

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

***“ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ
ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ”***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΧΑΣΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΣΑΡΙΜΒΕΗΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

Πρόλογος

Η εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές αλλαγές του πλανήτη οδηγούν την επιστημονική κοινότητα σε αναζήτηση καθαρών και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών με υποσχόμενη ενεργειακή αποδοτικότητα. Τα κελιά καυσίμου, που πρωτοπαρουσιάστηκαν ως ιδέα από τον *Sir William Grove* το 1839, αποτελούν μια εναλλακτική ενεργειακή τεχνολογία, η οποία αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κελιών καυσίμου είναι κατά πρώτο λόγο το γεγονός ότι εκπέμπουν μηδενική ποσότητα ρύπων και κατά δεύτερο ότι είναι μια ιδιαίτερα αποδοτική τεχνολογία παραγωγής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών βιομηχανιών που δραστηριοποιούνται στην περιοχή της ενέργειας, οι οποίες έχουν ασχοληθεί με την έρευνα και την ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Παρά όμως τα σημαντικά βήματα προόδου που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης, ώστε η τεχνολογία των κελιών καυσίμου να γίνει περισσότερο ανταγωνιστική και να μπορέσει χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε μεγάλη κλίμακα.

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική εργασία του συγγραφέα στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών του στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια ώστε η έρευνα στην τεχνολογία των κελιών καυσίμου να προχωρήσει ένα βήμα παραπέρα.

Αρχικά ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει τον Επίκουρο Καθηγητή Χαράλαμπο Σαρίμβη για την ευκαιρία που του δόθηκε να εκπονήσει την διπλωματική του εργασία στη συγκεκριμένη θεματική ενότητα. Ακόμα θα ήθελε να τον ευχαριστήσει και για το γεγονός ότι καθοδήγησε και στήριξε με θέρμη αυτή την προσπάθεια τόσο με τις γνώσεις του όσο και με τις καίριες παρατηρήσεις του όποτε χρειάστηκε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον Υποψήφιο Διδάκτορα Παναγιώτη Ζέρβα, του οποίου η βοήθεια, η στήριξη και η κριτική του σκέψη στα διάφορα θέματα και προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, όπως επίσης και το βαθύ γνωστικό του επίπεδο πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, αποτέλεσαν πολύ σημαντικές παραμέτρους για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστίες οφείλονται στον Καθηγητή Νικόλαο – Χρήστο Μαρκάτο για τη διάθεση του εργαστηριακού χώρου και εξοπλισμού, που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των αναγκαίων πειραμάτων.

Τέλος, ευχαριστίες οφείλονται στα μέλη των εργαστηρίων της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Αυτόματης Ρύθμισης και Πληροφορικής της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ τόσο για τις χρήσιμες και εποικοδομητικές συζητήσεις σε θέματα ρύθμισης και βελτιστοποίησης συστημάτων, όσο και για τη γενικότερη στήριξή τους.

Ο συγγραφέας ευελπιστεί ότι η παρούσα εργασία θα αποτελέσει ένα χρήσιμο και εποικοδομητικό εργαλείο για όσους ασχολούνται με την τεχνολογία των κελιών καυσίμου και θα συμβάλει όσο το δυνατόν στην περαιτέρω ανάπτυξη αυτής. Ελπίζει τέλος, ότι η επιστημονική κοινότητα θα οδηγήσει, μέσω της έρευνας, τα μεγάλα κράτη και τις βιομηχανίες να υιοθετήσουν και να επενδύσουν όσο το δυνατόν περισσότερο σε «καθαρές» τεχνολογίες ενέργειας, μεταξύ των οποίων και αυτή των κελιών καυσίμου και ότι τελικά ο αγώνας για την βελτίωση των συνθηκών ζωής στον πλανήτη θα έχει θετικά αποτελέσματα.

Ιωάννης Χάσικος

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ | VIII |
| ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ..... | IX |
| ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ | XI |
| ΟΡΟΛΟΓΙΑ (NOMENCLATURE) | XIII |
| 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 1 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 2 |
| 1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 2 |
| 1.2.1 <i>Ρύθμιση Συστημάτων Κελιών Καυσίμου</i> | 2 |
| 1.2.1.1 Ρυθμιστές PI, PID | 3 |
| 1.2.1.2 LQR (Linear Quadratic Regulator) | 5 |
| 1.2.1.3 Neural Control | 6 |
| 1.2.1.4 Μοντέλα Ασαφούς Ρύθμισης (Fuzzy Control)..... | 7 |
| 1.2.1.5 Εύρωστη Ρύθμιση (Robust Control) | 9 |
| 1.2.1.6 Μοντέλα Προβλεπτικής Ρύθμισης (Model Predictive Control, MPC)..... | 10 |
| 1.2.2 <i>Βελτιστοποίηση</i> | 13 |
| 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 14 |
| 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ..... | 17 |
| 2.1 ΚΕΛΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ..... | 18 |
| 2.1.1 <i>Εισαγωγή</i> | 18 |
| 2.1.2 <i>Βασικές αρχές λειτουργίας</i> | 18 |
| 2.2 ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (STACK)-ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ (BIPOLAR PLATES) | 23 |
| 2.3 ΕΙΔΗ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 25 |
| 2.3.1 <i>Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)</i> | 27 |
| 2.3.2 <i>Αλκαλικά κελιά καυσίμου (Alkaline Fuel Cells)</i> | 28 |
| 2.3.3 <i>Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells)</i> | 28 |
| 2.3.4 <i>Φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells)</i> | 29 |
| 2.3.5 <i>Τηγμένον ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells)</i> | 29 |
| 2.3.6 <i>Στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells)</i> | 29 |
| 2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 30 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.4.2 | Πρότυπο ηλεκτροδιακό δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος..... | 30 |
| 2.4.3 | Πυκνότητα ρεύματος-Πυκνότητα ισχύος..... | 32 |
| 2.4.4 | Απόδοση κελιού καυσίμου | 33 |
| 2.4.5 | Νόμος του Nernst | 36 |
| 2.4.6 | Μη αντιστρεπτές διεργασίες κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου..... | 37 |
| 2.4.6.1 | Πόλωση ενεργοποίησης (ΔV_{act})..... | 39 |
| 2.4.6.2 | Ωμικές απώλειες (ΔV_{ohm})..... | 43 |
| 2.4.6.3 | Πόλωση συγκέντρωσης (ΔV_{conc})..... | 44 |
| 2.4.6.4 | Συνολικές απώλειες..... | 47 |
| 3. | ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)..... | 49 |
| 3.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 50 |
| 3.2 | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 50 |
| 3.2.1 | Γενικά | 50 |
| 3.2.2 | Μοντέλα βοηθητικών διατάξεων..... | 52 |
| 3.2.2.1 | Συμπίεστής..... | 53 |
| 3.2.2.2 | Μοντέλο Σωληνώσεων | 54 |
| 3.2.2.2.1 | Σωληνώσεις εφοδιασμού της συστοιχίας..... | 54 |
| 3.2.2.2.2 | Σωληνώσεις εξόδου | 54 |
| 3.2.2.3 | Μοντέλο ψύξης του αέρα..... | 56 |
| 3.2.3 | Μοντέλο συστήματος ύγρανσης του αέρα..... | 56 |
| 3.2.4 | Μοντέλο συστοιχίας κελιών καυσίμου..... | 56 |
| 3.2.4.1 | Μοντέλο υπολογισμού του δυναμικού της συστοιχίας | 58 |
| 3.2.4.2 | Μοντέλο καθόδου της συστοιχίας..... | 59 |
| 3.2.5 | Μοντέλο ανόδου της συστοιχίας..... | 60 |
| 3.2.5.1 | Μοντέλο ενυδάτωσης των μεμβρανών..... | 60 |
| 4. | ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΑΜΟΝΤΕΛΩΝ..... | 62 |
| 4.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 63 |
| 4.1 | ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ | 63 |
| 4.2 | ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ | 65 |
| 4.2.1 | Συσχέτιση $P_{net} = f(v_{cm}, I_{st})$ | 65 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.2.2 | Συσχέτιση $\lambda_{O_2} = f(v_{cm}, I_{st})$ | 71 |
| 4.3 | ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ | 75 |
| 4.3.1 | Θεωρία τεχνητών νευρωνικών δικτύων..... | 76 |
| 4.3.1.1 | Κατηγορίες νευρωνικών δικτύων..... | 77 |
| 4.3.1.2 | Επανατροφοδοτούμενα Δίκτυα | 80 |
| 4.3.1.3 | Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης | 81 |
| 4.3.1.3.1 | Μοντέλο τεχνητού νευρώνα | 81 |
| 4.3.1.3.2 | Δίκτυα Πρόσθιας τροφοδότησης μονής στοιβάδας | 82 |
| 4.3.1.3.3 | Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης πολλαπλών στοιβάδων (Multi-layer perceptron, MLP) 82 | |
| 4.3.1.3.4 | Νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης | 85 |
| 4.3.2 | Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης..... | 89 |
| 4.3.2.1 | Μειονεκτήματα συμβατικών μεθόδων εκπαίδευσης..... | 90 |
| 4.3.2.2 | Περιγραφή του αλγορίθμου των ασαφών μέσων | 91 |
| 4.3.2.3 | Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου των ασαφών μέσων..... | 98 |
| 4.4 | ΕΞΑΓΩΓΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΒΑΣΗΣ | 99 |
| 4.4.1 | Συσχέτιση $P_{net} = f(v_{cm}, I_{st})$ | 99 |
| 4.4.2 | Συσχέτιση $\lambda_{O_2} = f(v_{cm}, I_{st})$ | 103 |
| 4.4.3 | Εξαγωγή νομογραφημάτων | 105 |
| 5. | ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)..... | 107 |
| 5.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 108 |
| 5.2 | ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ | 108 |
| 5.3 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ | 111 |
| 6. | ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MODEL PREDICTIVE CONTROL)..... | 113 |
| 6.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 114 |
| 6.2 | ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 116 |
| 6.3 | ΡΥΘΜΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΗΤΡΩΟΥ (DYNAMIC MATRIX CONTROL, DMC)..... | 117 |
| 6.3.1 | Δυναμικά μοντέλα παλμικής και βηματικής επιβολής..... | 117 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3.2 | <i>Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC με βάση μοντέλο παλμικής επιβολής</i> | 120 |
| 6.3.3 | <i>Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC για πολυμεταβλητό σύστημα</i> | 124 |
| 7. | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΤΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 126 |
| 7.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 127 |
| 7.2 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗ MPC..... | 127 |
| 7.2.1 | <i>Κατασκευή μοντέλων FIR</i> | 127 |
| 7.2.2 | <i>Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC</i> | 129 |
| 7.3 | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ PEMFC | 131 |
| 7.4 | ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ | 137 |
| 7.5 | ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ BALLARD NEXA™ POWER MODULE..... | 143 |
| 8. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ | 147 |
| 8.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 148 |
| 8.2 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ..... | 149 |
| 8.3 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ..... | 151 |
| 8.4 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ..... | 151 |
| 8.4 | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ | 153 |
| 9. | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 155 |
| 10. | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | 161 |
| 11. | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β | 163 |

Λίστα Πινάκων

| | |
|--|-----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ..... | 26 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: $\Delta_f G_m^\circ$ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ..... | 32 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΤΗ ΑΠΟΛΟΣΗ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ HHV..... | 35 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ..... | 64 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ 4.1..... | 68 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ (MIN), ΜΕΓΙΣΤΕΣ(MAX), ΜΕΣΕΣ (MEAN) ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (STANDARD DEVIATION) ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ RMSE ΚΑΙ R^2 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ 100 ΤΥΧΑΙΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 75%-25%. | 69 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ (4-7)..... | 72 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ (MIN), ΜΕΓΙΣΤΕΣ(MAX), ΜΕΣΕΣ (MEAN) ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (STANDARD DEVIATION) ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ RMSE ΚΑΙ R^2 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ 100 ΤΥΧΑΙΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 75%-25%. | 73 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΥΠΟΥ RBF ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΑΡΗ ΙΣΧΥ, P_{NET} | 100 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ (MIN), ΜΕΓΙΣΤΕΣ(MAX), ΜΕΣΕΣ (MEAN) ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (STANDARD DEVIATION) ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ RMSE ΚΑΙ R^2 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ 100 ΤΥΧΑΙΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 75%-25%. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΑΡΗ ΙΣΧΥ P_{NET} | 101 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΥΠΟΥ RBF ΓΙΑ ΛΟΓΟ Λ_{O_2} | 103 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: ΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ (MIN), ΜΕΓΙΣΤΕΣ(MAX), ΜΕΣΕΣ (MEAN) ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (STANDARD DEVIATION) ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ RMSE ΚΑΙ R^2 ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ 100 ΤΥΧΑΙΩΝ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ ΣΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 75%-25%. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΛΟΓΟ Λ_{O_2} | 103 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ | 109 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΜΗΤΡΩΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ DMC ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΙΑΣ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΜΙΑΣ ΕΞΟΔΟΥ..... | 124 |

| | |
|---|-----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: ΧΡΟΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΒΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΒΟΛΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΚ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ | 128 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: ΟΡΙΖΟΝΤΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΟΥ DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗ | 130 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3: ΧΡΟΝΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΕΙΣΑΓΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗ . | 132 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4: ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ..... | 132 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5: ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ..... | 135 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 11.1: ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ | 164 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ FIR ΜΟΝΤΕΛΩΝ | 165 |

Λίστα Σχημάτων

| | |
|---|----|
| ΣΧΗΜΑ 2.1: ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ. ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ..... | 19 |
| ΣΧΗΜΑ 2.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 20 |
| ΣΧΗΜΑ 2.3: ΒΑΣΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ – ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ - ΑΝΟΔΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΟΣ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 21 |
| ΣΧΗΜΑ 2.4: ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΙΑ ΕΝΟΣ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΟΞΙΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ. | 22 |
| ΣΧΗΜΑ 2.5 : ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΟΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΕΡΜΑΤΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ ΓΙΑ ΡΟΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ..... | 23 |
| ΣΧΗΜΑ 2.6: ΜΙΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ 3 ΜΟΝΑΔΩΝ, ΟΠΟΥ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Η ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΑΝΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΘΟΔΟΥ ΔΥΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΠΟΛΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ | 24 |
| ΣΧΗΜΑ 2.7: ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΠΛΑΚΑ ΑΠΟ ΓΡΑΦΙΤΗ..... | 24 |
| ΣΧΗΜΑ 2.8: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ | 25 |
| ΣΧΗΜΑ 3.1: ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ | 51 |
| ΣΧΗΜΑ 3.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (COMPRESSOR), ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ (SUPPLY MANIFOLD), ΨΥΚΤΗΡΑ (COOLER) ΚΑΙ ΤΟΥ ΥΓΡΑΝΤΗΡΑ (HUMIDIFIER) ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK | 52 |
| ΣΧΗΜΑ 3.3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΕΞΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK | 52 |
| ΣΧΗΜΑ 3.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΑΘΜΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ | 53 |
| ΣΧΗΜΑ 3.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΑΘΜΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ..... | 55 |
| ΣΧΗΜΑ 3.6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΑΘΜΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΕΞΟΔΟΥ..... | 55 |
| ΣΧΗΜΑ 3.7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK | 57 |

| | |
|--|-----|
| ΣΧΗΜΑ 3.8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΒΑΘΜΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ..... | 58 |
| ΣΧΗΜΑ 4.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK | 64 |
| ΣΧΗΜΑ 4.2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ..... | 65 |
| ΣΧΗΜΑ 4.3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ..... | 79 |
| ΣΧΗΜΑ 4.4: ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΡΥΦΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑ..... | 80 |
| ΣΧΗΜΑ 4.5: ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΡΥΦΗ ΣΤΟΙΒΑΔΑ..... | 80 |
| ΣΧΗΜΑ 4.6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΑ..... | 81 |
| ΣΧΗΜΑ 4.7: ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΘΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΜΟΝΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ..... | 82 |
| ΣΧΗΜΑ 4.8: ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΘΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΚΡΥΦΕΣ ΣΤΟΙΒΑΔΕΣ..... | 83 |
| ΣΧΗΜΑ 4.9: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΙΓΜΟΕΙΛΟΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ..... | 84 |
| ΣΧΗΜΑ 4.10: ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΒΑΣΗΣ..... | 86 |
| ΣΧΗΜΑ 4.11: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ GAUSS ΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΔΥΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ..... | 87 |
| ΣΧΗΜΑ 4.12: ΑΣΑΦΗΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΕ 5 ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΑ ΓΙΑ ΕΝΑ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ..... | 94 |
| ΣΧΗΜΑ 4.13: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ ΣΤΟ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ..... | 94 |
| ΣΧΗΜΑ 4.14: ΑΝΑΘΕΣΗ ΤΟΥ ΚΟΝΤΙΝΟΤΕΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΥΠΟΧΩΡΟΥ ΣΕ ΚΑΘΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ..... | 95 |
| ΣΧΗΜΑ 5.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΤΑΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ..... | 110 |
| ΣΧΗΜΑ 6.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟ..... | 115 |
| ΣΧΗΜΑ 6.2: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΠΑΛΜΙΚΗ ΕΠΙΒΟΛΗ..... | 118 |
| ΣΧΗΜΑ 6.3: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΟΛΗ..... | 120 |
| ΣΧΗΜΑ 6.4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 125 |
| ΣΧΗΜΑ 7.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ FIR ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK..... | 129 |
| ΣΧΗΜΑ 7.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ, ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΚΑΙ ΤΟΝ MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗ..... | 133 |
| ΣΧΗΜΑ 7.3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK..... | 138 |
| ΣΧΗΜΑ 7.4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ NEXA TM POWER MODULE..... | 143 |
| ΣΧΗΜΑ 7.5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ NEXA TM POWER MODULE..... | 144 |

| | |
|--|-----|
| ΣΧΗΜΑ 7.6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΝΕΧΑ TM POWER MODULE | 145 |
| ΣΧΗΜΑ 7.7: ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ λ_{O_2} ΟΠΩΣ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΝΕΧΑ TM POWER MODULE | 146 |
| ΣΧΗΜΑ 7.8: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ λ_{O_2} ΟΠΩΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΝΕΧΑ TM POWER MODULE..... | 146 |
| ΣΧΗΜΑ 8.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ . | 149 |

Λίστα Διαγραμμάτων

| | |
|--|-----|
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LOO CROSS VALIDATION, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ 4-1 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_{NET} | 69 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ P_{NET} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 70 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ P_{NET} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 71 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LOO CROSS VALIDATION, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ 4-7 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} | 72 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ λ_{O_2} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 74 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ λ_{O_2} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 75 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LOO CROSS VALIDATION, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ RBF ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_{NET} | 100 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ P_{NET} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RBF ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 102 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ P_{NET} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RBF ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 102 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LOO CROSS VALIDATION, ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ RBF ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} | 104 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ λ_{O_2} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RBF ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ λ_{O_2} ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΒΛΕΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RBF ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ..... | 105 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.13: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΚΑΘΑΡΗ ΙΣΧΥ, P_{NET} , ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΔΥΟ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ I_{ST} ΚΑΙ Y_{CM} | 106 |
| 77 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.14: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΛΟΓΟ λ_{O_2} , ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΔΥΟ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ I_{ST} ΚΑΙ Y_{CM} | 106 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ | 112 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ, I_{ST} ΚΑΙ V_{CM} , ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ. P_{NET} | 112 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.1: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ, P_{NET} , ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 7.3 | 134 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.2: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ, ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 7.3 | 134 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.3: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ, P_{NET} , ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 7.3 | 136 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.4: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 7.3 | 136 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.5: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ..... | 138 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.6: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ, P_{NET} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ Ο ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ..... | 139 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.7: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΟΤΑΝ ΣΕ ΑΥΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΝ ΤΑ 360 ΕΚ ΤΩΝ 381 ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (Α) ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ, (Β) MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ. | 141 |
| ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.8: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΑΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_{NET} ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ λ_{O_2} ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΟΤΑΝ ΣΕ ΑΥΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΝ ΤΑ 360 ΕΚ ΤΩΝ 381 ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (Α) ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ, (Β) MPC-DMC ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ..... | 142 |

Ορολογία (Nomenclature)

| | | |
|----------------|--|---|
| A : | Ενεργή επιφάνεια | $[\text{m}^2]$ |
| A_n : | Τριγωνικό ασαφές σύνολο | |
| A_{Tafel} : | Σταθερά Tafel | $[\text{Volts}]$ |
| $A_{\tau,m}$: | Άνοιγμα της βαλβίδας στραγγαλισμού | $[\text{m}^2]$ |
| C_D : | Συντελεστής αποφόρτισης ακροφυσίου | |
| C_B : | Συγκέντρωση παρεχόμενου αντιδρώντος | $[\text{mol/L}]$ |
| C_S : | Συγκέντρωση αντιδρώντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου | $[\text{mol/L}]$ |
| D_w : | Σταθερά διάχυσης | $[\text{cm}^2/\text{s}]$ |
| E : | Αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος ή δυναμικό “Nernst” | $[\text{Volts}]$ |
| E° : | Πρότυπο ηλεκτροδιακό δυναμικό στους 25°C | $[\text{Volts}]$ |
| E_t° : | Πρότυπο ηλεκτροδιακό δυναμικό σε κάποια θερμοκρασία t | $[\text{Volts}]$ |
| F : | Σταθερά Faraday | $[\text{A} \cdot \text{s}/\text{mole}]$ |
| H : | Πίνακας συντελεστών δυναμικού μοντέλου παλμικής επιβολής όταν το σύστημα είναι πολυμεταβλητό | |
| I : | Ένταση ρεύματος | $[\text{A}]$ |

| | | |
|---------------|---|--|
| J : | Αδράνεια συμπιεστή | $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ |
| K^n : | Αριθμός δεδομένων εισόδου σε ένα RBF νευρωνικό δίκτυο | |
| L^n : | Αριθμός νευρώνων κρυφής στοιβάδας σε ένα RBF νευρωνικό δίκτυο | |
| M : | Μοριακή μάζα | $[\text{kg}/\text{mol}]$ |
| M_{co} : | Ορίζοντας ρύθμισης | |
| N_{pr} : | Ορίζοντας πρόβλεψης | |
| N : | Αριθμός Avogadro | |
| P : | Ισχύς | $[\text{W}]$ |
| PD : | Πυκνότητα ισχύος | $[\text{W}/\text{m}^2]$ |
| R : | Παγκόσμια σταθερά αερίων | $[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$ |
| R^2 : | Συντελεστής προσδιορισμού | $[\%]$ |
| R_{CV}^2 : | Συντελεστής προσδιορισμού βασισμένος στη μέθοδο διασταύρωσης (cross-validation) | $[\%]$ |
| R_{fc} : | Ωμική αντίσταση του ρεύματος σε ένα κελί καυσίμου | $[\Omega]$ |
| S_{PRESS} : | Τετραγωνική ρίζα του στατιστικού συντελεστή PRESS προς τον αριθμό των δεδομένων | |
| T : | Θερμοκρασία | $[\text{K}]$ |

| | | |
|-------------|--|---------------------|
| U_f : | Λόγος του καταναλισκόμενου καυσίμου προς το εισερχόμενο | [%] |
| U_{ox} : | Λόγος του καταναλισκόμενου αέρα προς τον εισερχόμενο | [%] |
| V : | Όγκος | [m ³] |
| W : | Ρυθμός ροής μάζας | [kg/s] |
| a_n : | Παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης σε ένα MLP νευρωνικό δίκτυο | |
| c : | Αριθμός τριγωνικών ασαφών συνόλων | |
| d : | Μεταβλητή διαταραχής | |
| d_c : | Διάμετρος συμπίεστη | [m] |
| e : | Ρυθμιστική απόκλιση | |
| f_G : | Συνάρτηση Gauss | |
| f_{TPS} : | Συνάρτηση Thin Plate Spline | |
| g : | Συντελεστής δυναμικού μοντέλου μοναδιαίας βηματικής επιβολής | |
| h : | Συντελεστής δυναμικού μοντέλου παλμικής επιβολής | |
| i : | Πυκνότητα ρεύματος | [A/m ²] |
| i_0 : | Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής | [A/m ²] |

| | | |
|--------------|---|---------------------|
| i_L : | Πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί για $C_S = 0$ | [A/m ²] |
| kk : | Αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών | |
| $lpin$: | Πλήθος πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των FIR μοντέλων | |
| m : | Μάζα | [kg] |
| m_{conc} : | Σταθερά εμπειρικής σχέσης $\Delta V_{conc} = m_{conc} \exp(p_{conc} \cdot i)$ | [Volts] |
| n : | Αριθμός κελιών καυσίμου | |
| n_d : | Σταθερά ηλεκτροόσμωσης | |
| n_{per} : | Απόδοση | |
| nin : | Πλήθος μεταβλητών εισόδου | |
| nn : | Πλήθος δεδομένων | |
| $nout$: | Πλήθος μεταβλητών εξόδου | |
| p : | Πίεση | [Pa] |
| p_{conc} : | Σταθερά εμπειρικής σχέσης $\Delta V_{conc} = m_{conc} \exp(p_{conc} \cdot i)$ | [m ² /A] |
| rd : | Ευκλείδεια σχετική απόσταση | |
| r : | Κέντρο της κορυφής της συνάρτησης Gauss | |
| r_{fe} : | Ωμική αντίσταση πολλαπλασιασμένη με την ενεργή επιφάνεια | [Ω·m ²] |

| | | |
|------------|---|-----|
| r_i : | Συντελεστής βάρους μεταβλητών εξόδου MPC-DMC ρυθμιστή | |
| t : | Χρόνος | [s] |
| t_m : | Πάχος μεμβράνης | [m] |
| u : | Μεταβλητή εκ χειρισμού MPC ρυθμιστή | |
| u_q : | Είσοδος της συνάρτησης ενεργοποίησης $f(\cdot)$ του νευρώνα q | |
| w_i : | Συντελεστής βάρους μεταβλητών εισόδου MPC-DMC ρυθμιστή | |
| w_q : | Συναπτικό βάρος του νευρώνα q | |
| x : | Δεδομένα εισόδου νευρώνα | |
| y : | Μεταβλητή εξόδου MPC ρυθμιστή | |
| y_{sp} : | Επιθυμητή τιμή | |
| y_q : | Έξοδος νευρώνα | |
| z : | Ανταλλασσόμενο φορτίο | |

Ελληνικά σύμβολα

| | | |
|---------------------------|---|----------|
| $\Delta_f G_m^\circ(i)$: | Μεταβολή πρότυπης μοριακής συνάρτησης Gibbs λόγω σχηματισμού της χημικής ουσίας i | [kJ/mol] |
| $\Delta_r G_m^\circ$: | Μεταβολή πρότυπης μοριακής συνάρτησης Gibbs λόγω χημικής αντίδρασης | [kJ/mol] |
| $\Delta_f H_m^\circ(i)$: | Μεταβολή πρότυπης μοριακής ενθαλπίας λόγω σχηματισμού της χημικής ουσίας i | [kJ/mol] |

| | | |
|---------------------|---|----------------------|
| ΔV_{act} : | Απώλειες δυναμικού λόγω ενεργοποίησης | [Volts] |
| ΔV_{conc} : | Απώλειες δυναμικού λόγω συγκέντρωσης | [Volts] |
| ΔV_{ohm} : | Ωμικές απώλειες | [Volts] |
| Ω : | Λόγος υγρασίας | |
| α : | Ενεργότητα | |
| α_{in} : | Συντελεστής μεταφοράς ηλεκτροδιακής δράσης | |
| γ : | Λόγος ειδικής θερμοχωρητικότητας αέρα | |
| δ : | Πάχος οριακού στρώματος | [m] |
| λ_{O_2} : | Λόγος εισερχόμενου οξυγόνου προς το καταναλισκόμενο | |
| μ_A : | Συνάρτηση συμμετοχής | |
| ν : | Αριθμός μετακινούμενων ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτροχημικής αντίστασης | |
| ρ_a : | Πυκνότητα αέρα | [kg/m ³] |
| σ : | Εύρος της συνάρτησης Gauss | |
| υ : | Δυναμικό | [Volts] |
| ϕ : | Σχετική υγρασία | [%] |
| y : | Στοιχειομετρική αναλογία | |
| ω : | Γωνιακή ταχύτητα | [rad/s] |

Δείκτες/Εκθέτες

H_2 : Υδρογόνο

N_2 : Άζωτο

O_2 : Οξυγόνο

H_2O : Νερό

CO_2 : Διοξείδιο του άνθρακα

v : Ατμός

w : Νερό

l : Υγρό

atm : Ατμοσφαιρικές συνθήκες

in : Εισερχόμενο

out : Εξερχόμενο

rct : Αντιδρών

mbr : Μεμβράνη

net : Καθαρό

$purge$: Στιγμαία εκτόνωση

an : Άνοδος

ca : Κάθοδος

cm : Κινητήρας συμπιεστή

| | |
|--------------|-----------------------|
| <i>cp</i> : | Συμπιεστής |
| <i>fc</i> : | Κελί καυσίμου |
| <i>rm</i> : | Σωληνώσεις εξόδου |
| <i>sm</i> : | Σωληνώσεις εφοδιασμού |
| <i>st</i> : | Συστοιχία |
| <i>eff</i> : | Ηλεκτρόδιο |

Συντομεύσεις (*Abbreviations*)

| | | |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>AFC</i> | Alkaline Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Αλκαλικού Ηλεκτρολύτη |
| <i>ANN</i> | Artificial Neural Network | Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο |
| <i>CFD</i> | Computational Fluid Dynamics | Υπολογιστική Ρευστοδυναμική |
| <i>DMC</i> | Dynamic Matrix Control | Ρύθμιση Δυναμικού Μητρώου |
| <i>DMFC</i> | Direct Methanol Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Μεθανόλης |
| <i>FIR</i> | Finite Impulsive Response | Απόκριση Παλμικής Επιβολής |
| <i>FVM</i> | Finite Volume Method | Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων Ελέγχου |
| <i>HV</i> | Heating Value | Θερμογόνος Δύναμη |
| <i>HHV</i> | Higher Heating Value | Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη |
| <i>LHV</i> | Lower Heating Value | Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη |
| <i>MCFC</i> | Molten Carbonate Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Τηγμένου Ανθρακος |
| <i>MLP</i> | Multi Layer Perceptron | Πρόσθια Τροφοδότηση Πολλών Στοιβάδων |
| <i>MPC</i> | Model Predictive Control | Ρύθμιση Προβλεπτικού Μοντέλου |

| | | |
|---------------------|------------------------------------|--|
| <i>NLP</i> | Non Linear Programming | (Πρόβλημα) Μη Γραμμικού Προγραμματισμού |
| <i>OCV</i> | Open Circuit Voltage | Δυναμικό Ανοικτού Κυκλώματος |
| <i>PAFC</i> | Phosphoric Acid Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος |
| <i>PEMFC</i> | Proton Exchange Membrane Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων |
| <i>PRESS</i> | Prediction Error Sum of Squares | Πρόβλεψη σφάλματος αθροίσματος τετραγώνων |
| <i>RBF</i> | Radial Basis Function | Ακτινική συνάρτηση βάσης |
| <i>RMSE</i> | Root Mean Square Error | Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος |
| <i>SOFC</i> | Solid Oxide Fuel Cell | Κελί Καυσίμου Στερεού Οξειδίου |
| <i>SSE</i> | Sum of Square Errors | Άθροισμα τετραγωνικών σφαλμάτων |
| <i>SSY</i> | Sum of Square | Άθροισμα τετραγωνικών αποκλίσεων |

Ελληνικές Συντομεύσεις

AΠΕ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τίτλος θέματος:

«Ανάπτυξη μεθοδολογίας προβλεπτικού ελέγχου για τη ρύθμιση συστήματος κελιών καυσίμου υδρογόνου»

Περίληψη

Τα κελιά καυσίμου (fuel cells) αποτελούν τα τελευταία χρόνια μία ραγδαίως εξελισσόμενη τεχνολογία με πληθώρα επίγειων όσο και κινητών εφαρμογών. Τα κελιά καυσίμου ουσιαστικά αποτελούν χημικές μηχανές που μετατρέπουν το χημικό δυναμικό του καυσίμου και του οξειδωτικού αερίου (υδρογόνο και οξυγόνο) σε ηλεκτρική ενέργεια. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η μεγάλη απόδοση και η ελαχιστοποίηση των εκπομπών καυσαερίων. Παρόλα αυτά, η βιωσιμότητα, η αποδοτικότητα και η ευρωστία της τεχνολογίας αυτής εξαρτάται έντονα από την κατανόηση, την πρόβλεψη, την παρακολούθηση και εν τέλει τη βελτιστοποίηση και ρύθμιση της λειτουργίας τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου εργαλείου βελτιστοποίησης και ρύθμισης μίας συστοιχίας κελιών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) με στόχο την όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση υδρογόνου. Αρχικά μέσω μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας συστοιχίας PEMFC, δημιουργείται μία βάση δεδομένων που αποτελείται από διάφορες τιμές των μεταβλητών εισόδου (ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, I , και δυναμικό συμπίεστη, v_{cm}) και των μεταβλητών εξόδου (παραγόμενη ισχύς, P_{net} και λόγος παρεχόμενου οξειδωτικού αερίου ως προς το καταναλισκόμενο, λ).

Στη συνέχεια, επιδιώκεται ο προσδιορισμός συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου-εξόδου του συστήματος (μεταμοντελοποίηση) με χρήση γραμμικών και μη γραμμικών μεθόδων και πιο συγκεκριμένα με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Η σύγκριση έδειξε ότι η χρήση των ΤΝΔ πλεονεκτεί σε πολλά σημεία για την καλύτερη απόδοση των ισχυρά μη γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου-εξόδου.

Στο επόμενο στάδιο, διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Non Linear Programming Problem, NLP) όπου ως αντικειμενική συνάρτηση θέτουμε το παρεχόμενο προς κατανάλωση υδρογόνο του οποίου αποσκοπούμε την ελαχιστοποίηση. Έτσι, για κάθε τιμή απαιτούμενης ισχύος λαμβάνουμε και την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή του λόγου λ .

Τελευταίο βήμα αποτελεί η ρύθμιση της δυναμικής συμπεριφοράς της συστοιχίας με την χρήση ενός μοντέλου προβλεπτικής ρύθμισης (Model Predictive Control, MPC). Πιο συγκεκριμένα, ως επιθυμητές τιμές (set-points) εισάγονται η απαιτούμενη ισχύς και ο λόγος λ που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε παραπάνω. Τελικά, ο ρυθμιστής που κατασκευάζεται και εφαρμόζεται στη συστοιχία, οδηγεί το σύστημα με ταχύτητα και ακρίβεια στον στόχο που του θέτει ο χειριστής με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση υδρογόνου.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο βέλτιστης ρύθμισης κελιών καυσίμου το οποίο μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο σε όσους ενδιαφέρονται για την τεχνολογία αυτή καθιστώντας την όσο το δυνατόν πιο οικονομική και αποδοτική.

Thesis title:

“Development of a Model Predictive Control Methodology for the regulation of a hydrogen fuel cell system”

Fuel cell is a rapidly evolving technology with applications in many industries including transportation, and both portable and stationary power generation. Fuel cells basically convert the chemical energy of the reactant gases (hydrogen and oxygen) into electrical energy. The main advantages of this emerging technology are high efficiency and minimization of emissions. The viability, efficiency and robustness of fuel-cell systems depend strongly on optimization and control of their operation.

The purpose of this study is the development of a complete optimization and control tool for a Proton Exchange Membrane Fuel-Cell (PEMFC) stack. Emphasis is given on the minimization of the consumed amount of hydrogen. First, via a simulation model, a database is generated which includes values of the input variables (intensity of electric current, I , and compressor voltage, v_{cm}) and the corresponding values of output variables (net output power, P_{net} , and the ratio of the incoming oxygen mass flow to the oxygen mass that reacts, λ).

In a second step, mathematical relationships are developed between the input and output variables. In particular, the linear regression methodology and the Radial Basis Function (RBF) neural network architecture are utilized for producing the input-output “meta-models”. The comparison between linear and neural network models showed that neural network models obtain better results than linear models.

In the third step, a Non Linear Programming Problem (NLP) is formulated that takes into account the constraints and limitations of the system. The objective function to be minimized is the supplied hydrogen to the stack for a given value of power demand. Based on the formulation and solution of the NLP problem, a look-up table is developed, containing the optimal values of the system variables for any possible value of power demand.

In the last step, a methodology based on the principles of the Model Predictive Control (MPC) is designed for the optimal control of the system response to successive sep-point changes of power demand. . The optimal λ -value (determined by

the solution of the optimization problem as described above) is used as an additional controlled variable. The efficiency of the produced MPC system is illustrated by a number of simulations, which show that a successful dynamic closed-loop behavior can be achieved, while at the same time the consumption of hydrogen is minimized.

In conclusion, an integrated optimal control tool was developed for fuel cell systems, that may prove useful to researchers and practitioners who are working on this particular technology. It is also expected that the results of this Diploma Thesis will contribute in improving sufficiency and competitiveness of the fuel cell technology.



1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Τα κελιά καυσίμου (fuel cells) αποτελούν τα τελευταία χρόνια μία ραγδαίως εξελισσόμενη τεχνολογία με πληθώρα επίγειων όσο και κινητών εφαρμογών. Παρόλα αυτά, η τεχνολογία αυτή αντιμετωπίζει σήμερα αρκετά προβλήματα που την καθιστούν λιγότερο ανταγωνιστική από όσο θα έπρεπε. Η παρούσα εργασία προσεγγίζει και επιχειρεί να δώσει λύση σε κάποια από τα σημαντικότερα προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί στην τεχνολογία αυτή.

Το πρώτο πρόβλημα με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία είναι αυτό της βέλτιστης λειτουργίας των κελιών καυσίμου υδρογόνου. Με τη φράση «βέλτιστη λειτουργία» εννοούμε την εύρεση εκείνων των λειτουργικών παραμέτρων του κελιού καυσίμου για τις οποίες αφενός καλύπτεται η όποια απαίτηση σε ισχύ και αφετέρου η κατανάλωση σε υδρογόνο είναι η ελάχιστη δυνατή. Μέχρι σήμερα, οι προσπάθειες που έχουν γίνει για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι λιγοστές.

Το δεύτερο πρόβλημα για το οποίο ζητείται λύση είναι αυτό της ρύθμισης των κελιών καυσίμου. Η ρύθμιση έχει ως σκοπό κατά κύριο λόγο τη βελτίωση -όσο το δυνατόν περισσότερο- της δυναμικής συμπεριφοράς ιδιαίτερα κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων των κελιών καυσίμου. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων εγγυάται την ομαλή λειτουργία των κελιών καυσίμου ανεξάρτητα από τυχόν ανωμαλίες ή απότομες αλλαγές που μπορεί να προκύψουν ανά πάσα στιγμή. Αντίθετα με το πεδίο της βελτιστοποίησης, η έρευνα που έχει γίνει στον τομέα της ρύθμισης είναι αρκετά μεγαλύτερη.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.2.1 Ρύθμιση Συστημάτων Κελιών Καυσίμου

Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο εύρος εργασιών που αφορούν στη ρύθμιση κελιών καυσίμου διαφόρων τύπων. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια κατηγοριοποίηση των πιο σημαντικών μεθόδων που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία και επιλέγονται κάποιες αντιπροσωπευτικές εργασίες για κάθε μια από αυτές.

Μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα εντοπίστηκαν οι εξής κύριες κατηγορίες που αφορούν στα διάφορα είδη μεθόδων ρύθμισης που εφαρμόζονται στα κελιά καυσίμου:

- Αναλογική – ολοκληρωτική – διαφορική ρύθμιση (PI, PID ρυθμιστές)
- Ρύθμιση Linear Quadratic Regulation (LQR)
- Ρύθμιση με χρήση νευρωνικών δικτύων
- Ρύθμιση με βάση την ασαφή λογική
- Εύρωστη ρύθμιση
- Ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου

Παρακάτω παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές εργασίες για την κάθε κατηγορία

1.2.1.1 Ρυθμιστές PI, PID

Οι αναλογικοί – ολοκληρωτικοί – παραγωγικοί (Proportional – Integral – Derivative, PID) ρυθμιστές είναι μηχανισμοί ρύθμισης που μπορούν να ρυθμίσουν μια διεργασία όταν αυτή ανατροφοδοτείται συνεχώς. Αυτού του είδους οι ρυθμιστές προσπαθούν να διορθώσουν την απόκλιση ανάμεσα σε μια συγκεκριμένη πραγματική μεταβλητή μιας διεργασίας και στην επιθυμητή της τιμή. Αυτό το επιτυγχάνουν αρχικά με το να υπολογίζουν την διόρθωση που πρέπει να γίνει στη μεταβλητή και στη συνέχεια με το να προκαλούν την αντίστοιχη διορθωτική δράση ώστε να ρυθμιστεί η διεργασία.

Η αναλογική δράση του PID ρυθμιστή προσδιορίζει την διορθωτική δράση για μια στιγμιαία απόκλιση της πραγματικής και της επιθυμητής τιμής της ρυθμιζόμενης μεταβλητής, η ολοκληρωτική του δράση προσδιορίζει την διόρθωση που πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη και τις πρόσφατες αποκλίσεις και η παραγωγική δράση προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να αποκριθεί ο ρυθμιστής με βάση τον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται η ρυθμιστική απόκλιση. Ανάλογα με την διεργασία που ρυθμίζεται μπορεί ο ρυθμιστής να χρησιμοποιεί μόνο μια εκ των τριών ρυθμιστικών του δράσεων ή κάποιο συνδυασμό δύο εξ αυτών.

[Wang, R.-M et al, 2008]

Αυτή η εργασία ασχολείται και ερευνά το σύστημα ανόδου μιας γεννήτριας ισχύος 60kW που αποτελείται από κελιά καυσίμου τύπου PEM. Στην άνοδο των κελιών καυσίμου θα πρέπει η πίεση και η υγρασία να διατηρούνται σε ορισμένα όρια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των κελιών σε μόνιμη κατάσταση. Έχοντας ως στόχο τη ρύθμιση των χαρακτηριστικών αυτών του συστήματος ανόδου, σχεδιάστηκε ένας PID ρυθμιστής. Για τη ρύθμιση της υγρασίας στην άνοδο χρησιμοποιείται ένας ρυθμιστής PI ενός νευρώνα. Για την ρύθμιση της πίεσης στην άνοδο χρησιμοποιείται ένας PID ρυθμιστής. Η μεθοδολογία αυτή προσπερνά και αποφεύγει τυχόν προβλήματα σύζευξης των διαφόρων μεταβλητών που ρυθμίζονται και επιτυγχάνει αρκετά καλή σταθερότητα. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία, μπορεί κανείς να επιτύχει την ρύθμιση και της πίεσης και της υγρασίας στην άνοδο ανεξάρτητα από την μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος.

[Woo, C.H. et al, 2007]

Στην εργασία αυτή καταδεικνύεται ότι η ισχύς που παράγεται από ένα κελί καυσίμου τύπου PEM μπορεί να ρυθμιστεί άμεσα με το να περιοριστεί η παροχή του υδρογόνου προς το κελί καυσίμου. Η ρύθμιση της ισχύος επιτυγχάνεται με το να μεταβάλλεται η εσωτερική αντίσταση στη μεμβράνη και τα ηλεκτρόδια. Αυτό μπορεί να γίνει με το να μεταβάλλεται η υγρασία στο εσωτερικό της μεμβράνης. Το κελί καυσίμου σχεδιάζεται να λειτουργεί έτσι ώστε το υδρογόνο να μπορεί μόνο να εισάγεται και να μην διαφεύγει ενώ αντίθετα το νερό θα μπορεί και να εισάγεται και να διαφεύγει. Το νερό θα είναι ουσιαστικά η μεταβλητή εκ χειρισμού του συστήματος αφού από αυτό εξαρτάται και η εσωτερική αντίσταση στο κελί. Οι παροχές τόσο του υδρογόνου όσο και του αέρα προκαθορίζονται ώστε να μπορεί να παράγεται το επιθυμητό ρεύμα, σύμφωνα με το οποίο θα ρυθμίζεται και η υγρασία της μεμβράνης. Για τη ρύθμιση χρησιμοποιείται ένας PID ρυθμιστής με ανατροφοδότηση των παροχών έτσι ώστε να υπάρχει καλή δυναμική συμπεριφορά σε γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Η μέθοδος γενικά μειονεκτεί στο γεγονός ότι η εσωτερική αντίσταση του κελιού, με την οποία ρυθμίζεται και το ρεύμα, μπορεί να πάρει συγκεκριμένες τιμές οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος του κελιού. Ακόμα ο ρυθμιστής που χρησιμοποιείται έχει περιορισμένο εύρος όσον αφορά τη δυναμική του συμπεριφορά.

[Federico Zenith et al, 2006]

Σε αυτή την εργασία αναπτύσσεται ένα απλοποιημένο δυναμικό μοντέλο κελιών καυσίμου βασισμένο στην ιδέα των στιγμιαίων χαρακτηριστικών, δηλαδή τις τιμές του ρεύματος και του δυναμικού, τις οποίες το κελί καυσίμου μπορεί να πάρει στιγμιαία. Αυτή η ιδέα χρησιμοποιείται για να εξαχθεί ένα θεώρημα, το οποίο υποδεικνύει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η ισχύς που παράγει το κελί μπορεί, θεωρητικά, να ρυθμιστεί. Γίνεται αριθμητική προσομοίωση ενός κελιού καυσίμου, που είναι συνδεδεμένο με έναν DC/DC μετατροπέα. Στο σύστημα αυτό, το δυναμικό στην έξοδο του μετατροπέα ρυθμίζεται με βάση συγκεκριμένους κανόνες (switching rules) που έχουν σχέση με το κύκλωμα που δημιουργείται. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας PI ρυθμιστής για τη ρύθμιση της ροπής εξόδου ενός DC κινητήρα.

1.2.1.2 LQR (Linear Quadratic Regulator)

Η θεωρία της ρύθμισης ασχολείται πολλές φορές και με την ρύθμιση μιας διεργασίας με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας της. Όταν η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος περιγράφεται από γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και το κόστος από μια δευτεροβάθμια εξίσωση, τότε το πρόβλημα της ρύθμισης μιας τέτοιας διεργασίας ονομάζεται γραμμικό δευτέρου βαθμού. Η λύση ενός τέτοιου προβλήματος δίνεται με την μορφή ενός ρυθμιστή με ανατροφοδότηση.

[Guidong Liu et al, 2006]

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται ένας LQR ρυθμιστής για την ρύθμιση του ρεύματος μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου. Ο σκοπός της εργασίας είναι η αντιμετώπιση των προβλημάτων που εμφανίζονται σε τέτοιες συστοιχίες, που προκαλούνται από την μεταβολή του ρεύματος. Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι η αυξομείωση του δυναμικού, η έλλειψη σε οξυγόνο, η διαταραχή στην πίεση ανόδου και καθόδου και η έλλειψη υγρασίας στη μεμβράνη. Ο ρυθμιστής που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία αποτελεί ένα μόνο μέρος του συνολικού συστήματος που προτείνεται για την σωστή διαχείριση της λειτουργίας της συστοιχίας. Συγκεκριμένα, ο ρυθμιστής αυτός, αφενός παρέχει στο σύστημα φορτίο

με σχεδόν σταθερό δυναμικό και αφετέρου σταθεροποιεί το ρεύμα με το να ρυθμίζει την φόρτιση ή την αποφόρτιση της μπαταρίας ανάλογα με την συνολική αλλαγή του φορτίου.

[Arango E. et al, 2007]

Σε αυτή την εργασία εφαρμόζεται η μεθοδολογία της LQR ρύθμισης με σκοπό να ρυθμιστεί μια συστοιχία κελιών καυσίμου. Ο LQR ρυθμιστής χρησιμοποιείται για να ρυθμιστεί το δυναμικό στην έξοδο του κελιού όταν παρουσιάζονται διάφορες αποκλίσεις.

1.2.1.3 Neural Control

Η θεωρία των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιείται εκτενώς στην έρευνα των κελιών καυσίμου εξαιτίας του γεγονότος ότι περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια την μη γραμμική συμπεριφορά τους. Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας μαζικά παράλληλα διανεμημένος επεξεργαστής αποτελούμενος από απλές μονάδες επεξεργασίας, ο οποίος έχει μία εκ φύσεως κλίση να αποθηκεύει εμπειρική γνώση και να τη χρησιμοποιεί. Η λειτουργία τους προσπαθεί να συνδυάσει τον τρόπο σκέψης του ανθρώπινου εγκεφάλου με τον αφηρημένο μαθηματικό τρόπο σκέψης. Το κύριο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι ότι οι πρώτες αρχές και λειτουργίες τους βασίζονται στο νευρολογικό σύστημα των ζώντων οργανισμών (και φυσικά του ανθρώπου), αλλά η μελέτη και η χρήση τους έχει προχωρήσει πολύ πέρα από τους βιολογικούς οργανισμούς, και σήμερα τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να λύσουν κάθε είδους προβλήματα με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

[Zhang L. et al, 2006]

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό της να παρουσιάσει και να προτείνει μια νέα μεθοδολογία για την ρύθμιση του δυναμικού που παράγεται σε ένα κελί καυσίμου τύπου PEM κάτι που διασφαλίζει υψηλή απόδοση του κελιού καυσίμου αλλά και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αρχικά μοντελοποιείται η συνολική διεργασία που λαμβάνει χώρα στο κελί καυσίμου με τη χρήση εξισώσεων μεταβλητών κατάστασης. Ακολούθως δημιουργείται ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου για το δυναμικό εξόδου

του κελιού. Το νευρωνικό αυτό δίκτυο αποτελείται από ένα στρώμα εισόδου (layer), ένα κρυμμένο στρώμα και ένα στρώμα εξόδου. Τέλος σχεδιάζεται ένας ρυθμιστής, ο οποίος βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα για την ρύθμιση του δυναμικού εξόδου του κελιού καυσίμου. Οι εισοδοί στον ρυθμιστή είναι οι μάζες του υδρογόνου, του οξυγόνου και του αζώτου και η έξοδος του είναι το δυναμικό του κελιού. Το κρυμμένο στρώμα είναι το ρεύμα του κελιού καυσίμου.

[Li Y. et al, 2007]

Σε αυτή την εργασία περιγράφεται μια μεθοδολογία για την ρύθμιση της θερμοκρασίας σε ένα κελί καυσίμου τύπου PEM με τη χρήση των τεχνητών νευρικών δικτύων (Artificial Neural Network, ANN). Πιο συγκεκριμένα σχεδιάζεται ένας PID ρυθμιστής ο οποίος συνδυάζει και τα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η χρήση των δικτύων αυτών κρίνεται αναγκαία όταν αντιμετωπίζονται προβλήματα ρύθμισης μεταβλητών ου παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Ο PID-ANN ρυθμιστής που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία αποτελείται από τρία στρώματα. Τα είδη νευρώνων που χρησιμοποιούνται είναι ο αναλογικός νευρώνας (proportion neuron), ο ολοκληρωτικός νευρώνας (integrate neuron) και ο αντίστροφος ολοκληρωτικός νευρώνας (disintegrate neuron).

1.2.1.4 Μοντέλα Ασαφούς Ρύθμισης (Fuzzy Control)

Τα μοντέλα ασαφούς ρύθμισης βασίζονται στην ασαφή λογική, ένα μαθηματικό σύστημα που δέχεται αναλογικές τιμές εισόδου και τις μετατρέπει σε λογικές μεταβλητές που παίρνουν τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1. Το πλεονέκτημα της ασαφούς λογικής είναι ότι οι λύσεις που δίνει στα διάφορα προβλήματα μπορούν να γίνουν εύκολα κατανοητές από τους απλούς χειριστές. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να σχεδιαστούν ρυθμιστές που μπορούν εύκολα να εκτελούν εντολές που μπορούσαν να εκτελέσουν μόνο οι άνθρωποι-χειριστές.

[Zhan Yuedong et al, 2007]

Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια στρατηγική ρύθμισης, κατάλληλη για κελιά καυσίμου τύπου PEM, η οποία βασίζεται στην ασαφή λογική (fuzzy logic). Η συγκεκριμένη προσέγγιση δοκιμάζεται σε μια συστοιχία που αποτελείται από 32 κελιά καυσίμου με παράλληλα κανάλια. Σχεδιάζεται ένας fuzzy-PI ρυθμιστής, ο οποίος ρυθμίζει κυρίως τις παροχές του υδρογόνου και του αέρα αλλά και τις δευτερεύουσες μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία στην μεμβράνη και η στοιχειομετρία του αέρα. Ο ρυθμιστής αυτός παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον PID ρυθμιστή, όπως ο υψηλός λόγος της απόδοσης προς το κόστος. Στην εργασία αυτή αποδεικνύεται πειραματικά ότι ο fuzzy-PID ρυθμιστής μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος όσον αφορά την απαίτηση σε ρεύμα και δυναμικό.

[Mo Zhijun et al, 2005]

Η εργασία αυτή επιχειρεί να εφαρμόσει την λογική της ασαφούς ρύθμισης στα κελιά καυσίμου τύπου PEM. Η λειτουργία των κελιών αυτών παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά. Σύμφωνα με την εργασία, η ασαφής ρύθμιση μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά αυτή τη συμπεριφορά. Αρχικά σχεδιάζεται ένα δυναμικό μοντέλο κελιών καυσίμου τύπου PEM με σκοπό να εφαρμοστεί πάνω σε αυτό ο ρυθμιστής που θα λειτουργεί με βάση την ασαφή λογική. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το μοντέλο του ρυθμιστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του δυναμικού του συστήματος των κελιών καυσίμου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες απαιτήσεις φορτίου καταδεικνύουν την υψηλή αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου τύπου ρυθμιστή.

[Michael Buchholz et al, 2007]

Σε αυτή την εργασία περιγράφεται μια μεθοδολογία για τον εντοπισμό και την απομόνωση τυχόν δυσλειτουργιών σε συστοιχίες κελιών καυσίμου τύπου PEM. Η μεθοδολογία ονομάζεται FDI (Fault Detection and Isolation) και βασίζεται στην ασαφή λογική. Με τη βοήθεια της μεθοδολογίας αυτής, η οποία βασίζεται στην μέτρηση του ρεύματος και του δυναμικού της συστοιχίας, μπορούν να ανιχνευθούν

και να απομονωθούν αποκλίσεις σε παραμέτρους όπως η πίεση των αερίων, η στοιχειομετρία και η υγρασία του παρεχόμενου αέρα.

1.2.1.5 Εύρωστη Ρύθμιση (Robust Control)

Η θεωρία εύρωστης ρύθμισης είναι ένας κλάδος της θεωρίας ρύθμισης που ασχολείται αποκλειστικά με το πρόβλημα της αβεβαιότητας σε ένα σύστημα ρύθμισης. Ο σχεδιασμός ενός ρυθμιστή που βασίζεται σε αυτή τη θεωρία είναι απαραίτητο να γίνει στη βάση ενός μοντέλου της πραγματικής διεργασίας. Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο ο ρυθμιστής να αλληλεπιδρά με το πραγματικό σύστημα και όχι με το μοντέλο του πραγματικού συστήματος.

[Methekar R.N. et al, 2007]

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία εύρωστης ρύθμισης, η οποία έχει ως στόχο την ρύθμιση ενός κελιού καυσίμου τύπου PEM το οποίο λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα κοντά στο μέγιστο της ισχύος που μπορεί να παράγει. Οι μεταβλητές εκ χειρισμού επιλέγονται να είναι οι μοριακές παροχές του υδρογόνου και του αέρα και οι ρυθμιζόμενες μεταβλητές επιλέγονται να είναι η μέση πυκνότητα ισχύος και η μέση θερμοκρασία. Η κατάλληλη επιλογή των μεταβλητών εκ χειρισμού, συμβάλει στο να μην υπάρχει αλλαγή σήματος όταν επιβάλλεται συγκεκριμένη ενίσχυση στο σύστημα. Για το λόγο αυτό είναι δυνατή η χρήση γραμμικών ρυθμιστών. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται διάφοροι γραμμικοί ρυθμιστές για την ρύθμιση των προαναφερθέντων ρυθμιζόμενων μεταβλητών αλλά και για την αποφυγή τυχόν έλλειψης οξυγόνου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κελιού. Το μειονέκτημα της όλης μεθοδολογίας είναι ότι οι γραμμικοί ρυθμιστές δεν λύνουν το πρόβλημα της αργής δυναμικής συμπεριφοράς στο σύστημα για τον απλό λόγο ότι οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα κελιά καυσίμου είναι μη γραμμικές.

[Fu-Cheng Wang, 2007]

Η συγκεκριμένη εργασία εφαρμόζει διάφορες στρατηγικές εύρωστης (robust) ρύθμισης σε ένα σύστημα κελιών καυσίμου τύπου PEM. Η δυναμική συμπεριφορά της συστοιχίας των κελιών καυσίμου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως τον

μηχανισμό της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, την πίεση, τις παροχές, τις μεταβολές στη θερμοκρασία και τις συγκεντρώσεις και είναι γενικά μη γραμμική και εξαρτάται από τον χρόνο. Παρόλα αυτά, από την οπτική μεριά του συστήματος, ένα κελί καυσίμου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα γραμμικό σύστημα με δύο εισόδους και δύο εξόδους, με εισόδους την παροχή του υδρογόνου και του αέρα και εξόδους το δυναμικό και το ρεύμα του κελιού. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, που είναι μη γραμμικά και εξαρτώνται από το χρόνο μπορούν να θεωρηθούν ως διαταραχές και αντιμετωπίζονται από τους εύρωστους ρυθμιστές (robust controllers). Η εργασία αυτή συνίσταται από τρία μέρη. Αρχικά, υιοθετούνται “τεχνικές ταυτοποίησης του συστήματος” (“system identification techniques”) με σκοπό τη μοντελοποίηση του συστήματος των κελιών καυσίμου. Ακολούθως σχεδιάζεται ένας ρυθμιστής H_∞ ο οποίος σταθεροποιεί το σύστημα. Τέλος, προστίθενται συντελεστές βάρους στον ρυθμιστή με σκοπό να συνδυαστεί “συμβιβαστικά” η απόδοση και η σταθερότητα του συστήματος. Όπως προκύπτει τόσο από την προσομοίωση, όσο και από τα πειραματικά δεδομένα, οι ρυθμιστές H_∞ που σχεδιάστηκαν ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικοί.

1.2.1.6 Μοντέλα Προβλεπτικής Ρύθμισης (Model Predictive Control, MPC)

Τα μοντέλα προβλεπτικής ρύθμισης είναι μια ιδιαίτερα εξελιγμένη μέθοδος ρύθμισης διεργασιών και χρησιμοποιείται ευρέως στη χημική βιομηχανία. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των εξαρτημένων μεταβλητών (μεταβλητών εξόδου) ενός δυναμικού συστήματος στο οποίο συμβαίνουν μεταβολές των ανεξάρτητων μεταβλητών (μεταβλητών εισόδου) του. Τα μοντέλα προβλεπτικού ελέγχου υπολογίζουν τις μελλοντικές τιμές των μεταβλητών εισόδου ενός συστήματος, για τις οποίες ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί που αφορούν τόσο τις μεταβλητές εισόδου, όσο και τις μεταβλητές εξόδου. Οι τιμές αυτές αποστέλλονται στον ρυθμιστή της συγκεκριμένης διεργασίας ως επιθυμητές τιμές (set points).

[Xiaouri Wang et al, 2006]

Αυτή η εργασία εφαρμόζει την μεθοδολογία της προβλεπτικής ρύθμισης στα κελιά καυσίμου τύπου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα χαρακτηριστικό μοντέλο (benchmark model) το οποίο συναντάται ευρέως στην βιβλιογραφία των δυναμικών μοντέλων και των μοντέλων ρύθμισης των SOFC's. Τα σημαντικά προβλήματα που έχουν προκύψει από τη μελέτη της ρύθμισης τόσο των κελιών καυσίμου τύπου SO, όσο και των άλλων ειδών κελιών καυσίμου είναι ο αργός χρόνος απόκρισης και οι πιεστικοί-“σφικτοί” (tight) λειτουργικοί περιορισμοί. Σε αυτή την εργασία, εφαρμόζεται μια μεθοδολογία προβλεπτικής ρύθμισης, που βασίζεται σε μια βάση δεδομένων, με την οποία επιτυγχάνεται η ρύθμιση του κελιού καυσίμου ενώ παράλληλα αντιμετωπίζονται και τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Η βάση δεδομένων πάνω στην οποία χτίζεται το μοντέλο της προβλεπτικής ρύθμισης αποτελείται από πολλές τιμές των μεταβλητών εξόδου και εισόδου του συστήματος. Για την δημιουργία αυτής της βάσης δεδομένων υπολογίζονται οι μεταβλητές εξόδου όταν γίνει εισαγωγή των μεταβλητών εισόδου στο σύστημα ανοιχτού βρόγχου (open loop) του κελιού καυσίμου. Ως μεταβλητές εισόδου επιλέγονται οι παροχές εισόδου του αέρα και του υδρογόνου και ως μεταβλητές εξόδου επιλέγονται το δυναμικό εξόδου του κελιού, ο λόγος του καταναλισκόμενου υδρογόνου προς το εισαγόμενο, ο λόγος του εισαγόμενου υδρογόνου προς το εισαγόμενο οξυγόνο και η διαφορά των μερικών πιέσεων του υδρογόνου και του οξυγόνου. Ως επιθυμητή τιμή τίθεται έμμεσα η ισχύς που παράγεται από το κελί με το να καθορίζεται το δυναμικό του συμπιεστή και η ένταση του ρεύματος του κελιού. Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της προβλεπτικής ρύθμισης επιχειρείται η ρύθμιση των τεσσάρων μεταβλητών εξόδου. Το ρεύμα στο κελί καυσίμου θεωρείται ως διαταραχή στο σύστημα ενώ η ισχύς εξόδου και η απαίτηση σε δυναμικό είναι δεδομένα στο σύστημα.

[Joshua Golbert et al, 2004]

Η εργασία αυτή περιγράφει το μοντέλο ενός προβλεπτικού ρυθμιστή, που χρησιμοποιείται για την ρύθμιση ενός κελιού καυσίμου τύπου PEM (Proton Exchange Membrane). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις χωρικές εξαρτήσεις του ρεύματος, του δυναμικού, της παροχής των αντιδρώντων και της θερμοκρασίας του κελιού. Η

λογική που συνήθως εντοπίζεται στη βιβλιογραφία αφορά στην εφαρμογή του ρυθμιστή σε ένα μοντέλο που περιγράφει επαρκώς την συμπεριφορά του κελιού καυσίμου. Στην εργασία αυτή μελετάται η συμπεριφορά ενός τέτοιου μοντέλου στο λειτουργικό εύρος ενός κελιού καυσίμου. Από τη μελέτη αυτή προκύπτει ότι η ενίσχυση της διεργασίας υφίσταται αλλαγή μέσα στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας, κάτι που υποδεικνύει ότι το κελί καυσίμου δεν μπορεί να ρυθμιστεί επαρκώς με τη χρήση ενός PI ρυθμιστή. Συνεπώς, για τη ρύθμιση του κελιού καυσίμου χρησιμοποιείται ένας μη γραμμικός προβλεπτικός ρυθμιστής, που επιτρέπει στο κελί καυσίμου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε ισχύ με εύρωστο τρόπο. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις, οι οποίες γίνονται σε περιβάλλον MATLAB® – SIMULINK, καταδεικνύουν ότι το κελί καυσίμου ρυθμίζεται αποδοτικότερα και με μεγαλύτερη ευρωστία με ένα προβλεπτικό ρυθμιστή παρά με έναν PI ρυθμιστή.

[Alicia Arce et al, 2007]

Αυτή η εργασία παρουσιάζει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων προβλεπτικής ρύθμισης σε ένα κελί καυσίμου τύπου PEM. Οι προσομοιώσεις διεξάγονται σε έναν λεπτομερή μη γραμμικό προσομοιωτή κελί καυσίμου ο οποίος έχει προηγουμένως επαληθευτεί με βάση πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τα κυριότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου, όπως η δυναμική συμπεριφορά για τη θερμοκρασία και η ρευστοδυναμική των αντιδρώντων. Η προβλεπτική ρύθμιση λαμβάνει υπόψη της την επίδραση της ανατροφοδότησης καθώς επίσης και διάφορους φυσικούς περιορισμούς. Η εργασία αυτή προτείνει τρεις ρυθμιστές για την επίτευξη τριών διαφορετικών στόχων: της επίτευξης μέγιστης απόδοσης, της αποτροπής της έλλειψης των αντιδρώντων και της καταγραφής του δυναμικού της αντλίας του συμπιεστή του αέρα. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα ενός αναλογικού ρυθμιστή που λειτουργεί σε ένα πραγματικό εργοστάσιο.

1.2.2 Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κελιών καυσίμου είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα, όχι όμως τόσο όμως με την αυστηρή έννοια του όρου -που ουσιαστικά υποδηλώνει τη διαμόρφωση του αντίστοιχου προβλήματος- όσο από την παραμετρική μελέτη και ποιοτική κυρίως ανάλυση των αποτελεσμάτων για διάφορα συστήματα κελιών καυσίμου.

[Junxiao Wu et al, 2005]

Στην εργασία αυτή, επιχειρείται η μεγιστοποίηση της ολικής απόδοσης μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου μέσω της βελτιστοποίησης τεσσάρων λειτουργικών παραμέτρων: της θερμοκρασίας των κελιών καυσίμου, της στοιχειομετρίας στην κάθοδο, της πίεσης στην κάθοδο και της σχετικής υγρασίας στην κάθοδο.

[Rodatz P. et al, 2003]

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο την ρύθμιση της κατανομής της ισχύος ανάμεσα στον πυκνωτή και τα κελιά καυσίμου ενός υβριδικού οχήματος έτσι ώστε η κατανάλωση του υδρογόνου να είναι η ελάχιστη δυνατή.

[Pukrushpan et al, 2004]

Στο Κεφάλαιο 5 του βιβλίου αυτού περιγράφονται διάφορες μεθοδολογίες ρύθμισης μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου τύπου PEM, η οποία έχει ως στόχο την αποτροπή της έλλειψης οξυγόνου όταν η απαίτηση σε ισχύ αυξομειώνεται ξαφνικά. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρεται ότι ένας σημαντικός παράγοντας για να αποφευχθεί η έλλειψη οξυγόνου είναι η διατήρηση του λόγου λ_{O_2} σε επιθυμητά όρια. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται η τιμή $\lambda_{O_2}=2$ όμως αναφέρεται ξεκάθαρα η μελλοντική ανάγκη για την εύρεση των βέλτιστων τιμών του λόγου λ_{O_2} για κάποια δεδομένη απαίτηση ισχύος.

[Zervas P.L., Tatsis A, Sarimveis H., Markatos N. C. G., 2008]

Στην εργασία αυτή ακολουθείται η πορεία δημιουργία βάσης δεδομένων → μεταμοντελοποίηση → βελτιστοποίηση. Προτείνεται μια μεθοδολογία για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας προκειμένου ένα κελί καυσίμου φωσφορικού οξέος να καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ποσότητα καυσίμου για δεδομένη απαίτηση ισχύος. Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται ότι στο μέλλον, η πορεία βελτιστοποίησης θα μπορούσε να επεκταθεί και στην ρύθμιση του κελιού καυσίμου με ένα MPC ρυθμιστή.

[Τάτσης Α., 2006]

Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία έχει ως θέμα της την διερεύνηση των παραμέτρων λειτουργίας των κελιών καυσίμου φωσφορικού οξέος με χρήση ενός ρευστοδυναμικού μοντέλου επίλυσης. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι περισσότερο η βελτίωση και όχι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κελιών καυσίμου.

[Βατόπουλος Ι, 2007]

Σε αυτή την εργασία αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου φωσφορικού οξέος. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της επίδρασης κάποιων σημαντικών παραμέτρων στη λειτουργία του κελιού καυσίμου. Η πορεία που ακολουθείται στην εργασία αυτή είναι αρχικά η μελέτη αυτών των παραμέτρων, στη συνέχεια η μεταμοντελοποίηση και τελικά η βελτιστοποίηση.

1.3 Διάρθρωση της Εργασίας

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται αρχικά μια μεθοδολογία που αποσκοπεί στην εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας ενός μοντέλου κελιών καυσίμου υδρογόνου. Στη συνέχεια αναπτύσσεται μια μεθοδολογία ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου, η οποία και εφαρμόζεται στο μοντέλο κελιών καυσίμου υδρογόνου, με σκοπό την εύρωστη και βέλτιστη λειτουργία της συστοιχίας. Πιο συγκεκριμένα η

διάρθρωση της εργασίας καθώς και μία σύντομη περιγραφή του κάθε κεφαλαίου δίνεται παρακάτω:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η τεχνολογία των κελιών καυσίμου. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις βασικές αρχές λειτουργίας τους και δίνεται έμφαση στο θεωρητικό υπόβαθρο των αρχών αυτών. Ακόμα, γίνεται σύντομη περιγραφή των διαφόρων ειδών κελιών καυσίμου που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια παρουσίαση του μοντέλου της συστοιχίας κελιών καυσίμου υδρογόνου, τύπου PEM, στο οποίο εφαρμόζονται οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης και ρύθμισης. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα λεπτομερές μοντέλο που προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά μιας πραγματικής συστοιχίας.

Το Κεφάλαιο 4 αποτελεί το πρώτο μέρος της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία της δημιουργίας της βάσης δεδομένων και της μεταμοντελοποίησης. Τα στοιχεία της βάσης δεδομένων εξάγονται από το σύστημα ανοιχτού βρόχου του μοντέλου της συστοιχίας. Κατά την μεταμοντελοποίηση αναπτύσσονται διάφορες γραμμικές και μη γραμμικές συσχετίσεις ανάμεσα στις μεταβλητές εκ χειρισμού και τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές του συστήματος, από τις οποίες τελικά επιλέγονται οι πιο ακριβείς και οι πιο αξιόπιστες. Η επιλογή τους γίνεται με βάση ειδικές μεθοδολογίες αξιολόγησης.

Το Κεφάλαιο 5 ασχολείται με την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αρχικά διατυπώνεται φορμαλιστικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια διατυπώνεται η αντικειμενική συνάρτηση και περιγράφεται η πορεία επίλυσης του προβλήματος.

Στο Κεφάλαιο 6 εισάγονται οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας Ρύθμισης Προβλεπτικού Μοντέλου (Model Predictive Control, MPC). Επιπλέον, παρουσιάζεται εκτενώς ένα συγκεκριμένο είδος MPC ρυθμιστών: οι ρυθμιστές δυναμικού μητρώου (Dynamic Matrix Control, DMC).

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται αρχικά ο σχεδιασμός ενός MPC-DMC ρυθμιστή. Ο ρυθμιστής αυτός σχεδιάζεται έτσι ώστε να ρυθμίζει το μοντέλο της συστοιχίας κελιών καυσίμου με βάση τις βέλτιστες παραμέτρους λειτουργίας που υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 5. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην επιλογή των συντελεστών βάρους του ρυθμιστή. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται ακόμα η σύγκριση των αποτελεσμάτων

που προκύπτουν από τον ρυθμιστή που σχεδιάστηκε και από ένα ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση αλλά και από μια πραγματική συστοιχία κελιών καυσίμου.

Στο Κεφάλαιο 8, τέλος, παρουσιάζονται εκτενώς τα διάφορα συμπεράσματα που προκύπτουν τόσο από την πορεία βελτιστοποίησης όσο και από την μεθοδολογία ρύθμισης ενώ γίνονται και κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.



2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Κελιά καυσίμου-Βασικές Αρχές

2.1.1 Εισαγωγή

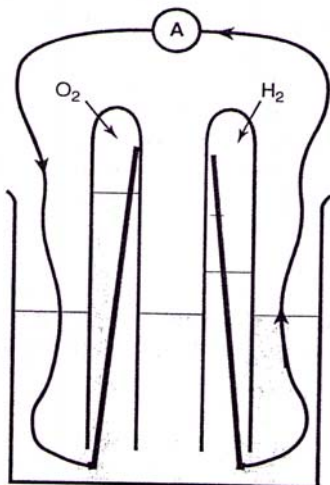
Στη σύγχρονη ελληνική βιβλιογραφία παρουσιάζονται τρεις όροι προς απόδοση του αγγλικού “fuel cell”. Αυτοί είναι οι όροι «στοιχείο καυσίμου ή στοιχείο υδρογόνου», «κελί καυσίμου ή κελί υδρογόνου» ή ο πολύ διαδεδομένος στο χώρο της τεχνολογίας καυσίμων και λιπαντικών, «κυψελίδα καυσίμου ή κυψελίδα υδρογόνου». Ο πρώτος όρος από αυστηρά ηλεκτροχημική σκοπιά είναι και ο ορθότερος. Όμως οι δύο τελευταίοι όροι τυγχάνουν ευρύτερης αποδοχής και σε γενικές γραμμές αυτή τη στιγμή είναι προσφιλέστεροι στην επιστημονική κοινότητα. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί κατά βάση ο δεύτερος όρος. Να σημειωθεί ότι ο μοναδικός επίσημος οργανισμός ο οποίος έχει εκφράσει θέση σχετικά με την απόδοση του όρου “fuel cell” και “fuel cell stack” είναι το Ελληνικό Ινστιτούτο Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων (ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο.) σύμφωνα με το οποίο οι ορθές αποδόσεις των προαναφερθέντων όρων είναι «ενεργειακό στοιχείο» και «ενεργειακή συστοιχία».

Τα κελιά καυσίμου, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας κυρίως υδρογόνο το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με ταυτόχρονη παραγωγή θερμότητας και νερού. Λειτουργούν με βάση τις αρχές λειτουργίας μιας κοινής μπαταρίας με τη διαφορά ότι το κελί καυσίμου λειτουργεί σαν χημικός αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας όσο τροφοδοτείται με υδρογόνο και οξυγόνο και δεν «αδειάζει» ή δεν χρειάζεται κάποια επαναφόρτιση. Η όλη ηλεκτροχημική αντίδραση πραγματοποιείται μέσω δύο ηλεκτροδίων που στο ενδιάμεσό τους περιέχεται ένας ιοντικά αγωγίμος ηλεκτρολύτης. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός κελιού καυσίμου είναι η ικανότητά του να μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με πολύ υψηλά ποσοστά απόδοσης, υψηλότερα από οποιοδήποτε άλλο θερμομηχανικό σύστημα. Επιπλέον η όλη διάταξη λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα θορύβου από τη στιγμή που δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη όπως υπάρχουν στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

2.1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Η βασική λειτουργία των κελιών καυσίμου (Fuel Cells) υδρογόνου είναι απλή. Η πρώτη παρουσίαση τους πραγματοποιήθηκε από τον William Grove το 1839, ο

οποίος χρησιμοποίησε ένα απλό πείραμα σύμφωνα με το οποίο το νερό ηλεκτρολύεται σε υδρογόνο και οξυγόνο κατά τη διέλευσή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτού.



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρόλυση του νερού. Παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος

Μία διαφορετική προσέγγιση της λειτουργίας των κελιών καυσίμου είναι ότι το υδρογόνο καταναλώνεται σύμφωνα με την εξής απλή χημική αντίδραση:



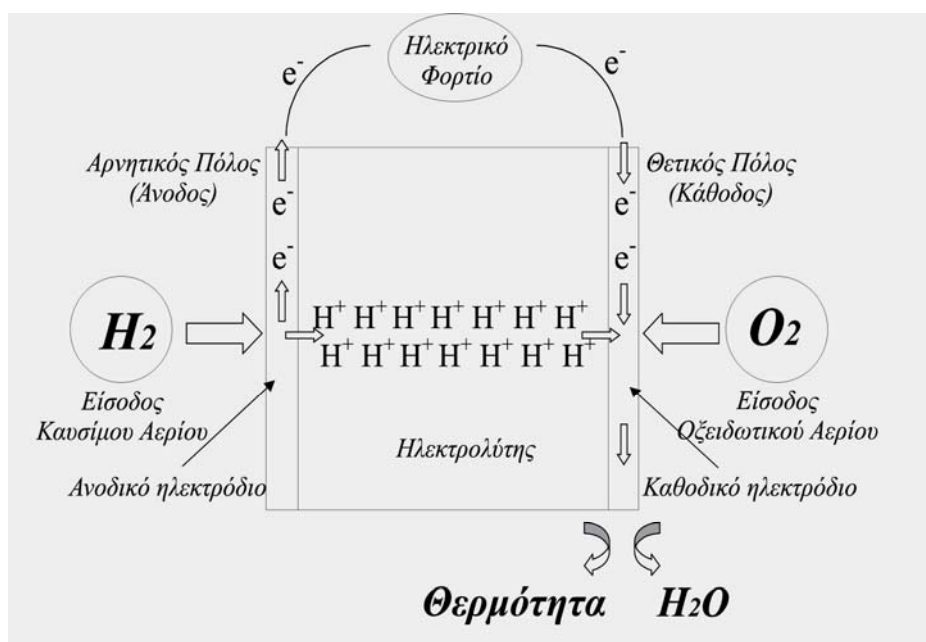
Σύμφωνα με τη χημική αντίδραση παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και απελευθέρωση θερμικής ενέργειας.

Σε συνέχεια των πειραμάτων πάνω στην ηλεκτρόλυση ο Grove πραγματοποίησε ένα πείραμα κατά το οποίο ηλεκτρική ενέργεια παραγόταν από την αντίστροφη της ηλεκτρόλυσης διεργασία. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράχθηκε ήταν πολύ μικρής έντασης. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από τους εξής δύο λόγους οι οποίοι οδήγησαν και στη σημερινή μορφή που έχουν πάρει τα κελιά καυσίμου:

- Η μικρή επιφάνεια επαφής ανάμεσα στα αέρια, στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη

- Η μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια-ηλεκτρολύτη εμποδίζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως επίπεδα με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη. Η δομή των ηλεκτροδίων είναι πορώδης έτσι ώστε να είναι διαπερατά από τον ηλεκτρολύτη και τα αέρια (υδρογόνο, οξυγόνο). Η πορώδης δομή των ηλεκτροδίων αυξάνει κατά μεγάλο βαθμό την αποτελεσματική επιφάνεια, δηλαδή την επιφάνεια επαφής των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη και των αερίων.



Σχήμα 2.2: Σχηματική παρουσίαση κελιού καυσίμου

Παρόλα αυτά για την κατανόηση της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της αντίδρασης του υδρογόνου και του οξυγόνου, καθώς και της πηγής προέλευσης των ηλεκτρονίων, πρέπει να θεωρηθούν ξεχωριστά οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε κάθε ηλεκτρόδιο (άνοδος / κάθοδος).

Άνοδος (+)

Στο ηλεκτρόδιο της ανόδου ενός όξινου ηλεκτρολύτη (Σχήμα 2.4) (επιτρέπει τη διέλευση κατιόντων) σε ένα κελί καυσίμου, το αέριο υδρογόνο ιονίζεται

απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας παράλληλα ιόντα H^+ (ή πρωτόνια):

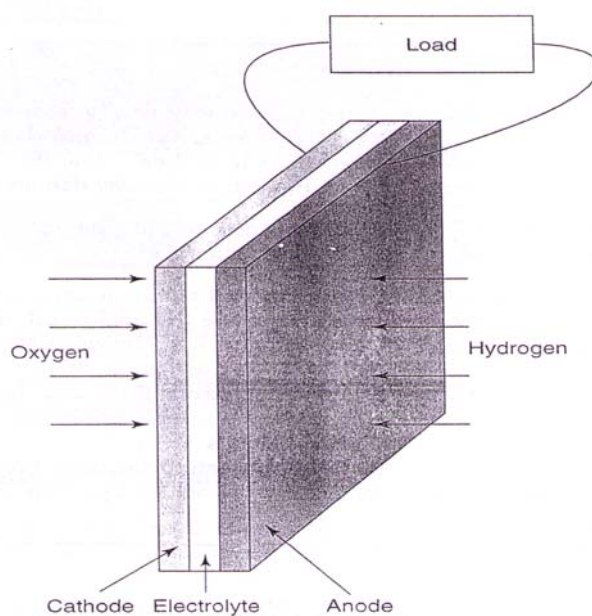


Κάθοδος (-)

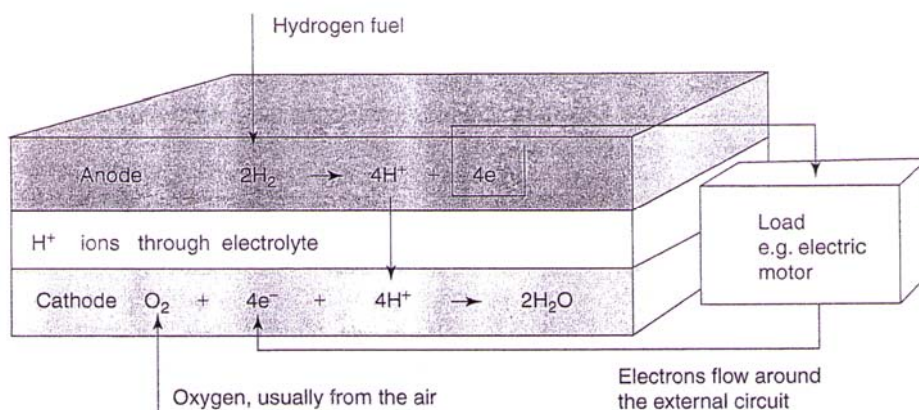
Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που μετακινούνται από το ηλεκτρόδιο της καθόδου προς το ηλεκτρόδιο της ανόδου και τα ιόντα H^+ που διέρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας νερό σύμφωνα με την αντίδραση:



Η συνεχής διεξαγωγή των αντιδράσεων απαιτεί τη διαρκή ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο διαμέσου ενός κλειστού κυκλώματος. Επίσης η διέλευση H^+ γίνεται μέσω ηλεκτρολύτη. Οι ηλεκτρολύτες που εξυπηρετούν το σκοπό αυτό ονομάζονται όξινοι ηλεκτρολύτες.



Σχήμα 2.3: Βασική σύνδεση καθόδου – ηλεκτρολύτη - ανόδου ως προς τη διαμόρφωση ενός κελιού καυσίμου



Σχήμα 2.4: Ροή φορτίου και αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια ενός κελιού καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη.

Άνοδος (+)

Σε ένα κελί καυσίμου με αλκαλικό ηλεκτρολύτη η όλη διαδικασία είναι ίδια, όμως οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται ξεχωριστά σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι διαφορετικές. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης επιτρέπει τη διέλευση ιόντων OH^- . Στην άνοδο τα ιόντα OH^- αντιδρούν με το υδρογόνο απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια, ενώ παράλληλα παράγεται νερό:



Κάθοδος (-)

Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από τα ηλεκτρόδια και το νερό μέσω του ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας νέα ιόντα OH^- .

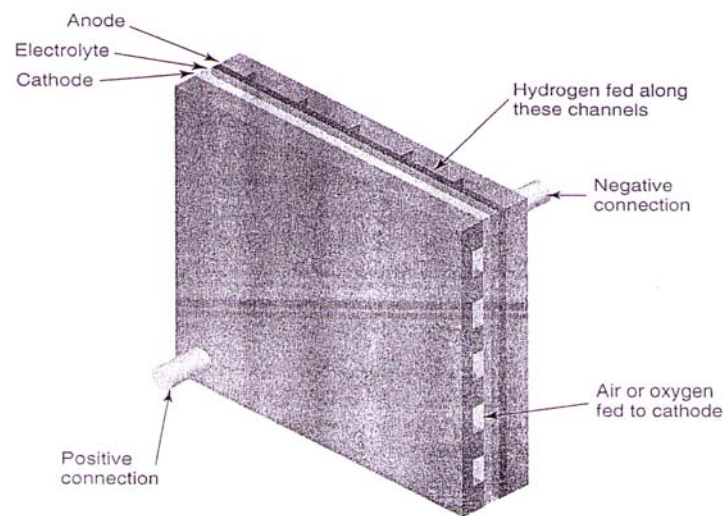


Και στην περίπτωση κελιών καυσίμου με αλκαλικό ηλεκτρολύτη για τη συνεχή πραγματοποίηση των αντιδράσεων τα ιόντα OH^- πρέπει να διέρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη (αλκαλικός), ενώ είναι επίσης αναγκαία η ύπαρξη κλειστού κυκλώματος για την ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο.

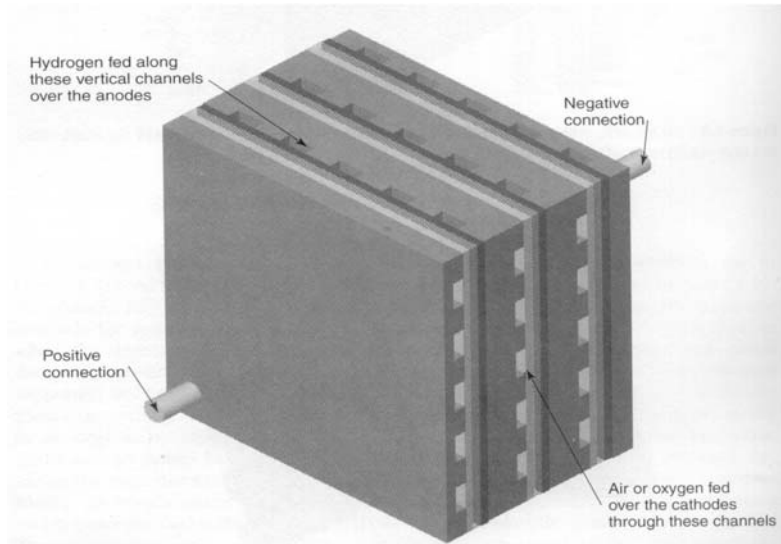
2.2 Συστοιχία κελιών καυσίμου (stack)-Διπολικές πλάκες (bipolar plates)

Για την αύξηση του δυναμικού του κελιού καυσίμου (σημαντικά μικρό συνήθως 0.7V) απαιτείται η σύνδεση διαδοχικών κελιών καυσίμου σε σειρά με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συστοιχίας (stack). Η διασύνδεση των κελιών καυσίμου σε σειρά πραγματοποιείται με τη χρήση των διπολικών πλακών (bipolar plates).

Οι διπολικές πλάκες επομένως επιτρέπουν τη σύνδεση πολλών κελιών καυσίμου σε σειρά προς το σχηματισμό συστοιχίας. Οι πλάκες αυτές έχουν κατάλληλα διαμορφωμένα κανάλια για τη ροή των αερίων, δηλαδή του υδρογόνου και του οξυγόνου, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Έτσι από τη μία πλευρά έχουν κατακόρυφα διαμορφωμένα κανάλια για τη ροή του καυσίμου (υδρογόνου) και από την άλλη πλευρά οριζόντια για τη ροή του οξειδωτικού (οξυγόνο/ αέρας).



Σχήμα 2.5 : Διάταξη ενός μεμονωμένου κελιού καυσίμου με τερματικές πλάκες για ροή του ρεύματος εξωτερικά του κελιού καυσίμου



Σχήμα 2.6: Μία συστοιχία κελιών καυσίμου 3 μονάδων, όπου διακρίνεται η σύνδεση της ανόδου και της καθόδου δύο γειτονικών διπολικών πλακών

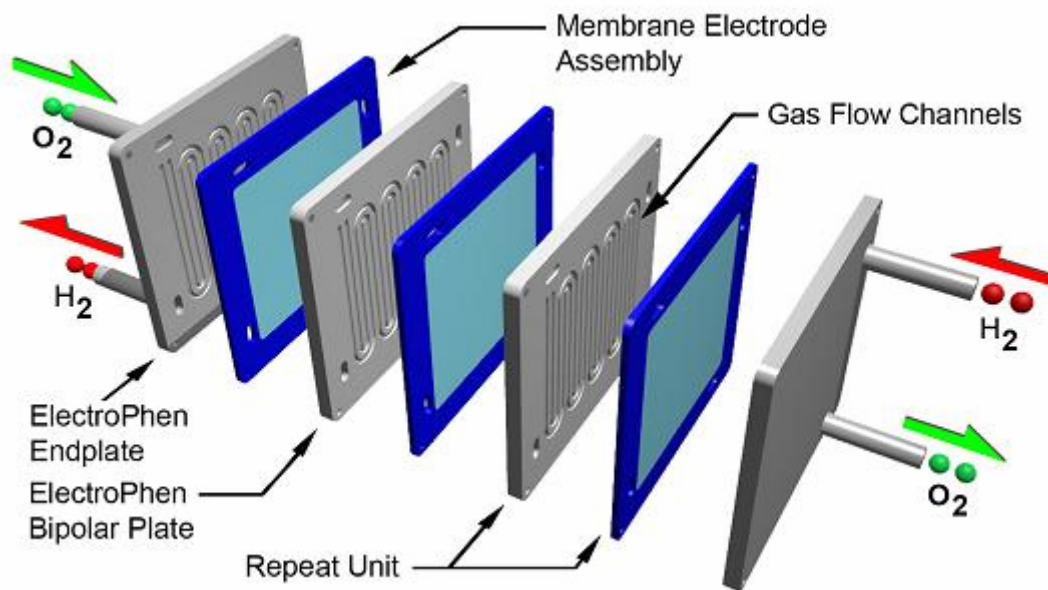
Ανάμεσα σε δύο διαδοχικές διπολικές πλάκες τοποθετούνται διαδοχικά τα εξής:

- Ηλεκτρόδιο ανόδου
- Ηλεκτρολύτης
- Ηλεκτρόδιο καθόδου

Οι διπολικές πλάκες μπορούν να έχουν και επιπλέον διαμορφώσεις εκτός των κύριων καναλιών ροής για την κυκλοφορία ψυκτικού υγρού. Αυτό είναι σημαντικό για τα κελιά καυσίμου με υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας.



Σχήμα 2.7: Διπολική πλάκα από γραφίτη



Σχήμα 2.8: Συστοιχία Κελιών καυσίμου με διπολικές πλάκες

2.3 Είδη κελιών καυσίμου

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

- χαμηλής έντασης ρεύμα και ισχύς που οφείλεται στον μικρό ρυθμό των αντιδράσεων
- το υδρογόνο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο καύσιμο

Οι διαφορετικοί τύποι κελιών καυσίμου διακρίνονται με βάση τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Συνεπώς διακρίνονται έξι (6) διαφορετικά είδη κελιών καυσίμου. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται βασικές πληροφορίες για τα είδη αυτά των κελιών καυσίμου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η τεχνολογία Proton Exchange Membrane (PEM) που θα αποτελέσει το κυρίως αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ τα υπόλοιπα είδη κελιών καυσίμου παρουσιάζονται περιληπτικά.

Πίνακας 2.1: Πληροφορίες για τα διαφορετικά είδη κελιών καυσίμου

| <i>Είδος κελιού καυσίμου</i> | <i>Μεταφέσιμο ιόν</i> | <i>Θερμοκρασία λειτουργίας</i> | <i>Εφαρμογή και σημειώσεις</i> |
|---|-----------------------|--------------------------------|---|
| Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) | H ⁺ | 30-100 °C | Οχήματα, σε κινούμενες εφαρμογές και σε χαμηλής ισχύος συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου (CHP systems) |
| Αλκαλικά (AFC) | OH ⁻ | 50-200° C | Διαστημικές εφαρμογές |
| Μεθανόλης (DMFC) | H ⁺ | 20-90 °C | Κατάλληλα για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος, φορτιστές πολλαπλών χρήσεων |
| Φωσφορικού Οξέος (PAFC) | H ⁺ | ~220 °C | Μεγάλη εφαρμογή σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος 200 kW (CHP systems) |

| | | | |
|--|--------------------|--------------------------|---|
| Τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC) | CO_3^{2-} | $\sim 650^\circ\text{C}$ | Κατάλληλα για μέσης-μεγάλης ισχύος συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος MW (CHP systems) |
| Στερεού οξειδίου (SOFC) | O^{2-} | $500-1000^\circ\text{C}$ | Για όλα τα μεγέθη των CHP συστημάτων 2kW-MW |

2.3.1 Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)

Τα κελιά καυσίμου τύπου PEM, γνωστά και ως κελιά καυσίμου πολυμερικής ηλεκτρολυτικής μεμβράνης ή μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, είναι ένας τύπος κελιών καυσίμου που σχεδιάστηκε με σκοπό να βρει χρήση τόσο σε στατικές, όσο και σε κινητές εφαρμογές. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των κελιών είναι ότι λειτουργούν σε χαμηλό σχετικά εύρος θερμοκρασίας ($50 - 100^\circ\text{C}$) και πίεσης και ότι ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται σε αυτά είναι μια πολυμερής μεμβράνη. Τα κελιά καυσίμου τύπου PEM αποτελούν την πρώτη επιλογή για τις εταιρίες που κατασκευάζουν υβριδικά αυτοκίνητα αλλά και για τις εταιρίες που παράγουν κινητές κατασκευές όλων των ειδών και μεγεθών, ακόμα και κινητά τηλέφωνα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι τα κελιά καυσίμου είναι συμπαγείς κατασκευές με χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας

Η ηλεκτρόλυση στα κελιά καυσίμου τύπου PEM καθίσταται δυνατή μέσω της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Για να λειτουργεί σωστά το κελί καυσίμου θα πρέπει η μεμβράνη να άγει τα πρωτόνια (αλλά όχι και τα ηλεκτρόνια) του υδρογόνου από την άνοδο προς την κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται και αυτά από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω όμως ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος που δημιουργείται, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια τάση ρεύματος. Η

μεμβράνη θα πρέπει επιπλέον να εμποδίζει την διέλευση των αερίων αντιδρώντων (υδρογόνου και αέρα). Τέλος, η μεμβράνη θα πρέπει να είναι ανθεκτική στο ισχυρά οξειδωτικό περιβάλλον της ανόδου.

Η λειτουργία και η απόδοση των κελιών καυσίμου τύπου PEM επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα της μεμβράνης σε νερό. Υπερβολική ποσότητα νερού στην μεμβράνη μπορεί να προκαλέσει υπερκορεσμό της ενώ μικρή ποσότητα νερού πιθανόν να προκαλέσει ξήρανση της. Και στις δύο περιπτώσεις το κελί καυσίμου κινδυνεύει να διακόψει την λειτουργία του. Η ρύθμιση της περιεκτικότητας της μεμβράνης των κελιών καυσίμου τύπου PEM σε νερό είναι ένα αρκετό δύσκολο έργο. Μεταξύ των λύσεων που έχουν προταθεί είναι και η χρήση μιας ηλεκτροοσμωτικής αντλίας, η οποία θα μεταφέρει μάζα νερού προς και από την μεμβράνη ανάλογα με το αν η περιεκτικότητα της σε νερό είναι λιγότερη ή περισσότερη από το επίπεδο πρέπει. Ένα άλλο θέμα που απασχολεί τους κατασκευαστές είναι ο κίνδυνος δηλητηρίασης του καταλύτη που βρίσκεται στη μεμβράνη. Ο καταλύτης είναι συνήθως φτιαγμένος από πλατίνα και μπορεί εύκολά να δηλητηριαστεί από μερικά μόνο ppm μονοξειδίου του άνθρακα CO, τα οποία μπορεί να προέλθουν από τυχόν διάβρωση των μεταλλικών διπολικών πλακών.

2.3.2 Αλκαλικά κελιά καυσίμου (Alkaline Fuel Cells)

Το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού αντίδρασης αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια υψηλού πορώδους με καταλύτη λευκόχρυσο (platinum), ενώ συνήθως λειτουργούν και σε υψηλές πιέσεις. Συνήθως θερμοκρασία λειτουργίας είναι 100° C. Το κύριο πρόβλημά τους είναι ότι το καύσιμο δεν πρέπει να περιέχει CO₂ διότι δηλητηριάζεται ο καταλύτης χάνοντας τις ιδιότητές του.

2.3.3 Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells)

Ονομάζονται κελιά καυσίμου απευθείας μεθανόλης γιατί η μεθανόλη χρησιμοποιείται σε υγρή μορφή. Μολονότι είναι μικρής ισχύος παρουσιάζουν ραγδαία και συνεχώς εξελισσόμενη εφαρμογή εξαιτίας του μεγάλου εύρους των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών.

2.3.4 Φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells)

Τα κελιά καυσίμου φωσφορικού οξέος ήταν τα πρώτα που παράχθηκαν στο εμπόριο. Για την επίτευξη ενός ικανοποιητικού ρυθμού αντίδρασης χρησιμοποιείται καταλύτης λευκόχρυσου, τα ηλεκτρόδια είναι πορώδους μικροδομής και λειτουργούν σε μία αρκετά υψηλή θερμοκρασία $\sim 220^{\circ}\text{C}$. Στο συγκεκριμένο τύπο κελιών καυσίμου το υδρογόνο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο προέρχεται από αναμόρφωση (reforming) φυσικού αερίου ως μίγμα υδρογόνου-διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).

2.3.5 Τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells)

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας επιτυγχάνεται ικανοποιητικός ρυθμός αντίδρασης, γεγονός που καθιστά εφικτή τη χρήση ενός σχετικά πιο φθηνού καταλύτη όπως είναι το νίκελ. Μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με μεθάνιο και μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα (H_2, CO) χωρίς αναμόρφωση (reforming). Αξίζει να σημειωθεί ότι απαιτεί την παρουσία CO_2 στον αέρα για να λειτουργήσει.

2.3.6 Στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα την επίτευξη ικανοποιητικών ρυθμών αντίδρασης ακόμη και με τη χρήση σχετικά φθηνότερων καταλυτών. Επιπλέον είναι δυνατή η χρήση φυσικού αερίου ως καυσίμου απευθείας και χωρίς αναμόρφωση. Όμως ακριβώς λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας η χρήση κεραμικών υλικών για την κατασκευή των συγκεκριμένων κελιών καυσίμου απαιτεί δύσκολο χειρισμό κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή τους, ενώ επιπλέον απαιτείται και ένας επιπρόσθετος εξοπλισμός για τη σωστή λειτουργία τους (πολύπλοκο σύστημα ψύξης, προθερμαντήρες καυσίμου και αέρα), καθιστώντας την εκκίνηση της λειτουργίας του συστήματος δύσκολη.

2.4 Θεωρητική προσέγγιση των βασικών αρχών λειτουργίας των κελιών καυσίμου

2.4.2 Πρότυπο ηλεκτροδιακό δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος

Σε ένα κοινό μηχανικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η εισερχόμενη καθώς και η εξερχόμενη ενέργεια είναι σαφώς καθορισμένες και ως εκ τούτου, είναι εύκολος και ο προσδιορισμός της απόδοσης του συστήματος. Ένα παράδειγμα αποτελεί η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου, μέσω των ανεμογεννητριών σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Σε ένα κελί καυσίμου υπάρχει ασάφεια στον καθορισμό της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η εισερχόμενη ενέργεια είναι η χημική ενέργεια του υδρογόνου και του οξυγόνου ενώ η εξερχόμενη είναι η ηλεκτρική, η θερμική και η χημική ενέργεια του παραγόμενου νερού. Οι διάφορες χημικές ενέργειες δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμες και έτσι η μοναδική προσέγγιση που πραγματοποιείται είναι από τη σκοπιά της Θερμοδυναμικής.

Αυτό λοιπόν που ενδιαφέρει από Θερμοδυναμικής σκοπιάς είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs λόγω χημικής αντίδρασης, $\Delta_r G_m^\circ$, η οποία μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης:

$$\Delta_r G_m^\circ = \sum_B \nu_i \Delta_f G_m^\circ(i) \quad (2.6)$$

και για την περίπτωση της αντίδρασης σχηματισμού του νερού, η παραπάνω σχέση γίνεται:



$$\begin{aligned} \Delta_r G_m^\circ(298.15K) = & 1 \cdot \Delta_f G_m^\circ(H_2O, 298.15K) + (-1) \cdot \Delta_f G_m^\circ(H_2, 298.15K) \\ & + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \Delta_f G_m^\circ(O_2, 298.15K) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Ο τύπος υπολογισμού του $\Delta_r G_m^\circ$ που παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.8 χρησιμοποιείται εφόσον η αντίδραση συμβαίνει σε θερμοκρασία 298.15K αφού μόνο

για αυτή τη θερμοκρασία υπάρχουν δεδομένα. Για διαφορετικές θερμοκρασίες απαιτείται η χρήση διαφορετικών τύπων υπολογισμού (Μασαβέτας Κ. (2001))

Το ηλεκτρικό έργο που παράγεται είναι ίσο με το συνολικό φορτίο επί το δυναμικό του κελιού. Το δυναμικό αυτό ονομάζεται πρότυπο δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (open circuit voltage, OCV). Όμως το ηλεκτρικό έργο, στην περίπτωση αντιστρεπτών διεργασιών, θα είναι ίσο με τη μεταβολή της ελεύθερης κατά Gibbs ενέργειας σχηματισμού. Έτσι, ένας άλλος τύπος υπολογισμού του $\Delta_f G_m^\circ$ είναι:

$$\Delta_f G_m^\circ = -\nu F E^\circ \quad (2.9)$$

Όπου:

ν : ηλεκτρόνια που ανταλλάσσονται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης

F: σταθερά Faraday

E° : πρότυπο ηλεκτροδιακό δυναμικό

Έτσι γνωρίζοντας για κάθε θερμοκρασία τη $\Delta_f G_m^\circ$ υπολογίζεται το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος του κελιού. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αναφορά γίνεται για συνθήκες σταθερής πίεσης και μεταβλητής θερμοκρασίας. Στον Πίνακα 2.2 παρατίθεται το $\Delta_f G_m^\circ$ της αντίδρασης παραγωγής του νερού για ένα ικανοποιητικό εύρος θερμοκρασιών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ακριβής υπολογισμός της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs είναι δυνατός μέσα από αναλυτικές σχέσεις, η παρουσίαση των οποίων όμως ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας εργασίας. Ακόμα, ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του πρότυπου δυναμικού σε μία θερμοκρασία παρέχεται μέσω της εξίσωσης 2.10

Πίνακας 2.2: $\Delta_f G_m^\circ$ αντίδρασης παραγωγής νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας

| <i>Φυσική κατάσταση του παραγόμενου νερού</i> | <i>Θερμοκρασία [$^\circ\text{C}$]</i> | <i>$\Delta_f G_m^\circ$ [kJ/mol]</i> |
|---|--|---|
| Υγρό | 25 | -237,2 |
| Υγρό | 80 | -228,2 |
| Αέριο | 80 | -226,1 |
| Αέριο | 100 | -225,2 |
| Αέριο | 200 | -220,4 |
| Αέριο | 400 | -210,3 |
| Αέριο | 600 | -199,6 |
| Αέριο | 800 | -188,6 |
| Αέριο | 1000 | -177,4 |

$$E_t^0 = E_{25}^0 + \frac{dE^0}{dt}(t - 25) \quad (2.10)$$

Ο όρος $\frac{dE^0}{dt}$ ονομάζεται ισοθερμικός συντελεστής πρώτης τάξης και είναι γνωστός για μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (Κουλουμπή (2002)).

2.4.3 Πυκνότητα ρεύματος-Πυκνότητα ισχύος

Η διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ενός κελιού καυσίμου προκαλεί τη δημιουργία κάποιου ρεύματος I . Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες από τους βασικότερους των οποίων είναι η αποτελεσματικότητα του καταλύτη. Πολλές φορές επιδιώκεται η σύγκριση διαφορετικών κελιών καυσίμου

τα οποία αποτελούνται από ηλεκτρόδια με διαφορετική ενεργή επιφάνεια. Για αυτό το λόγο ορίζεται η πυκνότητα ρεύματος i (στη βιβλιογραφία συχνά συναντάται και με το σύμβολο J) ως το πηλίκο του ρεύματος I προς την ενεργή επιφάνεια A_{eff} του ηλεκτροδίου από όπου διέρχεται αυτό (καθαρά δηλαδή για λόγους αδιαστατοποίησης του μεγέθους του ηλεκτρικού ρεύματος):

$$i = \frac{I}{A_{eff}} \quad (2.11)$$

Ακόμη, μία πολύ χρήσιμη έννοια που συναντάται συχνά είναι αυτή της πυκνότητας ισχύος (power density, PD) που μετράται σε W/m^2 και που όπως και η πυκνότητα ρεύματος χρησιμοποιείται για τη σύγκριση κελιών καυσίμου διαφορετικών διαστάσεων (με την προϋπόθεση πάντα ότι μεταβάλλεται και η ενεργή επιφάνεια των ηλεκτροδίων). Η πυκνότητα ισχύος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$PD = Vi \quad (2.12)$$

2.4.4 Απόδοση κελιού καυσίμου

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η απόδοση των συστημάτων κελιών καυσίμου αποτελεί ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτών συγκρινόμενα πάντα με τα κλασικά μηχανικά ή θερμικά συστήματα. Ο λόγος είναι ότι θερμοκρασιακά ένα κελί καυσίμου συγκρινόμενο με μία ισοδύναμη θερμική μηχανή δεν περιορίζεται από ανώτατα όρια. Αυτή η απελευθέρωση από θερμοκρασιακά όρια καθιστά τα κελιά καυσίμου πιο ευέλικτα στο χειρισμό τους ιδιαίτερα στην προσπάθεια επίτευξης υψηλών αποδόσεων. Μία πρώτη προσέγγιση της έννοιας της απόδοσης είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη μεταβολή της ελεύθερης κατά Gibbs ενέργειας σχηματισμού.

Μία άλλη θεώρηση είναι η σύγκριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά mol καυσίμου με τη μεταβολή της πρότυπης ενθαλπίας σχηματισμού $\Delta_f H_m^\circ$ η οποία ουσιαστικά ισούται με τη θερμότητα που θα απελευθερωνόταν αν καιγόταν πλήρως το H_2 . Αυτό το μέγεθος είναι γνωστό και ως θερμογόνος δύναμη (Heating Value, HV). Ανάλογα τώρα αν το προϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο

(νερό) θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και για το $\Delta_f H_m^\circ$ (Hoogers G., (2003)):



(ατμός)

$$\Delta_f H_m^\circ(H_2O, \nu) = -241.83 \text{ kJ} / \text{mol}$$



(υγρό)

$$\Delta_f H_m^\circ(H_2O, l) = -285.84 \text{ kJ} / \text{mol}$$

Το πρώτο ονομάζεται Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV), ενώ το δεύτερο Υψηλότερη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV). Έτσι για τον υπολογισμό της απόδοσης θα πρέπει να αναφέρουμε αν η βάση είναι το HHV ή το LHV. Όταν δεν αναφέρεται είναι σχεδόν σίγουρο ότι έχει υπολογιστεί βάσει της LHV καθότι οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις.

Έτσι λοιπόν η μέγιστη δυνατή απόδοση ισούται με το πηλίκο της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας σχηματισμού κατά Gibbs προς τη μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού:

$$n_{per,max} = \frac{\Delta_f G_m^\circ}{\Delta_f H_m^\circ} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

Στον Πίνακα 2.3 δίνονται τα μέγιστα όρια απόδοσης κελιών καυσίμου με βάση το HHV (αν φυσικά ο υπολογισμός γινόταν βάσει του LHV, τότε οι μέγιστες αποδόσεις για κάθε θερμοκρασία θα ήταν υψηλότερες).

Πίνακας 2.3: Μέγιστη δυνατή απόδοση κελιών καυσίμου με βάση το HHV

| <i>Φυσική κατάσταση του παραγόμενου νερού</i> | <i>Θερμοκρασία (^oC)</i> | <i>$\Delta_f G_m^\circ$ (kJ/mol)</i> | <i>Μέγιστη απόδοση(%)</i> |
|---|--|---|----------------------------|
| Υγρό | 25 | -237,2 | 83 |
| Υγρό | 80 | -228,2 | 80 |
| Αέριο | 100 | -225,2 | 79 |
| Αέριο | 200 | -220,4 | 77 |
| Αέριο | 400 | -210,3 | 74 |
| Αέριο | 600 | -199,6 | 70 |
| Αέριο | 800 | -188,6 | 66 |
| Αέριο | 1000 | -177,4 | 62 |

Η συσχέτιση της απόδοσης ενός κελιού καυσίμου με το δυναμικό που προκύπτει υπό σταθερό φορτίο γίνεται ως εξής: Λαμβάνοντας πάλι ως βάση το HHV ή το LHV, μέσω και της εξίσωσης (2.9), υπολογίζεται το μέγιστο δυναμικό (πρότυπο δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος) για κάθε θερμοκρασία. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι με βάση το HHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.48 V ενώ με βάση το LHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.25 V. Στην παρούσα εργασία για όλους τους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα θεωρείται ως βάση το LHV, δηλαδή ως μέγιστο δυνατό δυναμικό το 1.25 V.

Η έννοια “κατανάλωση του H₂”: Ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του υδρογόνου που αντέδρασε προς την παρεχόμενη μάζα στο σύστημα. Αυτός ο λόγος είναι ισοδύναμος με το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί προς αυτό που θα διερχόταν από αυτό αν αντιδρούσε όλη η παρεχόμενη μάζα. Έτσι:

$$U_f = \frac{m_{H_2,ret}}{m_{H_2,in}} \quad (2.16)$$

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

$$n_{per,fc} = U_f \cdot \frac{v_{fc}}{1.25} \cdot 100\% \quad (2.17)$$

όπου:

v_{fc} είναι το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί σε λειτουργία. Αντίστοιχη σχέση με τη (2.16) ισχύει και για τον ορισμό της κατανάλωσης του O_2 :

$$U_{ox} = \frac{m_{O_2,ret}}{m_{O_2,in}} \quad (2.18)$$

2.4.5 Νόμος του Nernst

Στην περίπτωση που μεταβάλλεται και η πίεση, εκτός από τη θερμοκρασία σε ένα κελί καυσίμου, τότε πάλι μεταβάλλεται η κατά Gibbs ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού και συνεπώς και το δυναμικό αυτού. Το δυναμικό σε αυτή την περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος υπολογίζεται μέσω του νόμου του Nernst:

$$E = -\frac{\Delta_f G_m^\circ}{zF} = E^\circ + \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln \left[\frac{\alpha_{H_2} \alpha_{O_2}^{0.5}}{a_w} \right] \quad (2.19)$$

όπου:

E° : Πρότυπο δυναμικό του κελιού

R : Παγκόσμια σταθερά των τελείων αερίων

T : Θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

z : Συνολικό μεταφερόμενο φορτίο

F : Σταθερά Faraday

a_{H_2} : Ενεργότητα του υδρογόνου

a_{O_2} : Ενεργότητα οξυγόνου

a_w : Ενεργότητα νερού

Το πρότυπο δυναμικό είναι αυτό το οποίο αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στους 25 °C η ενεργότητα του νερού μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μονάδα και το παραγόμενο νερό να μην παίζει κανένα ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού δυναμικού, υπό αντιστρεπτές πάντα συνθήκες. Σε θερμοκρασίες όμως διαφορετικές από τους 25 °C μία τέτοια προσέγγιση δεν μπορεί να θεωρηθεί ακριβής. Για αέρια συστατικά οι ενεργότητες μπορούν να αντικατασταθούν από τις μερικές πιέσεις στο μίγμα. Έτσι τελικά ο νόμος του Nernst γίνεται:

$$E = -\frac{\Delta_f G_m^\circ}{zF} = E^\circ + \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_w} \right] \quad (2.20)$$

2.4.6 Μη αντιστρεπτές διεργασίες κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου.

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

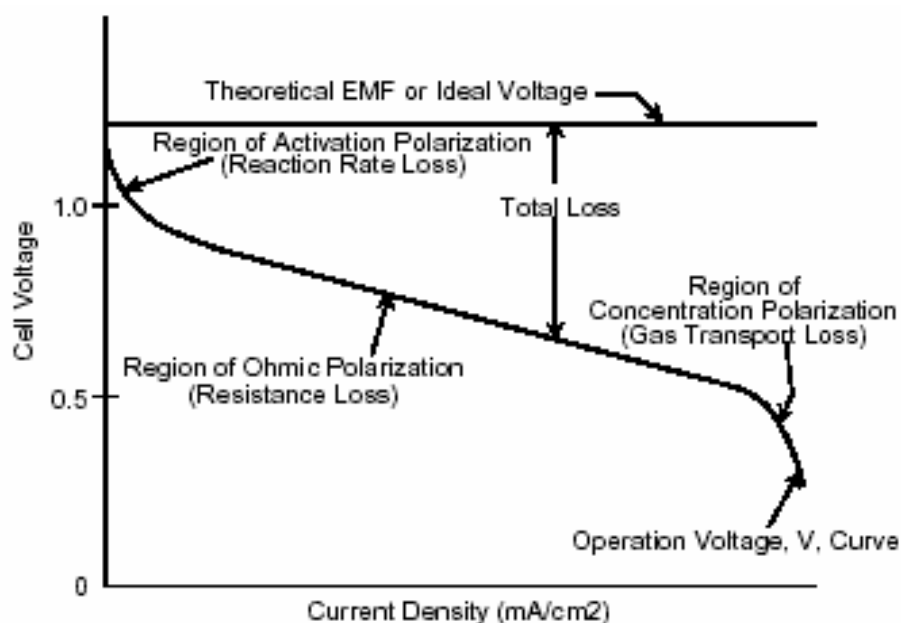
- πόλωση ενεργοποίησης
- ωμικές απώλειες
- πόλωση συγκέντρωσης

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

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

Πόλωση συγκέντρωσης. Το τρίτο είδος απωλειών τέλος παρουσιάζεται σε όλο το εύρος των τιμών της πυκνότητας ρεύματος αλλά γίνεται σημαντική στις οριακές, υψηλές τιμές.

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τα 3 είδη απωλειών συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος:



Διάγραμμα 2.1: Απώλειες τάσης συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος

Στη συνέχεια αναλύεται το κάθε είδος πόλωσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και ένα τέταρτο είδος το οποίο είναι σημαντικό μόνο σε πολύ μικρές τιμές πυκνότητας ρεύματος και οφείλεται σε εσωτερικά δημιουργούμενα ρεύματα. Γενικά όμως σε όλες

τις άλλες περιοχές πυκνότητας ρεύματος οι απώλειες που οφείλονται σε αυτά τα εσωτερικά ρεύματα είναι αμελητέες.

2.4.6.1 Πόλωση ενεργοποίησης (ΔV_{act})

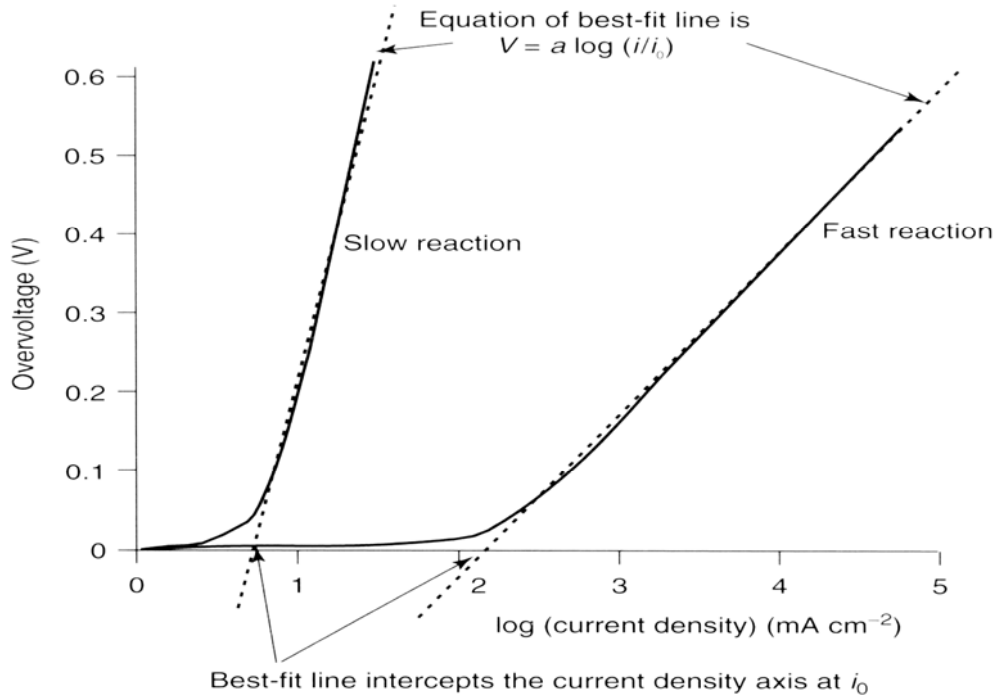
Αυτό το είδος απωλειών είναι σημαντικό όταν η κινητική της αντίδρασης που πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο είναι αργή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο οι τιμές του είναι πολύ μεγάλες στην κάθοδο (αργή αντίδραση) από ότι στην άνοδο (σχεδόν αντιστρεπτή, ταχύτατη αντίδραση). Η πόλωση ενεργοποίησης ΔV_{act} αποδίδεται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

$$\Delta V_{act} = A_{Tafel} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.21)$$

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε από πειραματικές παρατηρήσεις του Tafel το 1905 ο οποίος έφτασε στο συμπέρασμα ότι η υπέρταση στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου παρουσίαζε μία παρόμοια συμπεριφορά για μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Αυτή η συμπεριφορά μεταφράζεται σε μία ευθεία, τις περισσότερες φορές, γραμμή σε σχέση με το δεκαδικό λογάριθμο των τιμών της πυκνότητας ρεύματος. Βασική προϋπόθεση ισχύος της εξίσωσης είναι να ισχύει:

$$i > i_0 \quad (2.22)$$

Η πυκνότητα ρεύματος στην εξίσωση Tafel δίνεται σε mA/cm² ή σε A/m². Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται 2 τυπικές καμπύλες Tafel για μία αργή και μία ταχεία ηλεκτροχημική αντίδραση.



Διάγραμμα 2.2: Τυπικές καμπύλες Tafel για αργή και γρήγορη αντίδραση αντίστοιχα

Η σταθερά A είναι μεγαλύτερη όσο πιο αργή είναι η αντίδραση, ενώ το i_0 εξαρτάται από κάποιους παράγοντες που παρουσιάζονται παρακάτω. Μεγαλύτερες τιμές του i_0 επιφέρουν μικρότερη υπέρταση.

Σταθερά Tafel (A):

$$A_{Tafel} = \frac{RT}{2\alpha_{irr}F} \quad (2.23)$$

όπου:

R : Παγκόσμια σταθερά των αερίων

T : Η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου σε [K]

α_{irr} : Συντελεστής μεταφοράς ή παράγοντας συμμετρίας της ηλεκτροδιακής δράσης

F : Σταθερά Faraday

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

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

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

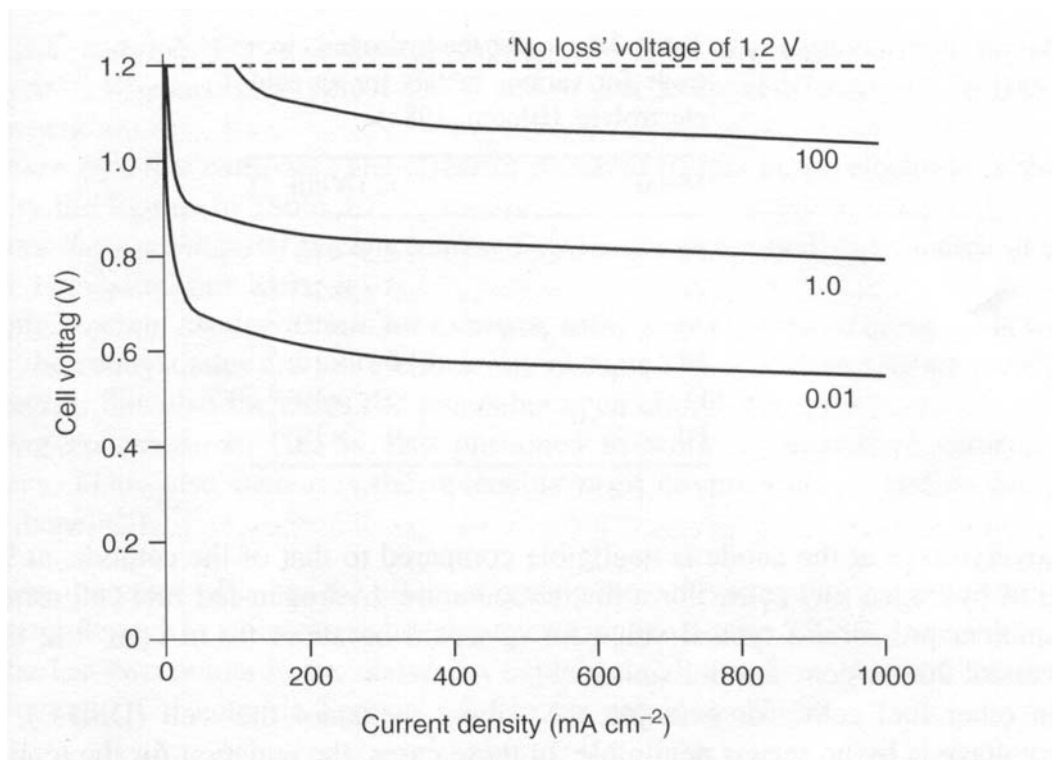
Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής δεν μπορεί άμεσα να μετρηθεί πειραματικά, αφού αναφέρεται σε συνθήκες ισορροπίας, όπου το αλγεβρικό άθροισμα των ροών ρεύματος προς τα αριστερά και δεξιά, σε γαλβανικό στοιχείο, ισούται με 0. Το ρεύμα ανταλλαγής i_0 προσδιορίζεται έμμεσα με άλλους τρόπους. Στον Πίνακα 2.4 δίνονται κάποιες τιμές του i_0 για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου στους 25 °C για διάφορους καταλύτες, θεωρώντας λεία την επιφάνεια αυτού.

Πίνακας 2.4: Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής για διάφορα μέταλλα

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

Παρατηρείται το πολύ μεγάλο εύρος τιμών για την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της τιμής της πυκνότητας

ρεύματος ανταλλαγής (3 χαρακτηριστικές καμπύλες για τιμές 0.01, 1.0 και 100 mAcm⁻²) για διάφορες τιμές πυκνότητας ρεύματος, στο δυναμικό:



Διάγραμμα 2.3: Επίδραση i_0 στο δυναμικό συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

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

Αναδιατάσσοντας την εξίσωση Tafel προκύπτει:

$$i = i_0 \exp\left(\frac{2\alpha_{an} F \Delta V_{act}}{RT}\right) \quad (2.24)$$

Αυτή η εξίσωση είναι γνωστή και ως εξίσωση Butler-Vollmer και χρησιμοποιείται ευρέως ως εναλλακτική της εξίσωσης Tafel.

Από τα παραπάνω προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τους τρόπους μείωσης της πόλωσης ενεργοποίησης. Αυτά είναι παρατίθενται παρακάτω:

- Αυξάνοντας τη θερμοκρασία του κελιού. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε ένα κελί καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών η τιμή του i_0 είναι 0.1 mA/cm^2 ενώ σε ένα κελί υψηλών θερμοκρασιών αυτή η τιμή είναι 100 φορές μεγαλύτερη.
- Χρησιμοποιώντας πιο ενεργούς καταλύτες
- Αυξάνοντας την τραχύτητα των ηλεκτροδίων
- Αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων καθώς αυτό θα επιφέρει πιο αποτελεσματική αντίδραση των καταλυτικών σωματιδίων και ενεργών κέντρων με τα μόρια των αντιδρώντων
- Αυξάνοντας την πίεση όπου παρουσιάζεται μία αντίστοιχη αύξηση της αποτελεσματικότητας καταλύτη, όπως και πριν.

2.4.6.2 Ωμικές απώλειες (ΔV_{ohm})

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

$$V = IR_{fc} \quad (2.25)$$

Οι ωμικές απώλειες εκφράζονται συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος ως εξής:

$$\Delta V_{ohm} = i r_{fc} \quad (2.26)$$

Η ωμική αντίσταση στα περισσότερα είδη κελιών καυσίμου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του κελιού.

Όπως και στην περίπτωση της πόλωσης ενεργοποίησης, έτσι και εδώ προτείνονται κάποιοι τρόποι ελάττωσης αυτών των απωλειών. Αυτοί είναι:

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

2.4.6.3 Πόλωση συγκέντρωσης (ΔV_{conc})

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

Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου μπορεί να περιγραφεί από το Νόμο διάχυσης του Fick:

$$i = \frac{\nu F D_w (C_B - C_S)}{\delta} \quad (2.27)$$

όπου:

ν : Αριθμός μετακινούμενων ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτροχημικής αντίδρασης

F : Σταθερά Faraday

D : Συντελεστής διάχυσης των αντιδρώντων ειδών

C_B : Η συγκέντρωση στο παρεχόμενο ρεύμα

C_S : Η συγκέντρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

δ : Το πάχος του οριακού στρώματος

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

$$i_L = \frac{\nu F D C_B}{\delta} \quad (2.28)$$

Από τις 2 παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η σχέση:

$$\frac{C_S}{C_B} = 1 - \frac{i}{i_L} \quad (2.29)$$

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

$$E_{i=0} = E^\circ + \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln C_B \quad (2.30)$$

Όταν διέρχεται ρεύμα η επιφανειακή συγκέντρωση μειώνεται στην τιμή C_s :

$$E_{i=0} = E^\circ + \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln C_s \quad (2.31)$$

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

$$\Delta V_{conc} = \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.32)$$

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

$$\Delta V_{conc} = - \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.33)$$

Στην ανάλυση που προηγήθηκε η πόλωση ενεργοποίησης θεωρήθηκε αμελητέα: Η αντίδραση μεταφοράς φορτίου έχει τόσο μεγάλη τιμή πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_0 (επειδή το i είναι μεγάλο το οποίο συνεπάγεται και πιο ενεργό καταλύτη), που το ΔV_{act} είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το ΔV_{conc} . Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι αυτό το είδος πόλωσης παίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε οριακές περιπτώσεις πολύ υψηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος.

Τελευταία, στο χώρο των κελιών καυσίμου κερδίζει έδαφος ολοένα και περισσότερο μία εμπειρική σχέση που όμως δείχνει πολύ ακριβή συμπεριφορά για πολλούς τύπους κελιών καυσίμου σε διάφορες θερμοκρασίες και τιμές πυκνοτήτων ρεύματος. Αυτή η σχέση είναι της μορφής:

$$\Delta V_{conc} = m_{conc} \exp(p_{conc} \cdot i) \quad (2.34)$$

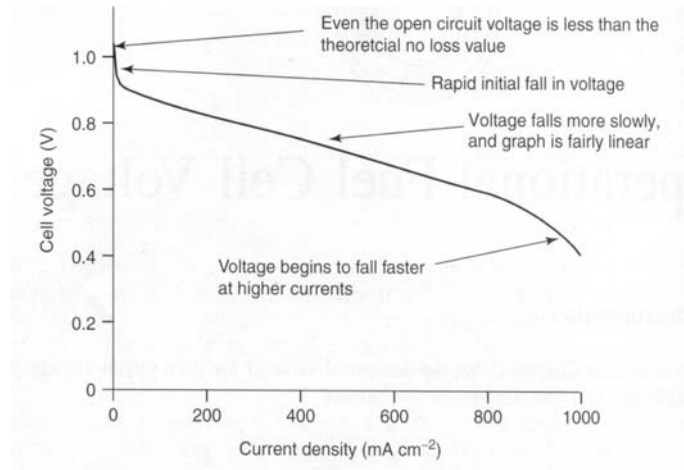
όπου:

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

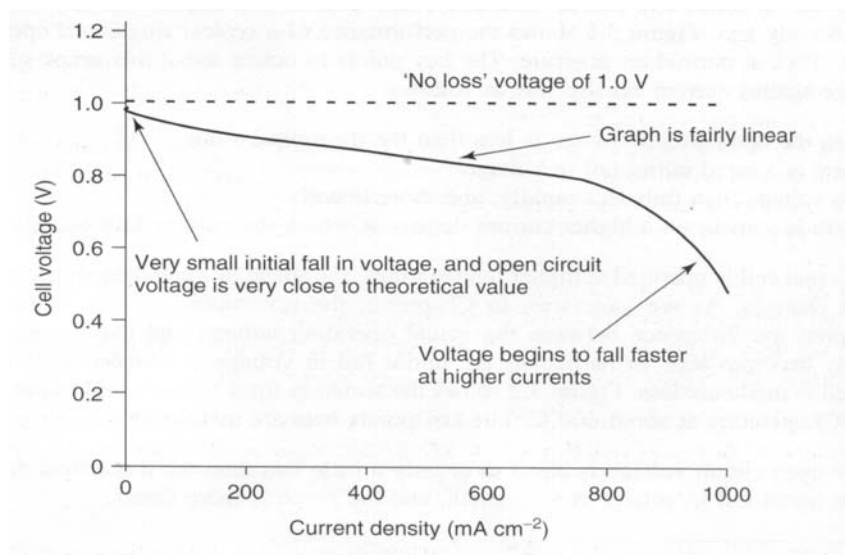
$$p_{conc} = 8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ mA}^{-1}$$

Η παραπάνω σχέση, αν και δείχνει αρκετά διαφορετική από την (2.33), με κατάλληλη επιλογή των συντελεστών m και n παρέχει παρόμοια αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται 2 χαρακτηριστικά διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή του δυναμικού για κελιά χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών αντίστοιχα σε σχέση με την πυκνότητα ρεύματος:



Διάγραμμα 2.4: Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμων χαμηλών θερμοκρασιών



Διάγραμμα 2.5: Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών

Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι αν και η θεωρητική τιμή πρότυπου δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί υψηλών θερμοκρασιών σε λειτουργία είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κελί χαμηλών θερμοκρασιών λόγω της μείωσης των τιμών των διαφόρων ειδών πόλωσης. Ακόμα η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής είναι εμφανέστατη στο δεύτερο διάγραμμα, καθώς παρατηρείται ότι έχει ελαχιστοποιηθεί η πόλωση ενεργοποίησης και το δυναμικό ξεκινάει από τιμές πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή του πρότυπου δυναμικού.

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

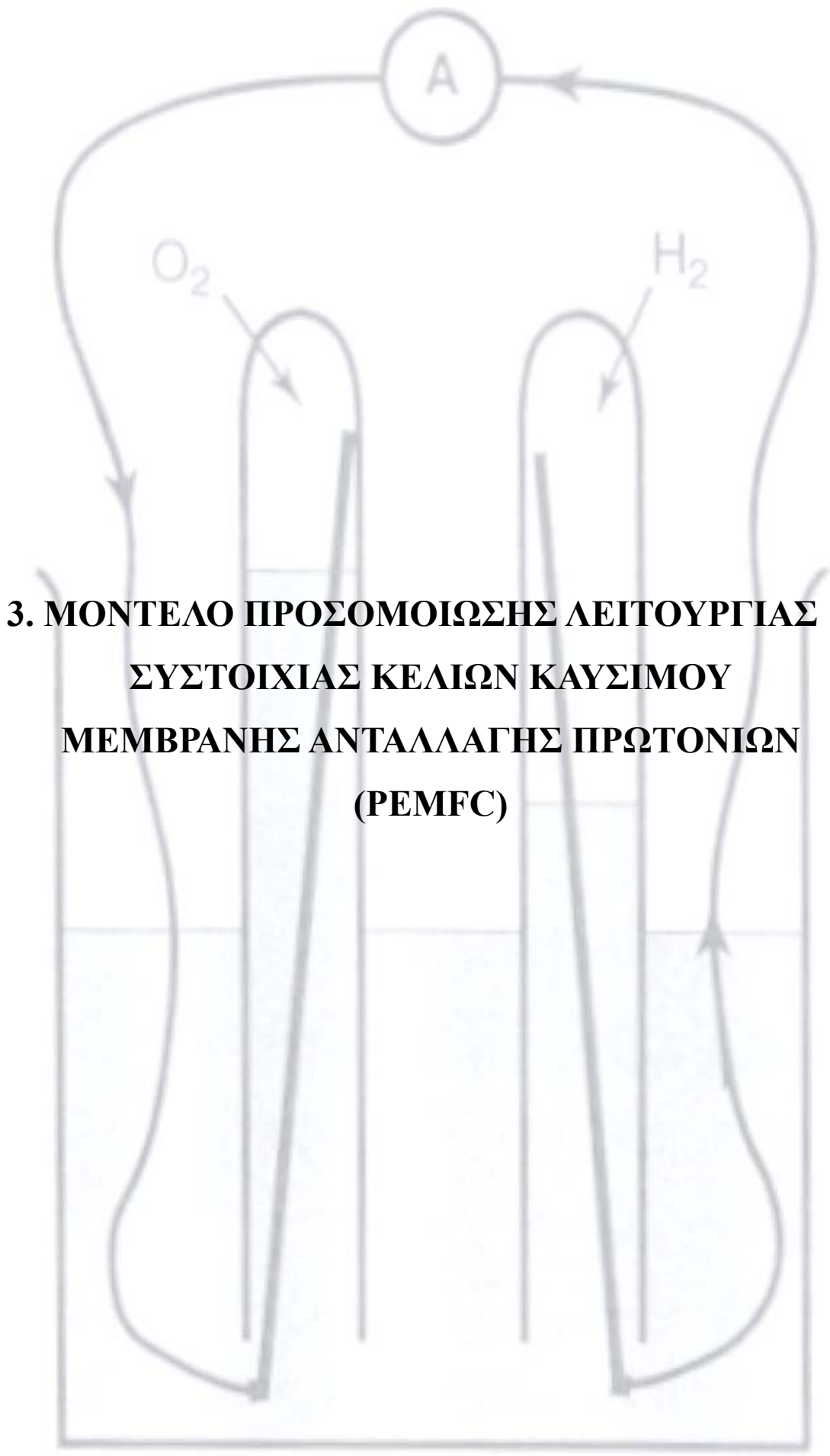
Τέλος, στην τρίτη περιοχή παρατηρείται μία γρήγορη πτώση του δυναμικού για μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος, που αφορά στα κελιά υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμποδίζεται ακόμα περισσότερο η μεταφορά του αντιδρώντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, με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

2.4.6.4 Συνολικές απώλειες

Σε ένα κελί που βρίσκεται σε λειτουργία αυτό που ενδιαφέρει είναι ο προσδιορισμός της τελικής πολικής τάσης όταν από το κελί διέρχεται ρεύμα I (πυκνότητα ρεύματος i). Βάσει όλων όσων παρατέθηκαν παραπάνω διαμορφώνεται η εξής σχέση (Larminie και συνεργάτες (2003)):

$$V_{st} = E^{\circ} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \quad (2.35)$$

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



**3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ
ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ
(PEMFC)**

3.1 Εισαγωγή

Για το σχεδιασμό και την εφαρμογή κάποια μεθοδολογία ή στρατηγικής προχωρημένης αυτόματης ρύθμισης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μοντέλου που να περιγράφει και να προβλέπει με αξιοπιστία τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος που πρόκειται να ρυθμιστεί. Το κεφάλαιο αυτό έχει ως στόχο την γενική περιγραφή ενός δυναμικού μοντέλου, το οποίο προσομοιώνει μια συστοιχία κελιών καυσίμου τύπου PEM. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα λεπτομερή μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης κελιών καυσίμου (ενδεικτικά: Panos Z. και συνεργάτες (2006), Alemo και συνεργάτες (2007), Berning και συνεργάτες (2002)). Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό των Pukrushpan, Stefanopoulou και Huei Peng (2004). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει σχεδιαστεί σε περιβάλλον MATLAB[®] – SIMULINK. Μια εκτενής παρουσίαση του μοντέλου και των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συνολικού συστήματος βρίσκεται στο Παράρτημα Α της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.2 Μοντελοποίηση κελιού καυσίμου

3.2.1 Γενικά

Το σύστημα κελιών καυσίμου που θα περιγραφεί αποτελείται από το κυρίως μέρος, δηλαδή τα ίδια τα κελιά καυσίμου και τις διεργασίες (όπως ηλεκτροχημικές αντιδράσεις) που τα χαρακτηρίζουν, και από τα βοηθητικά μέρη τα οποία είναι το σύστημα του συμπιεστή, ο οποίος παρέχει στην συστοιχία αέρα, το σύστημα ψύξης, το σύστημα ύγρανσης του αέρα και οι σωληνώσεις που υπάρχουν ανάμεσα στη συστοιχία και τους χώρους αποθήκευσης των αντιδρώντων συστατικών, δηλαδή του αέρα και του υδρογόνου.

Οι είσοδοι του μοντέλου είναι το δυναμικό του συμπιεστή, v_{cm} , και η ένταση ρεύματος της συστοιχίας I_{st} , ενώ μεταβλητές εξόδου αποτελούν η καθαρή ισχύς, P_{net} , το δυναμικό που παράγεται στη συστοιχία, v_{st} και ο λόγος λ_{O_2} της εισαγόμενης μαζικής παροχής του οξυγόνου στη συστοιχία προς την αντίστοιχη ποσότητα που καταναλώνεται. Η σχηματική διάταξη του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Η καθαρή ισχύς που παράγεται από τη συστοιχία ορίζεται ως η διαφορά ισχύος που παράγεται από τη συστοιχία μείον την ισχύ που καταναλώνεται από τον συμπιεστή:

$$P_{net} = P_{st}(I_{st}, v_{st}) - P_{cm}(I_{cm}, v_{cm}) \quad (3.1)$$

όπου:

P_{st} : Ισχύς που παράγεται από τη συστοιχία κελιών καυσίμου

P_{cm} : Ισχύς που καταναλώνεται από τον κινητήρα του συμπιεστή

I_{cm} : Ρεύμα που παράγεται από τον κινητήρα του συμπιεστή

Το ρεύμα που παράγεται από τη συστοιχία υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.34

Ο λόγος λ_{O_2} ορίζεται από την σχέση:

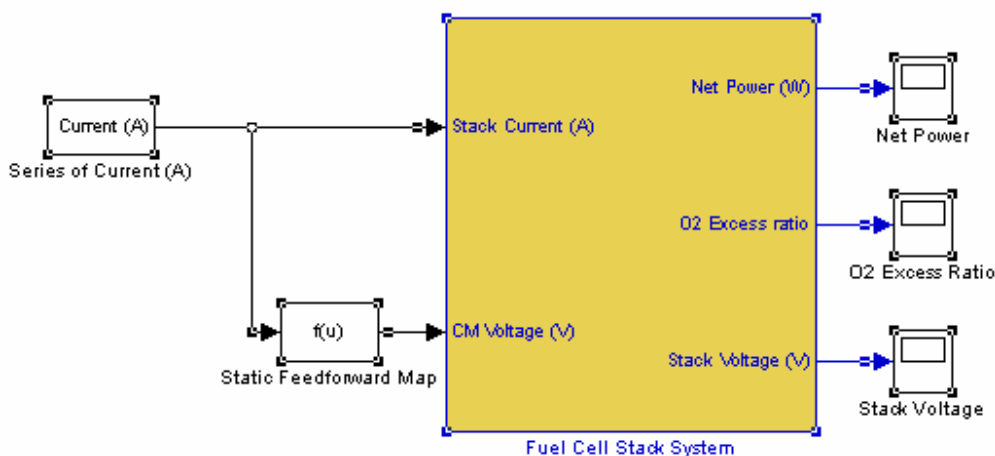
$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,react}} \quad (3.2)$$

όπου:

$W_{O_2,in}$: Η μαζική παροχή του οξυγόνου που εισάγεται στην κάθοδο της συστοιχίας

$W_{O_2,react}$: Η μαζική παροχή του οξυγόνου που αντιδρά.

Ο λόγος λ_{O_2} είναι ουσιαστικά αντίστροφος της ποσότητας U_{ox} που ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (εξίσωση 2.18)



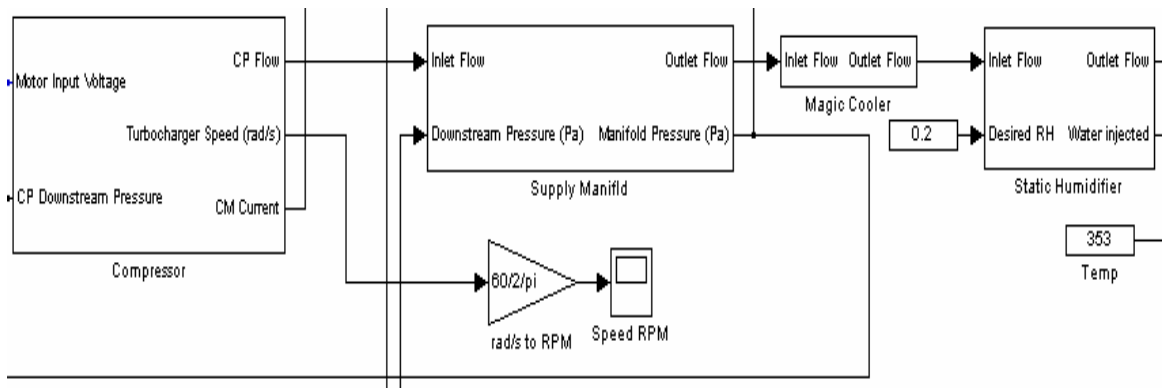
Σχήμα 3.1: Γενική μορφή μοντέλου της συστοιχίας κελιών καυσίμου

3.2.2 Μοντέλα βοηθητικών διατάξεων

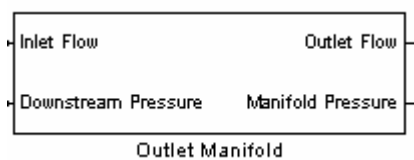
Τα μοντέλα αφορούν στις εξής επιμέρους διατάξεις:

- Συμπιεστής (Compressor)
- Σωληνώσεις εφοδιασμού και εξόδου (Inlet and Return Manifold)
- Διάταξη ψύξης του ρεύματος αέρα (Cooler)
- Διάταξη ενυδάτωσης ρεύματος αέρα (Humidifier)

Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 φαίνεται η σχηματική διάταξη των βοηθητικών μερών του μοντέλου σε περιβάλλον SIMULINK. Στα σχήματα αυτά φαίνονται οι εισοδοί και οι έξοδοι του κάθε μοντέλου.



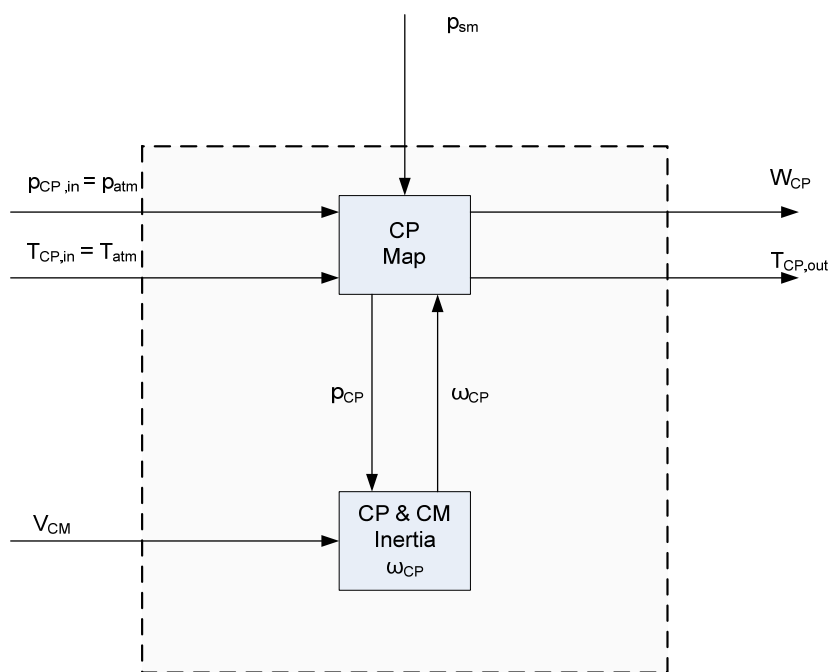
Σχήμα 3.2: Σχηματική διάταξη των μοντέλων του συμπιεστή (*compressor*), των σωληνώσεων εφοδιασμού (*supply manifold*), ψυκτήρα (*cooler*) και του υγραντήρα (*humidifier*) σε περιβάλλον SIMULINK



Σχήμα 3.3: Σχηματική διάταξη μοντέλου των σωληνώσεων εξόδου σε περιβάλλον SIMULINK

3.2.2.1 Συμπιεστής

Το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου του συμπιεστή φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Οι είσοδοι στο μοντέλο αυτό είναι η πίεση p_{sm} στη σωλήνωση της ανόδου (η οποία υπολογίζεται σε επόμενο μοντέλο), το δυναμικό του συμπιεστή v_{cm} (που όπως έχει αναφερθεί αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου στο συνολικό σύστημα) και η θερμοκρασία $T_{cp,in}$ και πίεση $p_{cp,in}$ του αέρα που εισέρχεται στον συμπιεστή. Το μοντέλο χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι στατικό και προσδιορίζει την παροχή του αέρα W_{cp} που παρέχει ο συμπιεστής και τη θερμοκρασία εξόδου $T_{cp,out}$ του αέρα από το συμπιεστή, συναρτήσει της θερμοκρασίας και πίεση του αέρα που εισέρχεται στον συμπιεστή, της πίεσης στη σωλήνωση της ανόδου και της γωνιακής ταχύτητας του συμπιεστή ω_{cp} . Για τον υπολογισμό της παροχής του αέρα χρησιμοποιείται μια μη γραμμική μέθοδος προσδιορισμού καμπύλης προσαρμογής, που ονομάζεται μέθοδος Jensen & Kristensen (Moraal και Kolmanovsky (1999)). Το δεύτερο μέρος του μοντέλου είναι δυναμικό και μοντελοποιεί τη δυναμική συμπεριφορά της γωνιακής ταχύτητας του συμπιεστή όταν υπάρξει μεταβολή στο δυναμικό του συμπιεστή v_{cm} .



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου συμπιεστή

3.2.2.2 Μοντέλο Σωληνώσεων

Στο μοντέλο αυτό αναπαριστώνται με ενιαίο τρόπο όλες οι σωληνώσεις και οι συνδέσεις ανάμεσα στα διάφορα τεχνικά μέρη της συστοιχίας και υπολογίζονται οι μεταβολές που προκαλούνται στις ροές των αντιδρώντων εξαιτίας αυτών των σωληνώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, που ονομάζεται μοντέλο σωληνώσεων εφοδιασμού, περιλαμβάνονται οι σωληνώσεις που συνδέουν τον συμπιεστή με την συστοιχία των κελιών καυσίμου. Σε αυτό το μέρος συμπεριλαμβάνονται οι σωληνώσεις των συστημάτων ύγρανσης και ψύξης. Το δεύτερο μέρος, που ονομάζεται μοντέλο σωληνώσεων εξόδου, περιλαμβάνει τις σωληνώσεις του συστήματος των παραγόμενων συστατικών της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

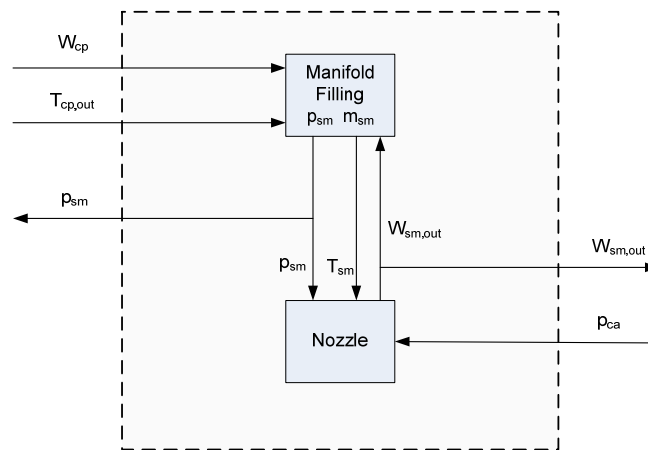
3.2.2.2.1 Σωληνώσεις εφοδιασμού της συστοιχίας

Οι είσοδοι στο μοντέλο αυτό είναι η ροή του αέρα W_{cp} που προέρχεται από τον συμπιεστή και η πίεση στην κάθοδο p_{ca} (η οποία υπολογίζεται στο αντίστοιχο μοντέλο). Ο όρος «ροή του αέρα» περιλαμβάνει την μαζική παροχή του αέρα, την θερμοκρασία του, την πίεση, την σχετική του υγρασία και την στοιχειομετρική αναλογία του οξυγόνου. Οι εξοδοί του μοντέλου είναι η ροή του αέρα που εξέρχεται από τη σωλήνωση $W_{sm,out}$ και η πίεση στις σωληνώσεις p_{sm} . Η ροή του αέρα προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά των σωληνώσεων, τη διαφορά της πίεσης ανάμεσα στην κάθοδο και τις σωληνώσεις και τη θερμοκρασία του αέρα. Το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου των σωληνώσεων εφοδιασμού φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

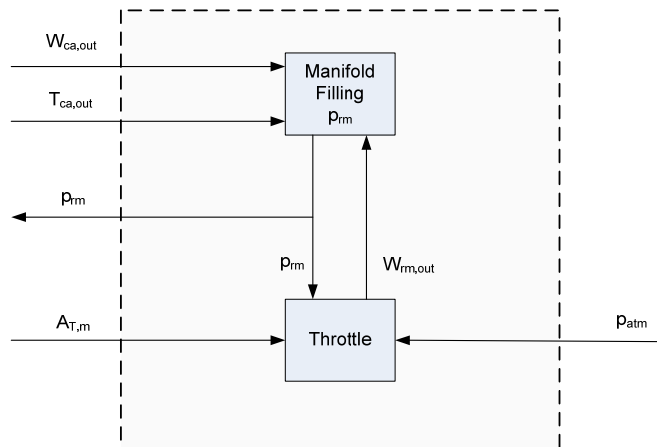
3.2.2.2.2 Σωληνώσεις εξόδου

Το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου των σωληνώσεων εξόδου φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Οι είσοδοι στο μοντέλο αυτό είναι η μαζική παροχή $W_{ca,out}$ και η θερμοκρασία $T_{ca,out}$ του αέρα που δεν αντέδρασε στην κάθοδο της συστοιχίας των κελιών καυσίμου. Η θερμοκρασία με την οποία το ρεύμα αέρα απομακρύνεται από τη συστοιχία κελιών καυσίμου είναι χαμηλή και η μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις σωληνώσεις εξόδου θεωρούνται αμελητέες. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει με

την πίεση, η οποία είναι συνάρτηση των μαζικών παροχών εισόδου $W_{ca,out}$ και εξόδου $W_{rm,out}$ από τις σωληνώσεις. Η μαζική παροχή εξόδου του αέρα υπολογίζεται από εξίσωση στην οποία συμμετέχουν η πίεση στο εσωτερικό των σωληνώσεων p_{rm} , η πίεση στην έξοδο των σωληνώσεων η οποία θεωρείται ίση με την ατμοσφαιρική p_{atm} και το άνοιγμα της βαλβίδας στραγγαλισμού $A_{T,rm}$, το οποίο θεωρείται σταθερό. Εναλλακτικά, η βαλβίδα στραγγαλισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρόσθετη μεταβλητή εισόδου (εκ χειρισμού) για τη ρύθμιση της πίεσης στις σωληνώσεις εξόδου και επομένως και της πίεσης στην κάθοδο.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σωληνώσεων εφοδιασμού



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου σωληνώσεων εξόδου

3.2.2.3 Μοντέλο ψύξης του αέρα

Η θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή είναι συνήθως αρκετά υψηλότερη από τα λειτουργικά όρια των κελιών καυσίμου και γι' αυτό θα πρέπει με κάποιο τρόπο να ελαττώνεται έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν ζημιές στις μεμβράνες των κελιών. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά ένας ιδανικός ψυκτήρας, αφού δεν λαμβάνεται υπόψη κανένα φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας. Απλά θεωρείται ότι το ρεύμα αέρα ψύχεται κατά τέτοιο τρόπο και σε τέτοια θερμοκρασία που να μην δημιουργείται πρόβλημα στη λειτουργία των κελιών καυσίμου. Θεωρείται ακόμα ότι δεν υπάρχει καμία πτώση πίεσης κατά μήκος του συστήματος ψύξης και άρα δεν υπάρχει μεταβολή ούτε της μαζικής παροχής του αέρα. Αντίθετα η πτώση της θερμοκρασίας επηρεάζει την σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα, κάτι που λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο.

3.2.3 Μοντέλο συστήματος ύγρανσης του αέρα

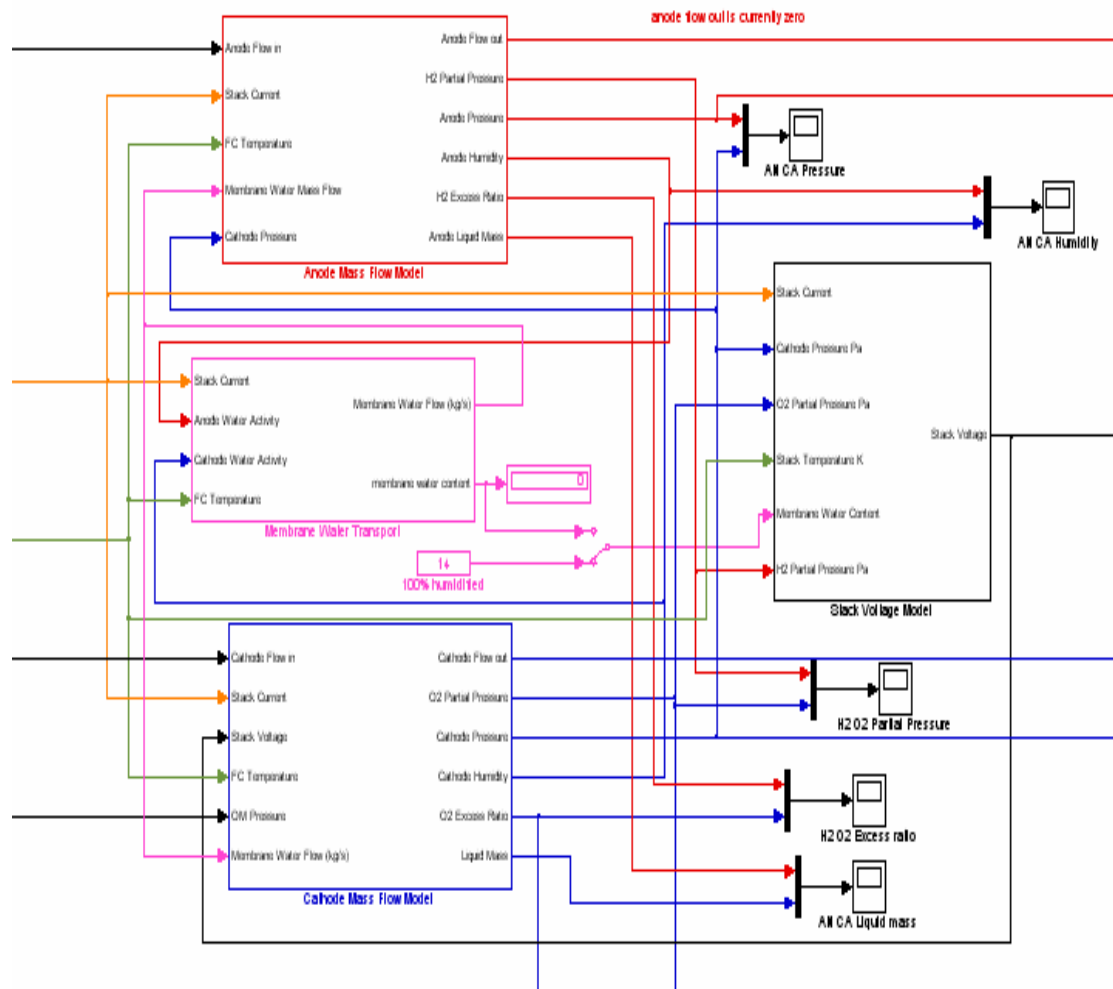
Το ρεύμα αέρα που εξέρχεται από το σύστημα ψύξης θα πρέπει να έχει το σωστό ποσοστό υγρασίας προτού εισέλθει στην συστοιχία των κελιών καυσίμου. Μικρό ποσοστό υγρασίας ενδέχεται να προκαλέσει ζημιά στις μεμβράνες των κελιών (cracking) ενώ μεγάλο ποσοστό υγρασίας αυξάνει την αντίσταση στα κελιά με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση της συστοιχίας (αυξάνονται οι ωμικές καθώς και οι απώλειες συγκέντρωσης). Το σύστημα ύγρανσης ψεκάζει το ρεύμα του αέρα με όσο νερό χρειάζεται για να διατηρείται η υγρασία στα σωστά επίπεδα. Η είσοδος του μοντέλου είναι η ροή του αέρα που εξέρχεται από το σύστημα ψύξης και η επιθυμητή σχετική υγρασία για το ρεύμα αυτό. Το μοντέλο υπολογίζει την μάζα του νερού που θα πρέπει να ψεκαστεί στο ρεύμα, η οποία εξαρτάται από την ισχύ που θα πρέπει να παραχθεί από την συστοιχία. Επιπλέον υπολογίζει την μεταβολή στην πίεση αλλά και την μαζική παροχή του ρεύματος, που οφείλεται στην αύξηση της μάζας του νερού στο ρεύμα του αέρα.

3.2.4 Μοντέλο συστοιχίας κελιών καυσίμου

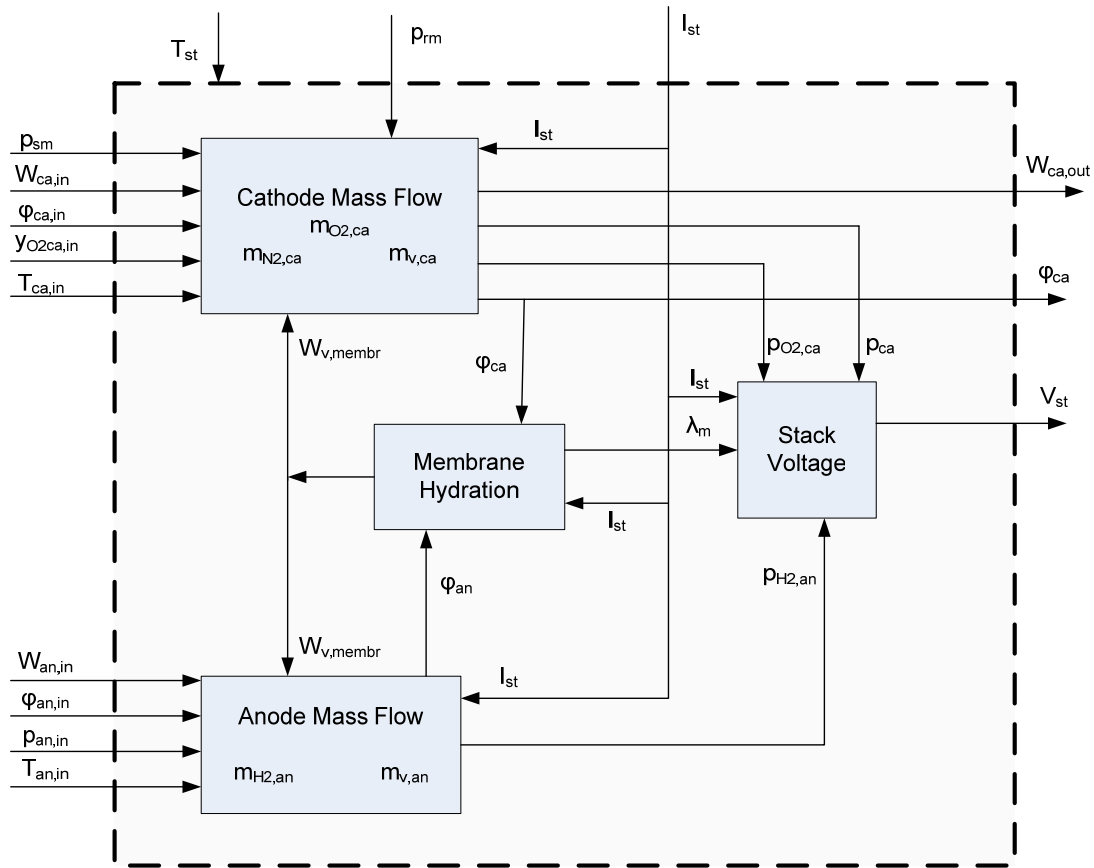
Το μοντέλο της συστοιχίας των κελιών καυσίμου αποτελείται από τέσσερα υπομοντέλα:

- Μοντέλο για τον υπολογισμό του δυναμικού της συστοιχίας
- Μοντέλο που περιγράφει τις διεργασίες στην άνοδο
- Μοντέλο που περιγράφει τις διεργασίες στην κάθοδο
- Μοντέλο περιγραφής των φαινομένων που συμβαίνουν στις μεμβράνες

Η θερμοκρασία στη συστοιχία θεωρείται ότι είναι σταθερή και ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο της. Η σχηματική διάταξη του μοντέλου της συστοιχίας των κελιών σε περιβάλλον SIMULINK φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου της συστοιχίας φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.7: Σχηματική διάταξη συστοιχίας κελιών καυσίμου σε περιβάλλον SIMULINK



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα βαθμίδων μοντέλου συστοιχίας κελιών καυσίμου

3.2.4.1 Μοντέλο υπολογισμού του δυναμικού της συστοιχίας

Το μοντέλο αυτό περιγράφει τον υπολογισμό του δυναμικού της συστοιχίας, το οποίο θεωρείται ότι είναι μια συνάρτηση του ρεύματος που παράγεται στα κελιά καυσίμου, της πίεσης στην κάθοδο των κελιών, των μερικών πιέσεων και των δυο αντιδρώντων, της θερμοκρασίας στο κελί καυσίμου και της υγρασίας στην μεμβράνη. Στο μοντέλο γίνεται χρήση τόσο εμπειρικών, όσο και φυσικών εξισώσεων και σχέσεων.

Για τον υπολογισμό του δυναμικού της συστοιχίας είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της εμπειρικής σχέσης:

$$E = 1.229 - 8.5 \cdot 10^{-4} (T_{FC} - 298.15) + 4.308 \cdot 10^{-5} T_{FC} \left[\ln \left(\frac{p_{H2,AN}}{1.01325} \right) + \ln \left(\frac{p_{O2,CA}}{1.01325} \right) \right] \quad (3.3)$$

όπου:

E : Δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος

T_{FC} : Θερμοκρασία συστοιχίας κελιών καυσίμου

$p_{H_2,an}$: Μερική πίεση υδρογόνου στην άνοδο

$p_{O_2,ca}$: Μερική πίεση οξυγόνου στην κάθοδο

Το πραγματικό όμως δυναμικό κάθε κελιού καυσίμου υπολογίζεται όταν ληφθούν υπόψη οι διάφορες απώλειες (Εξ. 2.35), οι οποίες χωρίζονται στις απώλειες λόγω του ρυθμού της ηλεκτροχημικής αντίδρασης (απώλειες ενεργοποίησης) ΔV_{act} , στις ωμικές απώλειες ΔV_{ohm} και στις απώλειες λόγω συγκέντρωσης ΔV_{conc} .

3.2.4.2 Μοντέλο καθόδου της συστοιχίας

Το μοντέλο της καθόδου της συστοιχίας περιγράφει την συμπεριφορά του ρεύματος του αέρα στην κάθοδο της συστοιχίας των κελιών καυσίμου. Το μοντέλο βασίζεται στη χρήση ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και στις ψυχομετρικές ιδιότητες του αέρα. Η αρχή της διατήρησης της μάζας εφαρμόζεται για τρία συστατικά: το οξυγόνο, το υδρογόνο και το νερό. Οι είσοδοι στο μοντέλο είναι το ρεύμα που παράγεται στη συστοιχία, η θερμοκρασία στη συστοιχία, η μαζική παροχή του νερού κατά μήκος της μεμβράνης, η πίεση που οφείλεται στη ροή του αέρα και είναι ίδια με την πίεση στις σωληνώσεις από τις οποίες διαφεύγει η παροχή του αέρα που δεν αντέδρασε και τα χαρακτηριστικά του ρεύματος αέρα που εισάγεται στην κάθοδο, δηλαδή η θερμοκρασία του, η πίεση του, η μαζική παροχή του, η σχετική του υγρασία και το στοιχειομετρικό κλάσμα του οξυγόνου σε αυτό. Το μοντέλο έχει σαν εξόδους του την μαζική παροχή του ρεύματος αέρα που διαφεύγει από την συστοιχία χωρίς να αντιδράσει, την πίεση στην κάθοδο, την μερική πίεση του οξυγόνου στην κάθοδο και την σχετική υγρασία στην κάθοδο. Ακόμη, το μοντέλο υπολογίζει τη μάζα του οξυγόνου που αντέδρασε.

Στο μοντέλο γίνονται διάφορες παραδοχές, οι οποίες θα πρέπει να αναφερθούν. Κατά πρώτο λόγο, γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά. Αυτή η παραδοχή ισχύει στο συνολικό μοντέλο σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες γίνονται υπολογισμοί θερμοδυναμικών μεγεθών. Κατά δεύτερον, η θερμοκρασία στην συστοιχία θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη παντού. Επιπλέον η θερμοκρασία του ρεύματος εισόδου του αέρα στην κάθοδο θεωρείται ίση με την θερμοκρασία στη

συστοιχία. Τρίτη παραδοχή είναι ότι οι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παραμένουν σταθερές σε όλη τη σωλήνωση της καθόδου (cathode flow channel). Τέλος, όλο το σύστημα της καθόδου θεωρείται σαν ένας ενιαίος όγκος.

3.2.5 Μοντέλο ανόδου της συστοιχίας

Το μοντέλο της ανόδου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου έχει σαν κύρια είσοδό του το ρεύμα του υδρογόνου. Στον όρο ρεύμα συμπεριλαμβάνονται η μαζική παροχή, η μερική πίεση, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία του υδρογόνου. Το υδρογόνο θεωρείται ότι βρίσκεται αποθηκευμένο και συμπιεσμένο σε μια δεξαμενή. Η μαζική παροχή του υδρογόνου θεωρείται ότι μπορεί να ρυθμιστεί στιγμιαία από μια βαλβίδα. Αυτό γίνεται έτσι ώστε η διαφορά της πίεσης ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο της συστοιχίας να διατηρείται πάνω από ένα ελάχιστο όριο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό προκειμένου να μην υπάρξει έλλειψη καυσίμου σε κανένα στάδιο της λειτουργίας της συστοιχίας. Οι εξοδοί του μοντέλου είναι η μερική πίεση και η σχετική υγρασία του υδρογόνου στην άνοδο. Το μοντέλο υπολογίζει ακόμη την ποσότητα του υδρογόνου που αντιδρά. Σημειώνεται ότι δεν διαφεύγει καθόλου υδρογόνο από την άνοδο καθώς όσο εισάγεται αντιδρά με άμεση συνέπεια η κατανάλωση αυτού, U_f , να είναι ίση με 100%.

Όπως και στο μοντέλο της καθόδου, γίνονται ορισμένες παραδοχές οι οποίες θα πρέπει να παρατεθούν. Η θερμοκρασία στην άνοδο θεωρείται ότι παραμένει σταθερή και ίση με την θερμοκρασία στη συστοιχία. Οι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παραμένουν σταθερές σε όλη τη σωλήνωση της ανόδου (cathode flow channel). Τέλος, όλο το σύστημα της ανόδου θεωρείται σαν ένας ενιαίος όγκος.

3.2.5.1 Μοντέλο ενυδάτωσης των μεμβρανών

Το μοντέλο ενυδάτωσης των μεμβρανών των κελιών καυσίμου της συστοιχίας υπολογίζει την μαζική παροχή του νερού στις μεμβράνες και την περιεκτικότητα των μεμβρανών σε νερό. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι συναρτήσεις του ρεύματος που παράγεται στην συστοιχία και της σχετικής υγρασίας στην άνοδο και την κάθοδο και αποτελούν και τις εξόδους του μοντέλου.

Η μεταφορά του νερού κατά μήκος μια μεμβράνης μπορεί να περιγραφεί από δύο διακριτά φαινόμενα. Το πρώτο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στις μεμβράνες είναι η μεταφορά μορίων νερού από την κάθοδο στην άνοδο δια μέσου της μεμβράνης από τα πρωτόνια του υδρογόνου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ηλεκτροόσμωση. Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο γίνεται μεταφορά νερού διαμέσου της μεμβράνης είναι η διαφορά της σχετικής υγρασίας, δηλαδή διαφορά στη συγκέντρωση του νερού, ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Αυτή η διαφορά αποτελεί ένα δυναμικό που με τη σειρά του προκαλεί μετακίνηση μορίων νερού από σημεία υψηλών συγκεντρώσεων σε σημεία χαμηλών συγκεντρώσεων. Τα φαινόμενα αυτά λαμβάνονται υπόψη και από το μοντέλο.



**4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ –
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΑΜΟΝΤΕΛΩΝ**

4.1 Εισαγωγή

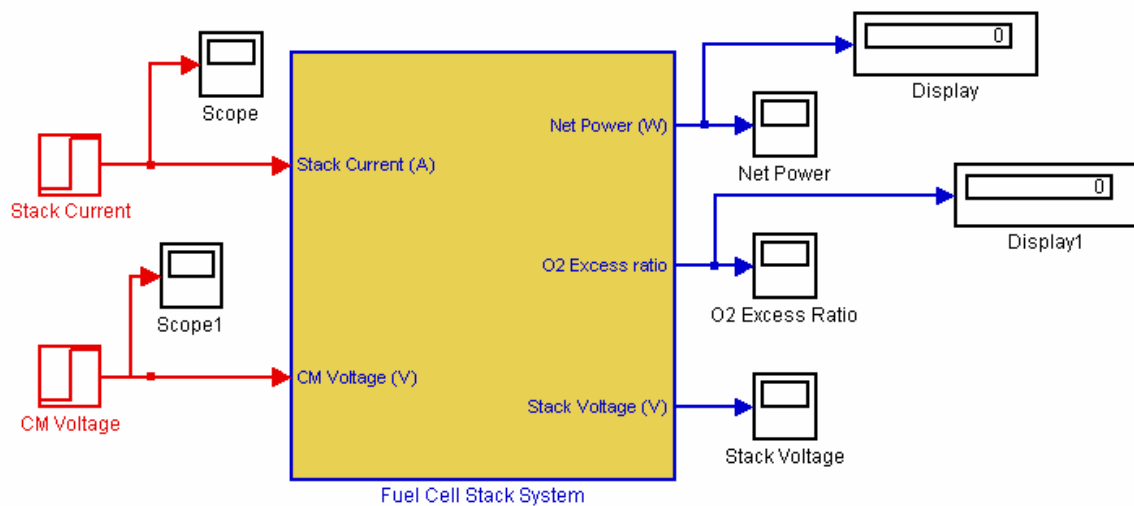
Το 4^ο κεφάλαιο περιγράφει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή εξισώσεων που συσχετίζουν τις μεταβλητές εισόδου και τις μεταβλητές εξόδου του μοντέλου που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο σε μόνιμη κατάσταση. Συγκεκριμένα αναπτύσσονται εξισώσεις που συσχετίζουν τις δύο μεταβλητές εισόδου (δυναμικό του συμπιεστή, v_{cm} και ένταση της συστοιχίας των κελιών καυσίμου, I_{st}) με τις δύο μεταβλητές εξόδου (καθαρή ισχύς, P_{net} , που παράγεται από τη συστοιχία, ο λόγος, λ_{O_2}). Η ανάπτυξη των συσχετίσεων βασίζεται σε μια βάση δεδομένων που δημιουργείται προσομοιώνοντας το λεπτομερές δυναμικό μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε πολλαπλές περιοχές λειτουργίας. Αναπτύσσονται μαθηματικές συσχετίσεις με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων αλλά επίσης χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και σχολιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε προσέγγισης. Μια εργασία στην οποία παρουσιάζεται μια αντίστοιχη πορεία μεταμοντελοποίησης είναι και αυτή των P.L Zervas και συνεργάτες (2007).

4.1 Διαμόρφωση βάσης δεδομένων

Για την ανάπτυξη των συσχετίσεων δημιουργείται αρχικά μια βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει ζεύγη τιμών για τις μεταβλητές εισόδου που καλύπτουν όλη τη περιοχή λειτουργίας του συστήματος που εξετάζεται και τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών εξόδου. Οι τιμές των μεταβλητών εξόδου προκύπτουν από το λεπτομερές δυναμικό μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσομοιώνοντας τη δυναμική του συστήματος για αρκετό χρόνο ώστε το σύστημα να ισορροπήσει σε μόνιμη κατάσταση. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται η δομή της βάσης δεδομένων και κάποιες ενδεικτικές τιμές. Ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για κάθε προσομοίωση, όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρονικός υπολογιστής με επεξεργαστή 1.87GHz Intel Pentium Core 2 και μνήμη 1GB Ram σε λειτουργικό σύστημα Windows XP, είναι περίπου 1s. Η σχηματική διάταξη του συστήματος ανοιχτού βρόγχου σε περιβάλλον SIMULINK που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

Πίνακας 4.1: Δομή και ενδεικτικές τιμές βάσης δεδομένων

| Αριθμός δεδομένων | Μεταβλητές Εισόδου | | Μεταβλητές Εξόδου | |
|----------------------|--------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| | v_{cm} (V) | I_{st} (A) | P_{net} (W) | λ_{O_2} |
| 1 | 50 | 60 | 14580 | 1.312 |
| 2 | 65 | 100 | 21640 | 1.176 |
| 3 | 90 | 150 | 29750 | 1.235 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| 524 | 200 | 250 | 48430 | 1.976 |



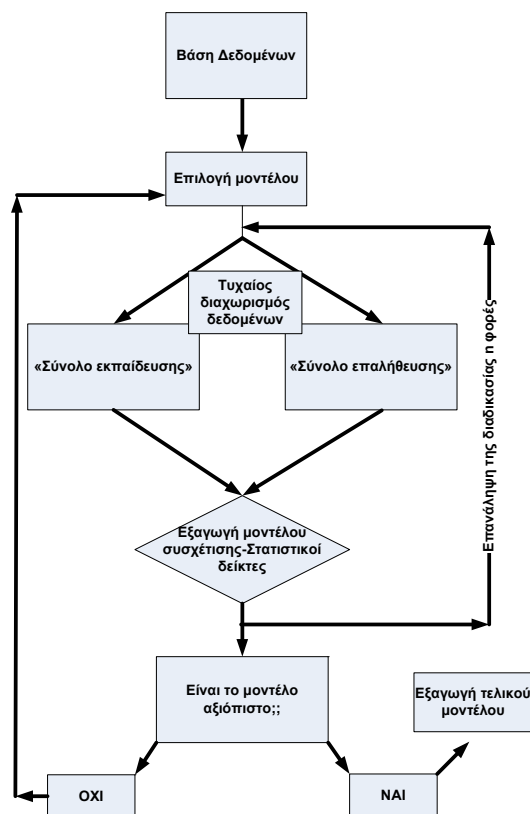
Σχήμα 4.1: Σχηματική διάταξη μοντέλου συστοιχίας κελιών καυσίμου ανοιχτού βρόχου σε περιβάλλον SIMULINK

4.2 Γραμμική Παλινδρόμηση

Η βάση δεδομένων που δημιουργείται από τις προσομοιώσεις του μοντέλου του συστήματος ανοιχτού βρόγχου χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξισώσεων με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Οι εξισώσεις που προκύπτουν συσχετίζουν τις μεταβλητές εξόδου P_{net} και λ_{O2} με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου I_{st} και U_{cm} .

4.2.1 Συσχέτιση $P_{net} = f(U_{cm}, I_{st})$

Για την εύρεση της καλύτερης δυνατής συσχέτισης της καθαρής ισχύος P_{net} της συστοιχίας των κελιών καυσίμου και των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου I_{st} και U_{cm} έγιναν δοκιμές με αρκετές δομές γραμμικών μοντέλων. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται σχηματικά ο τρόπος εφαρμογής αυτής της μεθόδου εξαγωγής μοντέλου συσχέτισης.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής της μεθόδου ανάπτυξης εξίσωσης συσχέτισης με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

Η καλύτερη δυνατή συσχέτιση που βρέθηκε περιγράφεται από την πιο κάτω σχέση:

$$P_{net} = 159.5193 * I_{st} - 1198.588 * \left(\frac{v_{cm}}{I_{st}} \right) + 7051.5691 \quad (4.1)$$

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες:

$$\text{Root Mean Squared Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{SSE}{nn}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nn} (P_{net,i} - \hat{P}_{net})^2}{nn}} \quad (4.2)$$

$$\text{Coefficient of Determination (R}^2\text{)} = 1 - \frac{SSE}{SSY} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nn} (P_{net,i} - \hat{P}_{net})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{net,i} - \bar{P}_{net})^2} \quad (4.3)$$

$$F - \text{statistic} = \frac{(R^2 / kk)}{((1 - R^2) / (nn - (kk + 1)))} \quad (4.4)$$

όπου ο δείκτης SSE αντιπροσωπεύει το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων ανάμεσα στις τιμές καθαρής ισχύος P_{net} της βάσης δεδομένων και τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπει η εξίσωση συσχέτισης, ενώ ο δείκτης SSY υπολογίζει το άθροισμα των τετραγωνικών αποκλίσεων των τιμών καθαρής ισχύος P_{net} της βάσης δεδομένων από τον μέσο όρο τους.

Στις πιο πάνω εξισώσεις ο όρος $P_{net,i}$ αναφέρεται στην i -οστή τιμή της καθαρής ισχύος P_{net} , ο όρος $\hat{P}_{net,i}$ είναι ο αντίστοιχος i -οστός όρος που προβλέπεται από το μοντέλο και ο όρος \bar{P}_{net} είναι ο μέσος όρος των τιμών της μεταβλητής αυτής για όλη τη βάση δεδομένων. Τέλος, η παράμετρος kk ορίζεται ως ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών του συστήματος, και η παράμετρος nn ως το πλήθος των δεδομένων εισόδου-εξόδου που συνιστούν τη διαθέσιμη βάση.

Με σκοπό να εξεταστεί περαιτέρω η ακρίβεια και αξιοπιστία του μοντέλου ακολουθήθηκε η μέθοδος της διασταύρωσης (Cross-validation). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή δημιουργείται ένας αριθμός βάσεων δεδομένων, που προκύπτει με την απομάκρυνση μιας ομάδας δεδομένων είτε ακόμα και ενός μεμονωμένου δεδομένου από την υφιστάμενη. Για κάθε νέα βάση δεδομένων που δημιουργείται, αναπτύσσεται ένα μοντέλο που συσχετίζει τις μεταβλητές εισόδους με την έξοδο, το οποίο βασίζεται στο γραμμικό μοντέλο συσχέτισης που κατασκευάστηκε αρχικά. Στη συνέχεια το κάθε νέο μοντέλο αξιολογείται ως προς την ακρίβεια με την οποία προβλέπει τις αποκρίσεις της μεταβλητής εξόδου στα δεδομένα τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της μεθόδου leave one-out (LOO) στην εργασία αυτή έγινε με το να διαγράφεται κάθε φορά ένα δεδομένο από το σύνολο των δεδομένων δημιουργώντας έτσι έναν αριθμό διαφορετικών μοντέλων. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργήθηκαν τόσα μοντέλα όσα και ο αριθμός των δεδομένων nn .

Ο δείκτης PRESS (Prediction error sum of squares) είναι ένας στατιστικός δείκτης που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ακρίβειας μιας μεθόδου μοντελοποίησης με τη χρήση της τεχνικής LOO cross-validation. Με βάση τους δείκτες PRESS και SSY, υπολογίζονται οι τιμές των R_{CV}^2 και S_{PRESS} . Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραπάνω στατιστικών μεγεθών είναι οι:

$$R_{CV}^2 = 1 - \frac{PRESS}{SSY} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{net,i} - \hat{P}_{net,i}^{LOO})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{net,i} - \bar{P}_{net})^2} \quad (4.5)$$

$$S_{PRESS} = \sqrt{\frac{PRESS}{nn}} \quad (4.6)$$

όπου $\hat{P}_{net,i}^{LOO}$ είναι η καθαρή ισχύς που παράγεται από τη συστοιχία που προβλέπεται από το μοντέλο που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα της βάσης, εκτός του δεδομένου i . Οι τιμές των στατιστικών δεικτών που προέκυψαν συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2. Το διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει τις προβλέψεις

$\hat{P}_{net,i}^{LOO}, i = 1, \dots, nn$ των μοντέλων που προκύπτουν με εφαρμογή της μεθόδου LOO cross-validation συναρτήσει των αντίστοιχων τιμών που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Στην ιδανική περίπτωση, τα σημεία βρίσκονται στην κύρια διαγώνιο του διαγράμματος. Είναι λοιπόν εμφανές ότι σε αρκετές περιπτώσεις τα σφάλματα ανάμεσα στις προβλέψεις των μοντέλων και τις τιμές που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων είναι σημαντικά.

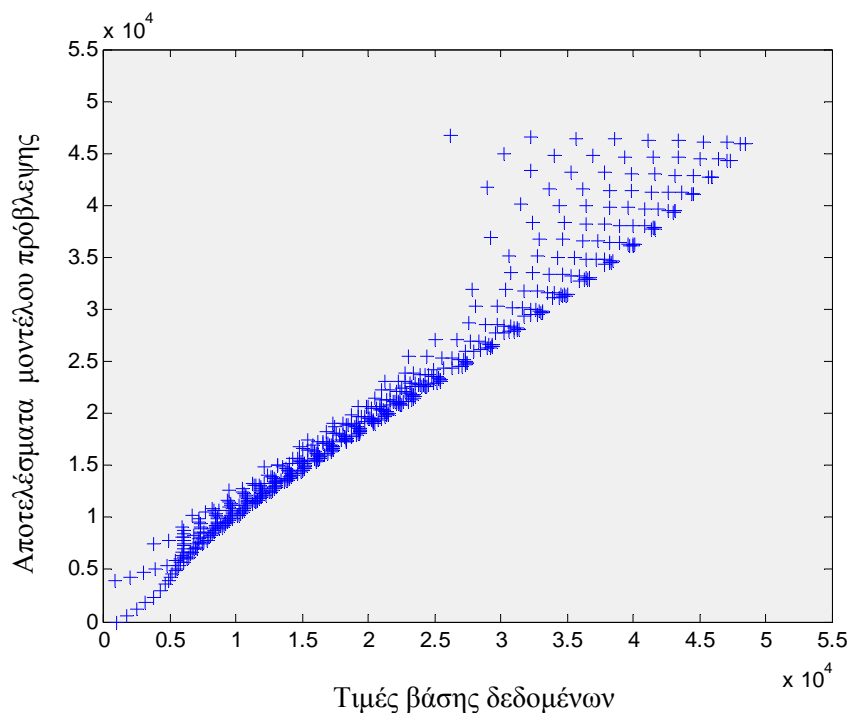
Πίνακας 4.2: Οι τιμές των στατιστικών δεικτών που αντιστοιχούν στο μοντέλο που περιγράφεται από την εξίσωση 4.1

| | <i>Min</i> |
|--------------------|------------|
| RMSE | 2530.6 |
| R^2 | 0.9505 |
| <i>F-statistic</i> | 4992.5 |
| R_{CV}^2 | 0.9496 |
| S_{PRESS} | 2550 |

Άλλος ένας έλεγχος αξιοπιστίας της μεθοδολογίας της γραμμικής συσχέτισης που ακολουθήθηκε γίνεται με την κατασκευή μοντέλων με βάση το 75% των δεδομένων της βάσης και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με κριτήριο το υπόλοιπο 25% των δεδομένων. Για να εξασφαλιστεί ότι η επιτυχία ενός μοντέλου να προβλέψει ορθά την συμπεριφορά του 25% των δεδομένων που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του δεν είναι τυχαία, πραγματοποιούνται 100 διαφορετικοί και τυχαίοι διαχωρισμοί της βάσης δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης (training data set) και σε δεδομένα επαλήθευσης (validation data set) (75% και 25% της βάσης δεδομένων αντίστοιχα) και άρα δημιουργούνται 100 διαφορετικές εξισώσεις.

Οι δείκτες RMSE και R^2 υπολογίζονται για κάθε μοντέλο με βάση τα δεδομένα που δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του μοντέλου, δηλαδή τα δεδομένα επαλήθευσης. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι ελάχιστες (min), μέγιστες (max), μέσες (mean) τιμές και η τυπική απόκλιση (standard deviation) των στατιστικών

δεικτών RMSE και R^2 που υπολογίστηκαν για τους 100 τυχαίους διαφορετικούς διαμερισμούς της βάσης δεδομένων.

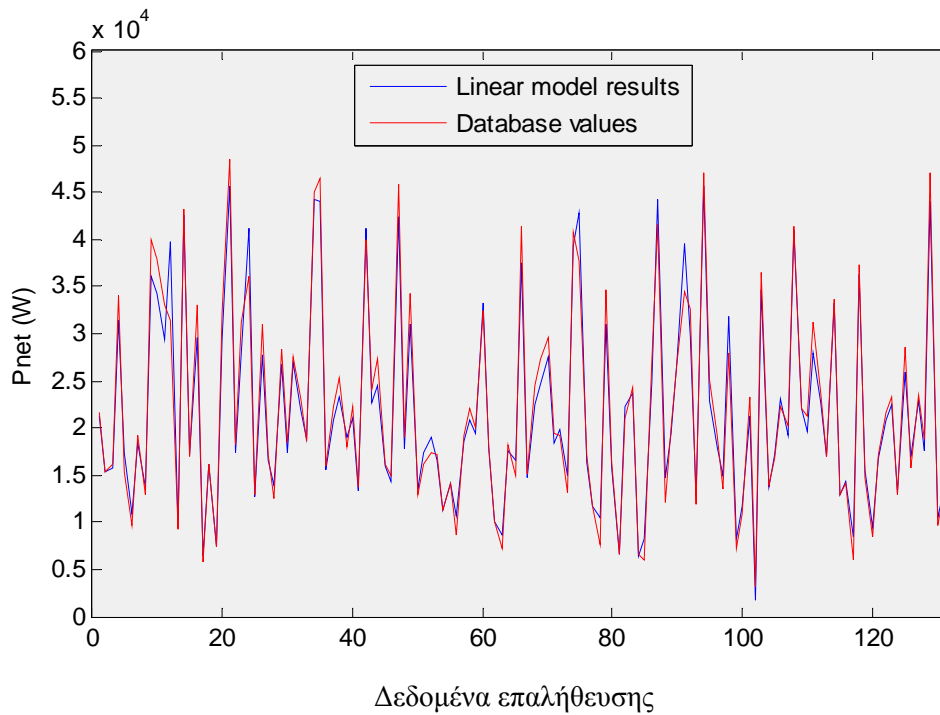


Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου *LOO cross validation*, χρησιμοποιώντας το μοντέλο της εξίσωσης 4-1 για την πρόβλεψη της καθαρής ισχύος P_{net}

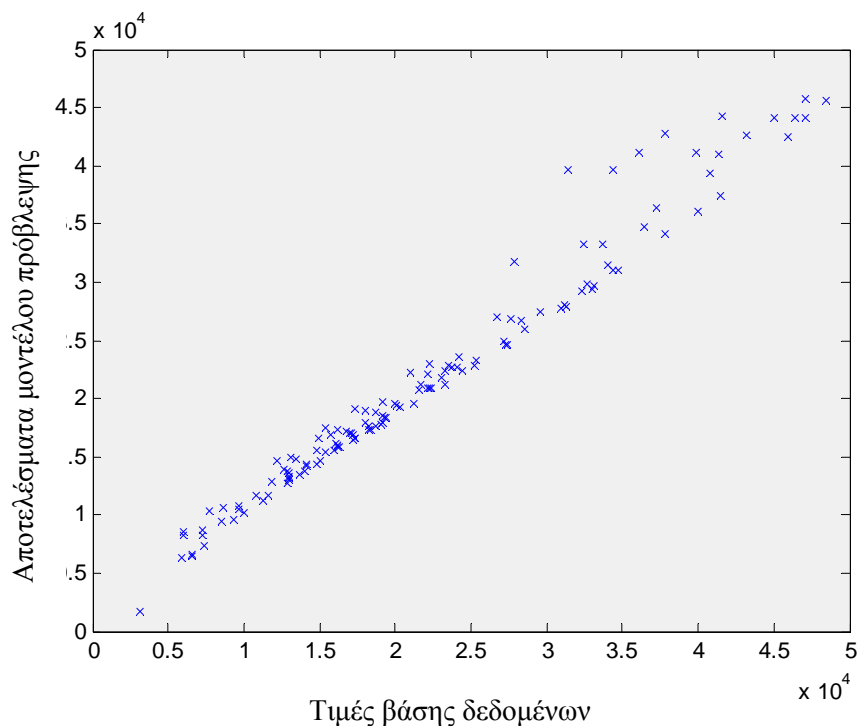
Τα Διαγράμματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζουν τις τιμές της καθαρής ισχύος P_{net} που προβλέπονται από ένα εκ των 100 γραμμικών μοντέλων που κατασκευάστηκαν το οποίο αντιστοιχεί στις ακόλουθες τιμές στατιστικών δεικτών: $RMSE=1969.91$ and $R^2=0.9689$. Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές της βάσης δεδομένων.

Πίνακας 4.3: Οι ελάχιστες (*min*), μέγιστες(*max*), μέσες (*mean*) τιμές και η τυπική απόκλιση (*standard deviation*) των δεικτών $RMSE$ και R^2 μετά από πραγματοποίηση 100 τυχαίων διαμερισμών των δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε ποσοστό 75%-25%.

| | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
|-------------------------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| RMSE | 1611,40 | 3316.10 | 2523.70 | 369.39 |
| R^2 | 0.9148 | 0.9798 | 0.9514 | 0.0151 |



Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση τιμών P_{net} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το γραμμικό μοντέλο για το σύνολο επαλήθευσης



Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση τιμών P_{net} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το γραμμικό μοντέλο για το σύνολο επαλήθευσης

Είναι εμφανές ότι το γραμμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι αρκετά ακριβές και αξιόπιστο ως προς την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της συστοιχίας των κελιών καυσίμου. Παρόλα αυτά, το μοντέλο παρουσιάζει σημαντικές αδυναμίες στις περιπτώσεις που η μεταβλητή εξόδου λαμβάνει υψηλές τιμές .

4.2.2 Συσχέτιση $\lambda_{O_2} = f(v_{cm}, I_{st})$

Μετά την εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφεται στο Σχήμα 4.1, η καλύτερη γραμμική συσχέτιση που βρέθηκε ανάμεσα στον λόγο λ_{O_2} και στις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος I_{st} και v_{cm} είναι η ακόλουθη:

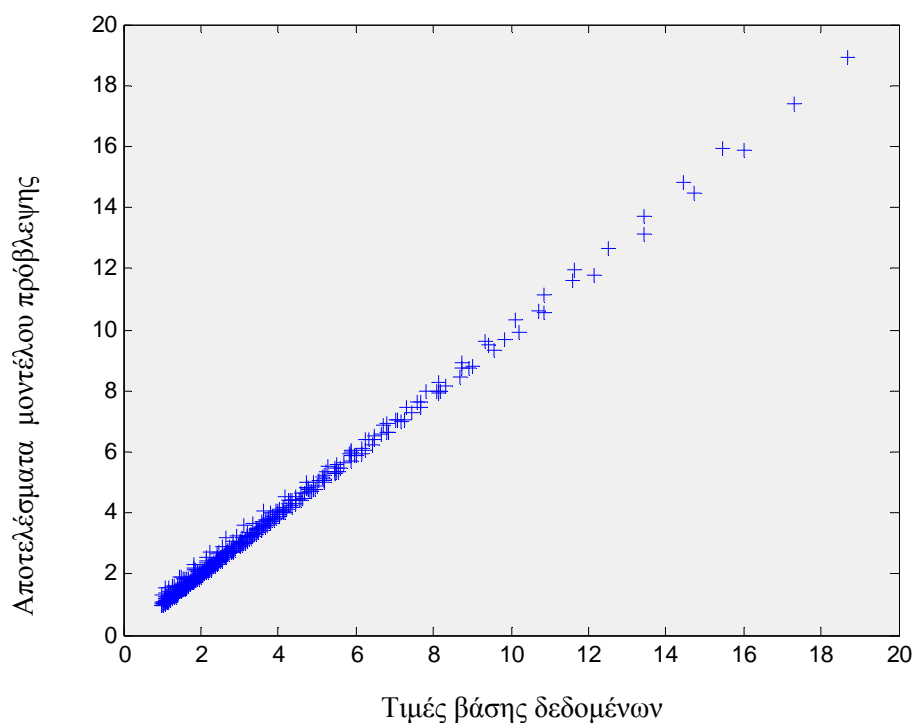
$$\lambda_{O_2} = 0.0053 * \left(\frac{v_{cm}^2}{I_{st}} \right) + 1.3187 * \left(\frac{v_{cm}}{I_{st}} \right) + 0.1067 \quad (4.7)$$

Για το παραπάνω μοντέλο προκύπτουν οι ακόλουθοι στατιστικοί δείκτες:

Πίνακας 4.4: Οι τιμές των στατιστικών δεικτών που αντιστοιχούν στο μοντέλο που περιγράφεται από την εξίσωση (4-7)

| | <i>Min</i> |
|--------------------|------------|
| RMSE | 0.1282 |
| R^2 | 0.9975 |
| <i>F-statistic</i> | 103740 |
| R^2_{CV} | 0.9975 |
| S_{PRESS} | 0.1299 |

Το Διάγραμμα 4.4 παρουσιάζει τις προβλέψεις $\hat{P}_{net,i}^{LOO}$, $i = 1, \dots, nn$ των μοντέλων που προκύπτουν με εφαρμογή της μεθόδου LOO cross-validation συναρτήσεως των αντίστοιχων τιμών που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, τα σφάλματα ανάμεσα στις προβλέψεις των μοντέλων και τις τιμές που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων είναι αρκετά μικρά



Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου LOO cross validation, χρησιμοποιώντας το μοντέλο της εξίσωσης 4-7 για την πρόβλεψη του λόγου λ_2

Επιπλέον εφαρμόζεται και εδώ η μεθοδολογία κατασκευής ενός μοντέλου με βάση το 75% της βάσης δεδομένων και επαλήθευσης του με βάση το υπόλοιπο 25%. Για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της μεθόδου, κατασκευάζονται μοντέλα για 100 διαφορετικούς διαμερισμούς.

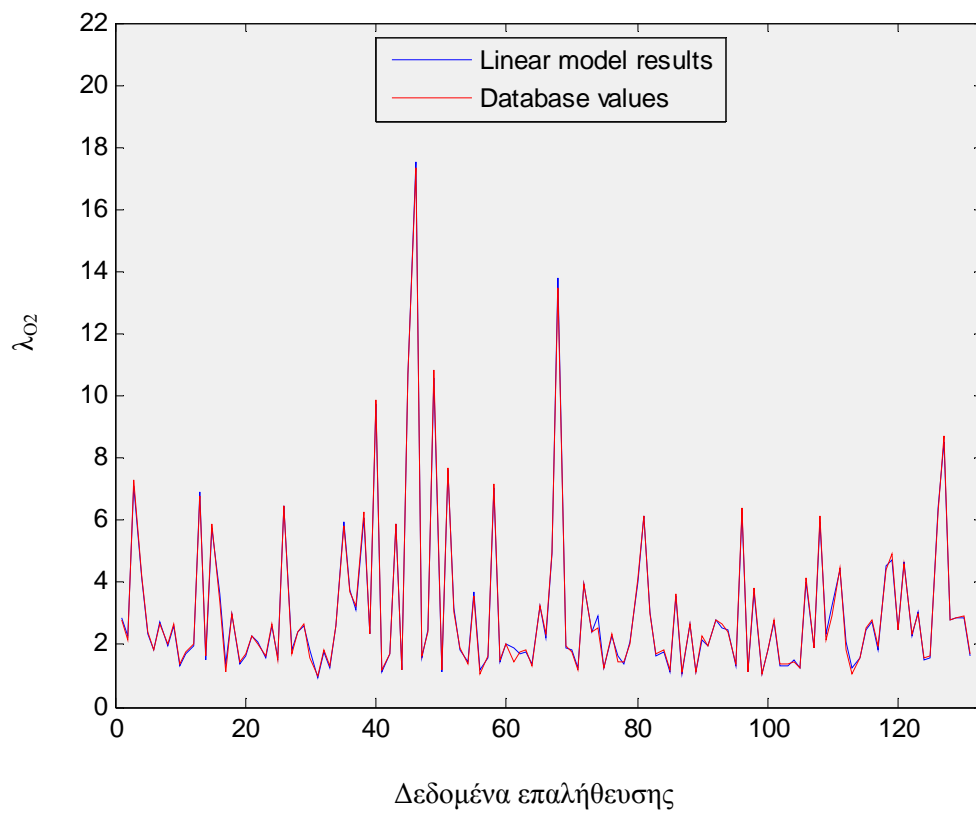
Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι ελάχιστες (min), μέγιστες (max), μέσες (mean) τιμές και η τυπική απόκλιση των στατιστικών δεικτών RMSE και R^2 που υπολογίστηκαν για τους 100 διαφορετικούς διαμερισμούς της βάσης δεδομένων. Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν βάση των δεδομένων επαλήθευσης μόνο

Πίνακας 4.5: Οι ελάχιστες (min), μέγιστες(max), μέσες (mean) τιμές και η τυπική απόκλιση (standard deviation) των δεικτών RMSE και R^2 μετά από πραγματοποίηση 100 τυχαίων διαμερισμών των δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε ποσοστό 75%-25%.

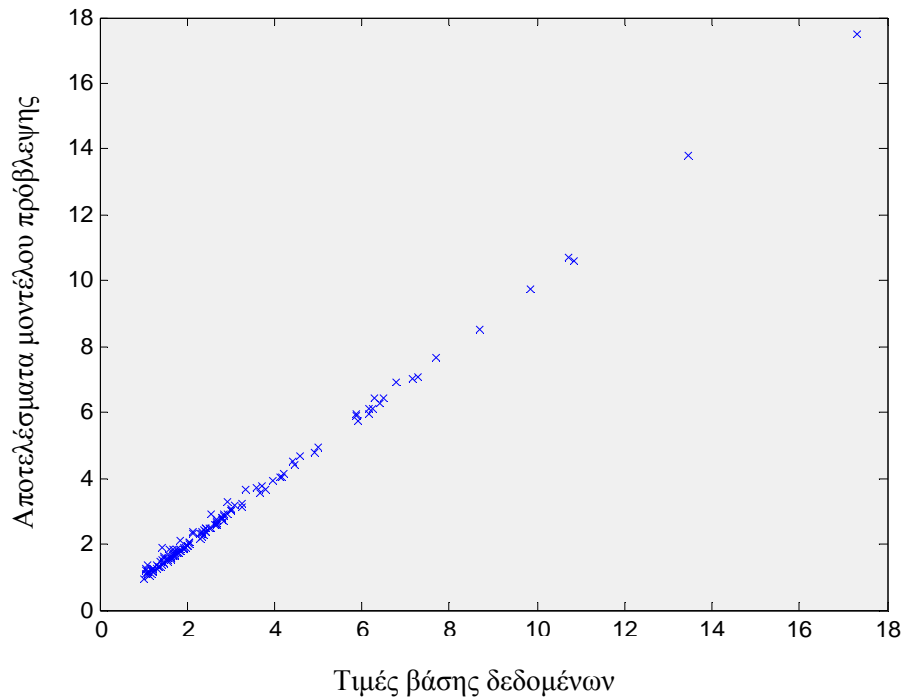
| | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
|-------------------------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| RMSE | 0.0948 | 0.1523 | 0.1239 | 0.0111 |
| R^2 | 0.9960 | 0.9988 | 0.9976 | 0.0006 |

Τα Διαγράμματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζουν τις τιμές του λόγου λ_{O2} που προβλέπονται από ένα εκ των 100 γραμμικών μοντέλων που κατασκευάστηκαν το οποίο αντιστοιχεί στις ακόλουθες τιμές στατιστικών δεικτών: $RMSE=0.1184$ and $R^2=0.9978$. Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές της βάσης δεδομένων.

Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση αυτή το γραμμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη συσχέτιση του λ_{O2} με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου είναι ακριβές και αξιόπιστο σε όλο το εύρος τιμών που λαμβάνει η συγκεκριμένη μεταβλητή εξόδου στη διαθέσιμη βάση δεδομένων.



Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση τιμών λ_{O_2} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το γραμμικό μοντέλο για το σύνολο επαλήθευσης



Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση τιμών λ_{O_2} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το γραμμικό μοντέλο για το σύνολο επαλήθευσης

4.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Παρά το γεγονός ότι η πρόβλεψη της μεταβλητής λ_{O_2} είναι ικανοποιητική χρησιμοποιώντας το μοντέλο που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθοδολογίας γραμμικής παλινδρόμησης, δε συμβαίνει το ίδιο με τη μεταβλητή P_{net} . Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η διαδικασία που περιγράφεται στο Σχήμα 4.2 είναι επαναληπτική και επομένως χρονοβόρος και μη αποδοτική. Η τεχνολογία των νευρωνικών δικτύων δίνει λύση και στα δύο προβλήματα αφού αφενός μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε μη γραμμική συμπεριφορά με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια και κατά δεύτερον βασίζεται σε συγκεκριμένες δομές μοντέλων, άρα δεν απαιτείται ο εκ νέου προσδιορισμός τους. Στο παρόν υποκεφάλαιο η αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης (Radial Basis Function, RBF) εφαρμόζεται στη ίδια βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη εξισώσεων συσχέτισης με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

4.3.1 Θεωρία τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) αποτελούν μια σχετικά νέα επιστημονική περιοχή που έχει τύχει όμως μεγάλης ανάπτυξης και προσοχής από την επιστημονική κοινότητα. Σε αυτό συνετέλεσαν τα εντυπωσιακά αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί σε πλήθος προβλημάτων, αλλά και η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων χρόνων τόσο σε υπολογιστική ισχύ όσο και στην ανάπτυξη αλγόριθμων εκπαίδευσης μοντέλων νευρωνικών δικτύων. Η τεχνική των νευρωνικών δικτύων έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών διαφορετικών επιστημονικών πεδίων, όπως η μηχανική, η φυσική, η νευρολογία, η ψυχολογία, η ιατρική, τα μαθηματικά, η πληροφορική, η χημεία και τα οικονομικά. Μερικές από τις σημαντικές εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων είναι η πρόβλεψη χρονοσειρών, η προσέγγιση συναρτήσεων, η συμπίεση δεδομένων, η αναγνώριση και η σύνθεση ομιλίας, η προτυποποίηση και η ρύθμιση μη γραμμικών συστημάτων, η κατηγοριοποίηση προτύπου, η επιλογή μεταβλητών, η συνδυαστική βελτιστοποίηση, ο εντοπισμός δυσλειτουργιών διεργασίας και η επίλυση διαφορικών εξισώσεων.

Το κύριο χαρακτηριστικό των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι ότι οι βασικές αρχές και λειτουργίες τους βασίζονται στο νευρολογικό σύστημα των ζώντων οργανισμών (και φυσικά του ανθρώπου). Έτσι στα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούμε έννοιες όπως, π.χ. ένα δίκτυο μαθαίνει και εκπαιδεύεται, θυμάται ή ξεχνά μια αριθμητική τιμή, κλπ. που αποδίδουμε επίσης στη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ένας γενικός ορισμός των νευρωνικών δικτύων είναι ο εξής:

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας παράλληλα διανεμημένος επεξεργαστής αποτελούμενος από απλές μονάδες επεξεργασίας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει εμπειρική γνώση και να τη χρησιμοποιεί. Μοιάζει στον ανθρώπινο εγκέφαλο σε δύο σημεία:

1. Το δίκτυο αποκτά γνώση από το περιβάλλον του με βάση μια διαδικασία εκπαίδευσης.
2. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, δηλαδή των μονάδων επεξεργασίας του νευρωνικού δικτύου, ονομάζονται συναπτικά βάρη και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της επίκτητης γνώσης.

Πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να προσομοιώσουν τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου προκειμένου να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματά του έναντι των συμβατικών υπολογιστών. Οι πρώτοι οι οποίοι προσπάθησαν να αναλύσουν τις αρχές που διέπουν τους νευρώνες του εγκεφάλου ήταν οι McCulloch και Pitts (1943). Αυτή η εργασία έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων.

Τα πλεονεκτήματα των νευρωνικών δικτύων συνοψίζονται ως εξής:

- Προσέγγιση μη γραμμικών συναρτήσεων: Ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να προσεγγίσει συναρτήσεις (τόσο στατικές όσο και δυναμικές) σε οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας, με τη χρησιμοποίηση επαρκούς μεγέθους δικτύου. Αυτή η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων λέγεται «ιδιότητα της βέλτιστης προσέγγισης» και έχει αποδειχτεί από τους Girosi, Poggio (1989), τόσο για τα νευρωνικά δίκτυα τύπου feedforward όσο και για τα νευρωνικά δίκτυα RBF.
- Προσαρμοστικότητα: Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στο περιβάλλον λειτουργίας τροποποιώντας κατάλληλα τα συναπτικά τους βάρη.
- Ευρωστία: Τα νευρωνικά δίκτυα επιδεικνύουν πολύ καλή συμπεριφορά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει θόρυβος στα δεδομένα

4.3.1.1 Κατηγορίες νευρωνικών δικτύων

Υπάρχουν πολλές κατηγοριοποιήσεις των νευρωνικών δικτύων: ανάλογα με τη δομή τους, τον τρόπο εκπαίδευσής τους, τις εφαρμογές τους, κλπ. Σημειώνεται ότι η εκπαίδευση είναι η διαδικασία που καθορίζει την αποτελεσματικότητα του νευρωνικού δικτύου και αποτελεί το βασικό πεδίο έρευνας πλέον στα νευρωνικά δίκτυα. Με τον όρο εκπαίδευση στα νευρωνικά δίκτυα εννοούμε τη διαδικασία μέσω της οποίας κάποιο σύστημα, αντιδρώντας σε περιβαλλοντικό ερέθισμα, αναδιοργανώνεται έτσι ώστε να γίνει πιο αποδοτικό.

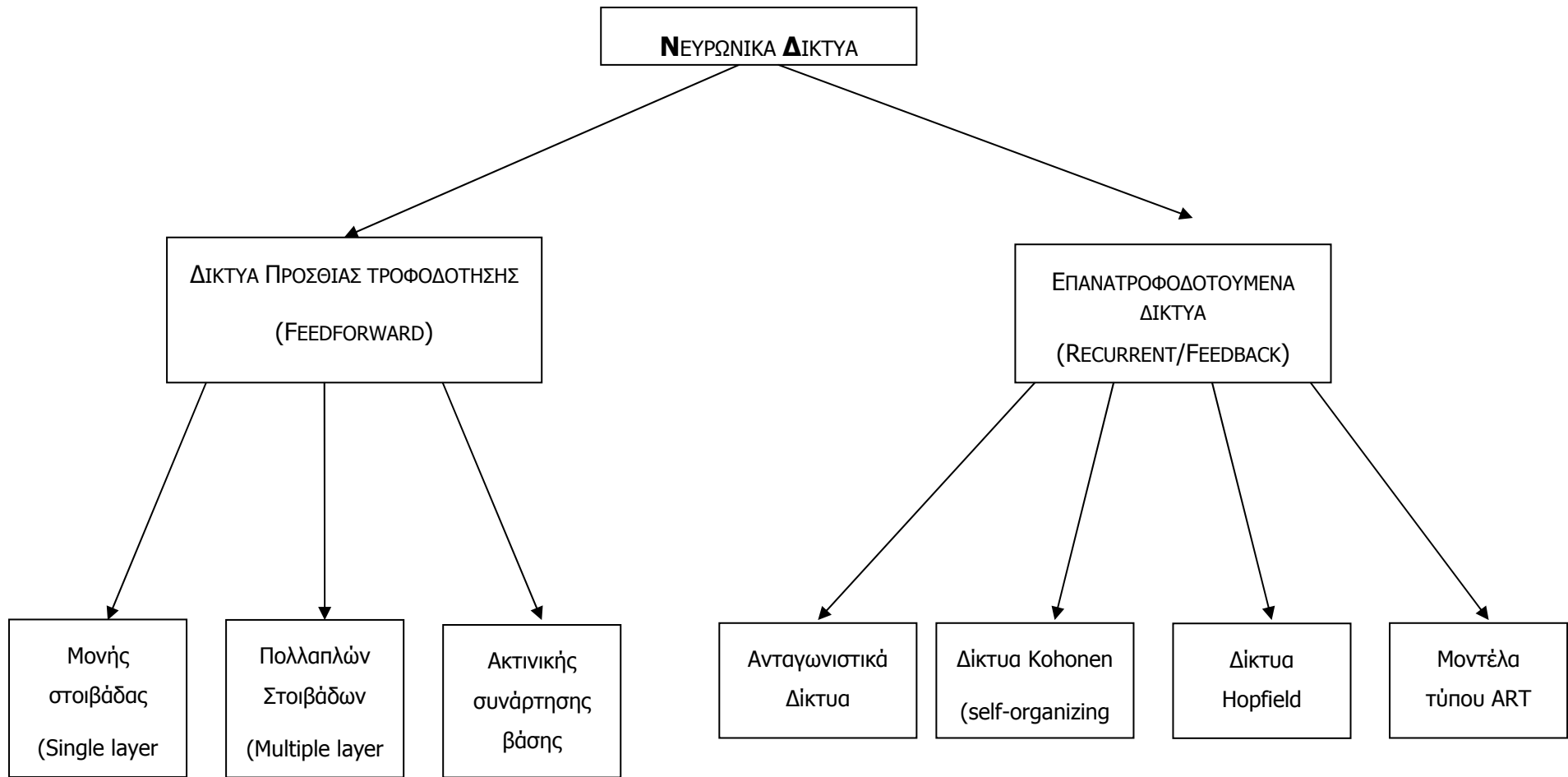
Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων:

- Εκπαίδευση με επίβλεψη: Στο νευρωνικό δίκτυο παρέχονται τόσο οι είσοδοι όσο και οι επιθυμητές έξοδοι του συνόλου των δεδομένων εκμάθησης. Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί

το σφάλμα μεταξύ των παραγόμενων και των επιθυμητών εξόδων, προσαρμόζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους του δικτύου.

- Εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη: Στην περίπτωση αυτή δεν γίνεται χρήση των επιθυμητών εξόδων. Γίνεται εξερεύνηση των δεδομένων εισόδου και προσπάθεια οργάνωσης των δεδομένων αυτών σε κατηγορίες.
- Υβριδική εκπαίδευση: Στην περίπτωση αυτή γίνεται συνδυασμός της εκπαίδευσης με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη. Συνήθως, τα συναπτικά βάρη υπολογίζονται με επίβλεψη ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι του δικτύου χωρίς επίβλεψη.

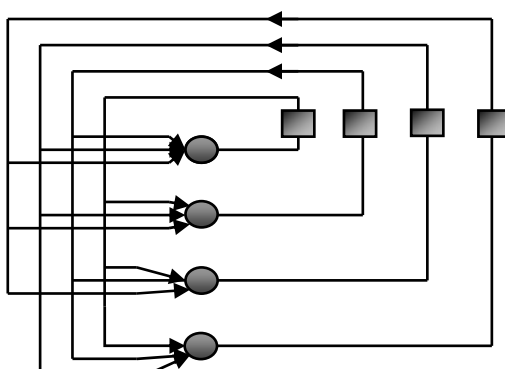
Η σημαντικότερη κατηγοριοποίηση των νευρωνικών δικτύων βασίζεται στη δομή τους, δηλαδή τον τρόπο σύνδεσης και διάταξης των μονάδων επεξεργασίας των δικτύων. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με το Σχήμα 4.4. Στην περιγραφή των επιμέρους κατηγοριών δε θα δοθεί μεγάλη βάση στα επανατροφοδοτούμενα δίκτυα αφού αυτά δεν χρησιμοποιούνται στη διπλωματική εργασία.



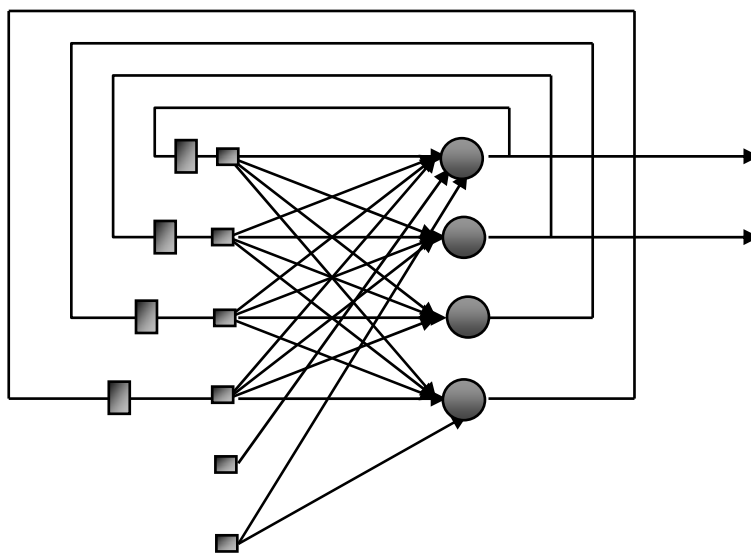
Σχήμα 4.3: Ταξινόμηση νευρωνικών δικτύων

4.3.1.2 Επανατροφοδοτούμενα Δίκτυα

Ένα επανατροφοδοτούμενο νευρωνικό δίκτυο διαφέρει από τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης στο ότι περιέχει τουλάχιστον ένα βρόγχο ανατροφοδότησης. Τα δίκτυα αυτά είτε αποτελούνται από ένα μία στοιβάδα νευρώνων, οι έξοδοι των οποίων ανατροφοδοτούνται πίσω στις εισόδους των νευρώνων (Σχήμα 4.4), είτε περιέχουν και μία κρυφή στοιβάδα νευρώνων, των οποίων οι έξοδοι ανατροφοδοτούνται και αυτές στις εισόδους (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.4: Νευρωνικό δίκτυο επανατροφοδότησης χωρίς κρυφή στοιβάδα



Σχήμα 4.5: Νευρωνικό δίκτυο επανατροφοδότησης με κρυφή στοιβάδα

4.3.1.3 Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης

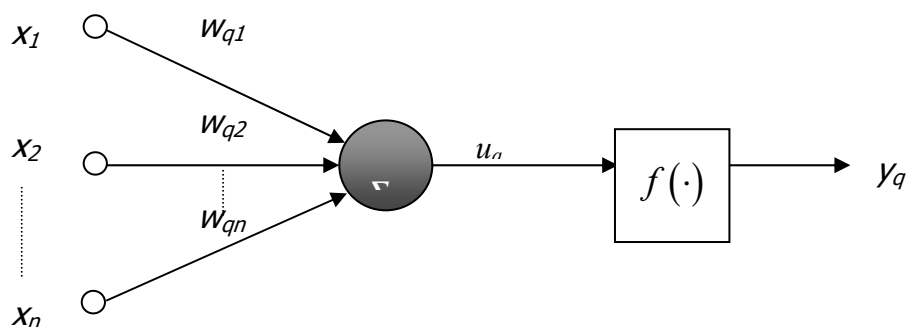
4.3.1.3.1 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα

Τα πλεονεκτήματα των νευρωνικών δικτύων έναντι άλλων συμβατικών μεθόδων υπολογισμού βασίζονται στην κύρια δομική τους μονάδα επεξεργασίας που ονομάζεται νευρώνας. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το μοντέλο του πιο συνηθισμένου τεχνητού νευρώνα. Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο νευρώνας εκτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό μεταξύ των στοιχείων του διανύσματος εισόδου $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$. Δηλαδή τα στοιχεία x_j ($j=1,2,\dots,n$) πολλαπλασιάζονται με τα αντίστοιχα συναπτικά βάρη w_{qj} και εν συνεχεία αθροίζονται.:

$$u_q = \sum_{j=1}^{nn} w_{qj} x_j \quad (4.8)$$

Ο γραμμικός συνδυασμός u_q αποτελεί την είσοδο στη συνάρτηση ενεργοποίησης $f(\cdot)$, η οποία συνήθως είναι μη γραμμική. Μπορεί να είναι είτε συνεχής, είτε δυαδική (η έξοδος 0 ή 1), είτε διπολική (η έξοδος -1 ή 1). Οπότε η έξοδος του νευρώνα δίνεται από τη σχέση:

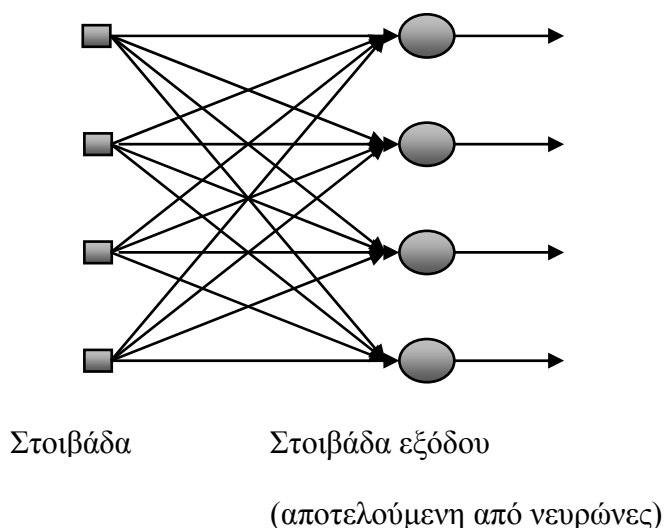
$$y_q = f(u_q) = f\left(\sum_{j=1}^{nn} w_{qj} x_j\right) \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.6: Μοντέλο τεχνητού νευρώνα

4.3.1.3.2 Δίκτυα Πρόσθιας τροφοδότησης μονής στοιβάδας

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο οι νευρώνες οργανώνονται υπό μορφή στοιβάδων. Η πιο απλή περίπτωση περιλαμβάνει μία στοιβάδα εισόδου που αποτελείται από κόμβους οι οποίοι μεταφέρουν τις εισόδους σε μία στοιβάδα εξόδου που αποτελείται από νευρώνες. Η πληροφορία μεταφέρεται μόνο από τη στοιβάδα εισόδου προς τη στοιβάδα εξόδου και σε καμία περίπτωση δε συμβαίνει το αντίθετο. Για αυτό το λόγο τα δίκτυα αυτά ονομάζονται δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ή άκυκλα δίκτυα. Επίσης τα δίκτυα αυτού του τύπου ονομάζονται «μονοστρωματικά» (single-layer), όπου το «μονοστρωματικό» αναφέρεται στη στοιβάδα εξόδου η οποία περιλαμβάνει τους νευρώνες. Ένα τέτοιο δίκτυο εικονίζεται στο Σχήμα 4.7.

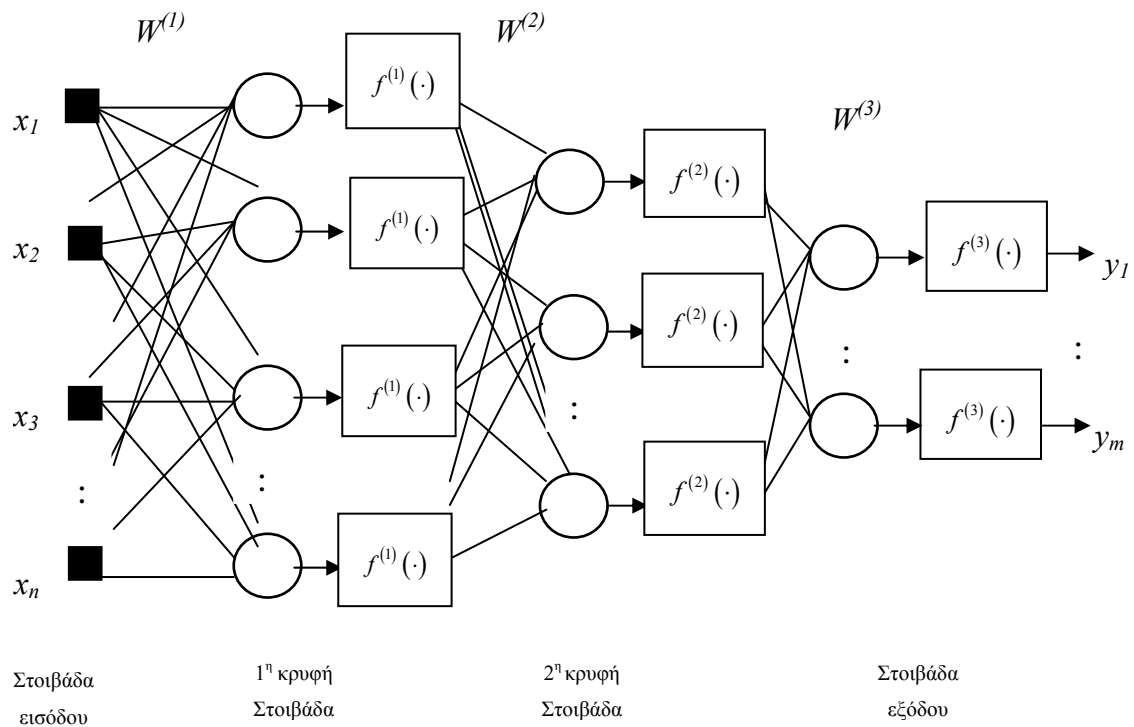


Σχήμα 4.7: Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης μονής στοιβάδας

4.3.1.3.3 Δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης πολλαπλών στοιβάδων (Multi-layer perceptron, MLP)

Τα νευρωνικά δίκτυα που ανήκουν σε αυτή την κλάση διαφέρουν στο ότι περιέχουν μία ή και περισσότερες κρυφές στοιβάδες, οι υπολογιστικές μονάδες των οποίων ονομάζονται κρυφοί νευρώνες ή κρυφές μονάδες. Η κρυφές στοιβάδες βρίσκεται μεταξύ της στοιβάδας εισόδου και της στοιβάδας εξόδου. Η πληροφορία εισάγεται στο δίκτυο μέσω των κόμβων εισόδου. Στη συνέχεια διοχετεύεται στους νευρώνες της κρυφής στοιβάδας μέσω των συναπτικών βαρών. Η πληροφορία διοχετεύεται

μόνο από τους κόμβους εισόδου προς τις κρυφές στοιβάδες και όχι στην αντίθετη διεύθυνση. Κάθε νευρώνας της κρυφής στοιβάδας περιέχει μία συνάρτηση η οποία ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης ή συνάρτηση μεταφοράς. Το αποτέλεσμα της μαθηματικής πράξης η οποία εκτελείται σε κάθε νευρώνα μεταφέρεται μέσω των συναπτικών βαρών στην επόμενη κρυφή στοιβάδα ή στη στοιβάδα εξόδου, στην περίπτωση που δεν υπάρχει άλλη κρυφή στοιβάδα. Στην περίπτωση που κάθε κόμβος κάθε στοιβάδας συνδέεται με κάθε κόμβο της επόμενης στοιβάδας, τότε το νευρωνικό δίκτυο λέγεται ότι είναι πλήρως συνδεδεμένο. Διαφορετικά, το νευρωνικό δίκτυο λέγεται ότι είναι μερικώς συνδεδεμένο. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η δομή ενός νευρωνικού δικτύου πρόσθιας τροφοδότησης με δύο κρυφές στοιβάδες (συνολικά τρεις στοιβάδες).

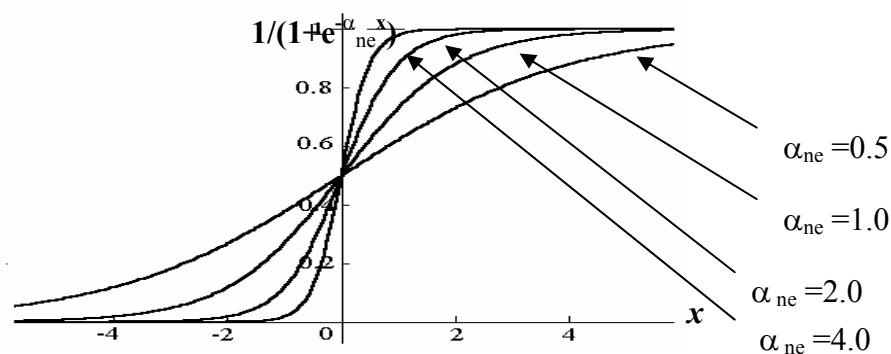


Σχήμα 4.8: Νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με δύο κρυφές στοιβάδες

Μία συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται συνήθως στα νευρωνικά δίκτυα MLP είναι η σιγμοειδής συνάρτηση, ο τύπος της οποίας δίνεται από τη Σχέση 4.10.

$$y_q = f(u_q) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_{ne} u_q}} \quad (4.10)$$

Όπου u_q , y_q είναι η είσοδος και η έξοδος αντίστοιχα του q νευρώνα και α_{ne} είναι η παράμετρος κλίσης της συνάρτησης. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης για διάφορες τιμές της παραμέτρου α_{ne} δίνεται στο 4.7.



Σχήμα 4.9: Γραφική παράσταση σιγμοειδούς συνάρτησης

Για τον κατάλληλο υπολογισμό των συναπτικών βαρών πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος εκπαίδευσης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μία μέθοδος εκπαίδευσης με επίβλεψη, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής εξόδου και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου. Ουσιαστικά διαμορφώνεται ένα πρόβλημα μη γραμμικής αριστοποίησης. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκπαίδευσης για τα δίκτυα MLP είναι αυτή της ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (error back propagation). Ο αλγόριθμος αυτός ουσιαστικά διεξάγει μία έρευνα καθόδου κλίσης.

Η μέθοδος αυτή δεν εγγυάται τη βέλτιστη λύση, αφού η αντικειμενική συνάρτηση είναι ισχυρά μη γραμμική, και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο αλγόριθμος να παγιδευτεί σε τοπικό άριστο. Επίσης, το αποτέλεσμα εξαρτάται από τις αρχικές τιμές των βαρών. Έτσι για την επίτευξη ικανοποιητικής λύσης απαιτείται το τρέξιμο του αλγορίθμου με διαφορετικά αρχικά βάρη και σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Οπότε, η όλη διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα και δεν εγγυάται την επίτευξη ολικού άριστου.

Το δίκτυο MLP παρέχει γενικά μία ολική προσέγγιση (global approximation) των δεδομένων, αφού η μη γραμμικότητα που εισάγεται από τη σιγμοειδή συνάρτηση σημαίνει τη συνεχή ενεργοποίηση κάθε νευρώνα από όλα τα δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι νευρώνες συμμετέχουν στην αναπαράσταση κάθε δεδομένου..

4.3.1.3.4 Νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης

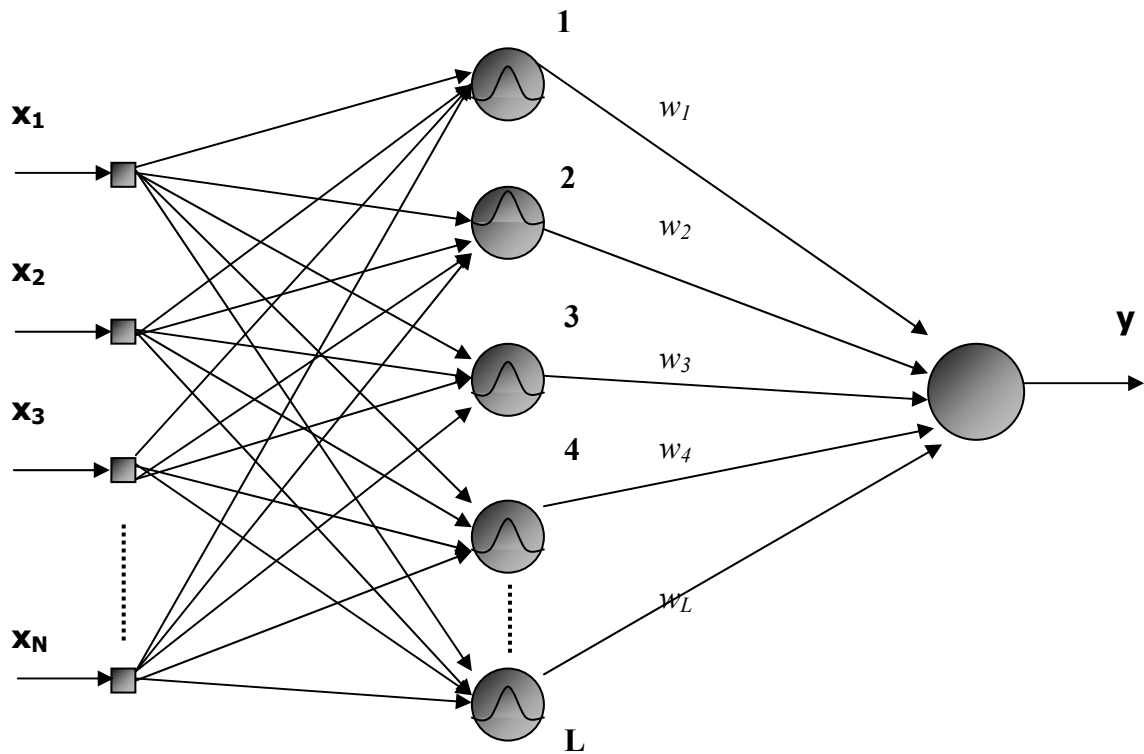
Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης (radial basis function neural networks ή RBF NN) αποτελούν μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική που ανήκει στα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης και παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα έναντι των άλλων νευρωνικών δικτύων.

Η δομή του νευρωνικού δικτύου ακτινικής συνάρτησης βάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Το δίκτυο αποτελείται από τρεις στοιβάδες: τη στοιβάδα εισόδου, μία κρυφή στοιβάδα και μία στοιβάδα εξόδου. Η στοιβάδα εισόδου διανέμει τα δεδομένα εισόδου στους νευρώνες της κρυφής στοιβάδας ως έχουν, δηλαδή χωρίς αυτά να πολλαπλασιάζονται με κάποια συναπτικά βάρη. Σημειώνεται ότι το δίκτυο RBF είναι πλήρως συνδεδεμένο. Σε κάθε νευρώνα της κρυφής στοιβάδας αντιστοιχεί ένα κέντρο διάστασης ίσης με τον αριθμό μεταβλητών εισόδου, ενώ μια ακτινική συνάρτηση χρησιμοποιείται για το μη γραμμικό μετασχηματισμό των δεδομένων εισόδου.

Η έξοδος της j συνάρτησης για ένα διάνυσμα δεδομένων εισόδου $\mathbf{x}^i \in \mathfrak{R}^N$, (όπου $i=1,2,\dots,K^n$ ο αριθμός των δεδομένων εισόδου), $\mathbf{x}^i = [x_1^i \ x_2^i \ \dots \ x_{N_n}^i]$ (όπου N_n ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου), έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f_{ji} = f_j(\mathbf{x}^i) = f\left(\|\mathbf{x}^i - \mathbf{c}^j\|\right) \quad (4.11)$$

όπου με $\|\dots\|$ συμβολίζεται η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του κέντρου του j (όπου $j=1,2,\dots,L^n$) νευρώνα και του i διανύσματος δεδομένων εισόδου.



Σχήμα 4.10: Νευρωνικό δίκτυο ακτινικής συνάρτησης βάσης

Μετά τον μη γραμμικό μετασχηματισμό των δεδομένων εισόδου από τους νευρώνες της κρυφής στοιβάδας, ακολουθεί ο γραμμικός συνδυασμός του νέου αυτού χώρου πολλαπλασιάζοντας την έξοδο κάθε νευρώνα με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος. Οπότε η έξοδος του νευρωνικού δικτύου δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{y}(\mathbf{x}^i) = \sum_{j=1}^L w_j f(\|\mathbf{x}^i - \mathbf{c}^j\|) \quad (4.12)$$

Σε μορφή πινάκων είναι:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{F} \mathbf{w} \quad (4.13)$$

$$\text{όπου: } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & \cdots & f_{L1} \\ f_{12} & f_{22} & \cdots & f_{L2} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ f_{1K} & f_{2K} & \cdots & f_{LK} \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_L]$$

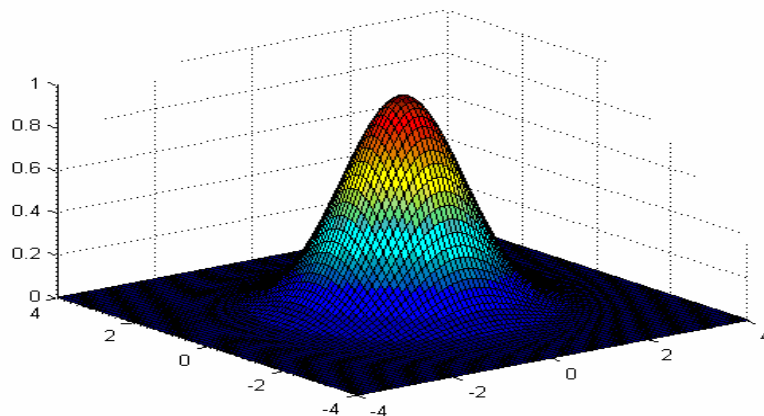
Τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση όπου έχουμε μόνο μία έξοδο. Εντούτοις, το αποτέλεσμα μπορεί να γενικευτεί και για περισσότερες εξόδους. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις στα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης είναι η συνάρτηση Gauss (Σχέση 4.14) και η συνάρτηση Thin Plate Spline (TPS, Σχέση 4.15):

$$f_G(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \quad (4.14)$$

$$f_{TPS}(r) = r^2 \ln(r) \quad (4.15)$$

Για τη συνάρτηση Gauss ισχύει: $\lim_{|r| \rightarrow \infty} f_G(r) = 0$

Αντίθετα για την TPS ισχύει: $\lim_{|r| \rightarrow \infty} f_G(r) = \infty$



Σχήμα 4.11: Γραφική παράσταση της καμπύλης Gauss για συνάρτηση δύο μεταβλητών

Παρά τις διαφορετικές τους ιδιότητες, έχει διαπιστωθεί ότι η επιλογή της μη-γραμμικής συνάρτησης δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του δικτύου. Οπότε, και οι δύο δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι η συνάρτηση Gauss απαιτεί τον καθορισμό μίας ακόμα παραμέτρου, η οποία ονομάζεται πλάτος σ της καμπύλης Gauss. Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η καμπύλη Gauss για συνάρτηση δύο μεταβλητών.

Αρχικά οι μέθοδοι των συναρτήσεων ακτινικής βάσης είχαν αναπτυχθεί για την ακριβή παρεμβολή ενός συνόλου δεδομένων σε ένα πολυδιάστατο χώρο (Powell, 1987). Η προσέγγιση αυτή απαιτούσε ο αριθμός των κρυφών νευρώνων να είναι ίσος με τον αριθμό K^n των δεδομένων εισόδου.

Σύμφωνα με την προσέγγιση των συναρτήσεων ακτινικής βάσης, μπορεί να γίνει ακριβής προβολή των δεδομένων εισόδου \mathbf{x}_i ($i=1, \dots, K^n$) στον αντίστοιχο στόχο y_i , χρησιμοποιώντας K συναρτήσεις ακτινικής βάσης. Στην πραγματικότητα, δεν είναι επιθυμητή η ακριβής μοντελοποίηση των δεδομένων εκπαίδευσης, αφού το μοντέλο που θα προκύψει θα έχει περιορισμένη ικανότητα πρόβλεψης λόγω του ότι στην κατασκευή του μοντέλου θα έχει περιληφθεί και ο τυχόν θόρυβος που περιέχουν τα δεδομένα εκπαίδευσης.

Στη συνέχεια (Broomhead, Lowe, 1988) προτάθηκε ο αριθμός L^n των νευρώνων της κρυφής στοιβάδας να μην είναι ίσος με αυτόν των δεδομένων εισόδου K^n . Έτσι προέκυψαν τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης.

Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής συνάρτησης βάσης (RBF) διαφέρουν από τα νευρωνικά δίκτυα MLP στα εξής:

- Τα δίκτυα RBF έχουν μόνο μία κρυφή στοιβάδα ενώ τα MLP μπορούν να έχουν περισσότερες από μία
- Σε κάθε νευρώνα ενός RBF δικτύου χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του διανύσματος εισόδου και του κέντρου του νευρώνα σαν όρισμα στη μη γραμμική συνάρτηση, ενώ στο δίκτυο MLP χρησιμοποιείται το εσωτερικό γινόμενο μεταξύ του διανύσματος εισόδου και του συναπτικού βάρους κάθε νευρώνα

- Κάθε νευρώνας του δικτύου RBF εξειδικεύεται μόνο σε μια μικρή περιοχή του υπερχώρου των διανυσμάτων εισόδου, δηλαδή δραστηριοποιείται μόνο εάν το διάνυσμα εισόδου εμπίπτει στην περιοχή του. Για αυτό λέγεται ότι τα RBF δίκτυα επιδεικνύουν τοπική συμπεριφορά. Αντιθέτως τα MLP έχουν ολική (global) συμπεριφορά, αφού κάθε νευρώνας ενεργοποιείται από όλα τα διανύσματα εισόδου.

Τα ειδικά αυτά χαρακτηριστικά των δικτύων RBF προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι των δικτύων MLP. Αυτά είναι:

- Λόγω της τοπικής συμπεριφοράς των δικτύων RBF, μόνο ένα μικρό ποσοστό του συνολικού δικτύου αποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μικρότερους χρόνους εκπαίδευσης και προσομοίωσης.
- Τα μοντέλα που προκύπτουν μπορούν να ερμηνευτούν ευκολότερα ως προς τη φυσική τους σημασία λόγω της απλής δομής των δικτύων RBF.
- Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων RBF μπορεί να γίνει σε δύο στάδια: Κατά το πρώτο στάδιο, υπολογίζονται τα κέντρα των νευρώνων με κάποια μέθοδο εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη και κατά το δεύτερο στάδιο υπολογίζονται τα συναπτικά βάρη με μία μέθοδο εκπαίδευσης με επίβλεψη όπως είναι τα ελάχιστα τετράγωνα, αφού το δεύτερο στάδιο είναι ένα καθαρά γραμμικό πρόβλημα. Αυτή η ιδιότητα μειώνει δραματικά το χρόνο εκπαίδευσης σε σχέση με τα MLP όπου η χρήση της μεθόδου ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (error back propagation) είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.

4.3.2 Εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω για την εξαγωγή μη γραμμικών εξισώσεων συσχέτισης, επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης. Το υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τους αλγόριθμους που έχουν προταθεί για την εκπαίδευση αυτού του τύπου των δικτύων και δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον αλγόριθμο των ασαφών μέσων, οποίος χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των μοντέλων.

4.3.2.1 Μειονεκτήματα συμβατικών μεθόδων εκπαίδευσης

Το κρίσιμο σημείο στο σχεδιασμό ενός νευρωνικού δικτύου RBF είναι η επιλογή των κέντρων. Το πρόβλημα αυτό, δηλαδή διαμορφώνεται ως ένα μη πολυωνυμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (non-polynomial, NP) (Garrey & Johnson, 1979). Αυτό σημαίνει ότι δεν έχει βρεθεί αλγόριθμος ο οποίος να εντοπίζει τη βέλτιστη λύση σε πολυωνυμικό χρόνο. Για τη λύση του προβλήματος έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολλές προσεγγιστικές μέθοδοι, όπως η k-means clustering (Moody & Darken, 1988, Leonard & Kramer, 1991), τα ορθογώνια ελάχιστα τετράγωνα ή OLS (Chen, Cowan & Grant, 1991) και άλλες.

Οι τεχνικές αυτές, αν και θεωρούνται ως οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης, παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα τα οποία δυσκολεύουν τη χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, η πιο κλασική από τις μεθόδους, η k-means clustering, παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Καταρχήν ο αριθμός των νευρώνων της κρυφής στοιβάδας, πρέπει να προκαθοριστεί από τον χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ακολουθηθεί μία τακτική δοκιμής και σφάλματος ώστε να επιλεγεί ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων της κρυφής στοιβάδας. Η τεχνική αυτή αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο της διαδικασίας εκπαίδευσης.
- Κατά την επιλογή των κέντρων των κρυφών νευρώνων, απαιτούνται πολλά περάσματα από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Η επαναλαμβανόμενη αυτή διαδικασία αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο, ιδιαίτερα αν η βάση των δεδομένων είναι μεγάλη.
- Τέλος, ο αλγόριθμος k-means βασίζεται στην τυχαία αρχική επιλογή των κέντρων. Αυτό σημαίνει ότι για τα ίδια δεδομένα, διαφορετικά τρεξίματα του αλγορίθμου εκπαίδευσης θα μας δώσουν διαφορετικά κέντρα.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη χρήση αυτών των τεχνικών εκπαίδευσης σε διάφορες εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων RBF.

4.3.2.2 Περιγραφή του αλγορίθμου των ασαφών μέσων

Μία μέθοδος εκπαίδευσης η οποία δεν χαρακτηρίζεται από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω είναι αλγόριθμος των ασαφών μέσων (Sarimveis και συνεργάτες, 2002). Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αυτός με βάση μία ασαφή διαμέριση του χώρου των μεταβλητών εισόδου επιλέγει τόσο τη δομή (τον αριθμό των νευρώνων), όσο και τις παραμέτρους (τα κέντρα των νευρώνων) σε ένα μόνο βήμα, κάνοντας μόνο ένα πέρασμα από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Ακόμα, για μία συγκεκριμένη ασαφή διαμέριση του χώρου των μεταβλητών εισόδου, ο αλγόριθμος παράγει πάντα το ίδιο σύνολο κέντρων, αφού δεν εμπλέκεται τυχαία επιλογή κέντρων.

Η θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα με μεγάλη αβεβαιότητα. Η βάση όλων των ασαφών συστημάτων είναι η διαμέριση του χώρου των μεταβλητών εισόδου σε ένα αριθμό ασαφών συνόλων. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία ο χώρος κάθε μεταβλητής εισόδου x_i ($i=1, 2, \dots, N_n$) διαμελίζεται σε c_i τριγωνικά ασαφή σύνολα $A_{i,n}^1, A_{i,n}^2, \dots, A_{i,n}^{c_i}$ με συνάρτηση συμμετοχής της μορφής:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-a|}{\delta a}, & \text{αν } x \in [a - \delta a, a + \delta a] \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (4.16)$$

όπου a είναι το κεντρικό στοιχείο στο οποίο η τιμή συμμετοχής γίνεται ίση με τη μονάδα και δa είναι το αντίστοιχο πλάτος, το οποίο επιλέγεται έτσι ώστε οι δύο κορυφές του τριγώνου να βρίσκονται ακριβώς στα κέντρα των δύο γειτονικών ασαφών συνόλων. Προκύπτει ότι κάθε ασαφές σύνολο A μπορεί να περιγραφεί πλήρως από το αντίστοιχο κέντρο και πλάτος του:

$$A_n = \{a, \delta a\} \quad (4.17)$$

Ορίζουμε τη διαμέριση του χώρου κάθε μεταβλητής εισόδου σαν :

$$T_i = \{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^{c_i}\}, \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.18)$$

Έπεται ότι η ασαφής διαμέλιση του συνολικού χώρου των μεταβλητών εισόδου \mathbf{X} μπορεί να οριστεί διαμερίζοντας τον σε C ασαφή σύνολα, $\mathbf{A}_n^1, \mathbf{A}_n^2, \dots, \mathbf{A}_n^C$, όπου

$$C = \prod_{i=1}^N c_i \quad (4.19)$$

Κάθε ασαφής υπόχωρος A_n^l ($1 \leq l \leq C$) μπορεί να οριστεί από το συνδυασμό N συγκεκριμένων ασαφών συνόλων $A_{1,n}^l \in T_1, A_{2,n}^l \in T_2, \dots, A_{N,n}^l \in T_N$, και μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$A_n^l = [A_1^l, A_2^l, \dots, A_N^l]^T \quad (4.20)$$

Ορίζουμε τα διανύσματα:

$$\mathbf{a}^l = [a_1^l, a_2^l, \dots, a_N^l]^T, \quad \delta \mathbf{a} = [\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_N]^T \quad (4.21)$$

Με τη βοήθεια της (4.17), ο υπόχωρος \mathbf{A}^l μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{A}_n^l = \{\mathbf{a}^l, \delta \mathbf{a}\} \quad (4.22)$$

Σημειώνεται ότι το διάνυσμα $\delta \mathbf{a}$ είναι το ίδιο για όλους τους ασαφείς υποχώρους.

Η ιδέα της συνάρτησης συμμετοχής μπορεί να επεκταθεί και σε πολλαπλές διαστάσεις εισάγοντας την έννοια της πολυδιάστατης συνάρτησης συμμετοχής $\mu_{A^l}(\mathbf{x}(k))$ του διανύσματος εισόδου $\mathbf{x}(k)$ στο \mathbf{A}^l :

$$\mu_{A^l}(\mathbf{x}(k)) = \begin{cases} 1 - rd^l(\mathbf{x}(k)), & \text{αν } rd^l(\mathbf{x}(k)) \leq 1 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (4.23)$$

όπου με $rd^l(\mathbf{x}(k))$ συμβολίζεται η ευκλείδεια σχετική απόσταση μεταξύ του \mathbf{A}^l και του διανύσματος εισόδου $\mathbf{x}(k)$:

$$rd^l(\mathbf{x}(k)) = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (a_i^l - x_i(k))^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^N (\delta a_i)^2 \right]^{1/2}} \quad (4.24)$$

Προφανώς, ο ασαφής υπόχωρος που περιγράφει καλύτερα ένα διάνυσμα εισόδου είναι αυτός με τη μικρότερη ευκλείδεια σχετική απόσταση, αφού αυτός ο υπόχωρος αναθέτει στο διάνυσμα αυτό το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής. Για τον καθορισμό του υπόχωρου που αντιστοιχεί σε κάθε διάνυσμα εισόδου, χρησιμοποιούμε την παρακάτω διαδικασία θεωρώντας ότι οι χώροι των μεταβλητών εισόδου έχουν διαμεριστεί σε ένα αριθμό ασαφών συνόλων.

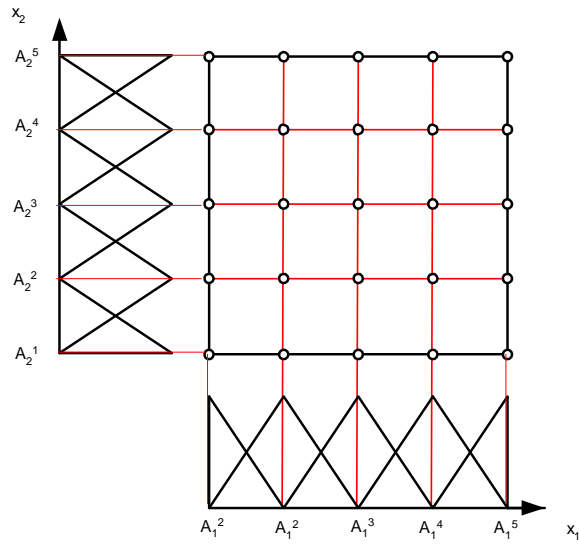
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 1: Καθορισμός του κοντινότερου ασαφούς υποχώρου για ένα δεδομένο διάνυσμα εισόδου

Έστω ότι έχουμε ένα διάνυσμα μεταβλητών εισόδου $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^N$, και όλοι οι χώροι των μεταβλητών έχουν διαμελιστεί σε ασαφή σύνολα. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε το διδιάστατο χώρο του Σχήματος 4.12 και ένα διάνυσμα εισόδου $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$. Τα ασαφή σύνολα για τις μεταβλητές x_1 και x_2 είναι αντιστοίχως:

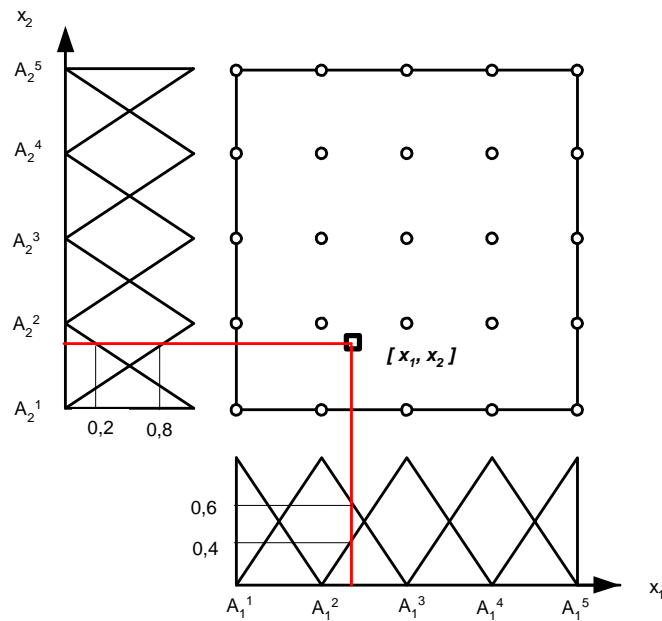
$$T_1 = \{A_{1,n}^1, A_{1,n}^2, A_{1,n}^3, A_{1,n}^4, A_{1,n}^5\}$$

$$T_2 = \{A_{2,n}^1, A_{2,n}^2, A_{3,n}^3, A_{4,n}^4, A_{5,n}^5\}$$

ΒΗΜΑ 1: Καθορίζονται οι βαθμοί συμμετοχής των x_1, x_2, \dots, x_N στα αντίστοιχα ασαφή σύνολα. Για το παράδειγμα έχουμε από το Σχήμα 4.13, ότι ο βαθμός συμμετοχής του x_1 είναι: 0.6 στο $A_{1,n}^2$, 0.4 στο $A_{1,n}^3$ και μηδενικός στα άλλα ασαφή σύνολα. Ομοίως, ο βαθμός συμμετοχής του x_2 είναι: 0.2 στο $A_{2,n}^1$, 0.8 στο $A_{2,n}^2$ και μηδέν στα άλλα ασαφή σύνολα.



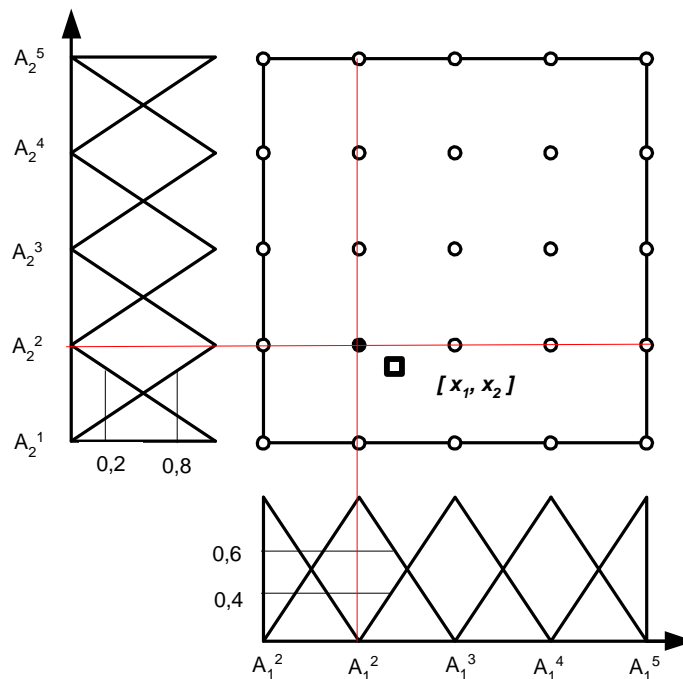
Σχήμα 4.12: Ασαφής διαμερισμός του χώρου των μεταβλητών εισόδου σε 5 ασαφή σύνολα για ένα διδιάστατο πρόβλημα



Σχήμα 4.13: Καθορισμός βαθμού συμμετοχής του διανύσματος $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ στο διδιάστατο χώρο

ΒΗΜΑ 2: Αναθέτουμε στις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_N τα ασαφή σύνολα με το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής. Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.13, το $A_{1,n}^2$ ανατίθεται στη μεταβλητή x_1 και το $A_{2,n}^2$ ανατίθεται στη μεταβλητή x_2 .

ΒΗΜΑ 3: Ο κοντινότερος ασαφής υπόχωρος $\mathbf{A}_n^{l_0}$ για το δεδομένο διάνυσμα εισόδου \mathbf{x} δίνεται ως ο συνδυασμός των ασαφών συνόλων που επιλέχτηκαν στο βήμα 2. Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.14 έχουμε: $\mathbf{A}_n^{l_0} = [A_{1,n}^2, A_{2,n}^2] = \{[a_1^2, a_2^2], [\delta a_1, \delta a_2]\}$



Σχήμα 4.14: Ανάθεση του κοντινότερου ασαφούς υπόχωρου σε κάθε μεταβλητή

Με βάση τον **αλγόριθμο 1**, αναπτύσσεται η μεθοδολογία εκπαίδευσης των ασαφών μέσων (fuzzy-means algorithm). Η μεθοδολογία προϋποθέτει την ύπαρξη K^n διανυσμάτων εισόδου $\mathbf{x}^T(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)]$, ($k=1, 2, \dots, K^n$) και μία ασαφή διαμέλιση του χώρου κάθε μεταβλητής x_i ($i=1, 2, \dots, N$) σε c_i συμμετρικά τριγωνικά ασαφή σύνολα.

Αλγόριθμος Fuzzy-Means

Πάρε το πρώτο διάνυσμα μεταβλητών εισόδου $\mathbf{x}(1)$.

Θέσε $L^n = 1$

Εφαρμογή του αλγορίθμου 1 στο διάνυσμα εισόδου $\mathbf{x}(1)$:

{

FOR $i=1$ έως N

$$A_{i,n}^1 = \{a_i^1, \delta a_i\} \leftarrow \max_{1 \leq j \leq c_i} [\mu_{A_j^i}(x_i(1))] \quad (4.25)$$

END

Δημιουργία του πρώτου ασαφούς υπόχωρου

$$\mathbf{A}_n^1 = \{\mathbf{a}^1, \delta \mathbf{a}\} = \left\{ [a_1^1, a_2^1, \dots, a_N^1]^T, [\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_N]^T \right\} \quad (4.26)$$

}

FOR $k=2$ έως K^n

$$rd^{l_0}(\mathbf{x}(k)) = \min_{1 \leq l \leq L} [rd^l(\mathbf{x}(k))] \quad (4.27)$$

IF $rd^{l_0}(\mathbf{x}(k)) > 1$ THEN

$L^n = L^n + 1$

Εφαρμογή του αλγορίθμου 1 στο διάνυσμα εισόδου $\mathbf{x}(k)$:

{

FOR $i=1$ έως N

$$A_{i,n}^{L^n} = \{a_i^{L^n}, \delta a_i\} \leftarrow \max_{1 \leq j \leq c_i} [\mu_{A_j^i}(x_i(1))] \quad (4.28)$$

END

Παραγωγή του L^n ασαφούς υπόχωρου

$$\mathbf{A}_n^{L^n} = \{\mathbf{a}^L, \delta \mathbf{a}\} = \left\{ \left[a_1^{L^n}, a_2^{L^n}, \dots, a_N^{L^n} \right]^T, [\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_N]^T \right\} \quad (4.29)$$

}

ENDIF

END

Μετά το τέλος του αλγόριθμου σχηματίζεται η κρυφή στοιβάδα με ανάθεση κάθε παραγόμενου ασαφούς υπόχωρου σε ένα κρυφό νευρώνα. Το κέντρο κάθε κρυφού νευρώνα είναι ίσο με το κέντρο του αντίστοιχου υπόχωρου.

Ο αλγόριθμος ξεκινάει με το πρώτο δεδομένο $\mathbf{x}(1)$ και υπολογίζει τον πρώτο ασαφή υπόχωρο, κάνοντας χρήση του αλγόριθμου 1: Για $i=1, 2, \dots, N$, επιλέγει το ασαφές σύνολο που αναθέτει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής στο $\mathbf{x}_i(1)$. Αυτή η διαδικασία επιλογής αντιπροσωπεύεται από τη Σχέση 4.23. Ο συνδυασμός των N επιλεγμένων ασαφών συνόλων σχηματίζεται τον πρώτο ασαφή υπόχωρο, ο οποίος περιγράφει καλύτερα το διάνυσμα εισόδου $\mathbf{x}(1)$ (Εξίσωση 4.24).

Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τα εναπομείναντα διανύσματα εισόδου $\mathbf{x}(k)$ ($k=2,3,\dots,K^n$), ο αλγόριθμος καθορίζει τον κοντινότερο υπόχωρο, από τους L^n που έχουν διαμορφωθεί μέχρι την εξέταση του εκάστοτε διανύσματος. Με βάση την Εξίσωση 4.25 υπολογίζεται η σχετική ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του εκάστοτε διανύσματος εισόδου και κάθε υπόχωρου, $rd^l(\mathbf{x}(k))$. Εάν η ελάχιστη από αυτές τις αποστάσεις $rd^l(\mathbf{x}(k))$ είναι μεγαλύτερη της μονάδας, τότε το διάνυσμα $\mathbf{x}(k)$ δεν περιγράφεται επαρκώς από κανένα από τους ήδη υπάρχοντες ασαφείς υποχώρους και αλγόριθμος παράγει ένα νέο ασαφή υπόχωρο. Εάν η ελάχιστη απόσταση είναι

μικρότερη της μονάδας, ένας υπάρχων ασαφής υπόχωρος ανατίθεται σε αυτό το διάνυσμα.

Ουσιαστικά, η μέθοδος των ασαφών μέσων ορίζει ένα πολυδιάστατο πλέγμα στο χώρο εισόδου και επιλέγει κάποιους από τους κόμβους του πλέγματος ως κέντρα. Ωστόσο, δεν εξετάζει όλους τους κόμβους, αλλά μόνο αυτούς που βρίσκονται κοντά στα διανύσματα εισόδου. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα όπου υπάρχουν 15 μεταβλητές εισόδου και επιλέγεται ο χώρος κάθε μεταβλητής εισόδου να διαμεριστεί σε πέντε ασαφή σύνολα, δημιουργούνται $5^{15} \approx 3 \times 10^{10}$ ασαφείς υπόχωροι. Ωστόσο, η μέθοδος εξετάζει μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό από αυτούς.

Στη συνέχεια, αφού έχει υπολογιστεί ο αριθμός των κρυφών νευρώνων καθώς και οι θέσεις των κέντρων, ακολουθεί ο υπολογισμός των συναπτικών βαρών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο υπολογισμός γίνεται με εκπαίδευση με επίβλεψη. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι αυτή των ελαχίστων τετραγώνων, αφού πρόκειται για ένα γραμμικό πρόβλημα. Σε μορφή πινάκων οι τιμές των συναπτικών βαρών προκύπτουν από τη σχέση:

$$\mathbf{w} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y}_{sp} \quad (4.30)$$

όπου με $\mathbf{F} \in \mathfrak{R}^{K^n \times L^n}$ συμβολίζεται ο πίνακας εξόδου από της κρυφής στοιβάδας (πίνακας ενεργοποίησης) όπως αυτός ορίστηκε στη Σχέση 4.11, και με $\mathbf{y}_{sp} \in \mathfrak{R}^{K^n \times 1}$ συμβολίζεται το διάνυσμα των επιθυμητών τιμών εξόδου.

4.3.2.3 Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου των ασαφών μέσων

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος εκπαίδευσης των ασαφών μέσων έναντι των συμβατικών μεθόδων εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων RBF, την καθιστά πολύτιμη για πολλές εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

- I. Μειώνεται δραστικά ο υπολογιστικός χρόνος για την εκπαίδευση του δικτύου, αφού ο αλγόριθμος χρειάζεται μόνο ένα πέρασμα από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αντίθετα, οι κλασικές μέθοδοι απαιτούν πολλαπλά περάσματα μέχρι να συγκλίνουν.

- II. Η μέθοδος έχει επαναληψιμότητα, αφού δεν εμπλέκεται αρχική τυχαία επιλογή κέντρων όπως συμβαίνει στην k-means clustering.
- III. Δεν απαιτείται εκ των προτέρων καθορισμός του αριθμού των κόμβων της κρυφής στοιβάδας, αφού για δεδομένο αριθμό ασαφών συνόλων ο αλγόριθμος υπολογίζει μόνος του τη διάσταση της κρυφής στοιβάδας.

4.4 Εξαγωγή μη γραμμικών εξισώσεων συσχέτισης με χρήση νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μη γραμμικές εξισώσεις συσχέτισης ανάμεσα στις μεταβλητές εξόδου P_{net} και λ_{O_2} και τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδους v_{cm} και I_{st} που προέκυψαν με εφαρμογή της αρχιτεκτονικής των νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης και του αλγόριθμου των ασαφών μέσω στην ίδια ακριβώς βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης

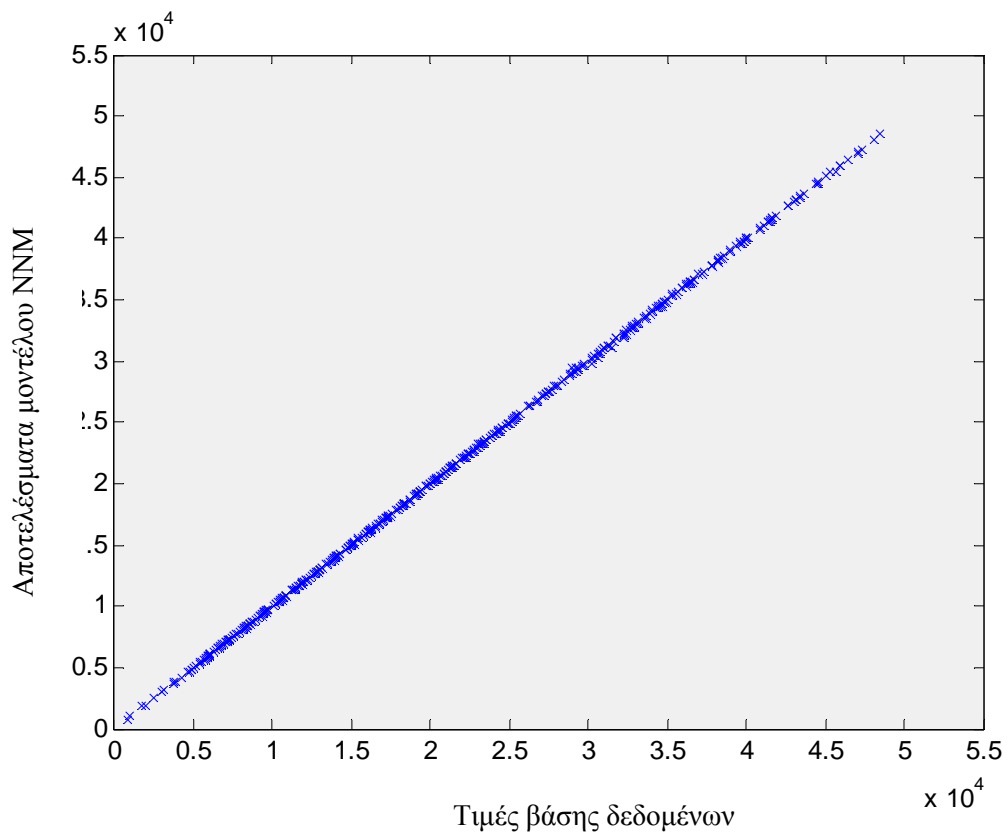
4.4.1 Συσχέτιση $P_{net} = f(v_{cm}, I_{st})$

Η μοναδική παράμετρος σχεδιασμού στον αλγόριθμο των ασαφών μέσω είναι ο αριθμός των ασαφών συνόλων στα οποία διαμερίζεται το πεδίο ορισμού κάθε μεταβλητής εισόδου. Τα καλύτερα αποτελέσματα εξάγονται για 16 ασαφή σύνολα. Οι στατιστικοί δείκτες που αντιστοιχούν στο προκύπτον τεχνητό νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή της γραμμικής παλινδρόμησης επαναλαμβάνονται στον ίδιο πίνακα, για την εύκολη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια σαφή υπεροχή του μοντέλου RBF.

Το Διάγραμμα 4.7 παρουσιάζει τις τιμές καθαρής ισχύος P_{net} της βάσης δεδομένων και τις αντίστοιχες προβλέψεις των νευρωνικών δικτύων RBF που κατασκευάστηκαν με χρήση της μεθόδου LOO.

Πίνακας 4.6: Σύγκριση στατιστικών δεικτών ανάμεσα στο γραμμικό μοντέλο και στο μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου *RBF* για την καθαρή ισχύ, P_{net} .

| | Linear Model | RBF (16 fuzzy sets) |
|-------------|--------------|------------------------|
| RMSE | 2530.6 | 52.9235 |
| R^2 | 0.9770 | 0.9999 |
| R^2_{CV} | 0.9496 | 0.9998 |
| S_{PRESS} | 2550 | 98.2385 |



Διάγραμμα 4.7: Διάγραμμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου *LOO cross validation*, χρησιμοποιώντας μοντέλο νευρωνικού δικτύου *RBF* για την πρόβλεψη της καθαρής ισχύος P_{net}

Στη συνέχεια, η αξιοπιστία και ακρίβεια της μεθόδου των νευρωνικών δικτύων RBF αξιολογείται με την τεχνική διαχωρισμού της βάσης δεδομένων σε δύο υποσύνολα που αποτελούνται από το 75% και 25% των δεδομένων αντίστοιχα. Για το 75% των δεδομένων κατασκευάζεται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, του οποίου η ακρίβεια ελέγχεται για το υπόλοιπο 25% των δεδομένων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 100 διαφορετικούς διαμερισμούς της βάσης δεδομένων. Οι στατιστικοί δείκτες RMSE και R^2 , που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 εξάγονται μόνο για τα δεδομένα στα οποία επαλήθευσης του εκάστοτε μοντέλου. Στον ίδιο πίνακα τα περιέχονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης.

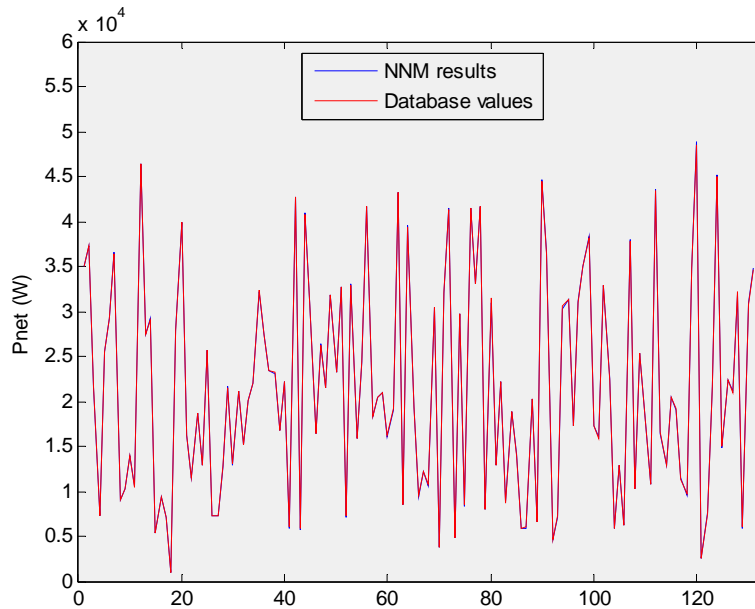
Πίνακας 4.7: Οι ελάχιστες (*min*), μέγιστες(*max*), μέσες (*mean*) τιμές και η τυπική απόκλιση (*standard deviation*) των δεικτών RMSE και R^2 μετά από πραγματοποίηση 100 τυχαίων διαμερισμών των δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε ποσοστό 75%-25%. Σύγκριση γραμμικού μοντέλου και μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την καθαρή ισχύ P_{net} .

| Γραμμικό μοντέλο | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
|------------------------------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| RMSE | 1611,40 | 3316.10 | 2523.70 | 369.39 |
| R^2 | 0.9148 | 0.9798 | 0.9514 | 0.0151 |
| | | | | |
| RBF νευρωνικό μοντέλο | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
| RMSE | 34.9082 | 233.4539 | 94.2287 | 38.2502 |
| R^2 | 0.9997 | 1 | 0.9999 | 0.0001 |

Τα Διαγράμματα 4.8 και 4.9 παρουσιάζουν τις τιμές της καθαρής ισχύος P_{net} που προβλέπονται από ένα εκ των 100 μοντέλων RBF που κατασκευάστηκαν το οποίο αντιστοιχεί στις ακόλουθες τιμές στατιστικών δεικτών: $RMSE=108.49$ and $R^2=0.9999$. Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές της βάσης δεδομένων.

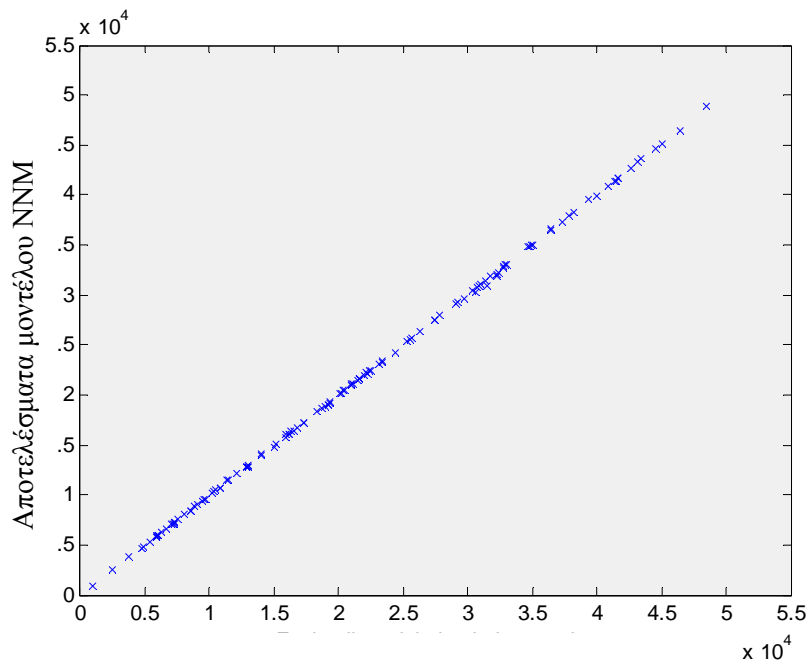
Από την οπτική παρατήρηση των Διαγραμμάτων 4.7, 4.8 και 4.9 και του Πίνακα 4.7 γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου προσεγγίζει με

αισθητά μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές της βάσης δεδομένων σε σύγκριση με το αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο που περιγράφεται στην ενότητα 4.2.1, ειδικότερα στις περιπτώσεις όπου οι τιμές της μεταβλητής εξόδου βρίσκονται πλησίον των ανώτερων ορίων της.



Δεδομένα επαλήθευσης

Διάγραμμα 4.8: Σύγκριση τιμών P_{net} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο RBF για το σύνολο επαλήθευσης



Τιμές βάσης δεδομένων

Διάγραμμα 4.9: Σύγκριση τιμών P_{net} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο RBF για το σύνολο επαλήθευσης

4.4.2 Συσχέτιση $\lambda_{O_2} = f(v_{cm}, I_{st})$

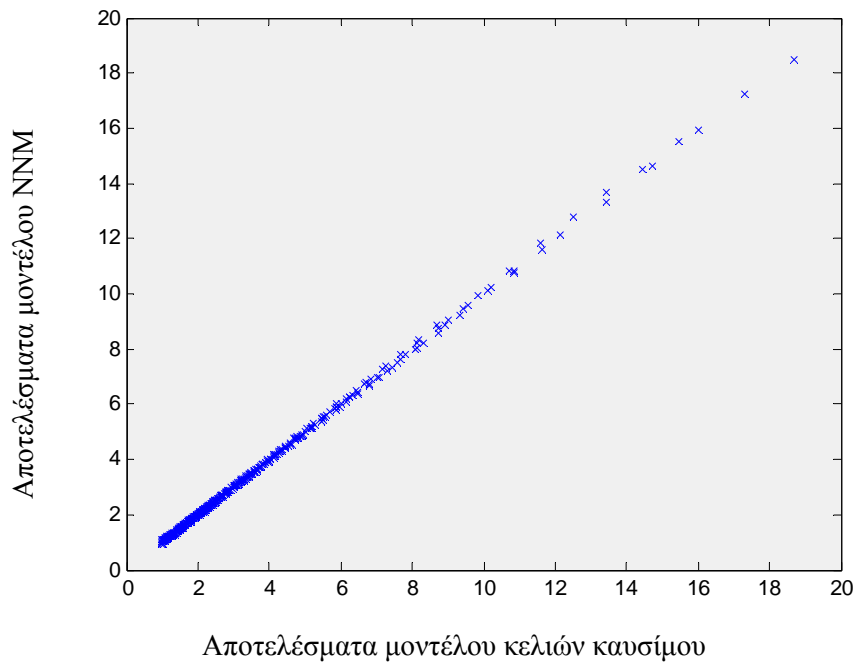
Η διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο για την ανάπτυξη και αξιολόγηση μοντέλου νευρωνικού δικτύου RBF, επαναλαμβάνεται εδώ χρησιμοποιώντας ως μεταβλητή εξόδου το λόγο λ_{O_2} . Τα καλύτερα αποτελέσματα εξάγονται και σε αυτή την περίπτωση (όπως και στην περίπτωση της ισχύος) για 16 ασαφή σύνολα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους Πίνακες 4.8, 4.9 και τα Διαγράμματα 4.10, 4.11, 4.12. Οι στατιστικοί δείκτες που αντιστοιχούν στα μοντέλα των Διαγραμμάτων 4.11, 4.12 είναι $RMSE=0.0458$ και $R^2=0.9996$

Πίνακας 4.8: Σύγκριση στατιστικών δεικτών ανάμεσα στο γραμμικό μοντέλο και στο μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου RBF για λόγο λ_{O_2} .

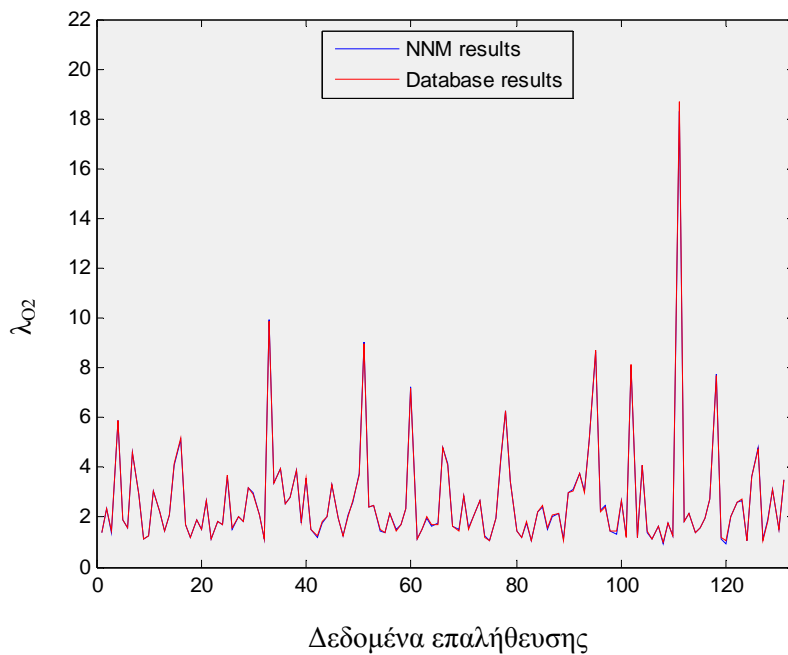
| | Linear Model | RBF (16 fuzzy sets) |
|-------------|--------------|------------------------|
| RMSE | 0.1282 | 0.0426 |
| R^2 | 0.9975 | 0.9997 |
| R^2_{CV} | 0.9975 | 0.9996 |
| S_{PRESS} | 0.1299 | 0.0513 |

Πίνακας 4.9: Οι ελάχιστες (*min*), μέγιστες (*max*), μέσες (*mean*) τιμές και η τυπική απόκλιση (*standard deviation*) των δεικτών $RMSE$ και R^2 μετά από πραγματοποίηση 100 τυχαίων διαμερισμών των δεδομένων σε δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε ποσοστό 75%-25%. Σύγκριση γραμμικού μοντέλου και μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων για τον λόγο λ_{O_2} .

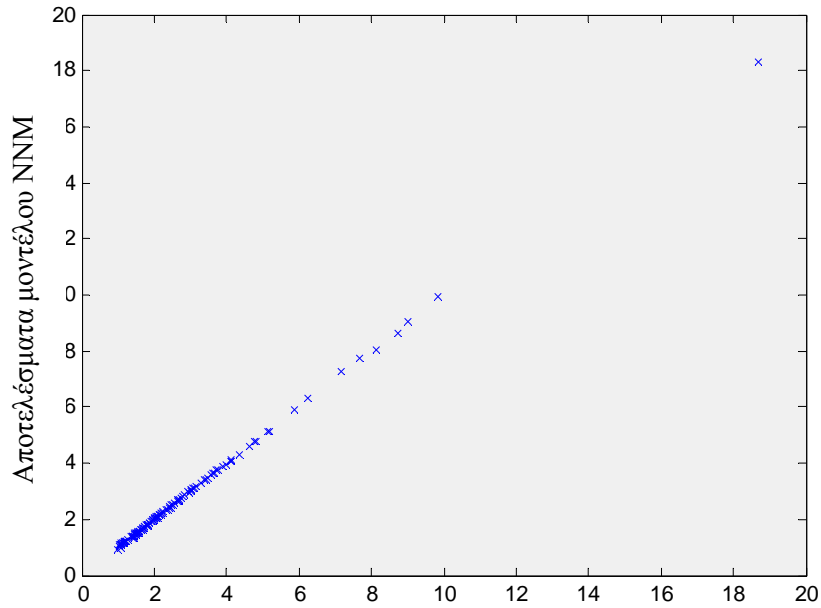
| Γραμμικό μοντέλο | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
|-------------------------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| RMSE | 0.0948 | 0.1523 | 0.1239 | 0.0111 |
| R^2 | 0.9960 | 0.9988 | 0.9976 | 0.0006 |
| | | | | |
| RBF μοντέλο | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Standard Deviation</i> |
| RMSE | 0.0259 | 0.1949 | 0.0602 | 0.0253 |
| R^2 | 0.9972 | 0.9999 | 0.9995 | 0.0004 |



Διάγραμμα 4.10: Διάγραμμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου *LOO cross validation*, χρησιμοποιώντας μοντέλο νευρωνικού δικτύου *RBF* για την πρόβλεψη του λόγου λ_{O_2}



Διάγραμμα 4.11: Σύγκριση τιμών λ_{O_2} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο *RBF* για το σύνολο επαλήθευσης



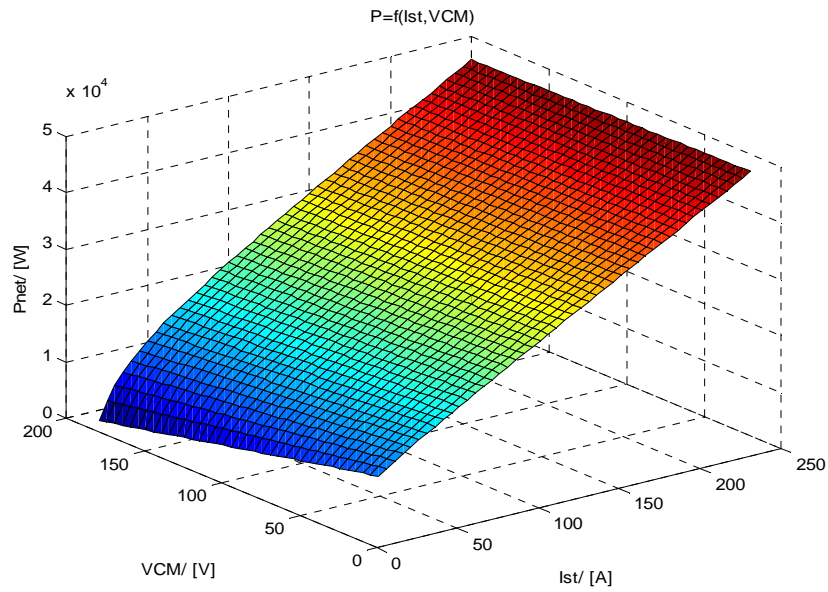
Αποτελέσματα μοντέλου κελιών καυσίμου

Διάγραμμα 4.12: Σύγκριση τιμών λ_{O_2} βάσης δεδομένων με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο RBF για το σύνολο επαλήθευσης

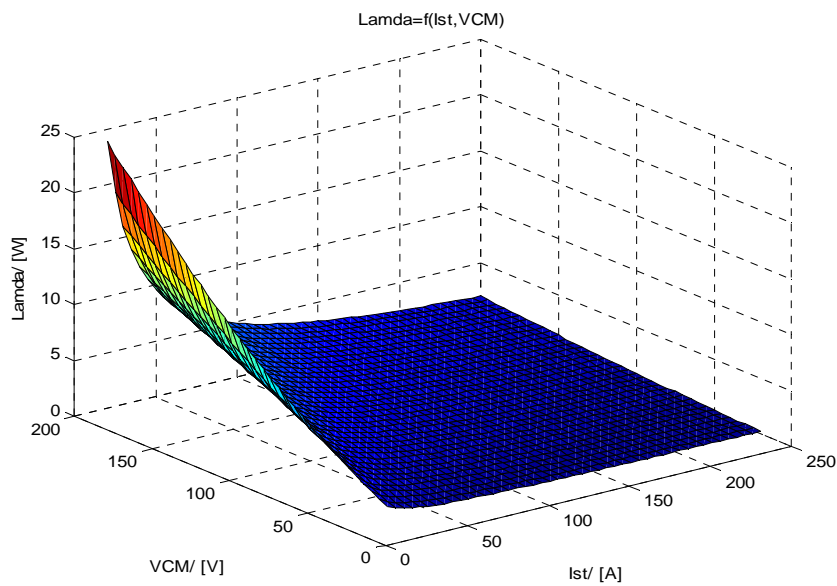
Από την οπτική παρατήρηση των Διαγραμμάτων 4.10, 4.11 και 4.12 και του Πίνακα 4.7 γίνεται αντιληπτό ότι αν και το γραμμικό μοντέλο συσχετίζει ικανοποιητικά την μεταβλητή εξόδου λ_{O_2} με τις δυο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου, εντούτοις το μοντέλο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου βελτιώνει περαιτέρω την ακρίβεια πρόβλεψης των τιμών λ_{O_2} της βάσης δεδομένων.

4.4.3 Εξαγωγή νομογραφημάτων

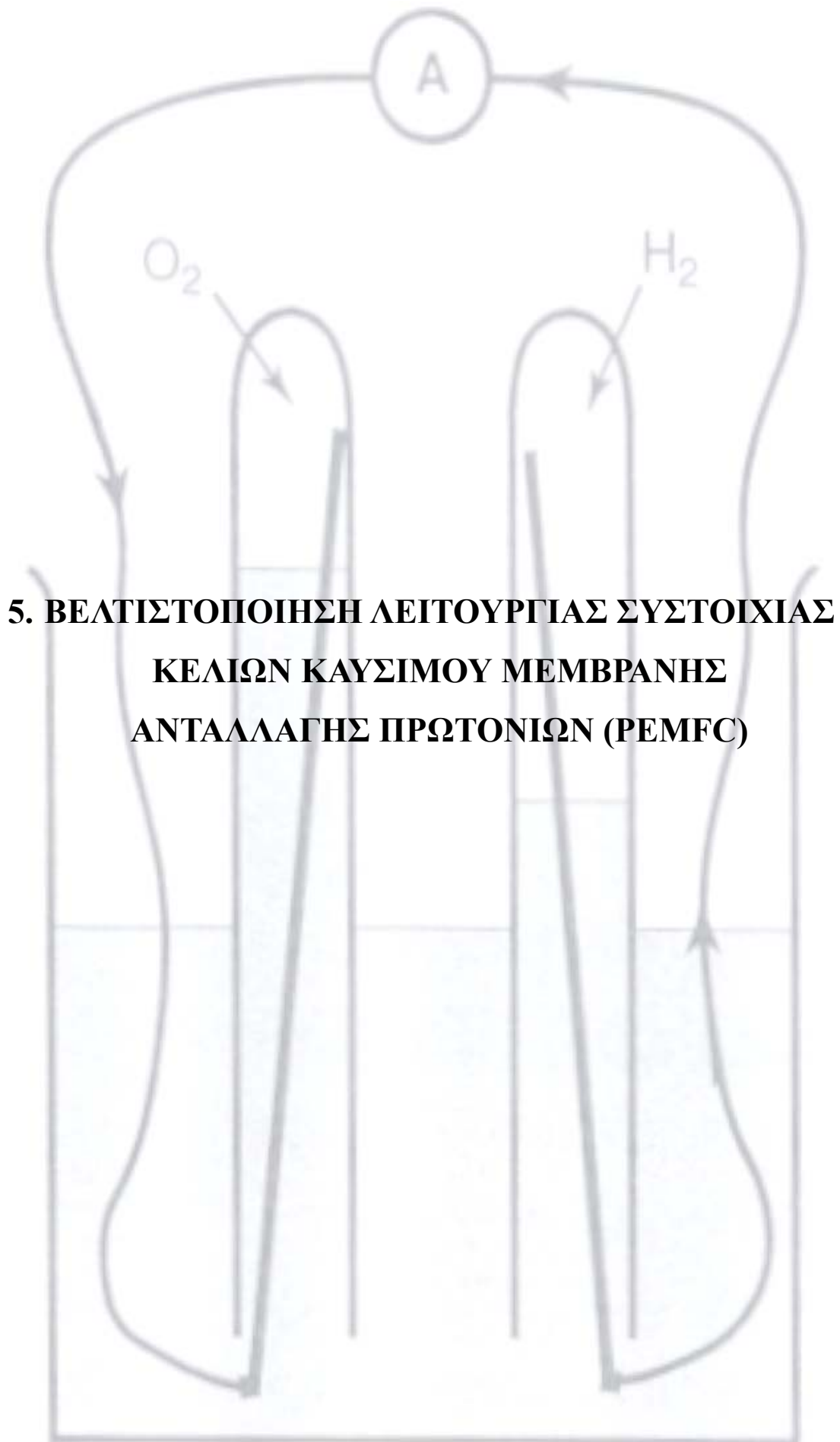
Στο υποκεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα ολόκληρου του κεφαλαίου υπό την μορφή των διαγραμμάτων 4.13 και 4.14, όπου παρουσιάζονται σε τρισδιάστατα νομογραφήματα οι μη γραμμικές συσχετίσεις ανάμεσα στις μεταβλητές P_{net} και λ_{O_2} με τις ανεξάρτητες μεταβλητές I_{st} και v_{cm} που προκύπτουν από την αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης



Διάγραμμα 4.13: Τρισδιάστατο νομογράφημα της μη γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στην καθαρή ισχύ, P_{net} της συστοιχίας των κελιών καυσίμου με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος I_{st} και v_{cm}



77Διάγραμμα 4.14: Τρισδιάστατο νομογράφημα της μη γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στον λόγο λ_{O_2} της συστοιχίας των κελιών καυσίμου με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος I_{st} και v_{cm}



**5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ
ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC)**

5.1 Εισαγωγή

Στην παρόν κεφάλαιο διαμορφώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης που έχει ως στόχο την ικανοποίηση της απαίτησης σε ισχύ από μια συστοιχία κελιών καυσίμου τύπου PEM με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση υδρογόνου.

5.2 Διαμόρφωση και επίλυση προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού

Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (Non Linear Programming, NLP problem) που αποτελείται από τις εξισώσεις συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, τους περιορισμούς και πιθανά επιθυμητά όρια λειτουργίας του συστήματος και από την αντικειμενική συνάρτηση της οποίας επιθυμούμε την αριστοποίηση. Μια εργασία στην οποία επιλύεται ένα παρόμοιο πρόβλημα NLP είναι αυτή των P. L. Zervas, A. Tatsis, H. Sarimveis, N. C. G. Markatos (2008)

Σε ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια ελεύθερη μεταβλητή. Ο αριθμός των ελεύθερων μεταβλητών ή βαθμών ελευθερίας για ένα πρόβλημα υπολογίζεται όταν από τον αριθμό των εξισώσεων με τις οποίες διατυπώνεται το πρόβλημα αφαιρεθεί ο αριθμός των μεταβλητών. Ακολουθεί η ανάλυση των βαθμών ελευθερίας για το πρόβλημα που μας απασχολεί:

| | |
|-----------------------|---|
| Αριθμός μεταβλητών: | 4 |
| Αριθμός εξισώσεων: | 3 |
| Ελεύθερες μεταβλητές: | 1 |

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται αναλυτικά οι εξισώσεις που ορίζουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς επίσης και οι μεταβλητές.

Πίνακας 5.1: Εξισώσεις και μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης

| Εξισώσεις | Μεταβλητές |
|---|--|
| $P_{net} = f(v_{cm}, I_{st})$ $\lambda_{O_2} = f(v_{cm}, I_{st})$ $P_{net} = P_0$ | $v_{cm}, I_{st}, P_{net}, \lambda_{O_2}$ |

όπου P_0 είναι η επιθυμητή τιμή (set point) για την καθαρή ισχύ της συστοιχίας ή η επιθυμητή απαίτηση καθαρής ισχύος

Οι εξισώσεις που ορίζουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι οι συσχετίσεις των μεταβλητών εξόδου του μοντέλου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου όπως προκύπτουν από τα μοντέλα συσχέτισης που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και η απαίτηση της συστοιχίας σε καθαρή ισχύ. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι μη γραμμικές συσχετίσεις που περιγράφονται από τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων αφού χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια προσέγγισης των τιμών που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και τα γραμμικά μοντέλα δεν υπολείπονται σημαντικά σε ακρίβεια ειδικά στην περίπτωση της πρόβλεψης του λόγου λ_{O_2} , η χρησιμοποίησή τους στη θέση των μοντέλων νευρωνικών δικτύων κρίνεται αναποτελεσματική αφού στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν συγκλίνει σε συγκεκριμένη λύση.

Η αντικειμενική συνάρτηση επιλέγεται να είναι συνάρτηση ελαχιστοποίησης και συγκεκριμένα είναι η ένταση του ρεύματος I_{st} . Η συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση επιλέγεται γιατί με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται έμμεσα η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται από τη συστοιχία, όπως προκύπτει από το Νόμο του Faraday που παρουσιάστηκε επίσης στο Κεφάλαιο 2:

$$W_{H_2,reacted} = m_{H_2} \frac{nI_{st}}{2F} \quad (5.1)$$

όπου:

$W_{H_2,reacted}$: μαζική παροχή υδρογόνου που καταναλώνεται σε kg/s

m_{H_2} : μοριακή μάζα υδρογόνου σε kg/mol

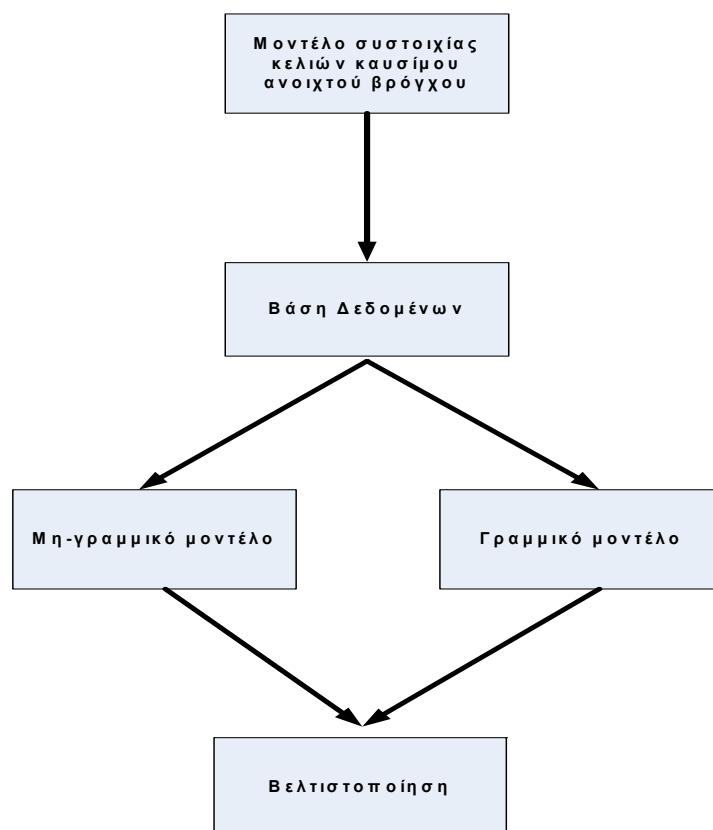
n : αριθμός κελιών της συστοιχίας

F : σταθερά Faraday

Η αντικειμενική συνάρτηση λοιπόν για το πρόβλημα μας διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min_{I_{st}, U_{cm}, P_{net}, \lambda_{O_2}} I_{st} \quad (5.2)$$

Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB[®] και συγκεκριμένα με χρήση της συνάρτησης *fmincon*. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται, με τη μορφή ενός διαγράμματος ροής, η πορεία που ακολουθήθηκε από την μεταμοντελοποίηση και την δημιουργία της βάσης δεδομένων μέχρι και την βελτιστοποίηση του προβλήματος των παραμέτρων λειτουργίας της συστοιχίας των κελιών καυσίμου για κάποια δεδομένη απαίτηση ισχύος.

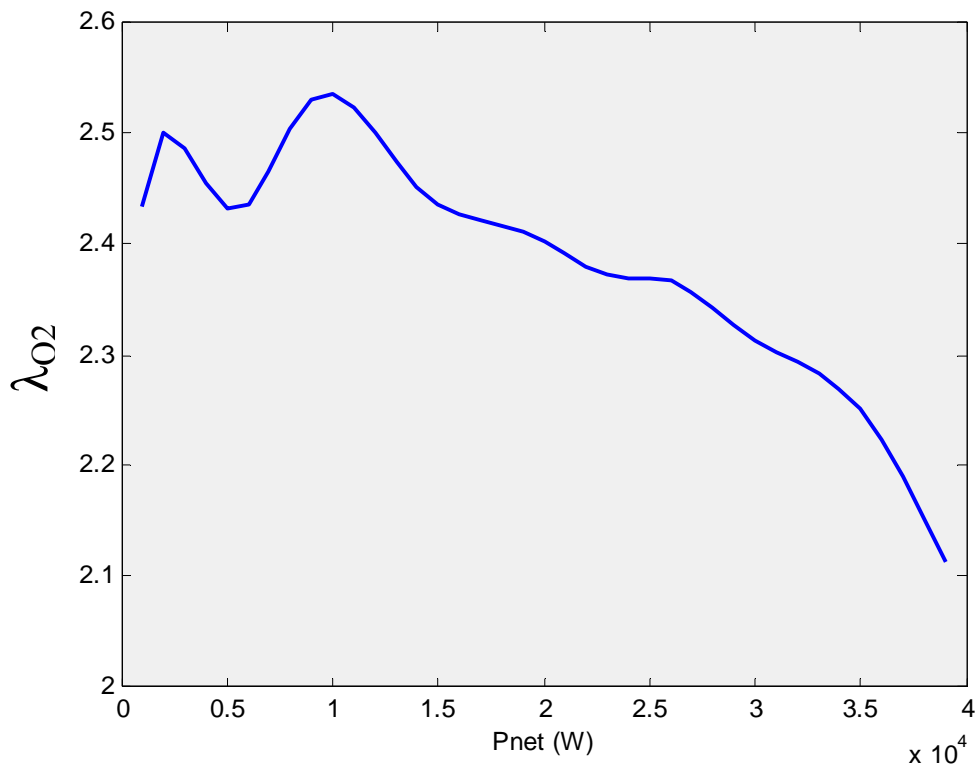


Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της πορείας από την μεταμοντελοποίηση μέχρι την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της συστοιχίας των κελιών καυσίμου

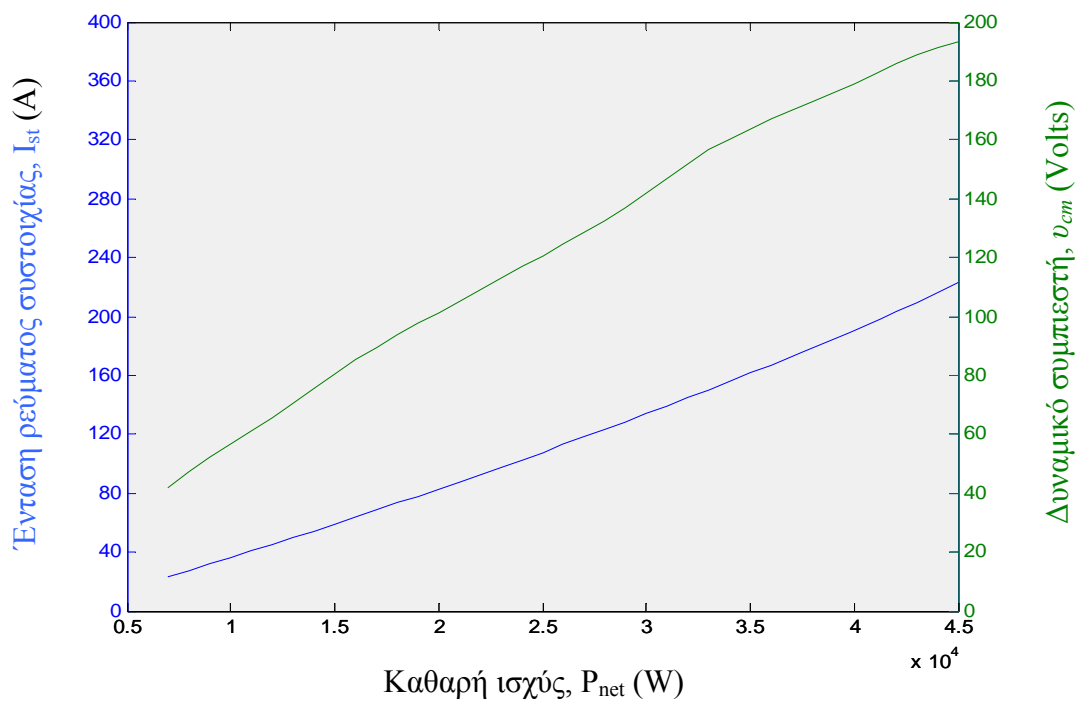
5.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Με την ανάπτυξη κατάλληλου κώδικα στο περιβάλλον MATLAB[®] προέκυψαν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της συστοιχίας για διάφορες τιμές απαίτησης ισχύος. Ο αλγόριθμος επίλυσης που χρησιμοποιείται είναι ο αλγόριθμος εσωτερικού σημείου (interior point algorithm). Τα τρεξίματα έγιναν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή 1.87GHz Intel Pentium Core 2 και μνήμη 1GB Ram σε λειτουργικό σύστημα Windows XP. Ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι περίπου 1s.

Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές του λόγου λ_{O2} ως συνάρτηση της απαίτησης σε ισχύ. Στο Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές που θα πρέπει να παίρνουν οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου, I_{st} και v_{cm} , του συστήματος της συστοιχίας των κελιών καυσίμου ώστε η κατανάλωση της συστοιχίας σε καύσιμο για μια δεδομένη απαίτηση ισχύος να είναι η ελάχιστη δυνατή. Τα διαγράμματα θα φανούν χρήσιμα στο Κεφάλαιο 7 και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα όπου θα χρησιμοποιηθεί ένας απλός ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση (look-up tables) αλλά και στην περίπτωση προσδιορισμού της επιθυμητής τιμής του λόγου λ_{O2} .



Διάγραμμα 5.1: Βέλτιστες τιμές του λόγου λ_{O_2} για δεδομένη απαίτηση ισχύος



Διάγραμμα 5.2: Βέλτιστες τιμές των μεταβλητών εισόδου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου, I_{st} και v_{cm} , για δεδομένη απαίτηση καθαρής ισχύος, P_{net}



**6. ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
(MODEL PREDICTIVE CONTROL)**

6.1 Εισαγωγή στην ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου

Ο όρος «ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου» (Model Predictive Control, MPC) αναφέρεται σε μια μεγάλη κατηγορία συστημάτων ρύθμισης που πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα. Έκτοτε, οι μεθοδολογίες MPC έχουν προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, αλλά ταυτόχρονα έχουν τύχει ευρείας αποδοχής και εφαρμογής στη βιομηχανία. Παρά το γεγονός ότι οι πρώτες εφαρμογές τους περιορίζονταν στην βιομηχανία πετρελαίου, σήμερα οι ρυθμιστές προβλεπτικού μοντέλου έχουν επεκταθεί στην χημική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και την αεροπορική βιομηχανία (Qin & Badgwell, 2000; 2003).

Κοινό σημείο όλων των μεθοδολογιών MPC είναι η χρήση ενός μοντέλου για την πρόβλεψη των μεταβλητών εξόδου της διεργασίας, σε ένα πεπερασμένο μελλοντικό ορίζοντα (ορίζοντα πρόβλεψης). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί μία κατάλληλα επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση. Μεταβλητές απόφασης αυτού του προβλήματος είναι οι μελλοντικές τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού, σε ένα εν γένει μικρότερο μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, τον ορίζοντα ρύθμισης. Εφόσον η βέλτιστη αλληλουχία μελλοντικών ρυθμιστικών κινήσεων προσδιοριστεί, μόνο η πρώτη τιμή εφαρμόζεται τελικά στο σύστημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται και επιλύεται εκ νέου την επόμενη χρονική στιγμή, αξιοποιώντας όλες τις νεότερες πληροφορίες για την διεργασία. Το Σχήμα 6.1 αναπαριστά την βασική ιδέα όλων των ρυθμιστών προβλεπτικού μοντέλου που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες MPC που έχουν διαμορφωθεί, συνήθως έγκεινται στο γεγονός ότι εστιάζουν σε συγκεκριμένες κατηγορίες διεργασιών ή σε διαφορετικές διαμορφώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης.

Η ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου παρουσιάζει μία σειρά από πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων, από τα οποία τα κυριότερα είναι τα εξής:

- η περίπτωση πολυμεταβλητού συστήματος μπορεί να αντιμετωπισθεί με ευκολία
- είναι πολύ χρήσιμη όταν η μελλοντική επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. ρομποτικοί βραχίονες) είναι εκ των προτέρων γνωστή
- είναι μία εξ' ολοκλήρου ανοιχτή μεθοδολογία βασισμένη σε συγκεκριμένες

ενός μοντέλου που να αποδίδει την δυναμική της διεργασίας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο προσδιορισμός θεμελιωδών εξισώσεων, που να βασίζονται στην φυσική του συστήματος, συχνά δεν είναι εύκολος σε μία βιομηχανική μονάδα και επομένως είναι προτιμότερη η ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων, τα οποία ωστόσο πάντα συνοδεύονται από ένα σφάλμα. Επίσης, παρόλη την πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων, το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο είναι υπαρκτό, ιδιαίτερα στην περίπτωση χρήσης μη γραμμικών μοντέλων σε συνδυασμό με περιορισμούς. Εκτός του γεγονότος ότι απαιτείται η εύρεση λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εφαρμογών της μεθόδου, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ποιότητα της λύσης για την καλή απόκριση του συστήματος.

6.2 Στρατηγική ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου

Οι μεθοδολογίες ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου χαρακτηρίζονται από την παρακάτω στρατηγική, δεδομένης της διαθεσιμότητας ενός δυναμικού μοντέλου διακριτού χρόνου:

1. Σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή t διαμορφώνονται οι μελλοντικές αποκρίσεις του διανύσματος των μεταβλητών εξόδου για έναν συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα N_{pr} (ορίζοντας πρόβλεψης) $\hat{\mathbf{y}}(t+k|t)$, $k=1,.. N_{pr}$ χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο διακριτού χρόνου ως μοντέλο πρόβλεψης. Οι αποκρίσεις αυτές εξαρτώνται από τις γνωστές τιμές των μεταβλητών εισόδου και εξόδου έως τη χρονική στιγμή t και από τις μελλοντικές τιμές του διανύσματος των μεταβλητών εκ χειρισμού $\mathbf{u}(t+k|t)$, $k=0,.., N_{pr}-1$. Οι τελευταίες είναι βεβαίως άγνωστες και αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης στη διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφεται στο επόμενο βήμα.
2. Σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή t διαμορφώνεται ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού όπου η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τις διαφορές μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών του διανύσματος των μεταβλητών εξόδου $\hat{\mathbf{y}}(t+k|t)$, $k=1,.. N_{pr}$ και της επιθυμητής τροχιάς αναφοράς $\mathbf{r}(t+k)$, $k=1,.. N_{pr}$, όπως επίσης και την ενέργεια ρύθμισης για τον μελλοντικό ορίζοντα ρύθμισης M_{co} (συνήθως επιλέγεται

$M_{co} < N_{pr}$). Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνονται επίσης και περιορισμοί που αφορούν στα διανύσματα εισόδου και εξόδου. Για παράδειγμα οι τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού δεν μεταβάλλονται μετά το πέρας του ορίζοντα ρύθμισης. Από την επίλυση του προβλήματος αυτού προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές του διανύσματος των μεταβλητών εκ χειρισμού $\mathbf{u}(t+k|t)$, $k=0, \dots, M_{co}$.

3. Η πρώτη τιμή του διανύσματος των μεταβλητών εκ χειρισμού $\mathbf{u}(t|t)$ εφαρμόζεται για τη ρύθμιση του συστήματος, ενώ οι υπόλοιπες τιμές απορρίπτονται, διότι στην επόμενη χρονική στιγμή η τιμές του διανύσματος των μεταβλητών εξόδου $\mathbf{y}(t+1)$ είναι ήδη γνωστές και το βήμα 1 επαναλαμβάνεται με την νέα αυτή τιμή, ενώ όλη η υπόλοιπη διαδικασία επαναλαμβάνεται εκ νέου. Αυτή είναι άλλωστε η βασική αρχή της μετατόπισης του χρονικού ορίζοντα στην οποία βασίζεται κατά μεγάλο μέρος η ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου (Camacho και Bordons, 1998; Rossiter, 2000).

6.3 Ρύθμιση δυναμικού μητρώου (Dynamic Matrix Control, DMC)

6.3.1 Δυναμικά μοντέλα παλμικής και βηματικής επιβολής

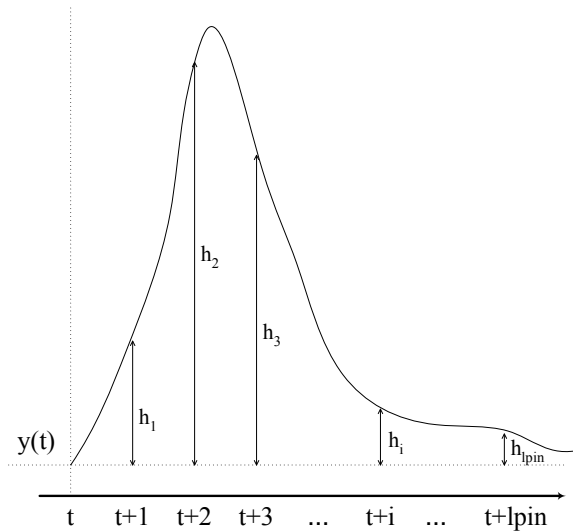
Είναι η πλέον δημοφιλής μεθοδολογία στη βιομηχανία επειδή είναι πολύ διαισθητική και απεικονίζει με σαφήνεια την επιρροή κάθε μεταβλητής εκ χειρισμού στο σήμα εξόδου. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόζεται μόνο σε ευσταθή συστήματα ανοικτού βρόχου.

Η μεθοδολογία βασίζεται σε δυναμικά μοντέλα παλμικής ή βηματικής επιβολής. Ένα μοντέλο παλμικής επιβολής (γνωστό και ως Finite Impulse Response, FIR) συσχετίζει μια μεταβλητή εκ χειρισμού με μια μεταβλητή εξόδου σύμφωνα με τη σχέση:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i \cdot u(t-i) \quad (6.1)$$

Οι συντελεστές h_i στο παραπάνω μοντέλο προκύπτουν πολύ απλά από την παρατήρηση της απόκρισης της μεταβλητής εξόδου όταν στην μεταβλητή εκ χειρισμού δοθεί μοναδιαία παλμική μεταβολή με χρόνο εφαρμογής ίσο με το χρόνο

δειγματοληψίας που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε. Συγκεκριμένα, οι τιμές h_i είναι οι τιμές της μεταβλητής εξόδου σε χρόνους πολλαπλάσιους του χρόνου δειγματοληψίας (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2: Απόκριση σε παλμική επιβολή

Αφού σε ευσταθές σύστημα εφαρμόζεται ένα σήμα με πεπερασμένη ενέργεια (το σήμα μετά από πεπερασμένο χρόνο επιστρέφει στην αρχική κατάσταση ισορροπίας) το ίδιο συμβαίνει και με τη μεταβλητή εξόδου. Συνεπώς το παραπάνω άθροισμα αποτελείται ουσιαστικά από πεπερασμένο αριθμό όρων (έστω $lpin$), οπότε θα έχουμε:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{lpin} h_i \cdot u(t-i) = H(z^{-1}) \cdot u(t) \quad (6.2)$$

όπου $H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-lpin}$, και z^{-1} ο backward shift operator. Η παράμετρος $lpin$ εκφράζει το πλήθος των πειραματικών τιμών απόκρισης της διεργασίας που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ώστε να δημιουργηθεί το προφίλ της μελλοντικής της συμπεριφοράς.

Η πρόβλεψη της τιμής της μεταβλητής εξόδου για ένα μελλοντικό χρονικό σημείο, θα δίνεται από την σχέση:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^{l_{pin}} h_i \cdot u(t+k-i|t) = H(z^{-1}) \cdot u(t+k|t) \quad (6.3)$$

Στην περίπτωση πολυμεταβλητού συστήματος, τα διαφορετικά σήματα εξόδου θα απεικονίζουν την επιρροή των n_{in} σημάτων εισόδου σύμφωνα με την σχέση:

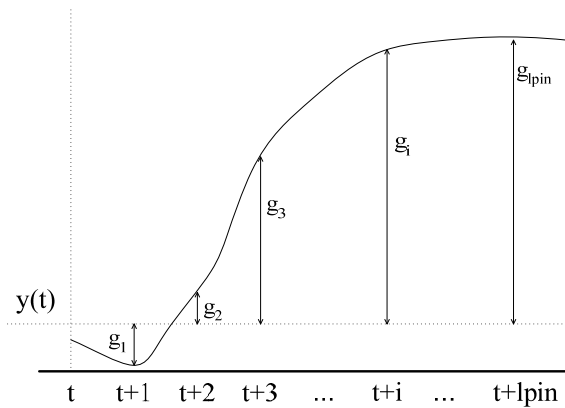
$$y_j(t) = \sum_{l=1}^{n_{in}} \sum_{i=1}^{l_{pin}} h_i^{lj} \cdot u^l(t-i) \quad (6.4)$$

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εκτός από τους συντελεστές απόκρισης (h_i) δεν απαιτούνται προηγούμενες πληροφορίες για την υπό εξέταση διεργασία, οπότε η διαδικασία αναγνώρισης της μελλοντικής συμπεριφοράς απλοποιείται και ταυτόχρονα περιγράφονται με ευκολία φαινόμενα όπως η χρονική καθυστέρηση.

Η ανάπτυξη μοντέλου βηματικής επιβολής είναι αντίστοιχη με αυτήν της παλμικής απόκρισης με την μόνη διαφορά ότι αυτή τη φορά το σήμα εισόδου είναι μία βηματική επιβολή. Ένα μοντέλο βηματικής επιβολής συσχετίζει μια μεταβλητή εκ χειρισμού με μια μεταβλητή εξόδου σύμφωνα με τη σχέση:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t-i) = G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (6.5)$$

Οι συντελεστές g_i στο παραπάνω μοντέλο προκύπτουν πολύ απλά από την παρατήρηση της απόκρισης της μεταβλητής εξόδου όταν στην μεταβλητή εκ χειρισμού δοθεί μοναδιαία βηματική επιβολή. Συγκεκριμένα, οι τιμές g_i είναι οι τιμές της μεταβλητής εξόδου σε χρόνους πολλαπλάσιους του χρόνου δειγματοληψίας (Σχήμα 6.3), ενώ $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$.



Σχήμα 6.3: Απόκριση σε βηματική επιβολή

6.3.2 Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC με βάση μοντέλο παλμικής επιβολής

Οι βασικές αρχές για την ανάπτυξη του αλγορίθμου ελέγχου μέσω δυναμικού μητρώου εμπεριέχουν τα παρακάτω στοιχεία:

- το μοντέλο απόκρισης σε παλμική επιβολή
- μία δευτεροβάθμια αντικειμενική συνάρτηση σε ένα πεπερασμένο ορίζοντα πρόβλεψης
- μελλοντική συμπεριφορά της μεταβλητής εξόδου του συστήματος η οποία θα πρέπει να ακολουθεί όσο το δυνατό καλύτερα το σημείο αναφοράς
- ο υπολογισμός των απαραίτητων σημάτων εισόδου μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων

Ας θεωρήσουμε ότι μελετούμε την απλή περίπτωση ενός συστήματος που αποτελείται από μία είσοδο και μία έξοδο όπου το μοντέλο της διεργασίας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^{lpin} h_i \cdot u(t+k-1|t) + d(t+k|t) \quad (6.6)$$

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με την εξίσωση 4-3 έχει προστεθεί ο όρος $d(t+k|t)$ που παριστάνει τη διαταραχή. Με βάση αυτό το μοντέλο, μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή της μεταβλητής εξόδου για ένα χρονικό ορίζοντα που

αποτελείται από N_{pr} χρονικά βήματα. Για την διαταραχή μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι ίση με το παρόν σφάλμα πρόβλεψης για όλα τα μελλοντικά χρονικά βήματα. Δηλαδή να υποθέσουμε ότι η διαταραχή περιγράφεται από την εξίσωση:

$$d(t+k|t) = d(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \sum_{i=1}^{lpin} h_i \cdot u(t-i) \quad (6.7)$$

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου θα εργαστούμε σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων $lpin$, N_{pr} , M_{co} (έστω $lpin=4$, $N_{pr}=6$, $M_{co}=2$) και ας θεωρήσουμε μια σταθερή επιθυμητή τιμή της μεταβλητής εξόδου y_{sp} . Το σφάλμα για τις επόμενες N_{pr} χρονικές στιγμές θα δίνεται από το διάνυσμα:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}(t+1|t) \\ \hat{e}(t+2|t) \\ \hat{e}(t+3|t) \\ \hat{e}(t+4|t) \\ \hat{e}(t+5|t) \\ \hat{e}(t+6|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1|t) - y_{sp} \\ \hat{y}(t+2|t) - y_{sp} \\ \hat{y}(t+3|t) - y_{sp} \\ \hat{y}(t+4|t) - y_{sp} \\ \hat{y}(t+5|t) - y_{sp} \\ \hat{y}(t+6|t) - y_{sp} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο παλμικής μεταβολής καταλήγουμε στην εξής ισότητα πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}(t+1|t) \\ \hat{e}(t+2|t) \\ \hat{e}(t+3|t) \\ \hat{e}(t+4|t) \\ \hat{e}(t+5|t) \\ \hat{e}(t+6|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1+h_2 & h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 & h_1 & 0 & 0 & 0 \\ h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 & h_1 & 0 & 0 \\ g_1+g_2+g_3+g_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 & h_1 & 0 \\ h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Du(t) \\ Du(t+1) \\ Du(t+2) \\ Du(t+3) \\ Du(t+4) \\ Du(t+5) \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$+ \begin{bmatrix} h_2 & h_3-h_2 & h_4-h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3 & h_4-h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t-2) \\ u(t-3) \\ u(t-4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \end{bmatrix}$$

και ας υποθέσουμε ότι η τιμή της μεταβλητής εκ χειρισμού παραμένει σταθερή μετά το πέρας του ορίζοντα ρύθμισης δηλαδή

$$u(t + M_{co} + 1) = u(t + M_{co} + 2) = \dots = u(t + N_{pr} - 1) = u(t + M_{co})$$

Η διαφορτικά:

$$\Delta u(t + M_{co} + 1) = \Delta u(t + M_{co} + 2) = \dots = \Delta u(t + N_{pr} - 1) = 0$$

Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να απομακρύνουμε τις στήλες $(M+2, \dots, N)$ από τον πρώτο πίνακα στην εξίσωση 6.9, η οποία διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}(t+1|t) \\ \hat{e}(t+2|t) \\ \hat{e}(t+3|t) \\ \hat{e}(t+4|t) \\ \hat{e}(t+5|t) \\ \hat{e}(t+6|t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 \\ h_1+h_2 & h_1 & 0 \\ h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 & h_1 \\ h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3 & h_1+h_2 \\ h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3 \\ h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 & h_1+h_2+h_3+h_4 \end{bmatrix}}_A \times \underbrace{\begin{bmatrix} Du(t) \\ Du(t+1) \\ Du(t+2) \\ Du(t+3) \\ Du(t+4) \\ Du(t+5) \end{bmatrix}}_{Du} \quad (6.10)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} h_2 & h_3-h_2 & h_4-h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3 & h_4-h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \\ h_2+h_3+h_4 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \end{bmatrix}}_E \times \underbrace{\begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t-2) \\ u(t-3) \\ u(t-4) \end{bmatrix}}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \\ y(t) - y_{sp} \end{bmatrix}}_D$$

Έστω ότι θέλουμε να λύσουμε το πρόβλημα ελαχιστοποίησης:

$$\min_{\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M)} J$$

όπου

$$J = \sum_{k=1}^{N_{pr}} [w_k \cdot (\hat{y}(t+k|t) - y_{sp})]^2 + \sum_{k=0}^{M_{co}} (r_k \cdot \Delta u(k))^2 \quad (6.11)$$

Στην παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση w_k $k=1, \dots, N_{pr}$ και r_k $k=0, \dots, M_{co}$ είναι συντελεστές βάρους, οι οποίοι ομαδοποιούνται στους παρακάτω πίνακες:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & w_N \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & r_M \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Η λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι:

$$\Delta u = \left[(\mathbf{W} \times \mathbf{A})^T \times (\mathbf{W} \times \mathbf{A}) + \mathbf{R}^T \times \mathbf{R} \right]^{-1} \times (\mathbf{W} \times \mathbf{A})^T \times \mathbf{W} \times (-\mathbf{E} \times \mathbf{U} - \mathbf{D}) \quad (6.13)$$

Παρατηρούμε ότι το πρώτο μέρος της εξίσωσης είναι σταθερό για κάθε χρονική στιγμή οπότε αρκεί να το υπολογίσουμε μία φορά δηλαδή:

$$\left[(\mathbf{W} \times \mathbf{A})^T \times (\mathbf{W} \times \mathbf{A}) + \mathbf{R}^T \times \mathbf{R} \right]^{-1} \times (\mathbf{W} \times \mathbf{A})^T \times \mathbf{W} = \text{σταθερό} \quad (6.14)$$

Το δεύτερο μέρος μεταβάλλεται χρονικά με αποτέλεσμα να απαιτείται ο υπολογισμός του για κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, υπολογίζοντας κάθε φορά την βέλτιστη τιμή του μητρώου:

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \Delta u(t+2) \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

χρησιμοποιούμε μόνο το $\Delta u(t)$ για να προσδιορίσουμε την παρούσα τιμή της μεταβλητής εκ χειρισμού από την σχέση:

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (6.16)$$

Η τιμή παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος του χρόνου δειγματοληψίας. Στο χρονικό αυτό σημείο το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται και επιλύεται εκ νέου.

Συνοψίζοντας, για την γενική περίπτωση, τα μητρώα του αλγορίθμου DMC θα έχουν την παραπάνω μορφή με τις διαστάσεις που δίνονται στον Πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1: Μητρώα αλγορίθμου DMC για σύστημα μίας εισόδου-μίας εξόδου

| Μητρώο | Διαστάσεις |
|---------------------------------------|--------------------------|
| A | $N_{pr}, (M_{co}+1)$ |
| $\Delta \mathbf{u}$ | $(M_{co} + 1), 1$ |
| E | $N_{pr}, lpin$ |
| U | $lpin, 1$ |
| D | $N_{pr}, 1$ |
| W | N_{pr}, N_{pr} |
| R | $M_{co} + 1, M_{co} + 1$ |

6.3.3 Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC για πολυμεταβλητό σύστημα

Στην περίπτωση πολυμεταβλητού συστήματος έχουμε ακριβώς την ίδια δομή του αλγορίθμου με τη μόνη διαφορά ότι οι τιμές των συντελεστών g ή h (βηματικής ή παλμικής απόκρισης αντίστοιχα) παύουν να είναι αριθμοί και γίνονται πίνακες της μορφής:

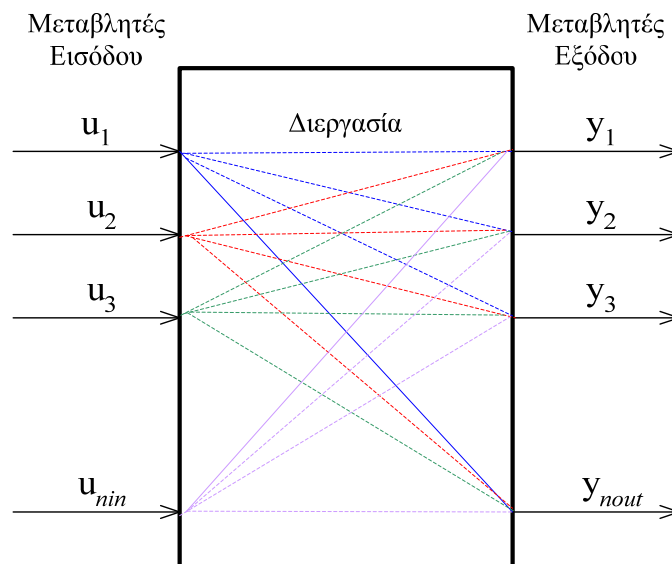
$$H_i = \begin{bmatrix} h_i^{1,1} & h_i^{1,2} & \dots & h_i^{1,nin} \\ h_i^{2,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_i^{nout,1} & \dots & \dots & h_i^{nout,nin} \end{bmatrix} \quad i = 1 \dots lpin \quad (6.17)$$

όπου n_{in} : πλήθος μεταβλητών εισόδου και n_{out} : πλήθος μεταβλητών εξόδου.

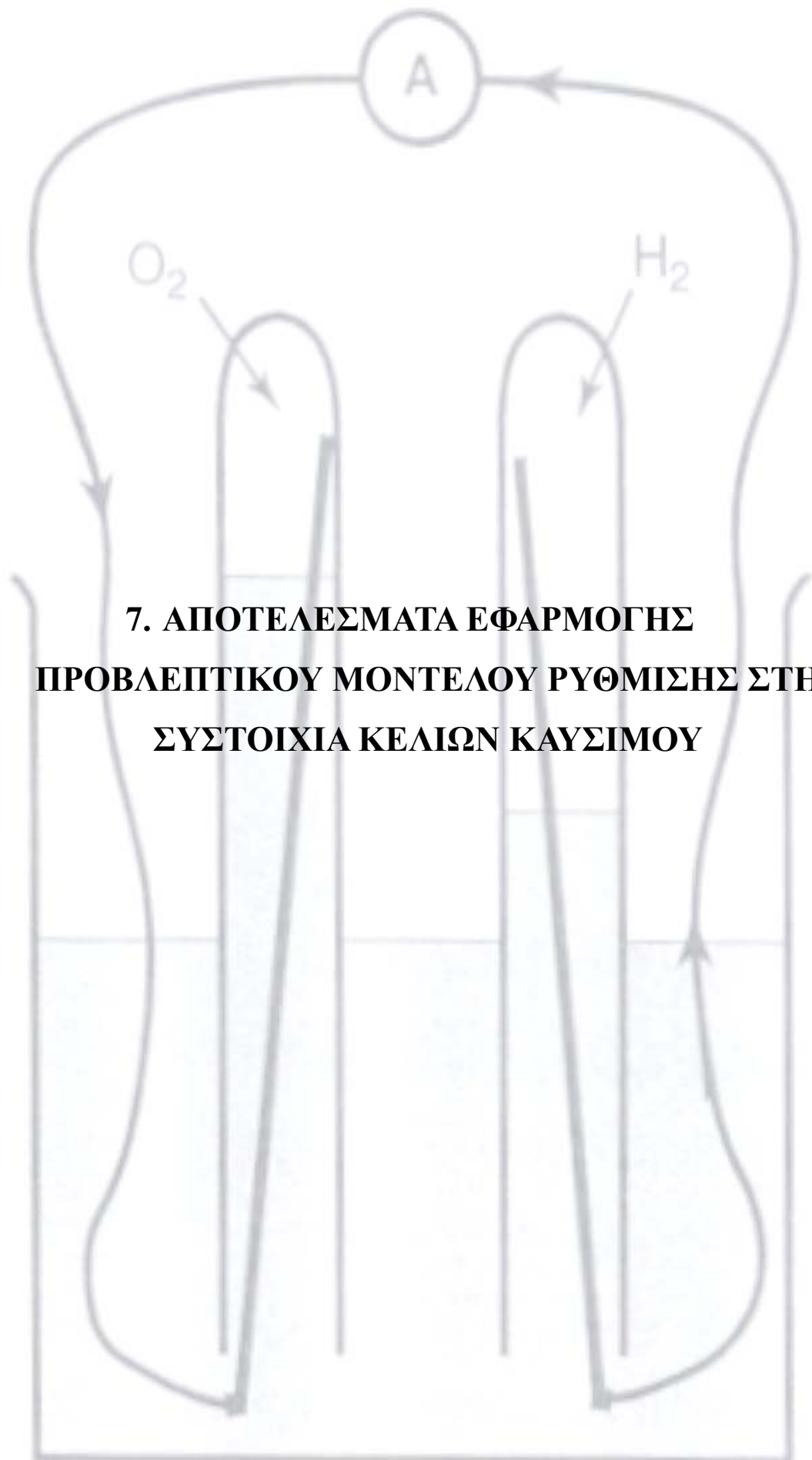
Κάθε μεταβλητή εξόδου θα επηρεάζεται από κάθε μεταβλητή εισόδου μέσω του μοντέλου πρόβλεψης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Έτσι, το γινόμενο $n_{in} \cdot n_{out}$ θα εκφράζει το πλήθος των εξισώσεων πρόβλεψης, δηλαδή για την i μεταβλητή εξόδου θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \hat{y}_j(t+k|t) = & h_1^{j,1} u_1(t+k-1) + h_2^{j,1} u_1(t+k-2) + \dots + h_{lpin}^{j,1} u_1(t+k-lpin) + \\ & h_1^{j,2} u_2(t+k-1) + h_2^{j,2} u_2(t+k-2) + \dots + h_{lpin}^{j,2} u_2(t+k-lpin) + \\ & \vdots \\ & h_1^{j,n_{in}-1} u_{n_{in}-1}(t+k-1) + h_2^{j,n_{in}-1} u_{n_{in}-1}(t+k-2) + \dots + h_{lpin}^{j,n_{in}-1} u_{n_{in}-1}(t+k-lpin) + \\ & h_1^{j,n_{in}} u_{n_{in}}(t+k-1) + h_2^{j,n_{in}} u_{n_{in}}(t+k-2) + \dots + h_{lpin}^{j,n_{in}} u_{n_{in}}(t+k-lpin) \end{aligned} \quad (6.18)$$

όπου $j = 1, \dots, n_{out}$



Σχήμα 6.4: Απεικόνιση πολυμεταβλητού συστήματος



**7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΤΗ
ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

7.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μεθοδολογία της ρύθμισης προβλεπτικού μοντέλου (MPC) για την ρύθμιση του συστήματος της συστοιχίας των κελιών καυσίμου τύπου PEM που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Ο στόχος της ρύθμισης του συγκεκριμένου συστήματος είναι αφενός η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς, δηλαδή η μείωση του χρόνου που χρειάζεται το σύστημα ώστε να φτάσει σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας όταν αλλάξει η απαίτηση σε ισχύ και αφετέρου η μείωση της πιθανότητας να σταματήσει απότομα η λειτουργία της συστοιχίας την χρονική στιγμή κατά την οποία αλλάζει η απαίτηση σε ισχύ, δηλαδή η ομαλότερη μετάβαση του συστήματος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Με παράλληλη χρήση των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 5 επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υδρογόνου αφού κάθε μεταβολή της επιθυμητής τιμής της ισχύος συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της επιθυμητής τιμής του λ_{O_2} σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.1.

7.2 Σχεδιασμός ρυθμιστή MPC

Το σύστημα της συστοιχίας των κελιών καυσίμου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 είναι ένα δυναμικό, ευσταθές σύστημα. Μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση του συστήματος η μεθοδολογία ρύθμισης δυναμικού μητρώου (DMC) που παρουσιάστηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 6. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό του ρυθμιστή DMC για το σύστημα της συστοιχίας των κελιών καυσίμου.

7.2.1 Κατασκευή μοντέλων FIR

Το πρώτο βήμα για τον σχεδιασμό του MPC ρυθμιστή, που θα βασίζεται στην μέθοδο DMC, είναι η ανάπτυξη ενός FIR μοντέλου, δηλαδή ενός μοντέλου παλμικής επιβολής που μοντελοποιεί τη δυναμική συμπεριφορά των ρυθμιζόμενων μεταβλητών συναρτήσει των μεταβολών που υφίστανται οι μεταβλητές εκ χειρισμού. Το σύστημα που εξετάζεται είναι πολυμεταβλητό αφού περιλαμβάνει δύο μεταβλητές εκ χειρισμού (I_{st}, v_{cm}) και δύο ρυθμιζόμενες μεταβλητές (P_{net}, λ_{O_2}). Οι συντελεστές του μοντέλου που προκύπτει λοιπόν μπορούν να παρουσιαστούν υπό τη μορφή πινάκων,

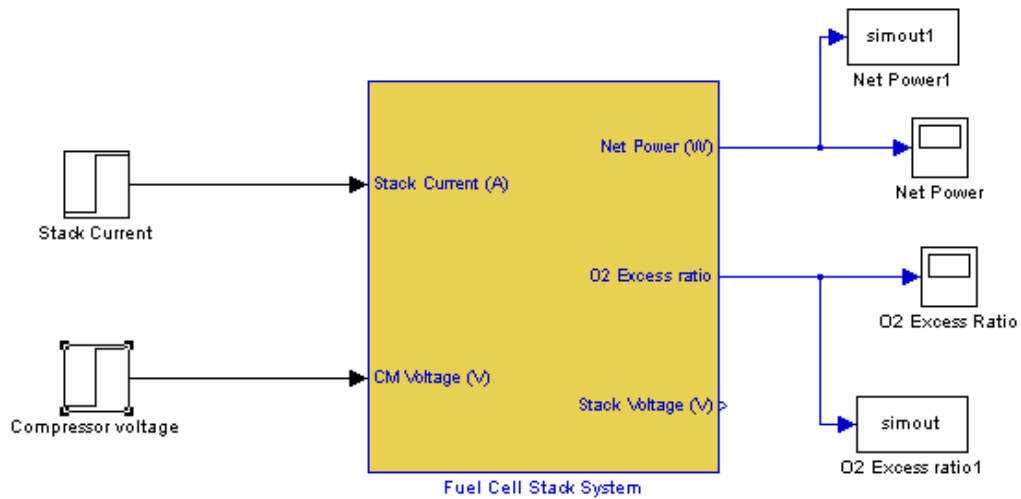
όπως φαίνεται στην εξίσωση 6.17). Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται πίνακες με τα μοντέλα παλμικής επιβολής και τα μοντέλα FIR που αναπτύχθηκαν.

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών του μοντέλου FIR, αναπτύχθηκε αρχικά μοντέλο βηματικής επιβολής όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 6 και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μετατροπή των συντελεστών (δηλαδή με βάση τους συντελεστές του μοντέλου βηματικής επιβολής προσδιορίστηκαν οι συντελεστές του μοντέλου FIR). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται στη βιομηχανική πρακτική, γιατί η στιγμιαία παλμική επιβολή δεν πραγματοποιείται εύκολα σε πολλά βιομηχανικά συστήματα. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία που αφορούν στην πραγματοποίηση των πειραμάτων βηματικής επιβολής, δηλαδή η αρχική μόνιμη κατάσταση των μεταβλητών εκ χειρισμού, οι βηματικές επιβολές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μεταβλητή και ο χρόνος δειγματοληψίας. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού επιλέγονται έτσι ώστε οι τιμές των μεταβλητών εξόδου να παίρνουν τις ακόλουθες τυπικές επιθυμητές τιμές λειτουργίας σε μόνιμη κατάσταση: $P_{net} = 23255W$, $\lambda_{O_2} = 2$. Ο χρόνος δειγματοληψίας επιλέγεται έτσι ώστε να προκύψει ικανοποιητικός αριθμός συντελεστών του μοντέλου ($lpin=20$), πριν το σύστημα ισορροπήσει στη νέα μόνιμη κατάσταση.

Πίνακας 7.1: Χρόνος δειγματοληψίας και βηματικές επιβολές για τις δύο μεταβλητές εκ χειρισμού

| Μοντέλο FIR | <i>Χρόνος δειγματοληψίας, t_i (s)</i> | <i>Αρχική τιμή μεταβλητών εκ χειρισμού</i> | <i>Βηματική επιβολή</i> |
|---|--|--|-----------------------------|
| <i>Συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές εξόδου και στην ένταση του ρεύματος ης συστοιχίας, I_{st}</i> | 0.075 | $I_{st} = 100A$ $v_{cm} = 99V$ | $I_{st} = +5A$ |
| <i>Συσχέτιση ανάμεσα στις μεταβλητές εξόδου και το δυναμικό του συμπιεστή, v_{cm}</i> | 0.075 | $I_{st} = 100A$ $v_{cm} = 99V$ | $v_{cm} = +10V$ |

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μοντέλων βηματικής επιβολής σε περιβάλλον SIMULINK. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται και τα σημεία με την ένδειξη simout και simout1, τα οποία καταγράφουν τις τιμές των δύο μεταβλητών εξόδου στον χρόνο δειγματοληψίας που καθορίζεται.



Σχήμα 7.1: Σχηματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των FIR μοντέλων σε περιβάλλον SIMULINK

7.2.2 Ανάπτυξη ρυθμιστή DMC

Το επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός του ρυθμιστή DMC, ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο FIR που έχει κατασκευαστεί προηγουμένως. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας DMC γίνεται όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι τιμές για τις βασικές παραμέτρους του ρυθμιστή, οι οποίες επιλέγονται έτσι ώστε ο ρυθμιστής να παρουσιάζει όσο το δυνατόν καλύτερη και ταχύτερη δυναμική συμπεριφορά.

Πίνακας 7.2: Ορίζοντες πρόβλεψης και ρύθμισης του DMC ρυθμιστή

| Παράμετρος | Τιμή |
|-------------------------------|------|
| Ορίζοντας πρόβλεψης, N_{pr} | 50 |
| Ορίζοντας ρύθμισης, M_{co} | 50 |

Όπως έχει αναφερθεί, οι ρυθμιζόμενες μεταβλητές, των οποίων θα πρέπει να εισαχθούν στον ρυθμιστή οι επιθυμητές τιμές, είναι η απαίτηση σε ισχύ, P_{net} και ο λόγος λ_{O_2} . Όσον αφορά στην καθαρή ισχύ της συστοιχίας, η επιθυμητή τιμή είναι η εκάστοτε επιθυμητή απαίτηση σε ισχύ, η οποία για το μοντέλο που μελετάται μπορεί να κυμαίνεται από 5kW – 45kW. Ως επιθυμητή τιμή για τον λόγο λ_{O_2} εισάγεται η τιμή για την οποία εξασφαλίζεται η ελάχιστη κατανάλωση υδρογόνου η οποία προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5 και που παρουσιάζεται συνοπτικά στο Διάγραμμα 5.1.

Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στους πίνακες **W** και **R**. Οι πίνακες αυτοί είναι διαγώνιοι και τα στοιχεία τους ονομάζονται και συντελεστές βάρους. Τα στοιχεία του πίνακα **W** είναι οι συντελεστές βάρους των ρυθμιζόμενων μεταβλητών, δηλαδή των μεταβλητών P_{net} και λ_{O_2} , ενώ τα στοιχεία του πίνακα **R** είναι οι συντελεστές βάρους των μεταβλητών εκ χειρισμού I_{st} και v_{cm} . Πιο συγκεκριμένα, $\mathbf{W} = diag\{w_{P_{net}}, w_{\lambda_{O_2}}\}$ και $\mathbf{R} = diag\{r_{v_{cm}}, r_{I_{st}}\}$. Μεταβάλλοντας κατάλληλα τους συντελεστές βάρους μπορεί να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στη ρύθμιση της μεταβλητής P_{net} ή της μεταβλητής λ_{O_2} .

Η λύση του προβλήματος δίνεται τελικά από την εξίσωση 6.13.

Από τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης εφαρμόζεται μόνο η πρώτη ρυθμιστική κίνηση και το πρόβλημα διαμορφώνεται και επιλύεται εκ νέου όταν μεσολαβήσει χρόνος ίσος με μια περίοδο δειγματοληψίας.

7.3 Εφαρμογή του DMC ρυθμιστή στο σύστημα της συστοιχίας PEMFC

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη του DMC ρυθμιστή, ο οποίος εφαρμόζεται στο σύστημα της συστοιχίας των κελιών καυσίμου τύπου PEM.

Ο MPC-DMC ρυθμιστής στο Σχήμα 7.2 έχει το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα. Όπως φαίνεται και στην σχηματική διάταξη, οι είσοδοι του ρυθμιστή είναι η ανατροφοδότηση από το σύστημα των κελιών καυσίμου των ρυθμιζόμενων μεταβλητών, δηλαδή οι τιμές της καθαρής ισχύος, P_{net} , και του λόγου λ_{O_2} , και οι προηγούμενες I_{pin} σε πλήθος τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού. Οι έξοδοι του ρυθμιστή είναι οι ρυθμιστικές κινήσεις για τις μεταβλητές εκ χειρισμού I_{st} και v_{cm} , που διαρκούν για χρονικό διάστημα ίσο με μια περίοδο δειγματοληψίας.

Ο στόχος της ρύθμισης του μοντέλου της συστοιχίας κελιών καυσίμου είναι η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των ρυθμιζόμενων μεταβλητών. Αυτός ο στόχος είναι δύσκολο να επιτευχθεί ταυτόχρονα γι' αυτό και θα παρουσιαστούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θα επιδιωχθεί καλύτερη δυναμική συμπεριφορά για την μεταβλητή P_{net} ενώ στη δεύτερη θα γίνει το αντίστοιχο για την μεταβλητή λ_{O_2} . Την διαφορά για κάθε περίπτωση την κάνουν οι συντελεστές βάρους.

Σε όλες τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιηθεί μια ακολουθία από μεταβολές των επιθυμητών τιμών των δύο ρυθμιζόμενων μεταβλητών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3. Υπενθυμίζεται ότι οι μεταβολές αφορούν ουσιαστικά την επιθυμητή ισχύ P_{net} , αφού οι μεταβολές του λόγου λ_{O_2} προκύπτουν άμεσα μέσω του διαγράμματος 5.1

Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές για τους συντελεστές βάρους με τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερη ρύθμιση της μεταβλητής λ_{O_2} .

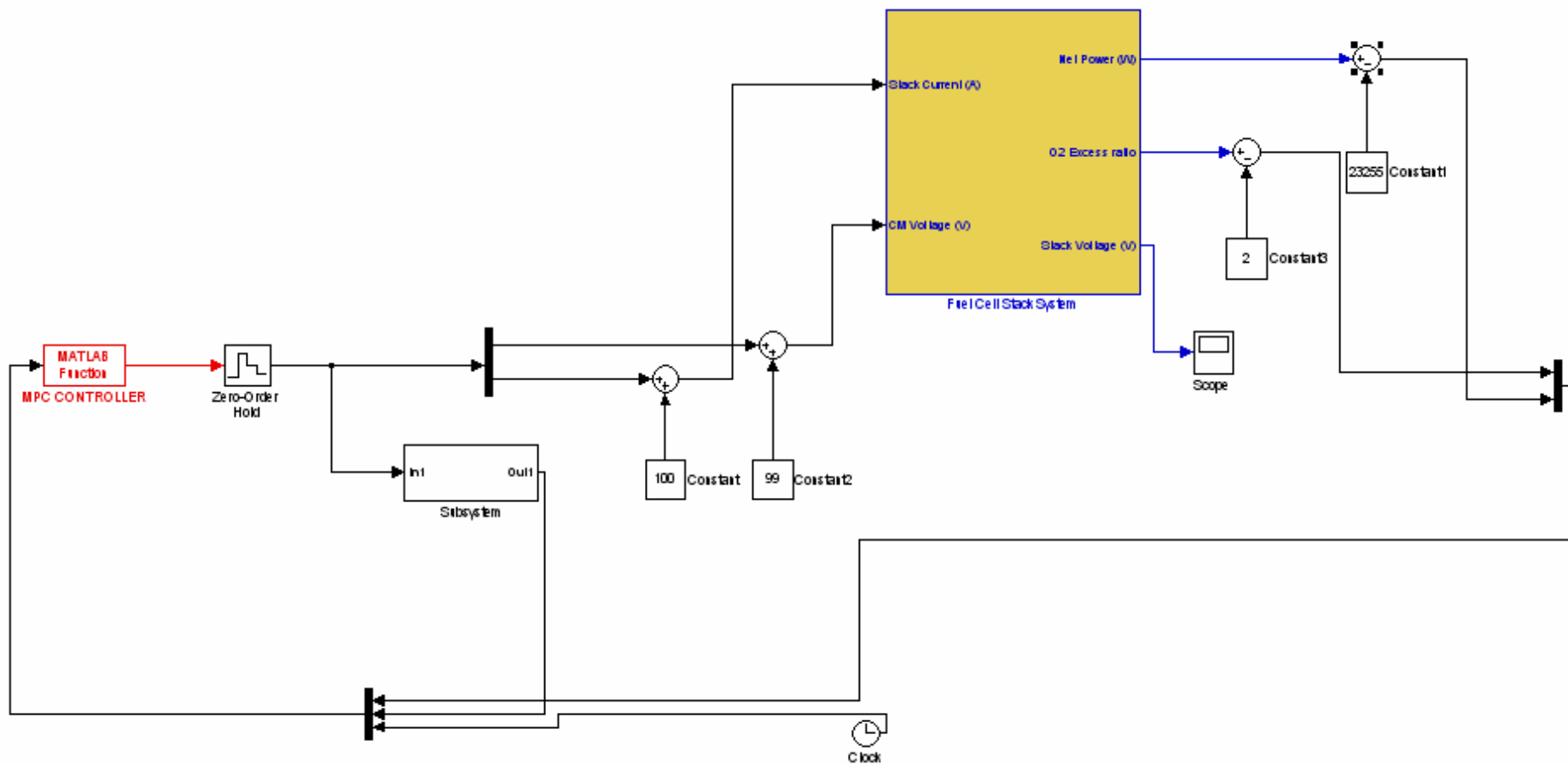
Στα Διαγράμματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των δύο ρυθμιζόμενων μεταβλητών, P_{net} και λ_{O_2} , στο σύστημα της συστοιχίας των κελιών καυσίμου, όταν σε αυτό εφαρμοστεί ο MPC-DMC ρυθμιστής με τους συντελεστές βάρους του Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.3: Χρονικά βήματα και επιθυμητές τιμές που εισάγονται στον MPC-DMC ρυθμιστή

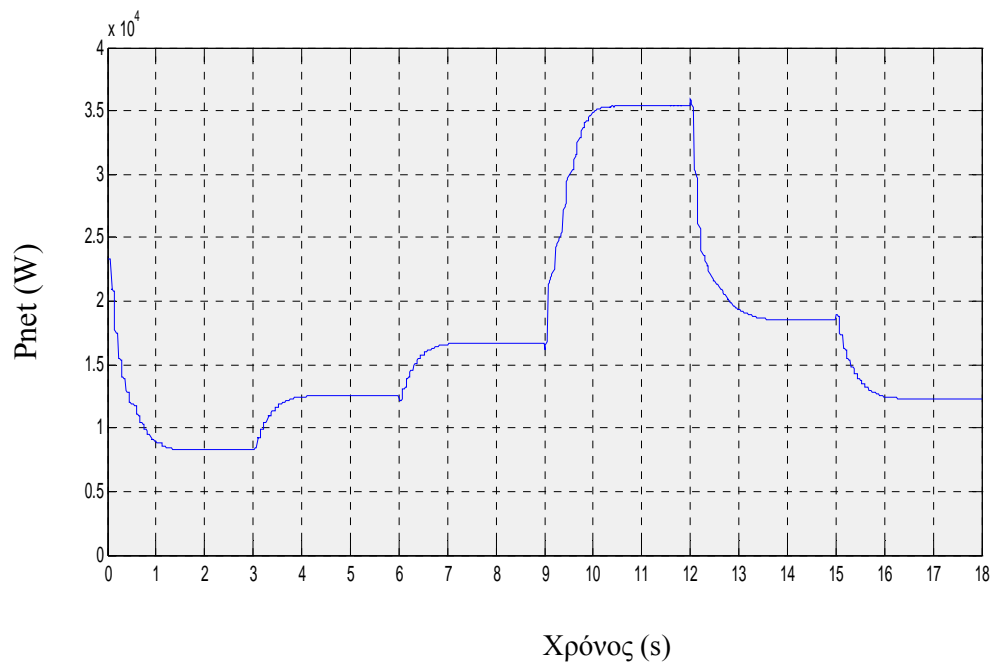
| Χρονικό βήμα (s) | Καθαρή ισχύς, P_{net} (W) | λ_{O_2} |
|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| 0 | 8350 | 2.496 |
| 3 | 12540 | 2.452 |
| 6 | 16730 | 2.527 |
| 9 | 35360 | 2.323 |
| 12 | 18500 | 2.488 |
| 15 | 12350 | 2.447 |

Πίνακας 7.4: Τιμές συντελεστών βάρους των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του ρυθμιστή

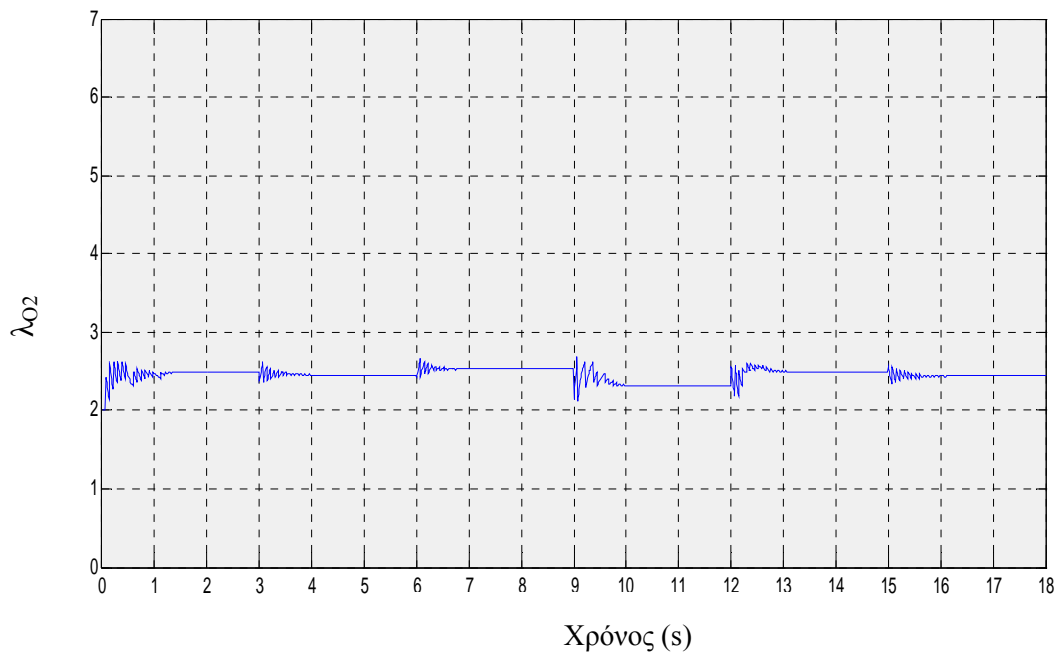
| Συντελεστής βάρους | Τιμή |
|-----------------------|-------|
| $w_{\lambda_{O_2}}$ | 100 |
| $w_{P_{net}}$ | 0.003 |
| $r_{v_{em}}$ | 1/1.3 |
| $r_{I_{st}}$ | 1/100 |



Σχήμα 7.2: Σχηματική διάταξη του κλειστού βρόχου του μοντέλου της συστοιχίας των κελιών καυσίμων, που περιλαμβάνει και τον MPC-DMC ρυθμιστή



Διάγραμμα 7.1: Απόκριση της καθαρής ισχύος, P_{net} , στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου στο οποίο εφαρμόζεται ο MPC-DMC ρυθμιστής με τη βαθμονόμηση του Πίνακα 7.3



Διάγραμμα 7.2: Απόκριση του λόγου λ_{O_2} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου, στο οποίο εφαρμόζεται ο MPC-DMC ρυθμιστής με τη βαθμονόμηση του Πίνακα 7.3

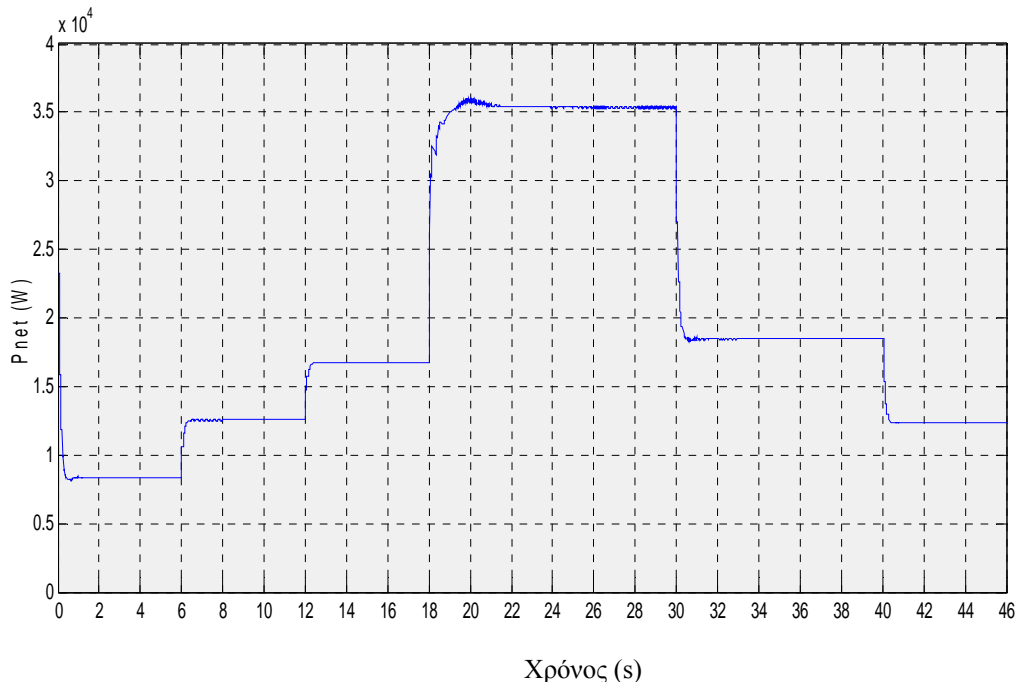
Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι τιμές για τους συντελεστές βάρους με τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερη ρύθμιση της μεταβλητής P_{net} .

Πίνακας 7.5: Τιμές συντελεστών βάρους των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του ρυθμιστή

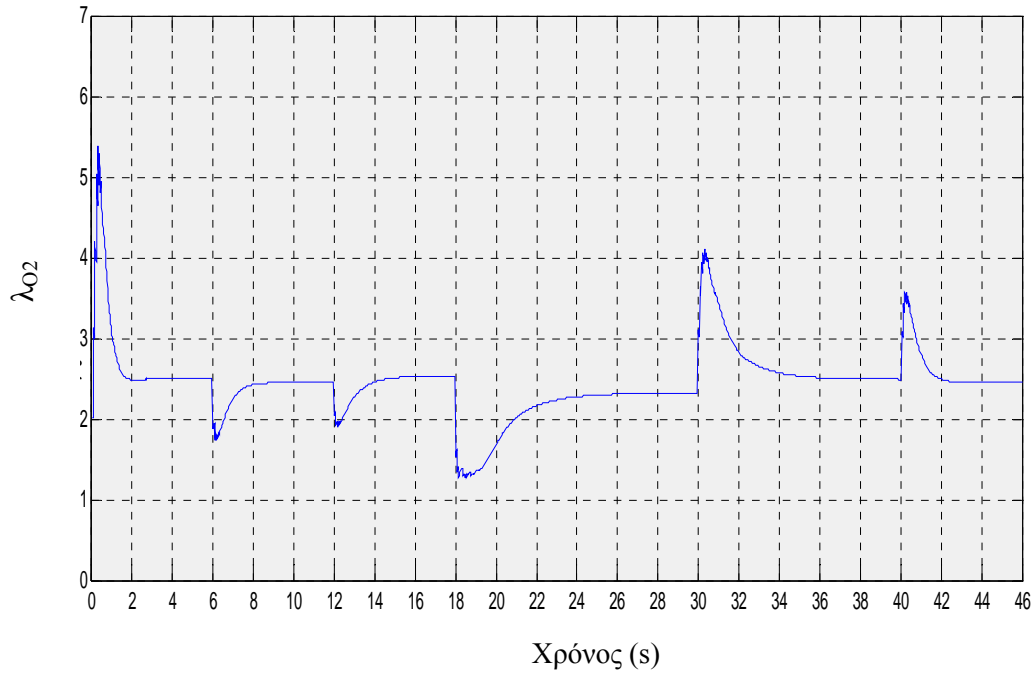
| Συντελεστής βάρους | Τιμή |
|---------------------|------|
| $w_{\lambda_{O_2}}$ | 1 |
| $w_{P_{net}}$ | 1 |
| $r_{v_{cm}}$ | 0.5 |
| $r_{I_{st}}$ | 0.01 |

Στα Διαγράμματα 7.3 και 7.4 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των δύο ρυθμιζόμενων μεταβλητών, P_{net} και λ_{O_2} , στο σύστημα της συστοιχίας των κελιών καυσίμου, όταν σε αυτό εφαρμοστεί ο MPC-DMC ρυθμιστής με τους συντελεστές βάρους του Πίνακα 7.5.

Συγκρίνοντας τα 4 διαγράμματα μεταξύ τους μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο ρυθμιστής οδηγεί το σύστημα στις επιθυμητές τιμές. Αυτό που διαφέρει για κάθε περίπτωση είναι ο χρόνος και η δυναμική απόκριση που κάνει κάθε μεταβλητή μέχρι να οδηγηθεί στην επιθυμητή της τιμή. Στο Διάγραμμα 7.1 η μεταβλητή P_{net} χρειάζεται περίπου 1sec μέχρι να φτάσει στην επιθυμητή τιμή ενώ στο Διάγραμμα 7.3 φαίνεται ότι χρειάζεται περίπου 0.5sec. Η μεταβλητή λ_{O_2} οδηγείται, στην πρώτη περίπτωση, σε μόνιμη κατάσταση σε περίπου 0.5sec και με μικρές ταλαντώσεις. Αντίθετα, στην δεύτερη περίπτωση χρειάζονται από 2.5–6sec ενώ παρατηρείται και δημιουργία μεγάλων κορυφών (peaks)



Διάγραμμα 7.3: Απόκριση της καθαρής ισχύος, P_{net} , στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου στο οποίο εφαρμόζεται ο MPC-DMC ρυθμιστής με τη βαθμονόμηση του Πίνακα 7.3

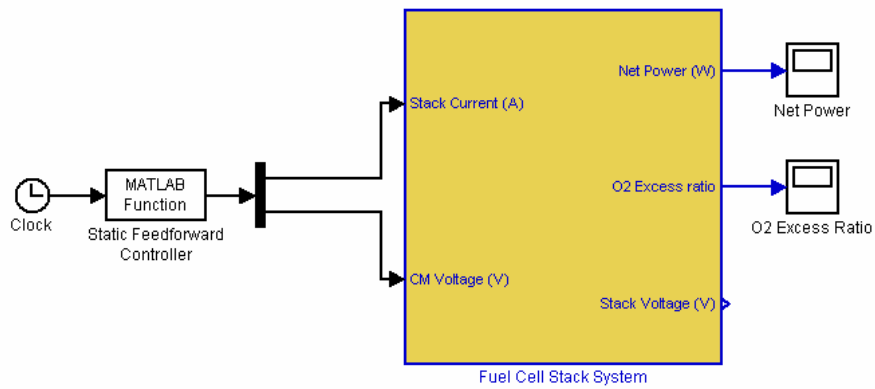


Διάγραμμα 7.4: Απόκριση του λόγου λ_{O_2} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου στο οποίο εφαρμόζεται ο MPC-DMC ρυθμιστής με τη βαθμονόμηση του Πίνακα 7.3

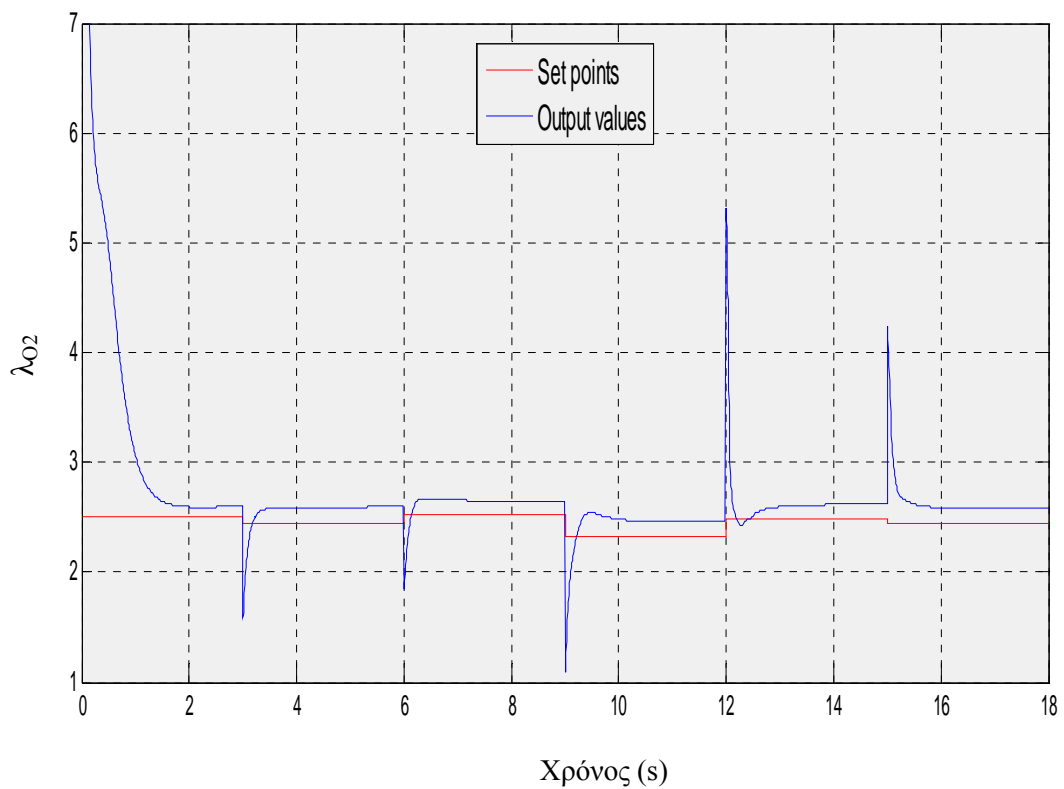
7.4 Ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση

Ένας τρόπος αξιολόγησης του MPC-DMC ρυθμιστή, που εφαρμόζεται στο μοντέλο της συστοιχίας των κελιών καυσίμου, είναι και η σύγκριση της συμπεριφοράς του με άλλους ρυθμιστές. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση στο μοντέλο συστοιχίας των κελιών καυσίμου.

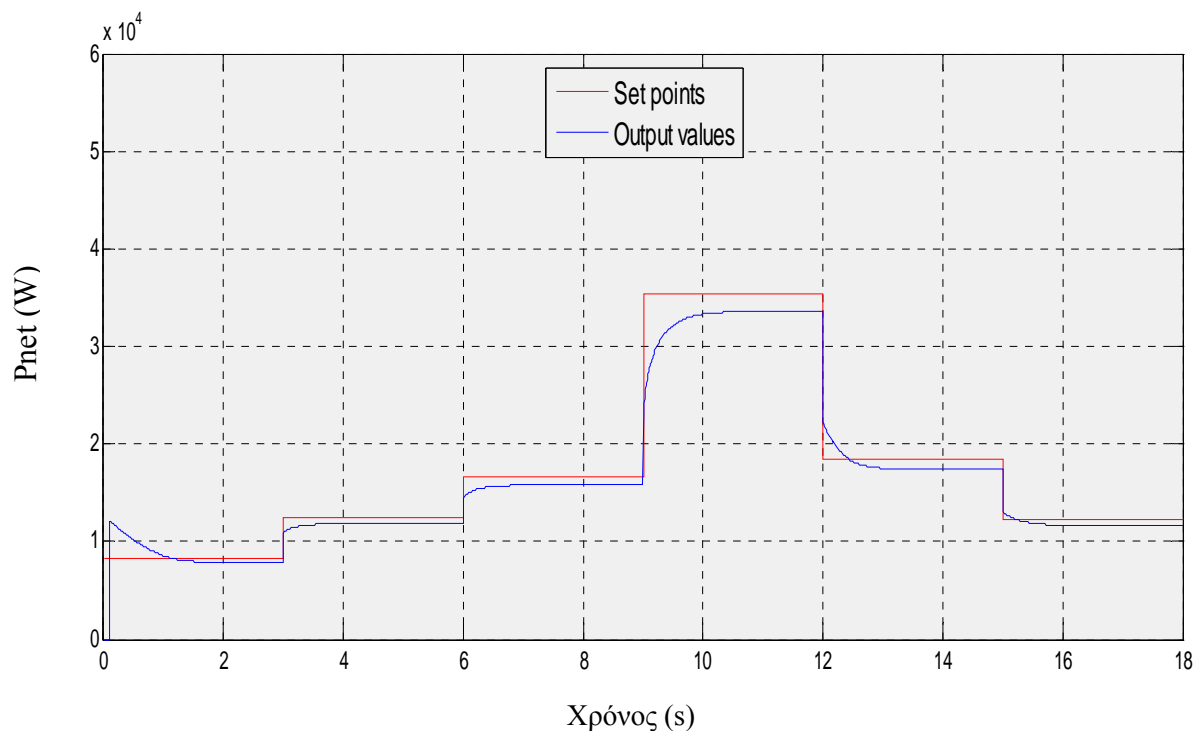
Ο ρυθμιστής αυτός λειτουργεί με βάση την λογική “look up tables”, δηλαδή ο ρυθμιστής επιλέγει τις τιμές των μεταβλητών εκ χειρισμού βάσει ενός πίνακα, που ουσιαστικά κωδικοποιεί τις πληροφορίες των Διαγραμμάτων 5.1, 5.2 εισάγεται σε αυτόν. Η σχηματική διάταξη του στατικού ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3. Ο ρυθμιστής εφαρμόστηκε ακριβώς στο ίδιο πρόβλημα αλλαγής των επιθυμητών τιμών των δύο ρυθμιζόμενων μεταβλητών που έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγησης της μεθοδολογίας DMC. Οι αποκρίσεις των μεταβλητών εξόδου παρουσιάζονται στα διαγράμματα 7.5 και 7.6. Παρατηρείται ότι ο ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση αδυνατεί να οδηγήσει το σύστημα στις επιθυμητές τιμές με ακρίβεια (κόκκινη γραμμή). Επιπλέον, στο Διάγραμμα 7.5, που παρουσιάζει την απόκριση της μεταβλητής λ_{O_2} , παρατηρείται ότι κατά την αλλαγή της απαίτησης σε ισχύ δημιουργούνται κορυφές (peaks) οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα σε απότομη διακοπή της λειτουργίας του λόγω έλλειψης οξυγόνου αλλά και να προκαλέσουν δυναμική καταπόνηση (dynamic stress) στις μεμβράνες των κελιών λόγω απότομης μεταβολής της πίεσης αλλά και της έλλειψης του οξυγόνου. Οι κορυφές αυτές είναι πιο έντονες από αυτές που παράγει ο MPC-DMC ρυθμιστής ακόμη και στην περίπτωση της βαθμονόμησης σύμφωνα με τον Πίνακα 7.5 όπου δίνεται έμφαση στη ρύθμιση της καθαρής ισχύος P_{net} .



Σχήμα 7.3: Σχηματική διάταξη του ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση σε περιβάλλον *SIMULINK*



Διάγραμμα 7.5: Απόκριση του λόγου λ_{O_2} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου στο οποίο εφαρμόζεται ο ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση



Διάγραμμα 7.6: Απόκριση της καθαρής ισχύος, P_{net} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου στο οποίο εφαρμόζεται ο ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση

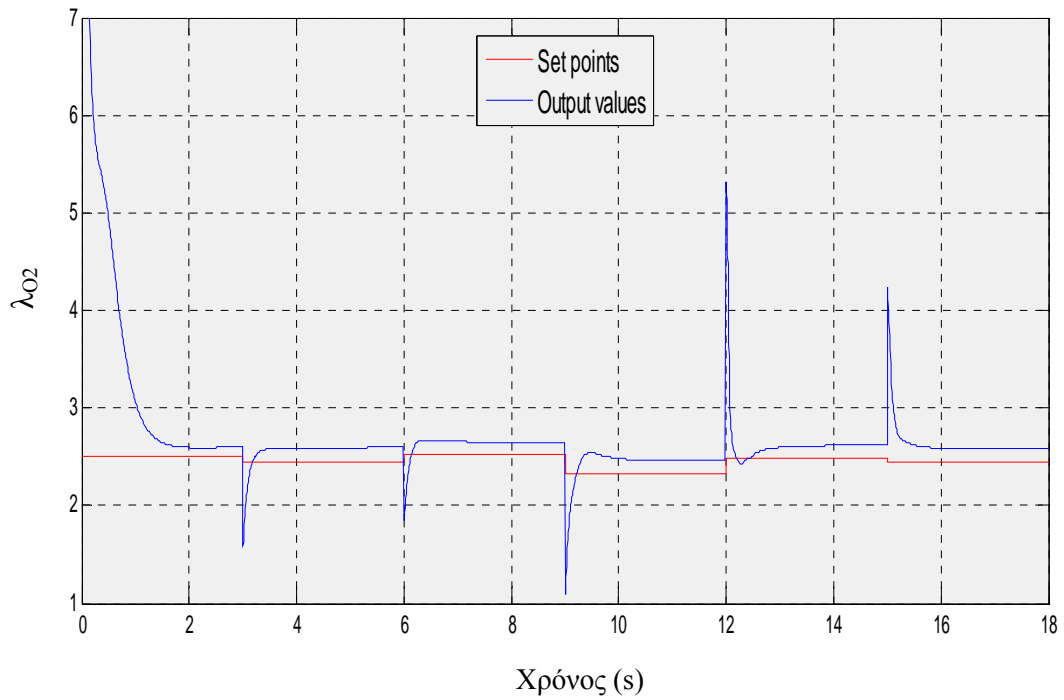
Πολλές φορές συμβαίνει να δημιουργείται κάποιο πρόβλημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου. Ένα τέτοιο πρόβλημα θα μπορούσε να είναι η ελαττωματική λειτουργία ή και καταστροφή, για οποιοδήποτε λόγο, ενός ή περισσοτέρων κελιών καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να δημιουργηθεί κάποια ρωγμή (cracking) σε κάποια μεμβράνη ή μεμβράνες των κελιών της συστοιχίας. Τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται με επιτυχία μόνο αν η στρατηγική ρύθμισης που χρησιμοποιούμε περιέχει ανατροφοδότηση. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των μεταβλητών εξόδου του συστήματος της συστοιχίας των κελιών καυσίμου στο πρόβλημα αλλαγής των επιθυμητών τιμών των ρυθμιζόμενων μεταβλητών που έχει χρησιμοποιηθεί ως τώρα, όταν 21 από τα 381 κελιά καυσίμου βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

Στα Διαγράμματα 7.7, 7.8 συγκρίνονται οι αποκρίσεις του ρυθμιζόμενων μεταβλητών λ_{O_2} και P_{net} τις περιπτώσεις που το μοντέλο της συστοιχίας κελιών καυσίμου ρυθμίζεται: (α) με ένα ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση και (β) με τον MPC-DMC ρυθμιστή που έχει βαθμονομηθεί σύμφωνα με τον Πίνακα 7.3. Είναι φανερό ότι ο ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση αποτυγχάνει να οδηγήσει τις ρυθμιζόμενες

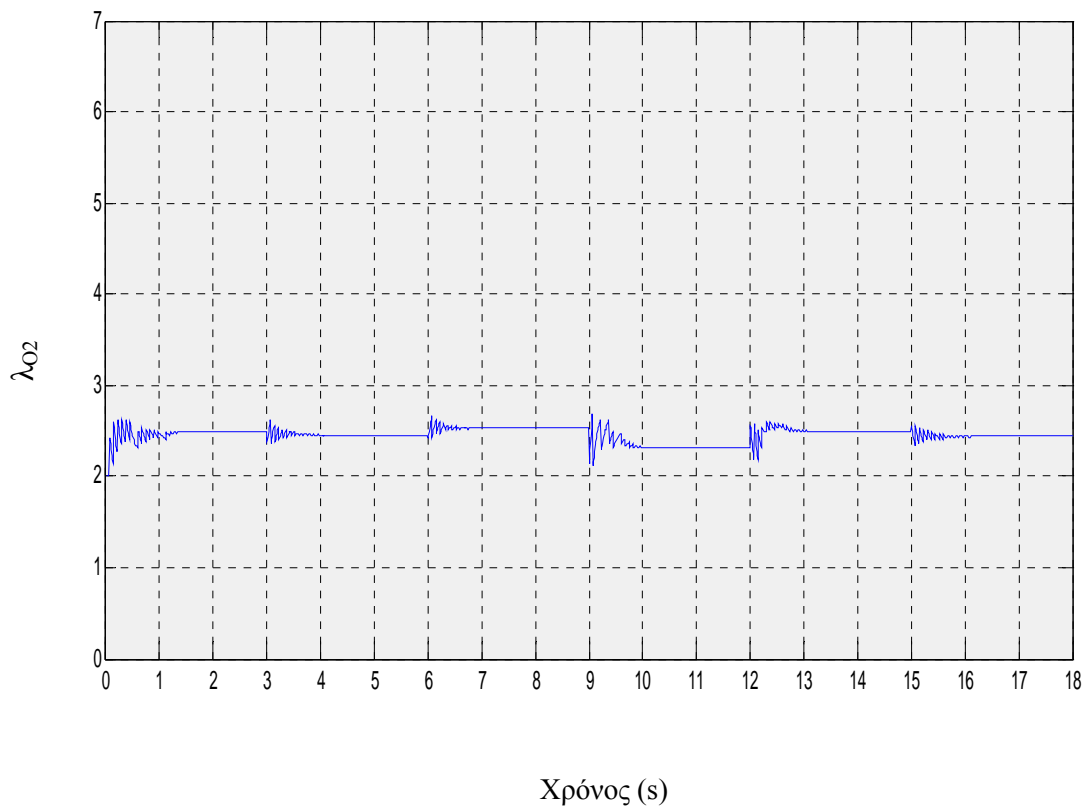
μεταβλητές στις επιθυμητές τιμές. σε αντίθεση με τον ρυθμιστή που περιέχει ανατροφοδότηση των μεταβλητών εξόδου. Ο ρυθμιστής MPC- DMC λοιπόν εξακολουθεί και ρυθμίζει επιτυχώς το σύστημα ακόμα και αν δημιουργηθούν ανωμαλίες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Όλες οι προσομοιώσεις που αναφέρονται σε αυτό το κεφάλαιο έγιναν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή 1.87GHz Intel Pentium Core 2 και μνήμη 1GB Ram σε λειτουργικό σύστημα Windows XP. Οι προσομοιώσεις, που έγιναν με τον MPC-DMC ρυθμιστή, για πραγματικό χρόνο 18s έγιναν σε υπολογιστικό χρόνο 3min. Οι προσομοιώσεις, που έγιναν με τον MPC-DMC ρυθμιστή, για πραγματικό χρόνο 46s έγιναν σε υπολογιστικό χρόνο 7min. Οι προσομοιώσεις που έγιναν με τον ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση για πραγματικό χρόνο 18s έγιναν σε υπολογιστικό χρόνο 10s.

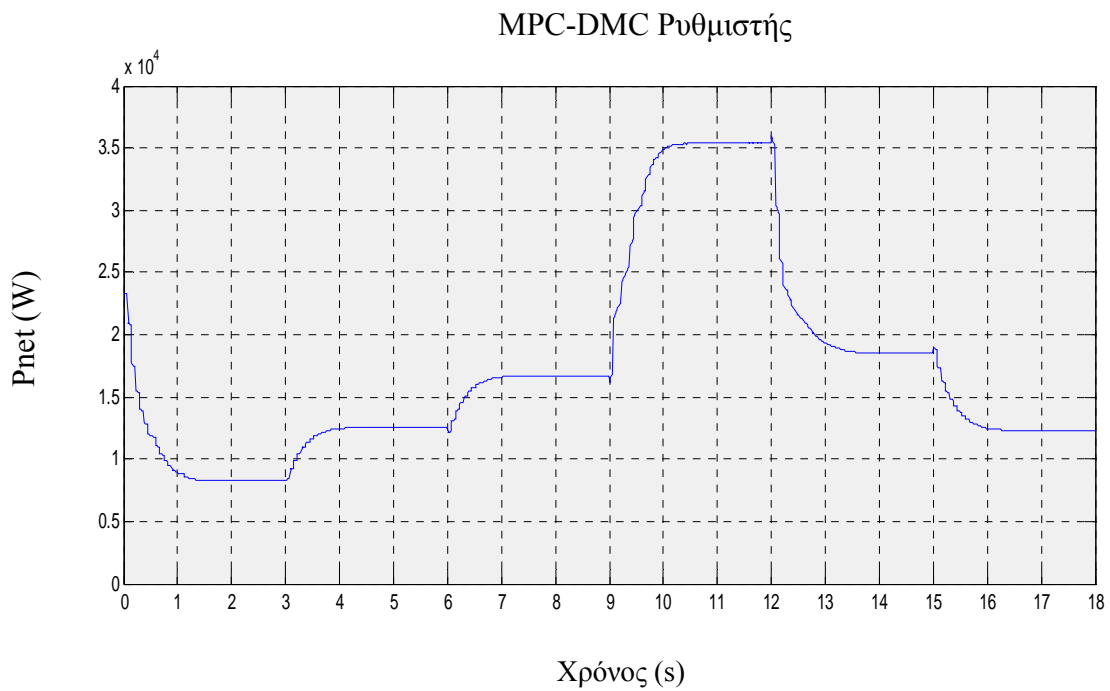
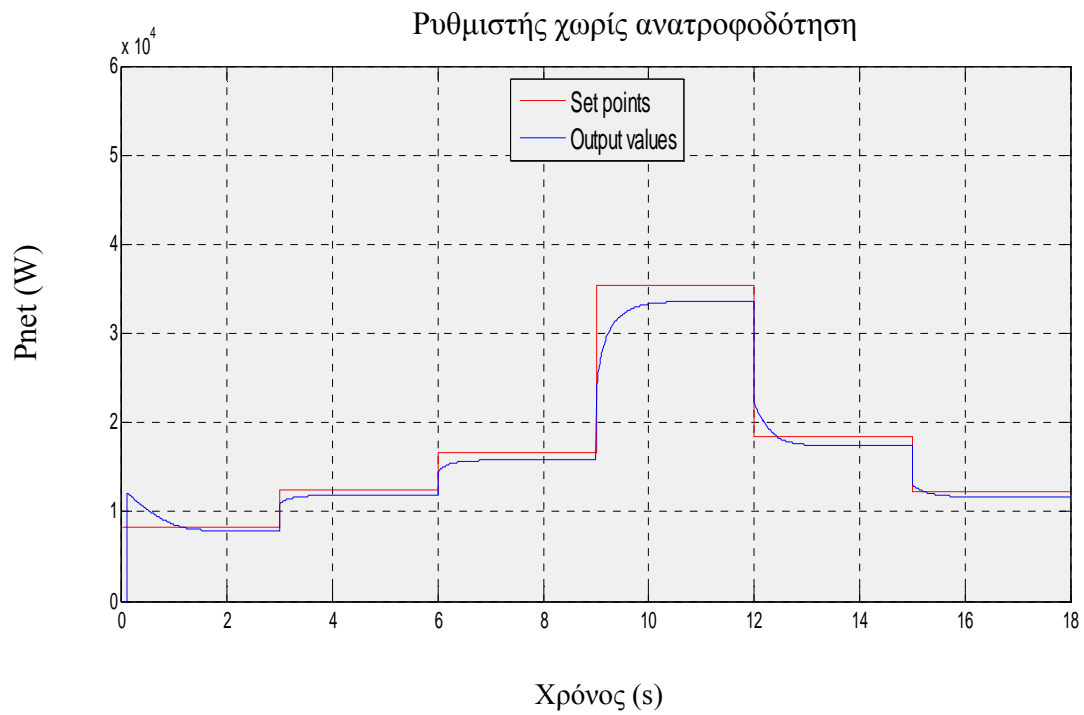
Ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση



MPC-DMC Ρυθμιστής



Διάγραμμα 7.7: Απόκριση του λόγου λ_{O_2} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου όταν σε αυτό λειτουργούν τα 360 εκ των 381 κελιών καυσίμου (α) Ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση, (β) MPC-DMC ρυθμιστής.

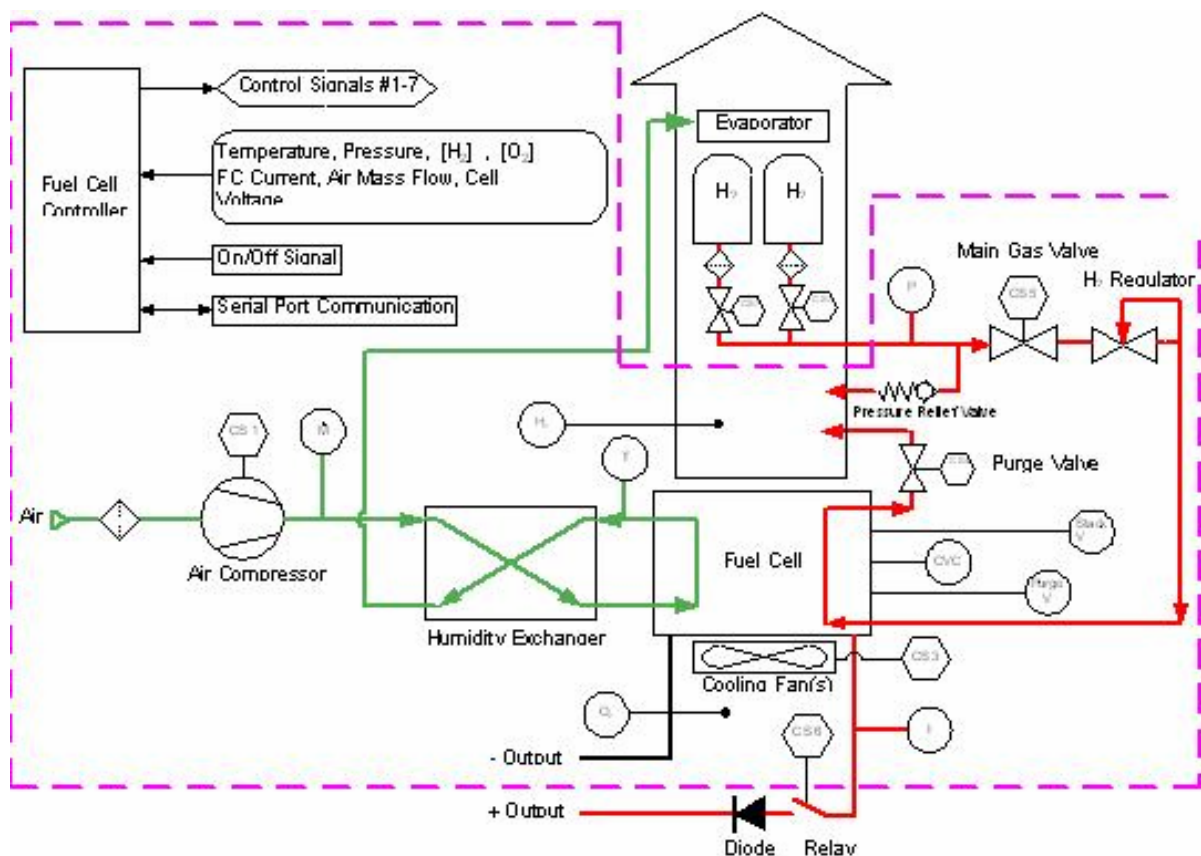


Διάγραμμα 7.8: Απόκριση της καθαρής ισχύος P_{net} του λόγου λ_{O_2} στο σύστημα της συστοιχίας κελιών καυσίμου όταν σε αυτό λειτουργούν τα 360 εκ των 381 κελιών καυσίμου (α) Ρυθμιστής χωρίς ανατροφοδότηση, (β) MPC-DMC ρυθμιστής.

7.5 Συστοιχία κελιών καυσίμου Ballard Nexa™ power module

Μια άλλη μορφή αξιολόγησης του MPC-DMC ρυθμιστή που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο είναι και η σύγκριση των αποκρίσεων που προκύπτουν από αυτόν με τις αποκρίσεις μιας πραγματικής συστοιχίας κελιών καυσίμου.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων ανήκει στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και βρίσκεται τοποθετημένη στο χώρο του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συγκεκριμένη συστοιχία ονομάζεται Nexa™ power module και η κατασκευάστρια εταιρεία είναι η Ballard. Πρόκειται για ένα σύστημα που μπορεί να αποδώσει από 0 έως και 1200W μέγιστη ισχύ. Το καύσιμο, δηλαδή το υδρογόνο, βρίσκεται αποθηκευμένο εξωτερικά της συστοιχίας σε συμπιεσμένη μορφή στα 200bar εντός φιάλης. Η σχηματική διάταξη της συγκεκριμένης συστοιχίας έτσι όπως παρέχεται από τον κατασκευαστή φαίνεται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4: Σχηματική διάταξη συστοιχίας κελιών καυσίμου Nexa™ power module

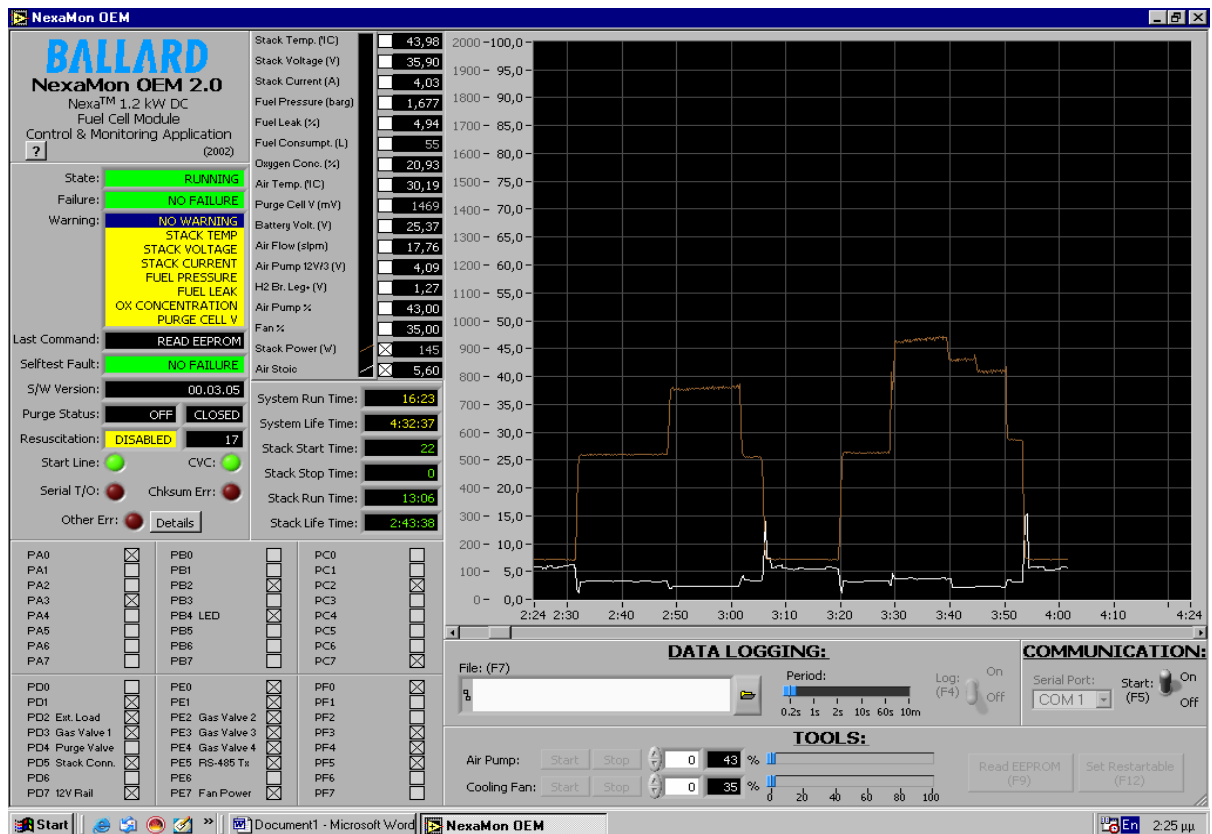
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4 υπάρχει ένα σύστημα ρύθμισης, οι ακριβείς όμως λεπτομέρειες και ο τρόπος λειτουργίας του οποίου θεωρούνται εμπιστευτικές πληροφορίες και δεν είναι διαθέσιμες στους χρήστες.

Το όλο σύστημα των κελιών καυσίμου είναι συνδεδεμένο με μετατροπέα συνεχούς/εναλλασσόμενου ρεύματος 200V (DC/AC inverter) και το φορτίο αποτελείται από σειρά λαμπτήρων. Η συνολική πειραματική διάταξη φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία:



Σχήμα 7.5: Πειραματική διάταξη του συστήματος κελιών καυσίμου Nexa™ power module

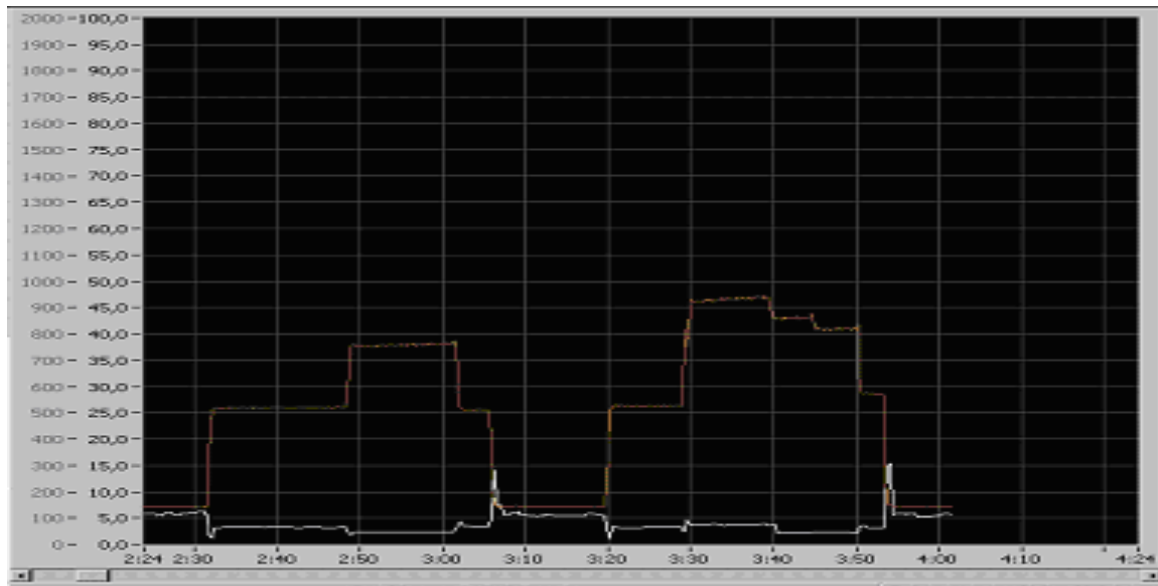
Με σκοπό να γίνει μια σύγκριση των αποκρίσεων των δύο συστημάτων, έγινε μια σειρά από πειράματα παρόμοια με αυτά που έγιναν στο μοντέλο της συστοιχίας με τον MPC-DMC ρυθμιστή. Πιο συγκεκριμένα, έγινε καταγραφή της απόκρισης της καθαρής ισχύος και του λόγου λ_{O_2} της πειραματικής διάταξης για διάφορες απαιτήσεις ισχύος. Στο Σχήμα 7.6 φαίνεται το περιβάλλον του λογισμικού της πειραματικής διάταξης και οι αποκρίσεις των δύο μεταβλητών για διάφορες βηματικές μεταβολές στην απαίτηση σε ισχύ.



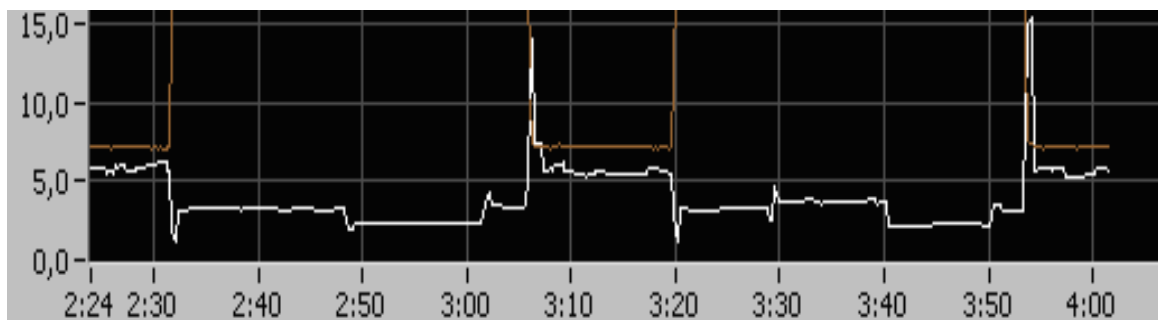
Σχήμα 7.6: Περιβάλλον λογισμικού συστοιχίας Nexa™ power module

Στα Σχήματα 7.7 και 7.8 φαίνονται σε μεγέθυνση οι αποκρίσεις της καθαρής ισχύος P_{net} και του λόγου λ_{O_2} για διάφορες απαιτήσεις ισχύος.

Παρατηρώντας κανείς το Διάγραμμα 7.7 μπορεί να διαπιστώσει ότι το σύστημα οδηγείται στην επιθυμητή μόνιμη κατάσταση με γρήγορες αποκρίσεις. Παρόλα αυτά, παρατηρώντας με περισσότερη προσοχή το Διάγραμμα 7.8 διαπιστώνεται ότι κατά την αλλαγή του φορτίου δημιουργούνται κορυφές στο διάγραμμα της απόκρισης της μεταβλητής λ_{O_2} . Όπως έχει τονιστεί και προηγουμένως, το είδος αυτής της δυναμικής συμπεριφοράς είναι δυνατόν να δημιουργήσει πρόβλημα στην λειτουργία των κελιών καυσίμου λόγω ενδεχόμενης έλλειψης οξυγόνου σε κάποια υψηλή απαίτηση φορτίου. Σύμφωνα με την εργασία των Thilo Bocklisch και συνεργάτες (2008), στην οποία μελετάται και η συμπεριφορά της συγκεκριμένης συστοιχίας, τα προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας αυτής της δυναμικής συμπεριφοράς μπορούν να αποφευχθούν αν οι αλλαγές των φορτίων της ισχύος γίνονται με αργό ρυθμό (περίπου 30W/s). Για παράδειγμα, μια αλλαγή σε απαίτηση ισχύος από 400W σε 700W θα πρέπει να γίνει σε περίπου 17s.



Σχήμα 7.7: Αποκρίσεις καθαρής ισχύος (πορτοκαλί χρώμα) και λ_{O_2} όπως προκύπτουν από την πειραματική συστοιχία κελιών καυσίμου Nexa™ power module



Σχήμα 7.8: Απόκριση της μεταβλητής λ_{O_2} όπως προκύπτει από την πειραματική συστοιχία κελιών καυσίμου Nexa™ power module

Η αντιδιαστολή του Διαγράμματος 7.2 και του Σχήματος 7.7 φανερώνει ότι ο MPC-DMC ρυθμιστής που σχεδιάζεται στην παρούσα εργασία παρουσιάζει καλύτερη δυναμική συμπεριφορά από τον ρυθμιστή που χρησιμοποιείται στην συστοιχία Nexa™ power module. Το κυριότερο πλεονέκτημα του MPC-DMC ρυθμιστή είναι ότι ρυθμίζει την μεταβλητή λ_{O_2} ομαλά και χωρίς να δημιουργούνται κορυφές, τη στιγμή που ο χρόνος που χρειάζεται η συγκεκριμένη μεταβλητή για να οδηγηθεί σε μόνιμη κατάσταση είναι παρόμοιος και για τους δύο ρυθμιστές. Τονίζεται ακόμη, ότι ο MPC-DMC ρυθμιστής που προτείνεται στη διπλωματική αυτή εργασία, ελαχιστοποιεί την κατανάλωση του υδρογόνου.



**8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

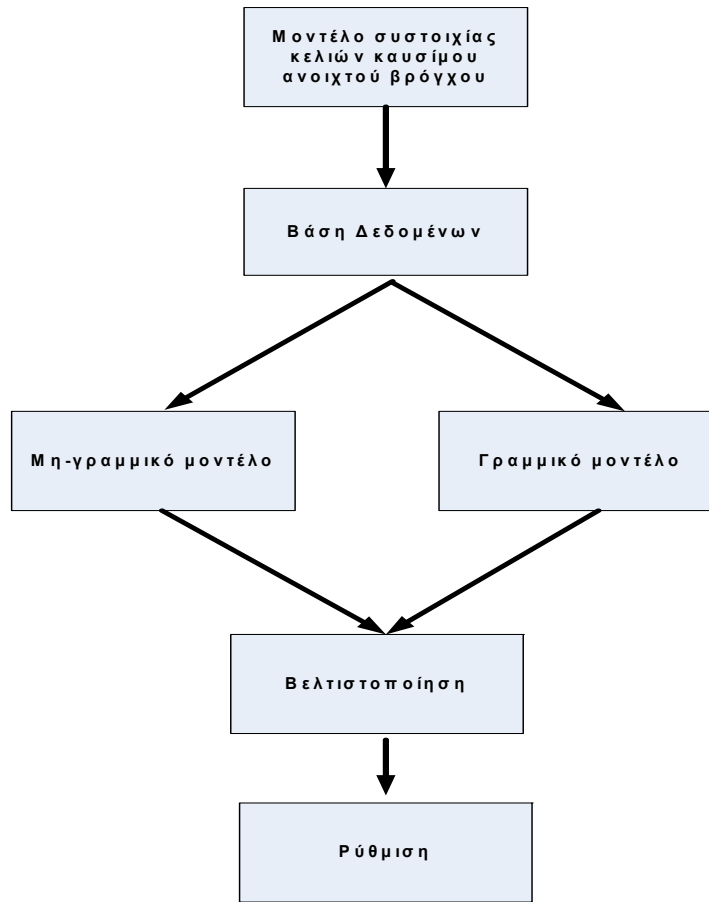
8.1 Εισαγωγή

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς, την βελτιστοποίηση αλλά και την ρύθμιση της λειτουργίας του μοντέλου μιας συστοιχίας κελιών καυσίμου τύπου PEM. Η πορεία μελέτης του μοντέλου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου τύπου PEM ξεκίνησε με την μεταμοντελοποίηση και την εξαγωγή γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων για τη συσχέτιση των μεταβλητών εξόδου με τις μεταβλητές εισόδου του μοντέλου. Ακολούθησε ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας της συστοιχίας για οποιαδήποτε απαίτηση ισχύος, ενώ στο τέλος έγινε εφαρμογή ενός MPC-DMC ρυθμιστή, με τον οποίο επιτεύχθηκε η ρύθμιση του μοντέλου στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής όλης της πορείας που ακολουθήθηκε από την δημιουργία της βάσης δεδομένων μέχρι και την ρύθμιση του μοντέλου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία χωρίζονται σε τρεις ενότητες:

- Στα συμπεράσματα που αφορούν στη διαδικασία της μεταμοντελοποίησης
- Στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίηση της λειτουργίας της συστοιχίας
- Στα συμπεράσματα που αφορούν στην αυτόματη ρύθμιση του συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο περιέχονται επίσης διάφορες προτάσεις-υποδείξεις για μελλοντική εργασία, οι οποίες συμβαδίζουν με τις ερευνητικές τάσεις που απορρέουν από τη σύγχρονη βιβλιογραφία, και αφορούν στη μοντελοποίηση, βελτιστοποίηση της λειτουργίας και αυτόματη ρύθμιση συστημάτων κελιών καυσίμου.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα ροής της συνολικής πορείας που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία

8.2 Συμπεράσματα από τη διαδικασία μεταμοντελοποίησης

Κατά τη διαδικασία της μεταμοντελοποίησης εφαρμόστηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης και η αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης για τη συσχέτιση σε μόνιμη κατάσταση των δύο μεταβλητών εξόδου, P_{net} και λ_{O_2} , με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου, I_{st} και U_{cm} . Η εξαγωγή των μοντέλων βασίστηκε σε βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο ανοιχτού βρόγχου της συστοιχίας κελιών καυσίμου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.

Αναλυτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης είναι ουσιαστικά μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος που απαιτεί τη θεώρηση πολλών διαφορετικών δομών του μοντέλου. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι η παραγόμενη δομή είναι συνήθως απλή και μικρή σε μέγεθος. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου όμως είναι ότι η διαδικασία δεν οδηγεί πάντοτε σε επιτυχή αποτελέσματα. Το μειονέκτημα αυτό έγινε φανερό στην προσπάθεια μοντελοποίησης της ισχύος P_{net} , όπου η καλύτερη δομή που επιλέχθηκε ανάμεσα στις πολλαπλές δομές μοντέλου που δοκιμάστηκαν παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα, ειδικά στις υψηλές τιμές της συγκεκριμένης μεταβλητής. Αντίθετα το μοντέλο που συσχετίζει το λόγο λ_{O_2} , με τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου του συστήματος είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο.
- Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων ακτινικής συνάρτησης βάσης (δηλαδή ο αλγόριθμος των ασαφών μέσων) απαιτεί πολύ μικρό υπολογιστικό κόστος, ενώ σημαντικό είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μόνο μια μεταβλητή σχεδιασμού, τον αριθμό των ασαφών συνόλων που ορίζονται για κάθε μεταβλητή εισόδου. Το μειονέκτημα της χρήσης νευρωνικών δικτύων είναι ότι τα παραγόμενα μοντέλα είναι μεγάλα σε μέγεθος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μη γραμμικά μοντέλα, που κατασκευάστηκαν με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων τύπου RBF, παρουσίασαν εξαιρετική ακρίβεια τόσο στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μοντέλου της συστοιχίας, όσο και στην πρόβλεψη των ακραίων τιμών των μεταβλητών εξόδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και για τη μεταβλητή εξόδου λ_{O_2} παρατηρήθηκε βελτίωση των αποτελεσμάτων με χρήση της τεχνολογίας των νευρωνικών δικτύων. Αυτό βεβαίως ήταν αναμενόμενο καθώς τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια και αξιοπιστία οποιαδήποτε μη γραμμική συμπεριφορά.

8.3 Συμπεράσματα από την διαδικασία βελτιστοποίησης

Με τον όρο βελτιστοποίηση εννοούμε την εύρεση εκείνων των λειτουργικών παραμέτρων της συστοιχίας κελιών καυσίμου, οι οποίες εξασφαλίζουν την ελάχιστη κατανάλωση υδρογόνου για κάποια δεδομένη απαίτηση σε ισχύ. Οι λειτουργικές αυτές παράμετροι είναι οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου ή μεταβλητές εκ χειρισμού, δηλαδή το ρεύμα της συστοιχίας, I_{st} και το δυναμικό του συμπιεστή, U_{cm} , από τις οποίες όμως προκύπτει και μια βέλτιστη τιμή για το λόγο λ_{O_2} .

Ειδικά ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών του λόγου λ_{O_2} συναρτήσει της καθαρής ισχύος, P_{net} , είναι ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας. Η αύξηση του λόγου λ_{O_2} έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μερικής πίεσης του οξυγόνου και επομένως της καθαρής ισχύος που παράγεται από τα κελιά καυσίμου. Αν όμως ο λόγος λ_{O_2} λάβει τιμή μεγαλύτερη από τη βέλτιστη, αυτό έχει ως αποτέλεσμα της υπερβολική αύξηση της ισχύος που πρέπει να καταναλώνει ο συμπιεστής και άρα την μείωση της καθαρής ισχύος που παράγεται από τα κελιά καυσίμου. Συνεπώς είναι εμφανές ότι για κάθε περιοχή λειτουργίας του συστήματος υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του λόγου λ_{O_2} η οποία και προσδιορίζεται στην αντίστοιχη ενότητα της διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματα της διαμόρφωσης και επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης συνοψίζονται στα Διαγράμματα 5.1 και 5.2 όπου παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων της συστοιχίας για ολόκληρο το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η απαιτούμενη ισχύς.

8.4 Συμπεράσματα από την μεθοδολογία ρύθμισης

Το τελευταίο στάδιο έρευνας της παρούσας εργασίας έχει να κάνει με το σχεδιασμό ρυθμιστή τύπου MPC-DMC για τη ρύθμιση του συστήματος της συστοιχίας κελιών καυσίμου τύπου PEM, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα κεφάλαια 6, 7 όπου παρουσιάζεται η προτεινόμενη στρατηγική αυτόματης ρύθμισης.

- Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία των κελιών καυσίμου είναι η απότομη αλλαγή του λόγου λ_{O_2} την χρονική στιγμή κατά την οποία αλλάζει η απαίτηση σε ισχύ. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην απότομη μεταβολή της απαίτησης σε οξυγόνο. Όταν για

παράδειγμα η απαίτηση σε ισχύ αυξηθεί τότε αυξάνεται και η απαίτηση σε οξυγόνο έτσι ώστε να μπορέσει να καλυφθεί η ανάγκη για επιπλέον παραγωγή ενέργειας. Αν αυτή η απαίτηση σε ισχύ είναι υπερβολική τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο έλλειψης οξυγόνου (oxygen depletion). Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν η παροχή οξυγόνου στη συστοιχία αδυνατεί να καλύψει την ανάγκη για παραγωγή ισχύος και έχει αρνητικές συνέπειες για τα κελιά καυσίμου. Τέτοιες συνέπειες είναι η φυσική φθορά των μεμβρανών των κελιών αλλά και η απότομη παύση της λειτουργίας τους (shut down). Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται συνήθως αυτό το πρόβλημα είναι με τη χρήση επιπλέον μπαταρίας ή πυκνωτή. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 7.2 μπορεί κανείς να διακρίνει ότι ο MPC-DMC ρυθμιστής, όταν χρησιμοποιούνται οι συντελεστές βάρους του Πίνακα 7.4, επιτυγχάνει να οδηγήσει το σύστημα σε μόνιμη κατάσταση χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για έλλειψη οξυγόνου αφού ο λόγος λ_{O_2} δεν πέφτει κάτω από την τιμή 1.8, που είναι αρκετά μεγαλύτερη από το όριο ασφαλείας (1.5). Ειδικότερα, την χρονική στιγμή $t=9$ η απαίτηση σε ισχύ αυξάνεται από $P_{net} = 16730W$ σε $P_{net} = 35360W$, δηλαδή κατά περίπου $20kW$, που ισοδυναμεί με περίπου το 50% της δυναμικότητας της συστοιχίας. Ακόμα και σε μια τέτοια απότομη μεταβολή, ο ρυθμιστής επιτυγχάνει να οδηγήσει το σύστημα με ομαλότητα και ακρίβεια σε μόνιμη κατάσταση, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος έλλειψης οξυγόνου. Η σύγκριση των αποκρίσεων του MPC-DMC ρυθμιστή με τις αντίστοιχες αποκρίσεις του ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση φανερώνουν το σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης στρατηγικής αυτόματης ρύθμισης.

- Ένας από τους αρχικούς στόχους αυτής της εργασίας ήταν η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου της συστοιχίας κελιών καυσίμου. Όπως αποδεικνύεται και από την παρατήρηση των Διαγραμμάτων 1-4 η δυναμική συμπεριφορά του ρυθμιστή εξαρτάται σε πολύ σημαντικό βαθμό από τους συντελεστές βάρους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ενισχύθηκαν οι συντελεστές βάρους της μεταβλητής λ_{O_2} , ενώ στη δεύτερη ενισχύθηκαν οι συντελεστές βάρους που αντιστοιχούν στη μεταβλητή P_{net} . Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτό να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση σε μία από τις δύο ρυθμιζόμενες μεταβλητές, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος.

- Η χρήση ενός MPC-DMC ρυθμιστή σε ένα σύστημα κελιών καυσίμου θα μπορούσε να έχει αντίκτυπο και στην διάρκεια ζωής των κελιών καυσίμου. Η ομαλή λειτουργία των κελιών καυσίμου είναι ένα στοιχείο που συμβάλει σημαντικά στην διάρκεια ζωής τους. Ένας MPC ρυθμιστής μπορεί να εξασφαλίσει ότι τα κελιά καυσίμου θα λειτουργούν συνεχώς, ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν ανωμαλίες σε αυτά ή αν κάποια από τα υπόλοιπα κελιά μιας συστοιχίας υπολειτουργούν. Αυτό αποδεικνύεται και από την σύγκριση ανάμεσα στον MPC-DMC ρυθμιστή και σε ένα ρυθμιστή χωρίς ανατροφοδότηση που γίνεται στο κεφάλαιο 7 (Διαγράμματα 7.6, 7.7). Επιπλέον ένας MPC ρυθμιστής μπορεί, με την κατάλληλη διαμόρφωση των συντελεστών βάρους, να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα μιας απότομης διακοπής της λειτουργίας των κελιών καυσίμου ή της έλλειψης οξυγόνου σε αυτά λόγω υπερβολικής απαίτησης για ενέργεια. Ακόμα, με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και η δυναμική καταπόνηση (dynamic stress) των μεμβρανών των κελιών καυσίμου λόγω της διαταραχής της πίεσης και της έλλειψης οξυγόνου.

8.4 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική εργασία και έρευνα:

- Το δυναμικό μοντέλο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος PEMFC. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο μοντέλο υστερεί ως προς την ύπαρξη ενός υπομοντέλου το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα αποκλειστικά στη συστοιχία, καθώς εκεί μόνο έχουν θεωρηθεί ισοθερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας $T = 80^{\circ}\text{C}$ (στα βοηθητικά συστήματα –συμπιεστής κλπ.- η προσέγγιση είναι μη ισοθερμοκρασιακή). Πιο συγκεκριμένα, στη συστοιχία θεωρείται ότι η σταθερή θερμοκρασία των 80°C εξασφαλίζεται με ένα άλλο, ανεξάρτητο σύστημα ρύθμισης
- Στο Κεφάλαιο 7 προτείνεται μια μεθοδολογία ρύθμισης τύπου MPC για το μοντέλο της συστοιχίας κελιών καυσίμου. Η δυναμική συμπεριφορά του ρυθμιστή που σχεδιάστηκε εξαρτάται σημαντικά από τους συντελεστές

βάρους που χρησιμοποιούνται. Αν και στην παρούσα εργασία μελετώνται δύο διαφορετικές περιπτώσεις, εντούτοις κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της επίδρασης που έχουν οι συντελεστές βάρους στην ρύθμιση κάθε μιας από τις δύο ρυθμιζόμενες μεταβλητές. Θεωρείται ότι είναι εφικτός ο προσδιορισμός τιμών των συντελεστών βάρους που θα βελτιώσουν ακόμη περισσότερο τη δυναμική απόκριση των δύο ρυθμιζόμενων μεταβλητών. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεθοδολογία βαθμονόμησης που θα εξασφαλίζει την εύρωστη ευστάθεια και απόδοση του συστήματος κλειστού βρόχου ακόμη και υπό την παρουσία αβεβαιότητας στο διαθέσιμο δυναμικό μοντέλο.

- Τέλος, προτείνεται σχεδιασμός ρυθμιστή MPC με χρήση πολλών διαφορετικών μοντέλων FIR (για τις διάφορες περιοχές λειτουργίας) έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης της μελλοντικής δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή κατά την οποία ο ρυθμιστής υπολογίζει τη ρυθμιστική του κίνηση.



9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλιογραφία

Alicia Arce, Alejandro J. del Real, Carlos Bordons, 2007, “Application of Constrained Predictive Control Strategies to a PEM Fuel Cell Benchmark”, Proceedings of the European Control Conference 2007

Arango, E., Ramos-Paja, C., Calvente, J., Giral, R., Romero, A., Martínez-Salamero, L., 2007, “Fuel cell power output using a LQR controlled AIDB converter”, 2007 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07

Berning, T., Lu, D.M., Djilali, N., 2002, “Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell “, Journal of Power Sources 106 (1-2), pp. 284-294

Broomhead, D.S., Lowe, D., 1988, “Multivariable functional interpolation and adaptive networks”, Complex Systems, 2, 321–355

Chen, S., Cowan, C. F. N., 1991, “Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Neural Networks”, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 2, No2

Federico Zenith, Sigurd Skogestad, 2006, “Control of fuel cell power output”, Journal of Process Control

Fu-Cheng Wang, Yee-Pien Yang, Chi-Wei Huang, Hsin-Ping Chang, Hsuan-Tsung Chen, 2007, “Robust Control Design of a Proton Exchange Membrane Fuel-Cell System”, Proceedings of the European Control Conference 2007

Garey, M.R, Johnson D.S., 1979, “Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness”, Freeman, San Francisco

Guidong, L., Wensheng, Y., Zhishou, T., 2006, “Power management for alleviation of the impact on PEM fuel cell due to load fluctuation”, Proceedings - ISDA 2006: Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications 1

Hoogers G., 2003, “ Fuel cell technology handbook”, CRC Press

Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Huei Peng, 2004, "Control of fuel cell power systems", Springer

Joshua Golbert, Daniel R. Lewin, 2004, "Model-based control of fuel cells: (1) Regulatory control", Journal of Power Sources 135

Joshua Golbert, Daniel R. Lewin, 2007, "Model-based control of fuel cells (2): Optimal efficiency", Journal of Power Sources 173

Junxiao Wu, Qingyun Liu, Hongbing Fang, 2005, " Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells", Journal of Power Sources 156

Larminie J., Andrew Dicks, 2003, "Fuel Cell Systems Explained-second edition", Wiley

Leonard, J.A., Kramer, M.A., 1991, "Radial Basis Function Networks for Classifying Process Faults, IEEE Control Systems", 11, 31-38

Li, Y., Wang, H., Dai, Z., 2007, "Using artificial neural network to control the temperature of fuel cell", 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS, Proceedings 3, art. no. 4064332, pp. 2159-2162

McCulloch, W. and Pitts, W., 1943, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics", 7:115 – 133

Methekar, R.N., Prasad, V., Gudi, R.D., 2007, "Dynamic analysis and linear control strategies for proton exchange membrane fuel cell using a distributed parameter model", Journal of Power Sources 165

Michael Buchholz, Gwendaelle Pecheur, Jens Niemeyer, Volker Krebs, 2007, "Fault Detection and Isolation for PEM Fuel Cell Stacks Using Fuzzy Clusters", Proceedings of the European Control Conference 2007

Mo Zhijun, Zhu Xinjian, Cao Guangyi, 2005, Design and Simulation of Fuzzy

Controller for PEMFCs”, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology

Moody, J., Darken, C. 1988, “Learning with localized receptive fields”. In: Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School (Touretzky, Hinton and Sejnowski (Eds.)), 133-143, Morgan- Kaufmann, San Mateo, CA

P. L. Zervas, A. Tatsis, H. Sarimveis, N. C. G. Markatos, 2008, “Development of a novel computational tool for optimizing the operation of fuel cells systems: Application for Phosphoric Acid Fuel Cells”, (in press)

P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, 2003, “Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle”, Control Engineering Practice 13

P.L Zervas, H. Sarimveis , J.A. Palyvos, N.C. Markatos, 2008, “Model-based Optimal Control of a Hybrid Power Generation System consisting of Photovoltaic Arrays and Fuel Cells”, Journal of Power sources, 181, pp. 327–338

P.L. Zervas, A. Tatsis, H. Sarimveis, M.K. Koukou, N.C. Markatos, 2007, “Progress in Fuel Cell Research”. Ed. Petr V. Alermo, Ch.3, “CFD Modeling and Optimization of Fuel-Cell Systems“, Nova Science Publishers

Panos Zervas, Maria Koukou, Nikolaos Orfanoudakis, Nikolaos-Chris Markatos, 2006 “Evaluating low temperature fuel cell performance for power generation: fluid dynamics study of PAFC systems at the cell level”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy, 220 (6), pp. 525-533

Poggio, T., Girosi, F., 1989, “Networks and the best approximation property”, MIT Artificial Intelligence Laboratory

Powell, M.J.D., 1987, “Radial Basis function approximation to polynomials”, Proc. 12th Biennial Numerical Analysis Conference, Dundee, pp.223-241

Qin J., Badgwell T., 2000, "An Overview of Nonlinear Model Predictive Control Applications", in: Allgöwer F., Zheng A. (Eds.), *Nonlinear Model Predictive Control*, Birkhäuser, Berlin, pp. 369-392

Qin J., Badgwell T., 2003, "A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology", *Control Engineering Practice*, vol. 11, pp. 733-764

Sarimveis H, Alexandridis A, Tsekouras G, Bafas G., 2002, "A Fast and Efficient Algorithm for Training Radial Basis Function Neural Networks Based on a Fuzzy Partition of the Input Space", *Industrial and Engineering Chemical Research* 41, 751-59

Thilo Bocklisch, Wo. Sc., St. Bo, 2008, "Predictive and optimizing energy management of photovoltaic fuel cell hybrid systems with short-time energy storage", CD-ROM Proceedings 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, Athens

Vahidi, A., Stefanopoulou, A., Peng, H., 2006, "Current management in a hybrid fuel cell power system: A model-predictive control approach", *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 14

Wang, R.-M., Zhang, Y.-Y., Cao, G.-Y., 2008, "Hybrid intelligent PID control design for PEMFC anode system", *Journal of Zhejiang University: Science A* 9 (4), pp. 552-557

Woo, C.H., Benziger, J.B., 2007, "PEM fuel cell current regulation by fuel feed control", *Chemical Engineering Science* 62 (4), pp. 957-968

Xiaouri Wang, Biao Huang, Tongwen Chen, 2006, "Data driven predictive control for solid oxide fuel cells", *Journal of Process Control* 17

Zhan Yuedong, Zhu Jianguo, Guo Youguang, Jin Jianxun, 2007, "Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Fuzzy Logic", *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference 2007*

Zhang, L., Pan, M., Quan, S., Chen, Q., Shi, Y., 2006, “Adaptive neural control based on PEMFC hybrid modeling”, Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) 2, art. no. 1713598, pp. 8319-8323

Αναστάσιος Τάτσης, 2006, Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο: “Διερεύνηση Παραμέτρων Λειτουργίας Κελιών Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC) με Χρήση Υπολογιστικού Ρευστοδυναμικού Μοντέλου Επίλυσης”, Δ.Π.Μ.Σ Υπολογιστική Μηχανική

Βατόπουλος Ιωάννης, 2007, Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο: “Διερεύνηση και Βελτιστοποίηση Λειτουργίας Κελιών Καυσίμου με Χρήση Υπολογιστικού Ρευστοδυναμικού Μοντέλου και Αλεβρικών Συσχετίσεων: Εφαρμογή σε Κελιά Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)”, Δ.Π.Μ.Σ Υπολογιστική Μηχανική

Μασαβέτας Αθ. Κ., 2001, “Εισαγωγή στη Χημική Θερμοδυναμική με Παραδείγματα, Ασκήσεις, Προβλήματα”

N. Κουλουμπή, 2002, “Ηλεκτροχημεία”, Εκδόσεις Συμεών

<<http://www.heliev.gr/>>

<<http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/848>>

<<http://www.fuelcell.gr/index2.html>>



10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου της συστοιχίας PEMFC, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

| Physical Law Applied to | Equation | Eq. No |
|--|--|--------|
| Conservation of Mass: Cathode/Oxygen | $\frac{dm_{O_2}}{dt} = W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rct}$ | (A1) |
| Conservation of Mass: Cathode/Nitrogen | $\frac{dm_{N_2}}{dt} = W_{N_2,in} - W_{N_2,out}$ | (A2) |
| Conservation of Mass: Cathode/Vapor | $\frac{dm_{v,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,gen} + W_{v,mbr}$ | (A3) |
| Conservation of Mass: Supply Manifold | $\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm}$ | (A4) |
| Conservation of Energy: Manifold Pressure | $\frac{dp_{sm}}{dt} = \gamma R (W_{cp} T_{cp} - W_{sm} T_{sm}) / (M_a^{atm} V_{sm})$ | (A5) |
| Conservation of Energy: Air Compressor | $J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = \frac{1}{\omega_{cp}} (P_{cm} - P_{cp})$ | (A6) |
| Conservation of Energy (Isothermal): Return Manifold Pressure | $\frac{dp_{rm}}{dt} = RT_{st} (W_{ca} - W_{rm}) / (M_a^{ca} V_{rm})$ | (A7) |
| Conservation of Mass: Hydrogen in the Anode | $\frac{dm_{H_2}}{dt} = W_{H_2,in} - W_{H_2,purge} - W_{H_2,rct}$ | (A8) |
| Conservation of Mass: Vapor in the Anode | $\frac{dm_{v,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,purge} - W_{v,mbr}$ | (A9) |
| Psychrometric Law: Vapor Pressure | $p_{v,ca} = \min [1, m_{w,ca} RT_{st} / (M_v V_{ca} p_{sat}^{st})] p_{sat}^{st}$ | (A10) |
| Dalton Law: Cathode Pressure | $p_{ca} = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}$ | (A11) |
| Ideal Gas Law: Oxygen Pressure | $p_{O_2} = \frac{RT_{st}}{M_{O_2} V_{ca}} m_{O_2}$ | (A12) |
| Ideal Gas Law: Nitrogen Pressures | $p_{N_2} = \frac{RT_{st}}{M_{N_2} V_{ca}} m_{N_2}$ | (A13) |
| Ideal Gas Law: Manifold Air Temperature | $T_{sm} = \frac{p_{sm} V_{sm} M_a^{atm}}{R m_{sm}}$ | (A14) |
| Dalton/Ideal Gas Laws: Anode | $p_{an} = \frac{RT_{st}}{M_{H_2} V_{an}} m_{H_2} + \min \left[1, \frac{RT_{st} m_{v,an}}{M_v V_{an} p_{sat}^{st}} \right] p_{sat}^{st}$ | (A15) |
| Sub-Critical Nozzle Eq.(linearized) Supply Manifold Outlet | $W_{sm} = k_{sm} (p_{sm} - p_{ca})$ | (A16) |
| Sub-Critical Nozzle Eq.: Return Manifold Flow | $W_{rm} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$ | |
| Critical Nozzle Eq. | $W_{rm} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$ | (A17) |
| Partial Oxygen Flow | $W_{O_2,in} = 0.21 \frac{M_{O_2}}{0.21M_{O_2} + 0.79M_{N_2}} \frac{1}{1+\Omega_{atm}} W_{sm}$ | (A18) |
| Partial Nitrogen Flow | $W_{N_2,in} = 0.79 \frac{M_{N_2}}{0.21M_{O_2} + 0.79M_{N_2}} \frac{1}{1+\Omega_{atm}} W_{sm}$ | (A19) |
| Partial Vapor Flow | $W_{v,ca,in} = \frac{\Omega_{ca,in}}{1+\Omega_{atm}} W_{sm}$ | (A20) |
| Atmospheric Humidity Ratio | $\Omega_{atm} = \frac{M_v}{M_a} \frac{\phi_{atm} p_{sat}^{atm} / p_{atm}}{1 - \phi_{atm} p_{sat}^{atm} / p_{atm}}$ | (A21) |
| Cathode Humidity Ratio | $\Omega_{ca,in} = \frac{M_v}{M_a} \frac{\phi_{ca,in} p_{sat}^{atm}}{p_{sm} (1 - \phi_{atm} p_{sat}^{atm} / p_{atm})}$ | (A22) |
| Oxygen Outflow | $W_{O_2,out} = \frac{m_{O_2}}{m_{ca}} W_{ca}$ | (A23) |
| Nitrogen Outflow | $W_{N_2,out} = \frac{m_{N_2}}{m_{ca}} W_{ca}$ | (A24) |
| Vapor Outflow | $W_{v,ca,out} = \frac{p_{v,ca} V_{ca} M_v}{RT_{st} m_{ca}} W_{ca}$ | (A25) |
| Reacted Oxygen | $W_{O_2,rct} = M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F}$ | (A26) |
| Reacted Hydrogen | $W_{H_2,rct} = M_{H_2} \frac{nI_{st}}{2F}$ | (A27) |
| Vapor Generated | $W_{v,gen} = M_v \frac{nI_{st}}{2F}$ | (A28) |
| Mass Transport: Vapor diffusion | $W_{v,membr} = M_v A_{fc} n \left(n_d \frac{i}{F} - D_w \frac{\phi_{ca} - \phi_{an}}{t_m} \right)$ | (A29) |
| Hydrogen flow | $W_{H_2,in} = \frac{1}{1+\Omega_{an,in}} W_{an,in}$ | (A30) |
| Anode Vapor flow | $W_{v,an,in} = \frac{\Omega_{an,in}}{1+\Omega_{an,in}} W_{an,in}$ | (A31) |
| Anode Humidity Ratio | $\Omega_{an,in} = \frac{M_v}{M_{H_2}} \frac{\phi_{an,in} p_{sat}^{an,in}}{p_{an,in}}$ | (A32) |
| Dead-ended anode | $W_{v,purge} = 0$ | (A33) |



11. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα μοντέλα παλμικής επιβολής (Πίνακας 11.1) και τα FIR μοντέλα (Πίνακας 11.2) που απαιτούνται για τον σχεδιασμό του MPC-DMC ρυθμιστή.

Πίνακας 11.1: Αποκρίσεις μοντέλων παλμικής επιβολής

| $I_{st}=\text{const}$ | | $U_{cm}=\text{const}$ | |
|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| P_{net} (W) | λ_{O2} | P_{net} (W) | λ_{O2} |
| 22376 | 2.0538 | 24338 | 1.9164 |
| 22651 | 2.2039 | 24315 | 1.9181 |
| 22849 | 2.2604 | 24296 | 1.9186 |
| 22996 | 2.2778 | 24280 | 1.9188 |
| 23105 | 2.2809 | 24267 | 1.9189 |
| 23187 | 2.2789 | 24257 | 1.919 |
| 23248 | 2.2758 | 24248 | 1.9191 |
| 23294 | 2.273 | 24241 | 1.9191 |
| 23328 | 2.2707 | 24236 | 1.9191 |
| 23355 | 2.2689 | 24231 | 1.9192 |
| 23374 | 2.2676 | 24228 | 1.9192 |
| 23389 | 2.2666 | 24224 | 1.9192 |
| 23401 | 2.2659 | 24222 | 1.9192 |
| 23409 | 2.2653 | 24220 | 1.9193 |
| 23416 | 2.2649 | 24218 | 1.9193 |
| 23421 | 2.2645 | 24217 | 1.9193 |
| 23424 | 2.2643 | 24216 | 1.9193 |
| 23427 | 2.2641 | 24215 | 1.9193 |
| 23429 | 2.2639 | 24214 | 1.9193 |
| 23431 | 2.2637 | 24214 | 1.9193 |

Πίνακας 11.2: Συντελεστές FIR μοντέλων

| I_{st} | | U_{cm} | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|
| P_{net} (W) | λ_{02} | P_{net} (W) | λ_{02} |
| -0.01672 | 0.00538 | 216.60000 | -87.90000 |
| 0.00034 | 0.01501 | -4.60000 | 27.50000 |
| 0.00010 | 0.00565 | -3.80000 | 19.80000 |
| 0.00004 | 0.00174 | -3.20000 | 14.70000 |
| 0.00002 | 0.00031 | -2.60000 | 10.90000 |
| 0.00002 | -0.00020 | -2.00000 | 8.20000 |
| 0.00002 | -0.00031 | -1.80000 | 6.10000 |
| 0.00000 | -0.00028 | -1.40000 | 4.60000 |
| 0.00000 | -0.00023 | -1.00000 | 3.40000 |
| 0.00002 | -0.00018 | -1.00000 | 2.70000 |
| 0.00000 | -0.00013 | -0.60000 | 1.90000 |
| 0.00000 | -0.00010 | -0.80000 | 1.50000 |
| 0.00000 | -0.00007 | -0.40000 | 1.20000 |
| 0.00002 | -0.00006 | -0.40000 | 0.80000 |
| 0.00000 | -0.00004 | -0.40000 | 0.70000 |
| 0.00000 | -0.00004 | -0.20000 | 0.50000 |
| 0.00000 | -0.00002 | -0.20000 | 0.30000 |
| 0.00000 | -0.00002 | -0.20000 | 0.30000 |
| 0.00000 | -0.00002 | -0.20000 | 0.20000 |
| 0.00000 | -0.00002 | 0.00000 | 0.20000 |