

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Εκπόνηση εργασίας: **Γεώργιος Πληγορόπουλος** Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Σταυρακάκης



Πρόλογος

Ο υβριδικός συνδυασμός πολλών διαφορετικών τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η λύση για μια φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ενέργειας και ανεξαρτητοποίηση από τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου που εδώ και δεκαετίες αποτελούν τον κύριο ενεργειακό πόρο της ανθρωπότητας. Σε αυτή τη διπλωματική συνδυάζεται ένα φωτοβολταικό σύστημα με ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου. Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται από το φωτοβολταικό σύστημα ενώ το σύστημα κυψέλης καυσίμου αξιοποιεί την ενέργεια που περισσεύει. Πιο συγκεκριμένα έχουμε ένα φωτοβολταικό πάρκο με ηλιακές κυψέλες τεχνολογίας πυριτίου, ηλεκτρονικές συσκευές διαχείρισης της τάσης του ρεύματος, συσκευή ηλεκτρόλυσης του νερού με αλκαλικό διαλύτη, μπουκάλες αποθήκευσης υδρογόνου σε υψηλή πίεση, κυψέλες καυσίμου τεχνολογίας μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και αντιστροφείς για την παροχή ρεύματος στον χρήστη. Στη διπλωματική θα γίνει αξιοποίηση προχωρημένων, σύγχρονων και λεπτομερών μοντέλων και η εξομοίωση τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Θα γίνει χρήση του εργαλείου Simulink της Matlab και μέσω της εξομοίωσης θα εξάγουμε απλοποιημένα μοντέλα που σε μακροσκοπικό επίπεδο θα είναι ενεργειακά ταυτόσημα με τα αρχικά. Σκοπός της διπλωματικής είναι η σωστή συνδεσμολογία όλων των επιμέρους μοντέλων για την κατασκευή ενός ενοποιημένου συστήματος στο οποίο θα γίνει η κατάλληλη διαστασιολόγηση ώστε αυτό να παρέχει αυτόνομα ενέργεια σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, τη νήσο Δονούσα. Περαιτέρω θα γίνει οικονομική μελέτη του συστήματος ώστε να εξετασθεί αν μια ανάλογη επένδυση κρίνεται ή όχι ως προσοδοφόρα. Το βασικό συμπέρασμα της εργασίας είναι πως μέσω της εξομοίωσης έχουμε μια πρώτη οπτική απεικόνιση του συστήματος και μια καλή συνολική εκτίμηση των επιδόσεων μιας αντίστοιχης υλοποίησης.

Λέξεις Κλειδιά

υβριδικό σύστημα, φωτοβολταικό σύστημα, electrolyzer, κυψέλες καυσίμου, υπερπυκνωτές, αντιστροφείς, μετατροπείς συνεχούς τάσης, τεχνοοικονομική ανάλυση, νήσος Δονούσα

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρακάκη για τον ενθουσιασμό που συμμερίστηκε μαζί μου, την συμβολή του στις προσπάθειες μου και την καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η άριστη συνεργασία του έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιτυχημένη διεκπεραίωση της εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων	
Πρόλογος	2
Λέξεις Κλειδιά	2
Ευχαριστίες	2
Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 1	
Ηλιακή Ακτινοβολία	
Ηλιακή ακτινοβολία εκτός Γήινης ατμόσφαιρας	12
Επίδραση Ατμοσφαιρικών Φαινομένων	13
Βασικές γωνίες, χρήσιμες έννοιες και εξισώσεις	
Αλγόριθμος ακριβής θέσης του ηλίου PSA	
Υπολογισμός βέλτιστης κλίσης Φ/Β πλαισίου σε πλήρη ηλιοφάνεια	19
Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας – πηγές στο διαδίκτυο	23
Κεφάλαιο 2	29
Φωτοβολταικό Σύστημα	29
Φωτοβολταικό φαινόμενο	29
Μελέτη ενός Τυπικού Φωτοβολταικού Κυττάρου	33
Εξομοίωση με το PC1D σε σταθερή κατάσταση	
Εξομοίωση με το PC1D σε μεταβαλλόμενη (transient) κατάσταση	
Υπολογισμός Απόδοσης Φωτοβολταικού Κυττάρου	
Θερμοκρασιακές Επιδράσεις στο Φωτοβολταικό Κύτταρο	
Εμπειρικό Μοντέλο Φωτοβολταικού Κυττάρου Δύο Διόδων	43
Σύνθεση Φωτοβολταικού Πλαισίου από Φωτοβολταικά Κύτταρα	46
Διάταξη Παρακολούθησης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)	49
Σύνθεση του Φωτοβολταικού Πάρκου από Φωτοβολταικά Πλαίσια	50
Βέλτιστη Διάταξη Φωτοβολταικών Συστοιχιών	51
Ενεργειακό Μοντέλο Φωτοβολταικής Γεννήτριας	52
Κεφάλαιο 3	54
Σύστημα Ηλεκτρόλυσης Νερού	54
Εξαγωγή Υδρογόνου από Μεθανόλη – Οικονομική Λύση	
Εξαγωγή Υδρογόνου από Νερό – Οικολογική Λύση	
PEM Electrolyzer	

3

Solid Oxide Electrolyzer	55
Alkaline Electrolyzer	56
Μονοπολική Διάταξη	57
Διπολική Διάταξη	58
Μονοπολική ή Διπολική Διάταξη?	58
Υπέρταση (Overpotential)	59
Μοντέλο Alkaline Electrolyzer	59
Εξισώσεις Μοντέλου	60
Παραγωγή Υδρογόνου & Οξυγόνου	62
Εξομοίωση Αναλυτικού Μοντέλου	63
Ενεργειακό Μοντέλο Electrolyzer	66
Κεφάλαιο 4	68
Αποθήκευση Καυσίμου	68
Παράγοντες: Πίεση και Θερμοκρασία	70
Υγροποίηση Υδρογόνου	70
Αποθήκευση Υδρογόνου εντός Χημικών Ενώσεων	71
Μεταλλικά Υδρίδια (Metal Hydrides)	72
Μοντέλο Αποθήκευσης Υδρογόνου υπό Υψηλή Πίεση	73
Υλοποίηση Μοντέλου στο Simulink	73
Συμπιεστής (Compressor)	77
Κεφάλαιο 5	80
Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)	80
Μηχανές Ανάφλεξης – Κυψέλες Καυσίμου	80
Κατηγορίες Κυψελών Καυσίμου	80
Κυψέλες Καυσίμου Υψηλών Θερμοκρασιών	81
Κυψέλες Καυσίμου Μέσης Θερμοκρασίας	82
Κυψέλες Καυσίμου Χαμηλής Θερμοκρασίας	83
Βασικά Μέρη μιας ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου	84
Φυσική Ερμηνεία μιας ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου	85
Ηλεκτρικές Απώλειες σε μια ΡΕΜ Κυψέλη Καυσίμου	87
Double-Layer Charging Effect	88
Μοντέλο ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου στο Simulink	88

Εξομοίωση Αναλυτικού Μοντέλου ΡΕΜFC	90
Ενεργειακό Μοντέλο Συστήματος Κυψελών Καυσίμου	95
Κεφάλαιο 6	98
Συστήματα Διαχείρισης Ισχύος	
Αρχές λειτουργίας Μετατροπέων DC/DC	
Ενεργειακό Μοντέλο Μετατροπέων DC/DC	100
Αρχές Λειτουργίας των Αντιστροφέων	101
Γέφυρα Αντιστροφέα	
Δημιουργία Τετραγωνικών Παλμών	
Αρμονικές Συχνότητες	
Ζωνοπερατό Φίλτρο στα 50Ηz	
Ρυθμιστής Τάσης	104
Φίλτρο Εισόδου	104
Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα Αυτόνομου Συστήματος	104
Ενεργειακό Μοντέλο Αντιστροφέα	105
Αρχές Λειτουργίας Υπερπυκνωτών	107
Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Υπερπυκνωτή	110
Κεφάλαιο 7	113
Υβριδικό Σύστημα Φ/Β και Κυψελών Καυσίμου	
Παρουσίαση & Παραδοχές	113
Έλεγχος Ενεργειακών Ροών	116
Διαστασιολόγηση & Απόδοση	117
Διαστασιολόγηση	
Συνολική Απόδοση Συστήματος	
Αποτελέσματα	
Εξομοίωση & Συμπεράσματα	127
Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου)	
Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου) Εξομοίωση Δύο Καλοκαιρινών Ημερών (15-16 Ιουλίου)	138 139
Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου) Εξομοίωση Δύο Καλοκαιρινών Ημερών (15-16 Ιουλίου) Κεφάλαιο 8	138 139 140
Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου) Εξομοίωση Δύο Καλοκαιρινών Ημερών (15-16 Ιουλίου) Κεφάλαιο 8 Τεχνοοικονομική Ανάλυση	
Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου) Εξομοίωση Δύο Καλοκαιρινών Ημερών (15-16 Ιουλίου) Κεφάλαιο 8 Τεχνοοικονομική Ανάλυση Μεθοδολογία Οικονομικής Εκτίμησης	

	Επιδότηση	. 141
	Δάνειο	. 141
	Πώληση Ενέργειας	. 142
	Λειτουργικό Κόστος	. 142
	Πληθωρισμός	. 143
	Φορολογία	. 144
	Καθαρή Παρούσα Αξία	.144
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	. 145
	Περίοδος Αποπληρωμής Ιδίων Κεφαλαίων	. 145
A	ποτελέσματα ενός Ενδεικτικού Επενδυτικού Πλάνου	145
Επί	λογος	148
Г	Ιαρατηρήσεις, Προτάσεις & Βελτιώσεις	149
В	ιβλιογραφία	152

Εικόνα 1 Απορρόφηση Ηλιακής ακτινοβολίας	13
Εικόνα 0-1 Ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδε ί	κτης.
Εικόνα 0-2 Ισχυς Ακτινοβολίας - Δονούσα - 50m υψόμετρο - 16 Ιανουαρίου Σφάλμα	! Δεν
έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Εικόνα 0-1 Ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδεί	κτης.
Εικόνα 0-2 Ενεργειακή Πυκνότητα ανά ημέρα για το έτος 2009 - περιοχή Δονούσα -	
υψόμετρο 50m Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδε ί	κτης.
Εικόνα 0-3 Ετήσια ενέργεια για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταικού πλαισίου Σφά	ιλμα!
Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Εικόνα 7 - Πυκνότητα Ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα	25
Εικόνα 8 - Ιστογραμμα Ηλιακής Ακτινοβολίας	26
Εικόνα 9 - Χειρότερη και Καλύτερη "Ηλιακή" ημέρα	27
Εικόνα 10 - Φωτοβολταικό Κύτταρο	29
Εικόνα 0-2 Φωτοβολταικό Κύτταρο σε ανοιχτοκύκλωμα	32
Εικόνα 0-3 Φωτοβολταικό Κύτταρο σε βραχυκύκλωμα	33
Εικόνα 13 - Πυκνότητα Πρόσμιξης Αποδοχέων και Δοτών (λογαριθμική κλίμακα x-άξονα	ι και
γ-άξονα)	35
Εικόνα 14 - Δημιουργία & Επανασύνδεση Φορέων	37
Εικόνα 15 - Χαρακτηριστική I-V	38
Εικόνα 16 - Ισχύς φωτοβολταικού κυττάρου	39
0-5 Μεταβολή Ισχύος σε σχέση με τη Θερμοκρασία	40
0-6 Μεταβολή της Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος σε σχέση με τη Θερμοκρασία	41
Εικόνα 0-7 Μεταβολή του Ρεύματος Βραχυκυκλώματος σε σχέση με τη Θερμοκρασία	42
Εικόνα 20 - Μοντέλο Δύο Διόδων	43
Εικόνα 21 - Συνδεσμολογία Φωτοβολταικού Πλαισίου	47
Εικόνα 22 - Δίοδοι Παράκαμψης και Απομόνωσης	48
Εικόνα 23 - Συνδεσμολογία Φωτοβολταικών Πλαισίων	51
Εικόνα 24 - Διάταξη Φ/Β συστοιχιών σε πλαγιά κλίσης ω	52
Εικόνα 25 - Simulink Block - PV Generator	53
Εικόνα 26 - Εξαγωγή Υδρογόνου από Μεθάνιο	54
Εικόνα 27 - Κύκλος Υδρογόνου	54
Εικόνα 28 - Το Φαινόμενο της Ηλεκτρόλυσης του Νερού	57
Εικόνα 29 - Μονοπολική Διάταξη Αλκαλικού Electrolyzer	57
Εικόνα 30 - Διπολική Διάταξη Αλκαλικού Electrolyzer	58
Εικόνα 31 - Επίδραση φυσαλίδων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Αλκαλικού	
Electrolyzer	59
Εικόνα 32 - Διάγραμμα Simulink Αναλυτικού Μοντέλου Electrolyzer	60
Εικόνα 33 - Παραγωγή Η $_2$ και Ο $_2$ σε Electrolyzer	62
Εικόνα 34 - Simulink Μπλοκ Αναλυτικού Μοντέλου Electrolyzer	63
Εικόνα 35 - Χαρακτηριστική Εξίσωση Electrolyzer	64
Εικόνα 36 - Θερμοκρασία Electrolyzer Στοιχείου για 2.9V και 50°C θερμοκρασία	
περιβάλλοντος	65
Εικόνα 37 - Απόδοση Electrolyzer & Απόδοση Faraday	66
Εικόνα 38 - Simulink Μπλοκ Ενεργειακού Μοντέλου Electrolyzer	67

Εικόνα 39 - Παραγωγή Υδρογόνου και Σπατάλη Ισχύος Ενεργειακού Μοντέλου Electrolyzer Εικόνα 0-1 Μπλοκ Simulink Δεξαμενής Υδρογόνου Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Μπλοκ Simulink Δεξαμενής Οξυγόνου .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Διάγραμμα Simulink Πολυτροπικού Συμπιεστή...... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Μπλοκ Simulink Πολυτροπικού Συμπιεστή Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-9 Κύκλωμα Switching Mode Buck Μετατροπέα Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-10 Κύκλωμα Switching Mode Boost Μετατροπέα Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-11 Κύκλωμα Switching Mode Buck-Boost Μετατροπέα ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Διάγραμμα Simulink του DC/DC Μετατροπέα...... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Μπλοκ Simulink του DC/DC Μετατροπέα..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Διάγραμμα Simulink PV ConverterΣφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Μπλοκ Simulink PV Converter.....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Molten Carbonate Fuel Cell..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Solid Oxide Fuel Cell......Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-3 Phosphoric Acid Fuel Cell **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.** Εικόνα 0-4 Alkaline Fuel Cell......Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-5 PEM Fuel Cell......Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-6 Fuel Cell Stack......Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Διάγραμμα Simulink Κυψέλης Καυσίμου **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί** σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Θερμικού Μοντέλου... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-3 Μπλοκ Simulink Στοίβας Κυψελών Καυσίμου Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-1 Ημιτονοειδές Σήμα με Αρμονικές Συχνότητες Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Συνδεσμολογία γέφυρας-Η με Δύο Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-3 Δημιουργία Τετραγωνικών Παλμών σε Inverter...... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί** σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-4 RLC Φιλτρο για Inverter**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.** Εικόνα 0-1 Διάγραμμα Simulink Μονοφασικού Inverter...... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. Εικόνα 0-2 Διάγραμμα Simulink Τριφασικού Inverter..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Εικόνα 0-3 Μπλοκ Simulink Τριφασικού Inverter ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Εισαγωγή

Από όλες τις μορφές ενέργειας στη φύση αυτή που μπόρεσε να αξιοποιήσει περισσότερο ο άνθρωπος είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Η ροή ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από καλώδια με πολύ μικρές απώλειες είτε σε μικρές είτε σε μεγάλες αποστάσεις την καθιστούν την ιδανικότερη μορφή για την διανομή ενέργειας καθώς και τη δημιουργία σύνθετων συσκευών που δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν διαφορετικά. Επομένως η παραγωγή επαρκούς ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για τη συντήρηση του πολιτισμού που έχει διαμορφωθεί ως τη σημερινή εποχή και την περαιτέρω πρόοδό του.

Η κοινωνία βασίστηκε και βασίζεται ως σήμερα στις συμβατικές μορφές ενέργειας, συγκεκριμένα τα ορυκτά καύσιμα, για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με έρευνα της Energy Information Administration το 2006 το πετρέλαιο συμμετείχε με 36.8%, το κάρβουνο με 26.6% και φυσικό αέριο με 22% στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούν την καύση των ορυκτών καυσίμων έχουν υψηλή απόδοση και σήμερα πλέον υπάρχει μεγάλη εμπειρία στη χρήση και βελτιστοποίηση τους για την εκάστοτε εφαρμογή τους. Έχουν όμως δύο πολύ βασικά μειονεκτήματα. Πρώτον η καύση των ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα παράγει περίπου 21.3 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος. Η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας που γίνεται με φυσικό τρόπο από τα φυτά μπορεί μας απαλλάξει μόνο από την μισή ποσότητα την οποία παράγουμε. Έτσι η περίσσεια του διοξειδίου του άνθρακα προκαλεί φαινόμενα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Δεύτερο μειονέκτημα είναι πως η διαδικασία παραγωγής των ορυκτών καυσίμων υπόγεια μέσα στη γη χρειάστηκε εκατομμύρια χρόνια για να ολοκληρωθεί και συνεπώς η ποσότητα που υπάρχει σήμερα είναι πεπερασμένη. Η πραγματικότητα που πολλοί ξεχνούν είναι πως τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων είναι συγκεκριμένα και μαίνεται να εξαντληθούν στο άμεσο μέλλον. Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους δύο παράγοντες γίνεται φανερό πως αυτό που αποκαλούσαμε μέχρι πριν λίγο μειονέκτημα είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιβίωση του πολιτισμού όπως τον γνωρίζουμε σήμερα. (1)

Τίθεται ως επιτακτική ανάγκη να στραφούμε προς εναλλακτικές μορφές ενέργειας που ταυτόχρονα να είναι ανανεώσιμες, δηλαδή να ανανεώνονται από φυσικές διαδικασίες και να είναι φιλικές προς το περιβάλλον, να μην παράγουν απόβλητα που να ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα το έδαφος ή τον υδάτινο ορίζοντα. Στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας ανήκουν τα βιοκαύσιμα, η βιομάζα, η γεωθερμία, η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας, η ενέργεια από τον ήλιο, από τον άνεμο, τα θαλάσσια και παλιρροιακά κύματα. Επίσης η πυρηνική ενέργεια θεωρείται εναλλακτική μορφή ενέργειας αλλά υπάρχουν δύο βασικά αντεπιχειρήματα σε αυτό. Πρώτον ακόμα και ο πιο σύγχρονος πυρηνικός καυστήρας αφήνει απόβλητα των οποίων τα κατάλοιπα παραμένουν ραδιενεργά για τουλάχιστον 500 χρόνια και δεύτερον αυτό που αποκαλούμε αστοχία υλικού στην περίπτωση ενός πυρηνικού αντιδραστήρα συνεπάγεται ένα πυρηνικό ολοκαύτωμα τις συνέπειες του οποίου όλοι γνωρίζουμε πολύ καλά από την ιστορία.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια τεράστια πηγή ενέργειας που δυνητικά θα μπορούσε να εξασφαλίσει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες αν μπορούσαμε να την εκμεταλλευτούμε πλήρως. Πολλές άλλες μορφές ενέργειας όπως η υδροηλεκτρική, η αιολική και εν μέρει η ενέργεια των κυμάτων βασίζονται έμμεσα στην ενέργεια του ηλίου. Οι φωτοβολταικές κυψέλες είναι η λύση που έχει εφεύρει ο άνθρωπος για άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η ενέργεια που παράγεται από τις φωτοβολταικές κυψέλες είναι πλήρως ανανεώσιμη, είναι αθόρυβη και με ελάχιστα κατάλοιπα προς το περιβάλλον. Επίσης η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει πολύ εύκολα σε τοπικό επίπεδο με την ίδια απόδοση που θα είχαμε σε μεγάλη κλίμακα παραγωγής χωρίς να ισχύει το ίδιο για τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η εξάρτησή της όμως από την ηλιοφάνεια σε ένα συγκεκριμένο τόπο εισάγει κάποιους σημαντικούς περιορισμούς. Ανάλογα τις καιρικές συνθήκες, την κλίση του ηλίου κτλ. η ενέργεια που προσπίπτει πάνω σε ένα φωτοβολταικό πλαίσιο εμφανίζει διακυμάνσεις τόσο μεγάλες που να δημιουργούν προβλήματα στην σωστή λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας το οποίο συνδέεται με φορτίο που έχει συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις. Γι' αυτό και ως τώρα η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιήθηκε συνοδευτικά για τη παραγωγή της ηλεκτρικής μαζί με την καύση των ορυκτών καυσίμων και ανάλογες θεωρήσεις μπορούν να γίνουν για τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Βλέπουμε πως η παραγωγή της ενέργειας σε επίπεδα που να μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις των χρηστών διευκολύνεται από το συνδυασμό πολλών εναλλακτικών μορφών ενέργειας, ενώ αυτές οι πηγές θα πρέπει να συνοδεύονται από αποθηκευτικά μέσα ενέργειας όταν η παραγωγή υπερέχει της κατανάλωσης. Σε αυτή την εργασία θα μελετήσουμε ένα υβριδικό σύστημα που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια και την παρέχει άμεσα στο χρήστη ή την αποθηκεύει σε μορφή συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου αν περισσεύει. Εναλλακτικά έχουν προταθεί τεχνολογίες όμοιες με τις κοινές μπαταρίες να αναλάβουν την αποθήκευση της ενέργειας. Οι μπαταρίες όμως λόγω του υγρού ηλεκτρολύτη φθείρονται γρήγορα και πρέπει να αντικατασταθούν αρκετά συχνότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη ενός φωτοβολταικού συστήματος. Στη δική μας περίπτωση μια συσκευή ηλεκτρόλυσης του νερού αναλαμβάνει να διαχωρίσει το νερό στα συστατικά του, υδρογόνο και οξυγόνο, με το πρώτο να αποθηκεύεται σε δεξαμενές υπό πίεση και το οξυγόνο να απελευθερώνεται στον περιβάλλοντα χώρο. Η τροφοδότηση του υδρογόνου και του οξυγόνου σε μια κυψέλη καυσίμου μας δίνει το ηλεκτρικό ρεύμα όταν χρειάζεται. Ο συνδυασμός φωτοβολταικού συστήματος με κυψέλες

καυσίμου είναι ένας πολύ ελκυστικός συνδυασμός επειδή οι κυψέλες καυσίμου και συγκεκριμένα οι κυψέλες καυσίμου τεχνολογίας Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων έχουν την απαραίτητη απόδοση και σχετικά γρήγορη απόκριση στις αλλαγές του φορτίου όπως προβλέπεται από ένα σύστημα που θα εγγυάται επάρκεια ηλεκτρικής ισχύος.

Οι επιδιώξεις της εν λόγω μελέτης είναι να σχεδιάσουμε ένα σύστημα βέλτιστης λειτουργίας που να συνδυάζει την φωτοβολταική τεχνολογία με την τεχνολογία υδρογόνου. Τα συστατικά του εν λόγω συστήματος βασίζονται σε σύγχρονα μοντέλα τα οποία παραμετροποιούνται ώστε να συμβαδίζουν με την τρέχουσα τεχνολογία που συναντάται στα έντυπα τεχνικών χαρακτηριστικών προιόντων που βρίσκονται στην αγορά. Ως επόμενο βήμα γίνεται μια τεχνοοικονομική ανάλυση της επένδυσης που έχει ως σκοπό να εξετάσει την οικονομική πορεία της επένδυσης σε εύρος χρόνου 25 ετών και να εξετάσει τη βιωσιμότητά της. Να σημειώσουμε πως η μελέτη θα γίνει σύμφωνα με το φορτίο μιας απομονωμένης γεωγραφικά περιοχής, τη νήσο Δονούσα που ανήκει στις Κυκλάδες του Αιγαίου Πελάγους. Η έλλειψη επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη Δονούσα καθώς και τα δεδομένα για το ετήσιο φορτίο της μας ώθησαν να στρέψουμε την προσοχή μας στο συγκεκριμένο τόπο ώστε να δείξουμε πως με τη καταβολή σωστής πρωτοβουλίας μπορεί αυτό το νησί να πετύχει ενεργειακή ανεξαρτησία.

Το Κεφάλαιο 1 εξετάζει τον ήλιο ως πηγή ενέργειας και πως η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει κατά ένα ποσοστό πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια που βρίσκεται στη νήσο Δονούσα. Το **Κεφάλαιο 2** ξεκινάει με το φωτοβολταικό φαινόμενο για να εξομοιώσει αναλυτικά ένα φωτοβολταικό κύτταρο. Το Κεφάλαιο 3 εξετάζει τους διάφορους τρόπους παραγωγής καθαρού υδρογόνου και επιλέγει την ηλεκτρόλυση του νερού ως την πιο οικολογική λύση μέσω ενός alkaline electrolyzer. Το Κεφάλαιο 4 ασχολείται με τους διάφορους τρόπους αποθήκευσης του υδρογόνου και μοντελοποιεί ένα αποθηκευτικό σύστημα υδρογόνου με υψηλή πίεση, καθώς και ένα συμπιεστή. Το **Κεφάλαιο 5** περιγράφει την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, εξηγεί γιατί οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι οι πλέον κατάλληλες για το εν λόγω σύστημα και μοντελοποιεί ένα τυπικό PEM fuel cell. Το Κεφάλαιο 6 αξιοποιεί απλοικά μοντέλα συστημάτων διαχείρισης ενέργειας τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ των ανωτέρω συστημάτων για την ευκολότερη βελτιστοποίηση του συστήματος. Το **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζει το πλήρες σύστημα το οποίο συντονίζεται μέσω ενός κεντρικού συστήματος που ελέγχει τη ροή της ενέργειας. Το **Κεφάλαιο 8** αναλύει τα βήματα για την βέλτιστη διαστασιολόγηση όλων των επιμέρους κομματιών του συστήματος. Το Κεφάλαιο 9 εξομοιώνει το σύστημα για να παρουσιάσει αριθμητικά μέσω πινάκων και οπτικά μέσω γραφικών παραστάσεων τα αποτελέσματα της εξομοίωσης ενός ολόκληρου χρόνου. Το Κεφάλαιο 10 εξετάζει αν με τα σημερινά οικονομικά δεδομένα μια ανάλογη επένδυση θα μπορούσε να επιβιώσει σε διάστημα 25 ετών.

Ηλιακή Ακτινοβολία

Ηλιακή ακτινοβολία εκτός Γήινης ατμόσφαιρας

Μια από τις πιο εξώθερμες αντιδράσεις στη φύση που λαμβάνουν χώρα κατά κόρον στα άστρα είναι η πυρηνική σύντηξη και ιδιαίτερα η πυρηνική σύντηξη δύο ατόμων υδρογόνου(Η) που μας δίνει ένα άτομο ηλίου(He). Αυτές οι αντιδράσεις δημιουργούν εντός του ηλίου θερμοκρασίες κοντά στα 20x10⁶ Κ. Ωστόσο ένα πολύ μεγάλο μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από αέριο υδρογόνου που βρίσκεται στην επιφάνεια του ηλίου με συνέπεια τελικά ο ήλιος να προσομοιάζει με ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας 5762K.

Υλοποιήσαμε στο MATLAB την συνάρτηση blackbody που μας επιστρέφει το μήκος κύματος για το οποίο έχουμε μέγιστη ισχύ ακτινοβολίας καθώς και την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται.

Επόμενο βήμα είναι να βρούμε την ολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο. Γνωρίζοντας από τα δεδομένα της NASA την ακτίνα του ηλίου, στον ισημερινό του (2) δηλαδή 695.5x10⁶m μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ της ακτινοβολίας σε μια απόσταση από τον ήλιο. Θεωρώντας πως η ακτινοβολία κατανέμεται ανεπηρέαστη στο κενό μπορούμε από την σχέση

$$H_0 = \left(\frac{R_{sun}}{D}\right)^2 * blackbody(5762)$$

να πάρουμε την ισχύ της ακτινοβολίας που δέχεται ένα σώμα σε μια απόσταση D από τον κέντρο του ήλιου όπου D>R_{sun}. Γνωρίζοντας επίσης την μέση απόσταση γηςήλιου που είναι 150x10⁹m μπορούμε να βρούμε την ισχύ της ακτινοβολίας ακριβώς πάνω από την Γήινη ατμόσφαιρα. Βέβαια αυτό είναι μόνο η μέση ισχύς μιας και η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο δεν είναι κυκλική αλλά ελλειψοειδής. Η μέγιστη απόσταση είναι περίπου ίση με 152x10⁹m και η ελάχιστη περίπου ίση με 147x10⁹m.

Η μελέτη του Rai (3) μας δίνει την ομώνυμη εξίσωση που περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ισχύ της ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα κάθε μέρα του χρόνου.

$$H = H_{constant} * \left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right) \right)$$

Όπου η είναι η μέρα του χρόνου με n=1 την 1ⁿ Ιανουαρίου και $H_{constant}$ = 1353kW/m².

Επίδραση Ατμοσφαιρικών Φαινομένων

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται τυπικά για φωτοβολταικά συστήματα που ενσωματώνονται σε δορυφόρους. Η ακτινοβολία όμως καθώς διέρχεται από την γήινη ατμόσφαιρα απορροφάται από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας περισσότερο ή λιγότερο ανάλογα το μήκος κύματος (4) όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα.

Όζον 20-40 Κμ			
Απορροφάει 2%	Δεν σκορπίζει στο διάστημα	Δεν σκορπίζει προς τη Γη	
А	νώτερο Στρώμα Σκόνης 15-25 Ι	ζμ	
Απορροφάει 1%	Σκορπίζει 1% στο διάστημα	Σκορπίζει 2% προς τη Γη	
Μόρια Αέρα 0-30 Κμ			
Απορροφάει 8%	Σκορπίζει 1% στο διάστημα	Σκορπίζει 4% προς τη Γη	
	Υδρατμοί 0-3 Κμ		
Απορροφάει 6%	Σκορπίζει 1% στο διάστημα	Σκορπίζει 1% προς τη Γη	
Κατώτερο Στρώμα Σκόνης Ο-3 Κμ			
Απορροφάει 1%	Σκορπίζει 1% στο διάστημα	Σκορπίζει 1% προς τη Γη	

Εικόνα 1 Απορρόφηση Ηλιακής ακτινοβολίας

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό πως συνολικά το 18% της ακτινοβολίας απορροφάται από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιράς. Επίσης το 4% επανεκπέμπεται πίσω στο διάστημα ενώ η ατμόσφαιρα επανεκπέμπει προς τη Γη το 8% της ακτινοβολίας. Έτσι έχουμε μια συνολική απορρόφηση 18+4=22% και το υπόλοιπο ποσοστό φθάνει ως την επιφάνεια της Γης. Σημαντικό ρόλο στα φωτοβολταικά συστήματα παίζει το ποσοστό της απευθείας ακτινοβολίας και το ποσοστό της σκεδάζουσας. Βλέπουμε πως το 70% είναι απευθείας ακτινοβολία ενώ το 8% είναι ακτινοβολία που έχει σκεδαστεί, μπορούμε με καλή ακρίβεια να υποθέσουμε ισοτροπικά, δηλαδή προσπίπτει με όλες τις πιθανές γωνίες. Να σημειώσουμε όμως πως αυτές οι τιμές είναι ενδεικτικές για μια ηλιόλουστη μέρα με καθαρή ατμόσφαιρα. Οι καιρικές συνθήκες καθώς και οι ανθρωπογόνοι ρύποι παίζουν έναν επίσης κύριο ρόλο στην ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια της Γης.

Επιπρόσθετα κάτι που περιπλέκει ακόμα περισσότερο τους υπολογισμούς είναι πως καθώς ο ήλιος «κινείται» κατά μήκος του ορίζοντα μεταβάλλεται η αέρια μάζα από την οποία θα διέλθει η ακτινοβολία του ηλίου. Όσο μεγαλύτερη η αέρια μάζα προφανώς τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση. Η αέρια μάζα σαφώς όμως μεταβάλλεται και από το ύψος που βρισκόμαστε από την επιφάνεια της θάλασσας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος τόσο μικρότερη η αέρια μάζα και τόσο μικρότερη η απορρόφηση. Οπότε αν θεωρήσουμε την απόκλιση του ηλίου σε θ μοίρες η αέρια μάζα δίνεται από τον τύπο:

 $AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0.50572 * (96.07995 - \theta)^{-1.6364}}$

Η αέρια μάζα μπορεί να θεωρηθεί και ως σταθερά ίση με ΑΜ=1.5 προσεγγιστικά για ενεργειακούς υπολογισμούς.

Μια εμπειρική καμπύλη από τα δεδομένα παρατήρησης βρίσκεται στην ανάπτυξη του Laue (5) και δίνει την ένταση της ακτινοβολίας σε σχέση με την αέρια μάζα και το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Δίνεται από τον εξής τύπο

$$\begin{split} I_D &= 1353 * \left[(1 - a * h) * 0.7^{AM^{0.678}} + a * h \right] \\ a &= 0.14 * 10^{-3} ε μπειρικός συντελεστής \\ h: το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας σε m \\ AM: η αέρια μάζα \\ I_D: η άμεση ακτινοβολία εκφρασμένη σε W/m^2 \end{split}$$

Σε μια ηλιόλουστη μέρα δίχως σύννεφα η ακτινοβολία που προκύπτει από τη σκέδαση, δηλαδή η διάχυτη ακτινοβολία, συμβάλλει περίπου 10% στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία οπότε η συνολική ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ηλίου είναι $I_G = 1.1 * I_D$.

Βασικές γωνίες, χρήσιμες έννοιες και εξισώσεις

Αν όμως η επιφάνεια αναφοράς δεν ακολουθεί την πορεία του ηλίου αλλά είναι σταθερή τότε η κλίση της επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ηλίου μεταβάλλει την ένταση της ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα η ένταση που αναλογεί στην κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από την ένταση στην κάθετο πολλαπλασιασμένη με το ημίτονο της γωνίας μεταξύ επιφάνειας και ακτίνας.



Εικόνα 2 - Ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Αν λάβουμε υπόψη πως αναφερόμαστε στις τρεις διαστάσεις, τότε αυτό σημαίνει πως θα εφαρμόσουμε τον παραπάνω κανόνα δύο φορές, μία για την μεταβολή σε σχέση με την κλίση του ηλίου από το έδαφος, δηλαδή το ύψος (elevetion) και μία για την μεταβολή σε σχέση με το αζιμούθιο (azimuth). Αν αυτές οι δύο γωνίες προκύψουν να είναι έστω θ και ψ αντίστοιχα τότε η ισχύς κάθε στιγμή στην οριζόντια επιφάνεια είναι: *Power Density* = $I_G * sin(\theta) * sin(\psi)$

Για να υπολογίσουμε το αζιμούθιο και το ύψος του ηλίου κάθε στιγμή της ημέρας αξιοποιούμε έτοιμους μαθηματικούς τύπους γνωστούς από την βιβλιογραφία.

$$Elevation = \sin^{-1}[\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(HRA)]$$

και

$$Azimuth = \cos^{-1}\left[\frac{\sin(\delta) * \cos(\varphi) - \cos(\delta) * \sin(\varphi) * \cos(HRA)}{\cos(a)}\right]$$

όπου δ είναι η γωνία απόκλισης και δίνεται από τον τύπο

 $\delta = 23.45^{o} * \sin\left[\frac{360}{365} * (d - 81)\right]$ όπου d είναι ο αριθμός των ημερών από την αρχή του έτους.

φ είναι το το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

α=90-φ+δ για το βόρειο ημισφαίριο

και

α=90+φ-δ για το νότιο ημισφαίριο

Μάλιστα πρέπει να κάνουμε και μια διόρθωση στον παραπάνω τύπο διότι για τις γωνίες μετά το μεσημέρι, δηλαδή για HRA>0 ισχύει

Πραγματικό Azimuth =
$$360^{\circ}$$
 – Azimuth

Επίσης να σημειώσουμε πως εδώ ως μηδέν μοίρες μοίρες έχει οριστεί η φορά που κοιτάει προς τον βορρά, 180° η φορά του νότου, 90° η φορά της ανατολής και 270° η φορά της δύσης.

HRA είναι η ωριαία γωνία που αντιστοιχεί την τοπική ώρα στον αριθμό των μοιρών που ο ήλιος κινείται κατα μήκος του ουρανού. Κατα κανόνα στο πραγματικό μεσημέρι έχουμε ωριαία γωνία ίση με 0° και καθώς η Γη περιστρέφεται με 15 μοίρες ανά ώρα έχουμε πως η ωριαία γωνία θα μεταβάλλεται κατά 15 μοίρες κάθε ώρα.

$$HRA = 15^{\circ}(LST - 12)$$

Το LST είναι η τοπική ηλιακή ώρα. Για να πάρουμε το LST από το LT που είναι η κοινή τοπική ώρα για όλους τους κατοίκους μιας ζώνης πρέπει να εισάγουμε την διόρθωση TC (Time Correction factor).

$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

Όπου

$$TC = 4 * (LSTM - Γεωγραφικό Μήκος) + ΕοΤ$$

LSTM είναι ο τοπικός μεσημβρινος σε σχέση με τον μεσημβρινό του Greenwich και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LSTM = 15 * DT_{GMT}$$

Όπου DT_{GMT} είναι η διαφορά ώρας από την ώρα Greenwich, για παράδειγμα +2 ώρες για την Ελλάδα.

Το 4 προκύπτει από το γεγονός ότι η Γη περιστρέφεται 1 μοίρα κάθε 4 λεπτά.

To EoT (Equation of Time, Εξίσωση του Χρόνου) εκφρασμένο σε λεπτά είναι μια εμπειρική εξίσωση που διορθώνει την εκκεντρικότητα της Γήινης τροχιάς και την απόκλιση του άξονα της Γης και δίνεται από το τύπο:

$$EoT = 9.87 * \sin\left(2 * \frac{360}{365} * (d - 81)\right) - 7.53 * \cos\left(\frac{360}{365} * (d - 81)\right) - 1.5$$
$$* \sin\left(\frac{360}{365} * (d - 81)\right)$$

Όπου d είναι ο αριθμός των ημερών από την αρχή του έτους.

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους μελετούμε την ισχύ της ακτινοβολίας ενός επιπέδου που «παρακολουθεί» τις ακτίνες του ηλίου και ενός επιπέδου παράλληλου και σταθερού με την επιφάνεια της Γης. Βρισκόμαστε στην πόλη της Δονούσας επομένως:

Γεωγραφικό Μήκος: 25.79 $^{\circ}$

Γεωγραφικό Πλάτος: 37.10°

Ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας: 50m

Έστω η ημερομηνία είναι 16 Ιανουαρίου.



Εικόνα 3 - Ισχυς Ακτινοβολίας - Δονούσα - 50m υψόμετρο - 16 Ιανουαρίου

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια ηλιοτροπική επιφάνεια σε σχέση με μία επιφάνεια που είναι παράλληλη της επιφάνειας του εδάφους έχει πολύ μεγάλη διαφορά. Σημειώστε πως το παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχεί σε μια ηλιόλουστη μέρα με καθαρή ατμόσφαιρα.

Αλγόριθμος ακριβής θέσης του ηλίου PSA

Για την τοποθέτηση λοιπόν ενός φωτοβολταικού πλαισίου έχουμε δύο επιλογές. Πρώτον να κατασκευάσουμε ένα μηχανισμό που ενεργά θα παρακολουθεί την κίνηση του ηλίου μετατρέποντας το σε ηλιοστάσιο. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση ενέργειας από τον ήλιο αλλά ταυτόχρονα και κατανάλωση ενέργειας για την κίνηση των μηχανισμών περιστροφής του πλαισίου. Ακόμα απαιτούν μεγαλύτερο αρχικό κόστος επένδυσης και τα λειτουργικά έξοδα συμπεριλαμβάνουν τη συντήρηση των μηχανικών μερών περιστροφής και την αντικατάστασή τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον δεν πρέπει να ξεχνάμε πως τέτοια συστήματα απαιτούν περαιτέρω μελέτη για την αντοχή των κινούμενων μερών τους σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, που ενδεχομένως να επικρατούν στην περιοχή που τοποθετούμε το φωτοβολταικό μας σύστημα. Μια ειδική περίπτωση τέτοιων συστημάτων είναι τα συγκεντρωτικά συστήματα, που συγκεντρώνουν με οπτικά μέσα τις ακτίνες του ηλίου. Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταικά λειτουργούν μόνο με παρακολούθηση της κίνησης του ηλίου και η παραμικρή απόκλιση μπορεί να προκαλέσει εκτροπή της δέσμης που συνεπάγεται μεγάλη απώλεια ενέργειας. Όλη η ανάλυση που υπάρχει συνήθως στην βιβλιογραφία με χρήση απλής γεωμετρίας δίνει ακρίβεια μέχρι μια μοίρα, κάτι που είναι ανεκτό για την μελέτη επίπεδα στατικών συστημάτων, αλλά για συγκεντρωτικά συστήματα απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Υπάρχουν αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για να μας δώσουν με υψηλή ακρίβεια τη θέση του ηλίου κάθε χρονική στιγμή και ένας από αυτούς τους αλγορίθμους που ονομάζεται PSA διανέμεται δωρεάν από το CIEMAT (6).

Δεύτερη και φθηνότερη επιλογή είναι να τοποθετήσουμε το φωτοβολταικό πλαίσιο σε σταθερή κλίση σε σχέση με το έδαφος. Για περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό όπως στα νησιά του Αιγαίου συνίσταται σταθερή κλίση. Τίθεται κατ' αυτόν τον τρόπο το ερώτημα της βέλτιστης κλίσης που θα μας δώσει τη μέγιστη ενέργεια το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος, για παράδειγμα έναν ολόκληρο χρόνο.

Το αζιμούθιο για τις διάφορες ημέρες του έτους παρατηρούμε πως διατηρεί συμμετρικές τιμές γύρω από το νότο, για το βόρειο ημισφαίριο, και συμμετρικές τιμές γύρω από το βορρά, για το νότιο ημισφαίριο. Έτσι γίνεται προφανές πως ένα φωτοβολταικό πλαίσιο θα πρέπει να τοποθετηθεί να κοιτάει προς το πραγματικό νότο αν βρισκόμαστε σε γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο των μηδέν μοιρών ή στον πραγματικό βορρά αν βρισκόμαστε σε γεωγραφικό πλάτος μικρότερο των μηδέν μοιρών. Αυτή η απλοική διατύπωση δεν θα ισχύει σε περίπτωση που υπάρχουν φυσικά εμπόδια όπως βουνά αριστερά ή δεξιά από το φωτοβολταικό πλαίσιο που θα έχουν ως αποτέλεσμα ο ήλιος να «ανατέλλει αργότερα» ή να «δύει νωρίτερα». Ένας δεύτερος παράγοντας που μπορεί να μετακινήσει τη βέλτιστη θέση σε σχέση με τον πραγματικό νότο ή βορρά είναι η κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για παράδειγμα κάποιες περιοχές μπορεί παρουσιάζουν συστηματικά βροχοπτώσεις και συννεφιά τις απογευματινές ώρες ή έντονη ομίχλη κατά τις πρωινές ώρες. Σε κάθε την περίπτωση θα πρέπει να γίνουν ειδικές μετρήσεις για τον εκάστοτε τόπο.

Υπολογισμός βέλτιστης κλίσης Φ/Β πλαισίου σε πλήρη ηλιοφάνεια

Η κλίση του φωτοβολταικού πλαισίου σε σχέση με το έδαφος πρέπει να είναι συγκεκριμένη ώστε να εκμεταλλευόμαστε το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό της ενέργειας σε ένα σταθερό πλαίσιο. Οπότε έχουμε τη γωνία β όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4 - Ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Οπότε προκύπτει η σχέση

$$S_{module} = \frac{S_{horizontal} * \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha)}$$

α: η κλίση της οριζόντιας επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ηλίου.

β: η κλίση του φωτοβολταικού πλαισίου σε σχέση με το έδαφος.

S_horizontal: η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην οριζόντια επιφάνεια.

S_module: η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο φωτοβολταικό πλαίσιο.

Αρχικά υλοποιούμε στο Matlab τον αλγόριθμο PSA σε μια συνάρτηση που αποκαλούμε **PAM** η οποία δέχεται ως ορίσματα το χρόνο και τον τόπο και επιστρέφει το αζιμούθιο και το ζενίθ του ηλίου με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η συνάρτηση διατίθεται έτοιμη σε γλώσσα c και απλώς τη μεταγλωττίσαμε σε script του Matlab.

Επόμενο βήμα είναι να υλοποιήσουμε μια συνάρτηση που να έχει ως ορίσματα πρώτα την ημερομηνία, δηλαδή την χρονιά, το μήνα και την μέρα, και δεύτερον το μέρος, δηλαδή, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος όπου βρισκόμαστε. Επίσης δέχεται ως όρισμα το υψόμετρο και την κλίση τοποθέτησης του φωτοβολταικού πλαισίου. Εκτελούμε την συνάρτηση PAM με ακρίβεια λεπτού για όλες τις ώρες της ημέρας και παίρνουμε το ζενίθ και το αζιμούθιο του ηλίου σε κάθε λεπτό. Χρησιμοποιώντας την πληροφορία από το elevation που είναι απλά η συμπληρωματική γωνία του ζενίθ αφαιρούμε τις τιμές πριν την ανατολή και μετά τη δύση του ηλίου που μας είναι περιττές. Υπολογίζουμε τη μεταβολή της αέριας μάζας με τη θέση του ηλίου και μέσω της συνάρτησης του Laue παίρνουμε την ακτινοβολία σε κάθετη επιφάνεια. Ακολουθούμε τις ανωτέρω γεωμετρικούς κανόνες για να λάβουμε την ακτινοβολία πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο ορισμένης γωνίας. Τέλος ολοκληρώνοντας για όλα τα λεπτά της ημέρας και παίρνουμε την συνολική ενέργεια σε KWh ανά τετραγωνικό μέτρο ανά ημέρα. Την συνάρτηση αυτή την ονομάζουμε **DED** (daily energy density).

Έπειτα κατασκευάζουμε ένα νέο script στο Matlab στο αρχείο,

YearlyEnergyDensity.m, στο οποίο ορίζουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της πόλης της Δονούσας και έστω πως βρισκόμαστε στο έτος 2009 και σε υψόμετρο 50 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Εκτελώντας με ένα loop την συνάρτηση DED για όλες τις ημέρες του χρόνου παίρνουμε μια καμπύλη που δείχνει την μεταβολή της προσπίπτουσας ενέργειας πάνω σε μια επιφάνεια στην πάροδο του έτους για μια συγκεκριμένη κλίση του ΦΒ συστήματος. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για τρεις αυθαίρετες κλίσεις, έστω 25, 35 και 45 μοίρες παίρνουμε τις τρεις γραφικές παραστάσεις όπως φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση παρακάτω.



Εικόνα 5 - Ενεργειακή Πυκνότητα ανά ημέρα για το έτος 2009 - περιοχή Δονούσα - υψόμετρο 50m

Σκοπός μας είναι να έχουμε τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση ενέργειας στην περίοδο ενός έτους. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε πως ένας χρήστης ενδεχομένως να έχει ειδικές απαιτήσεις όπως για παράδειγμα να θέλει να μεγιστοποιήσει την εκμετάλλευση ενέργειας κατά την χειμερινή περίοδο. Σε ένα νέο script του Matlab που ονομάζουμε **SteadyModuleInclination.m** θα προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε τη βέλτιστη κλίση. Αρχικά για μια συγκεκριμένη κλίση απλά αθροίζουμε την ετήσια ενέργεια που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια για να λάβουμε την συνολική ετήσια ενέργεια. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για διάφορες κλίσεις έχοντας υπόψη πως ο εμπειρικός κανόνας για το βόρειο ημισφαίριο και ιδιαίτερα για περιοχές με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο των 25° είναι να τοποθετείται ένα pv module σε κλίση περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος.

Άρα για όλες τις δυνατές κλίσεις παίρνουμε ένα γράφημα που παριστά την ετήσια ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6 - Ετήσια ενέργεια για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταικού πλαισίου

Μια επιπλέον εκτέλεση του αλγορίθμου για μεγαλύτερη ανάλυση στις γωνίες 48° έως 52° μας δίνει τελικώς πως η βέλτιστη κλίση σύμφωνα με το ως τώρα μοντέλο μας είναι 49 μοίρες.

Αυτή η κλίση έρχεται σε μεγάλη αντίθεση με τον εμπειρικό κανόνα που αναφέραμε νωρίτερα διότι η πόλη της Δονούσας βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ίσο με 37 μοίρες. Αυτό συμβαίνει διότι όλη η παραπάνω ανάλυση αναφέρεται σε ένα έτος που η ηλιοφάνεια είναι άριστη καθόλη τη διάρκεια της ημέρας για όλες τις ημέρες του έτους. Αυτό σαφώς απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Η συνολική ακτινοβολία που είναι αποτέλεσμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες όπως η υγρασία, η συννεφιά κτλ. Ένας ακόμα παράγοντας που συμβάλλει στην ακτινοβολία είναι το ίδιο το έδαφος. Το έδαφος αντανακλά ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προς το κεκλιμένο επίπεδο στο οποίο θα τοποθετήσουμε το φωτοβολταικό μας πλαίσιο. Η αντανάκλαση αυτή ονομάζεται albedo και συνήθως ορίζεται με μια τυπική τιμή ίση με 0.2. Αν το έδαφος είναι καλυμμένο με χιόνι τότε η τιμή του albedo μπορεί να φτάσει από 0.6 έως 0.8.

Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας - πηγές στο διαδίκτυο

Αναλυτικές μελέτες για να ανακτηθούν όλα τα απαραίτητα μετεωρολογικά στοιχεία για να κάνουμε σωστή εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας μια συγκεκριμένης περιοχής έχουν γίνει μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Επίσης ένα τέτοιο εγχείρημα θα ήταν μάταιο μιας και η ανάγκη είναι η εγκατάσταση της φωτοβολταικής τεχνολογίας σε όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές σε παγκόσμιο επίπεδο. Διάφορες μελέτες αναφέρουν τρόπους που μπορεί να γίνει εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε τυχαίο σημείο πάνω στη γη αν έχουμε μετρήσεις από κοντινά γεωγραφικά σημεία. Για την ηλιακή ενέργεια λοιπόν σε οριζόντιο επίπεδο σε έναν ορισμένο τόπο γίνονται μετρήσεις με τα κατάλληλα όργανα όπως το πυρανόμετρο, οι πυροηλεκτρικοί κρύσταλλοι, οι φασματογράφοι και άλλα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ιστορικό αυτών των μετρήσεων τόσο μεγαλύτερη και η ακρίβεια. Ταυτόχρονα όσο πιο πυκνή είναι η γεωγραφική κατανομή των μετρήσεων τόσο ακριβέστερα λειτουργούν τα μοντέλα που εκτιμούν την ηλιακή ακτινοβολία σε κοντινές περιοχές από την περιοχή της μέτρησης.

Στο διαδίκτυο υπάρχουν μερικά εργαλεία τα οποία εκτελούν πολύπλοκους αλγόριθμους που υλοποιούν στοχαστικά μοντέλα για να μας παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία. Για παράδειγμα έχει διαπιστωθεί πως μια ηλιόλουστη μέρα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να ακολουθηθεί από μια επίσης αρκετά ηλιόλουστη μέρα απ' ότι μια μέρα με συννεφιά. Αυτό στατιστικά κρατάει μερικές ημέρες. Αναλόγως οι μέρες συννεφιάς τείνουν να διαρκούν περισσότερες από μια ημέρες.

Ένα εργαλείο είναι το **PVGIS** (7) (PV Potential Estimation Utility) που είναι κατασκευασμένο ειδικά για φωτοβολταικά συστήματα. Παρέχει πληροφορίες από όλες τις περιοχές τις Ευρώπης γεωγραφικού μήκους από -23 μέχρι +40 μοίρες. Αρκεί να επιλέξουμε ένα σημείο στο χάρτη ή να εισάγουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και αυτόματα παράγονται πληροφορίες που ενδιαφέρουν για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταικού συστήματος. Επιλέγοντας τη πόλη της Δονούσας προκύπτει πως η βέλτιστη κλίση για την τοποθέτηση ενός φωτοβολταικού συστήματος σταθερής κλίσης είναι ίση με

$$\beta = 30^{\circ}$$

Επίσης μπορούμε να έχουμε την μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα ή την μέση ωριαία για όλες τις ημέρες ενός συγκεκριμένου μήνα όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

Fixed system: inclination=30°, orientation=0° (optimum)			
Month	H _d	H_m	
Jan	3.08	95.4	
Feb	3.70	104	
Mar	4.60	143	
Apr	5.64	169	
May	6.09	189	
Jun	6.60	198	
Jul	6.56	203	
Aug	6.39	198	
Sep	5.95	178	
Oct	4.76	148	
Nov	3.23	96.9	
Dec	2.64	82.0	
Yearly average	4.94	150	
Total for year		1800	

 $H_{\rm d}$: Ημερήσιο σύνολο της ισχύος της ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο $H_{\rm m}$: Μηνιαίο σύνολο της ισχύος της ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο.

Το δεύτερο πρόγραμμα που έχουμε στη διάθεσή μας είναι το **SoDa Project** (8) που παρέχει πολλές διαφορετικές υπηρεσίες που αφορούν μετεωρολογικά δεδομένα για όλες τις ανάγκες. Ανάμεσα στις υπηρεσίες παρέχεται και η ακτινοβολία του ηλίου ανά ώρα για όλες τις ώρες του έτους. Βάσει των δεδομένων από το SoDa μπορούμε να δούμε πως τη μηνιαία κατανομή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίες για όλο το έτος όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.





Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ιστόγραμμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην προσπάθεια μας να επιλέξουμε το κατάλληλο σύστημα παίζει σημαντικό ρόλο το πόσο συχνά τα φωτοβολταικά πλαίσια λαμβάνουν ακτινοβολία υψηλής ή χαμηλής ισχύος ακτινοβολία.



Εικόνα 8 - Ιστόγραμμα Ηλιακής Ακτινοβολίας

Έτσι βλέπουμε πως οι μικρότερης ισχύος ακτινοβολίες είναι επικρατέστερες, ενώ όσο πλησιάζουμε προς τις υψηλότερες εμφανίζεται ίση περίπου συχνότητα για ακτινοβολίες από 400 έως 800 Watt/m².

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία έτσι όπως διαμορφώνεται για την καλύτερη και χειρότερη «ηλιακά» ημέρα του έτους.





Από το SoDa έχουμε και την χρονοσειρά των θερμοκρασιών περιβάλλοντος ανά ώρα για τη πόλη της Δονούσας και στο παρακάτω γράφημα φαίνεται πως η πιο κρύα ημέρα του χρόνου παρουσίασε θερμοκρασίες κοντά στους 5 βαθμούς κελσίου ενώ η πιο ζεστή μέρα του χρόνου είχε μέγιστη θερμοκρασία τους 32 βαθμούς κελσίου.



Χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο πηγές μπορούμε να τροφοδοτήσουμε το μοντέλο του φωτοβολταικού μας συστήματος με προσεγγιστικές τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία με ακρίβεια ανά ώρα αλλά και για την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ένα στοιχείο που παίζει ρόλο σε όλα τα μοντέλα που θα μελετήσουμε και θα εξομοιώσουμε.

Κεφάλαιο 2

Φωτοβολταικό Σύστημα

Φωτοβολταικό φαινόμενο

Ένα φωτοβολταικό κύτταρο έχει τη μοναδική ιδιότητα να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Είναι κατά κανόνα ένας ημιαγωγός τύπου p-n όπου ο εκπομπός τύπου n είναι εκτεθειμένος σε ηλιακή ακτινοβολία. Η βασική διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα:

- 1. Παραγωγή φορέων που δημιουργούνται λόγω του φωτός
- Συλλογή των φορέων αυτών από την περιοχή απογύμνωσης που βρίσκεται στην επαφή μεταξύ p και n ώστε να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα
- 3. Τη δημιουργία τάσης κατά μήκος του φωτοβολταικού κυττάρου
- 4. Την έκλυση ισχύος στο φορτίο και σε παρασιτικές αντιστάσεις



Εικόνα 10 - Φωτοβολταικό Κύτταρο

Το φωτόνιο που προσπίπτει στο φωτοβολταικό κύτταρο έχει σαν αποτέλεσμα τη προσωρινή δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής που αν είμαστε στην n ή στην p περιοχή το ηλεκτρόνιο αποτελεί και στοιχείο πλειονότητας ή μειονότητας αντίστοιχα και αντίστροφα ισχύει για την οπή. Ιδανικά το εκάστοτε στοιχείο μειονότητας συλλέγεται και μεταβαίνει αναλόγως από την p στην n περιοχή ή αντίστροφα και γίνεται πλέον στοιχείο πλειονότητας ώστε να συμμετέχει στην ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Μόλις το ηλεκτρόνιο διέλθει από το φορτίο, με το οποίο υποθέτουμε συνδεδεμένο το φωτοβολταικό στοιχείο, τότε συναντάται με την οπή όπου επανασυνδέονται για να κλείσει το κύκλωμα.

Ιδανικά λοιπόν ένα φωτοβολταικό κύτταρο που εκμεταλλεύεται 100% την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό θα πρέπει να μετατρέπει κάθε φωτόνιο σε ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής το οποίο να συμμετέχει στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στην πραγματικότητα όμως στους ημιαγωγούς καθώς δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που συμβάλλουν στην επανασύνδεση των φορέων πριν αυτοί προλάβουν να συλλεχθούν.

- Η επανασύνδεση Band-to-Band όταν ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας επανασυνδέεται με μια οπή της ζώνης σθένους και εκλύεται ένα φωτόνιο αντίστοιχης ενέργειας. Αυτό το φαινόμενο είναι συχνό σε ημιαγωγούς άμεσης ζώνης όπως είναι το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).
- 2. Την επανασύνδεση Auger όπου ένα ηλεκτρόνιο επανασυνδέεται με μια οπή αλλά η ενέργεια αποδίδεται σε ένα δεύτερο ηλεκτρόνιο ως θερμότητα. Εφόσον η θερμότητα αυτή εκλύεται στο περιβάλλον το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στην αρχική ενεργειακή του κατάσταση. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε ημιαγωγούς με πολύ υψηλή πρόσμιξη.
- 3. Ο τρίτος και πιο συχνός τύπος επανασύνδεσης είναι ο τύπος επανασύνδεσης SRH (Shockley-Read-Hall) και οφείλεται στις ανομοιομορφίες του κρυσταλλικού πλέγματος του ημιαγωγού. Οι ανομοιομορφίες αυτές προκαλούνται είτε επίκτητα από την πρόσμιξη για τη δημιουργία των η και p περιοχών είτε από εγγενείς ατέλειες στον κρύσταλλο. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται ενδιάμεσα ενεργειακά επίπεδα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας αυξάνοντας την πιθανότητα οι ζώνες αυτές να καταληφθούν ταυτόχρονα από ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή και να γίνει επανασύνδεση.

Να σημειώσουμε πως στη περίπτωση που ένα ηλεκτρόνιο ή μια οπή που συμβάλλουν στη ροή του φορτίου απορροφήσουν ένα φωτόνιο τότε αυξάνεται η ενέργειά τους εντός του ενεργειακού επιπέδου που ήδη βρίσκονται. Το φωτόνιο

αυτό δεν συμμετέχει στη ροή φορτίου αλλά ευτυχώς ο παράγοντας αυτός έχει αρκετά μικρό ρόλο στη μείωση της απόδοσης του φωτοβολταικού στοιχείου.

Επομένως για να συλλεχθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ζώνη απογύμνωσης. Ενώ η πιθανότητα της συλλογής ενός φορέα εντός της ζώνης απογύμνωσης είναι 100%, η πιθανότητα μακριά από τη ζώνη απογύμνωσης εξαρτάται το μήκος διάχυσης του φορέα μειονότητας και από την ταχύτητα επανασύνδεσης φορέων στην επιφάνεια του φωτοβολταικού κυττάρου.

Η ακτινοβολία του ηλίου όπως γνωρίζουμε πολύ καλά δεν είναι μονοχρωματική αλλά κυμαίνεται σε μήκος κύματος από τα 300 nm μέχρι τα 3000nm περίπου οπότε θα πρέπει να επιλέξουμε ένα ημιαγώγιμο υλικό με υψηλή απορροφητικότητα σε αυτά τα μήκη κύματος.

Ισχύει πως ιδανικό ενεργειακό χάσμα που πρέπει να έχει το υλικό είναι ίσο με **1.35eV** (9). Αλλά εμείς έχουμε στη διάθεση μας ημιαγωγούς με ενεργειακά χάσματα από τον παρακάτω πίνακα.



Το πυρίτιο(Si) είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό χάσμα και αυτό έχει ως συνέπεια οι περισσότες μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από τη μία ζώνη στην άλλη να περιλαμβάνουν και την αλληλεπίδραση με ένα φωνόνιο. Επιπλέον η τιμή του ενεργειακού χάσματος είναι μικρότερη από την ιδανική και ίση με 1,1eV. Επιπρόσθετα όπως φαίνεται από το παραπάνω σχεδιάγραμμα η απορροφητικότητα του πυριτίου για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1450nm είναι πρακτικά μηδέν με αποτέλεσμα τα χαμηλής ενέργειας φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας να μην συμβάλλουν στη φωτοβολταική μετατροπή. Ενώ το Γερμάνιο παρότι έχει ακόμα μικρότερο ενεργειακό χάσμα κατέχει την ανώτερη θέση στην ικανότητα απορροφητικότητας.

Το ακάθαρτο πυρίτιο παρουσιάζεται πολύ συχνά στη φύση κάνοντας εύκολη την εξόρυξή του και οι διαδικασίες επεξεργασίας για τον καθαρισμό και κρυσταλλοποίησή του έχουν μελετηθεί εδώ και πολλά χρόνια. Γι' αυτό και το πυρίτιο είναι το ημιαγώγιμο υλικό που κυριάρχησε από την αρχή μέχρι και σήμερα σαν υλικό κατασκευής των φωτοβολταικών στοιχείων.

Παρακάτω θα αναλύσουμε δύο σημαντικές καταστάσεις κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα το φωτοβολταικό φαινόμενο.

1. Όταν το φωτοβολταικό κύτταρο είναι ανοικτοκυκλωμένο τότε η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του δημιουργεί φορτία τα οποία φέρνουν σε ορθή πόλωση την επαφή p-n και έτσι αυξάνουν τη ροή ηλεκτρικού φορτίου λόγω διάχυσης (diffusion current). Η ζώνη απογύμνωσης έχει μικρότερο μήκος λόγω του αντίθετου ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται. Εφόσον το ρεύμα ολίσθησης (drift current) έχει ίση και αντίθετη φορά το συνολικό ρεύμα είναι μηδέν. Καθότι όμως οι οπές στην p πλευρά και τα ηλεκτρόνια στην n πλευρά υπερτερούν αριθμητικά έναντι των φορέων μειονότητας έχουμε μια τάση να εφαρμόζεται στις επαφές του φωτοβολταικού κυττάρου.



Εικόνα 0-11 Φωτοβολταικό Κύτταρο σε ανοιχτοκύκλωμα

 Στην περίπτωση που το φωτοβολταικό κύτταρο είναι βραχυκυκλωμένο η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας εκατέρωθεν της επαφής p-n αυξάνεται και επομένως υπάρχει ανάλογη αύξηση στο ρεύμα ολίσθησης. Η ζώνη απογύμνωσης τώρα είναι μεγαλύτερη και εμποδίζει ως ένα βαθμό τη ροή φορτίου πλειονότητας από την p στην n πλευρά ή από την n στην p. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το καλώδιο για να συναντήσουν τις οπές στην άλλη άκρη του καλωδίου σχηματίζοντας έτσι ροή συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 0-12 Φωτοβολταικό Κύτταρο σε βραχυκύκλωμα

Μελέτη ενός Τυπικού Φωτοβολταικού Κυττάρου

Από το πανεπιστήμιο University of New South Wales έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ημιαγώγιμων υλικών με στόχο κυρίως τη μελέτη φωτοβολταικών κυττάρων το οποίο διανέμεται δωρεάν μέσω της ιστοσελίδας του πανεπιστημίου και φέρει το όνομα **PC1D** version 5. (10)

Μέσω του προγράμματος PC1D μπορούμε να μελετήσουμε πλήρως την συμπεριφορά ενός φωτοβολταικού κυττάρου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες μιας και έχουμε υπό τον έλεγχό μας όλες τις παραμέτρους που συμμετέχουν στο αναλυτικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο. Για δική μας ευκολία στο πρόγραμμα υπάρχουν προκαθορισμένες ημιαγώγιμες διατάξεις που μπορούμε να μελετήσουμε. Ανάμεσα σε αυτές είναι και ένα τυπικό φωτοβολταικό κύτταρο που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτή την εργασία.

Ο λόγος που εμπλεκόμαστε με αυτή τη διαδικασία είναι διότι θα μας δώσει τη δυνατότητα να μελετήσουμε ένα φωτοβολταικό κύτταρο γνωρίζοντας όλες τις επιμέρους εγγενής παραμέτρους του. Διαφορετικά θα έπρεπε να βασιστούμε μόνο στα χαρακτηριστικά εξόδου που δίνονται από τους κατασκευαστές. Η αναλυτική αυτή προσέγγιση συνεπάγεται πως θα πρέπει με το πέρας της ανάλυσης να είμαστε σε θέση να συμπληρώσουμε τον πίνακα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταικού μας κυττάρου. Το μέγεθος του φωτοβολταικού στοιχείου είναι ορισμένο στα <u>100cm²</u> που είναι ένα σύνηθες μέγεθος. Δηλαδή ένα τετράγωνο στοιχείο 10cm x 10cm αν κάνουμε την απλούστευση εδώ πως έχουμε ένα στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Όσον αφορά το πάχος του φωτοβολταικού στοιχείου θα πρέπει να λάβουμε υπόψη πως τα φωτόνια καθώς εισέρχονται εσωτερικά στο υλικό ενδεχομένως να διέλθουν μερικά μικρόμετρα πυριτίου πριν να απορροφηθούν, με τα φωτόνια υψηλότερης ενέργειας να απορροφώνται πρώτα πιο κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Αυτό συνεπάγεται πως υπάρχει ένα ελάχιστο πάχος που θα πρέπει να έχει το πυρίτιο του φωτοβολταικού κυττάρου. Το πάχος του δικού μας στοιχείου έχει μια τυπική τιμή <u>300μm</u>, και εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδος κοπής του εκάστοτε εργοστασίου παραγωγής φωτοβολταικών κυττάρων.

Το πυρίτιο αρχικά σε όλο το εύρος του έχει εμποτιστεί με αποδοχείς (βόριο) και συνεπώς είναι τύπου p με πυκνότητα που ορίζουμε εμείς ίση με 1.513*10¹⁶ cm⁻³. Η πυκνότητα είναι ομοιόμορφη καθόλο το μήκος του κυττάρου και παρουσιάζεται με πράσινη σταθερή γραμμή στην παρακάτω γραφική παράσταση. Για να αποκτήσει όμως ιδιότητες που θα επιτρέψουν την πραγματοποίηση του φωτοβολταικού φαινομένου θα πρέπει να έχουμε μια επαφή p-n. Αυτό το επιτυγχάνουμε με μία νέα ακόμα μεγαλύτερου βαθμού πρόσμειξη που εφαρμόζεται στην πάνω επιφάνεια του πυριτίου με δότες (φώσφορος) ώστε να γίνει τύπου n. Το ιδανικό θα ήταν να είχαμε ένα ομοιόμορφο n-doping. Αλλά η μεθοδολογία έγχυσης φωσφόρου μέσα στο p-doped πυρίτιο μας δίνει μια κατανομή που έχει μέγιστη τιμή στην επιφάνεια του πυριτίου και σταδιακά μειώνεται η συγκέντρωση κατά μήκος του υλικού. Έτσι βλέπουμε στην ίδια γραφική παράσταση την καμπύλη με κόκκινο χρώμα πως η συγκέντρωση των δοτών επικρατεί ως το μισό μικρόμετρο περίπου και έπειτα μειώνεται απότομα για να μηδενιστεί σε απόσταση 1μm από την επιφάνεια του φωτοβολταικού κυττάρου.

.



Εικόνα 13 - Πυκνότητα Πρόσμιξης Αποδοχέων και Δοτών (λογαριθμική κλίμακα x-άξονα και y-άξονα)

Για τη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταικών κυττάρων βοηθάει η χρήση ανάγλυφων επιφανειών στη πάνω πλευρά του στοιχείου. Η ανάγλυφη επιφάνεια συνίσταται να έχει δομή πυραμίδων που όπως έχει αποδειχτεί πως έχουν βέλτιστα αποτελέσματα στο απορροφούμενο φως. Άπαξ όμως και το φως εισέλθει μέσα στο φωτοβολταικό κύτταρο θέλουμε να συναντήσει ανακλαστικές επιφάνειες τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω μέρος ώστε να αυξήσουμε την πιθανότητα να απορροφηθεί από το πυρίτιο. Στο PC1D η απώλεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μοντελοποιείται ως ποσοστό ίσο με 10% και οι εσωτερικές ανακλάσεις μοντελοποιούνται επίσης με αντίστοιχα ποσοστά. Συγκεκριμένα για τη πάνω επιφάνεια έχουμε 75% για τη πρώτη ανάκλαση και 92% για τις μετέπειτα ενώ για την πίσω επιφάνεια έχουμε 70%.

Κατά σύμβαση ορίζουμε την πάνω πλευρά του φωτοβολταικού κυττάρου ως εκπομπό και την πίσω πλευρά ως βάση. Η επαφή του εκπομπού έχει μια απειροελάχιστη ωμική αντίσταση 1μΩ ενώ η επαφή της βάσης έχει μια ωμική αντίσταση 0.015Ω. Αυτές οι δύο αντιστάσεις μοντελοποιούν την εν σειρά αντίσταση του φωτοβολταικού κυττάρου.

Ορίζεται επίσης μια παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής. Η αντίσταση αυτή μοντελοποιεί τα ρεύματα που προκύπτουν διά των εξωτερικών επιφανειών της επαφής παράλληλα προς το ηλεκτρικό της πεδίο ή διαμέσου ηλεκτρικής

διάβασης που μπορεί να δημιουργούν ανεπιθύμητες προσμίξεις μέσα στο υλικό. Η αγωγιμότητα της αντίστασης διαρροής ορίζεται σε 0.3Siemens.

Εξομοίωση με το PC1D σε σταθερή κατάσταση

Πρώτα διεγείρουμε φωτοβολταικό κύτταρο με μια πηγή ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία καθορίζεται στις STC προδιαγραφές (Standard Test Conditions) οπότε η θερμοκρασία ορίζεται στους 25°, και η ισχύς ίση με 1000W/m². Το φάσμα της ακτινοβολίας δίνεται έτοιμο στο αρχείο am15g.spc και αντιστοιχεί στο φάσμα του ηλίου ολικής (άμεσης+διάχυτης) ακτινοβολίας όπως αυτή διαμορφώνεται μετά τη διέλευσης μέσα από 1.5 αέρια μάζα.

Αρχικά ρυθμίζουμε το κύκλωμα χωρίς να του ασκούμε κάποια εξωτερική τάση και η αντίσταση με την οποία συνδέεται είναι ίση με 10³⁰Ω/cm² που είναι η μεγαλύτερη δυνατή τιμή που μπορούμε να εισάγουμε, πρακτικά δηλαδή έχουμε ένα ανοιχτοκύκλωμα. Εκτελώντας την εξομοίωση στο PC1D το αποτέλεσμα μας δίνει το πολύ μικρό ρεύμα βάσης, πρακτικά μηδενικό και τάση ίση με 0.5920V. Άρα η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι <u>Voc=592mV</u>.

Σε αυτό το σημείο είναι ενδιαφέρον να εξάγουμε από το PC1D το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο βλέπουμε πρώτον με πράσινο χρώμα τη δημιουργία ρεύματος από τον ήλιο, δηλαδή το ρυθμό με τον οποίο παράγονται φορείς φορτίου και δεύτερον με κόκκινο χρώμα τους μηχανισμούς που αντιτίθενται σε αυτό το έργο, δηλαδή το ρυθμό με τον οποιό οι οπές και τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται και δεν συμβάλλουν στο φωτορεύμα.


Εικόνα 14 - Δημιουργία & Επανασύνδεση Φορέων

Παρατηρούμε πως όσο πιο βαθιά βρισκόμαστε στο φωτοβολταικό κύτταρο τόσοι περισσότεροι φορείς ρεύματος δημιουργούνται αλλά και τόσο περισσότερο μεγαλύτερος γίνεται ο ρυθμός με τον οποίο επανασυνδέονται. Από τα 2 μm και μετά ο ρυθμός επανασύνδεσης ξεπερνά το ρυθμό δημιουργίας φορέων και έτσι το φωτοβολταικό φαινόμενο δεν ευδοκιμεί σε αυτή την περιοχή και αυτό οφείλεται στο γεγονός πρώτον ότι είμαστε κοντά στην επαφή που το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρό και κατα δεύτερον ότι τα φωτόνια υψηλής ενέργειας είναι τα πρώτα που απορροφόνται από το υλικό ενώ τα φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας συνήθως ταξιδεύουν πιο βαθειά μέσα στο υλικό.

Έπειτα ρυθμίζουμε το κύκλωμα να έχει εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση ίση με ΟV αλλά τώρα μηδενίσουμε την αντίσταση βραχυκυκλώνωντας το φωτοβολταικό κύτταρο. Ως αποτέλεσμα έχουμε μηδενική τιμή τάσης και ρεύμα ίσο με -3.183Α. Άρα το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι <u>Isc=3.183Α</u>. Το μείον προκύπτει από τη συμβατικής φορά του PC1D για θετική ροή εντός του υλικού από τον εκπομπό προς την βάση.

Εξομοίωση με το PC1D σε μεταβαλλόμενη (transient) κατάσταση

Ως τώρα μελετήσαμε το φωτοβολταικό κύτταρο σε σταθερή κατάσταση. Το πρόγραμμα PC1D μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε το κύκλωμα και σε

μεταβαλλόμενη κατάσταση. Μεταβάλλουμε την τάση που εφαρμόζουμε εξωτερικά στο φωτοβολταικό κύτταρο από τα -0.1V μέχρι τα 0.6V. Το φορτίο στη βάση παραμένει μηδενικό στα μηδέν ohms. Προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα που είναι η χαρακτηριστική I-V του φωτοβολταικού κυττάρου.



Εικόνα 15 - Χαρακτηριστική Ι-V

Οι ουρές της καμπύλης που βρίσκονται αρνητικά των OVolts και θετικά των OAmperes ανήκουν στο πρώτο και στο τρίτο τεταρτημόριο πράγμα που συνεπάγεται πως το pv-cell καταναλώνει αντί να παράγει ενέργεια. Αντιθέτως το κομμάτι της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο δίνει αρνητικές τιμές ισχύος και είναι το κομμάτι εκείνο που μετατρέπει την ενέργεια από τον ήλιο σε ωφέλιμη ισχύ.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ισχύς που παράγεται (ή καταναλώνεται) στο φωτοβολταικό κύτταρο συναρτήσει της τάσης εξόδου. Η πιο αξιόλογη παρατήρηση είναι πως για έναν συγκεκριμένο συνδυασμό ρεύματος και τάσης η ισχύς μεγιστοποιείται. Εδώ η τιμή αυτή είναι ίση με 1.361watts και θα αποτελέσει την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταικού μας κυττάρου. Να σημειώσουμε πως για διαφορετικά φορτία (20,30,3000 ohms κοκ.) η μέγιστη ισχύς δίνεται για διαφορετικό συνδυασμό του ρεύματος και της τάσης και εφόσον το φορτίο είναι ένας παράγοντας που μεταβάλλεται συνεχώς σε ένα Φ/Β σύστημα υπάρχουν συσκευές που ονομάζονται Maximum Power Point Tracking (MPPT) με σκοπό να παρακολουθούν αυτές τις αλλαγές στο φορτίο και να ρυθμίζουν κατάλληλα το κύκλωμα ώστε να προσφέρει τη μέγιστη ισχύ του.



Εικόνα 16 - Ισχύς φωτοβολταικού κυττάρου

Υπολογισμός Απόδοσης Φωτοβολταικού Κυττάρου

Βασιζόμενοι στα δύο ανωτέρω διαγράμματα μπορούμε να συμπληρώσουμε ακόμη δύο στοιχεία στα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταικού κυττάρου. Η τάση στη μέγιστη ισχύ είναι 0.474V και το ρεύμα στη μέγιστη ισχύ είναι 2.871A.

Ο μαθηματικός τύπος που δίνει την απόδοση του φωτοβολταικού κυττάρου είναι ο εξής: $n = \frac{Power \ Out}{Power \ In}$. Εδώ ήδη γνωρίζουμε πως η ισχύς εξόδου είναι 1.361watts ενώ η ισχύς εισόδου, δηλαδή η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 1000W/m² x 100cm² = 10Watts.

Άρα η απόδοση είναι <u>n=13.61%</u>.

Επίσης να σημειώσουμε πως δεν έχει ληφθεί υπόψη η επιφάνεια που χάνεται λόγω της καλωδίωσης στον εκπομπό. Η καλωδίωση σκιάζει το φωτοβολταικό κύτταρο και μειώνει περαιτέρω το ωφέλιμο ποσοστό ακτινοβολίας. Διαφορετικά μπορούμε να εκφράσουμε πως στους υπολογισμούς μας θεωρήσαμε τα 100cm² του φωτοβολταικού κυττάρου να είναι η ενεργός του επιφάνεια. Έτσι τώρα είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον παράγοντα πλήρωσης (Fill Factor) από τον τύπο $FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}}$. Και προκύπτει <u>FF=0.72227</u>.

Θερμοκρασιακές Επιδράσεις στο Φωτοβολταικό Κύτταρο

Τέλος θα πρέπει να δούμε τον ρυθμό μεταβολής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, του ρεύματος βραχυκυκλώματος και της μέγιστης ισχύος σύμφωνα με την θερμοκρασία λειτουργίας.



0-17 Μεταβολή Ισχύος σε σχέση με τη Θερμοκρασία

Βλέπουμε πως για ένα μεγάλο εύρος πιθανών θερμοκρασιών λειτουργίας η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταικού κυττάρου συναρτήσει της θερμοκρασίας έχει γραμμική σχέση που προσεγγίζεται από την εξίσωση

 $i\sigma\chi$ ύς = -0.0066 * θ ερμοκρασία + 1.5249 Ο συντελεστής ισχύος ανά βαθμό κελσίου είναι -0.0066.



0-18 Μεταβολή της Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος σε σχέση με τη Θερμοκρασία

Στο παραπάνω γράφημα βλέπουμε πως η τάση ανοιχτού κυκλώματος έχει επίσης πολύ καλή γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με την θερμοκρασία. Οπότε μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση

τάση ανοιχτού κυκλώματος = -0.0022 * θερμοκρασία + 0.6461<u>Ο συντελεστής της τάσης ανά βαθμό κελσίου είναι -0.0022</u>.



Εικόνα 0-19 Μεταβολή του Ρεύματος Βραχυκυκλώματος σε σχέση με τη Θερμοκρασία

Τέλος βλέπουμε το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθώς μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Πρώτη μας παρατήρηση είναι πως η καμπύλη δεν προσδίδει μια γραμμική σχέση αλλά και πως η εξάρτηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος από την θερμοκρασία είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την τάση. Εντός των συνήθη θερμοκρασιών μπορούμε να προσεγγίσουμε την μεταβολή γραμμικά μέσω της εξίσωσης

ρεύμα βραχυκυκλώματος = $-0.154 * 10^{-3} * θερμοκρασία - 3.179$ <u>Ο συντελεστής ρεύματος ανά βαθμό κελσίου είναι -0.154e-3</u>.

Με βάση την εξομοίωση είμαστε σε θέση να συμπληρώσουμε τον παρακάτω πίνακα τεχνικών χαρακτηριστικών για το φωτοβολταικό μας κύτταρο:

Διαστάσεις	
Μέγεθος Φ/Β Στοιχείου(cm²)	100(10x10)
Πάχος(μm)	300
Ηλεκτρικές Ιδιότητες (STC)	
Ένταση Ρεύματος Βραχυκυκλώματος(Α)	3.183
Ένταση Ρεύματος Μέγιστης Ισχύος(Α)	2.871
Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος(V)	0.592
Τάση Μέγιστης Ισχύος(V)	0.474
Ονομαστική Ισχύς(Wp)	1.361
Απόδοση Φ/Β Στοιχείου(%)	13.61

Παράγοντας Πλήρωσης	0.722
Θερμοκρασιακοί Συντελεστές	
Ρεύματος Βραχυκυκλώματος(Α/°C)	-0.154e-3
Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος(V/°C)	-0.0022
Μέγιστης Ισχύος(W/ºC)	-0.0066

Εμπειρικό Μοντέλο Φωτοβολταικού Κυττάρου Δύο Διόδων

Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε το φωτοβολταικό κύτταρο μέσα στο Simulink θα πρέπει να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο που να ανταποκρίνεται όσο το δυνατό πιο πιστά στην ηλεκτρική του συμπεριφορά. Το εμπειρικό μοντέλο δύο διόδων που συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία έχει αποδειχθεί πως προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές με πολύ μικρό σφάλμα. Στην ανάλυση του Jürgen Schumacher et al (11) προτείνεται μια αναλυτική μεθοδολογία για τον εξαγωγή των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος δύο διόδων από τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταικού κυττάρου. Η μεθοδολογία βασίζεται στην εξής εξίσωση:

$$I = (c_{ph} + c_t * T) * G - c_s * T^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (V + I * R_s)}{k * T}\right) - 1\right)$$
$$- c_r * T^{\frac{5}{2}} * \exp\left(-\frac{E_g}{2 * k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (V + I * R_s)}{2 * k * T}\right) - 1\right)$$
$$- \frac{V + I * R_s}{R_p}$$

Όπως βλέπουμε υπάρχουν 6 άγνωστοι που πρέπει να εξάγουμε, μέσω ενός συστήματος 6 εξισώσεων, από τα τεχνικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 20 - Μοντέλο Δύο Διόδων

Σημειώστε πως για όλες τις παρακάτω εξισώσεις ισχύει G=1000W/m² διότι οι μετρήσεις έγιναν σε STC.

 Γνωρίζοντας το ρεύμα βραχυκυκλώματος ισχύει I=Isc και φυσικά V=0 για T=298.15K (25C)

$$0 = -I_{sc} + (c_{ph} + c_t * T) * G - c_s * T^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (I_{sc} * R_s)}{k * T}\right) - 1\right) - c_r * T^{\frac{5}{2}} * \exp\left(-\frac{E_g}{2 * k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (I_{sc} * R_s)}{2 * k * T}\right) - 1\right) - \frac{I_{sc} * R_s}{R_p}$$

Γνωρίζοντας την τάση ανοιχτού κυκλώματος ισχύει I=0 και V=Voc για T=298.15K (25C)

$$0 = (c_{ph} + c_t * T) * G - c_s * T^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (V_{oc})}{k * T}\right) - 1\right) - c_r * T^{\frac{5}{2}} \\ * \exp\left(-\frac{E_g}{2 * k * T}\right) * \left(\exp\left(\frac{q * (V_{oc})}{2 * k * T}\right) - 1\right) - \frac{V_{oc}}{R_p}$$

3. Γνωρίζοντας το ρεύμα και την τάση ισχύει I=I_{mp} και V=V_{mp} για T=298.15K (25C)

$$0 = -I_{mp} + (c_{ph} + c_t * T) * G - c_s * T^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k * T}\right) \\ * \left(\exp\left(\frac{q * (V_{mp} + I_{mp} * R_s)}{k * T}\right) - 1\right) - c_r * T^{\frac{5}{2}} * \exp\left(-\frac{E_g}{2 * k * T}\right) \\ * \left(\exp\left(\frac{q * (V_{mp} + I_{mp} * R_s)}{2 * k * T}\right) - 1\right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} * R_s}{R_p}$$

4. Γνωρίζοντας τον θερμοκρασιακό συντελεστή του ρεύματος βραχυκυκλώματος μπορούμε να παραγωγίσουμε την εξίσωση 1 που είναι σχέση του I_{sc} με την θερμοκρασία Τ έχοντας $\frac{dI_{sc}}{dT} = TC_{sc}$ όπου το TC_{sc} είναι σταθερά και ισχύει για όλες τις αναμενόμενες θερμοκρασίες.

$$\begin{split} 0 &= -TC_{sc} + c_t G \\ &- c_s \left(\left[3T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) + T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \frac{E_g}{kT^2} \right] * \left[\exp\left(\frac{qI_{sc}}{kT}R_s\right) - 1 \right] \\ &+ \left[T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] * \left[\exp\left(\frac{qI_{sc}}{kT}R_s\right) \frac{qR_s}{k} \left(\frac{TC_{sc}}{T} - \frac{I_{sc}}{T^2}\right) \right] \right) \\ &- c_r \left(\left[\frac{5}{2}T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) + T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \frac{E_g}{2kT^2} \right] \\ &* \left[\exp\left(\frac{qI_{sc}}{2kT}R_s\right) - 1 \right] + \left[T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \right] \\ &* \left[\exp\left(\frac{qI_{sc}}{2kT}R_s\right) \frac{qR_s}{2k} \left(\frac{TC_{sc}}{T} - \frac{I_{sc}}{T^2}\right) \right] \right) - TC_{sc} \frac{R_s}{R_p} \end{split}$$

5. Γνωρίζοντας τον θερμοκρασιακό συντελεστή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος μπορούμε να παραγωγίσουμε την εξίσωση 2 που είναι σχέση της V_{oc} με την θερμοκρασία Τ έχοντας $\frac{dV_{oc}}{dT} = TC_{oc}$ όπου το TC_{oc} είναι σταθερά και ισχύει για όλες τις αναμενόμενες θερμοκρασίες.

$$\begin{split} 0 &= c_t G - c_s \left\{ \left[3T^2 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) + T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \frac{E_g}{kT^2} \right] * \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \\ &+ \left[T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] * \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) \frac{q}{k} \left(\frac{TC_{oc}}{T} - \frac{V_{oc}}{T^2}\right) \right] \right\} \\ &- c_r \left\{ \left[\frac{5}{2} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) + T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \frac{E_g}{2kT^2} \right] * \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{2kT}\right) - 1 \right] \\ &+ \left[T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \right] * \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{2kT}\right) \frac{q}{2k} \left(\frac{TC_{oc}}{T} - \frac{V_{oc}}{T^2}\right) \right] \right\} - \frac{TC_{oc}}{R_p} \end{split}$$

6. Η τελευταία εξίσωση προκύπτει από το γεγονός πως η καμπύλη της ισχύος σε σχέση με την τάση έχει ένα μέγιστο σε εκείνο στο σημείο μέγιστης ισχύος, δηλαδή ισχύει πως dP/dV = 0. Γνωρίζοντας πως P = V * I έχουμε την σχέση $I + V * \frac{dI}{dV} = 0$. Κάνοντας την παραγώγιση και αντικαθιστώντας την τάση V_{mp} και το ρεύμα I_{mp} έχουμε την εξής σχέση:

$$0 = (c_{ph} + c_t T)G - c_s T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) * \left(\exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{kT}\right) - 1\right) - c_r T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \left(\exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{2kT}\right) - 1\right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_p} - c_s T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{kT}\right) \frac{q}{kT} (V_{mp} - R_s I_{mp}) - c_r T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{2kT}\right) \frac{q}{2kT} (V_{mp} - R_s I_{mp}) - \frac{V_{mp} - R_s I_{mp}}{R_p}$$

Ζητάμε από το Simulink να επιλύσει το σύστημα υλοποιώντας το κατάλληλο διάγραμμα στο αρχείο **twoDiode.mdl**. Τα αποτελέσματα για το φωτοβολταικό μας κύτταρο είναι τα εξής:

С _{рһ}	C _t	Cs	C _r	R _s (Ω)	R _p (Ω)
0.003229	-1.54*10^-7	6.26	0.06152	0.0002926	210.7

Το μοντέλο μας πέρα από την ακτινοβολία έχει εξάρτηση και από την θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταικού κυττάρου. Η θερμοκρασία λειτουργίας εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος καθώς και από την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταικό κύτταρο (12). Άρα για την θερμοκρασία λειτουργίας ισχύει

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{8} * G$$

Για ένα τυπικό φωτοβολταικό πλαίσιο έχουμε πως το NOCT (Κανονική Θερμοκρασία Λειτουργίας Κυττάρου) είναι περίπου ίσο με 48°*C*, για ένα κακό Φ/Β πλαίσιο (πχ. Plexiglas) είναι ίσο με 58°*C* και για ένα καλό Φ/Β πλαίσιο (πχ. aluminum finned substrate) είναι ίσο με 33° *C*. Εμείς καθώς θέλουμε να αντιπροσωπεύσουμε το μέσο φωτοβολταικό θα επιλέξουμε NOCT=48° *C*.

Σύνθεση Φωτοβολταικού Πλαισίου από Φωτοβολταικά Κύτταρα

Έχοντας ως βάση το φωτοβολταικό μας κύτταρο θα συνθέσουμε ένα πλαίσιο στο οποίο θα στοιχήσουμε πολλά φωτοβολταικά κύτταρα μαζί. Η κλίμακα στην οποία θα κινηθούμε στην εργασία απαιτεί πλαίσια μεγάλης ισχύος ώστε να γίνεται καλύτερη εξοικονόμηση του χώρου. Από απλή παρατήρηση των τεχνικών χαρακτηριστικών των διαφόρων μοντέλων μεγάλης ισχύος που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στην αγορά παρατηρούμε πως η αναλογία των διαστάσεων βρίσκεται από 1.5 έως 2. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια θα κινηθούμε για να κατασκευάσουμε και το δικό μας μοντέλο.

Οπότε έχοντας 1.361Wp ανά κύτταρο και ζητώντας περίπου 230Wp ανά πλαίσιο θα χρειαστούμε συνολικά <u>170 φωτοβολταικά κύτταρα</u>. Το κάθε κύτταρο έχει διαστάσεις 10x10 cm οπότε αν τοποθετήσουμε 17 κύτταρα στην ίδια γραμμή και 10 cells στην ίδια στήλη τότε θα έχουμε συνολικά 170 Φ/Β κύτταρα στην αναλογία διαστάσεων που θέλουμε. Επόμενο βήμα είναι να διαλέξουμε την εσωτερική συνδεσμολογία του φωτοβολταικού πλαισίου. Αποφασίζουμε να συνδέσουμε τις πέντε διαδοχικές σειρές Φ/Β κυττάρων εν σειρά και οι δύο πεντάδες που προκύπτουν θα συνδεθούν μεταξύ τους παράλληλα.

Είναι σημαντικό να έχουμε υψηλή τάση σε ένα Φ/Β πλαίσιο διότι οι διασυνδέσεις ενός πλαισίου γίνονται με λεπτά καλώδια που αυτό συνεπάγεται μεγάλες ωμικές απώλειες σε περίπτωση ροής υψηλού ρεύματος. Ακολούθως αυτή η ροή υψηλού ρεύματος αυξάνει τον κίνδυνο καταστροφής ενός κυττάρου λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα λεπτά καλώδια.

Το ρεύμα που παράγει το κάθε κύτταρο θα πολλαπλασιαστεί επί <u>Np=2</u> και η τάση θα πολλαπλασιαστεί με <u>Ns=85</u>. Συνεπώς θα έχουμε ένα φωτοβολταικό πλαίσιο με συνολική ισχύ <u>231.37Wp</u>.

Για να υπολογίσουμε τις διαστάσεις του πλαισίου έχουμε πως η ενεργή επιφάνεια είναι 1.7m² και η κάθε πλευρά του είναι: Μήκος ενεργής πλευράς + Αποστάσεις μεταξύ των κυττάρων + Σκελετός του πλαισίου. Αν υποθέσουμε πως οι αποστάσεις μεταξύ των κυττάρων είναι πολύ μικρές και συνολικά όλες μαζί ίσες με 1cm και η προεξοχή από το σκελετό του πλαισίου είναι επιπλέον 9cm θα έχουμε επιπρόσθετα 10cm ανά πλευρά.



Συνεπώς το φωτοβολταικό πλαίσιο θα έχει διαστάσεις <u>180x110cm</u>. Η συνδεσμολογία του Φ/Β πλαισίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

Εικόνα 21 - Συνδεσμολογία Φωτοβολταικού Πλαισίου

Συγκρίνοντας το πλαίσιο που κατασκευάσαμε με τα αντίστοιχης ισχύος και απόδοσης πλαίσια της αγοράς θα θεωρήσουμε πως δίνεται εγγύηση για 25 χρόνια. Η εγγύηση συνεπάγεται πως μέσα στα πρώτα 25 χρόνια η απόδοσή του φωτοβολταικού πλαισίου δεν θα πρέπει να υποστεί ύφεση μεγαλύτερη από 20%.

Ένα φωτοβολταικό πλαίσιο για να βεβαιώσει την ορθή λειτουργία του σε όλες τις συνθήκες θα πρέπει να περιλαμβάνει διόδους παράκαμψης και απομόνωσης. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα οι δίοδοι παράκαμψης είναι χρήσιμοι σε περίπτωση που κάποια από τα κύτταρα του πλαισίου σκιαστούν, για οποιοδήποτε λόγο, ενώ τα υπόλοιπα όχι. Τα φωτοβολταικά κύτταρα που σκιάζονται παύουν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα και καταναλώνουν το ρεύμα του κυκλώματος. Για να αποφευχθεί αυτή η περίπτωση χρησιμοποιούμε διόδους παράκαμψης για να έχει το ρεύμα μια εναλλακτική διαδρομή. Στο μοντέλο μας θεωρούμε πως η πιθανότητα να σκιαστεί ένα πλαίσιο λόγω κάποιων φύλλων δέντρων ή άλλων επικαθίσεων είναι μικρή και δεν θα παίξει σημαντικό ρόλο στους ενεργειακούς υπολογισμούς. The blocking diode on shaded module prevents current flow into shaded module from the parallel module.

Bypass diodes reduce the impact of mismatch losses from modules

connected in series.



Bypass diodes

Οι δίοδοι απομόνωσης από την άλλη πλευρά παίζουν σημαντικό ρόλο στους ενεργειακούς υπολογισμούς διότι καταναλώνουν συνεχώς ενέργεια. Ο ρόλος τους είναι να απαγορεύουν την ανάστροφη ροή ρεύματος μέσα από το φωτοβολταικό πλαίσιο σε περίπτωση που βρεθούν οι ακροδέκτες του σε ανάστροφη τάση μεγαλύτερη από την τάση που ασκεί το ίδιο το πλαίσιο. Οι δίοδοι που χρησιμοποιούνται είναι τύπου schottcky διότι έχουν μικρή πτώση τάσης ορθής πόλωσης. Η τοποθέτησή τους όμως πρέπει να ελέγχεται ανά περίπτωση. Κατά κανόνα στα μεμονωμένα συστήματα όπου τα φωτοβολταικά πλαίσια είναι συνδεδεμένα παράλληλα με μια μπαταρία θα πρέπει να υπάρχουν υποχρεωτικά δίοδοι απομόνωσης για να μην υπάρχει σπατάλη ενέργειας με τη ροή ρεύματος από την μπαταρία προς τα φωτοβολταικά. Είναι δυνατόν αν το ανάστροφο ρεύμα είναι μεγάλο σε ένα φωτοβολταικό πλαίσιο να υπάρξει έντονη αύξηση της θερμοκρασίας του και να προκληθούν μόνιμες βλάβες. Στα μεγάλα συστήματα όμως οι σύγχρονοι αντιστροφείς (inverters) ή τα συστήματα MPPT είναι αρκετά «έξυπνα» να αποσυνδέουν το φωτοβολταικό σύστημα σε περίπτωση έλλειψης φωτός (13). Αυτό σημαίνει πως οι δίοδοι απομόνωσης κρίνονται περιττές. Εμείς θα ακολουθήσουμε

την ίδια προσέγγιση και δεν θα προσθέσουμε διόδους απομόνωσης στο φωτοβολταικό μας πλαίσιο.

Διάταξη Παρακολούθησης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Για να παίρνουμε κάθε στιγμή το μέγιστο της ισχύος που μπορεί να μας προσφέρει το φωτοβολταικό σύστημα πρέπει να έχουμε την διάταξη MPPT που επιβάλει το σημείο μέγιστης ισχύος στο φωτοβολταικό ανεξάρτητα της τάσης που θα είχε το φωτοβολταικό στα άκρα του αν έλειπε η διάταξη MPPT.

Η διάταξη MPPT στην πραγματικότητα είναι απλά ένας υψηλής απόδοσης dc/dc μετατροπέας που λειτουργεί ως ιδανικό ηλεκτρικό φορτίο για ένα φωτοβολταικό σύστημα και μετατρέπει την ισχύ σε τάση ή ρεύμα ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Η λειτουργία του MPPT βασίζεται σε αλγόριθμο που αποθηκεύεται συνήθως εντός ενός μικροελεγκτή και εκτελείται επανειλημμένα με σκοπό να «κλειδώνει» στο σημείο μέγιστης ισχύος. Το σημείο μέγιστης ισχύος μεταβάλλεται με την αλλαγή του φορτίου, της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταικού και της θερμοκρασίας. Οι δύο πιο γνωστοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο MPPT είναι ο αλγόριθμος **P&O** (Perturb & Observe) και ο αλγόριθμος **INC** (Incremental Conductance) με αποτελεσματικότερο τον δεύτερο αλγόριθμο (14).

Στη δική μας περίπτωση όμως μέσα από το ίδιο το μοντέλο μπορούμε να εξάγουμε άμεσα το σημείο μέγιστης ισχύος. Με άλλα λόγια επειδή ο τύπος της χαρακτηριστικής του μοντέλου είναι γνωστός δεν απαιτείται να γίνουν μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος όπως γίνεται σε ένα πραγματικό MPPT σύστημα αλλά μπορούμε απλά να εκμεταλλευτούμε την συνάρτηση dP/dV=0 που χρησιμοποιήσαμε στην παράγραφο του εμπειρικού μοντέλου δύο διόδων για να εξάγουμε το ρεύμα και την τάση που αντιστοιχούν στο σημείο αυτό και έπειτα να πολλαπλασιάσουμε αυτές τις δύο τιμές μεταξύ τους για να λάβουμε την ισχύ της εξόδου. Δηλαδή στη δική μας περίπτωση δεν έχουμε απώλειες από το MPPT μιας και φαίνεται σαν να λειτουργεί «ακαριαία» και πάντα να μας δίνει το σημείο μέγιστης ισχύος και το υπόλοιπο σύστημα με τη σειρά του να έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί τη μέγιστη ισχύ. Επειδή όμως κανένα MPPT δεν είναι τέλειο θα εισάγουμε έναν σταθερό συντελεστή απόδοσης ίσο με

$MPPT_{eff} = 95\%$

για να εκφράσει τις απώλειες ισχύος τόσο σε παρασιτικά φορτία όπως ο μικροελεγκτής αλλά και στην αδυναμία του MPPT να προσδιορίζει πάντα με ακρίβεια και το σημείο μέγιστης ισχύος.

Σύνθεση του Φωτοβολταικού Πάρκου από Φωτοβολταικά Πλαίσια

Τελικό βήμα είναι ο τρόπος με τον οποίο θα συνδέσουμε τα φωτοβολταικά πλαίσια για τις ανάγκες του συστήματος που κατασκευάζουμε. Κάθε φωτοβολταικό πλαίσιο είναι έτοιμο από τον κατασκευαστή και δεν έχουμε επιλογές στις εσωτερικές του διασυνδέσεις, αλλά για φωτοβολταικά πλαίσια είναι στην ευχέρεια του μηχανικού που αναλαμβάνει τη μελέτη της εγκατάστασης να τα συνδέσει όπως κρίνει πως θα σχηματιστεί το βέλτιστο σύστημα. Το δικό μας φωτοβολταικό πλαίσιο έχει τάση ανοιχτού κυκλώματος περίπου 40 Volts. Ακόμα και στα πιο μεγάλα συστήματα η τάση σπάνια ξεπερνά τα 800 με 900 Volt οπότε αμέσως καταλαβαίνουμε πως θα χρειαστούν περίπου είκοσι φωτοβολταικά πλαίσια να συνδεθούν εν σειρά για να πάρουμε την απαιτούμενη τάση. Ακριβώς αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο θα στήσουμε ηλεκτρικά το φωτοβολταικό μας σύστημα. Θα σχηματίσουμε μια συστοιχία από φωτοβολταικά πλαίσια τόσα όσα χρειάζονται ώστε να πάρουμε την απαιτούμενη τάση. Έπειτα για να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις σε ισχύ θα συνδέσουμε πολλές συστοιχίες σε παράλληλη σύνδεση, πολλαπλασιάζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το ρεύμα εξόδου. Η συνδεσμολογία των πλαισίων θα μοιάζει με την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23 - Συνδεσμολογία Φωτοβολταικών Πλαισίων

Βέλτιστη Διάταξη Φωτοβολταικών Συστοιχιών

Τελευταίο βήμα είναι κατά την διάταξη των φωτοβολταικών συστοιχιών να διατηρηθούν αποστάσεις που θα εξασφαλίζουν πως δεν θα υπάρχει αισθητή σκίαση μίας συστοιχίας από την επόμενη. Έστω ότι έχουμε δύο διατάξεις με απόλυτα νότιο προσανατολισμό σε μια πλαγιά κλίσης ω όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 24 - Διάταξη Φ/Β συστοιχιών σε πλαγιά κλίσης ω

Για τιμές γεωγραφικού πλάτους φ από 25° έως 45° υπάρχει μια εμπειρική σχέση που συνδέει την απόσταση α με το ύψος υ (15).

$$\frac{\alpha}{v} = 0.0042 * \varphi^2 - 0.1661 * \varphi + 2.8653$$

Επομένως η ελάχιστη απόσταση ε δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \gamma * \frac{\frac{\alpha}{v} * \sin(\beta) + \cos(\beta)}{1 + \frac{\alpha}{v} * \tan(\omega)}$$

Ενεργειακό Μοντέλο Φωτοβολταικής Γεννήτριας

Πρώτα υλοποιούμε στο Simulink το εμπειρικό μαθηματικό μοντέλο δύο διόδων. Το φωτοβολταικό σύστημα όμως λειτουργεί προσεγγιστικά μονίμως σε MPPT και αξιοποιούμε την εξίσωση dP/dV=0 για να λάβουμε κάθε χρονική στιγμή το ρεύμα και την τάση μέγιστης ισχύος. Οπότε το σύστημα δέχεται ως είσοδο την ισχύ της ακτινοβολίας και την θερμοκρασία περιβάλλοντος για να μας δώσει στην έξοδο την ισχύ όλου του φωτοβολταικού συστήματος.

Το μπλοκ στο Simulink που αντιπροσωπεύει το φωτοβολταικό σύστημα το ονομάζουμε «PV Generator» και στις παραμέτρους αρχικοποίησης του μπλοκ ορίζουμε την επιθυμητή τάση του συστήματος καθώς και την επιθυμητή ισχύ και αυτόματα με απλές αριθμητικές πράξεις προκύπτει η στοίχιση των φωτοβολταικών πλαισίων σε παράλληλες συστοιχίες. Ακόμα υπολογίζουμε τον αριθμό των φωτοβολταικών πλαισίων που θα χρειαστούμε καθώς και την ενεργό επιφάνεια του συστήματος. Ακόμα αξιοποιώντας την ανωτέρω ανάλυση για την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών εξάγουμε την πραγματική έκταση που καταλαμβάνει το φωτοβολταικό σύστημα σε ένα επίπεδο έδαφος. Το εικονίδιο του PV Generator όπως υλοποιήθηκε στο Simulink φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



PV Generator

Εικόνα 25 - Simulink Block - PV Generator

Κεφάλαιο 3

Σύστημα Ηλεκτρόλυσης Νερού

Η ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταικό σύστημα είναι αναγκαίο στη διάρκεια μιας ημέρας να υπερέχει του φορτίου διότι θα την χρειαστούμε κατά τις βραδινές ώρες ή σε στιγμές χαμηλής ηλιοφάνειας. Την περίσσεια αυτή ενέργεια την αποθηκεύουμε σε μορφή υδρογόνου.

Εξαγωγή Υδρογόνου από Μεθανόλη - Οικονομική Λύση

Η εξαγωγή του υδρογόνου μπορεί να γίνει από πολλές διαφορετικές πηγές και εδώ ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να ζυγίσει τις προτεραιότητες του. Αν η φθηνότερη λύση είναι μονόδρομος τότε πολύ απλά παίρνουμε μεθανόλη που είναι πλούσια σε υδρογόνο και με τροφοδότηση θερμότητας λαμβάνουμε παράγωγα όπως το υδρογόνο (επιθυμητό), το διοξείδιο του άνθρακα (ανεπιθύμητο) και το μονοξείδιο του άνθρακα (πολύ ανεπιθύμητο). Αν λάβουμε υπόψη πως το μεθάνιο που θα έχουμε στη διάθεσή μας δεν θα είναι απολύτως καθαρό αλλά θα περιλαμβάνει επιπλέον προσμίξεις, οι αέριοι ρύποι αυξάνονται και απαιτείται περαιτέρω διαδικασία καθαρισμού για να αυξηθεί η καθαρότητα του αέριου υδρογόνου που επιβάλλεται από την τεχνολογία κυψελίδων καυσίμου.



Εξαγωγή Υδρογόνου από Νερό - Οικολογική Λύση

Είναι δύσκολο να σκεφτούμε μια περισσότερο οικολογική διαδικασία από τον κύκλο υδρογόνου. Στη δική μας περίπτωση που βρισκόμαστε σε μια απομονωμένη γεωγραφικά περιοχή η έλλειψη πηγής μεθανίου θα ανάγκαζε την μεταφορά του μεθανίου από άλλες περιοχές καταργώντας τον αρχικό μας στόχο για ενεργειακή ανεξαρτησία της περιοχής. Η παραγωγή υδρογόνου με μηδενικούς ρύπους πραγματοποιείται μέσω μιας συσκευής ηλεκτρόλυσης νερού (electrolyzer). Ένας electrolyzer διαχωρίζει το νερό στα παράγωγά του, σε αέριο υδρογόνο και αέριο οξυγόνο



Εικόνα 27 - Κύκλος Υδρογόνου

σύμφωνα με την παρακάτω χημική εξίσωση:

 $2H_2O_{(liquid)} + ενέργεια \rightarrow O_{2(gas)} + 2H_{2(gas)}$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εναλλακτικές τεχνολογίες electrolyzer που έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε.

PEM Electrolyzer

Μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα στις κυψέλες καυσίμου (PEM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστροφα ώστε το νερό να διαχωρίζεται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η λειτουργία του PEM electrolyzer βασίζεται στη χρήση πολύτιμων μεταλλικών καταλυτών (λευκόχρυσος) και ενός στερεού πολυμερή ηλεκτρολύτη. Ένας PEM electrolyzer παρέχει μεγάλη αξιοπιστία, περισσότερες από 100000 ώρες συνεχής λειτουργίας όπως έχει αποδειχθεί σε ανάλογες εφαρμογές όπως σε υποβρύχια όπου γίνεται ηλεκτρόλυση του νερού για να παρέχεται οξυγόνο στους επιβάτες. Η απόδοση τους είναι 50% - 90% χωρίς να επιτυγχάνουν μεγάλες αποδόσεις σε υψηλά ρεύματα. Από την άλλη πλευρά όμως ένας PEM electrolyzer μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερα ρεύματα από άλλες συσκευές ηλεκτρόλυσης. Η καθαρότητα του αερίου που παράγεται είναι μεγαλύτερη από πέντε εννιάρια (99.999%) τόσο για το υδρογόνο όσο και για το οξυγόνο επομένως δεν χρειάζεται επιπρόσθετος καθαρισμός των παραγόμενων αερίων.

Όσο δελεαστικό και αν είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν PEM electrolyzer θα πρέπει να αποφύγουμε το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης. Ένας PEM electrolyzer σήμερα αναλογεί σε >1000€/kW. Εναλλακτικά μια άλλη δυνατότητα είναι να συνδυάσουμε την κυψέλη καυσίμου, τεχνολογίας PEM, και τον PEM electrolyzer σε ένα κοινό αμφίδρομο σύστημα. Οι μόνες ροές που θα υπήρχαν προς ή από το σύστημα θα ήταν θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό ονομάζεται regenerative κυψέλη καυσίμου αλλά υπάρχει προς το παρόν μόνο σε ερευνητικό επίπεδο. Μια ολοκληρωμένη λύση μιας regenerative κυψέλης καυσίμου έχει παρουσιαστεί από τη NASA το 2007 (16). Η λύση αυτή βρίσκεται σε εμβρυικό στάδιο και δεν έχουν εμφανιστεί ακόμα προιόντα στην αγορά που να μπορούμε να αξιοποιήσουμε στην εργασία.

Solid Oxide Electrolyzer

Δεύτερη τεχνολογία ηλεκτρόλυσης του νερού είναι με χρήση στερεού ηλεκτρολύτη. O solid oxide electrolyzer έχει έναν στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη και λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες των 800-1000 βαθμών κελσίου. Όπως είναι φανερό o solid oxide electrolyzer απαιτεί μια πηγή θερμότητας ώστε να διατηρείται σε υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που συνεπάγεται μεγάλη σπατάλη ενέργειας. Εντούτοις ένα μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί από την ίδια τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης διότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες απαιτείται μικρότερη τάση και συνεπώς λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με την ηλεκτρόλυση νερού που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.

Ωστόσο έως σήμερα τα πρωτότυπα των solid oxide electrolyzers δεν έχουν παρουσιάσει αξιόλογη αντοχή στο χρόνο και προβλήματα όπως η ανακύκλωση της θερμότητας και η αποθήκευση των παραγόμενων αερίων μακριά από τον electrolyzer σε ένα ψυχρό ασφαλές σημείο είναι προβλήματα που πρέπει να λυθούν. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο και μένει να γίνουν οι κατάλληλες διορθωτικές παρεμβάσεις ώστε να παρουσιαστούν ανταγωνιστικά μοντέλα στην αγορά. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ανάγκη ενός electrolyzer που θα έχει γρήγορη εκκίνηση και όσο το δυνατόν πιο χαμηλή κατανάλωση όταν δεν χρησιμοποιείται μας αποτρέπει να χρησιμοποιήσουμε Solid Oxide Electrolyzer στο σύστημά μας.

Alkaline Electrolyzer

Οι επικρατέστεροι electrolyzers στην παγκόσμια αγορά είναι συσκευές ηλεκτρόλυσης του νερού που αναμειγνύεται με κάποιο ηλεκτρολύτη σε υγρή μορφή. Μέσα στο διάλυμα εφαρμόζεται τάση και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο προκαλούν φυσαλίδες οξυγόνου και υδρογόνου αντίστοιχα. Ένα απλουστευμένο σχεδιάγραμμα ενός στοιχείου electrolyzer παρουσιάζεται στην εικόνα 28.

Καθότι το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, θα χρειαστούμε έναν ηλεκτρολύτη που θα επιτρέψει την διαδικασία να πραγματοποιηθεί με μικρότερη τάση. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι είτε το NaOH με βέλτιστη περιεκτικότητα 25% σε αναλογία μάζας, είτε το KOH με βέλτιστη περιεκτικότητα 28%-30% σε αναλογία μάζας.

Το κομμάτι των ηλεκτροδίων που βρίσκεται εντός του διαλύματος θα πρέπει να είναι κατάλληλο να αντιδρά με καλή απόδοση με το υγρό διάλυμα ώστε να διευκολύνει την παραγωγή των φυσαλίδων. Επιπρόσθετα το υλικό εντός του διαλύματος δεν θα πρέπει να διαβρώνεται από το ίδιο το διάλυμα για ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Το πιο κατάλληλο μέταλλο για αλκαλικό ηλεκτρολύτη είναι το νικέλιο(Nichel) αλλά είναι ασύμφορο οικονομικά γι' αυτό στην πράξη συναντάμε ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel). Η περιεκτικότητα του ΚΟΗ επιλέγεται ίση με 20-30% καθότι έχει αποδειχθεί πως η αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων βελτιστοποιείται σε αυτή την περιεκτικότητα και ακόμα βελτιώνεται η αντοχή τους στη διάβρωση με τη πάροδο του χρόνου. Ένας ακόμα παράγοντας που παίζει ρόλο για τα ηλεκτρόδια είναι η δομή της επιφάνειάς τους. Το πιο εύκολο και αποτελεσματικό είναι να γίνει μια ειδική επεξεργασία στην επιφάνεια του μετάλλου που ονομάζεται *crosshatch pattern* και δημιουργεί πολλά αιχμηρά σημεία. Το τελευταίο χαρακτηριστικό βοηθά στη ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης τάσης.



Εικόνα 28 - Το Φαινόμενο της Ηλεκτρόλυσης του Νερού

Μονοπολική Διάταξη

Ο τρόπος διάταξης κάθε στοιχείου μπορεί να διαφέρει ανάλογα την υλοποίηση. Στη μονοπολική διάταξη (monopolar) η άνοδος διατηρεί μια απόσταση και διαχωρίζεται από την κάθοδο με ένα διάφραγμα που σκοπό έχει να μην συγχέονται τα παραγόμενα αέρια, οξυγόνο και υδρογόνο, μεταξύ τους. Το υλικό του διαφράγματος είναι από οξείδιο του νικελίου NiO(nickel-oxide) και βασικό μέλημα είναι να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη ωμική αντίσταση και παράλληλα να αφήνει λίγο χώρο για νερό μεταξύ ηλεκτροδίων και διαφράγματος. Σε μια συστοιχία μονοπολικής διάταξης όλα τα στοιχεία του electrolyzer συνδέονται παράλληλα



Εικόνα 29 - Μονοπολική Διάταξη Αλκαλικού Electrolyzer

Διπολική Διάταξη

Ο δεύτερος τρόπος διάταξης είναι η διπολική διάταξη (bipolar), όπου η άνοδος, ένα μονωτικό υλικό και η κάθοδος εφάπτονται. Η διάταξη αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά μέσα στο διάλυμα και διαχωρίζεται με το διάφραγμα. Οι διπολικές συστοιχίες δημιουργούν στοιχεία electrolyzer εν σειρά συνδεδεμένα μεταξύ τους.



Εικόνα 30 - Διπολική Διάταξη Αλκαλικού Electrolyzer

Μονοπολική ή Διπολική Διάταξη?

Η κάθε διάταξη έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υλοποίησης για να πούμε ποια από τις δύο θα έχει καλύτερη απόδοση. Στη μονοπολική διάταξη έχουμε μεγαλύτερη αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων αλλά η παραγωγή των φυσαλίδων γίνεται εκατέρωθεν του κάθε ηλεκτροδίου (αν τα φανταστούμε ως επίπεδες πλάκες). Ενώ αντίθετα στην περίπτωση διπολικής διάταξης οι φυσαλίδες των αερίων παράγονται μόνο από τη μία πλευρά κάθε ηλεκτροδίου αλλά η ηλεκτρική αντίσταση είναι μικρότερη.

Ένα ακόμα δίλημμα για την επιλογή μεταξύ μονοπολικής και διπολικής διάταξης είναι πως τα διπολικά λειτουργούν σε μεγαλύτερη πίεση και έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής καθότι είναι πιο σύνθετα. Από άλλη πλευρά όμως τα διπολικά είναι πιο συμπυκνωμένα με μικρότερο μέγεθος. Μια μονοπολική διάταξη είναι ευκολότερο να κατασκευαστεί και μειώνει το απαιτούμενο κόστος.

Επόμενο βήμα είναι να παρέχουμε ηλεκτρική ισχύ στο κύκλωμα. Η παραγωγή του αέριου υδρογόνου και οξυγόνου είναι ακριβώς ανάλογη με το ρεύμα που διέρχεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα και σε ένα ιδανικό σύστημα δεν έχει καμία εξάρτηση από την τάση η οποία είναι απαραίτητη για να εκκινήσει η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Από το νόμο του Faraday προκύπτει η θεωρητική τάση για το θερμικά ουδέτερο στοιχείο ενός electrolyzer και είναι ίση με 1.229V. Σε κανονικές συνθήκες, 25°C και πίεση 1 ατμόσφαιρα είναι σταθερή για οποιοδήποτε ρεύμα.

Υπέρταση (Overpotential)

Αυτή η ιδανικότητα όμως είναι αδύνατο να επιτευχθεί στην πραγματικότητα μιας και οι ίδιες οι φυσαλίδες που περιέχουν το αέριο οξυγόνο ή υδρογόνο συμβάλουν στο να σχηματίσουν μια στρώση γύρω από τα ηλεκτρόδια που εμποδίζει τη ροή των ιόντων και δημιουργεί ανάγκη για μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η επιπλέον αυτή τάση ονομάζεται υπέρταση(overpotential). Ιδανικά θέλουμε ο ηλεκτρολύτης να έχει ομοιόμορφη διάλυση το οποίο βοηθάει την καλύτερη αγωγιμότητα του διαλύματος. Συνεπώς αν ο ηλεκτρολύτης καθιζάνει ή αν μετατοπιστεί λόγω των φυσαλίδων θα έχουμε μικρότερη αγωγιμότητα από τη βέλτιστη. Όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω διάγραμμα το αποτέλεσμα αυτών των δύο εξαιρετικά μη γραμμικών φαινομένων είναι να έχουμε υπέρταση το οποίο μάλιστα έχει εξάρτηση από την θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer. Όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι η υπέρταση.



Εικόνα 31 - Επίδραση φυσαλίδων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Αλκαλικού Electrolyzer

Μοντέλο Alkaline Electrolyzer

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για τον alkaline electrolyzer είναι ένα προχωρημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Ενεργειακής Τεχνολογίας της Νορβηγίας (17). Το μαθηματικό αυτό μοντέλο βασίζεται στις θεμελιώδεις σχέσεις της θερμοδυναμικής, στη θεωρία ροής θερμότητας και σε εμπειρικές ηλεκτροχημικές σχέσεις.

Κατά την λειτουργία ενός αλκαλικού electrolyzer η ροή ρεύματος μέσα από το διάλυμα προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας και γι' αυτό το νερό που εισάγεται θα πρέπει να είναι κρύο για να περιορίσουμε τη θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer σε ασφαλή επίπεδα, και αποσταγμένο ώστε να μην περιέχονται πολλά άλατα και άλλες προσμίξεις που θα προκαλέσουν μόνιμες βλάβες στο εσωτερικό του electrolyzer. Κάνουμε την παραδοχή πως η ποσότητα νερού που προστίθεται μέσα στον electrolyzer είναι ακριβώς ίση με την ποσότητα νερού που καταναλώνεται, δηλαδή παίρνουμε την ιδανική περίπτωση και ταυτόχρονα κατ' αυτόν τον τρόπο διατηρείται σταθερή η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη.

Εξισώσεις Μοντέλου

Οι δύο βασικές εξισώσεις του μοντέλου είναι η χαρακτηριστική εξίσωση τάσης – ρεύματος και η εξίσωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του electrolyzer. Το μπλοκ που ονομάζεται «Calc Temperature» δέχεται ως εισόδους το ρεύμα, την τάση λειτουργίας, την αρχική θερμοκρασία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία του νερού που αναπληρώνουμε καθώς και την ποσότητα αυτού του νερού για να μας δώσει την τρέχουσα θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.



Εικόνα 32 - Διάγραμμα Simulink Αναλυτικού Μοντέλου Electrolyzer

$$T(t) = \left(T_{ini} - \frac{b}{a}\right)\exp(-at) + \frac{b}{a}$$

όπου

$$a = \frac{1}{\tau_t} + \frac{C_{cw}}{C_t} \left[1 - \exp\left(-\frac{UA_{HX}}{C_{cw}}\right) \right]$$

$$b = \frac{n_c (VI - IV_{tn})}{C_t} + \frac{T_a}{\tau_t} + \frac{C_{cw} T_{cw}}{C_t} \left[1 - \exp\left(-\frac{UA_{HX}}{C_{cw}}\right) \right]$$

όπου $UA_{HX} = h_{cond} + h_{conv} I$ και $\tau_t = R_t C_t$

Στο «πάνω» μέρος του διαγράμματος μοντελοποιείται η ηλεκτρική συμπεριφορά του electrolyzer μέσω μιας εμπειρικής σχέσης. Τις παραμέτρους της σχέσης μπορούμε να τις προσαρμόσουμε σε μια πραγματική συσκευή alkaline electrolyzer που θέλουμε να εξομοιώσουμε. Σημειώστε πως εδώ χρησιμοποιούμε τις ίδιες σταθερές που αναφέρονται στην εν λόγω διατριβή. Η χαρακτηριστική V-I σχέση που ισχύει για κάθε χωριστό στοιχείο ενός electrolyzer δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

Συντελεστής	Τιμή	Επεξήγηση	
V _{rev} (V)	1.229	Αντιστρέψιμη (reversible) τάση στοιχείου	
V _{tn} (V)	1.482	thermoneutral τάση στοιχείου	
$r_1 (\Omega m^2)$	8.05 * 10^-5	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
$r_2 (\Omega m^2/K)$	-2.5 * 10^-7	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
$t_1 (A^{-1} m^2)$	-1.002	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
t ₂ (A ⁻¹ m ² / K)	8.424	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
$t_3 (A^{-1} m^2 / K^2)$	247.3	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
s (V)	0.185	συντελεστής του ηλεκτρικού μοντέλου	
A (m ²)	0.25	εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίων	
Z	2	αριθμός των ηλεκτρονίων που	
		συμμετέχουν σε μια αντίδραση	
F (C/mol)	96485.3399	σταθερά του Faraday	
C _t (J/K)	625*10^3	συντελεστής του μοντέλου θερμοκρασίας	
R _t (K/W)	0.167	συντελεστής του μοντέλου θερμοκρασίας	
h _{cond} (W/K)	7	συντελεστής του μοντέλου θερμοκρασίας	
h _{conv} (W/K per A)	0.02	συντελεστής του μοντέλου θερμοκρασίας	
n _c	μεταβλητό	πλήθος στοιχείων συνδεδεμένα εν σειρά	

$$V = V_{rev} + \frac{(r_1 + r_2T)}{A}I + s * \log\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A}I + 1\right)$$

Όπως βλέπουμε η μόνη μεταβλητή παράμετρος είναι το πλήθος των στοιχείων ενός electrolyzer που θα συνδέσουμε εν σειρά. Αυτό συνεπάγεται πως θα πρέπει να εφαρμόσουμε τάση πολλαπλάσια της αντιστρέψιμης κάθε στοιχείου electrolyzer προσθέτοντας την υπέρταση. Από την άλλη πλευρά είναι απαραίτητο να θέσουμε ένα άνω όριο στην εφαρμοζόμενη τάση ώστε να μην επιτρέψουμε υψηλό ρεύμα να διέλθει από τον electrolyzer και τον καταστρέψει. Ένας επιπλέον λόγος είναι πως αν η τάση είναι πολύ υψηλή το μοντέλο βγαίνει εκτός ορίων και δεν συγκλίνει. Η έξοδος του μοντέλου είναι το ρεύμα που διέρχεται από τον electrolyzer και σροφόνου. Επίσης εξάγουμε την αντίστοιχη ποσότητα νερού που καταναλώνεται.

Παραγωγή Υδρογόνου & Οξυγόνου

Η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται εντός του μπλοκ που ονομάζεται «Calculate Mass Rates». Για να είμαστε συναφείς με τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούμε σε άλλα μπλοκ θα εκφράσουμε την παραγωγή του υδρογόνου σε Kg/sec. Αρχίζουμε με την βασική εξίσωση πως 1 mol H₂O δίνει 1 mol H₂ και ½ mol O₂. Άρα γνωρίζουμε πως αν το ρεύμα είναι *I* amperes τότε αυτό σημαίνει πως έχουμε *I* coulombs/sec. Αν διαιρέσουμε αυτή τη

σταθερά με το βασικό φορτίο του

ηλεκτρονίου *e* τότε θα έχουμε *I/e*



Εικόνα 33 - Παραγωγή Η₂ και Ο₂ σε Electrolyzer

ηλεκτρόνια/sec. Παρατηρώντας όμως την εικόνα 33 βλέπουμε πως κάθε αντίδραση περιλαμβάνει 2 ηλεκτρόνια. Έτσι για κάθε δύο ηλεκτρόνια έχουμε 1 μόριο υδρογόνου και μισό μόριο οξυγόνου. Διαφορετικά δηλαδή έχουμε *I/(2e)* μόρια H₂/sec. Εντούτοις λογαριάζοντας τον αριθμό Avogadro *N* που εκφράζει των αριθμό των μορίων ανά mol θα έχουμε *I/(2eN)* mol H₂/sec ή χρησιμοποιώντας την σταθερά του Faraday που είναι απλά *F= e*N* έχουμε *I/2F* mol H₂/sec. Επίσης αν έχουμε πολλά στοιχεία εν σειρά η παραγωγή του υδρογόνου πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των στοιχείων (n_c). Ένας ακόμα βασικός παράγοντας είναι πως ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτρολύτη δεν είναι τέλειος αλλά υπολογίζεται από την σχέση

$$n_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2$$

Άρα τα mol/sec για το υδρογόνο θα είναι $n_{H_2} = n_F \frac{n_c I}{zF}$. Επιπλέον ισχύει πως $n_{H_2} = n_{H_20} = \frac{1}{2} n_{O_2}$. Η μάζα του ατόμου του υδρογόνου είναι 1.00794 g/mol. Άρα το μόριο του υδρογόνου θα είναι 2.01588 g/mol ή μπορούμε να γράψουμε πως $Mr_{H_2} = 2.01588 * 10^{-3} Kg/mol$. Αντίστοιχα για το οξυγόνο ισχύει πως $Mr_{O_2} = 31.9988 * 10^{-3} Kg/mol$ και για το νερό $Mr_{H_20} = 18.0153 * 10^{-3} Kg/mol$

Τελικά ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου καθώς και ο ρυθμός κατανάλωσης νερού δίνονται από τους παρακάτω τύπους

$$W_{H_2} = n_F rac{n_c I}{zF} M r_{H_2} Kg/sec$$

$$W_{O_2} = n_F rac{n_c l}{2zF} Mr_{O_2} Kg/sec$$

 $W_{H_2} = n_F rac{n_c l}{zF} Mr_{H_2O} Kg/sec$

Να σημειώσουμε πως οι τιμές των συντελεστών απόδοσης f_1 και f_2 εξαρτώνται από την θερμοκρασία και καθότι δεν έχουμε κάποιο αναλυτικό πίνακα για τις διάφορες θερμοκρασίες θα κατασκευάσουμε μια γραμμική σχέση με τις τιμές που μας δίνονται για το f_1 και το ίδιο θα κάνουμε για τον συντελεστή f_2 . Έτσι προκύπτει πως

$$f_1 = 2.5T - 632.875$$
$$f_2 = -2.5 * 10^{-4}T + 1.0683$$

όπου Τ η θερμοκρασία σε Kelvin.

Εξομοίωση Αναλυτικού Μοντέλου

Το μπλοκ με το αναλυτικό μοντέλο του electrolyzer στο Simulink φαίνεται στην εικόνα 34.



Εικόνα 34 - Simulink Μπλοκ Αναλυτικού Μοντέλου Electrolyzer

Στο παρακάτω διάγραμμα αναπαράγουμε τη χαρακτηριστική εξίσωση I-V του electrolyzer. Ως θερμοκρασία λειτουργίας επιλέχθηκε η μέση ημερήσια θερμοκρασία για τη πόλη της Δονούσας ίση με 19°C. Η θερμοκρασία του αποσταγμένο νερού που εισάγουμε θα είναι ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εφόσον η μόνη περίπτωση λειτουργίας του electrolyzer θα είναι κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν μας απασχολούν οι θερμοκρασίες κατά τις βραδινές ώρες. Αλλά να σημειώσουμε πως η εκτέλεση του μοντέλου για την παραγωγή της χαρακτηριστικής εξίσωσης διήρκησε μόνο μερικά δευτερόλεπτα και έτσι η θερμοκρασία δεν έπαιξε σημαντικό ρόλο.



Εικόνα 35 - Χαρακτηριστική Εξίσωση Electrolyzer

Όπως παρατηρούμε από κάποιο σημείο της τάσης και μετά το ρεύμα αυξάνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Το σημείο βρασμού του νερού σε υψόμετρο ίσο με την επιφάνεια της θάλασσας είναι ίσο με 100°C και επομένως η θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer δεν θα πρέπει να ξεπεράσει πότε αυτή τη τιμή κάτω από τις χειρότερες συνθήκες περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο ορίζουμε ως μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος τους 50°C και εκτελούμε την εξομοίωση για μεγάλο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα έστω ένα ολόκληρο 24ωρο, για να δούμε σε ποιο σημείο σταθεροποιείται η θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αρκετές φορές αυξάνοντας σταδιακά την εφαρμοζόμενη τάση. Διαπιστώνουμε πως για τάση ίση με 2.9V η θερμοκρασία βρίσκεται σε οριακά επίπεδα όπως φαίνεται και από το γράφημα της εικόνας 36 που παρουσιάζει την εξέλιξη της θερμοκρασίας γι' αυτήν την εξομοίωση.

Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε πάλι την θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 19°C και να εκτελέσουμε μια σειρά από εξομοιώσεις για να μελετήσουμε την απόδοση του electrolyzer στις διάφορες εφαρμοζόμενες τάσεις. Γνωρίζοντας ότι στην ιδανική περίπτωση για ένα mol H₂ χρειαζόμαστε περίπου 285kJ ενέργειας εκτελούμε την εξομοίωση για μεγάλο χρονικό διάστημα και διατηρούμε την παρεχόμενη τάση σταθερή. Μετά το πέρας ενός ορισμένου διαστήματος για να έχει σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας μετράμε το παρεχόμενη ισχύ και την συγκρίνουμε με το υδρογόνου που παράγεται. Η σύγκριση αυτή μας δίνει την πραγματική απόδοση του electrolyzer όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 37.



Εικόνα 36 - Θερμοκρασία Electrolyzer Στοιχείου για 2.9V και 50°C θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η μέγιστη απόδοση του electrolyzer είναι ίση με 72.9947% και αντιστοιχεί σε 1.93V εφαρμοζόμενης τάσης. Στην τάση αυτή ο electrolyzer καταναλώνει ισχύ 22.1367W και η θερμοκρασία λειτουργίας του σε συνθήκες περιβάλλοντος ίσες με 19°C είναι ίση με 19.3889°C. Αυτή θα θεωρήσουμε πως είναι και η θερμοκρασία του αέριου υδρογόνου που παράγεται.

Σύμφωνα με τη διατριβή που βασίστηκε το μοντέλο μας υπήρχε ένας αντίστοιχος πραγματικός electrolyzer που είχε 21 στοιχεία συνδεδεμένα εν σειρά. Επομένως θα θεωρήσουμε για το δικό μας μοντέλο πως έχουμε τις ίδιες διπολικές συστοιχίες οι οποίες είναι ικανές να προσφέρουν υδρογόνο με πίεση <u>30 ατμόσφαιρες</u>. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας δίνονται στο παρακάτω πίνακα

Συστοιχία Αλκαλικού Electrolyzer		
Στοιχεία (εν σειρά)	21	
Ονομαστική Ισχύς (W)	465	
Τάση ονομαστικής Ισχύος (V)	40	
Ονομαστική Απόδοση (%)	73	

Εύρος ισχύος (W)	110 – 465
Εύρος εφαρμοζόμενης τάσης (V)	35 – 40
Εύρος Απόδοσης (%)	53 – 73



Εικόνα 37 - Απόδοση Electrolyzer & Απόδοση Faraday

Ενεργειακό Μοντέλο Electrolyzer

Για να κατασκευάσουμε το ενεργειακό ισοδύναμο του παραπάνω μοντέλου θα υποθέσουμε πως έχουμε στην διάθεση μας συστοιχίες electrolyzer οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα. Επιπλέον θα θεωρήσουμε πως υπάρχουν μπαταρίες παράλληλα συνδεδεμένες με την κάθε συστοιχία. Θεωρούμε λοιπόν πως η μπαταρία τροφοδοτεί τον electrolyzer με τάση ίση με 40V ώστε αυτός να λειτουργεί στη μέγιστη απόδοση. Επίσης θα θεωρήσουμε πως η Κατάσταση Φορτίου (State Of Charge) της μπαταρίας διατηρείται εσκεμμένα σε υψηλά επίπεδα και συνεπώς δεν έχουμε μείωση της απόδοσης της ενέργειας από τις μπαταρίες.

Άρα στο απλουστευμένο ενεργειακό μας μοντέλο οι συστοιχίες μπορούν είτε να λειτουργήσουν στην ονομαστική ισχύ, είτε θα είναι κλειστές και δεν θα λειτουργούν καθόλου. Επομένως το ενεργειακό μοντέλο δέχεται ως είσοδο την προσφερόμενη ισχύ και αναλόγως των αριθμό των συστοιχιών θα μπορέσει να την αξιοποιήσει εν μέρει ή καθόλου. Μόνο στην ειδική περίπτωση που η προσφερόμενη ισχύς είναι ίση με πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύς του electrolyzer δεν θα υπάρχουν απώλειες ενέργειας. Το αντίστοιχο block στο Simulink που αναλαμβάνει να υλοποιήσει την προαναφερόμενη λογική, και θα χρησιμοποιήσουμε στο τελικό μοντέλο του συνολικού συστήματος, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



electrolyzer equiv energy model

Εικόνα 38 - Simulink Μπλοκ Ενεργειακού Μοντέλου Electrolyzer

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις με την λειτουργία του ενεργειακού μοντέλου του electrolyzer καθώς του εισάγουμε συνεχώς αυξανόμενη ισχύς. Έχουμε υποθέσει πως υπάρχουν δύο συστοιχίες διαθέσιμες. Είναι εμφανές ότι αφού μπει σε λειτουργία η πρώτη συστοιχία μετά η επιπλέον ισχύς δεν αξιοποιείται μέχρι να μπει σε λειτουργία η επόμενη συστοιχία. Ενώ οποιαδήποτε ισχύς μεγαλύτερη από την ισχύ που μπορούν να δώσουν όλες οι συστοιχίες μαζί σπαταλιέται.



Εικόνα 39 - Παραγωγή Υδρογόνου και Σπατάλη Ισχύος Ενεργειακού Μοντέλου Electrolyzer

Κεφάλαιο 4

Αποθήκευση Καυσίμου

Ως σήμερα σε ευρεία κλίμακα χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας οι μπαταρίες τύπου Μόλυβδου-Θειικού Οξέως και λιγότερο οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί υδρογόνο για την αποθήκευση ενέργειας απαρτίζεται από έναν electrolyzer για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο, ένα ξεχωριστό χώρο αποθήκευσης του υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια μπαταρία εκτελεί αυτούσια αυτές τις τρεις ανωτέρω λειτουργίες. Η διάρκεια ζωής των μπαταριών έχει μεγάλη εξάρτηση από το ποσοστό εκφόρτισης που τους επιτρέπουμε να συμβεί. Στην περίπτωση ενός φωτοβολταικού συστήματος κατά τις βραδινές ώρες η μόνη παροχή ενέργειας θα γίνονταν από τις μπαταρίες με συνέπεια υψηλό ποσοστό εκφόρτισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη φθορά της μπαταρίας και την ανάγκη αντικατάστασής της με επακόλουθο την αύξηση των λειτουργικών εξόδων. Επιπλέον οι μπαταρίες είναι αναγκαίο να στεγάζονται σε ένα χώρο που η θερμοκρασία είναι ελεγχόμενη ώστε να εξασφαλίσουμε τη σωστή λειτουργία τους. Κατ' αυτό τον τρόπο αυξάνονται περαιτέρω τα λειτουργικά έξοδα και η χρήση μπαταριών κρίνεται ασύμφορη. Σε αυτή την εργασία εξετάζουμε την αποθήκευση της ενέργειας σε δεξαμενές υδρογόνου ως μια περισσότερο βιώσιμη λύση για να δούμε τις προοπτικές που μπορεί να έχει σε μελλοντικές εφαρμογές.

Οι παράγοντες που θα πρέπει να ζυγοσταθμίσουμε ανάλογα τις ανάγκες και δυνατότητές μας για μια δεξαμενή υδρογόνου είναι:

- Η ποσότητα υδρογόνου που είναι απαραίτητη για την αυτονομία του συστήματος.
- Ο όγκος που μπορούμε να διαθέσουμε για τη δεξαμενή του υδρογόνου. Η μάζα της δεξαμενής δεν παίζει ρόλο παρά μόνο για το κόστος μεταφοράς της δεξαμενής.
- Τη μέγιστη διαφορά πίεσης (εσωτερικής ατμοσφαιρικής) που μπορεί να αντέξει η δεξαμενή υδρογόνου κάτω από τις πιο θερμές συνθήκες.
- Η τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου ώστε να έχουμε καλή απόδοση (ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου).
- Αντοχή στο χρόνο και στις καιρικές συνθήκες.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής της δεξαμενής.



Εικόνα 40 - Δεξαμενές Αποθήκευσης Υδρογόνου

Η αποθήκευση του υδρογόνου είναι ένα βασικό ζήτημα της «οικονομίας υδρογόνου». Γίνονται μεγάλες προσπάθειες να αποθηκεύσουμε το υδρογόνο μέσα σε μια ελαφριά και μικρή σχετικά σε μέγεθος δεξαμενή ώστε να μπορέσει το υδρογόνο να αποτελέσει καύσιμο σε φορητά ή κινούμενα μέσα. Στη δική μας περίπτωση που η δεξαμενή βρίσκεται σε ένα σταθερό μέρος σε μια μεγάλη έκταση δίπλα, από το φωτοβολταικό σύστημα αυτοί οι παράγοντες παίζουν μικρότερο ρόλο. Αν όμως πρόκειται να στεγάσουμε τις δεξαμενές τότε ο όγκος μπορεί να έχει μια επιπλέον επιβάρυνση στο συνολικό κόστος.

Μια καινοτομική προσέγγιση για την αποθήκευση του υδρογόνου που έχει δοκιμαστεί ως τώρα με θετικά αποτελέσματα από την ICI (Imperial Chemical Industries) είναι η υπόγεια αποθήκευση του υδρογόνου. Δηλαδή αν είμαστε τυχεροί και ο τόπος εγκατάστασης του συστήματος βρίσκεται κοντά σε ένα αχρησιμοποίητο στεγανό ορυχείο ή σε μια εξαντλημένη πρώην πετρελαιοπηγή ή έστω ένα υπόγειο σπήλαιο τότε υπάρχει ήδη διαθέσιμος χώρος για αποθήκευση μεγάλης ποσότητας υδρογόνου χωρίς να σπαταλήσουμε όγκο ή κόστος για την κατασκευή μιας δεξαμενής. Σε περίπτωση που δεν έχουμε την παραπάνω δυνατότητα θα πρέπει να κατασκευάσουμε μια δεξαμενή υδρογόνου με τις κατάλληλες προδιαγραφές.

Παράγοντες: Πίεση και Θερμοκρασία

Το καθαρό αέριο υδρογόνο έχει πολύ καλύτερη αναλογία πυκνότητας ενέργειας σε σχέση με τη μάζα του απ' ότι τα συνήθη καύσιμα όπως η βενζίνη, αλλά όντας το ελαφρύτερο στοιχείο είναι και το αραιότερο. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια σε θερμοκρασία δωματίου, για παράδειγμα, να καταλαμβάνει σχετικά μεγάλο όγκο. Η αναλογία πυκνότητας ενέργειας σε σχέση με τον όγκο αποδεικνύεται πως απέχει πολύ από την επιθυμητή. Η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου σε πίεση 1 ατμόσφαιρας θα πρέπει να έχει και αυτή σχετικά μεγάλο όγκο που επιπλέον συνεπάγεται μεγαλύτερο βάρος και κόστος κατασκευής.

Για να βελτιώσουμε την κατάσταση μπορούμε να επιβάλουμε τις δικές μας συνθήκες τόσο στη θερμοκρασία όσο και στη πίεση. Αν συμπιέσουμε το υδρογόνο σε μεγαλύτερη πίεση θα έχουμε περισσότερη ποσότητα αέριου υδρογόνου στον ίδιο όγκο. Ο συμπιεστής όμως που θα αναλάβει αυτό το ρόλο θα καταναλώσει ενέργεια και φυσικά όσο μεγαλύτερη συμπίεση επιθυμούμε τόση περισσότερη ενέργεια καταναλώνουμε και άρα μπορούμε να πούμε πως ένα μέρος της ωφέλιμης ενέργειας του υδρογόνου χάνεται. Ως αριθμητικό παράδειγμα αναφέρουμε πως για να συμπιέσουμε το υδρογόνο σε πίεση 200bar έχουμε απώλεια περίπου 2% της ενέργειας που μπορεί να μας δώσει το υδρογόνο. Επιπρόσθετα η δεξαμενή του υδρογόνου θα πρέπει να κατασκευαστεί ώστε να αντέχει υψηλές εσωτερικές πιέσεις με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση του κόστους κατασκευής.

Υγροποίηση Υδρογόνου

Μια διαφορετική λύση για να μειώσουμε ακόμα περισσότερο τον όγκο του υδρογόνου είναι να το ψύξουμε σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία που να πάψει να είναι αέριο και να αποκτήσει υγρή μορφή. Ωστόσο η θερμοκρασία πήξεως του υδρογόνου είναι εξαιρετικά χαμηλή γύρω στους 20.268°K (-252.882°C). Γίνεται άμεσα φανερό πως η διαδικασία υγροποίησης του αέριου υδρογόνου είναι μια αρκετά δαπανηρή ενεργειακά διαδικασία. Επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη πως η δεξαμενή που θα περιέχει το υγρό υδρογόνο έχει αρκετά διαφορετικές προδιαγραφές από αυτή που θα περιέχει το αέριο υδρογόνο. Μια βασική αλλαγή είναι πως θα πρέπει να παρέχει πάρα πολύ καλή θερμομόνωση. Αν καταφέρναμε να λύσουμε το πρόβλημα της υγροποίησης και πάλι η πυκνότητα του υδρογόνου δεν είναι αυτή που θα θέλαμε. Σε ένα λίτρο υγρού υδρογόνου υπάρχει περίπου 64% της ποσότητας του υδρογόνου που βρίσκουμε σε έναν υδρογονάνθρακα του ίδιου όγκου.

Μια πειραματική ακόμα μέθοδος είναι η υβριδική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου υπό πίεση. Δηλαδή συνδυάζουμε υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία για ακόμα καλύτερη αναλογία ενεργειακής πυκνότητας ως προς όγκο. Μάλιστα προκύπτει πως η ενέργεια που καταναλώνεται για την υγροποίηση του υδρογόνου υπό πίεση είναι μικρότερη σε σχέση με την απλή ψύξη του υδρογόνου.



Εικόνα 41 - Δεξαμενή Αποθήκευσης Υγρού Υδρογόνου

Αποθήκευση Υδρογόνου εντός Χημικών Ενώσεων

Όταν αναφερόμαστε σε αποθήκευση του υδρογόνου, πέρα από το φυσικό επίπεδο υπάρχει και το χημικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο είναι ο τρόπος που αποθηκεύονται τα μόρια του υδρογόνου. Το χημικό επίπεδο είναι ο τρόπος που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε χημικές ενώσεις που να φέρουν υδρογόνο μέσα τους και να μπορούν να το αποδώσουν χωρίς ή με λίγα σχετικά καυσαέρια. Επομένως επιθυμούμε οι αντίστοιχες χημικές αντιδράσεις να λειτουργούν αμφίδρομα ώστε είτε να παίρνουμε υδρογόνο, είτε να το αποθηκεύουμε πάλι εντός των χημικών ενώσεων. Στόχος είναι να επιτύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη αναλογία ποσότητας υδρογόνου σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνουν αυτές οι χημικές ενώσεις, κάτι το οποίο όπως αναφέραμε είναι πολύ πιο δαπανηρό να το πετύχουμε με το καθαρό υδρογόνο. Τρεις είναι οι βασικές ιδιότητες στις οποίες βασιζόμαστε για την αποθήκευση του υδρογόνου εντός χημικών ενώσεων.

- Απορρόφηση (Absorption): Δηλαδή η απορροφητικότητα του υδρογόνου από άλλες χημικές ενώσεις. Με άλλα λόγια πόσο ικανές είναι οι ενώσεις να δεχθούν το υδρογόνο μέσα στο πλέγμα τους ανάμεσα στα μόρια τους, είτε μιλάμε για στερεά είτε για υγρά.
- 2. Προσρόφηση (Adsorption): είναι η διαδικασία που ένα αέριο αντιδρά με την επιφάνεια του υλικού μιας χημικής ένωσης και συσσωρεύεται πάνω στην επιφάνεια. Το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε για να «ενωθεί» με το υδρογόνο θα πρέπει να είναι αρκετά πορώδες ώστε να μεγιστοποιήσουμε την διαθέσιμη επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η διαδικασία της προσρόφησης.

3. Χημική Αντίδραση (Chemical reaction): Μέσω χημικών αντιδράσεων μπορεί το υδρογόνο να διασπαστεί και τα άτομα του να συμμετέχουν στο σχηματισμό νέων χημικών ενώσεων. Η χημική αντίδραση πρέπει υπό συνθήκες το ίδιο «εύκολα» να πραγματοποιείται κατά την αντίθετη φορά, δηλαδή να αποσπώνται τα άτομα υδρογόνου από τη χημική ένωση ώστε να σχηματίζουν και πάλι κανονικά μόρια υδρογόνου. Ο έλεγχος μιας τέτοιας αμφίδρομης χημικής αντίδρασης μπορεί να μετατοπιστεί προς τα προιόντα ή προς τα αντιδρώντα μεταβάλλοντας την πίεση και την θερμοκρασία.

Επομένως διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου βρίσκονται υπό έρευνα και ανάπτυξη ενώ ελάχιστοι από αυτούς χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή εκτός ερευνητικού εργαστηρίου. Ο πιο ελπιδοφόρους από αυτούς είναι τα μεταλλικά υδρίδια.

Μεταλλικά Υδρίδια (Metal Hydrides)

Οι χημικές ενώσεις όπως NaAlH₄, LaNi₅H₆ και TiFeH₂ είναι μεταλλικά υδρίδια που περιέχουν υδρογόνο και, με διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης, μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο. Το υδρογόνο οποίο επιβάλλεται να είναι υψηλής καθαρότητας ώστε οι προσμίξεις να μην αλλοιώσουν τη δομή των ατόμων. Υπάρχουν είτε απλά μεταλλικά υδρίδια που περιέχουν μαγνήσιο ή κάποιο από τα μέταλλα της ομάδα 12 του περιοδικού πίνακα (Zn, Cd, Hg), ή αποτελούν σύνθετες ενώσεις με Na, Li, Ca, Al και B. Τα μεταλλικά υδρίδια είναι μια από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιείται ήδη στην αγορά. Μερικά από αυτά είναι υγρά σε κανονική θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση ενώ άλλα βρίσκονται σε στερεά μορφή.

Με τα μεταλλικά υδρίδια βελτιώνουμε αρκετά την αναλογία σχέσης ενεργειακής πυκνότητας και όγκου, αλλά από την άλλη πλευρά τα άτομα των μετάλλων προσθέτουν αρκετή μάζα και συνεπώς έχουμε σημαντική αύξηση του βάρους. Αν από λάθος τα μεταλλικά υδρίδια εκτεθούν σε πολύ υγρή ατμόσφαιρα τότε θα προκαλέσουν ισχυρή έκρηξη ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ τοξικά για τον άνθρωπο. Άρα έχουμε δύο πολύ σοβαρά θέματα ασφαλείας που μας αναγκάζουν να κατασκευάσουμε μια δεξαμενή υψηλής ποιότητας για την αποθήκευση των μεταλλικών υδριδίων που σημαίνει επιπλέον επιβάρυνση του κόστους.

Ένας πίνακας που παρουσιάζει τις αναλογίες όγκου και βάρους για τις διάφορες μεθόδους αποθήκευσης του υδρογόνου που αναλύθηκαν ως τώρα παρουσιάζεται εδώ:

Υλικό	Άτομα H/cm ³ (x 10 ²²)	% της μάζας σε Η2
H ₂ αέριο, 200bar	0.99	100
Η₂ υγρό, 20 Κ	4.2	100
H ₂ στερεό, 4.2 Κ	5.3	100
----------------------------------	-----	------
MgH ₂	6.5	7.6
Mg ₂ NiH ₄	5.9	3.6
FeTiH ₂	6.0	1.89
LaNi5H ₆	5.5	1.37

Μοντέλο Αποθήκευσης Υδρογόνου υπό Υψηλή Πίεση

Το υδρογόνο επειδή βρίσκεται υπό υψηλή πίεση δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την απλή καταστατική εξίσωση των αερίων PV=nRT. Για να εξομοιώσουμε την πραγματική συμπεριφορά του αέριου υδρογόνου θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις κατάστασης Beattie-Bridgeman. Συγκεκριμένα θα αξιοποιήσουμε το μοντέλο μιας δεξαμενής υδρογόνου όπως αναπτύχθηκε από τον Jinglin He στο Auburn University (18). Στη δική μας επέκταση του μοντέλου η δεξαμενή θα έχει ένα δεύτερο στόμιο ώστε να μπορεί να δέχεται αέριο ως είσοδο, με ροή μάζας ίση με W_i. Σε κάθε περίπτωση ισχύει ο νόμος διατήρησης των μαζών ενώ λαμβάνοντας υπόψη την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε πως η θερμότητα από το περιβάλλον μεταφέρεται στο τοίχωμα της δεξαμενής και η θερμότητα του τοιχώματος μεταφέρεται στο αέριο υδρογόνο. Οι αντίστοιχοι θερμοκρασιακοί συντελεστές εξαρτώνται από το υλικό του τοιχώματος της δεξαμενής.

Υλοποίηση Μοντέλου στο Simulink

Παρακάτω παρουσιάζεται και αναλύεται το διάγραμμα του μοντέλου όπως αυτό αναπτύχθηκε στο Simulink της Matlab.



Εικόνα 42 - Σχεδιάγραμμα Μοντέλου Δεξαμενής Υδρογόνου

Στο διάγραμμα φαίνεται πως συνδέονται μεταξύ τους οι διάφορες εξισώσεις του μοντέλου, οι λεπτομέρειες των οποίων αναλύονται παρακάτω. Καταρχήν ορίζουμε και επεξηγούμε τους συντελεστές του συστήματος καθώς και τις αρχικές συνθήκες στο ακόλουθο πίνακα.

Σύμβολο	Τιμές Δεξαμενής	Περιγραφή της έννοιας του συμβόλου
T _r (K)	331.15	Αρχική θερμοκρασία αερίου
Т _w (К)	310	Αρχική θερμοκρασία τοιχώματος
T _a (Kelvin)	295	Αρχική εξωτερική θερμοκρασία
m _w (Kg)	35	Μάζα τοιχώματος δεξαμενής
$C_{W}\left(\frac{Joule}{m}\right)$	300	specific heat τοιχώματος (σχετίζεται με
"`Kg*K'		τη θερμομόνωση που παρέχει το υλικό
		του τοιχώματος)
$a_{\infty}(\frac{Joule}{2})$	15	Θερμοκρασιακός συντελεστής μεταξύ
`m²*K*sec'		ατμόσφαιρας και τοιχώματος
$a_w \left(\frac{Joule}{2} \right)$	80	Θερμοκρασιακός συντελεστής μεταξύ
"`m ² *K*sec'		τοιχώματος και αερίου
$A_w(m^2)$	1.116	Συνολική επιφάνεια τοιχώματος
V (m ³)	0.148	Όγκος δεξαμενής
$R\left(\frac{Joule}{Kg*K}\right)$	4124.3	Σταθερά του αερίου υδρογόνου
$C_{v}\left(\frac{Joule}{r}\right)$	10.16*10 ³	specific heat υδρογόνου σε σταθερό
· `Kg *K'		όγκο
P_0 (Pascal)	3.68*10 ⁷	Αρχική πίεση αέριου υδρογόνου
Mr (Kg/mol)	2.01588*10 ⁻³	Μοριακό βάρος αερίου υδρογόνου
F (C/mol)	96487	Σταθερά Faraday

Πάνω αριστερά στο πρώτο μπλοκ με όνομα **«Specific Volume»** δεχόμαστε ως είσοδο την αρχική πίεση και τη θερμοκρασία του αέριου υδρογόνου και στην έξοδο υπολογίζουμε το specific volume που έχει αρχικά το υδρογόνο μέσα στη δεξαμενή, το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο από το αντίστροφο της πυκνότητάς του.

Στο μπλοκ με το όνομα **«Initial Internal Energy»** εφόσον έχουμε την πληροφορία για την αρχική πυκνότητα και την αρχική θερμοκρασία του αέριου υδρογόνου υπολογίζουμε την τιμή της εσωτερικής ενέργειας που έχει αρχικά το αέριο.

Στο μπλοκ με το όνομα **«Density»** γίνεται εφαρμογή του νόμου της διατήρησης των μαζών. Εδώ λαμβάνοντας υπόψη την ροή εισόδου του αέριου υδρογόνου αλλά και τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που καταναλώνεται στην κυψέλη καυσίμου μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα αέριου υδρογόνου που εισάγεται ή αφαιρείται από τη δεξαμενή. Ολοκληρώνοντας την ποσότητα αυτή στο χρόνο έχουμε την μεταβολή της πυκνότητας. Εδώ να σημειώσουμε πως η σχέση που ισχύει στο μοντέλο μας και εξισώνει το ρεύμα με την ποσότητα υδρογόνου ισχύει μόνο για τη συγκεκριμένη τεχνολογία κυψελών καυσίμου (PEM) που χρησιμοποιούμε στην εργασία μας και αναλύουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Η λειτουργία άλλων τύπων κυψελών καυσίμου βασίζεται σε διαφορετικές χημικές αντιδράσεις τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο και συνεπώς θα πρέπει να καταγραφούν οι κατάλληλες εξισώσεις για αυτούς του τύπους.

Στο μπλοκ **«Heat Transfer»** γίνεται ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας με την πάροδο του χρόνου από το περιβάλλον στο αέριο υδρογόνο και αντίστροφα λαμβάνοντας υπόψη τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του τοιχώματος.

Έτσι έχοντας υπολογίσει τρεις βασικούς παράγοντες, το ρυθμό μεταβολής της θερμότητας την τρέχουσα χρονική στιγμή, τη μεταβολή στην πυκνότητα του αερίου και την πίεση του αερίου μπορούμε να υπολογίσουμε την εσωτερική του ενέργεια. Αυτό γίνεται στο μπλοκ «Internal Energy».

Με βάση την πυκνότητα και την εσωτερική ενέργεια του αέριου υδρογόνου υλοποιούμε το μπλοκ **«T gas computation»** για να υπολογίσουμε την θερμοκρασία του αερίου όπως διαμορφώνεται με τις νέες συνθήκες. Οι συναρτήσεις κατάστασης όπως μας δίνονται από το μοντέλο Beattie-Bridgeman καταλήγουν σε μια σύνθετη τριτοβάθμια εξίσωση όπου με τη βοήθεια του αλγόριθμου secant έχουμε τη λύση.

Από τις συναρτήσεις των εξισώσεων του Beattie-Bridgeman έχουμε την πίεση του αέριου υδρογόνου συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πυκνότητας. Και τα δύο είναι διαθέσιμα σε αυτό το σημείο και έτσι υπολογίζονται μέσα στο μπλοκ **«Pressure computation»** για να μας δώσουν την δεύτερη έξοδο του μοντέλου της δεξαμενής, τη πίεση του υδρογόνου.

Τελευταία έξοδος του μοντέλου είναι η τρέχουσα μάζα του υδρογόνου που υπάρχει εντός της δεξαμενής και προκύπτει με μια απλή διαίρεση, στο μπλοκ «Mass», του όγκου της δεξαμενής με το αντίστροφο της πυκνότητας που έχουμε υπολογίσει νωρίτερα. Ο όγκος θεωρείται σταθερός διότι έχουμε κάνει την υπόθεση πως το μέταλλο που αποτελεί την δεξαμενή είναι ένα στερεό ανελαστικό υλικό.

Η μέγιστη πίεση που μπορεί να αντέξει η δεξαμενή είναι ίση με <u>400 ατμόσφαιρες</u>. Οπότε θα πρέπει να δούμε ποια είναι η μέγιστη ποσότητα υδρογόνου που μπορεί να περιέχει η δεξαμενή υπό τις θερμότερες συνθήκες. Ορίζουμε εξωτερική θερμοκρασία ίση με 50°C και εισάγουμε σε αργούς ρυθμούς υδρογόνο έως ότου η πίεση φτάσει στο άνω όριο.



Εικόνα 43 - Εξομοίωση Γεμάτης Δεξαμενής Υδρογόνου στους 50°C

Το τελικό αποτέλεσμα είναι πως μια γεμάτη δεξαμενή θα έχει χωρητικότητα <u>3.344Kg υδρογόνου</u> που ισοδυναμεί με 131.7kWh ενέργειας.

Σε περίπτωση που θα χρειαστούμε περισσότερες από μια δεξαμενές θα κάνουμε την απλοική υπόθεση πως έχουμε μια σειρά από δεξαμενές που λειτουργούν παράλληλα και λειτουργούν ταυτόχρονα όλες μαζί. Συνεπώς αν έχουμε *n* δεξαμενές η ποσότητα του υδρογόνου που εισάγεται σε μία δεξαμενή θα είναι ίση με $\frac{Kg/sec H_2}{n}$. Επίσης το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου που υποδηλώνει το ρυθμό κατανάλωσης υδρογόνου θα αντιστοιχεί σε $\frac{Amperes}{n}$ για κάθε δεξαμενή. Η μάζα υδρογόνου που θα περιέχεται εντός των δεξαμενών θα είναι ίση με Kg * n. Η πίεση και η θερμοκρασία θα μεταβάλλεται ενιαία σε όλες τις δεξαμενές. Κάνουμε την απλή παραδοχή ότι οι δεξαμενές απέχουν μεταξύ τους αρκετά ώστε να ισχύει το μοντέλο θερμότητας που αναπτύχθηκε.

Το τελικό μπλοκ του μοντέλου έχει ως εισόδους την εξωτερική θερμοκρασία σε Kelvin, το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου σε Amperes, πόσες κυψέλες χρησιμοποιούνται και η ροή του αέριου όπως προκύπτει από τον συμπιεστή σε kg/sec. Για εξόδους έχουμε την θερμοκρασία του αερίου σε Kelvin, την πίεση του αερίου σε Pascal, και τη μάζα του αέριου υδρογόνου εντός της δεξαμενής την τρέχουσα χρονική στιγμή σε Kg.



Εικόνα 44 - Μπλοκ Simulink Δεξαμενής Υδρογόνου

Το παραγόμενο από τον electrolyzer υδρογόνο θα διέρχεται από έναν συμπιεστή compressor που θα έχει τη δυνατότητα, καταναλώνοντας ανάλογη ισχύ, να πιέσει το υδρογόνο εντός της δεξαμενής που βρίσκεται ήδη υπό πίεση.

Συμπιεστής (Compressor)

Μεταξύ του electrolyzer και της δεξαμενής αποθήκευσης του υδρογόνου θα χρειαστούμε έναν συμπιεστή επειδή οι απαιτήσεις μας σε πίεση είναι υψηλότερες από αυτές που μπορεί να μας προσφέρει αυτούσια ο electrolyzer. Επομένως στο τελικό σύστημα θα αφιερώνουμε ένα μέρος της ενέργειας στο παρασιτικό φορτίο του συμπιεστή για να ανεβάσουμε την πίεση από τις 30 ως και τις 400 ατμόσφαιρες.

Οι συμπιεστές κατηγοριοποιούνται από το είδος της εργασίας τους. Οι δυναμικοί συμπιεστές, δηλαδή φυγοκεντρικού και αξονικού τύπου λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες και συνήθως είναι μικρότεροι σε μέγεθος από τους συμπιεστές παλινδρόμησης. Αν και υψηλότερου κόστους για τη δική μας περίπτωση οι παλινδρομικοί συμπιεστές είναι πιο κατάλληλοι να συμπιέσουν αέρια σε τόση μεγάλη διαφορά πίεσης.

Προσπαθώντας να μοντελοποιήσουμε έναν συμπιεστή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάποια από τις παρακάτω θεωρήσεις για τη σχέση πίεσης και θερμοκρασίας.

Το Ισοθερμικό Μοντέλο υποθέτει ότι το συμπιεσμένο αέριο παραμένει σε μια σταθερή θερμοκρασία σε όλη τη διαδικασία συμπίεσης. Σε αυτή τη διαδικασία, η εσωτερική ενέργεια αφαιρείται από το σύστημα ως θερμότητα στο ίδιο ποσοστό ενέργειας που προστίθεται μέσω της συμπίεσης. Χρειαζόμαστε άπειρο αριθμό σταδίων συμπίεσης με αντίστοιχες ψυκτικές συσκευές σε κάθε στάδιο για να επιτευχθεί η τέλεια ισόθερμη συμπίεση.

- Το Αδιαβατικό μοντέλο υποθέτει πως η θερμότητα δεν μεταφέρεται προς ή από το αέριο κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, και όλη η παρεχόμενη ενέργεια προστίθεται στην εσωτερική ενέργεια του αερίου, με συνέπεια την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και συνεπώς πίεσης. Στην πράξη θα υπάρχει πάντα μια συγκεκριμένη ροή θερμότητας από το συμπιεσμένο αέριο προς το περιβάλλον. Η κατασκευή ενός τέλειου αδιαβατικού συμπιεστή θα απαιτούσε την τέλεια μόνωση θερμότητας όλων των μερών της μηχανής.
- Το Πολυτροπικό μοντέλο είναι κάτι ενδιάμεσο μεταξύ ισοθερμικού και αδιαβατικού μοντέλου καθώς λαμβάνει υπόψη τόσο την άνοδο στη θερμοκρασία του αερίου λόγω συμπίεσης καθώς επίσης και κάποια απώλεια ενέργειας σε μορφή θερμότητας στα τμήματα του συμπιεστή. Αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά των περισσότερων συμπιεστών προσεγγίζοντας περισσότερο την πραγματικότητα.

Το έργο που καταναλώνεται σε έναν πολυτροπικό συμπιεστή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_{poly} = R_{H_2} * T_{in} * \left(\frac{n}{n-1}\right) * \left(\left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$$

Αλλά ισχύει πως $\frac{n-1}{n} = \frac{\gamma-1}{\gamma} * \frac{1}{n_{poly}}$

Γνωρίζουμε από τη θεωρία πως για διατομικά αέρια, όπως το υδρογόνο, το γ είναι ίσο με 1.4. Επίσης γνωρίζουμε ότι η απόδοση της πολυτροπικής συμπίεσης μπορεί να είναι έως και n_{poly}=0.9.

Για να υπολογίσουμε τώρα την ισχύ που καταναλώνει ο συμπιεστής προκειμένου να συμπιέσει συγκεκριμένη ποσότητα αερίου έχουμε πως αν η ροή είναι ίση με W_{in} Kg/sec και έχοντας έναν παράγοντα Q_{comp} να είναι ο συντελεστής απόδοσης του συμπιεστή, που αντιπροσωπεύει τις συνολικές απώλειες από τη μηχανή και τυπικά ίσος με 63% τότε θα έχουμε:

$$P_{required} = \frac{E_{poly} * W_{in}}{Q_{comp}}$$

Το σχεδιάγραμμα του συμπιεστή όπως σχεδιάστηκε στο Simulink φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 45 - Διάγραμμα Simulink Πολυτροπικού Συμπιεστή

Έχουμε δύο εισόδους για τις πιέσεις. Η πρώτη θα είναι η πίεση της δεξαμενής, P₂, με την οποία είναι συνδεδεμένος ο συμπιεστής και η δεύτερη είναι η πίεση του electrolyzer ίση με 30 ατμόσφαιρες. Επόμενη είσοδος είναι η θερμοκρασία του αερίου που θεωρούμε ίση με την θερμοκρασία λειτουργίας του electrolyzer, 19.3889°C. Και τελευταία είσοδος είναι η ποσότητα του αερίου που παράγεται ανά δευτερόλεπτο από τον electrolyzer. Ως έξοδο έχουμε την ισχύ που απαιτείται από τον συμπιεστή για την εργασία της συμπίεσης του αερίου. Αν θεωρήσουμε πως έχουμε η δεξαμενές τότε το έργο που απαιτείται είναι πολλαπλάσιο κατά n.

Το παραπάνω διάγραμμα περικλείεται σε ένα μπλοκ όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 46 - Μπλοκ Simulink Πολυτροπικού Συμπιεστή

Κεφάλαιο 5

Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)

Το υδρογόνο που αποθηκεύσαμε εντός των δεξαμενών στο προηγούμενο κεφάλαιο θα το εκμεταλλευθούμε για να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια όταν το φωτοβολταικό σύστημα δεν είναι σε θέση να μας την παρέχει.

Μηχανές Ανάφλεξης - Κυψέλες Καυσίμου

Η πιο απλή λύση είναι μέσω ενός σπινθήρα να προκαλέσουμε καύση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου και να τροφοδοτήσουμε μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Η απόδοση της διαδικασίας αυτής όμως έχει απογοητευτικά υψηλές απώλειες διότι περιορίζεται από τον 2° θερμοδυναμικό νόμο, σύμφωνα με τον οποίο απαιτείται ενέργεια ώστε δύο σώματα ίσης θερμοκρασίας να μεταβούν σε μια κατάσταση που το ένα να έχει σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία από το άλλο. Έτσι και σε μια γεννήτρια μέσω της ανάφλεξης του καυσίμου προσπαθούμε να πετύχουμε μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στη ψυχρή και θερμή δεξαμενή με αποτέλεσμα ένα μέρος της χημικής ενέργειας να χάνεται.

Αντίθετα η τεχνολογία κυψελών καυσίμου βασίζεται σε τελείως διαφορετική φυσική διεργασία για τη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η διεργασία θεωρείται ισοθερμική με τα προιόντα της αντίδρασης να έχουν σχεδόν την ίδια θερμοκρασία με τα αντιδρώντα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή μεγαλύτερου μέρους της χημικής ενέργειας σε ωφέλιμο ηλεκτρικό έργο.

Κατηγορίες Κυψελών Καυσίμου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πέντε κατηγορίες κυψελών καυσίμου που έχουν επικρατήσει ως οι πιο ελπιδοφόρες να εφαρμοστούν στο μέλλον σε ευρεία πλέον κλίμακα σε συστήματα με διαφορετικές ενεργειακές και λειτουργικές απαιτήσεις.

	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
	MOLTEN CARBONATE FUEL CELL Electrical Current Hydrogen In H ₂ (C_2)	Electric Current Fuel In e e d H ₂ O ⁼ O ⁼ O ₂ Unused Gases Out Anode Electrolyte
Δυτιδοώντα	Eικόνα 47 - Molten Carbonate Fuel Cell	Εικόνα 48 - Solid Oxide Fuel Cell
Αντισρωντα	H_2, U_2, U_2	Π_2, O_2
Ποοιόντα		
Προιονία		Π20, (CO2) Στοορός Κοραμικά Οξοίδια (ZrO
ΠΛΕΚΙΡΟΛΟΙΤΙς	άλας σε LiAlO ₂ – έντονα διαβρωτικό	CaO)
Ηλεκτρόδια	Νικέλιο + οξείδια του νικελίου	Κεραμικό μείγμα με μέταλλο
Καταλύτης	Νικέλιο + οξείδια του νικελίου	Κεραμικό μείγμα με μέταλλο
Θερμοκρασία Λειτουργίας	650°C	600-1000°C
Απόδοση	60%	60%
Ανοχή σε θείο	Μικρή	Μεγάλη
Εκμετάλλευση	$CO + CO_3^{-2} \rightarrow 2CO_2 + 2e^{-1}$	$CO + O^{-2} \rightarrow CO_2 + 2e^{-1}$
СО	$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$	$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$
Χρήση CH₄		$CH_4 + 40^{-2} \rightarrow 2H_2O + CO_2$
		$+ 8e^{-}$

Κυψέλες Καυσίμου Υψηλών Θερμοκρασιών

Παρατηρούμε πως στα MCFCs είναι απαραίτητη η τροφοδότηση της κυψέλης καυσίμου με διοξείδιο του άνθρακα. Μπορούμε βέβαια να ανακυκλώσουμε ένα μέρος του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται στην άνοδο αλλά ένα μικρό ποσοστό πάντοτε θα εξέρχεται στην ατμόσφαιρα μαζί με του υδρατμούς. Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα δεν είναι δαπανηρή αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Ένα πλεονέκτημα των MCFCs και SOFCs είναι πως μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με φυσικό αέριο ή άλλα καύσιμα. Χάρις την υψηλή θερμοκρασία προκαλείται εσωτερική αναμόρφωση (internal reforming) και το υδρογόνο εξάγεται από τον υδρογονάνθρακα χωρίς να χρειάζεται κάποιος εξωτερικός αναμορφωτής. Επιπλέον ενώ σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου το CO είναι ανεπιθύμητο εδώ μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο.

Η θερμότητα που περιέχει το νερό στην έξοδο μπορεί να αξιοποιηθεί είτε ως ατμός υψηλής πίεσης είτε να δώσει κίνηση σε μια ατμομηχανή για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα αυξάνοντας κατ' αυτό το τρόπο την συνολική απόδοση του συστήματος.

Ο χρόνος ζωής και στα δύο συστήματα περιορίζεται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Ιδιαίτερα στα MCFCs η έντονα διαβρωτική δράση του ηλεκτρολύτη μειώνει ακόμα περισσότερο το χρόνο ζωής τους. Επιπλέον ο χρόνος εκκίνησης βρίσκεται σε απαγορευτικά υψηλές τιμές καθιστώντας τα MCFCs και τα SOFCs πρακτικά εφαρμόσιμα μόνο για συνεχή λειτουργία.



Κυψέλες Καυσίμου Μέσης Θερμοκρασίας

Ο υγρός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στα PAFCs και AFCs προκαλεί διάβρωση του συστήματος με την πάροδο του χρόνου μειώνοντας το χρόνο ζωής τους.

Αν και η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλή δεν είναι αρκετά χαμηλή για να δώσει αποδοτικούς χρόνους εκκίνησης και έτσι είναι εξαναγκασμένα σε συνεχή λειτουργία. Βέβαια τα AFCs μπορούν να λειτουργήσουν και σε χαμηλές θερμοκρασίες αλλά απαιτούν καθαρό οξυγόνο στη κάθοδο. Αυτό συνεπάγεται πως δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά θα χρειαζόμασταν μια επιπλέον δεξαμενή αποθήκευσης του καθαρού οξυγόνου που παράγεται από τον electrolyzer. Επιπλέον θα χρειαζόμασταν διπλάσιους συμπιεστές αν αποθηκεύαμε και το οξυγόνο υπό πίεση αυξάνοντας το αρχικό κόστος της επένδυσης.



Κυψέλες Καυσίμου Χαμηλής Θερμοκρασίας

Tα PEM fuel cell είναι οι πιο μικρές και ελαφριές κυψέλες καυσίμου που κατασκευάζονται έχοντας καλή αναλογία βάρους – ισχύς.

Ο στερεός ηλεκτρολύτης συνεπάγεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη απομόνωση των αερίων που παίζουν ρόλο στις αντιδράσεις. Ωστόσο επειδή η μεμβράνη είναι αρκετά λεπτή θα πρέπει να υπάρχει ακριβής έλεγχος της ροής του καυσίμου και του νερού εξόδου ώστε ούτε να πλημμυρίσει η κάθοδος και να σταματήσει η αντίδραση αλλά ούτε και να αδειάσει το νερό με συνέπεια να τρυπήσει η μεμβράνη λόγω υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα ένα «βραχυκύκλωμα» που ονομάζεται «gas crossover» όπου το υδρογόνο συναντάται άμεσα με το οξυγόνο και γίνεται καύση καταστρέφοντας την κυψέλη καυσίμου.

Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των PEMFCs επιτρέπει πολύ μικρούς χρόνους εκκίνησης, ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό στο σύστημά μας διότι δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε εκ των προτέρων πόσες φορές στη διάρκεια μιας ημέρας η ζήτηση θα είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταικό σύστημα.



Βασικά Μέρη μιας ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου

Εικόνα 52 - Παρουσίαση Μερών μιας PEMFC

 Μεμβράνη Ανταλλαγής Ιόντων που επιτρέπει τη διέλευση πρωτονίων κατασκευασμένη από φθορισμένο Teflon με πάχος περίπου 180μm.

- 2. Πορώδες στρώμα εκατέρωθεν της μεμβράνης στο οποίο γίνεται η διάχυση των αερίων. Το υλικό είναι πρώτον αγώγιμο ώστε να υπάρχει ηλεκτρική διαφυγή για τα ηλεκτρόνια και υδροφοβικό ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση νερού και να δίνεται μεγαλύτερη ελευθερία στα αέρια να αντιδράσουν με τον καταλύτη. Επιπλέον συμβάλλει στη μηχανική στήριξη της μεμβράνης.
- 3. Καταλύτης κατασκευασμένος από λευκόχρυσο (Pt) υποστηριζόμενος από άνθρακα ή γραφίτη. Η ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα στα αέρια μπορεί να οδηγήσει σε αντίδραση με υδρίδια που ενδεχομένως να έχουν απορροφηθεί από το λευκόχρυσο του καταλύτη μειώνοντας την απόδοσή του. Επιπλέον ουσίες όπως η αμμωνία, κάποια αλκαλικά μέταλλα, βαριοί υδρογονάνθρακες και το μονοξείδιο του άνθρακα μπορούν να προκαλέσουν «δηλητηρίαση» του καταλύτη ανόδου. Στη δική μας περίπτωση που το υδρογόνο παράγεται από ηλεκτρόλυση αποσταγμένου νερού δεν θα έχουμε τέτοιο πρόβλημα. Από την άλλη πλευρά στον καταλύτη καθόδου όπου τον διοχετεύουμε με ατμοσφαιρικό αέρα και όχι με καθαρό οξυγόνο δημιουργείται από το άζωτο ένα στρώμα που δημιουργεί προβλήματα σε υψηλή ροή ρεύματος. Σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος η ιοντική διαπερατότητα της μεμβράνης μειώνεται και εκεί ακριβώς είναι που θέλουμε μεγάλες ποσότητες οξυγόνου να αντιδράσουν με τον καταλύτη.
- Πλάκες ροής καυσίμου (υδρογόνου) και οξειδωτικής ουσίας (οξυγόνου) που επιπλέον συμμετέχουν στη σύνδεση των κυψελών μεταξύ τους για να δημιουργήσουν μια στοίβα κυψελών καυσίμου (PEMFC stack).

Φυσική Ερμηνεία μιας ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου

Κατ' ουσία μια PEM κυψέλη καυσίμου είναι ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας. Εκμεταλλεύεται την χημική ενέργεια της ένωσης υδρογόνου και οξυγόνου, που αντιδρούν με την παρουσία ενός καταλύτη, για να την μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι δύο βασικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε ένα PEMFC είναι:

- στην άνοδο: $2H_2 → 4H^+ + 4e^-$
- στη κάθοδο: $O_2 + 4H^+ + 4e^- → 2H_2O$

συνολικά: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + ενέργεια$

Η λειτουργία τους είναι πολύ απλή καθώς στην άνοδο το υδρογόνο που εισάγεται μετατρέπεται σε πρωτόνια ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα. Μόλις τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια φτάσουν στην κάθοδο αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα και σχηματίζουν νερό. Η συνολική θερμική ενέργεια της αντίδρασης ενός mol H₂ και ½ mol O₂ είναι η ενθαλπία της αντίδρασης (ΔΗ) όπου σε κανονικές συνθήκες πίεσης (1atm) και θερμοκρασίας (25°C) αντιστοιχεί σε 285.83kJ. Ισχύει όμως ότι

$$\Delta H = \Delta G - T * \Delta S$$

Όπου ΔG είναι η αλλαγή στην ελεύθερη ενέργεια του Gibbs της αντίδρασης και για την παραπάνω αντίδραση υπό τις ίδιες συνθήκες αντιστοιχεί σε 237.10kJ. ΤxΔS είναι η ενέργεια που «χάνεται» από τις μη αναστρέψιμες μεταβολές της εντροπίας του συστήματος. Άρα ένα μέρος της χημικής ενέργειας της αντίδρασης μετατρέπεται σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια ενώ ένα άλλο μέρος εκφράζεται ως απώλειες σε μορφή θερμότητας.

Η απόδοση της τέλειας κυψέλης καυσίμου θα είναι

Απόδοση Ιδανικής Κυψέλης Καυσίμου
$$= \frac{\Delta G}{\Delta H} = 83\%$$

σημαντικά ανώτερη από τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Έχοντας την τιμή ΔG μπορούμε από τη σχέση $\Delta G = -z * F * E^0$ όπου z είναι ο αριθμός των δύο ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση, και F η σταθερά του Faraday να βρούμε την ιδανική τάση μια κυψέλης καυσίμου και προκύπτει V_{ideal}=1.229V.

Οπότε θα μπορούσαμε να εκφράσουμε την απόδοση ως εξής:

$$A\pi \delta \delta \sigma \sigma \eta \ FC = \frac{\Omega \varphi \acute{\epsilon} \lambda \iota \mu \eta \ I \sigma \chi \acute{\upsilon} \varsigma}{\Delta H/sec} = 0.83 * \frac{V_{real} * I}{E^0 * I} = 0.83 * \frac{V_{real}}{1.229} = 0.675 * V_{real}$$

για πίεση 1 ατμόσφαιρα και θερμοκρασία 25° C.

Η παραπάνω απόδοση αναφέρεται στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου όταν όλο το καύσιμο που εισέρχεται αντιδρά. Στην πραγματικότητα όμως ένα μέρος του καυσίμου εξέρχεται χωρίς να αντιδράσει και έτσι έχουμε τον ορισμό της χρησιμοποίησης:

$$u_f = \frac{H_{2_{in}} - H_{2_{out}}}{H_{2_{in}}} = \frac{H_{2_r}}{H_{2_{in}}}$$

όπου H_{2r} είναι η ποσότητα του υδρογόνου που αντέδρασε με την άνοδο.

Οι περιπτώσεις να μην αντιδράσει το υδρογόνο είναι οι εξής:

- Το υδρογόνο αντέδρασε με κάποιο μέρος της κυψέλης καυσίμου χωρίς να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.
- Το υδρογόνο διαπέρασε τη μεμβράνη φαινόμενο crossover.
- Ένα μέρος του υδρογόνου διέφυγε στο περιβάλλον λόγω διαρροών.

 Το υδρογόνο δεν αντέδρασε με τον καταλύτη και παραμένει εγκλωβισμένο στην άνοδο ή ανακυκλώνεται με σκοπό να του δώσουμε μια επόμενη ευκαιρία να αντιδράσει.

Σε μια PEMFC υψηλής ποιότητας ο τελευταίος λόγος είναι και ο κυρίαρχος με αποτέλεσμα να έχουμε μια φαινομενικά μικρότερη απόδοση από την πραγματική.

Ηλεκτρικές Απώλειες σε μια ΡΕΜ Κυψέλη Καυσίμου

Η τάση ενός ιδανικού PEMFC είναι σταθερή ανεξάρτητα από το ρεύμα που διέρχεται μέσα από την κυψέλη καυσίμου και το ρεύμα που ζητάει το φορτίο δημιουργείται από την ροή του υδρογόνου αν υποθέσουμε πως αυτή η ροή είναι επαρκής.

Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν τρία φαινόμενα που προκαλούν απώλειες στην τάση ενός PEMFC και περιορίζουν το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει από την κυψέλη καυσίμου:

- Απώλειες Ενεργοποίησης (Activation polarization): αντιπροσωπεύουν την ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης στα ηλεκτρόδια. Η ενέργεια ενεργοποίησης υποδηλώνει μια προσπάθεια που πρέπει να καταβληθεί ώστε να ξεπεραστεί αυτό το κατώφλι ενέργειας και να ξεκινήσει η αντίδραση. Με άλλα λόγια είναι η αντίσταση στον εξαναγκασμό του υδρογόνου να διαχωριστεί σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια και από την άλλη μεριά το οξυγόνο να διαχωριστεί σε δύο άτομα για να αντιδράσει με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια προς το σχηματισμό νερού. Οι απώλειες ενεργοποίησης εξαρτώνται από την ίδια την αντίδραση, το υλικό και τη δομή του ηλεκτρολύτη και από τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων.
- 2. Ωμικές Απώλειες (Ohmic polarization): αντιπροσωπεύουν την ιοντική αντίσταση του ηλεκτρολύτη, την αντίσταση που έχει το πορώδες στρώμα που συλλέγει το ρεύμα και τις αντιστάσεις των ηλεκτροδίων. Οι αντιστάσεις αυτές είναι ανάλογες του ρεύματος και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως ωμικές. Εξαρτώνται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, από το σχήμα της κυψέλης καυσίμου και από τη θερμοκρασία.
- 3. Απώλειες Συγκέντρωσης (Concentration polarization): αντιπροσωπεύουν τον κορεσμό των αντιδρώντων στα ηλεκτρόδια που γίνεται αντιληπτός σε μεγάλα φορτία. Καθώς τα αντιδρώντα ωθούνται σε μεγάλες ποσότητες εντός της κυψέλης καυσίμου δεν διαχέονται ομοιόμορφα και δεν έρχονται ομοιόμορφα σε επαφή με τον καταλύτη και τη μεμβράνη. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη πυκνότητα ρεύματος από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων και από τη δομή των ηλεκτροδίων.

Double-Layer Charging Effect

Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη συγκέντρωση φορτίων ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη. Επειδή έχουμε δύο ηλεκτρόδια το φαινόμενο προσομοιάζει δυο πυκνωτές που τους ισοδυναμούμε με έναν πυκνωτή έστω C_{DCE}. Από τα φορτία αυτά εξαρτάται και η πραγματοποίηση της αντίδρασης. Όσο πιο πολλά φορτία τόσο πιο μεγάλη πιθανότητα να συμβεί η αντίδραση. Η συγκέντρωση των φορτίων αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος και η φόρτιση του πυκνωτή C_{DCE} εισάγει μια επιπλέον καθυστέρηση στην όλη διαδικασία.

Μοντέλο ΡΕΜ Κυψέλης Καυσίμου στο Simulink

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε αναπτύχθηκε από τον Παναγιώτη Παπαδόπουλο στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (19). Το μοντέλο αυτό εξομοιώνει πλήρως την ηλεκτρική συμπεριφορά μιας απομονωμένης PEM κυψέλης καυσίμου τόσο σε σταθερή όσο και σε μεταβατική κατάσταση.

Οι παραδοχές του μοντέλου είναι οι εξής:

- Θεωρούμε σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας ίση με 70°C λαμβάνοντας
 υπόψη πως η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται και με νερό για τη διατήρηση της θερμοκρασίας.
- Η καθυστέρηση στην τροφοδότηση του καυσίμου είναι αρκετά μεγαλύτερη από το Double Charging Effect το οποίο δεν εξομοιώνεται.

Το διάγραμμα που αναπτύξαμε στο Simulink φαίνεται στην εικόνα 53.

Το πρώτο μπλοκ με το όνομα "Reversible Voltage" υπολογίζει την τάση που θα μας έδινε η τέλεια κυψέλη καυσίμου. Η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτή την ανάστροφη τάση μοντελοποιείται σε ένα ξεχωριστό μπλοκ που ονομάζουμε "Temperature Loss". Η μείωση θεωρείται προσεγγιστικά ίση με 0.84mV/°C για τις αναμενόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Οι ηλεκτρικές απώλειες που η φυσική τους εξήγηση δόθηκε παραπάνω μοντελοποιούνται στα μπλοκ "Activation Loss" για τις απώλειες ενεργοποίησης, "Ohmic Loss" για τις ωμικές απώλειες και "Concentration Loss" για τις απώλειες συγκέντρωσης. Να σημειώσουμε πως η θερμοκρασία επηρεάζει τις απώλειες ενεργοποίησης καθότι σε κάθε χημική αντίδραση υπεισέρχεται ο παράγοντας της θερμοκρασίας. Επιπλέον επηρεάζει τις ωμικές απώλειες διότι η διέλευση των πρωτονίων από τον ηλεκτρολύτη και των ηλεκτρονίων από τα αγώγιμα υλικά δυσχεραίνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 53 - Διάγραμμα Simulink Κυψέλης Καυσίμου

Το συνολικό μπλοκ που αναπαριστά μια κυψέλη καυσίμου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και έχει ως εισόδους το ρυθμό τροφοδότησης υδρογόνου στην άνοδο και το ρεύμα που θέλουμε να παρέχουμε. Ως έξοδο παίρνουμε την τάση που εμφανίζει η κυψέλη καυσίμου.



Fuel Cell

Εικόνα 54 - Μπλοκ Simulink Κυψέλης Καυσίμου

Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διέλθει από την κυψέλη καυσίμου εξαρτάται από το εμβαδόν της ίδιας της κυψέλης και συγκεκριμένα από το εμβαδόν της μεμβράνης. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια όπου θα δράσουν τα αντιδραστήρια μιας κυψέλης καυσίμου, δηλαδή η επιφάνεια ανόδου και καθόδου, τόσο ισχυρότερη μπορεί να είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Για λόγους όμως καλής χωρικής κατανομής δεν παρασκευάζονται κυψέλες καυσίμου με πολύ μεγάλη επιφάνεια. Εξάλλου η τάση που μας δίνει μια κυψέλη καυσίμου είναι μικρότερη από 1V άρα θέλουμε μια στοίβα από κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά για να πάρουμε την επιθυμητή τάση. Αν έχουμε τη ζητούμενη τάση τότε συνδέουμε ξεχωριστές στοίβες κυψελών καυσίμου παράλληλα για να καλύψουμε τις απαιτήσεις σε ισχύ.

Εξομοίωση Αναλυτικού Μοντέλου PEMFC

Ως πρώτη εξομοίωση θα αναπαράγουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του PEMFC για διάφορες ροές καυσίμου



Εικόνα 55 - Χαρακτηριστική Εξίσωση Κυψέλης Καυσίμου

Εδώ βλέπουμε πως η πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου διαφέρει από την ιδανική. Παρατηρούμε πρώτα πως σε μικρές ροές ρεύματος πρακτικά οι απώλειες ενεργοποίησης έχουν τον κυρίαρχο ρόλο. Στην περιοχή ωμικών απωλειών η σχέση τάσης – ρεύματος είναι γραμμική ενώ σε πολύ υψηλά ρεύματα στην περιοχή των απωλειών συγκέντρωσης η τάση πέφτει κατακόρυφα. Έπειτα βλέπουμε πως ο ρυθμός τροφοδότησης του υδρογόνου είναι ικανός να αλλάξει την καμπύλη της χαρακτηριστικής φέρνοντάς την πιο κοντά στην ιδανική τάση. Εντούτοις καθώς ξεκινάμε από μια μικρή τροφοδότηση ίση με 3Kmol/sec και μεταβαίνουμε σε μια μέση τροφοδότηση 7Kmol/sec έχουμε πετύχει μια μικρή αύξηση της απόδοσης που για να την επαναλάβουμε θα πρέπει να ανεβάσουμε την τροφοδότηση στα 20Kmol/sec. Εδώ θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τον παράγοντα της χρησιμοποίησης του υδρογόνου. Το ποσοστό χρησιμοποίησης σε σχέση με την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου δεχόμενοι ένα μέσο ρεύμα έστω 25Α φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 56 - Μεταβολή της Τάσης Κυψέλης Καυσίμου σε σχέση με την Χρησιμοποίηση του υδρογόνου

Βλέπουμε λοιπόν πως για να αυξήσουμε την τάση πρέπει να αρκεστούμε σε μικρή χρησιμοποίηση του υδρογόνου. Σε περίπτωση μικρών συστημάτων το υδρογόνο που παρέχουμε στη κυψέλη δεν ανακυκλώνεται με αποτέλεσμα να έχουμε ανώφελη σπατάλη υδρογόνου. Αλλά και σε ένα πιο σύνθετο σύστημα που περιλαμβάνει ανακύκλωση υδρογόνου πρέπει να αναλογιστούμε το κόστος της ανατροφοδότησης πολύ μεγάλης ροής υδρογόνου για να έχουμε ένα σχετικά μικρό κέρδος σε τάση.

Στο παρακάτω γράφημα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η καμπύλη της ισχύος ως προς το ρεύμα για διαφορετικές ροές υδρογόνου. Στο γράφημα ξεχωρίζουν τα

σημεία μέγιστης ισχύος τα οποία συναντάμε για διαφορετικές τιμές ρεύματος ανάλογα τη ροή του υδρογόνου. Αυτό συνεπάγεται πως για διαφορετικά μέγιστα ισχύος θα έχουμε και διαφορετική χρησιμοποίηση του υδρογόνου.





Ο έλεγχος μιας κυψέλης καυσίμου μπορεί να γίνει με βάση την αρχή λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ. Η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος θα μείωνε το αρχικό κόστος μιας επένδυσης αφού λίγες μόνο συστοιχίες κυψελών καυσίμου θα ήταν αρκετές για να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις. Εντούτοις όπως διαπιστώσαμε η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται για μικρές χρησιμοποιήσεις του υδρογόνου δημιουργώντας έτσι την ανάγκη ενός κυκλοφορητή που θα καταναλώνει ενέργεια για να ανατροφοδοτήσει την κυψέλη καυσίμου με μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, αυξάνοντας έτσι τα λειτουργικά έξοδα.

Η δεύτερη θεώρηση είναι να λειτουργήσουμε την κυψέλη καυσίμου σε σημείο μέγιστης απόδοσης. Αυτό επιτυγχάνεται για μεγάλη χρησιμοποίηση μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά έξοδα. Δυστυχώς στο σημείο μέγιστης απόδοσης η τιμή της ισχύος είναι μικρή και έτσι αυξάνεται σημαντικά το κόστος της επένδυσης εφόσον η συνολική ισχύς του συστήματος απαιτεί μεγάλο πλήθος συστοιχιών κυψελών καυσίμου. Άρα θέλουμε να βρούμε ένα μέσο σημείο στο οποίο η χρησιμοποίηση του υδρογόνου να είναι καλή σε σχέση με την προσφερόμενη ισχύ. Παρακάτω στο πρώτο γράφημα έχουμε από κοινού τη μεταβολή του σημείου μέγιστης ισχύος και τη μεταβολή της χρησιμοποίησης σε σχέση με την παροχή του υδρογόνου. Στο δεύτερο γράφημα φαίνεται πως αν θεωρήσουμε την ισχύ ως βάρος για την χρησιμοποίηση, πολλαπλασιάσουμε δηλαδή τις δύο προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, θα δούμε το αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο ισχύος και χρησιμοποίησης.



Εικόνα 58 - Χρυσή Τομή Ισχύος - Χρησιμοποίησης σε Κυψέλη Καυσίμου

Σε αυτό το σημείο η χρησιμοποίηση είναι ίση με 86% και από εδώ και πέρα θα τροφοδοτούμε τη κυψέλη καυσίμου με το ρυθμό που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό το ποσοστό χρησιμοποίησης. Επιπρόσθετα για την χρησιμοποίηση υπάρχουν περιορισμοί που μας αναγκάζουν να ελέγξουμε σε ένα πραγματικό σύστημα κυψελών καυσίμου τη ροή υδρογόνου ώστε η χρησιμοποίηση να βρίσκεται πάντοτε εντός των ορίων 80-90% (20). Οι περιορισμοί είναι οι εξής:

- Σε μειωμένη χρησιμοποίηση υπάρχει ένα όριο κάτω από το οποίο η τάση της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται απότομα.
- 2. Σε αυξημένη χρησιμοποίηση οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να «λιμοκτονήσουν» και να συμβούν μόνιμες ζημιές στο εσωτερικό της κυψέλης.

3. Σε περίπτωση απότομης αλλαγής του φορτίου και άρα του ρεύματος της κυψέλης ο ελεγκτής που ελέγχει το καύσιμο αργεί να ανταποκριθεί για κάποιο χρονικό διάστημα. Σ' αυτό το διάστημα αν η αύξηση του φορτίου ξεπεράσει κάποιο όριο μπορεί να βρεθούμε στην παραπάνω περίπτωση όπου η κυψέλη στερεύει από καύσιμο με συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής στη μεμβράνη ή ακόμα και βλάβες.

Επομένως <u>για χρησιμοποίηση 86%</u> έχουμε Ονομαστική Μέγιστη Ισχύς Κυψέλης Καυσίμου: **16W** (42A @ 0.32V)

Επιπλέον πρέπει να εξετάσουμε τον χρόνο απόκρισης της κυψέλης σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Οπότε λειτουργώντας η κυψέλη σε σταθερή κατάσταση με μεγάλο φορτίο το απορρίπτουμε και το επανασυνδέουμε για να λάβουμε την ακόλουθη απόκριση της τάσης.



Εικόνα 59 - Χρονική Απόκριση Κυψέλης Καυσίμου

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως ένα φορτίο που απαιτεί 45Α δίνει τη θέση του απότομα σε ένα φορτίο των 5Α και μετά από λίγο χρόνο συμβαίνει το αντίθετο. Η μεγαλύτερη καθυστέρηση στην απόκριση του φορτίου της κυψέλης καυσίμου παρατηρείται κατά την απόρριψη του φορτίου όπου βλέπουμε μια καθυστέρηση περίπου ίση με 20 δευτερόλεπτα. Εντούτοις επειδή στην πραγματικότητα ο ελεγκτής της ροής καυσίμου δεν έχει ούτε και αυτός τέλεια απόκριση προσθέσαμε έναν PI controller για να εξομοιώσουμε αυτή την ατέλεια του συστήματος. Έτσι με κόκκινο χρώμα βλέπουμε την συνολική απόκριση ελεγκτή και κυψέλης καυσίμου και παρατηρούμε ακόμα μεγαλύτερη καθυστέρηση ίση περίπου με 25 δευτερόλεπτα.

Ενεργειακό Μοντέλο Συστήματος Κυψελών Καυσίμου

Για να είμαστε πιο πιστοί με την πραγματικότητα θα ομαδοποιήσουμε μερικές κυψέλες καυσίμου για να φτιάξουμε την δική μας συστοιχία. Καθότι μια κυψέλη καυσίμου αυτούσια μπορεί να μας δώσει το πολύ τάση ίση με 1Volt χρειαζόμαστε μια συστοιχία από κυψέλες καυσίμου εν σειρά για να έχουμε μια μεγαλύτερη τάση.

Συγκρίνοντας την ονομαστική ισχύ που υπολογίσαμε για τη δική μας κυψέλη με την ισχύ των συστημάτων κυψελών καυσίμου ανά κυψέλη διαπιστώνουμε πως το μέγεθος της κυψέλης μας αρμόζει σε συστήματα 1-2kW ονομαστικής ισχύος. Οπότε ορίζουμε για την δική μας εικονική συστοιχία αριθμό κυψελών ίσο με 100 ώστε η ονομαστική ισχύς της κυψέλης να είναι 1600W και η τάση ονομαστικής ισχύος ίση με 32V.



Εικόνα 60 - Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου

Καθώς οι συστοιχίες θα συνδεθούν με έναν αντιστροφέα για την παροχή ρεύματος στο δίκτυο και ο αντιστροφέας απαιτεί υψηλή τάση εισόδου θα υποθέσουμε πως παρεμβάλλεται μεταξύ τους ένα μετατροπέας συνεχούς τάσης με ικανότητα να αύξησης της τάσης (boost converter).

Μια επιπλέον παραδοχή που θα κάνουμε στο ενεργειακό μας μοντέλο είναι πως ενόσω η χρησιμοποίηση του υδρογόνου παραμένει όσο το δυνατόν πιο κοντά στο 86% ταυτόχρονα γίνεται ανακύκλωση του υδρογόνου ώστε τελικά να μην υπάρχουν

απώλειες κατά την μεταφορά του υδρογόνου από την δεξαμενή στις κυψέλες καυσίμου.

Για να κατασκευάσουμε ένα απλοποιημένο μοντέλο της παραπάνω κυψέλης καυσίμου θα πρέπει να έχουμε μια αντιστοιχία ισχύος και κατανάλωσης υδρογόνου. Δηλαδή ζητώντας να παραχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα ισχύος θέλουμε να έχουμε ως έξοδο την κατανάλωση του καυσίμου. Εφόσον όπως αναφέραμε δεν θα υπάρχουν απώλειες υδρογόνου μπορούμε να αντιστοιχήσουμε την κατανάλωση με το ρεύμα που διέρχεται από το φορτίο. Υλοποιούμε επομένως το παρακάτω διάγραμμα στο Simulink.



Εικόνα 61 - Διάγραμμα Simulink Ενεργειακού Μοντέλου Κυψέλης Καυσίμου

Η λογική που ακολουθείται είναι πρώτα να αρχικοποιήσουμε το μπλοκ. Για να δούμε πόσες συστοιχίες έχει το σύστημα κυψελών καυσίμου ορίζουμε την επιθυμητή ονομαστική ισχύς του συστήματος και με ένα μικρό Matlab script αρχικοποιούμε τις σταθερές που χρειαζόμαστε.

Κατά την εκτέλεση του ενεργειακού μοντέλου εξετάσουμε καταρχήν αν η ισχύς που απαιτείται είναι μηδενική ή όχι. Αν είναι μηδέν τότε απλά ζητάμε από όλο το σύστημα κυψελών καυσίμου να είναι κλειστό και συνεπώς το ρεύμα που διέρχεται είναι επίσης μηδέν. Αν όμως η ισχύς είναι διάφορη του μηδενός τότε δεχόμαστε επιτρεπτές τιμές από την μικρότερη ισχύ που μπορεί να δώσει μια μόνο συστοιχία κυψελών καυσίμου μέχρι την μέγιστη ισχύ που μπορούν να δώσουν όλες οι συστοιχίες μαζί.

Εκτελώντας μια διαίρεση της τρέχουσας τιμής της ζητούμενης ισχύος με την μέγιστη ισχύ κάθε συστοιχίας παίρνουμε τον αριθμό των συστοιχιών που χρειαζόμαστε. Αν χρειαζόμαστε συνολικά τουλάχιστον *n* συστοιχίες τότε οι *n-1* συστοιχίες θα λειτουργήσουν σε πλήρη ισχύ ενώ η τελευταία θα λειτουργήσει σε μικρότερη τιμή ισχύος για να καλύψει το υπόλοιπο. Το μπλοκ "flow rate" στο παραπάνω διάγραμμα βασίζεται σε έναν πίνακα αντιστοίχησης της ισχύος με το ρεύμα που καταναλώνει η κυψέλη καυσίμου. Ο πίνακας αυτός δημιουργήθηκε μετά από αλλεπάλληλες εξομοιώσεις του αναλυτικού μοντέλου. Εξομοιώνοντας ένα σύστημα κυψελών καυσίμου με ονομαστική ισχύ έστω στα 5kW προκύπτει πως χρειαζόμαστε 4 τουλάχιστον συστοιχίες και η γραφική παράσταση για το ρεύμα που θα διέλθει από το σύστημα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 62 - Εξομοίωση Simulink Ενεργειακού Μοντέλου

Τέλος παρουσιάζουμε το Simulink μπλοκ στο που εμπεριέχει το παραπάνω διάγραμμα και είναι αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε ως συστατικό του συνολικού συστήματος.



Εικόνα 63 - Μπλοκ Simulink Ενεργειακού Μοντέλου

Κεφάλαιο 6

Συστήματα Διαχείρισης Ισχύος

Το ρεύμα που παράγεται είτε από το φωτοβολταικό σύστημα είτε από τις κυψέλες καυσίμου είναι συνεχές (DC) ενώ η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές γίνεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και μάλιστα με συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ζητείται η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος να είναι ένα ημιτονοειδές σήμα που να ταλαντώνεται στη συχνότητα των 50Hz, με όσο το δυνατόν λιγότερες αρμονικές συχνότητες, και η RMS (root mean squared) τάση να βρίσκεται στα 230V(+6%,-10%). Για να το πετύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε διατάξεις αντιστροφέων (inverters) που ρόλος του είναι να μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο.

Από την ανωτέρω ανάλυση του electrolyzer και της κυψέλης καυσίμου διαπιστώθηκε πως αυτοί οι ηλεκτροχημικοί μετατροπείς λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερη τάση από αυτή που θέλουμε να παρέχουμε στο δίκτυο. Ο καθορισμός της τάσης εξόδου του φωτοβολταικού συστήματος θα προσαρμοστεί στις ανάγκες του αντιστροφέα παρά στις ανάγκες των ηλεκτροχημικών μετατροπέων για να εξασφαλίσουμε καλύτερη απόδοση. Επιπλέον παρατηρήσαμε πως η τάση του φωτοβολταικού συστήματος έχει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τις κυψέλες καυσίμου οι οποίες προσπαθώντας να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος φορτίου θα πρέπει ταυτόχρονα να λειτουργούν και σε μεγάλο εύρος τάσης εξόδου. Γίνεται φανερή λοιπόν η αναγκαιότητα της χρήσης μετατροπέων συνεχούς τάσης (dc/dc converters) που θα παρεμβάλλονται μεταξύ των συστημάτων για να μας εξασφαλίζουν την ανεξαρτητοποίηση των ιδιαίτερων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους.

Οι απαιτήσεις ισχύος μιας ολόκληρη κοινότητας ανθρώπων μπορεί να έχει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις ανά χρονική στιγμή που δεν μπορούν να προβλεφθούν. Για παράδειγμα η λειτουργία ορισμένων ηλεκτρικών συσκευών όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες απαιτούν πολύ μεγάλα φορτία κατά την εκκίνησή τους. Επομένως βραχυπρόθεσμα το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε αυτές τις απότομες μεταβολές του φορτίου. Όταν το φωτοβολταικό σύστημα δεν είναι σε θέση να καλύψει το τρέχον φορτίο βασίζεται στην κυψέλη καυσίμου. Τι γίνεται όμως όταν και οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου δεν μπορούν ούτε αυτές να καλύψουν τις απαιτήσεις ισχύος την τρέχουσα χρονική στιγμή? Θα χρειαστούμε μια επιπλέον συσκευή που να έχει την ικανότητα να δώσει όλη την απαιτούμενη ισχύ για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Η λύση βασίζεται στους υπερπυκνωτές (supercapacitors) οι οποίοι συνδέονται παράλληλα με τις υπόλοιπες συσκευές και προσφέρουν ισχύ όταν αυτή χρειάζεται. Οι υπερπυκνωτές επίσης υποστηρίζουν ενεργειακά τις κυψέλες καυσίμου που όπως είδαμε έχουν χρονική απόκριση μερικών δευτερολέπτων η οποία κρίνεται ανεπαρκής για την σωστή λειτουργία πολλών ηλεκτρικών συσκευών.

Αρχές λειτουργίας Μετατροπέων DC/DC

Ένας μετατροπέας dc/dc έχει την ικανότητα να δέχεται ένα εύρος τάσεων εισόδου και να τη μετατρέπει σε μια καθορισμένη τιμή τάσεως εξόδου. Ο μετατροπέας dc/dc άλλοτε επιθυμούμε να αυξάνει την τάση εισόδου και άλλοτε να την μειώνει. Οι μετατροπείς που μπορούν να δώσουν τάσεις μικρότερες της τάσης εισόδου ονομάζονται «buck converters» ενώ για τάσεις μεγαλύτερες της τάσης εισόδου χρησιμοποιούμε τους «boost converters». Επίσης υπάρχει δυνατότητα ενός μετατροπέα που και να μειώνει και να αυξάνει την τάση εισόδου με την ονομασία «buck-boost converter». Τα παρακάτω δύο κυκλώματα συνθέτουν έναν ιδανικό buck και έναν ιδανικό boost μετατροπέα αντίστοιχα.



Εικόνα 64 - Κύκλωμα Switching Mode Buck Μετατροπέα



Εικόνα 65 – Κύκλωμα Switching Mode Boost Μετατροπέα

Η λειτουργία των μετατροπέων αυτών βασίζεται στον διακόπτη u που φαίνεται στην εικόνα. Στον buck μετατροπέα όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 1, το ρεύμα εισόδου αυξάνεται με ένα ρυθμό που εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του πηνίου L και ο πυκνωτής φορτίζεται. Οπότε πριν φτάσουμε σε κατάσταση όπου ο πυκνωτής θα είχε φορτιστεί πλήρως, ο διακόπτης μεταβαίνει στη θέση 0, και το ρεύμα του πηνίου αρχίζει να μειώνεται. Η φόρτιση του πυκνωτή τώρα γίνεται μικρότερη έως ότου να μηδενιστεί και να αρχίσει ο πυκνωτής να εκφορτίζεται. Επομένως κατά το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι στη θέση 1 το πηνίο αποθηκεύει μέσα του ενέργεια και την αποδίδει στο σύστημα όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 0, στο μεσοδιάστημα ο πυκνωτής εναλλάσσεται μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης διατηρώντας το μέσο όρο του φορτίου του και συνεπώς την τάση εξόδου του. Εφόσον δεν έχουμε τον διακόπτη στο 1 για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε ο πυκνωτής φορτιστεί πλήρως και να αναπτύξει στα άκρα του τάση ίση με την τάση εισόδου, η τάση του πυκνωτή θα είναι πάντοτε μικρότερη από την τάση εισόδου επιτυγχάνοντας έτσι την μείωση της τάσης.

Στον boost μετατροπέα όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 1 το κύκλωμα

διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο αριστερό μέρος όπου η είσοδος δεδομένου πως έχει μια σταθερή τάση προκαλεί και μια σταθερή αύξηση του ρεύματος του πηνίου, αποθηκεύοντας ενέργεια στο πηνίο. Στο δεξί μέρος ο πυκνωτής αποφορτίζεται στην αντίσταση R θεωρώντας πως έχει αρκετά μεγάλη χωρητικότητα ώστε η μεταβολή στο φορτίο να μην προκαλέσει μεγάλη μεταβολή στην τάση εξόδου. Όταν ο διακόπτης μεταβεί στην θέση 0 τότε το ρεύμα του πηνίου μειώνεται χωρίς να προλαβαίνει να μηδενιστεί με αποτέλεσμα ο πυκνωτής να φορτίζεται επιπλέον και να αυξάνει η τάση του. Επομένως όταν το φορτίο που δέχεται ο πυκνωτής με το διακόπτη στη θέση 0 εξισωθεί με το φορτίο που αποδεσμεύει ο πυκνωτής με το διακόπτη στη θέση 1 έχουμε φτάσει σε μια τιμή τάσης εξόδου μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.

Ο έλεγχος του διακόπτη καθορίζεται από έναν Διαμορφωτή Εύρους Παλμών (PWM). Αποδεικνύεται πως οι παλμοί θα πρέπει να έχουν κύκλο φόρτου (duty cycle) ίσο με $D = \frac{V_o}{V_{in}}$ για τον ιδανικό buck μετατροπέα και $D = 1 - V_{in}/V_o$ για τον ιδανικό boost μετατροπέα. Το κύκλωμα όμως δεν είναι ιδανικό οπότε είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί έναν ελεγκτής κλειστού βρόγχου που θα εισάγει μια απόκλιση στο κύκλο φόρτου για να αντισταθμίζονται οι ατέλειες του κυκλώματος και να συγκλίνει πιο γρήγορα το κύκλωμα προς την επιθυμητή τάση. Η συχνότητα των παλμών είναι αρκετά υψηλή ίση με 1MHz περίπου με σκοπό αφενός να μην υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης εξόδου και αφετέρου να υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης πυκνωτών και πηνίων με μικρή χωρητικότητα και αυτεπαγωγή αντίστοιχα. Ως διακόπτης χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικός διακόπτης τύπου mosfet τρανζίστορ που είναι κατάλληλος για λειτουργία σε υψηλές συχνότητες.

Ενεργειακό Μοντέλο Μετατροπέων DC/DC

Στο δικό μας σύστημα πρώτος απαραίτητος μετατροπέας συνεχούς τάσεως είναι το σύστημα MPPT που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 2. Στους σύγχρονους αντιστροφείς το MPPT βρίσκεται ενσωματωμένο εντός του αντιστροφέα οπότε δεν θα χρειαστούμε κάποιο επιπλέο εξοπλισμό για τη σύνδεση με το φορτίο.

Όταν από το φωτοβολταικό σύστημα προκύπτει περίσσεια ισχύος αυτή θα κατευθυνθεί προς τους electrolyzers. Μεταξύ των δύο συστημάτων θα πρέπει να παρεμβληθεί ένας buck μετατροπέας που θα παρέχει χαμηλή τάση ρεύματος απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των electrolyzer.

Οι κυψέλες καυσίμου, όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουν πολύ μικρή τάση εξόδου και γι' αυτό θέλουμε πάρα πολλές εν σειρά. Εντούτοις κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε προβλήματα σωστής διαχείρισης του καυσίμου του υδρογόνου με αποτέλεσμα ανομοιομορφίες στην ικανότητα παροχής ρεύματος με τελική συνέπεια μειωμένη απόδοση και μεγαλύτερη πιθανότητα καταστροφών. Γι' αυτό περιοριζόμαστε σε συστοιχίες με μικρότερη τάση. Για να ανεβάσουμε την τάση σε επίπεδα αποδεκτά από τον αντιστροφέα παρεμβάλλουμε έναν boost μετατροπέα.

Γνωρίζοντας τα αναμενόμενα φορτία αλλά και το εύρος τάσεων εισόδου και εξόδου των παραπάνω μετατροπέων είμαστε σε θέση να επιλέξουμε έναν από τους πολλούς μετατροπείς buck ή boost της αγοράς. Οι περισσότεροι μετατροπείς λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες επιτυγχάνοντας καταυτό τον τρόπο υψηλές αποδόσεις. Στο συνολικό μας μοντέλο η απόδοση των μετατροπέων θεωρείται σταθερή ίση με 95%.

 $n_{dc-dc}=0.95$

Αρχές Λειτουργίας των Αντιστροφέων

Το όνομα των αντιστροφέων προέκυψε από το γεγονός πως αρχικά η μετατροπή από το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα γίνονταν με μηχανικούς διακόπτες που εναλλάσσονται ώστε να επιτύχουν την απαραίτητη μετατροπή (commutators). Έτσι η συνδεσμολογία αυτή όταν τροφοδοτήθηκε «αντίστροφα» με εναλλασσόμενο ρεύμα μας έδινε συνεχές στην έξοδο. Αυτός ο τρόπος μετατροπής βέβαια είναι ξεπερασμένος μιας και το ηλεκτρομηχανικό σύστημα έχει μεγάλες ενεργειακές απώλειες και γρήγορη φθορά. Οι σύγχρονοι αντιστροφείς χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς ταλαντωτές και ηλεκτρονικούς διακόπτες για να πετύχουν χωρίς μηχανικά μέρη το ίδιο αποτέλεσμα.

Γέφυρα Αντιστροφέα

Οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί διακόπτες είναι τρανζίστορ (thyristor, IGBT κτλ.) και για να έχουμε τριφασικό φορτίο τους συνδέουμε σε γέφυρα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 66 - Γέφυρα Τρανζίστορ Τριφασικού Αντιστροφέα

Οι φάσεις απέχουν μεταξύ τους κατά $120^{\circ}\left(\frac{2\pi}{3}rad\right)$. Σημειώστε πως οι 6 δίοδοι παράλληλα συνδεδεμένοι με τα τρανζίστορ είναι απαραίτητοι για να επιτρέπουν τη

ροή του ρεύματος κατά την αντίθετη φορά από την ορθή ροή κάθε τρανζίστορ. Στους πολυεπίπεδους (multilevel) αντιστροφείς υλοποιούνται περισσότερες του ενός συνδεσμολογίες γέφυρας ώστε να επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα της ημιτονοειδούς μορφής του ρεύματος.

Δημιουργία Τετραγωνικών Παλμών

Ο ηλεκτρονικός ταλαντωτής αναλαμβάνει να δημιουργήσει παλμούς μεταβλητού πλάτους οι οποίοι «ανοιγοκλείνουν» τα τρανζίστορ. Οι παλμοί παράγονται από την σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 67 - Δημιουργία Τετραγωνικών Παλμών μέσω σύγκρισης τριγωνικού και ημιτονοειδούς σήματος

Για να παραχθούν σωστοί τετραγωνικοί παλμοί θα πρέπει το τριγωνικό σήμα να έχει συχνότητα ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας των 50Hz που θέλουμε να παράγουμε. Όσο μεγαλύτερη η συχνότητα των τετραγωνικών παλμών τόσο καλύτερο ημιτονοειδές θα προκύψει μετά το φιλτράρισμα. Γι' αυτό οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα είναι εκατονταπλάσιες ή ακόμα μεγαλύτερες.

Αρμονικές Συχνότητες

Οι ηλεκτρονικοί διακόπτες παράγουν μόνο τετραγωνικές κυματομορφές είτε θετικές είτε αρνητικές και δεν μπορούν να παράγουν άμεσα ημιτονοειδές σήμα. Η βάση για την αντιστοίχηση των τετραγωνικών αυτών παλμών σε συνδυασμό ημιτονοειδών σημάτων προκύπτει από την θεωρία της Fourier ανάλυσης. Το ημιτονοειδές σήμα που έχει την ίδια συχνότητα με τον τετραγωνικό παλμό καλείται το βασικό σήμα και τα υπόλοιπα καλούνται αρμονικές με συχνότητα ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 68 - Ημιτονοειδές Σήμα με Αρμονικές Συχνότητες

Ζωνοπερατό Φίλτρο στα 50Hz

Για κάθε φάση του τριφασικού συστήματος χρειαζόμαστε ένα φίλτρο για να διώξουμε όλες τις αρμονικές και να κρατήσουμε μόνο τη συνιστώσα των 50Hz. Το φίλτρο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ένα απλό ζωνοπερατό φίλτρο RLC με συχνότητα συντονισμού που δίνεται από τη σχέση $f = \frac{1}{(2\pi)^2 \sqrt{LC}}$. Για να έχουμε έντονη μείωση των αρμονικών και η οποία επίσης να είναι ανεξάρτητη του φορτίου που έχουμε, δηλαδή το φορτίο να μην επηρεάζει την απόδοση του φίλτρου επιλέγουμε την ακόλουθη συνδεσμολογία.



Εικόνα 69 - Φίλτρο RLC αντιστροφέα

Εκτός της συχνότητας συντονισμού, οι υπόλοιπες συχνότητες «βλέπουν» μικρή εμπέδηση και βραχυκυκλώνονται μέσα από το L και το C. Για την κατασκευή ενός ποιοτικού φίλτρου επιλέγεται ένας όσο το δυνατόν μεγαλύτερος πυκνωτής και μια όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση R.

Ρυθμιστής Τάσης

Η διαρροή ρεύματος στην γέφυρα, η ανάστροφη τάση των τρανζίστορ και η πτώση τάσης στο φίλτρο προκαλούν μείωση στο μέγιστο της τάσης (peak) του αντιστροφέα. Επιπλέον η τάση DC στην είσοδο μπορεί να μεταβάλλεται και να μην είναι σταθερή. Επομένως δεν μπορούμε εκ των προτέρων να προβλέψουμε το RMS της τάσης εξόδου. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο είναι αναγκαίο να εφαρμόσουμε μια ρύθμιση που να διατηρεί το RMS σταθερό στα 230V(+6%, -10%) και σύμφωνο με τις προδιαγραφές.

Αν η τάση εισόδου δεν επαρκεί θα χρειαστούμε στην έξοδο έναν μετασχηματιστή (transformer). Αν και ο μετασχηματιστής επιφέρει μια περαιτέρω μείωση στην ισχύ ταυτόχρονα προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση από εξωτερικές επιδράσεις προστατεύοντας τον αντιστροφέα.

Ο ρυθμιστής της τάσης προκύπτει από τη μορφοποίηση (modulation) του πλάτους της ημιτονοειδούς κυματομορφής αναφοράς. Αν υποθέσουμε πως το πλάτος του ημιτόνου αναφοράς παίρνει τιμές στο πεδίο (0,1) μπορούμε να έχουμε ανάλογο πλάτος του ημιτόνου εξόδου.

Φίλτρο Εισόδου

Το φορτίο δεν είναι απαραίτητο πως θα έχει μόνο ωμικές αντιστάσεις, είναι πολύ πιθανό να έχει και επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις. Δηλαδή ρεύματα θα επιστρέφονται από το φορτίο πίσω στο κύκλωμα. Αυτό συνεπάγεται πως θα πρέπει να προσθέσουμε έναν πυκνωτή παράλληλα με την τάση DC της εισόδου ώστε να φιλτράρουμε όλα αυτά τα ανάστροφα ρεύματα.

Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα Αυτόνομου Συστήματος

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αντιστροφέας αυτόνομου συστήματος είναι (21):

- Μεγάλο εύρος τάσης εισόδου: -10% έως +30% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας.
- Τάση εξόδου όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική ημιτονοειδής κυματομορφή.
- Μικρή διακύμανση στη συχνότητα και εύρος τάσης εξόδου: ±6% σταθερότητα τάσης και ±2% σταθερότητα συχνότητας.
- Υψηλός βαθμό απόδοσης στα μερικά φορτία.

- Ικανότητα να υπομένει μικρής διάρκειας υπερφορτίσεις για τις συνθήκες εκκίνησης συσκευών. Για παράδειγμα 2 έως 3 φορές την ονομαστική ένταση του ρεύματος για διάρκεια 5 δευτερολέπτων.
- Όσο το δυνατόν λιγότερες υπερτάσεις για επαγωγικά και χωρητικά φορτία.
- Ικανότητα να αντέχει βραχυκύκλωμα.

Ενεργειακό Μοντέλο Αντιστροφέα

Για τις ανάγκες της εργασίας, εντός του συνολικού μοντέλου, θα αντιμετωπίσουμε τον αντιστροφέα ως έναν παράγοντα μείωσης της ισχύος εξόδου. Θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα μπλοκ που να δέχεται ως είσοδο την ισχύ που ζητείται από το φορτίο και να μας δίνει στην έξοδο την τιμή της ισχύος προσαυξημένη λόγω των απωλειών που εισάγονται από τον αντιστροφέα. Αν και η μέση απόδοση του αντιστροφέα για μεγάλα φορτία δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις, εντούτοις για μικρά φορτία ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται κατακόρυφα και συνεπώς δεν μπορούμε να λάβουμε μια σταθερή μέση τιμή για τους αντιστροφείς. Θα στηριχτούμε σε μια τυπική καμπύλη απόδοσης των σύγχρονων αντιστροφέων. Στο παρακάτω γράφημα αναπαριστάται ο συντελεστής απόδοσης του αντιστροφέα ως προς την κανονικοποιημένη επί τοις εκατό ισχύς εξόδου του (21).



Εικόνα 70 - Τυπική Καμπύλη Απόδοσης Αντιστροφέα

Η σχέση που εκφράζεται είναι η

$$n = f(P_{out}) = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

όπου Pout η ισχύς εξόδου και Pin η ισχύς εισόδου.

Διαφορετικά μπορούμε να εκφράσουμε πως η ισχύς εισόδου απαρτίζεται από την ισχύ εξόδου και από τις απώλειες ισχύος στον αντιστροφέα μέσω της σχέσης

$$P_{out} = P_{in} - P_{loss} \left(\gamma \iota \alpha \ P_{standby} \ \leq P_{in} \leq P_{rated} \right)$$

Όπου P_{in} η ισχύς εισόδου του αντιστροφέα P_{out} η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα P_{loss} οι απώλειες ισχύος στον αντιστροφέα P_{standby} η ισχύς του αντιστροφέα σε κατάσταση αναμονής P_{rated} η μέγιστη ισχύς του αντιστροφέα

Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε πως ο αντιστροφέας καταναλώνει ενέργεια ακόμα και όταν δεν παράγει, όταν δηλαδή βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής. Κατά την λειτουργία του υπάρχουν πτώσεις τάσης στα τρανζίστορ της γέφυρας που εκφράζουν γραμμικές απώλειες του αντιστροφέα και επιπλέον υπάρχει εμπέδηση που εκφράζει απώλειες που έχουν τετραγωνική σχέση με την ισχύ του αντιστροφέα.

Βάσει αυτής της λογικής αλλά και λόγω της μορφής της καμπύλης απόδοσης θα επιλέξουμε ένα μοντέλο που βασίζεται σε συνάρτηση της μορφής $P_{loss} = f(P_{out})$. Η συνάρτηση αυτή είναι ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού με τρεις συντελεστές που μπορούν εύκολα να αναχθούν με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

$$P_{loss} = K_0 + K_1 * P_{out} + K_2 * P_{out}^2$$

όπου

K₀ είναι η κατανάλωση του αντιστροφέα ανεξαρτήτως του φορτίου (ηλεκτρονικά μετρήσεων, οθόνες led, μικροελεγκτές κτλ.)

K₁ είναι γραμμικές απώλειες (οι πτώσεις τάσης στα τρανζίστορ της γέφυρας) K₂ είναι οι ωμικές απώλειες (οι μαγνητικές απώλειες λόγω του μετασχηματιστή περιλαμβάνονται σε αυτόν τον συντελεστή)

Επομένως αξιοποιώντας την βιβλιοθήκη συναρτήσεων της Matlab βρίσκουμε με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού που ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν πιστότερα στα πειραματικά δεδομένα. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται με τελείες τα πειραματικά δεδομένα και με κόκκινη γραμμή φαίνεται η εξίσωση που προέκυψε από το μοντέλο. Εντός του γραφήματος παρουσιάζονται οι συντελεστές όπως προέκυψαν για παράδειγμα για έναν αντιστροφέα με ονομαστική μέγιστη ισχύ εξόδου, έστω 10kW.



Εικόνα 71 - Μοντέλο Αντιστροφέα - Καμπύλη Ισχύος (10kW)

Όπως φαίνεται από τη γραφική παράσταση το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαραστήσει με μεγάλη ακρίβεια τις απώλειες ισχύος στον αντιστροφέα και είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Αρχές Λειτουργίας Υπερπυκνωτών

Οι πυκνωτές αποθηκεύουν ηλεκτρικό φορτίο με φυσικό τρόπο χωρίς να λαμβάνουν χώρα χημικές ή άλλες διεργασίες, γι΄ αυτό και ο κύκλος φόρτισης – εκφόρτισης μπορεί να επαναληφθεί θεωρητικά άπειρες φορές. Οι υπερπυκνωτές είναι η εξέλιξη των απλών πυκνωτών και αποθηκεύουν φορτίο εντός ενός διπλού στρώματος ενεργού άνθρακα μεγάλης επιφάνειας και ενός υγρού ηλεκτρολύτη.

Ο πιο απλός υπερπυκνωτής μπορεί να υλοποιηθεί εισάγοντας απλώς δύο αγώγιμα υλικά μέσα σε υγρό ηλεκτρολύτη. Με το απαραίτητο επίπεδο τάσης επιτυγχάνεται ροή ρεύματος από το ένα ηλεκτρόδιο προς το άλλο και όπως είναι φυσικό το κάθε ηλεκτρόδιο έλκει γύρω του φορτία. Με το άνοιγμα του διακόπτη τα ηλεκτρόδια παραμένουν φορτισμένα και συνεπώς έχει αποθηκευθεί ενέργεια. Καθότι έχουν δύο παράλληλες επιφάνειες με αντίθετα φορτία εξηγείται ο όρος «διπλού στρώματος».



Εικόνα 72 - Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτρολυτικού Πυκνωτή

Οι υπερπυκνωτές επιτυγχάνουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα σε πολύ μικρό όγκο εξαιτίας του υλικού του ηλεκτροδίου που είναι εξαιρετικά πορώδες δίνοντας πολύ μεγάλη ενεργό επιφάνεια. Εξαιτίας αυτής της δομής οι υπερπυκνωτές έχουν μικρότερη απόκριση από τους κλασσικούς πυκνωτές. Οι διαδρομές που θα πρέπει να ακολουθήσουν τα φορτία εντός του ηλεκτρολύτη στους νανοπόρους μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη δημιουργώντας έτσι μια καθυστέρηση. Η καθυστέρηση συνολικής φόρτισης και εκφόρτισης του υπερπυκνωτή μπορεί να είναι μέχρι και 1 δευτερόλεπτο, το οποίο είναι πολύ πιο γρήγορο από τις κλασσικές μπαταρίες που χρειάζονται πολύ ώρες φόρτισης. Ένας επιπλέον περιορισμός είναι η μέγιστη τάση των υπερπυκνωτών, περίπου 1-3V ανά στοιχείο υπερπυκνωτή, ένα φράγμα πολύ μικρότερο από τις τιμές που γνωρίζουμε για ηλεκτροστατικούς ή ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές το οποίο οφείλεται στην έλλειψη διηλεκτρικού που συναντάμε στα υπόλοιπα είδη πυκνωτών.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ μπαταριών και υπερπυκνωτών είναι ο τρόπος με τον οποίο αποθηκεύουν ενέργεια. Οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια εντός χημικών ουσιών που έχουν την ικανότητα να δίνουν φορτίο όταν αντιδράσουν με τα ηλεκτρόδια, ενώ οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν φορτίο απευθείας στην εσωτερική τους επιφάνεια όπως περίπου συμβαίνει και σε έναν ηλεκτροστατικό πυκνωτή. Γι' αυτό ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών περιορίζεται από την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων. Η εξάρτηση των μπαταριών από τη θερμοκρασία οφείλεται επίσης στην εξάρτηση των χημικών αντιδράσεων από αυτήν κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στους υπερπυκνωτές.
Επιπρόσθετα η εξάρτηση από τις χημικές αντιδράσεις κάνει δύσκολο τον ακριβή καθορισμό του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας, ενώ αντίθετα σε έναν υπερπυκνωτή όπου η τάση μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα είναι πολύ ευκολότερο να καθοριστεί το επίπεδο φόρτισης. Το μειονέκτημα εδώ είναι πως ένας υπερπυκνωτής χρειάζεται υποστήριξη από ηλεκτρονικά κυκλώματα που εξάγουν την ενέργεια από τον υπερπυκνωτή δίνοντας ταυτόχρονα σταθερή τάση στην έξοδό τους.

Μια μεγάλης πρακτικής σημασίας διαφορά μεταξύ μπαταριών και υπερπυκνωτών είναι ο χρόνος ζωής των υπερπυκνωτών που υπερτερεί σημαντικά σε σχέση με τις μπαταρίες. Καθότι στις μπαταρίες συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις, είναι εύκολο να αλλάξει η αναλογία υγρών και ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα τον περιορισμό των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης της μπαταρίας. Ακόμα και σε μια καινούρια μπαταρία είναι δύσκολο να επιτευχθούν αποδόσεις ανάλογες των υπερπυκνωτών, 95% ή μεγαλύτερες.

Έχουν κατασκευαστεί υπερπυκνωτές με χωρητικότητα ίση με 5000F και η μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα που έχει εμφανιστεί ως σήμερα σε εμπορικό προιόν είναι 0.03kWh/kg. Ενδιαφέρον είναι το παρακάτω σχεδιάγραμμα που δείχνει πως οι υπερπυκνωτές γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ απλών πυκνωτών και κλασσικών μπαταριών, με τους υπερπυκνωτές να φιλοδοξούν στο μέλλον να καλύψουν ακόμα



Εικόνα 73 - Ισχύς προς Ενέργεια για μέσα αποθήκευσης ενέργειας

Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Υπερπυκνωτή

Η διαδρομή στον νανοπόρο ενός υπερπυκνωτή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία διαδρομή με άπειρα μικρά κομμάτια RC όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, γεγονός που εξηγεί την καθυστέρηση του υπερπυκνωτή σε σχέση με τους κλασσικούς πυκνωτές αλλά και την εν σειρά αντίσταση που παρουσιάζει.



Εικόνα 74 - Ιδεαλιστικός Νανοπόρος Υπερπυκνωτή

Επομένως έχουμε μια ηλεκτρική αντίσταση R_s εν σειρά που οφείλεται στις ωμικές αντιστάσεις των ιόντων και των αγωγών με την αντίσταση των ιόντων να είναι πολύ μεγαλύτερη.

Έχουμε μια παράλληλη αντίσταση R_p εξαιτίας του ρεύματος διαρροής μεταξύ των δύο στρωμάτων.

Επίσης εμφανίζεται και μια παρασιτική αυτεπαγωγή *L* λόγω της εσωτερικής γεωμετρίας του.

Άρα έχουμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός υπερπυκνωτή όπως φαίνεται στο παρακάτω κύκλωμα (22).



Εικόνα 75 - Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Υπερπυκνωτή

Για υψηλή ενεργειακή απόδοση θέλουμε πολύ μικρό R_s . Η αντίσταση R_p παίζει ρόλο σε πολύ μικρές συχνότητες της τάξεως του mHz και οφείλεται για το χρόνο αυτό-εκφόρτισης του υπερπυκνωτή, $\tau = R_p * C$.

Η χωρητικότητα αποτελείται από ένα σταθερό παράγοντα C_0 και από έναν παράγοντα C_V που εξαρτάται από την τάση μέσω ενός συντελεστή K_V . Η συνολική χωρητικότητα σε τάση δίνεται από τη σχέση:

$$C = C_0 + C_V = C_0 + K_V * V \Rightarrow$$

$$\frac{Q}{V} = C_0 + K_V * V \Rightarrow$$

$$Q = C_0 * V + K_V * V^2$$

Γενικώς για το ρεύμα ισχύει η σχέση $I = \frac{dQ}{dt}$

Οπότε το ρεύμα σε σχέση με το χρόνο θα δίνεται από τη σχέση

$$I(t) = C_0 * \frac{dV}{dt} + K_V * 2 * V * \frac{dV}{dt}$$

Επομένως η ισχύς προκύπτει να είναι

$$P(t) = C_0 * V * \frac{dV}{dt} + 2 * K_V * V^2 * \frac{dV}{dt}$$

Ολοκληρώνοντας ως προς χρόνο παίρνουμε τελικώς την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον υπερπυκνωτή

$$E = \frac{1}{2}C_0 * V^2 + \frac{2}{3} * K_V * |V|^3$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως για μια συγκεκριμένη ποσότητα τάσης η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον υπερπυκνωτή είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που προκύπτει με τις εξισώσεις για τους κλασσικούς πυκνωτές εκφράζοντας την ικανότητα του υπερπυκνωτή να αποθηκεύει μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Αν η συχνότητα λειτουργίας του πυκνωτή είναι μεγάλη τότε παρατηρούμε εξάρτηση της χωρητικότητας και της εν σειρά αντίστασης από τη συχνότητα και χρειαζόμαστε πιο σύνθετα μοντέλα για να αναπαραστήσουμε τον υπερπυκνωτή κάτι που δεν θα χρειαστούμε στο δικό μας σύστημα.

Όπως αναφέρθηκε το πιο κρίσιμο σημείο του κυκλώματος στο οποίο θα χρειαστεί να παρεμβάλλουμε υπερπυκνωτές είναι η σύνδεση των κυψελών καυσίμου με αργή χρονική απόκριση με το φορτίο και η τοπολογία θα μοιάζει με την παρακάτω.



Εικόνα 76 - Τοπολογία Σύνδεσης Κυψελών Καυσίμου με Συστοιχίες Υπερπυκνωτών

Στο δικό μας συνολικό μοντέλο προσεγγίζουμε ενεργειακά την εξομοίωση του συστήματος γι' αυτό και δεν θα συμπεριλάβουμε τους υπερπυκνωτές οι οποίοι παίζουν ρόλο μόνο σε φαινόμενα μεταβατικών καταστάσεων.

Κεφάλαιο 7

Υβριδικό Σύστημα Φ/Β και Κυψελών Καυσίμου

Στη Δονούσα έως σήμερα δεν έχουν γίνει παρά ελάχιστες προσπάθειες για χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας και η μόνη μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε ντιζελογεννήτριες οι οποίες έχουν μικρά κόστη επένδυσης αλλά και μεγάλα λειτουργικά έξοδα, ειδικά στην περίπτωση μονάδων μικρής ισχύος. Ενώ επιβάλλεται να αναλογιστούμε πως σε μικρές κοινότητες ανθρώπων όπως και στη Δονούσα οι απαιτήσεις ισχύος είναι χαμηλές για μεγάλα χρονικά διαστήματα ενώ εμφανίζουν απότομες αυξομειώσεις για περιόδους μιας ημέρας ή λιγότερο ακολουθώντας τους ρυθμούς ζωής του νησιού. Επομένως είναι συχνό το φαινόμενο να υπερδιαστασιολογείται μια εγκατάσταση ντιζελογεννητριών εγκαθιστώντας μονάδες που να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε αυτά τα μέγιστα του φορτίου. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει μεγάλη επιβάρυνση τόσο στην απόδοση, καθώς οι ντιζελογεννήτριες θα πρέπει να λειτουργούν σε μικρή ισχύ και συνεπώς και μικρή απόδοση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αλλά και στα έξοδα

Αντίθετα μέσω ενός υβριδικού συστήματος μπορούμε να συνδυάσουμε διαφορετικές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας που προσφέρονται τοπικά στην εκάστοτε περιοχή. Στη Δονούσα καθότι δεν υπάρχει τοπική εξαγωγή φυσικού αερίου ή άλλων ανανεώσιμων ή μη πηγών ενέργειας και το πετρέλαιο πρέπει να μεταφερθεί στο νησί από μακριά, προσδίδοντας μιας εξάρτηση από τα μέσα μεταφοράς, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μας προσφέρει την ενεργειακή ανεξαρτησία που επιζητούμε. Όταν όμως το ενεργειακό σύστημα βασίζεται εξολοκλήρου στην ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γεννιέται το πρόβλημα πως οι ενεργειακές απαιτήσεις των χρηστών δεν ακολουθούν το ίδιο πρότυπο. Επομένως γίνεται φανερό πως ένα αποθηκευτικό σύστημα πρέπει να τοποθετηθεί μεταξύ ή παράλληλα με το σύστημα παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος, εδώ έχουμε τη αποθήκευση σε μορφή υδρογόνου.

Παρουσίαση & Παραδοχές

Η ανάλυση των επιμέρους μοντέλων ολοκληρώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και είμαστε πλέον έτοιμοι να συνθέσουμε το δικό μας αυτόνομο σύστημα παραγωγής «πράσινης» ενέργειας. σύμφωνα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του φορτίου της Δονούσας. Στην εικόνα της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα του μοντέλο όπως αυτό υλοποιήθηκε στο Simulink της Matlab.



Εικόνα 77 - Σχεδιάγραμμα Simulink Υβριδικού Συστήματος

Με μια πρώτη ματιά στο μοντέλο βλέπουμε τα εξής:

- Οι πληροφορίες της θερμοκρασίας επηρεάζουν σε <u>πραγματικό χρόνο</u> μόνο το μοντέλο του φωτοβολταικού συστήματος και της δεξαμενής υδρογόνου.
- Το συνολικό φορτίο προκύπτει από το άθροισμα της ισχύος των χρηστών και του συμπιεστή του υδρογόνου
- Η παραγωγή υδρογόνου από τον electrolyzer συνδέεται στον συμπιεστή και στη δεξαμενή υδρογόνου μέσω ελέγχου από ένα μπλοκ «διακόπτη».
- Η κατανάλωση υδρογόνου από τις κυψέλες καυσίμου συνδέεται στην δεξαμενή υδρογόνου επίσης μέσω ελέγχου από ένα μπλοκ «διακόπτη».
- Η πίεση στην οποία ζητάμε να λειτουργήσει ο συμπιεστής εξισώνεται με την πίεση του αέριου υδρογόνου κάθε χρονική στιγμή.

Αυτά που φαίνονται να λείπουν από το μοντέλο είναι οι μετατροπείς dc/dc, οι υπερπυκνωτές και άλλα παρασιτικά φορτία που θα υπήρχαν σε μια πραγματική υλοποίηση του συστήματος.

Ανάμεσα από τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας μόνο ο αντιστροφέας μοντελοποιείται ενεργειακά βάση μιας καμπύλης απόδοσης ενώ δεν αφιερώνεται αποκλειστικό μπλοκ για τους μετατροπείς dc/dc οι οποίοι μοντελοποιούνται ως ένα απλό κέρδος στην ενέργεια που είτε παράγεται από το φωτοβολταικό σύστημα και τις κυψέλες καυσίμου είτε καταναλώνεται από τον electrolyzer.

Το σύστημα εκτός από το φορτίο του χρήστη περιλαμβάνει και πολλά παρασιτικά φορτία. Για παράδειγμα η διαχείριση του νερού εισόδου και εξόδου τόσο στον electrolyzer όσο και στις κυψέλες καυσίμου καταναλώνει ισχύ στην αντλία. Επίσης είναι αναγκαίο ο electrolyzer να λειτουργεί σε κατάσταση αναμονής όταν δεν τον χρειαζόμαστε, καταναλώνοντας ένα πολύ μικρό ρεύμα, τουλάχιστον για τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον οι αισθητήρες καταγραφής μετρήσεων ή οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές που χρειάζονται για τον έλεγχο του συστήματος αποτελούν ένα πρόσθετο φορτίο. Για τις ανάγκες της αυτονομίας του συστήματος θα έπρεπε να προσθέσουμε μερικές μπαταρίες ή υπερπυκνωτές ως εφεδρική πηγή ενέργειας που να μας δίνουν τη δυνατότητα για εκκίνηση του συστήματος και λειτουργία των συσκευών μετρήσεων σε περίπτωση βλάβης. Αυτά τα φορτία <u>δεν</u> εξομοιώνονται. Η συμπερίληψή τους θα τροποποιούσε σε ένα μικρό βαθμό τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων εξόδου, αλλά δεν θα έπαιζε κανένα ρόλο στην συνολική

Το μόνο παρασιτικό φορτίο που περιλαμβάνουμε είναι ο συμπιεστής διότι καταναλώνει σημαντικά ποσά ενέργειας για την συμπίεση του αέριου υδρογόνου που αξίζει να καταγραφούν. Επίσης να παρατηρήσουμε πως ο μηχανισμός του συμπιεστή λειτουργεί με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα γι' αυτό και το φορτίο του προστίθεται άμεσα με το φορτίο των χρηστών πριν αυτό διέλθει από το μοντέλο του αντιστροφέα.

Επίσης σε πραγματικές συνθήκες υπάρχουν αναπόφευκτα κάποιες μικρές απώλειες σε υδρογόνο που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν τόσο στη δεξαμενή όσο και εντός των κυψελών καυσίμου. Το σύστημα του υδρογόνου θεωρήθηκε πως βασίζεται σε υψηλής ποιότητας κατασκευή και αντιστοίχως οι απώλειες κρίθηκαν αμελητέες και <u>δεν</u> μοντελοποιούνται.

Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να μελετήσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος σε μεγάλες χρονικές περιόδους βασιζόμενο σε μέσες τιμές και αποδόσεις. Οι απότομες αυξομειώσεις της ισχύος και η ακόλουθη χρήση των υπερπυκνωτών για την εξομάλυνση αυτών των μεταβατικών φαινομένων δεν συμπεριλαμβάνονται σε αυτό το μοντέλο.

Έλεγχος Ενεργειακών Ροών

Αν και όλα τα μοντέλα τοποθετήθηκαν σε ένα κοινό διάγραμμα και ενώθηκαν μεταξύ τους αυτό δεν αρκεί για την βέλτιστη και αρμονική λειτουργία του συστήματος. Η παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει να γίνεται ελεγχόμενα βάσει ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει η συνάρτηση "director" που βλέπουμε στο κέντρο του διαγράμματος του μοντέλου.

Η συνάρτηση director δέχεται πληροφορίες σε σχέση με την παραγωγή ισχύος από το φωτοβολταικό σύστημα, το τρέχων φορτίο, τα όρια λειτουργίας των ηλεκτροχημικών συσκευών και για τη πίεση της δεξαμενής υδρογόνου. Βάσει αυτών των πληροφοριών παίρνει αποφάσεις για την λειτουργία του electrolyzer και των κυψελών καυσίμου. Συγκεκριμένα ελέγχει αν ο electrolyzer θα βρίσκεται σε λειτουργία και το ποσό της ενέργειας που θα δοθεί προς παραγωγή υδρογόνου. Επίσης για τις κυψέλες καυσίμου ελέγχεται η λειτουργία τους και η ποσότητα ισχύος που θα ζητηθεί από αυτές.

Επιπλέον πέρα από ελεγκτικό ρόλο η συνάρτηση "director" μας πληροφορεί για την κατάσταση της δεξαμενής του υδρογόνου και την διακοπή ρεύματος. Αν η δεξαμενή υδρογόνου είναι γεμάτη τότε απαγορεύεται να παράγουμε επιπλέον υδρογόνο διότι δεν θα μπορούσαμε να το εκμεταλλευτούμε κάπως διαφορετικά. Αντιθέτως αν η δεξαμενή υδρογόνου είναι άδεια οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν καύσιμο να λειτουργήσουν και βασιζόμαστε στην φωτοβολταική ενέργεια να καλύψει τις ανάγκες ισχύος.

Είναι απολύτως αναγκαίο το σύστημα μας να λειτουργεί ως μια αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι ζητούμενο σε μια πλήρη εξομοίωση η πληροφορία για την διακοπή ρεύματος να εμφανίζεται ενεργή πολύ σπάνια ή καθόλου.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα ροών στο οποίο φαίνεται η λογική ελέγχου των ενεργειακών ροών που ακολουθείται μέσα στον κώδικα Matlab της συνάρτησης director.



Εικόνα 78 - Διάγραμμα Ενεργειακών Ροών

Διαστασιολόγηση & Απόδοση

Ο τρόπος συμπεριφοράς του φορτίου των χρηστών του συστήματος, στην προκειμένη περίπτωση ολόκληρου του νησιού της Δονούσας, επιβάλλει ανάγκες στις αναλογίες των επιμέρους συστημάτων. Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι μέσω του συγκεκριμένου σχεδιασμού που έχουμε επιλέξει να επιτύχουμε ένα βέλτιστο συνολικά σύστημα με σωστές επιλογές του όγκου της ισχύος που θα αναλογεί στα επιμέρους στοιχεία του συστήματος. Η σωστή διαστασιολόγηση μας δίνει εγγυήσεις για την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος χωρίς να υπερβάλλει σε επενδύσεις μεγάλης ποσότητας εξοπλισμού.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος θα βασιστεί σε ένα συνολικό συντελεστή απόδοσης που θα προκύψει από την εξομοίωση του μοντέλου για έναν ολόκληρο

χρόνο. Όμως για να εκτελέσουμε την πρώτη εξομοίωση θα πρέπει να είμαστε σε θέση να κάνουμε μια σωστή εκτίμηση για το μέγεθος ισχύος κάθε επιμέρους συστήματος του μοντέλου ή διαφορετικά θα πρέπει να κάνουμε εκτίμηση για τον συνολικό συντελεστή. Αμέσως βλέπουμε τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ σωστής διαστασιολόγησης και εξαγωγής του συντελεστή απόδοσης του συστήματος. Παρακάτω θα αναλύσουμε τη διαδικασία που ακολουθούμε για το καθένα χωριστά και θα αναφέρουμε πως αλληλοσυνδέονται.

Διαστασιολόγηση

Από τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας θα υπολογίσουμε την ημερήσια ενέργεια για όλες τις ημέρες του έτους και θα βρούμε το μέσο όρο όλων των ημερών για να έχουμε το προφίλ μιας τυπικής μέρας του έτους. Ανάλογους υπολογισμούς θα εκτελέσουμε και με τα δεδομένα του φορτίου. Εδώ υποθέτουμε πως γνωρίζουμε τον συντελεστή που εκφράζει την απόδοση ολόκληρου του συστήματος.

Μπορούμε λοιπόν να πούμε πως η ηλιακή ενέργεια διερχόμενη μέσα από σύστημα υποβαθμίζεται σύμφωνα με το συντελεστή του συστήματος και θα πρέπει να εξισώνεται με τη ζήτηση ενέργειας από το φορτίο. Εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία είναι εκφρασμένη σε πυκνότητα ενέργειας (Wh/m²) και το φορτίο είναι εκφρασμένο σε καθαρή ενέργεια (Wh) υπολογίζουμε την ενεργό επιφάνεια του φωτοβολταικού συστήματος που θα χρειαστούμε.

$$A_{PV} = \frac{E_{Ld}}{n_{sys} * E_{Sd}}$$

 A_{PV} : Συνολική επιφάνεια φωτοβολταικών στοιχείων (m^2) E_{Ld} : Μέση ημερήσια ενέργεια καταναλισκόμενη από το φορτίο (Wh) E_{Sd} : Μέση ημερήσια πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας $\left(\frac{Wh}{m^2}\right)$ n_{sys} : Συνολική απόδοση του συστήματος

Επόμενο βήμα είναι να βρούμε την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταικού συστήματος αντίστοιχης έκτασης.

Γνωρίζουμε πως η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταικών συστημάτων μετριέται σε κατάσταση STC (1000W/m² και 25°C). Η ισχύς της ακτινοβολίας μέσα από φωτοβολταικό απόδοσης *n* μας δίνει ισχύ εξόδου 1000*n W/m² και πολλαπλασιάζοντας με την έκταση της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταικού συστήματος που πρέπει να εγκαταστήσουμε.

$$P_{PV_{STC}} = (1000 W/m^2) * n_{PV_{STC}} * A_{PV}$$

 $P_{PV_{STC}}$: Ονομαστική ισχύς του φωτοβολταικού συστήματος (W) $n_{PV_{STC}}$: Απόδοση του φωτοβολταικού συστήματος σε STC A_{PV} : Συνολική επιφάνεια φωτοβολταικών στοιχείων (m^2)

Στη συνέχεια θέλουμε να διαστασιολογήσουμε τον electrolyzer. Στόχος εδώ είναι ακόμα και στη μεγαλύτερη διαφορά ισχύος μεταξύ φωτοβολταικού συστήματος και φορτίου να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια για να παράγουμε υδρογόνο.

Από τις ωριαίες τιμές του φορτίου υπολογίζουμε τη μέση τιμή κάθε ημέρας και η ημέρα με τη μικρότερη ζήτηση ορίζεται ως $P_{L_{min}}$.

Για να βρούμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να παράγει το φωτοβολταικό σύστημα στη συγκεκριμένη τοποθεσία της Δονούσας θα πρέπει να εξομοιώσουμε το μοντέλο του φωτοβολταικού συστήματος για έναν ολόκληρο χρόνο. Από τις τιμές που λαμβάνουμε κρατάμε μόνο αυτές που αντιστοιχούν στους μήνες που αναμένεται μεγαλύτερη περίσσεια ισχύος, δηλαδή από Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο. Ο μέσος όρος των ημερήσιων μεγίστων αυτής της περιόδου ορίζεται ως *P*_{PVL,max}. Οπότε η ονομαστική ισχύς του electrolyzer δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$P_{el_{rated}} = P_{PV_{L,max}} - P_{L_{min}}$$

Για την περίπτωση των κυψελών καυσίμου εξετάζουμε και πάλι το φορτίο όλου του χρόνου υπολογίζοντας τη μέση τιμή ανά ημέρα για όλες τις ημέρες του έτους και επιλέγουμε την ημέρα με τη μεγαλύτερη τιμή φορτίου. Εγκαθιστώντας συστοιχίες κυψελών καυσίμου με συνολικά ισάξια ονομαστική ισχύ βεβαιώνεται πως οι κυψέλες καυσίμου θα ανταπεξέλθουν απέναντι σε μεγάλη ζητήσου του φορτίο.

$$P_{fcs_{rated}} = P_{L_{max}}$$

Η παραπάνω σχέση είναι ικανοποιητική σε περίπτωση που οι μεγαλύτερες τιμές φορτίων συναντώνται την ημέρα και όχι τη νύχτα. Αν οι τοπικές συνήθειες προκαλούν μεγαλύτερη ή ισάξια κατανάλωση ενέργειας την νύχτα όσο και την ημέρα θα χρειαστεί να διαστασιολογήσουμε σε ακόμα μεγαλύτερη ισχύ το σύστημα κυψελών καυσίμου.

Ο αντιστροφέας που θα συνδέσουμε στο σύστημα συνήθως επιλέγεται να έχει ονομαστική ισχύ εξόδου ίση με την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταικού συστήματος ώστε να μπορεί να βρίσκεται εντός ορίων σε όλες τις πιθανές συνθήκες ακτινοβολίας του ηλίου.

Όντως αν βρισκόμαστε σε μία περιοχή όπου μια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας των 1000W/m², κοντά στις STC τιμές, εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα τότε η παραπάνω λογική δίνει έναν αποδοτικό συνδυασμό. Αν επιστρέψουμε όμως στο κεφάλαιο 1 και θυμηθούμε το ιστόγραμμα της ηλιακής ακτινοβολίας θα παρατηρήσουμε πως είναι μηδενική η πιθανότητα εμφάνισης ακτινοβολιών πάνω από 900W/m² και ταυτόχρονα όσο μικρότερη είναι η ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα εμφάνισής της. Συνεπώς το φωτοβολταικό σύστημα δεν θα λειτουργήσει ποτέ σε τιμές ονομαστικής ισχύος και είναι ανώφελο να έχουμε έναν υπερδιαστασιολογημένο αντιστροφέα όπου όχι μόνο θα αυξάνει το κόστος της επένδυσης αλλά και θα υποβαθμίζει το συντελεστή συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Από την άλλη πλευρά η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα εξαρτάται και από τις απαιτήσεις σε ισχύ του φορτίου. Εξετάζοντας τις μέσες ωριαίες τιμές που έχουμε για την περιοχή της Δονούσας προκύπτει μια σχετικά πολύ υψηλή τιμή στις 29 Ιουλίου. Με σκοπό να μπορεί ο αντιστροφέας να ανταπεξέλθει τέτοιες υψηλές τιμές ισχύος για σημαντικά χρονικά διαστήματα θέτει ένα κάτω όριο για την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα. Με άλλα λόγια δεν μπορούμε να συμβιβαστούμε με μικρότερη τιμή ισχύος ακόμα και αν αυτό έδινε αποδοτικότερο συνολικά σύστημα καθώς τότε θα βεβαιώναμε την διακοπή ρεύματος την εν λόγω ημερομηνία.

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του αντιστροφέα μπορούμε να του ορίσουμε μία τιμή ονομαστικής ισχύος από την οποία θα προκύψει με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και η ανάλογη καμπύλη απόδοσης. Εισάγουμε στο μοντέλο του αντιστροφέα τις τιμές του φορτίου της Δονούσας για όλο το έτος παίρνοντας στην έξοδο τις αντίστοιχες προσαυξημένες τιμές ισχύος λόγω των απωλειών του αντιστροφέα. Ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα στο πεδίο του χρόνου έχουμε την συνολική ενέργεια του φορτίου προς την συνολική ενέργεια που απαιτεί ο αντιστροφέας. Από τη διαίρεση αυτή προκύπτει η απόδοση του αντιστροφέα για την συγκεκριμένη τιμή ονομαστικής ισχύος. Επαναλαμβάνοντας την εξομοίωση για τιμές της ονομαστικής ισχύος από πολύ μικρές μέχρι την ονομαστική ισχύ του φωτοβολταικού συστήματος προκύπτει το γράφημα της εικόνας 79.

Όπως βλέπουμε ο αντιστροφέας με ονομαστική ισχύς 326kW επιτυγχάνει μια εξαιρετική μέση απόδοση για το διάστημα ενός έτους ακόμα και αν για κάποιες ωριαίες τιμές του φορτίου μεγαλύτερες της ονομαστικής ισχύς της απορρίπτει με αποτέλεσμα εκεί στιγμιαία η απόδοσή του να είναι μηδέν. Παρατηρούμε λοιπόν πως για μεγαλύτερες τιμές ισχύος η καμπύλη είναι φθίνουσα. Ενώ για τιμές ισχύος μικρότερες γρήγορα ο αντιστροφέας απορρίπτει όλο και περισσότερα φορτία μέχρι να μειωθεί η απόδοσή της εξομοίωσης στο μηδέν.



Εικόνα 79 - Μέση Απόδοση Αντιστροφέα μετά από εξομοίωση για 1 χρόνο με φορτία Δονούσας

Εμείς θα αναγκαστούμε να εγκαταστήσουμε έναν αντιστροφέα με ονομαστική ισχύ τα 1790kW ο οποίος είχε μια μέση απόδοση για τη διάρκεια ενός έτους ίση με 83.12%. Για τιμές μεγαλύτερες που προσεγγίζουν την ισχύ του φωτοβολταικού συστήματος έχουμε ακόμα μικρότερη απόδοση και λανθασμένη υπερδιαστασιολόγηση του αντιστροφέα.

Η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου αν και δεν παίζει κανένα ρόλο στην συνολική απόδοση του συστήματος επηρεάζει την αυτονομία αυτού. Το μέγεθος και το κόστος κατασκευής της δεξαμενής εξαρτάται από τις διάφορες λύσεις αποθήκευσης του υδρογόνου. Όποια λύση και αν διαλέξουμε όμως, η απαιτούμενη χωρητικότητα σε μάζα είναι η ίδια. Επομένως αρκεί να υπολογίσουμε τη μέγιστη ποσότητα υδρογόνου που ενδέχεται να χρειαστούμε.

Εφόσον η διαστασιολόγηση του συστήματος είναι σταθερή συνεπάγεται πως στη διάρκεια ενός έτους το σύστημα θα μπορεί να αποδώσει την απαιτούμενη ενέργεια. Σε κάποιους μήνες του έτους λόγω κλιματολογικών συνθηκών θα υπάρχει γενικώς περίσσεια ενέργειας και σε άλλους μήνες θα υπάρχει έλλειμμα. Υπολογίζοντας τη μέση πυκνότητα ενέργειας ανά μήνα και μετατοπίζοντας την αρχή των αξόνων στη μέση ετήσια πυκνότητα ενέργειας μπορούμε να αναπαράγουμε το γράφημα της εικόνας 7 του κεφαλαίου 1 ως εξής.





Τους έξι θερινούς μήνες του χρόνου η ενέργεια του ηλίου είναι μεγαλύτερη από τη μέση μηνιαία ενέργεια, ενώ για τους χειμερινούς μήνες συμβαίνει το αντίθετο. Άρα αν κάνουμε την απλοική παραδοχή πως όλη η ενέργεια που παράγεται κατά τους θερινούς μήνες πρέπει να αποθηκευτεί σε υδρογόνο για να καλύψει το έλλειμμα ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες έχουμε την ποσότητα ενέργειας που θέλουμε να αντιστοιχήσουμε σε υδρογόνο. Η ενέργεια του ηλίου πριν μετατραπεί σε υδρογόνο διέρχεται από τρία συστήματα, το φωτοβολταικό σύστημα, τον dc/dc buck μετατροπέα και τον electrolyzer με τους αντίστοιχους ονομαστικούς συντελεστές μετατροπής. Τελικώς η απαιτούμενη μάζα υδρογόνου προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

 $H_2Storage = E_{def} * A_{PV} * n_{PV} * n_{PCU_{el}} * n_{el} * MassPerJoule_{H_2}$

όπου

H₂Storage: Μάζα υδρογόνου που θέλουμε να αποθηκεύσουμε (Kg)

 E_{def} : Συνολικό έλλειμμα ενέργειας κατά τους χειρινούς μήνες (ανά m²)

A_{PV}: Συνολική επιφάνεια φωτοβολταικού συστήματος

 n_{PV} : Απόδοση φωτοβολταικού συστήματος

122

 $n_{PCU_{el}}$: Απόδοση dc/dc converter που συνδέει Φ/Β σύστημα και electrolyzer

 n_{el} : Απόδοση του electrolyzer

*MassPerJoule_H*₂: Μάζα υδρογόνου που αντιστοιχεί σε 1 joule της χημικής αντίδρασης υδρογόνου και οξυγόνου για το σχηματισμό νερού σε κανονικές συνθήκες.

Διαιρώντας το αποτέλεσμα με τη μέγιστη μάζα υδρογόνου ανά δεξαμενή έχουμε τον αριθμό των δεξαμενών που θα εγκαταστήσουμε.

Συνολική Απόδοση Συστήματος

Έχοντας ορίσει τα αρχικά μεγέθη για τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος μπορούμε μέσω της εξομοίωσης να καταγράψουμε μετρήσεις που θα μας δώσουν τον συνολικό συντελεστή απόδοσης του συστήματος. Ο συνολικός συντελεστής απόδοσης δίνεται από την ωφέλιμη ενέργεια του φωτοβολταικού συστήματος προς την ηλιακή ενέργεια για το χρονικό διάστημα μιας πλήρης εξομοίωσης.

$$n_{sys} = \frac{E_{PV_{use}}}{E_s * A_{PV}}$$

 $E_{PV_{use}}$: Η συνολική ωφέλιμη ενέργεια του φωτοβολταικού συστήματος (Joules) E_s : Η συνολική ενέργεια του ηλίου ανά τετραγωνικό μέτρο (Joules/m²) A_{PV} : Η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταικών πλαισίων (m²)

Η ωφέλιμη ενέργεια του φωτοβολταικού συστήματος είναι ίση με την συνολικά ωφέλιμη ενέργεια πολλαπλασιαζόμενη με το κλάσμα της ενέργειας που αντιστοιχεί στο φωτοβολταικό σύστημα. Το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας το παράγουν οι κυψέλες καυσίμου. Με συνέπεια να ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$E_{PV_{use}} = F_{in_{PV}} * E_{use}$$

 $F_{in_{PV}}$: το κλάσμα της συνολικά παραγόμενης ενέργειας που αποδίδεται στο φωτοβολταικό σύστημα

 $E_{use}\,$: Η συνολικά ωφέλιμη ενέργεια που παράγεται είτε σε μορφή υδρογόνου είτε σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας

Η συνολικά ωφέλιμη ενεργεία είναι η ενέργεια που αποθηκεύεται ως υδρογόνο μέσω του electrolyzer συν την ενέργεια που αποδίδεται στους χρήστες και δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$E_{use} = E_L + E_{ELN}$$

 E_L : ενέργεια που καταναλώνεται από τους χρήστες του ηλεκτρικού δικτύου E_{ELN} : Η ενέργεια που αποθηκεύεται ως υδρογόνο στη δεξαμενή

Γνωρίζοντας ήδη την ισχύ του φορτίου κάθε χρονική στιγμή, μπορούμε να ολοκληρώσουμε στο χρόνο για μια πλήρη εξομοίωση και να λάβουμε τη συνολική ενέργεια που αποδόθηκε στους χρήστες του δικτύου.

Αν η ποσότητα του υδρογόνου που παρήγαγε ο electrolyzer υπερείχε της ποσότητας υδρογόνου που καταναλώθηκε από τις κυψέλες καυσίμου μπορούμε να πούμε πως η διαφορά των δύο αντιστοιχεί σε μια ωφέλιμη ποσότητα υδρογόνου. Μπορούμε να αντιστοιχήσουμε την ποσότητα υδρογόνου σε ενέργεια βάσει της ενθαλπίας της χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες. Όμως επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη πως ένα μέρος αυτής της ενέργειας σπαταλήθηκε από τον electrolyzer και από τον buck μετατροπέα που τον συνοδεύει. Τελικώς η ωφέλιμη ενέργεια σε υδρογόνο θα δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$E_{ELN} = JoulesPerKgH2 * \left(H_{2_{prod}} - H_{2_{cons}}\right) * n_{el} * n_{PCU_{el}}$$

JoulesPerKgH2: σταθερά που δηλώνει το ποσό της ενέργειας που αντιστοιχεί σε ένα 1Kg υδρογόνου αν αυτό αντιδράσει με το οξυγόνο για να σχηματίσει νερό σε κανονικές συνθήκες

 $H_{2_{prod}}$: συνολική μάζα του υδρογόνου που παρήγαγε ο electrolyzer (Kg) $H_{2_{cons}}$: συνολική μάζα του υδρογόνου που κατανάλωσαν οι κυψέλες καυσίμου (Kg) n_{el} : απόδοση του electrolyzer όπως προέκυψε από την εξομοίωση $n_{PCU_{el}}$: απόδοση buck μετατροπέα του electrolyzer

Να σημειώσουμε πως η ενέργεια E_{ELN} είναι ίση με μηδέν αν το υδρογόνο που παρήγαγε ο electrolyzer είναι μικρότερο σε ποσότητα από το υδρογόνου που καταναλώθηκε. Αυτό εξηγείται πως συνολικά στην εξομοίωση δεν είχαμε αποθήκευση σε υδρογόνο αλλά εκμεταλλευθήκαμε προαποθηκευμένο υδρογόνο για να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια από τις κυψέλες καυσίμου.

Το κλάσμα της συνολικά παραγόμενης ενέργειας από το φωτοβολταικό σύστημα ισούται με την ποσότητα ενέργειας που παρήγαγε αυτούσιο το φωτοβολταικό σύστημα προς την συνολική ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη και τα υπόλοιπα στοιχεία παραγωγής ενέργειας. Εδώ το μόνο ξεχωριστό μέσο παραγωγής ενέργειας είναι οι κυψέλες καυσίμου και προκύπτει η παρακάτω σχέση.

$$F_{in_{PV}} = \frac{E_{PV_{out}}}{E_{PV_{out}} + E_{FCN}}$$

 $E_{PV_{out}}$: η συνολική ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταικό σύστημα E_{FCN} : η ποσότητα της ενέργειας που εκμεταλλεύονται οι κυψέλες καυσίμου από το αποθηκευμένο υδρογόνο Το ποσό του υδρογόνου που εκμεταλλεύθηκαν οι κυψέλες καυσίμου δίνεται από τη διαφορά της ποσότητας υδρογόνου που καταναλώθηκε με την ποσότητα υδρογόνου που παρήγαγε ο electrolyzer. Παρομοίως αντιστοιχίζουμε την ποσότητα υδρογόνου σε ενέργεια βάσει της ενθαλπίας της χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου σε κανονικές συνθήκες. Η ενέργεια αυτή υποβιβάζεται από την απόδοση των κυψελών καυσίμου και την απόδοση του boost μετατροπέα και προκύπτει πως η ενέργεια που αποδόθηκε από τις κυψέλες καυσίμου δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$E_{FCN} = JoulesPerKgH2 * (H_{2_{cons}} - H_{2_{prod}}) * n_{fc} * n_{PCU_{fc}}$$

 $H_{2_{cons}}$: συνολική μάζα του υδρογόνου που κατανάλωσαν οι κυψέλες καυσίμου (Kg) $H_{2_{prod}}$: συνολική μάζα του υδρογόνου που παρήγαγε ο electrolyzer (Kg) n_{fc} : απόδοση των κυψελών καυσίμου όπως προκύπτει από την εξομοίωση. $n_{PCU_{fc}}$: απόδοση boost μετατροπέα των κυψελών καυσίμου

Να σημειώσουμε πως η ενέργεια E_{FCN} είναι ίση με μηδέν αν το υδρογόνο που καταναλώθηκε από τις κυψέλες καυσίμου είναι μικρότερο από το υδρογόνο που παράχθηκε. Αυτό εξηγείται πως συνολικά στην εξομοίωση δόθηκε ενέργεια στους χρήστες του δικτύου και αποθηκεύθηκε ενέργεια σε μορφή υδρογόνου η οποία αποδίδεται όλη στο φωτοβολταικό σύστημα.

Αποτελέσματα

Όπως γίνεται φανερό από την ανωτέρω ανάλυση της διαστασιολόγησης και της συνολικής απόδοσης υπάρχει μια εξάρτηση μεταξύ των δύο. Για να διαστασιολογήσουμε το σύστημα είναι απαραίτητο να έχουμε προηγουμένως υπολογίσει τον συνολικό συντελεστή απόδοσης. Από την άλλη μεριά για να υπολογίσουμε το συνολικό συντελεστή απόδοσης πρέπει να εξάγουμε από μία πλήρη εξομοίωση τα εξής στοιχεία:

- Ποσότητα Υδρογόνου που παράχθηκε
- Ποσότητα Υδρογόνου που καταναλώθηκε
- Ενεργεία που ζητήθηκε από τους χρήστες του δικτύου
- Ενέργεια παράχθηκε από το φωτοβολταικό σύστημα
- Ηλιακή Ενέργεια που προσέλαβε το φωτοβολταικό σύστημα
- Μέση απόδοση του electrolyzer
- Μέση απόδοση των κυψελών καυσίμου

Αρχίζοντας από μια αρχικά αυθαίρετη εκτίμηση για την συνολική απόδοση του συστήματος διαστασιολογούμε το σύστημα και από την εξομοίωση προκύπτει μια νέα συνολική απόδοση. Εκτελούμε δηλαδή τις ενέργειες που φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Αναπόφευκτα εκτελούμε πολλαπλές φορές τον παραπάνω κύκλο εργασιών με σκοπό να συγκλίνουμε σε μια συνολική απόδοση και διαστασιολόγηση που θα βεβαιώνει την ορθή λειτουργία του συστήματος. Ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος προέκυψε ίσος με 2.96%.

n_{sys}=2.96%

Εκτελώντας τα βήματα της διαστασιολόγησης όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα είμαστε σε θέση να συμπληρώσουμε τον παρακάτω πίνακα με τα βασικά χαρακτηριστικά σου συστήματος.

Περιοχή	Δονούσα
Υψόμετρο (m)	~50
Γεωγραφικό Πλάτος	35.10º N
Γεωγραφικό Μήκος	25.79º E
Ισχύς Φωτοβολταικού Συστήματος (kWp)	2540
Πλήθος Φωτοβολταικών Πλαισίων	10980
Έκταση Φωτοβολταικού Συστήματος (στρέμματα)	43
Ισχύς Συστήματος Electrolyzer (kW)	1234
Πλήθος Συστοιχιών Electrolyzer	2654
Ισχύς Συστήματος Κυψελών Καυσίμου (kW)	389
Πλήθος Συστοιχιών Κυψελών Καυσίμου	243
Συνολικός Όγκος Δεξαμενών Υδρογόνου (m³)	634

Ως τελευταίο βήμα εξομοιώνουμε το σύστημα για έναν ολόκληρο χρόνο συλλέγοντας πληροφορίες που θα μας επιτρέψουν να οπτικοποιήσουμε και να αναλύσουμε την ενεργειακή συμπεριφορά του.

Εξομοίωση & Συμπεράσματα

Εκτελώντας την εξομοίωση για έναν ολόκληρο χρόνο μπορούμε να καταγράψουμε πολύτιμες πληροφορίες που θα μας δώσουν μια καλή εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας υλοποίησης ενός αντίστοιχα πραγματικού συστήματος.

Ως πρώτη παράμετρο εξετάζουμε την παρουσία διακοπών ρεύματος. Εδώ παρουσιάζεται το αντίστοιχο γράφημα.



Εικόνα 81 - Κατάσταση Διακοπής Ρεύματος στη διάρκεια του έτους εξομοίωσης

Αριθμητικά προκύπτει πως για 33 ώρες στην διάρκεια ενός ολόκληρου έτους το σύστημα αποτυγχάνει να αποδώσει την ισχύ που ζητήθηκε από το φορτίο. Αυτό μας δίνει μια σχετικά καλή εγγύηση παροχής ρεύματος στο δίκτυο.

Εγγύηση Παροχής Ρεύματος = 99.62%

Εξετάζοντας τις χρονικές στιγμές στις οποίες συμβαίνουν οι διακοπές ρεύματος διαπιστώνουμε πως λαμβάνουν χώρα αποκλειστικά κατά τις βραδινές ώρες. Ταυτόχρονα τις ίδιες ώρες οι δεξαμενές υδρογόνου δεν ήταν άδειες αλλά περιείχαν υδρογόνο προς εκμετάλλευση. Συνεπάγεται λοιπόν πως οι διακοπές ρεύματος έγκεινται σε υποδιαστασιολόγηση του συστήματος των κυψελών καυσίμου.

Μετά από αλλεπάλληλες εξομοιώσεις διαπιστώθηκε πως για να εξαλειφθούν οι διακοπές ρεύματος είναι αναγκαίο να εγκαταστήσουμε περίπου διπλάσιο αριθμό

συστοιχιών κυψελών καυσίμου. Συμπερασματικά είναι ανώφελη η χρήση τόσο μεγάλου πλήθους κυψελών καυσίμου και με σκοπό να διατηρήσουμε το κόστος σε χαμηλά επίπεδα θα δεχτούμε πως αυτές οι μεμονωμένες διακοπές ρεύματος κατά τις νυχτερινές ώρες βρίσκονται εντός των ορίων σφάλματος του συστήματος.

ΦΟΡΤΙΟ	
Ετήσια Ενεργειακή Ζήτηση (MWh)	675
Ελάχιστη Ωριαία Ισχύς (kW)	3
Μέγιστη Ωριαία Ισχύς (kW)	1790
Μέση Ετήσια Ισχύς (kW)	77
Μέση Ισχύ Ημέρας Χειμερινής περιόδου (kW)	47
Μέση Ισχύ Νυκτός Χειμερινής περιόδου (kW)	46
Μέση Ημερήσια Ισχύ Θερινής περιόδου (kW)	107
Μέση Ισχύ Νυκτός Θερινής περιόδου (kW)	106

Το φορτίο παρουσιάζει συμπεριφορά ανάλογη της συμπεριφοράς ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτι που είναι πολύ θεμιτό για την καλή επίδοση του συστήματος. Ενεργειακά η ημέρα είναι πιο απαιτητική από τη νύχτα, και κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου με υψηλή ισχύ ακτινοβολίας παρατηρείται και υψηλή ζήτηση φορτίου.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ		
Ονομαστική Τάση (V)	600	
Διακύμανση Τάσεως σε ΜΡΡ Λειτουργία (V)	210 – 563	
Μέγιστο Ρεύμα σε ΜΡΡ Λειτουργία (Α)	3058	
Απόδοση σε STC (%)	13.61	
Μέση Απόδοση (%)	10.69	
Ονομαστική Ισχύς (kWp)	2540	
Μέγιστη Ισχύς Εξόδου (kW)	1507	

Σε γράφημα μπορούμε να δούμε τη διακύμανση της τάσεως για τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταικού συστήματος καθώς και τη μέση τιμή που προκύπτει ίση με 479V, αρκετά μικρότερη από την ονομαστική τιμή της τάσεως που θα είχαμε σε STC, συνθήκες στις οποίες δεν λειτουργεί ποτέ το σύστημά μας.



Εικόνα 82 - Διακύμανση Τάσεως Φωτοβολταικού Συστήματος σε Λειτουργία Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Γνωρίζοντας το μέγιστο ρεύμα του φωτοβολταικού συστήματος μπορούμε να υπολογίσουμε και να διαστασιολογήσουμε εκ των προτέρων τις διατομές των αγωγών διασύνδεσης και άλλα σημεία του κυκλώματος στα οποία η ένταση του ρεύματος παίζει κύριο ρόλο. Επιπλέον η διακύμανση της τάσης μας πληροφορεί για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εισόδου που θα πρέπει να μπορεί να δέχεται ο buck μετατροπέας και ο αντιστροφέας.

ELECTROLYZER	
Συνολικά Παρεχόμενη Ενέργεια (kWh)	1865
Συνολική Ποσότητα Παραγόμενου Υδρογόνου (kg)	34355
Μέση Απόδοση (%)	73
Συνολική Διάρκεια Λειτουργίας (ώρες)	3905
Μέση Ημερήσια Διάρκεια Λειτουργίας (ώρες)	10
Αριθμός Εκκινήσεων	1147
Μέση Παρεχόμενη Ισχύς (kW)	198
Μέγιστη Παρεχόμενη Ισχύς (kW)	1234

Η συνολική διάρκεια χρήσης του electrolyzer μας δίνει μια καλή εκτίμηση για το χρόνο ζωής του. Βέβαια δεν λειτουργούν όλες οι μονάδες του electrolyzer ταυτόχρονα γι' αυτό πρέπει να εξετάσουμε το χρόνο λειτουργίας κάθε μονάδας χωριστά.

Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να υπολογίσουμε την αθροιστική συνάρτηση κατανομής για όλο το εύρος ισχύος. Σημειώστε πως στην εξομοίωση είχαμε δειγματοληπτίσει ανά τέταρτο της ώρας γι' αυτό πρέπει να διαιρέσουμε τα αποτελέσματα με το 4 για να λάβουμε το χρόνο λειτουργίας σε ώρες.

Επίσης εκτιμούμε πως το ίδιο μοτίβο χρήσης των electrolyzer θα επαναληφθεί για τα 25 χρόνια λειτουργίας του συστήματος. Επομένως πολλαπλασιάζουμε με τα χρόνια λειτουργίας για να έχουμε τις συνολικές ώρες χρήσης. Τελικά προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

Οι σύγχρονοι αλκαλικοί electrolyzer μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς προβλήματα για 40000 ώρες (24). Οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τα όρια πάνω από τα οποία οι electrolyzer έχουν φτάσει στο τέλος του χρόνου ζωής τους και θα πρέπει να αντικατασταθούν. Η κόκκινη γραμμή στο όριο των 80000 ωρών αντιπροσωπεύει τους electrolyzers που θα χρησιμοποιηθούν παραπάνω από το διπλάσιο χρόνο λειτουργίας τους και επομένως θα χρειαστεί να αντικατασταθούν δύο φορές κατά τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Ενώ το διάστημα μεταξύ του ορίου της πράσινης και κόκκινης γραμμής, 40000-80000 ωρών, αντιπροσωπεύει τους electrolyzer που θα πρέπει να αλλαχτούν τουλάχιστον 1 φορά κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 83 - Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Χρήσης Electrolyzer Συστοιχιών (σε 25 χρόνια) Επομένως προκύπτει ο εξής πίνακας.

Χρήση	Στατιστικά
Αρχικές Συστοιχίες Electrolyzer	2654 (1x)
Αντικατάσταση 1 φορά	1274 (1x)
Αντικατάσταση 2 φορές	767 (2x)
ΣΥΝΟΛΟ	5462

Ο αριθμός εκκινήσεων του electrolyzer μας πληροφορεί για το πόσες φορές θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα μεταβατικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα τα οποία μπορούμε να εξομοιώσουμε μόνο μέσω του δυναμικού μοντέλου.

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται το γράφημα με την παρεχόμενη ισχύς προς τον electrolyzer για όλο το χρόνο.



Εικόνα 84 - Ισχύς Παρεχόμενη προς τον Electrolyzer για όλο το χρόνο

Από το διάγραμμα βλέπουμε πως δεν έχουμε υποδιαστασιολογήσει τον electrolyzer διαφορετικά το παραπάνω γράφημα θα φαίνονταν «ψαλιδισμένο» εφόσον σε συνθήκες με μεγάλη περίσσεια ισχύος θα έφτανε συχνά στο ανώτατο όριο λειτουργίας του. Η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς μας πληροφορεί ότι υπήρχαν στιγμές που έγινε πλήρης εκμετάλλευση της μέγιστης ισχύος όλων των συστοιχιών του electrolyzer και επομένως δεν έγινε λανθασμένη υπερδιαστασιολόγηση.

ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ		
Συνολικά Αποδιδόμενη Ενέργεια (kWh)	435703	
Συνολική Κατανάλωση Υδρογόνου (kg)	43848	
Μέση Απόδοση (%)	26	
Συνολική Διάρκεια Λειτουργίας (ώρες)	4488	
Μέση Ημερήσια Διάρκεια Λειτουργίας (ώρες)	12.3	
Αριθμός Εκκινήσεων	399	
Μέση Αποδιδόμενη Ισχύς (kW)	90.76	
Μέγιστη Αποδιδόμενη Ισχύς (kW)	389	

Παρομοίως με τη ανάλυση που έγινε στις προηγούμενες σελίδες για τον electrolyzer θα εκτιμήσουμε την ποσότητα των συσκευών κυψελών καυσίμου που θα χρειαστούμε σε διάστημα 25 ετών.

Υπολογίζουμε την αθροιστική συνάρτηση κατανομής κατά τον ίδιο τρόπο και λαμβάνοντας υπόψη πως η διάρκεια ζωής μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου είναι ίση με 20000 ώρες λειτουργίας (25) παράγουμε το παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 85 - Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής Χρήσης Συστοιχιών Κυψελών Καυσίμου (σε 25 χρόνια)

Παρατηρούμε πως η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου σε σχέση με την τη χρήση που τους γίνεται είναι μικρή. Όπως βλέπουμε σε μια περίοδο 25 ετών θα πρέπει να γίνουν 6 αντικαταστάσεις κυψελών καυσίμου. Οι πράξεις που ακολουθούνται για να υπολογίσουμε το συνολικό αριθμό κυψελών καυσίμου που θα χρειαστούμε φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα

Χρήση	Πράξη	Αποτέλεσμα
Αρχικές Συστοιχίες Κυψελών Καυσίμου	243	
Αντικατάσταση 1 φορά	+ (39 - 32) * 1	250
Αντικατάσταση 2 φορές	+ (47 - 39) * 2	266

Αντικατάσταση 3 φορές	+ (55 - 47) * 3	290
Αντικατάσταση 4 φορές	+ (79 - 55) * 4	386
Αντικατάσταση 5 φορές	+ (168 - 79) * 5	831
Αντικατάσταση 6 φορές	+ (243 - 168) * 6	831
ΣΥΝΟΛΟ		1281

Ο αριθμός εκκινήσεων του συστήματος κυψελών καυσίμου είναι περίπου ίσος με τον αριθμό των ημερών του έτους διότι η λειτουργία τους ξεκινάει αργά το απόγευμα που δύει ο ήλιο και συνεχίζεται αδιάκοπα μέχρι το επόμενο πρωί. Μόνο σε λίγες περιπτώσεις είχαμε εκκίνηση των κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, για συγκεκριμένες ημέρες με υψηλές απαιτήσεις σε φορτίο. Κατά τη διάρκεια των εκκινήσεων λαμβάνουν χώρα μεταβατικά φαινόμενα που δεν εξομοιώνονται στο ενεργειακό μοντέλο.



Εικόνα 86 -Ισχύς Παραγόμενη από τις Κυψέλες Καυσίμου για όλο το χρόνο

Το γράφημα της ισχύος για την περίοδο του έτους συνάδει με το φορτίο που έπρεπε να καλυφθεί κυρίως κατά τις βραδινές ώρες. Παρατηρούμε όπως είναι αναμενόμενο πως οι κυψέλες καυσίμου διαστασιολογούνται με κριτήριο την κάλυψη της ισχύος τις νύχτες της θερινής περιόδου όπου ο τουρισμός αυξάνει και την ενεργειακή κατανάλωση του νησιού.

ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	
Πλήθος Δεξαμενών	4395
Όγκος ανά δεξαμενή (m³)	0.145
Συνολικός Όγκος (m³)	634
Χωρητικότητα ανά δεξαμενή υπό μέγιστη πίεση 400atm (kg)	3.344
Συνολική Χωρητικότητα υπό μέγιστη πίεση 400atm (kg)	14697
Μέγιστη Πίεση που μετρήθηκε (atm)	363.19
Ελάχιστη Πίεση που μετρήθηκε (atm)	92.77

Αν και οι δεξαμενές υδρογόνου φαντάζουν πολύ μεγάλες στο πλήθος είναι λογικό να υποθέσουμε πως ο όγκος των 634 κυβικών μέτρων δεν θα καλυφθεί από μικρές δεξαμενές σαν αυτή του μοντέλου αλλά θα συναρμολογηθεί μία πολύ μεγαλύτερη δεξαμενή, ή από ένα μικρός αριθμό δεξαμενών, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος κατασκευής της ίδιας της δεξαμενής. Η μεταβολή της πίεσης κατά τη διάρκεια ενός έτους φαίνεται στο εξής γράφημα.





Έχοντας κάνει την παραδοχή πως οι δεξαμενές αρχικά βρίσκονται «φορτισμένες» με υδρογόνο υπό πίεση περίπου 300 ατμόσφαιρες βλέπουμε πως κατά τους χειμερινούς μήνες υπάρχει μια σαφή μείωση της ποσότητας του υδρογόνου κάτι το οποίο αντισταθμίζεται κατά τους θερινούς μήνες. Ακόμα σημειώνονται περίοδοι όπου η κατανάλωση και η παραγωγή του υδρογόνου είναι κατά μέσο όρο ίσες στην πάροδο λίγων ημερών.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τις μετρήσεις που παίζουν ρόλο στον υπολογισμό των αποδόσεων του συστήματος.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	
Ποσότητα Υδρογόνου Παραγόμενη από Electrolyzer (kg)	34335kg
Ποσότητα Υδρογόνου Καταναλισκόμενη από Κυψέλες Καυσίμου (kg)	43848kg
Ηλεκτρική Ενέργεια που Αποδόθηκε στο Δίκτυο (MWh)	676MWh
Ηλεκτρική Ενέργεια Παραγόμενη από το Φ/Β Σύστημα (MWh)	2432MWh
Ηλεκτρική Ενέργεια Παραγόμενη από το Φ/Β Σύστημα (MWh)	2432MWh
Ηλιακή Ενέργεια Προσπίπτουσα στο Φ/Β Σύστημα (MWh)	22734MWh
Ωφέλιμη Ενέργεια που Αποθηκεύτηκε σε μορφή Υδρογόνου (kWh)	0
Ωφέλιμη Ενέργεια σε μορφή Υδρογόνου που Καταναλώθηκε από τις Κυψέλες Καυσίμου (kWh)	87696
Κλάσμα Συμμετοχής του Φωτοβολταικού Συστήματος στη Παραγωγή Ωφέλιμης Ενέργειας (%)	96.54
Συνολικά Ωφέλιμη Ενέργεια (kWh)	675389
Ωφέλιμη Ενέργεια Φωτοβολταικού Συστήματος (kWh)	651977
Μέση Απόδοση Λειτουργίας Φωτοβολταικού Συστήματος (%)	24.06
Συνολική Απόδοση Συστήματος (%)	2.96

Σημειώστε πως η Μέση Απόδοση Λειτουργίας του φωτοβολταικού συστήματος προκύπτει ως την ωφέλιμη ενέργεια, έχοντας εξαιρέσει τις επιδράσεις ενδεχομένως προαποθηκευμένου υδρογόνου, προς την ενέργεια που παρήγαγε το φωτοβολταικό σύστημα.

ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ		
Μέγιστη Ροή Υδρογόνου (kg/sec)	6.35e-3	
Μέση Ροή Υδρογόνου (kg/sec)	1.80e-3	
Μέγιστη Ισχύς (kW)	86.38	
Μέση Ισχύς (kW)	20.31	

Ως τελευταίο βήμα εξετάζουμε τη γραφική παράσταση του συμπιεστή για τη διάρκεια ενός χρόνου.





Πρώτη και σημαντικότερη παρατήρηση είναι πως το φορτίο του συμπιεστή είναι συγκρίσιμο με το φορτίο του νησιού. Δηλαδή μεγάλα ποσά ενέργεια σπαταλούνται προκειμένου να πετύχουμε μικρότερο συνολικό όγκο στις δεξαμενές υδρογόνου. Οι ενεργειακές απώλειες που συμβαίνουν κατά την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο και έπειτα του υδρογόνου πάλι πίσω σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια κυρίως της νύχτας προβλέπουν την αναγκαιότητα μεγάλης ισχύος φωτοβολταικού συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου το οποίο διέρχεται αναγκαστικά μέσω του συμπιεστή για να αποθηκευτεί υπό υψηλή πίεση στις δεξαμενές καυσίμου.



Εξομοίωση Δύο Χειμερινών Ημερών (15-16 Ιανουαρίου)





Εξομοίωση Δύο Καλοκαιρινών Ημερών (15-16 Ιουλίου)

Κεφάλαιο 8

Τεχνοοικονομική Ανάλυση

Ολοκληρώνοντας τη σύνθεση του συστήματος και επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μέσα από την εξομοίωση συνεχίζουμε στην υλοποίησή του. Είναι βασικό ο μηχανικός που αναλαμβάνει τη μελέτη ενός πραγματικού έργου, πριν μεταβεί από τη θεωρία στη πράξη, να εξετάσει την βιωσιμότητα μιας αντίστοιχης επένδυσης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνήσουμε την αποδοτικότητα του σχεδίου επένδυσης όταν αυτό εφαρμοστεί για χρονικό διάστημα ίσο με 25 έτη που ισούται με την εγγύηση που δίνεται από τους κατασκευαστές των φωτοβολταικών πλαισίων.

Μεθοδολογία Οικονομικής Εκτίμησης

Αρχικό Κόστος

Τα έξοδα μιας επένδυσης διακρίνονται στα αρχικά έξοδα που καθορίζουν το αρχικό κεφάλαιο και στα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Για το δικό μας σύστημα προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

- ΑΡΧΙΚΑ ΕΞΟΔΑ
 - ο Εξοπλισμός
 - Φωτοβολταικά Πλαίσια
 - Στήριξη Φωτοβολταικών Πλαισίων
 - Συστοιχίες Electrolyzer
 - Συστοιχίες Κυψελών Καυσίμου
 - Αντιστροφείς
 - Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης
 - Συμπιεστές
 - Δεξαμενές Καυσίμου
 - Υπερπυκνωτές
 - Κεντρικός Έλεγχος Συστήματος
 - Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός Παρακολούθησης Συστήματος
 - Αντικεραυνική Προστασία
 - ο Προσωπικό
 - Μελέτη Έργου
 - Άδειες από τους αρμόδιους φορείς για έγκριση
 - Εκπαίδευση Τεχνικού Προσωπικού
 - ο Μεταφορικά Εξοπλισμού
 - ο Εγκατάσταση Συστήματος
 - Καλώδια
 - Πίνακες Διανομής

- Κτήριο Εξοπλισμού
- ο Σύνδεση με το Δημόσιο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρισμού
- ΕΞΟΔΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ & ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
 - ο Ετήσια Έξοδα
 - Ενοίκιο Χώρου
 - Ασφάλεια Εγκατάστασης
 - Μισθός Προσωπικού
 - ο Περιοδικά Έξοδα
 - Αντικατάσταση Συστοιχιών Electrolyzer
 - Αντικατάσταση Συστοιχιών Κυψελών Καυσίμου
 - Αντικατάσταση Υπερπυκνωτών

Αθροίζοντας όλα τα αρχικά έξοδα προκύπτει το συνολικό αρχικό κόστος της επένδυσης.

Αρχικό Κόστος

- = Κόστος Εξοπλισμού + Κόστος Μελετών
- + Κόστος Προσωπικού Εγκατάστασης + Κόστος Εγκατάστασης
- + Κόστος Μεταφορικών + Κόστος Διασύνδεσης με Δίκτυο

Τα έργα που αφορούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιδοτούνται από το κράτος. Αλλά για να δοθεί η επιδότηση απαιτείται ο επενδυτής να συμβάλλει ένα ελάχιστο ποσοστό του αρχικού κόστους επένδυσης.

Ελάχιστο Απαιτούμενο Κεφάλαιο = Ποσοστό Επένδυσης * Αρχικό Κόστος

Επιδότηση

Η επιδότηση για καινοτόμα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως συμβαίνει στη περίπτωση που εξετάζουμε στην τρέχουσα εργασία είναι συνήθως μεγαλύτερη από 40%. Για τη σύνδεση με το δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού η επιδότηση διαφοροποιείται και ανέρχεται στο 50%.

> Επιδότηση = Ποσοστό Επιδότησης * Κόστος Εξοπλισμού + Ποσοστό Επιδότησης Δικτύου * Κόστος Διασύνδεσης με το Δίκτυο

Δάνειο

Θα θεωρήσουμε πως ο επενδυτής θα επενδύσει το ελάχιστο δυνατό και το υπόλοιπο ποσό θα το λάβει μέσο δανείου από μια τράπεζα που παρέχει δάνεια με σταθερό επιτόκιο. Επομένως το δάνειο προκύπτει ως έξης.

Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο μπορούμε άμεσα να υπολογίσουμε τη μηνιαία δόση του δανείου αν η αποπληρωμή του δάνειου διαρκέσει *n* μήνες (26).

$$M\eta \nu \iota \alpha i \alpha \, \Delta \delta \sigma \eta \, \Delta \alpha \nu \varepsilon i o \upsilon = \frac{E \pi \iota \tau \delta \kappa \iota o / 12}{1 - \frac{1}{1 + (E \pi \iota \tau \delta \kappa \iota o / 12)^n}}$$

Πώληση Ενέργειας

Προσπαθώντας να γίνει προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει ψηφιστεί από τη πολιτεία νόμος σύμφωνα με τον οποίο χρηματοδοτείται κάθε KWh παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά ένα ορισμένο ποσό που διαφοροποιείται ανάλογα την τεχνολογία και εφαρμογή. Επιπλέον, και πάλι με στόχο την προώθηση φιλικών προς το περιβάλλον διαδικασιών παραγωγής ενέργειας, για κάθε kWh που παράγεται χωρίς να γίνεται εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα προς την ατμόσφαιρα χρηματοδοτείται τυπικά με ένα πρόσθετο ποσοστό.

Από την εξομοίωση έχουμε τη συνολική ενέργεια εξόδου από το φωτοβολταικό σύστημα και από το σύστημα κυψελών καυσίμου. Επομένως το συνολικό μας εισόδημα, για τη πρώτη χρονιά, θα είναι:

$$\begin{split} E \iota \sigma \delta \delta \eta \mu \alpha (1) &= (X \rho \eta \mu \alpha \tau o \delta \delta \tau \eta \sigma \eta \ \alpha v \dot{\alpha} \ k W h \ \lambda \delta \gamma \omega \ A \Pi E \\ &+ X \rho \eta \mu \alpha \tau o \delta \delta \tau \eta \sigma \eta \ \alpha v \dot{\alpha} \ k W h \ \lambda \delta \gamma \omega \ \alpha \pi o \upsilon \sigma (\alpha \varsigma \ C O_2) * E_Y \end{split}$$

όπου

Eισόδημα(1): Το συνολικό εισόδημα της 1^{ης} χρονιάς λειτουργίας του συστήματος

 E_Y : Ωφέλιμη ενέργεια που αποδίδεται στους χρήστες του δικτύου σε kWh

Τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης διακρίνονται στα ετήσια και στα περιοδικά που αφορούν αντικαταστάσεις τμημάτων του εξοπλισμού.

Λειτουργικό Κόστος

Ως μόνιμο προσωπικό θα χρειαστούμε έναν ή περισσότερους καταρτισμένους τεχνικούς ώστε να επιβλέπουν και να συντηρούν το σύστημα. Ακόμα και η φύλαξη για αποφυγή κλοπών λόγω της μεγάλης αξίας των υλικών αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα. Έπειτα η ετήσια ενοικίαση του χώρου καθώς και η ασφάλεια της εγκατάστασης θεωρούνται σταθερές στην διάρκεια της περιόδου ζωής του έργου. Εφόσον η ποσότητα του εξοπλισμού καθώς και το πλήθος των ανθρώπων που θα ασχολούνται με το σύστημα σε ετήσια βάση είναι ανάλογα του μεγέθους του συστήματος ένας απλός πολλαπλασιαστικός παράγοντας επί του συνολικού κόστους μπορεί να αντικατοπτρίζει τα ετήσια έξοδα για λειτουργία και συντήρηση του συστήματος.

Ετήσια Λειτουγικά Έξοδα

= Ποσοστό Ετήσιων Λειτουργικών Εξόδων * Αρχικό Κόστος

Ο χρόνος ζωής των υπερπυκνωτών είναι ίσος με 10-12 χρόνια και γι' αυτό θα χρειαστεί στο μέσον του χρόνου ζωής του έργου να αντικατασταθούν τουλάχιστον μία φορά. Για την αντικατάσταση των electrolyzer και των κυψελών καυσίμου βασιζόμαστε στην ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε σχέση με τη χρήση που γίνεται ανά συστοιχία στην πάροδο όλου του χρόνου ζωής του έργου. Προκύπτει πως θα χρειαστούμε ένα συγκεκριμένο αριθμό electrolyzer να αντικατασταθούν κάθε 8 χρόνια, ενώ η αντικατάσταση των κυψελών καυσίμου γίνεται με διπλάσιο ρυθμό καθώς απαιτείται αντικατάσταση ενός συγκεκριμένου αριθμού συστοιχιών κυψελών καυσίμου κάθε 4 χρόνια.

Επομένως έστω πως στο 13° έτος γίνεται αντικατάσταση των υπερπυκνωτών.

Λειτουργικά Έξοδα Υπερπυκνωτών (j)= Κόστος Υπερπυκνωτών για j=13 (μηδέν διαφορετικά)

Λειτουργικά Έξοδα Υπερπυκνωτών (j)= 0 για j~=13

Θεωρούμε πως στο 9° και 17° έτος γίνεται αντικατάσταση ορισμένων συστοιχιών electrolyzer.

Λειτουργικά Έξοδα Electrolyzer(j) = Κόστος Συστοιχίας Electrolyzer * Αριθμό Electrolyzer προς Αντικατάσταση για j=9, 17 (μηδέν διαφορετικά)

Θεωρούμε πως στο 5°, 9°, 13°, 17° και 21° έτος γίνεται αντικατάσταση ορισμένων συστοιχιών κυψελών καυσίμου.

Λειτουργικά Έξοδα Κυψελών Καυσίμου(j) = Κόστος Συστοιχίας Κυψελών Καυσίμου * Αριθμό Συστοιχιών Κυψελών Καυσίμου προς Αντικατάσταση για j= 5, 9, 13, 17, 21 (μηδέν διαφορετικά)

Πληθωρισμός

Στην πορεία των χρόνων ζωής του έργου τόσο τα εισοδήματα αλλά και τα λειτουργικά έξοδα υπάγονται στο φαινόμενο του πληθωρισμού. Το φαινόμενο του πληθωρισμού είναι μια παράμετρος διαχρονικής μείωσης της αξίας του χρήματος. Σε συνθήκες πληθωρισμού με τη πάροδο του χρόνου με το ίδιο χρηματικό ποσό αγοράζονται όλο και λιγότερα αγαθά και υπηρεσίες. Στη παρούσα ανάλυση μπορούμε να θεωρήσουμε έναν σταθερό συντελεστή πληθωρισμού για όλα τα χρόνια ζωής του έργου. Εισάγουμε την έννοια της χρηματοροής για να εκφράσουμε μια δαπάνη ή ένα έσοδο κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Xρηματοροή (ν) = Xρηματοροή(ν - 1) * (1 + Συντελεστής Πληθωρισμού)

Βασιζόμενοι στους υπολογισμούς που κάναμε για το πρώτο έτος σχηματίζουμε έναν πίνακα για τα εισοδήματα και για τα έξοδα καθώς αυτά αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή σύμφωνα με το συντελεστή του πληθωρισμού.

Φορολογία

Επόμενος παράγοντας που θέλουμε να λάβουμε υπόψη είναι η φορολογία του κράτους. Ανάλογα το μέγεθος της επιχείρησης υπάρχει και ανάλογη φορολογία. Για μια μεσαία επιχείρηση για παράδειγμα η φορολογία είναι περίπου 25%. Εντούτοις ισχύει πως για μια αρχική περίοδο τυπικά 10 ετών, για κάθε χρόνο δικαιολογείται ένα ποσοστό από το κεφάλαιο του επενδυτή ως απόσβεση. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το ποσοστό αυτό του ποσού που επενδύσαμε δεν θα φορολογηθεί, παρά μόνο θα φορολογηθούν τα υπόλοιπα ακαθάριστα κέρδη. Μετά το πέρας των 10 ετών η φορολογία επιβαρύνει το συνολικό ποσό των ακαθάριστων κερδών. Τα ακαθάριστα κέρδη είναι απλά η διαφορά κερδών και εξόδων, που ως έξοδα ορίζονται τα συνολικά έξοδα λειτουργίας και συντήρησης προσθέτοντας την αποπληρωμή του δανείου.

Για 1 έως 10 έτη: Φορολογία

= (Ακαθάριστο Κέρδος – Ποσοστό Απόσβεσης * Επένδυσης) * Ποσοστό Φορολογίας

Για 11 έως 25 έτη: Φορολογία = Ακαθάριστο Κέρδος * Ποσοστό Φορολογίας

Επομένως έχοντας τη φορολογία για όλα τα έτη πρέπει να την αφαιρέσουμε από το ακαθάριστο κέρδος για να λάβουμε το καθαρό κέρδος.

Καθαρή Παρούσα Αξία

Επειδή η αξία του χρήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές δεν είναι ομοιογενής και συγκρίσιμη, μεταβάλλεται με το χρόνο με έναν ρυθμό που ονομάζεται επιτόκιο αναγωγής. Χρησιμοποιούμε το επιτόκιο αναγωγής για να ανάγουμε τις χρηματοροές σε μια κοινή χρονική βάση σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση.

$$C_t = P * (1+i)^t$$

C_t: χρηματοροή σε χρόνο t *t*: έτος *P*: παρούσα αξία *i*: επιτόκιο αναγωγής

Επομένως ανάγουμε τις χρηματοροές των καθαρών κερδών στο σήμερα.

Ως επόμενο βήμα προσθέτουμε όλες τις αναγόμενες ροές και από το άθροισμα αφαιρούμε το αρχικό κεφάλαιο που επενδύσαμε. Αυτό ονομάζεται καθαρή παρούσα αξία (NPV) που δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} C_t * (1+i)^{-t}$$

Το NPV υπολογίζεται άμεσα στο Matlab μέσω της συνάρτησης pvvar.
Ο παράγοντας NPV υποδηλώνει τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Αν NPV > 0 το επενδυτικό πλάνο είναι βιώσιμο.

Av NPV = 0 το επενδυτικό πλάνο είναι οριακό και η βιωσιμότητα του πρέπει να ελεγχθεί από άλλους παράγοντες.

Αν NPV<0 το επενδυτικό πλάνο δεν είναι βιώσιμο και απορρίπτεται.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Στην συνέχεια ακολουθούμε την ανάστροφη διαδικασία, ορίζουμε το NPV ως μηδενικό και αναζητούμε το αντίστοιχο επιτόκιο αναγωγής, δηλαδή θέλουμε να βρούμε ποιο θα ήταν το επιτόκιο αναγωγής αν η καθαρή παρούσα αξία γίνονταν μηδέν. Αυτό ονομάζεται εσωτερικό βαθμός απόδοσης της επένδυσης (IRR) και καθορίζει πόσο καλή είναι η επένδυση. Αν για παράδειγμα υπάρχουν πολλαπλά εναλλακτικά επενδυτικά πλάνα, αυτό με το υψηλότερο IRR είναι και το καλύτερο. Η μαθηματική σχέση για το IRR δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\sum_{t=1}^{n} C_t * (1 + IRR)^{-t} = 0$$

Το IRR υπολογίζεται αυτόματα από την ομώνυμη συνάρτηση στη Matlab *irr*.

Περίοδος Αποπληρωμής Ιδίων Κεφαλαίων

Ένα τελευταίο κριτήριο της επένδυσης αποτελεί ο χρόνος αποπληρωμής του των ιδίων κεφαλαίων (DPBP). Η τιμή αυτού του κριτηρίου εκφράζει των αριθμό των ετών που απαιτούνται για την ανάκτηση του αρχικού επενδυμένου κεφαλαίου μέσω του αθροιστικού καθαρού κέρδους της επιχείρησης.

Αποτελέσματα ενός Ενδεικτικού Επενδυτικού Πλάνου

Πριν προχωρήσουμε στην εφαρμογή της ανάλυσης της προηγούμενης ενότητας θα πρέπει να κοστολογήσουμε κάθε τμήμα του έργου συμπληρώνοντας τον παρακάτω πίνακα.

Περιγραφή	Κοστολόγηση*
Φωτοβολταικό Πλαίσιο	1€/Watt
Στήριξη Φωτοβολταικών Πλαισίων	0.25€/Watt
Electrolyzer	1.5€/Watt
Κυψέλες Καυσίμου	3€/Watt
Αντιστροφείς	0.45€/Watt
Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης	0.05€/Watt
Συμπιεστής	0.22€/Watt
Δεξαμενές Καυσίμου	700€/m³
Υπερπυκνωτές	0.01€/Watt
Κεντρικός Έλεγχος Συστήματος	60000€
Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός Παρακολούθησης Συστήματος	10000€

Αντικεραυνική Προστασία	0.5€/m²
Μελέτη Έργου	50000€
Άδειες από τους αρμόδιους φορείς για έγκριση	30000€
Εκπαίδευση Τεχνικού Προσωπικού	5000€
Μεταφορικά Εξοπλισμού	50000€
Εγκατάσταση Συστήματος	350000€
Σύνδεση με το Δημόσιο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρισμού	30€/m

*Να σημειωθεί πως η κοστολόγηση είναι εικονική και δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές τιμές

Στον παρακάτω πίνακα γίνονται ορισμένες παραδοχές για τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών.

Ποσοστό Ετήσιων Λειτουργικών Εξόδων	0.5%
Ποσοστό Επένδυσης	20%
Ποσοστό Επιδότησης	60%
Ποσοστό Επιδότησης Δικτύου	50%
Επιτόκιο Δανείου	6.5%
Χρηματοδότηση λόγω ΑΠΕ	0.65/kWh
Χρηματοδότηση λόγω απουσίας CO₂	0.02/kWh
Ποσοστό Απόσβεσης	10%
Ποσοστό Φορολογίας	25%
Μήνες Αποπληρωμής	180
Πληθωρισμός	2.5%
Επιτόκιο Αναγωγής	6%

Βάσει τα παραπάνω στοιχεία ακολουθούμε την οικονομική ανάλυση της προηγούμενης ενότητας για λάβουμε τους εξής οικονομικούς δείκτες από τους οποίους προκύπτει πως η επένδυση είναι οριακά βιώσιμη.

NPV	31708.29€
IRR	6.15%
DPBP	24 έτη και 3 μήνες

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η πορεία των αθροιστικών χρηματοροών της επένδυσης όπως αυτές εξελίχθηκαν ανά έτος για τα 25 χρόνια διάρκεια ζωής του έργου.



Εικόνα 89 - Αθροιστικές Χρηματοροές Επενδυτικού Πλάνου

Επίλογος

Στην παρούσα εργασία εξετάσαμε τη σύνθεση ενός υβριδικού συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια για τη μετατρέψει κατά το ένα μέρος άμεσα σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια ή να την αποθηκεύσει σε μορφή υδρογόνου κατά το άλλο.

Για την εξομοίωση του συστήματος και των επιμέρους στοιχείων του αξιοποιήσαμε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο, τόσο από απλούς χρήστες όσο και από βιομηχανίες, που ονομάζεται Simulink της Matlab.

Για κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος έγινε σύγκριση με τις παλαιότερες κλασσικές τεχνολογίες και παρουσιάστηκε το θεωρητικό του υπόβαθρο. Η ανάπτυξη αναλυτικών και δυναμικών μοντέλων στο Simulink μας επέτρεψε να επιβεβαιώσουμε την θεωρία και να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών, χημικών, θερμικών ή άλλων χαρακτηριστικών που έπαιζαν ρόλο σε κάθε στοιχείο.

Η συνολική μοντελοποίηση ενός δυναμικού συστήματος προυπέθετε την ανάγκη συμπερίληψης όλων των τεχνικών λεπτομερειών του συστήματος που σε επίπεδο εξομοίωσης ήταν αδύνατο να επιτευχθεί. Γι' αυτό αντικαταστήσαμε τα σύνθετα δυναμικά μοντέλα από ενεργειακά ισοδύναμα με τα οποία συνθέσαμε το συνολικό σύστημα.

Τα μεταβατικά φαινόμενα εξομοιώθηκαν μεμονωμένα για κάθε στοιχείο χωριστά με βάση το αναλυτικό του μοντέλο. Στο συνολικό μοντέλο μέσω της αλληλεπίδρασης των ενεργειακών επιμέρους μοντέλων είχαμε την δυνατότητα να κάνουμε μια ενεργειακή εκτίμηση του συστήματος για το χρονικό διάστημα ενός ολόκληρου έτους έχοντας στη διάθεσή μας ωριαίες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και το φορτίο. Επιπλέον εκτιμήσαμε την απόδοση των επιμέρους συστημάτων και δείξαμε το ποσοστό συμμετοχής τους στην συνολική απόδοση του συστήματος.

Επικεντρωθήκαμε στη νήσο Δονούσα ως μια ενδεικτική εφαρμογή του αυτόνομου υβριδικού μας συστήματος λόγω της μικρής έκτασης του νησιού που συνεπάγεται και μικρές ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και διότι μια αποκλεισμένη γεωγραφικά περιοχή όπως ένα νησί θα πρέπει να μπορεί να διαθέτει ενεργειακή ανεξαρτησία.

Τέλος αναλύσαμε τη μεθοδολογία που εξετάζει την βιωσιμότητα του συστήματός μας σε μια περίοδο 25 ετών βάσει την σημερινή διεθνή τάση για προώθηση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας που αντικατοπτρίζεται σε επιδοτήσεις εξοπλισμού και πληρωμές παραγωγής «πράσινης ενέργειας».

Παρατηρήσεις, Προτάσεις & Βελτιώσεις

- Η χρήση φωτοβολταικών μοντέλων πολλαπλών επαφών (multijunction) ή άλλων τεχνολογιών όπου επιτυγχάνουν μεγαλύτερες αποδόσεις θα αύξαναν την απόδοση αλλά δεν έχουν κάνει ακόμα την εμφάνισή τους στην αγορά λόγω υψηλού κόστους.
- 2. Κάναμε την παραδοχή πως η θερμοκρασία του φωτοβολταικού μεταβάλλεται ανάλογα την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του, δεδομένου βέβαια ως η ακτινοβολία αυτή δεν έχει μεγάλους ρυθμούς μεταβολής. Διότι, όπως είναι και διαισθητικά προσιτό, αν ένα φωτοβολταικό σύστημα δεχτεί ισχυρή ακτινοβολία για σύντομο χρονικό διάστημα η θερμοκρασία λειτουργίας του δεν θα μεταβληθεί σε σημαντικό βαθμό.
- 3. Στο σύστημά μας υποθέσαμε πως χρησιμοποιούμε έναν μόνο αντιστροφέα. Στην πραγματικότητα δεν κατασκευάζονται αντιστροφείς της τάξης ισχύος των MW όποτε θα χρησιμοποιήσουμε πολλούς μικρότερους. Ένα σύστημα που να διαμοιράζει ισοδύναμα το φορτίο στους αντιστροφείς μπορεί να επιτύχει καλύτερες αποδόσεις και αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος.
- 4. Χρήση προηγμένων electrolyzer που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος με εφαρμογή μικρότερης ηλεκτρικής τάσης. Αυτά τα δύο βέβαια έρχονται αντιμέτωπα διότι το να αυξήσεις την ροή του ρεύματος συνεπάγεται αύξηση της ωμικής αντίστασης και επιδείνωση των φαινομένων που προκαλούν την υπέρταση.
- 5. Electrolyzer με λειτουργία σε υψηλή πίεση για μείωση της σπατάλης ενέργειας στον συμπιεστή ή ακόμα και εξάλειψή του.
- 6. Οι electrolyzer, σε μια εποχή όπου όλα αυτοματοποιούνται από μηχανές σε γραμμές παραγωγής, έως και σήμερα συναρμολογούνται χειροποίητα και υπάρχει πολύ περιορισμένη εμπειρία μαζικής παραγωγής τους που θα μείωνε σημαντικά το κόστος κατασκευής.
- Χρήση κυψελών καυσίμου τεχνολογίας PEM που θα μπορούν να λειτουργήσουν αμφίδρομα και ως electrolyzer ενοποιώντας τις δύο τεχνολογίες σε μία συσκευή, μειώνοντας έτσι το κόστος επένδυσης.
- 8. Καθώς μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού παράγεται και οξυγόνο θα μπορούσαμε να το αποθηκεύσουμε ώστε να τροφοδοτήσουμε την κυψέλη καυσίμου με καθαρό οξυγόνο, αντί για ατμοσφαιρικό αέρα, ώστε να πετύχουμε μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος.

- 9. Η κατασκευή μιας κυψέλης καυσίμου που αντέχει στην υψηλή πίεση του αέριου καυσίμου εισόδου μας δίνει μια υψηλότερη ηλεκτρική τάση στην έξοδο.
- 10. Πέρα από την αποθήκευση καθαρού υδρογόνου μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα επιτεύγματα της νανοτεχνολογίας με τα οποία μπορούμε να κατασκευάσουμε δομές που θα φέρουν υδρογόνο με μεγαλύτερη συγκέντρωση και ταυτόχρονα θα είναι σημαντικά πιο ελαφριές από τις έως τώρα τεχνολογίες όπως τα μεταλλικά υδρίδια.
- Οι εκκινήσεις των κυψελών καυσίμου και των electrolyzer μπορεί να διαφοροποιούν ελαφρώς τα τελικά αποτελέσματα στους ενεργειακούς υπολογισμούς.
- 12. Η επίδραση των υπερπυκνωτών στη μείωση της απόδοσης των κυψελών καυσίμου θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο ενεργειακό μοντέλο αφού γίνει ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου.
- 13. Μια επιπλέον μορφή ενέργειας που θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε στο σύστημα είναι η αιολική. Τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από υψηλό αιολικό δυναμικό το οποίο μας προσφέρει ενέργεια τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύκτας διαστασιολογώντας καταυτό τον τρόπο τα επιμέρους στοιχεία σε μικρότερη ισχύ λειτουργίας.
- Προώθηση ηλεκτρικών συσκευών χαμηλής κατανάλωσης από τους κατοίκους της περιοχής που αφορά το αυτόνομο σύστημα με σκοπό την μείωση του φορτίου του συστήματος.

Ένα εμπόδιο για την εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων σήμερα είναι η προσπάθεια που θα πρέπει να καταβληθεί για τον αποτελεσματικό και αποδοτικό συνδυασμό τους. Για παράδειγμα ας αναλογιστούμε τον συνδυασμό ενός συστήματος που περιλαμβάνει όλες τις τεχνολογίες στην παρακάτω λίστα.

- Φωτοβολταικό Σύστημα
- Ανεμογεννήτρια
- Γεννήτρια αξιοποίησης υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Κυψέλες Καυσίμου
- Μπαταρίες
- Υπερπυκνωτές
- Electrolyzer

Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός πως καθένα από αυτά τα συστήματα έχει τελείως διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με τα υπόλοιπα. Επομένως είναι αναγκαίο να γίνει ανάπτυξη και μαζική παραγωγή μονάδων διαχείρισης ισχύος που θα δίνουν τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής του κάθε συστήματος σε μεγάλο εύρος ισχύος ώστε να μπορούν να βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλη γκάμα συστημάτων. Ταυτόχρονα αυτά τα συστήματα διαχείρισης ισχύος θα πρέπει να προσφέρουν υψηλή απόδοση για όλο το εύρος ισχύος. Έτσι θα είναι δυνατή η εύκολη διασύνδεση όλων των ανωτέρω τεχνολογιών σε ένα κοινό κανάλι μονοφασικού ή τριφασικού δικτύου χωρίς να γίνονται προσαρμοστικές τροποποιήσεις που θα ωφελούν περισσότερο το ένα ή το άλλο μέσο παραγωγής ή αποθήκευσης ενέργειας.

Η εργασία είχε ως στόχο τον προσανατολισμό προς μορφές παραγωγής ή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον ακριβώς επειδή είναι κοινή εμπειρία όλων των ανθρώπων η σημερινή υποβάθμιση της ποιότητας ζωής από τη χρήση καταστροφικών για το περιβάλλον μέσων παραγωγής ενέργειας όπως η καύση των ορυκτών καυσίμων.

Η προστασία του περιβάλλοντος είναι αυξημένης βαρύτητας στη σημερινή εποχή και πολύ πιθανόν στο προσεχές μέλλον να μην έχουμε την πολυτέλεια για περιττούς ρύπους στην ατμόσφαιρα, το νερό ή το έδαφος.

Πρέπει να θεσπίσουμε ως πρώτη μας προτεραιότητα την υιοθέτηση διαδικασιών φιλικών προς το περιβάλλον.

Είναι δική μας ευθύνη είναι να κάνουμε τις λεπτομέρειες της κάθε διαδικασίας βιώσιμες και οικονομικές.

«Η ενεργειακή εκμετάλλευση του κοντινότερου άστρου είναι η μόνη που μπορεί να εξασφαλίσει την επιβίωση του πολιτισμού μας»

Βιβλιογραφία

1. Fossil fuel. *wikipedia*. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 30 Φεβρουαρίου 2009.] http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel.

2. Sun: Facts & Figures. *National Aeronautics And Space Administration*. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 10 Νοέμβριος 2008.]

http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Sun&Display=Facts&System=Metri c.

3. Rai, G.D. Solar Energy Utilisation. s.l. : Khanna Publishers, 1980, σ . 44.

4. Hu, C. and White, R.M. Solar Cells: From Basic to Advanced Systems. New York : McGraw-Hill, 1983.

5. *MEASUREMENT OF SOLAR SPECTRAL IRRADIANCE AT DIFFERENT TERRESTRIAL ELEVATIONS*. **Laue, E.G.** 1970. σσ. 43-57.

6. *Plataforma Solar de Almería*. [Ηλεκτρονικό] http://www.psa.es/sdg/sunpos.htm.

7. PV Potential Estimation Utility. *PVGIS European Communities*. [Ηλεκτρονικό] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php.

8. *SoDa: Services for Professionals in Solar Energy and Radiation*. [Ηλεκτρονικό] http://www.soda-is.com/eng/index.html.

9. **Green, M. A.** *Solar cells: Operating principles, technology, and system applications.* s.l. : Prentice-Hall, 1982, σ. 89.

10. PC1D. *University of New South Wales*. [Ηλεκτρονικό] http://www.pv.unsw.edu.au/links/products/pc1d.asp.

11. Jürgen Schumacher, Ursula Eicker, Dirk Pietruschka, Alberto Catani. EXACT ANALYTICAL CALCULATION OF THE ONE-DIODE MODEL PARAMETERS FROM PV MODULE.

12. **Christiana Honsberg, Stuart Bowden.** 7.14. Nominal Operating Cell Temperature. *Photovoltaics CDROM.* [Ηλεκτρονικό] http://pvcdrom.pveducation.org/.

13. Tom Markvart, Luis Castaner. *Practical Handbook of Photovoltaics*. 2003. σσ. 526-527.

14. **Dezso Sera, Remus Teodorescu, Tamas Kerekes.** *Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface.* Aalborg, Denmark : s.n.

15. **Κτενίδης, Γεώργιος Λ.** Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας των 100kW. 2008.

16. David J. Bents, Bei-Jiann Chang, Donald W. Johnson, and Christopher P. Garcia. *Closed-Cycle Hydrogen-Oxygen Regenerative Fuel Cell at the NASA Glenn Research Center*. Cleveland, Ohio : s.n.

17. **Ulleberg, Oystein.** *Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach.* Institute for Energy Technology, P.O. Box 40, N-2027 Kjeller, Norway : s.n.

18. **He, Jinglin.** *Modeling of Pressurized Hydrogen Tank and its Estimator Design.* Auburn University : s.n., 2008.

19. **Παπαδόπουλος, Παναγιώτης.** *Μοντελοποίηση Συστημάτων Κυψελών Καυσίμου με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης : s.n., 2007.

20. **D. Georgakis, S. Papathanasiou, S. Manias.** *Modeling and control of a small scale gridconnected PEM fuel cell system.* National Technological University of Athens : s.n.

21. **Γεώργιος, Αρκούδης.** *Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Φωτοβολταικών Συστημάτων Στην Ελλάδα.* Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο : s.n., 2007.

22. The Solar Power Inverter. *Solar Energy At Home*. [Ηλεκτρονικό] http://www.solarenergy-at-home.com/solar-power-inverter.html.

23. **Gallay, Roland.** Supercapacitor electrical equivalent model. [Ηλεκτρονικό] http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Energy_storage&B&Superca pacitors&B&Model.

24. Bourgeois, Richard. Advanced Alkaline Electrolysis. Global Research Center : s.n., 2006.

25. J. Cotrell, W. Pratt. *Modeling the Feasibility of Using Fuel Cells and Hydrogen Internal Combustion Engines in Remote Renewable Energy Systems*. Golden, Colorado : s.n., 2003.

26. **Robert Prouty, Darrell Roberts.** How to Calculate the Loan Constant (Cost of Capital). *Ezine Articles.* [Ηλεκτρονικό] http://ezinearticles.com/?How-to-Calculate-the-Loan-Constant-(Cost-of-Capital)&id=2480586.

27. **Sproul A.B., Green M.A.** *Improved Value for the Silicon Intrinsic Carrier Concentration from 275 to 300.* 1991.