

Βέλτιστος σχεδιασμός υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ-Η₂ με στόχο την ενεργειακή κάλυψη κατοικιών

Δρόσος Χουσιάδας

Επιβλέπων καθηγητής

Δημήτριος Ιψάκης

Χανιά, Ιούνιος 2023

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της προσομοίωσης ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το οποίο παράλληλα πραγματοποιεί παραγωγή υδρογόνου μέσω της χημικής ηλεκτρόλυσης νερού. Η ηλεκτρόλυση του νερού λαμβάνει χώρα στην συσκευή ηλεκτρόλυσης η οποία τροφοδοτείται μέσω πλεονάζουσας ενέργειας που διαχειρίζεται αλγόριθμος ενεργειακής διαχείρισης.

Αρχικά, αναλύεται ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος στα επιμέρους μηχανολογικά στοιχεία που το απαρτίζουν καθώς και η λειτουργία του συστήματος. Η λειτουργία της εγκατάστασης αναλύεται μέσω αλγορίθμου προσομοίωσης ο οποίος αναπτύχθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης παρουσιάζεται σε 4 σκέλη (εισαγωγή, επεξεργασία, προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων) με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας του υπολογιστικού αλγορίθμου καθώς και των μεγεθών και μαθηματικών μοντέλων που τον απαρτίζουν.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεταβλητή ελέγχου της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (StateofCharge), μέσω μαθηματικών μοντέλων, και ο ρόλος που λαμβάνει στον αλγόριθμο ενεργειακής διαχείρισης για την βέλτιστη κατανομή της παράγουσας ενέργειας.

Συνεχίζοντας, αναλύονται και συγκρίνονται 2 διαφορετικές συναρτήσεις κόστους βασισμένες στους όρους του κόστους ενέργειας (CostofEnergy) και του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (CapitalRecoveryFactor).

Τέλος, πραγματοποιείται η προσομοίωση σεναρίων βελτιστοποίησης της εγκατάστασης στα οποία ζητείται η βέλτιστη διαστασιολόγηση για την άμεση κάλυψη φορτίου οικιών καθώς και για την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου παραγωγής υδρογόνου. Επιπροσθέτως, γίνεται αξιολόγηση της εγκατάστασης μέσω της σύγκρισης των μαθηματικών μοντέλων που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

Λέξεις κλειδιά: υδρογόνο, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ηλιακή ενέργεια, ενεργειακό πρόβλημα, ηλεκτρόλυση νερού, αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας, φωτοβολταϊκά

Abstract

The main objective of this thesis is the study and analysis of the simulation of a hybrid renewable energy sources system which simultaneously carries out the production of hydrogen through chemical electrolysis. The electrolysis of water takes place in the electrolyzer which is fed through excess energy managed by energy management algorithm.

Initially, the design of the hybrid system is analyzed in the individual mechanical elements that constitute it as well as the operation of the system. The operation of the installation is analyzed through a simulation algorithm developed in MATLAB programming environment. The simulation algorithm is presented in 4 parts (input, processing, simulation and output of results) in order to understand the operation of the computational algorithm as well as the subjects and mathematical models that constitute it.

Then, the control variable of the state of charge of the battery is presented through mathematical models, and the role it takes in the energy management algorithm for the optimal distribution of the generating energy.

Continuing, pre – existing mathematical models and equations of techno – economic subjects are analyzed and compared with mathematical models based on the Cost of Energy and the Capital Recovery Factor.

Finally, the simulation of plant optimization scenarios is carried out in which it is being requested the optimal sizing of the immediate load coverage of houses as well as the achievement of a specific hydrogen production target. In addition, the installation is evaluated by comparing the mathematical models analyzed in previous chapters.

Keywords: hydrogen, renewable energy sources (RES), solar energy, energy problem, water electrolysis, energy management algorithm, photovoltaic

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Κεφάλαιο 1ο : Ανάλυση υβριδικών συστημάτων Α.Π.Ε.	5
1.1 Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε.	5
1.2 Σχεδιασμός και ανάλυση κώδικα προσομοίωσης υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε.....	7
1.2.1 Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων	7
1.2.2 Επεξεργασία δεδομένων και ορισμός πινάκων των δεδομένων.....	8
1.2.3 Προσομοίωση της υβριδικής εγκατάστασης με βάση ενεργειακές στρατηγικές.....	9
1.2.4 Εξαγωγή τελικών δεδομένων και μεγεθών της εγκατάστασης και παρουσίαση αποτελεσμάτων	11
Κεφάλαιο 2ο :Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης της υβριδικής εγκατάστασης Α.Π.Ε.	12
2.1 Ανάλυση λειτουργίας και προσομοίωσης της υβριδικής εγκατάστασης ..	12
2.2 Ανάλυση κώδικα ενεργειακής στρατηγικής της εγκατάστασης.....	15
2.3 Ορισμός της κατάστασης φόρτισης (State of Charge)	18
2.4 Λειτουργία της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) στον κώδικα προσομοίωσης.....	19
2.5 Βέλτιστος ορισμός ορίων της κατάστασης φόρτισης (State of Charge).....	21
Κεφάλαιο 3ο : Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων ερμηνείας της αντικειμενικής συνάρτησης	23
3.1 Ορισμός παρούσας αντικειμενικής συνάρτησης	23
3.2 Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης με βάση το κόστος ενέργειας.....	25
Κεφάλαιο 4ο : Προσομοίωση σεναρίων βελτιστοποίησης της εγκατάστασης	28
4.1 Σενάριο προσομοίωσης 1	29
4.2 Σενάριο προσομοίωσης 2	34
4.3 Σενάριο προσομοίωσης 3	38
Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα και αξιολόγηση υβριδικής εγκατάστασης	43
Βιβλιογραφία	44

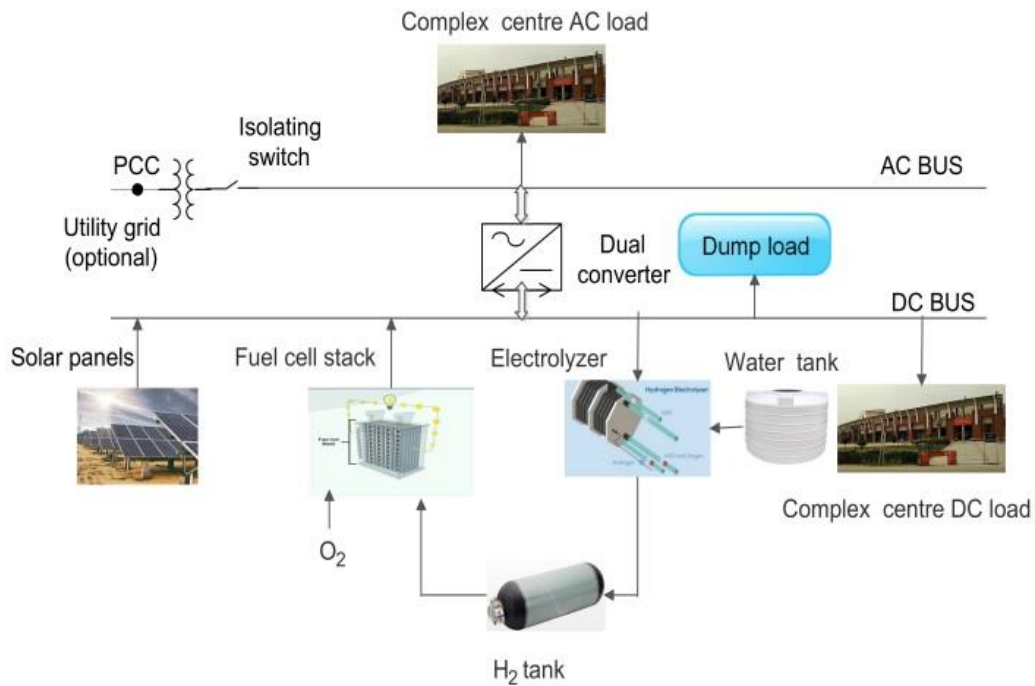
Κεφάλαιο 1^ο : Ανάλυση υβριδικών συστημάτων Α.Π.Ε.

1.1 Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε.

Το υβριδικό σύστημα των Α.Π.Ε. το οποίο σχεδιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από Φ/Β πάνελ, μια σειρά συσσωρευτών (Batteries), μια σειρά δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου, μετασχηματιστές ρεύματος και μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού (electrolyzer). Ο τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης των υβριδικών Α.Π.Ε. λειτουργεί με τον ακόλουθο τρόπο. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλιακής ακτινοβολίας έχοντας ως άμεσο σκοπό τη διατήρηση της ενέργειας η οποία είναι απαραίτητη για τους στόχους ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν τεθεί. Παράλληλα μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται με σκοπό την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών διάφορων εφαρμογών αν υπάρχουν. Σε περίπτωση που υπάρχει ενεργειακό πλεόνασμα στην εγκατάσταση, υπάρχουν οι εξής εναλλακτικές περιπτώσεις:

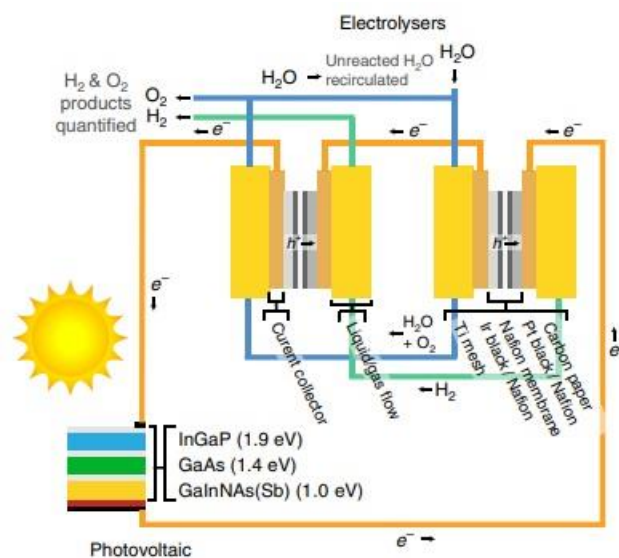
- Η εναλλακτική της αποθήκευσης (φόρτιση) του πλεονάσματος από τους συσσωρευτές της εγκατάστασης προς χρήση (εκφόρτιση) όταν υπάρχει έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη των ενεργειακών αναγκών των λοιπών εφαρμογών.
- Η εναλλακτική περίπτωση της απευθείας παροχής του πλεονάσματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης (electrolyzer) σε συνδυασμό με τις φιάλες αποθήκευσης του υδρογόνου πραγματοποιείται ως εξής. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης (electrolyzer) λαμβάνει την ενέργεια από τα Φ/Β πάνελ προς παραγωγή υδρογόνου και η συγκεκριμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει την διεργασία της ηλεκτρόλυσης του νερού και μεταγενέστερα την αποθήκευση του υδρογόνου (προϊόν της ηλεκτρόλυσης) σε δεξαμενές υδρογόνου συγκεκριμένων προδιαγραφών υπό πίεση.



Σχήμα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση διαγράμματος του υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε.

Πηγή :Cost Optimization of a Stand-Alone Hybrid Energy System with Fuel Cell and PV [6]



Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση συσκευής ηλεκτρόλυσης (electrolyzer)

Πηγή : Solar water splitting by photovoltaic – electrolysis with a solar – to – hydrogen efficiency over 30% [15]

Οι συσσωρευτές παρέχουν άμεση αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι είναι ρυθμιζόμενοι με συγκεκριμένες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η λειτουργία των συσσωρευτών και των υπολοίπων στοιχείων της εγκατάστασης Α.Π.Ε.. Όπως θα αναλυθεί και στα επόμενα κεφάλαια είναι καίριας σημασίας ο σωστός ορισμός και παραμετροποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών για την βελτιστοποίηση της οριοθέτησης της κατάστασης φόρτισης (State of charge), δηλαδή της τιμής της τρέχουσας χωρητικότητας του συσσωρευτή σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

1.2 Σχεδιασμός και ανάλυση κώδικα προσομοίωσης υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε.

Ο σχεδιασμός του κώδικα στηρίζεται στην λογική της δομής του υβριδικού συστήματος Α.Π.Ε. και επί της ουσίας αντικατοπτρίζει την λειτουργία του συστήματος καθώς δέχεται συγκεκριμένα μεγέθη για ορίσματα εισόδου και εφαρμόζει πλήρως τις κατάλληλες στρατηγικές, που θα αναλυθούν στην δομή του κώδικα προσομοίωσης. Λειτουργεί με βάση τις αρχές που έχουν τεθεί για το υβριδικό σύστημα και επιστρέφει τα κατάλληλα ορίσματα εξόδου.

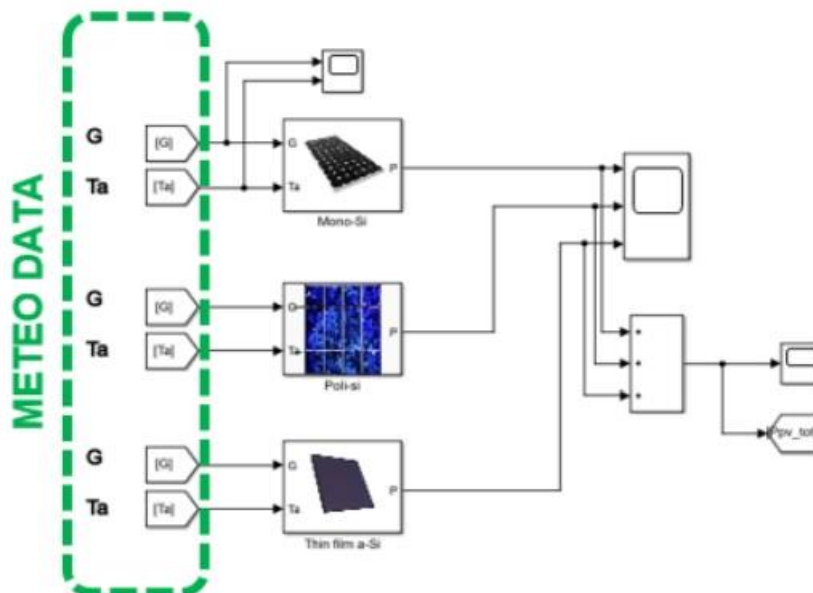
Η δομή του κώδικα χωρίζεται σε 4 σκέλη:

- 1^ο σκέλος: Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων
- 2^ο σκέλος: Βελτιστοποίηση μεταβλητών (σε συνδυασμό με το σκέλος 3)
- 3^ο σκέλος: Προσομοίωση της υβριδικής εγκατάστασης με βάση ενεργειακές στρατηγικές που θα αναλυθούν
- 4^ο σκέλος: Εξαγωγή τελικών δεδομένων και διαστάσεων των υποσυστημάτων της εγκατάστασης και παρουσίαση αποτελεσμάτων

1.2.1 Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων

Στην εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για την προσομοίωση της εγκατάστασης καθώς και η κατάλληλη προσαρμογή τους έτσι ώστε να ενσωματωθούν στον κώδικα προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, μεγέθη εισόδου όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, η ακτινοβολία

κλπ, εισάγονται μέσω χρήση πινάκων MATLAB. Η ανάλυση του συστήματος γίνεται μέσω προσομοιώσεων ανά ώρα σε χρονική κλίμακα καθώς λαμβάνονται τα ωριαία δεδομένα (για 1 έτος) έτσι ώστε η επεξεργασία των συγκεκριμένων δεδομένων να είναι ακριβής και να γίνει εστίαση στην ανάλυση του ενεργειακού τομέα της εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω εξισώσεων που εκφράζουν την ισχύ εξόδου μέσω μεταβλητών όπως η θερμοκρασία και η ακτινοβολία ορίζεται η ονομαστική ισχύς που δίδεται ως έξοδος από τα Φ/Β πλαίσια, και έπειτα οι συγκεκριμένες τιμές λαμβάνονται ανά ώρα, αποθηκεύονται με την χρήση πινάκων MATLAB σε διανύσματα πινάκων, έτσι ώστε να μπορούν μεταγενέστερα να επεξεργαστούν κατάλληλα για τις ανάγκες και τις λειτουργίες του κώδικα.

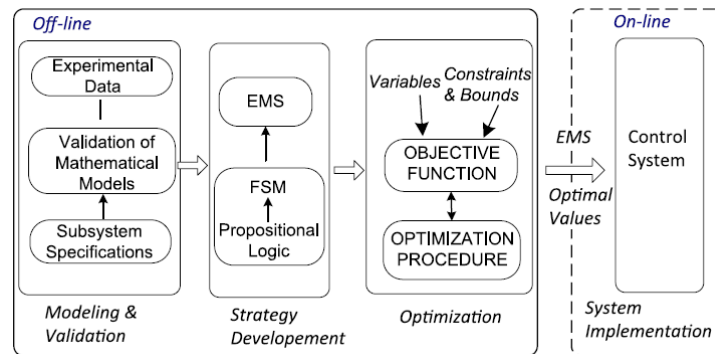


Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση εισαγωγής δεδομένων εισόδου

Πηγή :A model-based parametric and optimal sizing of a battery/hydrogen storage of a real hybrid microgrid supplying a residential load: towards island operation [3]

1.2.2 Επεξεργασία δεδομένων και ορισμός πινάκων των δεδομένων

Στην επεξεργασία δεδομένων, πραγματοποιείται η εισαγωγή των δεδομένων σε ειδικά διανύσματα πινάκων MATLAB όπου θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της εγκατάστασης.



Σχήμα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ροής δεδομένων εισόδου

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy [16]

1.2.3 Προσομοίωση της υβριδικής εγκατάστασης με βάση ενεργειακές στρατηγικές

Η εκτέλεση του βασικού σκέλους του κώδικα προσομοίωσης απαιτεί την κατανόηση της λογικής του κώδικα και τους τρόπους λειτουργίας του με βάση τις ενεργειακές στρατηγικές που έχουν προκαθοριστεί για την βέλτιστη λειτουργία της ενεργειακής εγκατάστασης. Συγκεκριμένα η προσομοίωση λειτουργεί μέσω διαδοχικών βελτιστοποιήσεων του κώδικα της προσομοίωσης με την μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Οι βελτιστοποιήσεις δέχονται σαν ορίσματα – στόχους 5 διανύσματα τα οποία απαρτίζουν την ομαλή λειτουργία της ενεργειακής εγκατάστασης:

- Μέγεθος σε Φ/Β πλαίσια
- Μέγεθος σε Συσσωρευτές/Μπαταρίες
- Μέγεθος σε Electrolyzer
- Περιορισμός για την ελάχιστη τιμή κατάστασης φόρτισης (State of Charge)
- Περιορισμός για την μέγιστη τιμή κατάστασης φόρτισης (State of Charge)

Στη συνέχεια λαμβάνουν μέρος οι συγκρίσεις των βελτιστοποιήσεων του γενετικού αλγορίθμου. Μέσω του Optimtool της MATLAB βελτιστοποιούνται διάφορες λύσεις (generations) όπου στην συνέχεια συνδυάζονται και τροποποιούνται κατάλληλα για να επιτευχθεί η εκλογή της βέλτιστης λύσης. Τα στάδια του γενετικού αλγορίθμου είναι τα εξής:

- Παραγωγή αρχικού πληθυσμού (Αρχικές λύσεις/εύρος διανυσμάτων)
- Εκλογή αρχικών λύσεων

- Διασταύρωση λύσεων και δημιουργία νέων γενεών (generations)
- Σύγκριση λύσεων παλαιάς με καινούργιας γενεάς
- Εκλογή βέλτιστης λύσης με βάση την δαρβινική θεωρία της εξέλιξης

Μέσω της βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται η εκλογή του βέλτιστου μεγέθους μηχανολογικών στοιχείων για την λειτουργία της εγκατάστασης (Φ/Β πλαίσια, συσσωρευτές, συσκευές ηλεκτρόλυσης κλπ.) τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στον κώδικα για την προσομοίωση της εγκατάστασης. Η προσομοίωση έχει ως στόχο τον προσδιορισμό οικονομικών μεγεθών του συστήματος:

- Καθαρή παρούσα αξία εγχειρήματος (NetPresentValue)
- Ισχύς εξόδου

Οι συγκεκριμένες παράμετροι ορίζονται στον κώδικα ως μεγέθη και βελτιστοποιούνται μέσω ορισμού τους ως αντικειμενικές συναρτήσεις με προκαθορισμένα βάρη, τα οποία βάρη καθορίζουν και την σημαντικότητα της κάθε μεταβλητής/παραμέτρου. Στην παρούσα προσομοίωση στόχος είναι η οριοθέτηση της κάθε παραμέτρου μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και συγκεκριμένων ενεργειακών στρατηγικών που σχετίζονται με τα μεγέθη της βελτιστοποίησης.

Οι ενεργειακές στρατηγικές εμπλέκουν άμεσα τα μεγέθη της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) καθώς και της παραγόμενης ισχύος της εγκατάστασης, απαρτίζουν συνθήκες και περιπτώσεις για την ενεργειακή διαχείριση της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) των συσσωρευτών καθώς και την παραγόμενη ισχύ των Φ/Β πλαισίων για την αξιολόγηση της περίσσειας ενέργειας σε διάφορα μηχανολογικά στοιχεία της εγκατάστασης έχοντας ως στόχο την βέλτιστη λειτουργία της μονάδας. Στην περίπτωση των συσσωρευτών, οι μπαταρίες της εγκατάστασης έχουν την δυνατότητα για ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση με βάση τις ενεργειακές ανάγκες που καθορίζονται με βάση τις ενεργειακές στρατηγικές που εφαρμόζονται στην προσομοίωση. Τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας της εγκατάστασης μέσω των στρατηγικών ελέγχου της ενεργειακής διαχείρισης επιτρέπουν ορισμένες ενέργειες της εγκατάστασης:

- Φόρτιση/εκφόρτιση συσσωρευτών
- Χρησιμοποίηση περίσσειας ενέργειας για την λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης
- Απόρριψη περίσσειας ενέργειας

1.2.4 Εξαγωγή τελικών δεδομένων και μεγεθών της εγκατάστασης και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Κατά την διάρκεια της μελέτης βελτιστοποίησης, στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης δομής υβριδικού συστήματος τόσο των τεχνικών χαρακτηριστικών που το απαρτίζουν όσο και συγκεκριμένων τεχνικών στοιχείων που χρίζουν ενδιαφέροντος:

- Απόσβεση εγκατάστασης
- State of charge
- Παραγόμενη ενέργεια
- Παραγόμενο υδρογόνο
- Πίεση υδρογόνου

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται με παρόμοιο τρόπο που γίνεται και η εισαγωγή των δεδομένων, με χρήση διανυσματικών πινάκων MATLAB. Η παρουσίαση τους γίνεται μέσω διαγραμμάτων συναρτήσεως του χρόνου για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων ανά περιπτώσεις για να προκύψουν συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά της εγκατάστασης αλλά και την τεchnοοικονομική της μελέτη. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται κατανοητή η παραπάνω λογική με λεπτομέρεια και ανάλυση αποτελεσμάτων.

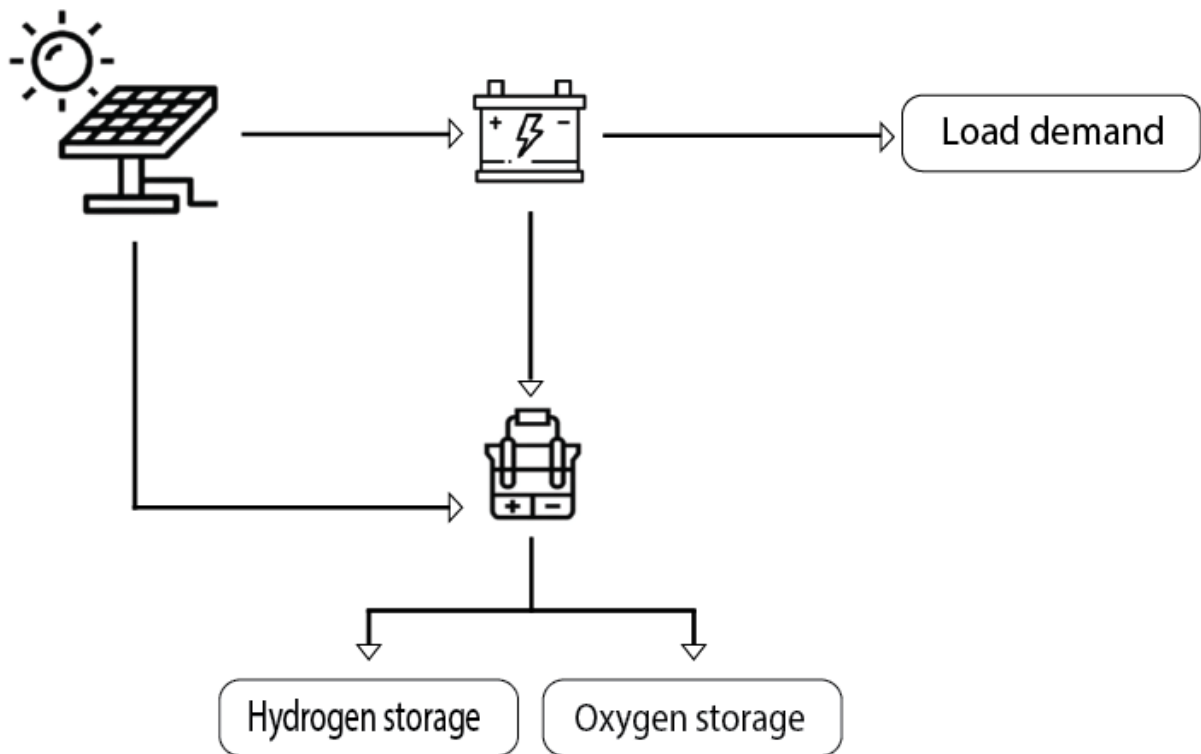
Κεφάλαιο 2^ο :Ανάλυση μοντέλου προσομοίωσης της υβριδικής εγκατάστασης Α.Π.Ε.

2.1 Ανάλυση λειτουργίας και προσομοίωσης της υβριδικής εγκατάστασης

Το υβριδικό σύστημα που αναλύεται βασίζεται στην συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων και τον διαμοιρασμό της ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα η εγκατάσταση απαρτίζεται από τα ακόλουθα μηχανολογικά στοιχεία:

- Φ/Β πλαίσια
- Συσκευή ηλεκτρόλυσης (Electrolyzer)
- Συσσωρευτές ηλεκτρικής ισχύς(μπαταρίες)
- Φιάλη οξυγόνου (δεν θα αναλυθεί σε βάθος)
- Φιάλη υδρογόνου

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα Φ/Β πλαίσια τροφοδοτεί άμεσα τους συσσωρευτές καθώς και την μονάδα ηλεκτρόλυσης. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης, τροφοδοτείται είτε από τους συσσωρευτές είτε από τα Φ/Β πλαίσια, τίθεται σε λειτουργία με γνώμονα την ενεργειακή στρατηγική (θα παρουσιαστεί παρακάτω) και παράγει υδρογόνο μέσω της χημικής διάσπασης του νερού ενώ τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης αποθηκεύονται σε φιάλες υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα. Παράλληλα, οι συσσωρευτές έχουν στην διάθεση τους ένα ποσό ισχύς το οποίο μπορεί να διατεθεί άμεσα προς κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών. Το αναφερόμενο σύστημα περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 2.1.

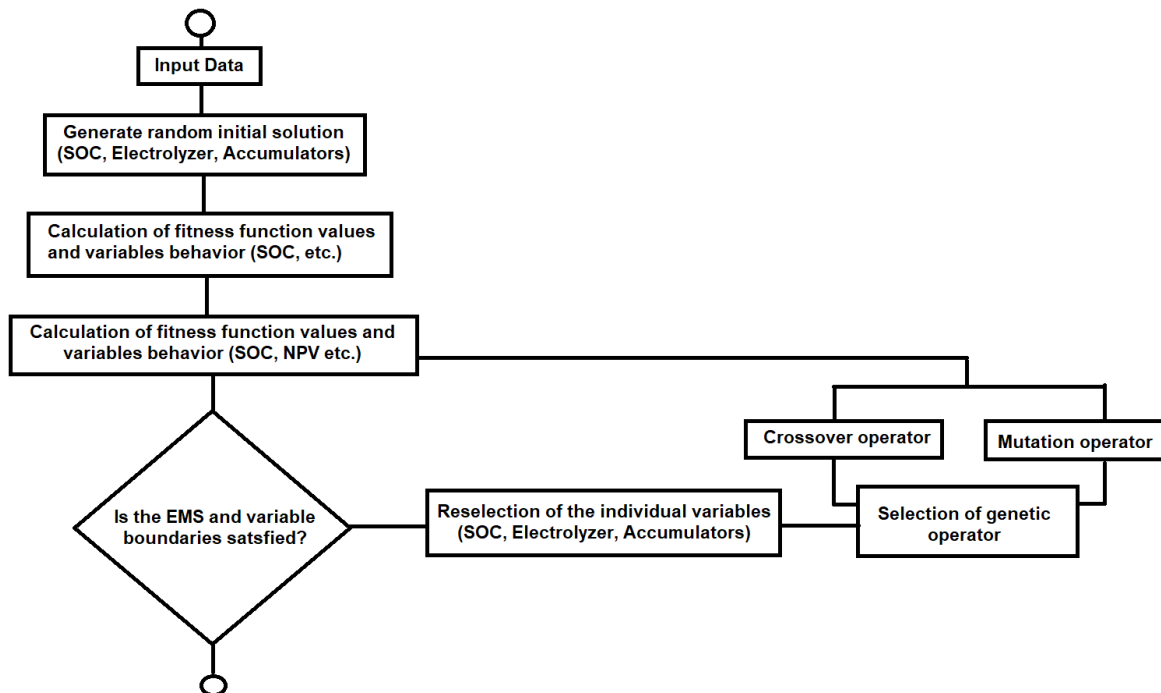


Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος ΑΠΕ-Η₂

Η προσομοίωση της παρούσας εγκατάστασης γίνεται με βάση τον κώδικα και την δομή που τον απαρτίζει. Γίνεται εισαγωγή των απαραίτητων μετεωρολογικών, τεχνικών και μηχανολογικών δεδομένων έτσι ώστε να λάβει μέρος η βελτιστοποίηση μέσω γενετικών αλγορίθμων των μεταβλητών που κρίνονται καίριες για το σύστημα:

- Φ/Β πλαίσια
- Συσσωρευτές/Μπαταρίες
- Electrolyzer
- Ελάχιστητιμής κατάστασης φόρτισης (StateofCharge)
- Μέγιστητιμής κατάστασης φόρτισης (StateofCharge)

Η βελτιστοποίηση ακολουθεί πλήρως την λογική των γενετικών αλγορίθμων και εξάγει τον βέλτιστο συνδυασμό καίριων μεταβλητών δεδομένου δοθέντος εύρους τιμών για τις συγκεκριμένες τιμές των μεταβλητών καθώς και με βάση περιορισμούς αντικειμενικής συνάρτησης και ενεργειακής στρατηγικής.



Σχήμα 2.2 Λογικό διάγραμμα ροής του γενετικού αλγόριθμου της εγκατάστασης

Οι ορισμοί των μεταβλητών του διαγράμματος ροής εξηγούνται παρακάτω:

- Inputdata: Μετεωρολογικά δεδομένα, ενεργειακή ζήτηση κλπ.
- EMS: Στρατηγική ενεργειακής διαχείρισης
- Crossover/Mutationoperation: Μέθοδοι λειτουργίας ορισμών των λύσεων

Πιο συγκεκριμένα μέσω του αλγόριθμου πραγματοποιείται αρχικοποίηση ενός διανύσματος το οποίο σηματοδοτεί το αρχικό διάνυσμα (λύση) της εγκατάστασης. Στη συνέχεια υπολογίζονται μέσω κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων οι τιμές των μεταβλητών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι συγκεκριμένες τιμές πρέπει να ικανοποιούν συνθήκες που εμπλέκουν και προβλέπουν την επίτευξη ορίων των μεταβλητών, που ορίζονται μέσω των ενεργειακών στρατηγικών. Η επανεκλογή των λύσεων γίνεται είτε μέσω απλής μετάλλαξης είτε μέσω μετάλλαξης crossover. Η απλή μετάλλαξη ουσιαστικά αλλάζει τυχαία μια μεταβλητή της λύσης και συγκρίνει την μεταλλαγμένη λύση με την αρχική λύση «γονέα» και επιλέγεται η βέλτιστη. Στην μετάλλαξη crossover επιλέγονται 2 λύσεις οι οποίες ανταλλάσσουν μεταξύ τους κομμάτια μεταβλητών έχοντας ως απώτερο σκοπό την δημιουργία «απογόνου» λύσης που θα προσφέρει

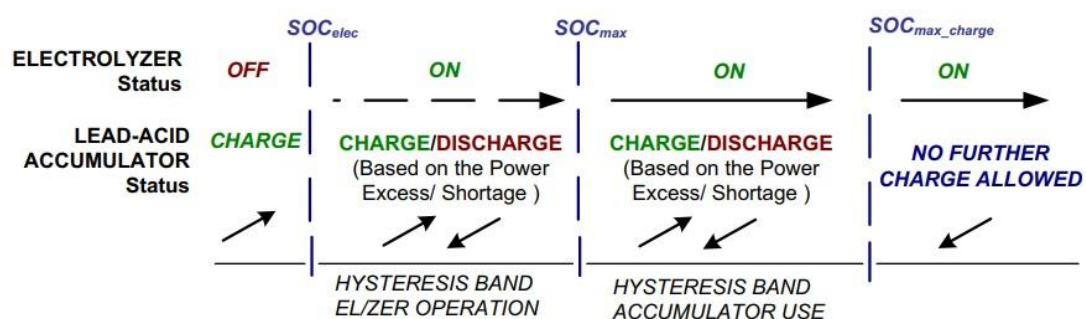
καλύτερα συγκριτικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη λύση συγκρίνεται με τις αρχικές για την εκλογή της βέλτιστης λύσης.

Η προσομοίωση της υβριδικής εγκατάστασης εκτελείται με την εξής σειρά βημάτων:

- Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων, δεδομένων ζήτησης ενέργειας καθώς και βέλτιστων μεταβλητών που προέκυψε από τον γενετικό αλγόριθμο
- Υπολογισμός μεγεθών ενέργειας και μεταβλητών μέσω κώδικα ενεργειακής διαχείρισης
- Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης και υπολογισμός τεχνοοικονομικών μεγεθών μείζονος ενδιαφέροντος προς την εγκατάσταση
- Σχεδιασμός και παρουσίαση γραφημάτων τεχνοοικονομικών μεγεθών και μεταβλητών της εγκατάστασης

2.2 Ανάλυση κώδικα ενεργειακής στρατηγικής της εγκατάστασης

Οι μεταβολές των μεταβλητών και των μεγεθών καθώς και ο καθορισμός των απαραίτητων ενεργειών για την βέλτιστη προσομοίωση εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, StateofCharge (SOC), SOC_{elec} , SOC_{max} και το DepthofDischarge τα οποία εκφράζουν το ελάχιστο όριο φόρτισης, το μέγιστο όριο φόρτισης καθώς και το βάθος εκφόρτωσης αντίστοιχα. Με βάση την κατάσταση φόρτισης (StateofCharge) θέτονται περιπτώσεις χρήσης και διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας:



Σχήμα 2.3 Αλγόριθμος στρατηγικής ελέγχου υβριδικής εγκατάστασης

Πηγή : Infrastructure, automation and model-based operation strategy in a stand-alone hydrolytic solar-hydrogen production unit [2]

Στην προκειμένη στρατηγική ελέγχου, λαμβάνουν μέρος συγκεκριμένες λειτουργίες οι οποίες αναλύονται σε περιπτώσεις χρήσης. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης έχουν επιπροσθέτως ως κρίσιμο παράγοντα την ποσότητα ισχύς που ορίζεται την δεδομένη στιγμή P . Η συγκεκριμένη ισχύς ορίζεται ως η διαφορά της ισχύος των ανανεώσιμων πηγών πλην της ζήτησης της ισχύος που έχει τεθεί. Όπου P_{max} και P_{min} ορίζονται ως η μέγιστη και η ελάχιστη αντίστοιχα δυνατή παροχή ισχύς λειτουργίας για την ηλεκτρόλυση. Επομένως η στρατηγική ελέγχου διαρθρώνεται ως εξής:

1. $SOC < SOC_{min}, P > 0$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή είναι χαμηλή και η ισχύς των ΑΠΕ παρέχεται προς φόρτιση στους συσσωρευτές (εφόσον έχουν καλυφθεί ενεργειακές ανάγκες π.χ. μίας οικίας).

2. $SOC_{elec} < SOC < SOC_{max}, P_{min} \leq P \leq P_{max}$

Στην προκειμένη περίπτωση οι συσσωρευτές λειτουργούν με δύο τρόπους, φόρτιση και εκφόρτιση, αποθηκεύοντας και παρέχοντας αντίστοιχα ισχύ στην συσκευή ηλεκτρόλυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση η εκλογή των ενεργειών πραγματοποιείται με βάση την παραγόμενη ισχύ και όχι μόνο με βάση το State of Charge.

3. $SOC > SOC_{max}, P_{min} \leq P \leq P_{max}$

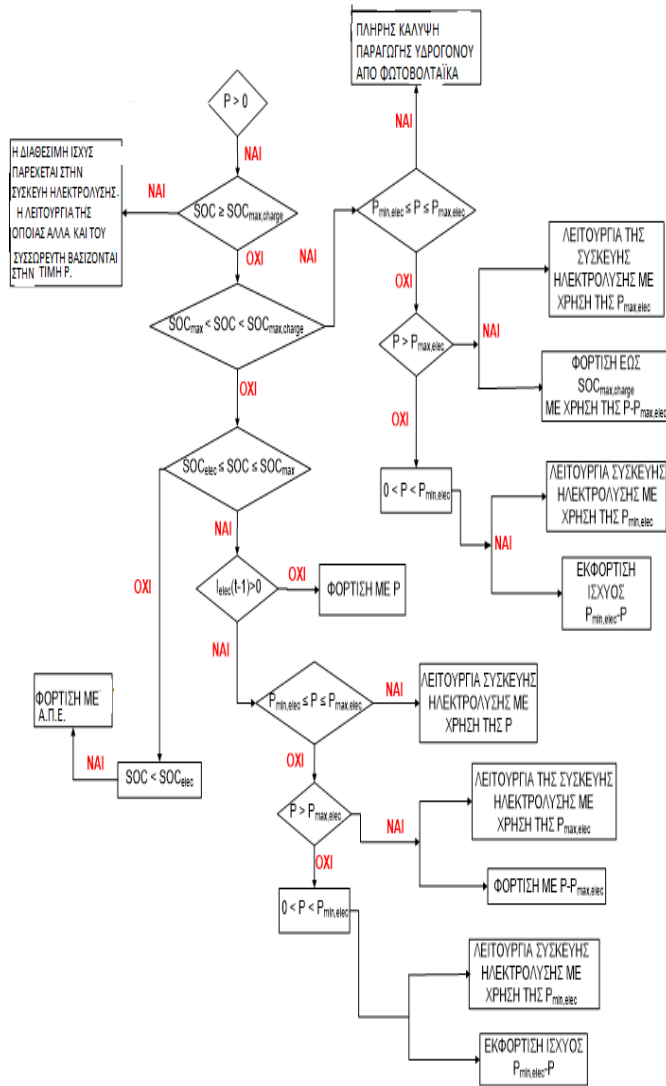
Η κατάσταση φόρτισης (State of Charge) βρίσκεται άνω του μέγιστου ορίου επομένως υπάρχουν 2 περιπτώσεις. Είτε παρέχει την περίσσεια ισχύ στην συσκευή ηλεκτρόλυσης είτε αποβάλλει την ισχύ ως πλεόνασμα (εφόσον είναι $P > P_{max}$).

Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι για την ομαλή λειτουργία τόσο της εγκατάστασης όσο και για την ρεαλιστική αποτίμηση της προσομοίωσης πρέπει να λαμβάνονται παράλληλα συγκεκριμένες οριοθετήσεις χαρακτηριστικών που απαρτίζουν την εγκατάσταση:

- Τήρηση ονομαστικών ορίων λειτουργίας μηχανολογικών στοιχείων της εγκατάστασης (Όριο της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) στους συσσωρευτές για την βελτιστοποίηση διάρκειας ζωής των συσσωρευτών, συσκευή ηλεκτρόλυσης κλπ)
- Συμβιβασμός μαθηματικών μοντέλων & εξισώσεων των εκφράσεων της εγκατάστασης (Φ.Β πάνελ, συσκευή ηλεκτρόλυσης κλπ) με τις στρατηγικές ελέγχου & διαχείρισης
- Ανεξάρτητη λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης προς παραγωγή υδρογόνου

Η ζώνη υστέρησης που ορίζεται στον κύριο κώδικα προσομοίωσης αποτελεί εργαλείο προστασίας και βελτίωσης του κύκλου ζωής των συσσωρευτών λόγω του μεγάλου αριθμού

λειτουργίας και παύσης των ίδιων κατά την διάρκεια της λειτουργίας της εγκατάστασης, πράγμα που βελτιώνει ταυτόχρονα τον αριθμό των λειτουργιών και αποφεύγει τις άσκοπες ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις των συσσωρευτών.



Σχήμα 2.4 Λογικό διάγραμμα υλοποίηση στρατηγικής ελέγχου

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011 [17]

2.3 Ορισμός της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge)

Ως κατάσταση φόρτισης (StateofCharge) ενός συσσωρευτή ορίζεται ένα κομμάτι της παρούσας χωρητικότητας που ορίζεται συγκεκριμένη χρονική στιγμή, διαιρεμένη με την ονομαστική χωρητικότητα που χαρακτηρίζει τον συσσωρευτή. Η μαθηματική εξίσωση που ορίζει την κατάσταση φόρτισης (StateofCharge) είναι η ακόλουθη:

$$SOC(t) = SOC(t - 1)(1 - \sigma) + I_{bat}\eta_{bat}(\Delta t) \quad (1)$$

Όπου οι μεταβλητές των σχέσεων είναι οι εξής:

- t : χρονική στιγμή σε h
- σ : ποσοστό αυτόματης εκφόρτισης σε % (το ποσοστό αυτό είναι περίπου ίσο με 3.5%)
- I_{bat} : ένταση ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης σε A
- η_{bat} : παράγοντας αποδοτικότητας σε %
- Δt : χρονικό διάστημα σε h

Η κατάσταση φόρτισης (StateofCharge) εξαρτάται από μεγέθη τα οποία σχετίζονται μεταξύ τους και χαρακτηρίζουν σημαντικές ιδιότητες των συσσωρευτών. Πιο συγκεκριμένα οι λειτουργίες αυτές είναι η φόρτιση και η εκφόρτιση των συσσωρευτών, οι οποίες στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στις έννοιες του βάθους εκφόρτισης (depth of discharge/DOD) και του εύρους της ζώνης υστέρησης.

Το βάθος εκφόρτισης ορίζεται ως το εύρος μεταξύ του μέγιστου επιτρεπτού ορίου της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) ενός συσσωρευτή (SOC_{max}) και του ελάχιστου επιτρεπτού ορίου της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) συσσωρευτή (SOC_{min}). Το εύρος ζώνης υστέρησης αναφέρεται στην διαφορά του θεωρητικού μέγιστου αποδεκτού ορίου φόρτισης με το πρακτικό μέγιστο αποδεκτό όριο λειτουργίας του συσσωρευτή, ενώ παράλληλα ισχύει η αντίστοιχη σχέση για το ελάχιστο όριο. Η ζώνη υστέρησης ορίζεται καταυτόν τον τρόπο:

$$HB = SOC_{max,charge} - SOC_{max} \quad (2)$$

$$HB = SOC_{max,charge} - SOC_{elec} \quad (3)$$

Το εύρος ζώνης υστέρησης αποτελεί τρόπο προστασίας των μηχανολογικών στοιχείων της υβριδικής εγκατάστασης από περαιτέρω υπερφόρτωση λόγω των συνεχόμενων ενάρξεων/παύσεων που δέχεται η εγκατάσταση κατά την διάρκεια της λειτουργίας της. Ως άμεσο συμπέρασμα το συγκεκριμένο μέγεθος προστατεύει τους συσσωρευτές από υψηλό αριθμό ενάρξεων/παύσεων καθώς και άσκοπων χρήσεων, γεγονός το οποίο συμβάλει από τεχνοοικονομικής άποψης στην προσομοίωση της εγκατάστασης καθώς μειώνεται τα λειτουργικά κόστη.

2.4 Λειτουργία της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) στον κώδικα προσομοίωσης

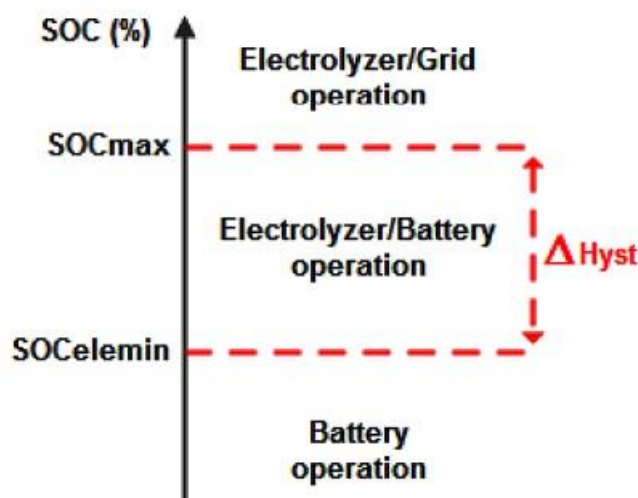
Ο κώδικας προσομοίωσης ορίζει την κατάσταση φόρτισης (StateofCharge), καθώς και τις έννοιες του βάθους εκφόρτισης και του εύρους ζώνης υστέρησης με τον ίδιο τρόπο που έχουν οριστεί στα παραπάνω υποκεφάλαια. Λόγω της φύσης τόσο των γενετικών αλγορίθμων όσο και της δομής του κώδικα ενεργειακής διαχείρισης τα παραπάνω μεγέθη έχουν οριστεί ιδανικά με βάση την κάθε δεδομένη χρονική στιγμή ορίζεται στο σύστημα (μονάδα μέτρησης 1 ώρα). Συνεπώς, η κατάσταση φόρτισης (StateofCharge) υπολογίζεται ωριαία και οι όροι του βάθους εκφόρτισης και του εύρους ζώνης υστέρησης εφαρμόζονται με βάση την στρατηγική ενεργειακής διαχείρισης, η οποία καθορίζει την κάθε χρονική στιγμή την βέλτιστη διαχείριση ενέργειας που διατίθεται από τους συσσωρευτές.

Ο στόχος του κώδικα ενεργειακής διαχείρισης (ενεργειακής στρατηγικής), είναι να επιτρέψει την βέλτιστη και ομαλή λειτουργία της υβριδικής εγκατάστασης με γνώμονα τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εκπλήρωση ενεργειακής ζήτησης (παραγωγή υδρογόνου, άμεση ενεργειακή ζήτηση)
- Λειτουργία εγκατάστασης με γνώμονα την μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής των επί μέρους μηχανολογικών στοιχείων που απαρτίζουν την εγκατάσταση
- Ελαχιστοποίηση λειτουργικών και επενδυτικών κοστών

Παράλληλα πρέπει να γίνουν κατανοητές οι επιπτώσεις που έχουν οι συνθήκες λειτουργίας στον εξοπλισμό της εγκατάστασης. Η συνεχόμενη και επαναλαμβανόμενη χρήση της συσκευής ηλεκτρόλυσης προς παραγωγή υδρογόνου αυξάνει την φθορά σε μέρη των ηλεκτροδίων μέσω του φαινόμενου της οξείδωσης, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση κύκλου ζωής της συσκευής ηλεκτρόλυσης, την μείωση παραγωγικότητας της καθώς και απώλειες τάσης. Παράλληλα, ο κύκλος ζωής των συσσωρευτών εξαρτάται από το βάθος

εκφόρτισης και τις συνθήκες λειτουργίας των συσσωρευτών, συνεπώς κρίνεται καίρια η προσθήκη του βάθους εκφόρτωσης στον υπολογισμό και στον ορισμό βέλτιστων ορίων της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge). Η τήρηση των παραπάνω χαρακτηριστικών επιζητά την βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση καθώς και την βέλτιστη χρήση τόσο του εύρους ζώνης υστέρησης όσο και του βάθους εκφόρτωσης. Για την χρήση του εύρους ζώνης υστέρησης θα τεθούν σε χρήση οι οριοθετήσεις της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) όπως αυτές αναλύθηκαν στα παραπάνω υποκεφάλαια:



Σχήμα2.5 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) με βάση το εύρος ζώνης υστέρησης ($\Delta Hyst=HB$)

Πηγή: An Energy Management Strategy and Fuel Cell Configuration Proposal for a Hybrid Renewable System with Hydrogen Backup, 2020
[5]

Η παρούσα στρατηγική προτείνει τις διαφορετικές λειτουργίες τροφοδοσίας των συσσωρευτών με βάση το διαφορετικό εύρος της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) την συγκεκριμένη δεδομένη στιγμή. Πιο συγκεκριμένα:

1. Όταν το κατώφλι είναι μικρότερο το SOC_{elemin} τότε οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ενέργεια
2. Όταν το κατώφλι βρίσκεται μεταξύ SOC_{max} και SOC_{elemin} τότε γίνεται ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου και την αποθήκευση ενέργειας
3. Όταν το κατώφλι υπερβαίνει το SOC_{max} όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση παράγεται ποσότητα υδρογόνου ενώ παράλληλα ικανοποιείται η ενεργειακή ζήτηση που υπάρχει

Η συγκεκριμένη λύση είναι η βέλτιστη λόγω της κατάλληλης διαχείρισης του εξοπλισμού της εγκατάστασης με γνώμονα την τήρηση των χαρακτηριστικών που έχουν προαναφερθεί. Όσον αφορά την χρήση του βάθους εκφόρτισης, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο μέγεθος είναι καίριας σημασίας λόγω της οριοθέτησης του αριθμού κύκλων λειτουργίας των συσσωρευτών. Ο κύκλος λειτουργίας ορίζεται ως μια πλήρης ολοκλήρωση των διαδοχικών διαδικασιών της φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών. Το συγκεκριμένο μέγεθος έχει παρατηρηθεί να αποτελεί τον μεγαλύτερο παράγοντα στην διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή και ορίζεται ως εξής:

$$N_{cycles} = a \ln(DOD) + b \quad (4)$$

Όπου α και β ορίζονται ως πειραματικές σταθερές με τιμές $\alpha = -2.768,2$ και $b = 13.384$.

2.5 Βέλτιστος ορισμός ορίων της κατάστασης φόρτισης (State of Charge)

Η οριοθέτηση της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) γίνεται με γνώμονα τα χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί στα παραπάνω υποκεφάλαια. Συνεπώς, είναι δεδομένο ότι κατασκευαστικά προτείνεται η αποφυγή μιας πολύ χαμηλής τιμής SOC_{min} έτσι ώστε με αυτό τον τρόπο να γίνει παράταση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή. Ομοίως ισχύει το ίδιο για την κατάσταση της συσκευής ηλεκτρόλυσης, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η σχετικά υψηλή τιμή SOC_{min} εξαλείφει την διάβρωση του εξοπλισμού. Επιπροσθέτως, πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι η χαμηλή τιμή του SOC_{min} έχει ως επίδραση στον συσσωρευτή την ανομοιόμορφη κατανομή περιόδων φόρτισης και εκφόρτισης. Επιπροσθέτως, έχει διαπιστωθεί πειραματικά, ότι η εκλογή του SOC_{min} έχει άμεση επίδραση στους κύκλους λειτουργίας ενός συσσωρευτή και αντίστροφα. Επομένως, ο βέλτιστος ορισμός των ορίων της κατάστασης φόρτισης (State of Charge) εξαρτάται εν μέρει από την εκλογή βέλτιστων κύκλων λειτουργίας συσσωρευτή. Τα ιδανικά αυτά όρια κρίνονται να είναι τα εξής:

- $SOC_{min} \approx 75\%$
- $SOC_{max} \approx 85\%$

Τίθεται το ερώτημα όμως, αν είναι βέλτιστο τα συγκεκριμένα όρια να ορίζονται χειροκίνητα από τον χρήστη. Τα συγκεκριμένα όρια δύναται να ορίζονται ως εύρος τιμών και όχι σαν τιμές. Ο λόγος που είναι απαραίτητο να ορίζονται με αυτόν τον τρόπο είναι η αλληλένδετη σχέση της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) με τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή. Πιο συγκεκριμένα για την απόλυτη κάλυψη όλων των περιπτώσεων ζήτησης πρέπει ο ορισμός της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) να ορίζεται μέσω της βελτιστοποίησης του αλγόριθμου, με βάση το πρότυπο των γενετικών αλγορίθμων, ο οποίος αλγόριθμος εμπλέκει στους υπολογισμούς της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge) τον βέλτιστο αριθμό κύκλων λειτουργίας.

Κεφάλαιο 3^ο : Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων ερμηνείας της αντικειμενικής συνάρτησης

3.1 Ορισμός παρούσας αντικειμενικής συνάρτησης

Ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η βελτιστοποίηση ορισμένων στόχων που έχουν τεθεί μέσω μαθηματικών μοντέλων και συναρτήσεων. Οι στόχοι ορίζονται ως εξής:

- Ελαχιστοποίηση σφάλματος παραγωγής υδρογόνου, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας
- Ελαχιστοποίηση σφάλματος κόστους εγκατάστασης
- Ελαχιστοποίηση σφάλματος ενεργειακών απωλειών

Ο τρόπος λειτουργίας της βελτιστοποίησης στηρίζεται στον ορισμό των μαθηματικών μοντέλων και στην οριοθέτηση του αθροίσματος των συγκεκριμένων στόχων. Πιο συγκεκριμένα η οριοθέτηση πραγματοποιείται ως εξής:

```
S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2)+(((max_SOC-0.85))^2)+(((min_SOC-0.75)/1)^2);  
S2=(C(1)-1e4)^2;  
S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;  
  
S=S1+S2+S3;
```

Εικόνα3.1 Μαθηματικά μοντέλα σχέσεων σφαλμάτων των επιμέρους στόχων

Οι παραπάνω όροι ορίζονται ως εξής:

- Hydrogen_elec_lt(8761): Η επιτυχημένη παραγωγή υδρογόνου την 8761^η ώρα λειτουργίας της εγκατάστασης (επί της ουσίας η τελική δυνατή παραγωγή)
- Target_H2: Στόχος παραγωγής υδρογόνου σεναρίου
- max_SOC: Μέγιστο επιτρεπτό όριο κατάστασης φόρτισης (Stateofcharge)
- min_SOC: Ελάχιστο επιτρεπτό όριο κατάστασης φόρτισης (Stateofcharge)
- Pres_loss_tot: Συνολική απώλεια παραγόμενης ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές

Επί της ουσίας η βελτιστοποίηση τόσο μέσω των γενετικών αλγορίθμων, όσο και μέσω της κύριας προσομοίωσης στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος Σπου εκφράζει τους κυρίους στόχους της εγκατάστασης.

- Εξίσωση κόστους εξοπλισμού:

$$C_{\text{εξοπλισμού}} = (\text{Αριθμός } PV * \text{Κόστος μονάδας } PV) \\ + (\text{Αριθμός } ELEC * \text{Κόστος μονάδας } ELEC) \\ + (\text{Αριθμός } BAT * \text{Κόστος } BAT) + (\text{Αριθμός } TANK * \text{Κόστος } TANK) \quad (5)$$

- Εξίσωση λειτουργικού κόστους:

$$C_{OM} = \text{Αριθμός } PV * \text{Κόστος μονάδας φωτοβολταϊκών} + \text{Αριθμός } ELEC \\ * \text{Κόστος Μονάδας Ηλεκτρόλυσης} + \text{Αριθμός } BAT * \text{Κόστος Μπαταρίας} \\ + \text{Αριθμός } TANK * \text{Κόστος δεξαμενής υδρογόνου} \quad (6)$$

- Εξίσωση κέρδους μέσω πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου:

$$C_{\text{ΠΩΛΗΣΗΣ}} = (\text{Κέρδος πώλησης υδρογόνου} * \text{Συνολική παραγωγή υδρογόνου}) \\ + (\text{Κέρδος πώλησης πλεονάζουσας ενέργειας} \quad (7) \\ * \text{Συνολική πλεονάζουσα ενέργεια})$$

- Εξίσωση ετήσιας απόσβεσης επένδυσης προς την εγκατάσταση:

$$NPV(i) = NPV(i - 1) + \frac{(C_{PV} + C_{ELEC} + C_{BAT} + C_{TANK} - C_{\text{ΠΩΛΗΣΗΣ}})}{(1 + h)^i} \quad (8)$$

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια και εκφράζουν τα έσοδα και τα έξοδα της εγκατάστασης. Τα έξοδα χωρίζονται σε λειτουργικά και έξοδα εγκατάστασης, ενώ παράλληλα τα έσοδα της εγκατάστασης χωρίζονται σε έσοδα από πωλήσεις υδρογόνου και έσοδα από πωλήσεις πλεονάζουσας ενέργειας. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση μιας διαφορετικής προσέγγισης της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και των επιμέρους μεγεθών που βελτιστοποιεί έχοντας ως στόχο την βελτίωση των αποτελεσμάτων που εξάγει η προσομοίωση, μέσω της άμεσης σύγκρισης των 2 τύπων αντικειμενικών συναρτήσεων.

3.2 Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης με βάση το κόστος ενέργειας

Ένας εναλλακτικός τρόπος ορισμού των τεχνοοικονομικών στοιχείων είναι ο ορισμός τους με βάση τον ορισμό διαφόρων μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα η καινούργια μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, ορίζει το κόστος ενέργειας της εγκατάστασης, το επιτόκιο της επένδυσης το ετήσιο κόστος, και μέσω αυτών διαμορφώνει την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης της εγκατάστασης και κατά συνέπεια την απόσβεση της.

- Εξίσωση κόστους ενέργειας:

$$COE \left(\frac{\text{€}}{\text{KWh}} \right) = \frac{C_{cap} + C_{om} - C_{\text{πώλησης}}}{E_{served} + H_{2\text{ served}}} \quad (9)$$

Το κόστος ενέργειας χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τεχνοοικονομικής δυνατότητας της εγκατάστασης και αναφέρεται στο κόστος που δαπανάται για την κάθε κιλοβατώρα στην εγκατάσταση (€/KWh). Ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος του κόστους του εξοπλισμού (C_{cap}) με το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης (C_{om}) μείον του κόστους πώλησης της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ($C_{\text{πώλησης}}$) δια της συνολικά παραγόμενης ενέργειας (E_{served}) και του παραγόμενου υδρογόνου ($H_{2served}$).

- Εξίσωση συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου:

$$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (10)$$

Ο συντελεστής εκφράζει πρακτικά τον προσδιορισμό της παρούσας αξίας μιας επένδυσης με βάση μιας σειράς ετήσιων τόκων που εξαρτώνται από το σταθερό ετήσιο επιτόκιο. Το μαθηματικό μοντέλο του συντελεστή ορίζεται ως ο λόγος του επιτοκίου υψωμένο στον χρονικό ορίζοντα της επένδυσης προς το επιτόκιο μειωμένο κατά μια μονάδα. Όπως θα δειχθεί παρακάτω ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου κρίνεται ως καθοριστικός στην ανάλυση ενός ετήσιου ισολογισμού της εγκατάστασης.

- Εξίσωση κόστους εξοπλισμού:

$$C_{CAP}(\text{€}) = (\text{Αριθμός } PV * \text{Κόστος μονάδας } PV) \\ + (\text{Αριθμός } ELEC * \text{Κόστος μονάδας } ELEC) \\ + (\text{Αριθμός } BAT * \text{Κόστος } BAT) + (\text{Αριθμός } TANK * \text{Κόστος } TANK) \quad (11)$$

Αναφέρεται σε κόστος αρχικής επένδυσης το οποίο εμπλέκει το κάθε μηχανολογικό στοιχείο που εμπλέκεται στον σχεδιασμό της εγκατάστασης και αφορά το κόστος που δαπανείται για την εγκατάσταση των επιμέρους στοιχείων.

- Εξίσωση λειτουργικού κόστους:

$$C_{OM}(\text{€}) = 0.02 C_{CAP} \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^k} \quad (12)$$

Η εξίσωση του λειτουργικού κόστους ορίζεται ως το γινόμενο του κόστους εξοπλισμού με μια σταθερά (0.02) και του αθροίσματος του σταθερού επιτοκίου. Η συγκεκριμένη σταθερά σχετίζεται και εξαρτάται από χρηματοοικονομικά μεγέθη όπως είναι ο πληθωρισμός κλπ. Μέσω μελετών και επιστημονικών άρθρων κρίνεται ότι η παρούσα αποτίμηση των λειτουργικών κοστών της εγκατάστασης είναι η πιο ρεαλιστική τεχνοοικονομικά, καθώς εμπλέκει άμεσα τον όρο του σταθερού επιτοκίου μιας επένδυσης.

- Εξίσωση συνολικού τωρινού κόστους:

$$TNPC(\text{€}) = C_{CAP} + \sum_{k=2}^T C_{OM} \quad (13)$$

Η εξίσωση του συνολικού τωρινού κόστους ορίζεται πρακτικά ως τα ετήσια έξοδα της εγκατάστασης. Επί της ουσίας απαρτίζεται από το άθροισμα των λειτουργικών εξόδων της εγκατάστασης από τον 2^ο χρόνο λειτουργίας και έπειτα και το κόστος εγκατάστασης. Τα λειτουργικά κόστη υπολογίζονται από το 2^ο έτος λειτουργίας και έπειτα καθώς θεωρείται ότι η εγκατάσταση τον 1^ο χρόνο δεν είναι σε κατάσταση λειτουργίας και τα λειτουργικά κόστη πρακτικά αντικαθίστανται από το κόστος εγκατάστασης.

- Εξίσωση ετήσιου κόστους:

$$C_{ann}(\text{€}) = TNPC * CRF \quad (14)$$

Το ετήσιο κόστος ορίζεται ως το γινόμενο του συνολικού τωρινού κόστους πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου.

- Εξίσωση ετήσιας απόσβεσης επένδυσης προς την εγκατάσταση:

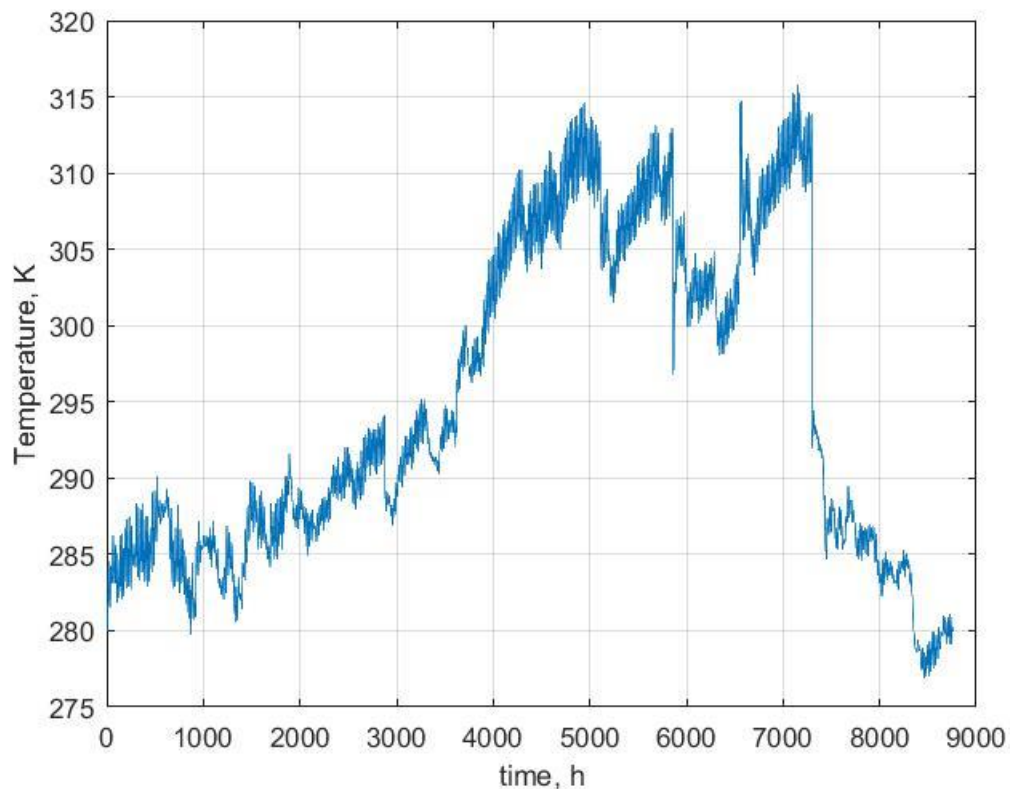
$$NPV(i)(\text{€}) = NPV(i-1) + \frac{(C_{ann(i)} - C_{ΠΩΛΗΣΗΣ})}{(1+h)^i} \quad (15)$$

Η απόσβεση υπολογίζεται μέσω της άθροισης της καθαρής παρούσας αξίας και του πηλίκου της διαφοράς του συνολικού ετήσιου κόστους με τις συνολικές πωλήσεις δια το συνολικό επιτόκιο.

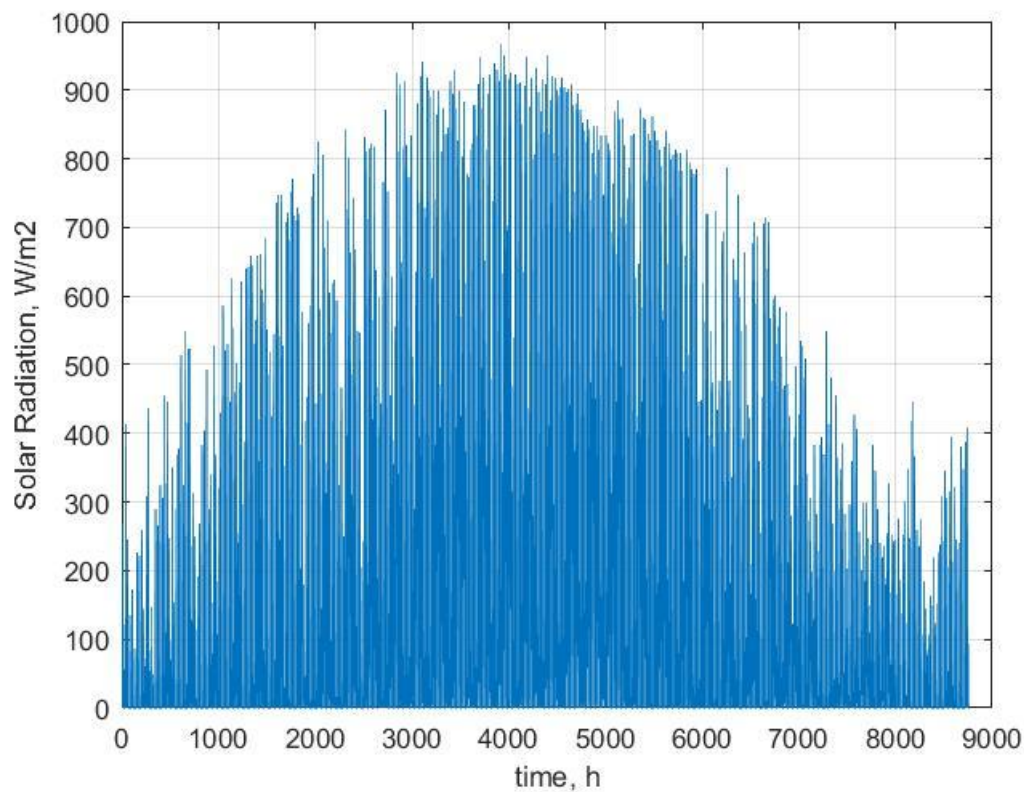
Στόχος της καινούργιας διάρθρωσης της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ρεαλιστική αποτίμηση των οικονομικών μεγεθών που έχουν προαναφερθεί. Συνεπώς, κρίζει απαραίτητη η σύγκριση των 2 μοντέλων υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης μέσω της παρατήρησης των αποσβέσεων που διαγράφονται στις 2 περιπτώσεις ξεχωριστά.

Κεφάλαιο 4^ο : Προσομοίωση σεναρίων βελτιστοποίησης της εγκατάστασης

Στο κεφάλαιο αυτό θα λάβει μέρος η προσομοίωση της εγκατάστασης, καθώς και η επιμέρους παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανά σενάρια. Τα σενάρια που θα καλυφθούν αφορούν τόσο ενεργειακές ζητήσεις όσο και κάλυψη στόχου παραγωγής υδρογόνου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε όλα τα σενάρια χρησιμοποιούνται τα ίδια δεδομένα εισαγωγής (inputdata), μετεωρολογικά δεδομένα και ηλιακή ακτινοβολία, τα οποία διαγράφουν ετήσια πορεία με εξαίρεση τα δεδομένα της ζήτησης ισχύος καθώς στα 3 σενάρια διαφέρουν με βάση την ζήτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί στο εκάστοτε σενάριο (0 οικίες, 1 οικία, 5 οικίες).



Σχήμα 4.1 Γραφική απόκριση θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο σε κλίμακα Kelvin



Σχήμα 4.2 Γραφική απόκριση ακτινοβολίας σε σχέση με τον χρόνο σε κλίμακα W/m²

4.1 Σενάριο προσομοίωσης 1

Στο παρόν σενάριο στόχος της προσομοίωσης είναι η κάλυψη των συγκεκριμένων ενεργειακών στόχων που έχουν τεθεί:

- Ενεργειακή κάλυψη 0 σπιτιών (μηδενική ενεργειακή ζήτηση)
- Παραγωγή υδρογόνου ίση με 2.000.000 λίτρα

Η ενεργειακή ζήτηση που απαιτείται από την εγκατάσταση περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα:

Πίνακας 4.3 Προδιαγραφές κόστους εξοπλισμού

Κόστος Μονάδας Φωτοβολταϊκών	18.000€/10KWp
Κόστος Μονάδας Ηλεκτρόλυσης	4.000€/6,9KWp
Κόστος Μπαταρίας	500€/500Ah
Κόστος δεξαμενής υδρογόνου	20€/500lt

Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού θα παραμείνουν σταθερές και αναλλοίωτες καθ' όλη την διάρκεια των προσομοιώσεων των σεναρίων.

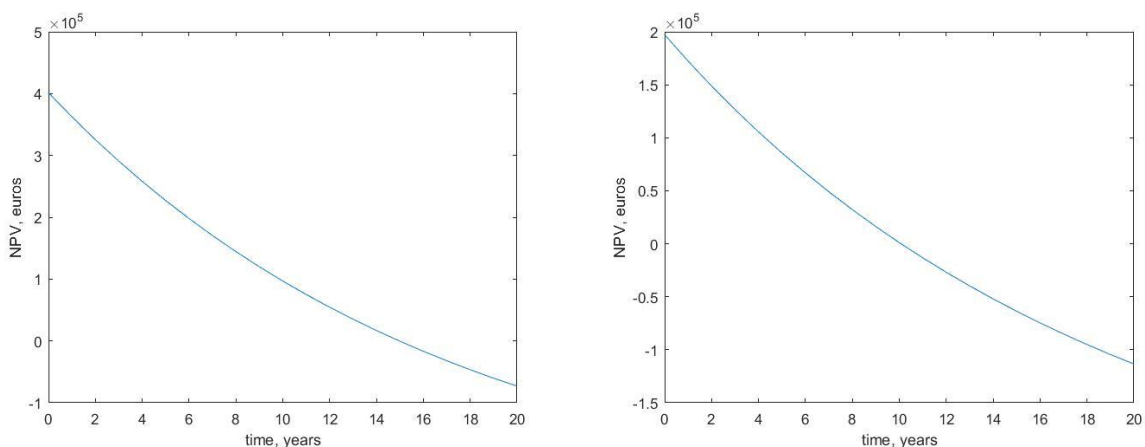
Αξίζει να σημειωθεί ότι καθ' όλη την διάρκεια των σεναρίων προσομοίωσης, η νέα προσομοίωση χρησιμοποιεί τις νέες σχέσεις τεχνοοικονομικού ελέγχου της εγκατάστασης (σχέσεις (9) – (15), νέα προσομοίωση) σε αντίθεση με τον αρχικό κώδικα προσομοίωσης όπου κάνει χρήση των αρχικών σχέσεων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (σχέσεις (5) – (8), αρχική προσομοίωση).

Καταγραφή αποτελεσμάτων σεναρίου προσομοίωσης 1:

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα βέλτιστων μεταβλητών σεναρίου προσομοίωσης 1

Σενάριο προσομοίωσης 1	Αρχική προσομοίωση	Νέα προσομοίωση
ΜέγεθοςPV, kW	19.93	8.32
ΜέγεθοςBAT, Ah	21.40	37.22
ΜέγεθοςELEC, kW	5.99	5.2
ΌριοSOC _{min}	-	70.09
Όριο SOC _{max}	-	80.13
ΜέγεθοςTANK, m ³	400	400
Παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου, lt	30.000.000	20.000.000
Τιμή πώλησης υδρογόνου (breakevenprice), €	8.7	7.5
Κόστος εξοπλισμού, €	401.370	197.250
Λειτουργικά Κόστη, €/yr	9.206,6	7.440,7

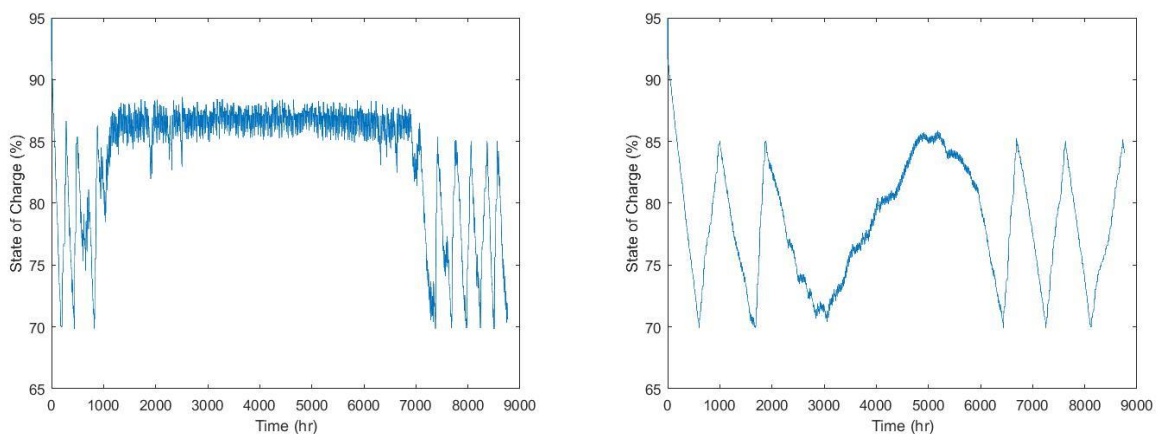
Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα βελτιστοποιήσης του συστήματος με αρχικό εύρος μεταβλητών $[0.2 \ 0.5 \ 0.1] - [100 \ 40 \ 6]$. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές αποκρίσεις της κατάστασης φόρτισης(State of Charge), παραγωγής υδρογόνου, απόσβεσης και πίεσης φιαλών υδρογόνου έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί κατάλληλος σχολιασμός των αποτελεσμάτων καθώς και επιμέρους σύγκριση μεταξύ αρχικής και νέας προσέγγισης. Επιπροσθέτως έχει προστεθεί η τιμή πώλησης υδρογόνου (breakeven price) όπου αναφέρεται στην τιμή πώλησης του υδρογόνου η οποία επιτυγχάνει την απόσβεση της εγκατάστασης στον 20^ο χρόνο. Η συγκεκριμένη μεταβλητή είναι πλήρως ανεξάρτητη και κρίνεται και καθορίζεται από τον χρήστη, στα παρακάτω διαγράμματα απόσβεσης της εγκατάστασης θα παρουσιαστούν αποσβέσεις με ίδιες τιμές πώλησης υδρογόνου, οι οποίες είναι διαφορετικές σε σχέση με τις τιμές υδρογόνου breakeven price που αναφέρονται στη 20ετή απόσβεση της εγκατάστασης, στην αρχική και νέα προσομοίωση έχοντας ως στόχο την άμεση τεχνοοικονομική σύγκριση των 2 διαφορετικών προσεγγίσεων (αρχικής και νέας). Οι τιμές υδρογόνου που χρησιμοποιήθηκαν είναι 10.3€ για τα σενάρια προσομοίωσης 0 και 1 οικίας αντίστοιχα και 9.1€ για το σενάριο προσομοίωσης με ενεργειακή κάλυψη 5 οικιών.



Σχήμα 4.5 Γραφικές αποκρίσεις καθαρής παρούσας αξίας αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα για το 1^ο σενάριο κόστους (NPV/απόσβεσης της επένδυσης)

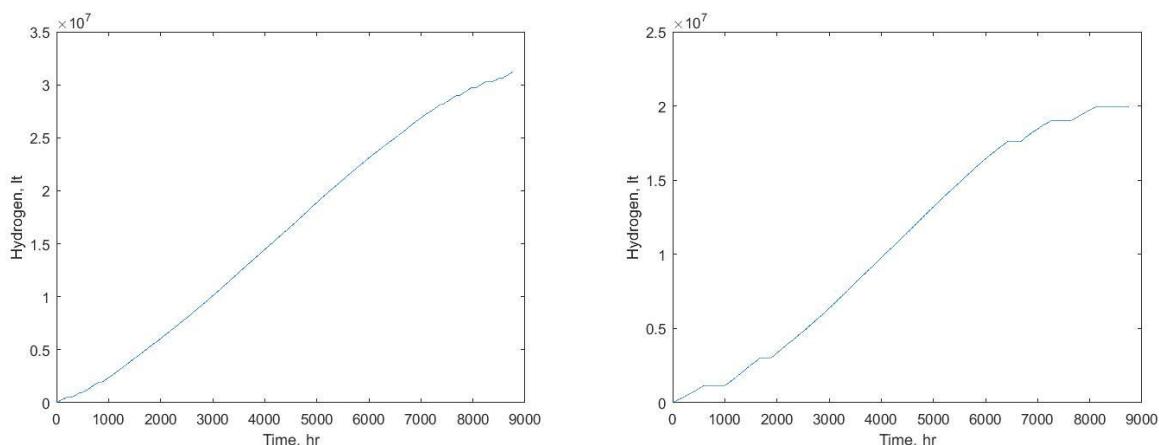
Οι παραπάνω γραφικές αποκρίσεις διαγράφουν την χρηματική απόσβεση της υβριδικής εγκατάστασης κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 20 ετών που έχει οριστεί για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά, όπου στον οριζόντιο άξονα ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την απόσβεση της εγκατάστασης. Παρατηρείται μια εκθετική μείωση της απόσβεσης κατά την χρονική πάροδο, γεγονός που είναι λογικό καθώς ο συνολικός

ισολογισμός της εγκατάστασης είναι ορισμένος με βάση το σταθερό επιτόκιο που έχει οριστεί. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής κεφαλαίου ανάκτησης μειώνεται εκθετικά κατά την διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης. Κατά συνέπεια εκθετική μείωση παρουσιάζει η απόσβεση της εγκατάστασης. Εμβαθύνοντας ακόμα περισσότερο, παρατηρώντας τα νεκρά σημεία και συγκρίνοντας τα στην κάθε περίπτωση της προσομοίωσης παρατηρείται ότι στην νέα προσέγγιση το νεκρό σημείο εμφανίζεται περίπου στον 12^ο χρόνο σε αντίθεση με τον αρχικό κώδικα προσομοίωσης όπου η απόσβεση της επένδυσης ολοκληρώνεται στον 16^ο χρόνο της επένδυσης. Πρακτικά, το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η νέα προσέγγιση της προσομοίωσης κρίνεται πιο επικερδής σε σχέση με την αρχική προσέγγιση.



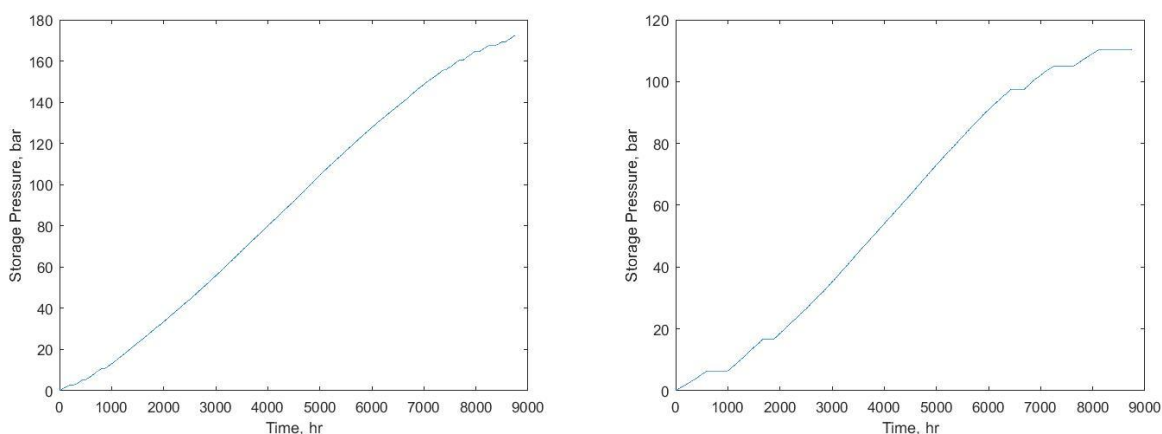
Σχήμα 4.6 Γραφικές αποκρίσεις των καταστάσεων φόρτισης(StateofCharge) για το 1^ο σενάριο κόστουςαρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.6, η κατάσταση της μπαταρίας είναι κυμαινόμενη μεταξύ από 70% έως 85% και στις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης. Η συμπεριφορά της κατάστασης φόρτισης είναι αποδεκτή και στις 2 περιπτώσεις με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί για την μεταβλητή της κατάστασης φόρτισης (Stateofcharge). Επιπροσθέτως, παρατηρείται περιοδικότητα κατά την διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης, γεγονός το οποίο κρίνεται επιθυμητό για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία της εγκατάστασης. Τέλος, στην νέα περίπτωση της προσομοίωσης παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετά μικρότερα ποσά φορτίσεων και εκφορτώσεων, φαινόμενο το οποίο είναι επιθυμητό από την εγκατάσταση και την προσομοίωση καθώς μείωση τους συνεπάγεται σε χαμηλούς κύκλους λειτουργίας των μπαταριών και ως αποτέλεσμα έχει την αύξηση του κύκλου ζωής και της αποδοτικότητας των συσσωρευτών/μπαταριών.



Σχήμα 4.7 Γραφικές αποκρίσεις παραγωγής υδρογόνου για το 1^ο σενάριο κόστους αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, στο παρόν σενάριο επιτυγχάνεται ο ελάχιστος στόχος παραγωγής υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια σιγμοειδής αύξηση της παραγωγής μέχρι την σταθεροποίηση της στο τέλος του έτους, συγκεκριμένα σε ποσότητα 20.000.000 λίτρα υδρογόνου για την νέα προσομοίωση ενώ στην αρχική περίπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου συγκεκριμένα περίπου στα 30.000.000.



Σχήμα 4.8 Γραφικές αποκρίσεις πίεσης φιαλών υδρογόνου για το 1^ο σενάριο αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.8 διαγράφεται η συμπεριφορά της πίεσης εντός των φιαλών αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου. Για τόσο κατασκευαστικούς όσο και

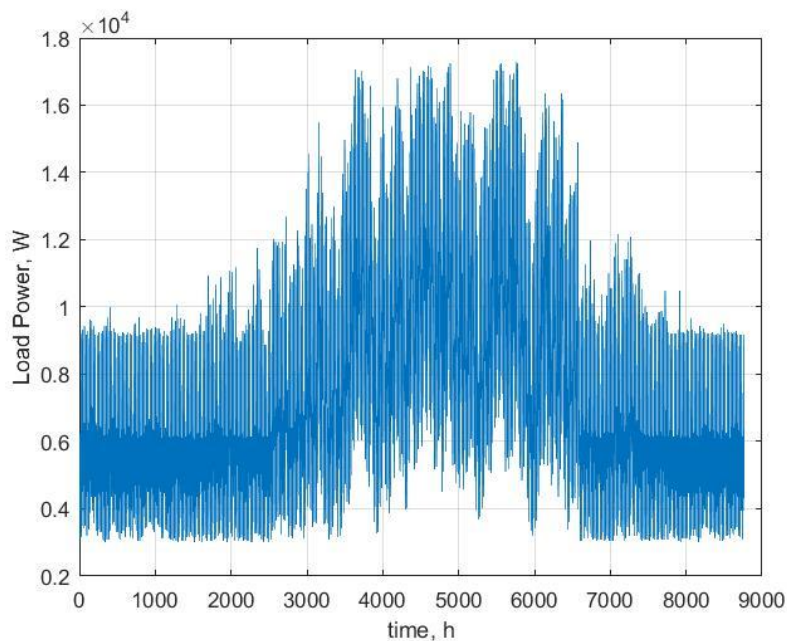
τεχνοοικονομικούς λόγους έχει οριστεί συγκεκριμένη μέγιστη τιμή, η οποία δεν πρέπει να παραβιαστεί για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία της υβριδικής εγκατάστασης (200bar). Στο παρόν σενάριο η πίεση αυξάνεται χρονικά, σε επιτρεπτό αριθμητικό όριο το οποίο δεν προσπερνάει την μέγιστη επιτρεπτή πίεση. Παρατηρείται στην σύγκριση των 2 αυτών περιπτώσεων ότι η νέα προσέγγιση πετυχαίνει μικρότερη πίεση (100bar) σε σχέση με την αρχική προσέγγιση (170bar).

4.2 Σενάριο προσομοίωσης 2

Στο παρόν σενάριο στόχος της προσομοίωσης είναι η κάλυψη των συγκεκριμένων ενεργειακών στόχων που έχουν τεθεί:

- Ενεργειακή κάλυψη 1 οικία (3-4 οικογένειες)
- Παραγωγή υδρογόνου ίση με 2.000.000 λίτρα

Η ενεργειακή ζήτηση που απαιτείται από την εγκατάσταση περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.9 Γραφική απόκριση ενεργειακής ζήτησης εγκατάστασης για το σενάριο προσομοίωσης 2 (1 οικία)

Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού θα παραμείνουν σταθερές και αναλλοίωτες καθ' όλη την διάρκεια των προσομοιώσεων των σεναρίων όπως αναγράφονται στον πίνακα 4.3.

Καταγραφή αποτελεσμάτων σεναρίου προσομοίωσης:

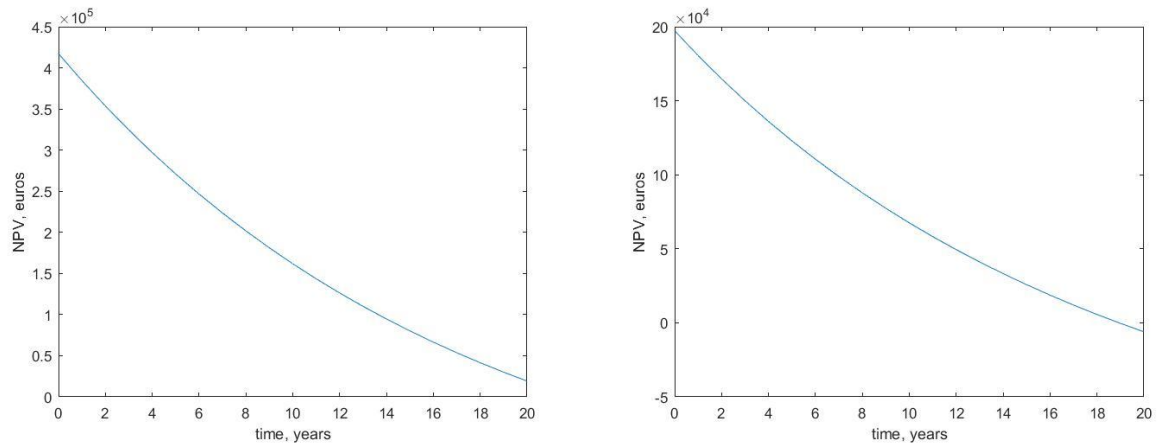
Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα βέλτιστων μεταβλητών σεναρίου προσομοίωσης 2

Σενάριο προσομοίωσης 2	Αρχική προσομοίωση	Νέα προσομοίωση
Μέγεθος PV, kW	20.28	10.54
Μέγεθος BAT, Ah	39.99	39.98
Μέγεθος ELEC, kW	5.99	5.99
Όριο SOC _{min}	-	70.00
Όριο SOC _{max}	-	80.00
Μέγεθος TANK, m ³	400	400
Παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου, lt	20.000.000	9.000.000
Τιμή πώλησης υδρογόνου (breakevenprice), €	10.8	9.7
Κόστος εξοπλισμού, €	417.200	241.820
Λειτουργικά Κόστη, €/yr	9.428,8	9.121,9

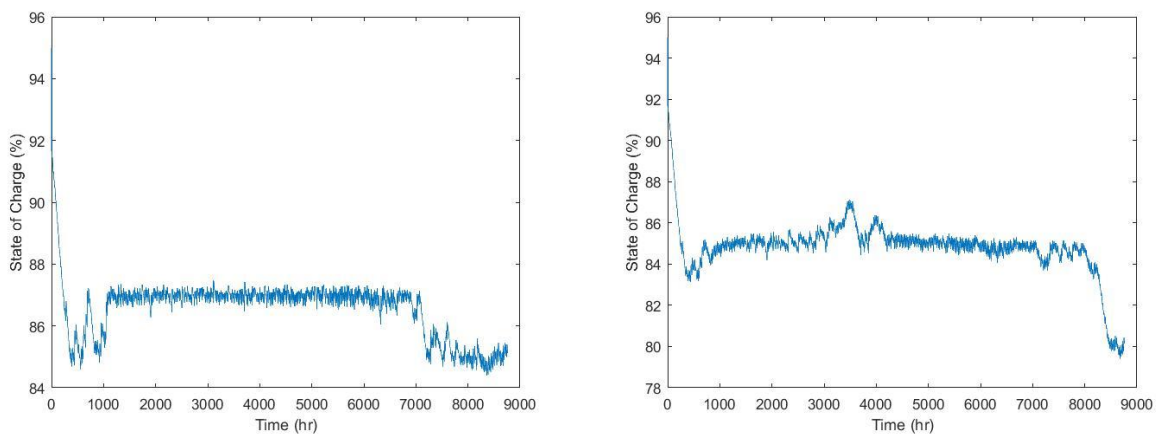
Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα βελτιστοποίησης του συστήματος με αρχικό εύρος μεταβλητών [0.2 0.5 0.1] – [100 40 6]. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές αποκρίσεις της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge), παραγωγής υδρογόνου, απόσβεσης και πίεσης φιαλών υδρογόνου έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί κατάλληλος σχολιασμός των αποτελεσμάτων καθώς και επιμέρους σύγκριση μεταξύ αρχικής και νέας προσέγγισης.

Οι παρακάτω γραφικές αποκρίσεις διαγράφουν την χρηματική απόσβεση της υβριδικής εγκατάστασης κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 20 ετών που έχει οριστεί για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Παρατηρείται μια εκθετική μείωση της απόσβεσης κατά την χρονική πάροδο, γεγονός που είναι λογικό καθώς ο συνολικός ισολογισμός της εγκατάστασης είναι ορισμένος με βάση το σταθερό επιτόκιο που έχει οριστεί. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής κεφαλαίου ανάκτησης μειώνεται εκθετικά κατά την διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης. Κατά συνέπεια εκθετική μείωση παρουσιάζει η απόσβεση της εγκατάστασης. Παρατηρώντας τα νεκρά σημεία και συγκρίνοντας τα στην κάθε περίπτωση της προσομοίωσης παρατηρείται ότι στην νέα προσέγγιση το νεκρό σημείο εμφανίζεται περίπου στον 17^ο χρόνο σε αντίθεση με τον αρχικό κώδικα προσομοίωσης όπου η απόσβεση της επένδυσης ολοκληρώνεται στον 20^ο χρόνο της

επένδυσης. Πρακτικά, το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η νέα προσέγγιση της προσομοίωσης κρίνεται πιο επικερδής σε σχέση με την αρχική προσέγγιση και σε αυτό το σενάριο.

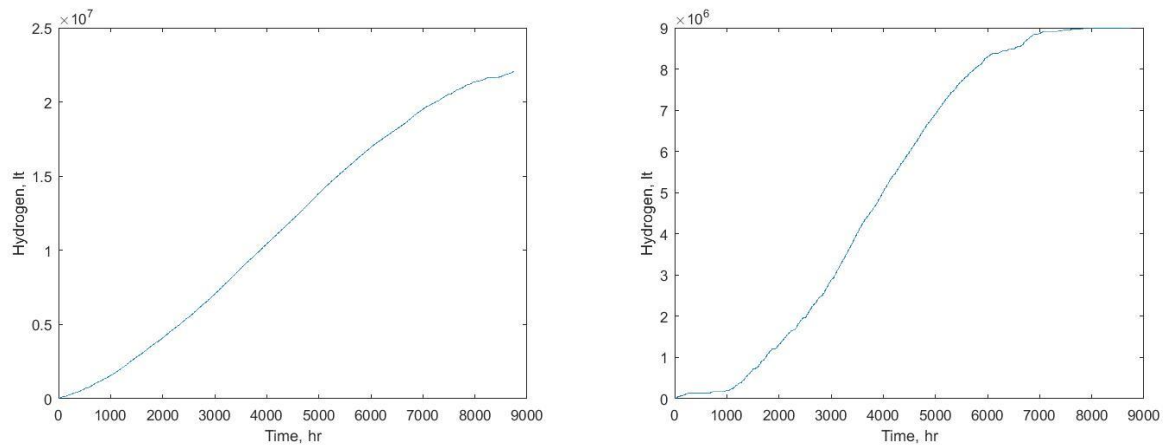


Σχήμα4.11 Γραφικές αποκρίσεις καθαρής παρούσας αξίας αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα για το 2^ο σενάριο κόστους (NPV/απόσβεσης της επένδυσης)



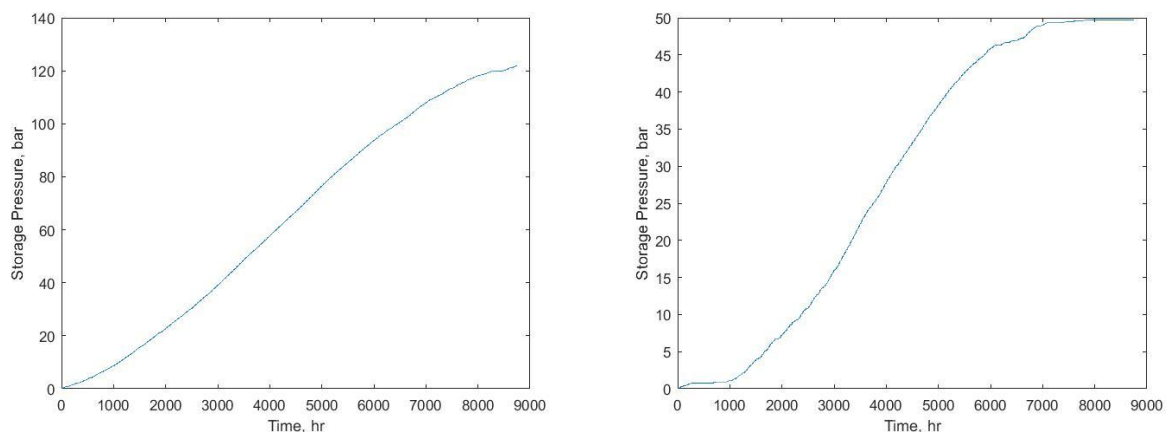
Σχήμα4.12 Γραφικές αποκρίσεις των καταστάσεων φόρτισης (StateofCharge) για το 2^ο σενάριο κόστουςαρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.12, η κατάσταση της μπαταρίας είναι κυμαινόμενη μεταξύ από 70% έως 85% και στις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης. Η συμπεριφορά της κατάστασης φόρτισης είναι αποδεκτή και στις 2 περιπτώσεις με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί για την μεταβλητή της κατάστασης φόρτισης.



Σχήμα 4.13 Γραφικές αποκρίσεις παραγωγής υδρογόνου για το 2^ο σενάριο κόστους αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13, στο παρόν σενάριο επιτυγχάνεται ο ελάχιστος στόχος παραγωγής υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια σιγμοειδής αύξηση της παραγωγής μέχρι την σταθεροποίηση της στο τέλος του έτους, συγκεκριμένα σε ποσότητα 9.000.000 λίτρα υδρογόνου για την νέα προσομοίωση ενώ στην αρχική περίπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου συγκεκριμένα περίπου στα 20.000.000 λίτρα υδρογόνου.



Σχήμα 4.14 Γραφικές αποκρίσεις πίεσης φιαλών υδρογόνου για το 2^ο σενάριο αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

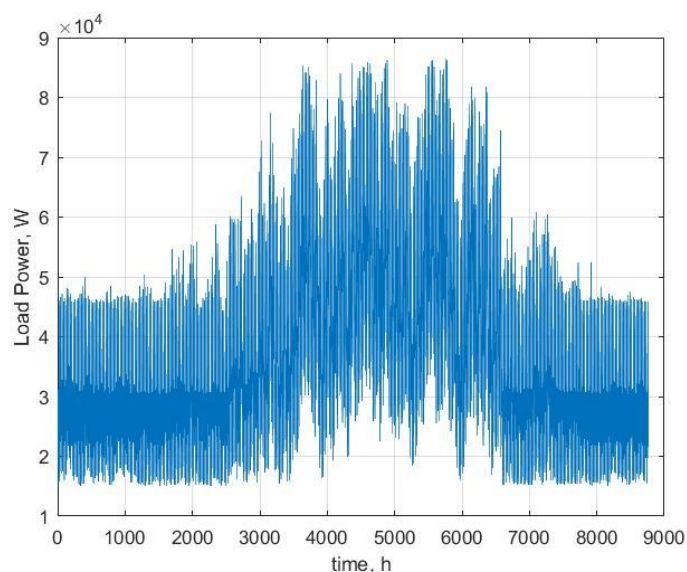
Στο σχήμα 4.14 διαγράφεται η συμπεριφορά της πίεσης εντός των φιαλών αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου. Για τόσο κατασκευαστικούς όσο και τεχνοοικονομικούς λόγους έχει οριστεί συγκεκριμένη μέγιστη τιμή, η οποία δεν πρέπει να παραβιαστεί για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία της υβριδικής εγκατάστασης (200bar). Στο παρόν σενάριο η πίεση αυξάνεται χρονικά, σε επιτρεπτό αριθμητικό όριο το οποίο δεν προσπερνάει την μέγιστη επιτρεπτή πίεση. Παρατηρείται στην σύγκριση των 2 αυτών περιπτώσεων ότι η νέα προσέγγιση πετυχαίνει μικρότερη πίεση (50 bar) σε σχέση με την αρχική προσέγγιση (120 bar).

4.3 Σενάριο προσομοίωσης 3

Στο παρόν σενάριο στόχος της προσομοίωσης είναι η κάλυψη των συγκεκριμένων ενεργειακών στόχων που έχουν τεθεί:

- Ενεργειακή κάλυψη 5 σπιτιών
- Παραγωγή υδρογόνου ίση με 2.000.000.000 λίτρα

Η ενεργειακή ζήτηση που απαιτείται από την εγκατάσταση περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.15 Γραφική απόκριση ενεργειακής ζήτησης εγκατάστασης για το σενάριο προσομοίωσης 2 (5 οικίες)

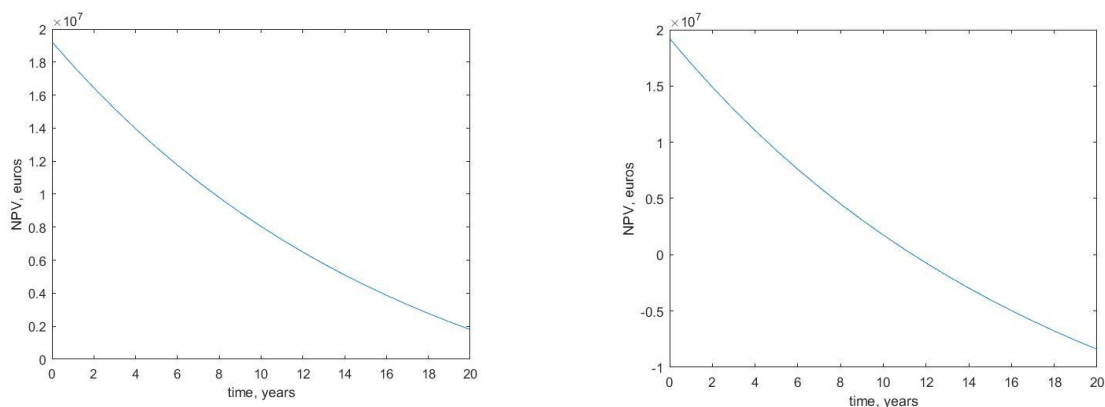
Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού θα παραμείνουν σταθερές και αναλλοίωτες καθ' όλη την διάρκεια των προσομοιώσεων των σεναρίων όπως αναγράφονται στον πίνακα 4.3.

Καταγραφή αποτελεσμάτων σεναρίου προσομοίωσης:

Πίνακας 4.16 Αποτελέσματα βέλτιστων μεταβλητών σεναρίου προσομοίωσης 3

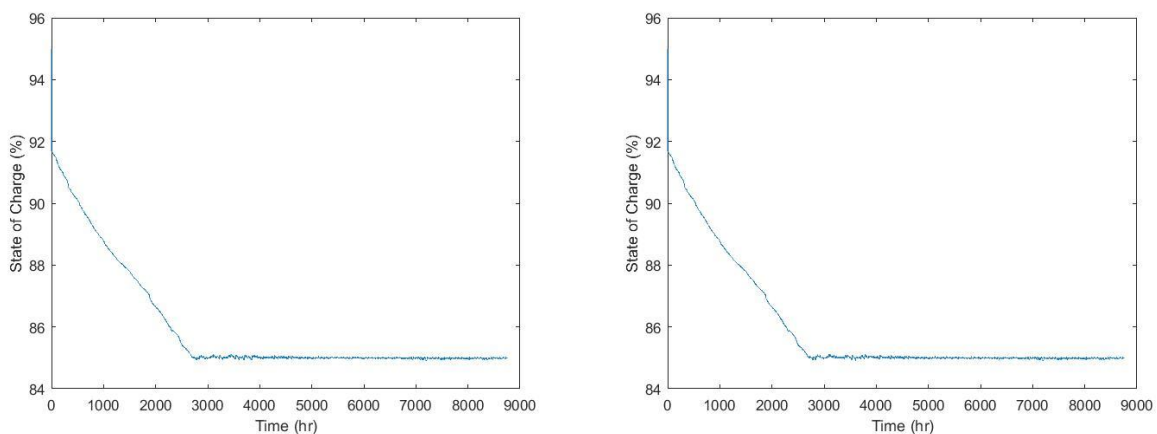
Σενάριο προσομοίωσης 3	Αρχική προσομοίωση	Νέα προσομοίωση
Ποσότητα PV, kW	824.43	824.49
Ποσότητα BAT, Ah	724.99	724.67
Ποσότητα ELEC, kW	804.90	804.99
Ποσότητα SOC _{min}	-	71.64
Ποσότητα SOC _{max}	-	80.00
Ποσότητα TANK, m ³	40000	40000
Παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου, lt	2.000.000.000	2.000.000.000
Τιμή πώλησης υδρογόνου, €	9.7	7.2
Κόστος εξοπλισμού, €	19.222.000	19.223.000
Λειτουργικά Κόστη, €/yr	892.150	725.130

Στον πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα βελτιστοποίησης του συστήματος με αρχικό εύρος μεταβλητών [0.2 0.5 0.1] – [900 725 805]. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι γραφικές αποκρίσεις της κατάστασης φόρτισης (StateofCharge), παραγωγής υδρογόνου, απόσβεσης και πίεσης φιαλών υδρογόνου έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί κατάλληλος σχολιασμός των αποτελεσμάτων καθώς και επιμέρους σύγκριση μεταξύ αρχικής και νέας προσέγγισης.



Σχήμα 4.17 Γραφικές αποκρίσεις καθαρής παρούσας αξίας αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα για το 3^ο σενάριο κόστους (NPV/απόσβεσης της επένδυσης)

Οι παραπάνω γραφικές αποκρίσεις διαγράφουν την χρηματική απόσβεση της υβριδικής εγκατάστασης κατά την διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των 20 ετών που έχει οριστεί για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Παρατηρείται μια εκθετική μείωση της απόσβεσης κατά την χρονική πάροδο, γεγονός που είναι λογικό καθώς ο συνολικός ισολογισμός της εγκατάστασης είναι ορισμένος με βάση το σταθερό επιτόκιο που έχει οριστεί. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής κεφαλαίου ανάκτησης μειώνεται εκθετικά κατά την διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης. Κατά συνέπεια εκθετική μείωση παρουσιάζει η απόσβεση της εγκατάστασης. Παρατηρώντας τα νεκρά σημεία και συγκρίνοντας τα στην κάθε περίπτωση της προσομοίωσης παρατηρείται ότι στην νέα προσέγγιση το νεκρό σημείο εμφανίζεται περίπου στον 13^ο χρόνο σε αντίθεση με τον αρχικό κώδικα προσομοίωσης όπου η απόσβεση της επένδυσης δεν ολοκληρώνεται στον χρονικό ορίζοντα της επένδυσης. Πρακτικά, το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η νέα προσέγγιση της προσομοίωσης κρίνεται πιο επικερδής σε σχέση με την αρχική προσέγγιση. Η συγκεκριμένη περίπτωση των 5 οικιών αποκτάει ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι οι μεταβλητές που έχουν προκύψει μέσω της βελτιστοποίησης (Φ/Β πλαίσια, συσκευές ηλεκτρόλυσης, συσσωρευτές κλπ.) είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Πρακτικά, οι 2 προσομοιώσεις συγκρίνονται αναλογικά με τον ίδιο τρόπο (1 – 1) καθώς όλες οι μεταβλητές, κατασκευαστικές σταθερές κλπ είναι πανομοιότυπες γεγονός που διευκολύνει την άμεση σύγκριση των 2 διαφορετικών κωδίκων προσομοίωσης.

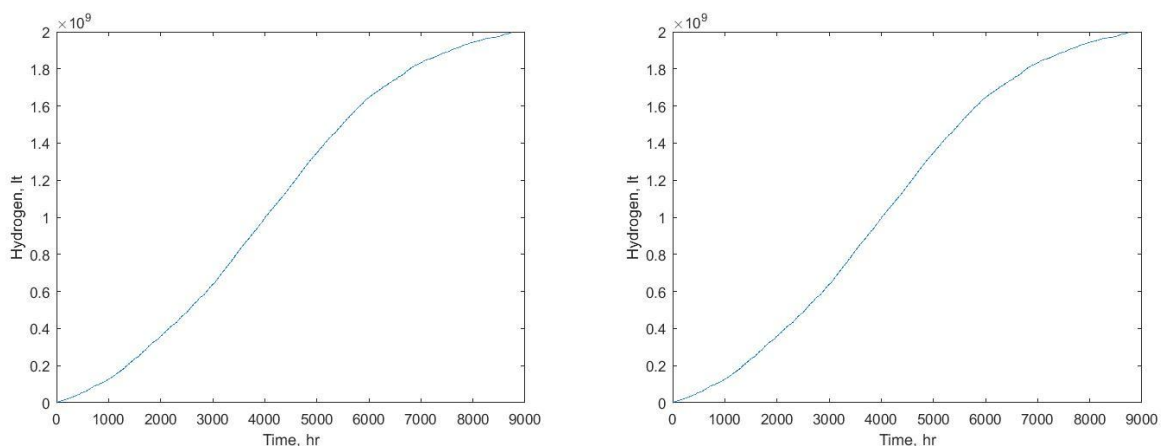


Σχήμα 4.18 Γραφικές αποκρίσεις των καταστάσεων φόρτισης (State of Charge) για το 3^ο σενάριο κόστους αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.1.2, η κατάσταση της μπαταρίας είναι κυμαινόμενη μεταξύ από 80% έως 85% και στις 2 περιπτώσεις προσομοίωσης. Η

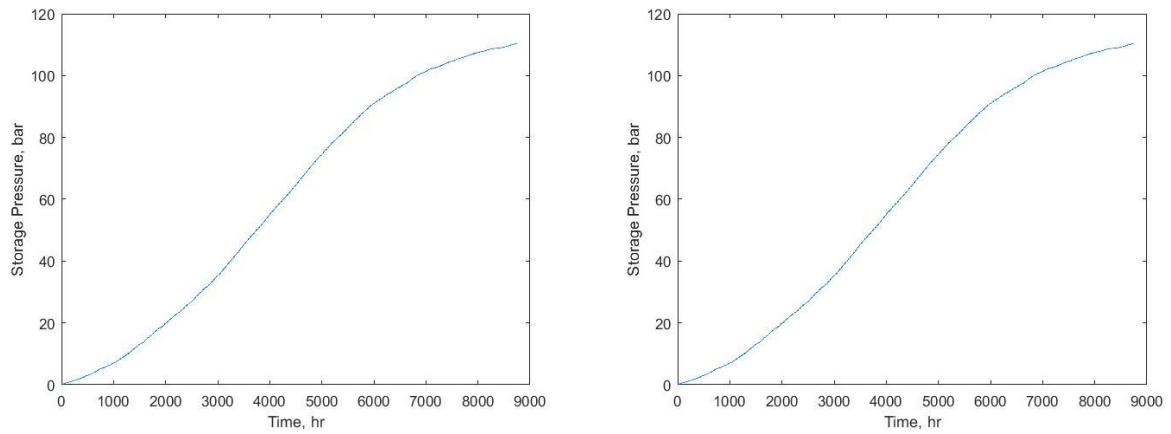
συμπεριφορά της κατάστασης φόρτισης είναι αποδεκτή και στις 2 περιπτώσεις με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί για την μεταβλητή της κατάστασης φόρτισης(State of Charge). Όσον αφορά την περιοδικότητα των φορτίσεων/εκφορτώσεων παρατηρείται τεράστια περιοδικότητα και στις 2 περιπτώσεις οι οποίες διαγράφουν πανομοιότυπες συμπεριφορές.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.19, στο παρόν σενάριο επιτυγχάνεται ο ελάχιστος στόχος παραγωγής υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια σιγμοειδής αύξηση της παραγωγής μέχρι την σταθεροποίηση της στο τέλος του έτους, συγκεκριμένα σε ποσότητα 2.000.000.000 λίτρα υδρογόνου για την νέα προσομοίωση καθώς και την αρχική.



Σχήμα 4.19 Γραφικές αποκρίσεις παραγωγής υδρογόνου για το 3^ο σενάριο κόστους αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Στο σχήμα 4.20 διαγράφεται η συμπεριφορά της πίεσης εντός των φιαλών αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου. Για τόσο κατασκευαστικούς όσο και τεχνοοικονομικούς λόγους έχει οριστεί συγκεκριμένη μέγιστη τιμή, η οποία δεν πρέπει να παραβιαστεί για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία της υβριδικής εγκατάστασης (200 bar). Στο παρόν σενάριο η πίεση αυξάνεται χρονικά, σε επιτρεπτό αριθμητικό όριο το οποίο δεν προσπερνάει την μέγιστη επιτρεπτή πίεση. Παρατηρείται στην σύγκριση των 2 αυτών περιπτώσεων ότι η νέα προσέγγιση πετυχαίνει την ίδια πίεση με την αρχική προσέγγιση (100 bar).



Σχήμα4.20 Γραφικές αποκρίσεις πίεσης φιαλών υδρογόνου για το 3^ο σενάριο αρχικής και νέας προσομοίωσης αντίστοιχα

Κεφάλαιο 5° : Συμπεράσματα και αξιολόγηση υβριδικής εγκατάστασης

Βασικό συμπέρασμα της παρούσας διπλωματικής, κρίνεται η βιωσιμότητα μιας υβριδικής εγκατάστασης της οποίας τα βασικά χαρακτηριστικά είναι η άμεση κάλυψη ενεργειακής ζήτησης καθώς και η παραγωγή ποσότητας υδρογόνου προς πώληση. Η βελτιστοποίηση της εγκατάστασης δύναται αξιόπιστη με γνώμονα τα εξαγόμενα αποτελέσματα καθώς ικανοποιεί πλήρως τους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι οποίοι απαρτίζονται από τεchnοοικονομικούς στόχους και στόχους ενεργειακής κάλυψης έως και κατασκευαστικούς στόχους που ικανοποιούν την βιωσιμότητα, την αξιοπιστία και την διάρκεια της υβριδικής εγκατάστασης.

Μέσω της τιμής πώλησης του υδρογόνου για την εύρεση του νεκρού σημείου στον 20^ο χρόνο της επένδυσης (breakeven price), πραγματοποιείται η σύγκριση των 2 μεθόδων προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια μικρότερη τιμή υδρογόνου σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης στην νέα προσέγγιση του κώδικα προσομοίωσης, γεγονός που καθιστά πιο ανταγωνιστική την καινούργια διάταξη. Επίσης μέσω συγκρίσεων με τις ίδιες τιμές υδρογόνου και στις 2 περιπτώσεις (αρχική και νέα) παρατηρείται ότι η νέα προσέγγιση πετυχαίνει γρηγορότερη απόσβεση σε σχέση με την αρχική. Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση που γίνεται ξεκάθαρο το παραπάνω συμπέρασμα είναι το 3^ο σενάριο όπου οι βέλτιστες μεταβλητές, παραγωγές υδρογόνου σχεδόν ταυτίζονται και στις 2 περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η νέα προσέγγιση πετυχαίνει απόσβεση πιο γρήγορα σε σχέση με την αρχική, επομένως η νέα προσέγγιση κρίνεται βέλτιστη και πιο επικερδής από την αρχική.

Η αξιολόγηση της υβριδικής εγκατάστασης βασίζεται στην απόδοση συγκεκριμένων μεταβλητών μεγεθών, αλλά και στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξάγονται κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας υποδεικνύει, μέσω της περιοδικότητας της, την ομαλή λειτουργία της μέσω των σταδιακών φορτίσεων/εκφορτίσεων και κατά συνέπεια την βέλτιστη λειτουργία των μπαταριών τόσο από τεchnοοικονομικής όσο και από μηχανολογικής άποψης. Επιπροσθέτως, η προσαρμογή της αντικειμενικής συνάρτησης μέσω μαθηματικών μοντέλων διασφαλίζει την ρεαλιστική προσέγγιση της απόσβεσης της επένδυσης καθώς και επιπρόσθετα τεchnοοικονομικά στοιχεία. Εν κατακλείδι, η εγκατάσταση αξιολογείται ικανοποιητική δεδομένου τόσο της ικανοποίησης των εν λόγω στόχων που έχουν τεθεί όσο και της αξιοπιστίας της εγκατάστασης.

Βιβλιογραφία

- [1] Ipsakis D., Voutetakis S., Seferlis P., Stergiopoulos F., Elmasides C.. 2008. "Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage." *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 7081 – 7095. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.051>.
- [2] Ziogou C., Ipsakis D., Stergiopoulos F., Papadopoulou S., Bezergianni S., Voutetakis S.. 2012. "Infrastructure, automation and model-based operation strategy in a stand-alone hydrolytic solar-hydrogen production unit." *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 16591 – 16603. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.179>.
- [3] Ferrario M. A., Bartolini A., Manzano S. F., Vivas F. J., Comodi G., McPhail S. J., Andujar J. M.. 2021. "A model-based parametric and optimal sizing of a battery/hydrogen storage of a real hybrid microgrid supplying a residential load: Towards island operation." *Advances in Applied Energy* 3: 100048. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100048>.
- [4] Ahadi A., Liang X.. 2017. "A stand-alone hybrid renewable energy system assessment using cost optimization method." 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). <https://doi.org/10.1109/ICIT.2017.7913260>.
- [5] Fernández F. J. V., Jiménez A., Segura F., Marquez J. M. A.. 2020. "An Energy Management Strategy and Fuel Cell Configuration Proposal for a Hybrid Renewable System with Hydrogen Backup." *Sustainable Infrastructure: Breakthroughs in Research and Practice*: 133 – 157. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0948-7.ch006>.
- [6] Singh S., Chauhan P., Aftab M. A., Ali I., Hussain S. M. S., Ustun T. S.. 2020. "Cost Optimization of a Stand-Alone Hybrid Energy System with Fuel Cell and PV." *Energies* 2020 13: 1295. <https://doi.org/10.3390/en13051295>.
- [7] Ferrario M. A., Vivas F. J., Manzano F. S., Comodi G., Andujar J. M., Bocci E., Martirano L.. 2020. "Hydrogen vs. Battery in the Long-term Operation. A Comparative Between Energy Management Strategies for Hybrid Renewable Microgrids." *Electronics* 2020 9: 698. <https://doi.org/10.3390/electronics9040698>.
- [8] Baumann L., Boggasch E., Rylatt R.M., Wright A. J.. 2010. "Energy flow management of a hybrid renewable energy system with hydrogen." *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, 2010 IEEE.

<https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619856>.

- [9] Terlouw T., AlSkaif T., Bauer C., van Sark W.. 2019. "Optimal energy management in all-electric residential energy systems with heat and electricity storage." *Applied Energy* 254: 113580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113580>.
- [10] Giannakoudis G., Papadopoulos A., Seferlis P., Voutetakis S.. 2009. "Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage." *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (3): 872 – 891. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.044>.
- [11] Castañeda M. , Cano A., Jurado F., Sánchez H., Fernández L. M.. 2013. "Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system." *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (10): 3830 – 3845. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.080>.
- [12] Mokhtara C., Negrou B., Setrou N., Bouferrouk A., Yao Y.. 2021. "Design optimization of grid-connected PV-Hydrogen for energy prosumers considering sector-coupling paradigm: Case study of a university building in Algeria." *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (75): 37564 – 37582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.069>.
- [13] Mokhtara C., Negrou B., Setrou N., Setrou B., Samy M. M.. 2020. "Design optimization of off-grid Hybrid Renewable Energy Systems considering the effects of building energy performance and climate change: Case study of Algeria." *Energy* 219: 119605. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119605>.
- [14] Singh A., Baredar P.. 2016. "Techno-economic assessment of a solar PV, fuel cell, and biomass gasifier hybrid energy system." *Energy Reports* 2: 254 – 260. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2016.10.001>.
- [15] Jieyang Jia, Linsey C. Seitz, Jesse D. Benck, Yijie Huo, Yusi Chen, Jia Wei Desmond Ng, Taner Bilir, James S. Harrise, Thomas F. Jaramillo. 2016. "Solar water splitting by photovoltaic-electrolysis with a solar-to-hydrogen efficiency over 30%." *Nature Communications* 7: 13237. <https://doi.org/10.1038/ncomms13237>.
- [16] Ziogou C., Ipsakis D., Seferlis P., Bezergianni S., Papadopoulou S., Voutetakis S.. 2013. "Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy." *Energy* 55: 58 – 67. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.017>.

- [17] Ipsakis D.. 2011. "Optimal operation of power systems utilizing renewable and alternative energy sources." <https://doi.org/10.12681/eadd/24029>.