



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου
κυψέλης καυσίμου για ηλεκτρικά
οχήματα

Λουκάς Κουτσούμπας

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)
Τσουρβελούδης Νικόλαος
Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά 25/9/2021

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο εξέλιξης του νέου συστήματος κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διπλωματική έχει ως στόχο τον πλήρη έλεγχο και ρύθμιση των παραμέτρων της κυψέλης καυσίμου για το υδρογονοκίνητο όχημα της ομάδας με στόχο την καλύτερη δυνατή κατανάλωση στο διεθνή διαγωνισμό Shell Eco Marathon όπου διαγωνίζεται το όχημα κάθε χρόνο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας και τους καθηγητές που βοήθησαν ο καθένας ξεχωριστά για την ανάπτυξη του οχήματος ER-2021 και τη συμβολή τους στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία με διάφορους τρόπους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή για τη βοήθειά του στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε με στόχο την μελέτη και ανάπτυξη συστήματος αυτομάτου ελέγχου για στοίβα κυψέλης καυσίμου η οποία τοποθετήθηκε στο υδρογονοκίνητο όχημα της ομάδας TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην εργασία αρχικά γίνεται μια γενική περιγραφή των κυψελών καυσίμου για τα στάδια από την πρώτη κυψέλη καυσίμου έως σήμερα. Ακόμη παρουσιάζονται τα διαφορετικά είδη κυψελών που υπάρχουν δείχνοντας βασικά στοιχεία του κάθε είδους με στόχο την κατανόηση των δομικών μερών αλλά και του τρόπου λειτουργίας των κυψελών για την καλύτερη κατανόηση της διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο σύστημα της εφαρμογής και ξεκινά η επεξήγηση του θεωρητικού (θερμικού και ηλεκτρικού) μοντέλου που περιγράφει την συμπεριφορά μίας κυψέλης καυσίμου PEM. Έπειτα γίνεται περιγραφή της ολοκλήρωσης του μοντέλου στο πρόγραμμα Simulink από το οποίο εξήχθησαν τα πρώτα θεωρητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου αλλά και για την επιλογή εξαρτημάτων για την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Ακόμη γίνεται μια πρώτη προσομοίωση του συνολικού συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των υπο-συστημάτων που πλαισιώνουν την κυψέλη καυσίμου αλλά και επεξήγηση των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν και πλαισιώνουν το συνολικό σύστημα της κυψέλης καυσίμου. Γίνεται επεξήγηση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου καθώς και του συστήματος ελέγχου που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο και τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Τέλος παρουσιάζονται γραφήματα από τα οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου καθ' όλη τη διάρκεια των ρυθμίσεων, καθώς και γραφήματα με την επεξήγηση του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στα διάφορα στάδια λειτουργίας της.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	4
1.1	Γενικά	4
1.2	Σύνοψη Κεφαλαίων	5
2	Κυψέλες καυσίμου	6
2.1	Εισαγωγή	6
2.2	Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	6
2.3	Είδη κυψελών καυσίμου	8
2.3.1	Κυψέλη καυσίμου με παροχή άμεσης μεθανόλης (DMFC)	9
2.3.2	Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)	10
2.3.3	Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	12
2.3.4	Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	14
2.3.5	Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	15
2.3.6	Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	17
3	Προσομοίωση του μοντέλου της PEM κυψέλης καυσίμου σε περιβάλλον Simulink	20
3.1	Θερμικό μοντέλο PEM κυψέλης καυσίμου	20
3.1.1	Απώλειες ενέργειας κυψέλης καυσίμου	21
3.1.2	Θέρμανση - ψύξη κυψέλης καυσίμου	22
3.1.3	Υλοποίηση θερμικού μοντέλου σε περιβάλλον Simulink και εξαγωγή αποτελεσμάτων	24
3.1.4	Υλοποίηση συνολικού συστήματος ελέγχου ψύξης σε περιβάλλον Simulink	30
3.2	Ηλεκτρικό μοντέλο PEM κυψέλης καυσίμου	33

4 Περιγραφή του συστήματος στοίβας κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος που υλοποιήθηκε	39
4.1 Πειραματική περιγραφή	39
4.2 Στοίβα κυψέλης καυσίμου εφαρμογής	40
4.3 Συστήματα ολοκλήρωσης κυψέλης καυσίμου εφαρμογής	41
4.3.1 Σύστημα παροχής υδρογόνου	41
4.3.2 Σύστημα ψύξης - ροής οξυγόνου	46
4.3.3 Σύστημα απομάκρυνσης καταλοίπων	47
4.3.4 Σύστημα εκκίνησης	48
4.3.5 Σύστημα ελέγχου	48
4.3.6 Σύστημα μέτρησης τάσης κελιών.	58
5 Πειραματικά αποτελέσματα	62
5.1 Ιδανική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου	62
5.2 Πειραματική μέτρηση του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και του συνολικού συστήματος της	69
6 Συμπεράσματα	72

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η διαχείριση των ορυκτών πόρων και της ενέργειας αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που πρέπει να διαχειριστεί η ανθρωπότητα. Η προσπάθεια μείωσης των ρύπων συμβάλει στην ερευνα νέων καυσίμων καθώς και στην αξιοποίηση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στρέφει όλο και περισσότερους τομείς στην παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς και τον περιορισμό κατανάλωσης των ορυκτών πόρων. Με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει η ανάγκη αποθήκευσής της ενέργειας, η οποία προκαλεί την ανάπτυξη ποικίλων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας.

Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς που συμβάλουν στην προσπάθεια αλλαγής των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των οχημάτων. Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπαταρίες λιθίου, ενώ τα τελευταία χρόνια ξεκινά να εφαρμόζεται η αποθήκευση χημικής ενέργειας, η οποία έπειτα με τη βοήθεια κυψελών καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα το καύσιμο που χρησιμοποιείται ως χημική ενέργεια είναι το υδρογόνο το οποίο παράγεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στην διαδικασία της ηλεκτρόλυσης παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποθηκεύεται στα μόρια του υδρογόνου. Με αυτό τον τρόπο το υδρογόνο αποτελεί καύσιμο με μηδενικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη διαδικασία της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης.

Η ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης κατασκευάζει πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα πόλης που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου για την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, έχοντας ως καύσιμο το υδρογόνο. Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στο νέο πρωτότυπο όχημα της ομάδας αυτής (ER.2021) με στόχο την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου της νέας κυψέλης καυσίμου, η οποία αποτελεί τη βασική μονάδα ισχύος του ηλεκτρικού οχήματος. Αρχικά, έγινε μια εκτενή έρευνα στις κυψέλες καυσίμου αλλά και στα καύσιμα με τα οποία λειτουργούν, καθώς γίνεται κατανοητή η λειτουργία κάθε κυψέλης καυσίμου αλλά και η επιλογή του τύπου PEM για το ηλεκτρικό όχημα. Το σύστημα της κυψέλης καυσίμου μοντελοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης με στόχο την καλύτερη εσοπτεία του συστήματος, τη ρύθμιση παραμέτρων και την εξαγωγή συμπερασμάτων που βοηθούν στη ρύθμιση του πραγματικού συστήματος. Έπειτα αναπτύχθηκαν τα υποσυστήματα που πλαισιώνουν το συνολικό σύστημα και ξεκίνησε ο έλεγχος του πραγματικού συστήματος. Στη συνέχεια αναλύονται οι πειραματικές μετρήσεις και εξάγονται συμπεράσματα για τη λειτουργία του συστήματος κυψέλης καυσίμου. Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η επίτευξη της βέλτιστου δυνατού βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου του οχήματος, το οποίο θα λάβει μέρος στον διεθνή διαγωνισμό οικονομίας Shell Eco Marathon.

1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων

Η δομή αυτής της εργασίας είναι η εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα είδη των κυψελών καυσίμου, τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν το κάθε είδος, καθώς και τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιείται το κάθε είδος μαζί με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του.
- Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM που χρησιμοποιείται στο ηλεκτρικό όχημα, καθώς και η υλοποίηση του θεωρητικού μοντέλου σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink. Ακόμη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση καθώς και χρήσιμα συμπεράσματα.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το σύστημα της κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο. Ακόμη, παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που ολοκληρώνουν την κυψέλη καυσίμου αλλά και το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε για τον έλεγχό της.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα πειράματα που διεξήχθησαν μετά την υλοποίηση του συστήματος, καθώς και συμπεράσματα που προέκυψαν μετά τη μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και βελτιώσεις για τη περεταίρω βελτίωση του συστήματος.

2 Κυψέλες καυσίμου

2.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) αποτελούν σήμερα τις βασικότερες και σημαντικότερες διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το υδρογόνο ή άλλα υδρογονούχα καύσιμα. Η αποθηκευμένη χημική ενέργεια στα άτομα του υδρογόνου μετατρέπεται μέσω της οξείδωσης του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα αξιοποιώντας την σε πολλές εφαρμογές της καθημερινότητάς μας.

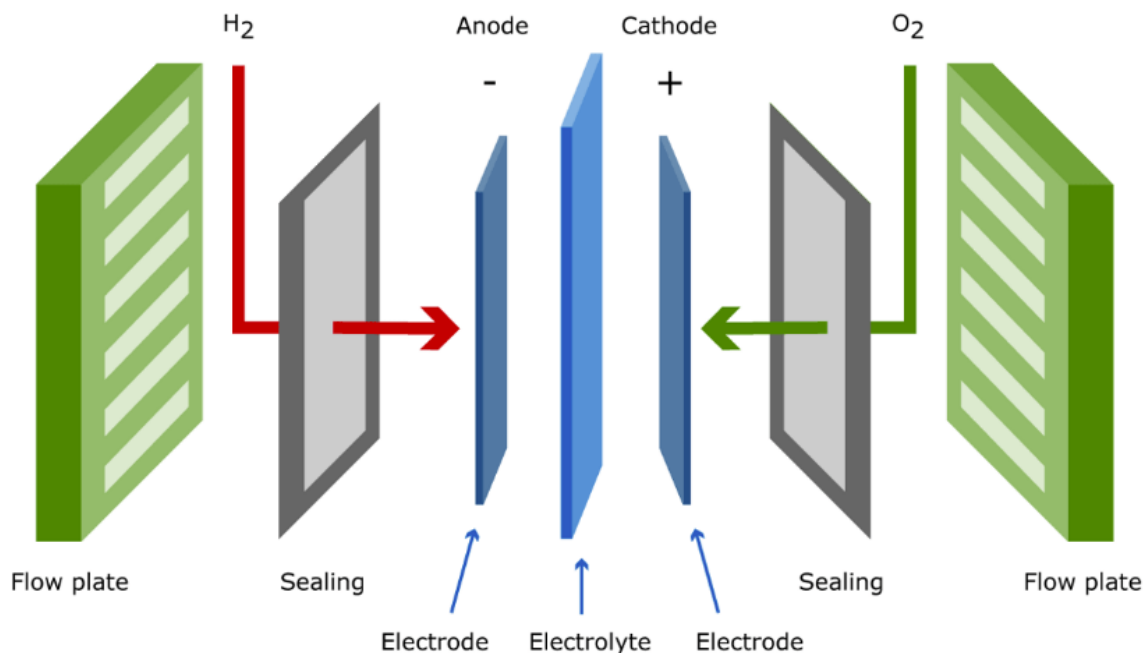
Η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου δεν αποτελεί εφεύρεση των τελευταίων χρόνων. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 1989 από τον Sir William Grove αλλά χρησιμοποιήθηκε πρακτικά από την NASA στα διαστημικά οχήματα Gemini και Apollo 11 τα έτη 1966 και 1969 ως φθηνότερη λύση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι της ηλιακής. Από τότε και έπειτα πραγματοποιήθηκε μία συνεχιζόμενη εξέλιξη των κυψελών καυσίμου οι οποίες αξιοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι άλλων διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις οι οποίες έχουν την δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και ένα ποσό θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση. Κατά την ηλεκτρόλυση, τροφοδοτείται το νερό με συνεχές ρεύμα. Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου τα ιόντα υδρογόνου μετασχηματίζονται με τη βοήθεια των ηλεκτρονίων σε υδρογόνο, ενώ στο ηλεκτρόδιο της ανόδου το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και πρωτόνια. Στην διαδικασία της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης το υδρογόνο οξειδώνεται παράγοντας συνεχές ρεύμα και βρίσκεται σε μορφή που αντιδρά με το οξυγόνο και παράγεται νερό.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από την μεμβράνη, τους καταλύτες και τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Τα ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από την μεμβράνη η οποία έχει τον ρόλο του ηλεκτρολύτη και από τους καταλύτες. Πιο συγκεκριμένα η μεμβράνη βρίσκεται ανάμεσα στους δύο καταλύτες και το συγκεκριμένο στρώμα που δημιουργείται διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια ή αλλιώς τις διπολικές πλάκες (bipolar plates). Η τροφοδοσία του υδρογόνου γίνεται μέσω ενός καναλιού του ηλεκτροδίου της ανόδου (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Όταν το υδρογόνο έρθει σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα διαπερνούν την μεμβράνη-ηλεκτρολύτη φτάνοντας στον καταλύτη της καθόδου όπου γίνεται η συνάντηση με το οξυγόνο, το οποίο διοχετεύεται σε εκείνο το σημείο μέσω του καναλιού της καθόδου. Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να διαπεράσουν την μεμβράνη και έτσι μεταφέρο-

νται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος από την άνοδο στην κάθοδο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 2.1: Δομή κυψέλης καυσίμου [8].

Η παραγωγή του νερού πραγματοποιείται στον καταλύτη της καθόδου όπου αντιδρούν το υδρογόνο με το οξυγόνο καθώς και ηλεκτρόνια που διοχετεύθηκαν σε αυτό το σημείο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην αρχή της συγκεκριμένης διαδικασίας. Τα δύο στρώματα καταλύτη αυξάνουν την ταχύτητα των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στις δύο καταλυτικές επιφάνειες όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η αντίδραση της οξείδωσης του υδρογόνου που πραγματοποιείται στην άνοδο περιγράφεται από την ακόλουθη χημική αντίδραση [1]:



Στην κάθοδο, τα άτομα του οξυγόνου διασπώνται και ενώνονται με τα πρωτόνια που φτάνουν στον ηλεκτρολύτη στην κάθοδο, καθώς και με τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η συγκεκριμένη διαδικασία εκφράζεται με την εξής χημική αντίδραση [1]:

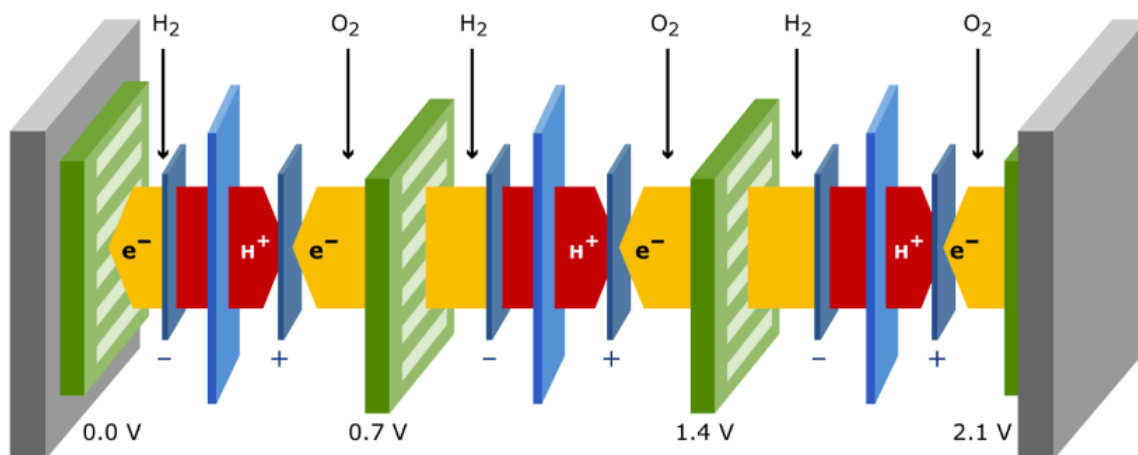


Συνολικά η αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο περιγράφεται με την παρακάτω χημική αντίδραση [1]:



Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται ανάμεσα στην διπολική πλάκα της ανόδου και σε αυτή της καθόδου ιδανικά αγγίζει το 1 Volt χωρίς αυτό να μπορεί να πραγματοποιηθεί στην πραγματικότητα. Μια τυπική τιμή είναι τα 0.7 Volt αν και η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται και

από το φορτίο που συνδέεται στις διπολικές πλάκες και από το είδος της κυψέλης καυσίμου. Η συγκεκριμένη τάση δεν μπορεί να αξιοποιηθεί παρά μόνο σε πολύ μικρές εφαρμογές οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν υπό αυτή την τάση. Για τον λόγο αυτόν, πολλές κυψέλες ενώνονται σε σειρά μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, με σκοπό την παροχή μεγαλύτερης τάσης και ισχύος ώστε να υπάρξει δυνατότητα αξιοποίησης τους σε μεγαλύτερες εφαρμογές. Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται στοίβα κυψέλης καυσίμου λόγω της διασύνδεσης πολλών κυψελών μεταξύ τους.



Σχήμα 2.2: Δομή στοίβας κυψέλης καυσίμου [8].

2.3 Είδη κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες έχοντας ως κύριο διαχωριστικό μέσο το καύσιμο με το οποίο λειτουργούν. Όπως περιγράφεται παρακάτω, οι κυψέλες μπορούν να τροφοδοτούνται είτε με καθαρό υδρογόνο είτε με υδρογονούχα καύσιμα. Ένα υδρογονούχο καύσιμο μπορεί να τροφοδοτήσει ορισμένα είδη κυψελών άμεσα χωρίς να υποστεί κάποια επεξεργασία και ορισμένα άλλα είδη στα οποία έχει προηγηθεί η διαδικασία της αναμόρφωσης. Με την διαδικασία της αναμόρφωσης διαχωρίζεται το υδρογόνο από τα υπόλοιπα στοιχεία του καυσίμου και στη συνέχεια τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο η κυψέλη καυσίμου. Επιπλέον οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται σύμφωνα με το εύρος θερμοκρασίας που λειτουργούν αλλά και με την πίεση του καυσίμου. Παρακάτω περιγράφονται βασικές κατηγορίες κυψελών καυσίμου που διαχωρίζονται σύμφωνα με το καύσιμο και τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι κυψελών καυσίμου.

Είδος κυψέλης καυσίμου	Ιόν μεταφοράς	Θερμοκρασία λειτουργίας	Εφαρμογή
Αλκαλική(AFC)	OH^-	50-200°C	Χρησιμοποιούνται σε διαστημικά οχήματα, σε οχήματα και κινητές εφαρμογές καθώς και σε συστήματα παραγωγής θερμότητας και χαμηλής ισχύος.
Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEMFC)	H^+	30-100°C	
Άμεσης μεθανόλης(DMFC)	H^+	20-90°C	Κατάλληλη για φορητά συστήματα χαμηλής ισχύος τα οποία λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
Φωσφορικού οξέος(PAFC)	H^+	~ 220°C	Χρήση σε συστήματα παραγωγής θερμότητας και ισχύος της τάξεως των 200kW
Τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	CO_3^{2-}	~ 650°C	Κατάλληλες για εφαρμογή σε μεσαίες και μεγάλες εφαρμογές ισχύος, από μερικά kW έως αρκετά MW.
Στερεού οξειδίου(SOFC)	O^{2-}	500 – 1000°C	

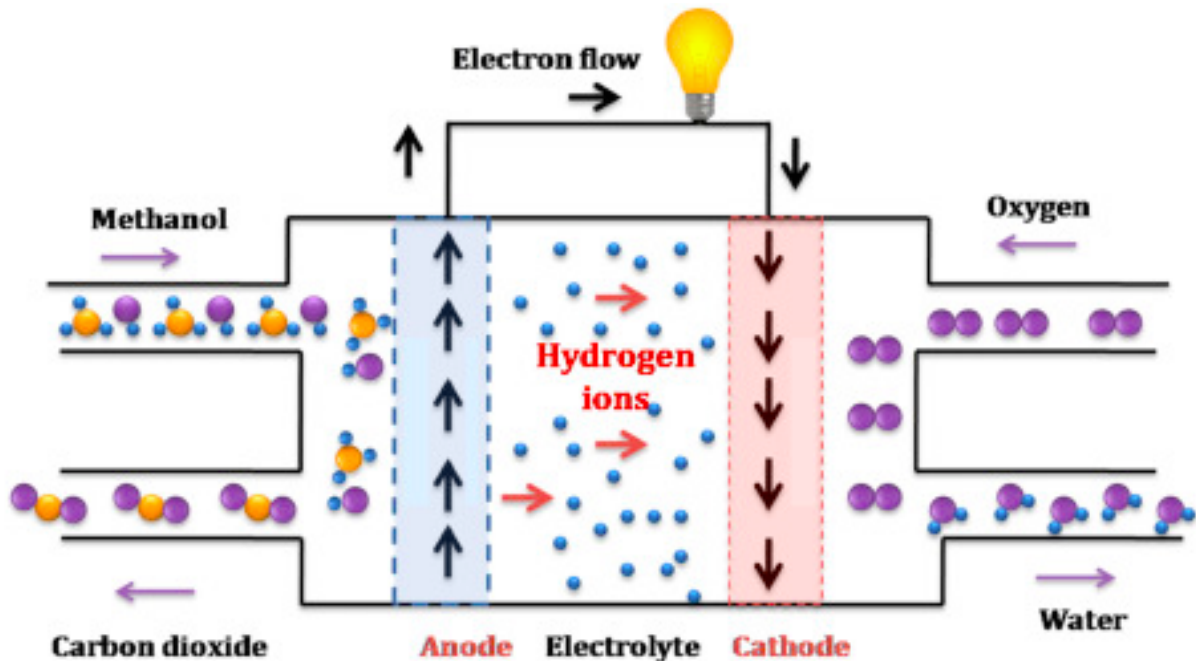
2.3.1 Κυψέλη καυσίμου με παροχή άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Η κυψέλη καυσίμου με παροχή άμεσης μεθανόλης ανήκει στην κατηγορία των κυψελών που τροφοδοτούνται από κάποιο υδρογονούχο καύσιμο και στην περίπτωση αυτή την μεθανόλη. Η παροχή άμεσης μεθανόλης επεξηγεί το γεγονός ότι η κυψέλη καυσίμου δεν χρειάζεται κάποιου είδους αναμορφωτή (reformer) για τον διαχωρισμό του υδρογόνου από τα υπόλοιπα στοιχεία αλλά, μπορεί να τροφοδοτηθεί στην άνοδο άμεσα με μεθανόλη η οποία θα οξειδωθεί. Αποτελεί μία υποκατηγορία της κυψέλης καυσίμου με μεμβράνη εξαγωγής πρωτονίων (PEMFC) καθώς αποτελείται από τα ίδια χαρακτηριστικά.

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιεί η DMFC κατασκευάζεται συνήθως από Nafion όπως και στην PEMFC, με τη διαφορά ότι είναι μια πολυμερής μεμβράνη με μεγαλύτερο πάχος.

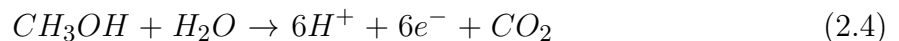
Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης τροφοδοτείται στην άνοδο με μεθανόλη και νερό. Το νερό είναι υπεύθυνο για την οξείδωση της μεθανόλης. Με την οξείδωσή της παράγεται στην άνοδο διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και θετικά ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να διαπεράσουν την μεμβράνη και έτσι μεταφέρονται στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας ηλεκτρισμό. Τα θετικά ιόντα μέσω της

μεμβράνης περνούν στην κάθοδο όπου συναντούν το οξυγόνο, με αποτέλεσμα την παραγωγή νερού.

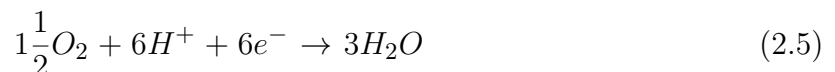


Σχήμα 2.3: Διάγραμμα λειτουργίας DMFC [12].

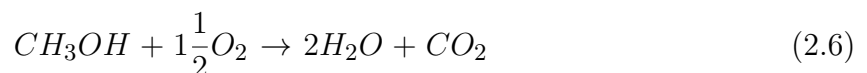
Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3, η αντίδραση της οξείδωσης της μεθανόλης που πραγματοποιείται στην άνοδο με την εισαγωγή νερού περιγράφεται από την εξής χημική αντίδραση [1]:



Το νερό για την οξείδωση της μεθανόλης στην άνοδο παράγεται από την αντίδραση της καθόδου όπως αυτή περιγράφεται από την παρακάτω χημική αντίδραση [1]:



Η συνολική αντίδραση κυψέλης καυσίμου DMFC είναι η εξής [1]:



2.3.2 Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου είναι από τις πρώτες κυψέλες που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για διαστημικές εφαρμογές από τη NASA και μετέπειτα για ενσωμάτωση σε κάποια βαρέα στρατιωτικά οχήματα και υποβρύχια.

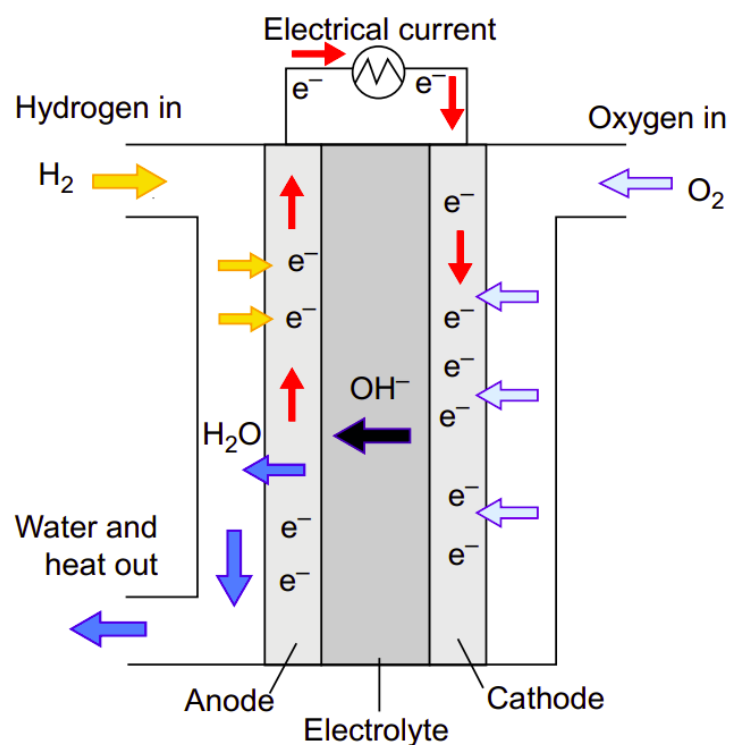
Ο ηλεκτρολύτης της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου είναι ένα αλκαλικό διάλυμα. Το συγκεκριμένο διάλυμα χρειάζεται να περιέχει υψηλή διαλυτική ικανότητα και να μην είναι αρκετά διαβρωτικό. Τα διαλύματα που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως το υδροξείδιο του νατρίου

και το υδροξείδιο του καλίου. Έχει αποδειχθεί ότι το ανθρακικό κάλιο έχει μεγαλύτερη διαλυτική ικανότητα και γι αυτό χρησιμοποιείται περισσότερο στον συγκεκριμένο τύπο κυψέλης καυσίμου.

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας και πίεσης το οποίο συμβαίνει λόγω των πολλών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια. Η εφαρμογή, το κόστος και ο συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας είναι τα στοιχεία που αλλάζουν το υλικό των ηλεκτροδίων ώστε να προσαρμοστεί στις παραπάνω ανάγκες. Στον αρχικό σχεδιασμό της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου ήταν επιθυμητό να κρατηθεί χαμηλά το κόστος παραγωγής και γι' αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν τα ευγενή μέταλλα, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια νικελίου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός μετάλλων όπως το νικέλιο Ράνεϊ στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός νικελίου και αλουμινίου. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με υψηλή περιεκτικότητα σε ευγενή μέταλλα κυρίως.

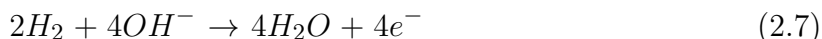
Ως καύσιμο της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρό υδρογόνο αλλά και αμμωνία υπό τη μορφή προϊόντων διάσπασης της, δηλαδή 25% άζωτο, 75% υδρογόνο και μικρές ποσότητες αμμωνίας. Η τροφοδοσία της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου με αμμωνία προκαλεί μικρή μείωση στο δυναμικό της σε μέσες πυκνότητες ρεύματος, λόγω της διάχυσης του υδρογόνου.

Η επιλογή του καταλύτη είναι εκείνη που καθορίζει την θερμοκρασία και πίεση στην οποία θα λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου. Οι πιο συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου είναι 60°C - 70°C. Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου είναι ο καθορισμός θερμοκρασίας λειτουργίας σύμφωνα με την εφαρμογή. Το ποσοστό υδροξειδίου του καλίου στο διάλυμα είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό του σημείου λειτουργίας το οποίο μπορεί να φτάσει έως και 23°C - 70°C έχοντας τη δυνατότητα λειτουργίας σε ψυχρά περιβάλλοντα, με δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα λειτουργίας AFC [9].

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4, στην άνοδο της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου, το υδρογόνο οξειδώνεται με τα ιόντα του υδροξειδίου σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση [1]:



Το αποτέλεσμα της παραπάνω αντίδρασης είναι νερό και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο, όπου αντιδρά με το νερό που υπάρχει στον ηλεκτρολύτη και το οξυγόνο σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση [1]:



Από την παραπάνω αντίδραση παράγονται ιόντα υδροξειδίου, τα οποία κατευθύνονται στην άνοδο για να αντιδράσουν ξανά με το υδρογόνο. Η συνολική αντίδραση που πραγματοποιείται σε μία αλκαλική κυψέλη καυσίμου είναι [1]:



Από την παραπάνω αντίδραση συμπεραίνεται ότι η αλκαλική κυψέλη καυσίμου χρειάζεται δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου για να σχηματίσει δύο μόρια νερού. Τα υποπροϊόντα που παράγονται από την χημική αντίδραση είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου είναι η ευαισθησία που παρουσιάζει στο CO και στο CO_2 . Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόδια λευκόχρυσου επηρεάζονται από το CO υποβαθμίζοντας έτσι την καταλυτική τους ικανότητα. Το CO_2 από την άλλη αντιδρά με το υδροξειδίου του καλίου, παράγοντας έτσι ανθρακικά άλατα τα οποία φράζουν τους πόρους των ηλεκτροδίων. Συνεπώς, ακόμη και το CO_2 που υπάρχει στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει τον βαθμό απόδοσης και την διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων καθαρισμού τόσο του υδρογόνου όσο και του οξυγόνου που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία του καθαρισμού είναι αρκετά δαπανηρή, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος της κυψέλης καυσίμου.

2.3.3 Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)

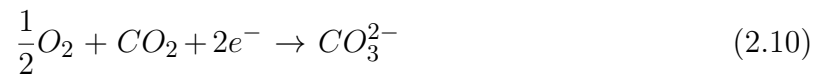
Η κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα στην κατασκευή μονάδων ισχύος καθώς και σε βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Όσον αφορά τα καύσιμα ανήκει στην κατηγορία των κυψελών που τροφοδοτούνται με υδρογονούχα καύσιμα καθώς επίσης και στην κατηγορία κυψελών καυσίμου με υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

Ο ηλεκτρολύτης είναι ένας συνδυασμός αλκαλικών ανθρακικών αλάτων. Η θερμοκρασία λειτουργίας της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου είναι υψηλή και συγκεκριμένα κοντά στους $650^\circ C$. Λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας, τα ανθρακικά άλατα σχηματίζουν ένα τηγμένο άλας, το οποίο αποτελεί αγωγό ανθρακικών ιόντων CO_3^{2-} . Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ηλεκτρολύτη επιδρούν σημαντικά στον βαθμό απόδοσης και την αντοχή της MCFC, καθώς για το μεγαλύτερο ποσοστό ωμικών απωλειών είναι υπεύθυνα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Η κατασκευή των ηλεκτρολυτών αποτελείται από ένα μείγμα ανθρακικών αλάτων καλίου και λιθίου όταν πρόκειται να λειτουργήσουν σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ από ένα μείγμα ανθρακικών αλάτων νατρίου και λιθίου όταν πρόκειται να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερες πιέσεις.

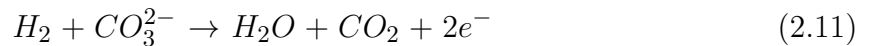
Η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί τα οξείδια του άνθρακα ως καύσιμο επιτρέποντάς της έτσι να λειτουργεί αποτελεσματικά με μίγματα καυσίμων που περιέχουν CO_2 . Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να λειτουργεί με υδρογονούχα καύσιμα που περνούν το στάδιο της αναμόρφωσης, καθώς και με άνθρακα-λιγνίτη και βιομάζα που έχουν υποστεί αεριοποίηση.

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου είναι οι εξής [1]:

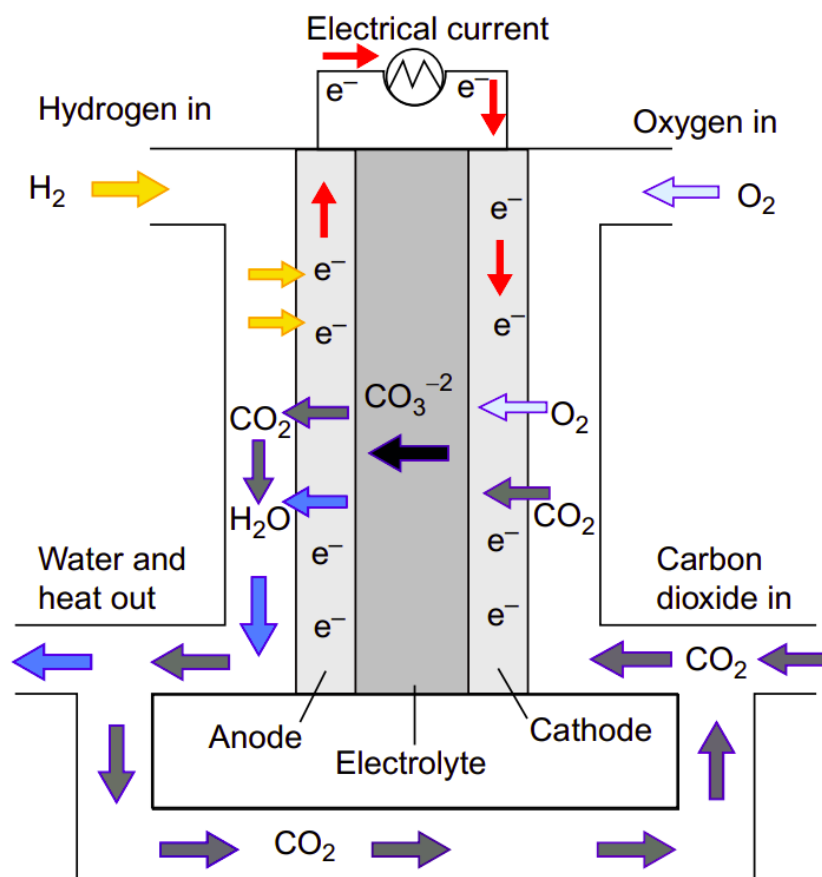
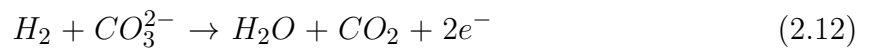
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



Συνολική αντίδραση:



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα λειτουργίας MCFC [9].

Παρατηρώντας τις παραπάνω χημικές αντιδράσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5 παρατηρείται ότι, το CO_2 μεταφέρεται από την άνοδο στην κάθοδο. Ο βαθμός απόδοσης της MCFC φτάνει το 44% για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3.4 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου ανήκει στην κατηγορία κυψελών καυσίμου με υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας όπως η MCFC που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζοντας αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 500 - 1000°C. Η λειτουργία της βασίζεται σε υδρογονούχα καύσιμα τα οποία λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας λειτουργίας ο μετασχηματισμός του καυσίμου σε υδρογόνο μπορεί να γίνεται εσωτερικά της κυψέλης καυσίμου με εσωτερική αναμόρφωση.

Η SOFC χρησιμοποιεί ένα σκληρό, μη-πορώδες κεραμικό υλικό ως καταλύτη το οποίο έλκει τα αρνητικά ιόντα του οξυγόνου από την κάθοδο προς την άνοδο. Η κατασκευή της διάταξης της συστοιχίας SOFC απαιτεί ειδικά και μεγάλης αξίας κράματα που μπορούν να αντεπεξέλθουν σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, αυξάνοντας έτσι το κόστος κατασκευής. Για την μείωση αυτού του κόστους αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν εναλλακτικά υλικά ως στερεοί ηλεκτρολύτες, τα οποία μπορούν επιτύχουν υψηλές τιμές ιοντικής αγωγιμότητας σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (500 - 800°C).

Η άνοδος της SOFC κατασκευάζεται από σύνθετα μίγματα κεραμικών υλικών στερεών ηλεκτρολυτών, όπως το οξείδιο του νικελίου. Η υψηλή σταθερότητα και αγωγιμότητα του νικελίου κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων το καθιστά βασικό υλικό της ανόδου αλλά και ως καταλύτη αναμόρφωσης σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνοντας τη δυνατότητα εσωτερικής αναμόρφωσης στην άνοδο.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια ανεξαρτήτως καυσίμου είναι οι εξής:

Στην άνοδο:

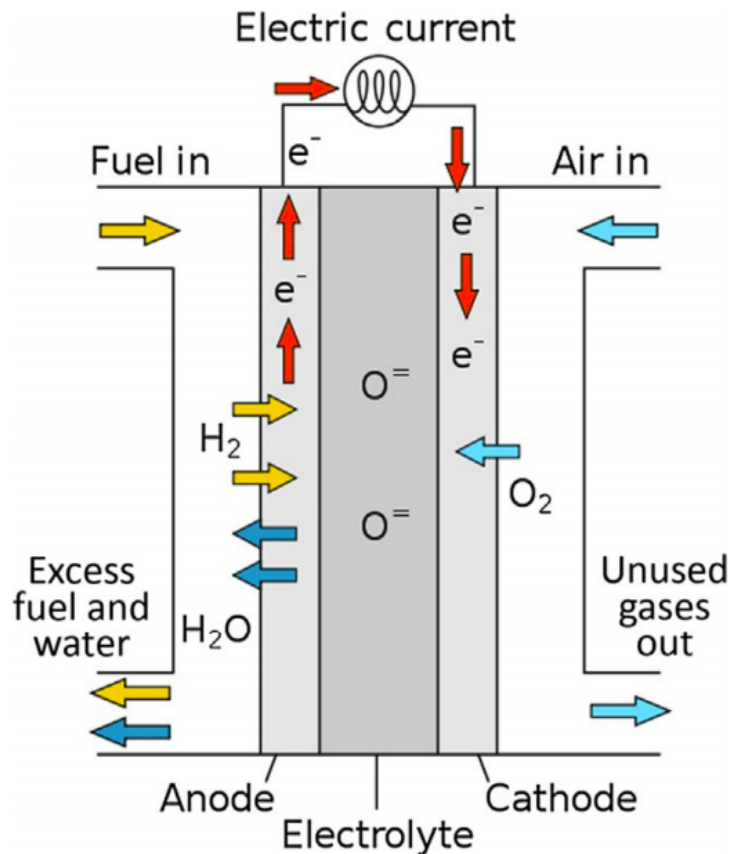


Στην κάθοδο:



Συνολική αντίδραση:





Σχήμα 2.6: Διάγραμμα λειτουργίας SOFC [9].

Στις παραπάνω αντιδράσεις παρατηρείται ότι τα ιόντα οξυγόνου που σχηματίζονται στην κάθοδο μετακινούνται μέσω ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Στη συνέχεια αντιδρούν με το υδρογόνο παράγοντας νερό, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται θερμότητα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού κυκλώματος οδηγούνται από την άνοδο στην κάθοδο δημιουργώντας ρεύμα. Έπειτα τα ηλεκτρόνια αντιδρούν με τα μόρια οξυγόνου του αέρα παράγοντας νέα ιόντα οξυγόνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Ο βαθμός απόδοσης της SOFC βρίσκεται από 50% έως 60%, ενώ η πυκνότητα ισχύος της βρίσκεται από 0.15 έως 0.7 W/cm².

2.3.5 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος ανήκει στην κατηγορία κυψελών μέσης θερμοκρασίας που λειτουργούν στους 200 - 250°C. Χρησιμοποιεί ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο είτε υδρογονούχα καύσιμα τα οποία έχουν περάσει το στάδιο της αναμόρφωσης. Ο ηλεκτρολύτης της συγκεκριμένης κυψέλης καυσίμου αποτελείται από ένα πυκνό διάλυμα φωσφορικού οξέος. Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης δρα ως το υγρό μεταφοράς των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο και άγει τα ιόντα φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων, συμπληρώνοντας έτσι το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια είναι οι εξής:

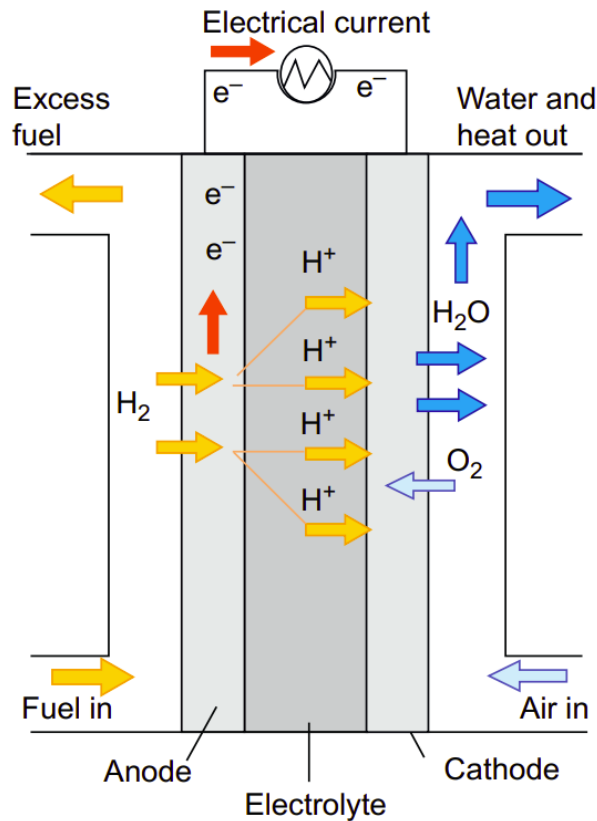
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



Συνολική αντίδραση:



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα λειτουργίας PAFC [9].

Αναλύοντας τις παραπάνω σχέσεις και παρατηρώντας το Σχήμα 2.7 συμπεραίνεται ότι η άνοδος τροφοδοτείται με υδρογόνο το οποίο έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στην κάθοδο δημιουργώντας έτσι ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και αντιδρούν με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια που μεταφέρθηκαν στην κάθοδο και παράγεται νερό. Πιο συγκεκριμένα δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου αντιδρούν σχηματίζοντας δύο μόρια νερού. Τα παραπροϊόντα αυτή της αντίδρασης είναι ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα.

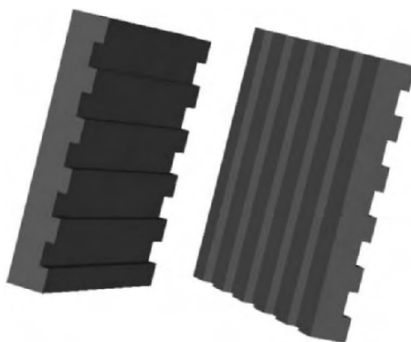
Ο βαθμός απόδοσης της PAFC κυμαίνεται σε χαμηλότερα από 37 – 42%. Επίσης έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 40000 ωρών λειτουργίας και μπορεί να αντεπεξέλθει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μεταξύ -30 και 50°C, επιτρέποντας της έτσι να είναι μια εμπορικά βιώσιμη εφαρμογή.

2.3.6 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη μια πολυμερή μεμβράνη, η οποία διαχωρίζει την άνοδο από την κάθοδο και άγει μόνο τα θετικά ιόντα υδρογόνου. Η πολυμερής μεμβράνη είναι κατασκευασμένη από Nafion και έχει πολύ μικρό πάχος που κυμαίνεται από 25.4 έως 254μm. Η παρουσία υγρασίας στην επιφάνεια της μεμβράνης δημιουργεί αγωγιμότητα μόνο για τα θετικά ιόντα του υδρογόνου.

Το στρώμα διάχυσης αερίων είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη διάχυση των αντιδρώντων αερίων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς και για τη διατήρηση υγρασίας εσωτερικά της κυψέλης, με στόχο την παροχή της κατάλληλης υγρασίας στη πολυμερή μεμβράνη. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του στρώματος είναι κυρίως υδροφοβικό χαρτί ή γραφίτης πάχους 0.2 έως 0.5mm.

Η δομή αυτής της κυψέλης καυσίμου αποτελείται από πλάκες ροής αερίων. Οι πλάκες ροής αερίων όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8, κατασκευάζονται από μέταλλο ή από γραφίτη και η γεωμετρία τους αποτελείται από κανάλια, από τα οποία περνούν το οξυγόνο και το υδρογόνο, με στόχο την αντίδρασή τους και τη διοχέτευση νερού στα ηλεκτρόδια και την μεμβράνη.

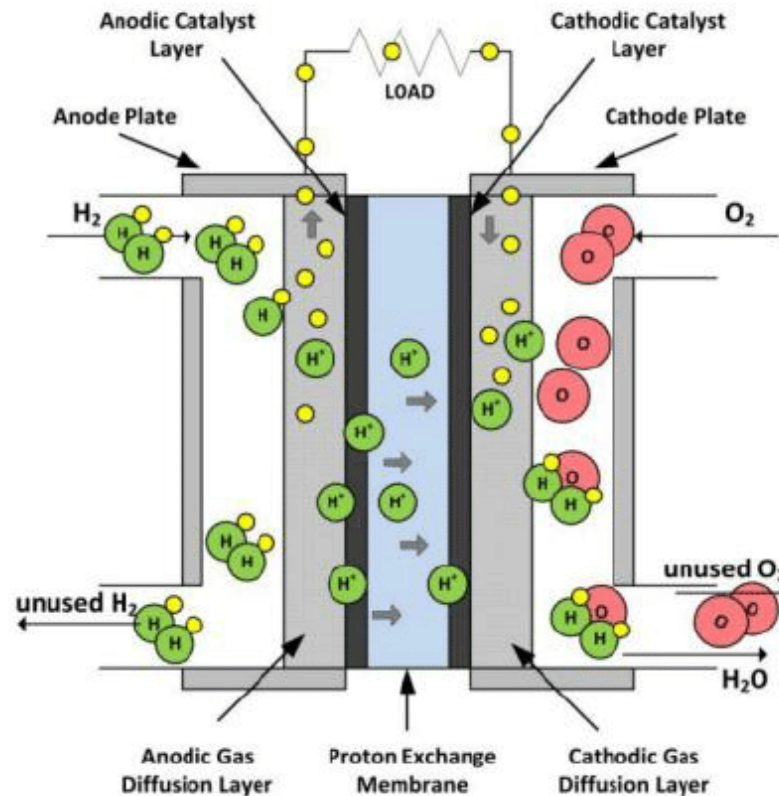


Σχήμα 2.8: Διπολικές πλάκες και κανάλια ροής αερίων [1].

Η τάση που αναπτύσσεται σε μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι της τάξης των 0.7V και γι' αυτό είναι αναγκαίο να συνδέονται σε σειρά πολλές κυψέλες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την συνολική τάση. Η σύνδεση πολλών κυψελών ονομάζεται στοίβα κυψέλης καυσίμου. Ακόμη οι διπολικές πλάκες είναι ηλεκτρικά αγωγίμες, με στόχο τη σύνθεση συνολικής τάσης και τη δυνατότητα σύνδεσης φορτίου στην απόληξη του τελευταίου κελιού της κυψέλης καυσίμου.

Η κυψέλη καυσίμου τύπου PEM χρησιμοποιεί ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο και ανήκει στην κατηγορία κυψελών όπου λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ειδικότερα λόγω της υγρασίας που χρειάζεται η μεμβράνη για να λειτουργήσει σωστά, η θερμοκρασία δεν μπορεί να ξεπεράσει τους 100°C. Συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας είναι 50 - 80°C.

Το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και συναντά την μεμβράνη η οποία διαχωρίζει τα θετικά ιόντα υδρογόνου και τα ηλεκτρόνια. Τα θετικά ιόντα οδηγούνται μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια οδηγούνται στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα λειτουργίας PEMFC [11].

Η χημική αντίδραση που περιγράφει την συγκεκριμένη διαδικασία στην άνοδο είναι η εξής [1]:



Στην κάθοδο εισέρχεται οξυγόνο το οποίο αντιδρά με τέσσερα θετικά ιόντα υδρογόνου που πέρασαν από την άνοδο μέσω της μεμβράνης καθώς και με τέσσερα ηλεκτρόνια τα οποία μεταφέρονται στην κάθοδο μέσω του κλειστού κυκλώματος σχηματίζοντας δύο μόρια νερού.

Η χημική αντίδραση που περιγράφει την συγκεκριμένη διαδικασία στην κάθοδο είναι η εξής [1]:



Η συνολική αντίδραση είναι [1]:



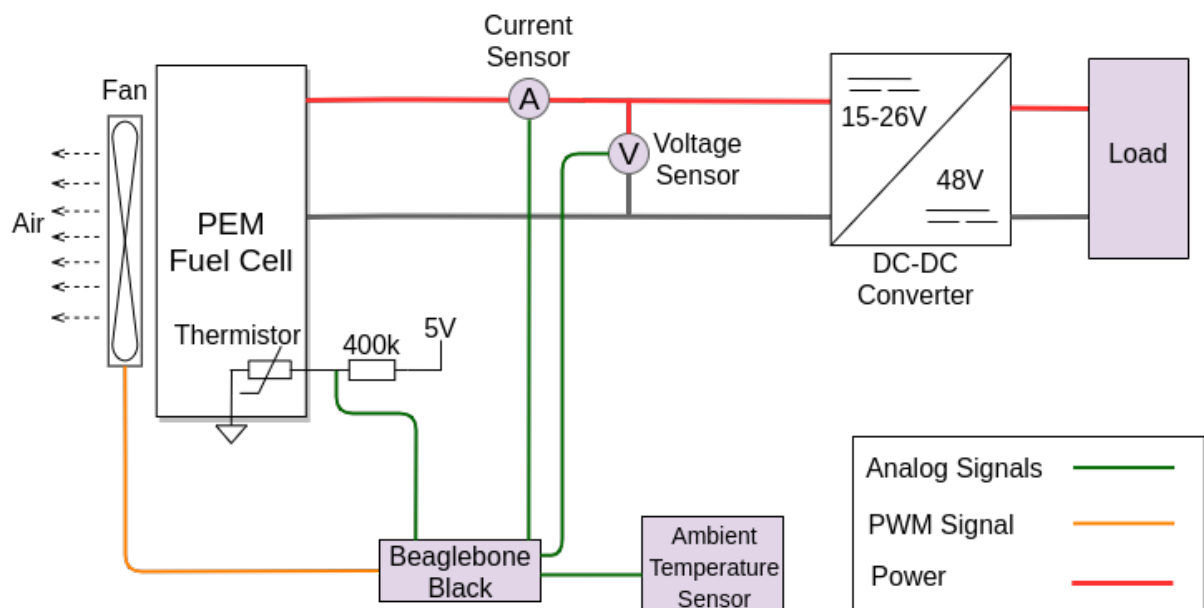
Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM είναι περίπου 50% και μεταβάλλεται κυρίως με τη ζήτηση ρεύματος από το φορτίο αλλά και από τις συνθήκες λειτουργίας. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου ο βαθμός απόδοσης σε σύγκριση με το εύρος μεταβολής της ζήτησης ισχύος είναι αρκετά υψηλός, έχοντας δυνατότητα να ανταποκριθεί γρήγορα σε μεταβολές ισχύος. Επιπλέον, παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα ισχύος από 0.2 έως 0.7W/cm², το οποίο την καθιστά συμπαγή και με μικρό βάρος. Επίσης έχει διαπιστωθεί η ικανότητά της για διατήρηση σταθερής λειτουργίας της για περισσότερο από 40000 ώρες, επιτρέποντας της έτσι να είναι μια εμπορικά βιώσιμη διάταξη.

Η κυψέλη καυσίμου τύπου PEM λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι ιδανική για διάφορες εφαρμογές όπως τα τελευταία χρόνια στην αυτοκίνηση, αλλά και γενικά σε κινητές εφαρμογές και τομείς που παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό και επενδυτικό ενδιαφέρον. Παράλληλα, το υλικό της πολυμερούς μεμβράνης (Nafion) του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης περιορίζει τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επομένως, για τη σωστή λειτουργία σε αυτές τις συνθήκες προκύπτει η ανάγκη χρήσης ευγενών μετάλλων, όπως λευκόχρυσου, ως καταλύτη. Τέλος, η 99.9% καθαρότητα του υδρογόνου που χρειάζονται οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM μαζί με τα υλικά του καταλύτη αυξάνουν σημαντικά το κόστος του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου.

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει μια σειρά από κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, παρουσιάζοντας την ποικιλία καυσίμων με τα οποία λειτουργούν καθώς και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα που έχουν. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζεται εκτενέστερα ο τύπος PEM τον οποίο χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό όχημα, με στόχο την κατανόηση των δομικών μερών αλλά και τον τρόπο λειτουργίας, το οποίο θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της διπλωματικής εργασίας.

3 Προσομοίωση του μοντέλου της PEM κυψέλης καυσίμου σε περιβάλλον Simulink

Το σύστημα της κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος αρχικά μελετήθηκε θεωρητικά με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink για την ρύθμιση των διάφορων παραμέτρων του συστήματος καθώς και για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την λειτουργία αλλά και την μετέπειτα ολοκλήρωση του συστήματος, όπως η επιλογή του κατάλληλου ανεμιστήρα για την ψύξη και ροή οξυγόνου της κυψέλης καυσίμου. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το σύστημα κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και το οποίο αποτελεί ένα μέρος του συνολικού συστήματος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Πιο συγκεκριμένα το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από την κυψέλη καυσίμου, τον ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη της, τον μικροεπεξεργαστή, καθώς και τους αισθητήρες θερμοκρασίας, ρεύματος και τάσης, όπου οι μετρήσεις τους καθορίζουν μια σειρά εντολών ελέγχου προς την κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 3.1: Σύστημα κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση σε περιβάλλον Simulink.

3.1 Θερμικό μοντέλο PEM κυψέλης καυσίμου

Ο βαθμός απόδοσης μίας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει θερμική ενέργεια η οποία παράγεται εσωτερικά της κυψέλης καυσίμου. Η συνολική ισχύς που παράγει η κυψέλη

καυσίμου περιγράφεται από την ηλεκτρική ισχύ (P_{el}) και από την θερμική ισχύ (P_{th}) [3]:

$$P_{el} = V_{cell} \cdot I_{stack} \quad (3.1)$$

$$Q_{gen} = P_{th} = (V_{nerst} - V_{cell}) \cdot I_{stack} \quad (3.2)$$

όπου V_{cell} είναι η πραγματική τάση ενός κελιού της κυψέλης καυσίμου, I_{stack} είναι το ρεύμα της στοίβας της κυψέλης καυσίμου, V_{nerst} είναι η ιδανική τάση που αναπτύσσει η κυψέλη καυσίμου, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση του Nerst και για την κυψέλη καυσίμου που θα τοποθετηθεί στο ηλεκτρικό όχημα δίνεται από τον κατασκευαστή η τιμή $V_{nerst} = 1.253V$.

3.1.1 Απώλειες ενέργειας κυψέλης καυσίμου

Η ιδανική τάση V_{nerst} της κυψέλης καυσίμου δεν μπορεί να επιτευχθεί στην πραγματικότητα καθώς υπάρχουν απώλειες ενέργειας οι οποίες δεν μπορούν να αποφευχθούν καθώς δημιουργούνται από τα δομικά μέρη της κυψέλης καυσίμου καθώς και από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Οι απώλειες χωρίζονται σε τρία είδη και αναφέρονται ως απώλειες ενεργοποίησης, ωμικές απώλειες καθώς και απώλειες συγκέντρωσης.

Απώλειες ενεργοποίησης [1]: οι απώλειες ενεργοποίησης προκαλούνται από τη βραδύτητα των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων αλλά και από τη δομή και το υλικό του καταλύτη. Ένα ποσοστό της παραγόμενης τάσης χάνεται κατά τη μεταφορά του προς τα ηλεκτρόδια ενώ δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του παραγόμενου ρεύματος. Η πτώση τάσης κατά τη διάρκεια απωλειών ενεργοποίησης είναι μη-γραμμική.

Ωμικές απώλειες [1]: οι ωμικές απώλειες δημιουργούνται λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων καθώς και λόγω της αντίστασης της ροής των ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Ακόμη, οι διπολικές πλάκες καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και μεταφορά των ιόντων εμφανίζουν αντίσταση. Η πτώση τάσης που δημιουργείται είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρεύματος $V = R \cdot I$. Για την μείωση των ωμικών απωλειών χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμα υλικά, λεπτότερο πάχος ηλεκτρολύτη καθώς και τεχνικές βέλτιστης σύνδεσης των διπολικών πλακών.

Απώλειες συγκέντρωσης [1]: η κυψέλη καυσίμου για τη λειτουργία της σε διάφορες πυκνότητες ρεύματος χρειάζεται τις κατάλληλες ποσότητες υδρογόνου και οξυγόνου. Η εναλλαγή του φορτίου στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου δημιουργεί και εναλλαγή στην πίεση και τη συγκέντρωση του υδρογόνου εσωτερικά της κυψέλης καυσίμου καθώς και αλλαγή στη συγκέντρωση του οξυγόνου που βρίσκεται στην κάθοδο καθώς μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος ισοδυναμεί και με μεγαλύτερη αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου. Οι εναλλαγές αυτές σε συνδυασμό με το ότι τα αέρια δεν μπορούν να ανταποκριθούν αχαριαία προκαλούν απώλειες οι οποίες ονομάζονται απώλειες συγκέντρωσης. Οι απώλειες συγκέντρωσης πραγματοποιούνται κυρίως στις μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος όπου υπάρχει και μεγαλύτερη εναλλαγή στις συγκεντρώσεις των αερίων.

Η πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου περιγράφεται ως η ιδανική τάση σύμφωνα με την εξίσωση του Nerst αφαιρώντας την πτώση τάσης που δημιουργείται λόγω των απωλειών που περιγράφηκαν παραπάνω [1]:

$$V_{cell} = V_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3.3)$$

όπου V_{act} είναι η πτώση τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης, V_{ohm} είναι η πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών και V_{conc} η πτώση τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης. Ο υπολογισμός των παραπάνω πτώσεων τάσης δίνει τον ακριβή τύπο για την πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής (FCgen 10-20ACS) ως εξής [2]:

$$V_{cell} = 1.005 - 0.0399 \cdot \log I_s - 0.00344 \cdot I_s - 0.118 \cdot e^{-0.021 \cdot I_s} \quad (3.4)$$

όπου ο καθαρός όρος προκύπτει από την εξίσωση του Nerst, ο λογαριθμικός όρος αναπαριστά την πτώση τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης, ο γραμμικός όρος αναπαριστά την πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών και ο εκθετικός όρος αναπαριστά την πτώση τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης.

3.1.2 Θέρμανση - ψύξη κυψέλης καυσίμου

Η θερμότητα που παράγει το κάθε κελί της κυψέλης καυσίμου περιγράφεται από την εξίσωση (3.2) από την οποία προκύπτει ότι η παραγόμενη θερμότητα είναι ανάλογη του ρεύματος. Η συνολική θερμότητα της κυψέλης καυσίμου εξάγεται από το πηλίκο της εξίσωσης (3.2) με τον αριθμό των κελιών από τα οποία αποτελείται η στοίβα της κυψέλης καυσίμου. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται στοίβα κυψέλης καυσίμου 28 κελιών συνεπώς η συνολική θερμότητα δίνεται από τον τύπο [3]:

$$Q_{gen} = (1.253 - V_{cell}) \cdot I_s \cdot n \quad (3.5)$$

όπου $n = 28$ είναι ο αριθμός των κελιών.

Η συνολική ροή θερμότητας της κυψέλης καυσίμου υπολογίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στη θερμότητα που παράγει η κυψέλη καυσίμου ανάλογα με την πυκνότητα του ρεύματος και στη θερμότητα που επάγεται από το ψυκτικό μέσο που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ροή αέρα που δημιουργεί ο ανεμιστήρας καθώς και η θερμότητα που εκλύεται από την εξωτερική επιφάνεια την κυψέλης καυσίμου. Η διαφορά θερμότητας περιγράφεται από τις εξισώσεις [6]:

$$\Delta Q = Q_{gen} - Q_{diss} \quad (3.6)$$

$$Q_{diss} = Q_{fan} + Q_{nat} \quad (3.7)$$

όπου Q_{fan} είναι η θερμότητα που απομακρύνει ο ανεμιστήρας από την κυψέλη καυσίμου και Q_{nat} είναι η ενέργεια που εκλύεται από την επιφάνεια της κυψέλης.

Η θερμότητα που αφαιρεί η ροή αέρα κατά τη λειτουργία του ανεμιστήρα υπολογίζεται από την εξίσωση [2]:

$$Q_{fan} = \dot{m}_{air} \cdot C_{p,air} \cdot (T_{fc} - T_{amb}) \quad (3.8)$$

όπου \dot{m}_{air} είναι ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα (air mass flow rate) και έχει ως μονάδα μέτρησης $[kg/s]$, ενώ $C_{p,air}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα και έχει ως μονάδα

μέτρησης $[\frac{J}{K \cdot kg}]$. Οι όροι T_{fc} και T_{amb} αναπαριστούν τη θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου και την ατμοσφαιρική αντίστοιχα, με μονάδα μέτρησης βαθμούς Κελσίου $[^{\circ}C]$.

Η φυσική επαγωγή θερμότητας από την επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου περιγράφεται από την εξίσωση [6]:

$$Q_{nat} = \alpha_{conv} \cdot A_{stack} \cdot (T_{fc} - T_{amb}) \quad (3.9)$$

όπου α_{conv} είναι συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τη στοίβα κυψέλης καυσίμου στον ατμοσφαιρικό αέρα με μονάδα μέτρησης $[\frac{W}{K \cdot m^2}]$. Ο όρος A_{stack} περιγράφει την επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου με μονάδα μέτρησης τετραγωνικά μέτρα (m^2). Οι όροι T_{fc} και T_{amb} αναπαριστούν τη θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου και της ατμόσφαιρας αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου μπορεί να περιγραφεί από την διαφορική εξίσωση [6]:

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{\Delta Q}{M_{stack} \cdot C_{stack}} \quad (3.10)$$

όπου η παράγωγος της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου υπολογίζεται ως η διαφορά θερμότητας όπως αυτή υπολογίζεται στην εξίσωση (3.6), προς το πηλίκο της μάζας της κυψέλης καυσίμου M_{stack} υπολογισμένη σε κιλά, με τη θερμοχωρητικότητα της κυψέλης καυσίμου C_{stack} με μονάδα μέτρησης $[\frac{J}{K \cdot kg}]$.

Ο υπολογισμός του ρυθμού ροής μάζας αέρα που χρειάζεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου με στόχο την ιδανική θερμοκρασία στην οποία πρέπει να λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου υπολογίζεται από τον κατασκευαστή σύμφωνα με την εξίσωση [2]:

$$\dot{m}_{air} = \frac{Q_{gen}}{C_{p,air} \cdot (T_{fc} - T_{amb} - 0.403 \cdot Q_{gen})} \quad (3.11)$$

Από τον ρυθμό ροής μάζας αέρα υπολογίζεται και η ροή όγκου του αέρα που πρέπει να παράγει ο ανεμιστήρας για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου με μονάδα μέτρησης $[m^3/s]$. Η εξίσωση που περιγράφει τη ροή όγκου δίνεται από τον τύπο [2]:

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air}} \quad (3.12)$$

όπου ρ_{air} είναι η πυκνότητα του αέρα η οποία μεταβάλλεται σε διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα και έχει ως μονάδα μέτρησης $[kg/m^3]$.

Η ροή αέρα που δημιουργεί ο ανεμιστήρας διαπερνά τα κανάλια ροής οξυγόνου στην κάθοδο των κελιών δημιουργώντας διαφορά πίεσης ανάμεσα στον αέρα εισόδου στο κανάλι και στον αέρα εξόδου από το κανάλι λόγω των μικρών οπών του καναλιού. Η συγκεκριμένη διαφορά πίεσης έχει σημαντικό ρόλο στην επιλογή ανεμιστήρα, καθώς η διαφορά πίεσης που δημιουργείται καθορίζει το αν ο ανεμιστήρας μπορεί να αντεπεξέλθει στις συγκεκριμένες συνθήκες ώστε να εξασφαλίσει την κατάλληλη ροή για την κυψέλη καυσίμου. Η εξίσωση υπολογισμού της διαφοράς πίεσης αέρα δίνεται από τον κατασκευαστή [2]:

$$\Delta P = \frac{0.0592 \cdot (T_{fc} + 273)^{1.5}}{T_{fc} + 393} \cdot \frac{\dot{V}_{air}}{n + 1} \quad (3.13)$$

όπου T_{fc} είναι η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου, \dot{V}_{air} είναι η ροή όγκου του αέρα και n είναι ο αριθμός των κελιών της κυψέλης καυσίμου.

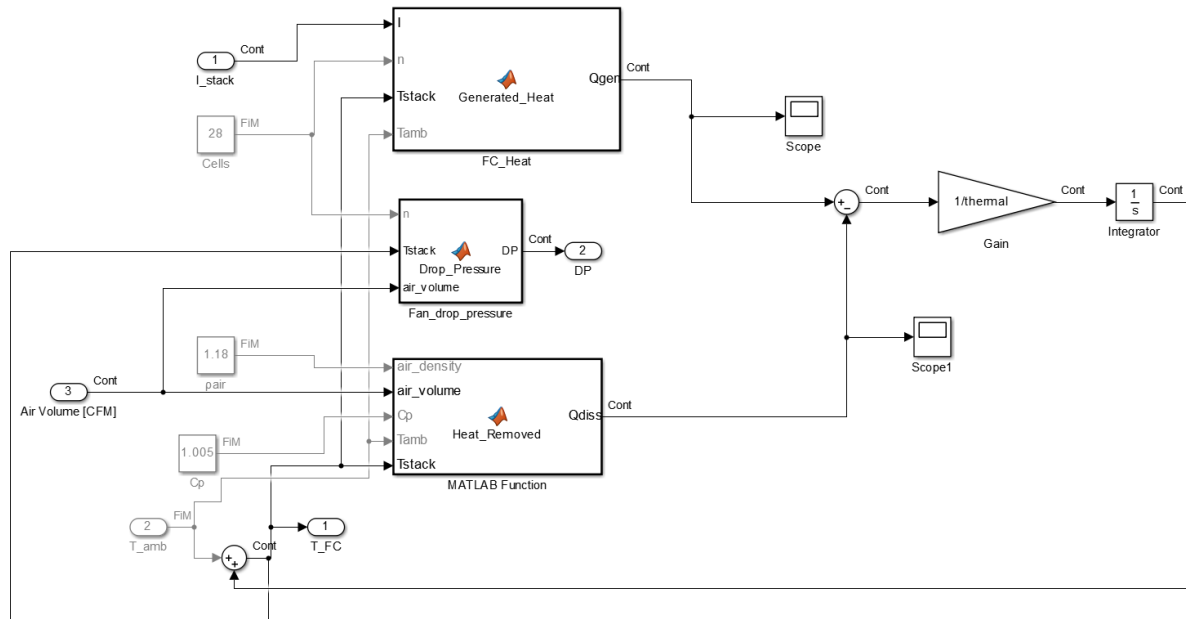
Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση καθώς και οι τιμές τους μαζί με τις μονάδες μέτρησης.

Πίνακας 3.1: Ορισμός παραμέτρων θερμικού μοντέλου.

Μεταβλητή	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
M_{stack}	Μάζα κυψέλης καυσίμου	6.58	kg
C_{stack}	Θερμοχωρητικότητα κυψέλης καυσίμου	2800	$J/^{\circ}C$
\dot{m}_{air}	Ρυθμός μάζας ροής αέρα	-	kg/s
ρ_{air}	Πυκνότητα αέρα	1.1839 στους $25^{\circ}C$	kg/m^3
$C_{p,air}$	Θερμοχωρητικότητα αέρα	1004 στους $0^{\circ}C$	$J/(kg \cdot K)$
\dot{V}_{air}	Ροή όγκου αέρα	-	m^3/s
A_{stack}	Επιφάνεια κυψέλης καυσίμου	735	cm^2
n	Αριθμός κελιών	28	-

3.1.3 Υλοποίηση θερμικού μοντέλου σε περιβάλλον Simulink και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Έπειτα από τον καθορισμό των εξισώσεων που περιγράφουν το θερμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων στο λογισμικό Simulink με στόχο την προσομοίωση του θερμικού μοντέλου και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου καθώς και τις ανάγκες της για ροή οξυγόνου και ψύξη.



Σχήμα 3.2: Θερμικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου και υλοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το θερμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό Simulink. Το παραπάνω σύστημα έχει ως εισόδους τις μεταβλητές του Πίνακα 3.1. Η μόνη μεταβλητή που δεν παραμένει σταθερή είναι η ροή όγκου αέρα που εξαρτάται από την έξοδο του ανεμιστήρα. Ως έξοδοι του συστήματος ορίζονται η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου καθώς και η διαφορά πίεσης που δημιουργείται.

Για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου αναπτύχθηκε PID ελεγκτής ο οποίος διαβάζει ως είσοδο (error) την διαφορά θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου και της ιδανικής θερμοκρασίας που πρέπει να έχει στη συγκεκριμένη τιμή ρεύματος. Η ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου δίνεται από την εξίσωση του κατασκευαστή [2]:

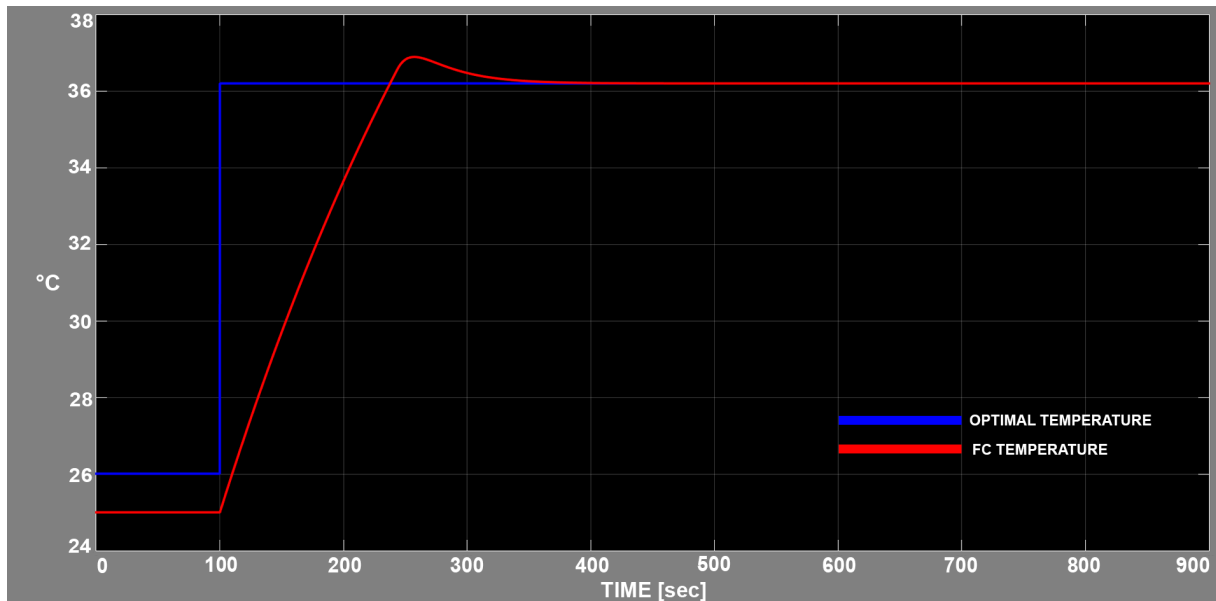
$$T_{opt} = 26.01 + 0.53 \cdot I_s \quad (3.14)$$

όπου I_s είναι το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου. Η ιδανική θερμοκρασία είναι γραμμική εξίσωση του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου και παρατηρείται ότι για αδρανή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου η ιδανική θερμοκρασία είναι οι 26°C . Σε περίπτωση όπου η ατμοσφαιρική θερμοκρασία είναι μικρότερη από τους 26°C και κυρίως σε χαμηλές τιμές όπως 10°C χρειάζεται χρόνος προετοιμασίας εκκίνησης της κυψέλης καυσίμου.

Αρχικά ο ελεγκτής είχε ως έξοδο την ροή αέρα η οποία περιορίζεται σε μία μέγιστη τιμή στην οποία υπήρχαν εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα ανεμιστήρων που να πετυχαίνουν τη συγκεκριμένη μέγιστη ροή. Ο ελεγκτής αρχικά ρυθμίστηκε ώστε να ικανοποιεί τα κριτήρια της ευστάθειας χρησιμοποιώντας το PID tuner του λογισμικού Simulink σε συγκεκριμένες συνθήκες και στη συνέχεια ξεκίνησε η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα όρια ροής οξυγόνου και διαφοράς πίεσης που πρέπει να έχει ο ανεμιστήρας με στόχο τον πλήρη έλεγχο της κυψέλης καυσίμου ακόμα και σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας.

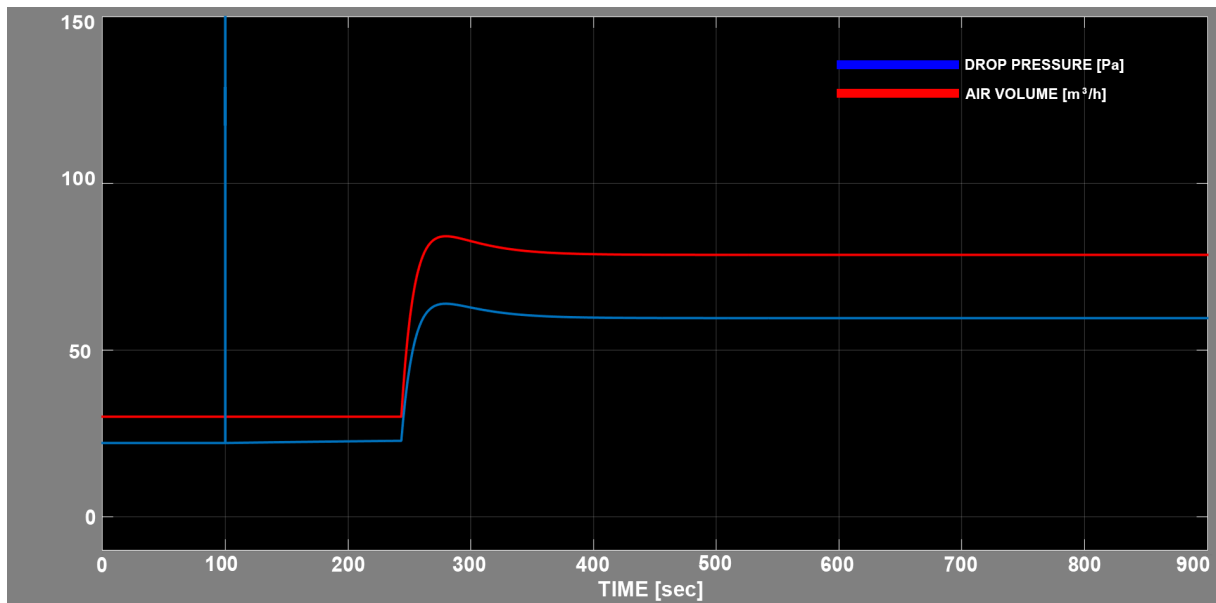
Η μέση κατανάλωση του ηλεκτρικού οχήματος στο οποίο θα τοποθετηθεί η κυψέλη καυσίμου κυμαίνεται από 250 – 300W. Με τη χρήση ενός συγκεκριμένου DC-DC Boost Converter ο οποίος εκτός από ανόρθωση τάσης έχει και τη δυνατότητα περιορισμού του

ρεύματος, ρυθμίζεται ως μέγιστο ρεύμα τα 20A. Θεωρώντας ότι η κυψέλη καυσίμου παράγει 20A εναλλάσσεται η τιμή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με στόχο την εύρεση του οριακού σημείου ψύξης περιορίζοντας τη μέγιστη ροή όγκου αέρα σε $600\text{ m}^3/\text{h}$.



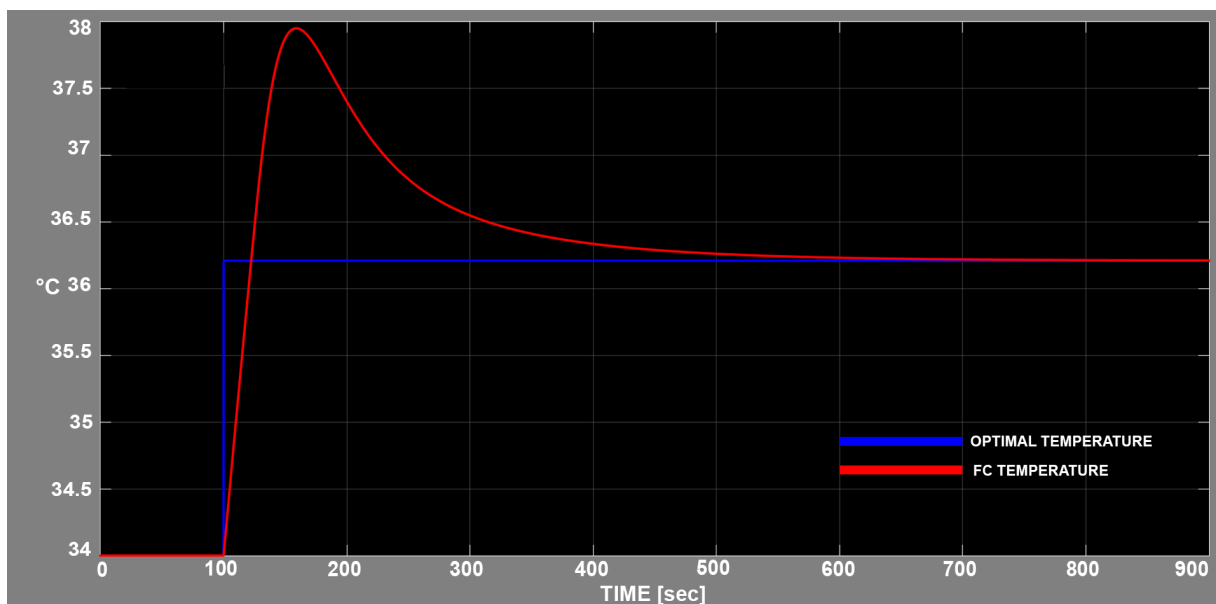
Σχήμα 3.3: Ιδανική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου σε σχέση με την πραγματική, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C κατά την παραγωγή ρεύματος 20A.

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει την ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα όταν εκείνη παράγει ρεύμα 20A, ενώ παράλληλα αναπαριστά και την πραγματική θερμοκρασία της με κόκκινο χρώμα. Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει την ροή όγκου αέρα που χρειάζεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου στα 20A με στόχο την ιδανική θερμοκρασία, καθώς και την διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τις μικρές οπές της κυψέλης καυσίμου. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής καταφέρνει και ισορροπεί το σύστημα στην ιδανική θερμοκρασία, ενώ παράλληλα η ροή και η διαφορά πίεσης παραμένουν σε χαμηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα η ροή όγκου αέρα που χρειάζεται για την ψύξη υπό αυτές τις συνθήκες είναι $75\text{ m}^3/\text{h}$ ενώ η διαφορά πίεσης που δημιουργείται είναι 60 Pa .

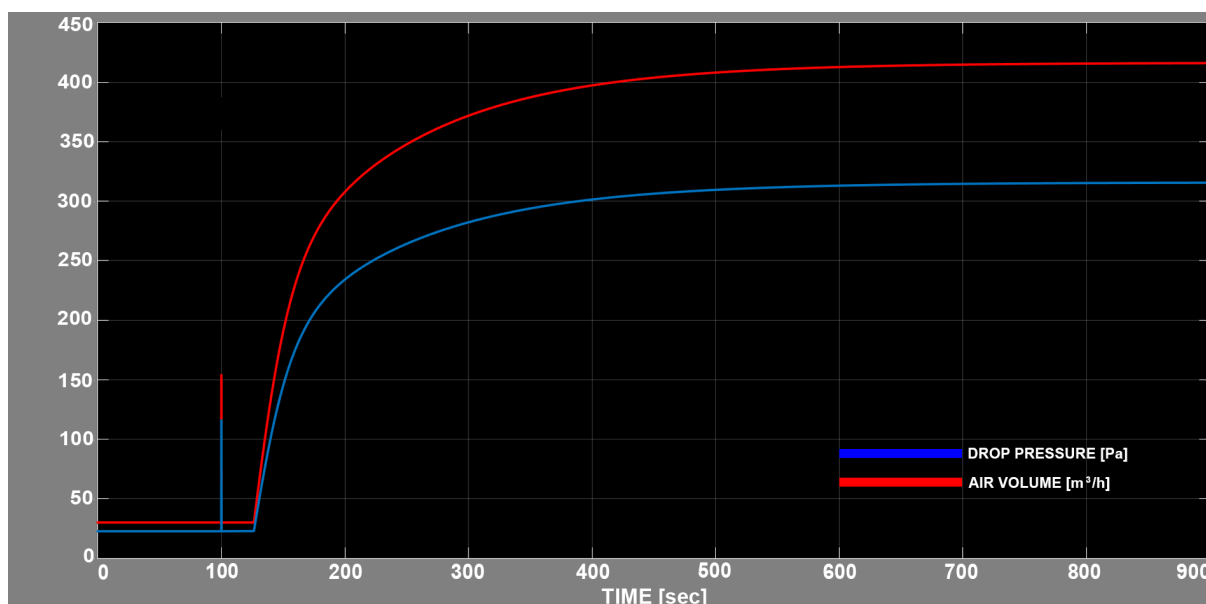


Σχήμα 3.4: Ροή όγκου αέρα και διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου όταν παράγει ρεύμα 20A σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C .

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.14) παρατηρούμε ότι η ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με το ρεύμα που παράγει. Σε χαμηλές τιμές ρεύματος η ιδανική θερμοκρασία βρίσκεται πολύ κοντά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος με αποτέλεσμα την μέγιστη αύξηση της ροής αέρα για την ψύξη της. Για παράδειγμα σε τιμή ρεύματος 50A η ιδανική θερμοκρασία είναι 52.5°C όταν μια μέγιστη ατμοσφαιρική θερμοκρασία μπορεί να είναι 38°C , ενώ για ρεύμα 20A η ιδανική θερμοκρασία είναι 36.61°C που σημαίνει ότι η ατμοσφαιρική θερμοκρασία πρέπει να είναι μικρότερη ή ότι το σύστημα δεν μπορεί να ισορροπήσει στην ιδανική θερμοκρασία αλλά σε κάποια μεγαλύτερη, με επίπτωση μείωση στο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 3.5: Ιδανική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου σε σχέση με την πραγματική, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 34°C όταν παράγει ρεύμα 20A.



Σχήμα 3.6: Ροή όγκου αέρα και διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου όταν παράγει ρεύμα 20A σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 34°C.

Το Σχήμα 3.5 αναπαριστά την ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα όταν εκείνη παράγει ρεύμα 20A, ενώ παράλληλα αναπαριστά και την πραγματική θερμοκρασία της με κόκκινο χρώμα. Το Σχήμα 3.6 αναπαριστά την ροή όγκου αέρα που χρειάζεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου στα 20A με στόχο την ιδανική θερμοκρασία, καθώς και την διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τις μικρές οπές της κυψέλης καυσίμου. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής καταφέρνει να ισορροπήσει το σύστημα αλλά με ροή όγκου αέρα $425 \text{ m}^3/\text{h}$ και διαφορά πίεσης 325 Pa .

Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή ανεμιστήρα που ικανοποιεί τις παραπάνω μετρήσεις. Αρχικά μελετήθηκε ο ανεμιστήρας τύπου EBM-PAPST W1G180AB3101 τον οποίο πρότεινε ο κατασκευαστής για στοίβα κυψέλης καυσίμου μικρότερη των 45 κελιών. Η συγκεκριμένη λύση αποτελεί γενικευμένη λύση καθώς η κυψέλη καυσίμου με 28 κελιά έχει λιγότερες απαιτήσεις ψύξης και ροής από εκείνη των 45 κελιών. Με τα παραπάνω δεδομένα από την προσομοίωση και μετά από έρευνα σε βιομηχανικούς ανεμιστήρες οι οποίοι πληρούν τις απαιτήσεις πίεσης, επιλέχθηκε ο ανεμιστήρας EBM-PAPST 6314/2TDHHP ο οποίος πληρεί τις απαιτήσεις σύμφωνα με την προσομοίωση. Με τη συγκεκριμένη αλλαγή, επιτεύχθηκε η μείωση της κατανάλωσης του ανεμιστήρα από 93W στα 67W αλλά και η ελάττωση του βάρους του συστήματος κατά ένα κιλό.

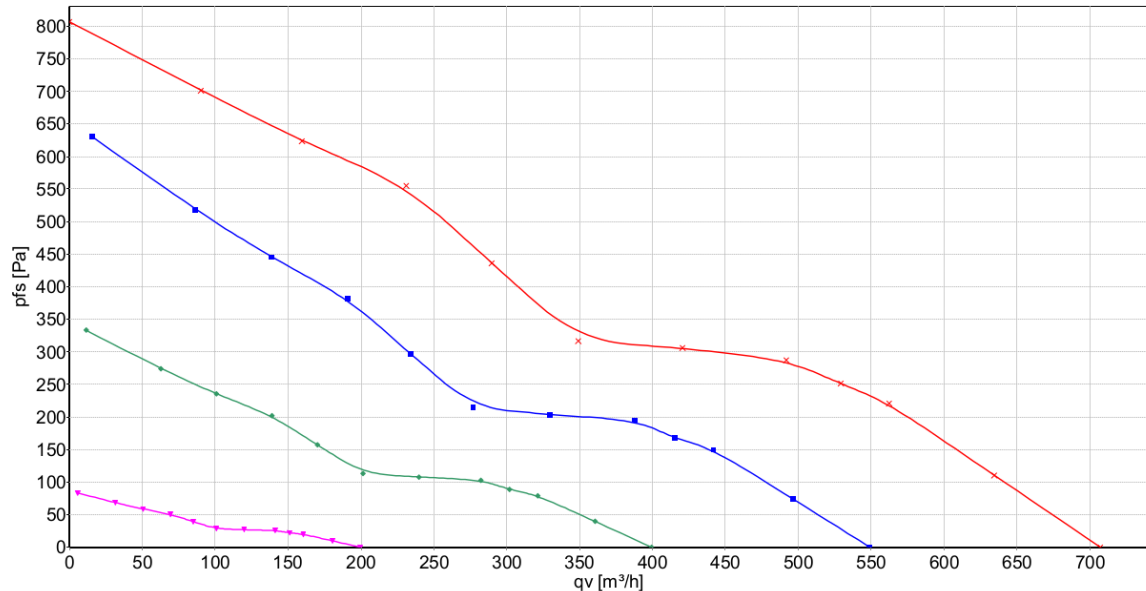
6314/2TDHHP

red: 100% PWM (7000rpm)
 blue: 70% PWM (5500rpm)
 green: 50% PWM (4000rpm)
 pink: 25% PWM (2000rpm)



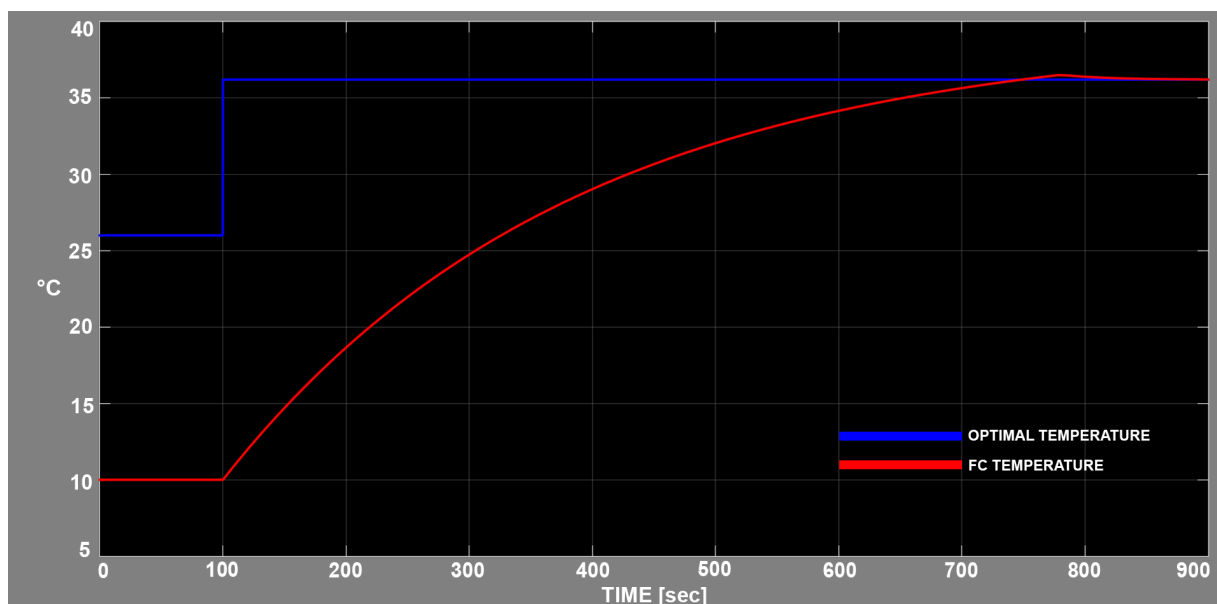
ebm papst

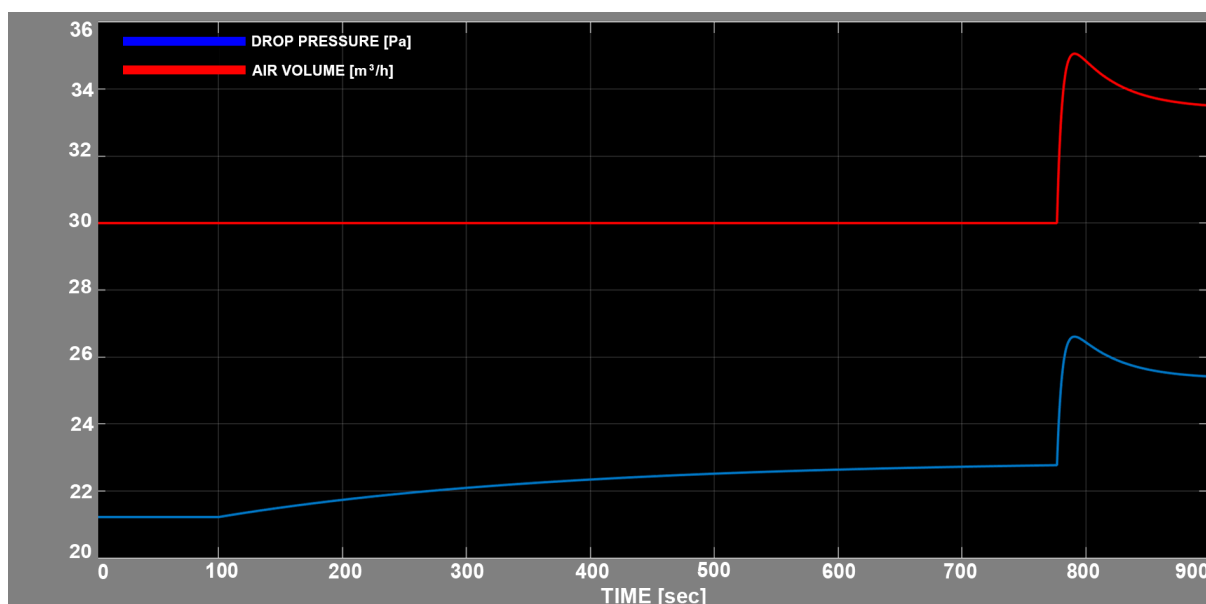
Line	Idno	Type	Idx.	U [V]	f [Hz]	Ust [V]	PWM [%]	Layout	Inst. cat.	Remark
638	6314/2TDHHP		24				100	A	A	
638	6314/2TDHHP		24				100	A	A	n=5500; Rho=1.2; Leak corr.
638	6314/2TDHHP		24				100	A	A	n=4000; Rho=1.2; Leak corr.
638	6314/2TDHHP		24				100	A	A	n=2000; Rho=1.2; Leak corr.



Σχήμα 3.7: Καμπύλες ανεμιστήρα τύπου 6314/2TDHHP.

Ανεμιστήρες με μεγαλύτερη ροή όγκου αέρα σε υψηλές διαφορές πίεσης μπορούν να ικανοποιήσουν το σύστημα ακόμα και στις πιο οριακές συνθήκες θερμοκρασίας. Όμως παρατηρήθηκε ότι τα συγκεκριμένα είδη υπερψύχουν την κυβέλη καυσίμου σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όπως μια μέση θερμοκρασία χειμώνα της τάξεως των 10°C .

Σχήμα 3.8: Ιδανική θερμοκρασία κυβέλης καυσίμου σε σχέση με την πραγματική όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 10°C και παράγει ρεύμα 20A.

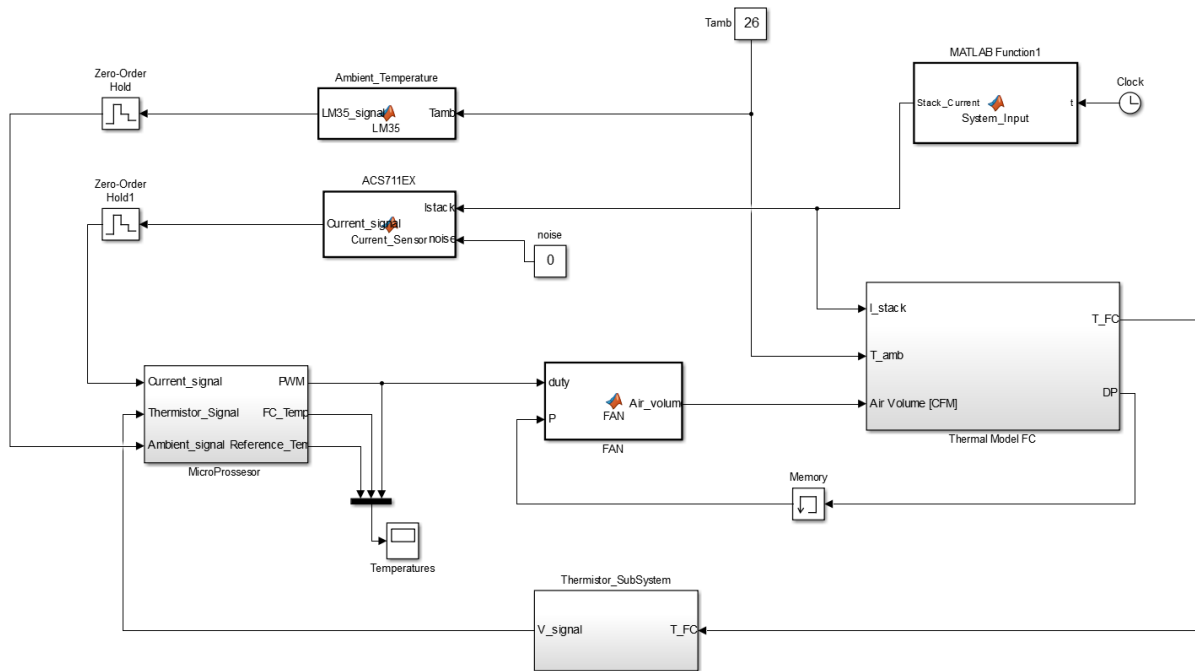


Σχήμα 3.9: Ροή όγκου αέρα και διαφορά πίεσης για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου όταν παράγει ρεύμα 20A .

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου με μπλε χρώμα όταν εκείνη παράγει ρεύμα 20A, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται και η πραγματική θερμοκρασία της με κόκκινο χρώμα. Παρατηρείται ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 10°C η κυψέλη καυσίμου αυξάνει τη θερμοκρασία της με πιο αργό ρυθμό και αυτό οφείλεται στην ελάχιστη ροή που δημιουργεί ο ανεμιστήρας για την ποσότητα οξυγόνου που χρειάζεται για την αντίδραση με το οξυγόνο. Παρατηρείται ότι με τη χρήση του ανεμιστήρα τύπου EBM-PAPST 6314/2TDHHP που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου, ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία η κυψέλη καυσίμου δεν υπερ-ψύχεται ακόμα και με την ελάχιστη ροή του ανεμιστήρα. Το Σχήμα 3.9 δείχνει την ροή όγκου αέρα που χρειάζεται για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου στα 20A με στόχο την ιδανική θερμοκρασία, καθώς και την διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τις μικρές οπές της κυψέλης καυσίμου. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής καταφέρνει να ισορροπήσει το σύστημα με ροή όγκου αέρα $35\text{ m}^3/\text{h}$ και διαφορά πίεσης 27 Pa . Οι συγκεκριμένες τιμές είναι οι ελάχιστες δυνατές που μπορούν να επιτευχθούν από το συγκεκριμένο τύπο ανεμιστήρα.

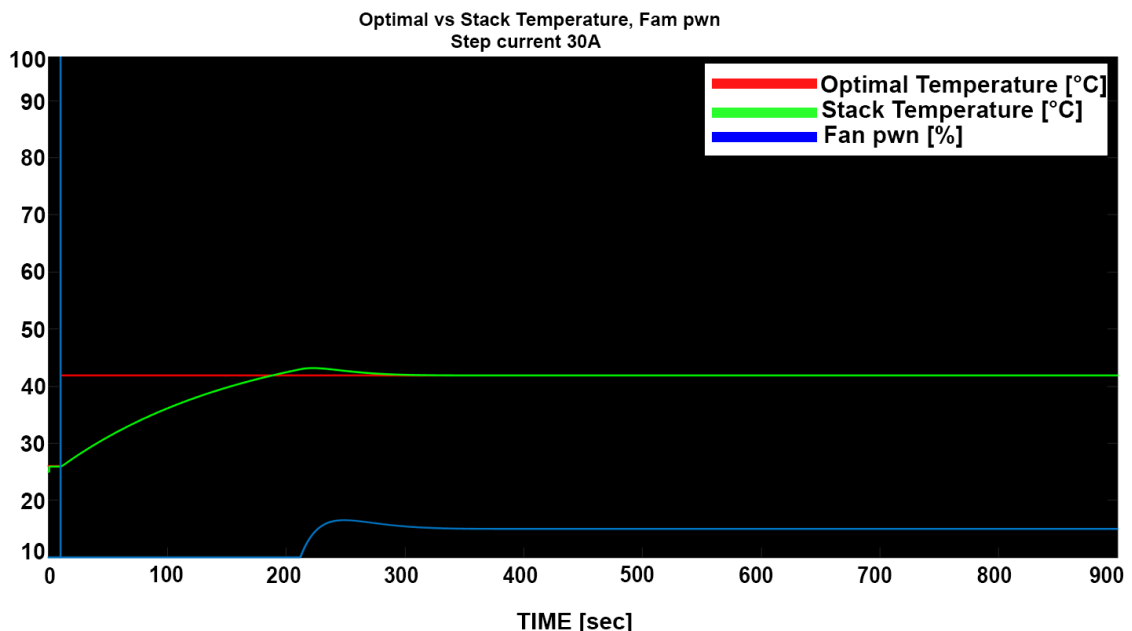
3.1.4 Υλοποίηση συνολικού συστήματος ελέγχου ψύξης σε περιβάλλον Simulink

Μετά την υλοποίηση του θερμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των διαφόρων αισθητήρων του συστήματος, το μοντέλο του ανεμιστήρα που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς και ο μικροεπεξεργαστής στον οποίο καταλήγουν όλα τα σήματα και λαμβάνονται οι αποφάσεις για τη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος. Το module του ανεμιστήρα χρησιμοποιεί look-up table με πολλαπλές τιμές που εξάγονται από το Σχήμα 3.7 καθώς και την εξίσωση διαφοράς πίεσης σε σχέση με τη ροή όγκου αέρα που δημιουργεί η κυψέλη καυσίμου σύμφωνα με την εξίσωση (3.13). Ως είσοδος στο σύστημα δίνεται το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου καθώς και η ατμοσφαιρική θερμοκρασία στην οποία προσομοιώνεται ότι θα λειτουργήσει το σύστημα.



Σχήμα 3.10: Υλοποίηση συνολικού συστήματος ελέγχου ψύξης σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink.

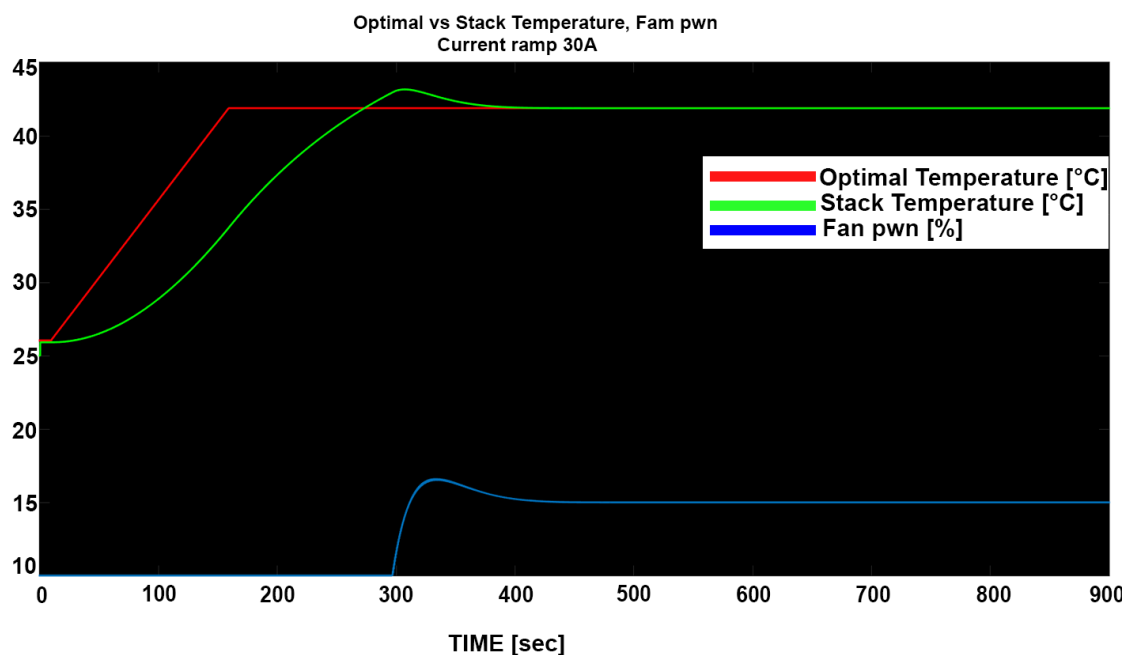
Για τη ρύθμιση του PID ελεγκτή του συνολικού συστήματος ελέγχου του Σχήματος 3.10 χρησιμοποιήθηκε το PID tuner του λογισμικού Simulink. Ως είσοδος ρεύματος αρχικά χρησιμοποιήθηκε βηματική μεταβολή ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκε η απόκριση του ελεγκτή με είσοδο γραμμικής μεταβολής (ramp).



Σχήμα 3.11: Ιδανική-πραγματική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου σε βηματική μεταβολή ρεύματος 30A, με ατμοσφαιρική θερμοκρασία 26°C.

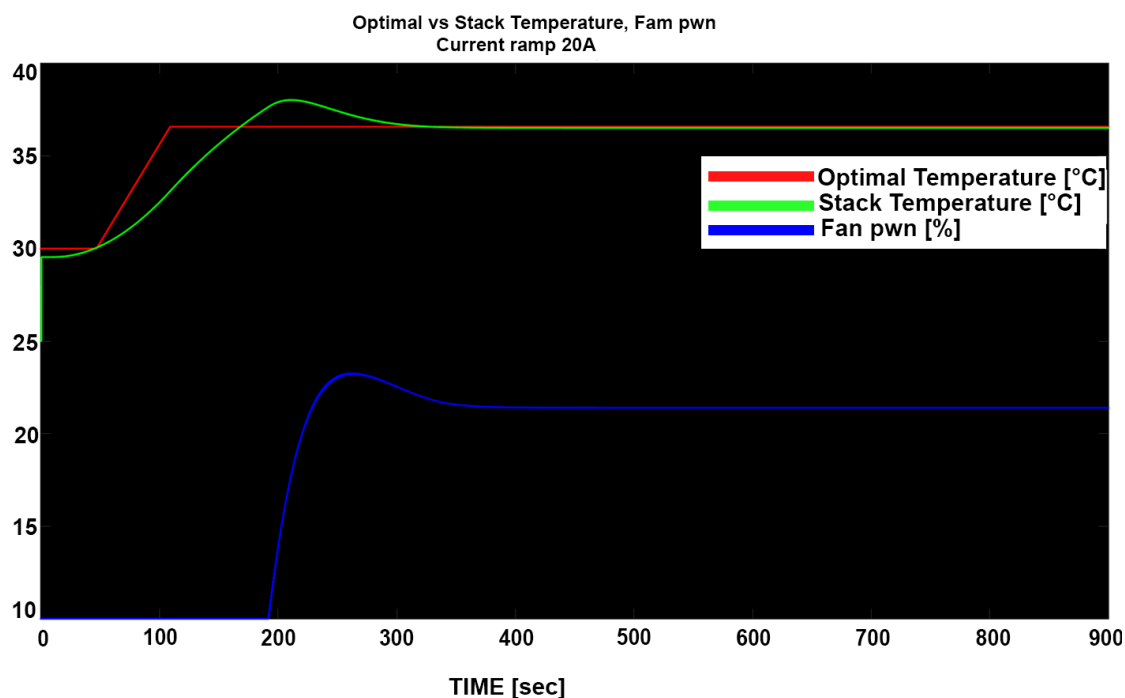
Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου με κόκκινο χρώμα για τιμή ρεύματος 30A, ενώ με πράσινο χρώμα αναπαριστάται η πραγματική θερμο-

κρασία της κυψέλης καυσίμου, η οποία ρυθμίζεται από τον PID ελεγκτή. Με μπλε χρώμα αναπαριστάται η % λειτουργία του ανεμιστήρα ο οποίος λειτουργεί με κατώτερο όριο το 10% της λειτουργίας του, καθώς πάντα υπάρχει ανάγκη ροής οξυγόνου για την αντίδραση με το υδρογόνο. Παρατηρείται ότι μέχρι τα πρώτα 200 δευτερόλεπτα η κυψέλη καυσίμου παράγει θερμότητα η οποία θερμαίνει το εσωτερικό της με αργό ρυθμό λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας της κυψέλης καυσίμου. Μετά τα 200 δευτερόλεπτα ο ελεγκτής δίνει εντολή ψύξης στον ανεμιστήρα ανεβάζοντας τις στροφές λειτουργίας του, πετυχαίνοντας έτσι το επίπεδο ιδανικής θερμοκρασίας λειτουργίας.



Σχήμα 3.12: Ιδανική-πραγματική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου σε μεταβολή ρεύματος 30A γραμμικής μεταβολής (ramp), με ατμοσφαιρική θερμοκρασία 26°C.

Στο Σχήμα 3.12 παρατηρείται η ιδανική σε σχέση με την πραγματική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου σε μεταβολή του ρεύματος με γραμμική μεταβολή (ramp) κλίσης 0.2A/s. Η εκκίνηση με γραμμική μεταβολή είναι αυτή που ενδείκνυται καθώς υπάρχουν κάποια όρια ασφαλούς λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου όσον αφορά την ιδανική θερμοκρασία. Παρατηρώντας το Σχήμα 3.11 διαπιστώνεται ότι κατά την εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου η ιδανική θερμοκρασία είναι 42°C ενώ η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου είναι 26°C, δηλαδή διαφορά θερμοκρασίας 16°C όταν η μέγιστη ασφαλής διαφορά θερμοκρασίας είναι 15°C. Στο Σχήμα 3.11 παρατηρείται ότι λόγω της ράμπας υπάρχει διαρκώς μεταβολή του σημείου ιδανικής θερμοκρασίας το οποίο όμως αναπτύσσει μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας από την πραγματική 10°C. Από το Σχήμα 3.12 εξάγεται το συμπέρασμα πως για την εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου χρειάζεται μεταβολή ρεύματος τύπου γραμμικής μεταβολής (ράμπας) και όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μεταβολής τόσο πιο ασφαλής είναι η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Ακόμη ο μικρότερος ρυθμός μεταβολής δίνει τη δυνατότητα στην κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί κοντά στην ιδανική θερμοκρασία αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τον βαθμό απόδοσής της καθώς βρίσκει κοντά στις ιδανικές συνθήκες.



Σχήμα 3.13: Ιδανική-πραγματική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου σε βηματική μεταβολή ρεύματος 20A, με ατμοσφαιρική θερμοκρασία 30°C.

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται γράφημα για μεταβολή του ρεύματος με μορφή ράμπας στα 20A και με ατμοσφαιρική θερμοκρασία στους 30°C. Παρατηρείται ότι η μορφή του γραφήματος είναι παρόμοια με το Σχήμα 3.12 με τη διαφορά ότι αυξήθηκαν οι στροφές για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου. Η μεταβολή στα 20A έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη ιδανική θερμοκρασία η οποία με την αύξηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας στους 30°C χρειάζεται περισσότερο ατμοσφαιρικό αέρα για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου και την επίτευξη της ιδανικής θερμοκρασίας.

Σε όλα τα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται η ευστάθεια του ελεγκτή και η ομαλή λειτουργία του ανεμιστήρα σε όλες τις συνθήκες. Αυτό που παρατηρήθηκε και θα επεξηγηθεί παρακάτω είναι ότι ο ανεμιστήρας αναπτύσσει λίγες στροφές σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα το οποίο οφείλεται στην επιπρόσθετη διαφορά πίεσης που δημιουργεί ο αεραγωγός που κατευθύνει το οξυγόνο στην κυψέλη καυσίμου υπό πραγματικές συνθήκες.

3.2 Ηλεκτρικό μοντέλο PEM κυψέλης καυσίμου

Με την ανάπτυξη του ηλεκτρικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου διακρίνεται η ηλεκτρική συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου και εξάγονται συμπεράσματα για τον βαθμό απόδοσής της. Για την κυψέλη καυσίμου της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις που υπολογίζουν την πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου όπως υπολογίζεται από πειράματα του κατασκευαστή. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3.4) που υπολογίζει την ιδανική τάση σύμφωνα με την εξίσωση του Nerst και αφαιρεί τις απώλειες (ενεργοποίησης, ωμικές, συγκέντρωσης) που δημιουργούνται φυσικά από την ίδια την κυψέλη καυσίμου.

Η ιδανική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου απαιτεί μια σειρά από ιδανικές συνθήκες όπως είναι η ιδανική θερμοκρασία λειτουργίας, η ιδανική πίεση του υδρογόνου αλλά και η

ιδανική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου εκτός των ιδανικών τιμών προκαλεί επιπλέον απώλειες οι οποίες μειώνουν την τάση που υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.4).

Όπως αναφέρεται στην εξίσωση (3.14), η μεταβολή του ρεύματος σημαίνει και μεταβολή στην ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου. Λόγω μεγάλης θερμοχωρητικότητας, η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα σε αυτή τη μεταβολή με αποτέλεσμα να βρίσκεται εκτός της ιδανικής θερμοκρασίας για κάποιο χρονικό διάστημα. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζει πτώση τάσης όπως περιγράφεται από την εξίσωση [3]:

$$\Delta V_{T_{stack}} = (-0.019935 \cdot (T_{stack} - T_{opt})^2 + 0.51177 \cdot (T_{stack} - T_{opt}) + 2.35976) \cdot (-0.00004435) \cdot I_s \quad (3.15)$$

όπου T_{stack} είναι η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου, T_{opt} είναι η ιδανική θερμοκρασία και I_s είναι το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου.

Για την ενεργοποίηση της αντίδρασης του υδρογόνου με τη μεμβράνη χρειάζεται η παρουσία υγρασίας στη μεμβράνη. Η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου έχει ρυθμιστεί από τον κατασκευαστή ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες υγρασίας χωρίς την χρήση υγραντήρα (humidifier) αλλά από την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα παρατηρείται πτώση τάσης στο κάθε κελί της κυψέλης καυσίμου όπως υπολογίζεται στην εξίσωση [3]:

$$\Delta V_{T_{air}} = (-0.0734 + 0.002974 \cdot I_s - 0.00003935 \cdot I_s^2) \cdot \left(\frac{T_{amb} - 40}{12} \right) \cdot \left(\frac{0.95 - RH}{0.85} \right) \quad (3.16)$$

όπου T_{amb} είναι η ατμοσφαιρική θερμοκρασία, I_s το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου και RH η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η πίεση εισαγωγής του υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου αναφέρεται από τον κατασκευαστή ότι έχει ιδανική τιμή 0.36 bar. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση προκαλεί πτώση τάσης όπως υπολογίζεται στην εξίσωση [3]:

$$\Delta V_{P_{H_2}} = -5.5156 \cdot 10^{-8} \cdot P_{H_2}^4 + 3.0630 \cdot 10^{-5} \cdot P_{H_2}^3 - 6.3681 \cdot 10^{-3} \cdot P_{H_2}^2 + 5.8766 \cdot 10^{-1} \cdot P_{H_2} - 20.316 \quad (3.17)$$

όπου P_{H_2} είναι η πίεση του υδρογόνου στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου.

Η κυψέλη καυσίμου της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιεί τον ατμοσφαιρικό αέρα για την ψύξη της αλλά και για την αντίδραση που πραγματοποιείται στην κάθοδο μεταξύ του υδρογόνου και του οξυγόνου. Η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου έχει ρυθμιστεί από τον κατασκευαστή ώστε οι ανάγκες οξυγόνου για την ψύξη να είναι πολύ μεγαλύτερες έναντι του οξυγόνου που χρειάζεται για αντίδραση. Επομένως εξασφαλίζεται ότι αν η κυψέλη καυσίμου ψύχεται σωστά τότε καλύπτει και τις ανάγκες οξυγόνου για την αντίδραση. Ο λόγος της συνολικής ροής όγκου του οξυγόνου που διαπερνά την κυψέλη καυσίμου σε σχέση με το οξυγόνο που χρειάζεται για την αντίδραση ονομάζεται οξειδωτική στοιχειομετρία (oxidant stoichiometry) και επηρεάζει το βαθμό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου. Η οξειδωτική στοιχειομετρία υπολογίζεται από την εξίσωση [2]:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{air}}{Air_{Required}} \quad (3.18)$$

$$AirRequired = C \cdot I_s \cdot n \quad (3.19)$$

όπου $C = 0.166$ και περιγράφει την κατανάλωση αέρα του κάθε κελιού, I_s είναι το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου και n είναι ο αριθμός των κελιών.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή όταν $\lambda \geq 50$ τότε δεν υπάρχει καμία απώλεια στο βαθμό απόδοσης καθώς η κυψέλη καυσίμου ψύχεται και αντιδρά με επάρκεια οξυγόνου. Όταν $20 \geq \lambda < 50$ τότε ίσως υπάρχει μικρή μείωση του βαθμού απόδοσης. Όταν $\lambda < 20$ τότε υπάρχει σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης και η κυψέλη καυσίμου αντιμετωπίζει πρόβλημα στην ψύξη και την αντίδραση του οξυγόνου αν βρίσκεται σε κανονική ή υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλιώς αν βρίσκεται σε κρύο περιβάλλον η κυψέλη καυσίμου ψύχεται ικανά έστω και με μικρή ποσότητα αέρα, αλλά δεν επαρκεί για την αντίδραση με το υδρογόνο.

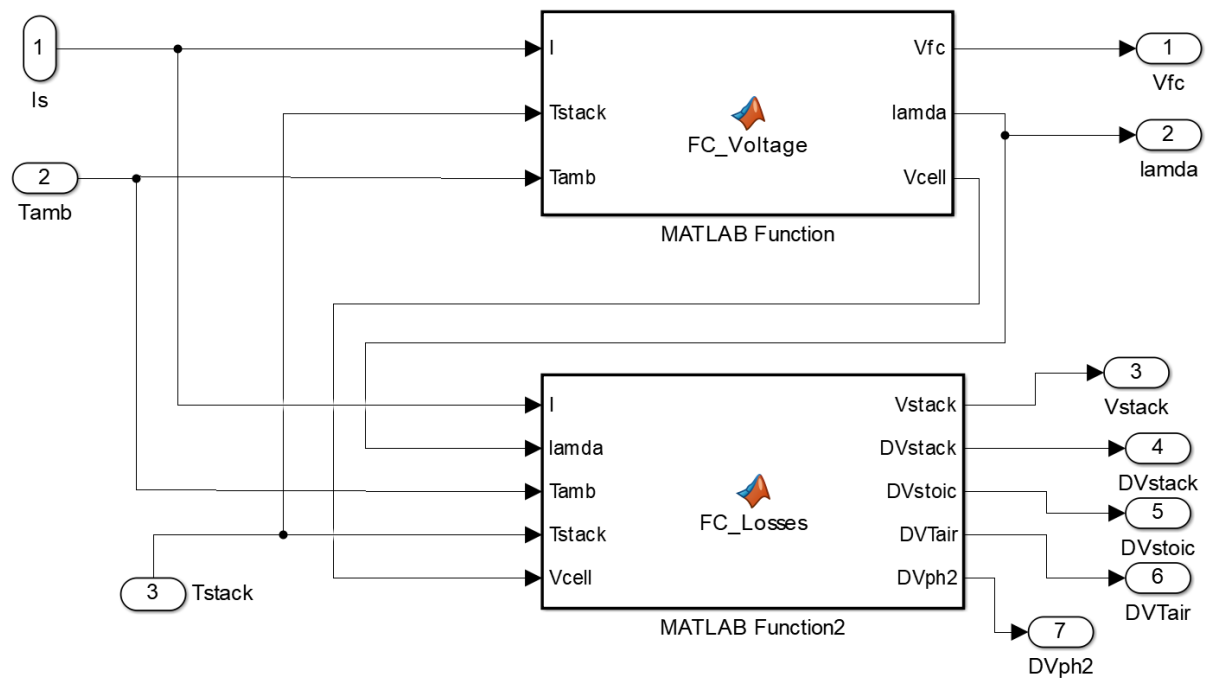
Οι παραπάνω συνθήκες όταν το λ είναι μικρότερο του πενήντα δημιουργούν πτώση τάσης η οποία δίνεται από την εξίσωση [3]:

$$\Delta V_{stoic} = \left(\frac{-0.4363}{\lambda - 5} \right) \cdot V_{cell} \quad (3.20)$$

όπου η παράμετρος λ υπολογίζεται από την εξίσωση (3.20) και η παράμετρος V_{cell} από την εξίσωση (3.4).

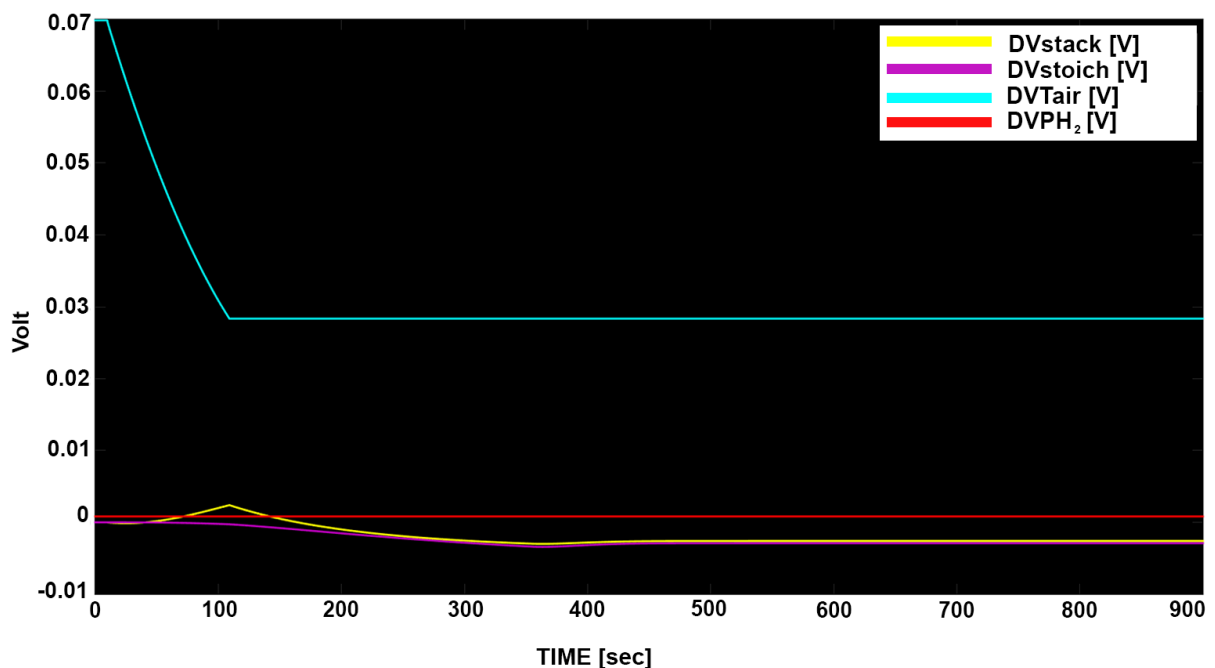
Η μέγιστη πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου περιγράφεται από την μεταβλητή V_{cell} . Αθροίζοντας όλες τις παραπάνω πτώσεις τάσεων λόγω μη-ιδανικών συνθηκών με την μεταβλητή V_{cell} προκύπτει η πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου υπό οποιαδήποτε συνθήκη και υπολογίζεται από την εξίσωση [3]:

$$V_{fc} = (V_{cell} + \Delta V_{T_{stack}} + \Delta V_{T_{air}} + \Delta V_{PH_2} + \Delta V_{stoic}) \cdot n \quad (3.21)$$



Σχήμα 3.14: Υλοποίηση ηλεκτρικού μοντέλου κυψέλης καυσίμου σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink.

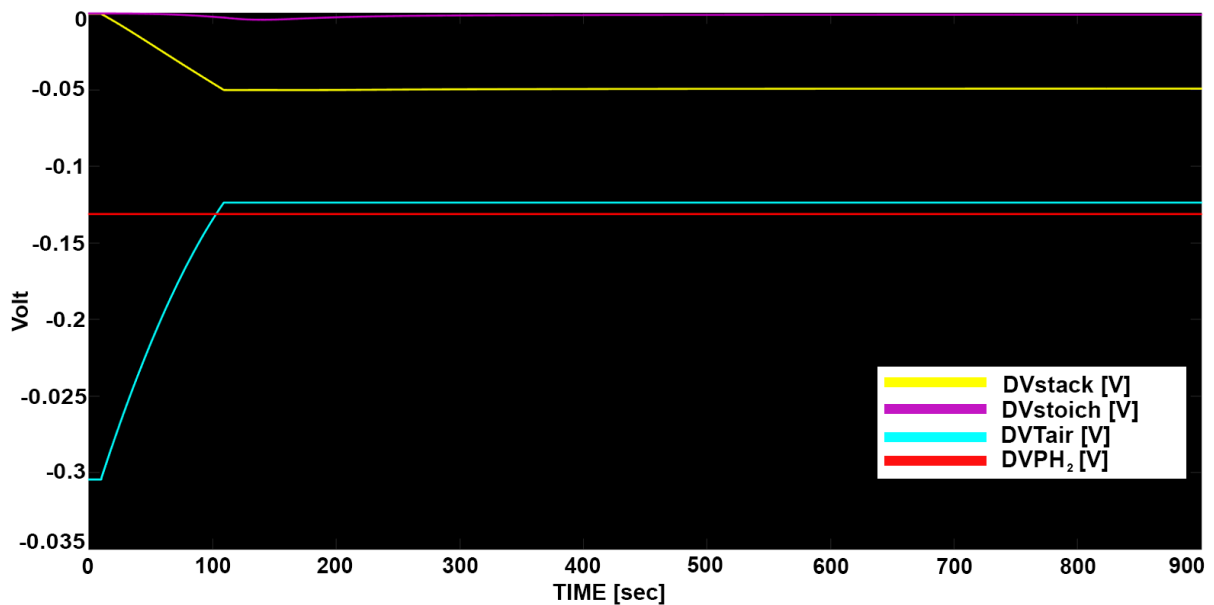
Αρχικά έγινε προσομοίωση με βηματική μεταβολή του ρεύματος στα 20A και σε συνθήκες όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι στους 25°C η υγρασία του αέρα είναι 30% και η πίεση του υδρογόνου είναι η ιδανική στα 0.36 bar. Τα δεδομένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα Simulink όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14. Στο Σχήμα 3.15 παρατηρείται με μπλε γραμμή η διαφορά τάσης που περιγράφεται από την εξίσωση (3.16). Από 0 – 200sec δεν υπάρχει ρεύμα, καθώς η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται σε διαδικασία ανοιχτοκύκλωσης και η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα συμβάλει θετικά στην συνολική τάση της κυψέλης καυσίμου. Με κόκκινο χρώμα αναπαριστάται η διαφορά τάσης που δημιουργείται λόγω της πίεσης του υδρογόνου στην είσοδο και παρατηρείται ότι συμβάλει θετικά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης καθώς βρίσκεται στην ιδανική πίεση των 0.36 bar. Η μωβ και κίτρινη γραμμή περιγράφουν τις διαφορές τάσης της οξειδωτικής στοιχειομετρίας καθώς και τη διαφορά θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου από την ιδανική θερμοκρασία, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι κατά την αύξηση του φορτίου προκύπτει αρνητική τιμή και στις δύο γραμμές. Αυτό δείχνει ότι πάντα θα υπάρχει πτώση τάσης στις διάφορες θερμοκρασίες ακόμα και στην ιδανική, απλά ο βαθμός της θα εξαρτάται και από τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν.



Σχήμα 3.15: Διαφορές τάσης σε συνθήκες πειράματος όπου παράγεται ρεύμα 20A, θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C , υγρασία αέρα 30% και πίεση υδρογόνου 0.36 bar.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης σε μη-ιδανικές συνθήκες με στόχο την εξαγωγή συμπεράσματος για το ποιες συνθήκες επηρεάζουν περισσότερο την κυψέλη καυσίμου. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξήθηκε στην τιμή των 45°C , όπου η υγρασία του επιλέχθηκε στην τιμή του 10% και για την συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέχθηκε η ελάχιστη πίεση εισαγωγής στην κυψέλη καυσίμου στα 0.16 bar. Ο συνδυασμός των παραπάνω δεδομένων δείχνει ότι η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου μαζί με την εξίσωση της οξειδωτικής στοιχειομετρίας που περιγράφονται από τις γραμμές με χρώματα κίτρινο και μωβ αντίστοιχα δεν επηρεάζουν αρκετά την τάση της κυψέλης καυσίμου, καθώς η διαφορά με το Σχήμα 3.16 δεν είναι μεγάλη. Αντιθέτως η πίεση αλλά και η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία δημιουργούν αρνητική διαφορά τάσης και διαφορετική συμπεριφορά από εκείνη του Σχήματος 3.16.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η κυψέλη καυσίμου έχει μια μικρή πτώση τάσης λόγω της εναλλαγής της θερμοκρασίας της και της οξειδωτικής στοιχειομετρίας. Οι σημαντικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο την κυψέλη καυσίμου είναι η ατμοσφαιρική θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα το οποίο δεν μπορεί να ρυθμιστεί αλλά μέσω της προσομοίωσης γίνεται αντιληπτό πως η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί αποδοτικότερα σε θερμοκρασίες γύρω από την ελάχιστη ιδανική της που είναι οι 26°C . Ακόμη γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στην ιδανική πίεση, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο και στην απομάκρυνση των καταλοίπων όπως αναφέρεται παρακάτω.



Σχήμα 3.16: Διαφορές τάσεις σε συνθήκη ρεύματος 20A, θερμοκρασία περιβάλλοντος 45°C , υγρασία αέρα 10% και πίεση υδρογόνου 0.16 bar.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι του ηλεκτρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του συστήματος ελέγχου.

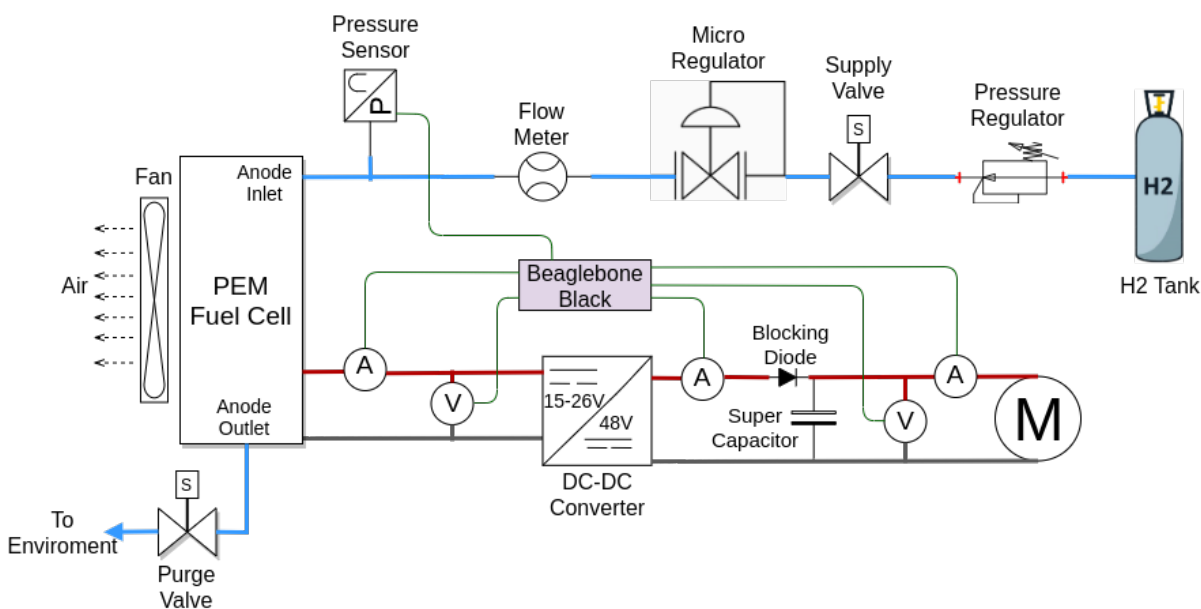
Μεταβλητή	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
$\Delta V_{T_{stack}}$	Πτώση τάσης λόγω μη ιδανικής θερμοκρασίας κυψέλης καυσίμου	-	<i>Volt</i>
$\Delta V_{T_{air}}$	Πτώση τάσης λόγω μη ιδανικής υγρασίας οξυγόνου κυψέλης καυσίμου	-	<i>Volt</i>
ΔV_{PH_2}	Πτώση τάσης μη ιδανικής πίεσης υδρογόνου κυψέλης καυσίμου	-	<i>Volt</i>
ΔV_{stoic}	Πτώση τάσης μη ιδανικής στοιχειομετρίας ροής οξυγόνου κυψέλης καυσίμου	-	<i>Volt</i>
λ	Στοιχειομετρία ροής οξυγόνου	5-200	-
C	Κατανάλωση οξυγόνου ανά κελί	0.166	<i>slpm · (A/cell)</i>
RH	Υγρασία ατμοσφαιρικού αέρα	0-100%	-
PH_2	Πίεση υδρογόνου εισαγωγής	116-156	<i>kPa</i>
T_{fc}	Θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου	-	$^{\circ}C$
T_{opt}	Ιδανική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου	-	$^{\circ}C$
V_{air}	Ροή όγκου αέρα	-	<i>slpm</i>
<i>Air Required</i>	Ροή όγκου αέρα για αντίδραση με υδρογόνο	-	<i>slpm</i>

Ο Πίνακας 3.2 περιέχει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου, καθώς και τις μονάδες μέτρησης των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Ακόμη περιέχονται οι σταθερές τιμές ή οι τιμές όπου είναι γνωστό το εύρος τιμών των παραμέτρων.

4 Περιγραφή του συστήματος στοίβας κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος που υλοποιήθηκε

4.1 Πειραματική περιγραφή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης του συνολικού συστήματος ελέγχου της κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής, καθώς και των υποσυστημάτων που το πλαισιώνουν. Η εφαρμογή είναι ένα υδρογονοκίνητο όχημα πόλης χαμηλής κατανάλωσης, το οποίο εξοπλίζεται με κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Στόχος είναι η ολοκλήρωση του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου καθώς και η βέλτιστη λειτουργία της που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοσή της στις μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες που θα κληθεί να λειτουργήσει. Μεγάλο βάρος δόθηκε και στις περιφερειακές συσκευές που πλαισιώνουν την κυψέλη καυσίμου καθώς με σωστή διαστασιολόγηση μειώνεται η κατανάλωση ισχύος που χρειάζεται η κυψέλη καυσίμου για να λειτουργεί, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης του συνολικού συστήματος.



Σχήμα 4.1: Το συνολικό σύστημα κυψέλης καυσίμου το οποίο αναπτύχθηκε για εφαρμογή σε ηλεκτρικό όχημα.

Το συνολικό σύστημα κυψέλης καυσίμου το οποίο αναπτύχθηκε για εφαρμογή σε ηλεκτρικό όχημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 όπου φαίνεται η συνολική του δομή και η διασύνδεση όλων των επιμέρους συστημάτων που απαιτούνται για την λειτουργία της κυ-

φέλης καυσίμου. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται το κύκλωμα παροχής υδρογόνου καθώς και τα διάφορα εξαρτήματα που το ολοκληρώνουν. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου προς το φορτίο.

4.2 Στοιίβα κυψέλης καυσίμου εφαρμογής

Η στοιίβα κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής είναι ένα εμπορικό μοντέλο της εταιρίας Ballard και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο FC-GEN 1020ACS με συστοιχία 28 κελιών όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Ανήκει στην κατηγορία κυψελών μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και τροφοδοτείται με αέριο υδρογόνο υψηλής ποιότητας και καθαρότητας 99.9%. Αποδίδει μέγιστη ισχύ 1.2kW με μέγιστο ρεύμα 75A και μέση τάση 0.7V ανά κελί.



Σχήμα 4.2: Στοιίβα κυψέλης καυσίμου με την οποία εξοπλίζεται το ηλεκτρικό όχημα (FC-GEN 1020ACS).

Είναι μια αερόψυκτη κυψέλη καυσίμου που σημαίνει ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας ρέει στο κανάλι της καθόδου για να αντιδράσει με τα θετικά ιόντα υδρογόνου, αλλά παράλληλα ψύχει την κυψέλη καυσίμου. Ο συγκεκριμένος τύπος δεν χρειάζεται επιπλέον συσκευή ύγρανσης (humidifier) του οξυγόνου που εισάγεται στην κάθοδο καθώς αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα αλλά και με την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο στην επιφάνεια της μεμβράνης προσδίδοντας έτσι την κατάλληλη υγρασία για την αναζωογόνηση της μεμβράνης.

Οι απαιτήσεις πίεσης υδρογόνου στην άνοδο είναι αρκετά μικρές και κυμαίνονται από 0.16 - 0.56bar απόλυτη πίεση, με ιδανική πίεση τα 0.36bar όπως αναγράφει ο κατασκευαστής. Η καθαρότητα του υδρογόνου δεν καθιστά απαραίτητη την ύγρανσή του μέσω εξωτερικής συσκευής ύγρανσης (humidifier).

Ακόμη ανήκει στην κατηγορία κυψελών καυσίμου μέσης θερμοκρασίας, δηλαδή η ιδανική της λειτουργία κυμαίνεται σε θερμοκρασίες από 30-100°C γεγονός που δίνει τη δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης ακόμη και σε ψυχρό περιβάλλον. Απαραίτητη προϋπόθεση λειτουργίας της είναι η υγρασία της μεμβράνης γι' αυτό το λόγο δεν πρέπει η θερμοκρασία να υπερβεί τους

100°C. Πιο συγκεκριμένα οι ιδανικές θερμοκρασίες κυμαίνονται από 26 – 72°C με μέγιστη 75°C για ρεύμα 65A και ελάχιστη 6°C. Οι συγκεκριμένες θερμοκρασίες αναφέρονται σε μόνιμη λειτουργία καθώς η συγκεκριμένη στοίβα κυψέλης καυσίμου σε διαδικασία εκκίνησης μπορεί να εκκινήσει και σε περιβάλλοντα με θερμοκρασίες υπό του μηδενός.

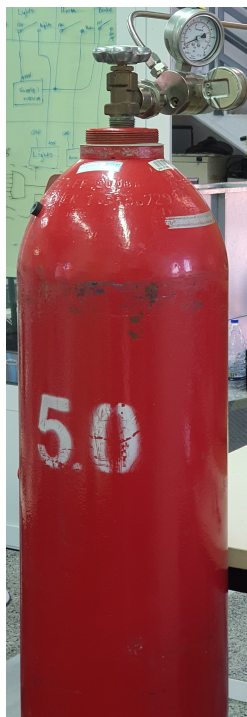
4.3 Συστήματα ολοκλήρωσης κυψέλης καυσίμου εφαρμογής

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η στοίβα κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής. Αποτελεί το βασικό δομικό μέρος της εφαρμογής και για τη λειτουργία της χρειάζεται μια σειρά συστημάτων που ελέγχουν και μεταφέρουν τα στοιχεία που χρειάζεται η στοίβα για να λειτουργήσει. Πιο ειδικά η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου προϋποθέτει την ύπαρξη των παρακάτω συστημάτων:

1. Σύστημα παροχής υδρογόνου
2. Σύστημα ψύξης - ροής οξυγόνου
3. Σύστημα απομάκρυνσης καταλοίπων
4. Σύστημα εκκίνησής
5. Σύστημα ελέγχου

4.3.1 Σύστημα παροχής υδρογόνου

Αποθήκευση υδρογόνου (tank). Η στοίβα κυψέλης καυσίμου χρειάζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υδρογόνο και οξυγόνο. Όπως έχει προαναφερθεί, το υδρογόνο μέσω του υδραυλικού κυκλώματός του μεταφέρεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου. Στην εφαρμογή το ηλεκτρικό όχημα εξοπλίζεται με μία φιάλη ενός λίτρου (1L) υδρογόνου υπό πίεση στα 200bar, ενώ για στατικά πειράματα σε βάση δοκιμών χρησιμοποιείται φιάλη πενήντα λίτρων (50L) στα 200bar.



Σχήμα 4.3: Πειραματική φιάλη 50 λίτρων για χρήση εντός εργαστηρίου.



Σχήμα 4.4: Φιάλη ενός λίτρου για χρήση στο ηλεκτρικό όχημα.

Για τη μεταφορά του υδρογόνου από την φιάλη προς την στοίβα χρησιμοποιείται ανοξείδωτη σωλήνωση (tubing) εξωτερικής διατομής 8 χιλιοστών και εσωτερικής διατομής 6 χιλιοστών. Η είσοδος της ανόδου της στοίβας έχει εσωτερική διατομή 6 χιλιοστών. Σύμφωνα με αυτή τη διατομή επιλέχθηκε σωλήνωση ίδιας διατομής με στόχο όλο το κύκλωμα να διαρρέεται από την ίδια πίεση και να μην υπάρχει σε κάποιο σημείο στραγγαλισμός της ροής του υδρογόνου.

Απαραίτητη προϋπόθεση στην επιλογή της σωλήνωσης είναι το υλικό να είναι ανοξείδωτο ατσάλι. Όπως προαναφέρθηκε, η βέλτιστη λειτουργία του συγκεκριμένου είδους κυψέλης καυσίμου καθώς και η μακροχρόνια ζωή της επιτυγχάνεται με την τροφοδότηση 100% καθαρού υδρογόνου. Με την ανοξείδωτη σωλήνωση εξασφαλίζεται ότι με την πάροδο του χρόνου δεν θα υπάρξει κάποια φυσική φθορά με αποτέλεσμα την ανάμειξη του υδρογόνου με διάφορα άλλα σωματίδια της σωλήνωσης. Πιο ειδικά, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το 316/ 316L stainless steel. Επίσης η ανοξείδωτη σωλήνωση χρησιμοποιείται σε συστήματα κυψελών καθώς μπορεί να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις πίεσης που χρειάζεται η κάθε εφαρμογή. Η σωλήνωση που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι μέσης πίεσης και μπορεί να αντεπεξέλθει σε μέγιστη πίεση 1034 bar προσδίδοντας έτσι υψηλά πρότυπα ασφαλείας στο όχημα της εφαρμογής.

Το υδρογόνο αποθηκεύεται στη φιάλη σε πίεση 200bar και έτσι προκύπτει η ανάγκη μείωσης της πίεσης καθώς η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε όρια 0.16-0.56bar. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται ρυθμιστής πίεσης (pressure regulator) ο οποίος περιέχει δύο μανόμετρα ένα στην είσοδο που μετράει την πίεση της φιάλης και ένα στην έξοδο που μετράει την πίεση του υδραυλικού κυκλώματος ροής υδρογόνου. Η οπτική επαφή του χρήστη με τα μανόμετρα βοηθάει στην ακριβέστερη ρύθμιση της πίεσης αλλά και στην εποπτεία του υδρογόνου. Για την αποδοτικότερη λειτουργία του, το συγκεκριμένο εξάρτημα τοποθετείται απευθείας με ειδικό έμβολο στην έξοδο της φιάλης, αποτρέποντας έτσι πιθανές διαρροές στη

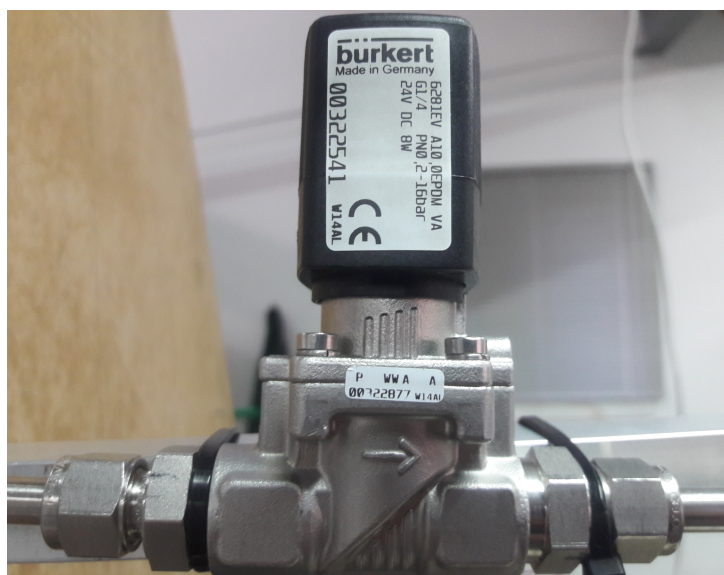
σύνδεση λόγω της υψηλής πίεσης, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια του συστήματος.



Σχήμα 4.5: Ρυθμιστής πίεσης υδρογόνου.

Η παροχή του υδρογόνου ξεκινά από τη φιάλη και αφού υποβιβαστεί η πίεση του μέσω του ρυθμιστή πίεσης καταλήγει στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα (solenoid valve) εισαγωγής. Το συγκεκριμένο εξάρτημα είναι υπεύθυνο για την τροφοδότηση ή την διακοπή τροφοδότησης της κυψέλης καυσίμου με υδρογόνο. Τα είδη των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή αρχικά δόθηκε βάση στο υλικό της βαλβίδας, το οποίο για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω είναι ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel). Για την καλύτερη ασφάλεια της κυψέλης καυσίμου επιλέχθηκε βαλβίδα η οποία ανοίγει όταν τροφοδοτηθεί από τάση (normally closed) διότι με αυτό τον τρόπο θα αποφευχθεί παροχή υδρογόνου σε οποιαδήποτε αστοχία και επίσης το σύστημα δεν χρειάζεται να έχει κάποια τάση όταν είναι απενεργοποιημένο.

Πιο συγκεκριμένα, ο ακριβής τύπος της βαλβίδας είναι “servo assisted 2/2-way diaphragm valve” και αποτελεί προϊόν βιομηχανικής χρήσης, της εταιρίας BURKERT, με κωδικό 6281 EV. Έπειτα από την επιλογή του υλικού, πραγματοποιήθηκε έρευνα για τον καταλληλότερο τύπο βαλβίδας με εφαρμογή σε υδρογόνο. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της βαλβίδας εισαγωγής είναι η σφράγιση της εισόδου κατά το κλείσιμό της με στόχο να μην ρέει υδρογόνο προς την κυψέλη καυσίμου όταν το σύστημα είναι κλειστό, γεγονός που θα καταστρέψει την πολυμερή μεμβράνη. Οι διαφραγματικές βαλβίδες πετυχαίνουν την καλύτερη σφράγιση καθώς το κλείσιμο του διαφράγματος λειτουργεί ως μονωτικό υλικό μεταξύ των ανοξείδωτων επαφών κατά το κλείσιμο. Το υλικό του διαφράγματος είναι αιθυλένιο μονομερές διένιο προπυλενίου (M-class) ελαστικό (Ethylene Propylene Diene Monomer (M-class) rubber) το οποίο αποτελεί ένας είδος καουτσούκ αρκετά ανθεκτικό γι’ αυτή την εφαρμογή.



Σχήμα 4.6: Ηλεκτρομαγνητική διαφραγματική βαλβίδα παροχής υδρογόνου.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα των διαφραγματικών βαλβίδων είναι ότι απομονώνουν μέσω του διαφράγματος τα εξαρτήματα λειτουργίας της βαλβίδας από την ροή του υδρογόνου ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια της εφαρμογής.

Στόχος της εφαρμογής είναι και η μικρή κατανάλωση ενέργειας των περιφερειακών συσκευών της κυψέλης καυσίμου. Με την επιλογή τύπου “servo assisted” βαλβίδας μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας καθώς ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιεί και την πίεση του υδρογόνου για το άνοιγμα, κλείσιμο και διατήρηση της βαλβίδας στην ανοιχτή θέση, μειώνοντας την ενέργεια που χρειάζεται το πηνίο για τη λειτουργία της.

Ένα πρόβλημα που υπάρχει στα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι η μεταβολή της πίεσης του υδρογόνου στην είσοδο της ανόδου η οποία προκύπτει από τις διάφορες μεταβολές σε ζήτηση ισχύος της εφαρμογής και επομένως κατανάλωσης υδρογόνου. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιείται ένας σταθερός ρυθμιστής πίεσης (micro regulator). Πρόκειται για ένα παθητικό εξάρτημα το οποίο δέχεται στην είσοδο πίεση μεγαλύτερη των 0.4bar και παράγει ως έξοδο πίεση σταθερή στα 0.4bar χωρίς να επηρεάζει την επιθυμητή ροή του υδρογόνου στο κύκλωμα. Επιπλέον εξασφαλίζει ότι η κυψέλη καυσίμου δεν θα βρεθεί σε κατάσταση μεγαλύτερης πίεσης που έχει ως αποτέλεσμα την διάβρωση και καταστροφή της πολυμερούς μεμβράνης, ενισχύοντας την ασφάλεια του συστήματος.



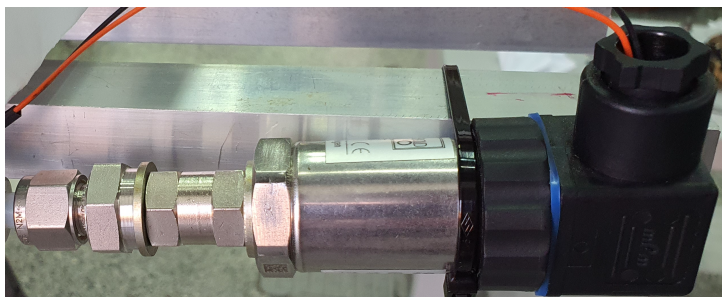
Σχήμα 4.7: Παθητικός ρυθμιστής σταθερής πίεσης στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου.

Ο μετρητής ροής υδρογόνου (flow meter) αποτελεί απαραίτητο εξάρτημα για το ηλεκτρικό όχημα, καθώς από αυτόν εξάγονται πληροφορίες για την κατανάλωση της κυψέλης καυσίμου και τελικά του οχήματος. Ο συγκεκριμένος μετρητής παρουσιάζει δύο ενδείξεις, μία για τη στιγμιαία κατανάλωση και μία για τη συνολική κατανάλωση από την αρχή λειτουργίας του έως και την παρούσα χρονική στιγμή. Ο ρόλος του είναι για μέτρηση καθαρού υδρογόνου και γι' αυτό παρουσιάζει ευαισθησία σε οποιοδήποτε άλλο υλικό εισαχθεί στη ροή. Γι' αυτό απαγορεύεται η οποιαδήποτε χρήση μονωτικής ταινίας τύπου TEFLON που χρησιμοποιείται για ενίσχυση της μόνωσης στις ενώσεις των εξαρτημάτων.



Σχήμα 4.8: Όργανο μέτρησης ροής υδρογόνου και καταγραφής συνολικής κατανάλωσης.

Η βέλτιστη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου όσον αφορά την πίεση του υδρογόνου, πετυχαίνεται μέσα σε κάποια όρια που έχουν ήδη αναφερθεί και είναι 0.16-0.56bar. Για την ασφάλεια του συστήματος χρησιμοποιείται αισθητήρας πίεσης (pressure sensor), ο οποίος μετράει την πίεση στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου. Σε περίπτωση που η πίεση υπερβεί το άνω όριο ή πέσει κάτω από το κατώτερο όριο τότε, μέσω του συστήματος ελέγχου κλείνει η βαλβίδα εισαγωγής για να αποτραπεί η εκτός ορίων λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελεί μια δικλείδα ασφαλείας καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχει ο ρυθμιστής πίεσης που αποτρέπει την υπέρβαση του άνω ορίου πίεσης.

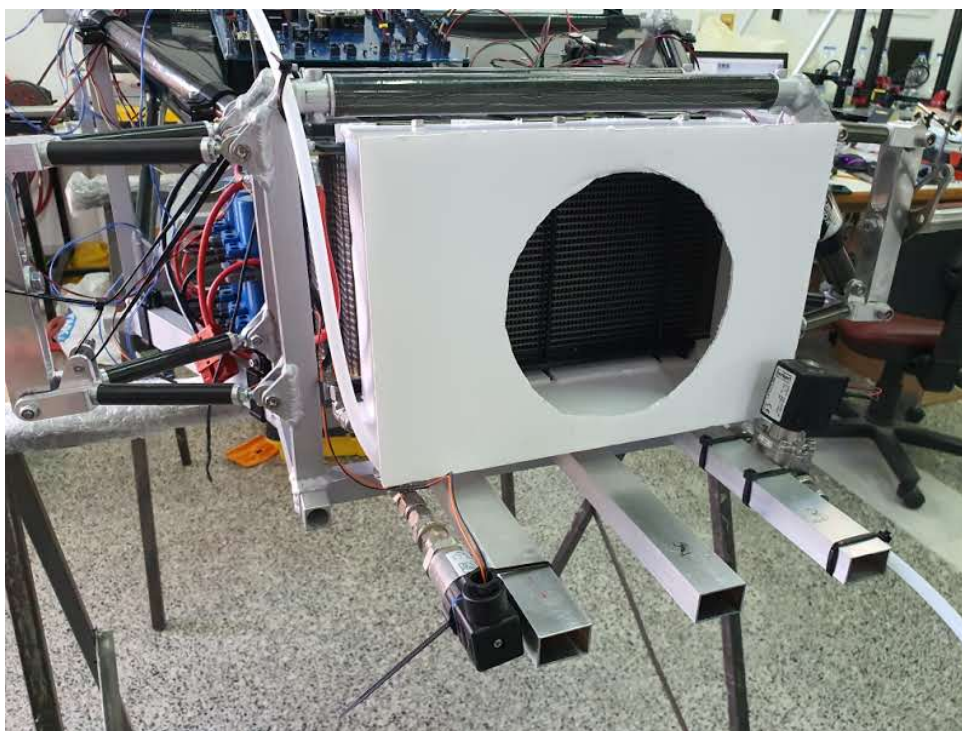


Σχήμα 4.9: Αισθητήρας μέτρησης πίεσης υδρογόνου στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου.

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάζεται από την εταιρία Koble και είναι ο τύπος SEN-3276 B 035 Y. Διαθέτει εύρος μέτρησης 0-1.6bar και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 4-20mA για τη μέτρηση της πίεσης. Παρουσιάζει επίπεδο ακρίβειας 0.5% και χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές με προστασία IP65. Το υλικό κατασκευής του είναι ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel) για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

4.3.2 Σύστημα ψύξης - ροής οξυγόνου

Η στοίβα κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής όπως προαναφέρθηκε είναι αερόψυκτη. Αυτό σημαίνει ότι ψύχεται με ατμοσφαιρικό αέρα μέσω του καναλιού ροής οξυγόνου που βρίσκεται στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου, το οποίο ταυτόχρονα χρησιμοποιεί μέρος του ατμοσφαιρικού αέρα για την αντίδραση με τα θετικά ιόντα υδρογόνου στην κάθοδο. Για τη δημιουργία ροής οξυγόνου στο κανάλι καθόδου κατασκευάζεται ένας αεροδυναμικός θάλαμος ο οποίος κατευθύνει και διαχέει τον ατμοσφαιρικό αέρα στα κανάλια οξυγόνου της καθόδου.



Σχήμα 4.10: Αεραγωγός κατεύθυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η ροή του οξυγόνου δημιουργείται με έναν ανεμιστήρα ο οποίος κατευθύνει τον αέρα από τη μία μεριά του καναλιού στην απέναντι δημιουργώντας έτσι ροή. Ο ανεμιστήρας ρουφάει τον αέρα προς την πλευρά εξόδου του αέρα για καλύτερη κατανομή στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου. Ο ψυχρός ατμοσφαιρικός αέρας παρασύρει τη θερμότητα που εκλύει η κυψέλη καυσίμου με αποτέλεσμα την ψύξη της. Η δομή του αεραγωγού αποτελεί κομβικό σημείο της ψύξης καθώς μπορεί να κατευθυνθεί ο αέρας σε όλη την κυψέλη καυσίμου χωρίς την ανάπτυξη πολλών στροφών από τον ανεμιστήρα. Ακόμη το μέγεθος του αεραγωγού δημιουργεί επιπλέον διαφορά πίεσης στο σύστημα ψύξης με αποτέλεσμα ο ανεμιστήρας να λειτουργεί σε αυξημένες στροφές αν δεν υπάρξει σωστή μελέτη. Στην παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκαν δύο αεραγωγοί και παρατηρήθηκε η διαφορά τους.

Το σύστημα ψύξης και συγκεκριμένα ο αεραγωγός αποτελεί ένα ενδιαφέρον κομμάτι για μελέτη αεροδυναμικής και ανάλυσης σε προγράμματα Computational Fluid Dynamics με στόχο τη βέλτιστη κατανομή αέρα και τη μείωση της διαφοράς πίεσης που προσθέτει στο σύστημα.

4.3.3 Σύστημα απομάκρυνσης καταλοίπων

Το σύστημα απομάκρυνσης καταλοίπων γνωστό και ως “purge” είναι υπεύθυνο για την απομάκρυνση του υδρογόνου που βρίσκεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου με στόχο την τροφοδότησή της με καθαρό υδρογόνο. Όπως έχει προαναφερθεί, οι κυψέλες τύπου PEM λειτουργούν αποδοτικά με την τροφοδοσία τους από καθαρό υδρογόνο. Στην πραγματικότητα δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί καθαρότητα 100% του υδρογόνου καθώς κατά την διαδικασία καθαρισμού του υδρογόνου πολύ μικρές ποσότητες από άλλα αέρια εισέρχονται στο αποθηκευτικό μέσο όπου αποθηκεύεται το υδρογόνο. Πιθανά τέτοια αέρια είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του άνθρακα, η αμμωνία κ.α.

Όταν το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο τα θετικά ιόντα περνούν μέσω της πολυμερούς μεμβράνης στην κάθοδο, τα αρνητικά ιόντα οδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο, ενώ τα διάφορα άλλα αέρια εγκλωβίζονται στην άνοδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κατάλοιπα να καταλαμβάνουν επιφάνεια πάνω στην μεμβράνη μειώνοντας έτσι την ωφέλιμη επιφάνεια που έχουν τα θετικά ιόντα υδρογόνου για να περάσουν στην κάθοδο. Η δέσμευση του χώρου από τα κατάλοιπα αέρια έχει ως αποτέλεσμα την πτώση τάσης στο κάθε κελί της στοίβας, συνολική πτώση τάσης σε όλη τη στοίβα και μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου για την ισχύ ζήτησης.

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, η άνοδος έχει μία πύλη εξόδου την οποία ελέγχει μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα (solenoid valve), ίδια με αυτή που προαναφέρθηκε για την τροφοδοσία της κυψέλης καυσίμου. Υπολογίζοντας ένα χρονικό διάστημα το οποίο εξαρτάται από το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου και επομένως από την κατανάλωση του υδρογόνου, ο ελεγκτής του συστήματος δίνει εντολή ώστε να ανοίξει η βαλβίδα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι, το υδρογόνο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη πίεση από την ατμοσφαιρική εσωτερικά της κυψέλης καυσίμου, εκτονώνεται στην έξοδο παρασύροντας μαζί του και τα υπόλοιπα κατάλοιπα αέρια. Ταυτόχρονα, η είσοδος της ανόδου τροφοδοτείται με φρέσκο υδρογόνο που έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης και τη δημιουργία ομοιόμορφης υγρασίας σε όλη την επιφάνεια της μεμβράνης.

4.3.4 Σύστημα εκκίνησης

Για να ξεκινήσει η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου πρέπει να ξεκινήσει πρώτα η λειτουργία μίας σειράς από υποσυστήματα τα οποία δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για την εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου. Αρχικά, ο αισθητήρας ανίχνευσης διαρροής υδρογόνου ελέγχει το σύστημα για τυχόν διαρροές. Ο αισθητήρας πίεσης ελέγχει αν η πίεση του υδρογόνου που πιθανώς να είχε παραμείνει στην κυψέλη καυσίμου λόγω κάποιας έκτακτης απενεργοποίησης της κυψέλης καυσίμου βρίσκεται στα σωστά πλαίσια για εκκίνηση. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας ελέγχουν την ατμοσφαιρική θερμοκρασία αλλά και την θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου ώστε να βεβαιώσουν με την σειρά τους την ασφαλή εκκίνηση ή όχι της κυψέλης καυσίμου. Έπειτα από την επιβεβαίωση όλων των παραπάνω μετρήσεων, τότε το σύστημα ελέγχου που περιγράφεται παρακάτω, εκκινεί τον ανεμιστήρα για την δημιουργία ροής οξυγόνου στο κανάλι καθόδου της κυψέλης καυσίμου και ανοίγει την βαλβίδα εισαγωγής για την ροή του υδρογόνου μέσω της σωλήνωσης στο κανάλι της ανόδου της κυψέλης καυσίμου. Μετά από αυτή τη διαδικασία δημιουργείται τάση και ρεύμα από την κυψέλη καυσίμου, η οποία υποστηρίζει πλέον το φορτίο στην έξοδό της, αλλά και τα περιφερειακά συστήματα που είναι υπεύθυνα για την εκκίνησή της αλλά και την συνέχεια της λειτουργίας της.

Για την εκκίνηση των παραπάνω συστημάτων χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία για την υποστήριξη των συστημάτων, η οποία είτε αφαιρείται μετά την εκκίνηση είτε παραμένει συνδεδεμένη παράλληλα στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου αν πρόκειται για συσσωρευτή. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, στη συγκεκριμένη εφαρμογή τα περιφερειακά συστήματα τροφοδοτούνται από υπερπυκνωτή (77 Farad) ο οποίος βρίσκεται παράλληλα συνδεδεμένος με τον μετατροπέα DC-DC και συνεπώς και με την κυψέλη καυσίμου της εφαρμογής. Τα περιφερειακά συστήματα έχουν επιλεγεί να τροφοδοτούνται με 24V, τα οποία εξασφαλίζονται από τον υπερπυκνωτή με τη χρήση ενός τροφοδοτικού και λόγω της μεγάλης χωρητικότητας του υπερπυκνωτή το σύστημα μπορεί να ξεκινήσει να λειτουργεί χωρίς επιπλέον εξωτερική τροφοδοσία αρκετές ημέρες μετά από την τελευταία εκκίνησή του. Σε περίπτωση που η τάση του υπερπυκνωτή είναι χαμηλή και δεν μπορεί να γίνει εκκίνηση, το ηλεκτρικό όχημα διαθέτει αχροδέκτες φόρτισης του υπερπυκνωτή στο πλαίσιο του οχήματος και υπάρχει δυνατότητα φόρτισης του υπερπυκνωτή από εξωτερική τροφοδοσία.

Η εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου προϋποθέτει την ύπαρξη ενός διακόπτη ο οποίος συνδέει την κυψέλη καυσίμου με το φορτίο. Όταν η κυψέλη καυσίμου αναπτύσσει στα άκρα της τάση μεγαλύτερη των 25V, τότε συνδέεται με το φορτίο αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο απότομη ζήτηση ρεύματος πριν αναπτυχθεί η απαραίτητη τάση από την κυψέλη καυσίμου. Επίσης, ακόμα πιο σημαντικό είναι η σταδιακή αύξηση της ζήτησης ισχύος κατά τη διάρκεια της εκκίνησης έως ότου η κυψέλη καυσίμου φτάσει στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας. Αυτά επιτυγχάνονται με την ύπαρξη του μετατροπέα DC-DC ο οποίος εξοπλίζεται με σήμα on/off καθώς και με ρύθμιση ρεύματος εξόδου προστατεύοντας έτσι την κυψέλη καυσίμου από απότομη ζήτηση ρεύματος κατά τη διάρκεια της εκκίνησής. Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος που ακολουθείται κατά την εκκίνηση είναι 0.2A/s.

4.3.5 Σύστημα ελέγχου

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από διάφορα υποσυστήματα όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω, για τα οποία προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης συστήματος ελέγχου για τον έλεγχο

τους και την ρύθμιση της εύρυθμης λειτουργίας του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου. Στόχος του συστήματος ελέγχου είναι η ρύθμιση διάφορων παραμέτρων που εξασφαλίζουν την αποδοτικότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, καθώς και την αποφυγή έκτακτων καταστάσεων που μπορούν να καταστρέψουν το συνολικό σύστημα. Ο έλεγχος των υποσυστημάτων της εφαρμογής ξεκίνησε με την μελέτη και κατασκευή πρωτότυπων εκτυπωμένων ηλεκτρονικών πλακετών (PCB) κάθε μία από τις οποίες ήταν υπεύθυνη για τον έλεγχο συγκεκριμένου υποσυστήματος.

Έλεγχος ανεμιστήρα (fan control). Αρχικά ξεκίνησε η μελέτη για τον έλεγχο του κυκλώματος του ανεμιστήρα, που αποτελεί ένα από τα πιο βασικά υποσυστήματα. Ο ανεμιστήρας της εφαρμογής τροφοδοτείται με τάση 24V και ο έλεγχος των στροφών γίνεται με σήμα τετραγωνικού παλμού ρυθμιζόμενου duty cycle (Pulse Width Modulation, PWM) σε διάταξη ανοικτού συλλέκτη (open collector). Ο ανεμιστήρας παράγει σήμα τάσης 12V και 5mA το οποίο όταν οδηγείται στην γείωσή του μέσω τρανζίστορ MOSFET, αντιλαμβάνεται εντολή μηδενικών στροφών, ενώ όταν το MOSFET δεν επιτρέπει την σύνδεση του σήματος με τη γείωση ο ανεμιστήρας αντιλαμβάνεται εντολή μέγιστων στροφών. Ο τετραγωνικός παλμός εφαρμόζεται στην πύλη του MOSFET ανοιγοκλείνοντας έτσι το σήμα με συχνότητα 2kHz και πλάτος παλμού (duty cycle) ανάλογο των στροφών που χρειάζεται να αναπτύξει ο ανεμιστήρας. Το σήμα τετραγωνικού παλμού παράγεται από μικροεπεξεργαστή και με τη χρήση optocoupler επιτυγχάνεται ηλεκτρική απομόνωση του σήματος από το υποσύστημα, αποφεύγοντας έτσι φαινόμενα θορύβου που προκύπτουν στις αναλογικές μετρήσεις.

Έλεγχος ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων και πίεσης (solenoid valve control and pressure measurment). Στη συνέχεια, μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων αλλά και για τη μέτρηση της πίεσης του υδρογόνου από τον αισθητήρα πίεσης. Για τον έλεγχο των βαλβίδων χρησιμοποιήθηκε τροφοδοσία 24V η οποία ενεργοποιείται από ηλεκτρονικό διακόπτη (τύπου MOSFET) ο οποίος ελέγχεται από τον μικροεπεξεργαστή με ψηφιακό σήμα που οδηγείται στην πύλη του MOSFET, ηλεκτρικά απομονωμένο με τη χρήση optocoupler. Ακόμη παράλληλα στην βαλβίδα συνδέεται μία δίοδος (fly back) για την προστασία της βαλβίδας από τα υπερτάσεις που αναπτύσσονται κατά το κλείσιμό της. Για τη μέτρηση από τον αισθητήρα πίεσης ο οποίος λειτουργεί με το πρωτόκολλο 4-20mA, χρησιμοποιήθηκε αντίσταση σε σειρά επάνω στην οποία μετρείται η πτώση τάσης με τη βοήθεια τελεστικού ενισχυτή σε διάταξη αφαιρέτη. Το αποτέλεσμα του οδηγείται στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό του μικροεπεξεργαστή και διαβάζεται από το πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί για την λήψη αποφάσεων καθώς και για καταγραφή της μέτρησης.

Αισθητήρες εφαρμογής. Ο έλεγχος της κυψέλης καυσίμου προϋποθέτει τη συλλογή δεδομένων από το σύνολο των αισθητήρων για τη λήψη αποφάσεων βέλτιστης ρύθμισης της κυψέλης καυσίμου. Η μέτρηση ρεύματος στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μετρήσεις καθώς το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου είναι ανάλογο της κατανάλωσης υδρογόνου, αλλά και αυτό που καθορίζει τη βέλτιστη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να βρίσκεται το εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου. Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιείται ο επαγωγικός αισθητήρας ACS709 της εταιρίας Pololu ο οποίος έχει δυνατότητα μέτρησης ρεύματος έως και 75A παράγοντας τάση ανάλογη του εφαρμοζόμενου ρεύματος, η οποία είναι μετρήσιμη από τον μικροεπεξεργαστή της εφαρμογής.

Για τη μέτρηση της τάσης της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται διάταξη διαιρέτη τάσης

ο οποίος υποβιβάζει την τάση ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει την είσοδο του ενισχυτή απομόνωσης τύπου ACPL-C87A-000E (isolated amplifier) μοναδιαίου κέρδους, ο οποίος παράγει ως έξοδο τάση ίση με αυτή της κυψέλης καυσίμου αλλά με διαφορετική γείωση, τη γείωση του μικροεπεξεργαστή πετυχαίνοντας έτσι γαλβανική απομόνωση του σήματος μέτρησης.

Η μέτρηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας γίνεται με τον αισθητήρα LM-35 ο οποίος είναι ολοκληρωμένος γραμμικός αισθητήρας συνδεδεμένος στην πιο απλή διάταξη πετυχαίνοντας έξοδο $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται θερμίστορ τύπου NTC $100\text{ k}\Omega$ με ανοξείδωτο άκρο για την εισαγωγή του στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου. Το θερμίστορ αποτελεί ένα είδος μεταβαλλόμενης αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε σε διάταξη διαιρέτη τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 .

Η τάση εξόδου του διαιρέτη τάσης έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τα όρια του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC) του μικροεπεξεργαστή. Η επίλυση του κυκλώματος του Σχήματος 4.12 υπολογίζει την αντίσταση του θερμίστορ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_{th} = \frac{V_{sig} \cdot 400}{5 - V_{sig}} \quad (4.1)$$

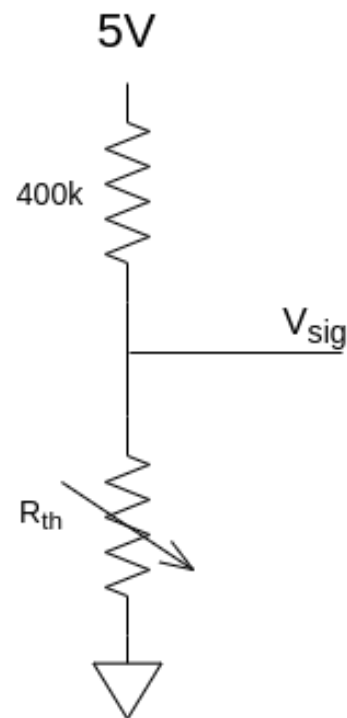
Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας γνωρίζοντας την αντίσταση του θερμίστορ που υπολογίζεται από την (4.1) χρησιμοποιείται η εξίσωση Steinhart-Hart equation:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{R_{th}}{R_0}\right) \quad (4.2)$$

Για την παραπάνω εξίσωση ως T_0 ορίζεται η θερμοκρασία των 25°C ενώ το β είναι σταθερός συντελεστής του θερμίστορ όπου στην περίπτωση της εφαρμογής έχει την τιμή $\beta = 3950$. Η παράμετρος R_{th} είναι η αντίσταση του θερμίστορ για κάθε διαφορετική θερμοκρασία όπως αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 3.4. Ως R_0 χρησιμοποιείται η αντίσταση του θερμίστορ στους 25°C .

Temp. (°C)	Resistance (kΩ)
-40	4397
-35	3089
-30	2197
-25	1582
-20	1151
-15	846.6
-10	629.0
-5	471.6
0	357.0
5	272.5
10	209.7
15	162.7
20	127.1
25	100.0
30	79.22
35	63.17
40	50.68
45	40.90
50	33.20
55	27.09
60	22.22
65	18.32
70	15.18
75	12.64
80	10.57
85	8.873
90	7.481
95	6.337
100	5.384
105	4.594
110	3.934
115	3.380
120	2.916
125	2.522

Σχήμα 4.11: Θερμοκρασία θερμίστορ σε σχέση με την αντίσταση.

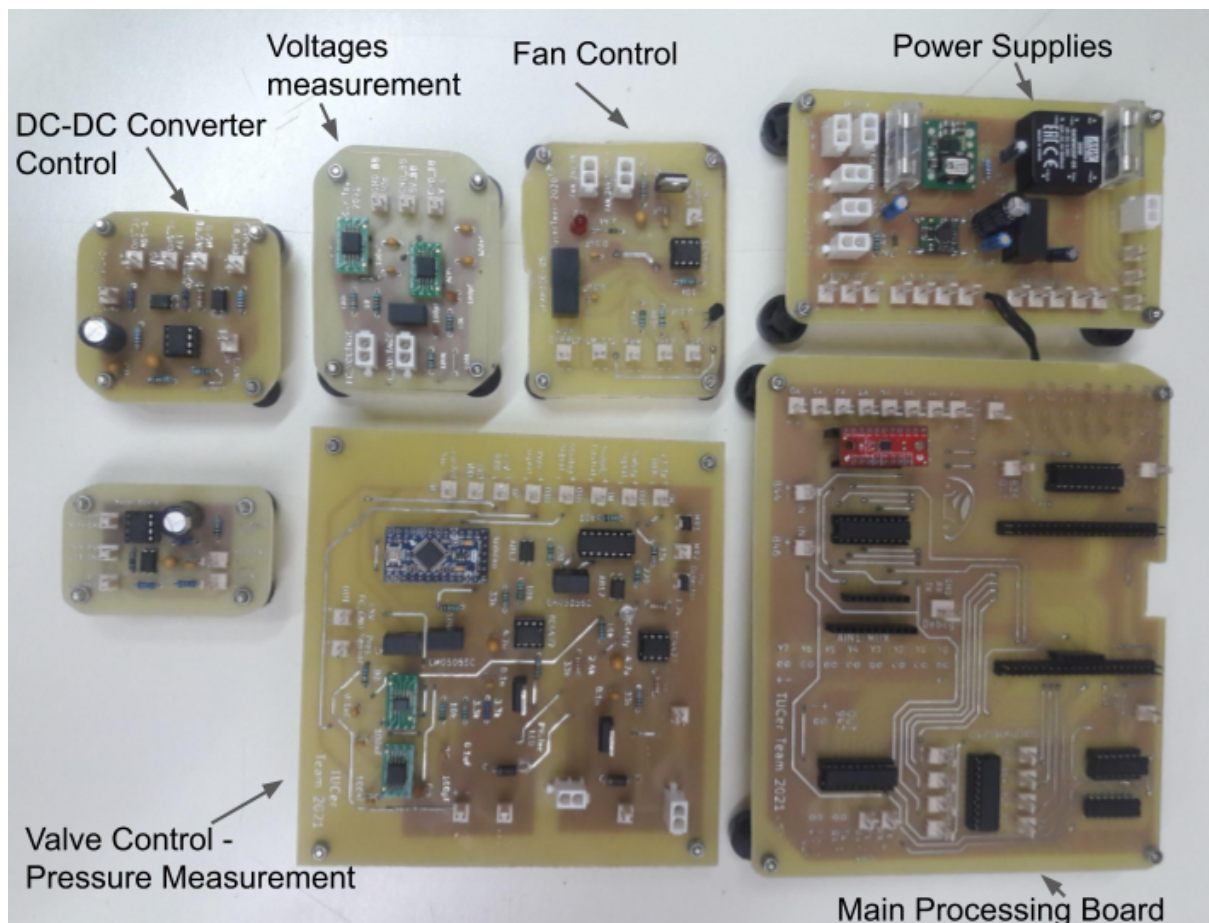


Σχήμα 4.12: Διάταξη διαιρέτη τάσης με θερμίστορ στη γείωση.

Έλεγχος θερμοκρασίας κυψέλης καυσίμου. Η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την εύρυθμη λειτουργίας της. Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα της εφαρμογής δεν χρησιμοποιεί επιπλέον υποσυστήματα ύγρανσης του ατμοσφαιρικού αέρα αλλά και του υδρογόνου καθώς η απαραίτητη υγρασία επιτυγχάνεται κάθε φορά από την ιδανική θερμοκρασία που αναπτύσσει η κυψέλη καυσίμου στα διάφορα ρεύματα λειτουργίας της. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή η κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να λειτουργεί σε ιδανική θερμοκρασία η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (3.14). Η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου ρυθμίζει και το ποσοστό της υγρασίας που παραμένει στη μεμβράνη από την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο. Σε μικρά ρεύματα η ιδανική θερμοκρασία είναι μικρή διατηρώντας την παραγόμενη υγρασία της μεμβράνης σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Σε υψηλά ρεύματα η αντίδρασή του υδρογόνου με το οξυγόνο αυξάνεται με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλης ποσότητας υγρασίας στη μεμβράνη. Για να αποφευχθεί η υπερχειλίση της ανόδου από την υγρασία της αντίδρασης τίθεται ιδανική θερμοκρασία σε μεγαλύτερες τιμές με στόχο τη μείωση της υγρασίας λόγω μεγαλύτερης θερμοκρασίας και την απομάκρυνσή της μέσω της ροής αέρα που δημιουργεί ο ανεμιστήρας.

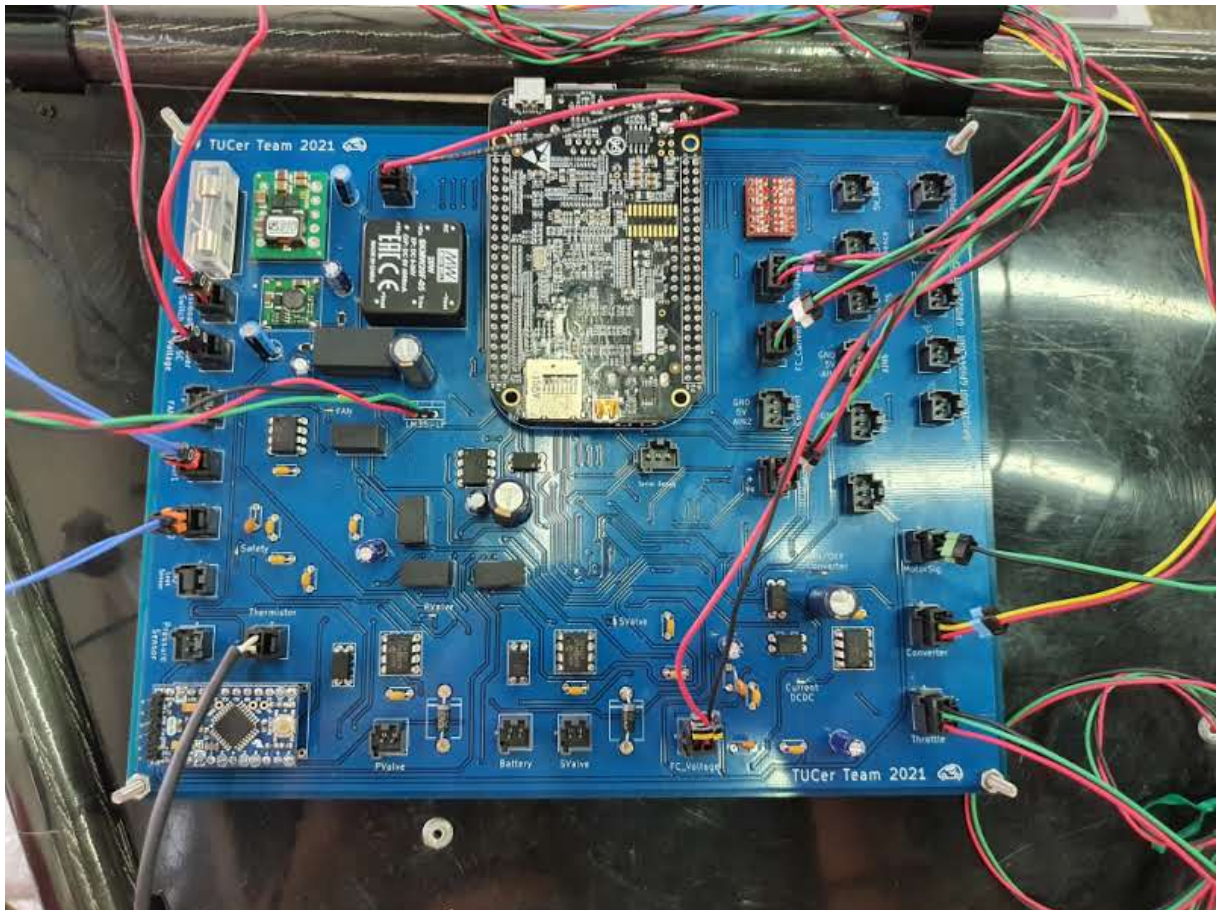
Για τη ρύθμιση της ιδανικής θερμοκρασίας αναπτύχθηκε PID ελεγκτής ο οποίος είναι

υπεύθυνος για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου στην ιδανική τιμή. Η ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Simulink στο οποίο αναπτύχθηκε το θερμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου. Με τη χρήση του μοντέλου του ανεμιστήρα της εφαρμογής υπήρξε η δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων και εποπτεία της συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου στις διάφορες αλλαγές που έγιναν στις παραμέτρους μέχρι την επίτευξη της ευστάθειας του συστήματος.



Σχήμα 4.13: Τα πρωτότυπα τυπωμένα κυκλώματα που κατασκευάστηκαν για τον έλεγχο των υποσυστημάτων και τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες.

Τα επιμέρους τυπωμένα κυκλώματα του Σχήματος 4.13 σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο για τον έλεγχο των υποσυστημάτων της κυψέλης καυσίμου, αλλά και για την καταγραφή μετρήσεων από τους αισθητήρες του συστήματος. Μετά την εφαρμογή τους στα πρώτα πειράματα ξεκίνησε η μελέτη για την κατασκευή ενός ενιαίου τυπωμένου κυκλώματος το οποίο θα εμπεριέχει όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που αναπτύχθηκαν στις επιμέρους πλακέτες. Έπειτα ακολούθησε η κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος του Σχήματος 4.14 με επαγγελματικά εργαλεία σε εργοστάσιο. Για τη νέα πλακέτα χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και μικρού όγκου και βάρους. Με τη συγκεκριμένη πλακέτα μειώθηκαν σημαντικά οι καλωδιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επικοινωνία των πρωτότυπων πλακετών, καθώς και ο θόρυβος από την απόσταση των καλωδίων.



Σχήμα 4.14: Βελτιωμένο τυπωμένο κύκλωμα για τον έλεγχο υποσυστημάτων και τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο ηλεκτρικό όχημα.

Λογισμικό ελέγχου του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου

Για την ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου και την ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του υλοποιήθηκε μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (FSM). Αρχικά καταγράφηκαν οι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται καθώς και τα σήματα εισόδου τα οποία οδηγούν το σύστημα στις κατάλληλες καταστάσεις. Η πρώτη κατάσταση του συστήματος είναι η κατάσταση “Απενεργοποίηση” όπου κανένα από τα εξαρτήματα δεν έχει τροφοδοσία και το συνολικό σύστημα της κυψέλης καυσίμου είναι απενεργοποιημένο.

Διάγνωση σφάλματος. Κατά τη διάρκεια ενεργοποίησης του συστήματος μεσολαβεί το διάστημα όπου ενεργοποιείται η τροφοδοσία για τα υποσυστήματα και γίνεται προετοιμασία του μικροεπεξεργαστή. Όταν ολοκληρωθεί η ενεργοποίηση του μικροεπεξεργαστή γίνεται έλεγχος τυχόν σφαλμάτων από τις μετρήσεις των αισθητήρων που διαβάζει ο μικροεπεξεργαστής. Τέτοια σφάλματα είναι η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου να βρίσκεται εκτός ορίων ή η πίεση του υδρογόνου να είναι εκτός των ορίων λόγω κάποιου σφάλματος σε προηγούμενη απενεργοποίηση του συστήματος. Ακόμη για την μετάβαση στην κατάσταση “έκκίνηση ανεμιστήρα” πρέπει να μην είναι ενεργοποιημένο το σήμα έκτακτης ανάγκης.

Εκκίνηση ανεμιστήρα. Όταν δεν υπάρξει σφάλμα στην κατάσταση “Διάγνωση σφάλματος” ξεκινά η πρώτη λειτουργική κατάσταση στην οποία η μόνη εντολή είναι η ενεργοποίηση του ανεμιστήρα στο 100% της λειτουργίας του. Στην κατάσταση “Εκκίνηση ανεμιστήρα” ο ανεμιστήρας οδηγείται στο 100% με στόχο τη δημιουργία ικανοποιητικής ροής αέρα προετοιμάζοντας με αυτό τον τρόπο το οξυγόνο που χρειάζεται για την αντίδραση με το υδρογόνο. Ο χρόνος παραμονής σε αυτή την κατάσταση είναι 3 δευτερόλεπτα δίνοντας χρόνο στον ανεμιστήρα να φτάσει στο 100% της λειτουργίας του. Η κυψέλη καυσίμου δεν εκκινεί στην συγκεκριμένη κατάσταση καθώς οι βαλβίδες εισαγωγής και καταλοίπων παραμένουν κλειστές όπως επίσης και ο μετατροπέας DC-DC τύπου Boost που τροφοδοτεί ηλεκτρικά το φορτίο.

Εκκίνηση κυψέλης καυσίμου. Στην κατάσταση “έκκίνηση κυψέλης καυσίμου” ο ανεμιστήρας λειτουργεί στο 100% συνεχίζοντας τη ροή οξυγόνου προς την κυψέλη καυσίμου ενώ παράλληλα ανοίγουν και οι βαλβίδες εισαγωγής και καταλοίπων. Ανοίγοντας η βαλβίδα εισαγωγής, υδρογόνο ρέει προς την κυψέλη καυσίμου μέσα από το κανάλι της ανόδου φτάνοντας τελικά στην πολυμερή μεμβράνη όπου τα θετικά ιόντα διαπερνούν την μεμβράνη και περνούν στην κάθοδο. Την ίδια στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής, ανοίγει και η βαλβίδα καταλοίπων. Κατά τη διάρκεια του κλεισίματος της κυψέλης καυσίμου, αέρια εγκλωβίζονται στην άνοδο με αποτέλεσμα το υδρογόνο όταν εισέρχεται στην κυψέλη καυσίμου να μην μπορεί να διαπεράσει την μεμβράνη σε όλη της την επιφάνεια προκαλώντας έτσι πτώση τάσης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ανοίγει η βαλβίδα καταλοίπων με στόχο το υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο έχοντας πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής να παρασύρει τα υπόλοιπα αέρια και να τα οδηγήσει εκτός της κυψέλης καυσίμου. Αυτή η απομάκρυνση καταλοίπων ονομάζεται “start-up purge” και αποτελεί βασική λειτουργία για την σωστή εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου. Η παραμονή στη συγκεκριμένη κατάσταση εξαρτάται από το χρόνο που πρέπει να μείνει ανοιχτή η βαλβίδα απομάκρυνσης καταλοίπων. Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μετά από μέτρηση της ποσότητας που πρέπει να απομακρυνθεί από την κυψέλη καυσίμου εξήχθη το συμπέρασμα παραμονής για 400 ms.

Πίνακας 4.1: Καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος ελέγχου της κυψέλης καυσίμου.

Κατάσταση	Υποσύστημα	Εντολή
Απενεργοποίηση	Ανεμιστήρας	0
	Βαλβίδα εισαγωγής	0
	Βαλβίδα καταλοίπων	0
	DC-DC converter	0
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0
Διάγνωση σφάλματος	Ανεμιστήρας	0
	Βαλβίδα εισαγωγής	0
	Βαλβίδα καταλοίπων	0
	DC-DC converter	0
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0
Εκκίνηση ανεμιστήρα	Ανεμιστήρας	100%
	Βαλβίδα εισαγωγής	0
	Βαλβίδα καταλοίπων	0
	DC-DC converter	0
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0
Εκκίνηση κυψέλης καυσίμου	Ανεμιστήρας	100%
	Βαλβίδα εισαγωγής	1
	Βαλβίδα καταλοίπων	1
	DC-DC converter	0
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0
Προθέρμανση	Ανεμιστήρας	PID
	Βαλβίδα εισαγωγής	1
	Βαλβίδα καταλοίπων	$\int 2300 \text{ Amp} \cdot \text{sec}$
	DC-DC converter	1
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	ramp 0.2 A/s
Κανονική λειτουργία	Ανεμιστήρας	PID
	Βαλβίδα εισαγωγής	1
	Βαλβίδα καταλοίπων	$\int 2300 \text{ Amp} \cdot \text{sec}$
	DC-DC converter	1
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0-75 A
Διαδικασία απενεργοποίησης	Ανεμιστήρας	PID
	Βαλβίδα εισαγωγής	0
	Βαλβίδα καταλοίπων	0
	DC-DC converter	0
	Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	0

Πίνακας 4.2: Σφάλματα απενεργοποίησης κυψέλης καυσίμου.

Έκτακτη Κατάσταση	Τιμή
Θερμοκρασία	$T_{fc} < T_{opt} - 15$ $T_{fc} > T_{opt} + 15$
Πίεση ανόδου	$> 0.56 \text{ bar}$ $< 0.16 \text{ bar}$
Ρεύμα κυψέλης καυσίμου	$> 75A$
Τάση κυψέλης καυσίμου	$< 0.5V/cell$
Σήμα έκτακτης ανάγκης	1

Προθέρμανση. Στην κατάσταση “προθέρμανση” η βαλβίδα καταλοίπων έχει κλείσει, η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή και υδρογόνο ρέει στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου. Επιπλέον ενεργοποιείται ο μετατροπέας τύπου Boost και ξεκινά η παραγωγή τάσης και ρεύματος ενώ ο ανεμιστήρας πλέον ελέγχεται από τον PID ελεγκτή σύμφωνα με την ιδανική θερμοκρασία. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.14) για την ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου ανάλογα με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία χρειάζεται μια ομαλή εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου χωρίς απότομες ζητήσεις σε ρεύμα μέχρι την εύρεση των ιδανικών συνθηκών. Με τη δυνατότητα ρύθμισης του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα τύπου Boost ρυθμίζεται η παραγωγή ρεύματος να γίνεται με τη μορφή γραμμικής μεταβολής κλίσης $0.2 A/s$. Αυτό προστατεύει την κυψέλη καυσίμου από απότομη ζήτηση ρεύματος κυρίως σε κρύο περιβάλλον όπου αναπτύσσεται ρεύμα σε θερμοκρασία αρκετά διαφορετική από την ιδανική, ενώ σε κάθε περίπτωση η αύξηση του ρεύματος είναι επιθυμητό να είναι σε μορφή γραμμικής μεταβολής για καλύτερο βαθμό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου καθώς η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου ακολουθεί αρκετά κοντά την ιδανική θερμοκρασία. Ακόμη ο χρόνος t στον οποίο πρέπει να πραγματοποιηθεί απομάκρυνση των καταλοίπων υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [2]:

$$Purge = \int_0^t I_s dt \quad (4.3)$$

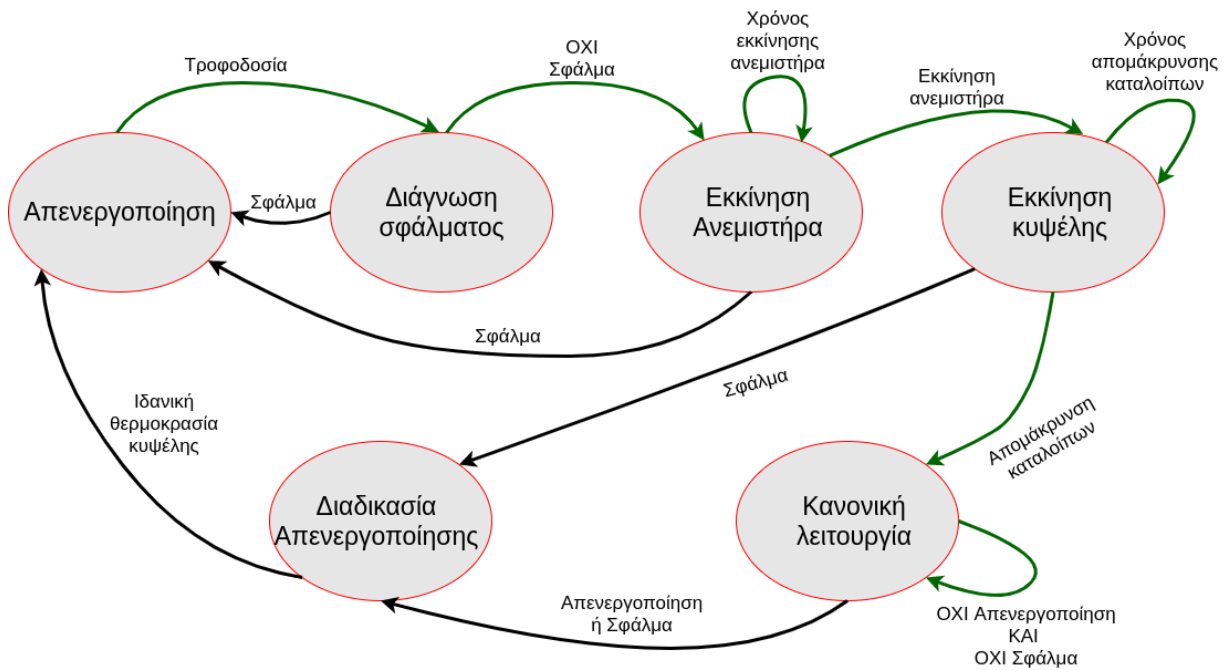
όπου I_s είναι το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου κάθε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η βέλτιστη λειτουργία της κυψέλης επιτυγχάνεται όταν το $Purge = 2300 Amp \cdot sec$.

Κανονική λειτουργία. Κατά την κανονική λειτουργία ο ανεμιστήρας ελέγχεται από τον PID ελεγκτή, η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή, ο μετατροπέας DC-DC τύπου Boost είναι ενεργοποιημένος, η βαλβίδα απομάκρυνσης καταλοίπων ανοίγει σύμφωνα με την εξίσωση (4.3), ενώ το ρεύμα μπορεί να πάρει τιμές από $0 - 75A$.

Διαδικασία απενεργοποίησης. Στην διαδικασία απενεργοποίησης το αυτόματο κλείνει όλες τις βαλβίδες και απενεργοποιεί τον μετατροπέα DC-DC τύπου Boost ώστε η κυψέλη

καυσίμου να σταματήσει να παράγει ρεύμα. Ο ανεμιστήρας συνεχίζει να λειτουργεί σύμφωνα με τον PID ελεγκτή, με στόχο την επαναφορά της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου στην ιδανική θερμοκρασία των 26°C . Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μικρότερη των 26°C τότε ο ανεμιστήρας λειτουργεί μέχρι η κυψέλη καυσίμου να ψυχθεί και να αποκτήσει την θερμοκρασία των 26°C . Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη των 26°C τότε ο ανεμιστήρας λειτουργεί ώστε η κυψέλη καυσίμου να αποκτήσει την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όταν η κυψέλη καυσίμου ψυχθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία τότε απενεργοποιείται και ο ανεμιστήρας και το αυτόματο μεταβαίνει στην κατάσταση “Απενεργοποίηση”.

Μετάβαση καταστάσεων. Η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη πραγματοποιείται είτε με τη χρήση χρονικού ορίου που πρέπει να παραμείνει το σύστημα στην συγκεκριμένη κατάσταση για την ενεργοποίηση κάποιου υποσυστήματος, είτε με την ανίχνευση σφάλματος όπως περιγράφεται από τον Πίνακα 4.2. Στην κατάσταση “Απενεργοποίηση” το σύστημα δεν τροφοδοτείται από κάποια πηγή. Όταν υπάρξει τροφοδοσία γίνεται μετάβαση στη κατάσταση “Διάγνωση σφάλματος”. Αν υπάρξει κάποιο σφάλμα στη συγκεκριμένη κατάσταση γίνεται μετάβαση στην κατάσταση “Απενεργοποίηση” με σκοπό την προστασία του συστήματος και την εύρεση του σφάλματος. Όταν δεν υπάρξει κάποιο σφάλμα στην κατάσταση “Διάγνωσης σφάλματος” γίνεται μετάβαση στην κατάσταση “Εκκίνηση ανεμιστήρα” όπου αν δεν υπάρξει κάποιο σφάλμα το σύστημα ελέγχου παραμένει σε αυτή την κατάσταση για 3 δευτερόλεπτα ώστε να υπάρξει πλήρης εκκίνηση του ανεμιστήρα. Οποιοδήποτε σφάλμα σε αυτή την κατάσταση οδηγεί στην κατάσταση “Απενεργοποίηση”. Έχοντας εκκινήσει πλήρως ο ανεμιστήρας και χωρίς την εμφάνιση σφάλματος γίνεται μετάβαση στην κατάσταση “Εκκίνηση κυψέλης καυσίμου” όπου ξεκινά η ροή υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στη συγκεκριμένη κατάσταση το σύστημα μένει για χρόνο 400ms όσο διαρκεί και η απομάκρυνση καταλοίπων. Από αυτή την κατάσταση και έπειτα οποιαδήποτε σφάλμα στέλνει το σύστημα στην “Διαδικασία απενεργοποίησης” καθώς εφόσον έχει ενεργοποιηθεί η κυψέλη καυσίμου και έχει αναπτύξει θερμοκρασία και υγρασία στη μεμβράνη το σύστημα δεν μπορεί να κλείσει απότομα χωρίς να προετοιμάσει την κυψέλη καυσίμου για απενεργοποίηση, ψύχοντάς την μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κατάσταση “Προθέρμανση” και “Κανονική λειτουργία” του Πίνακα 4.1 αποτελούν μια κατάσταση στο σύστημα ελέγχου του ηλεκτρικού οχήματος καθώς μέσω της ρύθμισης ρεύματος του μετατροπέα DC-DC τύπου Boost ρυθμίζεται η ζήτηση ρεύματος να φτάσει στο επιθυμητό σημείο με γραμμική μεταβολή (ramp) 0.2 A/s και στη συνέχεια απενεργοποιείται η ρύθμιση της ράμπας και η κυψέλη καυσίμου μπορεί να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε ζήτηση ρεύματος. Σφάλμα στη συγκεκριμένη κατάσταση οδηγεί στην κατάσταση οδηγεί στην “Διαδικασία απενεργοποίησης”.



Σχήμα 4.15: Το διάγραμμα ροής για τον έλεγχο του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου.

4.3.6 Σύστημα μέτρησης τάσης κελιών.

Η στοίβα κυψέλης καυσίμου της εφαρμογής αποτελείται από 28 κελιά που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Η τάση του κάθε κελιού κυμαίνεται από 0.5V έως 0.95V ανάλογα με το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου. Η τιμή της συνολικής τάσης προκύπτει από την πρόσθεση των τάσεων των επιμέρους κελιών. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου δεν είναι εύκολα αντιληπτό αν η τάση που αναπτύσσεται είναι απόλυτα σωστή καθώς είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη σε σχέση με το ρεύμα που αναπτύσσεται. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM είναι η γήρανση της μεμβράνης με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μικρότερης τάσης αλλά και την πιθανότητα καταστροφής της μεμβράνης, με αποτέλεσμα την διαρροή του υδρογόνου αλλά και την μείωση των ενεργών κελιών. Η καταστροφή κάποιου κελιού δεν γίνεται εύκολα αντιληπτή παρατηρώντας την συνολική τάση καθώς η μείωση της τάσης έχει να κάνει με την απομάκρυνση καταλοίπων αλλά και με την γήρανση της μεμβράνης.

Για την πλήρη εποπτεία της ζωής της κυψέλης καυσίμου αναπτύχθηκε σύστημα μέτρησης το οποίο υπολογίζει κάθε στιγμή την τάση του κάθε κελιού ξεχωριστά. Η τάση του κάθε κελιού υπολογίζεται ως:

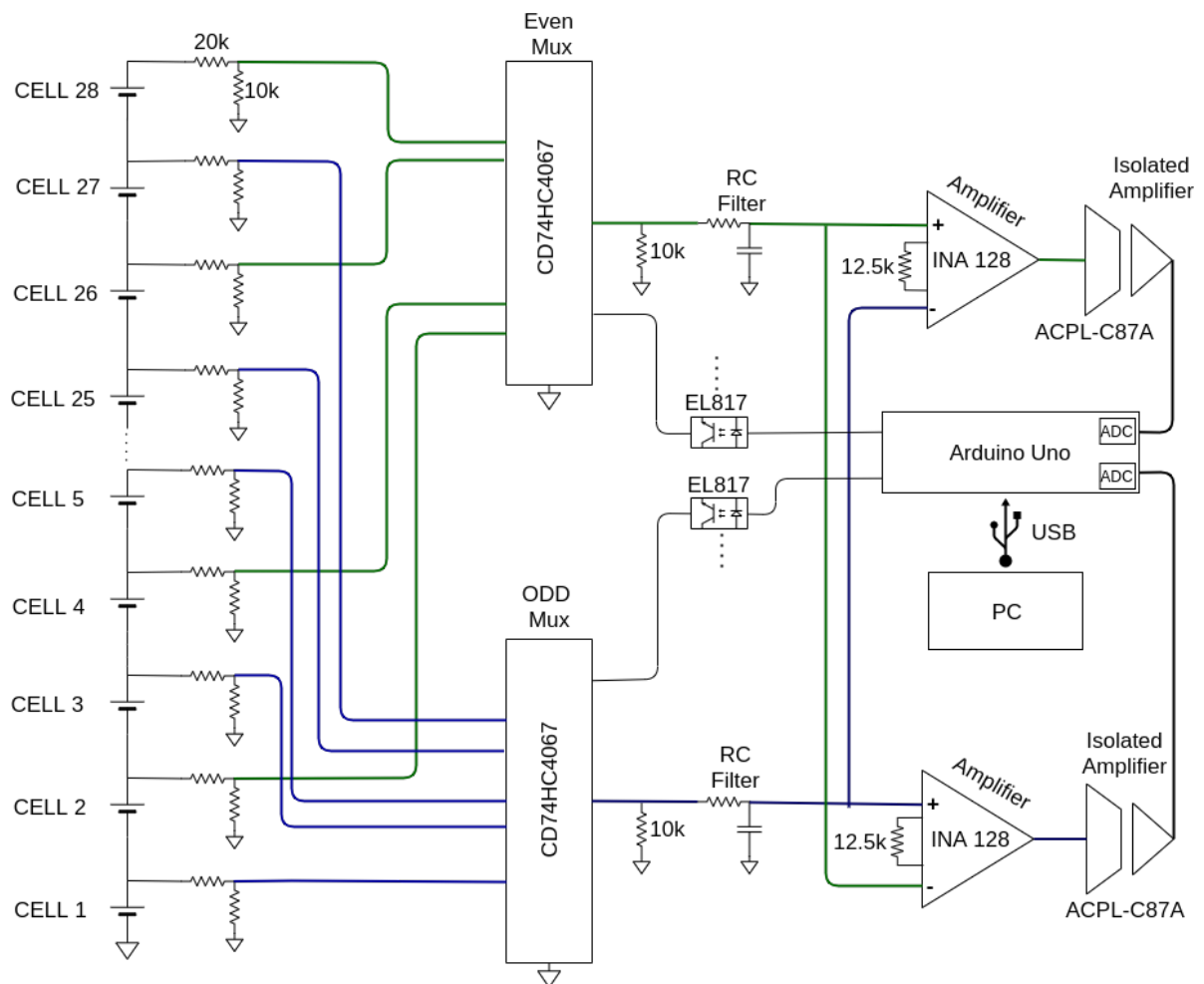
$$V_n = V_n - V_{n-1} \quad (4.4)$$

όπου n είναι ο αριθμός του κάθε κελιού. Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο πολυπλέκτες για την επιλογή των δύο τάσεων που αφαιρούνται. Στον έναν πολυπλέκτη καταλήγουν τα άρτια κελιά, ενώ στο άλλο πολυπλέκτη τα περιττά κελιά. Με αυτό τον τρόπο επιλέγεται από τον κάθε πολυπλέκτη ταυτόχρονα ένα κελί το οποίο αφαιρείται με εκείνο που επιλέχθηκε από τον άλλο πολυπλέκτη. Επίσης χρησιμοποιείται και διάταξη διαιρέτη τάσης για τον υποβιβασμό των τάσεων των κελιών στο εύρος τιμών τάσης που μπορεί να λειτουργήσει ο αναλογικός πολυπλέκτης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν

τελεστικοί ενισχυτές σε διάταξη αφαιρετέων για την αφαίρεση των δύο τάσεων καθώς και ενισχυτής με στόχο την ενίσχυση του σήματος αφαίρεσης όπου είχε υποβιβαστεί μέσω του διαιρέτη τάσης. Στην έξοδο του πολυπλέκτη χρησιμοποιείται αντίσταση για την αποφόρτιση της γραμμής κατά την διάρκεια εναλλαγής της εξόδου του, καθώς και βαθυπερατό RC φίλτρο για τη μείωση του θορύβου. Η αντίσταση αποφόρτισης είναι παράλληλα συνδεδεμένη με την αντίσταση της γείωσης του διαιρέτη τάσης γεγονός που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της τάσης στην έξοδο του πολυπλέκτη.

Το σύστημα περιλαμβάνει δύο τελεστικούς ενισχυτές. Ο ένας πραγματοποιεί τις άρτιες αφαιρέσεις (cell 28 - cell 27), ενώ ο άλλος τις περιττές (cell 27 - cell 26). Κάθε φορά ο ένας έχει θετικό αποτέλεσμα ενώ ο άλλος αρνητικό.

Στο σύστημα χρησιμοποιείται τεχνική απομόνωσης (isolation) τάσης για την αποφυγή διαταραχών λόγω της διακοπτικής συχνότητας του πολυπλέκτη, αλλά και των υπολοίπων συστημάτων που χρησιμοποιούν ως γείωση αυτή της κυψέλης καυσίμου. Επομένως το σήμα που εξάγεται από τους τελεστικούς ενισχυτές περνά από ενισχυτή απομόνωσης καθώς ο μικροεπεξεργαστής δεν χρησιμοποιεί την ίδια γείωση με το συνολικό σύστημα. Επιπλέον το αρνητικό αποτέλεσμα μεταφράζεται ως μηδέν από τον ενισχυτή απομόνωσης, προστατεύοντας έτσι τον μικροεπεξεργαστή. Για τον έλεγχο των επιλογών του πολυπλέκτη χρησιμοποιούνται optocouplers οι οποίοι ελέγχονται από τον μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 4.16: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης της τάσης των κελιών της κυψέλης καυσίμου.

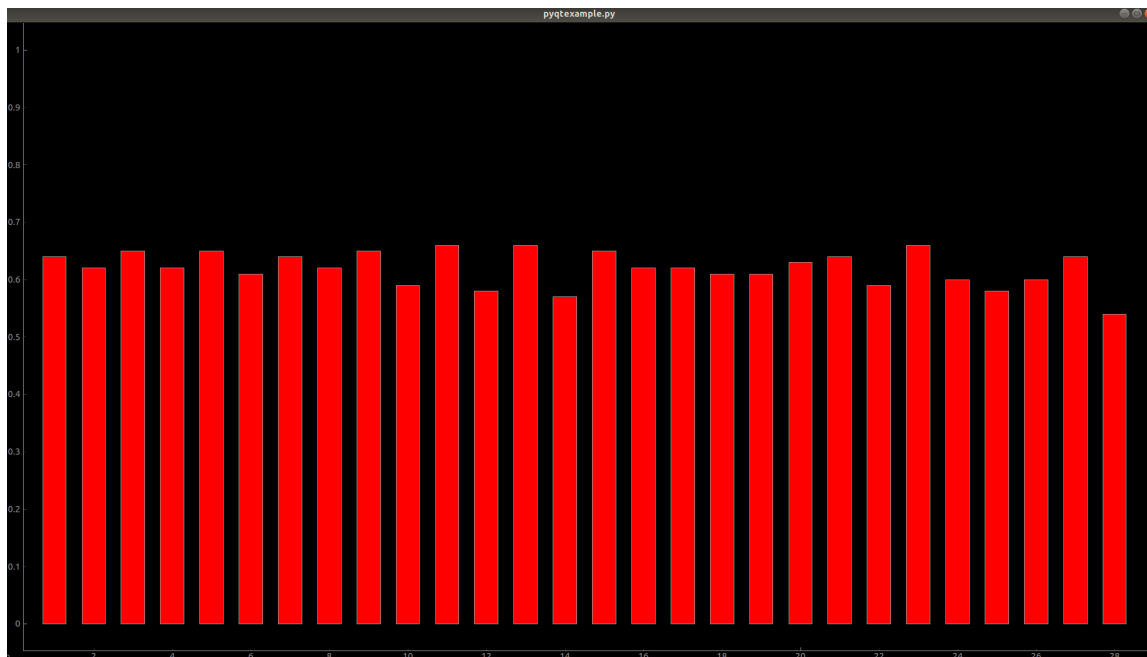
Οι έξοδοι των ενισχυτών απομόνωσης παράγουν θετική ή μηδενική τάση ανάλογα με την αφαίρεση που πραγματοποιήθηκε στους τελεστικούς ενισχυτές. Η αφαίρεση των κελιών 28-27 που πραγματοποιείται σε έναν από τους δύο τελεστικούς δίνει θετικό αποτέλεσμα ενώ η αφαίρεση των κελιών 27-28 που πραγματοποιείται στον άλλο τελεστικό δίνει αρνητικό αποτέλεσμα. Το αρνητικό αποτέλεσμα φιλτράρεται από τον ενισχυτή απομόνωσης, ο οποίος σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει μηδενική έξοδο. Τα αποτελέσματα των ενισχυτών απομόνωσης οδηγούνται στον μικροεπεξεργαστή ο οποίος κάθε φορά διαβάζει το θετικό αποτέλεσμα. Η κάθε τιμή αποθηκεύεται προσωρινά και όταν διαβαστούν οι τάσεις όλων των κελιών, ο μικροεπεξεργαστής στέλνει τα δεδομένα στον υπολογιστή προς απεικόνιση και στη συνέχεια ξεκινά ξανά το διάβασμα των νέων τιμών.



Σχήμα 4.17: Καλωδίωση μεταφοράς της τάσης του κάθε κελιού, από την κυψέλη καυσίμου στην πλακέτα μέτρησης και απεικόνισης των τάσεων.

Με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python και πιο συγκεκριμένα της βιβλιοθήκης PyQtGraph υλοποιήθηκε λογισμικό για τον υπολογιστή που λαμβάνει τα δεδομένα από τον μικροεπεξεργαστή και τα απεικονίζει με μορφή μπάρας (bar graph). Το συγκεκριμένο

γράφημα αποτελεί την καλύτερη λύση καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη απεικόνιση των τιμών τάσης των 28 κελιών.



Σχήμα 4.18: Στιγμιότυπο γραφικού περιβάλλοντος απεικόνισης με τη μορφή μπάρας, της τάσης του κάθε κελιού της κυψέλης καυσίμου (Cell Voltage Monitoring).

Το Σχήμα 4.18 απεικονίζει ένα στιγμιότυπο της ζωντανής αναπαράστασης της τάσης του κάθε κελιού. Όταν η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται στην κανονική της λειτουργία παρατηρείται η εναλλαγή της τάσης των κελιών σύμφωνα με το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου. Κατά τη διαδικασία απομάχρυνσης καταλοίπων παρατηρείται έντονα η αύξηση τάσης στο κάθε κελί λόγω του καθαρισμού της μεμβράνης με αποτέλεσμα τον πλήρη έλεγχο και την επιβεβαίωση των τιμών κάθε στιγμή. Το συγκεκριμένο γράφημα δεν χρησιμοποιείται τόσο για ακρίβεια στη μέτρηση της τάσης του κάθε κελιού αλλά στη διάγνωση για το αν όλα τα κελιά βρίσκονται στην ίδια κατάσταση.

Όταν σε κάποιο κελί τρυπήσει η μεμβράνη του, τότε η αντίστοιχη μπάρα στο γράφημα θα μηδενιστεί δίνοντάς πληροφορία για το ποιο κελί έχει διαρροή και στη συνέχεια το σύστημα θα περάσει σε διαδικασία απενεργοποίησης από το χρήστη ο οποίος θα καταλάβει άμεσα το είδος του προβλήματος. Σε περίπτωση όπου παρατηρείται μόνο η συνολική τάση του συστήματος, λόγω της εναλλαγής της σύμφωνα με το ρεύμα, είναι δύσκολο να ανιχνευθεί η διαρροή σε κάποιο κελί και επομένως ο μειωμένος βαθμός απόδοσης που θα παρουσιάζει. Ο βαθμός απόδοσης σε τέτοια κατάσταση μειώνεται σημαντικά καθώς η τάση της κυψέλης καυσίμου μειώνεται κατά ένα Volt και το ρεύμα αυξάνεται για να καλύψει την απαίτηση ισχύος, με αποτέλεσμα να αυξηθεί και η κατανάλωση υδρογόνου, ένα ποσοστό της οποίας χάνεται από διαρροή.

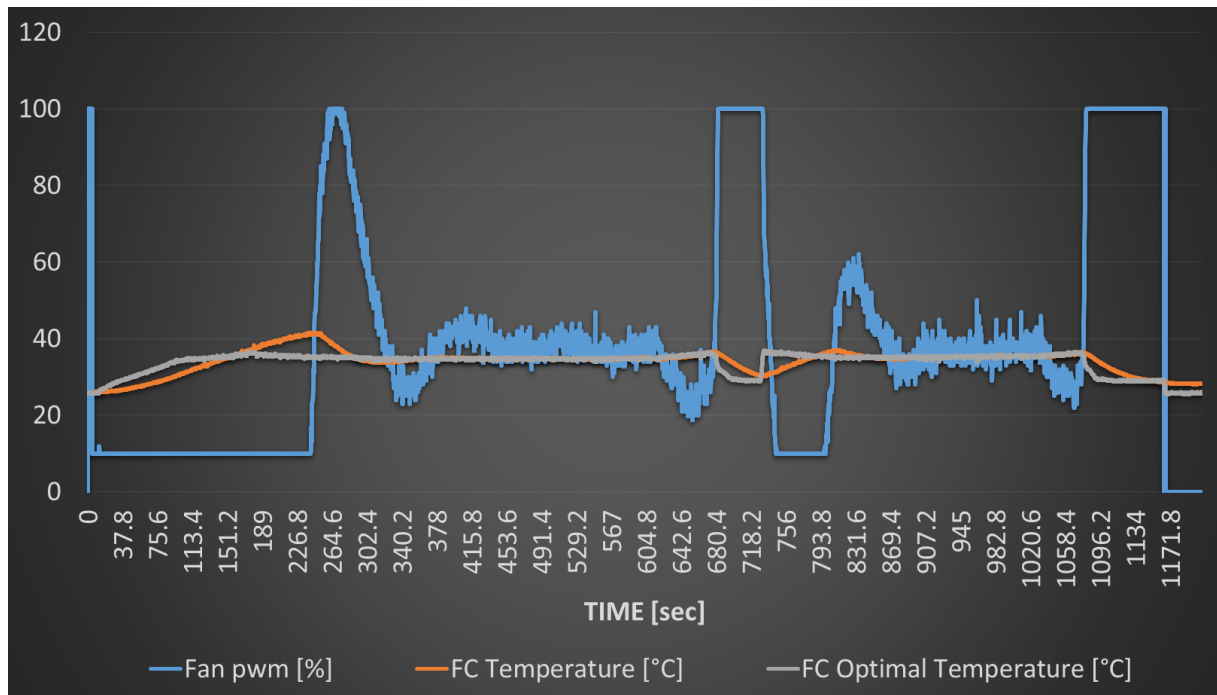
Επιπλέον η απομάχρυνση καταλοίπων δημιουργεί μια μικρή αύξηση τάσης στο κάθε κελί, η οποία γίνεται αντιληπτή από το γράφημα. Σε περίπτωση όπου το σύστημα απομάχρυνσης καταλοίπων δεν λειτουργήσει παρατηρείται μια συνεχόμενη πτώση τάσης σε κάθε μπάρα, η οποία εξαρτάται από τη διάρκεια μη-απομάχρυνσης των καταλοίπων αλλά και από το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου. Επομένως η συνεχόμενη πτώση τάσης του κάθε κελιού σηματοδοτεί πρόβλημα στο σύστημα απομάχρυνσης καταλοίπων.

5 Πειραματικά αποτελέσματα

Έπειτα από την θεωρητική μελέτη, την σχεδίαση και την κατασκευή όλων των υποσυστημάτων που πλαισιώνουν το συνολικό σύστημα της κυψέλης καυσίμου, ξεκίνησαν οι πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες αποτυπώνουν την πραγματική κατάσταση του συστήματος. Από τις μετρήσεις εξάγονται πληροφορίες για την κατάσταση της κυψέλης καυσίμου αλλά και την αξιοπιστία όλων των υποσυστημάτων που αναπτύχθηκαν για τη λειτουργία του συνολικού συστήματος. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ο μικροεπεξεργαστής αποθηκεύει τα δεδομένα σε αρχείο τύπου csv με αποτέλεσμα την άμεση απεικόνιση σε γράφημα μετά το τέλος του κάθε πειράματος.

5.1 Ιδανική θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου

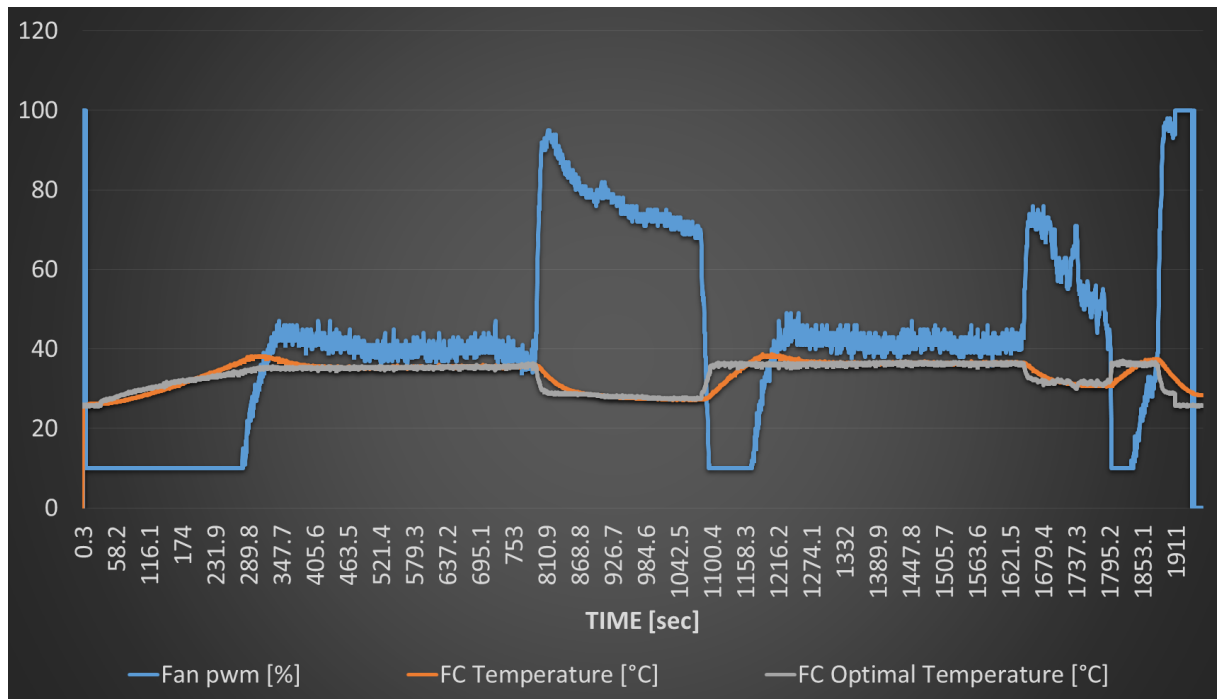
Η ιδανική θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου εξάγεται από την εξίσωση (3.14) και αποτελεί τη θερμοκρασία αναφοράς, σύμφωνα με την οποία ο PID ελεγκτής ρυθμίζει την ροή όγκου αέρα για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου με στόχο την ιδανική θερμοκρασία. Αρχικά στα πρώτα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τιμές για τα κέρδη του PID ελεγκτή όπως είχαν υπολογιστεί στο θεωρητικό μοντέλο με τη βοήθεια του Simulink, μη λαμβάνοντας υπόψιν τις διαταραχές του επαγωγικού αισθητήρα ρεύματος. Η μέτρηση του ρεύματος εισάγεται στην εξίσωση (3.14) με αποτέλεσμα οι διαταραχές να επηρεάζουν συνεχώς την θερμοκρασία αναφοράς και επομένως την εντολή που δίνει ο ελεγκτής στον ανεμιστήρα για την ανάπτυξη της κατάλληλης ροής αέρα.



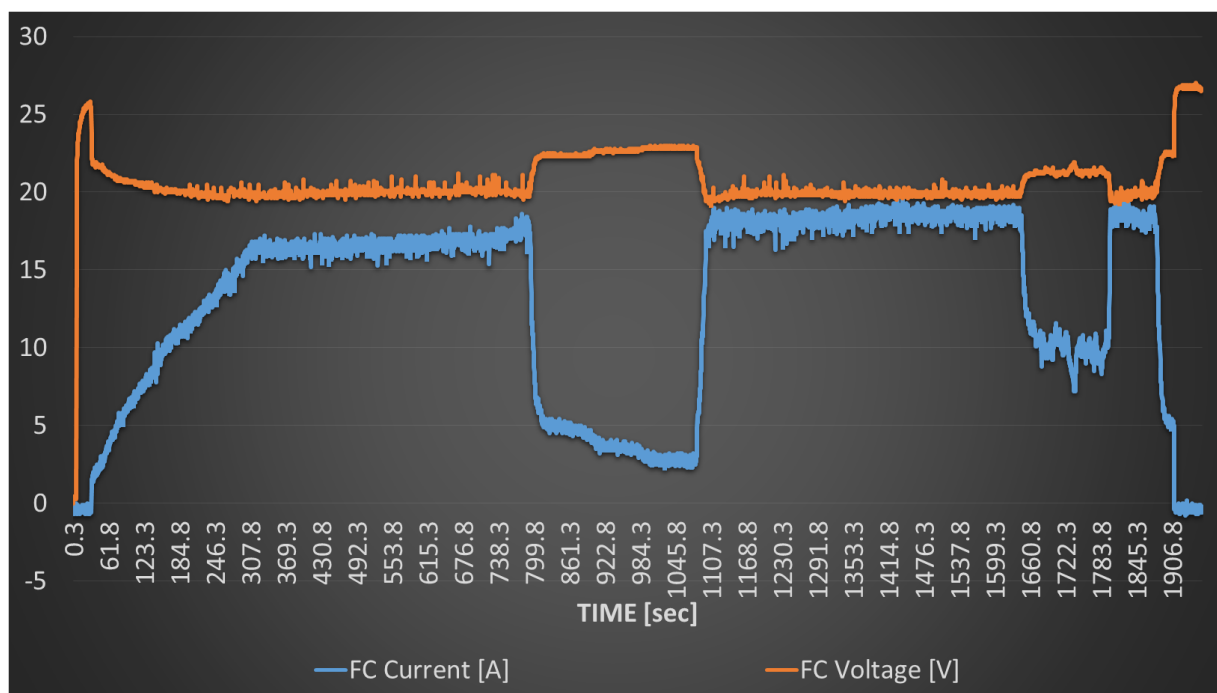
Σχήμα 5.1: 1ο Πείραμα: Πειραματικά διαγράμματα των θερμοκρασιών και της εντολής ανεμιστήρα σε συνθήκη ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας 26°C και μέγιστο ρεύμα κυψέλης καυσίμου στα 18A.

Στο Σχήμα 5.1 αποτυπώνεται η ιδανική θερμοκρασία που πρέπει να έχει η κυψέλη καυσίμου συγκριτικά με την πραγματική θερμοκρασία που έχει την κάθε χρονική στιγμή. Παρατηρείται ότι το σύστημα είναι ευσταθές καθώς ο ελεγκτής ανταποκρίνεται στις αλλαγές θερμοκρασίας και σχετικά γρήγορα θέτει την κυψέλη καυσίμου στην ιδανική θερμοκρασία. Στο παραπάνω πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που εξήχθησαν από την προσομοίωση, οι οποίες δίνουν ένα ευσταθές σύστημα. Παρατηρείται όμως ότι το σύστημα παράλληλα είναι αρκετά απότομο όπως φαίνεται στα 668 δευτερόλεπτα του γραφήματος όπου μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας θέτει τον ανεμιστήρα στο 100% της ισχύος του. Ακόμη και όταν η κυψέλη καυσίμου φτάσει στην ιδανική θερμοκρασία η εντολή του ανεμιστήρα παρουσιάζει έντονες διαταραχές οι οποίες οφείλονται στις διαταραχές του αισθητήρα ρεύματος αλλά και στην ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή.

Μετά την εκκίνησή της η κυψέλη καυσίμου παράγει ρεύμα για το φορτίο αλλά και για τα υποσυστήματά της. Ο ανεμιστήρας ανήκει στο υποσύστημα ψύξης το οποίο καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια από τα υπόλοιπα, καθώς στην ελάχιστη λειτουργία του καταναλώνει 10 Watt. Επίσης η καμπύλη κατανάλωσης ενέργειας του ανεμιστήρα είναι παραβολή και επομένως το σύστημα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια στις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας αλλά και στις διαταραχές όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.



Σχήμα 5.2: 2ο Πείραμα: Πειραματικά διαγράμματα των θερμοκρασιών και της εντολής ανεμιστήρα σε συνθήκη ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας 26°C και μέγιστο ρεύμα κυψέλης καυσίμου στα 18A μετά τις αλλαγές στις παραμέτρους του ελεγκτή.

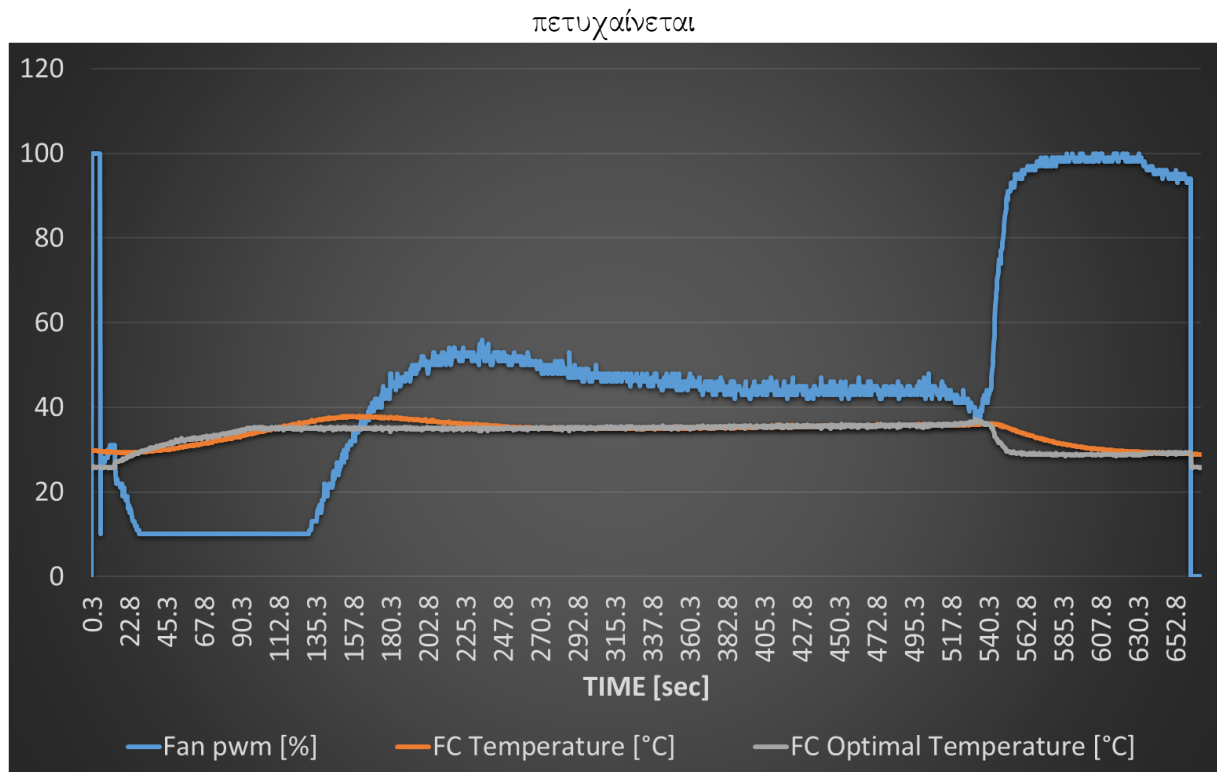


Σχήμα 5.3: 2ο Πείραμα: Πειραματικά διαγράμματα του ρεύματος και της τάσης της κυψέλης καυσίμου μετά τις αλλαγές στις παραμέτρους του ελεγκτή.

Στο 2ο πείραμα που παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.2 και 5.3 έγιναν αλλαγές στις παραμέτρους του ελεγκτή με στόχο πιο ομαλή λειτουργία. Οι αλλαγές έγιναν αρχικά στην προσομοίωση και έπειτα στο πείραμα. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες ρεύματος και ατμοσφαι-

ρικής θερμοκρασίας με το πείραμα 1 παρατηρείται βελτίωση της εντολής του ανεμιστήρα με πιο ομαλή λειτουργία και ευστάθεια του συστήματος.

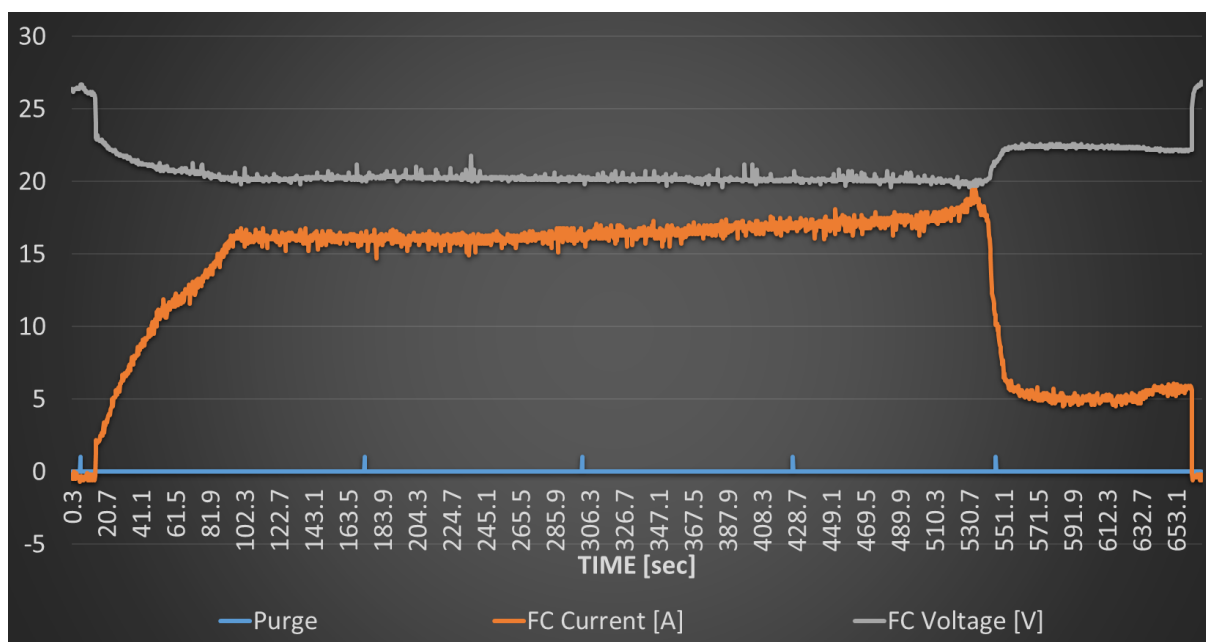
Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η τάση που αναπτύσσει η κυψέλη καυσίμου σε σχέση με το ρεύμα που παράγει. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια εκκίνησης η κυψέλη καυσίμου αναπτύσσει μέγιστη τάση 25.7 Volt σε λειτουργία χωρίς φορτίο, ενώ κατά τη διάρκεια απενεργοποίησης αναπτύσσει μέγιστη τάση 26.9 Volt σε λειτουργία χωρίς φορτίο. Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν τις απώλειες ενεργοποίησης που δημιουργούνται κατά την εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου, καθώς δεν έχει προλάβει να σχηματιστεί η απαραίτητη υγρασία στη μεμβράνη για τη μείωση της αντίστασής της.



Σχήμα 5.4: 3ο Πείραμα: Πειραματικά διαγράμματα θερμοκρασιών και εντολής ανεμιστήρα σε συνθήκη ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας 28°C και μέγιστο ρεύμα κυψέλης καυσίμου 18A.

Στη συνέχεια έγινε η τελευταία ρύθμιση στις παραμέτρους του ελεγκτή σύμφωνα με την οποία ο ανεμιστήρας παρουσίασε την πιο ομαλή συμπεριφορά και ταυτόχρονα το σύστημα ήταν ευσταθές. Στο Σχήμα 5.4 παρατηρείται ότι σε ρεύμα 18A και με θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 28°C ο ανεμιστήρας δεν ξεπερνά το 60% στην πρώτη μεταβολή της ιδανικής θερμοκρασίας ενώ στη δεύτερη οριακά αγγίζει το 100% γεγονός που σημαίνει πως σε σύγκριση με τις παραπάνω εξισώσεις πετυχαίνει το ίδιο αποτέλεσμα αλλά με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

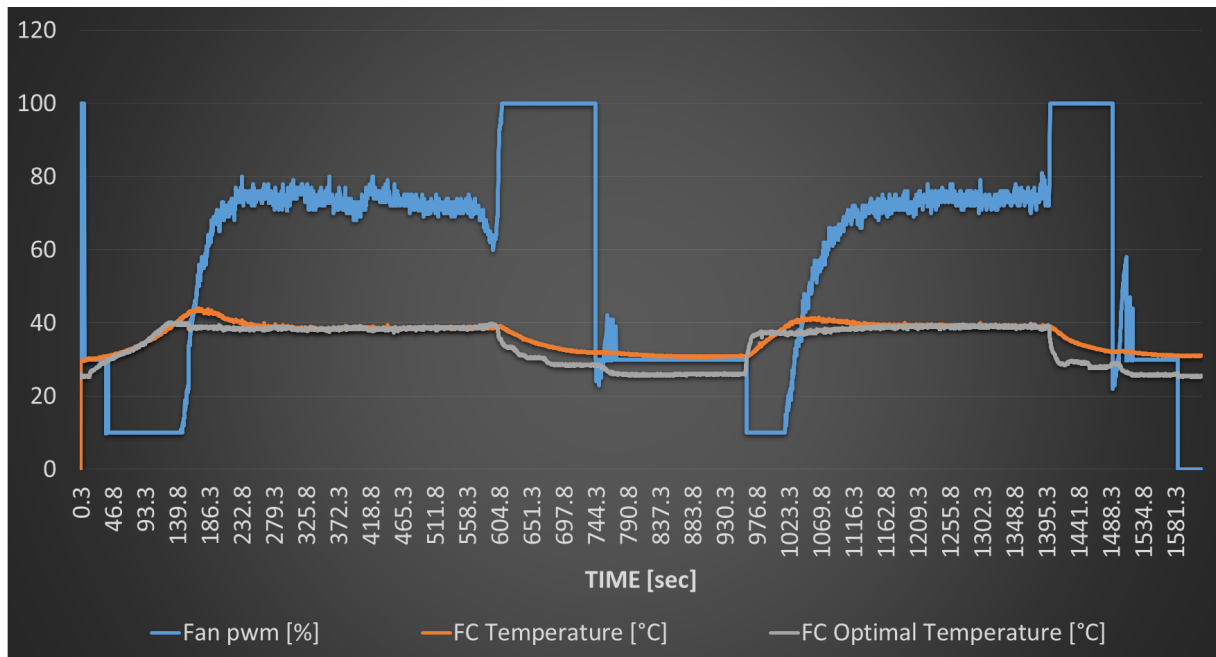
Όλες οι ρυθμίσεις των παραμέτρων αρχικά δοκιμάζονταν σε προσομοίωση από την οποία υπήρχε απόκλιση η οποία οφειλόταν στην διαφορά πίεσης του αεροδυναμικού κελύφους που κατευθύνει τη ροή του αέρα προς την κυψέλη καυσίμου. Η μοντελοποίηση και η εξαγωγή της τιμής της πίεσης στην προσομοίωση αναφέρεται στην διαφορά πίεσης που δημιουργείται λόγω των οπών της κυψέλης καυσίμου. Επιπλέον προστίθεται και διαφορά πίεσης λόγω του κελύφους, η οποία επηρεάζει την % εντολή του ανεμιστήρα με στόχο την κατάλληλη ροή οξυγόνο όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



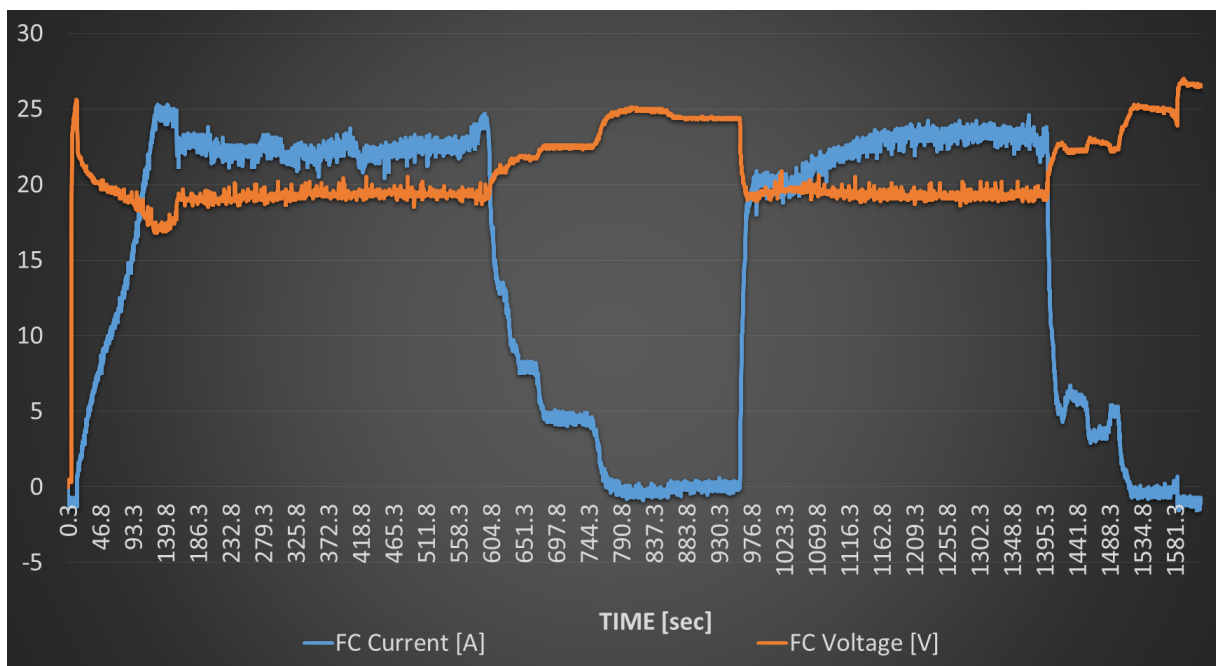
Σχήμα 5.5: 3ο Πείραμα: Πειραματικά διαγράμματα του ρεύματος και της τάσης της κυψέλης καυσίμου.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η τάση σε σχέση με το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου που καταγράφηκαν στο 3ο πείραμα. Παράλληλα σε αυτό το γράφημα παρουσιάζονται με μπλε χρώμα και οι χρονικές στιγμές όπου πραγματοποιήθηκε απομάκρυνση καταλοίπων. Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε σε κοντινή χρονική στιγμή με το 2ο πείραμα. Η κυψέλη καυσίμου έχει κρατήσει εσωτερικά το υδρογόνο από το τελευταίο πείραμα γι αυτό και φαίνεται ότι τη χρονική στιγμή μηδέν η κυψέλη καυσίμου έχει μέγιστη τάση. Η είσοδος του φρέσκου υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου γίνεται μαζί με την απομάκρυνση καταλοίπων στο σημείο όπου φαίνεται η πρώτη μπλε ακίδα στο Σχήμα 5.5. Παρατηρώντας την τάση φαίνεται μικρή αύξηση της τάσης σε μηδενικό φορτίο καθώς τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή απομακρύνθηκαν τα κατάλοιπα που ήταν εγκλωβισμένα από το προηγούμενο πείραμα και αυξήθηκε ο χώρος στη μεμβράνη όπου τα πρωτόνια μπορούν να περάσουν στην κάθοδο.

Παράλληλα παρατηρείται ότι τη χρονική στιγμή που η κυψέλη καυσίμου αποκτά την ισοδυναμική θερμοκρασία και έχοντας περάσει μερικά λεπτά από την εκκίνησή της ξεκινά αύξηση του ρεύματος χωρίς πτώση τάσης γεγονός που συνδέεται με τη μείωση των απωλειών ενεργοποίησης αλλά και των απωλειών λόγω μη-ιδανικής θερμοκρασίας. Λόγω των πολλαπλών μικρών μεταβολών του ρεύματος πραγματοποιούνται και μικρές μεταβολές στην τάση, γεγονός που δεν επιτρέπει να γίνει αντιληπτή η επίδραση της απομάκρυνσης καταλοίπων κατά την κανονική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 5.6: Ειδική κατάσταση: Πειραματικά διαγράμματα θερμοκρασιών και εντολής ανεμιστήρα σε συνθήκη ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας 30°C και μέγιστο ρεύμα κυψέλης καυσίμου 22A.



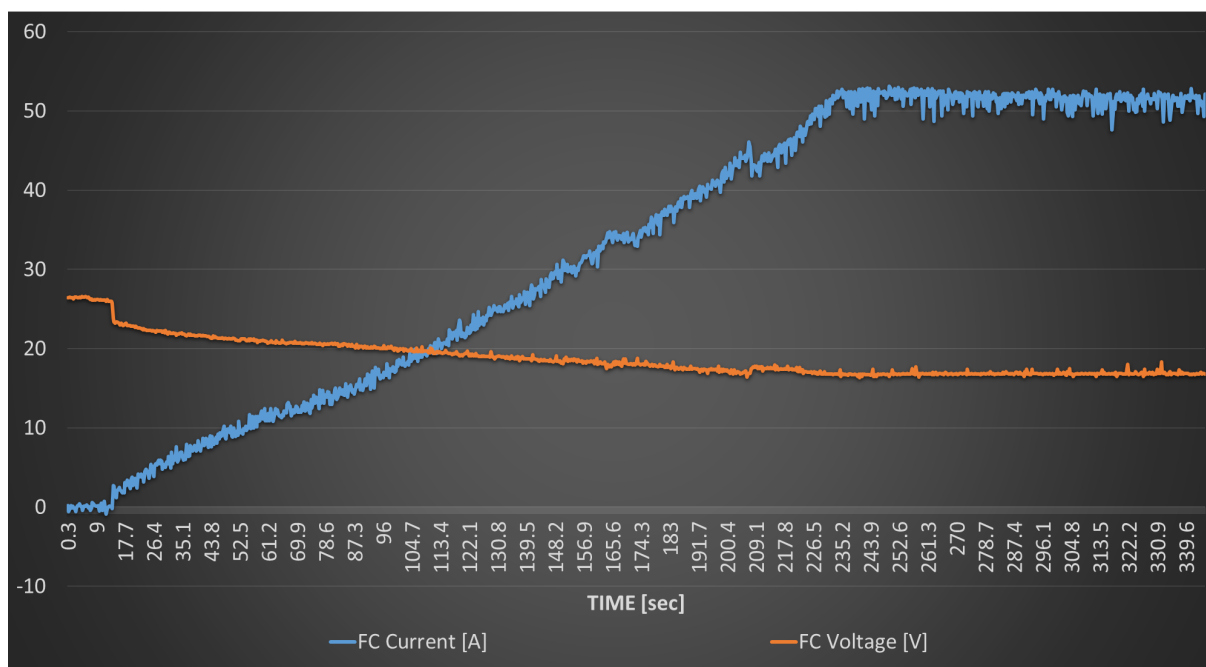
Σχήμα 5.7: Ειδική κατάσταση: Πειραματικά διαγράμματα του ρεύματος και της τάσης της κυψέλης καυσίμου.

Μετά την περαιτέρω ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή έγιναν αρκετά πειράματα και προσομοιώσεις με στόχο την εύρεση των ορίων λειτουργίας του συστήματος καθώς και την εύρεση ειδικών καταστάσεων. Μία ειδική κατάσταση που καταγράφηκε αναπαριστάται από τα Σχήματα 5.6 και 5.7. Στο συγκεκριμένο πείραμα η κυψέλη καυσίμου παράγει μέγιστο ρεύμα 25A σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C . Ο ανεμιστήρας ρυθμίζεται από τον ελεγκτή

και καταφέρνει να ισορροπήσει το σύστημα στην ιδανική θερμοκρασία. Όταν το ρεύμα που παράγεται μειώνεται, ο ανεμιστήρας λόγω των συνθηκών λειτουργεί στο 100% για να ψύξει την κυψέλη καυσίμου έχοντας ως ρεύμα λειτουργίας 4A γεγονός που ορίζει την ιδανική θερμοκρασία στους 28.1°C . Η ιδανική θερμοκρασία πλέον είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και επομένως τίθεται ίση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Σε αυτή την περίπτωση ο ανεμιστήρας θα λειτουργεί στο 100% για να ψύξει την κυψέλη καυσίμου με ατμοσφαιρικό αέρα την ώρα που η κυψέλη καυσίμου παράγει 4A και θερμότητα ώστε να τροφοδοτήσει τον ανεμιστήρα. Συνεπώς η κυψέλη παράγει ρεύμα για τον ανεμιστήρα και ο ανεμιστήρας ψύχει την κυψέλη για το ρεύμα που παράγει για εκείνον. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται ένας βρόχος, ο οποίος σταματά μόνο όταν υπάρξει ζήτηση ρεύματος από το φορτίο, διότι θα αλλάξει η τιμή της ιδανικής θερμοκρασίας και πλέον ο ανεμιστήρας θα λειτουργήσει για να κρατήσει το σύστημα στην ιδανική θερμοκρασία.

Όταν γίνει αντιληπτή η συγκεκριμένη κατάσταση από το σύστημα ελέγχου, υπάρχει συνθήκη στον αλγόριθμο ελέγχου που σταματάει την δράση του ελεγκτή όταν η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου βρεθεί να έχει 2°C διαφορά από την ατμοσφαιρική και θέτει σταθερή την τιμή λειτουργίας του ανεμιστήρα στο 30%. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το ρεύμα για τον ανεμιστήρα, δεν παράγεται πλέον αρκετή θερμότητα και η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου μένει 2 βαθμούς υψηλότερα από την ατμοσφαιρική. Αυτό προκαλεί μια μεγαλύτερη πτώση τάσης κατά τη διάρκεια εκ νέου ζήτησης ρεύματος από το φορτίο καθώς λόγω αυξημένης θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου δεν υπάρχει η κατάλληλη υγρασία στη μεμβράνη. Από την άλλη κατά τη ζήτηση ρεύματος η κυψέλη καυσίμου θα ισορροπήσει γρηγορότερα στην ιδανική θερμοκρασία μειώνοντας τις απώλειες λόγω μη-ιδανικής θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.8: Πειραματική καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η τάση της κυψέλης καυσίμου σε σύγκριση με το ρεύμα σε γραμμική μεταβολή 53A. Παρατηρείται συνεχόμενη πτώση τάσης λόγω αύξησης του ρεύματος αλλά και η μικρή αύξηση τάσης μετά τα 210 δευτερόλεπτα. Η συγκεκριμένη αύξηση πραγματοποιείται καθώς σε αυτό το σημείο λειτουργίας η κυψέλη καυσίμου απομακρύνει τα

κατάλοιπα και τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο. Τέλος, παρατηρείται ότι η κυψέλη μπορεί να φτάσει έως και 17V συνολική τάση όταν παράγει ρεύμα 53A και γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση μετατροπέα DC-DC τύπου Boost.

5.2 Πειραματική μέτρηση του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου και του συνολικού συστήματος της

Όπως έχει προαναφερθεί, η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα μέσα από μια ηλεκτροχημική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στη μεμβράνη της. Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου μετράται ως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται ανά mole καυσίμου μέσω αυτής της ηλεκτροχημικής διαδικασίας, σε σύγκριση με τη θερμότητα που θα παραγόταν σε περίπτωση καύσης του υδρογόνου. Το πηλίκο αυτό ονομάζεται θερμογόνο δύναμη (Heating Value-HV). Η θερμογόνο δύναμη χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το προϊόν της αντίδρασης. Αν το προϊόν είναι νερό σε υγρή μορφή τότε έχουμε ανώτερη θερμογόνο δύναμη (Higher Heating Value-HHV), ενώ αν το νερό είναι υπό αέρια μορφή τότε έχουμε κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value-LHV).

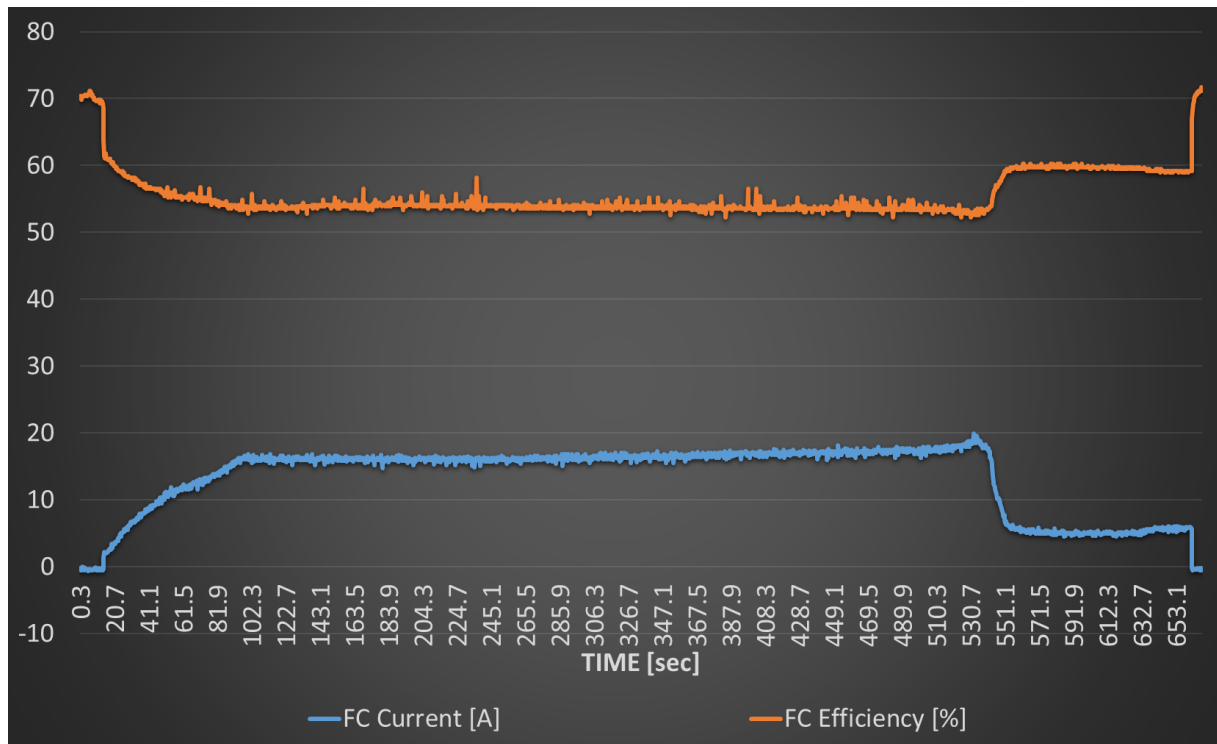
Η κυψέλη καυσίμου που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάγει ως προϊόν νερό υπό αέρια μορφή και γι αυτό παρακάτω υπολογίζεται ο LHV βαθμός απόδοσής της. Για την εύρεση του βαθμού απόδοσης αρχικά υπολογίζεται η πραγματική ισχύς ανά κιλό υδρογόνου όπως εξάγεται από τον κατασκευαστή [3]:

$$H_2 \text{ Instantaneous Efficiency} = \frac{n \cdot V_{cell} \cdot 2300(\text{amp} \cdot \text{sec})}{(n \cdot 24 \cdot 10^{-6} + n \cdot 1.7 \cdot 10^{-6}) \cdot 3600 \cdot 1000} \frac{\text{kW} \cdot \text{hrs}}{\text{kg}} \quad (5.1)$$

όπου n είναι ο αριθμός των κελιών της κυψέλης καυσίμου, V_{cell} είναι η τάση του κάθε κελιού, 2300 είναι η τιμή του ολοκληρώματος της εξίσωσης (4.3) που υπολογίζει τον χρόνο που μεσολαβεί για την απομάκρυνση καταλοίπων. Ο όρος $24 \cdot 10^{-6}$ αναπαριστά τα κιλά υδρογόνου που αντιδρούν σε κάθε κελί, ενώ ο όρος $1.7 \cdot 10^{-6}$ αναπαριστά τα κιλά υδρογόνου που εξάγονται από κάθε κελί κατά την απομάκρυνση καταλοίπων με ένταση $20\text{mL}/\text{cell}$. Τέλος, οι όροι 3600 και 1000 αποτελούν συντελεστές μετατροπής των δευτερολέπτων σε ώρες και των Watt σε kilo-Watts αντίστοιχα.

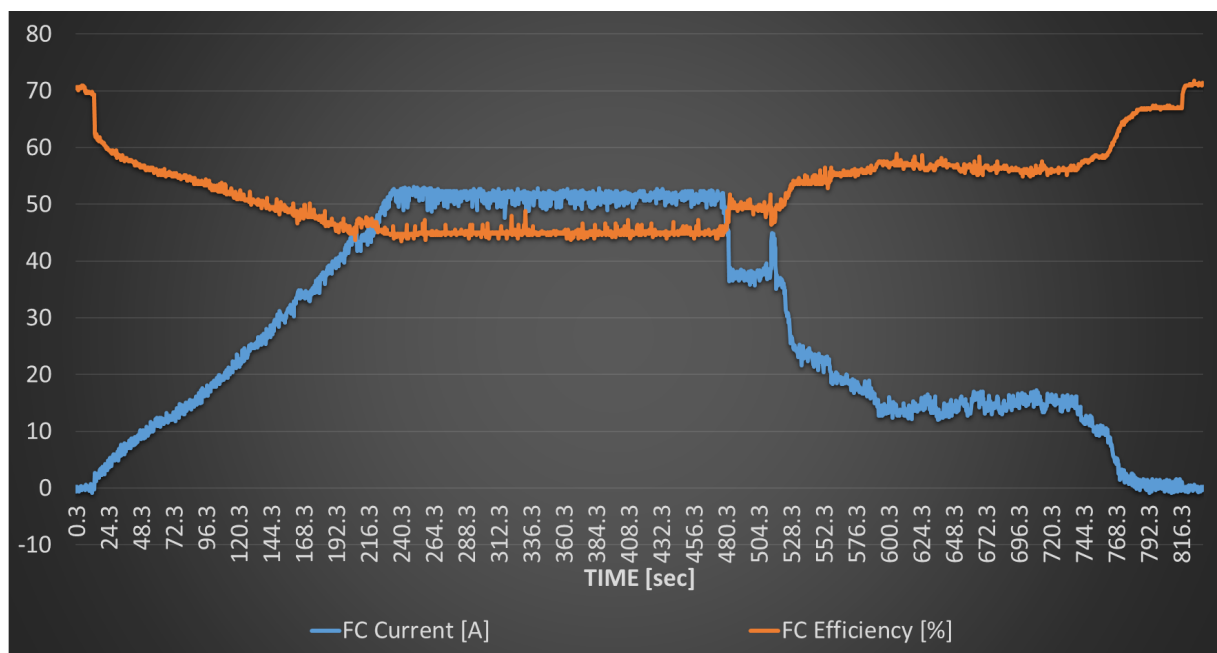
Χρησιμοποιώντας την κατώτερη θερμογόνο δύναμη, η συνολική ενέργεια του υδρογόνου είναι $33.3 \frac{\text{kW} \cdot \text{hrs}}{\text{kg}}$. Επομένως, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου είναι [3]:

$$H_2 \text{ Efficiency} = \frac{H_2 \text{ Instantaneous Efficiency}}{33.3} \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.9: 3ο Πείραμα: Πειραματικό διάγραμμα LHV βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με την παραγωγή ρεύματος.

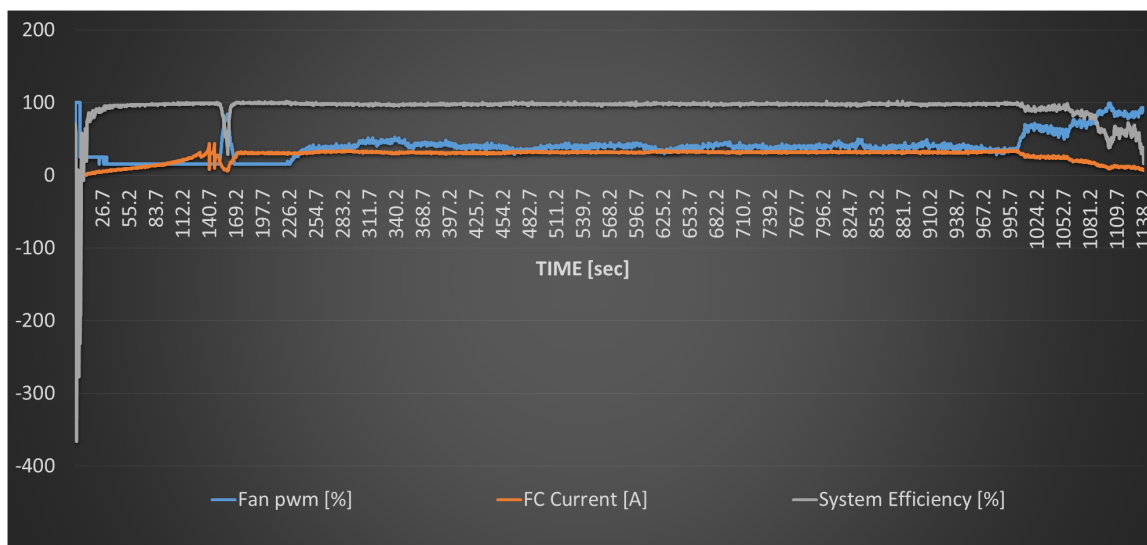
Στο Σχήμα 5.9 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα μειώνεται ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς όσο αυξάνεται το ρεύμα που παράγεται αυξάνεται και η θερμική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου. Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στα 18A είναι στο 55%, ενώ ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης της φαίνεται να είναι περίπου 70% σε πολύ μικρά ρεύματα.



Σχήμα 5.10: 4ο Πείραμα: Πειραματικό διάγραμμα LHV βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με παραγωγή ρεύματος σε διαφορετικό εύρος τιμών ρεύματος.

Στο Σχήμα 5.10 παρατηρείται η πτώση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με την αύξηση του ρεύματος. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης ξεκινά από το 70% και όταν ξεκινήσει η παραγωγή ρεύματος πέφτει άμεσα στο 60%. Από αυτό το σημείο και μετά ακολουθεί μια γραμμική συμπεριφορά όπου όσο αυξάνεται το ρεύμα τόσο μειώνεται ο βαθμός απόδοσης.

Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου αναφέρεται στην μετατροπή της ηλεκτροχημικής ενέργειας του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Τα παραπάνω γραφήματα αναπαριστούν αυτού του είδους το βαθμό απόδοσης. Έπειτα από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου ξεκινά και η μέτρηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος της κυψέλης καυσίμου. Όπως έχει αναφερθεί η κυψέλη καυσίμου για να λειτουργήσει χρειάζεται διάφορα υποσυστήματα που την υποστηρίζουν τα οποία τα τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια η ίδια η κυψέλη καυσίμου. Επομένως ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται τροφοδοτεί τα υποσυστήματα και ένα άλλο τροφοδοτεί το φορτίο. Ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την κατανάλωση των υποσυστημάτων. Η πλακέτα που ελέγχει την κυψέλη καυσίμου καταναλώνει περίπου σταθερά 8 Watt όπως επίσης και καθεμία από τις βαλβίδες εισαγωγής και απομάκρυνσης καταλοίπων. Το υποσύστημα που επηρεάζει αρκετά τον βαθμό απόδοσης του συστήματος είναι αυτό της ροής-ψύξης, όπου ο ανεμιστήρας σε κατανάλωση φτάνει τα 100 Watt.



Σχήμα 5.11: Πειραματικό διάγραμμα του βαθμού απόδοσης του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου.

Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε σχέση με την % λειτουργία του ανεμιστήρα αλλά και το ρεύμα που παράγεται από τη κυψέλη καυσίμου κάθε στιγμή. Παρατηρείται ότι στα πρώτα δευτερόλεπτα λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης έχει μεγάλες αρνητικές τιμές καθώς η κυψέλη καυσίμου δεν παράγει ρεύμα και τα υποσυστήματα λαμβάνουν την απαραίτητη ισχύ από τους υπερπυκνωτές όπου έχει αποθηκευτεί ενέργεια από προηγούμενο πείραμα. Στη συνέχεια όσο ο ανεμιστήρας βρίσκεται σε χαμηλές στροφές παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης βρίσκεται στο εύρος τιμών 95-98% καθώς η ισχύ που δαπανά ο ανεμιστήρας είναι πολύ μικρότερη από τη συνολική. Αντίθετα, στην αύξηση στροφών του ανεμιστήρα παρατηρείται αρκετά μειωμένο βαθμό απόδοσης καθώς ο ανεμιστήρας προσπαθεί να ψύξει το σύστημα και η τιμή του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου μειώνεται εκείνη τη χρονική στιγμή.

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική έρευνα στα είδη των κυψελών καυσίμου που υπάρχουν σήμερα, καθώς και στον τρόπο λειτουργίας του κάθε είδους. Στο τέλος του κεφαλαίου 2 εξεζητήθηκε η θεωρητική λειτουργία της PEM κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιείται στο ηλεκτρικό όχημα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έρευνα για την προσομοίωση της PEM κυψέλης καυσίμου, παραθέτοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν το θερμικό και ηλεκτρικό μοντέλο της. Έπειτα έγινε υλοποίηση του μοντέλου σε περιβάλλον προσομοίωσης Simulink, εξάγοντας συμπεράσματα για τη λειτουργική απόκριση της κυψέλης καυσίμου αλλά και ρυθμίσεις παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο πραγματικό σύστημα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υλοποίηση του πραγματικού συστήματος δίνοντας αρχικά μια περιγραφή για τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και εκείνα που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, όπως τα τυπωμένα κυκλώματα αλλά και το λογισμικό ελέγχου που αναπτύχθηκε. Τέλος παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις μαζί με χρήσιμα συμπεράσματα για το σύστημα της κυψέλης καυσίμου αλλά και για την απόδοσή της.

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό όχημα σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (συσσωρευτές, υπερπυκνωτές). Το σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται για απότομες εναλλαγές ισχύος, ενώ η κυψέλη καυσίμου σε σταθερή λειτουργία για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας με το βέλτιστο δυνατό βαθμό απόδοσης. Για την κατασκευή των κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανακυκλώσιμα υλικά και σε συνδυασμό τροφοδοσίας τους με υδρογόνο μπορούν να αποτελέσουν μια φιλική προς το περιβάλλον διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη του θεωρητικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου και η μελέτη του σε περιβάλλον προσομοίωσης συνέβαλε στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου αλλά και των ορίων λειτουργίας του συνολικού-συστήματος. Τα διάφορα σενάρια που υλοποιήθηκαν βοήθησαν στην επιλογή του ανεμιστήρα ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ροής όγκου αέρα και διαφοράς πίεσης, καθώς και στη ρύθμιση του PID ελεγκτή με στόχο της επίτευξη της ιδανικής θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου. Από το ηλεκτρικό μοντέλο εξήχθησαν αποτελέσματα για την πτώση τάσης που δημιουργούν οι διαφορετικές συνθήκες και πόσο επηρεάζεται η κυψέλη καυσίμου από αυτές. Η υλοποίηση της παραπάνω έρευνας συνοδεύθηκε από μία σειρά από συμπεράσματα τα οποία αφορούν τις κυψέλες καυσίμου ως διατάξεις αλλά και τη λειτουργική τους απόκριση. Επιπλέον μέσα από τα πειράματα προέκυψαν διάφορα συμπεράσματα για το συνολικό σύστημα, αλλά και πιθανή βελτίωση για την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος.

Η κυψέλη καυσίμου που μελετήθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας έχει μεταβαλλόμενο βαθμό απόδοσης ο οποίος εξαρτάται από το ρεύμα που παράγει αλλά και από τις συνθήκες στις οποίες λειτουργεί. Μέσα από τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η κυψέλη

καυσίμου χρειάζεται κάποιο χρόνο λειτουργίας για να πετύχει την επιθυμητή λειτουργία. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί και το οξυγόνο αντιδρά με το υδρογόνο αυξάνονται τα επίπεδα υγρασίας πάνω στη μεμβράνη και επίσης το εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου αποκτά την επιθυμητή θερμοκρασία, συμβάλλοντας έτσι στην παραγωγή ρεύματος με το βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Ακόμη παρατηρήθηκε πως η απομάκρυνση καταλοίπων αποτελεί σημαντική διαδικασία η οποία συμβάλει στην αύξηση του βαθμού απόδοσης της κυψέλης καυσίμου εμποδίζοντας τα διάφορα μη-επιθυμητά αέρια να προκαλέσουν πτώση τάσης και συνεπώς μείωση του βαθμού απόδοσης.

Σε ένα αερόφυκτο σύστημα όπως αυτό της κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στο ηλεκτρικό όχημα, το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης ισχύος πέραν από το φορτίο είναι ο ανεμιστήρας ψύξης. Με τη βοήθεια της προσομοίωσης επιλέχθηκε ο κατάλληλος ανεμιστήρας ο οποίος ικανοποιεί τις απαιτήσεις οξυγόνου για αντίδραση με το υδρογόνο, αλλά και τις απαιτήσεις ψύξης. Με την επιλογή του ανεμιστήρα για τη συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου μειώθηκε η κατανάλωση του συστήματος ψύξης, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης του συστήματος αλλά και του οχήματος καθώς μειώθηκε το βάρος κατά ένα κιλό από τον προτεινόμενο ανεμιστήρα του κατασκευαστή. Η εφαρμογή μεγαλύτερου ανεμιστήρα θα διασφάλιζε καλύτερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε θερμότερο περιβάλλον άνω των 34°C , αλλά θα υπήρξε πρόβλημα σε ψυχρότερες συνθήκες της τάξης των 10°C . Η κυψέλη καυσίμου θα υπερψυχόταν σε ένα τέτοιο περιβάλλον με την ελάχιστη ροή που θα επιτύγχανε ο ανεμιστήρας.

Ο αεραγωγός που κατευθύνει το οξυγόνο στην κυψέλη καυσίμου αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές διατάξεις σε ένα αερόφυκτο σύστημα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο αεραγωγός δεν μελετήθηκε, αλλά υλοποιήθηκε με εμπειρικό τρόπο μελετώντας αεραγωγούς παλαιότερων κυψελών καυσίμου που υπήρχαν διαθέσιμοι στο εργαστήριο. Δοκιμάζοντας δύο διαφορετικούς αεραγωγούς παρατηρήθηκε έντονη αλλαγή στον βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει καθώς ο αεραγωγός δημιουργεί μια επιπλέον διαφορά πίεσης στο σύστημα. Η διαφορά πίεσης επηρεάζει άμεσα τον ανεμιστήρα καθώς με μεγαλύτερη διαφορά πίεσης χρειάζεται περισσότερη ισχύ για την παραγωγή της ίδιας ροής οξυγόνου.

Συνεπώς η περεταίρω μελέτη της λειτουργίας και σχεδίασης του αεραγωγού θα βοηθήσει στην κατασκευή μιας μελετημένης γεωμετρίας η οποία θα διαχέει ομοιόμορφα το οξυγόνο στην κυψέλη καυσίμου με την ελάχιστη δυνατή διαφορά πίεσης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την περεταίρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Larminie and A. Dicks, "Fuel cell systems explained", 2nd ed. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2003.
- [2] J. M. Andújar and F. Segura, "PEFC Simulator and Real Time Monitoring System," Fuel Cells, vol. 15, no. 6, pp. 813–825, Dec. 2015, doi: 10.1002/fuce.201500128.
- [3] Ballard, <https://www.ballard.com/>, Putting fuel cells to work, "Product Manual and Integration Guide" Dec.2015
- [4] Ballard, <https://www.ballard.com/>, Putting fuel cells to work, "Quick start guide" Nov.2014
- [5] Ballard, <https://www.ballard.com/>, FCgen-1020ACS/FCvelocity-1020ACS Fuel Cell Stack , "Product specification" Oct.2014
- [6] K. Ondrejčka, V. Ferencey, and M. Stromko, "Modeling of the air-cooled PEM fuel cell," International Federation of Automatic Control-PapersOnLine, vol. 52, no. 27, pp. 98–105, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.740.
- [7] F. J. Vivas, A. de las Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, "Cell voltage monitoring All-in-One. A new low cost solution to perform degradation analysis on air-cooled polymer electrolyte fuel cells," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, no. 25, pp. 12842–12856, May 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.172.
- [8] <https://nedstack.com/en/pem-fcs-stack-technology>
- [9] Xianguo L. Principles of fuel cells. New York, London: Taylor and Francis, 1962
- [10] H. Vaghari, H. Jafarizadeh-Malmiri, A. Berenjian, and N. Anarjan, "Recent advances in application of chitosan in fuel cells," Sustainable Chemical Processes, vol. 1, no. 1, pp. 1-12, Dec. 2013, doi: 10.1186/2043-7129-1-16.
- [11] A. Abaspour, N. Tadrissi Parsa, and M. Sadeghi, "A New Feedback Linearization-NSGA-II based Control Design for PEM Fuel Cell," International Journal of Computer Applications, vol. 97, no. 10, pp. 25–32, Jul. 2014, doi: 10.5120/17044-7354.
- [12] R. Govindarasu and S. Somasundaram, "Studies on Influence of Cell Temperature in Direct Methanol Fuel Cell Operation," Processes, vol. 8, no. 3, pp. 1-10, Mar. 2020, doi: 10.3390/pr8030353.