

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΜΕ  
ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

**Γ. Γιαννακούδης, Α. Ι. Παπαδόπουλος**

*Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών(ΙΤΧΗΔ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης  
(ΕΚΕΤΑ), 6<sup>ο</sup> χλμ Θέρμης Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 60361, 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη*

**Π. Σεφερλής**

*Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 484, 54124,  
Θεσσαλονίκη*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός και η λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος αποτελούμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και καύσιμο υδρογόνο. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι στις οποίες υπεισέρχεται αβεβαιότητα, αναπαριστώμενη μέσω στοχαστικών μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, ανεμογεννήτριες, χημικούς συσσωρευτές, μια συσκευή ηλεκτρόλυσης, δεξαμενές υδρογόνου, ένα συμπιεστή υδρογόνου, μια κυψέλη καυσίμου και τέλος, μια ντιζελογεννήτρια. Η προτεινόμενη σχεδιαστική μέθοδος περιλαμβάνει την ανάπτυξη μιας στρατηγικής διαχείρισης της ισχύος η οποία υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το κάθε υποσύστημα συναρτήσει της συνολικής κατάστασης στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Η στρατηγική διαχείρισης της ισχύος συνδυάζεται με μια μέθοδο βελτιστοποίησης, η οποία λαμβάνει υπόψη σχεδιαστικές μεταβλητές, σχετιζόμενες με κατασκευαστικές και λειτουργικές παραμέτρους που επιδρούν άμεσα στην απόδοση του συστήματος παραγωγής ισχύος. Για την επίτευξη ρεαλιστικών συνθηκών λειτουργίας, η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδέεται με μια μέθοδο που εισάγει αβεβαιότητα σε παραμέτρους του συστήματος, οι οποίες επηρεάζονται από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες, όπως μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου ή αλλαγές στους βαθμούς απόδοσης των συσκευών του συστήματος. Η εφαρμογή της σχεδιαστικής μεθόδου καταλήγει σε πρακτικά υλοποιήσιμα ενεργειακά συστήματα, ικανά να επιτύχουν υψηλή απόδοση εντός μεγάλου εύρους λειτουργικών συνθηκών.

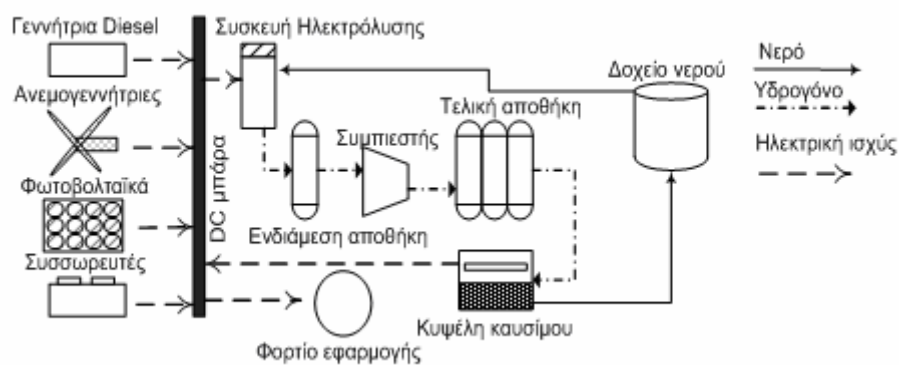
**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα συμβατικά ενεργειακά συστήματα αντικαθίστανται με γοργούς ρυθμούς από συστήματα τα οποία ενσωματώνουν ήπιες μορφές ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Μια μεγάλη πρόκληση σε τέτοιου τύπου συστήματα είναι η αξιόπιστη και αδιάκοπη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, μετατρέποντας την ενέργεια από πηγές που βασίζονται σε απρόβλεπτα καιρικά φαινόμενα. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση υβριδικών συστημάτων τα οποία συνδυάζουν πολλαπλές μονάδες παραγωγής ισχύος, καθώς και πολλαπλές μεθόδους αποθήκευσης της ενέργειας. Τέτοια συστήματα περιλαμβάνουν συνήθως φωτοβολταϊκά

στοιχεία και ανεμογεννήτριες ώστε να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες μιας στοχευόμενης εφαρμογής. Η διακοπτόμενη λόγω των καιρικών φαινομένων λειτουργία των συστημάτων αυτών επιτάσσει την ενσωμάτωση συσσωρευτών ώστε να αποθηκευτούν τυχόν πλεονάσματα ισχύος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στιγμές που υπάρχει έλλειμμα σε ισχύ. Το βασικό μειονέκτημα των χημικών συσσωρευτών (μπαταρίες) είναι η δυνατότητα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης καθώς και η περιορισμένη δυνατότητα κάλυψης υψηλών φορτίων. Για αυτόν τον λόγο το υδρογόνο αποτελεί ένα εναλλακτικό μέσο αποθήκευσης και κάλυψης των ενεργειακών αναγκών τέτοιων συστημάτων σε περιπτώσεις μακροπρόθεσμων απαιτήσεων χρήσης ενέργειας. Ωστόσο, η εναλλακτική αυτή μορφή αποθήκευσης προϋποθέτει την εγκατάσταση υποδομών που περιλαμβάνουν πολύπλοκα υποσυστήματα. Είναι σαφές πως η ενσωμάτωση συσκευών με πολλαπλές μονάδες διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών στο σύστημα, δημιουργεί πολυπλοκότητα και απαιτεί την χρήση αποτελεσματικών μεθόδων λήψης αποφάσεων. Η έντονη παρουσία αβεβαιότητας λόγω των απρόβλεπτων καιρικών συνθηκών ή των αλλαγών στην απόδοση των συσκευών μετατροπής της ισχύος (π.χ. λόγω βλαβών) δημιουργούν επιπρόσθετες απαιτήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη, καθώς επηρεάζουν την συνολική απόδοση του ολοκληρωμένου συστήματος λόγω της άμεσης συσχέτισης τους με τα υπόλοιπα υποσυστήματα. Υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες εξετάζουν συστήματα με παρόμοια πολυπλοκότητα, οι οποίες όμως εστιάζουν κυρίως στην ανάπτυξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης, χωρίς να εξετάζουν αναλυτικά την αναπαράσταση και επιρροή της αβεβαιότητας στην απόδοση του συστήματος [1-3].

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με δυνατότητες αποθήκευσης και παραγωγής ισχύος, με σκοπό να διερευνηθούν οι επιδράσεις της αβεβαιότητας στην λήψη αποφάσεων κατά την βελτιστοποίηση. Η δομή του εξεταζόμενου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η παραγωγή της ισχύος γίνεται μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων και ανεμογεννητριών. Το πλεόνασμα της ενέργειας παρέχεται σε μία ηλεκτρολυτική συσκευή μετά την κάλυψη του ζητούμενου φορτίου.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ενεργειακού συστήματος

Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται υπό πίεση σε δεξαμενές έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί

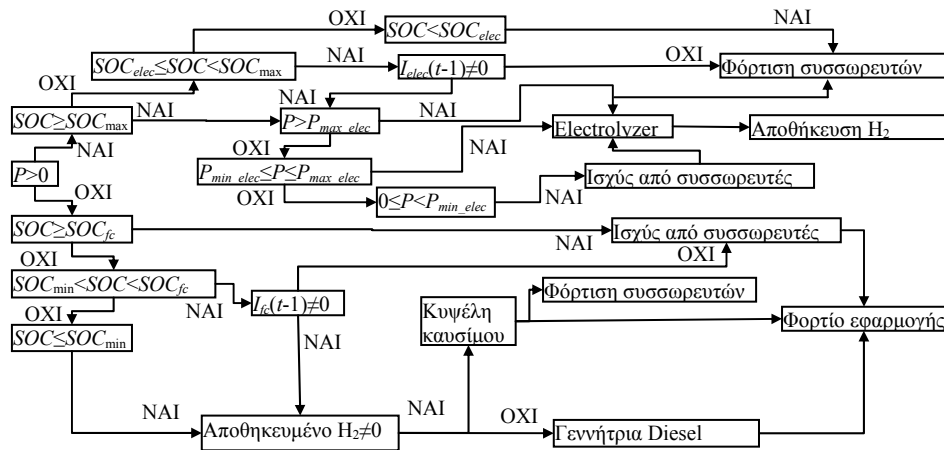
από την κυψέλη καυσίμου σε περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη ισχύος. Παράλληλα, συσσωρευτές μολύβδου χρησιμοποιούνται με τρόπο ώστε να ρυθμίζουν το έλλειμμα ή το πλεόνασμα του φορτίου μέσω κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης λόγω της μεταβλητότητας που προκύπτει από την χρήση των ΑΠΕ. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πλεόνασμα ισχύος, ένας συμπίεστης χρησιμοποιεί την διαθέσιμη ενέργεια ώστε να συμπίεσει το παραγόμενο υδρογόνο και να το αποθηκεύσει στις δεξαμενές. Επιπλέον, στο σύστημα ενσωματώνεται μια ντιζελογεννήτρια, η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, όπως για παράδειγμα όταν η ισχύς δεν μπορεί να καλυφθεί ούτε από τις ΑΠΕ, ούτε από τους συσσωρευτές αλλά ούτε και από το αποθηκευμένο υδρογόνο.

## 2.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το σύστημα του Σχήματος 1 αποτελείται από διαφορετικά υποσυστήματα με ξεχωριστές τεχνολογικές και λειτουργικές απαιτήσεις, οδηγώντας σε αύξηση του αριθμού των δυνατών συνδυασμών που επιτρέπουν την παραγωγή ισχύος κατά τη λειτουργία του. Μια αποτελεσματική ενσωμάτωση και ολοκλήρωση τόσων υποσυστημάτων απαιτεί την ύπαρξη μιας στρατηγικής διαχείρισης της ισχύος, η οποία θα λαμβάνει υπόψη τους δυνατούς τρόπους αλληλεπιδράσεων των υπο-συστημάτων, ενώ παράλληλα θα εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος προστατεύοντας τις συσκευές και διατηρώντας σε υψηλό επίπεδο την απόδοσή τους. Προηγούμενη έρευνα [4,5] έδειξε ότι η ανεύρεση διαφορετικών επιλογών παραγωγής ισχύος με βάση τις αλληλεπιδράσεις των υποσυστημάτων στα πλαίσια μιας στρατηγικής ισχύος επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από λειτουργικές παραμέτρους όπως είναι το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών ( $SOC$ ), η διαθέσιμη ισχύς του συστήματος ( $P$ ) καθώς και η ζώνη υστέρησης λειτουργίας των συσκευών ( $HBR$ ), η οποία καθορίζει την στιγμή έναρξης ή τερματισμού λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου.

Η στρατηγική διαχείρισης ισχύος ( $\Sigma DI$ ) που εξετάζεται εμπεριέχει τις εναλλακτικές επιλογές αποφάσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 για περιπτώσεις ελλείμματος ή περίσσειας ενέργειας. Σε περιπτώσεις ελλείμματος ισχύος ( $P \leq 0$ ), η ισχύς που απαιτείται ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις σε φορτίο παρέχεται άμεσα από τους συσσωρευτές, εάν υπάρχει αρκετή ισχύς ώστε να αποφευχθεί η χρήση της κυψέλης καυσίμου ( $SOC > SOC_{fc}$ ). Αν δεν υπάρχει διαθέσιμη ισχύς στους συσσωρευτές ( $SOC \leq SOC_{min}$ ) γίνεται χρήση της κυψέλης καυσίμου, με δεδομένο ότι θα υπάρχει διαθέσιμο υδρογόνο στις δεξαμενές. Αν  $SOC_{min} < SOC < SOC_{fc}$  και η κυψέλη καυσίμου λειτουργούσε την προηγούμενη χρονική στιγμή ( $I_{fc}(t-1) \neq 0$ ), η ζώνη υστέρησης ( $HBR=2\%$ ) επιτρέπει την επιμήκυνση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου έως ότου το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών φτάσει σε ένα όριο  $SOC_{fc}$  (οριζόμενο ως  $SOC_{min} + HBR$ ). Αν η κυψέλη καυσίμου δεν λειτουργούσε την προηγούμενη χρονική στιγμή ( $I_{fc}(t-1)=0$ ), τότε δεν ξεκινάει η λειτουργία της ώστε να αποφευχθούν οι συχνές εκκινήσεις και τερματισμοί της λειτουργίας του, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη, ενώ το φορτίο καλύπτεται από τους συσσωρευτές. Σε περίπτωση περίσσειας ισχύος ( $P > 0$ ), η πλεονάζουσα ισχύς χρησιμοποιείται στην συσκευή ηλεκτρόλυσης ( $SOC \geq SOC_{max}$ ) για την παραγωγή υδρογόνου, με δεδομένο ότι οι συσσωρευτές θα έχουν επίπεδο φόρτισης  $SOC_{max}$ . Αν η διαθέσιμη ισχύς είναι υψηλότερη από την ισχύ που απαιτείται από την συσκευή ηλεκτρόλυσης ( $P > P_{max,elec}$ ), τότε η πλεονάζουσα ισχύς αποθηκεύεται στους συσσωρευτές. Αυτό είναι δυνατό σε αυτή την περίπτωση, λόγω της επιπρόσθετης χωρητικότητας αποθήκευσης ισχύος που είναι διαθέσιμη στους συσσωρευτές (πάνω από  $SOC_{max}$ ), η οποία έχει ως σκοπό να διευκολύνει την επιβολή της ζώνης υστέρησης. Σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για επέκταση του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών  $SOC$ , το οποίο είναι πλέον το άθροισμα

των  $SOC_{max}$  και  $HBR$  και καθορίζει το σημείο όπου μόνο οι βοηθητικές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιήσουν την περίσσεια ισχύος. Σε περίπτωση ανεπάρκειας ισχύος ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης ( $P < P_{min\_elec}$ ), οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται έως ότου να καλυφθεί το όριο  $P_{min\_elec}$ . Σε περίπτωση ανεπαρκούς φορτίου στους συσσωρευτές ώστε να επιτραπεί η λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης ( $SOC < SOC_{elec}$ ) φορτίζονται οι συσσωρευτές. Τέλος, σε περίπτωση που  $SOC_{elec} \leq SOC < SOC_{max}$ , αν η συσκευή ηλεκτρόλυσης δεν λειτουργούσε την προηγούμενη χρονική στιγμή τότε δεν ξεκινάει και η διαθέσιμη ισχύς πηγαίνει στους συσσωρευτές.



Σχήμα 2: Στρατηγική διαχείρισης της ισχύος (ΣΔΙ)

## 2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

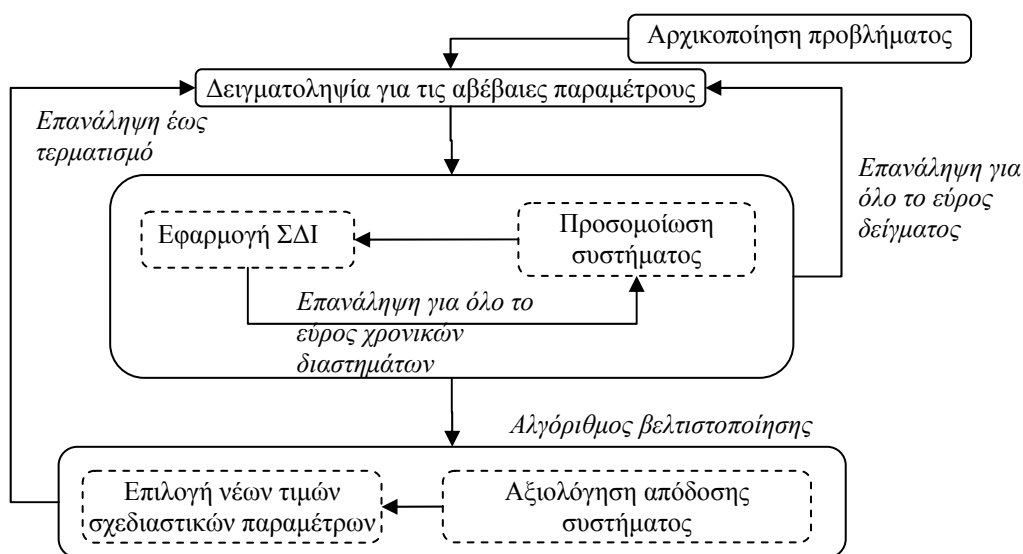
Η αβεβαιότητα είναι μια σημαντική παράμετρος που εμπεριέχεται εκ φύσεως σε οποιαδήποτε συστήματα καθώς υπόκειται σε εσωτερικά ή εξωτερικά προερχόμενη μεταβλητότητα λόγω των συνεχόμενων μεταβολών που παρατηρούνται κατά την λειτουργία τους σε σημαντικούς παράγοντες όπως η σύσταση και προδιαγραφές των πρώτων υλών, οι λειτουργικές και καιρικές συνθήκες, η απόδοση του εξοπλισμού κ.α. Η αβεβαιότητα που πηγάζει από αυτές τις μεταβολές αντιπροσωπεύει τις πολλαπλές διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος που είναι πιθανές σε μια χρονική στιγμή. Ταυτόχρονα, η μεταβλητότητα αυτή έχει σημαντικό αντίκτυπο στις σχεδιαστικές αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για το σύστημα, καθώς επηρεάζουν τα οικονομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος παραγωγής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές με χρήση ηλιακής ακτινοβολίας ή ανέμου εμπεριέχει την χρήση ιστορικών καιρικών δεδομένων ή μεθόδους πρόβλεψης καιρού με στόχο την προσομοίωση της παραγωγής ισχύος σε έναν επιθυμητό χρονικό ορίζοντα. Παρά την χρήση αυτών των μεθόδων, η συμπεριφορά των καιρικών συνθηκών πάντα εμπεριέχει αυξημένη αβεβαιότητα. Αν αυτή η αβεβαιότητα δεν ληφθεί υπόψη κατά την διάρκεια του σχεδιασμού, το σύστημα που θα προκύψει θα έχει απόδοση που μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστη μόνο μέσα στο εύρος των καιρικών συνθηκών που ελήφθησαν υπόψη. Πιθανές απρόβλεπτες μεταβολές των καιρικών συνθηκών θα οδηγήσουν αναπόφευκτα σε μη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας αβεβαιότητας, εκτός από τις καιρικές συνθήκες, είναι και η απόδοση ορισμένων υπο-συστημάτων η οποία μπορεί να μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του αναμενόμενου χρόνου ζωής τους λόγω έντονης χρήσης τους ή άλλων απρόβλεπτων παραγόντων. Για παράδειγμα, η απόδοση της συσκευής

ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου μπορεί να φθίνει κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος λόγω της χρήσης ευαίσθητων υλικών όπως οι μεμβράνες. Ο ρυθμός σταδιακής υποβάθμισης της απόδοσης αυτών των συστημάτων εμπεριέχει αβεβαιότητα λόγω της συνεχώς μεταβαλλόμενης πολιτικής χρήσης του εξοπλισμού, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τυχαιότητα των καιρικών συνθηκών και την χρησιμοποιούμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας. Η θεώρηση σταθερής απόδοσης για τα χρησιμοποιούμενα υπο-συστήματα θα οδηγούσε σε μη-βέλτιστη οικονομική και λειτουργική απόδοση του συνολικού συστήματος, άρα η μεταβλητότητα της απόδοσης πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Οι παραπάνω τύποι αβεβαιότητας που ανήκουν στους γενικότερους τύπους εξωτερικής ή συστημικής αβεβαιότητας [6] εξετάζονται σε αυτή την εργασία για παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και οι απόδοση της συσκευής ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες παράμετροι ή τύποι αβεβαιότητας που θα μπορούσαν να εξεταστούν για το σύστημα του Σχήματος 1, εάν κάτι τέτοιο ήταν επιθυμητό.

### 3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη σχεδιαστική μεθοδολογία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 και βασίζεται στην μέθοδο της Στοχαστικής Ανόπτυσης [7], η οποία χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας κατά τον βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων.



**Σχήμα 3:** Μέθοδος βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα

Το πρώτο βήμα μετά την αρχικοποίηση του υπολογιστικού προβλήματος εμπεριέχει την εισαγωγή τιμών στις αβέβαιες παραμέτρους. Στην περίπτωση που η αβεβαιότητα θεωρείται ντετερμινιστικής φύσης μπορεί να περιγραφεί είτε θέτοντας προκαθορισμένα όρια στο εύρος τιμών που μπορούν να ληφθούν από τις αβέβαιες παραμέτρους είτε μέσω ενός προκαθορισμένου αριθμού πεπερασμένων, διακριτών τιμών για τις αβέβαιες παραμέτρους. Σε περίπτωση που η αβεβαιότητα θεωρηθεί στοχαστικής φύσεως μπορεί να περιγραφεί από μια κατανομή πιθανότητας, καταδεικνύοντας έτσι το πιθανό εύρος τιμών για κάθε παράμετρο καθώς και την πιθανότητα ύπαρξης της κάθε τιμής στο συγκεκριμένο εύρος. Αυτή η ιδιότητα της στοχαστικής αβεβαιότητας ταιριάζει στην αβεβαιότητα των καιρικών συνθηκών και των

αποδόσεων που εξετάζονται σε αυτή την εργασία. Έντονες απρόσμενες μεταβολές στις καιρικές συνθήκες, σε σχέση με διαθέσιμες προβλέψεις ή ιστορικά στοιχεία, αναμένεται να είναι λιγότερο συχνές από αντίστοιχες πιο ήπιες μεταβολές, οπότε αυτού του είδους η αβεβαιότητα μπορεί να περιγραφεί από μια κανονική κατανομή πιθανότητας. Με μια αντίστοιχη κατανομή θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν και οι αποδόσεις των υπο-συστημάτων καθώς είναι περισσότερο πιθανό να μεταβληθούν σε ένα μικρό εύρος σε σχέση με την προκαθορισμένη μέγιστη απόδοσή τους.

Καθώς οι κατανομές πιθανότητας αποτελούν συνεχείς συναρτήσεις, αναπαριστώνται από μια ομάδα πεπερασμένων και διακριτών τιμών οι οποίες επιλέγονται χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους δειγματοληψίας [7]. Στην συνέχεια, το κάθε σημείο του δείγματος εισάγεται στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος. Η χρονική εξάρτηση αβέβαιων παραμέτρων όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου απαιτούν διακριτοποίηση σε πολλαπλά χρονικά διαστήματα της συνολικής χρονικής περιόδου για την οποία είναι επιθυμητοί οι υπολογισμοί. Ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων μπορεί να είναι ίσος με τα διαστήματα για τα οποία είναι διαθέσιμα τα χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα. Έτσι η τιμή του κάθε δείγματος, που έχει ληφθεί από τις διαθέσιμες κατανομές πιθανότητας, προστίθεται στην τιμή των χρονικά εξαρτημένων δεδομένων για όλο το εύρος των διαθέσιμων χρονικών διαστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η απρόβλεπτη συμπεριφορά που αντιστοιχεί στις αβέβαιες παραμέτρους για όλη την επιθυμητή χρονική περίοδο. Καθώς η τιμή του κάθε σημείου των χρονικά εξαρτημένων δεδομένων είναι διαφορετική σε κάθε χρονικό διάστημα (π.χ. διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας), η παραγόμενη ισχύς είναι επίσης διαφορετικής έντασης οπότε οι κανόνες που επιβάλλονται από την χρησιμοποιούμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας οδηγούν στην χρήση διαφορετικών υπο-συστημάτων σε κάθε διάστημα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία του δείγματος, το οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ομάδα τιμών για τις σχεδιαστικές παραμέτρους. Μετά το τέλος των επαναλήψεων που έχουν να κάνουν με την αβεβαιότητα, ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλέγει μέσω των διαθέσιμων μηχανισμών μια νέα ομάδα τιμών για τις σχεδιαστικές παραμέτρους και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με μια νέα δειγματοληψία, έως την ικανοποίηση των κριτηρίων βελτιστοποίησης και την ανεύρεση της βέλτιστης λύσης.

## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ) της επένδυσης για έναν χρονικό ορίζοντα λειτουργίας 10 ετών. Η χρησιμοποιούμενη αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την εξίσωση (1):

$$f = KPA = \sum_{i=0}^{yol} - \frac{C_i}{(1+p)^i} \quad (1)$$

όπου  $C_i$  είναι το συνολικό κόστος για το έτος  $i$  επί συνόλου  $yol$  ετών και  $p$  είναι το επιτόκιο αναγωγής σε καθαρή παρούσα αξία. Τα εξεταζόμενα κόστη που περιλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση εμπεριέχουν κεφάλαια αρχικής αγοράς και εγκατάστασης εξοπλισμού, όπως και έξοδα λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης [6]. Καθώς απαιτείται ταυτόχρονα η μεγαλύτερη δυνατή αυτονομία από ορυκτά καύσιμα, η χρήση της γεννήτριας Diesel λαμβάνεται υπόψη αλλά η χρήση της υπόκειται σε ποινές κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης. Η ζήτηση σε ισχύ (φορτίο) από την στοχευόμενη εφαρμογή επιτρέπεται

να μεταβάλλεται στο εύρος 0.6-1.3kW κατά την διάρκεια του έτους. Οι εξεταζόμενες παράμετροι απόφασης εμπεριέχουν τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων ( $n_{pv}$ ), τον αριθμό των ανεμογεννητριών ( $n_{wg}$ ), την χωρητικότητα των συσσωρευτών ( $n_{acc}$ ), την μέγιστη λειτουργική ισχύ της συσκευής ηλεκτρόλυσης ( $P_{max,e}$ ), την χωρητικότητα της ενδιάμεσης δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου, την ισχύ της κυψέλης καυσίμου ( $P_{op,fc}$ ) και τα άνω ( $SOC_{max}$ ) και κάτω όρια ( $SOC_{min}$ ) του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών. Οι αβεβαιες παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία ( $u_{s,t}$ ), την ταχύτητα του ανέμου ( $u_{w,t}$ ) καθώς και τις αποδόσεις της συσκευής ηλεκτρόλυσης ( $u_e$ ) και της κυψέλης καυσίμου ( $u_{fc}$ ). Τα καιρικά δεδομένα λαμβάνονται από μια βάση δεδομένων υπό την μορφή ωριαίων μέσων όρων ( $SR_b$ ,  $WS_t$ ) για ένα χρόνο και αντιστοιχούν στις καιρικές συνθήκες που παρατηρούνται σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Η αβεβαιότητα των καιρικών συνθηκών αναπαρίσταται από δείγματα που λαμβάνονται από μια κανονική κατανομή, τα οποία επιτρέπεται να έχουν μια απόκλιση έως και  $\pm 12\%$  από τους ωριαίους μέσους όρους. Η αβεβαιότητα στις αποδόσεις αναπαρίσταται από μια μονόπλευρη κανονική κατανομή που επιτρέπει την λήψη σημείων με απόκλιση έως και  $-8\%$  από μια προκαθορισμένη τιμή απόδοσης ( $n_e$ ,  $n_{fc}$ ) που ορίζεται από τους κατασκευαστές του συγκεκριμένου εξοπλισμού. Σε αυτή την περίπτωση η αβεβαιότητα δεν είναι χρονικά εξαρτημένη και επιτρέπεται μόνο να μειώνεται, με σκοπό να προσομοιωθεί η πιθανότητα της σταδιακά μειούμενης απόδοσης του εξοπλισμού. Η μαθηματική αναπαράσταση των παραπάνω παρουσιάζεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$u_{s,t} = SR_t \cdot (1 + \varepsilon_{SR,t}) \quad (2)$$

$$u_{w,t} = WS_t \cdot (1 + \varepsilon_{WS,t}) \quad (3)$$

$$u_e = \eta_e \cdot (1 + \varepsilon_e) \quad (4)$$

$$u_{fc} = \eta_{fc} \cdot (1 + \varepsilon_{fc}) \quad (5)$$

όπου  $\varepsilon$  αναπαριστά τιμές που λαμβάνονται τυχαία από μια κατανομή πιθανότητας με προκαθορισμένο μέσο όρο και τυπική απόκλιση.

#### 4.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

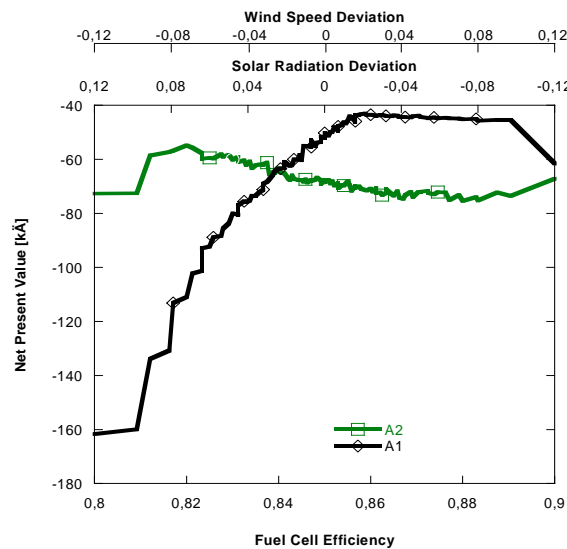
Οι εξεταζόμενες περιπτώσεις περιλαμβάνουν τον βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος χωρίς αβεβαιότητα (A1) και με αβεβαιότητα (A2) με σκοπό να συγκριθούν οι λαμβανόμενες βέλτιστες λύσεις. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα σχεδιαστικά αποτελέσματα που λαμβάνονται για τις δύο περιπτώσεις. Οι κύριες διαφορές που παρατηρούνται περιλαμβάνουν τον σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό φωτοβολταϊκών ( $n_{pv}$ ) που απαιτούνται στην περίπτωση A1 και τις σημαντικά μεγαλύτερες ενδιάμεσες δεξαμενές αποθήκευσης ( $V_b$ ) που απαιτούνται στην περίπτωση A2.

**Πίνακας 1:** Σχεδιαστικά αποτελέσματα

Περίπτωση	$n_{pv}$	$n_{wg}$	$n_{acc}$	$P_{max,e}$ (kW)	$V_b$ (Nm <sup>3</sup> )	$P_{op,fc}$ (kW)	$SOC_{max}$ (%)	$SOC_{min}$ (%)
A1	49	5	7	0.5	0.2	1	96	66
A2	45	6	6	0.5	0.9	2	93	68

Με βάση τον Πίνακα 1 ο στόχος είναι να συγκριθούν οι οικονομικές αποδόσεις των προτεινόμενων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις A1 και A2 σε σχέση με τυχαίες μεταβολές, οπότε ένα δείγμα μεταβολών επιβάλλεται στην ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου και γίνεται

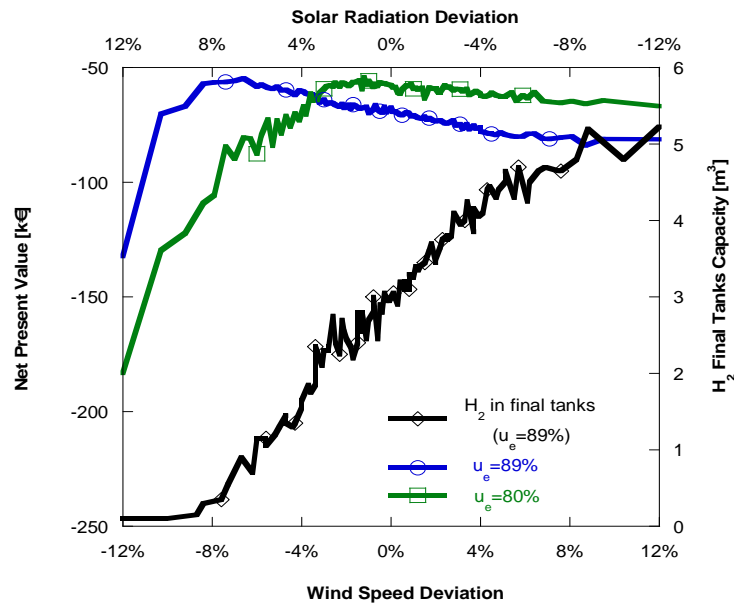
προσομοίωση μόνο για την βέλτιστη λύση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Η αρνητική τιμή για την ΚΠΑ οφείλεται στο ευρέως γνωστό γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτού του είδους είναι ακόμη υπό ανάπτυξη και αδυνατούν να ανταγωνισθούν τις τιμές συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Σε κάθε περίπτωση, αυτό που παρατηρείται είναι ότι όταν οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου είναι έντονα ευνοϊκές (π.χ. ξαφνικά ξεσπάσματα), οι μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ευνοϊκές και η απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι υψηλή, η απόδοση που προκύπτει στην περίπτωση A1 είναι καλύτερη από την απόδοση της περίπτωσης A2. Αντίθετα, όταν η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται σε τιμές μικρότερες των αναμενόμενων από τα ιστορικά δεδομένα και η απόδοση της κυψέλης καυσίμου μειώνεται επίσης, παρατηρείται μια απότομη πτώση στην ΚΠΑ για την περίπτωση A1, ενώ στην περίπτωση A2 το σύστημα δεν επηρεάζεται. Αυτό δείχνει ότι όταν οι συνθήκες γίνουν μη-ευνοϊκές, το σύστημα τις αντιμετωπίζει διατηρώντας υψηλή οικονομική απόδοση καθώς η αβεβαιότητα έχει ληφθεί υπόψη κατά την διάρκεια του σχεδιασμού.



**Σχήμα 4:** Απόδοση συστήματος υπό αβεβαιότητα με μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου και την απόδοση των κυψελών καυσίμου

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα περιπτώσεων όπου μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα με μεταβολές στην απόδοση της συσκευής ηλεκτρόλυσης για την περίπτωση A2. Για αρνητικές μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία και θετικές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, η υψηλή απόδοση της συσκευής ηλεκτρόλυσης οδηγεί σε αυξημένη παραγωγή υδρογόνου, το οποίο αποθηκεύεται στις τελικές δεξαμενές, οδηγώντας σε υψηλότερη τιμή επένδυσης. Σε περίπτωση μη-ευνοϊκών συνθηκών ανέμου και υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, το σύστημα απαιτεί υψηλή απόδοση στην συσκευή ηλεκτρόλυσης ώστε να διατηρηθεί το κόστος της επένδυσης σε χαμηλά επίπεδα. Το προφίλ αποθήκευσης και κατανάλωσης υδρογόνου παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 5. Σε περίπτωση απόδοσης 89% για την συσκευή ηλεκτρόλυσης, η χωρητικότητα των τελικών δεξαμενών αποθήκευσης είναι  $5\text{m}^3$  (για συμπιεσμένο υδρογόνο), ενώ καθώς οι συνθήκες ανέμου χειροτερεύουν το διαθέσιμο υδρογόνο σταδιακά καταναλώνεται.





**Σχήμα 5:** Απόδοση συστήματος υπό αβεβαιότητα με μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου και την απόδοση της συσκευής ηλεκτρόλυσης

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μια μέθοδος βέλτιστου σχεδιασμού υπό αβεβαιότητα ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει τον καθορισμό των τιμών δομικών και λειτουργικών σχεδιαστικών παραμέτρων που βελτιστοποιούν ένα κριτήριο απόδοσης κατά την διάρκεια του αναμενόμενου χρόνου ζωής του συστήματος, καθώς λαμβάνεται ταυτόχρονα υπόψη η αβεβαιότητα λόγω απρόσμενων μεταβολών σε καιρικές συνθήκες και απόδοση του εξοπλισμού. Παράλληλα, οι χρονικές μεταβολές παραγωγής ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λαμβάνονται υπόψη μέσω της χρήσης μια αποτελεσματικής διαχείρισης ισχύος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον ρεαλιστικό σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων υψηλής απόδοσης και πολύπλοκης δομής και λειτουργίας, ανεξάρτητα από την γεωγραφική περιοχή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bernal-Augustin, J.L., Dufo-Lopez, R., *Renew. Sust. Energ. Rev.*,13 (2009) 2111-2118.
- [2] Vosen, S.R., Keller, J.O., *Int. J. Hydrogen Energ.*, 24 (1999), 1139-1156.
- [3] Dufo-Lopez, R., Bernal-Augustin, J.L., *Renew. Energ.*, 33 (2008), 2559-2572.
- [4] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C., *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34 (2009), 7081-7095.
- [5] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Papadopoulou, S., Elmasides, C., *Energy*, 33 (2008), 1537-1550.
- [6] Giannakoudis, G., Papadopoulos, A.I., Seferlis, P., Voutetakis, S., *Int. J. Hydrogen Energ*, 35 (2010), 872-891.
- [7] Chaudhuri, P., Diwekar, U., *AICHE J.*, 45 (1999), 1671-1687