



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Μοντελοποίηση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου –  
Αντιστροφέα Τάσης και Ανάπτυξη Διεπαφής Χρήστη για  
τον Έλεγχο Πραγματικού Συστήματος σε ένα Ενεργειακά  
Αυτόνομο Κτήριο Υδρογόνου - ΑΠΕ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ**

**Επιβλέπων :** Κιαμάλ Πεκμεστζή  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μοντελοποίηση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου –  
Αντιστροφέα Τάσης και Ανάπτυξη Διεπαφής Χρήστη για  
τον Έλεγχο Πραγματικού Συστήματος σε ένα Ενεργειακά  
Αυτόνομο Κτήριο Υδρογόνου - ΑΠΕ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ**

**Επιβλέπων :** Κιαμάλ Πεκμεστζή  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2012.

.....  
Κιαμάλ Πεκμεστζή  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δημήτριος Σούντρης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Οικονομάκος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....

**ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2012 – All rights reserved

Copyright © Αλκιβιάδης Πασπαλιάρης 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη μοντελοποίηση συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που είναι εγκατεστημένο στο ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ-Η<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου, όπως επίσης και με την ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλου λογισμικού διεπαφής χρήστη το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας της κυψέλης καυσίμου είτε από κάποιον χειριστή του συστήματος είτε με αυτόματο τρόπο από το κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου του κτηρίου.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκαν τα απαιτούμενα μαθηματικά μοντέλα που έκαναν δυνατή τη μελέτη της συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου σε σταθερές και μεταβατικές συνθήκες καθώς και τη μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης στο περιβάλλον MATLAB/SIMULINK.

Επίσης, με στόχο τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας της κυψέλης αναπτύχθηκε το λογισμικό διεπαφής χρήστη το οποίο επικοινωνεί σειριακά με τον αντιστροφέα τάσης του συστήματος και παρέχει στο χρήστη ένα εύχρηστο και πλήρες γραφικό περιβάλλον για τον έλεγχο της λειτουργίας του. Επιπλέον, κατασκευάστηκε κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα που επιτρέπει την αυτόματη ενεργοποίηση της λειτουργίας του αντιστροφέα μέσω του λογισμικού. Η εύρυθμη λειτουργία του λογισμικού και του υλικού που αναπτύχθηκαν ελέγχθηκε με μια μεγάλη σειρά δοκιμών στην πράξη, καθώς και με την παρακολούθηση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης προς το κτήριο για μεγάλο χρονικό διάστημα.

### Λέξεις Κλειδιά:

κυψέλη καυσίμου, αντιστροφέας τάσης, μοντελοποίηση, SIMULINK, διεπαφή χρήστη, σειριακή επικοινωνία



## **Abstract**

The present diploma thesis involves the modeling of a fuel cell - DC/AC inverter system installed in the RES - H<sub>2</sub> building in the Technological and Cultural Park in Lavrion, as well as the development and application of the appropriate user interface software that enables the control of the fuel cell energy production either by an operator of the system either in an automatic way by the energy management and control system of the building.

In this frame, the necessary mathematical models were developed that enabled the study of the fuel cell output behavior both in steady-state and dynamic conditions, as well as the modeling of the whole fuel cell - DC/AC inverter system in the MATLAB/SIMULINK environment.

Moreover, the control of the fuel cell energy production was achieved through the development of the user interface software. The software communicates serially with the DC/AC inverter and provides an easy-to-use and complete graphical environment for the control of its operation. Additionally, an appropriate electronic circuit was designed that enables the automated activation of the inverter operation by the interface software. The software and hardware developed for the control of the fuel cell - inverter system were tested for a satisfactory time period in real operating conditions.

### **Keywords:**

fuel cell, voltage source inverter, modeling, SIMULINK, user interface, serial communication

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Πεκμεστζή για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική εργασία, μέσα από την οποία είχα την ευκαιρία να ασχοληθώ με πολύ ενδιαφέροντα και πρακτικά ζητήματα, καθώς επίσης για την εποπτεία και τη βοήθειά του. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους ερευνητές Λάμπρο Καραλή και Πανώριο Μπενάρδο για την πολύ εποικοδομητική και φιλική συνεργασία που είχαμε και για τη γενικότερη βοήθειά τους κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερω την οικογένειά μου και τους φίλους μου οι οποίοι βίωσαν υπομονετικά με τον δικό τους τρόπο την πίεση που απαιτούσε η ολοκλήρωσή της.

## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Σημάτων .....	iv
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Κατάλογος Εικόνων.....	xv
<b>1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....</b>	<b>27</b>
<b>2 Ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ – H<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου.....</b>	<b>31</b>
2.1 Γενικά - Ερευνητικό πρόγραμμα H <sub>2</sub> -SusBuild .....	32
2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κτηρίου Εφαρμογής του Συστήματος ΑΠΕ - H <sub>2</sub> .....	33
2.3 Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ - H <sub>2</sub> .....	34
2.4 Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (EMCS).....	37
<b>3 Κυψέλες Καυσίμου .....</b>	<b>41</b>
3.1 Γενικά περί κυψελών καυσίμου .....	42
3.1.1 Εισαγωγή.....	42
3.1.2 Ιστορική αναδρομή .....	44
3.1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας κυψέλης υδρογόνου.....	48
3.1.4 Είδη κυψελών καυσίμου .....	50
3.2 Κυψέλη Καυσίμου PEM.....	58
3.2.1 Εισαγωγή.....	58
3.2.2 Αρχές λειτουργίας.....	59
3.2.3 Δομή.....	61
3.2.4 Περιφερειακά συστήματα κυψέλης καυσίμου PEM.....	65
3.3 Θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας της κυψέλης.....	68
3.3.1 Εισαγωγή.....	68
3.3.2 Σχηματισμός του νερού.....	69
3.3.3 Εύρεση αντιστρεπτού δυναμικού κελιού καυσίμου .....	71
3.3.4 Απόδοση κελιού καυσίμου.....	73
3.4 Απώλειες τάσης .....	75
3.4.1 Γενικά.....	75
3.4.2 Απώλειες ενεργοποίησης .....	78
3.4.3 Ωμικές απώλειες.....	81
3.4.4 Απώλειες συγκέντρωσης ή μεταφοράς μάζας.....	83
3.4.5 Εσωτερικά ρεύματα και διάχυση καυσίμου .....	85

3.4.6	Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας.....	87
3.4.7	Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου.....	88
<b>4</b>	<b>Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος.....</b>	<b>91</b>
4.1	Μετατροπέας συνεχούς τάσης.....	92
4.1.1	Μετατροπέας ανύψωσης.....	92
4.1.2	Ανάλυση λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης με συνεχή αγωγή ρεύματος πηνίου.....	96
4.1.3	Έλεγχος μετατροπέων - Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM).....	102
4.2	Αντιστροφέας τάσης.....	104
4.2.1	Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.....	104
4.2.2	Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία Γέφυρας.....	106
4.2.3	Ανάλυση Fourier τάσης εξόδου.....	110
4.2.4	Έλεγχος τάσης εξόδου – Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM).....	112
4.2.5	Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM).....	113
4.2.6	Συντελεστής Ολικής Παραμόρφωσης (THD%).....	124
4.2.7	Σχεδιασμός φίλτρου εξόδου αντιστροφέα.....	125
<b>5</b>	<b>Τεχνική περιγραφή της κυψέλης καυσίμου Mira 6 και του αντιστροφέα τάσης DHF-1AC-5000W.....</b>	<b>127</b>
5.1	Κυψέλη καυσίμου Exergy Mira 6.....	127
5.2	Αντιστροφέας τάσης Delta DHF-1AC-5000W.....	131
<b>6</b>	<b>Μοντελοποίηση συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης στο περιβάλλον Matlab - Simulink.....</b>	<b>135</b>
6.1	Μοντελοποίηση τάσης εξόδου κυψέλης καυσίμου με χρήση του περιβάλλοντος Matlab.....	137
6.2	Μοντελοποίηση μεταβατικής συμπεριφοράς τάσης εξόδου κελιού καυσίμου με χρήση Simulink.....	150
6.3	Μοντελοποίηση DC/DC Μετατροπέα Τάσης.....	155
6.4	Μοντελοποίηση DC/AC Αντιστροφέα Τάσης.....	164
<b>7</b>	<b>Δημιουργία διεπαφής χρήστη για τον έλεγχο λειτουργίας του πραγματικού συστήματος.....</b>	<b>181</b>
7.1	Περιγραφή λογισμικού διεπαφής χρήστη.....	182
7.1.1	Περιβάλλον ανάπτυξης του λογισμικού.....	182
7.1.2	Άνοιγμα επικοινωνίας με τον αντιστροφέα.....	184
7.1.3	Προδιαγραφές επικοινωνίας.....	186
7.1.4	Ξεμάγνηση στο περιβάλλον της διεπαφής χρήστη.....	190
7.2	Κύκλωμα ενεργοποίησης αντιστροφέα.....	214
7.2.1	Γενική λειτουργία.....	214

7.2.2	Κύκλωμα ενεργοποίησης με είσοδο τάση 15 V .....	215
7.2.3	Κύκλωμα ενεργοποίησης με είσοδο τάση 5 V .....	221
7.3	Έλεγχος σωστής λειτουργίας διεπαφής .....	224
<b>8</b>	<b>Αποτελέσματα εφαρμογής του συνολικού συστήματος σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του κτηρίου.....</b>	<b>227</b>
8.1	Αποτελέσματα αυτόματης λειτουργίας του συστήματος.....	228
8.2	Δοκιμές με χειροκίνητη λειτουργία .....	232
<b>9</b>	<b>Σύνοψη και συμπεράσματα.....</b>	<b>241</b>
	<b>Παράρτημα : Σειριακή επικοινωνία RS-232 και RS-485.....</b>	<b>243</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>255</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.1.</b> Σχηματικό διάγραμμα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης ενέργειας και υδρογόνου του συστήματος ΑΠΕ- H <sub>2</sub> .....	32
<b>Σχήμα 2.2.</b> Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης του EMCS.....	38
<b>Σχήμα 2.3.</b> Αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου του EMCS.....	38
<b>Σχήμα 2.4.</b> Απλουστευμένο σχηματικό διάγραμμα παρακολούθησης και ελέγχου στο σύστημα παραγωγής υδρογόνου και κατανάλωσής του για την παραγωγή ενέργειας.....	39
<b>Σχήμα 2.5.</b> Βασική αρχή του ελέγχου της προσφοράς ενέργειας στο σύστημα από την κυψέλη καυσίμου και λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης.....	40
<b>Σχήμα 3.1.</b> Η “μπαταρία αερίων” που κατασκευάστηκε από τον Grove (1842).....	44
<b>Σχήμα 3.2.</b> Ιστορική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου.....	47
<b>Σχήμα 3.3.</b> Η βασική αρχή λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου με ροή πρωτονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη.....	48
<b>Σχήμα 3.4.</b> Εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα υλικών και ενέργειας σε μια κυψέλη καυσίμου PEM.....	50
<b>Σχήμα 3.5.</b> Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου PEMFC.....	52
<b>Σχήμα 3.6.</b> Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου SOFC.....	53
<b>Σχήμα 3.7.</b> Αντιδράσεις ηλεκτροδίων και ροή φορτίου σε κελί καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη AFC.....	54
<b>Σχήμα 3.8.</b> Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου MCFC.....	56
<b>Σχήμα 3.9.</b> Συνοπτική παρουσίαση των εφαρμογών και των κύριων πλεονεκτημάτων των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.....	57



<b>Σχήμα 3.10.</b> Τυπική δομή και λειτουργία κελιού καυσίμου PEM. ....	60
<b>Σχήμα 3.11.</b> Στήλη κυψέλης καυσίμου αποτελούμενη από κελιά καυσίμου και διπολικές πλάκες. ....	61
<b>Σχήμα 3.12.</b> Παράδειγμα διάταξης σωματιδίων καταλύτη – στρώματος διάχυσης αερίων – μεμβράνης.....	63
<b>Σχήμα 3.13.</b> Δυο διπολικές πλάκες απλά σχεδιασμένες με ευθείες οριζόντιες και κάθετες αυλακώσεις στην κάθε πλευρά αντίστοιχα. ....	64
<b>Σχήμα 3.14.</b> Διασύνδεση κελιών καυσίμου μέσω διπολικών πλακών. ....	65
<b>Σχήμα 3.15.</b> Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEM. ....	65
<b>Σχήμα 3.16.</b> Αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες σε συνθήκες πρότυπης πίεσης. ....	73
<b>Σχήμα 3.17.</b> Θεωρητική απόδοση κελιού καυσίμου υδρογόνου σε πρότυπη πίεση για διαφορετικές θερμοκρασίες βασισμένη στην τιμή HHV. ....	74
<b>Σχήμα 3.18.</b> Παράδειγμα καμπύλης πόλωσης κελιού καυσίμου με τις αντίστοιχες περιοχές απωλειών τάσης. ....	77
<b>Σχήμα 3.19.</b> Γραφικές παραστάσεις της τάσης κελιού καυσίμου συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος, θεωρώντας ότι οι απώλειες οφείλονται μόνο λόγω υπέρτασης ενεργοποίησης σε ένα ηλεκτρόδιο, για διαφορετικές τιμές $j_0$ (0.01, 1.0 και 100 mA/cm <sup>2</sup> ). ....	80
<b>Σχήμα 3.20.</b> Η γραφική παράσταση που προκύπτει από την εξίσωση (3-37) για $E = 1.2$ V, $A = 0.06$ V, $i_0 = 0.04$ mA/cm <sup>2</sup> και $i_{loss} = 3$ mA/cm <sup>2</sup> . Απεικονίζει την τάση εξόδου θεωρώντας μόνο τις απώλειες ενεργοποίησης και εσωτερικών ρευμάτων - διάχυσης καυσίμου. ....	86
<b>Σχήμα 3.21.</b> Το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας στην επιφάνεια της καθόδου. ....	87
<b>Σχήμα 3.22.</b> Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου PEM. ....	88
<b>Σχήμα 3.23.</b> Παράδειγμα απόκρισης τάσης εξόδου κελιού κυψέλης καυσίμου σε μεταβολές του ρεύματος με βάση το παραπάνω μοντέλο, όπου φαίνεται η επίδραση του φαινομένου ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας για διάφορες τιμές της χωρητικότητας C. ....	89
<b>Σχήμα 4.1.</b> Σχηματικό διάγραμμα των μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται για τη διασύνδεση μιας κυψέλης καυσίμου με το ηλεκτρικό δίκτυο. ....	91

<b>Σχήμα 4.2.</b> Κύκλωμα λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης PWM.....	92
<b>Σχήμα 4.3.</b> Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης όταν ο διακόπτης S άγει ενώ η δίοδος D δεν άγει.....	93
<b>Σχήμα 4.4.</b> Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης όταν ο διακόπτης S δεν άγει ενώ η δίοδος D άγει.....	93
<b>Σχήμα 4.5.</b> Ιδανικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου και διόδου του μετατροπέα ανύψωσης σε λειτουργία CCM.....	95
<b>Σχήμα 4.6.</b> Κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου στο όριο μεταξύ των λειτουργιών CCM και DCM. ....	99
<b>Σχήμα 4.7.</b> Κανονικοποιημένη τιμή του ρεύματος φορτίου στο όριο μεταξύ CCM και DCM συναρτήσει της σχετικής διάρκειας αγωγής D. ....	100
<b>Σχήμα 4.8.</b> Διαμόρφωση PWM μετατροπέα ανύψωσης.....	103
<b>Σχήμα 4.9.</b> Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας. ....	104
<b>Σχήμα 4.10.</b> Παλμοί έναυσης των διακοπών $T_+$ , $T_-$ και τάση εξόδου του αντιστροφέα με ωμικό φορτίο.....	105
<b>Σχήμα 4.11.</b> Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας.....	106
<b>Σχήμα 4.12.</b> Παλμοί έναυσης των διακοπών $T_{A+}$ , $T_{A-}$ , $T_{B+}$ και $T_{B-}$ και προκύπτουσα τάση εξόδου κατά τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου (ωμικό φορτίο).....	107
<b>Σχήμα 4.13.</b> Παλμοί έναυσης των διακοπών $T_{A+}$ , $T_{A-}$ , $T_{B+}$ και $T_{B-}$ και προκύπτουσα τάση εξόδου κατά τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου (ωμικό φορτίο).....	108
<b>Σχήμα 4.14.</b> Τάση εξόδου αντιστροφέα αποτελούμενη από έναν θετικό και έναν αρνητικό παλμό τάσης εύρους $\delta$ . ....	111
<b>Σχήμα 4.15.</b> Διαμόρφωση SPWM σε αντιστροφέα ημιγέφυρας. ....	115
<b>Σχήμα 4.16.</b> Κανονικοποιημένη τιμή του πλάτους της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου συναρτήσει του συντελεστή $ma$ . ....	118
<b>Σχήμα 4.17.</b> Διαμόρφωση SPWM σε αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου. ....	119

<b>Σχήμα 4.18.</b> Διαμόρφωση SPWM αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου.....	123
<b>Σχήμα 4.19.</b> Παρεμβολή χαμηλοπερατού φίλτρου LC μεταξύ τάσης εξόδου αντιστροφέα $V_{inv}$ και τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο $V_L$ .....	125
<b>Σχήμα 6.1.</b> Σύστημα κυψέλης καυσίμου Mira 6 – αντιστροφέα DHF-1AC-5000W για την παροχή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	136
<b>Σχήμα 6.2.</b> Μοντέλο Simulink της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου.....	138
<b>Σχήμα 6.3.</b> Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του κάθε κελιού.....	140
<b>Σχήμα 6.4.</b> Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης.....	141
<b>Σχήμα 6.5.</b> Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω ωμικών απωλειών.....	142
<b>Σχήμα 6.6.</b> Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης.....	143
<b>Σχήμα 6.7.</b> Εκτιμώμενη καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου Mira 6, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.4.....	146
<b>Σχήμα 6.8.</b> Εκτιμώμενη καμπύλη της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει του ρεύματος, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.4. ...	146
<b>Σχήμα 6.9.</b> Σύγκριση εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών τάσης της κυψέλης με τις πραγματικές τιμές της καμπύλης πόλωσης.....	147
<b>Σχήμα 6.10.</b> Σύγκριση εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών ισχύος της κυψέλης με τις υπολογιζόμενες τιμές από την καμπύλη πόλωσης.....	147
<b>Σχήμα 6.11.</b> Παράδειγμα εκτέλεσης του κώδικα Matlab για την εύρεση της τάσης εξόδου για $I = 50$ A. Όπως φαίνεται, η τάση προκύπτει $V_{stack} = 54.7172$ V.....	148
<b>Σχήμα 6.12.</b> Παράδειγμα εύρεσης σημείου λειτουργίας κυψέλης για $R = 2$ Ohm.....	149
<b>Σχήμα 6.13.</b> Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου.....	150
<b>Σχήμα 6.14.</b> Μοντέλο Simulink υπολογισμού της τάσης στα άκρα του πυκνωτή $V_C$ μέσω της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης (6-15).....	151

<b>Σχήμα 6.15.</b> Μοντέλο Simulink υπολογισμού της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου $V_{Stack}$ συναρτήσει του ρεύματος $I_{fc}$ , με χρήση του μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος. ....	151
<b>Σχήμα 6.16.</b> Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου υπό μεταβαλλόμενο φορτίο. ....	152
<b>Σχήμα 6.17.</b> Γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραδείγματος του Σχήματος 6.16. ....	153
<b>Σχήμα 6.18.</b> Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης στο περιβάλλον Simulink. ....	155
<b>Σχήμα 6.19.</b> Μοντελοποίηση στο περιβάλλον Simulink ελεγκτή PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης και τη σταθεροποίησή της στα 400 V. ....	156
<b>Σχήμα 6.20.</b> Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος μετατροπέα ανύψωσης – κυψέλης καυσίμου υπό φορτίο R. ....	159
<b>Σχήμα 6.21.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο $t = 2$ sec υπό αντίσταση φορτίου $R = 100 \Omega$ (κίτρινο) και $R = 40 \Omega$ (μωβ). ....	160
<b>Σχήμα 6.22.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο $t = 2$ sec υπό αντίσταση φορτίου $R = 100 \Omega$ (κίτρινο) και $R = 40 \Omega$ (μωβ), γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του συστήματος $V_{out}$ συναρτήσει του χρόνου. ....	161
<b>Σχήμα 6.23.</b> Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος μετατροπέα ανύψωσης – κυψέλης καυσίμου υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου. ....	161
<b>Σχήμα 6.24.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο $t = 6$ sec υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου $R1 = 100 \Omega$ , $R12 = 50 \Omega$ και $R123 = 40 \Omega$ . ....	162
<b>Σχήμα 6.25.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο $t = 6$ sec υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου $R1 = 100 \Omega$ , $R12 = 50 \Omega$ και $R123 = 40 \Omega$ , γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του συστήματος $V_{out}$ συναρτήσει του χρόνου. ....	163
<b>Σχήμα 6.26.</b> Μοντέλο Simulink που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του DC/AC αντιστροφέα τάσης. ....	164

<b>Σχήμα 6.27.</b> Μοντέλο Simulink που περιλαμβάνεται στο υποσύστημα του δομικού στοιχείου <i>PWM_Reference_Signal</i> για τον έλεγχο του συντελεστή <i>ma</i> και την παραγωγή της .....	166
<b>Σχήμα 6.28.</b> Μοντελοποίηση της λειτουργίας του αντιστροφέα τάσης στην ιδανική περίπτωση λειτουργίας υπό σταθερή τάση εισόδου $V_d = 400$ V.....	167
<b>Σχήμα 6.29.</b> (α) Γραφική παράσταση της τάσης που παράγει ο αντιστροφέας πριν την εφαρμογή του φίλτρου και (β) υπολογιζόμενο φάσμα με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.....	170
<b>Σχήμα 6.30.</b> (α) Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου μετά την εφαρμογή του φίλτρου και (β) υπολογιζόμενο φάσμα με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.....	171
<b>Σχήμα 6.31.</b> Συνολικό μοντέλο Simulink για την προσομοίωση του συστήματος κυψέλης καυσίμου – DC/DC μετατροπέα τάσης – DC/AC αντιστροφέα τάσης.....	173
<b>Σχήμα 6.32.</b> Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος $I_{load}$ και της τάσης $V_{load}$ της κατανάλωσης $R_L$ , όπου $R_L = 20$ Ω. ....	174
<b>Σχήμα 6.33.</b> Υπολογιζόμενο φάσμα της τάσης εξόδου του συστήματος με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.....	174
<b>Σχήμα 6.34.</b> Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής $V_{rms}$ της τάσης εξόδου του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα – αντιστροφέα. ....	175
<b>Σχήμα 6.35.</b> Γραφική παράσταση της μεταβολής της ισχύος εξόδου $P_{out}$ του συστήματος κυψέλης – μετατροπέα - αντιστροφέα με την οποία τροφοδοτείται η κατανάλωση $R_L$ .....	175
<b>Σχήμα 6.36.</b> Γραφικές παραστάσεις ηλεκτρικών μεγεθών της κυψέλης καυσίμου. ....	176
<b>Σχήμα 6.37.</b> Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος $I_{load}$ και της τάσης $V_{load}$ της κατανάλωσης $R_L$ για φορτίο $R_L = 50$ Ω. ....	178
<b>Σχήμα 6.38.</b> Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής $V_{rms}$ της τάσης εξόδου για φορτίο $R_L = 50$ Ω. ....	178
<b>Σχήμα 6.39.</b> Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος $I_{load}$ και της τάσης $V_{load}$ της κατανάλωσης $R_L$ για φορτίο $R_L = 10$ Ω. ....	179
<b>Σχήμα 6.40.</b> Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής $V_{rms}$ της τάσης εξόδου για φορτίο $R_L = 10$ Ω. ....	179

<b>Σχήμα 7.1.</b>	Επιμέρους πεδία που συνθέτουν τον πίνακα bytes κάθε μηνύματος που ανταλλάσσεται μεταξύ του αντιστροφέα και του τερματικού. ....	187
<b>Σχήμα 7.2.</b>	Λειτουργία λογισμικού διεπαφής χρήστη για τον έλεγχο του συστήματος κυνέλης καυσίμου - αντιστροφέα με αυτόματο τρόπο. ....	190
<b>Σχήμα 7.3.</b>	Δυνατότητες χρήστη που προσφέρονται στο γραφικό περιβάλλον της διεπαφής. ....	193
<b>Σχήμα 7.4.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού START. ....	206
<b>Σχήμα 7.5.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού STOP. ....	206
<b>Σχήμα 7.6.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού SET. ....	207
<b>Σχήμα 7.7.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού FW Version. ....	207
<b>Σχήμα 7.8.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού Reset Counter. ....	208
<b>Σχήμα 7.9.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού SEND. ....	208
<b>Σχήμα 7.10.</b>	Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Main Transfer/Receive. ....	209
<b>Σχήμα 7.11.</b>	Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Software Version Request. ....	209
<b>Σχήμα 7.12.</b>	Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Reset Inverter Counter. ....	210
<b>Σχήμα 7.13.</b>	Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Debug Data. ....	210
<b>Σχήμα 7.14.</b>	Διάγραμμα ροής υπορουτίνας καταγραφής γεγονότος στο txt αρχείο. ....	211
<b>Σχήμα 7.15.</b>	Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού Get All Data. ....	211
<b>Σχήμα 7.16.</b>	Διάγραμμα ροής της υπορουτίνας Get Debug Information η οποία εκτελείται σε κάθε χτύπο του χρονοδιακόπτη επικοινωνίας αν έχει πατηθεί προηγουμένως το κουμπί Get All Data. ....	212
<b>Σχήμα 7.17.</b>	Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του χρονοδιακόπτη επικοινωνίας η οποία εκτελείται επαναλαμβανόμενα κάθε 10 δευτερόλεπτα (εκτός αν έχει πατηθεί το κουμπί Get All Data οπότε εκτελείται κάθε 2 δευτερόλεπτα). ....	213
<b>Σχήμα 7.18.</b>	Διάγραμμα ροής υπορουτίνας σύνδεσης με τη βάση δεδομένων του EMCS. ....	213
<b>Σχήμα 7.19.</b>	Γενική λειτουργία κυκλώματος ενεργοποίησης αντιστροφέα με είσοδο τροφοδοσίας 15V. ....	215
<b>Σχήμα 7.20.</b>	Αναπαράσταση εσωτερικής δομής συγκριτή τάσης LM339. ....	216

<b>Σχήμα 7.21.</b> Συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την κατασκευή του κυκλώματος ενεργοποίησης εισόδου τροφοδοσίας 15V.....	217
<b>Σχήμα 7.22.</b> Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 15V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι +12V.....	219
<b>Σχήμα 7.23.</b> Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 15V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι -12V.....	219
<b>Σχήμα 7.24.</b> Συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την κατασκευή του κυκλώματος ενεργοποίησης εισόδου τροφοδοσίας 5V.....	221
<b>Σχήμα 7.25.</b> Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 5V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι +12V.....	223
<b>Σχήμα 7.26.</b> Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 5V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι -12V.....	223
<b>Σχήμα 8.1.</b> Κατανάλωση ισχύος στο χώρο του παταριού.....	228
<b>Σχήμα 8.2.</b> Παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ με την οποία τροφοδοτείται ο χώρος του παταριού.....	229
<b>Σχήμα 8.3.</b> Σύγκριση παραγωγής με κατανάλωση ενέργειας στο χώρο του παταριού. ....	230
<b>Σχήμα 8.4.</b> Απαιτούμενη ενέργεια και αντίστοιχες τιμές σημείου ρύθμισης που υπολογίστηκαν και δόθηκαν στον αντιστροφέα τάσης.....	231
<b>Σχήμα 8.5.</b> Παραγωγή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου σε σχέση με τις απαιτήσεις ενέργειας που δεν μπορούν να καλυφθούν από τις ΑΠΕ.....	231
<b>Σχήμα 8.6.</b> Παραγωγή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων χειροκίνητης λειτουργίας.....	232
<b>Σχήμα 8.7.</b> Σύγκριση τάσης εξόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.....	238
<b>Σχήμα 8.8.</b> Σύγκριση ισχύος εξόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.....	238
<b>Σχήμα 8.9.</b> Σύγκριση ισχύος εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.....	238

<b>Σχήμα 8.10.</b> Σύγκριση τάσης εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.....	239
<b>Σχήμα 8.11.</b> Σύγκριση ρεύματος εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή του από το μοντέλο Simulink....	239
<b>Σχήμα Π-1.</b> Παράδειγμα RS-232 σύνδεσης μεταξύ ενός προσωπικού υπολογιστή και ενός modem.....	244
<b>Σχήμα Π-2.</b> Ηλεκτρικές προδιαγραφές προτύπου TIA/EIA-232-F.....	246
<b>Σχήμα Π-3.</b> DB9 υποδοχή, αρσενική (αριστερά) και θηλυκιά (δεξιά).....	247
<b>Σχήμα Π-4.</b> Επίπεδα τάσης των σημάτων επικοινωνίας στο πρότυπο RS-485.....	251
<b>Σχήμα Π-5.</b> Επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση που το ζεύγος γραμμών δεν είναι συνεστραμμένο και στην περίπτωση που είναι.....	252
<b>Σχήμα Π-6.</b> Τοπολογία δικτύου για τη διασύνδεση πολλαπλών κόμβων μέσω προτύπου RS-485.....	252



# Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1.</b> Συγκριτική αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στους κυριότερους τύπους κυψελών καυσίμου.....	56
<b>Πίνακας 3.2.</b> Συγκριτική παρουσίαση των σημαντικότερων λειτουργικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.....	57
<b>Πίνακας 3.3.</b> Πεδία εφαρμογών των κυψελών καυσίμου PEM με βάση την παραγόμενη ισχύ.....	59
<b>Πίνακας 3.4.</b> Τιμές $\Delta H$ , $\Delta S$ και $\Delta G$ της αντίδρασης σχηματισμού νερού σε υγρή φάση για διάφορες θερμοκρασίες.....	69
<b>Πίνακας 4.1.</b> Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα ημιγέφυρας.....	106
<b>Πίνακας 4.2.</b> Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου.....	107
<b>Πίνακας 4.3.</b> Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου.....	109
<b>Πίνακας 4.4.</b> Γενικευμένες αρμονικές της τάσης εξόδου αντιστροφέα ημιγέφυρας για διάφορες τιμές του συντελεστή $ma$ και σχετικά μεγάλο συντελεστή $mf$ . Τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς την τάση εισόδου, δηλαδή παρουσιάζονται οι τιμές $V_o, h / 12Vd$ .....	117
<b>Πίνακας 4.5.</b> Γενικευμένες αρμονικές της τάσης εξόδου αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για διάφορες τιμές του συντελεστή $ma$ και σχετικά μεγάλο $mf$ . Τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς την τάση εισόδου, δηλαδή παρουσιάζονται οι τιμές $V_o, h / Vd$ .....	121
<b>Πίνακας 5.1.</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου Mira 6.....	129
<b>Πίνακας 5.2.</b> Μετρήσεις τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας οι οποίες δόθηκαν από τον κατασκευαστή.....	130

<b>Πίνακας 5.3.</b> Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά DC εισόδου αντιστροφέα DHF-1AC-5000W. ...	132
<b>Πίνακας 5.4.</b> Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά AC εισόδου αντιστροφέα DHF-1AC-5000W. ...	132
<b>Πίνακας 6.1.</b> Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των απωλειών ενεργοποίησης .....	141
<b>Πίνακας 6.2.</b> Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των ωμικών απωλειών .....	142
<b>Πίνακας 6.3.</b> Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των απωλειών συγκέντρωσης. ....	143
<b>Πίνακας 6.4.</b> Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών, σταθερών και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του συνολικού μαθηματικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου.....	145
<b>Πίνακας 6.5.</b> Ηλεκτρικά μεγέθη λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης για διάφορα σημεία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, υπό την παραδοχή μηδενικών απωλειών ισχύος και ιδανικής συμπεριφοράς των στοιχείων.....	158
<b>Πίνακας 6.6.</b> Τιμές παραμέτρων της διάταξης του μετατροπέα ανύψωσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του συστήματος. ....	159
<b>Πίνακας 6.7.</b> Συχνότητες και πλάτη των κύριων αρμονικών που εμφανίζονται στην τάση εξόδου, όπως υπολογίζονται για $ma = 0.8$ , $mf = 18$ και $fr = 50 \text{ Hz}$ . ....	168
<b>Πίνακας 7.1.</b> Τιμές παραμέτρων επικοινωνίας για τη σειριακή μετάδοση δεδομένων μεταξύ της διεπαφής χρήστη και του αντιστροφέα. ....	186
<b>Πίνακας 7.2.</b> Πληροφορίες που λαμβάνονται από την απάντηση του αντιστροφέα (πίνακας bytes) μετά από την αποστολή εντολής <i>Main Transfer/Receive</i> . ....	197
<b>Πίνακας 7.3.</b> Κατηγορίες μηνυμάτων που εμφανίζει το αρχείο καταγραφών σε κάθε μία από τις περιπτώσεις χαμηλού, μεσαίου και υψηλού επίπεδου καταγραφής.....	205
<b>Πίνακας 8.1.</b> Ηλεκτρικά μεγέθη εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα τάσης που λαμβάνονται από τους εσωτερικούς μετρητές του για κάθε στάδιο αύξησης της τιμής του σημείου ρύθμισης. ....	236
<b>Πίνακας 8.2.</b> Ηλεκτρικά μεγέθη εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα τάσης που προβλέπονται από το μοντέλο Simulink για διαφορετικές τιμές φορτίου. ....	237

# Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 2.1.</b>	Πανοραμική εικόνα του χώρου εφαρμογής του ερευνητικού προγράμματος H <sub>2</sub> SusBuild στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. ....	31
<b>Εικόνα 2.2.</b>	Τρισδιάστατη όψη του εσωτερικού του κτηρίου εφαρμογής του συστήματος ΑΠΕ - H <sub>2</sub> . ....	34
<b>Εικόνα 2.3.</b>	Εξωτερική όψη του κτηρίου εφαρμογής του συστήματος ΑΠΕ - H <sub>2</sub> . ....	34
<b>Εικόνα 2.4.</b>	Συσκευή ηλεκτρόλυσης EggeDue G6AP για την παραγωγή υδρογόνου και σύστημα απόθηκευσης και διανομής του. ....	35
<b>Εικόνα 2.5.</b>	Κυψέλη καυσίμου Mira 6 και αντιστροφέας τάσης DELTA DHF-1AC-5000W. ....	36
<b>Εικόνα 3.1.</b>	Παραδείγματα εφαρμογών κυψελών καυσίμου. ....	43
<b>Εικόνα 3.2.</b>	Ο Bacon με την 6-kW κυψέλη καυσίμου, παρουσιασμένη το 1959. ....	45
<b>Εικόνα 3.3.</b>	Συναρμολόγηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου του Apollo. ....	46
<b>Εικόνα 5.1.</b>	Κυψέλη καυσίμου MIRA 6 της εταιρείας Morphic Exergy. ....	128
<b>Εικόνα 5.2.</b>	Αντιστροφέας DHF-1AC-5000W της εταιρείας Delta Energy Systems. ....	131
<b>Εικόνα 7.1.</b>	Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio 2010. ....	184
<b>Εικόνα 7.2.</b>	Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη <i>Inverter Control Hall</i> , κεντρική καρτέλα <i>Communication</i> . ....	191
<b>Εικόνα 7.3.</b>	Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη <i>Inverter Control Hall</i> , καρτέλα <i>Options</i> . ....	191
<b>Εικόνα 7.4.</b>	Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη <i>Inverter Control Hall</i> , καρτέλα <i>Debug</i> . ....	192

<b>Εικόνα 7.5.</b>	Πεδίο <i>Establish Communication</i> , όπου παρέχεται η δυνατότητα έναρξης και λήξης της επικοινωνίας με τον αντιστροφέα.....	194
<b>Εικόνα 7.6.</b>	Πεδία <i>COM Settings</i> και <i>Enable Signal</i> , όπου ο χρήστης προσδιορίζει τις τιμές των παραμέτρων της σειριακής επικοινωνίας. ....	195
<b>Εικόνα 7.7.</b>	Πεδίο <i>Set DC Input Current</i> , όπου παρέχεται η δυνατότητα χειροκίνητης αποστολής στον αντιστροφέα της επιθυμητής τιμής του DC ρεύματος εισόδου (Setpoint) καθώς και της επιθυμητής Reset/Debug Flag. ....	196
<b>Εικόνα 7.8.</b>	Παραγωγή ρεύματος 20 A από την κυψέλη καυσίμου με τη βοήθεια του πεδίου Set DC Input Current. Το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του συστήματος. ....	198
<b>Εικόνα 7.9.</b>	Εμφάνιση σφάλματος κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η ετικέτα σφαλμάτων αναβοσβήνει με κόκκινο χρώμα, ενημερώνοντας για το σφάλμα που προέκυψε. ....	198
<b>Εικόνα 7.10.</b>	Παράδειγμα λήψης πληροφοριών πατώντας στην καρτέλα <i>Debug</i> το κουμπί <i>Get All Data</i> . ....	199
<b>Εικόνα 7.11.</b>	Πεδία <i>Connection to Database</i> και <i>Operating Mode</i> στην καρτέλα <i>Options</i> . ....	201
<b>Εικόνα 7.12.</b>	Παράδειγμα καταγραφής αποστολής εντολής Main Transfer/Receive.....	203
<b>Εικόνα 7.13.</b>	Παράδειγμα καταγραφής αποστολής εντολής Main Transfer/Receive, με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος. ....	203
<b>Εικόνα 7.14.</b>	Κύκλωμα ενεργοποίησης που κατασκευάστηκε για είσοδο τροφοδοσίας τάση 15V.....	217
<b>Εικόνα 7.15.</b>	Κύκλωμα ενεργοποίησης που κατασκευάστηκε για είσοδο τροφοδοσίας τάση 5V.....	221
<b>Εικόνα 7.16.</b>	Κύκλωμα ενεργοποίησης όταν το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0.....	225
<b>Εικόνα 7.17.</b>	Κύκλωμα ενεργοποίησης όταν το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1.....	225
<b>Εικόνα 8.1.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 15 A.....	233
<b>Εικόνα 8.2.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 20 A.....	233

<b>Εικόνα 8.3.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 25 A.....	234
<b>Εικόνα 8.4.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 30 A.....	234
<b>Εικόνα 8.5.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 35 A.....	234
<b>Εικόνα 8.6.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 40 A.....	235
<b>Εικόνα 8.7.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 45 A.....	235
<b>Εικόνα 8.8.</b>	Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 50 A.....	235



# 1

## Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Ο χώρος εφαρμογής της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν στο ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ-Η<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. Το κτήριο αυτό δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο “*Development of a clean and energy self-sustained building in the vision of integrating H<sub>2</sub> economy with renewable energy sources*” και ακρωνύμιο “*H<sub>2</sub>SusBuild*”.

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η θεωρητική και πρακτική μελέτη συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που είναι εγκατεστημένο στο κτήριο αυτό με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός τμήματος του κτηρίου που χρησιμοποιείται ως χώρος γραφείων, εμβαδού ίσου με 150 m<sup>2</sup>.

Η θεωρητική μελέτη περιλαμβάνει την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που επιτρέπουν τη μελέτη της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου καθώς και τη μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης στο περιβάλλον MATLAB/SIMULINK.

Μία σημαντική έλλειψη του συγκεκριμένου συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που είναι εγκατεστημένο στο κτήριο εφαρμογής ήταν η αδυναμία επικοινωνίας του με το κεντρικό Σύστημα Ελέγχου και Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management and Control System - EMCS) του κτηρίου, με συνέπεια να μην μπορεί να γίνει ανταλλαγή δεδομένων με αυτό και να μην μπορεί να προγραμματιστεί κεντρικά ο τρόπος λειτουργίας του. Σκοπός του εφαρμοσμένου μέρους της διπλωματικής εργασίας ήταν να καλύψει αυτό το κενό μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου λογισμικού διεπαφής χρήστη (user interface), το οποίο να επιτρέπει τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου είτε χειροκίνητα από τον χειριστή του συστήματος είτε με αυτόματο τρόπο από το κεντρικό σύστημα EMCS. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε βασίστηκε στην επικοινωνία με τον αντιστροφέα τάσης του συστήματος ενώ απαραίτητη κρίθηκε επίσης η κατασκευή

κατάλληλου υλικού για την αυτόματη ενεργοποίηση της λειτουργίας του αντιστροφέα το οποίο προστέθηκε ως εξωτερικό μέρος στο σύστημα.

Καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε το λογισμικό της διεπαφής χρήστη να προσφέρει ένα πλήρες γραφικό περιβάλλον για τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, να εξασφαλίζει άμεση και αποτελεσματική επικοινωνία με το κεντρικό σύστημα ενεργειακού ελέγχου του κτηρίου, να μην παρουσιάζει κενά στη λειτουργία του, να αντιμετωπίζει κατάλληλα όλες τις δυνατές καταστάσεις που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του στην πράξη και ταυτόχρονα να είναι απλό και φιλικό για το χρήστη. Η εύρυθμη λειτουργία του λογισμικού και του υλικού που αναπτύχθηκαν, ελέγχθηκε με μια μεγάλη σειρά δοκιμών στην πράξη, καθώς και με την παρακολούθηση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης προς το κτήριο για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται ακολούθως.

## **Κεφάλαιο 2: Ενεργειακά Αυτόνομο Κτήριο ΑΠΕ – H<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου**

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η ξενάγηση στο χώρο εφαρμογής της διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του σκοπού του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>SusBuild, καθώς και της δομής, του βασικού σχεδιασμού και των επί μέρους συσκευών και συστημάτων που συνιστούν το κτήριο εφαρμογής.

## **Κεφάλαιο 3: Κυψέλες Καυσίμου**

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί τη βασική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γύρω από την οποία αναπτύχθηκε το θεωρητικό και το εφαρμοσμένο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ιστορικά στοιχεία σχετικά με την πορεία ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου, οι σημαντικότερες εφαρμογές τους, η δομή τους καθώς και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Έμφαση δίνεται επίσης στη θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας τους, στα ηλεκτροχημικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία και οδηγούν σε απώλειες τάσης, όπως επίσης και στα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την επίδραση των φαινομένων αυτών στη συνολική τάση της κυψέλης σε σταθερές και μεταβατικές συνθήκες.

## **Κεφάλαιο 4: Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος**

Επειδή μια κυψέλη καυσίμου παράγει μη σταθεροποιημένη τάση, η έξοδός της είναι απαραίτητο να συνδεθεί με το κατάλληλο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος (μετατροπέας και αντιστροφέας τάσης) ώστε η ισχύς που παράγει να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση των καταναλώσεων του κτηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι αρχές



λειτουργίας και τα μαθηματικά μοντέλα στα οποία στηρίζεται ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και του αντιστροφέα τάσης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος κυψέλη καυσίμου - μετατροπέας τάσης - αντιστροφέας τάσης.

### **Κεφάλαιο 5: Τεχνική Περιγραφή της Κυψέλης Καυσίμου Mira 6 και του Αντιστροφέα Τάσης DHF-1AC-5000W**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή της λειτουργίας και των τεχνικών προδιαγραφών της κυψέλης καυσίμου Mira 6 της εταιρίας Exergy και του αντιστροφέα τάσης DHF-1AC-5000W της εταιρίας Delta Energy Systems που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

### **Κεφάλαιο 6: Μοντελοποίηση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου – Αντιστροφέα Τάσης στο Περιβάλλον Matlab - Simulink**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν στο περιβάλλον Matlab - Simulink για την προσομοίωση του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που χρησιμοποιείται στο κτήριο εφαρμογής. Οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση, οι τιμές των παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων καθώς και τα αντίστοιχα σχηματικά διαγράμματα των μοντέλων Simulink παρατίθενται σταδιακά και σχολιάζονται. Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο του συστήματος κυψέλη καυσίμου - μετατροπέας τάσης - αντιστροφέας τάσης - κατανάλωση και τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς του σε συνθήκες μεταβατικής κατάστασης.

### **Κεφάλαιο 7: Δημιουργία Διεπαφής Χρήστη για τον Έλεγχο Λειτουργίας του Πραγματικού Συστήματος**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό την εξασφάλιση της επικοινωνίας του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης με το κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (EMCS) του κτηρίου εφαρμογής καθώς και το ηλεκτρονικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε για να γίνει δυνατός ο έλεγχος της ενεργοποίησης του αντιστροφέα τάσης. Η περιγραφή του λογισμικού περιλαμβάνει την αναλυτική παρουσίαση του γραφικού περιβάλλοντος και των δυνατοτήτων που προσφέρονται από αυτό, των προδιαγραφών στις οποίες βασίζεται η επικοινωνία με τον αντιστροφέα και των βασικών αλγορίθμων λειτουργίας. Η περιγραφή του κυκλώματος ενεργοποίησης του αντιστροφέα περιλαμβάνει την ανάπτυξη της βασικής αρχής λειτουργίας του, την περιγραφή της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του και την προσομοίωση της λειτουργίας στο περιβάλλον Multisim.

## **Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα Εφαρμογής του Συνολικού Συστήματος σε Συνθήκες Πραγματικής Λειτουργίας του Κτηρίου**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά η παραγωγή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου για μια ημέρα λειτουργίας του κτηρίου, όπου η τιμή της παραγόμενης ισχύος καθοριζόταν με τη βοήθεια του συστήματος της διεπαφής χρήστη με αυτόματο τρόπο από το κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης του κτηρίου, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που παρατηρούνταν. Επίσης, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από δοκιμές όπου η τιμή της παραγόμενης ισχύος καθοριζόταν χειροκίνητα μέσα από το περιβάλλον της διεπαφής χρήστη. Τέλος, οι πληροφορίες που λήφθηκαν από τις δοκιμές χειροκίνητης λειτουργίας συγκρίνονται με τις προβλέψεις του μοντέλου που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του συνολικού συστήματος παραγωγής ενέργειας και περιγράφεται στο κεφάλαιο 6.

## **Κεφάλαιο 9: Σύνοψη και Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

# 2

## Ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ – H<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου

Το ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ - H<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με ακρωνύμιο “H<sub>2</sub>SusBuild” και αποτέλεσε τον χώρο εφαρμογής της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών και υδρογόνου για την παραγωγή ενέργειας, η ροή της οποίας παρακολουθείται και ρυθμίζεται από το κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου του κτηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται συνοπτικά ο σκοπός του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>SusBuild καθώς και η δομή, ο βασικός σχεδιασμός και οι επιμέρους συσκευές και συστήματα που συνιστούν το κτήριο εφαρμογής.



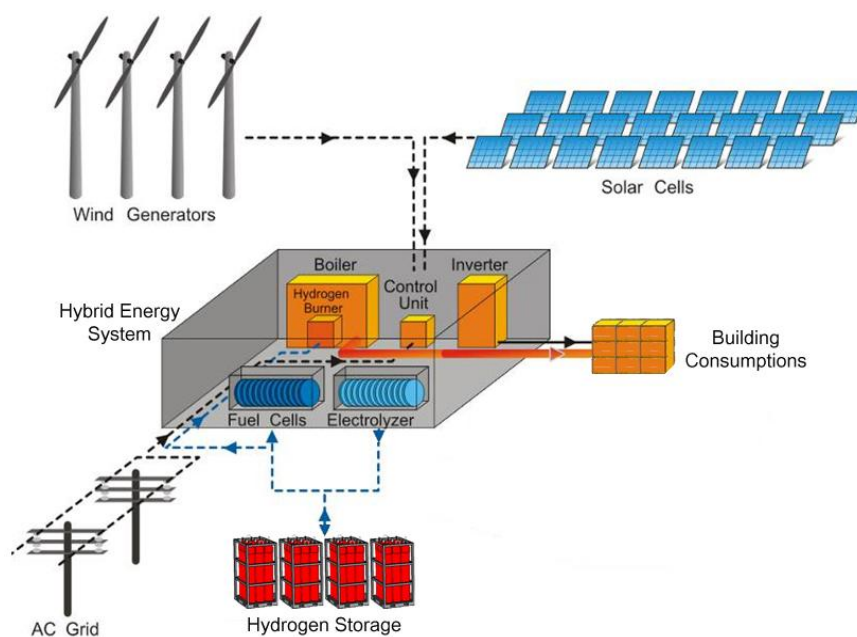
**Εικόνα 2.1.** Πανοραμική εικόνα του χώρου εφαρμογής του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>SusBuild στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου.

## 2.1 Γενικά - Ερευνητικό πρόγραμμα H<sub>2</sub>-SusBuild

Το ερευνητικό πρόγραμμα *H<sub>2</sub>SusBuild* έχει αντικείμενο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων, αφού περισσότερο από το 40% της ενέργειας που καταναλώνεται σήμερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ενεργειακές τους ανάγκες. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αυτής παράγεται με την καύση γαιανθράκων, φυσικού αερίου και πετρελαίου και αυτό έχει σαν συνέπεια ο τομέας των κτηρίων συνολικά να συμβάλλει σημαντικά στην ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και παγκόσμια.

Στην κατεύθυνση αυτή, βασικός σκοπός του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>SusBuild είναι η δημιουργία ενός ενεργειακά αυτόνομου κτηρίου στο οποίο η πρωτογενής παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ είτε χρησιμοποιείται απευθείας για την κάλυψη των άμεσων ενεργειακών αναγκών του κτηρίου είτε όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας μετατρέπεται με ηλεκτρόλυση νερού σε χημική ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου το οποίο αποθηκεύεται σε φιάλες υψηλής πίεσης. Στις περιπτώσεις που η ενέργεια που προσφέρεται κατευθείαν στο κτήριο από τις ΑΠΕ δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση των αναγκών του, το αποθηκευμένο υδρογόνο τροφοδοτείται σε μια κυψέλη καυσίμου η οποία χρησιμοποιώντας το ως καύσιμο παράγει την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει το κτήριο. Το όλο σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και διάθεσης της ενέργειας στο κτήριο γίνεται από ένα κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (*Energy Management and Control System – EMCS*).

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος καθώς και τα σημαντικότερα μέρη από τα οποία αποτελείται παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1.** Σχηματικό διάγραμμα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης ενέργειας και υδρογόνου του συστήματος ΑΠΕ- H<sub>2</sub>.

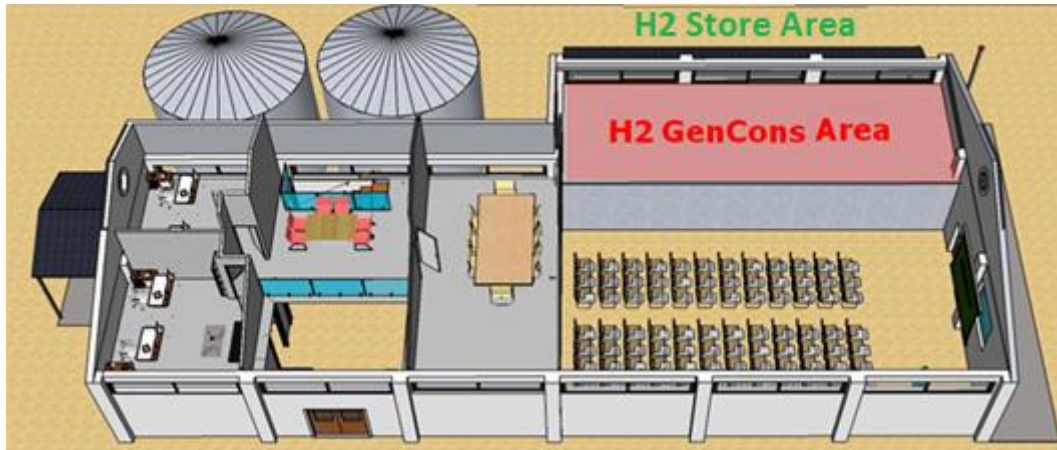
Η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ και η χρησιμοποίησή του ως μέσου αποθήκευσης ενέργειας και καθαρού καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και έχει αποτελέσει αντικείμενο εντατικής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι:

- Έχει μεγάλη κατά βάρος ενεργειακή χωρητικότητα 141.86 kJ/kg.
- Μπορεί να παραχθεί από το νερό με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσκευές ηλεκτρόλυσης.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κελιά καυσίμου με ιδιαίτερα μεγάλες αποδόσεις που μπορεί να φθάσουν έως και 60%.
- Η καύση του δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου αλλά καθαρό νερό.

Η υλοποίηση του προγράμματος περιέλαβε δύο στάδια, κατ' αρχήν τη λειτουργία του συστήματος σε μικρή πιλοτική κλίμακα με στόχο τον έλεγχο της καλής λειτουργίας και συνεργασίας των συσκευών και των συστημάτων καταγραφής και ελέγχου, όπου ως χώρος εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε το πατάρι του κτηρίου, εμβαδού ίσου με 150m<sup>2</sup>, και σε δεύτερη φάση τη λειτουργία σε πλήρη κλίμακα σε όλο το κτήριο. Η παρούσα διπλωματική εργασία όσον αφορά το εφαρμοσμένο μέρος της είχε στόχο τη στήριξη του προγράμματος κατά τη διάρκεια της πιλοτικής φάσης. Η συνεισφορά της συνίσταται στην ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμικού και υλικού ώστε να καταστεί δυνατή η επικοινωνία και ο έλεγχος του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης μικρής κλίμακας με το κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (EMCS), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αποτελεσματική διαχείριση της ενεργειακής τροφοδοσίας του χώρου του παταριού.

## **2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κτηρίου Εφαρμογής του Συστήματος ΑΠΕ - H<sub>2</sub>**

Όπως έχει αναφερθεί, το κτήριο στο οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα ΑΠΕ - H<sub>2</sub> βρίσκεται στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ). Η τοποθεσία αυτή συνδυάζει υψηλό βαθμό ηλιοφάνειας με υψηλές τιμές μέσης ταχύτητας ανέμων, παρέχοντας έτσι ιδιαίτερα ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες για την εγκατάσταση αιολικών και ηλιακών πηγών ενέργειας. Το κτήριο στο οποίο εφαρμόστηκε το σύστημα έχει συνολική επιφάνεια 525 m<sup>2</sup> ενώ το πατάρι του κτηρίου που χρησιμοποιήθηκε κατά την πιλοτική φάση του προγράμματος H2SusBuild έχει εμβαδό 150 m<sup>2</sup> και είναι διαμορφωμένο για να χρησιμοποιηθεί ως χώρος γραφείων. Η όψη του κτηρίου φαίνεται στην Εικόνα 2.2, όπου διακρίνονται συνολικά οι εσωτερικοί χώροι που περιλαμβάνει.



**Εικόνα 2.2.** Τρισδιάστατη όψη του εσωτερικού του κτηρίου εφαρμογής του συστήματος ΑΠΕ - H<sub>2</sub>.

Στην Εικόνα 2.2 διακρίνονται επίσης οι χώροι στους οποίους είναι εγκατεστημένα το σύστημα παραγωγής υδρογόνου το οποίο περιλαμβάνει μια συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού και το σύστημα κατανάλωσης υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο περιλαμβάνει την κυψέλη καυσίμου (H<sub>2</sub> GenConsArea). Η αποθήκευση του υδρογόνου γίνεται εκτός του κτηρίου σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο (H<sub>2</sub> StoreArea) που βρίσκεται ακριβώς πίσω από τον χώρο παραγωγής και κατανάλωσής του. Εντός του κτηρίου έχει επίσης διαμορφωθεί ειδική αίθουσα που φιλοξενεί το σύστημα ασφαλείας και το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Φωτογραφία της εξωτερικής όψης του κτηρίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.



**Εικόνα 2.3.** Εξωτερική όψη του κτηρίου εφαρμογής του συστήματος ΑΠΕ - H<sub>2</sub>.

## 2.3 Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ - H<sub>2</sub>

Το εγκατεστημένο σύστημα ΑΠΕ - H<sub>2</sub> αποτελείται από τα εξής βασικά υποσυστήματα:

## Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Το υποσύστημα των ΑΠΕ συνδυάζει παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας και περιλαμβάνει 6 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 36 kW και φωτοβολταϊκά συνολικής ισχύος 46.8 kWp. Τα φωτοβολταϊκά που εγκαταστάθηκαν βασίζονται στην τεχνολογία λεπτού υμενίου και η απόδοσή τους σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής είναι 9.9%. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν φωτοβολταϊκά τεχνολογίας λεπτού υμενίου είναι γιατί παρουσιάζουν μικρότερη πτώση τάσης σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κελιά στις αυξημένες θερμοκρασίες που παρατηρούνται κατά τη θερινή περίοδο και επίσης έχουν μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας σε συνθήκες μειωμένου φωτισμού όπως συμβαίνει σε μεγάλο μέρος της χειμερινής περιόδου.

Τα φωτοβολταϊκά είναι εγκατεστημένα στην οροφή ενός παρακείμενου κτηρίου, συγκεκριμένα στο παλιό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας της Γαλλικής Εταιρείας. Αποτελούνται από 6 χωριστές συνδεσμολογίες οι οποίες καταλήγουν αντίστοιχα σε 6 αντιστροφείς τάσης που είναι εγκαταστημένοι εντός του κτηρίου. Οι αντιστροφείς είναι συνδεδεμένοι ανά ζεύγος στο τριφασικό δίκτυό του υποστηριζόμενοι από κύκλωμα τριφασικής εξισορρόπησης.

## Παραγωγή υδρογόνου

Όπως αναφέρθηκε η παραγωγή υδρογόνου γίνεται με ηλεκτρόλυση νερού σε μια συσκευή ηλεκτρόλυσης ErreDue G6AP ισχύος 22.3 kW, ικανής να παράγει 4 Nm<sup>3</sup>/h υδρογόνο σε πίεση 12 bar. Το υδρογόνο που παράγεται έχει καθαρότητα 99.3% - 99.8% η οποία μπορεί να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου σχετικά με την ποιότητα που πρέπει να έχει το τροφοδοτούμενο υδρογόνο. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι εφοδιασμένη με ένα σύστημα Scada έτσι ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία της με το κεντρικό σύστημα ελέγχου μέσω μιας σύνδεσης Ethernet.



**Εικόνα 2.4.** Συσκευή ηλεκτρόλυσης ErreDue G6AP για την παραγωγή υδρογόνου και σύστημα απόθηκευσης και διανομής του.



## Αποθήκευση υδρογόνου

Το παραγόμενο από την ηλεκτρόλυση υδρογόνο το οποίο βρίσκεται αρχικά σε πίεση 12 bar συμπιέζεται με τη χρήση ενός συμπιεστή υδρογόνου στα 200 bar και αποθηκεύεται σε συστοιχία κυλινδρικών φιαλών υψηλής πίεσης. Το σύστημα διαθέτει 4 αυτόνομες συστοιχίες φιαλών, η κάθε μία εκ των οποίων αποτελείται από 12 φιάλες. Ο συνολικά διαθέσιμος αποθηκευτικός χώρος των φιαλών αντιστοιχεί σε 3480 L νερού στον οποίο μπορούν να αποθηκευτούν 690 Nm<sup>3</sup> υδρογόνο (62 kg) συνολικού ενεργειακού περιεχομένου 8795 kWh.

## Κυψέλη καυσίμου

Στο σύστημα έχει εγκατασταθεί μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) τύπου MIRA 6 της εταιρείας Morphic Exergy, μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος 7 KWe και ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 5,8 kWe. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε επίσης μια μεγαλύτερη κυψέλη καυσίμου ισχύος 20 kW της εταιρείας ICI με στόχο να χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές πλήρους κλίμακας στο κτήριο.

Επειδή οι κυψέλες καυσίμου παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα μεταβαλλόμενης τάσης, απαραίτητη είναι η σύνδεση της εξόδου με μια συσκευή αντιστροφέα η οποία αρχικά θα σταθεροποιεί την τάση του συνεχούς ρεύματος και ακολούθως θα μετατρέπει τη σταθεροποιημένη τάση σε εναλλασσόμενη ενεργού τιμής 230 V, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η τροφοδότηση με ρεύμα του ηλεκτρικού δικτύου. Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου Mira 6 χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός μονοφασικός αντιστροφέας τάσης τύπου DELTA DHF-1AC-5000W του οποίου η τάση εισόδου καλύπτει μια κλίμακα από 30V – 75V συνεχούς ρεύματος, ενώ στην έξοδο αποδίδεται εναλλασσόμενη τάση ενεργού τιμής 230 V και μέγιστης ισχύος 6 kW. Ο έλεγχος της παραγωγής ενέργειας από το συγκεκριμένο σύστημα κυψέλης - αντιστροφέα αποτέλεσε βασικό στόχο της παρούσας διπλωματικής και χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των δοκιμών σε πιλοτική κλίμακα στο χώρο που καλύπτεται από το πατάρι του κτηρίου. Το σύστημα θα αναλυθεί περαιτέρω στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.



**Εικόνα 2.5.** Κυψέλη καυσίμου Mira 6 και αντιστροφέας τάσης DELTA DHF-1AC-5000W.



## Σύστημα ασφαλείας

Επειδή το υδρογόνο είναι εύφλεκτο αέριο και όταν καίγεται αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες ενώ η φλόγα που δημιουργείται δεν είναι ορατή, για την αντιμετώπιση κινδύνων που μπορεί να προκύψουν από τυχόν διαρροή υδρογόνου από τις σωληνώσεις ή τις συσκευές του συστήματος, στο κτήριο έχει εγκατασταθεί ένα εκτεταμένο σύστημα ασφαλείας. Εκτός από την κεντρική μονάδα παρακολούθησης το σύστημα ασφαλείας περιλαμβάνει ένα σύνολο εξειδικευμένων τύπων ανιχνευτών που έχουν εγκατασταθεί στο χώρο παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης του υδρογόνου οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των συσκευών και του χώρου εντός του οποίου αυτές λειτουργούν.

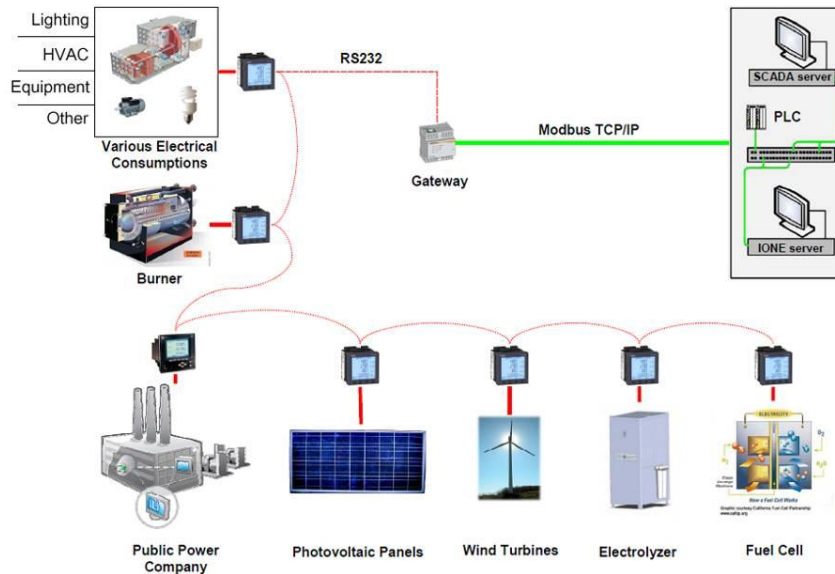
## 2.4 Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (EMCS)

Σκοπός του συστήματος ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου (EMCS) είναι η μέτρηση, και η καταγραφή της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και ο έλεγχος και η διαχείριση των συσκευών που συνιστούν το σύστημα ΑΠΕ – H<sub>2</sub> – κτήριο, ώστε αυτό να λειτουργεί με αξιοπιστία, ασφάλεια και με την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση στις δεδομένες κάθε φορά συνθήκες. Αποτελείται από έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC), που έχει σκοπό τον έλεγχο των διαφόρων υποσυστημάτων όπως τις ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, τη συσκευή ηλεκτρόλυσης, την κυψέλη καυσίμου μεγάλης κλίμακας κλπ και ένα σύνολο μετρητικών συσκευών που παρακολουθούν τη ροή ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται στο σημείο μέτρησης. Επίσης, περιλαμβάνει και το κατάλληλο λογισμικό που έχει εγκατασταθεί στο υπολογιστικό σύστημα του κτηρίου το οποίο καταγράφει, αναλύει και διαχειρίζεται την παραγωγή και διάθεση ενέργειας στο σύστημα ΑΠΕ – H<sub>2</sub> και στο κτήριο.

Το EMCS περιλαμβάνει επίσης δύο ηλεκτρονικούς υπολογιστές εξυπηρετητές (servers) που είναι συνδεδεμένοι με το PLC. Ο πρώτος Η/Υ φιλοξενεί το εποπτεύον σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) και χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των παραμέτρων ελέγχου και την διενέργεια των επεμβάσεων που γίνονται σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για την απεικόνιση, την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από τις μετρητικές συσκευές που είναι εγκαταστημένες στο σύστημα.

Η επικοινωνία μεταξύ του PLC και των διαφόρων υποσυστημάτων καθώς και των ηλεκτρονικών υπολογιστών γίνεται μέσω πρωτοκόλλου Modbus TCP/IP.

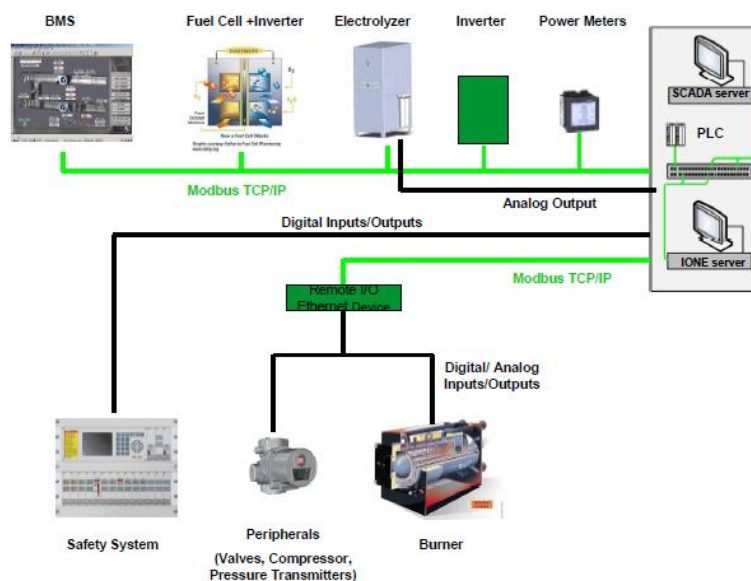
Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης που έχει εγκατασταθεί στο κτήριο φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης του EMCS.

Οι βασικές παράμετροι που παρακολουθούνται από το σύστημα EMCS είναι:

- η ροή ενέργειας από και προς το δίκτυο, όπως επίσης και η ροή ενέργειας από όλες τις επιμέρους διατάξεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου ηλεκτρικού ρεύματος
- η παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ
- οι λειτουργικές συνθήκες του εξοπλισμού παραγωγής υδρογόνου
- η κατανάλωση ενέργειας ανά χώρο και ανά είδος στο κτίριο (φωτισμός, HVAC, λοιπός εξοπλισμός)
- η πίεση στις δεξαμενές υδρογόνου
- τα δεδομένα από το σύστημα ασφαλείας

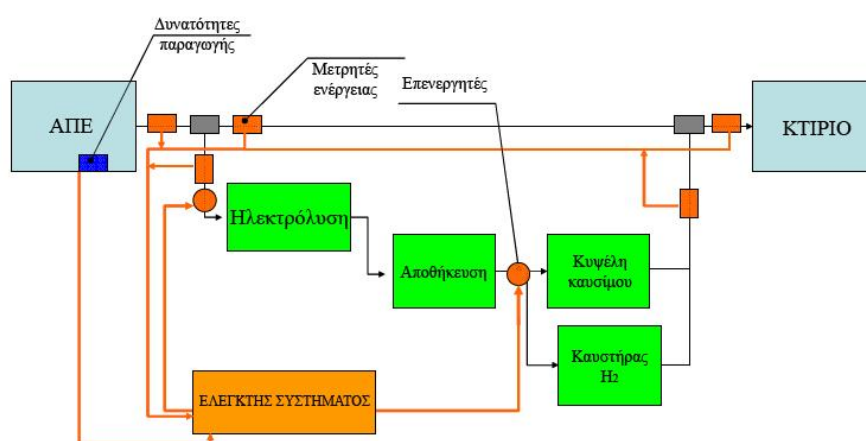


Σχήμα 2.3. Αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου του EMCS.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Τα βασικά υποσυστήματα με τα οποία επικοινωνεί το EMCS στα πλαίσια του ελέγχου είναι:

- το σύστημα διαχείρισης του κτηρίου (Building Management System – BMS) που περιλαμβάνει τον έλεγχο του κλιματισμού, του φωτισμού, της παροχής ενέργειας καθώς και τα συστήματα που αφορούν την παρακολούθηση (κάμερες κλπ), την πυροπροστασία κλπ
- η συσκευή ηλεκτρόλυσης
- η κυψέλη καυσίμου και ο αντιστροφέας τάσης
- όλες οι μετρητικές συσκευές
- ο καυστήρας
- το σύστημα ασφαλείας της όλης εγκατάστασης.

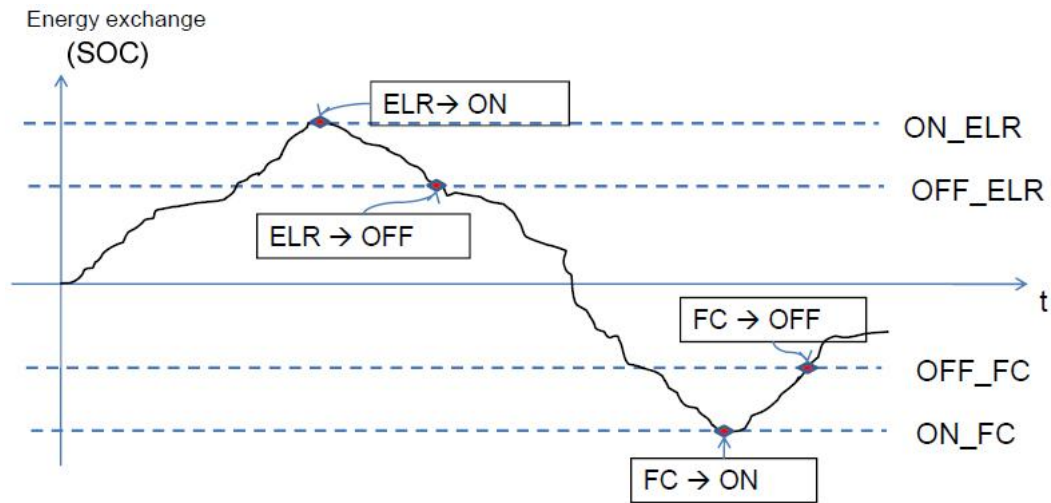
Το EMCS διαβάζει έναν μεγάλο αριθμό πληροφοριών που αφορούν το κάθε ένα από τα παραπάνω υποσυστήματα, όπως ενεργειακές καταναλώσεις, θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας, ροές υλικών, ηλεκτρικές μετρήσεις κλπ και δίνει τις κατάλληλες εντολές για την έναρξη ή την παύση ή την αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας της κάθε συσκευής.



**Σχήμα 2.4.** Απλουστευμένο σχηματικό διάγραμμα παρακολούθησης και ελέγχου στο σύστημα παραγωγής υδρογόνου και κατανάλωσής του για την παραγωγή ενέργειας.

### Αλγόριθμος ελέγχου της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου Mira 6

Ο αλγόριθμος ελέγχου της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου αποσκοπεί στον καθορισμό της χρονικής στιγμής, της διάρκειας και του ποσού ενέργειας που θα παράγει η κυψέλη καυσίμου ανάλογα με τις επικρατούσες κάθε φορά συνθήκες. Συνοπτικά, η βασική αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου στηρίζεται στην εξισορρόπηση της παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου (State of Charge – SOC) και σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5.** Βασική αρχή του ελέγχου της προσφοράς ενέργειας στο σύστημα από την κυψέλη καυσίμου και λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης.

Όταν το ισοζύγιο ενέργειας στο σύστημα βρίσκεται μεταξύ δύο συγκεκριμένων ορίων που ορίζονται από τις παραμέτρους OFF\_ELRL και OFF\_FC, δηλαδή όταν η παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ είναι περίπου ίση με την ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου, τότε η κυψέλη καυσίμου και η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι σε παύση λειτουργίας ή λειτουργούν σε κατάσταση αναμονής. Αν υπάρχει πλεόνασμα στην προσφορά ενέργειας από τις ΑΠΕ και το ισοζύγιο υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή ON\_ELRL, τότε τίθεται σε λειτουργία η συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Αντίστοιχα, όταν οι απαιτήσεις του κτηρίου σε ενέργεια είναι μεγαλύτερες από τη διαθέσιμη από τις ΑΠΕ ενέργεια και το έλλειμμα υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή ON\_FC, τότε υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου για να παρέχει στο κτήριο την απαιτούμενη για τη λειτουργία του ενέργεια.

Το ισοζύγιο ενέργειας υπολογίζεται από το EMCS κάθε ένα λεπτό με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από τα υποσυστήματα σε πραγματικό χρόνο και με βάση αυτή την τιμή τίθεται σε ενέργεια ο αλγόριθμος ελέγχου της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έκανε δυνατή την επικοινωνία της κυψέλης καυσίμου Mira 6 με το σύστημα EMCS και με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο επέτρεψε την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας από το πατάρι του κτηρίου κατά τη διάρκεια της πιλοτικής φάσης του προγράμματος. Στην εφαρμογή μεγάλης κλίμακας όπου χρησιμοποιείται κυψέλη καυσίμου 20 kW, ο αλγόριθμος ελέγχου είναι αρκετά πιο περίπλοκος, λαμβάνει υπόψη περισσότερους παράγοντες και εφαρμόζεται μέσω του PLC.

# 3

## Κυψέλες Καυσίμου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ιστορικά στοιχεία σχετικά με τις κυψέλες καυσίμου, οι εφαρμογές τους και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους, καθώς επίσης και τα μαθηματικά μοντέλα που την περιγράφουν. Η ανάλυση επικεντρώνεται στην κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), η οποία αποτελεί το είδος που χρησιμοποιήθηκε στο ενεργειακά αυτόνομο κτήριο H<sub>2</sub> - ΑΠΕ. Η αναλυτική περιγραφή των κυψελών καυσίμου κρίνεται αναγκαία διότι αποτελούν τη βασική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας γύρω από την οποία αναπτύχθηκε το θεωρητικό και το εφαρμοσμένο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επειδή στην ελληνική βιβλιογραφία ο αγγλικός όρος “fuel cell” αποδίδεται εναλλακτικά με τους όρους “κελί καυσίμου”, “στοιχείο καυσίμου” ή “κυψέλη καυσίμου”, για λόγους μεγαλύτερης σαφήνειας στο παρόν κείμενο επιλέχθηκε να υπάρχει διάκριση μεταξύ τους. Με τον όρο “κελί καυσίμου” ή “στοιχείο καυσίμου” εννοείται η στοιχειώδης ηλεκτροχημική μονάδα παραγωγής ενέργειας που αποτελείται από την άνοδο την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη, ενώ ο όρος “κυψέλη καυσίμου” χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συσκευή που προκύπτει από τη συνένωση πολλών “κελιών” ή “στοιχείων” σε μία ενιαία στήλη. Η διαφορά μεταξύ των δύο όρων θα γίνει περισσότερο κατανοητή στη συνέχεια του κεφαλαίου όταν η δομή και η λειτουργία των κελιών καυσίμου θα περιγραφεί αναλυτικά.

## 3.1 Γενικά περί κυψελών καυσίμου

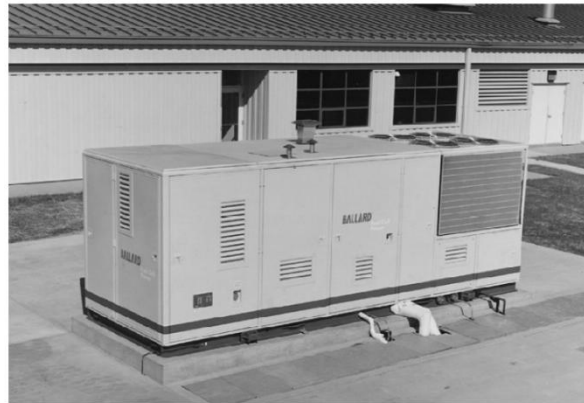
### 3.1.1 Εισαγωγή

Απέναντι στην αναγκαιότητα απεξάρτησης της παραγωγής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα και του περιορισμού του φαινομένου της παγκόσμιας ρύπανσης με αέρια του θερμοκηπίου, μία πολλά υποσχόμενη υποψήφια τεχνολογική διέξοδο αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells). Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου με το οποίο τροφοδοτούνται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενεργειακή μετατροπή του καυσίμου επιτυγχάνεται με υψηλή απόδοση, μεγάλη αξιοπιστία και κυρίως με ιδιαίτερα χαμηλές εκπομπές ρύπων. Χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η λειτουργία τους σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και στη φιλικότητά τους προς το περιβάλλον, χρησιμοποιούνται ως συσκευές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, από σταθμούς παραγωγής ενέργειας και αυτοκινούμενα οχήματα μέχρι φορητές συσκευές ισχύος και κινητά τηλέφωνα, έχοντας ταυτόχρονα πολλά περιθώρια επέκτασης των εφαρμογών τους στο μέλλον.

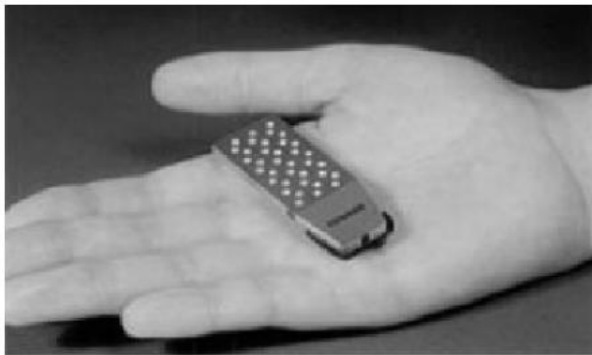
Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου στηρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ηλεκτροχημικής οξειδωσης ενός καυσίμου. Το κύριο χαρακτηριστικό της διαδικασίας αυτής είναι ότι η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική, επιτυγχάνοντας έτσι ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης, υψηλότερο από οποιοδήποτε συμβατικό θερμομηχανικό σύστημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις κυψέλες καυσίμου οι ηλεκτροχημικές διεργασίες γίνονται απουσία καύσης, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται τα ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής θερμότητας και μηχανικού έργου των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και έτσι η λειτουργία των κυψελών καυσίμου να μην περιορίζεται από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς των θερμικών μηχανών. Η απουσία κινητών μερών είναι ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου γιατί, σε αντίθεση με τα κλασικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εξασφαλίζει την αθόρυβη λειτουργία τους. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι η παραγωγή ενέργειας μπορεί να είναι συνεχής, αρκεί να τροφοδοτείται η κυψέλη αδιάλειπτα με καύσιμο και οξειδωτική ουσία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρησιμοποίησή ως καυσίμου του υδρογόνου μιας και η αντίδραση οξειδωσης του με το οξυγόνο καταλήγει στην παραγωγή καθαρού νερού, θερμότητας και ουσιαστικά μηδενικές εκπομπές ρύπων. Το συνηθέστερο οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας.



(a)



(b)



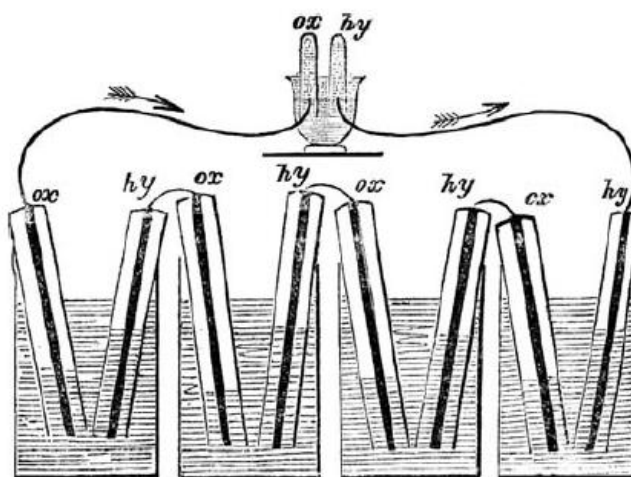
(c)

**Εικόνα 3.1.** Παραδείγματα εφαρμογών κυψελών καυσίμου.

- (a) Εφαρμογές κυψελών καυσίμου σε συστήματα μεταφοράς
- (b) Στατικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, μεσαίας (25kW) και μεγάλης (250kW) κλίμακας αντίστοιχα
- (c) Χρήση κυψέλης καυσίμου για φόρτιση μικρών συσκευών

### 3.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη εμφάνιση της κυψέλης καυσίμου έγινε το 1839 όταν ο Βρετανός δικηγόρος και χημικός William Grove κατασκεύασε την πρώτη κυψέλη καυσίμου αντιστρέφοντας τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού, επιτυγχάνοντας έτσι να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Ο Grove, αφού τοποθέτησε δύο ηλεκτρόδια από πλατίνα σε δύο ανεστραμμένα κυλινδρικά δοχεία εκ των οποίων το ένα περιείχε υδρογόνο και το άλλο οξυγόνο, παρατήρησε ότι βυθίζοντάς τα σε αραιό διάλυμα θειικού οξέος έρεε ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και παραγόταν νερό στις φιάλες αερίου. Ακολούθως, επεκτείνοντας τη διάταξη και συνδέοντάς τη σε σειρά με άλλες παρόμοιες κατάφερε να αυξήσει την παραγόμενη ηλεκτρική τάση, δημιουργώντας έτσι συστοιχία διαφορετικών κελιών που είχαν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας ως καύσιμο υδρογόνο και ως οξειδωτικό μέσο οξυγόνο. Τη συσκευή αυτή την ονόμασε “μπαταρία αερίων”.



Σχήμα 3.1. Η “μπαταρία αερίων” που κατασκευάστηκε από τον Grove (1842).

Πολύ σύντομα, η μπαταρία αερίων του Grove και η επεξήγηση του μηχανισμού λειτουργίας της αποτέλεσε πεδίο διαμάχης μεταξύ της επιστημονικής κοινότητας. Διακεκριμένοι επιστήμονες της εποχής ήταν διχασμένοι ως προς το αν η ροή ηλεκτρισμού μεταξύ των ηλεκτροδίων οφειλόταν στη φυσική επαφή των υλικών ή σε κάποιου είδους χημικές αντιδράσεις που λάμβαναν χώρα στη διάταξη. Το θεωρητικό υπόβαθρο και την εξήγηση της λειτουργίας της συσκευής την πραγματοποίησε τελικά σε μεγάλο μέρος ο F.Ostwald ο οποίος το 1893 προσδιόρισε πειραματικά τους διασυνδεδεμένους ρόλους των διαφόρων τμημάτων που την απαρτίζουν. Η έλλειψη θεωρητικού υποβάθρου που να εξηγεί το παρατηρούμενο φαινόμενο και παρά τις προσπάθειες που έγιναν όλο αυτό το χρονικό διάστημα για την εξήγησή του καθυστέρησε αρκετά τη δημιουργία πρακτικών συσκευών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα. Εξέλιξη άρχισε να εμφανίζεται το 1889 όταν οι Ludwig Mond και Charles Langer επιχείρησαν να αναπτύξουν μια αντίστοιχη συσκευή με τη μπαταρία αερίων χρησιμοποιώντας ως καύσιμο αέρια ενώσεις του άνθρακα και ως οξειδωτικό ατμοσφαιρικό αέρα. Περαιτέρω προσπάθειες συνεχίστηκαν μέχρι τις αρχές της



δεκαετίας του 1900, αλλά η ανάπτυξη και η ευρεία καθιέρωση των μηχανών εσωτερικής καύσης απομάκρυνε το ενδιαφέρον για έρευνα πάνω στην τεχνολογία αυτή.

Ο επόμενος σημαντικός σταθμός για την ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου ήρθε στα 1932 όταν ο Βρετανός μηχανικός Francis Bacon, προσελκυσμένος από την ιδέα της αντίστροφης διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης και του υψηλού βαθμού απόδοσής της, ξεκίνησε την ενασχόλησή του με τις κυψέλες καυσίμου. Οι έρευνές του σύντομα τον οδήγησαν να τροποποιήσει την κυψέλη που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, αντικαθιστώντας τα ηλεκτρόδια πλατίνας με τα λιγότερο δαπανηρά ηλεκτρόδια από νικέλιο και τον ηλεκτρολύτη θεικού οξέως με αλκαλικό ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου, ο οποίος είναι λιγότερο διαβρωτικός για τα ηλεκτρόδια. Αυτή η συσκευή ήταν στην ουσία η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC). Συνεχίζοντας τις έρευνές του ωστόσο, δεν ήταν παρά το 1959 δηλαδή 27 χρόνια αργότερα όταν κατάφερε με τους συνεργάτες του να κατασκευάσει την πρώτη πραγματικά λειτουργική κυψέλη καυσίμου, ισχύος 6 kW.



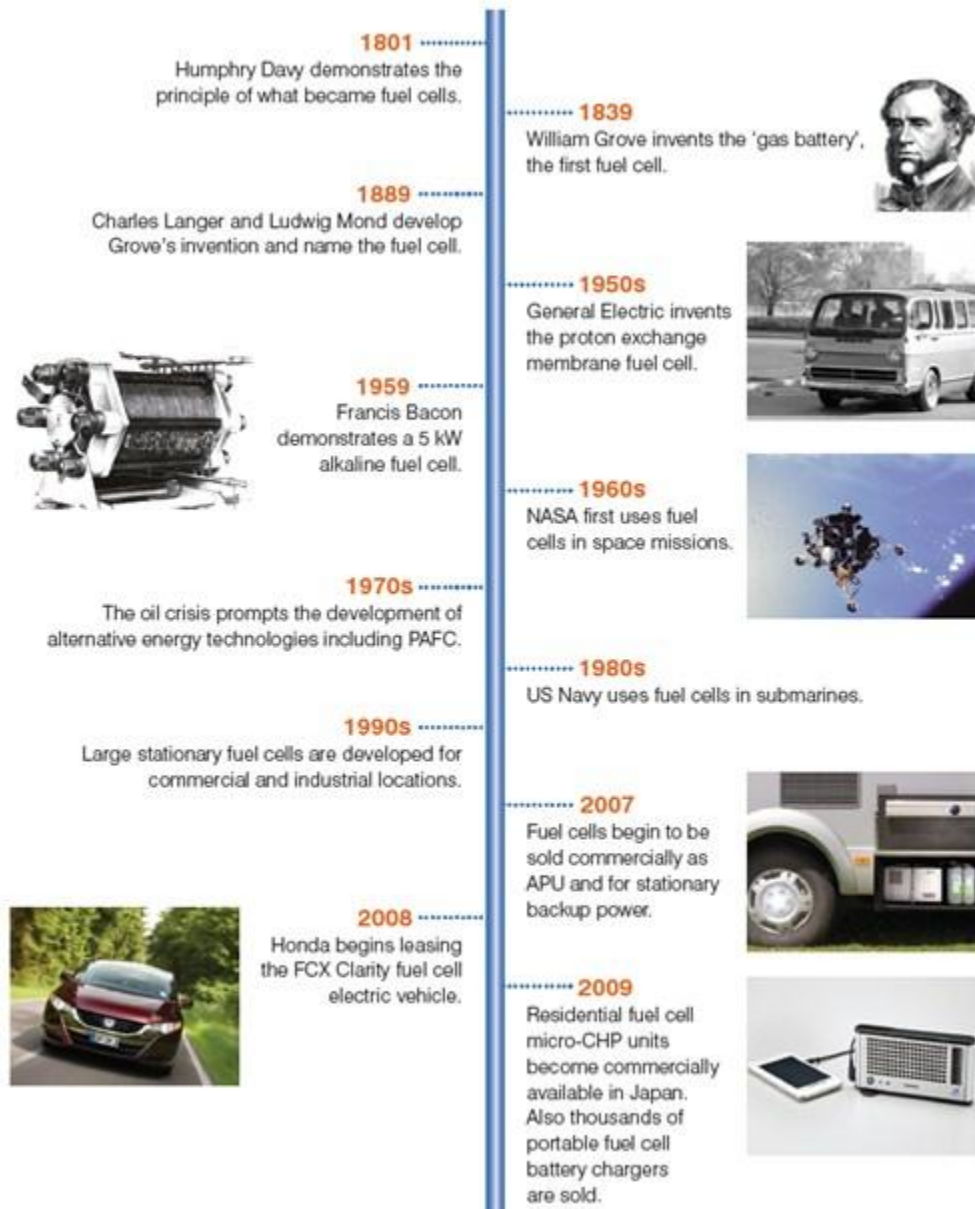
**Εικόνα 3.2.** Ο Bacon με την 6-kW κυψέλη καυσίμου, παρουσιασμένη το 1959.

Λίγα χρόνια αργότερα, με την έλευση της δεκαετίας του 1960 η NASA ξεκίνησε την έρευνα για την ανάπτυξη πρακτικά εφαρμόσιμων κυψελών καυσίμου, με στόχο την αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν διαστημικές πτήσεις. Η επιτυχία ήρθε σύντομα με τη δημιουργία της πρώτης κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC). Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ηλεκτροδότηση του διαστημικού προγράμματος Gemini ενώ αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFCs) χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo.



**Εικόνα 3.3.** Συναρμολόγηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου του Apollo.

Έκτοτε, χάρη στις ερευνητικές προσπάθειες η τεχνολογία άρχισε να ωριμάζει και να γίνεται αρκετά αποδοτική. Με την πάροδο του χρόνου όλο και περισσότεροι τύποι κυψελών καυσίμου άρχισαν να εμφανίζονται, το εύρος των πιθανών εφαρμογών διευρύνθηκε ενώ άρχισαν να τίθενται οι βάσεις για την εμπορική εκμετάλλευσή τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον γνώρισαν οι εφαρμογές σε αυτοκινούμενα οχήματα χάρη στη μεγάλη αγορά κατανάλωσης και την ανάγκη για μία τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον και εναλλακτική στις μηχανές εσωτερικής καύσης και στα ορυκτά καύσιμα. Σήμερα οι κυψέλες καυσίμου καλύπτουν πλέον ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, από φορητά συστήματα όπως αυτοκίνητα και ηλεκτρικές συσκευές μέχρι παραγωγή ενέργειας για κατοικίες και δημόσια κτήρια. Η ερευνητική προσπάθεια συνεχίζεται αδιάλειπτα με στόχο κυρίως την ανάπτυξη των υλικών που χρειάζονται και τη δραστική μείωση του κόστους των κυψελών.

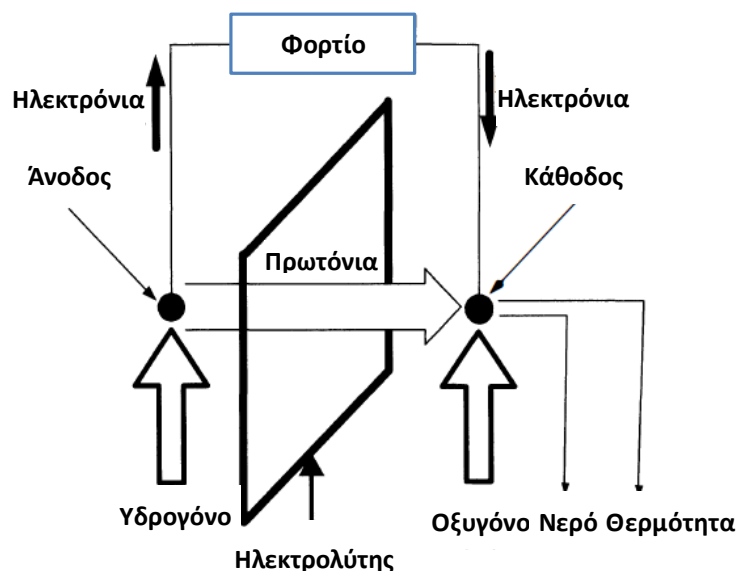


Σχήμα 3.2. Ιστορική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου.

### 3.1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας κυψέλης υδρογόνου

Η βασική αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου ουσιαστικά είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης. Με την ηλεκτρόλυση το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο όταν μέσα από αυτό διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα, στις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο αντιδρά και ενώνεται με το οξυγόνο σχηματίζοντας νερό, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν συστοιχίες κελιών εκ των οποίων το καθένα παράγει ηλεκτρισμό μετατρέποντας τη χημική ενέργεια της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, η κύρια δομή ενός κελιού καυσίμου αποτελείται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία διαχωρίζονται από ένα στρώμα ηλεκτρολύτη που τοποθετείται ενδιάμεσα σε αυτά. Στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων διασπείρεται καταλύτης που σκοπό έχει να επιταχύνει την αντίδραση οξειδωσης. Η γενική αρχή λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

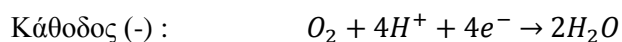


**Σχήμα 3.3.** Η βασική αρχή λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου με ροή πρωτονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη.

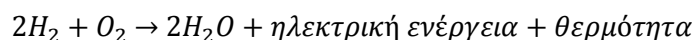
Στο παραπάνω κελί, η άνοδος τροφοδοτείται συνεχώς με καύσιμο υδρογόνο ενώ η κάθοδος με αέρα, το οξυγόνο του οποίου αποτελεί το οξειδωτικό μέσο που θα αντιδράσει με το καύσιμο υδρογόνο στην κάθοδο του κελιού για να σχηματίσει νερό. Αναλυτικότερα, τα μόρια υδρογόνου εισερχόμενα στην άνοδο διασπώνται με τη βοήθεια του καταλύτη που είναι διεσπαρμένος στην επιφάνειά της σε ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα (πρωτόνια). Τα ιόντα του υδρογόνου οδεύουν στην κάθοδο διαμέσου του ηλεκτρολύτη ενώ τα ηλεκτρόνια, αδυνατώντας να διέλθουν μέσα από αυτόν, οδεύουν προς την κάθοδο διαμέσου ενός εξωτερικού κυκλώματος (φορτίου) με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Στην κάθοδο τα ιόντα συνδέονται με τα ηλεκτρόνια και τα μόρια οξυγόνου που εισέρχονται με το ρεύμα του

τροφοδοτούμενου αέρα, επίσης με τη βοήθεια καταλύτη για να επιταχυνθεί η αντίδραση και σχηματίζουν νερό παράγοντας ταυτόχρονα και μια ποσότητα θερμότητας.

Έτσι, ουσιαστικά η ολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα κελί καυσίμου περιγράφεται από δύο επιμέρους αντιδράσεις, μία αντίδραση οξείδωσης και μία αναγωγής. Η αντίδραση οξείδωσης που συμβαίνει στην άνοδο του κελιού αντιστοιχεί στη διάσπαση των μορίων υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια, ενώ κατά την αντίδραση αναγωγής που λαμβάνει χώρα στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια υδρογόνου συνδέονται με τα μόρια του οξυγόνου για το σχηματισμό νερού. Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη είναι αντίστοιχα οι ακόλουθες:

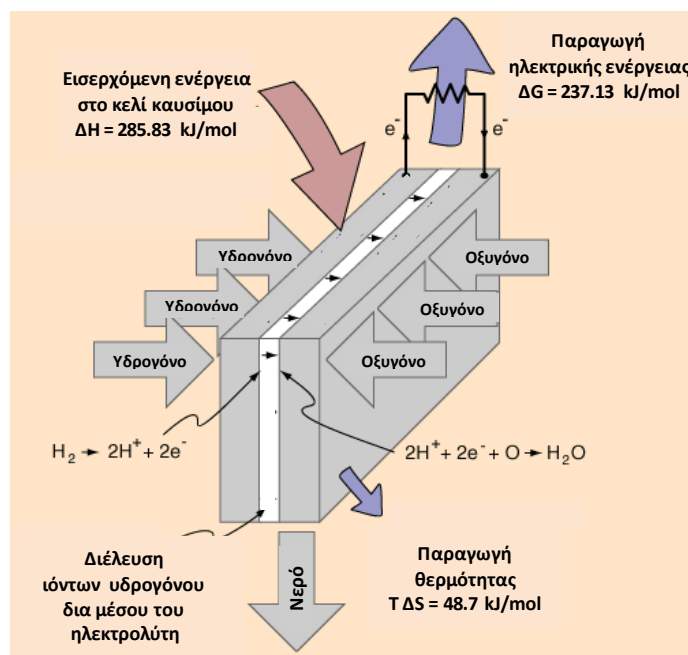


Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διατήρηση των αντιδράσεων είναι η διαρκής ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο διαμέσου ενός κλειστού κυκλώματος καθώς και η συνεχής διέλευση των κατιόντων υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη. Η συνολική χημική αντίδραση που συμβαίνει μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι η ακόλουθη:



Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 το τελικό προϊόν της όλης διεργασίας είναι νερό. Επίσης στο κελί του κύματος αυτού η συνολική ενέργεια που εισέρχεται στο κελί καυσίμου είναι 285.83 kJ/mol, ενώ παράγεται θερμότητα ίση με 48.7 kJ/mol και ηλεκτρική ενέργεια ίση με 237.13 kJ/mol. Στη θερμοδυναμική ανάλυση που θα ακολουθήσει θα γίνει λεπτομερέστερη ανάπτυξη του ενεργειακού ισοζυγίου του κελιού καυσίμου.

Ανάλογα με το είδος και τις χημικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κυψέλης και η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας της διαφέρουν. Επίσης, σε διαφορετικές κυψέλες καυσίμου η πόλωση των ιόντων και η κατεύθυνση μεταφοράς τους μπορεί να διαφέρει, καθορίζοντας αντίστοιχα την περιοχή παραγωγής νερού και απομάκρυνσής του. Αν τα ιόντα που παράγονται είναι θετικά, όπως στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος (Σχήμα 3.3), τότε το νερό παράγεται στην κάθοδο ενώ αντίθετα αν τα ιόντα είναι αρνητικά, όπως στις κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη, στερεών οξειδίων και στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, τότε το νερό σχηματίζεται στην άνοδο, χωρίς ωστόσο αυτό να αναιρεί το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα θα παραχθεί ως αποτέλεσμα της ροής των ηλεκτρονίων μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα.



**Σχήμα 3.4.** Εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα υλικών και ενέργειας σε μια κυψέλη καυσίμου PEM.

### 3.1.4 Είδη κυψελών καυσίμου

Η βασική διάκριση των κυψελών καυσίμου γίνεται ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, μιας και ο ηλεκτρολύτης είναι το συστατικό της κυψέλης καυσίμου το οποίο καθορίζει κάποιες από τις πιο βασικές ιδιότητές της. Ουσιαστικά, η επιλογή του ηλεκτρολύτη υπαγορεύει τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της όπως το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας καθώς και το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί ή τον απαιτούμενο βαθμό επεξεργασίας που χρειάζεται. Για αυτόν τον λόγο, η καταλληλότητα μιας κυψέλης καυσίμου για κάποια εφαρμογή εξαρτάται εν πολλοίς από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιεί και γενικώς το κάθε είδος κυψελών καυσίμου προσφέρεται για διαφορετικές εφαρμογές. Αν και η λειτουργία στα διαφορετικά είδη κυψελών καυσίμου βασίζεται σε διαφορετικές χημικές αντιδράσεις, η ίδια ηλεκτροχημική αντίδραση σχηματισμού νερού είναι η βάση όλων.

Από την άλλη πλευρά, με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας οι κυψέλες μπορούν να διακριθούν σε κυψέλες χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Οι κυψέλες χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC), η κυψέλη φωσφορικού οξέος (PAFC) και η κυψέλη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), λειτουργούν γενικά σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200°C μιας και ο ατμός στις υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί γρήγορη υποβάθμιση του υλικού του ηλεκτρολύτη τους. Στις κυψέλες αυτές όλο το καύσιμο πρέπει να μετατραπεί σε υδρογόνο προτού να εισέλθει στην κυψέλη καυσίμου διότι ο καταλύτης που χρησιμοποιείται (κυρίως πλατίνα) δηλητηριάζεται έντονα από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και επομένως το υδρογόνο που εισέρχεται πρέπει να είναι καθαρό. Αντίθετα, στις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας όπως η κυψέλη καυσίμου τήγματος

ανθρακικών αλάτων (MCFC) και η κυψέλη στερεών οξειδίων (SOFC), το CO και ακόμα και υδρογονάνθρακες (π.χ. CH<sub>4</sub>) δεν προκαλούν πρόβλημα αφού μπορούν να αναμορφωθούν εσωτερικά σε υδρογόνο ή ακόμα και να οξειδωθούν απευθείας.

Επιπρόσθετα από τους παραπάνω τύπους κυψελών καυσίμου υπάρχει άλλη μια κατηγορία κυψελών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μη υδρογονούχα καύσιμα απευθείας χωρίς εσωτερική ή εξωτερική επεξεργασία αναμόρφωσης. Δύο κοινά είδη σε αυτήν την κατηγορία είναι η κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (direct methanol fuel cell – DMFC) και η κυψέλη καυσίμου καύσης άνθρακα (Direct Carbon Fuel Cell – DCFC).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου και περιγράφονται σύντομα τα χαρακτηριστικά τους.

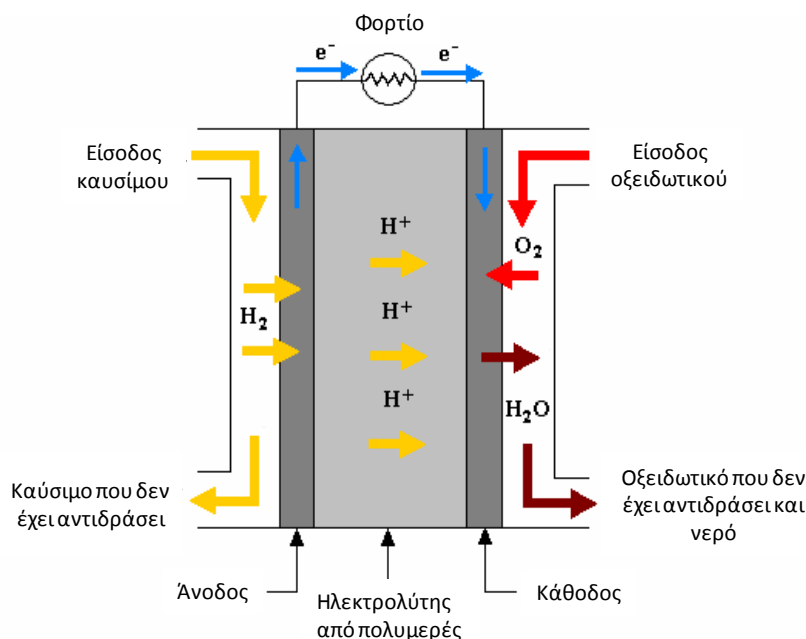
### **Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC)**

Οι κυψέλες καυσίμου PEM διαθέτουν ως ηλεκτρολύτη μεμβράνη από στερεό πολυμερές, με την ιδιότητα να άγει αποτελεσματικά τα κατιόντα υδρογόνου και να μην επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να διέλθουν διαμέσου αυτής. Στην άνοδο του κάθε κελιού, τα μόρια υδρογόνου διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια με τη βοήθεια καταλύτη από πλατίνα (Pt) και στη συνέχεια οδεύουν προς την κάθοδο, τα μεν ιόντα διαμέσου της μεμβράνης, τα δε ηλεκτρόνια διαμέσου εξωτερικού κυκλώματος το οποίο αποτελεί το τροφοδοτούμενο φορτίο. Η χρήση καταλύτη από πλατίνα είναι απαραίτητη και στην κάθοδο ώστε να επιταχυνθεί η αντίδραση σχηματισμού νερού, η οποία διαφορετικά λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας αυτού του είδους του κελιού είναι αρκετά αργή. Χάρη στα επιτεύγματα των τελευταίων ετών οι ποσότητες πλατίνας που απαιτούνται για αυτόν τον σκοπό είναι αρκετά χαμηλές, έτσι ώστε το κόστος της να αποτελεί ένα μικρό μόνο μέρος του συνολικού κόστους της κυψέλης. Ακόμη, σημαντικό ζήτημα για την καλή απόδοση των κυψελών PEM αποτελεί η αποτελεσματική διαχείριση του νερού. Το παραγόμενο νερό χρησιμοποιείται για την ενυδάτωση της μεμβράνης, ωστόσο, πρέπει να υπάρξει προσοχή ώστε να μην πλημμυρίσει η μεμβράνη από την παραγωγή και κατακράτηση μέσα στο κελί υπερβολικής ποσότητας νερού. Λόγω των περιορισμών που εισάγει η χρήση πολυμερούς ηλεκτρολύτη το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας των κυψελών καυσίμου PEM είναι αρκετά χαμηλό, συνήθως 60-80°C.

Η χρήση των κυψελών PEM ενδείκνυται σε πολλές εφαρμογές όπως σε οχήματα, σταθμούς παραγωγής ενέργειας ή ως εφεδρικές γεννήτριες. Έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρό χρόνο έναρξης λειτουργίας και η ηλεκτρική απόδοσή τους είναι υψηλή, κυμαίνεται μεταξύ 40-50%. Ο μικρός χρόνος εκκίνησης τις καθιστά ιδιαίτερα πρακτικές σε εφαρμογές μεταφορών.

Ωστόσο, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας καθιστά δύσκολη την ανάκτηση της παραγόμενης θερμότητας. Επίσης, οι κυψέλες PEM είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη δηλητηρίαση από αέριους ρύπους που περιέχονται στο τροφοδοτούμενο υδρογόνο, όπως για

παράδειγμα CO, θείο και αμμωνία. Για τους λόγους αυτούς είναι απαραίτητη η χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία της κυψέλης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Παρά τα παραπάνω μειονεκτήματα, η PEM τεχνολογικά είναι η πιο ανεπτυγμένη κυψέλη καυσίμου, με μεγάλη εμπορική εφαρμογή στην εφεδρική παραγωγή ρεύματος και τάση να αξιοποιηθεί εμπορικά και σε μεγαλύτερη έκταση στον τομέα των μεταφορών.



**Σχήμα 3.5.** Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου PEMFC.

### Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC)

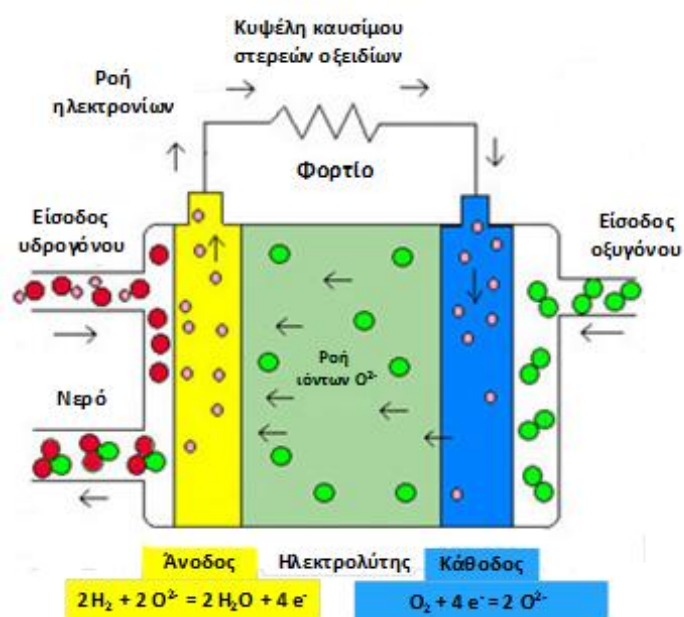
Οι SOFCs είναι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, οι οποίες λειτουργούν στην περιοχή των 600-1000 °C και μαζί με τις κυψέλες καυσίμου PEM προσελκύουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Διαθέτουν στερεό ηλεκτρολύτη ο οποίος έχει τη δυνατότητα να άγει αποτελεσματικά τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα στις υψηλές θερμοκρασίες, στην προκειμένη περίπτωση τα ανιόντα  $O^{2-}$ . Όσον αφορά τις επιφάνειες της ανόδου και της καθόδου, αυτές κατασκευάζονται πορώδεις έτσι ώστε να διατηρούν μεγάλες επιφανειακές περιοχές για την αποθήκευση φορτίου και να προσδίδουν στην κυψέλη υψηλή χωρητικότητα χάρη στο φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας (double-layer charge effect). Η τιμή της χωρητικότητας αυτής παίζει σημαντικό ρόλο στη βραχυπρόθεσμη μεταβατική ευστάθεια των κυψελών. Να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τις PEMFC όπου το νερό παράγεται στην κάθοδο, στις SOFC το νερό παράγεται στην άνοδο.

Χάρη στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου SOFC έχουν ιδιαίτερα υψηλή απόδοση (έως και 60%), διαθέτουν ευελιξία όσον αφορά την επιλογή καυσίμου ενώ επίσης υψηλοί ρυθμοί αντιδράσεων μπορούν να επιτευχθούν χωρίς να είναι



απαραίτητη η χρήση ακριβών καταλυτών. Αέρια καύσιμα όπως το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας ή να αναμορφωθούν στο εσωτερικό της, χωρίς την ανάγκη χρήσης μιας ξεχωριστής μονάδας. Ακόμη, η λειτουργία τους σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας καθιστά τις SOFC ελκυστικές για εφαρμογές συμπαραγωγής ενέργειας (Combined Heat and Power applications – CHP), παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρισμό και/ή θερμότητα με πολύ υψηλές αποδόσεις. Στα πλεονεκτήματα των κυψελών SOFC συμπεριλαμβάνεται επίσης η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη η οποία απλοποιεί τη σχεδίαση του συστήματος μιας και τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που σχετίζονται με υγρούς ηλεκτρολύτες εξαλείφονται. Για τους παραπάνω λόγους οι κυψέλες καυσίμου SOFC αποτελούν αρκετά καλές επιλογές για χρήση σε στατικές εφαρμογές.

Από την άλλη πλευρά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας ο χρόνος εκκίνησης των κυψελών SOFC είναι αρκετά χαμηλός, ενώ εγείρονται επίσης ζητήματα ασφαλείας. Τέλος, τα κεραμικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι κυψέλες αυτές είναι δύσκολο να κατεργασθούν και επομένως είναι ακριβά στην επεξεργασία ενώ επίσης απαιτείται η χρήση επιπλέον εξοπλισμού συγκριτικά με άλλους τύπους κυψελών όπως προθερμαντές αέρα και καυσίμου.



**Σχήμα 3.6.** Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου SOFC.

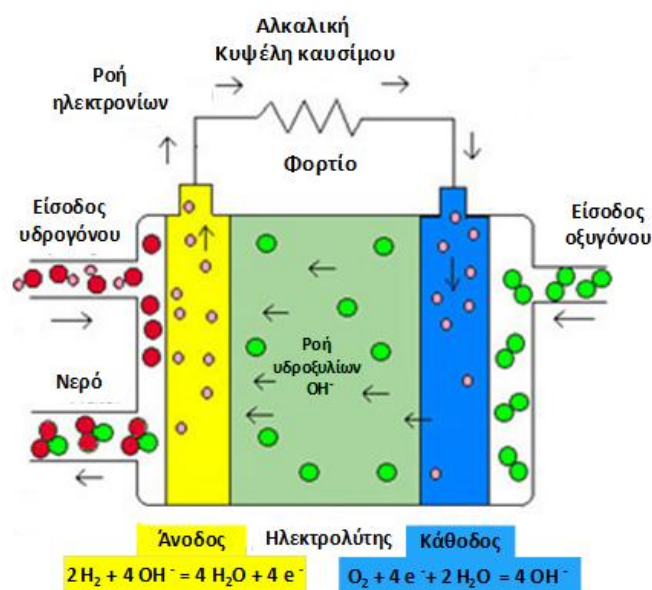
### Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cell – AFC)

Στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου AFC το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι ο ηλεκτρολύτης είναι αλκαλικό διάλυμα, συνήθως υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ή υδροξείδιο του καλίου (KOH). Παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η δομή των ηλεκτροδίων μπορεί να διαφέρουν πολύ ανάμεσα σε διαφορετικά σχέδια, αν και συνήθως οι

θερμοκρασίες λειτουργίας είναι κάτω των 100°C ενώ οι πιέσεις μπορεί να είναι αρκετά υψηλές. Γενικά, στις κυψέλες αυτές τα μετακινούμενα ιόντα είναι ανιόντα υδροξυλίου τα οποία αντιδρούν στην άνοδο με το υδρογόνο απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό, ενώ στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το ηλεκτρόδιο και το νερό στον ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας νέα ανιόντα OH<sup>-</sup>. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα των αργών ρυθμών αντιδράσεων λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται πορώδη ηλεκτρόδια εμποτισμένα με καταλύτη από πλατίνα.

Οι κυψέλες καυσίμου AFC έχουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τύπων κυψελών καυσίμου. Το πρώτο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η υπέρταση ενεργοποίησης στην κάθοδο είναι γενικώς μικρότερη από την αντίστοιχη σε έναν όξινο ηλεκτρολύτη, το οποίο είναι η σημαντικότερη πηγή απωλειών τάσης στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον, η αναγωγή του οξυγόνου διεξάγεται πιο γρήγορα σε ένα αλκαλικό σύστημα, το οποίο επιτρέπει στις AFCs να έχουν αρκετά υψηλές τάσεις λειτουργίας. Τέλος, η δυνατότητα χρήσης υδροξειδίου του καλίου ως ηλεκτρολύτη καθιστά το κόστος του αρκετά χαμηλό, ενώ η κατασκευή των ηλεκτροδίων μπορεί επίσης να γίνει με φθηνά υλικά.

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου AFC χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στη διαστημική αποστολή Apollo σημειώνοντας σημαντική επιτυχία και προσελκύνοντας μεγάλο ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα. Ωστόσο, στη συνέχεια ζητήματα όπως το κόστος, η αξιοπιστία, η ευκολία χρήσης και η ασφάλεια δεν κατάφεραν να επιλυθούν αποτελεσματικά, με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον να μετατοπιστεί προς τις κυψέλες καυσίμου PEM. Πλέον, το μεγαλύτερο ίσως πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη κυψελών AFC είναι ότι η παροχή αέρα και καυσίμου πρέπει να μην περικλείει ποσότητες CO<sub>2</sub>, διότι αυτό αντιδράει με τον ηλεκτρολύτη οδηγώντας στη διάβρωσή του και μειώνοντας ταυτόχρονα την απόδοση του κελιού.



**Σχήμα 3.7.** Αντιδράσεις ηλεκτροδίων και ροή φορτίου σε κελί καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη AFC.

### **Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC)**

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος PAFC διαθέτουν ως ηλεκτρολύτη υγρό φωσφορικό οξύ με τη δυνατότητα να άγει τα πρωτόνια υδρογόνου, ενώ η λειτουργία και οι αντιδράσεις που διεξάγονται είναι παρόμοιες με αυτές στις κυψέλες PEM (Σχήμα 3.5). Όπως και στις κυψέλες PEM, ως καταλύτης χρησιμοποιείται πλατίνα (Pt) ή κράματα πλατίνας ο οποίος τοποθετείται στο εσωτερικό των δύο ηλεκτροδίων. Χάρη στη χρήση καταλύτη και στη σχετικά υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (150-220°C) οι ρυθμοί διεξαγωγής των αντιδράσεων διατηρούνται σε ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα.

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου PAFC ήταν η πρώτη που αξιοποιήθηκε εκτενώς εμπορικά και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρύτατα. Πλεονεκτήματα που παρουσιάζει συγκριτικά με τα άλλα είδη κυψελών είναι ότι είναι ανεκτική στο CO<sub>2</sub> που μπορεί να υπάρχει στο καύσιμο και το οξειδωτικό ενώ επίσης παρουσιάζει πολύ μεγάλη αξιοπιστία. Από την άλλη, η απόδοσή της είναι μικρότερη ενώ υπάρχει ανάγκη για αύξηση της πυκνότητας ισχύος και μείωση του κόστους τους.

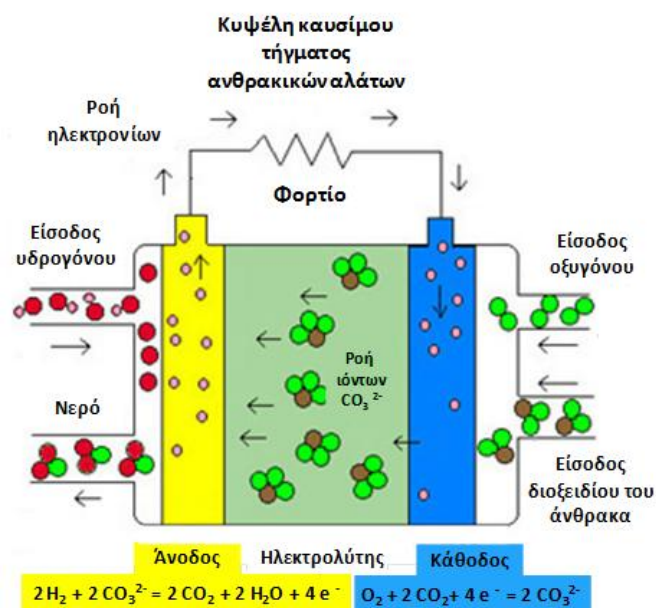
### **Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)**

Οι κυψέλες καυσίμου MCFCs χρησιμοποιούν τήγματα ανθρακικών αλάτων των αλκαλικών μετάλλων για ηλεκτρολύτη και καταλύτη χαμηλού κόστους από νικέλιο. Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 600°C - 700°C, όπου το τήγμα είναι πολύ καλός αγωγός των ανθρακικών ανιόντων CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Η διαδικασία λειτουργίας έχει ως εξής. Στην κάθοδο, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα ενώνονται με τα ηλεκτρόνια που φθάνουν από την άνοδο σχηματίζοντας ανιόντα CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Τα ιόντα αυτά ταξιδεύουν διαμέσου του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο, όπου αντιδρούν με το υδρογόνο παράγοντας νερό, διοξείδιο του άνθρακα και ταυτοχρόνως απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Τέλος, τα ηλεκτρόνια αυτά εισέρχονται στο εξωτερικό κύκλωμα που συνδέει την κυψέλη με το τροφοδοτούμενο φορτίο παράγοντας ηλεκτρισμό και φθάνουν εκ νέου στην κάθοδο.

Όπως και οι κυψέλες καυσίμου SOFC, οι κυψέλες MCFC διακρίνονται για την ευελιξία όσον αφορά την επιλογή καυσίμου, για το χαμηλό κόστος του καταλύτη και για την υψηλή τους απόδοση τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και σε εφαρμογές CHP. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο υδρογόνο όσο και αέριοι υδρογονάνθρακες (φυσικό αέριο, μεθάνιο ή αλκοόλη), όπου σε αντίθεση με τις κυψέλες PEMFC, το CO δεν είναι δηλητήριο για τον ηλεκτρολύτη και μπορεί να ενεργήσει ως καύσιμο. Η συνήθης ηλεκτρική απόδοση λειτουργίας τους είναι 50-55%, ενώ σε εφαρμογές CHP η ολική απόδοση μπορεί να φτάσει τιμή έως και 90%.

Στα μειονεκτήματα των κυψελών MCFC περιλαμβάνονται η υψηλή διαβρωτικότητα του τήγματος του ηλεκτρολύτη, τα σχετικά ακριβά υλικά κατασκευής του και η σχετικά γρήγορη υποβάθμισή του. Επίσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας έχουν μεγάλο χρόνο εκκίνησης και για τον λόγο αυτόν ενδείκνυνται για χρήση σε μεγάλης

κλίμακας στατικές και συνεχείς εφαρμογές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες μπορούν να φτάσουν και την τάξη των MW.



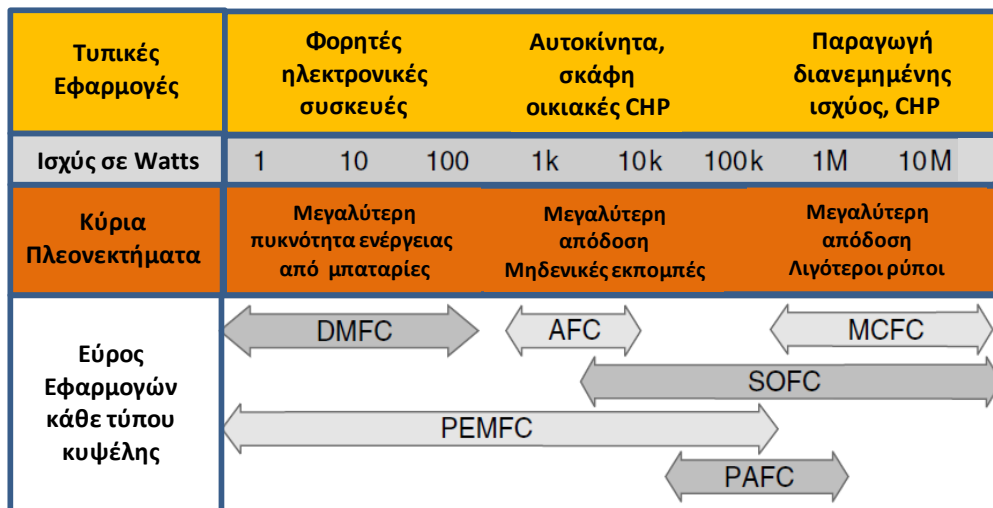
**Σχήμα 3.8.** Σχηματικό διάγραμμα και χημικές αντιδράσεις κελιού καυσίμου MCFC.

**Πίνακας 3.1.** Συγκριτική αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στους κυριότερους τύπους κυψελών καυσίμου.

Τύπος	Αντίδραση Καθόδου	Αντίδραση Ανόδου	Συνολική Αντίδραση
AFC	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow 2(\text{OH})$	$\text{H}_2 + 2(\text{OH}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2e^-$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$
PEMFC	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$
PAFC	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$
MCFC	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2e \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2e^-$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
SOFC	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e \rightarrow \text{O}_2$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e$

**Πίνακας 3.2.** Συγκριτική παρουσίαση των σημαντικότερων λειτουργικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Τύπος κυψέλης	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC
Ανάγκη Αναμόρφωσης Καυσίμου	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Ανοχή σε CO	Όχι, δηλητήριο (<50ppm)	Όχι, δηλητήριο (<1%)	Όχι, δηλητήριο (<50ppm)	Ναι (καύσιμο)	Ναι (καύσιμο)
Ηλεκτρική απόδοση (%)	~50	~40	40-50	45-55	50-60
Εύρος πυκνότητας ισχύος (mW/cm <sup>2</sup> )	150-400	150-300	300-1000	100-300	250-350
Εύρος ισχύος (kW)	1-100	50-1000	10 <sup>-3</sup> -1000	100-10 <sup>5</sup>	5-10 <sup>5</sup>
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (°C)	80-260	~200	50-80	600-700	600-1000
Χρόνος εκκίνησης		1-4 ώρες	1 λεπτό	2-10 ώρες	0.5-3 ώρες
Μετακινούμενο ιόν	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Ηλεκτρολύτης	KOH	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Πολυμερής μεμβράνη	Τήγμα ανθρακικών	Κεραμική μήτρα



**Σχήμα 3.9.** Συνοπτική παρουσίαση των εφαρμογών και των κύριων πλεονεκτημάτων των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

## 3.2 Κυψέλη Καυσίμου PEM

### 3.2.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) αρχικά αναπτύχθηκε από τη General Electric στις Ηνωμένες Πολιτείες τη δεκαετία του '60 για να χρησιμοποιηθεί από τη NASA στα πρώτα επανδρωμένα διαστημικά της οχήματα. Σήμερα, οι κυψέλες PEM αποτελούν ίσως τον πιο διαδεδομένο τύπο κυψελών καυσίμου έχοντας ένα πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογών. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης τους περιλαμβάνονται η μηδενική εκπομπή ρύπων όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο το υδρογόνο, η υψηλή ενεργειακή απόδοση η οποία είναι συνήθως μεγαλύτερη του 40% στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ο στερεός ηλεκτρολύτης, η μεγάλη διάρκεια ζωής της στήλης, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (50°C-100 °C) και το γεγονός ότι λειτουργούν αθόρυβα. Για τους λόγους αυτούς, οι κυψέλες PEM χρησιμοποιούνται συχνά για την τροφοδότηση αυτοκινούμενων οχημάτων, κατοικιών και μικρών γραφείων καθώς και φορητών ηλεκτρονικών συσκευών.

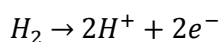
Το κύριο χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου PEM είναι ότι ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ειδική μεμβράνη από πολυμερές υλικό, επιφορτισμένη με τον ρόλο της αγωγής των πρωτονίων υδρογόνου ( $H^+$ ), δηλαδή των μετακινούμενων ιόντων. Στις δύο πλευρές της μεμβράνης εφάπτονται τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου, εμποτισμένα με σωματίδια καταλύτη για την επιτάχυνση των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτά. Έτσι, η άνοδος ο ηλεκτρολύτης και η κάθοδος διαμορφώνουν ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο με μικρό πάχος και τάση εξόδου περίπου 0.7 V, ενώ στις διάφορες εφαρμογές συνήθως συνδέονται αρκετά τέτοια κελιά σε σειρά με τη χρήση διπολικών πλακών ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία κελιών καυσίμου (κυψέλη) που θα παράγει την επιθυμητή τάση αθροιστικά. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται συνήθως υδρογόνο το οποίο τροφοδοτείται απευθείας στην κυψέλη, αν και υπάρχουν και άλλες δυνατότητες επιλογής καυσίμου όπως αιθανόλη και παράγωγα βιομάζας, τα οποία προτού εισέλθουν στην κυψέλη πρέπει να αναμορφωθούν προκειμένου να εξαχθεί καθαρό υδρογόνο από αυτά. Το οξυγόνο παρέχεται συνήθως με τη μορφή αέρα.

**Πίνακας 3.3.** Πεδία εφαρμογών των κυψελών καυσίμου PEM με βάση την παραγόμενη ισχύ.

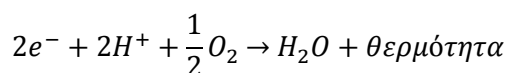
Μέγεθος Παραγόμενης Ισχύος	Εφαρμογές
> 1 MW	Τοπικοί σταθμοί παραγωγής ισχύος
100 kW – 1 MW	Μεγάλα οχήματα μεταφοράς, πλοία, υποβρύχια, λεωφορεία, μικροί σταθμοί παραγωγής ισχύος
10 kW – 100 kW	Οχήματα μεταφοράς, αυτοκίνητα, μικρά λεωφορεία, παραγωγή εφεδρικής ισχύος για μέσου μεγέθους σταθμούς επικοινωνίας
1 kW – 10 kW	Οχήματα μεταφοράς, αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, φορητές συσκευές, κτηριακές εγκαταστάσεις, παραγωγή εφεδρικής ισχύος
100 W – 1 kW	Ποδήλατα, σκούτερ, παραγωγή εφεδρικής ισχύος, UPS για χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις
10 W – 100 W	Φορητές συσκευές, φωτισμός, φωτισμός σήμανσης
< 10 W	Μικρές φορητές συσκευές, κινητά τηλέφωνα

### 3.2.2 Αρχές λειτουργίας

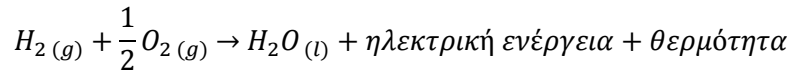
Με την προϋπόθεση ότι υδρογόνο και οξυγόνο τροφοδοτούν συνεχώς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα του κάθε κελιού της κυψέλης PEM, η τάση εξόδου παράγεται με τον εξής τρόπο. Αρχικά, τα άτομα υδρογόνου τα οποία εισέρχονται στο ηλεκτρόδιο της ανόδου απελευθερώνουν τα ηλεκτρόνιά τους χάρη στην επίδραση του καταλύτη και μετατρέπονται σε κατιόντα  $H^+$  (πρωτόνια).



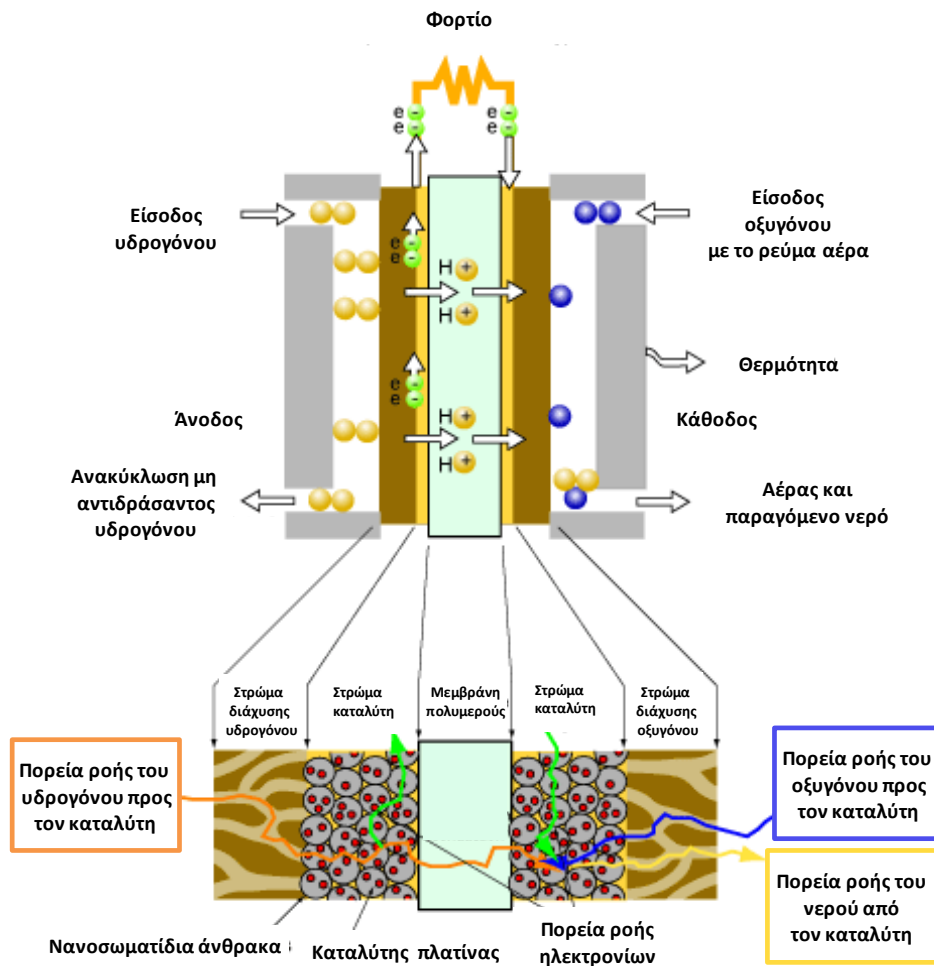
Η μεμβράνη από πολυμερές επιτρέπει μόνο στα κατιόντα  $H^+$  την είσοδο σε αυτή, ενώ τα ηλεκτρόνια συλλέγονται και κινούνται με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου διαμέσου ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στην κάθοδο, τα κατιόντα υδρογόνου που διαχέονται μέσα από τη μεμβράνη και τα ηλεκτρόνια που φθάνουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος συνδέονται με το παρεχόμενο οξυγόνο προερχόμενο σχηματίζοντας νερό και απελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή θερμότητας.



Έτσι, η ολική αντίδραση που πραγματοποιείται στο κελί καυσίμου είναι ουσιαστικά η εξής:



Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προκύπτει από την αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, δηλαδή την επανασύνδεση του υδρογόνου και του οξυγόνου σε νερό. Το νερό ως παραπροϊόν πρέπει να απομακρύνεται ώστε να μην υπερχειλίσει και καταστεί το κελί μη λειτουργικό. Επιπλέον, κάθε ποσότητα υδρογόνου και οξυγόνου (αέρα) που δεν έχει χρησιμοποιηθεί απομακρύνεται μέσω των εκροών ανόδου και καθόδου αντίστοιχα.



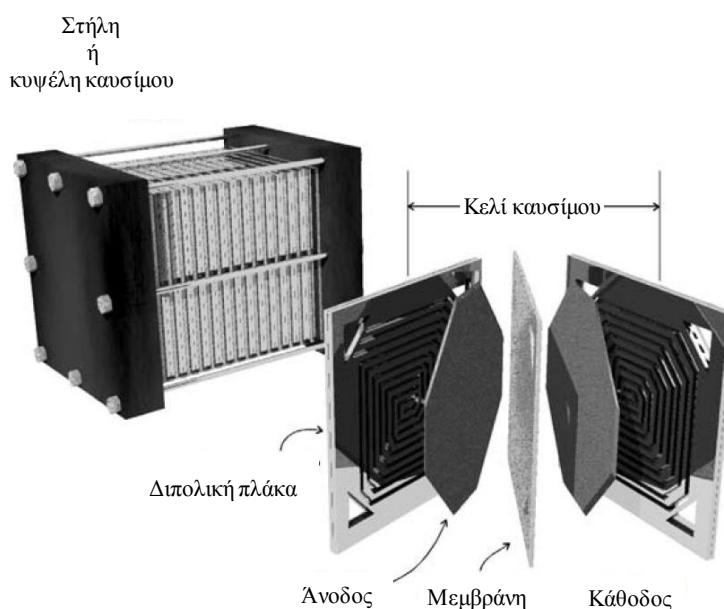
Σχήμα 3.10. Τυπική δομή και λειτουργία κελιού καυσίμου PEM.



### 3.2.3 Δομή

Η βασική δομή ενός κελιού καυσίμου PEM περιλαμβάνει την ηλεκτρολυτική μεμβράνη πολυμερούς υλικού της οποίας ο ρόλος είναι άγει τα κατιόντα  $H^+$  που παράγονται στην κάθοδο και τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου στα οποία συμβαίνουν οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Στην ουσία, τα στοιχεία αυτά συνθέτουν το κελί ως στρώματα τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Την κεντρική θέση στη δομή του κελιού καταλαμβάνει η μεμβράνη του πολυμερούς υλικού, ενώ στις δυο πλευρές της εφάπτονται τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, το κάθε ηλεκτρόδιο αποτελείται από δύο επιμέρους στρώματα, το στρώμα του καταλύτη ο οποίος επιταχύνει τις διεξαγόμενες αντιδράσεις και το στρώμα διάχυσης αερίων.

Επειδή η τάση εξόδου που παράγει ένα κελί καυσίμου είναι πολύ μικρή για να μπορεί να αξιοποιηθεί από μόνη της, πολλά κελιά τοποθετούνται διαδοχικά και συνδέονται σε σειρά διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο μια συστοιχία κελιών, τη στήλη (stack) της κυψέλης καυσίμου, η οποία παράγει την επιθυμητή τάση αθροιστικά (Σχήμα 3.11). Ανάμεσα στα κελιά παρεμβάλλονται πλάκες οι οποίες διαθέτουν αύλακες στις δύο πλευρές τους μέσα από τους οποίους ρέουν τα αντιδρώντα αέρια και για αυτό καλούνται πλάκες ροής αερίων ή διπολικές πλάκες. Κάθε πλάκα τροφοδοτεί ουσιαστικά με οξυγόνο την κάθοδο του προηγούμενου κελιού και με υδρογόνο την άνοδο του επόμενου. Η στήλη μπορεί να διαθέτει και άλλα στοιχεία όπως πλάκες ψύξης ή θέρμανσης, τα οποία όμως διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή.



**Σχήμα 3.11.** Στήλη κυψέλης καυσίμου αποτελούμενη από κελιά καυσίμου και διπολικές πλάκες.

## Ηλεκτρολύτης

Το κύριο χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου PEM που τις διακρίνει από τους άλλους τύπους κυψελών είναι η χρήση μεμβράνης από στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη, της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων έχει την ιδιότητα να επιτρέπει τη μεταφορά πρωτονίων από την άνοδο στην κάθοδο και να εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων διαμέσου αυτής. Αποτελεί επίσης το διαχωριστικό μεταξύ του καυσίμου και του οξειδωτικού μη επιτρέποντάς τους να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους.

Η κατασκευή του υλικού της μεμβράνης έχει ως βάση το πολυμερές πολυαιθυλένιο. Με την αντικατάσταση του υδρογόνου με φθόριο, αυτό μετατρέπεται σε πολυτετραφθοροαιθυλένιο ή PTFE, γνωστό αλλιώς με την εμπορική ονομασία Teflon. Οι ιδιότητες του υλικού αυτού το καθιστούν ιδιαίτερα σημαντικό στην κατασκευή κυψελών καυσίμου. Χάρη στους ισχυρούς δεσμούς ανάμεσα στο φθόριο και στον άνθρακα το υλικό αυτό είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό, έχει μεγάλη αντοχή σε χημική προσβολή ενώ επειδή είναι υδρόφοβο χρησιμοποιείται στα ηλεκτρόδια για να κρατήσει το παραγόμενο νερό μακριά από αυτά και επομένως να αποτρέψει την υπερχειλίση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την προσθήκη μιας πλευρικής αλυσίδας στο PTFE η οποία έχει στην άκρη της ένα μόριο θειώδους οξέος  $\text{HSO}_3^-$ . Ως αποτέλεσμα, το υλικό αποκτά την ικανότητα να προσελκύει τα κατιόντα  $\text{H}^+$  και να επιτρέπει την κίνησή τους μέσα σε αυτό. Στη διαδικασία αυτή στηρίζεται και η κατασκευή του Nafion, το οποίο αποτελεί την πιο διαδεδομένη μεμβράνη που χρησιμοποιείται σήμερα στις κυψέλες PEM.

## Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης καυσίμου αποτελούν τις επιφάνειες στις οποίες πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις, εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη κατανομή των αντιδρώντων και παρέχουν την ηλεκτρική σύνδεση της κυψέλης καυσίμου με την κατανάλωση. Κατασκευάζονται από πορώδη αγωγίμα υλικά έτσι ώστε να είναι διαπερατά από το καύσιμο και την οξειδωτική ουσία, να επιτρέπουν την αγωγή των ηλεκτρονίων και να αυξάνουν την επιφάνεια πάνω στην οποία συμβαίνει η χημική αντίδραση. Διαθέτουν δύο κύρια στοιχεία, τον καταλύτη και το στρώμα διάχυσης αερίων.

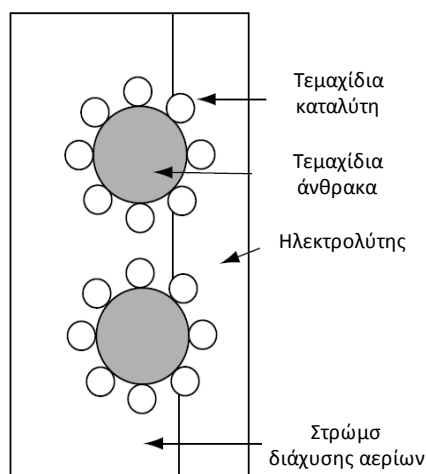
- *Καταλύτης*

Επειδή ο ρυθμός με τον οποίο διεξάγονται οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι πολύ αργός στις θερμοκρασίες λειτουργίας της κυψέλης, για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση καθίσταται απαραίτητη η χρήση καταλύτη ο οποίος θα επιφέρει την επιθυμητή επιτάχυνση. Ο καταλύτης είναι επίσης αναγκαίος για να αυξήσει τον ρυθμό αναγωγής του οξυγόνου στην κάθοδο μιας και ως αντίδραση είναι αρκετά πιο αργή από την οξείδωση του υδρογόνου στην άνοδο.

Ο αποτελεσματικότερος και συνάμα ο πιο δημοφιλής καταλύτης ο οποίος χρησιμοποιείται για αυτόν τον σκοπό, τόσο για το ηλεκτρόδιο της ανόδου όσο και για αυτό της καθόδου, θεωρείται ο λευκόχρυσος ή πλατίνα (Pt). Ωστόσο, επειδή η πλατίνα είναι ένα πολύ ακριβό υλικό, για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται στη μορφή σωματιδίων τα οποία τοποθετούνται με ομοιόμορφο τρόπο πάνω σε μεγαλύτερα σωματίδια από σκόνη άνθρακα. Αυτά τοποθετούνται δημιουργώντας ένα στρώμα του οποίου μεγάλο ποσοστό της επιφάνειάς είναι διάσπαρτο με πλατίνα, με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη επαφή με τα αντιδρώντα αέρια και επομένως η μέγιστη καταλυτική δραστηριότητα. Έτσι, η απαραίτητη ποσότητα πλατίνας που χρησιμοποιείται ανά ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μειωμένη με αποτέλεσμα πλέον το κόστος του υλικού αυτού να αποτελεί ένα μικρό μόνο ποσοστό από το κόστος της κυψέλης.

- *Στρώμα διάχυσης αερίων*

Τα σωματίδια καταλύτη και τα σωματίδια από άνθρακα που συνιστούν την υποστήριξή τους είναι επικολλημένα σε ένα πορώδες στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer – GDL). Το στρώμα διάχυσης αερίων κατασκευάζεται από ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό και έχει πάχος περίπου 0.2-0.5 mm. Αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη της υψηλής επίδοσης λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου μιας και χάρη σε αυτό, τα αντιδρώντα αέρια καθώς εισέρχονται διαχέονται ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια που διαμορφώνεται από τα σωματίδια καταλύτη. Παράλληλα, οδηγεί το νερό που σχηματίζεται στην κάθοδο μακριά από την ηλεκτρολυτική μεμβράνη και επιπλέον παρέχει ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στην αντίστοιχη διπολική πλάκα συμβάλλοντας ακόμα περισσότερο στην υψηλή απόδοση λειτουργίας.

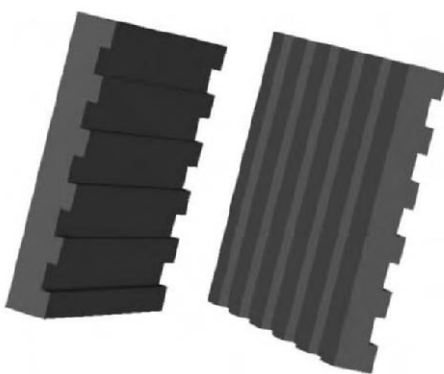


**Σχήμα 3.12.** Παράδειγμα διάταξης σωματιδίων καταλύτη – στρώματος διάχυσης αερίων – μεμβράνης

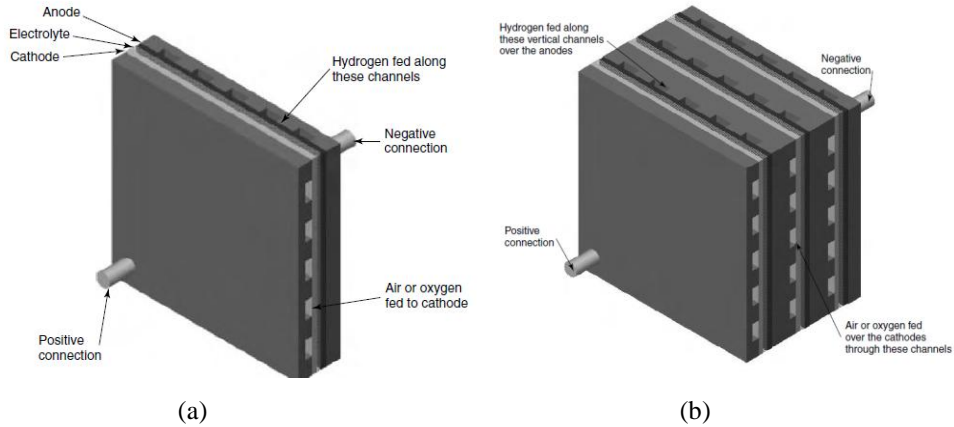
## Διπολικές πλάκες

Οι διπολικές πλάκες αποτελούν τη διασύνδεση που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών κελιών καυσίμου, έχοντας τη μια πλευρά τους σε επαφή με την επιφάνεια της καθόδου του ενός κελιού και την άλλη με την επιφάνεια της ανόδου του επόμενου. Η λειτουργία τους είναι διπλή, χάρη σε αυτές το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να ρέει από το ένα κελί στο άλλο χωρίς να συναντά ιδιαίτερη αντίσταση ενώ ταυτόχρονα είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά των αντιδρώντων αερίων στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου και την απομάκρυνση του παραγόμενου νερού. Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, οι διπολικές πλάκες έχουν κανάλια ροής χαραγμένα στις δύο πλευρές τους ώστε τα αέρια να ρέουν πάνω στην πλευρά των ηλεκτροδίων, φροντίζοντας ωστόσο να μην εμποδίζεται η ηλεκτρική επαφή μεταξύ πλάκας και ηλεκτροδίων.

Η σχεδίαση των διπολικών πλακών είναι θεμελιώδους σημασίας ώστε να επιτυγχάνονται οι λειτουργίες των διπολικών πλακών στον καλύτερο βαθμό, με ένα ανεκτό κόστος και αντέχοντας σε βάθος χρόνου. Δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους έχει μεγάλο αντίκτυπο στην καλή απόδοση της κυψέλης καυσίμου και ότι αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό του όγκου και του κόστους της, η καλή σχεδίαση είναι ένα πολύ κρίσιμο ζήτημα. Τα κανάλια ροής πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη επαφή μεταξύ του εισρεόμενου αερίου και της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων προσέχοντας παράλληλα τα διερχόμενα αέρια να είναι αυστηρώς διαχωρισμένα. Ακόμη, οι διπολικές πλάκες πρέπει να έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και να είναι ανθεκτικές και αξιόπιστες στις συνθήκες λειτουργίας. Όσον αφορά το υλικό κατασκευής τους, ο γραφίτης αποτελεί μια πολύ καλή και διαδεδομένη επιλογή χάρη στις φυσικές ιδιότητές του αλλά λόγω του κόστους του υλικού καθώς και του κόστους της επεξεργασίας του ερευνώνται εκτενώς και δοκιμάζονται εναλλακτικές επιλογές υλικών, καθεμία προσφέροντας τα δικά της πλεονεκτήματα.



**Σχήμα 3.13.** Δυο διπολικές πλάκες απλά σχεδιασμένες με ευθείες οριζόντιες και κάθετες αυλακώσεις στην κάθε πλευρά αντίστοιχα.



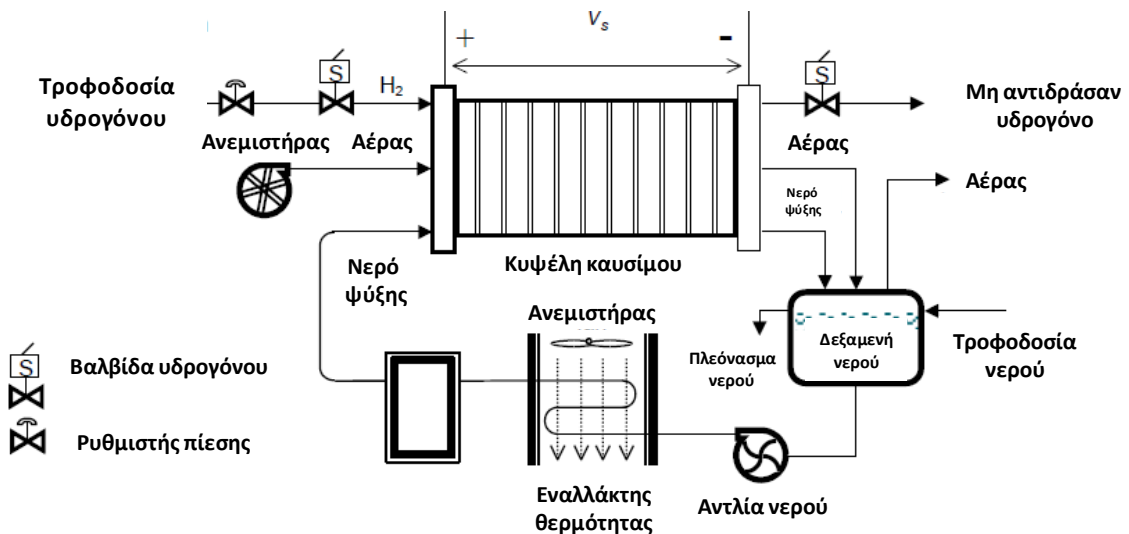
Σχήμα 3.14. Διασύνδεση κελιών καυσίμου μέσω διπολικών πλακών.

(a) Κελί καυσίμου με πλάκες στις δύο πλευρές του οι οποίες μπορούν να συλλέγουν το ρεύμα από ολόκληρη την πλευρική επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενώ παράλληλα την τροφοδοτούν με αέριο.

(b) Συστοιχία τριών κελιών καυσίμου στην οποία φαίνεται η σύνδεση της ανόδου ενός κελιού με την κάθοδο του γειτονικού του.

### 3.2.4 Περιφερειακά συστήματα κυψέλης καυσίμου PEM

Εκτός από τη στήλη της κυψέλης καυσίμου, ένα ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης απαιτεί για τη λειτουργία του την ύπαρξη πολλών επιμέρους συστημάτων, όπως για παράδειγμα το σύστημα παροχής υδρογόνου, το σύστημα διαχείρισης της παραγόμενης θερμότητας κ.α. Τα υποσυστήματα αυτά συχνά καταλαμβάνουν πολύ περισσότερο χώρο από ότι η στήλη της κυψέλης και συνήθως αυξάνονται ανάλογα με το μέγεθός της. Στο Σχήμα 3.15 απεικονίζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEM, ενώ παρακάτω περιγράφονται τα σημαντικότερα υποσυστήματα μιας κυψέλης PEM που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 3.15. Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEM.

## **Σύστημα διαχείρισης του νερού**

Η σωστή διαχείριση του νερού σε μια κυψέλη καυσίμου PEM είναι απαραίτητη έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της παραγωγής του και της απομάκρυνσής του από την κυψέλη. Γενικά, το νερό είναι πολύ σημαντικό για την ηλεκτρολυτική μεμβράνη, μιας και στην περίπτωση μη επαρκούς ενυδάτωσής της ο χρόνος ζωής της μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον, η υψηλή ποσότητα νερού στη μεμβράνη διασφαλίζει καλή ιοντική αγωγιμότητα, το οποίο βελτιώνει τη γενική απόδοση λειτουργίας της κυψέλης. Μιας και η ηλεκτροχημική αντίδραση παράγει θερμότητα αυξάνοντας έτσι την εξάερωση, υγραντήρες χρησιμοποιούνται για την αύξηση της υγρασίας των εισερχόμενων αερίων, ώστε να αποφευχθεί η αφυδάτωση της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων και να διασφαλίζεται η επαρκής ενυδάτωσή τους. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε το νερό να μην πλημμυρίζει ποτέ τα ηλεκτρόδια μιας και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να εμποδίζεται η διάχυση των αερίων σε αυτά και να μειώνεται η απόδοση λειτουργίας της κυψέλης.

## **Σύστημα παροχής αέρα (οξυγόνου)**

Για τη ροή του συστήματος που εφοδιάζει την πλευρά της καθόδου της κυψέλης με αέρα, και συνεπώς με οξυγόνο, είναι αναγκαία η χρήση ενός συμπιεστή και του συνοδευτικού κινητήρα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή και πίεση του αέρα. Ο ρυθμισμένος ως προς την πίεση αέρας στη συνέχεια ψύχεται ώστε η θερμοκρασία εισόδου του στην κυψέλη να είναι σε επιθυμητά επίπεδα, ενώ ο υγραντήρας έπειτα προσθέτει τον απαιτούμενο ατμό για τη ρύθμιση της υγρασίας της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων. Ο εξερχόμενος από την κάθοδο αέρας περιέχει επίσης ποσότητα νερού (προϊόν αντίδρασης) και στις εφαρμογές απαιτείται ένας διαχωριστής νερού ώστε το νερό να επαναχρησιμοποιηθεί για την ενυδάτωση του αέρα και του υδρογόνου.

## **Σύστημα θερμικής διαχείρισης**

Πέραν του νερού, ως προϊόν της αντίδρασης εκλύεται και θερμότητα η οποία πρέπει να απάγεται από την κυψέλη, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης σταθερή κάτω από τους 100°C. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την κυκλοφορία αποϊονισμένου νερού που απάγει τη θερμότητα της κυψέλης και στη συνέχεια ψύχεται, είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης που να επιτρέπει την εκ φύσεως απαγωγή της θερμότητας, είτε με τη χρήση ενός συστήματος ψύξης, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις η πλεονάζουσα θερμότητα θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την προθέρμανση του καυσίμου.

## **Αποθήκευση καυσίμου και επεξεργασία**

Το υδρογόνο που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μια κυψέλη PEM αποθηκεύεται συνήθως σε αέρια μορφή, συμπιεσμένο μέσα σε κυλίνδρους ή δεξαμενές. Στην έξοδο των

δεξαμενών αυτών τοποθετούνται μειωτήρες πίεσης οι οποίοι ρυθμίζουν την πίεση του υδρογόνου που θα εισέλθει στην κυψέλη στην επιθυμητή τιμή. Εναλλακτικά, το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί και σε υγρή μορφή χρησιμοποιώντας κατάλληλη μόνωση, αλλά αυτός ο τρόπος είναι λιγότερο αποτελεσματικός στην αποθήκευση και στη μεταφορά του.

### **Σύστημα μετατροπής της ισχύος**

Το σύστημα μετατροπής της ισχύος (Power Conditioning System – PCS ή Power Conditioning Unit – PCU) απαιτείται για τη μετατροπή της μεταβαλλόμενης και συνάμα χαμηλής DC τάσης που παράγεται στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου σε αξιοποιήσιμη DC ή AC ισχύ, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών ισχύος και μετατροπέων όπως μετατροπείς DC – DC που συνήθως ανυψώνουν την τάση εξόδου και τη διατηρούν σε σταθερή τιμή καθώς και αντιστροφείς DC – AC οι οποίοι μετατρέπουν την τάση εξόδου σε εναλλασσόμενη στη συχνότητα των 50 Hz για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί τόσο από φορτία όσο και από το δίκτυο. Στην έξοδο των αντιστροφέων αυτών συνήθως τοποθετείται κάποιο φίλτρο που μετριάζει το πλάτος των εμφανιζόμενων αρμονικών ώστε τελικώς να προκύψει ένα καλής ποιότητας ημιτονοειδές σήμα τάσης, κατάλληλο για χρήση. Το σύστημα μετατροπής της ισχύος θα περιγραφεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο μιας και αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της μοντελοποίησης που επιχειρήθηκε στην παρούσα εργασία.

### **Διάφοροι ελεγκτές**

Ο ρυθμός ροής των αντιδρώντων, η μερική πίεσή τους, η εσωτερική θερμοκρασία της κυψέλης και το ποσοστό υγρασίας της μεμβράνης είναι μερικές μόνο από τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία της κυψέλης. Φαινόμενα όπως οι ακαριαίες μεταβολές του φορτίου και οι διακοπές λειτουργίας πρέπει ανά πάσα στιγμή να αντιμετωπίζονται κατάλληλα διατηρώντας τις συνθήκες λειτουργίας στο βέλτιστο επίπεδο ώστε να αποφευχθεί μείωση της τάσεως και συνεπώς μείωση του βαθμού απόδοσης της συσκευής.

### 3.3 Θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας της κυψέλης

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ως συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας αξιοποιεί την ενέργεια που εκλύεται από τη χημική αντίδραση του υδρογόνου και του οξυγόνου προς σχηματισμό νερού, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παραχθεί από ένα κελί καυσίμου, είναι απαραίτητος ο ποσοτικός προσδιορισμός της χημικής ενέργειας που εκλύεται από την αντίδραση σχηματισμού του νερού, καθώς και του ποσοστού της ενέργειας αυτής που χρησιμοποιείται επωφελώς για την παραγωγή ηλεκτρικού έργου. Το θερμοδυναμικό μέγεθος που αποτελεί τη βάση για την ενεργειακή ανάλυση των φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα κελί καυσίμου και το οποίο δίνει τη δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού της παραγόμενης από αυτό ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η *ελεύθερη ενέργεια Gibbs (G)*.

Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα “*ωφέλιμης*” ενέργειας που μπορεί να προσφερθεί από ένα σύστημα στο περιβάλλον, όταν η διεργασία που συμβαίνει σ’ αυτό είναι αντιστρεπτή και συντελείται σε σταθερή πίεση και θερμοκρασία. Με τον όρο “*ωφέλιμη ενέργεια*” εννοείται κάθε μορφής ενέργεια που παράγεται από το σύστημα εκτός από την ενέργεια που συνδέεται με τη μεταβολή του όγκου ή/και της πίεσης του συστήματος. Στα ηλεκτροχημικά συστήματα, όπως τα κελιά καυσίμου, η ωφέλιμη ενέργεια αφορά την παραγωγή ηλεκτρικού έργου που παράγεται από το σύστημα και προσφέρεται στο περιβάλλον. Οποιοδήποτε έργο παράγεται λόγω αλλαγής του όγκου των εμπλεκόμενων υλικών ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του συστήματος, δεν αξιοποιείται από το σύστημα και δεν αντιστοιχεί σε παραγωγή ωφέλιμου έργου.

Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ενός συστήματος σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστές η *ενθαλπία (H)* και η *εντροπία (S)* του συστήματος στις συνθήκες αυτές. Η ενθαλπία είναι ένα θερμοδυναμικό μέγεθος που αντιπροσωπεύει την *ολική ενέργεια* που κατέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα όταν αυτό βρίσκεται υπό σταθερή πίεση ενώ η εντροπία είναι με απλά λόγια ο βαθμός “*αταξίας*” του και επίσης ένα μέτρο του ποσού της ενέργειας του συστήματος που δεν είναι διαθέσιμο για την παραγωγή έργου. Γενικά, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs ενός συστήματος σε συνθήκες σταθερής πίεσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της μεταβολής της ενθαλπίας και της μεταβολής της εντροπίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3-1)$$

Όταν η θερμοκρασία και η πίεση είναι γνωστές, οι τιμές των θερμοδυναμικών μεγεθών  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta G$  για κάποια συγκεκριμένη αντίδραση μπορούν να υπολογιστούν είτε από βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη των συστατικών που συμμετέχουν στη χημική αντίδραση όπως η ειδική τους θερμότητα και οι πρότυπες τιμές τους σε συνθήκες αναφοράς  $\Delta H_{ref}^0$ ,



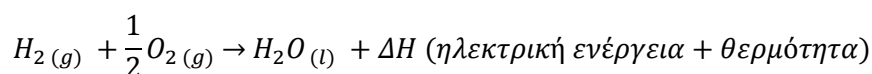
$\Delta S_{ref}^0$ ,  $\Delta G_{ref}^0$  είτε να βρεθούν από αντίστοιχους θερμοδυναμικούς πίνακες που διατίθενται στη βιβλιογραφία. Για την αντίδραση σχηματισμού υγρού νερού οι τιμές αυτές παρατίθενται για διάφορες θερμοκρασίες στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.4.** Τιμές  $\Delta H$ ,  $\Delta S$  και  $\Delta G$  της αντίδρασης σχηματισμού νερού σε υγρή φάση για διάφορες θερμοκρασίες

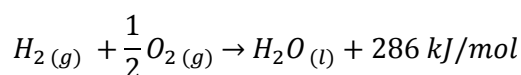
T (K)	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta S$ (J/K·mol)	$\Delta G$ (kJ/mol)
298	-285.835	-163.319	-237.166
308	-285.519	-162.277	-235.538
318	-285.202	-161.265	-233.92
328	-284.885	-160.282	-232.312
338	-284.566	-159.325	-230.714
348	-284.247	-158.394	-229.126
358	-283.927	-157.487	-227.546
368	-283.605	-156.601	-225.976
373	-283.444	-156.166	-225.194

### 3.3.2 Σχηματισμός του νερού

Όπως έχει αναφερθεί, η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε ένα κελί καυσίμου υδρογόνου είναι η ακόλουθη:



ή αλλιώς σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (standard reference conditions,  $T = 298.15$  K και  $P = 1$  atm) :



όπου  $\Delta H = -286 \text{ kJ/mol}$  είναι η μεταβολή της ενθαλπίας της αντίδρασης.

Κατά τη διεξαγωγή μιας χημικής αντίδρασης, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs ( $\Delta G_f$ ) ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs των προϊόντων και την ελεύθερη ενέργεια Gibbs των αντιδρώντων. Για τη συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο κελί καυσίμου υδρογόνου, η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι:

$$\Delta G_f = G_{f,προϊόντων} - G_{f,αντιδρώντων} = G_{f,H_2O} - G_{f,H_2} - \frac{1}{2}G_{f,O_2} \quad (3-2)$$

Η τιμή της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας Gibbs  $\Delta G_f$  της αντίδρασης εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του κελιού καυσίμου. Βασικό εργαλείο για τον υπολογισμό της το οποίο λαμβάνει υπόψιν τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας αποτελεί η εξίσωση του Nerst, η οποία είναι:

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3-3)$$

όπου  $\Delta G_f^0$  είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs όταν τα συστατικά της αντίδρασης βρίσκονται σε πρότυπη κατάσταση (standard state,  $P = 1 \text{ atm}$ ), μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία  $T$  που λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου

$p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  και  $p_{H_2O}$  είναι οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού αντίστοιχα

$R$  είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων ( $8.314 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ).

Από τις παραπάνω παραμέτρους, η  $\Delta G_f^0$  μπορεί να υπολογιστεί βάσει της εξίσωσης (3-1). Για παράδειγμα, σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς ( $1 \text{ atm}$ ,  $298.15 \text{ K}$ ) κατά τη διάρκεια σχηματισμού του νερού ισχύουν  $\Delta H_{ref}^0 = -285.8 \text{ kJ/mol}$  και  $\Delta S_{ref}^0 = -163.3 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ , επομένως η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs θα είναι:

$$\Delta G_{f,ref}^0 = \Delta H_{ref}^0 - T_{ref} \cdot \Delta S_{ref}^0 \Rightarrow$$

$$\Delta G_{f,ref}^0 = -285.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298.15 \text{ K} \cdot \left( -163.3 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \right) = -237.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (3-4)$$

Το γεγονός ότι η τιμή της  $\Delta G_f^0$  είναι αρνητική σημαίνει ότι η ενέργεια απελευθερώνεται από την αντίδραση.

### 3.3.3 Εύρεση αντιστρεπτού δυναμικού κελιού καυσίμου

Θεωρώντας ότι το σύστημα του κελιού καυσίμου είναι αντιστρεπτό, δηλαδή ότι όλη η ελεύθερη ενέργεια Gibbs που απελευθερώνεται μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs ισούται με το ηλεκτρικό έργο που παράγεται από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων κατά μήκος του εξωτερικού κυκλώματος. Επομένως, ισχύει:

$$\Delta G_f = W_{\eta\lambda\epsilon\kappa} = Q \times E \quad (3-5)$$

όπου  $W_{\eta\lambda\epsilon\kappa}$  είναι το μέγιστο παραγόμενο ηλεκτρικό έργο

$Q$  είναι η ποσότητα του μετακινούμενου φορτίου

$E$  είναι η τάση του κελιού καυσίμου

Κατά τη λειτουργία του κελιού καυσίμου, για κάθε μόριο υδρογόνου που χρησιμοποιείται απελευθερώνονται δύο ηλεκτρόνια τα οποία περνάνε μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα για να φτάσουν στην κάθοδο. Αντίστοιχα, για κάθε mol χρησιμοποιούμενου υδρογόνου περνάνε από το εξωτερικό κύκλωμα  $2N$  ηλεκτρόνια και επομένως φορτίο ίσο με  $-2Ne$  Coulombs, όπου  $N$  είναι ο αριθμός Avogadro και  $-e$  είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου. Δηλαδή:

$$Q = -2NE = -2F \quad (3-6)$$

όπου  $F = 96485$  Coulombs είναι η σταθερά του Faraday ή αλλιώς το φορτίο που περιέχεται σε ένα mol ηλεκτρονίων

Επομένως, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs συνδέεται με την τάση του κελιού καυσίμου  $E$  σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta G_f = -2FE \quad (3-7)$$

Η τάση  $E$  καλείται *αντιστρεπτό δυναμικό κελιού καυσίμου* (reversible fuel cell potential) και με βάση τις εξισώσεις (3-3) και (3-7), μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = \frac{-\Delta G_f}{2F} = \frac{-\Delta G_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3-8)$$

Η εξίσωση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό του αντιστρεπτού δυναμικού σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συγκεντρώσεις συστατικών όταν τα συστατικά που συμμετέχουν στην αντίδραση δεν βρίσκονται σε πρότυπη κατάσταση.

Ο όρος  $\frac{-\Delta G_f^0}{2F}$  ο οποίος εμφανίζεται στην εξίσωση (3-8) αντιστοιχεί στο πρότυπο δυναμικό του κελιού  $E^0$ , δηλαδή στο αντιστρεπτό δυναμικό που αντιστοιχεί σε συνθήκες πρότυπης κατάστασης ( $p_{H_2} = p_{O_2} = 1 \text{ atm}$ ). Σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (1 atm, 298.15 K) το δυναμικό αυτό είναι ίσο με:

$$E_{ref}^0 = -\frac{\Delta G_{f,ref}^0}{2F} = \frac{237.1 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ A s/mol}} = 1.229 \text{ V} \quad (3-9)$$

Η τιμή αυτή αποτελεί το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να εμφανίσει το κελί καυσίμου σε όλες τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Στην περίπτωση που το σύστημα δεν βρίσκεται στους 298.15 K, για τον υπολογισμό του πρότυπου δυναμικού ενός κελιού καυσίμου υδρογόνου συναρτήσει της θερμοκρασίας στη βιβλιογραφία προτείνεται η χρησιμοποίηση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$E^0 = E_{ref}^0 + \frac{\Delta S_{ref}^0}{2F} (T - T_{ref}) \quad (3-10)$$

δηλαδή

$$E^0 = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) \quad (3-11)$$

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της θερμοκρασίας και των μερικών πιέσεων των στοιχείων, το αντιστρεπτό δυναμικό του κελιού ή αλλιώς η τάση *Nerst* του κελιού καυσίμου δίνεται από τη σχέση

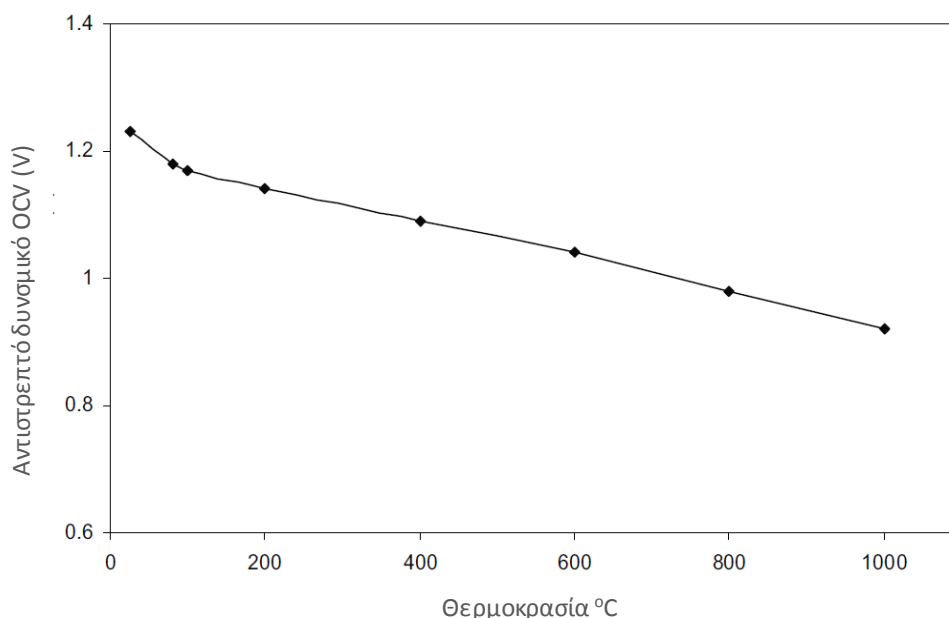
$$E_{Nerst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3-12)$$

η οποία μετά την αντικατάσταση των τιμών των γνωστών φυσικών ποσοτήτων γράφεται

$$E_{Nerst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \cdot 10^{-5} T \cdot \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3-13)$$

Αποδεικνύεται ότι η τάση αυτή ταυτίζεται με τη θεωρητικά αναμενόμενη τάση που παράγει το κελί καυσίμου σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος (reversible Open Circuit Voltage – OCV). Ωστόσο, στην πράξη ακόμα και όταν το κελί δεν λειτουργεί υπό φορτίο παρατηρούνται μη αντιστρεπτές απώλειες τάσης, το οποίο σημαίνει ότι οι πραγματικές τιμές

της OCV είναι πάντα μικρότερες από τις θεωρητικά αναμενόμενες. Μία πιθανή εξήγηση αποδίδει το γεγονός στη διάχυση καυσίμου στον ηλεκτρολύτη και στα εσωτερικά ρεύματα που παρατηρούνται, φαινόμενα τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια μαζί με τους γενικούς μηχανισμούς απωλειών τάσης που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του κελιού.



**Σχήμα 3.16.** Αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες σε συνθήκες πρότυπης πίεσης.

### 3.3.4 Απόδοση κελιού καυσίμου

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των συστημάτων κελιών καυσίμου σε σχέση με τα κλασικά μηχανικά ή θερμικά συστήματα είναι η αυξημένη συγκριτικά με αυτά ενεργειακή απόδοση που έχουν. Η λειτουργία ενός κελιού καυσίμου βασίζεται στη μετατροπή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs της χημικής ουσίας που δρα ως καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Υποθέτοντας ότι όλη η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και συγκρίνοντάς τη με την τιμή της ενθαλπίας του υδρογόνου, η μέγιστη δυνατή θεωρητική απόδοση ενός κελιού καυσίμου μπορεί να οριστεί ως:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3-14)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας της αντίδρασης σχηματισμού νερού αντιστοιχεί στη θερμική ενέργεια που θα παραγόταν από την πλήρη καύση 1 mol υδρογόνου με ½ mol οξυγόνου, ποσότητα η οποία είναι γνωστή και ως θερμογόνο δύναμη (heating value – HV). Η υπολογιζόμενη μεταβολή της ενθαλπίας της αντίδρασης διαφέρει αν το παραγόμενο νερό βρίσκεται στην υγρή ή στην αέρια φάση και ονομάζεται αντίστοιχα στην πρώτη περίπτωση

υψηλότερη θερμογόνος δύναμη (higher heating value – HHV) ενώ στη δεύτερη περίπτωση κατώτερη θερμογόνος δύναμη (lower heating value – LHV). Για τον λόγο αυτόν, όταν υπολογίζεται η απόδοση ενός κελιού καυσίμου πρέπει να αναφέρεται αν η βάση υπολογισμού είναι το HHV ή το LHV.

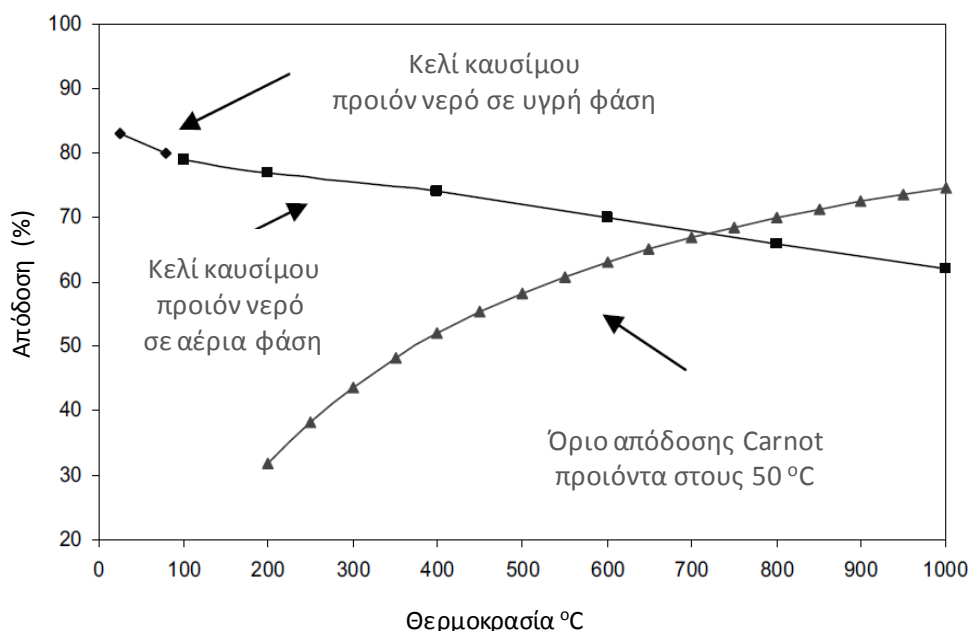
Με βάση το HHV του υδρογόνου, η μέγιστη δυνατή θεωρητική απόδοση ενός κελιού καυσίμου στους 25°C και σε ατμοσφαιρική πίεση είναι επομένως:

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = \frac{237.1 \text{ kJ/mol}}{286 \text{ kJ/mol}} = 83\% \quad (3-15)$$

Διαιρώντας αριθμητή και παρανομαστή με την ποσότητα  $nF$  μπορούμε επίσης να εκφράσουμε τη μέγιστη απόδοση του κελιού ως τον λόγο μεταξύ του πρότυπου δυναμικού προς το δυναμικό που αντιστοιχεί στο HHV του υδρογόνου, δηλαδή:

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0/nF}{\Delta H^0/nF} = \frac{E_o}{E_{\text{HHV}}} = \frac{1.23 \text{ V}}{1.48 \text{ V}} = 83\%$$

Η μέγιστη θεωρητική απόδοση που υπολογίστηκε παραπάνω διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίες μιας και οι τιμές των  $\Delta G$  και  $\Delta H$  είναι διαφορετικές. Το Σχήμα 3.17 απεικονίζει την τιμή που λαμβάνει η απόδοση για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας σε συνθήκες πρότυπης πίεσης.



**Σχήμα 3.17.** Θεωρητική απόδοση κελιού καυσίμου υδρογόνου σε πρότυπη πίεση για διαφορετικές θερμοκρασίες βασισμένη στην τιμή HHV.

Με βάση τα παραπάνω, η πραγματική απόδοση ενός κελιού καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος της τάσης που παράγει στην έξοδό του προς το θεωρητικό δυναμικό που θα παραγόταν βάσει της θερμογόνου δύναμης του υδρογόνου, δηλαδή στην περίπτωση του HHV:

$$\eta_{cell} = \frac{V_{cell}}{1.48} \times 100\% \quad (3-16)$$

Ωστόσο, στην πράξη παρατηρείται ότι το κελί καυσίμου δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλο το καύσιμο με το οποίο τροφοδοτείται και κάποια ποσότητα καυσίμου περνάει χωρίς να αντιδράσει. Έτσι, ένας συντελεστής κατανάλωσης μπορεί να οριστεί ως:

$$\mu_f = \frac{\text{μάζα καυσίμου που αντέδρασε}}{\text{συνολική μάζα καυσίμου}} \quad (3-17)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση  $H_2$  που επιτυγχάνεται, η απόδοση του κελιού καυσίμου μπορεί επομένως τελικά να δοθεί από τη σχέση:

$$\eta_{cell} = \mu_f \frac{V_{cell}}{1.48} \times 100\% \quad (3-18)$$

## 3.4 Απώλειες τάσης

### 3.4.1 Γενικά

Η μέγιστη θεωρητικά τιμή που μπορεί να λάβει ή τάση σ' ένα κελί καυσίμου υδρογόνου είναι όταν το κελί λειτουργεί σε *πρότυπες συνθήκες αναφοράς* και με τα συμμετέχοντα συστατικά σε *πρότυπη κατάσταση* και είναι ίση με

$$E_{ref}^0 = -\frac{\Delta G_{f,ref}^0}{2F} = \frac{237.1 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ A s/mol}} = 1.229 \text{ V} \quad (3-19)$$

Στην πραγματικότητα όμως, κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου υπό φορτίο, η τάση που παρατηρείται έχει τιμή μικρότερη από αυτή που προκύπτει από τον θεωρητικό υπολογισμό της. Αυτό οφείλεται στην εμφάνιση μη αντιστρεπτών φαινομένων στο κελί που έχουν σαν συνέπεια απώλειες σε ενεργεία και εμφάνιση πτώσεων τάσης με αποτέλεσμα η μετρούμενη τάση να αποκλίνει από τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή της. Επομένως για να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής τάσης εξόδου του κελιού καυσίμου, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες τάσης που παρατηρούνται στο κελί.

Οι τρεις κύριες κατηγορίες απωλειών στις οποίες οφείλεται η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ της πραγματικής τάσης του κελιού και της τάσης Nerst είναι:

- (1) οι απώλειες ενεργοποίησης (activation losses)
- (2) οι ωμικές απώλειες (ohmic losses)
- (3) οι απώλειες συγκέντρωσης (concentration losses)

Συνοπτικά, οι απώλειες ενεργοποίησης οφείλονται στη βραδεία κινητική των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο κελί, οι ωμικές απώλειες στην ηλεκτρική αντίσταση που προβάλλεται από τα διάφορα δομικά στοιχεία του κελιού στη ροή των ιόντων και των ηλεκτρονίων ενώ οι απώλειες συγκέντρωσης σε περιορισμούς που εμφανίζονται κατά τη μεταφορά της μάζας των αντιδρώντων.

Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν οι παραπάνω μηχανισμοί στις απώλειες τάσης, η τάση λειτουργίας του κελιού καυσίμου μπορεί τελικά να εκφραστεί ως η αντιστρεπτή τάση του κελιού μειωμένη κατά το άθροισμα των πτώσεων τάσης που προκαλούν οι παραπάνω μηχανισμοί, δηλαδή:

$$V_{cell} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (3-20)$$

όπου  $E_{Nerst}$  είναι το αντιστρεπτό δυναμικό του κελιού  
 $V_{act}$ ,  $V_{ohm}$ ,  $V_{conc}$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα απώλειες ενεργοποίησης, ωμικές απώλειες και απώλειες συγκέντρωσης.

Η εξίσωση (3-10) αποτελεί τη βασική εξίσωση υπολογισμού της τάσης εξόδου που παράγει το κελί καυσίμου και η εφαρμογή της προϋποθέτει τη γνώση των τιμών των απωλειών ενεργοποίησης, των ωμικών απωλειών και των απωλειών συγκέντρωσης. Ο τρόπος υπολογισμού τους είναι αντικείμενο των επόμενων παραγράφων.

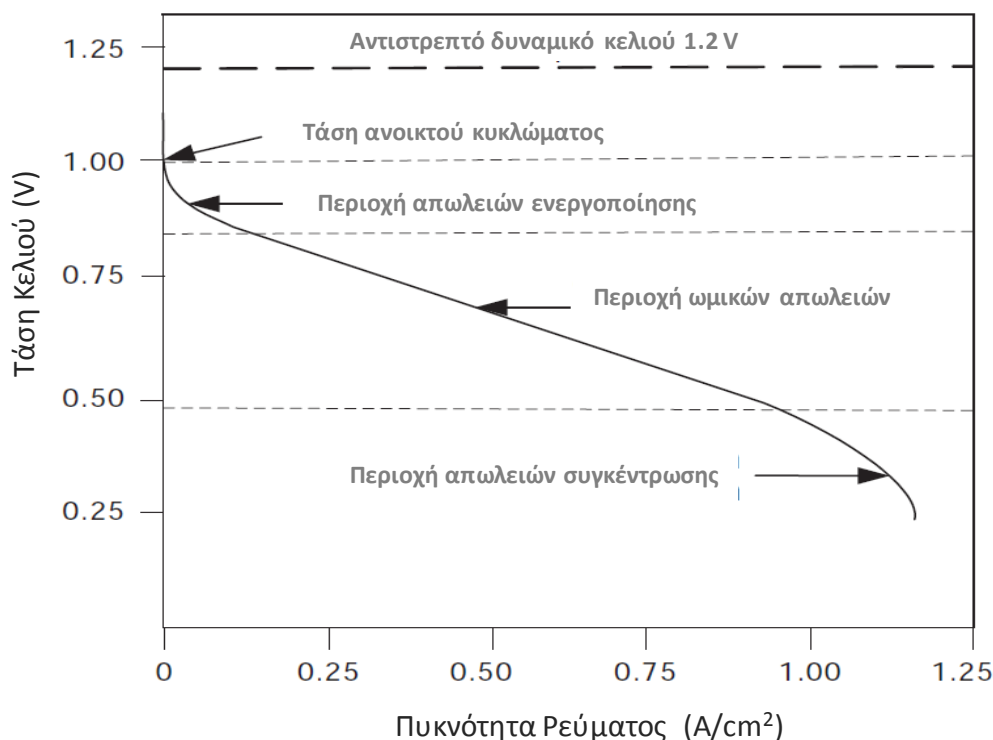
Η τάση εξόδου ενός κελιού καυσίμου καθώς και οι απώλειες τάσης που εμφανίζονται σε αυτό εξαρτώνται από την τιμή της πυκνότητας ρεύματος του κελιού καυσίμου  $j$  ( $A/cm^2$ ), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$j = \frac{i}{A_{cell}} \quad (3-21)$$

όπου  $i$  είναι η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το κελί  
 $A_{cell}$  είναι η ενεργή επιφάνεια του κελιού καυσίμου, δηλαδή η έκταση της επιφάνειας ενός ηλεκτροδίου η οποία είναι ηλεκτροχημικά ενεργή και μπορεί να παράγει ρεύμα.



Αν για κάποιο κελί καυσίμου κατασκευαστεί για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία το διάγραμμα της πραγματικής τάσης του κελιού  $V_{cell}$  συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος του κελιού  $j$  τότε λαμβάνεται μια καμπύλη γραμμική ή οποία ονομάζεται *καμπύλη πόλωσης* (polarization curve) του κελιού. Η καμπύλη αυτή είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου και έχει μορφή παρόμοια με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Στην καμπύλη πόλωσης φαίνεται καθαρά η επίδραση των διαφόρων μη αντιστρεπτών φαινομένων στις απώλειες τάσης.



**Σχήμα 3.18.** Παράδειγμα καμπύλης πόλωσης κελιού καυσίμου με τις αντίστοιχες περιοχές απωλειών τάσης.

Παρατηρώντας την παραπάνω καμπύλη πόλωσης, αρχικά διαπιστώνεται ότι ακόμη και για μηδενική πυκνότητα ρεύματος η εμφανιζόμενη τάση ανοικτού κυκλώματος είναι μικρότερη από την αντιστρεπτή τάση του κελιού. Επίσης, με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος οι απώλειες τάσης του κελιού αυξάνουν ακόμη περισσότερο και μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την τιμή της πυκνότητας ρεύματος σε τρεις κυρίως περιοχές απωλειών τάσης οι οποίες εκδηλώνονται εξαιτίας της εμφάνισης διαφορετικών μη αντιστρεπτών φαινομένων σε κάθε μια από αυτές. Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής:

- (1) Περιοχή απωλειών ενεργοποίησης
- (2) Περιοχή ωμικών απωλειών
- (3) Περιοχή απωλειών συγκέντρωσης

Κατά τη λειτουργία του κελιού καυσίμου στην περιοχή χαμηλών πυκνοτήτων ρεύματος, παρατηρείται απότομη μείωση της τάσης του κελιού η οποία οφείλεται κυρίως στην επίδραση των απωλειών ενεργοποίησης, δηλαδή των απωλειών που σχετίζονται με την βραδύτητα των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Από την άλλη, κατά τη λειτουργία του κελιού στην περιοχή μεσαίων πυκνοτήτων ρεύματος οι απώλειες ενεργοποίησης αποκτούν μια σχετικά σταθερή τιμή ενώ γίνεται σημαντική η επίδραση των ωμικών απωλειών που παρατηρούνται στο κελί. Οι ωμικές απώλειες προκαλούνται κυρίως από την αντίσταση που προβάλλει ο ηλεκτρολύτης στη ροή των ιόντων και τα ηλεκτρόδια στη ροή των ηλεκτρονίων και έχουν ως αποτέλεσμα τη σχεδόν γραμμική μείωση του δυναμικού του κελιού με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος. Τέλος, στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος παρατηρείται ξανά απότομη πτώση του δυναμικού η οποία οφείλεται αυτή τη φορά στην εμφάνιση και την επικράτηση των απωλειών συγκέντρωσης και μεταφοράς μάζας, δηλαδή στην πτώση της συγκέντρωσης των τροφοδοτούμενων αερίων κατά την κατανάλωση του καυσίμου λόγω περιορισμών στην ταχύτητα μεταφοράς μάζας τους και στην μη επαρκή τροφοδότηση με αντιδρώντα των ηλεκτροδίων.

Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και ένα τέταρτο είδος απωλειών το οποίο είναι σημαντικό μόνο σε πολύ μικρές τιμές πυκνότητας ρεύματος. Οι απώλειες αυτές οφείλονται σε δύο ανεπιθύμητους παράγοντες, στα εσωτερικά ρεύματα που δημιουργούνται στο κελί καυσίμου από κάποια ηλεκτρόνια που καταφέρνουν να διασχίσουν τον ηλεκτρολύτη και στη διάχυση καυσίμου μέσα στον ηλεκτρολύτη, δηλαδή στο γεγονός ότι κάποια ποσότητα καυσίμου εισέρχεται μέσα σε αυτόν και δεν αξιοποιείται. Γενικά όμως, πέραν της περιοχής των πολύ μικρών πυκνοτήτων ρεύματος, οι απώλειες αυτές είναι πολύ μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Τέλος, για να υπολογιστεί η τάση εξόδου της συστοιχίας κελιών καυσίμου, δηλαδή της κυψέλης, αρκεί να πολλαπλασιαστεί η τάση εξόδου του ενός κελιού επί τον συνολικό αριθμό των κελιών  $N$ , δηλαδή:

$$V_{out} = N \cdot V_{cell} \quad (3-22)$$

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή κάθε είδους απωλειών τάσης και εύρεση της σχέσης υπολογισμού τους.

### 3.4.2 Απώλειες ενεργοποίησης

Οι απώλειες ενεργοποίησης (activation losses) συνδέονται άμεσα με την ταχύτητα των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και συνιστούν το ενεργειακό φράγμα που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση. Η ταχύτητα της αντίδρασης που πραγματοποιείται στα ηλεκτρόδια έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της απώλειας ενεργοποίησης. Επειδή η αντίδραση οξειδωσης του υδρογόνου στην άνοδο είναι αρκετά

ταχύτερη από την αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο, οι απώλειες ενεργοποίησης οφείλονται κυρίως στην αντίδραση της καθόδου και παρατηρούνται κυρίως εκεί. Οι συνέπειες των απωλειών αυτών είναι ιδιαίτερα εμφανείς στις χαμηλές πυκνότητες ρεύματος όπου εξαιτίας του ενεργειακού φράγματος που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να αρχίσουν να συμβαίνουν οι χημικές αντιδράσεις, η καμπύλη της τάσης εξόδου πέφτει απότομα. Η τιμή της πτώσης τάσης που επιφέρουν οι απώλειες ενεργοποίησης συχνά κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 0.2 V, με αποτέλεσμα το μέγιστο δυναμικό να μειώνεται σε τιμές μικρότερες από 1.0 V, ακόμα και υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος. Η δημιουργία της υπέρτασης ενεργοποίησης (activation overvoltage) η οποία οδηγεί σε αυτή την πτώση τάσης οφείλεται στην ουσία στο φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας που παρατηρείται στις επιφάνειες μεταξύ ηλεκτροδίων και καταλύτη, το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Η πτώση τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης  $V_{act}$  υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια από την εξίσωση Tafel:

$$V_{act} = A \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) \quad (3-23)$$

όπου  $A$  είναι η σταθερά Tafel της ηλεκτροχημικής αντίδρασης

$j$  είναι η πυκνότητα ρεύματος

$j_0$  είναι η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής

Η εξίσωση Tafel μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη της πυκνότητας του ρεύματος ανταλλαγής, δηλαδή όταν

$$j > j_0$$

Για μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου στην οποία μεταφέρονται δύο ηλεκτρόνια ανά mol, η σταθερά  $A$  δίνεται από τη σχέση,

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (3-24)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς φορτίου της ηλεκτροχημικής αντίδρασης

$R$  είναι η παγκόσμια σταθερά αερίων (8.314 J/(kg·K))

$T$  είναι η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου

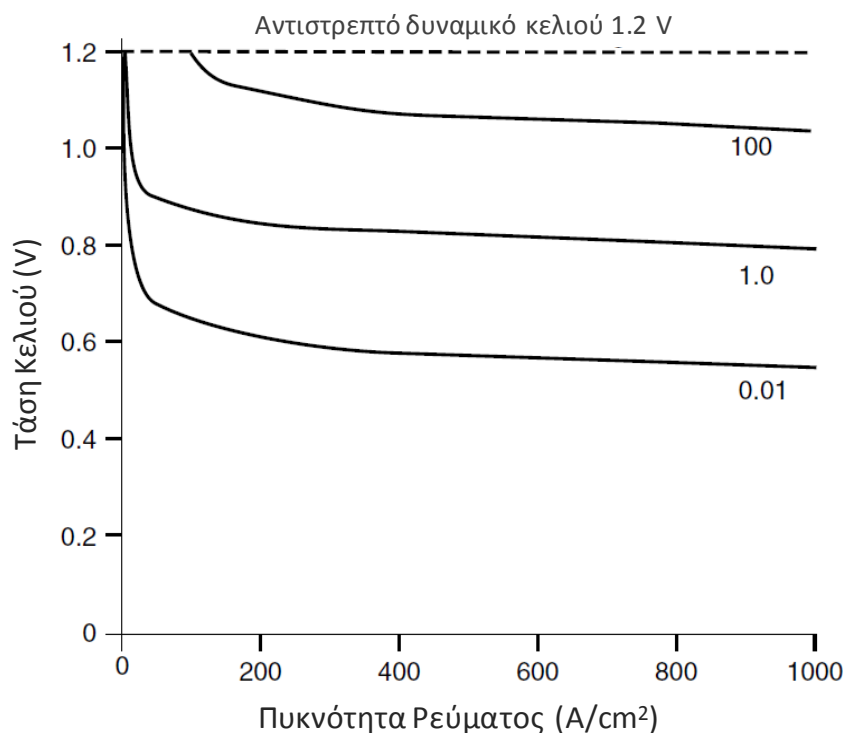
$F$  είναι η σταθερά Faraday (96485 C/mol)

επομένως η εξίσωση Tafel γράφεται:

$$V_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) \quad (3-25)$$

Ο συντελεστής  $\alpha$  καλείται συντελεστής μεταφοράς φορτίου (charge transfer coefficient) ή παράγοντας συμμετρίας της ηλεκτροδιακής αντίδρασης και είναι το μέτρο της συμμετρίας του ενεργειακού φράγματος που απαιτείται να ξεπεραστεί για να μπορέσει να συμβεί η ηλεκτροχημική αντίδραση. Οι τιμές του συντελεστή  $\alpha$  κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1.0 και εξαρτώνται από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το ηλεκτρόδιο. Για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου και για μια μεγάλη ποικιλία υλικών η τιμή του συντελεστή  $\alpha$  είναι 0.5. Στο ηλεκτρόδιο του οξυγόνου ο συντελεστής  $\alpha$  παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση, αλλά οι τιμές του παραμένουν στην περιοχή μεταξύ 0.1 και 0.5.

Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής  $j_0$  είναι η πυκνότητα ρεύματος που παρατηρείται όταν η αντίδραση που συμβαίνει στο ηλεκτρόδιο είναι σε ισορροπία δηλαδή όταν οι ταχύτητες των αντιδράσεων της ανόδου και της καθόδου και κατά συνέπεια οι αντίστοιχες πυκνότητες ρεύματος, είναι ίσες χωρίς να είναι μηδενικές. Η τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση, είναι μεγαλύτερη όσο ταχύτερη είναι η ηλεκτροχημική αντίδραση που συμβαίνει και εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύνθεση του ηλεκτροδίου, η τραχύτητά του, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των οξειδωτικών και αναγωγικών συστατικών στο σύστημα. Γενικά η τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής έχει πολύ σημαντική επίδραση στην απόδοση των ηλεκτροδίων του κελιού καυσίμου και επιδιώκεται να είναι όσο υψηλότερη είναι εφικτό, μιας και αυτό ισοδυναμεί με χαμηλότερη πτώση τάσης. Η επίδραση της τιμής της στο παραγόμενο δυναμικό φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 3.19.



**Σχήμα 3.19.** Γραφικές παραστάσεις της τάσης κελιού καυσίμου συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος, θεωρώντας ότι οι απώλειες οφείλονται μόνο λόγω υπέρτασης ενεργοποίησης σε ένα ηλεκτρόδιο, για διαφορετικές τιμές τιμές  $j_0$  (0.01, 1.0 και 100 mA/cm<sup>2</sup>).

Η σταθερά  $A$  στην εξίσωση (3-24) εξαρτάται από την ταχύτητα της ηλεκτροχημικής δράσης και αυξάνεται όσο πιο βραδεία είναι η αντίδραση. Τέλος, να σημειωθεί ότι αν και από την εξίσωση (3-25) φαίνεται ότι η πτώση τάσης αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, αυτό δεν ισχύει μιας και η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επίδραση στην τιμή της  $j_0$ , επίδραση σημαντικότερη από τη μεταβολή που προκαλείται στην τιμή της σταθεράς  $A$ . Στην πραγματικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες η υπέρταση ενεργοποίησης όχι απλώς δεν αυξάνεται αλλά γίνεται λιγότερο σημαντική.

### Εξίσωση Butler-Volmer

Αναδιατάσσοντας τους όρους της εξίσωσης Tafel μπορούμε να εξάγουμε μια έκφραση για την πυκνότητα ρεύματος στα ηλεκτρόδια αντί για την τάση. Η εξίσωση που προκύπτει καλείται εξίσωση Butler-Volmer και χρησιμοποιείται συχνά ως ισοδύναμη εναλλακτική της εξίσωσης Tafel.

$$j = j_0 \exp\left(\frac{2aFV_{act}}{RT}\right) \quad (3-26)$$

### Τρόποι μείωσης των απωλειών ενεργοποίησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να μειωθούν οι απώλειες ενεργοποίησης είναι σημαντικό να εφαρμοστούν τεχνικές που να οδηγούν στην αύξηση της τιμής της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής  $j_0$ . Τρόποι για να επιτευχθεί αυτό είναι:

- Ανύψωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κελιού η οποία σε κελιά καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών μπορεί οδηγήσει μέχρι και σε δέκα φορές αύξηση της τιμής της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής.
- Χρησιμοποίηση καταλυτών από κατάλληλα μέταλλα η φύση των οποίων επιδρά σημαντικά στην αύξηση της πυκνότητας ρεύματος.
- Αύξηση της τραχύτητας των ηλεκτροδίων η οποία έχει σα συνέπεια την αύξηση της επιφάνειας της αντίδρασης.
- Αύξηση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων συστατικών για παράδειγμα με τη χρήση καθαρού  $O_2$  αντί για αέρα.

### 3.4.3 Ωμικές απώλειες

Οι ωμικές απώλειες (ohmic losses) που παρατηρούνται σε ένα κελί καυσίμου προκύπτουν από την αντίσταση που προβάλλουν τα διάφορα στοιχεία που συνιστούν την κυψέλη στη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου. Στην αντίσταση αυτή συμβάλλουν όλα τα στοιχεία που παρεμβάλλονται στη διαδρομή του φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των

ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη, του στρώματος καταλύτη, του στρώματος διάχυσης καυσίμου, των διπολικών πλακών και των επαφών διασύνδεσης. Γενικά οι προκαλούμενες απώλειες διακρίνονται κυρίως σε δύο είδη, στις απώλειες λόγω της αντίστασης που προβάλλεται στη ροή των μετακινούμενων ηλεκτρονίων  $e^-$  κατά μήκος της διαδρομής τους ( $R_{elec}$ ) καθώς και στις απώλειες λόγω της αντίστασης που προβάλλει ο ηλεκτρολύτης στη ροή των ιόντων  $H^+$  μέσα από αυτόν ( $R_{ionic}$ ). Αυτό μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$V_{ohmic} = iR_{ohmic} = i(R_{elec} + R_{ionic}) \quad (3-27)$$

Στις περισσότερες κυψέλες καυσίμου, εκ των δύο αντιστάσεων η συμβολή της  $R_{ionic}$  είναι κυρίαρχη αν και η  $R_{elec}$  που μπορεί να παρουσιαστεί λόγω έλλειψης καλής επαφής μεταξύ των κελιών και των διαφόρων στρωμάτων αγωγής μπορεί επίσης να παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει επειδή η μετακίνηση των ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη είναι αρκετά πιο δύσκολη από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων κατά μήκος του σχηματιζόμενου κυκλώματος, με αποτέλεσμα οι κυριότερες ωμικές απώλειες να προκύπτουν από την αντίσταση που προβάλλεται στη ροή των ιόντων. Κοινές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ωμικών απωλειών αποτελούν η κατασκευή ηλεκτρολυτών με όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος καθώς και η χρήση υλικών υψηλής αγωγιμότητας με καλές διασυνδέσεις μεταξύ τους.

Η πτώση τάσης που προκύπτει λόγω ωμικών απωλειών εκφράζεται συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος  $j$  ως ακολούθως:

$$V_{ohmic} = j(A_{cell}R_{ohmic}) = j(ASR_{ohmic}) \quad (3-28)$$

όπου η  $ASR_{ohmic}$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ) είναι η ανά επιφάνεια ειδική αντίσταση (area-specific resistance) κάθε κελιού καυσίμου, η οποία ορίζεται ως

$$ASR_{ohmic} = A_{cell}R_{ohmic} \quad (3-29)$$

Θεωρώντας ότι οι ωμικές απώλειες οφείλονται κυρίως στην αντίσταση που προβάλλει η μεμβράνη στη ροή των ιόντων, η πτώση τάσης μπορεί επίσης να εκφραστεί με τον εξής τρόπο:

$$V_{ohmic} = iR_{ohmic} = jA_{cell}R_{ohmic} = jA_{cell} \left( \frac{d}{A_{cell}} r_M \right) = j \cdot d \cdot r_M \quad (3-30)$$

όπου  $r_M$  είναι η ειδική αντίσταση της μεμβράνης στη ροή των πρωτονίων ( $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ )

$d$  είναι το πάχος της μεμβράνης πολυμερούς (cm)

$A_{cell}$  είναι η ενεργή επιφάνεια του κελιού καυσίμου ( $\text{cm}^2$ )

Από την παραπάνω εξίσωση επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι ωμικές απώλειες μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας λεπτότερο στρώμα ηλεκτρολύτη ή χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτη υψηλότερης ιοντικής αγωγιμότητας.

Ακολούθως, η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη είναι συνάρτηση του τύπου και των χαρακτηριστικών της μεμβράνης, της περιεκτικότητάς της σε νερό, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ρεύματος. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης μεμβράνης Nafion έχει προταθεί η χρήση της παρακάτω εμπειρικής εξίσωσης, η οποία επιχειρεί να λάβει υπόψη την επίδραση των παραγόντων αυτών:

$$r_M = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03j + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 j^{2.5} \right]}{[\lambda - 0.634 - 3j] \exp \left( 4.18 \left[ \frac{T - 303}{T} \right] \right)} \quad (3-31)$$

όπου  $\lambda$  παράμετρος εξαρτώμενη από τον βαθμό ενυδάτωσης του κελιού

Τα βασικά στοιχεία της εξίσωσης αυτής είναι τα εξής:

- Ο όρος  $\frac{181.6}{\lambda - 0.634}$  αντιπροσωπεύει την ειδική αντίσταση σε μηδενικό ρεύμα, στους 30°C.
- Ο εκθετικός όρος στον παρανομαστή αντιστοιχεί στον παράγοντα διόρθωσης αν η θερμοκρασία του κελιού δεν είναι στους 30°C.
- Ο όρος σε τετραγωνικές παρενθέσεις στον αριθμητή και ο όρος  $3j$  μείωσης του  $\lambda$  αντιπροσωπεύουν μία εμπειρική διόρθωση στην ειδική αντίσταση επιχειρώντας να συμπεριλάβουν την εξάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό από την πυκνότητα ρεύματος και τη θερμοκρασία.
- Ο όρος  $\lambda$  αποτελεί ουσιαστικά παράμετρο προσαρμογής για την εξίσωση και επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι από 14 στην περίπτωση που η σχετική υγρασία είναι 100% μέχρι 23 στην περίπτωση που η μεμβράνη είναι πλημμυρισμένη.

Η πτώση τάσης που παρατηρείται λόγω ωμικών απωλειών μπορεί να μειωθεί ως εξής:

- Με τη χρήση ηλεκτροδίων με την υψηλότερη δυνατή αγωγιμότητα.
- Με καλή σχεδίαση και χρήση των κατάλληλων υλικών για τις διπολικές πλάκες και τις διασυνδέσεις των κελιών.
- Μειώνοντας το πάχος του ηλεκτρολύτη όσο αυτό είναι δυνατό.

### 3.4.4 Απώλειες συγκέντρωσης ή μεταφοράς μάζας

Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε μια κυψέλη καυσίμου είναι η συνεχής τροφοδοσία των κελιών της με καύσιμο και οξειδωτικό. Κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου, λόγω των διεξαγόμενων αντιδράσεων η συγκέντρωση των

παρεχόμενων αερίων υφίσταται μια διαρκή μείωση, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ποσότητα ρεύματος που παρέχεται στο τροφοδοτούμενο φορτίο καθώς και από φυσικούς παράγοντες που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας του κάθε αερίου. Η πτώση της συγκέντρωσης των αερίων προκαλεί αντίστοιχα πτώση στη μερική πίεσή τους, το οποίο συνεπάγεται την ύπαρξη απωλειών τάσης. Λόγω του γεγονότος ότι οι απώλειες αυτές οφείλονται στην αδυναμία του συστήματος τροφοδοσίας να καλύψει άμεσα την παρατηρούμενη πτώση στη συγκέντρωση των αερίων, οι απώλειες αυτές καλούνται απώλειες μεταφοράς μάζας (mass transport losses), ή αλλιώς απώλειες συγκέντρωσης (concentration losses). Η δράση των απωλειών αυτών γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στις υψηλές πυκνότητες ρεύματος.

Για την εύρεση της σχέσης υπολογισμού της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης  $V_{conc}$  ως θεωρηθεί μια μεταβολή στην τιμή της μερικής πίεσης του υδρογόνου από την τιμή  $P_1$  στην τιμή  $P_2$ , θεωρώντας ότι οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του νερού  $P_{O_2}$  και  $P_{H_2O}$  αντίστοιχα παραμένουν αμετάβλητες. Σύμφωνα με την εξίσωση (3-12), η πτώση τάσης που παρατηρείται θα είναι

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= E_2 - E_1 = \\
 &= E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] + \frac{RT}{2F} \ln [p_{H_2(2)}] - E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] - \frac{RT}{2F} \ln [p_{H_2(1)}] = \\
 &= \frac{RT}{2F} \ln(P_2) - \frac{RT}{2F} \ln(P_1) = \\
 &= \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \tag{3-32}
 \end{aligned}$$

Η παραπάνω εξίσωση συνδέει την πτώση τάσης του κελιού με τη μεταβολή στη μερική πίεση του τροφοδοτούμενου υδρογόνου. Η μεταβολή της μερικής πίεσης του υδρογόνου μπορεί να συνδεθεί με την πυκνότητα ρεύματος με τον ακόλουθο τρόπο. Αν υποθεθεί ότι η πυκνότητα ρεύματος του κελιού  $j$  είναι γραμμική συνάρτηση της μερικής πίεσης του υδρογόνου  $P$  και ότι το αέριο υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο καταναλώνεται με ρυθμό ίσο με τον μέγιστο δυνατό ρυθμό παροχής του, τότε η μερική πίεσή του είναι μηδενική και το ρεύμα που παράγεται λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του  $j_{max}$ . Από την άλλη, αν  $P_{oc}$  είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτού κυκλώματος τότε το παραγόμενο ρεύμα στην πίεση αυτή θα είναι μηδενικό. Έτσι, γνωρίζοντας αυτά τα δύο σημεία της συνάρτησης  $j(P)$ , η εξίσωση της ευθείας της προκύπτει από τον αντίστοιχο τύπο:

$$\begin{aligned}
 j - j_{max} &= \frac{j_{max} - 0}{0 - P_{oc}} (P - 0) \Rightarrow \\
 \frac{P}{P_{oc}} &= 1 - \frac{j}{j_{max}} \tag{3-33}
 \end{aligned}$$



Αν θεωρηθεί ότι η αρχική πίεση  $P_1$  είναι η πίεση που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτού κυκλώματος  $P_{oc}$  ενώ η πίεση  $P_2$  είναι η πίεση  $P$  που αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος  $j$ , τότε με βάση τις εξισώσεις (3-32) και (3-33) προκύπτει ότι

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P}{P_{oc}}\right) \Rightarrow \\ V_{conc} &= \left| \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right) \right| \Rightarrow \\ V_{conc} &= -\frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right)\end{aligned}\quad (3-34)$$

Ο όρος  $RT/2F$  είναι διαφορετικός για το κάθε αντιδρών αέριο, για παράδειγμα για το οξυγόνο θα είναι  $RT/4F$ . Γενικά, ο όρος αυτός στη γενική έκφραση των απωλειών συγκέντρωσης αντικαθίσταται από μια σταθερά  $B$ , η οποία εξαρτάται από το είδος του κελιού καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας του. Έτσι, η εξίσωση υπολογισμού παίρνει την τελική της μορφή:

$$V_{conc} = -B \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right) \quad (3-35)$$

Η μείωση των απωλειών συγκέντρωσης μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση της μεταφοράς μάζας με τους ακόλουθους τρόπους:

- Αυξάνοντας τη συγκέντρωση των αντιδρώντων, π.χ. του οξυγόνου με χρήση καθαρού οξυγόνου αντί για αέρα.
- Αυξάνοντας του ρυθμού τροφοδοσίας των αερίων ή της μερικής πίεσής τους.
- Με κατάλληλο σχεδιασμό του πεδίου ροής των αερίων ώστε να ενισχυθεί η μεταφορά μάζας.
- Με τη βελτιστοποίηση του πορώδους και της δομής των ηλεκτροδίων έτσι ώστε να διευκολυνθεί η διάχυση των αντιδρώντων αερίων.

### 3.4.5 Εσωτερικά ρεύματα και διάχυση καυσίμου

Δύο ακόμα φαινόμενα τα οποία συμβάλλουν στην ύπαρξη ενεργειακών απωλειών είναι το δημιουργούμενο εσωτερικό ρεύμα (internal current) και η διάχυση καυσίμου (fuel crossover). Αν και η επιλογή του ηλεκτρολύτη γίνεται έτσι ώστε να επιτρέπει τη ροή ιόντων στο εσωτερικό του εμποδίζοντας ταυτόχρονα την είσοδο ηλεκτρονίων και μορίων αερίου, στην πράξη, τόσο μια ποσότητα ηλεκτρονίων όσο και μια ποσότητα αερίου υδρογόνου επιτυγχάνει να εισέλθει σε αυτόν και να φτάσει στην κάθοδο διασχίζοντάς τον. Έτσι, από τη

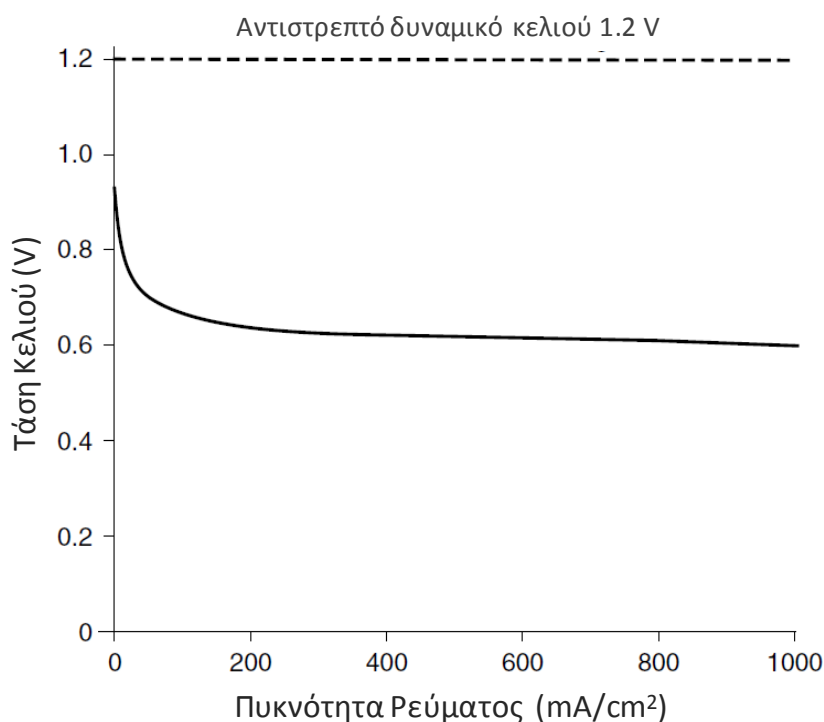
μία πλευρά υπάρχουν ηλεκτρόνια τα οποία φτάνουν στην κάθοδο χωρίς να χρειαστεί να περάσουν μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα και επομένως χωρίς να συμμετέχουν στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ενώ από την άλλη τα μόρια υδρογόνου που φτάνουν στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη αντιδρούν απευθείας με το οξυγόνο χάρη στον καταλύτη χωρίς να παράγουν ρεύμα επίσης. Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου οι απώλειες αυτές συνήθως είναι πολύ μικρές, αλλά μπορούν να γίνουν σημαντικές όταν η κυψέλη λειτουργεί σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος ή υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος.

Η επίδραση των παραπάνω φαινομένων μπορεί να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς ως ακολούθως. Θεωρώντας ότι το ολικό ηλεκτρικό ρεύμα ισοδυναμεί με το άθροισμα του ρεύματος που αξιοποιείται και του ρεύματος που χάνεται, τότε

$$i = i_{ext} + i_{loss} \quad (3-36)$$

Ανάγοντας τη σχέση αυτή σε σχέση πυκνοτήτων ρεύματος βάσει του ορισμού  $j = i/A$ , αντικαθιστώντας την ολική πυκνότητα ρεύματος στην εξίσωση (3-25), η τάση εξόδου στις χαμηλές πυκνότητες ρεύματος θεωρώντας μόνο τις απώλειες ενεργοποίησης θα είναι πλέον:

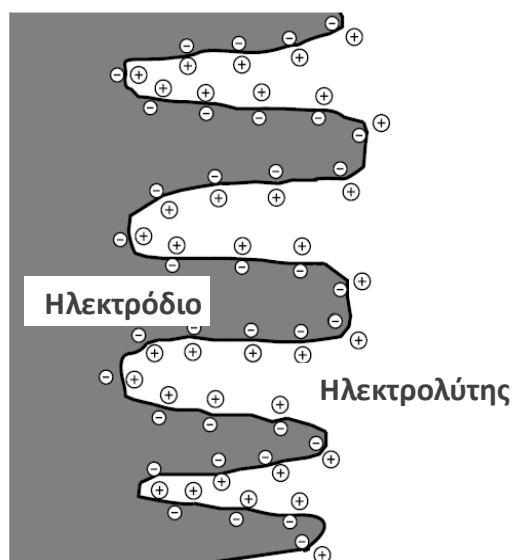
$$V_{cell} = E_o - \frac{RT}{aF} \ln \left( \frac{j_{ext} + j_{loss}}{j_0} \right) \quad (3-37)$$



**Σχήμα 3.20.** Η γραφική παράσταση που προκύπτει από την εξίσωση (3-37) για  $E = 1.2 \text{ V}$ ,  $A = 0.06 \text{ V}$ ,  $i_0 = 0.04 \text{ mA/cm}^2$  και  $i_{loss} = 3 \text{ mA/cm}^2$ . Απεικονίζει την τάση εξόδου θεωρώντας μόνο τις απώλειες ενεργοποίησης και εσωτερικών ρευμάτων - διάχυσης καυσίμου.

### 3.4.6 Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας

Όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή, παρατηρείται το φαινόμενο να συσσωρεύεται φορτίο στις επαπτόμενες επιφάνειες και αντίστοιχα να μεταφέρεται φορτίο από τη μία επιφάνεια στην άλλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαμορφώνονται στη διεπαφή δύο φορτισμένα στρώματα συνθέτοντας μια ηλεκτρική διπλοστοιβάδα, το οποίο φαινόμενο καλείται αντίστοιχα φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας (double-layer charge effect). Στα ηλεκτροχημικά συστήματα, η διαμόρφωση της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας προκύπτει κατά βάση λόγω φαινομένων διάχυσης, λόγω των αντιδράσεων που διεξάγονται μεταξύ των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στα ηλεκτρόδια και των ιόντων του ηλεκτρολύτη ή επίσης μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα εφαρμοζόμενων τάσεων. Στην περίπτωση ενός κελιού καυσίμου PEM, ηλεκτρόνια συλλέγονται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενώ κατιόντα  $H^+$  έλκονται στην επιφάνεια του ηλεκτρολύτη (Σχήμα 3.21). Αυτά, στη συνέχεια θα αποτελέσουν υλικό για τις διεξαγόμενες στα ηλεκτρόδια αντιδράσεις, με δράση κυρίως στην κάθοδο του κελιού μιας και εκεί η αντίδραση διεξάγεται με αρκετά χαμηλότερο ρυθμό από ότι στην άνοδο.



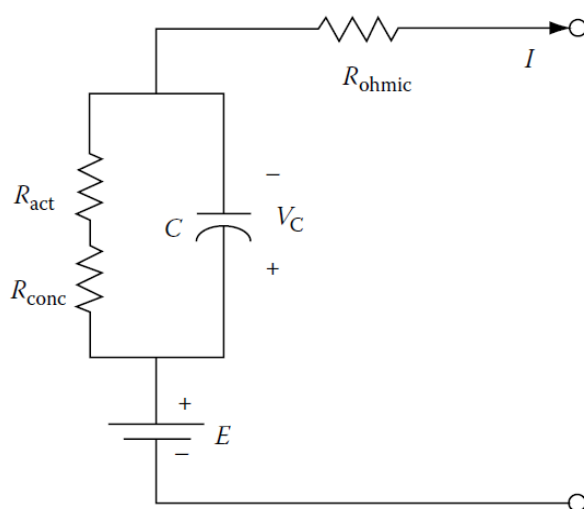
Σχήμα 3.21. Το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας στην επιφάνεια της καθόδου.

Όπως είναι εμφανές, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των φορτίων στη διεπαφή ηλεκτροδίου - ηλεκτρολύτη, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα διεξαγωγής αντιδράσεων και επακόλουθα τόσο μεγαλύτερο είναι το παραγόμενο ρεύμα. Ωστόσο, η συσσώρευση φορτίου στη διεπαφή έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής τάσης. Η δημιουργία της τάσης αυτής αποτελεί προϋπόθεση για τη διεξαγωγή αντιδράσεων και είναι στην ουσία η υπέρταση ενεργοποίησης (activation overvoltage), η επίδραση της οποίας περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4.2. Η υπέρταση ενεργοποίησης αυξάνεται κατά την αύξηση του ρεύματος και αποτελεί το φράγμα που πρέπει να ξεπεραστεί για να προκύψουν αντιδράσεις. Ακόμη, η μείωση που επιφέρει σε αυτή η καταλυτική δράση μπορεί να εξηγηθεί

αφού ένας αποτελεσματικός καταλύτης αυξάνει την πιθανότητα να προκύψουν αντιδράσεις με αποτέλεσμα περισσότερο ρεύμα να μπορεί να δημιουργηθεί χωρίς την ανάλογη συσσώρευση φορτίου.

### 3.4.7 Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου

Το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας που δημιουργείται στη διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη δρα ως συσσωρευτής ενέργειας και ηλεκτρικού φορτίου, με τρόπο ώστε να συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρικός πυκνωτής. Έτσι, στην περίπτωση που το ρεύμα μεταβληθεί απότομα, η υπέρταση ενεργοποίησης καθυστερεί να ακολουθήσει τη μεταβολή, σε αντίθεση με την ωμική πτώση τάσης της οποίας η μεταβολή είναι άμεση. Το αποτέλεσμα είναι ότι η τάση λειτουργίας του κελιού σημειώνει μια άμεση μεταβολή λόγω της εσωτερικής αντίστασης, αλλά στη συνέχεια εξακολουθεί να μεταβάλλεται προτού φτάσει στην τελική τιμή όπου θα ισορροπήσει, περιμένοντας να σταθεροποιηθεί το συνολικό φορτίο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας. Ένας τρόπος μοντελοποίησης της δυναμικής αυτής απόκρισης του κελιού στις αλλαγές του ρεύματος είναι σχεδιάζοντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπου η τάση Nerst αποτελεί την πηγή τάσης, οι μηχανισμοί απωλειών τάσεις αντιπροσωπεύονται από αντιστάσεις, ενώ η ηλεκτρική διπλοστοιβάδα αντιπροσωπεύεται από έναν ηλεκτρικό πυκνωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22. Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου PEM.

Στο παραπάνω κύκλωμα οι μηχανισμοί απωλειών λόγω ενεργοποίησης, ωμικής αντίστασης και συγκέντρωσης αντιπροσωπεύονται από τις αντιστάσεις  $R_{act}$ ,  $R_{ohmic}$  και  $R_{conc}$  αντίστοιχα, των οποίων η τιμή καθορίζεται από τον νόμο του Ohm. Ως τάση στα άκρα τους λαμβάνεται η πτώση τάση που επιφέρουν, όπως αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις υπολογισμού οι οποίες περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους. Ο πυκνωτής  $C$  αντιπροσωπεύει το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας και εξομαλύνει τη μεταβολή της πτώσης τάσης που προκαλείται λόγω ενεργοποίησης και συγκέντρωσης. Οι απώλειες λόγω

συγκέντρωσης θεωρείται ότι επηρεάζονται και αυτές από το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας μιας και αφορούν μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων, η οποία συνδέεται άμεσα με το συσσωρευμένο στη διπλοστοιβάδα φορτίο.

Εφαρμόζοντας τον νόμο ρευμάτων του Kirchoff στο κύκλωμα προκύπτει:

$$i = \frac{V_C}{R_{act} + R_{conc}} + C \frac{dV_C}{dt} \Rightarrow$$

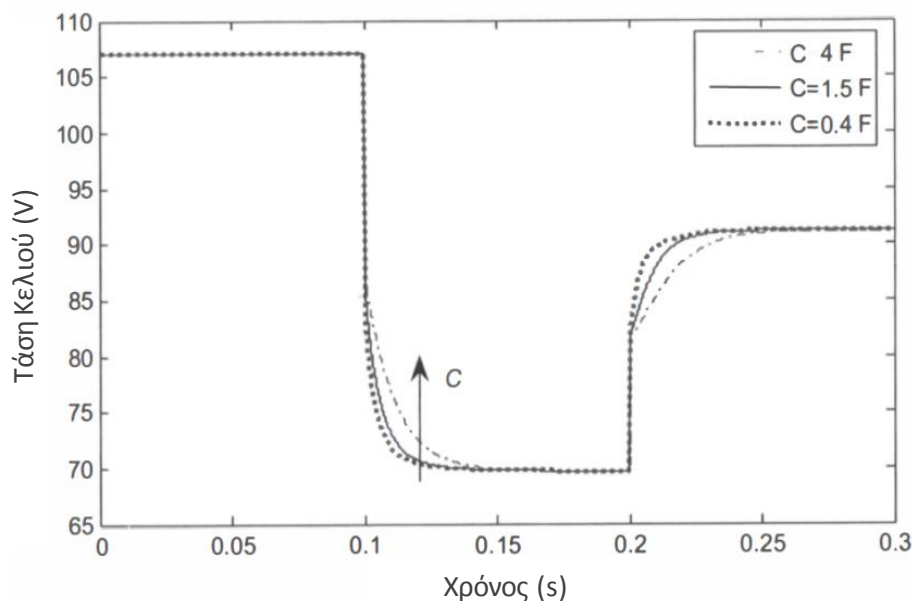
$$\frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})} V_C - \frac{i}{C} = 0 \quad (3-38)$$

όπου από την επίλυση της διαφορικής προκύπτει η τάση του πυκνωτή  $V_C$ .

Γνωρίζοντας την τιμή της  $V_C$ , εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων προκύπτει η τάση εξόδου του κελιού:

$$V_{cell} = E - V_C - V_{ohmic} \quad (3-39)$$

Το μοντέλο αυτό, το οποίο δίνει στην έξοδο του κυκλώματος τη δυναμική απόκριση της τάσης εξόδου του κελιού καυσίμου, είναι πολύ χρήσιμο καθώς επιτρέπει τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τις αλλαγές του ρεύματος. Επίσης, κατά τη σύνδεση της κυψέλης με ηλεκτρικά συστήματα, το ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρική προσομοίωση του συνολικού συστήματος και για τη μελέτη της συμπεριφοράς της κυψέλης ως πηγή τάσης.



**Σχήμα 3.23.** Παράδειγμα απόκρισης τάσης εξόδου κελιού κυψέλης καυσίμου σε μεταβολές του ρεύματος με βάση το παραπάνω μοντέλο, όπου φαίνεται η επίδραση του φαινομένου ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας για διάφορες τιμές της χωρητικότητας  $C$ .



# 4

## Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος που συνοδεύουν συνήθως την έξοδο μιας κυψέλης καυσίμου. Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση της ενέργειας που παράγεται από μια κυψέλης καυσίμου και αποτελεί βασικό κομμάτι του συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η γενική δομή του συστήματος κυψέλης καυσίμου - ηλεκτρονικών ισχύος κατά τη σύνδεση της κυψέλης με το ηλεκτρικό δίκτυο.



**Σχήμα 4.1.** Σχηματικό διάγραμμα των μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται για τη διασύνδεση μιας κυψέλης καυσίμου με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε μια συγκεκριμένη τιμή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός DC/DC μετατροπέα τάσης ενώ η μετατροπή της σε εναλλασσόμενη τάση ώστε να καταστεί εφικτή η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο βασίζεται στη χρήση ενός DC/AC αντιστροφέα τάσης. Το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί επίσης να περιλαμβάνει επιμέρους στοιχεία με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου ρεύματος.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι αρχές λειτουργίας βασικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των παραπάνω βαθμίδων και συγκεκριμένα θα μελετηθούν οι διατάξεις του μετατροπέα ανύψωσης, του αντιστροφέα ημιγέφυρας και του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας. Επίσης θα περιγραφεί η μέθοδος διαμόρφωσης εύρους

παλμών (PWM) η οποία επιτρέπει –με διαφορετικό τρόπο στην κάθε περίπτωση– τον έλεγχο της λειτουργίας.

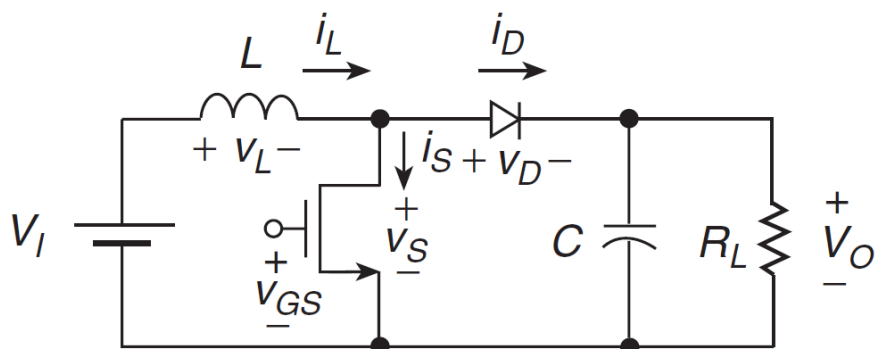
## 4.1 Μετατροπέας συνεχούς τάσης

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC – DC Converters) είναι κυκλώματα τα οποία μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές άλλης πολικότητας. Η μετατροπή αυτή βασίζεται στη χρήση διακοπτικών στοιχείων όπως το τρανζίστορ ισχύος, το IGBT, το MOSFET ή το θυρίστορ, όπου ελέγχοντας τον χρόνο αγωγής τους η τάση εξόδου μπορεί να ελεγχθεί και να σταθεροποιηθεί σε μια επιθυμητή τιμή. Για τον λόγο αυτό οι μετατροπείς συνεχούς τάσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας, συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος και σε διάφορες άλλες εφαρμογές.

Επειδή μια κυψέλη καυσίμου παράγει μη σταθεροποιημένη και μεταβαλλόμενη τάση, η έξοδος της είναι απαραίτητο να συνδεθεί με έναν μετατροπέα συνεχούς τάσης ώστε η ισχύς που παράγει να μπορέσει να αξιοποιηθεί. Στο σύστημα το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία, ο μετατροπέας αποτελεί το στάδιο ανύψωσης και σταθεροποίησης της τάσης που παρέχεται από την κυψέλη, πριν τη μετατροπή της σε εναλλασσόμενη και τη χρήση της από το δίκτυο. Για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας αυτής μελετήθηκε η τοπολογία του μετατροπέα ανύψωσης (boost converter).

### 4.1.1 Μετατροπέας ανύψωσης

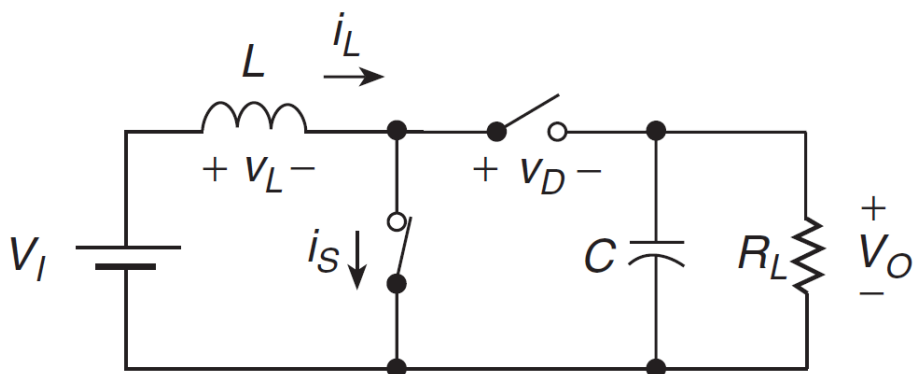
Το κύκλωμα λειτουργίας ενός μετατροπέα ανύψωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Αποτελείται από ένα πηνίο  $L$ , τον διακόπτη  $S$  ο οποίος υλοποιείται εδώ με τη χρήση ενός MOSFET ισχύος, μία δίοδο  $D$ , έναν πυκνωτή εξόδου  $C$  και το τροφοδοτούμενο φορτίο  $R_L$ . Ο διακόπτης  $S$  κλείνει και ανοίγει επαναλαμβανόμενα με σχετική διάρκεια αγωγής (Duty Cycle)  $D = t_{on}/T$ , όπου  $T = 1/f_s$  είναι η χρονική διάρκεια συμπλήρωσης ενός κύκλου λειτουργίας.



Σχήμα 4.2. Κύκλωμα λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης PWM.

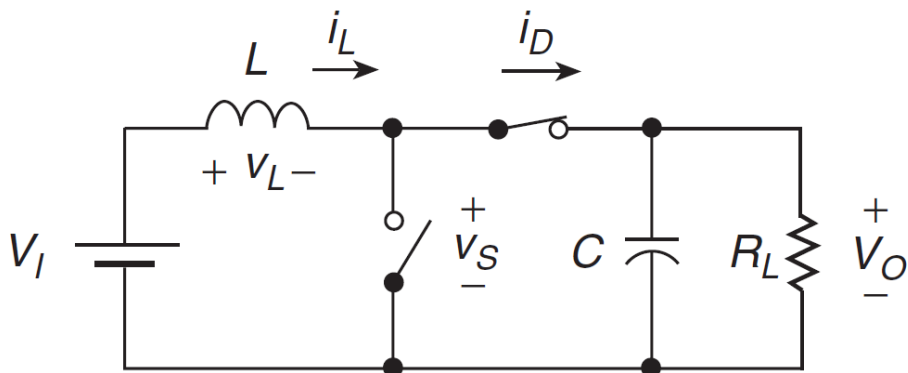


Κατά τη χρονική περίοδο  $0 < t < DT$  ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αγωγής (Σχήμα 4.3). Σαν αποτέλεσμα, η τάση στα άκρα της διόδου είναι  $v_D = -V_o$ , καθιστώντας τη δίοδο ανάστροφα πολωμένη και αποκόπτοντας το φορτίο από την τάση εισόδου. Κατά τη φάση αυτή ο πυκνωτής C εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια στο φορτίο και η τάση εξόδου μειώνεται γραμμικά. Από την άλλη, η τάση στα άκρα του πηνίου είναι  $v_L = V_I$  και επομένως το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται γραμμικά με κλίση  $V_I/L$ , ενώ παράλληλα αποθηκεύεται σε αυτό ενέργεια.



**Σχήμα 4.3.** Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης όταν ο διακόπτης S άγει ενώ η δίοδος D δεν άγει..

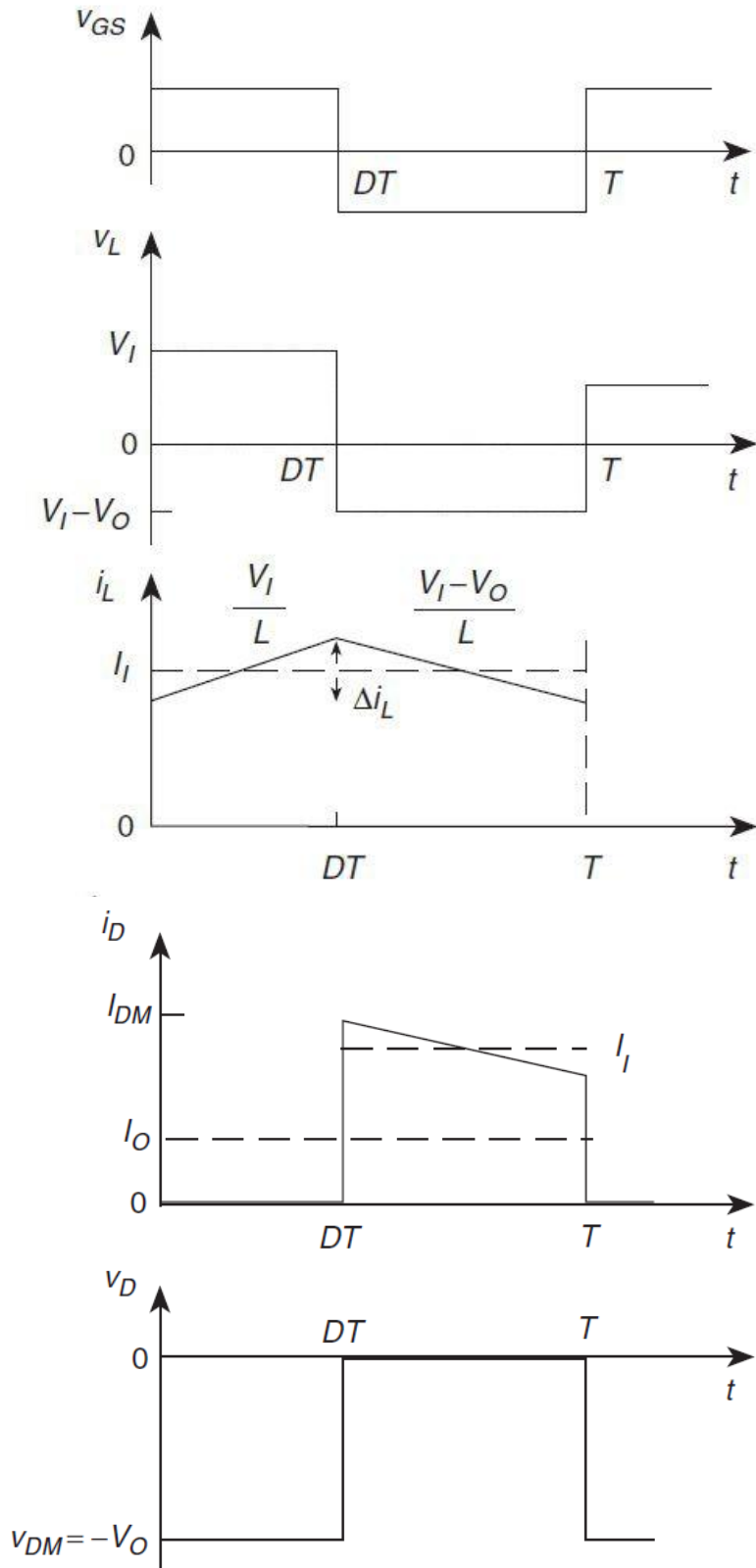
Όταν  $t = DT$ , ο παλμός έναυσης που εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη αφαιρείται και ο διακόπτης ανοίγει (Σχήμα 4.4). Η δίοδος τώρα μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής ενώ το πηνίο συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, η τιμή του οποίου μειώνεται γραμμικά με κλίση  $(V_I - V_o)/L$ . Σαν αποτέλεσμα το φορτίο τροφοδοτείται πλέον από την πηγή  $V_I$  και από το πηνίο ενώ ο πυκνωτής περιέρχεται σε κατάσταση φόρτισης. Τη χρονική στιγμή  $t = T$  ο διακόπτης κλείνει ξανά, σηματοδοτώντας την έναρξη νέου κύκλου λειτουργίας.



**Σχήμα 4.4.** Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης όταν ο διακόπτης S δεν άγει ενώ η δίοδος D άγει..

Ανάλογα με την τιμή της αντίστασης του φορτίου και τον χρόνο αγωγής του διακόπτη, το ρεύμα του πηνίου μπορεί να μηδενίζεται σε κάποια χρονική στιγμή. Στην περίπτωση που το ρεύμα του πηνίου δε μηδενίζεται καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας θεωρείται ότι ο μετατροπέας ανύψωσης λειτουργεί με συνεχή αγωγή του πηνίου (continuous conduction mode – CCM) ενώ στην αντίθετη περίπτωση θεωρείται ότι λειτουργεί με διακοπτόμενη αγωγή του πηνίου (discontinuous conduction mode – DCM). Η ανάλυση της λειτουργίας στις δύο αυτές περιπτώσεις διαφέρει, όπως επίσης και οι εξισώσεις που προκύπτουν. Εδώ θα εξεταστεί η περίπτωση λειτουργίας με *συνεχή αγωγή του πηνίου*, βασιζόμενη στις εξής παραδοχές:

- Το MOSFET ισχύος και η δίοδος λειτουργούν ως ιδανικοί διακόπτες και έχουν ιδανικές ιδιότητες.
- Τα παθητικά στοιχεία συμπεριφέρονται γραμμικά, χρονικώς αμετάβλητα και δεν επηρεάζονται από τη συχνότητα.
- Η αυτεπαγωγή της πηγής τάσης  $V_I$  είναι μηδενική, τόσο για τη dc όσο και για την ac συνιστώσα.
- Οι αντιστάσεις, οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες των αγωγών αγνοούνται.



**Σχήμα 4.5.** Ιδανικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου και διόδου του μετατροπέα ανύψωσης σε λειτουργία CCM.

#### 4.1.2 Ανάλυση λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης με συνεχή αγωγή ρεύματος πηνίου

##### Συνάρτηση μεταφοράς τάσης και ρεύματος

Θεωρώντας ότι στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας η μέση τιμή της τάσης του πηνίου είναι μηδενική, το ολοκλήρωμα της τάσης στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να ισούται με μηδέν, επομένως

$$\begin{aligned} V_I t_{on} + (V_I - V_o) t_{off} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{V_o}{V_I} &= \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \end{aligned} \quad (4-1)$$

Θεωρώντας επιπλέον ότι στο κύκλωμα δεν παρουσιάζονται απώλειες θα ισχύει

$$\begin{aligned} P_I = P_o \Rightarrow V_I I_I = V_o I_o \Rightarrow \\ \frac{I_o}{I_I} &= 1 - D \end{aligned} \quad (4-2)$$

Στη συνέχεια θα περιγραφεί μαθηματικά η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης κατά τις δύο φάσεις λειτουργίας του κυκλώματος στο διάστημα μιας περιόδου.

##### Φάση αγωγής του διακόπτη ( $0 < t < DT$ )

Κατά το χρονικό διάστημα  $0 < t < DT$  ο διακόπτης είναι κλειστός και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια. Η τάση στα άκρα του πηνίου ισούται με την τάση εισόδου  $V_I$ , δηλαδή

$$v_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \quad (4-3)$$

ενώ το ρεύμα του πηνίου θα είναι

$$i_L = \frac{V_I}{L} t + i_L(0) \quad (4-4)$$

όπου  $i_L(0)$  είναι το αρχικό ρεύμα του πηνίου τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Επομένως, το πλάτος κυμάτωσης του ρεύματος του πηνίου μπορεί να εκφραστεί ως

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(0) = \frac{V_I DT}{L} = \frac{V_o D(1-D)}{f_s L} \quad (4-5)$$

Από τη μελέτη της συνάρτησης αυτής προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του  $\Delta i_L$  προκύπτει για  $D = 0.5$  και είναι

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{V_o}{4f_s L} \quad (4-6)$$

Καθώς η σχετική διάρκεια αγωγής  $D$  αυξάνεται από το 0 στο 1, το  $\Delta i_L$  αυξάνεται ξεκινώντας από το μηδέν, φτάνει τη μέγιστη τιμή του για  $D = 0.5$  και στη συνέχεια μειώνεται ξανά καταλήγοντας πάλι στη μηδενική τιμή.

Όσον αφορά τον πυκνωτή εξόδου, κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια στην αντίσταση του φορτίου. Επειδή η διόδος δεν άγει, το ρεύμα του πυκνωτή ισούται με το ρεύμα εξόδου, δηλαδή

$$i_c = I_o = C \frac{dv_c}{dt} \quad (4-7)$$

ενώ η τάση του ταυτίζεται με την τάση εξόδου και μειώνεται γραμμικά ως ακολούθως

$$v_c = v_c(0) - \frac{I_o}{C} t = v_c(0) - \frac{V_o}{RC} t \quad (4-8)$$

όπου  $v_c(0)$  είναι η τάση του πυκνωτή τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Επομένως, το πλάτος της κυμάτωσης που παρουσιάζει η τάση του πυκνωτή είναι

$$\Delta v_c = v_c(0) - v_c(DT) = \frac{V_o DT}{RC} \quad (4-9)$$

#### **Φάση αποκοπής του διακόπτη ( $DT < t < T$ )**

Κατά το χρονικό διάστημα  $DT < t < T$  ο διακόπτης ανοίγει, η διόδος μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής και το πηνίο εκφορτίζεται ενώ ενέργεια αρχίζει να συσσωρεύεται πλέον στον πυκνωτή. Η τάση στα άκρα του πηνίου θα είναι τώρα

$$v_L = V_I - V_o = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (4-10)$$

ενώ το ρεύμα που διέρχεται από το πηνίο και τη δίοδο θα είναι

$$i_D = i_L = \frac{V_I - V_o}{L}(t - DT) + i_L(DT) \quad (4-11)$$

όπου  $i_L(DT)$  είναι το ρεύμα του πηνίου τη χρονική στιγμή  $t = DT$ . Το πλάτος του ρεύματος κυμάτωσης του πηνίου είναι όπως και πριν

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{(V_o - V_I)(1 - D)T}{L} = \frac{V_o D(1 - D)}{f_s L} \quad (4-12)$$

Ο πυκνωτής εξόδου βρίσκεται τώρα σε φάση φόρτισης, τροφοδοτούμενος με ενέργεια προερχόμενη από το πηνίο και την πηγή τάσης. Το ρεύμα του πυκνωτή θα είναι τώρα

$$i_C = I_I - I_o = C \frac{dv_C}{dt} \quad (4-13)$$

ενώ η τάση του αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση

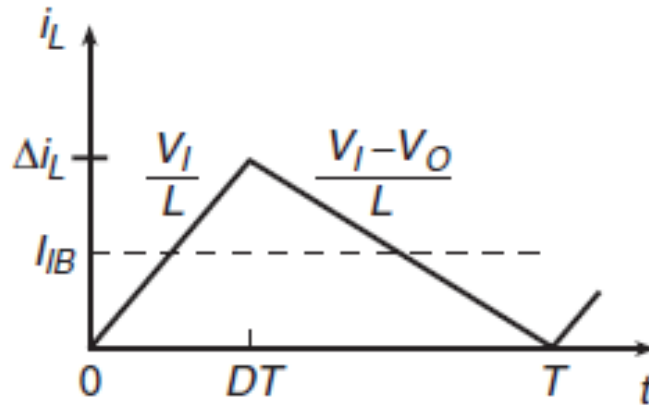
$$v_C = v_C(DT) + \frac{I_I - I_o}{C}(t - DT) = v_C(DT) + \left(\frac{I_I}{C} - \frac{V_o}{RC}\right)(t - DT) \quad (4-14)$$

όπου  $v_C(DT)$  είναι η τάση του πυκνωτή τη χρονική στιγμή  $t = DT$ . Το πλάτος της κυμάτωσης της τάσης του πυκνωτή υπολογίζεται πάλι

$$\begin{aligned} \Delta v_C = v_C(T) - v_C(DT) &= \left(\frac{I_I}{C} - \frac{V_o}{RC}\right)(T - DT) = \left(\frac{V_o}{RC(1 - D)} - \frac{V_o}{RC}\right)(1 - D)T \Rightarrow \\ \Delta v_C &= \frac{V_o DT}{RC} \end{aligned} \quad (4-15)$$

### Όριο μεταξύ λειτουργιών CCM και DCM και επιλογή πηνίου L

Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής του πηνίου, το ρεύμα του πηνίου μηδενίζεται στιγμιαία κάθε φορά που ο κύκλος φτάνει στο τέλος του ( $t = T$ ) και στη συνέχεια πάλι αυξάνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Η μελέτη της περίπτωσης αυτής είναι χρήσιμη για την εύρεση των απαραίτητων συνθηκών ώστε το κύκλωμα να βρίσκεται στη μία ή στην άλλη λειτουργία.



**Σχήμα 4.6.** Κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου στο όριο μεταξύ των λειτουργιών CCM και DCM.

Όπως είναι εύκολο να διαπιστωθεί, στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής του πηνίου ισχύει

$$i_L = \frac{V_I}{L} t, \text{ για } 0 < t < DT \quad (4-16)$$

και επομένως

$$\Delta i_L = i_L(DT) = \frac{V_I DT}{L} = \frac{V_o D(1-D)}{f_s L} \quad (4-17)$$

Ακολούθως, η μέση τιμή του dc ρεύματος εισόδου  $I_{IB}$  στο όριο των δύο λειτουργιών θα είναι

$$I_{IB} = \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_o D(1-D)}{2f_s L} \quad (4-18)$$

οπότε το dc ρεύμα εξόδου προκύπτει

$$I_{OB} = I_{IB}(1-D) = \frac{V_o D(1-D)^2}{2f_s L} \quad (4-19)$$

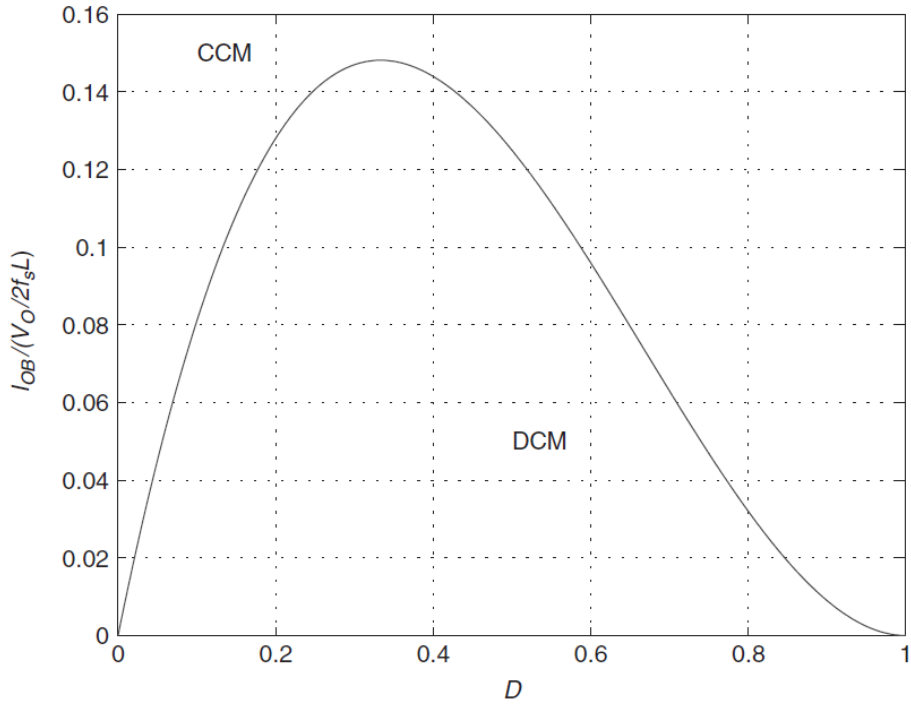
Για δεδομένη τιμή σχετικής διάρκειας αγωγής  $D$  και με σταθερή τάση εξόδου  $V_o$ , αν το μέσο ρεύμα του φορτίου πέσει κάτω από το  $I_{OB}$  τότε το ρεύμα του πηνίου θα γίνει ασυνεχές. Για τον λόγο αυτόν, για να διασφαλιστεί η λειτουργία CCM πρέπει να ισχύει

$$I_o > I_{OB} \quad (4-20)$$

άρα

$$I_{Omin} = I_{OB} = \frac{V_o D(1-D)^2}{2f_s L} \quad (4-21)$$

όπου  $I_{Omin}$  είναι η ελάχιστη τιμή του ρεύματος εξόδου για την οποία η αγωγή του πηνίου είναι συνεχής και αντιστοιχεί σε αντίσταση φορτίου  $R_{Lmax} = V_o/I_{Omin}$ .



**Σχήμα 4.7.** Κανονικοποιημένη τιμή του ρεύματος φορτίου στο όριο μεταξύ CCM και DCM συναρτήσει της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D$ .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, η έκφραση (4-19) του  $I_{OB}$  λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για

$$D = \frac{1}{3}$$

η οποία είναι

$$I_{OBmax} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s L} \quad (4-22)$$

Έτσι, για να διασφαλίζεται η λειτουργία CCM για όλες τις τιμές του  $D$ , η ελάχιστη αυτεπαγωγή του πηνίου  $L$  που μπορεί να επιλεγεί είναι

$$L_{min} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s I_{OBmax}} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s I_{Omin}} = \frac{2}{27} \frac{R_{Lmax}}{f_s} \quad (4-23)$$



Στην περίπτωση που  $D_{max} < 1/3$  ή  $D_{min} > 1/3$ , η ελάχιστη αυτεπαγωγή μπορεί να τεθεί υψηλότερα και να υπολογιστεί

$$L_{min} = \begin{cases} \frac{R_{Lmax} D_{max} (1 - D_{max})^2}{2f_s} & , \text{ for } D < \frac{1}{3} \\ \frac{R_{Lmax} D_{min} (1 - D_{min})^2}{2f_s} & , \text{ for } D \geq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (4-24)$$

$$(4-25)$$

### Πλάτος κυμάτωσης τάσης εξόδου και επιλογή πυκνωτή C

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, η κυμάτωση της τάσης εξόδου ισοδυναμεί με την κυμάτωση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή και το πλάτος της δίνεται από τη σχέση

$$\Delta v_o = \Delta v_c = \frac{V_o DT}{RC} \quad (4-26)$$

Συνήθως είναι επιθυμητό το πλάτος της κυμάτωσης να μην υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό  $a$  της τάσης εξόδου. Για να εξασφαλίζεται αυτό για όλες τις τιμές της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D$ , η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή εξόδου πρέπει επιλεγθεί έτσι ώστε να ισχύει

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v_o}{V_o} < a &\Rightarrow \\ C > \frac{DT}{aR_L} & \end{aligned} \quad (4-27)$$

Επομένως η ελάχιστη τιμή της χωρητικότητας  $C$  που μπορεί να επιλεγθεί ώστε να διασφαλίζεται η παραπάνω συνθήκη και η κυμάτωση της τάσης εξόδου να μην υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή  $V_{rip}$  είναι

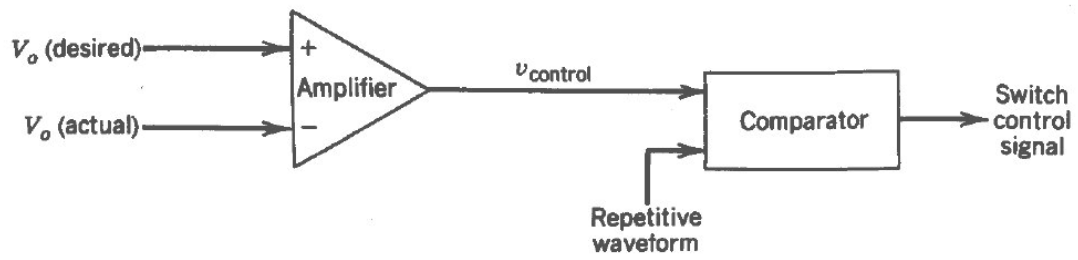
$$C_{min} = \frac{V_o D_{max} T}{R_{Lmin} V_{rip}} = \frac{D_{max} T}{a R_{Lmin}} \quad (4-28)$$

### 4.1.3 Έλεγχος μετατροπέων - Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

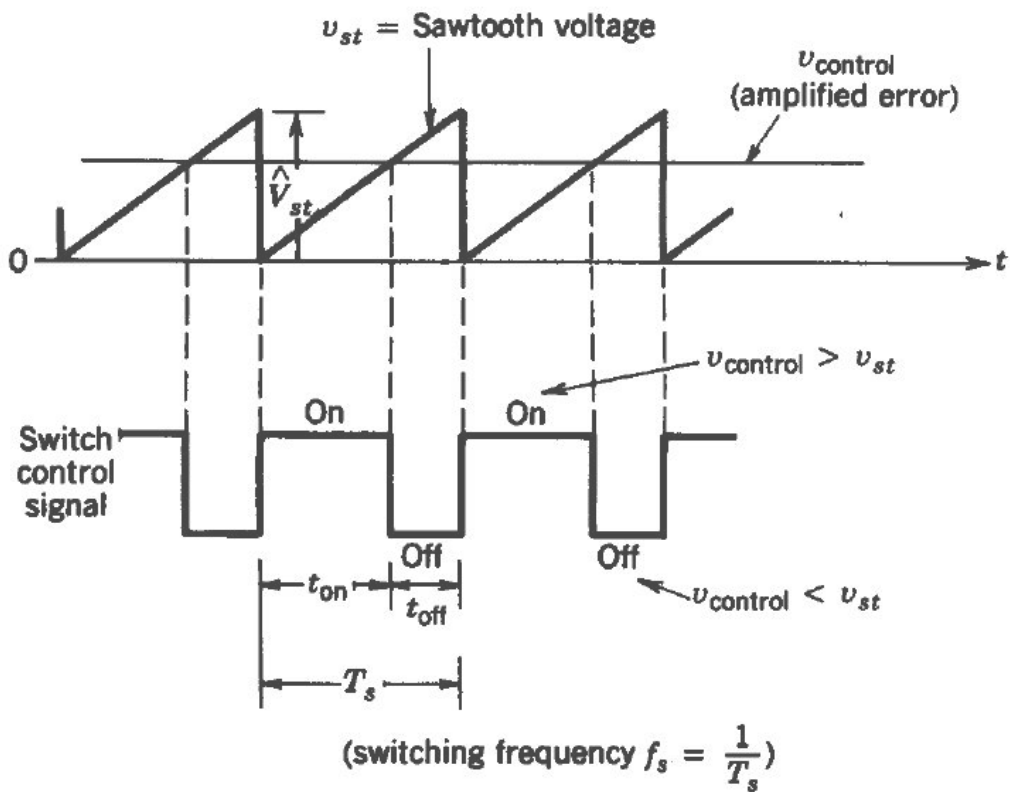
Σημαντικό στοιχείο κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης είναι ο έλεγχος της dc τάσης εξόδου του. Γενικά, η μέση τιμή της τάσης εξόδου πρέπει να είναι σταθερή ανεξαρτήτως των μεταβολών της τάσης εισόδου και της αντίστασης του φορτίου, οι τιμές των οποίων μπορεί να αυξομειώνονται. Για τον λόγο αυτόν, η διεξαγωγή ελέγχου είναι απαραίτητη έτσι ώστε η τάση εξόδου να μην επηρεάζεται από μεταβολές που μπορεί να προκύψουν και ο μετατροπέας να μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά.

Η πιο συχνή μέθοδος ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου είναι η *Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation – PWM)*. Στη μέθοδο αυτή η συχνότητα μετάβασης  $f_s$  διατηρείται σταθερή, σε αντίθεση με τη σχετική διάρκεια αγωγής  $D$  των διακοπών η οποία ρυθμίζεται κατάλληλα κάθε στιγμή ώστε η τάση εξόδου να διατηρείται σταθεροποιημένη σε μια επιθυμητή τιμή. Έτσι, ουσιαστικά αυτό που μεταβάλλεται είναι οι χρόνοι έναυσης και σβέσης ( $t_{on}$  και  $t_{off}$ ) των διακοπών, ή αλλιώς το εύρος των παλμών έναυσης που εφαρμόζονται στις πύλες τους.

Στην περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης, ο έλεγχος με διαμόρφωση PWM καθορίζει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη  $S$  μέσω ενός σήματος ελέγχου  $v_{control}$  το οποίο εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη. Το σήμα αυτό παράγεται από τη σύγκριση ενός επιπέδου τάσης με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους και σταθερής συχνότητας η οποία συνήθως επιλέγεται πριονωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Σε αντίθεση με τη συχνότητα και το πλάτος της περιοδικής κυματομορφής, το ύψος του επιπέδου τάσης μεταβάλλεται και η τιμή του καθορίζεται από το σφάλμα ή την απόκλιση που παρουσιάζει η πραγματική τάση εξόδου από την επιθυμητή τιμή της με τη χρήση ενός κατάλληλου ελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο, όταν η μετρούμενη τάση εξόδου είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή τάση αναφοράς τότε η σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη αυξάνεται ενώ στην αντίθετη περίπτωση μειώνεται. Η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη καθορίζεται από τη συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz.



(α)



(β)

Σχήμα 4.8. Διαμόρφωση PWM μετατροπέα ανύψωσης.

(α) Λειτουργικό διάγραμμα.

(β) Σήματα συγκριτή και κυματομορφές.

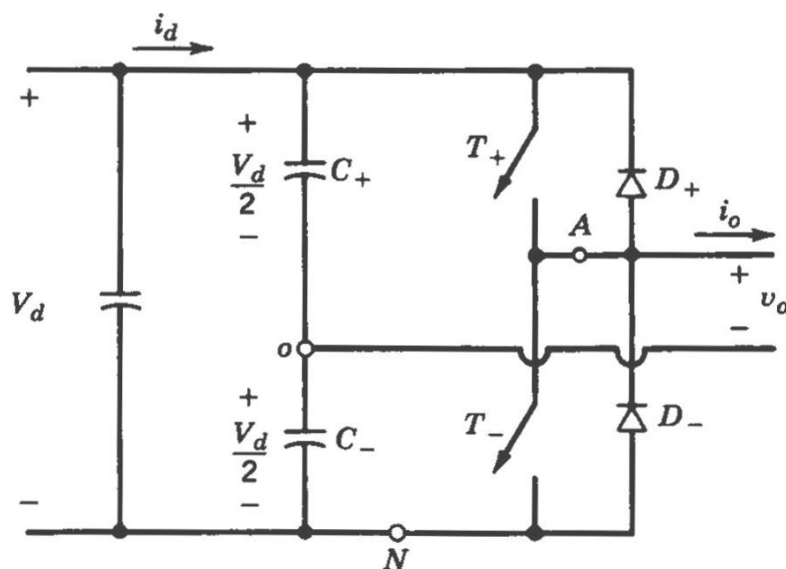
## 4.2 Αντιστροφέας τάσης

Ο αντιστροφέας (DC-AC Inverter) είναι ένα είδος μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Όπως και στην περίπτωση των μετατροπέων DC-DC, η λειτουργία βασίζεται στον έλεγχο της σχετικής διάρκειας αγωγής διακοπτικών στοιχείων και, αν και είναι σχετικά απλή, περίπλοκες μέθοδοι ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η παραμόρφωση της τάσης εξόδου. Ως ημιαγωγικά στοιχεία για την υλοποίηση των διακοπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρανζίστορ, MOSFET, IGBT, θυρίστορ, GTO ή κάποιος άλλος ημιαγωγός ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου.

Ο αντιστροφέας αποτελεί μία από τις βασικότερες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς (συστήματα ελέγχου ταχύτητας εναλλασσόμενων ηλεκτρικών κινητήρων, συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα ΑΠΕ κ.α.). Γενικά, ανάλογα με το είδος της πηγής τροφοδοσίας οι αντιστροφείς διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους αντιστροφείς πηγής τάσης (voltage-source inverters – VSI) και στους αντιστροφείς πηγής ρεύματος (current-source inverters – CSI). Το δεύτερο είδος αντιστροφέων χρησιμοποιείται συνήθως μόνο για AC κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Επιπλέον, οι αντιστροφείς μπορούν να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η λειτουργία στις κυριότερες τοπολογίες υλοποίησης ενός μονοφασικού αντιστροφέα τάσης, με έμφαση στη διάταξη του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

### 4.2.1 Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

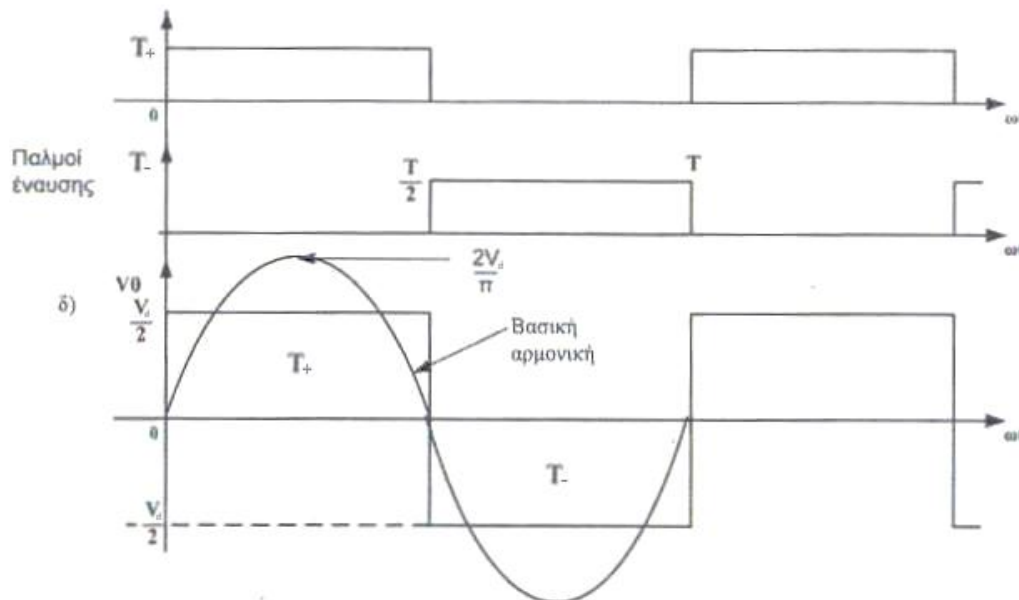
Η διάταξη λειτουργίας ενός μονοφασικού αντιστροφέα σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9. Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.

Στη συνδεσμολογία αυτή, η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης επιτυγχάνεται με τον έλεγχο δύο διακοπών, των  $T_+$  και  $T_-$ . Επιπλέον, για τη λειτουργία του κυκλώματος συνδέονται σε σειρά στα άκρα της DC εισόδου  $V_d$  δύο ίδιοι πυκνωτές με επαρκώς μεγάλες χωρητικότητες, ώστε το δυναμικό στο σημείο σύνδεσης των πυκνωτών, δηλαδή στο σημείο O, να παραμένει ουσιαστικά σταθερό σε σχέση με το δυναμικό στα άκρα της τάσης εισόδου και ίσο με  $V_d/2$ . Στο σημείο σύνδεσης των πυκνωτών συνδέεται η μία άκρη του φορτίου ενώ οι πυκνωτές λειτουργούν επίσης ως πυκνωτές αποκοπής της DC συνιστώσας του ρεύματος εξόδου.

Ανάλογα με τον διακόπτη ο οποίος άγει, το μονοπάτι ροής του ρεύματος διαφοροποιείται, η φορά του ρεύματος αντιστρέφεται και η πολικότητα της τάσης εξόδου αλλάζει. Έτσι, υπάρχουν δύο δυνατές καταστάσεις λειτουργίας, στην περίπτωση που ο διακόπτης  $T_+$  είναι κλειστός και ο διακόπτης  $T_-$  είναι ανοιχτός, το δυναμικό που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου είναι θετικό και συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $V_d/2$  ενώ στην αντίθετη περίπτωση το δυναμικό γίνεται αρνητικό και λαμβάνει την τιμή  $-V_d/2$ . Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κύκλωμα μια δεδομένη στιγμή καθορίζεται από τους παλμούς έναυσης που εφαρμόζονται στις πύλες των διακοπών (Σχήμα 4.10). Οι παλμοί έναυσης πρέπει επίσης να εξασφαλίζουν ότι κάθε στιγμή μόνο ο ένας από τους δύο διακόπτες θα άγει, διότι διαφορετικά δημιουργείται βραχυκύκλωμα και η τάση εξόδου μεταβαίνει σε απροσδιόριστη κατάσταση. Για τον λόγο αυτόν κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη λαμβάνεται μέριμνα ώστε να μεσολαβεί ένα κενό χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν άγει κανένας διακόπτης και οι πιθανότητες εμφάνισης βραχυκυκλώματος μειώνονται.



**Σχήμα 4.10.** Παλμοί έναυσης των διακοπών  $T_+$ ,  $T_-$  και τάση εξόδου του αντιστροφέα με ωμικό φορτίο.

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό, το ρεύμα εξόδου λαμβάνει μόνο τις τιμές που αντιστοιχούν σε τάση  $V_d/2$  και  $-V_d/2$  ενώ όταν και οι δύο διακόπτες είναι σε κατάσταση αποκοπής γίνεται μηδενικό. Αντίθετα, όταν το φορτίο είναι επαγωγικό, το ρεύμα

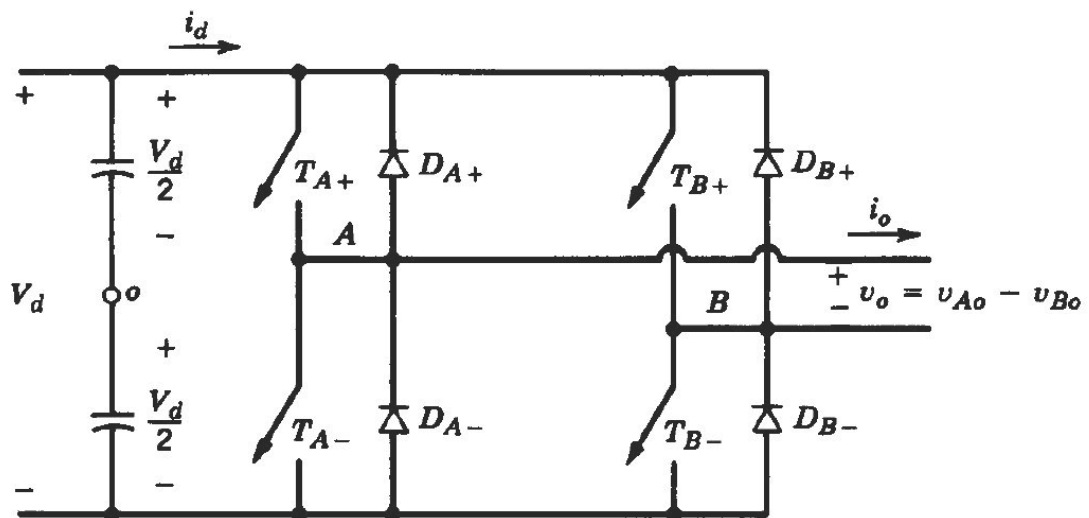
εξόδου σημειώνει ομαλότερη μεταβολή μεταξύ των δύο καταστάσεων και κατά το διάστημα που κανένας διακόπτης δεν άγει συνεχίζει να κυκλοφορεί. Για αυτόν τον λόγο στη συνδεσμολογία περιλαμβάνονται δύο διόδοι ( $D_+$  και  $D_-$ ) οι οποίες τοποθετούνται αντιπαράλληλα με τους διακόπτες και παρέχουν στο ρεύμα εξόδου μονοπάτι για να κυκλοφορήσει κατά το διάστημα που δεν άγει κανένας διακόπτης. Οι διόδοι αυτές ονομάζονται διόδοι ελεύθερης διέλευσης και άγει μία κάθε φορά, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου.

**Πίνακας 4.1.** Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα ημιγέφυρας.

Κατάσταση Λειτουργίας	Τάση Εξόδου
$T_+$ on και $T_-$ off	$V_d/2$
$T_+$ off και $T_-$ on	$-V_d/2$

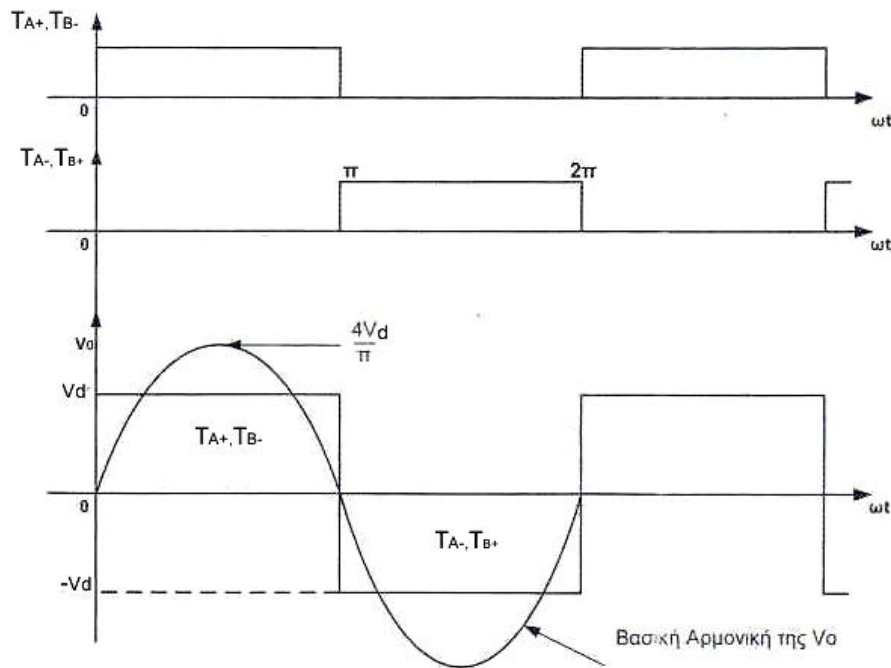
#### 4.2.2 Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία Γέφυρας

Μία πιο πλεονεκτική διάταξη για την επίτευξη της παραπάνω λειτουργίας είναι η συνδεσμολογία αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα. Η συνδεσμολογία αυτή μοιάζει με τη συνδεσμολογία ημιγέφυρας με τη διαφορά ότι περιλαμβάνει ένα ακόμα σκέλος διακοπών στο οποίο συνδέεται η μία άκρη του φορτίου, η οποία διαφορετικά θα συνδεόταν στο σκέλος των πυκνωτών. Χάρη στη χρήση των δύο επιπλέον διακοπών η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι διπλάσια εκείνης του αντιστροφέα ημιγέφυρας και επιτυγχάνεται επομένως μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος, ενώ προσφέρεται επίσης η δυνατότητα δημιουργίας τάσης εξόδου με διαστήματα μηδενικής τάσης για μη ωμικά φορτία.



**Σχήμα 4.11.** Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας.

Η πιο απλή μορφή ελέγχου των διακοπών είναι αντιμετωπίζοντας τους διακόπτες  $T_{A+} - T_{B-}$  και τους διακόπτες  $T_{A-} - T_{B+}$  ως ζεύγη διακοπών, εκ των οποίων κάθε στιγμή το ένα θα άγει και το άλλο θα είναι σε κατάσταση αποκοπής. Έτσι, όταν άγουν οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  είναι ανοιχτοί με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να λαμβάνει θετική τιμή ίση με την τάση εισόδου  $V_d$  και το ρεύμα εξόδου να είναι θετικό. Αντίθετα, όταν άγουν οι διακόπτες  $T_{A-}$ ,  $T_{B+}$  οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  είναι ανοιχτοί με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να γίνεται αρνητική, ίση με  $-V_d$ , και το ρεύμα εξόδου να έχει αρνητική τιμή. Επειδή η τάση εξόδου  $V_o$  μεταβαίνει μεταξύ των επιπέδων τάσης  $-V_d$  και  $V_d$ , ο έλεγχος των διακοπών θεωρείται ότι γίνεται σε αυτήν την περίπτωση με διπολική τάση εξόδου.

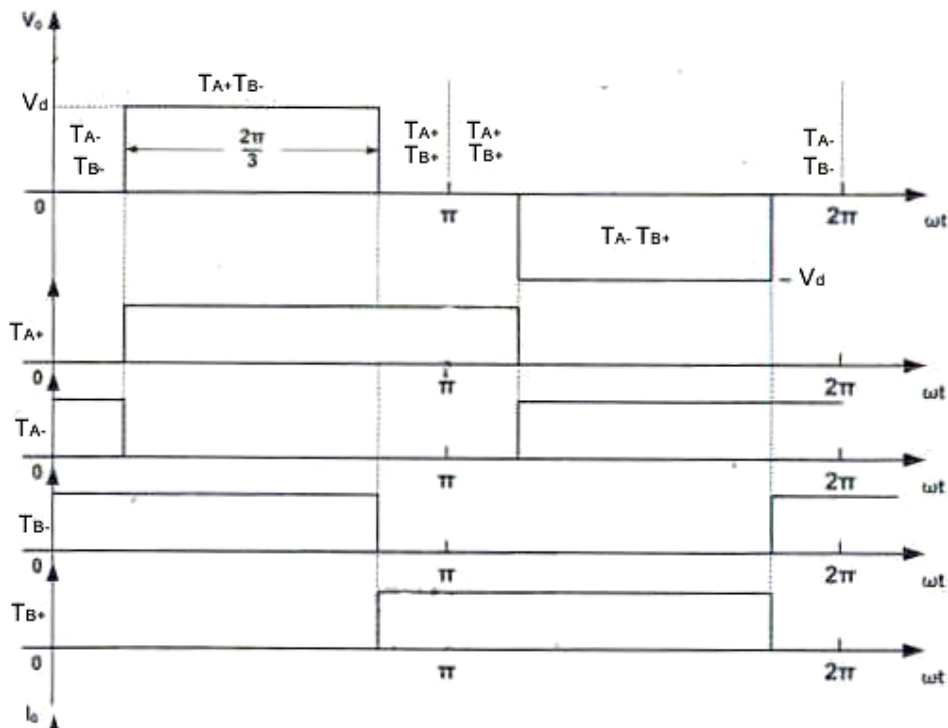


**Σχήμα 4.12.** Παλμοί έναυσης των διακοπών  $T_{A+}$ ,  $T_{A-}$ ,  $T_{B+}$  και  $T_{B-}$  και προκύπτουσα τάση εξόδου κατά τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου (ωμικό φορτίο).

**Πίνακας 4.2.** Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου.

Κατάσταση Λειτουργίας	Τάση Εξόδου
$T_{A+}$ on , $T_{A-}$ off , $T_{B+}$ off και $T_{B-}$ on	$V_d$
$T_{A+}$ off , $T_{A-}$ on , $T_{B+}$ on και $T_{B-}$ off	$-V_d$

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου των διακοπών μπορεί να διεξαχθεί παλμοδοτώντας τις πύλες τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Εδώ, παρατηρούνται δύο ακόμα καταστάσεις λειτουργίας, στη μία εκ των οποίων οι διακόπτες που βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής είναι το ζεύγος  $T_{A+} - T_{B-}$  ενώ στην άλλη σε κατάσταση αγωγής βρίσκονται οι διακόπτες  $T_{A-} - T_{B+}$ . Κατά τη μετάβαση στις δύο αυτές καταστάσεις η τάση εξόδου γίνεται μηδενική, ενώ το ρεύμα εξόδου μπορεί να συνεχίζει να κυκλοφορεί για ένα διάστημα υποβοηθούμενο από τις διόδους ελεύθερης διέλευσης. Οι καταστάσεις αυτές παρεμβάλλονται μεταξύ των άλλων δύο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Σαν αποτέλεσμα, όταν συμβαίνει μια μετάβαση η τάση εξόδου μεταπηδά είτε μεταξύ των επιπέδων τάσης 0 και  $+V_d$  είτε μεταξύ των επιπέδων 0 και  $-V_d$  και για αυτό ο έλεγχος των διακοπών θεωρείται ότι γίνεται εδώ με *μονοπολική* τάση εξόδου. Έτσι, η μεταβολή της τάσης εξόδου από θετική σε αρνητική και αντίστροφα γίνεται ομαλότερα ενώ η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου βελτιώνεται.



**Σχήμα 4.13.** Παλμοί έναυσης των διακοπών  $T_{A+}$ ,  $T_{A-}$ ,  $T_{B+}$  και  $T_{B-}$  και προκύπτουσα τάση εξόδου κατά τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου (ωμικό φορτίο).



**Πίνακας 4.3.** Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου.

Κατάσταση Λειτουργίας	Τάση Εξόδου
$T_{A+}$ <i>on</i> , $T_{A-}$ <i>off</i> , $T_{B+}$ <i>off</i> και $T_{B-}$ <i>on</i>	$V_d$
$T_{A+}$ <i>on</i> , $T_{A-}$ <i>off</i> , $T_{B+}$ <i>on</i> και $T_{B-}$ <i>off</i>	0
$T_{A+}$ <i>off</i> , $T_{A-}$ <i>on</i> , $T_{B+}$ <i>on</i> και $T_{B-}$ <i>off</i>	$-V_d$
$T_{A+}$ <i>off</i> , $T_{A-}$ <i>on</i> , $T_{B+}$ <i>off</i> και $T_{B-}$ <i>on</i>	0

Όπως και στην περίπτωση της συνδεσμολογίας ημιγέφυρας, όταν το φορτίο είναι επαγωγικό το ρεύμα εξόδου καθυστερεί να ακολουθήσει τις μεταβολές της τάσης και κατά το άνοιγμα των διακοπών εξακολουθεί να κυκλοφορεί για ένα χρονικό διάστημα μέσω των διόδων ελεύθερης διέλευσης.

### 4.2.3 Ανάλυση Fourier τάσης εξόδου

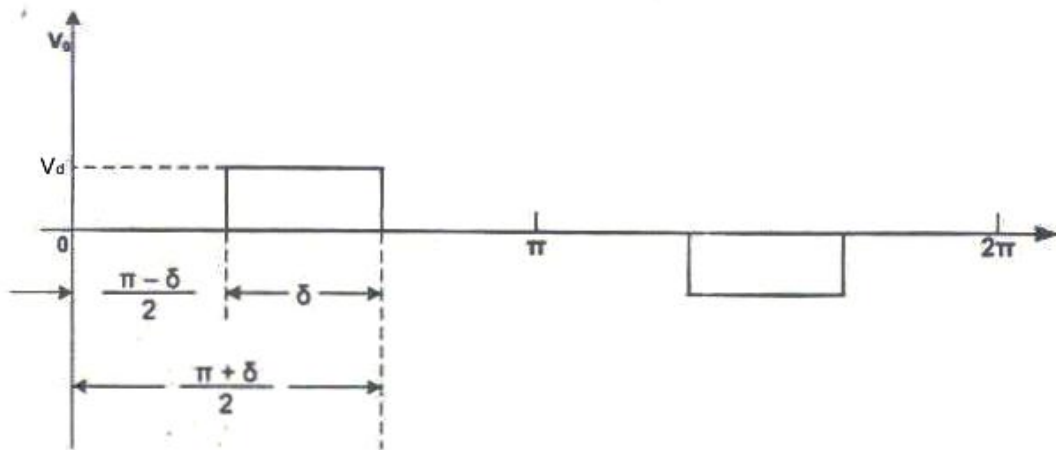
Έστω ότι σε κάθε κύκλο λειτουργίας η τάση εξόδου αποτελείται από έναν θετικό και έναν αρνητικό παλμό τάσης εύρους  $\delta$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Αν  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  είναι η αντίστοιχη κυκλική συχνότητα λειτουργίας, διαμορφώνονται οι εξής καταστάσεις:

1.  $0 < \omega t < \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}$ : Στο διάστημα αυτό οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει μηδενική τιμή,  $V_o = 0$ .
2.  $\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{\delta}{2}$ : Στο διάστημα αυτό οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = V_d$ .
3.  $\frac{\pi}{2} + \frac{\delta}{2} < \omega t < \frac{3\pi}{2} - \frac{\delta}{2}$ : Στο διάστημα αυτό οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει μηδενική τιμή  $V_o = 0$ .
4.  $\frac{3\pi}{2} - \frac{\delta}{2} < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \frac{\delta}{2}$ : Στο διάστημα αυτό οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = -V_d$ .
5.  $\frac{3\pi}{2} + \frac{\delta}{2} < \omega t < 2\pi$ : Στο διάστημα αυτό οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει μηδενική τιμή  $V_o = 0$ .

Αναλύοντας την κυματομορφή της τάσης εξόδου σε σειρά Fourier, προκύπτει

$$V_o(t) = \sum_{h=0,1,2,\dots}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) + \sum_{h=1,2,\dots}^{\infty} b_h \sin(h\omega t) \quad (4-29)$$

όπου  $h$  είναι η τάξη της κάθε αρμονικής συνιστώσας και  $a_h$ ,  $b_h$  είναι οι συντελεστές των αρμονικών οι οποίοι δίνονται από τις σχέσεις



**Σχήμα 4.14.** Τάση εξόδου αντιστροφεία αποτελούμενη από έναν θετικό και έναν αρνητικό παλμό τάσης εύρους  $\delta$ .

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V_o(t) \cos(h\omega t) d\omega t \quad (4-30)$$

και

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V_o(t) \sin(h\omega t) d\omega t \quad (4-31)$$

Η έκφραση της τάσης εξόδου κατά Fourier απλοποιείται λαμβάνοντας τις παρακάτω ιδιότητες:

- Η  $V_o(\omega t)$  παρουσιάζει περιττή συμμετρία αφού ισχύει  $V_o(t) = -V_o(-t)$ , επομένως  $a_h = 0$ , για κάθε  $h \geq 0$ .
- Η  $V_o(\omega t)$  παρουσιάζει συμμετρία μισού κύματος αφού ισχύει  $V_o(t) = -V_o(t + \frac{\pi}{2})$ , επομένως  $b_h = 0$ , για κάθε  $h$  άρτιο.
- Λόγω των δύο παραπάνω ιδιοτήτων οι συντελεστές  $b_h$  δίνονται από την εξίσωση

$$b_h = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(t) \sin(h\omega t) d\omega t \quad , \quad h = 1,3,5, \dots \quad (4-32)$$

Επομένως, η έκφραση (4-29) λαμβάνει τη μορφή

$$V_o(t) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} b_h \sin(h\omega t) \quad (4-33)$$

όπου

$$\begin{aligned}
b_h &= \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{2}} V_d \sin(h\omega t) d\omega t = -\frac{4V_d}{h\pi} \left( [\cos(h\omega t)]_{\frac{\pi}{2}-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \right) = -\frac{4V_d}{h\pi} \left( \cos\left(h\frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(h\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\delta}{2}\right)\right) \right) = \\
&= \frac{4V_d}{h\pi} \cos\left(h\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\delta}{2}\right)\right)
\end{aligned} \tag{4-34}$$

Το πλάτος της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου προκύπτει θέτοντας  $h=1$  και είναι

$$\hat{V}_{o,1} = \frac{4V_d}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\delta}{2}\right) \tag{4-35}$$

Ομοίως μπορούν να βρεθούν τα πλάτη των υπόλοιπων αρμονικών. Όπως μπορεί να διαφανεί, οι ανώτερης τάξης αρμονικές έχουν επίσης υπολογίσιμα πλάτη, με αποτέλεσμα η έξοδος να απέχει από τη σχετικά καθαρή ημιτονοειδή μορφή που επιθυμείται.

Να σημειωθεί ότι αν  $\delta = \pi$  η παραπάνω ανάλυση αντιστοιχεί στην τετραγωνική κυματομορφή του Σχήματος 4.12. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του πλάτους της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου

$$\hat{V}_{o,1(\max)} = \frac{4V_d}{\pi} \tag{4-36}$$

#### 4.2.4 Έλεγχος τάσης εξόδου – Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

Όπως έχει αναφερθεί, η τεχνική PWM βασίζεται στον έλεγχο της τάσης εξόδου μέσω της αυξομειώσης του εύρους των παλμών έναυσης που εφαρμόζονται στις πύλες των διακοπών. Στην περίπτωση των DC-AC αντιστροφών η μεταβολή του εύρους των παλμών έναυσης συνεπάγεται αντίστοιχα μεταβολή στο εύρος των παλμών που συνθέτουν την τάση εξόδου. Έτσι, εφαρμόζοντας κατάλληλο έλεγχο στη σχετική διάρκεια αγωγής των διακοπών οι ανεπιθύμητες αρμονικές της τάσης εξόδου μπορούν να περιοριστούν δραστικά ενώ επίσης η κυματομορφή της τάσης εξόδου μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί από τις μεταβολές της DC τάσης εισόδου και του φορτίου.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης PWM των διακοπών του αντιστροφέα με σκοπό την επίτευξη AC τάσεων εξόδου που να πλησιάζουν την ημιτονοειδή κυματομορφή. Οι παραπάνω περιπτώσεις λειτουργίας που περιγράφηκαν μπορούν επίσης να αντιμετωπιστούν ως υποπεριπτώσεις μεθόδων διαμόρφωσης εύρους παλμών. Ωστόσο, λόγω των ιδιαίτερα έντονων αρμονικών που εμφανίζονται στην τάση εξόδου και της αδυναμίας αποτελεσματικού ελέγχου του πλάτους της, συνήθως αποφεύγονται και αντικαθίστανται από πιο περίπλοκες και συνάμα πιο αποτελεσματικές μεθόδους ελέγχου. Στη συνέχεια θα περιγραφεί μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε μονοφασικούς

αντιστροφείς, η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM).

#### 4.2.5 Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM)

Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών SPWM επιτρέπει τον έλεγχο του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου μέσω της σύγκρισης δύο κυματομορφών, μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής (κυματομορφή αναφοράς) και μιας τριγωνικής (κυματομορφή φορέα). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους ελέγχου που περιγράφηκαν, η σύγκριση αυτή δημιουργεί περισσότερους από έναν παλμούς ανά ημιπερίοδο, με μεταβλητό εύρος και με πλάτος ίσο με την τιμή της τάσης εισόδου. Η έξοδος που προκύπτει προσεγγίζει αρκετά περισσότερο την επιθυμητή ημιτονοειδή μορφή ενώ οι ανεπιθύμητες αρμονικές τάσεις είναι μετατοπισμένες σε αρκετά υψηλές συχνότητες όπου μπορούν να αποκοπούν εύκολα με τη χρήση ενός φίλτρου.

Οι κυματομορφές αναφοράς και φορέα που χρησιμοποιούνται παράγονται από γεννήτρια κυματομορφών και είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους. Έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

**Κυματομορφή αναφοράς:** Η κυματομορφή αναφοράς αποτελεί το σήμα ελέγχου για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών. Η μορφή της επιλέγεται ημιτονοειδής ώστε να παράγεται ημιτονοειδής τάση εξόδου με λιγότερες αρμονικές και το πλάτος της  $\hat{A}_r$  καθορίζεται από την απόκλιση της πραγματικής με την επιθυμητή τάση εξόδου και μεταβάλλεται ανάλογα. Η συχνότητά της  $f_r$  ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης (modulating frequency) και είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

**Κυματομορφή φορέα:** Η κυματομορφή φορέα έχει τριγωνική μορφή και διατηρείται σταθερή σε συγκεκριμένη συχνότητα  $f_c$  και πλάτος  $\hat{A}_c$ . Η συχνότητα της κυματομορφής φορέα ονομάζεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency) και καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα.

Η σχετική απόκλιση των χαρακτηριστικών μεγεθών των δύο κυματομορφών μπορεί να εκφραστεί με τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους (amplitude modulation ratio)  $m_a$  και τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation ration)  $m_f$ , οι οποίοι ορίζονται

$$m_a = \frac{\hat{A}_r}{\hat{A}_c} \quad (4-37)$$

και

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (4-38)$$

Οι δύο παραπάνω κυματομορφές εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή, η έξοδος του οποίου εξαρτάται από τις τιμές των συντελεστών  $m_a$  και  $m_f$  και καθορίζει τη σχετική διάρκεια αγωγής των διακοπών. Ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η έξοδος του συγκριτή στη σχετική διάρκεια αγωγής κάθε διακόπτη εξαρτάται από τη συνδεσμολογία αντιστροφέα και τη μέθοδο ελέγχου που χρησιμοποιείται. Έτσι, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις.

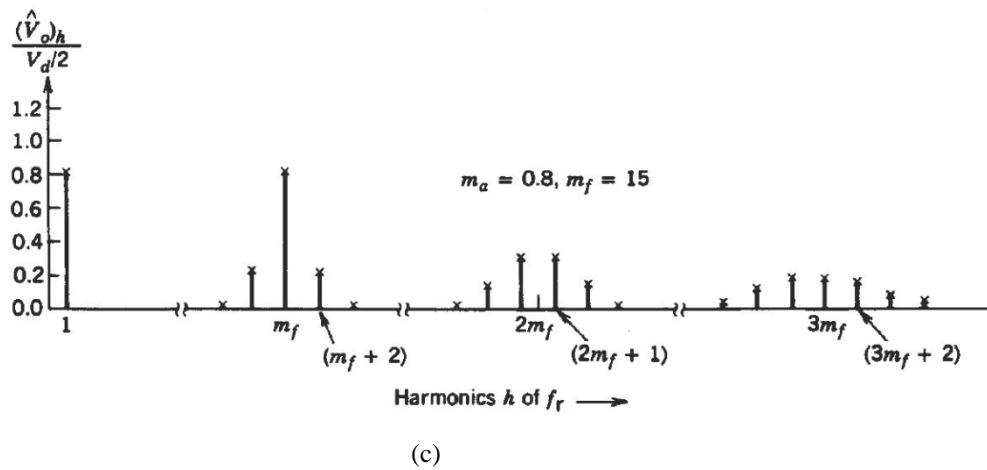
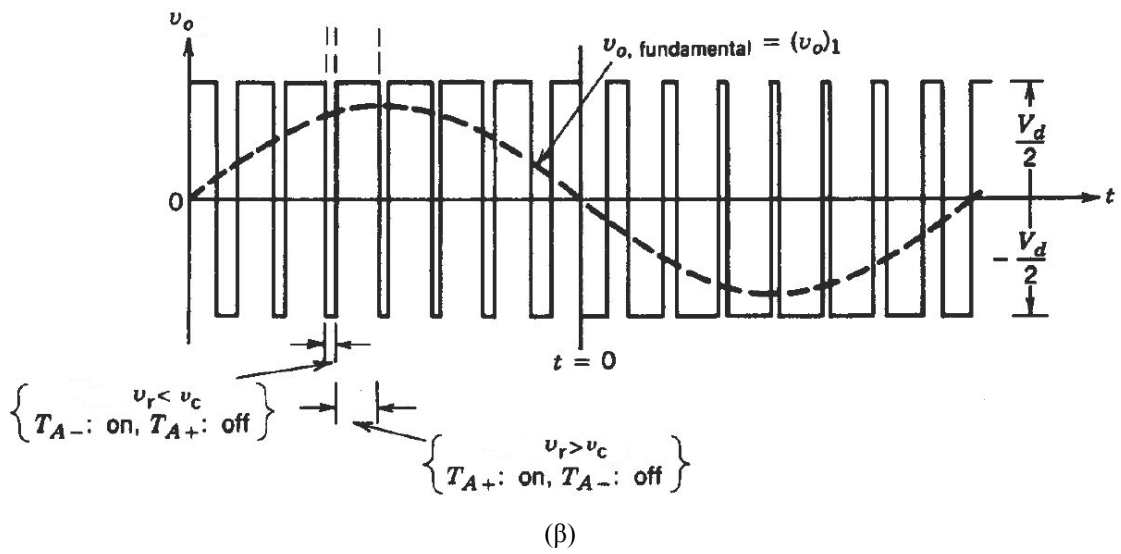
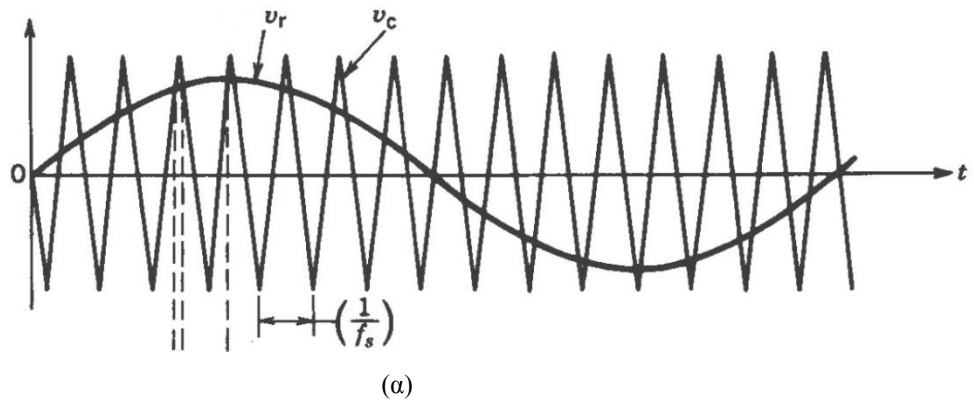
#### 4.2.5.1 Αντιστροφέας Ημιγέφυρας

Στη συνδεσμολογία του αντιστροφέα ημιγέφυρας, υπάρχουν δύο δυνατές καταστάσεις λειτουργίας στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το κύκλωμα, ανάλογα με τον διακόπτη ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Η διαδοχή των καταστάσεων καθορίζεται από τη σύγκριση των κυματομορφών αναφοράς και φορέα, με βάση τις παρακάτω συνθήκες:

1. Αν  $v_r > v_c$  τότε ο διακόπτης  $T_+$  βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, ο διακόπτης  $T_-$  βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = \frac{1}{2}V_d$ .
2. Αν  $v_r < v_c$  τότε ο διακόπτης  $T_+$  βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, ο διακόπτης  $T_-$  βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = -\frac{1}{2}V_d$ .

Επομένως, εφόσον οι δύο διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ανοιχτοί, το εύρος της τάσης εξόδου  $V_o$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $V_d/2$  και  $-V_d/2$ .

Στο Σχήμα 4.15 φαίνονται οι κυματομορφές αναφοράς και φορέα, η παραγόμενη τάση εξόδου καθώς και το αντίστοιχο φάσμα της κατά τη διαμόρφωση SPWM σε αντιστροφέα ημιγέφυρας, για  $m_a = 0.8$  και  $m_f = 15$ . Η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου αντιστοιχεί όπως έχει αναφερθεί στη συχνότητα διαμόρφωσης, δηλαδή  $f_1 = f_r$ .



Σχήμα 4.15. Διαμόρφωση SPWM σε αντιστροφή ημιγέφυρας.

Γενικά, από τη φασματική ανάλυση της τάσης εξόδου για  $m_a \leq 1$  προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις:

- Το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης εξόδου  $\hat{V}_{o,1}$  αποδεικνύεται ότι είναι  $m_a$  φορές η τιμή  $V_d/2$ , δηλαδή

$$\hat{V}_{o,1} = m_a \frac{V_d}{2} \quad , \quad m_a \leq 1 \quad (4-39)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι στην ημιτονοειδή διαμόρφωση SPWM το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$ , υπό την προϋπόθεση ότι  $m_a \leq 1$ . Για τον λόγο αυτόν, η περιοχή του  $m_a$  από 0 ως 1 αναφέρεται ως γραμμική περιοχή. Επίσης στη σχέση αυτή φαίνεται καθαρά ότι μεταβάλλοντας τον συντελεστή  $m_a$  μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος του πλάτους της τάσης εξόδου.

- Οι ανώτερες αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες με κέντρο τη συχνότητα μετάβασης  $f_c$  και τις πολλαπλάσιές της, για όλες τις τιμές του  $m_a$  από 0 ως 1. Για σχετικά μεγάλο συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$ , οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές μπορούν θεωρητικά να εκφραστούν συναρτήσει του  $m_f$  από τη σχέση

$$f_h = (jm_f \pm k)f_r \quad (4-40)$$

όπου  $h$  είναι η τάξη της αρμονικής και  $j, k$  είναι φυσικοί αριθμοί για τους οποίους ισχύει ότι όταν ο  $j$  είναι περιττός τότε ο  $k$  λαμβάνει μόνο άρτιες τιμές ενώ όταν ο  $j$  είναι άρτιος τότε ο  $k$  λαμβάνει μόνο περιττές τιμές. Η θεμελιώδης συχνότητα αντιστοιχεί στο  $h = 1$ . Όπως είναι εμφανές, οι τάξεις των εμφανιζόμενων αρμονικών προκύπτουν συναρτήσει του  $m_f$  από την εξίσωση

$$h = jm_f \pm k \quad (4-41)$$

Για σχετικά μεγάλο συντελεστή  $m_f$ , σε αντίθεση με τις συχνότητες των αρμονικών τα πλάτη τους είναι σχεδόν ανεξάρτητα από τον  $m_f$ . Οι τιμές τους μπορούν να βρεθούν για διάφορες τιμές του συντελεστή  $m_a$  μέσω του Πίνακα 4.4, όπου καταγράφονται τα πλάτη των αρμονικών κανονικοποιημένα ως προς την τάση εισόδου δηλαδή οι τιμές  $\hat{V}_{o,h} / \frac{1}{2}V_d$  συναρτήσει του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  για τιμές του  $j$  από 1 έως 4.



**Πίνακας 4.4.** Γενικευμένες αρμονικές της τάσης εξόδου αντιστροφέα ημιγέφυρας για διάφορες τιμές του συντελεστή  $m_a$  και σχετικά μεγάλο συντελεστή  $m_f$ . Τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς την τάση εισόδου, δηλαδή παρουσιάζονται οι τιμές  $\hat{V}_{o,h} / \frac{1}{2}V_d$ .

$h$ \ $m_a$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$1$ Θεμελιώδης	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$m_f$	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

Γενικά, οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται σχετικά ευκολότερα από τις αρμονικές με χαμηλή συχνότητα, γι' αυτό είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατόν υψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης  $f_c$  και επομένως συντελεστή  $m_f$ . Ωστόσο, οι υψηλές συχνότητες μετάβασης αυξάνουν επίσης και τις απώλειες μετάβασης στους διακόπτες του αντιστροφέα και για αυτό η επιλογή του συντελεστή  $m_f$  πρέπει να λαμβάνει υπόψιν και τους δύο αυτούς παράγοντες.

Ακόμη, η επιλογή της συχνότητας μετάβασης  $f_c$  πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζεται ότι ο συντελεστής  $m_f$  είναι ακέραιος και περιττός αριθμός. Ο συντελεστής  $m_f$  πρέπει να είναι ακέραιος έτσι ώστε η κυματομορφή φορέα να είναι συγχρονισμένη με την κυματομορφή αναφοράς, διότι διαφορετικά γίνεται αρκετά έντονη η εμφάνιση υποαρμονικών της θεμελιώδους συχνότητας στην τάση εξόδου του αντιστροφέα. Ακόμη, επιλέγεται να είναι

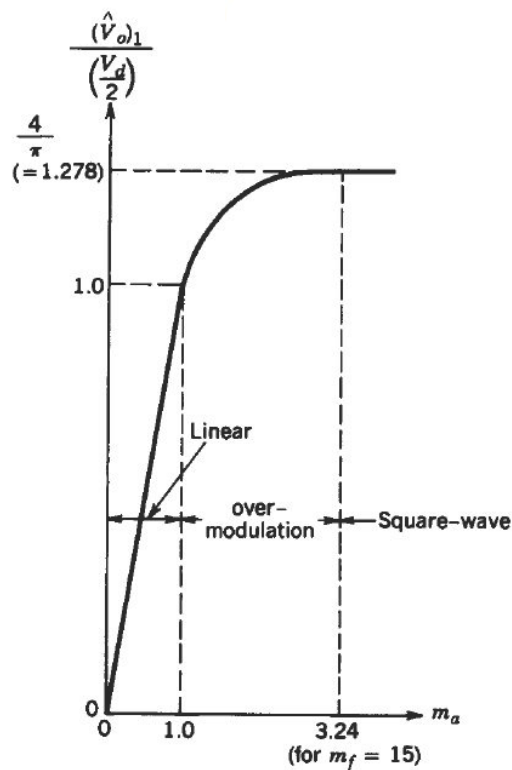
περιττός αριθμός ώστε η κυματομορφή της τάσης εξόδου να έχει περιττή συμμετρία, με αποτέλεσμα οι άρτιες αρμονικές στο φάσμα της να εξαφανίζονται.

Τέλος, σε διάφορες περιπτώσεις ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  επιλέγεται να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή  $m_a > 1$  (υπερδιαμόρφωση). Στην περιοχή αυτή το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου παύει να μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του  $m_a$  και εξαρτάται πλέον από τον συντελεστή  $m_f$ , παρουσιάζοντας παράλληλα το πλεονέκτημα ότι η τιμή του είναι αυξημένη σε σχέση με πριν. Ακόμη, οι αρμονικές που υπερισχύουν στη γραμμική περιοχή μπορεί να μην υπερισχύσουν κατά την υπερδιαμόρφωση και παρατηρούνται περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες. Ωστόσο, λόγω της παραμόρφωσης της τάσης εξόδου που επιφέρει, η περιοχή υπερδιαμόρφωσης αποφεύγεται σε αδιάλειπτες τροφοδοσίες ισχύος και χρησιμοποιείται κυρίως σε επαγωγικά κινητήρια συστήματα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16, για  $m_a > 1$  το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου κυμαίνεται στην περιοχή

$$\frac{V_d}{2} < \hat{V}_{o,1} < \frac{4 V_d}{\pi 2} \quad (4-42)$$

όπου η τιμή  $\frac{4 V_d}{\pi 2}$  αποκτάται για μεγάλες τιμές του  $m_a$  στις οποίες η τάση εξόδου εκφυλίζεται σε τετραγωνική κυματομορφή.

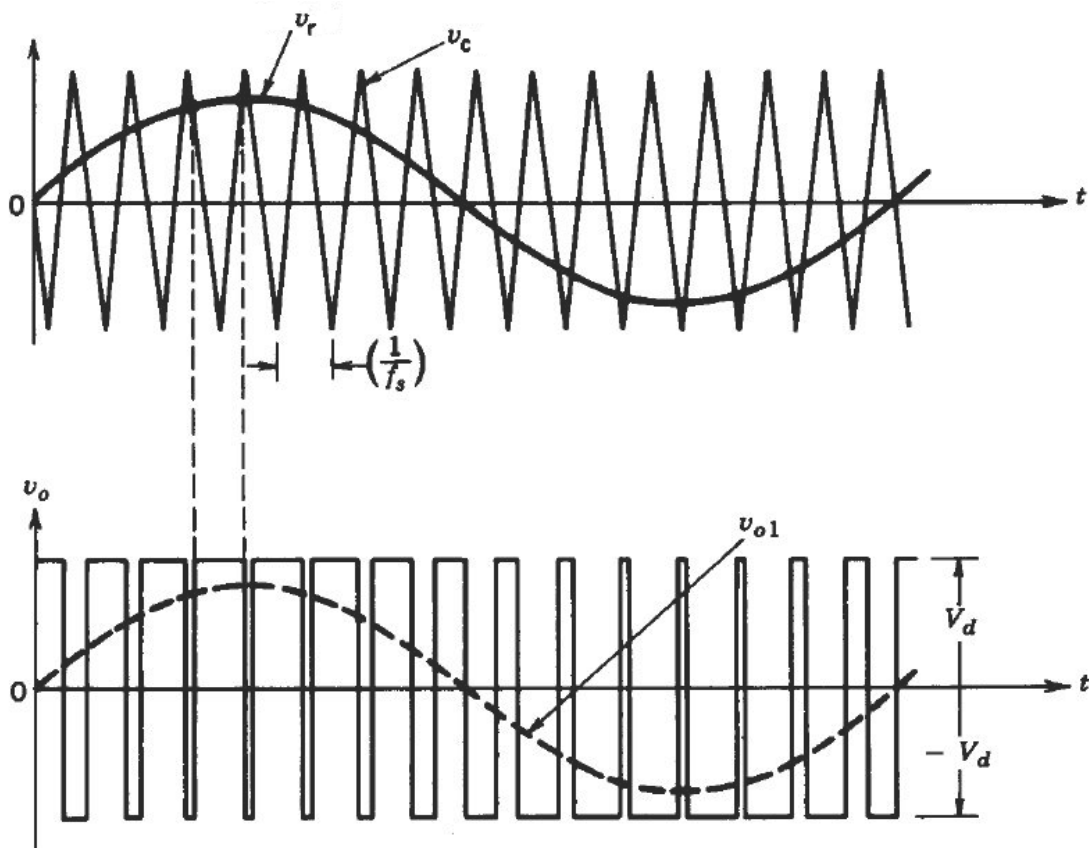


**Σχήμα 4.16.** Κανονικοποιημένη τιμή του πλάτους της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου συναρτήσει του συντελεστή  $m_a$ .

#### 4.2.5.2 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου

Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου, η διαμόρφωση SPWM καθορίζει τη σχετική διάρκεια αγωγής των ζευγών διακοπών  $T_{A+} - T_{B-}$  και  $T_{A-} - T_{B+}$ , μεριμνώντας ώστε κάθε στιγμή το ένα ζεύγος να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και το άλλο σε κατάσταση αποκοπής. Το ζεύγος το οποίο θα άγει μια δεδομένη στιγμή καθορίζεται από τη σύγκριση των κυματομορφών αναφοράς και φορέα ως ακολούθως:

1. Αν  $v_r > v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = V_d$ .
2. Αν  $v_r < v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = -V_d$ .



Σχήμα 4.17. Διαμόρφωση SPWM σε αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου.

Όπως και στην περίπτωση του αντιστροφέα ημιγέφυρας υπάρχουν δύο καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το κύκλωμα, με τη διαφορά ότι εδώ ο έλεγχος εφαρμόζεται

σε δύο ζεύγη διακοπών αντί για δύο μεμονωμένους διακόπτες και ότι τα επίπεδα μεταξύ των οποίων μεταβάλλεται η τάση εξόδου είναι  $-V_d$  και  $V_d$ , δηλαδή η τιμή τους είναι διπλάσια. Λόγω των ομοιοτήτων που παρουσιάζει η λειτουργία στις δύο αυτές περιπτώσεις, η ανάλυση που έγινε για τον αντιστροφέα ημιγέφυρας μπορεί να εφαρμοστεί και εδώ καταλήγοντας σε αντίστοιχες σχέσεις και πορίσματα. Έτσι, σε αντιστοιχία με πριν, συνοπτικά ισχύουν τα εξής:

- Στην περίπτωση που ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους είναι μικρότερος της μονάδας ( $m_a \leq 1$ ), το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου  $\hat{V}_{o,1}$  μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του  $m_a$  σύμφωνα με την εξίσωση

$$\hat{V}_{o,1} = m_a V_d \quad , \quad m_a \leq 1 \quad (4-43)$$

Από την άλλη, στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης ( $m_a > 1$ ) η γραμμική εξάρτηση του πλάτους  $\hat{V}_{o,1}$  με τον συντελεστή  $m_a$  παύει να ισχύει και εμφανίζεται εξάρτηση από τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$ . Το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει το πλάτος στην περιοχή αυτή είναι

$$V_d < \hat{V}_{o,1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad , \quad m_a > 1 \quad (4-44)$$

- Υπό την προϋπόθεση ότι  $m_a \leq 1$  και ότι ο συντελεστής  $m_f$  έχει σχετικά μεγάλη τιμή, οι ανώτερες αρμονικές που συνθέτουν την τάση εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες με κέντρο τη συχνότητα μετάβασης  $f_c$  και τις πολλαπλασιές της. Οι τάξεις των εμφανιζόμενων αρμονικών  $h$  δίνονται συναρτήσει του  $m_f$  από την εξίσωση

$$h = j m_f \pm k \quad (4-45)$$

οι οποίες αντιστοιχούν σε συχνότητες

$$f_h = (j m_f \pm k) f_r \quad (4-46)$$

όπου  $j$  φυσικός αριθμός

$k$  φυσικός αριθμός  $\begin{cases} \text{άρτιος αν ο } j \text{ είναι περιττός} \\ \text{περιττός αν ο } j \text{ είναι άρτιος} \end{cases}$

Η συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας προκύπτει για  $h = 1$  και αντιστοιχεί στη συχνότητα διαμόρφωσης, δηλαδή  $f_1 = f_r$ .

Τα πλάτη των αρμονικών για σχετικά μεγάλο συντελεστή  $m_f$  μπορούν να βρεθούν μέσω του Πίνακα 4.5, ο οποίος περιλαμβάνει τις τιμές τους κανονικοποιημένες ως προς την τάση εισόδου για διάφορες τιμές του συντελεστή  $m_a$  και για  $j = 1,2,3$  και 4. Οι τιμές του πίνακα ταυτίζονται με αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4, με τη διαφορά ότι εδώ αντιπροσωπεύουν την ποσότητα  $\hat{V}_{o,h}/V_d$ .

**Πίνακας 4.5.** Γενικευμένες αρμονικές της τάσης εξόδου αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για διάφορες τιμές του συντελεστή  $m_a$  και σχετικά μεγάλο  $m_f$ . Τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς την τάση εισόδου, δηλαδή παρουσιάζονται οι τιμές  $\hat{V}_{o,h} / V_d$ .

$h$ \ $m_a$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
<b>1</b> Θεμελιώδη	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
<b><math>m_f</math></b>	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
<b><math>m_f \pm 2</math></b>	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
<b><math>m_f \pm 4</math></b>					0.018
<b><math>2m_f \pm 1</math></b>	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
<b><math>2m_f \pm 3</math></b>		0.024	0.071	0.139	0.212
<b><math>2m_f \pm 5</math></b>				0.013	0.033
<b><math>3m_f</math></b>	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
<b><math>3m_f \pm 2</math></b>	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
<b><math>3m_f \pm 4</math></b>		0.012	0.047	0.104	0.157
<b><math>3m_f \pm 6</math></b>				0.016	0.044
<b><math>4m_f \pm 1</math></b>	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
<b><math>4m_f \pm 3</math></b>	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
<b><math>4m_f \pm 5</math></b>			0.034	0.084	0.119
<b><math>4m_f \pm 7</math></b>				0.017	0.050

Τέλος, όσον αφορά την επιλογή της συχνότητας μετάβασης  $f_c$  αυτή πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους εξής παράγοντες:

- Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της συχνότητας μετάβασης τόσο υψηλότερες προκύπτουν οι συχνότητες των ανεπιθύμητων αρμονικών και επομένως τόσο πιο εύκολο καθίσταται το

φιλτράρισμά τους. Ωστόσο, οι υψηλές συχνότητες μετάβασης αυξάνουν επίσης και τις απώλειες μετάβασης στους διακόπτες του αντιστροφέα.

- Η επιλογή της συχνότητας μετάβασης  $f_c$  πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζεται ότι ο συντελεστής  $m_f$  είναι *ακέραιος* και *περιττός* αριθμός. Ο συγχρονισμός των κυματομορφών αναφοράς και φορέα και η περιττή συμμετρία που επιτυγχάνονται με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την εμφάνιση ανεπιθύμητων αρμονικών σε σημαντικό βαθμό.

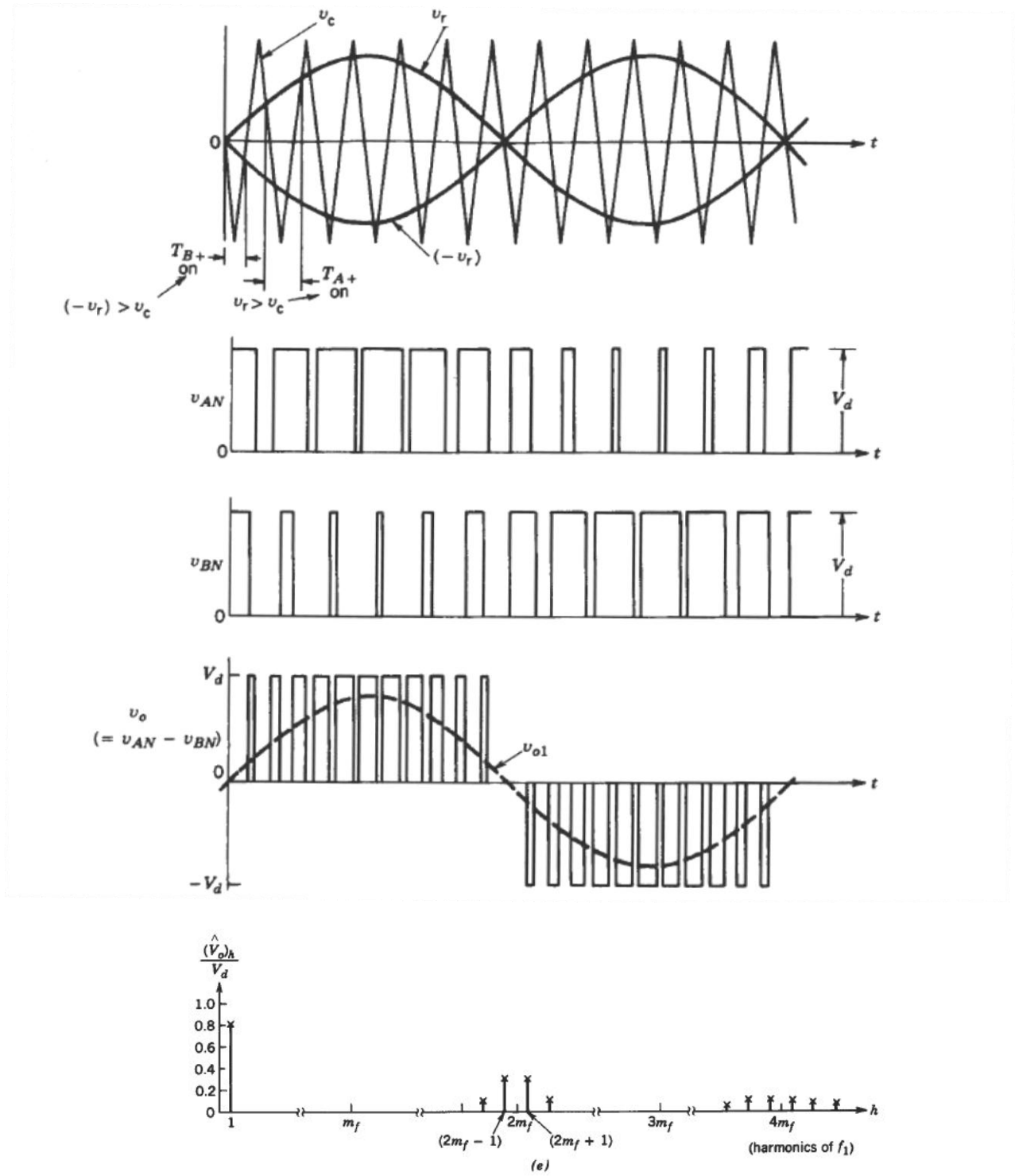
#### 4.2.5.3 Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου

Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου, οι διακόπτες στα δύο σκέλη δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα αλλά ελέγχεται η σχετική διάρκεια αγωγής του καθενός ξεχωριστά. Εδώ, επειδή οι δυνατές καταστάσεις λειτουργίας είναι τέσσερις, τα δύο σκέλη του αντιστροφέα ελέγχονται από δύο ξεχωριστές κυματομορφές αναφοράς  $v_r$  και  $-v_r$  οι οποίες συγκρίνονται με την κυματομορφή φορέα  $v_c$ . Η κάθε κυματομορφή αναφοράς εισάγεται με την κυματομορφή φορέα στην είσοδο ενός συγκριτή, στην έξοδο του οποίου παράγονται παλμοί καθορίζουν τη σχετική διάρκεια αγωγής των διακοπών του αντίστοιχου σκέλους. Το θετικό μέρος της εξόδου του πρώτου συγκριτή ορίζει τους παλμούς έναυσης του διακόπτη  $T_{A+}$  και το ανάστροφό του τους παλμούς έναυσης του διακόπτη  $T_{A-}$ , ενώ το θετικό μέρος της εξόδου τους δεύτερου συγκριτή ορίζει τους παλμούς έναυσης του διακόπτη  $T_{B+}$  ενώ το ανάστροφό του τους παλμούς του διακόπτη  $T_{B-}$ .

Συγκεντρωτικά, υπάρχουν επομένως οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Αν  $v_r > v_c$  και  $-v_r < v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = V_d$ .
2. Αν  $v_r > v_c$  και  $-v_r > v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = 0$ .
3. Αν  $v_r < v_c$  και  $-v_r > v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = -V_d$ .
4. Αν  $v_r < v_c$  και  $-v_r < v_c$  τότε οι διακόπτες  $T_{A-}$  και  $T_{B-}$  βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή  $V_o = 0$ .

Το αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18. Διαμόρφωση SPWM αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το φάσμα της τάσης εξόδου, εδώ οι αρμονικές υπάρχουν μόνο ως πλευρικές ζώνες γύρω από τη συχνότητα  $2m_f$  και τις πολλαπλάσιές της. Να σημειωθεί ότι ενώ στις προηγούμενες περιπτώσεις λειτουργίας ο συντελεστής  $m_f$  επιλεγόταν περιττός ακέραιος αριθμός εδώ επιλέγεται *άρτιος ακέραιος*. Η σχέση υπολογισμού της αρμονικής τάξης  $h$  αποκτάει τώρα τη μορφή

$$h = j(2m_f) \pm k \quad (4-47)$$

όπου  $j, k$  φυσικοί αριθμοί εκ των οποίων το  $k$  λαμβάνει μόνο περιττές τιμές. Από τη σχέση (4-47) φαίνεται ότι η μετάβαση με μονοπολική τάση εξόδου παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, παρουσιάζοντας ένα σημαντικά χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο. Τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών μπορούν να υπολογιστούν όπως και πριν από τον Πίνακα 4.5.

Όσον αφορά το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης εξόδου, ισχύουν όπως και πριν οι σχέσεις

$$\hat{V}_{o,1} = m_a V_d \quad , \quad m_a \leq 1 \quad (4-48)$$

και

$$V_d < \hat{V}_{o,1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad , \quad m_a > 1 \quad (4-49)$$

#### 4.2.6 Συντελεστής Ολικής Παραμόρφωσης (THD%)

Όπως προκύπτει από την ανάλυση της τάσης εξόδου σε σειρά Fourier, η τάση εξόδου είναι μια κυματομορφή η οποία αποτελείται από τη βασική ή θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες οι οποίες είναι ανεπιθύμητες και πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Η ποιότητα ενός εναλλασσόμενου μη ημιτονοειδούς σήματος εκφράζεται από τον συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion - THD factor) ο οποίος ορίζεται από τη σχέση

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} (\hat{V}_{o,h})^2}}{\hat{V}_{o,1}} \times 100 \quad (4-50)$$

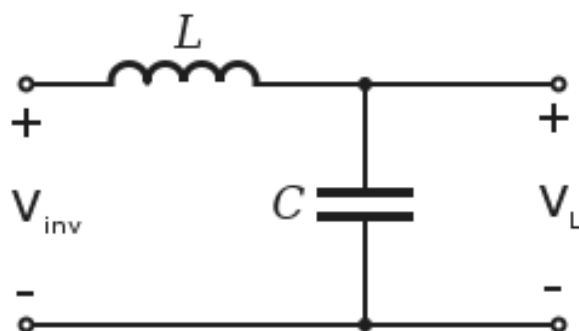
Για καθαρά ημιτονοειδή σήματα τάσης ή ρεύματος ο συντελεστής THD είναι ίσος με 0%. Γενικά, για να ελαττωθεί ο THD% της τάσης εξόδου του αντιστροφέα ένα φίλτρο πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ της εξόδου και του φορτίου με στόχο τη μείωση των ανεπιθύμητων



αρμονικών συνιστωσών. Απαραίτητη επίσης κρίνεται συνήθως η χρήση τεχνικών όπως η SPWM προκειμένου η τιμή του THD να βρίσκεται σε ανεκτά επίπεδα.

#### 4.2.7 Σχεδιασμός φίλτρου εξόδου αντιστροφέα

Η έξοδος ενός αντιστροφέα συνήθως συνοδεύεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο LC το οποίο μειώνει την επίδραση των ανεπιθύμητων αρμονικών και βελτιώνει τον συντελεστή THD της τάσης εξόδου. Έτσι, με βάση τις προδιαγραφές της λειτουργίας οι τιμές της αυτεπαγωγής  $L$  και του πυκνωτή  $C$  επιλέγονται κατάλληλα και το φίλτρο τοποθετείται στην έξοδο του αντιστροφέα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19.



**Σχήμα 4.19.** Παρεμβολή χαμηλοπερατού φίλτρου LC μεταξύ τάσης εξόδου αντιστροφέα  $V_{inv}$  και τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο  $V_L$ .

Αναλύοντας την παραπάνω συνδεσμολογία, θεωρώντας ως είσοδο την τάση εξόδου του αντιστροφέα  $V_{inv}$  και ως έξοδο την τάση του φορτίου  $V_L$  η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου προκύπτει

$$\frac{V_L}{V_{inv}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC + \frac{j\omega L}{Z_L}} \quad (4-51)$$

Στην περίπτωση της αρμονικής συνιστώσας τάξης  $h$  του αντιστροφέα η σχέση αυτή αποκτάει τη μορφή

$$\frac{\hat{V}_{L,h}}{\hat{V}_{inv,h}} = \frac{1}{1 - h^2 \omega^2 LC + \frac{j h \omega L}{Z_{L,h}}} \quad (4-52)$$

Για να είναι αποδεκτή η λειτουργία του αντιστροφέα συνήθως επιθυμείται ο συντελεστής THD της τάσης εξόδου να είναι μικρότερος από 5% κάτω από τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας. Αποδεικνύεται ότι ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται όταν το φίλτρο εξόδου μειώνει το πλάτος της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας το πολύ στο 3% της βασικής αρμονικής συνιστώσας. Οι χειρότερες συνθήκες λειτουργίας παρατηρούνται όταν δεν υπάρχει φορτίο, δηλαδή για  $Z_{L,h} = \infty$ , οπότε ο λόγος  $\hat{V}_{L,h}/\hat{V}_{inv,h}$  αποκτά τη μεγαλύτερη τιμή και η σχέση (4-52) γίνεται

$$\frac{\hat{V}_{L,h}}{\hat{V}_{inv,h}} \cong \frac{1}{1 - h^2 \omega^2 LC} \quad (4-53)$$

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός ενός φίλτρου εξόδου προϋποθέτει τα εξής στάδια:

- Εύρεση του πλάτους της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου  $\hat{V}_{inv,1}$ .
- Εύρεση της τάξης  $h$  της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής της τάσης εξόδου και του πλάτους της  $\hat{V}_{inv,h}$ .
- Προσδιορισμός των τιμών  $L, C$  από την εξίσωση (4-53), όπου η τιμή του  $\hat{V}_{L,h}$  καθορίζεται από τη συνθήκη

$$\hat{V}_{L,h} \leq \frac{3}{100} \hat{V}_{inv,1} \quad (4-54)$$

# 5

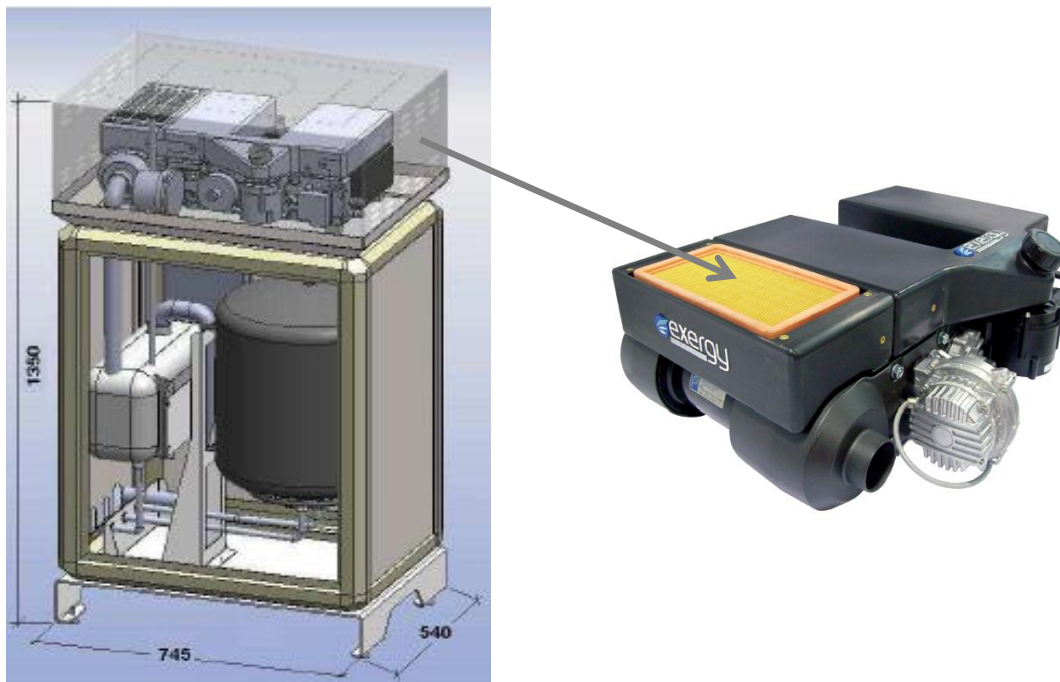
## Τεχνική περιγραφή της κυψέλης καυσίμου Mira 6 και του αντιστροφέα τάσης DHF-1AC-5000W

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο κτήριο ΑΠΕ-Η<sub>2</sub> για την τροφοδότηση με ηλεκτρική ενέργεια χώρου επιφάνειας ίσης με 150 m<sup>2</sup> στις περιπτώσεις που η προσφερόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ δεν ήταν επαρκής.

### 5.1 Κυψέλη καυσίμου Exergy Mira 6

Η κυψέλη καυσίμου η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πιλοτικής φάσης του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>-SusBuild ήταν ο τύπος MIRA 6 της εταιρείας Morphic Exergy (Εικόνα 5.1). Πρόκειται για κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων PEM η οποία χρησιμοποιεί ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο και παράγει στην έξοδο συνεχές ρεύμα μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος 7 KWe και ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 5,8 kWe.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1, η κυψέλη καυσίμου MIRA 6 εκτός από τη στήλη των κελιών καυσίμου περιλαμβάνει επιπλέον περιφερειακές συσκευές, απαραίτητες για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και λειτουργικού συστήματος, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.4 και στο Σχήμα 3.15 της εργασίας. Τα περιφερειακά συστήματα που χρησιμοποιούνται βρίσκονται τοποθετημένα κάτω από τη στήλη και περιλαμβάνουν κύκλωμα ψύξης μαζί με δεξαμενή αποθήκευσης νερού, αντλία νερού, αισθητήρες θερμοκρασίας και έναν εξωτερικό εναλλάκτη θερμότητας με ανεμιστήρα.



**Εικόνα 5.1.** Κυψέλη καυσίμου MIRA 6 της εταιρείας Morphic Exergy.

Η στήλη της κυψέλης καυσίμου αποτελείται από 72 κελιά, το καθένα από τα οποία έχει επιφάνεια  $250 \text{ cm}^2$ . Η κυψέλη διαθέτει επίσης εγκατεστημένο εσωτερικό ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου το οποίο παρακολουθεί και ελέγχει τις λειτουργικές παραμέτρους της κυψέλης όπως τις πιέσεις, τη θερμοκρασία, την τάση και το ρεύμα. Το κύκλωμα ελέγχει επίσης τη λειτουργία των βαλβίδων, των αντλιών και των ανεμιστήρων ψύξης.

Σχετικά με την τροφοδοσία της κυψέλης καυσίμου με υδρογόνο, σημειώνονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της κυψέλης παράγεται από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού ισχύος  $22.3 \text{ kW}$ , ικανής να παράγει  $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$  υδρογόνο.
- Η αποθήκευση του υδρογόνου γίνεται σε μια συστοιχία φιαλών υψηλής πίεσης  $200 \text{ bar}$ , συνολικής χωρητικότητας  $690 \text{ Nm}^3$  υδρογόνου ( $62 \text{ kg}$ ) και συνολικού ενεργειακού περιεχομένου  $2066 \text{ kWh}$ . Η καθαρότητα του υδρογόνου που αποθηκεύεται είναι  $99.95\%$ , καλύπτοντας έτσι τις προδιαγραφές λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.
- Η πίεση του υδρογόνου που τροφοδοτείται στη συστοιχία των κελιών καυσίμου ρυθμίζεται από κατάλληλο μειωτή πίεσης που βρίσκεται στην είσοδο τροφοδοσίας του υδρογόνου της κυψέλης καυσίμου έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή και ίση με  $1.5 \text{ bar}$ .
- Η προβλεπόμενη κατανάλωση υδρογόνου από την κυψέλη όταν η παραγόμενη ισχύς εξόδου αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της είναι  $4.3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .
- Ως οξειδωτικό μέσο χρησιμοποιείται αέρας, ο οποίος τροφοδοτείται στην κυψέλη καυσίμου από ξεχωριστή γραμμή τροφοδοσίας. Η πίεση του αέρα στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου είναι σταθερή και ίση με  $1 \text{ atm}$ .

Συνοπτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου Mira 6 παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1.** Τεχνικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου Mira 6.

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Τιμή
<b>Τεχνικά χαρακτηριστικά</b>		
Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς	kW	7
Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς	kW	5.8
Παραγόμενη τάση	V	31 - 72
Απόδοση σε λειτουργία στην ονομαστική ισχύ		> 40%
Αναμενόμενη διάρκεια ζωής	h	10000
Χρόνος εκκίνησης (ως το 75% της ονομαστικής ισχύος)	s	12
Αριθμός κελιών καυσίμου		72
Πάχος ηλεκτρολυτικής μεμβράνης	cm	$180 \cdot 10^{-4}$
Θερμοκρασία λειτουργίας	K	332
<b>Τροφοδοσία καυσίμου</b>		
Τύπος καυσίμου		Υδρογόνο
Πίεση υδρογόνου στην άνοδο	atm	1.5
Πίεση οξυγόνου στην κάθοδο	atm	0.21
Πίεση παραγόμενου νερού	atm	1
Κατανάλωση υδρογόνου	Nm <sup>3</sup> /h	4.3

Οι τιμές της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με το ρεύμα που μετρήθηκαν και δόθηκαν από τον κατασκευαστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2.** Μετρήσεις τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας οι οποίες δόθηκαν από τον κατασκευαστή.

Ένταση ρεύματος (A)	Τάση εξόδου (V)
0	71.7
10	60.8
20	59.2
30	57.6
40	56.3
50	54.9
60	53.3
70	52
80	50.8
90	50
100	49.3
110	48
120	47
130	45.7
140	44.3
150	42.7
160	41.5
170	39.7
180	37.9
190	35.1

## 5.2 Αντιστροφέας τάσης Delta DHF-1AC-5000W



Εικόνα 5.2. Αντιστροφέας DHF-1AC-5000W της εταιρίας Delta Energy Systems.

Προκειμένου η ισχύς που παράγεται από την κυψέλη Mira 6 να μπορέσει να αξιοποιηθεί από το δίκτυο, στην έξοδο της κυψέλης είναι συνδεδεμένος ένας αντιστροφέας τύπου DHF-1AC-5000W της εταιρίας Delta Energy Systems (Εικόνα 5.2). Το συγκεκριμένο μοντέλο αντιστροφέα είναι σχεδιασμένο ώστε να μετατρέπει με υψηλή απόδοση ενέργεια που προέρχεται από σταθερές πηγές τάσης σε ημιτονοειδές εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ η τάση εξόδου του αντιστροφέα αντιστοιχεί στην τάση του δικτύου (230V/50Hz). Η λειτουργία του ελέγχεται από ψηφιακούς μικροεπεξεργαστές στο εσωτερικό του ενώ σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι ότι συνδέεται με ένα ιεραρχικά ανώτερο σύστημα ελέγχου ή αλλιώς σύστημα “αφέντη” (master) μέσω του οποίου λαμβάνει εντολές και στέλνει πληροφορίες. Κύρια ευθύνη του συστήματος αυτού είναι να καθορίζει την επιθυμητή τιμή του DC ρεύματος εισόδου (και επομένως στην παρούσα περίπτωση το σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου) ενώ επίσης έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί τη λειτουργία του αντιστροφέα μέσω ενός σήματος ενεργοποίησης, του σήματος “ENABLE”.

Ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή των κύριων στοιχείων και χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου μοντέλου αντιστροφέα τάσης.

### DC-INPUT

Η σύνδεση του αντιστροφέα με τη συνεχή πηγή τάσης γίνεται μέσω της υποδοχής DC-INPUT μέσα από την οποία ο αντιστροφέας τραβάει την επιθυμητή ποσότητα ρεύματος. Η τιμή αυτή καθορίζεται από τον χειριστή μέσα από το σύστημα ελέγχου και αποστέλλεται στον αντιστροφέα μέσω διεπαφής RS-485. Έτσι, μια αλλαγή στην επιθυμητή τιμή του DC ρεύματος οδηγεί σε αλλαγή στην πραγματική τιμή του DC ρεύματος με έναν προκαθορισμένο ρυθμό αλλαγής (33 A/s), μέχρι η επιθυμητή τιμή να επιτευχθεί. Απαραίτητες προϋποθέσεις για να τραβήξει ρεύμα ο αντιστροφέας είναι να βρίσκεται το ηλεκτρικό σήμα “ENABLE” στο λογικό 1 και η DC τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο να βρίσκεται ανάμεσα στο προδιαγεγραμμένο εύρος τιμών. Στην περίπτωση που κάποια από αυτές τις προϋποθέσεις πάψει να ισχύει τότε το ρεύμα θα γρήγορα θα μηδενιστεί και το κύκλωμα της υποδοχής ανοίγει. Τα ηλεκτρικά δεδομένα που αφορούν την DC είσοδο του αντιστροφέα φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.3.

**Πίνακας 5.3.** Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά DC εισόδου αντιστροφέα DHF-1AC-5000W.

DC είσοδος	Τιμή
Ονομαστική τάση	36 V
Εύρος τάσης	30 - 75 V
Ονομαστικό ρεύμα	140 A
Μέγιστο ρεύμα	160 A
Όριο ρεύματος	180 A
Κυμάτωση ρεύματος	< 1.0 A <sub>p-p</sub>
Ρυθμός μεταβολής ρεύματος	33 A/s
Μέγιστη ισχύς	6000 W

### AC-OUTPUT – AC-AUX

Ο αντιστροφέας είναι εξοπλισμένος με δύο ξεχωριστές υποδοχές εξόδου AC, την υποδοχή AC-OUTPUT για σύνδεση στο δίκτυο και την υποδοχή AC-AUX ώστε να παρέχεται δυνατότητα τροφοδότησης επιπλέον AC φορτίων. Έτσι, η συνολική AC ισχύς που παράγεται από τον αντιστροφέα μπορεί να κατανεμηθεί και να τροφοδοτήσει είτε το δίκτυο, είτε τα φορτία, είτε και τα δύο. Τα ηλεκτρικά δεδομένα που αφορούν την έξοδο AC του αντιστροφέα φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4.** Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά AC εισόδου αντιστροφέα DHF-1AC-5000W.

AC έξοδος	Τιμή
Ονομαστική τάση	230 V
Εύρος τάσης	195 - 265 V
Μέγιστο ρεύμα (AC-AUX)	28.0 A
Μέγιστο ρεύμα (AC-OUTPUT)	23.0 A
Μέγιστη ισχύς (AC-AUX - AC-OUTPUT)	5800 W
Μέγιστη ισχύς (AC-OUTPUT)	4800 W
Συντελεστής ισχύος	0.99
Συχνότητα (αυτόματος συγχρονισμός)	50 Hz ± 0.1 Hz 50 Hz ± 0.1 Hz
Απόδοση	> 88.5%



## **Διεπαφή RS-485 και υποδοχή σήματος “ENABLE”**

Η επικοινωνία του αντιστροφέα με το σύστημα ελέγχου γίνεται μέσω της διεπαφής RS-485, χάρη στην οποία ο χειριστής μπορεί να θέσει την επιθυμητή τιμή του ρεύματος εισόδου και γενικότερα να στέλνει και να λαμβάνει πληροφορίες. Για αυτόν τον σκοπό ο αντιστροφέας διαθέτει μια σειριακή θύρα επικοινωνίας RS-485 η οποία έχει 9 ακροδέκτες, εκ των οποίων δύο είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά δεδομένων από και προς το σύστημα ελέγχου ενώ μέσω δύο άλλων ο αντιστροφέας λαμβάνει το σήμα “ENABLE. Η επικοινωνία με το σύστημα ελέγχου περιγράφεται λεπτομερώς από το πρωτόκολλο επικοινωνίας του αντιστροφέα το οποίο θα αναλυθεί στην παράγραφο 7.1.3 .

Από την άλλη, το σήμα “ENABLE” είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση της λειτουργίας του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας τραβάει ρεύμα από την DC πηγή τάσης υπό την προϋπόθεση ότι το σήμα είναι στα 5 Volt ενώ όταν πέσει στα 0 Volt το κύκλωμα της υποδοχής DC-INPUT ανοίγει και ο αντιστροφέας σταματάει να τραβάει ρεύμα.

## **Shut-down loop, Communication timeout “Backdoor”**

Για τις περιπτώσεις που η λειτουργία του αντιστροφέα παρουσιάζει σοβαρά σφάλματα, ο αντιστροφέας είναι εφοδιασμένος με έναν ηλεκτρικό διακόπτη (shut-down loop) ο οποίος είναι κλειστός όταν δεν παρατηρείται κάποια σημαντική δυσλειτουργία ενώ διαφορετικά ανοίγει και η λειτουργία διακόπτεται.

Επιπλέον, ένα ακόμη χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου αντιστροφέα είναι ότι στην περίπτωση που δεν δεχτεί κάποια εντολή από το σύστημα ελέγχου για 15 δευτερόλεπτα τότε η εισροή ρεύματος διακόπτεται. Με αυτόν τον τρόπο αν παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα στη διασύνδεση του αντιστροφέα με το σύστημα ελέγχου τότε η παραγωγή θα σταματήσει αυτόματα.

Τέλος, αναφέρεται ότι εσωτερικά ο αντιστροφέας αποτελείται από δύο στάδια μετατροπής της ισχύος, ένα στάδιο κατά το οποίο σταθεροποιεί την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου στο επίπεδο των 400 V και το στάδιο κατά το οποίο μετατρέπει την τάση αυτή σε εναλλασσόμενη ενεργού τιμής 230 V και συχνότητας 50 Hz. Το στοιχείο αυτό αποτέλεσε βασικό άξονα της μοντελοποίησης του συστήματος παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου που θα περιγραφεί στο ακόλουθο κεφάλαιο.



# 6

## Μοντελοποίηση συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης στο περιβάλλον Matlab - Simulink

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν με στόχο την προσομοίωση του συστήματος κυψέλης καυσίμου Mira 6 – αντιστροφέα DHF-1AC-5000W. Η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος έγινε στο περιβάλλον Simulink, παρέχοντας τη δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης που έχουν βασικές λειτουργικές παράμετροι στη συμπεριφορά των επί μέρους τμημάτων καθώς και του συνολικού συστήματος σε σταθερές και μεταβατικές συνθήκες.

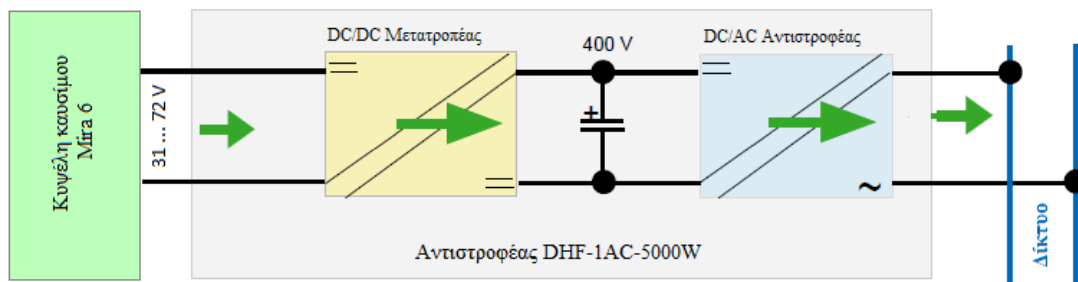
Η ανάπτυξη μοντέλων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος κυψέλης καυσίμου – αντιστροφέα τάσης είναι ιδιαίτερα σημαντική εργασία καθώς επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη εκτέλεσης των αντίστοιχων πειραμάτων. Επίσης δίνει τη δυνατότητα να κατανοηθεί σε βάθος η λειτουργία του συστήματος, να διακριθούν οι παράμετροι που έχουν τη σημαντικότερη επίδραση σ' αυτό και να ελεγχθεί η συμπεριφορά του σε ακραίες συνθήκες χωρίς να υπάρχει φόβος ατυχήματος ή καταστροφής εξοπλισμού.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου του υπό μελέτη συστήματος περιλάμβανε την επαναληπτική εκτέλεση των εξής σταδίων:

1. Ανάπτυξη και επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου (model selection).
2. Προσαρμογή μοντέλου με βάση τις λειτουργικές παραμέτρους της κάθε συσκευής (model fitting).

3. Προσομοίωση μοντέλου στο περιβάλλον Simulink και μελέτη της συμπεριφοράς του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (simulation).
4. Αξιολόγηση/Επικύρωση μοντέλου με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα (model validation).

Η ανάπτυξη των μοντέλων βασίστηκε στη θεωρητική ανάλυση που έγινε στα κεφάλαια 3 και 4 καθώς και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5. Η γενική δομή του συστήματος κυψέλης καυσίμου Mira 6 – αντιστροφέα DHF-1AC-5000W στην οποία στηρίχθηκε η μοντελοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1.** Σύστημα κυψέλης καυσίμου Mira 6 – αντιστροφέα DHF-1AC-5000W για την παροχή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

## 6.1 Μοντελοποίηση τάσης εξόδου κυψέλης καυσίμου με χρήση του περιβάλλοντος Matlab

Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, η τάση εξόδου της πρέπει να είναι σταθερή και ίση με το αντιστρεπτό δυναμικό. Ωστόσο, στην πράξη είναι χαμηλότερη και μεταβάλλεται μη γραμμικά συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των μηχανισμών απωλειών τάσης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας, η πραγματική τάση εξόδου κάθε κελιού  $V_{cell}$  μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{cell} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (6-1)$$

όπου  $V_{cell}$  είναι η τάση εξόδου του κελιού για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας

$E_{Nerst}$  αντιπροσωπεύει την αντιστρεπτή τάση ανοιχτού κυκλώματος

$V_{act}$  είναι η πτώση τάσης που προκαλείται λόγω απωλειών ενεργοποίησης

$V_{ohm}$  είναι η πτώση τάσης που προκαλείται λόγω ωμικών απωλειών

$V_{conc}$  είναι η πτώση τάσης που προκαλείται λόγω απωλειών συγκέντρωσης

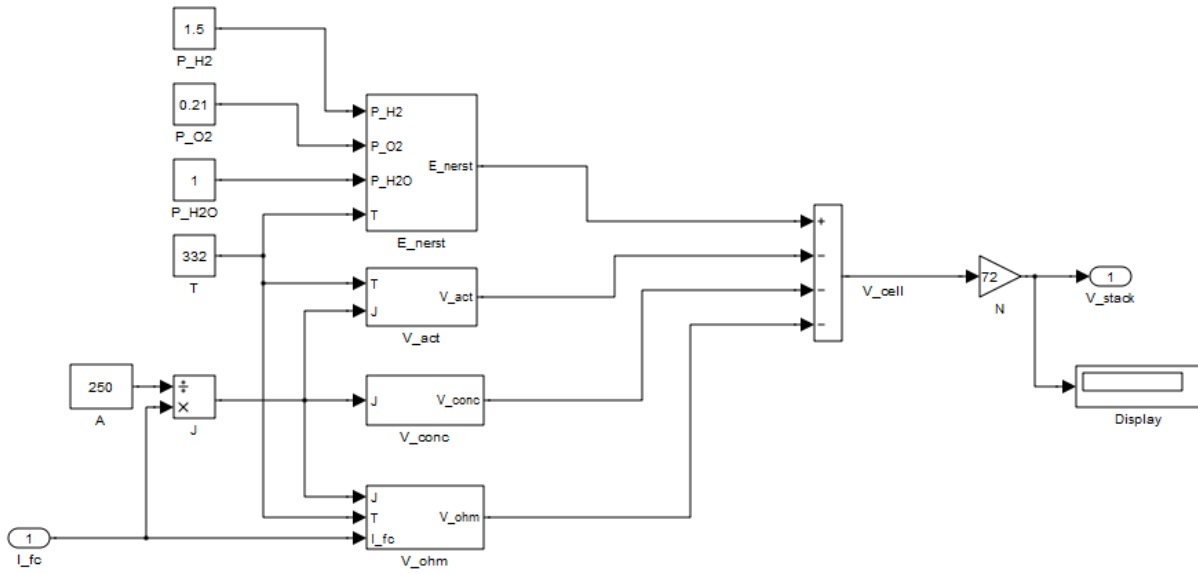
Η εξίσωση (6-1) αποτελεί τη βασική εξίσωση η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της πραγματικής τάσης εξόδου που παράγεται σ' ένα κελί καυσίμου της κυψέλης Mira 6 και η εφαρμογή της προϋποθέτει τη γνώση των τιμών των απωλειών ενεργοποίησης, των ωμικών απωλειών και των απωλειών συγκέντρωσης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος που διαρρέει το κάθε κελί. Αυτό θα γίνει με τη χρησιμοποίηση των μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού των παραπάνω απωλειών που αναπτύχθηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 0 και το οποίο είναι αντικείμενο των επόμενων παραγράφων. Η επίλυση των μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού της τάσης εξόδου κάθε κελιού καυσίμου καθώς και των επί μέρους απωλειών τάσης έγινε με κώδικα Matlab, ενώ επίσης παρατίθενται και τα αντίστοιχα μοντέλα Simulink τα οποία θα χρησιμεύσουν στη συνέχεια.

Σημειώνεται ότι η συνολική τάση εξόδου της συστοιχίας των κελιών καυσίμου  $V_{stack}$  που αποτελούν την κυψέλη καυσίμου Mira 6 υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό της τάσης εξόδου του ενός κελιού  $V_{cell}$  επί τον συνολικό αριθμό των κελιών  $N$  που συνιστούν την κυψέλη, δηλαδή

$$V_{stack} = N \cdot V_{cell} \quad (6-2)$$

Αντίθετα, μιας και τα κελιά καυσίμου είναι συνδεδεμένα σε σειρά, το ρεύμα λειτουργίας της κυψέλης  $I$  είναι κοινό τόσο για τα κελιά όσο και για την κυψέλη.

Το μοντέλο Simulink με το οποίο υπολογίζεται η τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2. Μοντέλο Simulink της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

### Αντιστρεπτή τάση ανοιχτού κυκλώματος

Όπως προκύπτει από την εξίσωση Nerst (εξίσωση (3-12)), η αντιστρεπτή τάση ανοιχτού κυκλώματος του κελιού καυσίμου  $E_{Nerst}$  σε σταθερές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση

$$E_{Nerst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (6-3)$$

όπου  $E^0$  είναι το πρότυπο δυναμικό του κελιού καυσίμου ή αλλιώς το αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος όταν τα συστατικά της αντίδρασης βρίσκονται σε πρότυπη κατάσταση (1 atm)

Οι τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του κελιού  $T$  καθώς και των μερικών πιέσεων των αερίων  $p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  και  $p_{H_2O}$  προσδιορίζονται από τα τεχνικά δεδομένα λειτουργίας του κελιού που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Με δεδομένο ότι η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης είναι 332 K, η τιμή του πρότυπου δυναμικού  $E_0$  του κελιού καυσίμου στη θερμοκρασία αυτή, σύμφωνα με την εξίσωση (3-10) είναι ίση με:

$$E^0 = E_{ref}^0 + \frac{\Delta S_{ref}^0}{2F} (T - T_{ref}) = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (332 - 298.15) = 1.201 V \quad (6-4)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6-3) την τιμή του πρότυπου δυναμικού καθώς και τις αντίστοιχες τιμές των μερικών πιέσεων και των φυσικών σταθερών προκύπτει ότι η αντιστρεπτή τάση ανοιχτού κυκλώματος του κελιού στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας είναι ίση με

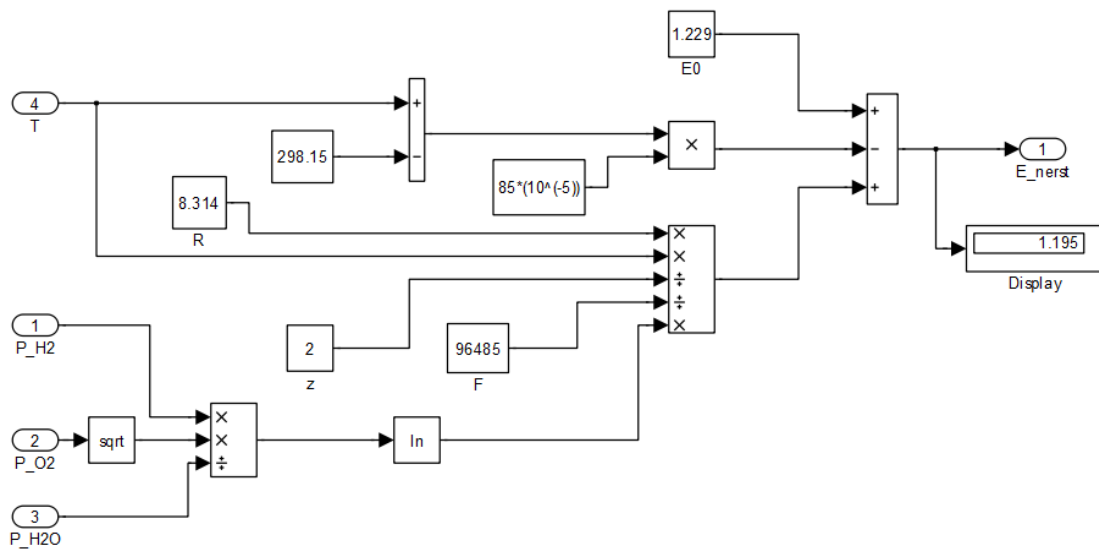
$$E_{Nerst} = 1.201 V + \frac{8.314 \cdot 332}{2 \cdot 96485} \ln \left[ \frac{1.5 \cdot 0.21^{1/2}}{1} \right] V = 1.195 V \quad (6-5)$$

Επισημαίνεται ότι στην πράξη η τιμή της πραγματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $E_{oc}$  είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τιμή της,  $E_{Nerst}$ , λόγω της επίδρασης φαινομένων απωλειών τάσης όπως είναι τα εσωτερικά ρεύματα που δημιουργούνται και η διάχυση καυσίμου στον ηλεκτρολύτη. Από τις μετρήσεις που δόθηκαν από τον κατασκευαστή, η τάση ανοιχτού κυκλώματος στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου Mira 6 απουσία φορτίου προέκυψε  $V_{oc,stack} = 71.7 V$ . Διαιρώντας την τιμή αυτή με τον αριθμό των κελιών της κυψέλης  $N_{cells} = 72$  η τάση ανοιχτού κυκλώματος κάθε κελιού για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας της προκύπτει

$$E_{oc,cell} = \frac{V_{oc,stack}}{N_{cells}} = \frac{71.7 V}{72} = 0.996 V \quad (6-6)$$

Η τιμή αυτή είναι σαφώς μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη πράγμα που δείχνει την σημαντική επίδραση των απωλειών λόγω εσωτερικών ρευμάτων και διάχυσης στις χαμηλές πυκνότητες ρεύματος.

Το μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της αντιστρεπτής τάσης ανοιχτού κυκλώματος του κάθε κελιού είναι το ακόλουθο:



**Σχήμα 6.3.** Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του κάθε κελιού.

### Πτώση τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης

Οι απώλειες τάσης λόγω υπέρτασης ενεργοποίησης λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των εσωτερικών ρευμάτων και της διάχυσης καυσίμου υπολογίζονται από την εξίσωση (3-37), δηλαδή:

$$V_{act} = \frac{RT}{2aF} \ln\left(\frac{j + j_n}{j_0}\right) \quad (6-7)$$

όπου  $j_n$  αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ρεύματος που χάνεται λόγω εσωτερικών ρευμάτων και διάχυσης καυσίμου ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

$j_0$  είναι η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

$a$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς φορτίου

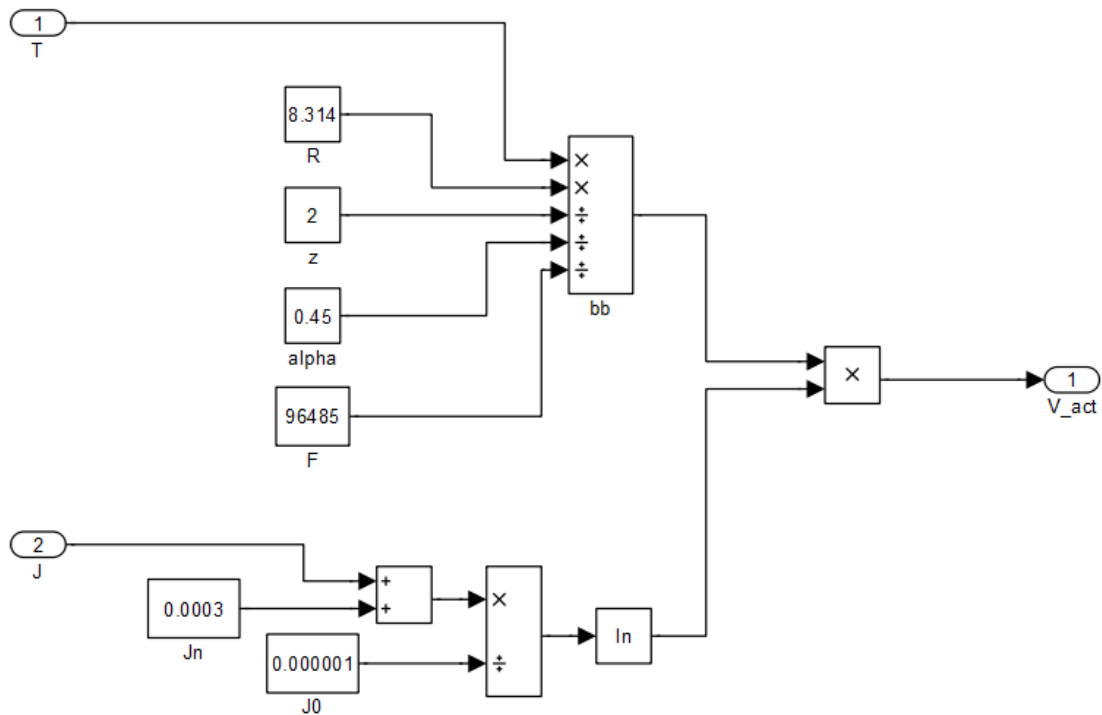
Οι τιμές των παραμέτρων  $a$ ,  $j_0$  και  $j_n$  εκτιμήθηκαν με βάση την καλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα των μετρήσεων και φαίνονται στον Πίνακα 6.1.



**Πίνακας 6.1.** Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των απωλειών ενεργοποίησης.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Εκτιμώμενη τιμή
Συντελεστής μεταφοράς φορτίου	$\alpha$	0.45
Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής	$j_0$	0.001 mA/cm <sup>2</sup>
Πυκνότητα ρεύματος που χάνεται λόγω εσωτερικών ρευμάτων και διάχυσης καυσίμου	$j_n$	0.3 mA/cm <sup>2</sup>

Το μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό των απωλειών ενεργοποίησης του κάθε κελιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.



**Σχήμα 6.4.** Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης.

## Πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών

Θεωρώντας ότι η πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών προκαλείται κυρίως λόγω της αντίστασης που προβάλλει η ηλεκτρολυτική μεμβράνη στη ροή των κατιόντων  $H^+$ , ο υπολογισμός της έγινε βάσει της εξίσωσης (3-30), δηλαδή:

$$V_{ohm} = j \cdot d \cdot r_M \quad (6-8)$$

όπου  $r_M$  είναι η ειδική αντίσταση της μεμβράνης στη ροή των πρωτονίων (ohm·cm)

$d$  είναι το πάχος της μεμβράνης πολυμερούς (cm)

Η ειδική αντίσταση  $r_M$  υπολογίστηκε από τη σχέση (3-31) :

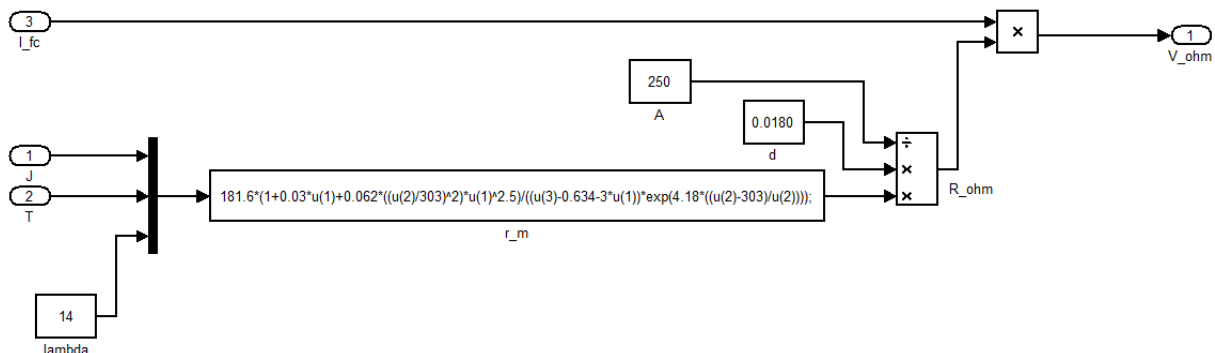
$$r_M = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03j + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 j^{2.5} \right]}{[\lambda - 0.634 - 3j] \exp \left( 4.18 \left[ \frac{T - 303}{T} \right] \right)} \quad (6-9)$$

Η τιμή της παραμέτρου  $\lambda$  εκτιμήθηκε με βάση την καλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα των μετρήσεων και φαίνεται στον Πίνακα 6.2.

**Πίνακας 6.2.** Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των ωμικών απωλειών.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Εκτιμώμενη τιμή
-	$\lambda$	14

Το μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω ωμικών απωλειών παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.



**Σχήμα 6.5.** Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω ωμικών απωλειών.

### Πτώση τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης

Για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3-35).

$$V_{conc} = -B \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{max}} \right) \quad (6-10)$$

όπου  $B$  είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από το είδος του κελιού καυσίμου και τις συνθήκες λειτουργίας του

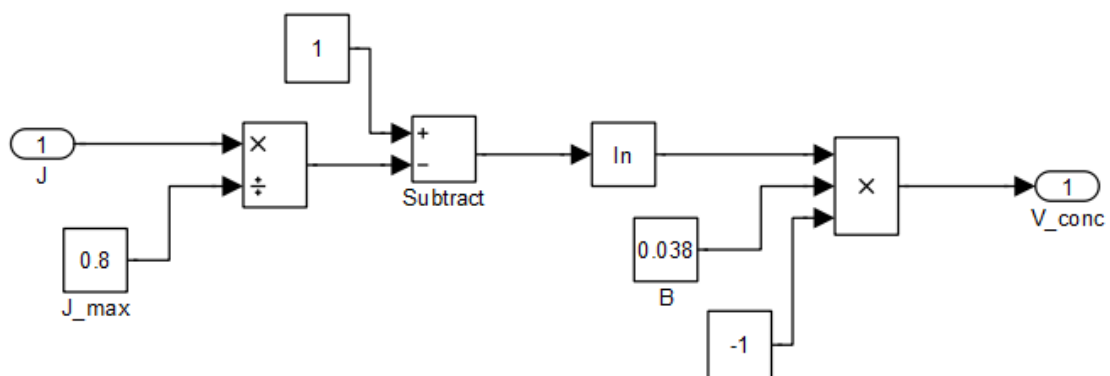
$j_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η πυκνότητα ρεύματος του κελιού καυσίμου

Οι τιμές των παραμέτρων  $B$ ,  $j_{max}$  εκτιμήθηκαν με βάση την καλή προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα των μετρήσεων και φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

**Πίνακας 6.3.** Τιμές παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού των απωλειών συγκέντρωσης.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Εκτιμώμενη τιμή
-	$B$	0.038 V
Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος	$j_{max}$	0.8 A/cm <sup>2</sup>

Το μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.



**Σχήμα 6.6.** Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης.

## Συνολικό μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού τάσης εξόδου της κυψέλης και καμπύλη πώλωσης

Με βάση τις σχέσεις (6-1) ως (6-10), το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της πραγματικής τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος  $j$  περιγράφεται συνολικά από τις εξισώσεις που παρατίθενται ακολούθως.

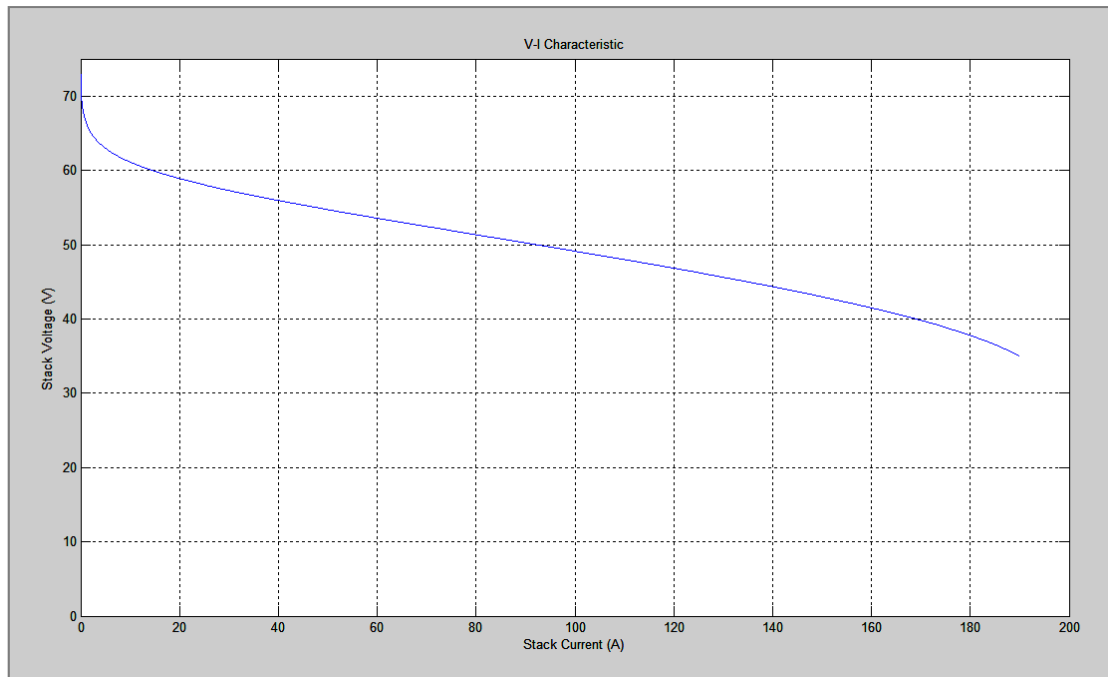
Τάση εξόδου κελιού καυσίμου	:	$V_{cell} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$
Τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου	:	$V_{stack} = N \cdot V_{cell}$
Αντιστρεπτή τάση ανοιχτού κυκλώματος	:	$E_{Nerst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right]$ όπου $E^0 = E_{ref}^0 + \frac{\Delta S_{ref}^0}{2F} (T - T_{ref})$
Πτώση τάσης λόγω απωλειών ενεργοποίησης	:	$V_{act} = \frac{RT}{2aF} \ln \left( \frac{j + j_n}{j_0} \right)$
Πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών	:	$V_{ohm} = j \cdot d \cdot r_M$ όπου $r_M = \frac{181.6 [1 + 0.03j + 0.062 (\frac{T}{303})^2 j^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3j] \exp(4.18 [\frac{T-303}{T}])}$
Πτώση τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης	:	$V_{conc} = -B \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{max}} \right)$

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου Mira 6 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

**Πίνακας 6.4.** Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών, σταθερών και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του συνολικού μαθηματικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου.

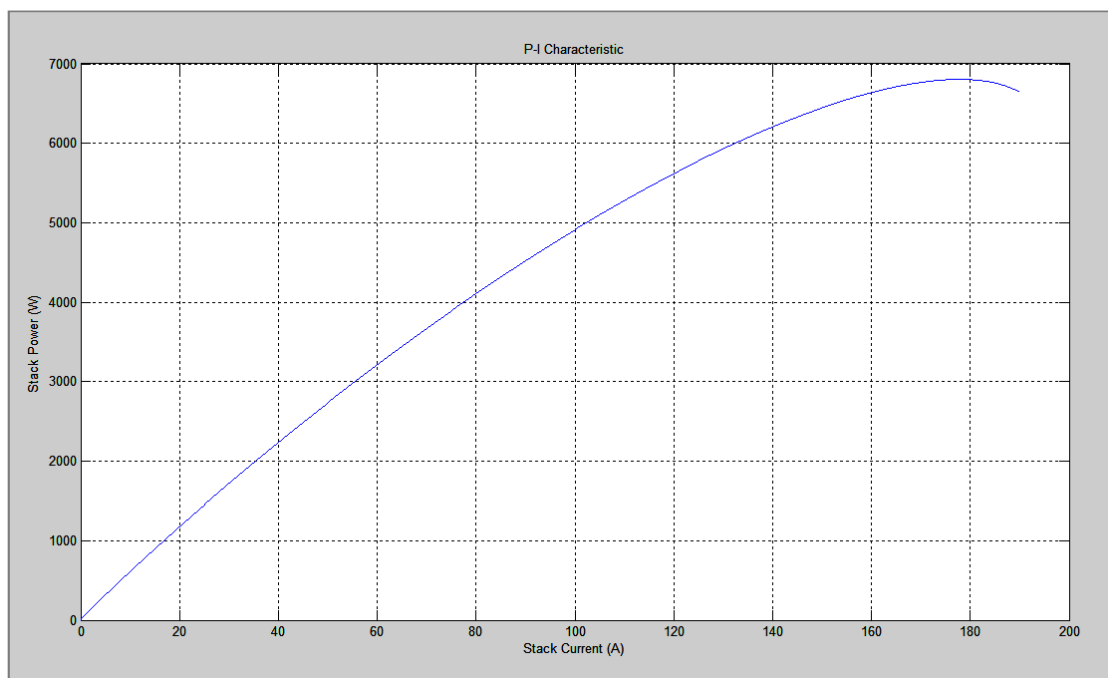
	Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή
Φυσικά χαρακτηριστικά κυψέλης και συνθήκες λειτουργίας	Αριθμός κελιών καυσίμου	$N$	72
	Πάχος ηλεκτρολυτικής μεμβράνης	$d$	$180 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$
	Θερμοκρασία λειτουργίας	$T$	332 K
	Πίεση υδρογόνου στην άνοδο	$p_{H_2}$	1.5 atm
	Πίεση οξυγόνου στην κάθοδο	$p_{O_2}$	0.21 atm
	Πίεση παραγόμενου νερού	$p_{H_2O}$	1 atm
Σταθερές	Παγκόσμια σταθερά αερίων	$R$	8.314 J/(mol·K)
	Σταθερά Faraday	$F$	96485 C/mol
Εκτιμώμενες παράμετροι	Συντελεστής μεταφοράς φορτίου	$\alpha$	0.45
	Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής	$j_0$	0.001 mA/cm <sup>2</sup>
	Εσωτερικές απώλειες ρεύματος	$j_n$	0.3 mA/cm <sup>2</sup>
	-	$\lambda$	14
	-	$B$	0.038 V
	Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος	$j_{max}$	0.8 A/cm <sup>2</sup>

Εκτελώντας τον κώδικα Matlab, *FuelCellPolarisationCurve*, που αντιστοιχεί στο παραπάνω μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.4 προκύπτει η εκτιμώμενη από το μαθηματικό μοντέλο καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου Mira 6 (Σχήμα 6.7).



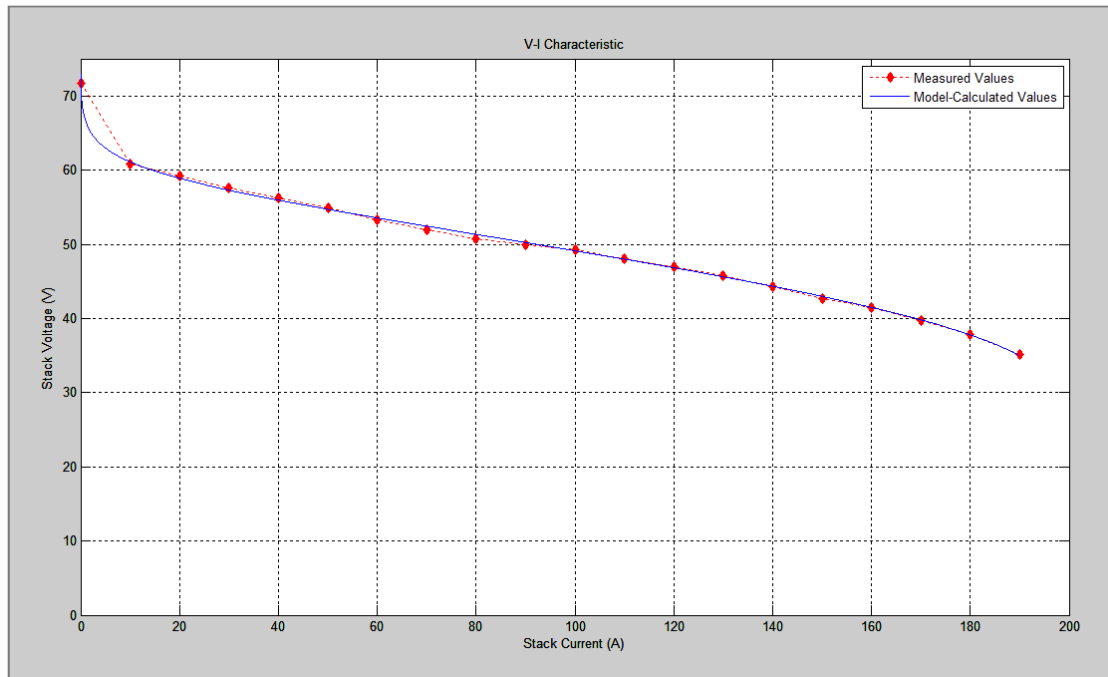
**Σχήμα 6.7.** Εκτιμώμενη καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου Mira 6, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.4.

Επιπλέον, βάσει της σχέσης  $P = V \cdot I$ , η γραφική παράσταση της ισχύος που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου συναρτήσει του ρεύματος  $I$  λαμβάνει τη μορφή του Σχήματος 6.8:

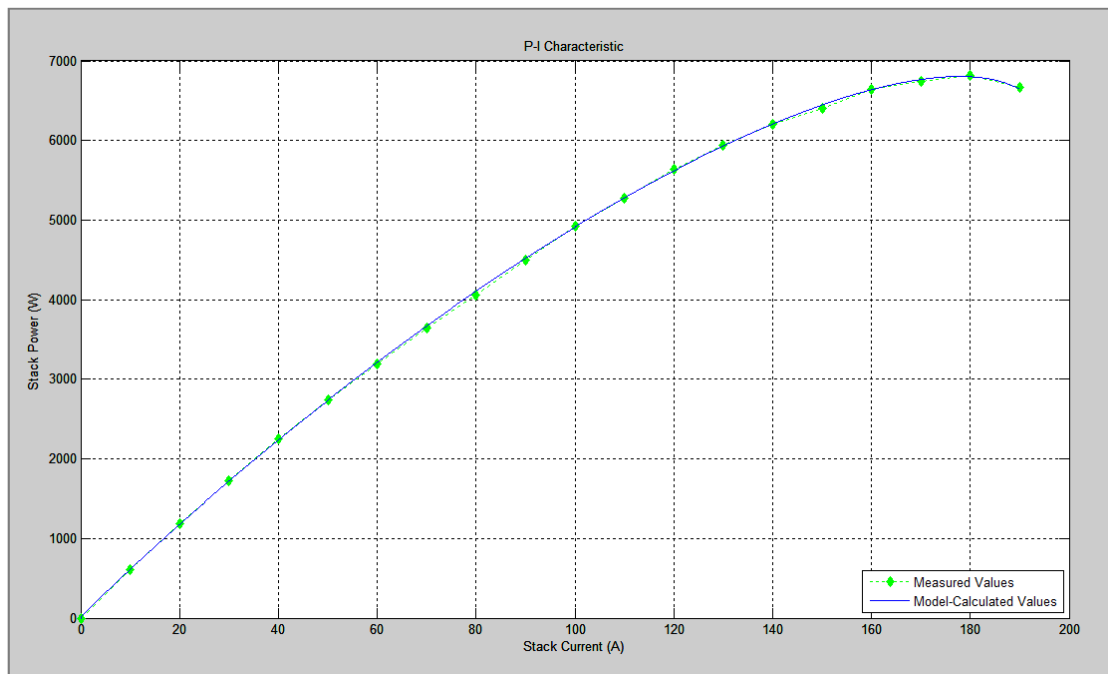


**Σχήμα 6.8.** Εκτιμώμενη καμπύλη της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει του ρεύματος, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.4.

Αντιπαραβάλλοντας τις καμπύλες αυτές με τις μετρήσεις που δόθηκαν από τον κατασκευαστή προκύπτουν τα Σχήματα 6.9 και 6.10:



Σχήμα 6.9. Σύγκριση εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών τάσης της κυψέλης με τις πραγματικές τιμές της καμπύλης πόλωσης.



Σχήμα 6.10. Σύγκριση εκτιμώμενων από το μοντέλο τιμών ισχύος της κυψέλης με τις υπολογιζόμενες τιμές από την καμπύλη πόλωσης.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το μοντέλο υπολογισμού της τάσης εξόδου της κυψέλης Mira 6 προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές της καμπύλης πόλωσης σε όλο το εύρος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος.

Name	Value	Min	Max
A	250	250	250
B	0.0380	0.0380	0.0380
E0	1.2290	1.2290	1.2290
E_nerst	1.1947	1.1947	1.1947
F	96485	96485	96485
I_cell	50	50	50
J	0.2000	0.2000	0.2000
J0	1.0000e-06	1.0000...	1.0000...
J_max	0.8000	0.8000	0.8000
Jn	3.0000e-04	3.0000...	3.0000...
N	72	72	72
P_H2	1.5000	1.5000	1.5000
P_H2O	1	1	1
P_O2	0.2100	0.2100	0.2100
R	8.3140	8.3140	8.3140
R_act	0.0078	0.0078	0.0078
R_conc	2.1864e-04	2.1864...	2.1864...
R_ohm	7.1614e-04	7.1614...	7.1614...
T	332	332	332
V_act	0.3880	0.3880	0.3880
V_cell	0.7600	0.7600	0.7600
V_conc	0.0109	0.0109	0.0109
V_ohm	0.0358	0.0358	0.0358
V_stack_calculated	54.7172	54.7172	54.7172
alpha	0.4500	0.4500	0.4500
bb	0.0318	0.0318	0.0318
d	0.0180	0.0180	0.0180
lambda	14	14	14
r_m	9.9463	9.9463	9.9463
z	2	2	2

**Σχήμα 6.11.** Παράδειγμα εκτέλεσης του κώδικα Matlab για την εύρεση της τάσης εξόδου για  $I = 50$  A. Όπως φαίνεται, η τάση προκύπτει  $V_{stack} = 54.7172$  V.

### Εύρεση σημείου λειτουργίας κατά τη σύνδεση της κυψέλης με φορτίο R

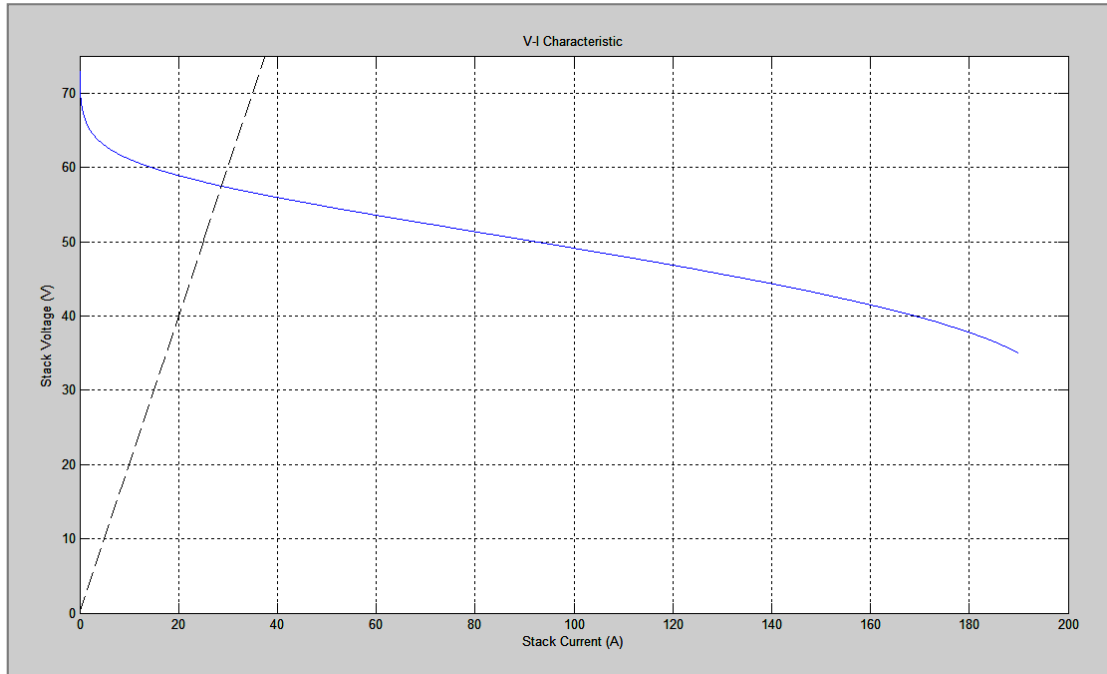
Κατά τη λειτουργία της κυψέλης υπό φορτίο R, η τάση και το ρεύμα λειτουργίας καθορίζονται από την καμπύλη πόλωσης της κυψέλης και αποκτούν συγκεκριμένη τιμή, έτσι ώστε ο λόγος τους να ισούται βάσει του νόμου του Ohm με την αντίσταση R. Ένας τρόπος εύρεσης του σημείου λειτουργίας είναι σχεδιάζοντας την ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και σχηματίζει με τον άξονα των x γωνία  $\theta = \arctan(R)$ . Η ευθεία αυτή τέμνει την καμπύλη πόλωσης στο σημείο (V, I) για το οποίο ισχύει:

$$\frac{V}{I} = \tan\theta = R \quad (6-11)$$

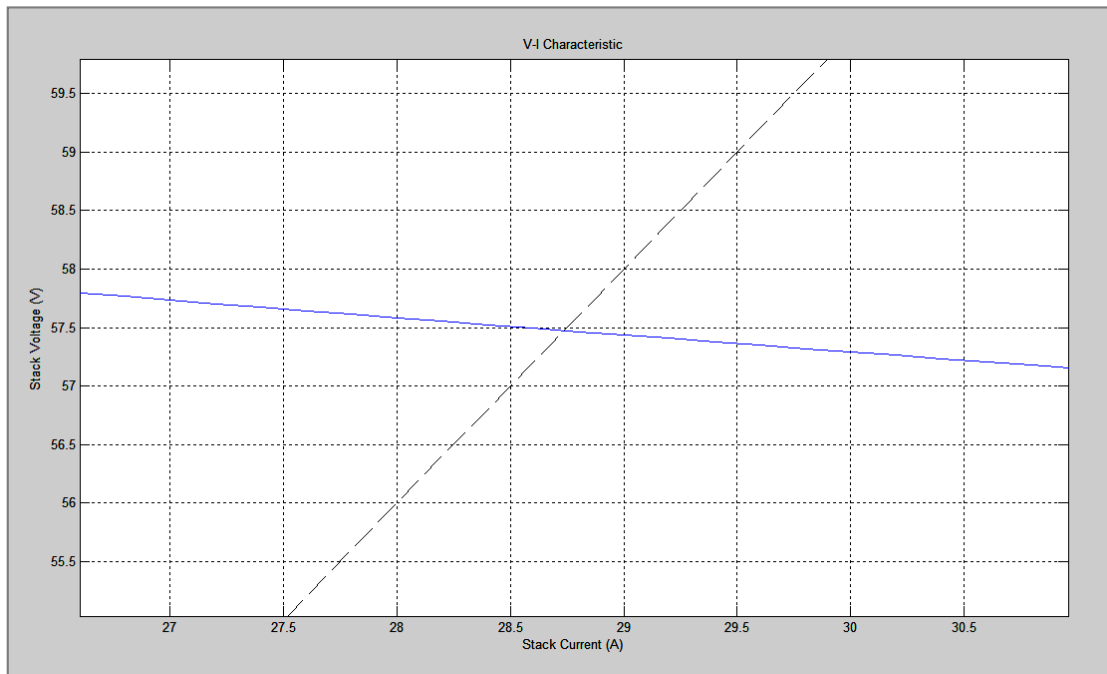
Επομένως οι τιμές V και I που αντιστοιχούν στο σημείο τομής της ευθείας με την καμπύλη πόλωσης είναι οι τιμές λειτουργίας που θα παρατηρηθούν κατά τη λειτουργία της



κυψέλης υπό φορτίο  $R$ . Για παράδειγμα, στην περίπτωση σύνδεσης της κυψέλης με φορτίο  $R = 2 \text{ Ohm}$ , το σημείο λειτουργίας βρίσκεται από την τομή της καμπύλης πόλωσης με την ευθεία  $y = 2x$  και αντιστοιχεί σε τάση  $V \cong 57.48 \text{ V}$  και ρεύμα  $I \cong 28.74 \text{ A}$  (Σχήμα 6.12).



(a)



(b)

**Σχήμα 6.12.** Παράδειγμα εύρεσης σημείου λειτουργίας κυψέλης για  $R = 2 \text{ Ohm}$ .

(a) Σχεδίαση ευθείας  $y=2x$  μαζί με την καμπύλη πόλωσης.

(b) Εστίαση στο σημείο τομής για την εύρεση των χαρακτηριστικών λειτουργίας.

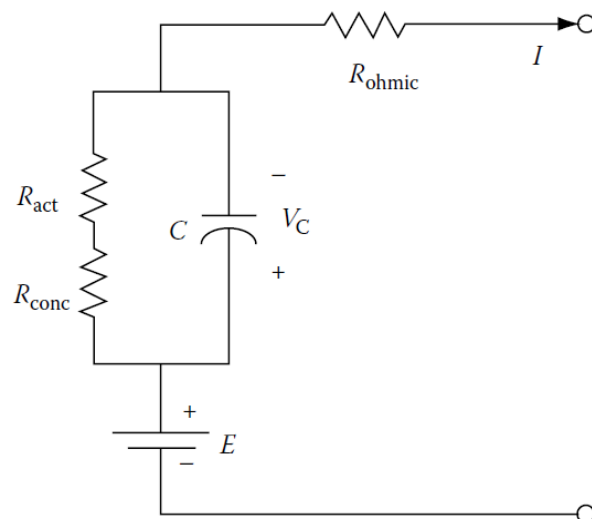
## 6.2 Μοντελοποίηση μεταβατικής συμπεριφοράς τάσης εξόδου κελιού καυσίμου με χρήση Simulink

Το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτίζει της πυκνότητας ρεύματος που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.1, αν και είναι χρήσιμο για τον υπολογισμό της καμπύλης πόλωσης της κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη μεταβατική συμπεριφορά της τάσης εξόδου κατά τις μεταβολές του ρεύματος και για τη χρονική απόκριση σε αυτές. Για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς της κυψέλης χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο κυκλώμα του κελιού καυσίμου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4.7, όπου το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας προσομοιώνεται με τη χρήση ενός πυκνωτή ενώ οι πτώσεις τάσεις λόγω της επίδρασης των μηχανισμών απωλειών προσομοιώνονται με τη χρήση αντιστάσεων. Οι τιμές που λαμβάνουν οι αντιστάσεις αυτές μπορούν να υπολογιστούν από την εκάστοτε τιμή ρεύματος του κελιού  $I$  και από την αντίστοιχη τάση, σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{I} \quad (6-12)$$

$$R_{ohm} = \frac{V_{ohm}}{I} \quad (6-13)$$

$$R_{conc} = \frac{V_{conc}}{I} \quad (6-14)$$



Η τιμή της χωρητικότητας  $C$  για τη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρήθηκε ίση με  $C = 5 \text{ F}$ .

**Σχήμα 6.13.** Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού καυσίμου.

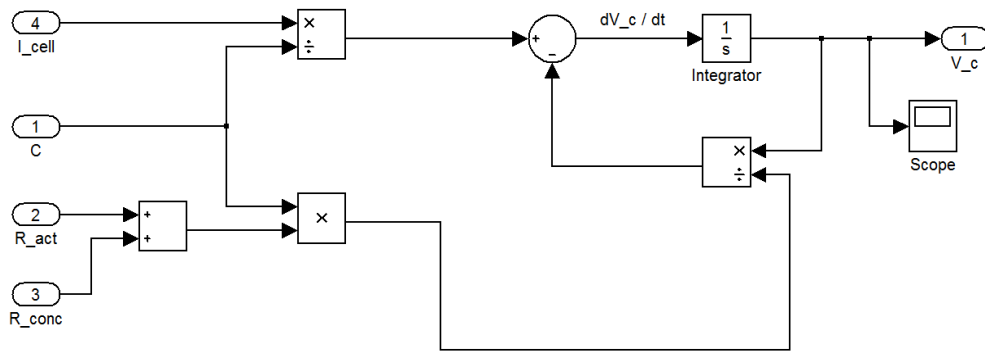
Σύμφωνα με την ανάλυση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4.7, η τιμή της τάσης  $V_C$  στα άκρα του πυκνωτή υπολογίζεται από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης

$$\frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})} V_C - \frac{i}{C} = 0 \quad (6-15)$$

ενώ η τάση εξόδου του κελιού προκύπτει από την εξίσωση

$$V_{cell} = E - V_C - V_{ohmic} \quad (6-16)$$

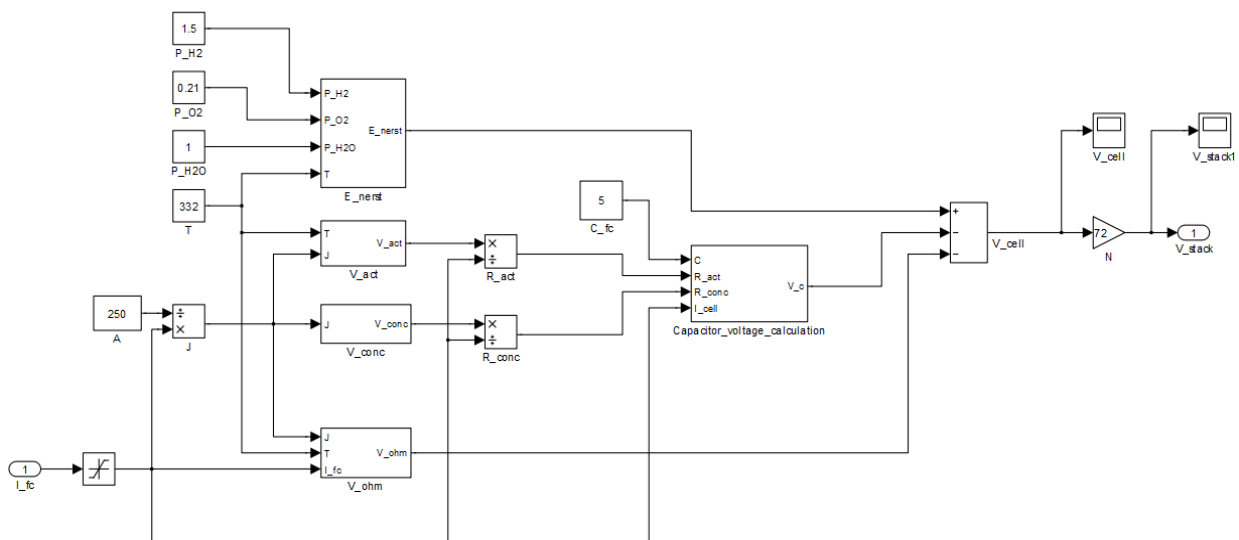
Η διαφορική εξίσωση (6-15) προσομοιώνεται με τη βοήθεια ενός ολοκληρωτή (integrator), χρησιμοποιώντας το μοντέλο Simulink που φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.14.



**Σχήμα 6.14.** Μοντέλο Simulink υπολογισμού της τάσης στα άκρα του πυκνωτή  $V_C$  μέσω της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης (6-15).

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει στην έξοδό του την τάση στα άκρα του πυκνωτή  $V_C$ , έχοντας ως παραμέτρους εισόδου την ένταση του ρεύματος  $I_{cell}$ , τις αντιστάσεις  $R_{act}$  και  $R_{conc}$  και τη χωρητικότητα  $C$ . Αρχικά υπολογίζεται η χρονική παράγωγος της τάσης του πυκνωτή με τη χρήση των κατάλληλων δομικών στοιχείων (blocks) μέσω της εξίσωσης  $\frac{dV_C}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{V_C}{C(R_{act}+R_{conc})}$  και στη συνέχεια η υπολογιζόμενη ποσότητα ολοκληρώνεται με τη βοήθεια του δομικού στοιχείου ενός ολοκληρωτή (integrator) ώστε να προκύψει η τιμή της τάσης  $V_C$ . Επειδή ο υπολογισμός της παραγώγου  $\frac{dV_C}{dt}$  απαιτεί γνώση της τιμής της  $V_C$ , η τιμή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό λαμβάνεται μέσω ανατροφοδότησης προς τα πίσω της εξόδου του μοντέλου.

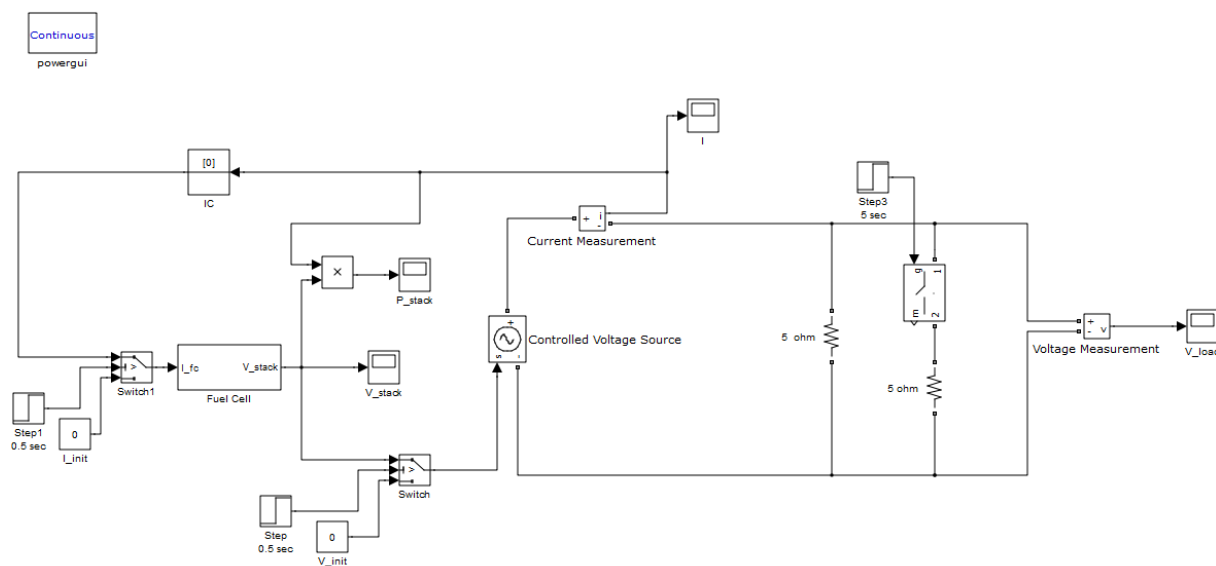
Ο υπολογισμός της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου  $V_{Stack}$  πραγματοποιείται σύμφωνα με το ακόλουθο μοντέλο προσομοίωσης (Σχήμα 6.15).



**Σχήμα 6.15.** Μοντέλο Simulink υπολογισμού της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου  $V_{Stack}$  συναρτήσει του ρεύματος  $I_{fc}$ , με χρήση του μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος.

Το μοντέλο αυτό έχει ως παράμετρο εισόδου την ένταση του ρεύματος  $I_{fc}$  και απαρτίζεται από διάφορα υποσυστήματα (subsystems) τα οποία υπολογίζουν τα ενδιάμεσα μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον τελικό υπολογισμό της  $V_{Stack}$ . Έτσι, ο υπολογισμός της τάσης του πυκνωτή πραγματοποιείται στο υποσύστημα *Capacitor\_voltage\_calculation*, το οποίο είναι ουσιαστικά το μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14. Αντίστοιχα, η τάση  $E_{Nerst}$  και οι αντιστάσεις  $R_{act}$  και  $R_{conc}$  υπολογίζονται από τα αντίστοιχα υποσυστήματα τα οποία παρουσιάζονται στα μοντέλα Simulink των Σχημάτων 6.3, 6.4 και 6.6. Με την εκτέλεση των απαραίτητων πράξεων και υπολογισμών ανάμεσα στα διάφορα μεγέθη και στις παραμέτρους όπως υπαγορεύονται από τις μαθηματικές σχέσεις που συνθέτουν το μοντέλο, προκύπτει τελικώς η υπολογιζόμενη τιμή της τάσης  $V_{Stack}$ .

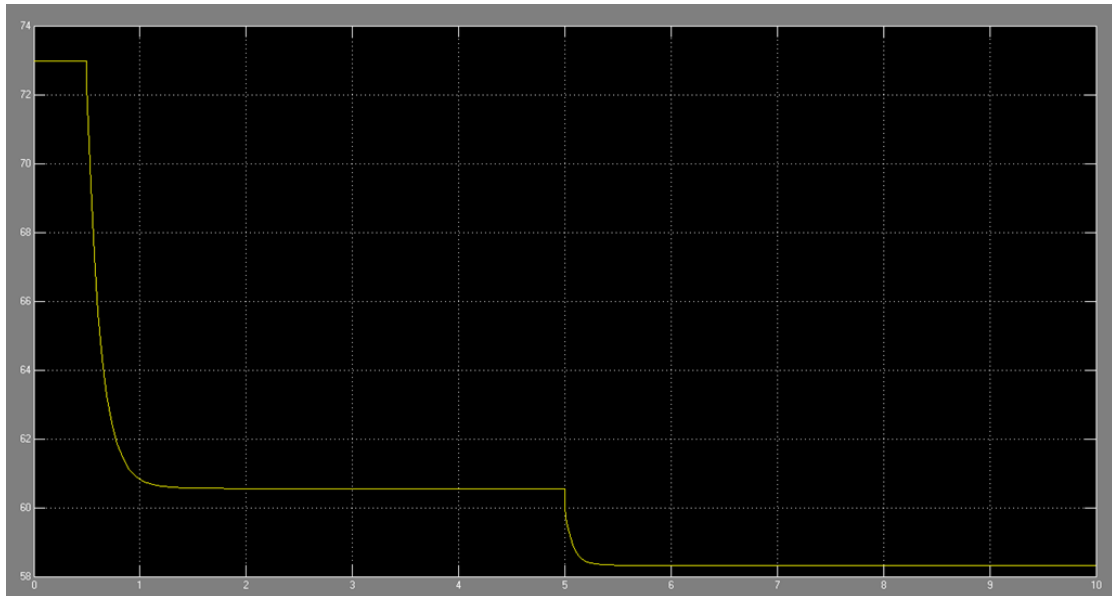
Τέλος, εισάγοντας το μοντέλο Simulink της τάσης εξόδου της κυψέλης στο δομικό στοιχείο ενός υποσυστήματος, ένα παράδειγμα προσομοίωσης της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου υπό φορτίο και μελέτης της συμπεριφοράς της κατά της αλλαγές του ρεύματος φαίνεται ακολούθως.



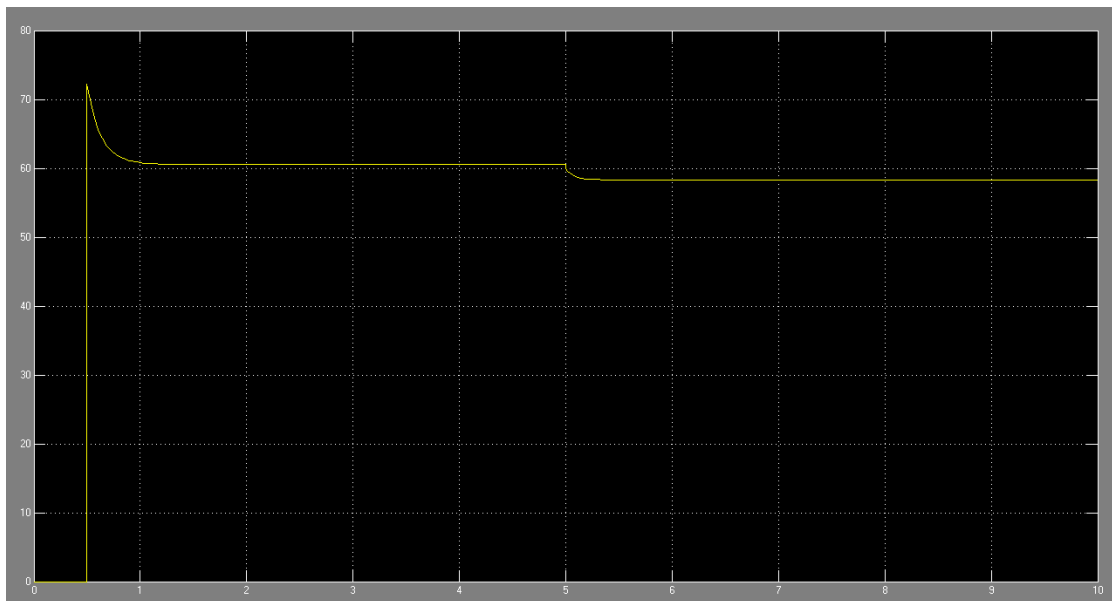
**Σχήμα 6.16.** Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου υπό μεταβαλλόμενο φορτίο.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα προσομοίωσης μελετάται η μεταβατική συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου όταν συνδεθεί με φορτίο 5 Ohm και 2.5 Ohm αντίστοιχα. Στην αρχή η κυψέλη καυσίμου αρχικά δεν είναι συνδεδεμένη με το φορτίο και επομένως θεωρείται ότι λειτουργεί υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, με ρεύμα λειτουργίας  $I = 0$  A. Τη χρονική στιγμή  $t = 1$  sec η κυψέλη συνδέεται με το φορτίο  $R = 5$  Ohm. Στη συνέχεια, τη χρονική στιγμή  $t = 5$  sec ο διακόπτης στο δεξί μέρος του κυκλώματος κλείνει με αποτέλεσμα να προστίθεται μια δεύτερη αντίσταση 5 Ohm παράλληλα στην πρώτη, με αποτέλεσμα η συνολική αντίσταση να λαμβάνει πλέον την τιμή  $R = \frac{5 \cdot 5}{5+5} \text{ Ohm} = 2.5 \text{ Ohm}$ . Η συμπεριφορά

της τάσης εξόδου για το συνολικό διάστημα από  $t = 0 \text{ sec}$  μέχρι  $t = 10 \text{ sec}$  φαίνεται στο Σχήμα 6.17.



(a)



(b)

**Σχήμα 6.17.** Γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραδείγματος του Σχήματος 6.16.

(a) Τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου  $V_{stack}$  συναρτήσει του χρόνου.

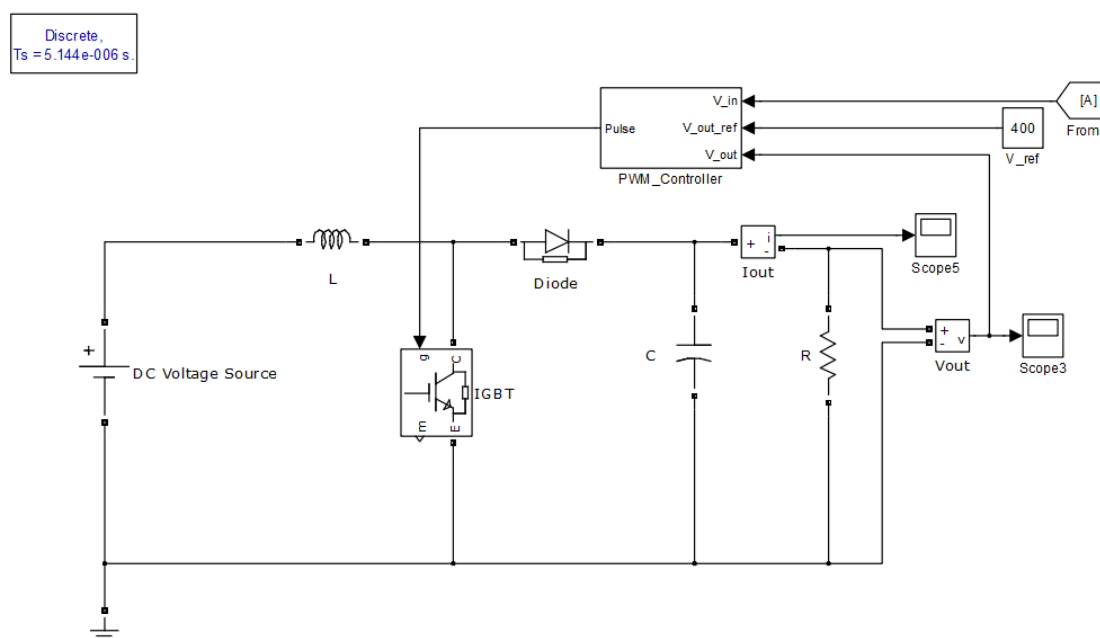
(b) Εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του φορτίου  $V_{load}$  συναρτήσει του χρόνου.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.17 (a) φαίνεται ότι η τάση που παρέχει η κυψέλη σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος είναι σταθερή και ίση με 72.98 V μέχρι η κυψέλη να συνδεθεί με το φορτίο 5 Ohm. Η τιμή αυτή είναι σε συμφωνία με την υπολογιζόμενη τιμή από το μοντέλο της καμπύλης πόλωσης της κυψέλης καυσίμου. Ακολουθώντας, με τη σύνδεση της κυψέλης με το φορτίο  $R = 5 \text{ Ohm}$  τη χρονική στιγμή  $t = 0.5 \text{ sec}$  η τάση της κυψέλης μειώνεται μέχρι να αποκτήσει την τιμή ισορροπίας 60.55 V. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των 0.7 s μέχρι να μπορέσει η κυψέλη να αποκτήσει την τελική τιμή τάσης. Η τιμή αυτή καθορίζεται από την τιμή της χωρητικότητας C που προσομοιώνει την επίδραση του φαινομένου ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της κυψέλης. Η τελική τιμή της τάσης είναι σε συμφωνία με την υπολογιζόμενη τιμή από το μοντέλο της καμπύλης πόλωσης της κυψέλης καυσίμου για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και στην περίπτωση που μετά από χρονική περίοδο  $t = 5 \text{ s}$  το φορτίο μειωθεί στα 2.5 Ohm, όπως φαίνεται από τη συμπεριφορά των γραφικών παραστάσεων των Σχημάτων 6.17 (a) και 6.17 (b) κατά τη μεταβολή του φορτίου τη χρονική στιγμή αυτή.

## 6.3 Μοντελοποίηση DC/DC Μετατροπέα Τάσης

Το πρώτο στάδιο μετατροπής της ισχύος που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου σε μορφή αξιοποιήσιμη από το δίκτυο αφορά τη σταθεροποίηση της DC τάσης εξόδου σε συγκεκριμένη τιμή με τη χρήση ενός DC/DC μετατροπέα. Για τον σκοπό αυτό ο αντιστροφέας *Delta DHF-1AC-5000W* διαθέτει έναν μετατροπέα ο οποίος ανυψώνει και σταθεροποιεί την τάση που δέχεται από την κυψέλη στα 400 V, προτού στη συνέχεια τη μετατρέψει σε AC. Η λειτουργία αυτή μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink με την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση ενός μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter) ο οποίος, υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή της αντίστασης εξόδου βρίσκεται εντός των προβλεπόμενων ορίων, παρέχει στην έξοδό του σταθερή τάση 400 V.

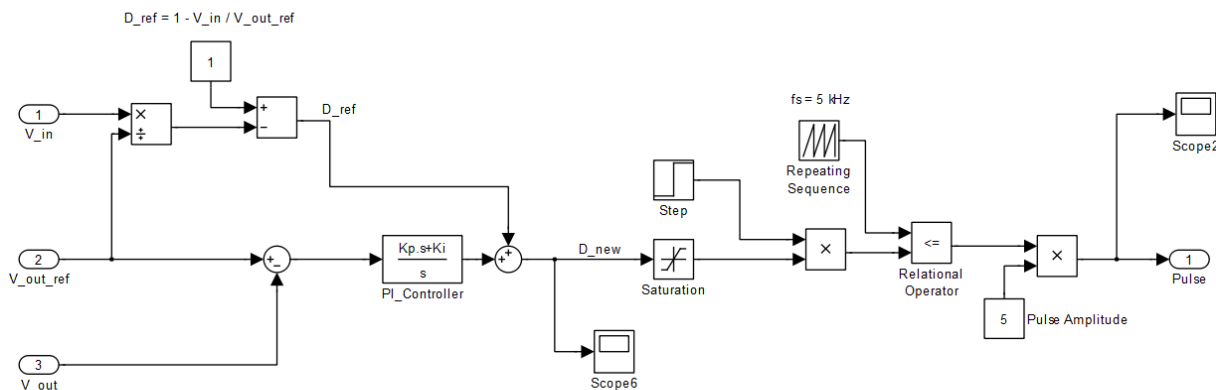


Σχήμα 6.18. Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης στο περιβάλλον Simulink.

Ο μετατροπέας ανύψωσης αντιπροσωπεύει το DC/DC στάδιο μετατροπής της παραγόμενης ενέργειας και αποτελείται από ένα πηνίο  $L$ , έναν πυκνωτή εξόδου  $C$ , μία διόδο και ένα διακοπτικό στοιχείο IGBT. Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 4 της εργασίας, η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στο γεγονός ότι το διακοπτικό στοιχείο ανοίγει και κλείνει συνεχόμενα με μεγάλη συχνότητα και σχετική διάρκεια αγωγής  $D$ , η οποία καθορίζει ουσιαστικά την τιμή που θα λάβει η τάση εξόδου. Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου στην τιμή των 400 V επιτυγχάνεται προσαρμόζοντας κατάλληλα κάθε στιγμή την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D$  με τη βοήθεια ενός ελεγκτή PWM, η λειτουργία του οποίου μοντελοποιείται στο υποσύστημα *PWM\_Controller*.

## Έλεγχος PWM

Ο έλεγχος PWM της τάσης εξόδου διεξάγεται στο υποσύστημα *PWM\_Controller* που αντιπροσωπεύεται από το μοντέλο Simulink του Σχήματος 6.19.



**Σχήμα 6.19.** Μοντελοποίηση στο περιβάλλον Simulink ελεγκτή PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης και τη σταθεροποίησή της στα 400 V.

Ο παραπάνω ελεγκτής δέχεται ως εισόδους τη μετρούμενη τάση εισόδου  $V_{fc}$ , τη μετρούμενη τάση εξόδου  $V_{out}$  και την επιθυμητή τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου  $V_{out,ref}$  η οποία είναι σταθερή και ίση με 400V. Ως έξοδο παράγει μια παλμοσειρά πλάτους 5 V και μεταβλητού εύρους παλμών, η οποία καθορίζει τον χρόνο αγωγής του IGBT σε κάθε περίοδο λειτουργίας  $T_s$ .

Η διαμόρφωση της τιμής της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D$  του IGBT βασίζεται στον υπολογισμό του αθροίσματος της τιμής ενός σήματος αναφοράς  $D_{ref}$  με την έξοδο ενός ελεγκτή *PI*, αναλογικού κέρδους  $K_p$  και ολοκληρωτικού κέρδους  $K_i$ , ο οποίος φροντίζει για την ελαχιστοποίηση της απόκλισης που παρατηρείται μεταξύ της τάσης εξόδου  $V_{out}$  και της επιθυμητής τιμής  $V_{out,ref}$ . Ο ελεγκτής *PI* δέχεται ως είσοδο το παρατηρούμενο σφάλμα  $V_{out,ref} - V_{out}$ , ενώ η έξοδός του συγκλίνει στην τιμή για την οποία το σφάλμα αυτό θα μηδενιστεί. Επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων  $K_p$  και  $K_i$ , η καινούρια τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D_{new}$  προκύπτει τελικά από το άθροισμα της εξόδου του ελεγκτή και του σήματος  $D_{ref}$ , το οποίο καθορίζεται βάσει της σχέσης  $D_{ref} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out,ref}}$ .

Τελικά, ανάλογα με την υπολογισθείσα τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής  $D_{new}$ , η παλμοσειρά ελέγχου της αγωγής του διακοπτικού στοιχείου διαμορφώνεται σύμφωνα με τη μέθοδο του Σχήματος 4.8 που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1.3. Αρχικά παράγεται μία πριονωτή κυματομορφή, η συχνότητα της οποίας καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης  $f_s$  του διακοπτικού στοιχείου και η οποία συγκρίνεται κάθε στιγμή με την εκάστοτε τιμή  $D_{new}$ . Κατά το χρονικό διάστημα που η τιμή της κυματομορφής είναι χαμηλότερη από την τιμή του



$D_{new}$  αποστέλλεται παλμός πλάτους 5 V στην πύλη του IGBT με αποτέλεσμα αυτό να άγει. Αντίθετα, στην περίπτωση που η τιμή της κυματομορφής υπερβαίνει την τιμή του  $D_{new}$  ο παλμός που στέλνεται έχει μηδενικό πλάτος και επομένως το IGBT περιέρχεται σε κατάσταση αποκοπής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχόμενα, με διαφορετική τιμή  $D_{new}$  κάθε φορά χάρη στον ελεγκτή PI, προσεγγίζοντας όλο και περισσότερο τη σχετική διάρκεια αγωγής για την οποία η τάση εξόδου του μετατροπέα λαμβάνει την τιμή των 400 V.

### Αυτεπαγωγή L και χωρητικότητα C

Η επιλογή των τιμών της αυτεπαγωγής του πηνίου  $L$  και της χωρητικότητας του πυκνωτή  $C$  έχει ιδιαίτερη σημασία για την αποτελεσματική λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης. Κακή επιλογή των τιμών  $L$  και  $C$  μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ο μετατροπέας να μην μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις λειτουργίας και η παραγόμενη από την κυψέλη καυσίμου ισχύς να μην μπορεί να αξιοποιηθεί. Αν και γενικά η τελική επιλογή των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, εδώ τα κριτήρια που εξετάστηκαν κυρίως ήταν η καλή απόκριση του μετατροπέα σε διάφορες απαιτήσεις φορτίου καθώς και η αποδεκτά μικρή κυμάτωση της τάσης εξόδου ώστε να μην παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα.

Ακόμη, σύμφωνα με την ανάλυση της παραγράφου 4.1.2, λόγω της απαίτησης ο μετατροπέας να λειτουργεί υπό συνθήκες συνεχούς ρεύματος πηνίου, η τιμή της αυτεπαγωγής πρέπει να υπερβαίνει μια ελάχιστη τιμή  $L_{min}$ :

$$L_{min} = \frac{V_{out}D(1 - D)^2}{2f_s I_{out,min}} \quad (6-17)$$

Θέτοντας την απαίτηση ο μετατροπέας να παρουσιάζει μέγιστη κυμάτωση της τάσης εξόδου της τάξης του 5%, η επιλογή της χωρητικότητας  $C$  μπορεί να γίνει βάσει της σχέσης (4-28), δηλαδή:

$$C_{min} = \frac{V_o D T_s}{R V_{rip}} = \frac{D T_s}{0.05 R} \quad (6-18)$$

Στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί φαίνονται οι θεωρητικές τιμές που λαμβάνουν τα διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη για διάφορα σημεία λειτουργίας της κυψέλης σύμφωνα με την ανάλυση της παραγράφου 4.1.2, ενώ υπολογίζονται επίσης η  $L_{min}$  και η  $C_{min}$  των σχέσεων (4-21) και (4-28) όπως διαμορφώνονται για κάθε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Αν και στην πράξη οι τιμές αυτές αποκλίνουν διότι βασίζονται στην παραδοχή μηδενικών απωλειών ισχύος και ιδανικής συμπεριφοράς των στοιχείων, εντούτοις αποτελούν ενδείξεις για την

πρόβλεψη της περιοχής τιμών και της πραγματικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών αυτών μεγεθών.

**Πίνακας 6.5.** Ηλεκτρικά μεγέθη λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης για διάφορα σημεία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, υπό την παραδοχή μηδενικών απωλειών ισχύος και ιδανικής συμπεριφοράς των στοιχείων.

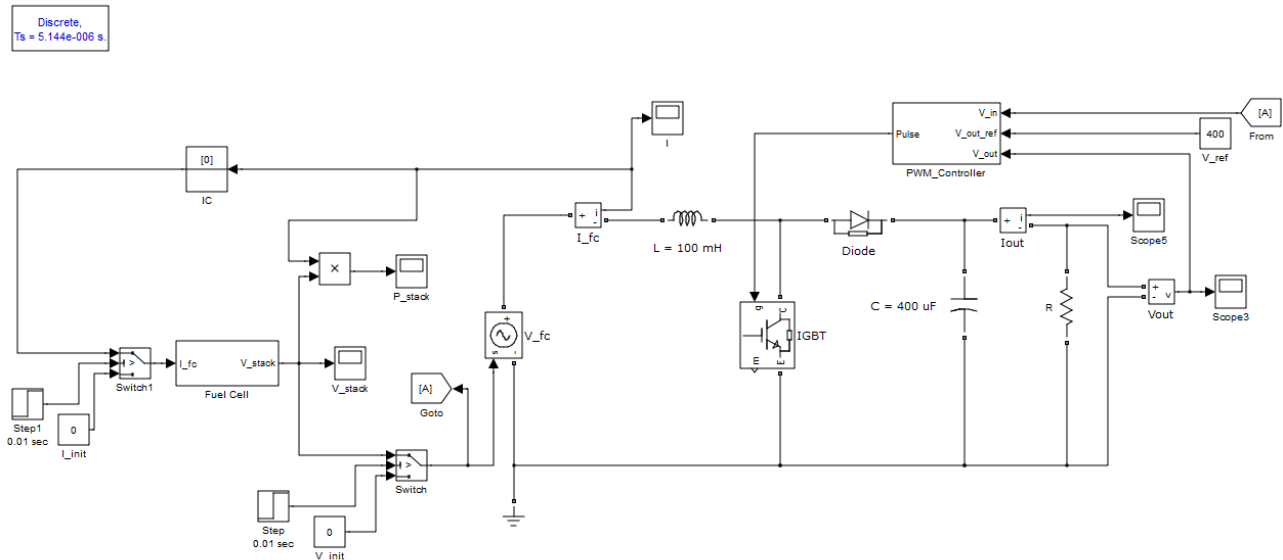
	Σχέση Υπολογισμού	$I_{in}=20$ A	$I_{in}=50$ A	$I_{in}=80$ A	$I_{in}=110$ A	$I_{in}=140$ A	$I_{in}=170$ A
$V_{in}$	$N \cdot V_{cell}$	58.9 V	54.73 V	51.35 V	48 V	44.35 V	39.82 V
$V_{out}$	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
D	$1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$	0.853	0.863	0.872	0.88	0.889	0.901
$I_{out}$	$(1 - D)I_{in}$	2.95 A	6.84 A	10.27 A	13.2 A	15.52 A	16.92 A
R	$\frac{V_{out}}{I_{out}}$	135.82 Ω	58.47 Ω	38.95 Ω	30.30 Ω	25.77 Ω	23.64 Ω
P	$V_{in}I_{in}$ ή $V_{out}I_{out}$	1178 W	2737 W	4108 W	5280 W	6209 W	6769 W
$L_{min}$	$\frac{V_{out}D(1 - D)^2}{2f_s I_{out}}$	251 μH	94 μH	56 μH	38 μH	24 μH	21 μH
$C_{min}$ ( $\alpha_{rip}=5\%$ )	$\frac{DT_s}{0.05R}$	25 μF	59 μF	89 μF	116 μF	138 μF	152 μF

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, η ελάχιστη αυτεπαγωγή για να εξασφαλιστεί η συνεχής αγωγή του πηνίου καθορίζεται από τις μικρές απαιτήσεις ισχύος και από τη λειτουργία υπό μικρής αντίστασης φορτίο εξόδου, μιας και εκεί παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές. Αντίθετα, η ελάχιστη χωρητικότητα που πρέπει να ληφθεί ώστε η κυμάτωση της τάσης εξόδου να είναι μικρότερη του 5% λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές της για μεγάλες απαιτήσεις ισχύος.

Συμπερασματικά, κατά την επιλογή των  $L$  και  $C$  αρχικά πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι τιμές που θα εξεταστούν θα είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες τιμές που υπολογίζονται στον παραπάνω πίνακα. Διασφαλίζοντας έτσι τη λειτουργία υπό συνεχή αγωγή πηνίου και τον περιορισμό της κυμάτωσης της τάσης εξόδου, οι τιμές μπορούν πλέον να επιλεγούν με βάση άλλα κριτήρια όπως η καλή συμπεριφορά της τάσης εξόδου στις μεταβολές του φορτίου, η καταπόνηση των ημιαγωγικών στοιχείων, η ευστάθεια, ο χρόνος μετάβασης στην τιμή των 400 V, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης κ.α.

## Λειτουργία συστήματος κυψέλης καυσίμου - μετατροπέα ανύψωσης υπό φορτίο R

Το μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διασύνδεση με την κυψέλη καυσίμου φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.20.



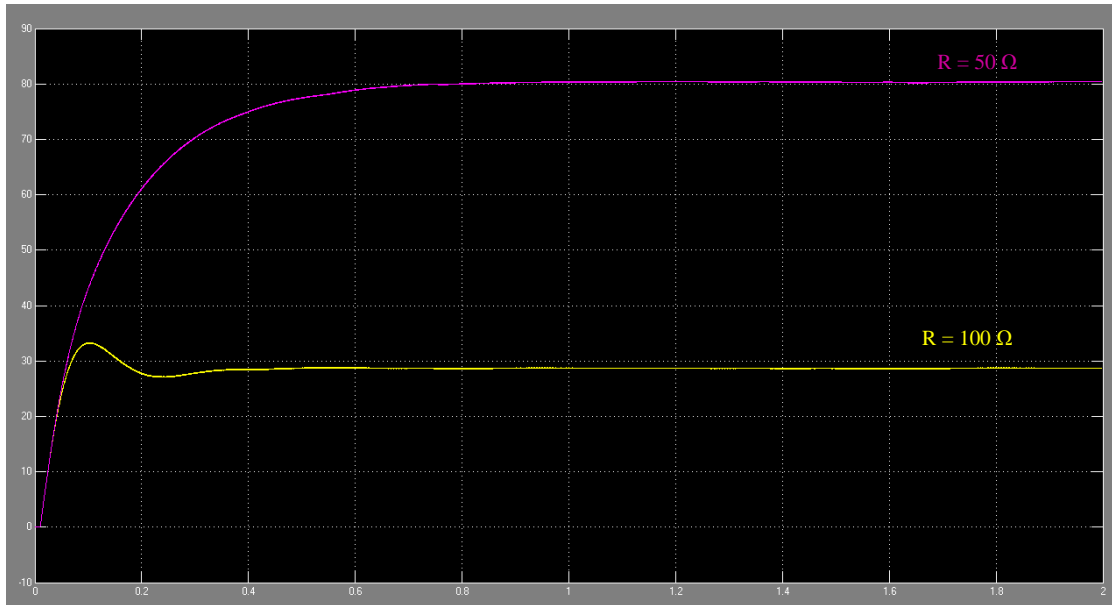
**Σχήμα 6.20.** Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος μετατροπέα ανύψωσης – κυψέλης καυσίμου υπό φορτίο R.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω μοντέλο, η τάση εξόδου της κυψέλης  $V_{fc}$  χρησιμοποιείται ως τάση εισόδου για το κύκλωμα του μετατροπέα, όπως αντίστοιχα και το ρεύμα της κυψέλης  $I_{fc}$ . Η ένταση του ρεύματος καθορίζεται από την αντίσταση  $R$  του φορτίου εξόδου και από τη διαμορφούμενη σχετική διάρκεια αγωγής  $D$  του IGBT, και ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει κάθε στιγμή υπολογίζεται η τάση  $V_{fc}$  με βάση το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων του μετατροπέα ανύψωσης και των κερδών του ελεγκτή PI που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του συστήματος φαίνονται στο ακόλουθο Πίνακα 6.6.

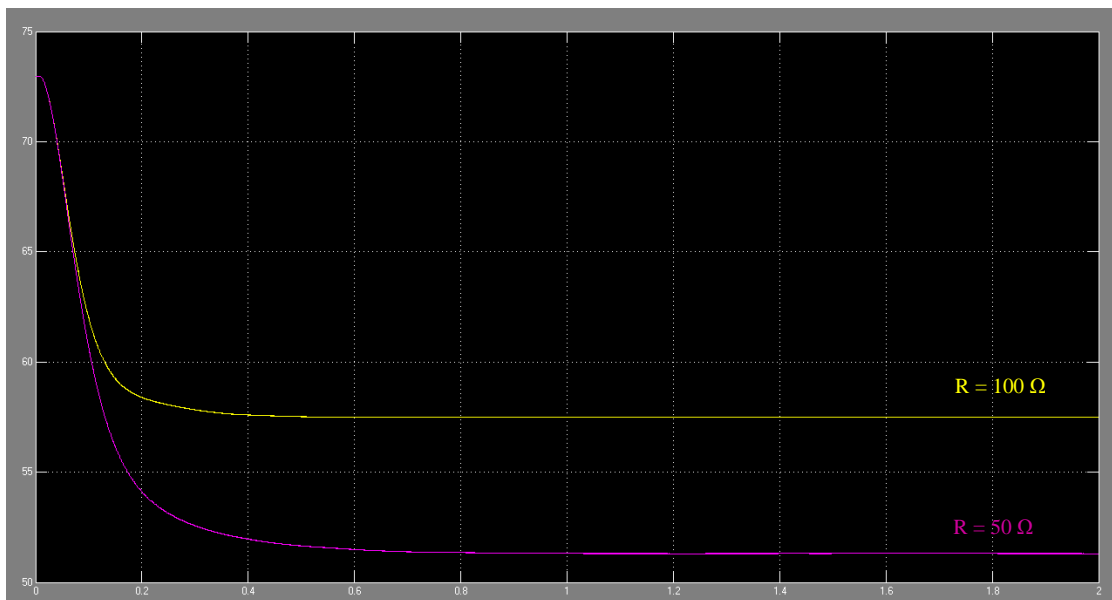
**Πίνακας 6.6.** Τιμές παραμέτρων της διάταξης του μετατροπέα ανύψωσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του συστήματος.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή
Αυτεπαγωγή πηνίου	L	100 mH
Χωρητικότητα πυκνωτή	C	400 $\mu$ F
Αναλογικό κέρδος ελεγκτή	$K_p$	0.00002
Ολοκληρωτικό κέρδος ελεγκτή	$K_i$	0.00004

Με βάση τις παραπάνω τιμές, προσομοιώνοντας το σύστημα για αντίσταση φορτίου  $R = 100 \Omega$  και  $R = 40 \Omega$ , δηλαδή για ισχύ εξόδου  $P = 1600 \text{ W}$  και  $P = 4000 \text{ W}$  αντίστοιχα, οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών  $I_{fc}$ ,  $V_{fc}$  και  $V_{out}$  που προκύπτουν συναρτήσει του χρόνου φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



(a)

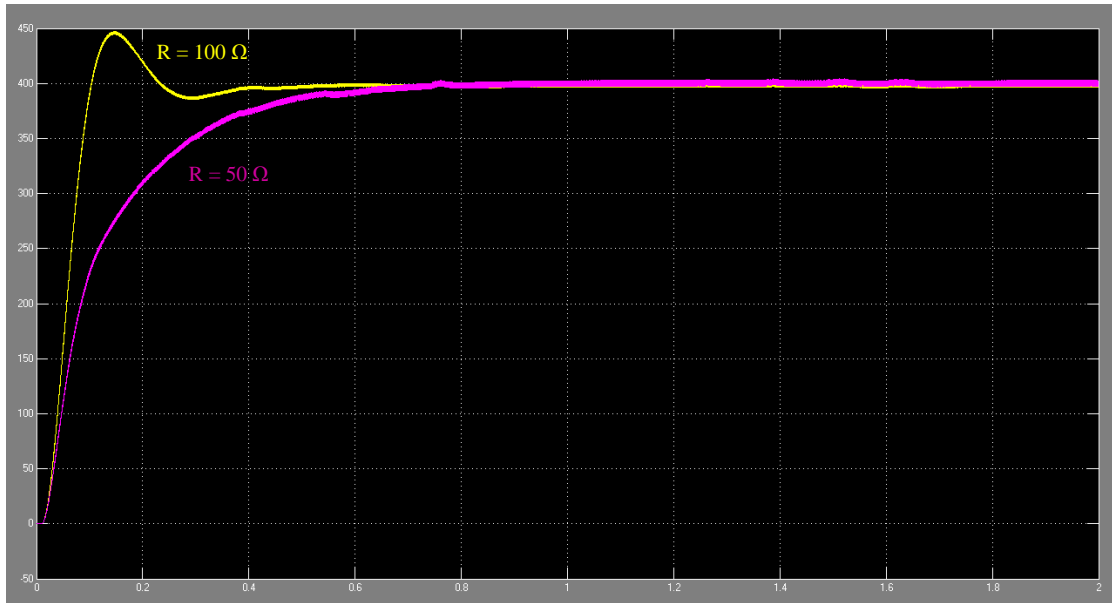


(b)

**Σχήμα 6.21.** Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο  $t = 2 \text{ sec}$  υπό αντίσταση φορτίου  $R = 100 \Omega$  (κίτρινο) και  $R = 40 \Omega$  (μωβ).

(a) Γραφική παράσταση του ρεύματος της κυψέλης  $I_{fc}$  συναρτήσει του χρόνου.

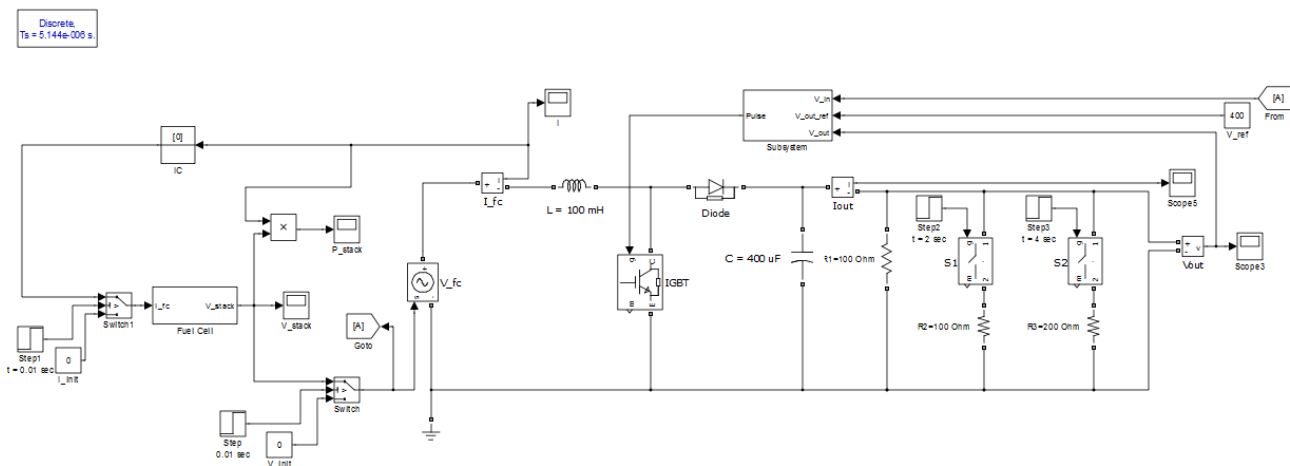
(b) Γραφική παράσταση της τάσης της κυψέλης  $V_{fc}$  συναρτήσει του χρόνου.



**Σχήμα 6.22.** Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο  $t = 2$  sec υπό αντίσταση φορτίου  $R = 100 \Omega$  (κίτρινο) και  $R = 40 \Omega$  (μωβ), γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του συστήματος  $V_{out}$  συναρτήσει του χρόνου.

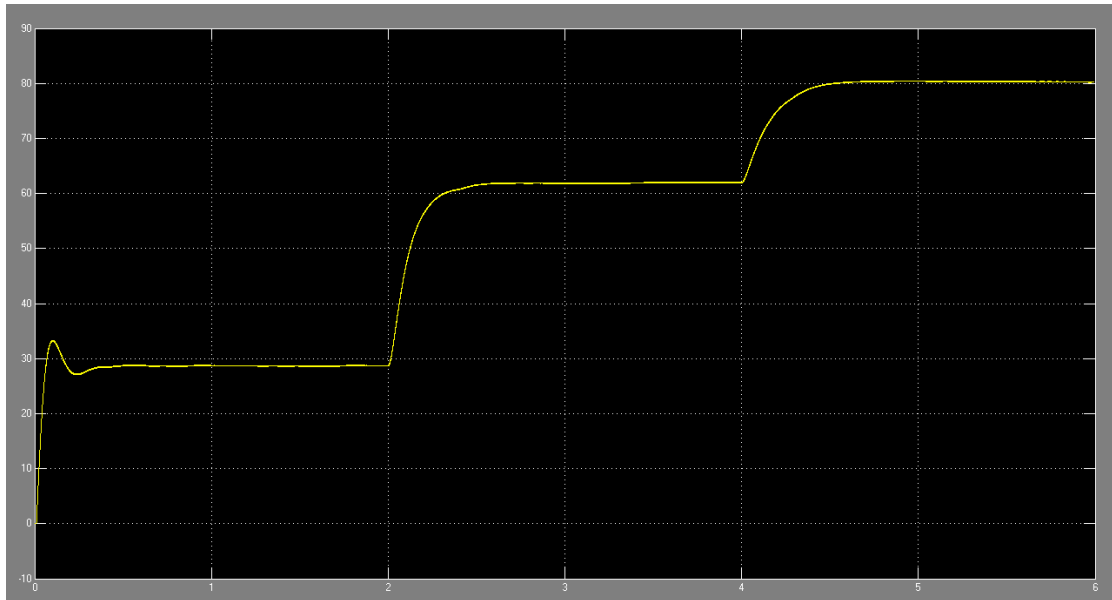
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης και του ελεγκτή PWM είναι αρκετά ικανοποιητική αφού η τάση εξόδου σταθεροποιείται γρήγορα στην τιμή των 400 V και στις δύο περιπτώσεις φορτίου, ενώ η κυμάτωσή της είναι αρκετά μικρή της τάξης του 1%. Αντίστοιχα το ρεύμα και η τάση λειτουργίας της κυψέλης σταθεροποιούνται σύντομα στις τιμές για τις οποίες αυτή παράγει την απαιτούμενη ισχύ των 1600 W και των 4000 W.

Η συμπεριφορά του συστήματος σε απότομες αλλαγές του φορτίου μπορεί να προσομοιωθεί με βάση το μοντέλο Simulink του Σχήματος 6.23.

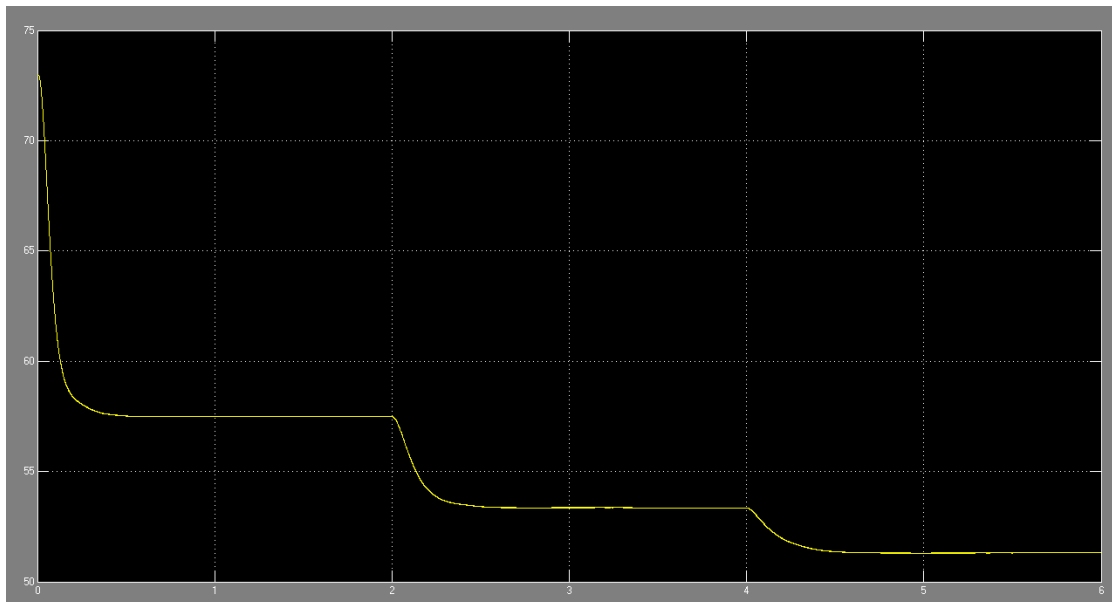


**Σχήμα 6.23.** Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος μετατροπέα ανύψωσης – κυψέλης καυσίμου υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου.

Στο μοντέλο του παραπάνω σχήματος αρχικά το σύστημα λειτουργεί υπό φορτίο  $R_1 = 100 \Omega$ . Τη χρονική στιγμή  $t = 2 \text{ sec}$  ο διακόπτης S1 κλείνει και το συνολικό φορτίο γίνεται  $R_{12} = 50 \Omega$ . Τέλος, τη χρονική στιγμή  $t = 4 \text{ sec}$  κλείνει και ο διακόπτης S2 οπότε το συνολικό φορτίο καθίσταται  $R_{123} = 40 \Omega$ . Οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου φαίνονται στα Σχήματα 6.24 και 6.25.



(a)

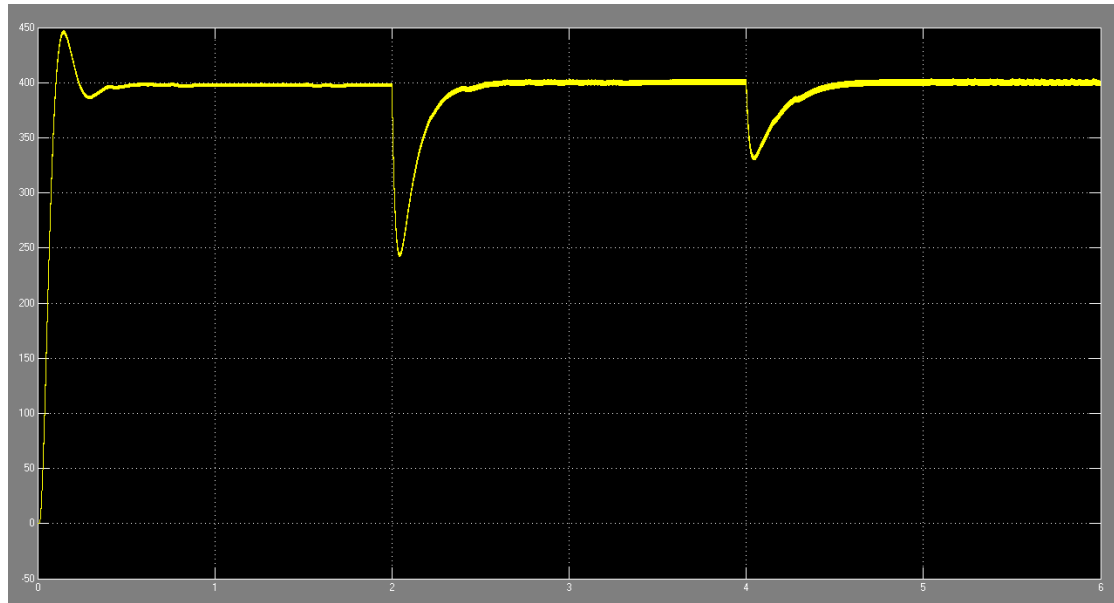


(b)

**Σχήμα 6.24.** Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο  $t = 6 \text{ sec}$  υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_{12} = 50 \Omega$  και  $R_{123} = 40 \Omega$ .

(a) Γραφική παράσταση του ρεύματος της κυψέλης  $I_{fc}$  συναρτήσει του χρόνου.

(b) Γραφική παράσταση της τάσης της κυψέλης  $V_{fc}$  συναρτήσει του χρόνου.



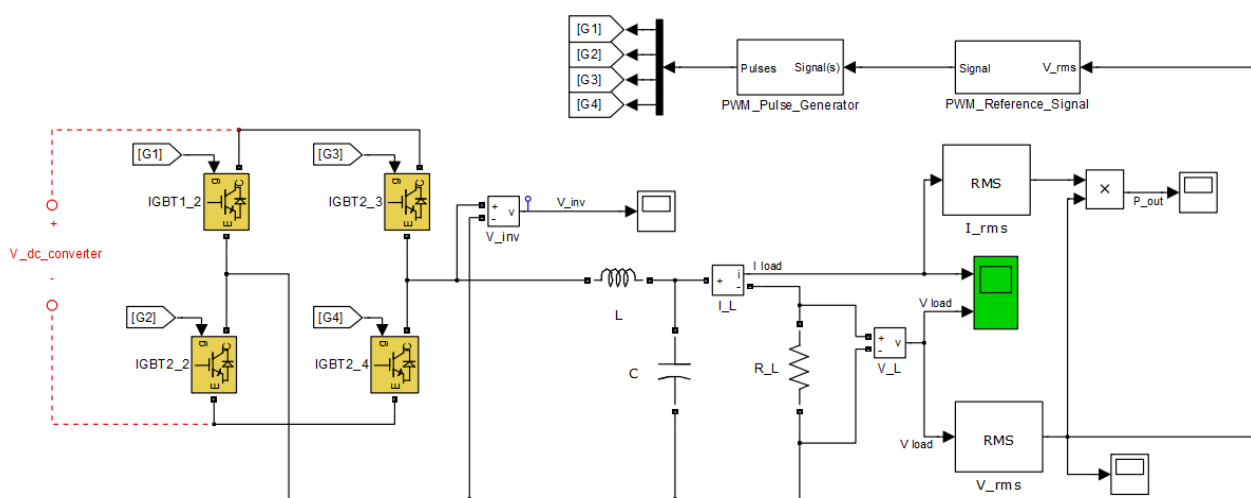
(c)

**Σχήμα 6.25.** Αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα ανύψωσης για χρόνο  $t = 6 \text{ sec}$  υπό μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_{12} = 50 \Omega$  και  $R_{123} = 40 \Omega$ , γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του συστήματος  $V_{out}$  συναρτήσει του χρόνου.

## 6.4 Μοντελοποίηση DC/AC Αντιστροφέα Τάσης

Μετά την ανύψωση της τάσης από τον DC/DC μετατροπέα στα 400 V, για να συνδεθεί η κυψέλη καυσίμου με το δίκτυο είναι απαραίτητο η τάση που παρέχει στην έξοδο του ο DC/DC μετατροπέας να μετατραπεί σε εναλλασσόμενη, ενεργού τιμής 230 V και συχνότητας 50 Hz, με τη χρήση ενός αντιστροφέα τάσης. Στο Simulink, η λειτουργία αυτή μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη διάταξη ενός αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, με το μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 6.26.

Discrete,  
Ts = 5.144e-006 s.



**Σχήμα 6.26.** Μοντέλο Simulink που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του DC/AC αντιστροφέα τάσης.

Η λειτουργία του παραπάνω αντιστροφέα βασίζεται στον έλεγχο της αγωγής των τεσσάρων διακοπτικών στοιχείων IGBT, με τρόπο ώστε η θεμελιώδης αρμονική της κυματομορφής εξόδου που προκύπτει να έχει ενεργό τιμή  $V_{rms} = 230$  V και συχνότητα  $f = 50$  Hz. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των δομικών στοιχείων *PWM\_Reference\_Signal* και *PWM\_Pulse\_Generator* τα οποία καθορίζουν τη σχετική διάρκεια αγωγής κάθε διακόπτη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SPWM με μονοπολική τάση εξόδου, όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.5.3. Ακόμη, στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετείται ένα φίλτρο LC το οποίο εμποδίζει τη διέλευση των ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων και μειώνει την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD). Με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων L και C ο συντελεστής THD% της τάσης εξόδου μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα μικρότερα του 5% , πράγμα το οποίο είναι απαραίτητο ώστε η σύνδεση με το δίκτυο να είναι αποδεκτή.



Τέλος, για τις ανάγκες της προσομοίωσης η απαίτηση ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα προσομοιώνεται με την τοποθέτηση ενός φορτίου  $R_L$ . Για κάθε τιμή που λαμβάνει η αντίσταση του φορτίου η ισχύς την οποία παρέχει στην έξοδό του ο αντιστροφέας υπολογίζεται από τη σχέση  $P = V^2/R_L = 230^2/R_L$ . Ταυτόχρονα λαμβάνεται μέριμνα ώστε ανεξαρτήτως της τιμής της αντίστασης  $R_L$  το πλάτος και η συχνότητα της τάσης εξόδου να μη μεταβάλλονται και η παραμόρφωση να διατηρείται σε αποδεκτά χαμηλά επίπεδα (< 5%).

## Έλεγχος SPWM

Ο έλεγχος SPWM που υλοποιήθηκε συντελείται σε δύο στάδια, στη σύνθεση της ημιτονοειδούς κυματομορφής αναφοράς (δομικό στοιχείο *PWM\_Reference\_Signal*) και στη σύγκρισή της με την κυματομορφή φορέα για την παραγωγή των παλμών ελέγχου που θα εφαρμοστούν στις πύλες των διακοπών (δομικό στοιχείο *PWM\_Pulse\_Generator*). Το αποτέλεσμα της σύγκρισης και επομένως η σχετική διάρκεια αγωγής κάθε διακόπτη εξαρτάται από τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  και τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$ :

$$m_a = \frac{\hat{A}_r}{\hat{A}_c} \quad (6-19)$$

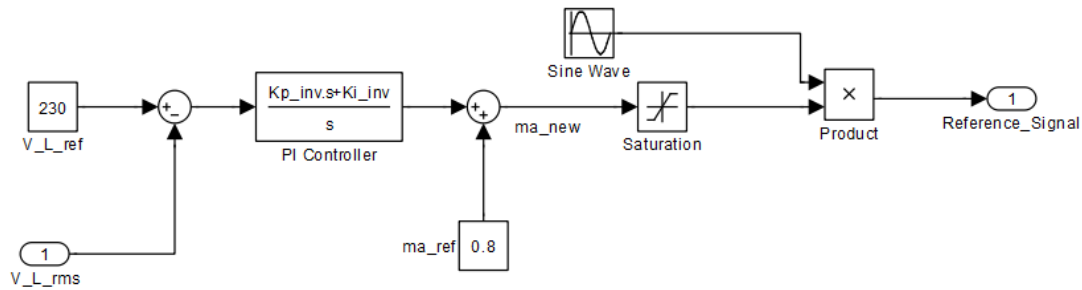
$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (6-20)$$

όπου  $\hat{A}_r$ ,  $f_r$  είναι το πλάτος και η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς

$\hat{A}_c$ ,  $f_c$  είναι το πλάτος και η συχνότητα της κυματομορφής φορέα

Η συχνότητα  $f_r$  (συχνότητα διαμόρφωσης) καθορίζει τη θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου και επομένως λαμβάνεται ίση με 50 Hz. Διατηρώντας τη συχνότητα  $f_c$  (συχνότητα μετάβασης) και το πλάτος της κυματομορφής φορέα  $\hat{A}_c$  σταθερά, η τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής  $m_f$  παραμένει αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, σε αντίθεση με την τιμή του συντελεστή  $m_a$  η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος  $\hat{A}_r$ . Χρησιμοποιώντας μοναδιαίο πλάτος  $\hat{A}_c$ , η τιμή του συντελεστή  $m_a$  ισούται με την τιμή του πλάτους  $\hat{A}_r$  και χρησιμοποιείται ως παράμετρος ελέγχου έτσι ώστε η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου να συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή των 230 V. Η τιμή που λαμβάνει σε κάθε κύκλο λειτουργίας ο συντελεστής  $m_a$  υπολογίζεται στο υποσύστημα το οποίο περιλαμβάνεται στο δομικό στοιχείο *PWM\_Reference\_Signal* και ταυτίζεται με το νέο πλάτος της κυματομορφής αναφοράς που θα χρησιμοποιηθεί.

Το μοντέλο Simulink του υποσυστήματος *PWM\_Reference\_Signal* στο οποίο καθορίζεται ο συντελεστής  $m_a$  και παράγεται η κυματομορφή αναφοράς σε κάθε κύκλο λειτουργίας παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.27.



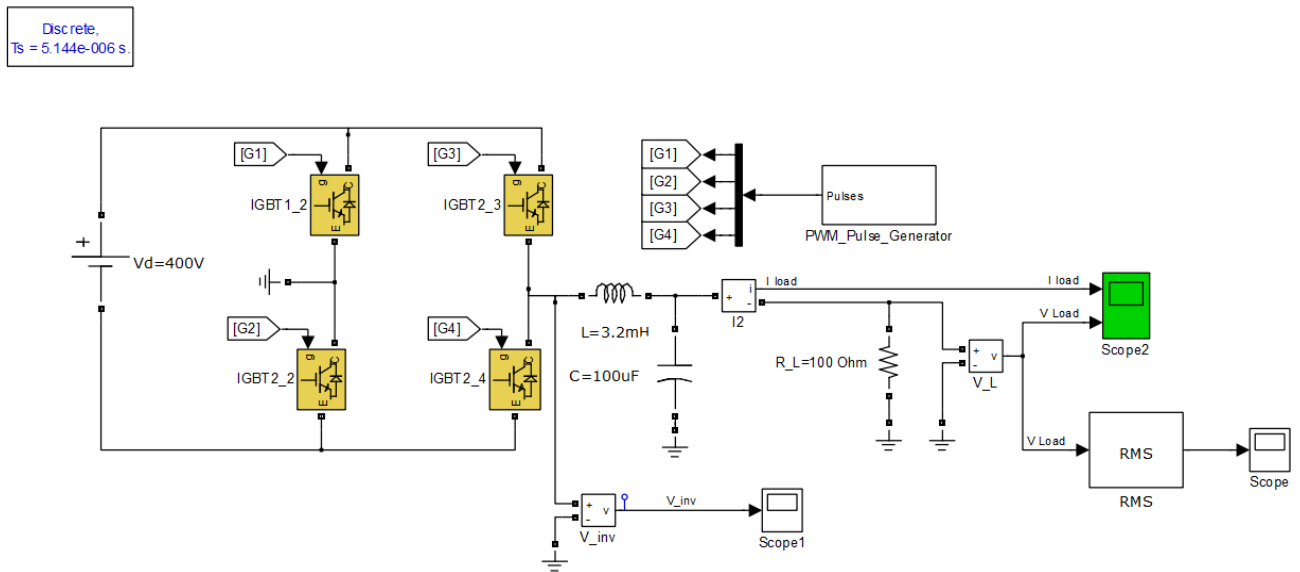
**Σχήμα 6.27.** Μοντέλο Simulink που περιλαμβάνεται στο υποσύστημα του δομικού στοιχείου *PWM\_Reference\_Signal* για τον έλεγχο του συντελεστή  $m_a$  και την παραγωγή της κυματομορφής αναφοράς.

Η ταχύτερη σύγκλιση της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου  $V_{L,rms}$  στην επιθυμητή τιμή  $V_{L,ref} = 230 \text{ V}$  επιτυγχάνεται με τη χρήση ελεγκτή PI, αναλογικού κέρδους  $K_{p,inv}$  και ολοκληρωτικού κέρδους  $K_{i,inv}$ . Ο ελεγκτής PI διορθώνει επαναλαμβανόμενα την τιμή του συντελεστή  $m_a$  ανάλογα με το εύρος του σφάλματος  $e = V_{L,ref} - V_{L,rms}$  που παρουσιάζεται σε κάθε κύκλο λειτουργίας. Η υπολογιζόμενη σε κάθε κύκλο νέα τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_{a,new}$  πολλαπλασιάζεται με ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας  $f_r = 50 \text{ Hz}$  και μοναδιαίου πλάτους, έτσι ώστε να παραχθεί η επιθυμητή κυματομορφή αναφοράς.

Ακολούθως, η κυματομορφή αναφοράς χρησιμοποιείται ως είσοδος στο δομικό στοιχείο *PWM\_Pulse\_Generator* ώστε να παραχθούν οι παλμοί ελέγχου που θα εφαρμοστούν στις πύλες G1, G2, G3 και G4. Το δομικό στοιχείο PWM Generator που χρησιμοποιήθηκε παρέχεται από τη βιβλιοθήκη SimPowerSystems και συγκρίνει τις κυματομορφές αναφοράς και φορέα σύμφωνα με τη θεωρία της παραγράφου 4.2.5.3 (έλεγχος διακοπών με μονοπολική τάση εξόδου). Η συχνότητα μετάβασης  $f_c$  επιλέγεται βάσει της τιμής που επιθυμείται να λαβει ο συντελεστής  $m_f$ , ενώ το πλάτος  $\hat{A}_c$  θεωρείται μοναδιαίο. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ο συντελεστής  $m_f$  που θα χρησιμοποιηθεί να είναι ακέραιος και ειδικότερα άρτιος αριθμός, διότι με αυτόν τον τρόπο οι ανεπιθύμητες αρμονικές που εμφανίζονται στο φάσμα της τάσης εξόδου μειώνονται σε μεγάλο βαθμό.

## Σχεδιασμός του φίλτρου LC, μελετώντας την ιδανική περίπτωση σταθερής τάσης εισόδου 400 V

Στην ιδανική περίπτωση όπου η τάση που παρέχει ο DC/DC μετατροπέας προσομοιωθεί ως μια σταθερή πηγή τάσης 400 V, το μοντέλο του αντιστροφέα λαμβάνει τη μορφή του Σχήματος 6.28. Επειδή η τάση εισόδου είναι αμετάβλητη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ο έλεγχος της τάσης εξόδου και επομένως το δομικό στοιχείο *PWM\_Reference\_Signal* παραλείφθηκαν, ενώ η κυματομορφή αναφοράς παράγεται εσωτερικά του δομικού στοιχείου *PWM\_Pulse\_Generator*.



**Σχήμα 6.28.** Μοντελοποίηση της λειτουργίας του αντιστροφέα τάσης στην ιδανική περίπτωση λειτουργίας υπό σταθερή τάση εισόδου  $V_d = 400 \text{ V}$ .

Λόγω της απουσίας ελέγχου, η τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας και ίση με  $m_a = 0.8$ , έτσι ώστε να ισχύει

$$V_{L,rms} = \frac{\hat{V}_{L,1}}{\sqrt{2}} = \frac{m_a V_d}{\sqrt{2}} = \frac{0.8 \cdot 400V}{\sqrt{2}} \cong 226.3V \quad (6-21)$$

Επίσης, επιλέγοντας συχνότητα μετάβασης  $f_s = 900 \text{ Hz}$  ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  προκύπτει

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} = \frac{900\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 18 \quad (6-22)$$

Βάσει της θεωρίας της παραγράφου 4.2.5.3, επιλέγοντας ακέραια και άρτια τιμή για τον συντελεστή  $m_f$  οι ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες γύρω από τη

συχνότητα  $2m_f$  και τις πολλαπλάσιές της. Η αρμονική τάξης  $h$  υπολογίζεται συναρτήσει του  $m_f$  από τη σχέση

$$h = j(2m_f) \pm k \quad (6-23)$$

και αντιστοιχεί σε συχνότητα

$$f_h = [j(2m_f) \pm k]f_r \quad (6-24)$$

όπου  $j, k$  φυσικοί αριθμοί εκ των οποίων το  $k$  λαμβάνει μόνο περιττές τιμές.

Το πλάτος  $\hat{V}_{inv,h}$  κάθε αρμονικής συνιστώσας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 4.5. Έτσι, εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις για  $m_a = 0.8$ ,  $m_f = 18$  και  $f_r = 50 \text{ Hz}$ , οι συχνότητες των κύριων αρμονικών που εμφανίζονται στην τάση εξόδου και τα αντίστοιχα πλάτη τους προκύπτουν:

$$\begin{aligned} f_1 = f_r = 50 \text{ Hz} & \quad , & \quad \hat{V}_{inv,1} = 0.8 \cdot 400 \text{ V} = 320 \text{ V} \\ f_{35} = 35f_r = 1750 \text{ Hz} & \quad , & \quad \hat{V}_{inv,35} = 0.314 \cdot 400 \text{ V} = 125.6 \text{ V} \\ f_{37} = 37f_r = 1850 \text{ Hz} & \quad , & \quad \hat{V}_{inv,37} = 0.314 \cdot 400 \text{ V} = 125.6 \text{ V} \end{aligned}$$

κ.ο.κ.

Συγκεντρωτικά, οι συχνότητες και τα πλάτη των κύριων αρμονικών που εμφανίζονται στην τάση εξόδου, καθώς επίσης και το ποσοστό % του πλάτους τους σε σχέση με το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής παρατίθενται στον Πίνακα 6.7.

**Πίνακας 6.7.** Συχνότητες και πλάτη των κύριων αρμονικών που εμφανίζονται στην τάση εξόδου, όπως υπολογίζονται για  $m_a = 0.8$ ,  $m_f = 18$  και  $f_r = 50 \text{ Hz}$ .

h	$f_h$ (Hz)	$V_{inv,h}$ (V)	$V_{inv,h} / V_{inv,1} \times 100 \%$
1	50	320	100 %
33	1650	55.6	17.37 %
35	1750	125.6	39.25 %
37	1850	125.6	39.25 %
39	1950	55.6	17.37 %
69	3450	46	14.38 %
71	3550	42	13.13 %
73	3650	42	13.13 %
75	3750	46	14.38 %

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.7, η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική της τάσης εξόδου παρατηρείται για  $f_{35} = 1750$  Hz και έχει πλάτος  $\hat{V}_{inv,35} = 125.6$  V, προκαλώντας αρκετά υψηλό συντελεστή ολικής παραμόρφωσης THD%. Με βάση τη θεωρία της παραγράφου 4.2.7, για να πέσει ο συντελεστής THD σε επίπεδα μικρότερα του 5% , το πλάτος της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας  $\hat{V}_{L,35}$  πρέπει να αντιστοιχεί το πολύ στο 3% του πλάτους της θεμελιώδους  $\hat{V}_{L,1}$ . Έτσι, θεωρώντας ότι  $\hat{V}_{L,35} = 0.01 \cdot \hat{V}_{inv,1}$ , το γινόμενο της αυτεπαγωγής  $L$  και της χωρητικότητας  $C$  του φίλτρου εξόδου υπολογίζεται από την εξίσωση (4-53), δηλαδή

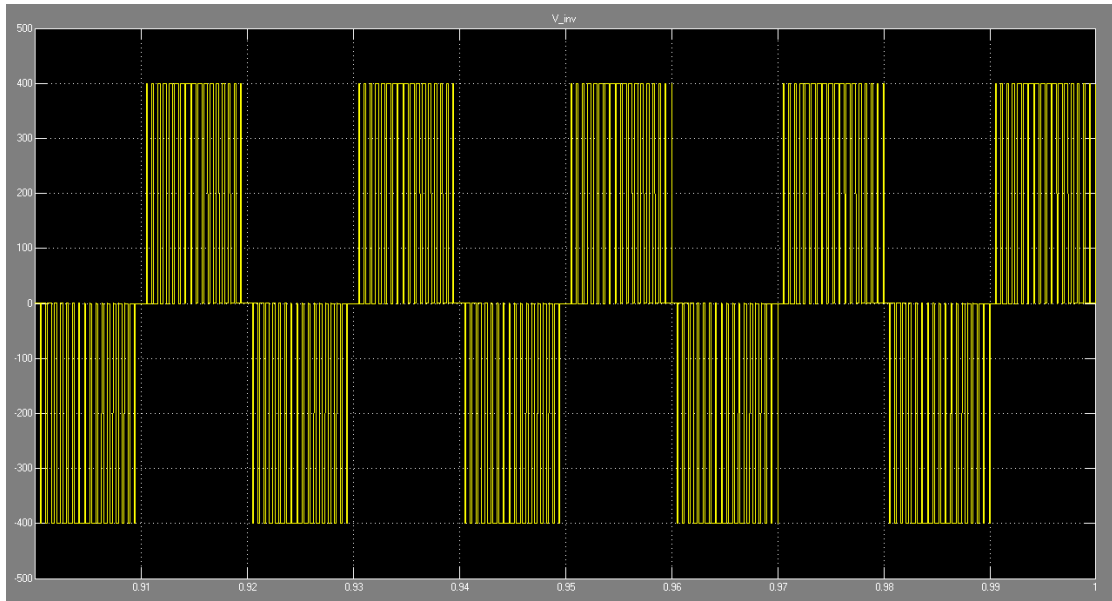
$$\frac{0.01 \cdot \hat{V}_{inv,1}}{\hat{V}_{inv,35}} = \frac{1}{|1 - h^2 \omega^2 LC|} \Rightarrow$$

$$\frac{0.01 \cdot 320}{125.6} = \frac{1}{|1 - 35^2 (100\pi)^2 LC|} \Rightarrow$$

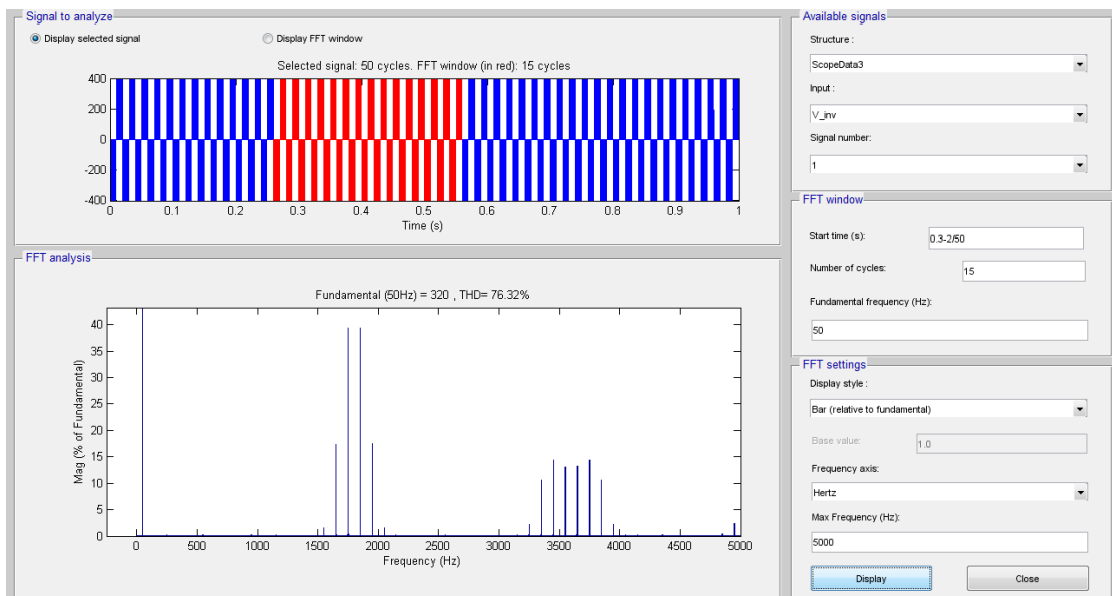
$$LC \cong 3.2 \cdot 10^{-7} \quad (6-25)$$

Επομένως, επιλέγοντας χωρητικότητα  $C = 100$   $\mu$ F η αυτεπαγωγή του πηνίου προκύπτει  $L = 3.2$  mH.

Προσομοιώνοντας το μοντέλο του Σχήματος 6.28 υπό φορτίο  $R_L = 100$   $\Omega$ , η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου που προκύπτει πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου LC φαίνεται στα Σχήματα 6.29 (α) και 6.30 (α). Το φάσμα της τάσης εξόδου μπορεί να υπολογιστεί στις δύο αυτές περιπτώσεις χρησιμοποιώντας τη λειτουργία FFT Analysis που περιλαμβάνεται στο στοιχείο PowerGui και φαίνεται στα Σχήματα 6.29 (β) και 6.30 (β).

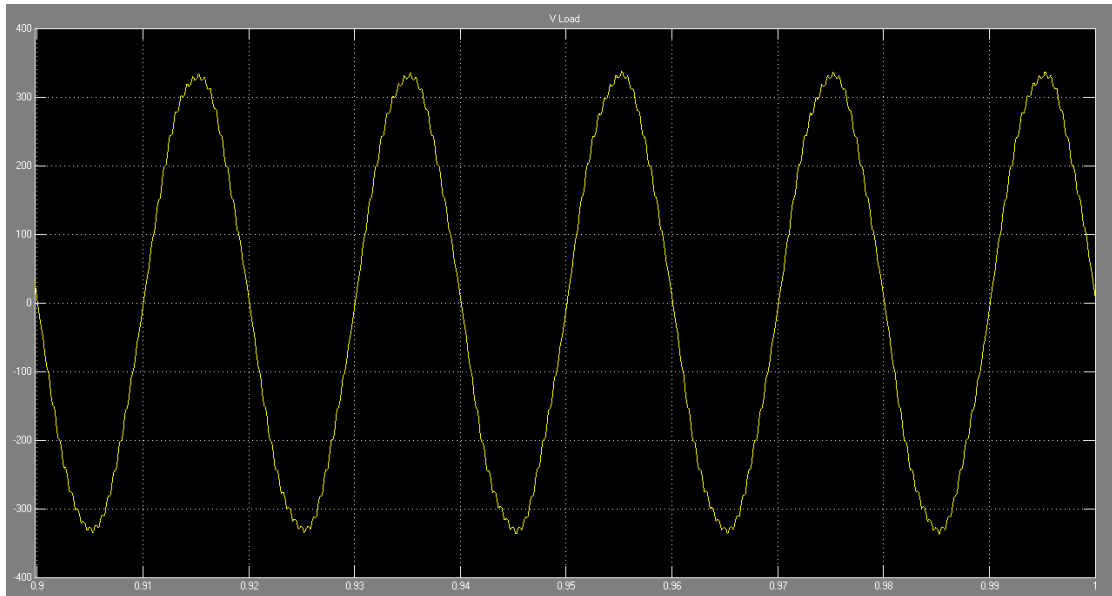


(α)

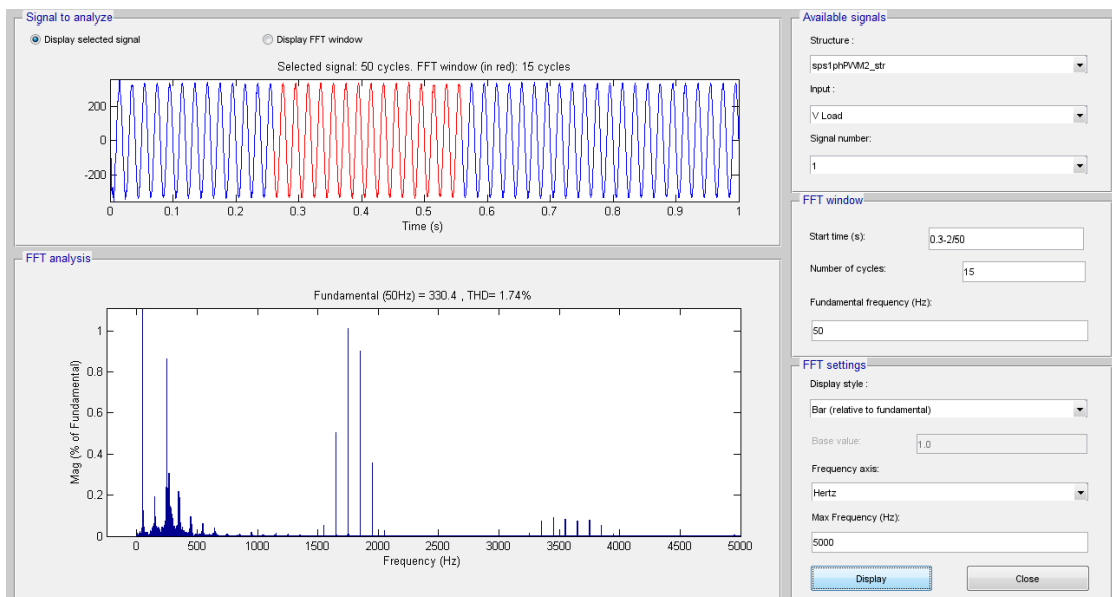


(β)

**Σχήμα 6.29.** (α) Γραφική παράσταση της τάσης που παράγει ο αντιστροφέας πριν την εφαρμογή του φίλτρου και (β) υπολογιζόμενο φάσμα με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.



(α)



(β)

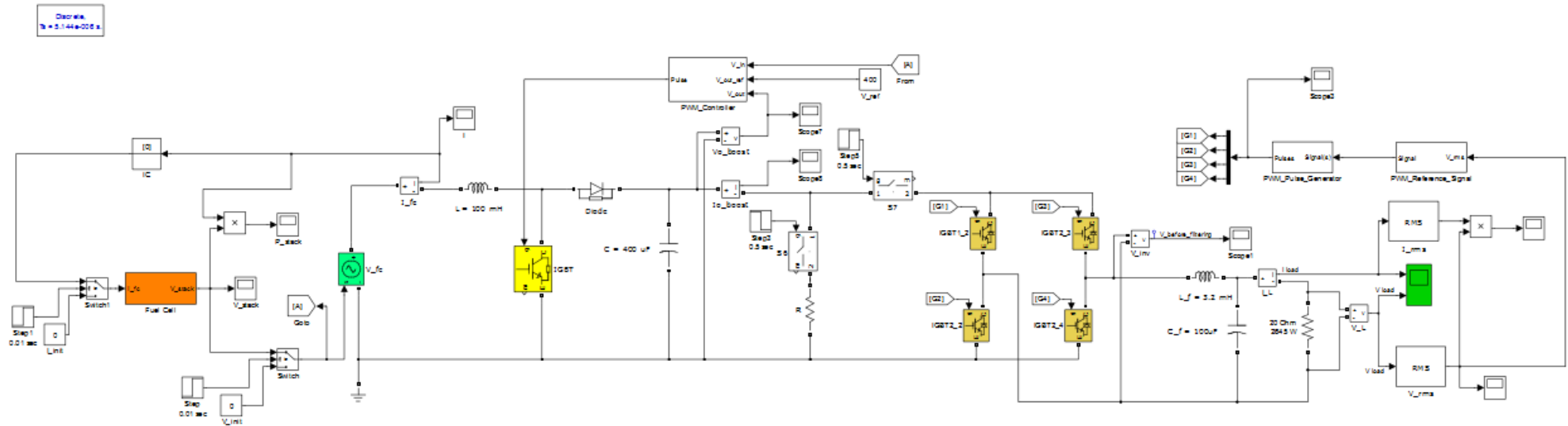
**Σχήμα 6.30.** (α) Γραφική παράσταση της τάσης εξόδου μετά την εφαρμογή του φίλτρου και (β) υπολογιζόμενο φάσμα με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.

Όπως φαίνεται από την παρατήρηση των Σχημάτων 6.29 και 6.30, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν τη μαθηματική ανάλυση που προηγήθηκε. Συγκεκριμένα, πριν την εφαρμογή του φίλτρου η θεμελιώδης αρμονική της τάσης εξόδου προκύπτει στη συχνότητα των 50 Hz και έχει πλάτος  $\hat{V}_{inv,1} = 320$  V ενώ οι ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται κυρίως στις συχνότητες 1750 Hz, 1850 Hz, 1650 Hz και 1950 Hz με αντίστοιχα πλάτη σε σχέση με το πλάτος της θεμελιώδους 39.3%, 39.31%, 17.42% και 17.43%, επαληθεύοντας τις τιμές που υπολογίστηκαν στον Πίνακα 6.7. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου το πλάτος της βασικής αρμονικής γίνεται  $\hat{V}_{L,1} = 330.3$  V λόγω της επίδρασης του πηνίου και του πυκνωτή, δηλαδή αντιστοιχεί σε τάση εξόδου ενεργού τιμής  $V_{L,rms} = 233.6$  V. Ο συντελεστής παραμόρφωσης THD% μειώνεται από την τιμή 76.32% πριν την εφαρμογή του φίλτρου στην τιμή 1.74% μετά από αυτήν ενώ το μέγιστο πλάτος αρμονικής που παρατηρείται σε σχέση με τη θεμελιώδη είναι 1.01%, επιβεβαιώνοντας έτσι την αποτελεσματική αποκοπή των ανεπιθύμητων συχνοτήτων.

#### **Προσομοίωση του συνολικού συστήματος κυψέλης καυσίμου – DC/DC μετατροπέα – DC/AC αντιστροφέα**

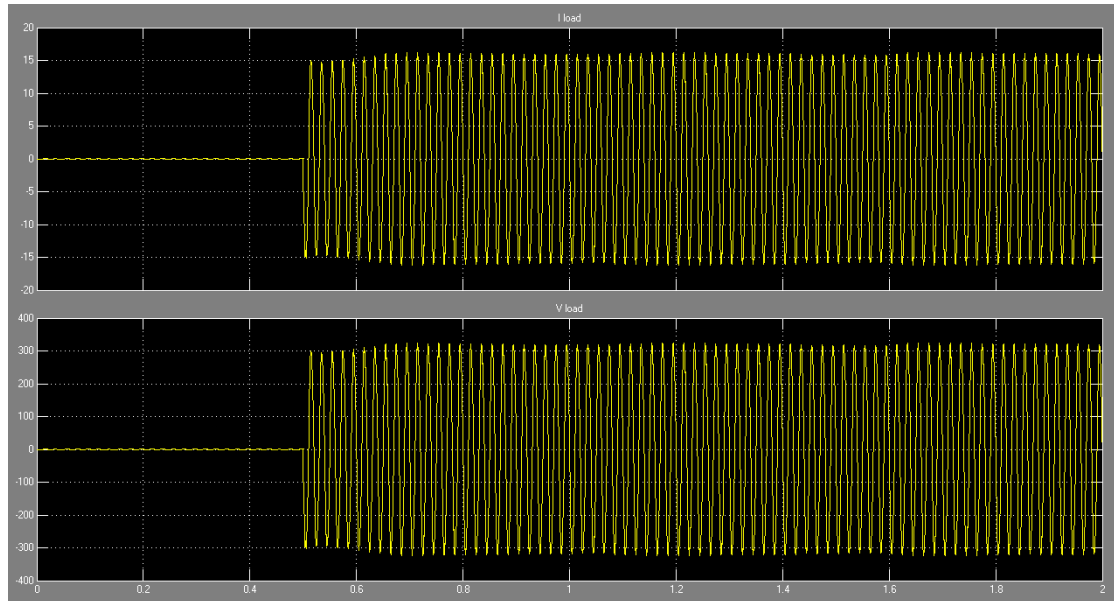
Συνδέοντας τα μοντέλα Simulink των Σχημάτων 6.20 και 6.26, το μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία του συνολικού συστήματος κυψέλης καυσίμου – DC/DC μετατροπέα τάσης – DC/AC αντιστροφέα τάσης φαίνεται στο Σχήμα 6.31. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος και την αξιολόγηση της λειτουργίας του για την τροφοδότηση φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Παρέχει επίσης πληροφορίες για τις απώλειες ισχύος που παρατηρούνται και επιτρέπει τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με την ισχύ που παρέχεται στην τροφοδοτούμενη κατανάλωση.



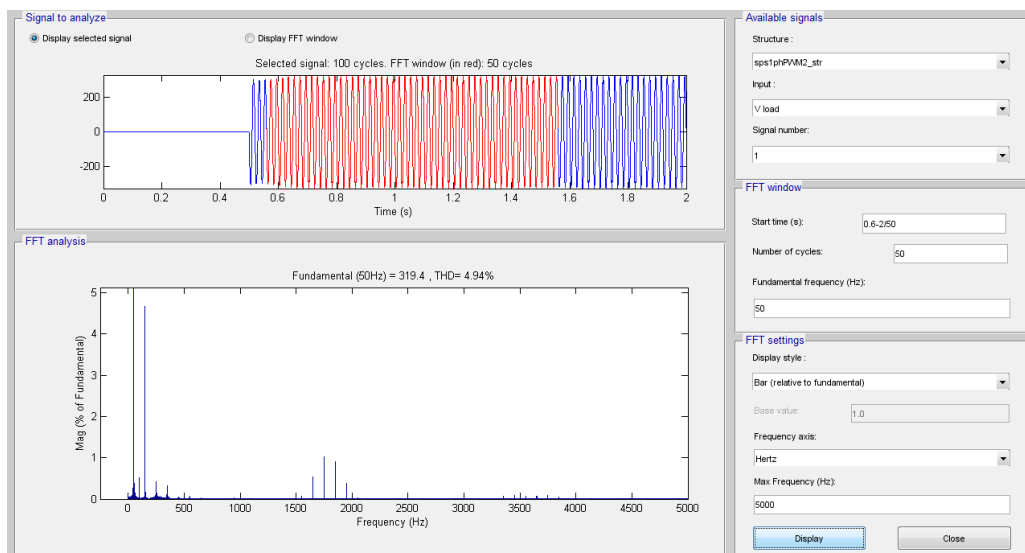


**Σχήμα 6.31.** Συνολικό μοντέλο Simulink για την προσομοίωση του συστήματος κυβέλης καυσίμου – DC/DC μετατροπέα τάσης – DC/AC αντιστροφή τάσης.

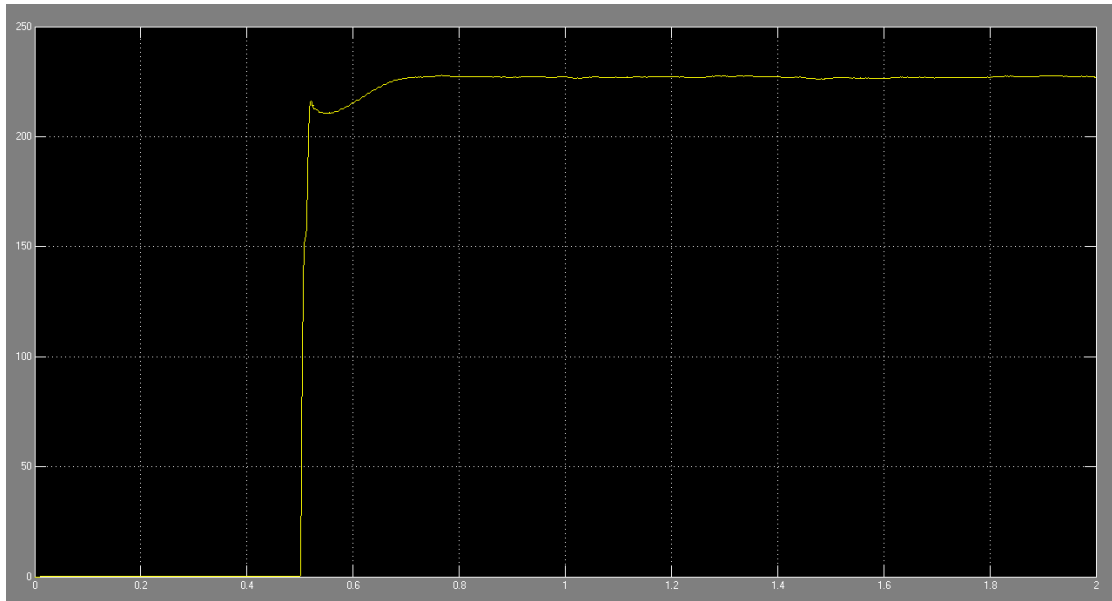
Στο μοντέλο του Σχήματος 6.31 αρχικά ο διακόπτης S7 είναι ανοιχτός ενώ ο διακόπτης S6 είναι κλειστός με αποτέλεσμα το DC/AC στάδιο του συστήματος να είναι αποσυνδεδεμένο. Μετά από χρονικό διάστημα  $t = 0.5 \text{ sec}$  όπου η τάση εξόδου του DC/DC μετατροπέα έχει σταθεροποιηθεί στα  $400 \text{ V}$  οι διακόπτες αντιστρέφουν την κατάστασή τους με αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου και ο μετατροπέας να συνδέονται με τον αντιστροφέα και την κατανάλωση. Προσομοιώνοντας το μοντέλο για κατανάλωση  $R_L = 20 \ \Omega$ , δηλαδή απαιτούμενη ισχύ  $2645 \text{ W}$ , στο χρονικό διάστημα μέχρι  $t = 2 \text{ sec}$  προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.



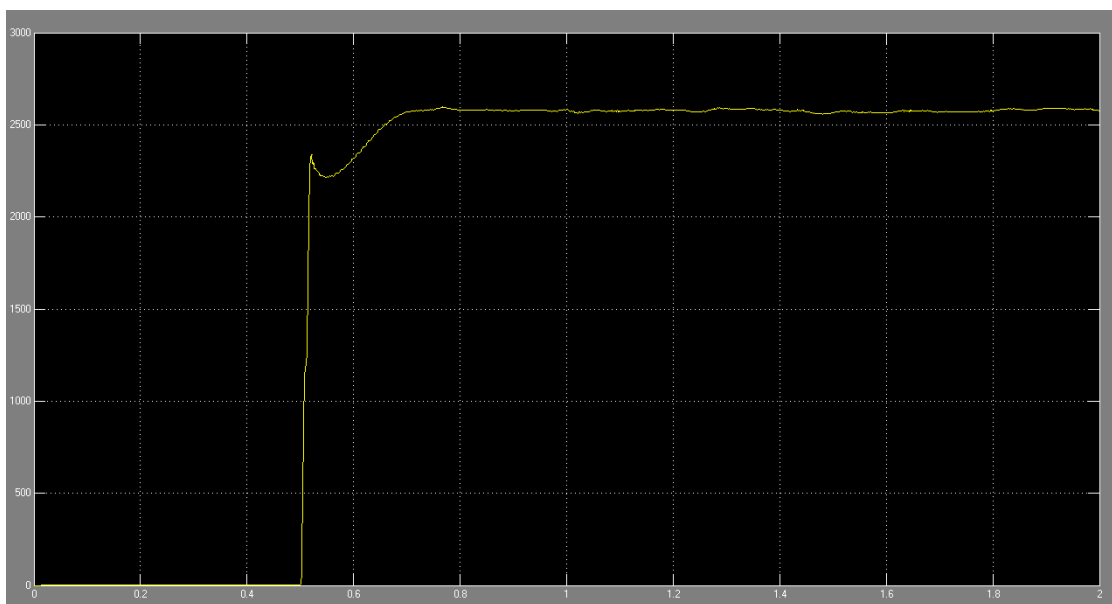
**Σχήμα 6.32.** Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος  $I_{\text{load}}$  και της τάσης  $V_{\text{load}}$  της κατανάλωσης  $R_L$ , όπου  $R_L = 20 \ \Omega$ .



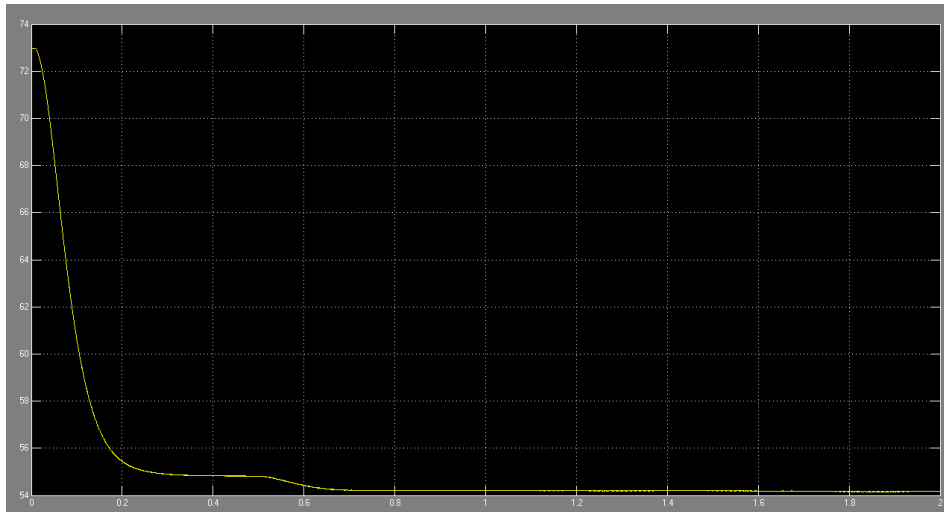
**Σχήμα 6.33.** Υπολογιζόμενο φάσμα της τάσης εξόδου του συστήματος με τη βοήθεια της λειτουργίας FFT Analysis του δομικού στοιχείου PowerGui.



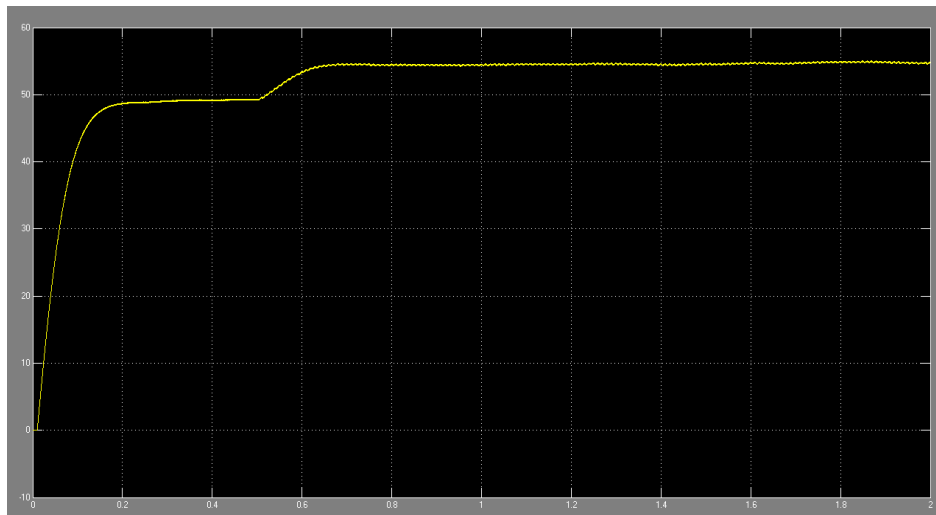
**Σχήμα 6.34.** Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής  $V_{rms}$  της τάσης εξόδου του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα – αντιστροφέα.



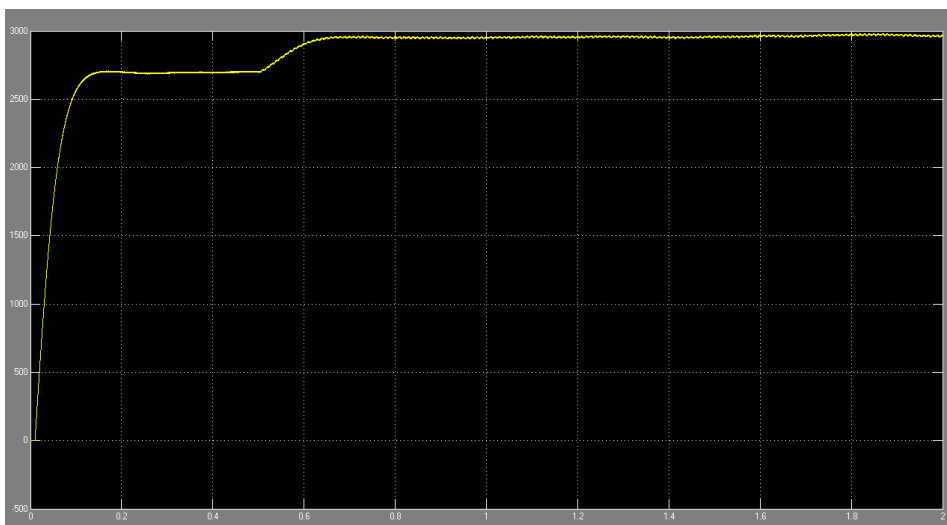
**Σχήμα 6.35.** Γραφική παράσταση της μεταβολής της ισχύος εξόδου  $P_{out}$  του συστήματος κυψέλης – μετατροπέα - αντιστροφέα με την οποία τροφοδοτείται η κατανάλωση  $R_L$ .



(α)



(β)



(γ)

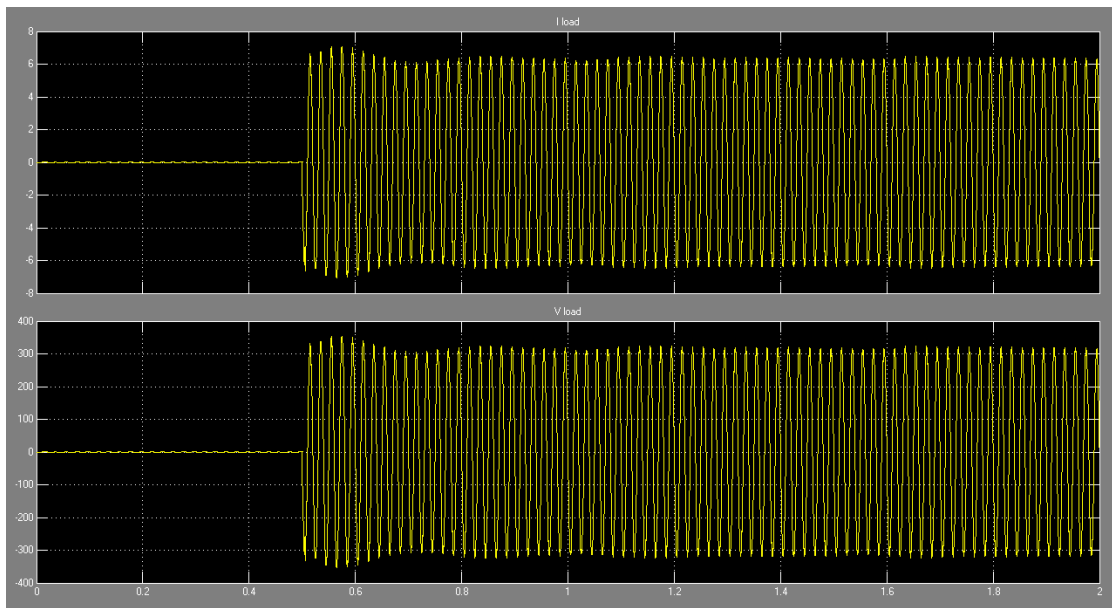
**Σχήμα 6.36.** Γραφικές παραστάσεις ηλεκτρικών μεγεθών της κυψέλης καυσίμου.

(α) : Τάση εξόδου  $V_{stack}$ . (β) : Παραγόμενο ρεύμα  $I_{fc}$ . (γ) : Παραγόμενη ισχύς  $P_{fc}$ .

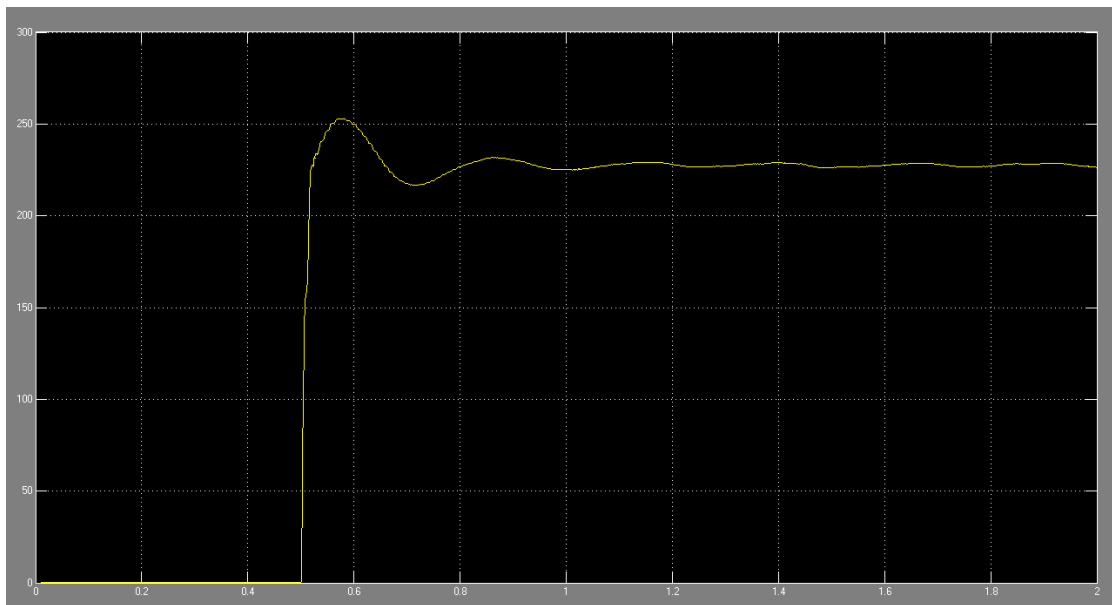
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα παραπάνω διαγράμματα, οι γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος εξόδου του συστήματος είναι ημιτονοειδείς (Σχήμα 6.32), με συντελεστή ολικής παραμόρφωσης THD% = 4.94% (Σχήμα 6.33). Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου σταθεροποιείται γρήγορα στην τιμή  $V_{rms} = 228V$  (Σχήμα 6.34) ενώ το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας προκύπτει από το υπολογιζόμενο φάσμα της τάσης εξόδου  $\hat{V}_{load} = 319.4V$  (Σχήμα 6.33). Συμπερασματικά, η έξοδος του συστήματος πληρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε να είναι αποδεκτή η σύνδεσή της με το δίκτυο.

Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.35, η ισχύς εξόδου του συστήματος σταθεροποιείται στα 2590W ενώ η ισχύς που παράγει η κυψέλη μετριέται ίση με 2900W (Σχήμα 6.36), επομένως παρατηρείται ότι η απόδοση ισχύος του συστήματος είναι της τάξης του 89.3%, η οποία συμφωνεί με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα που έχουν παρατεθεί στον Πίνακα 5.4.

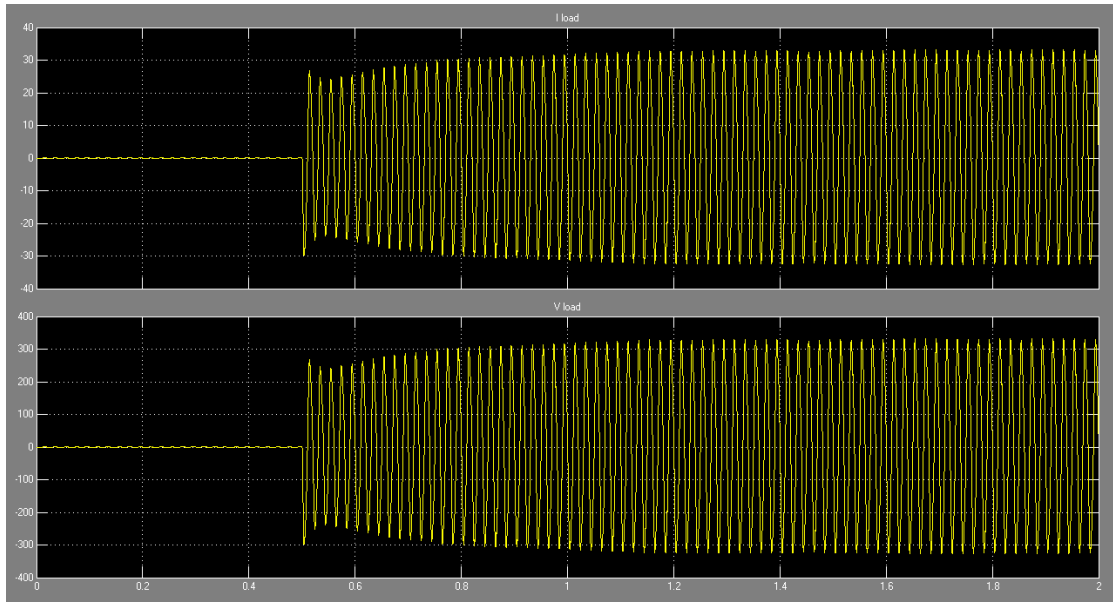
Στα Σχήματα 6.37, 6.38, 6.39 και 6.40 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος εξόδου καθώς και της μεταβολής της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου για φορτίο  $R_L = 50 \Omega$  και φορτίο  $R_L = 10 \Omega$ . Τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα των συμπερασμάτων που διατυπώθηκαν για τη συμπεριφορά του συστήματος στην περίπτωση φορτίου  $R_L = 20 \Omega$ . Και στις δύο περιπτώσεις τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ρεύματος είναι αποδεκτά για τη χρήση τους στο δίκτυο.



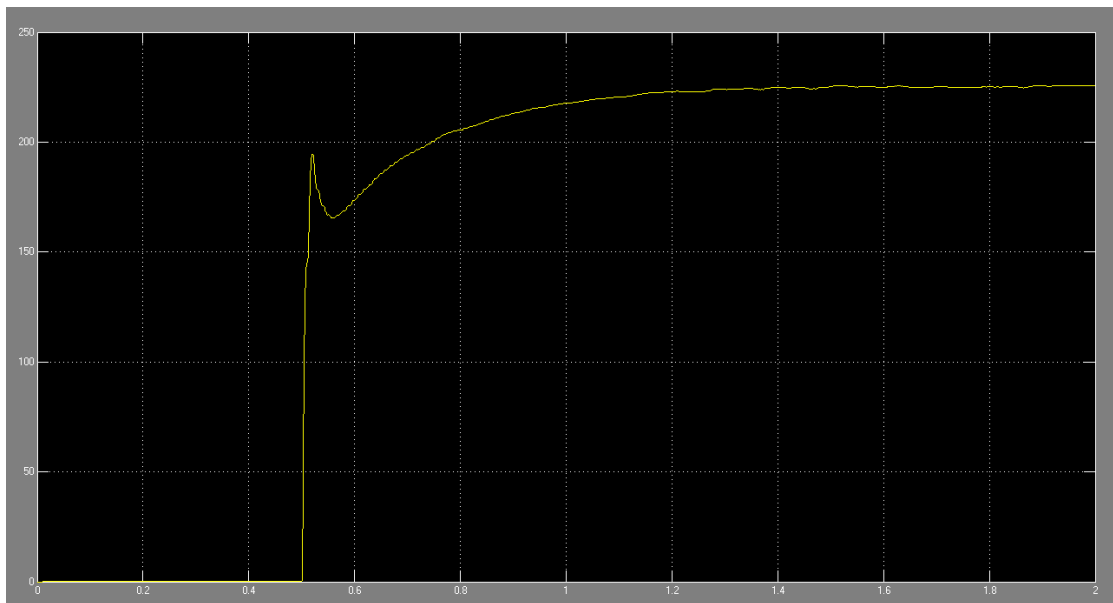
**Σχήμα 6.37.** Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος  $I_{load}$  και της τάσης  $V_{load}$  της κατανάλωσης  $R_L$  για φορτίο  $R_L = 50 \Omega$ .



**Σχήμα 6.38.** Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής  $V_{rms}$  της τάσης εξόδου για φορτίο  $R_L = 50 \Omega$ .



**Σχήμα 6.39.** Γραφικές παραστάσεις του ρεύματος  $I_{load}$  και της τάσης  $V_{load}$  της κατανάλωσης  $R_L$  για φορτίο  $R_L = 10 \Omega$ .



**Σχήμα 6.40.** Γραφική παράσταση της μεταβολής της ενεργού τιμής  $V_{rms}$  της τάσης εξόδου για φορτίο  $R_L = 10 \Omega$ .





# 7

## Δημιουργία διεπαφής χρήστη για τον έλεγχο λειτουργίας του πραγματικού συστήματος

Βασικός στόχος της ανάπτυξης του λογισμικού της διεπαφής χρήστη ήταν η αυτοματοποίηση και ο έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου Mira 6 με βάση τις ενεργειακές ανάγκες που παρατηρούνται κάθε στιγμή στο χώρο του παταριού του κτηρίου H<sub>2</sub>-ΑΠΕ. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας προϋπέθετε τη δημιουργία λογισμικού το οποίο επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα και του κεντρικού συστήματος EMCS ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος ελέγχου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Παράλληλα, η ανάπτυξη της διεπαφής χρήστη έδωσε τη δυνατότητα ολοκληρωμένου ελέγχου του συστήματος παραγωγής ενέργειας, είτε με αυτόματο είτε με χειροκίνητο τρόπο.

Η λειτουργία του λογισμικού της διεπαφής που αναπτύχθηκε βασίζεται στη σειριακή επικοινωνία με τον αντιστροφέα τάσης Delta DHF-1AC-5000W, μέσω της οποίας του στέλνει εντολές και διαβάζει πληροφορίες. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι προδιαγραφές της σειριακής επικοινωνίας με τον αντιστροφέα, ενώ επίσης παρουσιάζονται αναλυτικά οι δυνατότητες και οι λειτουργίες που προσφέρονται από το περιβάλλον του λογισμικού. Ακολουθώς, παρατίθενται τα διαγράμματα ροής του κώδικα που εκτελείται σε κάθε λειτουργία και τέλος περιγράφεται το κύκλωμα που κατασκευάστηκε για την αυτόματη ενεργοποίηση του αντιστροφέα τάσης.

## 7.1 Περιγραφή λογισμικού διεπαφής χρήστη

### 7.1.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του λογισμικού

Βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή του περιβάλλοντος ανάπτυξης του λογισμικού της διεπαφής χρήστη ήταν να παρέχονται οι κατάλληλες κλάσεις για τη δημιουργία της σειριακής επικοινωνίας του τερματικού με τον αντιστροφέα καθώς και να παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός εύχρηστου γραφικού περιβάλλοντος, εύκολα κατανοητού και πλήρους για τον χρήστη. Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν, ως πλατφόρμα ανάπτυξης του λογισμικού επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης **Microsoft Visual Studio 2010**, ενώ για τη συγγραφή του κώδικα της εφαρμογής επιλέχθηκε η γλώσσα προγραμματισμού **C++/CLI** ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν παράλληλα οι δυνατότητες που προσφέρουν το πλαίσιο λογισμικού **.NET Framework** και η διεπαφή προγραμματισμού **Windows Forms**.

#### Microsoft Visual Studio 2010

Το Microsoft Visual Studio 2010 είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment), δηλαδή ένα εξελιγμένο περιβάλλον προγραμματισμού και συγγραφής κώδικα, το οποίο είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στον κόσμο των προγραμματιστών. Παρέχει εργαλεία για τη γρήγορη και αποτελεσματική ανάπτυξη πολλών ειδών εφαρμογών όπως εφαρμογές κονσόλας, εφαρμογές με γραφικό περιβάλλον, εφαρμογές διαδικτύου, κινητών τηλεφώνων και πολλά άλλα. Συνήθως ο προγραμματισμός γίνεται σε περιβάλλον Visual Basic, Visual C++ ή Visual C#, αν και με τις κατάλληλες προεκτάσεις το Visual Studio μπορεί να υποστηρίξει σχεδόν κάθε γλώσσα προγραμματισμού. Επιπλέον, ένα ακόμα στοιχείο το οποίο διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες του προγραμματιστή είναι το γεγονός ότι οι γλώσσες αυτές έχουν πρόσβαση στη χρήση του .NET Framework.

#### .Net Framework

Το .NET Framework είναι ουσιαστικά ένα πλαίσιο λογισμικού (software framework) από τη Microsoft το οποίο αυξάνει τις δυνατότητες των προγραμματιστών και διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη εφαρμογών. Απαρτίζεται από δύο στοιχεία τα οποία φανερώνουν και τα κυριότερα πλεονεκτήματά του, το CLR (Common Language Runtime) και τις βιβλιοθήκες κλάσεων (.NET Class Libraries).

Το CLR είναι το προϊόν της προσπάθειας της Microsoft για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας ανάπτυξης και εκτέλεσης εφαρμογών, ανεξάρτητης της γλώσσας προγραμματισμού στην οποία η εφαρμογή είναι γραμμένη. Συγκεκριμένα, το CLR αποτελεί ένα κοινό περιβάλλον εκτέλεσης (runtime) για τις γλώσσες προγραμματισμού που

χρησιμοποιούν το .NET Framework, δηλαδή είναι ένα λογισμικό το οποίο παρέχει υπηρεσίες οι οποίες επιτρέπουν στον εκτελέσιμο κώδικα ενός προγράμματος να μην ασχολείται με λεπτομέρειες χαμηλού επιπέδου του λειτουργικού συστήματος (όπως π.χ. η διαχείριση μνήμης) και το οποίο ταυτόχρονα δεν χρειάζεται να είναι διαφορετικό για κάθε γλώσσα. Χάρη σε αυτό οι γλώσσες προγραμματισμού όχι απλώς δεν είναι απαραίτητο να έχουν εγκατεστημένο ξεχωριστό περιβάλλον εκτέλεσης κάθε μία στο λειτουργικό σύστημα αλλά επιπλέον μπορούν και να συνεργάζονται μεταξύ τους έτσι ώστε ο κώδικας μιας εφαρμογής να μην είναι γραμμένος κατ' ανάγκη σε μία μόνο γλώσσα.

Το CLR είναι στην ουσία μια υλοποίηση του ανοικτού προτύπου CLI (Common Language Infrastructure) το οποίο περιγράφει τις προδιαγραφές ώστε εφαρμογές γραμμένες σε περισσότερες από μία γλώσσες προγραμματισμού να μπορούν να εκτελεστούν σε διαφορετικά υπολογιστικά περιβάλλοντα χωρίς να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την αρχιτεκτονική του καθενός. Έτσι, με αυτό τον τρόπο ορίζεται το περιβάλλον εικονικής μηχανής (virtual machine) που χρησιμοποιεί το .NET Framework για την εκτέλεση των εφαρμογών. Να σημειωθεί ότι για αυτό τον λόγο η γλώσσα που προκύπτει από τον συνδυασμό της C++ με χρήση του CLR ονομάζεται C++/CLI.

Το δεύτερο πολύ σημαντικό στοιχείο από το οποίο αποτελείται το .NET Framework είναι ένας μεγάλος αριθμός από βιβλιοθήκες κλάσεων (.NET Class Libraries) οι οποίες είναι κοινές για όλες τις γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιούν το .NET Framework. Οι βιβλιοθήκες αυτές ανοίγουν στον προγραμματιστή τη δυνατότητα χρήσης έτοιμων κλάσεων και συναρτήσεων εξειδικευμένων σε διάφορες λειτουργίες, διευκολύνοντας και απλοποιώντας σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη εφαρμογών.

Συνοψίζοντας, το .NET Framework αποτελεί δομικό στοιχείο του λειτουργικού συστήματος των Windows και είναι σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζει στον προγραμματιστή τα ακόλουθα στοιχεία:

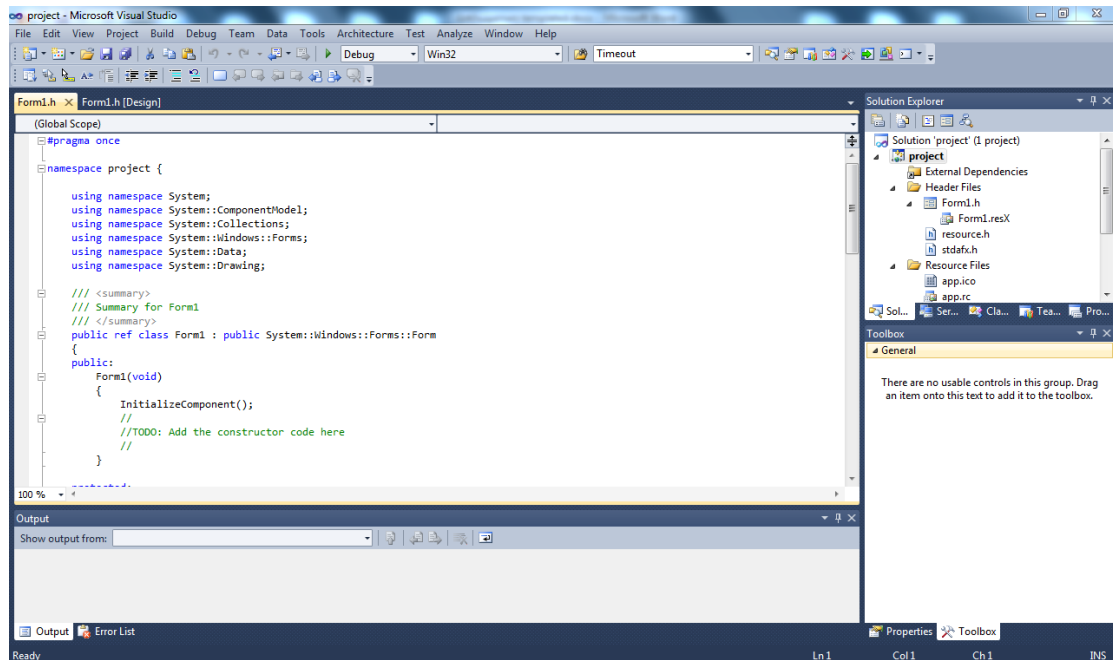
- να κάνει τις εφαρμογές των Windows πιο αξιόπιστες, βελτιώνοντας το βαθμό της ασφάλειάς τους,
- να διευκολύνει την ανάπτυξη λογισμικού καθώς και εφαρμογών και υπηρεσιών διαδικτύου,
- να παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών των οποίων ο κώδικας είναι γραμμένος σε περισσότερες από μία γλώσσες, συμβατές με τη χρήση του CLR.

### **C++/CLI – Windows Forms**

Για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρει η χρήση του .NET Framework, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++/CLI. Η C++/CLI στην ουσία είναι μια προέκταση της γλώσσας C++ η οποία έχει εμπλουτιστεί με έναν μεγάλο αριθμό καινούριων χαρακτηριστικών και η οποία στοχεύει στη χρήση του .NET Framework. Αν και η χρονική επίδοση της εκτέλεσης των εφαρμογών υπό τον έλεγχο του CLR είναι ελαφρώς μικρότερη από την εκτέλεση σε C++

χωρίς αυτό, γενικά ο προγραμματισμός εφαρμογών απλοποιείται και επιταχύνεται σε μεγάλο βαθμό.

Ακόμη, η C++/CLI προσφέρεται για χρήση στη διεπαφή προγραμματισμού Windows Forms για την ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος εφαρμογών. Ειδικότερα, με το Windows Forms η ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος μπορεί να γίνει σε πολύ μικρό χρόνο, χωρίς να είναι απαραίτητη η συγγραφή κώδικα από τον χρήστη. Στην ουσία ο προγραμματιστής εκμεταλλεύομενος τις επιλογές που του δίνονται μπορεί να δημιουργήσει γραφικά το περιβάλλον της εφαρμογής του ενώ ο κώδικας θα παράγεται αυτόματα. Στην περίπτωση που συναντήσει περιορισμούς μπορεί χρησιμοποιώντας την C++/CLI να αποκτήσει πλήρη έλεγχο, να προσθέσει λειτουργίες και γενικά να επεκτείνει τον κώδικα σύμφωνα με τις προτιμήσεις του.



Εικόνα 7.1. Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio 2010.

### 7.1.2 Άνοιγμα επικοινωνίας με τον αντιστροφέα

Βασική απαίτηση στην ανάπτυξη της διεπαφής χρήστη ήταν η δημιουργία σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του τερματικού, έτσι ώστε η διεπαφή να αναλάβει τη θέση του συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα. Για τον λόγο αυτό, το λογισμικό με τη βοήθεια των συναρτήσεων που παρέχει το .NET Framework ανοίγει μια σειριακή θύρα μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να στείλει εντολές στον αντιστροφέα και να διαβάσει πληροφορίες. Ακόμη, μία δεύτερη σειριακή θύρα χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί ώστε να

μπορεί το λογισμικό να δίνει εντολή στο κύκλωμα ενεργοποίησης του αντιστροφέα να θέτει το σήμα “ENABLE” στα 5 Volt, όποτε αυτό χρειάζεται.

Με την προϋπόθεση ότι το τερματικό διαθέτει ελεύθερη σειριακή θύρα, όταν ζητηθεί από τον χρήστη το άνοιγμα της επικοινωνίας το λογισμικό ανοίγει τη θύρα επικοινωνίας με τον αντιστροφέα και η επικοινωνία καθίσταται δυνατή. Η σειριακή θύρα του τερματικού περιγράφεται από το πρωτόκολλο RS-232, ωστόσο μέσω ενός κατάλληλου μετατροπέα μετατρέπεται σε θύρα RS-485 και μέσω κατάλληλης καλωδίωσης συνδέεται με την υποδοχή της διεπαφής RS-485 πάνω στον αντιστροφέα. Γενικά, ο αντιστροφέας δέχεται εντολές στην κωδικοποιημένη μορφή ενός πίνακα bytes και δίνει την ανάλογη απάντηση επίσης σε μορφή πίνακα bytes. Η κωδικοποίηση αυτή καθορίζεται αναλυτικά από το πρωτόκολλο επικοινωνίας του αντιστροφέα το οποίο θα περιγραφεί παρακάτω ενώ τα πρωτόκολλα RS-232 και RS-485 περιγράφονται αναλυτικά σε σχετικό παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Επιπλέον, η διεπαφή μέσα από ένα πεδίο επιλογών παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίζει ο ίδιος τα στοιχεία της επικοινωνίας. Με βάση τις επιλογές του χρήστη προσδιορίζονται τα εξής στοιχεία:

- Port Name* : Κατά την εκκίνησή του, το λογισμικό της διεπαφής ανιχνεύει τις σειριακές θύρες που διαθέτει το τερματικό και διαμορφώνει μία λίστα με τα ονόματά τους, εκ των οποίων ο χρήστης επιλέγει αυτή που επιθυμεί.
- BaudRate* : Το BaudRate αποτελεί έναν τρόπο έκφρασης της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων. Για τον προσδιορισμό της τιμής του παρέχονται διάφορες επιλογές.
- Databits* : Το πλήθος των bits δεδομένων που περιλαμβάνονται σε κάθε μεταφερόμενη λέξη μπορεί να είναι από 5 ως 9.
- Stopbits* : Το πεδίο αυτό αναφέρεται στη χρονική διάρκεια των bits που σηματοδοτούν το τέλος κάθε λέξης, η οποία μπορεί να εκτείνεται σε 1, 1.5 ή 2 περιόδους διάρκειας 1 bit.
- Parity* : Στην περίπτωση χρήσης ισοτιμίας (parity) αυτή μπορεί να είναι άρτια (even), περιττή (odd), σημείου (mark) ή κενού (space), αν και εδώ δεν χρησιμοποιείται.
- Handshake* : Μέσω του πεδίου Handshake ο χρήστης επιλέγει αν θα υπάρχει έλεγχος ροής δεδομένων της επικοινωνίας. Στην περίπτωση που υπάρχει, προσδιορίζεται ο τύπος ελέγχου ροής που θα εφαρμοστεί, δηλαδή αν θα γίνεται με τη βοήθεια λογισμικού (XonXoff), με τη βοήθεια υλικού (RequestToSend) ή και των δύο (RequestToSendXonXoff).

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι οι επιλογές του χρήστη να ταυτίζονται με τις παραμέτρους επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στην άλλη άκρη της γραμμής, δηλαδή στη συγκεκριμένη

περίπτωση από τον αντιστροφέα, διότι διαφορετικά η επικοινωνία δεν μπορεί να διεξαχθεί. Βάσει των προδιαγραφών επικοινωνίας, η επικοινωνία με τον αντιστροφέα προϋποθέτει τη χρήση των επιλογών που φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

**Πίνακας 7.1.** Τιμές παραμέτρων επικοινωνίας για τη σειριακή μετάδοση δεδομένων μεταξύ της διεπαφής χρήστη και του αντιστροφέα.

BaudRate	Databits	Stopbits	Parity	Handshake
19200	8	1	None	RequestToSend

Ταυτόχρονα με την θύρα επικοινωνίας το πρόγραμμα ανοίγει και μία δεύτερη σειριακή θύρα, η οποία είναι υπεύθυνη για την αποστολή του σήματος “ENABLE”. Συγκεκριμένα, εκμεταλλευόμενοι τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND της σειριακής το τερματικό μπορεί να καθορίσει αν το κύκλωμα ενεργοποίησης του αντιστροφέα θα θέτει το σήμα στο λογικό 0 ή στο λογικό 1. Στη σειριακή αυτή θύρα οι τιμές των παραμέτρων επικοινωνίας δεν έχουν σημασία (εκτός από το γεγονός ότι δεν πρέπει να υπάρχει έλεγχος ροής δεδομένων) αφού ουσιαστικά από αυτή χρησιμοποιούνται μόνο οι ακροδέκτες RTS και GND και επαφίεται στο χρήστη να καθορίσει μόνο το Port Name της θύρας που θα χρησιμοποιηθεί.

### 7.1.3 Προδιαγραφές επικοινωνίας

Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού, προκειμένου αυτό να μπορεί να επικοινωνήσει με τον αντιστροφέα σωστά και ολοκληρωμένα, ήταν απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι προδιαγραφές τις επικοινωνίας όπως αυτές περιγράφονται από το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο από την εταιρία κατασκευής. Αυτές καθορίζουν τα εξής στοιχεία:

- τα χαρακτηριστικά της σειριακής επικοινωνίας
- τη μορφή των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων
- την κωδικοποίηση των ανταλλασσόμενων πληροφοριών

#### 7.1.3.1 Χαρακτηριστικά της σειριακής επικοινωνίας

Η επικοινωνία βασίζεται σε ένα σύστημα διευθυνσιοδότησης όπου ο αντιστροφέας έχει τον ρόλο του “σκλάβου” (slave). Το τερματικό, το οποίο έχει τον ρόλο του “αφέντη” (master), είναι υπεύθυνο για την έναρξη της επικοινωνίας στέλνοντας κάποια εντολή και, υπό την προϋπόθεση ότι απευθύνεται στη διεύθυνση του αντιστροφέα, αυτός την εκτελεί και στέλνει πίσω την ανάλογη απάντηση. Η πραγματοποίηση της επικοινωνίας γίνεται μέσω διεπαφής RS-485, αν και για λόγους συμβατότητας η σύνδεση με τη σειριακή θύρα του τερματικού γίνεται μέσω ενός μετατροπέα ο οποίος τη μετατρέπει σε RS-232. Στο

πρωτόκολλο ορίζονται επίσης το Baud Rate της επικοινωνίας, ο χρόνος απόκρισης του αντιστροφέα καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος ανάμεσα στην αποστολή δύο διαδοχικών εντολών από το τερματικό.

### 7.1.3.2 Μορφή ανταλλασσόμενων μηνυμάτων

Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ του αντιστροφέα και του τερματικού έχουν όλα την ίδια δομή και συνθέτονται από πληροφορίες κωδικοποιημένες σε δυαδική μορφή. Έτσι, κάθε μήνυμα αποτελεί ουσιαστικά έναν πίνακα από bytes, αρκετά μικρό σε μέγεθος ώστε να διευκολύνεται η ταχύτητα της επικοινωνίας, ο οποίος χωρίζεται στα επιμέρους πεδία που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

	STX	ENQ/ACK	ADDR	COM	DL	Data	CRC1	CRC2	ETX
Byte Number	1	2	3	4	5		6+DL	7+DL	8+DL
Description	Start Transmission	Header	Address Byte	Command Byte	Data Length	Data	CRC Low Byte	CRC High Byte	End Transmission

**Σχήμα 7.1.** Επιμέρους πεδία που συνθέτουν τον πίνακα bytes κάθε μηνύματος που ανταλλάσσεται μεταξύ του αντιστροφέα και του τερματικού.

Αναλυτικά, τα πεδία STX και ETX αντιστοιχούν στους ASCII χαρακτήρες ελέγχου (control characters) που σηματοδοτούν την αρχή και το τέλος του μηνύματος αντίστοιχα, ενώ το πεδίο ENQ/ACK καταλαμβάνεται είτε από τον ASCII χαρακτήρα ελέγχου ENQ όταν δίνεται εντολή προς τον αντιστροφέα είτε από τον χαρακτήρα ελέγχου ACK όταν αυτός στέλνει την απάντηση προς το τερματικό. Στο πεδίο ADDR αντιστοιχεί η διεύθυνση του “σκλάβου” με τον οποίο γίνεται η επικοινωνία η οποία στην παρούσα διάταξη είναι η διεύθυνση του αντιστροφέα.

Στη συνέχεια του μηνύματος, τα bytes που ακολουθούν έχουν πιο άμεση σχέση με την ίδια την πληροφορία και τις δράσεις που παίρνονται. Η εντολή η οποία στέλνεται ή στην οποία το μήνυμα αποτελεί απάντηση καθορίζεται από την τιμή του πεδίου COM. Σε κάποιες από τις εντολές ή στις απαντήσεις τους μεταφέρονται επίσης δεδομένα υπό τη μορφή κωδικοποιημένης πληροφορίας. Το μέγεθος των δεδομένων αυτών τοποθετείται στο πεδίο DL (Data Length), ενώ τα bytes των δεδομένων αντιστοιχούν στο πεδίο Data μετά το DL. Στην περίπτωση που ο αριθμός των bytes δεδομένων είναι μηδενικός, το DL θα έχει τιμή 0x00.

Τέλος, στα πεδία CRC1 και CRC2 υπολογίζεται το CRC (Cyclical Redundancy Checking). Το CRC αποτελεί μία μέθοδο για την ανίχνευση λαθών κατά τη μετάδοση του μηνύματος η οποία προσδίδει αξιοπιστία στην επικοινωνία και εφαρμόζεται ανεξαρτήτως χρήσης άλλης μεθόδου ελέγχου όπως το parity bit. Στην ουσία περιγράφεται από μια συνάρτηση η οποία εφαρμόζεται στα περιεχόμενά του μηνύματος αρχικά από τον αποστολέα και στη συνέχεια από τον παραλήπτη και μας βοηθάει να ελέγξουμε αν ο παραλήπτης έλαβε

το σωστό μήνυμα. Η τιμή της συνάρτησης είναι 16-bit και χωρίζεται σε δύο bytes, το CRC1 και το CRC2, τα οποία επισυνάπτονται στο τέλος του μηνύματος πριν το πεδίο ETX.

Η διαδικασία έχει ως εξής. Ο αποστολέας του μηνύματος εφαρμόζει τη συνάρτηση του CRC στα περιεχόμενα του μηνύματος αρχίζοντας από το πεδίο ENQ/ACK και τελειώνοντας στο τελευταίο byte δεδομένων. Όταν ο παραλήπτης λάβει το μήνυμα υπολογίζει το CRC που προκύπτει μεταξύ των πεδίων ENQ/ACK και CRC2. Στη συνέχεια ελέγχει αν το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι 0 και αν η απάντηση είναι θετική αποδέχεται το μήνυμα, διαφορετικά έχει συμβεί κάποιο λάθος κατά τη μετάδοση και το μήνυμα αγνοείται.

### 7.1.3.3 Κωδικοποίηση ανταλλασσόμενων πληροφοριών

Ο αντιστροφέας είναι προγραμματισμένος ώστε να μπορεί να λάβει 4 εντολές, κάθε μία εκ των οποίων είτε του ζητά να εκτελέσει κάποια συγκεκριμένη πράξη είτε του ζητά να στείλει στο λογισμικό πληροφορίες είτε και τα δύο. Έτσι, λαμβάνοντας κάποιο μήνυμα από το τερματικό αναγνωρίζει σε ποια εντολή αντιστοιχεί μέσω της τιμής του byte του πεδίου COM και στη συνέχεια προχωράει στην εκτέλεσή της. Αφού εκτελέσει αυτό που του ζητήθηκε στέλνει πίσω ένα μήνυμα απάντησης το οποίο μπορεί είτε να περιέχει πληροφορίες που αναμένονται είτε απλά να αποτελεί επιβεβαίωση ότι έλαβε την εντολή. Το λογισμικό αφού λάβει τις πληροφορίες, οι οποίες συνήθως αφορούν παραμέτρους της λειτουργίας του αντιστροφέα, τις αποκωδικοποιεί με τη βοήθεια πινάκων που ορίζονται από τις προδιαγραφές επικοινωνίας.

Οι δυνατές εντολές που μπορεί να λάβει ο αντιστροφέας είναι οι εξής:

- *Main Transfer/Receive*

Αποτελεί την βασική εντολή που χρησιμοποιείται και την εντολή γύρω από την οποία οικοδομήθηκε η ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου, αφού χάρη σε αυτή ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το DC ρεύμα το οποίο τραβάει ο αντιστροφέας από το κελί καυσίμου. Έχει δύο ορίσματα τα οποία αντιστοιχούν σε δύο bytes δεδομένων κατά τη σύνθεση του μηνύματος που στέλνεται στον αντιστροφέα, την επιθυμητή ένταση του DC ρεύματος εισόδου (Setpoint) και τη Reset/Debug Flag.

Ο αντιστροφέας λαμβάνοντας την εντολή αυτή μεταβάλλει το φορτίο το οποίο συνδέεται στην έξοδο του κελιού καυσίμου ώστε να τραβήξει το επιθυμητό ρεύμα, αποθηκεύει την τιμή της Reset/Debug Flag και στη συνέχεια στέλνει στο λογισμικό μέσω της απάντησής του δεδομένα που αφορούν τη λειτουργία του. Τα δεδομένα αυτά, τα οποία το λογισμικό αποκωδικοποιεί με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου επικοινωνίας, παρέχουν πληροφορίες για:

- *παραμέτρους λειτουργίας* του όπως την ένταση των ρευμάτων εισόδου/εξόδου, την παραγόμενη ισχύ κλπ.



- την **κατάστασή** του μέσω του Status Byte. Για παράδειγμα από εδώ ο αντιστροφέας πληροφορεί τον χρήστη αν λαμβάνει ή όχι το σήμα “ENABLE”.
- τυχόν **σφάλματα ή προβλήματα λειτουργίας** που έχουν εμφανιστεί μέσω των Error Bytes. Στην περίπτωση που κάποιο από τα 4 Error Bytes δεν είναι 0x00 αυτό φανερώνει την ύπαρξη κάποιου σφάλματος, το είδος του οποίου εξαρτάται από την τιμή που το Byte έχει λάβει. Για να ξαναπάρει την τιμή 0x00 πρέπει το πρόβλημα να επιλυθεί και να δοθεί στον αντιστροφέα Reset/Debug Flag ίση με 1.

- *Debug Data*

Στέλνοντας την εντολή Debug Data, ο αντιστροφέας θα συμπεριλάβει στην απάντησή του 4 bytes δεδομένων τα οποία φέρουν ειδικές πληροφορίες για την εσωτερική του λειτουργία. Το περιεχόμενο των πληροφοριών αυτών καθορίζεται από την τελευταία τιμή της Reset/Debug Flag που του έχει δοθεί και μπορεί να αφορά εσωτερική θερμοκρασία, εντάσεις ρευμάτων κλπ. Η εντολή αυτή είναι αρκετά χρήσιμη στην περίπτωση που υπάρχει κάποιο σφάλμα στη λειτουργία του αντιστροφέα το οποίο είναι δύσκολο να εντοπίσουμε.

- *Software Version Request*

Αφού λάβει την εντολή Software Version Request, ο αντιστροφέας απαντάει συμπεριλαμβάνοντας δύο bytes δεδομένων τα οποία αντιστοιχούν στην έκδοση του λογισμικού του.

- *Reset Inverter Counter*

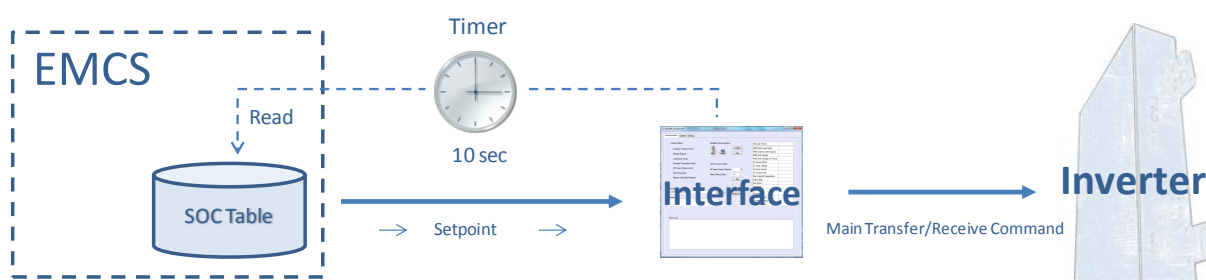
Η εντολή Reset Inverter Counter διατάζει τον αντιστροφέα να μηδενίσει τους δύο μετρητές του που αντιστοιχούν στο χρόνο λειτουργίας του από την εκκίνησή του καθώς και στη συνολική ενέργεια του ρεύματος που έχει μετατρέψει σε AC κατά την περίοδο αυτή. Η τρέχουσα τιμή των παραμέτρων αυτών φαίνεται στην απάντηση μετά από κάθε εντολή Main Transfer/Receive.

Τέλος, να αναφερθεί ότι ενδείξεις για την κατάσταση λειτουργίας του αντιστροφέα και ειδικότερα για την κατάσταση του DC-INPUT και του AC-OUTPUT ή για κάποια σφάλματα λειτουργίας που έχουν προκύψει λαμβάνονται και από τα leds που βρίσκονται στην επιφάνεια του αντιστροφέα, ανάλογα με το χρώμα τους και την ταχύτητα που αναβοσβήνουν.

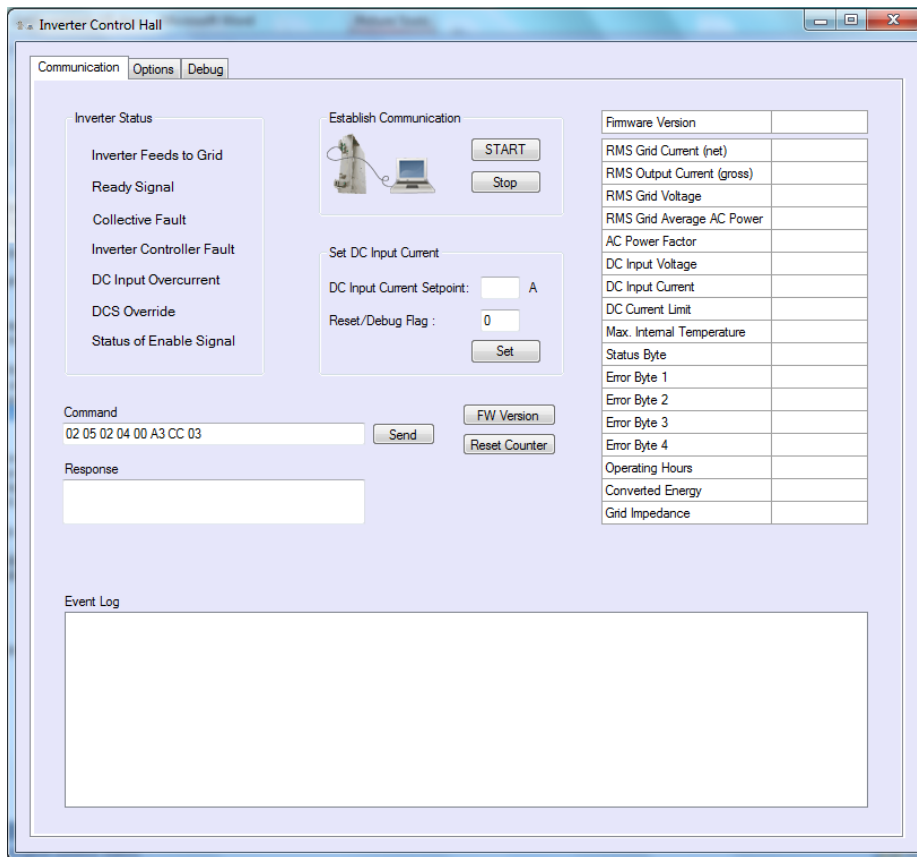
#### 7.1.4 Ξενάγηση στο περιβάλλον της διεπαφής χρήστη

Βασικό άξονα της ανάπτυξης της διεπαφής χρήστη αποτέλεσε να μπορεί ο χρήστης να εκμεταλλευτεί όλες τις δυνατότητες που παρέχονται από το συγκεκριμένο μοντέλο αντιστροφέα, όπως αυτές ορίζονται από τις προδιαγραφές επικοινωνίας. Για τον λόγο αυτό απαραίτητη ήταν επίσης η σχεδίαση ενός εύχρηστου και πλήρους γραφικού περιβάλλοντος το οποίο να μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για τον σκοπό αυτόν.

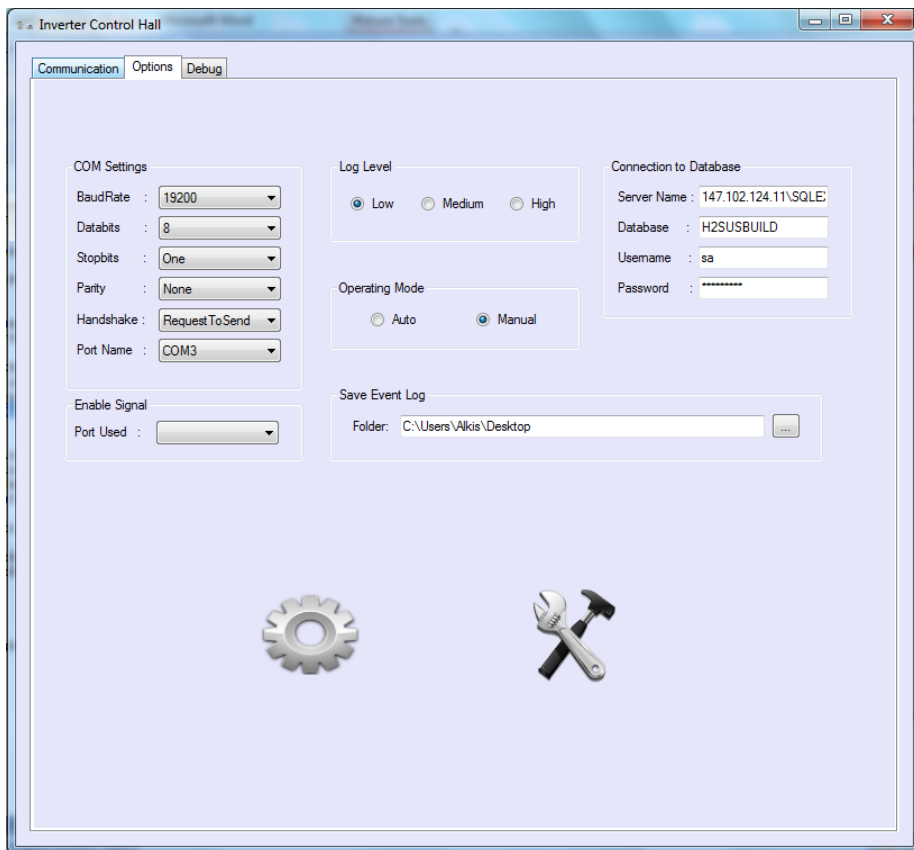
Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κτηρίου το λογισμικό της διεπαφής χρήστη είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα με αυτόματο τρόπο, σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου της παραγωγής ενέργειας που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4. Συνοπτικά, η λειτουργία αυτή γίνεται ως εξής. Το λογισμικό της διεπαφής συνδέεται με τη βάση δεδομένων του κεντρικού συστήματος και διαβάζει από τον αντίστοιχο πίνακα την επιθυμητή τιμή του ρεύματος εξόδου της κυψέλης καυσίμου Miga 6 σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις του χώρου του παταριού τη δεδομένη στιγμή, ή με άλλα λόγια το επιθυμητό σημείο λειτουργίας της κυψέλης. Στη συνέχεια στέλνει στον αντιστροφέα μια εντολή Main Transfer/Receive με την τιμή αυτή ως Setpoint καθορίζοντας έτσι το ρεύμα που θα τραβήξει ο αντιστροφέας από την κυψέλη καυσίμου και ενημερώνει με τα δεδομένα της απάντησης του αντιστροφέα τους πίνακες πληροφοριών (datagridviews) του παραθύρου της διεπαφής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ανά 10 δευτερόλεπτα, επιτρέποντας τη συνεχή παραγωγή ρεύματος ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του παταριού.



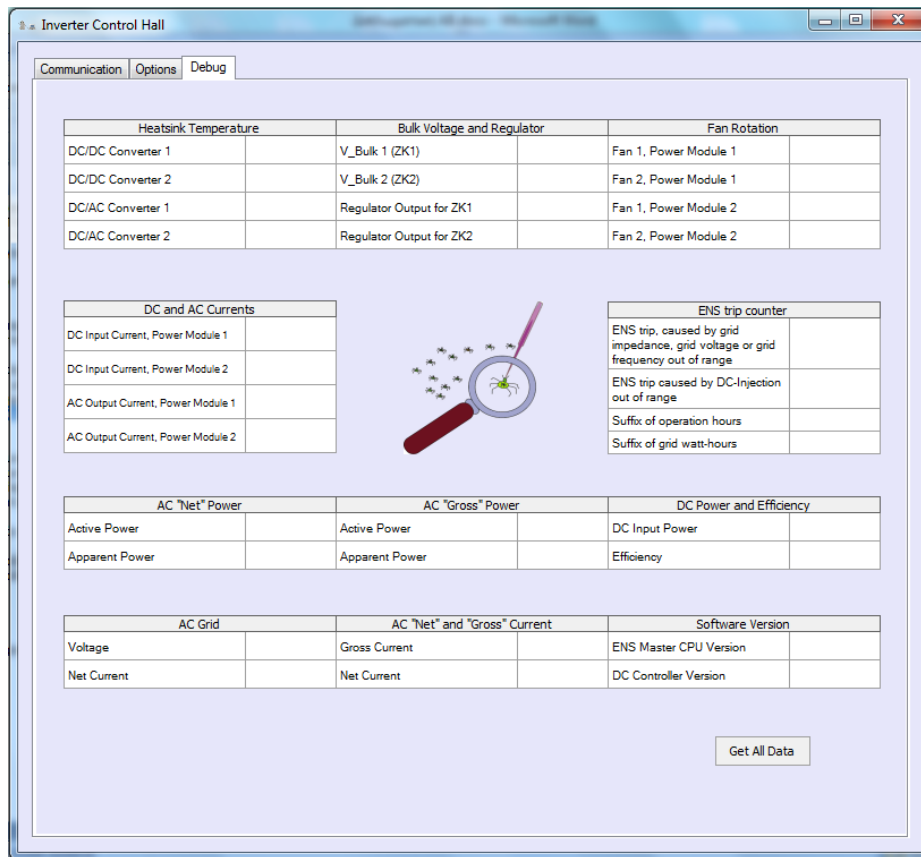
**Σχήμα 7.2.** Λειτουργία λογισμικού διεπαφής χρήστη για τον έλεγχο του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα με αυτόματο τρόπο.



Εικόνα 7.2. Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη *Inverter Control Hall*, κεντρική καρτέλα *Communication*.



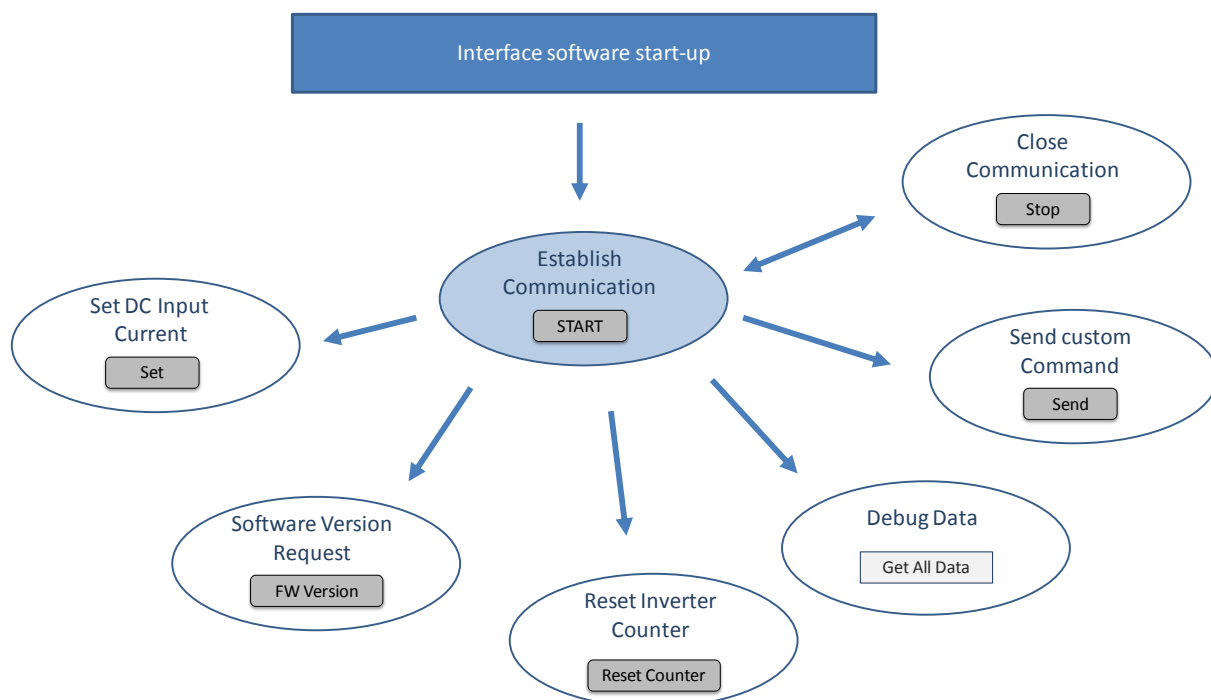
Εικόνα 7.3. Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη *Inverter Control Hall*, καρτέλα *Options*.



Εικόνα 7.4. Γραφικό περιβάλλον της διεπαφής χρήστη *Inverter Control Hall*, καρτέλα *Debug*.

Γενικά, απαραίτητη προϋπόθεση για τη διεξαγωγή οποιασδήποτε λειτουργίας του λογισμικού αποτελεί η δημιουργία επικοινωνίας με τον αντιστροφέα μέσω του κουμπιού *START* στο πεδίο *Establish Communication*. Εκτός από τη λειτουργία που περιγράφηκε παραπάνω, το λογισμικό προσφέρει στο χρήστη τις εξής δυνατότητες:

- να καθορίσει ο ίδιος το Setpoint που δίνεται στον αντιστροφέα μέσω του πεδίου *Set DC Input Current*.
- να ζητήσει από τον αντιστροφέα επιπλέον πληροφορίες μέσω του κουμπιού *Get All Data* στην καρτέλα *Debug*.
- να ζητήσει από τον αντιστροφέα τον αριθμό της έκδοσης του εσωτερικού λογισμικού λειτουργίας του μέσω του κουμπιού *FW Version*.
- να μηδενίσει τους εσωτερικούς μετρητές ενέργειας και χρόνου λειτουργίας που διαθέτει ο αντιστροφέας μέσω του κουμπιού *Reset Counter*.
- να συντάξει ο ίδιος και να στείλει την εντολή που θέλει (στη μορφή πίνακα bytes) μέσω του πεδίου αναγραφής κάθε εντολής και του κουμπιού *Send*.

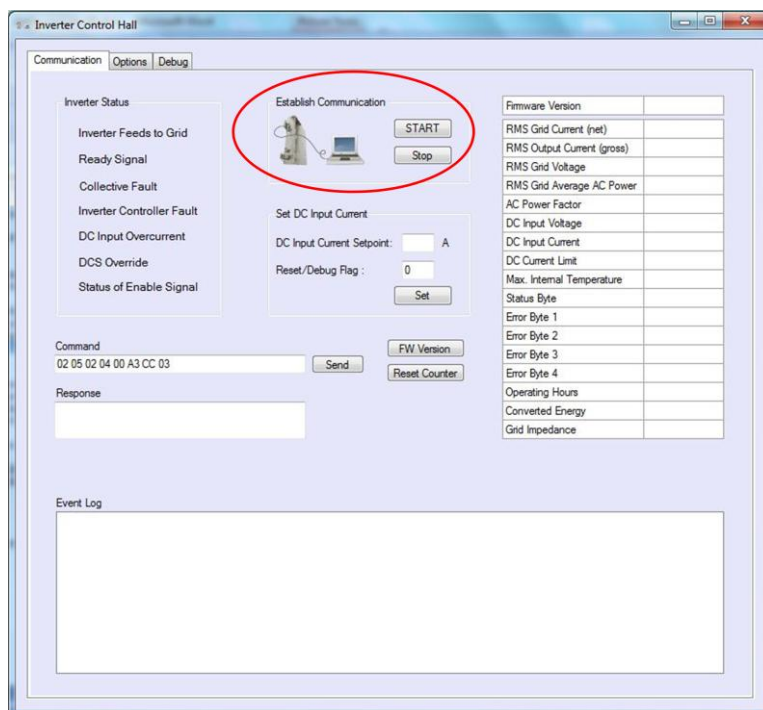


**Σχήμα 7.3.** Δυνατότητες χρήστη που προσφέρονται στο γραφικό περιβάλλον της διεπαφής.

Κατά τη λειτουργία της διεπαφής είναι απαραίτητο ο χρήστης να προσδιορίσει πρώτα συγκεκριμένες παραμέτρους ώστε να μπορέσει το λογισμικό να προχωρήσει στη διεξαγωγή των παραπάνω λειτουργιών. Η επιλογή των χαρακτηριστικών που επιθυμεί γίνεται από τα κατάλληλα πεδία της καρτέλας *Options* (Εικόνα 7.3). Ωστόσο, με την έξοδο από τη διεπαφή το λογισμικό σώζει τις επιλογές του χρήστη στη registry του λειτουργικού συστήματος και τις ανακτά με την εκκίνησή του, έτσι ώστε να μη χρειάζεται να συμπληρώνονται κάθε φορά.

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή των παραπάνω δυνατοτήτων και λειτουργιών, καθώς και των κύριων στοιχείων που συνθέτουν το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού της διεπαφής. Τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής των λειτουργιών που περιγράφονται παρατίθενται στην παράγραφο 7.1.4.7.

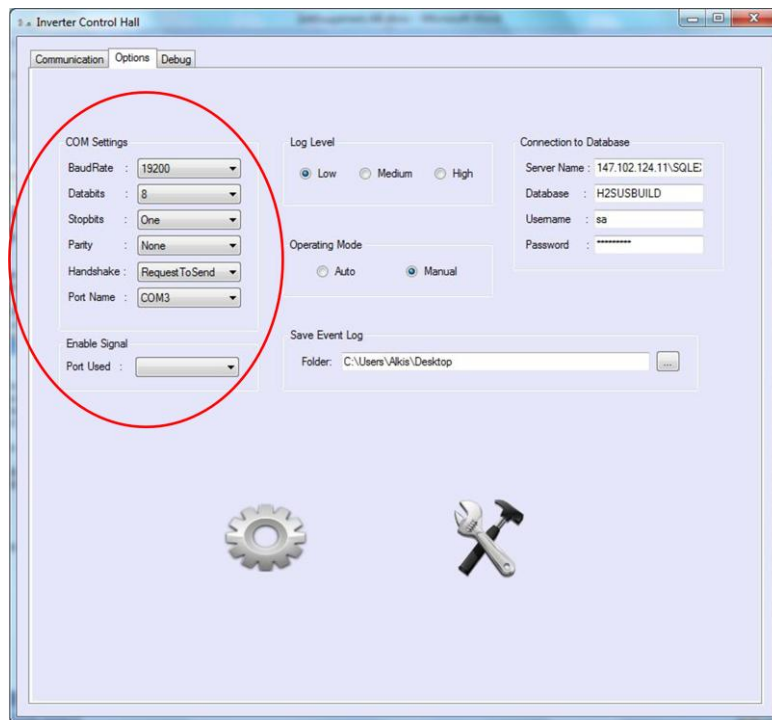
### 7.1.4.1 Establish Communication



**Εικόνα 7.5.** Πεδίο *Establish Communication*, όπου παρέχεται η δυνατότητα έναρξης και λήξης της επικοινωνίας με τον αντιστροφέα.

Το πεδίο *Establish Communication* είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία επικοινωνίας με τον αντιστροφέα. Όπως έχει ειπωθεί, η επικοινωνία του λογισμικού της διεπαφής με τον αντιστροφέα διεξάγεται με τη βοήθεια δύο σειριακών θυρών, εκ των οποίων η μία είναι υπεύθυνη για την αποστολή εντολών και τη λήψη των απαντήσεων (*Inverter Port*) ενώ η άλλη είναι υπεύθυνη για την αποστολή του σήματος “ENABLE” (*Enable Signal Port*). Το άνοιγμα των θυρών αυτών είναι απαραίτητο για την οποιαδήποτε χρήση των δυνατοτήτων που προσφέρει το λογισμικό και επιτυγχάνεται με το πάτημα του κουμπιού *START*. Από την άλλη, στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να διακόψει την επικοινωνία, αρκεί το πάτημα του κουμπιού *STOP*.

Προτού ο χρήστης πατήσει το κουμπί *START* για να ενεργοποιήσει την επικοινωνία πρέπει πρώτα να έχει συμπληρώσει τις επιλογές με τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας που επιθυμεί στην καρτέλα *Options*. Συγκεκριμένα, στην καρτέλα *Options* υπάρχουν δύο πεδία, το πεδίο *COM Settings* και το πεδίο *Enable Signal*. Στο πρώτο πεδίο ο χρήστης επιλέγει για την *Inverter Port* ποια θύρα του υπολογιστή θα χρησιμοποιηθεί (*Port Name*), το *Baud Rate*, τον αριθμό των *Data Bits*, τον αριθμό *Stopbits* καθώς και αν θα χρησιμοποιηθούν μέθοδοι *ισοτιμίας* και *χειραψίας* και ποιας μορφής θα είναι αυτές. Στο δεύτερο πεδίο ο χρήστης επιλέγει ποια θύρα θα χρησιμοποιηθεί για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του σήματος “ENABLE”. Οι επιλογές αυτές είναι απαραίτητο να είναι συμπληρωμένες ώστε το λογισμικό να προχωρήσει στο άνοιγμα των θυρών.

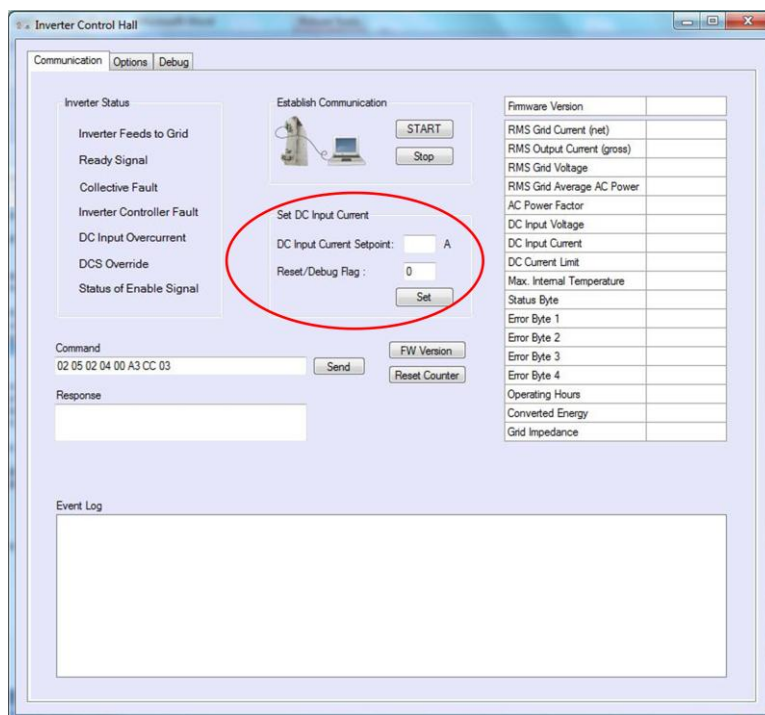


**Εικόνα 7.6.** Πεδία *COM Settings* και *Enable Signal*, όπου ο χρήστης προσδιορίζει τις τιμές των παραμέτρων της σειριακής επικοινωνίας.

Μόλις ο χρήστης πατήσει το κουμπί **START** εκτελούνται οι εξής ενέργειες. Αρχικά, το λογισμικό ελέγχει αν τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας είναι συμπληρωμένα και έγκυρα. Εάν όλα είναι σωστά, το λογισμικό ανοίγει τη θύρα **Inverter Port** δίνοντάς της τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια στέλνει στον αντιστροφέα μια εντολή **Software Version Request** ώστε καταρχάς να ενημερωθεί ο χρήστης για την έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιεί ο αντιστροφέας και το κυριότερο για να επιβεβαιώσει ότι δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα στην επικοινωνία με τον αντιστροφέα. Αφού ληφθεί η απάντηση από τον αντιστροφέα, το λογισμικό ελέγχει αν η επιλογή του ονόματος της δεύτερης θύρας είναι έγκυρη και προχωρά στο άνοιγμά της. Τέλος, θέτει στο λογικό 1 το σήμα “**ENABLE**” και ο χρήστης μπορεί πλέον να στείλει στον αντιστροφέα όποια εντολή επιθυμεί.

Στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να διακόψει την επικοινωνία με τον αντιστροφέα, τότε αρκεί να πατήσει το κουμπί **Stop**. Με το πάτημα του κουμπιού αυτού οι δύο σειριακές θύρες κλείνουν και ο χρήστης παύει να ενημερώνεται για την κατάσταση του αντιστροφέα και γενικά του συστήματος μετατροπής ενέργειας.

### 7.1.4.2 Set DC Input Current



**Εικόνα 7.7.** Πεδίο *Set DC Input Current*, όπου παρέχεται η δυνατότητα χειροκίνητης αποστολής στον αντιστροφέα της επιθυμητής τιμής του DC ρεύματος εισόδου (Setpoint) καθώς και της επιθυμητής Reset/Debug Flag.

Το πεδίο *Set DC Input Current* είναι αυτό που ασχολείται με την κύρια λειτουργία της διεπαφής, δηλαδή είναι υπεύθυνο για την αποστολή της εντολής *Main Transfer/Receive* προς τον αντιστροφέα. Περιλαμβάνει ένα πεδίο όπου ο χρήστης εισάγει την επιθυμητή τιμή του ρεύματος που θα τραβήξει ο αντιστροφέας από την κυψέλη καυσίμου (Setpoint) καθώς και ένα πεδίο όπου ο χρήστης εισάγει την επιθυμητή Reset/Debug Flag. Η εντολή αποστέλλεται στον αντιστροφέα με το πάτημα του κουμπιού *Set* και στη συνέχεια λαμβάνεται πίσω η απάντησή του με πληροφορίες που αφορούν τη λειτουργία του.

Με το πάτημα του κουμπιού *Set*, το λογισμικό δημιουργεί έναν πίνακα bytes ο οποίος αποτελεί την κωδικοποίηση της εντολής στη μορφή που θα μπορέσει να αντιληφθεί ο αντιστροφέας, όπως ορίζεται από το πρωτόκολλο επικοινωνίας. Στον πίνακα αυτόν συμπεριλαμβάνονται η τιμή του Setpoint που έχει συμπληρώσει ο χρήστης στο αντίστοιχο πεδίο καθώς και η τιμή της Reset/Debug Flag. Επίσης, το λογισμικό υπολογίζει τα δύο bytes του CRC και τα προσθέτει στο τέλος του πίνακα, πριν από το πεδίο ETX. Στη συνέχεια αποθηκεύει τις τιμές του Setpoint και της Reset/Debug Flag ώστε να ξέρει ποιες ήταν οι τελευταίες τιμές που δόθηκαν και στη συνέχεια προχωράει στην αποστολή της εντολής.

Αμέσως μετά την αποστολή της εντολής, ο αντιστροφέας αποθηκεύει τις τιμές που του δόθηκαν και στέλνει πίσω την απάντησή του, επίσης στην κωδικοποιημένη μορφή ενός πίνακα από bytes. Η απάντηση περιέχει 21 bytes δεδομένων κάθε ένα εκ των οποίων αντιπροσωπεύει κάποια πληροφορία σχετική με τη λειτουργία του αντιστροφέα (Πίνακας



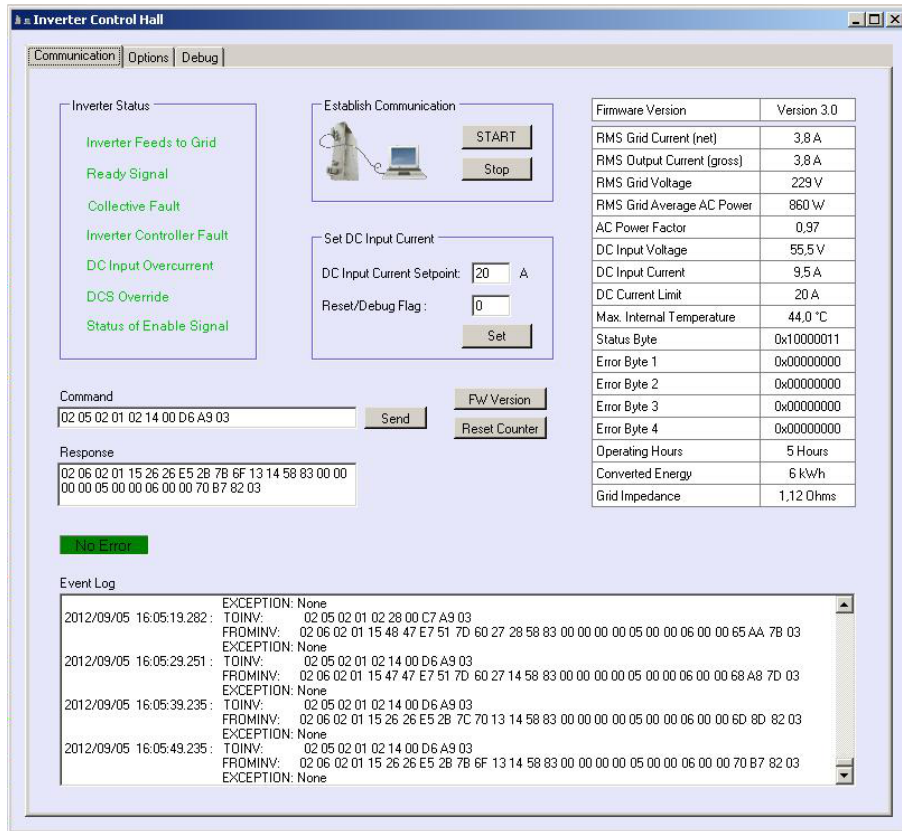
7.2). Ανάλογα με τις ληφθείσες τιμές το λογισμικό τις αποκωδικοποιεί και συμπληρώνει τον αντίστοιχο πίνακα πληροφοριών στην κεντρική ταμπέλα του προγράμματος, μέσω του οποίου ο χειριστής μπορεί ανά πάσα στιγμή να ενημερωθεί για τη λειτουργία του αντιστροφέα.

**Πίνακας 7.2.** Πληροφορίες που λαμβάνονται από την απάντηση του αντιστροφέα (πίνακας bytes) μετά από την αποστολή εντολής *Main Transfer/Receive*.

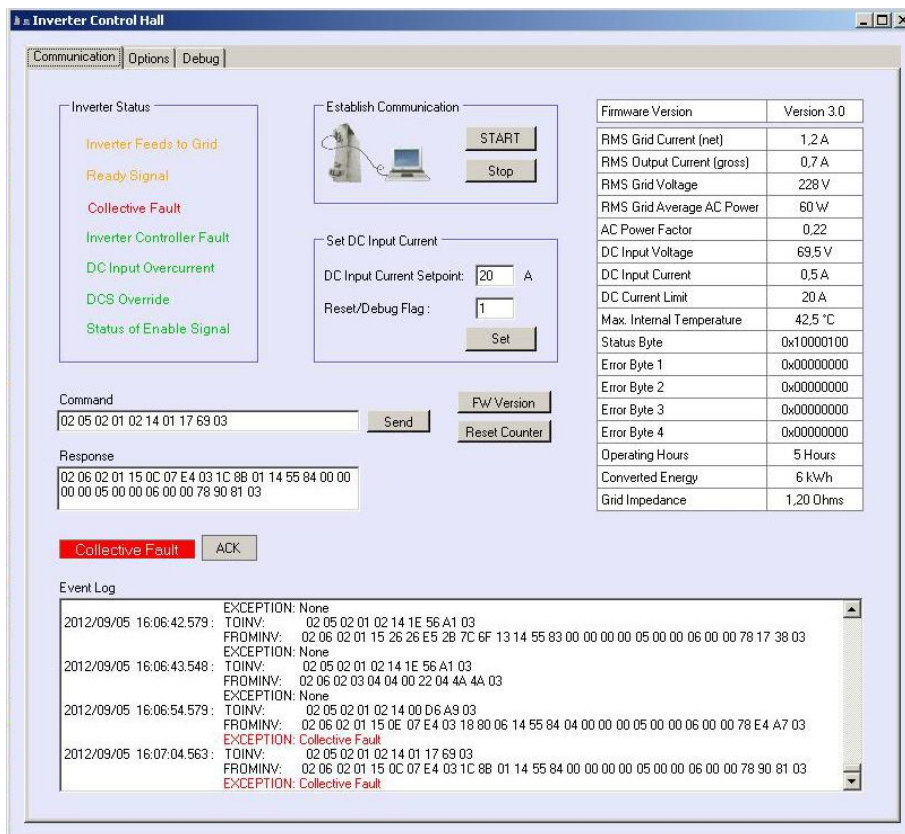
Item	Data	Size (bytes)	Units
1	RMS Inverter Output Current (net)	1	Amps
2	RMS Inverter Output Current (gross)	1	Amps
3	RMS Output Voltage	1	Volts
4	Average AC Power	1	W
5	AC Power Factor	1	
6	DC Input Voltage	1	Volts
7	DC Input Current	1	Amps
8	DC Current Setpoint	1	Amps
9	Maximum Internal Temperature	1	°C
10	Status Byte	1	NA
11	Error Bytes	4	NA
12	Operating Hours	3	Hours
13	Converted Energy	3	kW-hr
14	Grid Impedance	1	Ohms
	Total Bytes	21	

Στις πληροφορίες που απαρτίζουν την απάντηση του αντιστροφέα περιλαμβάνονται και πέντε bytes που αφορούν τον έλεγχο της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, το *Status Byte* και τα τέσσερα *Error Bytes*. Το *Status Byte* ενημερώνει τον χειριστή σχετικά με την κατάσταση του αντιστροφέα. Ανάλογα με την τιμή κάθε bit το λογισμικό αντιλαμβάνεται κάποια διαφορετική πληροφορία, όπως για παράδειγμα αν το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1, αν το dc ρεύμα εισόδου είναι μέσα στα προβλεπόμενα όρια, αν έχει εμφανιστεί κάποιο σφάλμα λειτουργίας κ.α. Οι πληροφορίες αυτές αποτυπώνονται στην οθόνη στο πεδίο *Inverter Status* μέσω κατάλληλου χρωματισμού του κάθε στοιχείου (Εικόνες 7.8 και 7.9), ενώ περαιτέρω ενημέρωση λαμβάνεται μέσω tooltips.

Από την άλλη, τα 4 *Error Bytes* είναι υπεύθυνα να ενημερώσουν τον χρήστη για ένα μεγάλο εύρος πιο εξειδικευμένων σφαλμάτων λειτουργίας που μπορεί να παρουσιαστούν. Η ενημέρωση γίνεται μέσω της ‘ετικέτας σφαλμάτων’ η οποία στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος αναβοσβήνει με κόκκινο χρώμα ενημερώνοντας για το σφάλμα που έχει προκύψει (Εικόνα 7.9). Παράλληλα, εμφανίζεται δίπλα από την ετικέτα το κουμπί *Ack* (acknowledge) με του οποίου το πάτημα η ετικέτα εξαφανίζεται και στέλνεται στον αντιστροφέα εντολή επανεκκίνησης.



Εικόνα 7.8. Παραγωγή ρεύματος 20 A από την κυβέλη καυσίμου με τη βοήθεια του πεδίου Set DC Input Current. Το πράσινο χρώμα υποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 7.9. Εμφάνιση σφάλματος κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η ετικέτα σφαλμάτων αναβοσβήνει με κόκκινο χρώμα, ενημερώνοντας για το σφάλμα που προέκυψε.

### 7.1.4.3 Άλλες δυνατές εντολές

Εκτός από την εντολή Main Transfer/Receive η διεπαφή δίνει στο χειριστή τη δυνατότητα να στείλει στον αντιστροφέα τις εξής εντολές:

#### Debug Data

Η εντολή *Debug Data* χρησιμοποιείται ώστε να λάβει ο χειριστής επιπλέον πληροφορίες από αυτές που περιλαμβάνονται στην απάντηση της εντολής Main Transfer/Receive, οι οποίες είναι πιθανό να χρησιμεύσουν στην περίπτωση που έχει παρουσιαστεί ένα δύσκολο εντοπίσιμο σφάλμα λειτουργίας. Η λήψη της επιθυμητής πληροφορίας προϋποθέτει την αποστολή μιας εντολής Main Transfer/Receive με την Debug Flag που αντιστοιχεί στην πληροφορία αυτή. Για λόγους ευχρηστίας και απλότητας, το λογισμικό αντί να απαιτεί από τον χειριστή την αποστολή της κατάλληλης εντολής Main Transfer/Receive πριν από την αποστολή της εντολής Debug Data παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης λήψης όλων των δυνατών πληροφοριών, αρκούμενο απλά στο πάτημα του κουμπιού Get All Data.

Heatsink Temperature		Bulk voltage and Regulator		Fan Rotation	
DC/DC Converter 1	36,5 °C	V_Bulk 1 (ZK1)	100,0 V	Fan 1, Power Module 1	94 Hz
DC/DC Converter 2	36,5 °C	V_Bulk 2 (ZK2)	99,5 V	Fan 2, Power Module 1	92 Hz
DC/AC Converter 1	44,0 °C	Regulator Output for ZK1	93	Fan 1, Power Module 2	94 Hz
DC/AC Converter 2	40,5 °C	Regulator Output for ZK2	95	Fan 2, Power Module 2	93 Hz

DC and AC Currents		ENS trip counter	
DC Input Current, Power Module 1	19,0 A	ENS trip, caused by grid impedance, grid voltage or grid frequency out of range	0x04
DC Input Current, Power Module 2	19,0 A	ENS trip caused by DC-injection out of range	0x00
AC Output Current, Power Module 1	3,4 A	Suffix of operation hours	31 min
AC Output Current, Power Module 2	3,6 A	Suffix of grid watt-hours	0,99 kWh

AC "Net" Power		AC "Gross" Power		DC Power and Efficiency	
Active Power	1636 W	Active Power	1591 W	DC Input Power	1844 W
Apparent Power	1651 W	Apparent Power	1647 W	Efficiency	0,861 %

AC Grid		AC "Net" and "Gross" Current		Software Version	
Voltage	230,6 V	Gross Current	7,13 A	ENS Master CPU Version	768
Net Current	7,15 A	Net Current	7,14 A	DC Controller Version	5120

Get All Data

Εικόνα 7.10. Παράδειγμα λήψης πληροφοριών πατώντας στην καρτέλα *Debug* το κουμπί *Get All Data*.

Το κουμπί *Get All Data* βρίσκεται στην καρτέλα Debug και με το πάτημά του αποστέλλονται διαδοχικά στον αντιστροφέα με αυτόματο τρόπο όλες οι δυνατές Debug Flags σε συνδυασμό με το τελευταία χρησιμοποιούμενο Setpoint ακολουθούμενες από εντολή Debug Data και ενημερώνει διαδοχικά/σιγά σιγά όλους τους παρευρισκόμενους πίνακες πληροφοριών (Εικόνα 7.10). Στην ουσία δηλαδή το λογισμικό στέλνει διαδοχικά για κάθε δυνατή Debug Flag όλα τα δυνατά ζεύγη Main Transfer/Receive - Debug Data. Μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας το λογισμικό δεν επιτρέπει στο χρήστη να στείλει εντολή προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν θα παρουσιαστεί κάποιο σφάλμα. Αφού ενημερωθούν όλοι οι πίνακες πληροφοριών ο χρήστης μπορεί πλέον να ελέγξει αν κάποια παράμετρος λειτουργίας είναι μη φυσιολογική ώστε να εντοπίσει την αιτία του σφάλματος.

### **Software Version Request**

Με την εντολή αυτή ζητείται από τον αντιστροφέα ο αριθμός της έκδοσης του εσωτερικού λογισμικού λειτουργίας του. Όπως αναφέρθηκε η εντολή στέλνεται αυτόματα με την έναρξη της επικοινωνίας, δηλαδή με το πάτημα του κουμπιού START, αλλά επίσης μπορεί να εκτελεστεί οποιαδήποτε στιγμή με το πάτημα του κουμπιού *FW Version*. Αποτελεί τον απλούστερο τρόπο ελέγχου αν η επικοινωνία με τον αντιστροφέα διεξάγεται σωστά.

### **Reset Inverter Counter**

Η εντολή αυτή εκτελείται με το πάτημα του κουμπιού *Reset Counter* και μηδενίζει τους μετρητές που διαθέτει ο αντιστροφέας για τη μέτρηση του χρόνου λειτουργίας του και τη συνολική ενέργεια του ρεύματος που έχει μετατρέψει σε εναλλασσόμενο από την εκκίνησή του. Η τρέχουσες τιμές των μεγεθών αυτών φαίνονται στα κελιά *Operating Hours* και *Total Energy Converted* στον πίνακα πληροφοριών που διαθέτει τις τιμές των παραμέτρων λειτουργίας και ενημερώνονται από την απάντηση του αντιστροφέα μετά από κάθε εντολή Main Transfer/Receive.

#### **7.1.4.4 Σύνδεση με βάση δεδομένων – Αυτόματη και χειροκίνητη λειτουργία**

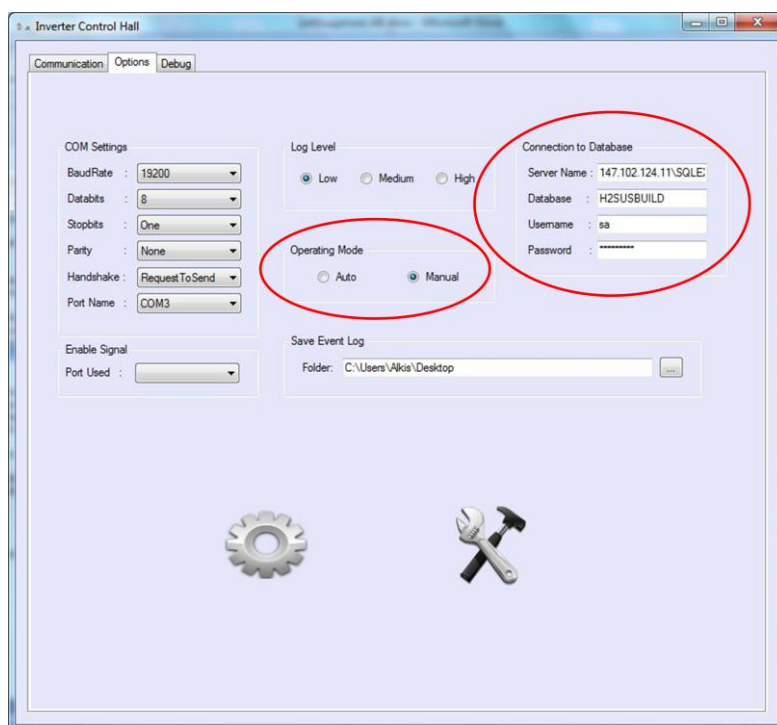
Κατά τη λειτουργία του κτηρίου, το κεντρικό σύστημα λαμβάνει κάθε στιγμή μέσω μετρητών τις τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών που αφορούν τη λειτουργία του και τις καταγράφει σε μια βάση δεδομένων. Από τις μετρήσεις που καταγράφονται ιδιαίτερα σημαντική είναι η τιμή του ισοζυγίου παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας, η οποία ανάλογα με το πρόσημό της δείχνει αν το κτήριο έχει περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας και επομένως αν η κυψέλη καυσίμου πρέπει να τεθεί σε λειτουργία ή όχι και πόσο ρεύμα να παράγει. Έτσι, η τιμή αυτή καθορίζει στην ουσία το επιθυμητό Setpoint που θα δοθεί στην

κυψέλη καυσίμου, το οποίο υπολογίζεται από το κεντρικό σύστημα ανά 1 λεπτό και καταγράφεται σε ξεχωριστό πίνακα της βάσης.

Προκειμένου να επιτευχθεί η αυτοματοποίηση και ο έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, η διεπαφή παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής αυτόματης λειτουργίας (*Auto*) όπου η τιμή του Setpoint λαμβάνεται περιοδικά από τη βάση δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, το λογισμικό ανά 10 δευτερόλεπτα συνδέεται με τη βάση δεδομένων, διαβάζει την υποδειχθείσα τιμή του Setpoint και στέλνει στον αντιστροφέα εντολή Main Transfer/Receive δίνοντας την τιμή αυτή. Ως Reset/Debug Flag δίνεται η αντίστοιχη τιμή που δόθηκε τελευταία φορά. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχει συμπληρώσει ο χρήστης με έγκυρο τρόπο το πεδίο Connection to Database στην καρτέλα Options.

Αντίθετα, στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας (*Manual*) τόσο η τιμή της Reset/Debug Flag όσο και του Setpoint που δίνονται ανά 10 δευτερόλεπτα αντιστοιχούν στις τιμές που τελευταία φορά δόθηκαν. Έτσι, η εντολή παραγωγής ρεύματος αλλάζει μόνο κατ'επιλογή του χρήστη.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που προκύψει κάποιο πρόβλημα κατά τη σύνδεση του λογισμικού με τη βάση δεδομένων τότε ο τρόπος λειτουργίας μεταπίπτει αυτόματα στη χειροκίνητη επιλογή. Η επιλογή αυτόματης ή χειροκίνητης λειτουργίας γίνεται στο πεδίο *Operating Mode* στην καρτέλα Options.



**Εικόνα 7.11.** Πεδία *Connection to Database* και *Operating Mode* στην καρτέλα *Options*.

#### 7.1.4.5 Χρονοδιακόπτης επικοινωνίας

Ένα χαρακτηριστικό του αντιστροφέα DHF-1AC-5000W είναι ότι στην περίπτωση που δεν δεχτεί κάποια εντολή για 15 δευτερόλεπτα αποσυνδέει την υποδοχή του από την έξοδο της κυψέλης καυσίμου και η παραγωγή ρεύματος διακόπτεται. Για τον λόγο αυτόν, το λογισμικό περιλαμβάνει έναν χρονοδιακόπτη επικοινωνίας (*Communication Timer*) ο οποίος σε κάθε χτύπο του διατάσσει την αποστολή εντολής στον αντιστροφέα, έτσι ώστε η παραγωγή ρεύματος να διατηρείται συνεχής.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση χειροκίνητης λειτουργίας με την έναρξη της επικοινωνίας το λογισμικό στέλνει στον αντιστροφέα κάθε 10 δευτερόλεπτα μια εντολή *Software Version Request*, ο ρόλος της οποίας είναι να αποτρέπει την αποσύνδεση του αντιστροφέα από την έξοδο της κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, αφού δοθεί στον αντιστροφέα το πρώτο *Setpoint* και ξεκινήσει η παραγωγή ρεύματος, η εντολή *Software Version Request* αντικαθίσταται από εντολή *Main Transfer/Receive*, με τιμές *Setpoint* και *Reset/Debug Flag* τις αντίστοιχες τιμές που δόθηκαν τελευταία φορά στον αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο η παραγωγή ρεύματος διατηρείται, ενώ επίσης υπάρχει διαρκής ενημέρωση σχετικά με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από την απάντηση του αντιστροφέα. Στην περίπτωση αυτόματης λειτουργίας η διαφορά είναι ότι σε κάθε χτύπο του χρονοδιακόπτη το λογισμικό συνδέεται με τη βάση δεδομένων και λαμβάνει από εκεί την τιμή του *Setpoint*. Η αποστολή εντολών *Software Version Request* στην αρχή είναι περιττή καθώς η παραγωγή ενέργειας ξεκινάει κατευθείαν.

Τέλος, στην περίπτωση που ο χρήστης πατήσει το κουμπί *Get All Data* της καρτέλας *Debug*, η παραπάνω λειτουργία του χρονοδιακόπτη διακόπτεται και ο χρονοδιακόπτης χρησιμοποιείται από το λογισμικό για την αποστολή των απαραίτητων εντολών *Main Transfer/Receive* και *Debug Data*. Μόλις η διαδικασία τελειώσει ο χρονοδιακόπτης ενανέργεται στην κανονική του λειτουργία.

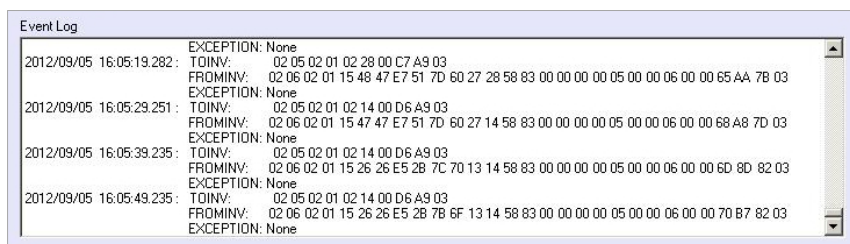
#### 7.1.4.6 Αρχείο Καταγραφών (Event Log)

Το λογισμικό διαθέτει για την καταγραφή γεγονότων το αρχείο καταγραφών (*event log*), υλοποιημένο με τη χρήση ενός *listbox* στο κάτω μέρος του παραθύρου της διεπαφής. Στο αρχείο καταγραφών εγγράφονται όλα τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα από την έναρξη του προγράμματος, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να ενημερωθεί ανά πάσα στιγμή για το ιστορικό της επικοινωνίας με τον αντιστροφέα όπως για παράδειγμα για τις τιμές *Setpoint* που έχουν δοθεί και για την ώρα αποστολής τους. Κάθε γεγονός καταχωρείται με τη μορφή μηνύματος προς τον χρήστη όπου το πρώτο μέρος του μηνύματος είναι η ημερομηνία και η ώρα καταγραφής. Τα γεγονότα που καταγράφονται και τα μηνύματα που τα συνοδεύουν διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:



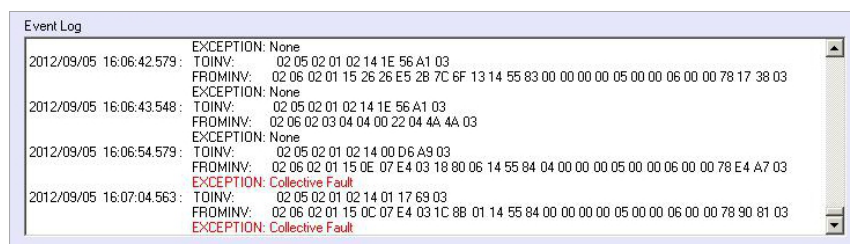
- Αποσταλθείσες εντολές ή ληφθείσες απαντήσεις

Όταν αποστέλλεται στον αντιστροφέα μια εντολή εμφανίζεται στο αρχείο καταγραφών μήνυμα τριών σειρών το οποίο περιλαμβάνει τον πίνακα bytes της εντολής, τον πίνακα bytes της απάντησης και μήνυμα αν έχει παρουσιαστεί exception ή όχι και ποιο είναι αυτό. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αποστολής εντολής Main Transfer/Receive με Setpoint = 20 A και Reset/Debug Flag = 1 η καταγραφή έχει την ακόλουθη μορφή:



Εικόνα 7.12. Παράδειγμα καταγραφής αποστολής εντολής Main Transfer/Receive.

Αν από την άλλη υπάρχει κάποιο σφάλμα και παρουσιαστεί κάποιο exception, αυτό εμφανίζεται με κόκκινα γράμματα όπως παρακάτω:



Εικόνα 7.13. Παράδειγμα καταγραφής αποστολής εντολής Main Transfer/Receive, με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος.

- Σφάλματα, exceptions και λανθασμένες ενεργειες χρήστη

Τα μηνύματα αυτά εμφανίζονται στο αρχείο καταγραφών για να υποδείξουν στο χρήστη γενικώς ότι κάτι δεν έχει γίνει σωστά. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει κάποιο σφάλμα στη διασύνδεση του τερματικού με τον αντιστροφέα, αν ο χρήστης στείλει κάποια εντολή εμφανίζεται Timeout Exception και επομένως καταλαβαίνει ότι πρέπει να ελέγξει αν το καλώδιο διασύνδεσης είναι εφαρμοσμένο σωστά. Άλλες περιπτώσεις εμφάνισης μηνύματος σφάλματος μπορεί να προκύψουν όταν παρουσιαστεί πρόβλημα κατά τη σύνδεση με τη βάση δεδομένων ή όταν ο χρήστης δεν έχει ορίσει τον φάκελο καταγραφών. Ακόμη, κατά τη λειτουργία του λογισμικού μπορεί να εμφανιστούν πολλών ειδών exceptions, όπως στις περιπτώσεις αδυναμίας ανοίγματος θύρας επικοινωνίας ή αδυναμίας εγγραφής στη Registry λόγω περιορισμένης πρόσβασης σε αυτές. Τέλος, τα μηνύματα σφάλματος μπορεί να αναφέρονται και σε ενέργειες του χρήστη οι οποίες δεν είναι επιτρεπτές όπως η αποστολή κάποιας εντολής χωρίς να έχει ανοιχτεί πρώτα η θύρα επικοινωνίας, η αποστολή

λανθασμένων τιμών Setpoint και Reset Flag ή η αποστολή κάποιας εντολής με το κουμπί Send της οποίας όμως η μορφή είναι λανθασμένη.

- *Ενέργειες χρήστη*

Ενέργειες του χρήστη όπως το άνοιγμα και το κλείσιμο της θύρας επικοινωνίας καθώς και η έναρξη και η λήξη της διαδικασίας λήψης δεδομένων μέσω του κουμπιού Get All Data επίσης καταχωρούνται στο αρχείο καταγραφών διευκολύνοντας τη μελέτη του ιστορικού της επικοινωνίας.

### **Αντιγραφή σε txt αρχείο**

Προκειμένου οι καταχωρήσεις να μη χαθούν με την έξοδο από το πρόγραμμα και για να είναι άμεσα προσβάσιμες και εύκολα αναγνώσιμες ασχέτως του χρόνου καταγραφής, ταυτόχρονα με το αρχείο καταγραφών εγγράφονται και σε ένα txt αρχείο με όνομα “eventLog yyyy-mm-dd” όπου yyyy-mm-dd είναι η ημερομηνία καταγραφής. Η τρέχουσα ημερομηνία συνιστά το μεταβλητό μέρος του τίτλου του αρχείου οπότε με την αλλαγή της οι επόμενες καταχωρήσεις θα εγγραφούν σε καινούριο αρχείο το οποίο δημιουργείται. Η τοποθεσία των αρχείων αυτών καθορίζεται από τον χρήστη από το αντίστοιχο πεδίο στην καρτέλα Options. Κάθε καταχωρούμενο γεγονός εγγράφεται στην επόμενη γραμμή από το αμέσως προηγούμενο, με παρόμοιο τρόπο όπως καταχωρήθηκε στο αρχείο καταγραφών.

Χάρη σε αυτή τη λειτουργία το ιστορικό της επικοινωνίας αποθηκεύεται σε αρχεία στα οποία ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει ανά πάσα στιγμή για να ενημερωθεί σχετικά με πληροφορίες που του χρειάζονται. Ταυτόχρονα, τα αρχεία αυτά αποτελούν μία ακόμα καταγραφή της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου (εκτός από τη βάση δεδομένων που διαθέτει το κεντρικό σύστημα EMCS) η οποία διαμορφώνεται με βάση τα δεδομένα που παρέχει ο αντιστροφέας.

### **Επίπεδο καταγραφής (log level)**

Τελευταίο χαρακτηριστικό του αρχείου καταγραφών είναι ότι ο χρήστης έχει επίσης την επιλογή να θέτει ένα φίλτρο στα γεγονότα που καταγράφονται μέσω της δυνατότητας που του παρέχεται από το λογισμικό να ορίσει το επίπεδο καταγραφής (*log level*). Το επίπεδο καταγραφής μπορεί να λάβει τις τιμές “low”, “medium” και “high” οι οποίες υποδηλώνουν αντίστοιχα τον βαθμό καταγραφής των γεγονότων και επιλέγεται στην καρτέλα Options. Σε γενικές γραμμές, τα γεγονότα που δεν αναφέρονται σε εντολές καταγράφονται σε όλες τις περιπτώσεις ενώ η καταχώρηση των εντολών και των απαντήσεων εξαρτάται από το επίπεδο καταγραφής.



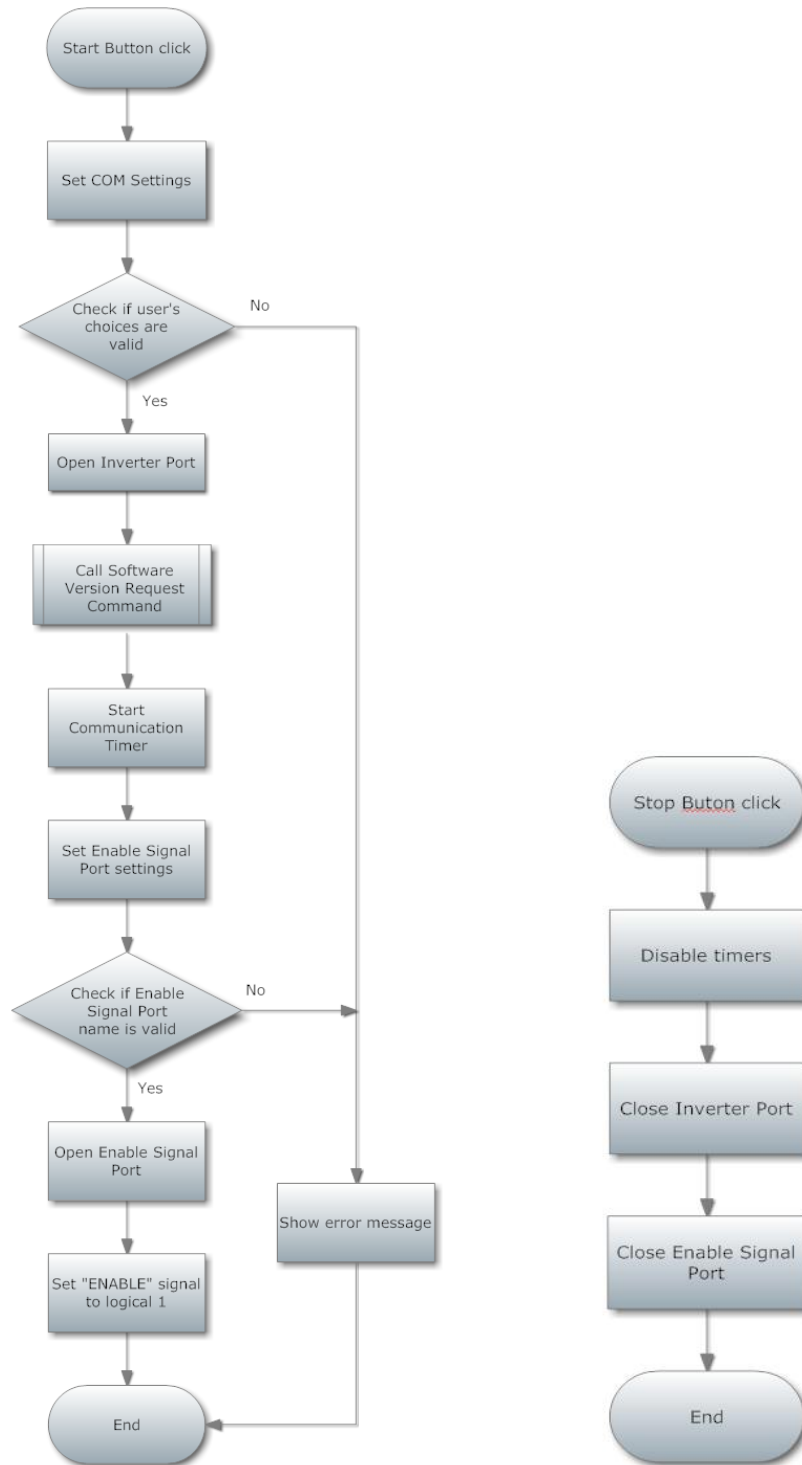
Αναλυτικά, στην περίπτωση χαμηλού επιπέδου καταγραφής καταχωρούνται όλα τα μηνύματα που αφορούν σφάλματα, exceptions και τις ενέργειες του χρήστη ενώ οι εντολές και οι απαντήσεις καταχωρούνται μόνο αν έχει παρουσιαστεί κάποιο exception. Από την άλλη, στην περίπτωση μεσαίου επιπέδου καταγραφής καταχωρούνται επιπλέον και οι εντολές με εξαίρεση την εντολή Software Version Request μιας και, ειδικά μέχρι την αποστολή του πρώτου setpoint όπου στέλνεται κάθε 10 δευτερόλεπτα, γεμίζει το αρχείο καταγραφών με μη ουσιώδεις πληροφορίες. Τέλος, στην περίπτωση υψηλού επιπέδου καταγραφής καταχωρούνται και οι εντολές Software Version Request δηλαδή με άλλα λόγια καταχωρούνται όλων των ειδών τα γεγονότα.

**Πίνακας 7.3.** Κατηγορίες μηνυμάτων που εμφανίζει το αρχείο καταγραφών σε κάθε μία από τις περιπτώσεις χαμηλού, μεσαίου και υψηλού επίπεδου καταγραφής.

High Log Level	Medium Log Level	Low Log Level
<p>ενέργειες χρήστη σφάλματα, exceptions εντολές/απαντήσεις Set DC Input Current εντολές/απαντήσεις Debug Data εντολές/απαντήσεις Software Version Request εντολές/απαντήσεις Reset Inverter Counter</p>	<p>ενέργειες χρήστη σφάλματα, exceptions εντολές/απαντήσεις Set DC Input Current εντολές/απαντήσεις Debug Data εντολές/απαντήσεις Reset Inverter Counter</p>	<p>ενέργειες χρήστη σφάλματα, exceptions εντολές/απαντήσεις Set DC Input Current μόνο όταν παρουσιάζεται exception</p>

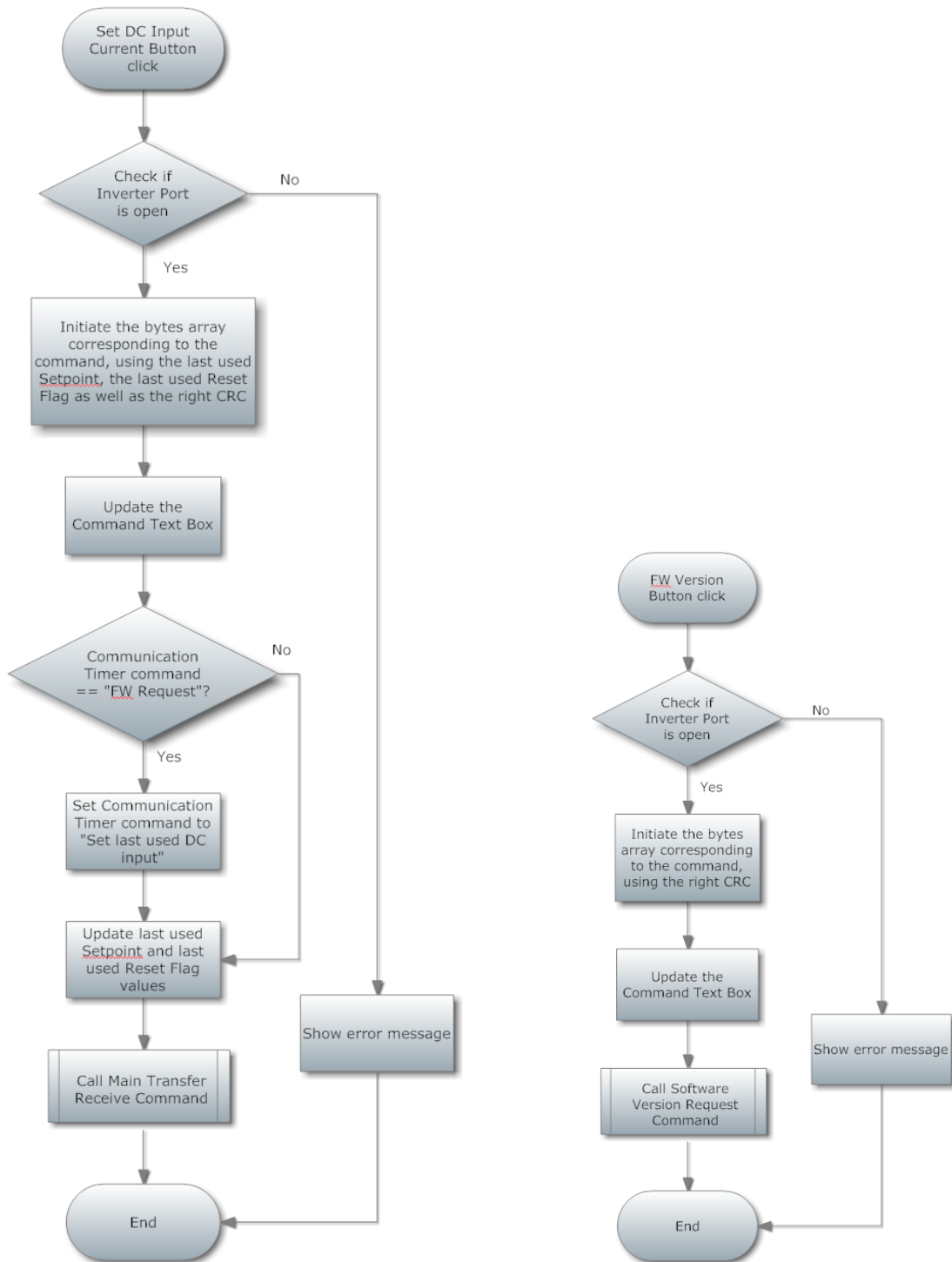
### 7.1.4.7 Διαγράμματα ροής

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα διαγράμματα ροής των λειτουργιών του λογισμικού που περιγράφηκαν στις παραγράφους 7.1.4.1 ως 7.1.4.6.



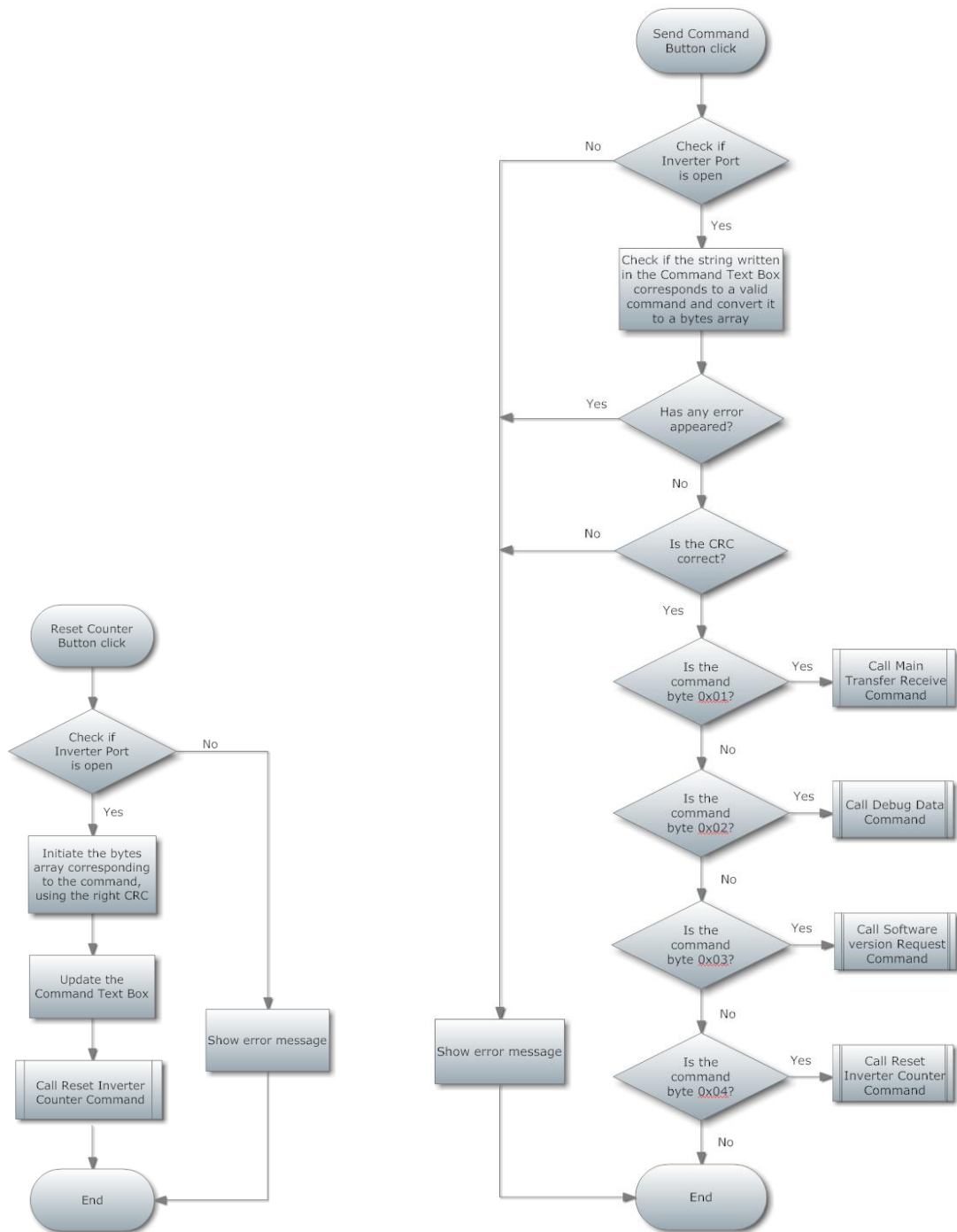
Σχήμα 7.4 (αριστερά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού START.

Σχήμα 7.5 (δεξιά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού STOP.



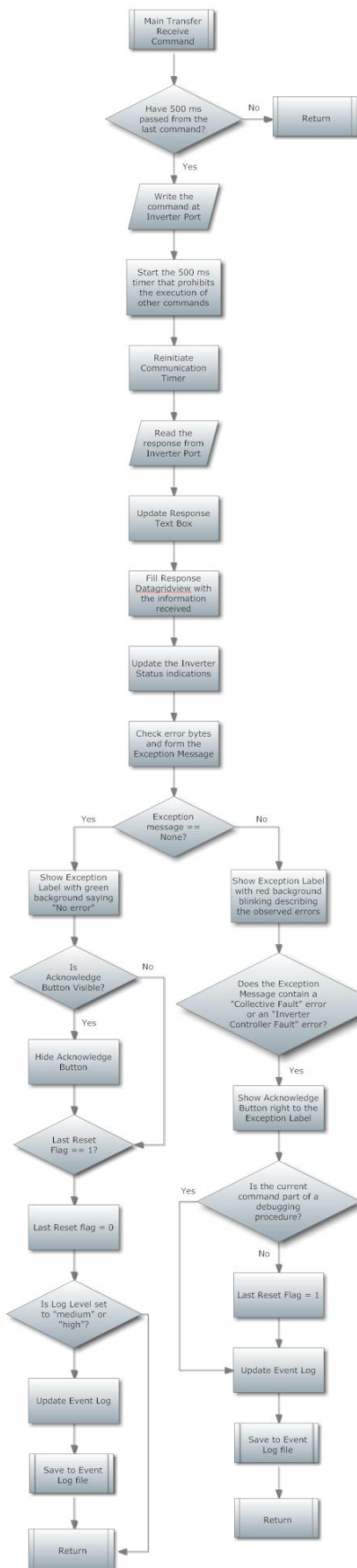
**Σχήμα 7.6** (αριστερά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού SET.

**Σχήμα 7.7** (δεξιά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού FW Version.

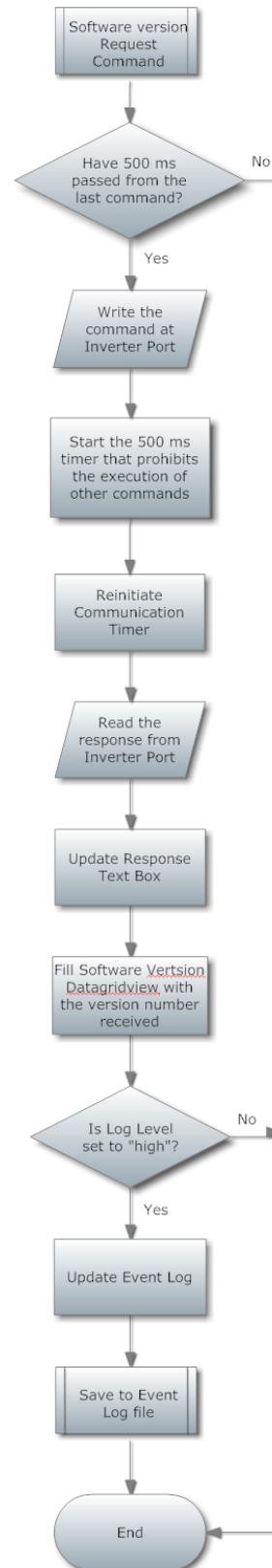


**Σχήμα 7.8** (αριστερά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού Reset Counter.

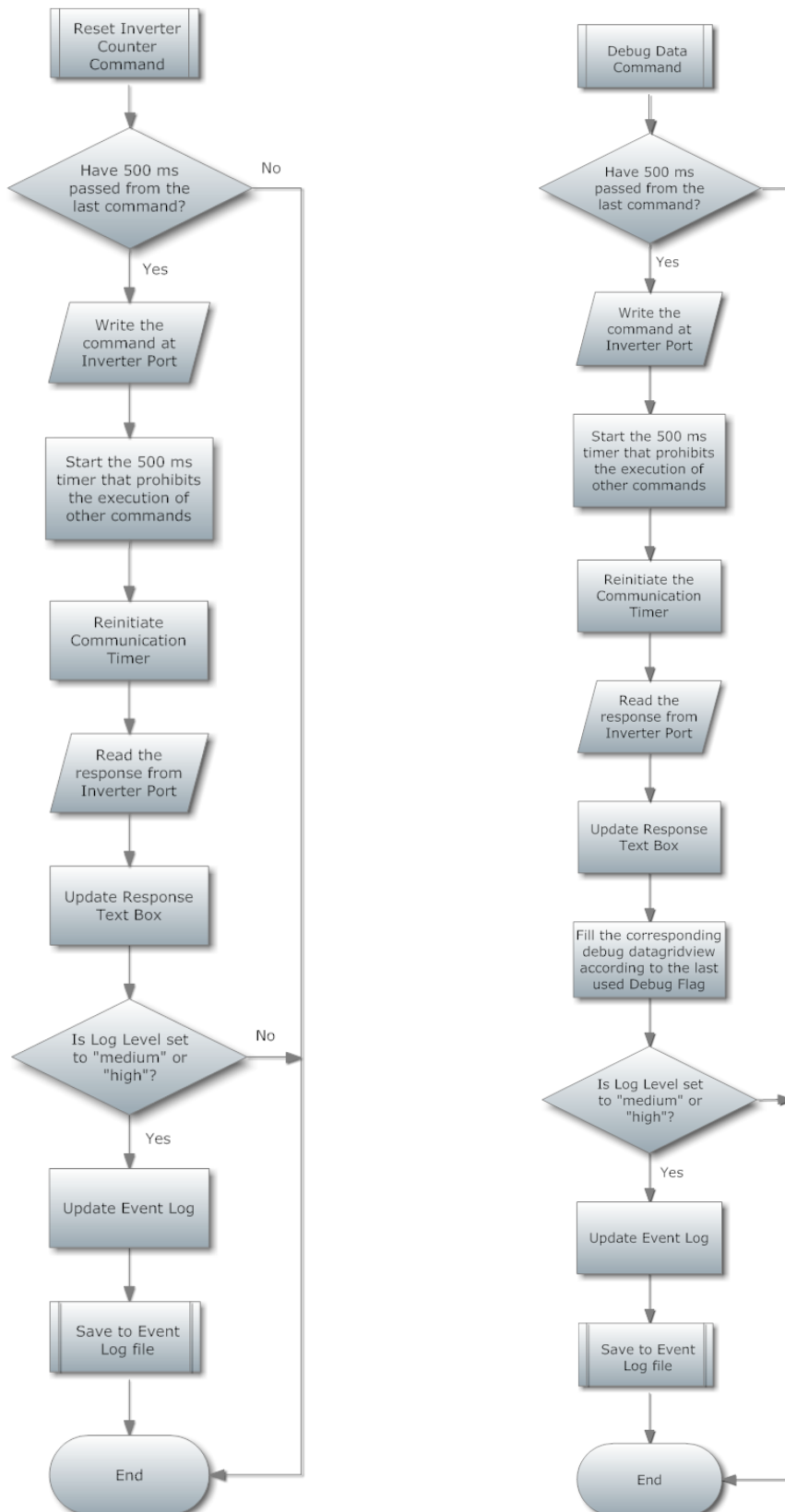
**Σχήμα 7.9** (δεξιά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού SEND.



Σχήμα 7.10 (αριστερά). Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Main Transfer/Receive.

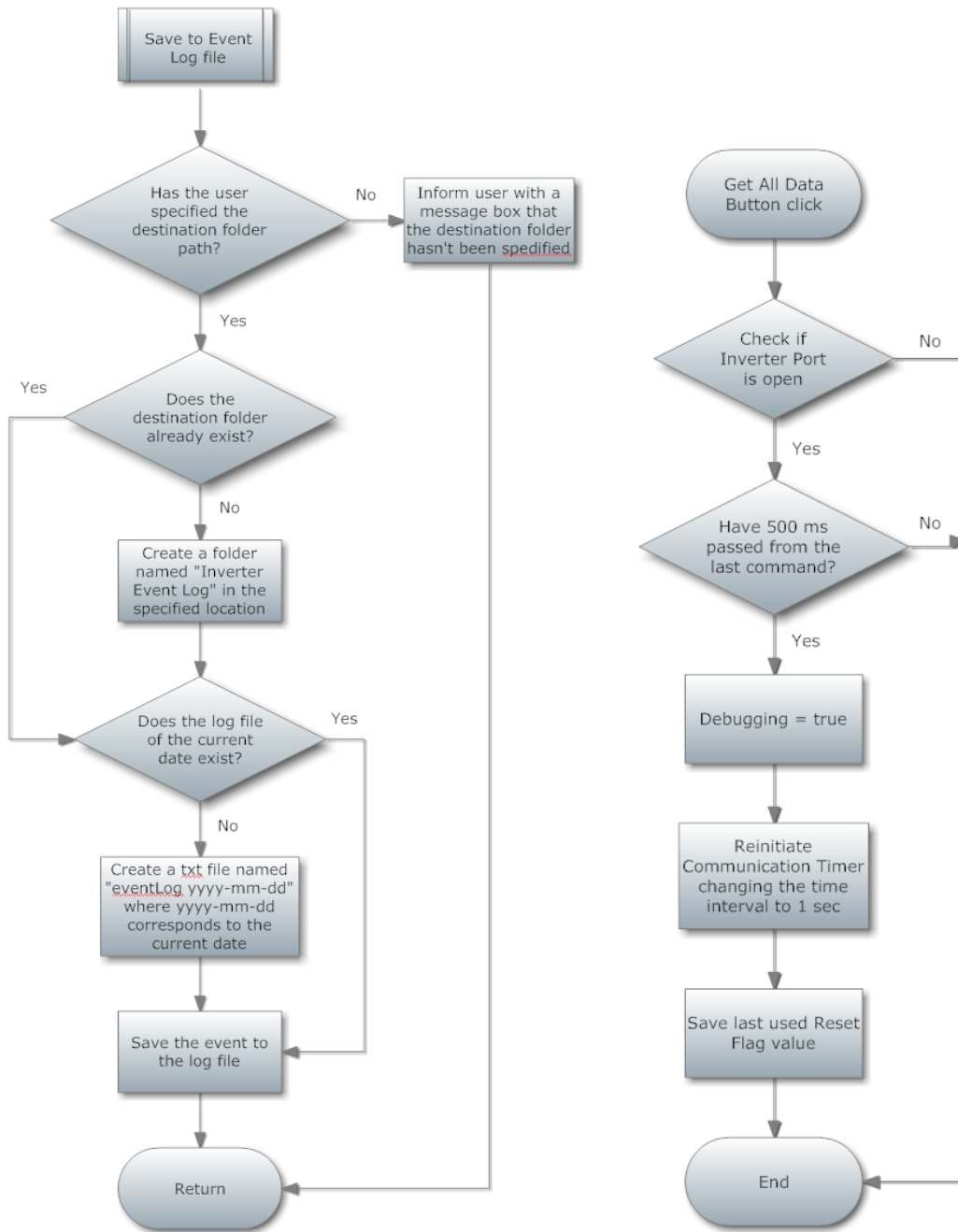


Σχήμα 7.11 (δεξιά). Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Software Version Request.



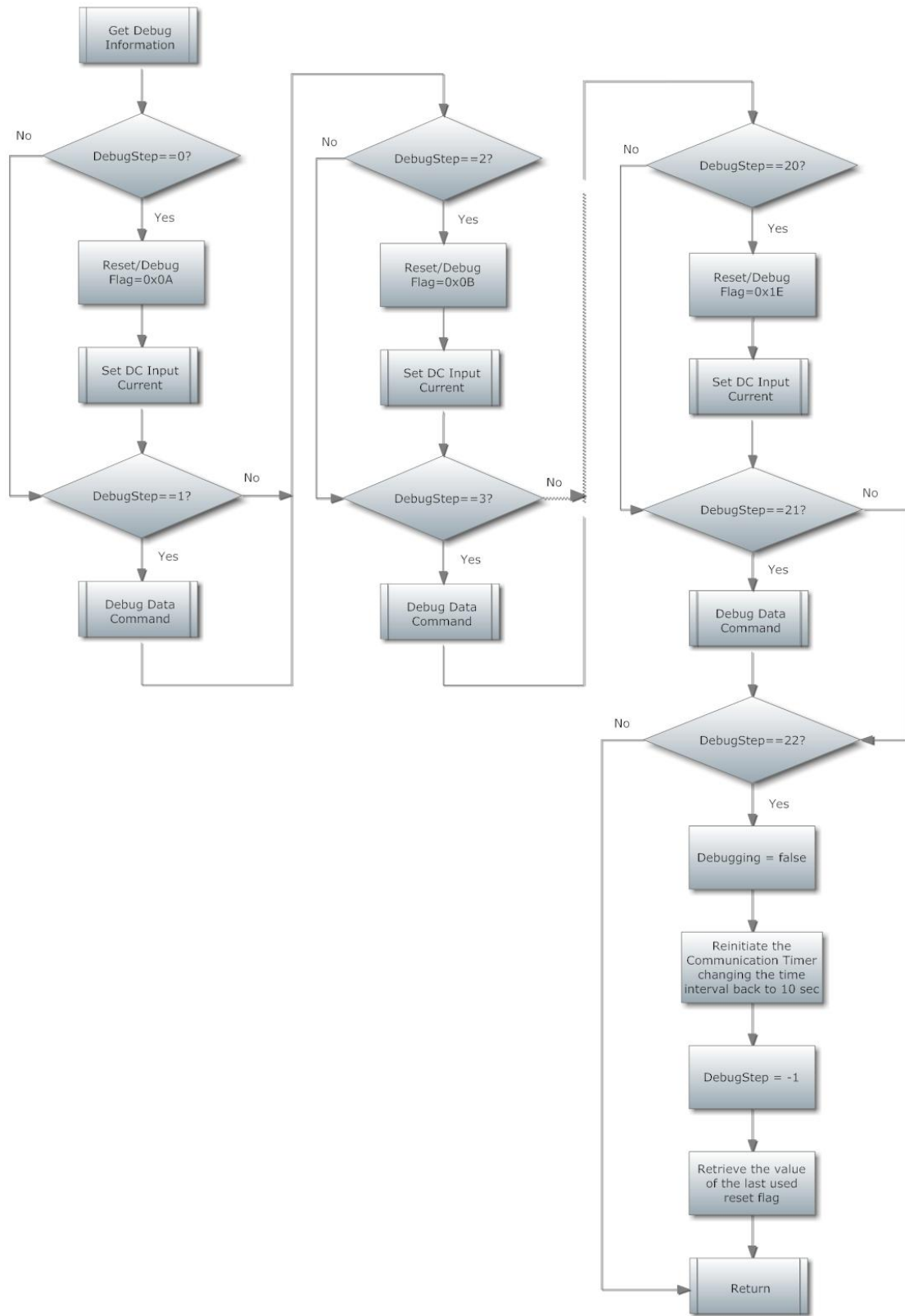
Σχήμα 7.12 (αριστερά). Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Reset Inverter Counter.

Σχήμα 7.13 (δεξιά). Διάγραμμα ροής εκτέλεσης της εντολής Debug Data.



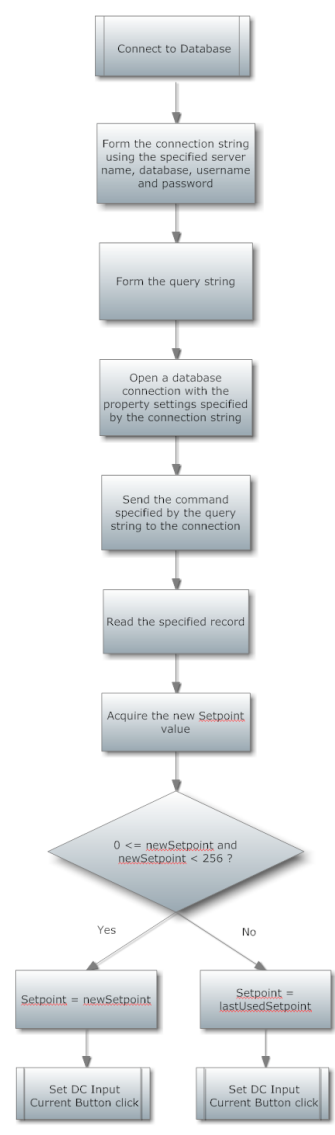
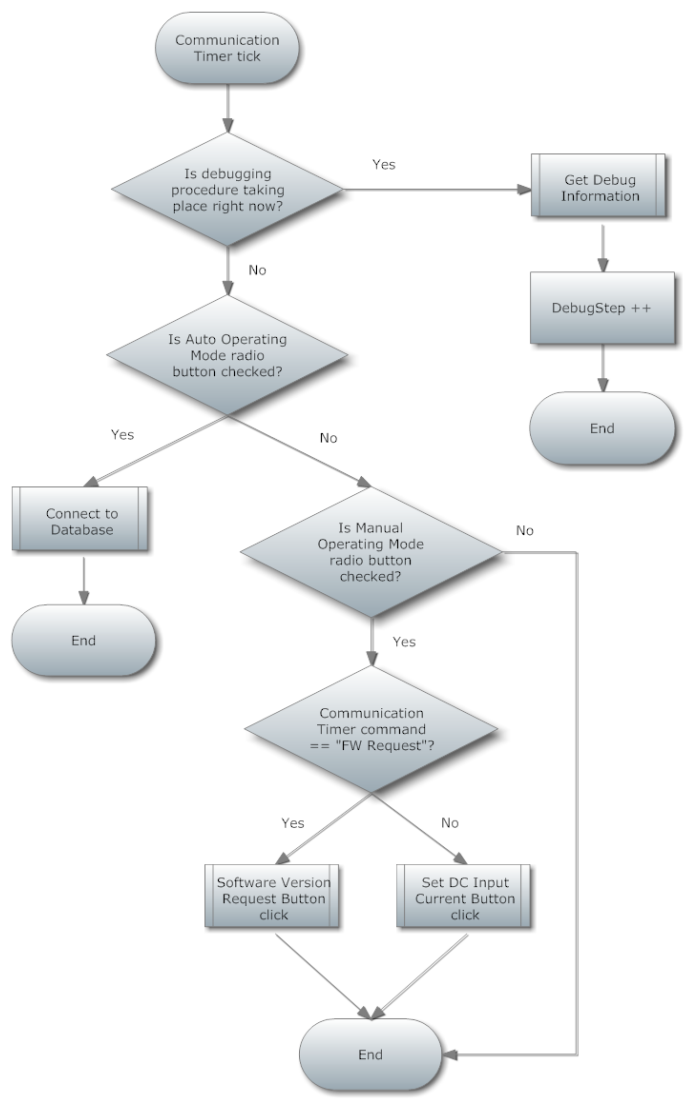
**Σχήμα 7.14** (αριστερά). Διάγραμμα ροής υπορουτίνας καταγραφής γεγονότος στο txt αρχείο.

**Σχήμα 7.15** (δεξιά). Διάγραμμα ροής που αντιστοιχεί στο πάτημα του κουμπιού Get All Data.



**Σχήμα 7.16.** Διάγραμμα ροής της υπορουτίνας Get Debug Information η οποία εκτελείται σε κάθε χτύπο του χρονοδιακόπτη επικοινωνίας αν έχει πατηθεί προηγουμένως το κουμπί Get All Data.





**Σχήμα 7.17** (αριστερά). Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του χρονοδιακόπτη επικοινωνίας η οποία εκτελείται επαναλαμβανόμενα κάθε 10 δευτερόλεπτα (εκτός αν έχει πατηθεί το κουμπί Get All Data οπότε εκτελείται κάθε 2 δευτερόλεπτα).

**Σχήμα 7.18** (δεξιά). Διάγραμμα ροής υπορουτίνας σύνδεσης με τη βάση δεδομένων του EMCS.

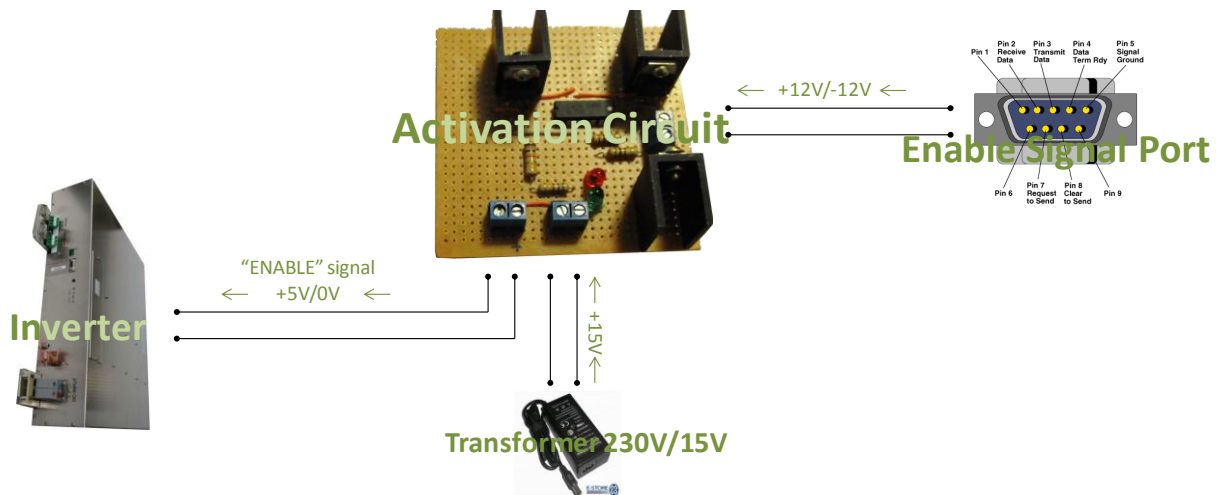
## 7.2 Κύκλωμα ενεργοποίησης αντιστροφέα

### 7.2.1 Γενική λειτουργία

Απαραίτητο στάδιο για την αυτοματοποίηση της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου με βάση της ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου ήταν η κατασκευή ενός κυκλώματος ενεργοποίησης του αντιστροφέα, δηλαδή ενός κυκλώματος υπεύθυνου για την αποστολή του σήματος “ENABLE”. Το σήμα “ENABLE” ουσιαστικά ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη λειτουργία του αντιστροφέα ανάλογα με το επίπεδο της τάσης του. Γενικά, για να τραβήξει ο αντιστροφέας ρεύμα από την κυψέλη καυσίμου προϋπόθεση είναι το σήμα αυτό να βρίσκεται στο λογικό 1 (5 Volt), ενώ πριν την εκκίνηση του αντιστροφέα και στις περιπτώσεις επανεκκίνησής του το σήμα πρέπει να βρίσκεται στο λογικό 0 (0 Volt). Το κύκλωμα ενεργοποίησης αποτελεί το μέσο με το οποίο το λογισμικό της διεπαφής χρήστη καθορίζει αν το επίπεδο τάσης στους ακροδέκτες λήψης του σήματος στον αντιστροφέα θα βρίσκεται στα 5 V ή στα 0 V.

Η υλοποίηση που έγινε για το κύκλωμα ενεργοποίησης και το σήμα “ENABLE” αξιοποιεί τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του ακροδέκτη *RTS (RequestToSend)* και του ακροδέκτη *GND (Signal Ground)* της σειριακής θύρας *Enable Signal Port* του τερματικού. Αν και ο ακροδέκτης *RTS* κανονικά χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ροής των δεδομένων και για την εξασφάλιση της σωστής διεξαγωγής της σειριακής επικοινωνίας, λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να εναλλάσσει το επίπεδο της τάσης του – που παρατηρείται σε σχέση με τον ακροδέκτη *GND* – με απλό τρόπο ανάμεσα στις τιμές +12 V και -12 V με τη βοήθεια της ιδιότητας *RtsEnable* της κλάσης *SerialPort* του .Net Framework, προσφέρεται για τον έλεγχο συσκευών μέσω του υπολογιστή. Ωστόσο, η τάση αυτή δεν μπορεί να αποτελέσει τη βάση δημιουργίας των επιθυμητών 5 V και να εφαρμοστεί στον αντιστροφέα διότι το ρεύμα που μπορεί να δώσει η σειριακή θύρα είναι πολύ μικρό, της τάξης των mA, και η τάση που τελικά θα παρατηρηθεί θα είναι αρκετά χαμηλότερη. Για τον λόγο αυτό, τα δύο επίπεδα τάσης που παρατηρούνται χρησιμοποιούνται για την επιλογή μέσω του λογισμικού της διεπαφής αν το επίπεδο τάσης του σήματος “ENABLE” θα βρίσκεται στο λογικό 0 ή στο λογικό 1, ενώ τα 5 V που αντιστοιχούν στο λογικό 1 λαμβάνονται από εξωτερική τροφοδοσία.

Συνεπώς, το κύκλωμα ενεργοποίησης δέχεται δύο σήματα εισόδου, το σήμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών *RTS* και *GND* και το σήμα της εξωτερικής τροφοδοσίας από την οποία λαμβάνονται τα 5 V. Ανάλογα με το επίπεδο τάσης του πρώτου σήματος, το κύκλωμα παρέχει στην έξοδό του σταθερή τάση 5 V ή 0 V η οποία εφαρμόζεται ως διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες 5 και 6 της σειριακής θύρας του αντιστροφέα, δηλαδή στους ακροδέκτες από όπου δέχεται το σήμα “ENABLE”. Η λειτουργία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 7.19.



**Σχήμα 7.19.** Γενική λειτουργία κυκλώματος ενεργοποίησης αντιστροφέα με είσοδο τροφοδοσίας 15V.

Η λήψη τάσης 5 V ήταν άμεσα διαθέσιμη με δύο τρόπους και για τον λόγο αυτόν κατασκευάστηκαν δύο κυκλώματα με διαφορετική είσοδο τροφοδοσίας, των οποίων όμως η λειτουργία είναι ισοδύναμη και εξίσου αποτελεσματική. Το πρώτο κύκλωμα χρησιμοποιεί την τάση ενός μετασχηματιστή 220V/15V, την οποία τη μετατρέπει στο εσωτερικό του σε 5 V και τη μεταβιβάζει στον αντιστροφέα. Από την άλλη, το δεύτερο κύκλωμα λαμβάνει το σήμα των 5 V κατευθείαν από τον ακροδέκτη VBUS (ακροδέκτης 1) μιας USB θύρας. Η κατασκευή δύο κυκλωμάτων είναι χρήσιμη διότι το καθένα αποτελεί παράλληλα εναλλακτική λύση στην περίπτωση που το άλλο παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία του. Ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή της λειτουργίας των δύο κυκλωμάτων, καθώς και προσομοίωση του καθενός με το πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων *Multisim 11* της εταιρίας National Instruments.

## 7.2.2 Κύκλωμα ενεργοποίησης με είσοδο τάση 15 V

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος, πρέπει πρώτα να επεξηγηθεί η λειτουργία των ακόλουθων ημιαγωγικών στοιχείων.

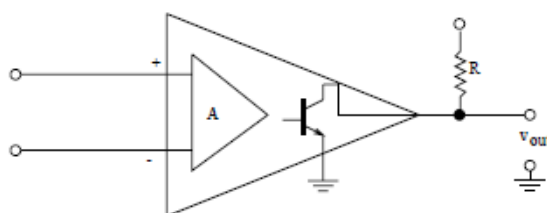
### Συγκριτής LM339

Οι συγκριτές είναι στην ουσία τελεστικοί ενισχυτές υψηλού κέρδους ανοιχτού βρόχου, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν αρνητική ανάδραση. Η έξοδος ενός συγκριτή μπορεί να λάβει δύο τιμές, ανάλογα με το αν η διαφορική τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο. Έτσι, αν  $A$  είναι το κέρδος ανοιχτού βρόχου του συγκριτή, η τάση εξόδου διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{out} = A(v_+ - v_-) = \begin{cases} +V_{max} & v_+ > v_- \\ -|V_{min}| & v_+ < v_- \end{cases}$$

όπου οι τιμές των  $V_{max}$  και  $V_{min}$  αντιστοιχούν κοντά στις τιμές των τάσεων πόλωσης. Με άλλα λόγια ο συγκριτής μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα εισόδου σε έξοδο με δύο δυνατές καταστάσεις.

Στα ολοκληρωμένα κυκλώματα συγκριτών όπως ο LM339, την ενίσχυση του διαφορικού σήματος εισόδου την ακολουθεί το στάδιο εξόδου, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 7.20.



**Σχήμα 7.20.** Αναπαράσταση εσωτερικής δομής συγκριτή τάσης LM339.

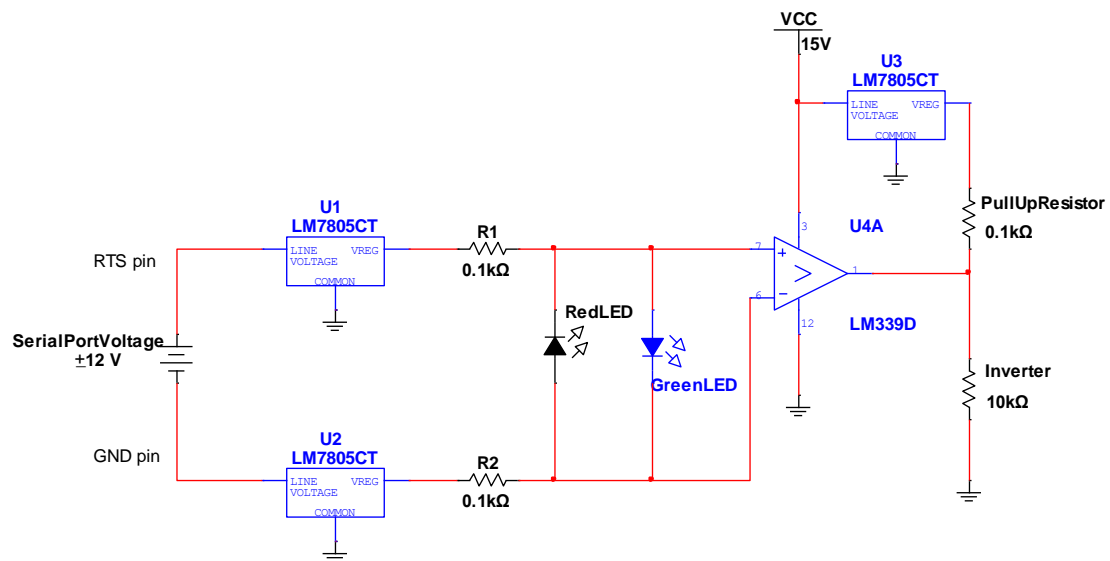
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.20, το σήμα που παράγεται από τη σύγκριση των τάσεων εισόδου, αντί να λαμβάνεται ως έξοδος, διέρχεται από έναν λογικό αντιστροφέα και εφαρμόζεται στη βάση ενός εσωτερικού NPN τρανζίστορ του οποίου ο συλλέκτης είναι ανοιχτός και συνδεδεμένος με τον ακροδέκτη της τάσης εξόδου (*συνδεσμολογία ανοιχτού συλλέκτη*, open collector circuit). Το κύκλωμα του τρανζίστορ συμπληρώνεται με τη χρήση μιας αντίστασης ‘ανύψωσης’  $R$  στην έξοδο του συγκριτή, η οποία συνδέεται με μια σταθερή πηγή τάσης. Ανάλογα με την έξοδο του διαφορικού ενισχυτή ( $V_{min}$  ή  $V_{max}$ ), το τρανζίστορ θα βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής ή θα άγει. Στην περίπτωση που άγει, τότε ρεύμα θα περάσει από την  $R$  στη σύνδεση του εκπομπού και θα παραχθεί κατά μήκος της μια πτώση τάσης η οποία θα φέρει την τιμή της τάσης εξόδου κοντά στην τάση του εκπομπού. Αντίθετα, όταν το τρανζίστορ μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος και πτώση τάσης κατά μήκος της  $R$  και επομένως η τάση εξόδου λαμβάνει την τάση της πηγής.

#### Σταθεροποιητής τάσης LM7805

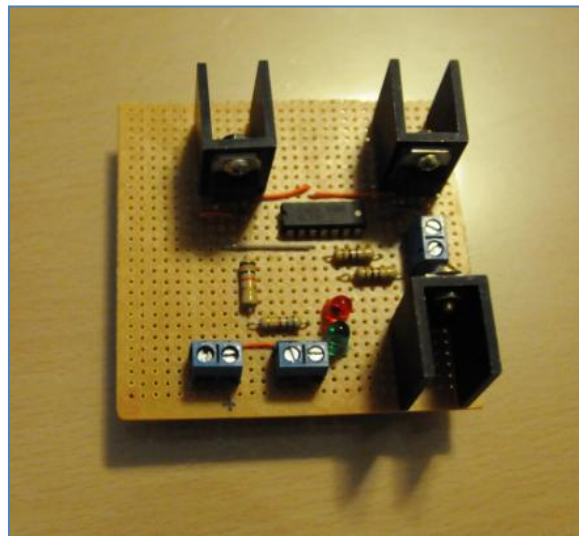
Ο σταθεροποιητής τάσης LM7805 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση στην έξοδό του σταθερής τάσης συγκεκριμένης τιμής. Διαθέτει τρεις ακροδέκτες, έναν για είσοδο, έναν για έξοδο και έναν για γείωση. Υπό την προϋπόθεση ότι το σήμα εισόδου του έχει επαρκώς υψηλή τάση, ο σταθεροποιητής παρέχει στον ακροδέκτη εξόδου του σταθερή τάση 5 V.

#### Ανάλυση λειτουργίας

Η συνδεσμολογία του πρώτου κυκλώματος ενεργοποίησης όπως σχεδιάστηκε στο περιβάλλον Multisim φαίνεται στο Σχήμα 7.21 ενώ στην Εικόνα 7.14 φαίνεται το πραγματικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε.



**Σχήμα 7.21.** Συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την κατασκευή του κυκλώματος ενεργοποίησης εισόδου τροφοδοσίας 15V.



**Εικόνα 7.14.** Κύκλωμα ενεργοποίησης που κατασκευάστηκε για είσοδο τροφοδοσίας τάση 15V.

Κεντρικό στοιχείο στη λειτουργία του πρώτου κυκλώματος ενεργοποίησης που κατασκευάστηκε αποτελεί η χρήση του συγκριτή LM339. Η γενική ιδέα της λειτουργίας είναι ότι ανάλογα με το επίπεδο τάσης του ακροδέκτη RTS της σειριακής θύρας του τερματικού σε σχέση με τον ακροδέκτη GND, το πρόσημο της διαφορικής τάσης που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες εισόδου του συγκριτή αντιστρέφεται και η τάση εξόδου αλλάζει.

Το κύκλωμα έχει τις εξής εισόδους και εξόδους:

#### *Είσοδοι :*

- Διαφορά δυναμικού μεταξύ του ακροδέκτη RTS και του ακροδέκτη GND της σειριακής

Το διαφορικό αυτό σήμα μπορεί να λάβει τις τιμές +12V και -12V μέσω του λογισμικού της διεπαφής. Συνδέοντας τον κάθε ακροδέκτη με την είσοδο ενός σταθεροποιητή τάσης LM7805 όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.21, η τάση του σήματος υποβιβάζεται και σταθεροποιείται στα 5V σε σχέση με τη γείωση της τροφοδοσίας, όπου στην πρώτη περίπτωση παρέχεται από την έξοδο του σταθεροποιητή τάσης  $U_1$  ενώ στη δεύτερη περίπτωση παρέχεται από την έξοδο του σταθεροποιητή τάσης  $U_2$ . Τελικά, η πολικότητα της διαφορικής τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του συγκριτή LM339 αντιστοιχεί στην πολικότητα της τάσης που παρατηρείται μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου των δύο σταθεροποιητών τάσης και η έξοδος του συγκριτή προκύπτει ανάλογα.

Στους ακροδέκτες εισόδου του συγκριτή είναι συνδεδεμένα επίσης δύο LEDs, ένα πράσινο και ένα κόκκινο, τα οποία συνδέονται αντιπαράλληλα μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο, όταν το επίπεδο τάσης του διαφορικού σήματος εισόδου που προέρχεται από τη σειριακή θύρα είναι +12V τότε η διαφορά δυναμικού που προκύπτει μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του συγκριτή είναι θετική και επομένως ανάβει το πράσινο LED, υποδεικνύοντας ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1. Αντίστοιχα, όταν το επίπεδο τάσης του διαφορικού σήματος εισόδου είναι -12V τότε ανάβει το κόκκινο LED και υποδεικνύεται στον χρήστη ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0.

- Τροφοδοσία 15V

Η τάση των 15V που λαμβάνεται από τον μετασχηματιστή υποβιβάζεται μέσω ενός σταθεροποιητή τάσης LM7805 στα 5V και αποτελεί την πηγή παροχής των 5V που εφαρμόζονται στον αντιστροφέα όταν το σήμα “ENABLE” είναι στο λογικό 1. Επίσης, από την τροφοδοσία των 15 V λαμβάνεται και η τάση πόλωσης που εφαρμόζεται στο συγκριτή.

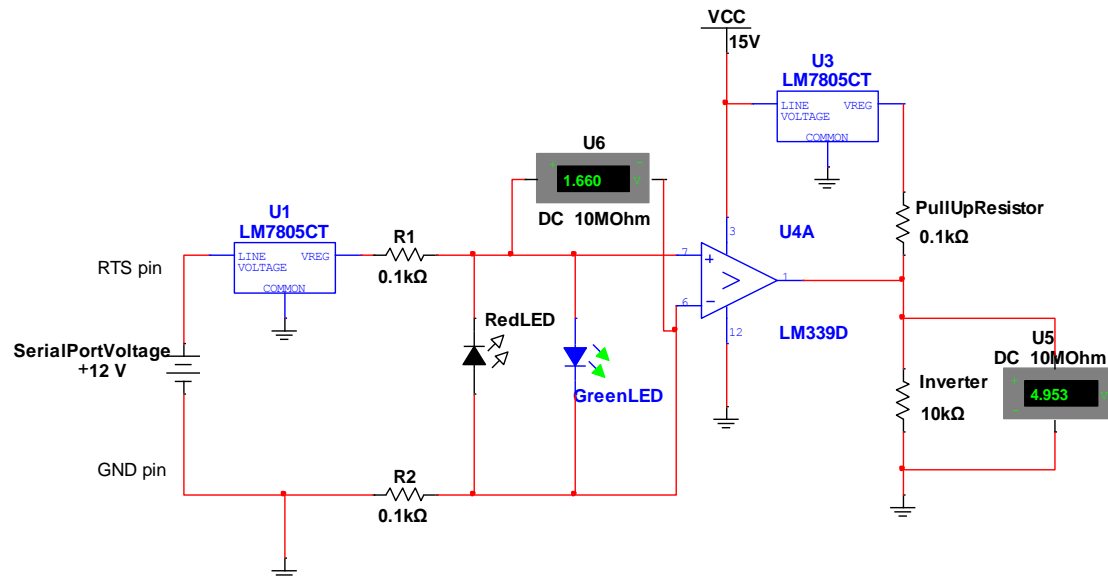
#### *Εξοδοι :*

- Τάση εξόδου

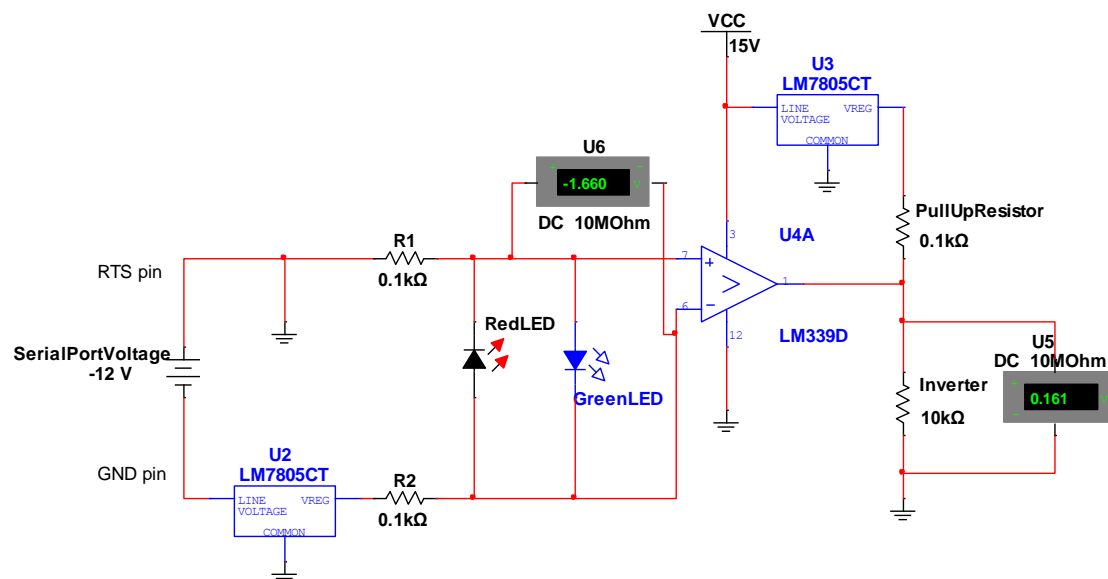
Η τάση εξόδου του κυκλώματος μπορεί να λάβει τις τιμές 0 V και 5 V και καθορίζεται ως εξής. Στην περίπτωση που το επίπεδο τάσης του ακροδέκτη RTS σε σχέση με τον ακροδέκτη GND είναι +12V, η διαφορική τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του συγκριτή είναι θετική. Σαν αποτέλεσμα, το τρανζίστορ του σταδίου εξόδου του συγκριτή περιέρχεται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου λαμβάνει την τιμή 5V. Αντίθετα, στην περίπτωση που το επίπεδο τάσης του ακροδέκτη RTS είναι -12V, ο συγκριτής δέχεται στην είσοδό του αρνητική τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τρανζίστορ του σταδίου εξόδου να άγει και η τάση εξόδου να λαμβάνει τιμή κοντά στην τιμή της τάσης του εκπομπού του τρανζίστορ, δηλαδή 0V.

## Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim

Η προσομοίωση της συνδεσμολογίας του Σχήματος 7.21 φαίνεται στα ακόλουθα Σχήματα 7.22 και 7.23 τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND της σειριακής θύρας +12 V και -12 V αντίστοιχα. Τα ρεύματα πόλωσης του συγκριτή προσομοιώθηκαν θέτοντας την τιμή της εσωτερικής αντίστασης μεταξύ των ακροδεκτών 3.5 MOhm.



**Σχήμα 7.22.** Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 15V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι +12V.



**Σχήμα 7.23.** Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 15V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι -12V.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.22, στην περίπτωση που η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι +12V, η διαφορική τάση εισόδου του συγκριτή είναι θετική και λαμβάνει την τιμή +1.661V. Η πτώση τάσης σε σχέση με την έξοδο του σταθεροποιητή  $U_1$  οφείλεται στις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , καθώς και στο πράσινο LED, το οποίο λόγω της θετικής διαφοράς δυναμικού στα άκρα του ανάβει. Αποτέλεσμα της θετικής διαφορικής τάσης εισόδου είναι ότι το τρανζίστορ του σταδίου εξόδου του συγκριτή περιέρχεται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση εξόδου της συνδεσμολογίας λαμβάνει την τιμή 4.953V, δηλαδή το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1.

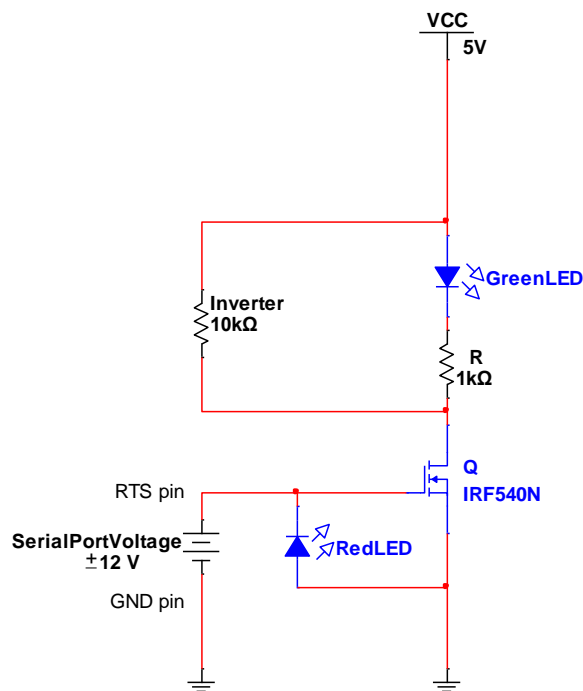
Από την άλλη, στην περίπτωση που η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι -12V (Σχήμα 7.23) η διαφορική τάση εισόδου του συγκριτή γίνεται αρνητική, ίση με -1.660V, καθιστώντας το κόκκινο LED αναμμένο αντί για το πράσινο. Η αρνητική πολικότητα στην είσοδο του συγκριτή έχει ως αποτέλεσμα το τρανζίστορ του σταδίου εξόδου να άγει και η τάση εξόδου να λαμβάνει την τιμή 0.161V, δηλαδή το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν τη σωστή λειτουργία της συνδεσμολογίας του κυκλώματος, το οποίο ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της κατασκευής του.



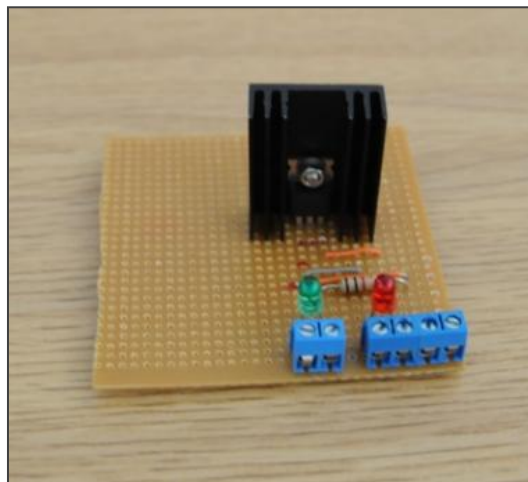
### 7.2.3 Κύκλωμα ενεργοποίησης με είσοδο τάση 5 V

#### Ανάλυση λειτουργίας

Σε σχέση με το προηγούμενο κύκλωμα, εδώ η συνδεσμολογία είναι αρκετά πιο απλή και έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι η τάση εισόδου προέρχεται από μια USB θύρα και επομένως δε χρειάζεται η χρήση μετασχηματιστή τάσης. Το σχέδιο του κυκλώματος με βάση το οποίο έγινε η προσομοίωση και η κατασκευή καθώς και το πραγματικό κύκλωμα φαίνονται στο Σχήμα 7.24 και στην Εικόνα 7.15 αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.24.** Συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την κατασκευή του κυκλώματος ενεργοποίησης εισόδου τροφοδοσίας 5V.



**Εικόνα 7.15.** Κύκλωμα ενεργοποίησης που κατασκευάστηκε για είσοδο τροφοδοσίας τάση 5V.

Στο κύκλωμα αυτό, η λειτουργία βασίστηκε στη χρήση ενός NMOS τρανζίστορ και συγκεκριμένα του ολοκληρωμένου IRF540N. Το τρανζίστορ αυτό λειτουργεί ουσιαστικά ως διακόπτης, η συμπεριφορά του οποίου καθορίζεται από την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη του, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον ακροδέκτη RTS του τερματικού. Η πηγή του τρανζίστορ συνδέεται με τη γείωση της τροφοδοσίας των 5 V, όπως επίσης και ο ακροδέκτης GND. Ως τάση εξόδου λαμβάνεται η τάση στα άκρα της αντίστασης R, η οποία ανάλογα με την τάση του ακροδέκτη εναλλάσσεται μεταξύ των τιμών 0 V και 5 V.

Το κύκλωμα έχει τις εξής εισόδους και εξόδους:

*Είσοδοι :*

- Διαφορά δυναμικού μεταξύ του ακροδέκτη RTS και του ακροδέκτη GND της σειριακής

Ο ακροδέκτης RTS μπορεί να λάβει τάση +12 V ή -12 V σε σχέση με τον ακροδέκτη GND, το οποίο καθορίζεται από το λογισμικό της διεπαφής. Η τάση αυτή εφαρμόζεται απευθείας στην πύλη του τρανζίστορ (gate), ενώ επίσης συνδέεται αντιπαράλληλα με ένα κόκκινο LED. Αν η τάση είναι +12 V τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής (source) καθίσταται μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου του τρανζίστορ ( $v_{GS} > V_t$ ) και το τρανζίστορ άγει. Αν από την άλλη η τάση είναι -12 V τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής καθίσταται μικρότερη από την τάση κατωφλίου και το τρανζίστορ μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής, ενώ παράλληλα το κόκκινο LED ανάβει, υποδεικνύοντας ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0.

- Τροφοδοσία 5V

Η τροφοδοσία των 5 V, όταν το τρανζίστορ άγει μεταβιβάζει την τάση της στην τάση εξόδου και επομένως ο αντιστροφέας αντιλαμβάνεται ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1. Συνδέεται μαζί με την αντίσταση R και το πράσινο LED στην πλευρά της υποδοχής του τρανζίστορ (drain).

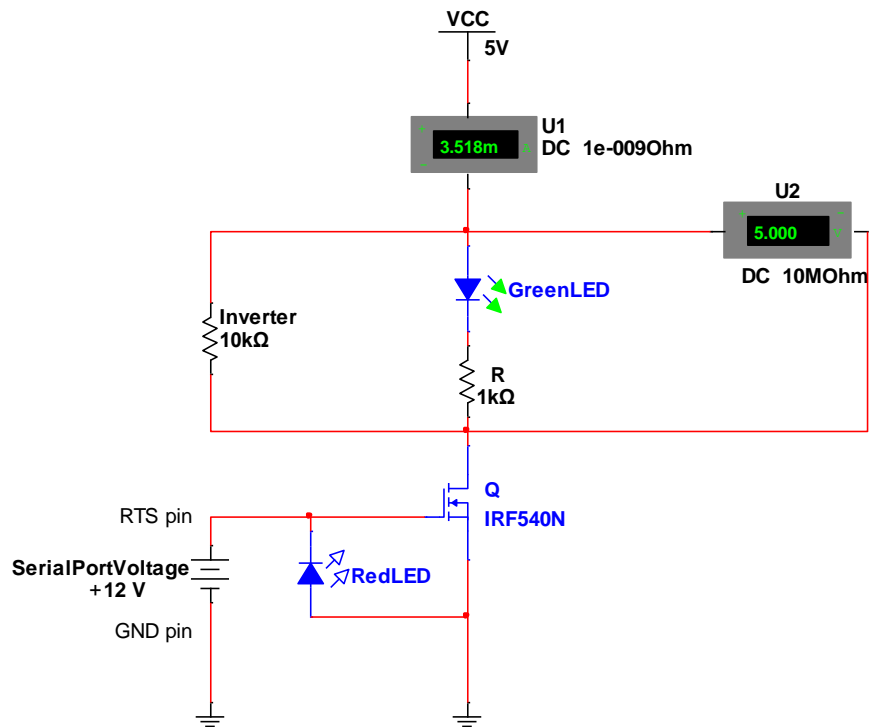
*Εξόδοι :*

- Τάση εξόδου

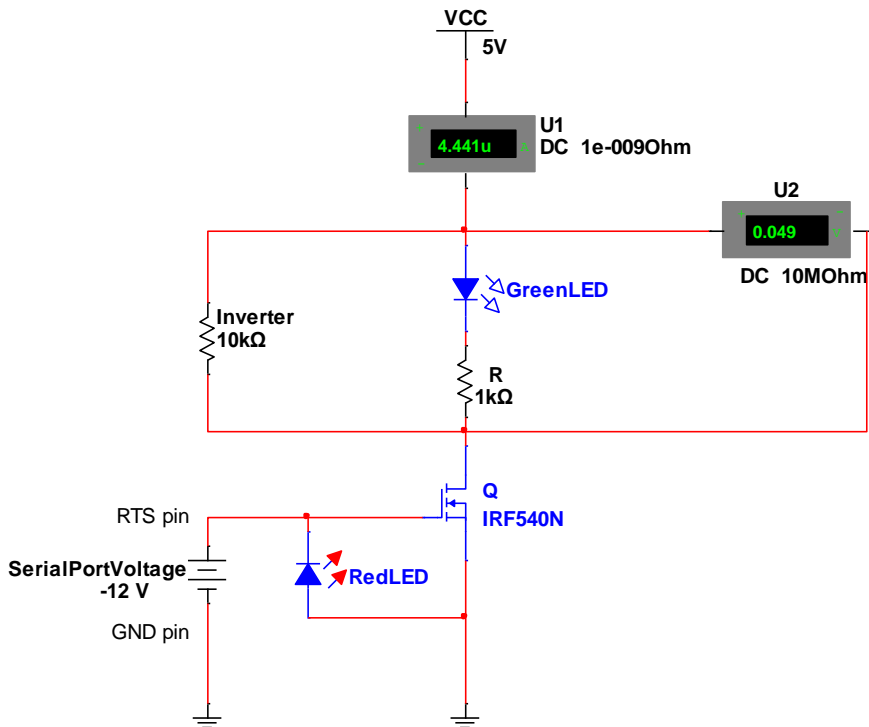
Ως τάση εξόδου του κυκλώματος λαμβάνεται η πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης R, έτσι ώστε όταν το επίπεδο τάσης του ακροδέκτη RTS είναι +12 V η τάση εξόδου να είναι ίση με 5 V ενώ όταν είναι -12 V τότε η τάση εξόδου να μηδενίζεται. Συγκεκριμένα, στην πρώτη από τις δύο περιπτώσεις το τρανζίστορ μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής με αποτέλεσμα να παρατηρείται πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης ίση με 5 V. Παράλληλα, λόγω της διαφοράς δυναμικού το πράσινο LED το οποίο είναι συνδεδεμένο σε σειρά με την αντίσταση ανάβει, υποδεικνύοντας ότι το σήμα “ENABLE” είναι στο λογικό 1. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση το τρανζίστορ μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής και επομένως δεν παρατηρείται ρεύμα, με αποτέλεσμα η πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης να είναι μηδενική.

## Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim

Στα Σχήματα 7.25 και 7.26 φαίνεται η προσομοίωση του κυκλώματος για τάση του ακροδέκτη RTS +12 V και -12 V αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.25.** Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 5V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι +12V.



**Σχήμα 7.26.** Προσομοίωση στο περιβάλλον Multisim της λειτουργίας του κυκλώματος ενεργοποίησης τροφοδοσίας 5V, όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών RTS και GND είναι -12V.

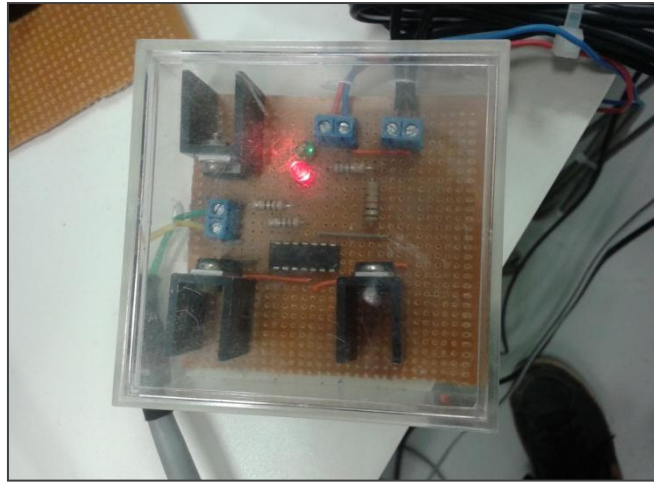
Από την παρατήρηση των σχημάτων 7.25 και 7.26 φαίνεται καθαρά ότι όταν η τάση του ακροδέκτη RTS είναι +12V τότε το τρανζίστορ Q άγει και η τάση του σήματος “ENABLE” λαμβάνει την επιθυμητή τιμή των 5V, ενώ όταν η τάση του ακροδέκτη RTS είναι -12V τότε το τρανζίστορ περιέρχεται σε κατάσταση αποκοπής και η τάση του σήματος “ENABLE” πέφτει στα 0.049V. Αντίστοιχα καθορίζεται και η συμπεριφορά των δύο LEDs, όπου στην πρώτη περίπτωση είναι αναμμένο το πράσινο LED υποδεικνύοντας ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1 ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι αναμμένο το κόκκινο LED υποδεικνύοντας ότι το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0. Συνεπώς, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανταποκρίνονται στην ανάλυση που προηγήθηκε και αποτέλεσαν την απαιτούμενη επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της λειτουργίας πριν την πραγματοποίηση της κατασκευής του κυκλώματος.

### 7.3 Έλεγχος σωστής λειτουργίας διεπαφής

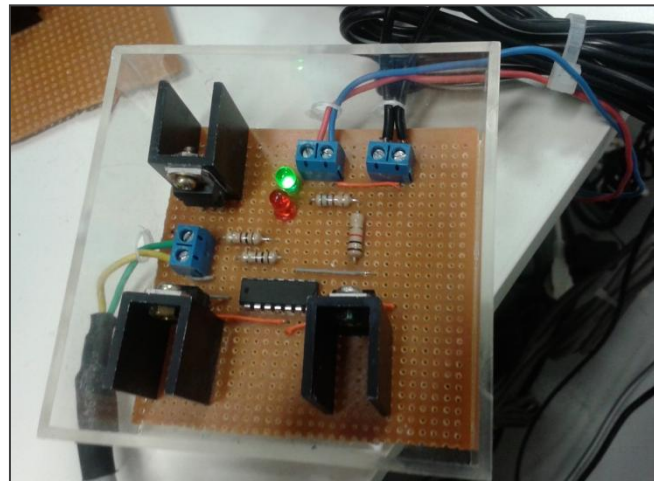
Ο έλεγχος λειτουργίας του συστήματος της διεπαφής χρήστη σε πραγματικές συνθήκες συντελέστηκε καθ’όλη τη διάρκεια ανάπτυξης και σχεδιασμού του συστήματος. Την ολοκλήρωση κάθε σταδίου ακολουθούσαν δοκιμές για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του. Συνοπτικά, τα σημαντικότερα στάδια ανάπτυξης του συστήματος ήταν τα εξής:

1. δημιουργία επικοινωνίας με τον αντιστροφέα, εύρεση σωστών παραμέτρων επικοινωνίας
2. υλοποίηση πεδίων για την αποστολή κάθε δυνατής εντολής, λήψη και απεικόνιση των πληροφοριών της αντίστοιχης απάντησης
3. κατασκευή κυκλώματος ενεργοποίησης, επιβεβαίωση αποτελεσματικότητας ελέγχου της τάσης του σήματος “ENABLE”
4. αντιμετώπιση σφαλμάτων, αποτελεσματική αντιμετώπιση όλων των δυνατών περιπτώσεων και εμφάνιση κατάλληλων μηνυμάτων
5. σύνδεση με τη βάση δεδομένων, αυτόματη λειτουργία

Επιπλέον, την ολοκλήρωση της ανάπτυξης του συνολικού συστήματος της διεπαφής ακολούθησαν εκτεταμένες δοκιμές για την επαλήθευση του αποτελεσματικού ελέγχου της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, τόσο χειροκίνητα όσο και με αυτόματο τρόπο από το κεντρικό σύστημα EMCS. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστούν ενδεικτικά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του συστήματος σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας στο χρονικό διάστημα μιας ημέρας.



Εικόνα 7.16. Κύκλωμα ενεργοποίησης όταν το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 0.



Εικόνα 7.17. Κύκλωμα ενεργοποίησης όταν το σήμα “ENABLE” βρίσκεται στο λογικό 1.



# 8

## **Αποτελέσματα εφαρμογής του συνολικού συστήματος σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του κτηρίου**

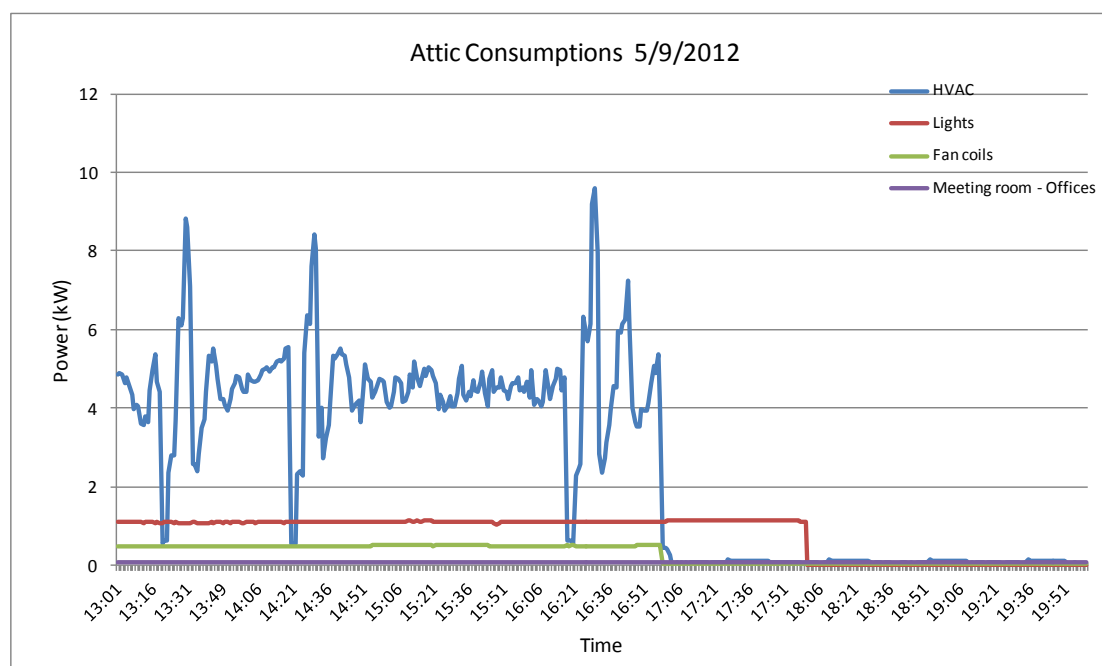
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της διεπαφής χρήστη σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του κτηρίου. Αρχικά παρουσιάζεται και σχολιάζεται η παραγωγή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου για μια ημέρα λειτουργίας του κτηρίου, όπου η τιμή της παραγόμενης ισχύος καθοριζόταν με αυτόματο τρόπο από το κεντρικό σύστημα EMCS με τη βοήθεια του συστήματος της διεπαφής χρήστη, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που υπήρχαν κάθε στιγμή. Στη συνέχεια παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από δοκιμές όπου η τιμή της παραγόμενης ισχύος καθοριζόταν χειροκίνητα μέσα από το περιβάλλον της διεπαφής χρήστη. Τέλος, τα πειραματικά δεδομένα που λήφθηκαν από τις δοκιμές χειροκίνητης λειτουργίας του συστήματος συγκρίνονται με τις προβλέψεις του μοντέλου Simulink που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 6 για την προσομοίωση του συνολικού συστήματος.

## 8.1 Αποτελέσματα αυτόματης λειτουργίας του συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί, στόχος του συστήματος της διεπαφής χρήστη που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι ο έλεγχος της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου Mira 6 ώστε να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του χώρου του παταριού του κτηρίου, εμβαδού 150 m<sup>2</sup> που χρησιμοποιείται ως χώρος γραφείων. Οι ενεργειακές καταναλώσεις του παταριού που καταγράφονται από το σύστημα EMCS του κτηρίου διακρίνονται σε:

- Κλιματισμό και θέρμανση (HVAC)
- Φωτισμό
- Καταναλώσεις στους ρευματολήπτες στους χώρους συναντήσεων και γραφείων (υπολογιστές, τηλεόραση, κλπ)
- Καταναλώσεις των σωμάτων εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (fan coils)

Η καταγραφή των παραπάνω καταναλώσεων την 5/9/2012 για το χρονικό διάστημα 13:00 - 20:00 παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.



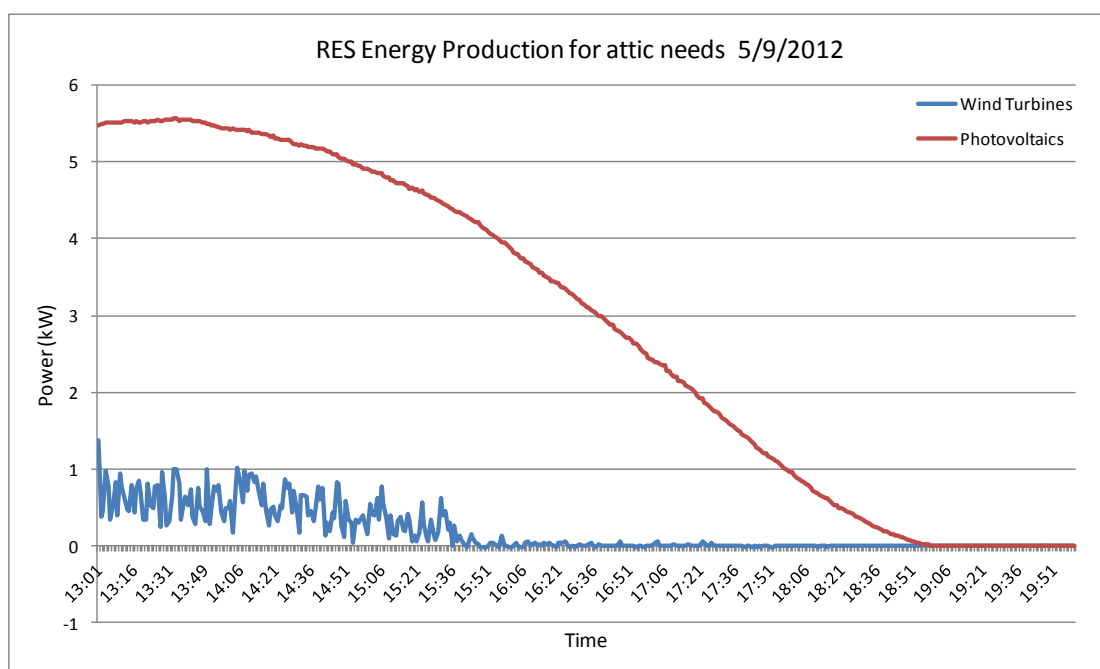
Σχήμα 8.1. Κατανάλωση ισχύος στο χώρο του παταριού.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το παραπάνω διάγραμμα, η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται για τον κλιματισμό του χώρου (HVAC). Η κατανάλωση αυτή μεταβάλλεται με τον χρόνο παρουσιάζοντας μια μέση κατανάλωση για το διάστημα λειτουργίας του συστήματος κλιματισμού περίπου 4.5 kW, αλλά και αιχμές που φτάνουν έως και 10 kW. Για τις ανάγκες φωτισμού του χώρου καταναλώνονται σταθερά 1.1 kW μέχρι τις 18:00 όπου τα φώτα κλείνουν, ενώ για την ηλεκτρική λειτουργία των σωμάτων



εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα καταναλώνονται 0.5 kW μέχρι τις 17:00 όπου παύουν τη λειτουργία τους. Τέλος, ένα μικρό μέρος ισχύος καταναλώνεται στους ρευματολήπτες των δωματίων για την τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών.

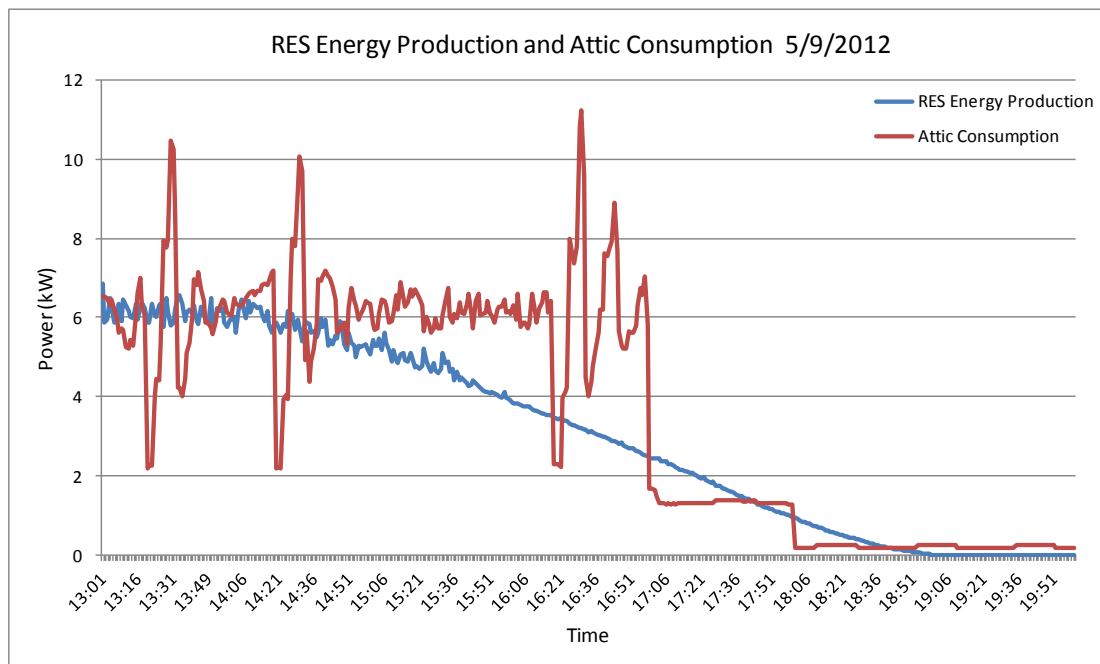
Η παραγωγή ισχύος από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά για την τροφοδότηση του χώρου του παταριού στο παραπάνω χρονικό διάστημα φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.2.



**Σχήμα 8.2.** Παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ με την οποία τροφοδοτείται ο χώρος του παταριού.

Τα φωτοβολταϊκά, δεδομένων των μετεωρολογικών συνθηκών της συγκεκριμένης μέρας παράγουν αρκετά περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες. Η ενέργεια αυτή είναι ανάλογη με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στους συλλέκτες τους. Το μεσημέρι παράγουν τη μέγιστη ενέργεια (5.5 kW) η οποία φθίνει καθώς το φως του ήλιου περιορίζεται, ώσπου κατά τις 19:00 με τη δύση του ηλίου η παραγόμενη ποσότητα ενέργειας μηδενίζεται. Η ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες μεταβάλλεται διαρκώς και καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου, σημειώνοντας μέγιστη στιγμιαία παραγωγή της τάξης του 1 kW.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η συνολική παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση φαίνεται στο Σχήμα 8.3.

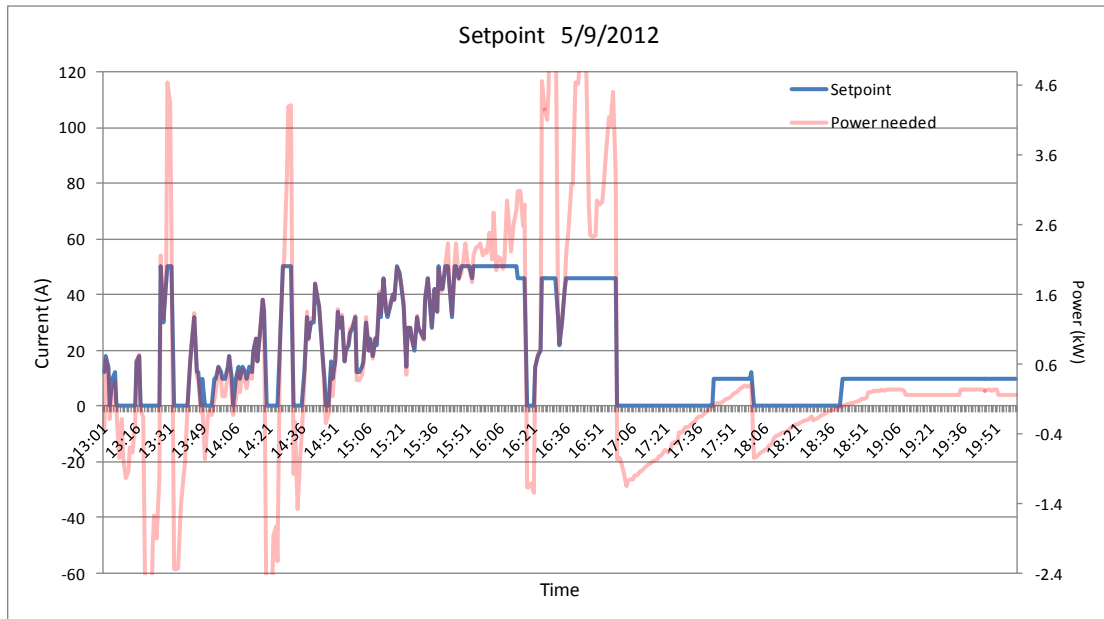


Σχήμα 8.3. Σύγκριση παραγωγής με κατανάλωση ενέργειας στο χώρο του παταριού.

Όπως παρατηρείται, σε ένα μεγάλο μέρος της ημέρας η διαθέσιμη ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του χώρου. Στις περιπτώσεις αυτές η υπολειπόμενη ενέργεια λαμβάνεται θέτοντας σε λειτουργία την κυψέλη καυσίμου Mira 6, με βάση τον αλγόριθμο ελέγχου που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4. Όταν αντίθετα παρατηρείται πλεόνασμα ενέργειας η κυψέλη καυσίμου τίθεται σε κατάσταση αναμονής (stand-by).

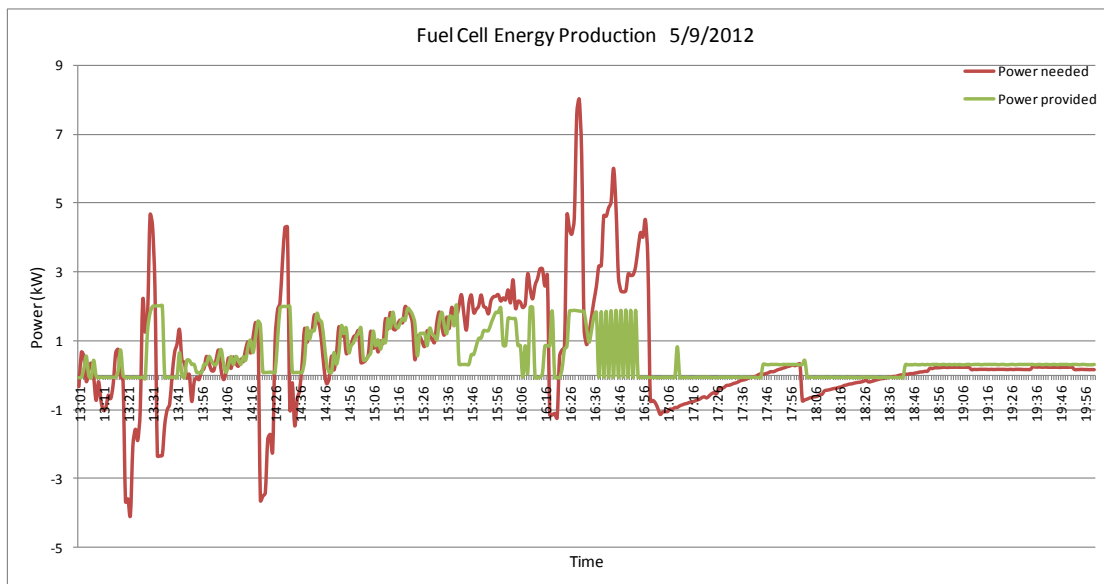
Ο έλεγχος της ποσότητας της ενέργειας που παράγεται κάθε στιγμή από την κυψέλη καυσίμου διεξάγεται με τη βοήθεια του λογισμικού της διεπαφής χρήστη, το οποίο επικοινωνεί με τον αντιστροφέα τάσης και του δίνει εντολή κάθε 10 δευτερόλεπτα πόσο ρεύμα να τραβήξει από την κυψέλη (setpoint ή αλλιώς *σημείο ρύθμισης*). Το σημείο ρύθμισης που πρέπει να δοθεί για να αυξηθεί ή να μειωθεί η παραγωγή ενέργειας στα απαιτούμενα επίπεδα υπολογίζεται από το κεντρικό σύστημα EMCS με βάση πειραματικά δεδομένα που έχουν προκύψει από μετρήσεις παραγόμενης ισχύος - ρεύματος που έχουν πραγματοποιηθεί στο σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης. Ακολούθως, το EMCS καταχωρεί την τιμή που υπολογίζει σε έναν πίνακα της βάσης δεδομένων του συστήματος, από όπου τη διαβάζει το λογισμικό της διεπαφής και τη μεταβιβάζει στον αντιστροφέα.

Για το χρονικό διάστημα που έγιναν οι παρατηρήσεις, τα σημεία ρύθμισης που υπολογίστηκαν από το EMCS βάσει των πειραματικών δεδομένων και δόθηκαν στο αντιστροφέα τάσης όπως επίσης και οι απαιτήσεις σε ενέργεια του χώρου του παταριού παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.4.



**Σχήμα 8.4.** Απαιτούμενη ενέργεια και αντίστοιχες τιμές σημείου ρύθμισης που υπολογίστηκαν και δόθηκαν στον αντιστροφέα τάσης.

Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται η προσφερόμενη ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου σε σχέση με τις ενεργειακές απαιτήσεις του χώρου του παταριού, όπως αυτή προέκυψε με την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου και των σημείων ρύθμισης που καθορίστηκαν από το EMCS.



**Σχήμα 8.5.** Παραγωγή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου σε σχέση με τις απαιτήσεις ενέργειας που δεν μπορούν να καλυφθούν από τις ΑΠΕ.

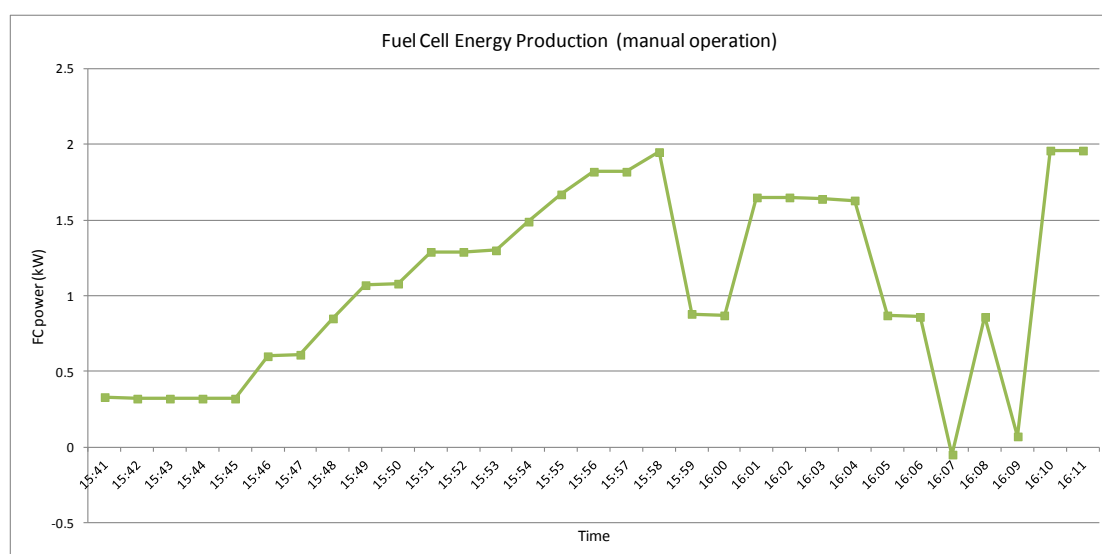
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η κυψέλη καυσίμου αποκρίνεται γρήγορα στις αυξομειώσεις των απαιτήσεων ισχύος και η καμπύλη της παραγωγής ενέργειας ακολουθεί

αρκετά πιστά την καμπύλη της ζήτησης. Ακόμη, στις περιπτώσεις όπου παρατηρείται πλεόνασμα ενέργειας η κυψέλη σταματάει να παράγει ενέργεια, αναμένοντας τη στιγμή όπου θα ξαναυπάρξει ζήτηση. Τη χρονική περίοδο όπου ο χώρος του παταριού δεν χρησιμοποιείται από το προσωπικό και η ζήτηση ενέργειας είναι αρκετά μικρή, η παραγωγή ενέργειας από την κυψέλη αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυνατή, δηλαδή 0.3 kW. Σημειώνεται ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσφέρει η κυψέλη καυσίμου στο κτήριο είναι 2 kW. Αυτό οφείλεται σε φθορά που έχουν υποστεί ορισμένα κελιά της κυψέλης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες τάσης και να μην μπορούν να αποδώσουν την ισχύ που προβλέπει ο κατασκευαστής. Τέλος, επισημαίνεται ότι η απόκλιση που παρατηρείται από τις 15:41 ως τις 16:12 οφείλεται στη διεξαγωγή πειραμάτων χειροκίνητης λειτουργίας της διεπαφής, τα οποία θα παρουσιαστούν στην επόμενη παράγραφο.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη σωστή και αποτελεσματική λειτουργία του λογισμικού της διεπαφής που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του χώρου του παταριού όταν αυτό απαιτείται.

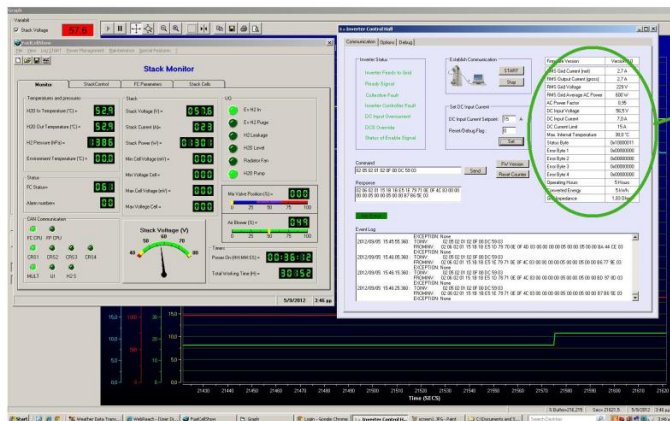
## 8.2 Δοκιμές με χειροκίνητη λειτουργία

Στο διάγραμμα του Σχήματος 8.5, το χρονικό διάστημα από 15:41 έως 16:12 αντιστοιχεί σε πειράματα χειροκίνητης λειτουργίας του λογισμικού της διεπαφής κατά τα οποία δόθηκαν σταδιακά τιμές σημείων ρύθμισης στην περιοχή 15 - 50 A και καταγράφηκαν οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα τάσης. Το χρονικό διάστημα αυτό η γραφική παράσταση της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων φαίνεται στο Σχήμα 8.6.



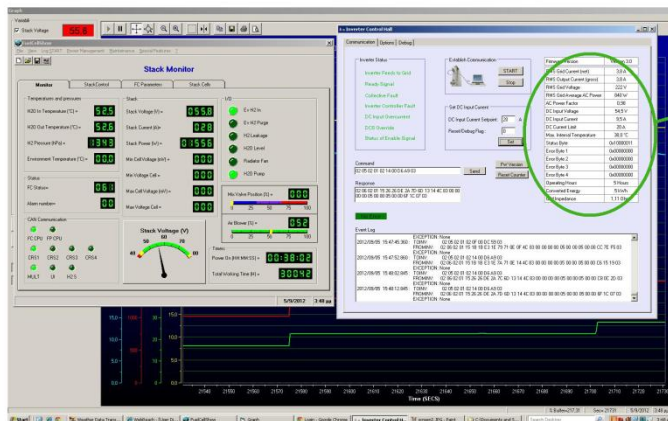
**Σχήμα 8.6.** Παραγωγή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων χειροκίνητης λειτουργίας.

Το ανοδικό τμήμα της καμπύλης από 15:46 ως 15:56 οφείλεται σε σταδιακή αύξηση του σημείου ρύθμισης, από τα 15 ως τα 50 A με βήμα 5 A. Τα στιγμιότυπα οθόνης όπου φαίνεται η λειτουργία της διεπαφής και τα δεδομένα που λαμβάνονταν από τους εσωτερικούς μετρητές του αντιστροφέα μετά από κάθε αύξηση της τιμής του σημείου ρύθμισης φαίνονται στις εικόνες 8.1 - 8.8 που ακολουθούν.



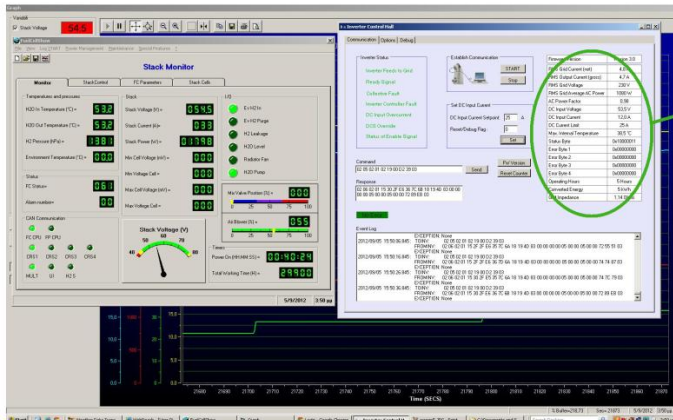
RMS Grid Current (net)	2,7 A
RMS Output Current (gross)	2,7 A
RMS Grid Voltage	229 V
RMS Grid Average AC Power	600 W
AC Power Factor	0,95
DC Input Voltage	56,5 V
DC Input Current	7,0 A
DC Current Limit	15 A
Max. Internal Temperature	38,0 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,83 Ohms

Εικόνα 8.1. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 15 A.



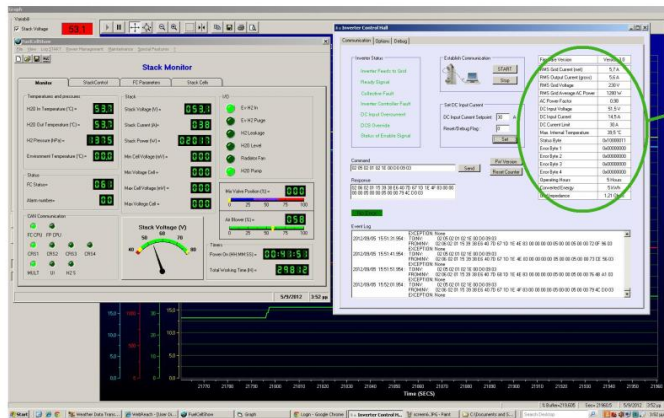
RMS Grid Current (net)	3,8 A
RMS Output Current (gross)	3,8 A
RMS Grid Voltage	222 V
RMS Grid Average AC Power	840 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	54,5 V
DC Input Current	9,5 A
DC Current Limit	20 A
Max. Internal Temperature	38,0 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,11 Ohms

Εικόνα 8.2. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 20 A.



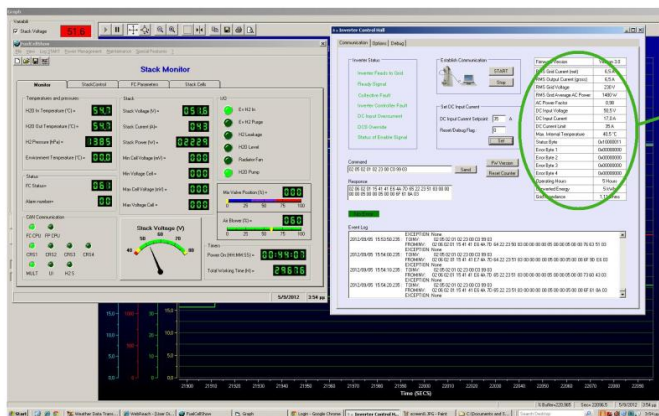
RMS Grid Current (net)	4,8 A
RMS Output Current (gross)	4,7 A
RMS Grid Voltage	230 V
RMS Grid Average AC Power	1080 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	53,5 V
DC Input Current	12,0 A
DC Current Limit	25 A
Max. Internal Temperature	38,5 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,14 Ohms

Εικόνα 8.3. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 25 A.



RMS Grid Current (net)	5,7 A
RMS Output Current (gross)	5,6 A
RMS Grid Voltage	230 V
RMS Grid Average AC Power	1280 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	51,5 V
DC Input Current	14,5 A
DC Current Limit	30 A
Max. Internal Temperature	39,5 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,21 Ohms

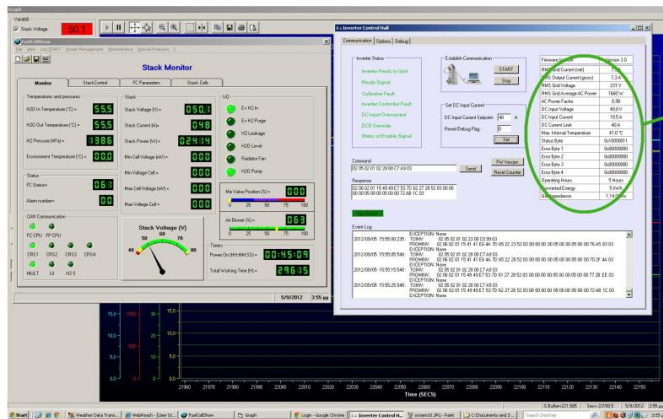
Εικόνα 8.4. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 30 A.



RMS Grid Current (net)	6,5 A
RMS Output Current (gross)	6,5 A
RMS Grid Voltage	230 V
RMS Grid Average AC Power	1480 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	50,5 V
DC Input Current	17,0 A
DC Current Limit	35 A
Max. Internal Temperature	40,5 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,11 Ohms

Εικόνα 8.5. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 35 A.





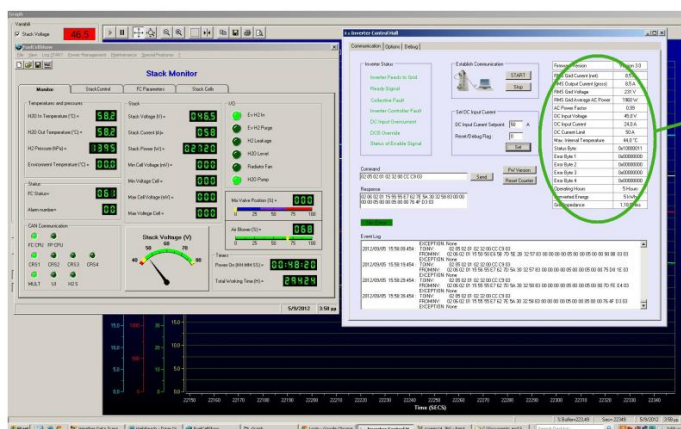
RMS Grid Current (net)	7,3 A
RMS Output Current (gross)	7,3 A
RMS Grid Voltage	231 V
RMS Grid Average AC Power	1660 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	49,0 V
DC Input Current	19,5 A
DC Current Limit	40 A
Max. Internal Temperature	41,0 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,14 Ohms

Εικόνα 8.6. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 40 A.



RMS Grid Current (net)	8,0 A
RMS Output Current (gross)	8,0 A
RMS Grid Voltage	231 V
RMS Grid Average AC Power	1820 W
AC Power Factor	0,98
DC Input Voltage	47,0 V
DC Input Current	22,0 A
DC Current Limit	45 A
Max. Internal Temperature	42,5 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,14 Ohms

Εικόνα 8.7. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 45 A.



RMS Grid Current (net)	8,5 A
RMS Output Current (gross)	8,5 A
RMS Grid Voltage	231 V
RMS Grid Average AC Power	1960 W
AC Power Factor	0,99
DC Input Voltage	45,0 V
DC Input Current	24,0 A
DC Current Limit	50 A
Max. Internal Temperature	44,0 °C
Status Byte	0x10000011
Error Byte 1	0x00000000
Error Byte 2	0x00000000
Error Byte 3	0x00000000
Error Byte 4	0x00000000
Operating Hours	5 Hours
Converted Energy	5 kWh
Grid Impedance	1,18 Ohms

Εικόνα 8.8. Στιγμιότυπο οθόνης από τη λειτουργία της διεπαφής θέτοντας σημείο ρύθμισης 50 A.

Σχετικά με τις απεικονιζόμενες πληροφορίες στον πίνακα πληροφοριών της διεπαφής σημειώνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η τιμή που απεικονίζεται στο πεδίο DC Input Current αντιστοιχεί στο μισό του ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα. Αυτό συμβαίνει διότι ο αντιστροφέας διαθέτει εσωτερικά για τη μετατροπή της ισχύος δύο δομικές μονάδες και το ρεύμα μοιράζεται σε αυτές ισόποσα. Η τιμή του ρεύματος στην κάθε μονάδα λαμβάνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον πίνακα πληροφοριών DC and AC Currents στην καρτέλα Debug.
- Η πραγματική τιμή του ρεύματος εισόδου είναι μικρότερη από την τιμή του σημείου ρύθμισης κατά 1 A περίπου. Η τιμή του σημείου ρύθμισης αντιστοιχεί στην πραγματικότητα στο μέγιστο όριο που θέτει ο αντιστροφέας στην ένταση του ρεύματος εισόδου (πεδίο DC Current Limit), η οποία συνήθως είναι ελαφρώς χαμηλότερη λόγω εσωτερικών περιορισμών λειτουργίας του αντιστροφέα.

Συγκεντρωτικά, οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα που παρατηρούνται σε κάθε αύξηση της τιμής του σημείου ρύθμισης φαίνονται στον Πίνακα 8.1.

**Πίνακας 8.1.** Ηλεκτρικά μεγέθη εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα τάσης που λαμβάνονται από τους εσωτερικούς μετρητές του για κάθε στάδιο αύξησης της τιμής του σημείου ρύθμισης.

Setpoint (A)	RMS Grid Current (A)	RMS Grid Voltage (V)	RMS Grid Average Power (W)	DC Input Voltage (V)	DC Input Current (A)	Output power (W) (EMCS measurement)
15	2.7	229	600	56.5	14	600
20	3.8	222	840	54.5	19	850
25	4.8	230	1080	53.5	24	1080
30	5.7	230	1280	51.5	29	1290
35	6.5	230	1480	50.5	34	1490
40	7.3	231	1660	49	39	1670
45	8	231	1820	47	44	1820
50	8.5	231	1960	45	48	1950

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις τιμές του Πίνακα 8.1, η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα αντιστοιχεί στην τάση του δικτύου, σημειώνοντας συνήθως μια μικρή απόκλιση της τάξης του 1 V. Η ισχύς εξόδου που μετράται από τους μετρητές του αντιστροφέα ουσιαστικά ταυτίζεται με τις μετρήσεις του συστήματος παρακολούθησης του EMCS, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των καταγραφών.



### Σύγκριση με αποτελέσματα μοντελοποίησης

Οι καταστάσεις λειτουργίας που απεικονίζονται στον Πίνακα 8.1 μπορούν να προσομοιωθούν στο μοντέλο του συστήματος που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Simulink (Σχήμα 6.31) μεταβάλλοντας την αντίσταση εξόδου  $R$  και επομένως τις **απαιτήσεις ισχύος**. Όπως έχει επισημανθεί και στην αντίστοιχη παράγραφο, η ισχύς που ζητείται να παρέχει το σύστημα κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης προσομοιώνεται με τη χρήση μιας κατανάλωσης  $R$  στην έξοδο του συστήματος και συνδέεται μαζί της με τη σχέση  $P = V_{grid}^2/R$ , όπου  $V_{grid} = 230$  V είναι η ενεργός τιμή της τάσης του δικτύου. Έτσι, προσομοιώνοντας διαδοχικά το μοντέλο για κατανάλωση

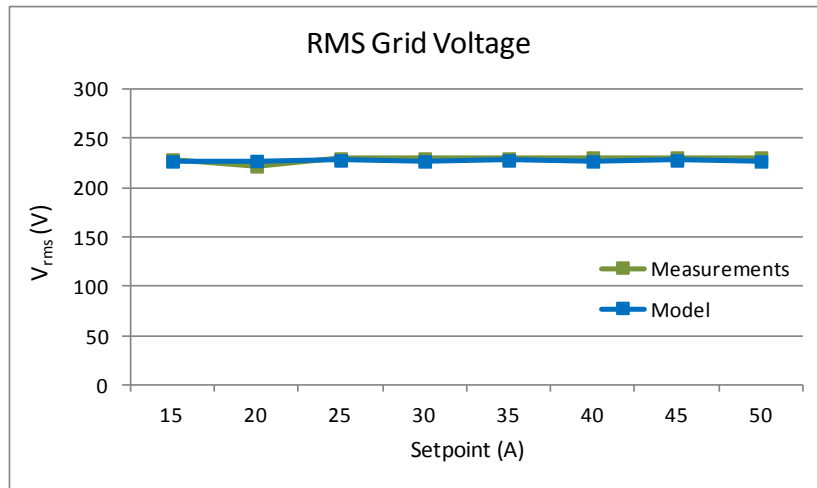
$$R = 88.2, 63, 49, 41.3, 35.7, 31.9, 29.1 \text{ και } 27 \text{ Ohm}$$

οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών που προκύπτουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2.

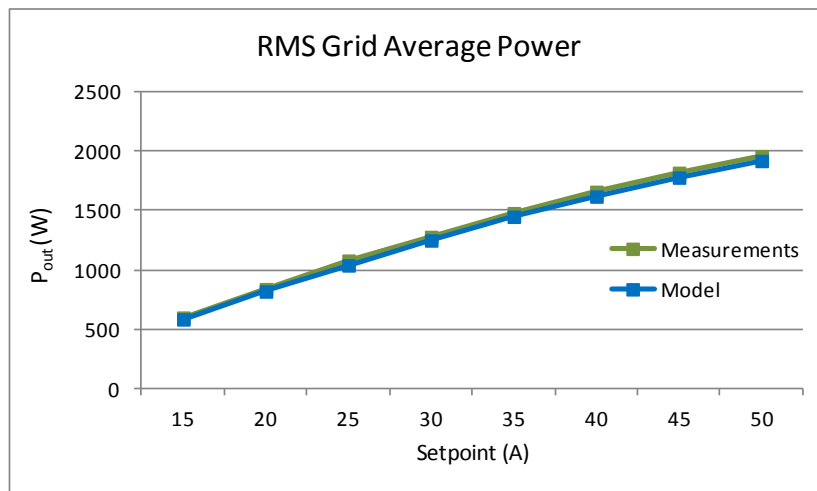
**Πίνακας 8.2.** Ηλεκτρικά μεγέθη εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα τάσης που προβλέπονται από το μοντέλο Simulink για διαφορετικές τιμές φορτίου.

RMS Output Voltage (V)	RMS Output Power (W)	Fuel Cell Voltage (V)	Fuel Cell Current (A)	Fuel Cell Power (W)
227	585	60.70	11.5	700
227.5	820	59.64	16	960
228	1040	58.80	20.5	1200
227	1250	58.10	25	1450
228	1450	57.43	29	1670
227	1620	56.90	33	1870
228	1780	56.42	36.5	2050
227	1920	56.05	39	2200

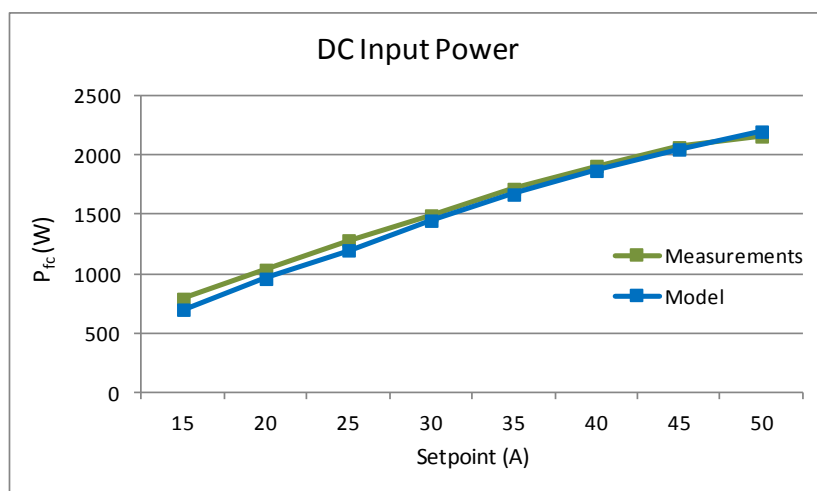
Οι τιμές από τις πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2 συγκρίνονται με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο Simulink στα Σχήματα 8.7 ως 8.11.



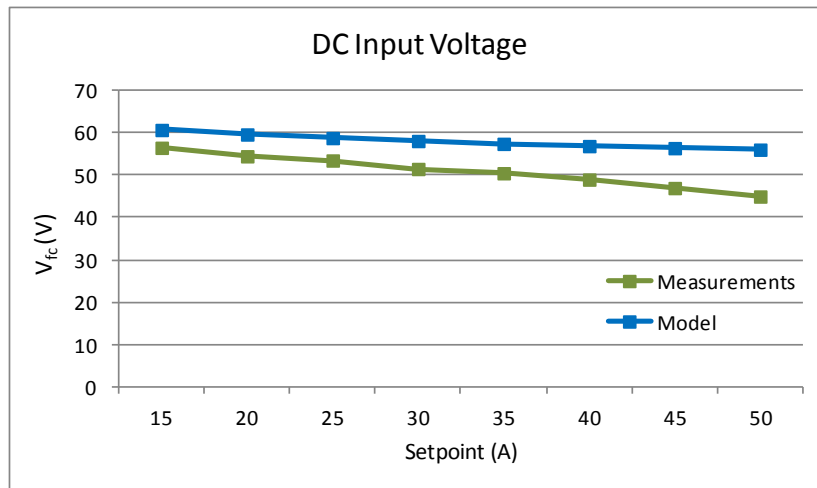
**Σχήμα 8.7.** Σύγκριση τάσης εξόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.



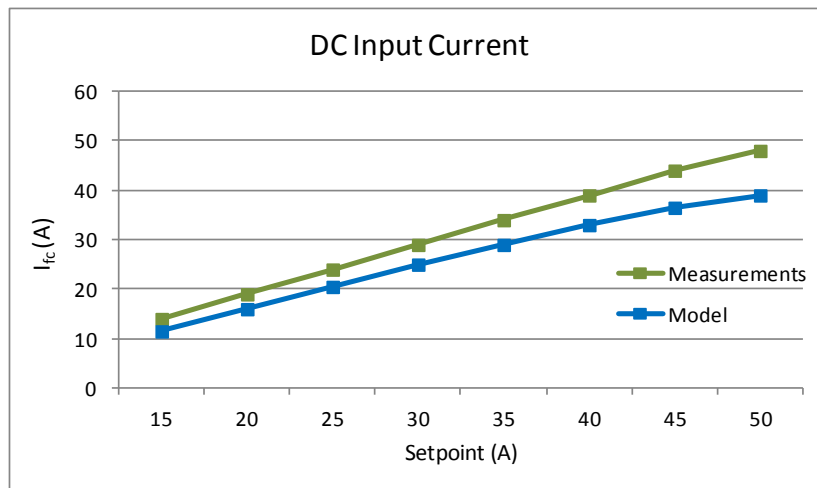
**Σχήμα 8.8.** Σύγκριση ισχύος εξόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.



**Σχήμα 8.9.** Σύγκριση ισχύος εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.



**Σχήμα 8.10.** Σύγκριση τάσης εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή της από το μοντέλο Simulink.



**Σχήμα 8.11.** Σύγκριση ρεύματος εισόδου αντιστροφέα που μετράται με τη βοήθεια της διεπαφής χρήστη με την υπολογιζόμενη τιμή του από το μοντέλο Simulink.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8.7 φαίνεται ότι για όλες τις περιπτώσεις απαιτήσεων ισχύος από 0.5 kW ως 2 kW η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου που υπολογίζεται από το μοντέλο Simulink είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 230 V, όπως ακριβώς και η έξοδος του πραγματικού συστήματος. Η καλή πρόβλεψη της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου έχει σαν συνέπεια την ορθή πρόβλεψη της τιμής της ισχύος εξόδου του συστήματος (Σχήμα 8.8). Επίσης, η ισχύς που προβλέπεται από το μοντέλο στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις πραγματικές μετρήσεις (Σχήμα 8.9), πράγμα που οφείλεται στην καλή εκτίμηση από το μοντέλο του βαθμού απόδοσης του αντιστροφέα. Αποκλίσεις παρατηρούνται στην υπολογιζόμενη τάση και ένταση εξόδου της κυψέλης καυσίμου (Σχήματα 8.10 και 8.11) οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση των απαιτήσεων ισχύος και οφείλονται στο γεγονός ότι το μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση την ιδανική καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου που δόθηκε από τον κατασκευαστή.



# 9

## Σύνοψη και συμπεράσματα

Ο χώρος υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ-Η<sub>2</sub> που είναι εγκαταστημένο στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου και λειτουργεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος H<sub>2</sub>SusBuild. Κύριο αντικείμενό της ήταν αφ' ενός η μοντελοποίηση και η προσομοίωση της λειτουργίας συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφή τάσης που είναι εγκατεστημένο στο κτήριο αυτό και αφ' ετέρου η ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμικού και υλικού που θα έκανε δυνατή την επικοινωνία του συστήματος με το κεντρικό Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου (EMCS) του κτηρίου και τον έλεγχο της λειτουργίας του.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε σταθερές συνθήκες και το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση των μηχανισμών απωλειών τάσης που παρατηρούνται κατά τη λειτουργία της, προβλέπει την τιμή που λαμβάνει η τάση εξόδου της κυψέλης σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Η καμπύλη πόλωσης που υπολογίζεται από το μαθηματικό μοντέλο συμφωνεί με τις μετρήσεις λειτουργίας της κυψέλης που δίνει ο κατασκευαστής.
- Το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της τάσης της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικές συνθήκες και το αντίστοιχο μοντέλο που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Simulink δίνουν τη δυνατότητα μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου. Ο χρόνος που χρειάζεται η τάση να αποκτήσει την τιμή ισορροπίας καθορίζεται από το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας το οποίο προσομοιώνεται στο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος με τη χρήση ενός πυκνωτή C. Η γνώση της πραγματικής τιμής της ή ο πειραματικός προσδιορισμός της είναι απαραίτητα στοιχεία για τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων του μεταβατικού μοντέλου.

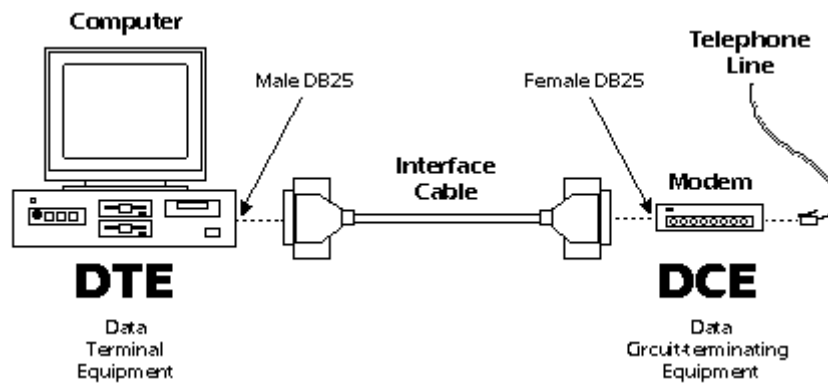
- Παράλληλα, για την ανύψωση και σταθεροποίηση της τάσης που παράγει η κυψέλη καυσίμου και ακολούθως τη μετατροπή της σταθεροποιημένης τάσης σε εναλλασσόμενη που πληρεί τις προδιαγραφές για τη σύνδεση στο δίκτυο αναπτύχθηκαν αντίστοιχα μοντέλα στο περιβάλλον Simulink που προσομοιώνουν τη λειτουργία ενός μετατροπέα ανύψωσης και ενός αντιστροφέα τάσης. Τα μοντέλα αυτά συνδέθηκαν με το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου και έτσι δόθηκε η δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος. Το βασικό συμπέρασμα της όλης προσομοίωσης του συνολικού κυκλώματος δείχνει ότι το σύστημα που σχεδιάστηκε μπορεί να τροφοδοτήσει με κατάλληλης ποιότητας ρεύμα τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.
- Για τις ανάγκες ελέγχου του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης που είναι εγκατεστημένο στο κτήριο και για την τροφοδότηση ενός τμήματος του κτηρίου εμβαδού 150 m<sup>2</sup> με την απαραίτητη ποσότητα ενέργειας κάθε στιγμή, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό διεπαφής χρήστη και υλικό που το συνοδεύει. Η εφαρμογή του συστήματος αυτού σε πραγματικό χρόνο έδειξε ότι η επικοινωνία με το κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου EMCS εκτελείται χωρίς πρόβλημα και τυχόν δυσλειτουργίες που παρουσιάζονται αντιμετωπίζονται κατάλληλα από το λογισμικό. Οι εντολές έναρξης και παύσης λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου καθώς και η ποσότητα ενέργειας που παρέχεται από αυτή συμβαδίζουν με μεγάλη ακρίβεια με τις ενεργειακές ανάγκες του τμήματος του κτηρίου που έχουν αναλάβει να καλύψουν. Παρόλα αυτά η κυψέλη καυσίμου για τεχνικούς λόγους από μια χρονική περίοδο και μετά δεν μπορούσε να παράγει την ισχύ που προβλεπόταν από τις τεχνικές της προδιαγραφές (6.3kW). Η προσφερόμενη ισχύς δεν μπορούσε να ξεπεράσει τα 2 kW πράγμα που πιθανότατα οφείλεται σε αστοχία της μεμβράνης ορισμένων κελιών της κυψέλης.
- Τέλος πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές χειροκίνητης λειτουργίας του συστήματος με σκοπό τη λήψη λεπτομερέστερων μετρήσεων σχετικών με τα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος όπως η τάση εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα, το ρεύμα που παρέχεται στο δίκτυο κλπ. Ακόμη, τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των πραγματικών μετρήσεων που προκύπτουν από το σύστημα με τις τιμές που προβλέπει το αντίστοιχο μοντέλο Simulink του συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για όλες τις περιπτώσεις απαιτήσεων ισχύος από 0.6 kW ως 2 kW η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου που υπολογίζεται από το μοντέλο Simulink είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 230 V, όπως ακριβώς και η έξοδος του πραγματικού συστήματος. Η πρόβλεψη της τελικής ισχύος εξόδου του συστήματος καθώς και της ισχύος που προβλέπεται από το μοντέλο στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου είναι επίσης σε πολύ καλή συμφωνία με τις πραγματικές μετρήσεις. Σε αυτό συμβάλλουν καταρχήν το γεγονός ότι το μοντέλο υπολογίζει σωστά την τάση εξόδου του συστήματος και κατά δεύτερον ότι ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα που προβλέπει το μοντέλο συμφωνεί με την πραγματική τιμή του. Αποκλίσεις παρατηρούνται μεταξύ της υπολογιζόμενης τάσης και έντασης εξόδου της κυψέλης καυσίμου και οφείλονται στο γεγονός ότι το μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση την ιδανική καμπύλη πόλωσης της κυψέλης καυσίμου που δόθηκε από τον κατασκευαστή.

# Παράρτημα :

## Σειριακή επικοινωνία RS-232 και RS-485

### Σειριακή επικοινωνία RS-232

Γενικά, η σειριακή επικοινωνία χαρακτηρίζεται από την αποστολή και λήψη δεδομένων κατά την οποία η μετάδοση των bits συμβαίνει διαδοχικά μέσα από ένα κανάλι μετάδοσης. Σε σχέση με την παράλληλη επικοινωνία είναι αρκετά πιο φθηνά υλοποιήσιμη και, αν και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι μικρότερη, έχει τη δυνατότητα να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρύτατα. Το πιο διαδεδομένο πρότυπο σειριακής επικοινωνίας είναι ίσως το πρότυπο *EIA-TIA-232-F* όπως ονομάζεται η σημερινή του έκδοση, ή αλλιώς όπως είναι ευρύτερα γνωστό *RS-232*. Στόχος του προτύπου αυτού είναι να περιγράψει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της σειριακής διασύνδεσης μεταξύ ενός DTE (Data Terminal Equipment) και ενός DCE (Data Circuit-terminating Equipment ή αλλιώς Data Communications Equipment), δηλαδή μεταξύ μιας συσκευής ενός χρήστη όπως π.χ. ο ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένης σε κάποιο δίκτυο με κάποιον κόμβο του δικτύου ο οποίος επικοινωνεί με τη συσκευή, όπως το modem. Ωστόσο, με τη χρήση κατάλληλης καλωδίωσης το πρότυπο μπορεί να εφαρμοστεί για τη σειριακή επικοινωνία μεταξύ οποιωνδήποτε συσκευών σαν να ήταν μεταξύ ενός DTE και ενός DCE.



**Σχήμα Π-1.** Παράδειγμα RS-232 σύνδεσης μεταξύ ενός προσωπικού υπολογιστή και ενός modem.

## Προδιαγραφές

Στο πρότυπο RS-232 ορίζονται αναλυτικά οι προδιαγραφές των σειριακών θυρών που χρησιμοποιούνται για την RS-232 επικοινωνία. Ακολουθεί περιγραφή των σημάτων που ορίζονται για τη διεξαγωγή της επικοινωνίας, των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της διάταξης και των μηχανικών χαρακτηριστικών της διεπαφής που ορίζεται, βασισμένη στην τελευταία έκδοση του προτύπου.

- *Σήματα επικοινωνίας*

Η διεπαφή που ορίζεται από το πρότυπο RS-232 χαρακτηρίζεται από 25 γραμμές σημάτων, αν και στην πράξη σπάνια χρησιμοποιούνται περισσότερες από 9. Από αυτές, απαραίτητες για την αμφίδρομη μετάδοση των δεδομένων είναι τρεις, μία για την αποστολή δεδομένων, μία για τη λήψη και μία που έχει τον ρόλο της γείωσης, ενώ οι υπόλοιπες είναι σχεδιασμένες για τον έλεγχο της σωστής διεξαγωγής της. Αναλυτικά, τα 9 σήματα τα οποία κυρίως χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή ασύγχρονης επικοινωνίας RS-232 είναι τα εξής:

*Data Terminal Ready (DTR)* Το σήμα αυτό τίθεται στο λογικό 1 από το DTE για να υποδηλώσει ότι η συσκευή είναι έτοιμη για ανταλλαγή δεδομένων.

*Data Set Ready (DSR)* Είναι το συμπληρωματικό σήμα του DTR, χρησιμοποιείται από το DCE για να υποδηλώσει με τη σειρά του ότι είναι επίσης έτοιμο για ανταλλαγή δεδομένων.

*Clear To Send (CTS)* Τίθεται στο λογικό 1 από το DCE για να υποδηλώσει ότι είναι διαθέσιμο να λάβει δεδομένα. Ανάλογα με την καλωδίωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιείται και ως απάντηση στο σήμα RTS.



<i>Request To Send (RTS)</i>	Ανάλογα με την καλωδίωση χρησιμοποιείται από το DTE για να υποδηλώσει είτε ότι επιθυμεί να στείλει δεδομένα είτε ότι είναι έτοιμο να δεχτεί.
<i>Data Carrier Detect (DCD)</i>	Χρησιμοποιείται από ένα DCE modem για να ενημερώσει το DTE ότι λαμβάνει ένα φέρον σήμα (carrier signal) από κάποιο απομακρυσμένο modem με το οποίο είναι συνδεδεμένο.
<i>Ring Indicator (RI)</i>	Χρησιμοποιείται από ένα DCE modem για να ενημερώσει το DTE ότι το τηλέφωνο λαμβάνει μια εισερχόμενη κλήση.
<i>Transmit Data (TD)</i>	Αποτελεί τη γραμμή μέσω της οποίας το DTE αποστέλλει δεδομένα στο DCE. Όσο βρίσκεται σε αδράνεια η στάθμη της τάσης είναι στο λογικό 1 (mark).
<i>Receive Data (RD)</i>	Αποτελεί τη γραμμή που μέσω της οποίας το DTE λαμβάνει δεδομένα από το DCE. Όσο βρίσκεται σε αδράνεια η στάθμη της τάσης είναι στο λογικό 1 (mark).
<i>Signal Ground (GND)</i>	Ο ακροδέκτης αυτός παρέχει την κοινή γείωση αναφοράς για τα κυκλώματα μεταφοράς των δεδομένων.

- *Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά*

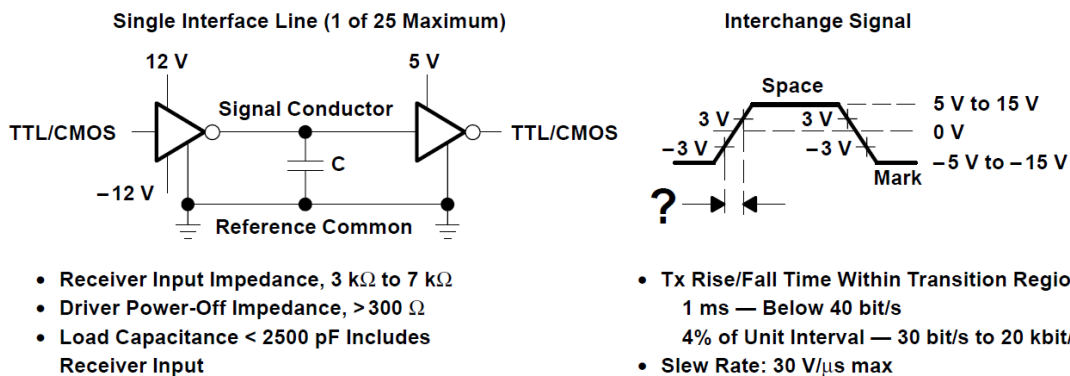
Σύμφωνα με το πρότυπο RS-232, τα σήματα που χρησιμοποιούνται αντιπροσωπεύονται από διαφορές τάσης αναφορικά με τη γείωση αναφοράς και χρησιμοποιούν δυαδική λογική, δηλαδή η τιμή τους μπορεί να βρίσκεται είτε στο λογικό 0 (space) είτε στο λογικό 1 (mark). Έτσι ορίζονται δύο επίπεδα τάσης, το υψηλό επίπεδο το οποίο ορίζεται μεταξύ +5 και +15 V και αντιστοιχεί στο λογικό 0 και το χαμηλό επίπεδο το οποίο μπορεί ορίζεται μεταξύ -5 και -15 V και αντιστοιχεί στο λογικό 1. Ακόμη, το πρότυπο δίνει το περιθώριο ακόμα και τάσεις πλάτους 3 V να αναγνωρίζονται πάντα σωστά από τον δέκτη σύμφωνα με την πολικότητά τους, έτσι ώστε η απόσβεση που υφίσταται η τάση του σήματος κατά τη μετάδοσή του να είναι μέχρι έναν βαθμό ανεκτή. Να σημειωθεί ότι τα σήματα δεδομένων (TD και RD) χρησιμοποιούν αρνητική λογική, ενώ τα σήματα ελέγχου (DCD, DTR, DSR, RTS, CTS και RI σε μία 9-γραμμών σειριακή διασύνδεση) χρησιμοποιούν θετική λογική.

Επίσης, το πρότυπο εισάγει ένα πλήθος περιορισμών οι οποίοι αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την ομαλή διεξαγωγή της επικοινωνίας. Σημαντικές επισημάνσεις είναι ότι:

- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (open-circuit voltage) πρέπει να μην υπερβαίνει τα  $\pm 25$  V ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώματος (short-circuit current) δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 500

mA. Η αντίσταση κάθε γραμμής πρέπει να είναι μεταξύ 3 kΩ και 7kΩ, το οποίο συνήθως καθορίζεται από την αντίσταση του κυκλώματος του δέκτη.

- Το μέγιστο μήκος του καλωδίου που θα χρησιμοποιηθεί ορίζεται εμμέσως από μία μέγιστη χωρητικότητα που επιτρέπεται να βλέπει ο οδηγός 2500 pF, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 15 με 20 μέτρα μήκους γραμμής, ανάλογα με την ανά μονάδα μήκους χωρητικότητα του καλωδίου.
- Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής (slew rate) στην έξοδο του οδηγού είναι καθορισμένος στα 30 V/μs έτσι ώστε να περιορίζεται σε ανεκτά επίπεδα το φαινόμενο crosstalk, κατά το οποίο μέρος του σήματος που διέρχεται από έναν αγωγό του καλωδίου επάγεται στους υπόλοιπους που γειτνιάζουν μαζί του εισάγοντας σημαντικό θόρυβο. Το γεγονός αυτό επιβάλλει επίσης τη χρήση ενός ανώτατου ορίου στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων το οποίο ορίζεται στα 20 kbit/s.



Σχήμα Π-2. Ηλεκτρικές προδιαγραφές προτύπου TIA/EIA-232-F.

- *Μηχανικά χαρακτηριστικά*

Η υποδοχή (connector) που ορίζεται από το πρότυπο RS-232 διαθέτει 25 ακροδέκτες ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν όλα τα σήματα που ορίζονται σε αυτό. Στην πράξη ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, από τα 25 σήματα χρησιμοποιούνται συνήθως τα 9 και επομένως η υποδοχή αυτή έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από μία μικρότερου τύπου η οποία διαθέτει 9 ακροδέκτες και ενδείκνυται για τις περισσότερες περιπτώσεις σειριακών διασυνδέσεων ανάμεσα σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές και περιφερειακά. Η υποδοχή επίσης διαφέρει ως προς το γένος ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται από συσκευή DTE ή συσκευή DCE. Συγκεκριμένα, τα DTE χρησιμοποιούν αρσενικές υποδοχές ενώ τα DCE θηλυκές, με αποτέλεσμα η διασύνδεση των δύο συσκευών να γίνεται ευθέως ακροδέκτη προς ακροδέκτη με ένα απλό RS-232 καλώδιο. Στην περίπτωση που η επικοινωνία αφορά δύο όμοιου τύπου συσκευές, δηλαδή δύο DTE ή δύο DCE, η σύνδεση είναι επίσης εφικτή χρησιμοποιώντας ένα RS-232 καλώδιο null modem. Τα καλώδια null modem διασταυρώνουν τις γραμμές αποστολής και λήψης έτσι ώστε ο ακροδέκτης TD του καθενός να ενώνεται στην άλλη άκρη

με τον ακροδέκτη RD του άλλου. Επιπλέον διασταυρώνονται και οι γραμμές DTR και DSR καθώς και οι RTS και CTS, επιτυγχάνοντας τελικά το επιθυμητό ταίριασμα των ακροδεκτών.



Σχήμα Π-3. DB9 υποδοχή, αρσενική (αριστερά) και θηλυκιά (δεξιά).

## Ασύγχρονη RS-232 επικοινωνία

Αν και το πρότυπο RS-232 ορίζει τις προδιαγραφές τόσο για τη διεξαγωγή σύγχρονης όσο και ασύγχρονης επικοινωνίας, συνήθως η επικοινωνία που εφαρμόζεται είναι ασύγχρονη, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι η σύγχρονη RS-232 επικοινωνία δεν χρησιμοποιείται. Ο όρος ασύγχρονη υποδηλώνει ότι η μεταφορά δεδομένων μπορεί να ξεκινήσει οποιαδήποτε στιγμή, επομένως ο αποστολέας (transmitter) μπορεί να αφήνει αυθαίρετα κενά διαστήματα πριν από κάθε μετάδοση ενώ ο δέκτης (receiver) πρέπει να είναι σε ετοιμότητα να λάβει δεδομένα.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα της σειριακής θύρας το οποίο αναλαμβάνει τη διαδικασία της αποστολής και της λήψης των δεδομένων είναι ο ασύγχρονος πομποδέκτης γενικής χρήσης (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ή αλλιώς UART. Το UART είναι προγραμματισμένο ώστε να μετατρέπει μια παράλληλη δέσμη δεδομένων οργανωμένων σε bytes σε σειριακή μορφή μεμονωμένων bits και αντίστροφα. Ειδικότερα, για την αποστολή μιας ακολουθίας από bytes δεδομένων το UART “σπάει” κάθε byte στα bits που το συνθέτουν και το πακετάρει με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί και να επανασυντεθεί από το UART της σειριακής θύρας του δέκτη. Στη συνέχεια τα bits που προκύπτουν διοχετεύονται διαδοχικά στη σειριακή γραμμή και στη συνέχεια καταλήγουν στην UART του δέκτη όπου μετατρέπονται πίσω στην παράλληλη μορφή τους ώστε να μπορεί να τα χρησιμοποιήσει η CPU του υπολογιστή.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε, στην ασύγχρονη RS-232 επικοινωνία η πληροφορία προτού αποσταλεί χωρίζεται σε λέξεις, όπου το μέγεθος κάθε λέξης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά που έχουν επιλεγεί για τη διεξαγωγή της. Με τη σειρά της, η κάθε λέξη χωρίζεται στα εξής πεδία:

**Start Bit :** Προκειμένου ο δέκτης να μπορεί να αναγνωρίσει την έναρξη μιας λέξης, αυτή σηματοδοτείται από το Start Bit. Όταν η γραμμή είναι αδρανής η τάση βρίσκεται

στο λογικό 1 (mark) ενώ η στάθμη του Start Bit βρίσκεται στο λογικό 0 (space), επομένως η αρχή της λέξης αναγνωρίζεται εύκολα από τον δέκτη. Χάρη στο Start Bit και στο Stop Bit επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας.

**Data Bits :** Αφού σταλεί το Start Bit ακολουθούν τα Data Bits στα οποία βρίσκονται τα μεταφερόμενα δεδομένα. Το πλήθος των Data Bits μπορεί να είναι από 5 έως 9 bits αν και συνηθέστερα είναι 8.

**Parity Bit :** Το Parity Bit παρέχει έναν στοιχειώδη έλεγχο για να επιβεβαιωθεί ότι η ληφθείσα λέξη δεν αλλοιώθηκε κατά τη μετάδοσή της. Η τιμή που λαμβάνει εξαρτάται από τη μορφή ισοτιμίας που χρησιμοποιείται, δηλαδή αν η ισοτιμία θα είναι άρτια (even), περιττή (odd), σημείου (mark) ή κενού (space). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται άρτια ισοτιμία μετριέται το πλήθος των άσων που εμπεριέχονται στα δεδομένα της λέξης και ανάλογα με το αποτέλεσμα το Parity Bit θα πάρει είτε την τιμή 0 είτε την τιμή 1 έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός άσων που θα προκύψει να είναι άρτιος. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και η περιττή ισοτιμία. Στην περίπτωση ισοτιμίας σημείου το Parity Bit είναι πάντα τεθειμένο στο λογικό 1 ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση ισοτιμίας κενού το Parity Bit είναι πάντα στο λογικό 0.

**Stop Bits :** Τα Stop Bits σηματοδοτούν το τέλος της λέξης και η στάθμη τους βρίσκεται πάντα στο λογικό 1 (mark). Διακρίνονται από τα προηγούμενα bits χάρη στη θέση τους και τη διάρκειά τους. Η χρονική τους διάρκεια μπορεί να εκτείνεται σε 1, 1.5 ή 2 περιόδους διάρκειας 1 bit.

Σημαντική παράμετρος της επικοινωνίας είναι και η προεπιλεγμένη συχνότητα με την οποία μεταδίδονται τα bits κάθε λέξης κατά μήκος της σειριακής γραμμής, η οποία εκφράζεται από το Baud Rate. Το Baud Rate ορίζεται ως ο αριθμός των αλλαγών κατάστασης που παρατηρούνται στη γραμμή στη μονάδα του χρόνου και είναι μία ένδειξη της ταχύτητας της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, Baud Rate τιμής 2400 υποδηλώνει ότι η γραμμή μπορεί να αλλάξει κατάσταση, δηλαδή να μεταβεί από το 0 στο 1 ή το αντίστροφο, έως και 2400 φορές ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα μετάδοσης μπορεί επίσης να εκφραστεί και από τα μεταδιδόμενα bit στη μονάδα του χρόνου (Bits Per Second ή BPS). Στην περίπτωση που η γραμμή μπορεί να λάβει μόνο δύο καταστάσεις όπως εδώ όπου οι δυνατές καταστάσεις είναι μόνο 0 και 1 τότε τα Bits Per Second και το Baud Rate είναι ίσα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διεξαγωγή της επικοινωνίας είναι ο αποστολέας και ο δέκτης να είναι προγραμματισμένοι ώστε να χρησιμοποιούν τις ίδιες παραμέτρους επικοινωνίας. Έτσι, τόσο η μορφή κάθε μεταδιδόμενης λέξης όσο και το Baud Rate πρέπει να είναι κοινά στα δύο άκρα της γραμμής, αλλιώς η επικοινωνία θα αποτύχει.

## Έλεγχος ροής (flow control)

Κατά την επικοινωνία μιας συσκευής DCE με μια συσκευή DTE είναι αρκετά σύνηθες ο αποστολέας να στέλνει τα δεδομένα με ρυθμό ταχύτερο από ότι μπορεί ο δέκτης να τα λάβει και να τα επεξεργαστεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται σοβαρός κίνδυνος πολλά από αυτά να χάνονται λόγω υπερχειλίσης. Προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα αυτή εφαρμόζεται κάποιο είδος ελέγχου της ροής των δεδομένων (flow control) ή αλλιώς χειραψίας (handshaking). Τα είδη ελέγχου που υπάρχουν είναι δύο, ο έλεγχος ροής με τη βοήθεια υλικού (hardware flow control) και ο έλεγχος ροής με τη βοήθεια λογισμικού (software flow control).

Ο έλεγχος ροής με τη βοήθεια λογισμικού προκειμένου να μπορεί να σταματήσει τη ροή δεδομένων όταν ο buffer του δέκτη είναι γεμάτος χρησιμοποιεί δύο χαρακτήρες ελέγχου (control characters), τον χαρακτήρα Xon και τον χαρακτήρα Xoff, οι οποίοι αντιπροσωπεύονται στον πίνακα ASCII από τους χαρακτήρες 17 και 19 αντίστοιχα, λόγω των οποίων ονομάζεται επίσης και Xon/Xoff. Μόλις ο buffer του δέκτη γεμίσει με δεδομένα και δεν υπάρχει άλλος χώρος στέλνει στον αποστολέα ένα byte με τον χαρακτήρα Xoff έτσι ώστε ο αποστολέας να σταματήσει να στέλνει δεδομένα. Από την άλλη, μόλις απελευθερωθεί ο χώρος στέλνει τον χαρακτήρα Xon και η αποστολή ξαναρχίζει. Έτσι, η ροή ελέγχεται και η υπερχειλίση αποφεύγεται ενώ δεν χρειάζονται επιπλέον γραμμές για την υλοποίησή του ελέγχου μιας και οι χαρακτήρες στέλνονται μέσω των γραμμών TD/RD. Μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Σε αργές διασυνδέσεις ο χρήση ελέγχου ροής με τη βοήθεια λογισμικού μπορεί να εισάγει καθυστέρηση στην επικοινωνία.
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα τα bytes 17 και 19 γιατί η επικοινωνία θα αποτύχει.
- Υπάρχει ο κίνδυνος ο δέκτης να μην αναγνωρίσει τον χαρακτήρα που του στάλθηκε λόγω αλλοίωσης.

Ο δεύτερος μηχανισμός ελέγχου ροής που μπορεί να εφαρμοστεί είναι ο έλεγχος ροής με τη βοήθεια υλικού ή αλλιώς RTS/CTS. Η χειραψία εδώ επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των ακροδεκτών RTS (Request To Send) και CTS (Clear To Send) της σειριακής θύρας και επομένως της χρήσης δύο επιπλέον γραμμών στην επικοινωνία των συσκευών DTE και DCE. Αν και η διαδικασία εξαρτάται μέχρις έναν βαθμό από την καλωδίωση που χρησιμοποιείται, συνήθως έχει ως εξής. Στην περίπτωση που η συσκευή DTE είναι έτοιμη να δεχτεί δεδομένα θέτει τον ακροδέκτη RTS στο λογικό 1, κάτι το οποίο το βλέπει η συσκευή DCE μέσω της αντίστοιχης γραμμής και αρχίζει τη μετάδοση δεδομένων. Από την άλλη, αν ο buffer γεμίσει και η αποστολή δεδομένων πρέπει να διακοπεί προσωρινά ο ακροδέκτης τίθεται στο λογικό 0. Η λειτουργία του ακροδέκτη RTS συμπληρώνεται από τον ακροδέκτη CTS ο οποίος αναλαμβάνει την αντίστοιχη δουλειά για τη συσκευή DCE. Έτσι, όταν η συσκευή DCE μπορεί να δεχτεί δεδομένα θέτει τον ακροδέκτη CTS στο λογικό 1, διαφορετικά τον θέτει στο λογικό 0. Σαν αποτέλεσμα, η ροή δεδομένων προστατεύεται χωρίς

κινδύνους, με αντίτιμο τη χρήση δύο επιπλέον γραμμών επικοινωνίας. Ακόμη, να σημειωθεί ότι με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να ελεγχθεί η ροή των δεδομένων μέσω του ζεύγους ακροδεκτών DTR (Data Terminal Ready) και DSR (Data Set Ready). Ωστόσο, σε γενικές γραμμές οι ακροδέκτες αυτοί χρησιμοποιούνται σπάνια για έλεγχο ροής ενώ κάποιες συσκευές τους χρησιμοποιούν σαν σήματα επιβεβαίωσης ότι είναι αναμμένες και συνδεδεμένες.

## **Σειριακή επικοινωνία RS-485**

Το πρότυπο TIA/EIA-485 ή αλλιώς RS-485 αποτελεί μια επέκταση του προτύπου RS-232 και σχεδιάστηκε ώστε να ξεπεραστούν κάποιοι από τους περιορισμούς που έθετε η RS-232 επικοινωνία. Είναι το πιο ευέλικτο από τη σειρά προτύπων σειριακής επικοινωνίας της EIA και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ αρκετών κόμβων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του σε σχέση με το RS-232 είναι τα εξής:

- Παρέχει τη δυνατότητα ταχύτερης επικοινωνίας επιτρέποντας ρυθμούς μετάδοσης σήματος έως και 50 Mbit/s.
- Παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε επικοινωνία πολλαπλών κόμβων και όχι μόνο στην επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών.
- Παρέχει τη δυνατότητα επέκτασης της επικοινωνίας σε μεγαλύτερες αποστάσεις επιτρέποντας τη χρήση μήκους γραμμής έως και 1200 μέτρων.
- Χρησιμοποιεί διαφορική μετάδοση σήματος με αποτέλεσμα τα σήματα να είναι λιγότερο ευάλωτα στο θόρυβο κατά τη μετάδοσή τους.

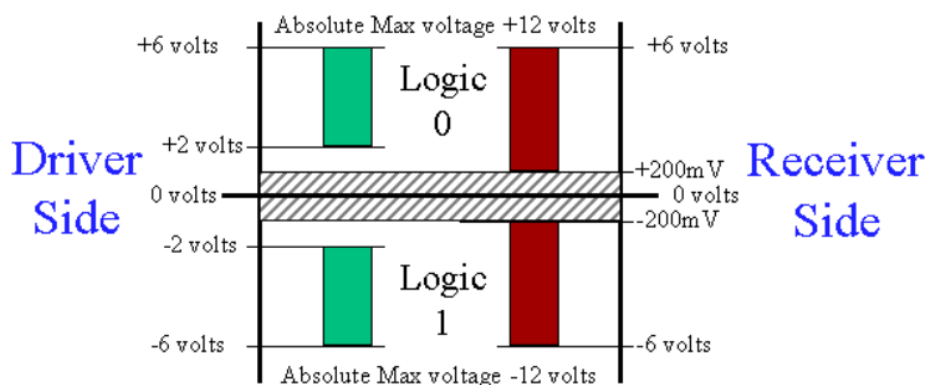
Χάρη στην ευελιξία που προσφέρει, ένας αυξανόμενος αριθμός προτύπων επικοινωνίας χρησιμοποιούν το RS-485 ως το φυσικό επίπεδο της υλοποίησής τους. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και πολύ διαδεδομένα πρότυπα όπως το Modbus και το Profibus.

### **Διαφορικά σήματα**

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της επικοινωνίας RS-232 είναι ότι τα σήματα είναι ευάλωτα στον θόρυβο κατά τη μετάδοσή τους μέσα από τις γραμμές επικοινωνίας. Το φαινόμενο αυτό ευθύνεται κυρίως στο γεγονός ότι τα σήματα αντιπροσωπεύονται από τη διαφορά τάσης ανάμεσα στη γραμμή μετάδοσης και στη γείωση αναφοράς. Για παράδειγμα, στην περίπτωση χρήσης ενός μακριού καλωδίου το επίπεδο τάσης της γείωσης αναφοράς στον δέκτη μπορεί να έχει μετατοπιστεί κατά αρκετά Volt από αυτό που παρατηρείται στον οδηγό με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα ο δέκτης να μη διαβάσει σωστά τα σήματα που λαμβάνει. Σαν αποτέλεσμα, ο θόρυβος που προκαλείται

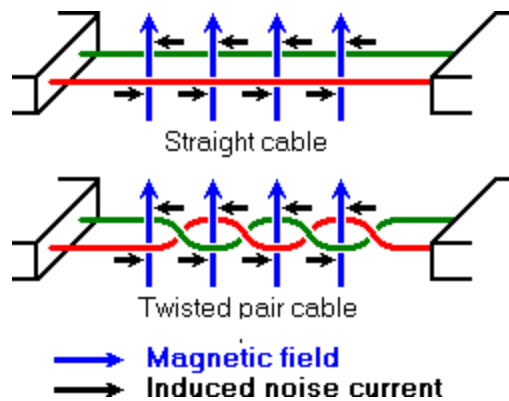
στη γραμμή της γείωσης μπορεί να έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα για την επικοινωνία και περιορίζει σημαντικά την απόσταση στην οποία μπορεί να διεξαχθεί.

Αντίθετα, στην επικοινωνία RS-485 το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται αφού αντιμετωπίζεται με τη χρήση διαφορικών σημάτων (differential signalling). Ειδικότερα, τα RS-485 σήματα μεταδίδονται μέσω ενός ζεύγους γραμμών και αντιπροσωπεύονται από τη διαφορά τάσης που παρατηρείται μεταξύ των γραμμών και όχι από τη διαφορά τάσης μεταξύ μιας γραμμής και της γείωσης αναφοράς. Έτσι, η διαφορά τάσης που θα μετρήσει ο δέκτης δεν επηρεάζεται από το επίπεδο τάσης της γείωσης και τα αποτελέσματα της μετατόπισης που μπορεί να έχει προκληθεί σε αυτό λόγω θορύβου εξαλείφονται. Όσον αφορά τα ηλεκτρικά μεγέθη, το λογικό 1 (mark) αναγνωρίζεται από μία θετική διαφορά δυναμικού της τάξης των 5V μεταξύ των γραμμών ενώ το λογικό 0 (space) από μία αρνητική διαφορά δυναμικού της τάξης των -5V. Οι τάσεις των γραμμών αναφορικά με τη γείωση του δέκτη πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων -7V και +12V μόλις φτάσουν στην είσοδό του.



Σχήμα Π-4. Επίπεδα τάσης των σημάτων επικοινωνίας στο πρότυπο RS-485.

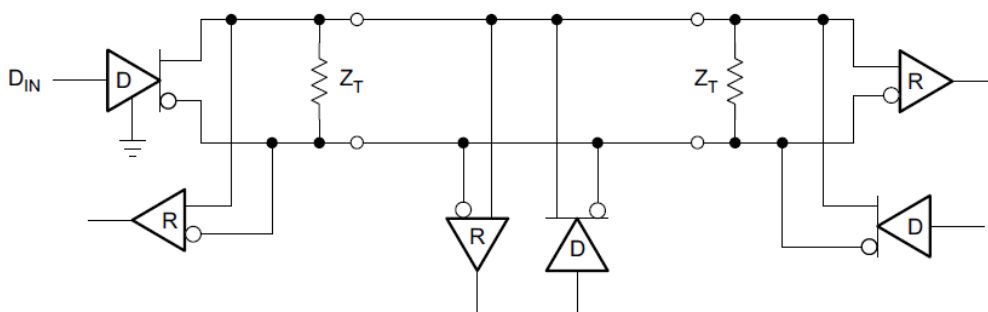
Επίσης, ο θόρυβος μειώνεται αρκετά στην RS-485 επικοινωνία μέσω της χρήσης συνεστραμμένου ζεύγους γραμμών (twisted pair). Με τη συστροφή του ζεύγους των γραμμών μετάδοσης τα ανεπιθύμητα ρεύματα που μπορεί να προκαλέσει ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αναιρούνται οπότε το μαγνητικό πεδίο ουσιαστικά χάνει την επίδρασή του στην επικοινωνία. Έτσι, ενώ στην περίπτωση της RS-232 επικοινωνίας είναι απαραίτητο να λαμβάνεται μέριμνα για τη θωράκιση των καλωδίων ώστε το μαγνητικό πεδίο να μην εισέρχεται στις γραμμές μεταφοράς, με τον τρόπο αυτόν αν και το μαγνητικό πεδίο εισέρχεται ο θόρυβος που προκαλεί είναι ανεπαίσθητος. Ο συνδυασμός χρήσης διαφορικών σημάτων και συνεστραμμένου ζεύγους γραμμών επιτρέπει στην RS-485 επικοινωνία να διεξάγεται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις και με αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα από την RS-232, αν και αυξανόμενη της απόστασης η επίδραση του θορύβου σταδιακά επανέρχεται και η επιτρεπόμενη ταχύτητα μειώνεται.



**Σχήμα Π-5.** Επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση που το ζεύγος γραμμών δεν είναι συνεστραμμένο και στην περίπτωση που είναι.

### Τοπολογία δικτύου

Το κυριότερο πλεονέκτημα που παρέχει η χρήση του προτύπου RS-485 είναι ότι υποστηρίζει τοπολογία δικτύου και μπορεί να συνδέσει πολλαπλούς αποστολείς και δέκτες στο ίδιο δίκτυο, έως και 32 συσκευές στην περίπτωση δεκτών με αντίσταση εισόδου 12 kΩ. Οντας απλό στην υλοποίησή του, αποτελεί συχνά την καλύτερη επιλογή δικτύωσης σε επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές με υπολογιστές, PLCs, μικροεπεξεργαστές ή και έξυπνους αισθητήρες. Η επικοινωνία που ορίζεται μεταξύ των συσκευών είναι ασύγχρονη, ενώ η σύνδεσή τους ενδείκνυται να γίνει σύμφωνα με την τοπολογία αλυσιδωτής σύνδεσης (daisy chain) όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Σε μεγάλες ταχύτητες και μεγάλες σε μήκος γραμμές είναι επίσης απαραίτητη η χρήση αντιστάσεων τερματισμού στα άκρα της τοπολογίας για να αποφευχθεί η ανάκλαση των σημάτων. Στην περίπτωση χρήσης άλλης τοπολογίας και όχι αλυσιδωτής σύνδεσης τότε η χρήση αντιστάσεων τερματισμού καθίσταται προβληματική και η ποιότητα των σημάτων θα υποβαθμιστεί σημαντικά.



**Σχήμα Π-6.** Τοπολογία δικτύου για τη διασύνδεση πολλαπλών κόμβων μέσω προτύπου RS-485.

Το δίκτυο που ορίζεται λειτουργεί με τον εξής τρόπο. Στην πλειοψηφία των υλοποιήσεων ένας από τους κόμβους ορίζεται ως “αφέντης”, ο οποίος στέλνει ερωτήματα ή



εντολές πάνω στον διάδρομο RS-485. Σε κάθε έναν από τους υπόλοιπους κόμβους ανατίθεται μία μοναδική διεύθυνση χάρη στην οποία ο κόμβος αυτός αποκρίνεται μόνο σε πακέτα προορισμένα για τον ίδιο, ενώ διαφορετικά βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής αντίστασης. Τα πακέτα αυτά δημιουργούνται από τον αφέντη, ο οποίος περιοδικά απευθύνεται σε όλες τις διασυνδεδεμένες υποτελείς μονάδες. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις υλοποιήσεων στις οποίες δεν υπάρχει αφέντης. Στις περιπτώσεις αυτές όλες οι μονάδες μπορούν να ανακοινώσουν τη μετάδοση ενός πακέτου ενώ ταυτόχρονα πρέπει να παρατηρούν τι έχει σταλεί. Το σύστημα αυτό είναι πολύ χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου οι συσκευές πρέπει να μπορούν ανά πάσα στιγμή να μεταδώσουν δεδομένα χωρίς την αναμονή ερώτησης από τον αφέντη, αλλά από την άλλη η αξιοποίηση του προσφερόμενου εύρους ζώνης γίνεται σε αρκετά μικρότερο βαθμό.



# Βιβλιογραφία

## Κεφάλαιο 2 : Ενεργειακά αυτόνομο κτήριο ΑΠΕ-H<sub>2</sub> στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου

- [1] <http://www.h2susbuild.ntua.gr/> [online]
- [2] M. Taxiarchou, “*Development of a clean and energy self-sustained building in the vision of integrating H<sub>2</sub> economy with renewable sources*”, Workshop on Energy efficient buildings, Brussels, April 2010
- [3] A. Milo, H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, S. Bacha, P. Rodríguez, “*Optimal economic exploitation of hydrogen based grid-friendly zero energy buildings*”, Renewable Energy pp 197 - 205, 2011

## Κεφάλαιο 3 : Κοψέλες Καυσίμου

- [4] K. Kuang, K. Easler, “*Fuel Cell Electronics Packaging*”, Springer, 2007
- [5] <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm> [online]
- [6] J. Larminie, A. Dicks, “*Fuel Cell Systems Explained*”, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 2003
- [7] G. Hoogers, “*Fuel Cell Technology Handbook*”, CRC Press, 2003
- [8] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “*Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications, Power Electronics and Applications Series*”, CRC Press, 2010
- [9] M. H. Nehrir, C. Wang, “*Modeling and Control of Fuel Cells: Distributed*

*Generation Applications*”, John Wiley and Sons, 2009

- [10] C. Spiegel, “*PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*”, Academic Press, 2008
- [11] J. Zhang, “*PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers*”, Springer, 2008
- [12] Ν. Αβραμιώτης - Φαληρέας, “*Ανάλυση λειτουργίας και ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου προσομοίωσης κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)*”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [13] Γ. Ιατρόπουλος, Ι. Κοντογιάννης, “*Μοντελοποίηση συστήματος διανεμημένης παραγωγής με κυψέλες καυσίμου και προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων*”, Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2008

#### **Κεφάλαιο 4 : Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος**

- [14] M. K. Kazimierczuk, “*Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*”, John Wiley and Sons, 2008
- [15] R. Shaffer , “*Fundamentals Of Power Electronics With Matlab*”, Charles River Media, 2006
- [16] Σ. Μανιάς, “*Ηλεκτρονικά Ισχύος*”, 6<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, 2007
- [17] Σ. Μανιάς, “*Ανώτερα κεφάλαια ηλεκτρονικών ισχύος*”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1997
- [18] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, “*Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος, ανάλυση, σχεδίαση και εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος*”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010

#### **Κεφάλαιο 5 : Τεχνική περιγραφή της κυψέλης καυσίμου Mira 6 και του αντιστροφέα τάσης DHF-1AC-5000W**

- [19] Morpheic Exergy, “*MIRA 6, Unregulated DC Power Module 6 kW DC*”, Technical Specifications Brochure
- [20] Delta Energy Systems, “*Inverter-Family DHF-1AC-2600W DHF-1AC-5000W Operation Manual*”, Technical Specifications Brochure, 2004
- [21] Delta Energy Systems, “*Fuel Cell Inverter Family*”, Technical Specifications Brochure, 2007

## **Κεφάλαιο 6 : Μοντελοποίηση συστήματος κυψέλης καυσίμου - αντιστροφέα τάσης στο περιβάλλον Matlab - Simulink**

- [22] J. M. Andujar, F. Segura, M. J. Vasallo, “*A suitable model plant for control of the set fuel cell - DC/DC converter*”, Renewable Energy 33, pp 813 – 826, 2008
- [23] Ahmad W. Al-Dabbagh, Lixuan Lu, Antonio Mazza, “*Modelling, simulation and control of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) power system*” Hydrogen Energy 35, pp 5061-5069, 2010
- [24] F. Laurencelle, R.Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T. K. Bose and A. Laperriere, “*Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack*”, Fuel Cells 1, pp 66-71, 2001
- [25] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, M .G. Simões, “*An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5, October 2004
- [26] Jinghua Zhong, “*PID Controller Tuning : A Short Tutorial*”, Mechanical Engineering, Purdue University, Spring 2006
- [27] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A.I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, P. R. Roberge, “*Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*”, Journal of Power Sources 86, pp 173–180, 2000
- [28] P. Khamphakdi and W. Khan-ngern, “*The Analysis of Output filter for Grid Connected Single Phase Full Bridge Inverter Based on PSpice Simulation Technique*”, Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Compatibility, 2005
- [29] M. C. Trigg, C. V. Nayar, “*Matlab Simulink Modelling of a Single-Phase Voltage Controlled Voltage Source Inverter*”, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC’06), December 2006
- [30] S. T. Karris, “*Circuit Analysis II with MATLAB Computing and Simulink / SimPowerSystems Modeling*”, Orchard Publications, 2009

## **Κεφάλαιο 7 : Δημιουργία διεπαφής χρήστη για τον έλεγχο λειτουργίας του πραγματικού συστήματος**

- [31] I. Horton, “*Ivor Horton’s Beginning Visual C++ 2010*”, Wrox, 2010
- [32] M. Snell, L. Powers, “*Microsoft Visual Studio 2010 Unleashed*”, Sams Publishing, 2010

- [33] Delta Energy Systems, “*Interface-Specification Inverter with Grid Connection Type: DHF-1AC-xx00W*”, Technical Specifications Brochure, 2004

**Παράρτημα : Σειριακή επικοινωνία RS-232 και RS-485**

- [34] Jan Axelson, “*Serial Port Complete*”, Second Edition, Lakeview Research LLC, 2007
- [35] [http://www.lavalink.com/wp-content/uploads/white\\_papers/rs\\_232\\_serial\\_ports.pdf](http://www.lavalink.com/wp-content/uploads/white_papers/rs_232_serial_ports.pdf)  
[online]
- [36] <http://www.ti.com/lit/an/slla037a/slla037a.pdf> [online]
- [37] [http://www.taltech.com/support/entry/serial\\_intro](http://www.taltech.com/support/entry/serial_intro) [online]
- [38] <http://www.lammertbies.nl/> [online]