



Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων
και Γεωργικής Μηχανικής

ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΕΞΥΠΝΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ
ΠΟΛΥΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

Γεώργιος Δ. Κυριακαράκος

Διδακτορική Διατριβή

ΑΘΗΝΑ 2012

Αυτόνομα έξυπνα μικροδίκτυα πολυπαραγωγής βασισμένα σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βελτιστοποιημένα με τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης

Γεώργιος Δ. Κυριακαράκος

Διδακτορική Διατριβή

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Γ. Παπαδάκης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Δρ. Σ. Ροζάκης, Αναπλ. Καθηγητής

Δρ. Κ. Αρβανίτης, Αναπλ. Καθηγητής

Δρ. Ν. Συγριμής, Καθηγητής

Δρ. Θ. Τσιλιγκιρίδης, Καθηγητής

Δρ. Α. Ντούνης, Αναπλ. Καθηγητής

Δρ. Θ. Τσούτσος, Αναπλ. Καθηγητής

Περίληψη

Στην αυγή του 21ου αιώνα υπάρχουν ακόμη πολλές περιοχές στον κόσμο χωρίς πρόσβαση σε δίκτυο ηλεκτροδότησης. Αυτό δεν παρατηρείται μόνο σε περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου, αλλά και σε περιοχές της υπαίθρου χωρών όπως ο Καναδάς και η Ρωσία. Σε αυτές τις περιοχές το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης αντιμετωπίζεται με τη χρήση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων που συνήθως περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες), ηλεκτρογεννήτριες πετρελαίου και συσσωρευτές. Η χρήση αυτής της τοπολογίας έχει πολλά μειονεκτήματα όπως η περιορισμένη περιοχή που μπορεί να καλύψει το σύστημα, η κεντρική χωροθέτηση των παραγωγών ενέργειας και η χρήση ηλεκτρογεννητριών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, επιβαρύνοντας το περιβάλλον και την ίδια στιγμή αυξάνουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αυτών των συστημάτων. Τα μικροδίκτυα που βασίζονται σε κατανεμημένη παραγωγή ισχύος με τη χρήση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών αναδεικνύονται στην πιο εξελιγμένη τεχνολογικά και βιώσιμη λύση για τις περιοχές αυτές.

Την ίδια στιγμή πολλές περιοχές παγκόσμια αντιμετωπίζουν πρόβλημα διαθεσιμότητας πόσιμου νερού. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμη και όταν υπάρχει διαθέσιμο νερό, μπορεί να μην είναι πόσιμο λόγω αλατότητας ή παρουσίας βιολογικών ρυπαντών. Συστήματα αφαλάτωσης έχουν αναδειχθεί σαν ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος. Η αφαλάτωση με τη χρήση τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης συνδυασμένη με ανανεώσιμες μπορεί να παράξει νερό υψηλής ποιότητας με βιώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο. Η επί τόπου παραγωγή καυσίμου για μετακινήσεις είναι μια καινοτόμος ιδέα που μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή αυτονομία απομονωμένων περιοχών της υπαίθρου. Τέλος, στις ημέρες μας, υπάρχουν διαθέσιμες στην αγορά ηλεκτρικές συσκευές πολύ χαμηλής ηλεκτρικής κατανάλωσης. Μεγάλης ενεργειακής αποδοτικότητας ψυγεία και καταψύκτες και λαμπτήρες τεχνολογίας LED μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση των κατοικιών. Η ψύξη και θέρμανση χώρου μπορεί να καλυφθεί αποδοτικά με τη χρήση αντλιών

θερμότητας αέρα-αέρα. Συσκευές που είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμες παρουσιάζουν COP μεγαλύτερο του 5.

Η γενική ιδέα αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι η κάλυψη σε απομακρυσμένες περιοχές της υπαίθρου όλων των απαραίτητων προϋποθέσεων για διαβίωση και ευημερία με ένα βιώσιμο, φιλικό προς το περιβάλλον και αυτόνομο τρόπο. Εκτός από την τροφή που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά από τη γεωργία, όλες οι υπόλοιπες ανάγκες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανάγκες που καλύπτονται μέσω ηλεκτρικών συσκευών, σε διαθεσιμότητα πόσιμου νερού, σε διαθεσιμότητα καυσίμου για μεταφορές και σε ψύξη και θέρμανση των κατοικιών. Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιλέγονται σαν τους βασικούς παραγωγούς ηλεκτρικής ισχύος σε μια τοπολογία μικροδικτύου που επιτρέπει την κατανεμημένη παραγωγή σε μια μεγάλη γεωγραφικά έκταση. Η αφαλάτωση νερού μέσω αντίστροφης ώσμωσης συνδυασμένη με διατάξεις ανάκτησης ενέργειας επιλέγεται ως ο παραγωγός πόσιμου νερού. Το υδρογόνο επιλέγεται ως καύσιμο για τις μεταφορές μιας και μπορεί να παραχθεί επί τόπου με τη χρήση ηλεκτρικής ισχύος και νερού. Τέλος η θέρμανση και η ψύξη των κατοικιών αποφασίστηκε να καλυφθεί με τη χρήση υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας αντλιών θερμότητας αέρα-αέρα. Αυτό το μικροδίκτυο πρέπει να είναι αυτόνομο και να παράγει πολλαπλά προϊόντα.

Μετά την μορφοποίηση της ιδέας διερευνήθηκε η δυνατότητα υλοποίησης από τεχνική σκοπιά μέσω ενός πιλοτικού αυτόνομου μικροδικτύου που εγκαταστάθηκε στους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η εμπορικά διαθέσιμη τοπολογία “Sunny Island[®]” που βασίζεται σε αναστροφείς της εταιρίας SMA επιλέχθηκε σαν την βάση του πιλοτικού μικροδικτύου.

Για να μπορέσει αυτή η τοπολογία να γίνει λειτουργική έγινε κατανοητό πως έπρεπε να αναπτυχθεί ευφυής εποπτικός διαχειριστής. Επίσης λόγω της ευελιξίας και της διαμόρφωσης με συναρτησιακά στοιχεία του μικροδικτύου έπρεπε να αναπτυχθεί ένα εργαλείο σχεδιασμού και διαστασιολόγησης, γιατί οι ανάγκες και το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταβάλλεται σε διάφορες περιοχές της γης σημαντικά. Μια πλατφόρμα προσομοίωσης σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με διπλή στόχευση: από τη μία να αποτελέσει την πλατφόρμα

ανάπτυξης του συστήματος ευφούς εποπτικής διαχείρισης και από την άλλη να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διαστασιολόγησης των συσκευών που απαρτίζουν το μικροδίκτυο. Τα εμπορικά λογισμικά πακέτα TRNSYS, Matlab, GenOpt και TRNOPT συνδυάστηκαν σε μια ενιαία πλατφόρμα. Νέες ρουτίνες γράφηκαν με σκοπό την προσομοίωση όλων των νέων συσκευών που δεν υπήρχαν διαθέσιμες στις βιβλιοθήκες των λογισμικών πακέτων. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις στο πώς να γράφεις κώδικα που προσομοιώνει μια συσκευή (πχ. χρησιμοποιώντας εμπειρικές ή ημιεμπειρικές σχέσεις, χρησιμοποιώντας θεωρητικές εξισώσεις και ισοζύγια κλπ.). Μιας και αυτή η πλατφόρμα θα αποτελέσει στο μέλλον το εργαλείο σχεδιασμού και διαστασιολόγησης τέτοιων μικροδικτύων, αποφασίστηκε ότι ο κώδικας έπρεπε να απαιτεί τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα από τους κατασκευαστές των συσκευών, με σκοπό την εύκολη ενσωμάτωση συσκευών διαθέσιμων σε κάθε περιοχή του κόσμου. Οι καινούργιες ρουτίνες χρησιμοποιούν δεδομένα των κατασκευαστών όπως καμπύλες βαθμού απόδοσης με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας των διάφορων συσκευών. Η βελτιστοποίηση βασισμένη στη θεωρία σμηνών (Particle Swarm Optimization) χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση των διάφορων συσκευών. Αυτή η προσέγγιση αποφασίστηκε κυρίως λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας του συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τρεις διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (ηλεκτρική ισχύ στο συσσωρευτή, πόσιμο νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης του πόσιμου νερού και υδρογόνο στο δοχείο των μεταλλικών υδριδίων) και η διαστασιολόγηση της κάθε συσκευής συσχετίζεται άμεσα με τα μεγέθη των υπολοίπων.

Το πρώτο σύστημα διαχείρισης της ενέργειας που σχεδιάστηκε ήταν πολύ απλό και στην πράξη ενεργοποιούσε ή απενεργοποιούσε τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, τη μονάδα αφαλάτωσης και την κυψέλη καυσίμου, που όλες λειτουργούσαν στο σημείο ονομαστικής λειτουργίας. Το επόμενο βήμα περιλάμβανε τη μελέτη λειτουργίας των συσκευών σε μερικό φορτίο. Χρησιμοποιήθηκε η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic) και ένα νέο σύστημα διαχείρισης σχεδιάστηκε. Οι παράμετροι του διαχειριστή βασισμένου στην ασαφή λογική βελτιστοποιήθηκαν διαισθητικά βάσει της εμπειρίας που είχε συσσωρευτεί πάνω στην τοπολογία. Μια αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση των παραμέτρων

αυτών μπορεί θεωρητικά να επιτευχθεί, αλλά η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση 150 μεταβλητών είναι πολύ περίπλοκη. Τελικά σχεδιάστηκε ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας βασισμένο σε μια συνδυαστική προσέγγιση δικτύων Petri και ασαφών γνωσιακών χαρτών (fuzzy cognitive maps). Μιας και οι παράμετροι λειτουργίας αυτού του συστήματος διαχείρισης ήταν σημαντικά λιγότεροι (της τάξης των 10) αποφασίστηκε να γίνει βελτιστοποίηση αυτών με τη χρήση της θεωρίας σμηνών. Επειδή όμως η λειτουργία του συστήματος διαχείρισης της ενέργειας και η διαστασιολόγηση των επί μέρους συσκευών αλληλοεπηρεάζονται μια νέα μεθοδολογία προτάθηκε και υλοποιήθηκε, που μπορεί την ίδια στιγμή να βελτιστοποιεί τις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος ελέγχου και να διαστασιολογεί τις διάφορες συσκευές του μικροδικτύου. Τα τρία διαφορετικά συστήματα διαχείρισης της ενέργειας συγκρίθηκαν μεταξύ τους μέσω μιας μελέτης περίπτωσης. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης είναι ότι η λειτουργία σε μερικό φορτίο των συσκευών είναι πολύ σημαντική και μπορεί να μειώσει σημαντικά τα μεγέθη των συσκευών. Η συνδυαστική προσέγγιση των δικτύων Petri και των ασαφών γνωσιακών χαρτών αποδείχθηκε ότι είναι η βέλτιστη των τριών.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης της ισχύος από την πλευρά της κατανάλωσης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι, τις περισσότερες φορές, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, οι ανάγκες αλλάζουν, αλλά οι άνθρωποι δεν έχουν το απαραίτητο κεφάλαιο για να αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ του ενεργειακού συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα συστήματα συνήθως καταρρέουν συχνά και η λειτουργία των συσκευών εκτός προδιαγραφών μειώνει σημαντικά τον λειτουργικό χρόνο ζωής τους. Ένα σύστημα διαχείρισης της ισχύος από την πλευρά της κατανάλωσης μπορεί να προστατεύσει το σύστημα σε περιπτώσεις σαν την ανωτέρω και την ίδια στιγμή να διασφαλίσει τη μέγιστη τεχνικά αποδεκτή χρήση των διαθέσιμων συσκευών. Μια πολυπρακτορική (Multi-agent) προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του συστήματος διαχείρισης ισχύος από την πλευρά της κατανάλωσης. Οι ευφυείς πράκτορες ελέγχουν τις διάφορες γραμμές ισχύος της κάθε κατοικίας και μπορούν να τις απενεργοποιούν προοδευτικά. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα

χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά μικρού κόστους. Η λειτουργία του διερευνήθηκε μέσω προσομοίωσης και τα αποτελέσματα επικύρωσαν το σχεδιασμό του. Το σύστημα διαχείρισης της ενέργειας από την πλευρά του φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά τον σχεδιασμό νέων αυτόνομων μικροδικτύων πολυπαραγωγής, όταν υπάρχει περιορισμός στο διαθέσιμο κεφάλαιο και σαν αποτέλεσμα μπορεί να σχεδιασθεί το βέλτιστο σύστημα για το διαθέσιμο αυτό κεφάλαιο.

Τέλος πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας. Η επένδυση σε ένα τέτοιο αυτόνομο έξυπνο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής διερευνήθηκε τόσο ντετερμινιστικά όσο και στοχαστικά. Η ντετερμινιστική διερεύνηση περιλάμβανε τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας και του χρόνου αποπληρωμής του συστήματος. Η στοχαστική διερεύνηση βασίστηκε στην μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επένδυση σε ένα αυτόνομο έξυπνο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής είναι κερδοφόρος ακόμη και σήμερα, ενώ αναμένεται να αποτελέσει μια ακόμη πιο κερδοφόρο επένδυση στο βραχυπρόθεσμο μέλλον.

Συνοψίζοντας η καινοτόμος τοπολογία των αυτόνομων έξυπνων μικροδικτύων πολυπαραγωγής διερευνήθηκε και επικυρώθηκε. Πρώτα αποδείχθηκε ότι υπάρχουν οι απαραίτητες συσκευές εμπορικά διαθέσιμες και η διασύνδεση μεταξύ τους είναι τεχνικά εφικτή. Μετά διερευνήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις με τη χρήση εργαλείων υπολογιστικής νοημοσύνης όπως η ασαφής λογική, οι ασαφείς γνωσιακοί χάρτες και η βελτιστοποίηση με θεωρία σημών με στόχο τον σχεδιασμό ενός συστήματος διαχείρισης της ενέργειας και ενός εργαλείου σχεδιασμού και διαστασιολόγησης. Ύστερα αναπτύχθηκε ένα σύστημα διαχείρισης της ισχύος από την πλευρά της κατανάλωσης το οποίο διερευνήθηκε μέσω προσομοίωσης. Τέλος η τοπολογία αυτόνομων έξυπνων μικροδικτύων πολυπαραγωγής διερευνήθηκε οικονομικά και αποδείχθηκε ότι αποτελεί κερδοφόρο επένδυση ακόμη και με σημερινά κόστη.

Δημοσιεύσεις

Οι παρακάτω δημοσιεύσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την προετοιμασία της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Journal Publications

1. Kyriakarakos, G., A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, , S. Rozakis, G. Papadakis (2011). "Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel." Applied Energy Volume 88, Issue 12, December 2011, Pages 4517-4526.
2. Kyriakarakos, G., A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, G. Papadakis (2011). "A Fuzzy Logic Energy Management System for Polygeneration Microgrids." Renewable Energy Volume 41, May 2012, Pages 315-327.
3. Kyriakarakos, G., A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, G. Papadakis (2012). "A Fuzzy Cognitive Maps - Petri Nets Energy Management System for Autonomous Polygeneration Microgrids." Applied Soft Computing, Special Issue on Fuzzy Cognitive Maps, Volume 12, Issue 12, December 2012, Pages 3785-3797.
4. Kyriakarakos, G., A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, G. Papadakis (2012), "Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids", Applied Energy, Volume 103, March 2013, Pages 39-51.

International Conference Publications

1. G. Kyriakarakos, A.I. Dounis, K.G. Arvanitis, G. Papadakis, "Comparison of three approaches for energy management in polygeneration microgrids", 6th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, 2012, France (*Poster Presentation*)
2. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Polygeneration Smartgrids: A Solution for the Supply of Electricity, potable Water and Hydrogen as Fuel for Transportation in Remote Areas", 5th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, 2010, Spain (*Oral Presentation*)

3. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "A pilot polygeneration microgrid for covering the needs of remote regions in electricity, potable water and fuel", Smartgrids & Mobility Conference, 2009, Germany (*Poster Presentation*)
4. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "A Pilot Microgrid that Uses Potable Water and Hydrogen Both as End-User Products and Medium to Long Term Energy Storage" 6th MedPower Conference, 2008, Greece (*Oral Presentation*)
5. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Experimental operation and evaluation of a hybrid renewable energy polygeneration microgrid", RE 2008, 2008, Korea (*Oral Presentation*)
6. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Experimental Operation of a hybrid renewable energy polygeneration system", AgEng2008, 2008, Greece (*Oral Presentation*)
7. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Realization and testing of a Hybrid Renewable Energy Polygeneration system", 4th PV Hybrid and Minigrid Conference, 2008, Greece (*Poster Presentation*)
8. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, S. Rozakis, G. Papadakis, "Creation of a multi criteria environmental economic model to assist the design of autonomous renewable energy polygeneration systems", Great Wall Renewable Energy Forum, 2006, China (*Oral Presentation*)
9. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Creation Of A Software Design Model And Realization Of A Hybrid Renewable Energy Polygeneration System", Renewable Energy 2006 conference, 2006, Japan (*Oral Presentation*)
10. G. Kyriakarakos, E. Mohamed, G. Papadakis, "Renewable Energy Polygeneration Systems: A Viable Solution For The Desert Regions", Global Conference on Renewable Energy Approaches for Desert Regions, 2006, Jordan (*Oral Presentation*)

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Πρόλογος.....	1
1.2	Τωρινή κατάσταση στις περιοχές της υπαίθρου	4
1.3	Αυτόνομα Έξυπνα Μικροδίκτυα Πολυπαραγωγής	8
2	Τοπολογία Μικροδικτύου	9
2.1	Εισαγωγή.....	9
2.2	Απόκτηση εμπειρίας	11
2.3	Η ανάγκη για Ευφυή Εποπτική Διαχείριση.....	12
3	Εργαλεία Προσομοίωσης.....	14
3.1	Εισαγωγή στο TRNSYS	14
3.2	Διαθέσιμες υπορουτίνες του TRNSYS που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.....	15
3.2.1	TYPE 89: Standard Weather Files - Trnsys Tmy - Simulation Start is first line	15
3.2.2	TYPE 16: RADIATION PROCESSOR.....	16
3.2.3	TYPE 180: PHOTOVOLTAIC ARRAY	18
3.2.4	TYPE 90: WIND TURBINE.....	19
3.2.5	TYPE 147: ELECTRICAL STORAGE BATTERY	19
3.2.6	TYPE 9: DATA READER.....	20
3.2.7	TYPE24:INTEGRATOR.....	20
3.2.8	EQUATIONS.....	20
3.2.9	TYPE 56: MULTIZONE BUILDING MODELING.....	20
3.3	Οι νέες υπορουτίνες που αναπτύχθηκαν	21
3.3.1	TYPE 171: FUEL CELL for steady operation	21
3.3.2	TYPE 172:FUEL CELL for variable operation	22
3.3.3	TYPE 161: ELECTROLYZER for steady operation	23
3.3.4	TYPE 172: ELECTROLYZER for variable operation	23
3.3.5	TYPE 165:HYDROGEN STORAGE WITH REFUELING STATION	25
3.3.6	TYPE 191: DESALINATION UNIT AND TANK for steady operation...	25
3.3.7	TYPE 192: DESALINATION UNIT AND TANK for variable operation	26
3.3.8	TYPE 198: AC BUS.....	27

3.3.9	TYPE 169: NET PRESENT COST CALCULATION	28
4	Εργαλεία υπολογιστικής νοημοσύνης.....	29
4.1	Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη.....	29
4.2	Διαστασιολόγηση των διαφόρων εξαρτημάτων	29
4.2.1	Διαστασιολόγηση μέσω βελτιστοποίησης	29
4.2.2	Λογισμική υλοποίηση του αλγόριθμου της ΒΘΣ.....	32
4.3	Σχεδιασμός Συστήματος Ενεργειακής Διαχείρισης	34
4.3.1	Διαχείριση Ενέργειας σε μικροδίκτυα	34
4.3.2	Ασαφής Λογική.....	36
4.3.3	Ασαφείς Γνωσιακοί Χάρτες (FCM).....	40
4.3.4	Δίκτυα Petri	43
5	Υλοποίηση των Συστημάτων Διαχείρισης της Ενέργειας.....	46
5.1	Γενικές πληροφορίες για τα Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας	46
5.2	ON-OFF Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας.....	46
5.3	Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας βασισμένο σε Ασαφή Λογική.....	49
5.4	Συνδυαστικό Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας με Δίκτυα Petri και Ασαφείς Γνωσιακούς Χάρτες.....	56
6	Σύγκριση των προσεγγίσεων διαχείρισης ενέργειας.....	60
6.1	Παράμετροι της Μελέτης Περίπτωσης.....	60
6.2	Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης	63
6.3	Βελτιστοποιήσεις	67
6.3.1	Οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση	67
6.3.2	Σύστημα διαχείρισης της ενέργειας ON-OFF (SEMS).....	68
6.3.3	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας ασαφούς λογικής (FLEMS).....	69
6.3.4	Συνδυασμένη προσέγγιση Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών (FPMS)	70
6.4	Σύγκριση των διαφορετικών Συστημάτων Διαχείρισης της Ενέργειας.....	76
7	Ευφυής Διαχείριση της Ενέργειας από την πλευρά της Κατανάλωσης.....	87
7.1	Εισαγωγή στην Διαχείριση της Ενέργειας από την πλευρά της Κατανάλωσης	87
7.2	Πράκτορες και Πολυπρακτορικά Συστήματα.....	89
7.3	Θεωρία Γκρίζων Συστημάτων	93

7.4	Ευφύες Σύστημα Διαχείρισης από την πλευρά της Κατανάλωσης.....	95
7.4.1	Επίπεδο πρόγνωσης	102
7.4.2	Επίπεδο Ενεργοποίησης	102
7.4.3	Επίπεδο ελεγκτών πρακτόρων	103
7.4.4	Επίπεδο ευφυούς επίσητη	107
7.5	Επικύρωση του Συστήματος Διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης μέσω προσομοίωσης	109
7.5.1	Ρουτίνες του IDSMS στο TRNSYS.....	109
7.5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης IDSMS.....	114
8	Οικονομική αξιολόγηση του Αυτόνομου Έξυπνου Μικροδικτύου πολυπαραγωγής.....	118
8.1	Υπόβαθρο Οικονομικής Αξιολόγησης.....	118
8.2	Ντετερμινιστική Αξιολόγηση Επένδυσης.....	120
8.3	Στοχαστική Αξιολόγηση Επένδυσης.....	121
9	Συμπεράσματα - Μελλοντικά Ερευνητικά Μονοπάτια	125
10	Αναφορές.....	129

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση του μικροδικτύου πολυπαραγωγής	10
Εικόνα 2.2 Έλεγχος μέσω της συχνότητας (SMA America, 2011)	11
Εικόνα 4.1 Δομή Λογισμικού.....	34
Εικόνα 4.2 Συναρτήσεις συμμετοχής διαθέσιμες στο Matlab (MathWorks, 2011)	38
Εικόνα 4.3 Λογικές πράξεις ασαφών συνόλων (MathWorks, 2011).....	39
Εικόνα 4.4 Ασαφής Γνωσιακός Χάρτης	41
Εικόνα 4.5 Ένα τυπικό Δίκτυο Petri.....	45
Εικόνα 5.1 Λογική ελέγχου διπλής υστέρησης.....	47
Εικόνα 5.2 Γραφική Απεικόνιση του Flems.....	49
Εικόνα 5.3 Συναρτήσεις συμμετοχής για τις εισόδους του TLFLS	51
Εικόνα 5.4 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 1	53
Εικόνα 5.5 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 2	53
Εικόνα 5.6 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 3	54
Εικόνα 5.7 Επιφάνειες ελέγχου FLS 1	54
Εικόνα 5.8 Επιφάνειες ελέγχου FLS 2.....	54
Εικόνα 5.9 Επιφάνειες Ελέγχου FLS 3	55
Εικόνα 5.10 Σχεδιασμός του FPEMS.....	57
Εικόνα 6.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα	62
Εικόνα 6.2 Υπολογισμός Ποινών	64
Εικόνα 6.3 Συναρτήσεις συμμετοχής του SOCL.....	71
Εικόνα 6.4 Συναρτήσεις συμμετοχής του SOCM	71
Εικόνα 6.5 Συναρτήσεις συμμετοχής για αρνητικά βάρη του FCM	71
Εικόνα 6.6 Συναρτήσεις συμμετοχής για θετικά βάρη του FCM.....	72
Εικόνα 6.7 Ασαφοποίηση της συχνότητας.....	73
Εικόνα 6.8 Ετήσια παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια.....	79
Εικόνα 6.9 Υδρογόνο στο δοχείο αποθήκευσης του υδρογόνου	80
Εικόνα 6.10 Νερό στη δεξαμενή πόσιμου νερού	81
Εικόνα 6.11 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 1 ^η Αυγούστου	84
Εικόνα 6.12 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 1 ^η Οκτωβρίου	85
Εικόνα 6.13 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 10 ^η Δεκεμβρίου.....	86
Εικόνα 7.1 Ένας τυπικός πράκτορας	89
Εικόνα 7.2 Τοπολογία Έξυπνου Μικροδικτύου Πολυπαραγωγής	96
Εικόνα 7.3 Προτεραιότητα των κατηγοριών φορτίων	98
Εικόνα 7.4 Δομή του ευφυούς Συστήματος Διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης.....	99
Εικόνα 7.5 Αλγόριθμος υπολογισμού τιμής διαπραγμάτευσης.....	101

Εικόνα 7.6 Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του IDSMS	103
Εικόνα 7.7 Πράκτορας ελέγχου	104
Εικόνα 7.8 Αλγόριθμος του ευφυή εποπτικού πράκτορα	108
Εικόνα 7.9 Νερό στη δεξαμενή του πόσιμου νερού	115
Εικόνα 7.10 Υδρογόνο στο δοχείο μεταλλικών υδριδίων	115
Εικόνα 8.1. Net Present Value distribution curve	124

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1 TYPE 89.....	16
Πίνακας 3.2 TYPE 16.....	17
Πίνακας 3.3 TYPE 180.....	18
Πίνακας 3.4 TYPE 90.....	19
Πίνακας 3.5 TYPE 147.....	19
Πίνακας 3.6 TYPE 171.....	21
Πίνακας 3.7 TYPE 172.....	23
Πίνακας 3.8 TYPE 161.....	23
Πίνακας 3.9 TYPE 172.....	24
Πίνακας 3.10 TYPE 165.....	25
Πίνακας 3.11 TYPE 191.....	26
Πίνακας 3.12 TYPE 192.....	27
Πίνακας 3.13 TYPE 198.....	27
Πίνακας 3.14 TYPE 169.....	28
Πίνακας 5.1 Type 190: SEMS.....	48
Πίνακας 5.2 Κανόνες TLFLS.....	51
Πίνακας 5.3 Αν... Τότε κανόνες FLS 1.....	55
Πίνακας 5.4 Αν... Τότε... κανόνες FLS 2.....	55
Πίνακας 5.5 Αν... Τότε κανόνες FLS 3.....	56
Πίνακας 5.6 Type155: Matlab.....	56
Πίνακας 5.7 Καταστάσεις Δικτύου Petri.....	58
Πίνακας 5.8 Type196: FPEMS.....	59
Πίνακας 6.1 Προφίλ Κατανάλωσης Ισχύος κατά τους Χειμερινούς μήνες.....	61
Πίνακας 6.2 Προφίλ Κατανάλωσης Ισχύος κατά τους Θερινούς μήνες.....	61
Πίνακας 6.3 Παράμετροι PSO.....	67
Πίνακας 6.4 Τιμές για υπολογισμό του NPC.....	68
Πίνακας 6.5 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το SEMS.....	69
Πίνακας 6.6 Μεταβλητές βελτιστοποίησης του FLEMS.....	69
Πίνακας 6.7 Παράμετροι και βάρη του FPEMS.....	71
Πίνακας 6.8 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το Βήμα 2 του FPEMS.....	75
Πίνακας 6.9 Βελτιστοποίηση Μεταβλητών Βήματος 3 του FPEMS.....	76
Πίνακας 6.10 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το Βήμα 4 του FPEMS.....	76
Πίνακας 6.11 Συγκρίσεις των διαφορετικών EMS.....	77
Πίνακας 7.1 PAGE του MAS.....	97
Πίνακας 7.2 Είσοδοι/Εξοδοι πράκτορα ενεργοποίησης.....	102
Πίνακας 7.3 Πράκτορας φωτισμού.....	104
Πίνακας 7.4 Πράκτορας ψύξης/κατάψυξης.....	104
Πίνακας 7.5 Πράκτορας Ψύξης/Θέρμανσης χώρων.....	105
Πίνακας 7.6 Πράκτορας διαφόρων καταναλώσεων.....	105

Πίνακας 7.7 Ευφυής εποπτικός πράκτορας.....	107
Πίνακας 7.8 TYPE 366: GREY PREDICTOR.....	110
Πίνακας 7.9 TYPE 250: ACTIVATION AGENT	110
Πίνακας 7.10 TYPE 251: AGENT NEGOTIATION	111
Πίνακας 7.11 TYPE257-9: INTELLIGENT SUPERVISOR AGENT.....	112
Πίνακας 7.12 TYPE390: ELECTROLYZER,FUEL CELL AND DESALINATION AGENTS.....	113
Πίνακας 7.13 10-11 ^η Αυγούστου.....	116
Πίνακας 7.14 10 ^η -11 ^η Αυγούστου	117
Πίνακας 8.1 Καθαρές ροές χρημάτων	120
Πίνακας 8.2 Επίδραση των αλλαγών των παραμέτρων στην Καθαρή Παρούσα Αξία.....	122
Πίνακας 8.3 Παράμετροι για την MSC για το έτος 2011 και στην παρένθεση για το έτος 2015.....	123

1 Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Στην αυγή του 21^{ου} αιώνα ο κόσμος αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις στην συνεχή εξέλιξη του ανθρώπινου είδους. Ο 20^{ος} αιώνας ιστορικά παρουσίασε τη μεγαλύτερη εξέλιξη στους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Η τεχνολογική επανάσταση άλλαξε την καθημερινή ζωή της ανθρωπότητας όσο τίποτε άλλο στο παρελθόν. Τα βασικά στοιχεία αυτής της επανάστασης είναι ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός νέων επιστημονικών ανακαλύψεων, ο μεγάλος αριθμός εφευρέσεων και η αυξανόμενη βιομηχανική παραγωγή αγαθών με ταυτόχρονη μείωση του κόστους.

Δυστυχώς αυτή η διαδικασία δεν ήταν και δεν είναι ακόμη ομοιόμορφη σε όλο τον κόσμο. Παρουσιάζει κυρίως δύο άξονες ανισοτήτων. Ο πρώτος αφορά τις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες και τις αναπτυσσόμενες και ο δεύτερος αφορά τις αστικές περιοχές σε σχέση με τις περιοχές της υπαίθρου. Πριν δύο αιώνες η τροφή και το νερό αποτελούσαν τις βασικές ανάγκες που έπρεπε να καλυφθούν ώστε μια περιοχή να μπορεί να συντηρεί μια ανθρώπινη κοινότητα. Στις μέρες μας οι βασικές ανάγκες έχουν επεκταθεί και περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια, την θερμική και ψυκτική ενέργεια, καύσιμο για μετακινήσεις και δυνατότητες τηλεπικοινωνιών που τελικά όλες εξαρτώνται από την ενέργεια. Τα ορυκτά καύσιμα, κυρίως οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο ήταν οι αρχικές και ακόμη οι βασικές ενεργειακές πηγές.

Τα ορυκτά καύσιμα και κυρίως το πετρέλαιο παρουσιάστηκαν ως η μόνη βιώσιμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας τον προηγούμενο αιώνα. Όταν όμως διερευνηθούν κριτικά παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένα και σημαντικά μειονεκτήματα. Πιθανότητα το πιο σημαντικό είναι το συνεχώς αυξανόμενο κόστος τους λόγω της μείωσης των διαθέσιμων αποθεμάτων. Σημαντικά επιστημονικά περιοδικά όπως τα Oil and Gas Journal και World Oil αναφέρουν ότι νέα αποθέματα πετρελαίου ανακαλύπτονται κάθε χρόνο, όταν την ίδια στιγμή, τα αξιοποιήσιμα αποθέματα αυξάνουν λόγω της τεχνολογικής προόδου (Rifkin, 2002). Αυτή η προσέγγιση αφήνει συνήθως τον

αναγνώστη με την αίσθηση ότι δεν υπάρχει και δεν θα υπάρξει πρόβλημα στην παροχή πετρελαίου. Είναι ενδιαφέρον να παρουσιαστεί εδώ μια θεωρία του γεωφυσικού M. Hubbert που αναπτύχθηκε το 1956 (Hubbert, 1956). Ανέπτυξε ένα μοντέλο που μπορούσε θεωρητικά να προβλέψει την πτώση στην παραγωγή πετρελαίου των ΗΠΑ. Αυτό το σημείο σύμφωνα με την έρευνά του οροθετήθηκε μεταξύ του 1965 και του 1970. Λόγω αυτής της θεωρίας περιθωριοποιήθηκε επιστημονικά και έγινε ο περίγελος του πετρελαϊκού κόσμου. Η ιστορία, όμως, τον δικαίωσε μιας και το 1970 η παραγωγή πετρελαίου των ΗΠΑ άγγιξε την κορύφωσή της, σημεία μείωσης έγιναν φανερά και οι ΗΠΑ έπαψαν να είναι η πρώτη πετρελαιοπαραγωγός χώρα στον κόσμο, ένα γεγονός που ακολουθήθηκε από την πρώτη πετρελαϊκή κρίση.

Αυτό που αναφέρει η θεωρία του Hubbert είναι ότι η παραγωγή πετρελαίου ξεκινά από το μηδέν, αυξάνει και επιτυγχάνει την κορύφωσή της όταν τα μισά από τα ολικά αξιοποιήσιμα αποθέματα έχουν χρησιμοποιηθεί. Μετά από αυτό το σημείο ακολουθεί μια συνεχή πτώση σύμφωνα με την καμπύλη της κανονικής κατανομής. Αυτή η θεωρία δεν αναφέρει ότι μετά την κορύφωση τα αποθέματα του πετρελαίου εξαντλούνται σύντομα, αλλά emphaticά αναφέρει ότι σίγουρα το πετρέλαιο θα γίνει ακριβότερο, λόγω της έλλειψής του. Πρόσθετα σε αυτό πολλά από τα διαθέσιμα αποθέματα πετρελαίου (πισσούχος άμμος, βαρύ πετρέλαιο, πετρέλαιο σε μεγάλα βάθη και πολικές περιοχές κλπ) παρουσιάζουν υψηλό κόστος εξόρυξης. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές η κορύφωση στην παγκόσμια παραγωγή του πετρελαίου έχει ήδη συμβεί κοντά στο 2010, ενώ άλλοι επιστήμονες αναμένουν να λάβει χώρα κοντά στο 2040. Σε κάθε περίπτωση τα τελευταία χρόνια η τιμή ενός βαρελιού πετρελαίου έχει φτάσει στην ιστορικά υψηλότερη τιμή των 145.91 US \$ (Ιούλιος 2008) και είναι περίπου 110 US \$ το Νοέμβριο του 2011.

Το φυσικό αέριο είναι ένα ακόμη ορυκτό καύσιμο υψηλής σημασίας. Είναι το πιο περιβαλλοντικά φιλικό από τα ορυκτά καύσιμα. Όμως ακολουθεί την ίδια τάση με το πετρέλαιο όσο αφορά την τιμολόγησή του. Η εταιρία πετρελαιοειδών Shell σε κάποιες μελέτες της έχει αναγνωρίσει ότι υπάρχουν πιθανότητες για ελλείψεις στην παροχή φυσικού αερίου ακόμη και το 2025 (Rifkin, 2002).

Εκτός από την συνεχώς αυξανόμενη τιμή, η χρήση του πετρελαίου και των ορυκτών καύσιμων γενικότερα συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και επίσης τα αποθέματά τους δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην υδρόγειο. Άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνουν την πυρηνική ενέργεια και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η τεχνολογία σχάσης που υπάρχει από τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο έχει αποδειχθεί απρόβλεπτη όσο αφορά πιθανά ατυχήματα. Το Chernobyl στη δεκαετία του 80 και η Fukushima στη δεκαετία του 10 είναι σημαντικά παραδείγματα του τι μπορεί να συμβεί αν κάτι πάει στραβά. Επιπλέον οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης παράγουν τοξικά ραδιενεργά απόβλητα που πρέπει να αποθηκευτούν κάπου· μια όμορφη κληρονομιά για τις επόμενες γενεές. Η πυρηνική σύντηξη παρουσιάζει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον στις ημέρες μας και παρουσιάζεται ως μια από τις μεγαλύτερες ελπίδες της ανθρωπότητας όσο αφορά την παροχή άφθονης και καθαρής ενέργειας. Δυστυχώς για να φτάσει η ανθρωπότητα στο σημείο που να λειτουργήσει τον πρώτο αντιδραστήρα σύντηξης απαιτείται μια σειρά επιστημονικών ανακαλύψεων που δυστυχώς δεν αναμένεται να λάβουν χώρα τουλάχιστον για κάποιες δεκαετίες ακόμη.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μια ομάδα ενεργειακών πηγών που άμεσα ή έμμεσα αντλούν ενέργεια από τον ήλιο. Όσο ο ήλιος λάμπει, όλες αυτές οι πηγές ενέργειας θα συνεχίσουν να υπάρχουν και θα είναι στη διάθεση της ανθρωπότητας για χρήση. Οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν:

- Ηλιακή Ενέργεια. Μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς. Μέσω ηλιακών θερμικών πάνελ μπορεί να παραχθεί θερμική ισχύς.
- Αιολική Ενέργεια. Ανεμόμυλοι και ανεμογεννήτριες μπορούν να αξιοποιήσουν τον άνεμο και να παράξουν μηχανικό έργο ή ηλεκτρική ισχύς.
- Γεωθερμική Ενέργεια. Η θερμότητα της γης που μπορεί να αξιοποιηθεί ως έχει ή να μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ.
- Βιομάζα. Ιστοί φυτών και ζώων, όπως και τα απόβλητά τους μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή θερμότητας και διαφόρων καυσίμων.
- Υδροηλεκτρική ενέργεια. Η ροή νερού μαζί με τις υδατοπτώσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή μηχανικού έργου που μπορεί να αξιοποιηθεί ως έχει ή να μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ.

- Κυματική ενέργεια. Η κίνηση των κυμάτων και υδάτινων ρευμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή μηχανικού έργου και ηλεκτρικής ισχύος.

Οι ΑΠΕ συνδυάζονται με ώριμες τεχνολογίες που μπορούν να παράξουν ενέργεια με ένα βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.

Οι πρώτοι σταθμοί παραγωγής ισχύος είναι κεντρικά κατασκευασμένοι κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα του οικονομικά ανεπτυγμένου κόσμου. Με την εξάπλωση των δικτύων διανομής οι περιοχές της υπαίθρου αυτών των χωρών απέκτησαν πρόσβαση και αυτές στην ενέργεια. Ακόμη και σε ανεπτυγμένες χώρες του κόσμου στις ημέρες μας υπάρχουν περιοχές της υπαίθρου μακριά από κάποιο κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. Καναδάς, Ρωσία). Στις αναπτυσσόμενες χώρες ακόμη σημαντικό μέρος του πληθυσμού ζει σε περιοχές της υπαίθρου. Σύμφωνα με το Energy Outlook 2010 του International Energy Agency περίπου 1.44 δις. ανθρώπων ακόμη και σήμερα δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό και το συντριπτικό ποσοστό τους ζει σε αναπτυσσόμενες χώρες. Σε αυτές τις χώρες η πρόσβαση είναι περιορισμένη ακόμη και στα αστικά κέντρα τους (IEA, 2010).

1.2 Τωρινή κατάσταση στις περιοχές της υπαίθρου

Συστήματα ΑΠΕ που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και συσσωρευτές έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε απομονωμένες περιοχές τις τελευταίες δεκαετίες με σκοπό την κάλυψη αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (Buran, Butler et al., 2003). Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από συναρτησιακά στοιχεία, μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να καλύψουν συγκεκριμένες ανάγκες και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Ένα γενικό πρόβλημα των συστημάτων ΑΠΕ είναι ότι σπάνια υπάρχει σύμπτωση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μακροπρόθεσμη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως υψηλού κόστους – οι συσσωρευτές είναι ακριβοί, παρουσιάζουν ζωές κοντά στα 5 έτη και συνήθως είναι ευαίσθητοι στην διαχείριση τους μετά την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής τους επειδή περιέχουν τοξικά στοιχεία – τέτοια συστήματα έχουν μεγάλες απώλειες ενέργειας σε ετήσια βάση (Manolakos, Papadakis et al., 2004; Kaldellis, Zafirakis et al., 2010). Έχει επίσης προταθεί ότι η

χρήση κάποιας εφεδρικής πηγής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την οικονομική αποτελεσματικότητα τέτοιων συστημάτων (Zoulias, Glockner et al., 2006).

Ελλείψεις πόσιμου νερού είναι συχνές σε αρκετές περιοχές του κόσμου. Συνήθως τοποθεσίες που έχουν περιορισμένες πηγές πόσιμου νερού παρουσιάζουν και δυσκολίες στην παροχή ενέργειας. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα σε περιοχές απομονωμένες και σε νησιωτικές περιοχές. Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση (ΑΩ) που τροφοδοτείται με ενέργεια από ΑΠΕ έχουν μελετηθεί εκτενώς για την παραγωγή πόσιμου νερού. Τα βασικά πλεονεκτήματα της ΑΩ περιλαμβάνουν την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση με περιορισμένες ανάγκες συντήρησης. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί και σε περιπτώσεις υφάλμυρου νερού (Kaldellis, Kavadias et al., 2004; Mohamed and Papadakis, 2004).

Οι εφαρμογές του υδρογόνου επεκτείνονται συνεχώς στις ημέρες μας. Αυτός ο φορέας ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο ως καύσιμο για μετακινήσεις (Ally and Pryor, 2007), όσο και σαν μια μέτρια ως μακροπρόθεσμη αποθήκη ενέργειας (Bielmann, U.F.Vogt et al., 2011). Υποσυστήματα υδρογόνου χρησιμοποιούνται και σε συστήματα ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια (Zoulias and Lymberopoulos, 2007). Τα τυπικά εξαρτήματα ενός υποσυστήματος υδρογόνου συνήθως περιλαμβάνουν μια μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού, αποθηκευτικό χώρο υδρογόνου, σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και κυψέλη καυσίμου. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού είναι μια συσκευή που παράγει υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις στην αποθήκευση του υδρογόνου σε συστήματα ΑΠΕ περιλαμβάνουν δοχεία αερίων υπό πίεση και δοχεία μεταλλικών υδριδίων. Το κόστος των δοχείων μεταλλικών υδριδίων είναι υψηλότερο, αλλά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την υψηλότερη ασφάλεια έναντι ατυχημάτων (Botzung, Chaudourne et al., 2008), που είναι ιδιαίτερα σημαντική για αυτόνομα συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε απομακρυσμένες περιοχές. Συστήματα τροφοδοσίας υπάρχουν στις περιπτώσεις εκείνες που το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο για μετακινήσεις. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από το υποθηκευμένο υδρογόνο. Η χρήση ενός υποσυστήματος υδρογόνου παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με μεγάλες συστοιχίες συσσωρευτών με όρους ενεργειακής πυκνότητας

και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας (Conte, Proisini et al., 2004). Τα υποσυστήματα υδρογόνου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό επίπεδο θορύβου, την δυνατότητα για αποθήκευση ενέργειας με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, εποχιακή αποθήκευση ενέργειας χωρίς απώλειες, δυνατότητα κάλυψης διακυμάνσεων ισχύος και συνεπώς ιδανικά για ενσωμάτωση σε συστήματα ΑΠΕ, δυνατότητα για χαμηλά και προβλέψιμα κοστολόγια λειτουργίας και συντήρησης και μειωμένη επίπτωση στο περιβάλλον σε σύγκριση με συμβατικές πηγές ενέργειας (Zoulias, Glockner et al., 2006).

Τα μικροδίκτυα είναι μικρής κλίμακας δίκτυα παροχής ισχύος. Μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα, είτε σε διασύνδεση με μεγαλύτερα δίκτυα (Llaria, Curea et al., 2011; Manfren, Caputo et al., 2011). Στα μικροδίκτυα είναι εφικτή η κατανεμημένη παραγωγή όπου διαφορετικές πηγές ενέργειας και διατάξεις αποθήκευσης της ενέργειας κατανέμονται σε οποιαδήποτε τοποθεσία καλύπτεται από το δίκτυο. Παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με συμβατικά αυτόνομα συστήματα γιατί έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος σε περίπτωση βλάβης κάποιου παραγωγού ενέργειας σε σύγκριση με την ολική κατάρρευση. Τα μικροδίκτυα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σε αυτόνομη λειτουργία, απαιτούν ευφυή διαχείριση και αποδοτικό σχεδιασμό με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες της περιοχής που καλύπτουν (Markvart, 2006). Μίας και οι περισσότερες περιοχές της υπαίθρου που δεν έχουν ήδη πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια δεν αναμένεται να διασυνδεθούν τα προσεχή χρόνια με κάποιο κεντρικό δίκτυο και η επιλογή απλώς να αναμένουν αυτή την επιλογή δεν είναι βιώσιμη εναλλακτική, τα μικροδίκτυα που βασίζονται σε κατανεμημένη παραγωγή από ΑΠΕ αναδεικνύονται σαν μια από τις πιο καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις για αυτές τις περιοχές (Thiam, 2010). Αυτά τα μικροδίκτυα μπορούν αυτόνομα να καλύψουν τις ανάγκες αυτών των περιοχών για τα προσεχή χρόνια και αν ποτέ επιτευχθεί διασύνδεση με κάποιο μεγαλύτερο δίκτυο ηλεκτροδότησης θα μπορούν να το συνεπικουρούν με υψηλότερη ποιότητα ισχύος και απόδοση (Markvart, 2006; Llaria, Curea et al., 2011).

Η ψύξη τις περισσότερες φορές καλύπτεται σε απομονωμένες περιοχές με ενεργειακά αποδοτικά ηλεκτρικά ψυγεία που τροφοδοτούνται από

φωτοβολταϊκά. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την αποθήκευση φαρμακευτικού υλικού και εμβολίων.

Η ψύξη και θέρμανση χώρων συνήθως αγνοούνται στις απομονωμένες περιοχές μιας και η φτώχεια είναι υψηλή και θεωρούνται πολυτέλεια. Για την κάλυψη αναγκών σε θέρμανση συνήθως αξιοποιείται βιομάζα. Ξυλεία και περιττώματα ζώων χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις σε ανοικτά τζάκια και αυτοσχέδιες σόμπες. Σε χώρες του ανεπτυγμένου χώρου συνήθως χρησιμοποιούνται καυστήρες πετρελαίου για θέρμανση χώρων. Η θέρμανση βασισμένη στην ηλεκτρική ενέργεια το παρελθόν παρουσίαζε υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, που οδηγούσε σε πολύ ακριβά ενεργειακά συστήματα για να την υποστηρίξουν. Σήμερα εμπορικά διαθέσιμες αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα στη μορφή των διαιρούμενου τύπου κλιματιστικών παρουσιάζουν COP ακόμη και μεγαλύτερο του 5. Αυτές οι αντλίες θερμότητας είναι εξοπλισμένες με αναστροφείς (inverter) που κάνει εφικτή τη λειτουργία του συμπιεστή σε μερικό φορτίο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις συνεχώς μειούμενες τιμές των φωτοβολταϊκών πάνελ (τιμές χαμηλότερες από 0.70 €/Wp καταγράφηκαν το 2011 (Neidlein H-C and J., 2011)) τα κάνει μια βιώσιμη εναλλακτική που αξίζει να διερευνηθεί. Οι αντλίες θερμότητας αέρα μπορούν να προσφέρουν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη χώρων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις σήμερα χρησιμοποιούνται ξεχωριστά συστήματα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Nema, Nema et al., 2009), και για παραγωγή πόσιμου νερού (Mohamed and Papadakis, 2004). Συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής έχουν προταθεί κυρίως για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών και αναγκών ψύξης και θέρμανσης (Chicco and Mancarella, 2009; Zhao, Akbarzadeh et al., 2009). Η παραγωγή καυσίμου τοπικά για την κάλυψη αναγκών σε μετακινήσεις είναι μια σχετικά νέα ιδέα (Degiorgis, Santarelli et al., 2007), όταν στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται βενζίνη ή πετρέλαιο για αυτό το σκοπό. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην κάλυψη περισσότερων αναγκών σε μια απομονωμένη περιοχή (ηλεκτρική ενέργεια, πόσιμο νερό, καύσιμο για μετακινήσεις, ψύξη και θέρμανση) μπορεί να είναι προτιμητέα

μιας και προσφέρει πλεονεκτήματα με όρους αξιοπιστίας και υψηλών βαθμών απόδοσης (Kyriakarakos, Mohamed et al., 2010).

1.3 Αυτόνομα Έξυπνα Μικροδίκτυα Πολυπαραγωγής

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει τη νέα ιδέα/προσέγγιση των αυτόνομων έξυπνων μικροδικτύων πολυπαραγωγής (ΑΜΠ), που στοχεύουν στην κάλυψη των αναγκών σε μια απομονωμένη περιοχή με τρόπο ολιστικό, φιλικό προς το περιβάλλον και βιώσιμα, καθώς και με την σε βάθος τεχνική διερεύνηση της υλοποίησης και εφαρμογής τους.

Πρώτα από όλα αυτή η ιδέα παρουσιάζει το στοιχείο της αυτονομίας. Δεν απαιτούνται εξωτερικές εισοδοί εκτός από τις ΑΠΕ. Μέσω των ΑΠΕ ενέργεια μπορεί να παραχθεί τοπικά. Μετά ακολουθεί το στοιχείο των μικροδικτύων. Το αυτόνομο δίκτυο χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να επεκταθεί ώστε να καλύψει όλα τα κτίρια σε μια απομονωμένη περιοχή. Οι παραγωγοί ισχύος μπορούν να εγκατασταθούν οπουδήποτε στο μικροδίκτυο αυτό. Η καταναλωμένη παραγωγή είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πολλές μικρές ενεργειακές πηγές, γεγονός που παρουσιάζει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί στην κορυφή ενός λόφου, ενώ φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να εγκατασταθούν σε πολλαπλές τοποθεσίες με νότιο προσανατολισμό και απουσία σκιάσεων από δένδρα ή άλλες κατασκευές. Αυτό το μικροδίκτυο θεωρείται ευφυές επειδή επιδιώκει να προβλέψει και να ανταποκριθεί με έξυπνο τρόπο στη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των παραγωγών και καταναλωτών τόσο από την πλευρά της παραγωγής όσο και από την πλευρά της κατανάλωσης (Chebbo, 2007). Η πολυπαραγωγή είναι το τελευταίο στοιχείο που χαρακτηρίζει αυτή την τοπολογία, η οποία παράγει πολλαπλά προϊόντα. Αυτά τα προϊόντα περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ισχύ, το πόσιμο νερό από αφαλάτωση, την τοπική παραγωγή καυσίμου για μετακινήσεις στη μορφή του υδρογόνου, την ψύξη και θέρμανση χώρων και την ψύξη προϊόντων.

2 Τοπολογία Μικροδικτύου

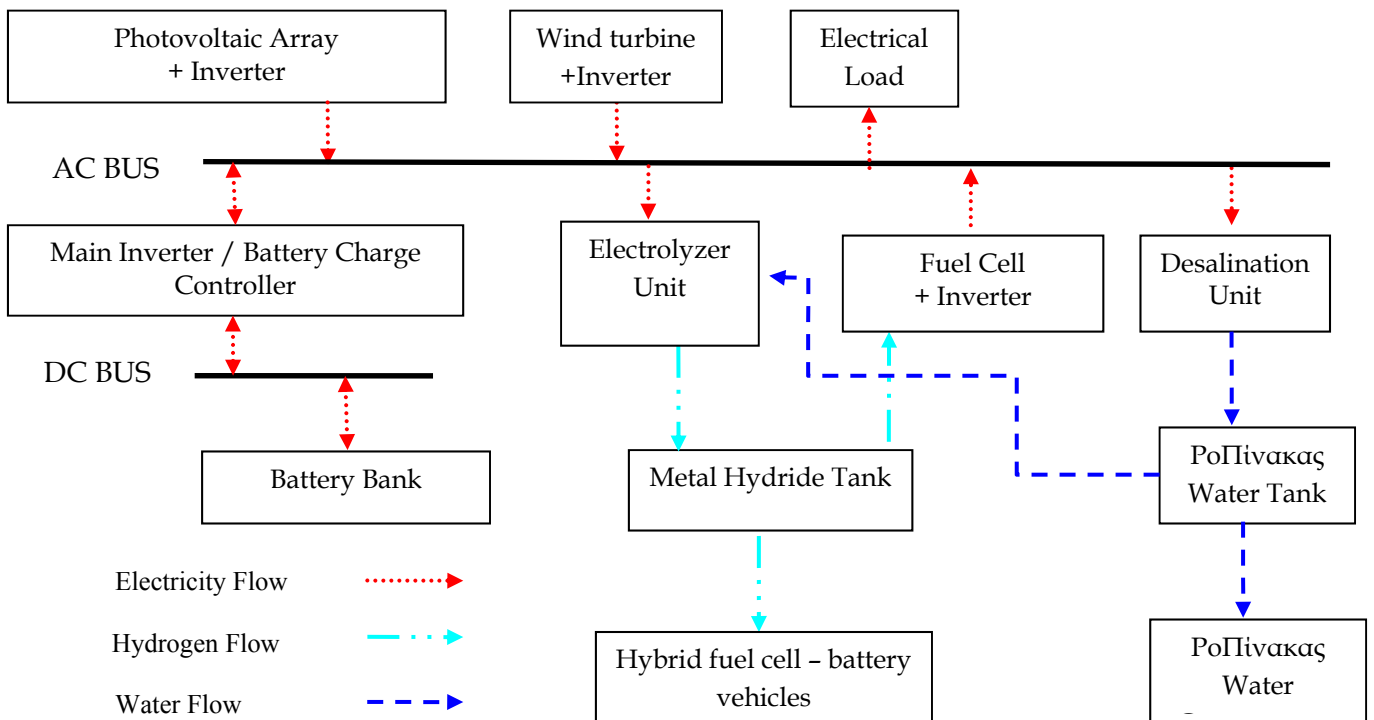
2.1 Εισαγωγή

Η βάση του μικροδικτύου πολυπαραγωγής είναι το ηλεκτρολογικό κομμάτι πάνω στο οποίο τα υπόλοιπα τμήματα χτίζονται. Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για το πώς να δομηθεί ένα αυτόνομο μικροδίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μια εμπορικά διαθέσιμη τοπολογία μιας και αυτό θα επέτρεπε την στόχευση στο στοιχείο της πολυπαραγωγής. Η τοπολογία που επιλέχθηκε είναι η Sunny Island που έχει πατενταριστεί από την εταιρία “SMA Solar Technology AG” (Engler, Meinhardt et al., 2004). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την κατανεμημένη παραγωγή στη γραμμή του εναλλασσόμενου ρεύματος όπως συστοιχίες φωτοβολταϊκών, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες πετρελαίου κλπ. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι ότι άλλες εταιρίες όπως οι “Studer Innotec SA” και “Steca” παράγουν αναστροφείς που μπορούν να δομήσουν αντίστοιχα μικροδίκτυα ή ακόμη και να διασυνδεθούν με την τοπολογία Sunny Island (Moix Pierre-Olivier and Claude, 2010). Αυτή η τοπολογία βασίζεται σε συναρτησιακά στοιχεία, μπορεί να επεκταθεί σε τριφασικό αυτόνομο μικροδίκτυο με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 500 kW χωρίς τη χρήση κάποιας γεννήτριας πετρελαίου. Επιτρέπει την κατανεμημένη παραγωγή και επιτρέπει την εύκολη επέκταση στο μέλλον χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση των υπάρχοντων συσκευών.

Αυτή η τοπολογία βασίζεται στον έλεγχο μέσω της συχνότητας – η συχνότητα του μικροδικτύου χρησιμοποιείται για να ελεγχθούν όλοι οι διασυνδεδεμένοι αναστροφείς όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα. Κατά αυτό τον τρόπο η συχνότητα στην αυτόνομη λειτουργία είναι ένας δείκτης του ισοζυγίου ενέργειας στο μικροδίκτυο εκείνη τη χρονική στιγμή.

Αποφασίστηκε όλοι οι παραγωγοί να τροφοδοτούν ισχύ στη γραμμή του εναλλασσόμενου ρεύματος και όλοι οι καταναλωτές να καταναλώνουν ισχύ από εκεί επίσης. Η γραμμή του συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιείται μόνο για τους

συσσωρευτές του συστήματος. Η τοπολογία παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση του μικροδικτύου πολυπαραγωγής

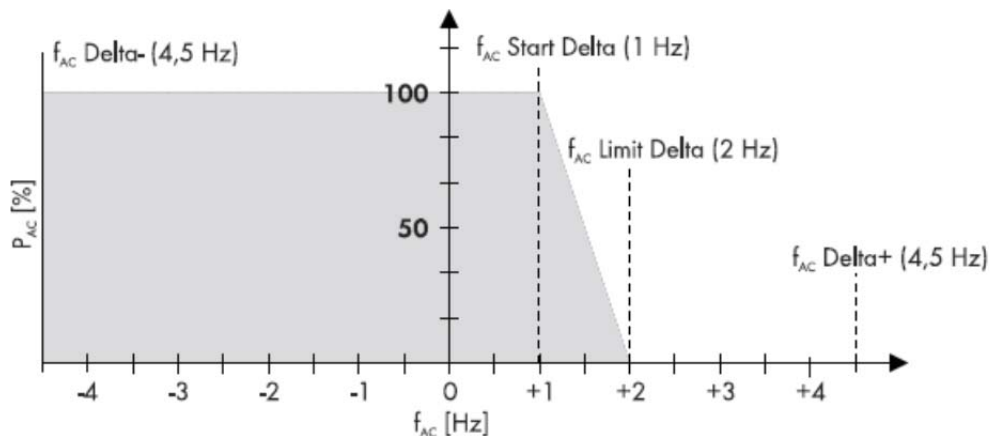
Ένα πιλοτικό μικροδίκτυο εγκαταστάθηκε στους χώρους του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών βασισμένο στην παραπάνω τοπολογία. Τα υποσυστήματά του περιλαμβάνουν:

- ❖ Συστοιχίες φωτοβολταϊκών
- ❖ Ανεμογεννήτρια
- ❖ Μονάδα αφαλάτωσης
- ❖ Μονάδα ηλεκτρόλυσης
- ❖ Δοχείο υδρογόνου τεχνολογίας μεταλλικών υδριδίων
- ❖ Όχημα υδρογόνου
- ❖ Αναστροφέας που διαμορφώνει το μικροδίκτυο
- ❖ Συστοιχία συσσωρευτών
- ❖ Ηλεκτρονικό φορτίο
- ❖ Σύστημα καταγραφής δεδομένων λειτουργίας

2.2 Απόκτηση εμπειρίας

Σημαντικός αριθμός πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο πιλοτικό μικροδίκτυο και παρουσιάστηκαν σε διάφορα συνέδρια. (Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2006; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2008; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2008; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2008; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2008; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2008; Kyriakarakos G. , Mohamed E. et al., 2009). Μέσω αυτών των πειραμάτων αποκτήθηκε εμπειρία όσο αφορά τη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων του μικροδικτύου και κυρίως για τον έλεγχο μέσω της συχνότητας της επιλεγμένης τοπολογίας κατά την αυτόνομη λειτουργία.

Κατά τον έλεγχο μέσω της συχνότητας αν ο αναστροφέας που δημιουργεί το μικροδίκτυο δει ότι ο συσσωρευτής φορτίζεται πλήρως αρχίζει να αυξάνει την συχνότητα του μικροδικτύου από τα 50 Hz στα 52 Hz με σκοπό τελικά να προστατεύσει το συσσωρευτή από υπερφόρτιση. Όταν οι αναστροφείς των παραγωγών (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κλπ) αναγνωρίσουν αύξηση της συχνότητας άνω των 50 Hz αρχίζουν να μειώνουν την ισχύ που παρέχουν στο μικροδίκτυο και την μηδενίζουν όταν η συχνότητα αγγίξει τα 52 Hz (βλέπε Εικόνα Εικόνα 2.2.). Όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στο μικροδίκτυο η συχνότητα μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 49 Hz (SMA America, 2011).



Εικόνα 2.2 Έλεγχος μέσω της συχνότητας (SMA America, 2011)

2.3 Η ανάγκη για Ευφυή Εποπτική Διαχείριση

Μετά την πειραματική διερεύνηση όλων των συστημάτων ξεχωριστά ακολούθησε η διασύνδεσή τους προς τη δημιουργία του μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Η συστοιχία φωτοβολταϊκών, η ανεμογεννήτρια και η συστοιχία συσσωρευτών λειτουργούσαν απροβλημάτιστα, πράγμα αναμενόμενο μιας και η επιλεγμένη τοπολογία είναι εμπορική. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτούνταν από τη γραμμή του εναλλασσόμενου ρεύματος και μπορούσαν να διασυνδεθούν στο μικροδίκτυο μέσω σύνδεσης σε κάποια πρίζα του. Η διασύνδεση της κυψέλης καυσίμου με το μικροδίκτυο έγινε επίσης εφικτή μέσω αντίστοιχου αναστροφέα. Αυτό που απέμενε να πραγματοποιηθεί ώστε το ΑΜΠ να γίνει λειτουργικό ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος ευφυούς εποπτικής διαχείρισης που θα μπορούσε να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τις διάφορες συσκευές.

Υπάρχουν δύο στοιχεία που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να γίνει εφικτή η διερεύνηση της ΑΜΠ τοπολογίας. Ένα τρίτο στοιχείο προκύπτει όταν διερευνάται η βιωσιμότητα της τοπολογίας εκτός των κατασκευαστικών προδιαγραφών. Αναλυτικότερα:

1. Πρέπει να σχεδιαστεί ένα αυτόματο σύστημα ευφυούς εποπτικής διαχείρισης.
2. Πρέπει να αναπτυχθεί μια προσέγγιση για τη διαστασιολόγηση τέτοιων μικροδικτύων σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής (ηλεκτρικό φορτίο, φορτίο ψύξης και θέρμανσης χώρων, ανάγκες σε πόσιμο νερό, ανάγκες σε υδρογόνο ως καύσιμο για μετακινήσεις) όπως και τις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής στη διάρκεια του έτους.
3. Ένα ευφύες σύστημα διαχείρισης των φορτίων από την πλευρά της κατανάλωσης. Ακόμη και όταν ένα σύστημα έχει σχεδιαστεί άρτια, αυτό ισχύει μόνο για τις δεδομένες ανάγκες. Είναι πολύ συχνό όμως μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα οι ανάγκες αυτές να έχουν αλλάξει, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα από τους ιδιοκτήτες του μικροδικτύου να επενδύσουν σε επέκτασή του.

Με σκοπό την διερεύνηση του μικροδικτύου και με την παροχή δυνατότητας σχεδιασμού και ελέγχου εικονικά διαφόρων προσεγγίσεων εποπτικής διαχείρισης μια πλατφόρμα προσομοίωσης του ΑΜΠ έπρεπε να αναπτυχθεί. Στη βάση των προσομοιώσεων η πλατφόρμα λογισμικού θα πρέπει να είναι ικανή να διαστασιολογεί και τα διάφορα υποσυστήματα του ΑΜΠ για δεδομένες ανάγκες σε δεδομένη περιοχή.

3 Εργαλεία Προσομοίωσης

3.1 Εισαγωγή στο TRNSYS

Για το σχεδιασμό ενός εποπτικού συστήματος διαχείρισης επιλέχθηκε η μεθοδολογία σχεδιασμού μέσω προσομοίωσης. Το AMΠ θα προσομοιωθεί σε υπολογιστικό περιβάλλον όπου και οι διαφορετικές προσεγγίσεις θα μπορούν να υλοποιηθούν και να διερευνηθούν σε μικρό χρόνο αναλυτικά. Το βασικό πακέτο λογισμικού που επιλέχθηκε είναι το TRNSYS (TRNSYS, 2011).

Το TRNSYS είναι ένα δυναμικό λογισμικό πακέτο προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων. Βασισμένο στη συναρτησιακή του δομή, μπορεί να επιλύσει μεγάλες ομάδες εξισώσεων που περιγράφονται από τις διάφορες υπορουτίνες γραμμένες σε Fortran. Κάθε υπορουτίνα Fortran περιέχει το μοντέλο προσομοίωσης για ένα συγκεκριμένο μέρος του συνολικού συστήματος. Για παράδειγμα η Υπορουτίνα 180 περιλαμβάνει ένα μοντέλο που μπορεί να προσομοιώσει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Κάθε υπορουτίνα έχει Εισόδους, Εξόδους και Παραμέτρους. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει αναφορά σε κάποιο αρχείο εισόδου αποθηκευμένο στον υπολογιστή που μπορεί να περιλαμβάνει παραμέτρους προς την ευκολία του χρήστη. Για παράδειγμα η υπορουτίνα που προσομοιώνει τη Φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει παραμέτρους τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πάνελ (πχ. Τάση ανοικτού κυκλώματος, ρεύμα βραχυκύκλωσης κλπ.), σαν εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα (πχ. Θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία) και εξόδους την παραγόμενη ισχύ. Στο αρχείο εισόδου του TRNSYS ο χρήστης διασυνδέει τις διάφορες υπορουτίνες που στο σύνολό τους περιγράφουν το σύστημα προς προσομοίωση. Η μηχανή επίλυσης του TRNSYS καλεί την κάθε υπορουτίνα που αναφέρεται στο αρχείο εισόδου και προσπαθεί να τις επιλύσει σε κάθε χρονικό βήμα. Ο μεγάλος αριθμός των πιθανών διασυνδέσεων των υπορουτίνων δίνουν μεγάλη ελευθερία στο χρήστη. Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού πακέτου είναι ότι ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει τις δικές του υπορουτίνες και να τις συμπεριλάβει στο λογισμικό πακέτο. Κατά αυτό τον τρόπο από το 1975 που έγινε διαθέσιμη η έκδοση 1, έχουν αναπτυχθεί πολλές υπορουτίνες που επιτρέπουν την προσομοίωση θερμικών συστημάτων, κτιριακών δομών και συστημάτων ΑΠΕ.

Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 16 του TRNSYS. Αυτή η έκδοση περιλαμβάνει μια γραφική επιφάνεια εργασίας για τη δημιουργία του αρχείου εισόδου. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να απεικονίσει τις διάφορες διασυνδέσεις και να απλοποιήσει την δημιουργία του αρχείου εισόδου.

Χρησιμοποιήθηκαν υπάρχουσες υπορουτίνες στο λογισμικό πακέτο όπως η φωτοβολταϊκή συστοιχία και οι συσσωρευτές για τις προσομοιώσεις. Εκτός όμως από τις διαθέσιμες υπορουτίνες, νέες ρουτίνες έπρεπε να αναπτυχθούν για την προσομοίωση των υποσυστημάτων υδρογόνου και αφαλάτωσης. Όσο αφορά το υποσύστημα υδρογόνου, το TRNSYS περιλαμβάνει κάποιες υπορουτίνες, αλλά αυτές οι υπορουτίνες απαιτούν πολύ αναλυτικά στοιχεία που οι κατασκευαστές τους δεν παρέχουν. Είναι απαραίτητη η κατοχή της συσκευής με σκοπό την πειραματική μέτρηση των παραμέτρων αυτών, ώστε τελικά αυτές να χρησιμοποιηθούν στην αντίστοιχη υπορουτίνα. Μιας και το εργαλείο προσομοίωσης προς ανάπτυξη έπρεπε να είναι ικανό να σχεδιάζει ΑΜΠ σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου, η χρήση των υπορουτίνων που περιλαμβάνονται στο πακέτο εγκαταλήφθηκε. Αναπτύχθηκαν νέα μοντέλα ισχύος των διαφόρων συσκευών βασισμένα σε καμπύλες απόδοσης. Με αυτό τον τρόπο είναι εύκολο να αναζητηθούν σε οποιαδήποτε περιοχή του κόσμου οι διαθέσιμες συσκευές και χρησιμοποιώντας τις καμπύλες απόδοσης που δίνουν οι κατασκευαστές να γίνει εφικτή η προσομοίωσή τους. Ο κώδικας της Fortran όλων αυτών των υπορουτίνων παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ι της διατριβής.

3.2 Διαθέσιμες υπορουτίνες του TRNSYS που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

3.2.1 TYPE 89: Standard Weather Files - Trnsys Tmy - Simulation Start is first line

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να διαβάσει μετεωρολογικά δεδομένα σε χρονικά βήματα που ορίζονται από το χρήστη στο αρχείο εισόδου. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να δεχθούν επεξεργασία, να μετατραπούν μονάδες αν απαιτείται και τέλος να τροφοδοτηθούν σε άλλες υπορουτίνες. Μπορεί να διαβάσει δεδομένα σε μορφή TMY, TMY2 και EnergyPlus. Αυτοί οι τύποι αρχείων περιλαμβάνουν

μετεωρολογικά δεδομένα με συγκεκριμένη μορφή. Ακόμη και αρχεία εισόδου με δομή που έχει ορίσει ο χρήστης μπορούν να εισαχθούν σε αυτή την υπορουτίνα. Χρησιμοποιήθηκε το Type 89b που διαβάζει αρχεία μορφής TRNSYS TMY. Οι έξοδοι και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.1.

Πίνακας 3.1 TYPE 89

Number of Parameter		Description
1	Mode	Number of rows to skip
2	L _{unit}	Number of logical unit for the external file that holds the meteorological data

Number of Output		Περιγραφή
3	I _{dn}	Direct solar radiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
4	I	Total solar radiation irradiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
5	T _{db}	Dry bulb temperature [° C]
6	RH	Relative Humidity
7	U _w	Wind Speed [m/s]
99	t _{d1}	Time of last data read [hr]
100	t _{d2}	Time of next data read [hr]

3.2.2 TYPE 16: RADIATION PROCESSOR

Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας καταγράφονται συνήθως σε χρονικά βήματα ίσα με 1 ώρα. Αυτή η ρουτίνα είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας όταν το βήμα της προσομοίωσης είναι μικρότερο από 1 ώρα. Μπορεί επίσης να υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία σε πολλαπλές επιφάνειες (μέχρι 8). Χρησιμοποιήθηκε το Type 16g (είναι γνωστή η ολική ηλιακή ακτινοβολία και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιείται το ισοτροπικό μοντέλο ουρανού). Επίσης αυτή η υπορουτίνα είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας όταν η συστοιχία των φωτοβολταϊκών είναι εγκατεστημένη σε ηλιοστάτες. Οι εισοδοι, οι έξοδοι και οι παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.2.

Πίνακας 3.2 TYPE 16

Number of Parameter		Description
1		Model for the calculation of horizontal radiation
2		Surface tracking mode
3		Tilted surface mode
4	n	Starting day of the simulation
5	φ	Latitude [degrees]
6	S_c	Solar constant [kJ/hr.m ²]
7	SHFT	Shift parameter for solar time
9	IE	Solar time switch

Number of Input		Description
1	I_{dn}	Total solar radiation irradiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
2	I	Direct solar radiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
3	t_{d1}	Time of last data read [hr]
4	t_{d2}	Time of next data read [hr]
5	ρ_g	Ground reflectance
6	β	Slope of surface [degrees]
7	γ	Azimuth of surface [degrees]

Number of Output		Description
4	I	Total solar radiation irradiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
5	I_b	Direct solar radiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
6	I_d	Diffuse radiation on horizontal surface [kJ/m ² hr]
7		Total solar radiation irradiation on surface 1 [kJ/m ² hr]
8		Direct solar radiation on surface 1 [kJ/m ² hr]
9		Diffuse radiation on surface 1 [kJ/m ² hr]
10	θ_1	Incidence angle [degrees]

3.2.3 TYPE 180: PHOTOVOLTAIC ARRAY

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Χρησιμοποιήθηκε το Type 180c στις προσομοιώσεις και υποθέτει ότι η συστοιχία είναι συνδεδεμένη σε αναστροφή που περιλαμβάνει ελεγκτή μέγιστου σημείου ισχύος. Η θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπολογίζεται βάση ενός συντελεστή ολικών θερμικών απωλειών που προσδιορίζεται από την απόδοση στις συνθήκες NOCT (Nominal Operating Cell Temperature). Οι παράμετροι των πάνελ διαβάζονται από εξωτερικό αρχείο. Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί τη χρήση διάφορων πάνελ επιλέγοντας μόνο τον αντίστοιχο αριθμό τους στο εξωτερικό αρχείο, όπου μπορεί να αποθηκευτούν δεδομένα για μεγάλο αριθμό πάνελ. Οι εισοδοι, οι παράμετροι και οι έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.3.

Πίνακας 3.3 TYPE 180

Number of Parameter		Description
1	MPPT	Maximum Power Point Tracker Activater
2	TCMODE	Cell temperature is calculated based on an overall heat loss coefficient
3	N_s	Number of PV cells in series per module
4	NS	Number of PV modules in series
5	NP	Number of PV modules in parallel
6	Area	Area of the module
7	$\tau\alpha_{norm}$	Reflectance-absoptance of PV-cover
8	ϵ_g	Energy band gap for silicon [eV]
9	R_s	Shunt resistance [Ω]
10	PV Type	Entry number in external file
11	L_{unit}	Number of logical unit for the external file that holds the PV module data

Number of Input		Description
1	Switch	Determines if the PV array is connected
2	G_T	The solar radiation flux on a surface [W/m^2]
3	T_a	Ambient Temperature [$^{\circ}C$]

Number of Output		Description
3	P	Produced Power [kJ/hr]

3.2.4 TYPE 90: WIND TURBINE

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει την λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας. Προσομοιώνει την ανεμογεννήτρια με τη χρήση καμπύλης παραγωγής ισχύος που δίνεται από τον κατασκευαστή. Οι εισοδοι, παράμετροι και έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.4.

Πίνακας 3.4 TYPE 90

Number of Parameter		Description
1	Elev	Site elevation [m]
2	Ht _{data}	Data collection Height [m]
3	Ht _{hub}	Hub height [m]
4	Loss	Turbine power loss [%]
5	Num	Number of turbines
6	L _{unit}	Logical unit of file containing power curve data

Number of Input		Description
1	SWITCH	ON - OFF control switch
2	WS	Wind Speed [m/s]
3	T _a	Dry bulb temperature [°C]
4	α	Site shear exponent
5	P	Barometric pressure [Pa]

Number of Output		Description
1	P _{turbine}	Power Output [W]
2	TH	Hours of operation
3	C _p	Power coefficient

3.2.5 TYPE 147: ELECTRICAL STORAGE BATTERY

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει την λειτουργία μιας συστοιχίας συσσωρευτών. Χρησιμοποιήθηκε το Type 147a που χρησιμοποιεί την ισχύ σαν εισοδο και υπολογίζει την απόδοση του συσσωρευτή βάσει του βαθμού απόδοσής του. Οι εισοδοι, παράμετροι και έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.5.

Πίνακας 3.5 TYPE 147

Number of Parameter		Description
---------------------	--	-------------

1	MODE	Power model
2	Q_s	Cell Energy Capacity [Wh]
3	c_p	Cells in parallel
4	c_s	Cells in series
5	eff	Efficiency

Number of Input		Description
1	P	Power to or from battery

Number of Output		Description
2	FSOC	Fractional state of charge

3.2.6 TYPE 9: DATA READER

Οι Data readers χρησιμοποιούνται για να διαβαστούν δεδομένα από κάποιο εξωτερικό αρχείο. Αυτό το αρχείο μπορεί να περιλαμβάνει στοιχεία ηλεκτρικής κατανάλωσης, κατανάλωσης υδρογόνου ή κατανάλωσης πόσιμου νερού.

3.2.7 TYPE24:INTEGRATOR

Αυτή η υπορουτίνα ολοκληρώνει ποσότητες σε χρονικά βήματα όπου αυτό απαιτείται.

3.2.8 EQUATIONS

Η υπορουτίνα των εξισώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς σκοπούς στην προσομοίωση. Μπορεί να αξιοποιηθεί για μετατροπές μονάδων, αλλά και για πιο περίπλοκους υπολογισμούς βασισμένους σε απλές δομές Αν...τότε...αλλιώς... Για παράδειγμα η ανεμογεννήτρια έχει μια ταχύτητα αποκοπής. Μια εξίσωση μπορεί να απενεργοποιήσει την υπορουτίνα της ανεμογεννήτριας αν η ταχύτητα ανέμου είναι κάτω από αυτό το όριο.

3.2.9 TYPE 56: MULTIZONE BUILDING MODELING

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να προσομοιώσει ένα κτίριο που χωρίζεται σε εικονικές ζώνες και δωμάτια. Η προσομοίωση είναι περίπλοκη και ένα πρόσθετο

πρόγραμμα περιλαμβάνεται στο λογισμικό πακέτο του TRNSYS που λέγεται TRNBuild με σκοπό να απλοποιήσει την προετοιμασία των απαραίτητων αρχείων που περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του κτιρίου υπό προσομοίωση. Βιβλιοθήκες με τοπικά υλικά κατασκευής και τοιχοποιίας ανάλογα με τους Γερμανικούς κώδικες DIN 4108 και VDI 2078 περιλαμβάνονται στο TRNBuild.

Οι ανάγκες σε θερμική ενέργεια για την θέρμανση και ψύξη του κτιρίου σύμφωνα με προφίλ χρηστών μπορούν να υπολογιστούν. Η ροή του αέρα όπως και ο φωτισμός μπορούν να προσομοιωθούν. Προφίλ για τους ανθρώπους που βρίσκονται στο κτίριο μπορούν να συμπεριληφθούν, όπως και ηλεκτρικές συσκευές που παράγουν θερμότητα. Τέλος όσο αφορά τη θερμική άνεση μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης Predicted Mean Vote (PMV).

Οι παράμετροι αυτής της υπορουτίνας συνθέτονται σε δύο εξωτερικά αρχεία. Το πρώτο περιλαμβάνει την περιγραφή του κτιρίου (*.BLD) και το δεύτερο τις εξισώσεις μεταφοράς των τοίχων κατά ASHRAE (*.TRN). Οι εισοδοί περιλαμβάνουν τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία ξηρού βολβού και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους τοίχους και την οροφή (αυτές υπολογίζονται από το TYPE 16). Οι δυνατές έξοδοι είναι πολλές. Αυτές που χρησιμοποιούνται είναι η ισχύς που απαιτείται για την θέρμανση και ψύξη του χώρου, η εσωτερική θερμοκρασία και το PMV. Το αρχείο που αποθηκεύει το TRNBuild έχει την επέκταση (*.BUI).

3.3 Οι νέες υπορουτίνες που αναπτύχθηκαν

3.3.1 TYPE 171: FUEL CELL for steady operation

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει μια κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί στο σημείο ονομαστικής ισχύος με δεδομένο βαθμό απόδοσης. Αυτή η υπορουτίνα χρησιμοποιείται μόνο όταν η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Οι εισοδοί, οι παράμετροι και οι έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.6.

Πίνακας 3.6 TYPE 171

Number of Parameter	Description
1	EFF Efficiency [%]

2	TS	Time Step [h]
Number of Input		Description
1	PLOAD	Needed power from the fuel cell [W]
Number of Output		Description
1	HCONS	Hydrogen consumed [Nm ³]

3.3.2 TYPE 172:FUEL CELL for variable operation

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να προσομοιώσει μια κυψέλη καυσίμου που μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα σημεία λειτουργίας σε μερικό φορτίο. Προσομοιώνεται μια τυπική κυψέλη καυσίμου τεχνολογίας PEM σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα λειτουργίας είτε από τον κατασκευαστή, είτε από τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιείται μια γραμμική καμπύλη βαθμού απόδοσης για την κυψέλη καυσίμου. Το μαθηματικό μοντέλο παρουσιάζεται στις εξισώσεις EQ 1-3 και οι εισοδοί, οι παράμετροι και οι έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.7.

$$P_{FC} = OP_{FC} \times P_{FCnominal} \quad (EQ 1)$$

$$EFF_{FC} = (A_{FC} \times OP_{FC}) + B_{FC} \quad (EQ 2)$$

$$H_{CONS} = \frac{P_{FC}}{EFF_{FC} \times LHV_{H_2}} \times TS \quad (EQ 3)$$

όπου:

P_{FC} :	Παραγόμενη Ισχύς
OP_{FC} :	Σημείο λειτουργίας
$P_{FCnominal}$:	Ονομαστική ισχύς
EFF_{FC} :	Βαθμός απόδοσης στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα.
A_{FC} :	Κλίση της γραμμικής εξίσωσης.
B_{FC} :	Σημείο τομής με τον άξονα Y της γραμμικής εξίσωσης του βαθμού απόδοσης.
H_{CONS} :	Καταναλισκόμενο υδρογόνο
LHV_{H_2} :	Κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου

TS: Μια παράμετρος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας σε χρονικό βήμα. Για ωριαία προσομοίωση παίρνει την τιμή 1.

Πίνακας 3.7 TYPE 172

Number of Parameter		Description
1	A_{FC}	Slope of the linear equation
2	B_{FC}	The Y axis intercept of the linear equation
3	P_{rated}	Rated power of the fuel cell
4	TS	Time Step [h]

Number of Input		Description
1	OP_{FC}	Fractional operation point of the Fuel Cell

Number of Output		Description
1	H_{CONS}	Hydrogen consumed [Nm^3]

3.3.3 TYPE 161: ELECTROLYZER for steady operation

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να προσομοιώσει την λειτουργία μιας μονάδας ηλεκτρόλυσης για δεδομένο βαθμό απόδοσης. Χρησιμοποιείται μόνο όταν η μονάδα ηλεκτρόλυσης λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Οι είσοδοι, παράμετροι και έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.8.

Πίνακας 3.8 TYPE 161

Number of Parameter		Description
1	EFF	Efficiency [%]
2	TS	Time Step [h]

Number of Input		Description
1	PLOAD	Power to be consumed by the electrolyzer [W]

Number of Output		Description
1	HPROD	Hydrogen produced [Nm^3]

3.3.4 TYPE 172: ELECTROLYZER for variable operation

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να προσομοιώσει μια μονάδα ηλεκτρόλυσης που μπορεί να λειτουργήσει σε μεταβλητό σημείο λειτουργίας. Μια τυπική μονάδα

τεχνολογίας PEM προσομοιώνεται σύμφωνα με πειραματικές δοκιμές από τον κατασκευαστή ή τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιείται μια γραμμική καμπύλη βαθμού απόδοσης για την μονάδα ηλεκτρόλυσης. Το μαθηματικό μοντέλο περιγράφεται στις Εξισώσεις 4-6 και οι είσοδοι, οι έξοδοι και οι παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.9.

$$P_{EL} = OP_{EL} \times P_{ELnominal} \quad (EQ 4)$$

$$EFF_{EL} = (A_{EL} \times OP_{EL}) + B_{EL} \quad (EQ 5)$$

$$H_{PROD} = \frac{P_{EL} \times EFF_{EL}}{LHV_{H_2}} \times TS \quad (EQ 6)$$

where:

P_{EL} :	Καταναλισκόμενη ενέργεια
OP_{EL} :	Σημείο λειτουργίας
$P_{ELnominal}$:	Ονομαστική ισχύς
EFF_{EL} :	Βαθμός απόδοσης για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα
A_{EL} :	Κλίση της γραμμικής εξίσωσης του βαθμού απόδοσης.
B_{EL} :	Σημείο τομής με τον άξονα Y της γραμμικής εξίσωσης του βαθμού απόδοσης.
H_{PROD} :	Παραγόμενο υδρογόνο
LHV_{H_2} :	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη του υδρογόνου
TS :	Μια παράμετρος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας σε χρονικό βήμα. Για ωριαία προσομοίωση παίρνει την τιμή 1.

Πίνακας 3.9 TYPE 172

Number of Parameter		Description
1	A_{EL}	Slope of the linear equation
2	B_{EL}	The Y axis intercept of the linear equation
3	P_{rated}	Rated power of the electrolyzer
4	TS	Time Step [h]

Number of Input		Description
1	OP_{EL}	Fractional operation point of the Electrolyzer

Number of Output		Description
------------------	--	-------------

3.3.5 TYPE 165:HYDROGEN STORAGE WITH REFUELING STATION

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και ένα σταθμό ανεφοδιασμού οχημάτων. Οι εισοδοι, έξοδοι και οι παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.10.

Πίνακας 3.10 TYPE 165

Number of Parameter		Description
1	H ₂ MAX	Capacity of the hydrogen storage [Nm ³]
2	H ₂ INIT	Initial hydrogen present in the tank in the beginning of the simulation [Nm ³]
Number of Input		Description
1	H ₂ IN	Hydrogen from the electrolyzer [Nm ³]
2	H ₂ FC	Hydrogen to the fuel cell [Nm ³]
3	H ₂ OUT	Hydrogen to the vehicles [Nm ³]
Number of Output		Description
1	H ₂	Hydrogen stored in the tank [Nm ³]
2	H ₂ MIS	Hydrogen demand that was not able to be met [Nm ³]
3	H ₂ D	Hydrogen that was dumped because the tank was full [Nm ³]

3.3.6 TYPE 191: DESALINATION UNIT AND TANK for steady operation

Αυτή η υπορουτίνα συνδυάζει την προσομοίωση μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και μιας δεξαμενής αποθήκευσης αφαλατωμένου νερού. Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης θεωρείται πως λειτουργεί σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας με σταθερή ειδική κατανάλωση ενέργειας. Η δεξαμενή νερού μπορεί να συνδεθεί με οποιοδήποτε προφίλ κατανάλωσης πόσιμου νερού. Οι εισοδοι, έξοδοι και παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.11.

Πίνακας 3.11 TYPE 191

Number of Parameter		Description
1	WATMAX	Capacity of the water storage tank [m ³]
2	SPDS	Specific energy consumption
3	WATINIT	Initial water present in the tank in the beginning of the simulation [m ³]
Number of Input		Description
1	P _{desal}	Power to the desalination unit [W]
2	WATOUT	Water to the consumption [m ³]
Number of Output		Description
1	Wat	Water stored in the tank [m ³]
2	Watm	Water demand that was not met [m ³]
3	Watd	Water that was dumped because the tank was full [m ³]
4	Wprod	Water produced [m ³]

3.3.7 TYPE 192: DESALINATION UNIT AND TANK for variable operation

Αυτή η υπορουτίνα μπορεί να προσομοιώσει μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που μπορεί να λειτουργεί σε μερικό φορτίο μαζί με μια δεξαμενή νερού. Μια τυπική μονάδα ΑΩ προσομοιώνεται σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα του κατασκευαστή ή από τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιείται μια γραμμική καμπύλη βαθμού απόδοσης. Το μαθηματικό μοντέλο παρουσιάζεται στις εξισώσεις 7-9 και οι εισοδοι, έξοδοι και παράμετροι στον Πίνακα Πίνακας 3.12.

$$P_{DS} = OP_{DS} \times P_{DSnominal} \quad (EQ 7)$$

$$SEC_{DS} = (A_{DS} \times OP_{DS}) + B_{DS} \quad (EQ 8)$$

$$W_{PROD} = \frac{P_{DS}}{SEC_{DS}} \times TS \quad (EQ 9)$$

where:

P _{DS} :	Καταναλισκόμενη ενέργεια
OP _{DS} :	Σημείο λειτουργίας
P _{DSnominal} :	Ονομαστική ισχύς

SEC_{DS} :	Ειδική κατανάλωση στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας
A_{DS} :	Κλίση της γραμμικής εξίσωσης του βαθμού απόδοσης.
B_{DS} :	Σημείο τομής με τον άξονα Y της γραμμικής εξίσωσης του βαθμού απόδοσης.
W_{PROD} :	Παραγόμενο πόσιμο νερό.
TS:	Μια παράμετρος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας σε χρονικό βήμα. Για ωριαία προσομοίωση παίρνει την τιμή 1.

Πίνακας 3.12 TYPE 192

Number of Parameter		Description
1	A_{DS}	Capacity of the water storage tank [m ³]
2	B_{DS}	Specific energy consumption
3	P_r	Rated power of the desalination unit [W]
4	TS	Time step [h]

Number of Input		Description
1	OP_{DS}	Fractional operation point

Number of Output		Description
1	Wat	Water stored in the tank [m ³]
2	Watm	Water demand that was not met [m ³]
3	Watd	Water that was dumped because the tank was full [m ³]
4	Wprod	Water produced [m ³]
5	Pdesal	Power consumed by the desalination unit [W]
6	SEC_{DS}	Specific Power of the desalination unit [W/m ³]

3.3.8 TYPE 198: AC BUS

Αυτή η υπορουτίνα προσομοιώνει την γραμμή εναλλασσόμενου ρεύματος του μικροδικτύου σαν ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης. Επίσης προσομοιώνει την συχνότητα του μικροδικτύου που χρησιμοποιείται στον έλεγχο μέσω της συχνότητας. Οι εισοδοι, παράμετροι και έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.13.

Πίνακας 3.13 TYPE 198

Number of		Description
-----------	--	-------------

Parameter		
1	BL	Base Load [W]
Number of Input		Description
1	P_{LOAD}	Fractional operation point
2	P_{PV}	Power of the PV array [W]
3	P_{WIND}	Power of the wind turbine [W]
4	P_{FC}	Power of the fuel cell [W]
5	P_{EL}	Power of the electrolyzer [W]
6	P_{DS}	Power of the desalination unit [W]
7	P_{AUX}	Power of an auxiliary power source [W]
Number of Output		Description
1	P_{BAT}	Power to or from the battery bank [W]

3.3.9 TYPE 169: NET PRESENT COST CALCULATION

Αυτή η υπορουτίνα υπολογίζει το Καθαρό Παρόν Κόστος του ΑΜΠ για μια περίοδο 20 ετών. Οι εισοδοι, παράμετροι και έξοδοι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 3.14.

Πίνακας 3.14 TYPE 169

Number of Parameter		Description
1	I	Interest rate
2	C_{PV}	Cost of a single PV panel [€]
3	C_{WT}	Cost of the wind turbine [€]
4	C_{FC}	Cost of fuel cell per each W [€]
5	C_{EL}	Cost of electrolyzer per each W [€]
6	C_{HT}	Cost of hydrogen tank per Nm^3 [€]
7	C_{BT}	Cost of 2V battery per each Wh [€]
8	C_{DS}	Cost of desalination unit per each W [€]
9	C_{PWT}	Cost of πίνακας water tank per $1 m^3$ [€]
10	C_{OM}	Yearly Operation and Maintenance cost [€]
11	C_{INST}	Installation cost [€]
Number of Input		Description
1	MS	Number of PV modules in series
2	MP	Number of parallel PV series
3	WT	Number of wind turbines used
4	P_{FC}	Rated Power of the fuel cell [W]
5	P_{EL}	Rated Power of the electrolyzer [W]
6	V_{H_2}	Volume of hydrogen tank [Nm^3]

7	QS	Energy capacity of each 2 V battery [Wh]
8	P _{DS}	Power of the desalination unit [W]
9	V _{WAT}	Volume of the water tank [m ³]
Number of Output		Description
1	NPC	Net Present Cost [€]

4 Εργαλεία υπολογιστικής νοημοσύνης

4.1 Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη

Σύμφωνα με την εγκυκλοπαίδεια Britannica η Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) μπορεί να περιγραφεί ως «η δυνατότητα ενός ψηφιακού υπολογιστή ή ενός ελεγχόμενου από υπολογιστή ρομπότ να εκτελεί δράσεις που συνήθως συσχετίζονται με νοήμονα όντα». Η υπολογιστική νοημοσύνη είναι ένας κλάδος της TN που επικεντρώνεται στην κατανόηση και την αναπαραγωγή ευφυΐας που απαντάται στη φύση μέσα σε ένα υπολογιστή. Μέσω αυτής της προσέγγισης, περίπλοκα προβλήματα που υπό άλλες συνθήκες θα ήταν δυσεπίλυτα ή η επίλυσή τους θα ήταν αδύνατη μπορούν να επιλυθούν. Η υπολογιστική νοημοσύνη περιλαμβάνει τα Νευρωνικά Δίκτυα, την Ασαφή Λογική, τον Εξελικτικούς αλγόριθμους, τη θεωρία Σμηνών και τη θεωρία του Χάους.

Λόγω της πολυπλοκότητας της τοπολογίας των ΑΜΠ, προσεγγίσεις υπολογιστικής νοημοσύνης μπορούν να αντιμετωπίσουν τα θέματα που περιγράφηκαν στην Παράγραφο **Error! Reference source not found.**

4.2 Διαστασιολόγηση των διαφόρων εξαρτημάτων

4.2.1 Διαστασιολόγηση μέσω βελτιστοποίησης

Διάφορες προσεγγίσεις διαστασιολόγησης υπάρχουν στην βιβλιογραφία οι οποίες υλοποιούνται από διάφορα λογισμικά πακέτα που στοχεύουν στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση συστημάτων ΑΠΕ. Μια προσέγγιση είναι η χειροκίνητη μέθοδος δοκιμής-σφάλματος. Για απλά συστήματα που οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση είναι 2 ή 3 (πχ. Ένα σύστημα με φωτοβολταϊκά και συσσωρευτή) αυτή η προσέγγιση μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα. Στην

προτεινόμενη τοπολογία ΑΜΠ όμως οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση είναι σημαντικά περισσότερες:

- Αριθμός Φ/B πάνελ
- Αριθμός και ισχύ ανεμογεννητριών
- Ενεργειακή χωρητικότητα της συστοιχίας συσσωρευτών
- Ονομαστική ισχύς της Κυψέλης Καυσίμου
- Ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης
- Χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου
- Ονομαστική ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ
- Χωρητικότητα της δεξαμενής πόσιμου νερού

Μιας και όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι αλληλεξαρτώμενες μια χειροκίνητη προσέγγιση δοκιμών/σφάλματος δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Μια άλλη συνηθισμένη προσέγγιση είναι η άμεση σύγκριση μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης όλων των πιθανών συνδυασμών των παραμέτρων. Συνήθως η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη μορφή μιας συνάρτησης κόστους (πχ. Καθαρό Παρόν Κόστος) για κάθε σύστημα. Τα συστήματα εκείνα που ικανοποιούν όλους τους τεχνικούς περιορισμούς συγκρίνονται και αυτό με το ελάχιστο κόστος επιλέγεται. Το λογισμικό πακέτο HOMER (HOMER ENERGY, 2011) είναι ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης. Οι ετήσιες προσομοιώσεις του TRNSYS όταν δεν προσομοιώνεται κτίριο συνήθως απαιτούν 1-2 δευτερόλεπτα στην καλύτερη περίπτωση. Οι πιθανοί συνδυασμοί παραμέτρων με μόλις 8 διακριτές τιμές για την κάθε παράμετρο αριθμούν 8^8 συνδυασμούς. Είναι φανερό πως ο χρόνος που απαιτείται για να υπολογιστεί η αντικειμενική συνάρτηση για το σύνολό τους ξεπερνά το μισό έτος, πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση αυτής της προσέγγισης είναι μη εφικτή.

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι πολυδιάστατο, μη κυρτό, και συνεπώς μη γραμμικό και πολυτροπικό. Συνεπώς είναι δύσκολο ή και αδύνατο να επιλυθεί αναλυτικά ή μέσω αριθμητικής ανάλυσης. Σε αυτό το περιεχόμενο διάφορες κλασσικές προσεγγίσεις (π.χ. Benders' Decomposition (Kaufman and Broeckx, 1978)) και αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης (πχ. Θεωρία Βελτιστοποίησης Σμηνών (Eberhart and Kennedy J., 1995), γενετικοί αλγόριθμοι

(Said, 2005)) έχουν αναπτυχθεί. Όσο αφορά τις κλασσικές προσεγγίσεις παρουσιάζονται συγκεκριμένα προβλήματα:

- Οι περισσότερες κλασσικές τεχνικές βελτιστοποίησης απαιτούν δεδομένα από παραγόμενα από την αντικειμενική συνάρτηση ώστε να καθορίσουν την πορεία αναζήτησης (Hazra and Sihha, 2008).
- Χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους (π.χ. αναλυτική λύση ή αριθμητική ανάλυση) το σύνολο του προβλήματος χωρίζεται σε υπο-προβλήματα και διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση του κάθε υπο-προβλήματος. Αυτό δημιουργεί περισσότερη πολυπλοκότητα.
- Μια λάθος επιλογή αρχικής κατάστασης του αλγόριθμου μπορεί να οδηγήσει σε πρόβλημα σύγκλησης όταν εφαρμόζονται συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης (Yorino, El-Araby et al., 2002).
- Το μέγεθος και η μη-κυρτότητα του προβλήματος, που βασίζονται στις παραμέτρους του συστήματος είναι σημαντικά ζητήματα που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα σύγκλησης σε κλασσικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης όπως ο αλγόριθμος Bender's Decomposition (Valle, Harley et al., 2009).

Όταν το πρόβλημα είναι περίπλοκο, μη κυρτό και μη διαφορίσιμο μοντέρνες τεχνικές βελτιστοποίησης βασισμένες στην υπολογιστική νοημοσύνη όπως η βελτιστοποίηση βασισμένη στη θεωρία σημνών (ΒΘΣ), οι γενετικοί αλγόριθμοι, προσομοιώσιμη απόπτωση, αποικίες μελισσών ή μυρμηγκιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση πολυδιάστατων προβλημάτων βελτιστοποίησης (Hazra and Sihha, 2008). Η ΒΘΣ είναι μια αποδοτική μέθοδος βελτιστοποίησης τόσο για συνεχούς όσο και για διακριτές μεταβλητές, υλοποιείται εύκολα με λίγες παραμέτρους για την βελτίωσή του, μη ευαίσθητη στη κλιμάκωση μεταβλητών σχεδιασμού και μπορεί να συμπεριλάβει περιορισμούς χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ποινής. Η ΒΘΣ μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα ολιστικά εύκολα και φυσικά και είναι εύκολη η υλοποίησή του σε σχέση με συμβατικές μεθόδους (Yamin, 2006). Ένα μειονέκτημα της ΒΘΣ είναι η μεγάλη ευαισθησία στις ρυθμίσεις των παραμέτρων της, μια μικρή αλλαγή στις παραμέτρους μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στο αποτέλεσμα (Lovberg and Krink, 2002). Ευτυχώς

διάφορα σετ παραμέτρων έχουν ελεγχθεί εκτενώς και τα καλύτερα από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς αντιμετώπιση του παραπάνω μειονεκτήματος (Parageorgiou, Parsopoulos et al., 2005).

Η ΒΘΣ έχει διερευνηθεί με καλά αποτελέσματα σαν μέθοδος βελτιστοποίησης για ενεργειακά συστήματα (Lee, Chen et al., 2009; Avril, Arnaud et al., 2010; Kornelakis, 2010; El-Zonkoly, 2011). Οι Boonbumroong et al (Boonbumroong, Pratinthong et al., 2011) διερεύνησαν την βελτιστοποίηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ενέργειας με διάφορες τεχνικές και κατέληξαν ότι η ΒΘΣ μπορεί να παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα.

4.2.2 Λογισμική υλοποίηση του αλγόριθμου της ΒΘΣ

Το GenOpt είναι ένα λογισμικό βελτιστοποίησης που μπορεί να ελαχιστοποιήσει μια αντικειμενική συνάρτηση κόστους που αξιολογείται από ένα εξωτερικό πρόγραμμα προσομοίωσης. Έχει συζευχθεί επιτυχώς με το TRNSYS. Η ανάπτυξη του ήρθε ως αποτέλεσμα προβλημάτων βελτιστοποίησης όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι υπολογιστικά υψηλού κόστους και παράγωγά της είτε δεν είναι διαθέσιμα, είτε δεν υπάρχουν καν. Μπορεί να βελτιστοποιήσει συνεχείς μεταβλητές, διακριτές μεταβλητές και συνδυασμούς συνεχών και διακριτών μεταβλητών (Berkley, 2011).

Στο GenOpt περιλαμβάνεται ένας αλγόριθμος ΒΘΣ. Η ΒΘΣ είναι μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στη βάση της κοινωνικής συμπεριφοράς μελών σμηνών πτηνών ή ψαριών και των σμηνών γενικά (Eberhart and Kennedy J., 1995). Οι αλγόριθμοι ΒΘΣ χρησιμοποιούν ένα σύνολο από πιθανές λύσεις για την διαδικασία βελτιστοποίησης. Κάθε μια από αυτές τις λύσεις ονομάζεται σωματίδιο και το σύνολο σε κάθε δεδομένο χρονικό βήμα σύγκλισης λέγεται πληθυσμός. Αφού ο χρήστης έχει ορίσει τον ερευνητικό χώρο, η αρχικοποίηση του πρώτου πληθυσμού λαμβάνει χώρα χρησιμοποιώντας μια μηχανή παραγωγής τυχαίων αριθμών με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στον ορισμένο ερευνητικό χώρο. Αν είναι k ο αριθμός γενεάς και n_p είναι ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε γενεά, η θέση ($x_i(k)$) και η ταχύτητα

$(u_i(k))$ του κάθε i σωματιδίου στην επόμενη γενεά δίδονται από τις εξισώσεις 10 και 11 (Berkley,, 2011).

$$u_i(k+1) = u_i(k) + c_1 \rho_1(k) (p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 \rho_2(k) (p_{g,i}(k) - x_i(k)) \quad (\text{EQ 10})$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k+1) \quad (\text{EQ 11})$$

Όπου: $p_{l,i}(k)$ είναι η θέση του i σωματιδίου που παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή από όλες τις γενεές
 $p_{g,i}(k)$ είναι η θέση του καλύτερου σωματιδίου όλων των γενεών
 c_1 είναι η σταθερά γνωσιακής επιτάχυνσης
 c_2 είναι η σταθερά κοινωνικής επιτάχυνσης
 $\rho_1(k)$ και $\rho_2(k)$ είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι τυχαίοι αριθμοί μεταξύ του 0 και 1.

Οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση στο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής είναι διακριτές μιας και το μικροδίκτυο χρησιμοποιεί εμπορικά διαθέσιμες συσκευές που έρχονται σε τυποποιημένα μεγέθη από τους κατασκευαστές. Μια δυαδική έκδοση του αλγόριθμου ΒΘΣ προτάθηκε από τους Kennedy και Eberhard (Kennedy and Eberhart, 1997) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση διακριτών μεταβλητών. Σε αυτό τον αλγόριθμο οι διακριτές ανεξάρτητες μεταβλητές κωδικοποιούνται σε μια σειρά δυαδικών αριθμών. Για όποιο $i \in \{1, \dots, n_d\}$ το x_i είναι το τμήμα της διακριτής ανεξάρτητης μεταβλητής και το $\psi_i \in \{0,1\}^{m_i}$ είναι η δυαδική αντιστοίχιση του x_i χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση Gray (Berkley, 2011), και επίσης $\pi_{l,i}$ και $\pi_{g,i}$ είναι οι δυαδικές αντιστοιχήσεις των $p_{l,i}$ και $p_{g,i}$. Για $i \in \{1, \dots, n\}$ και $j \in \{1, \dots, m_i\}$, αρχικοποιείται το $\psi_i^j(0) \in \{0,1\}$. Για κάθε γενεά ισχύει (Berkley, 2011):

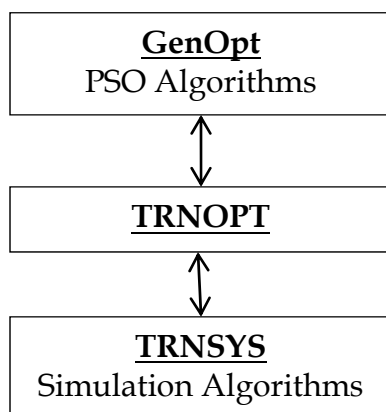
$$\hat{u}_i^j(k+1) = u_i^j(k) + c_1 \rho_1(k) (\pi_{l,i}^j(k) - \psi_i^j(k)) + c_2 \rho_2(k) (\pi_{g,i}^j(k) - \psi_i^j(k)) \quad (\text{EQ 12})$$

$$u_i^j(k+1) = \text{sign}(\hat{u}_i^j(k+1)) \min\{|\hat{u}_i^j(k+1)|, u_{\max}\} \quad (\text{EQ 13})$$

$$\psi_i^j(k+1) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_{i,j}(k) \geq s(u_i^j(k+1)) \\ 1, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (\text{EQ 14})$$

όπου: $s(u) \triangleq \frac{1}{1+e^{-u}}$

Για να διασυνδεθεί το GenOpt με το TRNSYS έχει αναπτυχθεί το λογισμικό TRNOPT (TESS Specialists, 2011). Το TRNOPT μεταδίδει δεδομένα από το TRNSYS στο GenOpt και αντίστροφα χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από το χρήστη. Η δομή παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Δομή Λογισμικού

4.3 Σχεδιασμός Συστήματος Ενεργειακής Διαχείρισης

4.3.1 Διαχείριση Ενέργειας σε μικροδίκτυα

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.3 η καρδιά του μικροδικτύου πολυπαραγωγής είναι το Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας (EMS). Χωρίς αυτό η τοπολογία δεν μπορεί να λειτουργήσει. Η πρώτη προσέγγιση που επιδιώχθηκε ήταν μια απλή ON/OFF EMS. Οι μόνες αποφάσεις που θα έπρεπε να πάρει είναι η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης. Αν και αυτή η απλή προσέγγιση μπορεί να κάνει την τοπολογία ΑΜΠ λειτουργική, είναι μακριά από τη βέλτιστη λειτουργία του ΑΜΠ γιατί δεν επιτρέπει τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας αφαλάτωσης και της μονάδας ηλεκτρόλυσης σε μερικό φορτίο.

Ήταν φανερό πως μια εξελιγμένη προσέγγιση έπρεπε να διερευνηθεί ώστε να γίνει εφικτή η λειτουργία των συσκευών σε μερικό φορτίο, που επιτρέπει την

καλύτερη συνολικά διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας. Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι οι κυψέλες καυσίμου (Yilanci, Dincer et al., 2008), οι μονάδες ηλεκτρόλυσης (Barbir, 2005) και οι μονάδες αφαλάτωσης (Mohamed and Papadakis, 2004), παρουσιάζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης όταν λειτουργούν σε μερικό φορτίο. Πολλές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης. Οι Vosen και Keller έχουν προτείνει μια μέθοδο βασισμένη στα νευρωνικά δίκτυα (Vosen and Keller, 1999). Το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτεί παρελθοντικά δεδομένα για την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου. Ο έλεγχος μέσω PID έχει αποδειχθεί ότι δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αν δεν συνδυαστεί με κάποιο ελεγκτή ρύθμισης των κερδών του σε πραγματικό χρόνο (Li, Song et al., 2008) ή στη μορφή ενός Fuzzy-PID ελεγκτή (Paris, Eynard et al., 2011). Η ασαφής λογική (fuzzy logic) έχει προταθεί και ελεγχθεί τα τελευταία χρόνια σε συστήματα ΑΠΕ, μιας και οι γλωσσικοί κανόνες μπορούν να απλοποιήσουν τον έλεγχο και τη διαχείριση περίπλοκων συστημάτων (Bilodeau and Agbossou, 2006). Οι Ασαφείς Γνωσιακοί Χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps) μπορούν να διαχειριστούν περίπλοκα συστήματα και διεργασίες στη βάση της ανθρώπινη συλλογιστική διαδικασία (Stylios and Groumpos, 1998; Beena and Ganguli, 2011) και έχουν προταθεί για χρήση σε εποπτικά συστήματα διαχείρισης και ελέγχου (Stylios and Groumpos, 1998; Karlis, Kottas et al., 2007). Τα δίκτυα Petri (Petri Nets) έχουν αποδειχθεί χρήσιμα για τη μελέτη συστημάτων διακριτών γεγονότων (Cassandras and Lafortune, 2008). Μια από τις σημαντικότερες προσεγγίσεις αφορά την στρατηγική εποπτικής διαχείρισης (Cassandras and Lafortune, 2008). Τα δίκτυα Petri έχουν προταθεί σε συστήματα ΑΠΕ για τη διαχείριση της ενέργειας και πιο συγκεκριμένα για την επιλογή διαφορετικών λειτουργικών καταστάσεων ενός συστήματος (Lu, Fakhm et al., 2010).

Στη βάση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποφασίστηκε να ακολουθηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις υπολογιστικής νοημοσύνης που φαίνονται ως οι πιο υποσχόμενες. Η πρώτη βασίζεται στην Ασαφή Λογική και η

δεύτερη σε μια συνδυαστική προσέγγιση Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών και Δικτύων Petri.

4.3.2 Ασαφής Λογική

Τα περισσότερα βιβλία για την Ασαφή Λογική ξεκινούν με ένα παράδειγμα για να περιγράψουν την έννοια της ασάφειας. Ένα από τα πιο συνηθισμένα είναι το παρκάρισμα ενός αυτοκινήτου. Η πιο κοινή περιγραφή για το παρκάρισμα με άμεσες εντολές θα ήταν: Οδήγησε το αυτοκίνητό σου παράλληλα από το αυτοκίνητο που βρίσκεται μπροστά από την ελεύθερη θέση στάθμευσης. Οδήγησε σιγά σιγά προς τα πίσω και στρέψε το τιμόνι ώστε το πίσω άκρο του αυτοκινήτου αρχίζει να κινείται προς το πεζοδρόμιο. Πριν η ρόδα σου αγγίξει το πεζοδρόμιο στρίψε το τιμόνι αντίθετα και συνέχισε την οπισθοπορεία μέχρι το αυτοκίνητο να έρθει στη θέση στάθμευσης. Αυτή η περιγραφή του πως σταθμεύεις ένα όχημα είναι μια σειρά ασαφών διαδικασιών. Αν χρησιμοποιούνταν σαφής λογική θα έπρεπε οι οδηγίες να είναι πολύ αναλυτικές, οδηγίες που θα έπρεπε να δοθούν σε ένα ρομπότ. Μετακίνησε το όχημα παράλληλα στο αυτοκίνητο που είναι εμπρός της θέσης στάθμευσης αφήνοντας 50 cm μεταξύ των δύο οχημάτων και προχώρα μπροστά για 5 m. Σταμάτα το όχημα, πάτα το συμπλέκτη και επέλεξε την όπισθεν και ούτω καθεξής.

Στην καθημερινότητα υπάρχουν πολλά παραδείγματα που η σαφής λογική δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Αν ερωτηθεί μια ομάδα ανθρώπων πότε ξεκινά το σαββατοκύριακο, πιθανότατα θα υπάρξουν αρκετές απαντήσεις. Κάποιοι θα πουν ότι το σαββατοκύριακο είναι το Σάββατο και η Κυριακή, άλλοι ότι το σαββατοκύριακο ξεκινά το απόγευμα της Παρασκευής. Αν χρησιμοποιούνταν σαφής λογική, η ερώτηση αν η Παρασκευή περιλαμβάνεται στο σαββατοκύριακο θα είχε μόνο δύο δυνατές απαντήσεις, ναι ή όχι. Στην πραγματικότητα όμως η απάντηση βρίσκεται κάπου ανάμεσα στο ναι και όχι - η Παρασκευή είναι κατά ένα μέρος της μέρος του σαββατοκύριακου.

Ακόμη και από την αρχαία Ελλάδα παρουσιάζονταν παράδοξα για να αμφισβητήσουν την σαφή λογική. Ένα από τα πιο διάσημα είναι η ερώτηση του πόσους κόκκους άμμου χρειάζεται να αφαιρέσεις από ένα σωρό με άμμο πριν

σταματήσει να είναι πια σωρός. Στο σύγχρονο κόσμο η ασαφής λογική εφευρέθηκε από τον Lotfi Zadeh την δεκαετία του 60 σαν ένας τρόπος μοντελοποίησης της αβεβαιότητας στην φυσική γλώσσα. Στις μέρες μας οι χρήσεις της ασαφούς λογικής είναι πολλές, από τον έλεγχο διεργασιών, στη λήψη αποφάσεων και στην οικονομία.

Σύμφωνα με τους McNeill και Thro (McNeill and Thro, 1994) υπάρχουν 5 τύποι συστημάτων που επωφελούνται ή και ακόμη απαιτούν τη χρήση ασάφειας:

- Πολύ περίπλοκα συστήματα που η μοντελοποίησή τους είναι δύσκολη ή αδύνατη
- Συστήματα που ελέγχονται από εμπειρογνώμονες
- Συστήματα που παρουσιάζουν περίπλοκες και συνεχείς εισόδους και εξόδους
- Συστήματα που η ανθρώπινη παρατήρηση χρησιμοποιείται ως είσοδος ή οι κανόνες βασίζονται σε αυτή
- Φυσικώς ασαφή συστήματα που συνήθως εμφανίζονται στις κοινωνικές επιστήμες.

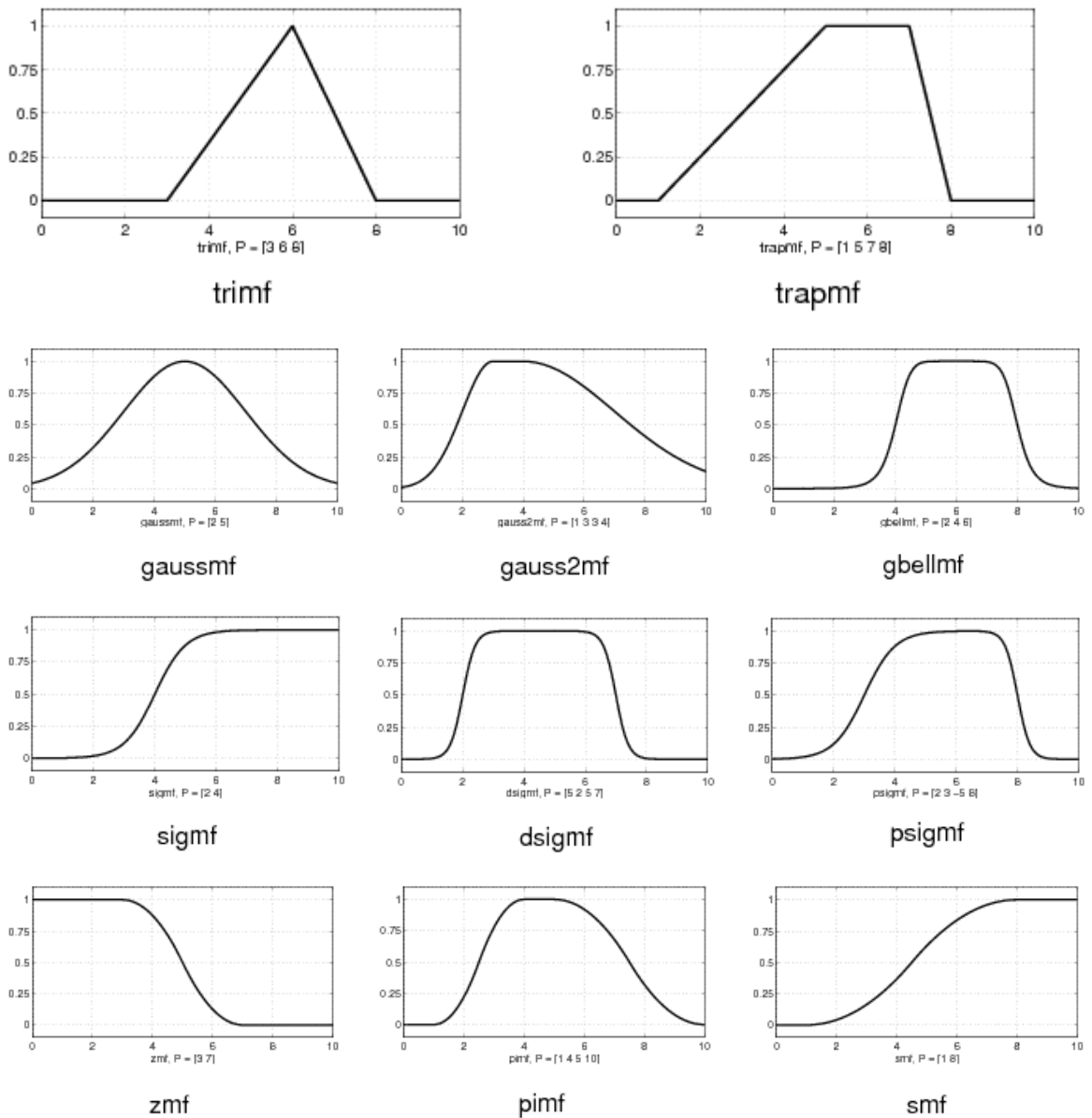
❖ Ασαφή σύνολα εναντίον Σαφών συνόλων

Ένα ασαφές σύνολο είναι ένα σύνολο χωρίς σαφή όρια, κατά αναλογία με το προηγούμενο παράδειγμα του σαββατοκύριακου. Ένα σαφές σύνολο θα μπορούσε να είναι «οι ημέρες της εβδομάδος». Η Δευτέρα για παράδειγμα ανήκει στο σαφές σύνολο «οι ημέρες της εβδομάδος». Ο Ιούνιος δεν ανήκει στο σαφές σύνολο «οι ημέρες της εβδομάδος». Για το ασαφές σύνολο «σαββατοκύριακο» η ερώτηση αν η Παρασκευή είναι μέρος του σαββατοκύριακο μεταλλάσσεται στο σε πόσο βαθμό η Παρασκευή είναι μέρος του σαββατοκύριακου.

❖ Συναρτήσεις συμμετοχής

Τα γραφήματα που ορίζουν πόσο κάθε μέλος αντιστοιχεί στην τιμή συμμετοχής μεταξύ 0 και 1 ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να είναι από απλές, όπως η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση μέχρι και πολύ πιο περίπλοκες όπως είναι αυτές οι συναρτήσεις που βασίζονται στην Γκαουσιανή συνάρτηση κατανομής, την σιγμοειδή συνάρτηση, συναρτήσεις πολυώνυμου και συνδυασμούς τους. Στην Εικόνα Εικόνα 4.2

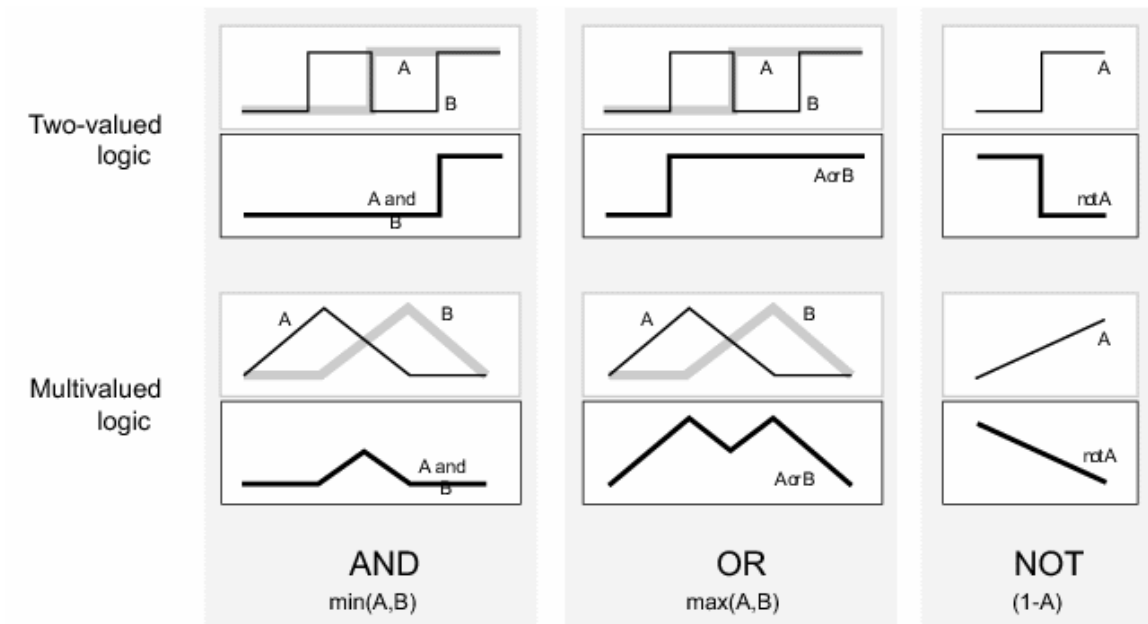
παρουσιάζονται όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής που είναι διαθέσιμες στο fuzzy logic toolkit του Matlab.



Εικόνα 4.2 Συναρτήσεις συμμετοχής διαθέσιμες στο Matlab (MathWorks, 2011)

❖ Λογικές πράξεις

Υπάρχουν τρεις ασαφείς λογικές πράξεις, η ένωση (AND), η τομή (OR) και το συμπλήρωμα (NOT). Αυτές οι λογικές πράξεις παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.3. Η πηγή της εικόνας είναι το εισαγωγικό κείμενο για την ασαφή λογική του Matlab (MathWorks, 2011).



Εικόνα 4.3 Λογικές πράξεις ασαφών συνόλων (MathWorks, 2011)

❖ Ασαφή συστήματα συμπεράσματος

Οι κανόνες συμπεράσματος είναι κανόνες από τους οποίους μπορούν να αντληθούν αλήθειες από ελεγμένες αλήθειες (McNeill and Thro, 1994). Αυτοί οι κανόνες απεικονίζονται με δηλώσεις Αν...τότε...Κάθε τέτοιος κανόνας μπορεί να έχει μεταβλητό βάρος από 0 έως 1 σε σύγκριση με τους υπόλοιπους κανόνες. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία συμπεράσματος είναι η διαδικασία Mamdani. Αυτή βασίζεται σε 5 βήματα (MathWorks, 2011):

1. Ασαφοποίηση των εισόδων
2. Εφαρμογή ασαφών πράξεων
3. Εφαρμογή κανόνων Αν...Τότε...
4. Ομαδοποίηση όλων των εξόδων
5. Αποασαφοποίηση

Τα πρώτα τρία βήματα έχουν αναπτυχθεί. Η ομαδοποίηση όλων των εξόδων μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Οι πιο συνηθισμένοι είναι η άθροιση όλων των εξόδων, η χρήση της μέγιστης εξόδου ή η χρήση μια πράξης OR στην έξοδο.

Η ασαφοποίηση είναι η διαδικασία με την οποία ξεκινώντας από ένα ασαφές σύνολο καταλήγεις σε ένα σαφή αριθμό. Υπάρχουν αρκετές συναρτήσεις αποασαφοποίησης διαθέσιμες με πιο χρησιμοποιούμενες την αποασαφοποίηση

μέσης τιμής, την αποασαφοποίηση μέσου όρου των μέγιστων, την αποασαφοποίηση του μικρότερου από τους μέγιστους και την αποασαφοποίηση του μέγιστου από τους ελάχιστους.

Μια άλλη διαδικασία συμπεράσματος προτάθηκε από τους Takagi, Sugeno και Kang και ονομάστηκε με τα ονόματά τους. Η βασική διαφορά από την μέθοδο Mamdani είναι ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιούνται είναι είτε γραμμικές είτε σταθερής τιμής. Η μέθοδος Mamdani είναι διαισθητική, ταιριάζει σε ανθρώπινη εισοδο και έχει ήδη ευρεία αποδοχή (MathWorks, 2011). Από την πλευρά της η Takagi-Sugeno-Kang μπορεί να αποδώσει καλύτερα με γραμμικές προσεγγίσεις όπως ο έλεγχος PID, είναι πιο εύκολη στη βελτιστοποίηση, παρουσιάζει συνέχεια στις εξόδους της, μπορεί να ταιριάζει καλά με μαθηματική ανάλυση και υπολογιστικά είναι πιο αποδοτική (MathWorks, 2011).

4.3.3 Ασαφείς Γνωσιακοί Χάρτες (FCM)

Οι FCM είναι γραφήματα που απεικονίζουν σχέσεις αιτίας και αποτελέσματος και χρησιμοποιούνται για την υπολογιστική επεξεργασία συμπεράσματος (Papageorgiou, Parsopoulos et al., 2005). Διάφορα συστήματα μπορούν να απεικονιστούν μέσω των FCM. Κόμβοι χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν διάφορα στοιχεία του συστήματος υπό μοντελοποίηση όπως εισοδοι, έξοδοι, κανόνες ή ενδιάμεσες καταστάσεις.

$$C_i, i=1,\dots,N$$

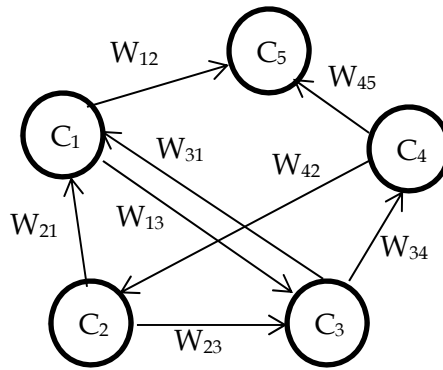
όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων.

Η τιμή του κάθε κόμβου ασαφοποιείται στο διάστημα $[0,1]$.

$$A_i \in [0,1], i=1,\dots,N$$

Αυτοί οι κόμβοι διασυνδέονται με τόξα που παρουσιάζουν διαφορετικά βάρη με σκοπό την εκδήλωση των συσχετισμών τους. Ένα FCM παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 4.4. Για να μπορέσουν να δοθούν τιμές στα βάρη χρησιμοποιείται η ανθρώπινη γνώση και εμπειρία. Τα βάρη είναι:

$$W_{ij} \in [-1,1], i=1,\dots,N \text{ and } j=1,\dots,N$$



Εικόνα 4.4 Ασαφής Γνωσιακός Χάρτης

Όταν το βάρος παρουσιάζει θετικό αλληλοσυσχετισμό τότε το βάρος είναι θετικό, όταν παρουσιάζει αρνητικό αλληλοσυσχετισμό είναι αρνητικό και όταν δεν υπάρχει συσχετισμός τότε παίρνει την τιμή μηδέν. Τα βάρη μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα πίνακα όπως παρακάτω:

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & W_{25} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} & W_{35} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} & W_{45} \\ W_{51} & W_{52} & W_{53} & W_{54} & W_{55} \end{pmatrix}$$

Αυτός ο πίνακας μπορεί να απλοποιηθεί με αντικατάσταση των βαρών των Κόμβων που δεν παρουσιάζουν συσχέτιση με μηδενικά.

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & W_{12} & W_{13} & 0 & 0 \\ W_{21} & 0 & W_{23} & 0 & 0 \\ W_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{42} & 0 & 0 & W_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Σύμφωνα με τον Kosko (Kosko, 1996) οι τιμές των κόμβων επηρεάζονται από τους υπόλοιπους κόμβους σύμφωνα με την εξίσωση EQ 15. Το FCM φτάνει σε κατάσταση σύγκλισης μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων.

$$A_i(k+1) = f \left(A_i(k) + \sum_{j=1}^n W_{ji} A_j(k) \right) \quad (\text{EQ 15})$$

όπου:

k είναι οι επαναλήψεις

Η συνάρτηση f είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης. Τέσσερις συναρτήσεις έχουν προταθεί: η σιγμοειδής, η υπερβολική εφαιπτομενική συνάρτηση, η βηματική συνάρτηση και η γραμμική συνάρτηση ορίου (Bueno and Salmeron, 2009).

- Η σιγμοειδής συνάρτηση παρουσιάζεται στην εξίσωση EQ 16 όπου $c \in (0, +\infty)$ είναι μια παράμετρος κλίσης. Για μια μικρή τιμή c (eg. $c=1$) προσομοιώνει μια γραμμική συνάρτηση, ενώ για μεγάλες τιμές ($c=10$) προσομοιώνει μια διακριτή συνάρτηση (Bueno and Salmeron, 2009).

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-cx}} \quad (\text{EQ 16})$$

- Η υπερβολική εφαιπτομενική συνάρτηση παρουσιάζεται στην εξίσωση EQ 17. Η έξοδος της είναι στο διάστημα $[-1,1]$ για μια τιμή του c κοντά στο 5 (Bueno and Salmeron, 2009).

$$f(x) = \frac{e^{cx} - e^{-cx}}{e^{cx} + e^{-cx}} \quad (\text{EQ 17})$$

- Η βηματική συνάρτηση παρουσιάζεται στην εξίσωση EQ 18. Με σκοπό την μείωση της υποκειμενικότητας της βηματικής συνάρτησης προτείνεται μια τιμή του T ίση με 0.5 (Bueno and Salmeron, 2009).

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq T \\ 1 & \text{if } x > T \end{cases} \quad (\text{EQ 18})$$

- Η γραμμική συνάρτηση ορίου είναι παράγωγη της βηματικής συνάρτησης και παρουσιάζεται στην εξίσωση EQ 19 (Bueno and Salmeron, 2009).

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq T \\ (x-T) & \text{if } x > T \end{cases} \quad (\text{EQ 19})$$

Σύμφωνα με τους (Bueno and Salmeron, 2009) η σιγμοειδής συνάρτηση παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Για να γίνει εφικτή η μοντελοποίηση μιας διεργασίας ή ενός ελεγκτή με FCM απαιτείται η γνώση εμπειρογνώμωνων. Ο FCM δομείται από έναν μηχανικό γνώσης ο οποίος συγκεντρώνει την γνώση του αντικειμένου από εμπειρογνώμονες του συστήματος και χρησιμοποιεί αυτή την γνώση για να ορίσει τους κόμβους, τις λογικές αλληλοσυσχετίσεις και τις γλωσσικές μεταβλητές του χάρτη. Οι

εμπειρογνώμονες ταυτοποιούν τις αλληλοσυσχετίσεις ανάμεσα στους κόμβους και εκτιμούν την ένταση της αλληλοσυσχέτισης με γλωσσικές μεταβλητές (Parageorgiou, 2011).

Οι εμπειρογνώμονες αποφασίζουν για τα σημαντικά στοιχεία του συστήματος τα οποία γίνονται κόμβοι και τα βάρη παίρνουν τιμή σύμφωνα με τις αλληλοσυσχετίσεις των κόμβων (Stylios and Groupos, 1999). Γλωσσικές μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους εμπειρογνώμονες με σκοπό την έκφραση των συσχετισμών με απλοποιημένο τρόπο. Αρχικά ορίζεται ο θετικός, αρνητικός ή μηδενικός συσχετισμός. Μετά η συσχέτιση περιγράφεται από μεταβλητές όπως πολύ αδύναμη, αδύναμη, μέση, δυνατή, πολύ δυνατή κλπ (Parageorgiou, Parsopoulos et al., 2005).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των FCM είναι η πιθανότητα σύγκλισης σε μια μη θεμιτή σταθερή κατάσταση. Για αυτό το λόγο έχουν προταθεί διαφορετικοί αλγόριθμοι εκπαίδευσης. Οι πρώτοι αλγόριθμοι που προτάθηκαν ήταν ο διαφορικός Hebbian, ο ενεργός και ο μη γραμμικός Hebbian. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό τα τελικά βάρη από τα αρχικά βάρη που έχουν δώσει οι εμπειρογνώμονες. Άλλες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τον υβριδικό μη γραμμικό αλγόριθμο Hebbian, το διαφορικό εξελικτικό αλγόριθμο, το αλγόριθμο προσομοιωμένης απόκτησης με γενετικούς αλγορίθμους και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης βασισμένος στη θεωρία σημνών (Parageorgiou, 2011).

4.3.4 Δίκτυα Petri

Ένα δίκτυο Petri (PN) είναι ένα σταθμισμένο διμερές γράφημα που ορίζεται από 4 παραμέτρους P , T , A^P και w (Cassandras and Lafortune, 2008):

P : Είναι το πεπερασμένο σύνολο θέσεων και απεικονίζεται ως ένας τύπος κόμβου στο διάγραμμα

T : Είναι ένα πεπερασμένο σύνολο μεταβάσεων και απεικονίζεται στο διάγραμμα με ένα δεύτερο τύπο κόμβου.

A^P : $A^P \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ και είναι το σύνολο που καλείται συσχετισμός ροής και περιλαμβάνει τα τόξα από τις μεταβάσεις σε θέσεις και από θέσεις σε μεταβάσεις στο γράφημα.

w : $A^P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ είναι η συνάρτηση βάρους των τόξων.

Θεωρείται ότι τα (P, T, A, w) δεν έχουν απομονωμένες θέσεις ή μεταβάσεις. Το σύνολο των θέσεων αντιπροσωπεύεται από $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ και το σύνολο των μεταβάσεων από $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $|P| = n$ και $|T| = m$. Τα βάρη των τόξων είναι θετικοί ακέραιοι και τα τόξα αντιπροσωπεύονται στη μορφή (p_i, t_j) ή (t_j, p_i) (Cassandras and Lafortune, 2008).

Το σύνολο των θέσεων εισόδου σε μια μετάβαση t_j απεικονίζεται από $I(t_j)$ και οι θέσεις εξόδου από $O(t_j)$ (Cassandras and Lafortune, 2008).

$$I(t_j) = \{p_i \in P : (p_i, t_j) \in A\} \text{ and } O(t_j) = \{p_i \in P : (t_j, p_i) \in A\}$$

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για να δείξει σε ένα PN αν μια κατάσταση ισχύει ή όχι γίνεται με την αντιστοίχιση με μάρκες στις διάφορες θέσεις. Αν μια κατάσταση ικανοποιείται τότε τοποθετείται μια μάρκα. Η σήμανση ορίζεται ως ο τρόπος που οι μάρκες αντιστοιχούνται στο PN (Cassandras and Lafortune, 2008). Η σήμανση M είναι ένα διάνυσμα m , $\langle M(p_1), \dots, M(p_n) \rangle$, όπου ο αριθμός των μαρκών στην θέση p_i δηλώνεται από $M(p_i)$. Η αρχική σήμανση του PN είναι M_0 , όπου $M_0 \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$. Όλες οι πιθανές σημάσεις του PN που μπορούν να ληφθούν από την κατάσταση M_0 είναι το σύνολο $R(M_0)$ (Lee, Liu et al., 2003).

Η κίνηση των μαρκών μέσα στο PN αντιπροσωπεύει την συνάρτηση εναλλαγής καταστάσεων του PN. Αυτό ονομάζεται ενεργοποίηση (Cassandras and Lafortune, 2008). Μια μετάβαση ενεργοποιείται αν υπάρχουν το λιγότερο $w(p, t)$ (το βάρος από το p στο t) μαρκών στις εισόδους των θέσεων t . Αν μια μετάβαση έχει μάρκες μπορεί να ενεργοποιηθεί, μπορεί και όχι. Αν ενεργοποιηθεί τότε $w(p, t)$ μάρκες φεύγουν από την θέση t των εισόδων και προστίθενται στις εξόδους σύμφωνα με το βάρος του τόξου από το t στο p ($w(t, p)$).

Ο πίνακας ροής ή πίνακας επίπτωσης $FM=[a_{ij}]$ ενός PN με n μεταβάσεις και m θέσεις ορίζεται σαν ένας πίνακας $n \times m$ ακεραίων όπου η τυπική της είσοδος δίνεται από (Murata, 1989):

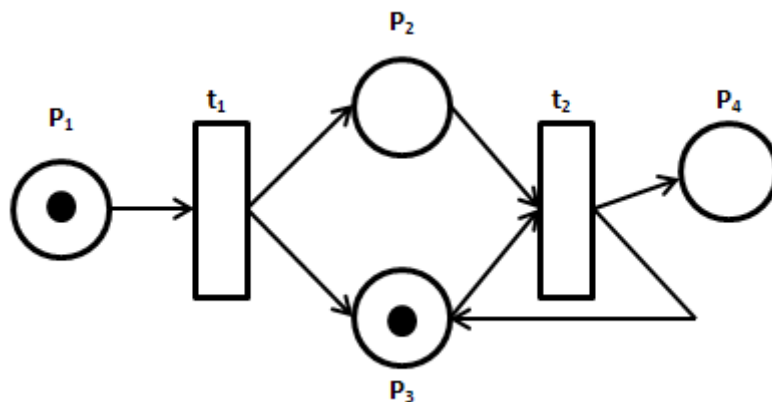
$$a_{ij} = w(i, j) - w(j, i) \text{ (EQ 20)}$$

Το διάνυσμα ελέγχου u_k ορίζεται σαν ένα διάνυσμα μιας στήλης $n \times 1$ που αποτελείται από $n-1$ τιμές ίσες με το 0 και μια τιμή ίση με 1. Το διάνυσμα δίνεται από $u=[s_1, s_2, \dots, s_m]$ όπου $s_j \in \{0, 1\}$. Αυτή η θέση δηλώνει ότι έχει ενεργοποιηθεί κατά την k ενεργοποίηση. Η συνάρτηση κατάστασης διαμορφώνεται ως εξής (Murata, 1989):

$$M_k = M_{k-1} + FM^T u_k \text{ (EQ 21)}$$

Όπου FM^T είναι η αντίστροφη του Πίνακα ροής.

Ένα τυπικό PN όπως περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 Ένα τυπικό Δίκτυο Petri

5 Υλοποίηση των Συστημάτων Διαχείρισης της Ενέργειας

5.1 Γενικές πληροφορίες για τα Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας

Τα Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας (EMS) είναι η καρδιά της προτεινόμενης τοπολογίας. Είναι το βασικό στοιχείο ώστε αυτή η τοπολογία να γίνει λειτουργική. Εφόσον η τοπολογία είναι πλήρως αρθρωτή και μπορεί να επεκταθεί μελλοντικά μετά την αρχική έναρξη λειτουργίας αποφασίστηκε ότι το EMS θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει στην βάση ισοζυγίων αντί σε σχέση με δεδομένες σαφείς τιμές που βασίζονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων υποσυστημάτων. Κατά αυτό τον τρόπο αν μελλοντικά οι ιδιοκτήτες του μικροδικτύου θελήσουν να προσθέσουν μια συστοιχία Φ/Β, το EMS θα μπορεί να είναι λειτουργικό αξιοποιώντας τις νέες προσθήκες. Σε άλλη περίπτωση θα έπρεπε να γίνει πλήρης επαναπρογραμματισμός του EMS και νέα έναρξη λειτουργίας αυξάνοντας το κόστος και προσθέτοντας πολυπλοκότητα. Η πρώτη προσέγγιση που αναπτύχθηκε ήταν μια προσέγγιση ON-OFF, η δεύτερη μια βασισμένη σε ασαφή λογική και η τρίτη βασισμένη σε μια συνδυασμένη προσέγγιση Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών.

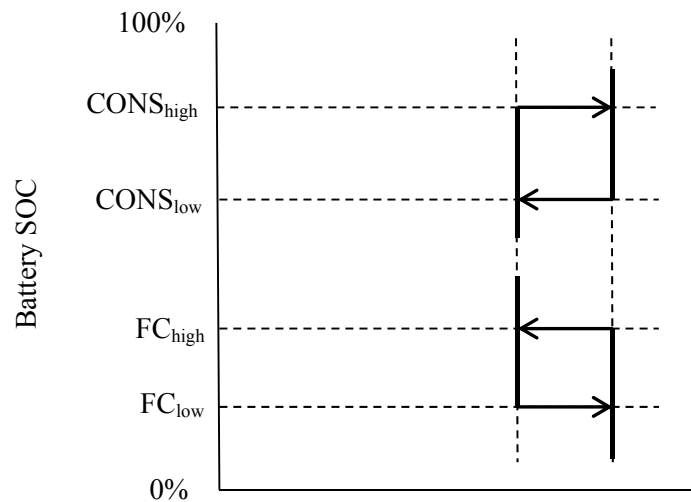
5.2 ON-OFF Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας

Για το απλό ON/OFF EMS (SEMS) τρεις λογικές ελέγχου τρέχουν παράλληλα και συνεργατικά:

α. Λογική ελέγχου διπλής υστέρησης

Αυτή η προσέγγιση είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες σε συστήματα ΑΠΕ εφοδιασμένα με υποσυστήματα υδρογόνου (Zhou, Ferreira et al., 2008). Η υστέρηση (Εικόνα Εικόνα 5.1) χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την συνεχή ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των συσκευών σε οριακές συνθήκες. Χρησιμοποιείται στο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής για την διαχείριση της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης.

Όταν το Επίπεδο Φόρτισης του συσσωρευτή (SOC) είναι τόσο χαμηλό όσο η παράμετρος FC_{low} τότε ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου (Εικόνα Εικόνα 5.1). Όταν ο συσσωρευτής φορτίζεται και το SOC ξεπεράσει την τιμή FC_{high} τότε η κυψέλη καυσίμου απενεργοποιείται (Εικόνα Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 Λογική ελέγχου διπλής υστέρησης

Όταν το SOC του συσσωρευτή ξεπεράσει την τιμή $CONS_{high}$ τότε ενεργοποιείται η χρήση των καταναλωτών (είτε και οι δύο είτε μόνο η μία από τις δύο σύμφωνα και με την Τρίτη λογική ελέγχου) (Εικόνα Εικόνα 5.1). Όταν ο συσσωρευτής αποφορτιστεί κάτω από την τιμή $CONS_{low}$ τότε απενεργοποιούνται οι καταναλώσεις. Το FC_{high} θεωρήθηκε ίσο με 45 %, το FC_{low} με 25 %, το $CONS_{high}$ με 85 %, και το $CONS_{low}$ με 65 % (Εικόνα Εικόνα 5.1).

β. Πρόγνωση φορτίου

Χρησιμοποιήθηκε μια απλή μέθοδος πρόγνωσης φορτίου στο SEMS μέσω ορισμού του ισοζυγίου ενέργειας στο μικροδίκτυο. Οι παραγωγοί ενέργειας θεωρούνται θετικοί και οι ηλεκτρικές καταναλώσεις αρνητικές. Αν το ισοζύγιο είναι θετικό ακόμη και αν η πρώτη λογική ελέγχου δίνει εντολή ενεργοποίησης στην κυψέλη καυσίμου, αυτή η εντολή παρακάμπτεται και η κυψέλη καυσίμου δεν ενεργοποιείται για το SEMS αναμένει ότι το SOC θα αυξηθεί χωρίς την συμβολή της κυψέλης καυσίμου.

Αυτή η λογική ελέγχου σε συνδυασμό με την Τρίτη λογική ελέγχου αποφασίζει αν μία ή και οι δύο καταναλώσεις θα ενεργοποιηθούν.

γ. Ιεραρχία των καταναλώσεων

Το πόσιμο νερό θεωρείται το πιο σημαντικό προϊόν του μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Για αυτό το λόγο το σύστημα διαχείρισης είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε να έχει πάντα πόσιμο νερό για την κάλυψη

αναγκών για 3 ημέρες. Αυτό σημαίνει ότι αν το νερό στη δεξαμενή πόσιμου νερού είναι λιγότερο από το νερό 3 ημερών όταν δίνεται εντολή ενεργοποίησης καταναλώσεων από την πρώτη λογική ελέγχου τότε η μονάδα αφαλάτωσης ενεργοποιείται πρώτη. Μετά από αυτό υπολογίζεται ένα νέο ισοζύγιο του συστήματος αφαιρώντας την ενέργεια που θα καταναλωθεί από την μονάδα αφαλάτωσης για αυτό το βήμα ελέγχου. Αν το ισοζύγιο είναι ακόμη θετικό, τότε η μονάδα ηλεκτρόλυσης θα ενεργοποιηθεί και αυτή.

Αν το νερό στη δεξαμενή του πόσιμου νερού αρκεί για την κάλυψη αναγκών για περισσότερες από 3 ημέρες όταν η πρώτη λογική ελέγχου δίνει εντολή ενεργοποίησης καταναλώσεων ενεργοποιείται η μονάδα ηλεκτρόλυσης. Μετά από αυτό υπολογίζεται ένα νέο ισοζύγιο του συστήματος αφαιρώντας την ενέργεια που θα καταναλωθεί από την μονάδα ηλεκτρόλυσης για αυτό το βήμα ελέγχου. Αν το ισοζύγιο είναι ακόμη θετικό, τότε η μονάδα αφαλάτωσης θα ενεργοποιηθεί και αυτή.

Το SEMS υλοποιήθηκε στο TRNSYS, ο πηγαίος κώδικας είναι διαθέσιμος στο Παράρτημα I, και οι εισοδοί, έξοδοι και οι παράμετροι παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

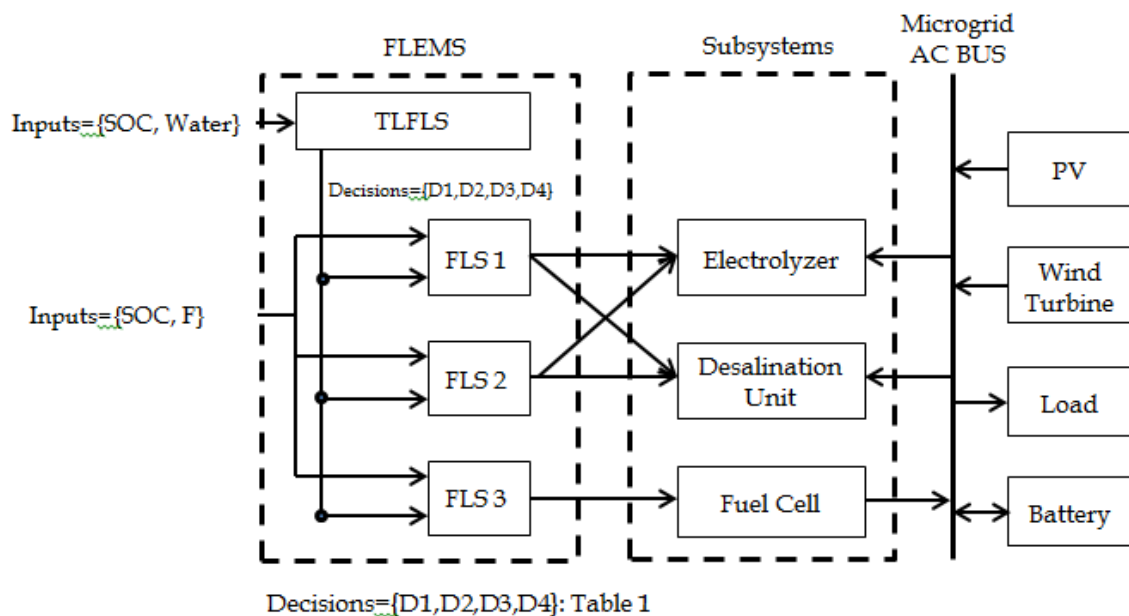
Πίνακας 5.1 Type 190: SEMS

Number of Parameter		Description
1	Pfc	Rated Power of the fuel cell [W]
2	PeI	Rated Power of the Electrolyzer [W]
3	CONShigh	CONShigh
4	CONSlow	CONSlow
5	FChigh	FC _{high}
6	FClow	FC _{low}
7	TS	Time step parameter
8	Pds	Rated Power of the Desalination Unit [W]
9	FCeff	Fuel Cell efficiency
10	Water3	Emergency Water for 3 days [m ³]
Number of Input		Description
1	Pload	Power of the load [W]
2	Ppv	Power produced by the PV [W]
3	Pwind	Power produced by the Wind Turbine [W]
4	Paux	Auxiliary Produced Power [W]
5	MishH ₂	Hydrogen shortage [Nm ³]
6	SOC	State of Charge

Number of Output	Water	Water in the water tank [m ³]
1	Pel	Consumed Power of the Electrolyzer [W]
2	Pfc	Produced Power of the Fuel Cell [W]
3	Pds	Consumed Power of the Electrolyzer [W]
4	Es	Electrolyzer state (ON/OFF)
5	FCs	Fuel Cell state (ON/OFF)
6	DSs	Desalination Unit state (ON/OFF)
7	Pmis	Load not met [W]

5.3 Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας βασισμένο σε Ασαφή Λογική

Το σύστημα διαχείρισης της ενέργειας βασισμένο σε ασαφή λογική (FLEMS) ήταν το πρώτο EMS που αναπτύχθηκε και επιτρέπει την λειτουργία σε μερικό φορτίο της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης. Το πόσιμο νερό σε αυτή την προσέγγιση συνεχίζει να θεωρείται το σημαντικότερο προϊόν του μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Το FLEMS επιδιώκει πάντα να έχει αρκετό πόσιμο νερό αποθηκευμένο ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για 3 ημέρες. Κατά αυτό τον τρόπο αν υπάρξει κάποια βλάβη θα υπάρχει αρκετό νερό μέχρι να επισκευαστεί το σύστημα ή νερό μεταφερθεί από κάποια άλλη τοποθεσία.



Εικόνα 5.2 Γραφική Απεικόνιση του Flems

Το FLEMS έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί σε 2 επίπεδα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 5.2. Το άνω επίπεδο διαχείρισης (TLFLS) βασίζεται σε ένα σύστημα απόφασης Takagi-Sugeno-Kang (TSK) με δύο εισόδους και 4 εξόδους και υλοποιήθηκε στο Matlab χρησιμοποιώντας το Fuzzy Logic Toolkit (Jang, Sun et al., 1997). Το κατώτερο επίπεδο του FLEMS απαρτίζεται από τρία συστήματα ασαφούς λογικής (FLS).

Το TLFLS είναι ένα σύστημα λήψης απόφασης που βασίζεται σε τυπικούς ασαφείς κανόνες. Κάθε κανόνας αντιπροσωπεύει μια ειδική κατάσταση (Dounis and Caraiscos, 2007). Έστω ένα πρόβλημα λήψης απόφασης n διαστάσεων για το οποίο N δεδομένα $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ δίνονται για M αποφάσεις $\{d_1, d_2, \dots, d_M\}$. Ο τυπικός ασαφής κανόνας για το TLFLS έχει τη μορφή:

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_{in} \text{ THEN } d_i$$

Όπου το A_{ij} δηλώνει το προγενέστερο ασαφές σύνολο που ορίζεται για $j=1, \dots, n$ και $i=1, \dots, M$. Η έξοδος του TLFLS υπολογίζεται βάσει του βαθμού ενεργοποίησης των κανόνων ενεργοποίησης:

$$\beta_i(\mathbf{x}) = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_j) \quad (\text{EQ 22})$$

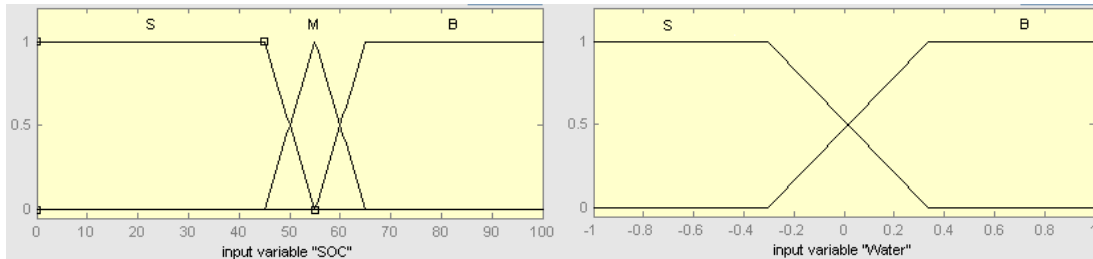
Μια σαφής απόφαση λαμβάνεται χρησιμοποιώντας την απόφαση που ανήκει στον ασαφή κανόνα που έχει τον υψηλότερο βαθμό ενεργοποίησης (στρατηγική όπου ο νικητής τα παίρνει όλα) (Kuncheva, 2000; Dounis, Tsiropanis et al., 2011; Zhang, Wu et al., 2011).

$$\mathbf{x} \in d_{i_w}, i_w = \underset{1 \leq i \leq M}{\operatorname{argmax}}(\beta_i(\mathbf{x})) \quad (\text{EQ 23})$$

Οι εισοδοί είναι η συχνότητα του μικροδικτύου και μια μεταβλητή που βασίζεται στο διαθέσιμο πόσιμο νερό στη δεξαμενή. Αυτή η μεταβλητή είναι ίση με την ποσότητα νερού στη δεξαμενή μείον το νερό που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες για 3 ημέρες. Οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις εισόδους του TLFLS παρουσιάζονται στην Εικόνα Εικόνα 5.3 και οι γλωσσικές μεταβλητές Μικρή, Μέση και Υψηλή χρησιμοποιήθηκαν για την συχνότητα και Μικρή και Μεγάλη για το νερό. Οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου είναι σταθερές, είτε ON (1) είτε OFF (0). Οι

έξοδοι είναι ουσιαστικά το βάρος που κυμαίνεται από 0 έως 1 στις παρακάτω 4 καταστάσεις:

- Φόρτωσε το FLS 1
- Φόρτωσε το FLS 2
- Κράτα όλες τις συσκευές απενεργοποιημένες
- Φόρτωσε το FLS 3



Εικόνα 5.3 Συναρτήσεις συμμετοχής για τις εισόδους του TLFLS

Κατά αυτό τον τρόπο η έξοδος με το μεγαλύτερο βάρος ορίζει ποιο σύστημα ασαφούς λογικής θα φορτωθεί αν πρέπει κάποιο να φορτωθεί. Οι κανόνες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Το TLFLS υλοποιήθηκε στο Matlab. Μετά από τον υπολογισμό από το κατώτερο επίπεδο των εξόδων του, το άνω επίπεδο ελέγχει αν η έξοδος είναι μικρότερη του 30% για λειτουργία σε μερικό φορτίο. Αν είναι η συσκευή απενεργοποιείται αντί να λειτουργήσει σε ένα τόσο χαμηλό επίπεδο.

Πίνακας 5.2 Κανόνες TLFLS

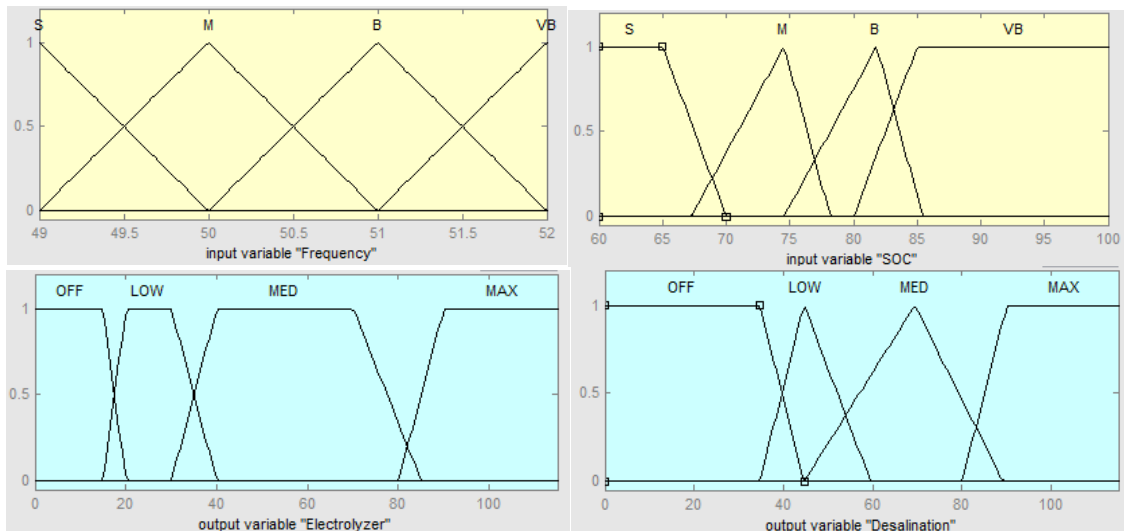
SOC	Water	Decision
Big	Big	D1: Load FLS 1
Big	Small	D2: Load FLS 2
Medium	-	D3: Turn all devices off
Low	-	D4: Load FLS 3

Τα τρία συστήματα ασαφούς λογικής του κατώτερου επιπέδου βασίζονται στην μηχανή συμπεράσματος Mamdani και χρησιμοποιούν το min και max για τα T-norm και T-conorm και υλοποιήθηκαν στο Matlab χρησιμοποιώντας το Fuzzy Logic Toolkit. Οι συναρτήσεις συμμετοχής χρησιμοποίησαν τις γλωσσικές μεταβλητές Μικρό, Μέσο, Μεγάλο και Πολύ Μεγάλο για το SOC και την F. Για τις εξόδους χρησιμοποιήθηκαν οι γλωσσικές μεταβλητές Απενεργοποιημένο, Χαμηλό, Μέσο και Μέγιστο. Η έξοδος των συστημάτων ασαφούς λογικής είναι το επίπεδο λειτουργίας της κάθε μια συσκευής με έναν αριθμό μεταξύ του 0 και του 100 με το

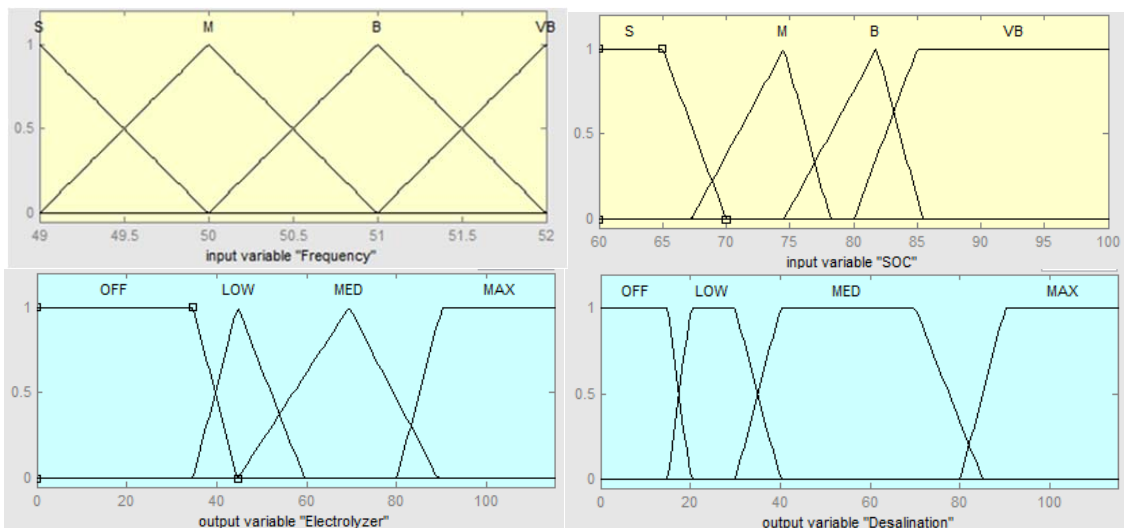
0 να απενεργοποιεί τη συσκευή και το 100 να την ενεργοποιεί σε πλήρες φορτίο. Σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν 3 συστήματα ασαφούς λογικής Mamdani. Το FLS 1 χρησιμοποιείται όταν το νερό στη δεξαμενή του πόσιμου νερού αρκεί να καλύψει τις ανάγκες 3 ημερών και υπολογίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης. Το FLS 2 χρησιμοποιείται όταν το νερό είναι ίσο ή λιγότερο από αυτό που αρκεί να καλύψει ανάγκες 3 ημερών για τις ίδιες συσκευές, ενώ το FLS 3 ελέγχει το επίπεδο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των 3 αλγόριθμων ασαφούς λογικής παρουσιάζονται στις Εικόνες Εικόνα 5.4, Εικόνα 5.5 και Εικόνα 5.6. Σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες ελέγχου (Εικόνες Εικόνα 5.7, Εικόνα 5.8 και Εικόνα 5.9) στη βάση της εμπειρίας. Οι κανόνες για κάθε μια από αυτές τις ρουτίνες και παρουσιάζονται στους Πίνακες Πίνακας 5.3, Πίνακας 5.4 και Πίνακας 5.5 αντίστοιχα και επιλέχθηκαν διαισθητικά στη βάση της εμπειρίας. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος MIN όσο αφορά το AND, ο χειριστής επίπτωσης είναι ο MIN, η ομαδοποίηση γίνεται με την MAX και η αποασαφοποίηση βασίζεται στον μέσο της επιφάνειας. Για παράδειγμα αν το SOC είναι υψηλό, το Νερό είναι Χαμηλό και η Συχνότητα είναι Μέση, το TLFLS θα επιλέξει το FLS 2, το οποίο θα επιλέξει να κρατήσει απενεργοποιημένη τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και θα ενεργοποιήσει τη μονάδα αφαλάτωσης σε μερικό φορτίο σε μέσο σημείο.

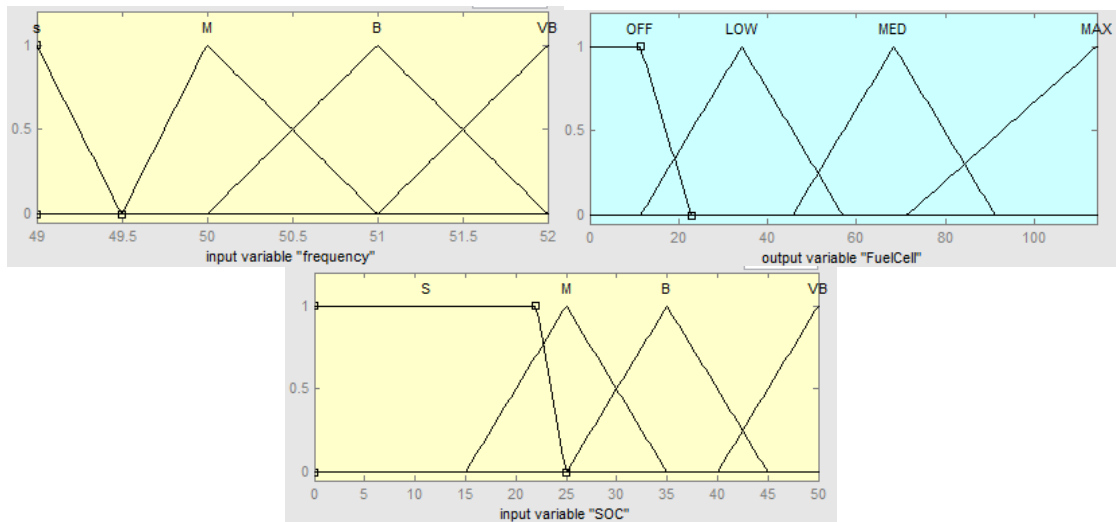
Το FLEMS υλοποιήθηκε στο Matlab. Το TYPE 155 του TRNSYS επιτρέπει την διασύνδεση του TRNSYS με το Matlab. Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι Είσοδοι, οι Έξοδοι και οι Παράμετροι του Type 155. Το M-file που περιέχει τον πηγαίο κώδικα για κάθε από τα ανωτέρω παρουσιασθέντα συστήματα ασαφούς λογικής παρουσιάζονται στο Παράρτημα II.



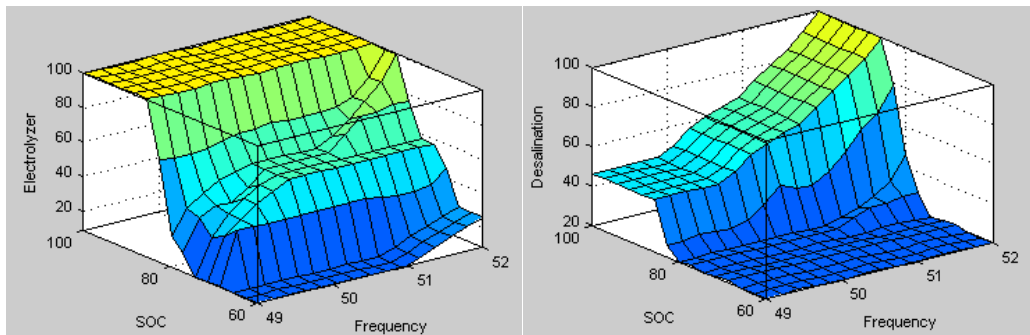
Εικόνα 5.4 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 1



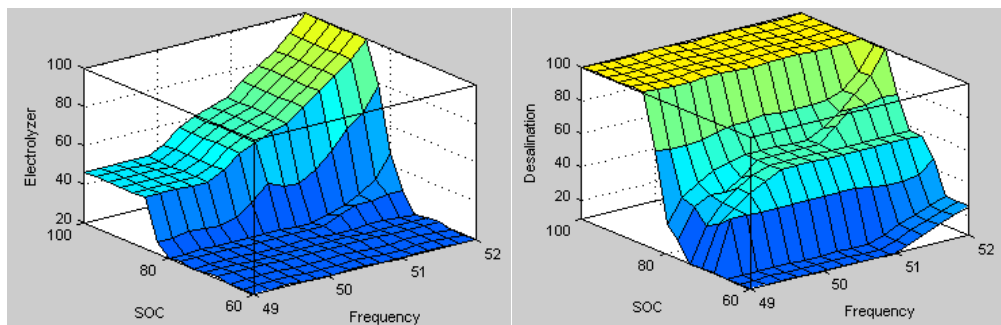
Εικόνα 5.5 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 2



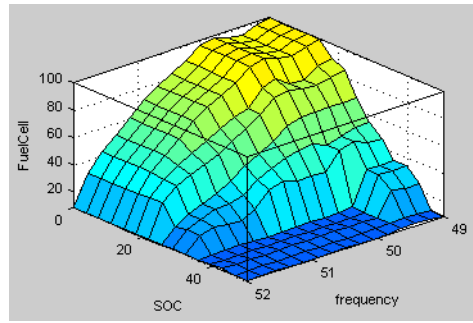
Εικόνα 5.6 Συναρτήσεις συμμετοχής FLS 3



Εικόνα 5.7 Επιφάνειες ελέγχου FLS 1



Εικόνα 5.8 Επιφάνειες ελέγχου FLS 2



Εικόνα 5.9 Επιφάνειες Ελέγχου FLS 3

Πίνακας 5.3 Αν... Τότε κανόνες FLS 1

	F	Small	Medium	Big	Very Big
(Hz)					
SOC (%)					
Small		OFF OFF	OFF OFF	OFF OFF	ON/LOW OFF
Medium		OFF OFF	ON/MED OFF	ON/MED OFF	ON/MED OFF
Big		ON/LOW OFF	ON/MED OFF	ON/MED OFF	ON/MAX ON/LOW
Very Big		ON/MAX ON/LOW	ON/MAX ON/LOW	ON/MAX ON/MED	ON/MAX ON/MAX

Legend:

- ✓ Normal fonts are for the electrolyzer unit
- ✓ **Bold fonts are for the desalination unit**

Πίνακας 5.4 Αν... Τότε... κανόνες FLS 2

	F	Small	Medium	Big	Very Big
SOC					
Small		OFF OFF	OFF OFF	OFF OFF	OFF ON/LOW
Medium		OFF OFF	OFF ON/MED	OFF ON/MED	OFF ON/MED
Big		OFF ON/LOW	OFF ON/MED	OFF ON/MED	ON/LOW ON/MAX
Very Big		ON/LOW ON/MAX	ON/LOW ON/MAX	ON/MED ON/MAX	ON/MAX ON/MAX

Legend:

- ✓ Normal fonts are for the electrolyzer unit
- ✓ **Bold fonts are for the desalination unit**

Πίνακας 5.5 Αν... Τότε κανόνες FLS 3

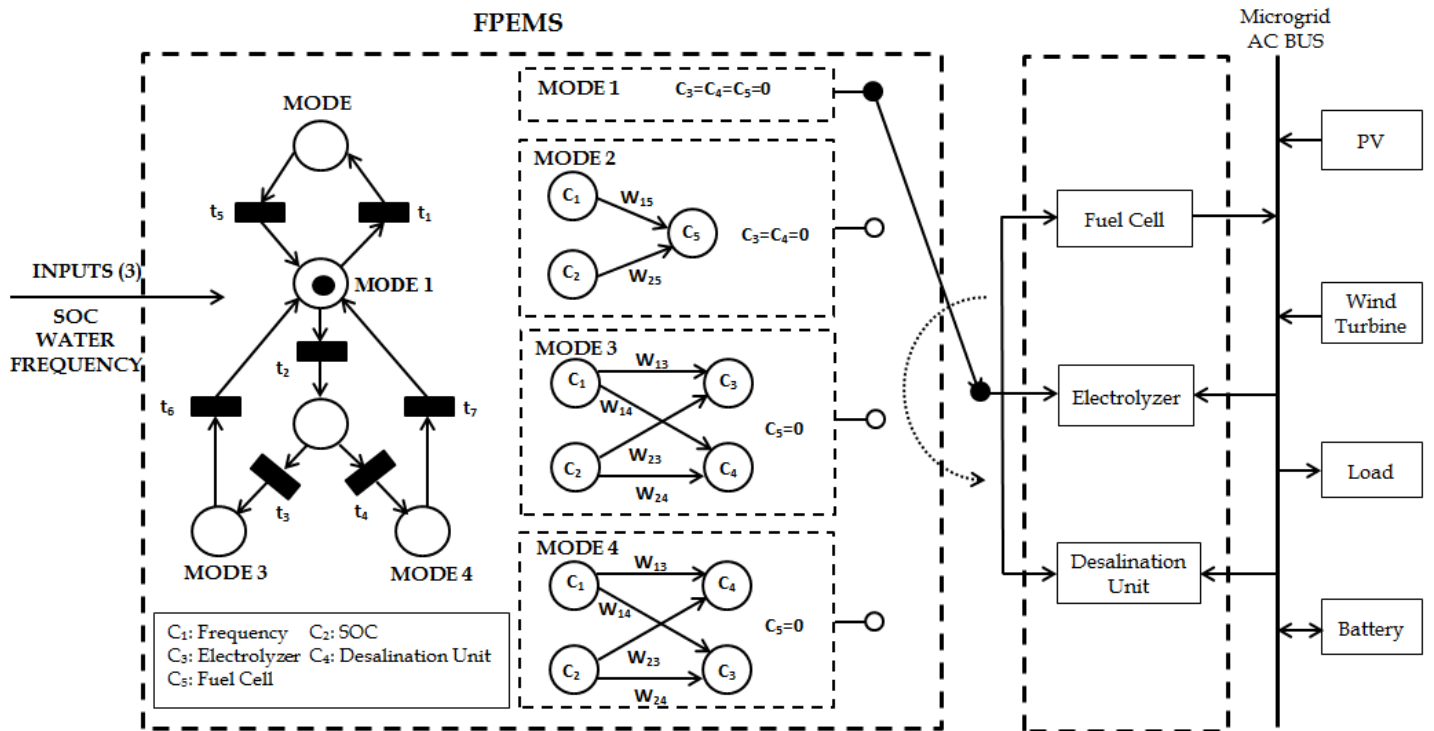
	F	Small	Medium	Big	Very Big
SOC					
Small		ON/MAX	ON/MAX	ON/MED	OFF
Medium		ON/MED	ON/MED	ON/LOW	OFF
Big		ON/LOW	OFF	OFF	OFF
Very Big		OFF	OFF	OFF	OFF

Πίνακας 5.6 Type155: Matlab

Number of Parameter		Description
1	MODE	Mode
2	NI	Number of inputs
3	NO	Number of outputs
4	CM	Calling Mode
5	SWITCH	Keep Matlab open after the end of simulation
Number of Input		Description
1	SOC	State Of Charge
2	F	Frequency of the microgrid [Hz]
3	W3	Emergency Water for 3 days [m ³]
Number of Output		Description
1	OP _{FC}	Fractional operation point of the Fuel Cell
2	OP _{EL}	Fractional operation point of the Electrolyzer
3	OP _{DS}	Fractional operation point of the Desalination Unit

5.4 Συνδυαστικό Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας με Δίκτυα Petri και Ασαφείς Γνωσιακούς Χάρτες

Το συνδυαστικό σύστημα Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών είναι το δεύτερο εξελιγμένο EMS που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε. Το PN χρησιμοποιείται για να προτείνει την εποπτική στρατηγική για τη διαχείριση της ενέργειας σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής. Το FPEMS παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 5.10 και αναλύεται στη συνέχεια.



Εικόνα 5.10 Σχεδιασμός του FPEMS

Το PN χρησιμοποιείται για να αποφασίσει για την κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου, ενώ 3 FCM χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την κατάσταση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης. Το FPEMS χρησιμοποιεί ως εισόδους τη συχνότητα του μικροδικτύου, το SOC και το διαθέσιμο νερό στη δεξαμενή του πόσιμου νερού.

Όπως και στο SEMS το νερό θεωρείται και εδώ ότι είναι το σημαντικότερο προϊόν του συστήματος. Για αυτό το FPEMS στοχεύει να έχει αρκετό πόσιμο νερό για 3 ημέρες. Αυτό είναι ένα μέτρο προστασίας σε περίπτωση βλάβης. Σε 3 ημέρες το μικροδίκτυο μπορεί να επισκευαστεί ή μπορούν να γίνουν συνεννοήσεις για μεταφορά νερού.

Η επιλογή της κατάστασης λειτουργίας βασίζεται σε ένα PN. Οι διαφορετικές καταστάσεις για την κίνηση από την μία κατάσταση στην άλλη εκφράζονται ως εξής:

t_1 : $SOC < SOCL$, όπου SOCL (SOC Low) είναι ένα σημείο SOC που από εκεί και κάτω η κυψέλη καυσίμου πρέπει να ενεργοποιηθεί.

t₂: SOC>SOCM, όπου SOCM (SOC Medium) είναι ένα σημείο SOC που από εκεί και πάνω μία ή και οι δύο καταναλώσεις (μονάδα ηλεκτρόλυσης και μονάδα αφαλάτωσης) πρέπει να ενεργοποιηθούν

t₃: W^{TANK}>W^{3D}, όπου W^{3D} είναι το νερό που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες για 3 ημέρες

t₄: W^{TANK}<W^{3D}

t₅: SOC>SOCL

t₆: (SOC<SOCM) OR (W^{TANK}<W^{3D})

t₇: (SOC<SOCM) OR (W^{TANK}>W^{3D})

Υπάρχουν 4 καταστάσεις που μπορούν να επιλεγούν, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 5.7.

Πίνακας 5.7 Καταστάσεις Δικτύου Petri

Mode	Fuel Cell	Desalination Unit	Electrolyzer	Remarks
1	OFF	OFF	OFF	-
2	Decided by FCM	OFF	OFF	-
3	OFF	Decided by FCM	Decided by FCM	Priority is given to the Electrolyzer
4	OFF	Decided by FCM	Decided by FCM	Priority is given to the Desalination Unit

Ο Πίνακας ροής για αυτό το Δίκτυο Petri έχει ως εξής:

$$FM = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Με αυτό τον Πίνακα και την Εξίσωση $M_k = M_{k-1} + FM^T u_k$ (EQ 21 μπορεί να μοντελοποιηθεί το Δίκτυο Petri. Για παράδειγμα αν το SOC είναι χαμηλότερα από το SOCL το PN επιλέγει να ενεργοποιήσει την Κατάσταση λειτουργίας 2.

Για τους FCM αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης με παράμετρο κλίσης ίση με 1. Αυτή η επιλογή έγινε γιατί δίνεται

γραμμικότητα στα αποτελέσματα και έτσι δεν υπάρχουν απότομες και μεγάλες μεταβολές με μικρή αλλαγή στις εισόδους.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα Εικόνα 5.10 οι Λειτουργικές Καταστάσεις 3 και 4 είναι ίδιες με τη διαφορά ότι ο Κόμβος 3 παίρνει τη θέση του 4 και αντίθετα, χωρίς να αλλάζει τίποτε άλλο. Λόγω αυτού η Λειτουργική Κατάσταση 3 δίνει προτεραιότητα στη μονάδα ηλεκτρόλυσης και η 4 στη μονάδα αφαλάτωσης. Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί το σύστημα έχοντας μόλις 4 βάρη να βελτιστοποιήσεις αντί για 8, ενώ οι απαιτήσεις της ενεργειακής διαχείρισης καλύπτονται.

Το FPEMS υλοποιήθηκε στο TRNSYS. Οι Είσοδοι, οι Έξοδοι και οι Παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 5.8 και ο πηγαίος κώδικας στο Παράρτημα II.

Πίνακας 5.8 Type196: FPEMS

Number of Parameter		Description
1	W_{Hour}	Hourly Water Consumption [m^3]
2	W14	W14
3	W23	W23
4	W24	W24
5	W13	W13
6	W25	W25
7	W15	W15
8	N	Number of iterations
9	SOCL	SOCL
10	SOCM	SOCM

Number of Input		Description
1	SOC	State Of Charge
2	F	Frequency of the microgrid [Hz]
3	W3	Emergency Water for 3 days [m^3]

Number of Output		Description
1	OP_{FC}	Fractional operation point of the Fuel Cell
2	OP_{EL}	Fractional operation point of the Electrolyzer
3	OP_{DS}	Fractional operation point of the Desalination Unit

6 Σύγκριση των προσεγγίσεων διαχείρισης ενέργειας

6.1 Παράμετροι της Μελέτης Περίπτωσης

Τα τρία EMS (SEMS, FLEMS και FPEMS) θα συγκριθούν άμεσα το ένα με το άλλο. Για να επιτευχθεί αυτό θα πραγματοποιηθεί μελέτη περίπτωσης και τα EMS θα συγκριθούν στη βάση του ποιο μπορεί να καλύψει πλήρως όλες τις ανάγκες παρουσιάζοντας ταυτόχρονα το μικρότερο κόστος.

Ένα αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής θα σχεδιαστεί με σκοπό την κάλυψη των αναγκών ενός πολύ μικρού οικισμού σε κάποιο νησάκι στις Κυκλάδες. Χρησιμοποιήθηκαν τυπικά μετεωρολογικά στοιχεία των Κυκλάδων. Ο μικρός οικισμός αποτελείται από 2 νοικοκυριά που είναι εξοπλισμένα με συσκευές υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας με 8 κατοίκους συνολικά. Τα προφίλ απαιτούμενης ισχύος προς κάλυψη παρουσιάζονται στους Πίνακες Πίνακας 6.1 και Πίνακας 6.2. Όλες οι συσκευές είναι ενεργειακής κλάσης A+. Για τις ανάγκες μαγειρέματος χρησιμοποιούνται επαγωγικές εστίες και ψηστήρα με αντιστάσεις (grill). Το ψυγείο και ο καταψύκτης θεωρούνται ότι είναι δύο πολύ χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης Steca PF 166, το ένα λειτουργώντας ως καταψύκτης και το άλλο ως ψυγείο. Για το φωτισμό χρησιμοποιούνται λαμπτήρες κρυσταλλοδιόδων LED με ονομαστική ισχύς 8 W έκαστος.

Για να αναπτυχθούν ρεαλιστικά ωριαία προφίλ καταναλώσεων σε ετήσια βάση, τα βασικά δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6.1. και Πίνακας 6.2 τυχαιοποιήθηκαν με την προσθήκη θορύβου. Αυτό έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου HOMER (ENERGY, 2011). Μιας και τα προφίλ φωτισμού και ψύξης/κατάψυξης βασίζονται στις συνθήκες περιβάλλοντος, θεωρούνται ότι είναι τα ίδια και για τα 2 σπίτια και έτσι χρησιμοποιήθηκε το ίδιο προφίλ. Για τις υπόλοιπες ενεργειακές καταναλώσεις προστέθηκε τυχαία μεταβλητότητα. Για το πρώτο σπίτι προστέθηκε 10% μεταβλητότητα μεταξύ των ημερών και 30% από ώρα σε ώρα. Για το δεύτερο σπίτι μια μεταβλητότητα 30% προστέθηκε μεταξύ των ημερών και 10% από ώρα σε ώρα. Κατά αυτό τον τρόπο τα συνθετικά προφίλ καταναλώσεων γίνονται πιο ρεαλιστικά.

Πίνακας 6.1 Προφίλ Κατανάλωσης Ισχύος κατά τους Χειμερινούς μήνες

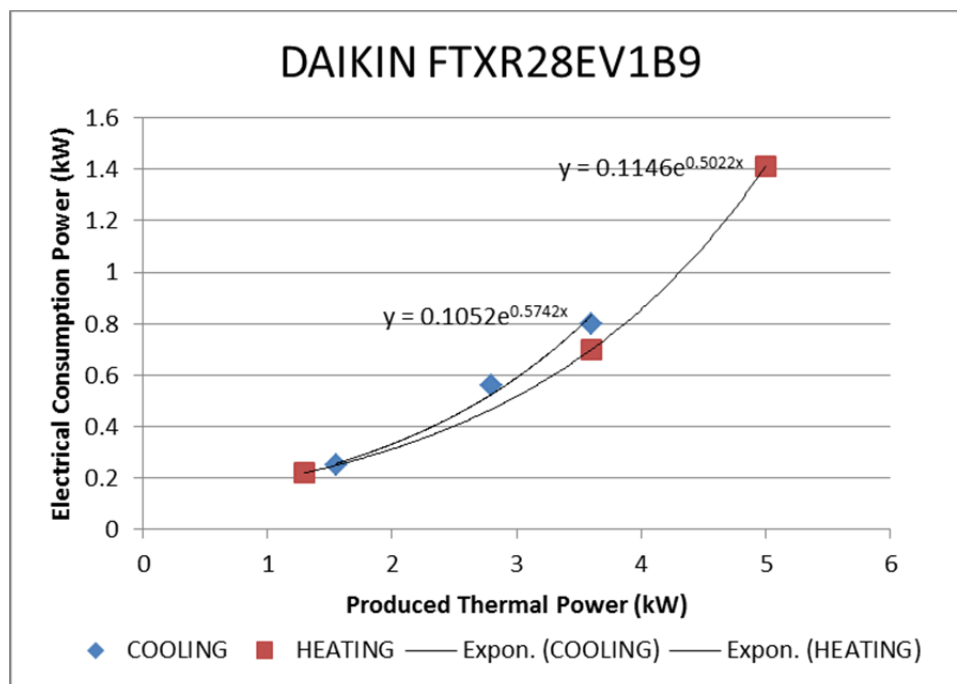
Power Consumption Profile (W) - Winter																								
Hours of the day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lighting	8	8	8	8	8	8	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	40	40	40	40	40	40	40	40
Cooking	-	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	1000	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-
TV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	90	90	90	90	-
Radio	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	2	2	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2
Laptop	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-	-	-	-	80	80	-	-	-	-
Refrigerator	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Freezer	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Various (Washing machine, dish washer etc)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	25	25	25	25	25	25	559	57	17	17	19	19	1019	187	517	17	57	59	727	227	147	147	147	59

Πίνακας 6.2 Προφίλ Κατανάλωσης Ισχύος κατά τους Θερινούς μήνες

Power Consumption Profile (W) - Summer																								
Hours of the day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lighting	8	8	8	8	8	8	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	40	40	40	40	40
Cooking	-	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	1000	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-
TV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	-	-	-	90	90	90	90	90	-
Radio	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	2	2	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2
Laptop	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-	-	-	-	80	80	-	-	-	-
Refrigerator	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Freezer	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Various (Washing machine, dish washer etc)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	58	58	58	58	58	58	592	90	50	50	52	52	1052	220	550	50	50	52	760	260	180	180	180	92

Τα σπίτια έχουν προσομοιωθεί στο TRNSYS σαν ενιαίο χώρο 48 m². Υπάρχει από ένα παράθυρο σε κάθε τοίχο και μια πόρτα στον νότιο τοίχο. Χρησιμοποιήθηκαν τυπικά δομικά στοιχεία που εφαρμόζονται στην Ελλάδα. Για το απόγευμα και βράδυ θεωρείται ότι όλοι οι κάτοικοι βρίσκονται εντός της οικίας, ενώ από το πρωί μέχρι το μεσημέρι μόνο ένας. Το αρχείο BUI που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει στο Παράρτημα 4. Η προσομοίωση των σπιτιών πραγματοποιήθηκε μόνο για να μπορέσει να υπολογιστεί η απαιτούμενη θερμική και ψυκτική ισχύς από την αντλία θερμότητας αέρα-αέρα. Η αντλία θερμότητας που επιλέχθηκε είναι η Daikin FTXR28EV1B9, η οποία είναι εξοπλισμένη με αναστροφέα (inverter) επιτρέποντας λειτουργία σε μερικό φορτίο και έχει COP ίσο με 5.14. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στην Εικόνα

Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα

Οι 8 κάτοικοι καταναλώνουν 1.92 m³ πόσιμου νερού σε καθημερινή βάση για να καλύψουν όλες τις ανάγκες τους (πόση, προσωπική καθαριότητα, πλύσιμο ρούχων και μαγείρεμα). Δύο υβριδικά σκούτερ χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των τοπικών αναγκών για μετακινήσεις όλων των κατοίκων. Αυτά τα 2 σκούτερ θεωρείται ότι καλύπτουν συνολικά κατά μέσο όρο 50 km ημερησίως και η

αναλογούσα κατανάλωση καυσίμου θεωρείται ότι είναι $2.4 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$. Τα σκούτερ ανεφοδιάζονται καθημερινά το απόγευμα. Το βήμα της προσομοίωσης είναι ίσο με 1 ώρα.

6.2 Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης

Αποφασίστηκε ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός θα ήταν αυτός με το χαμηλότερο παρόν κόστος για 20ετή ορίζοντα, ο οποίος ταυτόχρονα θα κάλυπτε τους τεχνικούς περιορισμούς. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς είναι σε ακολουθία με τις τιμές της αγοράς.

Οι τέσσερις τεχνικοί περιορισμοί είναι:

- Δεν επιτρέπεται βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών. Το SOC δεν πέφτει ποτέ κάτω από το 20%.
- Δεν επιτρέπεται καθόλου έλλειμμα νερού. Αυτό μεταφράζεται στο ότι ποτέ δεν αδειάζει τελείως η δεξαμενή πόσιμου νερού.
- Δεν επιτρέπεται καθόλου έλλειμμα υδρογόνου. Αυτό μεταφράζεται στο ότι ποτέ δεν αδειάζει τελείως η δεξαμενή υδρογόνου.
- Το αποθηκευμένο νερό και το αποθηκευμένο υδρογόνο στο τέλος του έτους είναι ίσο ή υψηλότερο με τις αποθηκευμένες ποσότητες στην αρχή του έτους.

Ο υπολογισμός των ποινών παρουσιάζεται στην Εικόνα

Εικόνα 6.2 και πρακτικά οι ποινές είναι είτε μηδενικές είτε μια πολύ μεγάλη τιμή ώστε να μπορεί να γίνει εύκολα η απόρριψή τους κατά τη βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση κόστους (CF1) που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και διαστασιολόγηση των μικροδικτύων παρουσιάζεται στην

$$CF1 = NPC + \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_w(t) + P_s \quad (\text{EQ 24.})$$

$$CF1 = NPC + \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_w(t) + P_s \quad (\text{EQ 24})$$

Όπου:

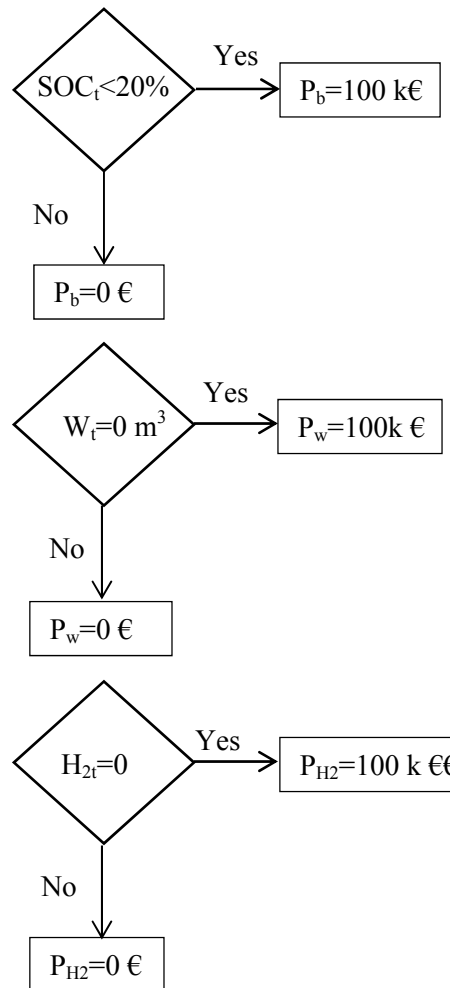
NPC: Καθαρό Παρόν Κόστος για 20ετή ορίζοντα

P_b : Ποινή συσσωρευτή.

P_{H_2} : Ποινή υδρογόνου.

P_w : Ποινή νερού.

P_S : Ποινή δεξαμενών. Αν το αποθηκευμένο νερό ή/και υδρογόνο στο τέλος του έτους είναι λιγότερο από την τιμή στην αρχή του έτους προστίθεται ένα μεγάλο ποσό.



Εικόνα 6.2 Υπολογισμός Ποινών

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση EQ 24 πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός των μικροδικτύων που βασίζονται στο SEMS και το FLEMS. Για το μικροδίκτυο που βασιζόμαστε στο SEMS δεν είναι εφικτή καμία άλλη βελτιστοποίηση. Για το μικροδίκτυο που βασίζεται στο FLEMS θεωρητικά μπορεί να υπάρξει περαιτέρω βελτιστοποίηση όσο αφορά τις παραμέτρους του συστήματος ασαφούς λογικής. Ο αριθμός των μεταβλητών προς βελτιστοποίηση είναι της τάξης του 150, που είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός. Κάθε συνάρτηση συμμετοχής απαιτεί τουλάχιστον 3 αριθμούς (για τριγωνική συνάρτηση) και κάθε εισόδος ή έξοδος περιγράφεται από τουλάχιστον 3 συναρτήσεις συμμετοχής. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα συστήματα

ασαφούς λογικής που απαρτίζουν το FLEMS καταλήγουμε στον ανωτέρω αριθμό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί επίσης όπως θα φανεί μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων πως ο υπολογιστικός χρόνος που θα απαιτούνταν για τη βελτιστοποίηση 150 μεταβλητών είναι απαγορευτικός. Αυτοί είναι οι λόγοι που δεν έγινε περαιτέρω βελτιστοποίηση για το FLEMS.

Από την άλλη πλευρά το FPEMS μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω, μιας και ο αριθμός των μεταβλητών είναι μικρός - μόλις 8. Αυτός περιλαμβάνει τις παραμέτρους των μεταβάσεων του PN και τα βάρη του FCM. Ακόμη και αυτή η βελτιστοποίηση είναι περίπλοκη γιατί η βελτιστοποίησή τους πρέπει να γίνει ταυτόχρονα και διαδραστικά με τη διαστασιολόγηση των διαφόρων συσκευών του μικροδικτύου. Η μεθοδολογική προσέγγιση που υλοποιήθηκε για να αντιμετωπιστεί αυτή η πραγματικότητα αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Ο μηχανικός γνώσης και οι εμπειρογνώμονες αποφασίζουν για τις μεθόδους ασαφοποίησης και αποασαφοποίησης καθώς και για τα αρχικά βάρη του FCM και τις παραμέτρους μετάβασης του PN.

2. Το μικροδίκτυο διαστασιολογείται χρησιμοποιώντας PSO βασισμένο στα αποτελέσματα του 1^{ου} βήματος.

3. Τα βάρη του FCM και οι παράμετροι μετάβασης του PN βελτιστοποιούνται στη βάση της διαστασιολόγησης του βήματος 2 χρησιμοποιώντας πάλι PSO.

4. Τέλος μια καινούργια διαστασιολόγηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους για τα βάρη του FCM και τις παραμέτρους μετάβασης του PN που υπολογίστηκαν στο βήμα 3.

Οι βελτιστοποιήσεις που λαμβάνουν χώρα στα Βήματα 3 και 4

χρησιμοποιούν την εξίσωση

$$CF1 = NPC + \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_w(t) + P_s$$

(EQ 24. Για την βελτιστοποίηση όμως που λαμβάνει χώρα στο βήμα 3 για τα βάρη του FCM και τις παραμέτρους μετάβασης του PN τεχνικοί περιορισμοί συνεχίζουν να υπάρχουν. Σε αυτή την περίπτωση καταγράφονται το ελάχιστο SOC, το ελάχιστο αποθηκευμένο H₂ και το ελάχιστο αποθηκευμένο νερό στη διάρκεια του έτους. Αυτές οι τιμές κανονικοποιούνται στη συνέχεια στο διάστημα [0,1] και

προστίθενται. Επειδή ο αλγόριθμος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την συνάρτηση κόστους, αυτό το άθροισμα αφαιρείται από τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το άθροισμα ώστε τελικά το καλύτερο σύστημα να πάρει την ελάχιστη τιμή στην συνάρτηση κόστους. Αυτό παρουσιάζεται στην εξίσωση

$$OPTP = (100 - SOC^{MIN}) \times 100 + \left(1 - \left(\frac{H_2^{MIN}}{H_2^{TANK}} \right) \right) \times 10000 + \left(1 - \left(\frac{W^{MIN}}{W^{TANK}} \right) \right) \times 10000 \quad (EQ \ 25)$$

Ο συνδυασμός των βαρών του FCM και των παραμέτρων μετάβασης του PN που παρουσιάζουν την χαμηλότερη τιμή στην εξίσωση

$$CF \ 2 = OPTP + \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_w(t) + P_s \quad (EQ \ 26 \ \text{είναι ο βέλτιστος.})$$

$$OPTP = (100 - SOC^{MIN}) \times 100 + \left(1 - \left(\frac{H_2^{MIN}}{H_2^{TANK}} \right) \right) \times 10000 + \left(1 - \left(\frac{W^{MIN}}{W^{TANK}} \right) \right) \times 10000 \quad (EQ \ 25)$$

$$CF \ 2 = OPTP + \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{t=1}^{8760} P_w(t) + P_s \quad (EQ \ 26)$$

Where:

NPC: Καθαρό Παρόν Κόστος για 20ετή ορίζοντα

P_b : Ποινή συσσωρευτή.

P_{H_2} : Ποινή υδρογόνου.

P_w : Ποινή νερού.

P_s : Ποινή δεξαμενών. Αν το αποθηκευμένο νερό ή/και υδρογόνο στο τέλος του έτους είναι λιγότερο από την τιμή στην αρχή του έτους προστίθεται ένα μεγάλο ποσό.

SOC^{MIN} : Το ελάχιστο SOC στη διάρκεια του έτους

H_2^{MIN} : Η ελάχιστη ποσότητα υδρογόνου στη δεξαμενή υδρογόνου στη διάρκεια του έτους

H_2^{TANK} : Ο όγκος της δεξαμενής υδρογόνου

W^{MIN} : Η ελάχιστη ποσότητα νερού στη δεξαμενή νερού στη διάρκεια του έτους

W^{TANK} : Ο όγκος της δεξαμενής πόσιμου νερού

Οι βελτιστοποιήσεις πραγματοποιούνται με το λογισμικό πακέτο GenOpt. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος PSO. Οι παράμετροι που έχουν προταθεί από Parageorgiou et al (Parageorgiou, Parsopoulos et al., 2005) χρησιμοποιούνται για όλες τις βελτιστοποιήσεις και παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6.3.

Πίνακας 6.3 Παράμετροι PSO

βελτιστο	lbest
Neighborhood size	3
Particles	20
Generations	100
Seed	0
Cognitive acceleration constant	2.05
Social acceleration constant	2.05
Constriction gain	0.729

6.3 Βελτιστοποιήσεις

6.3.1 Οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση

Για όλα τα συστήματα οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση είναι:

1. Ο αριθμός των Φ/Β πάνελ. Χρησιμοποιούνται πάνελ Solar world Sunmodule SW 180 τοποθετημένα σε ηλιοστάτη 1 άξονα (ρύθμιση αζιμούθιου).
2. Ονομαστική ισχύς κυψέλης καυσίμου
3. Ονομαστική ισχύς μονάδος ηλεκτρόλυσης
4. Ονομαστική ισχύς μονάδος αφαλάτωσης
5. Όγκος δοχείου μεταλλικών υδριδίων για αποθήκευση υδρογόνου
6. Όγκος δεξαμενής πόσιμου νερού
7. Ενεργειακή χωρητικότητα του συσσωρευτή

Χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μια τυπική ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος ονομαστικής ισχύος 7.5 kW (Bergey XL-R 7.5 kW) σε ιστό ύψους 16 m. Τα οικονομικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του καθαρού παρόντος κόστους παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6.4. Οι τιμές είναι όλες ανάλογες με εμπορικές τιμές. Το επιτόκιο λήφθηκε ίσο με 6%. Οι συσσωρευτές θεωρείται ότι αντικαθίστανται δύο φορές στην 20ετία. Οι ελάχιστες

και μέγιστες τιμές για κάθε μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκαν στις βελτιστοποιήσεις αποφασίστηκαν στη βάση ενός αριθμού προκαταρκτικών δοκιμών.

Πίνακας 6.4 Τιμές για υπολογισμό του NPC

Variable	Value (€)	Unit
PV Modules (price includes the price of the inverter)	700	Per panel
Fuel Cell	5	Per Watt
Electrolyzer Unit	8	Per Watt
Hydrogen Storage tank	1000	Per Nm ³ of H ₂
PoΠίνακας Water Tank Volume (m ³)	60	Per m ³
Desalination Unit (W)	10	Per Watt
Battery bank	12	Per Watt-hour of each of the 2 V batteries

6.3.2 Σύστημα διαχείρισης της ενέργειας ON-OFF (SEMS)

Ο ερευνητικός χώρος για το βέλτιστο μικροδίκτυο που χρησιμοποιεί την προσέγγιση SEMS παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.5. Οι ανώτερες και κατώτερες τιμές αποφασίστηκαν στη βάση εμπορικής διαθεσιμότητας και μερικών δοκιμαστικών προσομοιώσεων. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αν ο συσσωρευτής δεχθεί πλήρη εκφόρτιση ο αναστροφέας που δημιουργεί το δίκτυο θα χάσει τη δυνατότητα αυτή. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση οι αναστροφείς των φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας δεν θα τροφοδοτούν το μικροδίκτυο με ισχύ αφού δεν θα μπορούν να συγχρονιστούν με αυτό. Οι εταιρίες που προσφέρουν αυτού του είδους τους αναστροφείς προτείνουν την ύπαρξη μιας εξωτερικής γεννήτριας ρεύματος (συνήθως πετρελαίου) ώστε αυτή να μπορεί το μικροδίκτυο να γίνει και πάλι λειτουργικό. Η κυψέλη καυσίμου παίζει και αυτό το ρόλο μιας και είναι μια εφεδρική ενεργειακή πηγή για το σύστημα. Για αυτό το λόγο η ελάχιστη ισχύς της είναι 300 W. Οι πιθανοί συνδυασμοί μικροδικτύων είναι 18195840. Η διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγόριθμου PSO έχει αμελητέα

χρονική διάρκεια σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Μια ετήσια προσομοίωση απαιτεί 2-3 δευτερόλεπτα και για τις παραμέτρους του PSO που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκαν 1999 προσομοιώσεις. Ο βέλτιστος συνδυασμός παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.5.

Πίνακας 6.5 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το SEMS

Variable	Lowest Value	Highest Value	Step	Optimal Value
PV Modules	35	50	1	35
Rated Power of the Fuel Cell (W)	300	800	100	700
Rated Power of the Electrolyzer Unit (W)	600	1400	100	1400
Hydrogen Storage Capacity (Nm ³ of H ₂)	8	15	0.5	14.5
PoΠίνακας Water Tank Capacity (m ³)	30	50	1	50
Rated Power of the Desalination Unit (W)	600	1400	100	1000
Energy Capacity rating of each of the 2 V batteries. 24 are used for a 48 V DC bus (Wh)	400,500,600, 700, 840, 980, 1200,1400,1600,2000,2400,3000			840

6.3.3 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας ασαφούς λογικής (FLEMS)

Ο ερευνητικός χώρος για το βέλτιστο μικροδίκτυο που αξιοποιεί την ασαφή λογική παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.6. Οι πιθανοί συνδυασμοί μικροδικτύων είναι 9676800. Η διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγόριθμου PSO έχει αμελητέα χρονική διάρκεια σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Μια ετήσια προσομοίωση απαιτεί περίπου 60 δευτερόλεπτα και για τις παραμέτρους του PSO που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκαν 1999 προσομοιώσεις. Ο χρόνος είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σύγκριση με τη βελτιστοποίηση του SEMS. Αυτό συμβαίνει για το FLEMS υλοποιήθηκε στο Matlab. Η επικοινωνία μεταξύ TRNSYS και Matlab λειτουργεί απροβλημάτιστα, αλλά παρατηρείται χρονική καθυστέρηση λόγω της συνεχούς μετάδοσης και λήψης δεδομένων από τα δύο λογισμικά πακέτα. Ο βέλτιστος συνδυασμός παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.6.

Πίνακας 6.6 Μεταβλητές βελτιστοποίησης του FLEMS

Variable	Lowest Value	Highest Value	Step	Optimal Value
----------	--------------	---------------	------	---------------

PV Modules	35	48	1	36
Rated Power of the Fuel Cell (W)	300	800	100	300
Rated Power of the Electrolyzer Unit (W)	700	1400	100	1000
Hydrogen Storage Capacity (Nm ³ of H ₂)	8	15	0.5	12
PoΠίνιακας Water Tank Capacity (m ³)	35	50	1	32
Rated Power of the Desalination Unit (W)	500	1000	100	900
Energy Capacity rating of each of the 2 V batteries. 24 are used for a 48 V DC bus (Wh)	400,500,600, 700, 840, 980, 1200,1400,1600,2000			400

6.3.4 Συνδυασμένη προσέγγιση Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών (FPEMS)

6.3.4.1 Βήμα 1

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο **Error! Reference source not found.** η βελτιστοποίηση για το FPEMS λαμβάνει χώρα σε 4 βήματα.

Για να τεθούν τα αρχικά βάρη των FCM και των παραμέτρων του PN απαιτείται η γνώση ειδικών. Υπάρχουν λίγοι ειδικοί πάνω στην συγκεκριμένη τοπολογία λόγω της καινοτομίας της. Χρησιμοποιήθηκε η γνώμη του συγγραφέα αυτής της διατριβής, του Καθ. Γ. Παπαδάκη (προσωπική επικοινωνία 17/05/2011), του Αναπλ. Καθ. Κ. Αρβανίτη (προσωπική επικοινωνία 17/05/2011) και του Αναπλ. Καθ. Α. Ντούνη (προσωπική επικοινωνία 17/05/2011). Πρώτα αποτυπώθηκε η γνώμη των ειδικών σε σχέση με τις 2 παραμέτρους των μεταβάσεων του PN (SOCL και SOCM) και παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.7 Παράμετροι και βάρη του FPEMS, μαζί με τις γλωσσικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν. Συμφωνήθηκε από όλους όσο αφορά τα βάρη των FCM αν έχουν θετική ή αρνητική επίπτωση. Η γνώμη των ειδικών παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.7 Παράμετροι και βάρη του FPEMS, μαζί με τις γλωσσικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν. Χρησιμοποιώντας την κεντρική μέθοδο αποασαφοποίησης οι γλωσσικές μεταβλητές μετατρέπονται σε αριθμητικές τιμές (Jang, Sun et al., 1997). Αυτές παρουσιάζονται επίσης στην τελευταία στήλη του Στις Εικόνες Εικόνα 6.3, Εικόνα 6.4, Εικόνα 6.5 και Εικόνα 6.6 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για την ασαφοποίηση. Οι αρχικές τιμές των βαρών των FCM και των παραμέτρων του PN παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.7 Παράμετροι και βάρη του FPEMS.

Πίνακας 6.7 Παράμετροι και βάρη του FPMS

Variable	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Defuzzified Value
SOCL	M	VL	L	B	25
SOCM	VB	B	M	B	59
W_{15}	EB	EB	EB	EB	0.96
W_{25}	VB	RB	VB	B	0.75
W_{13}	VL	L	RL	L	-0.75
W_{14}	EL	VL	VL	EL	-0.90
W_{23}	EB	EB	EB	EB	0.96
W_{24}	EB	B	B	EB	0.82

Where:

EL: Extremely Low

EB: Extremely Big

VL: Very Low

VB: Very Big

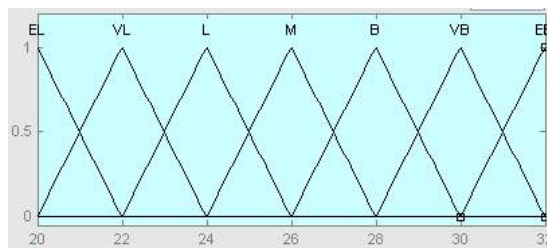
L: Low

B: Big

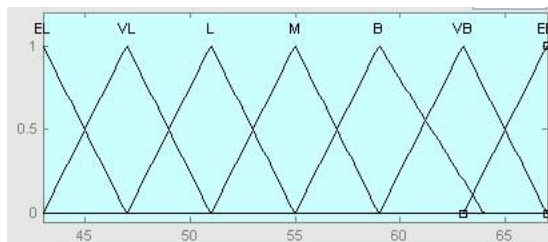
RL: Relatively Low

RB: Relatively Big

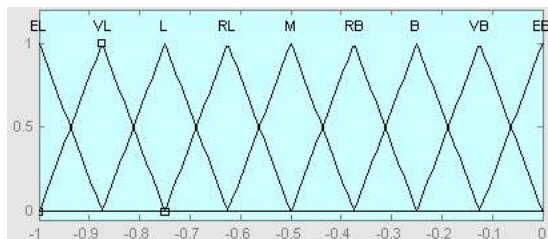
M: Medium



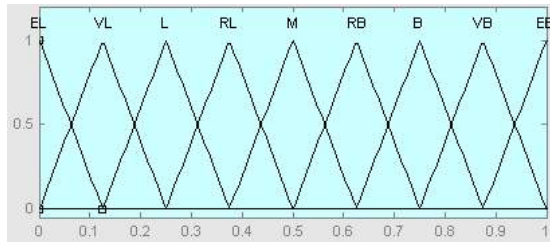
Εικόνα 6.3 Συναρτήσεις συμμετοχής του SOCL



Εικόνα 6.4 Συναρτήσεις συμμετοχής του SOCM



Εικόνα 6.5 Συναρτήσεις συμμετοχής για αρνητικά βάρη του FCM

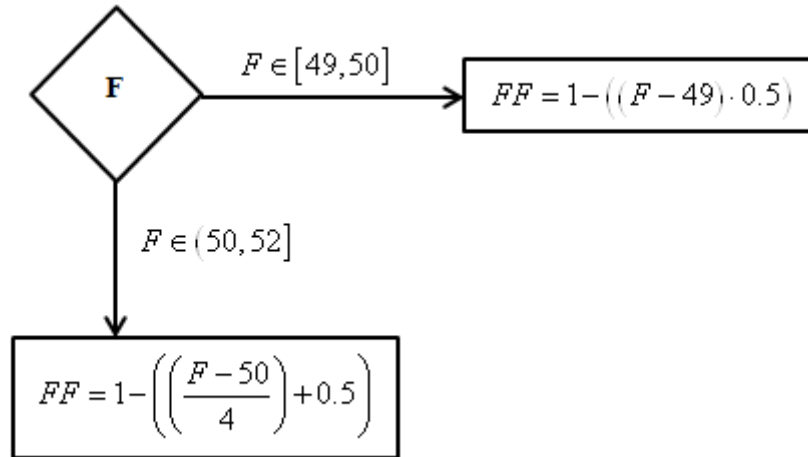


Εικόνα 6.6 Συναρτήσεις συμμετοχής για θετικά βάρη του FCM

Η μέθοδος ασαφοποίησης για τις εισόδους του FCM συμφωνήθηκε να είναι ως ακολούθως:

- Συχνότητα (F)

Το μοντελοποιημένο μικροδίκτυο βασίζεται ηλεκτρολογικά στην τοπολογία Sunny Island της εταιρίας SMA. Σε αυτή την τοπολογία η συχνότητα του μικροδικτύου χρησιμοποιείται για τον έλεγχο όλων των διασυνδεδεμένων αναστροφέων. Αν ο αναστροφέας που διαμορφώνει το δίκτυο αναγνωρίσει ότι ο συσσωρευτής πλησιάζει την πλήρη φόρτιση αρχίζει να αυξάνει τη συχνότητα του μικροδικτύου από τα 50 Hz στα 52 Hz με σκοπό να προστατεύσει τον συσσωρευτή από υπερφόρτιση. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί όταν οι διασυνδεδεμένοι αναστροφείς των παραγωγών (Φ/Β, ανεμογεννήτρια κλπ) αναγνωρίσουν αυξημένη συχνότητα αρχίζουν να μειώνουν την τροφοδοτούμενη ενέργεια στο μικροδίκτυο μέχρι τον μηδενισμό της παροχής όταν η συχνότητα φτάσει τα 52 Hz. Όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στο μικροδίκτυο η συχνότητα μειώνεται μέχρι τα 49 Hz (Engler, Meinhardt et al., 2004). Η ασαφοποίηση της συχνότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 6.7, όπου FF είναι η ασαφοποιημένη συχνότητα. Και για τις δύο διακριτές καταστάσεις ($F \in [49,50]$ και $F \in (50,52]$) η τιμή κανονικοποιείται στο διάστημα $[0,1]$.



Εικόνα 6.7 Ασαφοποίηση της συχνότητας

- SOC

Λόγω των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών κυρίως στην Κατάσταση 2 σε σύγκριση με τις Καταστάσεις 3 και 4, υλοποιήθηκαν 2 προσεγγίσεις.

- Κατάσταση 2

Η ασαφοποίηση του SOC στο διάστημα [0,1] για την Κατάσταση 2 παρουσιάζεται στην εξίσωση EQ 27.

$$FSOC = \frac{SOCL - SOC}{SOCL} \quad (EQ\ 27)$$

Όπου FSOC είναι το ασαφοποιημένο SOC

- Καταστάσεις 3 και 4

Η ασαφοποίηση του SOC στο διάστημα [0,1] για τις Καταστάσεις 3 και 4 παρουσιάζονται στην εξίσωση EQ 28.

$$FSOC = \frac{SOC - SOCM}{100 - SOCM} \quad (EQ\ 28)$$

Μιας και η έξοδος του FPEMS αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας των συσκευών η έξοδος πρέπει να είναι στο διάστημα [0,100]. Η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται με παράμετρο κλίσης ίση με 1 δίνει αποτέλεσμα στο διάστημα (0,1). Οι ελάχιστες και μέγιστες θεωρητικές τιμές

των αποτελεσμάτων που βασίζονται στα βάρη μπορούν να κυμαίνονται μακριά από τις οριακές τιμές 0 και 1. Η ασαφοποίηση συνεπώς πρέπει να κανονικοποιεί και τις τιμές στο διάστημα [0,100]. Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις

$$A_i(k+1) = f \left(A_i(k) + \sum_{j=1}^n W_{ji} A_j(k) \right) \quad (\text{EQ 15} \text{ και} \quad f(x) = \frac{1}{1 + e^{-cx}} \quad (\text{EQ 16, μπορούν να$$

υπολογιστούν η μέγιστη και ελάχιστη θεωρητική τιμή του FCM για όποια ομάδα βαρών. Στη βάση αυτού διαμορφώνονται οι εξισώσεις κανονικοποίησης EQ 29, EQ 30 και EQ 31:

$$OP_{FC} = 100 \cdot \frac{C_5 - FCL}{FCH - FCL} \quad (\text{EQ 29})$$

Όπου:

OP_{FC} : Σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου

FCL: είναι η τιμή του C_5 για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να απενεργοποιήσει την κυψέλη καυσίμου, δηλαδή FF=0 και FSOC=0

FCH: είναι η τιμή του C_5 για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να ενεργοποιήσει πλήρως την κυψέλη καυσίμου, δηλαδή FF=1 και FSOC=1

$$OP_{EL} = 100 \cdot \frac{C_3 - ELL}{ELH - ELL} \quad (\text{EQ 30})$$

Όπου:

OP_{EL} : Σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης

ELL: είναι η τιμή του C_3 για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να απενεργοποιήσει την μονάδα ηλεκτρόλυσης, δηλαδή FF=1 και FSOC=0

ELH: είναι η τιμή του C_3 για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να ενεργοποιήσει πλήρως την μονάδα ηλεκτρόλυσης δηλαδή FF=0 και FSOC=1

$$OP_{DS} = 100 \cdot \frac{C_4 - DSL}{DSH - DSL} \quad (\text{EQ 31})$$

Where:

OP_{DS}: Σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης

DSL: είναι η τιμή του C₄ για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να απενεργοποιήσει την μονάδα αφαλάτωσης, δηλαδή FF=0 και FSOC=1

DSH: είναι η τιμή του C₄ για το συνδυασμό Συχνότητας και SOC ο οποίος πρέπει να ενεργοποιήσει πλήρως την μονάδα αφαλάτωσης δηλαδή FF=1 και FSOC=1

Λόγω τεχνικών περιορισμών αν κάποια κατάσταση λειτουργίας των συσκευών υπολογιστεί κάτω του 30%, οι συσκευές παραμένουν απενεργοποιημένες.

6.3.4.2 Βήμα 2

Ο ερευνητικός χώρος για το βέλτιστο μικροδίκτυο που αξιοποιεί την συνδυασμένη προσέγγιση Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.8. Οι πιθανοί συνδυασμοί συσκευών του μικροδικτύου είναι 96768000. Η διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης του PSO είναι αμελητέα σε σχέση με το χρόνο που απαιτείται για τις προσομοιώσεις που πρέπει να ολοκληρωθούν. Μια ετήσια προσομοίωση απαιτεί 2-3 δευτερόλεπτα και για τις παραμέτρους του PSO πραγματοποιήθηκαν 1999 προσομοιώσεις. Ο βέλτιστος συνδυασμός παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.8.

Πίνακας 6.8 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το Βήμα 2 του FPEMS

Variable	Lowest Value	Highest Value	Step	Optimal Value
PV Modules	28	40	1	32
Rated Power of the Fuel Cell (W)	300	800	100	300
Rated Power of the Electrolyzer Unit (W)	700	1400	100	1000
Hydrogen Storage Capacity (Nm ³ of H ₂)	8	15	0.5	12
PoΠίνακας Water Tank Capacity (m ³)	30	50	1	49
Rated Power of the Desalination Unit (W)	500	1000	100	700
Energy Capacity rating of each of the 2 V batteries. 24 are used for a 48 V DC bus (Wh)	400,500,600, 700, 840, 980, 1200,1400,1600,2000			500

6.3.4.3 Βήμα 3

Στο βήμα 3 πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση των βαρών του FCM και των παραμέτρων του δικτύου Petri. Ο ερευνητικός χώρος παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.9. Στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.9 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές.

Πίνακας 6.9 Βελτιστοποίηση Μεταβλητών Βήματος 3 του FPEMS

Variable	Lowest Value	Highest Value	Step	Optimal Value
SOCL	22	35	1	30
SOCM	45	65	1	49
W_{15}	0	1	0.01	0.76
W_{25}	0	1	0.01	0.18
W_{13}	-1	0	0.01	-0.76
W_{14}	-1	0	0.01	-0.98
W_{23}	0	1	0.01	0.32
W_{24}	0	1	0.01	0.50

6.3.4.4 Βήμα 4

Ο ερευνητικός χώρος του τελευταίου βήματος της βελτιστοποίησης του FPEMS παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 6.10. Οι πιθανοί συνδυασμοί συσκευών ανέρχονται σε 519750. Οι βέλτιστες τιμές παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα Πίνακας 6.10.

Πίνακας 6.10 Μεταβλητές βελτιστοποίησης για το Βήμα 4 του FPEMS

Variable	Lowest Value	Highest Value	Step	Optimal Value
PV Modules	28	36	1	29
Rated Power of the Fuel Cell (W)	300	500	100	400
Rated Power of the Electrolyzer Unit (W)	700	1200	100	1000
Hydrogen Storage Capacity (Nm ³ of H ₂)	8	15	0.5	11.5
PoΠίνακας Water Tank Capacity (m ³)	35	50	1	41
Rated Power of the Desalination Unit (W)	600	1000	100	700
Energy Capacity rating of each of the 2 V batteries. 24 are used for a 48 V DC bus (Wh)	400,500,600, 700, 840			600

6.4 Σύγκριση των διαφορετικών Συστημάτων Διαχείρισης της Ενέργειας

Οι βέλτιστοι σχεδιασμοί για κάθε ένα από τα τρία συστήματα διαχείρισης της ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 6.11 Συγκρίσεις των διαφορετικών EMS.

Πίνακας 6.11 Συγκρίσεις των διαφορετικών EMS

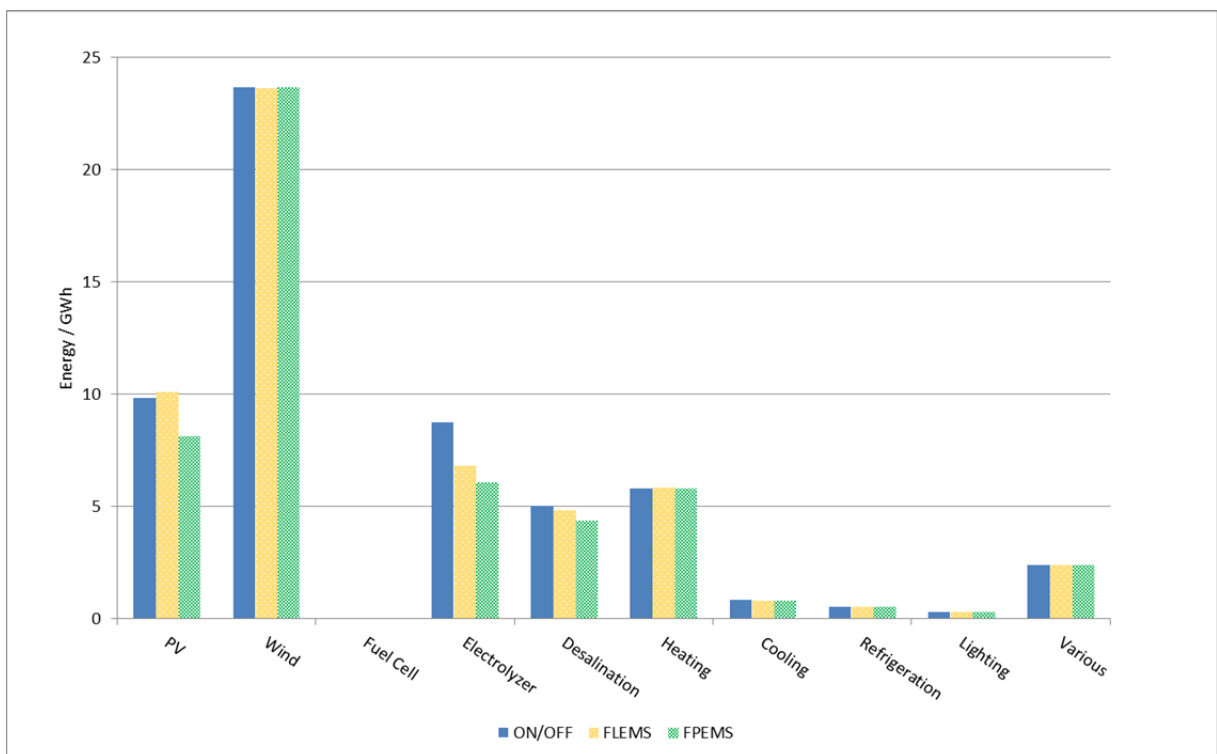
EMS	SEMS	FLEMS	FPMS
Installed PV power (Wp)	6300	6480	5220
Rated Power of the Fuel Cell (W)	700	300	400
Rated Power of the Electrolyzer Unit (W)	1400	1000	1000
Hydrogen Storage Capacity (Nm ³ of H ₂)	14.5	12	11.5
PoΠίνακας Water Tank Capacity (m ³)	50	32	41
Rated Power of the Desalination Unit (W)	1000	900	700
Energy Capacity rating of each of the 2 V batteries. 24 are used for a 48 V DC bus (Wh)	840	400	600
Net Present Cost (€)	106824	86617	85314

Είναι φανερό ότι η λειτουργία σε μερικό φορτίο της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης μπορούν να ωφελήσουν το μικροδίκτυο έως περίπου 20% στο Καθαρό Παρόν Κόστος για αυτή τη μελέτη περίπτωσης. Και η προσέγγιση της Ασαφους Λογικής, όσο και η συνδυασμένη προσέγγιση Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών και Δικτύων Petri διαχειρίζονται το μικροδίκτυο πιο αποδοτικά, κυρίως επειδή επιτρέπουν λειτουργία σε μερικό φορτίο των διαφόρων συσκευών. Το FLEMS κατόρθωσε να μειώσει τα εγκατεστημένα μεγέθη της κυψέλης καυσίμου, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της μονάδας αφαλάτωσης, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα και τη μείωση του μεγέθους του συσσωρευτή. Συνοψίζοντας το FLEMS πέτυχε μείωση του Καθαρού Παρόντος Κόστους κατά 20%. Το FPMS ακόμη και με μη βελτιστοποιημένα βάρη του FCM και παραμέτρους του PN κατάφερε να δώσει ένα οριακά οικονομικότερο σύστημα από το FLEMS. Στο τέλος του Βήματος 4 έγινε φανερή μια σαφής μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών. Η δεξαμενή του αφαλατωμένου νερού είναι το οικονομικότερο υποσύστημα του μικροδικτύου. Λόγω της καλύτερης διαχείρισης της μονάδος αφαλάτωσης η εγκατεστημένη ισχύς της μειώνεται στα 700 W και επιλέγεται μια μεγαλύτερη δεξαμενή αφαλατωμένου νερού με μικρότερο κόστος από τις άλλες προσεγγίσεις. Η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι μεγαλύτερη από το FLEMS, αλλά σημαντικά μικρότερη από το

SEMS. Το Καθαρό Παρόν Κόστος έχει μειωθεί στα 85314 €. Όσο αφορά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε από το FLEMS ήταν ίσος με 37 ώρες σε ένα τυπικό Η/Υ (Επεξεργαστής 3 GHz, 4 GB ram και Windows XP). Αυτή η μεγάλη χρονική διάρκεια ήταν το αποτέλεσμα της σύνδεσης δύο διαφορετικών λογισμικών πακέτων του TRNSYS και του Matlab. Θεωρητικά μια νέα ρουτίνα θα μπορούσε να αναπτυχθεί στο TRNSYS για ασαφή λογική, αλλά αυτή θα έχανε τη διαισθητική επιφάνεια διάδρασης του χρήστη που έχει το Fuzzy Logic toolkit του Matlab, η οποία προσφέρει τις επιφάνειες ελέγχου για τη ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί η περεταίρω βελτιστοποίηση του FLEMS μπορεί θεωρητικά να επιτευχθεί, αλλά η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση 150 μεταβλητών είναι πολύ περίπλοκη και λίγα λογισμικά πακέτα επιτρέπουν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση ενός τόσο μεγάλου αριθμού μεταβλητών. Από την άλλη πλευρά το FPEMS έχει σημαντικά λιγότερες μεταβλητές για βελτιστοποίηση. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε η βελτιστοποίηση των βαρών του FCM και των παραμέτρων του Δικτύου Petri. Κάθε ένα από τα Βήματα 2, 3 και 4 απαιτούν περίπου 4 ώρες για να ολοκληρωθούν, με συνολικό χρόνο βελτιστοποίησης περί των 12 ωρών. Επίσης, επειδή η βελτιστοποίηση λαμβάνει χώρα σε διακριτά βήματα, δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί σε 12 συνεχόμενες ώρες. Η βελτιστοποίηση των μεταβλητών είναι σημαντική, γιατί χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση δεν απαιτούνται ιστορικά δεδομένα ή μεγάλη εμπειρία σε τέτοια συστήματα ακόμη και αν τα αρχικά βάρη που έχουν τεθεί από τους ειδικούς αποδειχθούν μικρής ακρίβειας. Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι ότι και το FLEMS και το FPEMS μείωσαν σημαντικά το μέγεθος των συσσωρευτών σε σύγκριση με το SEMS. Αυτό είναι αποτέλεσμα του υψηλού κόστους των συσσωρευτών και την ανάγκη τους για αντικατάσταση σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια ζωής του μικροδικτύου. Καταλήγοντας, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν, η συνδυαστική μέθοδος των δικτύων Petri και των Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών είναι η πιο υποσχόμενη. Ο κώδικας σε FORTRAN που γράφηκε για το TRNSYS επιτρέπει χαμηλούς χρόνους προσομοίωσης, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την μετάφρασή του στο MATLAB. Από το Matlab ο κώδικας μπορεί να εξαχθεί σε

πολλών ειδών PLC, ολοκληρωμένα κυκλώματα ή κάρτες ελέγχου με εισόδους και εξόδους για χρήση σε πραγματικά συστήματα.

Στην Εικόνα Εικόνα 6.8 παρουσιάζονται συγκριτικά ραβδογράμματα ενέργειας. Όλες οι προσεγγίσεις μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ, πόσιμο νερό, υδρογόνο ως καύσιμο για μεταφορές, ψύξη και θέρμανση χώρων. Τα FLEMS και FPEMS μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες με λιγότερη παραγόμενη ενέργεια. Το FPEMS παρουσιάζει χαμηλότερο Καθαρό Παρόν Κόστος, χρησιμοποιώντας μικρότερης ονομαστικής ισχύος μονάδα ηλεκτρόλυσης και μικρότερο δοχείο μεταλλικών υδριδίων. Το μικρότερο αυτό δοχείο είναι αλληλένδετο με περισσότερο χρόνο ενεργοποίησης της μικρότερης μονάδας ηλεκτρόλυσης στην περίπτωση του FPEMS.

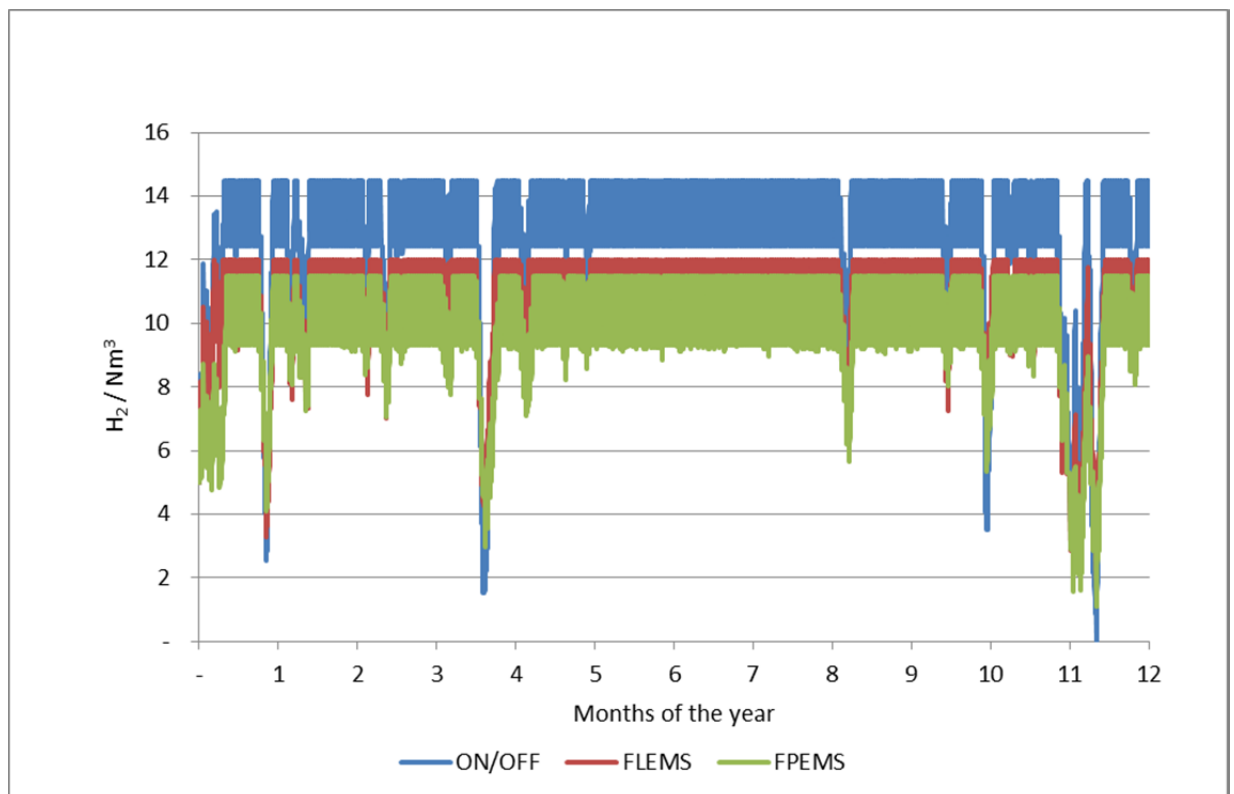


Εικόνα 6.8 Ετήσια παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια

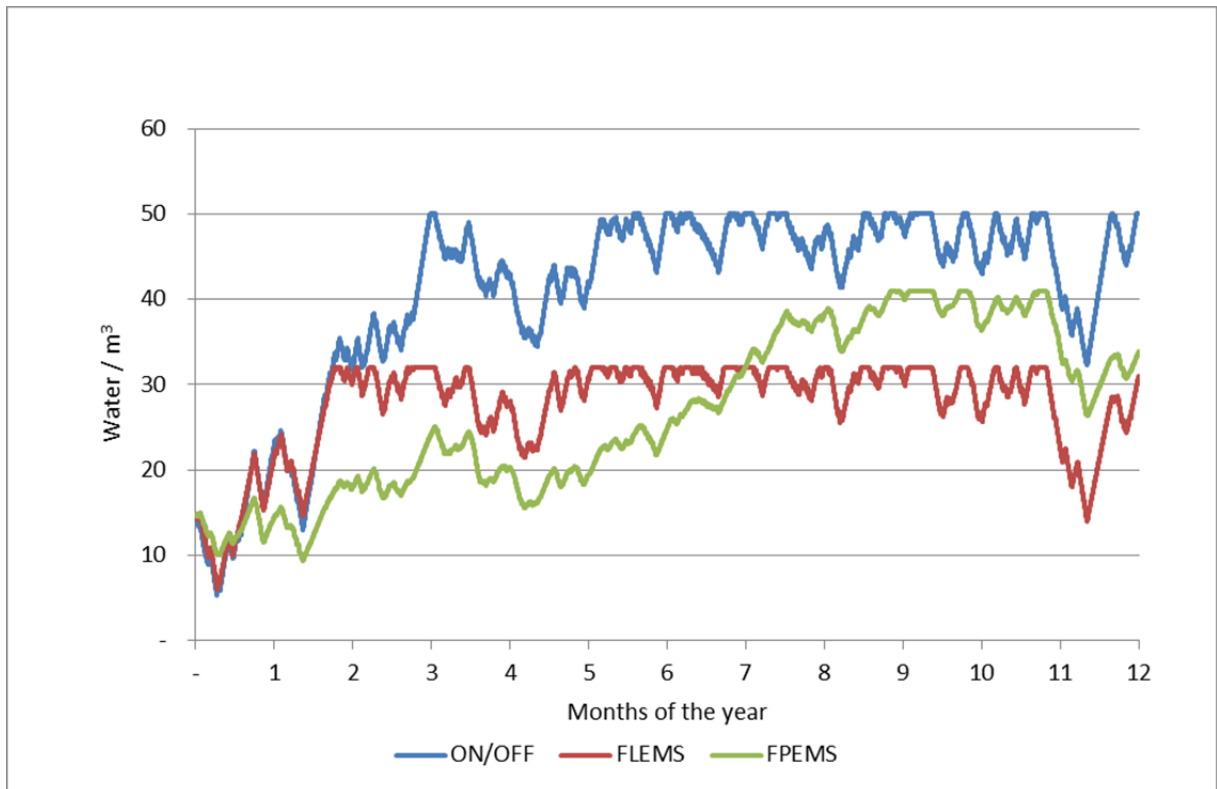
Στην Εικόνα Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση του όγκου του υδρογόνου στο δοχείο των μεταλλικών υδριδίων. Όπως είναι φανερό πραγματοποιείται εποχιακή αποθήκευση του υδρογόνου. Το FPEMS με το

μικρότερο δοχείο καταφέρνει να καλύψει τις ίδιες ανάγκες. Ο καθημερινός ανεφοδιασμός των οχημάτων επίσης παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 6.9.

Στην Εικόνα Εικόνα 6.10 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση του όγκου του νερού στη δεξαμενή του πόσιμου νερού. Όπως είναι φανερό η βελτιστοποίηση προκρίνει μεγάλες δεξαμενές νερού που δεν αδειάζουν οριακά σύμφωνα με την αρχή σχεδιασμού της ύπαρξης νερού για κάλυψη αναγκών ίσων με 3 ημέρες και επίσης λόγω του χαμηλότερου κόστους των δεξαμενών νερού. Οι ανάγκες σε νερό για 3 ημέρες αντιστοιχούν σε 5.76 m³ νερό. Η λειτουργία σε μερικό φορτίο της μονάδας αφαλάτωσης στο FLEMS και το FPEMS προσδίδουν ευελιξία στο σύστημα. Το FPEMS έχει μεγαλύτερη δεξαμενή πόσιμου νερού σε συνδυασμό με μικρότερη μονάδα αφαλάτωσης σε σύγκριση με το FLEMS, όπως φαίνεται στην Εικόνα Εικόνα 6.10.



Εικόνα 6.9 Υδρογόνο στο δοχείο αποθήκευσης του υδρογόνου



Εικόνα 6.10 Νερό στη δεξαμενή πόσιμου νερού

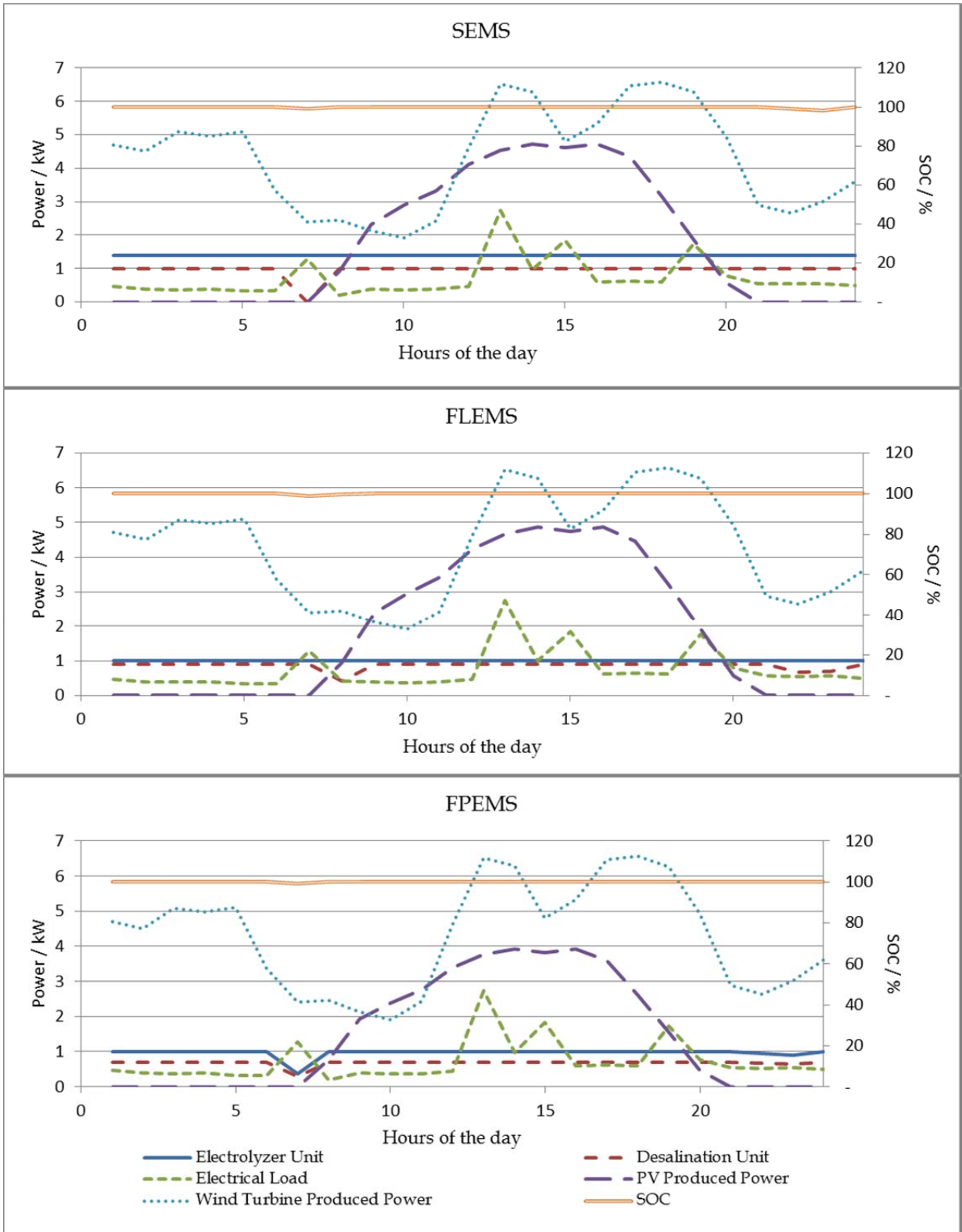
Επιλέχθηκαν 3 αντιπροσωπευτικές ημέρες με σκοπό την παρουσίαση της διαφορετικής απόδοσης των 3 συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Η μία ημέρα επιλέχθηκε για να παρουσιάσει τη λειτουργία κάτω από συνθήκες υψηλής ενεργειακής παραγωγής από τα Φ/Β και την ανεμογεννήτρια, η δεύτερη ημέρα επιλέχθηκε για να παρουσιάσει την κατάσταση κατά την οποία το μικροδίκτυο πολυπαραγωγής λειτουργεί κοντά στα τεχνικά του όρια λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών και η τρίτη για να παρουσιάσει μια μέση ημέρα με συνθήκες ανάμεσα στις δύο προηγούμενες. Αυτές οι ημέρες είναι η 1^η Αυγούστου, η 1^η Οκτωβρίου και η 10^η Δεκεμβρίου. Στην Εικόνα 6.11 παρουσιάζονται διαγράμματα ισχύος για την 1^η Αυγούστου. Το ηλιακό και αιολικό δυναμικό παραμένουν υψηλά για αυτή την ημέρα. Για όλα τα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας ο συσσωρευτής παραμένει πλήρως φορτισμένος σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Για το SEMS η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η μονάδα αφαλάτωσης παραμένουν ενεργοποιημένες συνεχώς, εκτός από την πρωινή αιχμή της κατανάλωσης, οπότε και η μονάδα αφαλάτωσης παραμένει απενεργοποιημένη. Για το FLEMS και το FPEMS οι συσκευές παραμένουν συνεχώς ενεργοποιημένες, αλλά σε δύο χρονικά σημεία

λειτουργούν σε μερικό φορτίο. Αυτό συμβαίνει αρχικά το πρωί και μετά το βράδι. Το FPEMS διαχειρίζεται καλύτερα τη διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας στο μικροδίκτυο μιας και μειώνει την ισχύ λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης όταν παρατηρείται αιχμή ζήτησης, ενώ το FLEMS κρατά την μονάδα ηλεκτρόλυσης που έχει προτεραιότητα πλήρως ενεργοποιημένη και μειώνει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης σημαντικά όπως φαίνεται στην Εικόνα Εικόνα 6.11.

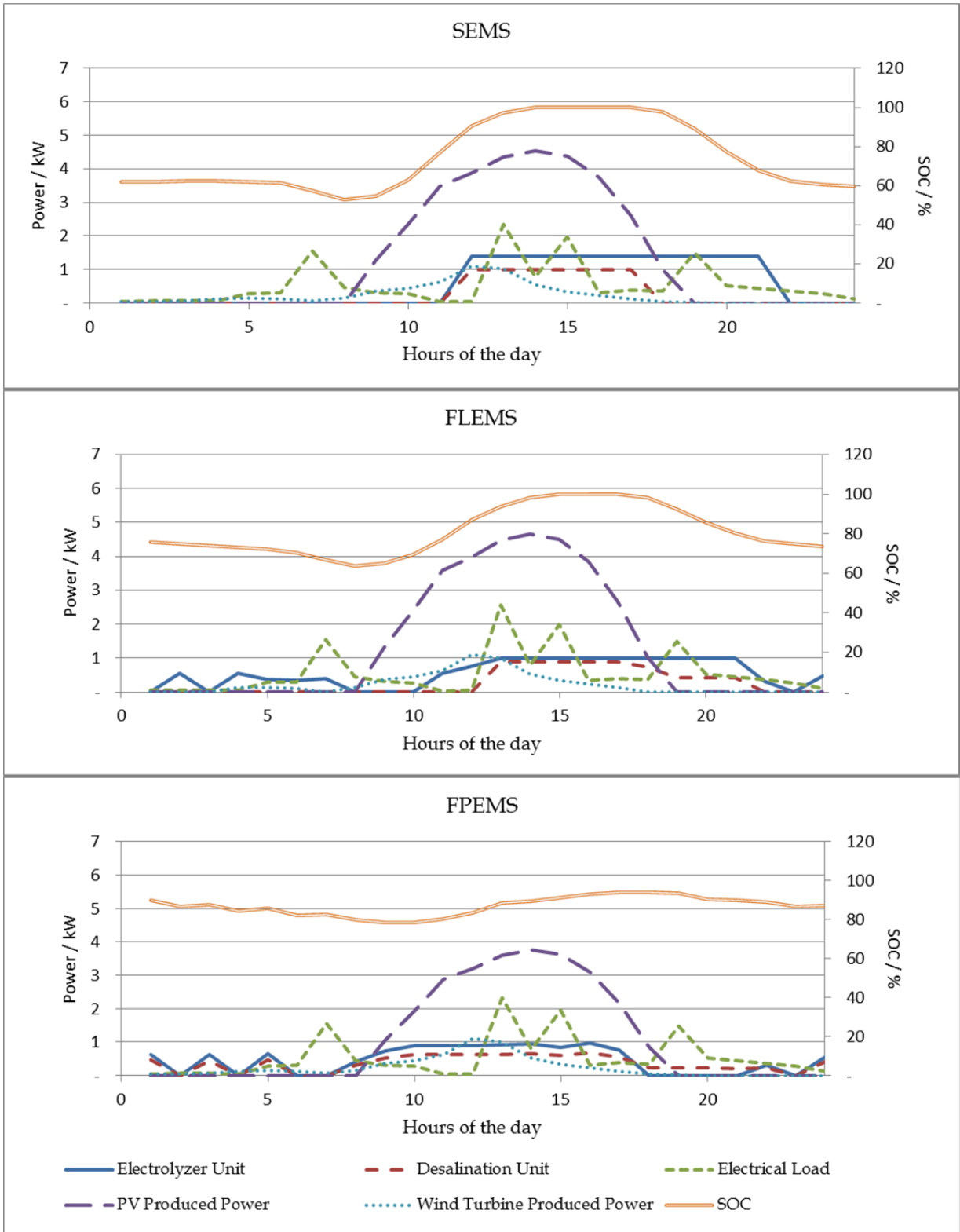
Η δεύτερη τυπική ημέρα είναι η 1^η Οκτωβρίου και παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 6.12. Για το SEMS το SOC παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στη διάρκεια της ημέρας από περίπου 50% μέχρι σχεδόν πλήρη φόρτιση. Το αιολικό δυναμικό είναι χαμηλό για αυτή την ημέρα, αλλά τα Φ/Β παράγουν σημαντική ποσότητα ενέργειας. Περίπου το μεσημέρι όταν η ισχύς των Φ/Β έχει φορτίσει πλήρως το συσσωρευτή, οι μονάδες ηλεκτρόλυσης και αφαλάτωσης ενεργοποιούνται. Όταν αρχίζει η δύση του ηλίου και η διαθέσιμη ισχύς στο μικροδίκτυο μειώνεται ως αποτέλεσμα απενεργοποιείται η μονάδα αφαλάτωσης. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παραμένει ενεργοποιημένη μέχρι το βράδυ, οπότε και απενεργοποιείται λόγω του χαμηλού SOC. Το FLEMS παρουσιάζει καλύτερη διαχείριση της ενέργειας από το SEMS. Αν και ο συσσωρευτής έχει χαμηλότερη χωρητικότητα το SOC παραμένει μεταξύ 65% και 100% σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης ενεργοποιείται σε μερικό φορτίο στις 10 το πρωί και λίγες ώρες αργότερα ενεργοποιείται και η μονάδα αφαλάτωσης σε πλήρες φορτίο όσο ο συσσωρευτής παραμένει πλήρως φορτισμένος. Όταν το απόγευμα η παραγωγή από τα Φ/Β μειώνεται η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί σε μερικό φορτίο μέχρι το βράδυ, οπότε και οι δύο συσκευές απενεργοποιούνται. Το FPEMS, όμως, παρουσιάζει την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας από τα τρία. Καταφέρνει να λειτουργήσει τις συσκευές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε μερικό φορτίο, αξιοποιώντας την παραγωγή των Φ/Β καλύτερα.

Η τελευταία ημέρα είναι η 10^η Δεκεμβρίου και τα δεδομένα λειτουργίας παρουσιάζονται στην Εικόνα Εικόνα 6.13. Το SOC του συσσωρευτή ήταν χαμηλό από την προηγούμενη ημέρα για όλα τα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας. Δεν υπάρχει άνεμος και ο ήλιος δεν έχει ακόμη ανατέλλει και έτσι τα ηλεκτρικά

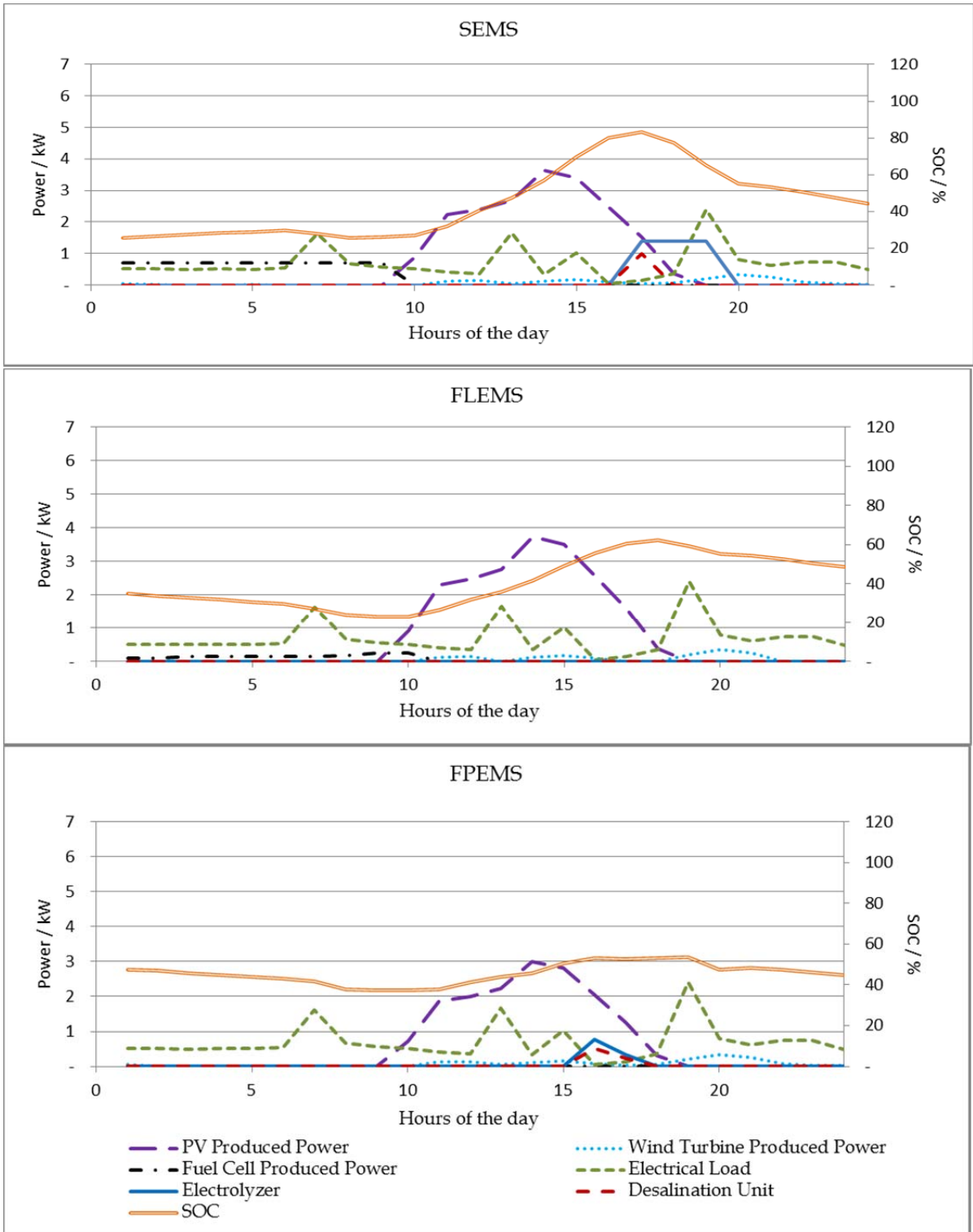
φορτία καλύπτονται από το συσσωρευτή. Για το SEMS και το FLEMS με στόχο την προστασία του συσσωρευτή από βαθιά εκφόρτιση, ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου. Για το FLEMS η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιείται σε μερικό φορτίο, ακολουθώντας τις ανάγκες του μικροδικτύου μέχρι την ανατολή του ήλιου και την έναρξη της παραγωγής από τα Φ/Β. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του FPEMS περιλάμβανε συσσωρευτή μεγαλύτερης χωρητικότητας κατά 50 Ah σε σχέση με το FLEMS. Αυτή η μικρή αύξηση είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες χωρίς την ενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου. Το SEMS λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης συστοιχίας Φ/Β καταφέρνει να φορτίσει πλήρως το συσσωρευτή και αργά το απόγευμα καταφέρνει να ενεργοποιήσει για λίγες ώρες τη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Αυτό με τη σειρά του εκφορτίζει το συσσωρευτή περίπου στο 45% το βράδυ.



Εικόνα 6.11 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 1^η Αυγούστου



Εικόνα 6.12 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 1^η Οκτωβρίου



Εικόνα 6.13 Ωριαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος από τα υποσυστήματα του μικροδικτύου για την 10^η Δεκεμβρίου

7 Ευφυής Διαχείριση της Ενέργειας από την πλευρά της Κατανάλωσης

7.1 Εισαγωγή στην Διαχείριση της Ενέργειας από την πλευρά της Κατανάλωσης

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 πρέπει να υλοποιηθεί μια ευφυής προσέγγιση για την διαχείριση της ενέργειας από τη πλευρά της κατανάλωσης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος μπορεί να αντιμετωπίσει τις προδιαγραφές σχεδιασμού και τις αρχικές ανάγκες. Στην πράξη η εμπειρία έχει δείξει ότι τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα ενέργειας λειτουργούν εκτός προδιαγραφών πολύ σύντομα μετά την εγκατάστασή τους. Οι χρήστες ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες δύσκολα κατανοούν πως η ενέργεια δεν είναι απεριόριστη και κατά αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται συχνά πλήρης κατάρρευση του συστήματος (black out) αν δεν έχει πραγματοποιηθεί εκπαίδευση των χρηστών κατά την εγκατάσταση. Επίσης αρκετές φορές ακόμη και αν το μικροδίκτυο είναι ικανό να καλύψει το αρχικό φορτίο σχεδιασμού, μετά από λίγα χρόνια εμφανίζονται νέες ανάγκες, ενώ ταυτόχρονα δεν είναι εφικτή από οικονομικής άποψης η επέκτασή του. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μικροδίκτυο θα δυσκολευόταν να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες και τελικά θα κατέρρεε συχνά. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερη η μερική μη κάλυψη αναγκών βραχυπρόθεσμα, ενώ μακροπρόθεσμα καταναλώσεις όπως η ψύξη και συντήρηση τροφίμων και ο φωτισμός δεν θα επηρεάζονταν, ακόμη και αν καταναλώσεις όπως η θέρμανση τηλεόρασης δεν καλύπτονταν.

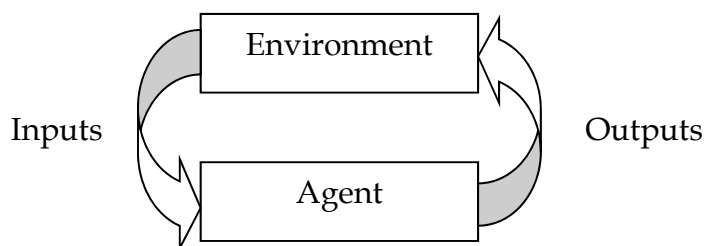
Το θέμα της Διαχείρισης του Φορτίου από την πλευρά της Κατανάλωσης (DSM) έχει ερευνηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (Duan and Deconinck, 2008; Logenthiran, Srinivasan et al., 2010; Romanos, Hatziaargyriou et al., 2010; Colson and Nehrir, 2011; Minciardi and Sacile, 2011). Οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται σε Πολυπρακτορικά συστήματα (Multi Agent Systems). Επιπλέον, έρευνα έχει πραγματοποιηθεί όχι μόνο για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για τη διαχείριση της ψύξης και θέρμανσης χώρων (Alvarez, Gomez-Aleixandre et al., 2009). Η περισσότερες εργασίες σε αυτό το πεδίο βρίσκουν εφαρμογή σε κτίρια, όπου θεωρείται ότι αποτελούν ένα μικροδίκτυο και

μέσω ευφυούς διαχείρισης βελτιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειάς τους (Simoes and Bhattarai, 2011; Wang, Dounis et al., 2011). Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, αυτό το μικροδίκτυο θεωρείται ότι είναι διασυνδεδεμένο με κάποιο κεντρικό δίκτυο και η διαχείριση των φορτίων από την πλευρά της κατανάλωσης αφορά τον βέλτιστο προγραμματισμό των φορτίων (όπως πχ. πλυντηρίων) όταν η ενέργεια είναι φθηνότερη. Σε μικρότερο βαθμό έχει πραγματοποιηθεί έρευνα και για αυτόνομα μικροδίκτυα (Chatzivasiliadis, Hatziaargyriou et al., 2008; Alviyal-Palavicino, Garrido-Echeverría et al., 2011). Στη βάση της ανασκόπησης της βιβλιογραφίας αποφασίστηκε να αναπτυχθεί ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας από την πλευρά της κατανάλωσης βασισμένο σε μια πολυπρακτορική τοπολογία με σκοπό τη διαχείριση τόσο των ηλεκτρικών καταναλώσεων όσο και της θέρμανσης και ψύξης χώρων.

Η πρόγνωση της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/B και την ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι πολύ σημαντική σε ένα αυτόνομο σύστημα. Πολλές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για την πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια της παραγόμενης ισχύος από τα Φ/B , όπως και για την πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου και συνεπώς της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Αυτές οι προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τη χρήση ιστορικών δεδομένων, τη χρήση στατιστικών μοντέλων και υβριδικές προσεγγίσεις που αξιοποιούν τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης (Lydia and Kumar, 2010; Yuehui, Jing et al., 2010). Οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται στα Νευρωνικά Δίκτυα (ANN). Η χρήση των ANN περιλαμβάνει τη διαδικασία της εκμάθησης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το μεγάλο βαθμό περιπλοκότητας αν δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα. Μια νέα προσέγγιση έχει προταθεί η οποία περιλαμβάνει τη χρήση Γκριζών Αλγορίθμων Πρόγνωσης (Dounis, Tiropanis et al., 2005). Τα βασικά της πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την ανάγκη μόνο για τις 5 προηγούμενες τιμές σε μια χρονοσειρά και η ευκολία στην υλοποίησή της. Λόγω αυτών αποφασίστηκε να υλοποιηθεί ένας Γκριζός Αλγόριθμος Πρόγνωσης (GP) για την πρόγνωση της παραγωγής ισχύος των Φ/B και της ανεμογεννήτριας για τη χρήση στο DSM.

7.2 Πράκτορες και Πολυπρακτορικά Συστήματα

Τη δεκαετία του 70 αναπτύχθηκε ένας νέος ερευνητικός τομέας εντός της τεχνητής νοημοσύνης που άρχισε να αναπτύσσεται ραγδαία. Αυτός ο τομέας ήταν η Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη (DAI). Η DAI σύμφωνα με τον Weiss (Weiss, 2000) μπορεί να περιγραφεί ως «η μελέτη, κατασκευή και εφαρμογή πολυπρακτορικών συστημάτων, τα οποία είναι συστήματα εντός των οποίων υπάρχει διάδραση αρκετών ευφυών πρακτόρων με σκοπό την επίτευξη ενός συνόλου δράσεων». Αυτό προσφέρει καλύτερη κατανόηση του τι είναι η DAI και πως επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή πολυπρακτορικών συστημάτων. Απομένει όμως η ερώτηση του τι είναι ένας πράκτορας. Σύμφωνα με τον Wooldridge (Wooldridge, 2002) «ένας πράκτορας είναι ένα υπολογιστικό σύστημα εγκατεστημένο σε κάποιο περιβάλλον το οποίο είναι ικανό για αυτόνομη δράση σε αυτό το περιβάλλον με σκοπό την ικανοποίηση των σχεδιαστικών του στόχων». Ένας πράκτορας παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.1.



Εικόνα 7.1 Ένας τυπικός πράκτορας

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένας πράκτορας σχεδόν ποτέ δεν θα έχει πλήρη έλεγχο του περιβάλλοντός του. Αυτό σημαίνει ότι οι δράσεις του μπορούν και θα επηρεάσουν το περιβάλλον του, αλλά η αντίδραση του περιβάλλοντος δεν είναι βέβαιη. Ένας πράκτορας μπορεί να αντιδράσει με τον ίδιο τρόπο στις ίδιες εισόδους από το περιβάλλον, αλλά το περιβάλλον μπορεί να εξελιχθεί διαφορετικά σε αυτές τις περιπτώσεις. Ένα τυπικό παράδειγμα της βιβλιογραφίας είναι ο θερμοστάτης. Ο θερμοστάτης μπορεί να θεωρεί ως ένας πράκτορας που έχει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος ως εισοδο και την ενεργοποίηση ή όχι του συστήματος θέρμανσης ως έξοδο. Ο πράκτορας - θερμοστάτης θα συγκρίνει την θερμοκρασία περιβάλλοντος με αυτή με την οποία είναι ρυθμισμένος και αν είναι χαμηλότερη θα ενεργοποιήσει τη θέρμανση. Ακόμη και έτσι δεν είναι γνωστό αν η

θερμοκρασία του δωματίου θα φτάσει την ρυθμισμένη θερμοκρασία, γιατί κάποιος μπορεί να ανοίξει μια πόρτα ή κάποιο παράθυρο.

Το επόμενο σημαντικό στοιχείο που πρέπει να αντιμετωπισθεί είναι το πότε ένας πράκτορας θεωρείται ότι είναι ευφυής. Σύμφωνα με τον Wooldridge (Wooldridge, 2002) ένας πράκτορας πρέπει να είναι αντιδραστικός, προνοητικός και κοινωνικός για να θεωρείται ως ευφυής. Αντιδραστικός σημαίνει ότι πρέπει ο πράκτορας να κατανοεί το περιβάλλον του και να αντιδρά στις εισόδους του περιβάλλοντος σύμφωνα με το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό του. Προνοητικότητα ενός ευφυούς πράκτορα μπορεί να περιγραφεί ως η ικανότητα να παίρνει πρωτοβουλία και να δρα με σκοπό την ικανοποίηση των στόχων του σχεδιασμού του. Η κοινωνική ικανότητα τέλος μπορεί να περιγραφεί ως η ικανότητα να συνεργάζεται με άλλους ευφυείς πράκτορες ή ακόμη και με ανθρώπους με σκοπό την επίτευξη των στόχων σχεδιασμού του.

Ένας πράκτορας πρέπει να κατανοεί το περιβάλλον στο οποίο υπάρχει. Ο κάθε πράκτορας έχει σχεδιαστεί με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου ή στόχων. Για να επιτύχει στους στόχους του πρέπει να προβεί σε συγκεκριμένες δράσεις και για να αποφασίσει ποιες δράσεις πρέπει να υλοποιήσει πρέπει να είναι ικανός να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του. Κατά αυτό τον τρόπο για να μπορέσει να περιγραφεί πλήρως ένας πράκτορας πρέπει να οριστούν οι Αντιλήψεις του, οι Δράσεις του, οι Στόχοι του και το Περιβάλλον του (PAGE: Percepts, Actions, Goals Environment) (Russell and Norvig, 2009).

Σύμφωνα με τους Russell και Norving (Russell and Norvig, 2009) οι παρακάτω ιδιότητες έχουν προταθεί για την ταξινόμηση του περιβάλλοντος των πρακτόρων.

- Προσβάσιμο – Μη προσβάσιμο. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα ενός περιβάλλοντος, τόσο το περιβάλλον γίνεται λιγότερο προσβάσιμο. Ένα μη προσβάσιμο περιβάλλον απαιτεί περισσότερους και πιο περίπλοκους πράκτορες.
- Ντετερμινιστικό – μη ντετερμινιστικό. Τα περίπλοκα συστήματα είναι μη ντετερμινιστικά, μιας και η ίδια δράση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διαφορετική τελική κατάσταση του περιβάλλοντος.

- Επεισοδιακό – μη επεισοδιακό. Όταν ακόμη και η παραμικρή αλλαγή στο περιβάλλον αλλάζει την απόδοση όλου του συστήματος, η δράση του πράκτορα βασίζεται μόνο στο τωρινό επεισόδιο και όχι στα προηγούμενα.
- Στατικό – δυναμικό. Ένα στατικό περιβάλλον παραμένει το ίδιο αν ο πράκτορας δεν προβεί σε κάποια δράση. Σε δυναμικά περιβάλλοντα λαμβάνουν χώρα παράλληλα και άλλες διεργασίες οι οποίες επηρεάζουν την νέα κατάσταση του περιβάλλοντος εκτός από τις δράσεις του πράκτορα.
- Διακριτό – συνεχές. Ένα διακριτό περιβάλλον είναι ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν συγκεκριμένες και απαριθμήσιμες δράσεις και αντιλήψεις.

Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη προγράμματα πρακτόρων (Russell and Norvig, 2009),

- Απλοί αντιδραστικοί πράκτορες (Simple reflex agents). Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η απλότητα. Κάθε δράση είναι δεμένη με μια συγκεκριμένη κατάσταση. Ο πράκτορας ταυτοποιεί την τωρινή κατάσταση και αντιδρά ανάλογα με προκαθορισμένους κανόνες.
- Πράκτορες που καταγράφουν την κατάσταση του κόσμου (Agents that keep track of the world). Αυτοί είναι μια αναβαθμισμένη έκδοση των απλών αντιδραστικών πρακτόρων. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η τωρινή αντίληψη συνδυάζεται με την προηγούμενη κατάσταση για να παράξει την τωρινή.
- Πράκτορες στόχου (Goal Based agents). Η δομή κανόνων τους είναι εφάμιλλη με αυτή ενός ελεγκτή. Αυτό τους δίνει την απαραίτητη ευελιξία για να επιτύχουν προγραμματισμένους στόχους.
- Πράκτορες εφαρμογών (Utility agents). Η εφαρμογή μπορεί να απεικονιστεί σαν μια συνάρτηση που αντιστοιχεί κάθε κατάσταση με έναν πραγματικό αριθμό συνήθως στο διάστημα $[0,1]$. Ένας μεγάλος αριθμός αντιπροσωπεύει μεγάλο βαθμό ικανοποίησης. Κατά αυτό τον τρόπο αυτού του τύπου οι πράκτορες προσπαθούν μέσω των δράσεων

τους να μεγιστοποιήσουν την συνάρτηση εφαρμογής. Αυτοί οι πράκτορες χρησιμοποιούνται συνήθως σε εποπτικά συστήματα διαχείρισης. Μπορούν να αντιμετωπίσουν καταστάσεις που στόχοι μπορεί να είναι αντιφατικοί. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση εφαρμογής μπορεί να εκληφθεί ως την περιγραφή του απαραίτητου συμβιβασμού.

Ένα πολυπρακτορικό σύστημα (MAS) μπορεί να οριστεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από έναν αριθμό ευφών πρακτόρων. Ο τελικός σκοπός ενός MAS είναι η καθοδήγηση και η εκπλήρωση των στόχων και εργασιών σχεδιασμού. Οι ευφείς πράκτορες που διαμορφώνουν το MAS μπορούν να λειτουργήσουν συνεργατικά ή ανταγωνιστικά. Στην πρώτη περίπτωση όλοι συνεργάζονται με σκοπό να έχουν τέτοια επίδραση στο περιβάλλον που ο καθένας μόνος του δεν θα μπορούσε να έχει. Όταν λειτουργούν ανταγωνιστικά μόνο κάποιοι από τους πράκτορες επιτυγχάνουν τους στόχους τους, και κατά αυτό τον τρόπο όλοι οι ευφείς πράκτορες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να επιτύχουν τους δικούς τους στόχους. Ο απώτερος στόχος της κατανεμημένης νοημοσύνης είναι να κάνει την διάδραση ευφών πρακτόρων όσο καλή ή ακόμη καλύτερη από την ανθρώπινη διάδραση και να μπορούν να αλληλοεπιδρούν με την ίδια επιτυχία με κάθε είδους οντότητα που παρουσιάζει νοημοσύνη, είτε είναι ανθρώπινη, είτε μηχανή (Weiss, 2000).

Σύμφωνα με τον Weiss (Weiss, 2000) τα βασικά χαρακτηριστικά ενός πολυπρακτορικού συστήματος είναι:

1. Η πληροφορία που κατέχει ο κάθε πράκτορας είναι ημιτελής και περιορισμένη
2. Ο έλεγχος του συστήματος είναι κατανεμημένος
3. Η πληροφορία είναι αποκεντρωμένη
4. Ο υπολογισμός είναι ασύγχρονος

Ένα παράδειγμα από τη φύση μπορεί να περιγράψει πως ένα μεγάλο σύνολο πολλών πρακτόρων χαμηλής νοημοσύνης μπορεί να επιτύχει περίπλοκη και προσαρμοστική συμπεριφορά. Μια αποικία μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες μελισσών, την βασίλισσα, τις εργάτριες και τους κηφήνες. Καμία οντότητα

δεν μπορεί να καταλάβει τα πάντα ή μπορεί να υλοποιήσει όλες τις δράσεις που απαιτούνται. Όμως σαν αποικία αντιμετωπίζονται όλες οι καταστάσεις με ευφυή τρόπο.

7.3 Θεωρία Γκριζων Συστημάτων

Η θεωρία των Γκριζων Συστημάτων (GST) ασχολείται με τη μελέτη αβέβαιων συστημάτων που χαρακτηρίζονται από μερική πληροφόρηση. Τα δείγματα της πληροφορίας μπορεί να είναι μικρά και χαμηλής ποιότητας με υψηλό θόρυβο. Η GST στοχεύει στην άντληση χρήσιμης πληροφορίας από την διαθέσιμη περιορισμένη πληροφορία (Liu and Lin, 2011). Μιας και τα περισσότερα συστήματα παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά, αναμένεται ότι η GST θα έχει μεγάλο εύρος εφαρμογής.

Ένα μοντέλο πρόγνωσης (GP) βασισμένο στην GST θα χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση της παραγόμενης ενέργειας από την συστοιχία Φ/Β και την ανεμογεννήτρια. Το GP θα αξιοποιεί τις τελευταίες 4 τιμές και θα κάνει πρόγνωση της 5^{ης}. Η διαδικασία είναι συνεχής και παρουσιάζεται παρακάτω:

Πρώτη πρόγνωση

$$y_1^{(0)} = [y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), y^{(0)}(4)] \xrightarrow{GP} \hat{y}^{(0)} \text{ (EQ 32)}$$

Δεύτερη πρόγνωση

$$y_2^{(0)} = [y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), y^{(0)}(4), y^{(0)}(5)] \xrightarrow{GP} \hat{y}^{(0)} \text{ (EQ 33)}$$

Όπου:

$y^{(0)}(n)$ είναι η n^{th} μετρημένη τιμή

$\hat{y}^{(0)}(n)$ είναι η τιμή της πρόγνωσης

Ο GP υλοποιήθηκε στη βάση της μεθοδολογίας που προτάθηκε από τους Dounis et al (Dounis, Tiropanis et al., 2005) και είναι μια διαδικασία 4 βημάτων.

1^ο Βήμα

Τα δεδομένα ελέγχονται για την ύπαρξη αρνητικών αριθμών. Οι αρνητικές τιμές απαγορεύονται στη Γκριζα μοντελοποίηση. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα η απόλυτη τιμή της μέγιστης αρνητικής τιμής προστίθεται στις

υπόλοιπες ώστε να μετακινηθούν τα δεδομένα στο διάστημα $[0, +\infty)$ (Dounis, Tiropanis et al., 2005).

2^ο Βήμα

Αυτό το βήμα περιλαμβάνει την προεπεξεργασία των αρχικών πρωτογενών δεδομένων. Μέσω της χρήσης αλγόριθμου της πρώτης τάξης Συγκεντρωτικών Διαδικασιών Γένεσης η ακολουθία $y^{(0)}$ μετατρέπεται στην ακολουθία $y^{(1)}$. Η διαδικασία αποδυναμώνει την τυχαιότητα στα διαθέσιμα δεδομένα.

$$y_1^{(1)}(k) = AGO \cdot y_1^{(0)} = \sum_{m=1}^k y_1^{(0)}(m), \quad k = 1, 2, 3, 4 \text{ (EQ 34)}$$

$$y_1^{(1)}(k) = [y_1^{(1)}(1), y_1^{(1)}(2), \dots, y_1^{(1)}(n)] \text{ (EQ 35)}$$

3^ο Βήμα

Η νέα ακολουθία που παράχθηκε στο βήμα 2, $y^{(1)}$ μπορεί να μοντελοποιηθεί από μιας πρώτης τάξης διαφορικά εξίσωση που καλείται εξίσωση λεύκανσης όπως ακολούθως:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + a_g \cdot y^{(1)} = u_g \text{ (EQ 36)}$$

Όπου:

a_g : ο συντελεστής εξέλιξης

u_g : η γκριζα εισοδος

Αυτό αποκαλείται ως η βασική φόρμα του μοντέλου GM(1,1) και αντιπροσωπεύει το γκριζο μοντέλο πρώτης τάξης με μία μεταβλητή.

Η ακολουθία $z^{(1)}(k)$ υπολογίζεται με την εφαρμογή της διαδικασίας MEAN στην ακολουθία $y^{(1)}$.

$$z_1^{(1)}(k) = MEAN \cdot y_1^{(0)} = \frac{1}{2} \cdot [y_1^{(0)}(k) + y_1^{(0)}(k-1)], \quad k = 2, 3, 4 \text{ (EQ 37)}$$

Η διαδικασία MEAN γενικά εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση (Dounis, Tiropanis et al., 2005):

$$z^{(1)}(k) = ay^{(1)}(k) + (1-a)y^{(1)}(k-1), \quad a \in [0,1] \text{ (EQ 38)}$$

Μίας και ο χρόνος δειγματοληψίας είναι ίσος με το 1:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} = y^{(1)}(k) - y^{(1)}(k-1) \stackrel{AGO}{=} y^{(0)}(k) \text{ (EQ 39)}$$

Με αντικατάσταση διαμορφώνεται η Γκριζα Διαφορική Εξίσωση (GDE)

$$y^{(0)}(k) + a_g z^{(1)}(k) = u_g \text{ (EQ 40)}$$

Για να λυθεί η GDE πρέπει να υπολογιστεί η παράμετρος ανάπτυξης και η γκριζα είσοδος. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων όπως παρουσιάζεται παρακάτω (Dounis, Tiropanis et al., 2005):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y^{(0)}(2) \\ y^{(0)}(3) \\ y^{(0)}(4) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y^{(0)}(n) \end{bmatrix}}_{\mathbf{Y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & 1 \\ -z_1^{(1)}(3) & 1 \\ -z_1^{(1)}(4) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -z_1^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a_g \\ u_g \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{a}}}, \quad \hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{B}^T \times \mathbf{B})^{-1} \times \mathbf{B}^T \times \mathbf{Y} \text{ (EQ 41)}$$

Μετά τον υπολογισμό των a_g , u_g , μπορούν να υπολογιστούν οι $\hat{y}^{(1)}(4)$ και $\hat{y}^{(1)}(5)$ μέσω της χρήσης της εξίσωσης 42.

$$\hat{y}^{(1)}(k+1) = (y^{(0)}(1) - \frac{u_g}{a_g}) \cdot e^{-a_g k} + \frac{u_g}{a_g} \text{ (EQ 42)}$$

Βήμα 4

Μέσω της χρήσης της αντίστροφης AGO (IAGO) στην ακολουθία $\hat{y}^{(1)}(k)$, μπορεί να υπολογιστεί η $\hat{y}^{(0)}(5)$ σύμφωνα με την Εξίσωση 43.

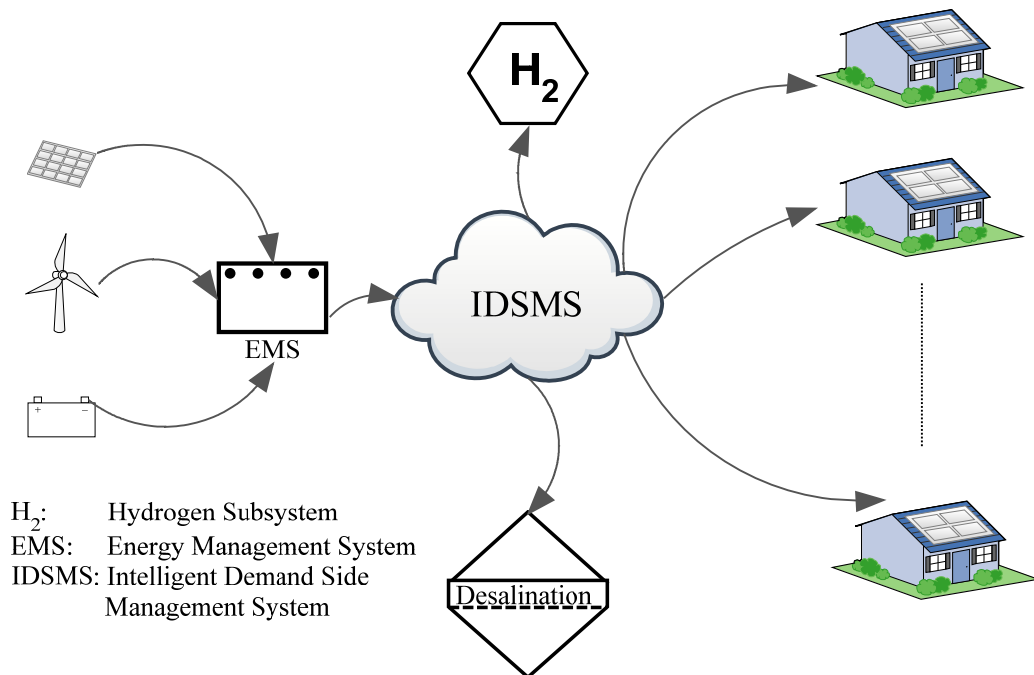
Η διαδικασία που περιγράφεται στα Βήματα 1-4 μπορεί να συνοψιστεί με την Εξίσωση 44 (Dounis, Tiropanis et al., 2005):

$$\hat{y}^{(1)}(n+1) = IAGO \cdot GM(1,1) \cdot AGO \cdot y^{(0)} \text{ (EQ 43)}$$

7.4 Ευφρές Σύστημα Διαχείρισης από την πλευρά της Κατανάλωσης

Στην προτεινόμενη τοπολογία ένα σύστημα διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης προτείνεται να χρησιμοποιηθεί όταν οι ανάγκες μελλοντικά αυξηθούν, η εγκατεστημένη ισχύς δεν μπορεί να καλύψει πλήρως το φορτίο και

δεν είναι εφικτή οικονομικά η επέκταση του μικροδικτύου με εγκατάσταση νέων Φ/Β ή ανεμογεννήτριας. Η υλοποίηση αυτής της τοπολογίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.2.



Εικόνα 7.2 Τοπολογία Έξυπνου Μικροδικτύου Πολυπαραγωγής

Για να σχεδιαστεί ένα σύστημα διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης για ένα μικροδίκτυο πολυπαραγωγής, το πόσιμο νερό, το υδρογόνο και οι ηλεκτρικές καταναλώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το πόσιμο νερό είναι το αγαθό με τη μέγιστη αξία για τους ανθρώπους στην απομονωμένη περιοχή. Επίσης μια ποσότητα υδρογόνου πρέπει πάντα να είναι διαθέσιμη πρώτον για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετακίνηση σε περίπτωση ανάγκης στην κοντινότερη πόλη και δεύτερον ώστε σε περίπτωση βλάβης που οδηγήσει σε βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών να είναι εφικτή η φόρτισή τους απευθείας από την κυψέλη καυσίμου. Κατά αυτό τον τρόπο γίνεται κατανοητό πως η πρώτη προτεραιότητα του συστήματος διαχείρισης της ενέργειας από την πλευρά της κατανάλωσης είναι να διασφαλίσει ότι υπάρχει μια ελάχιστη ποσότητα πόσιμου νερού και υδρογόνου πάντα. Κατά αυτό τον τρόπο δύο πράκτορες, ένας για την μονάδα αφαλάτωσης και ένας για την μονάδα ηλεκτρόλυσης ενεργοποιούν τις αντίστοιχες μονάδες όταν η αποθηκευμένη ποσότητα πέφτει κάτω από ένα όριο.

Αυτό το όριο μπορεί να οριστεί ως οι ανάγκες για 1 ημέρα. Επίσης το σημείο λειτουργίας των συσκευών μπορεί να οριστεί ως ίσο με το σημείο που η συσκευή θα παρήγαγε σε 1 ώρα την μέση ωριαία κατανάλωση πόσιμου νερού ή υδρογόνου. Το PAGE του IDSMS παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 7.1 PAGE του MAS.

Πίνακας 7.1 PAGE του MAS

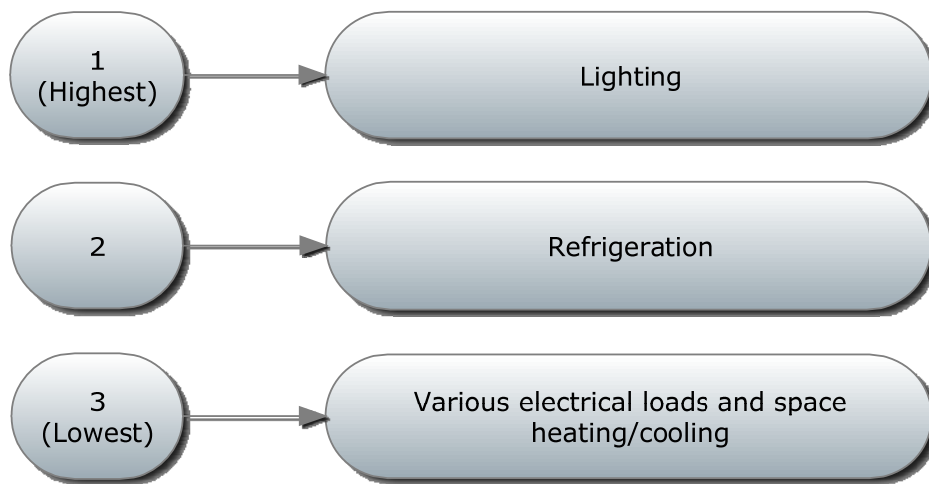
Percepts	Power that is produced and consumed in all parts of the microgrid, Battery SOC, Frequency of the microgrid, Solar Irradiation, Dry bulb temperature both for outside and inside each of the houses, wind speed, available water in the poΠίνακας water tank, available hydrogen in the hydrogen tank, PMV in each house
Actions	To evaluate and change if necessary EMS commands, to be able to cut individually all power lines in all of the houses.
Goals	To have zero poΠίνακας water and hydrogen shortage, not to let the battery get deep discharged and to meet the maximum technically feasible power demands of the users
Environment	All components of the microgrid, the houses that are connected to it and the local climatic environment.

Επίσης το ανεπτυγμένο ευφύες σύστημα διαχείρισης από τη πλευρά της κατανάλωσης κατηγοριοποιεί τα οικιακά φορτία σε 4 κατηγορίες:

1. Φωτισμός
2. Ψύξη τροφίμων (ψυγείο και καταψύκτης)
3. Διάφορες καταναλώσεις (λευκές συσκευές, ηλεκτρονικές συσκευές κλπ)
4. Ψύξη και Θέρμανση χώρων

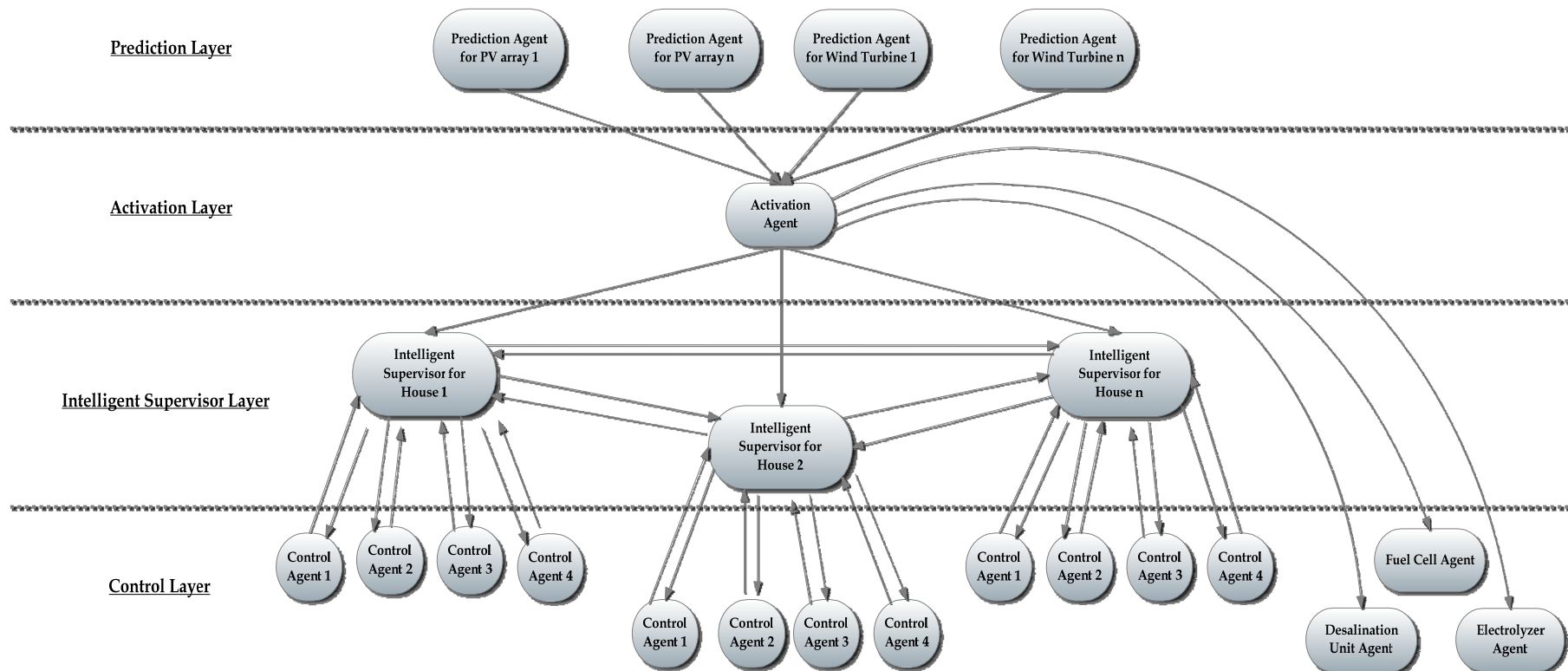
Ο φωτισμός των κατοικιών έχει την υψηλότερη προτεραιότητα από όλα τα φορτία. Η εγκατεστημένη ισχύ του είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τα άλλα φορτία. Αυτό σημαίνει ότι η αποσύνδεσή τους θα είχε ελάχιστη επίπτωση στη σταθερότητα του συστήματος. Τα φορτία ψύξης/συντήρησης τροφίμων έχουν την δεύτερη κατά σειρά υψηλότερη προτεραιότητα. Αυτό γίνεται επειδή εκεί αποθηκεύεται η τροφή, που είναι απαραίτητη για την επιβίωση των ανθρώπων. Η

τελευταία κατηγορία φορτίων με τη χαμηλότερη προτεραιότητα περιλαμβάνει την ψύξη/θέρμανση χώρων και τις διάφορες καταναλώσεις. Η προτεραιότητα των κατηγοριών των φορτίων παρουσιάζονται στην Εικόνα Εικόνα 7.3 . Σε κάθε χρονικό βήμα αποφασίζεται αν πρέπει να διακοπεί η τροφοδότηση κάποιας κατηγορίας φορτίων σε μία από τις κατοικίες. Όλες οι γραμμές των φορτίων από την ίδια κατηγορία προτεραιότητας πρέπει να αποσυνδεθούν από όλες τις κατοικίες πριν υπάρξει αποσύνδεση φορτίου υψηλότερης κατηγορίας προτεραιότητας. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι δεν μπορεί να διακοπεί η τροφοδότηση του ψυγείου μιας κατοικίας, όταν υπάρχει έστω και σε ένα σπίτι ενεργοποιημένο σύστημα ψύξης/θέρμανσης χώρων.



Εικόνα 7.3 Προτεραιότητα των κατηγοριών φορτίων

Μιας και οι διάφορες καταναλώσεις και η ψύξη/θέρμανση χώρων ανήκουν στην ίδια κατηγορία προτεραιότητας, σχεδιάστηκε μια προσέγγιση που μπορεί να δίνει προτεραιότητα εσωτερικά σε αυτή την κατηγορία. Κατά αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η θερμική άνεση με δείκτη της θερμικής άνεσης την Προβλεπόμενη Μέση Ψήφο (PMV). Η PMV προβλέπει την μέση αντίδραση μιας μεγάλης ομάδας ανθρώπων σύμφωνα με την κλίμακα της θερμικής αίσθησης της ASHRAE. Αυτή βασίζεται στο μοντέλο του P.O. Fanger που παρουσιάζεται στο πρότυπο ISO 7730. Αν το εσωτερικό κλίμα είναι ικανοποιητικό τότε η προτεραιότητα δίνεται στις διάφορες καταναλώσεις. Αν το εσωτερικό κλίμα είναι έξω από τα όρια αποδοχής, η προτεραιότητα δίνεται στις μονάδες ψύξης/θέρμανσης χώρων.



Εικόνα 7.4 Δομή του ευφυούς Συστήματος Διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης

Βάσει της κατάστασης του μικροδικτύου το IDSMS μπορεί να ενεργοποιήσει και να απενεργοποιήσει οποιαδήποτε από τις κατηγορίες φορτίων που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Το IDSMS βασίζεται σε μια Πολυπρακτορική προσέγγιση. Αυτή αποτελείται από 4 επίπεδα και παρουσιάζεται στους χρήστες μέσω προειδοποιητικών φωτεινών ενδείξεων στο χρήση ώστε αυτός να γνωρίζει πότε επίκειται αποσύνδεση φορτίου. Αυτό γίνεται ώστε να δοθεί η ελευθερία στο χρήση να αποφασίσει μόνος του αν θέλει να απενεργοποιήσει κάποια φορτία ώστε να μην χρειαστεί η ενεργοποίηση του IDSMS. Ένας καλός εμπειρικός κανόνας για την επιλογή του χρονικού βήματος ελέγχου είναι να είναι δυνατή η πλήρης απενεργοποίηση όλων των μεγάλων καταναλώσεων των κατοικιών εντός 1 ώρας από την ενεργοποίηση του IDSMS.

Η απόφαση για το ποιο φορτίο ποιανής κατοικίας θα απενεργοποιηθεί πρώτο είναι το αποτέλεσμα διαπραγμάτευσης μεταξύ του ευφυούς επόπτη της κάθε κατοικίας με τους τέσσερις πράκτορες ελέγχου των κατοικιών και μετά με την διαπραγμάτευση των ευφύων εποπτών των κατοικιών μεταξύ τους. Το βασικό κριτήριο στη διαπραγμάτευση μεταξύ των κατοικιών είναι η ενέργεια που έχει καταναλωθεί εντός των τελευταίων 3 ημερών. Αυτό γίνεται για να επιβραβευθούν οι χρήστες που έχουν καταναλώσει την λιγότερη ενέργεια τις τελευταίες ημέρες. Ταυτόχρονα όμως πρέπει να διασφαλιστεί ότι η απενεργοποίηση φορτίων γίνεται συνολικά σύμφωνα με τις κατηγορίες προτεραιότητας των φορτίων (λ.χ. ώστε να μην υπάρχει μια κατοικία με απενεργοποιημένο το ψυγείο, ενώ σε μια άλλη κατοικία υπάρχει ενεργοποιημένη τηλεόραση). Δύο αριθμοί θα πρέπει να επικοινωνούνται μεταξύ των ευφύων εποπτικών πρακτόρων των κατοικιών. Ο πρώτος είναι η κατανάλωση ενέργειας τις τελευταίες 3 ημέρες και ένας αριθμός που θα δείχνει αν και ποιες κατηγορίες προτεραιότητας φορτίων έχουν απενεργοποιηθεί. Για την απλοποίηση της διαδικασίας αποφασίστηκε να δημιουργηθεί ένας μικρός αλγόριθμος που παράγει έναν αριθμό και για τα δύο παραπάνω μεγέθη για την επικοινωνία με τους υπόλοιπους ευφυείς επόπτες. Αυτός ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 7.5.

Η πρώτη δράση που πραγματοποιείται όταν το IDSMS ενεργοποιείται είναι οριζόντια και αφορά τους θερμοστάτες όλων των αντλιών θερμότητας που

χρησιμοποιούνται για την ψύξη/θέρμανση χώρων σε όλες τις κατοικίες. Η ρυθμισμένη θερμοκρασία αλλάζει από αυτή που έχει ορίσει ο χρήστης σε προσαρμοσμένες θερμοκρασιακές τιμές που υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με την εξωτερική θερμοκρασία. Για την θέρμανση έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο που προτείνεται στο πρότυπο EN15251. Για την ψύξη χρησιμοποιείται η εξίσωση που έχει προταθεί από τους Nicol et al (Nicol, Humphreys et al., 1995). Οι εξισώσεις της θερμοκρασίας για εσωτερική άνεση για ψύξη και θέρμανση παρουσιάζονται στις EQ 45 και EQ 46.

$$T_c = 18.8 + 0.33 \cdot T_o, \text{ για θέρμανση (EQ 44)}$$

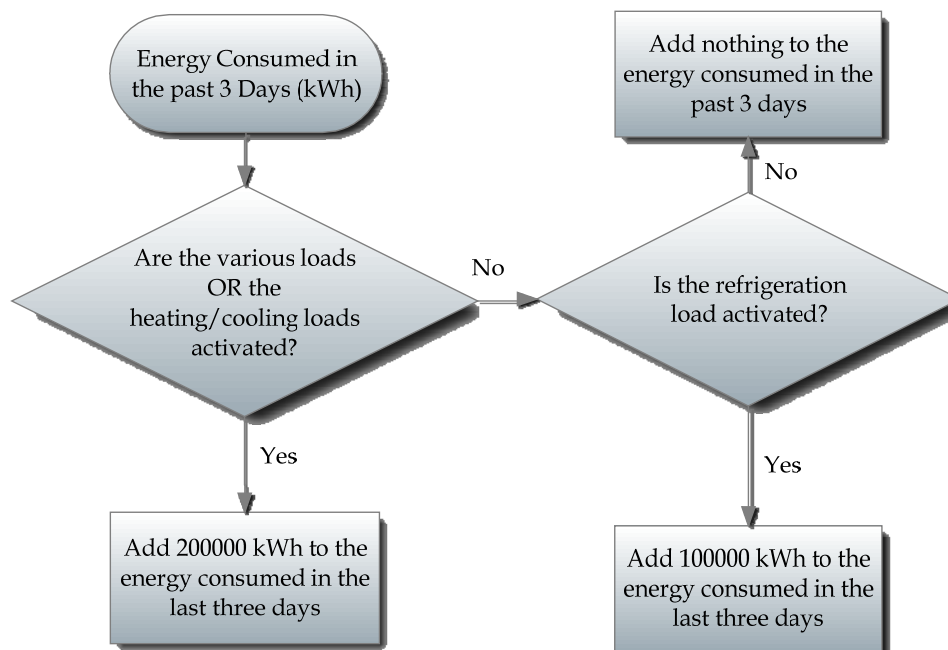
$$T_c = 18.6 + 0.16 \cdot T_o, \text{ για ψύξη (EQ 45)}$$

Όπου:

T_c : Η εσωτερική θερμοκρασία άνεσης

T_o : Εξωτερική θερμοκρασία

Κατόπιν για κάθε χρονικό βήμα ελέγχου ένα φορτίο θα απενεργοποιηθεί σε κάθε σπίτι, αν αυτό αποφασιστεί από το επίπεδο ενεργοποίησης. Αυτή η απόφαση βασίζεται στο ισοζύγιο ισχύος του μικροδικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλοι οι πράκτορες του πολυπρακτορικού συστήματος και στην Εικόνα 7.4 παρουσιάζεται μια συνολική γραφική απεικόνιση του IDSMS.



Εικόνα 7.5 Αλγόριθμος υπολογισμού τιμής διαπραγμάτευσης

7.4.1 Επίπεδο πρόγνωσης

Απαιτούνται δύο πράκτορες πρόγνωσης, ένας για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και ένας για την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιούνται στο μικροδίκτυο. Ένα Γκριζο μοντέλο πρώτης τάξης με μια μεταβλητή χρησιμοποιείται και για τις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση προβλέπεται η ολική ηλιακή ακτινοβολία και στη δεύτερη η ταχύτητα του ανέμου. Αυτές οι προβλέψεις ακολούθως τροφοδοτούνται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης και έτσι υπολογίζεται η αναμενόμενη παραγωγή ισχύος κατά το επόμενο χρονικό βήμα ελέγχου.

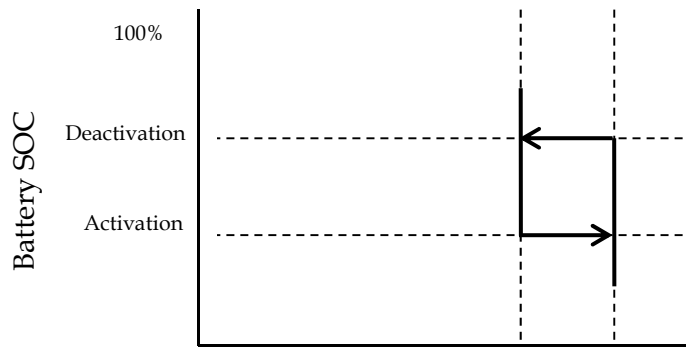
7.4.2 Επίπεδο Ενεργοποίησης

Το επίπεδο ενεργοποίησης αποτελείται από έναν πράκτορα ενεργοποίησης. Αυτός ο ευφυής πράκτορας αποφασίζει για το αν το IDSMS θα ενεργοποιηθεί και αν επίσης πρέπει να πραγματοποιηθούν περεταίρω αποσυνδέσεις φορτίων. Οι Είσοδοι και οι Έξοδοι του παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.2. Αυτός ο πράκτορας είναι ένας πράκτορας στόχου.

Πίνακας 7.2 Είσοδοι/Έξοδοι πράκτορα ενεργοποίησης

Inputs	Outputs
1. State of Charge of the Battery	Activation of the Demand Side Management (Activated/Deactivated)
2. Frequency of the microgrid	Shedding of more loads (Activated/Deactivated)
3. Prediction for PV produced power	Inform the users for imminent automatic load disconnections so that they could on their own disconnect some loads (Activated/Deactivated)
4. Prediction for Wind Turbine produced power	Emergency disconnection of all loads (Activated/Deactivated)

Η ενεργοποίησης του συστήματος διαχείρισης από την πλευρά του φορτίου (Έξοδος 1) βασίζεται σε μια προσέγγιση διπλής υστέρησης που παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 7.6.



Εικόνα 7.6 Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του IDSMS

Στην τοπολογία που χρησιμοποιείται η συχνότητα του μικροδικτύου ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος. Αν είναι κάτω των 50 Hz υπάρχει έλλειμμα ισχύος στο μικροδίκτυο και αν είναι άνω των 50 Hz παράγεται περισσότερη ισχύς από αυτή που καταναλώνεται από τα φορτία. Αν στο προηγούμενο χρονικό βήμα ελέγχου η συχνότητα είναι άνω των 50 Hz δεν χρειάζεται να απενεργοποιηθούν άλλα φορτία, αν είναι χαμηλότερη τότε περισσότερα φορτία πρέπει να απενεργοποιηθούν.

Αν το SOC είναι 5% πάνω από το SOC ενεργοποίησης, τότε ενεργοποιείται η φωτεινή ένδειξη αλληλεπίδρασης με τους χρήστες. Αυτό δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να μειώσουν τις καταναλώσεις του από μόνοι τους.

Όλα τα φορτία αποσυνδέονται από το μικροδίκτυο αν το SOC πέσει κάτω από το 15% με σκοπό την προστασία του συσσωρευτή.

7.4.3 Επίπεδο ελεγκτών πρακτόρων

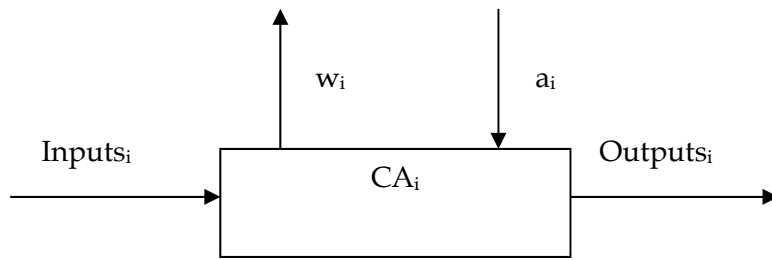
7.4.3.1 Πράκτορες ελεγκτές

Αυτοί οι ευφυείς πράκτορες είναι υπεύθυνοι για την αποσύνδεση των διαφόρων φορτίων. Κάθε κατοικία έχει τέσσερις τέτοιους πράκτορες, που ο καθένας ελέγχει μια κατηγορία φορτίων. Ο πράκτορας παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.7:

wi: σήμα ενεργοποίησης

ai: σήμα αναγνώρισης

Εικόνα 7.7. Αυτοί είναι απλοί αντιδραστικοί πράκτορες.



όπου:

w_i : σήμα ενεργοποίησης

a_i : σήμα αναγνώρισης

Εικόνα 7.7 Πράκτορας ελέγχου

7.4.3.2 Πράκτορας φωτισμού

Ο πράκτορας φωτισμού ελέγχει όλα τα φωτιστικά σώματα των κατοικιών. Οι Είσοδοι, οι Έξοδοι και οι καταστάσεις ενεργοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.3 Πράκτορας φωτισμού.

Πίνακας 7.3 Πράκτορας φωτισμού

Inputs	Activation	Outputs
1. State of connection of lighting power line (0 deactivated, 1 activated)	The agent gets activated IF	If the agent's activation signal is acknowledged by the house's intelligent supervisor agent, the lighting lines are disconnected from mains
2. State of connection of refrigeration power line (0 deactivated, 1 activated)	Input 1=1 AND	
3. State of connection of heating/cooling power line (0 deactivated, 1 activated)	Inputs 2,3,4=0	
4. State of connection for the rest electrical consumptions(0 deactivated, 1 activated)		

7.4.3.3 Πράκτορας ψύξης/κατάψυξης

Αυτός ο πράκτορας ελέγχει το ψυγείο και τον καταψύκτη της κάθε κατοικίας. Οι εισοδοι, οι Έξοδοι και οι καταστάσεις ενεργοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.4 .

Πίνακας 7.4 Πράκτορας ψύξης/ κατάψυξης

Inputs	Activation	Outputs
1. State of connection of refrigeration power line (0 deactivated, 1 activated)	The agent gets activated IF	If the agent's activation signal is acknowledged by the house's intelligent supervisor agent, the
2. State of connection of	Input 1=1	

heating/cooling power line (0 deactivated, 1 activated)	AND Inputs 2,3=0	refrigeration lines are disconnected from mains.
3. State of connection for the rest electrical consumptions(0 deactivated, 1 activated)		

7.4.3.4 Πράκτορας ψύξης/θέρμανσης χώρων

Ο πράκτορας ψύξης/θέρμανσης χώρων ελέγχει τις αντλίες θερμότητας της κάθε κατοικίας. Αυτός ο πράκτορας αξιοποιεί ένα αισθητήριο της Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου (PMV). Το PMV είναι ένας δείκτης της θερμικής άνεσης του χώρου. Παίρνει τιμές από το -3 έως το 3 με το 0 να αντιπροσωπεύει την ιδανική θερμική άνεση, το -3 το πολύ κρύο και το +3 την πολύ ζέστη. Οι Είσοδοι, Έξοδοι και οι καταστάσεις ενεργοποίησης αυτού του πράκτορα παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.5.

Πίνακας 7.5 Πράκτορας Ψύξης/Θέρμανσης χώρων

Inputs	Activation	Outputs
1. State of connection of heating/cooling power line (0 deactivated, 1 activated)	The agent gets activated IF	If the agent's activation signal is acknowledged by the house's intelligent supervisor agent, the air conditioning lines are disconnected from mains
2. State of connection for the rest electrical consumptions(0 deactivated, 1 activated)	Input 1=1 AND Input 2=1	
3. PMV (+3 ... -3, where 0 is neutral, -3 very cold, +3 very hot)	AND $ Input3 < 1.5$ OR Input 1=1 AND Input2=0	

7.4.3.5 Πράκτορας διαφόρων καταναλώσεων

Ο πράκτορας των διαφόρων καταναλώσεων ελέγχει τις υπόλοιπες ηλεκτρικές καταναλώσεις των κατοικιών. Αυτός ο πράκτορας αξιοποιεί επίσης το αισθητήριο του PMV. Οι Είσοδοι, Έξοδοι και οι καταστάσεις ενεργοποίησης του πράκτορα παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.6.

Πίνακας 7.6 Πράκτορας διαφόρων καταναλώσεων

Inputs	Activation	Outputs
1. State of connection of heating/cooling power line (0	The agent gets activated	If the agent's activation signal is acknowledged

deactivated, 1 activated)	IF	by the house's intelligent supervisor agent, the power lines for the rest of electrical loads are disconnected from mains
2. State of connection for the rest electrical consumptions(0 deactivated, 1 activated)	Input 2=1 AND Input 2=1	
3. PMV (+3 ... -3, where 0 is neutral, -3 very cold, +3 very hot)	AND $ Input3 > 1.5$ OR Input 1=0 AND Input2=1	

7.4.3.6 Πράκτορας μονάδος αφαλάτωσης

Αυτός ο πράκτορας ενεργοποιείται αν ο όγκος νερού στη δεξαμενή πόσιμου νερού είναι λιγότερος από μια προρυθμισμένη τιμή και αν υπάρχει παραγωγή ισχύος για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα ελέγχου. Υπολογίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδος αφαλάτωσης για να καλύψει την μέση ωριαία κατανάλωση νερού και ελέγχει αν η έξοδος του EMS είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από αυτή την τιμή. Αν είναι υψηλότερη υπερσχύει η τιμή του σε σχέση με αυτή του EMS. Αυτός ο πράκτορας είναι ένας απλός αντιδραστικός πράκτορας.

7.4.3.7 Πράκτορας μονάδας ηλεκτρόλυσης

Αυτός ο πράκτορας ενεργοποιείται αν ο όγκος του υδρογόνου στο δοχείο μεταλλικών υδριδίων είναι λιγότερος από μια προρυθμισμένη τιμή και αν υπάρχει παραγωγή ισχύος για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα ελέγχου. Υπολογίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδος ηλεκτρόλυσης για να καλύψει την μέση ωριαία κατανάλωση νερού και ελέγχει αν η έξοδος του EMS είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από αυτή την τιμή. Αν είναι υψηλότερη υπερσχύει η τιμή του σε σχέση με αυτή του EMS. Αυτός ο πράκτορας είναι ένας απλός αντιδραστικός πράκτορας.

7.4.3.8 Πράκτορας κυψέλης καυσίμου

Αν το IDSMS είναι ενεργοποιημένο τότε η κυψέλη καυσίμου απενεργοποιείται μιας και το IDSMS μπορεί να διαχειριστεί το έλλειμμα ενέργειας στο μικροδίκτυο. Η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιείται μόνο όταν το σύστημα έχει εισέλθει στην κατάσταση λειτουργίας έκτακτης ανάγκης και όλα τα φορτία έχουν αποσυνδεθεί ώστε να προστατεύσει το συσσωρευτή διατηρώντας ένα ελάχιστο αποδεκτό SOC.

Αυτό διατηρεί το μικροδίκτυο λειτουργικό ώστε η συστοιχία Φ/Β και η ανεμογεννήτρια να μπορέσουν να φορτίσουν το συσσωρευτή. Αυτός ο πράκτορας είναι ένας απλός αντιδραστικός πράκτορας.

7.4.4 Επίπεδο ευφυούς επόπτη

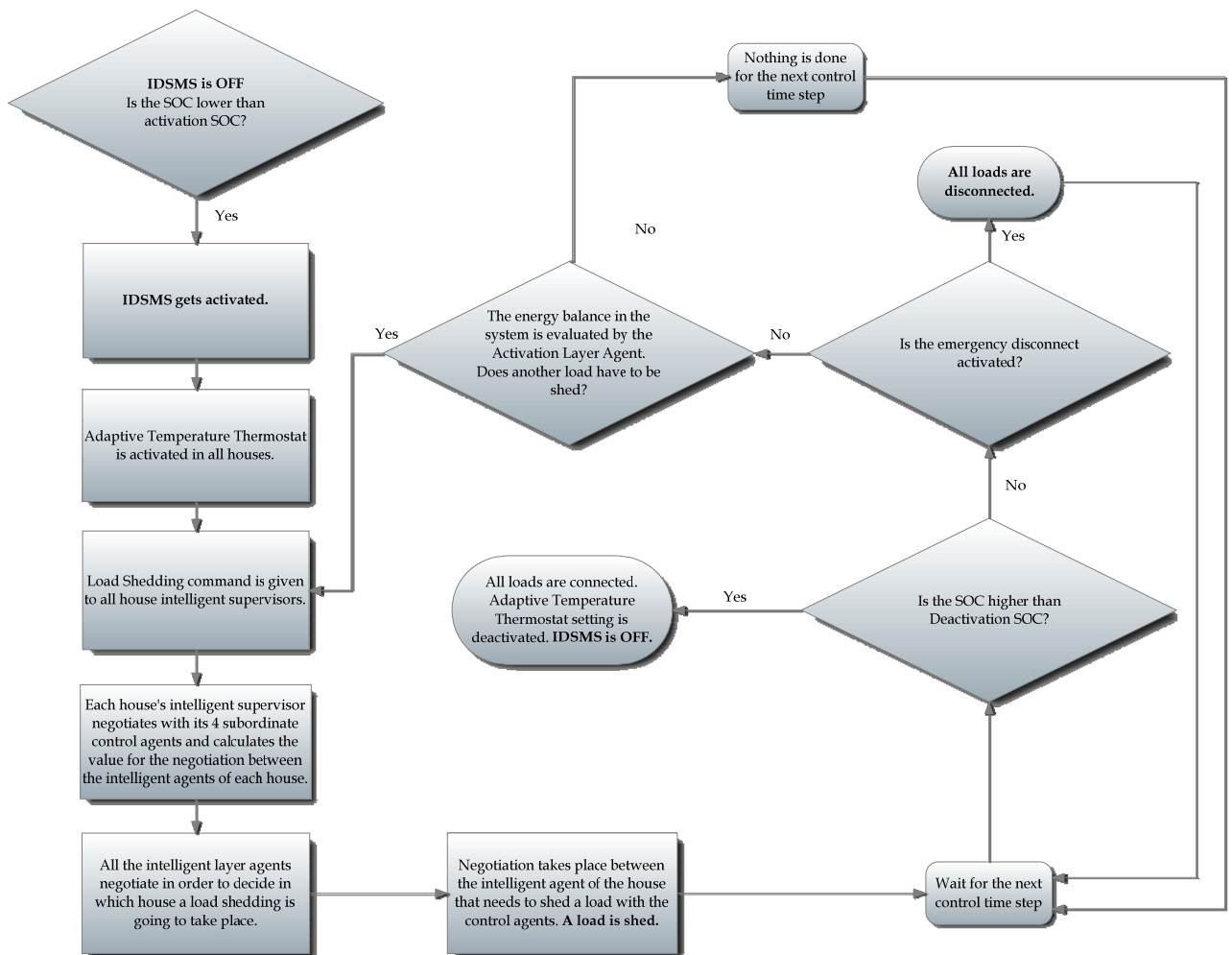
Κάθε κατοικία είναι εφοδιασμένη με έναν ευφυή εποπτικό πράκτορα. Αυτός ο πράκτορας αξιολογεί την κατανάλωση ισχύος στην κατοικία μέσω διαπραγμάτευσης με τους χαμηλότερου επιπέδου πράκτορες ελέγχου και τελικά αποφασίζει να απενεργοποιήσει κάποια ή όλα τα φορτία μετά από διαπραγμάτευση με τους υπόλοιπους ευφείς εποπτικούς πράκτορες των υπολοίπων κατοικιών. Όταν το IDSMS ενεργοποιείται όλοι οι ευφείς εποπτικοί πράκτορες ενεργοποιούν την προσαρμοστική θερμοκρασία του θερμοστάτη για την ψύξη/θέρμανση χώρων. Αν το σήμα για περεταίρω απενεργοποίηση φορτίων είναι ενεργό από τον πράκτορα ενεργοποίησης τότε όλοι οι ευφείς εποπτικοί πράκτορες μεταδίδουν την τιμή που υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην Εικόνα Εικόνα 7.5 Αλγόριθμος υπολογισμού τιμής διαπραγμάτευσης. Μετά ο κάθε ευφυής εποπτικός πράκτορας κάνει μια κατάταξη των τιμών που έχει λάβει από τους υπόλοιπους πράκτορες. Αν βρει την δική του τιμή στην κορυφή της λίστας, τότε στέλνει σήματα ενεργοποίησης στους πράκτορες ελέγχου του χαμηλότερου επιπέδου, αλλιώς στέλνει τα σήματα ενεργοποίησης του προηγούμενου χρονικού βήματος που έχει κρατήσει αποθηκευμένα. Αν το σήμα ενεργοποίησης του IDSMS απενεργοποιηθεί, τότε όλα τα φορτία ενεργοποιούνται ξανά. Οι εισοδοι και οι έξοδοι των ευφών εποπτικών πρακτόρων παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.7, και ο αλγόριθμός τους παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 7.8. Αυτός είναι ένας πράκτορας στόχου.

Πίνακας 7.7 Ευφυής εποπτικός πράκτορας

Inputs	Outputs
1. Activation Signal for Intelligent Demand Side Management	1. Transmit the consumed energy for the past 3 days
2. Activation Signal for further load shedding	2. Acknowledge/ Renounce signal for CA ₁
3. Activation of Adaptive Temperature thermostat for space heating/cooling	3. Acknowledge/ Renounce signal for CA ₂
4. Activation Signal for the information	4. Acknowledge/ Renounce

- of the users for imminent automatic load disconnections
- 5. Consumed energy for the past 3 days.
- 6. Activation Signal of CA₁
- 7. Activation Signal of CA₂
- 8. Activation Signal of CA₃
- 9. Activation Signal of CA₄
- 10. Consumed energy for the past 3 days of house 1
- 11. Consumed energy for the past 3 days of house 2
- n. Consumed energy for the past 3 days of house n

- signal for CA₃
- 5. Acknowledge/ Renounce signal for CA₄
- 6. Set temperature for space heating/cooling
- 7. Reconnect all 4 lines
- 8. Activation of LED for imminent activation of IDSMS



Εικόνα 7.8 Αλγόριθμος του ευφυή εποπτικού πράκτορα

7.5 Επικύρωση του Συστήματος Διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης μέσω προσομοίωσης

Η βάση αυτής της διερεύνησης είναι το βέλτιστο σύστημα της Παραγράφου 6.4. Θεωρείται ότι μετά από μερικά χρόνια λειτουργίας εκείνου του μικροδικτύου χτίζεται μια εξοχική κατοικία στον οικισμό. Τέσσερις άνθρωποι κατοικούν σε αυτό το σπίτι από τις αρχές Ιουνίου μέχρι το τέλος Αυγούστου. Το σπίτι είναι αντίστοιχο με τα άλλα δύο. Το προφίλ κατανάλωσης αυτής της κατοικίας υπολογίζεται με τη διαδικασία που έχει παρουσιαστεί στην Παράγραφο 6.1. Αυτή τη φορά έχει θεωρηθεί 15% μεταβλητότητα από το ένα χρονικό βήμα στο άλλο και 15% μεταβλητότητα από ημέρα σε ημέρα σε σχέση με το βασικό φορτίο. Επίσης μιας και οι μονάδες αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης δεν μπορούν να παράξουν περισσότερο νερό από την ονομαστική ισχύ τους, θεωρείται ότι οι κάτοικοι εκεί αποφάσισαν ότι για τις τοπικές μεταφορικές τους ανάγκες θα τις καλύπτουν από κοινού με τα υπάρχοντα σκουτέρ και ότι οι ανάγκες τους σε νερό θα καλύπτονταν από την υπάρχουσα μονάδα αφαλάτωσης. Έτσι η μέση ημερήσια κατανάλωση νερού αυξήθηκε από τα 1.92 m³ νερού σε 2.16 m³. Το IDSMS υλοποιήθηκε στο TRNSYS.

7.5.1 Ρουτίνες του IDSMS στο TRNSYS

Μερικά μέρη του IDSMS προσομοιώθηκαν με τη χρήση της ρουτίνας εξίσωσης και με τους υπάρχοντες ολοκληρωτές, ενώ για τα υπόλοιπα γράφηκαν νέες ρουτίνες στο TRNSYS. Οι αντλίες θερμότητας, οι γραμμές ενεργοποίησης της κάθε κατοικίας και οι συγκρίσεις μεταξύ των καταναλώσεων των κατοικιών προσομοιώθηκαν με τη ρουτίνα εξίσωσης. Τα μετρητικά ενέργειας προσομοιώθηκαν με τη χρήση περιοδικών ολοκληρωτών. Οι νέες ρουτίνες παρουσιάζονται παρακάτω. Ο πηγαίος κώδικας αυτών των ρουτίνων παρουσιάζεται στο Παράρτημα II.

7.5.1.1 TYPE 366: GREY PREDICTOR

Αυτή η ρουτίνα μπορεί να προβλέψει την τιμή του επόμενου χρονικού βήματος χρησιμοποιώντας τις 4 προηγούμενες. Οι εισοδοί, έξοδοι και παράμετροι της παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.8.

Πίνακας 7.8 TYPE 366: GREY PREDICTOR

Number of Parameter		Description
1	V1	Value of unit 3 time steps before the beginning of the simulation
2	V2	Value of unit 2 time steps before the beginning of the simulation
3	V3	Value of unit 1 time step before the beginning of the simulation

Number of Input		Description
1	CV	Current Value

Number of Output		Description
1	PrV	Predicted Value for the next time step

7.5.1.2 TYPE 250: ACTIVATION AGENT

Αυτή η ρουτίνα προσομοιώνει τον πράκτορα ενεργοποίησης του IDSMS. Οι εισοδοί, έξοδοι και παράμετροί της παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.9.

Πίνακας 7.9 TYPE 250: ACTIVATION AGENT

Number of Parameter		Description
1	SOCL	SOC below which the IDSMS is activated
2	SOCH	SOC above which the IDSMS is deactivated
3	SOCU	SOC below which the users are informed by a LED that load disconnections are imminent
4	SOCE	SOC below which everything is disconnected in order to protect the batteries

Number of Input		Description
1	SOC	State Of Charge
2	F	Frequency of the microgrid [Hz]
3	PRPV	Predicted value of the PVs production in the next time step [W]
4	PRWIND	Predicted value of the Wind Turbines in the next time step [W]
5	PBAT	Power to or from the battery for the current time step [W]

Number of Output		Description
1	DSMA	DSM activation signal
2	MORS	More load shedding activation signal
3	USERS	Activation of the information LED for the users

7.5.1.3 TYPE 251: AGENT NEGOTIATION

Αυτή η ρουτίνα προσομοιώνει την ασύρματη διαπραγμάτευση μεταξύ των ευφρών εποπτικών πρακτόρων για να επιτευχθεί η σύγκριση και να παρθεί η απόφαση ποιος θα αποσυνδέσει κάποιο φορτίο. Ο αλγόριθμος που έχει παρουσιαστεί στην Εικόνα 7.2 προσομοιώνεται και αυτός σε αυτή τη ρουτίνα. Αυτή η ρουτίνα γράφτηκε για να επιτρέψει την μελέτη περίπτωσης των τριών κατοικιών, αλλά μπορεί εύκολα να επικαιροποιηθεί ώστε να μπορεί να προσομοιώσει όσες κατοικίες απαιτούνται. Οι εισοδοι, έξοδοι και παράμετροι της παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.10.

Πίνακας 7.10 TYPE 251: AGENT NEGOTIATION

Number of Parameter		Description
-	-	-
Number of Input		Description
1	KWH1	Energy consumed in the last 3 days from Household 1 [kWh]
2	KWH2	Energy consumed in the last 3 days from Household 2 [kWh]
3	KWH3	Energy consumed in the last 3 days from Household 3 [kWh]
4	SL1	State of lighting line of house 1 (Connected/Disconnected)
5	SR1	State of refrigeration line of house 1 (Connected/Disconnected)
6	SHC1	State of heating/cooling line of house 1 (Connected/Disconnected)
7	SA1	State of the various other appliances line of house 1 (Connected/Disconnected)
8	SL2	State of lighting line of house 2 (Connected/Disconnected)
9	SR2	State of refrigeration line of house 2 (Connected/Disconnected)
10	SHC2	State of heating/cooling line of house 2 (Connected/Disconnected)
11	SA2	State of the various other appliances line of house 2 (Connected/Disconnected)
12	SL3	State of lighting line of house 3

13	SR3	(Connected/Disconnected) State of refrigeration line of house 3 (Connected/Disconnected)
14	SHC3	State of heating/cooling line of house 3 (Connected/Disconnected)
15	SA3	State of the various other appliances line of house 3 (Connected/Disconnected)
16	MORS	Signal if more loads need to be disconnected in this time step
17	DSMA	Activation signal of the IDSMS
Number of Output		Description
1	AC1	Activation signal that House 1 needs to shed a load
2	AC2	Activation signal that House 2 needs to shed a load
3	AC3	Activation signal that House 3 needs to shed a load
4	CC1	Energy for negotiation for House 1 (algorithm in Εικόνα 7.4)
5	CC2	Energy for negotiation for House 2 (algorithm in Εικόνα 7.4)
6	CC3	Energy for negotiation for House 3 (algorithm in Εικόνα 7.4)

7.5.1.4 TYPE257-9: INTELLIGENT SUPERVISOR AGENT

Αυτή η ρουτίνα προσομοιώνει τον ευφυή εποπτικό πράκτορα που υπάρχει σε κάθε κατοικία. Οι εισοδοί, έξοδοι και παράμετροι της παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.11.

Πίνακας 7.11 TYPE257-9: INTELLIGENT SUPERVISOR AGENT

Number of Parameter		Description
1	PMVL	Absolute value of the PMV above which the indoor climate is considered very annoying
2	TH	The thermostat temperature the habitants of the house choose for heating [⁰ C]
3	TC	The thermostat temperature the habitants of the house choose for cooling [⁰ C]
Number of Input		Description
1	ADSM	Activation signal of the IDSMS
2	AC	Signal from Type 251 to disconnect a load
3	AU	Signal for the LED activation informing the users for imminent load disconnections

4	AE	Signal for emergency disconnection of all loads
5	PMV	PMV inside the house
6	Tout	Outside dry bulb temperature [$^{\circ}$ C]
Number of Output		Description
1	LSL	State of the lighting line for the previous timestep
2	LSR	State of the refrigeration line for the previous timestep
3	LSHC	State of the heating and cooling line for the previous timestep
4	LSA	State of the other electrical appliances line for the previous timestep
5	LED	State of the user's information LED
6	TH	Set temperature for heating [$^{\circ}$ C]
7	TC	Set temperature for cooling [$^{\circ}$ C]
8	SL	State of the lighting line for the current timestep
9	SR	State of the refrigeration line for the current timestep
10	SHC	State of the heating and cooling line for the current timestep
11	SA	State of the other electrical appliances line for the current timestep

7.5.1.5 TYPE390: ELECTROLYZER,FUEL CELL AND DESALINATION AGENTS

Αυτή η ρουτίνα προσομοιώνει τους πράκτορες της μονάδος ηλεκτρόλυσης, της μονάδας αφαλάτωσης και της κυψέλης καυσίμου. Οι εισοδοι, έξοδοι και παράμετροι της παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.12.

Πίνακας 7.12 TYPE390: ELECTROLYZER,FUEL CELL AND DESALINATION AGENTS

Number of Parameter		Description
1	WM	Minimum water that must be present in the water tank [m^3]
2	H2M	Minimum hydrogen that must be present in the hydrogen tank [Nm^3]
3	WA	Average hourly water consumption [m^3]
4	H2A	Average hourly hydrogen consumption [Nm^3]
Number of Input		Description
1	FCOP	Fractional operation point of the fuel cell given by the EMS
2	ELOP	Fractional operation point of the electrolyzer

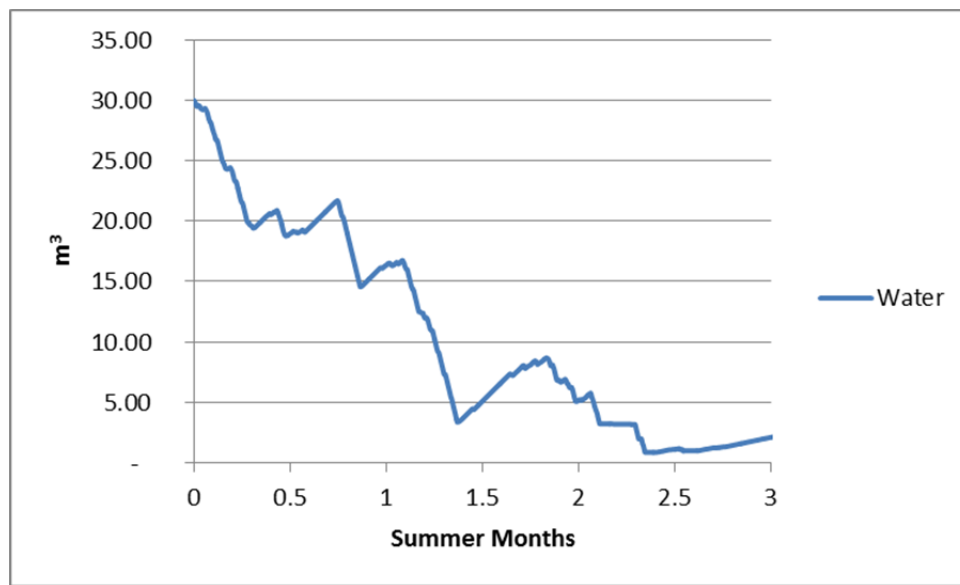
3	DSOP	given by the EMS Fractional operation point of the desalination unit given by the EMS
4	WAT	Water in the water tank [m ³]
5	H2	Hydrogen in the hydrogen tank [Nm ³]
6	PP	Produced Power by the PV arrays and wind turbines [W]
Number of Output		Description
1	OP _{FC}	Fractional operation point of the Fuel Cell
2	OP _{EL}	Fractional operation point of the Electrolyzer
3	OP _{DS}	Fractional operation point of the Desalination Unit

7.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης IDSMS

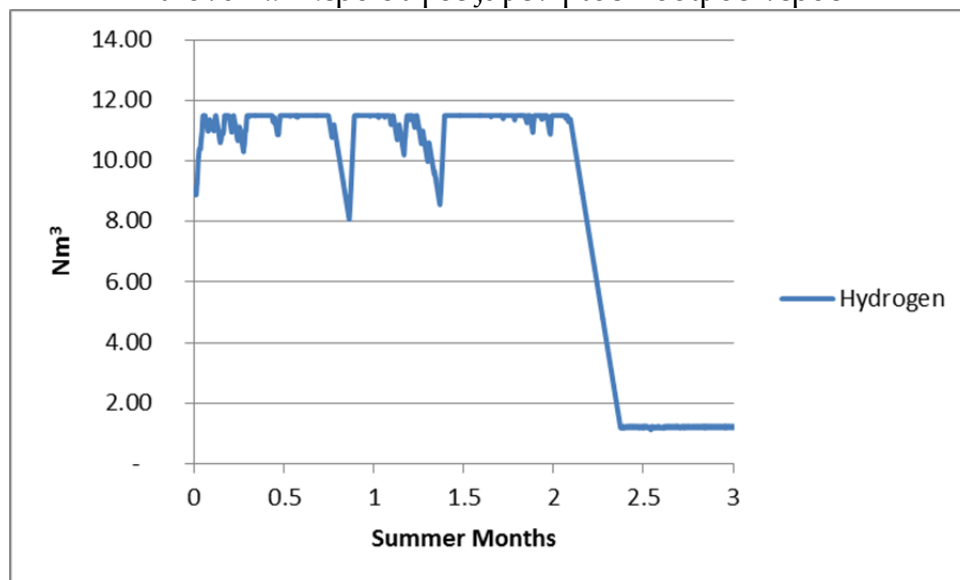
Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση χωρίς την εφαρμογή κάποιου συστήματος διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης. Όπως αναμενόταν για αρκετές ημέρες οι κάτοικοι έμειναν χωρίς πόσιμο νερό και υδρογόνο. Η αυξημένη παραγωγή των Φ/Β λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας του θέρους δεν επαρκούσε να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες. Όταν το προτεινόμενο IDSMS εφαρμόστηκε η απόδοση του μικροδικτύου αυξήθηκε σημαντικά. Το πρώτο σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι το ελάχιστο SOC που καταγράφηκε ήταν 17.46%. Αυτό σημαίνει ότι η αυτόματη αποσύνδεση όλων των φορτίων σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης που είχε οριστεί στο 15% δεν ενεργοποιήθηκε ποτέ. SOC μικρότερα από 20% παρατηρήθηκαν για περίπου 5μιση ώρες μόνο στη διάρκεια του καλοκαιριού.

Το δεύτερο σημαντικό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στις Εικόνες Εικόνα 7.9 και Εικόνα 7.10 είναι ότι ο πρωταρχικός στόχος του να υπάρχει επαρκές πόσιμο νερό και υδρογόνο επιτεύχθηκε. Όσο αφορά το πόσιμο νερό, αρκετό νερό είχε παραχθεί τους προηγούμενους μήνες και έτσι το περισσότερο χρησιμοποιήθηκε μέχρι περίπου το μέσο του καλοκαιριού. Μετά από αυτό το χρονικό σημείο το IDSMS διασφαλίζει ότι υπάρχει αρκετή παραγωγή ώστε να υπάρχει πάντα αρκετή ποσότητα νερού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η κατανάλωση σε νερό αυξήθηκε σχεδόν 20% σε σύγκριση με τις αρχικές ανάγκες που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του συστήματος. Για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης επίσης γίνεται

φανερό πως το IDSMS διασφαλίζει πάντα την ύπαρξη της ελάχιστης αποδεκτής ποσότητας υδρογόνου όλο τον Αύγουστο. Επειδή και η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η μονάδα αφαλάτωσης καταναλώνουν ισχύ για να παράξουν αρκετό νερό και υδρογόνο για να καλυφθούν οι καθημερινές ανάγκες, είναι πολύ δύσκολο να ξαναγεμίσουν οι αποθηκεύσεις τους. Για το δεύτερο μισό του Αυγούστου και οι δύο συσκευές καταφέρνουν οριακά να καλύψουν τις ανάγκες.



Εικόνα 7.9 Νερό στη δεξαμενή του πόσιμου νερού



Εικόνα 7.10 Υδρογόνο στο δοχείο μεταλλικών υδριδίων

Φορτία αποσυνδέθηκαν για περίπου 33 ώρες μόνο στη διάρκεια του καλοκαιριού. Δύο παραδείγματα θα παρουσιαστούν αναλυτικά. Το πρώτο ξεκινά το βράδυ της 10^{ης} Αυγούστου και τελειώνει περίπου μισή ημέρα αργότερα. Οι συνδέσεις και αποσυνδέσεις φορτίων παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 7.13.

Το IDSMS ενεργοποιείται και η 1^η κατοικία έχει καταναλώσει την περισσότερη ενέργεια τις τελευταίες 3 ημέρες. Στο πρώτο χρονικό βήμα ελέγχου οι διάφορες ηλεκτρικές καταναλώσεις του απενεργοποιούνται. Ο πράκτορας ενεργοποίησης στέλνει σήμα για περισσότερες αποσυνδέσεις και έτσι στο επόμενο βήμα η 1^η κατοικία απενεργοποιεί και την αντλία θερμότητας. Επειδή απαιτείται να απενεργοποιηθούν και άλλα φορτία, στο επόμενο χρονικό βήμα επιλέγεται διαφορετική κατοικία, μιας και το φορτίο ψύξης τροφίμων της 1^{ης} κατοικίας θεωρείται πιο σημαντικό από τις συσκευές ή την αντλία θερμότητας των άλλων κατοικιών. Η 3^η κατοικία είχε τη δεύτερη μεγαλύτερη κατανάλωση τις τελευταίες 3 ημέρες και έτσι πρέπει να απενεργοποιήσει ένα φορτίο και έτσι απενεργοποιεί την αντλία θερμότητας. Το μικροδίκτυο φαίνεται να ισορροπεί και από εκεί και πέρα δεν υπάρχουν άλλες αποσυνδέσεις. Μετά από περίπου 12 ώρες ο συσσωρευτής έχει φορτιστεί στο όριο απενεργοποίησης του IDSMS και έτσι όλα τα φορτία ξαναενεργοποιούνται.

Πίνακας 7.13 10-11^η Αυγούστου

	House 1				House 2				House 3			
	L	R	H/C	A	L	R	H/C	A	L	R	H/C	A
21:00:00	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
21:07:30	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
21:15:00	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
21:22:30	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	ON
...
09:22:30	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

L: Lighting Line
R: Refrigeration Line
H/C: Space Heating/Cooling Line
A: Other Electrical Appliances Line

Το δεύτερο παράδειγμα είναι από την 24^η και 25^η Ιουνίου. Λίγο μετά τις έξι και μισή το απόγευμα το IDSMS ενεργοποιείται. Όλα τα φορτία απενεργοποιούνται μέσα στην επόμενη μιάμιση ώρα όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα Πίνακας 7.14. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η ανεμογεννήτρια παράγει από πολύ λιγη ισχύ έως καθόλου. Μετά από την ανατολή του ήλιου ο συσσωρευτής φορτίζεται μέσω της συστοιχίας Φ/Β. Το IDSMS απενεργοποιείται και όλα τα φορτία ξαναενεργοποιούνται στις 10 παρά τέταρτο.

Πίνακας 7.14 10^η-11^η Αυγούστου

	House 1				House 2				House 3			
	L	R	H/C	A	L	R	H/C	A	L	R	H/C	A
18:22:30	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
18:30:00	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
18:37:30	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
18:45:00	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	ON
18:52:30	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
19:00:00	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
19:07:30	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
19:15:00	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
19:22:30	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
19:30:00	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
19:37:30	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
19:45:00	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
19:52:30	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
...
21:45:00	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

L: Lighting Line
R: Refrigeration Line
H/C: Space Heating/Cooling Line
A: Other Electrical Appliances Line

Συνοψίζοντας, με τη χρήση του εξελιγμένου συστήματος διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης το μικροδίκτυο πολυπαραγωγής καθίσταται πιο ευέλικτο. Αν για οποιοδήποτε λόγο στο μέλλον οι ανάγκες αυξηθούν και δεν υπάρχει η οικονομική δυνατότητα προσθήκης νέων παραγωγών ενέργειας μέσω του IDSMS ο υπάρχον εξοπλισμός θα αξιοποιηθεί με το βέλτιστο τρόπο. Επίσης το IDSMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ενός μικροδικτύου πολυπαραγωγής με δεδομένο περιορισμένο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης και που το κεφάλαιο αυτό δεν είναι ικανό να αγοράσει τις συσκευές εκείνες που θα διασφάλιζαν μηδενική έλλειψη ισχύος, πόσιμου νερού και υδρογόνου στη διάρκεια του έτους. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια είναι εφικτός ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός συστήματος με τους οικονομικούς περιορισμούς σχηματίζοντας μια νέα συνάρτηση κόστους, χρησιμοποιώντας τις προτεραιότητες του επενδυτή ως περιορισμούς.

8 Οικονομική αξιολόγηση του Αυτόνομου Έξυπνου Μικροδικτύου πολυπαραγωγής

8.1 Υπόβαθρο Οικονομικής Αξιολόγησης

Η τοπολογία του αυτόνομου έξυπνου μικροδικτύου πολυπαραγωγής αποδείχθηκε ότι είναι τεχνικά εφικτή και επίσης βελτιστοποιήθηκε. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια οικονομική αξιολόγηση αυτής της τοπολογίας. Στο πρώτο βήμα θα υπολογιστεί η Καθαρή Παρούσα Αξία του συστήματος, μαζί με την περίοδο αποπληρωμής χρησιμοποιώντας την μέθοδο των προεξοφλημένων χρηματικών ροών. Η ανάλυση προεξοφλημένων χρηματικών ροών χρησιμοποιεί προβλέψεις μελλοντικών χρηματοροών και τις προεξοφλεί ώστε να καταλήξει στην τωρινή αξία. Το μικροδίκτυο πολυπαραγωγής παράγει ηλεκτρική ενέργεια, πόσιμο νερό, καύσιμο για μετακινήσεις και ψύξη και θέρμανση χώρων. Για την αξία του πόσιμου νερού και του καυσίμου για μεταφορές χρησιμοποιήθηκαν τιμές της αγοράς (Νοέμβριος 2011). Η ψύξη και θέρμανση χώρων θεωρήθηκαν ως ηλεκτρικές καταναλώσεις. Για να προσδιοριστεί η αξία της ηλεκτρικής kWh σχεδιάστηκε και αξιολογήθηκε για 20ετή ορίζοντα ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρογεννήτριας πετρελαίου και συσσωρευτών. Αυτό το τυπικό σύστημα είναι η συνήθης πρακτική για κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές.

Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας, όπως οι τιμές της βενζίνης και του πετρελαίου, το επιτόκιο και η τιμή των ηλεκτροχημικών συσκευών προσθέτουν αβεβαιότητα σε διάφορους βαθμούς στην καθαρή παρούσα αξία. Για να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση της κερδοφορίας ενός μικροδικτύου πολυπαραγωγής πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση Monte Carlo (MCS), μια μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την αξιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Yu and Tao, 2009). Η βασική αρχή της Monte Carlo είναι ότι η δειγματοληψία βασίζεται στην ερμηνεία της συχνότητας πιθανότητας και απαιτεί μια σταθερή ροή τυχαίων αριθμών (Winston, 1991). Για συνεχείς κατανομές οι τυχαίοι αριθμοί παράγονται χρησιμοποιώντας την αντίστροφη μέθοδο μετασχηματισμού. Αυτή η μέθοδος

απαιτεί μια συγκεντρωτική συνάρτηση κατανομής (CDF) $f(x)$ σε κλειστή μορφή και συνίσταται στο δόσιμο μιας τυχαίας τιμής στην $f(x)$ και επίλυση ως προς x .

Τα δεδομένα της προσομοίωσης μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας μια πεπερασμένη προσέγγιση προσομοίωσης. N ανεξάρτητες επαναλήψεις του μοντέλου λαμβάνουν χώρα χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχικές συνθήκες, αλλά κάθε επανάληψη τρέχει με μια διαφορετική ακολουθία τυχαίων αριθμών. Αν το μέγεθος της απόδοσης αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή X , αυτή η προσέγγιση δίνει τους εκτιμητές X_1, \dots, X_n από τις N επαναλήψεις. Αυτοί οι εκτιμητές χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ένα $100(1-\alpha)$ ποσοστό $n \pm t_{n-1, \alpha/2} S$ (EQ 46) όπου $t_{n-1, \alpha/2}$ είναι το άνω $1-\alpha/2$ κρίσιμο σημείο για μια t κατανομή με $n-1$ βαθμούς ελευθερίας

$$\bar{X}(n) \pm t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \quad (\text{EQ 46})$$

Όπου: $\bar{X}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ και $S^2(n) = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}(n)]^2}{n-1}$

Για μια δεδομένη τιμή n , επιστρέφει το διάστημα εμπιστοσύνης για τον μέσο του πληθυσμού. Με άλλα λόγια μετά την προσομοίωση μπορεί να απαντηθεί η ερώτηση του ποια είναι η πιθανότητα αρνητικής Καθαρής Παρούσας Αξίας.

Ακολουθήθηκαν τα βήματα που έχουν προταθεί από τους Schade και Wiesenthal (Schade and Wiesenthal, 2011):

1. Ορίζεται η επιρροή των σημαντικών παραμέτρων στον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας.

2. Πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση ώστε να προσδιοριστούν τα διαστήματα αβεβαιότητας όπως και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τις σημαντικές παραμέτρους. Όπου δεν υπάρχει πληροφορία για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτή διαμορφώνεται από τα διαθέσιμα στοιχεία.

3. Πραγματοποιείται η προσομοίωση Monte Carlo.

Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται για το καλύτερο μικροδίκτυο της μελέτης περίπτωσης του Κεφαλαίου 6.

8.2 Ντετερμινιστική Αξιολόγηση Επένδυσης

Το αποφευχθέν κόστος του πόσιμου νερού θεωρήθηκε να είναι 5.5 €/m³ και το κόστος της βενζίνης 1.72 € / l. Και οι δύο τιμές είναι σε συνάφεια με τις τιμές της αγοράς για τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους το 2011. Για τον υπολογισμό του κόστους της ηλεκτρικής kWh σχεδιάστηκε και αξιολογήθηκε ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρογεννήτριας πετρελαίου – συσσωρευτών για μια περίοδο 20 ετών. Αυτό το σύστημα αποτελείται από μια τυπική ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου 4 kW (που είναι εξοπλισμένη με κινητήρα χαμηλών στροφών που επέκτεινε τον αναμενόμενο χρόνο ζωής πέρα των 12000 ωρών), συσσωρευτή 350 Ah στα 48 V, ένα ρυθμιστή φόρτισης, έναν αναστροφέα και μια δεξαμενή πετρελαίου. Η ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου έχει χρόνο ζωής ίσο με 12000 ώρες και συνεπώς απαιτεί αλλαγή κάθε 4 έτη και ο συσσωρευτής απαιτεί αντικατάσταση κάθε 7 έτη. Το επιτόκιο που έχει ληφθεί υπόψη είναι ίσο με 6%. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, εκτός από το κόστος του πετρελαίου, υπολογίζεται στα 600 ευρώ ανά έτος. Αυτό το κόστος περιλαμβάνει και το κόστος μεταφοράς του πετρελαίου από το βενζινάδικο στην απομονωμένη περιοχή. Η τιμή της ηλεκτρογεννήτριας πετρελαίου θεωρείται ίση με 5000 €, του συσσωρευτή 8000 €, του αναστροφέα και του ρυθμιστή φόρτισης 3000 € και της δεξαμενής πετρελαίου 1000 €. Το κόστος επένδυσης του μικροδικτύου πολυπαραγωγής υπολογίζεται στη βάση εμπορικών τιμών των εξαρτημάτων του. Οι καθαρές χρηματικές ροές παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1 και είναι ουσιαστικά το άθροισμα όλων των ροών που πραγματοποιούνται στη διάρκεια του έτους.

Πίνακας 8.1 Καθαρές ροές χρημάτων

Type of Monetary flow	Item	Years					
		0	1-6	7	8-13	14	15-20
Inflows (or avoided costs)	Electricity		8662	8662	8662	8662	8662
	Water		3854	3854	3854	3854	3854
	Fuel		1324	1324	1324	1324	1324
Outflows	PV	20300					
	Windturbine	12000					
	Fuel Cell	2000					
	Electrolyzer Unit	8000					

	Metal Hydride Tank	11500					
	Battery bank	7200		7200		7200	
	Scooters	20000					
	Desalination Unit	7000					
	Water Tank	2460					
	Energy Management Sensors and Equipment	3000					
	Installation Cost	5000					
	OM	0	500	500	500	500	500
	NCF	-98460	13341	6141	13341	6141	13341.82

Η Καθαρή Παρούσα Αξία του μικροδικτύου πολυπαραγωγής είναι 46585 € η Περίοδος Αποπληρωμής είναι ίση με 11.7 έτη.

8.3 Στοχαστική Αξιολόγηση Επένδυσης

Το πρώτο βήμα για την MCS περιλαμβάνει τον ορισμό των παραμέτρων με τη μεγαλύτερη επιρροή. Μια ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για αυτό το σκοπό (Schade and Wiesenthal, 2011) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 8.2. Η τιμή του πετρελαίου, η τιμή του πόσιμου νερού και το επιτόκιο επηρεάζουν περισσότερο την Καθαρή Παρούσα Αξία. Από τα υπόλοιπα εξαρτήματα, τα Φ/Β πάνελ και τα σκούτερ επηρεάζουν την Καθαρή Παρούσα Αξία. Η επιρροή των ηλεκτροχημικών συσκευών είναι χαμηλή, αλλά το κόστος τους αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον (Khan and Iqbal, 2005), και για αυτό το λόγο θα ληφθούν υπόψη στην MCS. Οι τιμές του πετρελαίου και της βενζίνης, του πόσιμου νερού και του επιτοκίου επίσης παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα και θα ληφθούν υπόψη στην MCS. Το κόστος των Φ/Β πάνελ και των συσσωρευτών δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές στην αγορά σήμερα, αλλά αναμένεται να μειωθούν σημαντικά τα επόμενα έτη (Hoffmann, 2006). Τα υβριδικά σκούτερ αναμένεται επίσης να μειώσουν τις τιμές τους λόγω της αύξησης της παραγωγής. Για αυτούς τους λόγους αποφασίστηκε να διερευνηθούν δύο σενάρια με την MSC, ένα για το έτος 2011 και ένα για το έτος 2015. Το κόστος της μονάδας αφαλάτωσης, της δεξαμενής πόσιμου νερού, το

κόστος εγκατάστασης, το κόστος του ελεγκτή και της ανεμογεννήτριας αναμένεται να παραμείνει σταθερό στα προσεχή έτη και για αυτό δεν θα ληφθούν υπόψη στην MCS.

Πίνακας 8.2 Επίδραση των αλλαγών των παραμέτρων στην Καθαρή Παρούσα Αξία

Change of NPV as percentage Parameter	Change of Output (Relative to NPV)			
	-30%	-15%	+15%	+30%
PV array with inverter	13.1	6.5	-6.5	-13.1
Windturbine	7.7	3.9	-3.9	-7.7
Fuel Cell	1.3	0.6	-0.6	-1.8
Electrolyzer Unit	5.2	2.6	-2.6	-5.2
Metal Hydride Tank	7.4	3.7	-3.7	-7.4
Battery bank	9.8	4.9	-4.9	-9.8
Scooter	12.9	6.4	-6.4	-12.9
Desalination Unit	4.5	2.3	-2.3	-4.5
Water Tank	1.6	0.8	-0.8	-1.6
Gasoline Fuel	-9.8	-4.9	4.9	9.8
Diesel Fuel	-35.9	-17.9	17.9	35.9
Interest Rate	45.7	21.5	-19.3	-36.5
PoΠίνακας Water	-28.5	-14.2	14.2	28.5

Οι τιμές των καυσίμων δεν μπορούν να προβλεφτούν με βεβαιότητα. Επίσης λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης το επιτόκιο μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά. Τέλος οι συσκευές του υδρογόνου παρουσιάζουν σταθερές πωτικές τάσεις στις τιμές τους. Αν η διείσδυση του υδρογόνου στον τομέα της αυτοκίνησης είναι σημαντική, οι τιμές για τις στατικές εφαρμογές θα μειωθούν με τη σειρά τους και αυτές. Τα υβριδικά σκούτερ αναμένεται να είναι σημαντικά φθηνότερα το 2015 λόγω της αναμενόμενης μείωσης των συσκευών υδρογόνου και των συσσωρευτών.

Υπάρχουν δύο ομάδες μεταβλητών που παρουσιάζουν συσχέτιση. Η πρώτη βασίζεται στην τιμή του βαρελιού του πετρελαίου (για τα ορυκτά καύσιμα) και η δεύτερη αποτελείται από τις ηλεκτροχημικές συσκευές. Για αυτές τις δύο ομάδες θα χρησιμοποιηθεί η τριγωνική κατανομή για την παραγωγή ενός αριθμού μεταξύ 0 και 1 και αυτός ο αριθμός θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις που υπολογίζουν τις

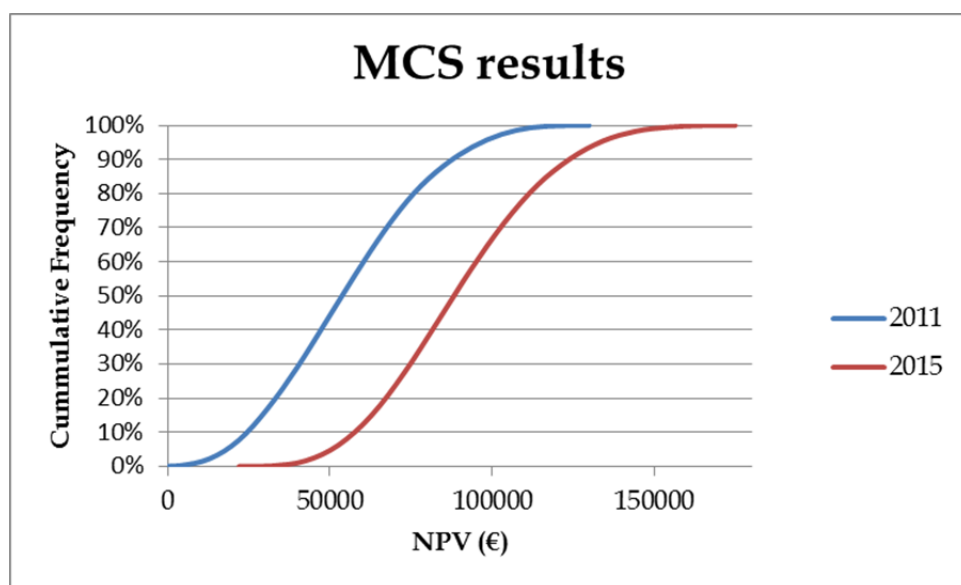
αντίστοιχες τιμές. Η τιμή θα υπολογίζεται από την χαμηλότερη δυνατή τιμή με πρόσθεση αυτού του αριθμού πολλαπλασιασμένου με τη διαφορά της μέγιστης δυνατής με την ελάχιστη δυνατή τιμή. Ο μέσος για την τριγωνική κατανομή των τιμών των καυσίμων θεωρείται 0.4 που σημαίνει ότι η πιθανότητα να αυξηθούν οι τιμές είναι μικρότερη από το να μείνουν σταθερές ή να μειωθούν. Αυτό αποφασίστηκε γιατί οι τωρινές τιμές στην Ελλάδα (2011) έχουν φτάσει στο ιστορικό μέγιστο. Για τις ηλεκτροχημικές συσκευές ο μέσος που επιλέχθηκε είναι το 0.2 γιατί αναμένεται ότι οι συσκευές υδρογόνου θα ακολουθήσουν πτωτική πορεία (Khan and Iqbal). Πρέπει να σημειωθεί ότι ήδη μια εταιρία έχει μειώσει σημαντικά το κόστος των μονάδων ηλεκτρόλυσης στον κατάλογο του Φθινοπώρου 2011 και άλλες εταιρίες αναμένεται να ακολουθήσουν λόγω ανταγωνισμού. Το επιτόκιο και τα κόστη του πόσιμου νερού, των Φ/Β και των συσσωρευτών θεωρείται ότι ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Για τον υπολογισμό 10000 επαναλήψεων χρειάζεται περίπου ένα λεπτό σε ένα τυπικό υπολογιστή (3 GHz CPU, 2 GB ram). Μιας και ο υπολογιστικός χρόνος είναι πολύ μικρός αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν 32000 επαναλήψεις (που είναι το μέγιστο όριο στον κώδικα της macro Excel VBA που αναπτύχθηκε) για την MCS για να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια. Ο κώδικας της VBA macro για την τριγωνική κατανομή και της προσομοίωσης MCS παρουσιάζονται στο Παράρτημα I.

Κατά αυτό τον τρόπο πραγματοποιήθηκε MCS για να υπάρχει καλύτερη εικόνα για την κερδοφορία αυτής της επένδυσης. Το μέγιστο και ελάχιστο κόστος για κάθε μια από τις μεταβλητές για τα 2 σενάρια παρουσιάζονται στον Πίνακα Πίνακας 8.3 Παράμετροι για την MSC για το έτος 2011 και στην παρένθεση για το έτος 2015. Οι συγκεντρωτικές κατανομές της Καθαρής Παρούσας Αξίας παρουσιάζονται στην Εικόνα Εικόνα 8.1.

Πίνακας 8.3 Παράμετροι για την MSC για το έτος 2011 και στην παρένθεση για το έτος 2015

Parameter	Unit	Distribution	Minimum	Mode	Maximum
Gasoline Fuel	€/l	Triangular	1.60 (1.40)	1.68 (1.62)	2.00 (2.50)
Diesel Fuel	€/l	Triangular	1.35 (1.20)	1.42 (1.36)	1.70 (2.00)
Fuel Cell	€/400 W	Triangular	1200 (500)	1400 (700)	2200 (1500)

Electrolyzer Unit	€/1000 W	Triangular	6000 (3000)	7200 (4000)	12000 (8000)
Metal Hydride Tank	€/11.5 Nm ³ H ₂	Triangular	10000 (2500)	10700 (4000)	13500 (10000)
Interest Rate	-	Uniform	0.04 (0.04)	N/A	0.08 (0.08)
ΡοΠινάκας Water	€/m ³	Uniform	2 (2)	N/A	10 (10)
PV array with inverter	€/array	Uniform	12500 (8000)	N/A	27500 (18000)
Battery Bank	€/(300 Ah/48 V)	Uniform	5500 (3000)	N/A	8500 (7000)
Hybrid Scooters	€	Uniform	18000 (8000)	N/A	22000 (12000)



Εικόνα 8.1. Net Present Value distribution curve

Και τα δύο σενάρια παρουσιάζουν επενδύσεις μηδενικού ρίσκου μιας και δεν υπάρχουν αρνητικές Καθαρές Παρούσες Αξίες. Η μέση τιμή της Καθαρής Παρούσας Αξίας για το σενάριο του 2011 είναι ίση με 54922 € και για το σενάριο του 2015 είναι ίση με 89582 €.

9 Συμπεράσματα – Μελλοντικά Ερευνητικά Μονοπάτια

Σε αυτή τη διατριβή προτάθηκε, βελτιστοποιήθηκε και επικυρώθηκε τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά μια καινοτόμος προσέγγιση για την κάλυψη αναγκών σε απομονωμένες περιοχές. Για να μπορέσει να επιβιώσει μια κοινότητα σε μια απομονωμένη περιοχή στις ημέρες μας πρέπει να καλύπτονται οι παρακάτω ανάγκες:

- Τροφή
- Πόσιμο νερό
- Ικανά καταλύματα με ψύξη και θέρμανση χώρων
- Φωτισμός
- Συντήρηση τροφίμων με ψύξη/κατάψυξη
- Ανάγκες νοικοκυριού (μαγειρέμα, πλύσιμο κλπ.)
- Μετακινήσεις
- Τηλεπικοινωνίες
- Διασκέδαση

Όλες οι παραπάνω ανάγκες εκτός από την τροφή, που μπορεί να καλυφθεί μόνο μέσω της γεωργίας, μπορούν να καλυφθούν με επιτυχία από την προτεινόμενη τοπολογία. Επιπρόσθετα το αποτύπωμα CO₂ της κοινότητας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, μιας και το σύστημα βασίζεται αποκλειστικά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Κατά αυτό τον τρόπο μια τέτοια απομονωμένη κοινότητα μπορεί να αναπτυχθεί με τρόπο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον.

Όλες οι συσκευές και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για ένα τέτοιο έξυπνο μικροδίκτυο υπάρχουν ήδη διαθέσιμες στην αγορά από περισσότερες της μιας εταιρίες. Μέσω της καινοτόμου σύνδεσης όλων αυτών των συσκευών μαζί με το Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας βασισμένο στην υπολογιστική νοημοσύνη μπορεί να κάνει αυτή την τοπολογία πλήρως λειτουργική.

Υλοποιήθηκε ένα εργαλείο σχεδιασμού έτσι ώστε να μπορούν να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν τέτοια μικροδίκτυα σε όλο τον κόσμο με ευκολία. Οι εισοδοί που απαιτούνται για αυτό το εργαλείο είναι:

- Οι μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί το ηλιακό και αιολικό δυναμικό, όπως και η θερμοκρασία

για να μπορέσουν να καλυφθούν με βέλτιστο τρόπο οι ανάγκες σε ψύξη και θέρμανση.

- Οι ανάγκες προς κάλυψη στην μορφή ενός προφίλ καταναλώσεων ηλεκτρικής ισχύος, πόσιμου νερού και καυσίμου για μετακινήσεις.
- Η διαθεσιμότητα κάθε είδους άλλης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στην περιοχή (όπως η δυνατότητα για ένα μικρο-υδροηλεκτρικό ή μια γεωθερμική εγκατάσταση)
- Τεχνικά στοιχεία συσκευών που είναι διαθέσιμα τοπικά ή περιφερειακά κοντά στην περιοχή ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κοστολόγια εισαγωγών.

Αυτό το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με νέους τύπους Φ/Β, ανεμογεννητριών, συσκευών υδρογόνου και μονάδων αφαλάτωσης όπως αυτές γίνονται διαθέσιμες μελλοντικά. Η προσέγγιση της προσομοίωσης ισχύος το επιτρέπει αυτό.

Τα εργαλεία υπολογιστικής νοημοσύνης αποδείχθηκαν μεγάλης αξίας για τη μεθοδολογία σχεδιασμού και για το Σύστημα Διαχείρισης της Ενέργειας. Η συνδυαστική προσέγγιση Δικτύων Petri και Ασαφών Γνωσιακών Χαρτών αποδείχθηκε πιο απλή όσο αφορά τους υπολογισμούς και κατά αυτό τον τρόπο πιο εύκολα βελτιστοποιήσιμη. Επίσης η λειτουργία του Συστήματος διαχείρισης της ενέργειας βασίζεται σε ισοζύγια ισχύος στο μικροδίκτυο. Με την αλλαγή μερικών από τις παραμέτρους του μπορεί να συνεχίσει να είναι λειτουργικό ακόμη και αν το μικροδίκτυο επεκταθεί στο μέγιστο που αυτή η τεχνολογία επιτρέπει (αυτή τη στιγμή περίπου 500 kW/3 φάσεις). Η υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης της ενέργειας είναι εύκολη μιας και ο κώδικας μπορεί εύκολα να μεταφραστεί στο Matlab ή το Labview και από εκεί σε κάποιο PLC, ολοκληρωμένο κύκλωμα ή υπολογιστή εξοπλισμένο με κάρτα με εισόδους/εξόδους.

Ο συσσωρευτής είναι ακόμη η Αχίλλειος πτέρνα των συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Με τη χρήση του εξελιγμένου συστήματος διαχείρισης της ενέργειας το μέγεθος του συσσωρευτή μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Τέλος το σύστημα αποτελείται από συναρτησιακά στοιχεία. Αν στο μέλλον οι ανάγκες αυξηθούν είναι πολύ εύκολα να προστεθούν κάποιες συστοιχίες Φ/Β ή κάποια ανεμογεννήτρια. Ακόμη και αν δεν υπάρχει διαθέσιμο κεφάλαιο, το σύστημα διαχείρισης του φορτίου από την πλευρά της κατανάλωσης θα επιτρέψει τις υπάρχουσες συσκευές να λειτουργήσουν κοντά στα τεχνικά τους όρια.

Η μελλοντική έρευνα θα έπρεπε να συγκεντρωθεί στις τεχνολογίες αποθήκευσης της ενέργειας. Οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης μολύβδου-οξέος έχουν αγγίξει την τεχνολογική τους κορύφωση και έχουν τα μειονεκτήματα των συχνών αντικαταστάσεων μετά από μερικά χρόνια και περιέχουν βαρέα μέταλλα τα οποία αποτελούν περιβαλλοντικό κίνδυνο αν δεν υπάρξει σωστή διαχείριση μετά το τέλος του λειτουργικού κύκλου ζωής τους. Οι συσσωρευτές λιθίου ιόντων υπάρχουν ήδη διαθέσιμοι στην αγορά και παρουσιάζουν πολύ υποσχόμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Το κόστος τους παρουσιάζει πτωτική τάση κυρίως λόγω των χρήσεών τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Οι συσσωρευτές τύπου Zebra και οξειδοαναγωγικής ροής αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς και είναι ακόμη και σήμερα διαθέσιμες για αγορά, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι η διαθεσιμότητά τους είναι ακόμη σε μικρούς αριθμούς με πολύ υψηλό κόστος. Οι υπερπυκνωτές και οι υβριδικοί υπερπυκνωτές θα πρέπει να διερευνηθούν για χρήση είτε μόνοι τους είτε σε υβριδικές τοπολογίες μαζί με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Το Σύστημα Διαχείρισης της ισχύος από την πλευρά της κατανάλωσης πρέπει να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες ώστε να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω και πρωτότυπα των ασύρματων πρακτόρων πρέπει επίσης να κατασκευαστούν με στόχο το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Υπάρχει σημαντική ερευνητική προσπάθεια στον τομέα των εργαλείων υπολογιστικής νοημοσύνης με στόχο τη βελτιστοποίηση. Κάποιες καινοτόμες προσεγγίσεις όπως αυτές των αποικιών μελισσών και μερμηγκιών επεκτείνονται ώστε να αποκτήσουν τη δυνατότητα να μπορούν να βελτιστοποιούν ταυτόχρονα τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές. Θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της απόδοσης όλων αυτών των καινοτόμων αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων

Τέλος η προτεινόμενη τοπολογία ταιριάζει πάρα πολύ προς χρήση σε φάρμες που βρίσκονται μακριά από κάποιο ηλεκτρικό δίκτυο. Ακόμη και στις ανεπτυγμένες χώρες πολλές κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις χτίζονται μακριά από κάποιο δίκτυο ηλεκτροδότησης και το κόστος διασύνδεσης με το δίκτυο μπορεί να ανέρθει σε αρκετές δεκάδες χιλιάδες ευρώ. Στην Αφρική και την Ασία θερμοκήπια βρίσκονται συχνά μακριά από ένα κεντρικό δίκτυο. Λόγω της μείωσης του κόστους αρκετών τεχνολογιών στις ημέρες μας, όσο και λόγω της βελτίωσης των αποδόσεων των διαφόρων συσκευών, λύσεις που δεν ήταν οικονομικά βιώσιμες ακόμη και μόλις 5 πριν θα έπρεπε να επαναξιολογηθούν. Η έρευνα για πλήρως αυτόνομες φάρμες πρέπει να είναι μια προτεραιότητα.

10 Αναφορές

- Agency, I. E. (2010). "World Energy Outlook 2010." Retrieved 3/5/2011, 2011, from http://www.worldenergyoutlook.org/database_electricity10/electricity_database_web_2010.htm.
- Ally, J. and T. Pryor (2007). "Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems." Journal of Power Sources **170**(2): 401-411.
- Alvarez, E., J. Gomez-Aleixandre, et al. (2009). Algorithm for microgrid on-line central dispatch of electrical power and heat. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International.
- Alvial-Palavicino, C., N. Garrido-Echeverría, et al. (2011). "A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid." Energy for Sustainable Development **15**(3): 314-323.
- Avril, S., G. Arnaud, et al. (2010). "Multi-objective optimization of batteries and hydrogen storage technologies for remote photovoltaic systems." Energy **35**(12): 5300-5308.
- Barbir, F. (2005). "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources." Solar Energy **78**(5): 661-669.
- Beena, P. and R. Ganguli (2011). "Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning." Applied Soft Computing **11**(1): 1014-1020.
- Bielmann, M., U.F.Vogt, et al. (2011). "Seasonal energy storage system based on hydrogen for self sufficient living." Journal of Power Sources **196**(8): 4054-4060.
- Bilodeau, A. and K. Agbossou (2006). "Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications." Journal of Power Sources **162**(2): 757-764.
- Boonbumroong, U., N. Pratinthong, et al. (2011). "Particle swarm optimization for AC-coupling stand alone hybrid power systems." Solar Energy **85**(3): 560-569.
- Botzung, M., S. Chaudourne, et al. (2008). "Simulation and experimental validation of a hydrogen storage tank with metal hydrides." International Journal of Hydrogen Energy **33**(1): 98-104.

- Bueno, S. and J. L. Salmeron (2009). "Benchmarking main activation functions in fuzzy cognitive maps." Expert Systems with Applications **36**(3, Part 1): 5221-5229.
- Buran, B., L. Butler, et al. (2003). "Environmental benefits of implementing alternative energy technologies in developing countries." Applied Energy **76**(1-3): 89-100.
- California, The Regents of the University of (through Lawrence Berkeley National Laboratory), GenOpt. c1998-2010 [updated 2010 Apr 26; cited 2011 Feb 10]; Available from: <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>.
- Cassandras, C. and S. Lafortune (2008). Introduction to Discrete Event Systems, Springer Science+Business Media, LLC.
- Chatzivasiliadis, S. J., N. D. Hatziaargyriou, et al. (2008). Development of an agent based intelligent control system for microgrids. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
- Chebbo, M. (2007). EU SmartGrids Framework "Electricity Networks of the future 2020 and beyond". Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE.
- Chicco, G. and P. Mancarella (2009). "Distributed multi-generation: A comprehensive view." Renewable and Sustainable Energy Reviews **13**(3): 535-551.
- Colson, C. M. and M. H. Nehrir (2011). Agent-based power management of microgrids including renewable energy power generation. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE.
- Conte, M., P. P. Prosini, et al. (2004). "Overview of energy/hydrogen storage: state-of-the-art of the technologies and prospects for nanomaterials." Materials Science and Engineering B **108**(1-2): 2-8.
- Degiorgis, L., M. Santarelli, et al. (2007). "Hydrogen from renewable energy: A pilot plant for thermal production and mobility." Journal of Power Sources **171**(1): 237-246.
- Dounis, A. I. and C. Caraiscos (2007). Intelligent Coordinator of Fuzzy Controller-Agents for Indoor Environment Control in Buildings Using 3-D Fuzzy Comfort Set. Fuzzy Systems Conference, 2007. FUZZ-IEEE 2007. IEEE International.

- Dounis, A. I., P. Tiropanis, et al. (2011). "Intelligent control system for reconciliation of the energy savings with comfort in buildings using soft computing techniques." Energy and Buildings **43**(1): 66-74.
- Dounis, A. I., P. Tiropanis, et al. (2005). "A Comparison of Grey Model and Fuzzy Predictive Model for Time Series." International Journal of Computational Intelligence **2**(3).
- Duan, R. and G. Deconinck (2008). Agent coordination for supply and demand match in microgrids with auction mechanism. Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future (INFRA), 2008 First International Conference on.
- Eberhart, R. and Kennedy J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. Micro Machine and Human Science.
- El-Zonkoly, A. M. (2011). "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization." Swarm and Evolutionary Computation **1**(1): 50-59.
- ENERGY, "HOMER." (2011)from <http://www.homerenergy.com/>.
- Engler, A., M. Meinhardt, et al. (2004). New Generation of V/f-Statics Controlled Battery Inverter Sunny Island - The Key Component for AC Coupled Hybrid Systems and Mini Grids. 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-14), Bangkok, Thailand.
- Hazra, J. and A. K. Sihha (2008). Environmental constrained economic dispatch using bacteria foraging optimization. Joint International conference on Power Systems Technology and IEEE Power India Conference 2008. New Delhi, India: 1-6.
- Hoffmann, W. (2006). "PV solar electricity industry: Market growth and perspective." Solar Energy Materials and Solar Cells **90**(18-19): 3285-3311.
- Hubbert, M. K. (1956). Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Spring Meeting of the Southern District, Division of Production, American Petroleum Institute. Plaza Hotel, San Antonio, Texas, Shell Development Company.
- Jang, J.-S. R., C.-T. Sun, et al. (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice Hall.

- Kaldellis, J. K., K. A. Kavadias, et al. (2004). "Renewable energy desalination plants for the Greek islands--technical and economic considerations." Desalination **170**(2): 187-203.
- Kaldellis, J. K., D. Zafirakis, et al. (2010). "Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous small islands." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **32**(1): 24-36.
- Karlis, A. D., T. L. Kottas, et al. (2007). "A novel maximum power point tracking method for PV systems using fuzzy cognitive networks (FCN)." Electric Power Systems Research **77**(3-4): 315-327.
- Kaufman, L. and F. Broeckx (1978). "An algorithm for the quadratic assignment problem using Bender's decomposition." European Journal of Operational Research **2**(3): 207-211.
- Kennedy, J. and R. C. Eberhart (1997). A discrete binary version of the particle swarm algorithm. Systems, Man, and Cybernetics, 1997. 'Computational Cybernetics and Simulation', 1997 IEEE International Conference on.
- Khan, M. J. and M. T. Iqbal (2005). "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland." Renewable Energy **30**(6): 835-854.
- Kornelakis, A. (2010). "Multiobjective Particle Swarm Optimization for the optimal design of photovoltaic grid-connected systems." Solar Energy **84**(12): 2022-2033.
- Kosko, B. (1996). Fuzzy Engineering, Prentice Hall.
- Kuncheva, L. I. (2000). "How good are fuzzy If-Then classifiers?" Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on **30**(4): 501-509.
- Kyriakarakos, G., E. Mohamed, et al. (2010). Polygeneration Smartgrids: A Solution for the Supply of Electricity, ποΠινάκας Water and Hydrogen as Fuel for Transportation in Remote Areas. 5th European Conference PV-Hybrid and Mini-Grid, Tarragona, Spain.
- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2006). Creation Of A Software Design Model And Realization Of A Hybrid Renewable Energy Polygeneration System. Renewable Energy 2006 Chiba, Japan.

- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2008). Experimental Operation of a hybrid renewable energy polygeneration system. AgEng2008, Hersonissos, Greece.
- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2008). A Pilot Microgrid that Uses ΠοΠινακας Water and Hydrogen Both as End-User Products and Medium to Long Term Energy Storage. 6th MedPower Conference. Thessaloniki, Greece.
- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2008). Realization and testing of a Hybrid Renewable Energy Polygeneration system. 4th PV Hybrid and Minigrid Conference. Glyfada, Greece.
- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2008). Experimental operation and evaluation of a hybrid renewable energy polygeneration microgrid. Renewable Energy 2008. Busan, Korea.
- Kyriakarakos G. , Mohamed E., et al. (2009). A pilot polygeneration microgrid for covering the needs of remote regions in electricity, ποΠινακας water and fuel. 1st Smartgrids & Mobility. Wurtzburg, Germany.
- Laboratory of Solar Energy, University of Wisconsin, TRNSYS. c2011 [updated 2011 Jan 11; cited 2011 Feb 10]; Available from: <http://sel.me.wisc.edu/TRNSYS>.
- Lee, J., K. F. R. Liu, et al. (2003). "Modeling uncertainty reasoning with possibilistic Petri nets." Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on **33**(2): 214-224.
- Lee, W.-S., Y. T. Chen, et al. (2009). "Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm." Applied Energy **86**(9): 1589-1595.
- Li, X., Y.-J. Song, et al. (2008). "Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller." Journal of Power Sources **180**(1): 468-475.
- Liu, S. and Y. Lin (2011). Grey systems theory and applications. Berlin; Heidelberg, Springer.
- Llaria, A., O. Curea, et al. (2011). "Survey on microgrids: Unplanned islanding and related inverter control techniques." Renewable Energy **36**(8): 2052-2061.
- Logenthiran, T., D. Srinivasan, et al. (2010). Multi-Agent System (MAS) for short-term generation scheduling of a microgrid. Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on.

- Lovberg, M. and T. Krink (2002). Extending particle swarm optimization with self-organized critically. 4th Congress Evolutionary Computation. Honolulu, Hawaii, USA, IEEE. **2**: 1588-1593.
- Lu, D., H. Fakham, et al. (2010). "Application of Petri nets for the energy management of a photovoltaic based power station including storage units." Renewable Energy **35**(6): 1117-1124.
- Lydia, M. and S. S. Kumar (2010). A comprehensive overview on wind power forecasting. IPEC, 2010 Conference Proceedings.
- Manfren, M., P. Caputo, et al. (2011). "Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models." Applied Energy **88**(4): 1032-1048.
- Manolakos, D., G. Papadakis, et al. (2004). "A stand-alone photovoltaic power system for remote villages using pumped water energy storage." Energy **29**(1): 57-69.
- Markvart, T. (2006). "Microgrids: Power systems for the 21st Century?" Refocus **7**(4): 44-48.
- MathWorks, Matlab. c1994-2011 [cited 2011 Feb 10]; Available from: <http://www.mathworks.com>.
- McNeill, F. M. and E. Thro (1994). Fuzzy logic: a practical approach, Academic Press Professional, Inc. .
- Minciardi, R. and R. Sacile (2011). "Optimal Control in a Cooperative Network of Smart Power Grids." Systems Journal, IEEE **PP**(99): 1-1.
- Mohamed, E. S. and G. Papadakis (2004). "Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics." Desalination **164**(1): 87-97.
- Moix Pierre-Olivier and R. Claude (2010). Partial AC-coupling in Minigrids. 5th European Conference PV-Hybrid and Mini-Grid, Tarragona, Spain.
- Murata, T. (1989). "Petri nets: Properties, analysis and applications." Proceedings of the IEEE **77**(4): 541-580.
- Neidlein H-C and G. J. (2011). EU PVSEC: Doors close on price war. PV Magazine - Photovoltaic Markets and Technology.

- Nema, P., R. K. Nema, et al. (2009). "A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews **13**(8): 2096-2103.
- Papageorgiou, E. I. (2011). "Learning Algorithms for Fuzzy Cognitive Maps---A Review Study." Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on **PP**(99): 1-14.
- Papageorgiou, E. I. (2011). "A new methodology for Decisions in Medical Informatics using fuzzy cognitive maps based on fuzzy rule-extraction techniques." Applied Soft Computing **11**(1): 500-513.
- Papageorgiou, E. I., K. E. Parsopoulos, et al. (2005). "Fuzzy Cognitive Maps Learning Using Particle Swarm Optimization." Journal of Intelligent Information Systems **25**(1): 95-121.
- Paris, B., J. Eynard, et al. (2011). "Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings." Applied Soft Computing **In Press, Corrected Proof**.
- Rifkin, J. (2002). The hydrogen economy: the creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth, Polity Press.
- Romanos, P., N. Hatziaargyriou, et al. (2010). Single Agents in Smart Grids. Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on.
- Russell, S. and P. Norvig (2009). Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice Hall.
- Said, Y. H. (2005). On Genetic Algorithms and their Applications. Handbook of Statistics. E. J. W. C.R. Rao and J. L. Solka, Elsevier. **Volume 24**: 359-390.
- Schade, B. and T. Wiesenthal (2011). "Biofuels: A model based assessment under uncertainty applying the Monte Carlo method." Journal of Policy Modeling **33**(1): 92-126.
- Simoës, M. G. and S. Bhattarai (2011). Multi agent based energy management control for commercial buildings. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE.

SMA America, LLC (2011). Off-Grid Inverter SUNNY ISLAND 5048U Technical Description.

Specialists, Thermal Energy System, TESS Libraries. c2008 [cited 2011 Feb 10];

Available from: <http://www.tess-inc.com/trnsys>.

Stylios, C. D. and P. P. Groumpos (1998). "The challenge of modelling supervisory systems using fuzzy cognitive maps." Journal of Intelligent Manufacturing **9**(4): 339-345.

Stylios, C. D. and P. P. Groumpos (1999). "Fuzzy Cognitive Maps: a model for intelligent supervisory control systems." Computers in Industry **39**(3): 229-238.

Thiam, D.-R. (2010). "Renewable decentralized in developing countries: Appraisal from microgrids project in Senegal." Renewable Energy **35**(8): 1615-1623.

Valle, Y., R. G. Harley, et al. (2009). Comparison of enhanced-PSO and classical optimization methods: a case study for STATCOM placement. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Brazil

Vosen, S. R. and J. O. Keller (1999). "Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies." International Journal of Hydrogen Energy **24**(12): 1139-1156.

Wang, Z., A. I. Dounis, et al. (2011). An Information Fusion Based Multi-Agent Control System for Indoor Energy and Comfort Management in Smart and Green Buildings. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA.

Weiss, G. (2000). Multiagent systems a modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge, Mass., MIT Press.

Winston, W. L. (1991). Operations Research: Applications and Algorithms, Duxbury Press.

Wooldridge, M. J. (2002). An introduction to multiagent systems. New York, J. Wiley.

- Yamin, H. Y. (2006). "Dynamic Optimal Power Flow Using Interior Point Method and Benders Decomposition Considering Active and Reactive Constraints." Electric Power Components and Systems **34**(12): 1377 - 1393.
- Yilanci, A., I. Dincer, et al. (2008). "Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system." International Journal of Hydrogen Energy **33**(24): 7538-7552.
- Yorino, N., E. E. El-Araby, et al. (2002). "A New Formulation for FACTS Allocation for Security Enhancement against Voltage Collapse." Power Engineering Review, IEEE **22**(8): 68-68.
- Yu, S. and J. Tao (2009). "Economic, energy and environmental evaluations of biomass-based fuel ethanol projects based on life cycle assessment and simulation." Applied Energy **86**(Supplement 1): S178-S188.
- Yuehui, H., L. Jing, et al. (2010). Comparative study of power forecasting methods for PV stations. Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on.
- Zhang, Y., X.-b. Wu, et al. (2011). "On generating interpreΠivακας and precise fuzzy systems based on Pareto multi-objective cooperative co-evolutionary algorithm." Applied Soft Computing **11**(1): 1284-1294.
- Zhao, Y., A. Akbarzadeh, et al. (2009). "Simultaneous desalination and power generation using solar energy." Renewable Energy **34**(2): 401-408.
- Zhou, K., J. A. Ferreira, et al. (2008). "Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems." International Journal of Hydrogen Energy **33**(2): 477-489.
- Zoulias, E. I., R. Glockner, et al. (2006). "Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews **10**(5): 432-462.
- Zoulias, E. I. and N. Lymberopoulos (2007). "Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems." Renewable Energy **32**(4): 680-696.

Τα Παραρτήματα έχουν αφαιρεθεί από αυτό το αντίγραφο της
διδακτορικής διατριβής για λόγους διαχείρισης πνευματικών
δικαιωμάτων.

Για περισσότερες πληροφορίες επικοινωνήστε με τον συγγραφέα
στο gk@aia.gr