

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΣ ΣΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Χ. Ζιώγου¹, Σ. Βουτετάκης¹, Σ. Παπαδοπούλου^{1,2}

¹Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, ΕΚΕΤΑ, ΤΘ 60361, 57001 Θεσσαλονίκη

²Τμήμα Αυτοματισμού, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, ΤΘ 14561, 54101 Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μέρος μιας πολλά υποσχόμενης και φιλικής προς το περιβάλλον τεχνολογίας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανικής όσο και της βασικής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη στρατηγική προηγμένης ρύθμισης που αποτελείται από το συνεχή υπολογισμό της μέγιστης ισχύος και τη χρήση ενός μη γραμμικού δυναμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από μία κυψέλη μονού κελιού υψηλής θερμοκρασίας τύπου πολυμερικής μεμβράνης (PEM), που λειτουργεί σε συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας. Για τη ρύθμιση της ισχύος που ζητείται από την κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιήθηκε μία συσκευή μετατροπής ισχύος (Power Conversion Device) η οποία ελέγχει το ρεύμα της κυψέλης. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου στοχεύει στη διατήρηση της ισχύος του κελιού κοντά στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας που ορίζεται από την ασφαλή λειτουργία στην υψηλότερη ισχύ για δεδομένο μέγεθος κυψέλης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό της μέγιστης δυνατής ισχύος της κυψέλης και του αντίστοιχου λόγου περίσσειας οξυγόνου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που διεξήχθησαν σε επίπεδο προσομοίωσης, έδειξαν ότι η εφαρμογή του προηγμένου σχήματος ελέγχου έχει βελτιωμένη απόδοση αναφορικά με την αποτελεσματικότητα και την ασφαλή λειτουργία υπό μεταβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου απ' ευθείας σε ηλεκτρική. Όμως λόγω των περιορισμών που τίθενται από τα υλικά, η ισχύς που ζητείται από την κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να καθορίζεται αυθαίρετα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εσωτερικές επιδράσεις που προκαλεί σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των αντιδρώντων και τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Επιπλέον η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου επηρεάζεται όταν υπάρχουν απότομες διακυμάνσεις στις απαιτήσεις ισχύος ή όταν η κυψέλη δεν λειτουργεί στη βέλτιστη περιοχή όπως προσδιορίζεται από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της. Η επιλογή της λειτουργικής περιοχής οδηγεί σε διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος που αφορά στην αποδοτικότητα, στην λειτουργικότητα, την ευστάθεια και την ασφάλεια της κυψέλης.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στην ηλεκτροχημική αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο, από την οποία παράγεται νερό και ελευθερώνεται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Για να περιγραφεί με ακρίβεια η συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιούνται τα ισοζύγια μάζας των αντιδρώντων και των προϊόντων και οι εξισώσεις που επηρεάζουν την μεταβολή της τάσης [1]. Όταν η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό φορτίο, η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται. Η συμπεριφορά της κυψέλης περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος και υπολογίζεται συναρτήσει των εξισώσεων [2]:

$$\text{Εξίσωση Nerst : } E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right] \quad (1)$$

$$\text{Απώλειες ενεργοποίησης : } \Delta V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \ln(i) \quad (2)$$

$$\text{Συγκέντρωση οξυγόνου: } C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 e^{\left(\frac{-498}{T}\right)}} \quad (3)$$

$$\text{Ωμικές απώλειες: } \Delta V_{ohm} = R_{mem} \cdot i \quad (4)$$

$$\text{Αντίσταση Μεμβράνης: } R_{mem} = \frac{r_m \cdot mem_{thick}}{A} \quad (5)$$

$$\text{Απώλειες λόγω συγκέντρωσης: } \Delta V_{conc} = me^{ni} \quad (6)$$

Όπου F είναι η σταθερά του Faraday (C/kmol), p_i είναι οι μερικές πιέσεις (atm) (με $i=H_2, O_2, H_2O$), $\zeta(i = 1-4)$ είναι παραμετρικοί συντελεστές, ο όρος C_{O_2} είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου στη μεμβράνη (mol/cm^{-3}), r_m είναι η αντίσταση της μεμβράνης στη διέλευση των ιόντων (Ωcm), mem_{thick} είναι το πάχος της μεμβράνης (cm), A είναι η ενεργός επιφάνεια του κελιού (cm^2), οι όροι m και n είναι σταθερές οι οποίες εκτιμώνται για καλύτερη ακρίβεια του μοντέλου. Επομένως η πραγματική τάση μειώνεται εξαιτίας των προαναφερθέντων απωλειών λόγω εμφάνισης διαφόρων ηλεκτροχημικών φαινομένων. Η εξίσωση που συνδυάζει τα παραπάνω και εκφράζει την πραγματική τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου είναι :

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (7)$$

Στο μοντέλο συμπεριλαμβάνονται και οι εξισώσεις των τυπικών ισοζυγίων μάζας. Θεωρούμε ότι τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά, γι' αυτό και περιγράφονται μέσω της μερικής πίεσης στα ισοζύγια μάζας :

$$\frac{d}{dt} p_g = \frac{R \cdot T}{V} [q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r] \quad \text{όπου } g=[H_2, O_2, H_2O] \quad (8)$$

Όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων ($(\text{atm}) (\text{kmol K})^{-1}$), T η θερμοκρασία (K), V ο όγκος της ανόδου ή της καθόδου (l). Για κάθε αέριο q_g^{in} είναι η ροή εισόδου, q_g^{out} είναι η ροή εξόδου και q_g^r είναι η κατανάλωση ή παραγωγή λόγω αντίδρασης, οι οποίες υπολογίζονται :

$$\text{Κατανάλωση υδρογόνου: } q_{H_2}^r = \frac{I}{2F} \quad (9)$$

$$\text{Κατανάλωση οξυγόνου: } q_{O_2}^r = \frac{1}{2} \frac{I}{2F} \quad (10)$$

$$\text{Παραγωγή νερού: } q_{H_2O}^r = -\frac{I}{2F} \quad (11)$$

Υπάρχουν δύο φαινόμενα που μπορούν να περιορίσουν ή ακόμη και να καταστρέψουν το κελί, το πλημμύρισμα (flooding) και η απουσία οξυγόνου (starvation). Το πρώτο σχετίζεται με τη θερμοκρασία και την υγρασία τα οποία θεωρούμε ότι στο υπό μελέτη σύστημα είναι σταθερά. Το δεύτερο είναι η έλλειψη οξυγόνου που εμφανίζεται όταν η μερική πίεση του οξυγόνου μειωθεί κάτω από ένα κρίσιμο σημείο. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού συνεπάγεται την άμεση μείωση της τάσης του κελιού, η οποία στη σοβαρότερη περίπτωση μπορεί να δημιουργήσει από μία θερμή περιοχή έως και ένα 'κάψιμο' στην επιφάνεια της μεμβράνης [3].

Για να προληφθεί το καταστροφικό αυτό γεγονός το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει την κατάσταση του επίπεδου του οξυγόνου ώστε το να προβεί σε κατάλληλες ενέργειες. Αν και η έλλειψη οξυγόνου μπορεί να διαφοροποιείται χωρικά, το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί μέσω της ρύθμισης του λόγου περισσειας του οξυγόνου στην κάθοδο λ_{O_2} , ο οποίος αποτελεί μη μετρούμενη μεταβλητή, καθώς υπολογίζεται συναρτήσει της ροής εισόδου του οξυγόνου $q_{O_2}^{in}$ και του ρυθμού κατανάλωσης του οξυγόνου λόγω αντίδρασης $q_{O_2}^r$:

$$\lambda_{O_2} = \frac{q_{O_2}^{in}}{q_{O_2}^r} \quad (12)$$

Όπως προκύπτει από τις (10) και (12) ο λόγος περίσσειας σχετίζεται άμεσα με το ρεύμα εισόδου στο σύστημα. Η εξάρτηση αυτή μπορεί να προκαλέσει στιγμιαία και απότομη πτώση του λόγου περίσσειας. Όταν το λ_{O_2} έχει σχετικά υψηλή τιμή, με συνέπεια την υψηλή μερική πίεση του οξυγόνου, τότε βελτιώνεται και η συνολική ισχύς του συστήματος. Χαμηλές τιμές του λ_{O_2} μπορούν να οδηγήσουν στην πλήρη έλλειψη οξυγόνου. Για να αποφευχθεί η έλλειψη του οξυγόνου, η επιβολή του ρεύματος στην κυψέλη θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται αρκετός χρόνος για τη συμπλήρωση του απαιτούμενου οξυγόνου στην κάθοδο.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

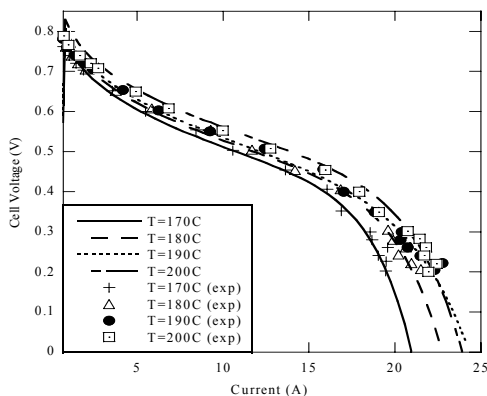
Τα αρχικό μοντέλο ύστερα από κατάλληλες επιλογές παραμέτρων έχει αποδεκτή δυναμική συμπεριφορά σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Αν και εμπεριέχει κάποιες παραδοχές λειτουργίας περιγράφει τη διεργασία στην περιοχή λειτουργίας που επιλέχθηκε. Για την αύξηση της ακρίβειας στη συμπεριφορά του συστήματος πραγματοποιήθηκε εκτίμηση συγκεκριμένων παραμέτρων του μοντέλου σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα από το σύστημα του κελιού καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση την απόκριση του μοντέλου ως προς το πραγματικό σύστημα. Οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο συστημάτων υπάρχουν κυρίως στην περιοχή όπου έχουν μεγάλη επίδραση οι απώλειες ενεργοποίησης και οι απώλειες λόγω συγκέντρωσης.

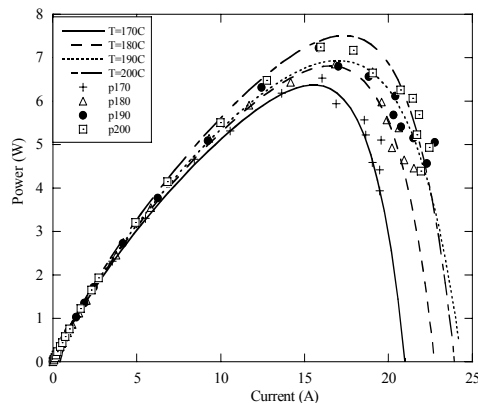
Πίνακας 1. Τιμές εκτιμώμενων παραμέτρων

Παράμετρος	Εκτιμώμενη τιμή
ξ_1	-1.771
m	7.04E-05 V
n	9.44 E-03 cm ² mA

Όπως είναι φανερό από τις καμπύλες I-P και I-V που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 και 2 αντίστοιχα, η απόκριση του μοντέλου συγκλίνει με τα πειραματικά δεδομένα σε όλο το εύρος λειτουργίας του κελιού. Επομένως η εφαρμογή των εκτιμημένων τιμών στις παραμέτρους του μοντέλου είχε ως αποτέλεσμα να εξαλειφθούν οι αποκλίσεις που εμφανιζόταν στις περιοχές που επιδρούν οι απώλειες ενεργοποίησης και συγκέντρωσης.



Σχήμα 1. Καμπύλες πόλωσης πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών

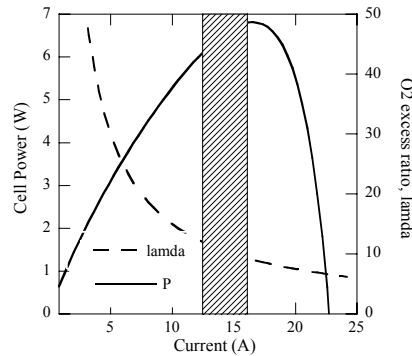


Σχήμα 2. Καμπύλες ισχύος πειραματικών και εκτιμώμενων τιμών

Η χαρακτηριστική καμπύλη παραγόμενης ισχύος-έντασης ρεύματος εμφανίζει ένα μέγιστο σημείο καμψής. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στο σημείο όπου μπορεί να παραχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα ισχύος από δεδομένη συσκευή. Δεξιά από αυτό το σημείο η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου θεωρείται επισφαλής και θα πρέπει να αποφεύγεται. Η περιοχή στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο σημείο τροποποιείται μη γραμμικά επηρεαζόμενη

από τις μεταβολές που έχουν οι λειτουργικές συνθήκες του κελιού. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να υπάρχει μία τεχνική για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου και κατ' επέκταση την ανίχνευση της επιθυμητής περιοχής λειτουργίας, η οποία να μπορεί να προσδιορίζει συνεχώς τη μέγιστη δυνατή ισχύ προς το φορτίο όταν μεταβάλλονται οι λειτουργικές συνθήκες.

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης χρησιμοποιεί το δυναμικό μοντέλο για να καθορίσει εκ των προτέρων (off-line) τη βέλτιστη περιοχή λειτουργίας και τον λόγο περίσσειας οξυγόνου. Γενικά υψηλές τιμές λόγου περίσσειας οξυγόνου οδηγούν σε ασφαλή λειτουργία [4]. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των επιθυμητών τροχιών που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ της μέγιστης ισχύος και του επιθυμητού λόγου περίσσειας οξυγόνου.

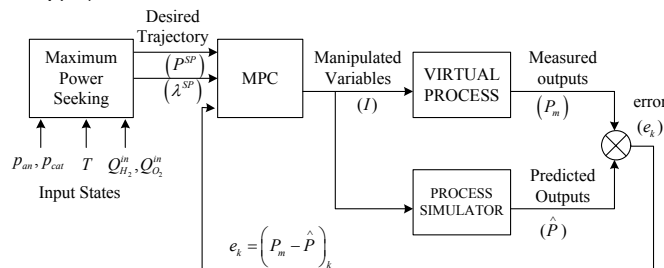


Σχήμα 3. Καμπύλη ισχύος και τροχιά λ_{O_2} .

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος και η αντίστοιχη τροχιά του λόγου περίσσειας οξυγόνου καθώς και η επιθυμητή περιοχή λειτουργίας, η οποία είναι το γραμμοσκιασμένο τμήμα.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΑΣΕΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MPC)

Η χρήση του σχήματος προβλεπτικού ελέγχου θεωρείται ως μια δημοφιλής τεχνική προηγμένης ρύθμισης εξαιτίας της δυνατότητας που έχει να λειτουργεί τη διεργασία με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται πολλαπλά και μεταβαλλόμενα λειτουργικά κριτήρια, ακόμη και όταν υπάρχουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά του συστήματος ή το σύστημα υπόκειται σε περιορισμούς [5]. Το σχήμα ελέγχου που βασίζεται στις προρρήσεις του μη γραμμικού μοντέλου, έχει ως στόχο να οδηγήσει το σύστημα στη βέλτιστη περιοχή λειτουργίας όπως αυτή προσδιορίζεται από τον αλγόριθμο υπολογισμού της μέγιστης ισχύος και υπόκειται σε περιορισμούς από το φυσικό σύστημα, με σκοπό την ασφαλέστερη λειτουργία του. Στο μπλοκ διάγραμμα (Σχήμα 4) περιγράφεται το σχήμα του MPC και η ολοκλήρωσή του με τον αλγόριθμο ανίχνευση μέγιστου.



Σχήμα 4. Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος ελέγχου

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης τιμής της πυκνότητας ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ένας σε σειρά βελτιστοποιητής με σταθμισμένη αντικειμενική συνάρτηση, που συμπεριλαμβάνει τις απαιτήσεις για ισχύ και το λόγο περίσσειας οξυγόνου. Επομένως ο συνολικός στόχος του ελέγχου είναι να προσδιοριστεί το ρεύμα εισόδου με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ικανοποιητική ποσότητα οξυγόνου στην κάθοδο για να προφυλάσσεται η λειτουργία της κυψέλης και παράλληλα να παράγεται ικανή ποσότητα ισχύος, με δεδομένη πάντα παροχή αερίου. Η πυκνότητα ρεύματος αποτελεί την χειραγωγούμενη μεταβλητή του συστήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις τάσης που προέρχονται από την εφαρμογή της χειραγωγούμενης μεταβλητής στο σύστημα και το σημείο λειτουργίας, το μοντέλο προσαρμόζεται μέσω της εκτίμησης των παραμέτρων που σχετίζονται με τις απώλειες ενεργοποίησης και συγκέντρωσης, ώστε να υπολογιστεί ένα νέο μέγιστο σημείο ισχύος και να τροφοδοτηθεί στο μη γραμμικό προρρητικό βέλτιστο ελεγκτή [1].

Η επίλυση του βέλτιστου προβλήματος υπολογίζει τη βέλτιστη τιμή της χειραγωγούμενης μεταβλητής ώστε να υπάρξει η επιθυμητή απόκριση της διεργασίας από την επιβαλλόμενη δράση ελέγχου. Η μαθηματική διατύπωση του MPC αλγόριθμου είναι :

$$\min_{k+j-1} J = \sum_{j=1}^{N_p} \left\| \hat{P}_{k+j} - P_{k+j}^{SP} \right\|_{w_p}^2 + \left\| \hat{\lambda}_{k+j} - \lambda_{k+j}^{SP} \right\|_{w_\lambda}^2 \quad (14)$$

Που υπόκειται σε :

$$e_{k+j-1} = (y^{meas} - y^{pred})_{k+j-1}, y_k = P_k \quad (15)$$

$$\hat{y}_{k+j} = y_{k+1}^{pred} + e_{k+j-1} \quad (16)$$

$$N_c = (T_c - T_k) / \Delta t_c \quad (17)$$

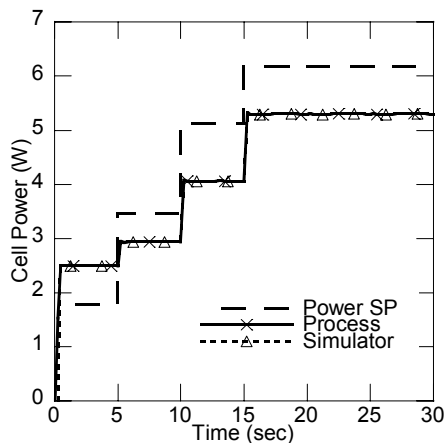
$$N_p = (T_p - T_k) / \Delta t_p \quad (18)$$

Όπου τα διανύσματα \hat{P}_k^{SP} και $\hat{\lambda}_k^{SP}$ αποτελούν τις επιθυμητές τροχιές μετάβασης. Η διαφορά e_k μεταξύ της μετρούμενης μεταβλητής y^{meas} και της προβλεπόμενης τιμής y^{pred} σε χρόνο k θεωρούμε ότι είναι σταθερή για το πλήθος των χρονικών διαστημάτων N_p του ορίζοντα πρόβλεψης T_p . Ενώ με T_c αναπαριστάται ο ορίζοντας ελέγχου ο οποίος υλοποιείται σε N_c χρονικά διαστήματα. Επιπλέον η ελαχιστοποίηση υπόκειται σε περιορισμούς των χειραγωγούμενων και των ελεγχόμενων μεταβλητών:

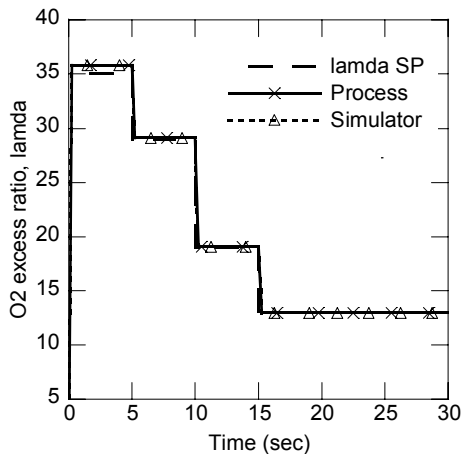
$$I_{\min} \leq I_{k+j-1} \leq I_{\max} \quad (19)$$

$$\lambda_{O_2, \min} \leq \lambda_{O_2} \leq \lambda_{O_2, \max} \quad (20)$$

Οι συντελεστές βαρύτητας (w_p, w_λ) καθώς και το μήκος του ορίζοντα πρόβλεψης και του ορίζοντα ελέγχου αποτελούν παραμέτρους ρύθμισης του αλγόριθμου. Ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του μη γραμμικού δυναμικού βέλτιστου προβλήματος επηρεάζει τη διάρκεια του διαστήματος ελέγχου. Ο ορίζοντας πρόβλεψης επιλέχθηκε να είναι ίσος με τον ορίζοντα ελέγχου στα 15s ενώ τα μεσοδιαστήματα των δράσεων ελέγχου είναι 5s.



Σχήμα 5. Απόκριση ισχύος



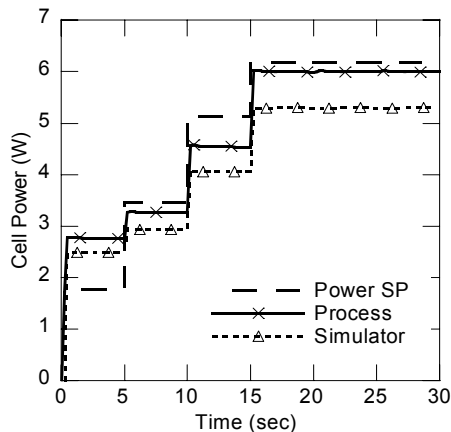
Σχήμα 6. Μεταβολή του λ_{O_2}

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος MPC αξιολογείται μέσω δοκιμών που έγιναν σε ένα κελί τύπου PEM υψηλής θερμοκρασίας. Αρχικά το σύστημα λειτουργεί σε σταθερή

θερμοκρασία ($T_{sim} = T_{process} = 180^{\circ}C$) και σταθερή πίεση ανόδου και καθόδου ($p_{an} = p_{cat} = 2\text{barg}$). Οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών βαρύτητας είναι $w_p = w_\lambda = 0.5$ και όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα των σχημάτων 5 και 6 παρατηρείται ότι το σύστημα μπορεί να οδηγηθεί στην επιθυμητή περιοχή λειτουργίας με έναν ασφαλή τρόπο.

Σε μια άλλη μελέτη που έγινε παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος όταν υπάρχουν αλλαγές στις λειτουργικές συνθήκες. Έχει εισαχθεί μία σημαντική διαταραχή στη θερμοκρασία μεταξύ της διεργασίας και του μοντέλου ($T_{sim} = 180^{\circ}C$, $T_{process} = 140^{\circ}C$) ώστε να αξιολογηθεί η προσαρμοστικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής.



Σχήμα 7. Απόκριση ισχύος με τροποποιημένη θερμοκρασία λειτουργίας

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η ικανότητα του μη γραμμικού σχήματος MPC να αντισταθμίζει την διαταραχή της θερμοκρασίας και να ικανοποιεί το στόχο ελέγχου με το να οδηγεί το σύστημα στην επιθυμητή περιοχή λειτουργίας. Η εφαρμογή του σχήματος MPC δείχνει ότι το σχήμα ελέγχου αν και δεν γνωρίζει την αλλαγή στην θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει το σύστημα στο επιθυμητό σημείο ισχύος με ασφαλή τρόπο μέσω της ρύθμισης του λόγου περίσσειας και της τροχιάς ισχύος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μη γραμμικό μοντέλο ενός κελιού καυσίμου τύπου PEM υψηλής θερμοκρασίας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε ένα σχήμα προβλεπτικού ελέγχου που ικανοποιεί λειτουργικούς περιορισμούς των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Η ρύθμιση μέσω MPC βασίζεται στην αξιοπιστία του μοντέλου η οποία διασφαλίστηκε μέσω της ταυτοποίησης και της εκτίμησης ορισμένων λειτουργικών παραμέτρων του. Η χρήση της μεθοδολογίας MPC εξασφάλισε ότι το σύστημα ικανοποιεί τις λειτουργικές απαιτήσεις του ελέγχου (ασφαλής και βελτιωμένη λειτουργία). Το προτεινόμενο σχήμα MPC θα εφαρμοστεί στο πραγματικό πειραματικό σύστημα κελιού καυσίμου. Επιπλέον για να βελτιωθεί η συνολική απόδοση θα συμπεριληφθούν μαθηματικά μοντέλα των παρελκόμενων υποσυστημάτων, όπως είναι οι συμπιεστές και οι μετατροπείς ισχύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ziogou C, Papadopoulou S., Seferlis P., Voutetakis S., (2009) „A Constrained model predictive control scheme for the efficient power regulation of a PEM Fuel Cell, CAPE, 26-27 March, Limerick, Ireland
- [2] Golbert J., Lewin, D.R. (2007) Model-based control of fuel cells: optimal efficiency, *Journal of Power Sources*, 173 (1), 298-309
- [3] Pukrushpan J., Stefanopoulou A., Peng H. (2004), Control of Fuel Cell Breathing, *IEEE Control Systems Magazine*, 0272-1708/04, 30-46
- [4] Ramos C.A., A. Romero, R. Giral, L. Martinez (2007), Maximum Power Point Tracking Strategy for Fuel Cell Power Systems, *IEEE Symposium on Industrial Electronics*, June 4-7 Spain, 2613-2618
- [5] Bordons C., Arce A. , A. J. del Real (2006), Constrained Predictive Control Strategies for PEM fuel cells, *Proceedings of the 2006 ACC*, Minnesota, USA, June 14-16, 2486-2491