από μόνες τους.
- Διαδοχικό κλείσιμο διακοπών κρίσιμου φορτίου/ Εκκίνηση λοιπών μονάδων: Τα φορτία που είναι κρίσιμα και πρέπει να τροφοδοτηθούν ανοίγουν διαδοχικά (με βαθμό προτεραιότητας) προκειμένου να μην υπάρξει υπερβολική ζήτηση ισχύος. Παράλληλα εκκινούν και οι λοιπές μονάδες παραγωγής.

Σε κάθε περίπτωση για τα συστήματα που μελετάμε η αρχική εκκίνηση είναι σχετικά απλή υπόθεση υπό τον όρο ότι υπάρχει επάρκεια ισχύος για τα κρίσιμα φορτία.

5.4.2.2 Απομονωμένη λειτουργία.

Η μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία είναι και αυτή μία σύνθετη λειτουργία του συστήματος που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί από τους πράκτορες. Το βασικό πρόβλημα σε σχέση με την οπτική γωνία που αντιμετωπίζουμε τα θέματα εδώ είναι οι μεγάλες ανισορροπίες στην ισχύ που μπορεί να προκύψουν από την μετάβαση. Σε αυτήν την περίπτωση ο στόχος είναι οι πράκτορες να γνωρίζουν εκ των προτέρων το τι πρέπει να γίνει.

5.4.2.3 ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έχει σαν στόχο την ομαλή λειτουργία του συστήματος κατά την διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας είτε αυτή προήλθε από εκκίνηση μετά από σφάλμα είτε από σκόπιμη απομόνωση. Ο στόχος είναι το σύστημα ανά πάσα στιγμή να ξέρει πως θα πρέπει να χειριστεί μία τέτοια κατάσταση. Προφανώς δεν λαμβάνουμε άμεσα υπ' όψιν τα ταχέα φαινόμενα δεδομένου ότι οι χρόνοι απόκρισης των πρακτόρων το απαγορεύουν. Έμμεσα αντιμετωπίζονται αυτά θεωρώντας την παρουσία μπαταριών που διατηρούν ένα ποσό εφεδρείας προκειμένου να αντιμετωπίσουν ξαφνικές αλλαγές στο φορτίο. Επιπλέον οι μπαταρίες μπορούν να υπερφορτιστούν για ένα σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να καλύψουν πολύ έκτακτες ανάγκες του συστήματος.

Σε αυτό το πρόβλημα το βασικό θέμα είναι η απουσία του δικτύου που σημαίνει ότι οι μονάδες επιδρούν η μία στην άλλη. Για παράδειγμα εάν μία μονάδα diesel σταματήσει να λειτουργεί τότε μια άλλη μονάδα θα πρέπει να αυξήσει την παραγωγή της προκειμένου να εξασφαλισθεί η επάρκεια στο δίκτυο. Για να λυθεί αυτό το αλγοριθμικό πρόβλημα εισάγεται μια εικονική μονάδα ταλάντωσης η οποία απορροφά τις όποιες αλλαγές. Η μονάδα αυτή σε ένα πραγματικό σύστημα θα διαχειρίζεται ουσιαστικά την εφεδρεία του συστήματος.

Στο πρόβλημα αυτό η μεταβλητή του συστήματος είναι η κατάσταση του ζυγού ταλάντωσης και η οποία έχει τρεις τιμές: {Το σύστημα λαμβάνει από τον Ζυγό, Καμία Ανταλλαγή, Προσφέρει προς τον ζυγό}. Και σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνεται ένας χρονικός ορίζοντας 24 ωρών.

Ο πίνακας μεταβάσεων έχει σε αυτήν την περίπτωση τρεις μεταβλητές {Καλή, Ουδέτερη, Κακή} και περιγράφει τις πιθανές μεταβάσεις του συστήματος. Αν το σύστημα μεταβεί σε μία καλύτερη κατάσταση τότε η μετάβαση θεωρείται ως καλή ενώ αν το σύστημα μεταβεί σε μία λιγότερο ασφαλή κατάσταση τότε θεωρείται ως κακή. Μη ασφαλής θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία άμεσα ή μετά από λίγα βήματα δεν θα μπορούμε να εξυπηρετήσουμε το φορτίο. Αντίστοιχα ασφαλής είναι αν στο τέλος της περιόδου το σύστημα εξυπηρετείται σωστά. Ο σκοπός λοιπόν είναι και εδώ να δοθεί μία εκτίμηση της επόμενης μετάβασης του συστήματος. Ο συνοπτικά οι επιτρεπόμενες μεταβάσεις φαίνονται στον πίνακα 5.10 Οι υπόλοιπες μεταβλητές του συστήματος είναι όμοιες με αυτές του της προηγούμενης εφαρμογής.

Περιβάλλον	
1	Αγορά από το δίκτυο
2	Μηδενική ανταλλαγή με το δίκτυο
3	Πώληση προς το δίκτυο

Πίνακας 5.9 Οι μεταβλητές του περιβάλλοντος.

Πράκτορας		Πράξεις
1	Μπαταρία	Παραγωγή
		Αποθήκευση
		Σταμάτημα
2	Μονάδα παραγωγής (diesel)	Παραγωγή
		Σταμάτημα
3	Φορτίο	Λειτουργία
		Σταμάτημα

Πίνακας 5.10 Οι δυνατές πράξεις του κάθε πράκτορα.

Περιβάλλον		Μεταβλητή Μετάβασης	Μετάβαση
1	Το σύστημα λαμβάνει από τον Ζυγό	Καλή	A ($\rightarrow A$)
		Ουδέτερη	B ($\rightarrow B$)
		Κακή	C ($\rightarrow D$)
2	Καμία Ανταλλαγή	Καλή	D ($\rightarrow C$)
		Ουδέτερη	E ($\rightarrow E$)
		Κακή	F ($\rightarrow G$)
3	Προσφέρει προς τον ζυγό	Καλή	G ($\rightarrow F$)
		Ουδέτερη	H ($\rightarrow H$)
		Κακή	I ($\rightarrow I$)

Πίνακας 5.11 Μεταβλητές Περιβάλλοντος και Μετάβασης.

Η ενδιάμεση επιβράβευση για τις πράξεις του κάθε πράκτορα δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

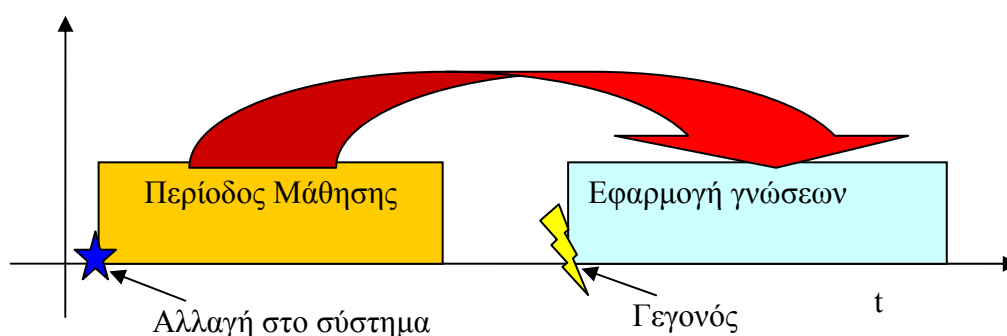
$$r = N * (\text{Επιβράβευση Μετάβασης} + \text{Επιβράβευση Τελικής Κατάστασης} + K)$$

όπου

- Το N είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης και είναι ίσος με το πηλίκο της διαίρεσης της ισχύος της μονάδος προς την συνολική εγκατεστημένη ισχύ. Ανάλογα σχηματίζεται και για τα φορτία. Ο βασικός ρόλος του παράγοντα αυτού θα αναλυθεί στην συνέχεια.
- Η Επιβράβευση Μετάβασης έχει τιμή $1/24$ αν το σύστημα πάει σε μία κατάσταση καλύτερη άμεσα, μηδέν αν δεν έχουμε μεταβολή της κατάστασης και $-1/24$ αν μεταβαίνουμε σε χειρότερη κατάσταση.
- Η επιβράβευση Τελική Κατάσταση έχει τιμή 1 αν το σύστημα είναι ασφαλές στο τέλος της περιόδου και -1 αν δεν είναι. Με τον όρο ασφαλές εννοούμε το σύστημα να είναι σε λειτουργία με επάρκεια ενέργειας την τελευταία ώρα λειτουργίας.
- Η παράμετρος K είναι διαφορετική για τα φορτία και τις μονάδες παραγωγής. Για τα φορτία παρουσιάζει τις ώρες που αυτά θα πρέπει να λειτουργήσουν ενώ για τις μονάδες παραγωγής τα διαθέσιμα καύσιμα.

Η μεταβλητή K και η {Επιβράβευση Μετάβασης} μπήκαν στον υπολογισμό της επιβράβευσης μετά τα αρχικά τρεξίματα και σκοπό έχουν να βοηθήσουν το σύστημα να βρει το σωστό μονοπάτι λύσεων. Η παρουσία τους θα εξηγηθεί κατά την διάρκεια της παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Ο αλγόριθμος τρέχει στην περίπτωση που υπάρχει μία σημαντική αλλαγή στο σύστημα όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα και ο σκοπός είναι να είναι έτοιμος να ανταπεξέλθει στο όποιο γεγονός συμβεί στην συνέχεια.



Σχήμα 5.8 Πρόγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου.

Και στην περίπτωση αυτή κατά την διάρκεια της χρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων η επιλογή των μεταβάσεων γίνεται με βάση το συνολικό όφελος του συστήματος. Δηλαδή

$$\text{Επιλεγόμενη Μετάβαση} = \operatorname{argmax}_{tr} \left(\sum_{tr=1,2,3} \max_{\alpha} (Q(s, a, tr)) \right)$$

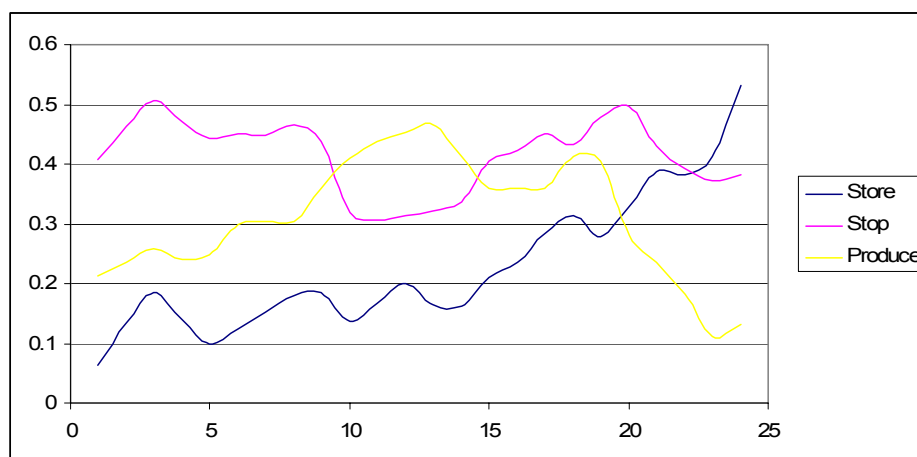
Στο σημείο αυτό φαίνεται ο σκοπός της παραμέτρου N . Στην επιλογή των επόμενων πράξεων και μεταβάσεων οι μονάδες πρέπει να συμμετέχουν ανάλογα με την ισχύ τους. Έτσι για παράδειγμα στην λήψη της απόφασης μεγαλύτερη βαρύτητα έχει μία μονάδα 100kW σε σχέση με μία 1kW.

5.4.2.4 Αποτελέσματα από την απομονωμένη λειτουργία.

Και στην περίπτωση αυτή επιλέξαμε ένα σύστημα με

- 2 μονάδες diesel 3kW με δυνατότητα παραγωγής 60kWh έκαστη.
- 2 μονάδες diesel 10kW με δυνατότητα παραγωγής 200kWh έκαστη.
- 2 συστοιχίες μπαταριών 3kW με 50kWh έκαστη.
- 2 συστοιχίες μπαταριών 10kW με 150kWh έκαστη.
- 4 φορτία από 1kW έως 10kW με συνολική ζήτηση 200kWh
- 6 κρίσιμα φορτία συνολικής ισχύος 50kW με συνολική ζήτηση 600kWh
- Ανανεώσιμες Πηγές ισχύος 5kW με δυνατότητα παραγωγής 30kWh.

Το κρίσιμο φορτίο θεωρείται μη ελέγξιμο αλλά όχι σταθερό όπως επίσης και η παραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οπότε δεν συμμετέχουν άμεσα στους υπολογισμούς. Και για αυτό το παράδειγμά ο αρχικός ρυθμός μάθησης ήταν $k=0.95$ και ο παράγοντας μείωσης (discount factor) $\gamma=0.1$. Ο αλγόριθμος συγκλίνει στην τελική λύση μετά από 20000 επαναλήψεις το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στον πίνακα Q .

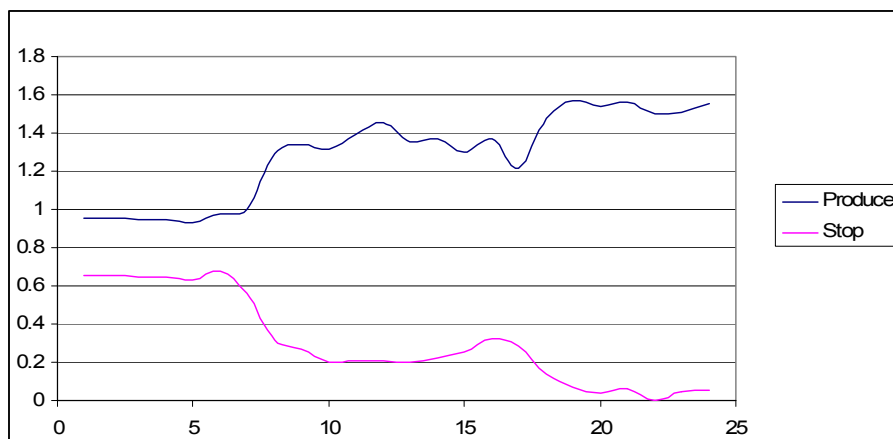


Σχήμα 5.9 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για την περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας (Μπαταρία 3kW).

Το σύστημα μαθαίνει να μη ζητά ενέργεια από την μονάδα slack. Ο λόγος είναι ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει έλλειμμα ισχύος το οποίο δεν μπορεί να καλυφθεί από τις υπόλοιπες μονάδες. Αντίθετα αν η μονάδα slack απορροφά ενέργεια αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο σύστημα που πιθανόν να μην μπορούμε να την απορροφήσουμε.

Στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Από τα σχήματα αυτά βλέπουμε ότι το σύστημα στην αρχή βρίσκεται σε ισορροπία ενώ όσο περνά η ώρα τόσο χρησιμοποιεί τις μονάδες diesel. Δεδομένου ότι η παραγωγή και τα καύσιμα των diesel είναι δεδομένα το σύστημα προσπαθεί να τα χρησιμοποιήσει προς το τέλος. Ενώ όταν

δει ότι βρίσκεται σε ασφάλεια τότε προσπαθεί να εξυπηρετήσει και κάποιο από το μη κρίσιμο φορτίο όπως στην περίπτωση για τις ώρες μεταξύ 10 και 15 στην περίπτωση της μπαταρίας.



Σχήμα 5.10 Αποτελέσματα του αλγορίθμου για την περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας (Diesel 10 kW).

Και στην περίπτωση αυτή αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα συνολικά. Επίσης αναπτύχθηκε και μία εφαρμογή στην οποία έβγαινε ένα πρόγραμμα για κάθε μονάδα ξεχωριστά. Η κατανομή της ισχύος για κάθε ώρα γινόταν με ένα ανάλογο τρόπο με το προηγούμενο παράδειγμα που βασίζεται σε λίστα προτεραιότητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χωρίς τις μεταβλητές K και {Επιβράβευση Μετάβασης} στην ενδιάμεση επιβράβευση φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

	Κατάσταση Φόρτισης Μπαταριών	Κατάσταση Συστήματος	Ποσοστά
1	Υψηλή	Ασφαλής	100% (99.8%)
		Μη ασφαλής	0% (0.2%)
2	Μέτρια	Ασφαλής	77% (73%)
		Μη ασφαλής	23% (26%)
3	Χαμηλή	Ασφαλής	33% (25%)
		Μη ασφαλής	67% (75%)

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το σύστημα απέτυχε στην μέτρια και χαμηλή φόρτιση των μπαταριών. Ωστόσο το ερώτημα που προκύπτει είναι ποιες συνθήκες οδήγησαν το σύστημα να αποτύχει. Οι συνθήκες αυτές είναι δύο:

- Το σύστημα έμεινε από καύσιμα.
- Το σύστημα δεν είχε επάρκεια ισχύος δηλαδή οι μπαταρίες ή οι diesel δεν είχαν καύσιμα και όταν τα κρίσιμα φορτία ζήτησαν μέγιστη ισχύ τότε αυτή δεν ήταν διαθέσιμη.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις μεταβλητές K και {Επιβράβευση Μετάβασης} στην ενδιάμεση επιβράβευση φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Κατάσταση Φόρτισης Μπαταριών		Κατάσταση Συστήματος	Ποσοστά
1	Υψηλή	Ασφαλής	100% (99.8%)
		Μη ασφαλής	0% (0.2%)
2	Μέτρια	Ασφαλής	82% (73%)
		Μη ασφαλής	18% (27%)
3	Χαμηλή	Ασφαλής	42% (25%)
		Μη ασφαλής	58% (75%)

Πίνακας 5.13 Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές K και {Επιβράβευση Μετάβασης} ουσιαστικά δίνουμε μία ώθηση στο σύστημα να μάθει καλύτερα να αντιμετωπίζει τις δύο καταστάσεις που προαναφέρθηκαν. Το εντυπωσιακό είναι ότι αναλύοντας τις μη ασφαλείς καταστάσεις και με τον τρόπο που συμπεριφέρθηκε το φορτίο η απώλεια του συστήματος ήταν αναπόφευκτη χωρίς αυτό να σημαίνει ότι εξασφαλίζουμε μαθηματικά απόλυτα την βέλτιστη λύση σε κάθε περίπτωση.

Το επόμενο ερώτημα είναι τι μαθαίνουν οι πράκτορες σε σχέση με την απλή μέθοδο που βασίζεται στον προγραμματισμό κάθε μονάδος ξεχωριστά. Αυτό που μαθαίνουν οι πράκτορες είναι προσπαθούν να χρησιμοποιούν και ένα τμήμα των μονάδων diesel για την φόρτιση των μπαταριών έτσι ώστε το σύστημα να μην μένει ποτέ από ισχύ.

5.5 Συμπεράσματα

Το αρχικό συμπέρασμα είναι ότι μπορούν να αναπτυχθούν αλγόριθμοι οι οποίοι θα επιτρέπουν στους πράκτορες να μάθουν να συντονίζονται μεταξύ τους για την επίλυση κάποιου προβλήματος. Ο στόχος μας ήταν να μπορούν οι πράκτορες ανταλλάσσοντας ένα μικρό ποσό πληροφορίας να μπορούν να επιλύσουν το πρόβλημα.

Ειδικότερα συμπεράσματα και από τα δύο παραδείγματα είναι:

- Ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει με επιτυχία ένα πρόβλημα σε έντονα στοχαστικό περιβάλλον όπου είναι αδύνατον να προβλέψουμε την επόμενη κατάσταση.
- Ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει με επιτυχία την πολυπλοκότητα του προβλήματος

Ωστόσο υπάρχει ένα σημείο που θέλει προσοχή: το αποτέλεσμα εξαρτάται άμεσα από την κατάστρωση της εξίσωσης επιβράβευσης το οποίο σημαίνει ότι πιθανόν και να υπάρχουν καταστάσεις τις οποίες να μην έχουμε λάβει υπ' όψιν. Ειδικότερα στο θέμα της λειτουργίας στην αγορά ενέργειας ένα εργαλείο όπως είναι η πιθανοτική κατανομή ενέργειας θα μας επέτρεπε να γνωρίζουμε ποια είναι η βέλτιστη λύση. Στην συνέχεια προγραμματίζοντας κατάλληλα τις επιβραβεύσεις θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε την λύση αυτή.

Κεφάλαιο 6

Από τον κεντρικό έλεγχο στα έξυπνα δίκτυα

6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια η τεχνολογία των συστημάτων πολλαπλών ευφών πρακτόρων θα πρέπει να θεωρηθεί ως εξέλιξη των κεντρικών συστημάτων εποπτείας και ελέγχου, γνωστά ως SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Ο ενδιάμεσος συνδετικός κρίκος είναι τα καταναμημένα SCADA σε περιβάλλον διαδικτύου. Την μετάβαση αυτήν δεν θα πρέπει να την αντιμετωπίσουμε σαν μεμονωμένη εξέλιξη στην τεχνολογία ελέγχου των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Θα πρέπει να ενταχθεί στην μετάβαση στα έξυπνα δίκτυα που αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο.

Η τωρινή εικόνα που υπάρχει για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεταφορά ενέργειας από ένα σημείο στο άλλο μονόδρομα. Αυτή η μορφή των δικτύων συμπληρώνεται από την κλασική μορφή της παραγωγής που βασίζεται σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς. Ωστόσο όπως προαναφέρθηκε η κατάσταση αυτή αλλάζει γοργά κυρίως λόγω δύο βασικών εξελίξεων. Η πρώτη εξέλιξη είναι η δημιουργία αγορών ενέργειας ενώ η δεύτερη είναι η εγκατάσταση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής. Τα δίκτυα διανομής πλέον γίνονται ενεργά δεδομένου ότι έχουν εσωτερικές μονάδες παραγωγής αλλά και η φορά της ισχύος είναι αμφίδρομη. Σε καμία περίπτωση τα δίκτυα δεν είναι πλήρως αμφίδρομα αφού μία σειρά από τεχνικά προβλήματα θα πρέπει να λυθούν, τα οποία μάλλον ξεφεύγουν από τον σκοπό του παρόντος κειμένου.

Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει κάποιες από τις τεχνολογίες της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών (Information and Communication Technology) που πιθανόν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των έξυπνων δικτύων.

Το κεφάλαιο αυτό λοιπόν χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο κομμάτι περιγράφει στις βασικές σύγχρονες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα εποπτικού και κεντρικού ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εστιάζοντας στα συστήματα που αφορούν δίκτυα διανομής και τα μικροδίκτυα αλλά και το τηλεπικοινωνιακό κομμάτι που αφορά το διαδίκτυο. Ειδικότερα θα δοθεί μία γενική εισαγωγή σε βασικά πρότυπα ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων όπως είναι το CIM, OPC και UCA-DER.

Το δεύτερο τμήμα αφορά το τεχνικό κομμάτι της υλοποίησης των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων. Θα εστιάσουμε κυρίως σε θέματα λογισμικού που σχετίζονται άμεσα με τους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

6.2 Η τεχνολογία της πληροφορικής στα έξυπνα δίκτυα και στα μικροδίκτυα.

Η τεχνολογία της πληροφορικής καλείται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των έξυπνων δικτύων γενικά αλλά και των μικροδικτύων που είναι ο βασικός πυρήνας της εργασίας αυτής. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ένα βασικό χαρακτηριστικό. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ότι ο πελάτης-καταναλωτής αποκτά ενεργό ρόλο στην λειτουργία του δικτύου. Ο ρόλος είναι ενεργός είτε επειδή ενδεχομένως έχει τοπική παραγωγή είτε επειδή ελέγχει σε συνδυασμό με το τι συμβαίνει στο περιβάλλον του την συμπεριφορά του.

Σήμερα σχεδόν όλοι οι μικροί πελάτες του δικτύου και πολλοί από τους μεγάλους είναι απλά φορτία χωρίς καμία ουσιαστική συμμετοχή στην διαχείριση του συστήματος. Η απελευθέρωση όμως της αγοράς θα οδηγήσει πιθανότατα κάποια στιγμή στην ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών στην λειτουργία του συστήματος.

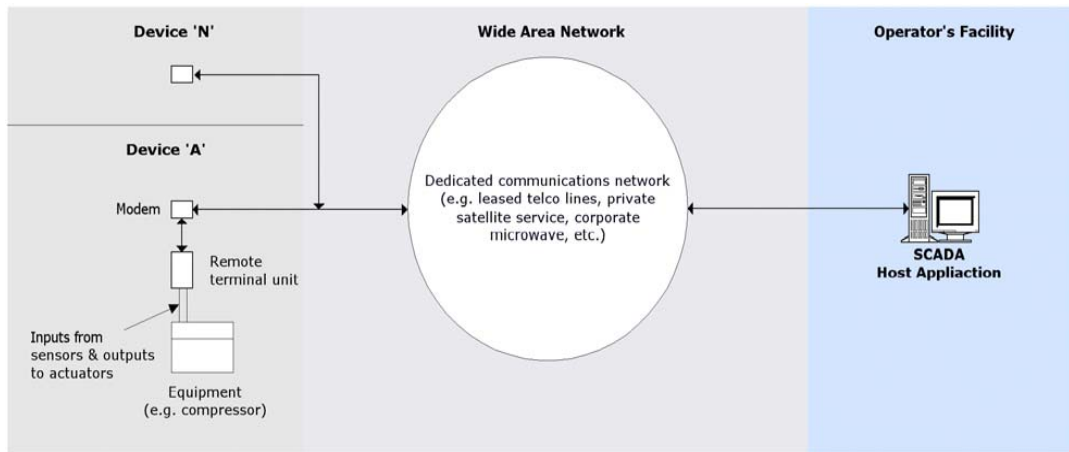
Κάτι τέτοιο δεν θα μπορεί να συμβεί αν δεν υπάρχει η κατάλληλη υποδομή για επικοινωνία και έλεγχο. Το κλασικό μοντέλο του κεντρικού συστήματος ελέγχου και εποπτείας θεωρείται πλέον ανεπαρκές. Από την μία η απελευθέρωση της αγοράς συνεπάγεται τον περιορισμό του κεντρικού ελέγχου. Από την άλλη η εισαγωγή πολλών μικρών μονάδων παραγωγής αλλά και στοιχείων ελέγχου στο δίκτυο συνεπάγεται ένα τεράστιο όγκο πληροφορίας που είναι πρακτικά αδύνατο να επεξεργαστεί σε ένα κεντρικό σημείο.

Μια από τις βασικότερες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων χρόνων σαφώς και είναι το διαδίκτυο και οι τεχνολογίες που το ακολουθούν. Οι ευκολίες και το χαμηλό κόστος λειτουργίας που παρέχει το διαδίκτυο σαφώς το καθιστά σαν την κύρια πλατφόρμα ανάπτυξης των όποιων συστημάτων πληροφορικής.

6.3 Συστήματα εποπτείας και ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (SCADA)

6.3.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός ενός τυπικού συστήματος SCADA είναι εξ' αποστάσεως παρακολούθηση και ο έλεγχος του εξοπλισμού αλλά και η λήψη δεδομένων. Τα συστήματα SCADA συνήθως περιλαμβάνουν απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (remote terminal unit -RTU) ή απλούς προγραμματιζόμενους ελεγκτές με αισθητήρες και ελεγκτές συνδεδεμένα στον βασικός εξοπλισμό που πρόκειται να ελεγχθεί. Επιπλέον περιλαμβάνουν τηλεπικοινωνιακές γραμμές για την μεταφοράς των δεδομένων αλλά και έναν κεντρικό υπολογιστή που λαμβάνει τα δεδομένα, τα επεξεργάζεται και στην συνέχεια δίδει εντολές στις συσκευές αλλά και επικοινωνεί με τον χρήστη μέσω γραφικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 6.1: Τυπική δομή ενός συστήματος SCADA

Η πρώτη γενεά συστημάτων SCADA χρησιμοποιούσε συσκευές με περιορισμένη ή ανύπαρκτη νοημοσύνη. Οι συσκευές απλά έστελναν δεδομένα και λάμβαναν εντολές. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας λάμβανε τα δεδομένα και στην συνέχεια τα επεξεργαζόταν. Το μοντέλο αυτό έχει αρχίσει πλέον να θεωρείται απαρχαιωμένο και ο λόγος είναι ότι πολλές διεργασίες πλέον απαιτούν την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Οι λύσεις για αυτό είναι δύο. Η πρώτη λύση είναι η χρήση εξαιρετικά ισχυρών υπολογιστών αλλά και υψηλών δυνατοτήτων τηλεπικοινωνιακών γραμμών, με αποτέλεσμα βέβαια το κόστος να ανεβαίνει δραματικά. Η δεύτερη λύση είναι να κατακερματιστεί η διαδικασία ελέγχου σε πολλές μικρότερες και στην συνέχεια να καταμεριστεί σε μικρότερους υπολογιστές του εμπορίου. Επιπλέον για περεταίρω μείωση του κόστους θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διαδίκτυο σαν μέσο επικοινωνίας. Η δεύτερη επιλογή είναι αυτή που υιοθετείται πλέον από όλους και σίγουρα αποτελεί τον προάγγελο των συστημάτων πολλαπλών ευφύων πρακτόρων.

6.3.2 Συστήματα εποπτείας και ελέγχου στο περιβάλλον του διαδικτύου

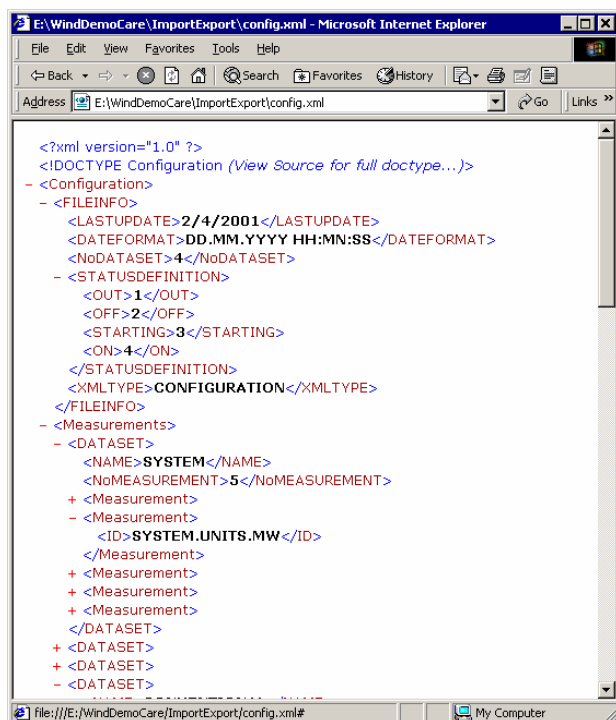
6.3.2.1 Εισαγωγή

Το πλέον βασικό πρόβλημα που έχει προκύψει στα συστήματα SCADA είναι το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός πρωτοκόλλων επικοινωνίας αλλά και διαφορετικού είδους εφαρμογών. Η μεγάλη πρόκληση πλέον είναι η συνύπαρξη όλων αυτών των συστημάτων. Οι κατασκευαστές πλέον έχουν συνειδητοποιήσει τις δυνατότητες που προσφέρει σήμερα το διαδίκτυο και προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την χρήση του. Στην συνέχεια πέρα από την βασική τεχνολογία XML θα παρουσιαστούν συνοπτικά και μία σειρά από πρότυπα που αφορούν κυρίως την περιοχή των τηλεπικοινωνιών και ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της διεσπαρμένης παραγωγής.

6.3.2.2 XML και Web services

Η γλώσσα XML (Extensible Markup Language) σύμφωνα με το W3C (World Wide Web Consortium) είναι ουσιαστικά μια ευέλικτη διάταξη κειμένου που προέρχεται από την

γλώσσα Standard Generalized Markup Language (SGML)[6.1-6.2]. Η XML δεν είναι ακριβώς γλώσσα προγραμματισμού, αλλά ένα σύνολο συντακτικών κανόνων και προτύπων για την περιγραφή και παράσταση δεδομένων. Η XML δεν έχει προκαθορισμένες ετικέτες όπως η γλώσσα περιγραφής ιστοσελίδων (HTML) αλλά επιτρέπει στον χρήστη την δημιουργία των δικών του δομών. Παράδειγμα ενός XML αρχείου φαίνεται στο σχήμα 6.2 που αφορά την εφαρμογή διασύνδεσης του SCADA της AREVA e-Terra με το MORE CARE EMS που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια.



Σχήμα 6.2 XML δεδομένα.

Από την στιγμή που έχει δημιουργηθεί το αρχείο με τα δεδομένα είναι έτοιμο να διανεμηθεί στους χρήστες μέσα από τα κανάλια επικοινωνίας. Ο σκοπός του κεφαλαίου δεν είναι να περιγράψουμε την XML αφού οποιοσδήποτε μπορεί να βρει σημαντικό όγκο πληροφοριών στο διαδίκτυο.

Οι υπηρεσίες διαδικτύου γνωστές ως Web services είναι ένα νέο είδος ανταλλαγής δεδομένων ανάμεσα σε εφαρμογές. Η ικανότητα να έχει κάποιος πρόσβαση σε μία απομακρυσμένη διαδικτυακή υπηρεσία και να εκτελέσει εκεί μία λειτουργία δίδει στους προγραμματιστές την δυνατότητα να παράσχουν γρήγορα υψηλών δυνατοτήτων εφαρμογές. Με τον τρόπο αυτό ο προγραμματιστής δεν χρειάζεται να αναπτύσσει όλες τις διαδικασίες και λειτουργίες μέσα στην δική του εφαρμογή.

Οι υπηρεσίες διαδικτύου είναι ουσιαστικά αντικείμενα και μέθοδοι που μπορούν να κληθούν από οποιονδήποτε πελάτη μέσω του διαδικτύου. Οι υπηρεσίες διαδικτύου έχουν βασιστεί στο Simple Object Access Protocol (SOAP) και αντίθετα με τα Distributed Component Object Model (DCOM) και Common Object Request Broker Architecture (CORBA) χρησιμοποιούν μηχανισμούς αποστολής μηνυμάτων μέσω του HTTP με ευρέως αποδεκτούς τρόπους περιγραφής των δεδομένων (XML). Οι βασικές λειτουργίες αποστολής δεδομένων ή απομακρυσμένης κλήσης συναρτήσεων βασίζεται σε υπάρχουσες τεχνολογίες και επιτρέπει την χρήση διάφορων πλατφορμών.

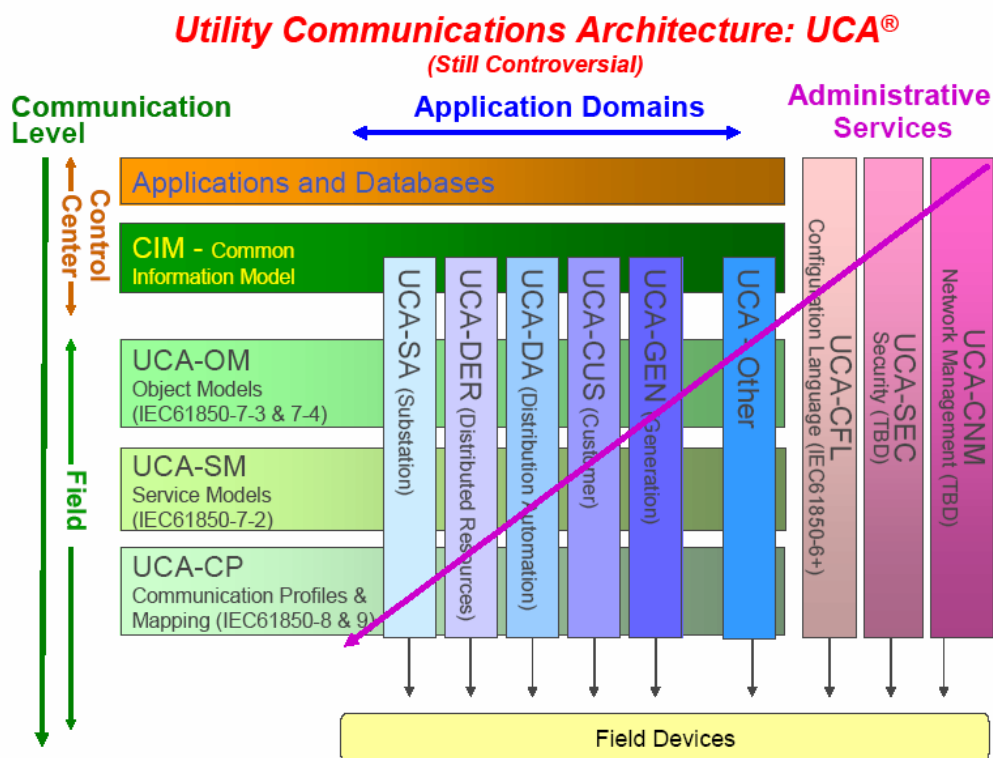
Οι υπηρεσίες διαδικτύου σε πρώτη ματιά φαίνονται να παρουσιάζουν κοινά σημεία με την λειτουργία των ευφών πρακτόρων και ειδικότερα σε σχέση με την ιδέα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των εφαρμογών. Ωστόσο η βασική διαφορά είναι ότι στις εφαρμογές των πολλαπλών

πρακτόρων η επικοινωνία δεν είναι μονόδρομη αλλά βασίζεται στην διαπραγμάτευση (negotiation). Επιπλέον οι εφαρμογές στις υπηρεσίες διαδικτύου είναι στατικές σε αντίθεση με την αυτονομία που έχουν οι πράκτορες.

6.3.2.3 UCA και UCA-DER

Η χρήση της ψηφιακής τεχνολογία στον αυτοματισμό των συστημάτων των υποσταθμών μπορεί να δώσει σημαντικές δυνατότητες αλλά και προκλήσεις. Μία βασική πρόκληση είναι η παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο αλλά και πελατών του δικτύου με ειδικές απαιτήσεις που μέχρι τώρα δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στα συστήματα ελέγχου των υποσταθμών αλλά και των δικτύων ηλεκτρικής ενεργείας γενικά.

Ο σκοπός του Utility Communications Architecture (UCA) – Object Models for Distributed Energy Resources (UCA-DER)[6.3] είναι να δημιουργηθεί ένα πρότυπο με βάση το οποίο οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θα μπορέσουν να ενταχθούν στο ευρύτερο σύστημα ελέγχου με στόχο την εποπτεία, τον έλεγχο, την συντήρηση αλλά και τον λογιστικό έλεγχο. Το UCA-DER σκοπεύει να αποτελέσει τμήμα των ευρύτερων προτύπων του χώρου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 και για αυτό τον λόγο είναι συμβατό με πρότυπα όπως το IEC61850 (UCA-SA), IEC61970 (CIM), IEC60870-5 (telecontrol protocol), and IEC60870-6 (ICCP/TASE.2)



Σχήμα 6.3 Η αρχιτεκτονική του UCA

Το UCA-DER έχει σαν στόχο να λάβει υπ' όψιν τις κύριες τεχνικές προκλήσεις που προέρχονται από την παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο. Ορισμένες από τις προκλήσεις που καλούνται να ληφθούν υπ' όψιν είναι:

- Οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν πλέον και σαν αρνητικά φορτία αφού έχουμε την παρουσία αποθηκευτικών συστημάτων.
- Πολλές μονάδες παραγωγής καλούνται να παρακολουθήσουν και να καλύψουν ένα τοπικό φορτίο. Η παρακολούθηση δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι θα είναι στιγμιαία αλλά με βάση χρονικά παράθυρα.
- Μείωση αιχμών του συστήματος.
- Διατήρηση ισχύος εφεδρείας. Χρησιμοποιώντας πολλές διεσπαρμένες μονάδες για εφεδρεία μπορεί να βοηθήσει την οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Παροχή ισχύος σε καταστάσεις ανάγκης
- Επιτήρηση της τάσης
- Βελτίωση συντελεστή ισχύος.
- Φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία
- Συμμετοχή σε αγορά ενέργειας.

Οι παραπάνω λειτουργίες δημιουργούν επιπρόσθετες ανάγκες στην λειτουργία του συστήματος ελέγχου και εποπτείας.

Οι βασικές ομάδες λειτουργιών που προτείνονται από το UCA-DER είναι:

1. Τοπικές λειτουργίες
2. Απομακρυσμένες λειτουργίες μεταξύ συσκευών
3. Αυτόματες λειτουργίες δικτύου διανομής
4. Λειτουργίες Επείγουσας Ανάγκης
5. Λειτουργίες Σχεδιασμού και Διαχείρισης και Συντήρησης του Συστήματος.

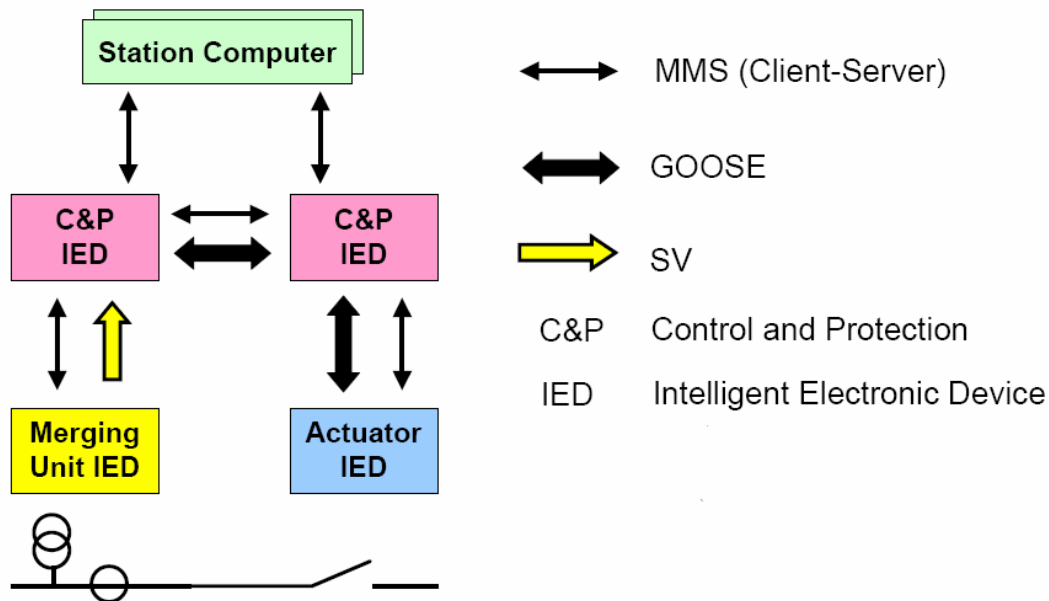
6.3.2.4 IEC 61850 UCA-SA

Η επιτροπή της IEC TC57 καθόρισε το πρότυπο IEC 61850 για τα δίκτυα επικοινωνιών και συστημάτων σε υποσταθμούς (Communication Networks and Systems in Substations). Ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία ενός προτύπου για την επικοινωνία του υλικού των υποσταθμών με τον υπόλοιπο εξοπλισμό καθώς και τα SCADA. Το IEC 61850 βασίζεται σε ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες διαδικτύου όπως το Ethernet και το TCP/IP.

Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει τις βασικές υπηρεσίες επικοινωνιών του IEC 61850. οι υπηρεσίες αυτές είναι απαραίτητες για την επικοινωνία μεταξύ των ευφών ηλεκτρονικών συσκευών (Intelligent Electronic Devices IED) αλλά και των άλλων υπολογιστικών συστημάτων που διαθέτει ο υποσταθμός (SCADA). Να επισημάνουμε ότι με τον όρο ευφής ηλεκτρονική συσκευή εννοούμε οποιαδήποτε συσκευή η οποία έχει έναν ή περισσότερους επεξεργαστές. Η πληροφορία που ανταλλάσσουν περιέχει λειτουργικά δεδομένα (π.χ. τάσεις, συχνότητα κλπ.) αλλά και πληροφορίες ρύθμισης (π.χ. χρόνοι απόκρισης προστασιών). Σε σχέση με την λειτουργία του υποσταθμού υπάρχουν δύο βασικές απαιτήσεις:

- Η μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών όπως μετρήσεις τάσεως και ρεύματος. Η μετάδοση γίνεται κυκλικά με συνεχή ροή και θα πρέπει να ορίζονται προτεραιότητες. Για τα υψηλής προτεραιότητας δεδομένα η καθυστέρηση δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 4ms αριθμός που σχετίζεται με τους χρόνους ενεργοποίησης των προστασιών του υποσταθμού.

- Η μετάδοση εντολών ενεργοποίησης διακοπών (trip) και άλλων σημάτων ελέγχου απαιτεί εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία που σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να επηρεάζεται από άλλες ροές δεδομένων.



Σχήμα 6.4 Οι βασικές υπηρεσίες επικοινωνιών του IEC 61850.

Για τον λόγο αυτό τρεις βασικές κατηγορίες επικοινωνιών έχουν οριστεί:

- SV (Sampled Values) Δειγματοληπτικές τιμές που αφορά μετρήσεις τάσεως και ρεύματος και απαιτούν την μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων με προτεραιότητες, κυκλικά και με κοινά πρότυπα.
- GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) οι εντολές ενεργοποίησης διακοπών (trip) και άλλων σημάτων ελέγχου απαιτούν την μετάδοση με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία και με κοινά πρότυπα
- MMS (Manufacturing Message Specification) Λειτουργικές πληροφορίες των συσκευών που απαιτούν χαμηλή προτεραιότητα.

Επιπλέον το πρότυπο δίδει ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα συγχρονισμού των συσκευών.

6.3.2.5 CIM

Το πρότυπο Common Information Model – CIM [6.4] ανήκει στην σειρά IEC 61970 και καθορίζει μία μέθοδο διασύνδεσης εφαρμογών (API Application Program Interface) και βασίζεται στην εργασία του EPRI Control Center API (CCAPI). Ο ρόλος του προτύπου αυτού είναι να μπορούν να συνδυαστούν εφαρμογές λογισμικού από διαφορετικούς κατασκευαστές σε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS Energy Management System). Οι βασικοί στόχοι είναι:

- Να μειωθεί το κόστος ανάπτυξης εφαρμογών για ενεργειακά συστήματα.
- Να είναι δυνατή η χρήση των υπάρχοντων δοκιμασμένων συστημάτων.

Το CIM είναι ουσιαστικά ένα αφαιρετικό αντικειμενοστραφές μοντέλο που περιγράφει όλα τα αντικείμενα που περιλαμβάνονται σε ένα ηλεκτρικό σύστημα καθώς και μία επιχείρηση ηλεκτρισμού. Παρέχει μία πρότυπη μέθοδο περιγραφής του υλικού σαν αντικείμενα λογισμικού με τις ιδιότητες καθώς και τις σχέσεις τους.

Η πολυπλοκότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι τεράστια και για τον λόγο αυτό το CIM είναι χωρισμένο σε λογικά πακέτα. Τα πακέτα είναι (σχήμα 6.5):

- Core
- Domain
- Generation
- Generation Dynamics
- LoadModel
- Meas
- Outage
- Production
- Protection
- Topology
- Wires
- SCADA
- Financial
- Reservation
- Energy Scheduling
- Assets
- Consumer
- Core2
- Distribution
- Documentation

Η περιγραφή των κυριότερων είναι:

- Core (Πυρήνας)

Περιέχει γενικές πληροφορίες για το σύστημα κοινές για όλο τον εξοπλισμό του συστήματος.

- Topology

Το πακέτο αυτό επεκτείνει τον πυρήνα και παρέχει πληροφορίες για τον τρόπο την τοπολογία του ηλεκτρικού συστήματος αλλά και τις συνδέσεις των συσκευών.

- Wires

Το πακέτο αυτό επεκτείνει το πακέτο Topology και Core και περιέχει πληροφορίες για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των καλωδίων και των γραμμών μεταφοράς και διανομής του συστήματος. Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται ιδιαίτερος από προγράμματα ροής φορτίου και εκτίμησης κατάστασης.

- Outage

Το πακέτο αυτό περιέχει πληροφορίες για την τρέχουσα αλλά και προγραμματισμένη διαμόρφωση του δικτύου..

- Protection

Το πακέτο αυτό επεκτείνει τον πυρήνα και παρέχει πληροφορίες για τις συσκευές προστασίας του συστήματος.

- Meas

Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες για τα μετρούμενα μεγέθη που χρειάζονται οι συσκευές όπως η τάση των ζυγών και η συχνότητα του συστήματος.

- Generation

Το πακέτο αυτό χωρίζεται σε δύο πακέτα : το Generation Dynamics και το Production

- Generation Dynamics

Το πακέτο αυτό περιγράφει τα χαρακτηριστικά των μοντέλων των διαφόρων τύπων μονάδων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν μεταξύ εφαρμογών που πραγματοποιούν προσομοιώσεις.

- Production

Το πακέτο αυτό περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής.

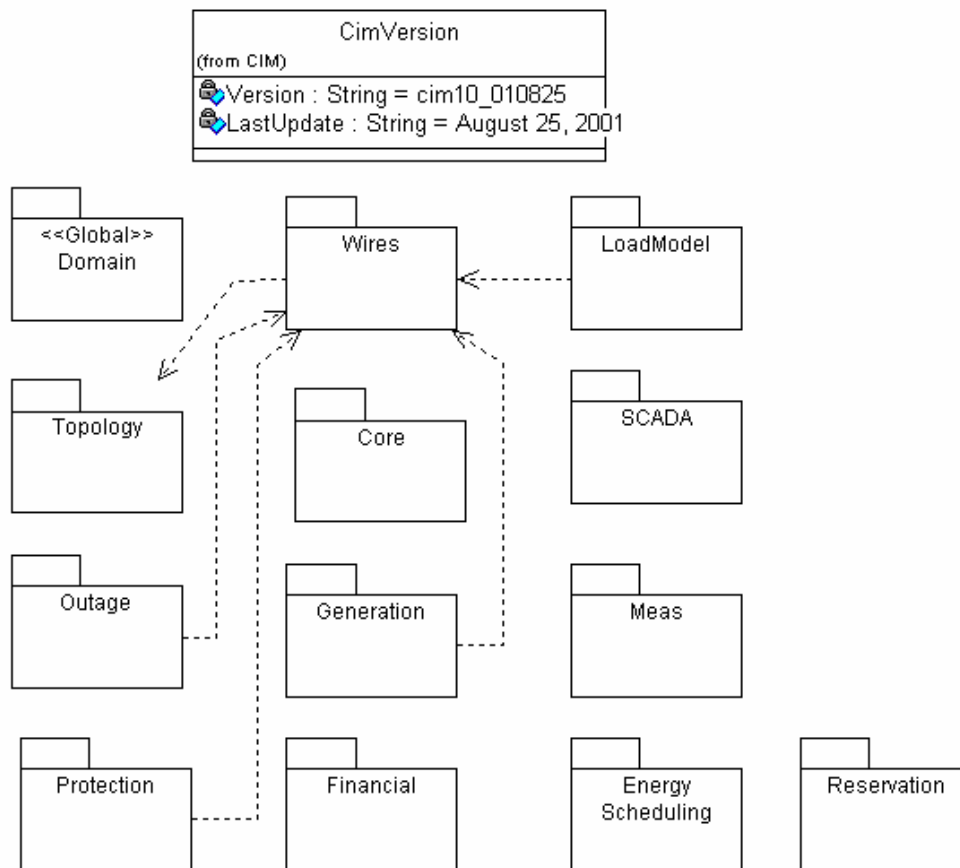
- LoadModel

Το πακέτο αυτό περιέχει μοντέλα για την περιγραφή των καταναλωτών ενέργειας

- Domain

Το πακέτο αυτό είναι ένα λεξικό για τις μονάδες μέτρησης και τις ποσότητες των διαφόρων μεγεθών. Για παράδειγμα η ενεργός ισχύς μετράτε σε W και η ποσότητα είναι το Mega Watt.

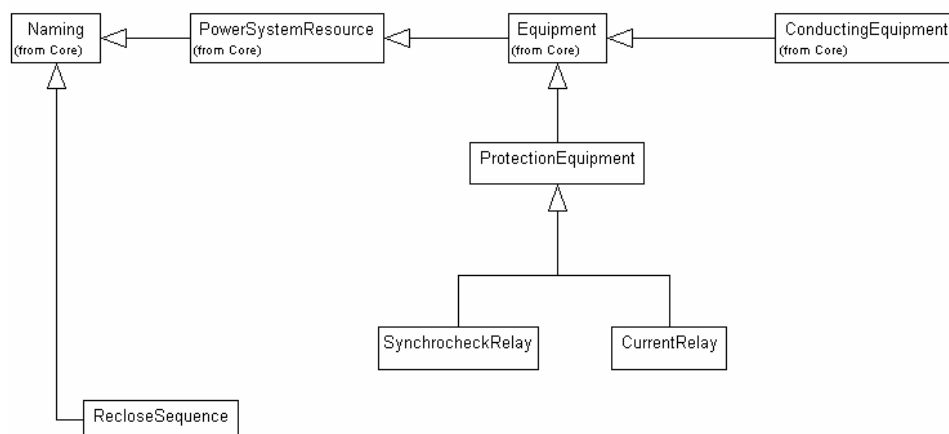
Το μοντέλο CIM έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα UML (Unified Modeling Language) [6.5]. Το διάγραμμα των κλάσεων του συστήματος παρουσιάζει τις κλάσεις σε κάθε πακέτο καθώς και τις σχέσεις αυτών. Οι βασικές σχέσεις είναι



Σχήμα 6.5 Τα βασικά πακέτα του CIM

- Γενίκευση (Generalization)

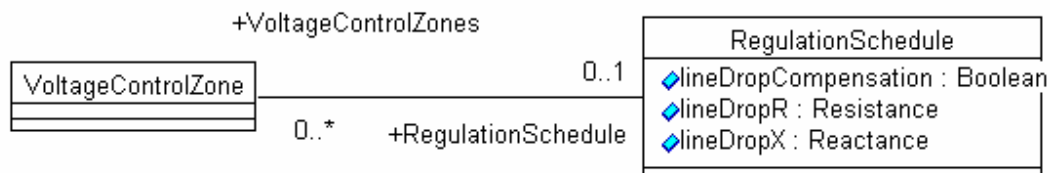
Η γενίκευση είναι η σχέση μεταξύ μίας γενικού περιεχομένου κλάσης με μία ειδικού. Η ειδικού περιεχομένου κλάση περιέχει μόνο επιπλέον πληροφορίες.



Σχήμα 6.6 Παράδειγμα γενίκευσης από το πακέτο προστασία

- Απλή συσχέτιση (Simple association)

Η συσχέτιση δύο κλάσεων παρουσιάζει μία θεμελιώδη σχέση μεταξύ των κλάσεων. Κάθε συσχέτιση έχει δύο ρόλους. Ο κάθε ρόλος δίνει την κατεύθυνση και τον ρόλο της τελικής κλάσης. Επιπλέον ορίζεται το ο αριθμός των στοιχείων που εμπλέκονται στη συσχέτιση (cardinality). Για παράδειγμα σχήμα 6.6 έχουμε την απλή συσχέτιση μεταξύ της κλάσης VoltageControlZone και RegulationSchedule. Η απλή συσχέτιση συμβολίζεται με μία γραμμή. Το cardinality 0..1 στο δεξί τμήμα της γραμμής μας λέει ότι κάθε περιοχή ελέγχου τάσης (VoltageControlZone) έχει ένα πρόγραμμα ρύθμισης (RegulationSchedule) ενώ το cardinality 1..* μας λέει ότι το κάθε πρόγραμμα ρύθμισης (RegulationSchedule) μπορεί να περιλαμβάνει πολλές περιοχές ελέγχου τάσης.



Σχήμα 6.6 Παράδειγμα συσχέτισης από το πακέτο wires

- Συσσώρευση (aggregation)

Η Συσσώρευση είναι ειδικού τύπου συσχέτιση που περιγράφει μία σχέση του τύπου «περιέχει» ή «αποτελείται» χωρίς να κληρονομείται κάτι όπως γίνεται στην γενίκευση. Για παράδειγμα σχήμα 6.7 το τοπολογικό νησί περιλαμβάνει έναν έως η τοπολογικούς κόμβους.



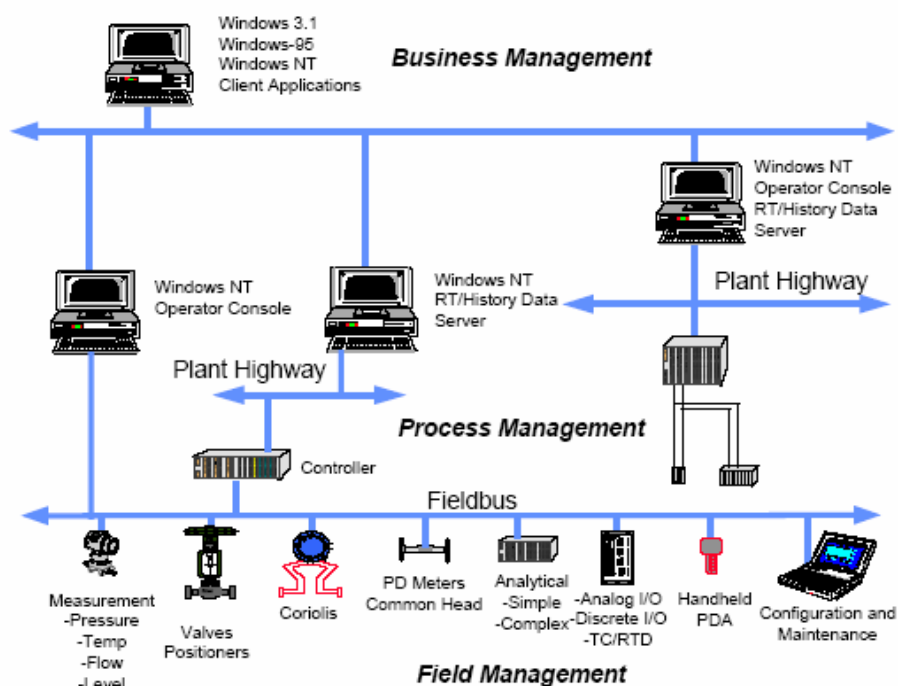
Σχήμα 6.7 Παράδειγμα Συσσώρευσης από το πακέτο wires

6.3.2.6 OPC

Το ακρωνύμιο OPC[6.7-6.14] σημαίνει Object Linking and Embedding for Process Control δηλαδή χρήση της τεχνολογίας διασύνδεσης αντικειμένων της Microsoft σε εφαρμογές ελέγχου διαδικασιών. Πρόκειται για έναν μηχανισμό που επιτρέπει την επικοινωνία πολλών πηγών δεδομένων. Μία πηγή δεδομένων μπορεί να είναι μία βάση δεδομένων ή μία συσκευή. Η αρχιτεκτονική του συστήματος πληροφοριών όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8 αποτελείται από τα εξής επίπεδα:

- Field Management Διαχείριση Πεδίου. Με τον όρο πεδίο (field) περιγράφουμε το κατώτερο επίπεδο της παραγωγής που ουσιαστικά είναι εγκατεστημένος όλος ο βασικός εξοπλισμός. Με την εισαγωγή πλήθους νέων έξυπνων συσκευών στο επίπεδο της παραγωγής ένας τεράστιος όγκος πληροφοριών αλλά και δυνατοτήτων ελέγχου βρίσκεται στην διάθεσή μας. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για την κατάσταση των συσκευών, τις ρυθμίσεις που έχουν αλλά και διάφορες μετρήσεις από αισθητήρια.

- **Process Management Διαχείριση Διαδικασιών.** Το επόμενο επίπεδο ενός συστήματος ελέγχου είναι η διαχείριση των επιμέρους διεργασιών. Με βάση τις αρχές του κατανεμημένου ελέγχου οι διεργασίες ελέγχονται με κατανεμημένο τρόπο ανεξάρτητα κατά το δυνατόν ή μία από την άλλη.
- **Business Management Διαχείριση Επιχείρησης.** Το ανώτερο επίπεδο είναι το επίπεδο της επιχείρησης όπου λαμβάνονται στρατηγικού χαρακτήρα αποφάσεις για το σύστημα.



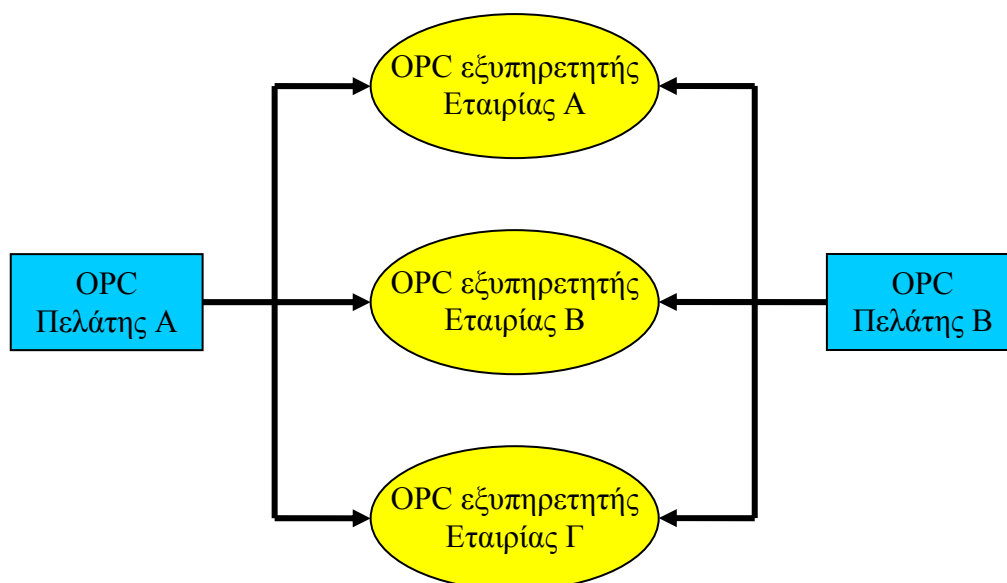
Σχήμα 6.8 Τα επίπεδα οργάνωσης του ελέγχου διαδικασιών

Προκειμένου να λειτουργήσει το μοντέλο αυτό θα πρέπει να είναι διαθέσιμη η πληροφορία σε όλα τα επίπεδα του συστήματος. Ο σκοπός του OPC είναι να παράσχει ένα τέτοιο εργαλείο με ανοιχτή αρχιτεκτονική που θα επιτρέπει την επικοινωνία των διαφόρων εφαρμογών του συστήματος χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες μορφές επικοινωνίας και κυρίως τα τοπικά δίκτυα Ethernet καθώς και το διαδίκτυο.

Η δομή του OPC βασίζεται κυρίως στην αρχιτεκτονική πελάτη/εξυπηρετητή (client/server). Ο εξυπηρετητής είναι η εφαρμογή που παρέχει τις πληροφορίες ενώ ο πελάτης είναι αυτός που τα χρησιμοποιεί.

Η κατασκευή του συστήματος βασίζεται στην τεχνολογία COM της Microsoft και χρησιμοποιεί διασυνδέσεις για την επικοινωνία των εφαρμογών. Ο γενικός τρόπος επικοινωνίας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9

Οι εξυπηρετητές παρέχονται από διάφορους κατασκευαστές και οι βασικές προδιαγραφές είναι να είναι συμβατοί με τα πρότυπα που θέτει το ίδρυμα για το OPC [6.8.-6.14].



Σχήμα 6.9 Τα επίπεδα οργάνωσης του ελέγχου διαδικασιών.

Οι βασικές διασυνδέσεις που παρέχει το OPC είναι:

1. OPC Διαχείριση δεδομένων (Data Access)

Πρόκειται για την βασική εφαρμογή του OPC και δίδει πρόσβαση στα δεδομένα πραγματικού χρόνου. Οργανώνεται βασικά με τρία κύρια αντικείμενα (objects) : τον εξυπηρετητή (server), την ομάδα (group) και το αντικείμενο (item). Το αντικείμενο εξυπηρετητή παρέχει πληροφορίες για τον OPC εξυπηρετητή. Το αντικείμενο ομάδα χρησιμοποιείται για την οργάνωση των δεδομένων. Το αντικείμενο (item) του OPC είναι ουσιαστικά η σύνδεση με τις διάφορες πηγές δεδομένων και πέρα από την κύρια πληροφορία (Value) έχει δεδομένα για την ποιότητα της πληροφορίας (Quality) καθώς και την ημερομηνία (Time Stamp).

2. OPC Διαχείριση συναγερμών και γεγονότων (Alarm and Event Handling)

Οι διασυνδέσεις για την διαχείριση συναγερμών και γεγονότων παρέχουν μηχανισμούς προκειμένου ο πελάτης της εφαρμογής να ειδοποιηθεί για την εμφάνιση ενός συναγερμού ή ενός γεγονότος. Στις εφαρμογές πολλές φορές δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ συναγερμού και γεγονότος. Ωστόσο συναγερμός γενικά είναι μία αντικανονική κατάσταση όπως για παράδειγμα η υπερθέρμανση μίας μηχανής. Αντίθετα το γεγονός είναι μία αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος η οποία θα πρέπει να αναφερθεί στον πελάτη όπως για η σύνδεση μίας νέας μικροπηγής στο δίκτυο.

3. OPC Διαχείριση Ιστορικών δεδομένων (Historical Data Access)

Οι διασυνδέσεις για την διαχείριση Ιστορικών δεδομένων παρέχουν μηχανισμούς για εύκολη πρόσβαση των πελατών στα ιστορικά δεδομένα της εφαρμογής. Το εργαλείο αυτό είναι κρίσιμο δεδομένου υπάρχει μία πληθώρα εφαρμογών για την παροχή ιστορικών δεδομένων που όμως δεν βασίζονται σε κοινά πρότυπα. Η διασύνδεση αυτή παρέχει του μηχανισμούς για την κοινή και εύκολη ανταλλαγή ιστορικών δεδομένων.

Το βασικό μειονέκτημα μέχρι πριν λίγο καιρό του OPC ήταν η χρήση της τεχνολογίας DCOM (Distributed COM) η οποία έχει αποδειχτεί ανασφαλής σε περιβάλλον διαδικτύου. Για τον λόγο αυτό στις νέες εκδόσεις των πελατών/εξυπηρετητών χρησιμοποιείται η τεχνολογία XML.

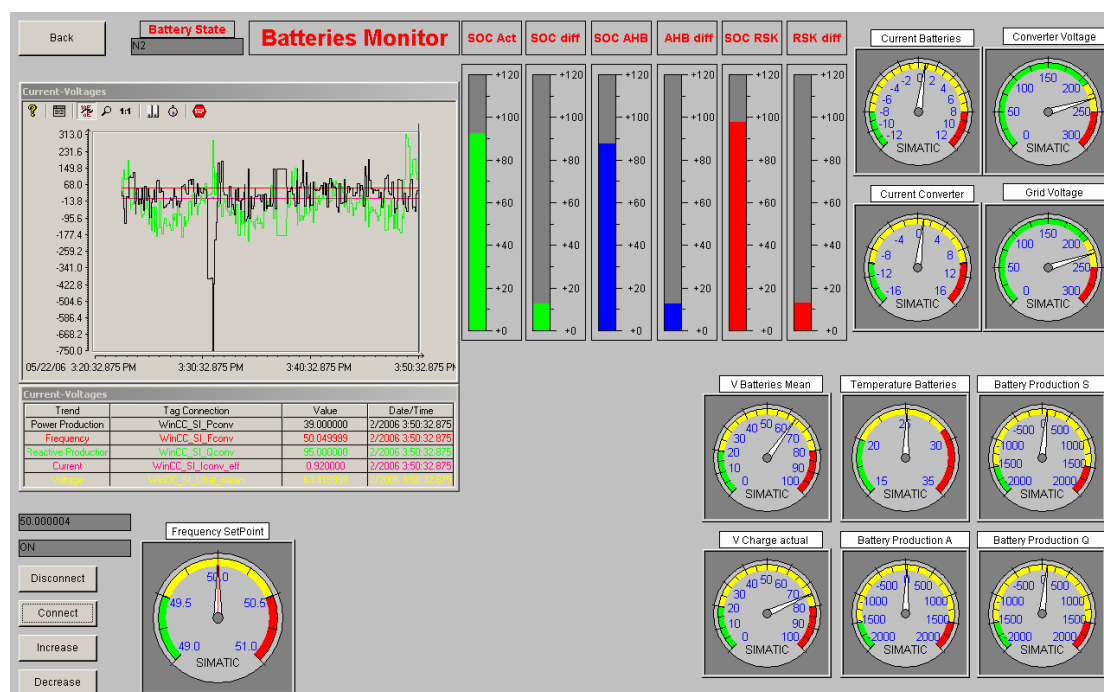
6.3.3 Πρακτικές εφαρμογές

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε δύο πρακτικές εφαρμογές που παρουσιάζουν τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες σελίδες.

6.3.2.1 Ανάπτυξη συστήματος SCADA για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του μικροδικτύου

Η πρώτη εφαρμογή αφορά την ανάπτυξη ενός συστήματος SCADA για την εποπτεία και τον έλεγχο των μικροπηγών του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βασικοί στόχοι ήταν δυο. Ο πρώτος ήταν ότι για τις ανάγκες του εργαστηρίου υπήρχε απαίτηση για την συνολική παρακολούθηση και τον έλεγχο του μικροδικτύου μέσα από ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Ο δεύτερος στόχος ήταν η δοκιμή διαφόρων νέων τεχνολογιών σε ότι αφορά την επικοινωνία με τις μικροπηγές και ειδικά εστίασαμε στην τεχνολογία OPC.

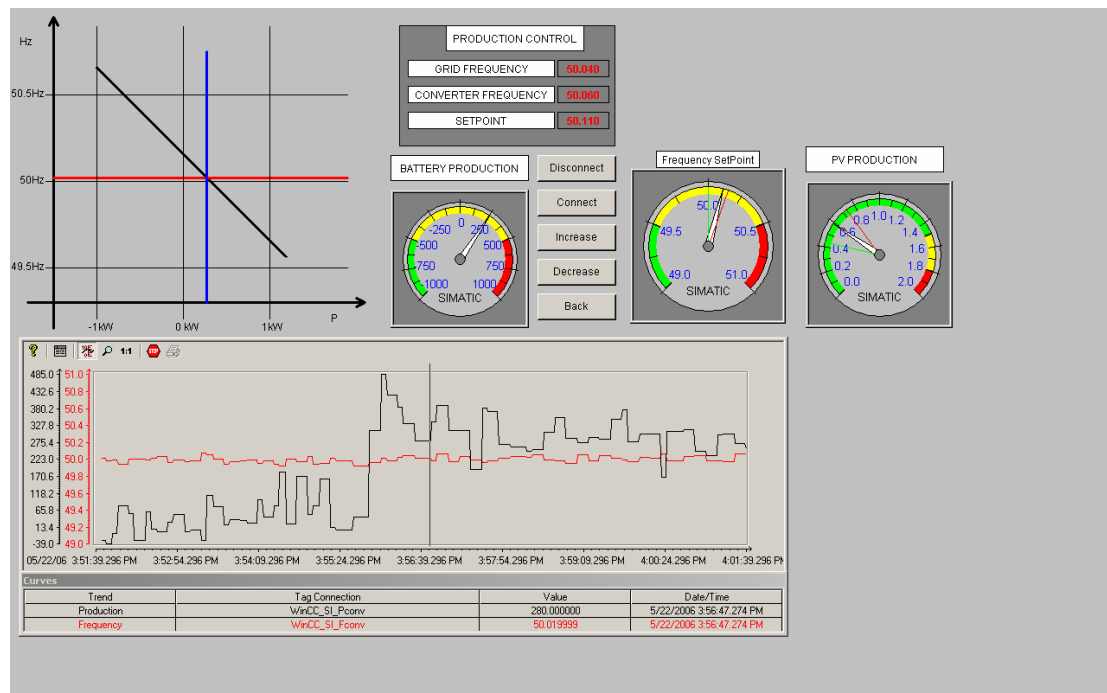
Η βάση του συστήματος SCADA είναι το πακέτο WinCC v6.0 της Siemens [6.19] το οποίο είναι ουσιαστικά μία διασύνδεση ανθρώπου μηχανής (HMI Human Machine Interface) και το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον Windows. Το WinCC παρέχει μία σειρά από εργαλεία για την οπτικοποίηση και τον έλεγχο της διεργασίας και επιπλέον χρησιμοποιεί σημαντικές λειτουργίες για την διασύνδεση με το διαδίκτυο.



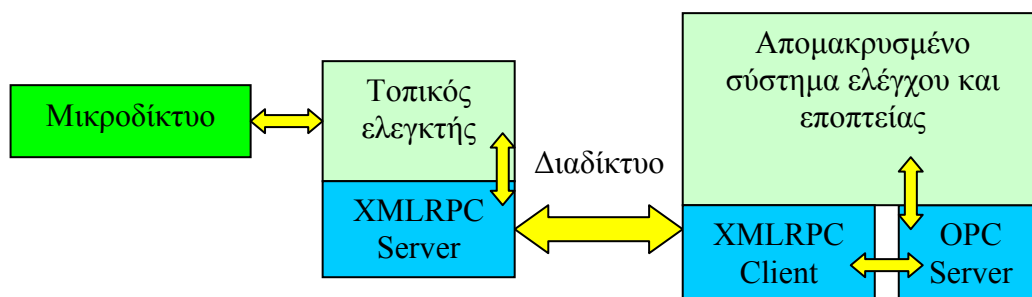
Σχήμα 6.9 Το γραφικό περιβάλλον του SCADA.

Η διασύνδεση του WinCC με τις μικροπηγές βασίστηκε στον OPC Server που παρείχε η SMA για τα συστήματά της. Επιπλέον σαν περεταίρω εφαρμογή αναπτύχθηκαν επιτυχώς

OPC Clients με βάση το SDK του OPC Foundation όπως επίσης δοκιμάστηκε και η ανάπτυξη ενός OPC Server με βάση βιβλιοθήκες από το διαδίκτυο και την επίσημη ιστοσελίδα του OPC Foundation. Στο σχήμα φαίνεται ένα από τα παράθυρα του περιβάλλοντος.



Σχήμα 6.10 Το γραφικό περιβάλλον του SCADA.



Σχήμα 6.11 Απλή αρχιτεκτονική του συστήματος.

Το σύστημα SCADA συνδέεται με τον υπολογιστή επικοινωνεί κατευθείαν με τους αντιστροφείς του μικροδικτύου. Ο τοπικός υπολογιστής έχει εγκατεστημένο έναν XMLRPC server. Στο απομακρυσμένο σύστημα που είναι εγκατεστημένο το SCADA τρέχει ένας δεύτερος OPC server που έχει παράλληλα και έναν XMLRPC client. Το SCADA συνδέεται στον OPC server. Από την υλοποίηση αυτή εξήχθησαν ορισμένα πολύ σημαντικά συμπεράσματα.

Το πρώτο από τα βασικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτής είναι ότι κατέστη δυνατός ο έλεγχος και η παρακολούθηση του μικροδικτύου από απόσταση μέσω του διαδικτύου χρησιμοποιώντας απλές τεχνολογίες. Ίσως η χρήση ενός ακριβού συστήματος όπως το WinCC να φαίνεται αρχικά υπερβολική ωστόσο τα τμήματα του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να αποκτηθούν με σχεδόν μηδενικό κόστος ή να αναπτυχθούν με βάση υπάρχουσες βιβλιοθήκες χωρίς να απαιτείται η αγορά ολόκληρης της πλατφόρμας ελέγχου.

Το δεύτερο βασικό συμπέρασμα προήλθε από ένα ατυχές συμβάν. Στο τέλος του Φεβρουαρίου 2006 ο XMLRPC server δέχτηκε επίθεση από κάποιο κακόβουλο χρήστη του διαδικτύου. Αν και δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα στο μικροδίκτυο αναγκαστήκαμε να περιορίσουμε για λόγους ασφαλείας την λειτουργία της εφαρμογής μόνο στο εσωτερικό δίκτυο του πολυτεχνείου. Ωστόσο προέκυψε το πολύ σημαντικό θέμα της ασφάλειας των δικτύων επικοινωνίας το οποίο θα πρέπει να είναι σημαντικό τμήμα της ανάπτυξης των όποιων συστημάτων ελέγχου πάνω από το διαδίκτυο.

6.3.2.2 Επικοινωνία του SCADA e-terra με το EMS MORE CARE

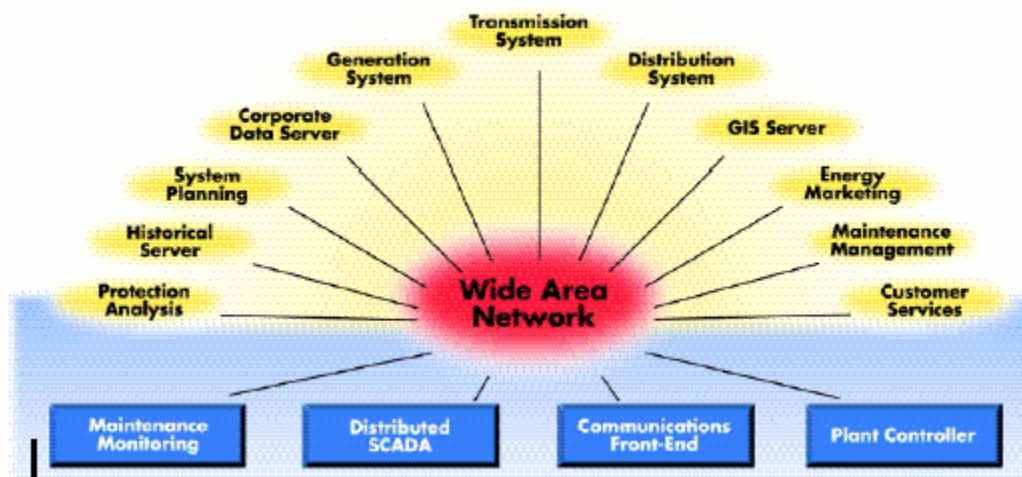
Η δεύτερη εφαρμογή που παρουσιάζουμε στο τμήμα του κεφάλαιο αυτού αφορά την διασύνδεση του SCADA της AREVA e-terra με την πλατφόρμα EMS MORE CARE.[6.15-6.17]

Το MORE CARE είναι ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που απευθύνεται σε απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα και στοχεύει στην βέλτιστη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το MORE CARE είναι προϊόν ερευνητικής δραστηριότητας που με χρηματοδότηση από την ευρωπαϊκή ένωση. Το MORE CARE αποτελείται από μία σειρά πακέτων λογισμικού που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη και περιλαμβάνει τις εξής δυνατότητες:

- Πρόβλεψη Φορτίου
- Πρόβλεψη Αιολικής Παραγωγής
- Ένταξη Μονάδων
- Οικονομική κατανομή
- Έλεγχος Δυναμικής Ασφάλειας Συστήματος
- Ολοκληρωμένο Σύστημα Γραφικής Απεικόνισης.

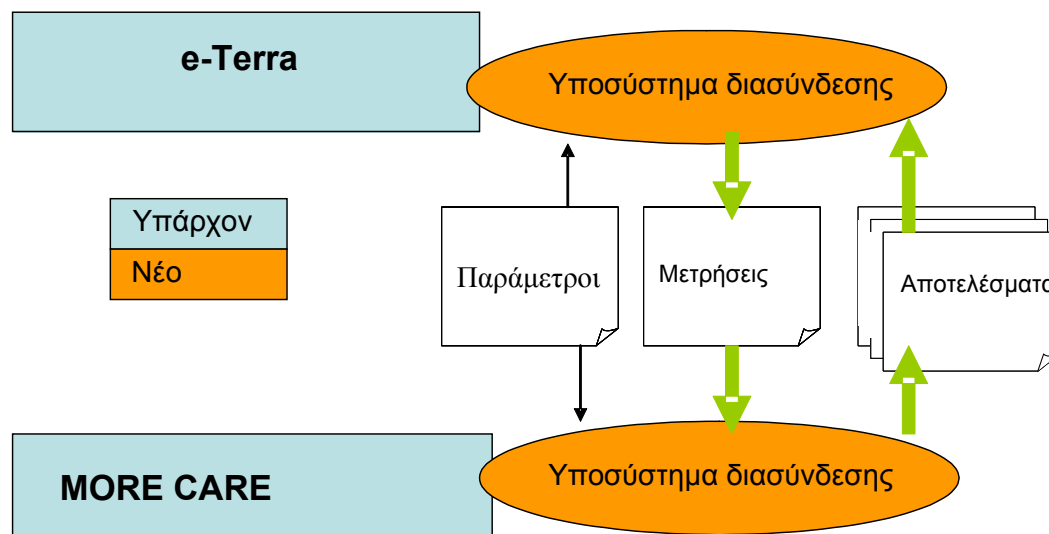
Το SCADA της AREVA με το όνομα e-Terra είναι ένα προηγμένο σύστημα που απευθύνεται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιεί εκτεταμένα τις τεχνολογίες του διαδικτύου και διαθέτει πλήθος λειτουργιών όπως φαίνεται στο σχήμα 6.11. Είναι ένα πλήρως καταναμημένο σύστημα και εξασφαλίζει απόλυτα ασφαλή και ομαλή λειτουργία.

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DISPOWER αναπτύχθηκε μία εφαρμογή για την ένταξη των λειτουργιών του MORE CARE στο SCADA e-Terra. Η ανταλλαγή των δεδομένων βασίστηκε σε web services και στην τεχνολογία XML. Η βασική δουλειά ήταν να αναπτυχθούν οι διασυνδέσεις με τις οποίες θα ανταλλάσουν δεδομένα οι δύο εφαρμογές, καθώς και οι ορισμοί (DTD Document Type Definition) των XML αρχείων.



Σχήμα 6.11 . Η βασικές λειτουργίες του e-Terra.

Επιπλέον τμήματα του γραφικού περιβάλλοντος του MORE CARE τροποποιήθηκαν σαν ανεξάρτητα ActiveX components με ενσωματωμένους XML parsers με σκοπό την εμφάνιση των δεδομένων στο γραφικό περιβάλλον του e-Terra.

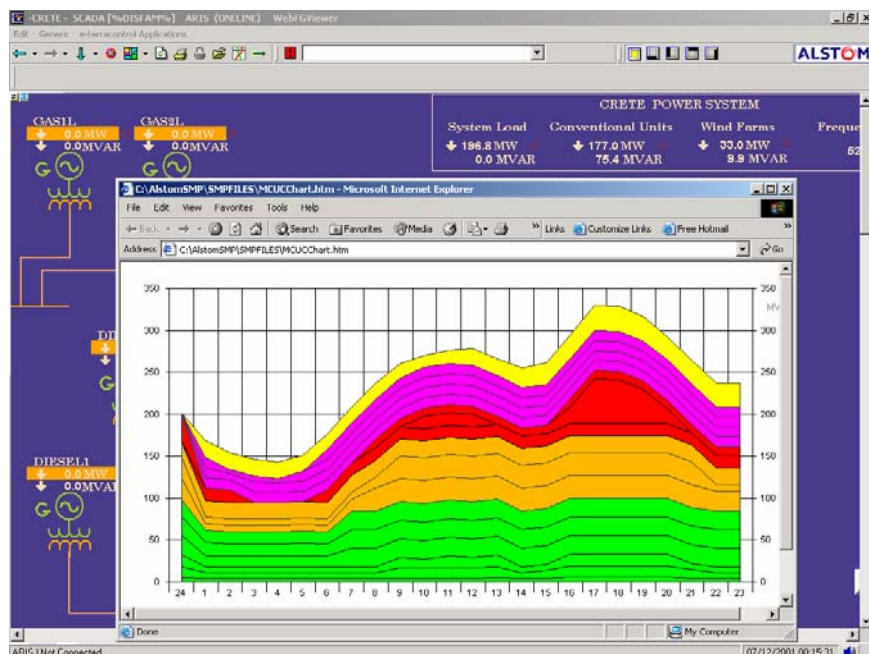


Σχήμα 6.12 Η διασύνδεση των δύο συστημάτων

Από το σχήμα βλέπουμε τρεις ροές δεδομένων

1. **Παράμετροι:** που αφορούν το ποια δεδομένα ανταλλάσσουν τα δύο συστήματα
2. **Μετρήσεις:** που αφορούν τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου που στέλνει το e-Terra στο MORE CARE.
3. **Αποτελέσματα:** που αφορούν την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του MORE CARE προς το e-Terra.

Επιπλέον αναπτύχθηκε ένας προσομοιωτής με βάση το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης προκειμένου να δοκιμαστεί το σύστημα. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6.13 Η εικόνα του SCADA με το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης.

Από την εφαρμογή αυτή εξήχθησαν μια σειρά από σημαντικά πρακτικά συμπεράσματα. Το πρώτο και βασικό συμπέρασμα είναι ότι η τεχνολογία XML δίνει σημαντικές δυνατότητες σε ότι αφορά την ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων με εύκολο και σαφή τρόπο.

Το δεύτερο βασικό θέμα ήταν η ανάπτυξη του τμήματος εκείνου του συστήματος που αφορά των συγχρονισμό των δύο εφαρμογών και για την ακρίβεια έχουμε μία real time εφαρμογή (e-terra) και μία εφαρμογή online (MORE CARE). Σε ένα σύστημα ελέγχου που αφορά καταναμημένες εφαρμογές, ο συγχρονισμός είναι ίσως το δυσκολότερο τεχνικά τμήμα. Ειδικότερα όταν έχουμε εφαρμογές που χτίζονται πάνω στην τεχνολογία του διαδικτύου. Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε ήταν προσομοίωση και δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα συγχρονισμού. Αν και στα σύγχρονα συστήματα υπάρχουν διάφορες εφαρμογές για το θέμα αναπτύξαμε κάποιες πειραματικές υπηρεσίες διαδικτύου προκειμένου να κατανοήσουμε σε καλύτερα τις τεχνικές δυσκολίες.

6.4 Ανάπτυξη λογισμικού για συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων

6.4.1 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)[6.22]. 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.

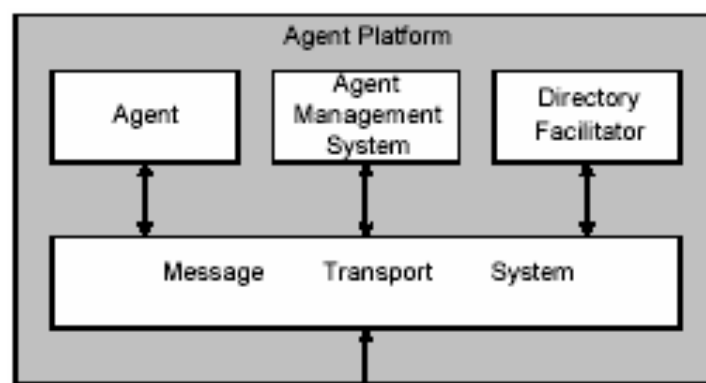
Το βασικό στοιχείο της ανάπτυξης είναι η πλατφόρμα λειτουργίας των ευφυών η οποία ουσιαστικά είναι μία βιβλιοθήκη από κατάλληλο λογισμικό και μια σειρά από υλοποιημένους πράκτορες που στόχο έχουν τον βασικό συντονισμό των πρακτόρων που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Για τις ανάγκες του λογισμικού μας χρησιμοποιήσαμε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

6.4.2 Jade

Το JADE (Java Agent DEvelopment Framework)[6.20-6.21] 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 μηνυμάτων στο οποίο έχει ενσωματωθεί το πλήρες πρότυπο επικοινωνίας της FIPA.

Το μοντέλο λειτουργίας του JADE παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.14 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 ευφών πρακτόρων (agents), διατηρώντας ένα κατάλογο με τους κωδικούς και την κατάσταση των agents της πλατφόρμας. Ο κάθε ευφής 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 ευφής πράκτορας (agent) ελέγχει μία μπαταρία τότε μπορεί να ανακοινώσει ότι «αποθηκεύει ή παράγει ενέργεια». Ομοίως για όλους τους άλλους ευφείς 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.

6.4.3 Το σύστημα πολλαπλών ευφών πρακτόρων για τον έλεγχο μικροδικτύων

6.4.3.1 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.

6.4.3.2 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 εκτελείτε 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.

6.4.3.3 Οντολογίες

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 [6.20].

6.4.4 Πρακτικές εφαρμογές.

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε συνοπτικά τέσσερα θέματα της υλοποίησης των πρακτόρων. Το πρώτο αφορά την υλοποίηση των οντολογιών, το δεύτερο την υλοποίηση των συμπεριφορών, το τρίτο αφορά την λειτουργία του πράκτορα DF και τέλος συνοπτική περιγραφή των πρακτόρων που υλοποιήθηκαν στο σύστημα.

6.4.4.1 Οντολογίες.

Στα πλαίσια της κατασκευής του προγράμματος μας κατασκευάσαμε μία βασική οντολογία για χρήση στα παραδείγματα που αναπτύξαμε καθώς και μία δεύτερη η οποία δεν αφορά της ανάγκες του προγράμματος αλλά δοκιμές για μία πιο εξελιγμένη οντολογία.

Η πρώτη και η βασική είναι αυτή που χρησιμοποιεί το σύστημα. Αποτελείται από μία σειρά αντικείμενα προκειμένου να υλοποιηθούν οι διάλογοι μέσα στο σύστημα. Κάποια από αυτά είναι:

Όνομα	Τύπος	Περιγραφή
I_belong	Predicates	Ανήκω
Sell	agent actions	Αγορά Ενέργειας
Buy	agent actions	Πώληση ενέργειας
Shut_Down	agent actions	Σταμάτημα φορτίου ή μονάδος
Amount	concepts	Ποσό προσφοράς
Setpoint	concepts	Ποσό ενέργειας

Πίνακα 6.1 Ορισμένα από τα στοιχεία των οντολογιών που υλοποιήθηκαν.

Με την χρήση των στοιχείων αυτών της οντολογίας αναπτύχθηκαν οι διάλογοι μέσα στο Jade. Η οντολογία αυτή αν και απλή στην γενική της μορφή μας δίνει σημαντικές δυνατότητες στην οργάνωση αλλά και την λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον μας παρέχει ένα εξαιρετικό εργαλείο προκειμένου να περιγράψουμε σύνθετες έννοιες και διεργασίες.

Μία δεύτερη οντολογία αναπτύχθηκε προκειμένου να δοκιμαστεί μία πιο εξεζητημένη λύση. Η οντολογία αυτή βασίστηκε στο CIM χωρίς ωστόσο να είναι πλήρως συμβατή με την αρχιτεκτονική που περιγράφει η FIPA. Ο στόχος όμως ήταν να χρησιμοποιήσουμε στην επικοινωνία τα αντικείμενα που περιγράφει το CIM. Για την ακρίβεια χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Poseidon δημιουργήσαμε τις κλάσεις σε Java όλων των στοιχείων του CIM. Στην συνέχεια χρησιμοποιήσαμε τα αντικείμενα σε υποτυπώδης διαλόγους των πρακτόρων κάνοντας serialize τα αντικείμενα και μεταφέροντας τα μέσα από το περιεχόμενο των μηνυμάτων.

Το βασικό συμπέρασμα που προήλθε από την χρήση του CIM για την επικοινωνία των πρακτόρων είναι ότι πρόκειται για ένα πολύ ευέλικτο μοντέλο περιγραφής πληροφορίας αλλά και συνάμα εξαιρετικά πολύπλοκο. Για τον λόγο αυτό η ανάπτυξη μία πλήρους οντολογίας με την τεχνολογία αυτή πρέπει να είναι αντικείμενο ομαδικής δουλειάς πολλών προγραμματιστών. Ωστόσο υπάρχει και ένα καίριο αδύνατο σημείο στην ανάπτυξη του CIM και αυτό σχετίζεται με σημαντικές ελλείψεις στην περιγραφή αγορών ενέργειας και αυτό το μειονέκτημα δεν αναμένεται να επιλυθεί άμεσα δεδομένου ότι δεν υπάρχει μία κοινή βάση λειτουργίας των αγορών ενέργειας διεθνώς.

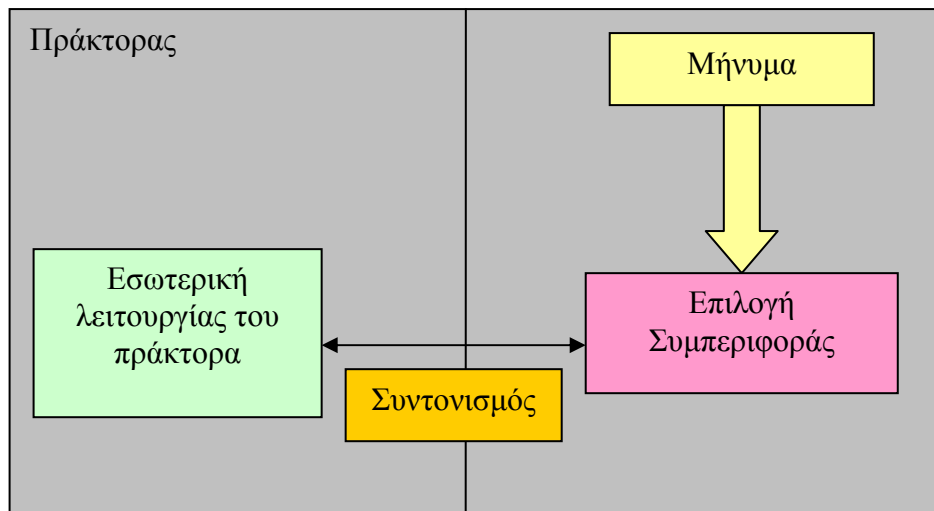
6.4.4.2 Συμπεριφορές.

Σε ότι αφορά την υλοποίηση των συμπεριφορών χρησιμοποιήσαμε τρεις βασικές κυκλικές συμπεριφορές.

1. Επικοινωνία πρακτόρων.
2. Εσωτερική λειτουργία του πράκτορα.
3. Συμμετοχή στην εκκίνηση του συστήματος και στην αγορά ενέργειας.

Η διαχείριση των συμπεριφορών είναι ένα σημαντικό θέμα της ανάπτυξης του συστήματος. Ο λόγος είναι ότι το σύστημα καλείται να υλοποιήσει εσωτερικά μια σειρά από λειτουργίες. Ο σωστός χρονισμός είναι κρίσιμος έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί μία χαοτική κατάσταση. Επιπλέον θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στην πλατφόρμα Jade οι συμπεριφορές δεν υλοποιούνται με νήματα αλλά είναι σειριακές.

Ουσιαστικά έχουμε δύο βασικές λειτουργίες στον πράκτορα. Η πρώτη αφορά την εσωτερική του κατάσταση και είναι ανεξάρτητη από την συμμετοχή του στις λειτουργίες του συστήματος. Ενώ η δεύτερη αφορά την συμμετοχή του στο σύστημα ευφών πρακτόρων.



Σχήμα 6.15 Η αρχιτεκτονική μια πλατφόρμας MAS συμβατή με τα πρότυπα της FIPA.

Η αντίδραση του πράκτορα εξαρτάται από τα μηνύματα που λαμβάνει από τους άλλους πράκτορες και το περιβάλλον. Πρακτικά αν τα μηνύματα αφορούν την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας τότε ο πράκτορας ενεργοποιεί τις αντίστοιχες λειτουργίες. Επιπλέον καθορίζει και τις αντίστοιχες παραμέτρους εσωτερικής λειτουργίας. Το σημαντικό είναι ότι η εσωτερική συμπεριφορά μπορεί να απορίψει τις παραμέτρους αυτές εάν το κρίνει. Για παράδειγμα η μπαταρία θα σταματήσει την παραγωγή αν η φόρτιση είναι κάτω από ένα όριο.

6.4.4.3 Η λειτουργία του πράκτορα DF.

Όπως έχει προαναφερθεί ο Directory Facilitator (DF) είναι ο πράκτορας που παρέχει υπηρεσίες «Χρυσού Οδηγού» στην πλατφόρμα. Πρακτικά κάθε πράκτορας κατά την δημιουργία του ανακοινώνει στον DF τις υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει στο δίκτυο. Οι υπηρεσίες αυτές είναι ο κορμός για την επικοινωνία αφού κάθε ερώτημα που υποβάλει ένας πράκτορας προς τους υπολοίπους είναι το τύπου:

«Ερώτηση X προς τους πράκτορες που παρέχουν την υπηρεσία A»

Ο συνολικός κατάλογος των υπηρεσιών που υλοποιήθηκαν φαίνεται στον πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Η λειτουργία αυτή των πρακτόρων είναι εξαιρετικά σημαντική αφού δίνει στο σύστημα πραγματική δυνατότητα «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» (plug n' play). Πρακτικά σημαίνει ο κάθε πράκτορας δεν γνωρίζει από την αρχή ποιοι πράκτορες είναι στο δίκτυο αλλά τους αναζητά μέσα από τις υπηρεσίες που παρέχουν. Προφανώς για την πληρότητα της προηγούμενης σύνδεσης η δυνατότητα «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» δεν αναφέρεται στην ηλεκτρική σύνδεσης της μονάδας παραγωγής ή του φορτίου.

	Υπηρεσία	Περιγραφή
1	SERVICE_MGCC	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή αναλαμβάνει τον συντονισμό των πρακτόρων ως MGCC
2	SERVICE_LOAD_CONSUMPTION	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί ένα φορτίο
3	SERVICE_POWER_PRODUCTION	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί μία μονάδα παραγωγής
4	SERVICE_POWER_SELLER	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή συμμετέχει στην αγορά ενέργειας σαν πωλητής
5	SERVICE_POWER_BUYER	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή συμμετέχει στην αγορά ενέργειας σαν αγοραστής
6	SERVICE_BLACKSTART_LOAD	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί ένα κρίσιμο φορτίο.
7	SERVICE_BLACKSTART_PRODUCTION	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί μία μονάδα που μπορεί να εκκινήσει το δίκτυο από μόνη της
8	SERVICE_MARKET_PLAYER_SELLER	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί ένα εικονικό πράκτορα που πουλά ενέργεια όπως αυτός περιγράφεται στην στο δεύτερο επίπεδο της πολυεπίπεδης μάθησης
9	SERVICE_MARKET_PLAYER_BUYER	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή εκπροσωπεί ένα εικονικό πράκτορα που αγοράζει ενέργεια όπως αυτός περιγράφεται στην στο δεύτερο επίπεδο της πολυεπίπεδης μάθησης
10	SERVICE_TRACKING	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή επιτηρεί το δίκτυο προκειμένου να κατανοήσει αν είναι σε λειτουργία ή υπάρχει πρόβλημα με την τάση ή την συχνότητα.
11	SERVICE_LOAD_CONTROL	Ο πράκτορας που παρέχει την υπηρεσία αυτή ελέγχει το φορτίο που εκπροσωπεί

Πίνακα 6.2 Οι υπηρεσίες που παρέχουν οι πράκτορες.

6.4.4.4 Οι πράκτορες που δημιουργήθηκαν.

Στα πλαίσια της υλοποίησης του συστήματος μας κατασκευαστήκαν οι εξής πράκτορες:

1. MGCC
2. Battery Agent
3. PV Agent
4. Load Agent
5. Tracking Agent
6. Power System Agent
7. selling/buying Agents

για του πράκτορες αυτούς κατασκευάστηκαν επιπλέον και αντίστοιχα γραφικά περιβάλλοντα (GUI Graphic User Interface) προκειμένου να γίνεται καλύτερη διαχείριση. Στην συνέχεια παρατίθεται σύντομη περιγραφή για κάθε έναν από αυτούς.

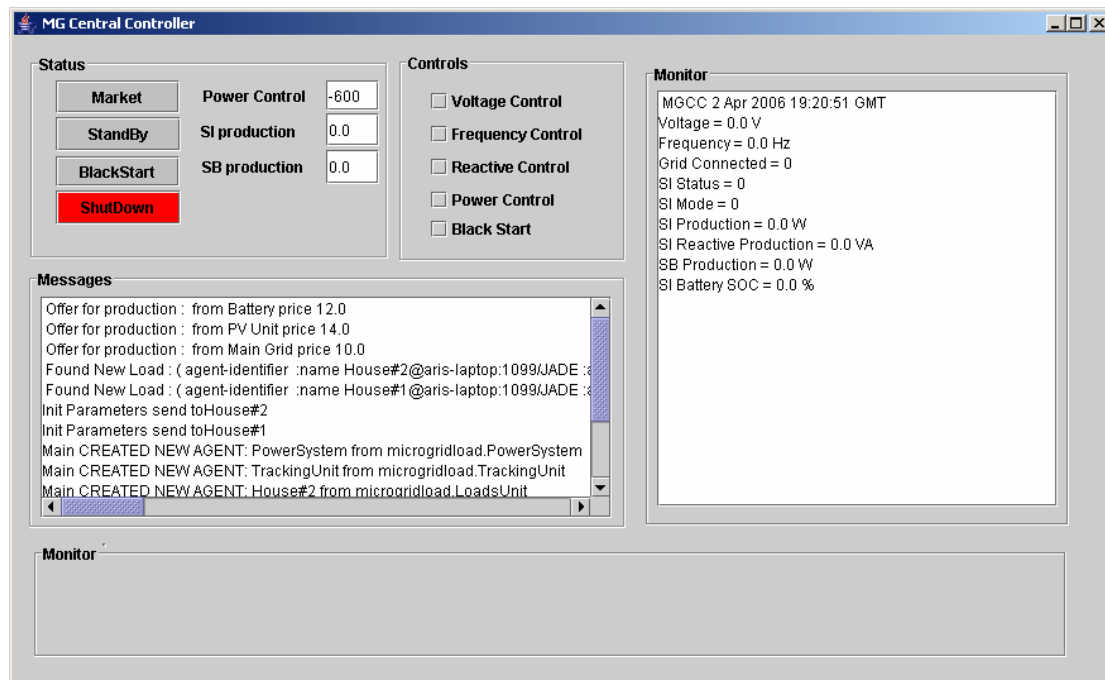
1. MGCC

Ο πράκτορας αυτό έχει σαν στόχο τον συντονισμό του συστήματος και για την ακρίβεια έχει αναλάβει τα εξής καθήκοντα:

- Δημιουργία όλων των λοιπών πρακτόρων του συστήματος
- Έναρξη τερματισμό αγοράς ενέργειας
- Έναρξη διαδικασίας εκκίνησης συστήματος από σβηστή κατάσταση.

Προκειμένου να επιτελεσει τους στόχους του στέλνει μηνύματα προς όλους τους πράκτορες για το πότε θα ξεκινήσουν κάποια λειτουργία ή θα την τερματίσουν. Σε ένα πραγματικό σύστημα προφανώς την λειτουργία αυτή θα μπορεί να την επιτελέσει οποιοσδήποτε πράκτορας. Προφανώς όμως θα γίνεται από έναν πράκτορα κάθε φορά.

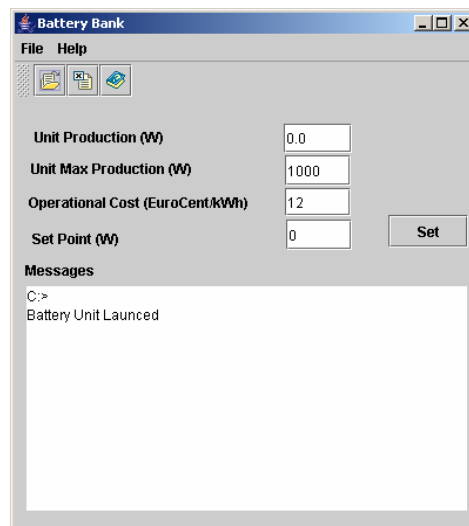
Το γραφικό του περιβάλλον φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 6.16 Το γραφικό περιβάλλον του MGCC

2. ο Battery Agent

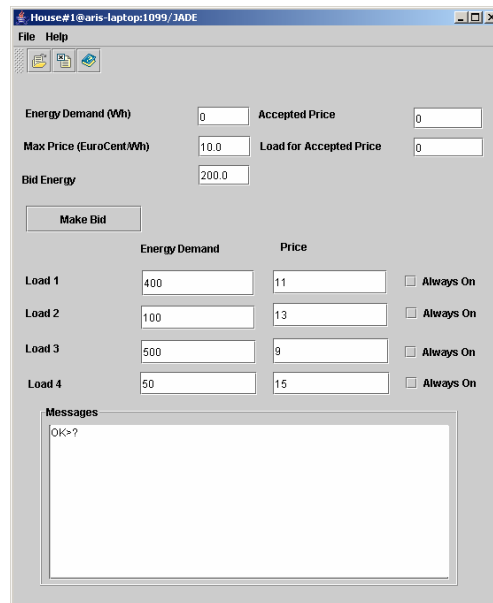
Ο πράκτορας αυτός ελέγχει την συστοιχία των μπαταριών. Προφανώς στον πράκτορα αυτό έχουν ενσωματωθεί οι λειτουργίες για τον έλεγχο της μπαταρίας αλλά και οι λειτουργίες για την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας ή την λειτουργία σε κατάσταση νησίδας. Από το γραφικό περιβάλλον ο χειριστής μπορεί να μεταβάλει τα κόστη σε ότι αφορά την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας.



Σχήμα 6.17 Το γραφικό περιβάλλον του Battery Agent

3. ο Load Agent

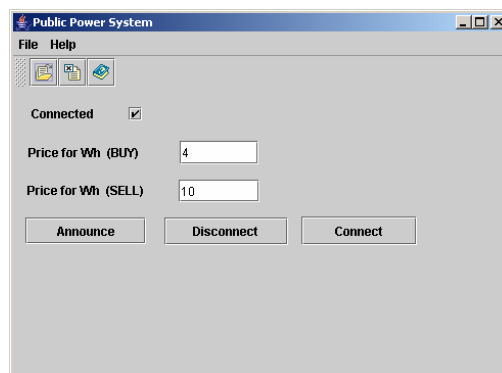
Ο πράκτορας αυτός ελέγχει τα φορτία. Δεδομένου ότι έχουμε οχτώ συνολικά ελεγχόμενα φορτία υλοποιήσαμε από 2 πράκτορες οι οποίοι ελέγχουν από τέσσερα φορτία. Από το γραφικό περιβάλλον ο χειριστής μπορεί να μεταβάλει τα κόστη σε ότι αφορά την συμμετοχή στην αγορά ενέργειας.



Σχήμα 6.17 Το γραφικό περιβάλλον του Load Agent

4. ο Power System Agent

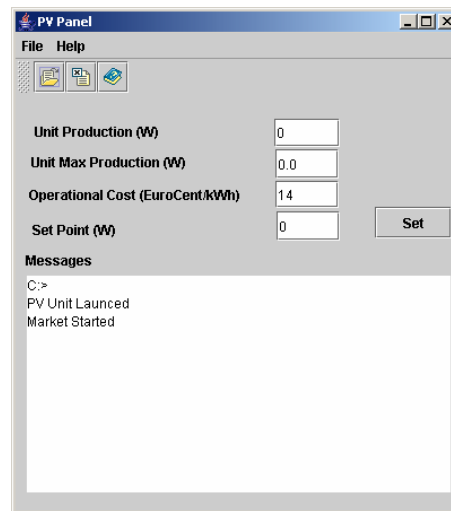
Ο πράκτορας αυτός εκπροσωπεί το κυρίως δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένο το μικροδίκτυο. Ουσιαστικά μεταφέρει τις τιμές για την αγορά και την πώληση της ενέργειας που ισχύουν την στιγμή εκείνη.



Σχήμα 6.18 Το γραφικό περιβάλλον του Power System Agent

5. ο PV Agent

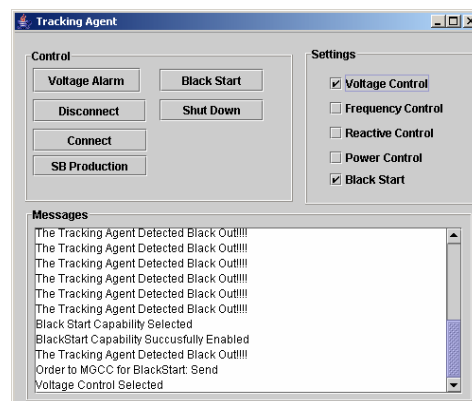
Ο πράκτορας αυτός ελέγχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Σχήμα 6.19 Το γραφικό περιβάλλον του PV agent

6. ο Tracking Agent

Ο πράκτορας αυτός επιτελεί επικουρικές εργασίες. Μπορεί να αντιληφθεί το black out ή συνδέσει-αποσυνδέσει το μικροδίκτυο από το κυρίως σύστημα. Αν και οι λειτουργίες του κανονικά περιλαμβάνονται στις λειτουργίες του MGCC ωστόσο για λόγους απλοποίησης την ανάπτυξης του λογισμικού επιλέχθηκε να είναι ξεχωριστός πράκτορας.



Σχήμα 6.20 Το γραφικό περιβάλλον του Tracking Agent

7. οι selling/buying Agents

Οι δύο αυτοί πράκτορες επιτελούν βοηθητικό έργο και ο πραγματικός του ρόλος επεξηγείται στο κεφάλαιο 4. Ποιο συγκεκριμένα αναλαμβάνουν να υλοποιήσουν το αλγόριθμο της συμμετρικής ανάθεσης αντικειμένων.

6.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν μία σειρά από τεχνικές λεπτομέρειες που σχετίζονται με την ανάπτυξη του λογισμικού για τα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων. Ποιο συγκεκριμένα τα σημεία που εστιάζουμε είναι τόσο η ανάπτυξη του λογισμικού με την γλώσσα Java αλλά και οι τεχνολογίες αυτές που θα επιτρέψουν στους πράκτορες την ομαλή επικοινωνία με τα υπόλοιπα τμήματα ενός μικροδικτύου αλλά και ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

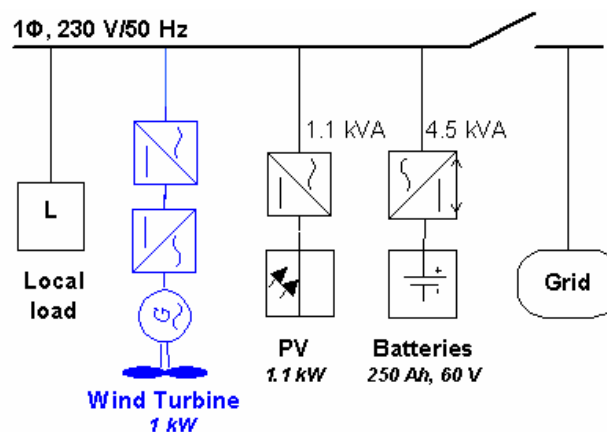
Ειδικότερα ειδική μνεία γίνεται στο CIM (Common Information Model) που όπως θα αναφερθεί και στο επόμενο κεφάλαιο αναμένεται να συγκεντρώσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Το CIM θα αποτελέσει την βάση για την ανάπτυξη μίας κοινής οντολογίας για τους πράκτορες που σχετίζονται με τον έλεγχο και την λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος παραθέσαμε λεπτομέρειες για την υλοποίηση των πρακτόρων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η υλοποίηση αυτή δοκιμάστηκε σε εργαστηριακές συνθήκες ελέγχοντας κάποιες μικροπηγές αλλά και κάποια φορτία.

Παράρτημα Α

Το πειραματικό μικροδίκτυο του ΕΜΠ

Στο εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του ΕΜΠ βρίσκεται εγκατεστημένο ένα εργαστηριακό μικροδίκτυο. Η σύνθεση του συστήματος του πολυτεχνείου φαίνεται στο σχήμα 1 ενώ στο επόμενο σχήμα ακολουθεί μία φωτογραφία του πραγματικού συστήματος. Πρόκειται για ένα αρθρωτό σύστημα που αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία 1.1 kW (10*110W) σαν κύρια πηγή ενέργειας, μία μικρή ανεμογεννήτρια 1kW, μία συστοιχία μπαταριών 250Ah/4.5kW μία μικρή φωτοβολταϊκή γεννήτρια 110 W και διάφορα ελεγχόμενα φορτία. Στον πίνακα Α.1 παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία του συστήματος περιληπτικά. Οι μικροπηγές είναι συνδεδεμένες παράλληλα σε ένα ζυγό AC μέσω αντιστροφών. Για τον αντιστροφέα των μπαταριών έγινε εκτενής αναφορά στο κείμενο.

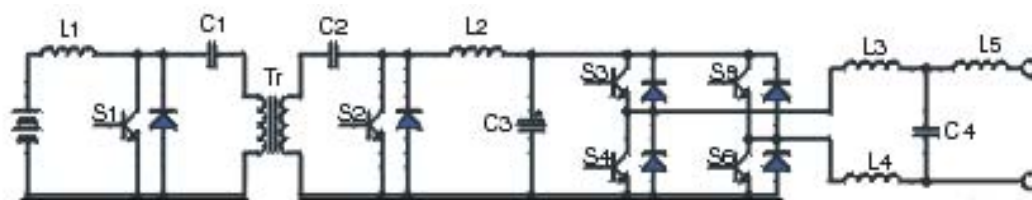


Σχήμα Α.1 Το εργαστηριακό μικροδίκτυο.

Στοιχείο	Περιγραφή
Γεννήτρια PV 1	10 Στοιχεία κρυστάλλου πυριτίου 110W/12V Αντιστροφέας SMA/Sunny Boy/1100 W
Γεννήτρια PV 2	1 Στοιχεία κρυστάλλου πυριτίου 110W/12V Αντιστροφέας Soladin 120 W
Μπαταρία	Κυψέλες: Μολύβδου- οξέος, 30 Κυψέλες, 2 V, 250/370 Ah Αντιστροφέας: SMA/Sunny Island/4.5 kVA
Ανεμόγεννήτρια	1 AC κινητήρας 1.1kW Αντιστροφέας SMA/Windy Boy/1100 W
Φορτία	Παθητικά, φωτισμός, κινητήρας ελεγχόμενα

Πίνακας Α.1 Στοιχεία του εργαστηρίου.

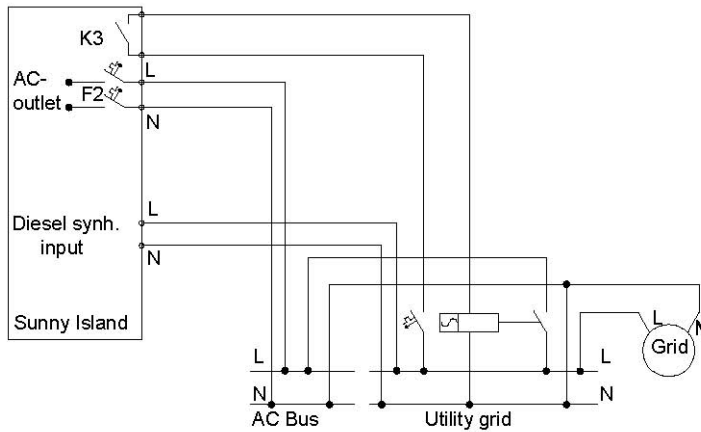
Ο αντιστροφέας των μπαταριών λειτουργεί σε κατάσταση ελέγχου τάσης (voltage control mode) , δηλαδή ελέγχει την συχνότητα, το πλάτος και την γωνία της τάσης όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη κατάσταση (“grid-forming”). Αντίστοιχα όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο τότε η συχνότητα, το πλάτος και η γωνία της τάσης καθορίζονται από το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ο αντιστροφέας σαν ακόλουθος του δικτύου (“grid-following”).



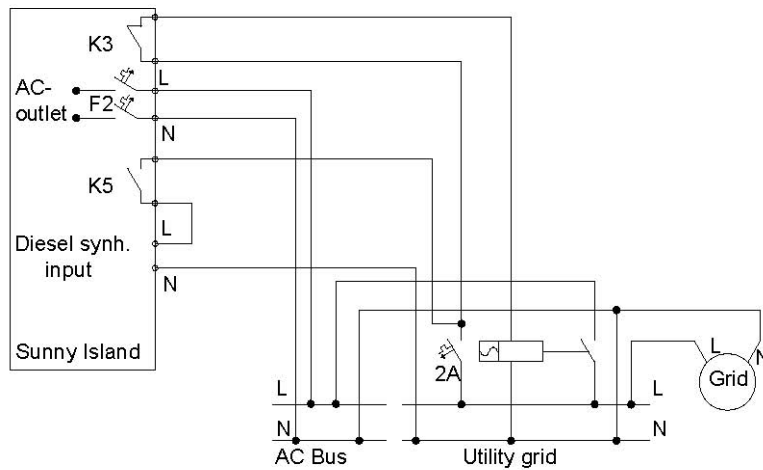
Σχήμα Α.2 Το κύκλωμα ισχύος του αντιστροφέα.

Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών επιτελούν λειτουργία MPPT (Maximum Power Point Tracking) προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν την ισχύ εξόδου τους. Οι αντιστροφείς αυτοί δεν συμμετέχουν στον έλεγχο της συχνότητας ή της τάσης.

Η αρχική σύνδεση του αντιστροφέα Sunny Island φαίνεται στο σχήμα Α.3. Η βασική ιδέα της σύνθεσης του σχήματος αυτού είναι να γίνει απομόνωση της λειτουργίας του συστήματος όταν το δίκτυο θα παρουσιάσει πρόβλημα. Για τον σκοπό αυτό η αντίστοιχη είσοδος του αντιστροφέα που ονομάζεται “Diesel synch. input” όταν εντοπίσει απώλεια του δικτύου δίνει εντολή στον K3 να ανοίξει. Με την επαναφορά του δικτύου, ο αντιστροφέας Sunny Island εντοπίζει την τάση στον K3 και δίνει αντίστοιχη εντολή να κλείσει. Με τον τρόπο αυτό η απώλεια του δικτύου γινόταν αυτόματα αντιληπτή και έτσι το μικροδίκτυο μεταφερόταν σε κατάσταση απομόνωσης. Το πρόβλημα που υπήρχε όμως ήταν ότι η μετάβαση γινόταν με μικρή διακοπή της τάσης εντός του μικροδικτύου.



Σχήμα Α.3 Αρχική σύνδεση στο μικροδίκτυο.



Σχήμα Α.4 Νέα σύνδεση στο μικροδίκτυο.

Στην συνέχεια αναβαθμίστηκε το πρόγραμμα του ελεγκτή και ακολουθείται η τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα Α.4 στο οποίο η μετάβαση από την συνδεδεμένη κατάσταση με το δίκτυο προς την απομονωμένη γίνεται με την χρήση του διακόπτη K5 ο οποίος οδηγεί την είσοδο “Diesel synch. input”. Όταν η είσοδος αυτή δεν βλέπει τάση τότε ο αντιστροφέας απομονώνει το μικροδίκτυο. Αντίστροφα όταν βλέπει τάση θεωρεί ότι το κυρίως δίκτυο επανήλθε και προσπαθεί να συνδεθεί σε αυτό. Η μετάβαση με τον τρόπο αυτό γίνεται χωρίς διακοπή.

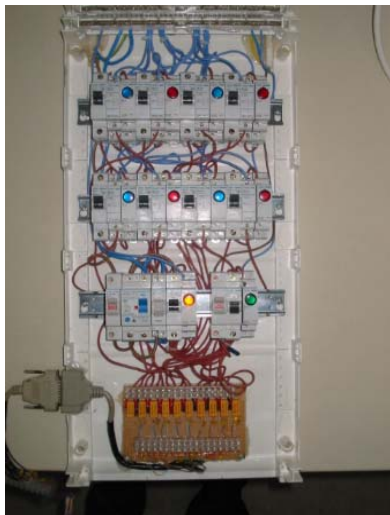
Το πρόβλημα ωστόσο είναι ότι η λειτουργία αυτή δεν μπορεί να εντοπίζει βλάβες στο κυρίως δίκτυο. Οπότε η μετάβαση εξασφαλίζεται αν δεν υπάρχει βλάβη στο δίκτυο. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό απαιτείται πολύ γρήγορη μέτρηση και εντοπισμός του σφάλματος στο δίκτυο.

Σε ότι αφορά τον έλεγχο των φορτίων χρησιμοποιήθηκε ένα PLC (Programmable Logic Controller) της Siemens που φαίνεται στο σχήμα Α.5 και επιπλέον μία κάρτα εισόδων εξόδων για υπολογιστή. Επιπλέον κατασκευάστηκε και ένας πίνακας με ηλεκτρονόμους 24V/230V που φαίνεται στο σχήμα Α.6 προκειμένου να οδηγούνται τα φορτία.



Σχήμα Α.5 το PLC που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο.

Ο πίνακας συνδέεται με την κάρτα εισόδων εξόδων χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους ηλεκτρονόμους 5 σε 24V.



Σχήμα Α.6 ο πίνακας με τους ηλεκτρονόμους..

Μια σειρά από φορτία χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες του εργαστηρίου. Ορισμένα από αυτά φαίνονται στο σχήμα Α.7.



Σχήμα Α.7. Διάφορα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν

Παράρτημα Β

Υλοποίηση λογικής καμπύλων στατισμού σε αντιστροφή

Μια σημαντική διαφορά που υπάρχει στα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι ότι το R δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Στην γενική περίπτωση θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και το R αλλά και το X. Μία μέθοδος που προτείνεται από τους [3.2.4] είναι να λάβουμε ένα μετασχηματισμό πίνακα που προκαλεί γραμμική περιστροφή του διανύσματος:

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & -\frac{R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad \text{B.1}$$

Οπότε καταλήγουμε στις εξής τροποποιημένες εξισώσεις θεωρώντας μικρό δ:

$$\delta = \frac{XP'}{V_1 V_2} \quad \text{B.2}$$

$$V_1 - V_2 = \frac{XQ'}{V_1} \quad \text{B.3}$$

Και

$$f - f_o = -k_p (P' - P'_o) \quad \text{B.4}$$

$$V_1 - V_o = -k_q (Q' - Q'_o) \quad \text{B.5}$$

Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει ότι ο έλεγχος συχνότητας και τάσης μπορεί να γίνει από τα μετασχηματισμένα P' και Q'. Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι να είναι γνωστός ή μετρήσιμος ο λόγος R/X της γραμμής. Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστός οι συγγραφείς [3.2.4] προτείνουν να θεωρείται ίσος με 1 δηλαδή R=X.

Παράρτημα Γ

Αποδείξεις σύγκλισης αλγορίθμου συμμετρικής ανάθεσης αντικειμένων

Θεωρητικές αποδείξεις

Το πρώτο πρόβλημα που προκύπτει είναι κατά πόσο η χρήση της ε-συμπληρωματικής αδιαφορίας μπορεί να εξασφαλίσει ότι η λύση απέχει το πολύ ϵ από την βέλτιστη λύση. Η απόδειξη [4.1-4.2] βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει βέλτιστη λύση. Έστω ότι $\epsilon > 0$. Τότε το συνολικό όφελος κάθε λογικής ανάθεσης $\{(i, k_i) | i=1, \dots, n\}$ ικανοποιεί την εξής σχέση:

$$\sum_{i=1}^n a_{ik_i} = \sum_{i=1}^n p_{k_j} + \sum_{i=1}^n (a_{ik_j} - p_{k_j}) \leq \sum_{j=1}^n p_j + \sum_{i=1}^n \max_j (a_{ij} - p_j) \quad \Gamma.1$$

Για κάθε σύνολο τιμών $\{p_j | j=1, \dots, n\}$ δεδομένου ότι το δεύτερο μέλος του δεξιού τμήματος της ανισότητας δεν είναι μικρότερο από:

$$\sum_{i=1}^n \max_j (a_{ij} - p_j) \geq \sum_{i=1}^n (a_{ik_j} - p_{k_j}) \quad \Gamma.2$$

Ενώ ο πρώτος όρος είναι

$$\sum_{j=1}^n p_j = \sum_{i=1}^n p_{k_j} \quad \Gamma.3$$

Έστω A^* ότι είναι η βέλτιστη ανάθεση τότε ισχύει:

$$A^* = \max_{\substack{k_i \in A(i), i=1, \dots, n \\ k_i \neq k_m \text{ αν } i \neq m}} \sum_{i=1}^n a_{ik_i} \quad \Gamma.4$$

Και έστω

$$D^* = \min_{\substack{p_j \\ j=1, \dots, n}} \left\{ \sum_{i=1}^n p_j + \sum_{i=1}^n \max_j (a_{ij} - p_j) \right\} \quad \Gamma.5$$

Προφανώς

$$A^* \leq D^* \quad \Gamma.6$$

Όμως για κάθε ανάθεση $\{(i,j_i)|i=1,\dots,n\}$ που ικανοποιεί το κριτήριο της ε-συμπληρωματικής αδιαφορίας με ένα σύνολο τιμών $\{\bar{p}_j | j=1,\dots,n\}$ ισχύει

$$a_{ij_i} - \bar{p}_{j_i} \geq \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - \bar{p}_j\} - \varepsilon \quad \Gamma.7$$

Προσθέτοντας την σχέση αυτή για κάθε i προκύπτει ότι

$$D^* \leq \sum_{i=1}^n \left(\bar{p}_{j_i} + \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - \bar{p}_j\} \right) \leq \sum_{i=1}^n a_{ij_i} + n\varepsilon \leq A^* + n\varepsilon \quad \Gamma.8$$

Οπότε λόγω της $A^* \leq D^*$ προκύπτει ότι

$$A^* \leq D^* \leq A^* + n\varepsilon \quad \Gamma.9$$

Δηλαδή το όφελος από την ανάθεση απέχει το πολύ $n\varepsilon$ από την βέλτιστη λύση. Προφανώς όταν $\varepsilon \rightarrow 0$ τότε η λύση τείνει στην βέλτιστη λύση. Στο [11] δείχνεται επίσης ότι αν τα οφέλη είναι ακέραιοι αριθμοί και $\varepsilon < 1/n$ τότε η λύση είναι η βέλτιστη.

Το επόμενο θέμα είναι κατά πόσο ο αλγόριθμος συγκλίνει σε πεπερασμένες επαναλήψεις για κάθε θετική τιμή του ε και καταλήγει σε μία αποδεκτή ανάθεση η οποία απέχει $n\varepsilon$ από το βέλτιστο και είναι βέλτιστη αν τα δεδομένα του προβλήματος είναι ακέραιοι και το $\varepsilon < 1/n$.

Θα πρέπει στην αρχή να αναφερθούν τρία δεδομένα.

Α)Το πρώτο δεδομένο είναι ότι αν ένα αντικείμενο έχει ανατεθεί σε κάποιο άτομο τότε αυτό θα παραμένει ανατεθειμένο σε καθ' όλη την διάρκεια του αλγορίθμου. Επιπλέον καθ' όλη την διάρκεια του αλγορίθμου και εκτός από την τελική φάση ένα τουλάχιστον αντικείμενο θα παραμένει στην αρχική του τιμή. Ο λόγος είναι ότι η διαδικασία προσφορών και αναθέσεων μπορεί να οδηγήσει στην ανάθεση εκ νέου ενός αντικειμένου σε κάποιο άτομο αλλά όχι να αφήσει ελεύθερο κάποιο αντικείμενο.

Β)Κάθε φορά που ένα αντικείμενο λαμβάνει μία προσφορά, η τιμή του αυξάνει κατά ε με αποτέλεσμα αν το αντικείμενο αυτό λάβει άπειρες προσφορές τότε η τιμή του θα τείνει στο άπειρο.

Γ)Το τελευταίο δεδομένο είναι ότι για κάθε $|A(i)|$ προσφορές, όπου $|A(i)|$ είναι ο αριθμός των αντικειμένων στο σύνολο $A(i)$ η αξία του καλύτερου αντικειμένου που είναι

$$u_i = \max_{j \in A(i)} \{a_{ij} - p_j\} \quad \Gamma.10$$

μειώνεται τουλάχιστον κατά ε . Ο λόγος για τον οποίον συμβαίνει αυτό είναι ότι σε κάθε προσφορά το αντικείμενο αυτό θα λάβει μία προσφορά και η τιμή του θα μειωθεί κατά τουλάχιστον ε ή δεν θα λάβει καμία προσφορά επειδή υπάρχουν αντικείμενα ίσης αξίας στο σύνολο. Ωστόσο είναι προφανές ότι μετά από $|A(i)|$ επαναλήψεις θα λάβει τουλάχιστον μία προσφορά. Το αποτέλεσμα είναι ότι μετά από άπειρες προσφορές η αξία του μειώνεται στο πλην άπειρο.

Η συνέχεια της απόδειξης είναι δια της άτοπου απαγωγής. Έστω ότι δεν τερματίζει ο αλγόριθμος οπότε το σύνολο J των αντικείμενων που έχουν λάβει άπειρες προσφορές δεν θα είναι κενό. Επιπλέον το σύνολο I των ατόμων που μετά από άπειρες επαναλήψεις και αυτό δεν θα είναι κενό. Σύμφωνα με την υπόθεση (B) οι τιμές των αντικειμένων που ανήκουν στο (B) θα τείνουν στο άπειρο ενώ σύμφωνα με το (Γ) οι αξία των αντικειμένων θα τείνει στο πλην άπειρο. Η βασική συνθήκη του αλγορίθμου είναι η

$$a_{ij_i} - p_{j_i} \geq \max_{j \in A(i)} \left\{ a_{ij} - p_j \right\} - \varepsilon \quad \Gamma.11$$

Δηλαδή

$$a_{ij_i} - p_{j_i} \geq u_i - \varepsilon \quad \Gamma.12$$

Η συνθήκη ισχύει για κάθε ζεύγος που δεν ανήκει στο I, J .

Οπότε ο αλγόριθμος θα συγκλίνει.

Παράρτημα Δ

Θεωρία μπαταριών

Δ.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία μίας μπαταρίας

Σε αυτό το σημείο θα προσπαθήσουμε να αναπτύξουμε ποιοτικά την επιρροή διαφόρων παραγόντων στην καλή λειτουργία της μπαταρίας[3.2.4-8].

Η επίδραση του ρεύματος εκφόρτισης

Όταν το ρεύμα που παρέχεται από την μπαταρία αυξάνει, οι απώλειες λόγω ωμικών αντιστάσεων και λόγω πόλωσης αυξάνονται και έτσι παρατηρείται μείωση της τάσης λειτουργίας. Για πολύ ασθενή ρεύματα, η τάση της μπαταρίας είναι δυνατόν να προσεγγίσει την ιδανική συμπεριφορά της. Ωστόσο σε ακόμα πιο αργούς ρυθμούς είναι δυνατόν να παρουσιαστούν απώλειες λόγω παράπλευρων χημικών αντιδράσεων. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται για διαφορετικά ρεύματα εκφόρτισης, τα διαγράμματα τάσης – χρόνου εκφόρτισης. Παρατηρούμε ότι με αύξηση του ρεύματος, η τάση πέφτει και μάλιστα η κλίση της καμπύλης εκφόρτισης γίνεται σαφώς πιο έντονη και η ωφέλιμη χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται.

Αν μία μπαταρία κατά την εκφόρτιση με έναν συγκεκριμένο ρυθμό φτάσει την τάση αποκοπής της, τότε με έναν μικρότερο ρυθμό η τάση λειτουργίας της θα είναι μεγαλύτερη και θα μπορεί να γίνει εκμετάλλευση περισσότερου αποθηκευμένου φορτίου μέχρι η τάση της να ξαναφτάσει την τάση αποκοπής. Έτσι για παράδειγμα, μία μπαταρία που έχει χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία μιας απαιτητικής σε ισχύ εφαρμογής και έχει εξαντληθεί, μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί σε μια εφαρμογή με μικρότερες απαιτήσεις σε ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί ο χρόνος ζωής ενός τύπου μπαταρίας για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης χρησιμοποιώντας μόνο ένα δείγμα αυτής της μπαταρίας.

Η επίδραση του τρόπου εκφόρτισης

Ο τρόπος εκφόρτισης της μπαταρίας μπορεί να έχει ιδιαίτερη επίδραση στην αποδοτικότητα της μπαταρίας, για αυτό είναι εν γένει προτιμώμενο οι έλεγχοι να γίνονται ακριβώς με τον τρόπο με τον οποίο αναμένεται να χρησιμοποιηθεί η μπαταρία.

Οι τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους γίνεται η εκφόρτιση σε εργαστηριακές συνθήκες προκειμένου να εξαχθούν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας είναι οι εξής[3.2.8-9]:

1. Υπό σταθερή αντίσταση. Στην μπαταρία συνδέεται σταθερό φορτίο. Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης το ρεύμα πέφτει αναλογικά με την τάση.

2. Υπό σταθερό ρεύμα.

3. Υπό σταθερή ισχύ. Το ρεύμα εκφόρτισης αυξάνει στην διάρκεια της εκφόρτισης προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η παρεχόμενη ισχύς.

Στην εκφόρτιση υπό σταθερό φορτίο, το ρεύμα πέφτει ακολουθώντας αναλογικά την πτώση τάσης, ενώ η ισχύς πέφτει γρηγορότερα ακολουθώντας το τετράγωνο της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη ισχύς στο τέλος της εκφόρτισης, το φορτίο ρυθμίζεται ώστε περισσότερο ρεύμα και ισχύς να αποδίδονται προηγουμένως, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια και χρόνος λειτουργίας να μειώνεται σημαντικά.

Στην εκφόρτιση υπό σταθερό ρεύμα, αυτό διατηρείται σε τέτοια επίπεδα ώστε όταν η τάση φτάσει την τιμή αποκοπής να μπορεί να αποδίδει την ελάχιστη ισχύ. Η τιμή του τότε παραμένει χαμηλότερη από την τιμή για εκφόρτιση υπό σταθερό φορτίο και ο χρόνος λειτουργίας αυξάνεται.

Σε εκφόρτιση υπό σταθερή ισχύ, το ρεύμα στην αρχή είναι χαμηλό και στην συνέχεια αυξάνεται αντίστροφα προς την τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μέσου ρεύματος σε σχέση με τους άλλους δυο τρόπους και κατά συνέπεια την αύξηση του χρόνου λειτουργίας.

Ενδιαφέρον τέλος παρουσιάζει η περίπτωση που η εκφόρτιση δεν είναι συνεχής αλλά διακοπτόμενη. Έχει διαπιστωθεί ότι αν μία μπαταρία χρησιμοποιηθεί για λίγο, και κατόπιν παραμείνει ανενεργή, λαμβάνουν χώρα φυσικές και χημικές διεργασίες οι οποίες προκαλούν άνοδο της τάσης, όπως για παράδειγμα η “χαλάρωση” των φαινομένων πόλωσης που παρουσιάζονται σε υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης.

Η επίδραση της θερμοκρασίας.

Η θερμοκρασία υπό την οποία εκφορτίζεται η μπαταρία έχει έντονη επίδραση στην ωφέλιμη χωρητικότητα και κατά συνέπεια στον χρόνο λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει διότι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται τα εξής δύο φαινόμενα.

1. Την μείωση της εσωτερικής αντίστασης της πηγής
2. Την αύξηση του ρυθμού των αντιδράσεων μέσω της μείωσης των δυναμικών πόλωσης ενεργοποίησης και συγκέντρωσης.

Η θερμοκρασία όμως έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση του ρυθμού των αντιδράσεων που σχετίζονται με την χημική φθορά των μπαταριών, οι οποίες μπορεί να προκαλούν αυτοεκφόρτιση ή και μόνιμη φθορά, προκαλώντας έτσι απώλεια ωφέλιμης χωρητικότητας ή ακόμα και μεταβολή στην μέγιστη χωρητικότητα που μπορεί να αποδώσει.

Δ.2 Μοντέλα μπαταριών

Τα τελευταία 50 χρόνια έχει πραγματοποιηθεί σημαντική προσπάθεια στην έρευνα για ανάπτυξη μοντέλων για την περιγραφή των μπαταριών μολύβδου οξέος. Λόγω της εξαιρετικής πολυπλοκότητας αυτού του είδους μπαταριών, δεν έχει γίνει μέχρι τώρα δυνατή η ανάπτυξη ενός, μοναδικού μοντέλου που θα περιγράψει ικανοποιητικά την συμπεριφορά τους. Στην πραγματικότητα, έχει κανείς την εντύπωση ότι η έρευνα στην περιοχή αυτή θα συνεχιστεί για πολλές ακόμα δεκαετίες παρόλο που ο τύπος αυτός είναι σε ευρεία χρήση εδώ και χρόνια. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Μοντέλα τύπου (α) (Ηλεκτροχημικά). Αναπτύχθηκαν για να κατανοήσουμε καλύτερα τα φυσικά, χημικά και ηλεκτρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης των ηλεκτροχημικών στοιχείων. Αυτά τα μοντέλα

μπορούν να λάβουν υπόψιν τους τον πορώδη χαρακτήρα των πλακών, τους ρυθμούς αντίδρασης των εμπλεκόμενων ενώσεων ή ακόμα και την διαστολή των πλακών.

- Μοντέλα τύπου (β) (Στατικά). Χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση των εξωτερικών ηλεκτρικών παραμέτρων κατά την φόρτιση και εκφόρτισή τους με σταθερό ρυθμό όπως για παράδειγμα οι καμπύλες τάσης-χρόνου, η διακύμανση της εσωτερικής αντίστασης κατά την εκφόρτιση, και η μείωση της ωφέλιμης χωρητικότητας σαν συνάρτηση του ρεύματος εκφόρτισης. Μερικοί συγγραφείς συνδυάζουν ημι-εμπειρικούς νόμους όπως αυτός του Peukert, εξισώσεις διάχυσης και ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα ενώ άλλοι χρησιμοποιούν μία συστηματική προσέγγιση στην οποία η μπαταρία θεωρείται ως ένα σύστημα με δύο ακροδέκτες και μη γραμμική σχέση τάσης-ρεύματος.
- Μοντέλα τύπου (γ) (Δυναμικά). Προκειμένου να περιγραφεί η δυναμική συμπεριφορά ενός στοιχείου κατά την φάση λειτουργίας του, έχουν προταθεί ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα στα οποία τα φαινόμενα διπλού στρώματος και διάχυσης προσομοιώνονται από κατάλληλα τοποθετημένους πυκνωτές και αντιστάτες. Η ανάγκη για ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων αυτού του είδους έχει προκύψει από την εφαρμογή των στοιχείων μολύβδου οξέος σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Εφόσον οι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης εξαρτώνται

Η εξίσωση του Peukert

Η εξίσωση του Peukert[3.2.3] είναι ένας τρόπος να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά του στοιχείου και να μοντελοποιηθεί η απώλεια χωρητικότητας με μαθηματικούς όρους. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ήδη από το 1897 αλλά παρόλα αυτά μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές.)

Πρόκειται για μια απλή ημιεμπειρική εξίσωση που προσεγγίζει την ωφέλιμη χωρητικότητα ενός στοιχείου σαν συνάρτηση του ρυθμού εκφόρτισης:

$$I^n \cdot t_{\text{tot}} = C$$

όπου I είναι το ρεύμα εκφόρτισης, C η θεωρητική χωρητικότητα της μπαταρίας t_{tot} ο συνολικός χρόνος εκφόρτισης της μπαταρίας ενώ n είναι ένα μέγεθος γνωστό ως “εκθέτης του Peukert”.

Το μοντέλο του Shepherd

Ο Shepherd ανέπτυξε το μοντέλο αυτό το 1965 [3.2.5]. Πρόκειται ίσως για το πιο γνωστό και πολυχρησιμοποιημένο μοντέλο στη διεθνή βιβλιογραφία τόσο για εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και για την ηλεκτρική αυτοκίνηση [3.2.7]. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι πολλοί μελετητές το χρησιμοποιούν ως βάση προσθέτοντας του διάφορους όρους για να περιγράψουν συγκεκριμένα φαινόμενα σχετικά με την λειτουργία της μπαταρίας.

Το μοντέλο περιγράφει την ηλεκτροχημική συμπεριφορά της μπαταρίας απευθείας σε όρους τάσης και ρεύματος. Στην πιο απλή του μορφή, η εξίσωση που το περιγράφει είναι η εξής:

$$E = E_0 - R_i \cdot I - K_i \cdot \frac{1}{1 - f}$$

όπου:

E η πολική τάση της μπαταρίας

E_0 η τάση ανοιχτού κυκλώματος όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη

R_i η εσωτερική ωμική αντίσταση της μπαταρίας

K_i μία παράμετρος που περιγράφει την αντίσταση πόλωσης

I το ρεύμα κάθε στιγμή

Και το f δίδεται από την επόμενη σχέση

$$f = \frac{\int I dt}{Q_0}$$

όπου Q_0 η χωρητικότητα της μπαταρίας. Δηλαδή το φορτίο που έχει αντληθεί από την μπαταρία προς την ολική της χωρητικότητα (βάθος εκφόρτισης). Για σταθερό ρεύμα, προφανώς $f = I \cdot t$.

Το κινητικό μοντέλο μπαταριών (Kinetic Battery Model, KiBaM)

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης από τους J.F. Manwell και J.G. McGowan προκειμένου να μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά της μπαταρίας μόνο με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή. Δεν απαιτούνται γενικά εκτενείς μετρήσεις του ρεύματος και της τάσης. Κύριος σκοπός του KiBaM είναι να περιγράψει την εξάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας από το ρυθμό εκφόρτισης.

Δυναμικά μοντέλα

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία της μπαταρίας σε καταστάσεις μεταβλητού φορτίου έχουν προταθεί ισοδύναμα κυκλώματα που να την περιγράφουν. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα τα οποία τοποθετούν στο κύκλωμα αντιστάτες και χωρητικότητες, των οποίων οι τιμές είναι στην πραγματικότητα οι παράμετροι προς προσδιορισμό από τους αλγορίθμους προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα.

Δ.3 Μηχανισμοί γήρανσης των μπαταριών

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι ένα σύστημα αρκετά μεγάλης ηλικίας και οι μηχανισμοί γήρανσης του έχουν μελετηθεί αρκετά. Οι κύριοι μηχανισμοί γήρανσης που οδηγούν σε σταδιακή μείωση της απόδοσής τους είναι οι εξής [3.2.11-3.2.12]:

1. Διάβρωση της ανόδου (Anodic corrosion) των πλακών,
2. Εκφυλισμός των ενεργών υλικών της καθόδου και απώλεια επαφής
3. Μη αναστρέψιμη δημιουργία θεικού μολύβδου στην ενεργή μάζα. (κρυστάλλωση)
4. Βραχυκυκλώματα
5. Απώλεια νερού

Διάβρωση της ανόδου

Όσον αφορά στα θετικά ηλεκτρόδια, η φθορά του πλέγματος είναι ο φυσικός μηχανισμός γήρανσης που οδηγεί σε “φυσικό θάνατο”. Ο μεταλλικός μολύβδος στο πλέγμα είναι θερμοδυναμικά ασταθής και για αυτό η ανοδική διάβρωση πρακτικά δεν μπορεί να αποφευχθεί υπό την επίδραση του νερού και του οξέος.

Εκφυλισμός των ενεργών υλικών της καθόδου.

Η απώλεια της συνάφειας ανάμεσα στα σωματίδια του διοξειδίου του μολύβδου στην κάθοδο και η απώλεια επαφής αυτών με το πλέγμα που τα συγκρατεί πάνω στο ηλεκτρόδιο είναι

ακόμα ένας ισχυρός μηχανισμός γήρανσης και σχετίζεται με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης που έχει εκτελέσει η μπαταρία.

Μη αναστρέψιμος σχηματισμός θεικού μολύβδου στην ενεργή μάζα.

Το φαινόμενο που ονομάζεται “σουλφούρωση” (sulfation ή sulfatation) υπήρξε πάντα ένα δύσκολο ζήτημα για τους μηχανικούς μπαταριών για πολλά χρόνια, και παραμένει ακόμα ένας παράγοντας φθοράς για της μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Ο όρος περιγράφει το φαινόμενο κατά το οποίο ο σχηματιζόμενος από την ηλεκτροχημική αντίδραση θειικός μολύβδος εναποτίθεται πάνω στα ηλεκτρόδια με μορφή υψηλής κρυσταλλικότητας. Η κρυσταλλική μορφή του PbSO_4 δεν μπορεί να επανέλθει πλήρως σε ηλεκτροχημικά ενεργή μορφή κατά την φόρτιση προκαλώντας έτσι απώλεια χωρητικότητας .

Βραχυκυκλώματα στους διαχωριστές.

Τα βραχυκυκλώματα στους διαχωριστές είναι πάντα αποτέλεσμα της παρατεταμένης βαθιάς εκφόρτισης. Όταν είναι διαλυμένο στον ηλεκτρολύτη, το PbSO_4 έχει την τάση να γεμίζει τους πόρους του διαχωριστικού υλικού. Κατά την φόρτιση είναι δυνατόν να σχηματιστεί εκεί μεταλλικός μολύβδος ο οποίος σχηματίζει δένδροδομές καθιστώντας δημιουργώντας αγωγίμους δρόμους στο εσωτερικό του διαχωριστή.

Εν γένει, διαχωριστές με μεγάλους πόρους έχουν μεγαλύτερη τάση προς την δημιουργία βραχυκυκλωμάτων από ότι αυτοί με μικρούς πόρους. Επίσης όσο στενότερος είναι ο διαχωριστής τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος.

Βραχυκυκλώματα λόγω μεταλλικών αποθέσεων

Αυτά είναι αποτέλεσμα του εκφυλισμού της ενεργού μάζας. Όταν τα σωματίδια του PbO_2 έχουν χάσει ηλεκτρική και μηχανική επαφή με το πλέγμα, η επιφάνειά τους μετατρέπεται σε PbSO_4 εξαιτίας της αυτοεκφόρτισης (δημιουργία οξυγόνου). Τα χαλαρώς συνδεδεμένα και μερικώς θειωμένα σωματίδια αιωρούνται στον ηλεκτρολύτη και μπορεί να εναποτεθούν στην κορυφή και τα πλάγια των αρνητικών ηλεκτροδίων όπου ανάγονται σε μεταλλικό Pb και προκαλούν βραχυκύκλωμα. Αυτό το ενεργό υλικό μπορεί επίσης να εναποτεθεί στο κάτω μέρος της μπαταρίας λόγω καθίζησης και να προκαλέσει και εκεί βραχυκύκλωμα.

Απώλεια νερού, αεριοποίηση (gassing)

Η απώλεια νερού προκαλείται κυρίως από την ηλεκτρόλυσή του και την απώλεια υπό μορφή οξυγόνου και υδρογόνου. Η ηλεκτρόλυση λαμβάνει χώρα κυρίως κατά την φόρτιση και ιδίως κατά την υπερφόρτιση αλλά και κατά την εκφόρτιση υπό χαμηλό ρεύμα (αν και με μικρότερο ρυθμό). Έχει παρατηρηθεί ωστόσο και απώλεια χωρητικότητας κατά την αποθήκευση της μπαταρίας εξαιτίας της ηλεκτρόλυσης αυτοεκφόρτισης, δηλαδή της εμφάνισης οξυγόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο και υδρογόνου στο αρνητικό (gassing) που είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης του οξέος με τα ενεργά υλικά. Ο ρυθμός αυτών των αντιδράσεων εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία και την συγκέντρωση του οξέος.

Βιβλιογραφία

- 1.2.1. EU Research Project Microgrids [Online]. Available:
<http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.2. Technical Annex, EU research project Microgrids Available on line
<http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.3. R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. Meliopoulos, R. Yinger, and J. Eto, "White Paper on Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS MicroGrid Concept," Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS), CA, Tech. Rep. LBNL-50 829, 2002.
- 1.2.4. N.Jenkins and others, Embedded Generation, Power and Energy Series
- 1.2.5. <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/EETD-microgrids.html>
- 1.2.6. Report on Telecommunication Infrastructures and Communication Protocols MICROGRIDS Deliverable Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.7. PROTECTION GUIDELINES FOR A MICROGRID Deliverable Available:
<http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.8. Methodology for Quantifying Economic and Environmental Benefits of MicroGrids Deliverable Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.9. MicroGrid Central Controller strategies and algorithms MICROGRIDS Deliverable Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.2.10. Local Micro Source controller strategies and algorithms MICROGRIDS Deliverable Available: <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- 1.4.1. H.A. Simon, *The Sciences of the Artificial*.Cambridge,MA:MIT Press, 1996.
- 1.4.2. G. Booch, *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. Reading, MA: Addison Wesley, 1994.
- 1.4.3. F.P. Brooks, *The Mythical Man-Month*. Reading, MA: AddisonWesley, 1995.
- 1.4.4. J. Mayfield,Y. Labrou, and T. Finin, "Evaluating KQML as an agent communication language," in *Intelligent Agents II*, M. Wooldridge, J.P. Müller, and M. Tambe, Eds. New York: Springer, 1995, pp. 347-360.
- 1.4.5. A. Newell, "The knowledge level," *Artif. Intell.*, vol. 18, pp. 87-127, 1982.
- 1.4.6. M.Wooldridge, "Agent-based software engineering," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 144, pp. 26-37, 1997.
- 1.4.7. N. Jennings, S. Bussman, "Agent Based Control Systems" IEEE Control Systems Magazine June 2003
- 1.7.1. Stephen D.J. McArthur, Euan M. Davidson, *University of Strathclyde, (UK)* Concepts and Approaches in Multi-Agent Systems for Power Applications,
- 1.7.2. E. M. Davidson, S. D. J. McArthur, J. R. McDonald, , T. Cumming, I. Watt, "Automating the analysis and management of Power System Data using Multi-agent Systems Technology" *Application and Innovations in Intelligent Systems XII (AI2004)*, Springer 2004, pp. 151-164
- 1.7.3. 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.

- 1.7.4. 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.
- 1.7.5. 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.
- 1.7.6. J. Q. Feng, D. P. Buse, Q. H. Wu, and J. Fitch. Distributed mobile communication base station diagnosis and monitoring using multi-agents. In *IDEAL2002*, number LNCS 2412 in Lecture Notes in Computer Science, pages 267{272, Manchester, UK. Springer Verlag.
- 1.7.7. A. Deshmukh, F. Ponci, A. Monti, *University of South Carolina, (USA)*, M. Riva, *University of Milan(Italy)*, L. Cristaldi, *Politecnico di Milano, (Italy)* Multi-Agent System for Diagnostics, Monitoring and Control of Electric Systems ISAP 05 Denver
- 1.7.8. K. L. Butler, N. D. R. Sarma, “General Reconfiguration Methodology for AC Radial Shipboard Power System”, proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp 23-27, Jan. 2000
- 1.7.9. Takeshi Nagata, *Hiroshima Institute of Technology, (Japan)*, Hiroshi Sasaki, *Hiroshima University, (Japan)*, Hideki Fujita, *Chubu Electric Co. Inc., (Japan)* Decentralized Approach to Normal Operations for Power System Network ISAP 05 Denver
- 1.7.10. Hairong Qi, Wenjuan Zhang, Leon M. Tolbert, *The University of Tennessee, (USA)* A Resilient Real-Time Agent-Based System for a Reconfigurable Power Grid Multi-Agent based Control and Protection of Power Distributed System
- 1.7.11. Takeshi Nagata; Yasuhiro Tao and Hideki Fujita An Autonomous Agent for Power System Restoration 2004 *IEEE Power Engineering society General Meeting*,
- 1.7.12. T. Nagata, H. Sasaki, “A Multi-Agent Approach to Power System Restoration”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 457-462, 2002.
- 1.7.13. C. C. Liu, J. Jung, G. T. Heydt, V. Vittal, and A. G. Phadke, “Conceptual Design of the Strategic Power Infrastructure Defense (SPID) System,” *IEEE Control System Magazine*, August 2000, pp. 40-52.
- 1.7.14. J. Jung, C. C. Liu, S. Tanimoto, and V. Vittal, “Adaptation in Load Shedding Under Vulnerable Operating Conditions,” to appear in *IEEE Transactions on Power Systems*.
- 1.7.15. J. Jung and C. C. Liu, “Multi-Agent Technology for Vulnerability Assessment and Control,” *IEEE PES Summer Meeting*, 2001.
- 1.7.16. H. You, V. Vittal, J. Jung, C. C. Liu, M. Amin, and R. Adapa, “An Intelligent Adaptive Load Shedding Scheme,” Proc. 2002 Power Systems Computation Conference (PSCC), Seville, Spain, June 2002.
- 1.7.17. A. Korbik and S. D. J. McArthur and G. W. Ault and G. M. Burt and J. R. McDonald “Enabling Active Distribution Networks Through Decentralised, Autonomous Network Management” *Proc. 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, Turin June 2005
- 1.7.18. F. Maturana, R. Staron, K. Hall, “Methodologies and Tools for Intelligent Agents in Distributed Control,” *IEEE Trans. Intelligent Systems*, Vol. 20, No. 1, pp. 42-49, Jan.-Feb., 2005.

- 1.7.19. F. Maturana, P. Tichy, P. Slechta, F. Discenzo, R. Staron, K. Hall, "Distributed Multi-Agent Architecture for Automation Systems," *Expert Systems with Applications*, Vol. 26, No. 1, pp. 49-56, January, 2004.
- 1.7.20. F. Maturana, R. Staron, K. Hall, Real time collaborative intelligent solutions," *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2004)*, Vol. 2, pp. 1895-1902, Oct. 2004.
- 1.7.21. D. P. Buse, P. Sun, Q. H. Wu, J. Fitch, "Agent-based substation automation" *IEEE Power and Energy Magazine*, Volume 1, Issue 2, Mar-Apr 2003, pp.50 – 55.
- 1.7.22. W. Junpu, C. Hao, X. yang, L. Shuhui, "An Architecture of Agent Based Intelligent Control systems," in *Proc. 2000 the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 404-407.
- 1.7.23. J. Kosakaya, A. Kobayashi, and K. Yamaoka, "Cooperative Multi-Agent-Based Control Technology for Supervisory Control and Data-Acquisition Systems," in *Proc. 2003 Emerging Technologies and Factory Automation Conf.*, pp.19-26.
- 1.7.24. T. Wittig, N.R. Jennings, and E.H. Mamdani, "ARCHON: framework for intelligent co-operation," *IEEE Trans. Intelligent Systems Engineering*, vol. 3, issue 3, pp. 168-179, 1994.
- 1.7.25. J. Jung and C.-H. Liu, "Multi-Agent System technologies and an Application for Power System Vulnerability," *2004 IEEE Power Engineering society General Meeting*,
- 1.7.26. Takashi Hiyama, Tsuyoshi Ohta, *Kumamoto University, (Japan)* Hierarchical Stabilization Control with Upper Level Multi-Agent based Controller and Lower Level Local Controller ISAP 05 Denver
- 1.7.27. Victoria M. Catterson, Euan M. Davidson, Stephen D.J. McArthur, *University of Strathclyde, (UK)* Issues in Integrating Existing Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications ISAP 05 Denver
- 1.7.28. R. P. Gupta and R. K. Varma, "Agent Based Software Integration at Distribution Control Center," *2004 IEEE Power Engineering society General Meeting*,
- 1.7.29. Jin S. Heo, Kwang Y. Lee, *The Pennsylvania State University, (USA)* A Multi-Agent System-Based Intelligent Steady-State Model for a Power Plant ISAP 05 Denver
- 1.7.30. S. E. Widergren, J. M. Roop, R. T. Guttromson, Z. Huang, "Simulating the dynamic coupling of market and physical system operations" *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Volume 1, 6-10 June 2004, pp.748 – 753
- 1.7.31. 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 pp931 – 936
- 1.7.32. 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.
- 1.7.33. A. J. Bagnall and G. D. Smith. Game playing with autonomous adaptive agents in a simplified economic model of the UK market in electricity generation. In *IEEE-PES / CSEE International Conference on Power System Technology POWERCON 2000*, pages 891.896, 2000.

- 1.7.34. K.L. Butler-Purry, *Texas A&M University, (USA)* Multi-Agent Technology for Self-Healing Shipboard Power Systems ISAP 05 Denver
- 1.7.35. K. Huang, D.A. Cartes, S.K. Srivastava, *Florida State University, (USA)* A Multi-Agent based Algorithm for Mesh-Structured Shipboard Power System Reconfiguration ISAP 05 Denver
- 1.7.36. Jignesh M. Solanki, Noel N. Schulz, *Mississippi State University, (USA)* Using Intelligent Multi-Agent Systems for Shipboard Power System Reconfiguration ISAP 05 Denver
- 1.7.37. F. Maturana, R. Staron, F. Discenzo, et al., "An Interoperable Agent based Control System for Survivable Shipboard Automation", ASNE Reconfiguration and Survivability Symposium 2005, Feb. 2005.
- 1.7.38. D. Scheidt, C. McCubbin, M. Pekala, Michael, S. Vick, D. Alger, "Intelligent Control of Auxiliary Ship systems," Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence 2002, pp. 913-918, Jul.-Aug. 2002
- 1.7.39. L. Sun, D. A. Cartes, "Reconfiguration of Shipboard Radial Power System using Intelligent Agents", ASNE Electric Machine Technology Symposium, Jan. 2004.
- 1.7.40. K. L. Butler, N. D. R. Sarma, V. Ragendra Prasad, "Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Power System, Vol. 16, No. 4, pp653-661, Nov., 2001
- 2.1. D. B. Lenat and E. A. Feigenbaum, On the Thresholds of Knowledge, Artificial Intelligence 47 (1991) 185-250.
- 2.2. D. Partridge, The Scope and Limitations of Future Generation Expert Systems, Future Generations Computer Systems 3 (1) (1987) 1-10.
- 2.3. L. Steels, Second Generation Expert Systems, Future Generations Computer Systems 1(4) (1985)
- 2.4. Fredrik Ygge, Hans Akkerman. Decentralized Markets versus Central Control: A Comparative Study. Journal of Artificial Intelligence Research 11 (October 1999) 301-333
- 2.5. Jacques Ferber. Multi-Agent Systems. An introduction to Distributed Intelligence. Addison-Wesley.
- 2.6. Jeffrey M. Bradshaw. Software Agents. MIT Press.
- 2.7. Shannon and Weaver The mathematical theory of Communication Urbana University of Illinois Press
- 2.8. Genesereth, M and Fikes, R. 1992 Knowledge Interchange Format Version 3.0 Technical Report Stanford University
- 2.9. Jade (Java Agent DEvelopment Framework) at <http://jade.tilab.com/>
- 2.10. ZEUS Agent Building Toolkit available on line at <http://more.btexact.com/projects/agents/zeus/>
- 2.11. JACK : <http://www.agent-software.com.au/jack.html>
- 2.12. FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) <http://www.fipa.org>
- 2.13. Jade programmer guide Available On line <http://www.fipa.org/>
- 2.14. Jade user guide Available On line <http://www.fipa.org/>
- 2.15. FIPA, FIPA 97 Specification Part 2: Agent Communication Language. FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents), Available On line <http://www.fipa.org/>, 28th November, 1997
- 2.16. [Peggy Fidelman](#) and [Peter Stone](#). **Layered Learning on a Physical Robot**. Phd Thesis, February 2005. Available online at http://www.cs.utexas.edu/users/pstone/Papers/bib2html/class_funding.html

- 3.2.1. D. Linden, T. Reddy “Handbook of Batteries” McGraw-Hill (2002)
- 3.2.2. W. Peukert, “An equation for relating capacity to discharge rate”. *Electrotech, Z.* 18 (1897) 287
- 3.2.3. D. Baert, A. Vervaeet, “Lead-acid battery model for the derivation of Peukert's law”, *Electrochimica Acta* 44 (1999) 3491-3504
- 3.2.4. Ηλεκτροχημικές Διατάξεις στην Παραγωγή και Αποθήκευση Ενέργειας. Θεωρία – Μοντελοποίηση Ραυτόπουλος Κωνσταντίνος Μεταπτυχιακή Εργασία Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας 2004-2005
- 3.2.5. C.M. Shepherd, “Design of primary and secondary cells.II. An equation describing battery discharge”, *Journal of the Electrochemical Society* 112 (1965) 657-664
- 3.2.6. W. B. Gu, C. Y. Wang, “Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems”, *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (8) 2910-2922 (2000)
- 3.2.7. G. Bopp, H. Gabler, K. Preiser, D.U. Sauer, H. Schmidt, “Energy Storage in Photovoltaic Stand-alone Energy Supply Systems”, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 6, (1998), 271-291
- 3.2.8. J.N.Ross, T. Markvart, W.He, “Modelling battery charge regulation for a standalone photovoltaic system”, *Solar Energy* Vol. 69, (2000). 181–190
- 3.2.9. D. Guasch and S. Silvestre, “Dynamic Battery Model for Photovoltaic Applications”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2003; 11:193–206
- 3.2.10. H.Wenzl, I.Baring-Gould, R.Kaiser, B.Y.Liaw, P.Lundsager, J.Manwell, A. Ruddell, V.Svoboda, “Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery”, *Journal of Power Sources [in press]* (2005)
- 3.2.11. G. Papazov, D. Pavlov, “Influence of cycling current and power profiles on the cycle life of lead/acid batteries”, *Journal of power sources* 62 (1996) 193-199
- 3.2.12. P. Ruetschi, “Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries”, *Journal of Power Sources* 127 (2004) 33–44
- 3.2.13. Μανιάς Σ., *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Τόμος Ι, Εκδόσεις Συμμεών, Πέμπτη έκδοση, Αθήνα 2002.
- 3.2.14. Μανιάς Σ., *Ανώτερα Κεφάλαια Ηλεκτρονικών Ισχύος*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου – Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ./Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- 3.2.15. A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen and R. Belmans 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference
- 3.2.16. A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger and K. Mauch, “Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections,” in *Proc. IEEE-APEC’97*, vol. 1, Feb. 1997, pp. 94-100.
- 3.2.17. E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo and P. F. D. Garcia, “Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 533-542, Mar./Apr. 2002.
- 3.2.18. M. C. Chandorkar, D. M. Divan and R. Adapa, “Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 136-143, Jan./Feb. 1993
- 3.2.19. Moschakis M., Hatziaargyriou N., Kladas A., “A Voltage Source Converter Model for Exchanging Active and Reactive Power with a Distribution Network”, *ELSEVIER - Journal of Materials Processing Technology*.

- 3.2.20. Bose B., *Power Electronics and Ac Drives*, Prentice Hall, 1986.
- 3.2.21. Sunny Island 3300 User Guide available at www.sma.de
- 3.3.1. Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* Vol. 82: pp. 35-45 (1960)
- 3.3.2. Kalman, R. E., Bucy R. S., New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* Vol. 83: pp. 95-107 (1961)
- 3.3.3. [JU97](#) Julier, Simon J. and Jeffery K. Uhlmann. A New Extension of the Kalman Filter to nonlinear Systems. In The Proceedings of AeroSense: The 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II, SPIE, 1997.
- 3.3.4. FUZZY THEORY SYSTEMS Cornelius Leondes, University of California, Los Angeles, U.S.A. Elsevier
- 3.3.5. [George J. Klir](#), [Bo Yuan](#) Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications FACSIMILE
- 3.3.6. Bonarini A., 1993, ELF: learning incomplete fuzzy rule sets for an autonomous robot, *Proc. of EUFIT '93*, ELITE Foundation, Agentchen, Germany, pp. 69-75.
- 3.3.7. Bonarini A., 1994b, Evolutionary learning of general fuzzy rules with biased evaluation functions: competition and cooperation. To appear in *Proc. of IEEE WCCI*
- 3.3.8. [NRC FuzzyJ Toolkit](#) available at www.iit.nrc.ca/IR_public/fuzzy/fuzzyJDocs/index.html
- 4.1.D. P. Bertsekas and D. A. Castanon, "A Forward/Reverse Auction Algorithm for Asymmetric Assignments Problems", *Computational Optimization and Applications* 1992, Vol. 1, pp. 277-297.
- 4.2.D. P Bertsekas, "Auction Algorithms for Network Flow Problems: A Tutorial Introduction", *Computational Optimization and Applications*, 1992, Vol. 1, pp. 7-66.
- 4.3.A. Ahmed, A. Patel, T. Brown, M. Ham, **M. Jang**, and G. Agha, "Task Assignment for a Physical Agent Team via a Dynamic Forward/Reverse Auction Mechanism," *Proceedings of the IEEE International Conference of Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems (KIMAS '05)*, pp. 311-317, Waltham, Massachusetts, April 18 - 21, 2005.
- 4.4.A.Dimeas and N.D. Hatziaargyriou "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control", *IEEE Transactions on Power Systems* Volume 20, Issue 3, Aug. 2005 Page(s):1447 – 1455 Digital Object Identifier 10.1109/TPWRS.2005.852060
- 4.5.E. Ζάχος Προγραμματισμός ηλεκτρονικών υπολογιστών Διδακτικές σημειώσεις ΕΜΠ Αθήνα 2003
- 4.6. Wilson, Robin J. *Introduction to graph theory* **4th ed.** Longman, 1996.
- 4.7. Bollobas, Bela *Graph theory:an introductory course* Springer-Verlag, 1979.
- 4.8. Diestel, Reinhard *Graph theory* **2nd ed.** Springer, 2000
- 5.1.Y. U. Cao, A. S. Fukunaga, and A. B. Kahng, "Cooperative mobile robotics: antecedents and directions," *Autonomous Robots*, vol. 4, pp. 1-23, 1997.
- 5.2.M. J. Mataric, "Reinforcement learning in the multirobot domain," *Autonomous*

- Robots*, vol. 4, pp. 73–3, 1997.
- 5.3.F. Michaud and M. J. Mataric, “Learning from history for behavior based mobile robots in nonstationary conditions,” *Autonomous Robots*, vol. 5, pp. 335–354, 1998.
- 5.4.T. Balch and R. C. Arkin, “Behavior based formation control for multirobot teams,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926–939, December 1998.
- 5.5.M. Asada, E. Uchibe, and K. Hosoda, “Cooperative behaviour acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via visionbased reinforcement learning and development,” *Artificial Intelligence*, vol. 110, pp. 275–292, 1999.
- 5.6.M. Wiering, R. P. Salustowicz, and J. Schmidhuber, “Reinforcement learning soccer teams with incomplete world models,” *Autonomous Robots*, vol. 7, pp. 77–88, 1999.
- 5.7.S. V. Zwaan, J. A. A. Moreira, and P. U. Lima, “Cooperative learning and planning for multiple robots,” 2000. [Online]. Available: citeseer.nj.nec.com/299778.html
- 5.8.C. F. Touzet, “Robot awareness in cooperative mobile robot learning,” *Autonomous Robots*, vol. 8, pp. 87–97, 2000.
- 5.9.F. Fernandez and L. E. Parker, “Learning in large cooperative multirobot domains,” *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 16, no. 4, pp. 217–226, 2001.
- 5.10. J. Liu and J. Wu, *MultiAgent Robotic Systems*. CRC Press, 2001.
- 5.11. M. J. Mataric, “Learning in behaviorbased multirobot systems: policies, models, and other agents,” *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 81–93, 2001.
- 5.12. M. Bowling and M. Veloso, “Simultaneous adversarial multirobot learning,” in *Proceedings of the Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 2003.
- 5.13. I. H. Elhajj, A. Goradia, N. Xi, and et al, “Design and analysis of internetbased telecoordinated multirobot systems,” *Autonomous Robots*, vol. 15, pp. 237–254, 2003.
- 5.14. L. Iocchi, D. Nardi, M. Piaggio, and A. Sgorbissa, “Distributed coordination in heterogeneous multirobot systems,” *Autonomous Robots*, vol. 15, pp. 155–168, 2003.
- 5.15. M. J. Mataric, G. S. Sukhatme, and E. H. Østergaard, “Multirobot task allocation in uncertain environments,” *Autonomous Robots*, vol. 14, pp. 255–263, 2003.
- 5.16. C. F. Touzet, “Distributed lazy Qlearning for cooperative mobile robots,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 5–13, 2004.
- 5.17. R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998.
- 5.18. M. L. Littman, “Value function reinforcement learning in markov games,” *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 55–66, 2001.
- 5.19. C. J. Watkins and P. Dayan, “Qlearning,” *Machine Learning*, vol. 8, pp. 279–292, 1992.
- 5.20. T. Basar and G. J. Olsder, *Dynamic Noncooperative Game Theory*. London: Academic Press, 1982.
- 5.21. J. Hu and M. P. Wellman, “Nash Qlearning for generalsum stochastic games,”

- Journal of Machine Learning Research*, vol. 4, pp. 1039–1069, 2003.
- 5.22. J. Hu and M. P. Wellman, “Multiagent reinforcement learning: theoretical framework and an algorithm,” in *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning*, San Francisco, California, 1998, pp. 242–250.
- 5.23. M. Bowling, “Multiagent learning in the presence of agents with limitations,” Ph.D. dissertation, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA
- 5.24. G. Chalkiadakis and C. Boutilier, “Multiagent reinforcement learning: theoretical framework and an algorithm,” in *the Second International Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS)*, Melbourne, Australia, July 14-18 2003, pp. 709–716.
- 5.25. G. Chalkiadakis, “Multiagent reinforcement learning: stochastic games with multiple learning players,” Department of Computer Science, University of Toronto,” Technical report, March 2003. [Online]. Available: www.cs.toronto.edu/~gehalk/DepthReport/DepthReport.ps
- 5.26. M. L. Littman, “Markov games as a framework for multiagent learning,” in *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning*, San Francisco, California, 1994, pp. 157–163.
- 5.27. J. Hu and M. P. Wellman, “Multiagent reinforcement learning in stochastic games,” 1999. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/hu99multiagent.html
- 5.28. M. L. Littman, “Friend-or-foe Qlearning in general-sum games,” in *Proceedings of The 18th International Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufman, 2001, pp. 322–328
- 5.29. E. F. Morales, “Scaling up reinforcement learning with a relational representation,” in *Workshop on Adaptability in MultiAgent Systems, The First RoboCup Australian Open 2003 (AORC2003)*, Sydney, Australia, January 31 2003.
- 5.30. [Peter Stone](#) and [Manuela Veloso](#). **Team-Partitioned, Opaque-Transition Reinforcement Learning**. In [Minoru Asada](#) and [Hiroaki Kitano](#), editors, *RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II*, Springer Verlag, Berlin, 1999. Also in *Proceedings of the Third International Conference on Autonomous Agents*, 1999
- 5.31. www.apx.nl
- 5.32. R. J. Kafka, D.R. Penders, S. H. Bouchey, M. M. Adibi, “System restoration plan development for a metropolitan electric system” IEEE trans, on PAS Vol PAS 100, No 8 Aug 1981, pp 3703-3713.
- 5.33. E. J. Simburger, F. J. Hubert, “Low voltage bulk system Restoration simulation”, IEEE trans on PAS Vol PAS 100, No 11 Nov 1981, pp 4479-4484.
- 5.34. M. M. Adibi , R. J. Kafka “Expert System requirements for power system restoration”, paper 94 WM 223-8 PWRs, IEEE PES 1994 WM, New York.

- 5.35. Ν. Φούντας Διδακτορική Διατριβή, «Περιβάλλον υποστήριξης για την αποκατάσταση Ηλεκτρικού συστήματος μετά από διακοπή ισχύος» Αθήνα Ιανουάριος 1997.
- 6.1. W3C at <http://www.w3.org/XML/>
- 6.2. XML Specification at <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-20040204/>
- 6.3. IEC 61850 Series
- 6.4. “Common Information Model (CIM) for the Control Center Application Program Interface”, EPRI, Sep., 1998
- 6.5. UML – Unified Modeling Language: Object Management Group OMG
- 6.6. Kraig Brockschmidt ,Inside OLE, Second Edition, Microsoft Press, Redmond, WA, 1995.
- 6.7. Microsoft COM Specification, version 0.9, 10/24/95 (available from Microsoft’s FTP site).
- 6.8. OLE Automation Programming Reference, Microsoft Press, Redmond, WA, 1996.
- 6.9. OLE 2 Programming Reference, Vol. 1, Microsoft Press, Redmond, WA, 1994.
- 6.10. The OPC Data Access Custom Specification 1.0A, OPC Foundation 1997.
- 6.11. The OPC Data Access Custom Specification 2.0, OPC Foundation 1998.
- 6.12. The OPC Data Access Automation Specification 2.0, OPC Foundation 1998.
- 6.13. The OPC Alarm and Event Access Specification 1.0, OPC Foundation 1998.
- 6.14. The OPC Historical Data Access Specification 1.0, OPC Foundation 1998
- 6.15. N.D. Hatziargyriou, G. Contaxis, M. Papadopoulos, B. Papadias, J.A. Peças Lopes, M. Matos, G. Kariniotakis, E. Nogaret, J. Halliday, G. Dutton, P. Dokopoulos, A. Bakirtzis, A. Androutsos, J. Stefanakis, A. Gigantidou, “Operation and Control of Island Systems – The Crete Case,” IEEE PES WM, Singapore, January 23-37, 2000.
- 6.16. “CARE: Advanced Control Advice for power systems with large-scale integration of Renewable Energy sources,” contract JOR3-CT96-2139, Final Report, August 1999.
- 6.17. More Care Technical Annex contract JOR3-CT96-0119
- 6.18. Nogaret E., Stavrakakis G., Kariniotakis G., 1997, ‘An advanced control system for the optimal operation and management of medium size power systems with a large penetration form renewable power sources’, Renewable Energy, Vol. 12, No. 2, November, pp. 137-149, Elsevier Science Ltd.
- 6.19. WinCC Documentation available at Siemens.com
- 6.20. Jade programmer guide Available On line <http://jade.tilab.com/>
- 6.21. Jade user guide Available On line <http://jade.tilab.com/>
- 6.22. <http://www.fipa.org>

