

559
A4T

Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΥΓΙΝΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ**



ΣΤΑΥΡΙΝΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΞΑΜΗΝΟ: 12^ο

Α.Μ.: 35894

ΚΑΤΣΙΚΟΓΙΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΞΑΜΗΝΟ: 12^ο

Α.Μ. : 35708

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Ι. ΝΤΟΥΝΗΣ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά τον κύριο Αναστάσιο Ντούνη, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας πτυχιακής εργασίας, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, το απαραίτητο υλικό και την υποστήριξη που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε τον κύριο Κυριακαράκο Γιώργο, διδάκτορα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για τις συμβουλές του πάνω στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του μικροδικτύου καθώς και για την παροχή του απαραίτητου λογισμικού.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Παναγιώτη Κοφινά, εργαστηριακό συνεργάτη του τμήματος Αυτοματισμού, για την βοήθειά του στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και στη συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	9
1.1 Γενικές πληροφορίες	9
1.2 Φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας.....	11
1.2.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	11
1.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών κυττάρων.....	14
1.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών κυττάρων.....	16
1.2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια(Συστοιχία).....	19
1.2.3.1 Συνιστώσες μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	19
1.2.3.2 Η κυψέλη.....	20
1.2.3.3 Συνδεσμολογία	21
1.2.3.4 Πλαίσιο	21
1.2.4 Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών.....	21
1.2.4.1 Σύνδεση σε σειρά	22
1.2.4.2 Σύνδεση εν παραλλήλω	23
1.3 Ανεμογεννήτριες.....	25
1.3.1 Η ισχύς του ανέμου	25
1.3.2 Πυκνότητα ισχύος του ανέμου.....	25
1.3.3 Μεταβλητότητα των ανέμων.....	27
1.3.3.3 Χωρικές μεταβολές.....	28
1.3.4 Περιγραφή των ανεμογεννητριών	28
1.3.4.1 Γενικά	28
1.3.4.2 Έλεγχος της ισχύος που παράγει μία Α/Γ	30
1.3.5 Εύρος Εφαρμογών των Ανεμογεννητριών.....	31
1.3.5.1 Κατηγορίες εφαρμογής.....	31
1.3.5.2 Αιολικά πάρκα.....	31
1.3.5.3 Καταναμημένη παραγωγή	33
1.3.5.4 Υβριδικά συστήματα ισχύος	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	37
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	37
2.1 Εισαγωγή.....	37
2.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά.....	38

2.3 Δομή- Σχεδιασμός.....	39
2.3.1 DC Σύνδεση.....	39
2.3.2 AC Σύνδεση.....	40
2.4 Μονάδες κατανάλωσης.....	40
2.4.1 Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων.....	41
2.5 Μονάδες αποθήκευσης στα μικροδίκτυα.....	41
2.5.1 Συσσωρευτές.....	42
2.5.2 Σφόνδυλοι.....	47
2.5.3 Εξελεγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές.....	48
2.6 Έξυπνα μικροδίκτυα.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	51
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ TRNSYS.....	51
3.1 Γενικές πληροφορίες για το λογισμικό TRNSYS.....	51
3.1.1 Περιεχόμενα λογισμικού.....	51
3.1.2 TRNSYS Simulation Studio.....	51
3.2 Σχεδιασμός μικροδικτύου στο TRNSYS.....	52
3.2.1 Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του Φωτοβολταϊκού panel.....	53
3.2.2 Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους της ανεμογεννήτριας.....	54
3.2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	54
3.2.4 Μπαταρία.....	55
3.2.5 Φορτίο.....	55
3.2.6 Printer.....	55
3.2.7 Online Plotter.....	55
3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	59
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ (ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ).....	59
4.1 Εισαγωγή στο GenOpt.....	59
4.1.1 Τι είναι το GenOpt.....	59
4.1.2 Τρόπος λειτουργίας του GenOpt.....	59
4.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στο GenOpt.....	60
4.3 Συνάρτηση κόστους.....	62
4.3.1 Καθαρά Παρούσα Αξία.....	62
4.4 Διαστασιολόγηση του μικροδικτύου στο TRNSYS μέσω του GenOpt.....	62
4.5 Χρήση του GenOpt.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	67
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DIESEL ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕ ΕΛΕΓΚΤΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ MATLAB.....		67
5.1 Γεννήτρια Diesel		67
5.2 Γεννήτρια Diesel στο TRNSYS		67
5.3 Επικοινωνία TRNSYS-MATLAB		69
5.4 Δημιουργία Ασαφούς ελεγκτή με την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab.....		69
5.4.1 Εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab		69
5.5 Δημιουργία m-file για την επικοινωνία TRNSYS-MATLAB		74
5.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης		75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		79
ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....		79
6.1 Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή.....		79
6.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων		84
6.3 Δημιουργία GUI (graphical user interface) εφαρμογής για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του PID ελεγκτή μέσω γενετικών αλγορίθμων.....		86
6.4 Παραδείγματα χρήσης της GUI εφαρμογής		92
Παράδειγμα 1.....		92
Παράδειγμα 2.....		94
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ		97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		99

Εισαγωγή

Η διαχείριση της ανανεώσιμης ενέργεια σε μικρή κλίμακα αποτελεί ένα σημαντικό επιστημονικό και τεχνολογικό θέμα. Η ανάπτυξη των μικροδικτύων έχει συμβάλει ουσιαστικά σε αυτήν την κατεύθυνση. Τελευταία, η ερευνητική προσπάθεια έχει εστιαστεί στην ανάπτυξη έξυπνων μικροδικτύων χρησιμοποιώντας τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης και εξελικτικού υπολογισμού.

Η πτυχιακή επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την προσομοίωση μικροδικτύων. Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά κελιά και συστοιχίες), ηλεκτρικούς μετατροπείς ισχύος (αντιστροφείς DC-AC), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) και ηλεκτρικά φορτία. Για τις προσομοιώσεις θα χρησιμοποιηθεί η πλατφόρμα TRNSYS.Ο εξελικτικός υπολογισμός διαθέτει ευρετικές (heuristic) τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα PSO (Particle Swarm Optimization) οι οποίες δύναται να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του μικροδικτύου και τη διαχείριση της διανομής της ενέργειας στους ηλεκτρικούς καταναλωτές του μικροδικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Γενικές πληροφορίες

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί στην εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό τη δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων που δημιουργούν οι συμβατικές ενεργειακές πηγές. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο μόνος δυνατός τρόπος που διαφαίνεται για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έθεσε το 1992 στη συνδιάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, να περιορίσει δηλαδή, μέχρι το έτος 2000 τους ρύπους του διοξειδίου του άνθρακα στα επίπεδα του 1993, είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- **ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας.
- **ο άνεμος - αιολική ενέργεια**.
- **οι υδατοπτώσεις - υδραυλική ενέργεια**, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, ισχύος κάτω από 10 MW.
- **η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια** που διακρίνεται σε υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας.

- **η βιομάζα:** θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων από τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών, αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων.
- **οι θάλασσες:** ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών, όπου γίνεται εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των υδάτων στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος από αυτήν.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα ακόλουθα:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, εξασφαλίζεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής, ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Παρέχουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για παραγωγή θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών ή αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ συμβάλλουν στη δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν, σε πολλές περιπτώσεις, πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και κίνητρο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς, για μεγάλη παραγωγή, απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους οδηγεί συνήθως σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων, παραμένει ακόμη υψηλό. [1]

1.2 Φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας

1.2.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από ενεργειακά σωματίδια που ονομάζονται φωτόνια, τα οποία έχουν κοινή ταχύτητα, αλλά διαφορετική ενέργεια, ανάλογα με το μήκος κύματος της περιοχής του ηλιακού φάσματος όπου ανήκουν. Όταν προσπίπτουν σε υλικό με ημιαγωγικές ιδιότητες, άλλα το προσπερνούν και άλλα απορροφώνται, ανάλογα με την ενέργεια που μεταφέρουν. Τα φωτόνια με μεγάλη ενέργεια που απορροφώνται προκαλούν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ τα φωτόνια με χαμηλή ενέργεια που έχουν μεγάλο μήκος κύματος, όπως η υπέρυθη ακτινοβολία, προσπερνούν το υλικό χωρίς να συνεισφέρουν στην ηλεκτρική παραγωγή. [2]

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ατόμου ημιαγωγικού υλικού, που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά, είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του που βρίσκονται στην εξωτερική του στοιβάδα (στοιβάδα σθένους). Ο πιο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και φέρει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα (εν προκειμένω αυτή που είναι συμπληρωμένη με 8 ηλεκτρόνια) αναζητούν άλλα άτομα, με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

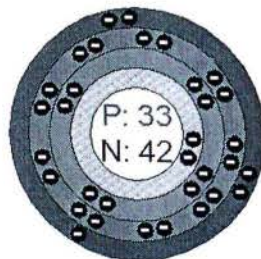
Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου, αφού, όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί, διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα εξωτερικά

ηλεκτρόνια ενός ατόμου να αλληλεπιδρούν με εκείνα των γειτονικών ατόμων και τελικά με τον τρόπο αυτό να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα δίνοντας στα άτομα κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

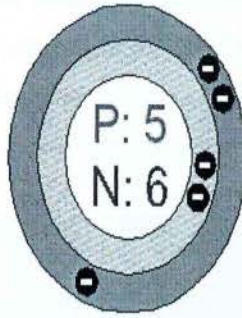
Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

Τις ημιαγωγικές ιδιότητές του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνητό τρόπο. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται με την πρόσμειξη του με άλλα στοιχεία, τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στη στοιβάδα σθένους τους. Η πρόσμειξη αυτή τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία, οπότε δημιουργείται ημιαγωγός τύπου p, είτε σε αρνητικά, οπότε δημιουργείται ημιαγωγός τύπου n.

Έτσι ένας ημιαγωγός τύπου n, δηλαδή ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου, δημιουργείται όταν να γίνει πρόσμειξη με άτομο που φέρει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, όπως είναι για παράδειγμα το αρσενικό (As). Αντίστοιχα, για να δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός τύπου p, δηλαδή ένας θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου, χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη με κάποιο στοιχείο, όπως π.χ. το βόριο (B) που έχει 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα.

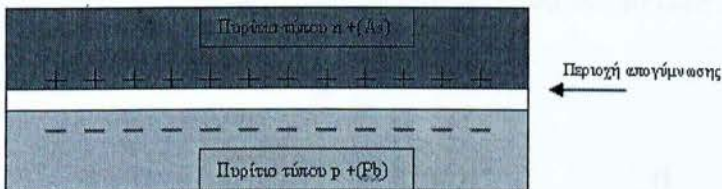


Εικόνα 1.1 Αρσενικό (As)



Εικόνα 1.2 Βόριο (B)

Εάν τεθούν σε επαφή δύο τεμάχια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια δίοδος δηλαδή ένα ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή επαφής των δύο υλικών, το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια μόνο κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζεύγος των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού ή κυττάρου ή κυψέλης και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.



Σχήμα 1.1 Δημιουργία επαφής ηλεκτρικού πεδίου

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας που διαδίδεται με τη μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων στο κύτταρο ερμηνεύεται ως εξής. Τα φωτόνια, όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη Φ/Β κελιού, περνούν αφήνοντας αμετάβλητη την περιοχή τύπου n, ενώ αντιθέτως επηρεάζουν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Έτσι τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της επαφής, όπου και έλκονται πλέον από το θετικό της πεδίο.

Αφού υπερβούν το ενεργειακό χάσμα (ή κενό) της περιοχής αυτής, μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο τμήμα n της επαφής υπάρχει μια περίσσεια ηλεκτρονίων της οποίας μπορεί να γίνει εκμετάλλευση. Αυτή η περίσσεια μπορεί να παράγει ηλεκτρικό

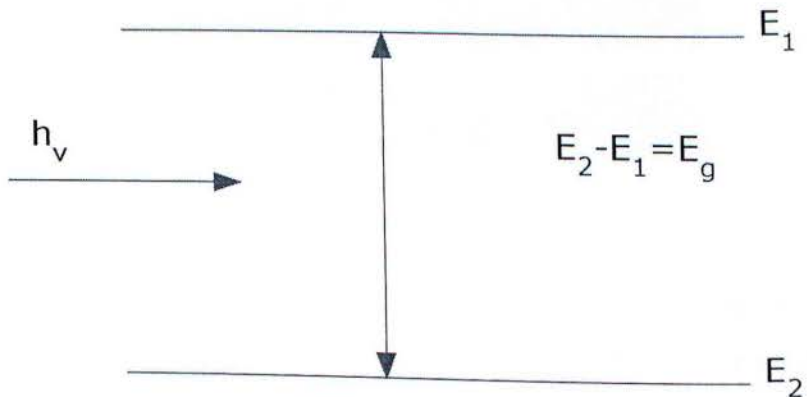
ρεύμα, εάν τοποθετηθεί μια διάταξη, όπως ένας μεταλλικός αγωγός, στο πάνω μέρος της περιοχής n και στο κάτω μέρος της περιοχής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. [3]

1.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών κυττάρων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών (ϕ/β) κυττάρων οι οποίοι διαφέρουν ως προς το υλικό απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το απλούστερο υλικό πρέπει να έχει δύο τουλάχιστον επίπεδα ενέργειας και να είναι αρκετά αγωγίμο ώστε να επιτρέπει την ροή ενέργειας. Γι' αυτό καθιερώθηκε το μοντέλο του ιδανικού ϕ/β κυττάρου στο οποίο θεωρείται ότι:

1. Τα ηλεκτρόνια κατέχουν μόνο τα επίπεδα 1 και 2 και όχι τα ενδιάμεσα.
2. Αν η φωτεινή ενέργεια $h\nu \ll E_g = E_2 - E_1$ δεν απορροφά αλλά διαπερνά το υλικό.
3. Αν $h\nu \gg E_g$ απορροφάται πλήρως και αφήνει μία οπή.
4. Μηχανισμοί μετάπτωσης από το επίπεδο 2 στο επίπεδο 1 είναι αρκετά αργοί.
5. Η τάση εξόδου είναι E_g/q .

όπου $h\nu$ είναι η φωτεινή ενέργεια, E_g , E_2, E_1 τα δυναμικά του ενεργειακού διακένου, της πλευράς p και της πλευράς n αντιστοίχως και q το φορτίο του ηλεκτρονίου.

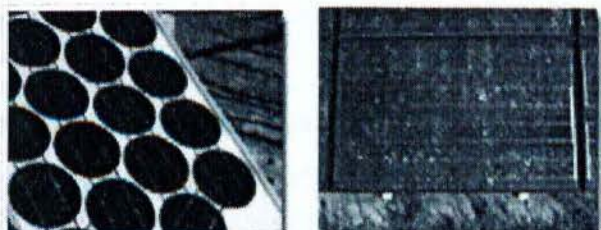


Σχήμα 1.2 Ιδανικό ηλιακό κύτταρο

[2]

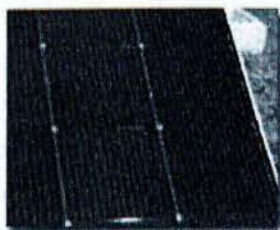
Οι κυψέλες πυριτίου κατασκευάζονται με τη χρήση μονοκρυσταλλικών ή πολυκρυσταλλικών δισκίων ή λεπτών μεμβρανών. Τα μονοκρυσταλλικά δισκία κόβονται σε φέτες (πάχους περίπου 1/3 ως 1/2 mm) από μία μεγάλη μονοκρυσταλλική ράβδο που έχει θερμανθεί σε 1400°C περίπου, διεργασία η οποία είναι πολύ δαπανηρή. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει μία τέλεια σχεδόν κρυσταλλική δομή (Εικόνα

1.3A). Τα πολυκρυσταλλικά δισκία κατασκευάζονται με μια διεργασία χύτευσης κατά την οποία τηγμένο πυρίτιο χύνεται σε ένα καλούπι και αφήνεται να στερεοποιηθεί. Κατόπιν τεμαχίζεται σε δισκία (Εικόνα 1.3B).



Εικόνα 1.3 A) Μονοκρυσταλλικές κυψέλες σε πλαίσιο B) Πολυκρυσταλλικό ηλιακό πλαίσιο

Εφόσον οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες κατασκευάζονται με χύτευση, η παραγωγή τους είναι αρκετά φτηνότερη, δεν είναι όμως τόσο αποδοτικές όσο οι μονοκρυσταλλικές, λόγω ατελειών στην κρυσταλλική δομή που οφείλονται στη διεργασία της χύτευσης. Το ήμισυ σχεδόν του πυριτίου χάνεται ως σκόνη κοπής στις δύο αυτές διεργασίες. Το άμορφο πυρίτιο, με χρήση μιας από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης, παράγεται με την εναπόθεση πυριτίου από ένα αέριο αντιδραστήριο, όπως το σιλάνιο (SiH_4), επάνω σε υπόστρωμα γυαλιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4 Ηλιακό πλαίσιο άμορφου πυριτίου

Ο τύπος φ/β κυψέλης υπό μορφή λεπτής μεμβράνης μπορεί να εφαρμοστεί σε χαμηλού κόστους υποστρώματα, π.χ. γυαλί ή πλαστικό. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης περιλαμβάνουν το λεπτό πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, κυψέλες δισεληνιούχου ινδικού χαλκού, θειούχου καδμίου, τελλουριούχου καδμίου, θειούχου καδμίου και αρσενικούχου γαλλίου. Οι κυψέλες του είδους αυτού διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ευκολότερη απόθεση και συναρμολόγηση, η ικανότητα να εναποτίθενται επάνω σε

φθηνά υποστρώματα ή υλικά οικοδομών, η ευκολία για μαζική παραγωγή και η καταλληλότητά τους σε μεγάλες εφαρμογές. [4]

1.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών κυττάρων.

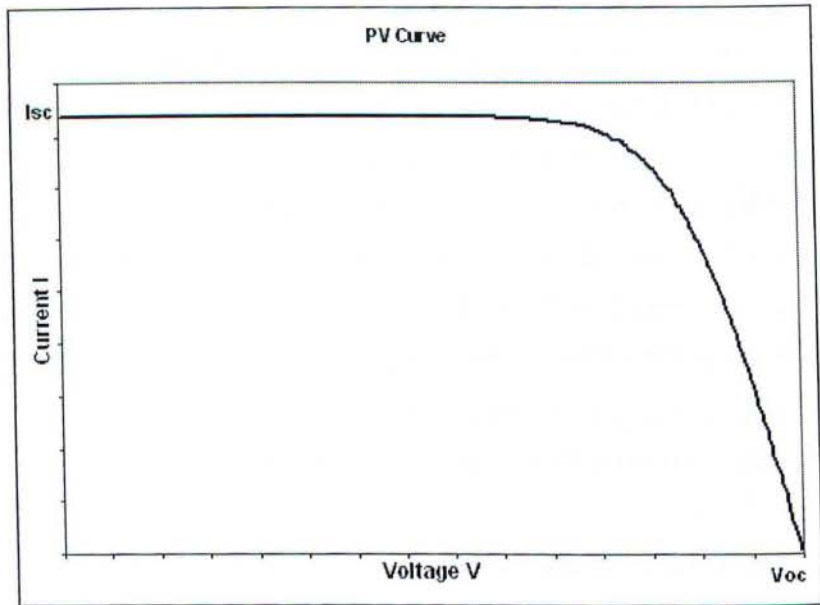
Παρακάτω θα αναφερθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φ/β κυττάρου που σε γενικές γραμμές είναι:

- Οι απώλειες λόγω ανάκλασης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κυττάρου, καθόσον ένα μόνο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται, ενώ το άλλο ανακλάται από την επιφάνεια και χάνεται. Για να μειωθούν οι απώλειες αυτές, που εξαρτώνται από το είδος του ημιαγωγού, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διεργασίες όπως η προσθήκη αντιανακλαστικής επένδυσης ή η δημιουργία επιφάνειας υφαντού.
- Η ατελής απορρόφηση είναι συνέπεια του γεγονότος ότι μόνο τα φωτόνια με ενέργεια $h\nu \gg E_g$ απορροφώνται, ενώ τα υπόλοιπα χάνονται.
- Η περίσσεια ενέργειας, η οποία παρατηρείται όταν τα φωτόνια που έχουν ενέργεια $h\nu \gg E_g$, δεν δημιουργεί παραπάνω από ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής με ενέργεια ίση με E_g , με συνέπεια η υπόλοιπη να μην είναι εκμεταλλεύσιμη, με αποτέλεσμα να προσδίδεται στα ηλεκτρόνια υπό μορφή κινητικής ενέργειας που χάνεται γρήγορα με τη μορφή θερμότητας λόγω προσκρούσεων με τα γειτονικά άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος.
- Ο συντελεστής συλλογής ο οποίος εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη δομή συλλογής, ο συντελεστής απορρόφησης και κυρίως τα χαρακτηριστικά του υλικού (καθαρότητα, ατέλειες, ηλεκτρικές ιδιότητες). Για το λόγο αυτό ένας σημαντικός αριθμός ζευγών ηλεκτρονίων-οπών παράγεται σε αποστάσεις από την περιοχή της επαφής του κυττάρου, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από το μήκος διάχυσης των αντίστοιχων φορέων μειονότητας, οπότε οι φορείς ανασυνδέονται χωρίς να συμβάλουν στη δημιουργία ρεύματος.
- Ο παράγοντας τάσεως που ορίζει τι ποσοστό από το δυναμικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου υλοποιείται.
- Ο συντελεστής πλήρωσης που εξαρτάται από το ρεύμα κορεσμού, όπως ο παράγοντας τάσης, και επομένως τις ιδιότητες του υλικού. Αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ενεργειακό διάκενο.
- Η αντίσταση σειράς, η οποία επιφέρει μία πτώση τάσης όσο το κύτταρο δέχεται ακτινοβολία.

Υπάρχουν όμως και περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των κυττάρων, όπως:

- Η θερμοκρασία: Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται η απόδοση του κυττάρου, διότι η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το φωτοβολταϊκό κύτταρο, μετατρέπεται κατά ένα μέρος σε ηλεκτρική που αποβάλλεται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και κατά ένα μέρος σε θερμική. Η θερμική ενέργεια αυξάνει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς με το περιβάλλον, η θερμότητα μεταφέρεται σε αυτό με ένα συνδυασμό μηχανισμών θερμικής μεταφοράς. Η θερμική παραγωγή από το φωτοβολταϊκό πρέπει να μεγιστοποιείται θερμοκρασία, διότι όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή του.
- Σκίες που μπορεί να δημιουργηθούν στην επάνω επιφάνεια του κυττάρου λόγω σκόνης, νέφους, ακαθαρσιών και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή του.
- Η ηλιακή ακτινοβολία που όταν μεταβάλλεται επηρεάζει και την απόδοση.
- Η ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία του φ/β και συνεπώς την απόδοση. [2]

Οι δύο κύριες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ηλεκτρικής απόδοσης ενός κυττάρου είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και το ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}). Η τάση ανοιχτού κυκλώματος υπολογίζεται μετρώντας την τάση εξόδου των ακροδεκτών, όταν αυτοί είναι ανοιχτοί. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος υπολογίζεται βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες εξόδου και μετρώντας το ρεύμα εξόδου των ακροδεκτών κάτω από πλήρη ακτινοβολία. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φ/β αναπαριστούνται από την καμπύλη ρεύματος(I) - τάσης(V). Η καμπύλη αυτή έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.3



Σχήμα 1.3 Καμπύλη ρεύματος-τάσης

Στο μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης το ρεύμα παραμένει σταθερό και ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Στην συνέχεια, παρατηρείται μια απότομη μείωση του ρεύματος που τελικά μηδενίζεται στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περιοχή πριν το «γόνατο» που παρουσιάζει η καμπύλη, το ρεύμα είναι σταθερό και το φωτοβολταϊκό λειτουργεί σαν σταθερή πηγή ρεύματος και παράγει τάση τέτοια ώστε να εξισορροπεί την αντίσταση του φορτίου. Επίσης, μετά το «γόνατο» της καμπύλης το ρεύμα μειώνεται απότομα με μικρή αύξηση της τάσης. Στην περιοχή αυτή το πλαίσιο λειτουργεί σαν σταθερή πηγή τάσης με εσωτερική αντίσταση. Κάπου ανάμεσα στις δύο περιοχές που αναφέρθηκαν υπάρχει ένα σημείο βέλτιστης λειτουργίας.

Εάν η τάση εφαρμοσθεί ανάποδα, για παράδειγμα κατά την διάρκεια ενός προσωρινού λάθους, το ρεύμα παραμένει σταθερό και η ισχύς απορροφάται από το πλαίσιο. Εκτός όμως από μια αρνητική τάση η ένωση οδηγείται σε διάσπαση, όπως ακριβώς συμβαίνει και στη δίοδο, και το ρεύμα αυξάνεται σε μια υψηλή τιμή.

Η ισχύς εξόδου ενός πλαισίου υπολογίζεται με βάση την τάση και το ρεύμα εξόδου.

Αξίζει να αναφερθεί πως δεν παράγεται καθόλου ισχύς όταν το είναι ρεύμα μηδενικό ή η τάση μηδενική, ενώ η μέγιστη παραγωγή ισχύος παρατηρείται σε ένα σημείο κοντά στο «γόνατο» της καμπύλης. Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν κοντά σε αυτό το βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

Οι ονομαστικές τιμές των πλαισίων που αποτελούνται από πολλά συνδεδεμένα μεταξύ τους κύτταρα δίνονται από τους κατασκευαστές κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που ονομάζονται «τυποποιημένες συνθήκες ελέγχου» (standard testing conditions, STC).

Αυτές είναι:

- Θερμοκρασία κυττάρου: 25°C
- Ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου: 1000 W/m²
- AM 1.5, όπου το AM αντιπροσωπεύει το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Το AM αντιπροσωπεύει την κατάσταση του διαστήματος όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι 1350W/m². Το AM=1 αντιπροσωπεύει την ιδανική γήινη κατάσταση το μεσημέρι με καθαρό αέρα, όπου και το φως του ήλιου συναντά τη μικρότερη αντίσταση για να φτάσει στη γη. Ο αέρας μιας τυπικής μέρας με τον μέσο όρο υγρασίας και ρύπανσης αντιπροσωπεύεται με AM=1.5.

Ο βαθμός απόδοσης n μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης για την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ισχύ, ορίζεται ως

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

όπου

- P_{out} : Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου
- P_{in} : Η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

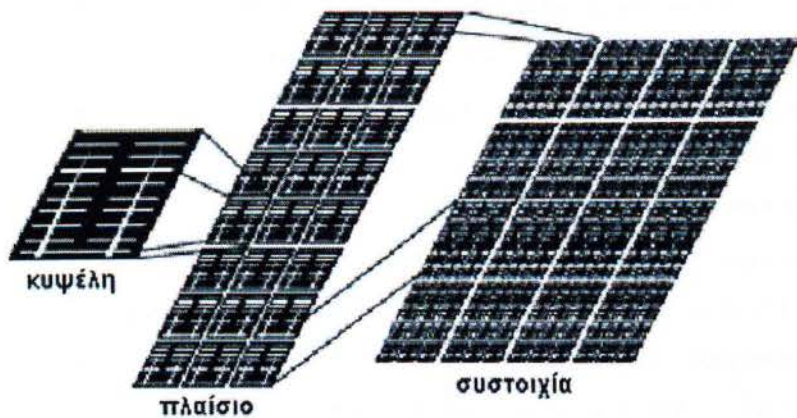
Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης, τόσο μεγαλύτερη είναι ισχύς εξόδου για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία.

1.2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια (συστοιχία)

Ο όρος συστοιχία αναφέρεται συνήθως στις συνιστώσες που εξετάζονται σε αυτό το χωρίο, συγκεκριμένα αφορά όλα τα πλαίσια ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, την καλωδίωση και τις διόδους τους, καθώς και τη βάση της συστοιχίας.

1.2.3.1 Συνιστώσες μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Οι κυψέλες ομαδοποιούνται σε πλαίσια και τα πλαίσια συναθροίζονται για να διαμορφώσουν μια συστοιχία όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Ανάλογα με την εφαρμογή η συστοιχία μπορεί να αποτελείται από μία κυψέλη ένα πλαίσιο, ή πολλά πλαίσια.



Σχήμα 1.4 Συνιστώσες μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

1.2.3.2 Η κυψέλη

Μια τυπική ηλιακή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχει βαθύ μπλε χρώμα και ζυγίζει λιγότερο από 10g. Το μήκος και το πλάτος της είναι περίπου 10cm, ανάλογα με τον κατασκευαστή. Η μεμονωμένη κυψέλη παράγει υπό βέλτιστες συνθήκες 1.5W στα 0.5V κατά προσέγγιση. Αυτό μόνο του δεν είναι πολύ χρήσιμο για τις περισσότερες ηλεκτρικές εφαρμογές. Προκειμένου να παραχθεί αξιοποιήσιμη ωφέλιμη ισχύς, οι κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά σε σειρά ή παράλληλα, ενώ μερικές φορές κόβονται σε μικρότερα τεμάχια.

Η κοπή των κυψελών γίνεται για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος είναι για αύξηση της τάσης. Αν απαιτείται μόνο μικρό ρεύμα σε υψηλή τάση, τότε τεμαχίζοντας τις κυψέλες στη μέση και με την καλωδίωσή τους σε σειρά μπορεί να δημιουργηθεί ένα μικρό πλαίσιο. Κάθε τεμάχιο θα παράγει την ίδια τάση με ολόκληρη την κυψέλη, αλλά με μικρότερο ρεύμα (για παράδειγμα αν μια κυψέλη κοπεί στη μέση το κάθε ήμισυ θα παράγει περίπου 0.5V και 1.5A. Ο άλλος λόγος για την κοπή των κυψελών είναι για να επιτευχθεί αύξηση της πυκνότητας της συσκευασίας τους.

Οι κυψέλες με εγκοπές δημιουργούν μη ωφέλιμη επιφάνεια στις γωνίες τους πράγμα που μπορεί να αντιμετωπιστεί τεμαχίζοντας τις κυψέλες σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλογράμμου. Το ίδιο γίνεται μερικές φορές και σε εφαρμογές όπου οι επιδόσεις είναι κρίσιμες και ο χώρος περιορισμένος. Τα μειονεκτήματα της κοπής των κυψελών είναι ότι με τη διεργασία αυτή συχνά σπαταλούνται τμήματα της κυψέλης, ενώ είναι ιδιαίτερα πιθανό ένα ποσοστό κυψελών να υφίσταται βλάβη κατά την κοπή. Ο κατασκευαστής μπορεί να παρέχει δεδομένα για τις ακριβείς διαστάσεις και ανοχές συγκεκριμένων κυψελών του. Κατά τον

υπολογισμό του συνολικού εμβαδού της κυψέλης είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ότι μερικές κυψέλες έχουν γωνίες με εγκοπές.

1.2.3.3 Συνδεσμολογία

Οι κυψέλες συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για να συστήσουν μια διάταξη που συχνά ονομάζεται συνδεσμολογία. Οι κυψέλες διασυνδέονται με συγκόλληση των ακροδεκτών τους από την κορυφή της μίας στη βάση της επόμενης. Αυτό γίνεται εν γένει εργοστασιακά με ειδικές μηχανές. Είναι σημαντικό να μην υφίστανται φθορές οι κυψέλες κατά τη διεργασία, να είναι ανθεκτικές οι συνδέσεις και να τηρείται το κατάλληλο διάστημα μεταξύ των κυψελών. Αν οι κυψέλες ακουμπούν μεταξύ τους μπορεί να προκύψουν προβλήματα ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων, καθώς επίσης και προβλήματα σκίασης, ενώ αυξάνεται η πιθανότητα ραγίσματός τους. Τα υπερβολικά μεγάλα κενά μεταξύ των κυψελών δημιουργούν σπατάλη πολύτιμης επιφάνειας.

1.2.3.4 Πλαίσιο

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται συνήθως σε σειρά διαμορφώνοντας ένα σύνολο που ονομάζεται πλαίσιο. Το φ/β πλαίσιο αποτελεί εν γένει τη μικρότερη αυτοτελή μονάδα σε μια συστοιχία, όπως μια ομάδα κυψελών που συνδεθεί μεταξύ τους και στη συνέχεια έχουν τοποθετηθεί σε ένα κέλυφος ως αυτόνομη μονάδα. Ο αριθμός των κυψελών ενός πλαισίου καθορίζεται συνήθως από τις ανάγκες του συστήματος σε τάση και οι περισσότεροι κατασκευαστές παράγουν πλαίσια τα οποία διαστασιολογούνται σύμφωνα με τις τάσεις των χρησιμοποιούμενων συσσωρευτών. Ένα τυπικό πλαίσιο, που είναι επιθυμητό να φορτίσει μια μπαταρία 12V, έχει 33 ως 36 κυψέλες (πρέπει να εξασφαλίζει πάνω από 12V ώστε να φορτίσει τη μπαταρία). Σημειώνεται ότι η λέξη πλαίσιο μπορεί να αναφέρεται είτε σε ένα μόνο πλαίσιο είτε σε ένα σύνολο πλαισίων.

1.2.4 Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών

Γενικά, ένα Φ/Β πλαίσιο ή μια συστοιχία επηρεάζονται από το περιβάλλον με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται και μια Φ/Β κυψέλη. Η τάση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και το ρεύμα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.



1.2.4.1 Σύνδεση σε σειρά

Όταν ηλιακές κυψέλες (ή πλαίσια) συνδέονται σε σειρά, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος της συνδεσμολογίας με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια. Αυτό προϋποθέτει ότι οι συνθήκες λειτουργίας για τις κυψέλες είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης (I-V).

Ρεύμα

Το ρεύμα σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι το αυτό σε κάθε σημείο της συνδεσμολογίας, ίσο με αυτό που παράγεται από μια κυψέλη. Αν μια κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.

$$I_{\text{σειράς}} = (I_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.1)$$

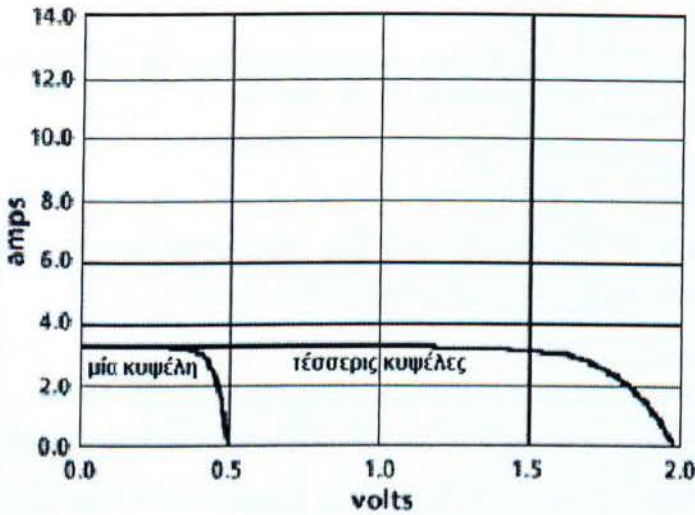
Τάση

Η τάση σε μια συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας όμοιες κυψέλες, η τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

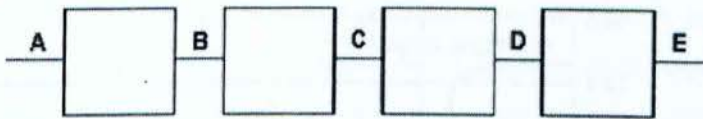
$$V_{\text{σειράς}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.2)$$

$$P_{\text{σειράς}} = I_{\text{σειράς}} \times V_{\text{σειράς}} \rightarrow P_{\text{σειράς}} = (I_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \times (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.3)$$

Σημειώνεται ότι μπορεί οι μεμονωμένες κυψέλες να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα, όπως και οι άλλες, στη συνδεσμολογία. Το σχήμα 1.5 παρουσιάζει το συνδυασμό των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V των μεμονωμένων κυψελών που διαμορφώνουν την καμπύλη I-V της εν σειρά συνδεσμολογίας. Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζεται μία εν σειρά συνδεσμολογία από τέσσερις κυψέλες και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.



Σχήμα 1.5 Τυπικές καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά



τάση μεταξύ A και B = 0.5 volts

A και C = 1.0 volts

A και D = 1.5 volts

A και E = 2.0 volts

ρεύμα στο A = B = C = D = E = 3.0 amps

Σχήμα 1.6 Τέσσερις ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά

1.2.4.2 Σύνδεση εν παραλλήλω

Αν οι κυψέλες (ή τα πλαίσια) συνδεθούν παράλληλα, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος τους με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια, υποθέτοντας και πάλι ότι οι συνθήκες λειτουργίας είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.

Ρεύμα

Το παραγόμενο ρεύμα από μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ισούται με το άθροισμα των μεμονωμένων τμημάτων της κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας παρόμοιες κυψέλες, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (I_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.4)$$

Τάση

Η τάση μεταξύ δύο κόμβων μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης.

$$V_{\text{παράλληλα}} = (V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.5)$$

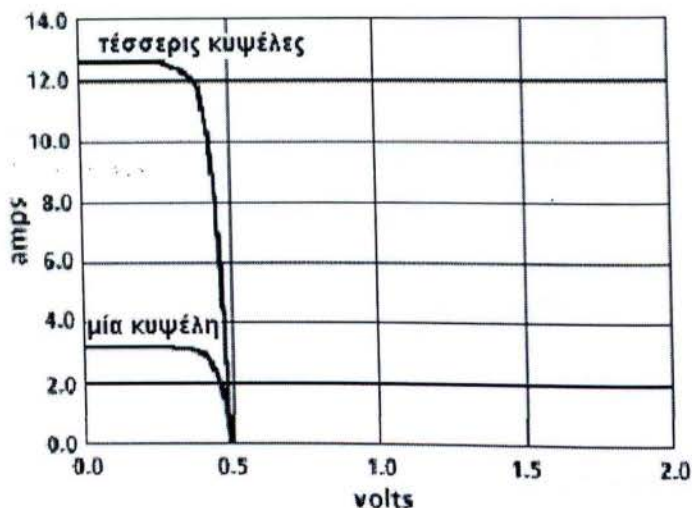
Ισχύς

Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με $I_{\text{παράλληλα}}$ - εξίσωση (3.4) - πολλαπλασιασμένο με $V_{\text{παράλληλα}}$ της εξίσωσης (3.5):

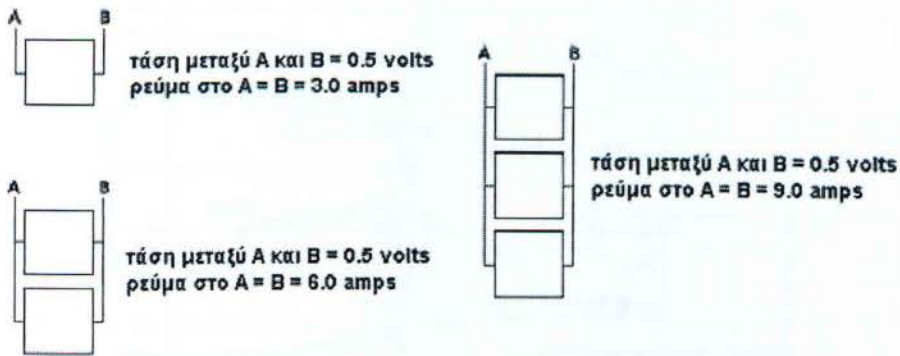
$$P_{\text{παράλληλα}} = I_{\text{παράλληλα}} \times V_{\text{παράλληλα}} \rightarrow$$

$$P_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (I_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \times (V_{\text{max}} \text{ μιας κυψέλης}) \quad (3.6)$$

Σημειώνεται ότι όταν οι κυψέλες μιας ομάδα κυψελών συνδέονται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην αυτή τάση. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών I-V των μεμονωμένων κυψελών ώστε να διαμορφωθεί η καμπύλη I-V της ομάδας κυψελών εν παραλλήλω. Στο σχήμα 1.8 απεικονίζονται ομάδες κυψελών εν παραλλήλω και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.[4]



Σχήμα 1.7 Καμπύλες I-V για μία και 4 κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα



Σχήμα 1.8 Μία, δύο και τρεις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα.

1.3 Ανεμογεννήτριες

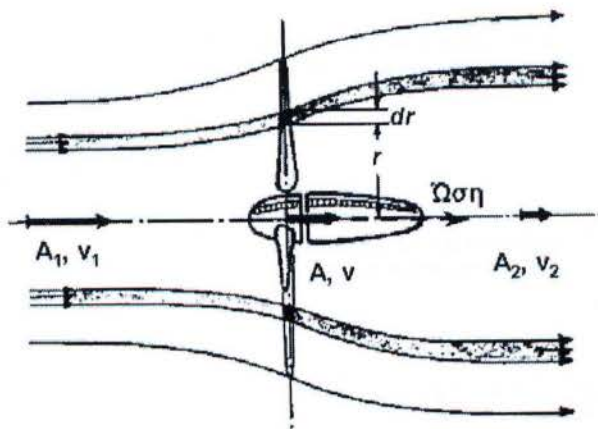
1.3.1 Η ισχύς του ανέμου

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του κινούμενου αέρα. Η ακανόνιστη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τους ανέμους. Η θερμότητα που απορροφάται από το έδαφος ή το νερό μεταφέρεται στον αέρα, όπου προκαλεί διαφορές στη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την πίεσή του. Με τη σειρά τους οι διαφορές αυτές προκαλούν δυνάμεις που ωθούν τον αέρα ολόγυρα. Σύμφωνα με τη μηχανική των ρευστών, ο αέρας κινείται από τις περιοχές υψηλής πίεσης προς τις περιοχές χαμηλής πίεσης της ατμόσφαιρας.

Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται από παράγοντες, όπως η περιστροφή της γης, τα τοπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά και η τραχύτητα του εδάφους.

1.3.2 Πυκνότητα ισχύος του ανέμου

Ο άνεμος περιέχει ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική με χρήση ανεμογεννητριών (Α/Γ). Η ηλεκτρική ισχύς των Α/Γ εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας του διερχόμενου ανέμου μέσω της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια της Α/Γ στη μονάδα του χρόνου. Αυτή η ροή ενέργειας ονομάζεται πυκνότητα ισχύος του ανέμου. Ειδικότερα οι δρομείς των Α/Γ ελαττώνουν την ταχύτητα του ανέμου από την αδιατάρακτη ταχύτητα v_1 πολύ πριν από το δρομέα στην μειωμένη τιμή ταχύτητας ροής του αέρα v_2 πίσω από αυτόν (σχήμα 1.9).



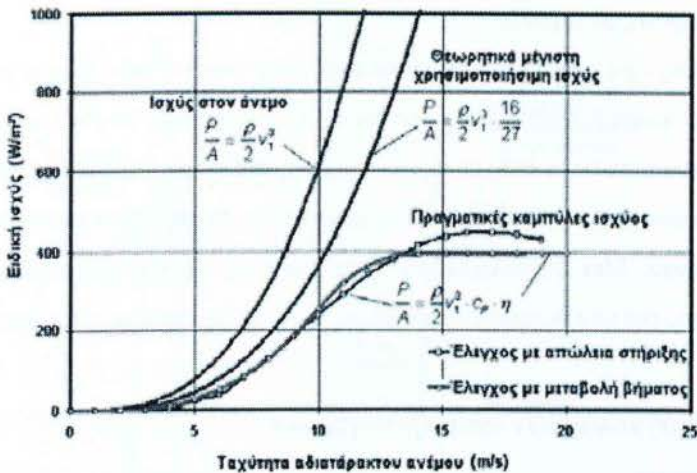
Σχήμα 1.9 Ροή του ανέμου μέσω μιας Α/Γ

Η διαφορά της ταχύτητας του ανέμου είναι ένα μέτρο της αποσπώμενης από αυτόν κινητικής ενέργειας που περιστρέφει τον δρομέα και την ηλεκτρική γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη στο άλλο άκρο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Η ισχύς που θεωρητικά παράγεται από μια Α/Γ περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P = c_p \cdot \eta \cdot \frac{\rho}{2} v_1^3 \cdot A \quad (2.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), c_p ο συντελεστής ισχύος, η η μηχανική/ηλεκτρική απόδοση και A το εμβαδό του δίσκου του δρομέα. Σε ιδανικές συνθήκες η μέγιστη τιμή του c_p (γνωστή ως όριο Betz) είναι 0.593, δηλαδή μία Α/Γ μπορεί θεωρητικά να αποσπάσει το 59.3% του ενεργειακού περιεχομένου της ροής του αέρα.

Υπό πραγματικές όμως συνθήκες, ο συντελεστής ισχύος δεν υπερβαίνει την τιμή $c_p = 0.5$, αφού περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της Α/Γ. Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζονται διαφορετικά περιεχόμενα και απολήψεις ισχύος ανάλογα με το συντελεστή ισχύος και τις αποδόσεις μιας Α/Γ.



Σχήμα 1.10 Παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.1.) ένα βασικό ζήτημα της πυκνότητας ισχύος του ανέμου αποτελεί η εξάρτησή της από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, αν διπλασιαστεί η ταχύτητα, η ισχύς που περιέχεται στον άνεμο θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές. Στην πράξη όμως η σχέση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος μιας Α/Γ και της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι τόσο αυστηρά καθορισμένη.

1.3.3 Μεταβλητότητα των ανέμων

1.3.3.1 Μεταβολή με το χρόνο

Για να προβλεφθεί με ακρίβεια η απόδοση των Α/Γ πρέπει να είναι γνωστά, όχι μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη θέση, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου με το χρόνο. Οι μεταβολές σε βραχεία χρονική κλίμακα συνήθως δεν είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση του αιολικού πόρου εκτός αν η ροή του ανέμου είναι πολύ τυρβώδης ή αν αλλάζει συχνά η διεύθυνσή του.

1.3.3.2 Εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από το ύψος

Η εξίσωση για την παραγόμενη ισχύ μιας Α/Γ δείχνει ότι η ενεργειακή παραγωγή της εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση που βρίσκεται, την πυκνότητα του αέρα, το μέγεθος του δρομέα και τον τεχνικό σχεδιασμό. Ειδικά το ύψος του πύργου της Α/Γ επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή παραγωγή, λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους επάνω από το επίπεδο του εδάφους, φαινόμενο γνωστό ως διάτμηση του ανέμου. Ο βαθμός της διάτμησης του ανέμου εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, την ατμοσφαιρική σύνθεση και την τραχύτητα του εδάφους.

1.3.3.3 Χωρικές μεταβολές

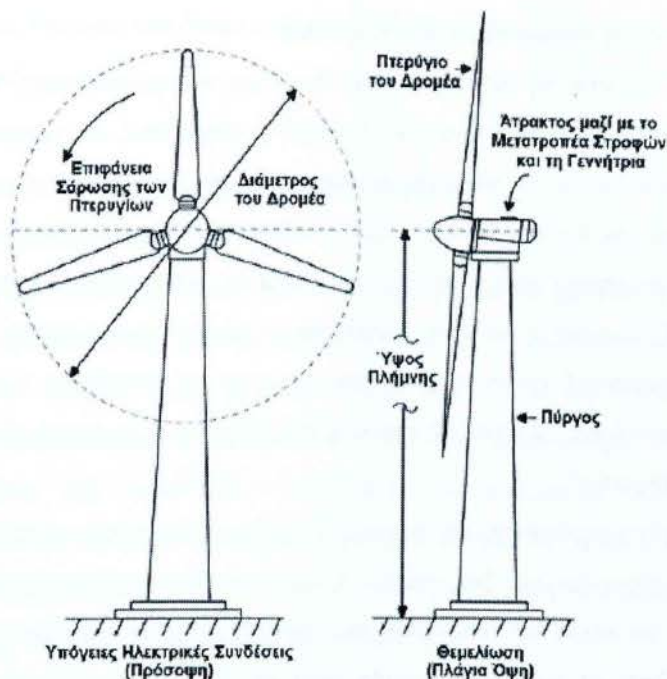
Όπως έχει αποδειχθεί τα χαρακτηριστικά του αιολικού πόρου μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ γειτονικών θέσεων. Για προφανείς λόγους οι ισχυρότεροι άνεμοι βρίσκονται σε πολύ εκτεθειμένες τοποθεσίες. Επιπλέον τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως οι λόφοι και οι κορυφογραμμές, μπορούν να επιταχύνουν τον άνεμο κατά το πέρασμά του από αυτά. Μια κορυφογραμμή είναι συνήθως ιδανική, όταν είναι προσανατολισμένη κάθετα προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου και έχει μια μέση κλίση.

1.3.4 Περιγραφή των ανεμογεννητριών

1.3.4.1 Γενικά

Στο σχήμα 1.12 απεικονίζεται ένα γενικό σύστημα Α/Γ οριζοντίου άξονα (ΑΓΟΑ). Μια εξίσου εφικτή εναλλακτική σχεδίαση είναι η Α/Γ καθέτου άξονα (ΑΓΚΑ), που δεν είναι όμως τόσο συνήθης όσο η ΑΓΟΑ στα τρέχοντα έργα. Αν και δεν υφίσταται κάποια γενική μέθοδος για την ταξινόμηση των υποσυστημάτων των Α/Γ, οι συνιστώσες του σχήματος 1.11 θα μπορούσαν να διαιρεθούν σε τέσσερα βασικά υποσυστήματα:

1. Τον δρομέα, αποτελούμενο συνήθως από δυο η τρία πτερύγια, μια πλήμνη μέσω της οποίας συνδέονται τα πτερύγια με τον χαμηλής ταχύτητας κινητήριο άξονα και, μερικές φορές, υδραυλικά ή μηχανικά οδηγούμενα συστήματα συνδέσμων για τη μεταβολή του βήματος του συνόλου ή μέρους των πτερυγίων.
2. Την άτρακτο, η οποία γενικά περιλαμβάνει ένα μετατροπέα στροφών και μία γεννήτρια, άξονες και συνδέσμους, ένα κάλυμμα για ολόκληρη την άτρακτο και συχνά ένα μηχανικό δισκόφρενο και ένα σύστημα εκτροπής.
3. Τον πύργο και τη θεμελίωση που στηρίζει το δρομέα και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης (άτρακτος).
4. Τους ηλεκτρικούς ελεγκτές και καλωδιώσεις, καθώς και τον εξοπλισμό εποπτείας και ελέγχου.



Σχήμα 1.11 Σχηματική αναπαράσταση μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Η ακολουθία των συμβαινόντων κατά την παραγωγή και μεταφορά της αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Α. Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με το δρομέα της Α/Γ παράγεται μια ροπή.
- Β. Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει μια γεννήτρια.
- Γ. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια διέρχεται μέσω του συστήματος ελέγχου και των αποζευκτών της Α/Γ και ενισχύεται σε μια μέση τάση από το μετασχηματιστή.
- Δ. Το σύστημα καλωδίωσης της θέσης μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στο μετασχηματιστή της θέσης μέσω του συστήματος ελέγχου και των αποζευκτών της θέσης, ο οποίος ενισχύει την τάση στην τιμή που απαιτεί το δίκτυο.
- Ε. Το δίκτυο ισχύος μεταβιβάζει την ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή τελικής χρήσης.
- ΣΤ. Υποσταθμοί μετασχηματιστών μειώνουν την τάση στις οικιακές ή βιομηχανικές τιμές και τα τοπικά δίκτυα χαμηλής τάσης μεταβιβάζουν την ηλεκτρική ενέργεια στις οικίες, τα γραφεία και τα εργοστάσια.

1.3.4.2 Έλεγχος της ισχύος που παράγει μία Α/Γ

Με την αύξηση της ταχύτητας ροής του αέρα, οι αεροδυναμικές δυνάμεις άνωσης στα πτερύγια του δρομέα αυξάνονται ανάλογα με το τετράγωνο, ενώ η παραγόμενη από την Α/Γ ενέργεια ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου, γεγονός που απαιτεί ένα πολύ αποτελεσματικό και άμεσης δράσης έλεγχο ισχύος του δρομέα, ώστε να αποφευχθεί η μηχανική και ηλεκτρική υπερφόρτωση στο σύστημα μετάδοσης ενέργειας της Α/Γ. Στις σύγχρονες Α/Γ εφαρμόζονται δύο διαφορετικές αρχές αεροδυναμικού ελέγχου για να περιοριστεί η παραγωγή ισχύος στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η πιο παθητική από αυτές είναι γνωστή ως "έλεγχος με απώλεια στήριξης", ενώ η ενεργή είναι ο "έλεγχος με μεταβολή του βήματος".

Στην πρώτη περίπτωση, την παραγωγή ισχύος καθορίζουν οι εγγενείς αεροδυναμικές ιδιότητες του πτερυγίου και δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος που να ρυθμίζεται. Η συστροφή και το πάχος του πτερυγίου του δρομέα μεταβάλλονται κατά μήκος αυτού με τρόπο τέτοιο ώστε να προκαλείται τύρβη πίσω από το πτερύγιο, όποτε αυξάνεται πολύ η ταχύτητα του ανέμου. Η τύρβη αυτή αναγκάζει μέρος της ενέργειας του ανέμου να διασκορπιστεί, ελαχιστοποιώντας την παραγωγή ισχύος στις υψηλότερες ταχύτητες. Οι μηχανές με έλεγχο απώλειας στήριξης διαθέτουν αερόφρενα στα ακροπτερύγια που ακινητοποιούν το δρομέα, εάν χρειαστεί να σταματήσει η Α/Γ για οποιοδήποτε λόγο.

Στη δεύτερη περίπτωση, η γωνία των πτερυγίων του δρομέα μπορεί να ρυθμίζεται ενεργά από το σύστημα ελέγχου της μηχανής. Το σύστημα ελέγχου μεταβολής του βήματος έχει ενσωματωμένα πέδη, καθώς τα πτερύγια ακινητοποιούνται, όταν είναι πλήρως "πτερυγωμένα". Κατά το παρελθόν, η πλειοψηφία των μικρού και μεσαίου μεγέθους συστημάτων Α/Γ χρησιμοποιούσαν τον απλό έλεγχο απώλειας στήριξης, αλλά τελευταία, με την αύξηση του μεγέθους των Α/Γ, οι κατασκευαστές προτιμούν όλο και περισσότερο το σύστημα ελέγχου μεταβολής του βήματος, το οποίο παρέχει περισσότερες δυνατότητες για παρέμβαση στη λειτουργία της Α/Γ.

Τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε και ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω ελέγχων, η "ενεργός απώλεια στήριξης". Στην περίπτωση αυτή, το βήμα του πτερυγίου του δρομέα στρέφεται σε κατεύθυνση προς την απώλεια στήριξης και όχι προς τη θέση πτερυγώματος (μικρότερη άνωση), όπως γίνεται στα κανονικά συστήματα μεταβολής του βήματος. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι ότι:

- απαιτούνται πολύ μικρές αλλαγές της γωνίας βήματος,
- είναι δυνατός ο έλεγχος ισχύος υπό συνθήκες μερικής ισχύος (ασθενείς άνεμοι),

- τα πτερύγια του δρομέα φέρονται σε θέση πτερυγώματος για χαμηλά φορτία σε σφοδρούς ανέμους.

1.3.5 Εύρος εφαρμογών των ανεμογεννητριών

1.3.5.1 Κατηγορίες εφαρμογής

Οι ηλεκτροπαραγωγές Α/Γ έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τις μεμονωμένες, αυτόνομες εγκαταστάσεις έως τις μεγάλες διατάξεις ανεμογεννητριών, που μπορεί να συνδέονται σε υπάρχον δίκτυο ή να συνδυάζονται με άλλες μη συνδεδεμένες στο δίκτυο πηγές ενέργειας. Το εύρος των εφαρμογών μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις κλάσεις. Τα αιολικά πάρκα, δηλ. οι μεγάλες σειρές Α/Γ που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, διαμορφώνουν το ένα άκρο του εύρους εφαρμογών. Από την άποψη του εγκατεστημένου δυναμικού και του οικονομικού αντικτύπου την περίοδο αυτή τα αιολικά πάρκα αποτελούν την κατά πολύ μεγαλύτερη κλάση εφαρμογής των Α/Γ.

Οι άλλες δύο κλάσεις εφαρμογής χρησιμοποιούν συνήθως μικρότερο αριθμό Α/Γ με μικρότερο μέγεθος μονάδας. Αυτές είναι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για διασυνδεδεμένη, κατανεμημένη παραγωγή και Α/Γ που συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας και μπορούν να λειτουργούν χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μεγαλύτερου ηλεκτρικού δικτύου. Αυτά είναι τα αποκαλούμενα "υβριδικά" συστήματα. Και οι δύο κλάσεις έχουν εφαρμοστεί τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ευρώπη.

1.3.5.2 Αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από σειρές Α/Γ που διασυνδέονται ηλεκτρικά ώστε η ισχύς τους να αποδίδεται στο δίκτυο της εταιρείας ηλεκτρισμού. Όσον αφορά την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, ένα αιολικό πάρκο λειτουργεί παράλληλα με το συμβατικό δυναμικό παραγωγής της εταιρείας ηλεκτρισμού για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ισχύ του συνδεδεμένου φορτίου. Οι σειρές μπορεί να αποτελούνται από εκατοντάδες μηχανών με ένα συνδυασμένο δυναμικό ισχύος του αιολικού πάρκου της τάξης των εκατοντάδων MW. Σχεδόν πάντα οι συμβατικές πηγές παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που απαιτείται από το φορτίο. Γενικά, η αναλογία του δυναμικού αιολικής παραγωγής προς το συνολικό δυναμικό (αιολικό συν συμβατικό) που εξυπηρετεί ένα ηλεκτρικό φορτίο σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή υπολογίζεται από την αιολική διείδυση WP :

$$WP = \frac{\text{Αιολικό Δυναμικό}}{\text{Αιολικό Δυναμικό} + \text{Συμβατικό Δυναμικό}}$$

Για παράδειγμα ας υποτεθεί ότι σε μία δεδομένη στιγμή της ημέρας το ηλεκτρικό φορτίο είναι 1.100MW και ότι η ζήτηση αυτή καλύπτεται από συνδυασμό αιολικών και συμβατικών πηγών ηλεκτροπαραγωγής. Εάν το υφιστάμενο αιολικό δυναμικό είναι 100MW και το συμβατικό δυναμικό 1.000MW, τότε σ' αυτή τη χρονική στιγμή η τιμή της αιολικής διείσδυσης θα είναι 0,0909 ή 9,1%. Με την τρέχουσα τεχνολογία των Α/Γ, η μέγιστη τιμή αιολικής διείσδυσης, με την οποία τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα είναι ασφαλή, κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15%. Το άνω όριο στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρικό σύστημα αντικατοπτρίζει τις ανησυχίες γύρω από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ισχύος που παρέχεται από το αιολικό σύστημα, που είναι η ποιότητα ισχύος. Ειδικότερα η ανησυχία σχετίζεται με την επίδραση της χρονικά μεταβαλλόμενης αιολικής ισχύος στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια της τάσης και της συχνότητας της συνδυασμένης ισχύος που παρέχεται στο φορτίο. Η αποδεκτή τιμή διείσδυσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι οι λεπτομέρειες της αιολικής τεχνολογίας, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συμβατικών πηγών παραγωγής και η δυναμικότητα και το μήκος των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τις πηγές με το φορτίο. Το άνω όριο στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές πηγές δεν αποτελεί αυστηρό περιορισμό και η τιμή του θα αυξηθεί με την απόκτηση μεγαλύτερης λειτουργικής εμπειρίας, τις αλλαγές της τεχνολογίας και την πιο στενή συσχέτιση των συστημάτων ελέγχου των αιολικών και των συμβατικών πηγών.

Η εντατική ανάπτυξη των συστημάτων αυτών τα προηγούμενα έτη οδήγησε στην αύξηση του μοναδιαίου μεγέθους τους (τελευταία, οι δυναμικότητες ισχύος των Α/Γ, που σχεδιάζονται πρωτίστως για χρήση σε αιολικά πάρκα, κυμαίνονται περίπου από 300kW έως 1,5MW, με τις αντίστοιχες διαμέτρους των δρομέων να κυμαίνονται από 35 έως 65m), καθώς και στη θεαματική βελτίωση της αξιοπιστίας και του κόστους τους. Τα κόστη των διασυνδεδεμένων αιολικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας προσεγγίζουν σήμερα εκείνα κάποιων συμβατικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής.

Στην περίπτωση που το c_p φθάσει στο θεωρητικό του μέγιστο (όριο "Betz"), η ταχύτητα του ανέμου v_2 πίσω από το δρομέα είναι μόνο το 1/3 της ταχύτητας v_1 μπροστά από αυτόν (σχήμα 2.1). Έτσι, οι Α/Γ που εγκαθίστανται σε ένα αιολικό πάρκο, παράγουν λιγότερη ενέργεια λόγω της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου που προκαλείται από τις Α/Γ που βρίσκονται μπροστά τους. Οι απώλειες ενέργειας μπορούν να μειωθούν με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των Α/Γ, καθώς ο άνεμος πίσω από μια Α/Γ θα επιταχυνθεί ξανά από το

περιβάλλον αιολικό πεδίο. Ένα καλά σχεδιασμένο αιολικό πάρκο μπορεί να εμφανίζει λιγότερο από 10% απώλειες λόγω των φαινομένων αμοιβαίας αλληλεπίδρασης.

Όπως υπάρχει ένα εύρος μεγεθών των Α/Γ, έτσι υπάρχει και ένα εύρος μεγεθών των αιολικών πάρκων. Τα μεγάλα πάρκα της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ είναι στο ένα άκρο αυτού του φάσματος, με το άλλο άκρο να αντιστοιχεί σε μια μικρή συστοιχία Α/Γ που εξυπηρετεί μια δημοτική εταιρεία ηλεκτρισμού, ένα συνεταιριστικό αγρόκτημα ή μια βιομηχανική μονάδα. Ανεξάρτητα από το μέγεθος, τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αιολικού πάρκου είναι ότι:

- οι Α/Γ διασυνδέονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο,
- το αιολικό δυναμικό παραγωγής αποτελεί εν γένει μικρό ποσοστό του συμβατικού δυναμικού που τροφοδοτεί το φορτίο του ηλεκτρικού συστήματος (χαμηλές τιμές αιολικής διεϊσδυσης), και
- οι Α/Γ απαιτούν κάποιου είδους ηλεκτρική υποστήριξη από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ανάλογα με τις λεπτομέρειες κατασκευής της γεννήτριας και των άλλων ηλεκτρικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε μια Α/Γ, η υποστήριξη μπορεί να κυμαίνεται από μια απλή αναφορά στη συχνότητα (για το συγχρονισμό του αιολικά παραγόμενου ηλεκτρισμού με αυτόν των συμβατικών πηγών) μέχρι την κατανάλωση άεργης ισχύος (απαιτείται για τη λειτουργία των γεννητριών των Α/Γ). Ανεξάρτητα από το μέγεθος του αιολικού πάρκου, χρησιμοποιούνται τυποποιημένες ηλεκτρικές τεχνικές και συνιστώσες (π.χ. μετασχηματιστές και προστατευτικός εξοπλισμός διανομής) για τη σύνδεση των Α/Γ με το δίκτυο. Η Α/Γ αποτελεί τη μόνη μη τυποποιημένη ηλεκτρική συνιστώσα.

1.3.5.3 Κατανεμημένη παραγωγή

Είναι πιθανό οι ανεμογεννήτριες να επαναφέρουν στη μνήμη τους ανεμόμυλους άντλησης νερού που χρησιμοποιούνταν ευρέως το πρώτο ήμισυ του 20^{ου} αιώνα σε αγροκτήματα και φάρμες παγκοσμίως. Αυτές οι πρώιμες, μικρής κλίμακας Α/Γ έχουν πλέον εκτοπιστεί από τα εξελιγμένα και αποδοτικότερα ισοδύναμά τους που χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Αν και δεν υπάρχουν τεχνικοί λόγοι για τους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες μονάδες, το μοναδιαίο μέγεθος των συστημάτων αυτών κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 50kW. Προορίζονται για μεμονωμένη χρήση ή κατά μικρές συστοιχίες, ενώ μπορούν να συνδέονται ή όχι στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή καλούνται συστήματα κατανεμημένης αιολικής παραγωγής.

Από την πλευρά της εταιρείας ηλεκτρισμού αλλά και των πελατών, η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να είναι χρήσιμη για την παροχή υποστήριξης της τάσης στο τέλος της γραμμής σ' ένα εκτεταμένο δίκτυο. Τα κατανεμημένα αιολικά συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση στην επέκταση του δικτύου σε απομακρυσμένα φορτία. Όπως παρατηρείται, οι εφαρμογές των αιολικών συστημάτων διαμορφώνουν ένα συνεχές σύνολο και, σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι σαφής η διάκριση μεταξύ ενός αιολικού πάρκου και ενός κατανεμημένου συστήματος. Η μόνη διαφορά μπορεί να αφορά το μέγεθος ή τον αριθμό των Α/Γ που χρησιμοποιούνται.

Όταν δεν υφίσταται σύνδεση με το δίκτυο, η ηλεκτρική ισχύς είναι μη ελεγχόμενη. Μόνο το φορτίο και η παραγωγή της Α/Γ καθορίζουν την ποιότητα ισχύος και τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια, το φορτίο πρέπει να είναι ικανό να χρησιμοποιεί αυτού του είδους τη μη ελεγχόμενη ισχύ χωρίς να προκαλείται ζημία ούτε στο φορτίο ούτε στη γεννήτρια της Α/Γ. Σχετικές εργασίες βρίσκονται σε εξέλιξη ώστε να βελτιωθεί αυτή η κατάσταση, όπου ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει αυτή που έχει ως στόχο την επιτυχή σύνδεση ενός επαγωγικού κινητήρα απευθείας με μια μη διασυνδεδεμένη Α/Γ. Στα παραδείγματα εφαρμογής περιλαμβάνονται οι Α/Γ που χρησιμοποιούνται για άντληση ύδατος, παραγωγή πάγου και παραγωγή ψύξης.

1.3.5.4 Υβριδικά συστήματα ισχύος

Τα υβριδικά συστήματα ισχύος χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες, ενδεχομένως και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μαζί με νηζελογεννήτριες ώστε να αποτελέσουν το ισοδύναμο μιας μικρογραφίας δικτύου. Μολονότι το μέγεθος μονάδας των Α/Γ στις εφαρμογές αυτές κυμαίνεται συνήθως από 1 ως 50kW, έχουν εγκατασταθεί και πολύ μεγαλύτερες μηχανές σε υβριδικά συστήματα ισχύος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με νηζελογεννήτριες, ενεργειακή αποθήκευση (π.χ. μπαταρίες) και, όπου είναι εφικτό, με άλλες ΑΠΕ, π.χ. φωτοβολταϊκά ή υδροηλεκτρικά συστήματα. Όταν χρησιμοποιούνται με τον τρόπο αυτό, τα συστήματα αυτά συχνά ονομάζονται υβριδικά συστήματα ισχύος. Εν γένει χρησιμοποιούνται όπου δεν υφίσταται καθόλου δίκτυο. Λόγω της στενής σύζευξης και ελέγχου όλων των πηγών ηλεκτροπαραγωγής και κάποιων (ή και όλων) από τα συνδεδεμένα φορτία, η αιολική συνιστώσα των υβριδικών συστημάτων ισχύος μπορεί

να επιτύχει διείσδυση 100%. Δηλαδή, με κατάλληλες συνθήκες ανέμου, το σύστημα αιολικής ενέργειας μπορεί να παρέχει όλη σχεδόν την ισχύ που απαιτείται από το φορτίο. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια συντελείται μία αλλαγή στον τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες αποδεδειγμένα πλέον συντελούν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου με πιθανές καταστροφικές συνέπειες για τους ανθρώπους και όλες τις άλλες μορφές ζωής στη γη. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητα και επίσης ζητήματα ιδιοκτησίας και εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει σε ενεργειακές κρίσεις όπως στις δεκαετίες του '70 και του '80. Έτσι, υπάρχει μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς και σε τεχνολογίες που μπορεί να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, αλλά έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, όπως είναι οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Παγκοσμίως ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ αυξάνονται συνεχώς οι ενεργειακές του ανάγκες, με αποτέλεσμα την ανάγκη για επέκταση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής. Με την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας έγινε και πιο επίκαιρος ο όρος μικροδίκτυο (microgrid/mini-grid). Η μικρό-παραγωγή δεν είναι μια νέα έννοια στην ηλεκτρική παραγωγή και διανομή ενέργειας και αναφερόταν στην παραγωγή ενέργειας χαμηλής κλίμακας, δηλαδή μερικών εκατοντάδων kW. Από την άλλη πλευρά, τα μικροδίκτυα είναι μια νέα έννοια που δημιουργήθηκε από την ολοένα και περισσότερο αυξημένη ζήτηση ενέργειας και την αδυναμία των υπάρχοντων δικτύων να ανταπεξέλθουν αξιόπιστα στις αυξημένες απαιτήσεις.

Τα μικροδίκτυα αποτελούν μικρογραφίες του δημόσιου δικτύου και συμβάλλουν στην κατανομημένη παραγωγή, παρέχοντας την δυνατότητα σε απομονωμένους καταναλωτές να έχουν αδιάλειπτη ηλεκτρική παροχή. Το γεγονός ότι για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τα θέτει στο επίκεντρο των εξελίξεων στο συγκεκριμένο τομέα, τόσο της ερευνητικής όσο και της εμπορικής δραστηριότητας. [5]

2.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά

Κατά την επικρατέστερη εκδοχή ως μικροδίκτυο ορίζεται ένα υποσύστημα του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου συνδεδεμένο σε ένα σημείο με το δίκτυο διανομής, το οποίο περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής, φορτία και στοιχεία αποθήκευσης της ενέργειας, ενώ μπορεί και λειτουργεί είτε συνδεδεμένο με το δημόσιο δίκτυο, είτε αυτόνομα. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές που δίνουν στα μικροδίκτυα και επιπλέον χαρακτηριστικά σε σχέση με την ισχύ τους ή την ισχύ των μονάδων παραγωγής ενέργειας από τις οποίες συνίστανται ή σε σχέση με το σημείο που συνδέονται στο δίκτυο διανομής και διαφοροποιούν, διευκρινίζουν ή εμπλουτίζουν τον επικρατέστερο ορισμό.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροδικτύων είναι τα κοινά χαρακτηριστικά των διαφόρων ορισμών που έχουν δοθεί γι' αυτά και συγκεκριμένα: η "θέση" των παραγωγικών μονάδων έναντι των καταναλώσεων και η δυνατότητα προσθήκης μονάδων παραγωγής χωρίς διαταραχή του συστήματος με ταυτόχρονη διατήρηση της ευστάθειάς του (plug and play).

Ο τρόπος που τα μικροδίκτυα συνδέονται στο δίκτυο διανομής διαφοροποιείται. Στο μικροδίκτυο δημιουργείται ουσιαστικά μια μικρογραφία του δικτύου χαμηλής τάσης, διαφοροποιήσεις όμως υπάρχουν για το αν το ίδιο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης σε μια ή περισσότερες θέσεις. Στο σημείο αυτό χρειάζεται να αναφερθεί ότι τα μικροδίκτυα μπορούν να μην έχουν και κανένα σημείο σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο είτε επειδή έχει επιλεγεί να λειτουργούν αυτόνομα για να παρέχουν στις καταναλώσεις τους αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας ισχύ είτε γιατί έχουν οδηγηθεί σε αυτόνομη λειτουργία από κάποια διαταραχή του δικτύου. Η διαφοροποίηση αυτή, ουσιαστικά, συνδέεται και με το μέγεθος της ισχύος των μονάδων παραγωγής. Ανάλογα λοιπόν και με το μέγεθος του μικροδικτύου αυτό θα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο διανομής είτε στη χαμηλή είτε στη μέση τάση. Μικρές παραγωγικές μονάδες σε συνδυασμό με ορισμένα φορτία, π.χ. ένα σύστημα παραγωγής που θα τροφοδοτεί ένα νοσοκομείο, και λειτουργεί σαν μικροδίκτυο, θα είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αντίθετα, στη μέση τάση συνδέονται τα συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους. Οι μονάδες παραγωγής μαζί με τα φορτία σχηματίζουν ένα δίκτυο χαμηλής τάσης αποτελώντας ως σύνολο το μικροδίκτυο και συνδέονται στη μέση τάση που τα "βλέπει" ως κάτι ενιαίο, ως μια ανεξάρτητη οντότητα. Με παρόμοιο τρόπο υπάρχουν μικροδίκτυα στο δίκτυο μέσης τάσης που συνδέονται στο δίκτυο υψηλής τάσης.

Υπάρχουν και αναφορές που θεωρούν βαθμίδες στο μικροδίκτυο. Η ανώτερη βαθμίδα είναι το σημείο σύνδεσης στην υψηλή τάση, ενώ η κατώτερη στη χαμηλή, που "υπακούει" στις απαιτήσεις των ανώτερων βαθμίδων του δικτύου.

Στην πλειονότητα των αναφορών οι μονάδες παραγωγής που περιέχονται στο μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένες σε ένα κοινό σημείο που αποτελεί το σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο. Σε μεγαλύτερης κλίμακας μικροδίκτυα υπάρχει περίπτωση να απαιτούνται περισσότερα σημεία σύνδεσης, κυρίως για να διατηρείται η αξιοπιστία, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα του ελέγχου. Το σημείο σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό και τη λειτουργία του μικροδικτύου. Σε απομακρυσμένα σημεία, τα χαρακτηριστικά του κυρίως δικτύου, τάση και συχνότητα, μπορεί να είναι αδύναμα, δημιουργώντας πρόβλημα στον έλεγχο του μικροδικτύου όσον αφορά την τάση και την ευστάθεια. Επιπλέον πρόβλημα μπορεί να δημιουργηθεί όταν τα μικροδίκτυα συνδέονται σε δευτερεύοντα δίκτυα ή σε διασυνδεδεμένα δίκτυα με το κυρίως δίκτυο (νησιωτικές περιοχές). [5]

2.3 Δομή- Σχεδιασμός

Τα μικροδίκτυα ανάλογα με τις ανάγκες που χρειάζεται να καλύπτουν και το σχεδιασμό τους διακρίνονται σε μικροδίκτυα με DC σύνδεση και σε μικροδίκτυα με AC σύνδεση.

2.3.1 DC Σύνδεση

Σε δίκτυα μικρής ισχύος, της τάξης των 50kW, υφίσταται λόγος για τη σύνδεση σε ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος, ειδικά αν υπάρχουν φορτία συνεχούς. Οι μονάδες παραγωγής που έχουν στην έξοδό τους συνεχή τάση και ρεύμα συνδέονται στον δίαυλο συνεχούς με ρυθμιστές συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC converters) και στον ίδιο δίαυλο συνδέονται και τα φορτία συνεχούς. Ένας αυτόνομος μετατροπέας ισχύος συνδέει τα εναλλασσόμενα φορτία με το δίαυλο συνεχούς. Οι ρυθμιστές φόρτισης ελέγχουν την στάθμη φόρτισης των μπαταριών, εφόσον υπάρχουν, και αν διαπιστωθεί ότι η στάθμη τους πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο συνδέουν αυτόματα την εφεδρική τροφοδοσία, που μπορεί να είναι κάποια ηλεκτρική γεννήτρια ή ακόμα και το δίκτυο. Υπάρχουν και αυτόνομοι μετατροπείς ισχύος με ενσωματωμένο ρυθμιστή φόρτισης που αποτελεί το σύνδεσμο ανάμεσα στο δίαυλο συνεχούς και στο δίαυλο εναλλασσομένου ρεύματος.

Βασικά πλεονεκτήματα της σύνδεσης αυτής είναι η δυνατότητα τροφοδοσίας φορτίων συνεχούς και η μεγαλύτερη απόδοση στη φόρτιση των μπαταριών. Ακόμα είναι πιο εύκολος ο έλεγχος του δικτύου και το σύστημα είναι σθεναρό. Στα μειονεκτήματα ανήκουν η δυσκολία επέκτασης, αλλά και προβλήματα που συνδέονται με την ύπαρξη συνεχών παραμέτρων. Η συνεχής τάση είναι δύσκολο να τυποποιηθεί, ενώ σε μεγάλου μήκους καλωδιώσεις αυξάνονται οι απώλειες, όταν η μεταφορά γίνεται με συνεχές. Επίσης υπάρχει

2.2 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά

Κατά την επικρατέστερη εκδοχή ως μικροδίκτυο ορίζεται ένα υποσύστημα του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου συνδεδεμένο σε ένα σημείο με το δίκτυο διανομής, το οποίο περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής, φορτία και στοιχεία αποθήκευσης της ενέργειας, ενώ μπορεί και λειτουργεί είτε συνδεδεμένο με το δημόσιο δίκτυο, είτε αυτόνομα. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές που δίνουν στα μικροδίκτυα και επιπλέον χαρακτηριστικά σε σχέση με την ισχύ τους ή την ισχύ των μονάδων παραγωγής ενέργειας από τις οποίες συνίστανται ή σε σχέση με το σημείο που συνδέονται στο δίκτυο διανομής και διαφοροποιούν, διευκρινίζουν ή εμπλουτίζουν τον επικρατέστερο ορισμό.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροδικτύων είναι τα κοινά χαρακτηριστικά των διαφόρων ορισμών που έχουν δοθεί γι' αυτά και συγκεκριμένα: η "θέση" των παραγωγικών μονάδων έναντι των καταναλώσεων και η δυνατότητα προσθήκης μονάδων παραγωγής χωρίς διαταραχή του συστήματος με ταυτόχρονη διατήρηση της ευστάθειάς του (plug and play).

Ο τρόπος που τα μικροδίκτυα συνδέονται στο δίκτυο διανομής διαφοροποιείται. Στο μικροδίκτυο δημιουργείται ουσιαστικά μια μικρογραφία του δικτύου χαμηλής τάσης, διαφοροποιήσεις όμως υπάρχουν για το αν το ίδιο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης σε μια ή περισσότερες θέσεις. Στο σημείο αυτό χρειάζεται να αναφερθεί ότι τα μικροδίκτυα μπορούν να μην έχουν και κανένα σημείο σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο είτε επειδή έχει επιλεγεί να λειτουργούν αυτόνομα για να παρέχουν στις καταναλώσεις τους αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας ισχύ είτε γιατί έχουν οδηγηθεί σε αυτόνομη λειτουργία από κάποια διαταραχή του δικτύου. Η διαφοροποίηση αυτή, ουσιαστικά, συνδέεται και με το μέγεθος της ισχύος των μονάδων παραγωγής. Ανάλογα λοιπόν και με το μέγεθος του μικροδικτύου αυτό θα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο διανομής είτε στη χαμηλή είτε στη μέση τάση. Μικρές παραγωγικές μονάδες σε συνδυασμό με ορισμένα φορτία, π.χ. ένα σύστημα παραγωγής που θα τροφοδοτεί ένα νοσοκομείο, και λειτουργεί σαν μικροδίκτυο, θα είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αντίθετα, στη μέση τάση συνδέονται τα συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους. Οι μονάδες παραγωγής μαζί με τα φορτία σχηματίζουν ένα δίκτυο χαμηλής τάσης αποτελώντας ως σύνολο το μικροδίκτυο και συνδέονται στη μέση τάση που τα "βλέπει" ως κάτι ενιαίο, ως μια ανεξάρτητη οντότητα. Με παρόμοιο τρόπο υπάρχουν μικροδίκτυα στο δίκτυο μέσης τάσης που συνδέονται στο δίκτυο υψηλής τάσης.

Υπάρχουν και αναφορές που θεωρούν βαθμίδες στο μικροδίκτυο. Η ανώτερη βαθμίδα είναι το σημείο σύνδεσης στην υψηλή τάση, ενώ η κατώτερη στη χαμηλή, που "υπακούει" στις απαιτήσεις των ανώτερων βαθμίδων του δικτύου.

Στην πλειονότητα των αναφορών οι μονάδες παραγωγής που περιέχονται στο μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένες σε ένα κοινό σημείο που αποτελεί το σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο. Σε μεγαλύτερης κλίμακας μικροδίκτυα υπάρχει περίπτωση να απαιτούνται περισσότερα σημεία σύνδεσης, κυρίως για να διατηρείται η αξιοπιστία, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα του ελέγχου. Το σημείο σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό και τη λειτουργία του μικροδικτύου. Σε απομακρυσμένα σημεία, τα χαρακτηριστικά του κυρίως δικτύου, τάση και συχνότητα, μπορεί να είναι αδύναμα, δημιουργώντας πρόβλημα στον έλεγχο του μικροδικτύου όσον αφορά την τάση και την ευστάθεια. Επιπλέον πρόβλημα μπορεί να δημιουργηθεί όταν τα μικροδίκτυα συνδέονται σε δευτερεύοντα δίκτυα ή σε διασυνδεδεμένα δίκτυα με το κυρίως δίκτυο (νησιωτικές περιοχές). [5]

2.3 Δομή- Σχεδιασμός

Τα μικροδίκτυα ανάλογα με τις ανάγκες που χρειάζεται να καλύπτουν και το σχεδιασμό τους διακρίνονται σε μικροδίκτυα με DC σύνδεση και σε μικροδίκτυα με AC σύνδεση.

2.3.1 DC Σύνδεση

Σε δίκτυα μικρής ισχύος, της τάξης των 50kW, υφίσταται λόγος για τη σύνδεση σε ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος, ειδικά αν υπάρχουν φορτία συνεχούς. Οι μονάδες παραγωγής που έχουν στην έξοδό τους συνεχή τάση και ρεύμα συνδέονται στον δίαυλο συνεχούς με ρυθμιστές συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC converters) και στον ίδιο δίαυλο συνδέονται και τα φορτία συνεχούς. Ένας αυτόνομος μετατροπέας ισχύος συνδέει τα εναλλασσόμενα φορτία με το δίαυλο συνεχούς. Οι ρυθμιστές φόρτισης ελέγχουν την στάθμη φόρτισης των μπαταριών, εφόσον υπάρχουν, και αν διαπιστωθεί ότι η στάθμη τους πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο συνδέουν αυτόματα την εφεδρική τροφοδοσία, που μπορεί να είναι κάποια ηλεκτρική γεννήτρια ή ακόμα και το δίκτυο. Υπάρχουν και αυτόνομοι μετατροπείς ισχύος με ενσωματωμένο ρυθμιστή φόρτισης που αποτελεί το σύνδεσμο ανάμεσα στο δίαυλο συνεχούς και στο δίαυλο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Βασικά πλεονεκτήματα της σύνδεσης αυτής είναι η δυνατότητα τροφοδοσίας φορτίων συνεχούς και η μεγαλύτερη απόδοση στη φόρτιση των μπαταριών. Ακόμα είναι πιο εύκολος ο έλεγχος του δικτύου και το σύστημα είναι σθεναρό. Στα μειονεκτήματα ανήκουν η δυσκολία επέκτασης, αλλά και προβλήματα που συνδέονται με την ύπαρξη συνεχών παραμέτρων. Η συνεχής τάση είναι δύσκολο να τυποποιηθεί, ενώ σε μεγάλο μήκος καλωδιώσεις αυξάνονται οι απώλειες, όταν η μεταφορά γίνεται με συνεχές. Επίσης υπάρχει

δυσκολία στην εγκατάσταση, αφού δεν υπάρχει χρωματική κωδικοποίηση στα καλώδια συνεχούς και χρειάζεται προμήθεια διακοπτικών συνεχούς και μεγαλύτερων διατομών. Τέλος ο σχεδιασμός των αυτόνομων μετατροπέων ισχύος πρέπει να γίνει για το μέγιστο φορτίο. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση με τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλή τάση. Το DC στη χαμηλή τάση έχει αυξημένες απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις.

2.3.2 AC Σύνδεση

Σε μεγαλύτερα δίκτυα είναι προτιμότερη η σύνδεση στο εναλλασσόμενο ρεύμα, γιατί προσφέρει καλύτερη συνδεσιμότητα με το δίκτυο ή άλλα μικροδίκτυα. Όλες οι μονάδες, είτε παραγωγής είτε αποθήκευσης, συνδέονται στο δίαυλο AC με ανάλογες συσκευές. Στις μονάδες παραγωγής με συνεχή τάση και ρεύμα χρειάζονται μετατροπείς ισχύος, ενώ, αν υπάρχουν μπαταρίες, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται αυτόνομοι μετατροπείς με ενσωματωμένους ρυθμιστές φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται η αμφίδρομη ροή ισχύος, αφού οι μετατροπείς αυτοί επιτρέπουν το βέλτιστο συντονισμό των μονάδων παραγωγής και χρησιμοποιούν τις μπαταρίες σαν ενδιάμεση μονάδα προσωρινής αποθήκευσης, ενώ παρατείνεται ο χρόνος ζωής των μπαταριών.

Η σύνδεση του είδους αυτού προτιμάται και φαίνεται επικρατέστερη στα σημερινά μικροδίκτυα εξαιτίας των πολλαπλών πλεονεκτημάτων. Τα κυριότερα είναι η αρκετά καλή δυνατότητα επέκτασης, όπως και η σύνδεση νέων μονάδων, ενώ τα διάφορα μέρη μπορούν να συνδυαστούν ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικότερα. Υπάρχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα, όπως η δυσκολία ελέγχου και το μεγάλο κόστος που προκύπτει στα μικτά συστήματα. Επιπλέον υπάρχουν απώλειες κατά τη μετατροπή ισχύος από το συνεχές στο εναλλασσόμενο ρεύμα. [5]

2.4 Μονάδες κατανάλωσης

Μονάδες κατανάλωσης στα μικροδίκτυα μπορούν να είναι φορτία, όπως και στα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα. Οικιακά φορτία, βιομηχανικές και εργοστασιακές μονάδες, μονάδες αφαλάτωσης, μπορούν να τροφοδοτούνται και να καλύπτουν τις ανάγκες τους από τα μικροδίκτυα. Τα φορτία μπορούν να είναι είτε μονοφασικά είτε τριφασικά, χωρητικά, ωμικά ή επαγωγικά και απολαμβάνουν όλα τα πλεονεκτήματα της αδιάλειπτης και υψηλής ποιότητας παροχής ενέργειας που προσφέρουν τα μικροδίκτυα.

Μεγάλη σημασία για τα φορτία έχει η σωστή διαστασιολόγηση των μικροδικτύων, ώστε κατά την αυτόνομη λειτουργία τους να εξασφαλίζεται η τροφοδοσία των φορτίων. Στο σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, όχι μόνο η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την

τροφοδοσία τους, αλλά και η ζήτηση αιχμής, καθώς επίσης και ο χρόνος που θα χρειαστεί για να εξασφαλιστεί η αυτονομία του συστήματος.

2.4.1 Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα. Οι πηγές τους είναι συνήθως μονάδες Α.Π.Ε ή μονάδες συμπαραγωγής με υψηλή απόδοση που οδηγούν σε περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνοντας την απόδοση ως 30%. Επίσης ο τοπικός χαρακτήρας της παραγωγής μειώνει τις απώλειες μεταφοράς. Αν το μικροδίκτυο λειτουργεί παράλληλα με το κεντρικό δίκτυο μπορεί να το υποστηρίζει προσφέροντας του ισχύ τις ώρες αιχμής και απορροφώντας ή διοχετεύοντας ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα, όταν απαιτείται. Τέλος, η αξιοπιστία του συστήματος βελτιώνεται εφόσον, σε περίπτωση απώλειας του κεντρικού δικτύου, το μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτεί κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις μέρος των καταναλωτών. Όσον αφορά μικρές εγκαταστάσεις, τα μικροδίκτυα δίνουν τη δυνατότητα ηλεκτροδότησης απομονωμένων περιοχών, στις οποίες δεν υπάρχει κεντρικό δίκτυο και όπου πολλές φορές το κόστος σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο είναι μεγαλύτερο από την εγκατάσταση αυτόνομου συστήματος. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν σπίτια και οικισμοί σε βουνά, δάση και άλλες δύσβατες περιοχές στον αναπτυγμένο κόσμο και ολόκληρα χωριά σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπου ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. [5]

2.5 Μονάδες αποθήκευσης στα μικροδίκτυα

Οι μονάδες αποθήκευσης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα μικροδίκτυα, ειδικά όσον αφορά την αυτόνομη λειτουργία τους, αφού υποκαθιστούν τις μονάδες παραγωγής. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο.

Οι συσκευές άμεσης αποθήκευσης έχουν μεγαλύτερες αποδόσεις λόγω των λιγότερων μετατροπών ενέργειας, ενώ απαιτούνται λιγότερες συσκευές. Ανάλογα με το είδος των εφαρμογών και την ισχύ που απαιτείται, καθώς και το χρόνο αποκατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου, εξετάζονται: ο χρόνος εκφόρτισης, η απόδοση, ο χρόνος ζωής ακόμα και σε ακραίες συνθήκες κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας, η συντήρηση που απαιτούν, καθώς και η φιλικότητα προς το περιβάλλον. Στον Πίνακα 1.1 δίνεται μια σύντομη συγκριτική μελέτη των χαρακτηριστικών των μονάδων αποθήκευσης. Η ανάλυση θα είναι λεπτομερέστερη για τις μπαταρίες, γιατί αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως στα μικροδίκτυα, ενώ απλές αναφορές θα γίνουν για τους υπόλοιπους τρόπους αποθήκευσης.

	Μέγιστα επίπεδα ισχύος	Χρόνος εκφόρτισης	Χρόνος Απόκρισης	Απόδοση	Χρόνος ζωής
Lead Acid	20MW	6-8 ώρες	<5msec	0,85	5 χρόνια
Σφόνδυλοι	750kW/1650kW	1 ώρα/3 - 120sec	<20msec	0.9/0.93	20 χρόνια
Πυκνωτές Μεγάλης Χωρητικότητα	100kW	10 sec	<5msec	0,9	10.000κύκλοι
Υπεραγωγίμα Πηνία	6-100MW		<5msec	0,95	30 χρόνια
Πεπιεσμένος Αέρας	220M	μέρες	Sec-min	0.79	30 χρόνια
Αντλίες Νερού	4.000MW	~12 ώρες	min	0.87	30 χρόνια

Πίνακας 1.1 Συγκριτικός Πίνακας Μονάδων Αποθήκευσης

2.5.1 Συσσωρευτές

Ανεξαρτήτως του τύπου τους οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από ορισμένα μεγέθη, αλλά και κάποιους συντελεστές. Το κυριότερο από αυτά τα μεγέθη είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή. Η χωρητικότητα μετριέται σε Ah(αμπερώρια) και εκφράζει το μέγεθος του ρεύματος εκφόρτισης που είναι δυνατόν να παραχθεί κατά την διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου. Η μείωση της χωρητικότητας κατά την εκφόρτιση καλείται *βάθος εκφόρτισης* (Depth of Discharge, DOD) και εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας. Η απομένουσα διαθέσιμη χωρητικότητα καλείται *στάθμη φόρτισης* (State of Charge, SOC) και εκφράζεται με τον ίδιο τρόπο. Μια πλήρης εκφόρτιση μαζί με την επόμενη επαναφόρτιση αποτελούν ένα *κύκλο λειτουργίας*. Κατά την διάρκεια ενός κύκλου συμβαίνουν μη αναστρέψιμες μεταβολές, που προκαλούν βαθμιαία μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας, έως ότου το στοιχείο δεν μπορεί πλέον να λειτουργήσει ικανοποιητικά, οπότε έχει εξαντλήσει πλήρως τη διάρκεια ζωής του.

Υπάρχουν διάφορα είδη μπαταριών με πιο συνήθη τα ακόλουθα: μολύβδου-οξέος (Lead Acid), νικελίου-καδμίου (Nickel-cadmium - NiCd), υδριδίων νικελίου (Nickel metal hydride) και ιόντων λιθίου (Lithium-ion - Li-ion). Από τα είδη αυτά οι μολύβδου-οξέος είναι αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές.

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου έχουν μεγάλους ρυθμούς εκφόρτισης, μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα υπερφόρτισης, σχετικά σταθερή τάση λειτουργίας συναρτήσει της στάθμης φόρτισης χωρίς να υφίστανται πολλές φθορές. Μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος και η μικρή χωρητικότητα. Προτιμούνται για εφαρμογές σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες (π.χ. πολύ κρύο) γιατί δεν επηρεάζονται έντονα από τη θερμοκρασία, όπως οι άλλοι τύποι (σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται η χωρητικότητα των συσσωρευτών). Βέβαια,

επειδή η ονομαστική τους τάση είναι 1,2V και η τάση φόρτισης 1,65-1,8V ανά στοιχείο, προκύπτουν θέματα συμβατότητας με τους ρυθμιστές φόρτισης και τους μετατροπείς.

Ο πιο κοινός τύπος μπαταριών είναι αυτές μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση, φωτισμό και ανάφλεξη αυτοκινήτων και νηξελομηχανών (Starting-Lighting-Ignition, SLI). Περιέχουν μεγάλο αριθμό λεπτών πλακών ώστε να αποκτούν μεγάλη επιφάνεια με αποτέλεσμα να μπορούν να παρέχουν υψηλό ρεύμα σε μικρή χρονική περίοδο αποδίδοντας υψηλά ποσοστά ενέργειας σε μικρές χρονικές περιόδους με μικρό βάθος εκφόρτισης.

Υπάρχουν και συσσωρευτές μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα, με διαφοροποιήσεις από τις μπαταρίες τύπου SLI στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, στον ηλεκτρολύτη ή και στα δυο. Οι μπαταρίες μολύβδου ανοιχτού τύπου διαφέρουν κατασκευαστικά, γιατί έχουν λεπτότερες πλάκες ενισχυμένες με αντιμόνιο.

Όμως η πιο εξελιγμένη παραλλαγή της κλασικής μπαταρίας μολύβδου-οξέος, που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι η κλειστού τύπου (VRLA-Valve Regulated Lead Acid), επειδή έχει μια βαλβίδα ώστε να υπάρχει διαφυγή της πίεσης σε περίπτωση υπερφόρτισης. Οι συσσωρευτές αυτοί διακρίνονται σε τεχνολογίας GEL και σε τεχνολογίας AGM (Absorbent Glass Mat).

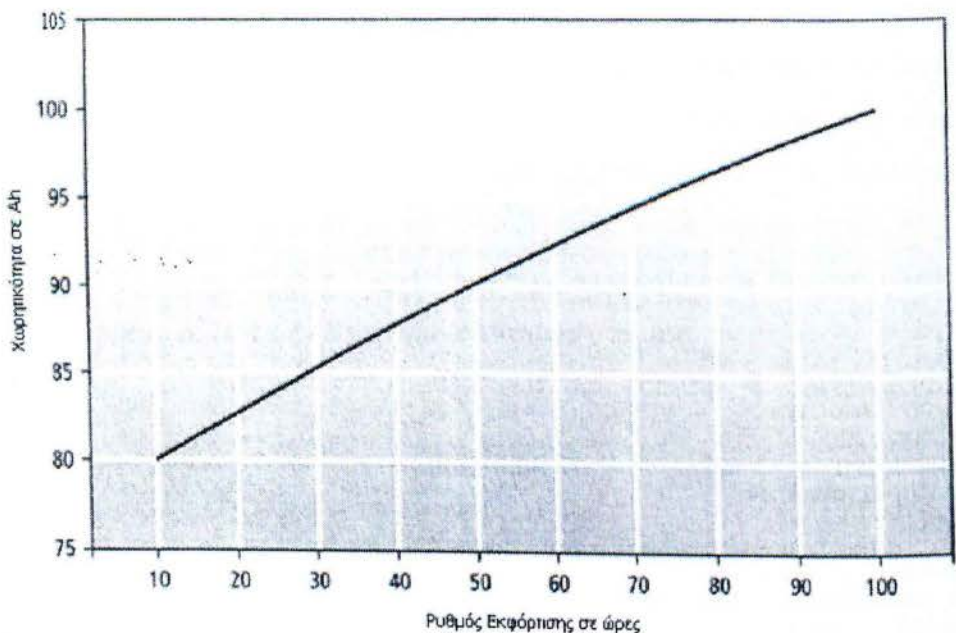
Στους τελευταίους ο ηλεκτρολύτης απορροφάται από μια επιφάνεια ινών γυαλιού (glass fibre mat) με αποτέλεσμα να αναστέλλεται η λειτουργία του. Αυτή η επιφάνεια-στρώμα συνεισφέρει στην επανασύνδεση των αερίων κατά τη διάρκεια της φόρτισης επιτυγχάνοντας τη μείωση του παραγόμενων των αερίων. Οι συσσωρευτές αυτοί ενδείκνυνται για λειτουργίες που απαιτούν υψηλό ρεύμα σε μικρή χρονική περίοδο (όπως οι μπαταρίες τύπου SLI).

Στους συσσωρευτές GEL ο ηλεκτρολύτης έχει "μετατραπεί" (έχει την μορφή) σε ζελέ. Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά είναι πιο ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες και ευάλωτοι στην υπερφόρτιση.

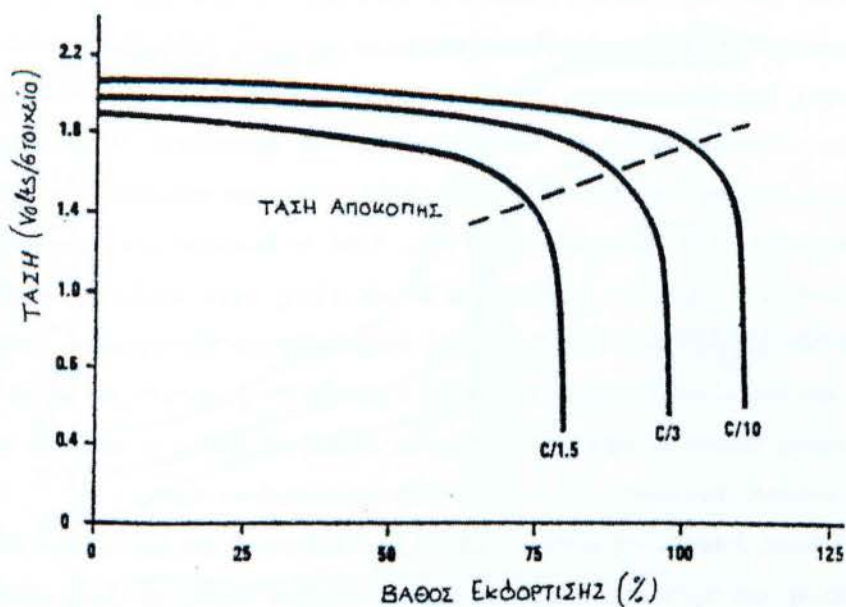
Άλλοι συσσωρευτές, που διαφέρουν κατασκευαστικά, είναι αυτοί που δεν έχουν επίπεδες πλάκες, αλλά ένα συνδυασμό κυλινδρικών και επίπεδων πλακών (θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο). Οι μπαταρίες αυτές είναι γνωστές σαν OPzS (Ortsfeste Panzerplatte Spezial), οι οποίες έχουν υγρό ηλεκτρολύτη και ειδικούς διαχωριστές ή OPzV (Ortsfeste Panzerplatte Verschlussen), οι οποίες έχουν ηλεκτρολύτη GEL. Χαρακτηριστικό τους είναι οι μεγάλοι κύκλοι ζωής. Μειονεκτήματά τους αποτελούν το βάρος τους, ο όγκος, καθώς και το κόστος εγκατάστασης.

Γενικά για περιστασιακή (σποραδική) χρήση προτιμούνται οι απλές μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Πιο ασφαλείς είναι οι τύπου GEL κλειστού τύπου, που δεν έχουν διαρροές οξέος και κατ' επέκταση δεν βάζουν περιορισμούς στον τόπο εγκατάστασης. Οι μπαταρίες αυτές είναι όμως πιο ευαίσθητες στο φαινόμενο της υπερφόρτισης, όπως αναφέρθηκε. Τα συστήματα που λειτουργούν διαρκώς δεν καλύπτονται από τις προαναφερθείσες μπαταρίες γιατί χρειάζονται αντικατάσταση σε σύντομο χρόνο (μικρή διάρκεια ζωής). Για αυτά τα συστήματα προτείνονται οι μπαταρίες τύπου OPzS και OPzV.

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μεταβάλλεται και εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 την τάση αποκοπής, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2 και τη θερμοκρασία (μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας με μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση πάνω από 25°C, αλλά και μείωση του χρόνου ζωής, του ρυθμού αυτοεκφόρτισης και τέλος αλλοίωση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών).



Εικόνα 2.1 Χωρητικότητα ως συνάρτηση του ρυθμού εκφόρτισης για μπαταρία οξέως - μολύβδου (Lead Acid)



Σχήμα 2.2 Τάση εκφόρτισης σαν συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης για μπαταρία μολύβδου

Η φόρτιση του συσσωρευτή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Σήμερα ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η φόρτιση με σταθερό ρεύμα, με σταθερή τάση και η φόρτιση με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM).

Σχετικά με τις δύο πρώτες μεθόδους, η φόρτιση περιλαμβάνει τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο (normal charge) ο συσσωρευτής φορτίζεται με ένα σταθερό ρεύμα, ενώ η τάση δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, αρκεί να είναι πάνω από το όριο φόρτισης αυτού, συνήθως 2,1 V. Καθώς ο συσσωρευτής φορτίζεται, το ρεύμα που απορροφά μειώνεται και αυξάνεται η τάση στα άκρα του. Στο στάδιο αυτό ο συσσωρευτής χρειάζεται λίγη ακόμη φόρτιση ώστε να εξασφαλιστεί ότι φορτίζονται πλήρως όλα τα στοιχεία του (full charge). Αυτό σημαίνει ότι για ένα μικρό διάστημα θα πρέπει η τάση του να υπερβεί τα 2,4V/κυψέλη. Το στάδιο αυτό θεωρείται πολλές φορές ξεχωριστό, στην ουσία τέταρτο, ενώ άλλες φορές είναι ενσωματωμένο στο στάδιο κανονικής φόρτισης.

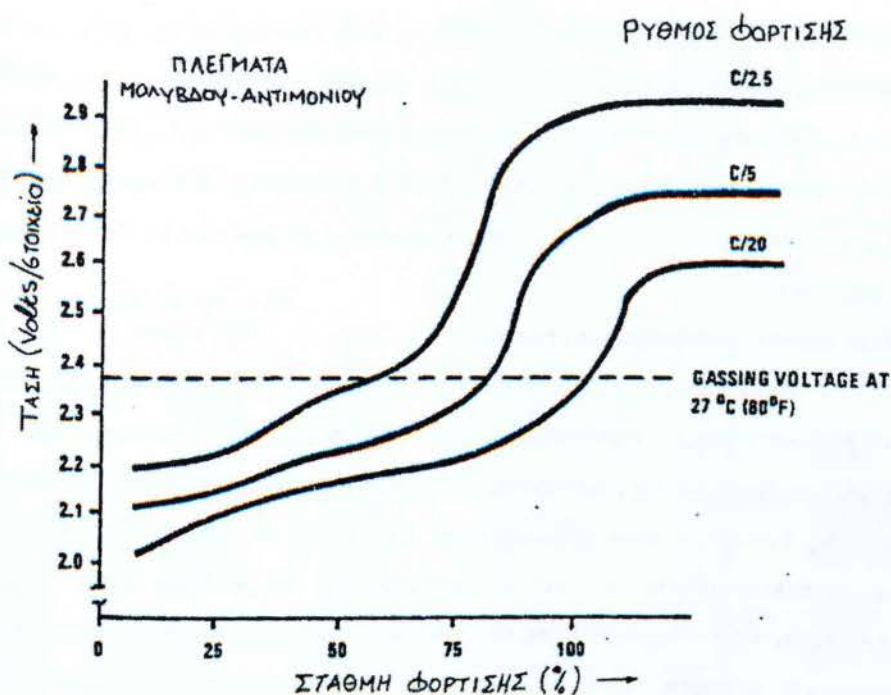
Όταν ο συσσωρευτής σταματήσει να φορτίζεται, η τάση στα άκρα του αρχίζει να μειώνεται, ώσπου να φτάσει στα 2,1V που είναι η τάση πλήρους φόρτισής του. Για να διατηρηθεί σε μια συνεχώς φορτισμένη κατάσταση, ένας σωστός ελεγκτής φόρτισης θα πρέπει να εκτελεί το επόμενο διάστημα μια περιοδική φόρτιση συντήρησης (float charge), η οποία έχει ως ανώτατο όριο τα 2,3V/κυψέλη και κατώτατο τα 2,1V/κυψέλη.

Οι παραπάνω τιμές αφορούν σε συσσωρευτές μολύβδου-οξέος και είναι ενδεικτικές για την τεχνολογία αυτή.

Όταν ένας συσσωρευτής υποβάλλεται σε συνεχείς βαθιές εκφορτίσεις, όπως είναι πιθανό να συμβαίνει σε ένα μικροδίκτυο, απαιτείται μια ακόμη διαδικασία βελτιστοποίησης της φόρτισης (equalizing charge, που γίνεται έπειτα από συγκεκριμένο αριθμό διαδοχικών φορτίσεων - εκφορτίσεων ή σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα αφού ο συσσωρευτής έχει φορτιστεί πλήρως και απαιτείται παροχή τάσης σε κάθε στοιχείο 2,4-2,5V για 1 έως και 5 ώρες. Κατά το διάστημα αυτό πραγματοποιείται ηλεκτρόλυση του νερού στο διάλυμα του θεικού οξέος, οπότε εκλύονται υδρογόνο και οξυγόνο υπό μορφή φυσαλίδων και είναι απαραίτητη για την αποφυγή σχηματισμού κρυστάλλων στις πλάκες του συσσωρευτή. Να σημειωθεί ότι η ελάττωση του νερού λόγω της ηλεκτρόλυσης μπορεί να αφήσει ακάλυπτες τις πλάκες μολύβδου, γι' αυτό και απαιτείται συχνή συντήρηση των συσσωρευτών με προσθήκη απιονισμένου νερού.

Τελείως διαφορετική είναι η φόρτιση με διαμόρφωση του εύρους των παλμών. Ο συσσωρευτής φορτίζεται συνεχώς με παλμούς τάσης, των οποίων το εύρος μεταβάλλεται σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή. Όταν αυτός είναι σε χαμηλή στάθμη φόρτισης, ο ρυθμιστής καθορίζει μεγάλη σχετικά διάρκεια αγωγής, ώστε να παρέχεται μεγάλο ρεύμα. Αντίθετα, όσο προχωράει η φόρτιση, το εύρος των παλμών μειώνεται, ώστε να παρέχεται μικρότερο ρεύμα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία του συσσωρευτή αυξάνεται κατά τη φόρτισή του. Ιδιαίτερα αν η φόρτιση δεν διακοπεί μετά την πλήρη φόρτισή του, εκτός από την ηλεκτρόλυση του νερού, αρχίζει να αυξάνεται και η θερμοκρασία αισθητά, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Στο διάγραμμα του σχήματος 2.1 δειχνεται η τάση ανά στοιχείο ενός συσσωρευτή κατά τη διάρκεια της φόρτισής του. [5]



Σχήμα 2.1 Η τάση κατά την διάρκεια της φόρτισης σαν συνάρτηση της στάθμης φόρτισης.

2.5.2 Σφόνδυλοι

Οι σφόνδυλοι χρησιμοποιούνται προς το παρόν για διάφορες μη ηλεκτροπαραγωγές εφαρμογές. Εντούτοις, πρόσφατα, οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν την ενεργειακή αποθήκευση και για τις εφαρμογές αυτού του είδους. Μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου αποτελείται από ένα σφόνδυλο που περιστρέφεται με πολύ υψηλή ταχύτητα και μία ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή που μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας για να περιστρέφει το σφόνδυλο και να αποθηκεύει ενέργεια, είτε ως γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρική ισχύ κατά τη ζήτηση με χρήση της ενέργειας που αποθηκεύτηκε στο σφόνδυλο.

Σε ένα σύστημα υπεραγωγικής μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης (YMEA) η ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγωγίμο υλικό. Για να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγωγική κατάστασή του, βυθίζεται σε υγρό ήλιο που περιέχεται σε ένα μονωμένο υπό κενό κρυστάτη. Η παραγωγή ενέργειας από ένα τέτοιο σύστημα εξαρτάται πολύ λιγότερο από το ρυθμό εκφόρτισης απ' ό,τι αυτή των μπαταριών. Τα συστήματα YMEA έχουν επίσης μεγάλο κύκλο ζωής και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, πλήρη ανακύκλωση και συνεχή ρυθμό λειτουργίας.

Αν και η διεξαγόμενη έρευνα αφορά τα μεγαλύτερα συστήματα της τάξης των 10 έως 100MW, πρόσφατα έχει εστιαστεί σε μικρότερες διατάξεις της τάξης του 1 έως 10MW. Οι διατάξεις μικροσυστημάτων διατίθενται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Στο σχήμα 1.16 παρατίθεται η σχηματική άποψη μιας μονάδας ΥΜΕΑ με απόδοση 3MW πραγματικής ισχύος και ένα χρόνο απόκρισης <0,5ms. Η μονάδα αυτή μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυα μεταφοράς από 69 έως 500 kV.

2.5.3 Εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές βρίσκονται στα πρώιμα στάδια της ανάπτυξής τους ως τεχνολογία ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής έχει συνιστώσες που σχετίζονται τόσο με μια μπαταρία όσο και με ένα πυκνωτή. Συνεπώς η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Ειδικότερα, η φόρτιση αποθηκεύεται από τα ιόντα σε μία μπαταρία. Αλλά, όπως ισχύει και σε ένα συμβατικό πυκνωτή, δεν συμβαίνει χημική αντίδραση κατά την απόδοση της ενέργειας. Ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής αποτελείται από δύο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, ένα διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος.

Προς το παρόν, υπερπυκνωτές πολύ μικρού μεγέθους, της τάξης των 7 ως 10W, διατίθενται ευρέως στο εμπόριο για εφαρμογές ποιότητας ισχύος από την πλευρά του καταναλωτή και βρίσκονται συνήθως σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Η εξέλιξη για τους πυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει εστιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα. Τελευταία, η ποιότητα ισχύος μικρής κλίμακας (<250kW) θεωρείται ως η πιο ελπιδοφόρος ηλεκτροπαραγωγική χρήση για τους εξελιγμένους πυκνωτές. [4]

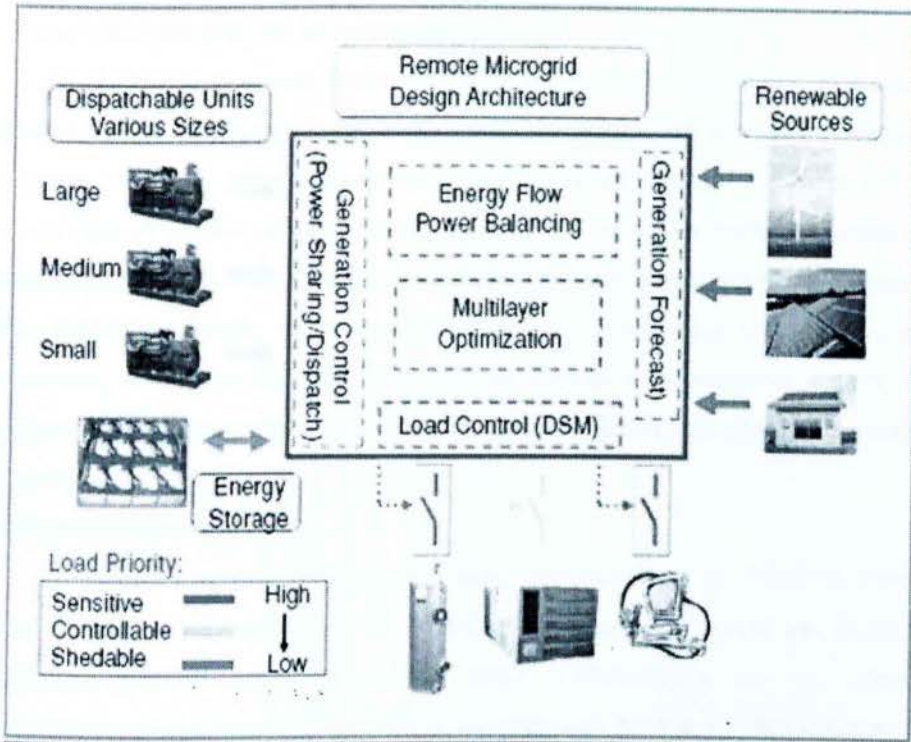
2.6 Έξυπνα μικροδίκτυα

Για να προστεθεί «έξυπνάδα» στα δίκτυα χρειάζονται ανεξάρτητοι μικροεπεξεργαστές σε κάθε συσκευή του δικτύου. Έξυπνα δίκτυα (smart grids) είναι δίκτυα που χρησιμοποιούν στιβαρές επικοινωνίες δυο κατευθύνσεων, εξελιγμένους αισθητήρες (sensors) και ενεργοποιητές (actuators), καθώς και κατανεμημένους υπολογιστές για να βελτιώνουν την απόδοση, την αξιοπιστία και την ασφάλεια τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας στον καταναλωτή. Αποτελούν το όραμα για τα αναβαθμισμένα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος.

Η αυτοδιόρθωση (self healing) είναι μία υπό μελέτη προοπτική για τα δίκτυα αυτά.

Στα έξυπνα δίκτυα κάθε μονάδα του δικτύου έχει το δικό της ανεξάρτητο επεξεργαστή με στιβαρό λειτουργικό σύστημα, ικανό να δρα ως ανεξάρτητος διαμεσολαβητής (agent) που μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τους άλλους επεξεργαστές σχηματίζοντας μία μεγάλη κατανεμημένη υπολογιστική πλατφόρμα.

Η μελλοντική φιλοσοφία της προστασίας των μικροδικτύων ή έξυπνων δικτύων θα είναι πολύ διαφορετική από τη σημερινή που στηρίζεται στις δυνατότητες των ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων.[6]



Εικόνα 2.3 Γενική δομή ενός μικροδικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ TRNSYS

3.1 Γενικές πληροφορίες για το λογισμικό TRNSYS

Το TRNSYS (transient systems) είναι ένα ευέλικτο λογισμικό βασισμένο σε περιβάλλον γραφικών που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση δυναμικών συστημάτων. Έχει ευρεία εφαρμογή παγκοσμίως από μηχανικούς και ερευνητές τόσο για την επικύρωση νέων ενεργειακών σχεδιασμών όσο και για τον έλεγχο παλαιών. Οι σχεδιασμοί αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν από απλά συστήματα παραγωγής θερμού νερού μέχρι την προσομοίωση κτιρίων πολλαπλών ζωνών, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών ελέγχου τους και της συμπεριφοράς των χρηστών τους. Επιπλέον το λογισμικό προσφέρεται για τη μελέτη εναλλακτικών συστημάτων ενέργειας όπως τα αιολικά, ηλιακά, φωτοβολταϊκά, συστήματα υδρογόνου, κ.ά. [7]

3.1.1 Περιεχόμενα λογισμικού

Το TRNSYS αποτελείται από μια ομάδα προγραμμάτων: το TRNSYS Simulation Studio, το σύστημα προσομοίωσης TRNDll.dll και το εκτελέσιμο αρχείο του TRNExe.exe, το σύστημα εισόδου δεδομένων για το κτίριο TRNBuild.exe και τον editor που χρησιμοποιείται για να δημιουργεί αυτόνομα προγράμματα γνωστά ως TRNSED εφαρμογές, TRNEdit.exe.

3.1.2 TRNSYS Simulation Studio

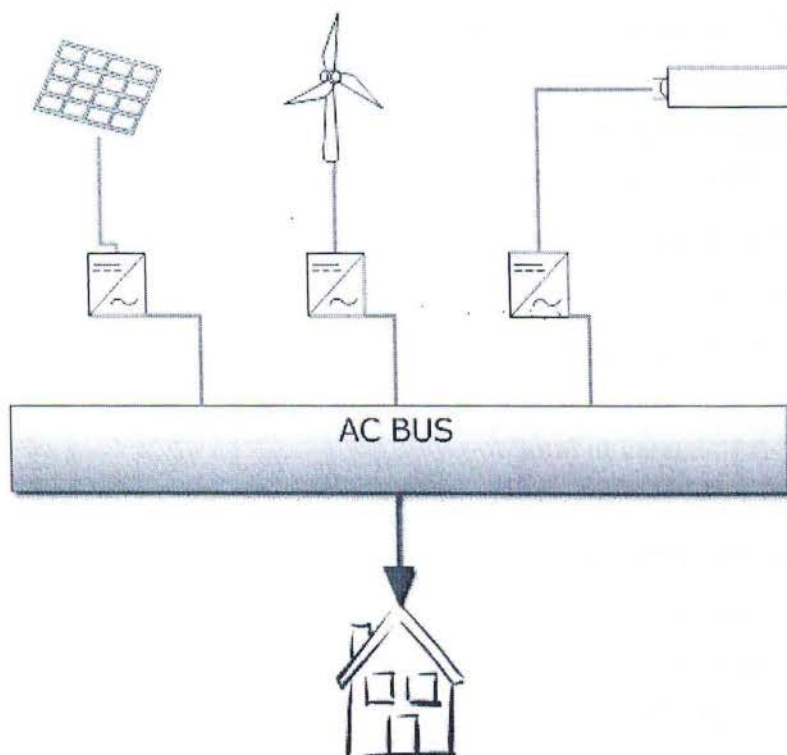
Η κυριότερη λειτουργία του TRNSYS Simulation Studio είναι η δημιουργία μελετών (projects) προσομοίωσης. Στην τρέχουσα έκδοση, έκδοση 16, είναι διαθέσιμη η ταχεία δημιουργία τέτοιων προγραμμάτων μέσω του New Project Wizard.

Οι πληροφορίες των TRNSYS projects αποθηκεύονται σε αρχεία τύπου Trnsys Project File (*.tpf). Όταν εκτελείται μια προσομοίωση, το TRNSYS Simulation Studio δημιουργεί ένα αρχείο εισόδου. Πρόκειται για αρχείο κειμένου που περιέχει όλες τις πληροφορίες των μεγεθών της προσομοίωσης, αλλά καμία πληροφορία γραφικών. Ένας διαχειριστής εξόδου εξασφαλίζει τη δυνατότητα επιλογής και ελέγχου των μεταβλητών που θα ολοκληρωθούν, θα καταγραφούν και θα απεικονιστούν σε διάγραμμα κατά την προσομοίωση. Επίσης ένας διαχειριστής ελέγχου λάθους παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της προσομοίωσης μετά το πέρας της ώστε να διορθωθούν πιθανά λάθη.

Άλλες λειτουργίες του TRNSYS Simulation Studio είναι η επεξεργασία αρχείων εισαγωγής δεδομένων, η δημιουργία νέων πρότυπων στοιχείων -types-, η δημιουργία HTML αρχείων, η προβολή λιστών και αρχείων εξόδου, η εκτύπωση των αποτελεσμάτων, η απευθείας σύνδεση με online βοήθεια, η εκτέλεση παραμετρικών προσομοιώσεων και η παροχή συντομεύσεων για διάφορες επαναλαμβανόμενες συνδέσεις, π.χ. σε περιβάλλον γλωσσών Fortran ή C++.[8]

3.2 Σχεδιασμός μικροδικτύου στο TRNSYS

Στην παρούσα εργασία θα σχεδιαστεί μικροδίκτυο στο TRNSYS το οποίο θα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, συσσωρευτές με σκοπό να εξυπηρετήσει την ηλεκτρική κατανάλωση 10 οικιών (φορτίο) στην πόλη της Αθήνας. Το μικροδίκτυο που θα υλοποιηθεί στο TRNSYS φαίνεται παρακάτω:

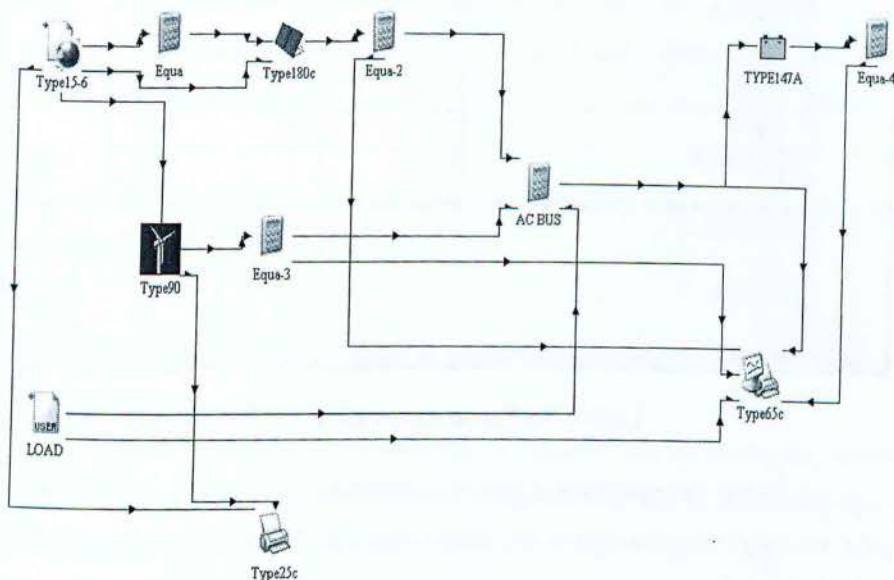


Εικόνα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση του μικροδικτύου

Σκοπός μας είναι να επιλεγεί ο κατάλληλος αριθμός Φ/Β, ανεμογεννητριών και η κατάλληλη χωρητικότητα της μπαταρίας ώστε να παρασχεθεί η απαραίτητη ισχύς στο φορτίο (δέκα σπίτια), ώστε να μην πέσει το επίπεδο φόρτισης (State of Charge) της μπαταρίας κάτω από 20%.

Για την υλοποίηση του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκε το Simulation Studio του TRNSYS. Το μικροδίκτυο αποτελείται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες και το φορτίο.

Το μικροδίκτυο στο TRNSYS φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 3.2 Μικροδίκτυο στο TRNSYS

Για το φωτοβολταϊκό πάνελ επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη του TRNSYS το μοντέλο **Type180c**, το οποίο είναι μαθηματικό μοντέλο για φωτοβολταϊκή γεννήτρια βασισμένο στο ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου μιας διόδου. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκές συστοιχίες (PV arrays) που αποτελούνται από κύτταρα πυριτίου (silicon cells). Υπάρχουν επίσης και άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών πάνελ που μπορεί να επιλεγούν, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή.

3.2.1 Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του Φωτοβολταϊκού panel

Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο του Φ/B πάνελ του TRNSYS ανοίγει το παρακάτω παράθυρο :

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
2	TCMODE	2	-			More...
3	NCSER	72	-			More...
4	NMSER	300	-			More...
5	NMPAR	1	-			More...
6	AREA	1.50	m ²			More...
7	TAUALPHA	0.9	-			More...
8	EGAP	1.12	eV			More...
9	RSH	1E6	any			More...
10	PVTYPE	8	-			More...

Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικά Φ/Β στο TRSNYS

Ο τύπος του χρησιμοποιούμενου φωτοβολταϊκού έχει το MPPT (Maximum power point tracking) ενεργοποιημένο και αποτελείται από 72 κύτταρα σε σειρά (NCSER=72). Ο αριθμός των πάνελ που συνδέονται σε σειρά είναι 300 (NMSER=300). Το κάθε πάνελ έχει ισχύ 130W.

Στην καρτέλα **external files** δίνεται η θέση (directory) του εξωτερικού αρχείου με τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού.

Το calculator (**Equa 2**) της εικόνας 3.1 αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος από τον μετατροπέα (inverter).

3.2.2 Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους της ανεμογεννήτριας

Για την ανεμογεννήτρια επιλέχτηκε από τη βιβλιοθήκη του TRNSYS το μοντέλο **Type90** που είναι ένα μαθηματικό μοντέλο για συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας (WECS).

Επιλέχτηκαν δύο ανεμογεννήτριες ισχύος 3,8kW η καθεμιά (Number of turbines=2). Στην καρτέλα **external files** δίδεται η θέση του εξωτερικού αρχείου με τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας. Το calculator **Equa 3** (εικόνα 3.1) αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος από τον inverter.

3.2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα

Το εικονίδιο με το όνομα **type 15-6** του μικροδικτύου χρησιμοποιείται για την εισαγωγή στο σύστημα των μετεωρολογικών δεδομένων, τα οποία δέχονται ως είσοδο τα

φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες. Το calculator **Equa-1** χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των μονάδων ισχύος από τα kJ σε Wh.

3.2.4 Μπαταρία

Οι μπαταρίες που επιλέχθηκαν είναι τύπου μολύβδου-οξέος που λειτουργούν σε σύνδεση με συστοιχία ηλιακών κυττάρων και με στοιχεία ρύθμισης της ισχύος. Καθορίζεται η μεταβολή του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου με δεδομένο το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης αυτής. Στο πεδίο **qcell** καθορίζεται η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah. Δίδεται επίσης ο αριθμός των σε σειρά και παράλληλα συνδεδεμένων μπαταριών.

Οι απώλειες της μπαταρίας καθορίζονται από το πεδίο **efficiency** το οποίο περιέχει και τις απώλειες ισχύος από τον inverter.

3.2.5 Φορτίο

Το φορτίο που χρησιμοποιείται είναι η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τις ανάγκες δέκα οικιών.

Οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, το φορτίο και οι μπαταρίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω του διαύλου εναλλασσόμενου ρεύματος (**AC BUS**). Η υλοποίηση του AC BUS πραγματοποιήθηκε με βάση τον τύπο:

$$P_{bat} = P_{Vin} + WIND_{in} - Load$$

P_{bat} : Η ισχύς της μπαταρίας

P_{Vin} : Η ισχύς που παράγει το Φ/Β

$WIND_{in}$: Η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια

$Load$: Η ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο.

3.2.6 Printer

Ο Printer (**type25c**) καταγράφει τις τιμές των μεταβλητών εξόδου του συστήματος σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

3.2.7 Online Plotter

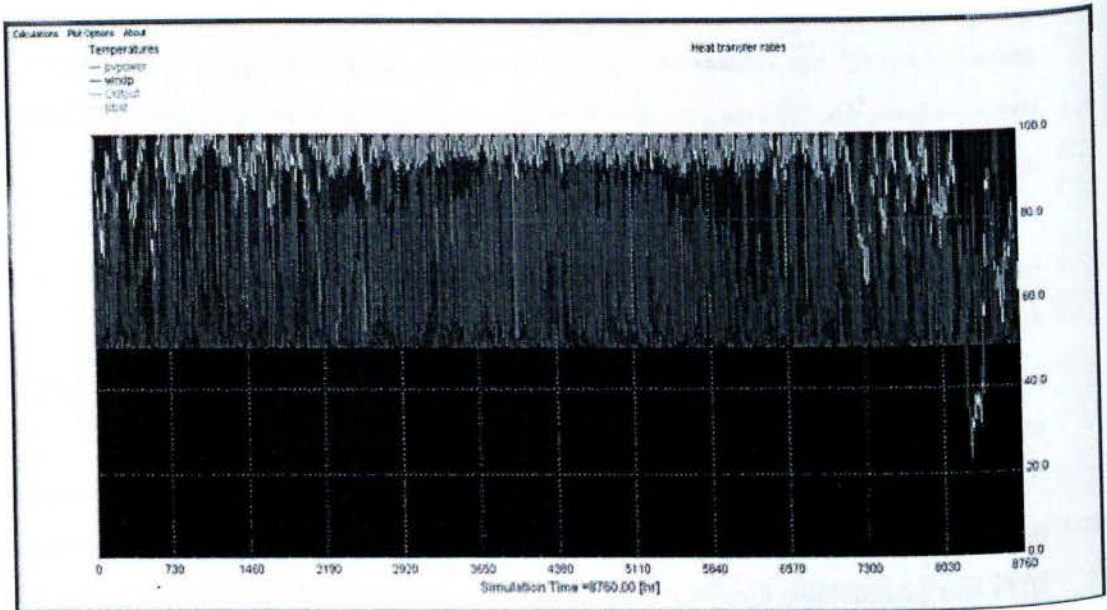
Ο Online Plotter (**type65c**) καταγράφει τις γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών του συστήματος καθώς εκτελείται η προσομοίωση. Μέσω αυτού καθορίζονται οι άξονες, καθώς και το εύρος τιμών σε κάθε άξονα.

3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

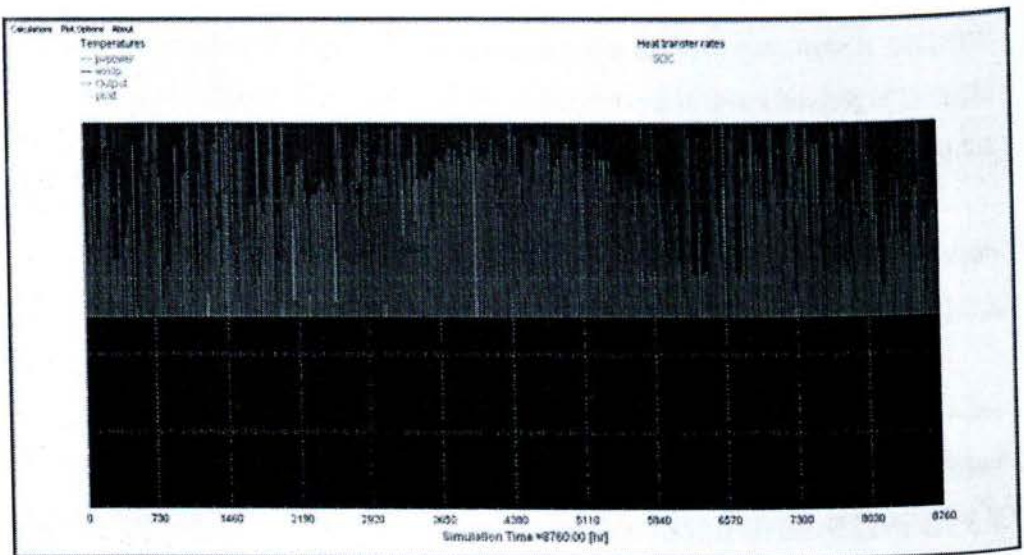
Όπως προαναφέρθηκε το φορτίο που θα τροφοδοτηθεί είναι 10 οικίες. Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους χρησιμοποιήθηκαν 2 ανεμογεννήτριες των 3,8kW η κάθε μία και 300 Φ/Β πάνελ των 130 W, ενώ για την αποθήκευση της παρεχόμενης

ενέργειας μια μπαταρίας χωρητικότητας 3000Ah. Τα μετεωρολογικά δεδομένα αφορούσαν την πόλη της Αθήνας σε χρονική περίοδο ενός έτους.

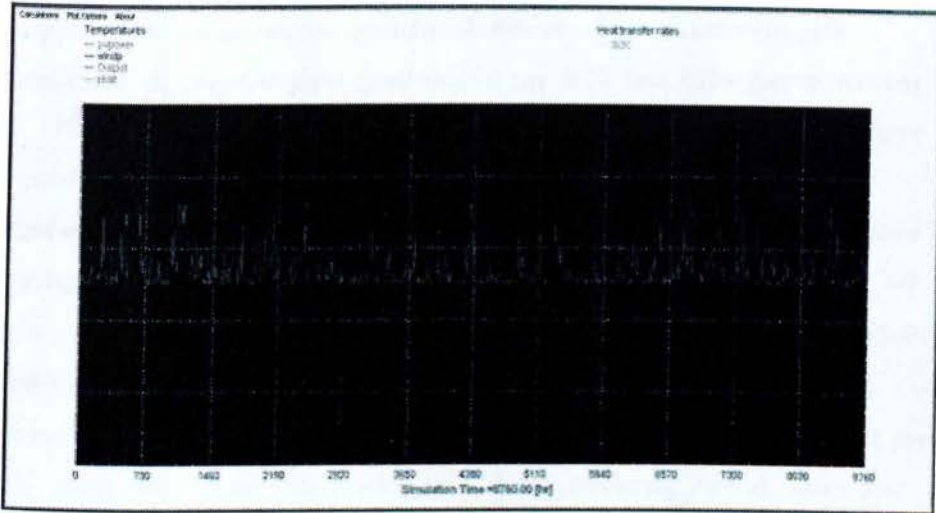
Με SOC (state of charge) (πράσινο χρώμα) να συμβολίζεται το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρουσιάζονται παρακάτω:



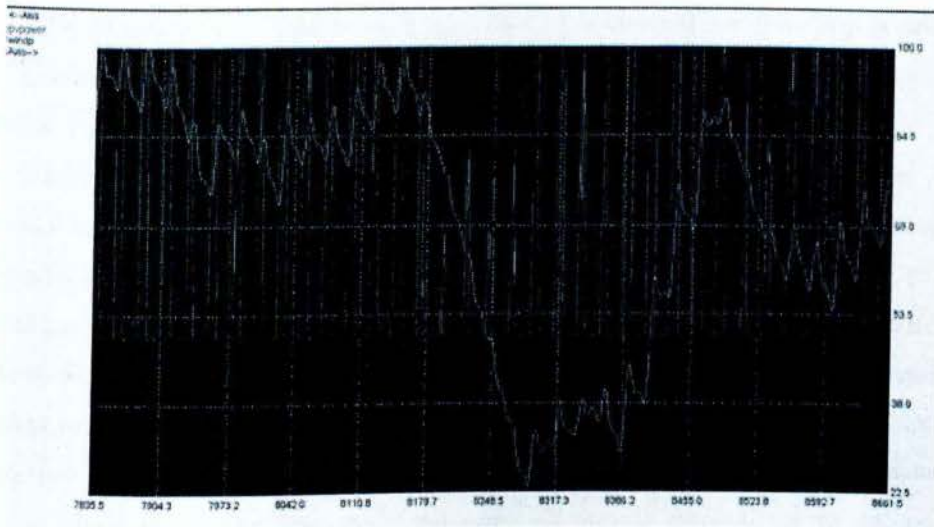
Εικόνα 3.4 Συνδυαστική απόκριση συστήματος (SOC, Φ/Β, Α/Γ).



Εικόνα 3.5 Παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πάνελ



Εικόνα 3.6 Παραγόμενη ισχύς των Α/Γ



Εικόνα 3.7 Σημείο χαμηλότερου SOC

Από τη μελέτη των γραφικών παραστάσεων παρατηρείται ότι σε συνθήκες ασθενούς ανέμου και χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, η μπαταρία επεμβαίνει για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου σε ισχύ και το επίπεδο φόρτισής της μειώνεται. Όταν αρχίσει να αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας, η ισχύς που παράγουν το φωτοβολταϊκό και η ανεμογεννήτρια είναι αρκετή ώστε να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου. Τότε το μικροδίκτυο δίνει στο φορτίο λιγότερη ισχύ, με αποτέλεσμα η μπαταρία να φορτίζεται.

Παρατηρείται επίσης ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας δεν κατέρχεται σε καμία χρονική στιγμή κάτω από 20% της ονομαστικής χωρητικότητας με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται η βιωσιμότητά της.

Τέλος φαίνεται ότι κατά τις περιόδους υψηλής θερμοκρασίας η πυκνότητα και το ύψος των γραμμών αυξάνονται, ενώ σε περιόδους χαμηλότερης θερμοκρασίας η πυκνότητα και το ύψος των γραμμών μειώνονται. Αυτό υποδεικνύει πως επηρεάζεται η ισχύς που παράγουν τα φωτοβολταϊκά.

Αντίστοιχα ισχύουν για τις ανεμογεννήτριες, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ (ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ)

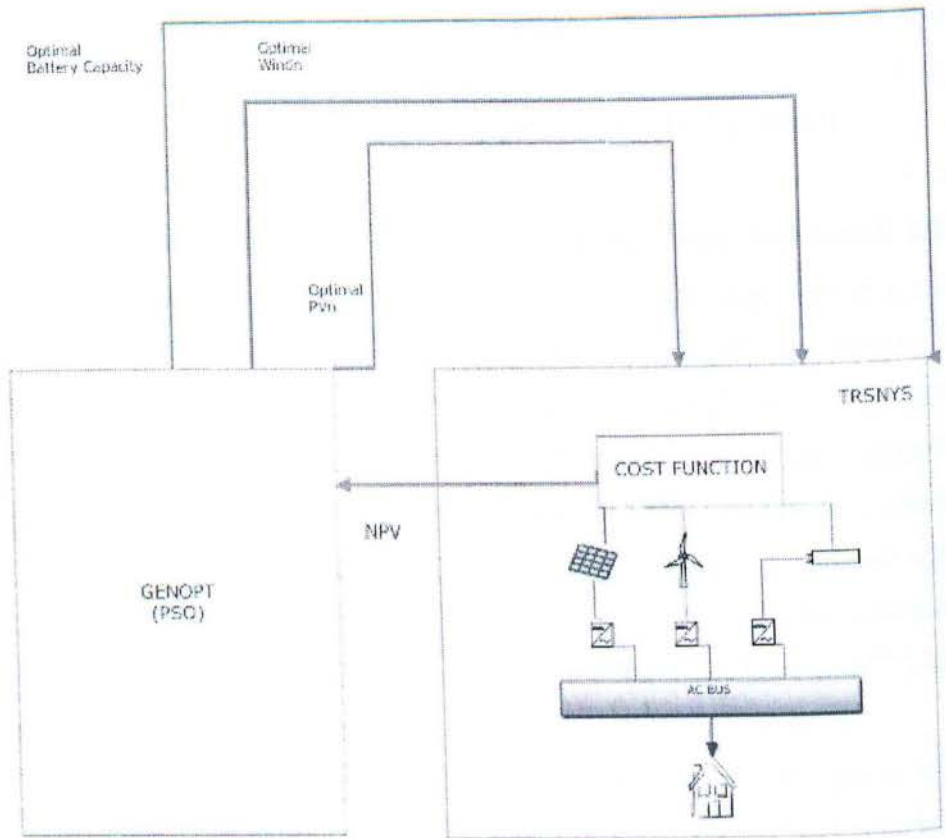
4.1 Εισαγωγή στο GenOpt

4.1.1 Τι είναι το GenOpt

Το GenOpt (generic optimization) είναι ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης συστημάτων. Είναι σχεδιασμένο για να βρίσκει τις τιμές μιας παραμέτρου επιλεγμένης από το χρήστη, η οποία ελαχιστοποιεί μία συνάρτηση κόστους, όπως είναι η ετήσια χρήση ενέργειας ή η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, οδηγώντας έτσι στην καλύτερη δυνατή λειτουργία ενός συστήματος. Η συνάρτηση κόστους υπολογίζεται από ένα εξωτερικό πρόγραμμα προσομοίωσης (στην περίπτωση μας το TRNSYS). [9]

4.1.2 Τρόπος λειτουργίας του GenOpt

Για να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση το GenOpt δημιουργεί αυτόματα αρχεία εισόδου του προγράμματος προσομοίωσης. Το GenOpt τότε ανοίγει το πρόγραμμα προσομοίωσης, διαβάζει τη τιμή της συνάρτησης κόστους που ελαχιστοποιείται από το αρχείο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, ελέγχει πιθανά λάθη της προσομοίωσης και τότε καθορίζει ένα νέο σύνολο παραμέτρων εισόδου για την επόμενη προσομοίωση. Ολόκληρη η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το ελάχιστο της συνάρτησης. Το GenOpt έχει περιβάλλον διεπαφής (interface) μεταξύ του προγράμματος προσομοίωσης και του αλγόριθμου ελαχιστοποίησης. Η συνεργασία του με το εξωτερικό πρόγραμμα επιτυγχάνεται τροποποιώντας ένα αρχείο ρυθμίσεων. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του GenOpt και του εξωτερικού προγράμματος γίνεται μόνο με αρχεία κειμένου. Για να πραγματοποιήσει τη βελτιστοποίηση το GenOpt δημιουργεί αυτόματα νέα αρχεία εισόδου για το πρόγραμμα προσομοίωσης. Σε ένα αρχείο ρυθμίσεων ο χρήστης μπορεί να καθορίσει πώς θα εκτελεστεί το πρόγραμμα προσομοίωσης και το εύρος τιμών εντός του οποίου το GenOpt θα αναζητήσει την τρέχουσα τιμή της συνάρτησης κόστους που θα ελαχιστοποιηθεί, καθώς και άλλες τιμές που μπορεί να επεξεργαστεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. [9]



Εικόνα 4.1 Αλληλεπίδραση Genopt-TRNSYS

4.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στο GenOpt

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης συνεχών μη γραμμικών συναρτήσεων, αναπτύχθηκε η στοχαστική μέθοδος των ατόμων σμήνους (*Particle Swarm Optimization*) από τους J. Kennedy και R. Eberhart. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε μέσω της προσομοίωσης απλοποιημένων κοινωνικών μοντέλων (π.χ. σμήνη πουλιών, ψαριών), και, ενώ υφίσταται η μεταφορά στο κοινωνικό μοντέλο (π.χ. θεωρία σμήνους), ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα.

Η μέθοδος PSO σχετίζεται άμεσα και με τους εξελικτικούς αλγορίθμους (*evolutionary computation*) και τους γενετικούς αλγορίθμους (*genetic algorithms*).

Οι αλγόριθμοι PSO βελτιστοποιούν μία αντικειμενική συνάρτηση διεξάγοντας μία στοχαστική αναζήτηση βασισμένη στον «πληθυσμό» του αλγορίθμου. Ο πληθυσμός αποτελείται από πιθανές λύσεις, που καλούνται άτομα (*particles* που αποτελεί μεταφορά των ατόμων ενός σμήνους), τα οποία στην έναρξη της διαδικασίας επιλέγονται με τυχαίο τρόπο εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης, της εφικτής δηλαδή περιοχής, και «πετούν» ελεύθερα εντός αυτού. Στη διαδικασία των επαναλήψεων, κάθε άτομο ανανεώνει

την «ταχύτητα» (*velocity*) και τη «θέση» (*position*) του, βασισμένο στην βέλτιστη προηγούμενη εμπειρία του ίδιου (*cognitive*), αλλά και του συνολικού πληθυσμού, έως τη συγκεκριμένη στιγμή (*social*). Ο κανόνας της ανανέωσης της θέσης και της ταχύτητας έχει ως ρόλο να κατευθύνει το «σμήνος» προς μία βέλτιστη περιοχή με καλύτερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση, βάσει μίας σχέσης ή και μίας συνάρτησης καταλληλότητας (*fitness function*). Τελικά όλα τα άτομα συγκεντρώνονται γύρω από τη βέλτιστη περιοχή ή σημείο, όπου ελέγχεται πιο σχολαστικά ο χώρος αναζήτησης για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, η βασική μέθοδος αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Βήμα 1ο: Αρχικοποίηση. Στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας ρυθμίζεται η θέση και η ταχύτητα όλων των ατόμων τυχαία εντός της εφικτής περιοχής του προβλήματος, ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας.
- Βήμα 2ο: Ανανέωση της ταχύτητας. Σε κάθε επανάληψη, οι ταχύτητες όλων των ατόμων ανανεώνονται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{u}_i \leftarrow \omega \vec{u}_i + c_1 r_1 (\vec{p}_{i,best} - \vec{p}_i) + c_2 r_2 (\vec{g}_{best} - \vec{p}_i)$$

όπου \vec{p}_i και \vec{u}_i είναι η θέση και η ταχύτητα του ατόμου i , αντίστοιχα, $\vec{p}_{i,best}$ και \vec{g}_{best} είναι οι θέσεις με την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει βρεθεί έως τη στιγμή αυτή από το άτομο i και ολόκληρο τον πληθυσμό αντίστοιχα. Οι μεταβλητές r_1 , r_2 λαμβάνουν τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$ εισάγοντας ένα στοχαστικό χαρακτήρα στη διαδικασία αναζήτησης, ενώ οι c_1 , c_2 αποτελούν παράγοντες βαρύτητας. Η ω είναι μία παράμετρος που ελέγχει τη δυναμική της «πτήσης» και καθορίζει το βαθμό στον οποίο τα άτομα αναζητούν λύσεις στην κοντινή τους περιοχή ή ακολουθούν ταχύτατα το ολικά καλύτερο άτομο, παίζει δε ουσιαστικό ρόλο στην αποφυγή των τοπικών βέλτιστων. Η ω μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\omega = \omega_{max} - \left(\frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iterations} \right) * iter$$

όπου ω_{max} και ω_{min} είναι αντίστοιχα η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που έχουν οριστεί, $iterations$ ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και $iter$ η συγκεκριμένη επανάληψη.

- Βήμα 3ο: Ανανέωση της θέσης. Μεταξύ συνεχόμενων επαναλήψεων, οι θέσεις όλων των ατόμων ανανεώνονται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$\vec{p}_i \leftarrow \vec{p}_i + \vec{u}_i$$

- Βήμα 4ο: Ανανέωση της μνήμης. Τα στοιχεία $\vec{p}_{i,best}$ και \vec{g}_{best} ανανεώνονται εφόσον ισχύουν οι αντίστοιχες προϋποθέσεις:

$$\vec{p}_{i,best} \leftarrow \vec{p}_i \text{ εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{p}_{i,best})$$

$$\vec{g}_{best} \leftarrow \vec{p}_i \text{ εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{g}_{best})$$

όπου $f(\vec{x})$ είναι η προς ελαχιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση.

• Βήμα 5ο: Εξέταση κριτηρίων τερματισμού. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τα βήματα 2 έως 4, έως ότου ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες τερματισμού.

Μετά τον τερματισμό εξάγονται οι λύσεις $\sim gbest$ και $f(\sim gbest)$. [10]

4.3 Συνάρτηση κόστους

4.3.1 Καθαρά Παρούσα Αξία

Η Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ ή NPV: Net Present Value) ορίζεται ως η παρούσα αξία των ετήσιων εισοδημάτων μείον την παρούσα αξία των ετήσιων εξόδων συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων. Στην πράξη κι εφόσον έχει καταστρωθεί ο πίνακας των ταμειακών ροών, η ΚΠΑ υπολογίζεται ως η διαφορά των χρηματικών εισροών (καθαρών ταμειακών ροών μετά φόρων) μείον το κόστος των επενδύσεων, όπως δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{ΚΠΑ} = \left[\sum_{\tau=1}^{\nu} \frac{\text{ΚΤΡ}_{\tau}}{(1 + \varepsilon)^{\tau}} \right] - E_0$$

όπου:

ΚΠΑ = η Καθαρά Παρούσα Αξία του σχεδίου

ΚΤΡ_τ = η Καθαρά Ταμειακή Ροή το έτος τ

E₀ = η αρχική επένδυση το χρόνο τ=0

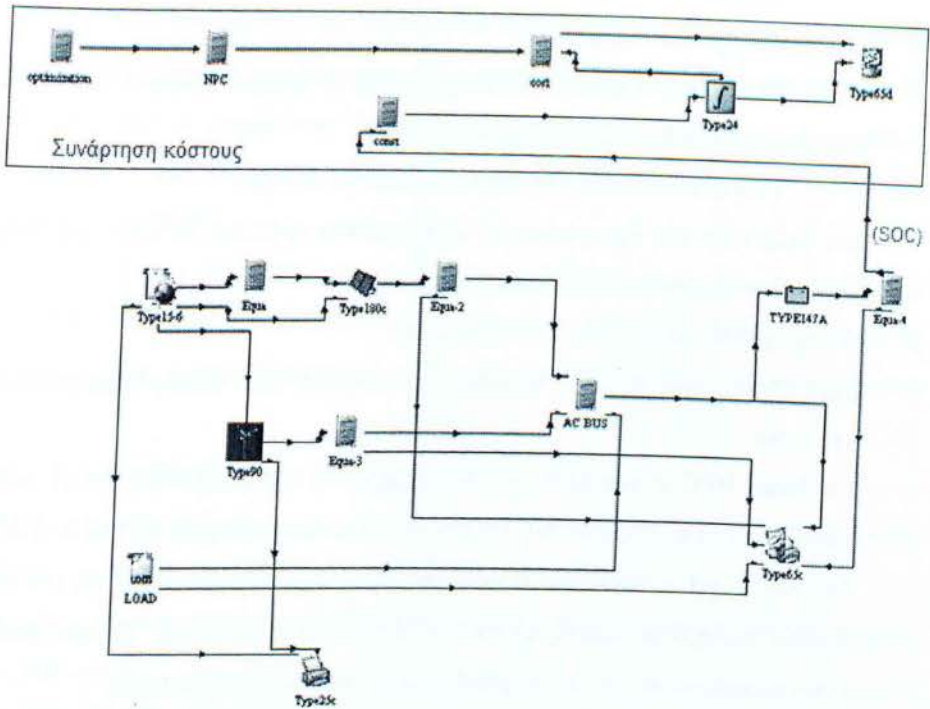
ν = η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου

ε = το επιτόκιο προεξόφλησης

[11]

4.4 Διαστασιολόγηση του μικροδικτύου στο TRNSYS μέσω του GenOpt

Το GenOpt θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του μικροδικτύου που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, βρίσκοντας τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β και Α/Γ, καθώς και τη χωρητικότητα της μπαταρίας, ώστε να ικανοποιείται το οικονομοτεχνικό κριτήριο το οποίο συνδυάζει την καθαρά παρούσα αξία και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Είναι επιθυμητό το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας να μην πέφτει κάτω από 20%.



Εικόνα 4.2 Υπολογισμός συνάρτησης κόστους στο μικροδίκτυο

Υπολογίζεται η καθαρά παρούσα αξία του συστήματος για χρονική περίοδο είκοσι ετών.

Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

Αρχικά υπολογίζεται η δαπάνη κατασκευής του μικροδικτύου.

$$Y_0 (\text{Αρχικό Κόστος}) = \text{Αριθμός } \Phi/B * \text{Κόστος } \Phi/B \text{ πάνελ} + \text{Αριθμός } A/\Gamma * \text{Κόστος } A/\Gamma + \text{Χωρητικότητα Μπαταρίας} * \text{Κόστος Φορτίου}$$

Στις δαπάνες συμπεριλαμβάνεται και η ετήσια συντήρηση του μικροδικτύου.

Το επιτόκιο (interest) στον τύπο του NPV καθορίζεται στο 6%.

Για τον 1^ο χρόνο ο τύπος θα είναι:

$$Y_1 = OM / (1 + \text{Interest})^1, \text{ όπου } OM \text{ είναι το κόστος συντήρησης.}$$

Οι μπαταρίες θεωρείται ότι έχουν χρόνο ζωής ίσο με 7 χρόνια. Δηλαδή θα αλλαχθούν τον 7^ο και το 14^ο χρόνο.

Για τα συγκεκριμένα χρόνια ο τύπος θα είναι ο εξής:

$$Y_n = (\text{Συντήρηση} + \text{Κόστος καινούριας μπαταρίας}) / (1 + \text{επιτόκιο})^n$$

όπου $n=7$ ή $n=14$.

Άρα ο τελικός τύπος της συνάρτησης κόστους (NPV) θα είναι:

$$NPV=y_0+y_1+y_2+\dots+y_{19}+y_{20}$$

Το παραπάνω κριτήριο συνδυάζεται με το τεχνικό κριτήριο που αφορά το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, δηλαδή (SOC) $\geq 20\%$.

Τα παραπάνω υλοποιούνται στο TRNSYS ως εξής:

Στο Calculator που έχει ονομαστεί **Optimization** ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων, των οποίων αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές.

Οι παράμετροι είναι: PVn, Windn, Batcap,

όπου PVn=ο αριθμός Φ/Β, Windn=ο αριθμός Α/Γ και Batcap=η χωρητικότητα κάθε μιας μπαταρίας.

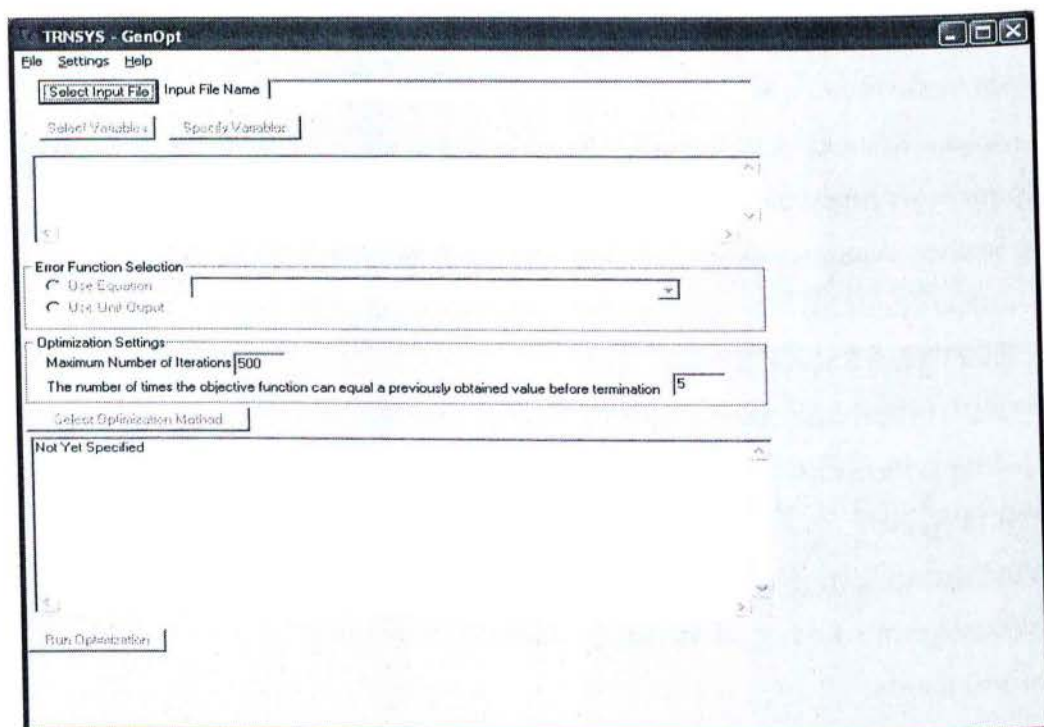
Στο block NPC υπολογίζεται η καθαρά παρούσα αξία θεωρώντας ότι το κόστος ενός Φ/Β πάνελ είναι 214ευρώ, μιας Α/Γ 7000ευρώ και το κόστος ισχύος 0.15ευρώ η Wh.

Στο block cost προστίθεται η τιμή από τη καθαρά παρούσα αξία και την «ποινή» από τον τεχνικό περιορισμό, οπότε, αν το SOC βρεθεί κάτω από 20% κάποια χρονική περίοδο, η λύση απορρίπτεται από τον αλγόριθμο λόγω πολύ υψηλού κόστους.

Ο ολοκληρωτής (type 24) υλοποιεί τον τύπο της καθαρής παρούσας αξίας για το διάστημα των 20 ετών που προκαθορίστηκε.

4.5 Χρήση του GenOpt

Για να χρησιμοποιηθεί το Genopt ανοίγει το **TRNOPT Optimization Program**.



Εικόνα 4.3 Γραφικό περιβάλλον του Genopt

Στο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζονται οι παράμετροι του PSO. Στο πεδίο **Select Input File** ορίζεται το αρχείο του προγράμματος προσομοίωσης που θα βελτιστοποιηθεί. Εν προκειμένω ανοίγεται το αρχείο του TRNSYS που περιέχει το μικροδίκτυο. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχει τεκτελεστεί μία φορά για να δημιουργηθεί το αρχείο τύπου **.dck** που αναγνωρίζει το Genopt.

Στο πεδίο **Select Variables** επιλέγονται οι μεταβλητές που είναι επιθυμητό να βελτιστοποιηθούν (Batcap, PVn, Windn). Στη συνέχεια στο πεδίο **Specify Variables** ορίζονται τα όρια των μεταβλητών μεταξύ των οποίων το PSO θα αναζητήσει τη βέλτιστη λύση.

Έχει επιλεγεί μπαταρία τύπου OPZS των 2V.

Οπότε από το φυλλάδιο του κατασκευαστή επιλέχθηκαν οι ακόλουθες τιμές χωρητικότητας της μπαταρίας: 2340, 2640, 3300, 3680, 3960, 4700(Ah).

Ο αριθμός των ανεμογεννητριών που ορίστηκε είναι 0, 1, 2, ενώ των φωτοβολταϊκών από 150 ως 400 ανά 5.

Στο πεδίο **Use Equation** επιλέχθηκε η συνάρτηση κόστους(cost function), η οποία είναι:

$NPC + \text{τιμωρή}$ σε περίπτωση που το SOC λάβει τιμή κάτω από 20%.

Στο **Optimization Settings** χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές. Στο πεδίο **Optimization Method** επιλέχθηκε PSO with Constriction Coefficient.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

Table 1: PSO Settings

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

Το αρχείο αποθηκεύεται και στη συνέχεια αρχίζει η εκτέλεση Run Optimization. Πατώντας OK στο μήνυμα που εμφανίζεται και κατόπιν File->Start ορίζεται το directory του αρχείου με επέκταση (.ini)

C:/Program Files/TRnsys16/Optimization/Genopt/Configuration/Trnsys16.ini

Αφού ολοκληρώθηκε η προσομοίωση, το σύστημα που ικανοποιεί τη συνάρτηση κόστους αποτελείται από:

220 Φ/Β πάνελ των 130 W το καθένα.

2 Α/Γ των 3.8kW η μία

Χωρητικότητα Μπαταρίας 4700 Ah

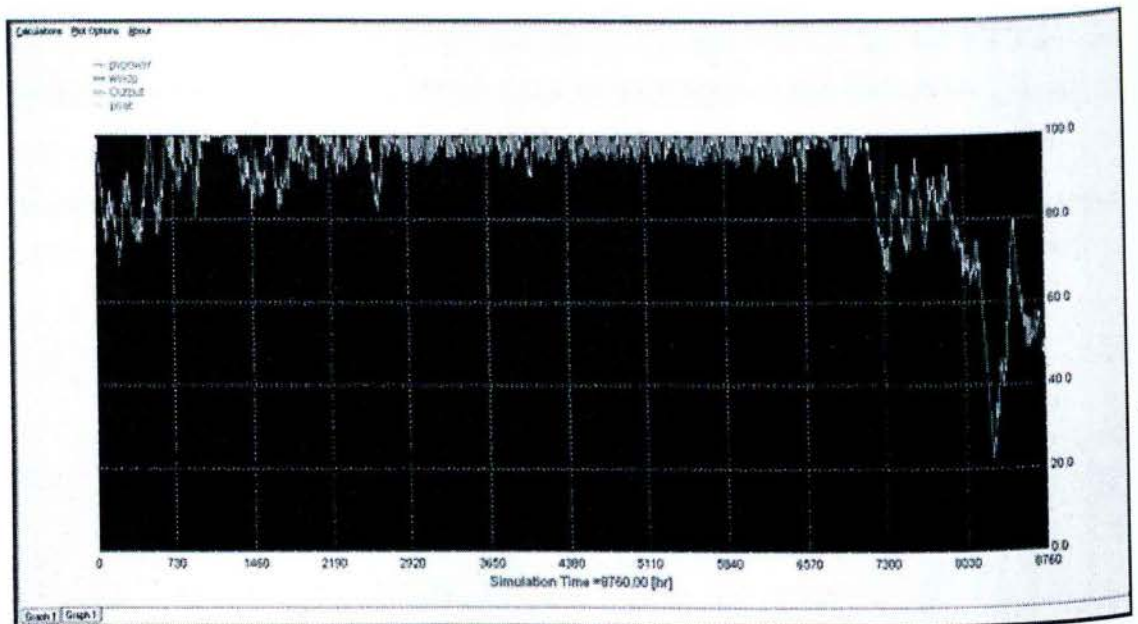
Simulation 272: Results=63962.2355688764

Simulation 272: Batcap=4700.0

Simulation 272: PVn=220.0

Simulation 272: Windn=2.0

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι το εξής:



Εικόνα 4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης (SOC)

Παρατηρείται ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας δεν κατέρχεται κάτω από 20% καθόλη τη διάρκεια του χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DIESEL ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕ ΕΛΕΓΚΤΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ MATLAB

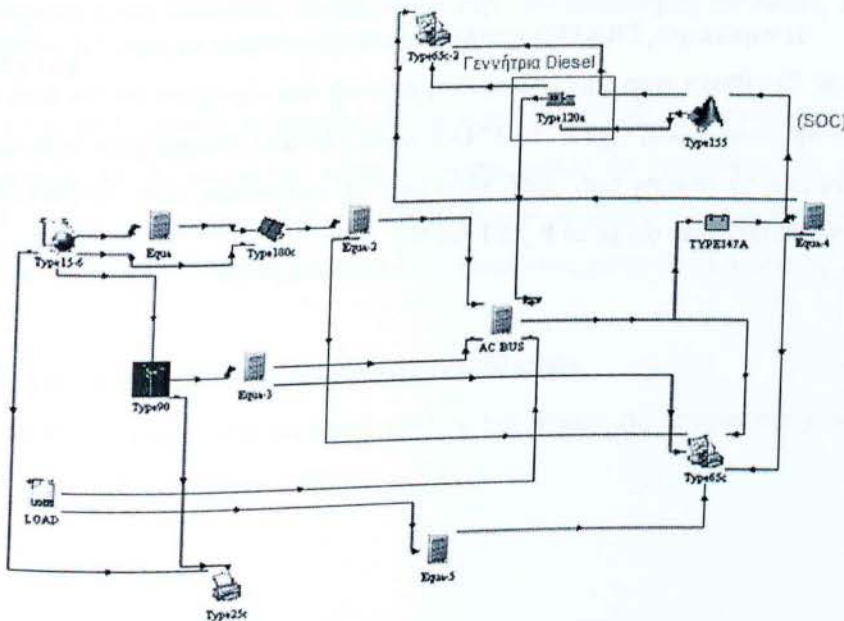
5.1 Γεννήτρια Diesel

Μια γεννήτρια ντήζελ είναι ο συνδυασμός ενός κινητήρα ντήζελ με μία ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες diesel χρησιμοποιούνται σε περιοχές χωρίς σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, ως τροφοδοσία έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση βλάβης του δικτύου. Η ισχύς των γεννητριών ντήζελ είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή χαμηλού φορτίου ή έλλειψης ενέργειας. [5]

5.2 Γεννήτρια Diesel στο TRNSYS

Προσθέτουμε σε μικροδίκτυο με 300 Φ/Β πάνελ των 130W το ένα, 1 ανεμογεννήτρια και μπαταρία χωρητικότητας 2000Ah που δημιουργήθηκε στο Trnsys μία γεννήτρια ντήζελ για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου.

Σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένας ασαφής ελεγκτής ο οποίος θα ελέγχει τον αριθμό των γεννητριών diesel (από μηδέν ως τέσσερις) που θα ενεργοποιούνται κάθε φορά ώστε να μην πέφτει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (SOC) κάτω από 40%.



Εικόνα 5.1 Μικροδίκτυο με γεννήτρια Diesel

Στο Trnsys η γεννήτρια ντήζελ αντιπροσωπεύεται από το **Type 120a**.

Με διπλό κλικ στο εικονίδιο της γεννήτριας ντήζελ μπορούν να τροποποιηθούν οι παράμετροι και να εμφανιστούν μερικά χαρακτηριστικά της.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	MODE	1	-	More...		
2	FUELTYPE	1	-	More...		
3	PMAX	1.2	kW	More...		
4	PMIN	0.6	kW	More...		
5	PRATED	1	kW	More...		

Εικόνα 5.2 Παράμετροι του Type120a (γεννήτρια Diesel)

Η παράμετρος **PRATED** αντιπροσωπεύει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας ντήζελ σε kW. Το **PMIN** είναι η μικρότερη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος της και συνήθως ορίζεται στο 40% της ονομαστικής ισχύος. Το **PMAX** είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της ισχύος της γεννήτριας με συνήθη τιμή 20% πάνω από την ονομαστική ισχύ. Το **PRATED** (σε kW) πρέπει να έχει ίδια τιμή με το **P_SET** (σε W).

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	Comment
1	SWITCH		1	-	More...
2	P_SET		1000	W	More...
3	NUNITS		1	-	More...

Εικόνα 5.3 Είσοδοι του Type120a (γεννήτρια Diesel)

Το **SWITCH** δείχνει αν είναι ανοιχτή ή κλειστή η γεννήτρια ντήζελ (1=ON 0=OFF).

Το **P_SET** είναι η επιθυμητή τιμή της ισχύος της γεννήτριας ντήζελ.

Το **NUNITS** είναι ο αριθμός των όμοιων γεννητριών ντήζελ που λειτουργούν ταυτόχρονα

5.3 Επικοινωνία TRNSYS-MATLAB

Για την σύνδεση του MATLAB με το TRNSYS χρησιμοποιείται το εικονίδιο **Type 155** στο οποίο καθορίζεται ο αριθμός των εισόδων που δέχεται το Matlab από το TRNSYS, καθώς και ο αριθμός των εξόδων του Matlab προς το TRNSYS.

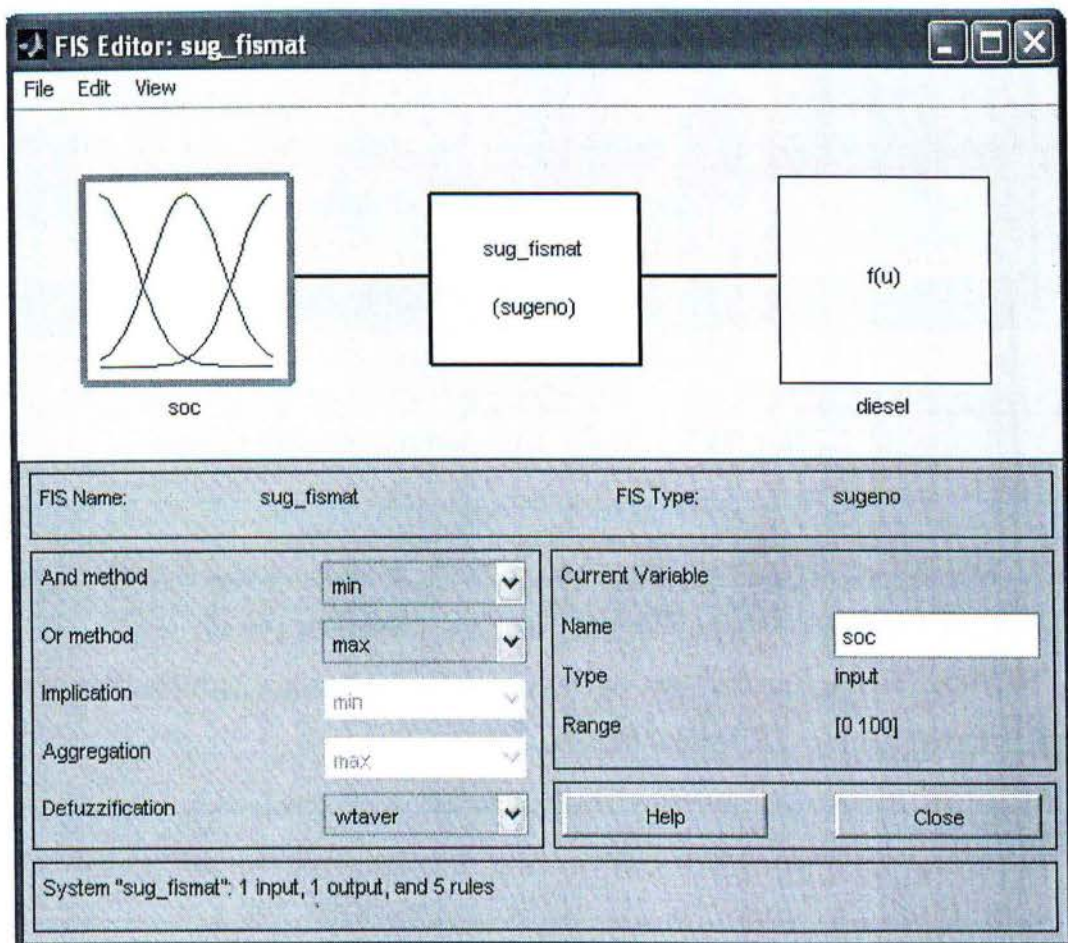
Στο πεδίο **Special Cards** δίδεται η διεύθυνση του m-file που πρέπει να τεθεί μέσα σε εισαγωγικά π.χ. "C:mymfile.m".

5.4 Δημιουργία Ασαφούς ελεγκτή με την εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab

Ο ελεγκτής ο οποίος θα δημιουργηθεί θα δέχεται ως είσοδο το **State of charge (SOC)** της μπαταρίας και θα αποφασίζει πόσες γεννήτριες ντήζελ θα ενεργοποιηθούν και ποιες χρονικές στιγμές για να τροφοδοτήσουν το δίκτυο, αν το φορτίο της μπαταρίας πέσει σε χαμηλά όρια προστατεύοντας τη μπαταρία από καταπόνηση, ώστε να μη μειωθεί η διάρκεια ζωής της.

5.4.1 Εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής του Matlab

Πληκτρολογώντας στο command window του Matlab την εντολή fuzzy ανοίγει η εργαλειοθήκη (toolbox) ασαφούς λογικής:



Εικόνα 5.4 Ασαφής (fuzzy) ελεγκτής τύπου Sugeno

Δημιουργείται ελεγκτής τύπου **Sugeno**.

Ορίζονται τα **MFs** (Membership Functions) της εισόδου (**SOC**) που λαμβάνουν τιμές από 0 ως 100.

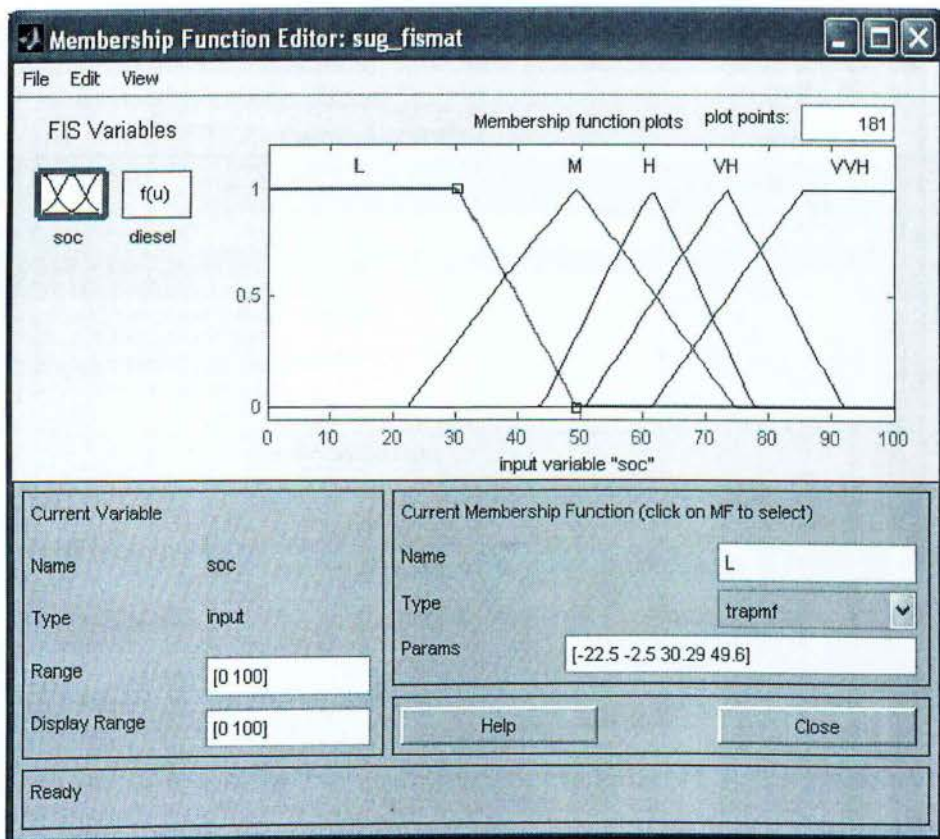
L=LOW

M=MEDIUM

H=HIGH

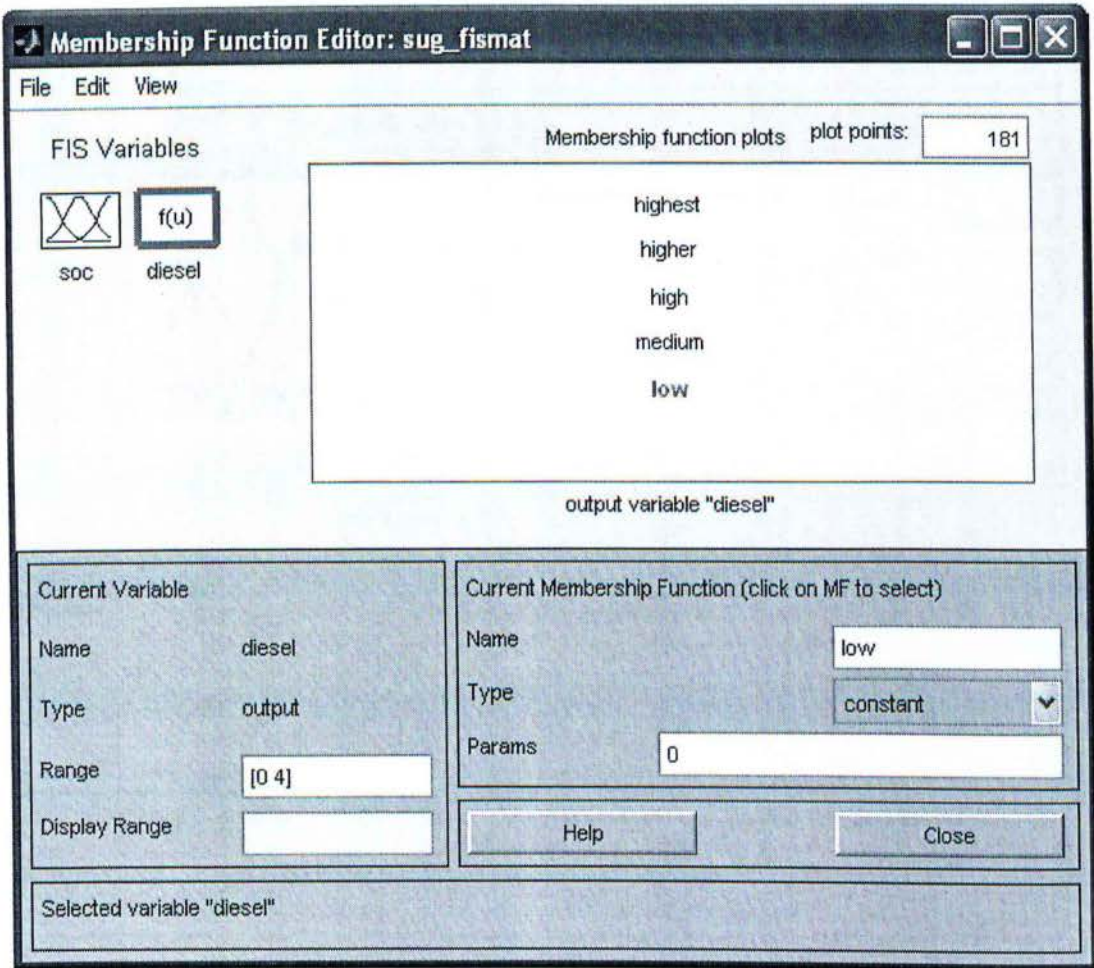
VH=VERY HIGH

VVH=HIGHEST



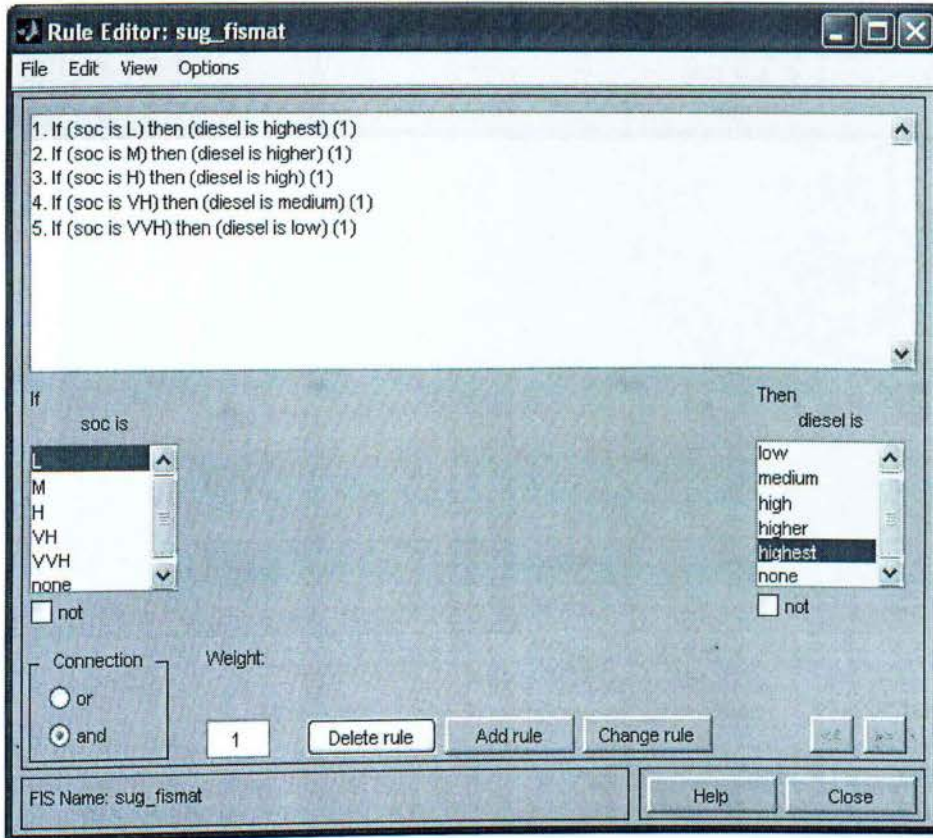
Εικόνα 5.5 MFs εισόδου

Τα MFs (συναρτήσεις συμμετοχής) της εξόδου που αντιστοιχούν στον αριθμό των Diesel γεννητριών είναι τα low=0, medium=1, high=2, higher=3 και highest=4.



Εικόνα 5.6 MFs εξόδου

Η βάση κανόνων είναι η εξής:



Εικόνα 5.7 Βάση κανόνων ασαφούς ελεγκτή

Πατώντας διαδοχικά **File**→**Export**→**To workspace** εισάγεται ο ελεγκτής στο περιβάλλον εργασίας (workspace) του Matlab.

5.5 Δημιουργία m-file για την επικοινωνία TRNSYS-MATLAB

Ο κώδικας του m-file είναι ο ακόλουθος:

```
% Set inputs
% -----
SOC=trnInputs(1);
x=readfis('sug_fismat.fis');

nofd=evalfis(SOC,x);
if nofd>=0 && nofd<0.5
nofd=0;
end
if nofd>=0.5 && nofd<1.5
nofd=1;
end
if nofd>=1.5 && nofd<2.5
nofd=2;
end
if nofd>=2.5 && nofd<3.5
nofd=3;
end
if nofd>=3.5
nofd=4;
end

% Set outputs
% -----
trnOutputs(1)=nofd;
mFileErrorCode = 420;
mFileErrorCode =0;
return
```

Με την εντολή:

«**SOC = trnInputs(1);**» το MATLAB δέχεται μια είσοδο από το TRNSYS - το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας - και την καταχωρίζει στη μεταβλητή **SOC**.

«**x = readfis('sug_fismat.fis');**» γίνεται η μετάβαση στο Workspace του Matlab του Fuzzy ελεγκτή με το όνομα **sug_fismat**.

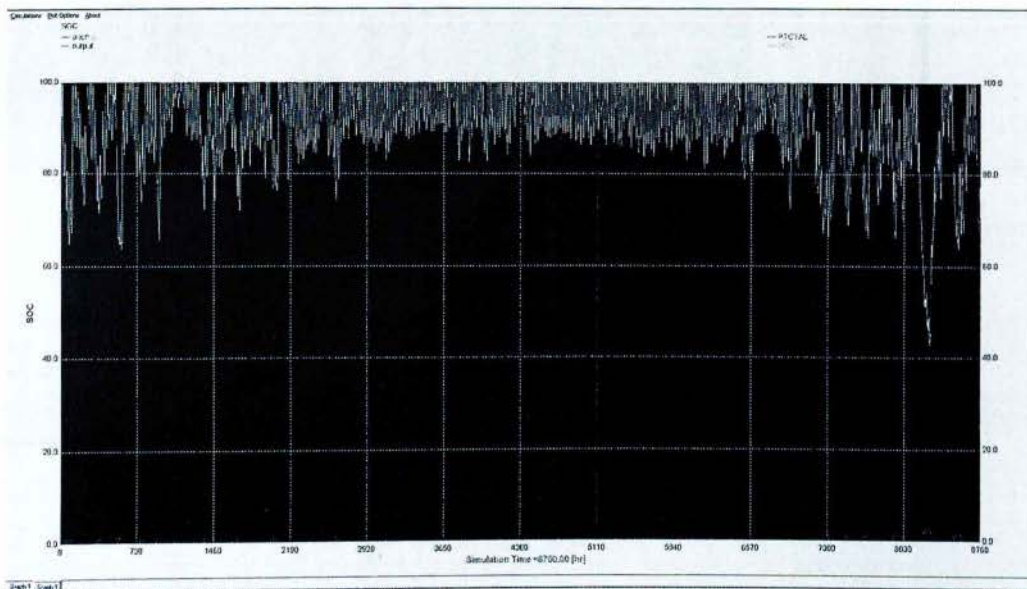
evalfis υπολογίζεται η τιμή στην έξοδο του ελεγκτή.

Με τον υπόλοιπο κώδικα η έξοδος του ελεγκτή λαμβάνει ακέραια τιμή.

Με την εντολή **trnOutputs** ορίζεται η έξοδος από το MATLAB στο TRNSYS, δηλαδή ο αριθμός των νηζελογεννητριών που θα ενεργοποιηθούν.

5.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

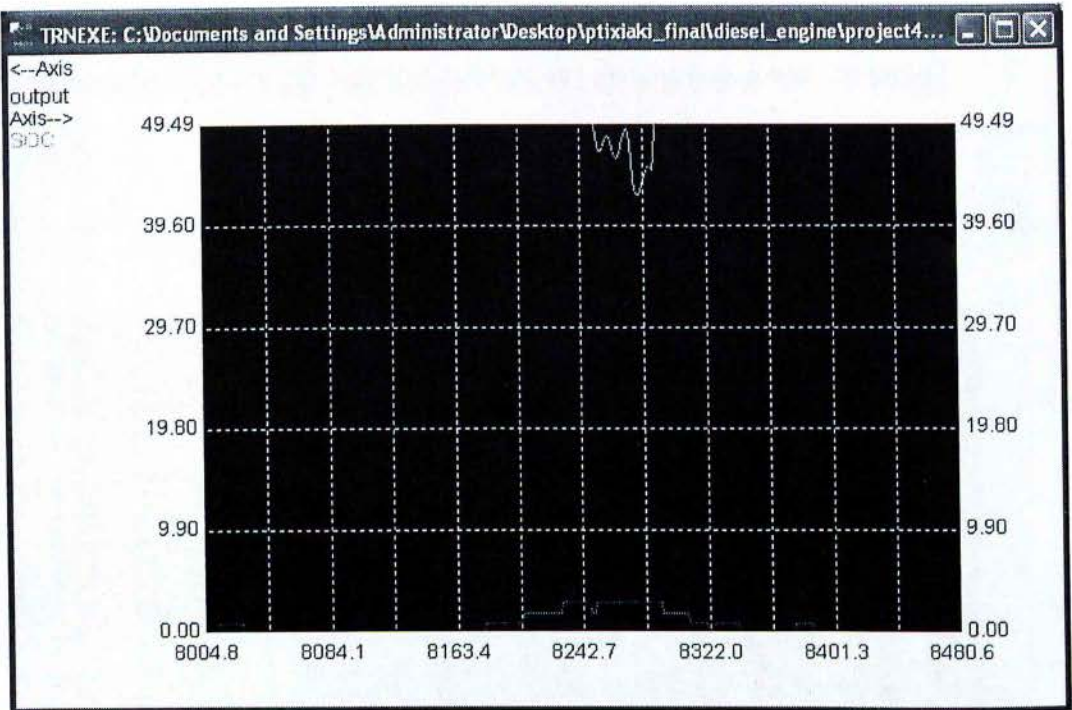
Τρέχοντας την προσομοίωση για χρονική διάρκεια ίση με ένα έτος προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:



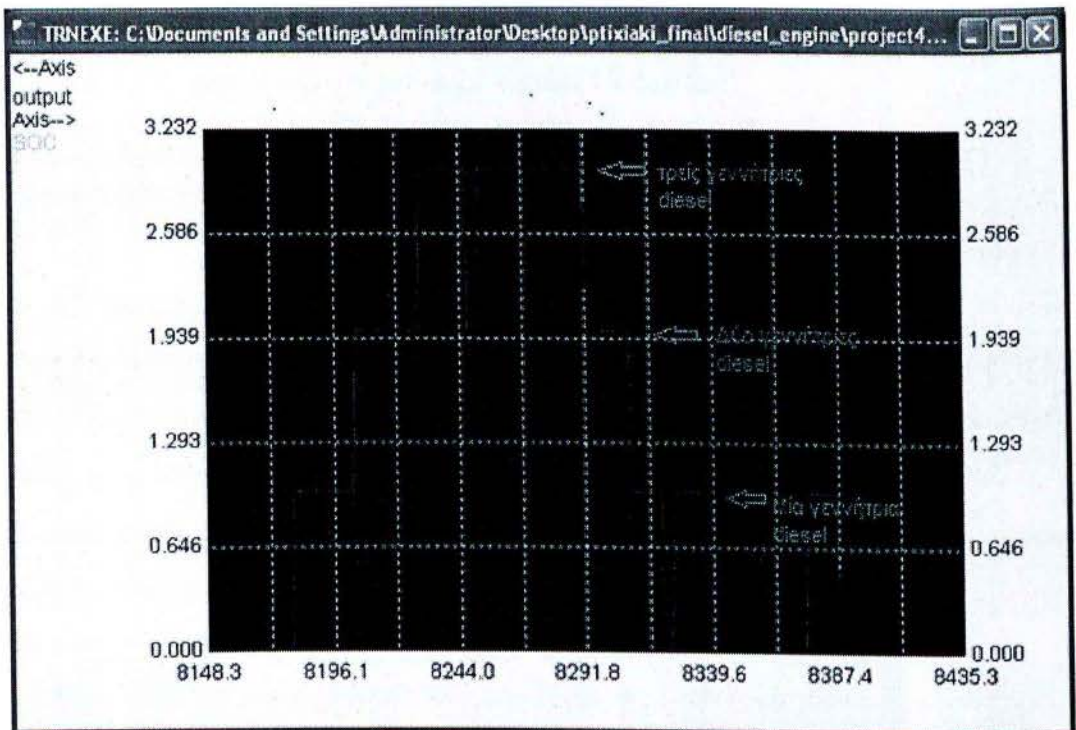
Εικόνα 5.8 Επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το SOC της μπαταρίας (με πορτοκαλί χρώμα) το οποίο δεν πέφτει σε καμία περίοδο του έτους κάτω από 40%.

Οι Diesel γεννήτριες που ενεργοποιούνται φαίνονται με μπλε χρώμα. Την στιγμή που έχουμε το χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ενεργοποιούνται για να μην πέσει κάτω από 40%.



Εικόνα 5.9 Χαμηλότερο σημείο SOC της μπαταρίας



Εικόνα 5.10 Αριθμός γεννητριών Diesel που ενεργοποιούνται

Με χαμηλό SOC ο αριθμός των γεννητριών DIESEL που ενεργοποιούνται είναι υψηλότερος, βλέπουμε ότι σταδιακά αυξάνονταν ο αριθμός όσο έπεφτε το SOC ώστε να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου σε ισχύ. Τελικά, χρειάστηκε να ενεργοποιηθούν μέχρι τρεις γεννήτριες Diesel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

6.1 Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Γενετικής Εξέλιξης και της Κληρονομικότητας. Τα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού που να μπορεί να εκμεταλλεύεται πιο αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλικού, ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες σ' αυτήν την αναζήτηση. Αυτού του είδους οι μέθοδοι λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες επιλογής του καλύτερου ατόμου, καθώς και διάφορους γενετικούς τελεστές. Οι τελεστές αυτοί αντιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας, τόσο κομμάτια και στοιχεία από την προηγούμενη γενιά, όσο και εντελώς καινούρια κομμάτια που δοκιμάζονται για τυχόν καλή απόδοσή τους. Επανειλημμένες δοκιμές και πειράματα έχουν δείξει ότι μια «φυσική» αναπαράσταση των πιθανών λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα, σε συνδυασμό με την εφαρμογή σε αυτή μιας οικογένειας γενετικών τελεστών, αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών λύσεων σε μια πολύ μεγάλη ποικιλία προβλημάτων και εφαρμογών. Αυτό το γεγονός μετατρέπει αυτή την προσέγγιση «φυσικού μοντέλου» σε μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση, όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων γενικότερα.

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί και σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα. Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους/διαστάσεις και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά με όσο το δυνατόν με το επιθυμητό τρόπο.

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (Σ.Ι).

Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η Σ.Ι, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την Σ.Ι.

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές της παραπάνω διαδικασίας για τους Γ.Α από τις οποίες κάποιες περιλαμβάνουν και τη διασταύρωση (ζευγάρωμα) γονιδίων/λύσεων ώστε ο αλγόριθμος να φτάσει στο αποτέλεσμα πιο γρήγορα. Καθώς υπάρχει το στοχαστικό (τυχαίο) συστατικό της μετάλλαξης και ζευγαρώματος, κάθε εκτέλεση του Γ.Α μπορεί να συγκλίνει σε διαφορετική λύση και σε διαφορετικό χρόνο. Η απόδοση του Γ.Α εξαρτάται επί το πλείστον από την συνάρτηση ικανότητας και συγκεκριμένα από το κατά πόσο το μέτρο της περιγράφει την βέλτιστη λύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα πεπερασμένο σύνολο οδηγιών για την εκπλήρωση ενός έργου, το οποίο δεδομένης μιας αρχικής κατάστασης θα οδηγήσει σε μια αναγνωρίσιμη τελική κατάσταση, και το οποίο προσπαθεί να μιμηθεί την διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να βρουν τη λύση ενός

προβλήματος με το να προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού «λύσεων» του προβλήματος.

Όπως ήδη αναφέραμε, οι ΓΑ χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της φυσικής Γενετικής. Κατ' αναλογία με τα έμβια όντα, αναφέρονται σε άτομα ή γονότυπα μέσα σε έναν πληθυσμό. Πολύ συχνά αυτά τα άτομα καλούνται επίσης χρωμοσώματα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει μερικούς σε λάθος συμπεράσματα, αν γίνει παραλληλισμός με τους φυσικούς οργανισμούς, όπου κάθε κύτταρο κάθε συγκεκριμένου είδους περιέχει έναν συγκεκριμένο αριθμό χρωμοσωμάτων (τα ανθρώπινα κύτταρα για παράδειγμα περιέχουν 46 χρωμοσώματα). Στους ΓΑ αναφερόμαστε σχεδόν πάντα σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται γονίδια και είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνώρισμα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται τόποι (loci). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει την δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις, που μπορεί να πάρει το γονίδιο, καλούνται αλληλόμορφα (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος).

Κάθε γονότυπος (που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα μόνο χρωμόσωμα) αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το μεταφρασμένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος και καθορίζεται από τον χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του. Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο μέσα σε ένα χώρο από πιθανές λύσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος. Η εκτενής χρησιμοποίηση των ΓΑ ως εργαλείο βελτιστοποίησης είναι εύκολο να δώσει σε κάποιον την εντύπωση ότι οι ΓΑ είναι αποκλειστικά αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Αυτό, όμως, δεν ευσταθεί, διότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου οι ΓΑ αποτυγχάνουν να βρουν μια προφανή βέλτιστη λύση μέσα σε ένα συγκεκριμένο χώρο ψαξίματος. Βέβαια, αυτό μπορεί να οφείλεται σε ακατάλληλη κωδικοποίηση του προβλήματος. Για την αποφυγή δημιουργίας αυτής της λανθασμένης εντύπωσης, οι ΓΑ πρέπει να αντιμετωπίζονται και ως μια ιδεατή προσομοίωση μιας φυσικής

διαδικασίας, τέτοια ώστε να ενσωματώνει τους στόχους και τους σκοπούς της διαδικασίας αυτής. Παρόλα αυτά, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε ότι η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των εφαρμογών των ΓΑ. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το ενδιαφέρον για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να υπάρχουν πολύπλοκα και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλήματα, που να μπορούν να λυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές. Οι ΓΑ αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση τέτοιου είδους προβλημάτων. Εάν και ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους αλγόριθμους που εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι ΓΑ θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης.

Ένας ΓΑ πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις με το να διατηρεί έναν πληθυσμό από πιθανές λύσεις και να υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά «καλές» λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά «κακές» αφαιρούνται. Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης ή συνάρτησης ικανότητας (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Επίσης στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως συνάρτηση αξιολόγησης και συνάρτηση καταλληλότητας. Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου έχει σε γενικές γραμμές ως εξής:

Κατά την διάρκεια της επαναληπτικής εκτέλεσης t , ο ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις:

Κάθε λύση x αξιολογείται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς της. Αφού ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των στοιχείων του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (επαναληπτική εκτέλεση $t + 1$) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούριο αυτό πληθυσμό υφίστανται μετατροπές με τη βοήθεια των διαδικασιών της μετάλλαξης (mutation) και της διασταύρωσης (crossover ή mating) σχηματίζοντας νέες

πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας αντίστοιχα κομμάτια από τους γονείς.

Για παράδειγμα, έστω ότι οι γονείς αναπαριστώνται με διανύσματα πέντε διαστάσεων $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ και $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$, τότε οι απόγονοι (με σημείο διασταύρωσης —crossover point = 2) είναι οι (a_1, b, c_2, d_2, e_2) και $(a_2, b_2, c_1, d_1, e_1)$. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Εδώ πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση. Αν οι μεταβλητές στα παραπάνω διανύσματα είναι δυαδικές, τότε κάθε διάνυσμα αναπαριστά την τιμή μιας μεταβλητής, δηλαδή ένα χρωμόσωμα. Στην περίπτωση που είναι πραγματικές, τότε καθεμία είναι ένα χρωμόσωμα, δηλαδή κάθε διάνυσμα αναπαριστά τις τιμές πολλών μεταβλητών, δηλαδή αποτελεί ένα γονότυπο. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση μίας συνάρτησης πολλών μεταβλητών, απαιτεί την κωδικοποίηση της λύσης με ένα γονότυπο.

Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων και με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

Ένας ΓΑ για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα:

1. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους.
4. Γενετικούς τελεστές που μετατρέπουν τη σύνθεση των παιδιών.
5. Τιμές για διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.λπ.).

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση. Για να γίνει η αναπαράσταση μιας μεταβλητής, που παίρνει τιμές στο διάστημα $[\alpha, \beta]$ σε δυαδική μορφή, απαιτείται ο καθορισμός του μήκους της συμβολοσειράς. Αυτό υπολογίζεται εύκολα, αν μετατρέψουμε το άνω όριο σε δυαδικό αριθμό, και μετρήσουμε το μήκος της συμβολοσειράς που προκύπτει.

6.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων

Η χρήση των ΓΑ σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι κυριότεροι, ίσως, είναι οι εξής :

1. Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των ΓΑ είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες, λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους ΓΑ αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.

2. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι ΓΑ προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.

3. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Όπως θα γίνει σαφές στα επόμενα κεφάλαια, οι ΓΑ δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ, που δεν είναι αντιγραμμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά ανεκτές, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.

4. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ

5. Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό, που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα, είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο

τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.

6. Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κτλ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους ΓΑ πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.

7. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη «επικοινωνία» του ΓΑ με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλματα προβλήματα για τους ΓΑ Όπου όμως, δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

8. Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι ΓΑ σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η

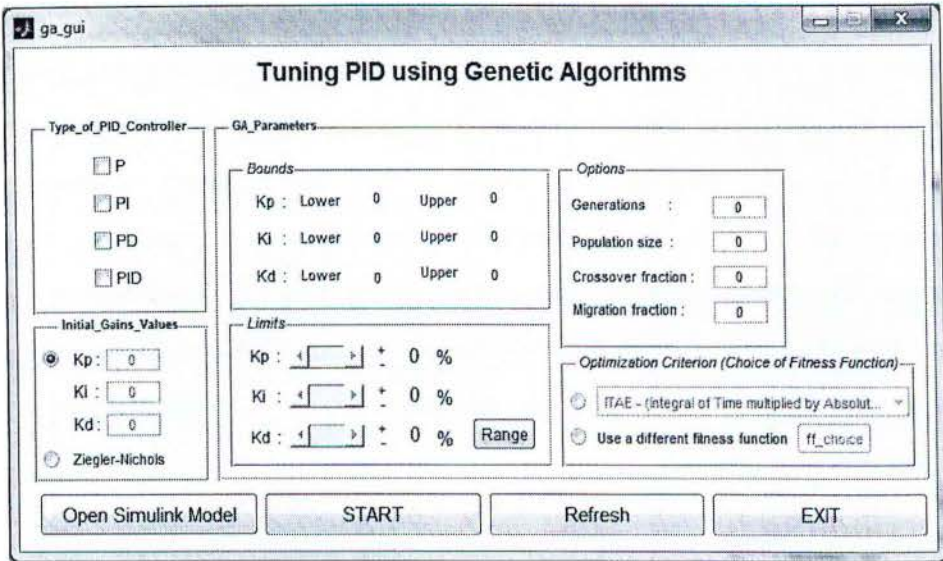
αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

9. Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με την αναζήτηση με μικρά άλματα στη συνάρτηση (hillclimbing) γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

10. Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι ΓΑ μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης. [12]

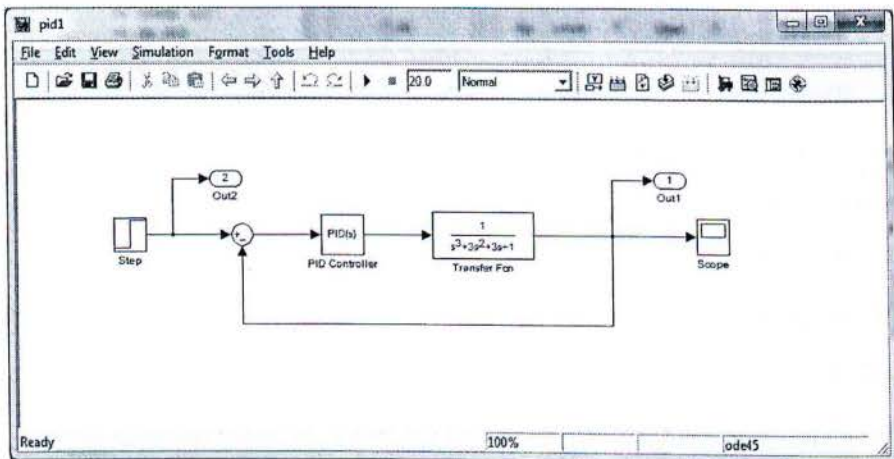
6.3 Δημιουργία GUI (graphical user interface) εφαρμογής για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του PID ελεγκτή μέσω γενετικών αλγορίθμων

Για να ξεκινήσει η εφαρμογή αρκεί να δοθεί στο Command Window του MATLAB η εντολή «ga_gui». Το παράθυρο που ανοίγει φαίνεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1 Αρχικό παράθυρο της GUI εφαρμογής

Με το πάτημα του button **Open Simulink Model** ανοίγει το μοντέλο του Simulink στο οποίο καθορίζεται το σύστημα που πρέπει να ελεγχθεί.



Εικόνα 6.2 Ελεγχόμενο σύστημα στο Simulink

Η προεπιλεγμένη συνάρτηση μεταφοράς είναι η :

$$\frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

Αλλάζοντας του συντελεστές του αριθμητή και του παρονομαστή μπορεί να τροποποιηθεί η συνάρτηση μεταφοράς. Από το block Step δίνεται στο σύστημα η επιθυμητή βηματική είσοδος. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να δοθεί στο σύστημα είσοδος διαφορετικού τύπου.

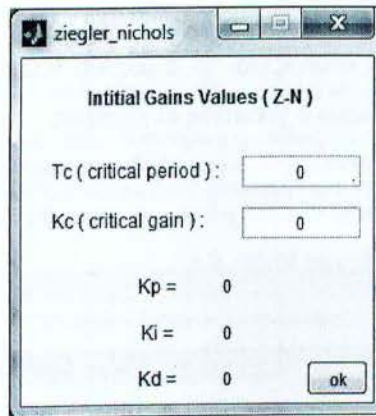
Τα block Out 1 και Out 2 είναι απαραίτητα για την σωστή λειτουργία της εφαρμογής.

Στο πεδίο **Type of PID Controller** του GUI (Εικόνα 6.1) δίνεται η δυνατότητα επιλογής του ελεγκτή που θα χρησιμοποιηθεί.

Στο πεδίο **Initial Gains Values** υπάρχουν δύο επιλογές :

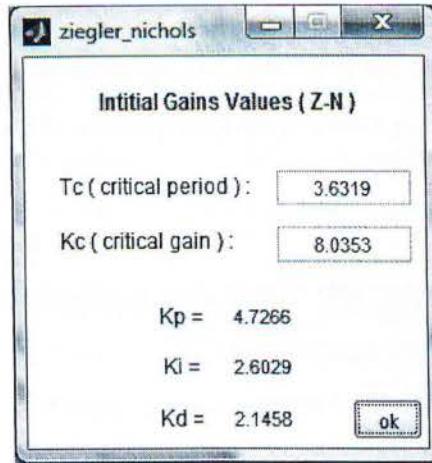
Στην πρώτη επιλογή, δίνεται η δυνατότητα να οριστούν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή, οι οποίες θα βελτιστοποιηθούν.

Στην δεύτερη επιλογή γίνεται χρήση της μεθόδου Ziegler-Nichols. Επιλέγοντάς την, ανοίγει το παράθυρο της εικόνας 6.3.



Εικόνα 6.3 Παράθυρο για τον υπολογισμό των τιμών κατά Ziegler-Nichols

Δίνοντας το κρίσιμο κέρδος **Kc** και την κρίσιμη περίοδο **Tc** και πατώντας το button **Ok** υπολογίζονται με την μέθοδο Ziegler-Nichols οι τιμές των κερδών του ελεγκτή (Εικόνα 6.4).

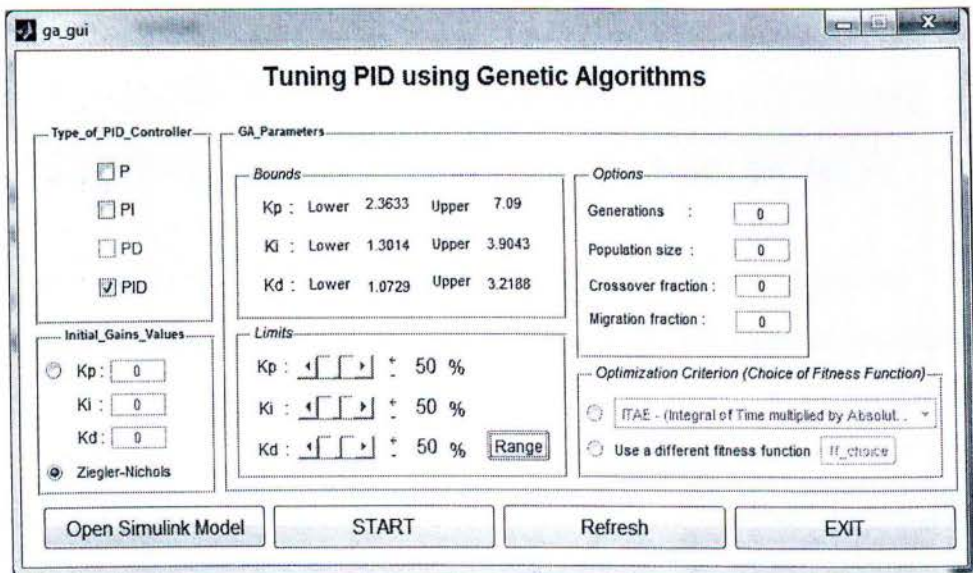


Εικόνα 6.4 Παράμετροι PID ελεγκτή κατά Ziegler-Nichols

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιηθούν οι τιμές που προκύπτουν με την μέθοδο Ziegler-Nichols ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόκριση.

Στο πεδίο **Limits** καθορίζεται το εύρος επί τοις εκατό των τιμών των κερδών του ελεγκτή στο οποίο θα «ψάξει» ο γενετικός αλγόριθμος.

Αφού οριστεί το επιθυμητό εύρος τιμών, πατώντας το μπουτόν **Range** εμφανίζονται αυτόματα στο πεδίο **Bounds** τα όρια μέσα στα οποία θα «ψάξει» ο γενετικός αλγόριθμος για να βρεί τις καλύτερες τιμές των K_p, K_i, K_d .



Εικόνα 6.5 Αρχικό παράθυρο της εφαρμογής

Στο πεδίο **Options** καθορίζονται μερικές από τις βασικές παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου και συγκεκριμένα οι γενιές, το μέγεθος του πληθυσμού ο τελεστής διασταύρωσης και ο τελεστής μετάλλαξης.

Στο πεδίο **Optimization Criterion** επιλέγεται η συνάρτηση καταλληλότητας που θα χρησιμοποιήσει ο γενετικός αλγόριθμος.

Υπάρχουν δύο επιλογές στο συγκεκριμένο πεδίο:

Η πρώτη δίνει μερικές έτοιμες συναρτήσεις καταλληλότητας οι οποίες είναι :

ITAE (Ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος επί τον χρόνο).

IAE (Ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος).

ISE (Ολοκλήρωμα του τετραγώνου του σφάλματος).

MSE (Μέση τιμή του τετραγώνου του σφάλματος).

RMSE (Ρίζα της μέσης τιμής του τετραγώνου του σφάλματος).

Στην δεύτερη επιλογή πατώντας το μπουτόν **ff_choice** ανοίγει το παράθυρο που φαίνεται στην εικόνα 6, το οποίο δίνει την δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο εναλλακτικών συναρτήσεων καταλληλότητας, στις οποίες είναι δυνατό να καθοριστούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος όπως ο χρόνος ανύψωσης, ο χρόνος αποκατάστασης και η υπερύψωση μαζί με τους επιθυμητούς συντελεστές βαρύτητας αυτών.

Choice of Fitness Function

Selection of Objective Function Φ :

$$\Phi = w1 * \left(\frac{T_{rdes} - Tr}{T_{rdes}} \right)^2 + w2 * \left(\frac{M_{pdes} - Mp}{M_{pdes}} \right)^2 + w3 * \left(\frac{T_{sdes} - Ts}{T_{sdes}} \right)^2$$

T_rdes : Επιθυμητός χρόνος ανύψωσης
T_sdes : Επιθυμητός χρόνος αποκατάστασης
M_pdes : Επιθυμητή υπερύψωση
w1, w2, w3 : Συντελεστές βαρύτητας με θετικές τιμές

T_rdes = w1 =
T_sdes = w2 =
M_pdes = w3 =

$$\Phi = w1 * \left(\frac{ISE}{\max(e)} \right) + w2 * \text{Percent Overshoot} + w3 * \left(\frac{Tset}{T} \right)$$

Tset : χρόνος αποκατάστασης
T : Συνολικός χρόνος προσαρμογής

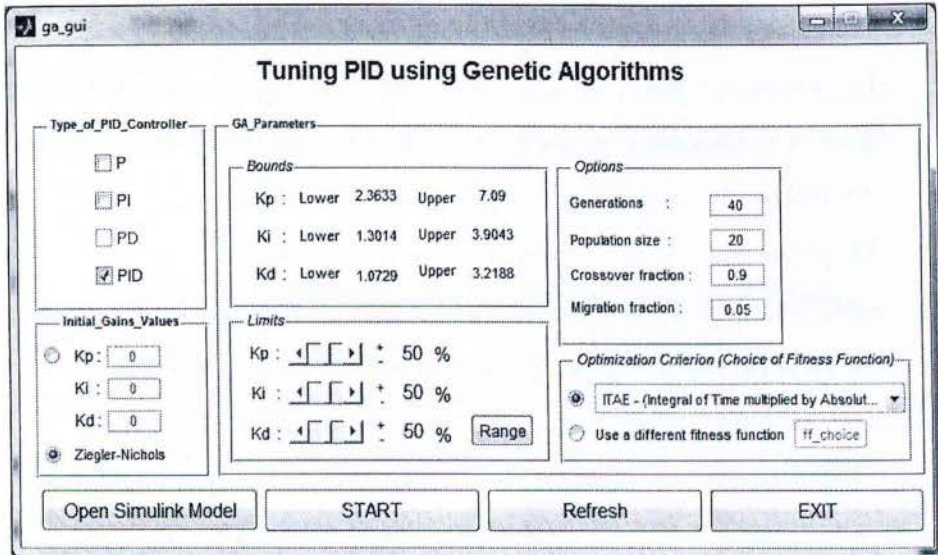
w1 =
w2 =
w3 =

Fitness Function = 1/(Φ + 1)

Εικόνα 6.6 Επιλογή συνάρτησης καταλληλότητας

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα χρησιμοποιηθεί σαν συνάρτηση καταλληλότητας το ITAE.

Η εικόνα 6.7 δείχνει τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει στο παράδειγμα αυτό πριν πατηθεί το μπουτόν **START** για να τρέξει η εφαρμογή.



Εικόνα 6.7 Παράθυρο εφαρμογής πριν την εκτέλεσή της.

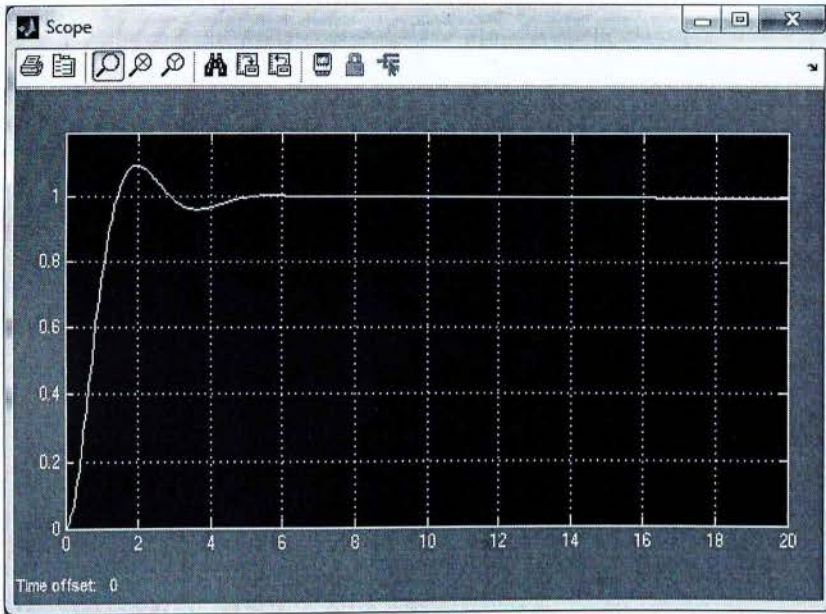
Στη συνέχεια πατώντας το μπουτόν **START** αρχίζει να τρέχει η εφαρμογή.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, τα αποτελέσματα, δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων K_p , K_i , K_d φαίνονται στο Workspace του Matlab.

Τα αποτελέσματα μετά την εκτέλεση της εφαρμογής είναι :

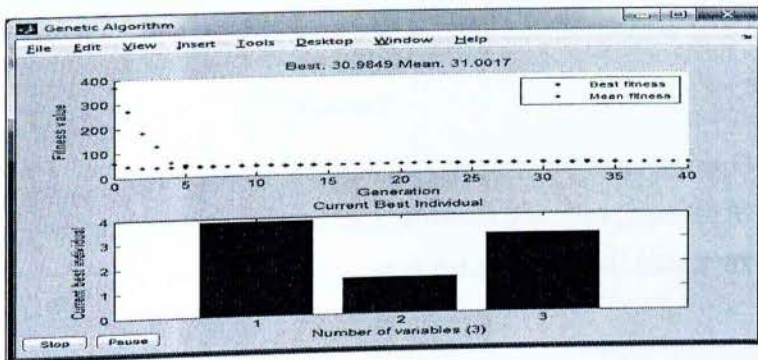
$$K_p = 3.8568, \quad K_i = 1.4597, \quad K_d = 3.2105$$

Στην εικόνα 6.8 φαίνεται η απόκριση του συστήματος



Εικόνα 6.8 Απόκριση του PID ελεγκτή

Δίνεται η δυνατότητα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης να παρακολουθείται η μεταβολή των παραμέτρων (K_p , K_i , K_d) του PID ελεγκτή καθώς και η πορεία της συνάρτησης καταλληλότητας όπως μεταβάλλονται από γενιά σε γενιά, μέσω των γραφικών παραστάσεων που φαίνονται και στην εικόνα 6.9.



Εικόνα 6.9 Γραφική απεικόνιση της εξέλιξης του γενετικού αλγορίθμου

Τέλος με το μπουτόν **Refresh** (εικόνα 1) γίνεται ανανέωση του παραθύρου για να χρησιμοποιηθεί εκ νέου.

Πατώντας το μπουτόν **Exit** τερματίζεται η εφαρμογή.

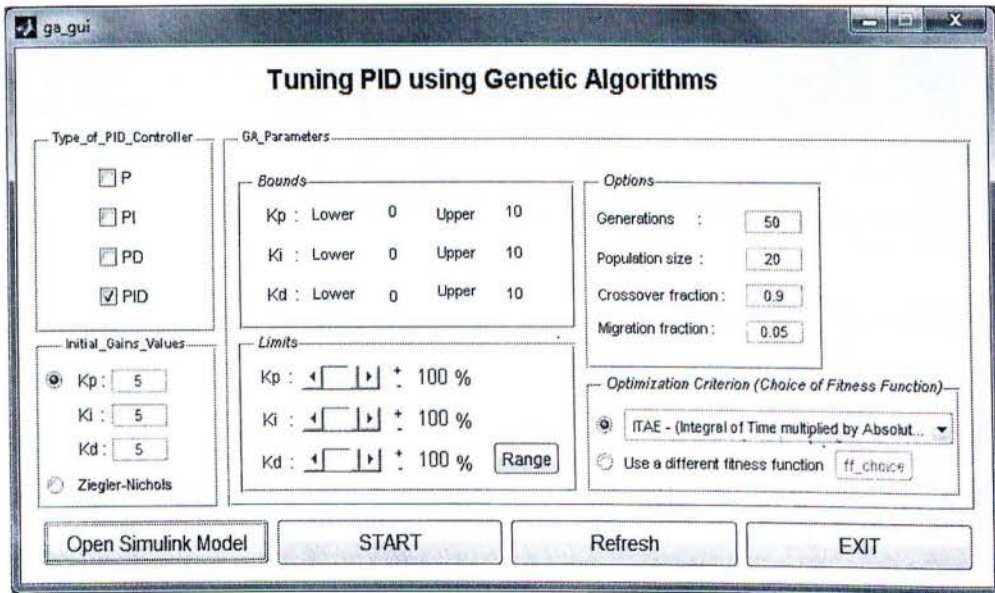
6.4 Παραδείγματα χρήσης της GUI εφαρμογής

Παράδειγμα 1

Θα βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του PID ώστε η απόκριση του συστήματος να είναι η επιθυμητή (set point=1). Το σύστημα που θα ελεγχθεί θα έχει την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G(s) = \frac{e^{-2.5s}}{10s + 1}$$

Στο παράθυρο της gui γίνονται οι ρυθμίσεις που φαίνονται παρακάτω:



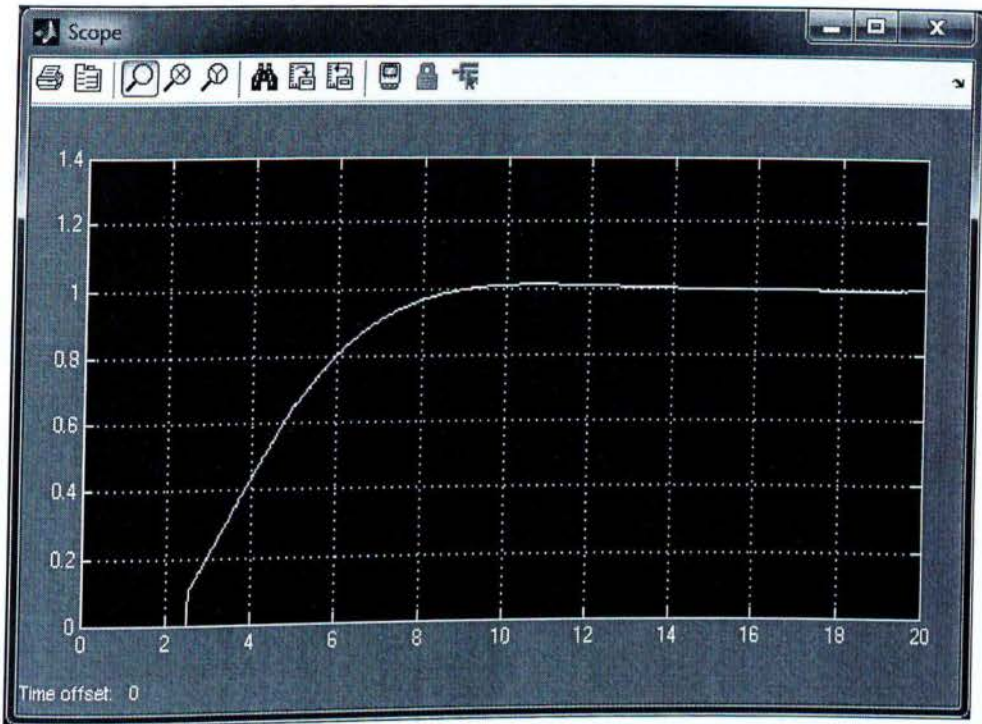
Εικόνα 6.10

Ο χρόνος προσομοίωσης ήταν περίπου ίσος με ένα λεπτό.

Οι βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν μετά την εκτέλεση της εφαρμογής είναι:

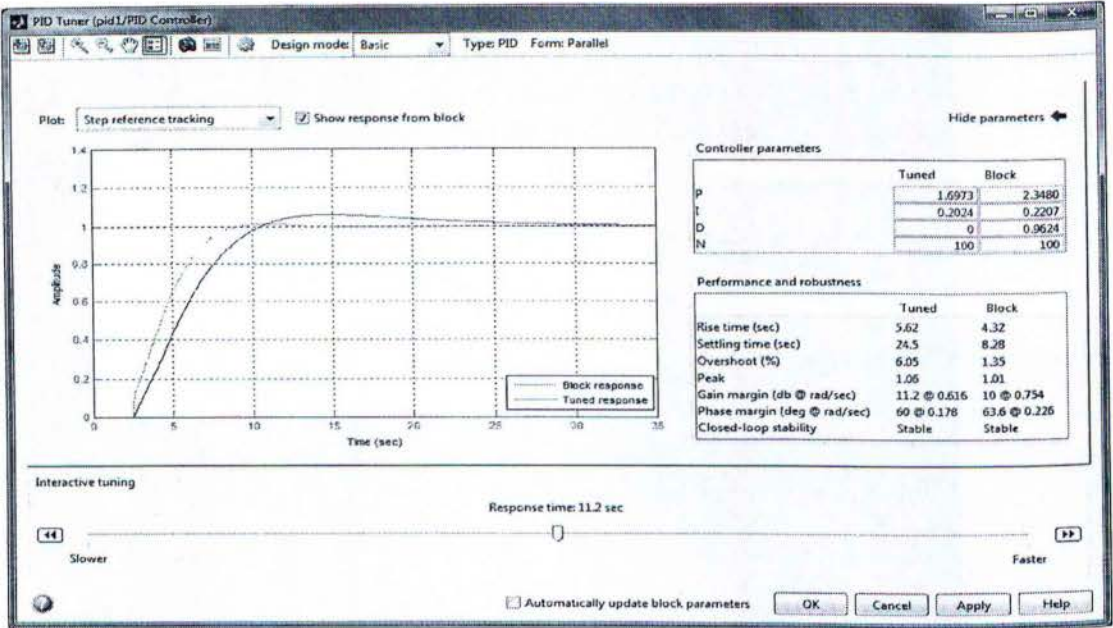
Kp=2.3480 Ki=0.2207 Kd=0.9624

Η απόκριση του συστήματος φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 6.14

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σύγκριση του αποτελέσματος των γενετικών αλγόριθμων (γκρι) με την επιλογή “tuning” του Matlab (μπλε) που υπάρχει στο block του ID ελεγκτή:



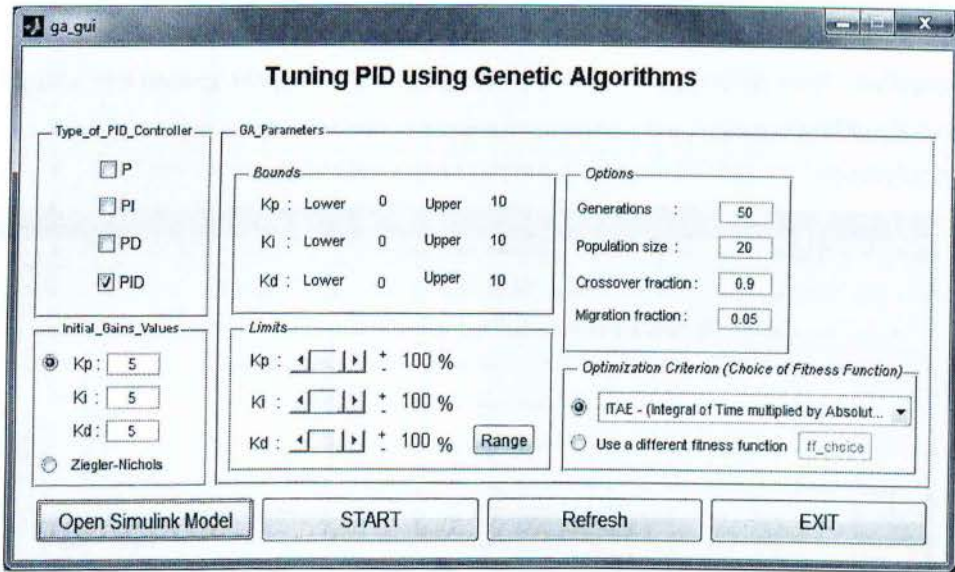
Εικόνα 6.15

Παράδειγμα 2

Θα βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του PID ώστε η απόκριση του συστήματος να είναι η επιθυμητή (set point=1). Το σύστημα που θα ελεγχθεί θα έχει την ακόλουθη συνάρτηση

$$G(s) = \frac{e^{-0.4s}}{(0.3s + 1)^2} \quad \text{μεταφοράς:}$$

Στο παράθυρο της gui γίνονται οι ρυθμίσεις που φαίνονται παρακάτω:



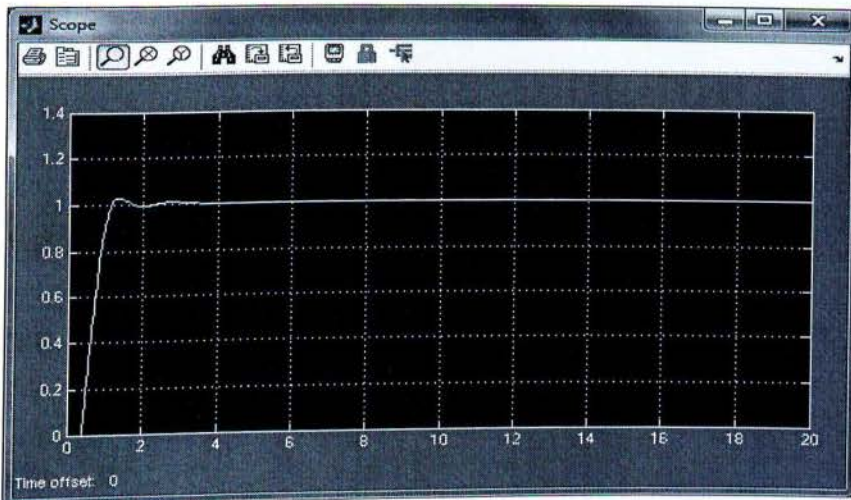
Εικόνα 6.11

Ο χρόνος προσομοίωσης ήταν περίπου ίσος με ένα λεπτό.

Οι βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν μετά την εκτέλεση της εφαρμογής είναι:

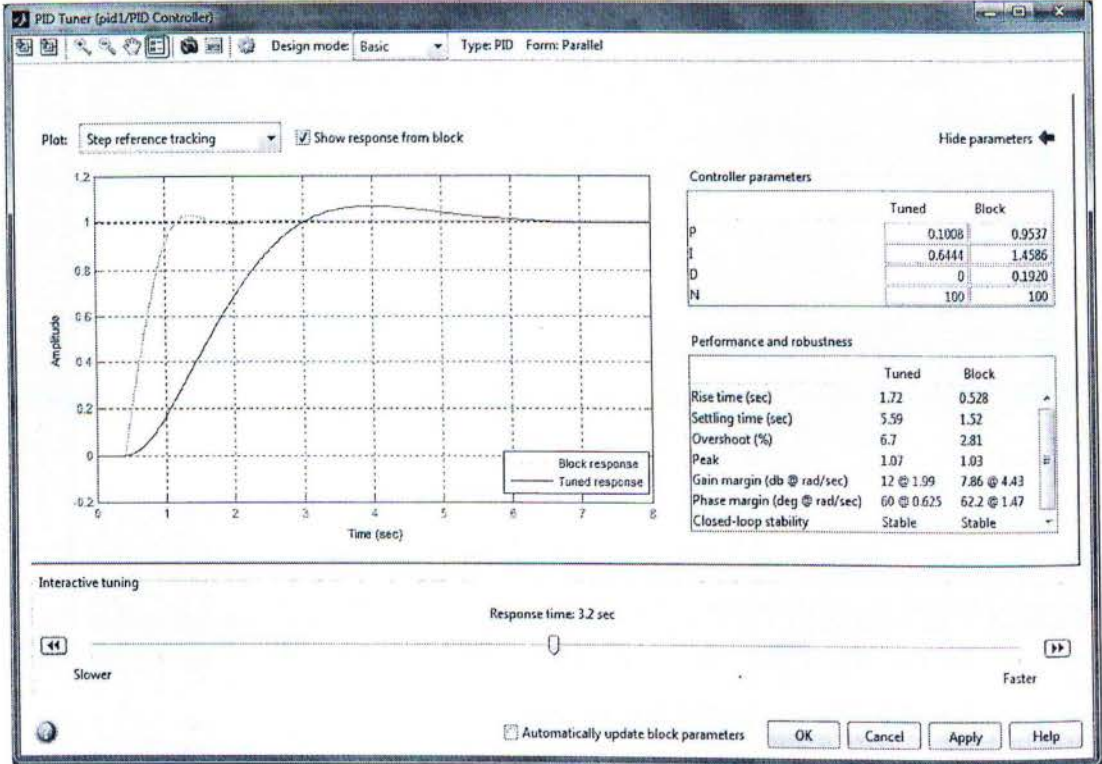
$K_p=0.9537$ $K_i=1.4586$ $K_d=0.1920$

Η απόκριση του συστήματος φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 6.15

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σύγκριση του αποτελέσματος των γενετικών αλγορίθμων (γκρι χρώμα) με την επιλογή “tuning” του Matlab (μπλε χρώμα) που υπάρχει στο block του PID ελεγκτή:



Εικόνα 6.16

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

- Υλοποίηση του μικροδικτύου και βελτιστοποίηση του μέσω του MATLAB.
- Σύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο και μελέτη της λειτουργίας του.
- Βελτιστοποίηση με περισσότερες τεχνικές βελτιστοποίησης.
- Υλοποίηση ασαφούς ελεγκτή και του ασαφούς ελέγχου στο TRNSYS.
- Σύνδεση TRNSYS με το LABVIEW για συλλογή δεδομένων και απεικόνιση αποτελεσμάτων των μεγεθών του μικροδικτύου στο LABVIEW.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] www.allaboutenergy.gr Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης ινστιτούτο τεχνολογίας και εφαρμογών στερεών καυσίμων.
- [2] Διπλωματική εργασία Πανεπιστημίου Πατρών του Μαυροκέφαλου Ιωάννη με θέμα: Σύγκριση Απόδοσης και κόστους μια τυπικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε παραδοσιακή κατοικία με φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου ή CIS(2010).
- [3] <http://www.selasenergy.gr/fundamentals.php> Φωτοβολταϊκά συστήματα HelioSystems.
- [4] Οδηγός Τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΚΑΠΕ) (2001).
- [5] Διπλωματική εργασία Πανεπιστημίου Πατρών τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών της Ελένης Κεμενέ με θέμα: Ανάλυση και σχεδιασμός επιδεικτικού μικροδικτύου-Μελέτη Συμπεριφοράς ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος(2010).
- [6] Ημερίδα: Δίκτυα, Διασυνδέσεις και Προμήθεια Ηλεκτρικής Ενέργειας 16-2-2009
Σημειώσεις του Νικόλαου Βοβού του Πανεπιστημίου Πατρών τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών.
- [7] Εγχειρίδιο του TRNSYS 17 A transient Simulation Program
- [8] Μεταπτυχιακή εργασία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου της Ζωής Σαγιά Παραμετρικός Προσδιορισμός Ενεργειακών Απαιτήσεων Κτιρίων για Θέρμανση και Ψύξη υπό διάφορες συνθήκες με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης TRNSYS(2009).
- [9] Άρθρο του Seventh International IBPSA Conference με τίτλο GenOpt–A Generic Optimization Program του Michael Wetter(Lawrence Berkeley National Laboratory 2001).
- [10] Διπλωματική εργασία του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου του Γρηγόριου Πιπεράγκα (2009) με τίτλο: Ανάπτυξη Πολυκριτηριακής μεθόδου particle swarm optimization: Εφαρμογή σε στοχαστική βέλτιστη περιβαλλοντική κατανομή φορτίου-θερμότητας με CHP και αιολική παραγωγή.
- [11] Σημειώσεις μαθήματος Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών (2008).
- [12] Διπλωματική εργασία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών του Σακελλαρίου Φώτιου (2007) Σύνθεση συστημάτων κατεργασιών με βάση εναλλακτικά φασεολόγια.