

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΩΝ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

Ανάπτυξη προηγμένου συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ – Αλγόριθμος ελέγχου και εφαρμογή σε σταθερό φορτίο

ΑΝΑΓΝΩΣΤΗΣ ΣΑΜΑΝΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Παναγιώτης Σεφερλής , Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Εξεταστική Επιτροπή: Παναγιώτης Σεφερλής , Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Νατσιάβας Σωτήριος , Καθηγητής Α.Π.Θ

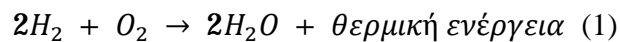
Παναγιωτίδης Κωνσταντίνος , Λέκτορας Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη , Οκτώβριος 2010

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κυψέλες ή κελιά ή στοιχεία καυσίμου (fuel cells) παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης βασιζόμενες σε μια τεχνολογία που δεν προκαλεί περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη κατανάλωση καυσίμου υδρογόνου, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο, με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και νερού. Λειτουργούν με βάση τις αρχές λειτουργίας μιας κοινής μπαταρίας, με τη διαφορά ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί ως ένας χημικός αντιδραστήρας συνεχόμενης λειτουργίας, υπό την προϋπόθεση συνεχούς τροφοδοσίας με H_2 και O_2 . Δε θεωρούνται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αλλά είναι μια μέθοδος μετατροπής ενέργειας αποθηκευμένης υπό τη μορφή καυσίμου (H_2 , CH_4 , φυσικό αέριο κ.ά.) σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Αυτό γίνεται με υψηλή απόδοση (40-80% ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης) και με μοναδική εκπομπή το καθαρό νερό κατά την αντίδραση:



Όταν το καύσιμο περιέχει άνθρακα, εκπέμπονται και αέρια επιβλαβή για το περιβάλλον (λ.χ. CO_2), αλλά σε ποσότητες πολύ μικρότερες από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αντίστοιχης ισχύος. Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα της κυψέλης καυσίμου κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική την εφαρμογή τους στα αυτοκίνητα περισσότερο από ποτέ στο παρελθόν.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός προηγμένου σχήματος ελέγχου που να ρυθμίζει τη λειτουργία της κυψελίδας καυσίμου ανάλογα με τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού φορτίου ζήτησης, που εξαρτάται από την εφαρμογή της κυψελίδας. Προφανώς η χρήση του σε ένα αυτοκίνητο απαιτεί συνεχείς αυξομειώσεις της ισχύος της κυψελίδας λόγω των απαιτήσεων της οδήγησης. Σε μια τέτοια περίπτωση η δυναμική συμπεριφορά της κυψελίδας και του συστήματος ελέγχου πρέπει να μπορούν να ακολουθήσουν τις απαιτήσεις σε ισχύ.

Το σχήμα ελέγχου εφαρμόστηκε με χρήση του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control, MPC) που βασίζεται σε προρρήσεις του μη γραμμικού μοντέλου της διεργασίας (στην εργασία αυτή η κυψέλη καυσίμου) και χρησιμοποίηση αυτών για την επίτευξη του επιθυμητού φορτίου λειτουργίας. Η χρήση του σχήματος προβλεπτικού ελέγχου είναι μια δημοφιλής τεχνική προηγμένης ρύθμισης, εξαιτίας της δυνατότητας που έχει να λειτουργεί τη διεργασία με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν πολυπλά και μεταβαλλόμενα λειτουργικά κριτήρια, ακόμα και όταν υπάρχουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά του συστήματος ή η λειτουργία του συστήματος υπόκειται σε περιορισμούς.

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Αρχικά έγινε ανάπτυξη του μη γραμμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου, και στη συνέχεια η σύδεση της με τον MPC ελεγκτή. Το ρεύμα λειτουργίας αποτελεί την χειραγωγούμενη μεταβλητή του συστήματος

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή των κυψελών καυσίμου ξεκινώντας από μια ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας τους, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή της και τα στοιχεία που τη συνθέτουν, όπως τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης και ο καταλύτης. Παρουσιάζονται επίσης και τα είδη των κυψελών καυσίμου ενώ γίνεται μια σύγκριση ως προς τη λειτουργία τους και την αποδοτικότητα τους.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου δίνοντας έμφαση στις ηλεκτροχημικές εξισώσεις καθώς και στις απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του συστήματος, ενώ παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της παραγόμενης τάσης εξόδου.

Η ανάπτυξη του μη γραμμικού μοντέλου και η περιγραφή των μαθηματικών εξισώσεων που τα χαρακτηρίζουν γίνεται εκτεταμένα στο 3^ο κεφάλαιο, ενώ γίνεται και μια μελέτη των δυναμικών του χαρακτηριστικών που θα βοηθήσει σημαντικά στην εφαρμογή του σχήματος ελέγχου.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η ανάπτυξη του σχήματος ελέγχου. Στην αρχή εφαρμόζεται έλεγχος με τη βοήθεια του γραμμικού ελεγκτή PID, και φαίνεται η αδυναμία του να εκπληρώσει αποτελεσματικά τις απαιτήσεις της διεργασίας συγκριτικά με το μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου που εφαρμόζεται αμέσως μετά. Διενεργούνται διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας απαίτησης φορτίου ακόμα και η εφαρμογή διαταραχής στο σύστημα, για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας του MPC ελεγκτή ως πρόταση ελέγχου για μη γραμμικά συστήματα.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η αναφορά σε ερευνητικές προσπάθειες που έχουν γίνει κατά καιρούς στο παρελθόν, με στόχο τον αποτελεσματικό έλεγχο της κυψέλης καυσίμου. Ο Mufford έκανε μια εκτεταμένη προσπάθεια με τη χρήση ενός PID ελεγκτή να ρυθμίσει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας σαν χειραγωγούμενη μεταβλητή τη ροή του αέρα στη κάθοδο. Ο Stueber, προσπάθησε να επιτύχει ρύθμιση της εμπέδησης χρησιμοποιώντας ένα ελεγκτή ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic) αξιοποιώντας μετρούμενες τιμές της τάσης. Ο Chmielewsky, χρησιμοποίησε πολλές χειραγωγούμενες μεταβλητές, όπου κάθε μία συνδέονταν με έναν διαφορετικό PI ελεγκτή συνθέτοντας μια δομή διαδοχικής ακολουθίας. Οι Peng, Pukrushpan, Stefanopoulou υλοποίησαν ένα σχήμα ελέγχου με χρήση ενός βέλτιστου γραμμικού τετραγωνικού ελεγκτή ανάδρασης καταστάσεων μαζί με έναν εκτιμητή μη μετρούμενων μεταβλητών. Στο σύστημα ελέγχου συνδέσαν επίσης και ένα ελεγκτή πρόδρασης για να βελτιώσουν το σχήμα ελέγχου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή.....	2
Περιεχόμενα	3
Κεφάλαιο 2	7
Κυψελή καυσίμου γενική περιγραφή.....	7
2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία.....	7
2.2 Περιγραφή – Βασικό Σχέδιο.....	9
2.3 Ιστορική Αναδρομή.....	12
2.4 Αρχή Λειτουργίας.....	15
2.5 Είδη κυψέλης καυσίμου.....	18
2.6 Δομή κυψελίδας καυσίμου – Κατασκευαστικά στοιχεία.....	36
2.6.1 Δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου.....	36
2.6.1.1 Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων.....	38
2.6.1.2 Ηλεκτρόδια.....	39
2.6.1.3 Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης.....	41
2.6.1.4 Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα (Gas Diffusion Layer).....	42
2.6.1.5 Διπολικές πλάκες (Bipolar plates).....	43
2.6.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και προτάσεις επίλυσης.....	45
2.6.2.1 Πρόβλημα στην απόδοση των χημικών αντιδράσεων.....	46
2.6.2.2 Διαχείριση νερού – Υγρασία.....	47
2.6.2.3 Θερμοκρασία Λειτουργίας.....	48
2.6.2.4 Πίεση Λειτουργίας.....	49



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

2.6.2.5 Πρόβλημα στη τροφοδοσία των αερίων, στη ψύξη της κυψέλης καυσίμου και πρόβλημα διαρροής.....	49
2.6.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμου.....	51
2.6.4 Ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου – Βοηθητικά εξαρτήματα.....	52
2.6.4.1 Επιπρόσθετος βοηθητικός εξοπλισμός συστήματος κυψέλης καυσίμου.....	52
2.6.4.2 Αλληλεπίδραση υποσυστημάτων.....	53
2.6.5 Υβριδικό σύστημα με χρησιμοποίηση κυψέλης καυσίμου.....	56
2.7 Πρακτικές Εφαρμογές Κυψέλης Καυσίμου.....	57
2.8 Παραδείγματα Εφαρμογών Κυψέλης Καυσίμου.....	58
Κεφάλαιο 3.....	63
Μελέτη λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	63
3.1 Εισαγωγή.....	63
3.2 Αναλυτική Λειτουργία της Κυψέλης Καυσίμου.....	63
3.2.1 Παραγόμενη ενέργεια και τάση κυψέλης καυσίμου	64
3.2.2 Υπολογισμός τάσης ανοιχτού κυκλώματος.....	66
3.2.3 Εξίσωση του Nerst	68
3.2.4 Πυκνότητα Ρεύματος – Πυκνότητα Ισχύος.....	72
3.3 Υπολογισμός απόδοσης και περιορισμοί μεγίστου.....	72
3.4 Θεωρητική λειτουργία και πραγματικές συνθήκες.....	74
3.5 Περιγραφή απωλειών και πραγματικής τάσης εξόδου.....	76
3.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης (ΔV_{act}).....	77
3.5.2 Ωμικές Απώλειες (ΔV_{ohm}).....	80
3.5.3 Απώλειες Συγκέντρωσης (ΔV_{conc}).....	81
3.5.4 Συνολικές Απώλειες – Τάση Εξόδου.....	84
3.6 Ισοζύγιο μάζας κυψέλης καυσίμου για μοντελοποίηση.....	85

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



Κεφάλαιο 4	86
Μοντελοποίηση και δυναμική προσομείωση κυψέλης καυσίμου.....	86
4.1 Εισαγωγή.....	86
4.2 Είδη μοντέλων πληροφορίες.....	86
4.2.1 Λεπτομερή μοντέλα κυψελών καυσίμου βασισμένα σε μερικές διαφορικές εξισώσεις.....	87
4.2.2 Μοντέλα σταθερής κατάστασης.....	88
4.2.3 Δυναμικά Μοντέλα Κυψελών Καυσίμου.....	88
4.3 Προτάσεις άλλων εργασιών για μοντελοποίηση PEM Κυψέλης.....	88
4.3.1 Προτάσεις για μοντέλα που χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις.....	88
4.3.2 Προτάσεις - Δημοσιεύσεις μοντέλων σταθερής κατάστασης.....	89
4.3.3 Προτάσεις - Δημοσιεύσεις δυναμικών μοντέλων κυψελών καυσίμου.....	89
4.4 Δημιουργία μοντέλου για τη μελέτη του προβλήματος ρύθμισης της PEM κυψέλης καυσίμου.....	89
4.4.1 Χαρακτηριστικά μοντέλου – Αναγκαίες Παραδοχές.....	90
4.4.2 Μη αντιστρεπτές διεργασίες – Τύποι Περιγραφής Απωλειών.....	91
4.4.3 Διαφορικές Εξισώσεις – Ισοζύγιο Μάζας.....	95
4.4.4 Έλεγχος Πίεσης.....	97
4.4.4.1 Προσθήκη βαλβίδας σταθερής διατομής.....	98
4.4.4.2 Ρύθμιση με εφαρμογή PID ελεγκτή.....	99
4.4.5 Υπολογισμός περίσσειας οξυγόνου.....	101
4.4.6 Γενική παρουσίαση του προς ρύθμιση μοντέλου με τις μεταβλητές κατάστασης, τις εισόδους, τις εξόδους του. Σχολιασμός και τεχνική επίλυσής του.....	103
4.4.7 Παράμετροι Μοντέλου – Σχεδιαστικές Προδιαγραφές Κυψέλης.....	107



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

4.4.8 Μελέτη Δυναμικής Συμπεριφοράς του Μοντέλου.....	108
4.4.8.1 Σχεδιασμός Χαρακτηριστικής Καμπύλης.....	108
Κεφάλαιο 5.....	123
Εφαρμογή σχήματος ελέγχου - Ρύθμιση.....	123
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά ελέγχου.....	123
4.2 Έλεγχος με εφαρμογή PID ελεγκτή.....	126
4.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά PID ελέγχου.....	127
4.2.2 Εφαρμογή PID ελέγχου.....	129
4.2.2.1 Έλεγχος για σταθερές απαιτήσεις ισχύος.....	130
4.2.2.2 Έλεγχος για σταδιακή μεταβολής της ισχύος.....	133
4.2.3 Συμπέρασμα PID ελέγχου.....	135
4.3 Έλεγχος με ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου (MPC: Model Predictive Control).....	136
4.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	136
4.3.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα για τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.....	137
4.3.3 Μεθοδολογία εφαρμογής – Γενική περιγραφή.....	138
4.3.4 Βασικές πληροφορίες για τη κατάσταση ενός συστήματος μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου.....	139
4.3.5 Αλγόριθμος υπολογισμού.....	139
4.5 Εφαρμογή ελέγχου στο σύστημα κυψέλης καυσίμου – Αποτελέσματα.....	151
Γενικά Συμπεράσματα	167
Ευχαριστίες	168
Βιβλιογραφία.....	169

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

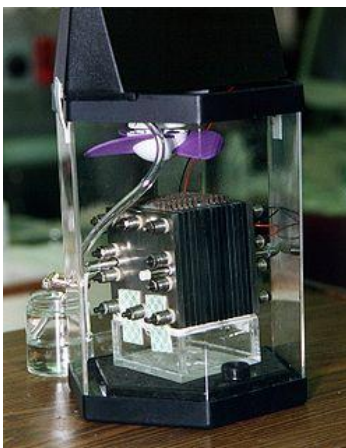
2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη ανησυχία λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και υπάρχει μεγάλη ανάγκη να μειωθούν οι εκπομπές CO_2 από τις καθημερινές βιομηχανικές δραστηριότητες του ανθρώπου. Επιπρόσθετα η άνοδος των τιμών του πετρελαίου δημιουργεί ενεργειακό ζήτημα, και αναζητείται διέξοδος με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων διαφορετικών από τους υδρογονάνθρακες για τη παραλαβή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας, και την αποφυγή εκπομπής βαβλερών ρύπων που οδηγούν στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Παράλληλα έχει αναπτυχθεί ένας γενικός προσανατολισμός προς τη βελτίωση της απόδοσης των διάφορων μετατροπών ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη. Συγκεκριμένα οι αυτοκινητοβιομηχανίες, πέρα από το ότι προσανατολίζονται να αυξήσουν το βαθμό απόδοσης κατά την καύση του καυσίμου, έχουν στόχο να περιορίσουν ή ακόμα να μηδενίσουν εντελώς τις βλαβερές εκπομπές των καυσαερίων.

Οι παραπάνω ανάγκες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον σε ένα εναλλακτικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί σαν καύσιμο το υδρογόνο το οποίο υπάρχει σε αφθονία στη φύση. Αρχικά η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου απασχολούσε περιορισμένη επιστημονική ειδικευση κυρίως χημικών μηχανικών καθώς και χημικών που ασχολούνταν με τη τεχνολογία των καταλυτών και της ηλεκτροχημείας. Η αυξανόμενη ανάγκη χρήσης της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου, ακόμα και σε καθημερινές εφαρμογές και η αντικατάσταση άλλων εξαντλήσιμων καυσίμων, προκάλεσε το ενδιαφέρον και άλλων επιστημονικών ειδικοτήτων δίνοντας στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αποτελείται από μια συστοιχία με κατάλληλη διάταξη επεξεργασίας καυσίμου καθώς και δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας, παραλαβής παραγόμενης ισχύος και κατάλληλα συστήματα ελέγχου. Η σημασία όλων αυτών των διατάξεων, αναλύεται στα επόμενα

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

τμήματα της εργασίας, και τονίζεται ο ρόλος τους στη ολοκληρωμένη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 1. Διάταξη κυψέλης καυσίμου μεθανόλης

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, γαιοθερμία, αιολική), έχει συνεισφέρει σημαντικά στην επίλυση του ενεργειακού προβλήματος. Η ολοένα αυξανόμενη εκμετάλευση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας από οργανωμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών και ανεμογεννητριών) αντικαθιστά τη χρήση ορυκτών καυσίμων και του πετρελαίου και οδηγεί στη παραγωγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς περιβαλλοντική επιβάρυνση, λόγω μηδενικής εκπομπή ρύπων κατά τη παραγωγική διαδικασία.

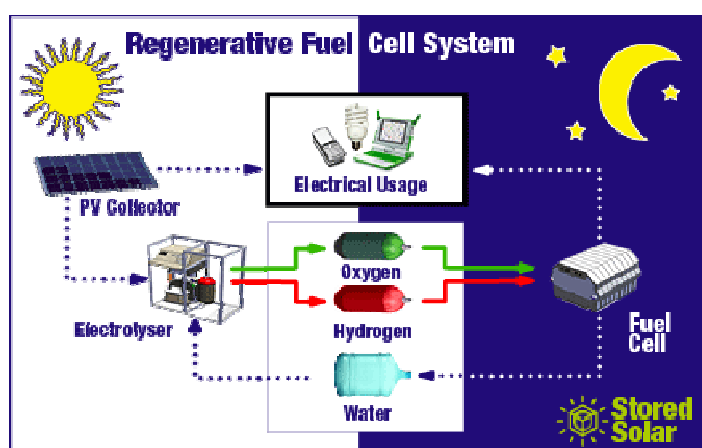
Η κατεύθυνση αυτής της εκμετάλευσης των ανανεώσιμων πόρων του πλανήτη, οδήγησε στη κατασκευή (μετά απο ανάλογη επιστημονική μελέτη) ολοκληρωμένων σταθμών παραγωγής, με κατάλληλο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που λειτουργεί αυτόνομα προς τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ηλεκτροπαραγωγική αυτή μονάδα έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με το δίκτυο του ηλεκτρικού ρεύματος με στόχο τη τροφοδοσία με ρεύμα προς πώληση, ή να λειτουργεί αυτόνομα σε μια περιοχή για τη κάλυψη ιδίων αναγκών. Στη περίπτωση που η σύνδεση με το δίκτυο είναι πρακτικά ανέφικτη (π.χ. σε μια απομακρυσμένη περιοχή), τότε γίνεται αποκλειστικά επιλογή του αυτόνομου συστήματος.

Στη περίπτωση της επιλογής αυτόνομου συστήματος, είναι δυνατό να ενσωματωθεί στο σύστημα, η διάταξη της κυψέλης καυσίμου. Είναι μια χημική διάταξη παραγωγής ενέργειας με χρήση καυσίμου υδρογόνου και συνεισφέρει στη διασφάλιση της αυτονομίας του συστήματος. Οι λόγοι που οδηγούν στην ενσωμάτωση της διάταξης της



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

κυψέλης καυσίμου είναι η διακύμανση του φορτίου καθώς και αλλαγές στην ημερήσια βάση του καιρού. Οι κυψέλες καυσίμου δεν απαιτούν κάποιο ιδιαίτερο περιβάλλον για την εγκατάσταση και λειτουργία τους και παράγουν ελάχιστους έως και μηδενικούς ρύπους (ειδικά όταν χρησιμοποιούν καύσιμο καθαρό υδρογόνο). Όταν το καύσιμο περιέχει άνθρακα, εκπέμπονται και αέρια επιβλαβή για το περιβάλλον (λ.χ. CO₂), αλλά σε ποσότητες πολύ μικρότερες από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αντίστοιχης ισχύος. Επιτυγχάνουν ακόμα πάρα πολύ καλό βαθμό απόδοσης κατά την ηλεκτροπαραγωγή (40-80%).



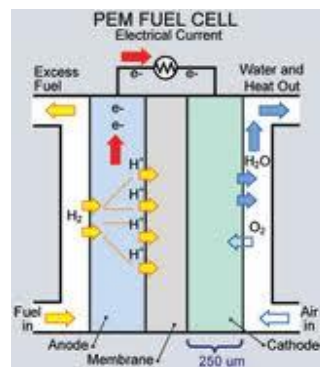
Εικόνα 2. Σύστημα κυψέλης καυσίμου συνδεδεμένο με φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Υβριδικό σύστημα).

Οι διατάξεις των κυψελών καυσίμου στη σημερινή εποχή υπόκεινται σε εκτεταμένη μελέτη από αρκετούς κατασκευαστές με στόχο την ανάπτυξη τους σε διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής σε αυτόνομους σταθμούς καθώς και σε κινητές εφαρμογές. Η ζωτικότητα και η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στη κατανόηση, προβέψη και έλεγχο των αντίστοιχων συστημάτων κελιών καυσίμου, κάτω από μια πληθώρα διαφορετικών συνθηκών του περιβάλλοντος και μια ευρεία περιοχή σημείων λειτουργίας.

2.2 Περιγραφή - Βασικό Σχέδιο

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο πραγματοποιεί μια χημική αντίδραση μεταξύ ενός καυσίμου και ενός οξειδωτικού παράγοντα με την συνεισφορά ενός καταλύτη. Είναι ηλεκτροχημικές συσκευές και αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

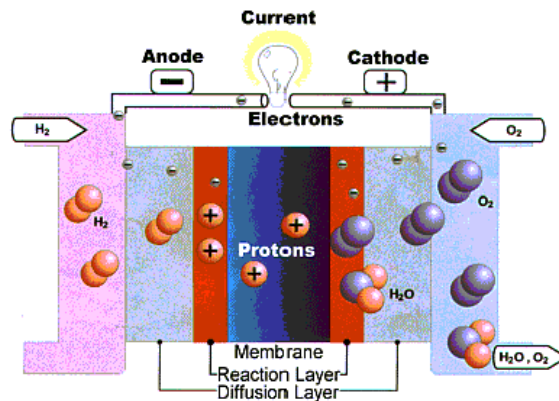
Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν γενικότερα υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, ή τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες (μεθανόλη, αιθανόλη) και το φυσικό αέριο. Η πιο απλοϊκή μορφή της κυψέλης καυσίμου, είναι η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου που χρησιμοποιεί σαν καύσιμο το υδρογόνο και σαν οξειδωτικό παράγοντα το οξυγόνο ή αέρα και σαν προϊόν της αντίδρασης παράγεται νερό και θερμότητα. Υπάρχουν αρκετοί συνδυασμοί καυσίμου και οξειδωτικού παράγοντα. Άλλες διατάξεις κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν καύσιμο υδρογονάνθρακες ή αλκοόλες και οξειδωτικούς παράγοντες χλωρίδια, ή διοξείδιο του χλωρίου.



Εικόνα 3. Σχηματική παράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Τα αντιδρώντα (υδρογόνο και οξυγόνο) κυκλοφορούν μέσα στη κυψέλη, ενώ τα προϊόντα της αντίδρασης (νερό) ρέουν έξω από αυτήν. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν επ'αόριστον σαν μια μορφή χημικού αντιδραστήρα εφόσον διατηρείται η συνεχής τροφοδοσία των προϊόντων (υδρογόνο και οξυγόνο).





Εικόνα 4. Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι εντελώς διαφορετικές από τους συμβατικούς ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές κελιών καυσίμου (μπαταρίες) επειδή καταναλώνουν τα αντιδρώντα από μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας που πρέπει συνεχώς να ανανεώνεται, και αποτελεί ένα ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα, ενώ οι μπαταρίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική μορφή και αποτελούν ένα κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα. Επίσης οι μπαταρίες όταν καταναλώσουν όλη την αποθηκευμένη χημική ενέργεια πρέπει να αντικατασταθούν ενώ η κυψέλη καυσίμου έχει αδιάκοπη λειτουργία υπό τη προϋπόθεση σταθερής παροχής καυσίμου και οξειδωτικού παράγοντα.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν κατευθείαν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική, χωρίς να μεσολαβεί ενδιάμεση μετατροπή σε μηχανική ενέργεια, και αυτό το χαρακτηριστικό τις διαχωρίζει από τις θερμικές μηχανές όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Επομένως τα ενδιάμεσα στάδια παραγωγής μηχανικού έργου και θερμότητας αποφεύγονται και η απόδοση της κυψέλης καυσίμου δεν περιορίζεται από τον θερμοδυναμικό κύκλο του Carnot. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλής τιμής απόδοσης συγκριτικά με μια συμβατική μηχανή εσωτερικής καύσης.

Οι κυψέλες καυσίμου ανέρχονται σε πολλές ποικιλίες, όμως όλες δουλεύουν με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Αποτελούνται από τρία στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους. Την άνοδο, τον ηλεκτρολύτη και τη κάθοδο. Δύο χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των τριών διαφορετικών στοιχείων. Το αποτέλεσμα είναι η κατανάλωση του καυσίμου και παράλληλα η δημιουργία νερού ή διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος που θα τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές και το οποίο χαρακτηρίζεται ως παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, και η έρευνα για τη βελτίωση της αποδόσεων της γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα, τομέας εξ ορισμού μελετώμενος στην κλίμακα του νανομέτρου.

Η ηλεκτροχημική αντίδραση στη κυψελή καυσίμου συμβαίνει ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη και γι' αυτό θα πρέπει να υπάρχουν πολλές περιοχές που να μπορεί η ουσία που αντιδρά να έρχεται σε επαφή με το ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη ταυτόχρονα. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που αυξάνει την απόδοση της κυψέλης.

2.3 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Ουαλό δικηγόρο και επιστήμονα Sir William Grove το 1839. Πραγματοποίησε ένα πείραμα, με τη διάταξη της παρακάτω εικόνας. Χρησιμοποίησε ψευδάργυρο και πλατίνα σαν ηλεκτρόδια σε διάλυμα θειϊκού οξέος διαχωριζόμενα από ένα πορώδες κεραμικό δοχείο. Αρχικά συνέδεσε το ηλεκτρολυτικό διάλυμα με εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και πραγματοποιήθηκε ηλεκτρόλυση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο λόγω της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Στη συνέχεια αντικατέστησε την πηγή τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος, με ένα αμπερόμετρο και παρατήρησε μια μικρή ροή ρεύματος. Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης αντιστράφηκε, το υδρογόνο και οξυγόνο επανασυνδέονται και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή ήταν η 1^η παρατήρηση της τεχνολογίας κυψέλης καυσίμου κατά την οποία μπορούμε θεωρητικά να πούμε ότι έχουμε «καύση» υδρογόνου με στόχο τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το 1842 ο Grove κατασκεύασε τη 1^η κυψέλη καυσίμου την οποία ονόμασε μπαταρία βολταϊκού αερίου (gas voltaic battery) η οποία παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα συνδέοντας υδρογόνο και οξυγόνο και το περιέγραψε χρησιμοποιώντας θεωρία συσχετισμού. Αναπτύσσοντας το κελί καυσίμου έδειξε ότι ο ατμός μπορεί να διαχωριστεί σε οξυγόνο και υδρογόνο και η διαδικασία μπορεί επίσης να αντιστραφεί. Ήταν ο πρώτος που έδειξε το θερμικό διαχωρισμό των μορίων στα δομικά τους άτομα.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Το 1955 ο W. Thomas Grubb, ένας χημικός που δούλευε στην εταιρία General Electric , τροποποίησε την πρωταρχική κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρολύτη μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από θειϊκό πολυστυρένιο. Τρία χρόνια αργότερα το 1958 ένας άλλος χημικός της General Electric, ο Leonard Niedrach, επινόησε ένα τρόπο καταχώρησης πλατίνας στη μεμβράνη , το οποίο εξυπηρετούσε σαν καταλύτης για την οξειδωση του υδρογόνου. Αυτό έγινε γνωστό ως Grubb-Niedrach κυψέλη καυσίμου.

Το 1959 ο Βρεταννός μηχανικός Francis Thomas Bacon, ανέπτυξε επιτυχώς ένα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής 5KW βασιζόμενο αποκλειστικά σε κυψέλες καυσίμου υψηλής πίεσης. Το ίδιο έτος μια ομάδα οδηγούμενη από τον Harry Ihrig , κατασκεύασε ένα τρακτορα με κυψέλες καυσίμου συμβολικής ισχύος 15 KW. Στα τέλη του 1959 , ο Bacon και οι συνεργάτες του, επέδειξαν μια μηχανή συγκόλλησης 5 KW, βασιζόμενη στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου.

Η General Electric , εκμεταλεύτηκε αυτή τη τεχνολογία μαζί με τη NASA, και την εταιρία McDonnell Aircraft , τη δεκαετία του '60 χρησιμοποιώντας την στα διαστημικά πρόγραμμα Gemini , Apollo και Spacelab. Η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στο διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo ως φθηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια. Αυτή ήταν η πρώτη εμπορική χρήση της κυψέλης καυσίμου. Χρησιμοποίησε για αυτό το σκοπό , αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, (AFC) και κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).

Το γεγονός αυτό ενθάρρυνε τους επιστήμονες με αποτέλεσμα να ξεκινήσει, μια αυξανόμενη δραστηριότητα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου σε πανεπιστήμια , εργαστήρια και στη βιομηχανία. Ο αρχικός ενθουσιασμός όμως εξασθένησε σύντομα στην αρχή της δεκαετίας του '70 εξαιτίας του υψηλού κόστους. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά μόνο σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια ύστερα από αρκετές χρηματοδοτήσεις το ενδιαφέρον εκδηλώθηκε για τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) , τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) , και τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), δηλαδή για τις κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη στόχευε στην εφαρμογή σε μονάδες ισχύος μερικών εκατοντάδων MW.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Η έρευνα για τις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) άρχισε στο τέλος της δεκαετίας του '70. Με τη συμμετοχή των εταιριών Ballard, Siemens, H-Power , σε συνεργασία με διάφορα Αμερικανικά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα προέκυψε η κατασκευή βελτιωμένων συσκευών MEA (Membrane Electrode Assemblies). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα , το βάρος και το κόστος των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) να μειωθεί δραστικά και να δώσει νέα ώθηση και περισσότερες λύσεις για την εφαρμογή τους. Κινητοποιήθηκαν επομένως αρκετές κατασκευάστριες εταιρίες αυτοκινήτων και λεωφορείων να θεωρήσουν τις κυψέλες καυσίμου (PEMFC) ως εναλλακτικό σύστημα καύσης , έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Σε παγκόσμιο επίπεδο , τουλάχιστον 600 εκατομμύρια ευρο το χρόνο επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου για την επίτευξη ενός «καθαρότερου» μέλλοντος. Μέχρι το 1999 , είχαν εγκατασταθεί 40.000 KW περίπου , σαν γενήτριες ισχύος και θερμότητας, από τις οποίες περίπου το 90% είναι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).

Όσον αφορά τις κινητές μονάδες, το ενδιαφέρον εντάθηκε τα τελευταία χρόνια , λόγω της περιβαλλοντικής ευαισθησίας για την προώθηση στην αγορά οχημάτων με μηδενικές ή έστω πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Η χρήση της τεχνολογίας κυψέλης καυσίμου στη βιομηχανία οχημάτων έχει εξελιχθεί και αποτελεί ένα σημαντικό ανταγωνιστή με πλεονεκτήματα , υψηλή απόδοση, υψηλή παραγωγή πυκνότητας, και μηδενική εκπομπή ρύπων.

Η εταιρία , United Technologies Corporation's UTC Power , είναι ο βασικός πάροχος κυψελών καυσίμου στη NASA, για χρήση σε διαστημικά οχήματα, έχοντας μέχρι τώρα τροφοδοτήσει τις αποστολές του Apollo, και σύγχρονα διαστημικά προγράμματα, ενώ παράλληλα κατασκευάζει κυψέλες καυσίμου για επίγεια οχήματα, όπως λεωφορεία και για πύργους κινητής τηλεφωνίας. Η εταιρία επίσης έχει επιδείξει τη πρώτη κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για κινητές εφαρμογές σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας.

Μια συνοπτική ιστορική ανασκόπηση της εξέλιξης των κυψελών καυσίμου δίνεται στο παρακάτω πίνακα:



1838	Ανακάλυψη των κυψελών καυσίμου από τον Grove
1855	Κυψέλη άνθρακα Bequerel
1859	Μηχανές εσωτερικής καύσης
1876	Τετράχρονοι κινητήρες Otto
1889	Κυψέλη H ₂ των Mond και Langer
1894	Κυψέλη του Ostwald
1897	Ηλεκτρισμός από άνθρακα 1,5 kW
1899	Ενασχόληση με το θέμα από τον Nerst
1921	Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs)
1930	Στρόβιλοι
1947	Ανακάλυψη και εμπορική διάθεση του Teflon®
1948	Κυψέλη του Bacon
1952	Μονάδα ισχύος 5 kW τύπου Bacon
1959	Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) της Pratt & Whitney Aircraft
1962	Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη
1965	Διαστημικό πρόγραμμα Gemini
1966	Διαστημικό πρόγραμμα Apollo
1960s	Εμπορική διάθεση Nafion®
1973	Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση
1976	Μονάδα κυψελών καυσίμου, ισχύος 1 MW
1992	Πρώτη εμπορική μονάδα ισχύος PC25™ (200kW)
1993	Συμφωνία (PNVG) αυτοκινητοβιομηχανιών με την αμερικανική κυβέρνηση για ανάπτυξη εργοστασίου παραγωγής αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου
1996	Επίδειξη μονάδων από κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων
1996	100 ^η μονάδα ισχύος PC25™
1997	100 ^η διαστημική πτήση με αλκαλικές κυψέλες καυσίμου
1997	Συμφωνία των εταιριών Ballard/Daimler Benz

Πίνακας 1. Ιστορική αναδρομή εξέλιξης στην ανάπτυξη και χρήση κυψελών καυσίμου

2.4 Αρχή Λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με βάση ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Συγκεκριμένα η κάυση του υδρογόνου δε γίνεται σύμφωνα με τη παρακάτω αντίδραση:

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

(1)

Αυτό που στη πραγματικότητα συμβαίνει είναι οι παρακάτω ενεργειακές αντιδράσεις στις πλευρές ενός ηλεκτροκαταλύτη.

Συγκεκριμένα στην άνοδο:

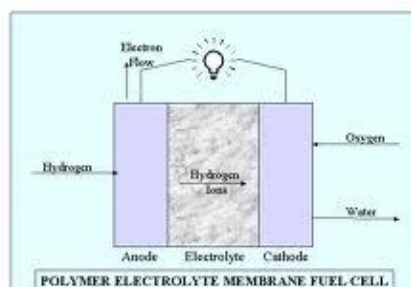
(2)

Ενώ στη Kathodo:

(3)

Εξετάζοντας αναλυτικά τις παραπάνω αντιδράσεις, αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η τυπική μορφή μιας κυψέλης καυσίμου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε μια γενική περιγραφή, αποτελείται από δύο τμήματα (ηλεκτρόδια) που ονομάζονται άνοδος και κάθοδος, τα οποία τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο ή αέρα.

Τα δύο ηλεκτρόδια όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι συνδεδεμένα με τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσα τους. Η συγκροτημένη δομή τους αποτελείται από 3 πλάκες που συνδέονται μεταξύ τους. Οι δύο εξωτερικές είναι η άνοδος και η κάθοδος και ενδιάμεσα τοποθετείται ο ηλεκτρολύτης, που στη περίπτωση που χρησιμοποιούμε κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων, το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει η μεμβράνη που τοποθετείται ενδιάμεσα, τα κατασκευαστικά στοιχεία της οποίας θα αναφερθούν παρακάτω σε σχετική υποενότητα. Επίσης μεταξύ της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη, που βοηθάει στην πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης. Μια αντιπροσωπευτική εικόνα της δομής αυτής φέρεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 5. Απεικόνιση σύνδεσης ηλεκτροδίων-μεμβράνης στη κυψέλη καυσίμου.

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Η τροφοδοσία του υδρογόνου γίνεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου , που αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Στη συνέχεια το υδρογόνο έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη, και στην επιφάνεια της ανόδου διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου (υδρογονοκατιόντα) και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης επιτρέπουν τη διάχυση των ατόμων του υδρογόνου από να γίνεται με ομογενή τρόπο. Η δραστηριότητα αυτή περιγράφεται από τη χημική αντίδραση (1). Στη περίπτωση αυτή η αντίδραση που συμβαίνει είναι ουσιαστικά μια διαδικασία οξειδωσης του υδρογόνου.

Τα ηλεκτρόνια που παράγονται μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο δημιουργώντας ροή ρεύματος, ενώ η μεμβράνη που αποτρέπει τη διέλευση του μέσα από αυτήν είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμο υλικό. Πρέπει επομένως η άνοδος και ο καταλύτης να είναι αγώγιμα υλικά.

Παρόλο που η μεμβράνη είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμο υλικό , επιτρέπει την διέλευση των υδρογονοκατιόντων μέσα από την επιφάνεια της, με κατεύθυνση τη κάθοδο. Αυτό συμβαίνει λόγω διαφοράς συγκεντρώσεως από τη μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Η μεμβράνη είναι ημιπερατή επομένως εφαρμόζεται ο νόμος της οσμωσης για τη μεταφορά των ατόμων μέσα από αυτήν. Τα θετικά φορτισμένα άτομα του υδρογόνου (μεμονωμένα πρωτόνια) συνδέονται στη κάθοδο (θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) με το οξυγόνο που τροφοδοτείται εκεί.

Στη συνέχεια στη κάθοδο σχηματίζεται νερό ως εξής. Για την ολοκλήρωση της αντίδρασης σχηματισμού ενός μορίου νερού απαιτούνται 2 ηλεκτρόνια, τα οποία αποδεσμεύτηκαν στην άνοδο και μεταφέρθηκαν στην κάθοδο δια μέσου ενός κυκλώματος ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως η σύνδεση των ιόντων υδρογόνου, με τα μόρια οξυγόνου και τα ηλεκτρόνια που φεύγουν από την άνοδο, σχηματίζουν μόρια νερού όπως παριστάνεται στη δεύτερη χημική αντίδραση (3). Την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει, η κατασκευή του ηλεκτροδίου (περισσότερα για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά στο κεφάλαιο 2). Το φαινόμενο που παρατηρείται στην κάθοδο λέγεται αναγωγή του οξυγόνου. Η αναγωγή του οξυγόνου γίνεται καθώς το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τον αέρα έρχεται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θερμότητα. Αντίθετα με τη διαδικασία της οξειδωσης, στη διαδικασία της αναγωγής δεν έχει ακόμα κατανοηθεί ο μηχανισμός της αντίδρασης πλήρως.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Σε όλη τη παραπάνω διαδικασία αρκετά σημαντικό ρόλο επιτελεί ο καταλύτης που υπάρχει συνδεδεμένος στην άνοδο και τη κάθοδο αντίστοιχα. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Τα δύο στρώματα καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα.

Με βάση τη παραπάνω διαδικασία η διαφορά δυναμικού που σχηματίζεται από τα υδρογονοκατιόντα, και τα ηλεκτρόνια είναι η αιτία δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε εφαρμογή. Η διαφορά δυναμικού που παράγεται, από ένα μεμονωμένο κελί καυσίμου είναι της τάξης του 0-1 Volt, και εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του κελιού καυσίμου και το μέγεθος του φορτίου που συνδέεται στο κελί. Μια αντιπροσωπευτική τιμή της διαφοράς δυναμικού που παράγεται είναι 0.7 Volts.

Για την επίτευξη μεγαλύτερης τιμής διαφοράς δυναμικού μπορούμε να συνδέσουμε πολλές κυψέλες καυσίμου σε σειρά δημιουργώντας αυτό που στη βιομηχανία λέγεται συστοιχία κυψελών καυσίμου (fuel cell stack). Στη περίπτωση αυτή η συνολική διαφορά δυναμικού υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου όρου της διαφοράς δυναμικού που αποδίδει το κάθε κελί ξεχωριστά επί τον συνολικό αριθμό των κελιών που συγκροτούν τη συστοιχία. Όπως συμβαίνει σε κάθε ηλεκτρική μηχανή υπάρχουν απώλειες λόγω αντίστασης του ηλεκτρικού κυκλώματος, οι οποίες εκφράζονται με τη μορφή θερμότητας που αποβάλλεται από το σύστημα όπως περιγράφουν οι παραπάνω χημικές αντιδράσεις (1-3).

2.5 Είδη κυψέλης καυσίμου

Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων κελιών καυσίμου οφείλεται κυρίως σε δύο ουσιαστικούς λόγους:

- Χαμηλής έντασης ρεύμα και ισχύ που οφείλεται στο μικρό αριθμό των αντιδράσεων.
- Το υδρογόνο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο καύσιμο.

Οι διαφορετικοί τύποι κελιών καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Αυτός καθορίζει το είδος της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται μες στη κυψέλη, το είδος του καταλύτη που απαιτείται, τη



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

θερμοκρασία λειτουργίας, τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται καθώς και άλλους παράγοντες. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν τις εφαρμογές για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κάθε τύπος κυψέλης. Διακρίνονται 6 διαφορετικά είδη κελιών καυσίμου:

- Ø Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells).
- Ø Αλκαλικά (Alkaline Fuel Cells).
- Ø Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells).
- Ø Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells).
- Ø Τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells).
- Ø Στερεού Οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells).

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται βασικές πληροφορίες για τα είδη των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό αυτών των κελιών καυσίμου:

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΔΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ
PEMFC + PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H^+ + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Πίνακας 2. Χημικές αντιδράσεις που παράγονται στα είδη κυψελών καυσίμου

Ένας άλλος διαχωρισμός μπορεί να γίνει ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται:

- Ø Direct Alcohol Fuel Cell (DAFC) ή Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απευθείας κάποια αλκοόλη (π.χ. μεθανόλη) χωρίς επεξεργασία.
- Ø Direct Carbon Fuel Cell (DCFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν άνθρακα ως καύσιμο στην άνοδο, χωρίς ενδιάμεσο στάδιο αεριοποίησης. Είναι τύπου SOFC, MCFC ή AFC. Τέτοιου τύπου κυψέλες μπορούν να φτάσουν σε υψηλές αποδόσεις αλλά υπάρχουν διάφορα πρακτικά προβλήματα.

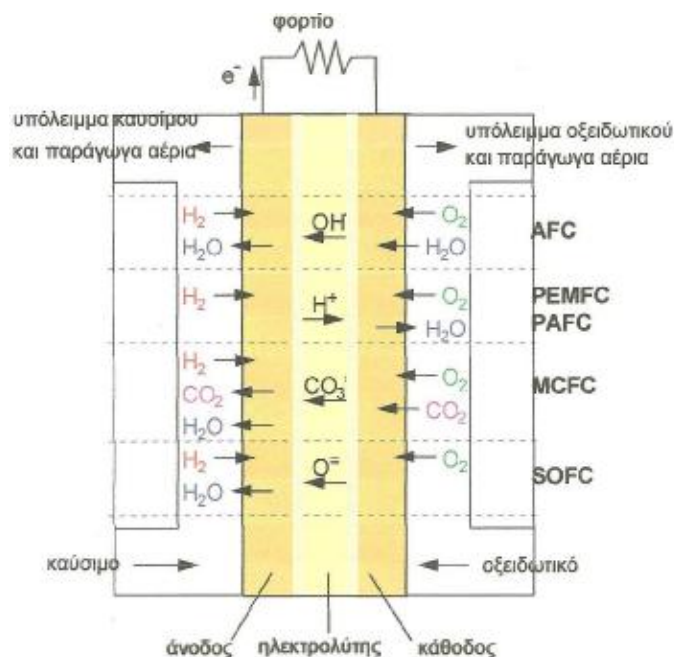
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Μια άλλη διάκριση είναι με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας:

- Ø Χαμηλής θερμοκρασίας είναι οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC).
- Ø Μεσαίας Θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).
- Ø Υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο. Η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αερίων που περιέχουν θείο (S) στην ροή του καυσίμου, προκαλούν καταστροφή της ανόδου και μείωση της λειτουργίας της κυψέλης.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το καύσιμο στην άνοδο και στη κάθοδο για τα είδη των κυψελών καυσίμου που αναλύονται στη συνέχεια καθώς και το ιόν που μεταφέρεται δια μέσου του ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 6. Αέρια καύσιμα και ιόντα που χρησιμοποιεί το κάθε είδος κυψέλης καυσίμου

Για μια κυψέλη SOFC λ.χ. ο ηλεκτρολύτης είναι οξείδιο του ζirkονίου σταθεροποιημένο με οξείδιο του υτρίου, ένα κεραμικό υψηλής τεχνολογίας που επιτρέπει σε ιόντα

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

οξυγόνου (O₂-) να κινούνται μέσα σ' αυτό, όταν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή (900-1.000 οC). Τα ηλεκτρόδια μπορούν να αποτελούνται από πορώδη πλατίνα (και αγωγίμο και καταλυτικό υλικό), αν και στις κυψέλες τελευταίας τεχνολογίας είναι ειδικά κεραμικά που αντέχουν την έντονα οξειδωτική (O₂) και αναγωγική (H₂) ατμόσφαιρα στις αντίστοιχες πλευρές του ηλεκτρολύτη.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική αναφορά μεμονωμένα στο κάθε είδος κυψέλης καυσίμου που αναφέρθηκε παραπάνω κάνοντας περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του και των χαρακτηριστικών του.

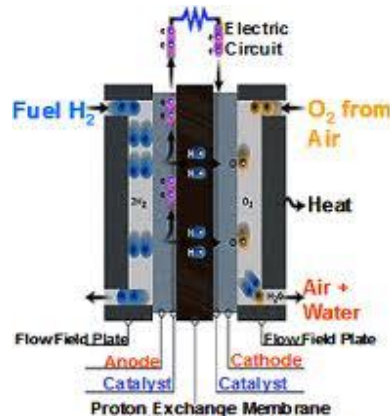
Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η εξέλιξη στην τεχνολογία των μεμβρανών και η μείωση του κόστους έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον στη βιομηχανία των κυψελών μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή στερεού πολυμερούς (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC ή Solid Polymer Fuel Cells, SPFC). Πολλές εταιρίες ανά τον κόσμο επιδίδονται στην έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων με βασικότερο κίνητρο τη δυνατότητα εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η λειτουργία αυτών των κυψελών καυσίμων περιγράφηκε εκτενώς στην ενότητα 1.5 αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

Η πολυμερής μεμβράνη (στην οποία οφείλεται και η ονομασία αυτής της κατηγορίας) αποτελεί τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης και βρίσκεται μεταξύ δύο πορωδών ηλεκτροδίων, την άνοδο και τη κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκοχρυσό (Pt). Η δομή της κυψέλης φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:





Εικόνα 6. Δομή και τρόπος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου με πολυμερισμένη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων θεωρούνται ότι βρίσκονται στο ποιο εξειγμένο επίπεδο για την εφαρμογή τους σε κινούμενα οχήματα εδάφους. Αποδίδουν υψηλή πυκνοτητα ισχύος, διαθέτουν στερεό ηλεκτρολύτη, μεγάλη διάρκεια ζωής, και χαμηλή διάβρωση. Έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις θερμικές μηχανές και η χρήση τους στη προώθηση ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολλά υποσχόμενη για το άμεσο μέλλον. Λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες () και πιέσεις, και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών όπως η κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ των 50-250 KW. Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα. Η έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου όσον αφορά εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων αυτή τη στιγμή είναι επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο.

Η απόδοση τους είναι είναι αρκετά υψηλή με εφαρμογή μερικού φορτίου, το οποίο αντιστοιχεί στη πλειονότητα του φορτίου που απαιτούν οι οδηγητικές απαιτήσεις των οχημάτων που κυκλοφορούν στους αστικούς δρόμους. Για μια ονομαστική ταχύτητα της τάξεως των — , η απόδοση της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας τροφοδοσία υδρογόνου με μετασχηματισμό από φυσικό αέριο (πρωταρχικό καύσιμο), είναι δύο φορές μεγαλύτερη από την απόδοση της συμβατικής μηχανής εσωτερικής καύσης. Χρησιμοποιώντας καθαρό υδρογόνο σαν πρωταρχικό καύσιμο υπάρχει η δυνατότητα μηδενικών εκπομπών καυσαερίων για οχήματα που κινούνται μέσα στα αστικά κέντρα.

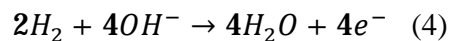
Τα κελιά καυσίμου τύπου PEM αποτελούν την πρώτη επιλογή για τις εταιρίες που κατασκευάζουν υβριδικά αυτοκίνητα αλλά και για τις εταιρίες που παράγουν κινητές κατασκευές όλων των ειδών και μεγεθών, ακόμα και κινητά τηλέφωνα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι τα κελιά καυσίμου είναι συμπαγείς κατασκευές με χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

Η γρήγορη απόκριση που έχουν μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αιχμών στο δίκτυο, χωρίς περαιτέρω ενίσχυση αυτού. Η αναμενόμενη μείωση του κόστους θα οδηγήσει γρήγορα σε εφαρμογές για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως υπολογιστές, βιντεοκάμερες, φορητά τηλέφωνα κτλ. Η χρήση καθαρού H₂ είναι απαραίτητη, όπως και στην περίπτωση των PAFC, καθώς η ύπαρξη έστω και μικρής ποσότητας CO στην τροφοδοσία δηλητηριάζει το ηλεκτρόδιο με δραματικές επιπτώσεις στην απόδοση της κυψέλης.

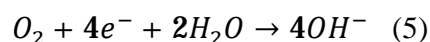
Οι πρώτες κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα “Gemini”, της NASA και είχαν διάρκεια ζωής, περίπου 500 ωρών, αρκετές για τις ανάγκες των πρώτων αποστολών. Οι συνεχείς έρευνες οδήγησαν το 1967, στην δημιουργία καινούριας πολυμερούς μεμβράνης που ονομάστηκε Nafion της εταιρίας Dupont. Αυτός ο τύπος μεμβράνης καθιερώθηκε και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Στη κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Στη περίπτωση αυτή η συνολική χημική αντίδραση της κυψέλης είναι ακριβώς ίδια με την αντίδραση που πραγματοποιείται στη PEM κυψέλη με τη διαφορά ότι πραγματοποιούνται διαφορετικές επιμέρους αντιδράσεις για το κάθε ηλεκτρόδιο. Στην αλκαλική κυψέλη, τα ιόντα υδροξυλίου OH⁻ είναι κινούμενα και ελεύθερα. Στην άνοδο αντιδρούν με το υδρογόνο, ελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια παράγοντας παράλληλα νερό. Η αντίδραση είναι:



Στη κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το ηλεκτρόδιο και το νερό του ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας καινούρια ιόντα OH⁻. Η αντίδραση είναι:



Για να επαναλαμβάνονται αυτές οι αντιδράσεις συνεχώς, θα πρέπει να ιόντα OH⁻ να έχουν τη δυνατότητα να περάσουν δια μέσου του ηλεκτρολύτη, και θα πρέπει να υπάρχει ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα για τα ηλεκτρόνια για να μεταφερθούν από την άνοδο στη κάθοδο. Συγκρίνοντας τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι όπως και με τη



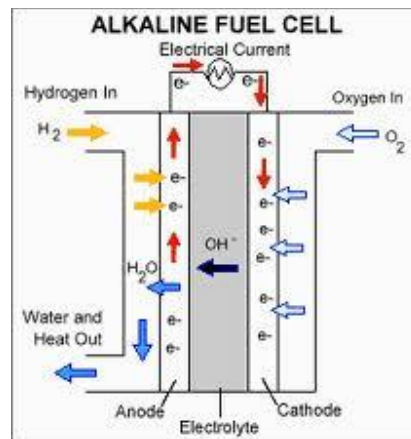
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

περίπτωση της PEM κυψέλης με όξινο ηλεκτρολύτη, απαιτείται διπλάσια ποσότητα υδρογόνου σε σχέση με το οξυγόνο. Επίσης παρόλο που το νερό καταναλώνεται στη κάθοδο, δημιουργείται με διπλάσια ταχύτητα στην άνοδο (μια και οι αντίδραση στην άνοδο πραγματοποιείται σε μικρότερο χρόνο).

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας σε αυτές τις κυψέλες καυσίμου είναι για υψηλές συγκεντρώσεις KOH στον ηλεκτρολύτη, και για χαμηλές συγκεντρώσεις 12 .

Στα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά ως ηλεκτροκαταλύτες όπως για παράδειγμα νικέλιο (Ni), άργυρος (Ag), διάφορα οξειδία μετάλλων ή ευγενή μέταλλα.

Το προτιμώμενο καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) θεωρείται δηλητήριο για τον καταλύτη αφού έστω και παραμικρή ποσότητα, διοξειδίου του άνθρακα θα αντιδράσει με το υδροξείδιο του καλίου (KOH) και θα μεταβάλλει τη σύσταση του ηλεκτρολύτη. Υπάρχουν και ορισμένες AFC που χρησιμοποιούν στερεό άνθρακα ως καύσιμο (DCFC). Η δομή της αλκαλικής κυψέλης φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 7. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου. Δομή - λειτουργία

Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες και σε ατμοσφαιρική πίεση. Τυπική πυκνότητα ισχύος είναι —. Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10.000 ώρες. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας συνήθως μεταξύ επιτρέπει γρήγορη εκκίνηση, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να απομακρύνεται το νερό και η θερμότητα ανάλογα. Η απόδοσή τους όμως που αγγίζει το 70% είναι ένα πλεονέκτημα

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψέλιδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Το προτιμώμενο καύσιμο είναι το καθαρό H_2 και το παραγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο, ειδικά σε εφαρμογές όπου ο όγκος και το βάρος πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα τους είναι η ευαισθησία τους στο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Δηλαδή το καύσιμο δε πρέπει να περιέχει CO_2 διότι δηλητηριάζεται ο καταλύτης χάνοντας τις ιδιότητες του. Έπομένως η αλκαλική κυψέλη δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ατμοσφαιρικό αέρα. Για την παροχή απαραίτητου οξυγόνου στην κάθοδο χρειάζεται ένα ειδικό σύστημα, το οποίο να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα. Επίσης η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη είναι ακόμα ένα μειονέκτημα. Ο ηλεκτρολύτης διαβρώνει τα υλικά γύρω του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής της κυψέλης και την αύξηση του κόστους της. Το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού αντίδρασης αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια υψηλού πορώδους με καταλύτη λευκόχρυσο (platinum), ενώ συνήθως λειτουργούν και σε υψηλές πιέσεις.

Αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο διαστημόπλοιο Apollo το 1960 και αργότερα σε πολλές διαστημικές αποστολές. Πέρα από αυτό έχουν σχετικά περιορισμένη χρήση λόγω της αναγκαιότητας για απουσία διοξειδίου του άνθρακα. Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου σήμερα χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές της Nasa, καθώς επίσης και σε στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά το υψηλό κόστος περιορίζει την ευρύτερη χρήση τους.

Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

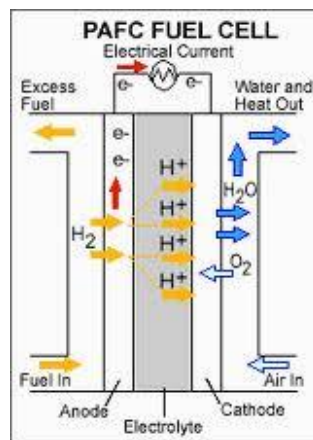
Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells, PAFC) είναι αυτές όπου είναι διαθέσιμες σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C και ανήκουν στις μέσης θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Ωστόσο τα επίπεδα ανοχής της συγκέντρωσης του CO είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

τροφοδότηση του. Στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης ωστόσο πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια.

Πορώδη ηλεκτρόδια , καταλύτη από λευκόχρυσο (Pt), υψηλή θερμοκρασία της τάξης των , χρησιμοποιείται για να αυξήσουν την ταχύτητα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης σε επιθυμητά επίπεδα. Το πρόβλημα της παροχής με υδρογόνο επιλύεται χρησιμοποιώντας αναμορφωτή φυσικού αερίου (κυρίως μεθάνιο) , σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα . Ο εξοπλισμός όμως που απαιτείται με τη προσθήκη του αναμορφωτή ανεβάζει κατακόρυφα το κόστος και το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου.

Τα μειονεκτήματα των PAFC κυψέλων καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος) ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλό και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψέλων καυσίμου. Η δομή αυτής της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 8. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος. Δομή - Λειτουργία

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης.

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος ήταν η πρώτη που παράχθηκε σε μεγάλες βιομηχανικές ποσότητες και είναι σε εκτεταμένη χρήση παγκοσμίως. Αρκετά συστήματα 200 KW, κατασκευάστηκαν από την εταιρία “International Fuel Cells Corporation”

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

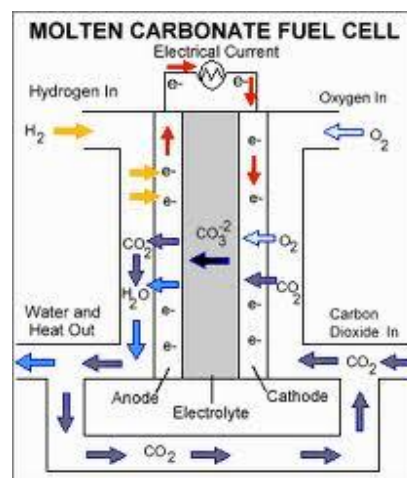
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

(UTC fuel cells) , και εγκαταστάθηκαν σε Η.Π.Α. και Ευρώπη, ενώ επίσης κατασκευάστηκαν αρκετά συστήματα από Ιαπωνικές εταιρίες. Αποτελούν τον τεχνολογικά πιο ώριμο τύπο κυψέλης καυσίμου. Είναι κατάλληλες για σταθερούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο το κόστος τους είναι ακόμη (2001) αρκετά υψηλό (περίπου 4.000\$ Η.Π.Α./KW).

Παρ'όλα αυτά τα συστήματα τα οποία κατασκευάζονται με αυτές τις κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν την απλότητα των PEMFC κυψελών παρέχοντας ένα αξιόπιστο και χαμηλής συντήρησης μηχανισμό παραγωγής ισχύος. Αρκετά PAFC συστήματα λειτουργούν συνεχόμενα για ένα χρόνο περίπου με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης (που να οδηγήσουν στη διακοπή λειτουργίας) ή ανθρώπινης παρέμβασης.

Κυψέλη καύσιμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Η κατηγορία αυτή των κυψελών καυσίμου λειτουργεί κατά ένα παρόμοιο τρόπο με τις προαναφερθέντες κατηγορίες, με τη διαφορά ότι ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από από υγρό τήγμα ανθρακικού άλατος αλκαλικού μετάλλου το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα, και είναι ένα αρνητικό ιόν και οξειδωτικός παράγοντας. Η άνοδος είναι κράμα νικελίου χρωμίου και η κάθοδος οξείδιο του νικελίου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ και η πίεση ατμοσφαιρική και λειτουργούν μόνο όταν ξεπεραστεί το σημείο τήξης του ηλεκτρολύτη. Σε αυτές τις θερμοκρασίες η εξαγωγή του H₂ από το καύσιμο-φορέα μπορεί να γίνει εσωτερικά στην κυψελίδα, ενώ ιονίζεται, χωρίς τη χρήση καταλύτη, μειώνοντας έτσι το κόστος. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 4000 ώρες. Η δομή της κυψέλης φαίνεται στη παρακατω εικόνα:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Εικόνα 9. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων

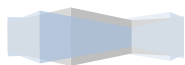
Μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με μεθάνιο και μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα (H_2, CO) χωρίς αναμόρφωση (reforming). Η επεξεργασία τους γίνεται στο εσωτερικό της κυψέλης. Παρ'όλα αυτά αυτή η απλότητα του μηχανισμού αυτού αντισταθμίζεται από τη φύση του ηλεκτρολύτη, που είναι μια εύκολα διαβρώσιμη μίξη από λίθιο, κάλιο και νιτρικά ανθρακικά άλατα.

Αντίθετα με τις PEMFC οι κυψέλες καυσίμου, SOFC, MCFC, δε δηλητηριάζονται από το μονοξείδιο του άνθρακα CO , λόγω της αρκετά υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Επειδή η αντίδραση οξειδωσης συμβαίνει στην άνοδο, άμεση χρήση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πιθανό να χρειάζεται. Επίσης, ο ατμός που παράγεται από την αντίδραση οξειδωσης μπορεί να μετασχηματίσει το μονοξείδιο του άνθρακα παράγοντας υδοκαρβονικά καύσιμα μέσα στην άνοδο. Αυτές οι αντιδράσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροχημική αντίδραση, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικό αναμορφωτή.

Επειδή ο ηλεκτρολύτης χάνει μέρος του ανθρακικού αλάτος, στην αντίδραση οξειδωσης, το μέρος αυτό πρέπει να ανανεωθεί με τη βοήθεια κάποιων μέσων. Αυτό επιτυγχάνεται με την επανακυκλοφορία του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τα προϊόντα της αντίδρασης, στη κάθοδο, όπου αντιδρά με τον εισερχόμενο αέρα, και μετασχηματίζει καρβονικό άλας.

Αυτή η περίπτωση της κυψέλης καυσίμου, έχει το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό να χρειάζεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στον αέρα για να λειτουργήσει. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της, σημαίνει ότι μια καλή αντίδραση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα συγκριτικά φτηνό καταλύτη από νικέλιο (Ni). Το νικέλιο επίσης σχηματίζει την ηλεκτρική βάση του ηλεκτροδίου.

Οι κυψέλες καυσίμου MCFC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εκπομπών από τους σταθμούς ισχύος καύσης άνθρακα καθώς και από σταθμούς ισχύος αεριοστροβίλων. Χρησιμοποιούνται επίσης σε μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μεγάλες σε μέγεθος, βαριές και αργούν να ξεκινήσουν. Είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που εκπέμπεται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς και σε μονάδες παραγωγής ενέργειας για το δίκτυο. Υπάρχουν όμως ακόμα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν, όπως η διάβρωση και η αξιοπιστία, ενώ η διάθεσή τους στο εμπόριο αναμενόταν μετά το 2005.

Κυψέλη καύσιμου τήγματος στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες ηλεκτρολυτών σταθεροποιημένων οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) είναι παρόμοιες με τις MCFC ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας και τις εφαρμογές.

Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου λειτουργεί σε θερμοκρασίες **600 – 1000°C**. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης μπορούν να επιτευχθούν χωρίς την ανάγκη ακριβών καταλυτών, και τα καύσιμα όπως φυσικό αέριο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, τα οποία μετασχηματίζονται εσωτερικά της κατασκευής σε υδρογόνο και δεν απαιτούν κάποια εξωτερική μονάδα για αυτό το σκοπό.

Η κυψέλη SOFC, είναι εξ'ολοκλήρου στερεή κατασκευή. Ο ηλεκτρολύτης είναι μη πορώδες κεραμικό υλικό αγώγιμο στα ιόντα του οξυγόνου που διέρχονται από το πλέγμα του μετάλλου. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας της δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολίτυμων μετάλλων για τον καταλύτη.

Η SOFC κυψέλη είναι αρκετά πλεονεκτική κυψέλη καυσίμου, λόγω της δυνατότητας χρήσης εκτεταμένης ποικιλίας καυσίμων. Πέρα από τις άλλες κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν μόνο υδρογόνο, οι SOFC, χρησιμοποιούν υδρογόνο, βουτάνιο, μεθανόλη, και άλλα προϊόντα του πετρελαίου. Για τις SOFC, που χρησιμοποιούν μεθανόλη, στη περιοχή της ανόδου, ένας καταλύτης διασπά τους δεσμούς της μεθανόλης και του νερού, προς το σχηματισμό, διοξειδίου του άνθρακα CO₂, ιόντα υδρογόνου και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ιόντα υδρογόνου συναντούν τα ιόντα οξειδίου τα οποία έχουν δημιουργηθεί στη πλευρά της καθόδου, και περνούν κατά μήκος του ηλεκτρολύτη στη πλευρά της ανόδου, όπου αντιδρούν σχηματίζοντας νερό. Το φορτίο συνδέεται εξωτερικά ανάμεσα στην άνοδο και στη κάθοδο, ολοκληρώνοντας το ηλεκτρικό κύκλωμα. Στη συνέχεια δίνονται οι χημικές εξισώσεις που περιγράφουν την παραπάνω δραστηριότητα:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

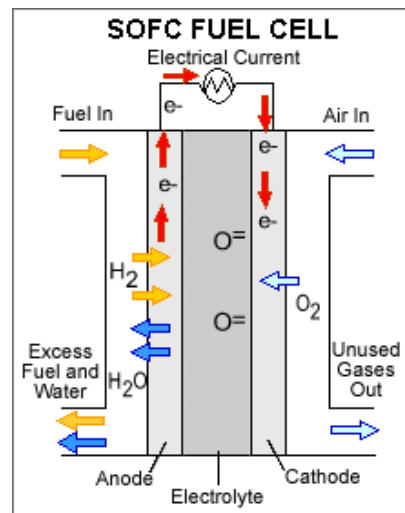
Αντίδραση Ανόδου:

Αντίδραση Καθόδου: -

Συνολική Αντίδραση: $\text{CH}_3\text{OH} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{electrical energy}$ (8)

Οι κυψέλες στερεών οξειδίων αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά, το 1899, όταν ο Nerst, πρώτος περιέγραψε, το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2), ως αγωγό ανιόντων οξυγόνου.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου SOFC, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 10. Δομή κυψέλης καυσίμου τμήματος στερεών οξειδίων

Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους καταλύτες της κυψέλης καυσίμου SOFC, η άνοδος χρησιμοποιεί καταλύτη από νικέλιο (Ni) ή άλλους καταλύτες που μπορούν να συνεισφέρουν στη διάσπαση της μεθανόλης σε ιόντα υδρογόνου και πρότυπο CO. Ένα στερεό υλικό που ονομάζεται οξείδιο υτρίου σταθεροποιημένου ζirkονίου (YSZ), χρησιμοποιείται επίσης σαν ηλεκτρολύτης. Όπως όλοι οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου, το υλικό (YSZ), είναι αγωγίμο σε συγκεκριμένα ιόντα (συγκεκριμένα στα ιόντα οξυγόνου O²⁻) επιτρέποντας τη μετάβαση από τη κάθοδο στην άνοδο, αλλά είναι μη-αγωγίμο στα ηλεκτρόνια. Το YSZ έχει αρκετά καλή διάρκεια ζωής και χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη βιομηχανία. Παρόλο που είναι αγωγίμο στα ιόντα, λειτουργεί μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 1000°C. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, συμβάλλει στην εύκολη διάσπαση του μεθανίου και του οξυγόνου σε ιόντα. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της λειτουργίας σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, είναι ότι υπάρχουν περιορισμοί στα υλικά τα οποία

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

χρησιμοποιούνται για διασυνδέσεις, ενώ παράλληλα ένα άλλο μειονέκτημα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι ότι μπορούν να συμβούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου. Η κατασκευή της ανόδου από καρβονική σκόνη γραφίτη, αποτρέπει στο καύσιμο να έρθει σε επαφή με το καταλύτη. Αρκετά εκτεταμένη έρευνα, γίνεται για την εύρεση εναλλακτικών υλικών από το YSZ, τα οποία να μπορούν να άγουν ιόντα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Τα κεραμικά υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζουν δυσκολία στο χειρισμό και η κατασκευή τους είναι αρκετά δαπανηρή. Επομένως χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός από ένα επιπρόσθετο εξοπλισμό για τη κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος κυψέλης καυσίμου. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει σύστημα προθέρμανσης αέρα και καυσίμου που εισάγονται στη κυψέλη. Επίσης το σύστημα ψύξης είναι πιο πολύπλοκο και δεν είναι εύκολο στην εκκίνηση του.

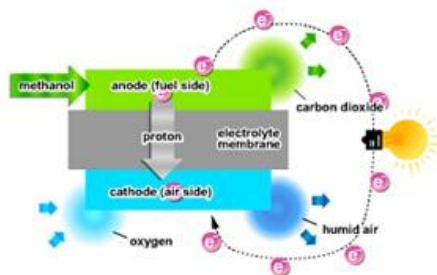
Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν εύρος ισχύος, από 1KW – 1MW. Οι εφαρμογές τους εστιάζονται, σε μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και θερμότητας, δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν τη μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας, από όλους τους τύπους των κυψελών καυσίμου.

Κυψέλη καύσιμου μεθανόλης (DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών (direct methanol fuel cells, DMFC) χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη σε υγρή μορφή, χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

ανάπτυξη αναμορφωτών. Η δομή αυτής της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 11. Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης. Δομή - λειτουργία

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στην είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) αλλά έχει μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο, είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο (Pt) και στη κάθοδο λευκόχρυσος. Στην άνοδο, ο καταλύτης από μόνος του έλκει το υδρογόνο από το υγρό μεθάνιο.

Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτής της κυψέλης είναι μεταξύ , σε ατμοσφαιρική πίεση και δίνει πυκνότητα ισχύος, —. Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10.000 ώρες. Συμπεραίνουμε ότι αυτά τα κελιά καυσίμου παράγουν πολύ χαμηλή ισχύ , παρ'όλα αυτά όμως ακόμα και με αυτή την απόδοση, χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές στην αναπτυσσόμενη περιοχή των φορητών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στο προσεχές μέλλον θα χρησιμοποιούνται σε συσκευές που απαιτούν για τη λειτουργία τους, χαμηλή και σταθερή κατανάλωση ρεύματος, για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Σύγκριση Κυψελών Καυσίμου



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, που περιγράφουν τα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου, είναι δυνατόν να γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους. Στο παρακάτω πίνακα, γίνεται μια συνολική σύγκριση όλων των προαναφερθέντων τύπων κυψελών καυσίμου σε όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους:

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Ενυδατωμένη μεμβράνη από πολυμερές	Υδροξείδιο του καλίου σε πίνακα από αμιάντο	Υγρό φωσφορικό οξύ	Υγρό λιωμένο ανθρακικό άλας σε LiAlO ₂	Κεραμικός (σταθεροποιημένο ζirkόνιο)
Ηλεκτρόδια	Άνθρακας	Από στοιχεία μετάπτωσης	Από άνθρακα	Νικέλιο (Ni) και οξείδια του νικελίου	Κεραμικά (Μίγμα με μέταλλο)
Καταλύτης	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος	Όμοια με ηλεκτρόδια	Όμοια με ηλεκτρόδια
Εσωτερικοί Σύνδεσμοι	Μεταλλικοί ή από άνθρακα	Μεταλλικοί	Γραφίτης	Ανοξειδωτος χάλυβας ή νικέλιο	Από νικέλιο, κεραμικοί ή χαλυβδίνιοι
Θερμοκρασία Λειτουργίας	40-80 °C	65-220 °C	205 °C	650 °C	600 - 100 °C
Μεταφέριμο Ιόν	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻⁻	O ₂ ⁻⁻
Εξωτερικός Αναμορφωτής	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα	Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα
Εξωτερική Μετατροπή CO σε Υδρογόνο	Ναι. Καθαρισμός για απομάκρυνση του CO	Ναι. Καθαρισμός για απομάκρυνση του CO και του CO ₂	Ναι	Όχι	Όχι
Κύρια μέρη κυψέλης	Από άνθρακα	Από άνθρακα	Από γραφίτη	Από ανοξειδωτα υλικά	Κεραμικά
Διαχείριση Νερού	Εξατμιζόμενο	Εξατμιζόμενο	Εξατμιζόμενο	Αέριο	Αέριο
Διαχείριση Θερμότητας	Επεξεργασία καυσίμου και αποβολή σε υγρό ψυκτικό	Επεξεργασία καυσίμου και βοήθεια στη κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη	Επεξεργασία καυσίμου και αποβολή σε ψυκτικό ή παραγωγή ατμού	Επεξεργασία καυσίμου και εσωτερική διαμόρφωση	Επεξεργασία καυσίμου και εσωτερική διαμόρφωση
Απόδοση	40-50 %	50-70 %	40-45 %	50-60 %	50-60 %
Ισχύς	έως 250 KW	Μέχρι 20 KW	άνω των 50 KW	άνω του 1 MW	άνω των 200 KW
Εφαρμογές	Μεταφορές, οχήματα, κινητές εφαρμογές, ηλεκτροπαραγωγή, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, χαμηλής ισχύος συστήματα	Διαστημικά οχήματα και διαστημικές εφαρμογές	Μεγάλη εφαρμογή σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος 200 kW (CHP systems). Ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις	Κατάλληλα για μέσης-μεγάλης ισχύος συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος MW (CHP systems)	Για όλα τα μεγέθη των CHP συστημάτων 2 kW-MW

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Πλεονεκτήματα	<p>Ο ηλεκτρολύτης δεν επιτρέπει την ύπαρξη CO₂. Μηχανικά σταθερός ηλεκτρολύτης. Ελάχιστα προβλήματα των υλικών ακόμα και σε συνθήκες διάβρωσης.</p>	<p>Πολλές εναλλακτικές στη χρήση καταλυτών. Καταλύτες χαμηλού κόστους. Καλύτερη κινητική της καθόδου σε σχέση με την PAFC</p>	<p>Ο ηλεκτρολύτης τους δεν απορρίπτει το CO₂. Υψηλός βαθμός απόδοσης συστήματος ειδικά σε περιπτώσεις συμπαραγωγής</p>	<p>Υψηλής ταχύτητας κινητική στα ηλεκτρόδια. Αποδιδόμενη θερμότητα υψηλής ενθαλπίας. Το CO αποτελεί καύσιμο. Χαμηλότερου κόστους από τις PAFC. Δυνατότητα εσωτερικής ανμόρφωσης καυσίμου</p>	<p>Υψηλής ταχύτητας κινητική στα ηλεκτρόδια. Αποδιδόμενη θερμότητα υψηλής ενθαλπίας. Το CO αποτελεί καύσιμο. Δυνατότητα εσωτερικής ανμόρφωσης καυσίμου</p>
Μειονεκτήματα	<p>Απαιτεί μεγάλες ποσότητες Pt. Το CO καταστρέφει την άνοδο. Απαιτεί μεμβράνη υψηλού κόστους. Προβληματική διαχείριση νερού. Το H₂ είναι το μόνο ασφαλές καύσιμο.</p>	<p>Δεν επιτρέπουν την ύπαρξη CO₂. Δεν επιτρέπουν τη χρήση καυσίμων που έχουν άνθρακα.</p>	<p>Το CO καταστρέφει την άνοδο. Το υδρογόνο το μόνο ασφαλές καύσιμο. Χρησιμοποιεί καταλύτες υψηλού κόστους. Μη αντιστρεπτή κινητική O₂. Ηλεκτρολύτης χαμηλής απόδοσης</p>	<p>Προβλήματα στα υλικά σχετικά με τη διάρκεια ζωής και μηχανικής σταθερότητας. Χαμηλή αντοχή σε θειούχες ενώσεις. Το CO₂, απαιτείται για την τροφοδοσία της καθόδου</p>	<p>Υψηλό κόστος κατασκευής. Περιορισμοί στην επιλογή των υλικών λόγω υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Σχετικά υψηλή αντίσταση ηλεκτρολύτη</p>

Πίνακας 3. Πίνακας σύγκρισης διαφόρων ειδών κυψελών καυσίμου

Όπως γίνεται αντιληπτό από το παρακάτω πίνακα μπορεί να γίνει μια πρόχειρη επιλογή της κυψέλης καυσίμου και ένας πρόχειρος υπολογισμός του κόστους ανάλογα με τα δεδομένα της εγκατάστασης στην οποία θέλουμε να την εφαρμόσουμε.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες (μεθανόλη, αιθανόλη) και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας.

Στο παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι επιδράσεις που έχουν οι διάφορες αέριες ουσίες στις κυψέλες καυσίμου:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Αέριο	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο
CO	Δηλητήριο αναστρέψιμο, μέγιστο 50 ppm	Δηλητήριο	Δηλητήριο (πρέπει <0.5 %)	Καύσιμο	Καύσιμο
CH ₄	Διαλύτης	Δηλητήριο	Διαλύτης	Διαλύτης	Καύσιμο
CO ₂ +H ₂ O	Διαλύτης	Δηλητήριο	Διαλύτης	Διαλύτης	Διαλύτης
S (H ₂ S+CO ₂)	Δηλητήριο	Δηλητήριο	Δηλητήριο (πρέπει < 50 ppm)	Δηλητήριο (πρέπει < 0.5 %)	Δηλητήριο (πρέπει < 1 ppm)

Πίνακας 4. *Επιδράσεις διαφόρων ουσιών στα είδη των κυψελών καυσίμου*

Ο βασικός στόχος των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται διάφορα είδη τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη διανομή της παραγόμενης ισχύος:

Τεχνολογία	Ισχύς
Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)	5 KW - 10 MW
Μικρο-τουρμπίνες	35 KW - 1 MW
Μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια	1-100 MW
Πολύ μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια	25KW - 1 MW
Μπαταρίες	500 KW - 5 MW
Ανεμογενήτριες	200 W - 3 MW
Φωτοβολταϊκά	20 W - 100 KW
Βιομάζα	100 KW - 20 MW
Κυψέλες καυσίμου PAFC	200 KW - 2 MW
Κυψέλες καυσίμου MCFC	250 KW - 2 MW
Κυψέλες καυσίμου PEMFC	1 - 250 KW
Κυψέλες καυσίμου SOFC	250 KW - 5 MW
Γεωθερμία	5 - 100 MW

Πίνακας 5. *Σύγκριση παραγόμενης ισχύος διαφόρων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα.*

Παρατηρούμε ότι οι επιδόσεις των κυψελών καυσίμου όλων των κατηγοριών μπορούν να ανταγωνιστούν τις μεθόδους παραγωγής ισχύος που χρησιμοποιούνται σήμερα.



Γενικά στο χώρο της ενέργειας, παρατηρείται μια στροφή από τις μεγάλες παραγωγικές μονάδες, στα αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής. Επίσης στις μεταφορές υπάρχει η τάση της χρησιμοποίησης καυσίμων που να μην οδηγούν στη παραγωγή επιβλαβών ρύπων που μολύνουν την ατμόσφαιρα και διογκώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το υδρογόνο μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην επίλυση των προβλημάτων.

2.6 Δομή κυψελίδας καυσίμου – Κατασκευαστικά στοιχεία

2.6.1 Δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου

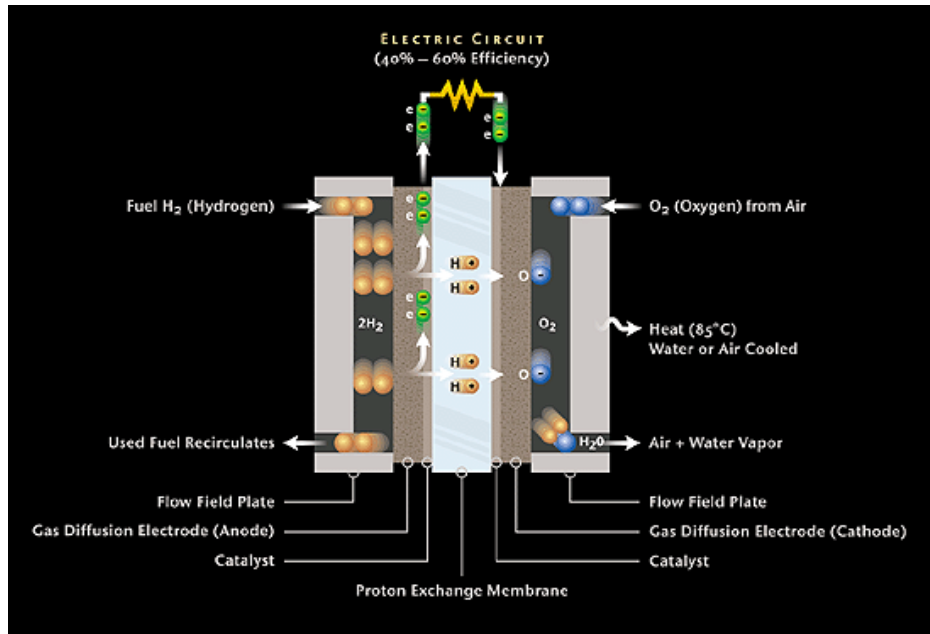
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η δομή μιας κυψέλης καυσίμου καθώς και διάφορα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Η αναφορά αυτή ειδικεύεται για τη κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM Fuel Cell) που είναι και η πιο διαδεδομένη από όλες και έχει την πιο απλοϊκή κατασκευή.

Τα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου είναι:

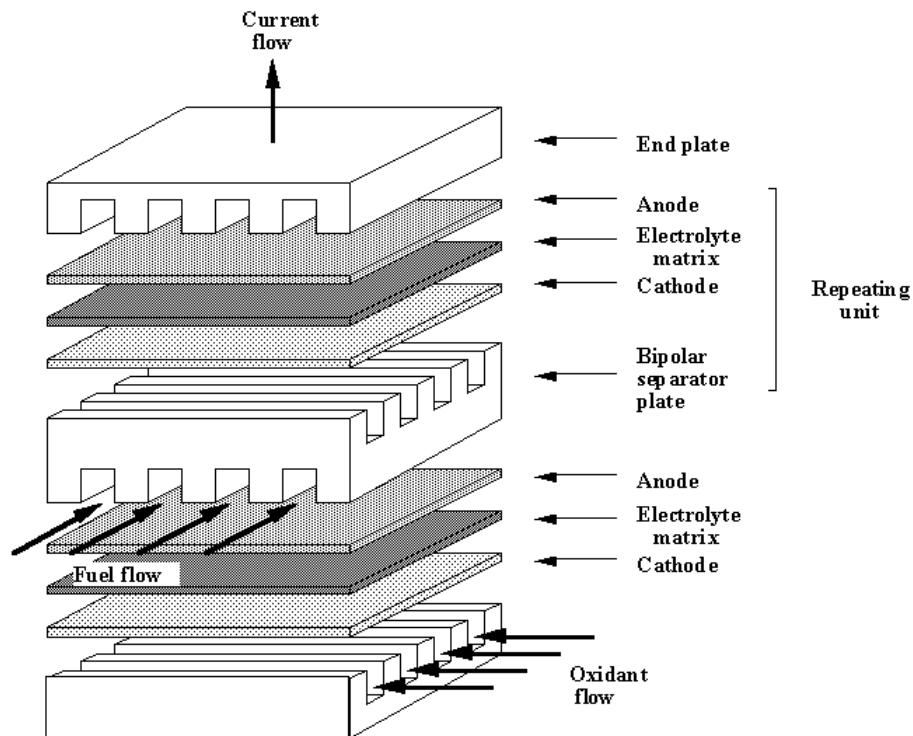
- Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων (Proton Exchange Membrane) ή Ηλεκτρολύτης
- Ηλεκτρόδια (electrodes)
- Καταλύτης (catalyst)
- Στρώμα διάχυσης αερίων (gas diffusion layers) ή πορώδες στρώμα (backing layer)
- Διπολικές πλάκες (Bipolar plates)

Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου με τα δομικά της στοιχεία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες με διαφορετικές παραλλαγές:





Εικόνα 12. Παρουσίαση δομικών στοιχείων κυψέλης καυσίμου



Εικόνα 13. Σύνθεση δομικών στοιχείων κυψέλης καυσίμου



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Όσον αφορά τη δομή της ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται στο κέντρο, και αποτελείται από πολυμερισμένη μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων. Στη συνέχεια με κατεύθυνση από μέσα προς τα έξω στην περιγραφή ακολουθούν τα ηλεκτρόδια, που είναι μεταλλικά υλικά στα οποία εφαρμόζεται το στρώμα του καταλύτη. Συνεχίζοντας προς τα έξω, ακολουθεί το στρώμα διάχυσης των αερίων. Στη συνέχεια η κυψέλη καυσίμου τελειώνει με τις διπολικές πλάκες, ανόδου και καθόδου, από τις οποίες εισέρχονται και εξέρχονται τα αντιδρώντα και προϊόντα των αντιδράσεων όπως φαίνεται στην εικόνα (13). Η δομή και η λειτουργία του καθενός από τα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια.

2.6.1.1 Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων

Η πολυμερισμένη ηλεκτρολυτική μεμβράνη είναι ένας ηλεκτρονικός μονωτής και παράλληλα ένας άριστος αγωγός κατιόντων υδρογόνου. Το τυπικό υλικό της μεμβράνης αποτελείται από πληρως φθοριομένο άνθρακα, στον οποίο είναι προσαρμοσμένα ρίζες θειϊκών οξειδίων ($SO_3^- H^+$). Όταν η μεμβράνη ενυδατώνεται, τότε τα ιόντα υδρογόνου (H^+) αποκτούν ελευθερία κίνησης. Η μεταφορά ιόντων επομένως δια μέσου της μεμβράνης εξαρτάται από την ποσότητα νερού που βρίσκεται δεσμευμένη ή ελεύθερη μέσα στο πολυμερές.

Οι ιδιότητες της μεμβράνης εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές της. Το πάχος της μεμβράνης ποικίλλει από 50-175 μm , το οποίο είναι αναλογικά ίδιο πάχος με 2-7 σελίδες χαρτιού στη σειρά. Το εμπορικό όνομα με το οποίο κυκλοφορούν οι μεμβράνες είναι Nafion 117 και συναντάται σε διαφορετικό πάχος σε διάφορες κυψέλες (π.χ. 177 μm , συνήθως ο αριθμός συνδέεται με το πάχος).

Οι μεμβράνες αυτές παρουσιάζουν υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Η βασική λειτουργία της μεμβράνης στηρίζεται στην ιδιότητα που έχει να επιτρέπει διέλευση ιόντων από το εσωτερικό της. Η μεμβράνη θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει, τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες, και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης. Εάν η μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία της κυψέλης. Παράλληλα λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια, ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδρασή τους. Η μεμβράνη προσδιορίζει, τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Έτσι η θερμοκρασία λειτουργίας, εξαρτάται άμεσα από το είδος της μεμβράνης που αυτή διαθέτει. Εξαιτίας της χαμηλής

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

θερμοκρασίας λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, χρησιμοποιούν ακριβούς ηλεκτρολύτες, για την επαρκή κατάλυση της αντίδρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους.

2.6.1.2 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης αποτελούν πολύπλοκες νανοδομές και περιέχουν καταλύτη, πόρους και ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά. Όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία κυψέλη καυσίμου αποτελούνται από δύο επιμέρους ημι-αντιδράσεις. Την οξείδωση (Αγγλ. *Oxidation*) του υδρογόνου η οποία πραγματοποιείται στην άνοδο και την αναγωγή (Αγγλ. *Reduction*) του οξυγόνου στην κάθοδο.

Με την οξείδωση του υδρογόνου παράγονται ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια), τα οποία μεταφέρονται μέσω της ιοντικά αγώγιμης μεμβράνης στην κάθοδο και ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύονται στο εξωτερικό κύκλωμα καθώς η διέλευση τους μέσα από τη μεμβράνη δεν είναι δυνατή.

Η αναγωγή του οξυγόνου γίνεται καθώς το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τον αέρα έρχεται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θερμότητα. Αντίθετα με τη διαδικασία της οξείδωσης, στη διαδικασία της αναγωγής δεν έχει ακόμα κατανοηθεί ο μηχανισμός της αντίδρασης πλήρως.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα της καθοδικής αντίδρασης είναι 100 φορές μικρότερη από αυτή της ανόδου και αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό όριο στην απόδοση της κυψέλης. Η χαμηλή ταχύτητα αναγωγής του οξυγόνου οφείλεται σε 3 παράγοντες:

- § Στη μεγάλη ισχύ του δεσμού του μοριακού οξυγόνου και στην αυξημένη σταθερότητα του δεσμού Pt - O ή Pt - OH.
- § Στο ότι είναι αντίδραση μεταφοράς 4 ηλεκτρονίων
- § Στην δημιουργία παραπροϊόντων όπως το H₂O₂ (OH-OH)

Η συνεκτική δομή των ηλεκτροδίων με τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσα τους είναι ένα πολύ βασικό στοιχείο του σχεδιασμού των κυψελών καυσίμου. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει η αντίδραση, είναι αναλογικός με την επιφάνεια (εμβαδόν) των ηλεκτροδίων. Η επιφάνεια που καλύπτει το ηλεκτρόδιο είναι ένα ζωτικό στοιχείο της απόδοσης της κυψέλης, που συχνά αναφέρεται ως ρεύμα ανά cm^2 . Η επιφάνεια των ηλεκτροδίων υπολογίζεται ως μήκος επί πλάτος, που είναι σχεδιαστικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων.



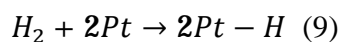
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική, γίνεται στα ηλεκτρόδια, άνοδος και κάθοδος. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα, ενώ τα ιόντα διαπερνάνε τον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη, διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, καθώς επίσης πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την άξηση της αποτελεσματικής επιφάνειας ή διαφορετικά ενεργους επιφάνειας. Η αποτελεσματική επιφάνεια αποτελεί την επιφάνεια πάνω στην οποία επιτυγχάνονται οι χημικές αντιδράσεις. Το πορώδες υλικό των ηλεκτροδίων συσσιτά μια μικροσκοπική δομή που αυξάνει αυτή την αποτελεσματική επιφάνεια πολλαπλάσιες φορές από το μέγεθος μήκος επί πλάτος του ηλεκτροδίου βελτιώνοντας την απόδοση της χημικής αντίδρασης. Αυτή η μικροσκοπική δομή είναι μια βασική κατασκευαστική και σχεδιαστική απαίτηση των κυψελών καυσίμου. Επιπρόσθετα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενσωματώνεται ένας καταλύτης, ενώ πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη το γεγονός ότι είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν για πολλές ώρες σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, επομένως η απαίτηση για ανθεκτικότητα στη διάβρωση είναι επιβεβλημένη.

2.6.1.3 Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης

Στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, χρησιμοποιείται ως καταλύτης λευκόχρυσος (Pt) καθώς είναι ο μόνος, που μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς αναγωγής του οξυγόνου, στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της PEM (60 – 80 °C). Ο σκοπός του είναι να επιταχύνει την αντίδραση της καθόδου, η οποία είναι 100 φορές πιο αργή, από την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου. Ο λευκόχρυσος χρησιμοποιείται, εξαιτίας της μοναδικής του ιδιότητας, να διασπά τόσο το υδρογόνο, όσο και το οξυγόνο. Ανάμεσα στις αντιδράσεις οξείδωσης, και αναγωγής μεσολαβεί ένα ενδιάμεσο βήμα στο οποίο, τα άτομα της πλατίνας ενώνονται με τα άτομα του υδρογόνου και του οξυγόνου. Ο δεσμός αυτός είναι τόσο ισχυρός, ώστε να έλκει τα άτομα, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά ασθενής ώστε απελευθερώνει τα άτομα του υδρογόνου ή του οξυγόνου, ώστε να σχηματιστούν τα τελικά προϊόντα. Η χημική διεργασία που γίνεται στο ηλεκτρόδιο της ανόδου είναι:

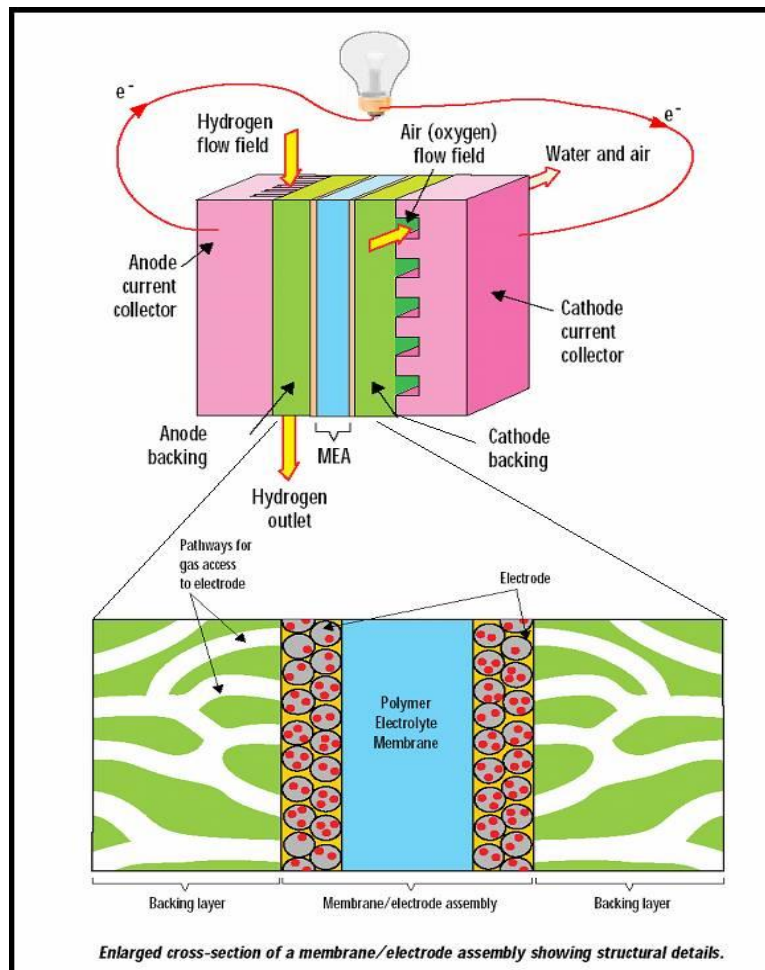
A) Δεσμεύονται τα άτομα του υδρογόνου από τον λευκόχρυσο.

B) Απελευθέρωση ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρονίων



(10)

Λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου γίνεται προσπάθεια να μειωθεί η ποσότητα που απαιτείται. Συνηθισμένη πλέον τιμή είναι συνολικά στην άνοδο και στη κάθοδο. Ένας τρόπος για καλύτερη αξιοποίηση του καταλύτη είναι να κατασκευαστεί το στρώμα του καταλύτη, με τέτοιο τρόπο ώστε, να καταλαμβάνει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια. Κάθε ηλεκτρόδιο αποτελείται από πορώδη άνθρακα (C) με τον οποίον συνδέονται τα πολύ μικρά μόρια πλατίνας. Το ηλεκτρόδιο είναι πορώδες ώστε τα μόρια του αερίου να μπορούν να διαπεράσουν κάθε ηλεκτρόδιο για να φθάσουν στον καταλύτη. Τόσο η πλατίνα όσο και ο άνθρακας έχουν καλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων που τα επιτρέπει να κινούνται ελεύθερα μέσω του ηλεκτροδίου.

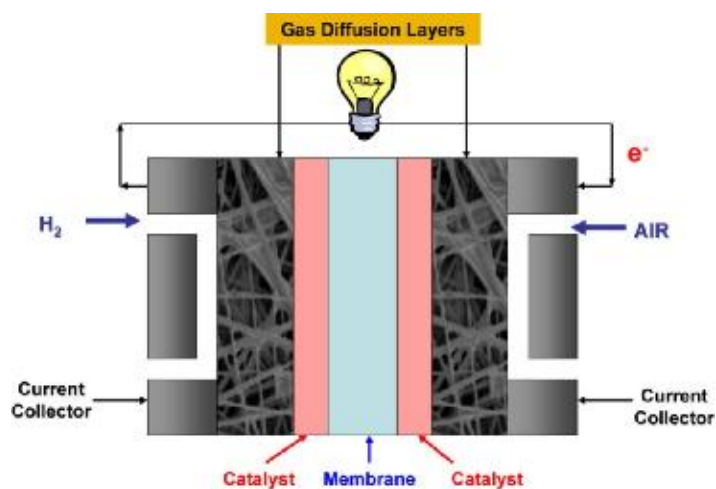


Εικόνα 14. Σύνδεση μεμβράνης ηλεκτροδίων. Πορώδης δομή ηλεκτροδίων

Το μικρό μέγεθος των μορίων Pt, περίπου 2nm σε διάμετρο, οδηγεί σε πολύ μεγάλη συνολική περιχή επιφάνειας που είναι προσβάσιμη στα μόρια αερίου. Η μεγάλη περιοχή επιφάνειας Pt, επιτρέπει τις αντιδράσεις ηλεκτροδίων να πραγματοποιούνται σε πολλές περιοχές επιφάνειας Pt ταυτόχρονα. Η μεγάλη διασπορά των μορίων του λευκόχρυσου αυξάνει δραματικά τη συνολική επιφάνεια του, ακόμα και όταν η ποσότητα του λευκόχρυσου που χρησιμοποιείται είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνει σημαντικά η ταχύτητα της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο. Αυτή η υψηλή διασπορά του καταλύτη είναι βασική για την ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή το παραγόμενο ρεύμα σε μια κυψέλη καυσίμου. Ο συνδυασμός Άνοδος/Μεμβράνη/Κάθοδος συχνά αναφέρεται και ως σώμα Μεμβράνης-Ηλεκτρόδια (Membrane Electrode Assembly MEA).

2.6.1.4 Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα (Gas Diffusion Layer)

Το σώμα μεμβράνης ηλεκτροδίων περιβάλλεται από δύο πορώδη στρώματα από γραφίτη. Μπορεί να αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου τόσο της ανόδου όσο και της καθόδου, είτε να είναι ξεχωριστό στρώμα. Η πορώδης φύση του στρώματος αυτού εξασφαλίζει αποτελεσματική διάχυση και ισοκατανομή του κάθε αντιδρώντος αερίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, που αποτελεί τον πρωταρχικό του ρόλο, ενώ επίσης δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στον καταλύτη και τη διπολική πλάκα. Επιπρόσθετα απομακρύνει το παραγόμενο νερό από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου και σχηματίζει ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη. Τέλος λειτουργεί και ως μηχανικό στήριγμα για τη μεμβράνη. Μια αντιπροσωπευτική απεικόνιση δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



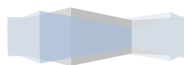
Εικόνα 15. Δομή στρώματος διάχυσης αερίων

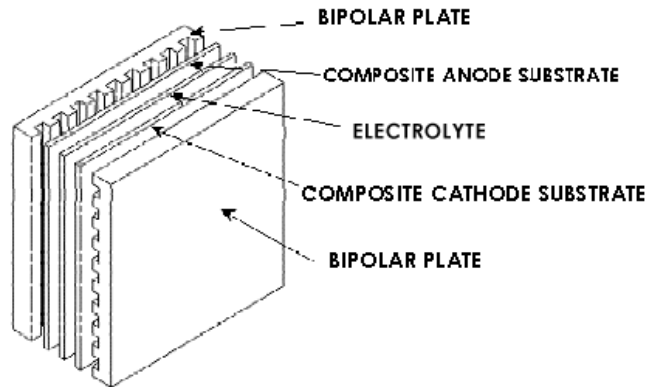
Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του , έχει ως βάση τον άνθρακα μαζί με κάποιο υδροφοβικό υλικό το οποίο αποτρέπει τη συγκέντρωση του νερού (ώστε να μπορούν τα αέρια ελεύθερα να έρχονται σε επαφή με το καταλύτη).

2.6.1.5 Διπολικές πλάκες (Bipolar plates)

Η τάση μιας κυψέλης καυσίμου υπό φορτίο είναι αρκετά μικρή , της τάξης του 0.7 Volt. Για να φτάσουμε το επιθυμητό επίπεδο της τάσης , πολλές κυψέλες καυσίμου θα πρέπει να ενωθούν στη σειρά. Η εν σειρά ένωση των κυψελών καυσίμου, δημιουργεί μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ο πιο απλός τρόπος είναι η σύνδεση της άκρης της καθόδου της μιας κυψέλης καυσίμου στην άνοδο της επόμενης κυψέλης. Το πρόβλημα με αυτή τη διάταξη είναι ότι θα πρέπει τα ηλεκτρόνια, να διατρέξουν όλη την επιφάνεια του ηλεκτροδίου μέχρι να φτάσουν στο άκρο της ηλεκτρικής σύνδεσης. Παρόλο που τα ηλεκτρόδια είναι καλοί αγωγοί , όταν η κυψέλη έχει τάση 0.7 Volt, ακόμα και μια πολύ μικρή πτώση τάσης είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνεται με τη χρησιμοποίηση των διπολικών πλακών, για τη σύνδεση των κυψελών μεταξύ τους. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης κυψέλης , για τον λόγο αυτό ονομάζονται διπολικές. Ταυτόχρονα οι διπολικές πλάκες τροφοδοτούν με οξυγόνο τη κάθοδο και με υδρογόνο την άνοδο. Παρότι τα δύο ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν καλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους, τα αέρια πρέπει να τροφοδοτούνται ξεχωριστά. Είναι κατασκευασμένες από αγωγικά υλικά, όπως ο γραφίτης ή το ανοξείδωτο ατσάλι. Στις παρακάτω εικόνες δίνεται μια απεικόνιση των διπολικών πλακών:





Εικόνα 16. Απεικόνιση διπολικών πλακών και σύνδεση τους με το σώμα μεμβράνη-ηλεκτρόδια.



Εικόνα 17. Διπολικές πλάκες με τα κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση καναλιών

Οι πλάκες έχουν κανάλια έτσι ώστε τα αέρια να ρέουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα κατακόρυφα κανάλια είναι για τη ροή του υδρογόνου στην άνοδο, ενώ τα οριζόντια κανάλια είναι για τη ροή του οξυγόνου στην κάθοδο. Είναι επίσης κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν αγωγή επαφή με την επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου. Το αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης σε σειρά των κυψελών, είναι το ηλεκτρικό ρεύμα να περνά στην ουσία κατευθείαν από τη μία κυψέλη στην άλλη και όχι από την επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου στο άλλο. Τα ηλεκτρόδια επίσης δέχονται μηχανική υποστήριξη από τις πλάκες, με αποτέλεσμα να έχουμε μια σθεναρή κατασκευή.

2.6.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και προτάσεις επίλυσης

Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, συμβαίνουν διάφορα προβλήματα που αφορούν τη κατασκευαστική της διαμόρφωση, ή τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά και επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την απόδοση της χημικής αντίδρασης του καυσίμου και κατ'επέκταση την απόδοση στη παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνουν εκτεταμένες μελέτες για την βελτιστοποίηση της απόδοσης της κυψέλης, μέσω επεμβάσεων στη κατασκευαστική διαμόρφωση των επιμέρους συνεργαζόμενων τεμαχίων που συνθέτουν τη δομή της. Μια σύντομη αποτίμηση των σημαντικότερων προβλημάτων που εμφανίζονται και η πρόταση κάποιων λύσεων παρατίθενται στη συνέχεια.

2.6.2.1 Πρόβλημα στην απόδοση των χημικών αντιδράσεων

Κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης στη κυψέλη καυσίμου πέρα από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, απελευθερώνεται και θερμότητα. Το ηλεκτρικό ρεύμα όμως που παράγεται, είναι αρκετά μικρό σε ένταση, και οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι:

- Η χαμηλή επιφάνεια επαφής ανάμεσα στο παρεχόμενο αέριο, τα ηλεκτρόδια, και τον ηλεκτρολύτη.
- Η μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη δημιουργεί αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται επίπεδα, με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη ανάμεσα τους. Η δομή του ηλεκτροδίου είναι πορώδης ώστε το καύσιμο να μπορεί να το διαπεράσει. Αυτό δίνει τη μέγιστη πιθανή επαφή, ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο τον ηλεκτρολύτη και το αέριο.

Ένα άλλο πρόβλημα σχετίζεται με την ενέργεια ενεργοποίησης. Στην άνοδο, όπου αντιδρά το υδρογόνο έχουμε απελευθέρωση ενέργειας, το οποίο δε σημαίνει ότι η αντίδραση συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό. Παρόλο που απελευθερώνεται ενέργεια, πρέπει να τροφοδοτηθεί με ενέργεια ενεργοποίησης αρχικά, ώστε να ξεπεραστεί ένα επιθυμητό επίπεδο στην αρχική ενέργεια των μορίων για να μπορέσει να



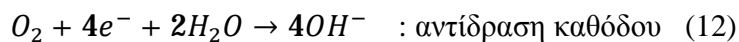
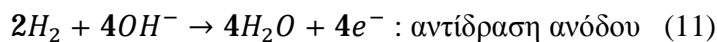
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Αν η πιθανότητα ενός μορίου να έχει επαρκή αρχική ενέργεια είναι χαμηλή, τότε η αντίδραση θα πραγματοποιηθεί με αργό ρυθμό, με εξαίρεση πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την αντιμετώπιση της χαμηλής ταχύτητας αντίδρασης:

- Χρήση καταλυτών
- Ανύψωση της θερμοκρασίας
- Αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων

Οι πρώτες δύο λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε χημική αντίδραση. Αντιθέτως η τρίτη λύση είναι ειδική για περιπτώσεις κελιών καυσίμου, και είναι πολύ σημαντική. Αυτό προκύπτει από την μελέτη των αντιδράσεων που συμβαίνουν στη αλκαλική κυψέλη καυσίμου:



Σχετικά με τη πρώτη αντίδραση της ανόδου, απαιτείται καύσιμο υδρογόνο και ιόντα υδροξυλίου OH^- καθώς και ενέργεια ενεργοποίησης. Επιπλέον η σύνδεση του καυσίμου υδρογόνου με τα ιόντα υδροξυλίου γίνεται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενώ ταυτόχρονα τα ηλεκτρόνια πρέπει να απομακρυνθούν.

2.6.2.2 Διαχείριση νερού - Υγρασία

Η διαχείριση του παραγόμενου νερού είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Παρόλο που το νερό είναι προϊόν των αντιδράσεων, που πραγματοποιούνται στη κυψέλη καυσίμου και μεταφέρεται έξω από αυτή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, πρέπει τόσο το υδρογόνο όσο και ο αέρας που εισάγονται να υγρασιούνται. Η υγρασία των αερίων, θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Ακόμα η ύπαρξη, ελάχιστου νερού, μειώνει την αγωγιμότητα, της μεμβράνης στα ιόντα υδρογόνου και προκαλεί τη μείωση του ρεύματος της κυψέλης.



Όπως έχει προαναφερθεί για να ολοκληρωθεί η αντίδραση (τόσο στην άνοδο όσο και στη κάθοδο) πρέπει το καύσιμο να έρθει σε επαφή ταυτόχρονα και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη. Επειδή στις PEM κυψέλες, ο ηλεκτρολύτης (μεμβράνη) δεν είναι υγρός και δεν μπορεί να γεμίσει τις περιοχές ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη, η ύπαρξη νερού είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Όταν η μεμβράνη είναι πλήρως ενυδατωμένη, η απόδοση της κυψέλης αυξάνεται γιατί δημιουργούνται περισσότερες περιοχές, που είναι δυνατή η αντίδραση. Υπάρχει όμως ένα σημείο το οποίο αν ξεπεραστεί τότε ο ηλεκτρολύτης «πλυμμυρίζει» και το νερό εμποδίζει την επαφή του αερίου με τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Επομένως ο έλεγχος, της ποσότητας του νερού είναι πολύ σημαντικός. Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, όταν ένα πρωτόνιο διαπερνά τη μεμβράνη μεταφέρει, περίπου 2.5 μόρια νερού από την άνοδο στην κάθοδο. Η αναλογία είναι μια εκτίμηση, και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και η ίδια η μεμβράνη. Όταν η κυψέλη λειτουργεί σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος το πρόβλημα της αφυδάτωσης είναι μεγαλύτερο. Η λειτουργία με αφυδατωμένη μεμβράνη μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης.

2.6.2.3 Θερμοκρασία Λειτουργίας

Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να κυμαίνεται σε κάποια πλαίσια. Αν η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου μειωθεί πολύ, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης. Αν αντίθετα η θερμοκρασία ξεπεράσει το ανώτατο όριο λειτουργίας της κυψέλης τότε θα αφυδατωθεί η μεμβράνη, λόγω εξάτμισης του νερού, οπότε η κυψέλη, θα καταστραφεί. Για αυτό το λόγο πρέπει με κάποιο τρόπο, να γίνεται απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για συμπαραγωγή θερμότητας είτε σε κάποιο υβριδικό σύστημα με αμοστρόβιλο, είτε στη μονάδα επεξεργασίας καυσίμου ή ακόμα και με κάποιο τρόπο να γίνεται απαγωγή της στο περιβάλλον.

Επιπλέον η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) περιορίζεται από το γεγονός ότι πρέπει το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή. Η μεμβράνη πρέπει να περιέχει νερό, έτσι ώστε να μεταφέρονται τα πρωτόνια μέσα από αυτήν. Έτσι η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες κάτω των **100°C**. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου σε θερμοκρασίες άνω των **100°C**, είναι δυνατή αρκεί να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης, ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή ή να υπάρχει κατάλληλη μεμβράνη που να μπορεί να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες.



Οι κυψέλες τύπου PEM, λειτουργούν σε θερμοκρασίες της τάξεως των **60 – 80°C**.

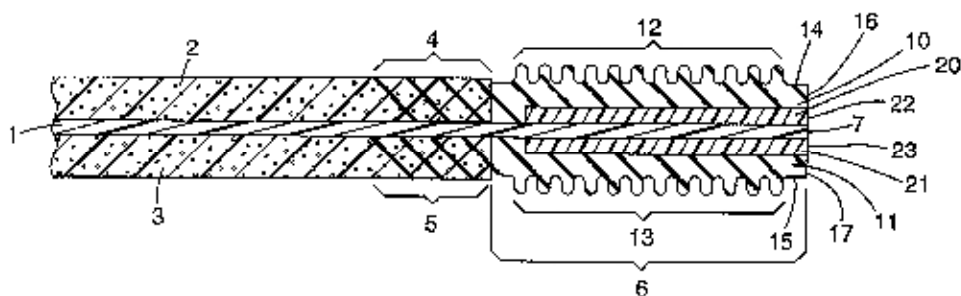
2.6.2.4 Πίεση Λειτουργίας

Όσον αφορά τη πίεση, η πίεση του υδρογόνου θα πρέπει να ελέγχεται. Αν η πίεση είναι πολύ μικρή, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, ενώ αν η πίεση γίνει πολύ μεγάλη, τότε τίθεται θέμα δομικής αντοχής της. Οι κυψέλες τύπου PEM, λειτουργούν σε πιέσεις της τάξεως των **0.001 – 1 MPa \approx 0.0098 – 9.8 atm**, ενώ υπάρχει μια προτίμηση για κυψέλες που λειτουργούν σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (1 atm).

2.6.2.5 Πρόβλημα στη τροφοδοσία των αερίων, στη ψύξη της κυψέλης καυσίμου και πρόβλημα διαρροής

Επειδή τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη (για να επιτρέπουν το αέριο να εισέλθει), αφήνουν παράλληλα το αέριο να διαρεύσει από τα άκρα της κατασκευής τους. Επομένως τα άκρα των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι σφραγισμένα. Συνήθως αυτό γίνεται κατασκευάζοντας τον ηλεκτρολύτη, μεγαλύτερο και από τα δύο ηλεκτρόδια και προσαρμόζοντας μια τσιμούχα γύρω από το κάθε ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σκαρίφημα:





Εικόνα 18. Σχεδιαστική διαμόρφωση ηλεκτροδίων – ηλεκτρολύτη με τσιμούχα

Το καύσιμο υδρογόνο και το το οξυγόνο που τροφοδοτούνται στην κυψέλη καυσίμου, χρησιμοποιούν τη παραπάνω κατασκευή. Εξαιτίας των σφραγισμάτων που έχουν γίνει γύρω από τα άκρα των ηλεκτροδίων, το υδρογόνο έρχεται σε επαφή μόνο με την άνοδο, εφόσον τροφοδοτείται κάθετα στη κατεύθυνση δια μέσου της κυψέλης. Παρομοίως το οξυγόνο (ή ο αέρας) τροφοδοτείται οριζόντια δια μέσου της κυψέλης και θα έρθει σε επαφή μόνο με τη κάθοδο, και σε καμία περίπτωση ούτε με τα άκρα της ανόδου.

Πέρα από το παραπάνω πρόβλημα δημιουργείται άλλο ένα που έχει να κάνει με τη ψύξη της κυψέλης καυσίμου. Η παραπάνω διαμόρφωση με τις τοποθετούμενες τσιμούχες και το σφράγισμα των ηλεκτροδίων, λέγεται εξωτερική σωλήνωση της κυψέλης καυσίμου και έχει το πλεονέκτημα της απλότητας στη κατασκευή. Παρ' όλα αυτά έχει δύο μεγάλα μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι η δυσκολία ψύξης του συστήματος. Οι κυψέλες καυσίμου απέχουν κατά πολύ από 100% απόδοση, και παράγονται υπολογίσιμες ποσότητες θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος.

Γίνεται κατανοητό από τη δομή της κατασκευής όπως φαίνεται στα σχήματα (---), ότι είναι αρκετά δύσκολη η τροφοδοσία, ενός ψυκτικού υγρού δια μέσου των κυψελών καυσίμου. Επομένως αυτός ο τύπος της κυψέλης καυσίμου πρέπει να ψυχθεί από το αντιδρών αέριο που περνάει δια μέσω της καθόδου. Αυτό σημαίνει ότι ο αέρας πρέπει να τροφοδοτηθεί σε πολύ μεγαλύτερο ρυθμό από ότι απαιτεί η χημική αντίδραση. Μερικές αυτές αυτές είναι αρκετό για να ψυχθεί η κυψέλη καυσίμου, αλλά είναι επιζήμια κατανάλωση ενέργειας.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

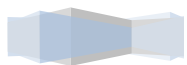
Το δεύτερο μειονέκτημα, είναι ότι η τσιμούχα γύρω από τα άκρα των ηλεκτροδίων, δεν μπορεί να πιεστεί ώστε να εφαρμοσει σταθερά στο ηλεκτρόδιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένη πιθανότητα, διαροής των αντιδρώντων αερίων.

Η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων απαιτεί μια ποιο σύνθετη δομή των των διπολικών πλακών και τη δημιουργία μιας δομής εσωτερικών σωληνώσεων. Οι διπολικές πλάκες κατασκευάζονται μεγαλύτερες σε σχέση με τα ηλεκτρόδια, και έχουν επιπρόσθετα κανάλια που εκτείνονται δια μέσου της κυψέλης, και τροφοδοτούν το καύσιμο και το οξυγόνο στα ηλεκτρόδια. Προσεκτικά τοποθετημένες τρύπες διανοίγονται που τροφοδοτούν τα αντιδρώντα στα κανάλια που καταλήγουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η δομή αυτή της κυψέλης καυσίμου με αυτή τη διαμόρφωση αποτελεί ένα στέρεο μπλοκ με τα αντιδρώντα αέρια να τροφοδοτούνται ακριβώς εκεί στο τέλος όπου γίνεται η σύνδεση με το αρνητικό και θετικό ηλεκτρόδιο.

Όσον αφορά το θέμα της ψύξης, η διπολική πλάκα, με την εσωτερική σωλήνωση, μπορεί να ψυχθεί με πολλούς τρόπους. Ο απλούστερος, είναι να κατασκευαστούν στενά κανάλια δια μέσου των πλακών, που να οδηγούν τον αέρα ψύξης ή το νερό δια μέσου αυτών των καναλιών. Μια τέτοια προσέγγιση, χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα. Εναλλακτικά κανάλια μπορούν να κατασκευαστούν κατά μήκος της κυψέλης καυσίμου. Το προτιμώμενο σύστημα ψύξης ποικίλλει ανάλογα με τα διάφορα είδη κυψελών καυσίμου.

2.6.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δεν είναι 100% κι επομένως η θεωρητική τάση των 1,16 V δε συναντάται. Αντίθετα μια συνηθισμένη τιμή τάσης εξόδου ισούται περίπου με 0,7V. Ωστόσο επειδή αυτή η τάση είναι μικρή και επομένως ακατάλληλη για τις περισσότερες πιθανές εφαρμογές της, γίνεται χρήση παραπάνω από μιας κυψέλης συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, δημιουργώντας αυτό το οποίο ονομάζουμε στήλη κυψέλης καυσίμου (fuel cell stack). Ανάλογα με τη χρήση όπου προορίζεται η κυψέλη η στήλη μπορεί να αποτελείται από μερικές έως και εκατοντάδες κυψέλες. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται εκτός από μεγάλη τάση και μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία στήλες σε σειρά.



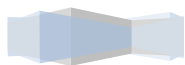
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

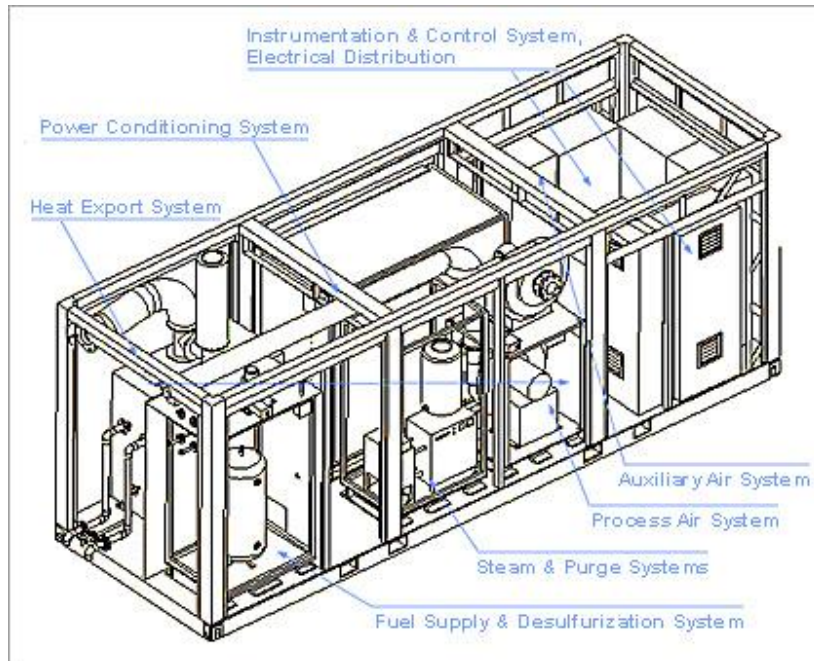
Προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός όγκος και βάρος της στήλης γίνεται χρήση αντί δύο πλακών καθορισμού της ροής των αερίων, μίας. Αυτή η πλάκα έχει δύο περιοχές με κανάλια μεταφοράς, μια σε κάθε μεριά της η οποία αναλαμβάνει τη μεταφορά και διαφορετικού αερίου (υδρογόνου ή αέρα) και ονομάζεται διπολική πλάκα (bipolar plate). Στα άκρα της κυψέλης βρίσκονται δύο απλές πλάκες.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο αδιαπέραστο από αέρια της στήλης διότι σε αντίθετη περίπτωση υδρογόνο και αέρας θα ενώνονταν άμεσα χωρίς την παραγωγή εκμεταλλεύσιμου ρεύματος. Η διπολική πλάκα πρέπει επίσης να είναι αγωγίμη ώστε το ρεύμα να μπορεί να κινηθεί από τη μία κυψέλη στην επόμενη.

2.6.4 Ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου – Βοηθητικά εξαρτήματα

Ο Πυρήνας ενός κελιού καυσίμου είναι , τα ηλεκτρόδια , ο ηλεκτρολύτης και οι διπολικές πλάκες που έχουν περιγραφεί πιο πάνω. Παρ'όλα αυτά υπάρχουν και άλλα κομμάτια που συνθέτουν τον εξοπλισμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Αυτά τα πρόσθετα μέρη λέγονται «υπόλοιπο» της κυψέλης καυσίμου (balance of the plant BOP). Σε κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, η συστοιχία των κυψελών καυσίμου είναι αρκετά μικρή και από άποψη μεγέθους αποτελεί το μικρότερο κομμάτι της κατασκευής. Τα επιπρόσθετα μέρη που απαιτούνται εξαρτώνται από το τύπο της κυψέλης καθώς και από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Τα μέρη αυτά και ο ρόλος που παίζουν στην λειτουργία του συστήματος, αναφέρονται παρακάτω. Μια απεικόνιση ενός ολοκληρωμένου συστήματος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:





Εικόνα 19. Απεικόνιση ολοκληρωμένου συστήματος κυψέλης καυσίμου

2.6.4.1 Επιπρόσθετος βοηθητικός εξοπλισμός συστήματος κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου περιλαμβάνει τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε συνεχές ρεύμα. Επομένως για να αξιοποιηθεί από το δίκτυο είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος. Χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης DC/DC για να αυξήσει και να σταθεροποιήσει την τάση και στη συνέχεια ένας αντιστροφέας DC/AC (inverter) για να τη μετατρέψει σε εναλλασσόμενη με την επιθυμητή συχνότητα. Στην περίπτωση που το καύσιμο δεν είναι καθαρό υδρογόνο (όπως φυσικό αέριο ή μεθανόλη) είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί επεξεργασία του καυσίμου ώστε το τελικό αέριο που θα εισαχθεί στην κυψέλη να έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μονάδα επεξεργασίας καυσίμου (αναμορφωτής - reformer).

Μέσω της διαδικασίας της αναμόρφωσης (reforming) επιτυγχάνεται η παραγωγή υδρογόνου από τα υλικά αυτά και κατά αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η χρήση του σε εφαρμογές όπως η κίνηση ενός οχήματος χωρίς να είναι απαραίτητη αποθήκευση του αυτού καθ' αυτού. Οι αναμορφωτές φαίνεται να είναι αναγκαίοι αφού προς το παρόν δεν υπάρχει οργανωμένη υποδομή για την παράδοση υδρογόνου ενώ δεν υπάρχουν επίσης

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

και αποτελεσματικοί τρόποι για την αποθήκευση του ώστε να επιτευχθεί η άμεση χρήση του.

2.6.4.2 Αλληλεπίδραση υποσυστημάτων

Ο ακριβής έλεγχος της ροής των αντιδρώντων αερίων, της πίεσης, και της θερμοκρασίας της συστοιχίας, καθώς και της υγρασίας της μεμβράνης, κατά τη μεταβατική κατάσταση του συστήματος που προκαλείται από απότομες αλλαγές στο φορτίο είναι σημαντικό θέμα όσον αφορά τη διάρκεια ζωής, την απόδοση και τη σθεναρότητα της κυψέλης καυσίμου. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι πολύ σύνθετο, λόγω των αλληλεπιδράσεων που υπάρχουν μεταξύ των υποσυστημάτων. Κάθε υποσύστημα έχει ένα αντίστοιχο στόχο ελέγχου και αλληλεπιδρά με τα άλλα συστήματα. Αυτά τα υποσυστήματα είναι:

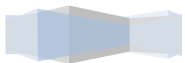
- Υποσύστημα ροής αντιδρώντος καυσίμου
- Υποσύστημα ελέγχου θερμότητας και θερμοκρασίας
- Υποσύστημα διαχείρισης νερού
- Υποσύστημα διαχείρισης ισχύος
- Υποσύστημα διαχείρισης παρεχόμενου καυσίμου

✓ Υποσύστημα ροής αντιδρώντος καυσίμου

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει την ασταμάτητη τροφοδοσία του υδρογόνου και του αέρα. Όσο ο κινητήρας του οχήματος απαιτεί ρεύμα, υδρογόνο και οξυγόνο καταναλώνεται στη συστοιχία. Στη περίπτωση που συμπιεσμένο υδρογόνο είναι διαθέσιμο, η ροή του υδρογόνου στην άνοδο και του αέρα στη κάθοδο ρυθμίζεται μέσω μιας βαλβίδας και μιας συσκευής ροής θετικής πίεσης. Ο στόχος του ελέγχου είναι η παροχή επαρκούς ροής αντιδρώντος καυσίμου (για να διατηρήσει την αναμενόμενη αναλογία αερίων), και να εξασφαλίσει γρήγορη και ασφαλή μεταβατική απόκριση ισχύος και να μειώσει την κατανάλωση των βοηθητικών εξαρτημάτων.

✓ Υποσύστημα ελέγχου θερμότητας και θερμοκρασίας

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει το σύστημα ψύξης της κυψέλης καυσίμου, και το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας του συστήματος παροχής αντιδρώντος καυσίμου. Όσο αντλείται φορτίο από εξωτερικό κινητήρα, παράγεται θερμότητα στη κυψέλη καυσίμου. Για τις κυψέλες καυσίμου που απαιτούνται για οχήματα που μεταφέρουν επιβάτες, η θερμότητα που παράγεται δεν μπορεί να απομακρυνθεί παθητικά από τη μετάδοση



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

θερμότητας του αέρα και της θέρμανσης της εξωτερικής επιφάνειας της κυψέλης. Αυτό απαιτεί ενεργή ψύξη μέσω ενός κατάλληλου συστήματος. Η θερμική διαχείριση μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου, είναι πιο δύσκολη από το σύστημα ψύξης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. Αρχικά χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό σαν ψυκτικό αντί για κάποιο άλλο εξειδικευμένο ψυκτικό ρευστό. Δευτερευόντως η κυψέλη καυσίμου σχεδιάζεται να λειτουργεί σε μια θερμοκρασία περίπου **80°C**. Επομένως, τα καυσαέρια, που εξέρχονται από από τη κυψέλη, που έχουν θερμοκρασία περίπου **80°C** , έχουν λιγότερη ικανότητα να μεταφέρουν θερμότητα, από την αντίστοιχη ικανότητα που έχουν στις μηχανές εσωτερικής καύσης όπου τα καυσαέρια έχουν θερμοκρασίες της τάξης των **500°C**.

✓ Υποσύστημα διαχείρισης νερού

Ο ρόλος του υποσυστήματος διαχείρισης νερού είναι να διατηρήσει την ενυδάτωση της πολυμερικής μεμβράνης και να εξισορροπήσει τη χρήση και τη κατανάλωση νερού στο σύστημα.

Η ποσότητα του αντιδρώντος αερίου και της ροής του νερού που εισάγεται στην άνοδο και τη κάθοδο επηρεάζοντας την υγρασία της μεμβράνης. Κυψέλες καυσίμου με ξηρή μεμβράνη προκαλούν μεγάλες απώλειες , ενώ το ίδιο συμβαίνει και με κυψέλες καυσίμου στις οποίες η μεμβράνη είναι πλήρως πλημμυρισμένη από νερό , κάτι που δε θα πρεπε να συμβαίνει καθώς οδηγεί σε μεγάλες απώλειες. Όσο αντλείται φορτίο που παράγει η κυψέλη καυσίμου , από εξωτερικές συσκευές, μόρια νερού παράγονται στη κάθοδο ενώ ταυτόχρονα μόρια νερού μεταφέρονται από την άνοδο στη κάθοδο από τα πρωτόνια υδρογόνου. Όσο η συγκέντρωση του νερού στη κάθοδο αυξάνεται, προκαλεί τη διάχυση του νερού από τη κάθοδο στην άνοδο. Η διατάραξη της υγρασίας της κυψέλης καυσίμου μπορεί να προκληθεί από διαφορετικούς μηχανισμούς. Από την παραγωγή του νερού όσο αυξάνεται το φορτίο ή από αλλαγές στην απόλυτη και σχετική πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, ή αλλαγές στο ρυθμό ροής αέρα, και αλλαγές στη θερμοκρασία της συστοιχίας τα οποία αλλάζουν τη πίεση κορεσμού του ατμού. Αυτοί οι μηχανισμοί υποδεικνύουν ισχυρές και μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις στη διαδικασία ελέγχου της υγρασίας , καθώς και στην επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της παροχής αντιδρώντος καυσίμου , και στην επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της ισχύος. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αποτελεσματικός έλεγχος της υγρασίας μέσα στη κυψέλη καυσίμου, μπορεί να οδηγήσει σε μια μείωση στη διαφορά δυναμικού της τάξεως **20 – 40%**.



▼ Υποσύστημα διαχείρισης ισχύος

Το υποσύστημα αυτό ελέγχει την ισχύ που αντλείται από τη κυψέλη καυσίμου. Το φορτίο που αντλείται από το σύστημα (ρεύμα), μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εξωτερική διαταραχή. Παρ'όλα αυτά η άντληση του ρεύματος, έχει άμεση επίδραση στα υπόλοιπα υποσυστήματα. Αν η μπαταρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια επιπρόσθετη πηγή παροχής ισχύος στο σύστημα, η διαχείριση ισχύος ανάμεσα στις δύο πηγές παραγωγής, μπορεί να γίνει επιτυγχάνοντας μια ικανοποιητική μεταβατική απόκριση στο όχημα καθώς και μια βέλτιστη διαχείριση της απόδοσης του συστήματος της συστοιχίας.

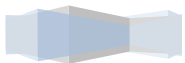
▼ Υποσύστημα διαχείρισης παρεχόμενου καυσίμου

Ανεπαρκής υποδομή για τροφοδοσία καυσίμου υδρογόνου, καθώς και διανομή και αποθήκευσή του καθιστά τη τεχνολογία επεξεργασίας καυσίμου ένα σημαντικό εξάρτημα του συστήματος της κυψέλης καυσίμου. Σαν πηγές μπορούν καυσίμοι να χρησιμοποιηθούν το μεθάνιο, η βενζίνη, ή το φυσικό αέριο. Η διαχείριση αυτών των καυσίμων περιλαμβάνει μετατροπή των καυσίμων που βασίζονται σε ενώσεις με βλάση των άνθρακα σε καθαρό υδρογόνο. Διάφορες επιπλοκές ανάμεσα στα εξαρτήματα των μηχανισμών επεξεργασίας καυσίμου καθώς και σε συνεργαζόμενους μηχανισμούς κίνησης κάνουν αρκετά πολύπλοκο το πρόβλημα ελέγχου. Οι ρυθμιζόμενες μεταβλητές του μηχανισμού επεξεργασίας καυσίμου είναι η θερμοκρασία των αντιδρώντων, και η συγκέντρωση του υδρογόνου και του μονοξειδίου του άνθρακα στο ρεύμα αερίων.

2.6.5 Υβριδικό σύστημα με χρησιμοποίηση κυψέλης καυσίμου

Το βασικό πρόβλημα στις τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής και αιολικής ενέργειας σχετίζεται με τη διαθεσιμότητά τους, αφού οι δύο αυτές μορφές ενέργειας δεν είναι πάντα διαθέσιμες, ενώ επίσης δεν είναι εφικτή η ακριβής πρόβλεψη της διαθεσιμότητάς τους σε ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα. Έχοντας λοιπόν ως σκοπό να υπερκεράσουμε αυτούς τους περιορισμούς, η ιδέα του συνδυασμού ΑΠΕ με τεχνολογίες υδρογόνου πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Lund, 1991).

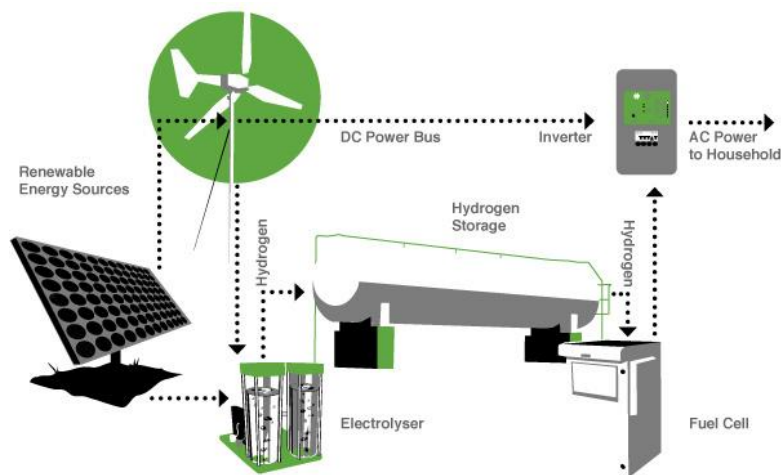
Πολλοί ερευνητές εστίασαν την έρευνά τους σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθώντας κυρίως τρεις κατευθύνσεις: α) Πειραματική μελέτη σε εγκατεστημένα συστήματα, β) Προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και γ) Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Ένας αριθμός μελετών (Gazey et al, 2006,



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Chaparro et al, 2005, Ghosh et al, 2003, Vanhanen et al, 1997) παρουσιάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας υβριδικών μονάδων (ηλιακά/αιολικά συστήματα + τεχνολογίες υδρογόνου), σε πιλοτική κλίμακα. Αντιπροσωπευτική εργασία της δεύτερης κατεύθυνσης αποτελεί η προαναφερθείσα εργασία του Lund, 1991, ενώ στις πιο σύγχρονες προσπάθειες συγκαταλέγεται η εργασία των Santarelli & Macagno, 2004 οι οποίοι μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων – τεχνολογιών υδρογόνου για ένα κτίριο στις Άλπεις. Στόχος του συστήματος ήταν η πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών και μέρος του θερμικού φορτίου. Οι Kelouwani et al, 2005 ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο για ένα αυτόνομο σύστημα που συνδυάζει ηλιακή και αιολική ενέργεια με τεχνολογίες υδρογόνου ενώ οι M. Korraas et al, 2003 πρότειναν μία μέθοδο για τον προγραμματισμό και τη λειτουργία συστημάτων ανεμογεννητριών με διατάξεις αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Επίσης, στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν ενδεικτικές μελέτες που αφορούν στην προσομοίωση αλλά και στη βελτιστοποίηση (σε όρους επιλογής των βέλτιστων επιμέρους διατάξεων για τη σύνθεση του συστήματος) υβριδικών συστημάτων με αποθήκευση υδρογόνου. Αναφερόμενοι στην πρώτη κατηγορία ο M.T. Iqbal, 2003 ανέπτυξε ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννητριών με αποθήκευση υδρογόνου ενώ οι M. Santarelli et al, 2004 μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών – μικρής υδροηλεκτρικής γεννήτριας – αποθήκευσης υδρογόνου.

Η δομή ενός υβριδικού συστήματος κυψέλης καυσίμου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 20. Απεικόνιση Υβριδικού Συστήματος

2.7 Πρακτικές Εφαρμογές Κυψέλης Καυσίμου

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



Ø Κυψέλες καυσίμου και φυσικό αέριο

Οι κυψέλες καυσίμου φυσικού αερίου (Natural Gas Fuel Cell, NGFC) αποτελούν έναν απλό και αξιόπιστο τρόπο για να βελτιωθεί η χρήση του φυσικού αερίου και η απόδοσή της. Η τεχνολογία αυτή μετατρέπει το φυσικό αέριο σε ηλεκτρισμό, ώστε να παρέχει ένα ήσυχο, καθαρό και σε υψηλή απόδοση επί τόπου (on-site) σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα αποτελεί και πηγή θερμής ενέργειας. Τα NGFC παρέχουν αποτελεσματική εξυπηρέτηση για επί τόπου παραγωγή ενέργειας, ικανοποιώντας τις ανάγκες για ηλεκτρισμό, θερμότητα και ζεστό νερό. Για περιοχές με χαμηλό κόστος φυσικού αερίου και υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, η τεχνολογία αυτή μπορεί να αποτελέσει μια οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική ενεργειακή λύση.

Ø Κυψέλες καυσίμου στη βιομηχανία

Στο βιομηχανικό τομέα με τη χρήση κυψελών καυσίμου παρέχεται αξιόπιστο και υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό ρεύμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται SOFC και MCFC που είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την εκπεμπόμενη θερμότητα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Σήμερα λειτουργεί ανά τον κόσμο με επιτυχία μεγάλος αριθμός πιλοτικών εφαρμογών.

Ø Χρήση κυψελών καυσίμου στις μεταφορές.

Τα πάντα στηρίζονται σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση, μέσω της οποίας η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται σε ηλεκτρική και χρησιμοποιείται ως πηγή για την τροφοδοσία ενός ηλεκτροκινητήρα. Το σύστημα χονδρικά απαρτίζεται από 4 μέρη: ένα δοχείο καυσίμου για τη μεθανόλη ή όποιο άλλο καύσιμο χρησιμοποιείται, μια συσκευή για την παραγωγή του H₂ από το καύσιμο, την κυψέλη καυσίμου και τέλος τον ηλεκτροκινητήρα. Οι θετικές επιπτώσεις από τη χρήση κινητήρων υδρογόνου είναι πραγματικά εντυπωσιακές αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αξίζει χαρακτηριστικά να σημειωθεί ότι αν 20% των αυτοκινήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούσαν κινητήρες H₂, η εισαγωγή πετρελαίου υπολογίζεται ότι θα μειωνόταν κατά 1,5 εκατομμύρια βαρέλια ημερησίως.

2.8 Παραδείγματα Εφαρμογών Κυψέλης Καυσίμου

Ø Σταθμοί παραγωγής ισχύος

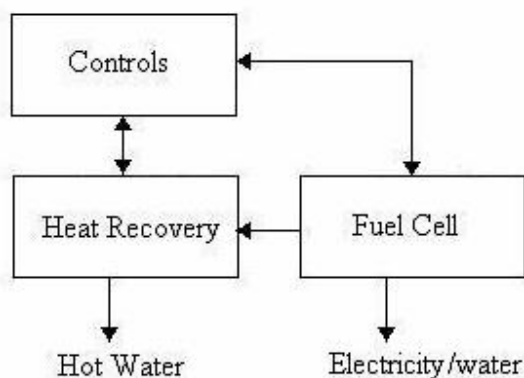
Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται αρκετά εκτεταμένα ανά το κόσμο σε διάφορων ειδών εφαρμογές καθημερινής χρήσεως ή σε πιλοτικά προγράμματα. Ενδεικτικά στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια περιγραφή μερικών τέτοιων εφαρμογών.

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ χρήσιμες σε απομακρυσμένες περιοχές όπως διαστημόπλοια, ή απομακρυσμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, μεγάλα πάρκα, αστικές περιοχές, και σε συγκεκριμένες στρατιωτικές εφαρμογές. Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου υδρογόνου είναι συμπαγές και ελαφριά κατασκευή και δεν έχει πολλά κινούμενα μέρη. Λόγω αυτού του πλεονεκτήματος, και του γεγονότος ότι δεν συμπεριλαμβάνεται διεργασία καύσης στις δραστηριότητες του μπορεί να επιτύχει 100% αξιοπιστία.

Ø Συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου (Cogeneration systems or CHP systems)

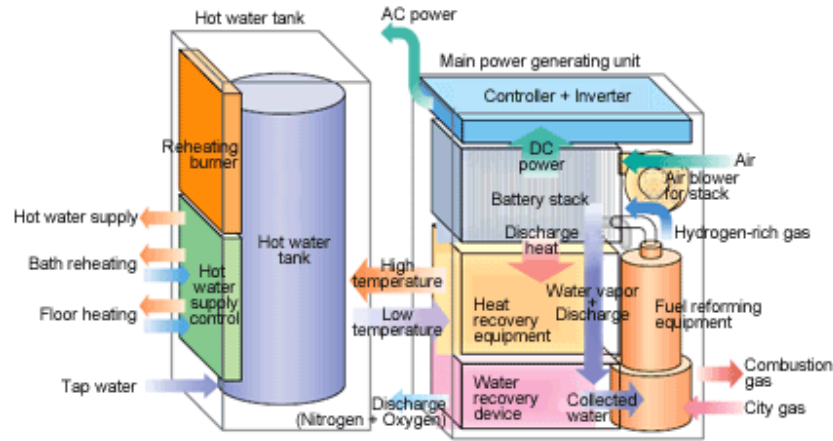
Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μια θερμική μηχανή και ένα σταθμό παραγωγής ισχύος για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και αξιοποιήσιμης θερμότητας. Με τη χρησιμοποίηση της κυψέλης καυσίμου το σύστημα παράγει σταθερή ηλεκτρική ισχύ ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει κατανάλωση ισχύος από μια εξωτερική συσκευή η περίσσεια της ισχύος μεταφέρεται σε μια αποθηκευτική συσκευή.



Σχήμα 1. Σχήμα συνδυασμένου θερμικού κύκλου

Ένα σύστημα χαμηλού συνδυασμένου θερμικού κύκλου παράγει ισχύ σε επίπεδα συνήθως κάτω των 5KW ιδανικό για σπίτια ή μικρές επιχειρήσεις. Γίνεται μια χαμηλότερη απόδοση μετατροπής καυσίμου σε ηλεκτρισμό σε επίπεδα 15-20% επειδή η περισσότερη ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, χρησιμοποιείται σαν θερμότητα. Ένα ποσό θερμότητας χάνεται με τα εξερχόμενα καυσαέρια, επομένως η συνδυασμένη απόδοση παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, είναι μικρότερη από 100%, πρακτικά κοντά στο 80%. Η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί με την μεγιστοποίηση του παραγόμενου ηλεκτρισμού και τη χρησιμοποίηση για την οδήγηση της αντλίας θερμότητας. Οι PAFC κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε CHP συστήματα, και μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 90%. Επίσης κάποιες σποραδικές εφαρμογές για τέτοιου είδους συστήματα έχουν γίνει με κυψέλες καυσίμου MCFC και SOFC. Ένα παράδειγμα χρήσης της κυψέλης καυσίμου σε CHP σύστημα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:

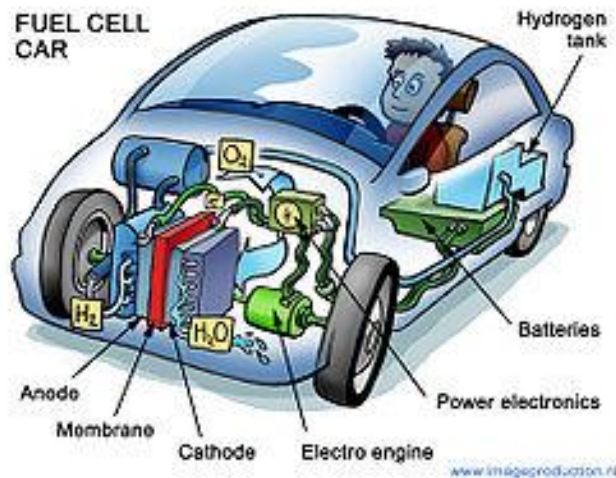
Structural Diagram of 1kW Residential Fuel Cell Cogeneration System



Εικόνα 21. Χρήση κυψέλης καυσίμου σε σύστημα συνδυασμένου θερμικού κύκλου

Ø Συστήματα μεταφοράς – Οχήματα

Σήμερα υπάρχουν αναρίθμητα σχέδια παραγωγής αυτοκινήτων και λεωφορείων που βασίζονται στη τεχνολογία των κελιών καυσίμου τα οποία ερευνώνται και κατασκευάζονται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Μια απεικόνιση της μορφής που θα έχει ένα αυτοκίνητο στο οποίο θα εφαρμόζεται η τεχνολογία κυψέλης καυσίμου, προσπαθεί να αναπαραστήσει η παρακάτω εικόνα:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Εικόνα 22. Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε αυτοκίνητο

Το 2001 , η εταιρία Chrysler Natrium χρησιμοποίησε το πρώτο μηχανισμό επεξεργασίας καυσίμου υδρογόνου. Παράγει υδρογόνο για κυψέλες καυσίμου ,το οποίο παράγει ηλεκτρισμό μέσα στη κυψέλη για μια αρκετά ήρεμη λειτουργία σε αυτονομία περίπου 300 μιλίων. Η εταιρία έχει επίσης εξελίξει οχήματα τα οποία διαχωρίζουν το υδρογόνο από τη βενζίνη , με στόχο να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων, χωρίς να βασίζονται σε μια μη υπάρχουσα προς το παρόν υποδομή υδρογόνου έτσι ώστε να αποφύγουν τις μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου.

Το 2005 η βρετανική εταιρία , British firm Intelligent Energy, τη πρώτη μοτοσυκλέτα υδρογόνου που λέγεται ENV(Emission Neutral Vehicle). Η μοτοσυκλέτα μπορεί να αποθηκεύσει αρκετό καύσιμο για να λειτουργήσει 4 ώρες με αυτονομία 100 μιλίων σε μια αστική περιοχή και μέγιστη ταχύτητα

Το 2004 η Honda ανέπτυξε μια μοτοσυκλέτα υδρογόνου που χρησιμοποιούσε κελί καυσίμου κατασκευασμένο από τη Honda, ενώ το 2008 το πρώτο όχημα υδρογόνου με την ονομασία FCX Clarity. Εν τω μεταξύ υπάρχουν αρκετά παραδείγματα από μοτοσυκλέτες και ποδήλατα με μηχανή κελιού καυσίμου υδρογόνου.

Κάποιες εταιρίες προσανατολίζονται στην έρευνα για τη παραγωγή αστικών λεωφορείων με κελί καυσίμου υδρογόνου. Η εταιρία Daimler AG, δραστηριοποιούμενη σε αυτό το χώρο, με 36 πειραματικές μονάδες , τροφοδοτήθηκε με κυψέλες καυσίμου, από την εταιρία Ballard Power Systems, και πραγματοποίησε επιτυχείς δοκιμές για 3 χρόνια σε 11 πόλεις το 2007.



Εικόνα 23. Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε λεωφορείο

Ø Σταθμοί Ανεφοδιασμού Υδρογόνου

Ο πρώτος σταθμός ανεφοδιασμού με κάυσιμο υδρογόνου, δημιουργήθηκε στο Reykjavík της Ισλανδίας, τον Απρίλιο του 2003. Ο σταθμός εξυπηρετεί τρία λεωφορεία κατασκευασμένα από την εταιρία, DaimlerChrysler τα οποία συνεισφέρουν στη δημόσια μεταφορά της δημόσιας συγκοινωνίας στο Reykjavík. Ο σταθμός παράγει από μόνος του τα ποσά υδρογόνου που χρειάζεται , με τη βοήθεια μιας μονάδας ηλεκτρολύτη, (που τη παρήγαγε μια εταιρία με το όνομα Norsk Hydro) και δεν έχει ανάγκη από εξωτερική τροφοδοσία. Τα μόνα στοιχεία που τροφοδοτούνται είναι ηλεκτρισμός και νερό. Η εταιρία Royal Dutch Shell είναι συνεργάτης σε αυτό το πρόγραμμα. Ο σταθμός δεν έχει στέγη, για να αφήσει οποιαδήποτε διαφυγούσα ποσότητα υδρογόνου λόγω διαρροής να μεταβεί στην ατμόσφαιρα.

Η λεωφόρος υδρογόνου στη Καλιφόρνια, είναι μια πρωτοβουλία , του κυβερνήτη της Καλιφόρνιας, να εφαρμόσει μια σειρά σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου σε όλη τη πολιτεία. Οι σταθμοί χρησιμοποιούνται για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο, οχημάτων που στηρίζονται στη τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Τον Ιούλιο του 2007 , η Καλιφόρνια, είχε 179 οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, και 25 σταθμούς ανεφοδιασμού σε λειτουργία, ενώ ήδη 10 σταθμοί είναι υπό σχεδιασμό.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου είναι να περιγραφούν οι χημικές και οι θερμοδυναμικές σχέσεις που αφορούν την λειτουργία των κελιών καυσίμου και το πως οι λειτουργικές συνθήκες επηρεάζουν την απόδοσή τους. Το πρώτο βήμα για την κατανόηση της λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου είναι ο καθορισμός της θεωρητικής λειτουργίας. Από τη στιγμή που έχει καθοριστεί η θεωρητική λειτουργία μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες που όταν αφαιρεθούν από την θεωρητική απόδοση μας δίνουν την πραγματική λειτουργία του συστήματος.

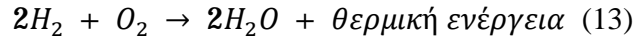
Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία της κυψέλης και ο τρόπος υπολογισμού της τάσης. Η τάση υπολογίζεται συναρτήσει του δυναμικού των μερικών πιέσεων των αντιδρώντων και της θερμοκρασίας της κυψέλης. Επιπλέον περιγράφεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος, που προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της χημικής ενέργειας των αντιδρώντων και της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος αναλύονται οι κατηγορίες απωλειών που συμβάλλουν στη πτώση τάσης της κυψέλης.

3.2 Αναλυτική Λειτουργία της Κυψέλης Καυσίμου

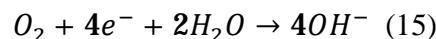
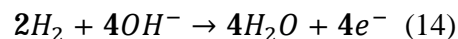
Στην ενότητα αυτή γίνεται μια αναλυτική μελέτη της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, σαν ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας, ενώ παράλληλα γίνεται μια αξιολόγηση της απόδοσης του και μια περιγραφή των απωλειών που οδηγούν στη μείωση της παραγόμενης τάσης στην έξοδο. Βγαίνει το συμπέρασμα, ότι παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου διαφέρουν από τις θερμικές μηχανές μια και δεν υπόκεινται στους περιορισμούς που δημιουργούνται από τον κύκλο Carnot, και έχουν αρκετά μεγάλο βαθμό απόδοσης, εντούτοις όμως υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μειώνουν σημαντικά αυτό το βαθμό απόδοσης και μια αναλυτική έκθεσή τους επιχειρείται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

3.2.1 Παραγόμενη ενέργεια και τάση κυψέλης καυσίμου

Σε μια κυψέλη τύπου PEM, η συνολική χημική αντίδραση είναι:



ενώ η αντίδρασεις καθόδου και ανόδου είναι:



Η κυψέλη μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε ένα κελί καυσίμου υπάρχει ασάφεια στον καθορισμό της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας αντίστοιχα. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η εισερχόμενη ενέργεια είναι η χημική ενέργεια του υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα και η εξερχόμενη είναι η ηλεκτρική, η θερμική και η χημική ενέργεια του παραγόμενου νερού. Οι διάφορες χημικές ενέργειες δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμες και έτσι η μοναδική προσέγγιση που πραγματοποιείται είναι από τη σκοπιά της Θερμοδυναμικής, και τη χρησιμοποίηση της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ενεργειακά τις χημικές διεργασίες.

Επομένως στη περίπτωση της κυψέλης καυσίμου που εξετάζουμε, η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο, προσδιορίζεται από την μεταβολή της ελεύθερης ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο, που ισούται με την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού των προϊόντων μείον την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού των αντιδρώντων:

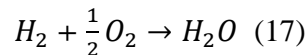


Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$\Delta G_f = G_f \text{ of products} - G_f \text{ of reactants} \quad (16)$$

Στη περίπτωση αυτή είναι πιο βολικό να υπολογίζουμε αυτές τις ενεργειακές ποσότητες ανά mol. Συγκεκριμένα, ο όρος $(\bar{g}_f)_{H_2O}$, ορίζεται ως μοριακή ελεύθερη ενέργεια του Gibbs του σχηματισμού του νερού.

Η χημική αντίδραση που εξετάζουμε στη κυψέλη καυσίμου, μπορεί ισοδύναμα να γραφεί:



Επομένως το προϊόν είναι 1 mol H_2O και τα αντιδρώντα που χρειάζονται είναι 1 mol H_2 και $\frac{1}{2}$ mol O_2 . Επομένως η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιώντας το παραπάνω τύπο με τις μοριακές ποσότητες της ενέργειας του Gibbs, υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{g}_f)_{O_2} \quad (18)$$

Παρόλο που υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιώντας την ελεύθερη ενέργεια του Gibbs, φαίνεται απλός, εντούτοις η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, μεταβάλλεται επηρεαζόμενη από τη θερμοκρασία και τη κατάσταση του στοιχείου (υγρή ή αέρια).

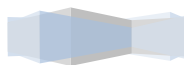
Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι αρνητικές που σημαίνει απελευθερώνεται ενέργεια κατά τη διεργασία (το πρόσημο έχει φυσική σημασία).

Αν θεωρήσουμε αντιστρεπτή τη διαδικασία (μηδενικές απώλειες) τότε όλη η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, μετατρέπεται σε ηλεκτρική (στη πραγματικότητα, ένα ποσό μετατρέπεται σε θερμότητα).

Όσον αφορά το φορτίο, στη περίπτωση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης, 2 ηλεκτρόνια μεταφέρονται δια μέσου του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος για κάθε παραγόμενο μόριο νερού και κάθε μόριο υδρογόνου που χρησιμοποιείται. Άρα με βάση τη χημική ισορροπία, για 1 mol H_2 που χρησιμοποιείται, $2 \cdot N$ ηλεκτρόνια, περνούν δια μέσου του ηλεκτρικού κυκλώματος, όπου N είναι ο αριθμός Avogadro. Αν $-e$ είναι το φορτίο του ενός ηλεκτρονίου τότε το φορτίο που μεταφέρεται δια μέσου του κυκλώματος είναι:

$$-2Ne = -2F \text{ coulombs} \quad (19)$$

Όπου F είναι η σταθερά του Faraday, ή το ποσό του φορτίου που αντιστοιχεί σε ένα Mol ηλεκτρονίων.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Για τον υπολογισμό της τάσης της κυψέλης καυσίμου, λειτουργούμε με βάση το παρακάτω σκεπτικό:

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού έργου (ή αλλιώς της ηλεκτρικής ενέργειας) που απαιτείται για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων από το ηλεκτρικό κύκλωμα, δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Ηλεκτρικό Έργο} = \text{φορτίο} * \text{διαφορά δυναμικού κυψέλης (τάση)} = -2FE \quad (20)$$

Όπου E... είναι η τάση της κυψέλης καυσίμου.

Εφόσον θεωρούμε τη διεργασία αντιστρεπτή χωρίς απώλειες, το απαιτούμενο ηλεκτρικό έργο πρέπει να είναι ίσο με την ελεύθερη ενέργεια του Gibbs.

Άρα:

$$\Delta\bar{g}_f = -2FE \rightarrow E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (21)$$

Αυτή η σχέση είναι πολύ σημαντική και δίνει την ηλεκτρεγερτική δύναμη (electromotive force EMF) του ανοιχτού κυκλώματος της αντιστρεπτής κυψέλης καυσίμου. Επίσης η σχέση αυτή υποθέτει μη αντιστρεψιμότητα, και τροφοδοσία καθαρού υδρογόνου και οξυγόνου σε συνθήκες σταθερής πίεσης 0.1 MPa. Στη πράξη η τάση που υπολογίζεται είναι μικρότερη από τον παραπάνω τύπο, λόγω απωλειών γιατί η μη αντιστρεψιμότητα είναι πρακτικά ανέφικτη.

Η παραπάνω εξίσωση, υπολογίζει την τάση ενός ανοιχτού κυκλώματος για τη κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Στη περίπτωση χρήσης καυσίμου υδρογόνου παράγονται 2 ηλεκτρόνια στην άνοδο που μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Αν γενικεύσουμε την παραπάνω εξίσωση για περιπτώσεις χρησιμοποίησης διαφορετικού καυσίμου, με βάση το οποίο έχουμε διαφορετική παραγωγή ηλεκτρονίων, τότε μπορούμε κατά αντίστοιχο τρόπο να υπολογίσουμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Ο τύπος είναι:

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{zF} \quad (22)$$

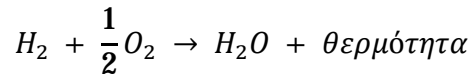
Όπου z... ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται κατά αντιστοιχία με το δεδομένο καύσιμο.

3.2.2 Υπολογισμός τάσης ανοιχτού κυκλώματος



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Στη PEM , κυψέλη καυσίμου το υδρογόνο από την άνοδο και το οξυγόνο από την κάθοδο , αντιδρούν για τη παραγωγή νερού και θερμότητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση:



Όταν πραγματοποιείται μια αντίδραση, μειώνεται η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της μεταβολής της ενθαλπίας και της εντροπίας του συστήματος.

$$\text{Ισχύει: } \Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad ()$$

Όπου,

ΔH ... η μεταβολή της ενθαλπίας (J)

ΔS ...η μεταβολή της εντροπίας (J/K)

T... η θερμότητα [K]

Η συνολική θερμική ενέργεια της αντίδρασης είναι η ενθαλπία (ΔH). Η ελεύθερη ενέργεια προκύπτει αν από αυτή την ενθαλπία αφαιρέσουμε την ενέργεια ($T*\Delta S$) που χάνεται από τις μη αντιστρεπτές μεταβολές της εντροπίας του συστήματος. Η ποσότητα $T*\Delta S$ μας δίνει και τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία της κυψέλης. Όταν το ΔS είναι αρνητικό, αυτό σημαίνει ότι παράγεται θερμότητα. Τέτοιου είδους αντίδραση είναι η οξειδωση του υδρογόνου. Όταν το ΔS , είναι θετικό, όπως συμβαίνει κατά την άμεση οξειδωση του άνθρακα, αυτό σημαίνει ότι αν η θερμότητα που παράγεται είναι μικρότερη από την θερμότητα που απορροφάται τότε συνολικά απορροφάται θερμότητα από το περιβάλλον.

Η διαδικασία θεωρείται ισόθερμη όταν τα προϊόντα της αντίδρασης έχουν την ίδια θερμοκρασία με τα αντιδρώντα. Έτσι είναι δυνατή η μετατροπή μέρους της χημικής ενέργειας σε ωφέλιμο ηλεκτρικό έργο αφού δεν χρησιμοποιείται μέρος της χημικής ενέργειας αυτής για την αύξηση της θερμοκρασίας των προϊόντων όπως συμβαίνει στις θερμικές μηχανές.

Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ($1atm, 25^\circ C$), η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας , κατά τη διάρκεια της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο είναι:

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S = -285.8 J - (298K) * \left(-163.2 \frac{J}{K}\right) = -237.2$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας , προκαλεί μείωση της ελεύθερης ενέργειας. Αντίθετα η ενθαλπία και η εντροπία του συστήματος μεταβάλλονται ελάχιστα και για τους υπολογισμούς μπορούν να θεωρηθούν σταθερές.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Το μέγιστο ηλεκτρικό έργο που μπορεί να παράγει μια κυψέλη εξαρτάται από την ελεύθερη ενέργεια της συνολικής αντίδρασης που συμβαίνει στο εσωτερικό της και δίνεται από το τύπο:

$$W = \Delta G - -n * F * E$$

Όπου,

n...ο αριθμός των ηλεκτρονίων που σχετίζονται με την στοιχειομετρική αντίδραση
F... η σταθερά Faraday
E... το θεωρητικό δυναμικό της κυψέλης (ιδανικό) υπό κανονικές συνθήκες.

Από τη παραπάνω σχέση αν γνωρίζουμε το ΔG , που είναι η μεταβολή της ενέργειας του Gibbs για πίεση 1atm, και θερμοκρασία T=298K., μπορούμε να υπολογίσουμε το E^o , που είναι το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης για πίεση 1atm, και θερμοκρασία T=298K.

Από τη σχέση $\Delta G = \Delta H - T * \Delta S$ μπορούμε να υπολογίσουμε, το ΔG υπολογίζοντας τα ΔH και ΔS από θερμοδυναμικούς πίνακες. Επομένως η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (ιδανικό δυναμικό) είναι:

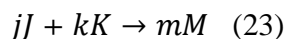
$$E^o = \frac{-\Delta G^o}{2 * F} = \frac{-237.2J}{-2 * 96.487 J/V} = 1.229 V.$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές από πίνακες προκύπτει $E^o = 1.229 V$, για προϊόν νερό σε υγρή μορφή και $E^o = 1.18 V$ για προϊόν νερό σε αέρια μορφή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ενέργεια που απαιτείται για να μετατραπεί το νερό από υγρή σε αέρια μορφή.

3.2.3 Εξίσωση του Nerst

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs μιας χημικής αντίδρασης, μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Εξίσου σημαντική όμως είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs, λόγω της πίεσης και της συγκέντρωσης των αντιδρώντων.

Θεωρούμε τη γενική μορφή μιας χημική αντίδρασης:



Όπου j moles, του αντιδρώντος στοιχείου J, αντιδρά με k moles από το στοιχείο K για να παράγει m moles, του στοιχείου M. Κάθε ένα από τα αντιδρώντα και τα προϊόντα συνδέεται με ένα συντελεστή δραστηριότητας, που περιγράφει τη λειτουργία του στη χημική αντίδραση, και η αναλυτική του εξήγηση ξεπερνάει τους στόχους αυτής της εργασίας.

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Επομένως, a_J και a_K , είναι οι συντελεστές δραστηριότητας των αντιδρώντων και a_M του προϊόντος αντίστοιχα. Για τη περίπτωση των αερίων που λειτουργούν σαν ιδανικά αέρια, ισχύει η σχέση για το συντελεστή δραστηριότητας:

$$\text{δραστηριότητα } \alpha = \frac{P}{P_0} \quad (24)$$

Όπου P , είναι η πίεση, ή η μερική πίεση, του αερίου, και P_0 η σταθερή πίεση αναφοράς: $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$.

Η παραπάνω σχέση είναι αρκετά χρήσιμη μια και τα περισσότερα είδη καυσίμων που χρησιμοποιούνται, στη κυψέλη καυσίμου είναι αέρια. Από τη σχέση προκύπτει ότι ο συντελεστής δραστηριότητας είναι ανάλογος με τη μερική πίεση του αερίου, ενώ στη περίπτωση των χημικών στοιχείων που είναι διαλυμένα σε κάποιο διαλύτη, η σχέση συνδέεται με μοριακότητα κατ'όγκο (Molarity) του στοιχείου.

Όσον αφορά το νερό που παράγεται σαν προϊόν στη κάθοδο, επειδή μπορεί να βρίσκεται σε υγρή είτε σε αέρια κατάσταση, είναι δύσκολη η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης. Στη περίπτωση που είναι ατμός, ο τύπος έχει τη μορφή:

$$\alpha_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \quad (25)$$

Όπου $P_{H_2O}^0$, είναι η πίεση εξάτμισης του νερού στη θερμοκρασία αναφοράς, η οποία προσδιορίζεται από πίνακες θερμοδυναμικής.

Στη περίπτωση που το νερό είναι σε υγρή κατάσταση, μπορούμε κατά προσέγγιση να υποθέσουμε, ότι $\alpha_{H_2O} = 1$.

Οι συντελεστές δραστηριότητας των αντιδρώντων και των προϊόντων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας σχηματισμού του Gibbs, κατά τη χημική αντίδραση. Με τη βοήθεια θερμοδυναμικών νόμων αποδεικνύεται ότι σε μια χημική αντίδραση όπως αυτή που δίνεται από τη σχέση (---), ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT * \ln \left(\frac{\alpha_J^j * \alpha_K^k}{\alpha_M^m} \right) \quad (26)$$

Όπου $\Delta \bar{g}_f^0$... είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, σε σταθερή και γνωστή πίεση.

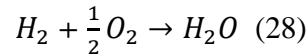
Στη περίπτωση της αντίδρασης οξείδωσης του υδρογόνου που γίνεται σε μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ο παραπάνω τύπος γίνεται:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^o - RT * \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} * \alpha_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (27)$$

Ενώ η αντίδραση είναι:



Η ποσότητα $\Delta \bar{g}_f^o$, δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

Μορφή νερού (προϊόν)	Θερμοκρασία °C	Δg_f^o
Υγρή	25	-237.2
Υγρή	80	-228.2
Αέρια	100	-225.2
Αέρια	200	-220.4
Αέρια	400	-210.3
Αέρια	600	-199.6
Αέρια	800	-188.6
Αέρια	1000	-177.4

Πίνακας 6. Τιμές $\Delta \bar{g}_f^o$ για αντιστρεπτές κυψέλες καυσίμου υδρογόνου με προϊόν σχηματισμού νερό

Ο τύπος αυτός υπολογίζει τη μεταβολή της ενέργειας σχηματισμού του Gibbs, κατά τη πραγματοποίηση μιας χημικής αντίδρασης. Παρατηρούμε ότι αν , η δραστηριότητα του αντιδρώντος αερίου αυξηθεί , η μεταβολή της ενέργειας σχηματισμού του Gibbs $\Delta \bar{g}_f$ γίνεται περισσότερο αρνητική, δηλαδή αυξάνεται , πράγμα που σημαίνει ότι απελευθερώνεται περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια προς εκμετάλλευση.

Για να ελεγχθεί κατά πόσο ο παραπάνω τύπος επηρεάζει τη ποσότητα της παραγόμενης τάσης , τον αντικαθιστούμε στην εξίσωση (22) και προκύπτει:

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f^o}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} * \alpha_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{\alpha_{H_2O}} \right) = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} * \alpha_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (29)$$

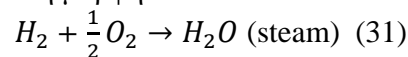
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Όπου E^o , είναι η λεκτρεγερτική δύναμη σε σταθερή πίεση και υπολογίζεται από το πίνακα (---). Η παραπάνω αντίδραση δείχνει ακριβώς ότι αυξάνοντας τη δραστηριότητα των αντιδρώντων τότε αυξάνεται η τάση εξόδου του κυκλώματος. Η εξίσωση αυτή λέγεται **εξίσωση του Nerst**, και η τάση που υπολογίζεται, λέγεται τάση Nerst, και είναι η αντιστρεπτή τάση της κυψέλης καυσίμου που παράγεται στην έξοδο, για δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης.

Στη περίπτωση που έχουμε παραγωγή νερού σε αέρια κατάσταση (ατμός) σε κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (όπως π.χ. η SOFC σε θερμοκρασίες **1000°C**), τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο ατμός συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο και επομένως από την παραπάνω υπόθεση της σχέσης (24) μπορούμε να γράψουμε:

$$\alpha_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P^o}, \alpha_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P^o}, \alpha_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^o} \quad (30)$$

Ενώ η χημική αντίδραση έχει τη μορφή:



Επομένως αντικαθιστώντας τις σχέσεις (30) στην εξίσωση (29) προκύπτει:

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\frac{P_{H_2}}{P^o} * \left(\frac{P_{O_2}}{P^o}\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{P_{H_2O}}{P^o}}} \right) \quad (32)$$

Αν όλες οι πιέσεις δίνονται σε bar, τότε $P^o = 1$ και η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} * (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (33)$$

Οι πιέσεις στην εξίσωση αυτή (33) είναι μερικές πιέσεις, αφού τα αέρια είναι μέρος ενός μίγματος. Για παράδειγμα, το αέριο υδρογόνο μπορεί να είναι μέρος ενός μίγματος H_2, CO_2 , που μπορεί να προέκυψε από έναν αναμορφωτή, ενώ το μίγμα μπορεί να περιέχει και μόρια νερού που αποτελεί το προϊόν. Το οξυγόνο είναι πάντα μέρος μίγματος αέρα. Επομένως κατά τη μελέτη του συστήματος, σαν ολική πίεση μπορούμε να θεωρούμε τη πίεση του μίγματος, είτε της ανόδου είτε της καθόδου, ενώ μια απλοποίηση θα ήταν να θεωρήσουμε τη πίεση ανόδου ίδια με τη πίεση καθόδου. Επομένως αν η πίεση του συστήματος είναι P, τότε μπορούμε να γράψουμε τις μερικές πιέσεις των προϊόντων και των αντιδρώντων:

$$P_{H_2} = \alpha P \quad (34)$$

$$P_{O_2} = \beta P \quad (35)$$

$$P_{H_2O} = \delta P \quad (36)$$

Όπου οι σταθερές α, β, δ εξαρτώνται από το Μοριακό Βάρος, και τη συγκέντρωση του αερίου. Η εξίσωση λοιπόν (33) γίνεται:

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha * \beta^{\frac{1}{2}}}{\delta} * P^{\frac{1}{2}} \right) = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha * \beta^{\frac{1}{2}}}{\delta} \right) + \frac{RT}{4F} * \ln(P) \quad (37)$$

Οι εξισώσεις (33), (37) είναι διαφορετικές μορφές της εξίσωσης του Nerst. Παρέχουν μια θεωρητική βάση, και μια ποσοτική ένδειξη, για ένα μεγάλο αριθμό από μεταβλητές που έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό της κυψέλης καυσίμου καθώς και τη λειτουργία της.

3.2.4 Πυκνότητα Ρεύματος – Πυκνότητα Ισχύος

Η διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ενός κελιού καυσίμου προκαλεί τη δημιουργία κάποιου ρεύματος I . Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες από τους βασικότερους των οποίων είναι η αποτελεσματικότητα του καταλύτη. Πολλές φορές επιδιώκεται η σύγκριση διαφορετικών κελιών καυσίμου τα οποία αποτελούνται από ηλεκτρόδια με διαφορετική ενεργή επιφάνεια. Για αυτό το λόγο ορίζεται η πυκνότητα ρεύματος i (στη βιβλιογραφία συχνά συναντάται και με το σύμβολο J) ως το πηλίκο του ρεύματος I προς την ενεργή επιφάνεια A_{eff} του ηλεκτροδίου από όπου διέρχεται αυτό (καθαρά δηλαδή για λόγους αδιαστατοποίησης του μεγέθους του ηλεκτρικού ρεύματος):

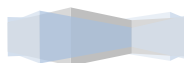
$$i = \frac{I}{A}$$

Ακόμη, ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος που συναντάται συχνά είναι αυτό της πυκνότητας ισχύος (power density, PD) που μετράται σε W/m^2 και που όπως και η πυκνότητα ρεύματος χρησιμοποιείται για τη σύγκριση κελιών καυσίμου διαφορετικών διαστάσεων (με την προϋπόθεση πάντα ότι μεταβάλλεται και η ενεργή επιφάνεια των ηλεκτροδίων).

Η πυκνότητα ισχύος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$PD = V * i$$

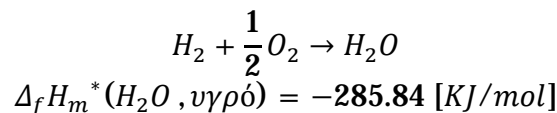
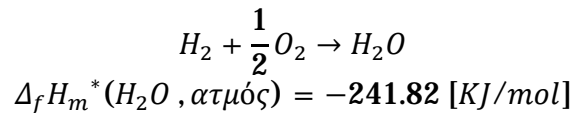
3.3 Υπολογισμός απόδοσης και περιορισμοί μεγίστου



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Η απόδοση των συστημάτων κελιών καυσίμου αποτελεί ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτών συγκρινόμενα πάντα με τα κλασικά μηχανικά ή θερμικά συστήματα. Θερμοκρασιακά ένα κελί καυσίμου συγκρινόμενο με μία ισοδύναμη θερμική μηχανή δεν περιορίζεται από ανώτατα όρια. Αυτό καθιστά τα κελιά καυσίμου πιο ευέλικτα στο χειρισμό τους ιδιαίτερα στην προσπάθεια επίτευξης υψηλών αποδόσεων.

Η σύγκριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά mol καυσίμου με τη μεταβολή της πρότυπης ενθαλπίας σχηματισμού $\Delta_f H_m^*$ η οποία ουσιαστικά ισούται με τη θερμότητα που θα απελευθερωνόταν αν καιγόταν πλήρως το H_2 . Αυτό το μέγεθος είναι γνωστό και ως θερμογόνος δύναμη (Heating Value, HV). Ανάλογα τώρα αν το προϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο (νερό) θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και για το $\Delta_f H_m^*$.



Το πρώτο ονομάζεται Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV), ενώ το δεύτερο Υψηλότερη Θερμογόνος Δύναμη.

Έτσι για τον υπολογισμό της απόδοσης θα πρέπει να αναφέρουμε αν η βάση είναι το HHV ή το LHV. Όταν δεν αναφέρεται είναι σχεδόν βέβαιο ότι έχει υπολογιστεί βάσει της LHV καθότι οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις. Έτσι λοιπόν η μέγιστη δυνατή απόδοση ισούται με το πηλίκο της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας σχηματισμού κατά Gibbs προς τη μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού:

$$n_{per,max} = \frac{\Delta_f G_m^*}{\Delta_f H_m^*} * 100\%$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα μέγιστα όρια απόδοσης κελιών καυσίμου με βάση το HHV (αν φυσικά ο υπολογισμός γινόταν βάσει του LHV, τότε οι μέγιστες αποδόσεις για κάθε θερμοκρασία θα ήταν υψηλότερες).

Μορφή νερού	Θερμοκρασία °C	$\Delta_f G$ ο	Μέγιστη Απόδοση (%)
Υγρή	25	-237.2	83
Υγρή	80	-228.2	80

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Αέρια	100	-225.2	79
Αέρια	200	-220.4	77
Αέρια	400	-210.3	74
Αέρια	600	-199.6	70
Αέρια	800	-188.6	66
Αέρια	1000	-177.4	62

Πίνακας 7. Μέγιστη δυνατή απόδοση κελιών καυσίμου με βάση το HHV.

Η συσχέτιση της απόδοσης ενός κελιού καυσίμου με το δυναμικό που προκύπτει υπό σταθερό φορτίο γίνεται ως εξής: Λαμβάνοντας πάλι ως βάση το HHV ή το LHV, μέσω και της παραπάνω εξίσωσης υπολογίζεται το μέγιστο δυναμικό (πρότυπο δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος) για κάθε θερμοκρασία. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι με βάση το HHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.48 V ενώ με βάση το LHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.25 V. Θα θεωρείται πάντα ως βάση το LHV.

Η έννοια «κατανάλωση του H_2 »: Ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του υδρογόνου που αντέδρασε προς την παρεχόμενη μάζα στο σύστημα. Αυτός ο λόγος είναι ισοδύναμος με το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί προς αυτό που θα διερχόταν από αυτό αν αντιδρούσε όλη η παρεχόμενη μάζα. Έτσι:

$$U_f = \frac{m_{H_2,rct}}{m_{H_2,in}}$$

Τελικά η απόδοση του κελιού καυσίμου με βάση το LHV δίνεται από τον τύπο:

$$n_{per,fc} = U_f \frac{v_{fc}}{1.25} * 100\%$$

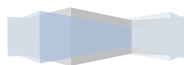
Όπου ,

U_f ... είναι το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί σε λειτουργία. Αντίστοιχη σχέση με τη προηγούμενη για το U_f , ισχύει και για τον ορισμό της κατανάλωσης του O_2 :

$$U_{ox} = \frac{m_{O_2,rct}}{m_{O_2,in}}$$

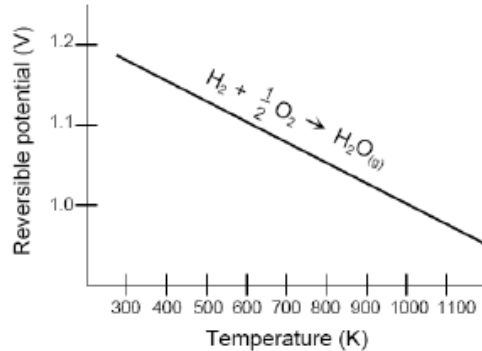
3.4 Θεωρητική λειτουργία και πραγματικές συνθήκες

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως περιγράφηκε από τους παραπάνω τύπους . Η ιδανική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιεί υδρογόνο, σε



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι, 1.229 V, εαν το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή μορφή , ή 1.18 V, αν το παραγόμενο νερό είναι αέριο.



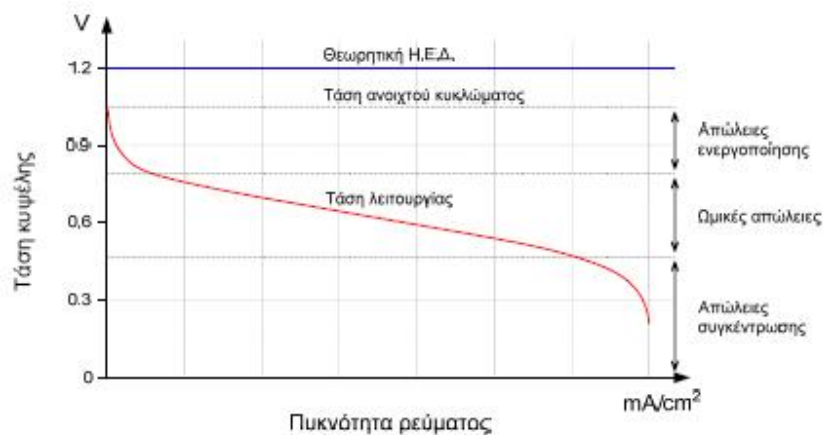
Διάγραμμα 1. Μεταβολή του δυναμικού σε σχέση με τη θερμοκρασία

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος επηρεάζεται επίσης και από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων. Το μέγιστο δυναμικό επιτυγχάνεται όταν τα αντιδρώντα στην άνοδο και στη κάθοδο είναι χωρίς προσμίξεις. Όταν το σύστημα τροφοδοτείται με αέρα ή όταν στην άνοδο δεν έχουμε καθαρό υδρογόνο , το δυναμικό του κελιού μειώνεται.

Όταν η κυψέλη λειτουργεί υπό φορτίο , η τάση ανοιχτού κυκλώματος (όπως υπολογίστηκε από το τύπο του Nerst) μειώνεται. Η συνολική πτώση οφείλεται στις απώλειες ενεργοποίησης, συγκέντρωσης, και ωμικές απώλειες που θα περιγραφούν αναλυτικά στην επόμενη ενότητα, και η τάση εξόδου που παραλαμβάνουμε αν αφαιρεθούν οι απώλειες είναι :

Μετά από τον υπολογισμό του παραπάνου τύπου κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου σε συγκεκριμένες συνθηκες λειτουργίας. Η συμπεριφορά της κυψέλης είναι μη γραμμική, και η τάση μειώνεται ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος.





Διάγραμμα 2. Μεταβολή της τάσης εξόδου συναρτήσει του ρεύματος εξόδου

Από τη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι για μηδενικό ρεύμα, η τάση είναι η ιδανική τάση του ανοιχτού κυκλώματος. Με την αύξηση του ρεύματος, επικρατούν διάφορα φυσικο-χημικά φαινόμενα απωλειών που οδηγούν στη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος.

Όπως φαίνεται από τη καμπύλη κάθε κυψέλη καυσίμου έχει ένα κατώτατο όριο τάσης περίπου 0.5 V., κάτω από την οποία η κυψέλη υποφέρει από έλλειψη καυσίμου και καταστρέφεται. Στη μόνιμη λειτουργία η PEM κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.

3.5 Περιγραφή απωλειών και πραγματικής τάσης εξόδου

Κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου το δυναμικό που εν τέλει αποδίδει ένα κελί που βρίσκεται υπό σταθερό φορτίο, είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που προκύπτει από το νόμο του Nernst. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσα στο κελί λαμβάνουν χώρα κάποιες μη αντιστρεπτές διεργασίες, οι οποίες και αποτελούν τις συνολικές απώλειες δυναμικού σε ένα κελί σε λειτουργία. Αυτές οι απώλειες είναι γνωστές υπό το γενικό όρο «ηλεκτροδιακή πόλωση» ή «ηλεκτροδιακή υπέρταση». Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά αυτές οι απώλειες, των οποίων οι πηγές είναι κατά κύριο λόγο τριών ειδών:

- Απώλειες ενεργοποίησης
- Ωμικές απώλειες
- Απώλειες συγκέντρωσης

Απώλειες ενεργοποίησης



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Περιλαμβάνει την υπέρταση μεταφοράς φορτίου και την υπέρταση φάσης με πιο σημαντική αυτή της μεταφοράς φορτίου. Αυτό το είδος απώλειας είναι κυρίαρχο σε χαμηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος και χαρακτηρίζεται από μεταβολές στην ενέργεια ενεργοποίησης.

Ωμικές απώλειες

Το δεύτερο είδος απωλειών είναι αυτό που οφείλεται στην ωμική αντίσταση του κελιού η οποία αποτελείται από τη συνολική αντίσταση των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη ή ακόμα και των διπολικών πλακών και συνδέσεων σε μία συστοιχία κελιών καυσίμου, και η οποία κατά βάση παραμένει σταθερή για όλες τις τιμές της πυκνότητας ρεύματος.

Απώλειες συγκέντρωσης

Το τρίτο είδος απωλειών τέλος, παρουσιάζεται σε όλο το εύρος των τιμών της πυκνότητας ρεύματος αλλά γίνεται σημαντική στις οριακές, υψηλές τιμές. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τα τρία είδη απωλειών συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος καθώς επίσης και το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος καθώς και την πυκνότητα ρεύματος περιορισμού για ένα τυχαίο κελί καυσίμου:

Στη συνέχεια αναλύεται το κάθε είδος απώλειας. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και να τέταρτο είδος το οποίο είναι σημαντικό μόνο σε πολύ μικρές τιμές πυκνότητας ρεύματος και οφείλεται σε εσωτερικά δημιουργούμενα ρεύματα. Γενικά όμως, σε όλες τις άλλες περιοχές πυκνότητας ρεύματος οι απώλειες που οφείλονται σε αυτά τα εσωτερικά ρεύματα είναι αμελητέες.

3.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης (ΔV_{act})

Αυτό το είδος απωλειών είναι σημαντικό όταν η κινητική της αντίδρασης που πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο είναι αργή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο οι τιμές του είναι πολύ μεγάλες στην κάθοδο (αργή αντίδραση) από ότι στην άνοδο (σχεδόν αντιστρεπτή, ταχύτατη αντίδραση). Η πόλωση ενεργοποίησης ΔV_{act} αποδίδεται ικανοποιητικά από την εξίσωση Tafel:

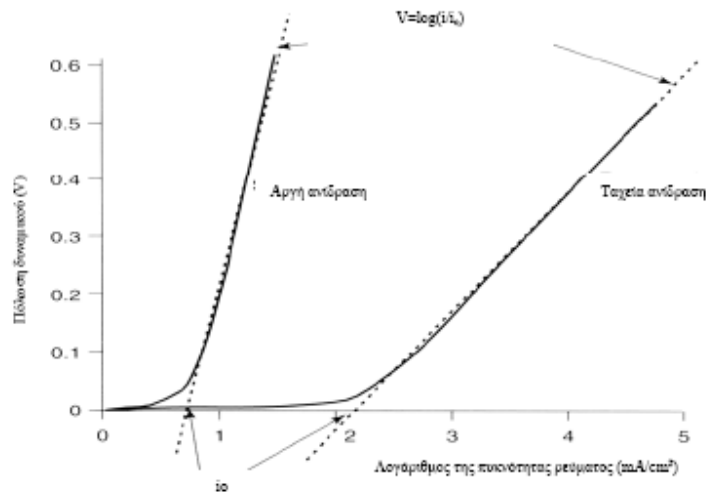
$$\Delta V_{act} = A_{taffel} * \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$$

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε από πειραματικές παρατηρήσεις του Tafel το 1905 ο οποίος έφτασε στο συμπέρασμα ότι η υπέρταση στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου παρουσίαζε μία παρόμοια συμπεριφορά για μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Αυτή η συμπεριφορά μεταφράζεται σε μία ευθεία, τις περισσότερες φορές,

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

γραμμή σε σχέση με το δεκαδικό λογάριθμο των τιμών της πυκνότητας ρεύματος. Βασική προϋπόθεση ισχύος της εξίσωσης είναι να ισχύει:

Η πυκνότητα ρεύματος στην εξίσωση Tafel δίνεται σε i ή σε i_0 . Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται 2 τυπικές καμπύλες Tafel για μία αργή και μία ταχεία ηλεκτροχημική αντίδραση.



Διάγραμμα 3. Τυπικές καμπύλες Tafel για αργή και γρήγορη αντίδραση αντίστοιχα

Η σταθερά β είναι μεγαλύτερη όσο πιο αργή είναι η αντίδραση, ενώ το α εξαρτάται από κάποιους παράγοντες που παρουσιάζονται παρακάτω. Μεγαλύτερες τιμές του επιφέρουν μικρότερη υπέρταση.

όπου:

R : Παγκόσμια σταθερά των αερίων

T : Η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου σε [K]

α : Συντελεστής μεταφοράς ή παράγοντας συμμετρίας της ηλεκτροδιακής δράσης

F : Σταθερά Faraday

Οι τιμές του συντελεστή α εξαρτώνται από την αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο και από το υλικό του ηλεκτροδίου, αλλά πρέπει πάντα να είναι μεταξύ 0 και 1.0 με συνηθέστερη τιμή αυτή του 0.5.

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Το i_0 ονομάζεται πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (exchange current density) και αποτελεί βασικό στοιχείο της κινητικής μεταφοράς φορτίου. Προκύπτει από τη θεώρηση της ισορροπίας της αναγωγικής και οξειδωτικής δράσης στο ηλεκτρόδιο και εξαρτάται από τα εξής:

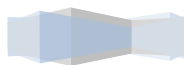
- τη σύνθεση του ηλεκτροδίου
- την τραχύτητά του
- τη θερμοκρασία
- τη συγκέντρωση οξειδωτικών και αναγωγικών σωματιδίων του συστήματος

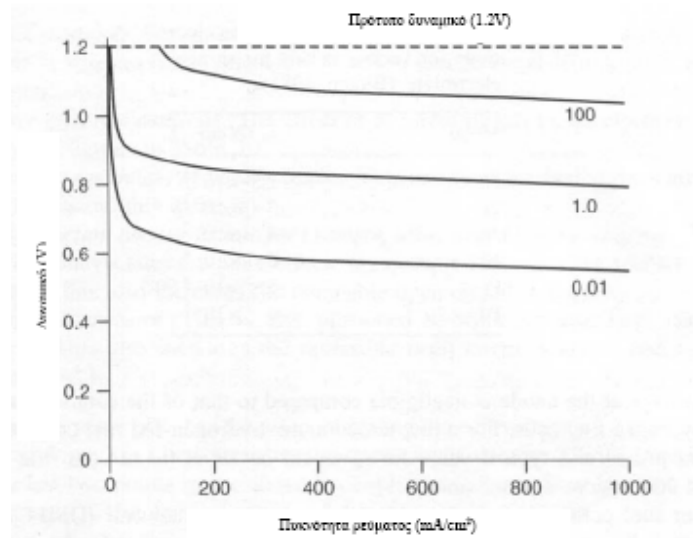
Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής δεν μπορεί άμεσα να μετρηθεί πειραματικά, αφού αναφέρεται σε συνθήκες ισορροπίας, όπου το αλγεβρικό άθροισμα των ροών ρεύματος προς τα αριστερά και δεξιά, σε γαλβανικό στοιχείο, ισούται με 0. Το ρεύμα ανταλλαγής i_0 προσδιορίζεται έμμεσα με άλλους τρόπους. Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται κάποιες τιμές του i_0 για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου στους 25 °C για διάφορους καταλύτες, θεωρώντας λεία την επιφάνεια αυτού.

Μέταλλο	i_0 [A/cm ²]
Pb	2.5×10^{-13}
Zn	3×10^{-11}
Ag	4×10^{-7}
Ni	6×10^{-6}
Pt	5×10^{-4}
Pd	4×10^{-3}

Πίνακας 8. Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής για διάφορα μέταλλα

Παρατηρείται το πολύ μεγάλο εύρος τιμών για την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της τιμής της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής (3 χαρακτηριστικές καμπύλες για τιμές 0.01, 1.0 και 100 mA/cm²) για διάφορες τιμές πυκνότητας ρεύματος, στο δυναμικό:





Διάγραμμα 4. Επίδραση i_0 στο δυναμικό συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

Φαινομενικά μία αύξηση της θερμοκρασίας θα επέφερε και αύξηση της υπέρτασης, καθώς ο όρος A στην εξίσωση Tafel αυξάνεται. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την κατά πολλές φορές αύξηση του i_0 και άρα την τελική μείωση της απώλειας.

Αναδιατάσσοντας την εξίσωση Tafel προκύπτει:

$$\eta = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$$

Αυτή η εξίσωση είναι γνωστή και ως εξίσωση Butler-Vollmer και χρησιμοποιείται ευρέως ως εναλλακτική της εξίσωσης Tafel. Από τα παραπάνω προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τους τρόπους μείωσης της απώλειας ενεργοποίησης, τα οποία και παρατίθενται παρακάτω:

- Αυξάνοντας τη θερμοκρασία του κελιού. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε ένα κελί καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών η τιμή του i_0 είναι 0.1 mA/cm^2 ενώ σε ένα κελί υψηλών θερμοκρασιών αυτή η τιμή είναι 100 φορές μεγαλύτερη.
- Χρησιμοποιώντας πιο ενεργούς καταλύτες
- Αυξάνοντας την τραχύτητα των ηλεκτροδίων
- Αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων. Αυτό θα επιφέρει πιο αποτελεσματική αντίδραση των καταλυτικών σωματιδίων και ενεργών κέντρων με τα μόρια των αντιδρώντων

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

- Αυξάνοντας την πίεση. Παρουσιάζεται μία αντίστοιχη αύξηση της αποτελεσματικότητας καταλύτη, όπως και πριν.

3.5.2 Ωμικές Απώλειες (ΔV_{ohm})

Οι ωμικές απώλειες αποτελούν τον απλούστερο τύπο απωλειών καθώς υπάρχει γραμμική εξάρτηση αυτών από το ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί και την αντίσταση αυτού μέσω του γνωστού Νόμου του Ohm:

$$V = I * R_{fc}$$

Οι ωμικές απώλειες εκφράζονται συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος ως εξής:

$$V = i * r_{fc}$$

Η ωμική αντίσταση στα περισσότερα είδη κελιών καυσίμου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του κελιού. Όπως και στην περίπτωση της απώλειας ενεργοποίησης, έτσι και εδώ προτείνονται κάποιοι τρόποι ελάττωσης αυτών των απωλειών. Αυτοί είναι:

- Χρήση ηλεκτροδίων με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα
- Κατάλληλος σχεδιασμός και επιλογή του υλικού κατασκευής των διπολικών πλακών και συνδέσεων
- Σχεδιάζοντας (όσο επιτρέπεται από τεχνολογικής σκοπιάς) τον ηλεκτρολύτη όσο το δυνατόν λεπτότερο

3.5.3 Απώλειες Συγκέντρωσης (ΔV_{conc})

Καθώς ένα αντιδρών καταναλώνεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, παρουσιάζεται μία πτώση τάσης λόγω της αδυναμίας να κρατηθεί η συγκέντρωση του αντιδρώντος στα επίπεδα της συγκέντρωσης του παρεχόμενου ρεύματος. Έτσι λοιπόν δημιουργείται μία κατανομή συγκέντρωσης. Αρκετές διεργασίες συμβάλουν σε αυτή την πτώση τάσης: αργή διάχυση στην αέρια φάση και στους πόρους του ηλεκτρολύτη, διάλυση και επαναδιάλυση των αντιδρώντων και προϊόντων στη διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίων και τέλος διάχυση διαμέσου του ηλεκτρολύτη των αντιδρώντων και προϊόντων από και προς την καταλυτική επιφάνεια. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου μπορεί να περιγραφεί από το Νόμο διάχυσης του Fick:

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$i = \frac{\nu * F * D_w * (C_B - C_S)}{\delta_{op}}$$

όπου:

ν ...Αριθμός μετακινούμενων ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτροχημικής αντίδρασης

F... Σταθερά Faraday

D... Συντελεστής διάχυσης των αντιδρώντων ειδών

C_B ... Η συγκέντρωση στο παρεχόμενο ρεύμα

C_S ... Η συγκέντρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

δ_{op} ... Το πάχος του οριακού στρώματος

Ως οριακό ρεύμα i_L , ορίζεται το ρεύμα εκείνο που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δηλαδή όταν $C_S=0$ δηλαδή:

$$i_L = \frac{\nu * F * D * C_B}{\delta_{op}}$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η σχέση:

$$\frac{C_S}{C_B} = 1 - \frac{i}{i_L}$$

Όταν δεν διέρχεται ρεύμα από το κελί τότε ο νόμος του Nernst δίνει:

$$E_{i=0} = E^0 + \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln C_B$$

Όταν διέρχεται ρεύμα η επιφανειακή συγκέντρωση μειώνεται στην τιμή C_S :

$$E_{i=0} = E^0 + \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln C_S$$

Η διαφορά δυναμικού ονομάζεται ΔV_{conc} και δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{conc} = \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$$

Εδώ να σημειωθεί ότι λόγω χρήσης των όρων πτώσης τάσης πρέπει να προστεθεί και ένα “-“ στην παραπάνω σχέση:



$$\Delta V_{conc} = - \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

Στην ανάλυση που προηγήθηκε η απώλεια ενεργοποίησης θεωρήθηκε αμελητέα: Η αντίδραση μεταφοράς φορτίου έχει τόσο μεγάλη τιμή πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_0 (επειδή το i είναι μεγάλο το οποίο συνεπάγεται και πιο ενεργό καταλύτη), που το ΔV_{act} είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το ΔV_{conc} . Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι αυτό το είδος απώλειας παίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε οριακές περιπτώσεις πολύ υψηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος. Τελευταία, στο χώρο των κελιών καυσίμου κερδίζει έδαφος ολοένα και περισσότερο μία εμπειρική σχέση που όμως δείχνει πολύ ακριβή συμπεριφορά για πολλούς τύπους κελιών καυσίμου σε διάφορες θερμοκρασίες και τιμές πυκνοτήτων ρεύματος. Αυτή η σχέση είναι της μορφής (Kim J., 1995):

$$\Delta V_{conc} = m_{conc} * \exp(p_{conc} * i)$$

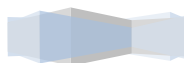
Όπου:

$$m_{conc} = 3 \times 10^{-5} \text{ Volts}$$

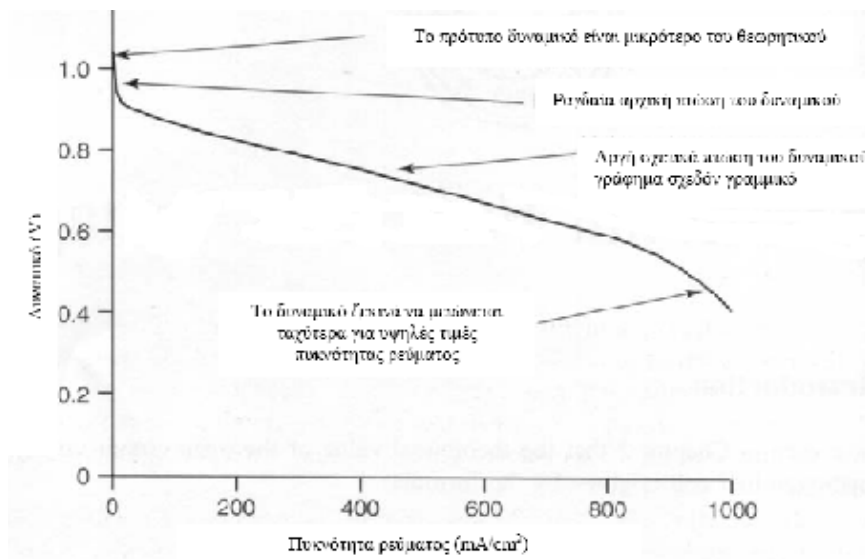
$$p_{conc} = 8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{mA}^{-1}$$

Η παραπάνω σχέση, αν και δείχνει αρκετά διαφορετική από την προηγούμενη εξίσωση υπολογισμού, με κατάλληλη επιλογή των συντελεστών m και n παρέχει παρόμοια αποτελέσματα.

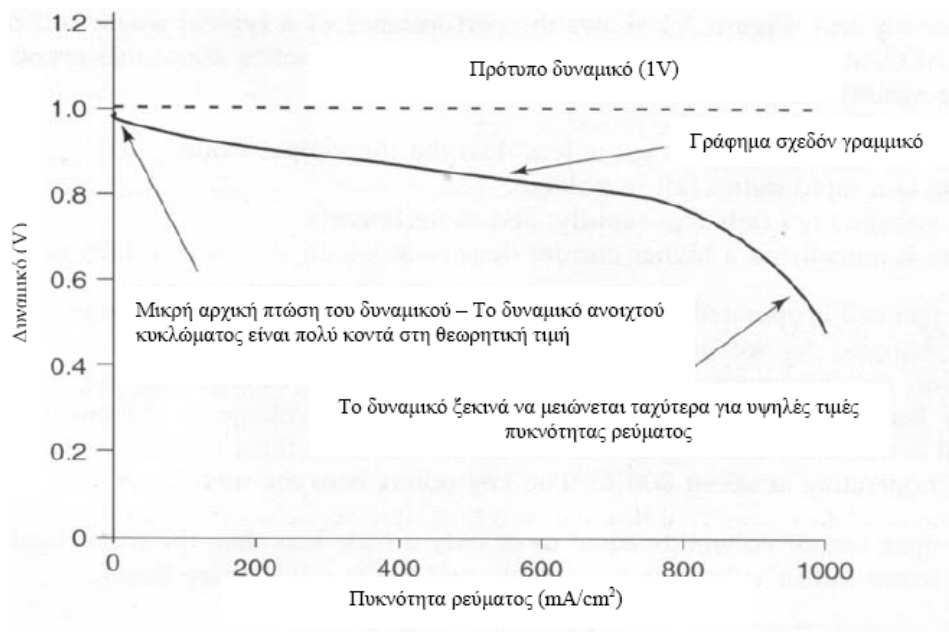
Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή του δυναμικού για κελιά χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών αντίστοιχα σε σχέση με την πυκνότητα ρεύματος:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου



Διάγραμμα 5. Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμων χαμηλών θερμοκρασιών



Διάγραμμα 6. Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμων υψηλών θερμοκρασιών

Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι αν και η θεωρητική τιμή πρότυπου δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί υψηλών θερμοκρασιών σε λειτουργία είναι μεγαλύτερο από

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

το αντίστοιχο κελί χαμηλών θερμοκρασιών λόγω της μείωσης των τιμών των διαφόρων ειδών πόλωσης. Ακόμα, η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής είναι εμφανέστατη στο δεύτερο διάγραμμα, καθώς παρατηρείται ότι έχει ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ενεργοποίησης και το δυναμικό ξεκινάει από τιμές πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή του πρότυπου δυναμικού.

Όσον αφορά στη δεύτερη περιοχή, δηλαδή αυτή των ωμικών απωλειών, όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι και η ιοντική ευκινησία και συνεπώς η αγωγιμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δυναμικό να πέφτει με μικρότερο ρυθμό από ότι στην περίπτωση των κελιών καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών.

Τέλος, στην τρίτη περιοχή παρατηρείται μία γρήγορη πτώση του δυναμικού για μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος, που αφορά στα κελιά υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμποδίζεται ακόμα περισσότερο η μεταφορά του αντιδρώντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη κλίση στην κατανομή συγκέντρωσης. Για παράδειγμα, σε ένα κελί που το οξειδωτικό μέσο είναι ο αέρας, σε υψηλότερες θερμοκρασίες το αδρανές άζωτο, λόγω της μεγαλύτερης κινητικότητας των μορίων του, εμποδίζει το οξυγόνο να φτάσει με ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Αντίστοιχο πρόβλημα βέβαια αποτελεί και ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται.

3.5.4 Συνολικές Απώλειες – Τάση Εξόδου

Σε ένα κελί που βρίσκεται σε λειτουργία αυτό που ενδιαφέρει είναι ο προσδιορισμός της τελικής πολικής τάσης όταν από το κελί διέρχεται ρεύμα I (πυκνότητα ρεύματος i). Βάσει όλων όσων παρατέθηκαν παραπάνω διαμορφώνεται η εξής σχέση:

$$V_{st} = E^{\circ} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc}$$

Αυτή είναι και η σχέση που χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς ερευνητές στο χώρο των κελιών καυσίμου για τον υπολογισμό της πολικής τάσης εξόδου σε ένα κελί καυσίμου που βρίσκεται σε λειτουργία.

Η τάση εξόδου, εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το ρεύμα και τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού. Έτσι επηρεάζεται άμεσα από τον ρυθμό ροής των αντιδρώντων στην άνοδο και στην κάθοδο και την υγρασία τους. Για την αποτελεσματική της λειτουργία πρέπει η πίεση στο εσωτερικό της να μηδενίζεται.

3.6 Ισοζύγιο μάζας κυψέλης καυσίμου για μοντελοποίηση



Το υπό μελέτη μοντέλο της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στο θεμελιώδη νόμο διατήρησης της ύλης:

$$\frac{dn_g}{dt} = q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r$$

Όπου,

n_g ... ο αριθμός των mol του κάθε αερίου

q_g^{in} ...η ροή εισόδου (kmol/sec)

q_g^{out} ...η ροή εξόδου (kmol/sec)

q_g^r ...η ροή του αερίου που αντιδρά (kmol/sec)

Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου εισέρχεται το αέριο υδρογόνο, ενώ στη καθόδο, εισέρχεται ο αέρας και παράγεται το νερό. Κάθε αέριο εξετάζεται ξεχωριστά και εφαρμόζεται η εξίσωση των ιδανικών αερίων:

$$p_g V = n_g R T$$

Όπου,

V... ο όγκος της ανόδου ή της καθόδου αντίστοιχα

R... η παγκόσμια σταθερά των αερίων

T... η απόλυτη θερμοκρασία

Λύνουμε λοιπόν τη παραπάνω σχέση ως προς τη πίεση και αντικαθιστούμε στη παραπάνω διαφορική εξίσωση: Προκύπτει:

$$\frac{dp_g}{dt} = \frac{RT}{V} * (q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r)$$

Ο όρος q_g , αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής της ροής του αερίου (kmol/sec) είναι η παράγωγος του γραμμομοριακού περιεχομένου n_g στο χρόνο.

Επομένως η μεταβολή της πίεσης του αερίου καθορίζεται από το ισοζύγιο μάζας, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της ροής εισόδου, της ροής εξόδου και της κατανάλωσης από την αντίδραση. Η αύξηση της ροής εισόδου μεταβάλλει την πίεση και μπορεί να αυξήσει την απόδοση της κυψέλης, αλλά αυτό αυξάνει το κόστος του υπόλοιπου συστήματος καθώς και την πρόσθετη ενέργεια (παρασιτικό φορτίο) που απαιτείται για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Η πίεση επιδρά επιπλέον και στις απώλειες ενεργοποίησης όπως θα φανεί στη μοντελοποίηση.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την ανάπτυξη ενός δυναμικού μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και συγκεκριμένα το καθορισμό των μεταβλητών κατάστασης και τη σχέση τους με τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος. Το μοντέλο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο αξιόπιστο περιγράφοντας με ακρίβεια τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου. Το χαρακτηριστικό αυτό θα συμβάλει αρκετά στην αποτελεσματικότητα του σχήματος ελέγχου.

Απαιτείται όμως ένας συμβιβασμός μεταξύ της κατάστρωσης ενός λεπτομερούς και αξιόπιστου μοντέλου χωρίς παράλληλα υπερβολική πολυπλοκότητα που να αυξάνει υπερβολικά το χρόνο επίλυσης.

4.2 Είδη μοντέλων - Πληροφορίες

Υπάρχουν σήμερα πάρα πολλές προτάσεις ενδεικτικών μοντέλων από πάρα πολλούς ερευνητές για τη μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου. Παρ'όλα αυτά, υπάρχει έλλειψη από μοντέλα που να είναι κατάλληλα για να εφαρμοστούν τεχνικές ελέγχου.

Τα μοντέλα που έχουν προαθεί μέχρι στιγμής, μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:



- Λεπτομερή μοντέλα κυψελών καυσίμου βασισμένα σε μερικές διαφορικές εξισώσεις.
- Μοντέλα σταθερής κατάστασης βασισμένα σε πειραματικά δεδομένα ή πίνακες.
- Δυναμικά μοντέλα τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη τους χωρικές μεταβολές.

Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή καθε μιας από τις παραπάνω κατηγορίες.

4.2.1 Λεπτομερή μοντέλα κυψελών καυσίμου βασισμένα σε μερικές διαφορικές εξισώσεις

Αρκετές δημοσιεύσεις εγασιών ρύθμισης κυψελών καυσίμου, είχαν αναπτύξει μοντέλα που συμπεριελάμβαναν χωρικές μεταβολές των παραμέτρων της κυψέλης καυσίμου. Για την ανά[τυξη αυτών των μοντέλων απαιτούνται πολύπλοκες ηλεκτροχημικές, θερμοδυναμικές και ρευστομηχανικές εξισώσεις. Με τη χρήση τέτοιων εξισώσεων μπορεί να μελετηθεί και να βγει απόφαση για την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της κυψέλης καυσίμου κάτω από διαφορετικές σταθερές λειτουργικές συνθήκες.

Ο κύριος στόχος αυτής της κατηγορίας των μοντέλων είναι ο σχεδιασμός, των εξαρτημάτων της κυψέλης καυσίμου, και η επιλογή των σημείων λειτουργίας της. Παρόλο που αυτή η κατηγορία μοντέλων είναι ακατάλληλα για τη μελέτη του τρόπου ελέγχου τους, εισάγουν βασικές επιδράσεις λειτουργικών παραμέτρων τους, όπως για παράδειγμα επιδράσεις που μπορεί να έχει η πίεση και η θερμοκρασία στη τάση της κυψέλης καυσίμου.

Αρκετές δημοσιεύσεις επιστημόνων ρίχνουν το βάρος σε συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα που μπορεί να συμβαίνουν στη κυψέλη καυσίμου και να επηρεάζουν τη λειτουργία της και καταστρώνουν μοντέλα για τη προσεκτικότερη μελέτη αυτών των χαρακτηριστικών.

Υπάρχουν μοντέλα που παρουσιάζουν τη διαμόρφωση των αντιστάσεων (απώλειες) των κυψελών καυσίμου, που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τα χαρακτηριστικά πόλωσης της κυψέλης καυσίμου σε πολλές διαφορετικές συνθήκες. Εξισώσεις μεταφοράς αερίων και νερού συμπεριλαμβάνονται επίσης σε αρκετές άλλες δημοσιεύσεις καταστρώνοντας μοντέλα μονοδιάστατα ή και δυοδιάστατα. Άλλες περιπτώσεις ασχολούνται με τη μελέτη της θερμότητας του νερού της κυψέλης καυσίμου.

4.2.2 Μοντέλα σταθερής κατάστασης

Τα συστήματα σταθερής κατάστασης τυπικά χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων που συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα κεψάλης καυσίμου, καθώς και για στατική ανάλυση. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη αθροιστικής κατανάλωσης καυσίμου, ή για υβριδικά συστήματα.



Η μόνη δυναμική που υπάρχει σε αυτή τη κατηγορία μοντέλων είναι η αδράνεια του οχήματος.

4.2.3 Δυναμικά Μοντέλα Κυψελών Καυσίμου

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει πολλές προσπάθειες ανάπτυξης μοντέλων. Διαφορετικά μεγέθη δυναμικής συμπεριφοράς ενσωματώθηκαν σε κάθε ένα από τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας. Η θερμική δυναμική θεωρείται ότι είναι η πιο αργή στο σύστημα κυψέλης καυσίμου. Γι'αυτό το λόγο αρκετές δημοσιεύσεις εργασιών προσανατολίζονται στην ανάπτυξη μόνο της θερμοκρασιακής δυναμικής στα μοντέλα και αγνοούν άλλες δυναμικές, όπως τροφοδοσία αέρα και υγρασία.

4.3 Προτάσεις άλλων εργασιών για μοντελοποίηση PEM Κυψέλης

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια απλή αναφορά καθώς και επισκόπηση των μοντέλων που έχουν χρησιμοποιήσει κατά καιρούς διάφοροι ερευνητές για τη κυψέλη καυσίμου σε μια προσπάθεια να αναπτύξουν ένα μοντέλο κατάλληλο για την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη ρύθμισή του με τεχνικές αυτομάτου ελέγχου. Υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις εργασιών για μοντέλα που έχουν να κάνουν και με τις τρεις κατηγορίες μοντέλων που εξετάστηκαν παραπάνω.

4.3.1 Προτάσεις για μοντέλα που χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις

Ο Springer, παρουσίασε ένα μοντέλο, που προβλέπει την ροή του νερού για κάθε πρωτόνιο δια μέσου της μεμβράνης και την αύξηση της αντίστασης της μεμβράνης εξαιτίας της ποσότητας νερού που συσσωρεύεται σε αυτήν.

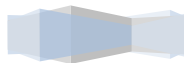
Οι Nguyen και White ανέπτυξαν ένα μοντέλο που διερευνά την αποτελεσματικότητα ποικίλων σχεδίων υγροποίησης.

Οι Fuller και Newman, ανέπτυξαν ένα δυσδιάστατο μοντέλο μεταφοράς μάζας, μιας μεμβράνης για να εξετάσουν τη θερμική ενέργεια, τη ποσότητα του νερού που παράγεται καθώς και τη μεταβολή της ποσότητας των αντιδρώντων αερίων.

Ο Okada, παρουσίασε μια μέθοδο, για την αναλυτικό υπολογισμό της συγκέντρωσης του νερού στο προφίλ της μεμβράνης.

Οι Bashuk, και Li, ανέπτυξαν ένα μοντέλο που περιλαμβάνει το φαινόμενο του πλημμυρισμού στο στρώμα καταλύτη στη κάθοδο.

Ο Wohr, παρουσίασε ένα δυναμικό μοντέλο μελέτης θερμότητας και μεταφοράς νερού στη κυψέλη καυσίμου και έδειξε τα αποτελέσματα ποικίλων μεταβολών του ρεύματος στη κυψέλη καυσίμου.



Όλες οι προσπάθειες των παραπάνω ατόμων για την δημιουργία αξιόπιστων μοντέλων , βασίστηκαν σε πειράματα και φυσικούς νόμους.

4.3.2 Προτάσεις - Δημοσιεύσεις μοντέλων σταθερής κατάστασης

Ο Barbir, παρουσίασε ένα μοντέλο σταθερής κατάστασης , για ένα ολόκληρο σύστημα το οποίο υπολογίζει τις παραμέτρους του συστήματος της κυψέλης καυσίμου καθώς και των συνεργαζόμενων στοιχείων, για διαφορετικές πιέσεις , θερμοκρασίες και ισχείς λειτουργίας. Επίσης υπολογίζεται και ο βαθμός απόδοσης. Οι εξισώσεις που παρουσίασε, χρησιμοποιούνταν λειτουργικές στρατηγικές βασιζόμενες στην αποτελεσματικότητα του κάθε εξαρτήματος που ήταν συνδεδεμένο με τη κυψέλη καυσίμου, ενώ ακόμα παρουσίασε μια μέθοδο για να βελτιστοποιήσει τη παραγόμενη ωφέλιμη ισχύ.

4.3.3 Προτάσεις - Δημοσιεύσεις δυναμικών μοντέλων κυψελών καυσίμου

Οι Turner και Gayer, συμπεριέλαβαν το μεταβατικό αποτέλεσμα της ανόδου της θερμοκρασίας μιας κυψέλης καυσίμου στα μοντέλα τους. Εισάγοντας μόνο θερμοκρασιακή δυναμική , η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να παρατηρηθεί ξεκάθαρα, κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης.

4.4 Δημιουργία μοντέλου για τη μελέτη του προβλήματος ρύθμισης της PEM κυψέλης καυσίμου

Για τη μελέτη του προβλήματος ρύθμισης της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου πρέπει να γίνει η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει πλήρως τη λειτουργία του καθώς και τη σχέση μεταξύ εισόδων, εξόδων και μεταβλητών κατάστασης. Για το σχεδιασμό και την αποτελεσματική εφαρμογή ενός συστήματος ρύθμισης είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός τέτοιου μοντέλου που να περιγράφει με αξιοπιστία τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Μετά από μια βασική επισκόπηση των χαρακτηριστικών των μοντέλων που έχουν προταθεί, γίνεται η επιλογή ενός μαθηματικού μοντέλου που στηρίζεται στο ισοζύγιο μάζας των αντιδρώντων και των προϊόντων της χημικής διεργασίας και αναλύεται λεπτομερώς στις υποενότητες που ακολουθούν.

4.4.1 Χαρακτηριστικά μοντέλου – Αναγκαίες Παραδοχές



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Αρχικά το μοντέλο που αναπτύσσεται περιγράφει τον υπολογισμό της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της κυψέλης καυσίμου, οποίος γίνεται με εφαρμογή του τύπου του Nerst, όπως αναφερθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που εκφράζει τη διαφορά δυναμικού που παράγει η κυψέλη καυσίμου και είναι μια συνάρτηση του ρεύματος που παράγεται, της μερικής πίεσης του υδρογόνου στην άνοδο, της μερικής πίεσης του νερού και του οξυγόνου στη κάθοδο, της θερμοκρασίας στο κελί καυσίμου και της υγρασίας στη μεμβράνη.

Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τα εξής:

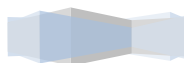
- Ισοζύγιο μάζας
- Απώλειες ενεργοποίησης
- Απώλειες συγκέντρωσης
- Ωμικές απώλειες
- Απώλειες θερμοκρασίας
- Υπολογισμός ηλεκτρεγερτικής δύναμης (δυναμικό) του κελιού

Πρώτα αναπτύσσονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των απωλειών (με βάση τους τύπους που αναπτύχθηκαν για τις απώλειες στο παραπάνω κεφάλαιο) και μετά τα ισοζύγια μάζας. Η αρχή διατήρησης της μάζας εφαρμόζεται για το υδρογόνο, το οξυγόνο, και το νερό. Οι εισοδοί του μοντέλου είναι, η θερμοκρασία του, η παροχή υδρογόνου και οξυγόνου, και το ρεύμα που εισάγεται στο κελί. Οι έξοδοι του μοντέλου είναι οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού και η τάση εξόδου του κελιού.

Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου και μείωσης υπολογιστικού φόρτου, έγιναν κάποιες παραδοχές που αφορούν την ανάλυση λειτουργίας του οι οποίες είναι:

- Όλα τα αέρια θεωρούνται ότι υπακούουν στο νόμο των ιδανικών αερίων.
- Η θερμοκρασία του κελιού καυσίμου θεωρείται ομοιόμορφη και σταθερή σε όλα τα τμήματα της κυψέλης καυσίμου (αυτό πρακτικά είναι αδύνατο, και είναι ένας παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη περίπτωση που συνδέουμε στο κελί καυσίμου ψυκτική διάταξη για τον έλεγχο της θερμοκρασίας).
- Οι θερμοκρασία εισόδου των αερίων στα ηλεκτρόδια είναι ίση με τη σταθερή θερμοκρασία του κελιού.
- Η παροχή αερίου στη κάθοδο είναι καθαρό οξυγόνο, και όχι αέρας που περιέχει άζωτο (στη περίπτωση που θεωρούμε παροχή ατμοσφαιρικού αέρα, πρέπει να λάβουμε υπόψη και το ισοζύγιο μάζας του αζώτου).
- Το σύστημα της ανόδου και της καθόδου θεωρείται σαν ένας ενιαίος όγκος ξεχωριστός ο ένας από τον άλλον.

4.4.2 Μη αντιστρεπτές διεργασίες – Τύποι Περιγραφής Απωλειών



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου το δυναμικό που εν τέλει αποδίδει ένα κελί που βρίσκεται υπό σταθερό φορτίο, είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που προκύπτει από το νόμο του Nernst. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσα στο κελί λαμβάνουν χώρα κάποιες μη αντιστρεπτές διεργασίες, οι οποίες και αποτελούν τις συνολικές απώλειες δυναμικού σε ένα κελί σε λειτουργία.

Αυτές οι απώλειες είναι:

- Απώλειες ενεργοποίησης
- Ωμικές απώλειες
- Απώλειες συγκέντρωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι τύποι για κάθε μια από τις προαναφερθέντες απώλειες:

Απώλειες ενεργοποίησης

Αυτό το είδος απωλειών είναι σημαντικό όταν η κινητική της αντίδρασης που πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο είναι αργή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο οι τιμές του είναι πολύ μεγάλες στην κάθοδο (αργή αντίδραση) από ότι στην άνοδο (σχεδόν αντιστρεπτή, ταχύτατη αντίδραση). Η πόλωση ενεργοποίησης V_{act} αποδίδεται ικανοποιητικά από την εξίσωση Tafel:

$$V_{act} = \left(\frac{1}{a}\right) * \left(\frac{RT}{nF}\right) * \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (38)$$

Όπου:

a ...συντελεστή μεταφοράς φορτίου.

R ...παγκόσμια σταθερά των αερίων [$lt * atm * K^{-1} * mol^{-1}$]

F ...σταθερά του Faraday [C/mol^{-1}]

n ...ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο.

i ...Η πυκνότητα του ρεύματος που διαρρέει τη κυψέλη [A/m^2]

i_o ...Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής [A/m^2]

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε από πειραματικές παρατηρήσεις του Tafel το 1905 ο οποίος έφτασε στο συμπέρασμα ότι η υπέρταση στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου παρουσίαζε μία παρόμοια συμπεριφορά για μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων.



Ωμικές Απώλειες

Οι ωμικές απώλειες αποτελούν τον απλούστερο τύπο απωλειών καθώς υπάρχει γραμμική εξάρτηση αυτών από το ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί και την αντίσταση αυτού μέσω του γνωστού Νόμου του Ohm:

$$V_{ohm} = R_{mem} * i \quad (39)$$

Όπου,

i ...η πυκνότητα ρεύματος που διαρρέει τη κυψέλη [A/m^2].

R_{mem} ... η ιοντική αντίσταση της μεμβράνης [Ω].

Η αντίσταση της μεμβράνης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Ø Είδος της μεμβράνης
- Ø Περικτικότητα της μεμβράνης σε νερό
- Ø Θερμοκρασία της μεμβράνης
- Ø Πυκνότητα ρεύματος που τη διαρρέει
- Ø Πάχος της μεμβράνης
- Ø Επιφάνεια της μεμβράνης

Η αντίσταση της μεμβράνης δίνεται από τον τύπο:

$$R_{mem} = \frac{r_m * mem_{thick}}{A} \quad (40)$$

Όπου,

r_m ...η αντίσταση της μεμβράνης για κάθε μονάδα μήκους [$\Omega * m$]

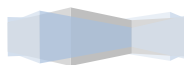
mem_{thick} ...πάχος της μεμβράνης [m]

A ...επιφάνεια της μεμβράνης και ενεργή επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου [m^2]

Στο μοντέλο χρησιμοποιούμε μεμβράνη Nafion 117 , με πάχος $mem_{thick} = 230 [\mu m]$ και επιφάνεια $A = 0.0025 [m^2]$.

Η ειδική αντίσταση r_m , υπολογίζεται εμπειρικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$r_m = \frac{181.6 * \left[1 + 0.03 * i + 0.062 * \left(\frac{T}{303} \right)^2 * i^{2.5} \right]}{[\lambda_m - 0.634 - 3 * i] * \exp \left(4.18 * \frac{T - 303}{T} \right)} \quad (41)$$



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Όπου,

T ... η θερμοκρασία της μεμβράνης που βάση παραδοχής είναι ίση με τη θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου $T_{fc} = 170^{\circ}\text{C} = 443 \text{ [K]}$.

i ... η πυκνότητα ρεύματος που διαρρέει τη κυψέλη $[\text{A}/\text{m}^2]$.

λ_m ... παράμετρος που δείχνει το ποσοστό νερού στη μεμβράνη. Μπορεί να πάρει τιμές από 0-14. Για $\lambda_m = 14$, έχουμε πλήρως πλημμυρισμένη μεμβράνη 100%.

Με βάση μια παραδοχή, ο όρος που ισούται με $\frac{181.6}{\lambda_m - 0.634}$, για μηδενικό ρεύμα στους 30°C είναι και η ειδική αντίσταση σε $[\Omega * \text{cm}]$.

Υπάρχει ένας ακόμα τύπος που υπολογίζει την αντίσταση της μεμβράνης που είναι:

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (42)$$

Όπου,

t_m ... το πάχος της μεμβράνης [m]

σ_m ... η ηλεκτρική αγωγιμότητα της μεμβράνης $(\Omega/\text{m})^{-1}$

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

$$\sigma_m = b1 * \left(b2 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right) \quad (43)$$

Όπου,

$$b1 = (b11 * \lambda_m - b12) \quad (44)$$

Για τη μεμβράνη Nafion 117, οι συντελεστές $b11, b12, b2$ προσδιορίζονται εμπειρικά.

Ισχύει:

$$b11 = 0.005139$$

$$b12 = 0.0326$$

$$b2 = 350$$

Θεωρώντας αυθαίρετα μια τιμή για τη περιεκτικότητα του νερού της μεμβράνης $\lambda_m = 4$, δηλαδή υγρασία περίπου 30%, και με τη βοήθεια των δεδομένων συντελεστών και των παραπάνω τύπων υπολογίζεται η αντίσταση της μεμβράνης $r_m = 0.1 \left[\frac{\Omega}{\text{m}} \right]$.

Η ωμική αντίσταση στα περισσότερα είδη κελιών καυσίμου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του κελιού. Προτείνονται κάποιοι τρόποι ελάττωσης αυτών των απωλειών. Αυτοί είναι:

- Χρήση ηλεκτροδίων με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

- Κατάλληλος σχεδιασμός και επιλογή του υλικού κατασκευής των διπολικών πλακών και συνδέσεων.
- Σχεδιάζοντας (όσο επιτρέπεται από τεχνολογικής σκοπιάς) τον ηλεκτρολύτη όσο το δυνατόν λεπτότερο.

Απώλειες συγκέντρωσης

Καθώς ένα αντιδρών καταναλώνεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, παρουσιάζεται μία πτώση τάσης λόγω της αδυναμίας να κρατηθεί η συγκέντρωση του αντιδρώντος στα επίπεδα της συγκέντρωσης του παρεχόμενου ρεύματος.

Αυτή η πτώση τάσης υπολογίζεται από μια εμπειρική σχέση που προσομοιάζει αρκετά καλά τις πραγματικές τιμές και αποτελεί το παρακάτω τύπο:

$$V_{conc} = m * \exp(n * i) \quad (45)$$

Όπου,

$$m = 3 * 10^{-5} [V]$$

$$n = 8 * 10^{-3} [(cm)^2 * (mA)^{-1}]$$

Συνολικές Απώλειες

Σε ένα κελί που βρίσκεται σε λειτουργία αυτό που ενδιαφέρει είναι ο προσδιορισμός της τελικής τάσης όταν από το κελί διέρχεται ρεύμα I (πυκνότητα ρεύματος i). Βάσει όλων όσων παρατέθηκαν παραπάνω διαμορφώνεται η εξής σχέση:

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (46)$$

Όπου συμπεριλαμβάνονται στη σχέση όλες οι απώλειες που υπολογίστηκαν παραπάνω. E ... είναι η ιδανική τάση του κελιού καυσίμου και υπολογίζεται από το τύπο του Nerst.

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} * (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (47)$$

Όπου,

E^o ...το ιδανικό (αντιστρεπτό) δυναμικό της κυψέλης καυσίμου (σε σταθερή πίεση)

T ... η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου $T_{fc} = 170^{\circ}C = 443 [K]$.

R ...παγκόσμια σταθερά των αερίων [$lt * atm * K^{-1} * mol^{-1}$]

F ...σταθερά του Faraday [C/mol^{-1}]

P_{H_2} ...μερική πίεση του υδρογόνου [atm]

P_{O_2} ...μερική πίεση του οξυγόνου [atm]

P_{H_2O} ...μερική πίεση του νερού [atm]

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Επομένως από τη σχέση (44) , υπολογίζεται η τάση της κυψέλης καυσίμου. Αυτή είναι και η σχέση που χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς ερευνητές στο χώρο των κελιών καυσίμου για τον υπολογισμό της πολικής τάσης σε ένα κελί καυσίμου που βρίσκεται σε λειτουργία.

Πέρα από τη τάση που παράγεται στην έξοδο, λαμβάνοντας υπόψη το ρεύμα που διαρρέει ανά πάσα χρονική στιγμή το σύστημα της κυψέλης καυσίμου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδει το σύστημα, προς αξιοποίηση από εξωτερική μονάδα που συνδέεται σε αυτό, καθώς και το πως μεταβάλλεται στο χρόνο, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου. Ο τύπος υπολογισμού της ηλεκτρικής ισχύος είναι:

$$P = I * V_{cell} \quad (48)$$

Όπου,

V_{cell} ...πραγματική τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου [V]

I ... το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό κύκλωμα της κυψέλης καυσίμου.

Η ηλεκτρική ισχύς, αποτελεί άλλη μια έξοδο του συστήματος, που είναι αρκετά σημαντική για τη ρύθμιση του κελιού καυσίμου που θα γίνει παρακάτω.

4.4.3 Διαφορικές Εξισώσεις – Ισοζύγιο Μάζας

Οι είσοδοι στο σύστημα που περιγράφεται από το μοντέλο, είναι οι ροές εισόδου του υδρογόνου και του και του οξυγόνου , από τις οποίες γίνεται ο υπολογισμός των μερικών πιέσεων του υδρογόνου , του οξυγόνου και του νερού. Εφαρμόζοντας τα ισοζύγια μάζας, οι μερικές πιέσεις μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την καταστατική εξίσωση των αερίων εφόσον έγινε η παραδοχή ότι είναι ιδανικά. Για κάθε αέριο εξετάζεται το ισοζύγιο μάζας του ξεχωριστά και εφαρμόζεται η εξίσωση των ιδανικών αερίων. Επομένως έχουμε τις διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{d}{dt}(p_g) = \frac{RT}{V} * [q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r] \quad (49)$$

Όπου,

q_g^{in} ...ροή εισόδου του αερίου [mol/sec]

q_g^{out} ...ροή εξόδου του αερίου [mol/sec]

q_g^r ...κατανάλωση/παραγωγή αερίου κατά την πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης [mol/sec]

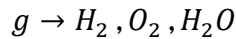
V ...Ο όγκος του ηλεκτροδίου, (άνοδος για το υδρογόνο, και κάθοδος για το οξυγόνο και νερό αντίστοιχα)

R ...παγκόσμια σταθερά των αερίων [$lt * atm * K^{-1} * mol^{-1}$]

T ... η θερμοκρασία της κυψέλης (σταθερή κατά τη παραδοχή) $T=443$ [K]



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου



Οι παραπάνω διαφορικές εξισώσεις μέσω υπολογισμού των πιέσεων, υπολογίζουν εμμέσως τις ποσότητες του υδρογόνου, οξυγόνου, νερού καθώς μεταβάλλονται με το χρόνο κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης, παρέχοντας ένα εποπτικό έλεγχο στα συστατικά του συστήματος.

Ο ρυθμός κατανάλωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου, υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{H_2}^r = \frac{I}{2F} \quad (50)$$

$$q_{O_2}^r = \frac{1}{2} * \frac{I}{2F} \quad (51)$$

Ενώ αντίστοιχα η παραγωγή νερού ως προϊόν δίνεται από τον τύπο:

$$q_{H_2O}^r = -\frac{I}{2F} \quad (52)$$

Οι παραπάνω τύποι εκφράζουν το ρυθμό με τον οποίο συμμετέχουν στη χημική αντίδραση τα αέρια.

Ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου είναι ο μισός σχετικά με τον ρυθμό κατανάλωσης του υδρογόνου, όπως ορίζει η στοιχειομετρία της χημικής αντίδρασης. Αντίστοιχα για τον ίδιο λόγο, ο ρυθμός παραγωγής νερού είναι ίδιος με το ρυθμό κατανάλωσης υδρογόνου,

Επομένως όσο το φορτίο αντλεί ρεύμα από τη κυψέλη καυσίμου, οι ποσότητες του υδρογόνου, και του οξυγόνου μειώνονται, και επομένως αντιστοίχως μειώνονται και οι μερικές τους πιέσεις, οι οποίες ελέγχονται από τις εξισώσεις (49). Για να προστατευθεί η συνεχόμενη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου πρέπει να υπάρχει συνεχόμενη εξωτερική παροχή υδρογόνου και οξυγόνου που αποτελούν τα αντιδρώντα της χημικής εξίσωσης.

Επίσης η κυψέλη πρέπει να λειτουργεί με περίσσεια οξυγόνου, ώστε βάση της στοιχειομετρίας να μη δημιουργηθεί πρόβλημα στη πραγματοποίηση της αντίδρασης, καθώς η ποσότητα του παρεχόμενου υδρογόνου αντιδρά κάθε στιγμή με την αντίστοιχη μισή ποσότητα οξυγόνου της καθόδου. Επομένως στη κυψέλη εισάγεται πάντα πλεονάζον οξυγόνο, για να εξασφαλιστεί η ομαλή κατανάλωση του υδρογόνου. Έτσι η ροή εισόδου του οξυγόνου επιλέγεται σε αναλογία με τη ροή εισόδου του υδρογόνου. Για τον έλεγχο αυτής της κατάστασης και για να μη δημιουργηθεί πρόβλημα στην αντίδραση, υπεισέρχεται μια μεταβλητή που λέγεται «περίσσεια οξυγόνου», ο έλεγχος της οποίας αποτρέπει την εμφάνιση πιθανών προβλημάτων και για την οποία γίνεται αναφορά σε παρακάτω υποκεφάλαιο.

Εφόσον καταγράφηκαν, τα ισοζύγια μάζας για τον έλεγχο της ποσότητας των αντιδρώντων και κατ'επέκταση της ορθής λειτουργίας της χημικής αντίδρασης που αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τη κυψέλη, κρίνεται επίσης σκόπιμο να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης του συστήματος. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τη βοήθεια του τύπου:

$$\eta = \frac{V_{cell}}{E_q} \quad (53)$$

Όπου,

V_{cell} ..., η τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου [V]

E_q ..., η μέγιστη αποκτούμενη τάση [V]

Η μέγιστη αποκτούμενη τάση υπολογίζεται από το τύπο:

$$E_q = \frac{\Delta H_{f,H_2O}}{nF} \quad (54)$$

Όπου,

$\Delta H_{f,H_2O}$... η ενθαλπία σχηματισμού του νερού (θεωρώντας ότι παράγεται νερό σε αέρια μορφή, ατμός) [J/mol]

F...σταθερά του Faraday [C/mol⁻¹]

n...ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο.

4.4.4 Έλεγχος Πίεσης

Η ρύθμιση της πίεσης είναι απαραίτητη, καθώς η σταθερή πίεση, διασφαλίζει σταθερότητα στις μεταβολές του δυναμικού στη κυψέλη καυσίμου. Μας ενδιαφέρει επομένως να διατηρήσουμε τη πίεση της ανόδου και τη πίεση της καθόδου σε ένα επιθυμητό σημείο.

Η πίεση που μας ενδιαφέρει είναι η πίεση εξόδου, που ταυτίζεται με την πίεση στο εσωτερικό της κυψέλης (παραδοχή) από τα διαθέσιμα mol των αερίων που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Η πίεση εξόδου έρχεται σε άμεση συνάρτηση με τη ροή εξόδου επομένως επεμβαίνοντας στη ροή εξόδου μπορούμε να ρυθμίζουμε τη πίεση στη κυψέλη.

Για τη ρύθμιση αυτής της πίεσης υπάρχουν δύο τρόποι που έχουν εφαρμοστεί στην εργασία:

- Προσθήκη βαλβίδας στο στόμιο εξόδου που επηρεάζει τη ροή καυσίμου που εξέρχεται από τη κυψέλη.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

- Ρύθμιση πίεσης , χρησιμοποιώντας τη ροή εξόδου σαν χειραγωγούμενη μεταβλητή με εφαρμογή συστήματος ελέγχου με PID ελεγκτή.

Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά στοιχεία για αυτές τις τεχνικές.

4.4.4.1 Προσθήκη βαλβίδας σταθερής διατομής

Αυτό γίνεται με προσθήκη κατάλληλης βαλβίδας στην έξοδο των καυσίμων , υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα, για την οποία πρέπει να προσδιοριστούν τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά. Αυτό γίνεται με τον ορισμό ενός συντελεστή k , που προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της βαλβίδας.

Τοποθετείται μια βαλβίδα στην έξοδο της ανόδου, και μια βαλβίδα στην έξοδο της καθόδου αντίστοιχα.

Υπάρχει επίσης ένας ακόμα συντελεστής που καθορίζει , τη ροή του συγκεκριμένου αερίου από τη βαλβίδα που τοποθετούμε. Αναλυτικά για τα αέρια που έχουμε στη κυψέλη:

$$\frac{q_{H_2}^{out}}{p_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = k_{H_2} \quad (55)$$

$$\frac{q_{O_2}^{out}}{p_{O_2}} = \frac{k_{ca}}{\sqrt{M_{O_2}}} = k_{O_2} \quad (56)$$

$$\frac{q_{H_2O}^{out}}{p_{H_2O}} = \frac{k_{ca}}{\sqrt{M_{H_2O}}} = k_{H_2O} \quad (57)$$

Όπου,

$q_{H_2}^{out}, q_{O_2}^{out}, q_{H_2O}^{out} \dots$ οι ροές εξόδου του υδρογόνου, οξυγόνου και νερού αντίστοιχα [mol/sec].

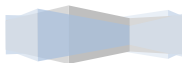
$k_{an}, k_{ca} \dots$ Ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει τη βαλβίδα που τοποθετείται στην άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα $[\frac{\sqrt{mol \cdot Kg}}{atm \cdot sec}]$.

$k_{H_2}, k_{O_2}, k_{H_2O} \dots$ οι συντελεστές βαλβίδας για το κάθε αέριο αντίστοιχα $[\frac{mol}{atm \cdot sec}]$.

$p_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O} \dots$ οι μερικές πιέσεις των αερίων.

$M_{H_2}, M_{O_2}, M_{H_2O} \dots$ τα μοριακά βάρη του υδρογόνου, οξυγόνου και νερού αντίστοιχα.

Εκλέγοντας, συγκεκριμένη τιμή για το συντελεστή βαλβίδας ανόδου και καθόδου, μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή εξόδου για το κάθε αέριο ξεχωριστά με βάση τις σχέσεις (55)-(57), και να αντικαταστήσουμε τη σχέση που θα προκύψει στο ισοζύγιο



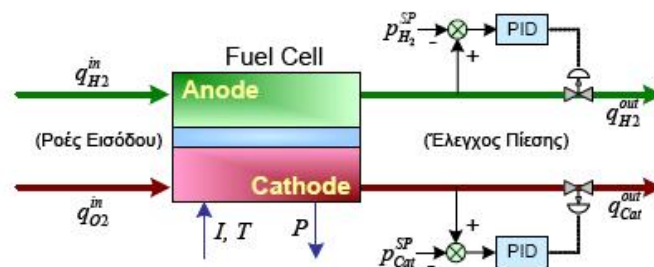
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

μάζας (49). Μετά από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, οι μερικές πιέσεις των αερίων θα σταθεροποιηθούν σε κάποια χρονική στιγμή και μπορούμε να υπολογίσουμε αντίστοιχα τις πιέσεις ανόδου και καθόδου. Ανάλογα, με τις συνολικές πιέσεις που θέλουμε να έχουμε στη κάθοδο και στην άνοδο, επιλέγουμε ανάλογες τιμές για τους συντελεστές. Μετά από αρκετές επαναλήψεις στους υπολογισμούς έχουν επιλεγεί οι τιμές που αναγράφονται στο υποκεφάλαιο με τις παραμέτρους του συστήματος.

4.4.4.2 Ρύθμιση με εφαρμογή PID ελεγκτή

Στη περίπτωση αυτή ουσιαστικά έχουμε την ευχέρια να ρυθμίζουμε δυναμικά τη πίεση στην άνοδο και τη κάθοδο, μεταβάλλοντας την ροή εξόδου που λειτουργεί σαν χειραγωγούμενη μεταβλητή. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να εγκαταστήσουμε μια βαλβίδα μεταβλητής διατομής στη ροή εξόδου, που να παίρνει ανάλογες τιμές με τις αποφάσεις του ελεγκτή.

Για τη ρύθμιση της συνολικής πίεσης ανόδου και καθόδου με χρήση PID ελεγκτή, εισάγονται δύο υποσυστήματα που ελέγχουν τις πιέσεις του συστήματος. Οι δύο κλειστοί βρόχοι που χρησιμοποιούνται ελέγχουν ανεξάρτητα τις δύο πιέσεις μέσω των μεταβλητών των ροών εξόδου. Η διαδικασία ελέγχου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2. Έλεγχος πιέσεων ανόδου και καθόδου με χρήση PID ελεγκτών

Οι ροές εξόδου στο πραγματικό σύστημα ελέγχονται από αντίστοιχες ρυθμιστικές βάνες μεταβλητής διατομής, στις οποίες καταληγουν οι έξοδοι, δηλαδή οι εντολές των PID ελεγκτών. Η μερική πίεση υπολογίζεται από το μοντέλο για κάθε ροή εξόδου ξεχωριστά και προκύπτει με βάση τη κατανάλωση. Όταν η κατανάλωση είναι μηδενική η πίεση εξόδου είναι ίση με την πίεση εισόδου. Ο υπολογισμός των ολικών πιέσεων της ανόδου και της καθόδου γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των πιέσεων εξόδου στη κάθοδο και την άνοδο, και με βάση μια επιθυμητή τιμή (SP = set point) εφαρμόζει κατάλληλη δράση στη ροή εξόδου $q_{total,an}^{out}$, $q_{total,cat}^{out}$.

Ο τύπος που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής κατά τη δράση του είναι:

$$q_{total,\{cat,an\}}^{out} = q_{total,\{cat,an\}}^{ss} + k * \left[e + \frac{1}{\tau_I} \int e + \tau_D * \frac{de}{dt} \right] \quad (60)$$

Όπου,

e ...το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής συνολικής πίεσης καθόδου ή ανόδου και της τιμής που υπολογίζεται από το μοντέλο ανά πάσα χρονική στιγμή και υπολογίζεται από το παρακάτω τύπο:

$$e = p_{total,\{cat,an\}}^{sp} - p_{total,\{cat,an\}}^{out} \quad (61)$$

k , τ_I , τ_D ... οι παράμετροι του PID ελεγκτή.

$q_{total,\{cat,an\}}^{ss}$... ροή μόνιμης κατάστασης ανόδου ή καθόδου στην οποία δρα ο ελεγκτής.
 $p_{total,\{cat,an\}}^{sp}$... επιθυμητή τιμή συνολικής πίεσης ανόδου ή καθόδου αντίστοιχα.

Ο νόμος ελέγχου επιβάλλει κάθε φορά το $q_{total,\{cat,an\}}^{out}$. Όμως η συνολική ροή εξόδου για τη κάθοδο (στην οποία υπάρχει μίγμα οξυγόνου και νερού) χρειάζεται να κατανεμηθεί ανάλογα, ώστε να μπορεί να αντικατασταθεί στις διαφορικές εξισώσεις υπολογισμού των μερικών πιέσεων οξυγόνου και νερού. Οι τύποι που πρέπει να χρησιμοποιηθούν είναι:

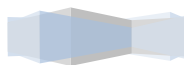
$$q_{O_2}^{out} = \frac{p_{O_2}}{p_{total,cat}} * q_{total,cat}^{out} \quad (62)$$

$$q_{H_2O}^{out} = \frac{p_{H_2O}}{p_{total,cat}} * q_{total,cat}^{out} \quad (63)$$

Πέρα όμως από τον έλεγχο της πίεσης, πρέπει να δίνουμε συγκεκριμένες τιμές στις ροές εισόδου για τον έλεγχο της ροής του καυσίμου. Αυτό γίνεται στην έξοδο της κυψέλης για να έχουμε το αναγκαίο καύσιμο για την παραγωγή του ηλεκτρικού φορτίου. Η παροχή του υδρογόνου μπορεί να ρυθμιστεί από στιγμιαία από μια βαλβίδα, έτσι ώστε η διαφορά πίεσης ανάμεσα στη κάθοδο και την άνοδο να διατηρείται πάνω από ένα ελάχιστο όριο. Ο κίνδυνος αντιστροφής της διαφοράς πιέσεων μεταξύ ανόδου και καθόδου μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες ροές του καυσίμου από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο και να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση της χημικής αντίδρασης.

4.4.5 Υπολογισμός περισσειας οξυγόνου

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



Υπάρχουν δύο φαινόμενα τα οποία , μπορούν να περιορίσουν ακόμα και να καταστρέψουν τη κυψέλη καυσίμου. Αυτά είναι ο πλημμυρισμός του, και η έλλειψη ποσότητας οξυγόνου. Ο πλημμυρισμός συνδέεται με τη θερμοκρασία και την σχετική υγρασία της μεμβράνης. Το δεύτερο φαινόμενο της έλλειψης του οξυγόνου στην επιφάνεια της καθόδου, όταν συμβαίνει η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σταματά για να αποτρέψει το πρόβλημα που θα εμφανιστεί στη διαχείριση του καυσίμου κατά τη πραγματοποίηση της αντίδρασης η οποία όπως γίνεται αντιληπτό δεν μπορεί να λειτουργήσει κανονικά, όταν εκλείπει η ποσότητα ενός από τα δύο αντιδρώντα.

Η έλλειψη οξυγόνου είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και αποδεικνύεται ότι μπορεί να συμβεί όταν η ποσότητα του οξυγόνου, μειωθεί κάτω από ένα κρισιμο επίπεδο, σε οποιοδήποτε σημείο της καθόδου. Όταν συμβαίνει αυτό , ακολουθεί μια απότομη πτώση στην παραγόμενη τάση εξόδου της κυψέλης, το οποίο σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε φθορά (κάψιμο) της επιφάνειας της μεμβράνης. Για να αποτραπεί αυτό το καταστροφικό γεγονός, το σύστημα θα πρέπει να σταματήσει τη ροή ρεύματος στη κυψέλη ενεργοποιώντας μια διαδικασία παύσης λειτουργίας.

Επομένως κρίνεται απολύτως αναγκαίο η κυψέλη καυσίμου να έχει τη δυνατότητα να ελέγχει ανά πάσα στιγμή τη διαθέσιμη ποσότητα του οξυγόνου στη κάθοδο. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να ενσωματωθεί ένας αποτελεσματικός και γρήγορος μηχανισμός ελέγχου της ροής του παρεχόμενου αέρα, που να αποτρέπει εγκαίρως την έλλειψη του οξυγόνου και να επεκτείνει τη ζωή της κυψέλης καυσίμου.

Παρόλο που η συγκέντρωση του οξυγόνου στη κάθοδο δεν είναι ομοιογενής, ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί προσδιορίζοντας μια παράμετρο, που εκφράζει την ποσότητα του οξυγόνου στη κάθοδο και ονομάζεται αναλογία περίσσειας οξυγόνου (oxygen excess ratio) και συμβολίζεται ως λ_{O_2} . Είναι μια μη μετρήσιμη αλλά παρατηρήσιμη μεταβλητή και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

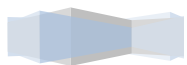
$$\lambda_{O_2} = \frac{q_{O_2}^{in}}{q_{O_2}^r} \quad (64)$$

Όπου,

$q_{O_2}^{in}$... η παροχή εισόδου του οξυγόνου στην κάθοδο [mol/sec]

$q_{O_2}^r$...ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου στη κάθοδο κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης [mol/sec]

Από τη παραπάνω σχέση προκύπτει ότι , η αναλογία περίσσειας του οξυγόνου , εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου ανά πάσα χρονική στιγμή.



$$\lambda_{O_2} = \frac{q_{O_2}^{in}}{q_{O_2}^r} = -\frac{q_{O_2}^{in} * 4F}{I} \quad (65)$$

Όπου I ... το ρεύμα που παράγεται [A].

Επομένως όταν καταναλώνεται καύσιμο, μειώνεται απότομα η τιμή της αναλογίας της περισσειας οξυγόνου. Υψηλές τιμές λ_{O_2} παράλληλα σημαίνει υψηλή τιμή της μερικής πίεσης του οξυγόνου, που βελτιώνει τη παραγόμενη ισχύ, ενώ με χαμηλές τιμές λ_{O_2} υπάρχει κίνδυνος, δημιουργίας έλλειψης οξυγόνου. Αυτό παράλληλα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας και θα πρέπει να αυξηθεί η παροχή του οξυγόνου επειγόντος. Στην αντίθετη περίπτωση όμως που έχουμε αρκετά υψηλές τιμές λ_{O_2} , αυτό θα αυξήσει την ισχύ της εξωτερικής συσκευής (συμπιεστής) που παρέχει οξυγόνο στη κάθοδο και κατ'επέκταση θα μειώσει την ωφέλιμη ηλεκτρική ισχύ που θα παράγει η κυψέλη καυσίμου.

$$P_{\omega\phi} = P_{\eta\lambda} - P_{\epsilon\zeta\omega\tau.\sigma\upsilon\sigma\kappa\epsilon\upsilon\omega\nu} = P_{net} \quad (66)$$

Με βάση επομένως τα παραπάνω, είναι αναγκαία η εύρεση μιας βέλτιστης τιμής λ_{O_2} που θα πρέπει να επιτυγχάνει η κυψέλη καυσίμου ώστε ούτε να την υπερβαίνει και να μειώνεται η ωφέλιμη ισχύς που αποδίδει, ούτε να υπολείπεται αρκετά χαμηλά από αυτήν και να ελοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου έλλειψης οξυγόνου.

4.4.6 Γενική παρουσίαση του προς ρύθμιση μοντέλου με τις μεταβλητές κατάστασης, τις εισόδους, τις εξόδους του. Σχολιασμός και τεχνική επίλυσής του.

Συγκεντρώνοντας όλες τις παραπάνω πληροφορίες που οδηγούν στη κατασκευή του μοντέλου για το προς ρύθμιση σύστημα γίνεται μια απεικόνιση της μορφής του, και καθορισμός των μεταβλητών του. Καθορίζονται οι μεταβλητές κατάστασης, οι χειραγωγούμενες μεταβλητές και οι μεταβλητές ελέγχου. Αυτό θα βοηθήσει στην επίτευξη του ελέγχου που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Αρχικά παρουσιάζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του μοντέλου της κυψελίδας καυσίμου που επιλέξαμε. Οι εξισώσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στις διαφορικές εξισώσεις που μελετούν τις μεταβολές των ποσοτήτων των αερίων (αντιδρώντων - προϊόντων) κατά την εξέλιξη της χημικής αντίδρασης καθώς και στις αλγεβρικές εξισώσεις που υπολογίζουν τις απώλειες ή πτώσεις τάσης της διαδικασίας και

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

κατ' επέκταση τη τελική παραγόμενη τάση εξόδου, καθώς και την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδει το σύστημα και αποτελούν τις μεταβλητές εξόδου.

Όσον αφορά τη πίεση, έχουμε επιλέξει να εγκαταστήσουμε μια βαλβίδα σταθερής διατομής στην έξοδο της ανόδου και της καθόδου αντίστοιχα, επιλέγοντας τις τιμές κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η συνολική πίεση της ανόδου και της καθόδου να διατηρείται πρακτικά σταθερή σε τιμή 2 atm.

Οι εξισώσεις που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σχετικά με την εγκατάσταση της βαλβίδας, περιγράφονται στην υποενότητα 3.4.4.1.

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι:

Διαφορικές Εξισώσεις

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2}) = \frac{RT}{V_{cat}} * \left[q_{H_2}^{in} - k_{H_2} * p_{H_2} - \frac{I}{2F} \right] \quad (67)$$

$$\frac{d}{dt}(p_{O_2}) = \frac{RT}{V_{an}} * \left[q_{O_2}^{in} - k_{H_2} * p_{O_2} - \frac{I}{4F} \right] \quad (68)$$

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2O}) = \frac{RT}{V_{an}} * \left[q_{H_2O}^{in} - k_{H_2} * p_{H_2O} + \frac{I}{2F} \right] \quad (69)$$

Θεωρούμε ότι το οξυγόνο που εισάγεται στη κάθοδο περιέχει ποσότητα νερού σε αέρια κατάσταση τέτοια ώστε να ισχύει:

$$q_{H_2O}^{in} = 0.1 * q_{O_2}^{in} \quad (70)$$

Επομένως η σχέση (69) γίνεται:

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2O}) = \frac{RT}{V_{an}} * \left[0.1 * q_{O_2}^{in} - k_{H_2} * p_{H_2O} + \frac{I}{2F} \right] \quad (71)$$

Αλγεβρικές Εξισώσεις

Με τις εξισώσεις αυτές θα υπολογίσουμε τις μεταβλητές εξόδου του συστήματος. Σαν μεταβλητές εξόδου καθορίζονται, η ηλεκτρική ισχύς, η τάση εξόδου που αποδίδει η κυψέλη και η περισσεια οξυγόνου της καθόδου. Οι εξισώσεις υπολογισμού είναι:

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \rightarrow$$

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



$$\rightarrow V_{cell} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} * (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) - \left(\frac{1}{a} \right) * \left(\frac{RT}{nF} \right) * \ln \left(\frac{i}{i_o} \right) - R_{mem} * i - m * \exp(n * i) \quad (72)$$

Επειδή i ... είναι η πυκνότητα του ρεύματος και ορίζεται από τον τύπο, $i = \frac{I}{A}$ (73), (όπου A η επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου), η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$V_{cell} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} * (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) - \left(\frac{1}{a} \right) * \left(\frac{RT}{nF} \right) * \ln \left(\frac{I}{A * i_o} \right) - \frac{R_{mem} * I}{A} - m * \exp \left(\frac{n * I}{A} \right) \quad (74)$$

Η ηλεκτρική ισχύς είναι:

$$P = I * V_{cell} \quad (75)$$

Ενώ η περίσσεια της ποσότητας αναλογίας του οξυγόνου στη κάθοδο είναι:

$$\lambda_{O_2} = - \frac{q_{O_2}^{in} * 4F}{I} \quad (76)$$

Όπου I ... το ρεύμα που παράγει η κυψέλη [A].

Καθορισμός μεταβλητών του μοντέλου

Η καθορισμός των μεταβλητών του μοντέλου είναι απαραίτητος για τη κατάστρωση του σχηματος ελέγχου.

Οι μεταβλητές κατάστασης είναι οι μεταβλητές του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων, δηλαδή οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου, οξυγόνου και του νερού.

$$x = \begin{bmatrix} p_{H_2} \\ p_{O_2} \\ p_{H_2O} \end{bmatrix}$$

Χειραγωγούμενες μεταβλητές είναι, οι παροχές εισόδου του υδρογόνου και του οξυγόνου, καθώς και το ρεύμα που παράγει η κυψέλη.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$u = \begin{bmatrix} I \\ q_{H_2}^{in} \\ q_{O_2}^{in} \end{bmatrix}$$

Στο πρόβλημα ελέγχου που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία, χρησιμοποιείται σαν χειραγωγούμενη μεταβλητή μόνο το ρεύμα I , και οι παροχές εισόδου του υδρογόνου και του οξυγόνου είναι σταθερές και δεδομένες τιμές.

Έξοδοι του συστήματος θεωρούνται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, η τάση εξόδου, και η περισσεια της ποσότητας του οξυγονου στη κάθοδο.

Δηλαδή, το διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου είναι:

$$y = \begin{bmatrix} P \\ V_{cell} \\ \lambda_{O_2} \end{bmatrix} = [P \quad V_{cell} \quad \lambda_{O_2}]^T$$

Για τον έλεγχο του συστήματος που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, σαν μεταβλητή ελέγχου εξετάζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς.

Επομένως το μοντέλο που δημιουργείται από τις παραπάνω σχέσεις έχει τη μορφή:

$$\dot{x} = A_p * x + B_p * u \quad (77)$$

$$y = f(x, u) \quad (78)$$

Οι πίνακες A_p , B_p εξαρτώνται από τις παραμέτρους του συστήματος και είναι:

$$A_p = \begin{bmatrix} -\frac{k_{H_2} * R * T}{V_{an}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_{O_2} * R * T}{V_{ca}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_{H_2O} * R * T}{V_{ca}} \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} -\frac{R * T}{2 * F * V_{an}} & \frac{R * T}{V_{an}} & 0 \\ -\frac{R * T}{4 * F * V_{ca}} & 0 & \frac{R * T}{V_{ca}} \\ \frac{R * T}{2 * F * V_{ca}} & 0 & \frac{0.1 * R * T}{V_{ca}} \end{bmatrix}$$

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Συμπεραίνουμε ότι , το μοντέλο όπως εκφράζεται από τις εξισώσεις (77,78) είναι μη γραμμικό και συγκεκριμένα η μη γραμμικότητα εντοπίζεται στον υπολογισμό των εξόδων του συστήματος. Και οι τρεις έξοδοι όπως έχουν εκφραστεί με τους τύπους που διατυπώθηκαν παραπάνω, εξαρτώνται μη γραμμικά από τις μερικές πιέσεις των αερίων και το παραγόμενο ρεύμα, ενώ η εξίσωση (77) είναι γραμμική.

Επίλυση του μοντέλου

Το μοντέλο που καταστρώθηκε αποτελείται από ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων , και τρεις μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις. Οι διαφορικές εξισώσεις δεν σχετίζονται με τις μη γραμμικές αλγεβρικές , δηλαδή για να επιλυθούν δεν χρειάζονται κάποια πληροφορία (για κάποια μεταβλητή) από τις αλγεβρικές εξισώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο δεν είναι DAE (differential algebraic equations), δηλαδή δεν είναι σύστημα διαφορικών – αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο απαιτεί ιδιαίτερη τεχνική επίλυσης με επαναληπτική διαδικασία, όπου οι διαφορικές εξισώσεις λύνονται ταυτόχρονα σε άμεση συνάρτηση με τις αλγεβρικές. Αντιθέτως στη περίπτωση του μοντέλου που εξετάζεται, οι διαφορικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν ανεξάρτητα για δεδομένες τιμές των μεταβλητών εισόδου που έχουν οριστεί (το ρεύμα I, τις παροχές εισόδου $q_{H_2}^{in}, q_{O_2}^{in}$). Από την επίλυση των διαφορικών , έχουμε πλήρη γνώση για κάθε χρονική στιγμή των μερικών πιέσεων των αερίων, και για δεδομένες εισόδους, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες της τάσης και κατ'επέκταση όλες τις εξόδους όπως τις έχουμε ορίσει παραπάνω. Δηλαδή $y = [P \quad V_{cell} \quad \lambda_{O_2}]^T$.

Η επίλυση του παραπάνω μοντέλου δεν είναι δυνατόν να γίνει με τις μεθόδους χρησιμοποιεί η θεωρία του αυτομάτου ελέγχου στο πεδίο του Laplace. Η επίλυση γίνεται στο πεδίο του χρόνου με τη βοήθεια της συνάρτησης ode45 του MATLAB. Το μοντέλο επίσης καταγράφηκε και επιλύθηκε με το SIMULINK το οποίο είναι ένα αρκετά αποτελεσματικό εργαλείο που παρέχει περισσότερες δυνατότητες ανάλυσης της λειτουργίας ενός δυναμικού μοντέλου και επισκόπηση του στο πεδίο του χρόνου.

4.4.7 Παράμετροι Μοντέλου – Σχεδιαστικές Προδιαγραφές Κυψέλης

Το μαθηματικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου, που περιγράφηκε με τις παραπάνω εξισώσεις επιλύθηκε χρησιμοποιώντας το MATLAB και το SIMULINK. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν καταγράφονται στο παρακάτω πίνακα, και αποτελούν τα δεδομένα του προβλήματος.

Παράμετρος	Τιμή
Παροχή Εισόδου Υδρογόνου [mol/sec]	0.001301
Παροχή Εισόδου Οξυγόνου [mol/sec]	0.00042733
Σταθερά του Faraday F [C/mol]	96485.3383
Παγκόσμια σταθερά αερίων R [J*K ⁻¹ *mol ⁻¹]	8.314472

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Παγκόσμια σταθερά αερίων R [$m^3 \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]	8.20575E-05
Θερμοκρασία Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου T [$^{\circ}C$]	170
Θερμοκρασία Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου T [K]	443
Όγκος Ανόδου V_{an} [V]	0.00002
Όγκος Καθόδου V_{cat} [V]	0.000008
Αντιστρεπτό/Ιδανικό Δυναμικό Κυψέλης E_0 [V]	1.14
Ιοντική Αντίσταση Μembrάνης r_m [$\Omega \cdot m$]	0.106521739
Πάχος Μembrάνης mem_thick [m]	0.00023
Ενεργή Επιφάνεια Κυψέλης A [m^2]	0.0025
m [V]	0.0000704
n [m^2/A]	0.000944
Σταθερά Βαλβίδας εξόδου αερίων στην ανόδο k_{an} [$\sqrt{mol \cdot kg} / (atm \cdot sec)$]	0.000026589
Σταθερά Βαλβίδας Εξόδου αερίων στη καθόδο k_{cat} [$\sqrt{mol \cdot kg} / (atm \cdot sec)$]	0.0000417
Μοριακό Βάρος Υδρογόνου M_{H2} [kg/mol]	0.0020158
Μοριακό Βάρος Οξυγόνου M_{O2} [kg/mol]	0.032
Μοριακό Βάρος Νερού M_{H2O} [kg/mol]	0.0180153
Πυκνότητα ρεύματος Ανταλλαγής j_0 [A/m^2]	0.1
Συντελεστής μεταφοράς Ηλεκτρικού Φορτίου α	0.5
Αριθμός Ηλεκτρονίων που διαφεύγουν από την άνοδο n	2
Ενθαλπία Σχηματισμού του Νερού (Χαμηλή) DHf_{H2O}	285830

Πίνακας 9. Φυσικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου

4.4.8 Μελέτη Δυναμικής Συμπεριφοράς του Μοντέλου

Στην υποενότητα αυτή γίνεται επίλυση του μοντέλου, με τη τεχνική που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα, και μια μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, που σχετίζεται με την απόκριση του στις διάφορες τιμές των μεταβλητών εισόδου. Επίσης γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του κατά πόσο επηρεάζουν το μοντέλο διάφορες αλλαγές στις μεταβλητές εισόδου. Με βάση τις πληροφορίες που θα αποκομίζουμε, μπορούμε να κάνουμε επιλογή των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν ως χειραγωγούμενες μεταβλητές.

4.4.8.1 Σχεδιασμός Χαρακτηριστικής Καμπύλης

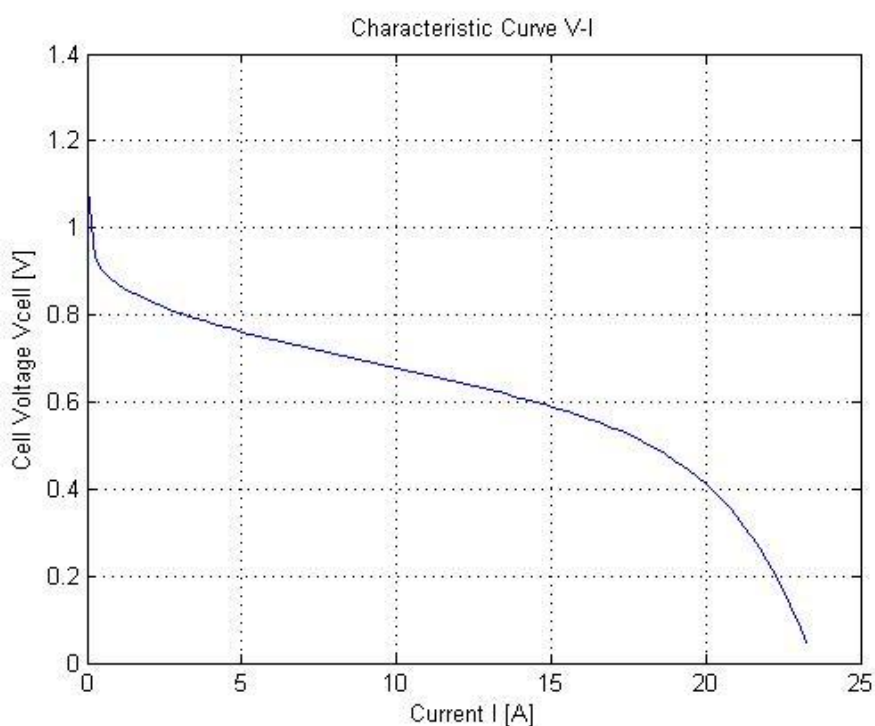
Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης έντασης $V - I$ αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό της κυψέλης καυσίμου και απεικονίζει τη λειτουργία της και τις δυνατότητες της για δεδομένες συνθήκες. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης για μια κυψέλη καυσίμου



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

μπορούμε να αποφανθούμε κατά πόσο μας εξυπηρετεί η συγκεκριμένη κυψέλη για την εφαρμογή που θέλουμε να τη χρησιμοποιήσουμε.

Για τη παραγωγή αυτής της καμπύλης επιλύεται επαναληπτικά η εξίσωση (74) για τις δεδομένες παραμέτρους του συστήματος, δίνοντας σε κάθε επανάληψη συγκεκριμένη τιμή ρεύματος I , η οποία αυξάνεται βηματικά. Επομένως οι ροές εισόδου του υδρογόνου και του οξυγόνου και η θερμοκρασία του συστήματος, παραμένουν σταθερές. Τα ζεύγη των τιμών τάσης έντασης αποτελούν σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης που παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6. Διάγραμμα μεταβολής τάσης ως προς το ρεύμα

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε, ότι όσο αυξάνεται το φορτίο του ρεύματος, τόσο περισσότερο μειώνεται η τάση εξόδου του ανοιχτού κυκλώματος. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τις απώλειες που προκαλούν πτώση τάσης. Η πρώτη κλίση της καμπύλης, οφείλεται σε απώλειες ενεργοποίησης, ενώ το τμήμα της καμπύλης που είναι προσεγγιστικά γραμμικό αντιπροσωπεύει τις ωμικές απώλειες. Τέλος το τμήμα περίπου από τη τιμή 17 A., του ρεύματος μέχρι το σημείο μηδενισμού αντιπροσωπεύει της απώλειες συγκέντρωσης.

Η παραπάνω απεικόνιση της καμπύλης δεν αποτελεί προσομείωση για κάθε χρονική στιγμή. Κατασκευάστηκε με χρήση των τιμών τη χρονική στιγμή που το σύστημα έχει

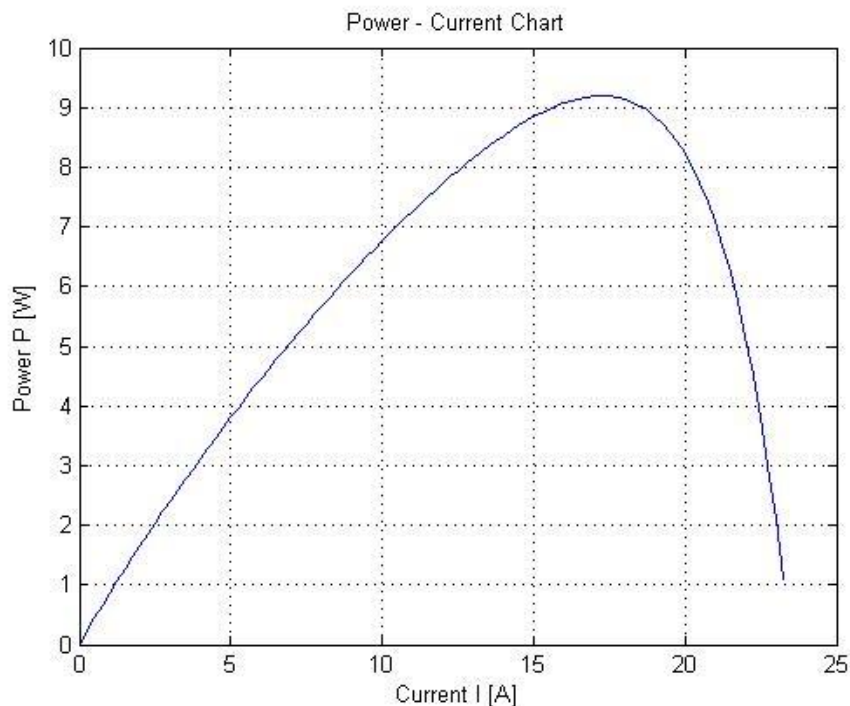
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

επέλθει σε κατάσταση ισορροπίας, όσον αφορά τις πιέσεις (ή τις μάζες) των αερίων της χημικής αντίδρασης.

Αξίζει να σημειώσουμε εδώ, ότι η παραπάνω χαρακτηριστική καμπύλη εξαρτάται από τις δεδομένες αρχικές συνθήκες που ορίζουν οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν. Αυτό σημαίνει ότι αν κάποιο χαρακτηριστικό λειτουργίας μεταβληθεί όπως για παράδειγμα, μείωση του ρεύματος, τότε θα συμβεί μείωση του ποσοστού υγρασίας της μεμβράνης και κατ'επέκταση αύξηση της ιοντικής αντίστασης της μεμβράνης και αλλαγή στη χαρακτηριστική καμπύλη.

Μελέτη Καμπύλης Ισχύος

Στη συνέχεια από τον υπολογισμό της ισχύος, κατασκευάζεται το διάγραμμα ισχύος-ρεύματος.



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα μεταβολής ισχύος ως προς το ρεύμα

Στο πίνακα που ακολουθεί, καταγράφονται όλες οι τιμές, από τις οποίες προκύπτει το παραπάνω διάγραμμα, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο προσδιορισμό του μέγιστου, και κατ'επέκταση στο προσδιορισμό του βέλτιστου σημείου ισορροπίας.

Ρεύμα I

Ισχύς P

Συνέχεια των τιμών

Συνέχεια των τιμών

Συνέχεια των τιμών

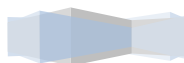
Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

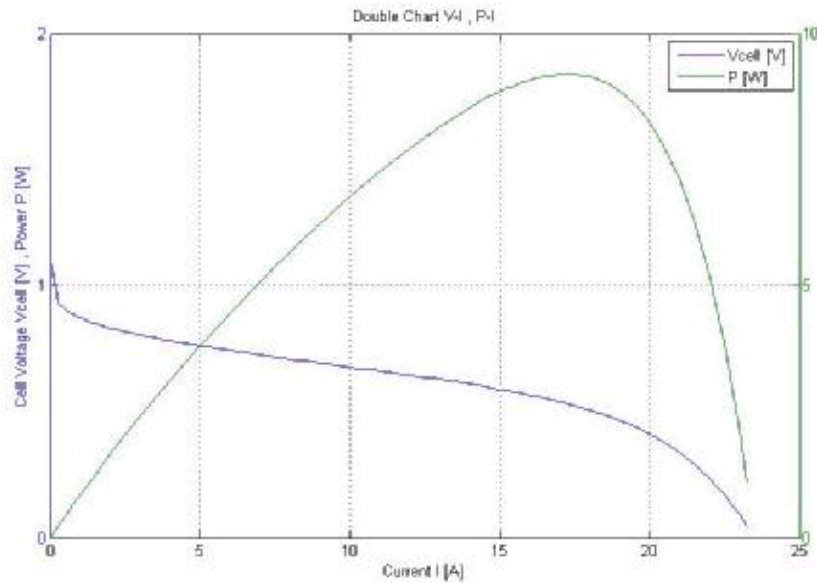
[A]	[W]						
0.0025	0.0028	6.0025	4.4591	12.0025	7.7321	18.0025	9.1379
0.2525	0.2352	6.2525	4.617	12.2525	7.8422	18.2525	9.0925
0.5025	0.4533	6.5025	4.7732	12.5025	7.9497	18.5025	9.0311
0.7525	0.665	6.7525	4.9275	12.7525	8.0545	18.7525	8.9522
1.0025	0.8719	7.0025	5.0799	13.0025	8.1563	19.0025	8.8538
1.2525	1.0749	7.2525	5.2306	13.2525	8.2551	19.2525	8.7341
1.5025	1.2745	7.5025	5.3795	13.5025	8.3506	19.5025	8.5909
1.7525	1.4711	7.7525	5.5265	13.7525	8.4427	19.7525	8.4216
2.0025	1.6648	8.0025	5.6717	14.0025	8.5311	20.0025	8.2236
2.2525	1.8558	8.2525	5.8151	14.2525	8.6157	20.2525	7.9939
2.5025	2.0444	8.5025	5.9567	14.5025	8.6961	20.5025	7.7292
2.7525	2.2305	8.7525	6.0964	14.7525	8.7721	20.7525	7.4258
3.0025	2.4143	9.0025	6.2343	15.0025	8.8432	21.0025	7.0796
3.2525	2.5959	9.2525	6.3703	15.2525	8.9093	21.2525	6.686
3.5025	2.7753	9.5025	6.5044	15.5025	8.9697	21.5025	6.2401
3.7525	2.9526	9.7525	6.6365	15.7525	9.0242	21.7525	5.7363
4.0025	3.1278	10.0025	6.7667	16.0025	9.0721	22.0025	5.1683
4.2525	3.301	10.2525	6.8949	16.2525	9.113	22.2525	4.5294
4.5025	3.4722	10.5025	7.0211	16.5025	9.1461	22.5025	3.812
4.7525	3.6414	10.7525	7.1452	16.7525	9.1708	22.7525	3.0077
5.0025	3.8088	11.0025	7.2671	17.0025	9.1863	23.0025	2.1071
5.2525	3.9742	11.2525	7.3868	17.2525	9.1918	23.2525	1.1
5.5025	4.1377	11.5025	7.5043	17.5025	9.1863		
5.7525	4.2993	11.7525	7.6194	17.7525	9.1687		

Πίνακας 10. Παρουσίαση των σημείων που παράγουν το διάγραμμα ισχύος- ρεύματος $P-I$.

Όπως έχει σημειωθεί στο πίνακα, το μέγιστο παρουσιάζεται με πολύ καλή προσέγγιση, κοντά στη περιοχή για τιμή ρεύματος $I = 17,2525 [A]$, και ισχύος $P = 9.1918 [W]$.

Από το διάγραμμα (---) συμπεραίνουμε ότι, όσο αυξάνεται η ένταση του απαιτούμενου ρεύματος, αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς της κυψέλης καυσίμου, μέχρι ένα σημείο που αποτελεί το μέγιστο της τάσης που μπορεί να αποδώσει η κυψέλη. Στη συνέχεια όμως παρατηρούμε απότομη μείωση της παραγόμενης ισχύος , η οποία οφείλεται στις απώλειες τάσης και συγκεκριμένα στην μεγάλη πτώση τάσης που προκαλεί η απώλεια συγκέντρωσης. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα, από το διάγραμμα που ακολουθεί, στο οποίο είναι εμφανές ότι η πτώση της παραγόμενης πίεσης αρχίζει στο σημείο στο οποίο αρχίζει να επενεργεί η πτώση τάσης που οφείλεται στις απώλειες συγκέντρωσης.





Διάγραμμα 8. Χαρακτηριστική καμπύλη V-I

Στη περιοχή λειτουργίας όπου μειώνεται η παραγόμενη πίεση έχουμε ανεπιθύμητα αποτελέσματα για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της απόδοσης του συστήματος. Όταν λειτουργία του συστήματος ξεπεράσει το μέγιστο σημείο, αυξάνεται η ένταση του ρεύματος, και η κυψέλη θα είναι αναγκασμένη να λειτουργήσει σε μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων από αυτές που μπορεί να αντέξει με κίνδυνο να δημιουργηθούν βλάβες στα λειτουργικά της χαρακτηριστικά, κυρίως για τη μεμβράνη που επηρεάζεται από την αύξηση θερμοκρασίας.

Η λειτουργία στα δεξιά της καμπύλης δεν συνίσταται, γιατί πέρα από τη βλάβη που μπορεί να προκληθεί στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της κυψέλης, η ισχύς που παράγεται θα μπορούσε να παραχθεί και για μικρότερες τιμές ρεύματος, που υποδηλώνει χαμηλή απόδοση λειτουργίας και άσκοπη κατανάλωση ωφέλιμης ενέργειας. Δηλαδή θα έχουμε υψηλή κατανάλωση καυσίμου για μια τιμή παραγωγή ισχύος που θα είναι λιγότερη από τη μέγιστη δυνατότητα της συσκευής, ενώ η λειτουργία στην αριστερή περιοχή λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει αυτή τη τιμή ισχύος με μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.

Από το διάγραμμα, διακρίνεται ότι το μέγιστο, εμφανίζεται για τιμή του ρεύματος για τιμή ισχύος .

Το επόμενο διάγραμμα, αν και μοιάζει με το προηγούμενο, είναι ένα διπλο διάγραμμα, ισχύος- ρεύματος και απόδοσης-ρεύματος της κυψέλης. Η διαφορά εγκείται στο ότι υπάρχει διαφορετική τάξη μεγέθους ανάμεσα στην απόδοση και την παραγόμενη τάση. Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται από το τύπο:





Διάγραμμα 9. Σχέση βαθμού απόδοσης και πίεσης ως προς το ρεύμα λειτουργίας

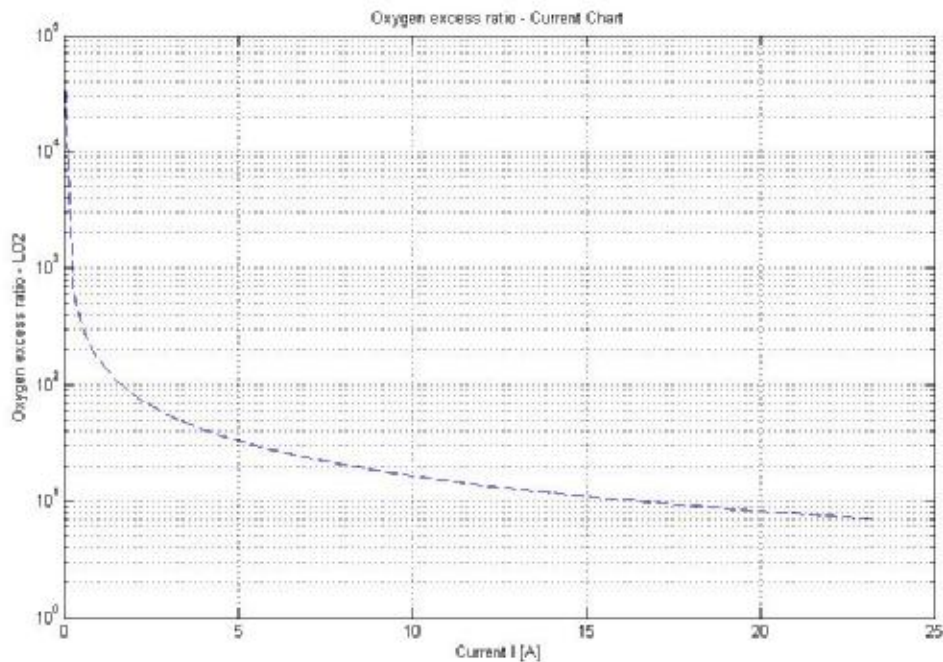
Από το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνεται το προηγούμενο συμπέρασμα , δηλαδή η προτίμηση της λειτουργία του συστήματος, κοντά στο μέγιστο και για τιμές του ρεύματος αριστερά από αυτό και ποτέ στη περιοχή δεξιά του, γιατί όπως φαίνεται και από το διάγραμμα , δεξιά από τη μέγιστη ισχύ της κυψέλης η απόδοση μειώνεται σημαντικά.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Μελέτη καμπύλης περίσσειας οξυγόνου

Με βάση τον τύπο που έχουμε ορίσει για τον υπολογισμό της περίσσειας ποσότητας οξυγόνου στη κάθοδο, σχεδιάζουμε τη συνάρτηση του σε σχέση με τις μεταβολές του ρεύματος:

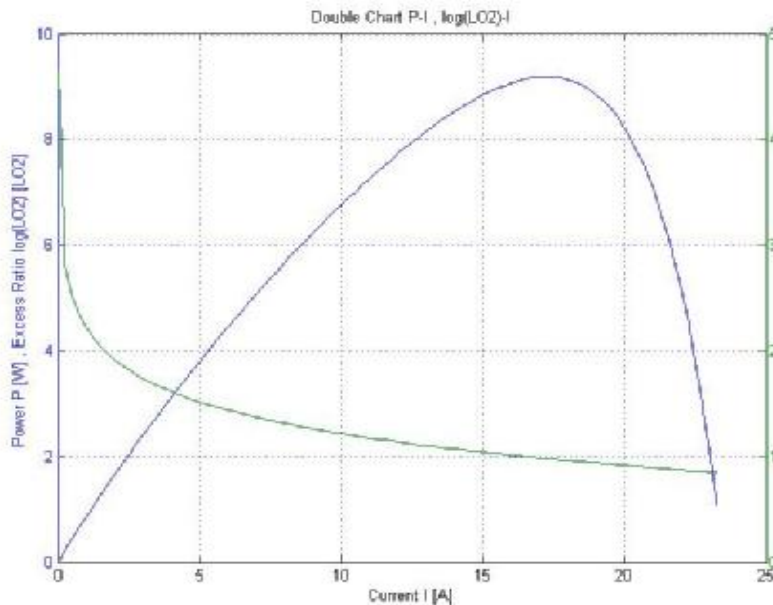


Διάγραμμα 10. Σχέση περίσσειας ποσότητας οξυγόνου στη κάθοδο συναρτήσει του ρεύματος λειτουργίας

Από το διάγραμμα αυτό βγαίνει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η ζήτηση του φορτίου δηλαδή αυξάνεται το ρεύμα, έχουμε μείωση της περίσσειας της ποσότητας οξυγόνου στη κάθοδο. Αυτό συμβαίνει γιατί όλο και περισσότερη ποσότητα οξυγόνου αντιδρά κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης, με αποτέλεσμα, η αναλογία του στη κάθοδο να μειώνεται δραστικά. Αν δε ληφθούν κατάλληλα μέτρα, ώστε να ανανεωθεί η ποσότητα αυτή μέσω αύξησης παροχής οξυγόνου, τότε υπάρχει κίνδυνος να συμβεί το φαινόμενο έλλειψης ποσότητας οξυγόνου, που μπορεί να οδηγήσει σε φθορά στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου.

Στη συνέχεια απεικονίζεται το διάγραμμα, της περίσσειας της ποσότητας του οξυγόνου, και της ισχύος συναρτήσει του ρεύματος. Για την καλύτερη απεικόνιση του διαγράμματος, για την ποσότητα του οξυγόνου παίρνουμε το αντίστοιχο λογαριθμικό του διάγραμμα, όπως συνέβη και στο αμέσως προηγούμενο διάγραμμα.





Διάγραμμα 11. Διάγραμμα πίεσης και λογαρίθμου της ποσότητας του οξυγόνου ως προς το ρεύμα.

Το διάγραμμα αυτό έγινε, για να εξαχθεί το συμπέρασμα σχετικά με εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Παρατηρώντας και τις δύο καμπύλες συμπεραίνουμε ότι δεν αρκεί μόνο η εκλογή ενός σημείου λειτουργίας κοντά στο μέγιστο της καμπύλης ισχύος, αλλά και η εξασφάλιση του γεγονότος ότι το σημείο που θα διαλέξουμε δεν θα αντιστοιχεί σε σημείο πολύ χαμηλής ποσότητας οξυγόνου για τη λογαριθμική καμπύλη που μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργία της κυψέλης καυσίμου (και πρακτικά στο τερματισμό της λειτουργίας της).

Επομένως η βέλτιστη περιοχή εστιάζεται κοντά στο μέγιστο της καμπύλης της ισχύος, από αριστερά του μεγίστου, ώστε να υπάρχει η ευχέρεια να μετακινηθούμε είτε πιο αριστερά σε περίπτωση που έχουμε χαμηλή ποσότητα οξυγόνου στη κιάθοδο, είτε πιο δεξιά πλησιάζοντας το μέγιστο τη ισχύος σε περίπτωση που επαρκεί η ποσότητα οξυγόνου και δεν υπάρχει κίνδυνος δραστηκής μείωσής της κάτω από ένα όριο ασφαλείας. Ποτέ όμως δε συνίσταται να διαλέξουμε σημεία λειτουργίας δεξιά από το μέγιστο της καμπύλης ισχύος.

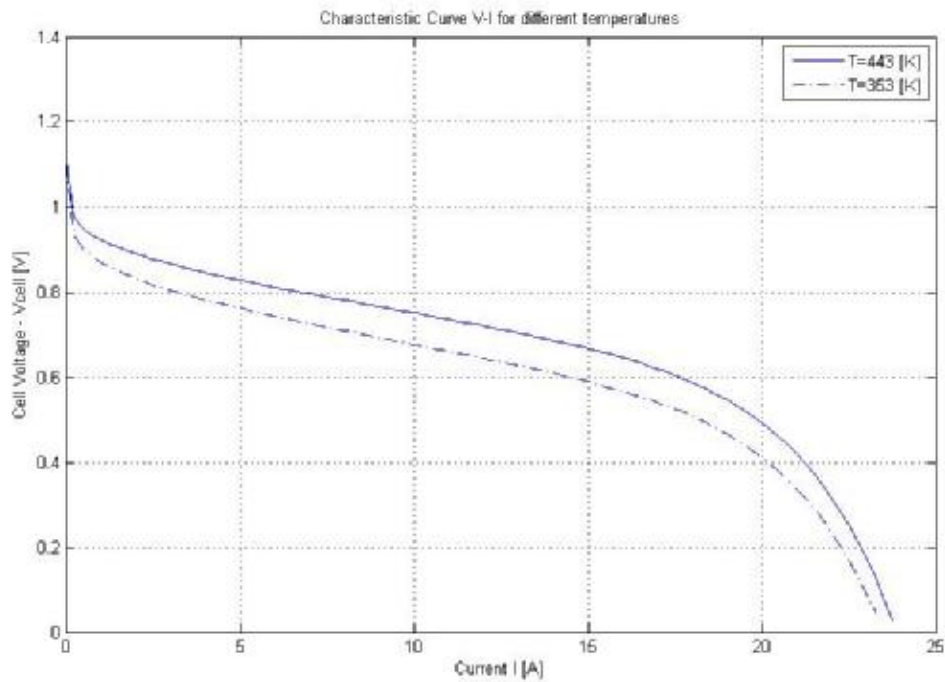
Μελέτη της απόκρισης του συστήματος για διάφορες μεταβολές των παραμέτρων

Στη συνέχεια κάνουμε διάφορες μεταβολές σε μεταβλητέ του συστήματος και βλέπουμε τις αποκρίσεις του.

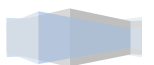


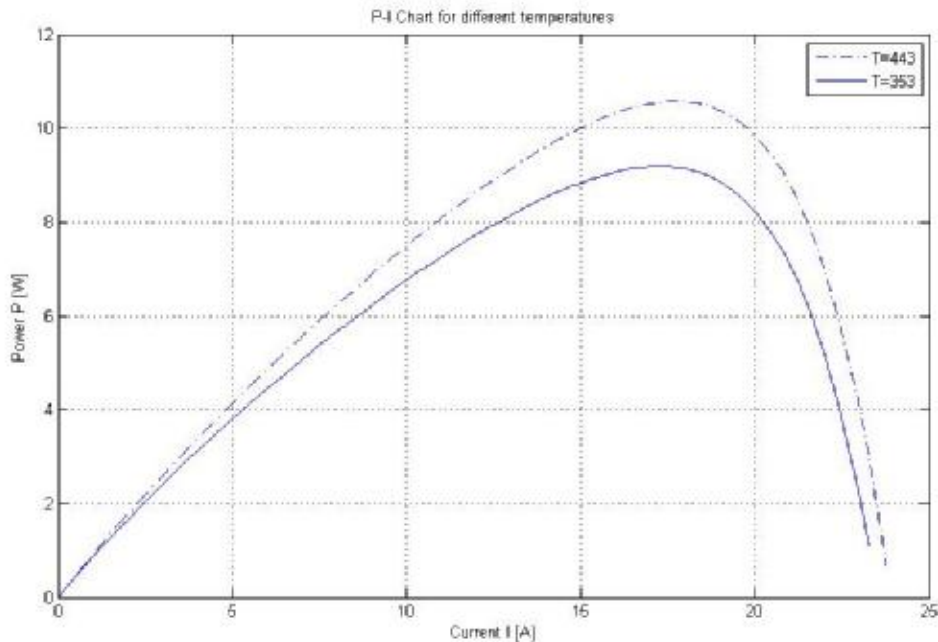
Μεταβολή της θερμοκρασίας

Στη περίπτωση αυτή μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία, μεταξύ δύο διαφορετικών τιμών και ξανακάνουμε τους υπολογισμούς συγκρίνοντας τα αποτελέσματα εξετάζοντας τα διαγράμματα χαρακτηριστικής καμπύλης και ισχύος – ρεύματος.



Διάγραμμα 12. Σχέση τάσης ρεύματος για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες





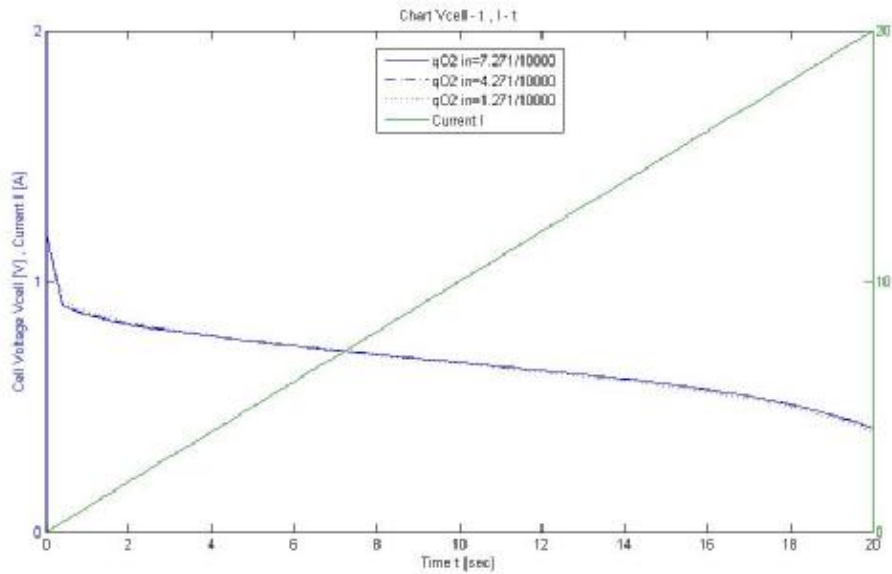
Διάγραμμα 13. Σχέση πίεσης ρεύματος για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες

Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει, ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η παραγόμενη τάση και κατ'επέκταση και η ισχύς του συστήματος.

Μεταβολή Ροής Εισόδου του Οξυγόνου

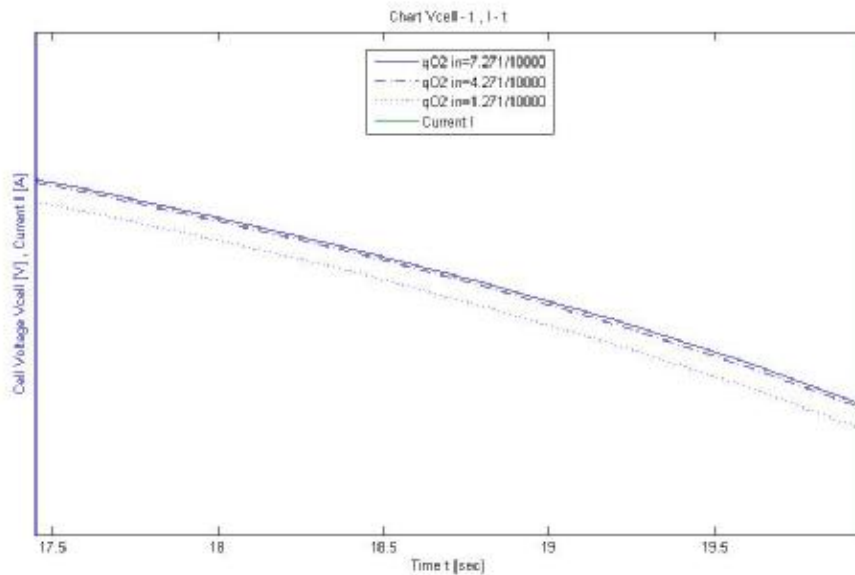
Στη περίπτωση αυτή θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει στις μεταβλητές εξόδου του μοντέλου η μεταβολή της ροής εισόδου του οξυγόνου (παροχή). Θα διαλεξουμε τρεις διαφορετικές τιμές και θα επαναλάβουμε τους υπολογισμούς συγκρίνοντας τις μεταβλητές εξόδου. Οι τιμές που δίνουμε στη ροή εισόδου του οξυγόνου είναι:

Για κάθε μια από τις παραπάνω τιμές, επιλύουμε το μοντέλο, και κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της μεταβολής της τάσης και της ισχύος σε συνάρτηση με το χρόνο. Σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις για σταθερή παροχή οξυγόνου, οι τιμές του ρεύματος μεταβάλλονται με το χρόνο ακολουθώντας μια τροχιά της μοναδιαίας συνάρτησης κλισης (ράμπας). Τα διαγράμματα που προκύπτουν είναι:



Διάγραμμα 14. Μεταβολή χαρακτηριστικής καμπύλης τάσεων για τρεις διαφορετικές τιμές παροχής οξυγόνου στην κάθοδο

Επειδή δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα, πως μεταβάλλεται η τάση, για διαφορετική τιμή της παροχής, μεγενθύνουμε σε μια περιοχή. Προκύπτει λοιπόν το διάγραμμα:

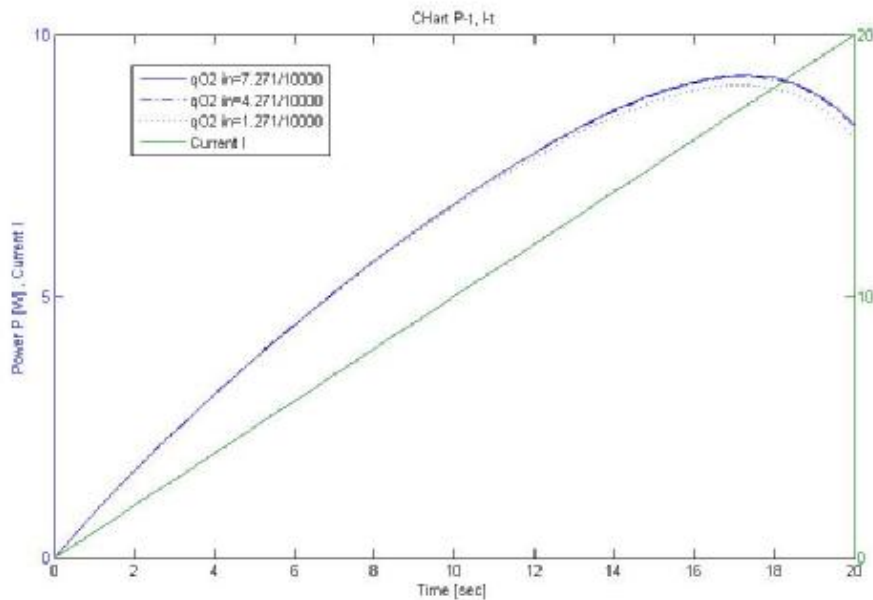


Διάγραμμα 15. Μεγύνθυνση του διαγράμματος 14

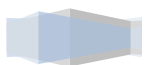


Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι καθώς αυξάνεται η παροχή του οξυγόνου, αυξάνεται η τάση με τη πάροδο του χρόνου. Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις αντιστοιχικές μεταβολές της ισχύος.

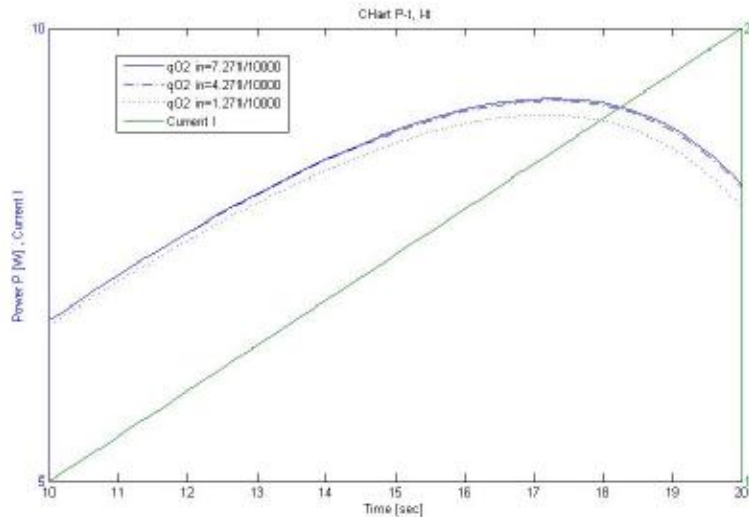


Διάγραμμα 16. Μεταβολή χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύων για τρεις διαφορετικές τιμές παροχής εισόδου οξυγόνου στην κάθοδο



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Όμοια μεγενθύνουμε το διάγραμμα σε κάποια περιοχή του για να πάρουμε καλύτερα αποτελέσματα:



Διάγραμμα 17. Μεγύνθυση του διαγράμματος 16

Προκύπτει παρόμοιο συμπέρασμα, όπως και για τη τάση. Δηλαδή η αύξηση της παροχής οξυγόνου, αυξάνει την ισχύ που παράγει το σύστημα της κυψέλης καυσίμου και μετακινεί το μέγιστο πιο δεξιά στη περιοχή του διαγράμματος.

Η συμπεριφορά τόσο του μεγέθους της τάσης όσο και της ισχύος, ερμηνεύεται από το γεγονός ότι, όσο περισσότερο αυξάνεται η διαθέσιμη ποσότητα του οξυγόνου στη cathode, αυξάνεται ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης, καθώς όλο και περισσότερο καύσιμο υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο της cathode και αυξάνεται η απόδοση της συσκευής.

Μεταβολές Ρεύματος

Όταν μεταβάλλεται το ρεύμα, συμβαίνει αντίστοιχα μεταβολή στη ροή εξόδου των αερίων, και σαν συνέπεια αυτού επηρεάζεται η πίεσή τους, το οποίο λόγω του ισοζυγίου μάζας δημιουργεί μεταβολές στη παραγόμενη τάση εξόδου και την ισχύ της κυψέλης καυσίμου.

Θα δοθούν δύο διαφορετικές σειρές μεταβολών στη τιμές του ρεύματος που αποτελεί το φορτίο της κυψέλης και μελετάται η απόκριση των εξόδων του (τάση, ισχύς) στη πάροδο του χρόνου.

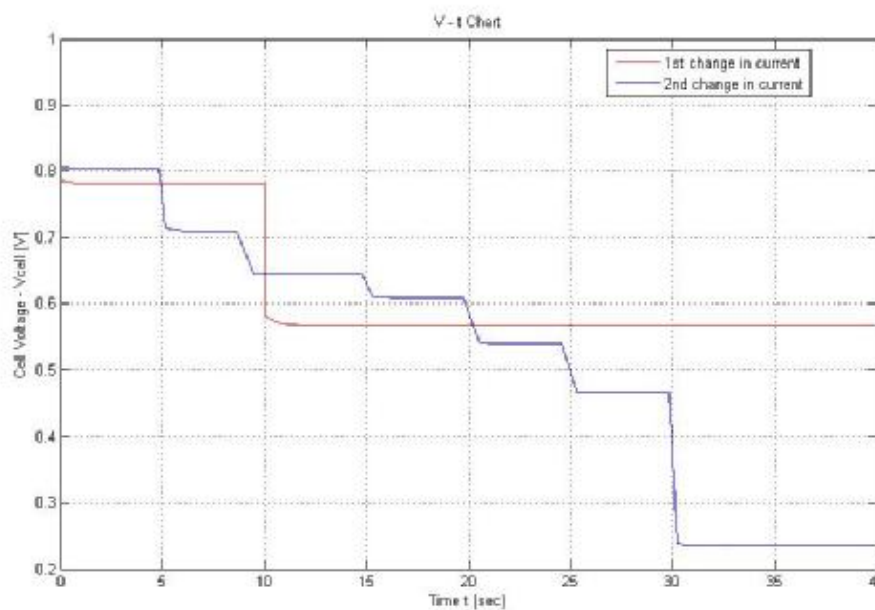


Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Στη πρώτη σειρά μεταβολών, το σύστημα βρίσκεται σε μια σταθερή κατάσταση φορτίου και ξαφνικά σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, το φορτίο αυξάνεται στη μέγιστη τιμή του. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε προοδευτικές αυξήσεις του φορτίου μέχρι κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή που το φορτίο σταθεροποιείται.

Και για τις δύο περιπτώσεις, σχεδιάζονται τα διαγράμματα της τάσης εξόδου και της ισχύος που παράγει η κυψέλη από τα οποία θα βγει σημαντικό συμπέρασμα, για το πως αποκρίνεται η κυψέλη καυσίμου στις παραπάνω μεταβολές του ρεύματος.

Η απόκριση της παραγόμενης τάσης στις μεταβολές του ρεύματος δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

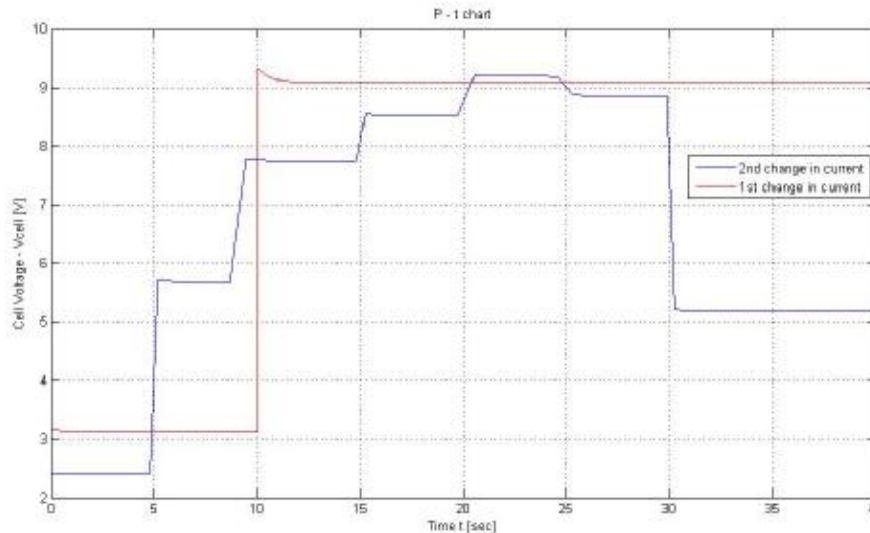


Διάγραμμα 18. Απόκριση της παραγόμενης τάσης σε προκαθορισμένες μεταβολές του ρεύματος



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Όμοια η απόκριση της παραγόμενης ισχύος της κυψέλης καυσίμου στις μεταβολές του ρεύματος δίνεται από το διάγραμμα:



Διάγραμμα 19. Απόκριση της παραγόμενης ισχύος σε προκαθορισμένες μεταβολές του ρεύματος

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα των καμπυλών Τάσης – Ρεύματος και Ισχύος – Ρεύματος, το σύστημα έχει την αναμενόμενη συμπεριφορά και δυναμική, και πληρεί τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί στο σχήμα ελέγχου που θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Συμπέρασμα

Με την ολοκλήρωση του κεφαλαίου αυτού, έχει γίνει μια πλήρης περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου, με όλες τις μαθηματικές εξισώσεις που το περιγράφουν, και παράλληλα γίνεται κατάστρωση του με βάση τις μεταβλητές κατάστασης. Στη συνέχεια γίνονται δοκιμές, κατά τις οποίες μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι του και ελέγχονται και οι αποκρίσεις του. Αυτή η διαδικασία αποτελεί μια μελέτη ανοιχτού βρόχου και μας παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία του μοντέλου που καταστρώσαμε. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, εφόσον έχει κατασκευαστεί το μοντέλο, για να χρησιμοποιηθεί με αποτελεσματικότητα στο σχήμα ελέγχου πρέπει να αξιολογηθεί κάνοντας ταυτοποίηση και εκτίμηση των παραμέτρων του με χρήση μετρούμενων μεταβλητών που λαμβάνονται από πειραματική διάταξη κυψέλης καυσίμου. Η διαδικασία αυτή υπερβαίνει κατά πολύ τους στόχους αυτής της εργασίας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

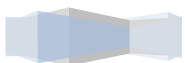
ΕΛΕΓΧΟΥ-ΡΥΘΜΙΣΗ

4.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Ελέγχου

Έχοντας κατασκευάσει το μοντέλο που περιγράφει τη δυναμική της κυψέλης καυσίμου που θέλουμε να κατασκευάσουμε μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα, που αφορά τον έλεγχο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου έτσι ώστε να επιτύχουμε τη βελτιστοποίηση αυτής της λειτουργίας όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μέγιστη απόδοση ισχύος με τη καλύτερη δυνατή χρονική απόκριση. Η διαδικασία αυτή θα δώσει επιπλέον τη δυνατότητα στη παραγωγική βιομηχανία να μειώσει το κόστος κατασκευής της κυψέλης καθιστώντας την, μια προσιτή εφαρμογή στο μέλλον, εκμεταλεύοντας όλα τα πλεονεκτήματά της που εκθειάστηκαν στο κεφάλαιο 1.

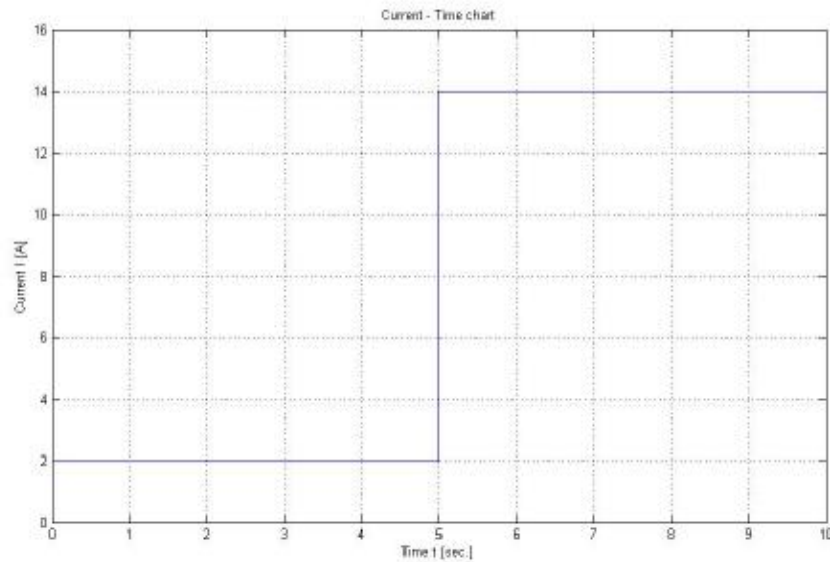
Η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου, επηρεάζεται όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στις απαιτήσεις ισχύος, ή όταν η κυψέλη δε λειτουργεί στη βέλτιστη περιοχή που που προσδιορίζεται από από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της. Από την ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος που έγινε παραπάνω, ο έλεγχος βασίζεται σε δύο κατηγορίες μεταβλητών, αυτές που σχετίζονται με τις ροές αερίων, και αυτές που σχετίζονται με την ροή των ηλεκτρονίων. Ο στόχος είναι η διατήρηση της εύρυθμης λειτουργίας της χημικής αντίδρασης στην άνοδο και στη κάθοδο. Το φορτίο που συνδέεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα της κυψέλης δημιουργεί διαταραχή στην ισορροπία των ηλεκτρονίων, και η στρατηγική ελέγχου πρέπει να επιδράσει πάνω στις ποσότητες των αντιδρώντων για να αντισταθμίσει τη μεταβολή. Συγκεκριμένα θα πρέπει να ρυθμιστεί η ισχύς του συστήματος καθώς και η θερμοκρασία, απλά στην εργασία αυτή η θερμοκρασία θεωρήθηκε σταθερή.

Οι δοκιμαστικές μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος που έγιναν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη στρατηγική ελέγχου που θα πραγματοποιήσουμε. Συγκεκριμένα θα εστιάσουμε τη προσοχή μας, στην

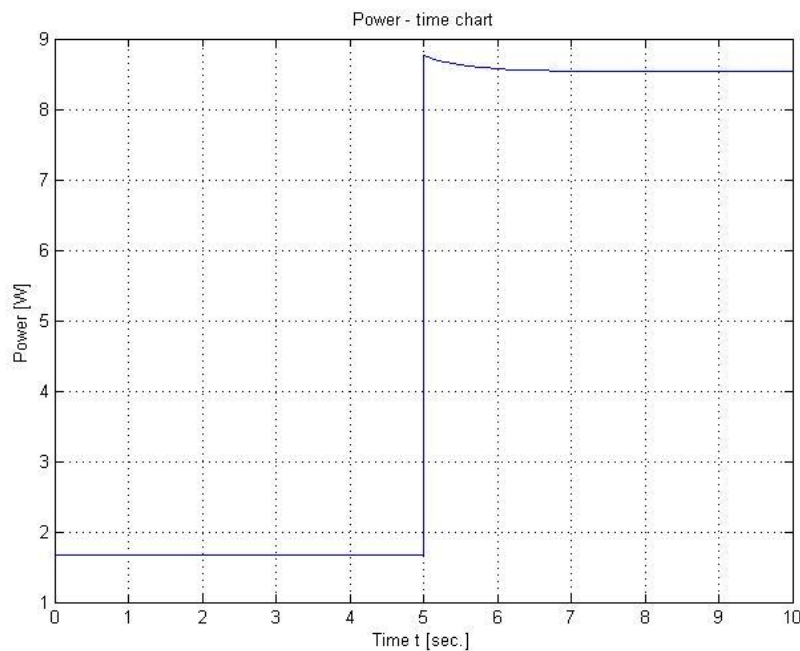


Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

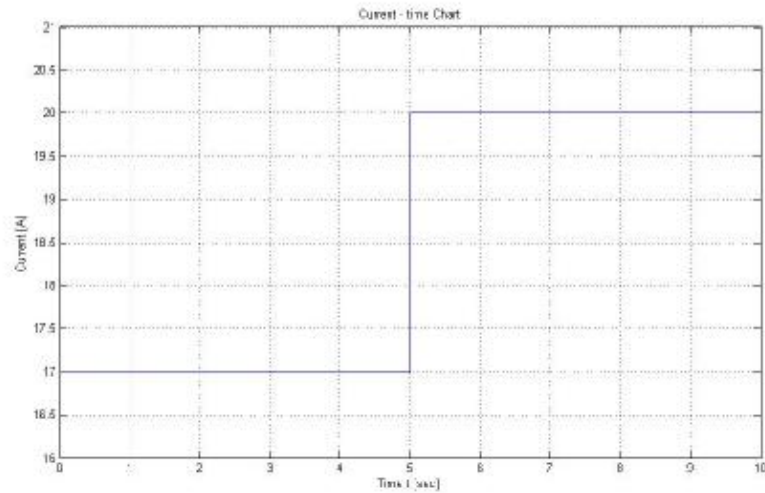
απόκριση ισχύος από τη μεταβολή του φορτίου , για δύο περιπτώσεις που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



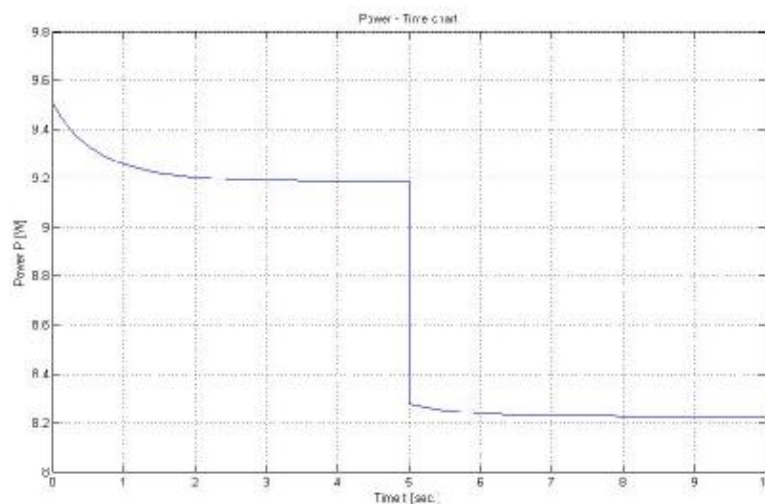
Διάγραμμα 20. Βηματική Μεταβολή ρεύματος



Διάγραμμα 21. Απόκριση ισχύος για βηματική μεταβολή ρεύματος του διαγράμματος 20.



Διάγραμμα 22. Βηματική Μεταβολή ρεύματος



Διάγραμμα 23. Απόκριση ισχύος για βηματική μεταβολή ρεύματος του διαγράμματος 20.

Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε αύξηση του φορτίου (ρεύματος) , και παρακολουθούμε την απόκριση της τάσης. Στα πρώτα δύο διαγράμματα (20-21) , η ζήτηση του φορτίου το αυξάνει από τη κατάσταση λειτουργίας , των 2A. , στη κατάσταση λειτουργίας των 14 A. Παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται, για να ικανοποιήσει τη ζήτηση του φορτίου.

Στη δεύτερη περίπτωση , έχουμε μετάβαση από τη κατάσταση λειτουργίας των 17 A. (βέλτιστη λειτουργία), σε κατάσταση λειτουργίας 20 A. Παρόλο που έχουμε μια αύξηση στη ζήτηση του φορτίου, και θα περιμέναμε η κυψέλη καυσίμου να αυξήσει την παραγόμενη ισχύ, αντιθέτως έχουμε μείωση της ισχύος για τους λόγους που

παρουσιάστηκαν στην ανάλυση του ανοιχτού βρόχου που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η παραπάνω διατύπωση προκαλεί σοβαρά προβλήματα για ένα σύστημα ελέγχου, και αυτό συμβαίνει γιατί η κατεύθυνση της μεταβολής της ισχύος ως αντίδραση της μεταβολής του φορτίου, δεν είναι σταθερή, και επομένως για ένα μεγάλο διάστημα της περιοχής λειτουργίας εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί. Η μεταβολή αυτή της συμπεριφοράς (ή αλλιώς η αλλαγή σήματος στο στατικό κέρδος), κάνει ακατάλληλη τη χρήση ενός ελεγκτή σταθερού κέρδους με ολοκληρωτική δράση (όπως π.χ. ο PID), διότι ένας τέτοιος ελεγκτής είναι εξαιρετικά δύσκολο να σταθεροποιηθεί. Συνιστάται λοιπόν η χρήση προσαρμοστικού ελέγχου, ή του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου.

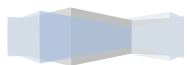
Στην εργασία αυτή επιλέγεται η δεύτερη περίπτωση, του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου. Η ανάπτυξη δηλαδή ενός συστήματος ελέγχου βασισμένου στις προρρήσεις του δυναμικού μοντέλου, και η κατάλληλη χρησιμοποίησή του, με σκοπό το βέλτιστο έλεγχο του συστήματος. Μια τέτοια στρατηγική είναι ελέγχου είναι η κατάλληλη προσέγγιση ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος και να αυξηθεί η απόδοσή του.

Όσον αφορά τη δομή της διαδικασίας ελέγχου που εφαρμόζεται στην εργασία, αρχικά χρησιμοποιούμε ένα ελεγκτή PID, για τη ρύθμιση της απαιτούμενης ισχύος. Από τη μελέτη αυτή προκύπτουν οι αδυναμίες αυτού του είδους του ελέγχου, τις οποίες καλείται να διορθώσει, η ρύθμιση με βάση το σχήμα του προβλεπτικού ελέγχου. Αφού αναπτυχθεί αυτό το σχήμα, μας ενδιαφέρει να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα δουλεύει εντός μιας βέλτιστης περιοχής, εξασφαλίζοντας υψηλή απόδοση και ταυτόχρονα ασφάλεια.

Εκτός από αυτές τις δύο περιπτώσεις ελέγχου, γίνεται χρήση και άλλων τεχνικών ελέγχου, όπως η διαδοχική ακολουθία με χρήση PID ελεγκτή, η ανάδραση καταστάσεων, καθώς και εφαρμογή του μοντέλου βέλτιστου τετραγωνικού ελεγκτή (LQG Regulator) και εξετάζεται η απόδοσή τους.

4.2 Έλεγχος με εφαρμογή PID ελεγκτή

Για την εφαρμογή του ελεγκτή PID, χρησιμοποιούμε το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά ορίζονται οι μεταβλητές κατάστασης, οι χειραγωγούμενες μεταβλητές και οι μεταβλητές εξόδου και στη συνέχεια γίνεται κατάλληλη προσαρμογή των παραμέτρων του ελεγκτή ώστε το σύστημα μαζί με τη σύνδεση του ελεγκτή να προσεγγίσει την επιθυμητή κατάσταση.



4.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά PID ελέγχου

Μια μορφή μονάδας ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε διάφορες διεργασίες βιομηχανικού ελέγχου, αποτελεί ο λεγόμενος ελεγκτής τριών όρων ή ο ελεγκτής PID. Ο ελεγκτής αυτός περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο του Laplace:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D * s \quad (80)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή αυτού περιλαμβάνει ένα αναλογικό, έναν διαφορικό, και έναν ολοκληρωτικό όρο. Η απόκριση της εξόδου του ελεγκτή στο πεδίο του χρόνου δίνεται από την συνάρτηση:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_I * \int e(t) dt + K_D * \frac{de(t)}{dt} \quad (81)$$

Ο ελεγκτής τριών όρων, καλείται επίσης και ελεγκτής PID (*Proportional Integral Derivative*).

Η συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχεί στον διαφορικό όρο είναι ουσιαστικά:

$$G_d(s) = \frac{K_D * s}{\tau_d * s + 1} \quad (82)$$

Συνήθως η σταθερά χρόνου τ_d , είναι πολύ μικρότερη συγκρινόμενη με τις σταθερές χρόνου που εμφανίζονται στην ελεγχόμενη διεργασία και για τον λόγο αυτό θεωρείται αμελητέα.

Αν θέσουμε $K_D = 0$, προκύπτει ο λεγόμενος αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής ή απλούστερα ο ελεγκτής PI:

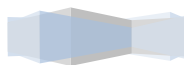
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (83)$$

Όταν είναι, $K_I = 0$, τότε έχουμε:

$$G_c(s) = K_p + K_D * s \quad (84)$$

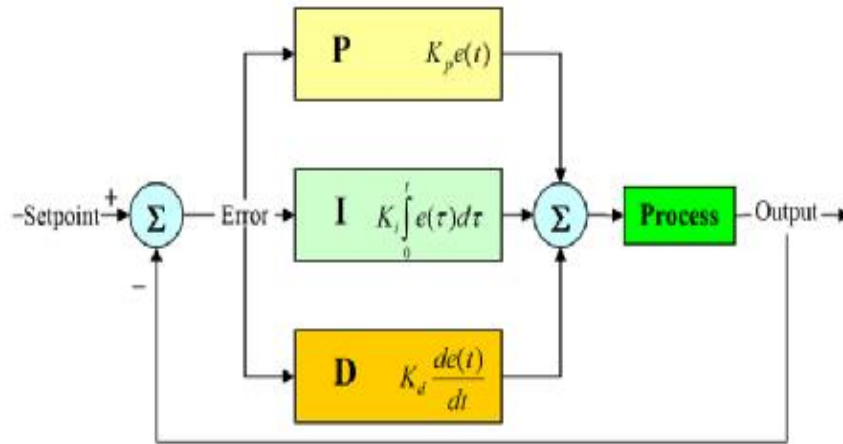
Που αντιστοιχεί στο λεγόμενο αναλογικό – διαφορικό ελεγκτή (ελεγκτής PD).

Ο PID ελεγκτής είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ανάδρασης κλειστού βρόχου που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στη βιομηχανία, και θεωρείται ο πιο διαδεδομένος ελεγκτής ανάδρασης. Η λειτουργία του βασίζεται στον υπολογισμό μιας τιμής σφάλματος που είναι η διαφορά μεταξύ μιας μετρούμενης μεταβλητής της διαδικασίας



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

και ενός επιθυμητού σημείου αναφοράς. Ο ελεγκτής προσπαθεί να μειώσει το σφάλμα, δρώντας στις χειραγωγούμενες μεταβλητές της διεργασίας. Η δομή της λειτουργίας του συστήματος της διεργασίας με την εφαρμογή του ελεγκτή PID απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3. Δομή PID Ελεγκτή

Πολλές διεργασίες βιομηχανικού τύπου ελέγχονται με την βοήθεια μονάδων ελεγκτών PID. Η δημοτικότητα του ελεγκτή PID, οφείλεται κατά ένα μέρος στην πολύ καλή συμπεριφορά του έναντι μιας αρκετά ευρείας κλίμακας λειτουργικών συνθηκών και κατά ένα άλλο μέρος στην σχετική του απλότητα η οποία επιτρέπει στον μηχανικό έναν εύκολο και αξιόπιστο χειρισμό. Για να χρησιμοποιήσουμε έναν τέτοιου είδους ελεγκτή θα πρέπει να καθορίσουμε τρεις παραμέτρους για την αντίστοιχη ελεγχόμενη διεργασία: το αναλογικό κέρδος (proportional gain), το ολοκληρωτικό κέρδος (integral gain) και το διαφορικό κέρδος (derivative gain).

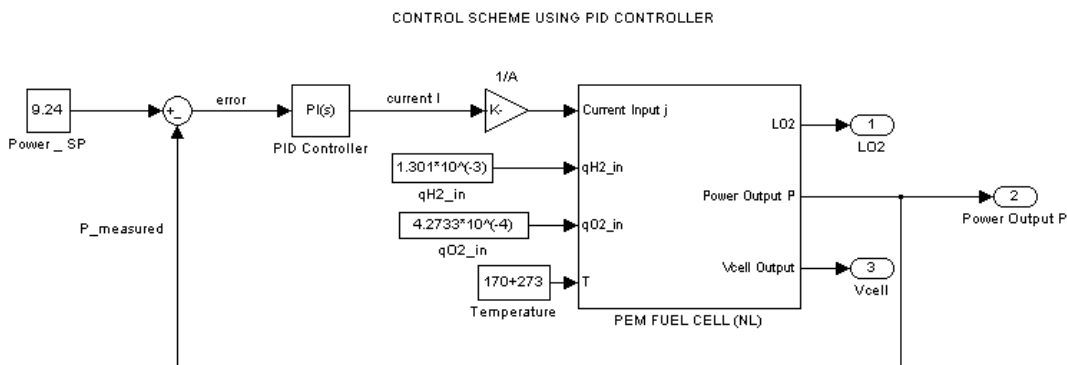
Για καλύτερη απόδοση, οι παράμετροι του ελεγκτή που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό, πρέπει να ρυθμιστούν (tuning), σύμφωνα με τη φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, ενώ η δράση του ελεγκτή είναι γενικής φύσεως. Η δράση των παραμέτρων αυτών μπορούν να ερμηνευτούν σε σχέση με το χρόνο. Ο αναλογικός όρος P, εξαρτάται από το σφάλμα του παρόντος, ο ολοκληρωτικός όρος ασχολείται με τη συσσώρευση των λαθών του παρελθόντος και ο διαφορικός όρος D με την πρόβλεψη των λαθών του μέλλοντος. Η απόκριση του συστήματος μετά τη δράση του ελεγκτή περιγράφεται με τους όρους, ποσοστό υπερύψωσης, χρόνος αποκατάστασης, τελικό σφάλμα. Η χρήση του PID ελεγκτή δεν εγγυάται τον βέλτιστο έλεγχο του συστήματος, ούτε τη σταθερότητά του.

Κάποια συστήματα μπορεί να χρειάζονται μόνο δύο από τους τρεις όρους του PID ελεγκτή, και είναι οι ελεγκτές, PI, PD. Οι ελεγκτές PI, είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι και αυτό συμβαίνει επειδή η διαφορική δράση είναι ευαίσθητη στο θόρυβο των μετρήσεων, ενώ η απουσία ολοκληρωτικής δράσης δημιουργεί σφάλμα στη προσπάθεια να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της μεταβλητής εξόδου.

4.2.2 Εφαρμογή PID ελέγχου

Για το σύστημα της κυψέλης καυσίμου που θέλουμε να εφαρμόσουμε τον PID ελεγκτή, χρησιμοποιούμε τις πληροφορίες από τη κατάστρωση του μοντέλου ρύθμισης που έγινε στο κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, το ρεύμα είναι η είσοδος του συστήματος, και αποτελεί των χειραγωγούμενη μεταβλητή, ενώ η ισχύς είναι η έξοδος του συστήματος και αποτελεί τη μεταβλητή ελέγχου. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι, οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού αντίστοιχα.

Εφόσον έχουμε συνδέσει τον ελεγκτή με το μοντέλο της διεργασίας της κυψέλης καυσίμου, θα μελετήσουμε την απόκριση του συστήματος και κατ'επέκταση θα αξιολογήσουμε την απόδοση του ελεγκτή, δηλαδή κατά πόσο ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας και ακολουθεί την επιθυμητή τροχιά που δίνουμε στη μεταβλητή ελέγχου, δρώντας στο υπολογιζόμενο ρεύμα (φορτίο). Η δομή του συστήματος με την εφαρμογή του ελεγκτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4. Εφαρμογή σχήματος ελέγχου PID ελεγκτή

Οι επιθυμητές τροχιές που δίνουμε στο σύστημα αφορούν επιθυμητές τιμές της ισχύος σε σχέση με το χρόνο, απαιτώντας από το ρυθμισμένο σύστημα της κυψέλης καυσίμου να τις ικανοποιήσει και αποτελούν τις εξής περιπτώσεις:

- Ø Σταθερές απαιτήσεις ισχύος.
- Ø Σταδιακή μεταβολή της ισχύος.

4.2.2.1 Έλεγχος για σταθερές απαιτήσεις ισχύος

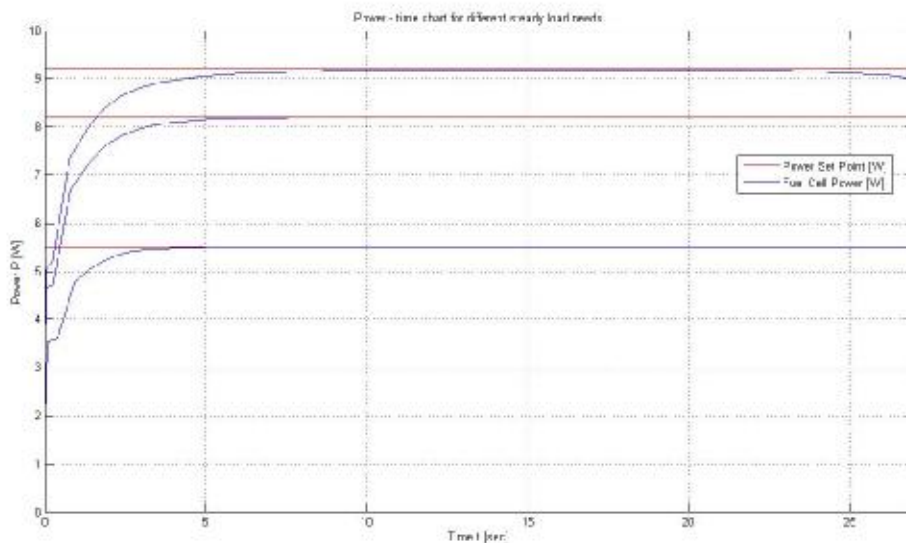
Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



Στη περίπτωση αυτή, δίνουμε σταθερές τιμές ισχύος που θέλουμε να επιτύχει η συσκευή, ξεκινώντας από μηδενικές συνθήκες λειτουργίας. Οι επιθυμητές τιμές ισχύος που δίνουμε και απαιτούμε από τη συσκευή είναι:

Από το πίνακα (10), προκύπτει ότι το μέγιστο είναι P_{max} . Έχουμε δώσει δηλαδή δύο τιμές κάτω από τη σημείο μέγιστης απόδοσης, και μια τιμή ελάχιστα πάνω από το σημείο μέγιστης απόδοσης, και αναμένουμε τα αποτελέσματα του ελεγκτή.

Θα κατασκευαστούν τα διαγράμματα, με τις αποκρίσεις της κυψέλης, δηλαδή τα διαγράμματα ισχύος και τάσεως σε σχέση με το χρόνο, καθώς και το διάγραμμα, που εμφανίζει τις δράσεις του ελεγκτή (ρεύμα - χρόνου). Στο διάγραμμα ισχύος - χρόνου, απεικονίζονται επίσης και οι επιθυμητές τροχιές για τις ισχύεις που έχουμε διαλέξει.

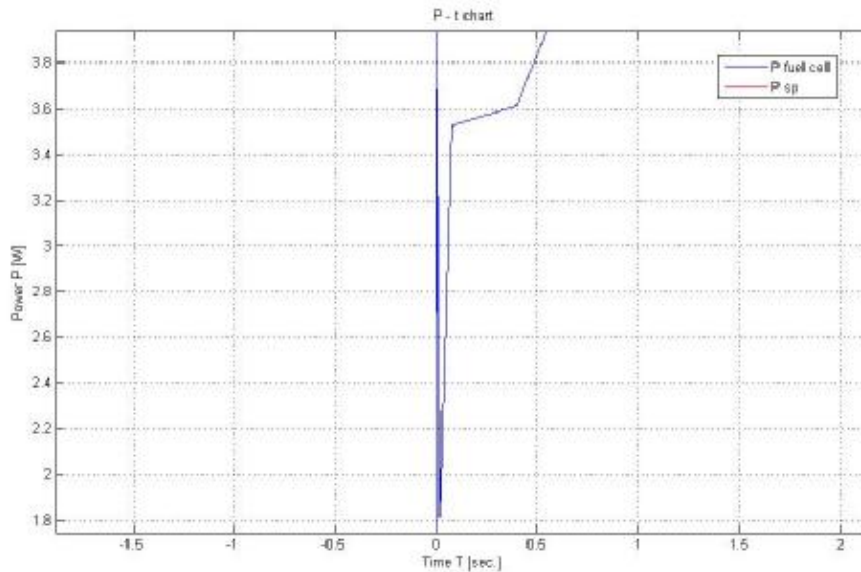


Διάγραμμα 24. Ρύθμιση ισχύος κυψέλης για σταθερές απαιτήσεις φορτίου με ελεγκτή PID

Από το διάγραμμα προκύπτει, ότι το σύστημα καταφέρνει να διατηρήσει τις απαιτήσεις της ισχύος είτε για μικρότερες τιμές από το μέγιστο όπως (P_{set1}), είτε για τιμές πολύ κοντά στο μέγιστο, όπως (P_{set2}), ενώ η απόκριση είναι σχετικά γρήγορη. Όπως βλέπουμε σταθεροποιείται σε χρόνο t_{settle} . Όταν οι ζητείται από το σύστημα, να ικανοποιήσει τιμές ελάχιστα μεγαλύτερες από το μέγιστο της ισχύος (θυμίζουμε το μέγιστο είναι P_{max}), τότε ο έλεγχος αποτυγχάνει. Παρατηρούμε στο διάγραμμα, ότι η επιθυμητή ισχύς για τη τρίτη περίπτωση (P_{set3})

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

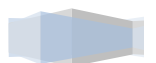
), διατηρείται για περιορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ στη συνέχεια σταδιακά χάνει το σημείο αναφοράς. Επίσης έχει αργή απόκριση στην επίτευξη του σημείου αναφοράς (έστω και προσωρινά). Το διάγραμμα παρουσιάζει ενδιαφέρον και για μια ακόμα περιοχή στο αριστερό σημείο του, το οποίο μεγενθύνουμε για να έχουμε καλύτερη απεικόνιση.

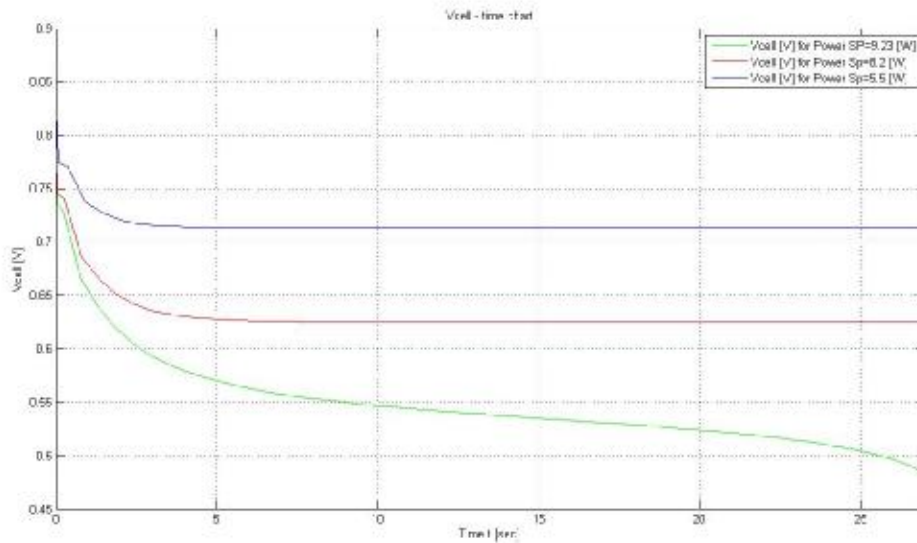


Διάγραμμα 25. Μεγένθυση περιοχής του διαγράμματος 24

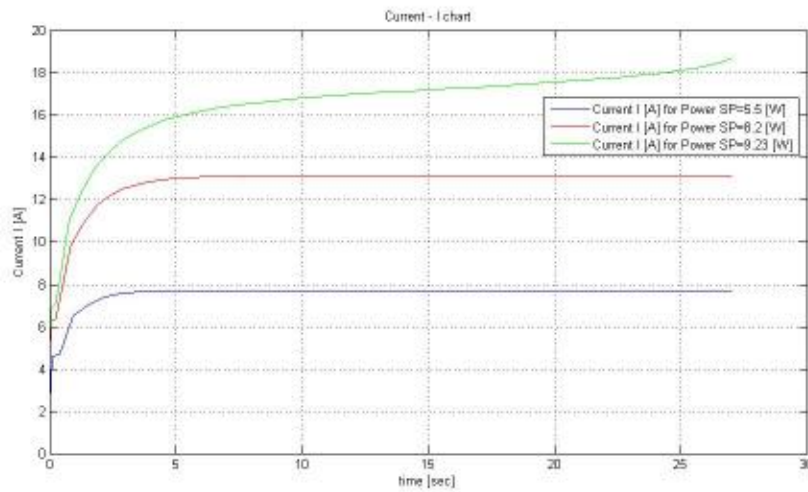
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, αυτό στην αρχή της δράσης του ελεγκτή παρουσιάζονται έντονες ταλαντώσεις στη προσπάθεια του ελεγκτή να ακολουθήσει την επιθυμητή τροχιά της ισχύος. Αυτό έχει να κάνει με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, στα οποία αδυνατεί να ανταποκριθεί πλήρως ο PID ελεγκτής.

Στα επόμενα δύο διαγράμματα, παρουσιάζονται οι μεταβολές της τάσης και του ρεύματος (δράση του ελεγκτή), για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής της επιθυμητής τροχιάς ισχύος.





Διάγραμμα 26. Δράσεις ελεγκτή στη χειραγωγούμενη μεταβλητή του ρεύματος για τρεις διαφορετικές απαιτήσεις σταθερής λειτουργίας



Διάγραμμα 27. Δράσεις ελεγκτή στη χειραγωγούμενη μεταβλητή της τάσης για τρεις διαφορετικές απαιτήσεις σταθερής λειτουργίας



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

4.2.2.2 Έλεγχος για σταδιακή μεταβολής της ισχύος

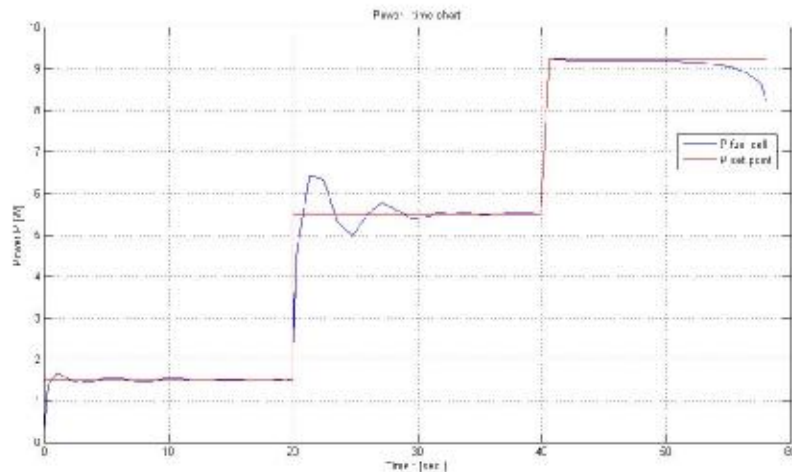
Στη περίπτωση αυτή εξετάζεται η απόκριση του συστήματος, σε μια κλιμακωτή μεταβολή της ισχύος. Εφαρμόζεται λοιπόν, ένα σήμα σταδιακής μεταβολής της ισχύος σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, και μελετάται η απόκριση του συστήματος, και η δυνατότητα του ελεγκτή να διατηρήσει αυτή την επιθυμητή τροχιά.

Στο παρακάτω πίνακα, δίνεται η τροχιά της επιθυμητής ισχύος που απαιτείται να ικανοποιηθεί από το σύστημα.

Power SP [W]	Time [sec.]
1.5	0
1.5	20
5.5	20
5.5	40
9.23	40
9.23	60

Πίνακας 11. Επιθυμητή τροχιά απίτησης ισχύος

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα, της ισχύος που αποδίδει η κυψέλη ως προς το χρόνο, ως προς τη προκαθορισμένη τροχιά.



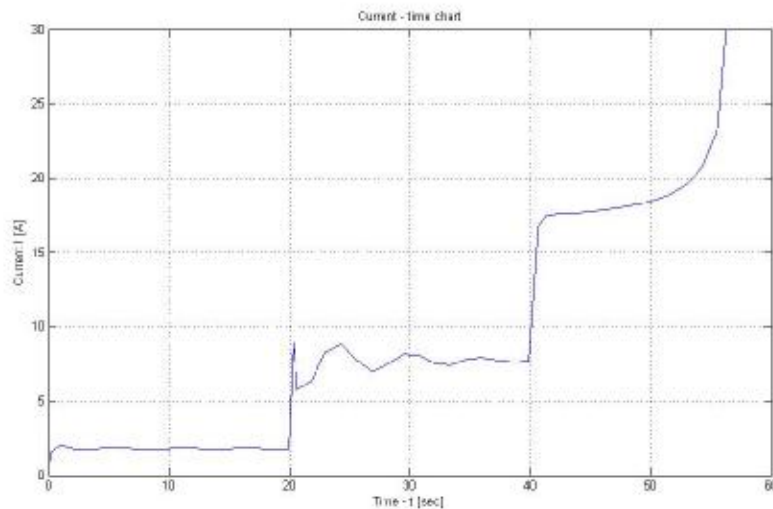
Διάγραμμα 28. Διάγραμμα, της ισχύος που αποδίδει η κυψέλη ως προς το χρόνο, ως προς τη προκαθορισμένη τροχιά



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Παρατηρούμε ότι, όταν η επιθυμητή ισχύς βρίσκεται κάτω από το μέγιστο σημείο (), το σύστημα ακολουθεί το επιθυμητό σήμα. Όταν ζητηθεί ισχύς μεγαλύτερη από τη μέγιστη, το σύστημα ακολουθεί για ένα χρονικό διάστημα την επιθυμητή τροχιά και δίνει τη μέγιστη ισχύ, στη συνέχεια όμως μειώνεται λόγω αδυναμίας του ελεγκτή.

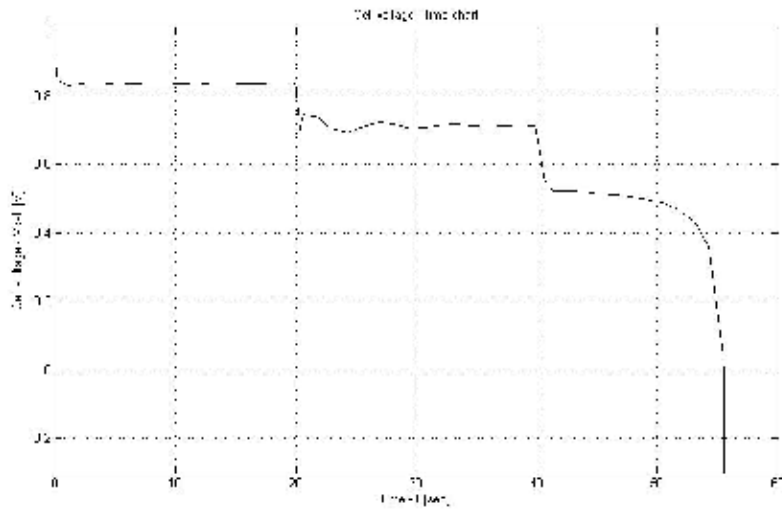
Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα της τάσης και της δράσης του ελεγκτή (επιβαλλόμενο ρεύμα) ως προς το χρόνο που αντιστοιχούν στη παραπάνω προκαθορισμένη τροχιά της επιθυμητής ισχύος.



Διάγραμμα 29. Διάγραμμα, της τάσης που αποδίδει η κυψέλη ως προς το χρόνο, ως προς τη προκαθορισμένη τροχιά

Παρατηρούμε σχετικά με το διαγραμμα της επιβαλλόμενης τάσης, ότι η κυψέλη καυσίμου για να επιτύχει τη μέγιστη παραγωγή ισχύος που δίνεται από την επιθυμητή τροχιά, προσπαθεί να αυξήσει τις τιμές του ρεύματος, δίνοντας υπερβολικές τιμές για το ρεύμα, που είναι αδύνατο να εφαρμοστούν. Κάτι αντίστοιχο, συμβαίνει και στο διάγραμμα της τάσεως συναρτήσει του χρόνου, όπου στο σημείο της μέγιστης παραγωγής ισχύος, η κυψέλη καυσίμου μειώνει τη τάση αδυνατώντας να επιτύχει το επιθυμητό σημείο λειτουργίας.





Διάγραμμα 30. Διάγραμμα, της δράσης του PID ελεγκτή της κυψέλης ως προς το χρόνο, με βάση τη προκαθορισμένη τροχιά απίτησης φορτίου

Παρατηρούμε και σε αυτό το διάγραμμα, ότι επειδή σαν τελικό επιθυμητό σημείο λειτουργίας έχουμε δώσει ένα σημείο ισχύος ($P=9.23 \text{ W}$), το οποίο δε μπορεί να επιτύχει ο ελεγκτής λόγω του ότι δεν έχει περιορισμούς λειτουργικών χαρακτηριστικών, επομένως για να επιτύχει αυτό το σημείο προσπαθεί να μειώσει το ρεύμα, κατευθύνοντας τη κυψέλη καυσίμου σε άλλο σημείο λειτουργίας μακριά από το επιθυμητό.

4.2.3 Συμπέρασμα PID ελέγχου

Από τη παραπάνω μελέτη του PID ελεγκτή, βγαίνει το συμπέρασμα, ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με ικανοποιητικό έλεγχο, όταν βρισκόμαστε σε ικανοποιητικές συνθήκες λειτουργίας. Όταν έχουμε ακραίες συνθήκες το σύστημα παρουσιάζει επιπλοκές και η λειτουργία καθίσταται προβληματική και αδύνατη. Επιπλέον βασικό μειονέκτημα του PID ελέγχου είναι ότι δεν μπορεί να συμπεριλάβει στον υπολογισμό του λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος και δεν μπορεί να εφαρμόσει πολυμεταβλητό έλεγχο. Αυτά είναι προβλήματα τα οποία η επιλογή του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου μπορεί να επιλύσει.



4.3 Έλεγχος με ανάπτυξη συστήματος προβλεπτικού ελέγχου (MPC: Model Predictive Control)

4.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο όρος ρύθμιση με χρήση προβλεπτικού μοντέλου (Model Predictive Control), αναφέρεται σε μια μεγάλη κατηγορία συστημάτων ρύθμισης που πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα. Έκτοτε οι μεθοδολογίες MPC, έχουν προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, αλλά ταυτόχρονα έχουν τύχει ευρείας αποδοχής και εφαρμογής στη βιομηχανία. Παρά το γεγονός ότι οι πρώτες εφαρμογές τους περιορίζονταν στην βιομηχανία του πετρελαίου, σήμερα οι ρυθμιστές προβλεπτικού μοντέλου έχουν επεκταθεί στην χημική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και την αεροπορική βιομηχανία.

Η χρήση του σχήματος προβλεπτικού ελέγχου θεωρείται ως μια δημοφιλής τεχνική προηγμένης ρύθμισης για την βιομηχανία εξαιτίας της δυνατότητας που έχει να λειτουργεί τη διεργασία με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται πολλαπλά και μεταβαλλόμενα λειτουργικά κριτήρια, ακόμη και όταν υπάρχουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά του συστήματος. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό του προβλεπτικού ελέγχου είναι η διαχείριση των περιορισμών. Στην πράξη όλα τα συστήματα-διεργασίες υπόκεινται σε περιορισμούς και το σχήμα ελέγχου λειτουργεί κοντά στα όρια με αποτέλεσμα να είναι πιθανές πολλές φορές οι υπερβάσεις των περιορισμών. Με τη χρήση του προβλεπτικού ελέγχου, οι υπερβάσεις μπορούν να προβλεφθούν και επομένως να διορθωθούν κατάλληλα.

Ο γενικός στόχος του του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου είναι, ο υπολογισμός της μελλοντικής τροχιάς της χειραγωγούμενης μεταβλητής u , με στόχο τη βελτιστοποίηση της μελλοντικής συμπεριφοράς της εξόδου y του συστήματος. Η βελτιστοποίηση εκτελείται στα όρια ενός περιορισμένου χρονικού παραθύρου, δίνοντας τις πληροφορίες του συστήματος, στην αρχή αυτού του χρονικού παραθύρου.

Η χρήση του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου για ρύθμιση διαφόρων συστημάτων παρουσιάζει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα:

- ∅ Η περίπτωση του πολυμεταβλητού συστήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί με ευκολία.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

- ∅ Είναι πολύ χρήσιμη όταν η μελλοντική επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. ρομποτικοί βραχίονες) είναι εκ των προτέρων γνωστή.
- ∅ Είναι μια εξ'ολοκλήρου ανοιχτή μεθοδολογία βασισμένη σε συγκεκριμένες βασικές αρχές γεγονός που επιτρέπει μελλοντικές επεκτάσεις.
- ∅ Λαμβάνει υπόψη τους νεκρούς χρόνους του συστήματος.
- ∅ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση ενός μεγάλου φάσματος διεργασιών, που παρουσιάζουν είτε σχετικά απλή, είτε ιδιαίτερα πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις ή αστάθειες.
- ∅ Ο ρυθμιστής που προκύπτει, βασίζεται σε έναν εύκολα εφαρμόσιμο, μη γραμμικό κανόνα ρύθμισης.
- ∅ Οι επεκτάσεις που αφορούν την εισαγωγή περιορισμών είναι θεωρητικά απλές και επιτρέπουν, την συστηματική εισαγωγή τους κατά την διαδικασία σχεδιασμού.

Υπάρχουν όμως και μερικά μειονεκτήματα, που αφορούν κυρίως, την εφαρμογή τους στη βιομηχανία:

- ∅ Είναι άκρως απαραίτητη η ύπαρξη ενός μοντέλου που να αποδίδει τη δυναμική του συστήματος-διεργασίας με το καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο προσδιορισμός θεμελιωδών εξισώσεων, που βασίζονται στη φύση του συστήματος συχνά δεν είναι εύκολος σε μια βιομηχανική μονάδα και επομένως είναι προτιμότερη η ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων, τα οποία ωστόσο πάντα συνοδεύονται από σφάλμα.
- ∅ Παρά τη πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων, το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο είναι αρκετά ανησυχητικό, ιδιαίτερα στη περίπτωση χρήσης μη γραμμικών μοντέλων σε συνδυασμό με περιορισμούς.

4.3.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα για τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου

Έχουν γίνει τρεις γενικές προσεγγίσεις για το μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου. Κάθε προσέγγιση χρησιμοποιεί μια μοναδική δομή μοντέλου. Στις αρχικές περιπτώσεις του σχηματισμού του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα πεπερασμένης παλμικής απόκρισης (FIR) καθώς και μοντέλα μοναδιαίας απόκρισης.

Η διαδικασία σχεδιασμού με χρήση μοντέλων FIR, περιλαμβάνει μεθόδους ελέγχου δυναμικού πίνακα (DMC), με χρήση τετραγωνικού αλγορίθμου. Τα μοντέλα FIR χρησιμοποιούνται από μηχανικούς διεργασιών, επειδή η δομή του μοντέλου αυτού δίνει προφανή περιγραφή, του χρόνου καθυστέρησης της διεργασίας, του χρόνου απόκρισης και του κέρδους. Παρ'όλα αυτά περιορίζονται σε σταθερά συστήματα και συχνά απαιτούν μεγάλες σειρές μοντέλων. Το μοντέλο αυτού του τύπου τυπικά απαιτεί 30 - 60 Συντελεστές παλμικής απόκρισης που εξαρτώνται από τη δυναμική της διεργασίας και την επιλογή των διαστημάτων δειγματοληψίας.

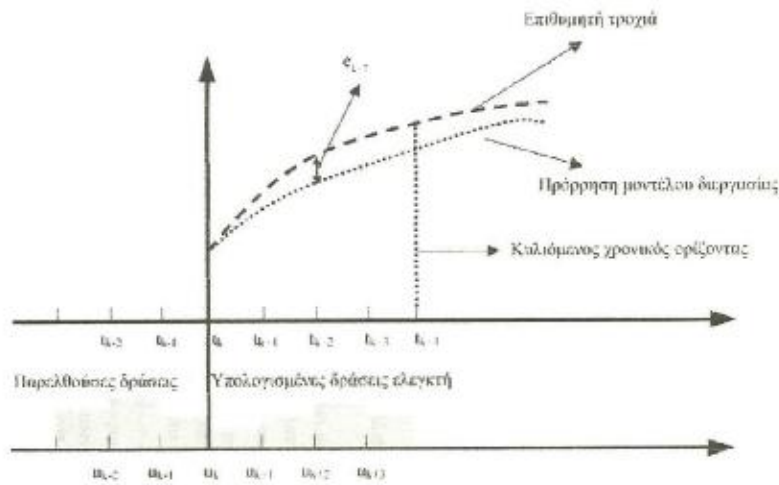
Τα μοντέλα συναρτήσεων μεταφοράς δίνουν μια σχετικά φειδωλή περιγραφή της δυναμικής της διαδικασίας και είναι εφαρμόσιμα σε σταθερά καθώς και ασταθή συστήματα. Αντιπρόσωποι των μοντέλων συναρτήσεων μεταφοράς στην εφαρμογή μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου είναι ο αλγόριθμος του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου του Peterka (1984), και ο αλγόριθμος του γενικευμένου μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου του Clarke (1987). Ο προβλεπτικός έλεγχος που βασίζεται στο μοντέλο της συνάρτησης μεταφοράς θεωρείται λιγότερο αποτελεσματικός στη διαχείριση πολυμεταβλητών διεργασιών.

Οι Ordys και Clarke, παρουσίασαν ένα μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου που βασίζεται στο σχεδιασμό μοντέλου μεταβλητών κατάστασης (1993). Πρόσφατα παρατηρήθηκε αυξημένο ενδιαφέρον στην επιλογή αυτών των μοντέλων για την εφαρμογή προβλεπτικού ελέγχου. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η τρίτη προσέγγιση με χρησιμοποίηση μοντέλου των μεταβλητών κατάστασης για την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου MPC.

4.3.3 Μεθοδολογία εφαρμογής – Γενική περιγραφή

Κοινό σημείο όλων των μεθοδολογιών MPC, είναι η χρήση ενός μοντέλου για την πρόβλεψη των μεταβλητών εξόδου της διεργασίας σε ένα πεπερασμένο μελλοντικό ορίζοντα (ορίζοντα πρόβλεψης $T_p = t_k \dots t_{k+4}$) που παραμένει σταθερός. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που επιλύεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση μιας κατάλληλα επιλεγμένης αντικειμενικής συνάρτησης. Μεταβλητές απόφασης αυτού του προβλήματος είναι και οι μελλοντικές τιμές των χειραγωγούμενων μεταβλητών ($u_k \dots u_{k+3}$), σε ένα μικρότερο ή ίσης διάρκειας μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, τον ορίζοντα ρύθμισης. Εφόσον η βέλτιστη αλληλουχία μελλοντικών ρυθμιστικών δράσεων προσδιοριστεί, μόνο η πρώτη τιμή εφαρμόζεται τελικά στο σύστημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται και επιλύεται εκ νέου την επόμενη χρονική στιγμή, αξιοποιώντας όλες τις νεότερες πληροφορίες για την διεργασία. Η παρακάτω εικόνα αναπαριστά την λειτουργία όλων των ρυθμιστών προβλεπτικού μοντέλου που περιγράφηκε στα ανωτέρω.





Σχήμα 5. Βασική Αρχή Λειτουργίας του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου

4.3.4 Βασικές πληροφορίες για τη κατάστροση ενός συστήματος μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου

Το σύστημα βέλτιστου ελέγχου καταστρώνεται με την επιλογή των κατάλληλων ρυθμιζόμενων και χειραγωγούμενων μεταβλητών που οδηγούν το σύστημα στην επιθυμητή τροχιά:

- Καταγραφή των μετρήσεων για τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές και όλες τις διαθέσιμες μεταβλητές κατάστασης.
- Την εκτίμηση των μη μετρήσιμων μεταβλητών του μοντέλου.
- Τον αλγόριθμο βέλτιστου ελέγχου (MPC) που στηρίζεται σε προβλέψεις του μοντέλου και υπολογίζει τη βέλτιστη ακολουθία δράσεων για τις χειραγωγούμενες μεταβλητές ώστε να ικανοποιηθεί η τροχιά (πορεία) αναφοράς για τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές.
- Τη μετάδοση των υπολογισμένων τιμών για τις χειραγωγούμενες μεταβλητές στα τελικά στοιχεία ελέγχου (ενεργοποιητές) της διεργασίας.



4.3.5 Αλγόριθμος υπολογισμού

Γενικές πληροφορίες

Η γενική φιλοσοφία σχεδίασης του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου είναι , ο υπολογισμός της μελλοντικής τροχιάς μιας χειραγωγούμενης μεταβλητής $u(t)$, για την βελτιστοποίηση τη μελλοντική συμπεριφορά της εξόδου της διεργασίας. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται εντός ενός περιορισμένου χρονικού πλαισίου (πλαίσιο κινούμενου ορίζοντα). Το πλαίσιο που εξαρτάται από τον χρόνο , περιγράφεται από τον αρχικό χρόνο t_i , και το εύρος του πλαισίου T_p . Δεδομένης χρονικής στιγμής t_i , το πλαίσιο καθορίζεται στο χρονικό διάστημα από t_i , έως $t_i + T_p$. Το εύρος του παραθύρου παραμένει σταθερό. Ο ορίζοντας πρόβλεψης ισούται με το μήκος του πλαισίου του κινούμενου ορίζοντα T_p , και υποδεικνύει κατά πόσο μακριά στο μέλλον θέλουμε να επιτύχουμε πρόβλεψη. Παρόλο που η βέλτιστη τροχιά του μελλοντικού σήματος ελέγχου πετυχαίνεται στο κινούμενο πλαίσιο χρονικού ορίζοντα, η κανονική δράση ελέγχου στη διεργασία, χρησιμοποιεί τη πρώτη δράση του σήματος εισόδου, αγνοώντας την υπόλοιπη τροχιά.

Χρησιμοποίηση παραγώγου του σήματος ελέγχου και ανάπτυξη βοηθητικού μοντέλου

Το κλειδί για το σχεδιασμό του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου, είναι η μοντελοποίηση της τροχιάς ελέγχου , χρησιμοποιώντας ένα σετ από ορθοκανονικές εξισώσεις. Για να επιτευχθεί σύγκλιση θα πρέπει η τροχιά ελέγχου να ικανοποιεί μια σημαντική προϋπόθεση: Το ολοκλήρωμα από το μηδέν ως το άπειρο του τετραγώνου της συνάρτησης ελέγχου πρέπει να είναι φραγμένο, δηλαδή να ισχύει:

$$\int_0^{\infty} u(t)^2 dt < \infty$$

Αυτό όμως πρακτικά δεν ισχύει για σταθερά εξωτερικά σήματα εισόδου. Αντιθέτως όμως ισχύει πάντα για τη περίπτωση της παραγώγου του σήματος ελέγχου $\dot{u}(t)$, όταν εφαρμόζονται στο σύστημα σταθερά σήματα εισόδου.

Το πρώτο βήμα για την εφαρμογή του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου είναι η κατασκευή ενός μοντέλου που θα χρησιμοποιεί την παράγωγο του σήματος ελέγχου , σαν σήμα εισόδου διατηρώντας την ίδια έξοδο.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε να ρυθμίσουμε μια διεργασία m-εισόδων, και q-εξόδων (δηλαδή ένα πολυμεταβλητό σύστημα), που περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις μεταβλητών κατάστασης:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= A_m * x_m(t) + B_m * u(t) \\ y(t) &= C_m * x_m(t) \end{aligned}$$



Ορίζουμε τις βοηθητικές μεταβλητές:

$$\begin{aligned}z(t) &= \dot{x}_m(t) \\ y(t) &= C_m * x_m(t)\end{aligned}$$

Επιλέγουμε ένα καινούριο διάνυσμα κατάστασης:

$$x(t) = \begin{bmatrix} z(t)^T \\ y(t)^T \end{bmatrix}^T$$

Με βάση αυτές τις μεταβλητές που έχουν οριστεί, το παραπάνω μοντέλο μετασχηματίζεται στο «αυξημένο» μοντέλο και αποκτά τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & \mathbf{0}_m^T \\ C_m & \mathbf{0}_{q \times q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ \mathbf{0}_{q \times m} \end{bmatrix} * \dot{u}(t)$$

$$y(t) = [\mathbf{0}_m \quad I_{q \times q}] * \begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$$

Όπου,

$$A = \begin{bmatrix} A_m & \mathbf{0}_m^T \\ C_m & \mathbf{0}_{q \times q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_m \\ \mathbf{0}_{q \times m} \end{bmatrix}, C = [\mathbf{0}_m \quad I_{q \times q}]$$

Παρατηρούμε ότι το «αυξημένο» μοντέλο έχει τη πρώτη παράγωγο της χειραγωγούμενης μεταβλητής (σήμα ελέγχου) σαν είσοδο και η έξοδος παραμένει ίδια.

Το αυξημένο μοντέλο, θα πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας. Η ελεγχιμότητα είναι απαραίτητη, για να μπορεί το σύστημα προβλεπτικού ελέγχου να επιτύχει την επιθυμητή απόκριση κλειστού βρόχου, ενώ η παρατηρησιμότητα απαιτείται ώστε για τον επιτυχή σχεδιασμό ενός εκτιμητή.

Για ένα γραμμικό μη μεταβαλλόμενο σύστημα ως προς το χρόνο, όταν η απόκριση κλειστού βρόχου είναι σταθερή, η παράγωγος του σήματος ελέγχου για εξάλειψη των διαταραχών, τείνει εκθετικά στο μηδέν, μετά από μια μεταβατική περίοδο. Το ίδιο συμβαίνει και για μια μεταβολή σημείου αναφοράς μιας μεταβλητής ελέγχου (έξοδος). Η διαπίστωση αυτή θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της αρχής της απομάκρυνσης του ορίζοντα ελέγχου (receding horizon control).

Μοντελοποίηση της τροχιάς του σήματος ελέγχου

Θεωρούμε ένα κινούμενο χρονικό πλαίσιο, από τη χρονική στιγμή t_i , μέχρι $t_i + T_p$ μια χρονική μεταβλητή τ που παίρνει τιμές μέσα σε αυτό το πλαίσιο. Η παράγωγος του



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

σήματος ελέγχου μέσα σε αυτό το πλαίσιο είναι $\dot{u}(\tau)$. Το βοηθητικό μοντέλο περιγράφεται, από τα μητρώα (A,B,C). Δεδομένης της γνώσης της μεταβλητής κατάστασης $x(t_i)$ σε μια χρονική στιγμή t_i σαν αρχική κατάσταση, ο έλεγχος ανάδρασης καταστάσεων, με κέρδος ανάδρασης K, είναι για $0 \leq \tau \leq T_p$:

$$\dot{u}(t) = -K * x(t)$$

Το σύστημα κλειστού βρόχου, με αρχική κατάσταση $x(t_i)$, παίρνει τη μορφή:

$$x(\tau) = e^{(A-BK)\tau} * x(t_i)$$

$$\dot{u}(t) = -K * e^{(A-BK)\tau} * x(t_i)$$

Το κέρδος K έχει επιλεγεί έτσι, ώστε το σύστημα κλειστού βρόχου να είναι σταθερό με όλες τις ιδιοτιμές του μητρώου (A-BK), να είναι στο αριστερό μέρος του μιγαδικού επιπέδου. Εφόσον ισχύει αυτό, η παράγωγος $\dot{u}(\tau)$ τείνει εκθετικά στο μηδέν.

Επομένως για για οποιοδήποτε σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται έλεγχος ανάδρασης με σταθερό μητρώο ανάδρασης K, υπάρχει πάντα μια καθορισμένη τροχιά του σήματος ελέγχου $\dot{u}(\tau)$, που προσδιορίζεται από ένα σετ εκθετικά φθίνουσων συναρτήσεων, μέσα στο διάστημα $0 \leq \tau \leq T_p$. Επιπλέον επειδή αυτή η καθορισμένη τροχιά ικανοποιεί τη προϋπόθεση,

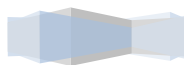
$$\lim_{T_p \rightarrow \infty} \int_0^{T_p} \dot{u}(\tau)^2 d\tau < \infty$$

η παράγωγος του σήματος ελέγχου μπορεί να περιγραφεί από ένα σετ ορθοκανονικών εξισώσεων. Σε αυτή τη περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε οι εξισώσεις Laguerre, είτε οι εξισώσεις Kautz. Στη περίπτωση μας χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις Laguerre, και η παράγωγος γίνεται:

$$\dot{u}(\tau) \approx \sum_{i=1}^N c_i * l_i(\tau) = L(\tau)^T \eta$$

Όπου, $\eta = [c_1 c_2 \dots c_N]^T$ είναι το διάνυσμα των συντελεστών, και $l_i(\tau)$, $i = 1, 2, \dots, N$ είναι ο αριθμός των εξισώσεων που συνθέτουν το σετ που αναζητάμε το οποίο προσομοιάζει το σήμα ελέγχου.

Για ένα δεδομένο $p > 0$, και ένα μικρό αριθμό $\epsilon > 0$, αυξάνοντας τον αριθμό N ισχύει:



$$\int_0^{\infty} \left(\dot{u}(\tau) - \sum_{i=1}^N c_i * l_i(\tau) \right)^2 < \epsilon$$

Το οποίο επιβεβαιώνει την ιδιότητα της σύγκλισης.

Οι εξισώσεις Laguerre, εκφράζονται χρησιμοποιώντας τη παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1(\tau) \\ \dot{l}_2(\tau) \\ \vdots \\ \dot{l}_N(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ -2p & \ddots & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ -2p & \dots & -2p & -p \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_1(\tau) \\ l_2(\tau) \\ \vdots \\ l_N(\tau) \end{bmatrix}$$

Η επίλυση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης, δίνει ένα σετ από εξισώσεις Laguerre, για $i = 1, 2, \dots, N$.

$$L(\tau) = e^{A_p \tau} * L(\mathbf{0})$$

Όπου ,

$L(\mathbf{0})$, θεωρείται αρχική κατάσταση του διανύσματος κατάστασης, και

$$A_p = \begin{bmatrix} -p & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ -2p & \ddots & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ -2p & \dots & -2p & -p \end{bmatrix}$$

Πρόβλεψη απόκρισης της διεργασίας

Αν υποθέσουμε, ότι σε μια δεδομένη χρονική στιγμή t_i , η μεταβλητή $x(t_i)$ είναι γνωστή. Στο χρόνο τ , με $\tau > 0$, η πρόβλεψη της μεταβλητής αυτής που συμβολίζεται με τη σχέση:

$$x(t_i + \tau | t_i) = e^{A \tau} * x(t_i) + \int_0^{\tau} e^{A*(\tau-\gamma)} * B * \dot{u}(\gamma) d\gamma$$

Το διάνυσμα των στοιχείων του σήματος ελέγχου είναι:

$$\dot{u}(\tau) = [u_1(\tau) \quad u_2(\tau) \quad \dots \quad u_m(\tau)]^T$$

Ενώ το μητρώο εισόδου είναι:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$B_m = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_m]$$

Το i -οστό σήμα ελέγχου $u_i(t)$, μπορεί να γραφεί σύμφωνα με τη προσέγγιση με τις εξισώσεις Laguerre:

$$u_i(\tau) = L_i(\tau)^T * \eta_i$$

Όπου

$$L_i(\tau)^T = [l_1^i(\tau) \quad l_2^i(\tau) \quad \dots \quad l_{N_i}^i(\tau)]$$

Και οι συντελεστές

$$\eta_i = [c_1^i \quad c_2^i \quad \dots \quad c_{N_i}^i]^T$$

Η πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης στο χρόνο τ , είναι:

$$x(t_i + \tau | t_i) = e^{A\tau} * x(t_i) + \int_0^\tau e^{A(\tau-\gamma)} * [B_1 L_1(\gamma)^T \quad \dots \quad B_m L_m(\gamma)^T] d\gamma \eta$$

Που μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$x(t_i + \tau | t_i) = e^{A\tau} * x(t_i) + \varphi(\tau)^T \eta$$

Όπου,

$$\varphi(\tau)^T = \int_0^\tau e^{A(\tau-\gamma)} * [B_1 L_1(\gamma)^T \quad \dots \quad B_m L_m(\gamma)^T] d\gamma$$

Και

$$\eta^T = [\eta_1^T \quad \eta_2^T \quad \dots \quad \eta_m^T]$$

Η πρόβλεψη της εξόδου στο χρόνο τ είναι :

$$y(t_i + \tau | t_i) = C * e^{A\tau} x(t_i) + C * \varphi(\tau)^T \eta$$

Ο όρος $\varphi(\tau)^T$, ονομάζεται ολκλήρωμα συνέλιξης και υπολογίζεται με βάση τη διαδικασία που ακολουθείται:

Μπορεί να αποδειχτεί ότι ισχύει η αλγεβρική εξίσωση:

$$A * \varphi(\tau)^T - \varphi(\tau)^T * A_p^T = -B * L(\tau)^T + e^{A\tau} B * L(0)^T$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να επιλυθεί αλγεβρικά και να επιλυθεί ο όρος $\varphi(\tau)^T$.



Σε περίπτωση που η πρόβλεψη $x(t_i + \tau|t_i)$ υπολογίζεται, με όρους $\tau = 0, h, 2h, \dots, T_p$, τότε το ολοκλήρωμα συνέλιξης μπορεί να λυθεί επαναληπτικά, με την εξίσωση:

$$\varphi(kh)^T = e^{Ah} \varphi((k-1)h)^T + \varphi(h)^T * e^{(k-1)A_p^T h}$$

Στρατηγική Βέλτιστου Ελέγχου

Για τη στρατηγική βέλτιστου ελέγχου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να ορίσουμε μια αντικειμενική συνάρτηση:

$$J = \int_0^{T_p} (x(t_i + \tau|t_i)^T * Q * x(t_i + \tau|t_i) + \dot{u}(\tau)^T * R * \dot{u}(\tau)) d\tau$$

Με αρχική τιμή $x(t_i)$.

Η βέλτιστη τιμή $\dot{u}(\tau)$, υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση κόστους, και αποτελεί τη βέλτιστη τιμή μέσα στο κινούμενο χρονικό πλαίσιο. Η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται καθορίζοντας τις τιμές των μητρώων βαρύτητας Q,R.

Για να εισάγουμε στη συνάρτησης βελτιστοποίησης το σήμα αναφοράς της επιθυμητής τροχιάς τροποποιούμε τη συνάρτηση κόστους στη μορφή:

$$J = \int_0^{T_p} \left((r(t) - y(t_i + \tau|t_i))^T * (r(t) - y(t_i + \tau|t_i)) + \dot{u}(\tau)^T * R * \dot{u}(\tau) \right) d\tau$$

Ο στόχος του προβλεπτικού ελέγχου είναι, είναι η ικανοποίηση του παραπάνω νόμου ελέγχου που εισάγει η συνάρτηση κόστους ώστε να οδηγηθούν οι προβλέψεις της εξόδου $y(t_i + \tau|t_i)$, όσο πιο κοντά γίνεται στη μελλοντική τιμή του σημείου αναφοράς.

Όταν το σημείο αναφοράς είναι ένα σταθερό σήμα $r(t_i)$, αφαιρώντας το από από τη μεταβλητή $y(t_i + \tau|t_i)$, το αυξημένο μοντέλο παίρνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t_i + \tau|t_i) \\ \dot{e}(t_i + \tau|t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & \mathbf{0}_m^T \\ C_m & \mathbf{0}_{q \times q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} z(t_i + \tau|t_i) \\ e(t_i + \tau|t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ \mathbf{0}_{q \times m} \end{bmatrix} \dot{u}(\tau)$$

Όπου ,

$$e(t_i + \tau|t_i) = y(t_i + \tau|t_i) - r(t_i)$$



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Το διάνυσμα $r(t_i)$, είναι ένα σταθερό διάνυσμα στο χρονικό πλαίσιο , $0 \leq \tau \leq T_p$ και ορίζεται ως:

$$r(t_i) = [r_1(t_i) \quad r_2(t_i) \quad \dots \quad r_q(t_i)]$$

Ισχύει ότι:

$$C = [0_m \quad I_{q \times q}]$$

Επιλέγοντας το συντελεστή βαρύτητας Q , να πάρει τιμές με βάση τη σχέση, $Q = C^T C$ (ώστε να έχει άμεση σχέση με το «αυξημένο» μοντέλο, η συνάρτηση κόστους μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$J = \int_0^{T_p} \left((x(t_i + \tau|t_i))^T * Q * (x(t_i + \tau|t_i)) + \dot{u}(\tau)^T * R * \dot{u}(\tau) \right) d\tau$$

Όπου, η αρχική τιμή της μεταβλητής κατάστασης $x(t_i)$, να περιέχει το σφάλμα $y(t_i + \tau|t_i) - r(t_i)$, αντί μόνο της τιμής $y(t_i)$.

Επίλυση βέλτιστου ελέγχου

Έχοντας καταλήξει στη παραπάνω εξίσωση ελέγχου θα προχωρήσουμε στην επίλυση, καθορίζοντας πρώτα τις τιμές των συντελεστών στάθμισης.

Ο συντελεστής R , πρέπει να είναι διαγώνιος:

$$R = \text{diag}\{r_k\}$$

Με $k=1,2,\dots,m$.

Επομένως ο δεύτερος όρος της συναρτησης κόστους γίνεται:

$$\int_0^{T_p} \dot{u}(\tau)^T * R * \dot{u}(\tau) d\tau = \sum_{k=1}^m \int_0^{T_p} r_k * \dot{u}_k(\tau)^2 d\tau$$

Συνήθως ο ορίζοντας πρόβλεψης επιλέγεται να είναι αρκετά μεγάλος , ώστε να ισχύει: $\dot{u}(\tau) \approx 0$ για $\tau \geq T_p$.

Επομένως,



$$\int_0^{T_p} \dot{u}_k(\tau)^T * R * \dot{u}_k(\tau) d\tau \approx \int_0^{\infty} \eta_k^T * L_k(\tau) * L_k(\tau) * \eta_k d\tau = \eta_k^T \eta_k$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$J = \int_0^{T_p} \left((x(t_i + \tau|t_i))^T * Q * (x(t_i + \tau|t_i)) + \eta_k^T * R_L * \eta_k \right) d\tau$$

Όπου,

R_L , είναι ένα διαγώνιο μητρώο που έχει τη μορφή:

$$R_k = r_k * I_{N_k \times N_k}$$

Επόμενο βήμα είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους.

Αντικαθιστώντας για τη μεταβλητή $x(t_i + \tau|t_i)$, τη τιμή της πρόβλεψής της που υπολογίστηκε από τη σχέση, $x(t_i + \tau|t_i) = e^{A\tau} * x(t_i) + \varphi(\tau)^T \eta$, η συνάρτηση κόστους γίνεται:

$$J = \int_0^{T_p} \left((e^{A\tau} * x(t_i) + \varphi(\tau)^T \eta)^T * Q * (e^{A\tau} * x(t_i) + \varphi(\tau)^T \eta) d\tau + \eta^T * R_L * \eta \right) d\tau$$

Που είναι μια τετραγωνική συνάρτηση του η :

$$J = \eta^T * \left[\int_0^{T_p} \varphi(\tau) * Q * \varphi(\tau)^T d\tau + R_L \right] * \eta + 2\eta^T \left(\int_0^{T_p} \varphi(\tau) * Q * e^{A\tau} d\tau \right) * x(t_i)$$

Ορίζουμε ως:

$$\Omega = \int_0^{T_p} \varphi(\tau) * Q * \varphi(\tau)^T d\tau + R_L$$

Και

$$\Psi = \int_0^{T_p} \varphi(\tau) * Q * e^{A\tau} d\tau$$

Ολοκληρώνοντας τη τετραγωνοποίηση της συνάρτησης κόστους προκύπτει:



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

$$J = [\eta + \Omega^{-1} * \Psi * x(t_i)]^T * \Omega * [\eta + \Omega^{-1} * \Psi * x(t_i)] + x(t_i)^T \left(\int_0^{T_p} e^{A^T \tau} * Q * e^{A \tau} d\tau \right) * x(t_i) - x(t_i)^T * \Psi^T * \Omega^{-1} * \Psi * x(t_i)$$

Η βέλτιστη τιμή η , για την οποία ελαχιστοποιείται η συνάρτηση κόστους είναι:

$$\eta = -\Omega^{-1} * \Psi * x(t_i)$$

Όταν υπολογιστεί αυτή η τιμή η , τότε, η τροχιά των συναρτήσεων $\dot{u}(\tau)$, μπορεί να προσομοιωθεί πολύ καλά χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Laguerre.

$$\dot{u}(\tau) = \begin{bmatrix} L_1(\tau)^T & o_2 & \dots & o_m \\ o_1 & L_2(\tau)^T & \dots & o_m \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ o_1 & o_2 & \dots & L_m(\tau)^T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_m \end{bmatrix}$$

Όπου το διάνυσμα o_k παριστάνει τα μηδενικά.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του ελέγχου είναι ο υπολογισμός των τιμών Ω, Ψ , οποίες για ένα πεπερασμένο χρονικό πλαίσιο T_p , υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω προσεγγίσεις:

$$\Omega = \sum_{k=0}^M \varphi(kh) Q \varphi(kh)^T h + R_L$$

$$\Psi = \sum_{k=0}^M \varphi(kh) Q * e^{Akh} h$$

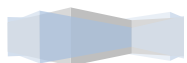
Όπου ο όρος $\varphi(kh)$, υπολογίζεται επαναληπτικά όμως αναφέρθηκε παραπάνω:

Απομάκρυνση Ορίζοντα Ελέγχου

Η βέλτιστη τιμή η υπολογίστηκε για όλα τα τ του χρονικού διαστήματος $0 \leq \tau \leq T_p$.

Εφαρμόζοντας την αρχή της απομάκρυνσης του ορίζοντα ελέγχου (η δράση ελέγχου θα χρησιμοποιήσει τη παράγωγο του μελλοντικού σήματος ελέγχου στο χρόνο $\tau=0$), η παράγωγος του βέλτιστου ελέγχου για πρόβλημα χωρίς περιορισμούς για πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα είναι:

$$\dot{u}(t_i) = \begin{bmatrix} L_1(\mathbf{0})^T & o_2 & \dots & o_m \\ o_1 & L_2(\mathbf{0})^T & \dots & o_m \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ o_1 & o_2 & \dots & L_m(\mathbf{0})^T \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_m \end{bmatrix}$$



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Για μια αυθαίρετη χρονική στιγμή t , ισχύει $\dot{\eta} = -\Omega^{-1} * \Psi * x(t_i)$, επομένως η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\dot{u}(t_i) = \begin{bmatrix} L_1(\mathbf{0})^T & o_2 & \dots & o_m \\ o_1 & L_2(\mathbf{0})^T & \dots & o_m \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ o_1 & o_2 & \dots & L_m(\mathbf{0})^T \end{bmatrix} * \Omega^{-1} \Psi x(t) = -K_{mpc} x(t)$$

Το μητρώο ανάδρασης είναι:

$$K_{mpc} = \begin{bmatrix} L_1(\mathbf{0})^T & o_2 & \dots & o_m \\ o_1 & L_2(\mathbf{0})^T & \dots & o_m \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ o_1 & o_2 & \dots & L_m(\mathbf{0})^T \end{bmatrix} \Omega^{-1} \Psi$$

Παρατηρούμε, ότι η αρχή της απομάκρυνσης του ορίζοντα ελέγχου είναι η φύση του ελέγχου ανάδρασης καταστάσεων, εξαιτίας της εξάρτησης του με τη μεταβλητή κατάστασης $x(t_i)$. Το αυξημένο μοντέλο είναι:

$$\dot{x}(t) = A * x(t_i) + B * \dot{u}(t_i)$$

Ενώ το σύστημα κλειστού βρόχου είναι:

$$\dot{x}(t) = (A - B * K_{mpc}) * x(t_i)$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές του κλειστού βρόχου του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου.

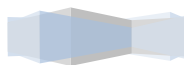
Για να υπολογίσουμε τη δράση του ελεγκτή πρέπει να υπολογίσουμε τη τιμή του παρακάτω ολοκληρώματος:

$$u(t) = \int_0^t \dot{u}(\tau) d\tau$$

Η μεταβλητή κατάστασης όπως έχει οριστεί αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο είναι η παράγωγος της μεταβλητής κατάστασης του αρχικού μοντέλου $\dot{x}_m(t)$ ενώ το δεύτερο είναι το σήμα σφάλματος $y(t) - r(t)$.

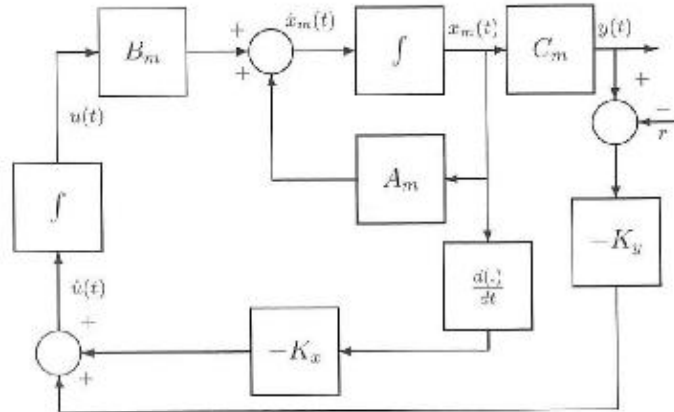
Επομένως μπορούμε να γράψουμε για τον ελέγχο ανάδρασης κατάστασης:

$$\dot{u}(t) = -K_{mpc} x(t) = -[K_x \quad K_y] * \begin{bmatrix} \dot{x}_m(t) \\ y(t) - r(t) \end{bmatrix}$$



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Το λειτουργικό διάγραμμα της εφαρμογής του ελέγχου σύμφωνα με το μοντέλο του προβλεπτικού ελέγχου είναι:



Σχήμα 6. Λειτουργικό διάγραμμα εφαρμογής MPC ελεγκτή σε γραμμικό μοντέλο

Χρήση Εκτιμητή

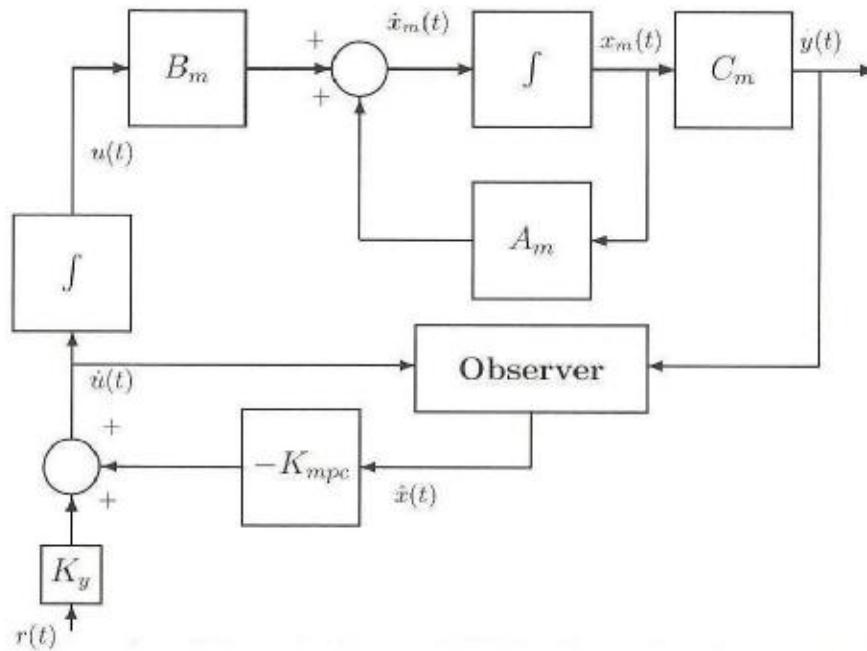
Η πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς της διεργασίας εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της μεταβλητής στο χρόνο. Γενικώς η μεταβλητή είναι μη μετρήσιμη. Επίσης η μεταβλητή, περιέχει τη παράγωγο της μεταβλητής κατάστασης του αρχικού συστήματος. Επειδή ο χειρισμός της παραγωγή αυτής της τιμής ενισχύει την υψηλή συχνότητα θορύβου (high frequency noise) του συστήματος συστήνεται ο υπολογισμός των συναρτήσεων παραγωγού δια μέσου της χρήσης ενός φίλτρου. Επομένως ένας εκτιμητής θα παίξει διπλό ρόλο, την εκτίμηση των μη μετρούμενων μεταβλητών, και το φιλτράρισμα του θορύβου των μετρήσεων.

Η εξίσωση του εκτιμητή δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

Όπου,

, είναι η εκτίμηση της, είναι το κέρδος του εκτιμητή, και (A,B,C) είναι τα μητρώα του «αυξημένου» συστήματος.

Το λειτουργικό διάγραμμα της εφαρμογής του ελέγχου με την προσθήκη του εκτιμητή τροποποιείται και παίρνει τη μορφή:



Σχήμα 7. Λειτουργικό διάγραμμα εφαρμογής MPC ελεγκτή μεχρησιμοποίηση εκτιμητή σε γραμμικό μοντέλο

4.5.5 Εφαρμογή ελέγχου στο σύστημα κυψέλης καυσίμου - Αποτελέσματα

Η δομή του συστήματος ελέγχου είναι βασικό στοιχείο , για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχήματος ελέγχου για τη διεργασία. Περιγράφεται από την επιλογή των ρυθμιζόμενων και χειραγωγούμενων μεταβλητών για την επίτευξη των στόχων του του συστήματος ελέγχου. Αρχικά προσδιορίζονται οι στόχοι του συστήματος ελέγχου. Οι στόχοι αυτοί είναι οι βέλτιστες τιμές των ρυθμιζόμενων μεταβλητών του συστήματος που καθορίζονται από τις λειτουργικές προδιαγραφές.

Για τη κυψελή καυσίμου ο στόχος είναι η ικανοποίηση της απαιτούμενης ισχύος, ο οποίος είναι άμεσος. Η ικανοποίηση της απαίτησης για μια βέλτιστη τιμή της αναλογίας περίσσειας οξυγόνου στη κάθοδο , είναι ένας έμμεσος στόχος γιατί η αναλογία της ποσότητας του οξυγόνου είναι μη μετρήσιμη μεταβλητή και εξαρτάται από το ρεύμα και από τη παροχή εισόδου του οξυγόνου. Στη περίπτωση που έχουμε έμμεσους στόχους πρέπει οι μεταβλητές που σχετίζονται με αυτόν, να εκτιμηθούν με χρήση ενός εκτιμητή (όπως π.χ. φίλτρο kalman) μέσω συναρτησιακών σχέσεων με ανάμεσα στις μεταβλητές της διαδικασίας.

Στην εργασία αυτή έχουμε μοναδικό στόχο τη ικανοποίηση της απαιτούμενης ισχύος. Η συμπερίληψη του έμμεσου στόχου, της ικανοποίησης ταυτόχρονα και της αναλογίας

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

ποσότητας οξυγόνου στη κάθοδο, προυποθέτει την κατάστροψη πολυμεταβητού ελέγχου με δύο ρυθμιζόμενες μεταβλητές και επειδή η τιμή της περισσειας του οξυγόνου στη κάθοδο είναι μη μετρήσιμη, απαιτείται εφαρμογή κατάλληλου εκτιμητή για την εκτίμηση της. (Η περίπτωση αυτή δεν εξετάζεται από την παρούσα εργασία).

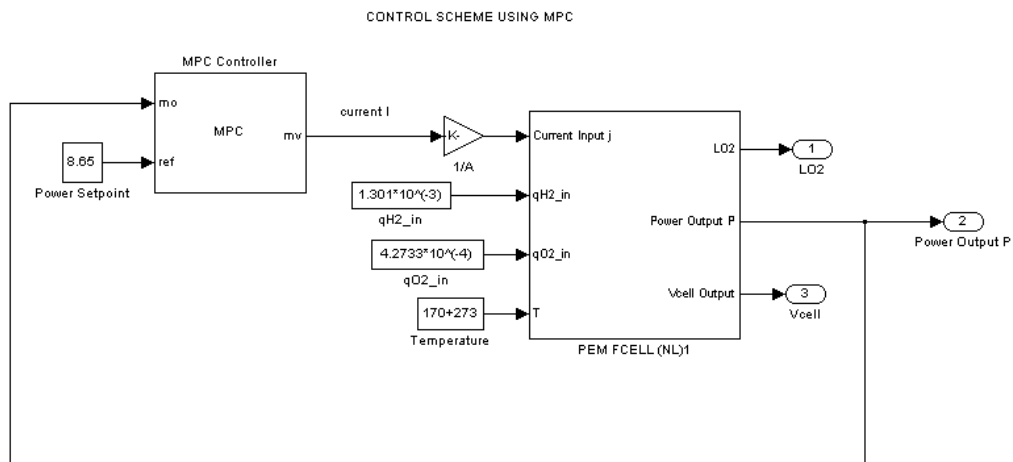
Συνεπώς , η μεταβλητή ελέγχου είναι , η ισχύς , και η χειραγωγούμενη μεταβλητή είναι το ρεύμα στο οποίο δρα ο ελεγκτής. Οι μερικές πιέσεις αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης όπως και στη περίπτωση της εφαρμογής του PID ελεγκτή.

Εφόσον έχουμε καθορίσει τις μεταβλητές για το μοντέλο του συστήματος ελέγχου, πρέπει να καθορίσουμε και την αντικειμενική συνάρτηση κόστους, η οποία βελτιστοποιεί τη δραστηριότητα του ελέγχου με βάση κάποιες παραμέτρους που μπορούμε να επιλέξουμε (tuning parameters).

Η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιήσουμε έχει τη μορφή:

Η βέλτιστη δράση ελέγχου , υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας τη παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση κόστους.Ο όρος , όπως ορίζεται από το επαυξημένο μοντέλο, περιέχει το σφάλμα μεταξύ της μεταβλητής ελέγχου και της επιθυμητής τιμής.Οι συντελεστές βαρύτητας Q, R , αποδίδουν τη σχετική σπουδαιότητα των προαναφερθέντων όρων για κάθε μεταβλητή, και καθορίζουν τη κατεύθυνση της βελτιστοποίησης.

Η δομή του ελέγχου δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8. Λειτουργικό διάγραμμα εφαρμογής MPC ελεγκτή στο μη γραμμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Για την επίτευξη του μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου είναι απαραίτητη η επιλογή ενός μοντέλου που θα περιγράφει τη δυναμική του συστήματος, πάνω στο οποίο θα βασιστεί η εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου που είναι μια κλασική μέθοδος ανάδρασης καταστάσεων. Στη περίπτωση που καλούμαστε να ρυθμίσουμε τη διεργασία της κυψέλης καυσίμου, το μοντέλο που προκύπτει από την εφαρμογή των εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του, που έγινε στο κεφάλαιο 2, είναι ισχυρά μη γραμμικό. Αυτό εμποδίζει την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου, που απαιτεί ένα γραμμικό μοντέλο που να περιγράφει τη δυναμική του συστήματος, το οποίο θα ρυθμίσει. Μια λύση σε αυτή τη περίπτωση, θα ήταν η υλοποίηση του προβλεπτικού ελέγχου χρησιμοποιώντας το μη γραμμικό μοντέλο που έχει παραχθεί στο κεφάλαιο 2, και εφαρμογή του αλγορίθμου ρύθμισης. Η διαδικασία αυτή λέγεται μη γραμμικός προβλεπτικός έλεγχος, και ξεφεύγει αρκετά από τους στόχους αυτής της εργασίας.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος λοιπόν θα χρησιμοποιηθεί μια τεχνική στην οποία εφαρμόζεται γραμμικοποίηση του μη γραμμικού μοντέλου, σε μια καθορισμένη περιοχή λειτουργίας και παράγεται ένα γραμμικό μοντέλο που περιγράφει αρκετά καλά τη δυναμική του συστήματος στη περιοχή λειτουργίας που επιλέχθηκε.

Η γραμμικοποίηση του μη γραμμικού μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια του SIMULINK από το πακέτο του MATLAB.

Επιλέγουμε ένα σημείο κοντά στο μέγιστο της καμπύλης ισχύος ρεύματος. Συγκεκριμένα: $I = 13 [A]$. Η τιμή αυτή του ρεύματος αντιστοιχεί σε παραγόμενη ισχύ: $P = 8.155 [W]$

Οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης σταθεροποιούνται και είναι:

$$p_{H_2} = 2.0831 [atm]$$

$$p_{O_2} = 1.6887 [atm]$$

$$p_{H_2O} = 0.35438 [atm]$$

Από γραμμικοποίηση μέσω του SIMULINK, παίρνουμε το γραμμικοποιημένο σύστημα στη μορφή του μοντέλου των μεταβλητών κατάστασης.

Το γραμμικό μοντέλο έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= A_{ln} * x_m + B_{ln} * u \\ y &= C_{ln} * x_m + D_{ln} * u \end{aligned}$$

Με βάση των καθορισμό των μεταβλητών που έχει γίνει πιο πάνω για την εφαρμογή του προβλεπτικού μοντέλου, μπορούμε να γράψουμε για τις μεταβλητές:

Για τη μεταβλητή ελέγχου:

$$u = [I - current]^T$$



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Για τις μεταβλητές κατάστασης (μερικές πιέσεις των αερίων):

$$x_m = \begin{bmatrix} P_{H_2} \\ P_{H_2O} \\ P_{O_2} \end{bmatrix}$$

Για τις μεταβλητές ελέγχου:

$$y = [P - power]$$

Οι τιμές των πινάκων, του γραμμικού μοντέλου που προέκυψε από τη γραμμικοποίηση είναι:

$$A_{ln} = \begin{bmatrix} -1.076 & 0 & 0 \\ 0 & -1.412 & 0 \\ 0 & 0 & -1.059 \end{bmatrix}, B_{ln} = \begin{bmatrix} -0.009419 \\ 0.02355 \\ -0.01177 \end{bmatrix}$$

$$C_{ln} = [0.1191 \quad -0.7002 \quad 0.07347], D_{ln} = [0.4149]$$

Έχοντας υπολογίσει το γραμμικοποιημένο μοντέλο διαπιστώνουμε ένα πρόβλημα το οποίο εμποδίζει την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου. Έχουμε υποθέσει στο κεφάλαιο στο οποίο έγινε αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου, ότι για να εφαρμοσθεί ο νόμος του ορίζοντα απομάκρυνσης ελέγχου (receding horizon control law), πρέπει να μην υπάρχει καμμία άμεση σύνδεση μεταξύ των εισόδων και των εξόδων του συστήματος. Επειδή το μητρώο D, δεν είναι μηδενικό ακυρώνεται αυτός ο νόμος με αποτέλεσμα, να μην είναι δυνατό να εφαρμοσθεί ο προβλεπτικός έλεγχος.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται, συνδέοντας στο παραπάνω γραμμικό μοντέλο ένα φίλτρο με μια πολύ μικρή σταθερά χρόνου. Το φίλτρο αυτό εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ των εισόδων και των εξόδων του συστήματος και μηδενίζει το μητρώο D, δίνοντας τη δυνατότητα για την εφαρμογή του τροποποιημένου μοντέλου (με τη προσθήκη φίλτρου) για τον προβλεπτικό έλεγχο. Επειδή έχουμε συνδέσει ένα φίλτρο με πολύ μικρή σταθερά χρόνου δεν επηρεάζεται η δυναμική του μοντέλου, επομένως το νέο μοντέλο που παράγεται έχει ίδια δυναμική συμπεριφορά με το προηγούμενο, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του προβλεπτικού ελέγχου.

Το τροποποιημένο μοντέλο που προκύπτει μετά από τη σύνδεση του φίλτρου έχει τις ακόλουθες τιμές, για τα μητρώα A,B,C,D.

$$A_{ln_filter} = \begin{bmatrix} -4.547 & -1.925 & -0.7204 & -0.4022 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}, B_{ln_filter} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{ln_filter} = [0.4149 \quad 0.3633 \quad 0.2104 \quad 0.1614], D_{ln_filter} = [0]$$

Το επόμενο βήμα για την εφαρμογή του προβλεπτικού ελέγχου MPC, είναι η κατασκευή του «επαυξημένου μοντέλου», όπως περιγράφηκε στην υποενότητα σχετικά με τον αλγόριθμο εφαρμογής του προβλεπτικού ελέγχου, που να περιέχει σαν ξεχωριστή μεταβλητή τη διαφορά της μετρούμενης από την επιθυμητή τιμή, δηλαδή το σφάλμα και τη παράγωγο της χειραγωγούμενης μεταβλητής \dot{u} , που εκφράζει τη πρόβλεψη των δράσεων του ελεγκτή. Το επαυξημένο μοντέλο λοιπόν έχει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ln_filter} & \mathbf{0}_m^T \\ C_{ln_filter} & \mathbf{0}_{qxq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ \mathbf{0}_{qxm} \end{bmatrix} * \dot{u}(t) \quad (86)$$

$$y(t) = [\mathbf{0}_m \quad I_{qxq}] * \begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (87)$$

Όπου,

$$z(t) = \dot{x}_m(t)$$

$$y(t) = C_{ln_filter} * x_m(t)$$

$$x(t) = [z(t) \quad y(t) - r(t)]^T$$

Και, q ο αριθμός των εξόδων, ενώ m ο αριθμός των εισόδων αντίστοιχα.

Για τους πίνακες του «επαυξημένου μοντέλου» :

$$A = \begin{bmatrix} A_{ln_filter} & \mathbf{0}_m^T \\ C_{ln_filter} & \mathbf{0}_{qxq} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_m \\ \mathbf{0}_{qxm} \end{bmatrix}, C = [\mathbf{0}_m \quad I_{qxq}]$$

Υπολογίζοντας τις τιμές για τους πίνακες του «επαυξημένου μοντέλου», στη συνέχεια το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων του MPC ελεγκτή.

Οι παράμετροι έχουν τις τιμές:

$$Q = \begin{bmatrix} [\mathbf{0} & \dots & \mathbf{0}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{10000} \end{bmatrix}, R=1$$

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις εξισώσεις Laguerre, είναι:

$$p = 1.04$$

$$N = 5$$



Και ο ορίζοντας πρόβλεψης είναι:

$$T_p = 30$$

Στη συνέχεια, έχοντας ορίσει τις παραμέτρους, μέσω του κώδικα που έχει στηθεί σε MATLAB, λύνεται ο αλγόριθμος του MPC ελεγκτή και υπολογίζεται το σταθερό κέρδος του ελεγκτή, το οποίο εφαρμόζεται στη παράγωγο των δράσεων, καθώς και στο σφάλμα της μετρούμενης από την επιθυμητή τιμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα δυναμικό μητρώο για το αρχικό (και όχι το «επαυξημένο» σύστημα) το οποίο ρυθμίζει το σύστημα εφαρμόζοντας πρόβλεψη για τις δράσεις του ελεγκτή χρησιμοποιώντας τις παρελθοντικές τιμές.

Το κέρδος επομένως του MPC είναι:

$$K_{MPC} = [5.1222 \quad 4.4887 \quad 2.6017 \quad 1.9973 \quad 30.0319]$$

Έχοντας υπολογίσει τον ελεγκτή τον συνδέουμε με το γραμμικοποιημένο μοντέλο που υπολογίσαμε στην αρχή σύμφωνα με τη δομή ελέγχου όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα του αλγορίθμου εφαρμογής του ελεγκτή MPC. Κάνοντας τις κατάλληλες προσαρμογές στις παραμέτρους του ελεγκτή (και συνεχιζόμενους υπολογισμούς), ώστε να επιτύχουμε ικανοποιητική ρύθμιση για το γραμμικό μοντέλο, μπορούμε στη συνέχεια να εφαρμόσουμε τον ελεγκτή στο μη γραμμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου.

Στο συγκεκριμένο σημείο αξίζει να σημειωθεί, ότι ο ελεγκτής MPC, απαιτεί σαν εισόδους του, τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης όπως έχει εξηγηθεί στην ενότητα επεξήγησης του αλγορίθμου MPC, και φαίνεται επίσης από το σχετικό σχήμα (---). Επειδή οι μεταβλητές κατάστασης είναι πρακτικά μη μετρήσιμες, είναι επιβεβλημένη η χρήση ενός εκτιμητή που θα δίνει εκτιμήσεις των μεταβλητών κατάστασης ως εισόδους στον ελεγκτή MPC για να πραγματοποιηθεί η πορεία του ελέγχου.

Η εφαρμογή του εκτιμητή, απαιτεί την παρατηρησιμότητα του «επαυξημένου» μοντέλου. Ο πίνακας παρατηρησιμότητας δίνεται από τη σχέση:

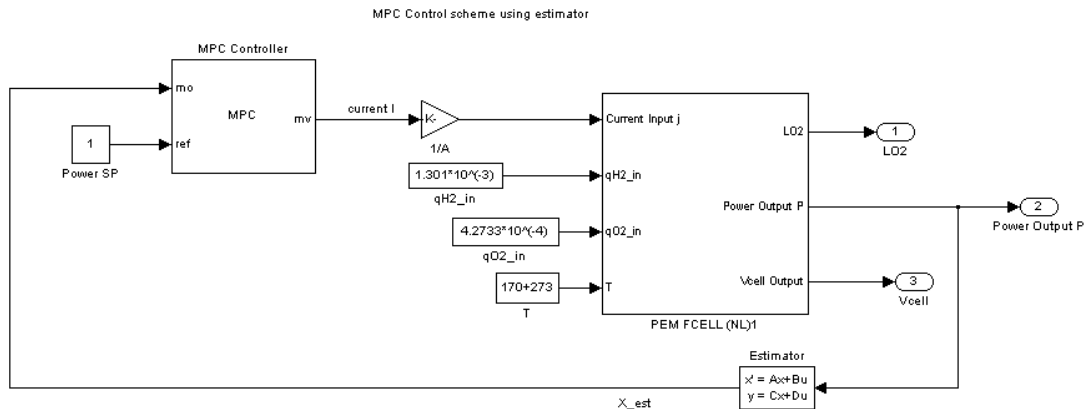
$$Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (88)$$

Ελέγχουμε την παρατηρησιμότητα του «επαυξημένου» μοντέλου υπολογίζοντας την ορίζουσα του παραπάνω πίνακα παρατηρησιμότητας Q. Προκύπτει μη μηδενική ορίζουσα του πίνακα παρατηρησιμότητας, οπότε το σύστημα είναι παρατηρήσιμο.

Αρχικά ο εκτιμητής εφαρμόζεται στο γραμμικοποιημένο μοντέλο, ενώ στη συνέχεια, συνδέεται στο μη γραμμικό σύστημα της κυψέλης καυσίμου σύμφωνα με το παρακάτω λειτουργικό διάγραμμα.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου



Σχήμα 9. Λειτουργικό διάγραμμα εφαρμογής MPC ελεγκτή στο μη γραμμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του κέρδους του εκτιμητή ως εξής:

Επειδή δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί ο νόμος ελέγχου, σύμφωνα με το σχήμα (9), λόγω του ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι μη μετρήσιμες, τότε, θα εφαρμοστεί ο έλεγχος χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις αυτών των μεταβλητών κατάστασης. Οι εκτιμήσεις υπολογίζονται από τον εκτιμητή σύμφωνα με τη σχέση:

Μετατρέποντας αυτή τη σχέση, στη μορφή:

Όπου y η έξοδος του συστήματος και u η δράση του ελεγκτή. Από τη παραπάνω σχέση διαμορφώνουμε τη μορφή του εκτιμητή σε μορφή μοντέλου μεταβλητών κατάστασης και γίνεται:

Όπου:



Συνεπώς: $A_{est} = [A - L * C]$, $B_{est} = [B - L * D \ L]$

Το κέρδος του εκτιμητή L υπολογίζεται με τη παρακάτω εντολή του Matlab.

$$K = place(A_{est}, B_{est}, p)$$

Όπου p είναι οι επιθυμητές θέσεις των πόλων κλειστού βρόχου του μοντέλου του εκτιμητή. Οι θέσεις των πόλων κλειστού βρόχου του μοντέλου του εκτιμητή επιλέγονται έτσι ώστε να είναι 4-10 φορές πιο αργοί από τους πόλους κλειστού βρόχου του «επαυξημένου συστήματος» στο οποίο έχει εφαρμοστεί ο νόμος ελέγχου. Οι πόλοι του επαυξημένου συστήματος υπολογίζονται από τις παρακάτω εντολές του MATLAB:

```
Acl=A-B*K_mpc;  
eig(Acl);
```

Όπου A_{cl} , είναι ο πίνακας A του επαυξημένου συστήματος, στο οποίο έχει εφαρμοστεί η ανάδραση με τον πίνακα K_{mpc} .

Το κέρδος του εκτιμητή είναι:

$$L = \begin{bmatrix} -5.2536 \\ 13.8865 \\ 41.2950 \\ 30.9491 \\ 100.1654 \end{bmatrix}$$

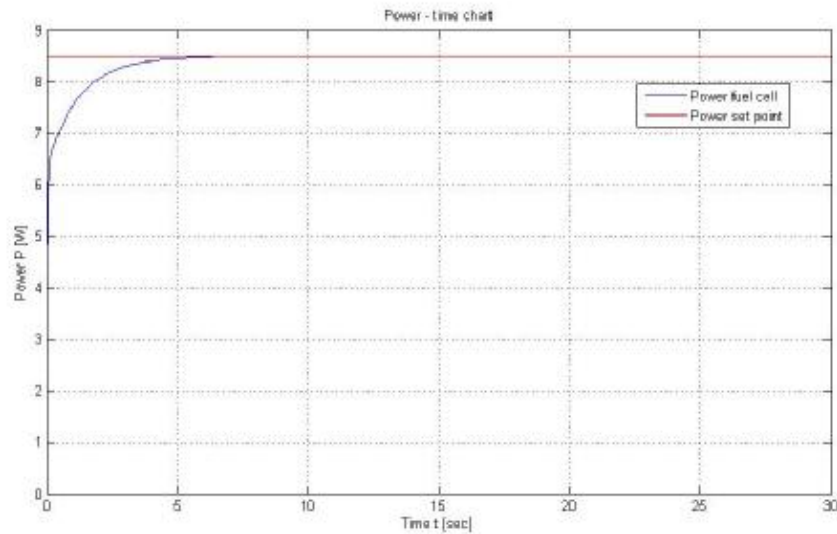
Έχοντας υπολογίσει το κέρδος του εκτιμητή, μπορούμε να συνδέσουμε τον εκτιμητή στον ελεγκτή MPC, σύμφωνα με το λειτουργικό διάγραμμα που απεικονίστηκε παραπάνω. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής μπορούμε να προσομοιάσουμε το σύστημα μαζί με τον ελεγκτή σε οποιοσδήποτε επιθυμητές συνθήκες.

Στη συνέχεια καθορίζουμε δύο διαφορετικές επιθυμητές τροχιές, όπως είχε γίνει και στη περίπτωση ρύθμισης με τον PID ελεγκτή. Η πρώτη περίπτωση, είναι, απότομη αύξηση της ισχύος από μια προηγούμενη σταθερή τιμή σε μια καινούρια, δηλαδή σταθερή απαίτηση ισχύος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση καταστρώνεται μια τροχιά συνεχιζόμενων μεταβολών, δηλαδή σταδιακά μεταβαλλομενη ισχύς.

Για τη πρώτη περίπτωση θεωρούμε τη συσκευή, να μεταβαίνει από τη σταθερή κατάσταση ηρεμίας σε κατάσταση, με $P = 8.5 [W]$.

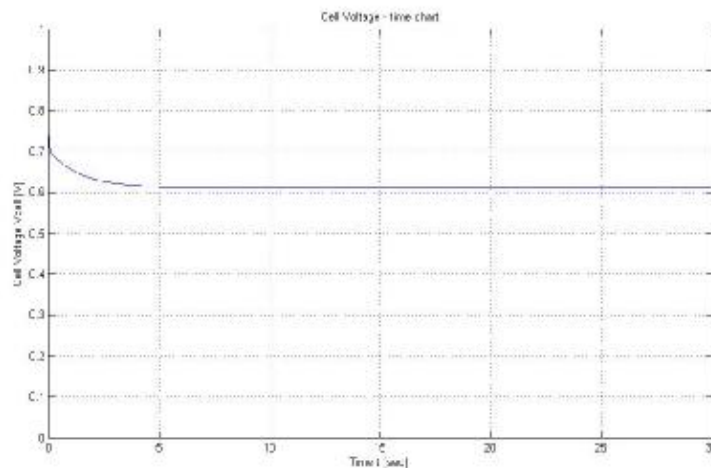
Τα διαγράμματα της ισχύος που αποδίδει η κυψέλη καυσίμου, του ρεύματος στο οποίο δρα ο ελεγκτής, καθώς και της τάσης λειτουργίας της δίνονται παρακάτω. Στο διάγραμμα της ισχύος, σχεδιάζεται επίσης και η επιθυμητή τροχιά για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης του ελεγκτή.





Διάγραμμα 31. Διάγραμμα της ισχύος που παράγει η κυψέλη καυσίμου για σταθερή απαίτηση φορτίου με χρήση MPC ελεγκτή

Παρατηρούμε αρκετά καλή απόκριση για την ισχύ που παράγει το σύστημα, με καλή απόκριση στα πρώτα 4-5 sec. , ενώ από ότι φαίνεται στο σχήμα δεν παρουσιάζονται ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που σημαίνει ότι ο ελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί αρκετά καλά τη μη γραμμική δυναμική του συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της τάσης και της δράσης του ελεγκτή ως προς το χρόνο.



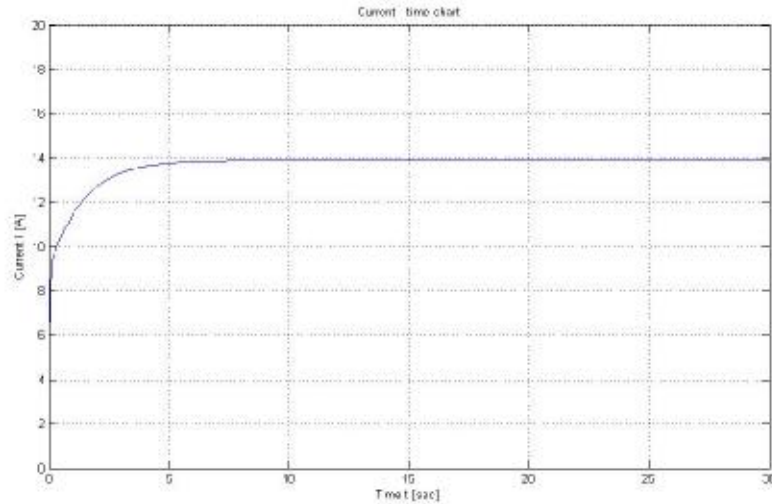
Διάγραμμα 32. Διάγραμμα της παραγόμενης τάσης παράγει η κυψέλη καυσίμου για σταθερή απαίτηση φορτίου με χρήση MPC ελεγκτή



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Η τάση σταθεροποιείται σε τιμή περίπου 0.6 V.

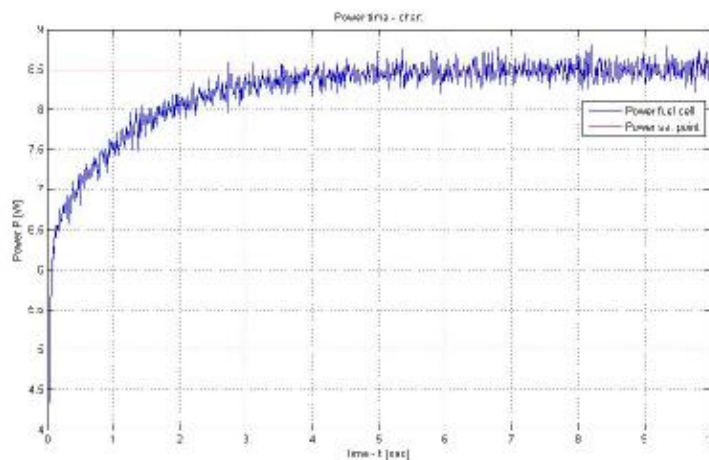
Αντίστοιχα για τη δράση του ελεγκτή έχουμε:



Διάγραμμα 33. Διάγραμμα της δράσης του ελεγκτή MPC με στόχο να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της ισχύος

Για τη δράση του ελεγκτή, μπορούμε να σχολιάσουμε την αρκετά ομαλή ροή, κάτι που είναι επιθυμητό, ώστε μη προκληθούν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις στην απόκριση της ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, που απεικονίζει την απόκριση της κυψέλης καυσίμου, σε συνθήκες θορύβου, εισάγοντας ένα θόρυβο που επηρεάζει τις μετρήσεις της ισχύος στην έξοδο.



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Διάγραμμα 34. Απόκριση κυψέλης καυσίμου σε συνθήκες θορύβου.

Παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής επιτυγχάνει ικανοποιητική απόκριση προσπαθώντας να εξαλείψει τις διαταραχές του θορύβου.

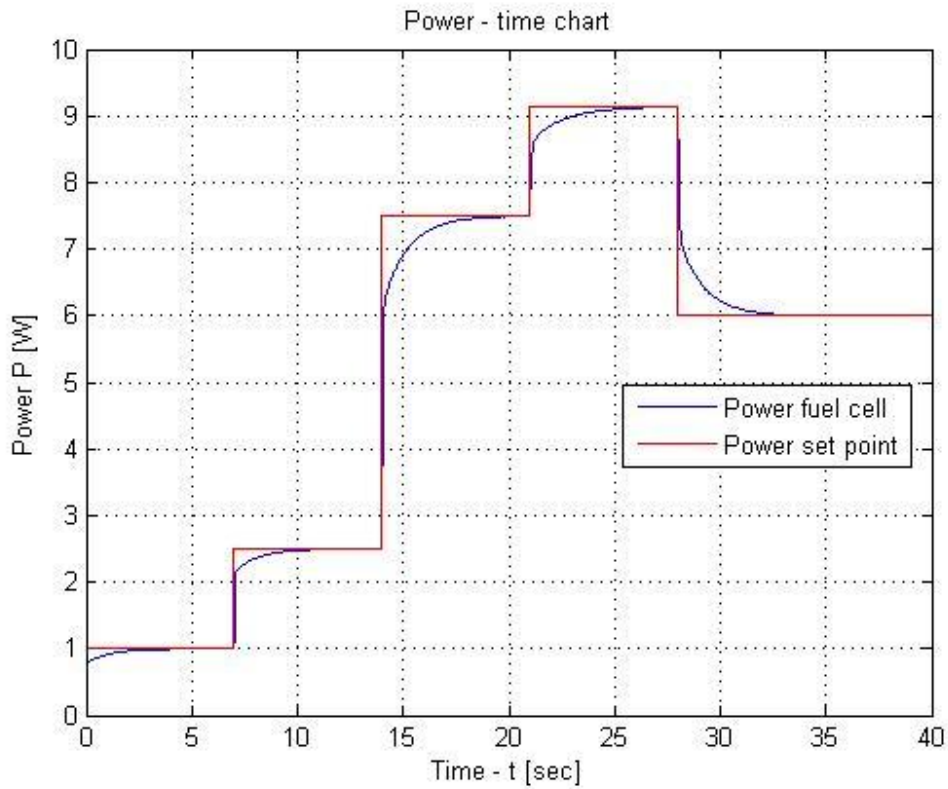
Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση δοκιμών, θα καθορίσουμε μια επιθυμητή τροχιά, που θα αποτελεί την επιθυμητή ισχύ που θέλουμε να αποδώσει το σύστημα. Η τροχιά αυτή καθορίζεται από τα σημεία του παρακάτω πίνακα:

Power SP [W]	Time [sec.]
1	0
1	7
2.5	7
2.5	14
7.5	14
7.5	21
9.15	21
9.15	28
6	28
6	40

Πίνακας 12. Επιθυμητή τροχιά ζητούμενης ισχύος

Στη συνέχεια σχεδιάζονται τα ίδια διαγράμματα, όπως και στη πρώτη περίπτωση της σταθερής απαίτησης ισχύος.

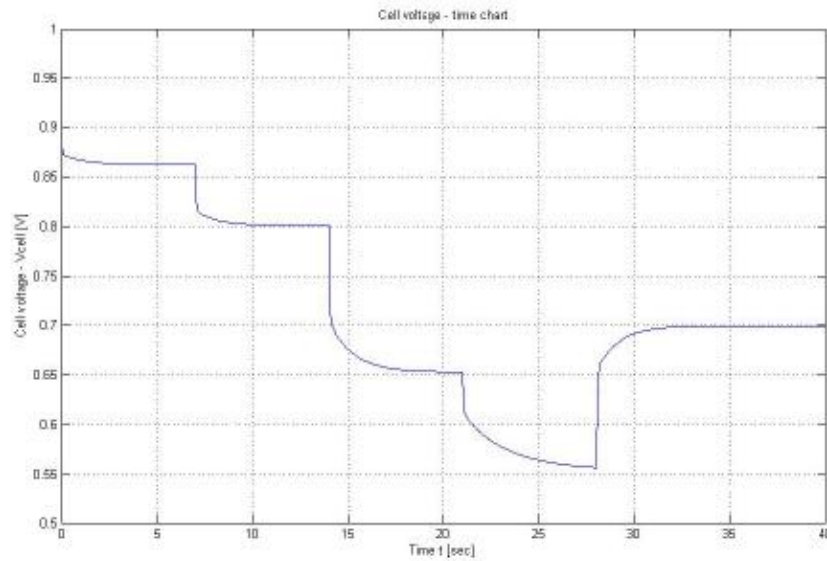




Διάγραμμα 35. Διάγραμμα απόκρισης ισχύος κυψέλης καυσίμου για δεδομένη επιθυμητή πορεία λειτουργίας με χρήση MPC ελεγκτή

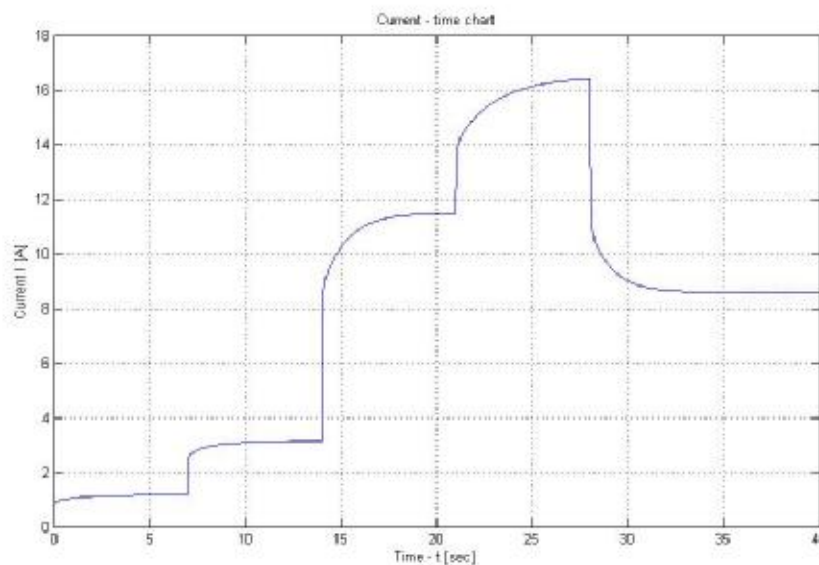
Για το διάγραμμα της ισχύος, παρατηρούμε αρκετά καλή προσαρμογή του συστήματος στις απαιτήσεις της ζήτησης ισχύος, και αρκετά γρήγορη συμπεριφορά στο χρόνο.





Διάγραμμα 36. Διάγραμμα απόκρισης τάσης ζ κυψέλης καυσίμου για δεδομένη επιθυμητή πορεία λειτουργίας με χρήση MPC ελεγκτή

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε για τη τάση ότι σταθεροποιείται σε τιμή περίπου 0.7 V. Το αποτέλεσμα της μεταβολής είναι αρκετά ικανοποιητικό, διακρίνοντας μια αρκετά ομαλή ροή, που συμβάλει στην εύρυθμη λειτουργία της κυψέλης μαζί με τα συνεργαζόμενα βοηθητικά στοιχεία.

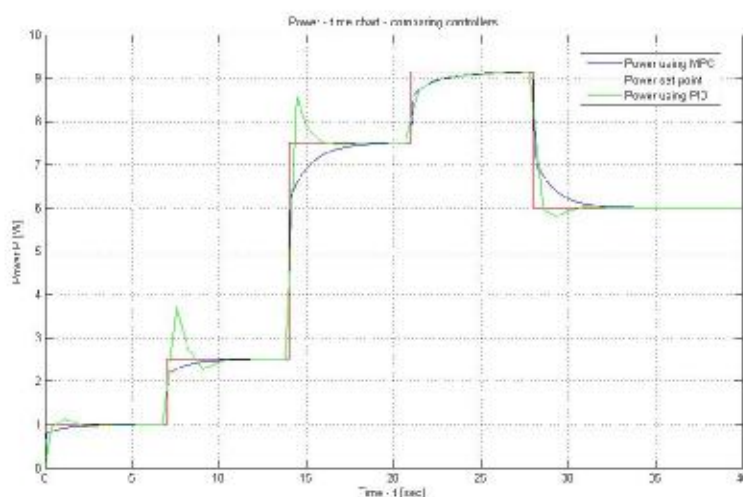


Διάγραμμα 37. Διάγραμμα δράσης του ελεγκτή MPC για δεδομένη επιθυμητή πορεία λειτουργίας



Παρόμοια ποιοτική συμπεριφορά παρουσιάζει και το ρεύμα που είναι η δράση του ελεγκτή ως προς το χρόνο. Η ομαλή ροή χωρίς την εμφάνιση ταλαντώσεων είναι επιθυμητό αποτέλεσμα για την ομαλή λειτουργία της συσκευής.

Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση δοκιμών της λειτουργίας του συστήματος, εφαρμόζοντας αυξημένη πορεία απαίτησης ισχύος, μπορούμε να κάνουμε μια σύγκριση του MPC με τον PID ελεγκτή, ως προς την απόκριση που επιτυγχάνουν για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Προκύπτει λοιπόν το διάγραμμα:



Διάγραμμα 38. Διάγραμμα σύγκρισης MPC ελεγκτή με PID, για δεδομένη πορεία αυξημένη πορεία ζήτησης ισχύος από το σύστημα

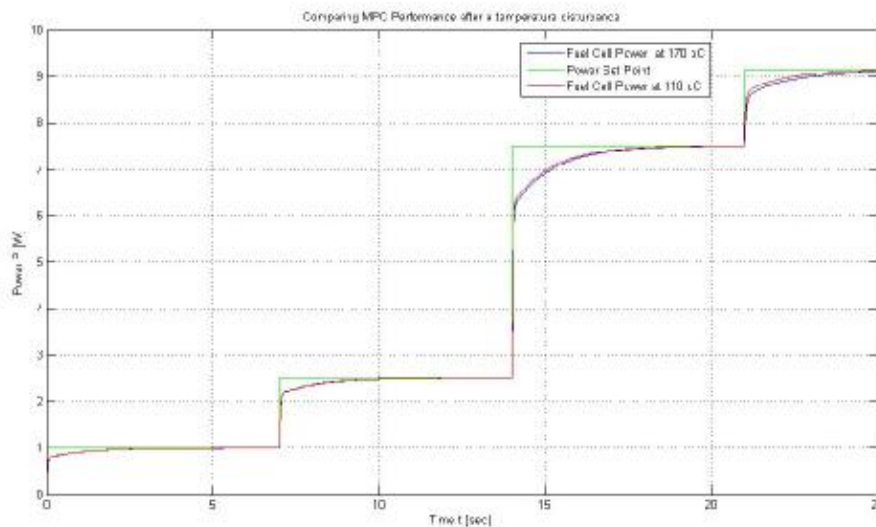
Παρατηρούμε σε αυτό το διάγραμμα, ότι ο ελεγκτής MPC, είναι θεαματικά καλύτερος όσον αφορά τη λειτουργία του, εξασφαλίζοντας και γρηγορότερη απόκριση (επιτευξη του επιθυμητού σημείου σε λιγότερο χρόνο), καθώς και ομαλότερη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη, δείχνοντας ότι μπορεί να διαχειριστεί αρκετά καλά τη δυναμική του συστήματος που είναι ισχυρά μη γραμμικό. Αντίθετα για τον PID, θα μπορούσαμε να πούμε ότι παρουσιάζει έντονες ταλαντώσεις κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη, ίσως και σε μεγαλύτερο βαθμό από την περίπτωση σταθερής απαίτησης σε φορτίο που εξετάστηκε στην ενότητα (4.2.2.1). Αυτό οφείλεται στη μη γραμμικότητα του συστήματος που επηρεάζει αρκετά τη συμπεριφορά του ελεγκτή διογκώνοντας τις ταλαντώσεις όταν έχουμε απότομες μεταβολές στην αύξηση του φορτίου ιδιαίτερα σε μικρές χρονικές περιόδους.

Αξίζει επίσης να μελετήσουμε τη λειτουργία του MPC ελεγκτή, σε περίπτωση που εισάγουμε αυθαίρετα μια διαταραχή στο σύστημα, ή κάποιο σφάλμα ώστε να μεταβληθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου. Επομένως θα προκύψει ένα

Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

μοντέλο διαφορετικό από το μοντέλο που περιγράφει τη δυναμική της κυψέλης καυσίμου. Η προσομείωση λειτουργίας υπό νέες απαιτήσεις ισχύος για τη κυψέλη καυσίμου, θα μας δείξει κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία του MPC ελεγκτή από το εσφαλμένο μοντέλο και κατά πόσο μπορεί να ακολουθήσει την επιθυμητή τροχιά της ισχύος.

Στη περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε εισάγουμε μια μεταβολή στη θερμοκρασία λειτουργίας, μειώνοντας τη θερμοκρασία κατά . Επομένως η νέα θερμοκρασία λειτουργίας θα είναι: . Από τα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η επίδραση που έχει αυτή η διαταραχή στο σύστημα.

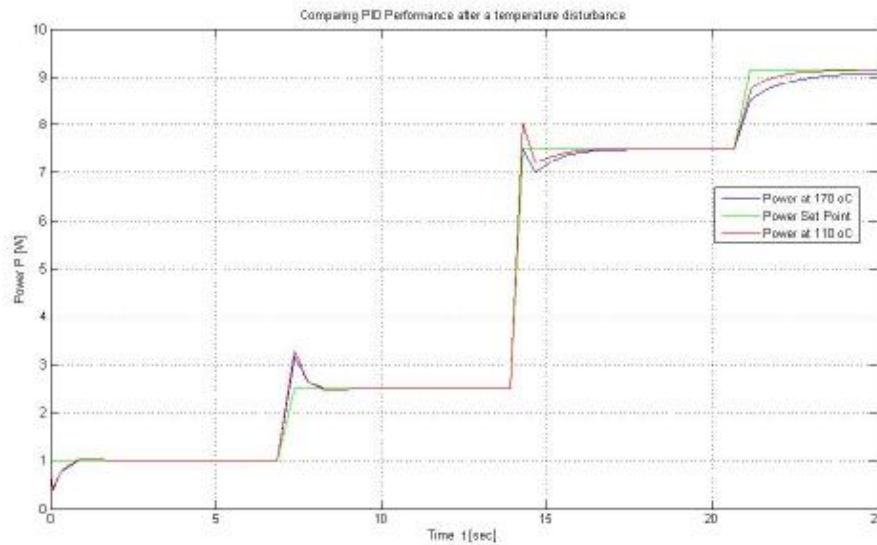


Διάγραμμα 39. Μελέτη συμπεριφοράς ελεγκτή MPC μετά την εφαρμογή διαταραχής θερμοκρασίας.

Παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα, ότι παρόλο που έχει εφαρμοστεί διαταραχή θερμοκρασίας στο μοντέλο (μείωση θερμοκρασίας στους 110) και ενώ ο ελεγκτής βασίστηκε στο μοντέλο με θερμοκρασία 170 , δίνει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με τη περίπτωση που η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 170 . Αυτό δείχνει την ικανότητα του MPC ελεγκτή καθώς και του εκτιμητή που έχουμε συνδέσει, να εξαλείφει τις διαταραχές καθώς και οποιαδήποτε σφάλματα υπάρχουν στο μοντέλο και να ακολουθεί τη προκαθορισμένη τροχιά με πάρα πολύ καλό χρόνο απόκρισης.

Για λόγους σύγκρισης με τη δυνατότητα του PID , να αντιμετωπίζει παρόμοιες συνθήκες διαταραχών , παρουσιάζεται το διάγραμμα του PID ελεγκτή μετά από την επιβολή της διαταραχής θερμοκρασίας:





Διάγραμμα 40 . Μελέτη συμπεριφοράς ελεγκτή PID μετά την εφαρμογή διαταραχής θερμοκρασίας.

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα, ότι ο PID ελεγκτής αφού έχει υποστεί διαταραχή το μοντέλο, οδηγεί τη κυψέλη καυσίμου σε τιμές που διαφέρουν αρκετά από τη περίπτωση της ρύθμισης του πραγματικού μοντέλου που λειτουργεί σε θερμοκρασία . Ειδικά στη περίπτωση που η διεργασία κατευθύνεται στην απόκτηση σταθερής ισχύος 7.4 KW, ο ελεγκτής δημιουργεί ισχυρή ταλάντωση μεγαλύτερη κατά σημαντικό βαθμό σε σχέση με τη ρύθμιση του ακριβούς μοντέλου (χωρίς τη διαταραχή). Αυτό υποδηλώνει την αδυναμία του PID ελεγκτή να ανταπεξέλθει σε πιθανές διαταραχές που μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα της κυψέλης και να μεταβάλουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Επομένως βγαίνει το συμπέρασμα, ότι ο ελεγκτής μοντέλου προβλεπτικού ελέγχου παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τον PID σε διάφορες περιπτώσεις όπως καλύτερη αντιμετώπιση της μη γραμμικότητας του μοντέλου και ομαλότερη μετάβαση στο σημείο αναφοράς, καλύτερους χρόνους απόκρισης, ικανότητα εξάλειψης των διαταραχών του συστήματος, ενώ ακόμη σε σχέση με τον PID έχει την ικανότητα διαχείρισης περιορισμών σε διάφορα λειτουργικά χαρακτηριστικά της διεργασίας και την πραγματοποίηση πολυμεταβλητού ελέγχου.

Αυτά τα πλεονεκτήματα του MPC ελεγκτή, τον καθιστούν ένα προηγμένο σύστημα ελέγχου που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον εκτεταμένης βιομηχανικής έρευνας γύρω από τη λειτουργία του και την εφαρμογή του.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός σχήματος ελέγχου χρησιμοποιώντας το μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου και η εφαρμογή του σε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου. Αντικειμενικός στόχος ήταν η ρύθμιση της κυψέλης καυσίμου μέσω δράσης της χειραγωγούμενης μεταβλητής της (στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το ρεύμα) ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του ηλεκτρικού φορτίου ζήτησης. Από διάφορες δοκιμές που έγιναν, εισάγοντας διαφορετικές περιπτώσεις απαιτήσεων ισχύος, τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι το μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (MPC ελεγκτής) χρησιμοποιώντας τις προβλεψεις του μη γραμμικού συστήματος, καταφέρνει να καθοδηγήσει τη κυψέλη καυσίμου να ακολουθήσει τις απαιτήσεις στη ζήτηση του φορτίου με αρκετά καλούς χρόνους απόκρισης (3-4 sec). Αντίθετα, ο διαδομένος γραμμικός ελεγκτής PID, αδυνατούσε να επιτύχει μια ικανοποιητική απόκριση ιδιαίτερα στη περίπτωση αυξομειούμενης τροχιάς στη ζήτηση του φορτίου. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που προστίθεται στα θετικά του MPC ελεγκτή είναι, η δυνατότητα του να διαχειρίζεται με αποτελεσματικότητα τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μη γραμμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου, επιτυγχάνοντας μια αρκετά ομαλή ροή της παραγόμενης ισχύος καθώς πλησιάζει το επιθυμητό σημείο λειτουργίας, ενώ ο ελεγκτής PID στη προσπάθεια του να βελτιώσει το χρόνο απόκρισης στην επίτευξη της επιθυμητής πορείας προκαλούσε στη λειτουργία της κυψέλης ανεπιθύμητες ταλαντώσεις ιδιαίτερα για περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια από τη διεργασία. Ένα άλλο ιδιαίτερα πλεονεκτικό χαρακτηριστικό του MPC ελεγκτή είναι η εξαιρετική του ικανότητα μαζί με το συνδυασμό του εκτιμητή, να απαλείφουν πιθανές διαταραχές στο σύστημα, που οφείλονται είτε σε μεταβολή κάποιων λειτουργικών χαρακτηριστικών είτε σε σφάλμα του μοντέλου που περιγράφει τη κυψέλη καυσίμου. Εισάγοντας μια διαταραχή στη θερμοκρασία του συστήματος, παρατηρήθηκε στο σχετικό διάγραμμα ότι ο ελεγκτής MPC παρόλο που υπήρχε η δράση της διαταραχής, έδωσε αποτελέσματα ελάχιστα διαφορετικά εξαλείφοντας σε μεγάλο βαθμό τη δράση αυτή, ενώ ο PID ελεγκτής αύξησε περισσότερο το εύρος των ταλαντώσεων.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα κάνουν ιδιαίτερα σημαντική την λειτουργία του MPC ελεγκτή, αφήνοντας υποσχέσεις ότι οι κυψέλες καυσίμου θα χρησιμοποιηθούν σύντομα στο μέλλον στα οχήματα τα οποία απαιτούν συνεχείς αυξομειώσεις της ισχύος λόγω των απαιτήσεων της οδήγησης.

Επιπλέον, ένα ολοκληρωμένο σύστημα ρύθμισης θα απαιτούσε από τον ελεγκτή να αν γνωρίζει πληροφορίες για τα συνεργαζόμενα βοηθητικά στοιχεία της κυψέλης, όπως π.χ. οι συμπιεστές, ο μετατροπέας ισχύος, σύστημα ψύξης κτλ. Η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων και η ενσωμάτωσή τους στο σχήμα ελέγχου θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο επέκτασης της παρούσας εργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου για κυψελίδα καυσίμου υδρογόνου με μέγιστη ισχύ



Διπλωματική Εργασία Ελέγχου Κυψέλης Υδρογόνου

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου , κ. Παναγιώτη Σεφερλή , που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής εργασίας, καθώς και να εφαρμόσω τα πολύ ενδιαφέροντα θέματα της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου, όπως επίσης και για τη βοήθεια που μου παρείχε μέχρι τη περάτωσή της εργασίας.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- § Joshua Golbert, Daniel Lewin (2004), “Model based control fuel cells” (1) Regulatory Control.
- § J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H.Peng, Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System. (2002).
- § M.Y.El-Sharkish, A. Rahman, M.S. Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla, T.Thomas (2004), A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications.
- § Ardalan Vahidi, Anna Stefanopoulou, Huei Peng, Mechanical Engineering, Univeristy of Michigan, Ann Arbor (2004), Model Predictive Control for Starvation Prevention in a Hybrid Fuel Cell System
- § Jay T. Pukrushpan, Huei Peng, Anna G. Stefanopoulou, Department of Mechanical engineering in Michigan (2004) , “Control-Oriented Modelling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems.
- § Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB (2008).
- § Kevin C. Lauzze and Donald Chielewsky (2006), “Power Control of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell”.
- § Ziogou Chrisovalantou, Simira Papadopoulou, Panos Seferlis, Spyros Voutetakis (2009), “An efficient multi-objective model predictive control framework of a PEM fuel cell.
- § Ζιωγου Χρυσοβαλάντου, (2009) , “Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (predictive), και ανίχνευση βέλτιστου σημείου λειτουργίας.
- § Παναγιώτης Λ. Ζέρβας, (2009) , «Σχεδιασμός , Ανάπτυξη και Βελτιστοποίηση Υβριδικής Μονάδας Ισχύος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – Τεχνολογιών Υδρογόνου.
- § Richard C.Dorf, Robert H.Bishop (2001) , Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου

