



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY
OF CRETE

Ηλεκτρονικά Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας

Project Εξαμήνου

Research Paper: #3
Milestone: 4

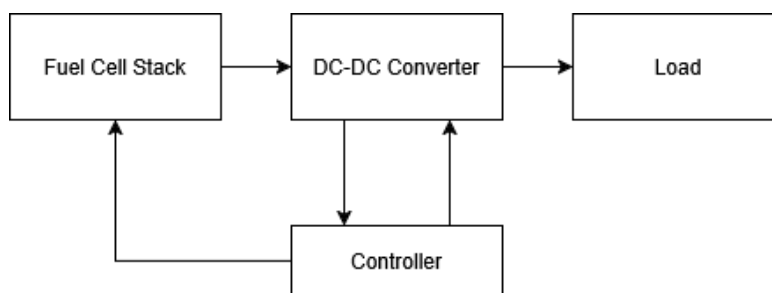
Μπελέσης Ιωάννης Παναγιώτης
AM: 2022030167
Οικονομίδης Κωνσταντίνος
AM: 2021030075

1) Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη εργασία βασίζεται στο ερευνητικό paper με τίτλο «A new control algorithm for increasing efficiency of PEM fuel cells – Based boost converter using PI controller with PSO method». Σκοπός είναι η εξερεύνηση της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας με πολλαπλά fuel cells (multi-stack) και έναν DC-DC Converter σε σχέση με τα «παραδοσιακά» single-stack συστήματα που απαιτούν πολλαπλούς converter και έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

1.1) Single-Stack Διάταξη

Πολλά single-stack συστήματα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, όπως ελαφρά οχήματα ή εφεδρείες. Μία συνηθισμένη διάταξη ενός single-stack συστήματος φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1: Διάταξη με ένα single-stack fuel cell

Παρόλο που τα single-stack συστήματα είναι απλά στην υλοποίηση έχει παρατηρηθεί πως έχουν χαμηλή αποδοτικότητα και ανθεκτικότητα, υψηλό κόστος και μη επιθυμητή αξιοπιστία, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος.

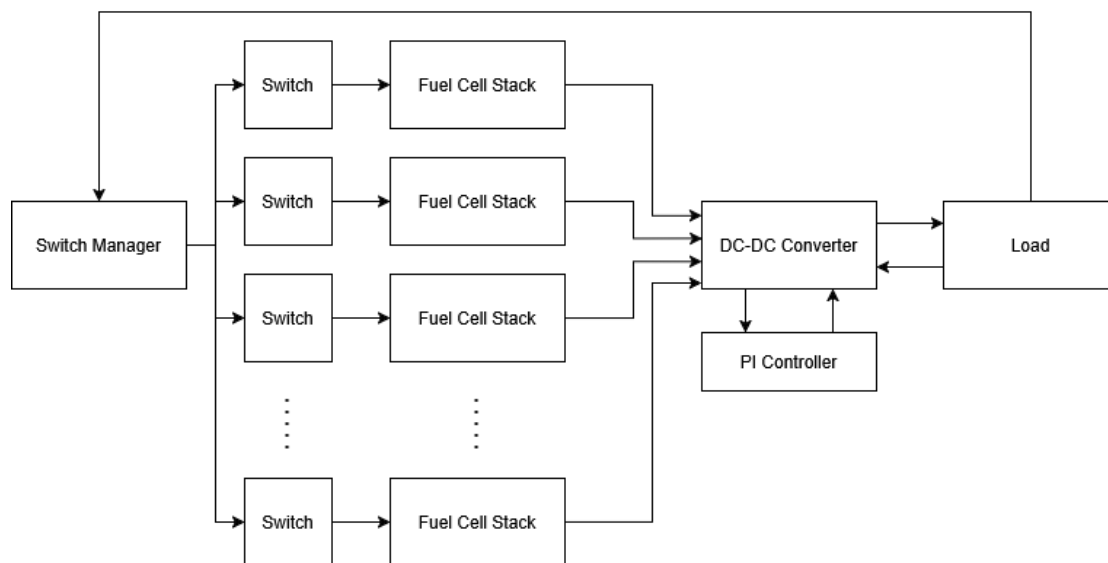
1.2) Multi-Stack Διάταξη

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται multi-stack συστήματα τα οποία λύνουν αρκετά από τα παραπάνω προβλήματα

και επιπλέον έχουν μεγαλύτερη ανοχή σφαλμάτων καθώς αν ένα fuel cell stack αποτύχει, τα υπόλοιπα μπορούν να καλύψουν την ζήτηση ισχύος.

Οι multi-stack διατάξεις μπορούν να πραγματοποιηθούν βάζοντας τα fuel cells σε σειρά ή παράλληλα. Οι σε σειρά διατάξεις έχουν αρκετά εμπόδια να αντιμετωπίσουν σχετικά με την ροή του αερίου και της θερμότητας, οπότε προτιμούνται συστήματα με παράλληλη διάταξη. Τέτοια συστήματα έχουν σταθερότητα και μπορούν εύκολα να επεκταθούν.

Η παράλληλη διάταξη που θα μελετηθεί σε αυτή την εργασία φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2: Multi-stack διάταξη fuel cell με έναν converter

Τα βέλη στο διάγραμμα αναπαριστούν την ανταλλαγή πληροφορίας από το ένα στοιχείο στο άλλο. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε πολλαπλά fuel cell stacks (units) τα οποία συνδέονται παράλληλα σε έναν DC-DC converter. Ο converter χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση της τάσης και του ρεύματος και συνδέεται απευθείας με το φορτίο. Καθώς θέλουμε το πλήθος των fuel cell stacks που είναι διαθέσιμα να είναι μεταβλητό, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ελεγκτή για την ρύθμιση του duty-cycle του converter ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση εξόδου. Ένας απλός PI controller παρατηρεί την έξοδο του converter για τυχών αποκλίσεις και κάνει αυτόματη διόρθωση της ρύθμισης του converter.

Επιπλέον, επειδή θέλουμε να έχουμε μεταβλητό φορτίο, έχουμε switches/regulators που ελέγχουν την λειτουργία ενός fuel cell stack και έναν Switch Manager/Controller για τον συντονισμό των πολλαπλών switches. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παρέχουμε την ισχύ που χρειάζεται το φορτίο ανοίγοντας ή κλείνοντας μεμονωμένα τα fuel cell stacks. Είναι ξεκάθαρο πως χρειάζεται ο switch manager να γνωρίζει τις απαιτήσεις του φορτίου και αυτό επιτυγχάνεται με την μέτρηση της τάσης και του ρεύματος του φορτίου και τον υπολογισμό της ζητούμενης ισχύς.

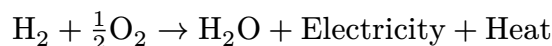
Με την παραπάνω διάταξη, γίνεται χρήση ενός multi-stack συστήματος με μόνο έναν converter άρα μειώνοντας αρκετά το κόστος εγκατάστασης.

Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση του μοντέλου κάθε στοιχείου στην διάταξη (fuel cell stack, DC-DC converter, load, PI controller, switch manager) με σκοπό την προσομοίωση της μέσω του MatLab Simulink.

2) Στοιχεία Διάταξης

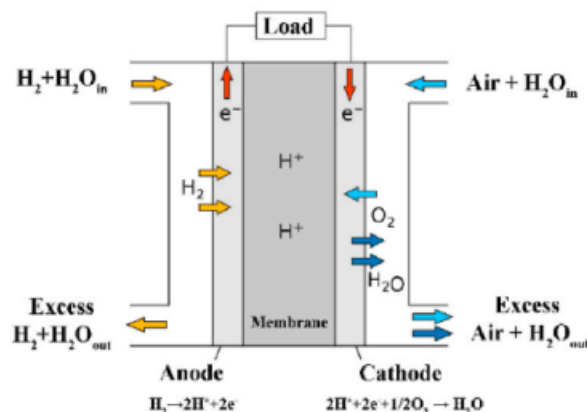
2.1) PEM Fuel Cell model

Ένα PEM Fuel Cell είναι μια μονάδα που παράγει ηλεκτρισμό μέσω του υδρογόνου, σύμφωνα με την χημική σχέση:



Αποτελείται από την **άνοδο**, όπου το υδρογόνο εισέρχεται και διαχωρίζεται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια, την **μεμβράνη PEM**, που επιτρέπει στα πρωτόνια να περάσουν από μέσα της για να πάνε στην κάθοδο, το **κύκλωμα**, που αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να ακολουθήσουν μια άλλη διαδρομή, δημιουργώντας έτσι το ηλεκτρικό ρεύμα και την **κάθοδο**, που τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο του αέρα ενώνονται και σχηματίζουν το νερό (H_2O) που βγαίνει.

Ακολουθεί το σχηματικό διάγραμμα ενός PEMFC, όπως δίνεται από το paper:



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα PEM Fuel Cell (από το paper)

2.2) DC-DC Converter

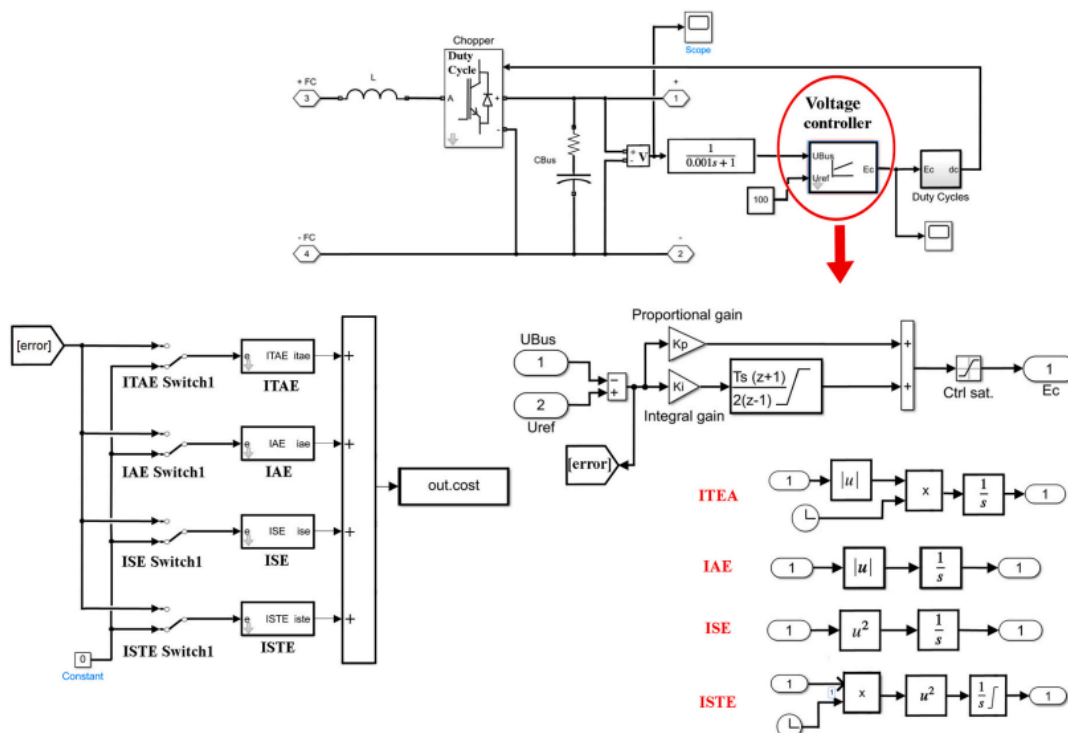
Ο DC-DC converter χρησιμοποιείται για αυξηθεί η χαμηλή τάση που παράγουν τα PEMFCs και να μειώσει το ρεύμα από την πηγή στο φορτίο. Επίσης ο converter εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της τάσης και ελέγχει την κατανομή του ρεύματος στα παράλληλα cells για να αποφευχθεί οποιαδήποτε καταπόνηση.

Η ιδιότητα που εκμεταλλευόμαστε και επιτρέπει τα παραπάνω, είναι η αποθήκευση ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο, όταν ο διακόπτης (IGBT) κλείνει, και η έκλυση της προς το φορτίο όταν ο διακόπτης ανοίξει.

Για να έχουμε σταθερή τάση ανεξάρτητα από τον αριθμό των fuel cell stack που είναι συνδεδεμένα, το duty cycle του converter ελέγχεται από έναν εξωτερικό controller όπως αναλύεται παρακάτω. Όταν έχουμε λιγότερα fuel cells διαθέσιμα, τότε πρέπει να μειωθεί η συχνότητα με την οποία ο converter ανοιγοκλείνει. Στην αντίθετη περίπτωση που έχουμε περισσότερα fuel cells διαθέσιμα, η συχνότητα του

converter πρέπει να αυξηθεί ώστε να μην ξεπεραστεί η τάση λειτουργίας που έχουμε ορίσει.

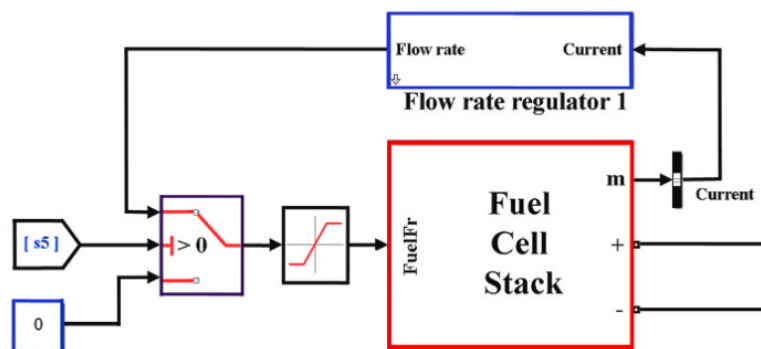
Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση όπως φαίνεται στο paper:



Εικόνα 4: Σχηματικό διάγραμμα dc-dc converter (από το paper)

2.3) Fuel Cell Switch

Ένα fuel cell switch είναι πρακτικά ένας ελεγκτής που ρυθμίζει την λειτουργία του fuel cell. Συγκεκριμένα, ένα switch ελέγχει την ροή υδρογόνου και οξυγόνου προς το fuel cell stack. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με βάση μία εξωτερική τιμή που παρέχεται από τον switch manager η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως on/off.

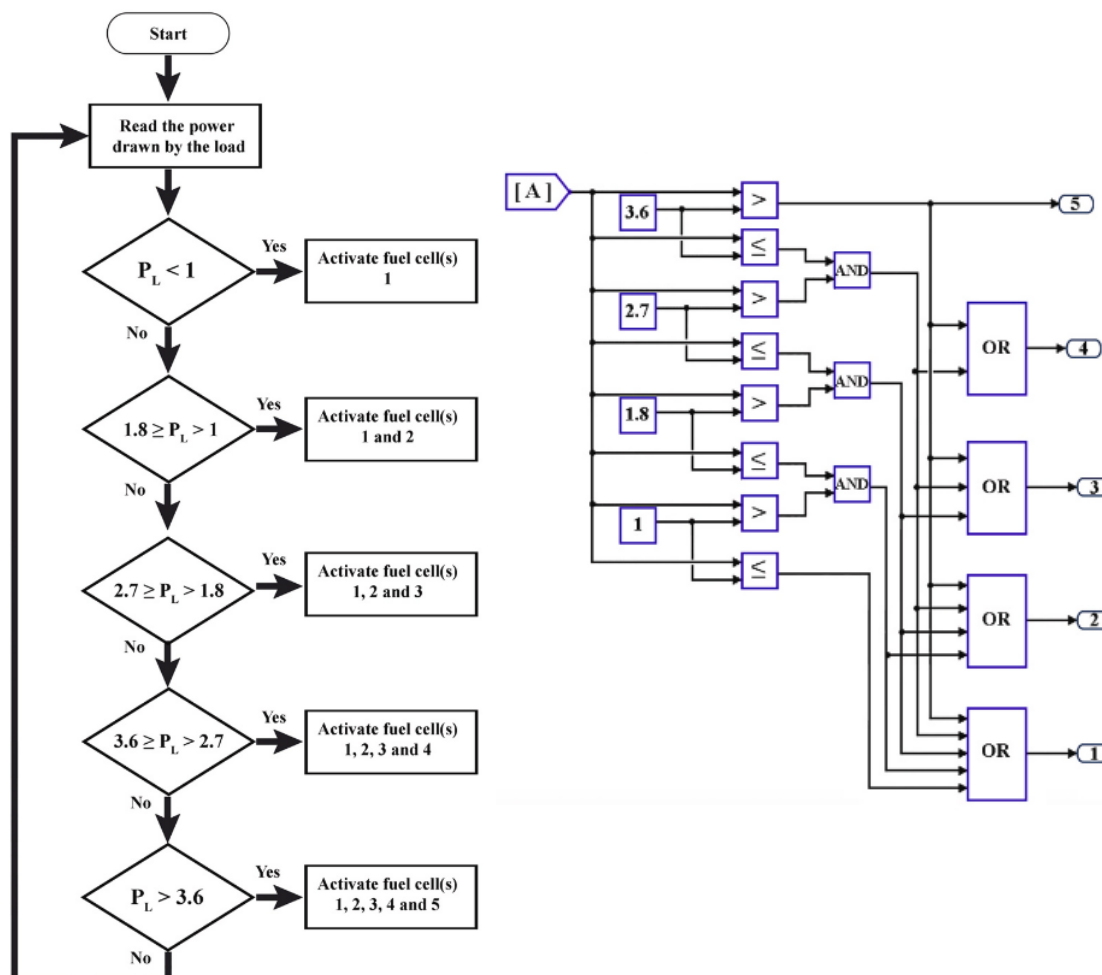


Εικόνα 5: Fuel Cell with switch (από το paper)

Ο flow rate regulator είναι απαραίτητος για να μπορέσει να διατηρηθεί η διαδικασία της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται εσωτερικά στο fuel cell stack.

2.4) Switch Manager/Controller

Ο σκοπός του switch manager είναι αρκετά απλός, παρατηρώντας την ζητούμενη ισχύ του φορτίου υπολογίζει τον αριθμό των fuel cell stack που χρειάζονται για να την παρέχουν και ενεργοποιεί/απενεργοποιεί αναλόγως τα fuel cell stack που διαχειρίζεται. Παρακάτω φαίνεται η λογική με την οποία ενεργοποιούνται τα fuel cells και το block diagram για την υλοποίηση αυτής της λογικής.



Εικόνα 6: Switch manager activity diagram (αριστερά)
Switch manager control block diagram (δεξιά)
(Από το paper)

2.5) PI Controller

Ο PI Controller, παίρνει ως είσοδο την διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της επιθυμητής τάσης από την έξοδο του converter, έτσι ώστε να διορθώσει οποιαδήποτε σφάλματα. Ο Controller επεμβαίνει με απόκριση ανάλογη του μεγέθους του σφάλματος(P) και εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, δουλειά του controller είναι να ελέγχει την τάση να μην αυξομειώνεται απότομα όταν το φορτίο αλλάζει και να κρατούνται σε σωστά επίπεδα(< 2%) τα όρια διακύμανσης. Οι παράμετροι του ελεγκτή ορίζονται με βάση τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης PSO.

2.6) PSO Optimization

Για την σωστή λειτουργία του συστήματος απαιτείται παραμετροποίηση του PI Controller. Η διαδικασία της παραμετροποίησης χρειάζεται αρκετή ώρα αν γίνει χειροκίνητα και είναι δύσκολο αν επιτευχθούν βέλτιστες τιμές. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων K_p και K_I του ελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αυτοματοποιήσουμε την διαδικασία της παραμετροποίησης του ελεγκτή και ταυτόχρονα να βρούμε τις βέλτιστες τιμές ώστε να έχουμε σταθερή τάση στην έξοδο του.

2.7) Φορτίο/Load

Το φορτίο, στο οποίο συνδέεται το σύστημα, μοντελοποιείται ως ένα ωμικό-επαγωγικό φορτίο μεταβλητής ισχύος.. Η μεταβολή του φορτίου μοντελοποιεί την απρόβλεπτη φύση ενός τέτοιου φορτίου και γίνεται κατά την προσομοίωση του συστήματος για την δοκιμή της δυναμικής συμπεριφοράς του.

Στο paper λαμβάνονται υπόψη οι εξής τιμές:

1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW, 4.5 kW, 5 kW, 6 kW

Περισσότερες τιμές μπορούν να δοκιμαστούν για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του συστήματος.

3) Προσομοίωση - Milestone #2

Η προσομοίωση του συστήματος γίνεται στο Simulink της MatLab και χρειάζεται να υπάρχει ένα μοντέλο για κάθε κομμάτι του συστήματος μας που περιγράφει την λειτουργία και συμπεριφορά του.

3.1) Μοντέλο Fuel Cell Stack

Για το μοντέλο του fuel cell χρησιμοποιήσαμε την σχέση (2) του paper η οποία περιγράφει την τάση που παράγεται στα άκρα εξόδου του fuel cell. Η σχέση προκύπτει από το εμπειρικό μοντέλο Mann.

$$V_{\text{stack}} = N_{\text{cells}} \cdot (E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\Omega} - V_{\text{con}})$$

Η τάση E_{nernst} είναι η θερμοδυναμική τάση που παράγεται από την αντίδραση στο εσωτερικό του fuel cell και είναι η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου που μπορεί θεωρητικά να παράγει το fuel cell.

Η V_{act} είναι η τάση που χάνεται λόγω της χημικής αντίδρασης στην επιφάνεια των υλικών.

Η V_{Ω} είναι οι ωμικές απώλειες στο fuel cell

Η V_{con} μοντελοποιεί το υπερ-δυναμικό συγκέντρωσης που χάνεται όταν η αντίδραση καταναλώνεται ταχύτερα από ότι μπορεί να τροφοδοτηθεί.

Οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν οι παραπάνω μεταβλητές φαίνονται παρακάτω:

$$E_{\text{nernst}} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{\text{fc}} - 298.15) + 4.3085 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{fc}} \cdot \ln(P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}})$$

$$V_{\text{act}} = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 T_{\text{fc}} + \varepsilon_3 T_{\text{fc}} \ln(C_{\text{O}_2}) + \varepsilon_4 T_{\text{fc}} \ln(I_{\text{fc}}))$$

$$C_{\text{O}_2} = \left(\frac{P_{\text{O}_2}}{5.08 \cdot 10^6} \right) \cdot e^{\frac{498}{T_{\text{fc}}}}$$

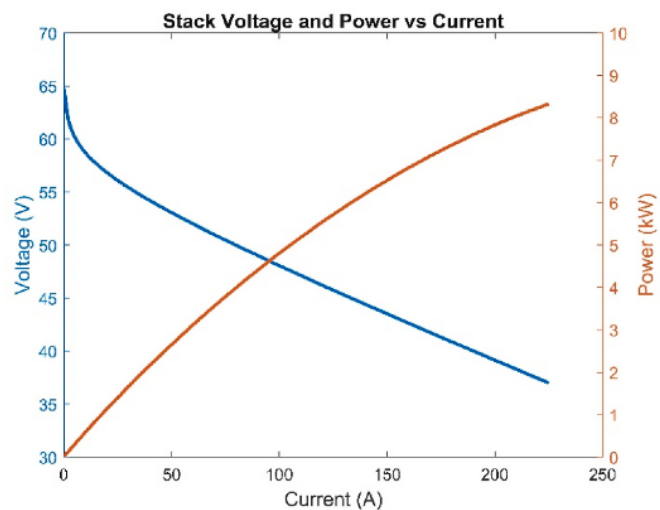
$$V_{\Omega} = I_{\text{fc}} \cdot (R_{\text{m}} + R_{\text{c}})$$

$$R_{\text{m}} = \frac{\rho_{\text{m}} \cdot l}{M_{\text{A}}}$$

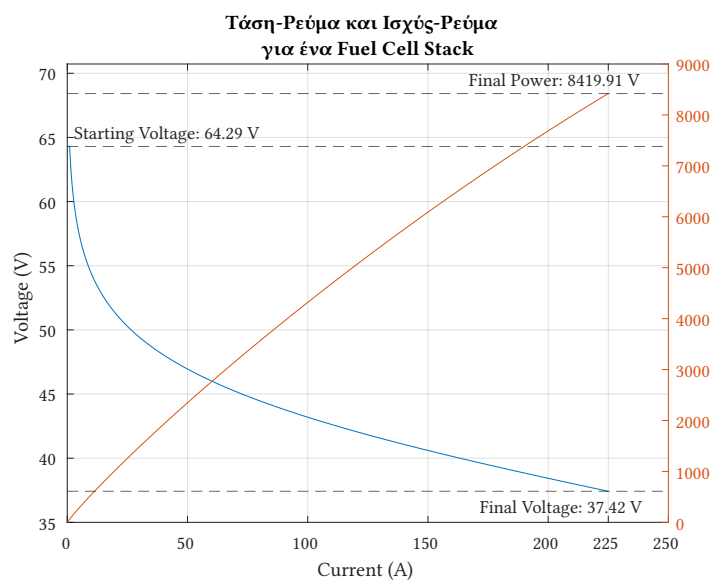
$$\rho_{\text{m}} = \frac{181.6 \cdot \left(1 + 0.03 \left(\frac{I_{\text{fc}}}{M_{\text{A}}} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{\text{fc}}}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{\text{fc}}}{M_{\text{A}}} \right)^{2.5} \right)}{\left(\lambda - 0.634 - 3 \frac{I_{\text{fc}}}{M_{\text{A}}} \right) \cdot e^{4.18 \frac{T_{\text{fc}} - 303}{T_{\text{fc}}}}}$$

$$V_{\text{con}} = -\beta \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}} \right)$$

$$J = \frac{I_{\text{fc}}}{M_{\text{A}}}$$



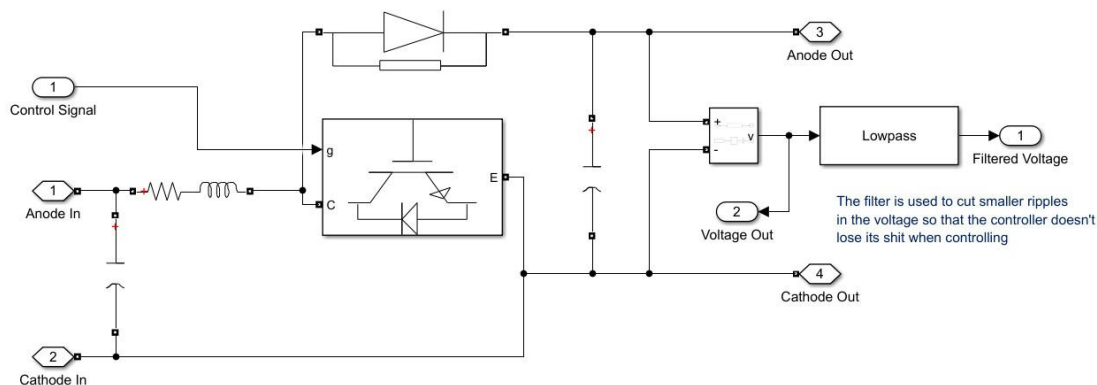
Εικόνα 8: Τάση-Ρεύμα και ισχύς στο μοντέλο fuel cell stack του paper



Εικόνα 9: Γραφική Τάσης-Ρεύματος στο fuel cell stack μοντέλο μας

3.2) Μοντέλο Converter

Ο converter που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση είναι ένας Boost-Converter που χρησιμοποιεί IGBT Transistor για το switching. Η υλοποίηση του στο simulink φαίνεται παρακάτω:



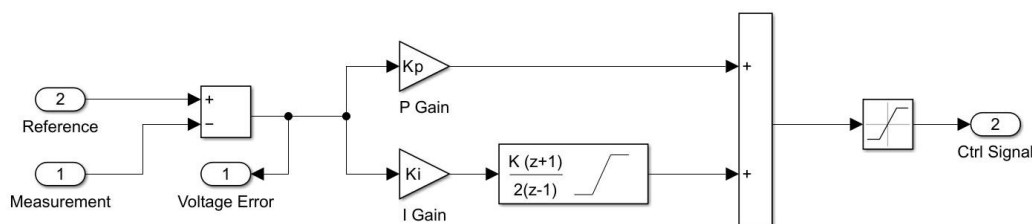
Εικόνα 10: Διάγραμμα Boost-Converter

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι το transistor που λειτουργεί ως διακόπτης, το πηνίο που αποθηκεύει την ηλεκτρική και η δίοδος που ολοκληρώνει την επιστροφή του κυκλώματος. Ο πυκνωτής υπάρχει για την σταθεροποίηση της εξόδου, όπως και το βαθυπερατό φίλτρο.

Ο converter έχει το σήμα Control Signal το οποίο ελέγχει την κατάσταση on/off. Το σήμα αυτό ελέγχεται από έναν PI Controller όπως φαίνεται παρακάτω.

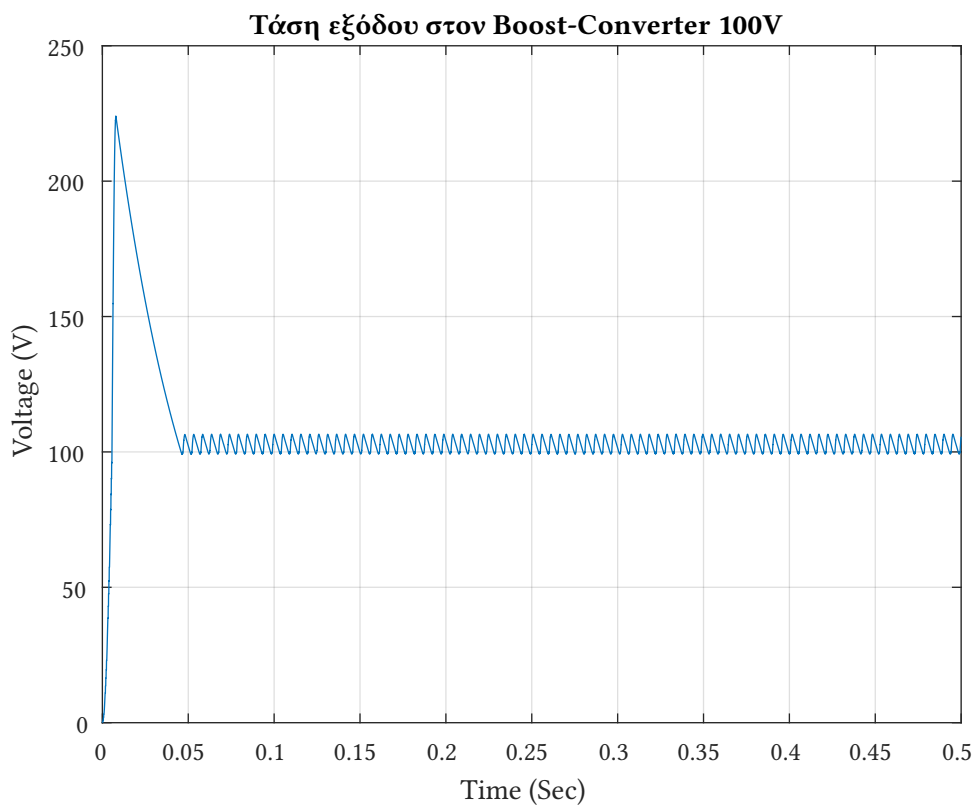
3.3) PI Controller

Ο PI controller δημιουργεί το σήμα ελέγχου του converter ανάλογα με την τάση εξόδου και το reference. Η δομή του φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 11: PI Controller

Γίνεται σύγκριση του reference με την μέτρηση και εφαρμόζονται τα gains K_p και K_i ανάλογα. Στο τέλος, υπάρχει ένα saturation block για να εφαρμόσουμε μέγιστη και ελάχιστη τιμή στο σήμα εξόδου.

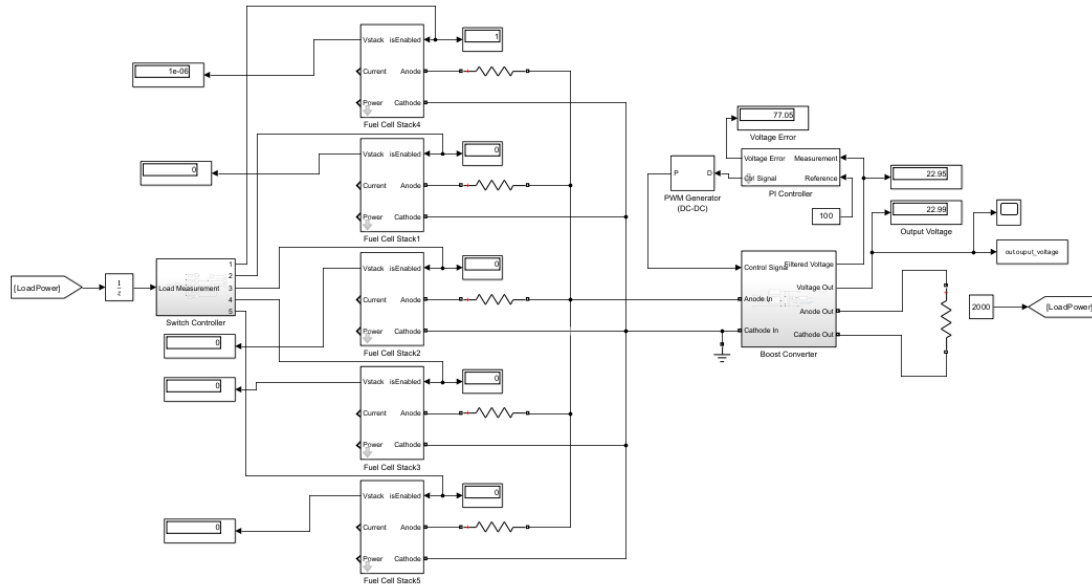


Εικόνα 13: Τάση εξόδου του Boost Converter
για στόχο των 100V και 2 fuel cell stacks

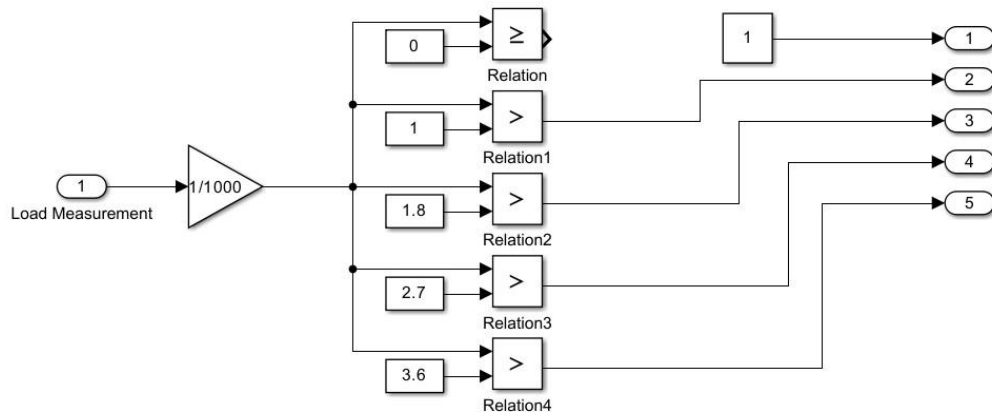
Παρατηρούμε η έξοδος του συστήματος κυμαίνεται κοντά στον στόχο μας. Ταυτόχρονα όμως βλέπουμε πως υπάρχει μία αρκετά μεγάλη υπέρταση στην αρχή της προσομοίωσης καθώς και μία συνεχής ταλάντωση στην έξοδο του converter. Η ταλάντωση αυτή δημιουργείται από το switching που γίνεται στο εσωτερικό του converter.

4) Υλοποίηση των stack switches - Milestone #3

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, βασικός στόχος ήταν η υλοποίηση του switch manager για 5 fuel cells. Για να το πετύχουμε αυτό αλλάξαμε την διάταξη του συνολικού συστήματος στην παρακάτω:



Εικόνα 14: Block διάγραμμα με τον switch manager, εξαρτώμενο από την ισχύ
Ο switch controller φαίνεται παρακάτω:



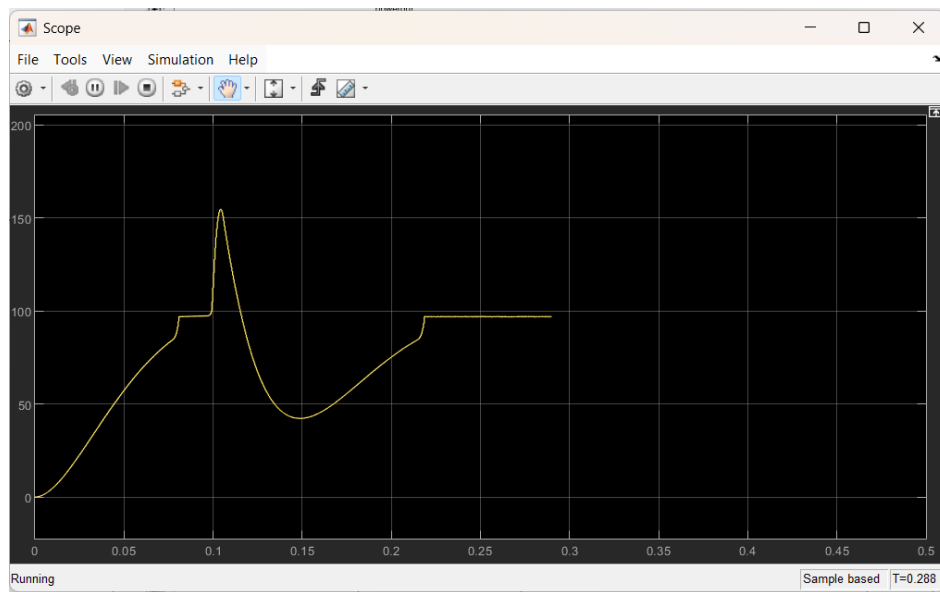
Εικόνα 15: Block diagram του Switch Controller

Γίνεται ενεργοποίηση των fuel cell ανάλογα με το φορτίο.

Για να υποστηρίζεται αυτό, έγινε τροποποίηση των fuel cell ώστε να έχουν ένα on/off σήμα ελέγχου.

Πριν εφαρμόσουμε τον PSO αλγόριθμο για την βέλτιστη εκτίμηση των τιμών K_p και K_i , δοκιμάσαμε δικές μας τιμές στον PI Controller για δεδομένο φορτίο, για να

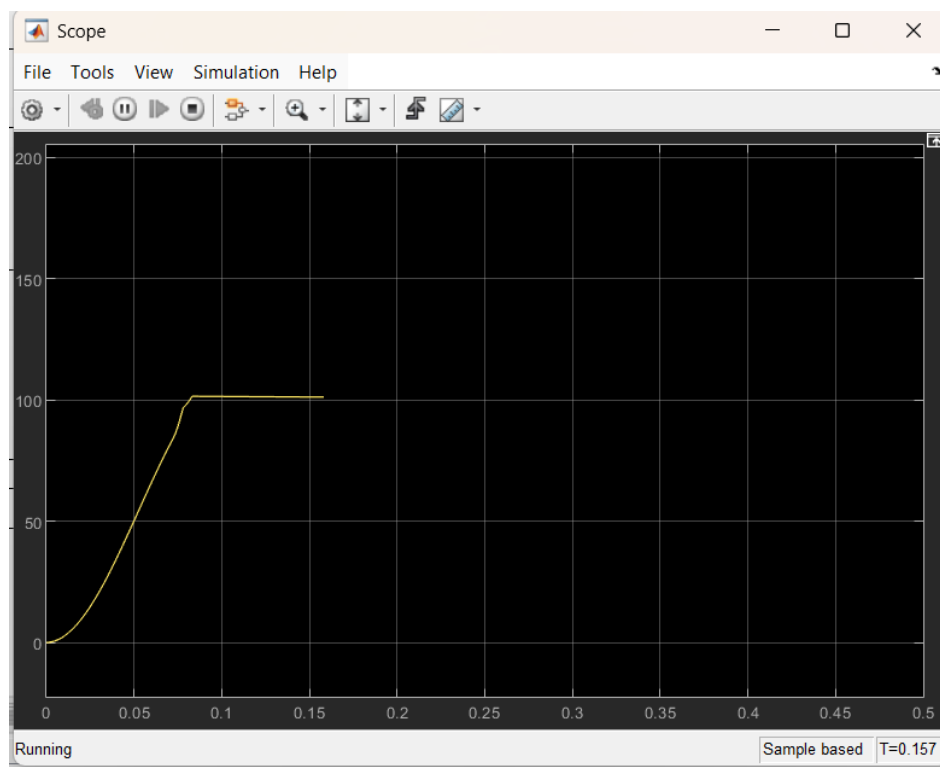
διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του switch manager. Συγκεκριμένα για $P=2000W$, $R_{load} = 5\Omega$, $K_p = 0.05$, $K_i = 0.35$, λάβαμε το εξής αποτέλεσμα:



Εικόνα 16: Τάση εξόδου του Boost Converter για τυχαίες τιμές K_p και K_i και φορτίο 2kW

Η γραφική αυτή παρουσιάζει πολύ μεγάλο overshoot(φτάνει τα 150V), πιθανότατα λόγω των τιμών K_p και K_i που μπήκαν τυχαία.

Παρακάτω φαίνεται και άλλη προσπάθεια με φορτίο 5kΩ, με Unit delay στην είσοδο και τιμές $K_p = 0.016$ και $K_i = 0.036$:

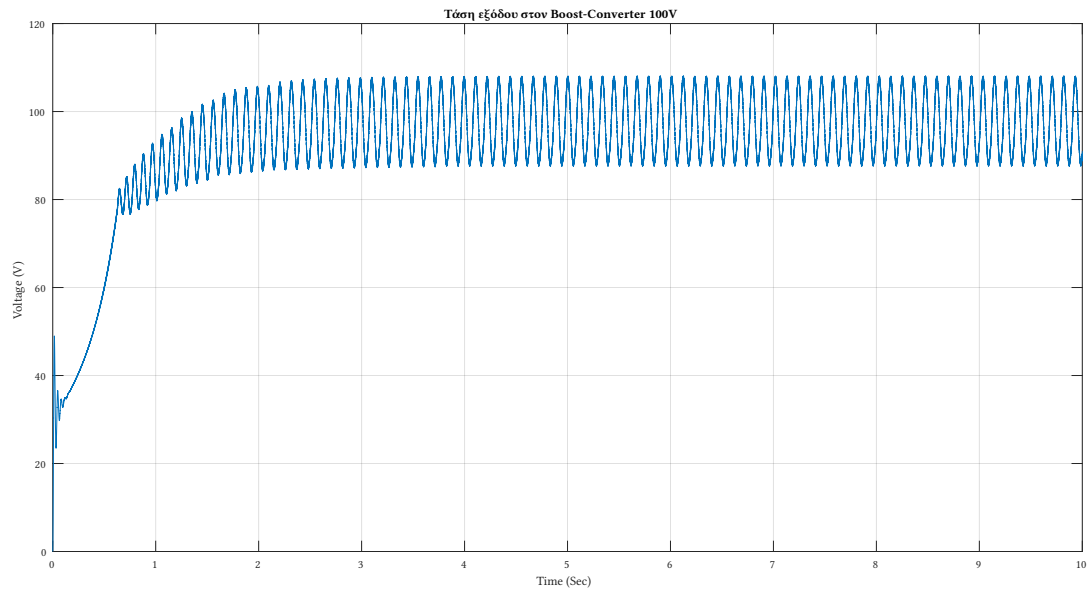


Εικόνα 17: Τάση εξόδου του Boost Converter για φορτίο 5kΩ με $K_p = 0.016$ και $K_i = 0.036$

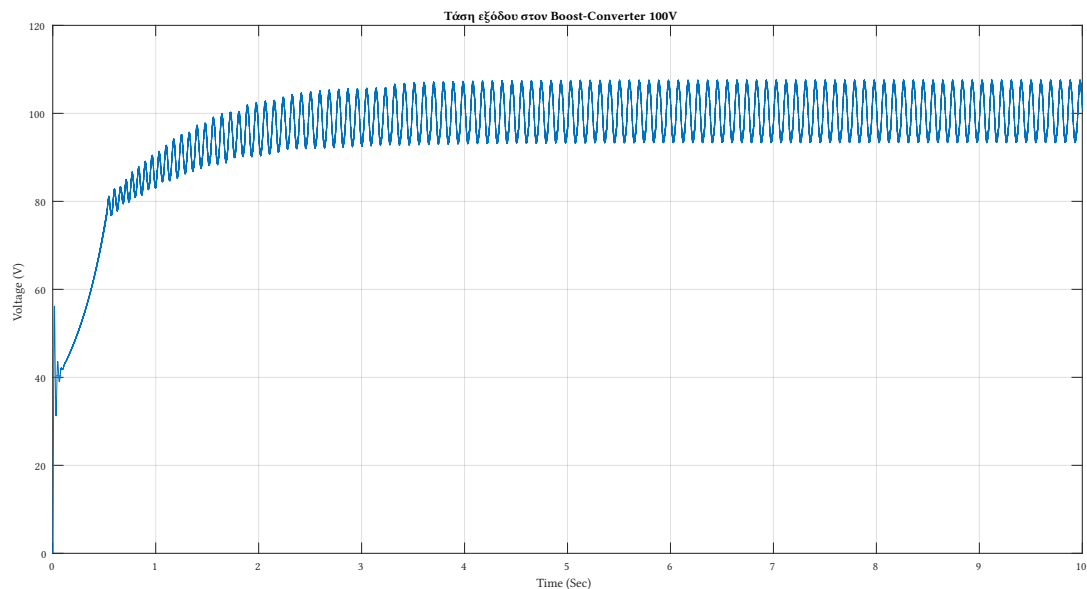
5) Δοκιμή με διάφορα φορτία - Milestone #4

5.1) Πριν την εφαρμογή PSO

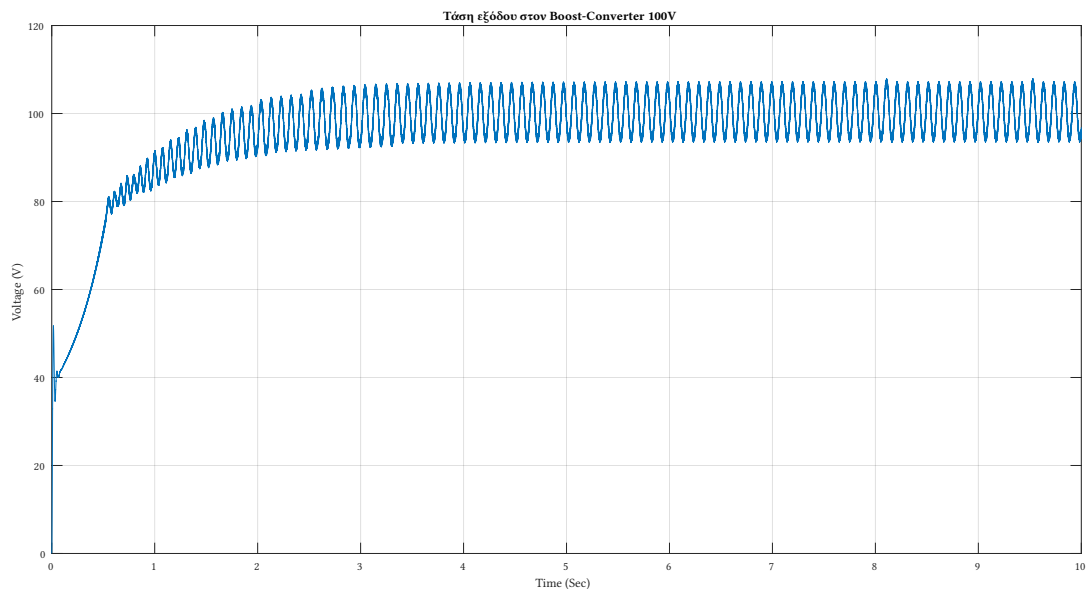
Πριν γίνει χρήση των παραμέτρων που προέκυψαν από το PSO Optimization του paper, η έξοδος του συστήματος είχε απόκριση σαν αυτή στα παρακάτω γραφήματα:



Εικόνα 18: Τάση εξόδου του Boost Converter στην μόνιμη κατάσταση (10 second) για φορτίο 3kW



Εικόνα 19: Τάση εξόδου του Boost Converter στην μόνιμη κατάσταση (10 second) για φορτίο 4.5kW



Εικόνα 20: Τάση εξόδου του Boost Converter στην μόνιμη κατάσταση (10 second) για φορτίο 6kW

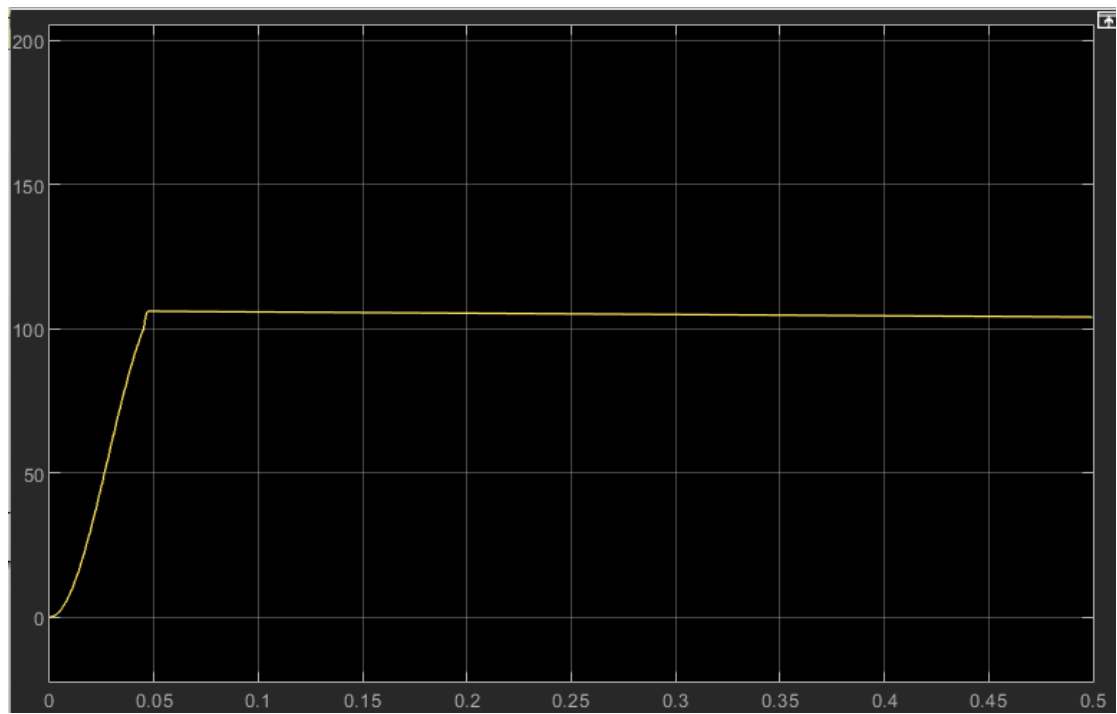
Παρατηρούμε πως παρόλο που άλλαξε το φορτίο το σύστημα φτάνει την τάση εξόδου των 100V.

Επιπλέον φαίνεται ξεκάθαρα πως καθώς η τάση πλησιάζει την επιθυμητή τιμή των 100V, αρχίζει να εμφανίζεται μια ταλάντωση περίπου στα 10 Hz. Αυτό οφείλεται στον PI Controller και τα στοιχεία του Boost Converter που μαζί ελέγχουν την τελική τάση εξόδου. Ο controller δεν μπορεί μόνο με τις τιμές των παραμέτρων P και I ($K_p = 0.0055$, $K_i = 0.012$) να κάνει απόσβεση της ταλάντωσης, αντιθέτως φαίνεται να την ενισχύει μέχρι να σταθεροποιηθεί το πλάτος της. Μαζί με τα στοιχεία LC του converter επιτυγχάνεται η ταλάντωση $\pm 10\%$ της επιθυμητής εξόδου.

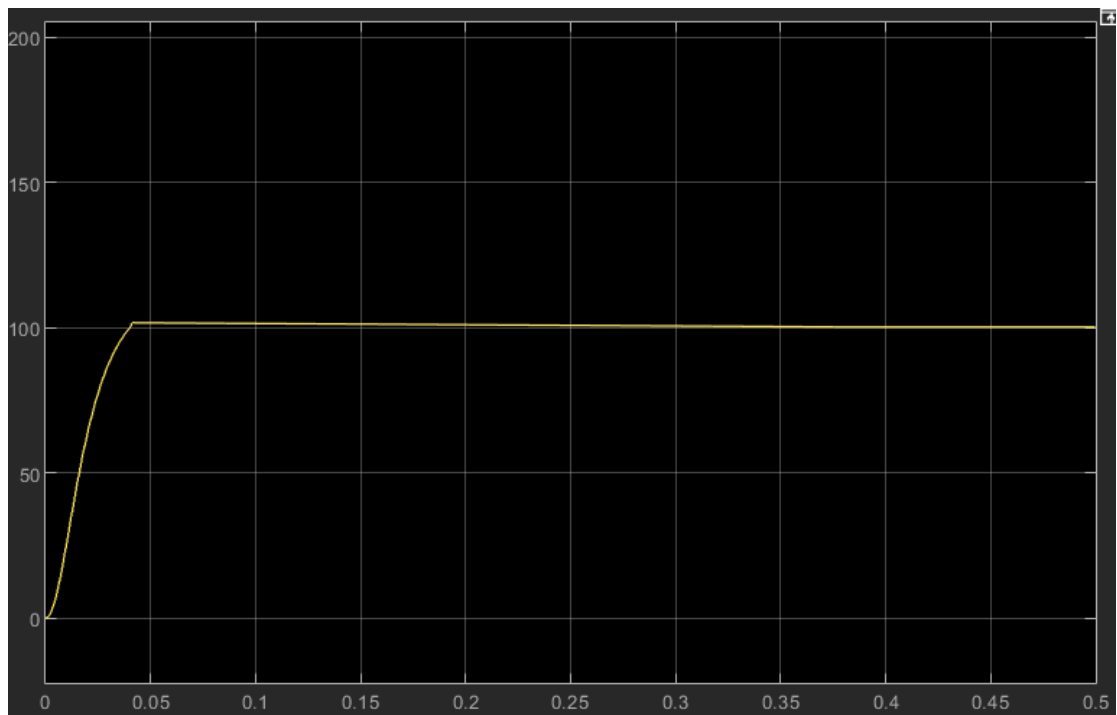
5.2) Μετά την εφαρμογή PSO

Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η απόκριση του συστήματος είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του controller του converter. Καθώς η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι μια πολύ αργή διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν η τιμές που προέκυψαν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του paper στο οποίο είναι βασισμένη αυτή η εργασία.

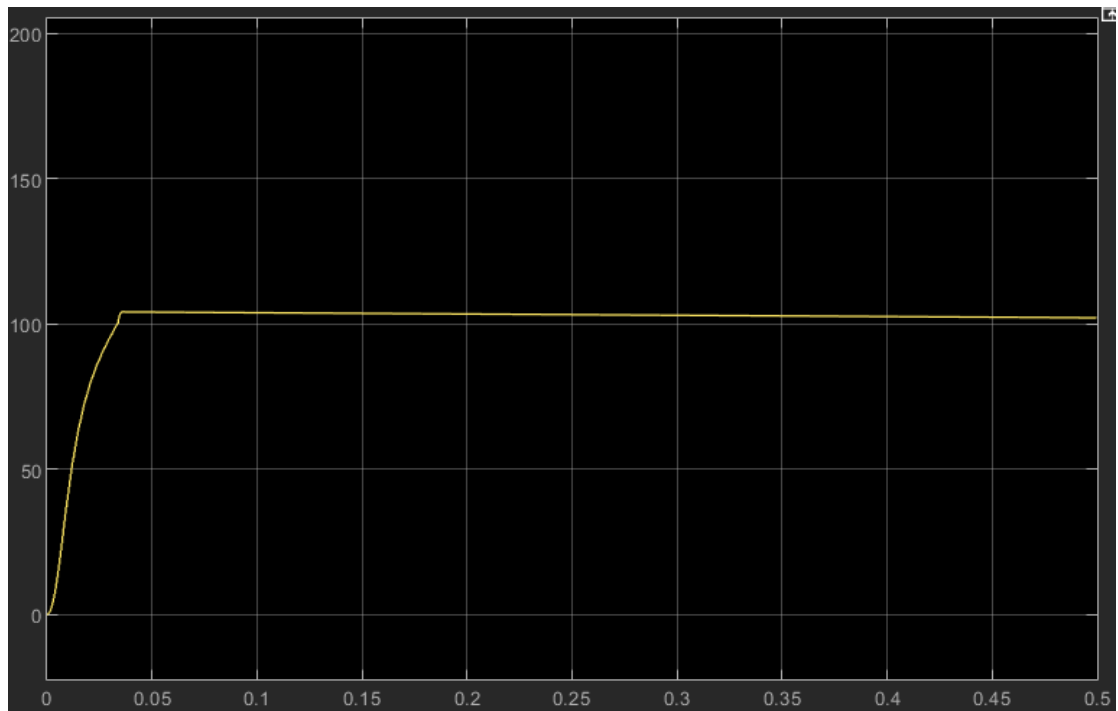
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του Simulink για διαφορετικά φορτία. Σε κάθε φορτίο, οι παράμετροι K_i και K_p έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα ανάλογα με το φορτίο, με βάση τα αποτελέσματα του PSO αλγορίθμου.



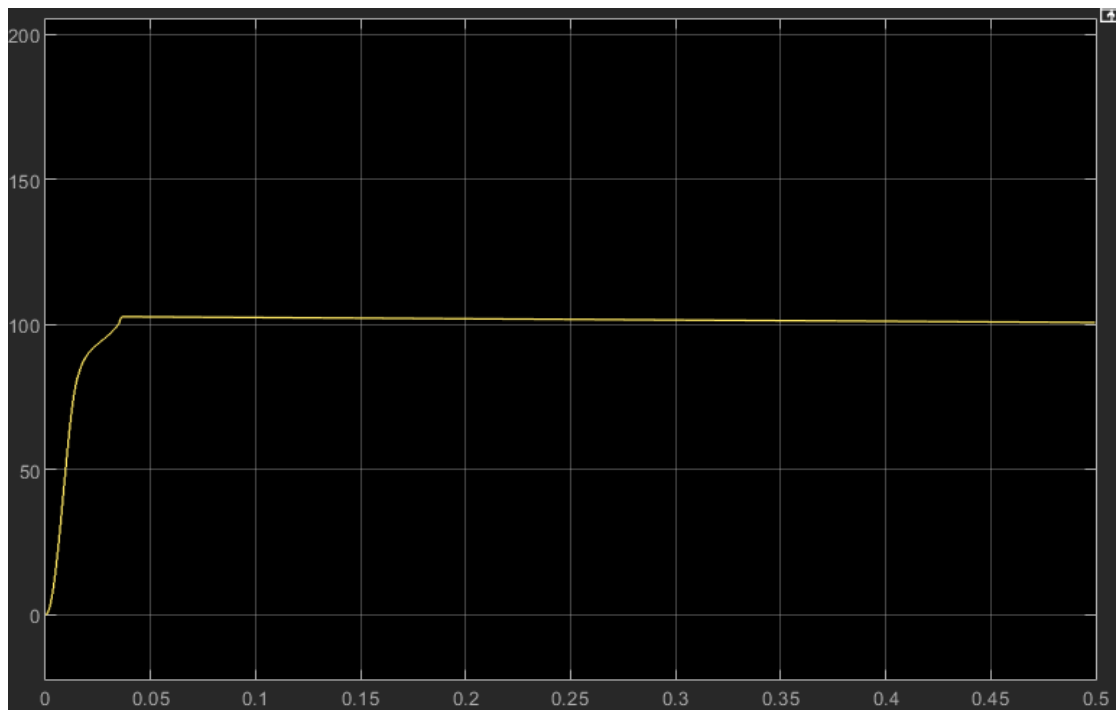
Εικόνα 21: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 1kW, $K_p = 0.004$, $K_i = 0.76$



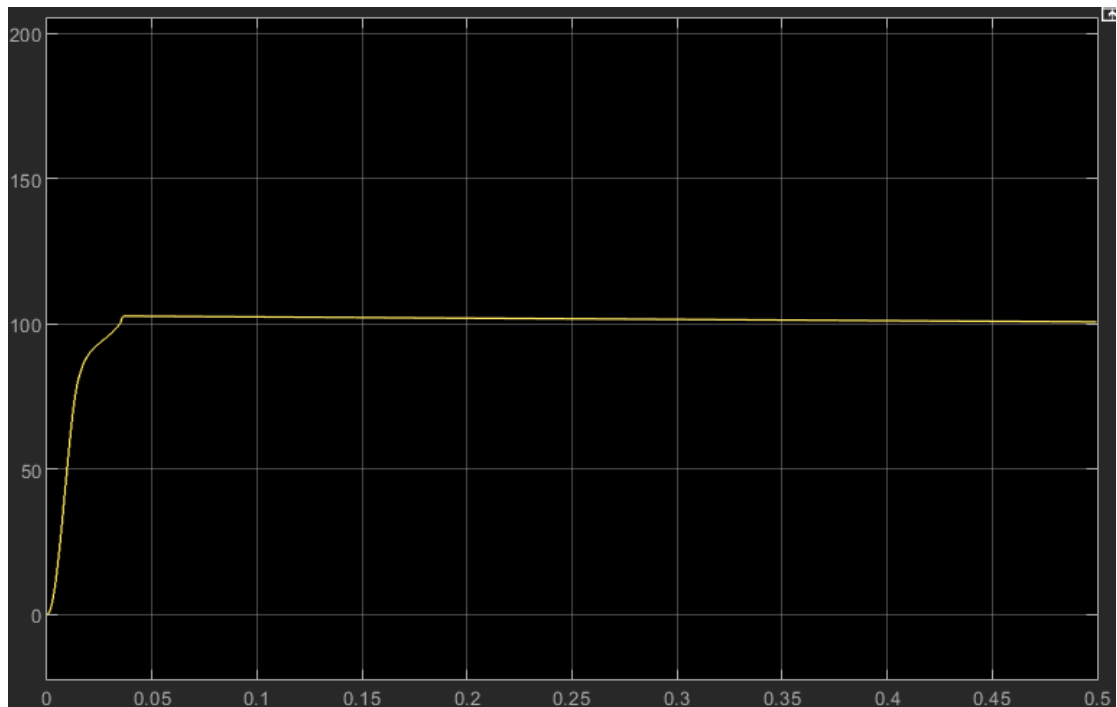
Εικόνα 22: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 2kW, $K_p = -0.004$, $K_i = 0.76$



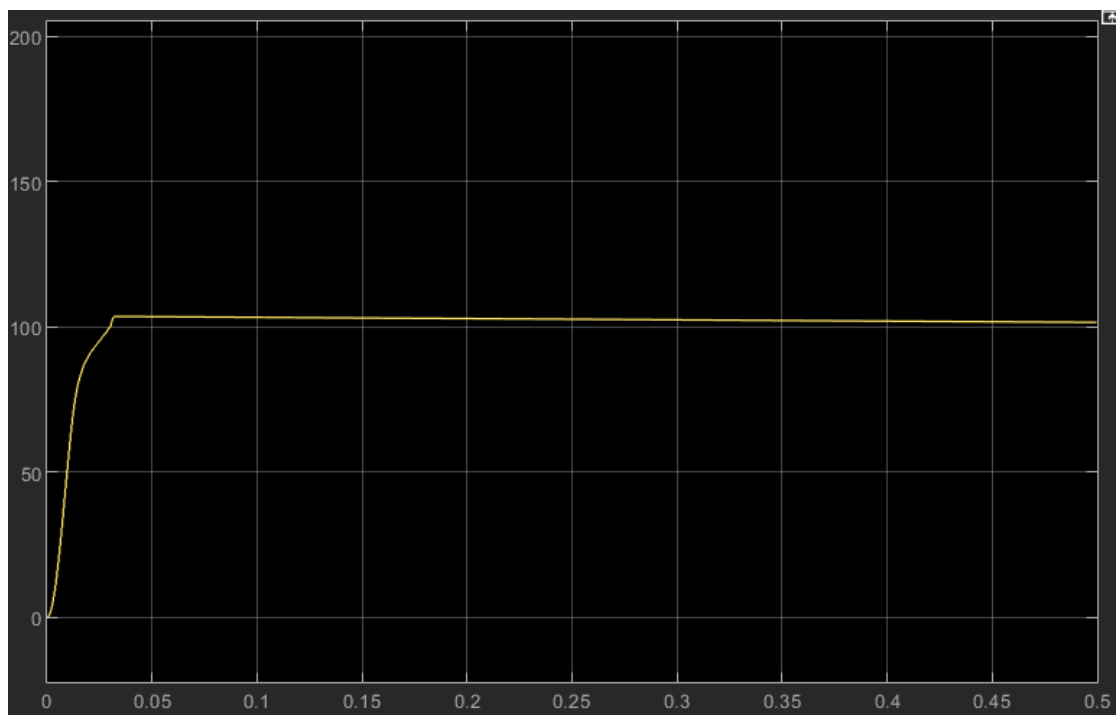
Εικόνα 23: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 3kW, $K_p = -0.008$, $K_i = 0.76$



Εικόνα 24: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 4kW, $K_p = -0.021$, $K_i = 0.76$



Εικόνα 25: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 4.5kW, $K_p = -0.021$, $K_i = 0.76$



Εικόνα 26: Τάση εξόδου του Boost Converter
για φορτίο 6kW, $K_p = 0.002$, $K_i = 0.037$

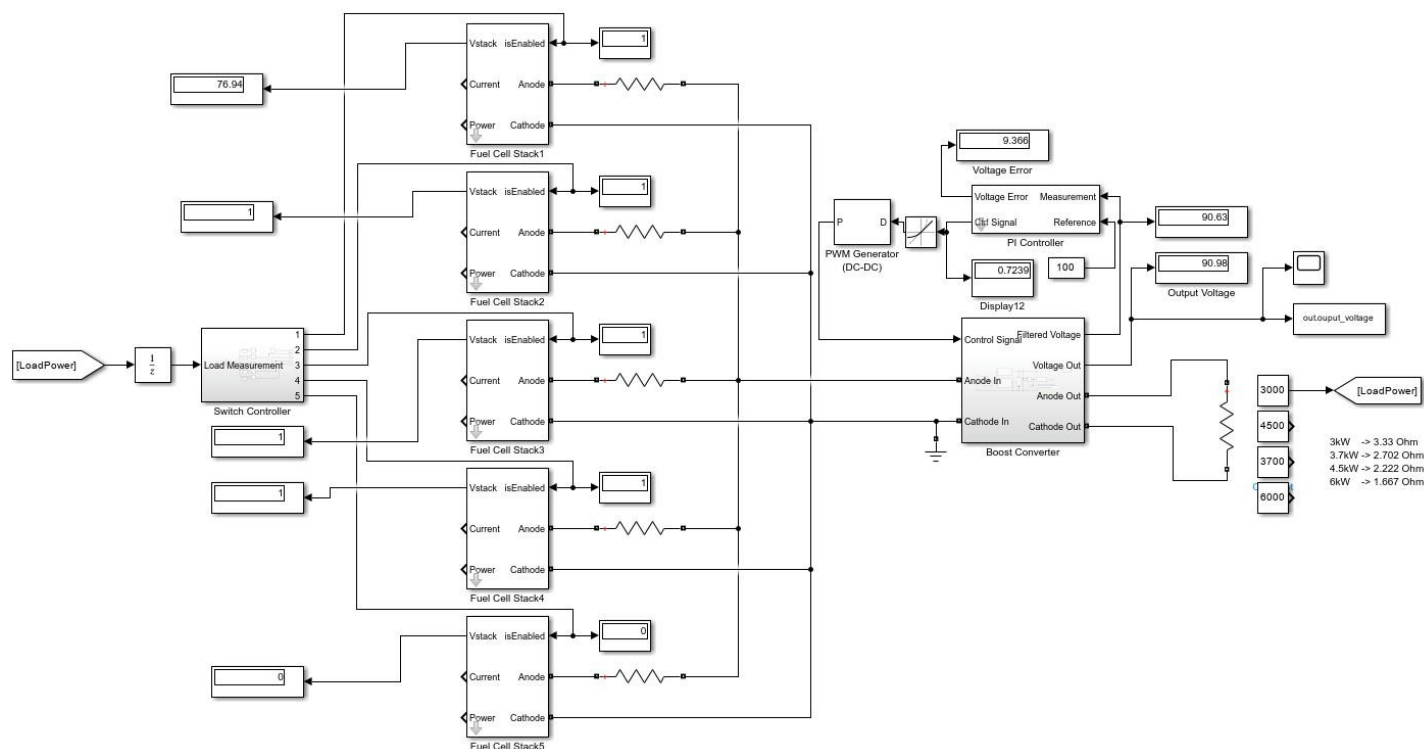
Βλέπουμε πως δεν υπάρχουν πλέον ταλαντώσεις στο σήμα εξόδου, το οποίο αμέσως ανεβαίνει λίγο πιο πάνω από την επιθυμητή τάση και φθίνει σιγά-σιγά μέχρι τα 100V. Παρόλο που το φορτίο αλλάζει από γράφημα σε γράφημα, καθώς και ο αριθμός των fuel cell stack που τροφοδοτούν το σύστημα, η μορφή της

γραφικής παράστασης έχει πολύ μικρές αλλαγές και η τιμή της μόνιμης κατάστασης παραμένει σταθερή.

6) Τελική επισκόπηση & συμπεράσματα

6.1) Επισκόπηση λειτουργίας

Μια τελική επισκόπηση του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω block διάγραμμα:



Εικόνα 27: Top-Level block διάγραμμα συστήματος

Η καρδιά του συστήματος απαρτίζεται από τα fuel cell stacks, τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα και τον boost converter. Κάθε fuel cell stack μπορεί μόνο του να παρέχει τάση έως ~65V καθώς κάθε fuel cell παρέχει τάση μικρότερη ή ίση με ~1V και σε κάθε stack υπάρχουν 65 fuel cell συνδεδεμένα σε σειρά. Όμως η πραγματική τάση εξόδου εξαρτάται από το ρεύμα που τραβάει το φορτίο και μπορεί να φτάσει μέχρι την τιμή των ~12V.

Τα παράλληλα fuel cell stacks συνδέονται με τον boost converter ο οποίος ανυψώνει την τάση μέχρι την επιθυμητή τιμή λειτουργίας (πχ. 100V). Ο converter ελέγχεται από έναν PI controller ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται στις αλλαγές του φορτίου. Για τον έλεγχο, μεσολαβεί ένας PWM generator που μετατρέπει την έξοδο του controller σε παλμούς που ελέγχουν το εσωτερικό IGBT του converter.

Επιπλέον ο switch controller θέτει τα μεμονομένα fuel cell stacks σε λειτουργία ανάλογα με την ισχύ του συνδεδεμένου φορτίου. Καθώς το σύστημα υλοποιείται ως προσομοίωση στο Simulink, η ισχύς του φορτίου δεν μετράται απευθείας από την αντίσταση που δρα ως φορτίο στο σύστημα αλλά παρέχεται ως σταθερά για την αποφυγή των feedback loop.

Συνολικά, το σύστημα επιτυγχάνει να παρέχει σταθερή DC τάση κάνοντας χρήση μόνο ενός boost converter και ταυτόχρονα να αντιδρά σε μεταβολές τόσο στο φορτίο όσο και στην παροχή ενέργειας.

6.2) Συμπεράσματα & Σχόλια

Από την υλοποίηση και προσομοίωση του συστήματος, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. Τα fuel cells μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία φορτίων με σταθερή DC τάση χωρίς να χρειάζονται πολλαπλοί DC-DC converters, μειώνοντας έτσι δραματικά το κόστος μιας εγκατάστασης.
2. Μπορεί να γίνει χρήση πολλαπλών διατάξεων (σειρά, παράλληλα) από fuel cell ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή τάση εξόδου.
3. Καθώς τα fuel cell είναι παράλληλα και μπορούν να ενεργοποιηθούν/απενεργοποιηθούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, υπάρχει μεγάλη δυναμικότητα στο σύστημα για διαφορετικά φορτία
4. Η λειτουργία του PI controller έχει μεγάλη επίδραση στην έξοδο του συστήματος, οπότε η βέλτιστη λειτουργία δεν είναι μόνο επιθυμητή αλλά απαραίτητη.
5. Όσο περισσότεροι είναι οι παράλληλοι κλάδοι των fuel cell stack, τόσο πιο εύελικο και επεκτάσιμο είναι το σύστημα.
6. Η χρήση ενός controller για τον boost converter, δίνει στο σύστημα την δυνατότητα να ανταποκριθεί στις αλλαγές της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, διαπιστώσαμε τα εξής από την λειτουργία του συστήματος:

1. Υπάρχει σχετικά χαμηλό όριο της μέγιστης τάσης μέχρι την οποία μπορεί να κάνει ανύψωση ο boost converter. Το όριο αυτό θα μπορούσε να αυξηθεί αν γινόταν χρήση ενός multi-step ή πολυφασικού converter. Με αυτόν το τρόπο θα μπορούσε να γίνει ανύψωση σε μεγαλύτερες τιμές τάσης και θα υπήρχε μια στοιχίωδη αντιμετώπιση των ταλαντώσεων.
2. Καθώς η ευαισθησία του PI controller είναι μεγάλη, θα μπορούσε να γίνει χρήση ενός PID Controller ή και νέων τεχνικών όπως Fuzzy Logic Control και ο έλεγχος με Neural Networks.
3. Στην παρούσα υλοποίηση του συστήματος, η λογική ενεργοποίησης ενός fuel cell stack είναι πολύ απλοϊκή. Αν ο αριθμός των παράλληλων κλάδων είναι αρκετά μεγάλος, μπορεί να γίνει χρήση μιας πιο σύνθετης λογικής για τον έλεγχο των fuel cell stack, η οποία λαμβάνει υπόψη περισσότερα δεδομένα όπως η απόδοση του κάθε κλάδου, η υγεία/φθορά που υπάρχει, η διαθεσιμότητα καυσίμου ή ένας δείκτης προτεραιότητας.