



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Πρόγραμμα Προπτυχιακών Σπουδών

Χανιά Σεπτέμβρης 2016

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

με θέμα

**Μοντελοποίηση και προσομοίωση υβριδικού συστήματος ενέργειας
Φωτοβολταϊκών-Μικροτουρμπίνας**

Καλομοίρης Νικόλαος

A.M.: 2003030105

Επιτροπή Εξέτασης:

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης , Επιβλέπων

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης (ΜΠΔ) , Συν-επιβλέπων

Καθηγητής Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης , Μέλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

- 1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- 1.2 Υβριδικά συστήματα ενέργειας
- 1.3 Φωτοβολταϊκή ενέργεια
- 1.4 Μικροτουρμπίνα καύσης βιοαερίου
- 1.5 Στόχοι της μελέτης
- 1.5 Δομή της εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Συνοπτική παρουσίαση του συστήματος

- 2.1 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια
 - 2.1.1 Γενική περιγραφή της φωτοβολταϊκής κυψέλης
 - 2.1.2 Πηγές απωλειών σε μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια
 - 2.1.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)
- 2.2 Γεννήτρια Μικροτουρμπίνας
 - 2.2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος MTG
 - 2.2.2 Παραγωγή και αποθήκευση βιοαερίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

- 3.1 Φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV cell)
 - 3.1.1 Μοντέλο μίας διόδου
 - 3.1.2 Μοντέλο δύο διόδων
- 3.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- 3.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)
 - 3.3.1 Παράγοντας πλήρωσης FF και καμπύλη I-V
 - 3.3.2 Κατηγοριοποίηση στρατηγικών εύρεσης MPP
Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental conductance)
- 3.4 Προσομοίωση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας
 - 3.4.1 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου
 - 3.4.2 Το μοντέλο της μονάδας ελέγχου MPPT
 - 3.4.3 Μετατροπέας DC-DC
- 3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Γεννήτρια Μικροτουρμπίνας

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Σύστημα MTG

- 4.2.1 Τύποι συστημάτων MTG
 - 4.2.2 Βασική λειτουργία συστημάτων MTG
 - 4.3 Μαθηματική μοντελοποίηση της μικροτουρμπίνας
 - 4.3.1 Υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας και επιτάχυνσης
 - 4.3.2 Υποσύστημα καυσίμου
 - 4.3.3 Υποσύστημα συμπίεστή και τουρμπίνας
 - 4.3.4 Υποσύστημα ελέγχου θερμοκρασίας
 - 4.4 Η γεννήτρια το συστήματος MTG
 - 4.4.1 Τύποι μαγνητικών υλικών
 - 4.4.2 Περιοχή λειτουργίας μίας PMSM
 - 4.4.3 Αναπαράσταση μίας PMSM στους dq άξονες
 - 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος MTG
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος
- 5.1 Δεδομένα
 - 5.1.1 Ηλιακή ενέργεια
 - 5.1.2 Παραγωγή βιοαερίου
 - 5.1.3 Φορτίο
 - 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης
 - 5.2.1 Χειμερινή ημέρα
 - 5.2.2 Ανοιξιιάτικη ημέρα
 - 5.2.3 Θερινή ημέρα
 - 5.3 Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον
 - 5.3.1 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια
 - 5.3.2 Γεννήτρια μικροτουρμπίνας
 - 5.3.3 Προσομοίωση του συστήματος
 - 5.3.4 Προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις

Παράρτημα

Βιβλιογραφία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, πιο συγκεκριμένα ενός συστήματος φωτοβολταϊκών - μικροτουρμπίνας καύσης βιοαερίου. Καθώς ένα από τα πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων είναι ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον, η κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος που εξετάζεται είναι τα φωτοβολταϊκά. Η απόδοσή τους όμως είναι εξαιρετικά απρόβλεπτη καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένη η μονάδα παραγωγής, από την εποχή του χρόνου που μελετάμε αλλά και από τις καιρικές συνθήκες. Αυτή η αβεβαιότητα της απόδοσης των φωτοβολταϊκών είναι και ο λόγος ύπαρξης των υβριδικών συστημάτων, τα οποία με τον συνδυασμό χρήσης ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας, καθώς και ενός συστήματος αποθήκευσης (μπαταρία), εξασφαλίζουν σταθερή τροφοδότηση του δικτύου ακόμα και στην περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Στην παρούσα εργασία η συμβατική πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι ένα σύστημα μικροτουρμπίνας καύσης βιοαερίου, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια οδηγούμενη από μικροτουρμπίνα (MTG) και μία δεξαμενή βιοαερίου.

Η εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος υποθέτουμε πως γίνεται σε μία μέση κτηνοτροφική μονάδα με 300 γαλακτοφόρες αγελάδες. Το υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών - μικροτουρμπίνας βιοαερίου που μελετάμε είναι ιδανικό για μία τέτοια εγκατάσταση καθώς η προμήθεια του συστήματος με βιοαέριο μπορεί να εξασφαλιστεί εν μέρη από την ίδια την κτηνοτροφική μονάδα μειώνοντας σημαντικά το κόστος αγοράς αερίου από τρίτους. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή βιοαερίου γίνεται με την φυσική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων της κτηνοτροφικής μονάδας σε μία δεξαμενή χώνευσης. Με την αναερόβια χώνευση των στερεών αποβλήτων από βακτήρια που βρίσκονται στον πυθμένα της δεξαμενής παράγεται μεθάνιο, το οποίο συλλέγεται και οδηγείται στην δεξαμενή βιοαερίου η οποία τροφοδοτεί την μικροτουρμπίνα. Επιπλέον, η διαδικασία της χώνευσης και παραγωγής βιοαερίου μπορεί να επιταχυνθεί, αν υπάρχει ανάγκη, με χρήση της όποιας περίσσιας παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά ή της αποβαλλόμενης θερμικής ενέργειας από την εξάτμιση της μικροτουρμπίνας, αυξάνοντας την θερμοκρασία της δεξαμενής χώνευσης.

Η προσομοίωση του συστήματος, έγινε στο περιβάλλον Matlab/Simulink, κυρίως λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει, αλλά και της εύχρηστης και κατανοητής αναπαράστασης μαθηματικών μοντέλων και κανόνων λειτουργίας, από τα μοντέλα του Simulink. Το βασικό συμπέρασμα του πονήματος αυτού, είναι ότι η προσομοίωση του υπό εξέταση συστήματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την απεικόνιση της πραγματικής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, σε τοποθεσία με χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί, ότι η εφαρμογή του Simulink, σχεδιάστηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι εύκολη η παραμετροποίηση, ώστε να μπορούν να εξεταστούν διαφορετικές δομές του συστήματος ή διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (άλλες περιοχές). Το σύστημα παρουσίασε πολύ καλή συμπεριφορά κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν και θα μπορούσε να αποτελέσει μία βιώσιμη λύση για την μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένων κτηνοτροφικών μονάδων παρόμοιων με αυτή της μελέτης μας.

Λέξεις κλειδιά: Αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, Φωτοβολταϊκή γεννήτρια, Μικροτουρμπίνα, Σύστημα MTG, βιοαντιδραστήρας.

Επιτροπή Εξέτασης

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης , Επιβλέπων

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης (ΜΠΔ) , Συν-επιβλέπων

Καθηγητής Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης , Μέλος

Ευχαριστίες

Σ' αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη καθώς και τον συν-επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, τις συμβουλές και την άριστη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Τέλος να ευχαριστήσω και τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη που δέχτηκε να είναι μέλος της επιτροπής εξέτασης .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

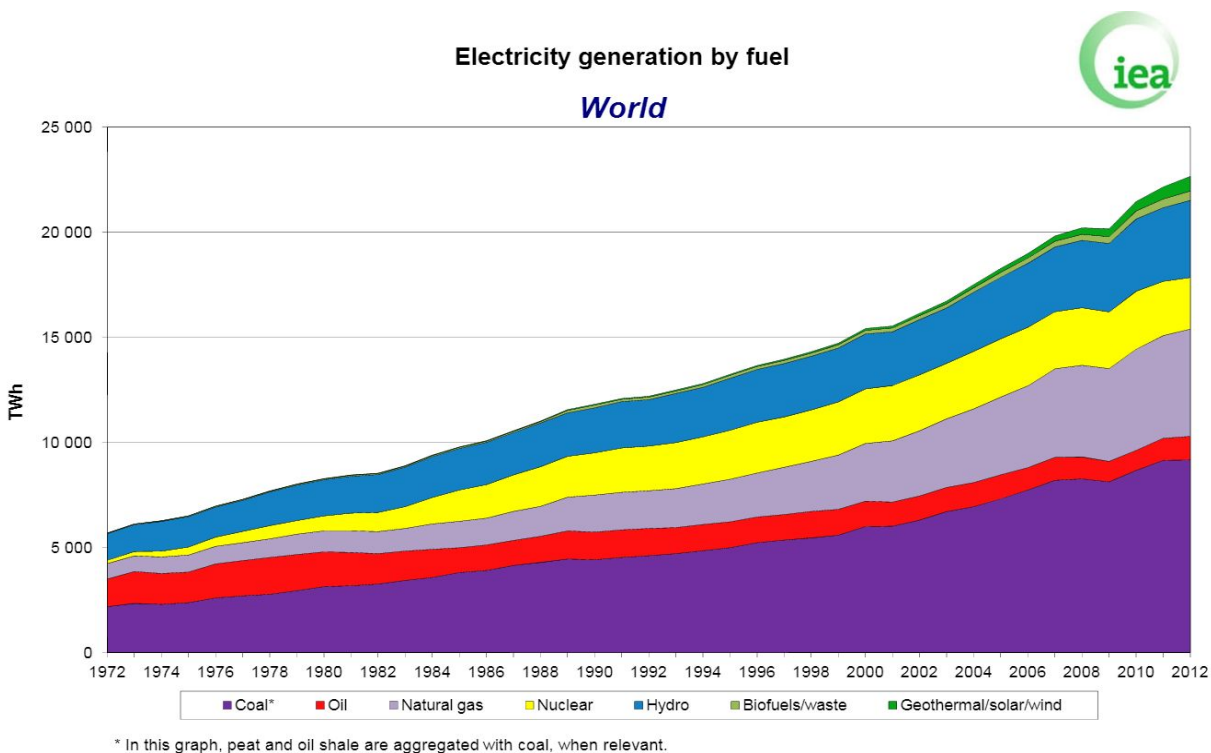
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η όλο και αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική [1] ενέργεια που παρατηρείται και οφείλεται στην συνεχή αύξηση του πληθυσμού αλλά και την τεχνολογική εξέλιξη των κοινωνιών, έχει ως συνέπεια την σταδιακή εξάντληση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων καθώς και την ατμοσφαιρική ρύπανση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την γενικότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος αλλά και των συνθηκών ζωής του ίδιου του ανθρώπου. Τα παραπάνω έχουν καταστήσει αναγκαία την επένδυση πόρων για την έρευνα και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως από την πλευρά των ανεπτυγμένων χωρών, καθώς έχει καταστεί αντιληπτό ότι για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς επιπλέον επιβάρυνση του ήδη επιβαρυσμένου περιβάλλοντος αλλά και του επιπέδου ζωής, πρέπει να στραφούμε σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής φιλικούς προς το περιβάλλον.

Για τους παραπάνω λόγους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) θα παίξουν σημαντικό ρόλο στο πολυμορφικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο είναι αναγκαίο να αναπτυχθεί τα επόμενα χρόνια. Οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ είναι οι υδροηλεκτρική, η ηλιακή ενέργεια, η αιολική, η γεωθερμική, οι κυψέλες καυσίμου, η κινητική ενέργεια της θάλασσας αλλά και η βιομάζα. Κάποια από τα πολλά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι ότι θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες καθώς και ότι η χρήση τους επιβαρύνει ελάχιστα το περιβάλλον. Επίσης αποτελούν εγχώριες πλουτοπαραγωγικές πηγές, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στην εξασφάλιση του εθνικού ενεργειακού ανεφοδιασμού χωρών που δεν έχουν πρόσβαση σε συμβατικά καύσιμα αλλά και στην ενεργειακή τους χειραφέτηση. Μπορούν να μειώσουν τις απώλειες από την μεταφορά της ενέργειας συμβάλλοντας στην γεωγραφικά διεσπαρμένη παραγωγή. Το χαμηλό λειτουργικό κόστος αλλά και το γεγονός ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας μένει ανεπηρέαστο από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και τις τιμές των συμβατικών καυσίμων, καταστούν τις μονάδες ΑΠΕ τον πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών. Τέλος, το κυριότερο μειονέκτημα των ΑΠΕ που είναι οι περιορισμοί διείσδυσης σε ασθενή δίκτυα και το υψηλό κόστος επένδυσης, μπορεί να ξεπεραστεί με αναβάθμιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την δημιουργία ελκυστικών οικονομικών επενδύσεων, είτε με κρατικές επιχορηγήσεις είτε με χρηματοδότηση από

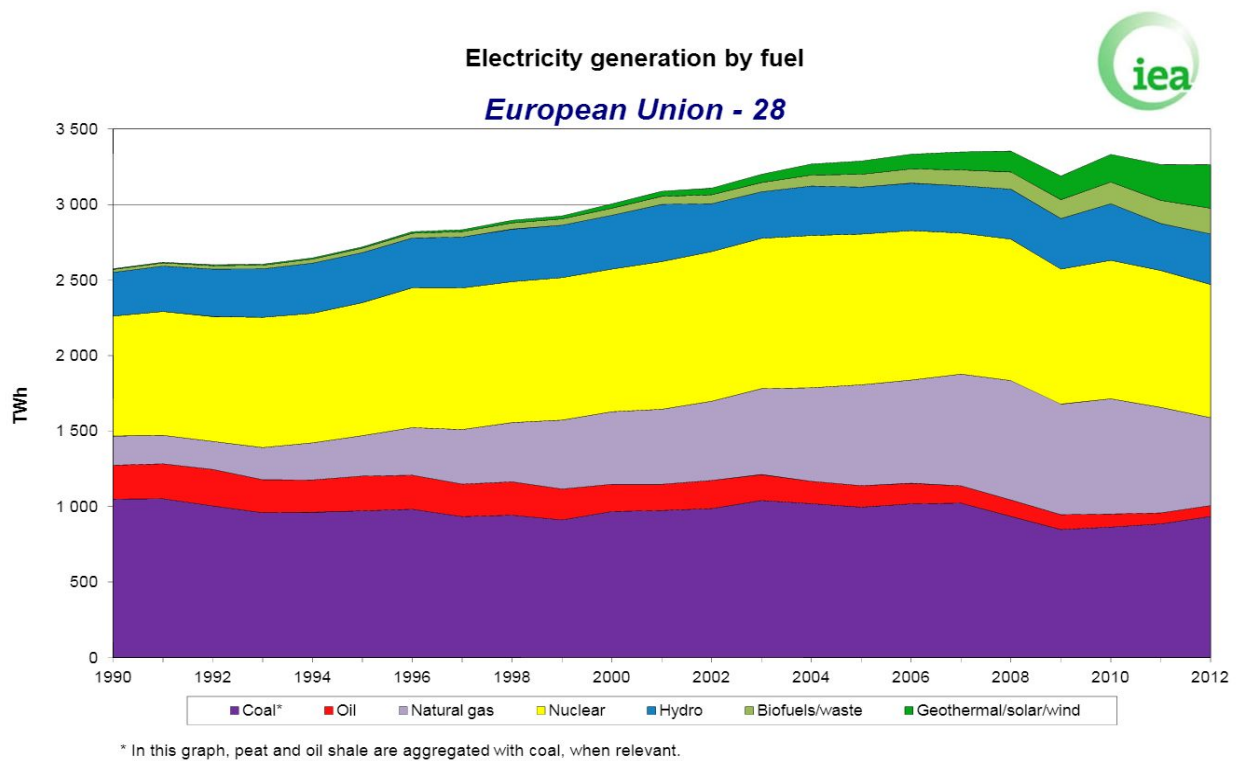
τρίτους.

Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία για την εξέλιξη της παραγωγής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό αλλά και εθνικό επίπεδο [2]. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή διαχωρισμένη με βάση την μορφή της ενέργειας ή του καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της. Η αυξητική τάση της παραγόμενης ενέργειας είναι σαφής και αποτελεί και μία ένδειξη των απαιτήσεων σε παγκόσμιο επίπεδο για τα επόμενα χρόνια.

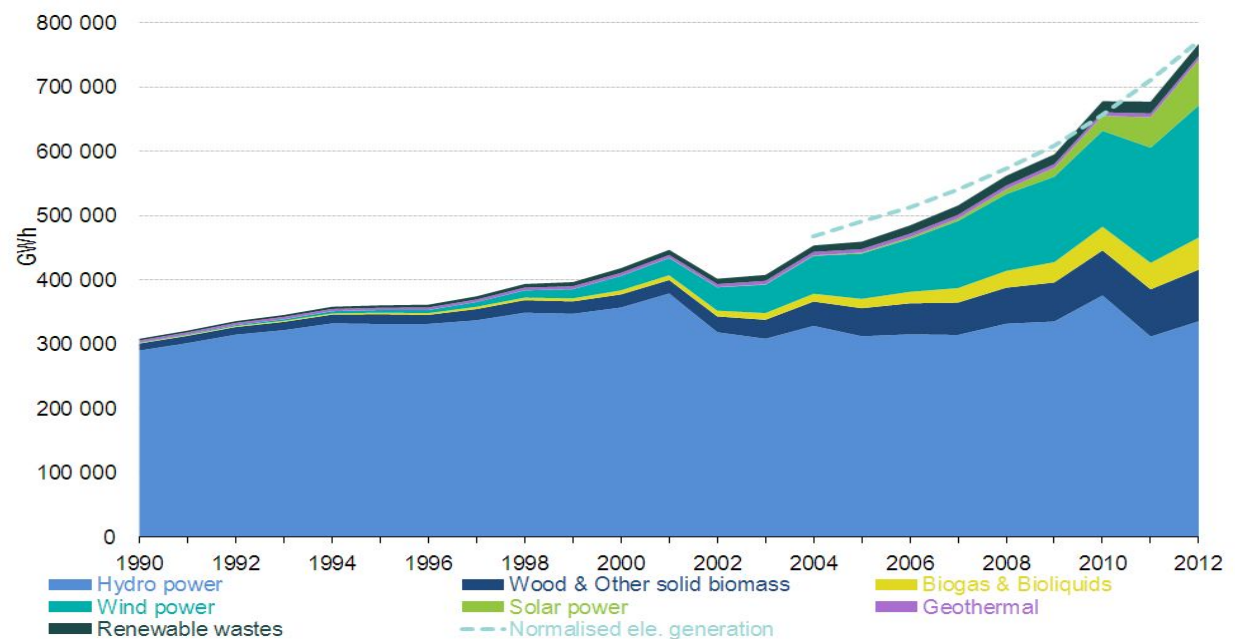


Εικόνα 1.1 Παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή ανά καύσιμο 1972-2012

Στην εικόνα 1.2 φαίνεται η ηλεκτροπαραγωγή σε ευρωπαϊκό επίπεδο ταξινομημένο με βάση την μορφή καυσίμου ή ενέργειας. Από το γράφημα γίνεται φανερή η αυξημένη χρήση ΑΠΕ καθώς και η μικρή μείωση της χρήσης ορισμένων συμβατικών καυσίμων όπως οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο. Επίσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο, στην εικόνα 1.3 φαίνεται το μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από κάθε μορφή ΑΠΕ. Ενδεικτική είναι η αυξημένη χρήση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας των τελευταίων ετών.

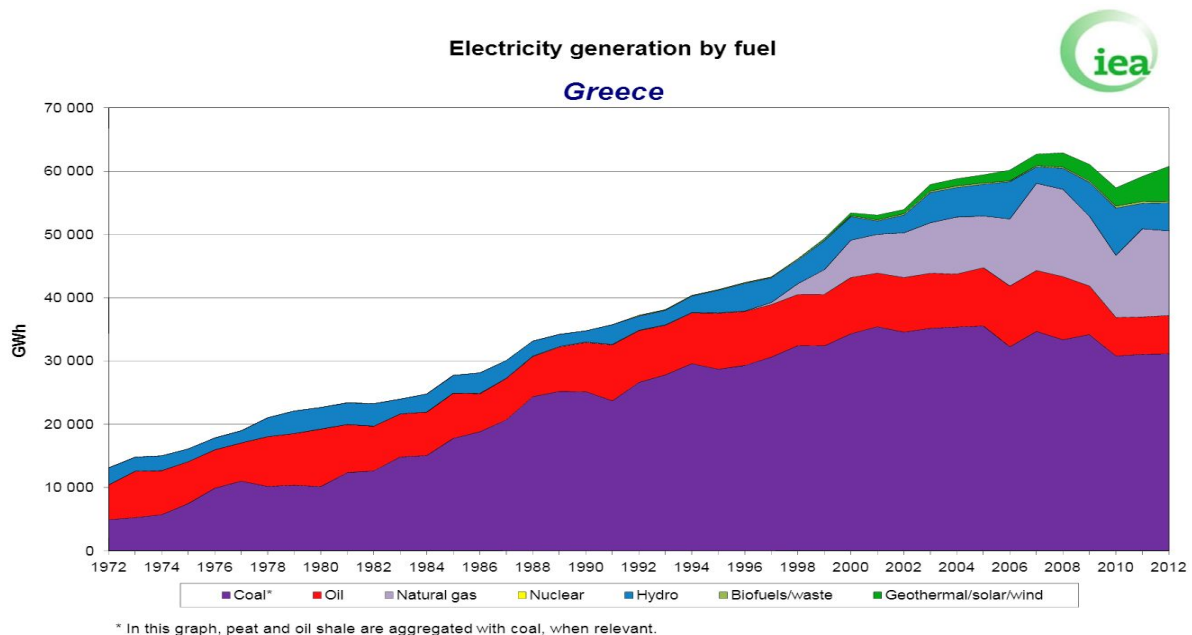


Εικόνα 1.2 Πανευρωπαϊκή ηλεκτροπαραγωγή ανά καύσιμο 1990-2012



Εικόνα 1.3 Πανευρωπαϊκή ηλεκτροπαραγωγή ανά τύπο ΑΠΕ 1990-2012

Στην εικόνα 1.4 φαίνεται η ηλεκτροπαραγωγή σε εθνικό επίπεδο για την Ελλάδα σε βάθος σαράντα ετών. Παρατηρείται μία μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων όπως του πετρελαίου και των γαιανθράκων. Επιπλέον, αν και το καύσιμο με την μεγαλύτερη αύξηση είναι το φυσικό αέριο, παρατηρούμε μία σημαντική αύξηση και στην χρήση της αιολικής, ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας.



Εικόνα 1.4 Ηλεκτροπαραγωγή ανά καύσιμο για την Ελλάδα 1972-2012

Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία, η ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια αναμένεται αλματώδης, δημιουργώντας νέα δεδομένα στο τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Το γεγονός όμως πως η απόδοση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από πηγές όπως ο ήλιος ή ο άνεμος είναι εξαιρετικά απρόβλεπτη, καθώς εξαρτάται από παράγοντες που δεν μπορεί να ελέγξει ο άνθρωπος, έχει σαν συνέπεια η παραγωγή ενέργειας από συστήματα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά ΑΠΕ να γίνεται απαγορευτική. Αυτός ο περιορισμός μας εισάγει στην έννοια των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, τα οποία με τον συνδυασμό των συμβατικών τεχνικών παραγωγής ενέργειας και των ΑΠΕ καθιστούν δυνατή την αξιόπιστη απόδοση για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου σε ενέργεια, αλλά και την παραγωγή ενέργειας με τα οφέλη της χρήσης των ΑΠΕ.

1.2 Υβριδικά συστήματα ενέργειας

Υβριδικό σύστημα ενέργειας (ΥΣΕ) καλείται ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας που αποτελείται από μία τουλάχιστον μονάδα παραγωγής ενέργειας μέσω συμβατικών καυσίμων και μία μονάδα χρήσης κάποιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Ένας τέτοιος συνδυασμός εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Πρώτον, με την χρήση των ΑΠΕ μειώνεται η παραγωγή ρύπων που θα παράγονταν αν είχαμε αποκλειστική χρήση συμβατικών καυσίμων. Σε ένα υβριδικό σύστημα η παραγωγή ενέργειας καλύπτεται κυρίως από την χρήση των ΑΠΕ και η χρήση του συμβατικού καυσίμου γίνεται μόνο αν είναι απολύτως απαραίτητο, όπως σε περιπτώσεις χαμηλής ή απουσίας ηλιοφάνειας στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών ή στην απουσία επαρκούς αέρα στην περίπτωση των αιολικών πάρκων. Δεύτερον, την μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς το κόστος ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας αποκλειστικά από μία ή περισσότερες ΑΠΕ το οποίο θα μπορούσε να καλύψει την ανάγκη ενός δικτύου σε σταθερή παροχή ενέργειας θα ήταν απαγορευτικό.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εμποτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που:

- Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ.
- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δε μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υβριδικών συστημάτων, τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε δίκτυο απείρου ζυγού, τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή έργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται, καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Παρομοίως, τυχούσα περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο με κάποιους περιορισμούς για την στιγμιαία παραγωγή ισχύος του ΥΣΕ. Στην περίπτωση ασθενούς δικτύου, όπου η ρύθμιση τάσης και συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη του ΥΣΕ, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου [3].

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων/φορτίων ειδικού σκοπού ή απομονωμένων/νησιωτικών περιοχών, που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου, όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής έργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου [3].

1.3 Φωτοβολταϊκή ενέργεια

Μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών, η φωτοβολταϊκή ενέργεια μαζί με την αιολική, χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής ενέργειας. Παρότι η αιολική είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ σε πολλές περιπτώσεις η χρήση φωτοβολταϊκών σε μία

εφαρμογή υβριδικής παραγωγής ενέργειας είναι προτιμητέα οικονομικά [4]. Επίσης, αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας και ανάπτυξης για χρήστες μεγάλης κλίμακας, καθώς η κατασκευή συσκευών φωτοβολταϊκών χαμηλού κόστους, αποτελεί πλέον μια πραγματικότητα [5]. Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες είναι αυτές που μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και έχουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα. Μερικά απ' αυτά είναι :

- είναι ανεξάντλητες
- δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον
- είναι αθόρυβες
- δεν έχουν περιστρεφόμενα μέρη

Λόγω των πλεονεκτημάτων αυτών, έχουν γίνει πλέον δημοφιλείς για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας. Με την αυξανόμενη εισχώρηση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συσκευών, πολλά συστήματα αντιρύπανσης μπορούν να λειτουργήσουν από την ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια, όπως για παράδειγμα ο καθαρισμός του πόσιμου νερού μέσω ηλεκτροχημικής επεξεργασίας ή η αναστολή της ερημοποίησης από φωτοβολταϊκή άντληση νερού με δένδροφύτευση.

Από πλευράς λειτουργικότητας, μια φωτοβολταϊκή μονάδα παραγωγής ενέργειας παρουσιάζει τεράστιες διακυμάνσεις στην αποδιδόμενη ενέργεια, κυρίως λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα, όπως εκτεταμένες αποκλίσεις στη συχνότητα. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, η κυμαινόμενη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας, σημαίνει ότι οι γεννήτριες παραγωγής αμιγώς φωτοβολταϊκής ενέργειας, για εφαρμογές εκτός δικτύου, πρέπει να είναι μεγάλες και κατά συνέπεια, ακριβές. Μία μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών με άλλες πηγές ενέργειας, όπως ντίζελ, κυψέλες καυσίμου ή μπαταρία [6], [7] και [8]. Η εφεδρική γεννήτρια ντίζελ για την φωτοβολταϊκή ενέργεια, μπορεί μεν να εξασφαλίσει παραγωγή ενέργειας επί 24ώρου βάσεως όμως έχει και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως ο θόρυβος και τα ρυπογόνα αέρια. Επίσης, οι εφεδρικές γεννήτριες ντίζελ, για να έχουν έναν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, πρέπει το εύρος της ενέργειας να είναι πάνω από 5KW, το οποίο είναι υπερβολικά υψηλό για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Για μεσαίο ή χαμηλό εύρος η τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκετά αποτελεσματικά.

1.4 Μικροτουρμπίνα καύσης βιοαερίου

Σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιας αποθηκευτικής μονάδας ή κάποιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας, για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου στην περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς από την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι ανεπαρκής. Τον ρόλο αυτόν στην παρούσα μελέτη παίζει ένα σύστημα γεννήτριας οδηγούμενης από μικροτουρμπίνα ή MTG (Microturbine Generation System). Ένα σύστημα MTG αποτελείται από μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator ή PMSG) οδηγούμενη από μία μικροτουρμπίνα μέσω ενός άξονα. Η μικροτουρμπίνες είναι μικρού μεγέθους και υψηλής ταχύτητας εκδοχές των συμβατικών βαρέως τύπου τουρμπίνων καύσης αερίου και γι αυτόν τον λόγο το δυναμικό μοντέλο μίας συμβατικής τουρμπίνας καύσης μπορεί να υιοθετηθεί, με μικρές αλλαγές, για την μελέτη μίας μικροτουρμπίνας.

Ο Rowen [9] ήταν από του πρώτους που μελέτησε και παρουσίασε ένα μοντέλο τουρμπίνας καύσης αερίου κατάλληλο για χρήση στην μελέτη και ανάλυση της. Το μοντέλο στην συγκεκριμένη μελέτη διέθετε συστήματα ελέγχου όπως: σύστημα ελέγχου ταχύτητας, σύστημα ελέγχου επιτάχυνσης και σύστημα ελέγχου καυσίμων. Επίσης το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι κατάλληλο για χρήση σε συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο αλλά και σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα. Οι Hannett και Afzal Khan [10], σε συνέχεια της δουλειάς του Rowen, απέδειξαν ότι το μαθηματικό μοντέλο της τουρμπίνας αερίων είναι ακριβές και αναπαράγει τις ιδιότητες της ικανοποιητικά, συγκρίνοντας το με μία πραγματική λειτουργική τουρμπίνα. Το μοντέλο των Hannett και Afzal Khan χρησιμοποιήθηκε από μία ομάδα ερευνητών στην προσομοίωση μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου [11]. Το σύστημά τους αποτελούνταν από μία τουρμπίνα καύσης αερίου και μία τουρμπίνα ατμού, όπου η τελευταία χρησιμοποιούσε την αποβαλλόμενη θερμότητα της πρώτης μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Και αυτή η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μαθηματικό μοντέλο του Rowen είναι ακριβές.

Σε συνέχεια των παραπάνω, μελετήθηκε η επιρροή των μικροτουρμπίνων στην σταθερότητα των δικτύων διανομής [12]. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι μικροτουρμπίνες, στον ρόλο του συστήματος διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του φορτίου. Σε άλλη μελέτη [13] χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω μοντέλο μικροτουρμπίνας με στόχο την υλοποίηση

ενός συστήματος ελέγχου για ένα υβριδικό σύστημα μικροτουρμπίνας-κυψέλης καυσίμου. Το σύστημα ελέγχου που υλοποιήθηκε είχε την δυνατότητα να σταθεροποιεί το σύστημα σε περιπτώσεις διαταραχών που μπορούσαν να το επηρεάσουν, όπως η διακύμανση του φορτίου ή η αλλαγή της σύνθεσης του καυσίμου της μικροτουρμπίνας. Σε συνέχεια της προηγούμενης μελέτης, ερευνητές χρησιμοποίησαν έναν αναδρομικό αλγόριθμο με εξωτερικό σήμα (ARX) ώστε να καταλήξουν στην συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει το μοντέλο της μικροτουρμπίνας. Αυτές οι συναρτήσεις μεταφοράς προσομοιώνουν με την ίδια ακρίβεια με τα δυναμικά μοντέλα μία μικροτουρμπίνα, με ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Η τάξη του μοντέλου με χρήση των συναρτήσεων μεταφοράς είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη των δυναμικών μοντέλων, άρα και η προσομοίωση είναι λιγότερο απαιτητική σε χρόνο και πόρους.

Τέλος οι Amer Al-Hinai και Ali Feliachi [14] παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο MTG συστήματος, στον ρόλο του συστήματος διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα μικροτουρμπίνων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η γεννήτρια του συστήματος MTG είναι μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG).

1.5 Στόχοι της μελέτης

Έχει ήδη τεκμηριωθεί επαρκώς ότι, σε μια φωτοβολταϊκή πηγή ενέργειας πρέπει να ενσωματωθεί κάποια άλλη πηγή ενέργειας τόσο στα αυτόνομα όσο και στα συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα, καθώς η πρώτη δεν μπορεί να παράσχει ισχύ κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών ή υπό νεφελώδεις καιρικές συνθήκες. Το υπό εξέταση σύστημα, είναι ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών/MTG, το οποίο αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, από μία μικροτουρμπίνα καύσης βιοαερίου η οποία οδηγεί μία ηλεκτρική γεννήτρια σταθερού μαγνήτη και μία δεξαμενή για την αποθήκευση του βιοαερίου. Αυτό το σύστημα στοχεύει να αποτελέσει έναν μελλοντικό ανταγωνιστή των υβριδικών συστημάτων φωτοβολταϊκών/ντίζελ, κυρίως από περιβαλλοντικής σκοπιάς. Λόγω της σχετικής σχεδιαστικής απλότητας και της απουσίας πολλών κινούμενων εξαρτημάτων, οι μικροτουρμπίνες πλεονεκτούν στην ευκολία εγκατάστασης, στην υψηλότερη αξιοπιστία, στα χαμηλά επίπεδα θορύβου και δονήσεων, στο χαμηλό κόστος συντήρησης και χαμηλότερων επιπέδων εκπομπών σε σχέση με τις αντίστοιχες μηχανές εσωτερικής καύσης [13][15][16]. Οι εκπομπές μίας μικροτουρμπίνας μπορεί να είναι μέχρι και οκτώ φορές χαμηλότερες από εκείνες μίας γεννήτριας ντίζελ, καθώς και οι μέχρι στιγμής διαθέσιμες μικροτουρμπίνες έχουν

εκπομπές NOx έως και 50% χαμηλότερες από μία κορυφαία μηχανή καύσης φυσικού αερίου.

Για τη μελέτη του συστήματος, μελετήθηκαν τα φυσικά χαρακτηριστικά των μερών που το αποτελούν και παρήχθησαν οι αντίστοιχοι μαθηματικοί τύποι. Το περιβάλλον Matlab/Simulink χρησιμοποιήθηκε για την δυναμική προσομοίωση του συστήματος. Σε γενικές γραμμές, οι στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι :

- Συλλογή και η σύνθεση των δεδομένων που είναι κατάλληλα να περιγράψουν τη λειτουργία του συστήματος και το προφίλ του φορτίου.
- Απεικόνιση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος με την παρακολούθηση της ροής ισχύος σε μεσοπρόθεσμο χρόνο, όπως μία ημέρα ή μία εβδομάδα.
- Δημιουργία ενός μοντέλου που προσομοιώνει με αξιοπιστία το σύστημα, ικανού να προβλέψει την απόδοση του πραγματικού συστήματος φωτοβολταϊκών/MTG.
- Παραμετροποίηση του συστήματος με τον πιο προσαρμόσιμο δυνατό τρόπο, ώστε τα μοντέλα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια μεγαλύτερη ποικιλία εφαρμογών.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι κάποιες από τις μονάδες ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του συστήματος, όπως οι μετατροπείς DC/DC, πάρθηκαν από τη βιβλιοθήκη SimPowerSystems που παρέχει το Simulink.

1.5 Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των τεχνολογιών που εμπλέκονται στο σύστημα που μελετάται στην εργασία, όπως οι αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών γεννητριών, ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων MTG και η παραγωγή του βιοαερίου μέσω της εκμετάλλευσης των ζωικών αποβλήτων.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται λεπτομερέστερα η γεννήτρια φωτοβολταϊκών και η μέθοδος μοντελοποίησής της. Παρουσιάζονται επίσης οι κυριότεροι αλγόριθμοι ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Τέλος παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων στο περιβάλλον Simulink του Matlab.

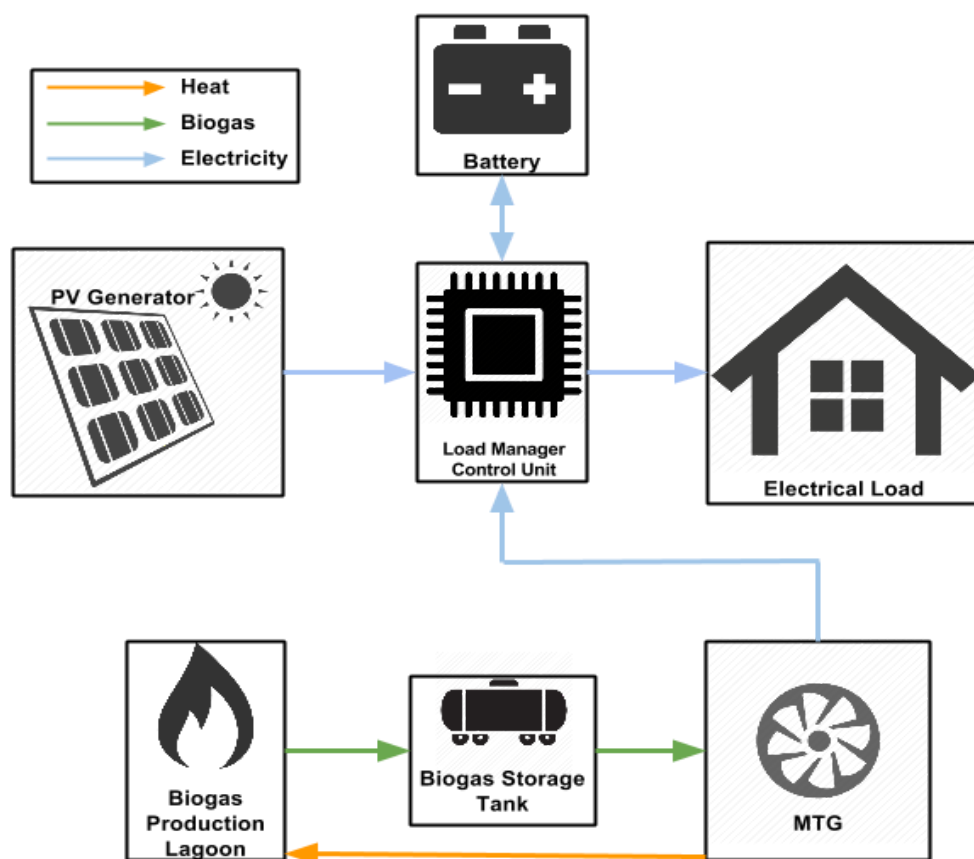
Αντίστοιχα στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τα συστήματα MTG. Παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες MTG και η βασικές αρχές λειτουργίας τους, αναλύεται η δομή και λειτουργία των γεννητριών μόνιμων μαγνητών και παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο των παραπάνω συστημάτων. Τέλος παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά για την λειτουργία του αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος MTG που μελετάται.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα πραγματικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, παραγωγής βιοαερίου και φορτίου με βάση τα οποία προσομοιώθηκε το σύστημα MTG/φωτοβολταϊκών. Τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και αναλύεται η κατανάλωση καυσίμου που φαίνεται να έχει το σύστημα στις πραγματικές συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Συνοπτική παρουσίαση του συστήματος

Η αξιοποίηση των διακοπτόμενων φυσικών πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο αέρας και το νερό, απαιτεί την ύπαρξη κάποιας μορφής αποθήκευσης ενέργειας. Η ιδέα της χρήσης βιοαερίου ως ουσίας για την αποθήκευση ενέργειας, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1. Στο πόνημα αυτό, εξετάζεται ένα υβριδικό σύστημα, βασισμένο στην φωτοβολταϊκή ενέργεια και στην τεχνολογία των μικροτουρμπίνων. Εστιάζοντας στα μέρη της τεχνολογίας των μικροτουρμπίνων, αυτά που χρειαζόμαστε είναι : μια μονάδα παραγωγής καύσιμου βιοαερίου (δεξαμενή χώνευσης), μια μονάδα αποθήκευσης βιοαερίου (δεξαμενή) και μια μονάδα αξιοποίησης του βιοαερίου (σύστημα MTG). Ωστόσο το σύστημα βασίζεται σε διακοπτόμενες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος, και πιθανόν να παρουσιάσει διακυμάνσεις στην εισροή ενέργειας, σε ημερήσια και ωριαία βάση ή ακόμα και μέσα σε ένα λεπτό. Συνεπώς, πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι ο βασικός σκοπός της ύπαρξης ενός συστήματος MTG είναι να αποθηκεύει ενέργεια για μικρά και για μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. από τη μία ώρα στην άλλη, ή από την μία εποχή στην άλλη). Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ακόμα μια μικρή μονάδα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία), η οποία θα παρέχει ισχύ σε ακραίες περιπτώσεις, όταν το σύστημα θα αδυνατεί να ανταποκριθεί στο φορτίο και η οποία θα πρέπει να δουλεύει διαρκώς, ώστε να χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της τάσης. Επίσης, είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο θα συντονίζει και θα καθοδηγεί τη λειτουργία των μερών του συστήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή των επιμέρους μερών, ώστε το σύστημα PV/MTG να γίνει πιο εύκολα κατανοητό. Τα μέρη του συστήματος είναι τα εξής:

- Φωτοβολταϊκή γεννήτρια
- MTG και μέρη από τα οποία αποτελείται
- Μπαταρία
- Στρατηγική ελέγχου



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος PV/MTG

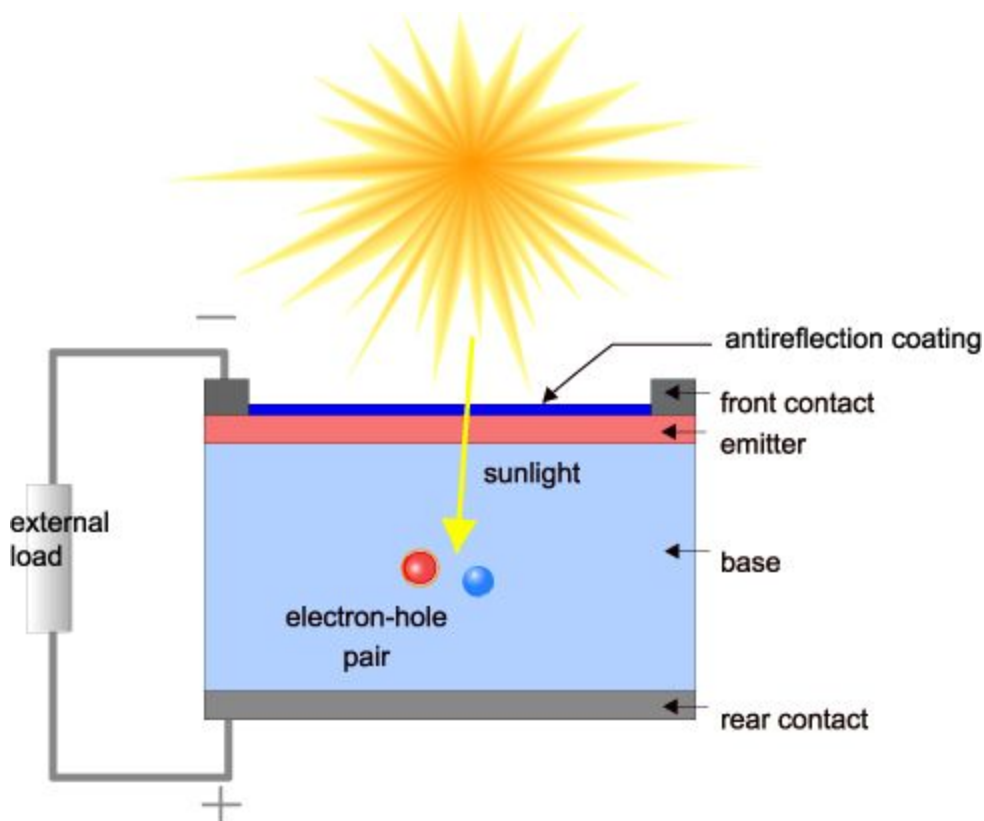
2.1 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι βιομηχανία των φωτοβολταϊκών, προσέλκυσε το ενδιαφέρον πολύ μεγάλων εταιρειών ενέργειας και κυβερνητικών υπηρεσιών. Με το κεφάλαιο που επενδύθηκε, συντελέσθηκε μια γιγάντια επιτάχυνση στην ανάπτυξη των φ/β πλαισίων. Στις μέρες μας, είναι διαθέσιμες ολόκληρες γραμμές παραγωγής με φ/β πλαίσια που μπορούν να παραμείνουν άφθαρτα για δεκαετίες. Επίσης, το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά, χάρη στον αυτοματισμό, τα καλύτερα σχέδια και τις βελτιωμένες

κατασκευαστικές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών [17].

2.1.1 Γενική περιγραφή της φωτοβολταϊκής κυψέλης

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική πρώτη ύλη που είναι απαραίτητη για όλες σχεδόν τις φ/β κυψέλες που διατίθενται στην αγορά, είναι η σιλικόνη υψηλής καθαρότητας (Si), η οποία λαμβάνεται από άμμο ή χαλαζία. Βασικά, για την παραγωγή φ/β κυψελών, χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τεχνολογίες: πολυκρυσταλλικές, μονοκρυσταλλικές και άμορφες κυψέλες σιλικόνης [18]. Η τεχνολογία της κρυσταλλικής σιλικόνης, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς ή ως βάση για την τεχνολογία παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Γενικά, η τεχνολογία της φ/β κυψέλης, βασίζεται στον βαθμό απόδοσης και στο κατασκευαστικό κόστος. Ο βαθμός απόδοσης, καθορίζεται από την ικανότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών να απορροφούν την ενέργεια του φωτός σε μεγάλο εύρος και στο ενεργειακό διάκενο των υλικών.



Σχήμα 2.2. Φωτοβολταϊκό κύτταρο

Η κρυσταλλική και η πολυκρυσταλλική σιλικόνη, είναι τα δύο υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται στις φ/β κυψέλες. Τα βασικό πλεονέκτημα που έχουν οι κυψέλες σιλικόνης είναι η αφθονία σιλικόνης που υπάρχει στη γη. Η φ/β κυψέλη αποτελείται από διάφορα στρώματα ημιαγωγών υλικών με διαφορετικές ατομικές ιδιότητες. Σε μία τυπική πολυκρυσταλλική κυψέλη, το μεγαλύτερο μέρος της πρώτης ύλης είναι η σιλικόνη, αναμεμειγμένη με μια μικρή ποσότητα βορίου, για να δώσει έναν θετικό ή p-type χαρακτήρα. Ένα λεπτό στρώμα στο μπροστά τμήμα της κυψέλης, έχει ενισχυθεί με φώσφορο, ώστε να δώσει έναν αρνητικό ή n-type χαρακτήρα. Η διεπαφή των δύο αυτών στρωμάτων παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο και διαμορφώνει τη λεγόμενη «σύζευξη των κυψελών» [19] .

Όταν η κυψέλη εκτίθεται στο ηλιακό φως, ένα ποσοστό των εισερχόμενων φωτονίων απορροφάται στην περιοχή της σύζευξης (ένωσης) απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο σιλικόνης (σχήμα 2.2). Εάν τα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια, τα ηλεκτρόνια θα μπορέσουν να ξεπεράσουν το ηλεκτρικό πεδίο της ένωσης και να κινηθούν μέσω της σιλικόνης σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι αντίθετη από την κατεύθυνση που θα έχει εάν η συσκευή λειτουργεί ως δίοδος.

Μια φ/β γεννήτρια αποτελείται από έναν αριθμό πλαισίων (modules) που σχηματίζονται από τη διασύνδεση των φ/β κυψελών, που συνδέονται σε μία σειριακή – παράλληλη σύνδεση ώστε να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη τάση και το ρεύμα. Συνεπώς, η απόδοση της φ/β γεννήτριας εξαρτάται από τα πλαίσια που συνθέτουν τη γεννήτρια και από τις κυψέλες που συνθέτουν τα πλαίσια. Το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας, καθορίζεται από την διασταύρωση των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης (I-V) με τη γραμμή φορτίου, του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτή.

2.1.2 Πηγές απωλειών σε μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια

1. Απώλειες αντανάκλασης των Φ/Β πλαισίων : Όταν η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει από την κατακόρυφη ως προς το έδαφος κατεύθυνση της φ/β γεννήτριας, δημιουργούνται απώλειες αντανάκλασης, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν υπερεκτίμηση της αναμενόμενης φ/β παραγωγής βάσει των ιδιοτήτων του πεδίου. Οι απώλειες αυτές, μπορούν να μειωθούν εάν η επιφάνεια καλυφθεί με ένα στρώμα «αντι-αντανάκλασης» [19].

2. Απώλειες που σχετίζονται με το φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας : Η ηλιακή ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από ευρεία ηλιακή κατανομή, επειδή η τιμή της μάζας του αέρα αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ηλιακή ακτινοβολία περιέχει φωτόνια με ακραία διαφορετικές ενέργειες. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο (band gap) δεν μπορούν να απορροφηθούν και κατά συνέπεια δεν χρησιμοποιούνται. Στις περιπτώσεις όπου τα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο, αξιοποιείται μόνο το πόσο της ενέργειας που είναι ίσο με το διάκενο. Το υπόλοιπο, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που απελευθερώθηκε από το δεσμό και τελικά σε θερμότητα στο δικτυωτό πλέγμα κρυστάλλου.
3. Απώλειες αστοχίας (mismatch) μεταξύ των Φ/Β πλαισίων : Τα χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσης των φ/β πλαισίων, του ίδιου τύπου και του ίδιου κατασκευαστή μπορούν να ποικίλουν από πλαίσιο σε πλαίσιο. Με βάση τις πληροφορίες που δίνονται από τους προμηθευτές, το σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ (Maximum Power Point) ενός πλαισίου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (STC) μπορεί να αποκλίνει μέχρι και 10% από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πλαισίου [20].
4. Απώλειες σκίασης : Η παρουσία μερικής σκίασης, επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας και ιδιαίτερα την μέγιστη παραγόμενη ισχύ, τον συντελεστή πλήρωσης και την αποδοτικότητα της γεννήτριας. Συνεπώς, η επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας για την φ/β γεννήτρια είναι πολύ σημαντική, ώστε να αποφεύγεται η μερική σκίαση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της του φ/β συστήματος [21]. Ο συντελεστής πλήρωσης που προαναφέρθηκε καθορίζεται από τον λόγο της ισχύος εξόδου στο σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, προς το γινόμενο του πολλαπλασιασμού της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc} , open-circuit voltage) με το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc} , short-circuit current)
5. Εξωτερικές απώλειες : Σε ένα πραγματικό σύστημα, η ισχύς εξόδου δεν είναι ακριβώς ίση με την ισχύ εισόδου. Για να υπολογίσουμε την ισχύ αυτή, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες που προκαλούνται από την πτώση της τάσης εξαιτίας των αντιστάσεων των καλωδίων και των διόδων αντεπιστροφής. Οι απώλειες που προκαλούνται από τις αντιστάσεις των συνδεδεμένων καλωδίων

(ωμικές απώλειες) πρέπει να υπολογίζονται βάσει του μήκους και της διαμέτρου των καλωδίων. Αυτή η αντίσταση θεωρείται σειριακή και συζητιέται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε ακολουθία που αποτελεί την φ/β γεννήτρια, οι δίοδοι αντεπιστροφής είναι συνδεδεμένες σειριακά με αυτές τις ακολουθίες. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε μία ή περισσότερες ακολουθίες, οι δίοδοι αντεπιστροφής θα εμποδίσουν το ρεύμα να περάσει από τις τέλειες ακολουθίες στις προβληματικές. Κατά τη λειτουργία αυτή, σημειώνεται μια πτώση της τάσης κάθε δίοδου περίπου 0.7.V. Η τιμή αυτή πρέπει να αφαιρεθεί από την τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας.

2.1.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Η θέση των σημείων λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ (MPP) πάνω στην φ/β γεννήτρια, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της κυψέλης. Η θέση αυτή χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της τάσης και του ρεύματος της πραγματικής λειτουργίας με τρόπο τέτοιο ώστε η πραγματική ισχύ να προσεγγίζει κατά το μέγιστο δυνατό, τη βέλτιστη τιμή. Η λειτουργία της φ/β γεννήτριας σε MPP, απαιτεί η εμπέδωση του φορτίου να ταιριάζει με αυτήν της γεννήτριας. Για το σκοπό αυτό, μια ηλεκτρονική συσκευή, συνήθως μια μονάδα ρύθμισης ισχύος, ικανή να πραγματοποιήσει τη λειτουργία του ελέγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος, πρέπει να είναι συνδεδεμένη ανάμεσα στην φ/β γεννήτρια και το φορτίο. Συνεπώς η εύρεση των MPP, έχει κάποια σημασία μόνο εάν είναι εφικτή η επεξεργασία τους, αν δεν επιφέρει επιπλέον ενεργειακές απώλειες και αν έχει μικρό επιπλέον κόστος. Πολλές διαφορετικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των σημείων MPP για την φ/β γεννήτρια [22] και [23]. Οι τεχνικές αυτές, μπορούν να διαχωριστούν σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες μέθοδοι βασίζονται σε έναν αλγόριθμο αναζήτησης για τον προσδιορισμό της καμπύλης βέλτιστης δυνατής ισχύος, χωρίς να διακόπτεται η κανονική λειτουργία της φ/β γεννήτριας. Η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ό,τι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του, ωστόσο, επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φ/β δεν είναι σταθερή, ομοίως δεν είναι σταθερή και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό, για κάθε στιγμή το φ/β να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτές καθορίζονται από το φορτίο, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης

– έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Οι έμμεσες μέθοδοι, χρησιμοποιούν ένα εξωτερικό σήμα για τον προσδιορισμό του MPP. Τέτοιου είδους εξωτερικά σήματα, μπορούν να δοθούν με τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του πλαισίου, του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης μιας φ/β κυψέλης αναφοράς. Ένα σετ φυσικών παραμέτρων πρέπει να προσδιοριστεί και το σετ του σημείου MPP προκύπτει από το σήμα. Κάποιοι από τους αλγορίθμους εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Γεννήτρια Μικροτουρμπίνας

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές αεριωθούμενες μηχανές οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν με την καύση φυσικού αερίου, προπανίου ή αερίου αποβλήτων. Οι σύγχρονες μικροτουρμπίνες είναι αποτέλεσμα της έρευνας για την χρήση τουρμπίνων στην αυτοκινητοβιομηχανία και στους κινητήρες αεροσκαφών, για αυτό τον λόγο συνδυάζουν την αξιοπιστία των κινητήρων των σύγχρονων αεροσκαφών με το χαμηλό κόστος των τουρμπίνων των αυτοκινήτων. Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μικροτουρμπίνες κερδίζουν συνεχώς έδαφος στην αγορά συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στα εξής χαρακτηριστικά τους:

- Μικρό μέγεθος, όχι μεγαλύτερες από έναν τηλεφωνικό θάλαμο
- Υψηλή απόδοση
- Εύκολη εγκατάσταση
- Φθηνή συντήρηση
- Πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων
- Γρήγορη εκκίνηση
- Χαμηλά επίπεδα θορύβου

Γενικά τα συστήματα MTG της αγοράς μπορούν να παράγουν από 30 έως 400 KW ενέργειας, όταν οι κλασικές τουρμπίνες των σταθμών παραγωγής ενέργειας παράγουν μέχρι και 300 MW. Αντίθετα όμως με τους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτρικής παραγωγής, οι μικροτουρμπίνες μπορούν να τοποθετηθούν δίπλα στο φορτίο, κάτι που εξαλείφει την

ανάγκη μεταφοράς της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις όπου θα παρατηρούνταν απώλειες μέχρι και 7% της παραγόμενης ισχύος [24].

Μπορεί η απόδοσή τους να είναι χαμηλότερη από αυτής μίας γεννήτριας εσωτερικής καύσης αλλά χάρη στην σχεδιαστική τους απλότητα και στην απουσία πολλών κινούμενων μερών, οι μικροτουρμπίνες υπερτερούν στη αξιοπιστία, στην μειωμένη παραγωγή θορύβου και κραδασμών, στην φθινή συντήρηση, στις χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και πιθανόν στο μικρότερο κόστος λειτουργίας τους. Η απόδοση των μικροτουρμπίνων κυμαίνεται από 15 έως 17% σε ένα σύστημα χωρίς προθέρμανση του αέρα εισαγωγής, ενώ με την προσθήκη του συστήματος προθέρμανσης μπορεί να φτάσει μέχρι και 33 έως 37% [25]. Το σύστημα προθέρμανσης είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιεί την τεράστια θερμοκρασία των αερίων εξαγωγής της τουρμπίνας, για να ανεβάσει περαιτέρω την θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα εισαγωγής πριν την καύση του. Έτσι η ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται στον θάλαμο καύσης μειώνεται σημαντικά και η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται. Τα καυσαέρια της τουρμπίνας μπορούν να αξιοποιηθούν επίσης σε ένα σύστημα συμπαραγωγής βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο την απόδοση του συστήματος έως και 80%. Ένα σύστημα λέγεται σύστημα συμπαραγωγής όταν από αυτό παράγονται πολλές μορφές ενέργειας. Στην περίπτωση των συστημάτων MTG τα καυσαέρια μπορούν να οδηγηθούν σε εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι θα θερμάνουν νερό ή αέρα ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής (ζεστό νερό για το σπίτι/επιχείρηση, θέρμανση χώρου) [15] [26] - [28].

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των MTG είναι τεράστια σε σύγκριση με τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα. Όπως κάθε στρόβιλος που καίει φυσικό αέριο, οι τοξικές εκπομπές των μικροτουρμπίνων είναι ελάχιστες. Συγκεκριμένα οι εκπομπές τους μπορεί να είναι 50% χαμηλότερες από αυτές μιας υπερσύγχρονης γεννήτριας εσωτερικής καύσης φυσικού αερίου, έως και οκτώ φορές χαμηλότερες από τις γεννήτριες diesel εσωτερικής καύσης (3-50 ppm NOx) και έως 600 φορές χαμηλότερες εκπομπές CO από αυτές των σταθμών παραγωγής με καύση άνθρακα [13], [15], [28].

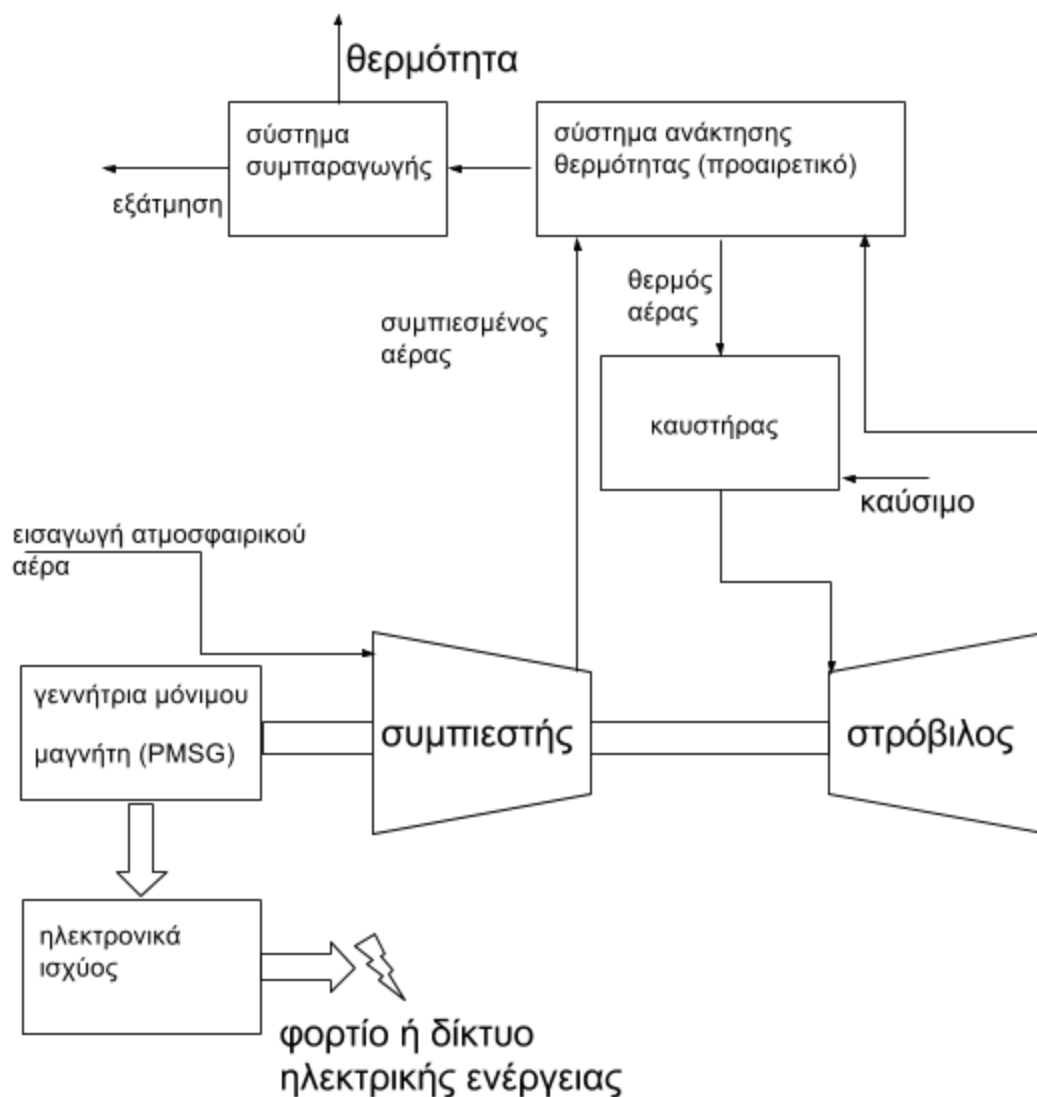
2.2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος MTG

Τα συστήματα MTG χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης από την μικροτουρμπίνα στην γεννήτρια. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

- **Μικροτουρμπίνα ενός ενιαίου άξονα.** Στις υλοποιήσεις ενιαίου άξονα η περιστροφή της τουρμπίνας περιστρέφει και τον συμπιεστή και την γεννήτρια μέσω του ίδιου άξονα. Αυτό έχει ως συνέπεια οι μαγνήτες της γεννήτριας να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται ο στρόβιλος της τουρμπίνας, σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνώντας τις 100.000 στροφές ανά λεπτό, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια πολύ υψηλής συχνότητας της τάξεως των kHz. Αυτός ο τύπος μικροτουρμπίνας είναι και ο πιο διαδεδομένος καθώς η κατασκευή του είναι απλούστερη και λιγότερο ακριβή. Ωστόσο επειδή η ηλεκτρική ενέργεια τόσο υψηλής συχνότητας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας, στις υλοποιήσεις ενιαίου άξονα απαιτείται η παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος που θα αλλάξουν την συχνότητα του ρεύματος της εξόδου ώστε να είναι κατάλληλο για οικιακή χρήση, δηλαδή 60 Hz ή 50 Hz.
- **Μικροτουρμπίνα δύο αξόνων.** Σε αυτή την υλοποίηση χρησιμοποιούνται διαφορετικοί άξονες για την σύνδεση τουρμπίνας- συμπιεστή και τουρμπίνας-γεννήτριας. Αυτό δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης ενός κιβωτίου ταχυτήτων ανάμεσα στην τουρμπίνα και την γεννήτρια. Έτσι η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας και συνεπώς να ελέγχεται και η συχνότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτρονικών ισχύος [29]. Επίσης λόγω της ύπαρξης κιβωτίου ταχυτήτων, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα της γεννήτριας σε σχέση με αυτή της τουρμπίνας τόσο μεγαλύτερη είναι η ροπή του άξονα που περιστρέφει την γεννήτρια. Συνεπώς μπορούν να περιστραφούν πολύ μεγαλύτερες γεννήτριες. Γι αυτό τον λόγο ο τρόπος υλοποίησης με δύο άξονες χρησιμοποιείται κυρίως στις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας.

Επίσης ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των μικροτουρμπίνων είναι η λειτουργία τους σε απλό κύκλο ή με ανάκτηση θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, ο συμπιεσμένος αέρας αναμιγνύεται με το καύσιμο και καίγεται κάτω από σταθερές συνθήκες πίεσης. Το αέριο υψηλής θερμοκρασίας και

πίεσης που παράγεται από την καύση διαστέλλεται μέσω της πτερωτής του στρόβιλου, περιστρέφοντάς τον. Στην συνέχεια τα αέρια αποβάλλονται από την εξάτμιση στο περιβάλλον ή σε κάποιο σύστημα συμπαραγωγής το οποίο θα εκμεταλλευτεί την εναπομείνουσα θερμότητα τους. Σε έναν στρόβιλο ανάκτησης θερμότητας, το αέριο πριν την εξαγωγή του από την εξάτμιση και αφού έχει διασταλεί περιστρέφοντας τον στρόβιλο, οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας όπου με την χρήση φύλλων μετάλλου προθερμαίνει τον συμπιεσμένο αέρα εισαγωγής πριν την καύση του. Έτσι μειώνει την απαίτηση καυσίμου 30% με 40% για την ανάφλεξη και βελτιώνει την απόδοση της ίδιας της τουρμπίνας [30]. Ωστόσο αν η μικροτουρμπίνα είναι μέρος ενός συστήματος συμπαραγωγής, μειώνεται η θερμότητα που είναι διαθέσιμη στα αέρια της εξάτμισης για περαιτέρω εκμετάλλευση. Στο σχήμα 2.3 φαίνονται τα κύρια μέρη ενός συστήματος MTG και οι μεταξύ τους συνδέσεις [31].



Σχήμα 2.3 Βασικά μέρη ενός συστήματος MTG με ενιαίο άξονα και ανάκτηση θερμότητας

Η λειτουργία των μικροτουρμπίνων, όπως και των μεγάλων τουρμπίνων αερίων, βασίζεται στον θερμοδυναμικό κύκλο του Brayton [15]. Σε αυτό τον κύκλο ο ατμοσφαιρικός αέρας από το στόμιο της εισαγωγής συμπιέζεται από τον στρόβιλο του συμπιεστή. Ο συμπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με το καύσιμο και καίγεται στον καυστήρα. Το καυτό συμπιεσμένο αέριο που παράγεται από την καύση αποσυμπιέζεται στον στρόβιλο περιστρέφοντάς τον και περιστρέφοντας μαζί του τον συμπιεστή και την γεννήτρια μέσω ενός ενιαίου άξονα (στην υλοποίηση μικροτουρμπίνας ενιαίου άξονα). Σε μία τυπική μικροτουρμπίνα το καυσάριο μετά από τον στρόβιλο οδηγείται σε έναν

εναλλάκτη θερμότητας, όπου βοηθάει στην προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την καύση του, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Ένα σύστημα υψηλής ταχύτητας ενιαίου άξονα συνήθως διαθέτει μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG), και προϋποθέτει την μετατροπή της υψηλής συχνότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια συχνότητας 50 ή 60 Hz για γενική χρήση. Αυτή η μετατροπή περιλαμβάνει έναν ανορθωτή από υψηλής συχνότητας AC σε DC και στην συνέχεια μετατροπή του DC σε AC συχνότητας 50 ή 60 Hz μέσω ενός inverter. Η παρουσία αυτών των ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη σε ένα σύστημα ενιαίου άξονα καθώς είναι σχεδιασμένα να αποτρέπουν και απότομες αλλαγές τάσης [15].

2.2.2 Παραγωγή και αποθήκευση βιοαερίου

Ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας φωτοβολταϊκών/MTG πρέπει να διαθέτει μία αξιόπιστη και σταθερή πηγή καυσίμου, καθώς η λειτουργία της μικροτουρμπίνας μπορεί να είναι απαραίτητη ανά πάσα στιγμή και σε μη προβλέψιμα χρονικά διαστήματα. Το σύστημα που αναλύεται σε αυτό το πόνημα εξυπηρετεί τις ανάγκες μίας κτηνοτροφικής μονάδας παραγωγής γάλακτος. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, μια πηγή βιοαερίου μπορούν να αποτελέσουν τα ζωικά απόβλητα της εγκατάστασης, με την επεξεργασία των οποίων μπορεί να παραχθεί βιοαέριο το οποίο θα αποτελέσει το καύσιμο του συστήματος MTG. Κάποιες κτηνοτροφικές μονάδες χρησιμοποιούν δεξαμενές “χωνευτήρες” όπου οδηγούν τα ζωικά απόβλητα της φάρμας και εκεί μετατρέπονται σε αξιοποιήσιμο και πολύτιμο βιοαέριο. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται εξοικονόμηση στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία η εγκατάσταση θα αγόραζε από το δίκτυο, αλλά και στο κόστος μεταφοράς και διαχείρισης των αποβλήτων [32].

Μέσα στις δεξαμενές “χωνευτήρες” γίνεται ο διαχωρισμός του μεθανίου από τα υγρά και στερεά απόβλητα μέσω της αναερόβιας χώνευσης. Αναερόβια χώνευση ονομάζεται η διάλυση των οργανικών ουσιών από βακτήρια που είναι παρόντα απουσία οξυγόνου. Το τελικό προϊόν της διαδικασίας αυτής είναι ένα συμπαγές στερεό απόβλητο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λίπανση καλλιεργειών, καθώς και μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία αποτελούν το βιοαέριο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και θερμότητας [33].

Υπάρχουν δύο τύποι “χωνευτήρων”, οι συνεχούς ροής και οι παραγωγής σε παρτίδες. Η χρήση του κάθε τύπου καθορίζεται από παράγοντες όπως το κόστος, το μέγεθος, οι τοπικές κλιματικές συνθήκες καθώς και η ποσότητα και διαθεσιμότητα των οργανικών αποβλήτων [34]. Ωστόσο υπάρχουν διάφοροι τρόποι επεξεργασίας των αποβλήτων μέσα στις δεξαμενές οι οποίοι είναι:

- Καλυμμένη λίμνη. Μία λίμνη υγρών αποβλήτων καλύπτεται με κάποιο υλικό που έχει την δυνατότητα να επιπλέει και να μην επιτρέπει στο παραγόμενο βιοαέριο να διαφύγει. Αυτός ο τύπος “χωνευτήρα” είναι ο πιο φθηνός στην κατασκευή του και συντήρησή του αλλά και ο πιο απλός στην αρχή λειτουργίας του. Επίσης λόγω της απλότητας του είναι εξαρτώμενος από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος που έχει ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου να έχει διακυμάνσεις και γενικά να είναι μεγαλύτερη τους καλοκαιρινούς μήνες και μικρότερη του χειμερινούς.
- Σταθερής μεμβράνης. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από μία δεξαμενή και ένα σταθερό πλέγμα στο εσωτερικό της το οποίο υποστηρίζει μία βιομεμβράνη. Αυτή η βιομεμβράνη είναι ουσιαστικά μία μεμβράνη βακτηρίων και ο σκοπός της χρήσης της είναι να μεγιστοποιηθεί η επιφάνεια επαφής τους με τα απόβλητα. Συνεπώς ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή του βιοαερίου είναι σημαντικά μικρότερος που μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 6 ημέρες. Επίσης αυτός ο τύπος “χωνευτήρα” μπορεί να είναι και πολύ μικρότερος σε διαστάσεις.
- Πλήρους μείγματος. Αυτός ο τύπος αποτελείται από μία δεξαμενή τύπου σιλό, όπου τα απόβλητα αναδεύονται και θερμαίνονται. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου “χωνευτήρα” είναι ότι μπορεί να επεξεργαστεί απόβλητα μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε στερεά της τάξης του 2% με 10%, σε αντίθεση με τους παραπάνω που απαιτούν απόβλητα όχι μεγαλύτερης περιεκτικότητας από 2% σε στερεά.
- Ροής σε σωλήνα. Αυτός ο τρόπος επεξεργασίας είναι ο μοναδικός που μπορεί να δεχτεί απόβλητα που έχουν μεταφερθεί και όχι ξεπλυθεί τα οποία μπορούν να φτάσουν και 13% σε περιεκτικότητα στερεών. Τα απόβλητα εισέρχονται σε έναν σωλήνα που τον διατρέχουν σωληνώσεις ζεστού νερού για την διατήρησή της

σωστής θερμοκρασίας και εξέρχονται από αυτόν λόγω της πίεσης που δέχονται από τα νέα απόβλητα που μπαίνουν στο σύστημα.

Μερικά από τα οφέλη μιας τέτοιας εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου σε μία κτηνοτροφική μονάδα είναι [35]:

- Η επεξεργασία των αποβλήτων μειώνει τις οσμές, παράγοντας σημαντικός για κτηνοτροφικές μονάδες που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.
- Μειώνεται η ρύπανση των υπόγειων υδάτων λόγω της εισχώρησης των αποβλήτων στο υπέδαφος
- Μειώνεται ή μηδενίζεται η ανάγκη αγοράς βιοαερίου για την λειτουργία του υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Οικονομικά οφέλη από την παραγωγή υποπροϊόντων όπως το οργανικό λίπασμα, το οποίο μπορεί να πωληθεί ή να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση των καλλιεργειών [36].
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από την κτηνοτροφική δραστηριότητα

Ενδεικτικά έχει διαπιστωθεί ότι μία κτηνοτροφική μονάδα 300 βοοειδών μπορεί να παράγει 50 kW ενέργειας σε συνεχή βάση, δηλαδή 400.000 kWh τον χρόνο [37]. Το κόστος μίας τέτοιας εγκατάστασης πρέπει να σημειωθεί ότι δεν καθιστά την υλοποίησή του οικονομικά βιώσιμη σε μία κτηνοτροφική μονάδα με λιγότερα από 500 βοοειδή, ωστόσο με κάποια οικονομική βοήθεια από το κράτος σε μορφή επιδότησης για την εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου αυτό το κόστος της αρχικής εγκατάστασης θα μπορούσε να είναι βιώσιμο και σε μικρότερες μονάδες.

Σε μία πειραματική εγκατάσταση του California Polytechnic State University (Cal Poly) [38] χρησιμοποιήθηκε μια καλυμμένη λίμνη αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου σε συνδυασμό με ένα σύστημα MTG για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση του, για την κάλυψη των αναγκών μίας κτηνοτροφικής μονάδας βοοειδών. Ο όγκος του “χωνευτήρα” ήταν 14400 κυβικά μέτρα και η ημερήσια εισροή αποβλήτων με 0.5% περιεκτικότητα στερεών αποβλήτων ήταν 365.000 λίτρα την ημέρα. Η μέση παραγωγή βιοαερίου που παρατηρήθηκε σε διάστημα 5 μηνών ήταν 127 κυβικά μέτρα την μέρα με περιεκτικότητα μεθανίου περίπου 57%. Στον πίνακα 2.1 φαίνεται η

κατανάλωση αερίου από την λειτουργία της μικροτουρμπίνας για τρεις διαφορετικές ρυθμίσεις παραγόμενης ισχύος.

Microturbine Power Setting	15 kW	20 kW	25 kW
Hours of Operation	4.15 hrs	4.5	4.34
Biogas @57% Methane	59 m ³	73 m ³	82 m ³
Microturbine Efficiency	20%	23%	25%
Exhaust Emissions			
NOx			3 ppm
CO			200 ppm

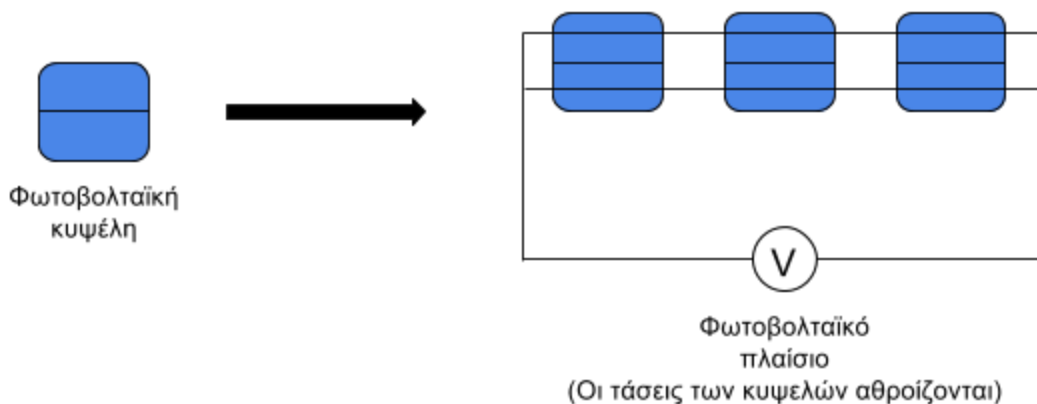
Πίνακας 2.1 Κατανάλωση αερίου από την λειτουργία της μικροτουρμπίνας

Από αυτή την πειραματική εγκατάσταση διαπιστώθηκε ότι:

- Ο μεγαλύτερος περιορισμός στην παραγόμενη ενέργεια από την μικροτουρμπίνα είναι η διαθέσιμη ποσότητα μεθανίου. Για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή μεθανίου είναι απαραίτητη η σταθερή και συνεχής εισαγωγή αποβλήτων στον “χωνευτήρα”.
- Διακυμάνσεις στην ροή των εισερχόμενων αποβλήτων μπορούν να διαταράξουν σημαντικά την αποδοτικότητα της δεξαμενής χώνευσης και την ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου.
- Με την αύξηση του αριθμού των ζώων θα αυξανόταν η ποσότητα των στερεών αποβλήτων και κατά συνέπεια η περιεκτικότητα τους στην λίμνη χώνευσης. Αυτό με την σειρά του θα αύξανε την παραγωγή του βιοαερίου.
- Τέλος, η ανάδευση και θέρμανση των αποβλήτων θα βελτίωνε την απόδοση της εγκατάστασης. Ειδικότερα η αύξηση της θερμοκρασίας των αποβλήτων θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την χρήση μίας ήδη υπάρχουσας πηγής θερμότητας, την εξάτμιση της μικροτουρμπίνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (PV) είναι μια δημοφιλής ανανεώσιμη πηγή ενέργειας λόγω της απουσίας κινούμενων μερών και ως εκ τούτου του σχεδόν μηδενικού κόστους συντήρησης. Το βασικό δομικό στοιχείο του συστήματος, δηλαδή η φωτοβολταϊκή κυψέλη χρησιμοποιεί τυπικές ιδιότητες των ημιαγωγών για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και μπορεί να κατασκευαστεί με σχετικά ελάχιστες απαιτήσεις εγκαταστάσεων. Επί πλέον, οι μετατροπείς ισχύος (DC-DC μετατροπέας ή/και inverter), που αποτελούν την διασύνδεση των PV με το δίκτυο ή τις μπαταρίες είναι καλά καθιερωμένες τεχνολογίες. Ωστόσο, σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά, λόγω του υψηλού κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας είναι κρίσιμη και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ακριβούς μοντέλου προσομοίωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Σχήμα 3.1 Φωτοβολταϊκή κυψέλη και πλαίσιο

Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα ή σε σειρά και τα οποία με την σειρά τους αποτελούνται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών κυψελών συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης των φωτοβολταϊκών κυψελών ώστε να σχηματιστεί ένα

φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο λόγος που οι φωτοβολταϊκές κυψέλες συνδέονται σε σειρά είναι η πολύ μικρή τάση που έχει την δυνατότητα να παράξει η κάθε κυψέλη, περίπου 0.6 V για τις κυψέλες σιλικόνης. Η σύνδεση τους σε σειρά έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που τελικά παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να είναι το άθροισμα των τάσεων των φωτοβολταϊκών κυψελών που το αποτελούν, και το ρεύμα να ισούται με το ρεύμα που παράγεται από κάθε κυψέλη χωριστά. Στην συνέχεια τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους, παράλληλα ώστε να αυξηθεί το ρεύμα ή σε σειρά ώστε να αυξηθεί η τάση, σχηματίζοντας μια φωτοβολταϊκή συστοιχία.

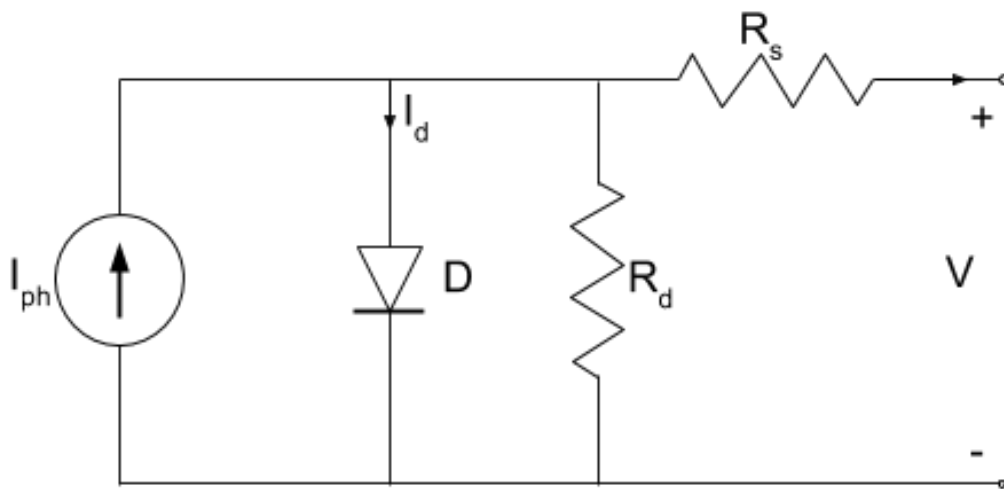
3.1 Φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV cell)

Το δομικό στοιχείο μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι η φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV cell), η οποία με βάση τις ιδιότητες των ημιαγωγών μετατρέπει την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά της σε ηλεκτρική ενέργεια [39]. Η πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης μίας κυψέλης αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα για όποιον προσπαθεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα PV, και αυτό γιατί η πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα, δηλαδή ο ήλιος, είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό απρόβλεπτη. Πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια των κυψελών, όπως μια απρόβλεπτη σκίαση από συννεφιά, σκονισμένη επιφάνεια των πλαισίων καθώς και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Γι αυτό τον λόγο έχει υπάρξει μεγάλη προσπάθεια και εκτεταμένο ερευνητικό έργο προς την κατεύθυνση της δημιουργίας μοντέλων φωτοβολταϊκών κυψελών που να προσομοιώνουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την λειτουργία μίας πραγματικής κυψέλης. Η μοντελοποίηση τους είναι εφικτή με την χρήση ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων και η πρόκληση για να επιτευχθεί καλή ακρίβεια του μοντέλου είναι ο υπολογισμός κάποιων παραμέτρων αυτών των ισοδύναμων κυκλωμάτων. Τα δημοφιλέστερα μοντέλα φωτοβολταϊκών κυψελών είναι το μοντέλο της μίας διόδου [40] και το μοντέλο δύο διόδων [41], τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια της ενότητας.

3.1.1 Μοντέλο μίας διόδου

Το μοντέλο της μίας διόδου είναι το απλούστερο ισοδύναμο κύκλωμα μίας φ/β κυψέλης και φαίνεται στο σχήμα 3.2. Τα στοιχεία που το αποτελούν είναι μία πηγή συνεχούς ρεύματος I_{ph} που αντιπροσωπεύει το ρεύμα που παράγεται από τα προσπίπτοντα φωτόνια, μία δίοδος D , και μία αντίσταση R_s που εκφράζει την εσωτερική

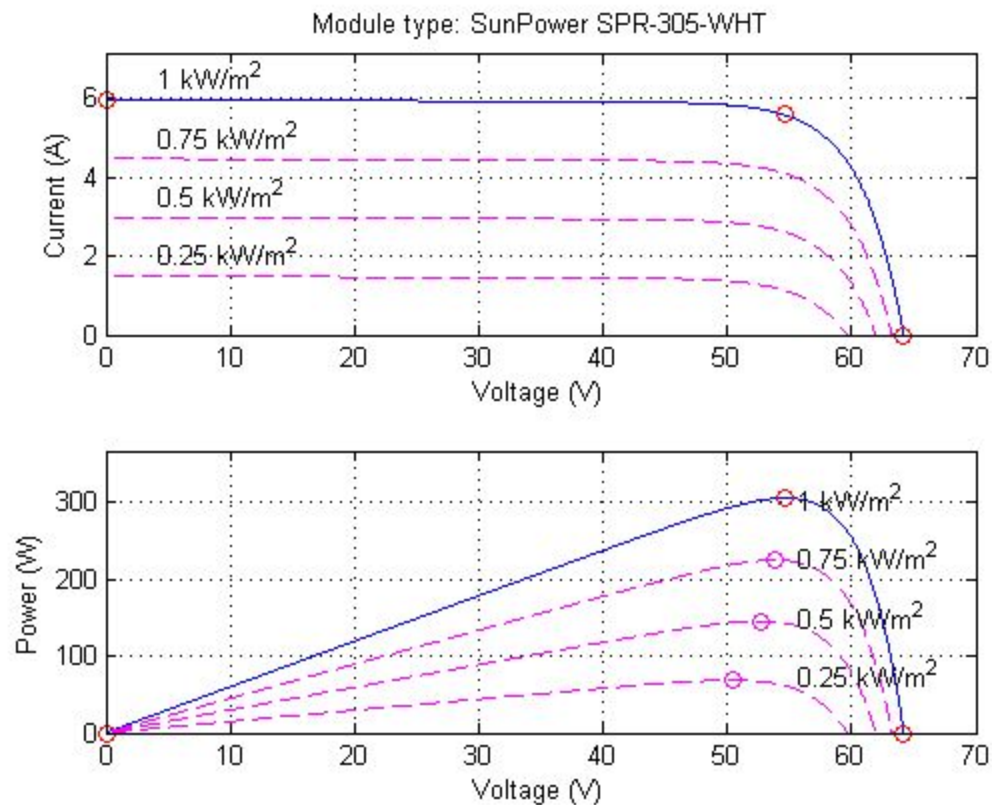
αντίσταση της κυψέλης. Επίσης μπορεί να περιληφθεί στο μοντέλο και μία παράλληλη αντίσταση R_p η οποία εκφράζει τις διαρροές ρεύματος προς το έδαφος, αλλά η επίδρασή της στην ακρίβεια του μοντέλου είναι σχεδόν αμελητέα και θα παραληφθεί στην περίπτωση μας. Αυτό το μοντέλο έχει τέσσερις άγνωστες παραμέτρους, ρεύμα φωτονίων I_{ph} , το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου I_{sat} , την αντίσταση R_s , και τον παράγοντα ιδανικότητας της διόδου Q_d που μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 2. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται δεδομένα που δίνονται από τον κατασκευαστή αλλά και χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας της κυψέλης όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος.



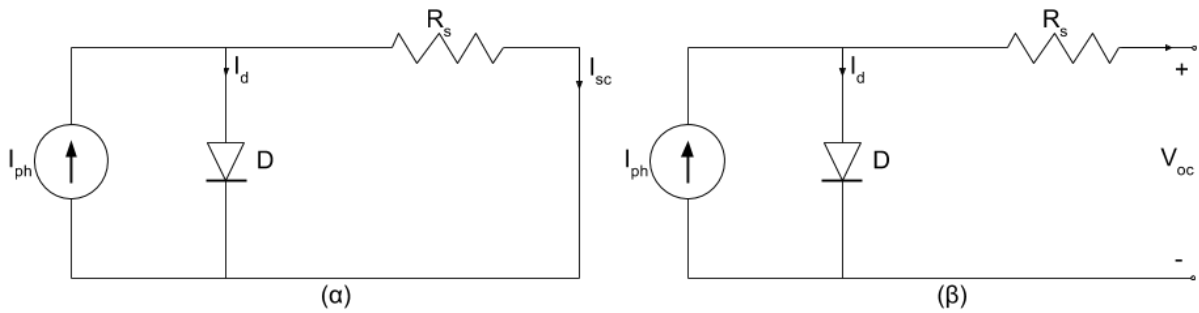
Σχήμα 3.2 Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου μίας διόδου

Αν υποθέσουμε ότι η ακτινοβολία και η θερμοκρασία διατηρούνται σταθερές, τότε παρατηρώντας το κύκλωμα μπορούμε να προβλέψουμε ότι μεταβάλλοντας την αντίσταση του φορτίου, για κάθε σταθερή τιμή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, θα μεταβληθούν και οι τιμές της τάσης και της έντασης στα άκρα της κυψέλης. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του φορτίου από μηδενική έως άπειρη μπορούμε να πάρουμε δύο πολύ σημαντικές γραφικές παραστάσεις, όπως θα δούμε στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, και μία γενική τους εικόνα φαίνεται στο σχήμα 3.3. Στο σχήμα 3.4(α) φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα που είδαμε προηγουμένως, αγνοώντας την

αντίσταση R_p , αλλά με μηδενική αντίσταση φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση η τάση που παρέχει η κυψέλη μηδενίζεται και το ρεύμα που διοχετεύεται έξω από την κυψέλη ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Αντίθετα, αν η αντίσταση του φορτίου είναι άπειρη όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4(β), δηλαδή πρακτικά έχουμε ανοιχτοκύκλωμα, το ρεύμα της κυψέλης διοχετεύεται εσωτερικά μέσω της διόδου p-n και έτσι στα άκρα της κυψέλης δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Οι τιμές των I_{sc} και V_{oc} δίνονται πάντα από τον κατασκευαστή και είναι τα σημεία όπου η καμπύλη I-V τέμνει τους άξονες στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 I-V και P-V διαγράμματα για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας



Σχήμα 3.4 Συνθήκες βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης

Για το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια I_{ph} είναι ευρέως αποδεκτή η προσέγγιση πως είναι ευθέως ανάλογο με την ακτινοβολία που προσπίπτει στην κυψέλη. Ο κατασκευαστής του πλαισίου παρέχει αυτή την τιμή του ρεύματος όπως μετρήθηκε σε συγκεκριμένες συνθήκες ελέγχου, δηλαδή ακτινοβολία $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ και μάζα αέρα A.M. = 1.5. Συνεπώς το ρεύμα φωτονίων δίνεται από την σχέση:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} \cdot I_{sc} \quad (3-1)$$

Όπου:

G η ακτινοβολία που προσπίπτει στην κυψέλη

G_0 η ακτινοβολία σε συνθήκες ελέγχου (1000 W/m^2)

I_{sc} το ρεύμα φωτονίων υπό συνθήκες ελέγχου

Το ρεύμα I_d που διατρέχει την διόδο δίνεται από την εξίσωση του Shockley:

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{V_d + I R_s}{V_T}} - 1 \right) \quad (3-2)$$

Όπου:

I_{sat} το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

V_d η τάση της διόδου

V_T η τάση λόγω θερμοκρασίας

Η τάση V_T ισούται με:

$$V_T = \frac{kT}{q \cdot Q_d (N_{call} \cdot N_{ser})} \quad (3-3)$$

Όπου:

k η σταθερά του Boltzman (1.3806×10^{-23} J/K)

T η θερμοκρασία

q το φορτίο του ηλεκτρονίου (1.602×10^{-19} eV)

Q_d ο παράγοντας ιδανικότητας της διόδου

Για τον υπολογισμό του αντίστροφου ρεύματος κόρου I_{sat} της διόδου αρχικά πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το ρεύμα που παράγεται από την κυψέλη ισούται με την διαφορά του ρεύματος φωτονίων και του ρεύματος της διόδου, δηλαδή:

$$I = I_{sc} - I_d \quad (3-4)$$

Αντικαθιστώντας το I_d στην (3-4) με την σχέση (3-2), παίρνουμε την σχέση τάσης - ρεύματος της κυψέλης:

$$I = I_{sc} - I_{sat} \left(e^{\frac{V_d + IR_s}{V_T}} - 1 \right) \quad (3-5)$$

Στην συνέχεια λύνοντας ως προς το I_{sat} για την περίπτωση ανοιτοκύκλωσης, όπου $I=0$ και $V=V_{oc}$ έχουμε:

$$I_{sat} = \frac{I_{sc}}{e^{V_{oc}/V_T} - 1} \quad (3-6)$$

Η τιμή της αντίστασης R_s μπορεί να υπολογιστεί από την διαφοροποίηση της σχέσης ρεύματος-τάσης (3-5):

$$R_s = - \frac{dI}{dV} - \frac{nKT/q}{I_0 \cdot e^{q(\frac{V+IR_s}{nKT})}} \quad (3-7)$$

Και τέλος αξιολογώντας την εξίσωση (3-7) στην τάση ανοιχτοκύκλωσης $V = V_{oc}$ και $I = 0$ παίρνουμε:

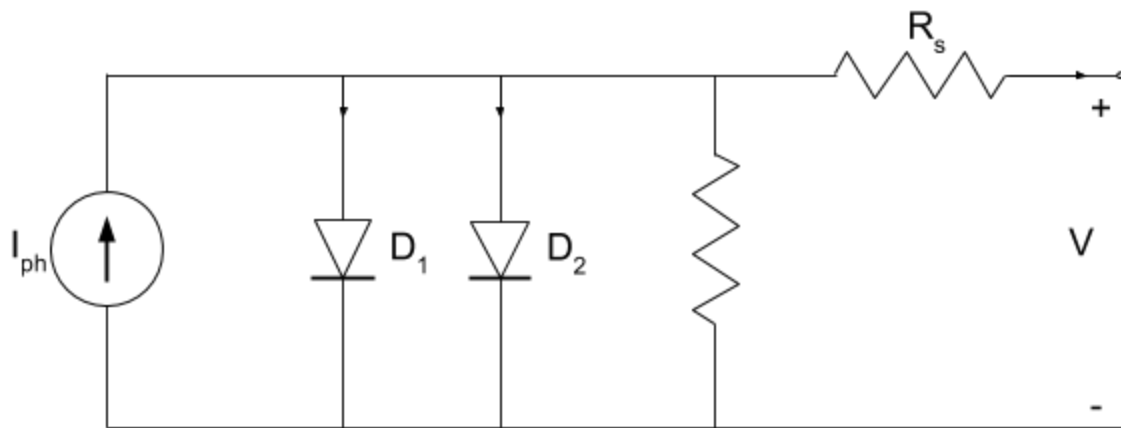
$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc}} - \frac{nKT/q}{I_0 \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{nKT}}} \quad (3-8)$$

Ο παράγοντας ιδανικότητας Q_d θεωρείται σταθερός και εξαρτάται από την τεχνολογία των κυψελών [42]. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές της παραμέτρου Q_d που αντιστοιχούν σε κάθε τεχνολογία.

Technology	Ideality factor
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-H tandem	3.3
a-Si-H triple	5
cdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

Πίνακα 3.1 Τιμές του παράγοντα ιδανικότητας για κάθε τεχνολογία κυψέλης φ/β

3.1.2 Μοντέλο δύο διόδων



Σχήμα 3.5 Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου δύο διόδων

Μία βελτιωμένη, όσον αφορά την ακρίβεια, έκδοση του μοντέλου της μίας διόδου που συζητήθηκε παραπάνω αποτελεί το μοντέλο δύο διόδων σχήμα 3.5. Το μοντέλο των δύο διόδων αποτελεί ένα μοντέλο της φωτοβολταϊκής κυψέλης με μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς λαμβάνει υπόψιν του τις διαρροές λόγω επανασύνδεσης των περιοχών απογύμνωσης των φ/β κυψελών. Παρ'όλα αυτά δεν προτιμάται έναντι του μοντέλου της μίας διόδου επειδή εισάγει στο σύστημα πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, καθώς απαιτεί τον υπολογισμό 7 παραμέτρων. Η αντίστοιχη σχέση ρεύματος - τάσης για το μοντέλο των δύο διόδων είναι:

$$I = I_{SC} - I_{sat1} \left(e^{q \frac{V+IR_s}{KT}} - 1 \right) - I_{sat2} \left(e^{q \frac{V+IR_s}{2KT}} \right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_p} \right) \quad (3-9)$$

3.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι ένα σύνολο κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά. Μία μεμονωμένη κυψέλη έχει πολύ μικρή τάση στα άκρα της, μικρότερη από 1 V. Όταν όμως συνδεθούν σε σειρά σε ένα πλαίσιο, οι τάση του πλαισίου θα είναι το άθροισμα των τάσεων των κυψελών που το αποτελούν. Τα περισσότερα φ/β πλαίσια

κρυσταλλικής σιλικόνης που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, συνήθως αποτελούνται είτε από 36 είτε από 72 σειριακά συνδεδεμένες κυψέλες. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που θα μοντελοποιήσουμε (Sunpower SPR-305-WHT-U (305W)) αποτελείται από 96 κυψέλες μονοκρυσταλλικής σιλικόνης με τάση ανοιχτοκύκλωσης περίπου 0.66V ανά κυψέλη. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται τα δεδομένα που παρέχονται από τον κατασκευαστή για το παραπάνω πλαίσιο.

STC Power Rating	305W
PTC Power Rating	280.6W
Number of Cells	96
I_{mp}	5.58A
V_{mp}	54.7V
I_{sc}	5.96A
V_{oc}	64.2V
NOCT	45°C
Temp. Coefficient of Power	-0.38%/K
Temp. Coefficient of Voltage	-0.177V/K
Series Fuse Rating	15A

Πίνακας 3.2 Sunpower SPR-305-WHT-U (305W) datasheet

Η στρατηγική μοντελοποίησης του ϕ/β πλαισίου είναι η ίδια με αυτή της κυψέλης. Η μόνη αλλαγή που είναι απαραίτητη είναι ο υπολογισμός των τάσεων και των ρευμάτων,

ανάλογα με τον αριθμό των σε σειρά συνδεδεμένων κυψελών και των σε σειρά και παράλληλα συνδεδεμένων πλαισίων.

3.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκές γεννήτριες έχουν διάφορους τρόπους διασύνδεσης. Η απλούστερη εκδοχή ενός τέτοιου συστήματος είναι η απευθείας σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε έναν DC-AC αντιστροφέα, και από εκεί η ηλεκτρική ενέργεια στέλνεται στο κεντρικό δίκτυο. Σε μία άλλη εκδοχή, στην οποία χρησιμοποιείται ένας “υβριδικός αντιστροφέας”, ένα ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο και η υπόλοιπη σε μία εγκατάσταση αποθήκευσης σε μπαταρίες. Και τέλος υπάρχει και η εκδοχή όπου δεν έχουμε σύνδεση με το δίκτυο και όλη η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται από το τοπικό φορτίο.

Επειδή η σχέση τάσεως-ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν είναι γραμμική και αλλάζει συνεχώς επηρεαζόμενη από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η ακτινοβολία, αλλά και από την ηλικία των πλαισίων, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο εκείνου του ζεύγους τάσεως-ρεύματος που θα αποδώσει την μέγιστη ισχύ [43]. Αυτή την δουλειά την αναλαμβάνουν τα ηλεκτρονικά ισχύος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) που αποτελούν συνήθως μέρος ενός DC-DC μετατροπέα, και ο έλεγχος τους γίνεται με βάση κάποιους αλγόριθμους που θα συζητηθούν στην συνέχεια.

3.3.1 Παράγοντας πλήρωσης FF και καμπύλη I-V

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν μία περίπλοκη σχέση μεταξύ της μέγιστης ισχύος που μπορούν να παράγουν και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η παράμετρος που χαρακτηρίζει αυτή την σχέση και παρέχεται από τον κατασκευαστή του πλαισίου ονομάζεται Fill Factor (FF) και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος που παράγεται προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} . Με την γνώση του FF μπορούμε να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ισχύ υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας με τον τύπο $P=FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}$.

Στο πρώτο διάγραμμα του σχήματος 3.3 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της σχέσης τάσης-ρεύματος για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο για διάφορες τιμές ακτινοβολίας. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής λειτουργίας του το φωτοβολταϊκό συμπεριφέρεται σαν μία πηγή σταθερού ρεύματος. Ωστόσο, στο

σημείο μέγιστης ισχύος που βρίσκεται στο “γόνατο” της καμπύλης, η σχέση τάσης-ρεύματος είναι σχεδόν αντίστροφα εκθετική. Από την βασική θεωρία κυκλωμάτων, γνωρίζουμε ότι η ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται από ένα σύστημα είναι βελτιστοποιημένη όταν dI/dV , η κλήση δηλαδή της καμπύλης του σχήματος 3.6, ισούται με το αντίθετο του λόγου I/V . Στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 3.3 φαίνεται η αντίστοιχη σχέση τάσεως ισχύος και το σημείο όπου η ισχύς μεγιστοποιείται [45].

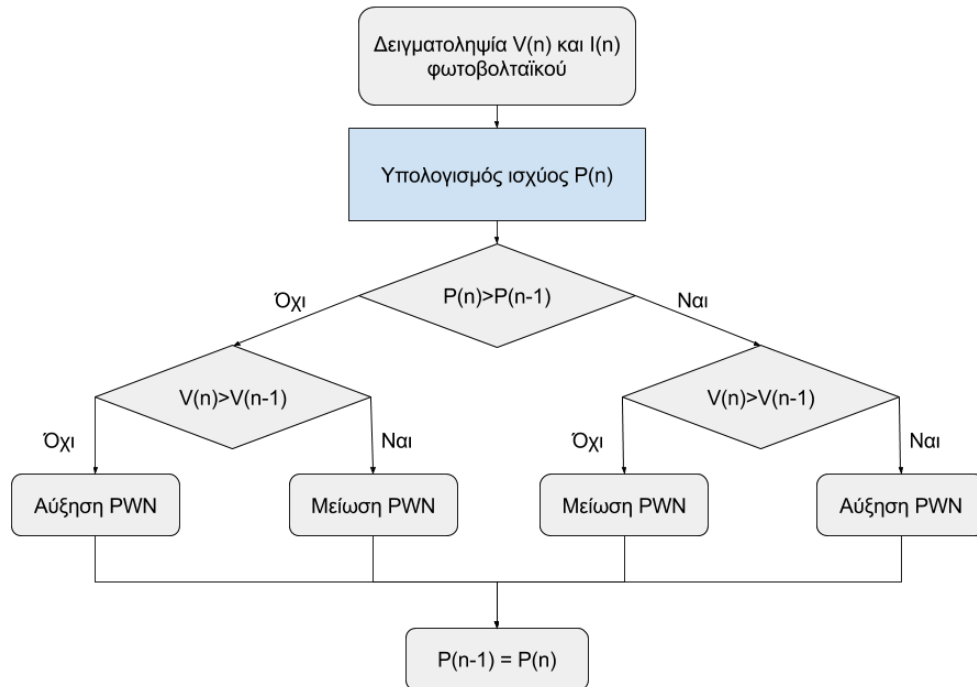
3.3.2 Κατηγοριοποίηση στρατηγικών εύρεσης MPP

Οι ελεγκτές που διατίθενται στο εμπόριο συνήθως χρησιμοποιούν μία από τις ακόλουθες στρατηγικές ελέγχου για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια [44]. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ελεγκτές που έχουν την δυνατότητα χρήσης περισσότερων από μίας στρατηγικής ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος [45].

- **Διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and observe)**

Αυτή η κατηγορία αλγορίθμων αποτελεί την δημοφιλέστερη επιλογή στα συστήματα παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά πλαίσια κυρίως λόγω της απλότητας της υλοποίησης τους. Η στρατηγική που ακολουθείται για την εύρεση του MPP είναι η σταδιακή μεταβολή κατά μία μικρή ποσότητα της τάσης και η μέτρηση της ισχύος που παράγεται για το τρέχον ζεύγος ρεύματος τάσης. Αν η ισχύς αυξήθηκε σε σχέση με τον προηγούμενο κύκλο συνεχίζεται η αλλαγή της τάσης προς την ίδια κατεύθυνση έως ότου η ισχύς σταματήσει να αυξάνεται όπου και έχει βρεθεί το MPP. Αν αντίθετα η ισχύς μειώθηκε, στον επόμενο κύκλο η αλλαγή της τάσης γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Για να γίνει πιο κατανοητό έστω ότι το σημείο λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού βρίσκεται αριστερά από το σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη ρεύματος τάσης του σχήματος 3.3. Έστω ότι ο αλγόριθμος προκαλεί αύξηση της τάσης στον πρώτο κύκλο λειτουργίας του. Τότε στον επόμενο κύκλο θα υπολόγιζε την μεταβολή ισχύος που προκάλεσε αυτή η αλλαγή τάσης και θα διαπίστωνε ότι η ισχύς αυξήθηκε, γιατί το σημείο λειτουργίας μετατοπίστηκε προς τα δεξιά μετά την αύξηση της τάσης. Άρα θα συνέχιζε να αυξάνει την τάση στους επόμενους κύκλους μέχρι το σημείο λειτουργίας να βρεθεί δεξιότερα του σημείου μέγιστης ισχύος. Τότε ο αλγόριθμος θα παρατηρούσε μείωση της ισχύος μετά από την αύξηση της τάσης και από τον επόμενο κύκλο θα άρχιζε την σταδιακή μείωση της τάσης μέχρι να παρατηρηθεί και πάλι αρνητική μεταβολή της ισχύος. Από το παραπάνω παράδειγμα μπορούμε να

καταλάβουμε ότι αυτός ο αλγόριθμος ουσιαστικά δεν εντοπίζει πότε το σημείο μέγιστης απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, αλλά προκαλεί μία ταλάντωση του σημείου λειτουργίας του γύρω και πολύ κοντά στο σημείο MPP. Αυτό το χαρακτηριστικό προκαλεί ορισμένα προβλήματα κατά την εφαρμογή του σε πραγματικά συστήματα. Ένα από τα προβλήματα αυτά είναι ότι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3, η καμπύλη P-V μεταβάλλεται πιο αργά κοντά στο σημείο MPP όσο η ακτινοβολία μειώνεται. Επομένως ο εντοπισμός στην αλλαγή πρόσημου της μεταβολής ισχύος γίνεται δυσκολότερος και η απόδοση του αλγορίθμου μειώνεται. Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζει αυτός ο αλγόριθμος είναι η αδυναμία σύγκλισης στο σημείο μέγιστης ισχύος κατά την διάρκεια απότομων αλλαγών των περιβαλλοντικών συνθηκών και ειδικότερα της ακτινοβολίας. Οι γρήγορες αλλαγές της ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια μίας συνεφιασμένης ημέρας για παράδειγμα, προκαλεί την αλλαγή της καμπύλης P-V πάνω στην οποία κινείται το σημείο λειτουργίας του ϕ/β και οι μετρήσεις που παίρνει ο ελεγκτής στην μεταβολής της ισχύος μπορεί να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Σε αυτή την περίπτωση οι ενέργειες του αλγορίθμου μπορεί να απομακρύνουν το σημείο λειτουργίας από το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Διατάραξης και Παρατήρησης. (Αύξηση του PWM σημαίνει αύξηση της τάση.)

- **Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental conductance)**

Επειδή η ισχύς είναι συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος ($P=V \cdot I$), αν παραγωγίσουμε την ισχύ ως προς μία από τις δύο μεταβλητές και θέσουμε την εξίσωση που προκύπτει ίση με μηδέν θα έχουμε βρει την μέγιστη τιμή της ισχύος. Δηλαδή:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (3-10)$$

Από την σχέση (3-10) προκύπτει:

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I}{V} \quad (3-11)$$

Όπου $\frac{dI}{dV}$ η αυξητική αγωγιμότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου και $-\frac{I}{V}$ η αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα.

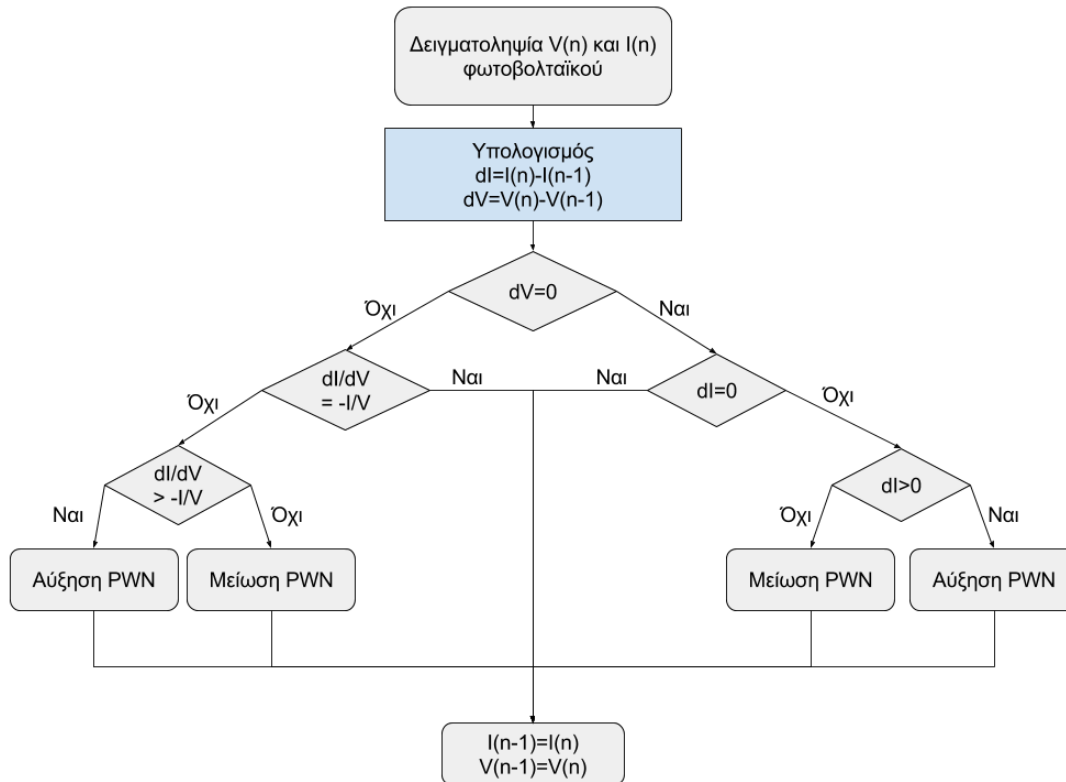
Η σχέση (3-11) αποτελεί την βάση λειτουργίας του αλγορίθμου της αυξητικής αγωγιμότητας. Υπολογίζοντας τα δύο μέρη της εξίσωσης από μετρήσεις που παίρνει από το φ/β πλαίσιο και συγκρίνοντάς τες, ο αλγόριθμος μπορεί να εκτιμήσει εάν το σημείο λειτουργία βρίσκεται δεξιά ή αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος, με συνέπεια να μπορεί να προβλέψει τι επίπτωση θα έχει στην παραγόμενη ισχύ μία αλλαγή της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος της αυξητικής αγωγιμότητας χρησιμοποιεί τις παρακάτω σχέσεις ελέγχου:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad (3-12)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (3-13)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (3-14)$$

Αν μετά την σύγκριση των όρων ισχύει η ισότητα (3-12) τότε ο αλγόριθμος δεν προκαλεί καμία αλλαγή στην τάση, καθώς το σημείο λειτουργίας του πλαισίου ταυτίζεται με το σημείο μέγιστης ισχύος. Ταυτόχρονα ελέγχεται και η μεταβολή του ρεύματος και οποιαδήποτε αλλαγή της σημαίνει αλλαγή της ακτινοβολίας, εφόσον η τάση παραμένει σταθερή. Αυτή η δυνατότητα να αντιλαμβάνεται τις περιβαλλοντικές αλλαγές αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας σε σχέση με τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης, καθώς λύνει το πρόβλημα της κακής απόδοσης σε γρήγορες μεταβολές των περιβαλλοντικών αλλαγών. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Αυξητικής Αγωγιμότητας

- **Άλλοι αλγόριθμοι**

Περίληπτικά κάποιες άλλες κατηγορίες αλγορίθμων είναι:

Αλγόριθμος Παρασιτικής Χωρητικότητας: Η στρατηγική έλεγχου αυτού του αλγορίθμου είναι η ίδια με αυτή του αλγορίθμου αυξητικής αγωγιμότητας με την διαφορά ότι στον υπολογισμό του ρεύματος λαμβάνεται υπόψιν και η επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας των φ/β κυψελών C_p . Η παρασιτική χωρητικότητα αναφέρεται στα συσσωρευμένα φορτία που συγκεντρώνονται στην επαφή των υλικών που αποτελούν την κυψέλη. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε σχέση με τον αλγόριθμο αυξητικής αγωγιμότητας σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλο αριθμό φ/β πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η παρασιτική αγωγιμότητα λαμβάνει αξιοσημείωτες τιμές.

Αλγόριθμος Σταθερής Τάσης: Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην παραδοχή ότι ο λόγος της τάσης μέγιστης ισχύος V_{MPP} και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} είναι

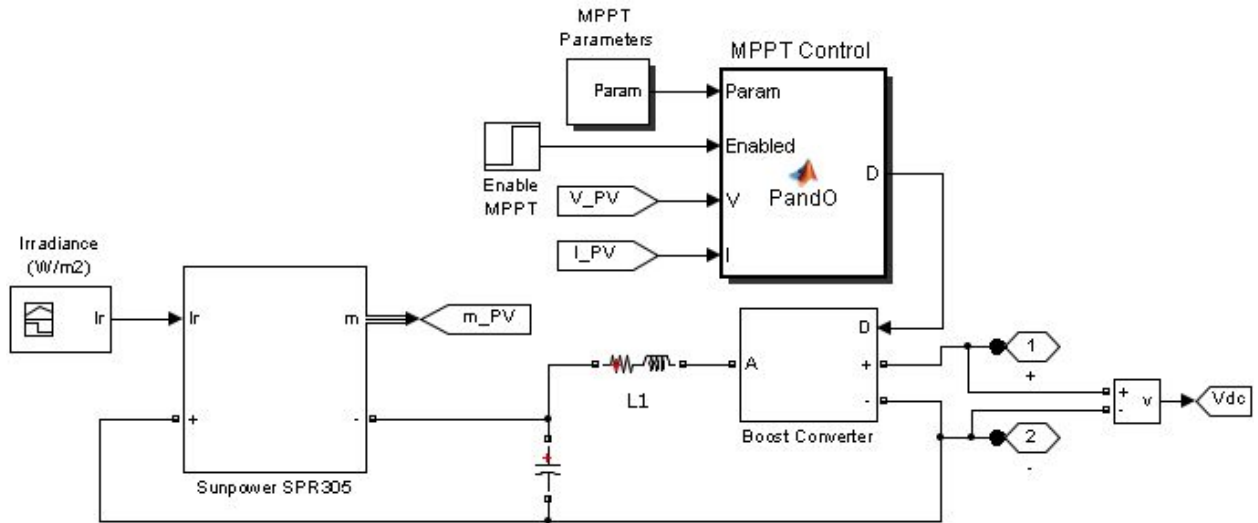
σχεδόν σταθερός. Η λειτουργία του περιληπτικά είναι: Προσωρινά απομονώνεται η φ/β συστοιχία και γίνεται μέτρηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} και στην συνέχεια, μετά την επανασύνδεση της συστοιχίας, ρυθμίζεται η τάση λειτουργίας έως ότου ο λόγος V_{MPP}/V_{OC} πάρει την προκαθορισμένη τιμή.

3.4 Προσομοίωση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3-1 έως 3-9, και κάνοντας την παραδοχή ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την προσομοίωση παραμένει σταθερή στους 25°C, μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή των παραμέτρων του μοντέλου για οποιαδήποτε φωτοβολταϊκή γεννήτρια του εμπορίου. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η γεννήτρια Sunpower SPR305 της οποίας τα χαρακτηριστικά παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3.2. Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων που δίνονται από τον κατασκευαστή στις σχέσεις της ενότητας 3.1 υπολογίστηκαν οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου [46]:

$$I_{ph} = 5.96, I_{sat} = 1.17 \cdot 10^{-8}, R_s = 0.037998, Q_d = 1.3$$

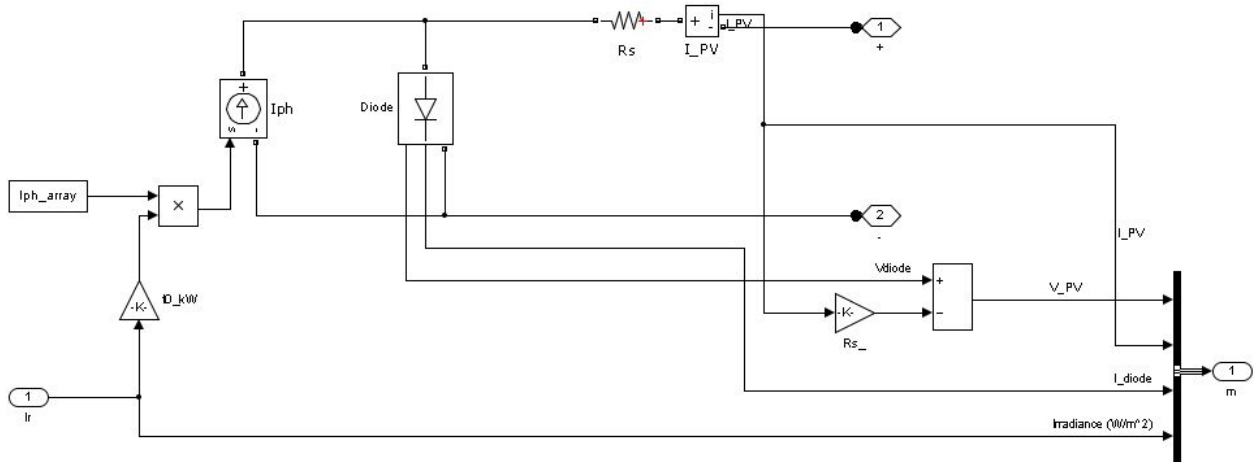
Στο σχήμα 3.8 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας που δέχεται σαν είσοδο την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας (I_r) και στην έξοδο δίνει τις τιμές της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού, καθώς και το ρεύμα της διόδου και την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας. Οι ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού συνδέονται στην συνέχεια με τον DC-DC μετατροπέα που ρυθμίζει την τάση έτσι ώστε η γεννήτρια να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Ο αλγόριθμος που ακολουθείται από τον συγκεκριμένο μετατροπέα είναι ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and observe) του οποίου το διάγραμμα ροής φαίνεται στο σχήμα 3.6 και η λειτουργία του παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3.2. Οι ακροδέκτες του DC-DC μετατροπέα στην συνέχεια μπορούν να συνδεθούν με έναν αντιστροφέα DC-AC ο οποίος θα παρείχε ρεύμα τριών φάσεων σε ένα πραγματικό φορτίο.



Σχήμα 3.8 Σχηματικό διάγραμμα της φ/β γεννήτριας και της διεπαφής της με το υπόλοιπο σύστημα.

3.4.1 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου μίας διόδου που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

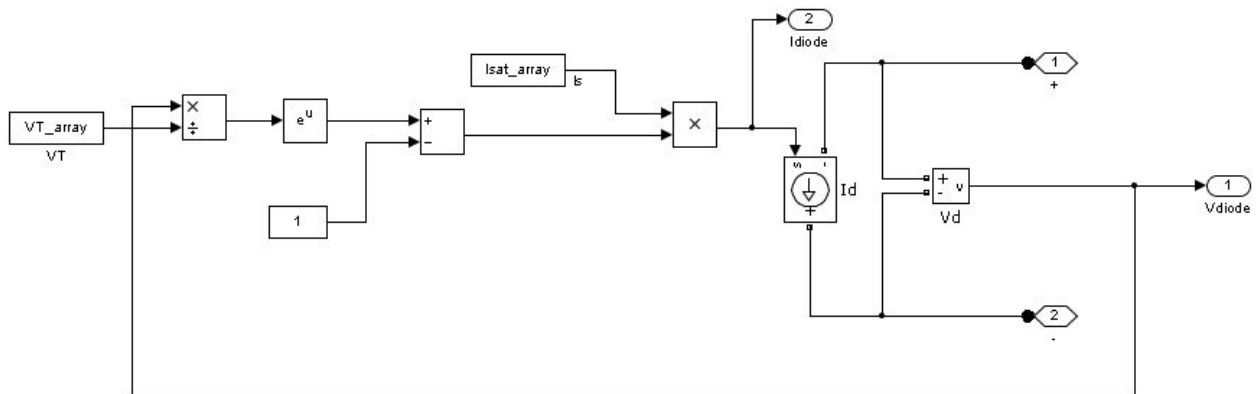


Σχήμα 3.9 Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου μίας διόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, αρχικά η είσοδος I_g , που αντιπροσωπεύει την ένταση της ακτινοβολίας την δεδομένη στιγμή, πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά $1/1000$ ($1/G_0$) και στην συνέχεια με μία σταθερά I_{ph_array} . Η τιμή της σταθεράς I_{ph_array} υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των παράλληλα συνδεδεμένων φ/β πλαισίων που έχουμε επιλέξει να αποτελούν την φ/β μας συστοιχία, και είναι πολλαπλάσιο της τιμής I_{sc} που δίνεται από τον κατασκευαστή. Αυτό το τελικό γινόμενο αποτελεί την είσοδο μίας οδηγούμενης πηγής ρεύματος I_{ph} η οποία αποτελεί την υλοποίηση του τύπου:

$$I_{ph} = G/G_0 \cdot I_{sc}$$

Το ρεύμα I_{ph} οδηγείται στην συνέχεια στην δίοδο και στην αντίσταση R_s . Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου που υλοποιεί την λειτουργία της διόδου.



Σχήμα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου της διόδου

Το μοντέλο της διόδου που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα υλοποιεί την σχέση

$$I_d = I_{sat} \cdot (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1)$$

Οι σταθερές V_T και I_{sat} υπολογίζονται και πάλι με βάση τον αριθμό των σε σειρά συνδεδεμένων κυψελών που έχουμε επιλέξει να αποτελούν το φ/β πλαίσιο και τον αριθμό των παράλληλα συνδεδεμένων φ/β πλαισίων που αποτελούν την φ/β συστοιχία αντίστοιχα. Η σταθερά V_T είναι πολλαπλάσια της τιμής V_T που υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

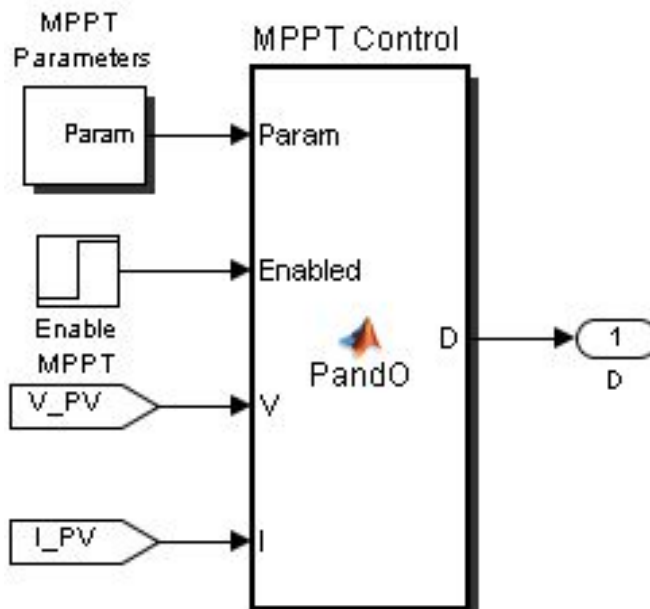
$$V_T = \frac{kT}{qQ_d(N_{cell}N_{ser})}$$

και η σταθερά I_{sat_array} είναι πολλαπλάσια της τιμής της I_{sat} που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_{sat} = \frac{I_{sc}}{e^{V_T}-1}$$

3.4.2 Το μοντέλο της μονάδας ελέγχου MPPT

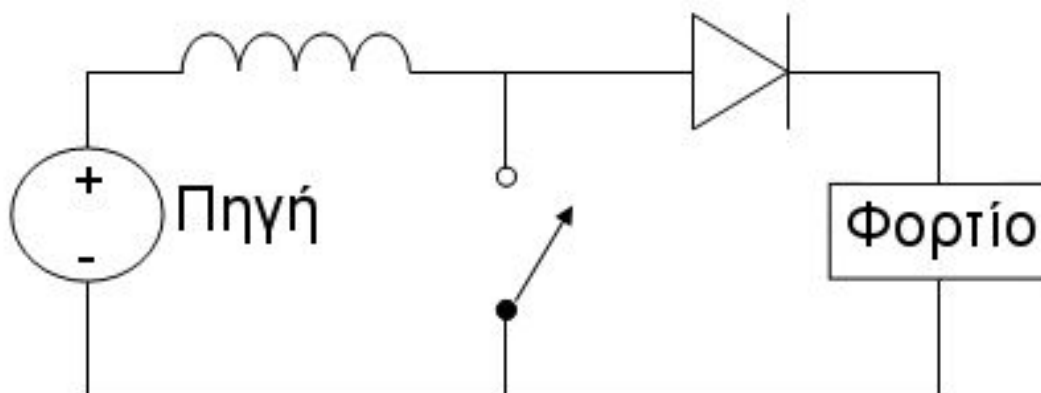
Το σύστημα εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος αποτελείται από δύο κύριες μονάδες. Ένα μετατροπέα DC-DC (Boost converter) και μία μονάδα ελέγχου του μετατροπέα. Στο σχήμα 3.11 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της μονάδας ελέγχου MPPT. Όπως φαίνεται στο σχήμα η μονάδα δέχεται σαν εισόδους την τάση του φ/β πλαισίου, το ρεύμα του φ/β πλαισίου, τις αρχικές τιμές των παραμέτρων της καθώς και ένα σήμα ενεργοποίησης (Enable MPPT). Η ίδια η μονάδα υλοποιήθηκε ως μία συνάρτηση Matlab, ο κώδικας της οποίας παρουσιάζεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας, η οποία ουσιαστικά υλοποιεί το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and observe) του σχήματος 3.6. Η έξοδος της μονάδας ελέγχου είναι ένα σήμα D το οποίο, όπως θα δούμε στην συνέχεια αποτελεί είσοδο του DC-DC μετατροπέα και ελέγχει την τάση εξόδου του.



Σχήμα 3.11 Το μοντέλο της μονάδας ελέγχου της MPPT.

3.4.3 Μετατροπές DC-DC

Ο Boost Converter, ή μετατροπές ανύψωσης είναι ένα παλμοτροφοδοτικό συνεχούς σε συνεχές ρεύμα που η τάση εξόδου του είναι μεγαλύτερη από την τάση στην είσοδο του παλμοτροφοδοτικού [47]. Ένας τέτοιος μετατροπές φαίνεται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Μετατροπές ανύψωσης Boost Converter

Όταν ο διακόπτης στο παραπάνω κύκλωμα είναι κλειστός (On), το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου. Στο πηνίο αποθηκεύεται ενέργεια με την μορφή μαγνητικού πεδίου. Το πηνίο αντιστέκεται στο ρεύμα, οπότε η πολικότητα του είναι θετική στο αριστερό άκρο και αρνητική στο δεξί άκρο.

Όταν ο διακόπτης ανοίξει (Off) το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται, αφού η συνολική αντίσταση του κυκλώματος μεγαλώνει. Το πηνίο θα χρησιμοποιήσει την ενέργεια που έχει αποθηκεύσει ώστε να αναιρέσει την μεταβολή του ρεύματος (που μικραίνει). Οπότε θα αντιστρέψει την πολικότητα του (αριστερό άκρο αρνητικό, δεξί θετικό). Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι η τάση της πηγής και του πηνίου να προστίθενται και ο πυκνωτής, μέσω της διόδου, να φορτίζεται σε μία τάση μεγαλύτερη της πηγής.

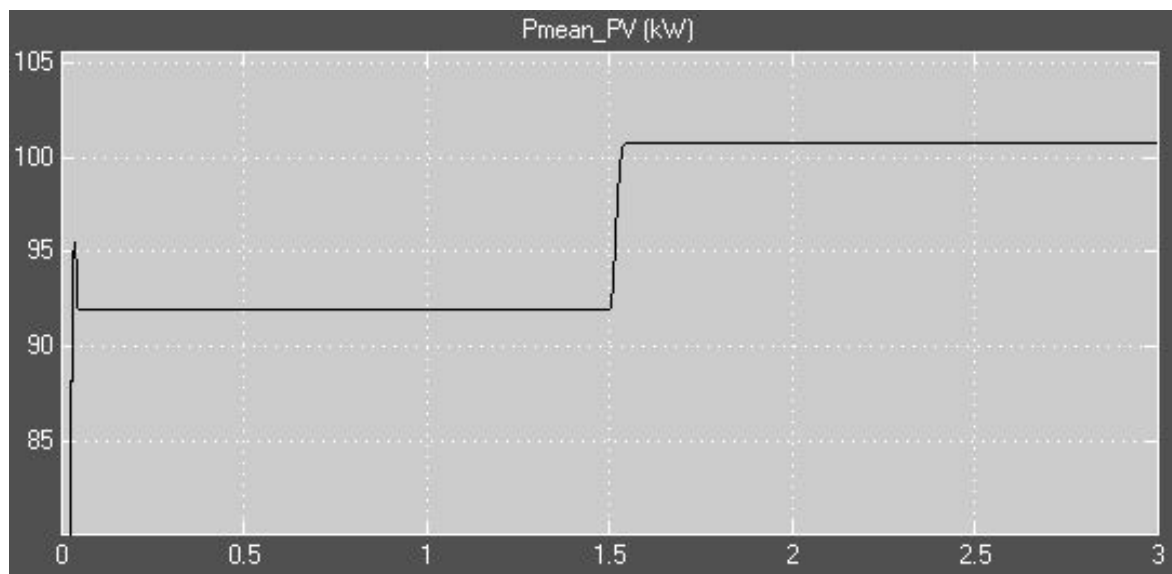
Η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη από αυτή της εισόδου. Όταν αλλάζει το εύρος της PWM αλλάζει και η τάση εξόδου. Όσο αυξάνεται ο χρόνος που είναι κλειστός ο διακόπτης, αυξάνεται και η τάση. Το εύρος της PWM καθορίζεται από το σήμα D που παράγεται από την μονάδα ελέγχου (σχήμα 3.11) και καθορίζει τον κύκλο εργασίας (duty circle).

3.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η φ/β γεννήτρια που παρουσιάστηκε παραπάνω υλοποιήθηκε με το εργαλείο Simulink του Matlab. Στα αποτελέσματα που ακολουθούν φαίνεται ότι η παραγόμενη ενέργεια είναι η αναμενόμενη. Επίσης φαίνεται η μεγάλη συνεισφορά του συστήματος MPPT στην παραγωγή της μέγιστης ισχύος. Το μοντέλο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία 330 φ/β πλαισίων που συνολικά παράγουν ισχύ 100 kW, ένα μετατροπέα DC-DC (Boost converter) και μία μονάδα ελέγχου του μετατροπέα που υλοποιεί τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης (Perturb and observe) για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

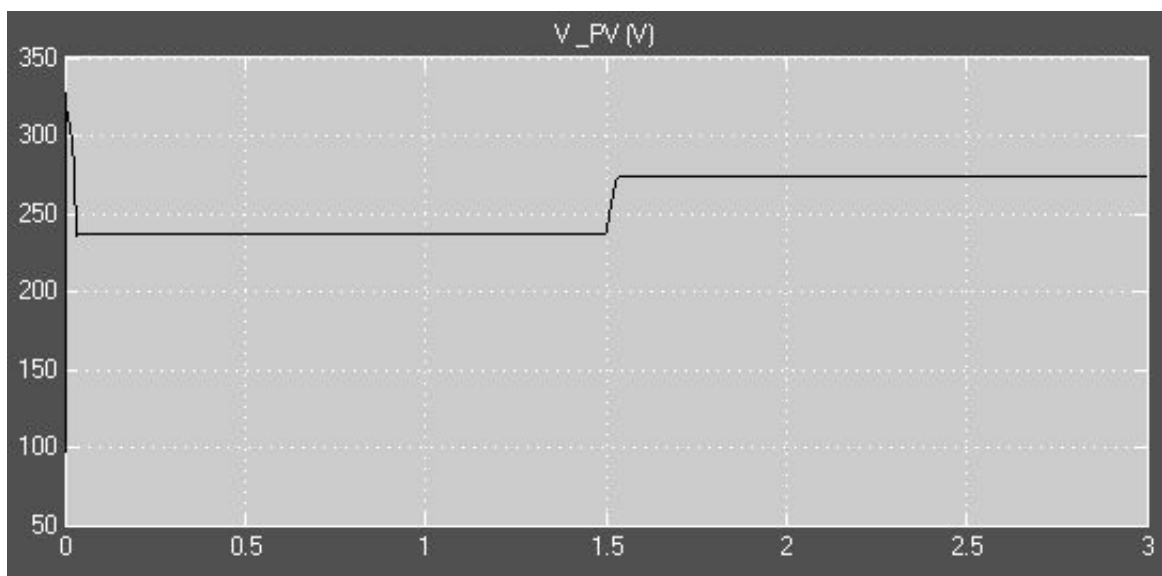
Στην πρώτη προσομοίωση (σχήμα 3.13-3.15) η ένταση της ακτινοβολίας ήταν σταθερή στα 1000 W/m², το φορτίο σταθερό και το σύστημα MPPT ενεργοποιήθηκε μετά από 1.5 μονάδες χρόνου από την έναρξη της προσομοίωσης. Στο σχήμα 3.13 φαίνεται η παραγόμενη ισχύς της φ/β γεννήτριας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η ισχύς που παράγεται πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος MPPT είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτή που θα έπρεπε να παράγεται (100 kW) για την ακτινοβολία που

δεχόταν η γεννήτρια. Αυτό αλλάζει μετά από 1.5 δευτερόλεπτα, όπου ενεργοποιείται το σύστημα MPPT και η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται στα επίπεδα που θα περιμέναμε.



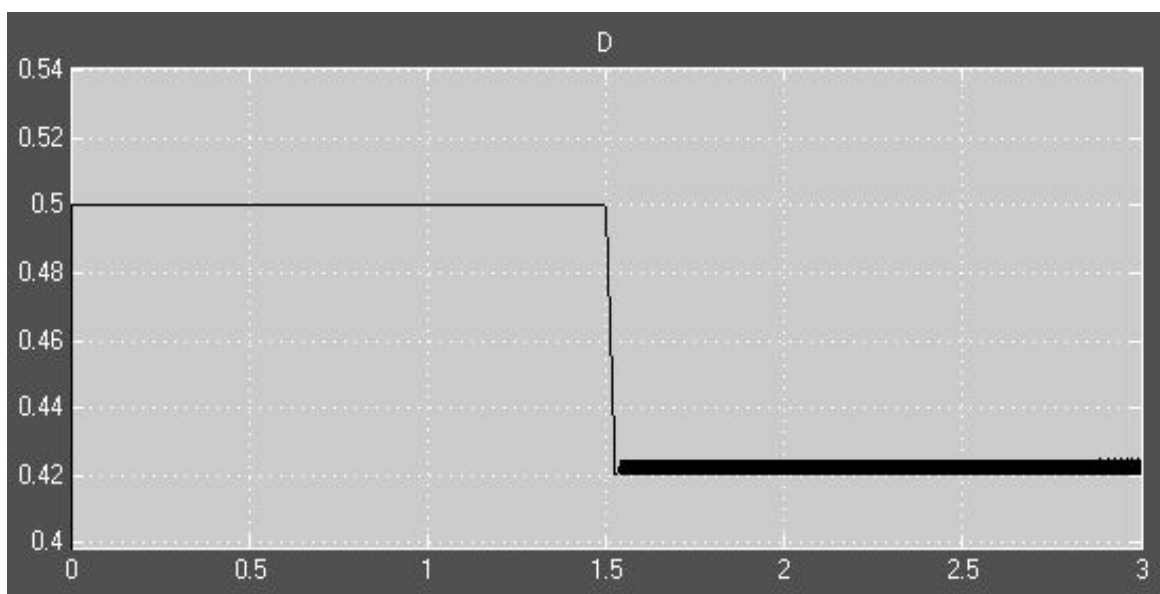
Σχήμα 3.13 Παραγόμενη ισχύς της φ/β γεννήτριας

Στο σχήμα 3.14 φαίνεται η μεταβολή στην τάση που προκλήθηκε από την ενεργοποίηση του MPPT μετά από 1.5 μονάδες χρόνου. Αυτή η μεταβολή της τάσης είχε σαν αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας να μετακινηθεί πάνω στην καμπύλη τάσης-ρεύματος έως ότου το σημείο λειτουργίας να συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ισχύος.



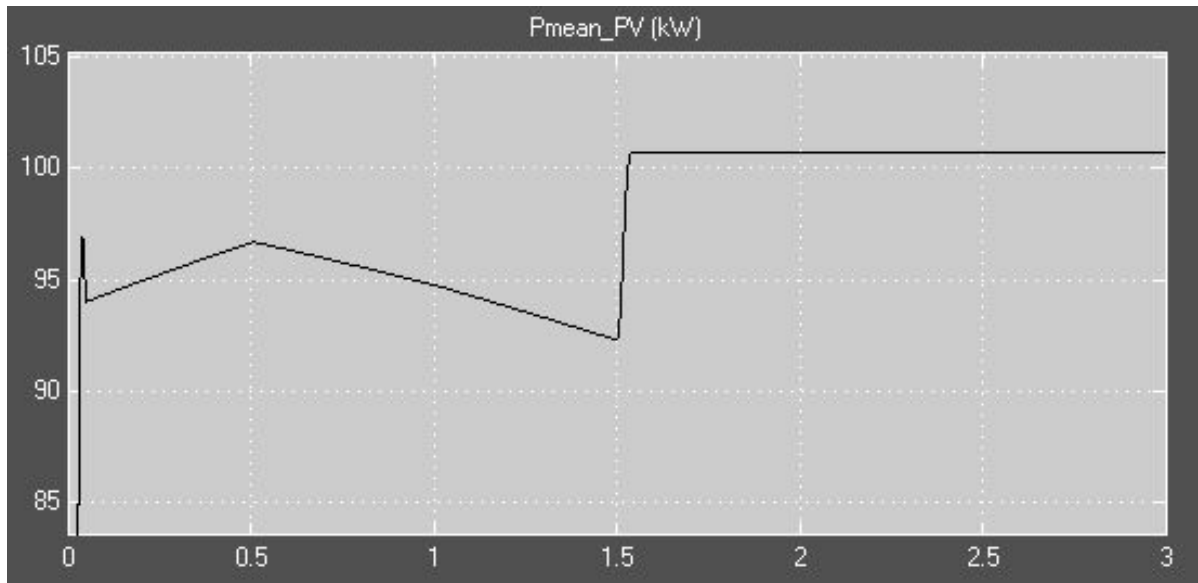
Σχήμα 3.14 Τάση της φ/β γεννήτριας

Στο σχήμα 3.15 φαίνεται η αντίστοιχη μεταβολή του κύκλου εργασίας (duty circle D) η οποία προκάλεσε την μεταβολή της τάσης που είδαμε παραπάνω. Στο σχήμα αυτό, μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ένα χαρακτηριστικό της λειτουργίας του αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.3.2. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ότι ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης στην πραγματικότητα δεν εντοπίζει ποτέ το σημείο μέγιστης ισχύος, αλλά αντίθετα προκαλεί μία ταλάντωση του σημείου λειτουργίας πολύ κοντά και γύρω από αυτό. Στο σχήμα 3.15 μπορούμε να παρατηρήσουμε αυτή την ταλάντωση μετά το 1.5 δευτερόλεπτο και αφού η τιμή του κύκλου εργασίας μεταβληθεί από την αρχική του τιμή 0.5 στα περίπου 0.42. Από το σημείο αυτό και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η τιμή του κύκλου εργασίας, άρα και της τάσης και της παραγόμενης ενέργειας, ταλαντώνεται κοντά στην τιμή 0.42 και ποτέ δεν σταθεροποιείται. Κάτι το οποίο είναι φυσικά αναμενόμενο.



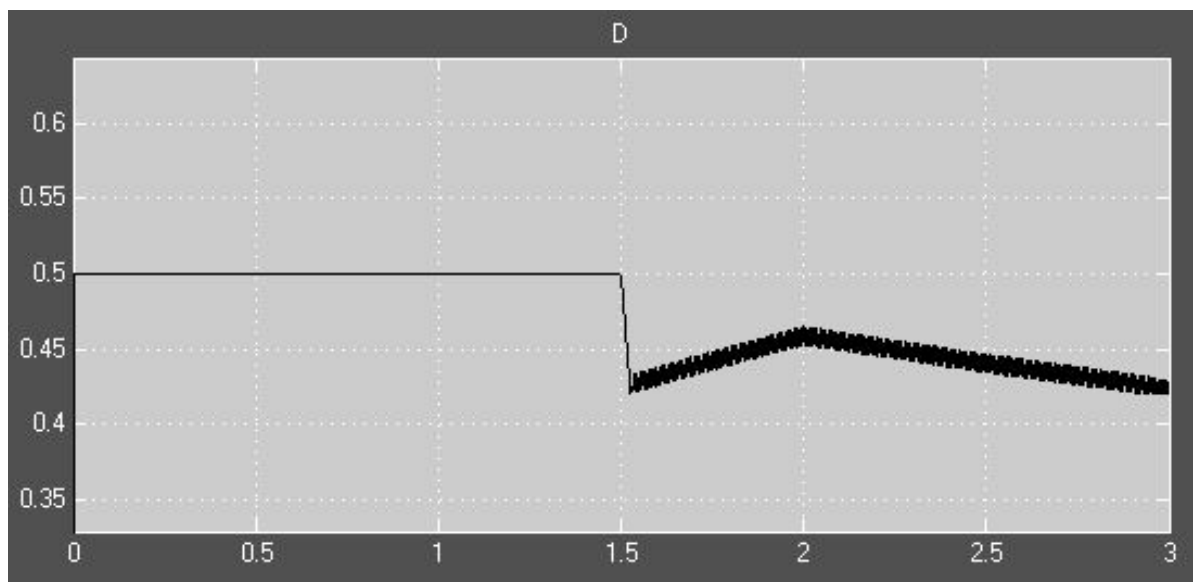
Σχήμα 3.15 Κύκλος εργασίας του μετατροπέα ανύψωσης

Στην δεύτερη προσομοίωση (σχήμα 3.16-3.18) η ένταση της ακτινοβολίας διατηρήθηκε σταθερή στα 1000 W/m² αλλά το φορτίο μεταβλήθηκε με σκοπό να φανεί η συνεισφορά του συστήματος MPPT στην διατήρηση της μέγιστης ισχύος ανεξαρτήτως φορτίου. Η μεταβολή του φορτίου από την στιγμή 1.5 έως την στιγμή 3 ήταν ακριβώς η ίδια με αυτή από 0 έως 1.5 μονάδες χρόνου. Στο σχήμα 3.16 φαίνεται η σημαντικότερη διαφορά στην παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας πριν και μετά την ενεργοποίηση του MPPT. Πριν την ενεργοποίησή του όχι μόνο η παραγόμενη ισχύς ήταν χαμηλότερη από αυτή των προδιαγραφών της γεννήτριας αλλά και μεταβαλλόταν ανάλογα με την μεταβολή του φορτίου, παρότι η ακτινοβολία ήταν σταθερή σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.16 Παραγόμενη ισχύς της φ/β γεννήτριας

Στο σχήμα 3.17 φαίνεται η μεταβολή του κύκλου εργασίας που προκάλεσε την λειτουργία της γεννήτριας στο σημείο μέγιστης ισχύος μετά το 1.5 δευτερόλεπτο της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.17 Κύκλος εργασίας του μετατροπέα ανύψωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Γεννήτρια Μικροτουρμπίνας

4.1 Εισαγωγή

Σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελούμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητη η παρουσία και κάποιου μέσου αποθήκευσης ενέργειας ή μίας εφεδρικής μονάδας παραγωγής, ώστε σε περίπτωση μη επαρκούς παραγωγής από την μονάδα ανανεώσιμων πηγών να υπάρχει η δυνατότητα κάλυψης του ελλείμματος ενέργειας. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση ενός τέτοιου συστήματος παραγωγής ενέργειας το οποίο λειτουργεί ως εφεδρικό της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι γεννήτριες οδηγούμενες από μικροτουρμπίνα (MTG), παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι συστημάτων MTG που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές και αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Το σύστημα MTG αποτελεί την μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας του υβριδικού συστήματος που αναλύεται σε αυτή την εργασία και τα βασικά μέρη που το αποτελούν είναι μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη οδηγούμενη από μία μικροτουρμπίνα καύσης βιοαερίου. Τέλος γίνεται η περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της μικροτουρμπίνας και της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης αυτών των μοντέλων στο περιβάλλον της Matlab.

Τα συστήματα MTG είναι μία αρκετά δημοφιλής επιλογή στα συστήματα διανεμημένης παραγωγής ενέργεια λόγω του μικρού τους μεγέθους, της υψηλής απόδοσης (με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας) και της γρηγορότερης απόκρισης σε σχέση με τις συμβατικές τουρμπίνες αερίου. Οι μικροτουρμπίνες έχουν την δυνατότητα καύσης ενός μεγάλου εύρους καυσίμων υψηλής ή χαμηλής πίεσης. Ενδεικτικά μία μικροτουρμπίνα μπορεί να λειτουργήσει με την καύση φυσικού αερίου, προπανίου και αερίων που παράγονται από απόβλητα ή εγκαταστάσεις υγειονομικής ταφής. Οι σύγχρονες μικροτουρμπίνες είναι η εξέλιξη των μικρών σε μέγεθος τουρμπίνων που συναντάμε στα οχήματα από την δεκαετία του 1950 και των κινητήρων που συναντάμε στα αεριωθούμενα αεροσκάφη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι σημερινές μικροτουρμπίνες να συνδυάζουν την αξιοπιστία των κινητήρων των αεροσκαφών με το μικρό κόστος των υπερσυμπιεστών των κινητήρων αυτοκινήτων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μοντελοποιηθεί ένα σύστημα MTG ενός ενιαίου άξονα και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε στο περιβάλλον της Matlab. Η προσομοίωση έγινε με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου κάτω από διαφορετικές συνθήκες φορτίου.

4.2 Σύστημα MTG

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες οι οποίες καίνε αέρια ή υγρά καύσιμα ώστε να δημιουργηθεί μία ροή αερίων πολύ υψηλής ενέργειας η οποία με την σειρά της περιστρέφει μία φτερωτή. Η περιστροφή της φτερωτής μεταφέρεται μέσω ενός ή περισσότερων αξόνων σε μία γεννήτρια από όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Το ενδιαφέρον για την χρήση τέτοιων συστημάτων είναι αυξανόμενο καθώς οι μικροτουρμπίνες μπορούν να εκκινηθούν γρήγορα για να καλύψουν τις απαιτήσεις ενέργειας ενός δικτύου σε ώρα αιχμής. Επίσης τα συστήματα MTG βρίσκουν εφαρμογή σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας εκτός κεντρικού δικτύου καθώς και σε εγκαταστάσεις ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας και θερμότητας (combined heat and power CHP), όπου η θερμότητα που αποβάλλεται από την εξάτμιση της μικροτουρμπίνας χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θερμικής ενέργειας ενός κτηρίου ή μίας βιομηχανικής εγκατάστασης [15] [26]-[28].

Γενικά η παραγόμενη ισχύς από τα συστήματα MTG κυμαίνεται από 30 KW έως 400 KW [13] [14] [25], την στιγμή που οι μεγάλες συμβατικές τουρμπίνες μπορούν να παράξουν από 500 KW έως πάνω από 300 MW [10] [48].

Οι μικροτουρμπίνες έχουν την δυνατότητα καύσης ενός μεγάλου εύρους καυσίμων είτε σε υψηλή είτε σε χαμηλή πίεση. Γενικά η αποδοτικότητά τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ πιο χαμηλή από μία γεννήτρια εσωτερικής καύσης αντίστοιχου μεγέθους. Μία μικροτουρμπίνα χωρίς εναλλάκτη θερμότητας έχει απόδοση που κυμαίνεται από 15 έως 17%, την στιγμή που μία γεννήτρια εσωτερικής καύσης μπορεί να είναι έως και 37% αποδοτική. Παρ' όλα αυτά, λόγω της απλότητας του σχεδιασμού τους και των σχετικά λιγότερων κινούμενων μερών τους, οι μικροτουρμπίνες έχουν το πλεονέκτημα της απλούστερης εγκατάστασής, της μεγαλύτερης αξιοπιστίας, της μειωμένης παραγωγής θορύβου και δονήσεων, χαμηλότερου κόστους συντήρησης, χαμηλότερων εκπομπών καυσαερίων και πιθανόν χαμηλότερου απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου [13] [15] [28]. Συγκεκριμένα οι εκπομπές καυσαερίων μίας μικροτουρμπίνας είναι έως και οκτώ φορές χαμηλότερες

από αυτές μίας γεννήτριας diesel, και οι εκπομπές NOx έως και 50% χαμηλότερες από μια σύγχρονη γεννήτρια καύσης φυσικού αερίου [15].

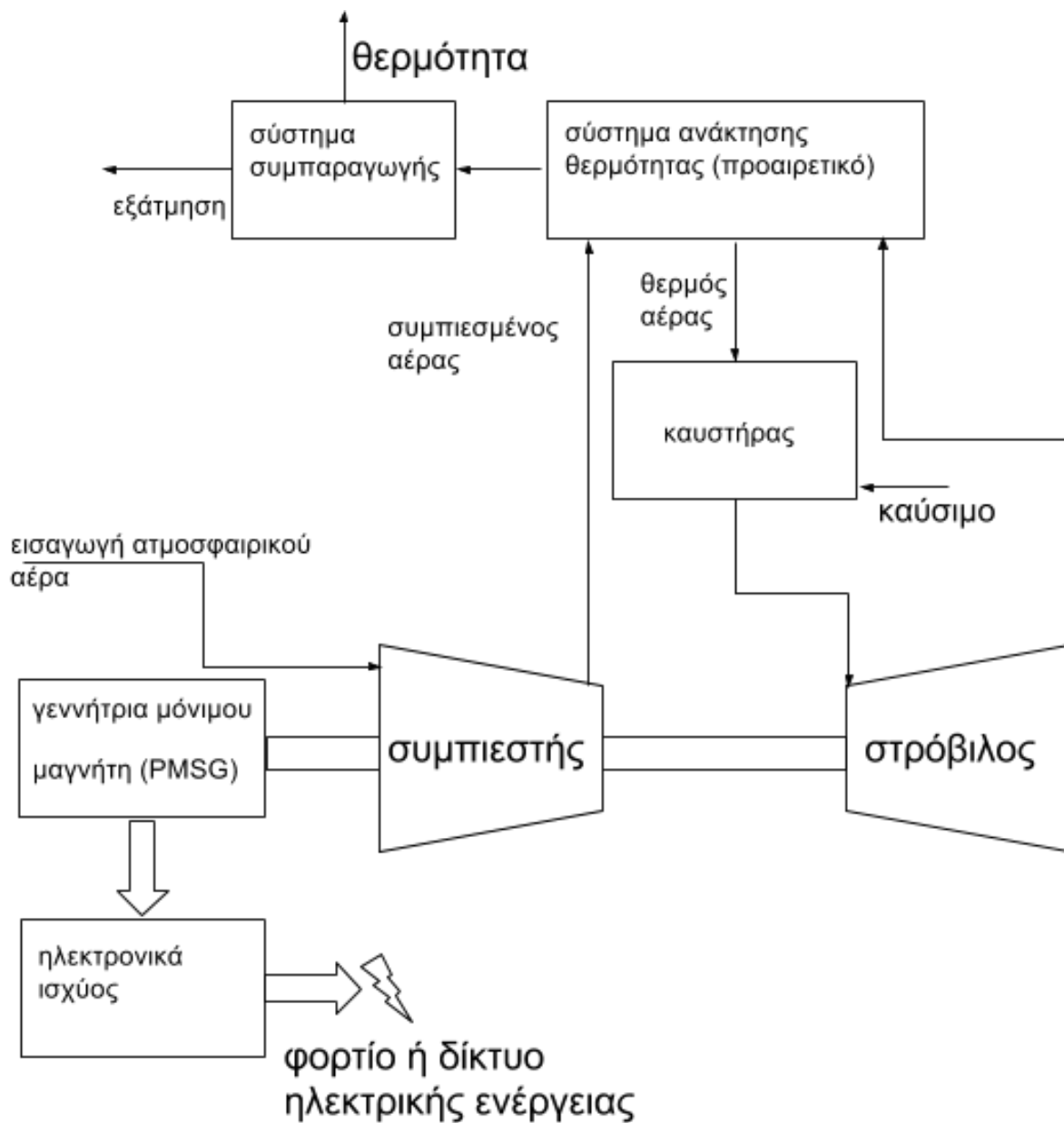
4.2.1 Τύποι συστημάτων MTG

Τα συστήματα MTG διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στα συστήματα ενός ενιαίου άξονα και τα συστήματα δύο αξόνων. Στην περίπτωση του ενός ενιαίου άξονα η φτερωτή της μικροτουρμπίνας συνδέεται απευθείας με την γεννήτρια μέσω ενός ενιαίου άξονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η γεννήτρια να περιστρέφεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες της τάξης των 100.000 στροφών το λεπτό, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να είναι πολύ μεγάλης συχνότητας. Έτσι στα συστήματα ενός άξονα είναι απαραίτητη η παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος που ρυθμίζουν την συχνότητα της παραγόμενης ενέργειας ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα συμβατικό φορτίο.

Στα συστήματα δύο αξόνων, μεταξύ της μικροτουρμπίνας και την γεννήτριας, παρεμβάλλεται ένα κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο μπορεί να ρυθμίσει την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η γεννήτρια. Τα συστήματα αυτά δεν απαιτούν την παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς η συχνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατάλληλη για χρήση, 60 ή 50 HZ [4.17 MTG]. Το μειονέκτημα όμως των συστημάτων δύο αξόνων είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό τους και η παρουσία περισσότερων κινούμενων μερών σε σχέση με τα συστήματα ενός άξονα. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα σύστημα ενός ενιαίου άξονα.

4.2.2 Βασική λειτουργία συστημάτων MTG

Ένα σύστημα MTG αποτελείται από τα εξής βασικά εξαρτήματα: τον συμπιεστή, την τουρμπίνα, τον εναλλάκτη θερμότητας, την γεννήτρια και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αυτή την ενότητα δίνεται μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω εξαρτημάτων και παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση της μικροτουρμπίνας. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος MTG ενός άξονα, με τα μέρη που το αποτελούν και την μεταξύ τους διασύνδεση.



Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος MTG ενός άξονα

Η λειτουργία των μικροτουρμπίνων, όπως και των μεγάλων τουρμπίνων αερίων, βασίζεται στον θερμοδυναμικό κύκλο του Brayton [15]. Σε αυτό τον κύκλο ο ατμοσφαιρικός αέρας από το στόμιο της εισαγωγής συμπιέζεται από τον στρόβιλο του συμπιεστή. Ο συμπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με το καύσιμο και καίγεται στον καυστήρα. Το καυτό συμπιεσμένο αέριο που παράγεται από την καύση αποσυμπιέζεται στον στρόβιλο περιστρέφοντάς τον και περιστρέφοντας μαζί του τον συμπιεστή και την

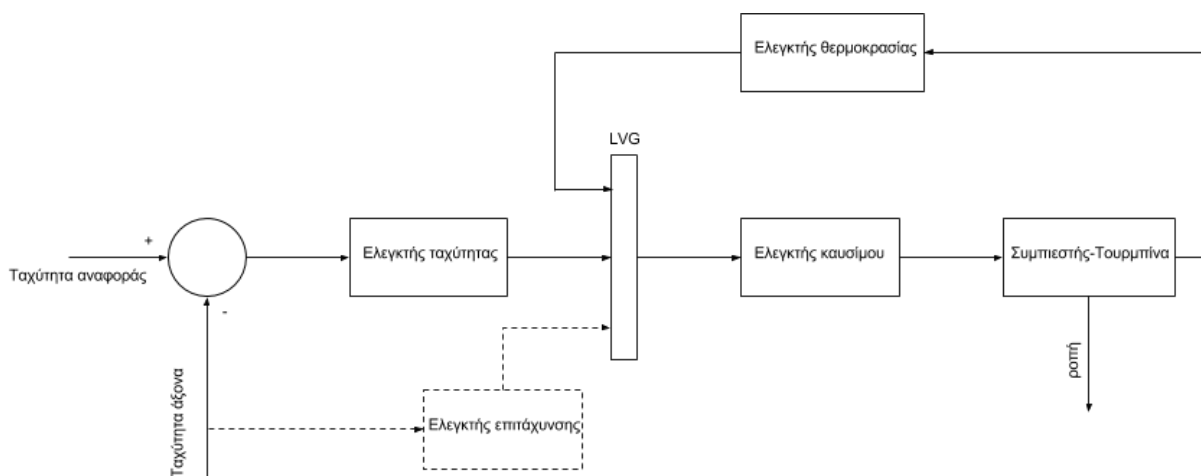
γεννήτρια μέσω ενός ενιαίου άξονα (υλοποίηση μικροτουρμπίνας ενιαίου άξονα). Σε μία τυπική μικροτουρμπίνα το καυσαέριο μετά από τον στρόβιλο οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου βοηθάει στην προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την καύση του, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Ένα σύστημα υψηλής ταχύτητας ενιαίου άξονα συνήθως διαθέτει μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG), και προϋποθέτει την μετατροπή της υψηλής συχνότητας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια συχνότητας 50 ή 60 Hz για γενική χρήση. Αυτή η μετατροπή περιλαμβάνει έναν ανορθωτή από υψηλής συχνότητας AC σε DC και στην συνέχεια μετατροπή του DC σε AC συχνότητας 50 ή 60 Hz μέσω ενός inverter. Η παρουσία αυτών των ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη σε ένα σύστημα ενιαίου άξονα καθώς είναι σχεδιασμένα να αποτρέπουν και απότομες αλλαγές τάσης [15].

Το μοντέλο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνει υπόψιν του την εκκίνηση της τουρμπίνας, τον τερματισμό λειτουργίας της ή τις βλάβες και τις απώλειες ενέργειας καθώς αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η συμπεριφορά του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Επίσης στο μοντέλο δεν περιλαμβάνεται ο εναλλάκτης θερμότητας καθώς δεν επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της μικροτουρμπίνας, παρά μόνο την ενεργειακή απόδοσή της [29].

4.3 Μαθηματική μοντελοποίηση της μικροτουρμπίνας

Έχει υπάρξει εκτεταμένη έρευνα πάνω στην μοντελοποίηση τουρμπίνων και η διαθέσιμη βιβλιογραφία καλύπτει μεγάλο εύρος μοντέλων διαφορετικής πολυπλοκότητας που ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο που προτάθηκε από τον Rowen [9], το οποίο είναι ένα μοντέλο συστήματος MTG ενός άξονα, γεννήτριας οδηγούμενης από τουρμπίνα. Το υποσύστημα της τουρμπίνας (σχήμα 4.2) περιλαμβάνει σύστημα ελέγχου ταχύτητας, θερμοκρασίας και ροής καυσίμου. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει υιοθετηθεί από πολλούς ερευνητές στην προσομοίωση τουρμπίνων καύσης αερίων [11] [49] [10] [48] και στην προσομοίωση μικροτουρμπίνων [13] [14] [50].



Σχήμα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα μικροτουρμπίνας

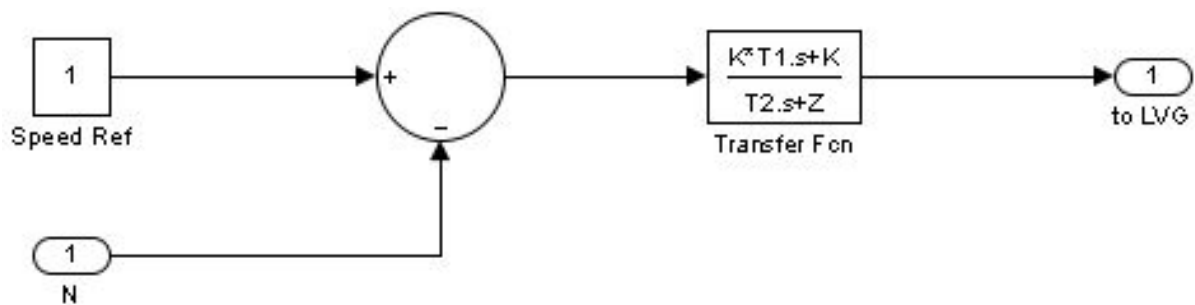
Οι τρεις συναρτήσεις ελέγχου μίας μικροτουρμπίνας είναι: ελεγκτής ταχύτητας ο οποίος επιδρά κάτω από συνθήκες μερικού φορτίου για την διατήρηση μίας ταχύτητας αναφοράς, ο ελεγκτής θερμοκρασίας ο οποίος λειτουργεί ως όριο μέγιστης ισχύος που μπορεί να παράξει η μικροτουρμπίνα και ο ελεγκτής επιτάχυνσης ο οποίος αποτρέπει την περιστροφή της μικροτουρμπίνας σε υπερβολικές ταχύτητες. Η έξοδος των τριών παραπάνω συναρτήσεων ελέγχου οδηγούνται σε μία πύλη ελάχιστης τιμής (LVG) από όπου εξάγεται η μικρότερη από τις τρεις τιμές εξόδου των ελεγκτών. Η έξοδος της LVG αποτελεί την ελάχιστη ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την λειτουργία της μικροτουρμπίνας την συγκεκριμένη στιγμή. Τα υποσυστήματα του σχήματος 4.2 αναλύονται στην συνέχεια. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με μονάδα μέτρησης p.u., γεγονός που επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή του σε συστήματα διαφορετικών προδιαγραφών [9].

4.3.1 Υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας και επιτάχυνσης

Η λειτουργία του ελεγκτή ταχύτητας λειτουργεί με βάση την διαφορά μεταξύ μιας ταχύτητας αναφοράς (1 p.u.) και της πραγματικής ταχύτητας του άξονα της μικροτουρμπίνας (N), και αποτελεί το κύριο σύστημα ελέγχου όταν η μικροτουρμπίνα λειτουργεί σε συνθήκες μερικού φορτίου. Συνήθως οι ελεγκτές ταχύτητας μοντελοποιούνται με την χρήση μίας συνάρτησης μεταφοράς lead-lag [9] ή με έναν ελεγκτή PID [49]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μίας συνάρτηση μεταφοράς lead-lag για την μοντελοποίησή του, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Η σταθερά K του

σχήματος αναπαριστά το κέρδος του ελεγκτή, οι σταθερές T_1 , T_2 είναι οι σταθερές χρόνου lead και lag αντίστοιχα, και η σταθερά Z καθορίζει τον τύπο του ελεγκτή (droop ή ισόχρονος). Σε έναν ελεγκτή τύπου droop η έξοδος είναι ευθέως ανάλογη της εισόδου, της διαφοράς δηλαδή μεταξύ πραγματικής ταχύτητας και ταχύτητας αναφοράς. Σε έναν ισόχρονο ελεγκτή η έξοδος αλλάζει ευθέως ανάλογα με την είσοδο του και υπολογίζεται ως το άθροισμα με κάποια σταθερά reset.

Ο ελεγκτής επιτάχυνσης χρησιμοποιείται κυρίως κατά την εκκίνηση του συστήματος και η χρησιμότητά του είναι να αποτρέψει την περιστροφή του άξονα σε υπερβολικές ταχύτητες. Όταν όμως η ταχύτητα λειτουργίας της μικροτουρμπίνας βρίσκεται πολύ κοντά στην μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα, ο ελεγκτής επιτάχυνσης μπορεί να παραλειφθεί [9], όπως και συμβαίνει στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.3 Ελεγκτής ταχύτητας της μικροτουρμπίνας.

4.3.2 Υποσύστημα καυσίμου

Το υποσύστημα καυσίμου αποτελείται από την βαλβίδα καυσίμου και από τον ενεργοποιητή του συστήματος και η έξοδός του διαμορφώνεται από την αδράνεια αυτών των δύο εξαρτημάτων [9] [49], η οποία υπολογίζεται παρακάτω.

Η συνάρτηση μεταφοράς που αντιπροσωπεύει την αδράνεια της βαλβίδας καυσίμου είναι [50]:

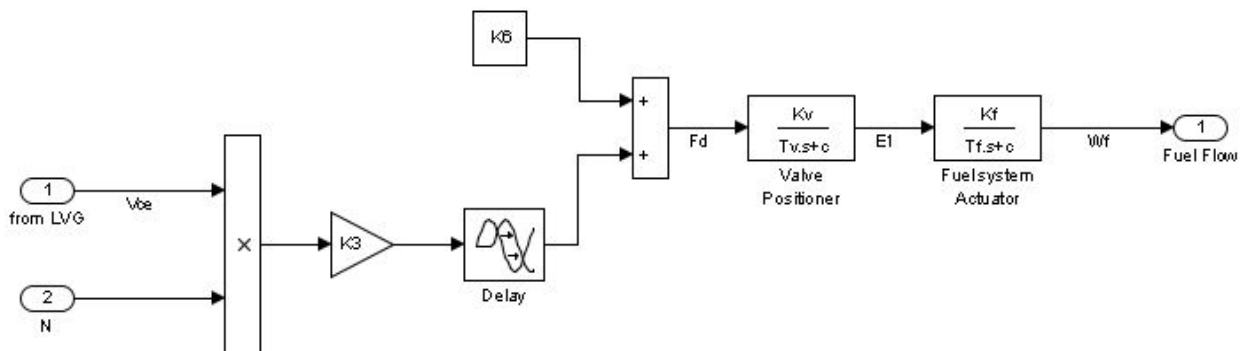
$$E_1 = \frac{K_v}{T_v s + c} F_d \quad (4-1)$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς για την αδράνεια του ενεργοποιητή του συστήματος καυσίμου είναι [50]:

$$W_f = \frac{K_f}{T_f s + c} E_1 \quad (4-2)$$

Στις σχέσεις (4-1), (4-2) K_v και K_f είναι οι σταθερές κέρδους του κάθε ελεγκτή, T_v , T_f είναι οι σταθερές χρόνου των ελεγκτών, F_d και E_1 είναι η είσοδος και η έξοδος αντίστοιχα της βαλβίδας καυσίμου και W_f είναι η κατανάλωση καυσίμου για την λειτουργία της μικροτουρμπίνας σε μονάδες μέτρησης per unit (p.u.).

Η είσοδος V_{CE} του υποσυστήματος αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου για την λειτουργία της μικροτουρμπίνας την κάθε στιγμή, και προέρχεται από την έξοδο της πύλης ελάχιστης τιμής (LVG). Η τιμή αυτής της εισόδου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τιμή της μηχανικής ισχύος της μικροτουρμπίνας σε σταθερή λειτουργία. Η δεύτερη είσοδος (N) του υποσυστήματος είναι η ταχύτητα του άξονα, επίσης σε μονάδες μέτρησης per unit. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, το γινόμενο των εισόδων πολλαπλασιάζεται με την σταθερά K_3 , όπου $K_3=1-K_6$, και μετά από μία χρονική καθυστέρηση προστίθεται με την σταθερά K_6 . Η σταθερά K_6 αντιπροσωπεύει την ποσότητα καυσίμου (p.u.) που απαιτείται για την λειτουργία της μικροτουρμπίνας σε συνθήκες μηδενικού φορτίου και ουσιαστικά διασφαλίζει την συνεχή λειτουργία της κάτω από όλες τις συνθήκες.



Σχήμα 4.4 Σχηματικό διάγραμμα του υποσυστήματος καυσίμου

4.3.3 Υποσύστημα συμπιεστή και τουρμπίνας

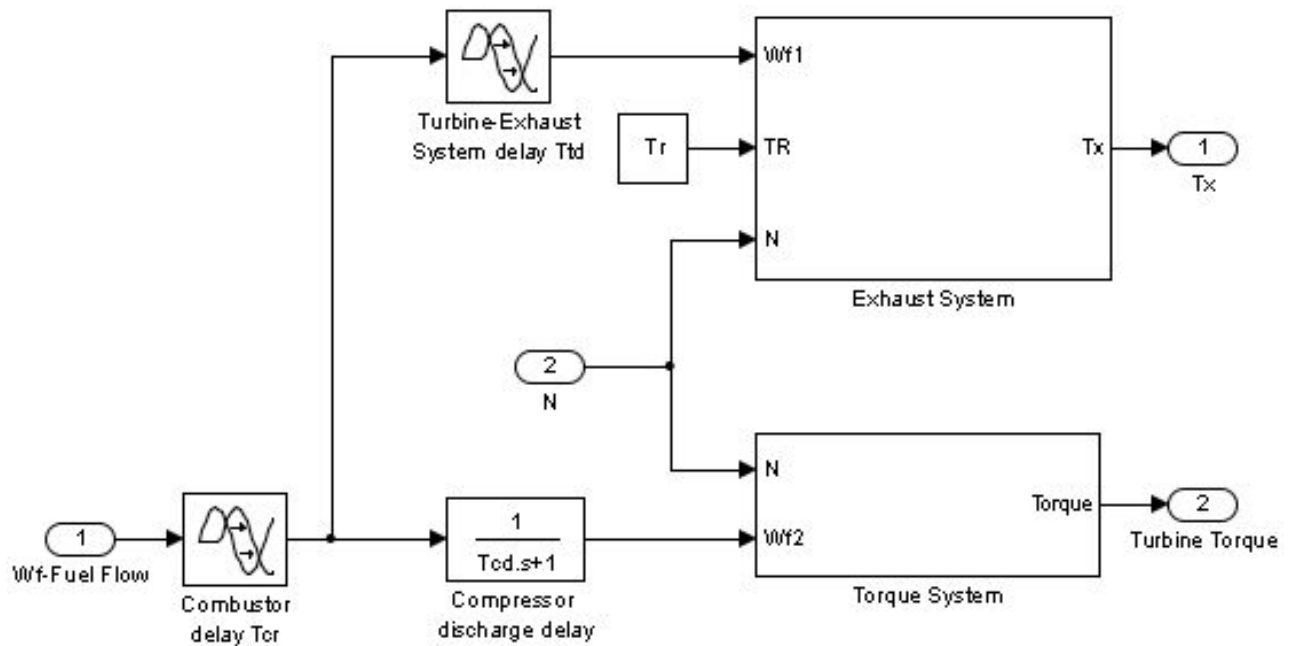
Το κυριότερο υποσύστημα της μικροτουρμπίνας είναι το υποσύστημα συμπιεστή-τουρμπίνας, και ουσιαστικά είναι ένα γραμμικό, μη δυναμικό σύστημα [9]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, αρχικά επιβάλλεται στην είσοδο W_f μία χρονική καθυστέρηση T_{CR} , η οποία σχετίζεται με τον χρόνο καύσης των αέριων καυσίμων. Στην συνέχεια στο σήμα εφαρμόζονται οι χρονικές καθυστερήσεις T_{CD} και T_{TD} οι οποίες σχετίζονται με την καθυστέρηση αποσυμπίεσης των αερίων από τον συμπιεστή προς την τουρμπίνα και την καθυστέρηση διέλευσης των αποσυμπιεσμένων αερίων από την τουρμπίνα προς το σύστημα εξαγωγής αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5, σε μία μικροτουρμπίνα τύπου ενός ενιαίου άξονα, οι τιμές της ροπής και της θερμοκρασίας καυσαερίων έχουν γραμμική σχέση με την ροή καυσίμου και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μικροτουρμπίνας. Στα σχήματα 4.6 και 4.7 φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα που υλοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις θερμοκρασίας καυσαερίων και ροπής αντίστοιχα [9]:

$$Torque = K_{HHV}(W_{f2} - 0.23) + 0.5(1 - N) \quad (Nm) \quad (4-3)$$

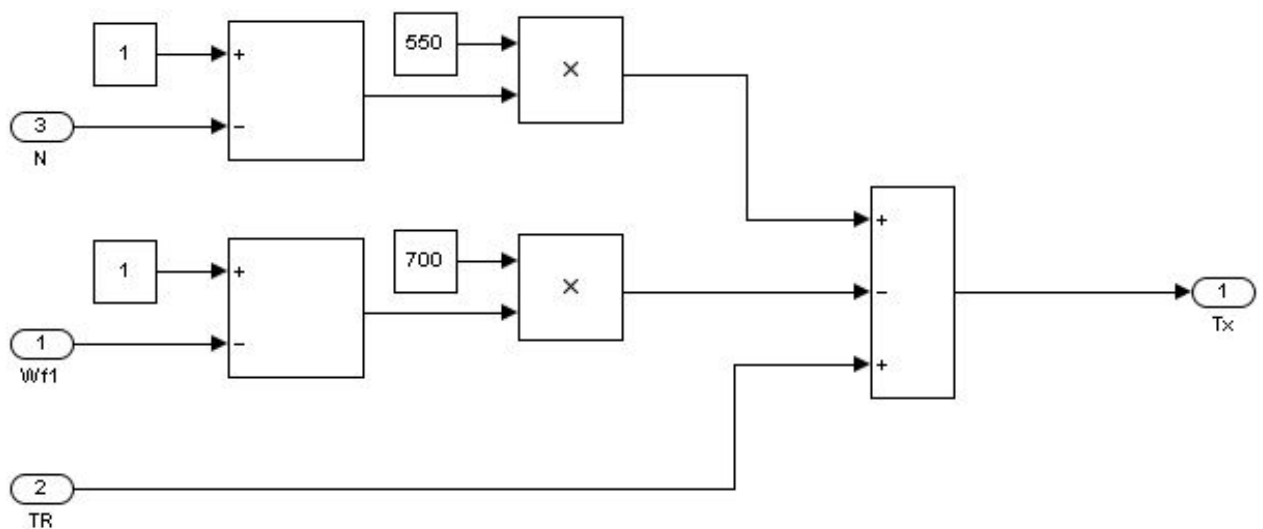
$$T_x = T_R - 700(1 - W_{f1}) + 550(1 - N) \quad (Fahrenheit) \quad (4-4)$$

όπου K_{HHV} είναι ένας παράγοντας η τιμή του οποίου εξαρτάται από την ενθαλπία της ροής αερίων στον θάλαμο καύσης και T_R είναι η θερμοκρασία αναφοράς των καυσαερίων [9] [10]. Η σταθερά K_{HHV} και η σταθερά 0.23 στην εξίσωση υπολογισμού της ροπής καθορίζουν τον λόγο ισχύος/καυσίμου, ο οποίος αυξάνεται γραμμικά από το σημείο μηδενικής ισχύος/23% ροής καυσίμου έως το σημείο μέγιστης ισχύος/100% ροής καυσίμου.

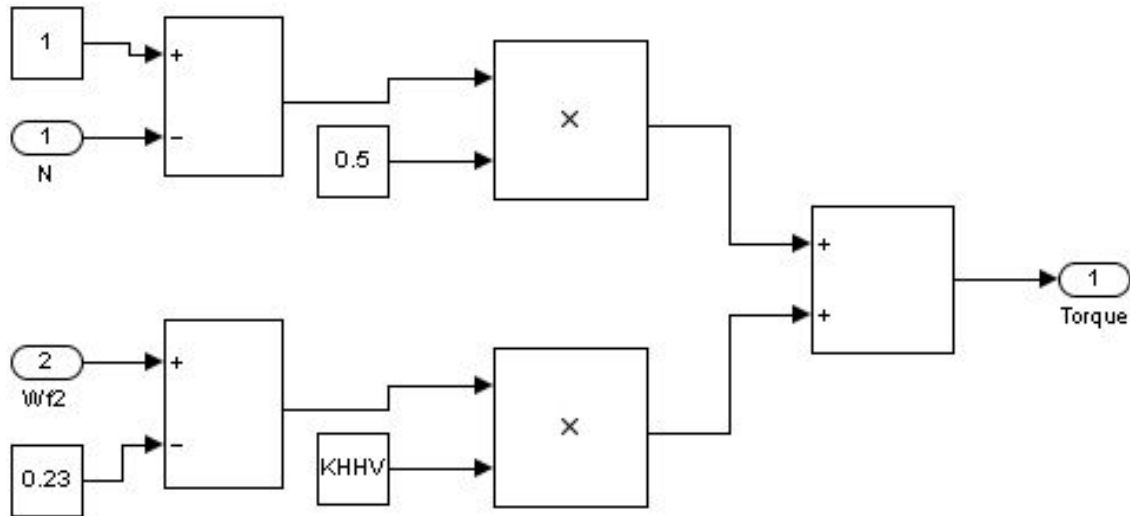
Η είσοδος του υποσυστήματος συμπιεστή-τουρμπίνας είναι η ροή καυσίμου W_f και οι έξοδοι είναι η παραγόμενη ροπή σε μονάδες μέτρησης per unit και η θερμοκρασία των καυσαερίων σε βαθμούς fahrenheit.



Σχήμα 4.5 Σχηματικό διάγραμμα του υποσυστήματος συμπιεστή-τουρμπίνας



Σχήμα 4.6 Σχηματικό διάγραμμα της εξίσωσης του συστήματος εξαγωγής καυσαερίων

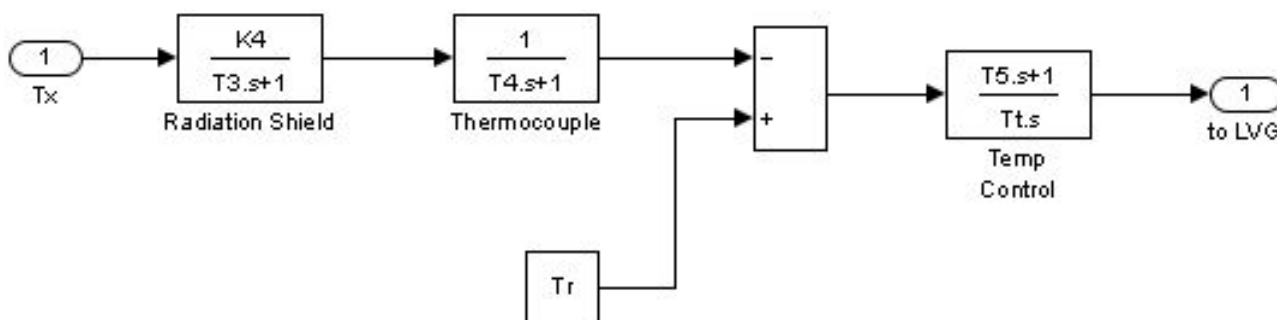


Σχήμα 4.7 Σχηματικό διάγραμμα της συνάρτησης υπολογισμού της ροπής

4.3.4 Υποσύστημα ελέγχου θερμοκρασίας

Το υποσύστημα ελέγχου θερμοκρασίας είναι το μέσο το οποίο διασφαλίζει την λειτουργία της μικροτουρμπίνας μέχρι κάποιο ανώτερο όριο θερμοκρασίας καυσαερίων. Η λειτουργία του ελεγκτή θερμοκρασίας βασίζεται μόνο στην θερμοκρασία των παραγόμενων καυσαερίων και όχι στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος ή τα χαρακτηριστικά των καυσίμων. Το καύσιμο που καίγεται στον καυστήρα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ροπής από την τουρμπίνα και θερμοκρασίας καυσαερίων, όπως είδαμε και στην ενότητα 4.3.3. Η θερμοκρασία που παράγεται από το υποσύστημα συμπιεστή-τουρμπίνας περνάει από ένα θερμοστοιχείο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Στην συνέχεια συγκρίνεται με μία θερμοκρασία αναφοράς T_R η οποία συνήθως είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία των καυσίμων. Έτσι η έξοδος του υποσυστήματος συνήθως έχει μεγάλες τιμές, γεγονός που επιτρέπει στο σήμα ελέγχου ταχύτητας να περάσει από την LVG. Όταν όμως η θερμοκρασία των καυσίμων ξεπεράσει την θερμοκρασία αναφοράς η διαφορά μετά την σύγκρισή τους γίνεται αρνητική και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η έξοδος του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας να αρχίζει να μειώνεται. Αν συνεχιστεί αυτή η μείωση, δηλαδή αν η θερμοκρασία καυσίμων παραμείνει μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αναφοράς για μεγάλο χρονικό διάστημα, κάποια στιγμή η έξοδος του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας θα είναι μικρότερη από την έξοδο του συστήματος ελέγχου της ταχύτητας. Οπότε από την LVG θα περάσει το σήμα ελέγχου του υποσυστήματος

ελέγχου της θερμοκρασίας και από εκείνη την στιγμή η μικροτουρμπίνα θα λειτουργεί σε κατάσταση περιορισμού της θερμοκρασίας παράγοντας μικρότερη ισχύ και μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής της.



Σχήμα 4.8 Σχηματικό διάγραμμα του υποσυστήματος ελέγχου θερμοκρασίας

4.4 Η γεννήτρια το συστήματος MTG

Τα συστήματα μικροτουρμπίνας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μίας γεννήτριας υψηλής ταχύτητας η οποία περιστρέφεται απευθείας από τον άξονα της τουρμπίνας και του συμπιεστή. Οι μικρές τουρμπίνες αερίων ωφελούνται ιδιαίτερα από την απουσία του κιβωτίου ταχυτήτων που επιβραδύνει την περιστροφή της γεννήτριας σε συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας. Η απουσία του κιβωτίου ταχυτήτων έχει σαν αποτέλεσμα ένα σύστημα πιο αποδοτικό, με μεγαλύτερη αξιοπιστία και μικρότερο μέγεθος το οποίο περιστρέφεται από 30.000 στροφές/λεπτό έως και 100.000 στροφές/λεπτό. Υψηλής ενέργειας μόνιμοι μαγνήτες και υλικά υψηλής αντοχής διαρρών όπως οι μαγνήτες σαμάρου-κοβαλτίου έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα κατάλληλα για ηλεκτρικές γεννήτριες υψηλής ταχύτητας [15] [26] [27] [28] [31].

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (PMSM) καθώς και μία σύντομη περιγραφή του τρόπου κατασκευής, των υλικών που χρησιμοποιούνται και του τρόπου λειτουργίας των PMSM.

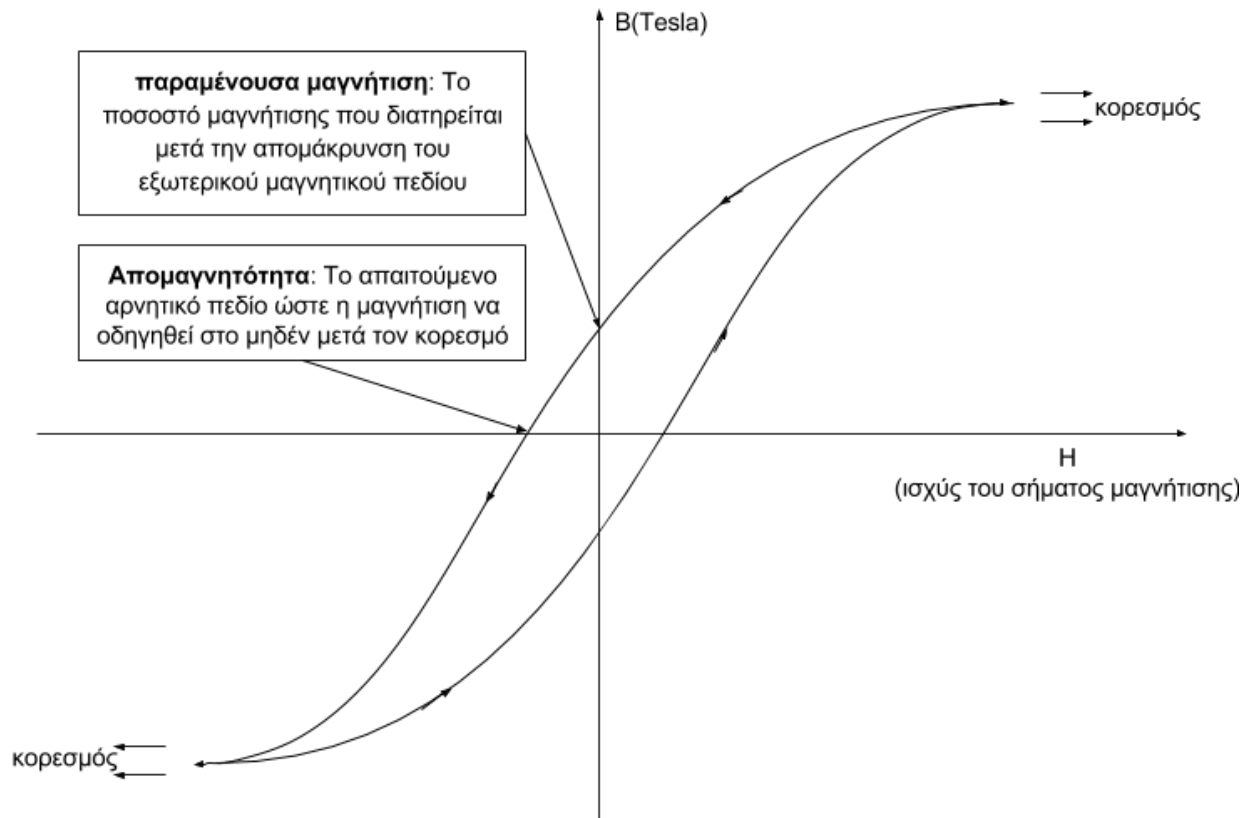
Σε μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη το τύλιγμα του δρομέα αντικαθίσταται από έναν μόνιμο μαγνήτη. Τα πλεονεκτήματα μίας τέτοιας γεννήτριας είναι η εξάλειψη των απωλειών από το τύλιγμα χαλκού, μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας, μικρότερη

αδράνεια του δρομέα και πιο συμπαγής κατασκευή του δρομέα. Στα μειονεκτήματα είναι η απώλεια ελέγχου της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η πιθανή απομαγνήτιση. Τέλος το κόστος μίας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη είναι υψηλότερο αλλά η απόδοσή της καλύτερη.

4.4.1 Τύποι μαγνητικών υλικών

Οι ιδιότητες ενός μόνιμου μαγνήτη και η επιλογή των σωστών υλικών είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες στην κατασκευή των γεννητριών μόνιμου μαγνήτη PMSM. Ένας κατάλληλος μόνιμος μαγνήτης θα πρέπει να παράγει ισχυρό μαγνητικό πεδίο, να είναι μικρός σε όγκο και να είναι ανθεκτικός απέναντι σε παράγοντες που μπορεί να συμβάλουν στην απομαγνήτισή του. Αυτές οι ιδιότητες αναφέρονται ως παραμένουσα μαγνήτιση και απομαγνητότητα ή συνεκτικότητα ενός μαγνήτη και μετρούνται σε Tesla, την βασική μονάδα μαγνητικού πεδίου (σχήμα 4.9).

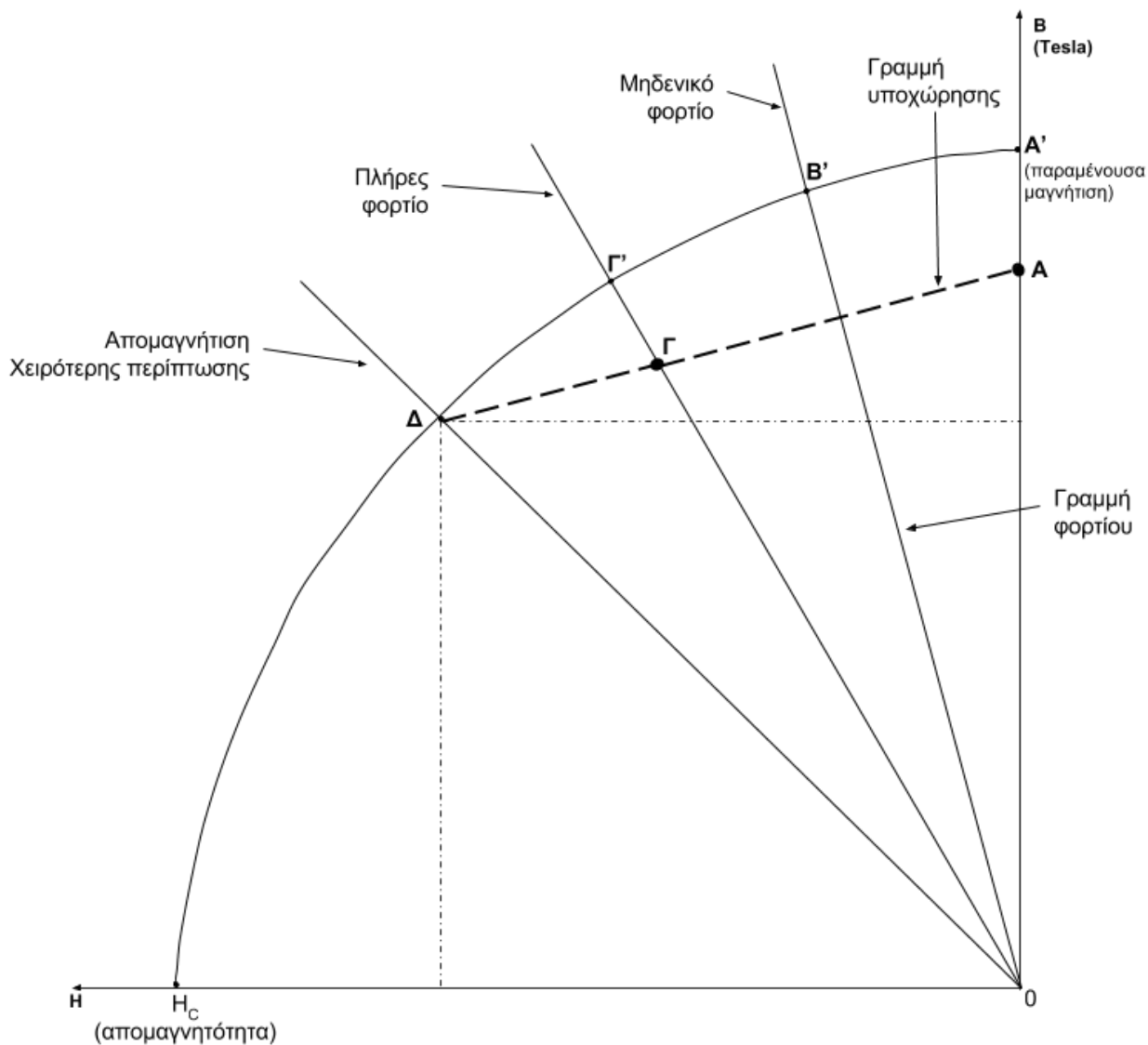
Ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο και άλλα σπάνια μέταλλα παρουσιάζουν μία μοναδική μαγνητική ιδιότητα που ονομάζεται σιδηρομαγνητισμός. Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την τάση να παραμένουν σε ένα βαθμό μαγνητισμένοι αφού εκτεθούν σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το ποσοστό μαγνήτισης που διατηρούν μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (παραμένουσα μαγνήτιση) είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του υλικού του μόνιμου μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα PMSM. Τέλος όλοι οι σιδηρομαγνήτες έχουν μία μέγιστη θερμοκρασία γνωστή ως θερμοκρασία Curie, όπου η ιδιότητα του σιδηρομαγνητισμού χάνεται, οπότε η θερμοκρασία λειτουργίας του PMSM παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή των υλικών του μαγνήτη [51].



Σχήμα 4.9 Γραφική παρουσίαση των ιδιοτήτων παραμένουσας μαγνήτισης και απομαγνητότητας.

4.4.2 Περιοχή λειτουργίας μίας PMSM

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το τμήμα απομαγνήτισης της καμπύλης B-H του σχήματος 4.9, στην οποία περιοχή είναι συνήθως σχεδιασμένος να λειτουργήσει ένας μόνιμος μαγνήτης[52].



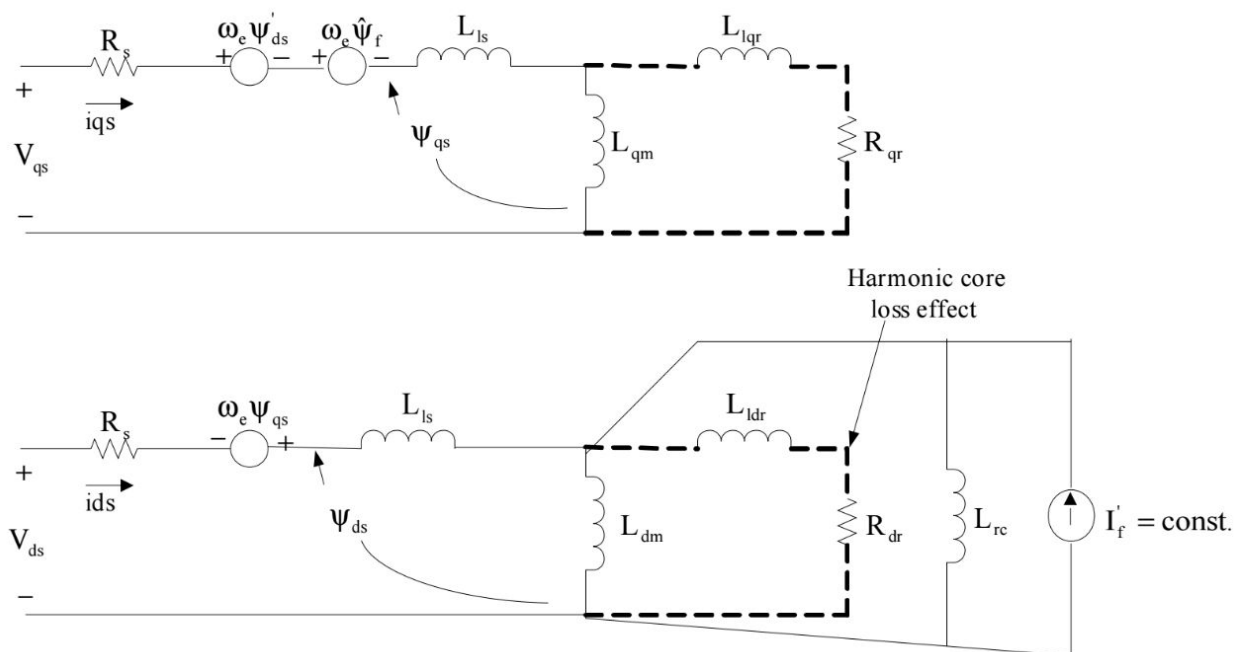
Σχήμα 4.10 Σημεία λειτουργίας ενός μόνιμου μαγνήτη στην καμπύλη B-H.

Η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικών γραμμών B_r που αντιπροσωπεύεται από το σημείο A' είναι διαθέσιμη αρχικά πριν την εγκατάσταση του μόνιμου μαγνήτη στην γεννήτρια. Κατά την εγκατάσταση του, το διάκενο αέρος θα επιδράσει απομαγνητίζοντας τον ώστε το σημείο λειτουργίας B' να αντιπροσωπεύει την πυκνότητα μαγνητικών γραμμών σε κατάσταση μηδενικού φορτίου. Όταν κάποιο ηλεκτρικό φορτίο διατρέξει την περιέλιξη του στάτορα το φαινόμενο απομαγνήτισης γίνεται εντονότερο, και σε κατάσταση πλήρους φορτίου η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών αντιπροσωπεύεται από το

σημείο Γ'. Η γραμμή φορτίου χειρότερης περίπτωσης που φαίνεται στο σχήμα 4.10 μπορεί να οφείλεται είτε σε ελαττωματική λειτουργία της γεννήτριας είτε στο φορτίο εκκίνησης. Όταν το σημείο λειτουργίας φτάσει στο σημείο Δ και η αιτία απομαγνητισμού αφαιρεθεί, τότε ο μαγνήτης θα ανακάμψει ακολουθώντας την γραμμή υποχώρησης ΔΑ, οπότε και θα έχει απομαγνητιστεί μόνιμα κατά ένα μέγεθος Α'Α. Κατά συνέπεια και τα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας θα μετατοπιστούν στα σημεία τομής των γραμμών φορτίου και υποχώρησης. Σε δημοσίευση του Bimal Kumar Bose [52] παρουσιάζονται αυτά τα χαρακτηριστικά διάφορων υλικών μόνιμων μαγνητών.

4.4.3 Αναπαράσταση μίας PMSM στους dq άξονες

Σε μία PMSM, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι ενσωματωμένοι στην επιφάνεια του δρομέα στην περίπτωση της μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (SPM), και ενσωματωμένοι στο εσωτερικό του δρομέα στην περίπτωση μηχανής εσωτερικών μόνιμων μαγνητών (IPM). Το τύλιγμα του στάτορα είναι ημιτονοειδές τριών φάσεων το οποίο με την περιστροφή της μηχανής δημιουργεί ημιτονοειδείς τάσεις τριών φάσεων. Η αναπαράσταση μίας σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη στους άξονες dq φαίνεται στο σχήμα 4.11 [52] [53] [54]. Για ένα σύστημα σε ισορροπία οι τιμές στον 0-άξονα ισούνται με μηδέν. Επίσης στο σχήμα 4.11 οι απώλειες πυρήνα της μηχανής παρίστανται από το τμήμα με την διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 4.11 Ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (PMSM)

Αγνοώντας τις απώλειες πυρήνα, οι εξισώσεις που περιγράφουν τα παραπάνω κυκλώματα είναι οι εξής:

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_e \psi'_{ds} + \omega_e \bar{\psi}_f + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (4-5)$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_e \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (4-6)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για τα συστήματα IPM αλλά και για τα SPM (στην περίπτωση των συστημάτων SPM ισχύει $L_{dm}=L_{qm}$).

Οι μαγνητικές ροές δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{\psi}_f = L_{dm} I'_f \quad (4-7)$$

$$\psi'_{ds} = i_{ds} (L_{ls} + L_{dm}) = i_{ds} L_{ds} \quad (4-8)$$

$$\psi_{ds} = \bar{\psi}_f + \psi'_{ds} \quad (4-9)$$

$$\psi_{qs} = i_{qs} (L_{ls} + L_{qm}) = i_{qs} L_{qs} \quad (4-10)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που αναπτύσσεται στο κενό αέρος της μηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (4-11)$$

Αντικαθιστώντας τις (4-5)-(4-8) στις (4-3), (4-4) και (4-9) και απλοποιώντας, παίρνουμε:

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_{qs}} [V_{qs} - R_s i_{qs} - L_{ds} \omega_e i_{ds} - \bar{\psi}_f \omega_e] \quad (4-12)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}} [V_{ds} - R_s i_{ds} - L_{qs} \omega_e i_{qs}] \quad (4-13)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} [\bar{\psi}_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds}] \quad (4-14)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_{shaft}) \quad (4-15)$$

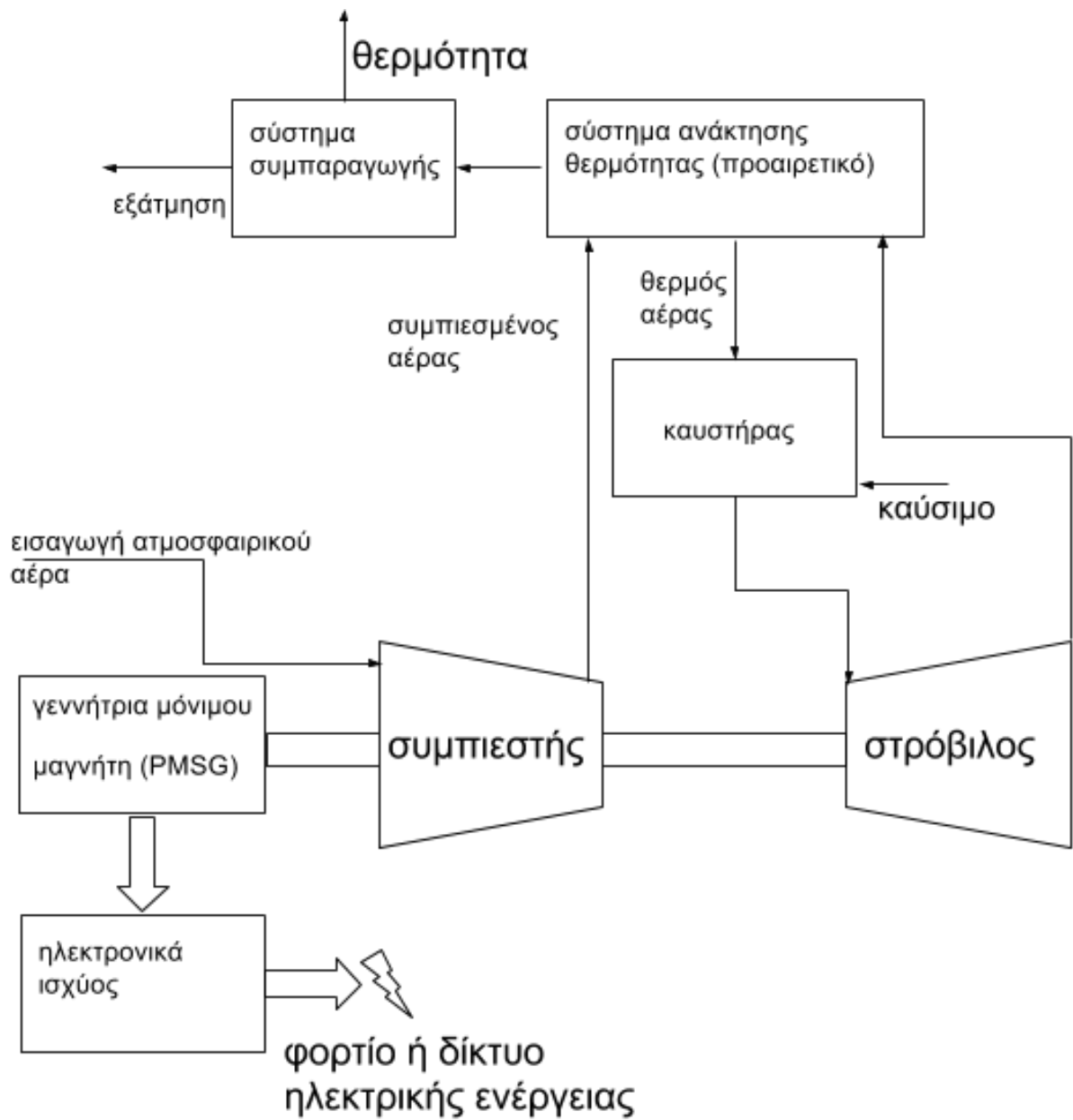
όπου ω_e , ω_r είναι η ηλεκτρική και η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/sec), V_{qs} , V_{ds} (I_{qs} , I_{ds}) είναι η τάση (και το ρεύμα) στον q και στον d άξονα αντίστοιχα και L_{qs} , L_{ds} είναι η επαγωγή του στάτορα στον q και στον d άξονα. L_{dm} είναι το άθροισμα της επαγωγής στον d άξονα του στάτορα, του τηλίγματος του αποσβεστήρα και του μόνιμου μαγνήτη L_{rc} . I_f είναι το ισοδύναμο ρεύμα πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και I'_f είναι το

ισοδύναμο ρεύμα στην πλευρά του στάτορα. Ψ_f ($\Psi_f = L_{dm} I'_f$) είναι μία σταθερά που αντιπροσωπεύει την σύνδεση του μαγνητικού πεδίου των μόνιμων μαγνητών και των φάσεων του στάτορα, J είναι η αδράνεια του δρομέα (Kgm^2), T_{shaft} είναι η ροπή που παράγεται από την μικροτουρμπίνα (Nm), T_e είναι η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από την PMSM (Nm), και P είναι το πλήθος των πόλων.

Σημείωση: Τα μεγέθη T_e και T_{shaft} είναι θετικά όταν η PMSM λειτουργεί ως κινητήρας και αρνητικά όταν λειτουργεί ως γεννήτρια όπως και στην περίπτωση μας.

4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος MTG

Για την προσομοίωση του συστήματος δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3 της μικροτουρμπίνας στο περιβάλλον MATLAB/Simulink με χρήση της βιβλιοθήκης SimPowerSystems. Για την μοντελοποίηση της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο μοντέλο μηχανής μόνιμου μαγνήτη της Simulink [13] [52] το οποίο δέχεται σαν είσοδο το σήμα της ροπής που παράγει η μικροτουρμπίνα με αρνητικό πρόσημο ώστε να λειτουργεί σαν γεννήτρια και όχι σαν κινητήρας. Παρακάτω δίνονται οι τιμές των σταθερών αγνώστων του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος MTG και ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για διαφορετικές συνθήκες φορτίου.



Σχήμα 4.12 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος MTG

Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιήθηκε είναι το δευτερόλεπτο και οι τιμές των σταθερών είναι [9] [10] [48]:

Παράμετροι του υποσυστήματος ελέγχου της ταχύτητας, σχήμα 4.3:

$K = 25, T_1 = 0.4, T_2 = 1, Z = 3.$

Παράμετροι του υποσυστήματος καυσίμου, σχήμα 4.4:

$K_V = 1, T_V = 0.05, c = 1, K_3 = 0.77, K_6 = 0.23, K_f = 1, \text{Delay} = 0, T_f = 0.04.$

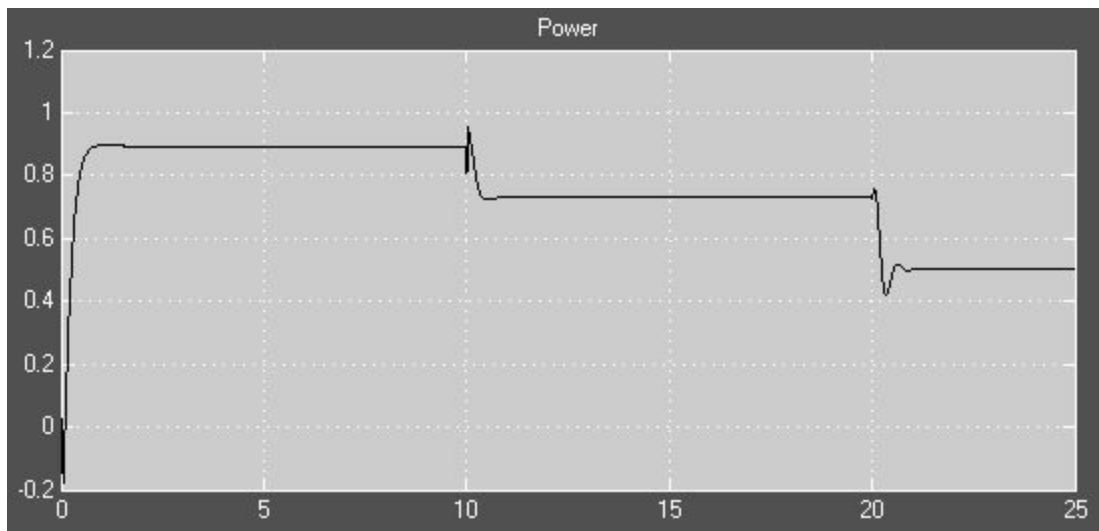
Παράμετροι του υποσυστήματος συμπίεστη και τουρμπίνας, σχήμα 4.5 - 4.7:

$T_{CR} = 0.01, T_{TD} = 0.04, T_{CD} = 0.2, K_{HHV} = 1.2.$

Παράμετροι του υποσυστήματος ελέγχου θερμοκρασίας, σχήμα 4.8:

$K_4 = 0.8, T_3 = 15, T_4 = 2.5, T_5 = 3.3, T_t = 450 \text{ }^\circ\text{F}, T_R = 950 \text{ }^\circ\text{F}.$

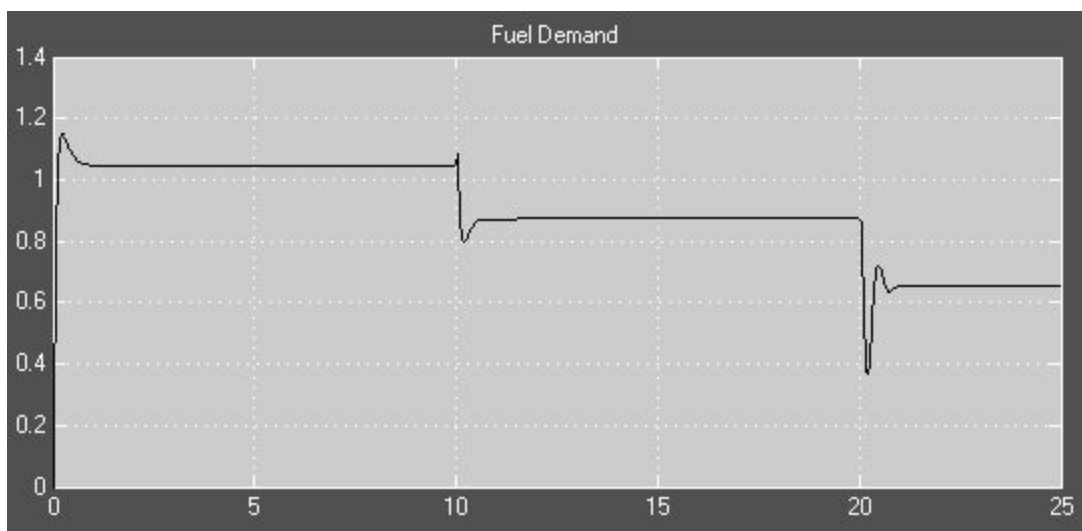
Η ταχύτητα αναφοράς διατηρήθηκε σταθερή στο 1 p.u. σε όλες τις προσομοιώσεις. Η απόκριση του μοντέλου MTG σε διαφορετικές συνθήκες φορτίου δίνονται παρακάτω:



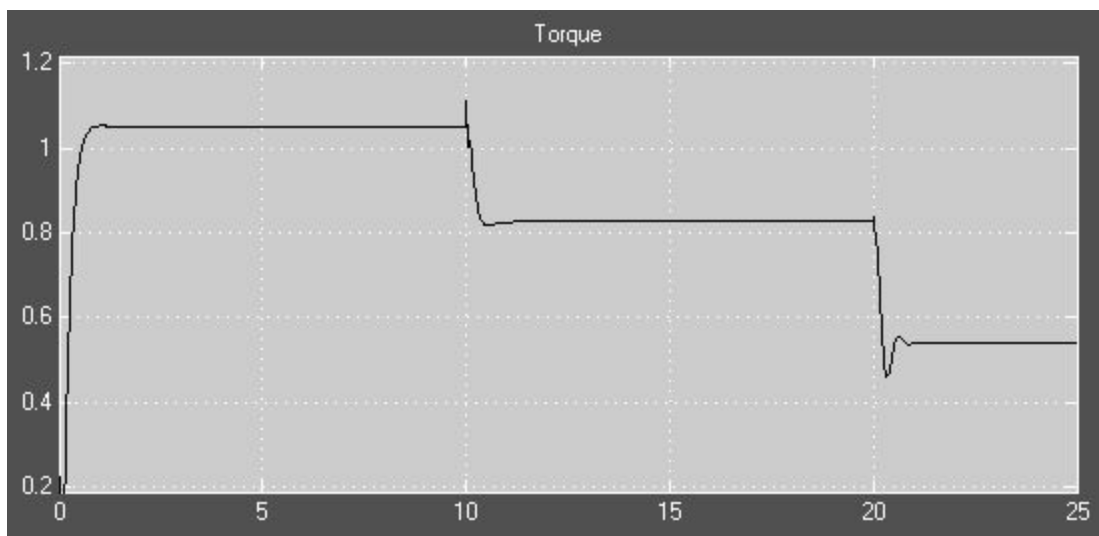
Σχήμα 4.13 Παραγόμενη ισχύς από το σύστημα MTG

Αρχικά εφαρμόζεται φορτίο ίσο με 0.9 p.u., μετά από 10 δευτερόλεπτα το φορτίο μειώνεται στα 0.7 p.u. και τέλος μετά από 20 δευτερόλεπτα το φορτίο μειώνεται περαιτέρω στα 0.5 p.u. . Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η παραγωγή ισχύος από το σύστημα MTG για τις διαφορετικές συνθήκες φορτίου που περιγράφηκαν παραπάνω. Στο σχήμα 4.14 φαίνεται η κατανάλωση καυσίμου από την μικροτουρμπίνα. Παρατηρούμε ότι για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου αρχικά η κατανάλωση καυσίμου είναι λίγο πάνω από το 1 p.u., στην συνέχεια για φορτίο 0.7 p.u. η κατανάλωση πέφτει στα 0.9 p.u. περίπου και για φορτίο 0.5 p.u. η κατανάλωση πέφτει περίπου στα 0.65 p.u. . Παρόμοια

με την κατανάλωση καυσίμου είναι και η παραγόμενη ισχύς που φαίνεται στο σχήμα 4.15.

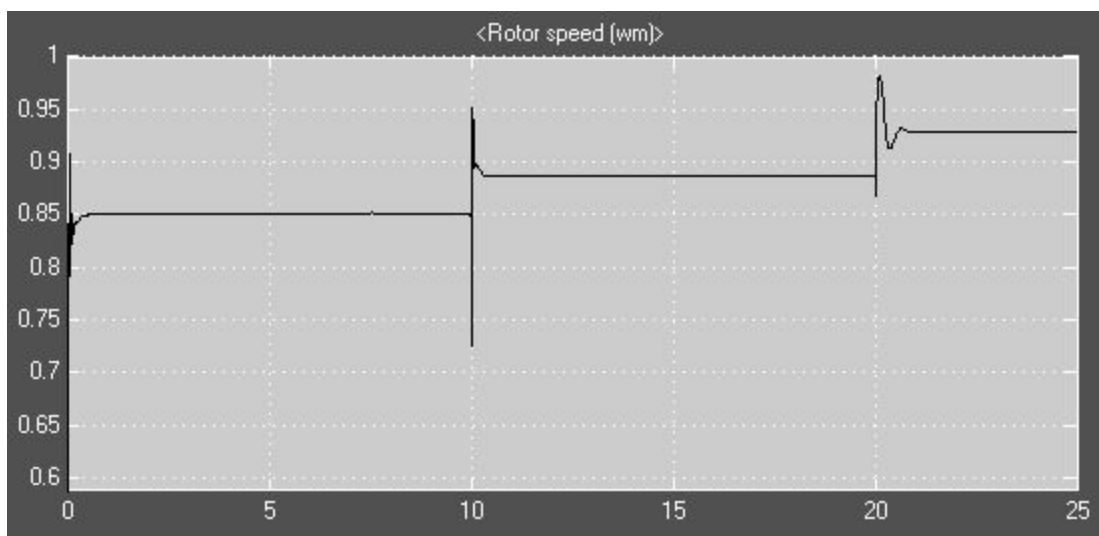


Σχήμα 4.14 Κατανάλωση καυσίμου της μικροτουρμπίνας



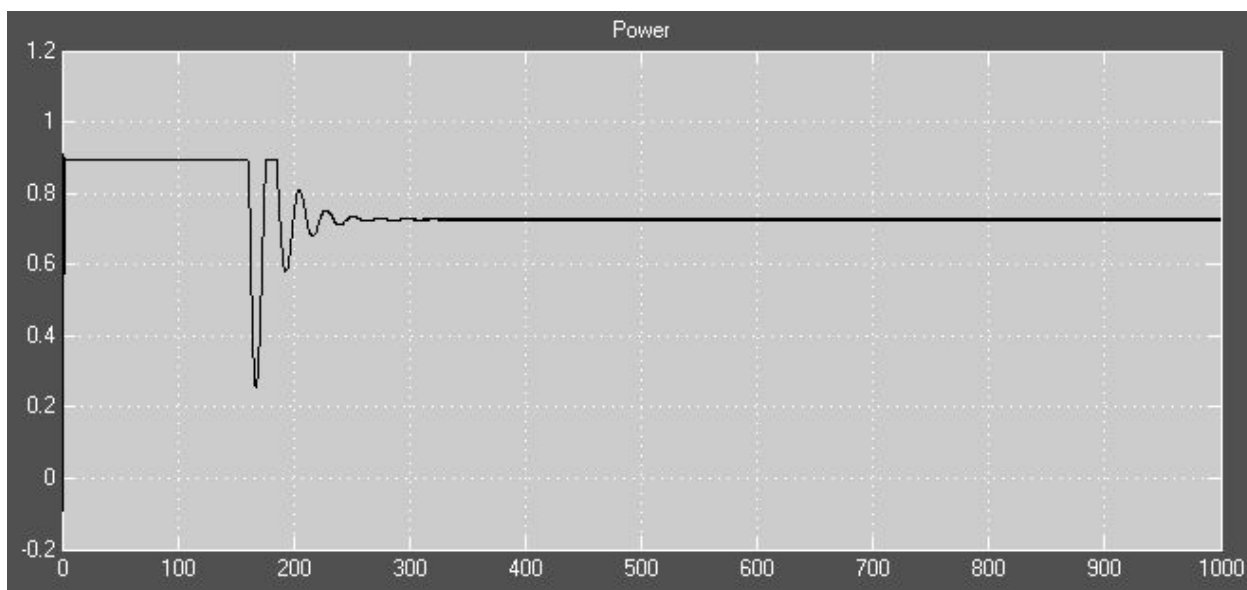
Σχήμα 4.15 Παραγόμενη ροπή στον άξονα του MTG

Τέλος στο σχήμα 4.16 φαίνεται η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του συστήματος. Όταν το φορτίο που εφαρμόζεται είναι 1 p.u. η ταχύτητα περιστροφής είναι 0.85 p.u. και τελικά για φορτίο 0.5 p.u. η ταχύτητα περιστροφής του άξονα φτάνει στα 0.93 p.u. περίπου.

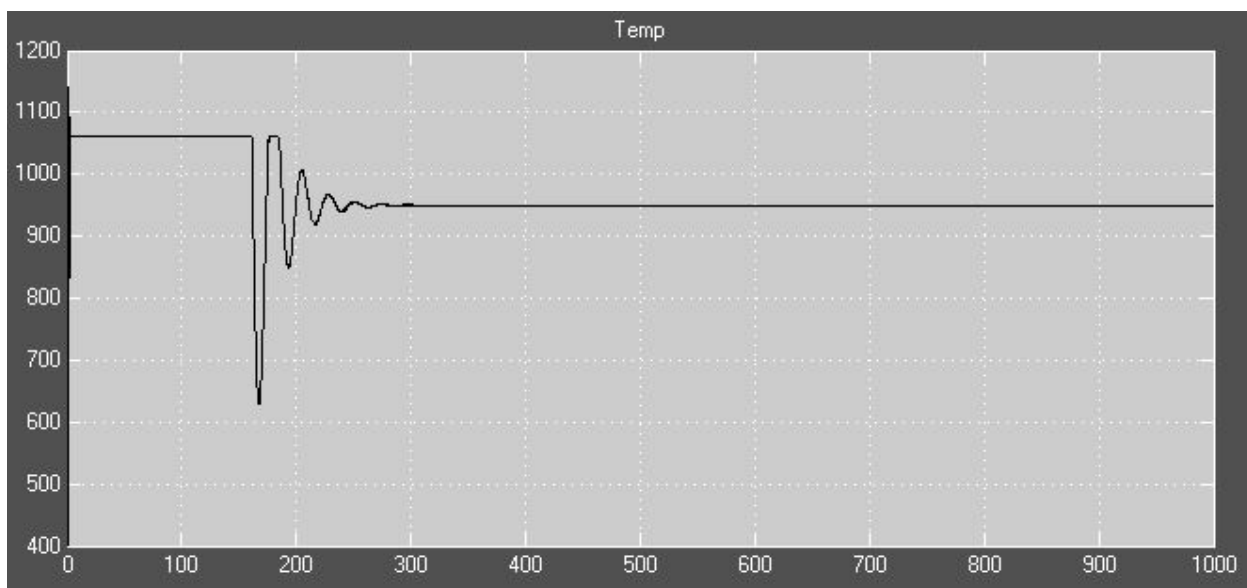


Σχήμα 4.16 Ταχύτητα περιστροφής του άξονα του MTG

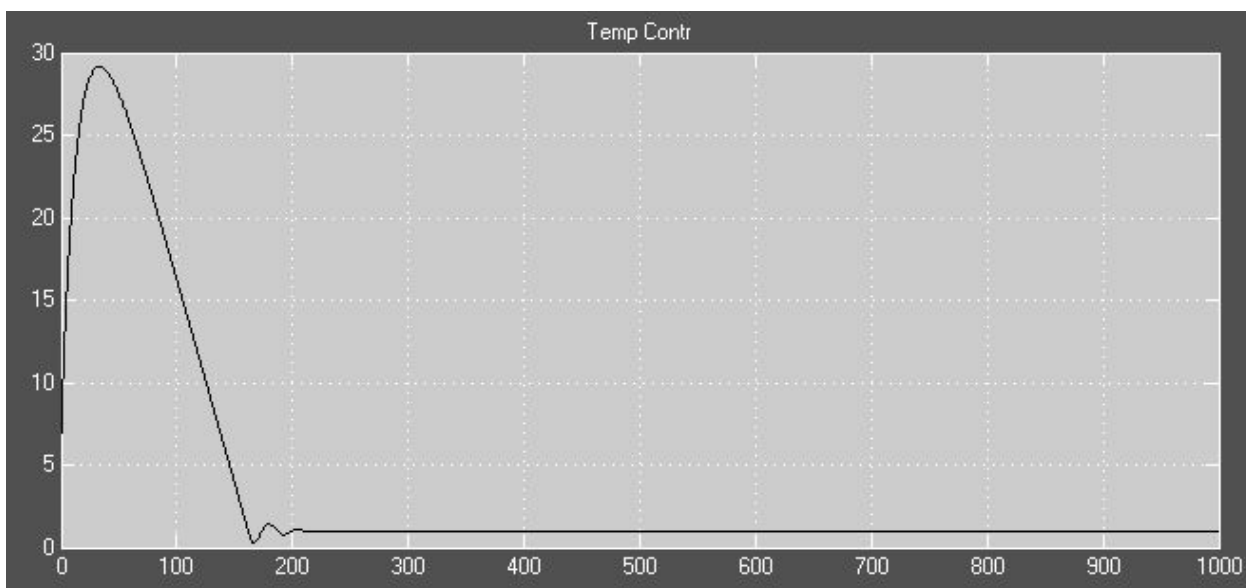
Στην δεύτερη προσομοίωση σκοπός ήταν να παρουσιαστεί η λειτουργία του υποσυστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας. Η προσομοίωση είχε διάρκεια 1000 δευτερόλεπτα. Το φορτίο διατηρήθηκε στα 0.9 p.u. σε όλη την διάρκεια. Αρχικά παρατηρούμε στο σχήμα 4.17 ότι η παραγόμενη ισχύς καλύπτει το φορτίο, αλλά στα 160 περίπου δευτερόλεπτα η ισχύς πέφτει σημαντικά στα 0.7 p.u. παρότι το φορτίο δεν άλλαξε. Αυτό συμβαίνει επειδή η μικροτουρμπίνα λειτούργησε για αρκετή ώρα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αναφοράς (950°F) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18. Αυτή η συνεχής υψηλή θερμοκρασία είχε σαν αποτέλεσμα η έξοδος του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας (σχήμα 4.19) να μειώνεται συνεχώς έως ότου να γίνει μικρότερη από την έξοδο του υποσυστήματος ελέγχου της ταχύτητας περίπου στα 160 δευτερόλεπτα. Συνεπώς από εκείνη τη στιγμή η μικροτουρμπίνα μπήκε σε λειτουργία ελεγχόμενη από το υποσύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας, γεγονός που μείωσε την θερμοκρασία της στους 950°F καθώς και την παραγόμενη ροπή όπως φαίνεται στο σχήμα 4.20.



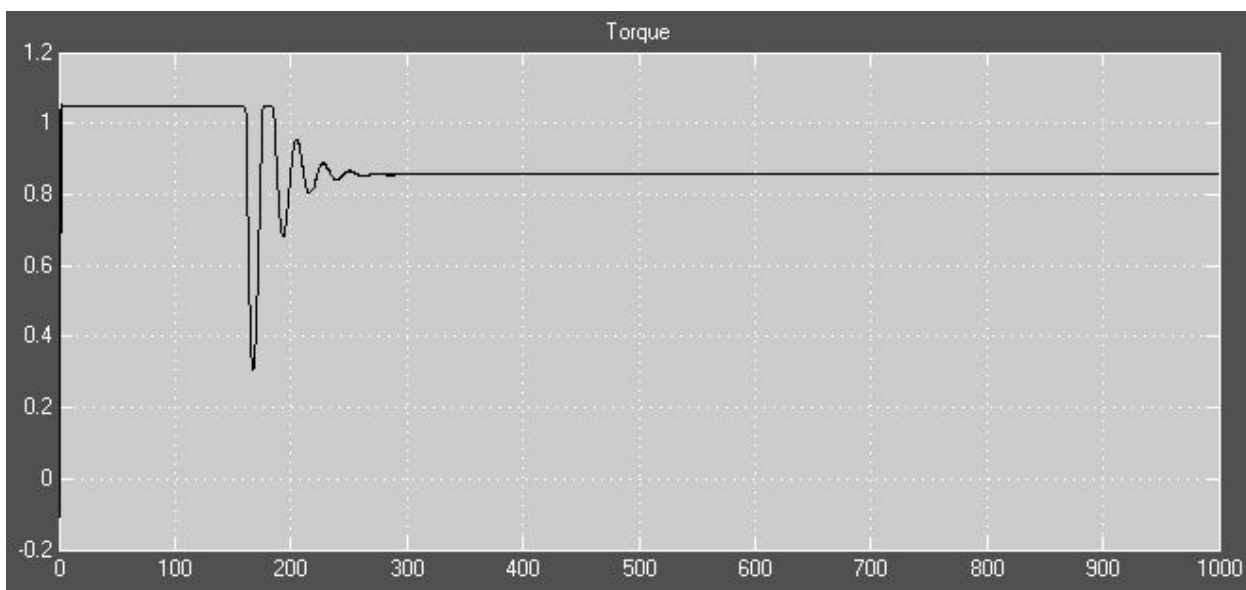
Σχήμα 4.17 Παραγόμενη ισχύς



Σχήμα 4.18 Θερμοκρασία λειτουργίας της μικροτουρμπίνας



Σχήμα 4.19 Έξοδος του υποσυστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας



Σχήμα 4.20 Παραγόμενη ροπή από την μικροτουρμπίνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Προσομοίωση του υβριδικού συστήματος

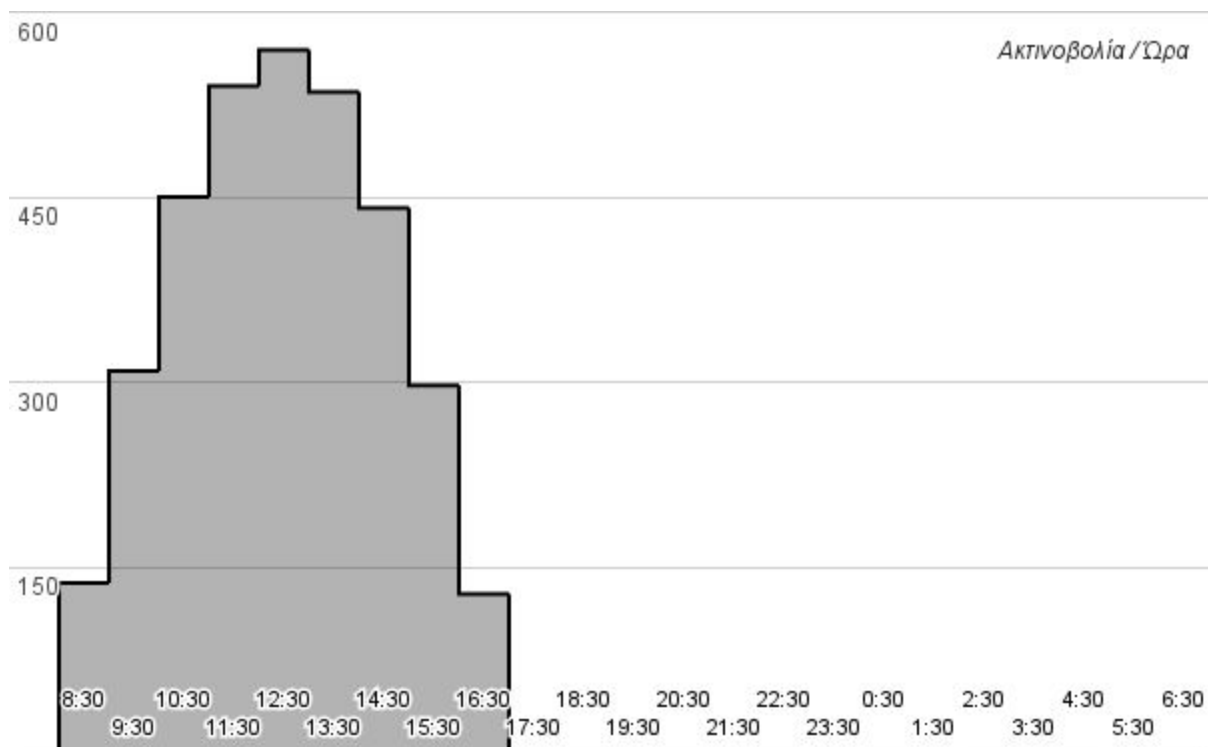
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ενεργειακά χαρακτηριστικά μίας γαλακτοπαραγωγικής κτηνοτροφικής μονάδας, όπου υποθέτουμε ότι θα γίνει η εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος φ/β γεννήτριας - MTG, καθώς και οι πραγματικές συνθήκες ακτινοβολίας. Με τα δεδομένα αυτά γίνεται η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και αναλύονται τα αποτελέσματα.

5.1 Δεδομένα

5.1.1 Ηλιακή ενέργεια

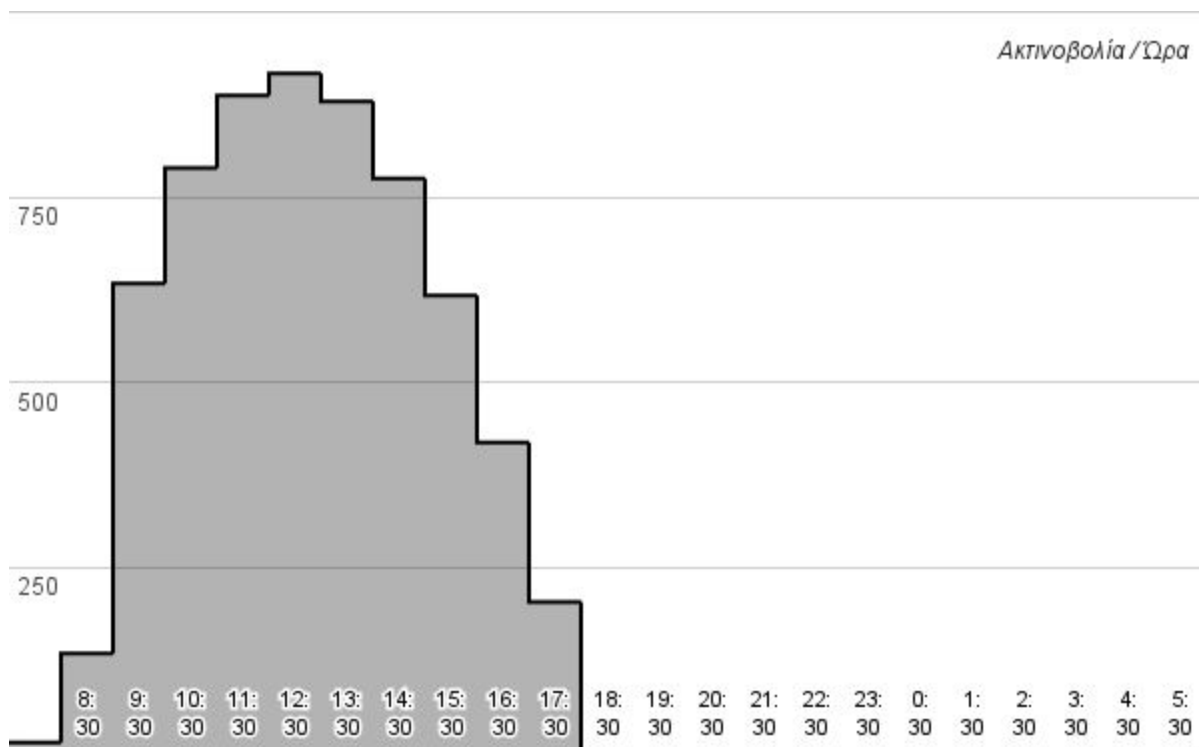
Ηλιακή ενέργεια καλείται η μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, είτε άμεσα με την χρήση φωτοβολταϊκών είτε έμμεσα με την χρήση συγκεντρωτικών φακών. Τα φωτοβολταϊκά, που μας ενδιαφέρουν στην περίπτωση μας, μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρικό ρεύμα χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η χρήση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν προηγουμένως στην προσομοίωση κάτω από πραγματικές συνθήκες. Πηγή [55] των πραγματικών τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που παρουσιάζονται παρακάτω ήταν το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμων πηγών των Ηνωμένων Πολιτειών (NREL) και η εθνική βάση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας (NSRDB). Με σκοπό να ελεγχθεί η λειτουργία του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες, επιλέχθηκαν μία χειμερινή (1^η Ιανουαρίου, σχήμα 5.1), μία ανοιξιιάτικη (1^η Απριλίου, σχήμα 5.2) και μία θερινή μέρα (1^η Ιουλίου, σχήμα 5.3). Εκτός από την διαφορά στην ένταση της ακτινοβολίας ανάμεσα στις τρεις μέρες, μπορούμε να παρατηρήσουμε στα σχήματα ότι υπάρχει και σημαντική διαφορά στην διάρκεια της ημέρας για κάθε εποχή.



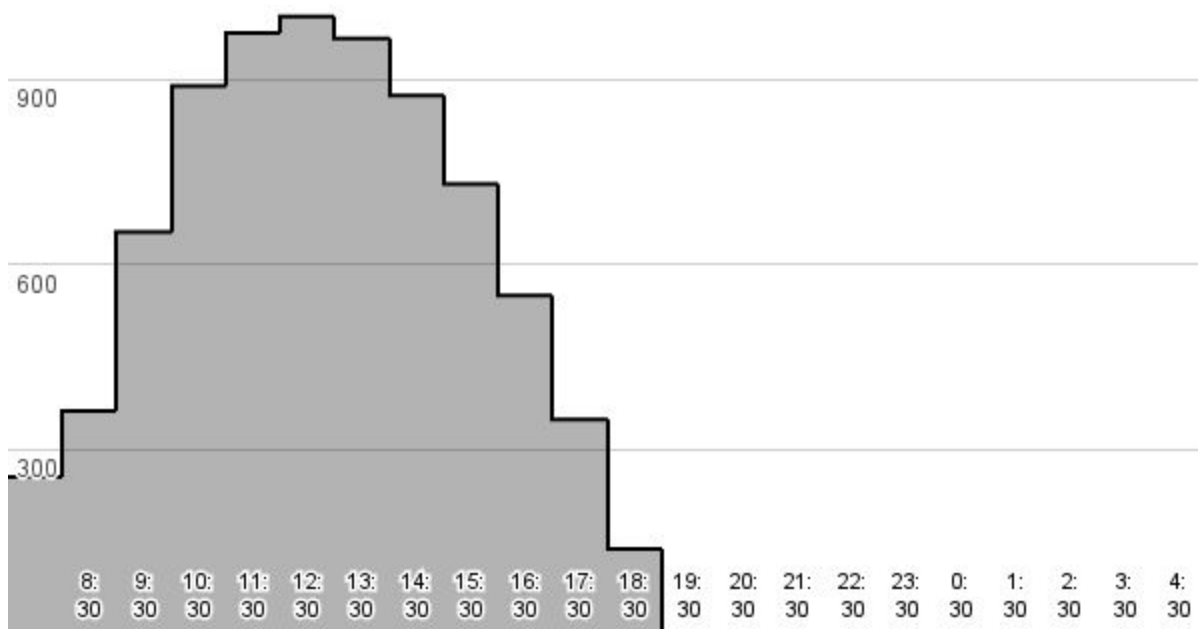
Σχήμα 5.1 Ακτινοβολία για την ημέρα 1/1/2014

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, η ακτινοβολία είναι σχετικά ασθενής κατά την διάρκεια μίας χειμερινής μέρας. Η διάρκεια της ημέρας που υπάρχει μη μηδενική ακτινοβολία είναι 8 ώρες (8:30-16:30) και το μέγιστο αγγίζει τα 550 W/m^2 .



Σχήμα 5.2 Ακτινοβολία για την ημέρα 1/4/2014

Η ακτινοβολία κατά την διάρκεια μίας ανοιξιιάτικης ημέρας διαρκεί 11 ώρες και η μέγιστη τιμή της είναι περίπου 900 W/m^2 .



Σχήμα 5.3 Ακτινοβολία για την ημέρα 1/7/2014

Τέλος κατά την διάρκεια μίας καλοκαιρινής ημέρας η ακτινοβολία έχει μη μηδενική τιμή για 13 ώρες και η μέγιστη τιμή της είναι περίπου 1000 W/m^2 .

5.1.2 Παραγωγή βιοαερίου

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει κινήσεις από την πλευρά της ευρωπαϊκής ένωσης προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου μέσω της εκμετάλλευσης των αποβλήτων κτηνοτροφικών μονάδων. Ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα με αυτό τον σκοπό ήταν το Geronimo II [56]. Σκοπός του προγράμματος ήταν η συνεργασία με κτηνοτροφικές μονάδες σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, όπως την Κροατία, την Κύπρο, την Γερμανία και άλλες, με στόχο την καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης και την κάλυψη μέρους της από την εκμετάλλευση των αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου. Σύμφωνα με την μελέτη μία κτηνοτροφική μονάδα 300 γαλακτοφόρων αγελάδων έχει δυναμικό παραγωγής 100.000 κυβικών μέτρων βιοαερίου ανά έτος.

Στον πίνακα 5.1 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά μίας μονάδας παραγωγής βιοαερίου η οποία εγκαταστάθηκε σε κτηνοτροφική μονάδα 300 γαλακτοπαραγωγικών αγελάδων στο Πολυτεχνείο της Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών [38]. Η μονάδα

παραγωγής βιοαερίου αποτελούνταν από μία λεκάνη χώνευσης 14.000 κυβικών μέτρων, τις απαραίτητες σωληνώσεις για την μεταφορά των αποβλήτων στην λεκάνη και για την εξαγωγή του παραγόμενου αερίου καθώς και ένα κάλυμμα ενισχυμένου πολυπροπυλενίου που σκέπαζε την λεκάνη. Επίσης μέρος του συστήματος ήταν ένα σύστημα γεννήτριας οδηγούμενης από μικροτουρμπίνα μέγιστης ισχύος 30 kW την οποία τροφοδοτούσε το παραγόμενο βιοαέριο από τον χωνευτήρα. Στον πίνακα 5.1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η παραγωγή βιοαερίου σε μία πραγματική εγκατάσταση είναι περίπου η μισή (50.000 κυβικά μέτρα) από εκείνη που εκτιμήθηκε ότι θα είναι σε μία μονάδα ανάλογου μεγέθους από τις συνεργαζόμενες του προγράμματος Geronimo II.



Εικόνα 5.1 Η λεκάνη χώνευσης

Parameter	Average Value	Units
Lagoon Volume	14400	m ³
Influent Flow Rate	365,000	l./day
Hydraulic Retention Time	40	days
Average Biogas Production	127	m ³ /day
Methane Concentration	55	%
Lagoon Temperature	15	°C
Influent COD Concentration	4300	mg/L
Effluent COD Concentration	1800	mg/L
COD Reduction	59	%
Total Solids	0.5	%
Volatile Solids	0.4	%
Influent pH	7.64	
Effluent pH	7.04	

Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά μίας πραγματικής εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου

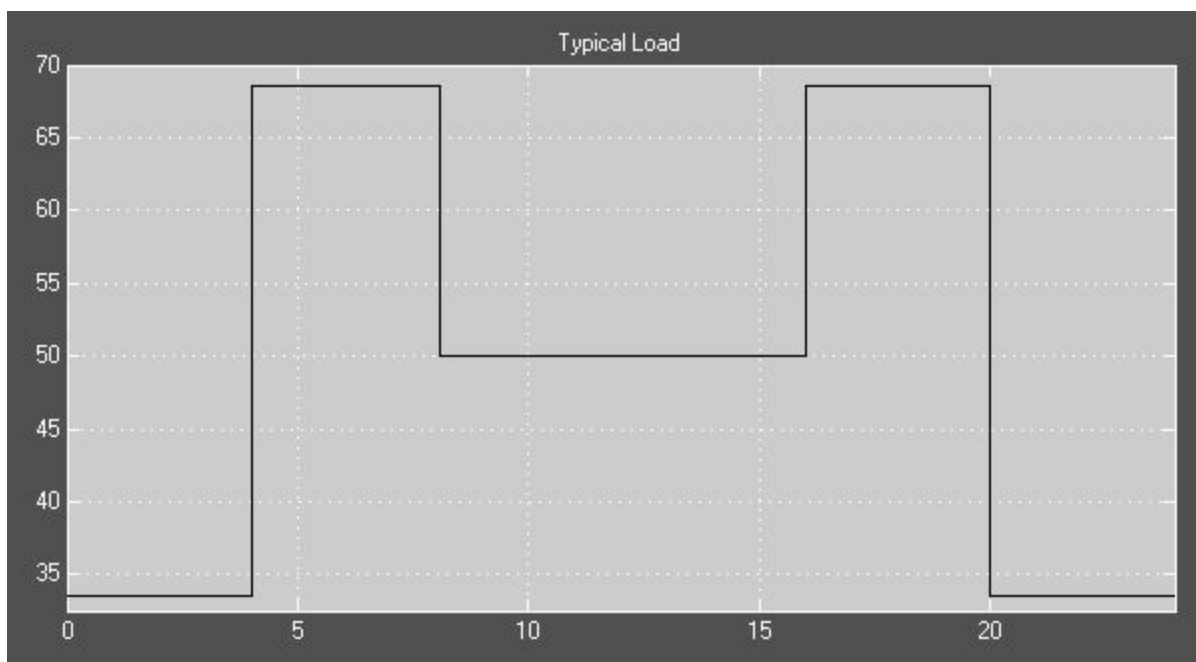
5.1.3 Φορτίο

Ενδεικτικά μία κτηνοτροφική μονάδα 300 γαλακτοφόρων αγελάδων συνεργαζόμενη με το πρόγραμμα Geronimo II έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά [56]:

- 4 κινητήρες κλιματισμού 0.5 kW ο καθένας
- 24 λαμπτήρες ατμών υδραργύρου 0.25 kW ο καθένας
- Σύστημα προθέρμανσης πόσιμου νερού 3 kW
- Ηλεκτρικοί κινητήρες για την τροφοδοσία τροφής 3 kW
- 2 συστήματα αρμέγματος των 10 θέσεων με αερισμό και θέρμανση υγραερίου 6 kW
- Αντλία κενού 7.5 kW
- Αντλία γάλακτος 2 kW
- Συμπιεστής ψύξης 2 x 2.75 kW
- Συμπιεστής αέρος 2 kW
- Σύστημα καθαρισμού δεξαμενής γάλακτος 12 kW
- 3 ενσύρματες ξύστρες καθαρισμού αποβλήτων 1.5 kW η καθεμία
- Αντλία κτηνοτροφικών αποβλήτων 15 kW

Συνολικά το μέγιστο φορτίο που πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει ένα σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας στην συγκεκριμένη μονάδα είναι περίπου 68 kW.

Η διακύμανση που έχει το φορτίο κατά την διάρκεια της ημέρας εξαρτάται κυρίως από το πρόγραμμα αρμέγματος που τηρείται, καθώς ο εξοπλισμός αρμέγματος, θέρμανσης του νερού και μεταφοράς και ψύξης του γάλακτος είναι αυτός με την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Αν για παράδειγμα το άρμεγμα γίνεται δύο φορές την ημέρα, πρωί και βράδυ, η διακύμανση του φορτίου θα είναι ενδεικτικά αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.4 [57].



Σχήμα 5.4 Διακύμανση του φορτίου μίας φάρμας κατά την διάρκεια ενός 24ώρου.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το φορτίο διπλασιάζεται κατά την διάρκεια του πρωινού αρμέγματος σε σχέση με το φορτίο κατά την διάρκεια της νύχτας, όπου η ενέργεια καταναλωνόταν από του λαμπτήρες και το σύστημα εξαερισμού. Μετά το τέλος της πρώτης περιόδου αρμέγματος το φορτίο πέφτει αλλά όχι στα επίπεδα την νύχτας, καθώς κατά την περίοδο ανάμεσα στα δύο αρμέγματα καταναλώνεται ενέργεια από το σύστημα ψύξης του γάλακτος.

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος PV/MTG εκτελέστηκε με δεδομένα ακτινοβολίας για τρεις διαφορετικές ημέρες, μία χειμωνιάτικη, μία ανοιξιάτικη και μία καλοκαιρινή, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 5.1-5.3.

Η παραγωγή βιοαερίου θεωρήθηκε ότι είναι η μέγιστη δυνατή για την κτηνοτροφική μονάδα μεγέθους 300 ζώων, $100.000 \text{ m}^3/\text{έτος}$ δηλαδή $273 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι ισχύος 112 kW και η γεννήτρια της μικροτουρμπίνας 100 kW. Η μικροτουρμπίνα έχει μέγιστη κατανάλωση $31 \text{ m}^3/\text{ώρα}$ στα 100 kW φορτίου [31]. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος MTG ABB MT100.

Table 1: ABB MT100 CHP unit - main characteristics

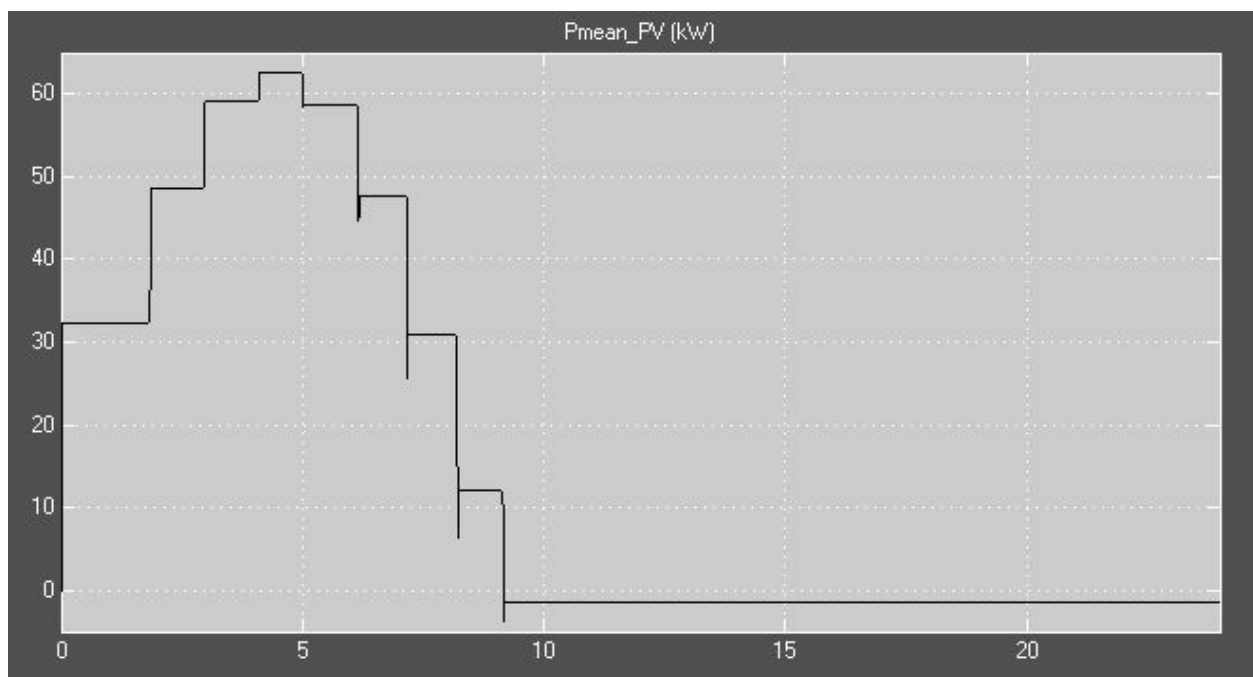
Property	Data
Dimensions	
Width	840 mm
Height	1900 mm
Length	2900 mm
Weight	2000 kg
Noise level	70 dB (A) at 1 meter
Performance¹⁾	
Net electrical output	100 kW
Net electrical efficiency	30%
Net thermal output (hot water)	167 kW
Net total efficiency	80%
Volumetric exhaust gas emissions (15% O₂ and 100% load)	
NO _x	<15 ppm v
CO	<15 ppm v
UHC	<10 ppm v
Ambient inlet	
Air temperature	– 25°C to +40°C
Air inlet humidity	0-100%
Gas pressure min/max	6/9.5 bar (a)
Wobbe index	43–55 MJ/m ³
Mass flow, at 100 kW load (39 MJ/kg)	31 Nm ³ /hour
Surrounding air	
Temperature	0°C to +40°C
Surrounding humidity	0–80%
Exhaust-gas flow	0.79 kg/s
Exhaust-gas temperature	55° C
Water inlet temperature	50° C
Water outlet temperature	70° C

¹⁾ Based on ISO conditions and taking into account power consumption and losses for all auxiliaries, including the gas compressor.

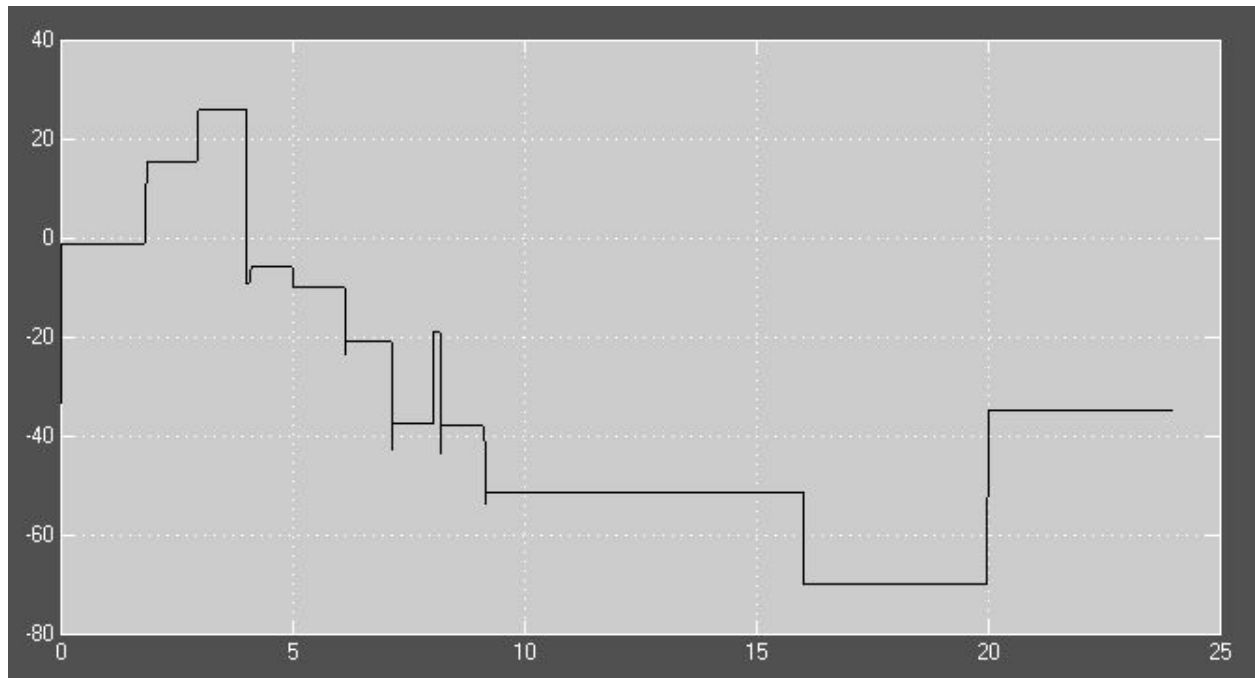
Πίνακας 5.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μικροτουρμπίνας ABB MT100

5.2.1 Χειμερινή ημέρα

Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η παραγόμενη ισχύς από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά την διάρκεια μίας χειμερινής ημέρας. Όπως είναι αναμενόμενο η γεννήτρια δεν παράγει καμία στιγμή της ημέρας την μέγιστη ισχύ, την θα μπορούσε να παράξει κάτω από ιδανικές συνθήκες, καθώς η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι αρκετά χαμηλή. Επίσης στο σχήμα φαίνεται και η μικρή σχετικά διάρκεια της ημέρας, γεγονός που αναγκάζει το σύστημα να στηρίξει την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας στην γεννήτρια της μικροτουρμπίνας για περισσότερες ώρες, συγκεκριμένα για 20 ώρες.

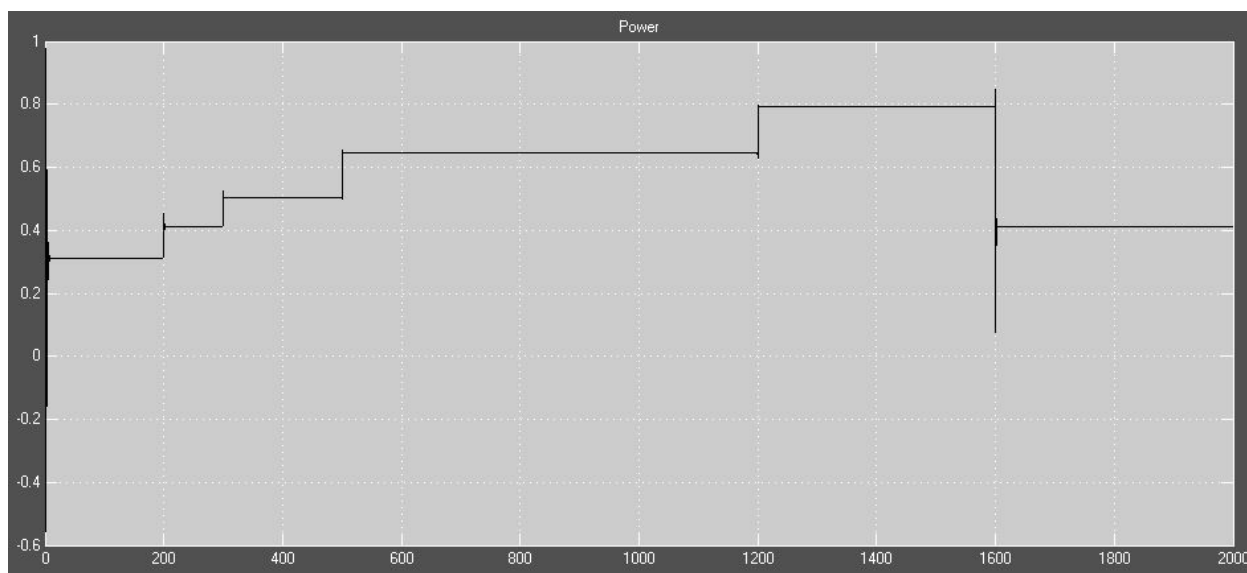


Σχήμα 5.5 Παραγόμενη ισχύς από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά την διάρκεια μίας χειμερινής ημέρας 8:30π.μ. - 7:30π.μ της επομένης.



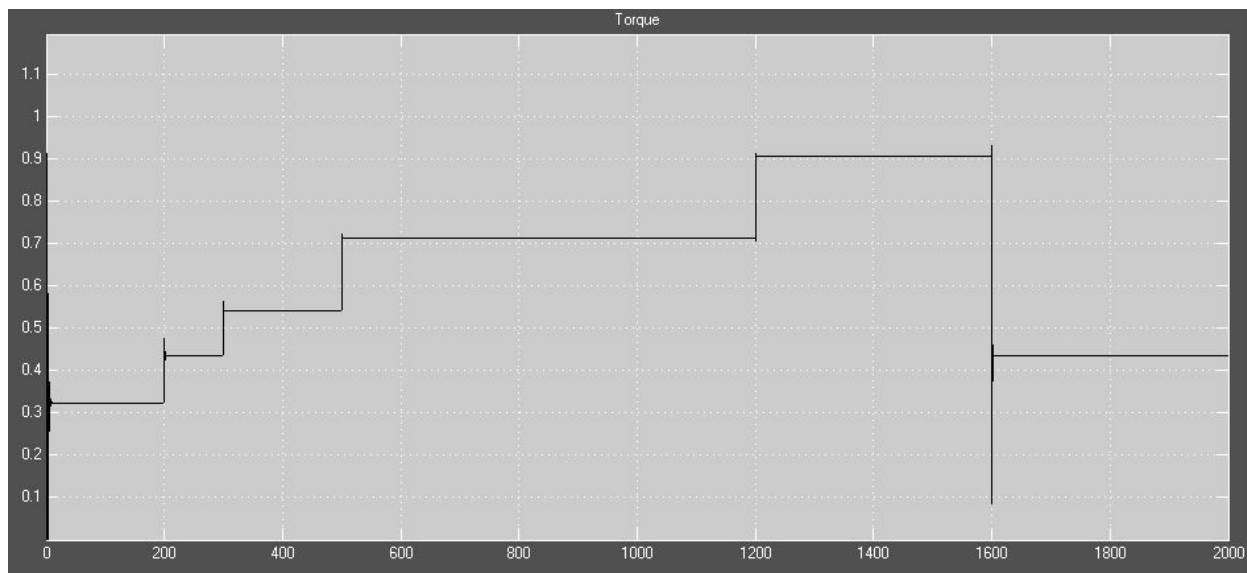
Σχήμα 5.6 Διαφορά φορτίου και παραγόμενης ισχύος από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η διαφορά φορτίου και παραγόμενης ισχύος από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Όταν αυτή η διαφορά είναι μικρότερη από το μηδέν υπάρχει έλλειψη ενέργειας η οποία πρέπει να καλυφθεί από το σύστημα MTG. Για την περίπτωση της χειμερινής ημέρας φαίνεται στο σχήμα ότι απαιτείται η λειτουργία της μικροτουρμπίνας για 20 ώρες συνολικά.



Σχήμα 5.7 Παραγόμενη ισχύς από το σύστημα MTG κατά την διάρκεια της χειμερινής ημέρας.

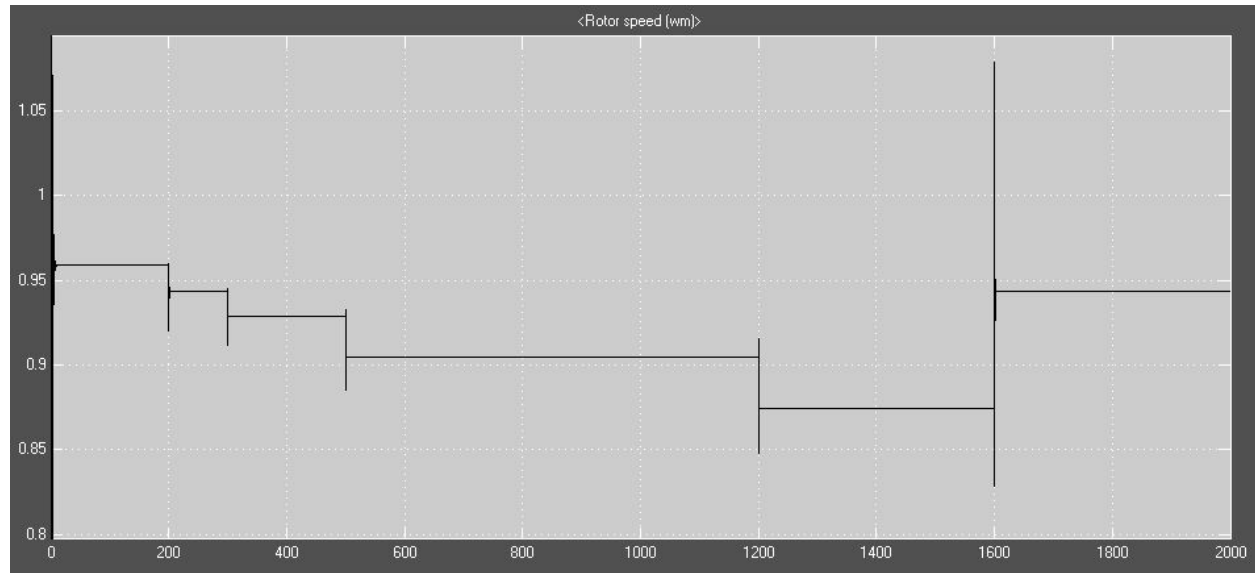
Στο σχήμα 5.7 φαίνεται το τμήμα της ημέρας κατά το οποίο χρειάστηκε να λειτουργήσει η μικροτουρμπίνα, δηλαδή 20 ώρες, και η αντίστοιχη ενέργεια που παράχθηκε για να καλύψει το έλλειμμα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.



Σχήμα 5.8 Παραγόμενη ροπή από την μικροτουρμπίνα.

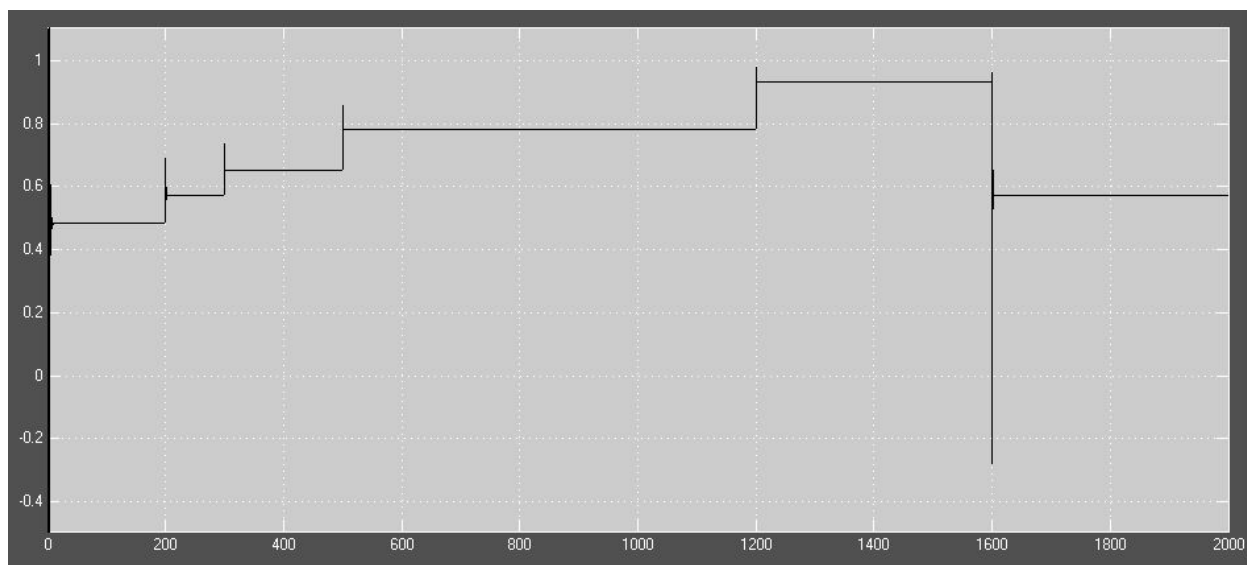
Στο σχήμα 5.8 φαίνεται η ροπή η οποία παράχθηκε από την μικροτουρμπίνα για να περιστρέψει την γεννήτρια κάτω από διαφορετικές συνθήκες φορτίου και στο σχήμα 5.9 φαίνεται η ταχύτητα του άξονα περιστροφής της μικροτουρμπίνας. Μπορούμε να

παρατηρήσουμε ότι η ταχύτητα περιστροφής της μικροτουρμπίνας μειώνεται όσο το φορτίο αυξάνεται και αυτό συμβαίνει γιατί συναντά μεγαλύτερη αντίσταση από την γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη που περιστρέφει.



Σχήμα 5.9 Ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μικροτουρμπίνας

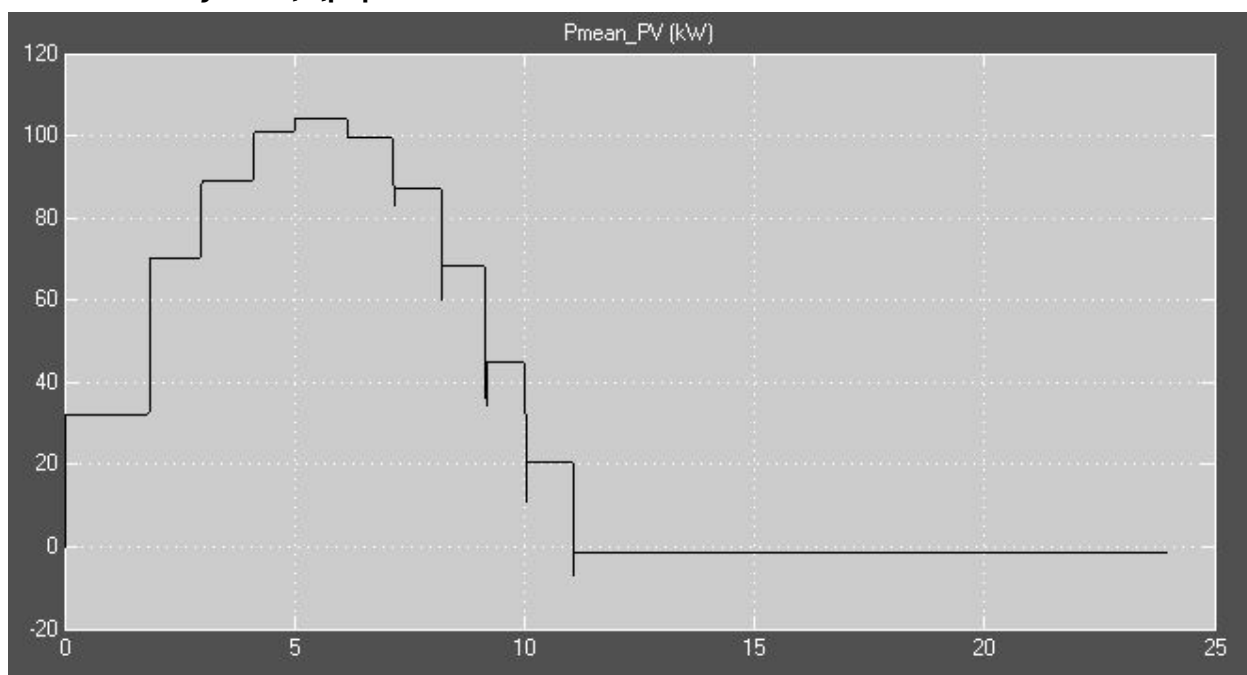
Τέλος στο σχήμα 5.10 φαίνεται η απαίτηση σε καύσιμο της μικροτουρμπίνας για να ανταποκριθεί στο συγκεκριμένο φορτίο. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για δύο ώρες λειτουργίας η απαίτηση καυσίμου ήταν 0.5 p.u., στην συνέχεια αυξήθηκε στα 0.6 p.u. για μία ώρα, τις επόμενες 2 ώρες ήταν περίπου 0.7 p.u. και στην συνέχεια για 7 ώρες ήταν 0.8 p.u.. Τις επόμενες 4 ώρες η κατανάλωση καυσίμου ανέβηκε περίπου στα 0.95 p.u. μέχρι να πέσει τις τελευταίες 4 ώρες στα 0.6 p.u. περίπου. Αν κάνουμε την μετατροπή της κατανάλωσης από p.u. σε $\text{m}^3/\text{ώρα}$ η συνολική κατανάλωση για μία μέρα ήταν 458 m^3 .



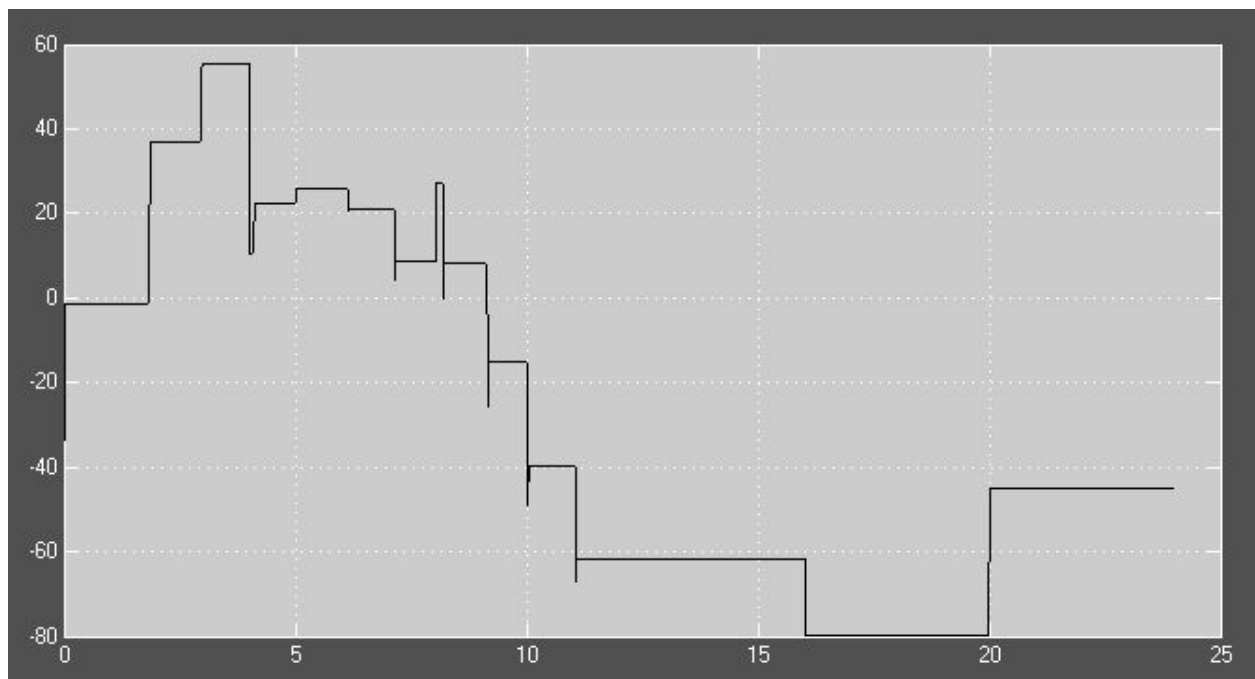
Σχήμα 5.10 Κατανάλωση καυσίμου της μικροτουρμπίνας

Στις επόμενες δύο ενότητες παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για μία ανοιξιάτικη και μία καλοκαιρινή μέρα. Στο τέλος της κάθε ενότητας αναλύεται η κατανάλωση καυσίμου από την μικροτουρμπίνα που παρατηρήθηκε για κάθε ημέρα.

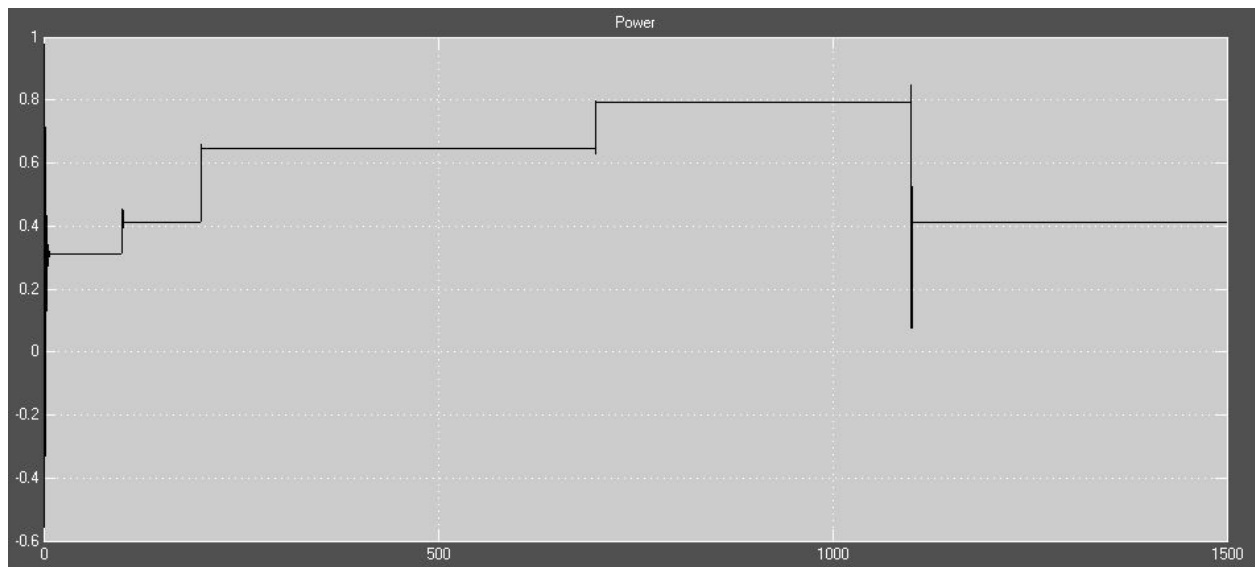
5.2.2 Ανοιξιάτικη ημέρα



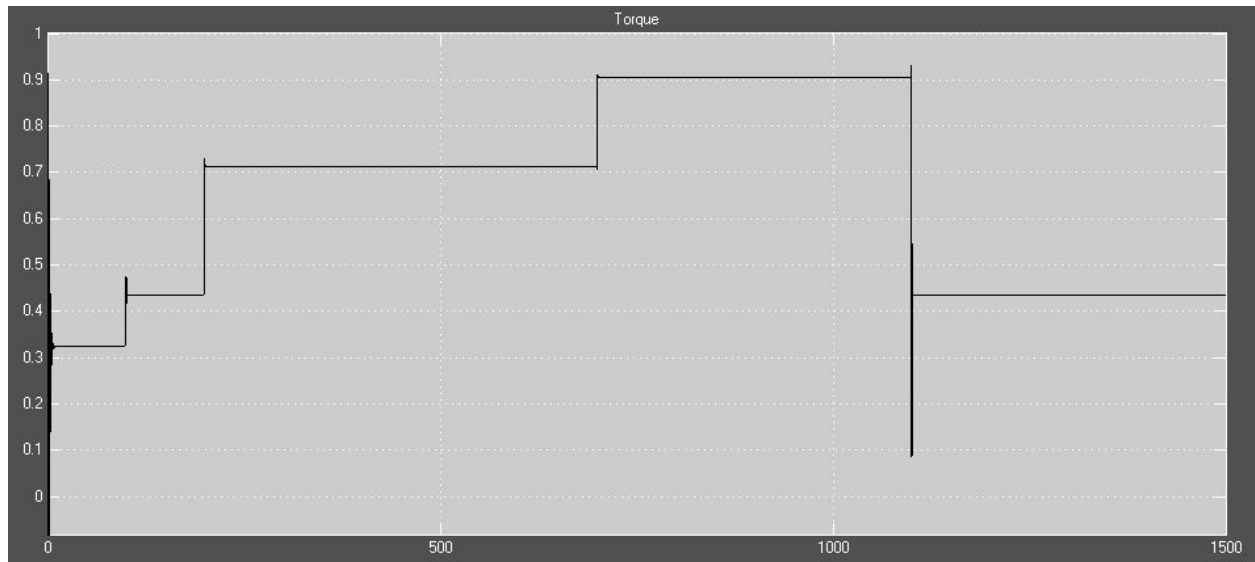
Σχήμα 5.11 Παραγόμενη ισχύς από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά την διάρκεια μίας ανοιξιάτικης ημέρας 7:30π.μ. - 6:30π.μ της επομένης.



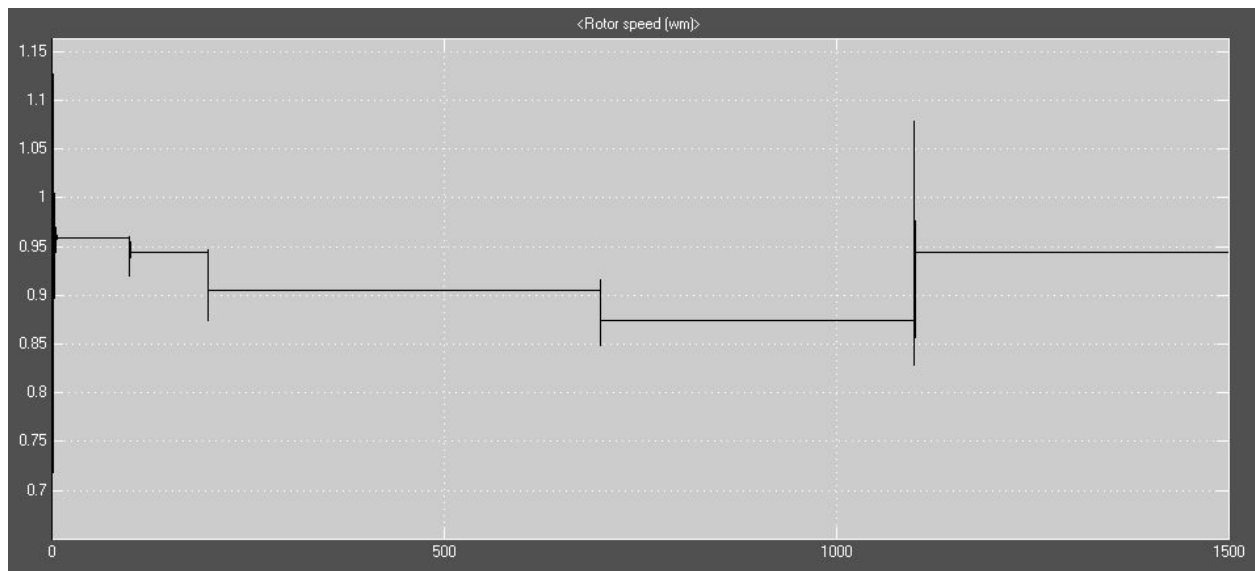
Σχήμα 5.12 Διαφορά φορτίου και παραγόμενης ισχύος από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.



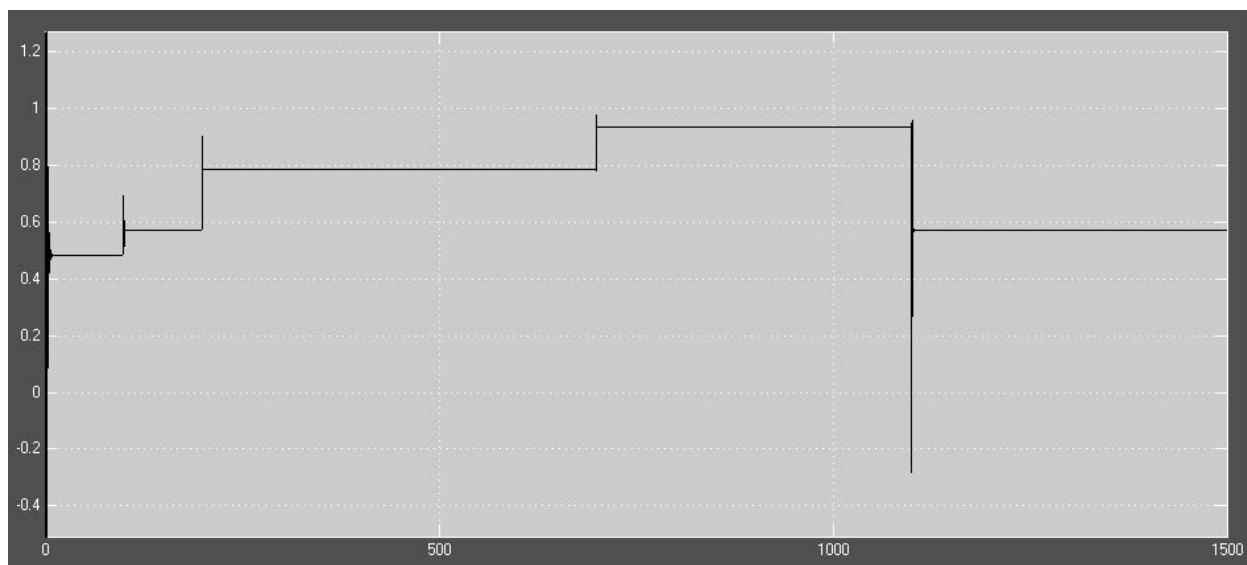
Σχήμα 5.13 Παραγόμενη ισχύς από το σύστημα MTG κατά την διάρκεια της ανοιξιάτικης ημέρας.



Σχήμα 5.14 Παραγόμενη ροπή από την μικροτουρμπίνα.



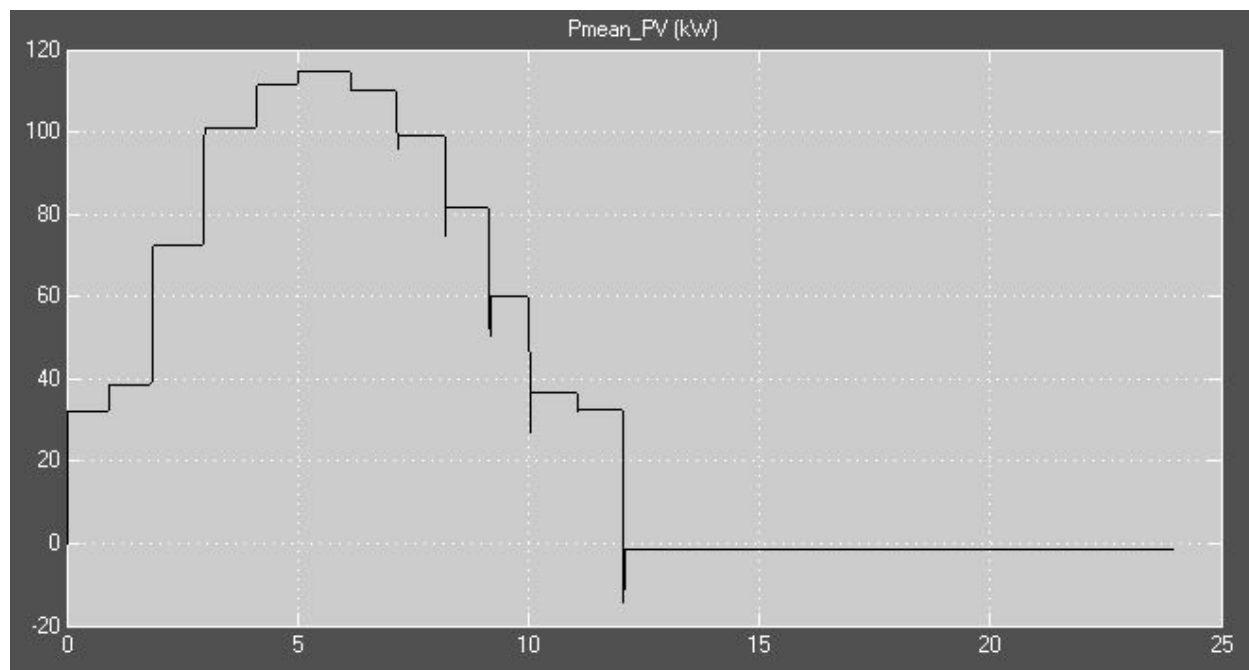
Σχήμα 5.15 Ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μικροτουρμπίνας



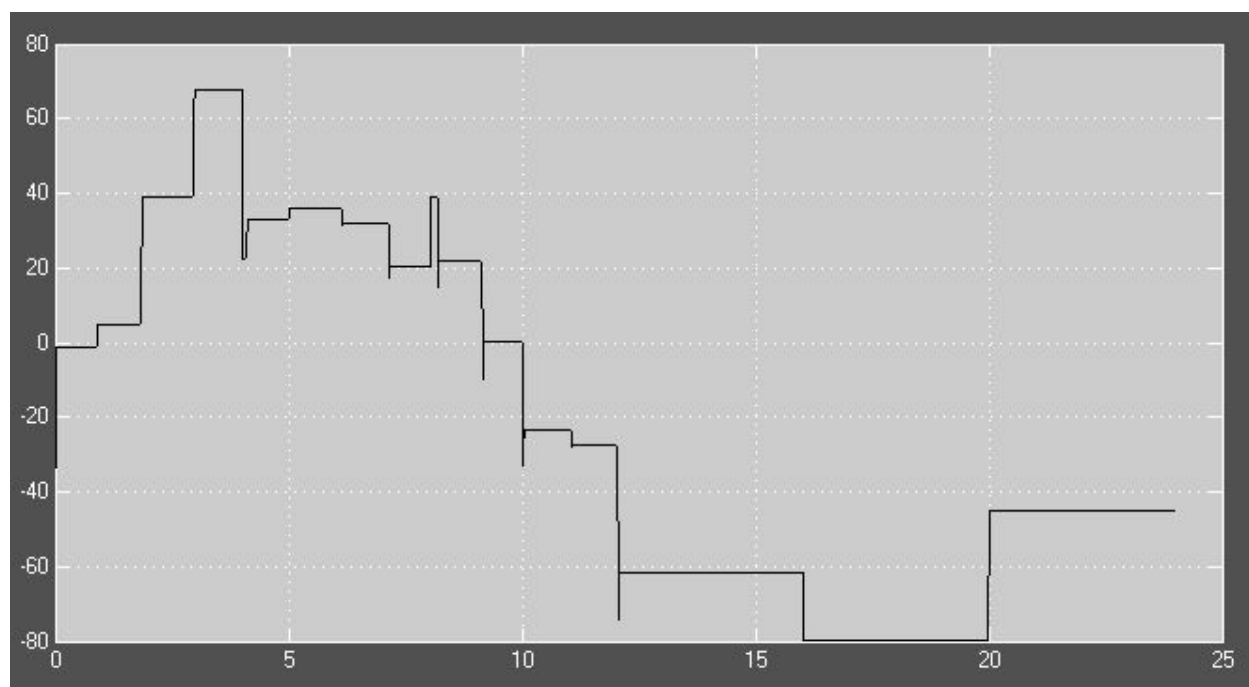
Σχήμα 5.16 Κατανάλωση καυσίμου της μικροτουρμπίνας

Κατά την διάρκεια της ανοιξιάτικης μέρας παρατηρούμε πως η μικροτουρμπίνα χρειάστηκε να λειτουργήσει 15 ώρες, 5 ώρες λιγότερες από την περίπτωση της χειμερινής ημέρας. Αναλυτικά η κατανάλωση καυσίμου ήταν 0.5 p.u. για 1 ώρα, 0.6 p.u. για 5 ώρες, 0.8 p.u. για 5 ώρες και 0.95 p.u. για 4 ώρες. Συνολικά και μετά από μετατροπή σε κυβικά μέτρα η κατανάλωση για μία ανοιξιάτικη ημέρα ήταν 350 m³.

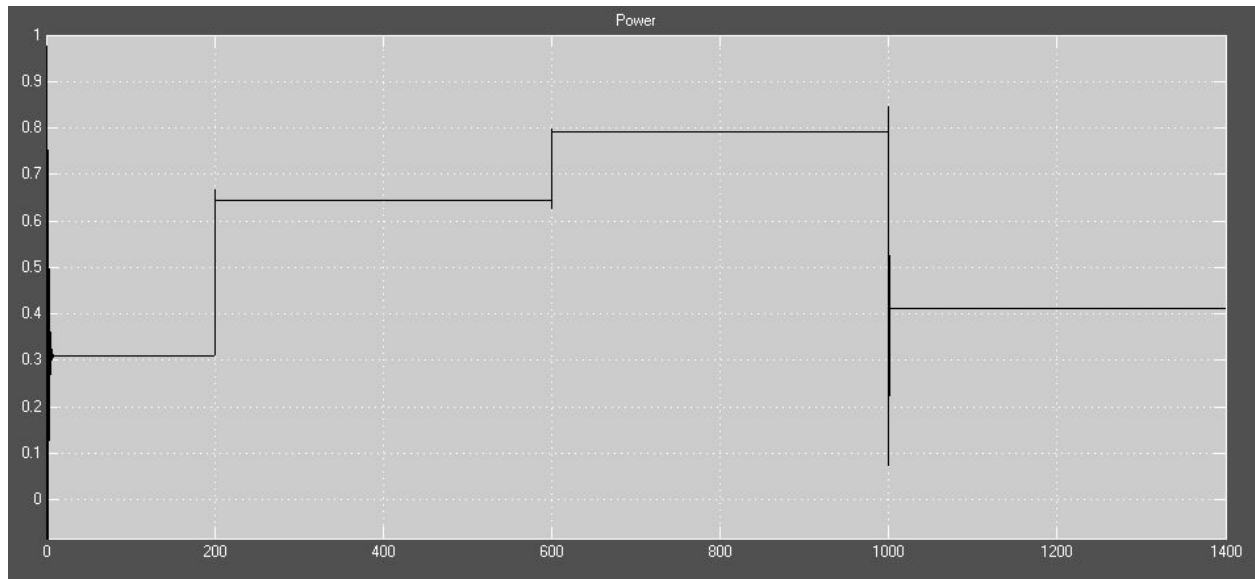
5.2.3 Θερινή ημέρα



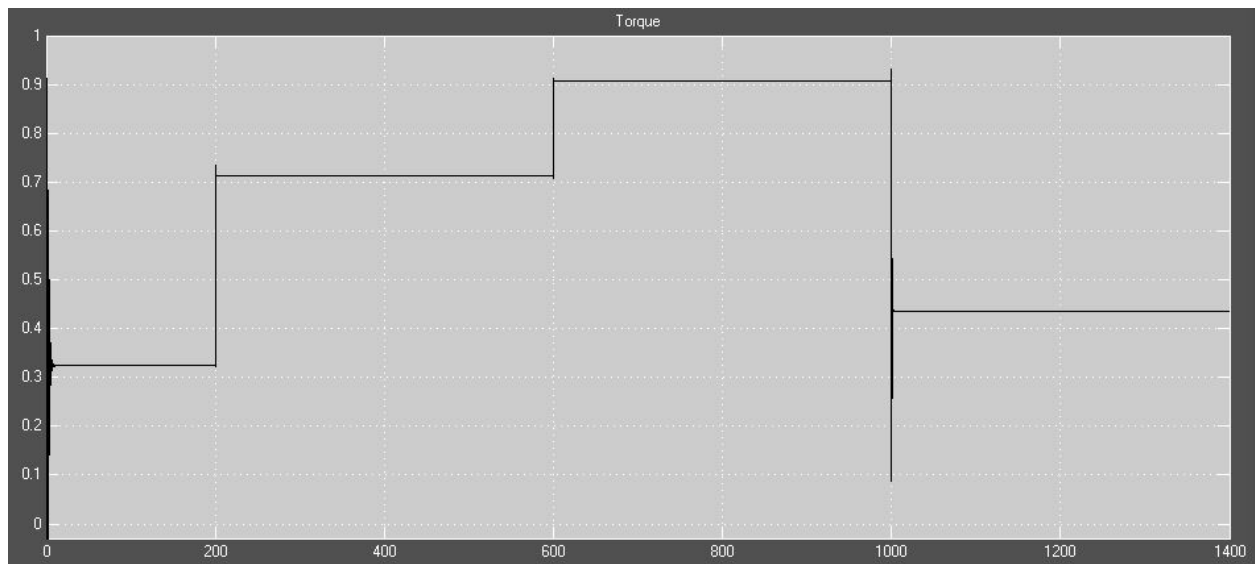
Σχήμα 5.17 Παραγόμενη ισχύς από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά την διάρκεια μίας καλοκαιρινής ημέρας 6:30π.μ. - 5:30π.μ της επομένης.



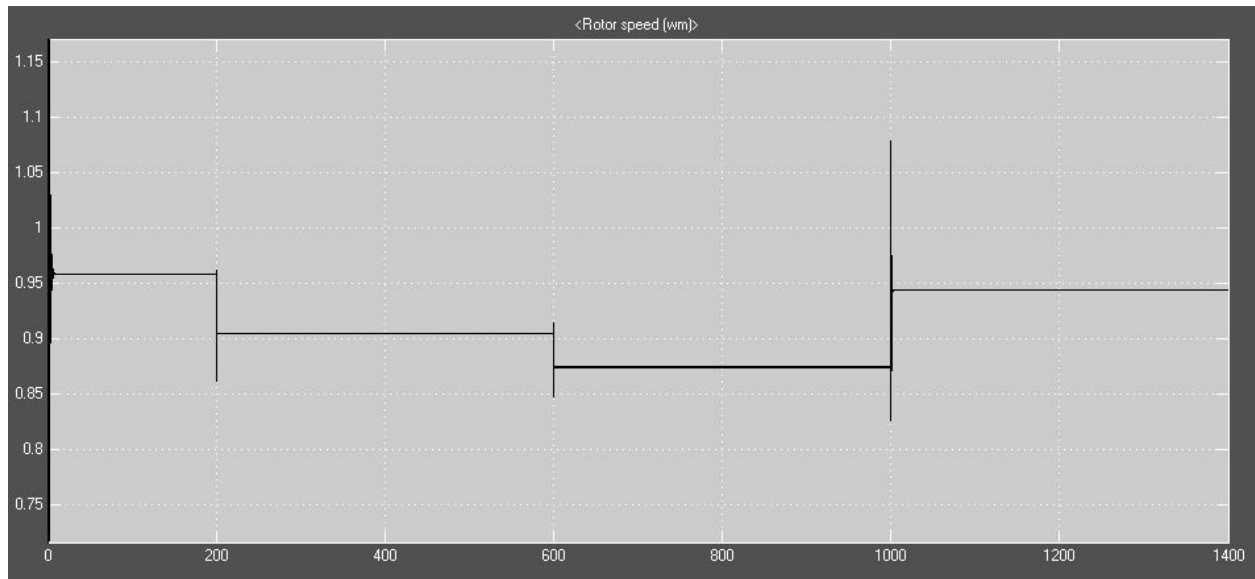
Σχήμα 5.18 Διαφορά φορτίου και παραγόμενης ισχύος από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.



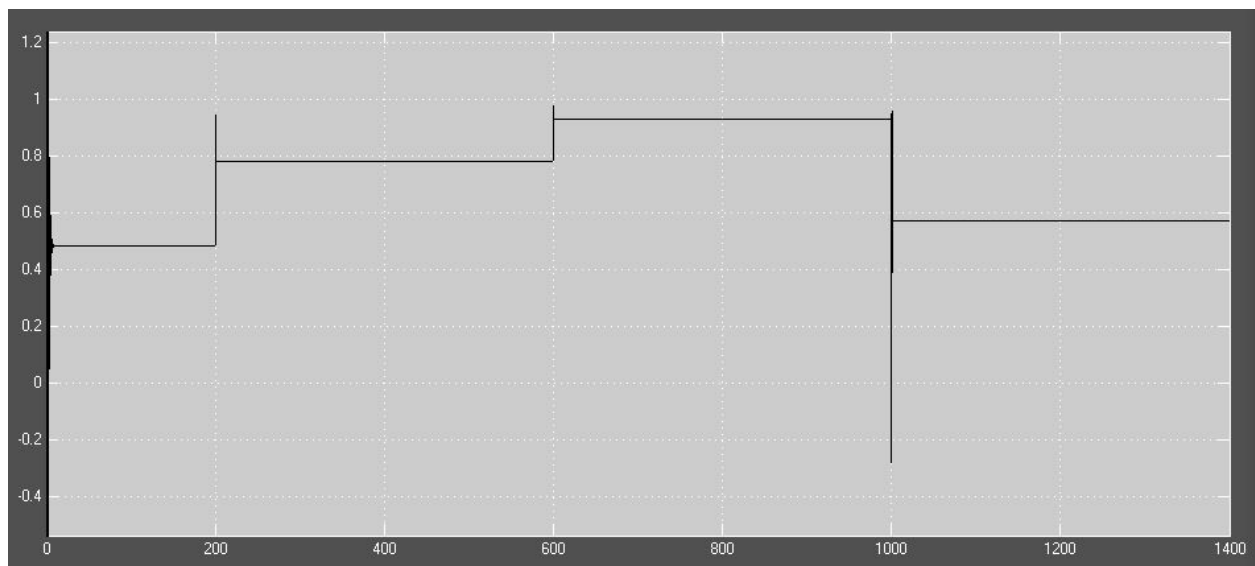
Σχήμα 5.19 Παραγόμενη ισχύς από το σύστημα MTG κατά την διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας.



Σχήμα 5.20 Παραγόμενη ροπή από την μικροτουρμπίνα.



Σχήμα 5.21 Ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μικροτουρμπίνας



Σχήμα 5.22 Κατανάλωση καυσίμου της μικροτουρμπίνας

Κατά την διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας παρατηρούμε πως η μικροτουρμπίνα χρειάστηκε να λειτουργήσει 14 ώρες, 1 ώρα λιγότερη από την περίπτωση της ανοιξιιάτικης ημέρας. Αναλυτικά η κατανάλωση καυσίμου ήταν 0.5 p.u. για 2 ώρες, 0.6 p.u. για 4 ώρες, 0.8 p.u. για 4 ώρες και 0.95 p.u. για 4 ώρες. Συνολικά και μετά από μετατροπή σε κυβικά μέτρα η κατανάλωση για μία ανοιξιιάτικη ημέρα ήταν 322 m³.

5.3 Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον

Στην εργασία αυτή, παρουσιάστηκε ένα μοντέλο αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και συστήματος MTG, το οποίο εφαρμόστηκε στο περιβάλλον Simulink με στόχο να προβλεφθεί η λειτουργική απόδοσή του, μέσω μιας δυναμικής προσομοίωσης.

5.3.1 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών γεννητριών και οι δύο βασικές μέθοδοι μοντελοποίησής τους. Επίσης έγινε παρουσίαση του συστήματος εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος, παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας του και οι βασικότεροι αλγόριθμοι ελέγχου. Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα μοντέλο Φ/B κυψέλης μίας διόδου καθώς και ένα σύστημα MPPT το οποίο υλοποιούσε τον αλγόριθμο διατάραξης και παρατήρησης.

5.3.2 Γεννήτρια μικροτουρμπίνας

Παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας των μικροτουρμπίνων, τα συστήματα ελέγχου που περιλαμβάνουν, οι κατηγοριοποιήσεις του ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους με τις γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη καθώς και τα πλεονεκτήματά τους σε σύγκριση με τις συμβατικές γεννήτριες ντίζελ. Υλοποιήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο μικροτουρμπίνας στο περιβάλλον Simulink, το οποίο παρήγαγε ροπή για την περιστροφή μίας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Για την μοντελοποίηση της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο block της Simulink.

5.3.3 Προσομοίωση του συστήματος

Με σκοπό να προβλέψουμε την λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος PV-MTG, έγινε προσομοίωση με πραγματικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, παραγωγής βιοαερίου και φορτίου. Θεωρήθηκε ότι η εγκατάσταση του συστήματος γίνεται σε μία κτηνοτροφική μονάδα 300 γαλακτοφόρων αγελάδων. Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας πάρθηκαν από το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμων πηγών των Ηνωμένων Πολιτειών (NREL) για τρεις μέρες, μία ανοιξιάτικη, μία καλοκαιρινή και μία χειμερινή. Για την παραγωγή βιοαερίου θεωρήθηκε ένα σύστημα καλυμμένης λίμνης χώνευσης, το οποίο έχει υλοποιηθεί το πολυτεχνείο της Καλιφόρνια. Επίσης βρέθηκαν και πηγές που περιγράφουν το φορτίο μίας τέτοιας κτηνοτροφικής μονάδας καθώς και την διακύμανση του κατά την διάρκεια μίας τυπικής ημέρας.

Από την προσομοίωση έγινε φανερό ότι ένα σύστημα PV-MTG με παραγωγή βιοαερίου με πόρους της ίδιας της κτηνοτροφικής μονάδας, δεν μπορεί να καλύψει πλήρως της ενεργειακές ανάγκες της. Και αυτό λόγω της ανάγκης καύσης βιοαερίου περισσότερου από αυτό που μπορούσε να παραχθεί ημερησίως από τον βιοαντιδραστήρα, δηλαδή 273m^3 περίπου. Αναλυτικότερα, κατά την διάρκεια ενός χειμερινού 24ώρου η μικροτουρμπίνα χρειάστηκε να λειτουργήσει για 20 ώρες και να καταναλώσει 458m^3 βιοαερίου οπότε υπήρχε ένα έλλειμμα 185m^3 την ημέρα. Κατά την διάρκεια μίας ανοιξιιάτικης ημέρας η μικροτουρμπίνα χρειάστηκε να λειτουργήσει για 15 ώρες και να καταναλώσει 350m^3 βιοαερίου. Και τέλος μία καλοκαιρινή ημέρα η μικροτουρμπίνα έπρεπε να λειτουργήσει για 14 ώρες με κατανάλωση 322m^3 συνολικά. Παρατηρούμε ότι αν και την ανοιξιιάτικη και την καλοκαιρινή μέρα η κατανάλωση βιοαερίου έπεσε σημαντικά και πάλι υπήρχε έλλειμμα 49m^3 .

5.3.4 Προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις

- Η προσθήκη μιας ακόμα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στο σύστημα, όπως μια ανεμογεννήτρια. Η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει μέρος της απαιτούμενης ενέργειας κατά την διάρκεια περιόδων που η Φ/Β γεννήτρια δεν μπορούσε, όπως κατά την διάρκεια της νύχτας. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της κατανάλωσης βιοαερίου, καθώς η μικροτουρμπίνα λειτουργούσε κυρίως κατά την διάρκεια της νύχτας.
- Η προσθήκη παραπάνω φ/β πλαισίων στο σύστημα, ώστε όλα μαζί συνδεδεμένα να βοηθούν στην μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας . Καθώς και η τοποθέτηση μίας μπαταρίας ή ενός υπερ-πυκνωτή για αποθήκευση ενέργειας και σταθερότητας στο σύστημα μας .
- Η χρήση φωτοβολταϊκών μοντέλων πολλαπλών επαφών (multijunction) ή άλλων τεχνολογιών που επιτυγχάνουν αρκετά μεγαλύτερες αποδόσεις, θα αύξαναν την αποδοτικότητα του συστήματος μας. Βέβαια τέτοια μοντέλα δεν έχουν κάνει ακόμα την εμφάνισή τους στην αγορά λόγω υψηλού κόστους.
- Η μελέτη ενός συστήματος συμπαραγωγής και τα οικονομικά οφέλη. Τα οφέλη από μία τέτοια εγκατάσταση θα είναι πάρα πολλά καθώς πολλά συστήματα MTG έχουν μεγαλύτερη απόδοση θερμικής ενέργειας από ότι ηλεκτρικής.

- Η μελέτη διαφορετικών τύπων βιοαντιδραστήρων και η πιθανή βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου.
- Τεχνική-οικονομική ανάλυση και συγκεκριμένη πρόταση για εγκατάσταση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, σαν το σύστημα που εξετάστηκε στη παρούσα μελέτη. Είναι βασικό ο μηχανικός που αναλαμβάνει τη μελέτη ενός έργου, πριν μεταβεί από τη θεωρία στη πράξη, να εξετάσει την βιωσιμότητα μιας αντίστοιχης επένδυσης .

Παράρτημα

Κώδικας αλγορίθμου διατάραξης και παρατήρησης:

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4);

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
```

end

Dold=D;

Vold=V;

Pold=P;

Βιβλιογραφία

- [1] Bose, Bimal K. "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics." IEEE Industrial Electronics Magazine 4, no. 1 (2010): 6-17.
- [2] <http://www.eia.doe.gov/>
- [3] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, "Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [4] Kaldellis, J. K., K. A. Kavadias, and P. S. Koronakis. "Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers." Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, no. 1 (2007): 57-77.
- [5] de La Tour, Arnaud, Matthieu Glachant, and Yann Ménière. "Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models." Energy 62 (2013): 341-348.
- [6] Krauter, S., and R. G. Araújo. "New Power Conditioning Unit Incorporating Charge Controller, Energy Flow Monitor, Data Logger, DC/AC Converter for Stand Alone and Combined PV-Diesel Operation." In Proc. of 16th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2575-2577. 2000.
- [7] Hollmuller, Pierre, Jean-Marc Joubert, Bernard Lachal, and Klaus Yvon. "Evaluation of a 5 kW p photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland." International Journal of Hydrogen Energy 25, no. 2 (2000): 97-109.
- [8] Almonacid, M., and J. Aguilera. "Fuzzy logic charge regulator." In Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, pp. 3273-3275. 1998.
- [9] Rowen, William I. "Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines." Journal of engineering for power 105, no. 4 (1983): 865-869.
- [10] Hannett, L. N., and A. H. Khan. "Combustion turbine dynamic model validation from tests." IEEE Transactions on Power Systems 8, no. 1 (1993): 152-158.
- [11] De Mello, F. P., and D. J. Ahner. "Dynamic models for combined cycle plants in power system studies." IEEE Transactions on Power Systems (Institute of Electrical and Electronics Engineers);(United States) 9, no. 3 (1994).

- [12] Cano, A., F. Jurado, and J. Carpio. "Influence of micro-turbines on distribution networks stability." In Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol. 4. IEEE, 2003.
- [13] Jurado, F., and A. Cano. "Use of ARX algorithms for modelling micro-turbines on the distribution feeder." IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 151, no. 2 (2004): 232-238.
- [14] Al-Hinai, Amer, and Ali Feliachi. "Dynamic model of a microturbine used as a distributed generator." In System Theory, 2002. Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on, pp. 209-213. IEEE, 2002.
- [15] Goldstein, Larry, Bruce Hedman, Dave Knowles, Steven I. Freedman, Richard Woods, and Tom Schweizer. "Gas-fired distributed energy resource technology characterizations." Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory Report NREL/TP-620-34783 (2003).
- [16] Malmquist, Anders. Analysis of a gas turbine driven hybrid drive system for heavy vehicles. Institutionen för elkraftteknik, 1999.
- [17] Winfried Hoffmann: PV Solar Electricity: One Among the New Millennium Industries, 17th EPVSEC, Paper No. PB 2.1, Munich, Germany, 2001, pp. 851-861.
- [18] Fry, Bryan. Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems. University of Wisconsin--Madison, 1999.
- [19] Kininger, Franz, and R. Energiewandlung. "Photovoltaic systems technology." Universität Kassel 155 (2003).
- [20] Moraes-Duzat, Rejane Mércia de Siqueira. "Analytical and experimental investigation of photovoltaic pumping systems." PhD diss., Universität Oldenburg, 2000.
- [21] Ahmad, G. E., M. A. Mohamad, S. A. Kandil, and R. Hanitsch. "Fault Detection in PV Generators Using an Improved Electronic Load." Proc. of 14th EPVSEC (1997): 199-202.
- [22] Kuo, Yeong-Chau, Tsorng-Juu Liang, and Jiann-Fuh Chen. "Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system." IEEE Transactions on Industrial Electronics 48, no. 3 (2001): 594-601.
- [23] Jantsch, M., M. Real, H. Häberlin, C. Whitaker, K. Kurokawa, G. Blässer, P. Kremer, and C. W. G. Verhoeve. Measurement of PV maximum power point tracking performance. Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1997.

- [24] Hingorani, Narain G., and Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. Wiley-IEEE press, 2000.
- [25] Borbely, Anne-Marie, and Jan F. Kreider, eds. Distributed generation: the power paradigm for the new millennium. CRC press, 2001.
- [26] Lasseter, Robert. "Dynamic models for micro-turbines and fuel cells." In Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, vol. 2, pp. 761-766. IEEE, 2001.
- [27] Puttgen, Hans B., Paul R. Macgregor, and Frank C. Lambert. "Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?." IEEE power and energy magazine 1, no. 1 (2003): 22-29.
- [28] Malmquist, Anders. Analysis of a gas turbine driven hybrid drive system for heavy vehicles. Institutionen för elkraftteknik,, 1999.
- [29] Zhu, Y., and K. Tomsovic. "Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells." Electric Power Systems Research 62, no. 1 (2002): 1-11.
- [30] Treece, Bill, Phil Vessa, and Robert McKeirnan. "Microturbine recuperator manufacturing and operating experience." In ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, pp. 1017-1023. American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [31] Malmquist, Anders, Ola Aglen, Edgar Keller, Marco Suter, and Jari Wickstrom. "Microturbines: Speeding the shift to distributed heat and power." ABB review 3 (2000): 22-30.
- [32] Weiland, Peter. "Biogas production: current state and perspectives." Applied microbiology and biotechnology 85, no. 4 (2010): 849-860.
- [33] Holm-Nielsen, Jens Bo, Theodorita Al Seadi, and Piotr Oleskowicz-Popiel. "The future of anaerobic digestion and biogas utilization." Bioresource technology 100, no. 22 (2009): 5478-5484.
- [34] Gerardi, Michael H. "Types of Anaerobic Digesters." The Microbiology of Anaerobic Digesters: 141-151.
- [35] Mata-Alvarez, Joan, S. Mace, and P. Llabres. "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives." Bioresource technology 74, no. 1 (2000): 3-16.

- [36] Monnet, Fabien. "An introduction to anaerobic digestion of organic wastes." Remade Scotland (2003): 1-48.
- [37] ΑΝΔΡΩΝΗΣ Β., "Ενεργειακή αξιοποίηση κτηνοτροφικών αποβλήτων με την αναερόβια χώνευση τους σε κτηνοτροφική μονάδα του Δήμου Δεσκάτης Γρεβενών", Μεταπτυχιακό πρόγραμμα "Γεωπληροφορική" με κατεύθυνση στους υδατικούς πόρους, Τμήμα αγρονόμων και τοπογράφων μηχανικών, ΑΠΘ, 2013
- [38] Williams, Douglas W., and D. Gould-Wells. "Biogas production from a covered lagoon digester and utilization in a microturbine." Resource: Engineering & Technology for a Sustainable World 11, no. 3 (2004): 11-12.
- [39] Rauschenbach, Hans S. Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion. Springer Science & Business Media, 2012.
- [40] Chenni, R., M. Makhlouf, T. Kerbache, and A. Bouzid. "A detailed modeling method for photovoltaic cells." Energy 32, no. 9 (2007): 1724-1730.
- [41] Ishaque, Kashif, Zainal Salam, and Hamed Taheri. "Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules." Solar Energy Materials and Solar Cells 95, no. 2 (2011): 586-594.
- [42] Tsai, Huan-Liang, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su. "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK." In Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, vol. 2008, pp. 1-6. Citeseer, 2008.
- [43] Ishaque, Kashif, and Zainal Salam. "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition." Renewable and Sustainable Energy Reviews 19 (2013): 475-488.
- [44] Salas, V., E. Olías, A. Barrado, and A. Lazaro. "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems." Solar energy materials and solar cells 90, no. 11 (2006): 1555-1578.
- [45] Ρούσσος, Γουλιέλμος, and Παναγιώτης Παπαθεοδοσίου. "Προσομοίωση ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με έλεγχο απόδοσης σε πραγματικό χρόνο." (2014).
- [46] Giroux, Pierre, Gilbert Sybille, Carlos Osorio, and Shripad Chandrachood. "Grid-Connected PV Array." Mathworks Co (2012).
- [47] https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter

- [48] Hajagos, L. M., and G. R. Berube. "Utility experience with gas turbine testing and modeling." In IEEE power engineering society winter meeting, vol. 2, no. 2, pp. 671-677. 2001.
- [49] Jurado, Francisco, and Jose Ramon Saenz. "Adaptive control of a fuel cell-microturbine hybrid power plant." In Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, vol. 1, pp. 76-81. IEEE, 2002.
- [50] Guda, Sreedhar Reddy. "Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation system." PhD diss., Montana State University-Bozeman, College of Engineering, 2005.
- [51] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/magperm.html>
- [52] Bose, Bimal K. "Power electronics and motor drives recent progress and perspective." IEEE Transactions on Industrial Electronics 56, no. 2 (2009): 581-588.
- [53] Chee-Mun, Ong. "Dynamic simulation of electric machinery." (1998).
- [54] MATLAB/Simulink Documentation: <http://www.mathworks.com>
- [55] NREL: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer>
- [56] GERONIMO II:
<https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/geronimo-ii-biogas>
- [57] <https://bizenergyadvisor.com/dairy-farms>