

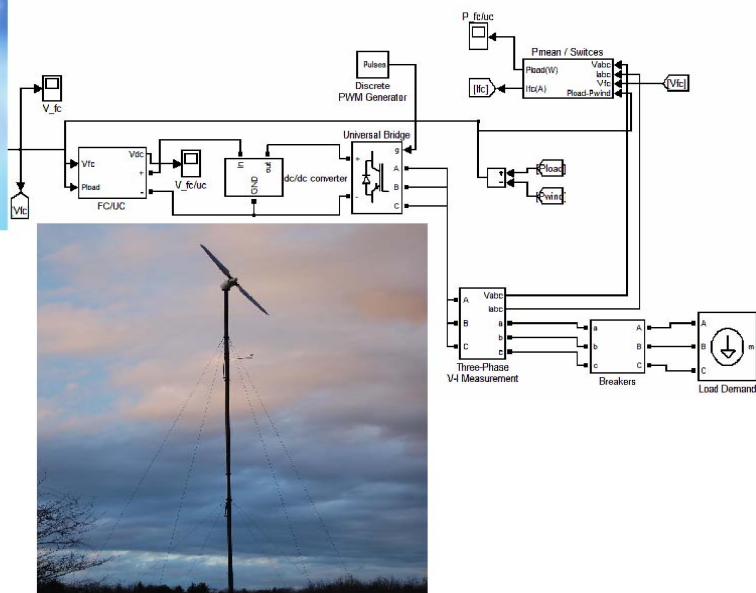
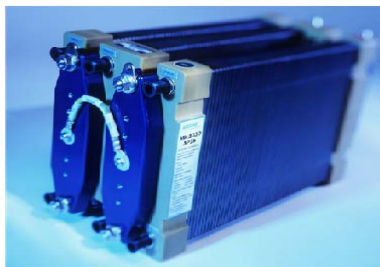


Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Δυναμική Μοντελοποίηση, Σχεδιασμός και Προσομοίωση Υβριδικού Συστήματος Ανεμογεννήτριας / Κυψέλης Καυσίμου / Υπερ- Πυκνωτών για Παραγωγή Ενέργειας

Ζάββος Αριστείδης
Α.Μ. 2001030002



Εξεταστική επιτροπή :

Σταυρακάκης Γεώργιος (επιβλέπων)

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Μπούχερ Ματτίας

Ιούνιος 2008

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται παρουσίαση, μελέτη, μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος το οποίο αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια, μία κυψέλη καυσίμου και μία δεξαμενή υπερ-πυκνωτών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γιώργο Σταυρακάκη καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Τριανταφυλλιά Νικολάου για την καθοδήγηση, τις συμβουλές, την άριστη συνεργασία και τη σημαντική βοήθεια τους σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	2
Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1	8
Υβριδικά Συστήματα	8
Κεφάλαιο 2	9
Η Ανεμογεννήτρια	9
2.1 Γενικά	9
2.2 Ο Άνεμος	9
2.2.1 Ταχύτητα Ανέμου	10
2.2.2 Διεύθυνση Ανέμου	10
2.2.3 Ανατάραξη Ανέμου	10
2.2.4 Στροβιλισμός Ανέμου	11
2.2.5 Κατανομή Του Ανέμου	11
2.3 Αιολική Ενέργεια	11
2.4 Απόδοση Αιολικής Μηχανής	12
2.4.1 Θεωρία του Δίσκου Ενέργειας	12
2.4.2 Επίδραση Περιστροφής του Όρμου	13
2.4.3 Δυναμική Συμπεριφορά Αιολικής Μηχανής	14
2.4.4 Μέγιστη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος από Ανεμογεννήτρια	15
2.5 Τύποι Αιολικών Μηχανών	17
2.5.1 Χαρακτηριστικές Ταχύτητες Αιολικών Μηχανών	17
2.5.2 Παραδοσιακοί Ανεμόμυλοι	18
2.5.3 Αργές Αιολικές Μηχανές	18
2.5.4 Γρήγορες Αιολικές Μηχανές	19
2.5.5 Άλλες Αιολικές Μηχανές	19
2.6 Μέρη Μιας Ανεμογεννήτριας Οριζοντίου Άξονα	19
2.6.1 Η Πτερωτή	20
2.6.2 Ο Πύργος	21
2.6.3 Το Κέλυφος της Ατράκτου	21
2.6.4 Ο Κύριος Άξονας	21

2.6.5 Ο Πολλαπλασιαστής Στροφών	22
2.6.6 Το Σύστημα Πέδησης Άξονα Δρομέα	22
2.6.7 Η Ηλεκτρική Γεννήτρια	23
2.6.7.1 Σύγχρονη Ηλεκτρική Γεννήτρια	23
2.6.7.2 Ασύγχρονη Ηλεκτρική Γεννήτρια	24
2.6.8 Σύστημα Προσανατολισμού	25
2.6.9 Σύστημα Ελέγχου Πτερυγίων	26
2.6.10 Σύστημα Ελέγχου	26
Κεφάλαιο 3	27
Κυψέλες Καυσίμου	27
3.1 Γενικά	27
3.2 Λειτουργία Ιδανικής Κυψέλης Καυσίμου	27
3.3 Είδη Κυψελών καυσίμου	29
3.3.1 Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC ή PEFC)	29
3.3.2 Alkaline Fuel Cell (AFC)	31
3.3.3 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	31
3.3.4 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	32
3.3.5 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	33
3.3.6 Γενικά Χαρακτηριστικά των Κυψελών Καυσίμου	34
3.4 Αναλυτική Παρουσίαση Μιας PEMFC	35
3.4.1 Μembrάνη Ανταλλαγής Ιόντων (Proton Exchange Membrane)	36
3.4.2 Πορώδες Στρώμα (Porous Banking Layer)	36
3.4.3 Ήλεκτρο-καταλύτης	36
3.4.4 Διαχείριση Νερού	37
3.5 Φυσική Εξήγηση της Λειτουργίας Μιας PEMFC	37
3.6 Υπολογισμός Απόδοσης Μιας Κυψέλης Καυσίμου	40
3.7 Η Χρησιμοποίηση	41
3.8 Υπολογισμός Απωλειών	41
Κεφάλαιο 4	44
Μοντελοποίηση	44
4.1 Το Μοντέλο της Αιολικής Μηχανής	46
4.2 Το Μοντέλο της Ασύγχρονης Γεννήτριας	49

4.3 Το Μοντέλο του AC/DC Μετατροπέα	51
4.4 Ο DC/AC Μετατροπέας της Ανεμογεννήτριας	54
4.5 Το Συνολικό Σύστημα της Ανεμογεννήτριας	55
4.6 Η Κυψέλη Καυσίμου	56
4.7 Οι Υπέρ – Πυκνωτές	60
4.8 Ο Ηλεκτρολύτης	62
4.9 Η Δεξαμενή Καυσίμου	64
4.10 Ο Έλεγχος Εξόδου του Συστήματος FC/UC	65
4.11 Ο DC/AC Μετατροπέας του Συστήματος FC/UC	66
4.12 Breakers / Switches	66
4.13 Το Μοντέλο του Συνολικού FC/UC Συστήματος	68
4.14 Το Wind/FC/UC Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας	69
Κεφάλαιο 5	70
Προσομοίωση του Συστήματος	70
Κεφάλαιο 6	81
Συμπεράσματα – Προτάσεις	81
Παράρτημα Α	83
Παράρτημα Β	86
Βιβλιογραφία	89

Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την παρούσα εξάρτηση των διαφόρων κρατών για την παραγωγή ενέργειας από τις κλασσικές πηγές ενέργειας, καθώς και η συνεχόμενη εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, η εκτεταμένη χρήση των οποίων έχει προκαλέσει τεράστια οικολογικά προβλήματα στο περιβάλλον του πλανήτη μας, έχουν οδηγήσει τους επιστήμονες στην αναζήτηση νέων ενεργειακών λύσεων. Οι **ήπιες μορφές ενέργειας**, όπως η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες οι οποίες σε αντίθεση με τις κοινές μέχρι τώρα μορφές παραγωγής ενέργειας είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα, και σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ.[1]

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ήπιων μορφών ενέργειας είναι ο μικρός συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερος. Για τον λόγο αυτό μελετάται η υλοποίηση τοπολογιών οι οποίες να συνδυάζουν την εκμετάλλευση περισσότερων από μίας μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτόν, όχι μόνο καλύπτεται μεγαλύτερη ζήτηση φορτίου από τον πιθανό χρήστη, αλλά ξεπερνιέται και ένα ακόμα μεγάλο μειονέκτημα το οποίο αντιμετωπίζουν τα συστήματα αυτά, η εξάρτησή τους από το κλίμα και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής στην οποία έχουν εγκατασταθεί. Για παράδειγμα, συστήματα τροφοδοσίας τα οποία συνδυάζουν συλλέκτες ηλιακής ενέργειας και ανεμογεννήτριες είναι ικανά να προσφέρουν ενέργεια τόσο κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, σε περιόδους άπνοιας, όσο και κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου δεν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια. Όπως γίνεται αντιληπτό, το κάθε ένα από τα συστήματα αυτά ίσως δεν είναι αρκετό από μόνο του για την κάλυψη των αναγκών του χρήστη κάτω από όλες τις συνθήκες, σε αντίθεση με τον συνδυασμό τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η λειτουργία ενός **υβριδικού συστήματος** το οποίο αποτελείται από μία **ανεμογεννήτρια** η οποία λειτουργεί παράλληλα με ένα σύστημα **κυψελών καυσίμου** και μίας δεξαμενής **υπερπυκνωτών**, όπως αυτό παρουσιάζεται στο σύγγραμμα των καθηγητών O.C. Onar, M. Uzunoglu και M.S. Alam [2], με κάποιες τροποποιήσεις. Αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, τα βασικά είδη των στοιχείων καυσίμου, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες του καθενός, καθώς και τα εξωτερικά συστήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία τους.

Η ανεμογεννήτρια η οποία επιλέχθηκε για την μελέτη αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι μία τυπική γρήγορη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και μέσης ισχύος, συνδεδεμένη σε ασύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια τεσσάρων πόλων.

Από τα είδη των κυψελών καυσίμου επιλέγονται οι Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) λόγω της απλότητας στη λειτουργία τους και της πληθώρας επιστημονικών μελετών που υπάρχει για αυτές. Στη συνέχεια αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος, τα διάφορα μέρη από τα οποία αποτελείται και γίνεται αναφορά στα επιπλέον συστήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία και για τη διασύνδεση της ανεμογεννήτριας και των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο ή το φορτίο.

Στόχος της λεπτομερούς ανάλυσης είναι η δημιουργία ενός μοντέλου στο λογισμικό Matlab/Simulink. Γίνεται περιγραφή των βασικών εξισώσεων, των απωλειών και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση. Παρουσιάζεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Simulink και περιγράφονται τα διάφορα blocks καθώς και η φυσική τους ερμηνεία. Στη συνέχεια σχεδιάζεται η V-I χαρακτηριστική του μοντέλου και διάφορα διαγράμματα για την παρατήρηση των αλλαγών σημαντικών μεγεθών στο εσωτερικό της κυψέλης όπως οι μερικές πιέσεις καυσίμου, οι απώλειες, η απόδοση και η ισχύς.

Το μοντέλο του συστήματος αποτελείται από το μοντέλο της ανεμογεννήτριας, το οποίο αποτελείται από την αιολική μηχανή, την ασύγχρονη γεννήτρια καθώς και τα απαραίτητα εξωτερικά συστήματα ισχύος (ac/dc μετατροπέας, dc/ac μετατροπέας) τα οποία χρειάζονται για την συνδεσμολογία της ανεμογεννήτριας με το υπόλοιπο σύστημα. Με την χρήση του Simulink μπορούμε να δούμε τον τρόπο λειτουργίας του μοντέλου καθώς και να σχεδιάσουμε την V-I χαρακτηριστική της ανεμογεννήτριας, καθώς και να παρατηρήσουμε τις αλλαγές στην ισχύ την οποία παρέχει κατά την διάρκεια της αλλαγής των καιρικών συνθηκών και τον τρόπο με τον οποίο αυτή διανέμεται στο υβριδικό σύστημα με βάση την ζήτηση φορτίου την οποία απαιτεί ο χρήστης την κάθε στιγμή.

Επιπρόσθετα γίνεται μια απλοποιημένη μοντελοποίηση μιας στοίβας (stack) 712 κυψελών καυσίμου και μίας δεξαμενής 148 υπερπυκνωτών, η οποία είναι συνδεδεμένη παράλληλα με την δεξαμενή κυψελών, και σχεδιάζεται η V-I χαρακτηριστική της στοίβας των κυψελών και της δεξαμενής των πυκνωτών, καθώς και διαγράμματα άλλων μεγεθών όπως η ισχύς την οποία καλύπτουν οι πυκνωτές σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης φορτίου από τον χρήστη, οι μερικές πιέσεις καυσίμου, η απόδοση και η ισχύς.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και τα προβλήματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση, οι παραδοχές οι οποίες έγιναν κατά την μελέτη και την υλοποίηση, και προτείνονται μελλοντικές βελτιώσεις του μοντέλου μας.

Υβριδικά Συστήματα

Υβριδικά λέγονται τα δυναμικά εκείνα συστήματα ελέγχου τα οποία συνδυάζουν δύο ξεχωριστούς τύπους δυναμικών συστημάτων, **συνεχόμενων** και **διακριτών**, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί δηλαδή να παρουσιάζει συνεχόμενη δυναμική συμπεριφορά, η οποία μπορεί να περιγραφεί από μία διαφορική εξίσωση, και ταυτόχρονα διακριτή συμπεριφορά, η οποία περιγράφεται από μία διακριτή ακολουθία. Ο όρος «υβριδικό δυναμικό σύστημα» χρησιμοποιείται συνήθως από τους επιστήμονες για να ξεχωρίσουν τα συστήματα εκείνα τα οποία συνδυάζουν **νευρωνικά δίκτυα** και **fuzzy logic**, ή **ηλεκτρολογικούς** και **μηχανικούς** τρόπους παραγωγής και διάδοσης ενέργειας. Η μελέτη τέτοιων συστημάτων είναι πρωταρχικής σημασίας όσον αφορά τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου με υψηλό βαθμό αυτονομίας, καθώς παρέχουν μεγάλο βαθμό «ελαστικότητας» στην μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων.

Γενικά, η λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος μπορεί να περιγραφεί εν συντομία ως εξής : η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα εξαρτάται από τα *σήματα ελέγχου*, τα οποία μπορούν να αλλάξουν με βάση τους δυναμικούς νόμους των δεδομένων του συστήματος. Τα δεδομένα περιέχουν μία *συνεχόμενη εξίσωση*, $f(x)$, η οποία περιγράφει την συνεχή δυναμική συμπεριφορά, ένα σύνολο δεδομένων C , μέσα στο οποίο επιτρέπεται η συνεχόμενη ροή, μία *διακριτή εξίσωση*, $g(x)$, η οποία περιγράφει την διακριτή δυναμική του συστήματος, και ένα σύνολο δεδομένων D , μέσα στο οποίο επιτρέπεται η διακριτή εξέλιξη των δεδομένων.[3]

Το σύστημα το οποίο μελετήσαμε σε αυτήν την διπλωματική εργασία είναι ένα υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας και κυψέλης κυττάρων καυσίμου. Το φορτίο το οποίο ζητάει ο χρήστης παράγεται από την τουρμπίνα της ανεμογεννήτριας και παράλληλα δουλεύει και η κυψέλη καυσίμου. Αν η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παρέχει την ενέργεια η οποία απαιτείται, τότε συνεισφέρει και η κυψέλη στην παραγωγή ενέργειας. Αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας από την ανεμογεννήτρια, τότε αυτή αποθηκεύεται σε μορφή υδρογόνου για μελλοντική χρήση από την κυψέλη.

Κεφάλαιο 2

Η Ανεμογεννήτρια

2.1 Γενικά

Γενικά, **αιολική ενέργεια** ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές ενέργειας. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα (περίπου το 700 π.Χ.) οι ανεμόμυλοι στην ξηρά.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής, μιας και το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.[4]

2.2 Ο Άνεμος

Ως άνεμος ορίζεται ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος βρίσκεται σε κίνηση [5]. Η κίνηση αυτή οφείλεται κυρίως στην περιστροφή της Γης και στην ηλιακή ακτινοβολία. Ο καθορισμός του διανύσματος του ανέμου γίνεται με μέτρο την ένταση του ανέμου και με φορά την κατεύθυνση του ανέμου. Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου είναι η **ταχύτητα**, η **διεύθυνση**, η **ανατάραξη** στην περιοχή, ο **στροβιλισμός** και η **κατανομή** του ανέμου.

2.2.1 Ταχύτητα Ανέμου

Η **στιγμιαία ταχύτητα** του ανέμου για μία χρονική στιγμή t δίνεται από τον τύπο

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V} + \mathbf{V}'(t)$$

ενώ η **μέση ταχύτητα** του ανέμου για μία χρονική περίοδο $[t_0, T]$ δίνεται από τον τύπο

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt$$

Η **μέγιστη ταχύτητα** του ανέμου σε μία περιοχή εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της περιοχής και υπολογίζεται βάση δεδομένων τα οποία συλλέγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε 20 ώρες ή κάθε χρόνο). Τέλος, ως **ριπή** ανέμου ορίζεται η ξαφνική αύξηση της ταχύτητάς του, με μέτρο το οποίο διαφέρει 4-5 m/s από την μέχρι εκείνη την στιγμή ταχύτητα του ανέμου και έχει διάρκεια περίπου 20 δευτερολέπτων. Συνήθως η ταχύτητα μίας ριπής ξεπερνά τα 9 m/s και αν διαρκέσει περισσότερο από 30 δευτερόλεπτα οφείλουμε να κλείσουμε την ανεμογεννήτρια για λόγους ασφαλείας. [5]

2.2.2 Διεύθυνση Ανέμου

Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο εκείνο του ορίζοντα από το οποίο φυσάει ο άνεμος σε σχέση με εμάς. Η διεύθυνση του ανέμου δεν είναι πάντα σταθερή σε μία περιοχή αλλά ταλαντώνεται συνεχώς γύρω από αυτήν. Η διεύθυνση του ανέμου με την μεγαλύτερη συχνότητα σε μία περιοχή ονομάζεται **επικρατούσα**, ενώ η περιοχή αυτή η οποία βρίσκεται πάνω στην επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου ονομάζεται **προσήνεμη**. [5]

2.2.3 Ανατάραξη Ανέμου

Ανατάραξη του αέρα για μία χρονική περίοδο $[t_0, T]$ είναι η διακύμανση γύρω από την μέση τιμή του ανέμου της συγκεκριμένης περιοχής [5]. Το μέτρο της ανατάραξης δίνεται από τον τύπο:

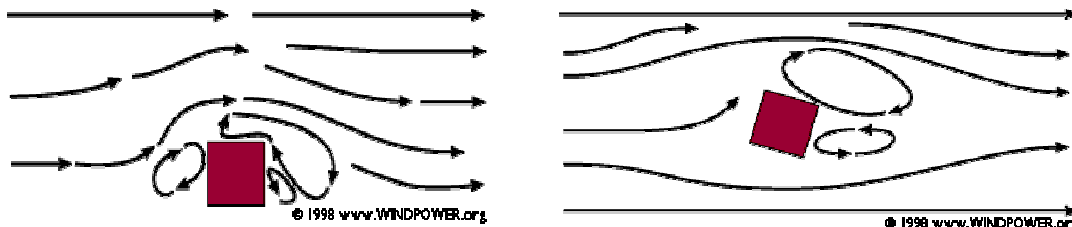
$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt$$

ενώ το μέτρο της έντασης της ανατάραξης δίνεται από τον τύπο :

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$

2.2.4 Στροβιλισμός Ανέμου

Η ανατάραξη του αέρα και η διαμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους δημιουργεί οργανωμένους στροβίλους οι οποίοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την όλη εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής. [5]



2.2.5 Κατανομή Ανέμου

Για να καταλήξουμε σε ασφαλή αποτελέσματα για την εγκατάσταση μιας αιολικής μηχανής απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Το κόστος των μετρήσεων και η αναπόφευκτη καθυστέρηση του έργου σε συνδυασμό με την συχνή έλλειψη μακροχρόνιων μετρήσεων στις περιοχές που ενδιαφερόμαστε οδηγούν στην χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων τα οποία μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να εκτιμηθεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο.

Το πιο δημοφιλές μοντέλο κατανομής ανέμου είναι η **κατανομή Weibull** η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για υψόμετρο μέχρι 100m από το έδαφος. [5]

2.3 Αιολική Ενέργεια

Ο τύπος της κινητικής ενέργειας είναι
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 .$$

Γνωρίζουμε ότι $m = \rho \cdot U = \rho \cdot A \cdot S = \rho \cdot A \cdot V \cdot t$, όπου A είναι η περιοχή

την οποία διαπερνά κάθετα ο αέρας με ταχύτητα $V = S/t$.

Οπότε ο παραπάνω τύπος για

την κινητική ενέργεια γίνεται $E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$

αφού ως ισχύς ορίζεται η ενέργεια η οποία παράγεται σε συγκεκριμένο χρόνο.

Στην σελίδα [4] ορίσαμε την μέση ταχύτητα του ανέμου ως $\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt$

- Άρα ο τύπος της μέσης αιολικής ισχύς σε χρόνο T είναι

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 \Rightarrow P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [V(t)]^3 dt$$

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της επιφάνειας σάρωσης και συνάρτηση του κύβου της ταχύτητας. Επίσης, σε μέσα γεωγραφικά πλάτη, η ισχύς του ανέμου δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα.[6]

2.4 Απόδοση Αιολικής Μηχανής

Καμία αιολική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η απόδοση της ανεμογεννήτριας καθορίζεται από το **όριο Betz**, την **επίδραση της περιστροφής του όμορου** και την **δυναμική συμπεριφορά** της αιολικής μηχανής.

2.4.1 Θεωρία του Δίσκου Ενέργειας

Σύμφωνα με την θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από τον δρομέα θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς απώλειες. Ο δρομέας εξετάζεται ως «μαύρο κουτί» διαμέσου του οποίου περνά ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με πτώση της στατικής του πίεσης. Η πτερωτή θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό (δίσκος ενέργειας). Μία αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου γιατί τότε η μάζα του αέρα που διαπερνά την πτερωτή μηχανή θα είχε στην συνέχεια μηδενική ενέργεια. Υπάρχει ένα μέγιστο ποσό το οποίο ονομάζεται **όριο Betz**.

Το όριο Betz προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ενέργειας και υπολογίζεται ως το ακρότατο της γραφικής παράστασης dC_p / da , και το ακρότατο της γραφικής dC_T / da όπου

- C_p , είναι ο συντελεστής ισχύος και ορίζεται ως $C_p = 4a(1-a)^2$ και
 C_T , είναι ο συντελεστής αντίστασης ο οποίος ορίζεται ως $C_T = 4a(1-a)$

- a , είναι ο λόγος $a = \frac{U - V_s}{U}$

με U την αρχική ταχύτητα του ανέμου καθώς αυτός έρχεται από το άπειρο και V_s την ταχύτητα του ανέμου αφότου περάσει από την πτερωτή της αιολικής μηχανής. Προφανώς η ταχύτητα V_s είναι μικρότερη της αρχικής ταχύτητας U γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα καθώς αυτός περνάει από μέσα του.

Η μέγιστη τιμή για τον συντελεστή ισχύος προκύπτει για $a = 1/3$ και είναι $C_{p \max} = 59\%$.

Η τιμή αυτή είναι και το όριο Betz της αιολικής μηχανής. Προκύπτει λοιπόν ότι : $P_{\max} = C_{p \max} \cdot \bar{P}$,

όπου $\bar{P}$ η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου. [7]

2.4.2 Επίδραση Περιστροφής του Όμορου

Η προηγούμενη ανάλυση βασίστηκε στην υπόθεση ότι ο όμορος του πεδίου ροής στερείται συστροφής (2 αντίθετα στρεφόμενοι δρομείς). Στην πράξη όμως και στην ιδανικότερη περίπτωση έχει συστροφή που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του ρεύματος του αέρα με τον δρομέα. Η κινητική ενέργεια που έχει το ρευστό μετά τον δρομέα αποτελείται από την κινητική ενέργεια που οφείλεται στην **αξονική-μεταφορική ταχύτητα** του ανέμου και στην **περιφερειακή κινητική ενέργεια** που οφείλεται στην συστροφή του ρευστού. [7]

Η περιφερειακή κινητική ενέργεια δεν μπορεί να ανακτηθεί στο άπειρο και να γίνει στατική πίεση και γι' αυτό αποτελεί ενεργειακή απώλεια του συστήματος η οποία μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Το ρευστό στην προσήνεμη πλευρά του δίσκου στερείται συστροφής (αστρόβιλο) και η κινητική του ενέργεια οφείλεται μόνο στην αξονική μεταφορική κίνησή του.

2.4.3 Δυναμική Συμπεριφορά της Αιολικής Μηχανής

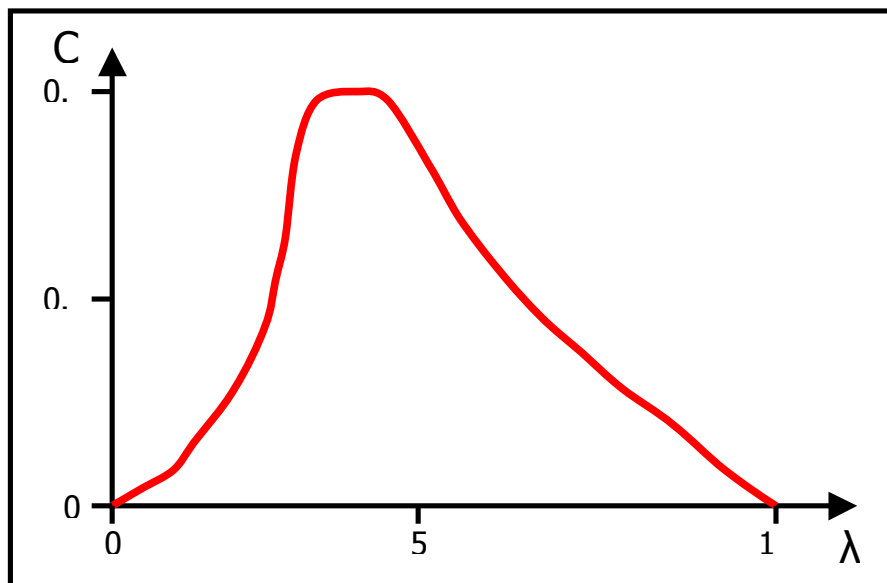
Η απόδοση μίας αιολικής μηχανής επηρεάζεται από την απόσταση των πτερυγίων για δεδομένες ταχύτητες ανέμου. Η συχνότητα της περιστροφής των πτερυγίων της αιολικής μηχανής πρέπει να προσαρμόζεται με την ταχύτητα του ανέμου ανά πάσα στιγμή. Ο συντελεστής απόδοσης μίας μηχανής εξαρτάται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά των πτερυγίων της :

- Τον λόγο της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ ο οποίος ορίζεται ως $\lambda = \frac{\text{ταχύτητα ακρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{R\omega}{u}$

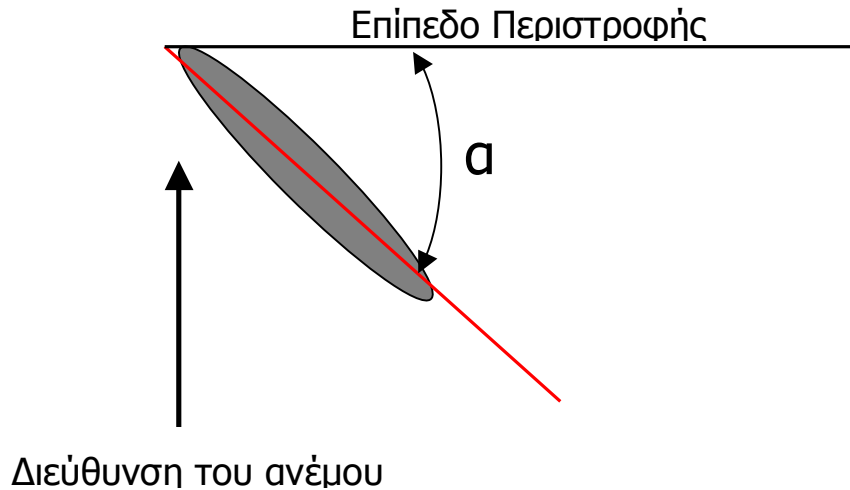
Για μέγιστη ισχύ έχουμε: $\lambda = \frac{2\pi R}{n d} = \frac{2\pi}{k n}$ όπου n ο αριθμός των ακροπτερυγίων, d το

πλάτος του ακροπτερυγίου και $k = d/R$. Όταν $k=1/2$ το λ γίνεται μέγιστο, οπότε για μια αιολική μηχανή με n πτερύγια έχουμε: $\lambda_{\text{max}} = 4 \cdot n/n$.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του λόγου του ακροπτερυγίου. [7]



- Την γωνία πρόσπτωσης **α** η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ χορδής πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής του πτερυγίου. [7]



- Τις δυνάμεις οι οποίες ασκούνται πάνω στην πτερωτή. Οι βασικές δυνάμεις αυτές είναι δύο: Η **ανωστική** δύναμη και η **οπισθέλκουσα**. Η ανωστική δύναμη είναι κάθετη στην οπισθέλκουσα, η οποία εμποδίζει την περιστροφή. Ένας από τους βασικούς στόχους του αεροδυναμικού σχεδιασμού της πτερωτής είναι η κατασκευή πτερυγίων με υψηλό λόγο ανωστικής προς οπισθέλκουσα. [7]

2.4.4 Μέγιστη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος από Ανεμογεννήτρια

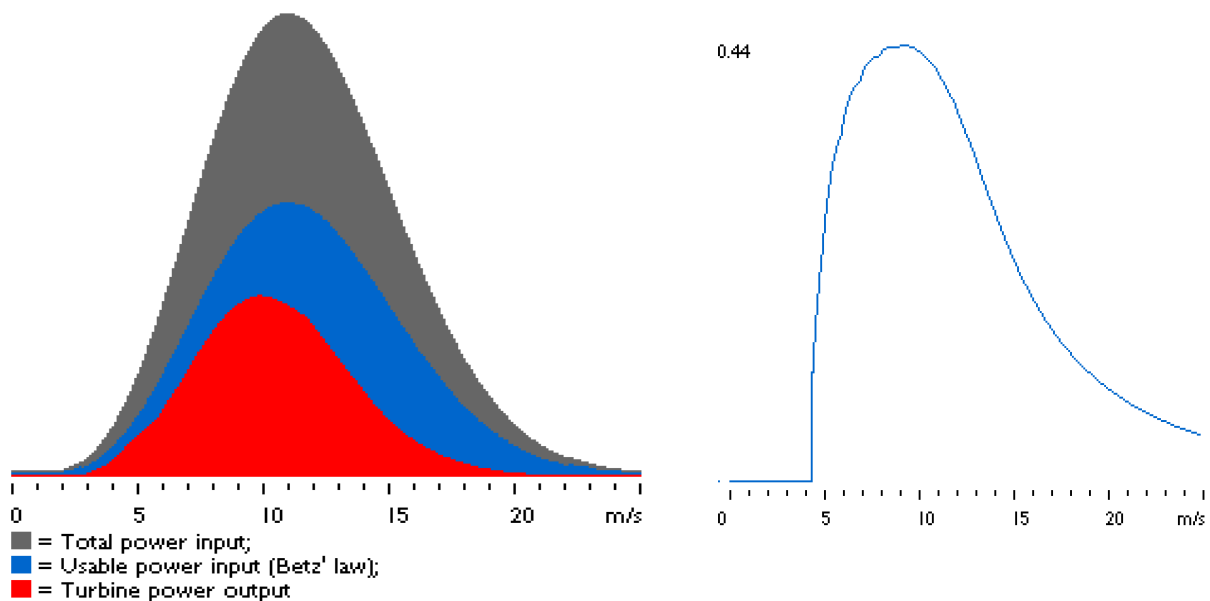
Η μέγιστη αιολική ενέργεια που δεσμεύει μια ιδανική αιολική μηχανή είναι ένα τμήμα της κινητικής ενέργειας του ανέμου και ισούται με: $E_{max} = C_p \cdot E_{wind}$, όπου $C_p = 0.59$ το όριο Betz. Η ηλεκτρική ισχύς που παίρνουμε από την αιολική μηχανή είναι:

$$P_{electric} = c_p n_{gearbox} n_{generator} n_{accumulator} P_{wind}$$

όπου: **$\eta_{gearbox}$** η απόδοση του πολλαπλασιαστή στροφών, **$\eta_{generator}$** η απόδοση της γεννήτριας, **$\eta_{accumulator}$** η απόδοση των συσσωρευτών και **P_{wind}** η ισχύς του ανέμου. [7]

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε μια σχηματική απεικόνιση της αρχικής συνολικής ενέργειας του ανέμου και της τελικής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Με γκρι χρώμα είναι η κατανομή Weibull η οποία αντιπροσωπεύει την διαθέσιμη αιολική ενέργεια, με μπλε χρώμα η μέγιστη ενέργεια την οποία μπορούμε να δεσμεύσουμε με βάση το όριο Betz και τέλος με κόκκινο χρώμα η ηλεκτρική ισχύς η οποία παράγεται με βάση την απόδοση της εκάστοτε αιολικής μηχανής.

Power of the Wind



Το βασικό συμπέρασμα το οποίο μπορούμε να βγάλουμε από τα παραπάνω είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης αιολικής ενέργεια βρίσκεται για ταχύτητες **μεγαλύτερες από την μέση ταχύτητα του ανέμου** του τόπου όπου είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου έχουν πολύ μεγαλύτερο ενεργειακό «περιεχόμενο» σε σχέση με τις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου.

Επίσης, ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας, ο οποίος προσδιορίζει το πόσο αποδοτικά η μηχανή μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική, εξαρτάται και αυτός από την ταχύτητα του ανέμου καθώς είναι μικρός για χαμηλές ταχύτητες ανέμου ενώ για υψηλές αυξάνει και φτάνει στην μέγιστη τιμή του. [7]

2.5 Τύποι Αιολικών Μηχανών

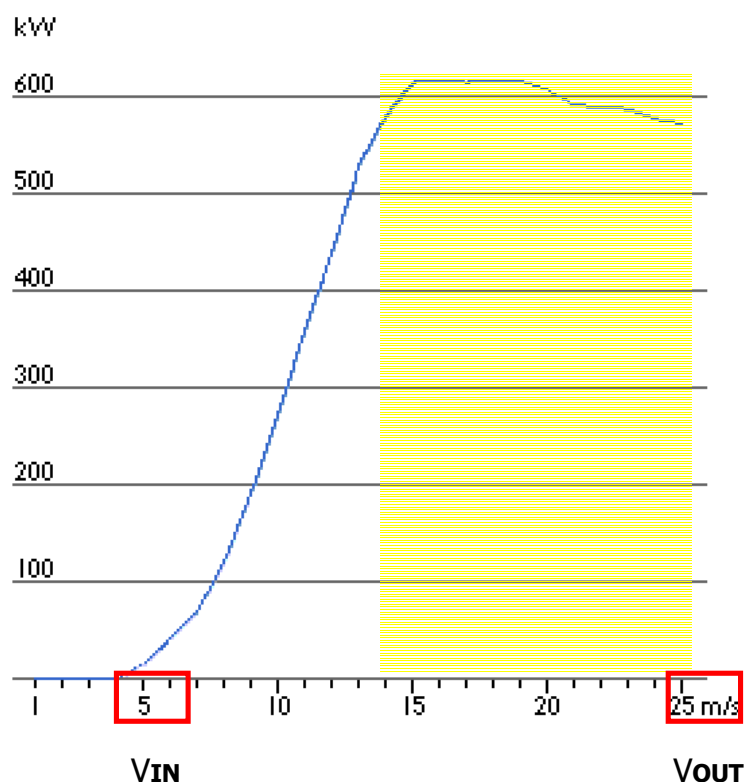
Ο σχεδιασμός μίας αιολικής μηχανής, τεχνικά και οικονομικά, η οποία θα εκμεταλλεύεται πλήρως την αιολική ενέργεια της περιοχής στην οποία θα εγκατασταθεί περιλαμβάνει την μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για εγκατάσταση της αιολικής μηχανής και πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας, καθώς και τον σχεδιασμό της αεροδυναμικής διάταξης που να μετατρέπει κατά τον αποδοτικότερο τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική. [8]

Ακόμα, χρειάζεται μελέτη της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου σε άλλη πιο συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα, όπως και την εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.

Στην συνέχεια αναφέρονται οι πιο διαδεδομένοι τύποι αιολικών μηχανών καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

2.5.1 Χαρακτηριστικές Ταχύτητες Αιολικών Μηχανών

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας όλων των αιολικών μηχανών είναι οι χαρακτηριστικές ταχύτητες, οι οποίες είναι τρεις : Η **ταχύτητα έναρξης λειτουργίας** (V_{in}), η **ονομαστική ταχύτητα** (V_R) και η **ταχύτητα εξόδου** (V_{out}). Ταχύτητα έναρξης V_{in} είναι η ταχύτητα εκείνη του ανέμου για την οποία η αιολική μηχανή ξεκινάει να κινείται και να παράγει ενέργεια. Για τιμές μεγαλύτερες της V_{in} αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου έχουμε αύξηση της ωφέλιμης ισχύος μέχρι μια ταχύτητα V_R πέρα από την οποία υπάρχει σύστημα που διατηρεί σχεδόν σταθερή την παραγόμενη ισχύ (ονομαστική ισχύς). Έτσι θα πρέπει να βρεθεί για κάθε θέση εγκατάστασης της αιολικής μηχανής η καλύτερη σχέση μεταξύ των παρατηρούμενων ταχυτήτων του ανέμου και της ονομαστικής ταχύτητας της μηχανής έτσι ώστε $V_R = 1.9 \langle V \rangle$, όπου $\langle V \rangle$ η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στη θέση εγκατάστασης. Τέλος, για πολύ υψηλές ταχύτητες του ανέμου πρέπει η αιολική μηχανή να τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας. Η ταχύτητα του ανέμου πάνω από την οποία αποφασίζουμε να θέσουμε την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας ονομάζεται ταχύτητα εξόδου V_{out} . Σήμερα βέβαια στις μεγάλες αιολικές μηχανές γίνεται προσπάθεια να λειτουργούν σε οποιοσδήποτε ταχύτητες ανέμου. [8]



2.5.2 Παραδοσιακοί Ανεμόμυλοι

Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι έχουν μήκος πτερυγίων από 5-15m και πλάτος πτερυγίων περίπου το 1/5 του μήκους των πτερυγίων τους. Η ταχύτητα περιστροφής ενός ανεμόμυλου κυμαίνεται στις 10-40 στροφές ανά λεπτό ενώ ο λόγος ακροπτερυγίου είναι 2-3. Τέλος, με συντελεστή απόδοσης 0.3 η μέγιστη παραγόμενη ισχύς $P_{max} = 0.15 \cdot (2 \cdot R)^2 \cdot u^3$. [8]

2.5.3 Αργές Αιολικές Μηχανές

Αυτού του είδους οι μηχανές κάνουν χρήση ανεμοδείκτη για τον προσανατολισμό της μηχανής. Ο αριθμός των πτερυγίων τους είναι από **12** έως **24** (πολύπτερες) και η διάμετρος της πτερωτής είναι **6-8m**. Λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου ($V_{in} = 2-3 \text{ m/sec}$) και χρησιμοποιούνται συνήθως για άντληση νερού. Λόγος ακροπτερυγίου για βέλτιστη απόδοση είναι περίπου **1** ενώ ο συντελεστής απόδοσής τους είναι 0.3. Οι μηχανές αυτές είναι συνήθως χαμηλής ισχύος λόγω του μεγάλου βάρους τους και επειδή λειτουργούν σε μικρές ταχύτητες ανέμου. [8]

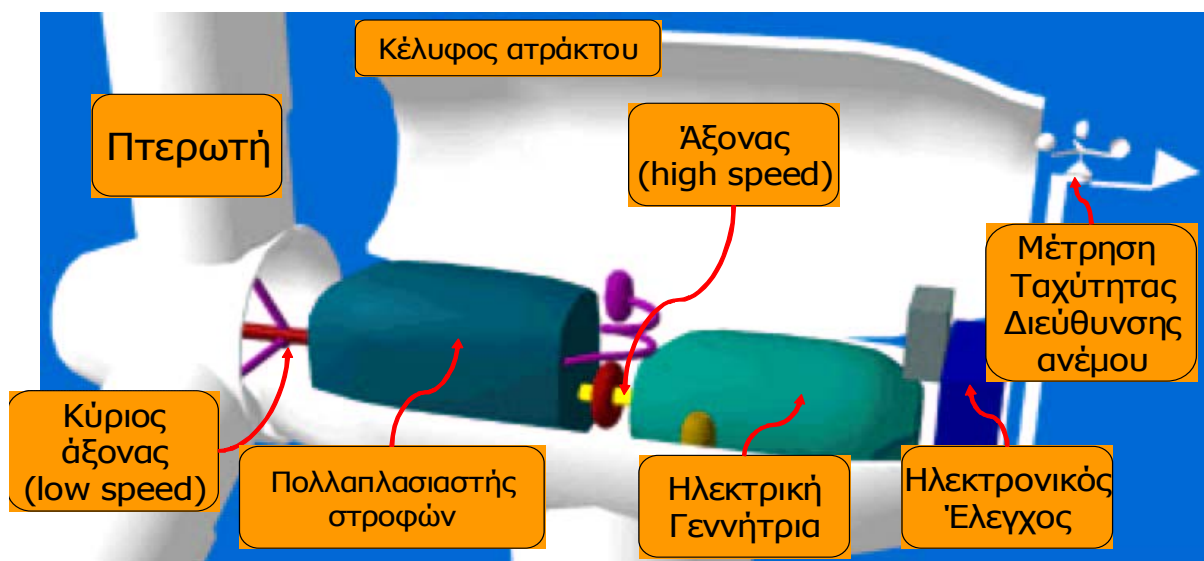
2.5.4 Γρήγορες Αιολικές Μηχανές

Μηχανές μικρού σχετικά βάρους και μικρού κόστους κατασκευής σε σχέση με τις πολύπτερες. Ο αριθμός των πτερυγίων τους είναι **2-4** και ο λόγος του ακροπτερυγίου τους φτάνει μέχρι και **10** (για βέλτιστη απόδοση περίπου **6**). Λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου ($V_{in} = 5\text{m/sec}$) ενώ συχνά χρησιμοποιείται ανεμοδείκτης ή είναι αυτοπροσανατολιζόμενες. Τέλος ο συντελεστής απόδοσης τους είναι **0.4**. [8]

2.5.5 Άλλες Αιολικές Μηχανές

- Μονόπτερη αιολική μηχανή : Λειτουργεί με πτερύγιο και αντίβαρο και εμφανίζει σημαντικούς κραδασμούς.
- Αιολική μηχανή με ηθμό διάχυσης : Παρουσιάζουν αύξηση της ροής στην πτερωτή. Ο ηθμός είναι τοποθετημένος έτσι ώστε η στενή διατομή του να στρέφεται προς την διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Η χρήση τους είναι σπάνια λόγω προβλημάτων όπως δύσκολη περιστροφή του συστήματος.
- Αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα : Όλες οι μηχανές τις οποίες αναφέραμε μέχρι τώρα είναι οριζόντιου άξονα. Οι πιο διαδεδομένες αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές τύπου **Savonius** και **Darrieus**. [8]

2.6 Μέρη Μιας Ανεμογεννήτριας Οριζοντίου Άξονα



Από όλους τους παραπάνω τύπους αιολικών μηχανών, ο πιο διαδεδομένος για την παραγωγή ενέργειας είναι αυτός της γρήγορης αιολικής μηχανής οριζοντίου άξονα λόγω του μικρού κόστους κατασκευής της, της ικανότητάς της να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες ανέμου και του αρκετά καλού συντελεστή απόδοσής της.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι **η πτερωτή, ο πύργος, το κέλυφος της ατράκτου, ο κύριος άξονας, ο πολλαπλασιαστής στροφών, το σύστημα πέδησης άξονα δρομέα, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου όλων των λειτουργιών της ανεμογεννήτριας. [8]**

2.6.1 Η Πτερωτή

Στόχος στο σχεδιασμό του δρομέα είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων παραμέτρων που τον συνθέτουν (διάμετρος δρομέα, γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, αριθμός και υλικό πτερυγίων κλπ.) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και ελαχιστοποίηση του κόστους. Η διάμετρος της πτερωτής εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης ενώ η γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας της πτερωτής επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας του ακροπτερυγίου (λ) να βρίσκεται στην περιοχή βέλτιστης τιμής του συντελεστή ισχύος (C_p). Ο αριθμός των πτερυγίων όπως αναφέραμε και πιο πριν κυμαίνεται από 2 έως 4 πτερύγια και ο συντελεστής απόδοσης είναι περίπου 4. Ο τρίπτερος δρομέας είναι ~5% αποδοτικότερος από τον δίπτερο και με μικρότερα φορτία, αλλά ακριβότερος. Ο μονόπτερος είναι οικονομικότερος αλλά με 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από τον δίπτερο.

Ανάλογα με την ισχύ την οποία θέλουμε να μας παρέχει η ανεμογεννήτρια αυξάνεται και το μήκος της διαμέτρου της πτερωτής. Για ζήτηση φορτίου **μέχρι 20 KW** η διάμετρος της πτερωτής φτάνει μέχρι τα **10m (μηχανή μικρής ισχύος)**. Για ζήτηση φορτίου **μέχρι 250 KW** η διάμετρος της πτερωτής φτάνει μέχρι τα **25m (μηχανή μέσης ισχύος)**. Τέλος, για ζήτηση φορτίου **από 500 έως 2500 KW** η διάμετρος της πτερωτής φτάνει μέχρι και τα **80m (μηχανή μεγάλης ισχύος)**. Γενικά είναι δύσκολο να ξεπεράσει κανείς την ισχύ των 2500 KW γιατί απαιτείται κατασκευή πτερωτών πολύ μεγάλης διαμέτρου (άνω των 80m) η οποία παρουσιάζει σοβαρά τεχνικά προβλήματα.

Είναι σημαντικό για την επιλογή των υλικών κατασκευής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, η συμπεριφορά των υλικών σε εναλλασσόμενη φόρτιση που μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη γήρανση των πτερυγίων. [8]

Τα πτερύγια σε μικρές ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται από πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο. Στις μεσαίου μεγέθους πτερωτές χρησιμοποιούνται επίσης υαλονήματα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις, η ακόμα και ξύλο το οποίο εμφανίζει μεγάλη αντοχή και μικρή κόπωση. Τα πτερύγια σε μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτρια κατασκευάζονται από εποξικό υλικό ενισχυμένο με υαλονήματα καθώς και ανθρακονήματα, ενώ χρησιμοποιείται η τεχνολογία των ελίκων των αεροσκαφών.

Υπάρχουν πτερύγια σταθερού και μεταβλητού βήματος. Στην δεύτερη περίπτωση έχουν ως σκοπό την εξισορρόπηση, για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, της παραγόμενης ισχύος με την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης (π.χ. γεννήτριας) ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα υπερφόρτωσης.

2.6.2 Ο Πύργος

Ο πύργος είναι κυλινδρικός και ελαφρά κωνικός. Επιμεταλλώνεται και βάφεται συνήθως με λευκή βαφή. Κατασκευάζεται συνήθως σε 3 ή περισσότερα τμήματα με εσωτερικές φλάντζες σύνδεσης. [8]

2.6.3 Το Κέλυφος της Ατράκτου

Το κέλυφος της ατράκτου (nacelle) είναι συνήθως από πολυεστερικό υλικό ενισχυμένο με υαλοβάμβακα και προστατεύει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της ανεμογεννήτριας. Η πρόσβαση στην άτρακτο επιτυγχάνεται από κεντρικό άνοιγμα, ανεξάρτητα από τη θέση της ατράκτου ως προς τον πύργο. [8]

2.6.4 Ο Κύριος Άξονας

Ο κύριος άξονας συνδέει το κέντρο της πτερωτής με τον πολλαπλασιαστή στροφών. Ο σφυρήλατος κύριος άξονας στηρίζεται σε δύο κύρια έδρανα. Σε μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια 600kW ο δρομέας περιστρέφεται σχετικά αργά με ταχύτητα **19 έως 30 περιστροφές το λεπτό** (RPM). Ο άξονας συνδέεται με δίκτυο σωληνώσεων του υδραυλικού συστήματος που χρησιμοποιείται για την λειτουργία των αεροδυναμικών φρένων. [8]

2.6.5 Ο Πολλαπλασιαστής Στροφών

Ο πολλαπλασιαστής στροφών (gear box) έχει στόχο την προσαρμογή των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας. Μία άμεση σύνδεση του κύριου άξονα με την γεννήτρια (50Hz AC) με 2, 4 ή 6 πόλους θα απαιτούσε μία ταχύτητα περιστροφής 1000-3000 RPM, που αντιστοιχεί 2 φορές περίπου στην ταχύτητα του ήχου. Έλλειψη του πολλαπλασιαστή στοφών απαιτεί χρήση γεννήτριας με πολλούς πόλους και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (περίπου 200 πόλους για ταχύτητα 30 RPM). Η αδράνεια του ρότορα που θα πρέπει να χειριστεί η γεννήτρια σε άμεση σύνδεση απαιτεί στιβαρή και άρα ακριβή γεννήτρια. Η τελική περιστροφή την οποία επιτυγχάνουμε φτάνει περίπου τις 1500 RPM.

Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ο πολλαπλασιαστής στροφών λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία που οδηγούν σε πολύ γρήγορη φθορά του και μείωση της διάρκειας ζωής του. Το κιβώτιο ταχυτήτων επιλέγεται να έχει ονομαστική ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και ονομαστική ροπή κατά 200% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή της αιολικής μηχανής.

Τα βασικά είδη κιβωτίων είναι δύο: **Με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών** (κιβώτιο παράλληλων αξόνων), το οποίο είναι απλούστερο κατασκευαστικά και με μικρό κόστος συντήρησης, και το **κιβώτιο όπου οι οδοντωτοί τροχοί έχουν ελικοειδή οδόντωση** (κιβώτιο με πλανητικό σύστημα τροχών), το οποίο έχει ψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, αλλά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερες στάθμες θορύβου. Για την αύξηση του χρόνου ζωής και την μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας το κιβώτιο του πολλαπλασιαστή στοφών μπορεί να στηριχθεί πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών. Σε μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια 600kW ο λόγος του πολλαπλασιαστή στροφών είναι 1:50. [8]

2.6.6 Το Σύστημα Πέδησης Άξονα Δρομέα

Οι βασικοί τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα είναι

- Μεταβολή βήματος πτερυγίου, ακροπτερυγίου ή αεροπέδη
- Στροφή του δρομέα παράλληλα στον άνεμο
- Πέδηση του άξονα

Σε περίπτωση αστοχίας των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου απαιτείται ύπαρξη συστήματος πέδησης άμεσα στον άξονα του δρομέα (συνήθως τύπου δισκόφρενο) η τοποθέτηση του οποίου γίνεται στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής όπου η ροπή πέδησης είναι μικρή. Συχνά η πέδηση είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου και ενεργοποιείται αυτόματα με την διακοπή του ρεύματος (η πέδη παραμένει ανοικτή με ηλεκτρομαγνήτες). [8]

2.6.7 Η Ηλεκτρική Γεννήτρια

Τα δύο βασικά είδη ηλεκτρικής γεννήτριας τα οποία συνδέονται στο σύστημα της ανεμογεννήτριας είναι η **σύγχρονη** και η **ασύγχρονη** ηλεκτρική γεννήτρια. Η μηχανική ισχύς μεταφέρεται από τον πολλαπλασιαστή στροφών στην ηλεκτρική γεννήτρια μέσω ενός άξονα μετάδοσης. Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. [8]

2.6.7.1 Σύγχρονη Ηλεκτρική Γεννήτρια

Οι σύγχρονες γεννήτριες, σε αντίθεση με τις ασύγχρονες, δεν απαιτούν εξωτερική τάση για την διέγερσή τους. Η διέγερση είναι συνεχούς ρεύματος και παράγεται από την ίδια την γεννήτρια. Όταν ο αιολικός σταθμός είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο τότε οι συχνότητες του δικτύου και της γεννήτριας ταυτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις των στροφών λόγω απότομων μεταβολών του ανέμου να μεταφέρονται κατευθείαν στο δίκτυο.

Στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, όταν δηλαδή δεν υπάρχει διασύνδεση με το δίκτυο ρεύματος, είναι απαραίτητη η περιστροφή των ρότορα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα για να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Στην πράξη οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιούνται ελάχιστα λόγω του σταδιακού απομαγνητισμού των μόνιμων μαγνητών, κυρίως εξαιτίας της λειτουργίας τους μέσα στα ισχυρά μαγνητικά πεδία που υπάρχουν στην γεννήτρια.

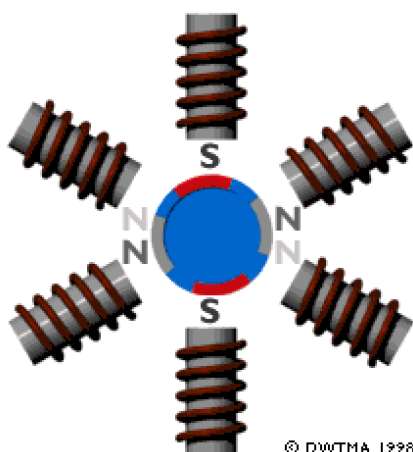
Επίσης, οι ισχυροί μαγνήτες κατασκευάζονται από σπάνια υλικά (π.χ. Νεοδύμιο) τα οποία είναι κατά κανόνα ακριβά. Για τον λόγω αυτό γίνεται εκτεταμένη χρήση ηλεκτρομαγνητών στο ρότορα ο οποίος τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από το δίκτυο.

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας περιγράφεται από τις εξισώσεις

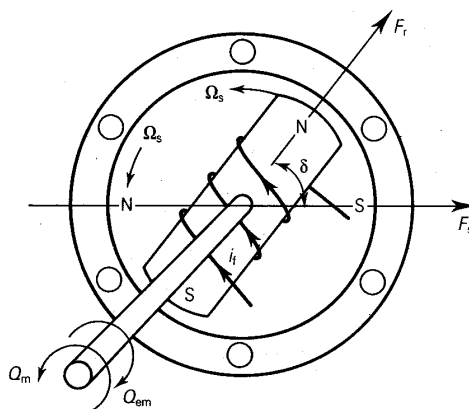
$$\Omega_s = \frac{P}{2} \Omega_m$$

και

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ Hz}$$



© DWTMA, 1998



όπου Ω_s (rad/sec) η ταχύτητα περιστροφής του στάτη, η οποία συμπίπτει με την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του ρότορα, Ω_m (rad/sec) η μηχανική ταχύτητα περιστροφής και P ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Η συχνότητα f (Hz) του πεδίου εξαρτάται από τους πόλους της γεννήτριας και την μηχανική ταχύτητα n (rad/sec). Από τους παραπάνω τύπους μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων, μπορούμε να μειώσουμε την απαραίτητη ταχύτητα περιστροφής του πεδίου. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν 4-6 πόλους για λόγους οικονομίας και όγκου. Ακολουθεί ένας πίνακας ο οποίος απεικονίζει την σχέση αυτή μεταξύ αριθμού πόλων και μηχανικής ταχύτητας της γεννήτριας. [8]

Synchronous Generator Speeds (rpm)		
Pole number	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

2.6.7.2 Ασύγχρονη Ηλεκτρική Γεννήτρια

Τα πλεονεκτήματα της ασύγχρονης γεννήτριας είναι η απλότητα της κατασκευής της, το χαμηλό κόστος και η ευκολία σύνδεσης με το δίκτυο. Η ασύγχρονη γεννήτρια με δρομέα τύπου κλωβού χρησιμοποιείται ευρύτατα σε μικρή ισχύος ανεμογεννήτριες (μέχρι 300kW), συνιστάται σε περιοχές με μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου.

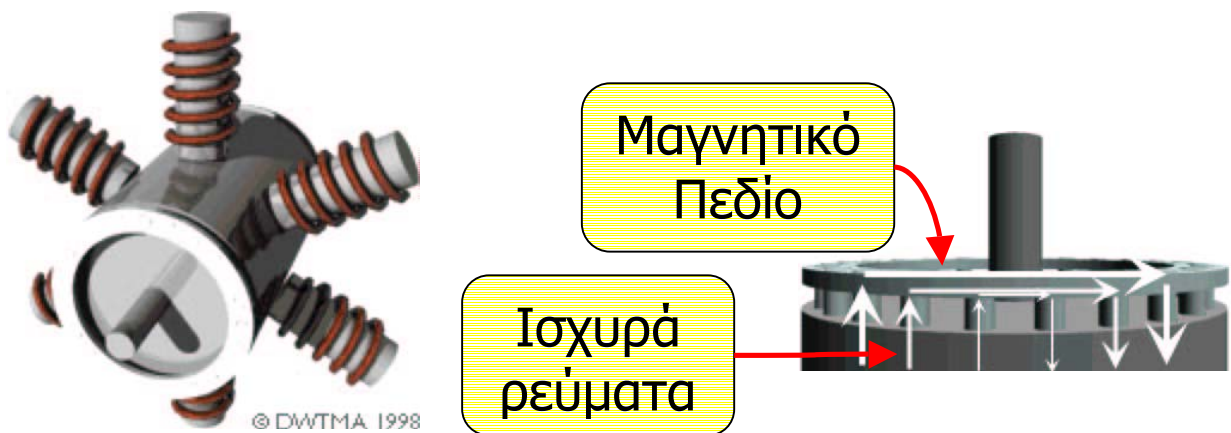
Ο ρότορας είναι κυρίως εκείνος που κάνει την ασύγχρονη γεννήτρια διαφορετική από την σύγχρονη. Αποτελείται από ένα αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων ράβδων οι οποίες είναι ενωμένες στις άκρες τους και στο κέντρο του υπάρχει μεταλλικός πυρήνας. Ο ρότορας τοποθετείται στο εσωτερικό του στάτορα ο οποίος έχει συνήθως 4 πόλους.

Όταν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη (1500 RPM για γεννήτρια 4 πόλων), δηλαδή με συχνότητα μεγαλύτερη από την συχνότητα μεταβολής του πεδίου του στάτορα, ισχυρά ρεύματα εμφανίζονται στο ρότορα. Όσο γρηγορότερα περιστρέφεται ο στάτορας τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται. Η γεννήτρια μεταβάλλει ελάχιστα την ταχύτητά της με την μεταβολή της ροπής. Αυτό σημαίνει ότι μειωμένες τριβές στον πολλαπλασιαστή στροφών και αποτελεί από τους βασικούς λόγους χρήσης της ασύγχρονης γεννήτριας.

Η λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$\mathbf{r} = (1-s) \mathbf{s} \quad \text{και} \quad \mathbf{s} = (\mathbf{s} - \mathbf{r}) / \mathbf{s}$$

όπου Ω_s (rad/sec) η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη, Ω_r (rad/sec) η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα και s (slip) η ολίσθηση της γεννήτριας. [8]



2.6.8 Σύστημα Προσανατολισμού

Στις μικρού ή μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο ενώ στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου.

Ο δρομέας προσανατολίζεται με δύο ηλεκτροκίνητους οδοντωτούς τροχούς προσανατολισμού που εφαρμόζουν σε μια οδοντωτή κορώνα τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου (**yaw control**). [8]

2.6.9 Σύστημα Ελέγχου των Πτερυγίων

Το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων είναι υπεύθυνο για την μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου. Μπορεί να στρέψει τον δρομέα ώστε το επίπεδό του να γυρίσει παράλληλα στην διεύθυνση του ανέμου (yaw control) και να αυξήσει την αεροδυναμική αντίσταση της μηχανής με την ενεργοποίηση αεροπέδης (spoiler). [8]

2.6.10 Σύστημα Ελέγχου

Όλες οι λειτουργίες της ανεμογεννήτριας μετρώνται και ελέγχονται από μια μονάδα ελέγχου που βασίζεται σε μικροεπεξεργαστή και περιέχει τα κατάλληλα κυκλώματα ελέγχου ισχύος. [8]

Κεφάλαιο 3

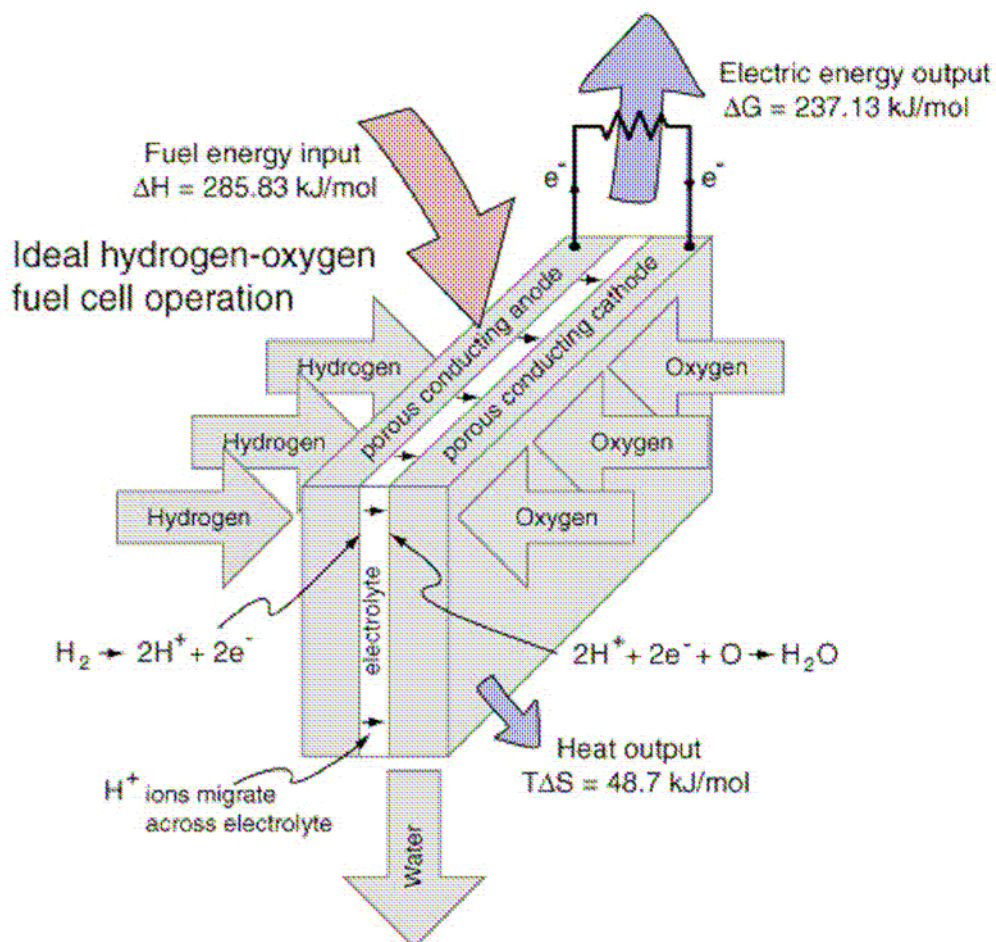
Κυψέλες Καυσίμου

3.1 Γενικά

Οι Κυψέλες Καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου απ' ευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μπορούμε να τις φανταστούμε σαν ένα εργοστάσιο το οποίο παράγει ηλεκτρική ενέργεια για όσο "καύσιμο" του παρέχουμε. Επειδή τα ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής θερμότητας και μηχανικού έργου αποφεύγονται, η απόδοση των κυψελών καυσίμου δεν περιορίζεται από την απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου Carnot. Έτσι επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις και επομένως μειωμένοι ρύποι και μειωμένο κόστος καυσίμου.

3.2 Λειτουργία Ιδανικής Κυψέλης Καυσίμου

Η απλούστερη μορφή μιας κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Τα βασικά μέρη μιας κυψέλης καυσίμου είναι ο **ηλεκτρολύτης**, ο οποίος είναι ικανός να επιτρέπει σε ιόντα να τον διαπερνούν και τα **ηλεκτρόδια** στην άνοδο και στην κάθοδο, τα οποία κατασκευάζονται από πορώδη αγώγιμα υλικά με στόχο τη διάχυση του καυσίμου και της οξειδωτικής ουσίας καθώς και την αγωγή των ηλεκτρονίων.

Οι λειτουργίες του ηλεκτρολύτη είναι να διευκολύνει την ηλεκτροχημική αντίδραση, να επιτρέπει στα ιόντα, είτε αρνητικά είτε θετικά ανάλογα με το είδος της κυψέλης και του καυσίμου, να τον διαπερνούν, να διευκολύνει τη μεταφορά των αντιδρώντων ουσιών από και προς τα ηλεκτρόδια και ταυτόχρονα να αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο που να αποτρέπει την απ' ευθείας ανάμιξη του καυσίμου με την οξειδωτική ουσία.

Οι λειτουργίες των ηλεκτροδίων είναι να παρέχουν την επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η ηλεκτροχημική αντίδραση, να παρέχουν ηλεκτρική σύνδεση με το φορτίο, να μοιράζουν τις ουσίες που αντιδρούν ομοιόμορφα και να οδηγούν τα προϊόντα της αντίδρασης στην έξοδο της κυψέλης. Για τους παραπάνω λόγους κατασκευάζονται από πορώδη και αγώγιμα υλικά.

Κατά τη λειτουργία της η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται συνεχώς με καύσιμο στην άνοδο, το οποίο στην απλούστερη περίπτωση είναι καθαρό υδρογόνο και με μια οξειδωτική ουσία στην κάθοδο, η οποία στην απλούστερη περίπτωση είναι καθαρό οξυγόνο. Η ηλεκτροχημική αντίδραση συμβαίνει ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη γι' αυτό είναι σημαντικό να υπάρχουν πολλές περιοχές που να μπορεί η ουσία που αντιδρά να έρχεται σε επαφή και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη ταυτόχρονα. Η δημιουργία τέτοιων περιοχών μπορεί να αυξήσει την απόδοση.

Στις κυψέλες καυσίμου με υγρό ηλεκτρολύτη πρέπει ένα μέρος του πορώδους ηλεκτροδίου να έρθει σε επαφή με τον υγρό ηλεκτρολύτη επιτρέποντας όμως ταυτόχρονα και τη μεταφορά των αντιδρώντων ουσιών. Υπερβολική κάλυψη του ηλεκτροδίου με υγρό μπορεί να «πλημμυρίσει» το ηλεκτρόδιο και να εμποδίσει την μεταφορά των αντιδρώντων μειώνοντας την απόδοση.

Στις κυψέλες καυσίμου με στερεό ηλεκτρολύτη πρέπει να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές που να επιτρέπουν στα αντιδρώντα να έρθουν σε επαφή και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη. Συνήθως στην περιοχή κοντά στον ηλεκτρολύτη το ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από ουσίες που παρουσιάζουν και ηλεκτρική και ιονική αγωγιμότητα.

Όταν το υδρογόνο φτάσει σε μια τέτοια περιοχή αντιδρά σύμφωνα με την αντίδραση $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$. Τα 2H^+ , τα οποία είναι στην ουσία δύο πρωτόνια, περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη και αντιδρούν με το οξυγόνο στην κάθοδο και τα 2 ηλεκτρόνια που έχουν περάσει μέσα από το φορτίο παράγοντας έργο σύμφωνα με την αντίδραση $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

Στην πραγματικότητα η στοιχειομετρία είναι διαφορετική αλλά δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Δηλαδή η αντίδραση στην άνοδο είναι $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ και στην κάθοδο $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Η συνολική αντίδραση για όλη την κυψέλη είναι $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Το τελικό προϊόν είναι νερό, 48.7KJ/mol θερμότητα και 237.13 KJ/mol ηλεκτρική ενέργεια.

3.3 Είδη Κυψελών Καυσίμου

Ο κυριότερος τρόπος διαχωρισμού των κυψελών καυσίμου είναι με βάση τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Τα είδη που προκύπτουν είναι τα παρακάτω [9]:

- Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC ή PEFC)
- Alkaline Fuel Cell (AFC)
- Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
- Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)
- Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Επιπλέον διαχωρισμός μπορεί να γίνει με βάση το καύσιμο που χρησιμοποιείται:

- Direct Alcohol Fuel Cell (DAFC) ή Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απ' ευθείας κάποια αλκοόλη (π.χ. μεθανόλη) χωρίς επεξεργασία. Συνήθως είναι PEFC.
- Direct Carbon Fuel Cell (DCFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απ' ευθείας άνθρακα σαν καύσιμο στην άνοδο χωρίς ενδιάμεσο στάδιο αεριοποίησης. Μπορεί να είναι SOFC, MCFC ή AFC. Τέτοιου τύπου κυψέλες θεωρητικά μπορούν να φτάσουν σε υψηλές αποδόσεις αλλά υπάρχουν διάφορα πρακτικά προβλήματα.

3.3.1 Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC / PEFC)

Σε αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης είναι μια **μεμβράνη** από κάποιο πολυμερές που είναι πολύ καλός αγωγός πρωτονίων. Τα ηλεκτρόδια, και στην άνοδο και στην κάθοδο, είναι συνήθως κατασκευασμένα από άνθρακα με ηλεκτροκαταλύτη Λευκόχρυσο (Pt) για να παρέχει περιοχές για την αντίδραση όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το μόνο υγρό στο εσωτερικό της κυψέλης είναι το νερό που προκύπτει ως προϊόν της αντίδρασης γι' αυτό υπάρχουν ελάχιστα προβλήματα διάβρωσης.

Η διαχείριση του νερού που προκύπτει ως προϊόν είναι πολύ σημαντικό στοιχείο. Πρέπει το νερό να μην εξατμίζεται με τον ίδιο ρυθμό που παράγεται γιατί η μεμβράνη πρέπει να παραμένει «ενυδατωμένη» για να λειτουργεί σωστά η κυψέλη. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από 100°C, συνήθως γύρω στους 60-80°C. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι αέριο υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο και με ελάχιστες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα (CO) γιατί είναι «δηλητήριο» για τον καταλύτη(Pt). Επιπλέον κατά την επεξεργασία του καυσίμου πρέπει να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα θείου και αλογόνων.

Οι PEFC είναι από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες κυψέλες καυσίμου ως πηγή ενέργειας για αυτοκίνητα, ως στατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας καθώς και ως πηγές ενέργειας για φορητές συσκευές.

Πλεονεκτήματα:

- Ο στερεός ηλεκτρολύτης παρέχει καλό διαχωρισμό του καυσίμου από την οξειδωτική ουσία.
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει γρήγορο ξεκίνημα.
- Δεν απαιτούνται ιδιαίτερα και ακριβά υλικά για την κατασκευή τους.
- Παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος η οποία φτάνει τα 2W/cm².
- Είναι κατάλληλες για εφαρμογή όπου είναι διαθέσιμο καθαρό υδρογόνο.

Μειονεκτήματα:

- Η χαμηλή θερμοκρασία δημιουργεί προβλήματα στην απαγωγή θερμότητας ιδιαίτερα σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος και δε διευκολύνει τη χρήση της θερμότητας για συμπαραγωγή ή για παραγωγή ατμού σε κάποιο υβριδικό σύστημα.
- Η διαχείριση του νερού είναι πολύπλοκη γιατί πρέπει να διασφαλίζεται σωστή «ενυδάτωση» της μεμβράνης αλλά ταυτόχρονα να αποφεύγεται τυχόν «πλημμύρα» (flooding). Δηλαδή πρέπει να υπάρχει ισορροπία στην ποσότητα νερού που υπάρχει στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου.
- Το καύσιμο πρέπει να είναι ιδιαίτερα καθαρό με ελάχιστη ή μηδενική περιεκτικότητα σε θείο, μονοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία.

Για να μειωθούν τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να αυξηθεί η περιεκτικότητα των ηλεκτροδίων σε λευκόχρυσο (Pt) και να μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, με αποτέλεσμα όμως την αύξηση του κόστους.

3.3.2 Alkaline Fuel Cell (AFC)

Σ' αυτό το είδος της κυψέλης καυσίμου ο ηλεκτρολύτης είναι **υδροξείδιο του καλίου** (KOH). Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι, για υψηλές συγκεντρώσεις KOH στον ηλεκτρολύτη, 250°C και για χαμηλές συγκεντρώσεις 120°C. Στα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά ως ηλεκτροκαταλύτες όπως για παράδειγμα νικέλιο (Ni), άργυρος (Ag), διάφορα οξείδια μετάλλων ή ευγενή μέταλλα. Το προτιμώμενο καύσιμο για αυτό το είδος κυψέλης είναι καθαρό υδρογόνο. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) θεωρείται «δηλητήριο» για τον καταλύτη αφού έστω και παραμικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα θα αντιδράσει με το υδροξείδιο του καλίου (KOH) και θα μεταβάλλει τη σύσταση του ηλεκτρολύτη. Υπάρχουν και ορισμένες AFC που χρησιμοποιούν στερεό άνθρακα ως καύσιμο (DCFC).

Πλεονεκτήματα :

- Υψηλή απόδοση για χρήση H₂ ως καύσιμο και O₂ ως οξειδωτική ουσία.
- Είναι δυνατή η χρήση διάφορων υλικών ως ηλεκτροκαταλύτες

Μειονεκτήματα:

- Ευαισθησία στην ύπαρξη CO₂ οπότε είναι αναγκαία η χρήση καθαρού υδρογόνου ως καύσιμο.
- Λόγω της προαναφερθείσας ευαισθησίας στην ύπαρξη CO₂ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας ο αέρας ως οξειδωτική ουσία αλλά πρέπει πρώτα να αφαιρεθεί το CO₂.

3.3.3 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται **φωσφορικό οξύ**. Η θερμοκρασίες λειτουργίας κυμαίνονται από 150 ως 220 °C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η ικανότητα του φωσφορικού οξέος να άγει ιόντα μειώνεται. Επιπλέον επειδή στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται λευκόχρυσος (Pt) ως ηλεκτροκαταλύτης σε χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει πρόβλημα με τη «δηλητηρίαση» του από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Επειδή η χρήση φωσφορικού οξέος με συγκέντρωση 100% μειώνει την πίεση των υδρατμών που παράγονται, δεν υπάρχει πρόβλημα στη διαχείριση του νερού.

Πλεονεκτήματα:

- Οι PAFC είναι λιγότερο ευαίσθητες στην ύπαρξη μονοξειδίου του άνθρακα στο καύσιμο απ' ότι είναι οι PEFC και οι AFC. Η ανοχή μπορεί να φτάσει το 1%.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλή οπότε δεν υπάρχει πρόβλημα στη χρήση διαφόρων υλικών στο υπόλοιπο σύστημα που περιβάλλει την κυψέλη αντίθετα με τις SOFC και τις MCFC.
- Η θερμοκρασία αν και χαμηλή ώστε να μη δημιουργεί προβλήματα με τη χρήση υλικών επιτρέπει τη διαχείριση της θερμότητας και τη χρήση της για συμπαραγωγή.
- Η απόδοση είναι αρκετά υψηλή και κυμαίνεται από 37 ως 42%. Είναι υψηλότερη από τις PEFC αλλά χαμηλότερη από τις SOFC και τις MCFC.

Μειονεκτήματα:

- Επειδή η αντίδραση μείωσης του οξυγόνου στην κάθοδο είναι αργή είναι απαραίτητη η χρήση λευκόχρυσου και στην κάθοδο.
- Η επεξεργασία του καυσίμου είναι αρκετά πολύπλοκη όχι όμως όσο πολύπλοκη είναι για τις PEFC και τις AFC.
- Επειδή το φωσφορικό προκαλεί διαβρώσεις σε πολλά υλικά, είναι αναγκαία η χρήση ακριβών υλικών.

3.3.4 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζεται από **αλκαλικά ανθρακικά άλατα**. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 600-700 °C. Σ' αυτή τη θερμοκρασία ο ηλεκτρολύτης είναι λιωμένος.

Στην άνοδο χρησιμοποιείται νικέλιο (Ni) και στην κάθοδο οξείδια του νικελίου. Η χρήση ευγενών μετάλλων δεν είναι απαραίτητη και λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι δυνατή η χρήση διαφόρων υδρογονανθράκων ως καύσιμα, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να γίνει στο εσωτερικό της κυψέλης (internal reforming).

Πλεονεκτήματα:

- Δεν χρειάζονται ηλεκτρο-καταλύτες από ακριβά υλικά λόγω της υψηλής θερμοκρασίας
- Πολλοί υδρογονάνθρακες καθώς και το CO μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα εξαιτίας των αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό της κυψέλης (internal reforming).

- Υψηλή απόδοση που ξεπερνάει το 45%.
- Χρήση της παραγόμενης θερμότητας σε κάποιο άλλο θερμοδυναμικό κύκλο αυξάνοντας τη συνολική απόδοση πάνω από 55%.

Μειονεκτήματα:

- Ο ηλεκτρολύτης προκαλεί διαβρώσεις και έτσι απαιτούνται ανθεκτικά υλικά
- Η υψηλή θερμοκρασία έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου και στην μηχανική αντοχή των υλικών.
- Στην κάθοδο χρειάζεται είσοδος CO₂. Έτσι αυξάνεται το κόστος των συσκευών του συστήματος αφού γίνεται πολυπλοκότερο. Το CO₂ προέρχεται συνήθως από το καύσιμο που εισάγεται στην άνοδο, αν βέβαια το καύσιμο περιέχει CO₂, αφού γίνει διαχωρισμός του από τις υπόλοιπες ουσίες.
- Η αντίσταση που παρουσιάζουν οι κυψέλες είναι αρκετά υψηλή με αποτέλεσμα η πυκνότητα ισχύος να περιορίζεται σε 100-200 mW/cm².

3.3.5 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Ο ηλεκτρολύτης είναι κάποιο **στερεό, μη πορώδες οξειδίο μετάλλου**. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 600 - 1000 °C. Τα ιόντα που μεταφέρονται είναι ιόντα οξυγόνου.

Αρχικά η μειωμένη αγωγιμότητα οδηγούσε σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας κοντά στους 1000 °C. Αργότερα όμως κατασκευάστηκαν ηλεκτρολύτες με μικρότερο πάχος και έγινε δυνατή η λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (650 - 850 °C). Έτσι έγινε δυνατή η κατασκευή πιο φτηνών και με υψηλότερη απόδοση τέτοιου είδους κυψελών καυσίμου.

Πλεονεκτήματα:

- Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι στερεός η κυψέλη μπορεί να πάρει διάφορα σχήματα όπως π.χ. κυλινδρική
- Εξαιτίας του στερεού ηλεκτρολύτη δεν υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης
- Εξαιτίας και πάλι του στερεού ηλεκτρολύτη δεν υπάρχουν προβλήματα στην επαφή του καυσίμου με το ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη ταυτόχρονα και επιπλέον δεν υπάρχει πρόβλημα «πλημμύρας» (flooding) του ηλεκτρολύτη.
- Το CO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο όπως στις MCFC.
- Αντίθετα με τις MCFC δεν χρειάζεται CO₂ στην κάθοδο.
- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δεν είναι ιδιαίτερα ακριβά.

- Μπορούν να επιτευχθούν υψηλές πυκνότητες ρεύματος παρόμοιες με τις PEFC.
- Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας είναι δυνατή η χρήση της παραγόμενης θερμότητας για συμπαραγωγή ή σε κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο.
- Υψηλές απόδοσεις από 40% μέχρι και πάνω από 50% με τη δυνατότητα να ξεπεραστεί το 60% σε υβριδικά συστήματα όπως και με τις MCFC.

Μειονεκτήματα:

- Προβλήματα με τα διάφορα υλικά λόγω υψηλής θερμοκρασίας κατά την επιλογή τους καθώς και κατά την κατασκευή.
- Μειωμένη διάρκεια ζωής.

3.3.6 Γενικά Χαρακτηριστικά των Κυψελών Καυσίμου

Μερικά θετικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου είναι η ικανότητα μετατροπής της ενέργειας απ' ευθείας από χημική σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να προηγείται καύση του καυσίμου και μετατροπή της θερμικής σε μηχανική ενέργεια. Έχουν υψηλές αποδόσεις (από 30 ως 55%) ακόμα και σε κατάσταση λειτουργίας όπου το φορτίο δεν είναι πλήρες. Η απόδοση αυξάνεται σε κατάσταση μερικής λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, ενώ υπάρχουν είδη κυψελών που μπορούν να λειτουργήσουν και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μπορούμε με ευκολία να συνδέσουμε σε σειρά και παράλληλα πολλές κυψέλες ανάλογα με τις ανάγκες του φορτίου και με την αξιοπιστία που απαιτείται. Τέλος έχουν σχετικά γρήγορη απόκριση στις αλλαγές φορτίου (μερικά δευτερόλεπτα αρκούν ώστε η τάση και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου να έρθουν σε κατάσταση ισορροπίας).

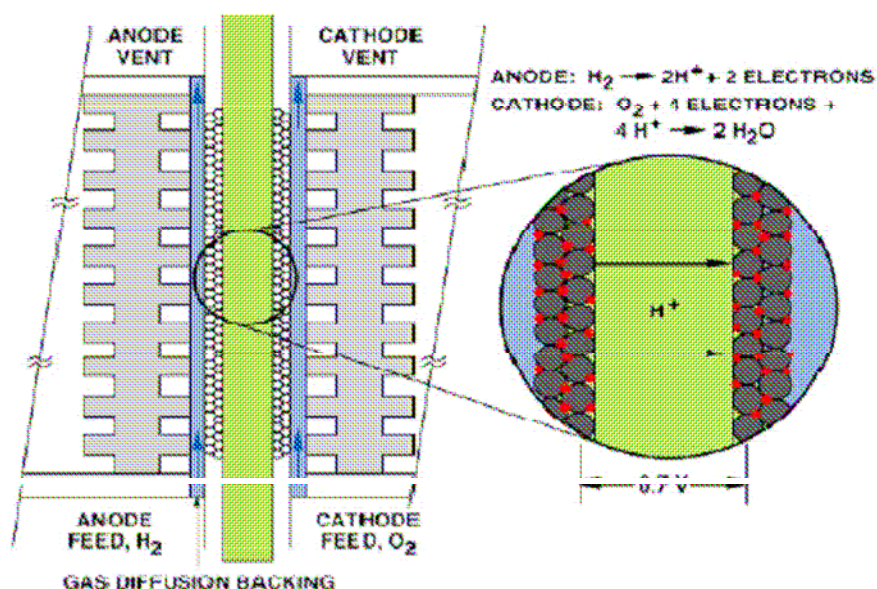
Στα αρνητικά των κυψελών μπορούμε να αναφέρουμε το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης καθώς και ότι δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία αντοχής και διάρκειας ζωής για κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Τέλος δεν υπάρχουν κατάλληλες υποδομές για τη μεταφορά υδρογόνου.

Από τα παραπάνω είδη που παρουσιάστηκαν περισσότερο ενδιαφέρον φαίνεται να παρουσιάζουν οι PEMFC και οι SOFC. Το εύρος ισχύος που διαθέτουν συνήθως μονάδες PEMFC είναι από 1kW μέχρι 1MW ενώ οι SOFC από 5kW έως 3MW. Βέβαια τα μεγέθη ποικίλουν και επιπλέον μπορούν να συνδυαστούν πολλές κυψέλες σε σειρά ώστε να σχηματίσουν στοίβες (stacks) και στη συνέχεια να συνδεθούν πολλές στοίβες παράλληλα δίνοντας μεγάλο εύρος ισχύος. Οι αποδόσεις για τις PEMFC κυμαίνονται από 34-36% ενώ για τις SOFC είναι αρκετά υψηλότερες 45-65%.

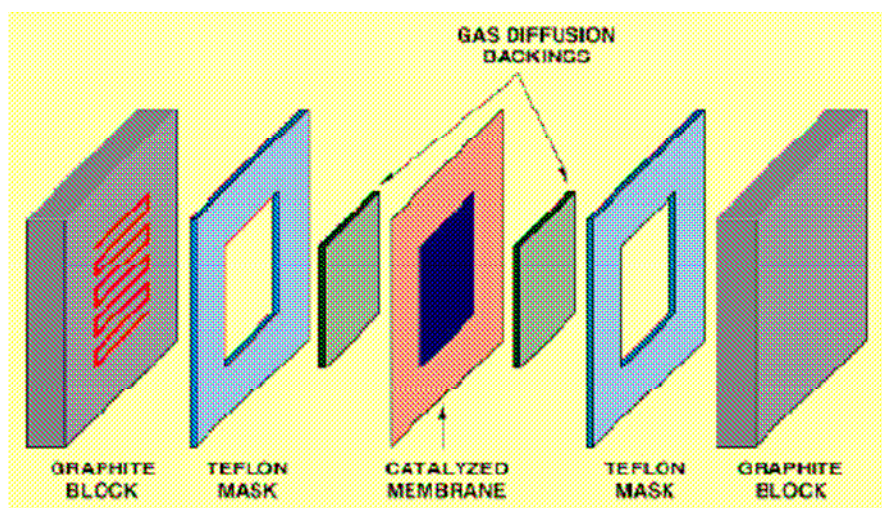
Η ανάλυση που θα ακολουθήσει αναφέρεται σε μια Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) λόγω της διάδοσης του συγκεκριμένου είδους, της απλότητας του καυσίμου και επομένως των αντιδράσεων στο εσωτερικό της κυψέλης. Επίσης υπάρχει και μια πληθώρα μοντέλων και άρα στοιχείων που αναφέρονται σε PEMFC.

3.4 Αναλυτική Παρουσίαση μιας PEMFC

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια PEMFC είναι η **μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων** (Proton Exchange Membrane), ένα **πορώδες στρώμα** (Porous Backing Layer ή αλλιώς Gas Diffusion Layer), ο **ηλεκτροκαταλύτης** (ηλεκτροδία) που βρίσκεται ανάμεσα στα δυο παραπάνω στρώματα και οι **πλάκες ροής** καυσίμου και οξειδωτικής ουσίας και σύνδεσης των κυψελών μεταξύ τους (interconnects και Flowplates).



σχήμα τομής PEMFC



τομή μεμβράνης PEMFC

3.4.1 Μεμβράνη Ανταλλαγής Ιόντων (Proton Exchange Membrane)

Βασική λειτουργία της είναι να επιτρέπει σε ιόντα να τη διαπερνούν ενώ ταυτόχρονα διαχωρίζει φυσικά τα αντιδρώντα από τα προϊόντα. Το υλικό είναι μονωτής. Η μεταφορά ιόντων γίνεται μέσω ομάδων ιόντων μέσα στο πολυμερές και εξαρτάται από την ποσότητα νερού που βρίσκεται δεσμευμένη ή ελεύθερη μέσα στο πολυμερές.

Οι μεμβράνες αυτές παρουσιάζουν υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Επίσης αντέχουν σε επαφή με ισχυρές βάσεις και οξειδωτικές ουσίες, όπως είναι και το υδρογόνο και το οξυγόνο. Τέλος παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Βέβαια η διάρκεια αυτή πρέπει να αυξηθεί κι άλλο όσον αφορά τις κυψέλες καυσίμου.

3.4.2 Πορώδες Στρώμα (Porous Banking Layer)

Η μεμβράνη βρίσκεται ανάμεσα σε δύο λεπτά στρώματα πορώδους υλικού. Οι λειτουργίες των στρωμάτων αυτών είναι να διαχέουν τα αέρια, δηλαδή το καύσιμο και την οξειδωτική ουσία, να στηρίζουν μηχανικά τη μεμβράνη, να είναι ηλεκτρικά αγωγίμα ώστε να προσφέρουν δρόμο για τη διαφυγή των ηλεκτρονίων και να διοχετεύουν το νερό που παράγεται μακριά από τα ηλεκτρόδια.

Το υλικό που χρησιμοποιείται έχει συνήθως ως βάση τον άνθρακα μαζί με κάποιο υδροφοβικό υλικό το οποίο αποτρέπει τη συγκέντρωση του νερού ώστε να μπορούν τα αέρια να έρχονται ελεύθερα σε επαφή με τον καταλύτη.

3.4.3 Ήλεκτρο-Καταλύτης

Το στρώμα αυτό βρίσκεται σε άμεση επαφή και με την μεμβράνη και με το πορώδες στρώμα. Στην ουσία είναι το ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Ο καταλύτης είναι συνήθως λευκόχρυσος και μπορεί να εφαρμοστεί είτε στην μεμβράνη είτε στο πορώδες στρώμα. Στις PEMFC που χρησιμοποιείται καθαρό υδρογόνο ο λευκόχρυσος μπορεί να υποστηρίζεται από άνθρακα ή γραφίτη. Συνήθως το καύσιμο περιέχει H_2 , CO_2 , CO , N_2 . Στην κάθοδο χρησιμοποιείται λευκόχρυσος είτε μόνος του είτε υποστηριζόμενος από άνθρακα ή γραφίτη. Λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου γίνεται προσπάθεια να μειωθεί η ποσότητα που απαιτείται.

3.4.4 Διαχείριση Νερού

Όπως έχει προαναφερθεί για να ολοκληρωθεί η αντίδραση πρέπει το καύσιμο να έρθει σε επαφή ταυτόχρονα και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη. Επειδή στις PEMFC ο ηλεκτρολύτης δεν είναι υγρός και δεν μπορεί να γεμίσει τις περιοχές ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη, η ύπαρξη νερού είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Όταν η μεμβράνη είναι πλήρως ενυδατωμένη η απόδοση της κυψέλης αυξάνεται γιατί δημιουργούνται περισσότερες περιοχές που είναι δυνατή η αντίδραση. Υπάρχει όμως ένα σημείο το οποίο αν ξεπεραστεί ο ηλεκτρολύτης «πλημμυρίζει» και το νερό εμποδίζει την επαφή του αερίου με τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Επομένως ο έλεγχος της ποσότητας του νερού είναι πολύ σημαντικός.

Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου όταν ένα πρωτόνιο διαπερνά τη μεμβράνη μεταφέρει περίπου 2.5 μόρια νερού από την άνοδο στην κάθοδο. Η παραπάνω αναλογία είναι μια εκτίμηση και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και το υλικό της μεμβράνης. Όπως είναι φανερό όταν η κυψέλη λειτουργεί σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος το πρόβλημα της αφυδάτωσης είναι μεγαλύτερο. Επιπλέον λειτουργία με αφυδατωμένη μεμβράνη μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης.

3.5 Φυσική Εξήγηση της Λειτουργίας μιας PEMFC

Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό μιας PEMFC είναι:

- Στην άνοδο : $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ή $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
- Στην κάθοδο : $1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ή $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- Η συνολική αντίδραση είναι: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ή $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Το μέγιστο ηλεκτρικό έργο που μπορεί να παράγει μια κυψέλη εξαρτάται από την ελεύθερη ενέργεια Gibbs της συνολικής αντίδρασης που συμβαίνει στο εσωτερικό της και δίνεται από τον τύπο: $\mathbf{W = \Delta G = -nFE}$

όπου **n** είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παίρνουν μέρος στην αντίδραση (στην συγκεκριμένη περίπτωση **δύο**), **F** είναι η σταθερά Faraday που ισούται με 96487 Coulomb/mol και **E** είναι το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης.

Επιπλέον η ενέργεια Gibbs μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$,

όπου ΔH είναι η ενθαλπία της αντίδρασης και ΔS είναι η εντροπία της αντίδρασης. Η συνολική θερμική ενέργεια της αντίδρασης είναι η ενθαλπία (ΔH). Η ελεύθερη ενέργεια προκύπτει αν από αυτή την ενέργεια αφαιρέσουμε την ενέργεια ($T\Delta S$) που «χάνεται» από τις μη αναστρέψιμες μεταβολές της εντροπίας του συστήματος. Η ποσότητα $T\Delta S$ μας δίνει και τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία της κυψέλης. Όταν το ΔS είναι αρνητικό, αυτό σημαίνει ότι παράγεται θερμότητα. Τέτοιου είδους αντίδραση είναι η οξείδωση του υδρογόνου. Όταν το ΔS είναι θετικό, όπως π.χ. συμβαίνει κατά την άμεση οξείδωση του άνθρακα, αυτό σημαίνει ότι αν η θερμότητα που παράγεται είναι μικρότερη από την θερμότητα που απορροφάται τότε συνολικά απορροφάται θερμότητα από το περιβάλλον.

Από την εξίσωση $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$ μπορούμε γνωρίζοντας το ΔG° , το οποίο είναι η μεταβολή της ενέργειας Gibbs για πίεση 1atm και θερμοκρασία 298K, να υπολογίσουμε το E° το οποίο είναι το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης για πίεση 1 atm και θερμοκρασία 298K. Χρησιμοποιώντας τις τιμές από πίνακες προκύπτει $E^\circ = 1.229 \text{ V}$ για προϊόν νερό σε υγρή μορφή και $E^\circ = 1.18 \text{ V}$ για προϊόν νερό σε αέρια μορφή. Επειδή στην πράξη οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες είναι ανάγκη να διορθωθεί η τάση αυτή για τις συνθήκες λειτουργίας.

Η ενέργεια Gibbs για διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας των αντιδρώντων και προϊόντων για τη γενική αντίδραση $aA + bB \rightarrow \gamma\Gamma + \delta\Delta$ είναι :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{f_\Gamma^\gamma \cdot f_\Delta^\delta}{f_A^a \cdot f_B^b}$$

όπου f είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται fugacity. Μερικές φορές αναφέρεται και ως δραστηριότητα (activity) [10] που μπορεί να συμβολιστεί με a . Η δραστηριότητα έχει σχέση με τον τρόπο που αλληλεπιδρούν τα μόρια σε ένα μη ιδανικό αέριο. Δίνεται από τον τύπο $a_i = \gamma_i \cdot x_i \cdot p/p_o$. Το γ_i είναι μια σταθερά (fugacity coefficient) η οποία δίνεται από πίνακες και για συγκεκριμένη θερμοκρασία «διορθώνει» τη μερική πίεση όταν υπολογίζουμε το χημικό δυναμικό.

x_i είναι το ποσοστό των mol της i ουσίας στο συνολικό μείγμα

p είναι η πίεση (σε atm)

p_o είναι η πίεση της ατμόσφαιρας (1 atm)

Η δραστηριότητα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χημικού δυναμικού και αν θεωρήσουμε ότι τα αέρια είναι ιδανικά η δραστηριότητα ισούται με τη μερική πίεση του αερίου. Για ιδανικά αέρια η σταθερά $\gamma_i = 1$, $x_i \cdot p$ είναι η μερική πίεση σε atm και διαιρούμενη με p_o προκύπτει ένα αδιάστατο μέγεθος με τιμή ίση με τη μερική πίεση [11].

Έχοντας υπολογίσει την ενέργεια Gibbs της αντίδρασης μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το δυναμικό για τη γενική αντίδραση:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_{\Gamma}^{\gamma} \cdot f_{\Delta}^{\delta}}{f_{\text{A}}^{\alpha} \cdot f_{\text{B}}^{\beta}}$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται εξίσωση Nernst και δίνει το ιδανικό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος που μπορεί να προκύψει από μια κυψέλη στο εσωτερικό της οποίας συμβαίνει η γενική αντίδραση $\alpha\text{A} + \beta\text{B} \rightarrow \gamma\Gamma + \delta\Delta$ που αναφέρθηκε παραπάνω.

Συγκεκριμένα για την αντίδραση που συμβαίνει στο εσωτερικό μιας PEMFC ισχύει:

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln \frac{f_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{f_{\text{O}_2}}}{f_{\text{H}_2\text{O}}}$$

και

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_{\text{H}_2\text{O}}}{f_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{f_{\text{O}_2}}} \quad \text{ή} \quad E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{f_{\text{O}_2}}}{f_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Αν θεωρήσουμε τα αέρια ιδανικά όπως προαναφέρθηκε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μερικές πιέσεις στην εξίσωση Nernst. Στην ουσία το μέγεθος έχει την ίδια τιμή με τη μερική πίεση αλλά είναι αδιάστατο μέγεθος. Τελικά:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_{\text{H}_2} \cdot \sqrt{p_{\text{O}_2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

3.6 Υπολογισμός Απόδοσης μιας Κυψέλης Καυσίμου

Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δίνεται από τον τύπο: $\eta = \frac{\text{Χρήσιμη Ενέργεια}}{\Delta H}$

Η ενέργεια Gibbs εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που είναι «ελεύθερη» για χρήση. Στην ιδανική περίπτωση που όλη αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει έργο

έχουμε: $\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H}$. Από πίνακες για την αντίδραση που συμβαίνει μέσα σε μια PEMFC με καύσιμο καθαρό υδρογόνο έχουμε $\Delta G = 237.1 \text{ KJ/mol}$ και $\Delta H = 285.8 \text{ KJ/mol}$ στους 25°C θερμοκρασία και πίεση 1 atm . Με τις τιμές αυτές προκύπτει $\eta = 0.83$. Αυτή η θεωρητική μέγιστη τιμή για να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κύκλο Carnot πρέπει η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής να είναι 1480°C .

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ροή καυσίμου (mol/sec) τότε η χρήσιμη ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως χρήσιμη ισχύς ($\text{KJ}/(\text{mol} \cdot \text{sec})$). Με την ίδια λογική η ενέργεια Gibbs θα εκφράζεται κι αυτή σε μονάδες $\text{KJ}/(\text{mol} \cdot \text{sec})$. Έτσι προκύπτει:

$$\eta = \frac{\text{Χρήσιμη Ενέργεια}}{\Delta H} = \frac{\text{Χρήσιμη Ισχύς}}{\Delta H}$$

στην οποία αν αντικαταστήσουμε με $\Delta H = \Delta G/\eta = E^\circ \cdot I/0.83$ παίρνουμε την τελική απόδοση

$$\eta = \frac{\text{Χρήσιμη Ενέργεια}}{\Delta H} = \frac{V_{\text{real}} \cdot I \cdot \eta}{E^\circ \cdot I} = 0.83 \frac{V_{\text{real}}}{1.229} = 0.675 V_{\text{real}}$$

για πίεση 1 atm και θερμοκρασία 25°C . Η τάση V_{real} διαφέρει από την πραγματική τάση λόγω των απωλειών που θα αναφερθούν παρακάτω.

Η παραπάνω απόδοση αναφέρεται στην απόδοση της κυψέλης όταν όλο το καύσιμο που εισέρχεται αντιδρά. Στην πραγματικότητα όμως δε συμβαίνει κάτι τέτοιο. Ένα μέρος του καυσίμου εξέρχεται χωρίς να αντιδράσει όπως θα δούμε παρακάτω στον ορισμό της χρησιμοποίησης.

3.7 Η Χρησιμοποίηση

Η χρησιμοποίηση ενός καυσίμου ορίζεται ως :

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

όπου H_{2r} είναι το υδρογόνο που αντιδρά στο εσωτερικό της κυψέλης. Στην πραγματικότητα ένα μέρος του υδρογόνου που εισέρχεται στην άνοδο δεν αντιδρά και είτε εξέρχεται από την άνοδο, οπότε μπορεί να εισαχθεί πάλι στην είσοδο της, είτε αντιδρά με διάφορα μέρη της κυψέλης χωρίς να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα κάποια μόρια υδρογόνου διαπερνούν την μεμβράνη χωρίς να διασπαστούν σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια και αντιδρούν με το οξυγόνο της καθόδου. Επιπλέον ένα μέρος του υδρογόνου μπορεί να διαφεύγει στο περιβάλλον λόγω διαρροών . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια μικρότερη τελική απόδοση. Η τελική απόδοση είναι:

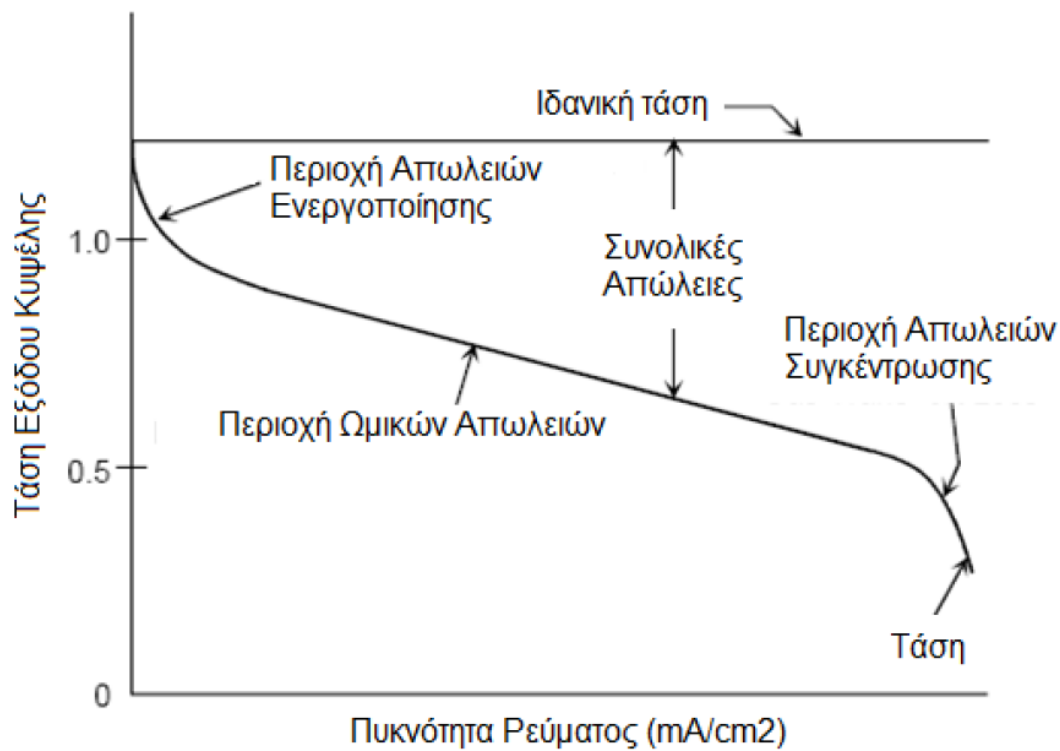
$$\eta_{τελ} = \eta^* u_f = 0.675 V_{real}^* u_f$$

3.8 Υπολογισμός Απωλειών

Τα κυριότερα είδη απωλειών είναι πέντε:

- **Απώλειες ενεργοποίησης** (activation losses ή polarization): Οφείλονται στην ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης στα ηλεκτρόδια. Η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης είναι το κατώφλι ενέργειας που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την ίδια την αντίδραση, από το υλικό και τη δομή του ηλεκτροϋποκαταλύτη, από τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και λίγο από την πυκνότητα του ρεύματος.
- **Ωμικές απώλειες** (ohmic losses ή polarization): Προκαλούνται από την ιοντική αντίσταση του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων, την αντίσταση των ηλεκτροδίων, των συλλεκτών ρεύματος και των εσωτερικών συνδέσμων και από τις αντιστάσεις επαφής. Είναι ανάλογες με την πυκνότητα του ρεύματος και εξαρτώνται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, από το σχήμα της κυψέλης και από τη θερμοκρασία.
- **Απώλειες συγκέντρωσης** (concentration losses ή polarization ή mass transport related losses): Οφείλονται στην περιορισμένη μεταφορά μάζας στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου και εξαρτώνται από την πυκνότητα του ρεύματος, από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων και από τη δομή των ηλεκτροδίων. Η φυσική εξήγηση είναι ότι τα μόρια δεν διαχέονται ομοιόμορφα και δεν έρχονται ομοιόμορφα σε επαφή με τον ηλεκτροϋποκαταλύτη και τη μεμβράνη.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή της V-I χαρακτηριστικής μια κυψέλης καυσίμου με την επίδραση των απωλειών.

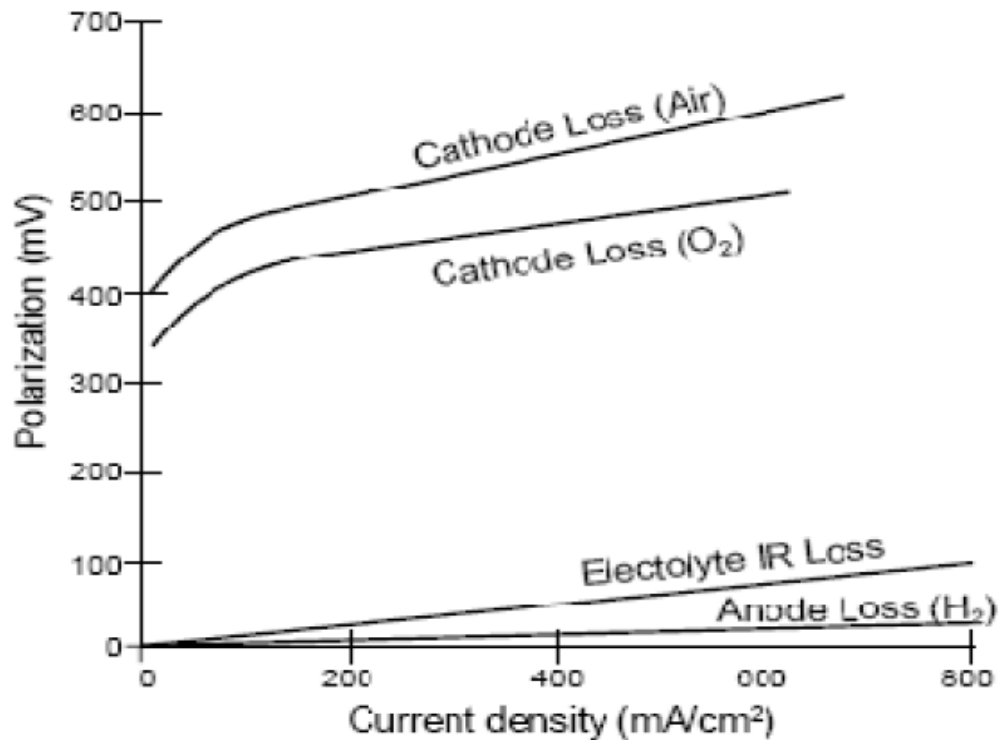


Οι συνολικές απώλειες προκύπτουν αν από το τελικό δυναμικό τις καθόδου, το οποίο προκύπτει από την πρόσθεση των απωλειών ενεργοποίησης και συγκέντρωσης στο δυναμικό της καθόδου, αφαιρέσουμε το δυναμικό της ανόδου, το οποίο επίσης προκύπτει από την πρόσθεση των απωλειών ενεργοποίησης και συγκέντρωσης στο δυναμικό της ανόδου, και τις ωμικές απώλειες. Πιο συγκεκριμένα :

- Οι συνολικές απώλειες για την άνοδο είναι: $\eta_{\text{anode}} = \eta_{\text{conc,a}} + \eta_{\text{act,a}}$
- Το δυναμικό της ανόδου είναι: $V_{\text{anode}} = E_{\text{anode}} + |\eta_{\text{anode}}|$
- Οι συνολικές απώλειες για την κάθοδο είναι: $\eta_{\text{cathode}} = \eta_{\text{conc,c}} + \eta_{\text{act,c}}$
- Το δυναμικό της καθόδου είναι: $V_{\text{cathode}} = E_{\text{cathode}} + |\eta_{\text{cathode}}|$

Αυτές οι απώλειες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του δυναμικού της ανόδου και τη μείωση του δυναμικού της καθόδου, μειώνοντας έτσι το συνολικό δυναμικό της κυψέλης, το οποίο είναι : $V_{\text{cell}} = V_{\text{cathode}} - V_{\text{anode}} - iR$.

Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα όπου φαίνονται οι συνολικές απώλειες της ανόδου της καθόδου και οι ωμικές απώλειες της κυψέλης. Όπως είναι φανερό οι απώλειες της καθόδου είναι πολύ μεγαλύτερες.



- Η επίδραση της θερμοκρασίας :** Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μια μείωση στην ιδανική τάση η οποία είναι 1.229V στους 25°C. Αποτέλεσμα είναι και η συνολική μείωση της τάσης εξόδου της κυψέλης. Η μείωση αυτή είναι 0.84 mV/°C για μια PEMFC με καύσιμο υδρογόνο, οξειδωτική ουσία οξυγόνο και προϊόν νερό σε υγρή μορφή. Πέρα από αυτή την επίδραση η θερμοκρασία επηρεάζει κι άλλες παραμέτρους της κυψέλης όπως την ωμική αντίσταση και τον ρυθμό αντίδρασης. Παρακάτω στη μοντελοποίηση η επίδραση αυτή λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των απωλειών.
- Η επίδραση της πίεσης :** Η αύξηση της πίεσης μπορεί να αυξήσει την απόδοση της κυψέλης αλλά αυτό αυξάνει το κόστος του υπόλοιπου συστήματος καθώς και το παρασιτικό φορτίο που απαιτείται για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

Μοντελοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτεταμένη και λεπτομερής ανάλυση του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματός μας, το οποίο υλοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Simulink του Matlab. Προτού όμως περάσουμε στην περιγραφή των μοντέλων θα πρέπει να εξηγήσουμε την λειτουργία του συστήματος και να αναφέρουμε τις παραδοχές οι οποίες έγιναν στην μοντελοποίησή του.

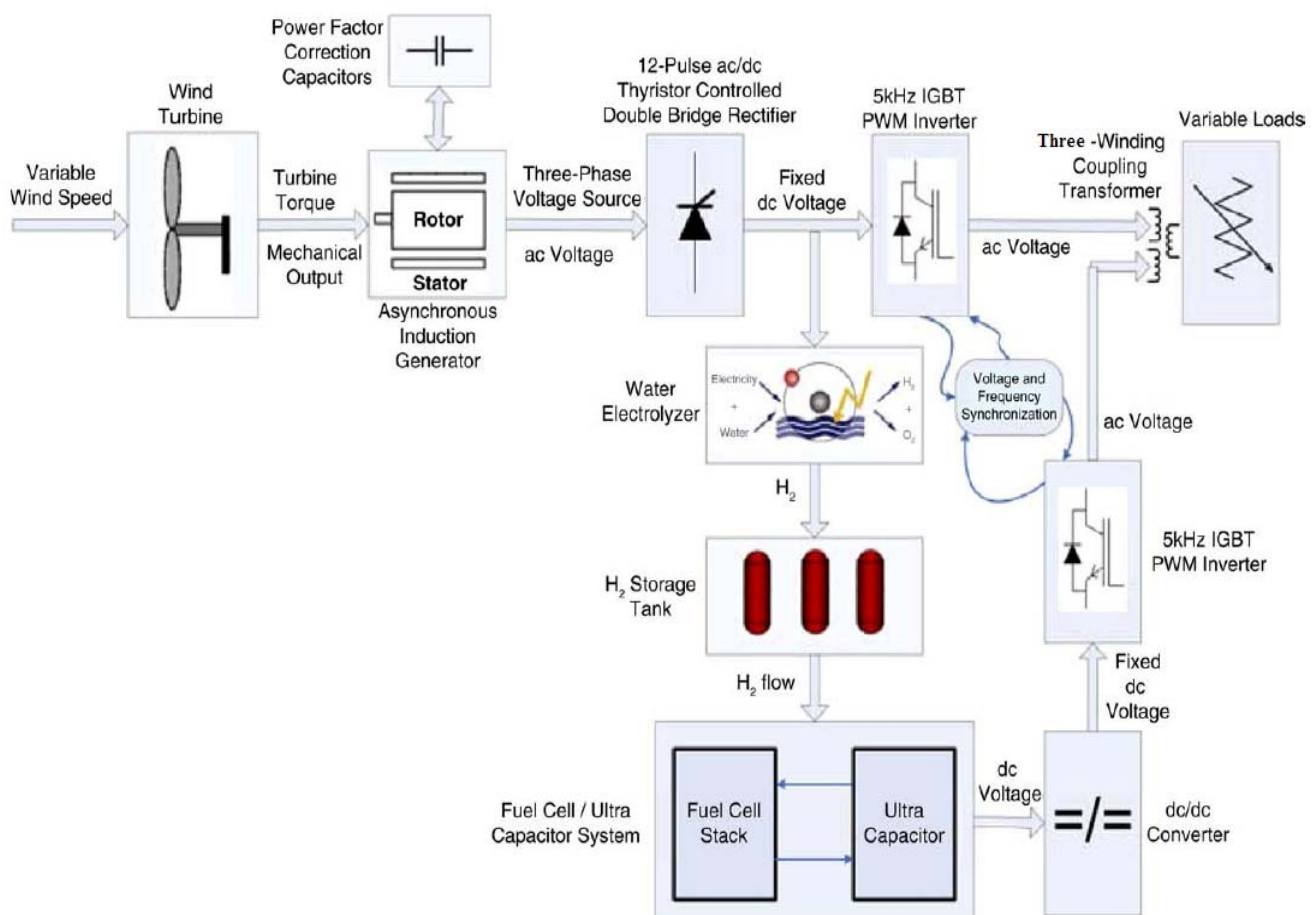
Το σύστημά μας αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια η οποία παράγει ισχύ στην έξοδό της σε συνάρτηση πάντα με τον άνεμο. Επειδή η ανεμογεννήτρια εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου η οποία αλλάζει τιμή συνεχώς από την μία στιγμή στην άλλη, δεν μπορεί να έχει σταθερή έξοδο. Η διακύμανση αυτή της εξόδου της τουρμπίνας λόγω της εναλλαγής της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την χρήση μιας κυψέλης καυσίμου, οι οποίες υπερέχουν κατά πολύ από τις συμβατικές μπαταρίες όσων αφορά την πυκνότητα ενέργειας που μπορούν να παρέχουν αλλά και την μακροχρόνια αποθήκευσή της.

Το φορτίο το οποίο ζητάει ο χρήστης, παράγεται από την ανεμογεννήτρια και παράλληλα δουλεύει και η κυψέλη καυσίμου. Αν η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παρέχει την ενέργεια η οποία απαιτείται, τότε συνεισφέρει και η κυψέλη στην παραγωγή ενέργειας. Αν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας από την ανεμογεννήτρια, τότε αυτή αποθηκεύεται σε μορφή υδρογόνου για μελλοντική χρήση από την κυψέλη. Σε περίπτωση την οποία και η ανεμογεννήτρια αλλά και η κυψέλη καυσίμου δεν μπορούν να ικανοποιήσουν την ζήτηση φορτίου την οποία απαιτεί ο χρήστης, τότε συνεισφέρουν και οι υπέρ-πυκνωτές. Οι υπέρ-πυκνωτές ελαττώνουν επίσης τις διακυμάνσεις της τάσης της εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

Το σύστημα έχει δύο εισόδους : την ταχύτητα του ανέμου και την ζήτηση φορτίου από τον χρήστη. Στην ιδανική περίπτωση όπου ο άνεμος επαρκεί, η ανεμογεννήτρια τροφοδοτεί συνεχώς τον ηλεκτρολύτη του συστήματος και την κυψέλη. Στην περίπτωση όπου η ζήτηση φορτίου είναι μικρή και η ενέργεια του ανέμου μεγάλη, η ανεμογεννήτρια καλύπτει την ζήτηση του φορτίου εξ' ολοκλήρου από μόνη της και η κυψέλη καυσίμου καταναλώνει ισχύ 2kW, η οποία είναι η ελάχιστη ισχύς για να βρίσκεται η κυψέλη σε λειτουργία και σε ετοιμότητα να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Το περίσσειμα ενέργειας το οποίο παράγεται από την ανεμογεννήτρια τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης καυσίμου ο οποίος με την σειρά του καταναλώνει ισχύ ύψους 18 kW και παράγει υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή καυσίμου. Παράλληλα αποθηκεύεται ενέργεια και στους υπέρ-πυκνωτές από την κυψέλη.

Σε περίπτωση όμως που ο άνεμος έχει μικρή ταχύτητα, και η ζήτηση του φορτίου είναι μεγάλη, η διαφορά ενέργειας καλύπτεται από την κυψέλη η οποία παρέχει ισχύ μέχρι και 32 kW, καταναλώνοντας το υδρογόνο το οποίο είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή υδρογόνου. Αν ούτε η κυψέλη δεν μπορεί να καλύψει την διαφορά μεταξύ απαιτούμενης και παραγόμενης ενέργειας, τότε αποφορτίζονται οι υπέρ-πυκνωτές για να καλύψουν την διαφορά αυτήν. Κατά την διάρκεια αυτού του σεναρίου η ανεμογεννήτρια σταματάει να τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη και δίνει όλη την ενέργεια που παράγει για να καλύψει την ζήτηση του χρήστη, ενώ η δεξαμενή καυσίμου αδειάζει ανάλογα με την ζήτηση που υπάρχει. Όταν ο άνεμος έχει ταχύτητα μικρότερη των 3 m/sec η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας και το σύστημα δουλεύει μέχρι να καταναλωθεί όλο το υδρογόνο το οποίο είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή καυσίμου του συστήματος.

Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των μοντέλων (blocks ή subsystems όπως αναφέρονται στο Simulink) που συνιστούν την ανεμογεννήτρια, την κυψέλη καυσίμου, τον ηλεκτρολύτη, την δεξαμενή καυσίμου, καθώς και των απαραίτητων ac/dc, dc/dc και dc/ac μετατροπών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα σύμφωνα με την παρακάτω τοπολογία [2]:



Απεικόνιση Τοπολογίας Συνολικού Συστήματος

4.1 Το Μοντέλο της Αιολικής Μηχανής

Πολλές μελέτες έχουν γίνει από επιστήμονες όσων αφορά την μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας η οποία παράγει ενέργεια από την συνδυασμένη λειτουργία μίας αιολικής μηχανής η οποία δίνει την απαιτούμενη μηχανική ροπή και μίας ασύγχρονης γεννήτριας [13,14,15]. Το μοντέλο το οποίο υλοποιήθηκε χρησιμοποιεί το ήδη υπάρχον μοντέλο του Simulink για την προσομοίωση της αιολικής μηχανής.

Η βασική εξίσωση την οποία χρησιμοποιεί το μοντέλο μας για τον υπολογισμό της μηχανικής ροπής σε σχέση με τον άνεμο είναι η [16,17,18]

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3, \text{ όπου}$$

- **P_m**, η μηχανική ισχύς στην έξοδο της αιολική μηχανής σε Watt (W)
- **A**, το εμβαδόν κάλυψης της πτερωτής σε m²
- **C_p**, ο συντελεστής χρησιμοποίησης της ανεμογεννήτριας
- **λ**, ο λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου ο οποίος ορίζεται ως $\lambda = \frac{\text{ταχύτητα ακρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{R\omega}{u}$
- **β**, η γωνία του ακροπτερυγίου σε μοίρες (°)
- **ρ**, η πυκνότητα του ανέμου σε kg/m³
- **U_{wind}**, η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί για συγκεκριμένες τιμές πυκνότητας **ρ** του αέρα και περιοχής κάλυψης **A** της πτερωτής. Στο σύστημα per unit (p.u.) έχουμε:

$$P_{m_pu} = k_p c_{p_pu} v_{wind_pu}^3 \quad \text{όπου}$$

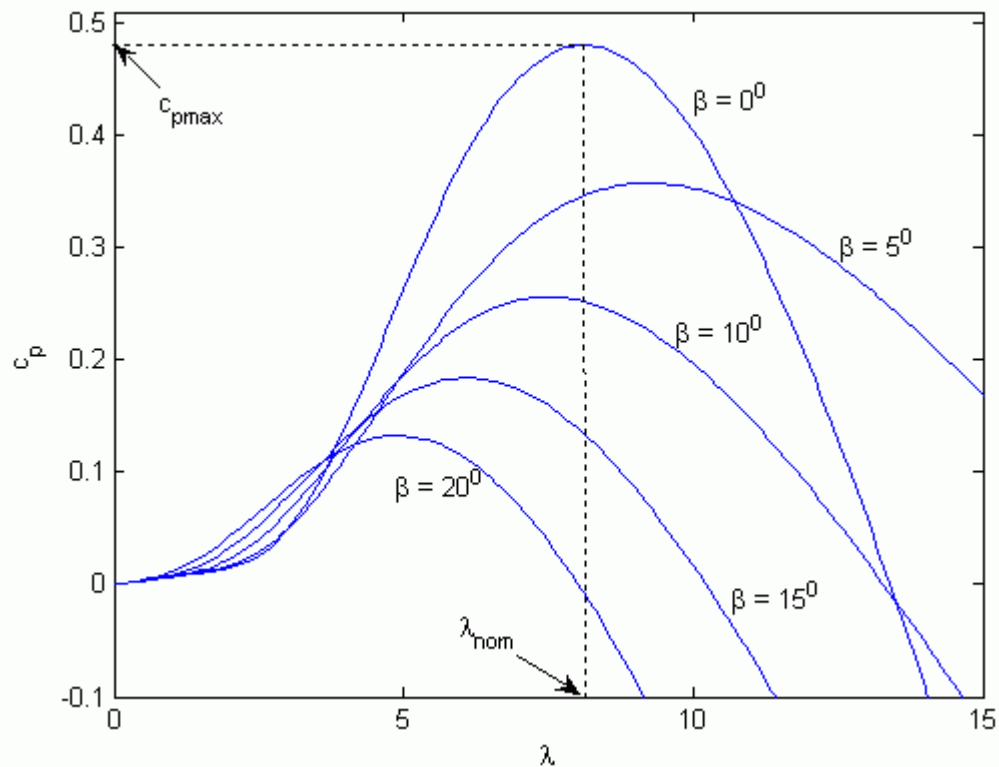
- **P_{m_pu}**, η ισχύς σε p.u. σε σχέση με την ονομαστική ισχύ για συγκεκριμένες τιμές **A** και **ρ**
- **C_{p_pu}**, ο συντελεστής χρησιμοποίησης σε p.u. σε σχέση με την μέγιστη τιμή του c_p
- **U_{wind_pu}**, η ταχύτητα του ανέμου σε p.u. σε σχέση με μία βάση ταχύτητας ανέμου. Ως βάση ανέμου χρησιμοποιείται η μέση τιμή του αναμενόμενου ανέμου σε m/s.
- **K_p**, η απόδοση ισχύος για c_{p_pu}=1 p.u. και u_{wind_pu}=1 pu, με το k_p να παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες με 1

Η εξίσωση την οποία χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον υπολογισμό του C_p είναι η

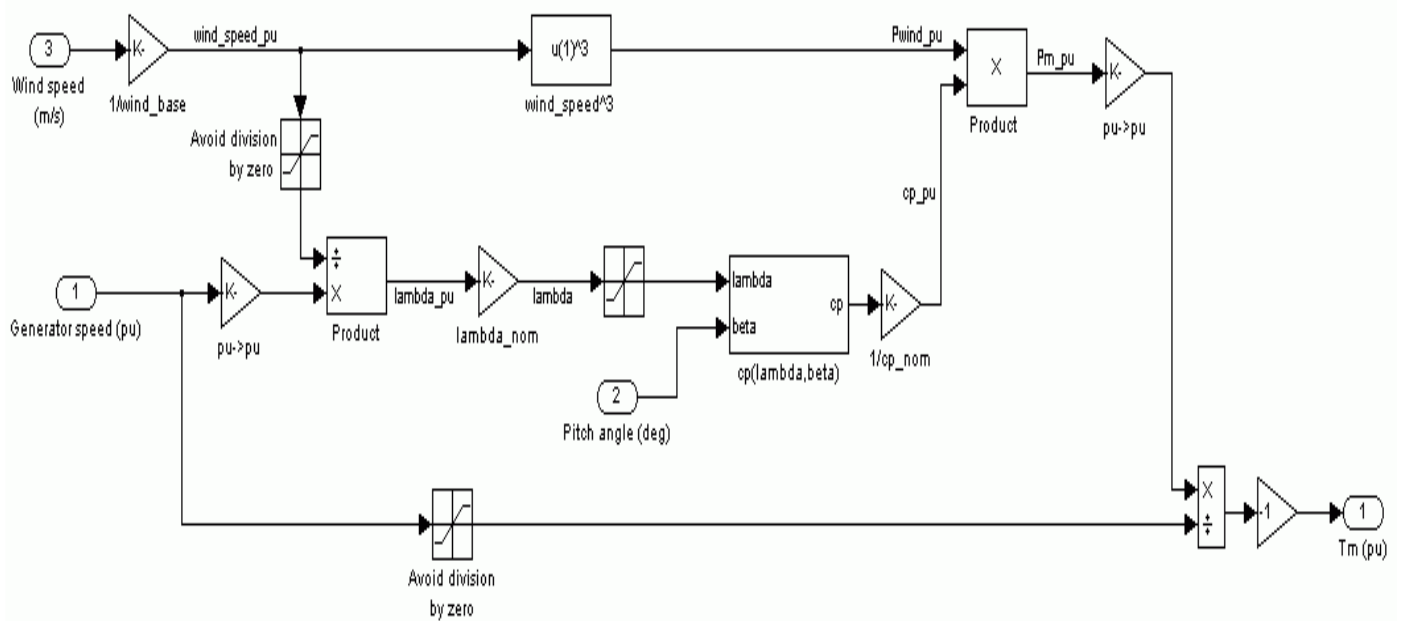
$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \text{ στην οποία το } \lambda_i \text{ υπολογίζεται από τον τύπο}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}.$$

Οι παράμετροι c_1 έως c_6 είναι: $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ και $c_6 = 0.0068$. Οι χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τον **Cp** σε σχέση με την γωνία **λ** των πτερυγίων, φαίνεται παρακάτω. Η μέγιστη τιμή του C_p ($C_{pmax} = 0.48$) επιτυγχάνεται για $\beta = 0$ μοίρες και για $\lambda = 8.1$. Η συγκεκριμένη αυτή τιμή ορίζεται και ως ονομαστική τιμή για τον C_p (C_{p_nom}). [16]



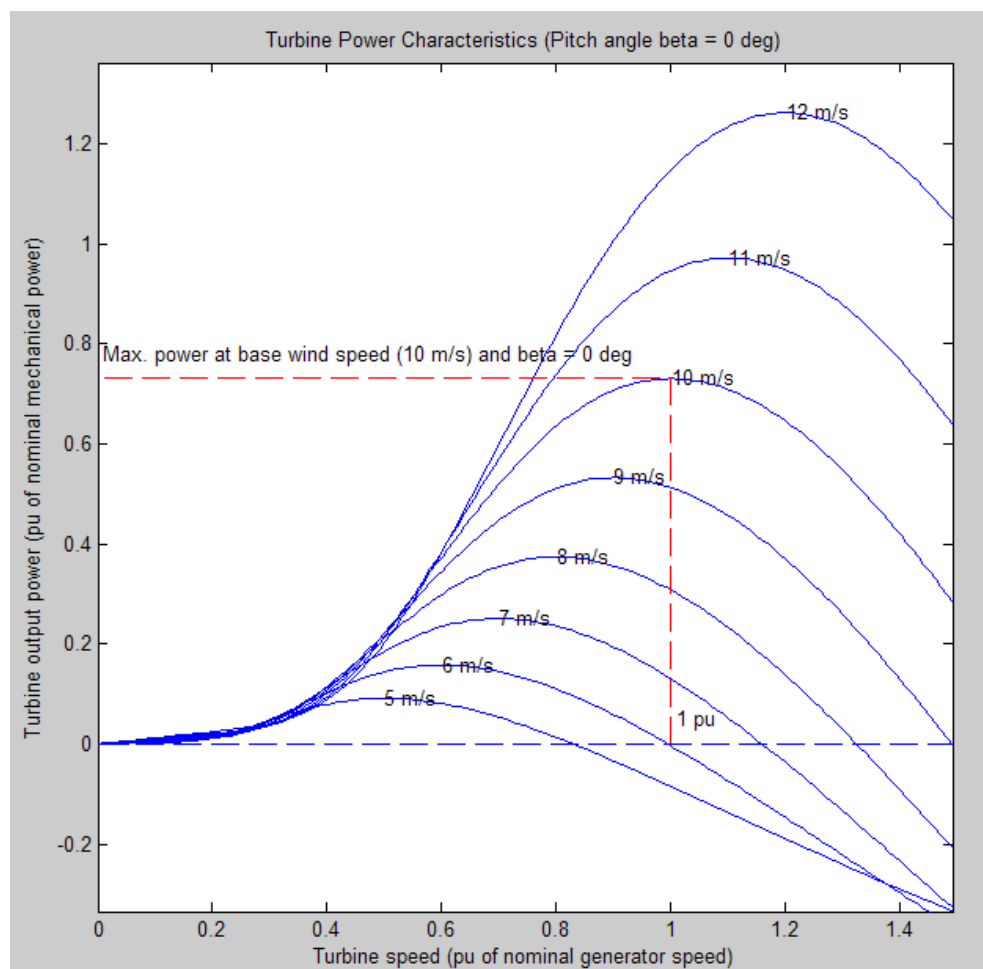
Το μοντέλο του Simulink για την wind-turbine φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Το μοντέλο αυτό έχει τρεις εισόδους : μία για την ταχύτητα του ανέμου σε m/sec, μία για την γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας στην οποία είναι συνδεδεμένη η αιολική μηχανή σε μονάδες p.u. και η τρίτη είσοδος είναι η γωνία β των πτερυγίων την οποία έχουμε θέσει στις 0° . Στην έξοδο του block υπολογίζεται η παραγόμενη μηχανική ροπή την οποία στην συνέχεια συνδέουμε στην είσοδο της ασύγχρονης γεννήτριας. Οι παράμετροι του block αυτού είναι :

- Η ονομαστική μηχανική ισχύς της αιολικής μηχανής σε watts (W). Η ισχύς αυτή υπολογίζεται βάση της ισχύος της γεννήτριας και του συντελεστή χρησιμοποίησης. Στο σύστημά μας είναι $1.492e5 \cdot 0.9$ Watt
- Η ονομαστική ισχύς της ηλεκτρικής γεννήτριας σε VA. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μηχανικής ροπής σε p.u. της γεννήτριας. Στο σύστημά μας είναι 200 Hp ή περίπου 150 kW
- Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου σε m/sec, την οποία ρυθμίσαμε στα 10 m/sec.
- Η ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου σε σύστημα p.u. , ρυθμισμένη στην μονάδα.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες που απεικονίζουν την σχέση της ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (p.u.) και της παραγόμενης ισχύος (p.u.) για $\beta=0$ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Το Μοντέλο της Ασύγχρονης Γεννήτριας

Το ήδη υπάρχον block του Simulink της ασύγχρονης μηχανής χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ασύγχρονης γεννήτριας στο σύστημά μας. Η μηχανική ροπή η οποία απαιτείται για την λειτουργία της γεννήτριας έρχεται από την αιολική μηχανή, την οποία αναλύσαμε προηγουμένως [16].

Η ασύγχρονη αυτή μηχανή είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε αν “δει” θετική μηχανική ροπή στην είσοδό της δουλεύει σαν κινητήρας, ενώ αν “δει” αρνητική ροπή σαν ασύγχρονη γεννήτρια. Οι βασικές εξισώσεις που μας δίνουν την σύγχρονη ταχύτητα και την γωνιακή ταχύτητα της μηχανής είναι

$$n_s = \frac{60}{p} f_n, \quad \text{και} \quad \omega_m = \frac{2\pi}{60} n_s \quad \text{όπου}$$

- **n_s** , ο αριθμός σύγχρονων περιστροφών ανά λεπτό
- **p** , ο αριθμός των ζευγών των πόλων της ασύγχρονης μηχανής
- **f_n** , η ονομαστική συχνότητα
- **ω_m** , η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα

Η μηχανική ροπή η οποία κινεί τον άξονα του ρότορα αποδίδει την μηχανική ισχύ στην είσοδο της μηχανής σύμφωνα με το τύπο **$P_m = T_m \omega_m$** , όπου **T_m** η μηχανική ροπή του άξονα και **P_m** η μηχανική ισχύς.

Η παράγωγος της γωνιακής ταχύτητας και της γωνιακής θέσης του ρότορα δίνονται από τους

τύπους $\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m), \quad \text{και} \quad \frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad \text{με}$

- **H** , η σταθερά συνδυασμένης αδράνειας ρότορα και φορτίου
- **T_e** , η ηλεκτρομαγνητική ροπή
- **F** , συντελεστής συνδυασμένης τριβής μεταξύ ρότορα και φορτίου
- **θ_m** , γωνιακή θέση του ρότορα

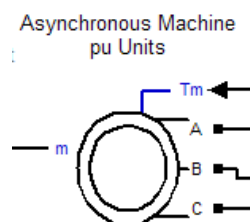
Η σχέση μεταξύ της τάσης που παράγεται στον στάτορα και της τελικής τάσης στην έξοδο της γεννήτριας είναι $V_s = E_s - (R'_s + j2\pi f L'_s) I_s$, με

- **V_s** , την τελική φασική τάση στα άκρα της γεννήτριας
- **E_s** , την παραγόμενη φασική τάση του στάτορα
- **R'_s** , την συνολική αντίσταση και επαγωγή του στάτορα και του ρότορα
- **L'_s** , την επαγωγή του στάτορα
- **I_s** , το ρεύμα του στάτορα

Τέλος η ενεργός ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο

$$P_e = 3 \frac{E_s V_s}{\sqrt{R_s'^2 + (2\pi f L_s')^2}} \sin \delta. \quad \text{όπου } \delta, \text{ η γωνία της ισχύος.}$$

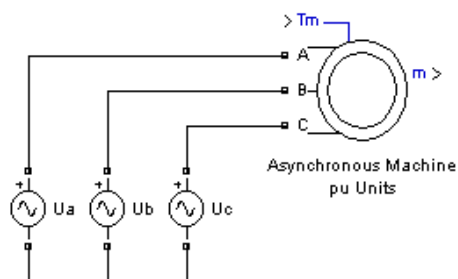
Η ασύγχρονη μηχανή του Simulink έχει μία είσοδο η οποία είναι η μηχανική ροπή η οποία ενεργεί πάνω στην μηχανή σε μονάδες p.u., τρεις εξόδους οι οποίες αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις της παραγόμενης τάσης καθώς μία έξοδο **m** την οποία αντιστοιχούμε με την χρήση ενός demux στην γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, επίσης σε μονάδες p.u. .



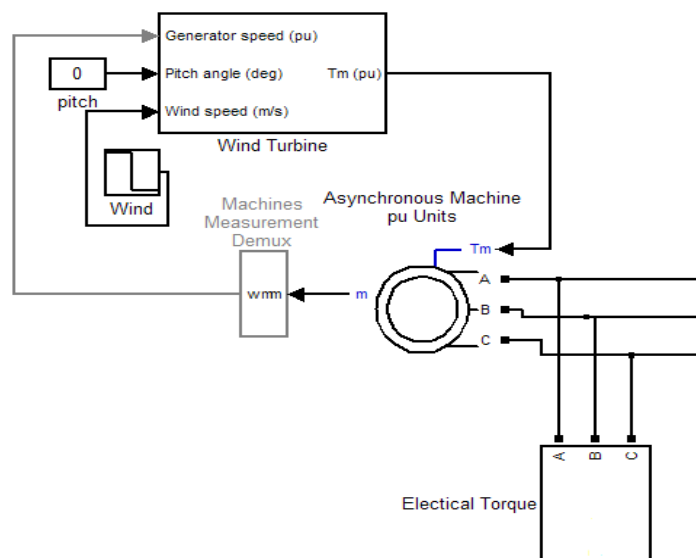
Οι παράμετροι του block της ασύγχρονης μηχανής ρυθμίστηκαν ως εξής :

- Η ονομαστική ισχύς ($P_{mechanic}$) ρυθμίστηκε στους 200 Hp
- Η ονομαστική τάση (line-to-line) ρυθμίστηκε στα 460 V
- Η ονομαστική συχνότητα στα 60 Hz
- Οι ονομαστικές περιστροφές του ρότορα το λεπτό στους 1785 rpm
- Τύπος ρότορα squirrel cage
- Αντίσταση στάτορα 0.01282 p.u
- Επαγωγή στάτορα 0.05051 p.u
- Αντίσταση ρότορα 0.00702 p.u
- Επαγωγή ρότορα 0.05051 p.u
- Ζεύγη πόλων 2

Όπως αναφέραμε και στην περιγραφή των ασύγχρονων ηλεκτρικών γεννητριών, για να δουλέψει μια ασύγχρονη γεννήτρια εκτός από την μηχανική ροπή είναι απαραίτητο να “δει” στα άκρα της και μία ηλεκτρική διέγερση. Στην πράξη αυτή παρέχεται με την χρήση πυκνωτών οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη άεργο διέγερση στο κύκλωμα. Στην μοντελοποίηση όμως της γεννήτριας υπάρχει ένας περιορισμός από το ίδιο το Simulink όσον αφορά την διέγερση της γεννήτριας : η ηλεκτρική ισχύς πρέπει να παρέχεται από τριφασική ηλεκτρική γεννήτρια σε τοπολογία αστέρα όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα



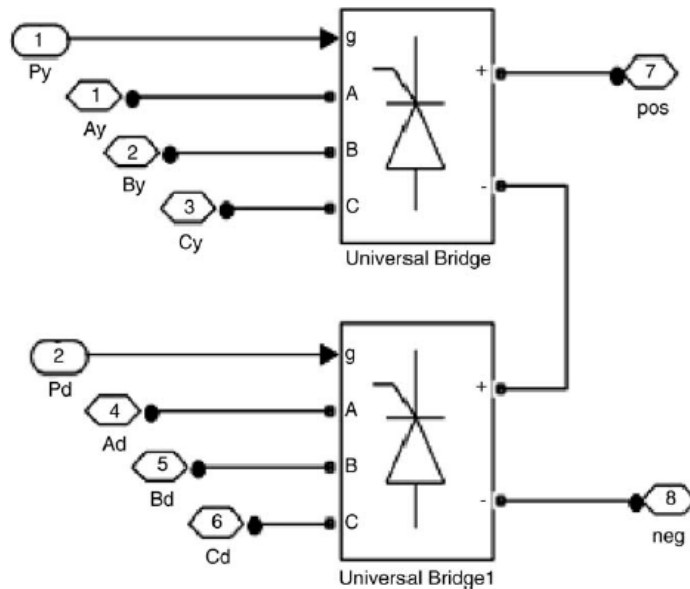
Το πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε με αυτού του είδους την συνδεσμολογία είναι ότι κατά την προσομοίωση υπήρχε μεταφορά ενέργειας από την πηγή ρεύματος προς το σύστημα. Προκειμένου να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό προσομοιώσαμε την ανεμογεννήτρια ξεχωριστά και αποθηκεύσαμε σε αρχείο **.mat** την ισχύ την οποία αποδίδει η ασύγχρονη γεννήτρια πριν τον dc ζυγό προκειμένου να το χρησιμοποιήσουμε στην τελική προσομοίωση του συνολικού συστήματος. Μία πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν η άεργος διέγερση της ασύγχρονης μηχανής να προσομοιωθεί με μία σύγχρονη γεννήτρια μηδενικής ισχύος. Η προσπάθεια όμως που έγινε να προσομοιωθεί η διέγερση με τον τρόπο αυτό απαιτούσε αρκετή μελέτη η οποία ξέφυγε έξω από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Η τελική συνδεσμολογία του μοντέλου της αιολικής μηχανής με το μοντέλο της ασύγχρονης γεννήτριας και την ηλεκτρική διέγερση της γεννήτριας φαίνεται παρακάτω



Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας

4.3 Το Μοντέλο του AC/DC Μετατροπέα

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου έχει σαν αποτέλεσμα η τριφασική έξοδος της γεννήτριας να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση τόσο στο πλάτος της όσο και στην συχνότητά της. Η μεταβαλλόμενη τριφασική τάση της γεννήτριας εξομαλύνεται και μετατρέπεται σε συνεχόμενη τάση dc με την χρήση ενός 12-παλμικού μετατροπέα. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήσαμε τον 12-παλμικό ανορθωτή είναι ότι προκαλεί μικρότερη αρμονική διαταραχή και μπορεί να ελεγχθεί εύκολα ρυθμίζοντας την γωνία πυροδότησής του ώστε να παράγει σταθερή τάση στην έξοδό του. Για την μοντελοποίηση του μετατροπέα χρησιμοποιήθηκαν 2 γέφυρες τύπου thyristor, η είσοδος του οποίου έρχεται από έναν μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων. Ο μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων χρειάζεται για την δημιουργία των έξι σημάτων που χρειάζεται για είσοδο ο μετατροπέας.

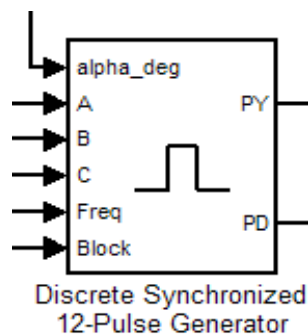


Το μοντέλο του 12-παλμικού ac/dc μετατροπέα

Οι δύο γέφυρες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά τα οποία είναι

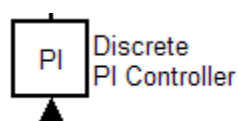
- Snubber resistance 2000 Ω
- Snubber capacitance 0.1 μF
- Internal resistance 1 m Ω

Για την παραγωγή των παλμών οι οποίοι ελέγχουν τον μετατροπέα χρησιμοποιήσαμε μία 12-παλμική γεννήτρια παλμών.



Το block της 12-παλμικής γεννήτριας παλμών

Το πλάτος των παλμών του block ρυθμίστηκε στις 80° και η συχνότητα αναφοράς της εισόδου στα 60 Hz. Η γωνία των παλμών της γεννήτριας ελέγχεται από έναν PI ελεγκτή ο οποίος είναι ρυθμισμένος έτσι ώστε να κρατάει την dc τάση στην έξοδο του συστήματος σταθερή στα 400 V.

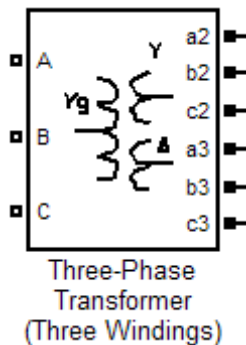


Ο PI ελεγκτής

Ο ΠΙ ελεγκτής δέχεται σαν είσοδό του την διαφορά της dc τάσης του μετατροπέα από την τάση αναφοράς, η οποία στην περίπτωση μας είναι τα 400 V τα οποία θέλουμε να έχουμε στην έξοδο. Οι παράμετροι του block του ΠΙ είναι :

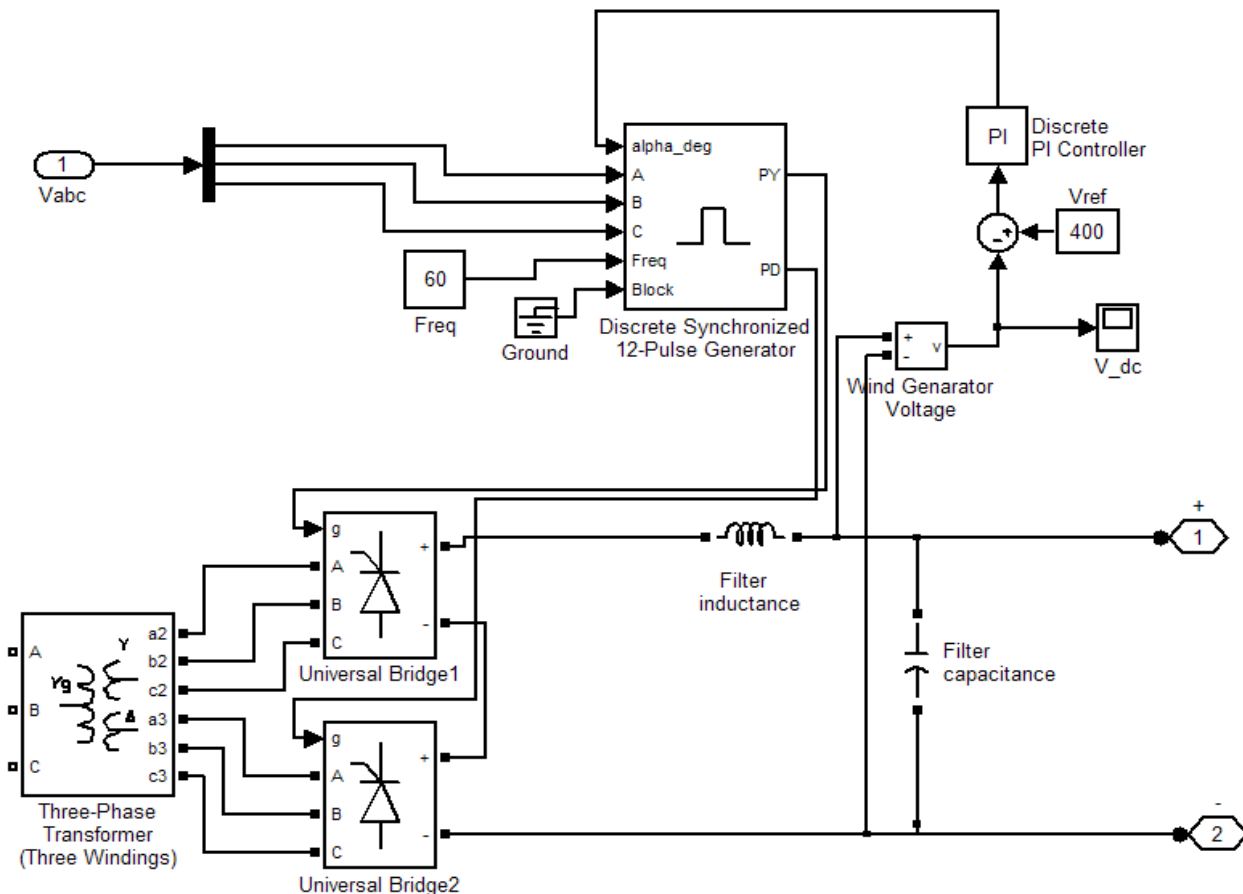
- K_p , 0.00004
- K_i , 0.0114
- Αρχική τιμή , 10

Το block του μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι τιμές του φαίνονται παρακάτω:



- Ονομαστική Ισχύς , 120 kW
- Ονομαστική συχνότητα, 60 Hz
- Παράμετροι τυλίγματος εισόδου (Y_g), 460 V, 0.00025 p.u. , 0 p.u
- Παράμετροι τυλίγματος εξόδου (Y), 230 V, 0.00025 p.u. , 0.0024 p.u.
- Παράμετροι τυλίγματος εξόδου (D_{11}), 230 V, 0.00025 p.u. , 0.0024 p.u.
- Μαγνητική αντίσταση, 464 p.u.
- Επαγωγική αντίσταση, 464 p.u.

Η προτεινόμενη τοπολογία του ελεγχόμενου ac/dc μετατροπέα [2] φαίνεται παρακάτω :

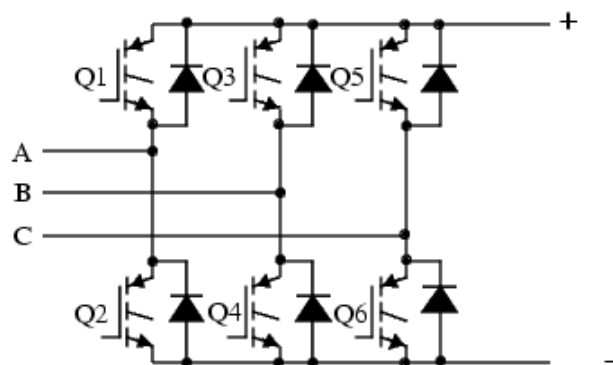


Το φίλτρο το οποίο φαίνεται στο σχήμα έχει διαστάσεις $L = 66 \text{ mH}$ και $C = 3300 \text{ }\mu\text{F}$. Η σταθερή dc τάση η οποία παράγεται χρησιμοποιείται για την παροχή ενέργειας στο σύστημα αλλά και για την σταθερή τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη του συστήματος.

4.4 Το Μοντέλο του DC/AC Μετατροπέα

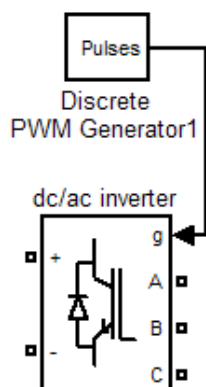
Εφόσον αποφύγαμε τις διακυμάνσεις της τάσης της γεννήτριας, μετατρέπουμε πάλι το dc ρεύμα σε ac για την τροφοδοσία του συστήματος με την χρήση ενός dc/ac αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας του συστήματος είναι τύπου IGBT ο οποίος μετατρέπει το dc ρεύμα σε ac σύμφωνα

με τον τύπο
$$V_{l-l} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m V_{dc}$$
 ,όπου V_{l-l} το πλάτος της πολικής τάσης της εξόδου του αντιστροφέα, V_{dc} η σταθερή dc τάση 400 V και m το πλάτος εναλλαγής της τάσης το οποίο έχει τιμή 0.98. Η υλοποίηση του αντιστροφέα φαίνεται παρακάτω :



Ο dc/ac inverter

Ένας PWM generator χρησιμοποιείται για την παραγωγή των σημάτων ελέγχου του inverter. Το μοντέλο του τριφασικού IGBT inverter καθώς και οι παράμετροι του block φαίνονται παρακάτω :

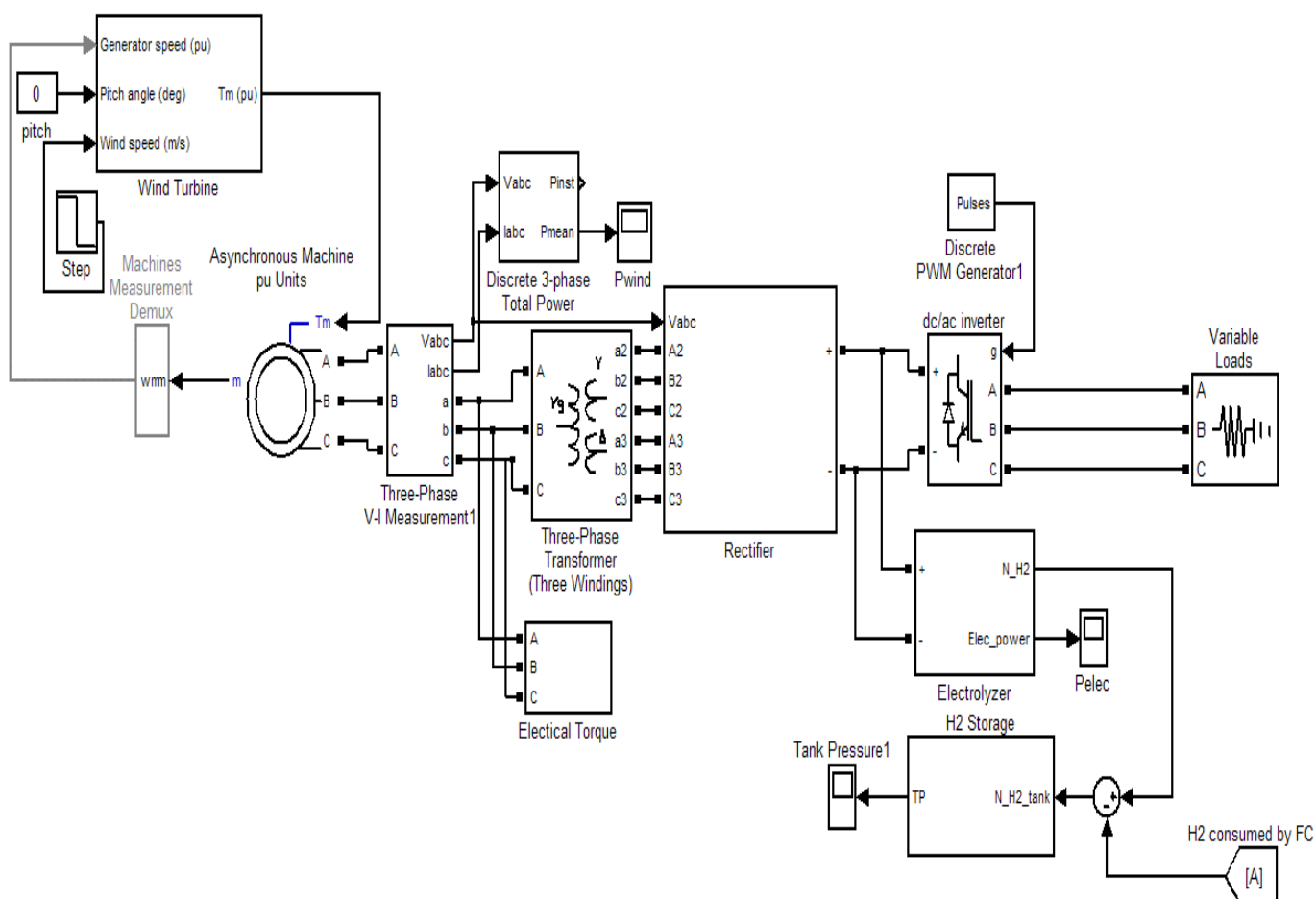


- Τύπος ημιαγωγού : IGBT – DIODE
- Snubber resistance : 2 kΩ
- Snubber capacitance : 0.1 μF
- Internal resistance : 1 mΩ
- Συχνότητα φέροντος : 5 kHz
- Modulation index : 0.98
- Συχνότητα τάσης εξόδου : 60 Hz

Στην πράξη, θα έπρεπε στην έξοδο του μετασχηματιστή να υπάρχει ένα φίλτρο το οποίο θα αποκόπτε τις αρμονικές τάσεις του εναλλασσόμενου ρεύματος και θα αφήνει μόνο την πρώτη αρμονική ($\sim 120\text{V}$) η οποία είναι και η μοναδική παράγει πραγματική ισχύ στην πράξη. Στην συνέχεια θα έπρεπε να συνδέσουμε ακόμα έναν μετασχηματιστή ο οποίος θα μας έδινε τα 240 V τα οποία ζητάει το σύστημά μας. Για χάριν απλοποίησης του συστήματος κρατήσαμε όλες οι αρμονικές του φορτίου και θεωρούμε ότι παράγουν και αυτές πραγματική ισχύ πάνω σε ωμικό φορτίο. Η έξοδος του dc/ac inverter είναι η rms τιμή της ac τάσης ($\sim 240\text{ V}$)

4.5 Το Συνολικό Σύστημα της Ανεμογεννήτριας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το συνολικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας και η συνδεσμολογία της με τους ac/dc και dc/ac μετατροπείς, καθώς και με την συνολική ζήτηση φορτίου αλλά και με τον ηλεκτρολύτη του συστήματος.



4.6 Η Κυψέλη Καυσίμου

Το μοντέλο της κυψέλης μας δέχεται σαν είσοδο το dc ρεύμα της κυψέλης το οποίο υπολογίζεται αναδρομικά από την ζήτηση του φορτίου και ως τελική έξοδος λαμβάνεται η συνολική τάση της κυψέλης καυσίμου [19][20].

Αρχικά με βάση το dc ρεύμα της εισόδου υπολογίζεται το υδρογόνο το οποίο καταναλώνεται από την κυψέλη για την παραγωγή φορτίου σύμφωνα με την εξίσωση

$$H^2 = N_o * I_{FC} / (2 * F * U) \text{ όπου}$$

- H^2 , το υδρογόνο το οποίο καταναλώνεται από την κυψέλη σε kmol/sec
- N_o , ο αριθμός των fuel cells συνδεδεμένα σε σειρά μέσα στην κυψέλη. Στο σύστημά μας είναι **712 fuel cells** σε σειρά
- I_{FC} , το dc ρεύμα της κυψέλης σε Ampere
- F , η σταθερά Faraday, 96484600 C/kmol
- U , η χρησιμοποίηση, 0.8
- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση είναι **2**

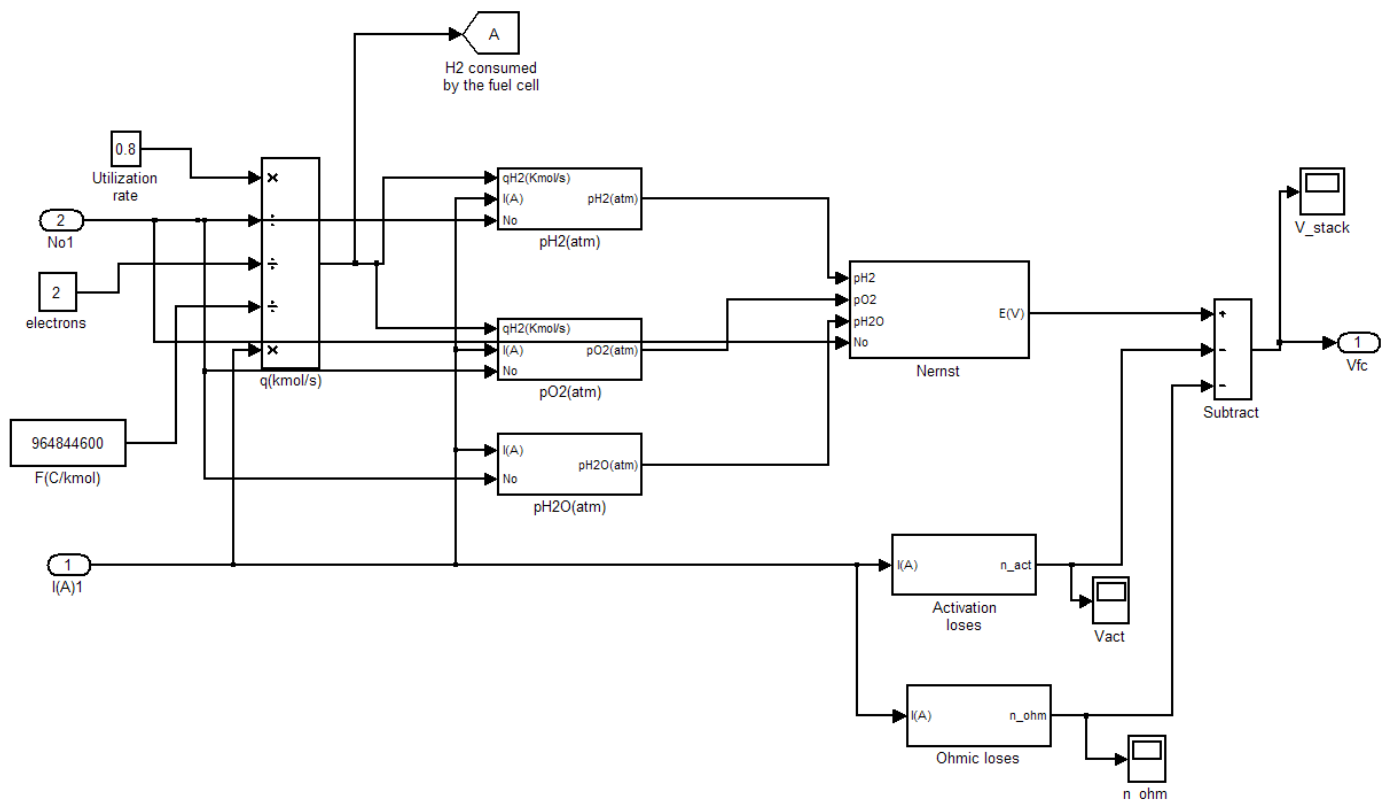
Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη εμπειρική τιμή χρησιμοποίησης ($U = 0.8$) είναι για να γίνει προσομοίωση της κυψέλης με βάση τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες λειτουργούν οι κυψέλες καυσίμου. Αν η χρησιμοποίηση είναι μεγάλη (>1.2) υπάρχει κίνδυνος να λιώσει η κυψέλη ενώ αν είναι υπερβολικά μικρός δεν γίνεται κατανάλωση υδρογόνου μέσα στην κυψέλη.

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού σε αέρια μορφή, και υπολογίζεται η τάση της κυψέλης σύμφωνα με την εξίσωση του Nernst η οποία

είναι
$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} * \ln \frac{P_{H_2} * \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \text{ όπου}$$

- E° , η ιδανική τάση της κυψέλης, 0,6 V
- R , η παγκόσμια σταθερά αερίων, 8314.47 J/(kmol K)
- T , η θερμοκρασία, 343 K
- n , ο αριθμός των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση, 2
- F , η σταθερά Faraday
- P_{H_2} , η πίεση του υδρογόνου σε atm
- P_{O_2} , η πίεση του οξυγόνου σε atm
- P_{H_2O} , η πίεση του νερού σε atm

Για τον υπολογισμό της τελικής τάσης εξόδου του συστήματος αφαιρούνται από την παραπάνω τάση E οι απώλειες ενεργοποίησης και οι ωμικές απώλειες. Για χάριν απλοποίησης του συστήματος δεν έχουν συμπεριληφθεί οι απώλειες συγκέντρωσης της κυψέλης. Παρατίθεται το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου.

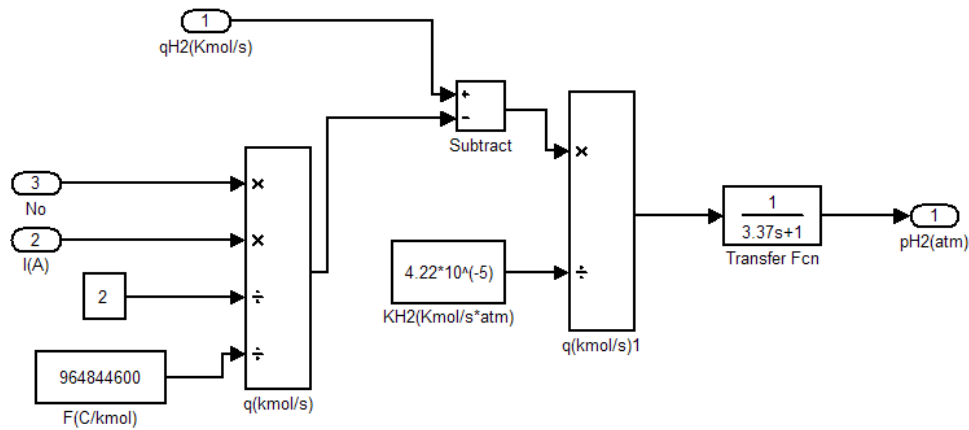


Ο υπολογισμός της πίεσης του υδρογόνου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r), \text{ όπου } \tau_{H_2} = \frac{V_a}{K_{H_2}RT} [s] \text{ και } q_{H_2}^r = \frac{I}{2F} \text{ με}$$

- K_{H_2} , σταθερά βαλβίδας υδρογόνου , $4.7955 \cdot 10^{-7} \text{ kmol}/(\text{atm} \cdot \text{s})$
- τ_{H_2} , χρονική σταθερά υδρογόνου , 3.37 sec
- $q_{H_2}^{in}$, ρυθμός ροής εισόδου υδρογόνου kmol/sec
- $q_{H_2}^r$, ρυθμός με τον οποίο αντιδρά το υδρογόνο

Ο τρόπος υπολογισμού της πίεσης του υδρογόνου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί

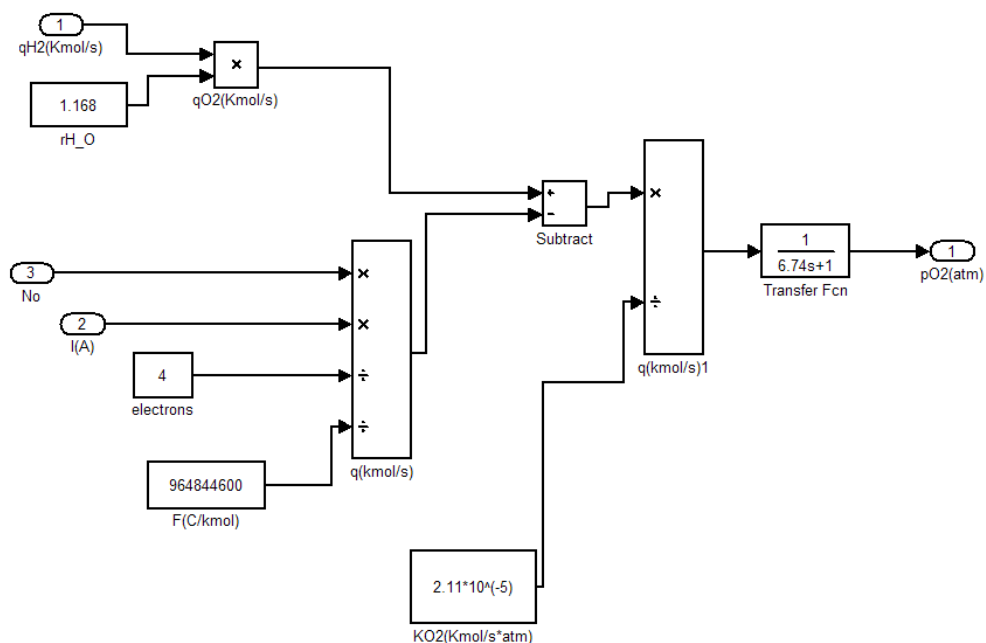


Ο υπολογισμός της πίεσης του οξυγόνου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1+\tau_{O_2}s} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^r), \text{ όπου } \tau_{O_2} = \frac{V_c}{K_{O_2}RT} [s] \text{ και } q_{O_2}^r = 1/2 * \frac{I}{2F} \text{ με}$$

- **K_{O2}** , σταθερά βαλβίδας οξυγόνου , $2.11 \cdot 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{atm} \cdot \text{s})$
- **T_{O2}** , χρονική σταθερά οξυγόνου , 6.74 sec
- **qⁱⁿ_{O2}** , ρυθμός ροής εισόδου οξυγόνου kmol/sec
- **q^r_{O2}** , ρυθμός με τον οποίο αντιδρά το οξυγόνο
- **r_{H_O}** , ρυθμός ροής υδρογόνου – οξυγόνου , 1.168

Ο τρόπος υπολογισμού της πίεσης του οξυγόνου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί

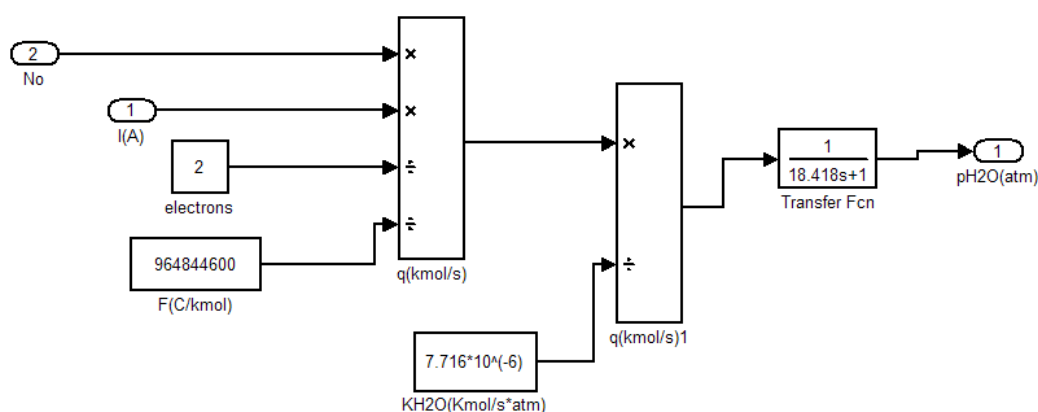


Ο υπολογισμός της πίεσης του νερού γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

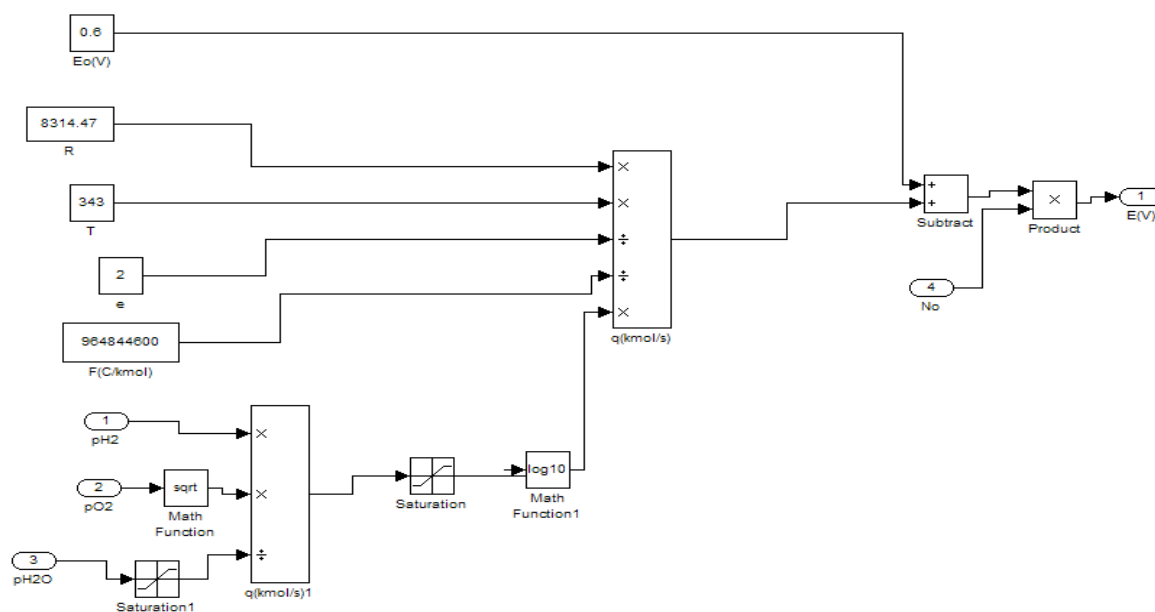
$$p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1+\tau_{H_2O}s} (q_{H_2O}^{in} - q_{H_2O}^r), \text{ όπου } \tau_{H_2O} = \frac{V_c}{K_{H_2O}RT} [s] \text{ και } q_{H_2O}^r = -\frac{I}{2F} \text{ με}$$

- **K_{H2O}** , σταθερά βαλβίδας νερού , $7.716 \cdot 10^{-6}$ kmol/(atm*s)
- **T_{H2O}** , χρονική σταθερά νερού , 18.418 sec
- **qⁱⁿ_{H2O}** , ρυθμός ροής εισόδου νερού kmol/sec
- **q^r_{H2O}** , ρυθμός με τον οποίο αντιδρά το νερό
- **r_{H₂O}** , ρυθμός ροής υδρογόνου – οξυγόνου , 1.168

Ο τρόπος υπολογισμού της πίεσης του νερό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί



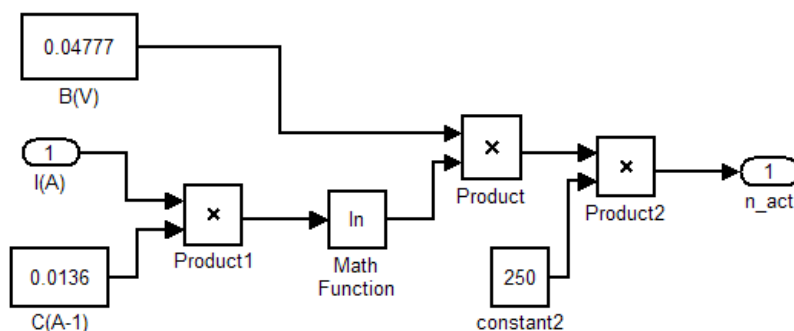
Έχοντας υπολογίσει τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού μπορούμε με την εξίσωση του Nernst να υπολογίσουμε την τάση E της κυψέλης. Ο υπολογισμός της τάσης E φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί



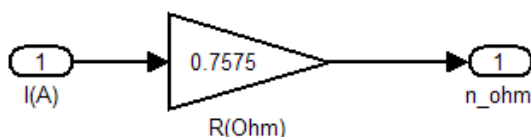
Οι απώλειες ενεργοποίησης υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εξίσωση $n_{act} = B \cdot \log(C \cdot I)$ όπου

- **B και C** , εμπειρικές σταθερές μοντελοποίησης των απωλειών ενεργοποίησης της κυψέλης, 0.4777 V και 0.0136 A^{-1} αντίστοιχα.
- **I** , η ένταση του dc ρεύματος

Ο τρόπος υπολογισμού των απωλειών ενεργοποίησης φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί

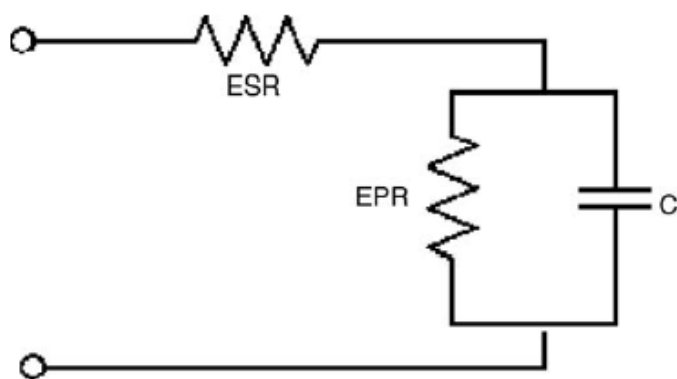


Οι ωμικές απώλειες της κυψέλης είναι $n_{ohm} = I \cdot R_{int}$ όπου $R_{int} = 0.7575 \Omega$ σταθερή αντίσταση για την κυψέλη του συστήματός μας. Ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών φαίνεται παρακάτω



4.7 Οι υπέρ – Πυκνωτές

Το κλασσικό ισοδύναμο ενός Ultra – Capacitor φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



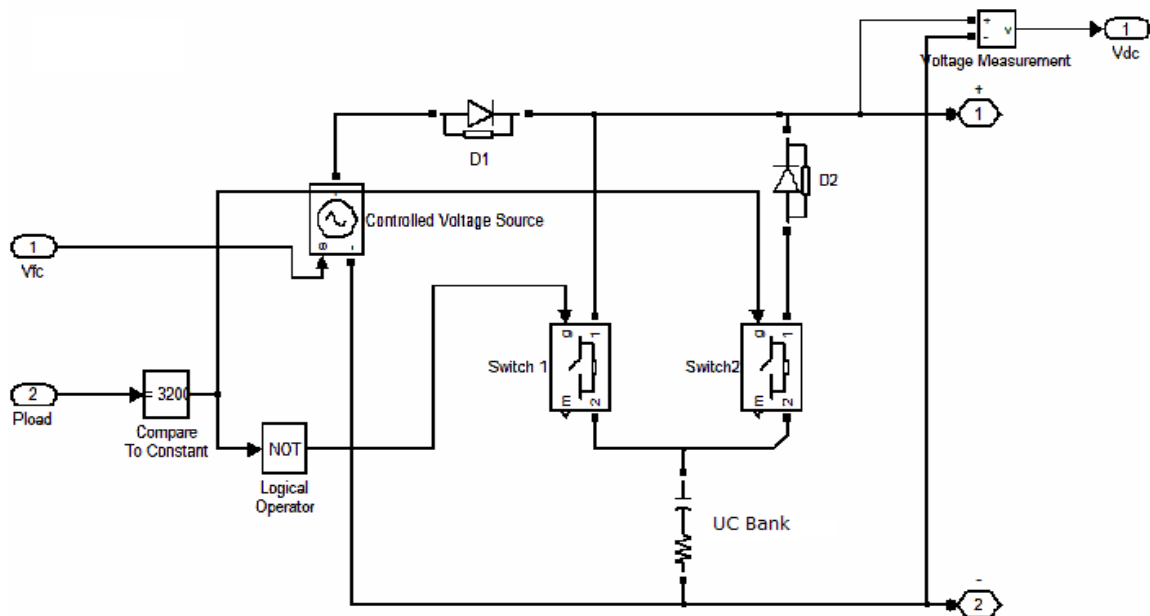
όπου

- **C** , η συνολική χωρητικότητα του πυκνωτή
- **ESR** , η ισοδύναμη σειριακή αντίσταση
- **EPR** , η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση

Η ESR αντίσταση αντιπροσωπεύει την αντίσταση του πυκνωτή κατά την φόρτιση και εκφόρτιση του ενώ η EPR αντίσταση αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας του πυκνωτή λόγω διαρροής και επηρεάζει μόνο της μακροχρόνια χρήση του [21],[22],[23]. Επειδή εμείς προσομοιώνουμε την λειτουργία των πυκνωτών για ένα μικρό χρονικό διάστημα μπορούμε να παραλείψουμε την EPR από τους υπολογισμούς μας.

Το ποσό ενέργειας το οποίο παρέχουν οι πυκνωτές δίνεται από τον τύπο $E_{UC} = \frac{1}{2}C(V_i^2 - V_f^2)$ όπου **V_i** η αρχή τάση πριν ξεκινήσει η εκφόρτιση τους και **V_f** η τελική τάση μόλις τελειώσει η εκφόρτιση [21]. Η ενέργεια αυτή είναι θετική όταν η δεξαμενή των πυκνωτών απελευθερώνει ενέργεια στο κύκλωμα και αρνητική όταν οι πυκνωτές συλλέγουν ενέργεια από το σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένοι. Οι ultra-capacitors του συστήματός έχουν υλοποιηθεί με πρότυπο τον ultra-capacitor **Maxwell BCAP 3000 E270** [24]. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν ονομαστική τάση 2,7V , ESR 0.00037 Ω και χωρητικότητα 3000F. Θεωρώντας ότι η κυψέλη καυσίμου έχει έξοδο 400V dc , **148** τέτοιοι πυκνωτές έχουν συνδεθεί σε σειρά για να μας δώσουν τάση ~400 V και συνολική χωρητικότητα 20,270 F. Το μέγεθος της χωρητικότητας του ultra-capacitor μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.

Διάφορες τοπολογίες έχουν προταθεί για τον τρόπο που μπορούμε να συνδέσουμε τους πυκνωτές ώστε να δουλεύουν παράλληλα με την κυψέλη καυσίμου [22],[23],[25],[26] . Στο σύστημά μας ο τρόπος με τον οποίο η κυψέλη καυσίμου και οι πυκνωτές μοιράζονται την ζήτηση φορτίου καθορίζεται με την χρήση διακοπών . Αν η ζήτηση φορτίου είναι μικρότερη από την μέγιστη ισχύ την οποία μπορεί να παρέχει η κυψέλη (<32 kW), η κυψέλη παρέχει όλη την απαιτούμενη ενέργεια και οι πυκνωτές φορτίζονται. Στην περίπτωση αυτή ο διακόπτης Switch 1 είναι κλειστός και οι πυκνωτές δεν μπορούν να δώσουν ισχύ στο σύστημα καθώς ο διακόπτης Switch 2 είναι ανοιχτός. Αν η ζήτηση φορτίου είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ την οποία μπορεί να καλύψει η κυψέλη (>=32 kW), η κυψέλη δίνει την μέγιστη ενέργεια την οποία μπορεί να παρέχει στο σύστημα και παράλληλα οι πυκνωτές αποφορτίζονται. Στην περίπτωση αυτή ο διακόπτης Switch 2 κλείνει και οι πυκνωτές καλύπτουν την διαφορά στην απαιτούμενη ισχύ. Η αντίστροφη ροή ενέργειας στο σύστημά μας εμποδίζεται με την χρήση διόδων. Το κύκλωμα το οποίο περιγράψαμε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

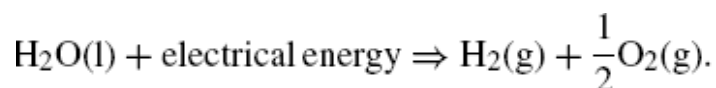


Στην συνέχεια δίνονται οι παράμετροι των διαφόρων block

- Ωμική αντίσταση ultra-capacitors , 0.00037*148 Ω
- Χωρητικότητα ultra-capacitors , 20,270 F
- Εσωτερική αντίσταση διόδων , 0,001 Ω
- Πτώση τάσης διόδων , 0,8 V
- Εσωτερική αντίσταση διακοπών , 0,001 Ω
- Αρχική τάση των πυκνωτών , 363.5 V

4.8 Το Μοντέλο του Ηλεκτρολύτη

Το νερό μπορεί να διασπαστεί στα στοιχεία του για την παραγωγή υδρογόνου με την χρήση δύο ηλεκτροδίων τα οποία διαπερνούνται από ηλεκτρικό ρεύμα και χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη υγρής μορφής [27][28]. Η ηλεκτροχημική αντίδραση της ηλεκτρόλυσης είναι η



Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου από έναν ηλεκτρολύτη είναι ανάλογος του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο τον διαπερνά σύμφωνα με τον

τύπο
$$n_{\text{H}_2} = \frac{\eta_F n_C i_e}{2F}$$
 με

- **F** , την σταθερά Faraday
- **i_e**, την ένταση του ρεύματος

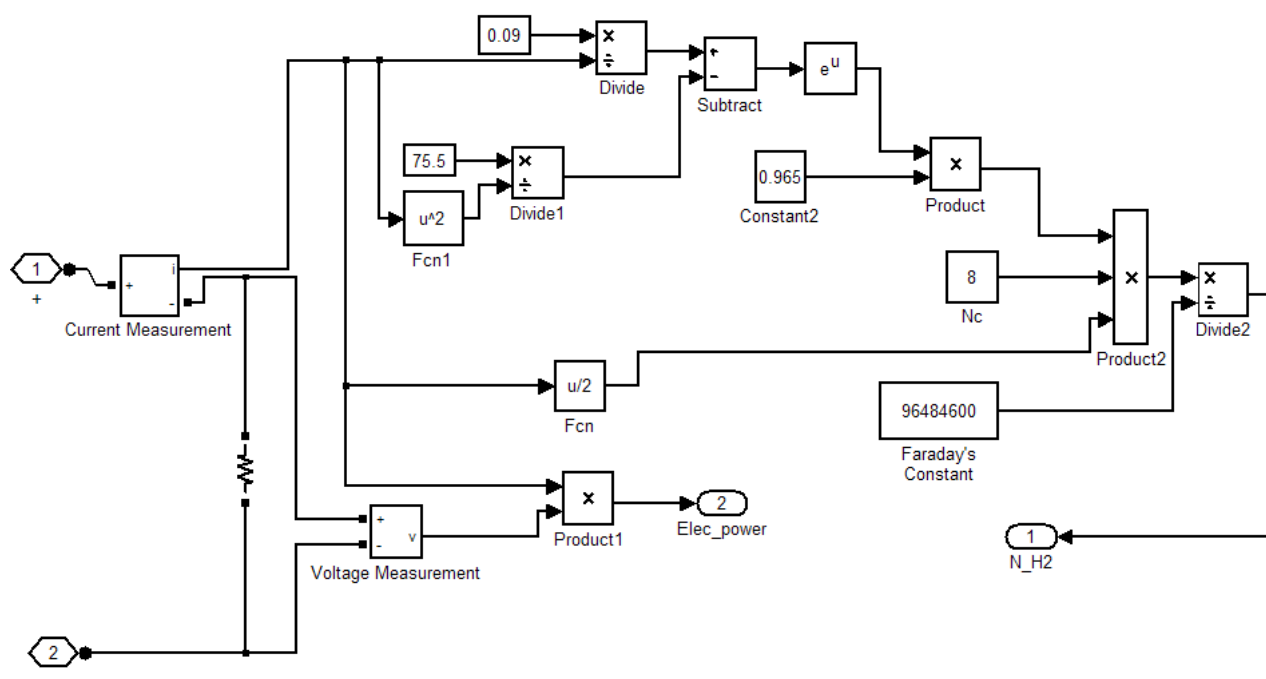
- N_c , τον αριθμό των ηλεκτρολυτών σε σειρά
- η_F , η απόδοση Faraday
- N_{H_2} , τα mol υδρογόνου που παράγονται

Η απόδοση Faraday ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της μέγιστης θεωρητικής ποσότητας υδρογόνου το οποίο παράγεται από τον ηλεκτρολύτη προς την πραγματική ποσότητα υδρογόνου. Θεωρώντας ότι ο ηλεκτρολύτης δουλεύει σε θερμοκρασία 40°C , η απόδοση Faraday εκφράζεται ως [13][27][28]

$$\eta_F = 96.5e^{(0.09/i_e - 75.5/i_e^2)}$$

. Ο αριθμός 96.5 στην αρχή της εξίσωσης είναι ποσοστό %.

Με βάση τις δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να φτιάξουμε το μοντέλο του ηλεκτρολύτη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Η αντίσταση στην είσοδο του μοντέλου μας αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά τάσης – ρεύματος του ηλεκτρολύτη Von Hoerner [14][29] για θερμοκρασίες μεταξύ 39 και 52°C . Στο μοντέλο αυτό ο ηλεκτρολύτης έχει σημείο λειτουργίας τα 45A και 50V . Η είσοδος του ηλεκτρολύτη είναι η σταθερή dc τάση του ανορθωτή ρεύματος της ανεμογεννήτριας, η οποία έχει σταθερή τιμή 400V . Τέλος να αναφέρουμε ότι οχτώ τέτοιοι ηλεκτρολύτες έχουν συνδεθεί σε σειρά ($45\text{A} - 400\text{V}$) για την παραγωγή του απαιτούμενου υδρογόνου. Ο ηλεκτρολύτης καταναλώνει συνεχώς ενέργεια ύψους 18 kW την οποία παρέχει η ανεμογεννήτρια κάτω από όλες τις συνθήκες.

4.9 Η Δεξαμενή Καυσίμου

Οι σημερινές δεξαμενές καυσίμου αποθηκεύουν υδρογόνο είτε σε συμπιεσμένη αέρια μορφή είτε σε υγρή μορφή. Μία τυπική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου έχει χωρητικότητα 50lt αλλά πολλές δεξαμενές μπορούν να υπάρχουν σε κάθε εγκατάσταση ανάλογα με τις προδιαγραφές του συστήματος και τις απαιτήσεις του χρήστη [30].

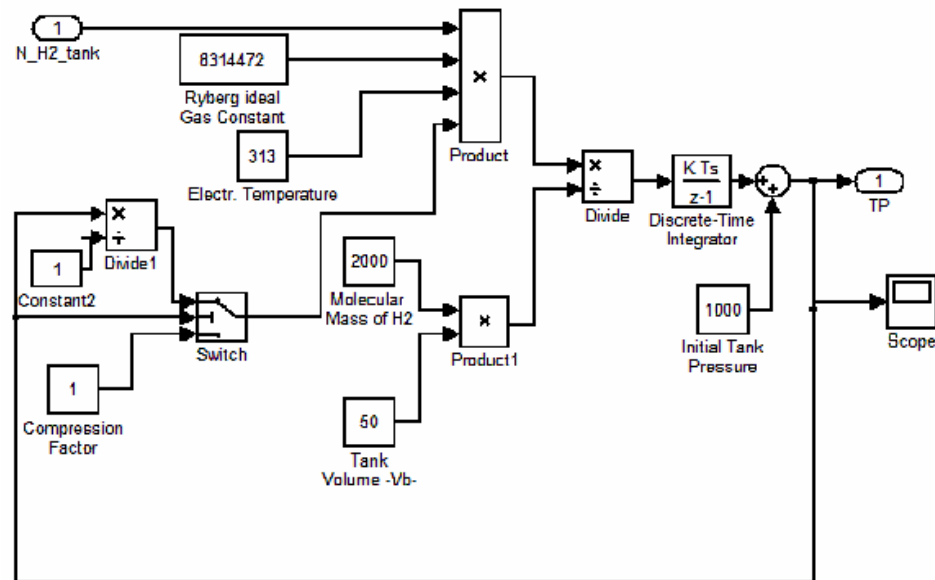
Στο σύστημά μας υποθέτουμε ότι η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με όσο υδρογόνο χρειάζεται ανά πάσα στιγμή από την δεξαμενή καυσίμου. Η διαφορά του παραγόμενου υδρογόνου από αυτό που καταναλώνεται στην κυψέλη αποθηκεύεται στην συνέχεια στην δεξαμενή καυσίμου.

Η μοντελοποίηση της δεξαμενής καυσίμου βασίστηκε στην εξίσωση $P_b \hat{=} P_{bi} = z \frac{N_{H_2} R T_b}{M_{H_2} V_b}$ όπου

- **P_b** , πίεση στην δεξαμενή (Pa)
- **P_{bi}** , αρχική πίεση στην δεξαμενή , 1000 Pa (~0.01atm)
- **N_{H2}**, τα mol υδρογόνου τα οποία παραδίδονται στην δεξαμενή από το σύστημα ανά δευτερόλεπτο (kmol/sec)
- **R** , σταθερά του Rydberg για τα ιδανικά αέρια , 8314472 J/(kmol °K)
- **T_b** , η θερμοκρασία λειτουργίας της δεξαμενής , 313 °K
- **V_b** , όγκος της δεξαμενής , 50 lt
- **M_{H2}**, μοριακή μάζα υδρογόνου , 2 gr/mol
- **Z** , συντελεστής συμπίεσης αερίου σαν συνάρτηση της πίεσης

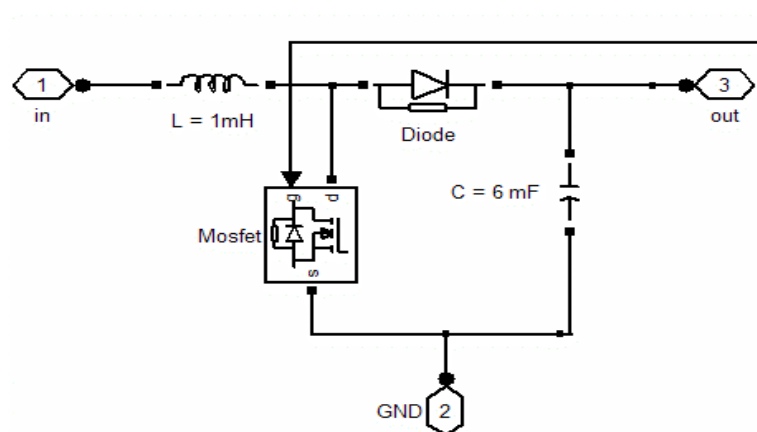
Ο παράγοντας **z** εκφράζει τις απώλειες της καταστατικής εξίσωσης καθώς το H₂ δεν είναι ιδανικό αέριο. Για τα ιδανικά αέρια **z=1**. Εφόσον η θερμοκρασία παραμένει σταθερή , ο **z** αυξάνεται όσο αυξάνεται η πίεση.

Οι απαιτήσεις ενέργειας για την συμπίεση του αερίου δεν έχουν συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς μας καθώς και όλες οι επιπλέον απώλειες από τα διάφορα εξαρτήματα της δεξαμενής όπως αντλίες, βαλβίδες, μηχανισμοί συμπίεσης του αερίου, κτλ , δεν έχουν μοντελοποιηθεί. Ακολουθεί το μοντέλο της δεξαμενής καυσίμου :

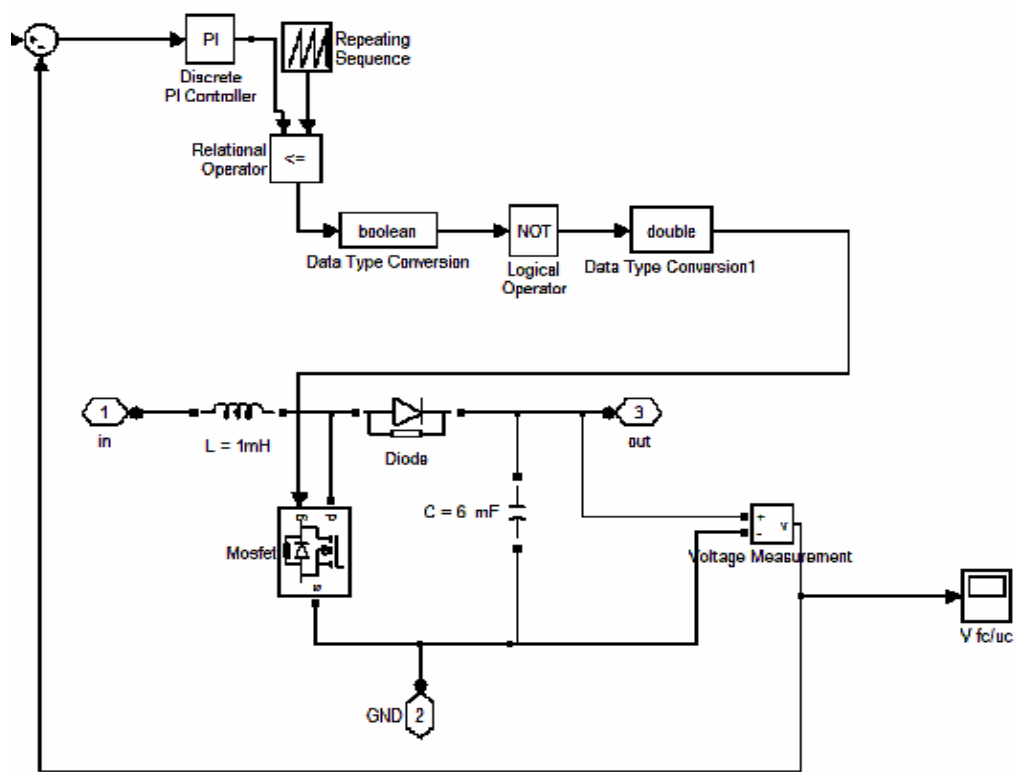


4.10 Ο Έλεγχος Εξόδου του συστήματος FC/UC

Για να παραμείνει σταθερή η έξοδος του συστήματος FC/UC κατά τις μεταβολές στην ζήτηση του φορτίου, είναι απαραίτητος ένας dc/dc boost converter για να κρατήσει σταθερή την έξοδο του συστήματος στην απαιτούμενη τάση, η οποία είναι 400 V. Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήσαμε το dc/dc boost converter είναι ο παρακάτω



Το σήμα ελέγχου του μετατροπέα ελέγχεται από έναν PI ο οποίος έχει σαν είσοδο την διαφορά της τάσης εξόδου του FC/UC συστήματος από την τάση αναφοράς (400 V). Η τοπολογία που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο του μετατροπέα είναι η παρακάτω



Οι παράμετροι του block του PI είναι :

- K_p , 0.07
- K_i , 0.001

και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 50 kHz. Το φίλτρο του boost converter έχει παραμέτρους $L = 1\text{mH}$ και $C = 6000\mu\text{F}$

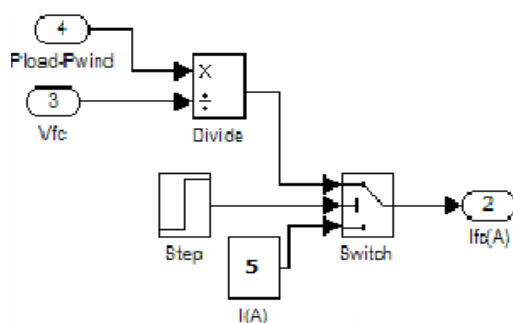
4.11 Ο DC/AC Μετατροπέας του Συστήματος FC/UC

Ο DC/AC μετατροπέας ο οποίος απαιτείται για την σύνδεση του συστήματος με το υπόλοιπο κύκλωμα είναι ακριβώς ίδιος με τον μετατροπέα που χρησιμοποιήσαμε για την έξοδο της ανεμογεννήτριας. Εφόσον αυτοί οι δύο inverters έχουν την ίδια σταθερή dc τάση για είσοδο, θα παράγουν στην έξοδό τους εναλλασσόμενη τάση με τα ίδια χαρακτηριστικά (πλάτος και συχνότητα).

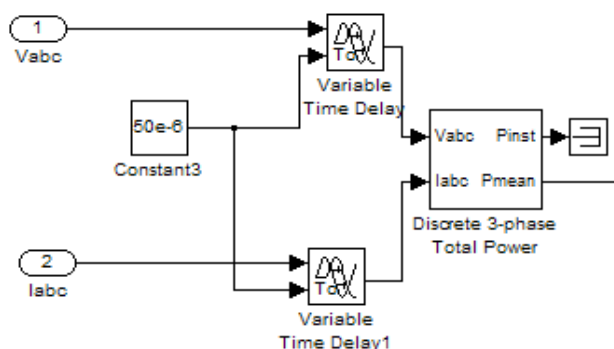
4.12 Breakers/Switches

Όπως είπαμε , η κυψέλη καυσίμου έχει σαν είσοδό της την ένταση του ρεύματος, η οποία είναι συνάρτηση του συνολικού φορτίου που ζητάει ο χρήστης. Για να αρχίσει να δουλεύει το αναδρομικό αυτό σύστημα πρέπει να τροφοδοτήσουμε το σύστημά μας με μία αρχική κατάσταση η οποία θα είναι κοντά στα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος. Να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι η λειτουργία αυτή γίνεται γιατί αντιμετωπίζει πρόβλημα το Simulink κατά την προσομοίωση και

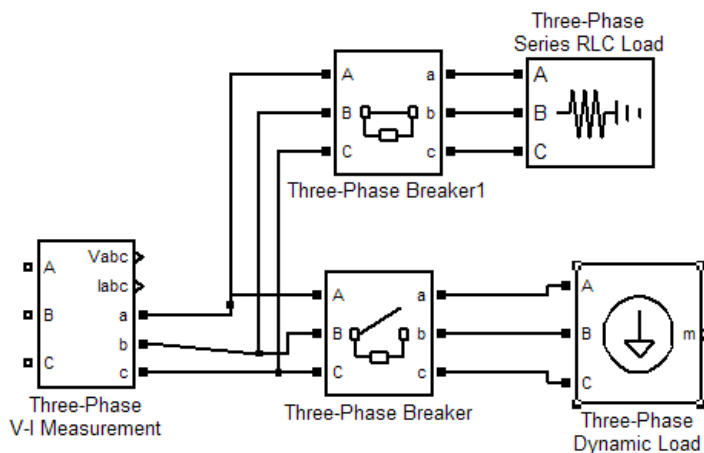
όχι γιατί αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα το σύστημά μας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω τοπολογία με έναν διακόπτη ο οποίος τροφοδοτεί την κυψέλη καυσίμου με μία αρχική ένταση ρεύματος $I = 5A$,για 0.5 sec προκειμένου το μοντέλο μας να αρχίσει να παράγει τιμές.



Επειδή οι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς μας μετρητές ισχύος δεν μπορούν να αρχίσουν να παράγουν τιμές από το πρώτο κλάσμα του δευτερολέπτου και παρουσιάζει σφάλμα το Simulink κατά την προσομοίωση του συστήματος, τους βάλαμε μία μικρή καθυστέρηση της τάξης των 50^{-6} sec στην είσοδό τους.

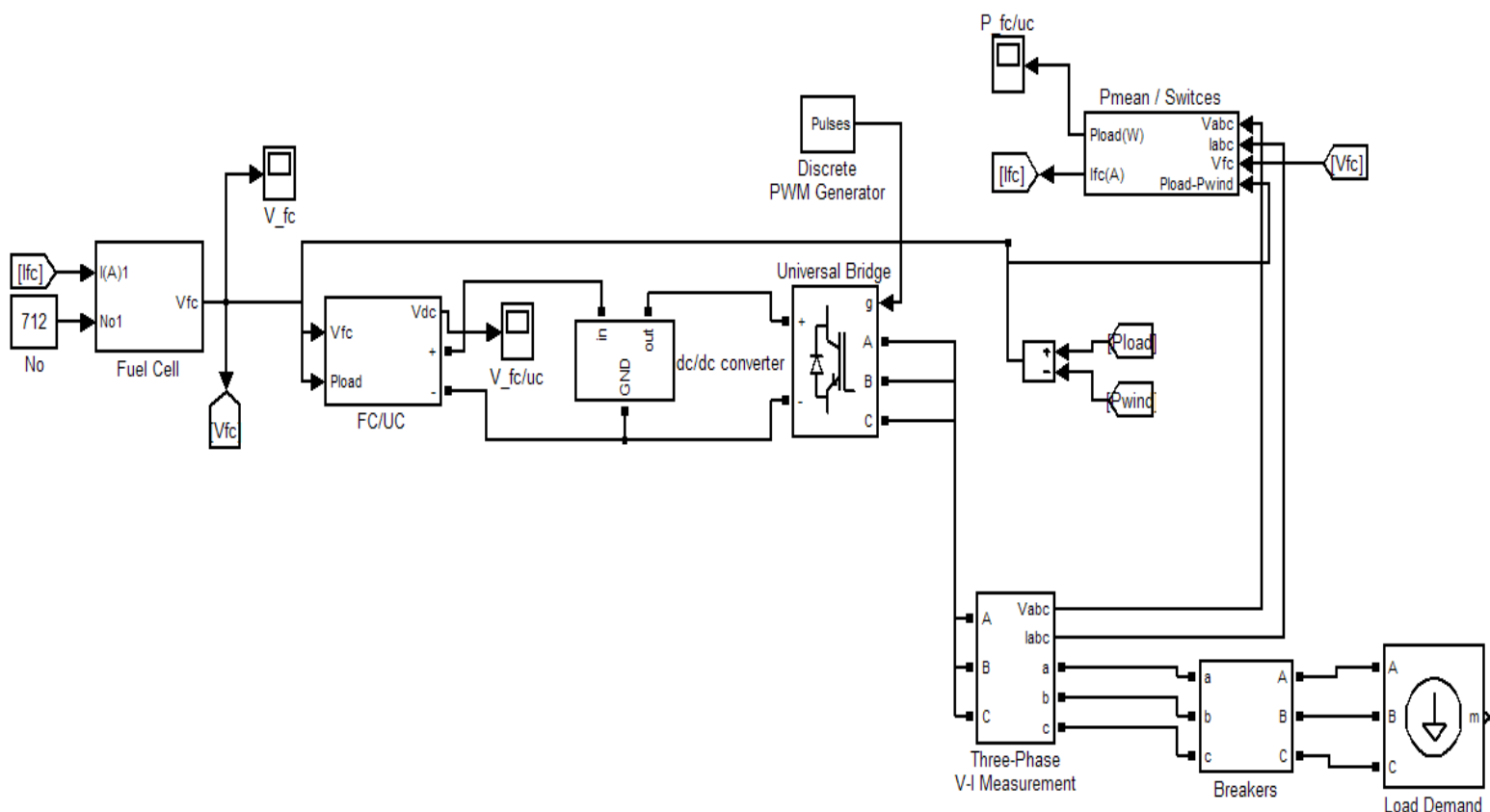


Τέλος, το Simulink έχει να μικρό bug όσων αφορά την σύνδεση μετρητή τριφασικής τάσης σε σειρά με δυναμικό φορτίο. Για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό, συνδέουμε τον μετρητή αρχικά με ένα απλό φορτίο για 0.1 sec και στην συνέχεια με την βοήθεια δύο breaker συνδέουμε το δυναμικό φορτίο το οποίο αντιπροσωπεύει την ζήτηση φορτίου από τον χρήστη.



4.13 Το Μοντέλο του Συνολικού FC/UC Συστήματος

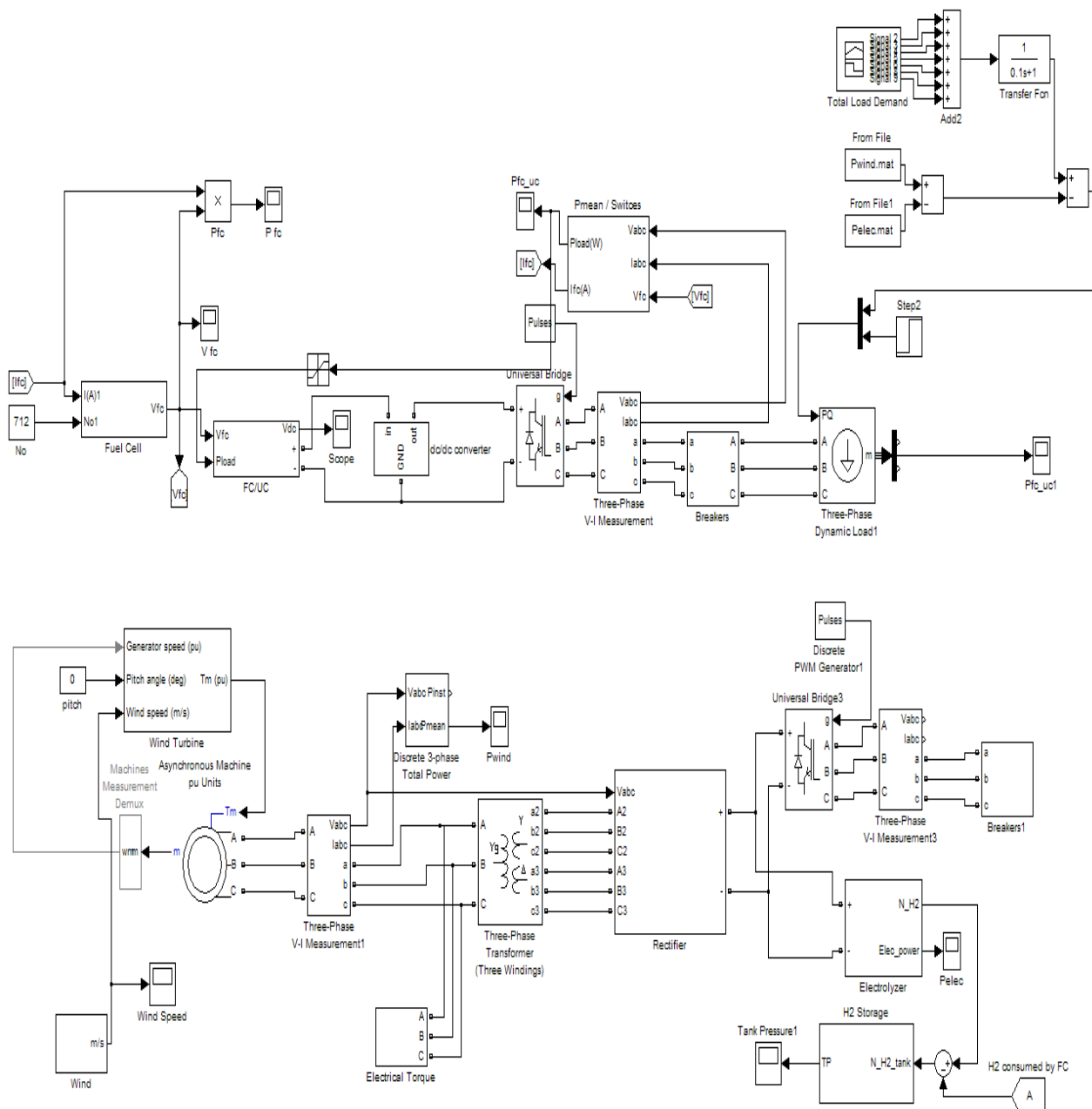
Το συνολικό μοντέλο του συστήματος FC/UC δέχεται σαν είσοδο την διαφορά του φορτίου το οποίο ζητάει ο χρήστης μείον το φορτίο το οποίο καλύπτει η ανεμογεννήτρια. Στο φορτίο το οποίο καλύπτει η ανεμογεννήτρια έχουν συμπεριληφθεί και τα 18 kW τα οποία καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης για την παραγωγή υδρογόνου. Η ελάχιστη ισχύς που καταναλώνει η κυψέλη για να βρίσκεται σε ετοιμότητα ανά πάσα στιγμή για να προσφέρει ενέργεια είναι 2 kW.



Οι τριφασικές έξοδοι των δύο συστημάτων (ανεμογεννήτριας και FC/UC) συνδέονται σε έναν 3-phase 3-winding transformer ο οποίος είναι με την σειρά του συνδεδεμένος με την συνολική ζήτηση φορτίου του χρήστη. Το τελικό μας μοντέλο του συστήματος φαίνεται παρακάτω

4.14 Το Wind/FC/UC Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας

Για την τελική προσομοίωση του συστήματος, προκειμένου το μοντέλο μας να γίνει πιο γρήγορο δεν συνδέσαμε τα δύο μοντέλα της ανεμογεννήτριας και του FC/UC συστήματος απευθείας μεταξύ τους αλλά προσομοιώσαμε πρώτα την ανεμογεννήτρια και η ισχύς η οποία παράγεται αφαιρέθηκε από την συνολική ζήτηση φορτίου. Σε προσπάθεια η οποία έγινε για να μοντελοποιηθεί το σύστημα με κοινή ζήτηση φορτίου στα δύο άκρα των δύο συστημάτων, ο χρόνος προσομοίωσης ήταν πολύ μεγάλος και η πολυπλοκότητα του υπολογισμού των αναδρομικών τιμών που πρέπει να υπολογίσει το λογισμικό για την σωστή προσομοίωση του συστήματός μας αυξήθηκε σε βαθμό που έκανε την προσομοίωση αδύνατη. Έτσι το τελικό μοντέλο του συνολικού συστήματος ανεμογεννήτριας/ κυψέλης καυσίμου/ υπερ-πυκνωτών είναι το παρακάτω

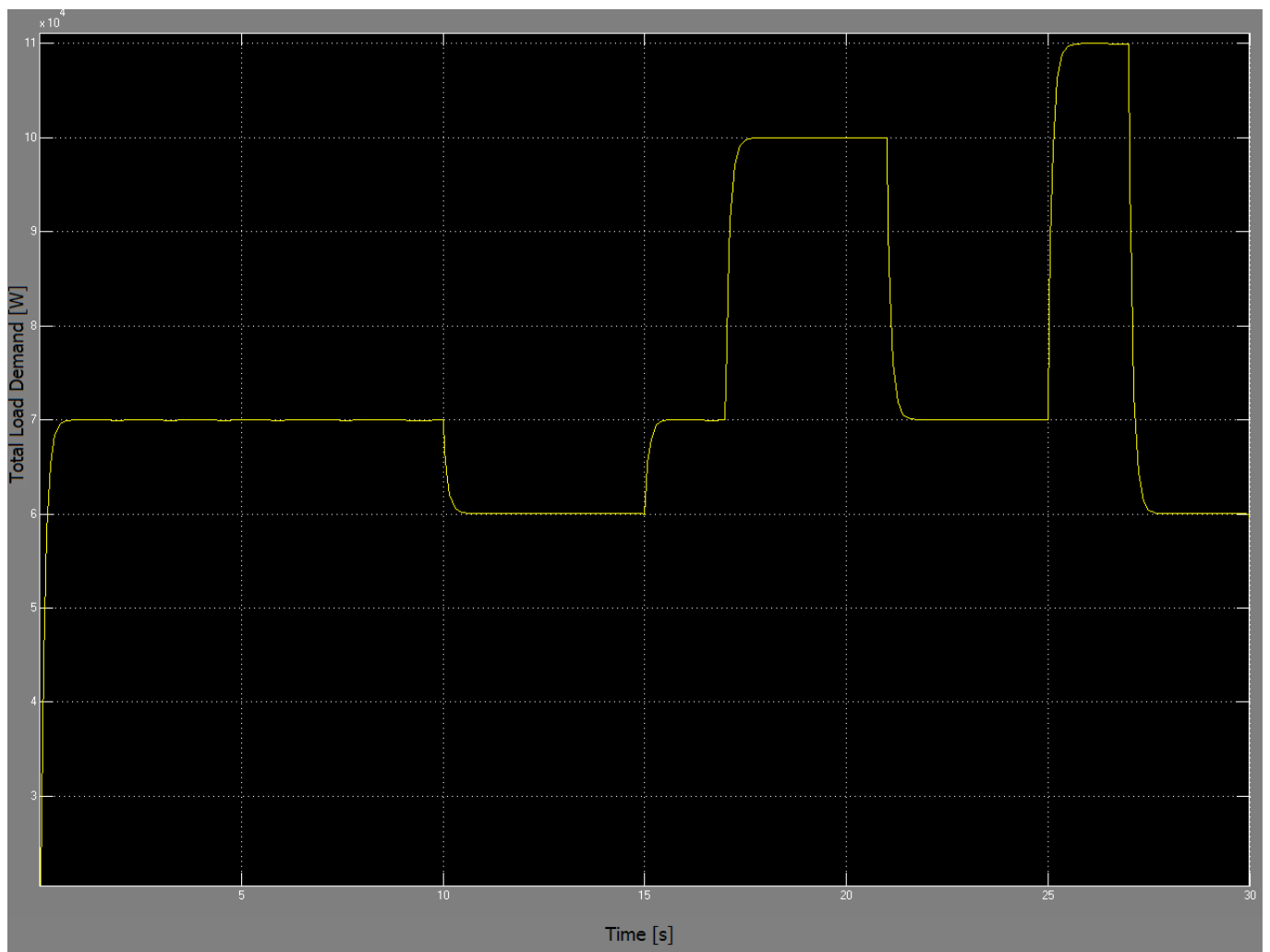


Προσομοίωση του Συστήματος

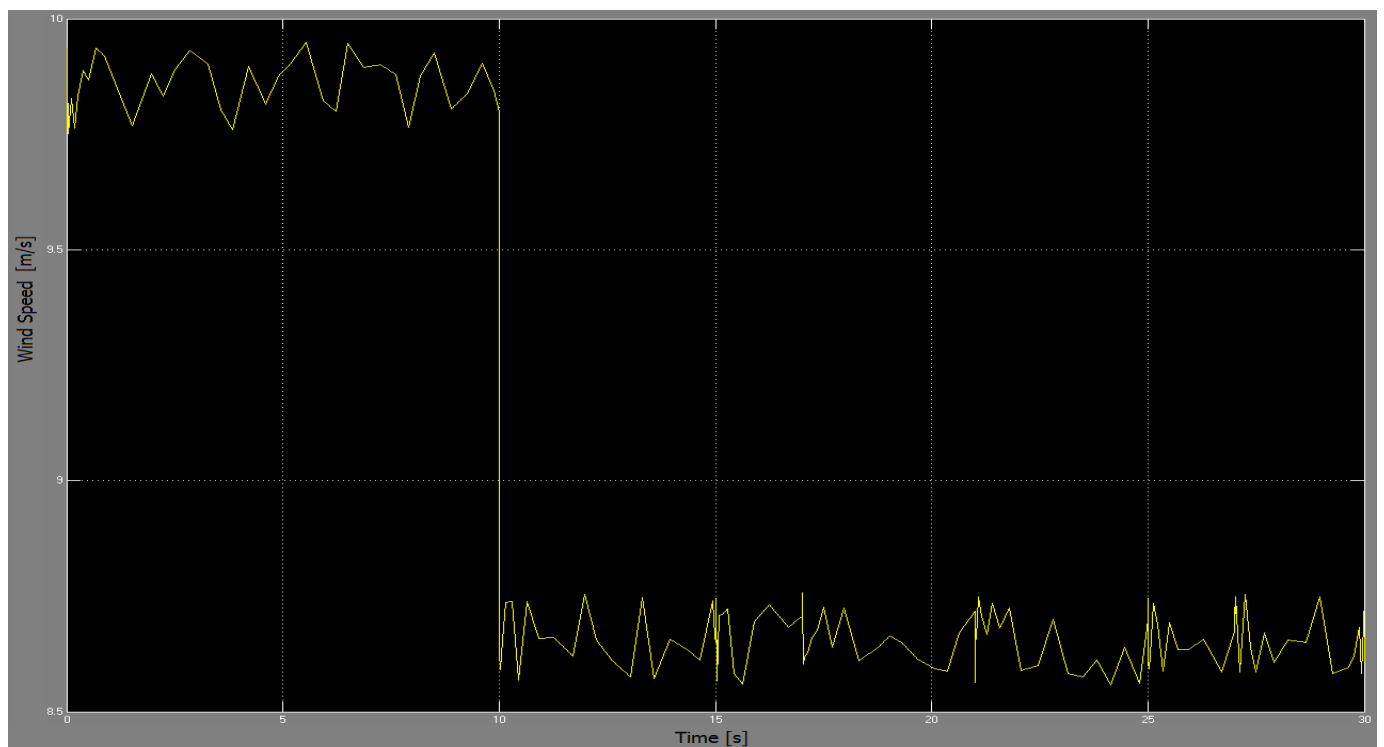
Η συνολική ζήτηση του φορτίου την οποία απαιτεί ο χρήστης καλύπτεται από το κύκλωμα της ανεμογεννήτριας, της κυψέλης καυσίμου και της δεξαμενής υπερ-πυκνωτών, τα μοντέλα και τη λειτουργία των οποίων έχουμε ήδη περιγράψει. Για την προσομοίωση του συστήματος θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια δουλεύει συνεχώς για την κάλυψη τόσο της ζήτησης φορτίου από τον χρήστη όσο και για την συνεχή τροφοδοσία του κυκλώματος του ηλεκτρολύτη και της κυψέλης καυσίμου. Θεωρούμε δηλαδή ότι ο άνεμος κατά την διάρκεια του σεναρίου μας είναι αρκετός τόσο για την κάλυψη ενός ποσοστού ενέργειας το οποίο ζητά ο χρήστης όσο για την παροχή των 18 kW που απαιτεί ο ηλεκτρολύτης για την παραγωγή υδρογόνου, αλλά και για την παροχή των 2 kW που απαιτεί η κυψέλη. Επίσης η ταχύτητα του ανέμου δεν πέφτει ποτέ κάτω από 3 m/s, όπου είναι το κατώτατο όριο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ούτε ξεπερνάει τα 13 m/s, τα οποία είναι η ταχύτητα εξόδου της ανεμογεννήτριας. Έτσι η ανεμογεννήτριά μας δουλεύει συνεχώς καθ' όλη την διάρκεια του σεναρίου που προσομοιώνουμε.

Όσον αφορά την κυψέλη καυσίμου, θεωρούμε ότι η δεξαμενή υδρογόνου έχει αποθηκευμένο αρκετό υδρογόνο για την τροφοδοσία της και ότι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης δεν προλαβαίνει να αδειάσει ή να γεμίσει. Ακόμα, επειδή θεωρούμε ότι δεν είναι η πρώτη φορά που δουλεύει το σύστημά μας, υπάρχει ήδη μια αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου μέσα στην δεξαμενή καυσίμου ώστε να μπορεί να λειτουργεί το σύστημα.

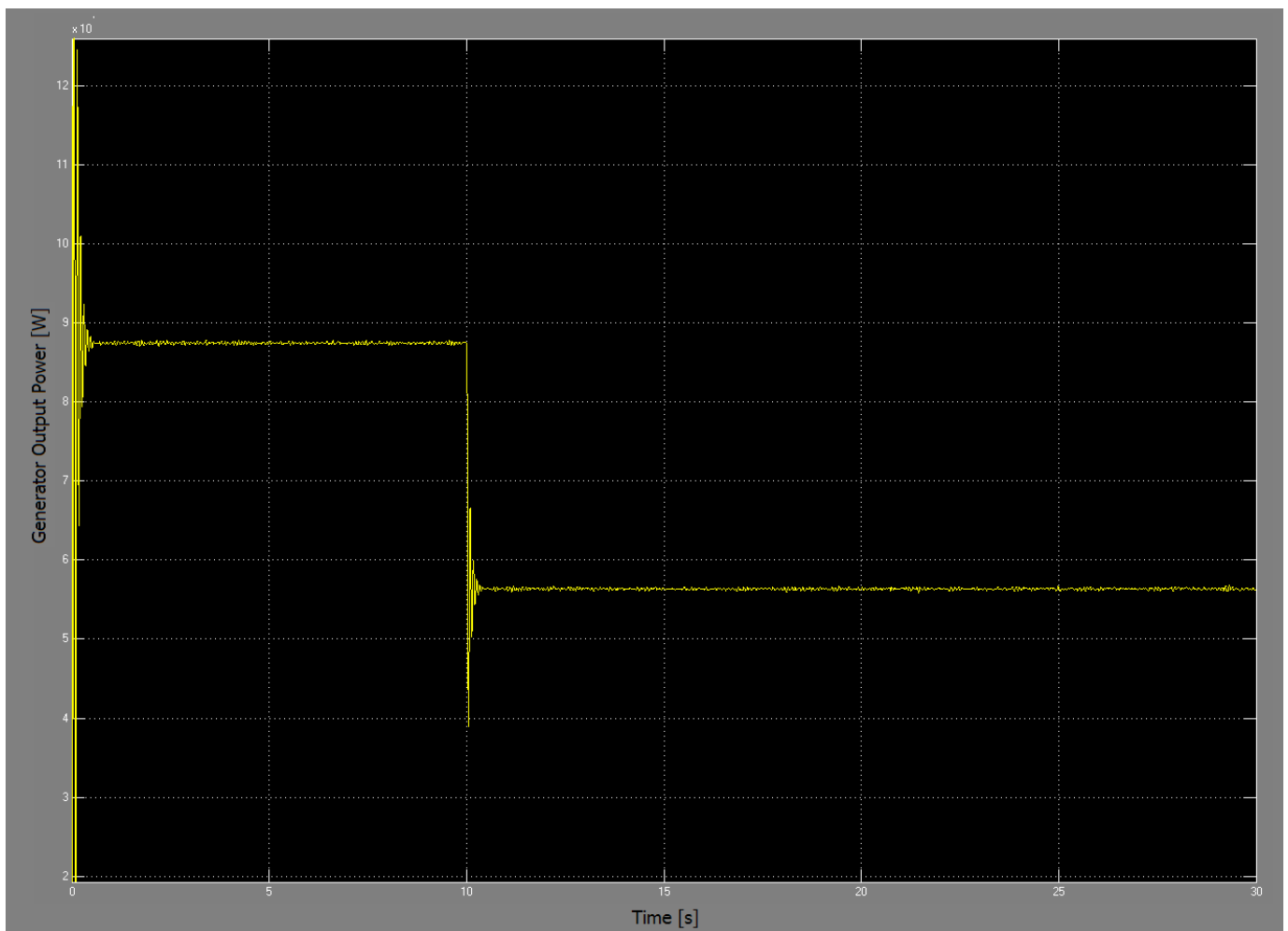
Η συνολική ζήτηση φορτίου την οποία καλείται να καλύψει το σύστημά μας κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ των 60 kW και των 120 kW. Η συνολική ζήτηση φορτίου αποκλειστικά από τον χρήστη (χωρίς δηλαδή να συμπεριλαμβάνεται η ενέργεια την οποία απαιτεί ο ηλεκτρολύτης για την λειτουργία του) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



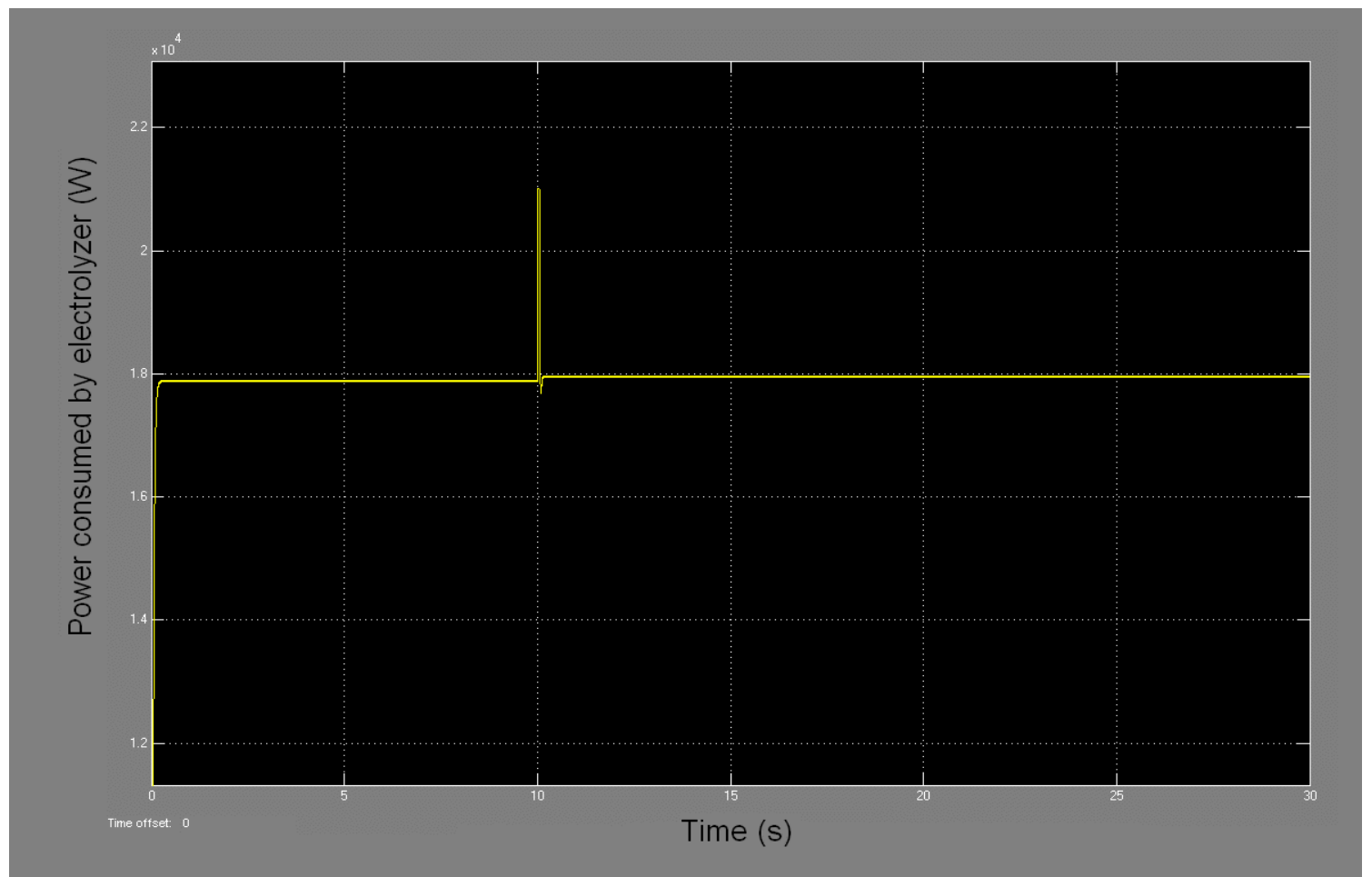
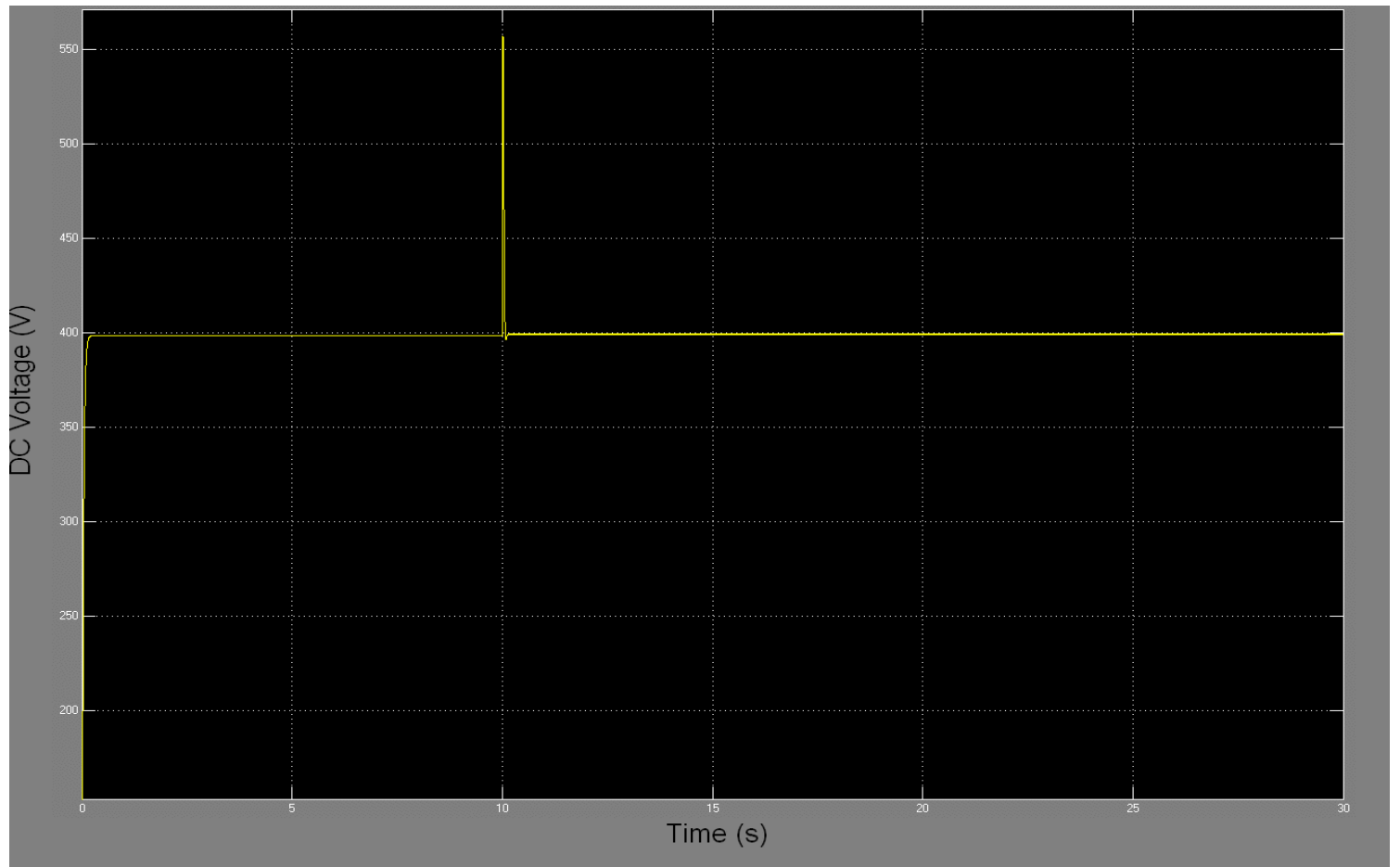
Για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω τυχαία μέτρηση ταχύτητας ανέμου, διάρκειας 30 δευτερολέπτων , στην οποία παρατηρείται μία σημαντική πτώση μετά το δέκατο δευτερόλεπτο.



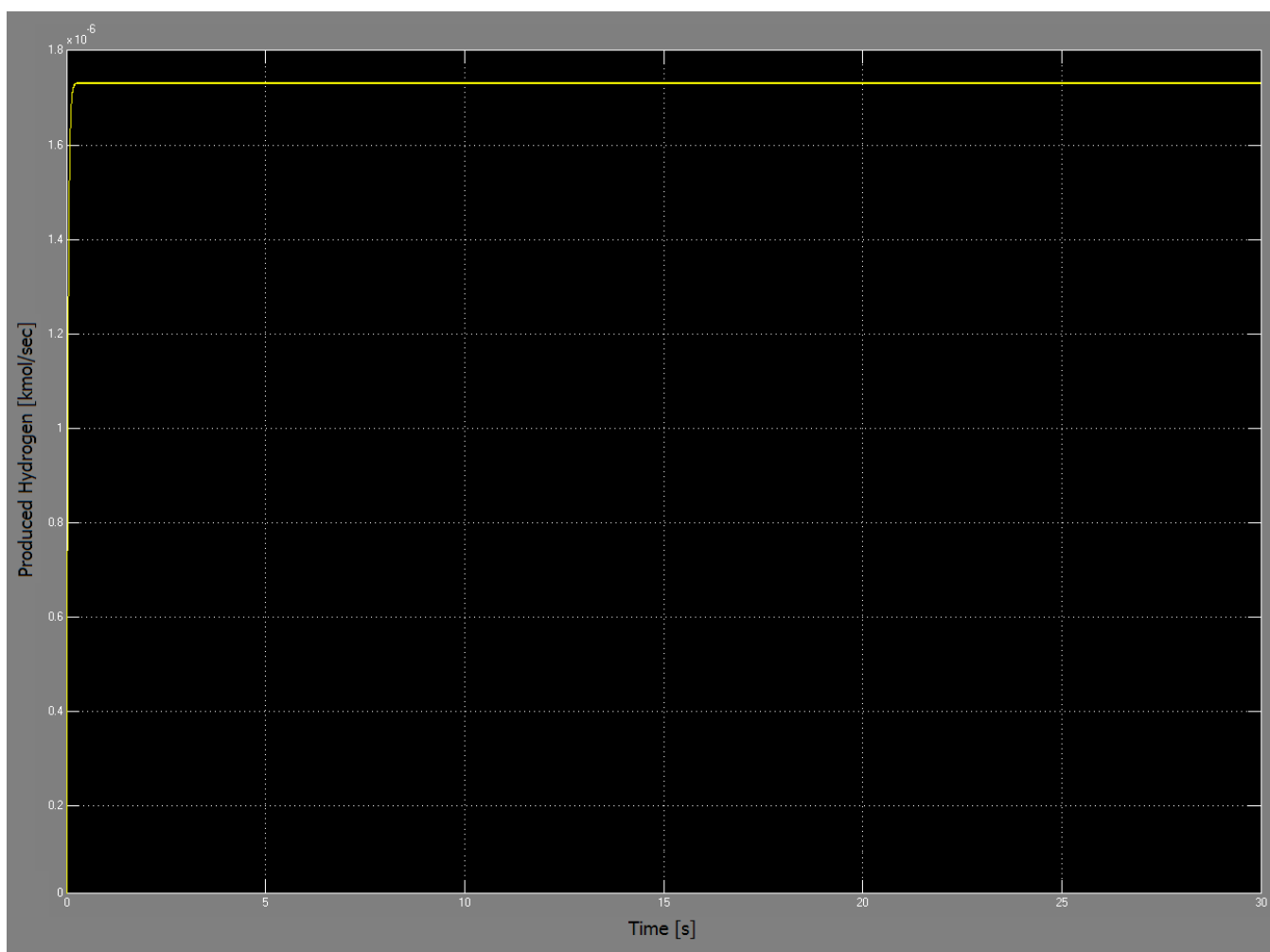
Η ισχύς η οποία παράγεται από την ανεμογεννήτρια με τον παραπάνω άνεμο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όπως μπορούμε να δούμε η μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση της ισχύος την οποία δίνει η ανεμογεννήτρια στο σύστημα.



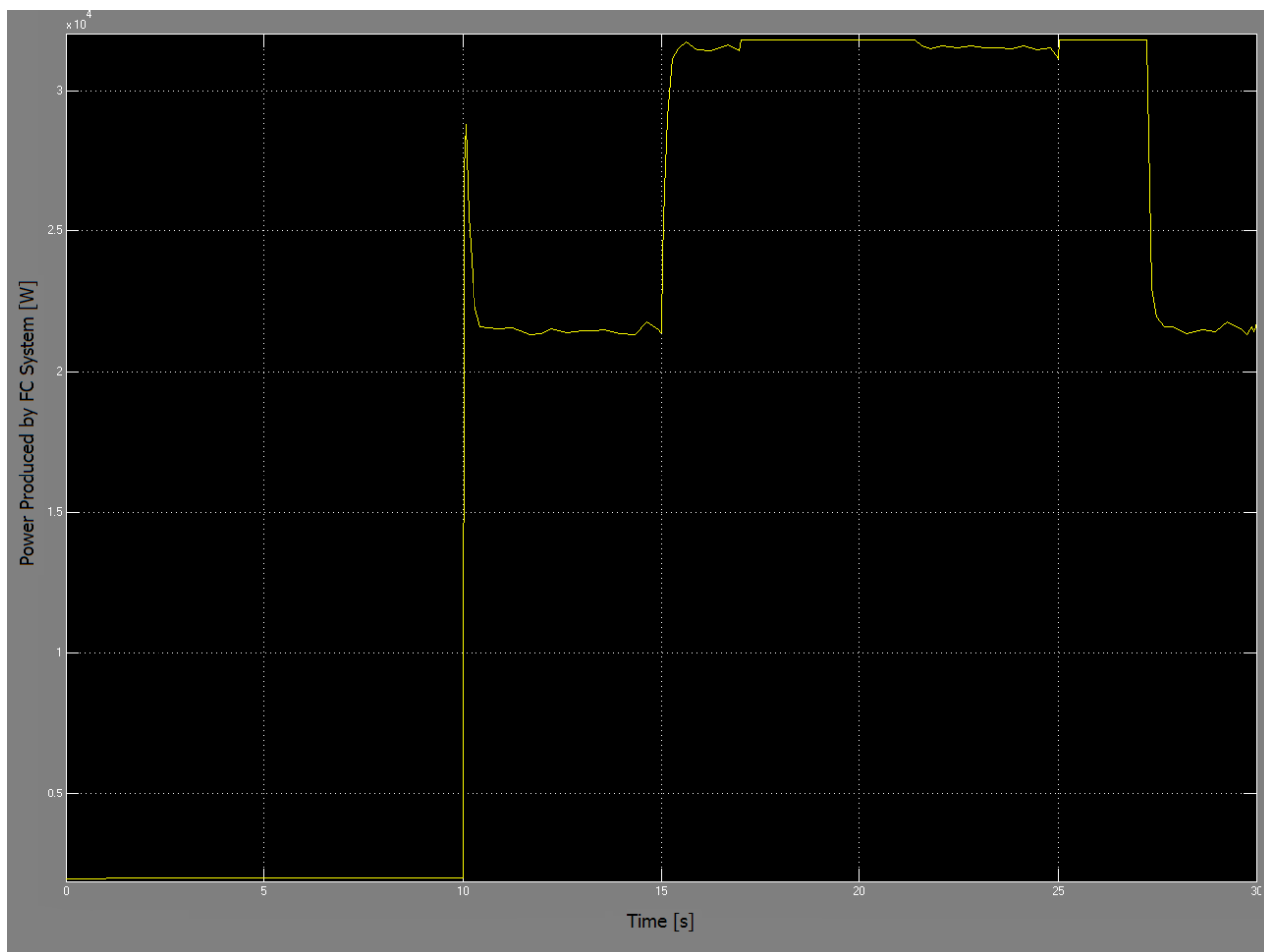
Η dc τάση η οποία φτάνει στον ηλεκτρολύτη μετά την μετατροπή και τον έλεγχο ο οποίος γίνεται στον ανορθωτή του κυκλώματος της ανεμογεννήτριας μπορούμε να δούμε ότι παραμένει σχεδόν σταθερή γύρω από την απαιτούμενη τιμή των 400 V με μία μικρή απόκλιση της τάξης του 1 V ενώ η ισχύς την οποία καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης είναι σταθερή στα 18 kW όπως φαίνεται στα δύο παρακάτω σχήματα



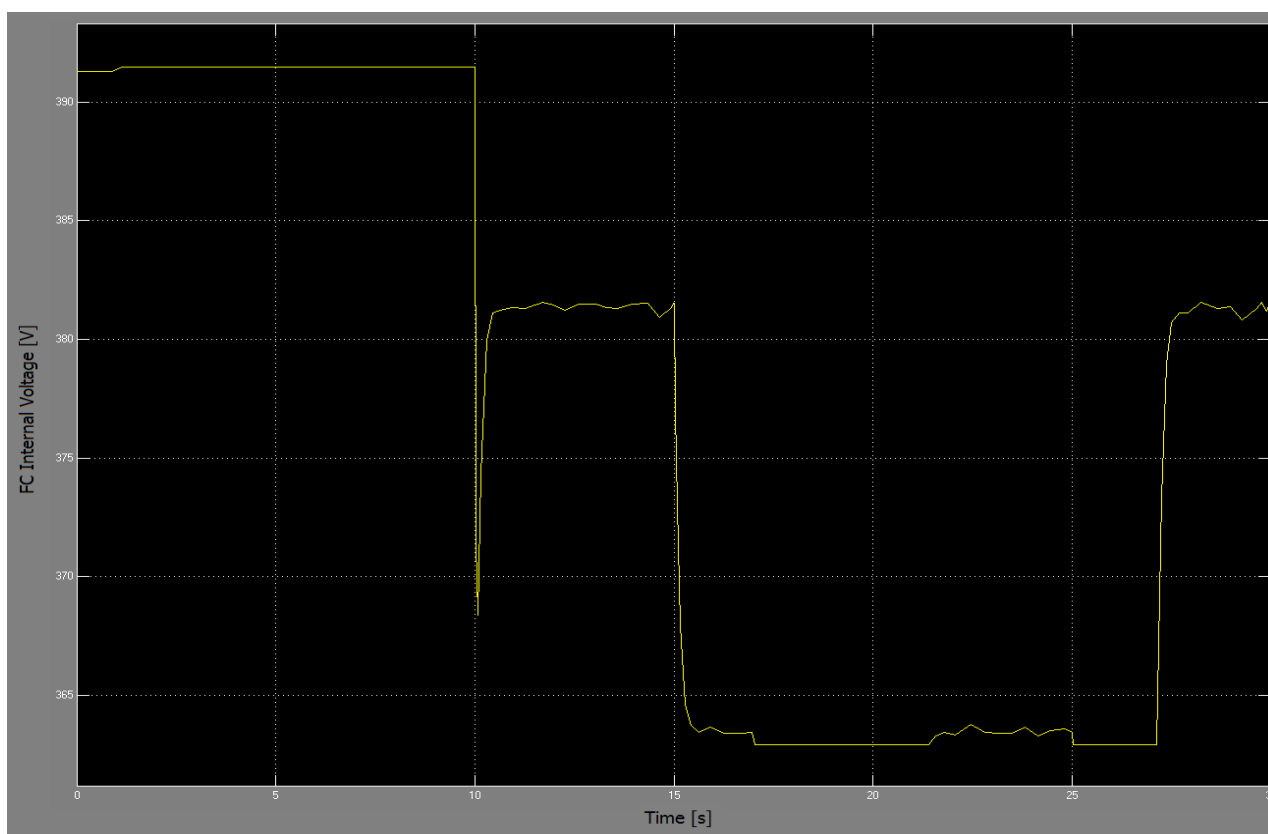
Εφόσον η ισχύς την οποία καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης και η τάση στα άκρα του παραμένει σταθερή, είναι λογικό να παραμένει σταθερή και η ποσότητα των mol υδρογόνου τα οποία παράγονται κατά την λειτουργία του συστήματος ($1.8 \cdot 10^{-6}$ mol/sec).



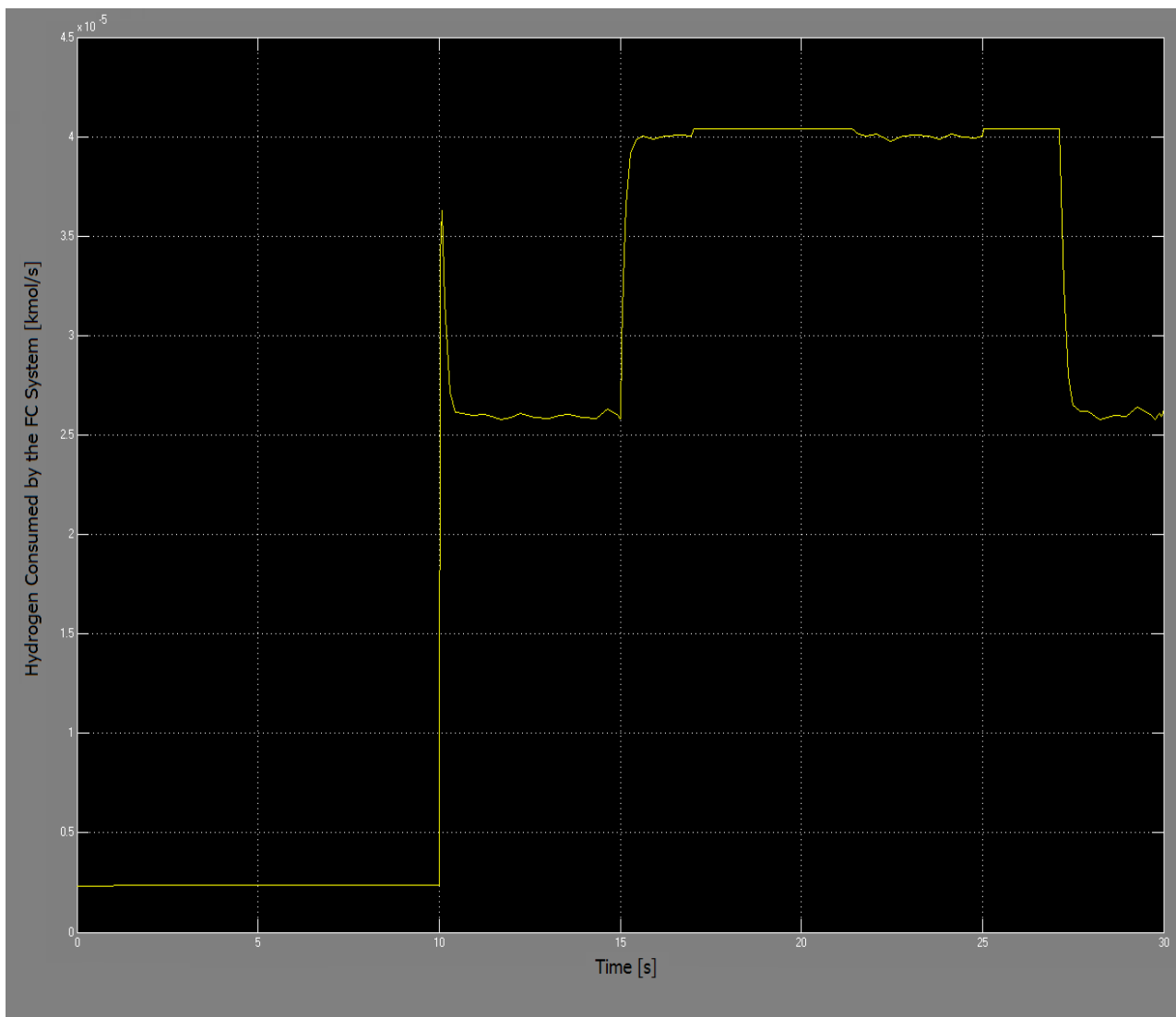
Κατά τα πρώτα δέκα δευτερόλεπτα του πειράματός μας, η ανεμογεννήτρια καλύπτει όλη την απαιτούμενη ισχύ. Μετά τα δέκα δευτερόλεπτα, που ο άνεμος έχει μια σημαντική πτώση στην ταχύτητά του και η ισχύς την οποία μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια πέφτει, αναλαμβάνει η κυψέλη καυσίμου να καλύψει την διαφορά μεταξύ του φορτίου που ζητάει ο χρήστης και στην ισχύ την οποία μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια. Μπορούμε χαρακτηριστικά να δούμε ότι για περιπτώσεις μεγάλης ζήτησης φορτίου, η κυψέλη φτάνει στο όριό της αποδίδοντας 32 kW ισχύος από το 15ο μέχρι και το 27ο δευτερόλεπτο. Το συνολικό φορτίο το οποίο καλύπτει η κυψέλη καυσίμου καθ' όλη την διάρκεια του σεναρίου μας φαίνεται παρακάτω.

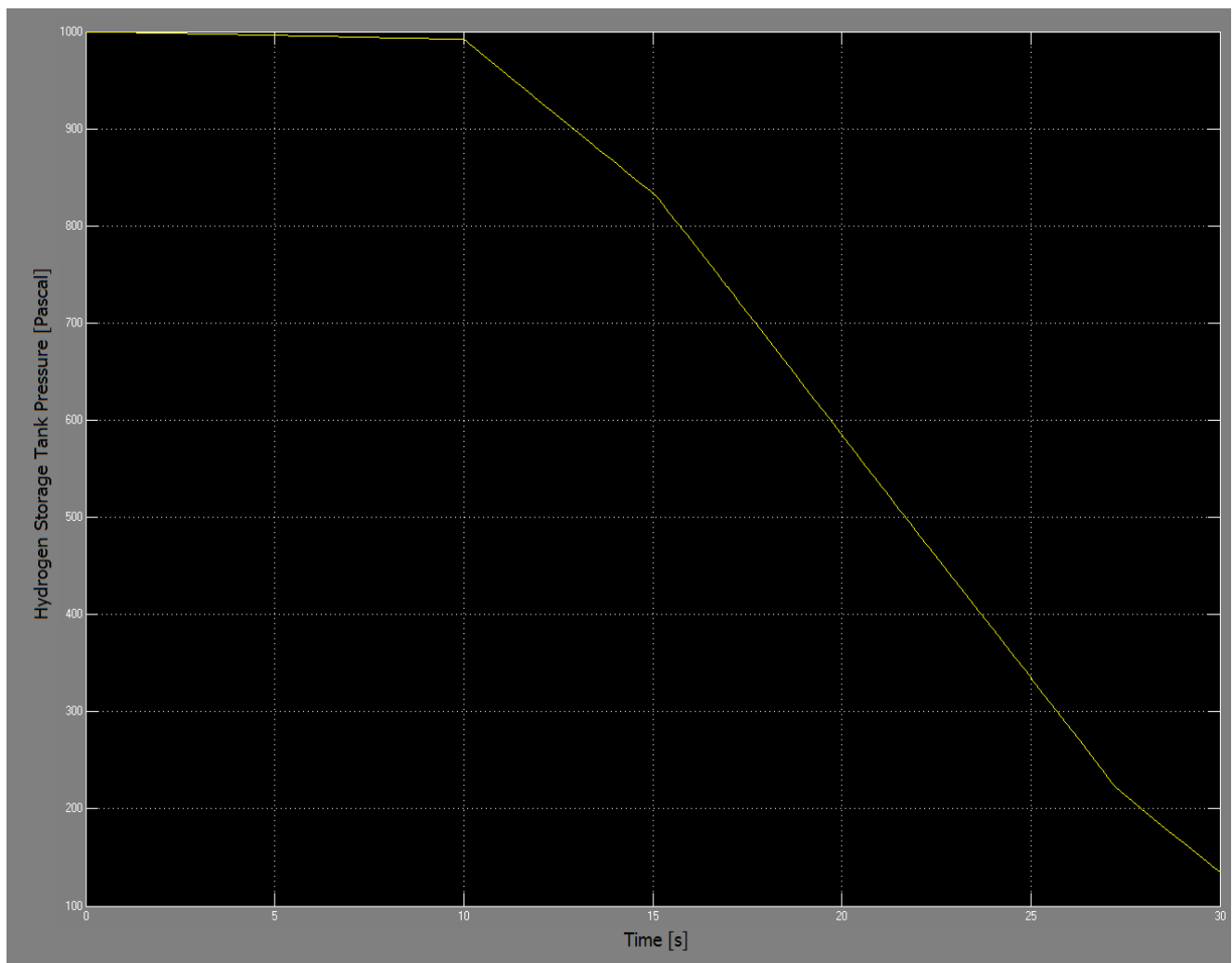


Ανταποκρινόμενη στις αλλαγές του φορτίου κατά την διάρκεια του σεναρίου που υλοποιήσαμε, η τάση της κυψέλης καυσίμου αλλάζει και αυτή ανάλογα με το φορτίο το οποίο παράγει η κυψέλη καυσίμου. Συγκεκριμένα για περιπτώσεις μεγάλης ζήτησης φορτίου η τάση πέφτει.

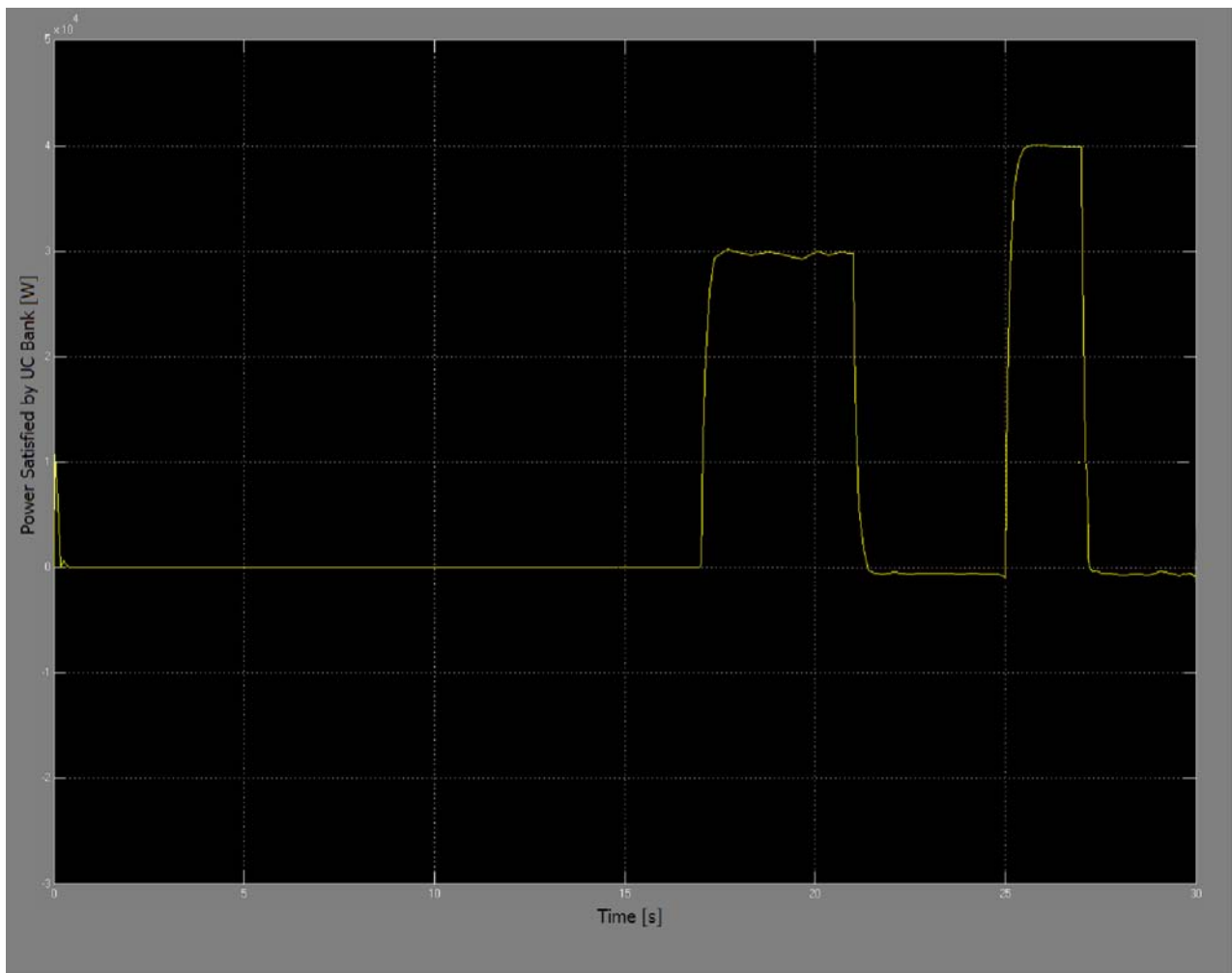


Η ποσότητα καυσίμου το οποίο καταναλώνεται από την κυψέλη είναι ανάλογο με την ζήτηση φορτίου ανά πάσα στιγμή. Είναι λογικό λοιπόν να παρατηρείται μία αύξηση στην κατανάλωση μετά το 10ο δευτερόλεπτο του σεναρίου μας η οποία γίνεται μέγιστη μεταξύ 15ου και 27ου δευτερολέπτου όπου η κυψέλη λειτουργεί στο όριο της. Ο ρυθμός με τον οποίο η κυψέλη καυσίμου “τραβάει” υδρογόνο από την δεξαμενή καυσίμου είναι και αυτός αντίστοιχος του φορτίου που παράγει η κυψέλη. Συγκεκριμένα μπορούμε να δούμε ότι η κλίση της πίεσης της δεξαμενής καυσίμου γίνεται μεγαλύτερη για τις ίδια χρονικές περιόδους που η κατανάλωση υδρογόνου γίνεται μεγαλύτερη. Η ποσότητα των mol υδρογόνου που καταναλώνεται από την κυψέλη, καθώς και ο ρυθμός με τον οποίο αλλάζει η πίεση στην δεξαμενή καυσίμου φαίνονται αντίστοιχα στα παρακάτω σχήματα.

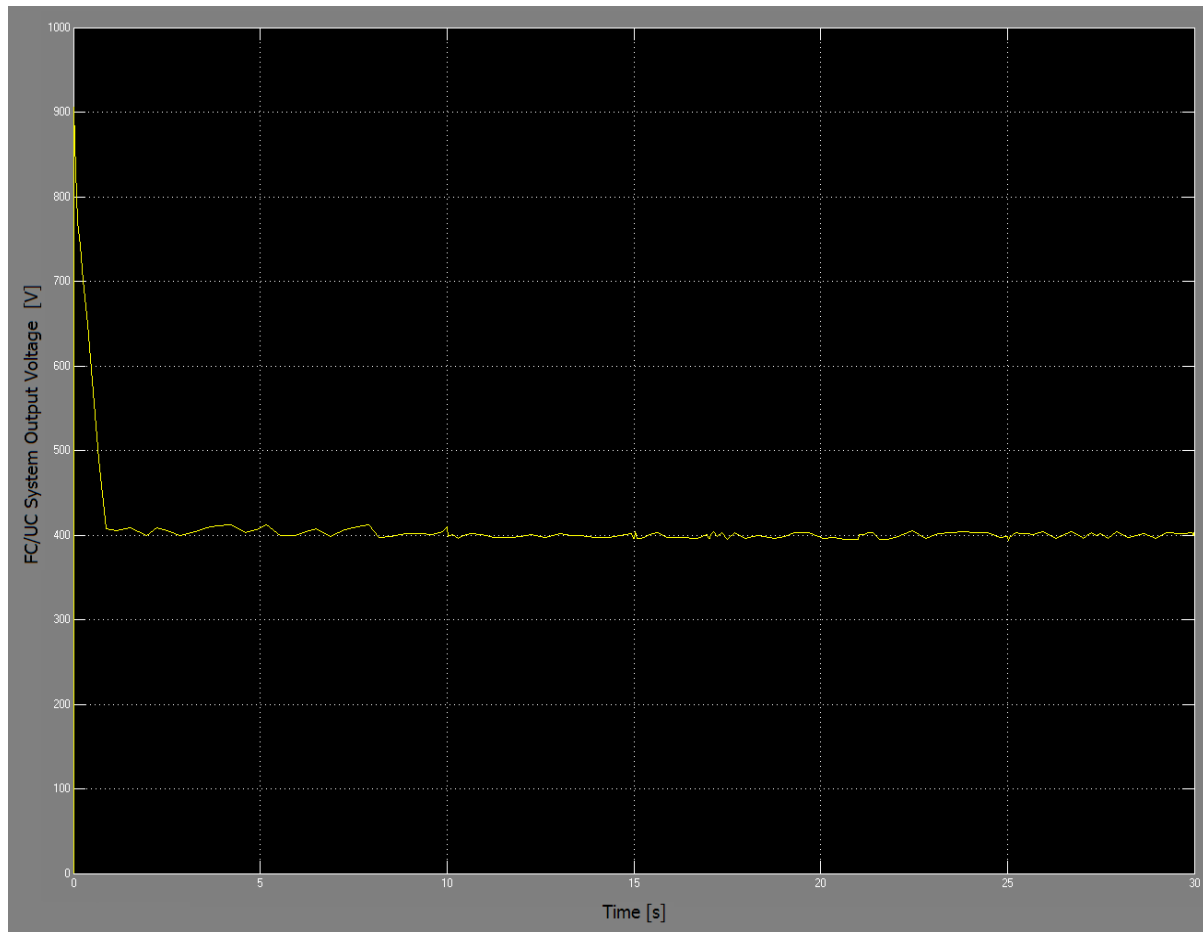




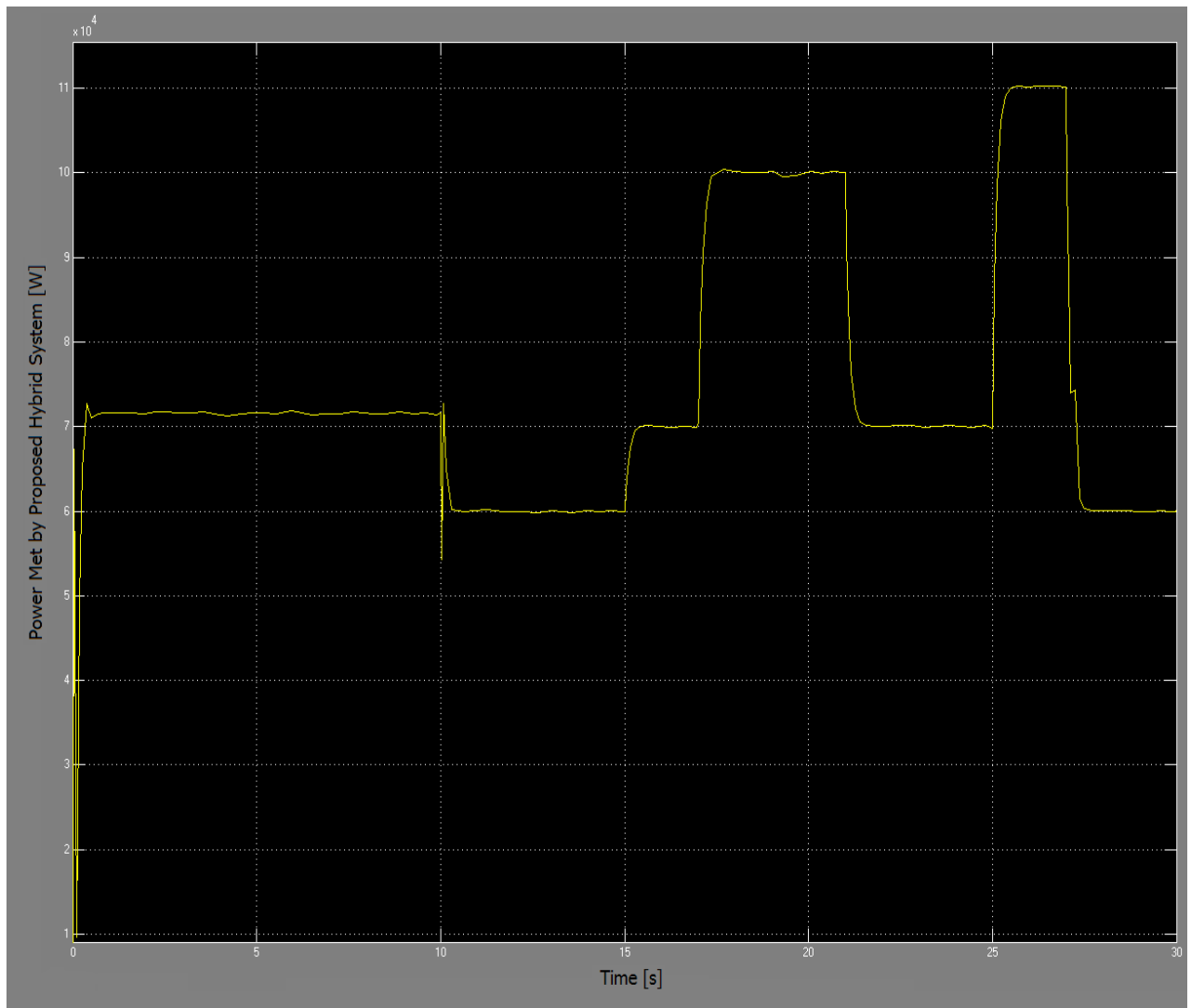
Σύμφωνα με την συνολική ζήτηση φορτίου, έχουμε δύο περιόδους μεγάλης ενεργειακής απαίτησης από τον χρήστη, η πρώτη μεταξύ 17ου και 21ου δευτερολέπτου και η δεύτερη μεταξύ 25ου και 27ου. Εφόσον η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να δώσει παραπάνω ενέργεια και η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στο όριό της εκείνη την περίοδο, αποφορτίζονται οι υπερ-πυκνωτές προκειμένου να καλύψουν την ενέργεια την οποία ζητάει ο χρήστης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η ισχύς των πυκνωτών παραμένει στο μηδέν μέχρι 17ο δευτερόλεπτο και αυξάνεται απότομα εκείνη την χρονική στιγμή. Αμέσως μετά το 21ο δευτερόλεπτο η ισχύς των πυκνωτών γίνεται αρνητική για ένα μικρό διάστημα το οποίο σημαίνει ότι απορροφάνε ενέργεια από το σύστημα και επαναφορτίζονται. Η ίδια ακριβώς λειτουργία παρατηρείται και στο χρονικό διάστημα μεταξύ 25-27 sec.



Παρ' όλο που οι πυκνωτές και η κυψέλη καυσίμου έχουν πολλές ταλαντώσεις στις τάσεις λόγω των διαφόρων εναλλαγών του απαιτούμενου φορτίου, η dc έξοδος του FC/UC συστήματος παραμένει σταθερή κοντά στα απαιτούμενα 400 V με την βοήθεια του dc/dc boost μετατροπέα και του έλεγχου που γίνεται από τον PI ελεγκτή.



Η συνολική ισχύς την οποία προσφέρει το σύστημα ανεμογεννήτριας/ κυψέλης καυσίμου/ υπερ-πυκνωτών φαίνεται παρακάτω. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το σύστημα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις φορτίου από τον χρήστη. Οι μικρές διαφορές μεταξύ του απαιτούμενου και του φορτίου που τελικά αποδίδει το σύστημα, οφείλονται σε φυσικούς περιορισμούς όπως το βήμα προσομοίωσης, η χρονική καθυστέρηση των διαφόρων ελέγχων, λάθη σε μετρήσεις από τα όργανα, μη βέλτιστη ρύθμιση των PI ελεγκτών αλλά και την πολυπλοκότητα του μοντέλου του συστήματός μας.



Το σύστημα το οποίο φτιάξαμε προσομοιώθηκε σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel core 2-duo processor στα 2GHz και 2Gbyte DDR-2 SD-RAM και η προσομοίωση των 30 δευτερολέπτων λειτουργίας του έγινε μέσα σε **9 λεπτά και 7 δευτερόλεπτα**.

Συμπεράσματα – Βελτιώσεις

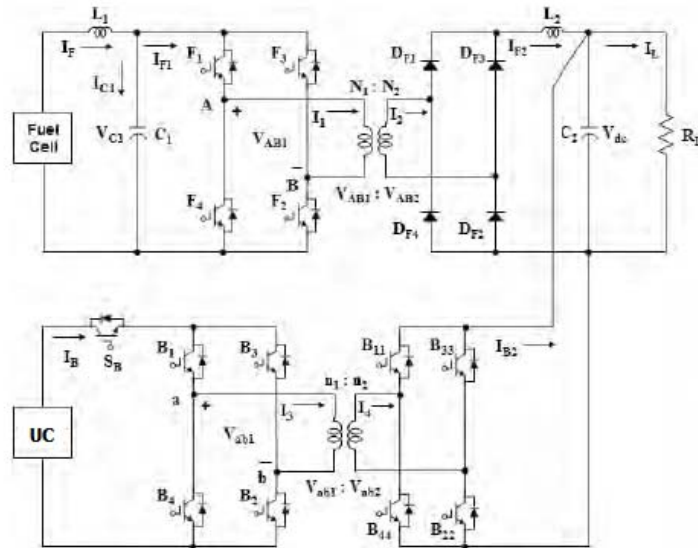
Μία από της σημαντικότερες και πιο διαδεδομένες μορφές ήπιας ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια. Παρ' όλα αυτά οι αιολικές μηχανές εξαρτώνται σε αρκετά μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές αλλαγές της περιοχής στην οποία είναι εγκαταστημένες και οι εναλλαγές αυτές στην ταχύτητα του ανέμου έχουν αντίστοιχες επιπτώσεις στο μέγεθος της ενέργειας το οποίο μπορούν να προσφέρουν στον χρήστη. Η προτεινόμενη υβριδική τοπολογία η οποία αναλύθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη προσφέρει μία λύση στο πρόβλημα αυτό, χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολύ μεγαλύτερη απόδοση και διάρκεια ζωής από τις κοινές μπαταρίες και σε συνδυασμό με τους υπερ-πυκνωτές παρέχουν μία σπουδαία λύση τόσο για την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας σε περιπτώσεις μικρής ζήτησης, όσο και για την κάλυψη μεγάλης ενεργειακής ζήτησης σε περιόδους νηνεμίας.

Όπως είδαμε κατά την μελέτη και την προσομοίωση του συστήματος, η απόκρισή του στις απαιτήσεις του χρήστη είναι άμεση και απόλυτα ικανοποιητική, τόσο σε περιπτώσεις μικρής όσο και μεγάλης ζήτησης φορτίου, με μεγάλη ή και με μικρή ταχύτητα ανέμου. Επίσης, οι υπερ-πυκνωτές και ο έλεγχος τάσης ο οποίος γίνεται βοηθάνε ώστε να μην υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην έξοδο του συστήματος. Τέτοιου είδους τοπολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων απομονωμένων μικρών εγκαταστάσεων ή και για την μερική τροφοδοσία μεγαλύτερων ενεργειακών εγκαταστάσεων οι οποίες βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παρουσιάζουν μεγάλη εξάρτηση από τις κλιματικές αλλαγές της περιοχής.

Λόγο του μεγάλου μεγέθους του συστήματός μας και των πάρα πολλών ενεργειακών στοιχείων τα οποία περιέχει, έχουν γίνει κάποιες απλοποιήσεις του μοντέλου προκειμένου αυτό να γίνει πιο ευέλικτο και πιο γρήγορο στην προσομοίωση. Οι απλοποιήσεις αυτές είναι κυρίως σε θέματα ελέγχου, ενώ δεν έχει μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος σε ακραίες περιπτώσεις όπως πολύ ισχυρός ή μηδενικός άνεμος καθώς και η περίπτωση ανεπαρκούς υδρογόνου μέσα στην δεξαμενή καυσίμου για την τροφοδοσία της κυψέλης. Οι πιθανές βελτιώσεις του συστήματος σε περίπτωση μελλοντικής μελέτης αναφέρονται παρακάτω.

- Η υλοποίηση καλύτερου ελέγχου της ανεμογεννήτριας και του τρόπου σύνδεσής της με το υπόλοιπο σύστημα. Στο δικό μας σενάριο ο άνεμος επαρκεί πάντα για την κάλυψη τόσο του φορτίου το οποίο ζητάει ο χρήστης όσο και για την τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη. Θα μπορούσε να υπάρχει κάποιος καλύτερος έλεγχος της ενέργειας την οποία δίνει η ανεμογεννήτρια στο σύστημα έτσι ώστε σε περίπτωση μικρού ανέμου και μεγάλης ζήτησης από τον χρήστη, η ανεμογεννήτρια να δίνει όλη την παραγόμενη ενέργεια στον χρήστη και να θέτει τον ηλεκτρολύτη εκτός λειτουργίας.

- Η υλοποίηση ανώτατου και κατώτατου ορίου ταχύτητας του ανέμου για τα οποία λειτουργεί η ανεμογεννήτρια ($V_{out} - V_{min}$). Στην περίπτωση αυτή η ανεμογεννήτρια θα έπρεπε να τίθεται εκτός λειτουργίας και το σύστημα να συνεχίζει να παράγει ενέργεια έως ότου καταναλωθεί ολόκληρη η ποσότητα καυσίμου η οποία βρίσκεται μέσα στην δεξαμενή. Στην συνέχεια αν η ταχύτητα του ανέμου δεν έχει επανέλθει στα όρια λειτουργίας της μηχανής και το υδρογόνο στην δεξαμενή εξαντληθεί, το σύστημα θα πρέπει τίθεται εκτός λειτουργίας.
- Πιο λεπτομερής προσομοίωση της κυψέλης καυσίμου. Όπως αναφέραμε και όταν περιγράψαμε το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου, δεν έχουν υπολογιστεί οι απώλειες συγκέντρωσης της κυψέλης στις συνολικές απώλειες τάσης, η οποίες είναι πολύ σημαντικές.
- Καλύτερος και πιο ρεαλιστικός έλεγχος της δεξαμενής καυσίμου και του τρόπου παράδοσης υδρογόνου στην κυψέλη. Στο μοντέλο του συστήματός μας δεν υπάρχει άμεση σύνδεση της δεξαμενής καυσίμου με την κυψέλη, ούτε συγκεκριμένος αριθμός δεξαμενών οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο σύστημα. Έτσι δεν γνωρίζουμε σε πιο σημείο γεμίζει ή αδειάζει η συνολική αποθήκη υδρογόνου του συστήματός μας. Ακόμα, έτσι όπως είναι τώρα φτιαγμένο το σύστημά μας, φαίνεται σαν η κυψέλη να δέχεται υδρογόνο απευθείας από τον ηλεκτρολύτη και όχι από την δεξαμενή υδρογόνου. Σε περίπτωση που η δεξαμενή καυσίμου έχει αδειάζει θα έπρεπε η κυψέλη καυσίμου να τίθεται εκτός λειτουργίας και να μην μπορεί να παράγει φορτίο έως ότου ο ηλεκτρολύτης έχει αποθηκεύσει και πάλι μια ικανή ποσότητα στην δεξαμενή. Τέλος θα έπρεπε να έχουν σχεδιαστεί και οι απώλειες που προκαλούν τα εξωτερικά κυκλώματα τα οποία είναι απαραίτητα για την λειτουργία της δεξαμενής καυσίμου.
- Ο έλεγχος των υπερ-πυκνωτών θα έπρεπε να γίνει κανονικά με ηλεκτρονικά ισχύος. Για να αποφύγουμε παραπάνω λεπτομέρεια στο κύκλωμά μας, η οποία θα το έκανε ακόμα πιο αργό στην προσομοίωση, χρησιμοποιήσαμε την τοπολογία της αναφοράς [2] με τους διακόπτες, προκειμένου να ρυθμίσουμε χειροκίνητα το πότε θα δίνουν ενέργεια στο σύστημα και πότε όχι. Μια προτεινόμενη λύση είναι η χρήση ενός dc/dc full bridge μετατροπέας διπλής κατεύθυνσης του οποίου το μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [31]



- Καλύτερη ρύθμιση των PI ελεγκτών προκειμένου να έχουμε dc τάση ακόμα πιο κοντά στην απαιτούμενη τιμή των 400 V με ακόμα μικρότερη απόκλιση.

Παράρτημα Α

Στα χαρακτηριστικά του ανέμου αναφέρθηκε η έννοια της ανατάραξης του ανέμου. Στο παράρτημα αυτό αναφέρονται με περισσότερη λεπτομέρεια η έννοια της τραχύτητας του εδάφους, η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της ανατάραξης του αέρα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη αιολική ενέργεια μιας περιοχής με βάση την ανατάραξη του αέρα σε μία συγκεκριμένη περιοχή.

Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους. Τα μεγέθη που εκφράζουν την τραχύτητα του εδάφους είναι το μήκος τραχύτητας z_0 και η **κλάση** (κατηγορία) τραχύτητας.

Το **μήκος τραχύτητας z_0** εκφράζει το μέσο ύψος των στοιχείων μιας επιφάνειας. **Ομοιογενές** θεωρείται ένα πεδίο το μήκος τραχύτητας του οποίου είναι μικρό σε σχέση με το ύψος της αιολικής μηχανής, ενώ **ανομοιογενές** θεωρείται το πεδίο εκείνο το μήκος τραχύτητας του οποίου είναι μεγάλο. Οι τιμές του z_0 κυμαίνονται από 0.01m (πάγος) ως 10 m (αστικές περιοχές) ενώ αλλάζει με τις εποχές (φθινόπωρο, άνοιξη, εποχές συγκομιδής, ...) και εξαρτάται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών. Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών διαφορετικής τραχύτητας ονομάζεται όριο τραχύτητας. Η μεταβολή αυτή του μήκους τραχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την διαδοχική μεταβολή του κατανομής του ανέμου λόγω του σχηματισμού διαδοχικών εσωτερικών οριακών στρωμάτων. Απαιτείται προσεκτική διαστασιολόγηση του πύργου της αιολικής μηχανής ώστε η πτερωτή της μηχανής να μην βρίσκεται σε ζώνη σημαντικών «αναταράξεων».

Οι **κατηγορίες τραχύτητας** είναι τρεις :

- **Κατηγορία τραχύτητας 1:** Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις. Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι
- **Κατηγορία τραχύτητας 2 :** Καλλιεργημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000m μεταξύ τους και μερικά σπίτια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή κυματώδες με δέντρα και σπίτια
- **Κατηγορία τραχύτητας 3 :** Συνδυασμός δάσους και καλλιεργημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περίχωρα της πόλης. Τα εμπόδια είναι κοντά μεταξύ τους σε αποστάσεις μικρότερες από μερικές εκατοντάδες μέτρα

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος εδάφους	Zo(m)
0	Πηλώδες έδαφος, Πάγος	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
0	Ήρεμη θάλασσα	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
0	Αμμώδες έδαφος	$10^{-4} - 10^{-3}$
0	Χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	$4.9 \cdot 10^{-3}$
1	Χέρσο έδαφος	$10^{-3} - 0.01$
1	Χλοερό έδαφος	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο έδαφος	0.021
2	Χαμηλή βλάστηση, Στέπα	0.032
2	Υψηλά χόρτα	0.039
2	Σποβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1-0.3
2	Δάση με χαμηλά δένδρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δένδρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

Όπως αναφέραμε Ανατάραξη του αέρα για μία χρονική περίοδο $[t_0, T]$ είναι η διακύμανση γύρω από την μέση τιμή του ανέμου της συγκεκριμένης περιοχής. Το μέτρο της ανατάραξης δίνεται από τον τύπο:

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt$$

ενώ το μέτρο της έντασης της ανατάραξης δίνεται από τον τύπο : $I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$

Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί

με βάση το μήκος τραχύτητας **zo** σύμφωνα με τον τύπο $I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_o}}$ για **zo** <= 0.20m

$$I = \frac{-0.14 \ln z_o + 0.78}{\ln \frac{z}{z_o}} \quad \text{για } \mathbf{zo} \leq 0.20\mathbf{m} .$$

Η ένταση της ανατάραξης είναι ένα από τα βασικά μεγέθη τα οποία πρέπει να γνωρίζει κανείς όταν πρόκειται να εγκαταστήσει μια αιολική μηχανή, γιατί δεν επιδρά μόνο στην συλλεγόμενη ισχύ, αλλά και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος.

Με βάση τον νέο ορισμό της ανατάραξης μπορούμε να υπολογίσουμε εκ νέο την ένταση της ανατάραξης και την συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια μίας περιοχής. Ο τύπος της μέσης αιολικής ισχύς σε χρόνο T είναι

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 \Rightarrow P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [V(t)]^3 dt$$

ενώ η στιγμιαία ταχύτητα σε σχέση με την διακύμανση γύρω από την μέση τιμή είναι

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) = \bar{V} + \sigma_v, \text{ , οπότε προκύπτει ο τύπος}$$

$$P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [\bar{V} + \sigma_v]^3 dt = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \left[\int_0^T \bar{V}^3 dt + \int_0^T \sigma_v^3 dt + 3 \cdot \int_0^T \bar{V}^2 \cdot \sigma_v dt + 3 \cdot \int_0^T \bar{V} \cdot \sigma_v^2 dt \right]$$

$$\Rightarrow P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot \bar{V}^3 \cdot \left[1 + \frac{\sigma_v^3}{\bar{V}^3} + \frac{3 \cdot \sigma_v}{\bar{V}} + \frac{3 \cdot \sigma_v^2}{\bar{V}^2} \right]$$

Αλλά $I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$ και $\left[\frac{\sigma_v^3}{\bar{V}^3} \right] \approx 0$ οπότε $P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot \bar{V}^3 \cdot [1 + 3 \cdot I^2]$

Θεωρώντας ένα σύνολο μέσων ταχυτήτων του ανέμου για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (μήνας, χρόνος,...) η μέση ισχύς του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κατανομή των συχνοτήτων των ταχυτήτων στο διάστημα αυτό με Vmax την μέγιστη ταχύτητα του συνόλου των δεδομένων και f(Vi) την συχνότητα εμφάνισης του Vi έχουμε:

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \int_0^{V_{\max}} f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 d\bar{V} = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3$$

Θεωρώντας ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου, τότε σε ένα χρόνο θα έχουμε T=24*365=8760 μετρήσεις:

$$E_E = 4.38 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 \quad \text{kWh/year}$$

και θεωρώντας ρ=1.225 kgr/m³ η ανά μονάδα σάρωσης διαθέσιμη αιολική ενέργεια είναι:

$$E_E = 5.366 \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 \quad \text{kWh/m}^2/\text{year}$$

Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό γίνεται πιο λεπτομερείς ανάλυση των τριών βασικών απωλειών μιας PEMFC κυψέλης καυσίμου οι οποίες είναι οι απώλειες ενεργοποίησης, οι ωμικές απώλειες και οι απώλειες συγκέντρωσης και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού τους.

Υπολογισμός απωλειών ενεργοποίησης : Όπως αναφέραμε και στην ανάλυση της PEMFC η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης είναι το κατώφλι ενέργειας που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να ξεκινήσει η αντίδραση. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την ίδια την αντίδραση, από το υλικό και τη δομή του ηλεκτροκatalυτή, από τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και λίγο από την πυκνότητα του ρεύματος. Για τον υπολογισμό των απωλειών αυτών ας θεωρήσουμε την αντίδραση : $aA + ne \leftrightarrow bB$

Αν θεωρήσουμε τη μεταφορά μάζας αμελητέα τότε η «κινητικότητα» της αντίδρασης (reaction kinetics) δίνεται από την εξίσωση Butler – Volmer [12], [11]:

$$i = i_o [e^{-\alpha n F \eta / RT} - e^{(1-\alpha) n F \eta / RT}]$$
$$i_o = n F A k^o [\exp(-\frac{\Delta F_e}{RT})(C_A^*)^{a(1-\alpha)} (C_B^*)^{b\alpha}]$$

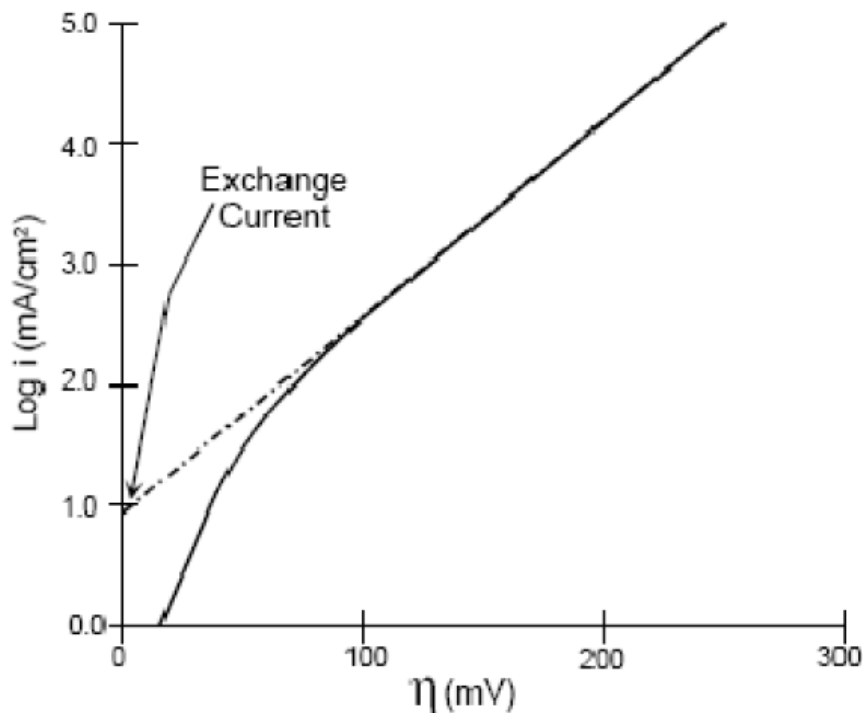
Όπου n είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παίρνουν μέρος στην αντίδραση ανά mol, a και b είναι οι αναλογίες των αντιδρώντων και προϊόντων όπως φαίνεται στην αντίδραση, A είναι η ενεργός επιφάνεια δηλαδή η επιφάνεια που πραγματοποιείται η αντίδραση, k^o είναι μια σταθερά ροής (intrinsic rate constant) με μονάδες cm/s, η είναι η απώλεια δυναμικού λόγω απωλειών ενεργοποίησης και ΔF_e είναι η ελεύθερη ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης.

Στην πραγματικότητα ο δεύτερος όρος της εξίσωσης Butler – Volmer είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον πρώτο. Έτσι απαλείφοντας τον όρο αυτό και λύνοντας ως προς η προκύπτει η ημιεμπειρική εξίσωση Tafel η οποία είναι και ο συνηθισμένος τρόπος υπολογισμού των απωλειών ενεργοποίησης:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_o}$$

όπου α είναι μια σταθερά μεταφοράς ηλεκτρονίων της αντίδρασης (electron transfer coefficient) η οποία πολλές φορές παίρνεται αυθαίρετα ίση με 0.5. i_o είναι η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής και δίνεται από τον τύπο που αναφέρεται παραπάνω (exchange current density). Το i_o είναι το ρεύμα όταν $\eta_{act} = 0$, που είναι ένα μέτρο του μέγιστου ρεύματος με ελάχιστες απώλειες. Η εξίσωση συνήθως γράφεται με τη μορφή ευθείας και παρουσιάζεται γραφικά σε λογαριθμική κλίμακα (Tafel Plot) όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\eta_{act} = a + b \ln i, \text{ όπου } a = -(RT/\alpha n F) * \ln i_0 \text{ και } b = RT/\alpha n F$$



Εξίσωση Tafel σε λογαριθμική κλίμακα

Υπολογισμός ωμικών απωλειών : Οι ωμικές απώλειες οφείλονται στην αντίσταση που παρουσιάζει ο ηλεκτρολύτης στη ροή των ιόντων και στην αντίσταση των ηλεκτροδίων λόγω μειωμένης αγωγιμότητας και κακής επαφής. Δίνονται από τον τύπο: $\eta_{ohm} = iR$, όπου i είναι το ρεύμα που διαρρέει την κυψέλη και R η συνολική αντίσταση.

$$R = R_{electronic} + R_{ionic} + R_{contact}$$

Όπου **Relectronic** είναι η αντίσταση στη ροή των ηλεκτρονίων που εμφανίζουν τα διάφορα μέρη της κυψέλης όπως ηλεκτρόδια, εσωτερικοί σύνδεσμοι κτλ. , **Rionic** είναι η αντίσταση στη μεταφορά ιόντων η οποία οφείλεται κυρίως στην αντίσταση της μεμβράνης αλλά των ηλεκτροδίων και **Rcontact** είναι οι αντιστάσεις που δημιουργούνται από την επαφή των διαφόρων μερών της κυψέλης τα οποία είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά.

Στις PEMFC οι κυριότερες ωμικές απώλειες οφείλονται στην αντίσταση που παρουσιάζει η μεμβράνη στη διέλευση ιόντων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να υπολογίσουμε την αντίσταση ή μάλλον καλύτερα την ειδική αντίσταση (Area Specific Resistance ASR).

Η **ASR** προκύπτει αν διαιρέσουμε την αντίσταση της κυψέλης με την επιφάνειά της. Η μονάδα που προκύπτει είναι Ωcm^2 . Η ASR είναι συνάρτηση του σχεδιασμού της κυψέλης, των υλικών και της θερμοκρασίας. Μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους είτε πειραματικά είτε αναλυτικά. Από την $V-I$ καμπύλη της κυψέλης όταν υπάρχει περιοχή στην οποία το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με την τάση, η κλίση αυτής της ευθείας δίνει την ASR, γιατί μόνο οι απώλειες αυτές μεταβάλλονται γραμμικά με το ρεύμα και αυτό σημαίνει ότι σε αυτή την περιοχή είναι κυρίαρχες οι ωμικές απώλειες.

Η αντίσταση που οφείλεται στην ικανότητα αγωγής των ηλεκτρονίων μπορεί να μετρηθεί και απ' ευθείας. Είναι η Relectronic που αναφέρθηκε παραπάνω.

Τέλος όταν είναι γνωστά η γεωμετρία της κυψέλης, το μήκος των διαδρομών που ακολουθούν τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια μαζί με την αγωγιμότητα και τις αντιστάσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι δυνατή η χρήση αναλυτικών μεθόδων για τον υπολογισμό των αντιστάσεων.

Υπολογισμός απωλειών συγκέντρωσης : Οι απώλειες αυτές οφείλονται στον περιορισμένο ρυθμό απομάκρυνσης των προϊόντων και ανανέωσης των αντιδρώντων. Στην ουσία στις περιοχές που γίνονται αντιδράσεις χρειάζεται κάποιος χρόνος μέχρι να μεταφερθούν νέα μόρια καυσίμου και να απομακρυνθούν τα προϊόντα της αντίδρασης. Στις PEMFC η υγρή φάση του νερού μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα και επιπλέον οι απομάκρυνση των προϊόντων συνήθως είναι πιο αργή. Οι απώλειες αυτές έχουν μικρή τιμή για μικρή πυκνότητα ρεύματος αλλά γίνονται σημαντικές σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος όπου δουλεύουν πρακτικά οι κυψέλες. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου δίνεται από τον πρώτο νόμο της διάχυσης του Fick :

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta}$$
, όπου **D** είναι η σταθερά διάχυσης της ουσίας, **C_B** είναι η συνολική συγκέντρωση, **C_S** είναι η επιφανειακή συγκέντρωση και **δ** είναι το πάχος της επιφάνειας διάχυσης. Το οριακό ρεύμα είναι ένα μέτρο του μέγιστου ρυθμού μεταφοράς μάζας μιας ουσίας και δίνεται από τον παραπάνω τύπο για **C_S = 0**.

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta}$$

Από τις 2 παραπάνω εξισώσεις και χρησιμοποιώντας την εξίσωση Nernst για την περίπτωση που το ρεύμα είναι μηδέν, δηλαδή η συγκέντρωση $C_S = 0$, και για μια περίπτωση που το ρεύμα είναι διάφορο του μηδέν, οπότε η επιφανειακή συγκέντρωση είναι μικρότερη από την συνολική, προκύπτει:

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

Όπου **η_{conc}** είναι η πτώση τάσης σε V λόγω των απωλειών συγκέντρωσης. Στην παραπάνω ανάλυση οι απώλειες ενεργοποίησης θεωρήθηκαν αμελητέες για τον υπολογισμό των απωλειών συγκέντρωσης.

- [1] <http://el.wikipedia.org/wiki> , ήπιες μορφές ενέργειας
- [2] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam , Dynamic modeling design and simulation of a wind/fuel-cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation System, Journal of Power Sources ,Volume 161, Issue 1, 20 October 2006, Pages 707-722
- [3] <http://wikipedia.org/wiki> , hybrid systems
- [4] <http://el.wikipedia.org/wiki> , αιολική ενέργεια
- [5] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Α, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης
- [6] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Β, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης
- [7] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Γ, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης
- [8] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Δ, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης
- [9] U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)
- [10] James Larminie, Andrew Dicks Fuel Cell Systems Explained (2nd Edition) John Wiley & Sons Ltd
- [11] Gregor Hoogers Fuel Cell Technology Handbook, 2003 CRC Press
- [12] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B.A. Peppley, P. R. Roberge
“Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I. Mechanistic Model” Journal of Electrochemical Society, Vol. 142, No. 1, January 1995
- [13] M.J. Khan, M.T. Iqbal, Dynamic modeling and simulation of a small windfuel cell hybrid energy system, J. Renewable Energy 30 (3) (2005) 421–439.
- [14] H. De Battista, R.J. Mantz, F. Garelli, Power conditioning for a windhydrogen energy system, J. Power Sources 155 (2) (2006) 478–486.
- [15] E.S. Abdin,W. Xu, Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit, IEEE Trans. Energy Conversion 15 (1) (2000) 91–96.
- [16] MATLAB SimPowerSystems for Use with Simulink User’s Guide,Version 4.1.1
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf.doc/phymod/powersys/powersys.pdf>.
- [17] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, JohnWiley & Sons Ltd, New York, 1998.
- [18] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation, IEEE Trans. Industry Appl. 37 (1) (2001) 240–246.
- [19] M. Uzunoglu, M.S. Alam, Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone applications, IEEE Trans. Energy Conversion, accepted for publication.
- [20] M.Y. El-Shark, A. Rahman, M.S. Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla, T. Thomas, A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications, J. Power Sources 138 (1–2) (2004) 199–204.
- [21] R.M. Nelms, D.R. Cahela, B.J. Tatarchuk, Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits, IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 39(2) (2003) 430–438
- [22] K.H. Hauer, Analysis tool for fuel cell vehicle hardware and software (controls) with an application to fuel cell economy comparisons of alternative system designs, Ph.D. Dissertation, Department of Transportation Technology and Policy, University of California Davis,2001.

- [23] R.L. Spyker, R.M. Nelms, Analysis of double-layer capacitors supplying constant power loads, *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.* 36 (4) (2000) 1439–1443
- [24] <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/large-cell/bcap3000.asp>
- [25] Honda fuel cell power FCX (2004). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/FCXPK.pdf>
- [26] L. Gao, R.A. Dougal, S. Liu, Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid, *IEEE Trans. Power Electron.* 20 (1) (2005) 236–243
- [27] O. Ulleberg, Stand-alone power systems for the future: optimal design. Operation and Control of Solar-Hydrogen Energy Systems, PhD Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [28] K. Sapru, N.T. Stetson, S.R. Ovshinsky, Development of a small scale hydrogen production storage system for hydrogen applications, in: *Proceedings of the 32nd Intersociety Conference*, vol. 3, 1997, pp. 1947–1952.
- [29] T. Schucan, Case studies of integrated hydrogen energy systems, International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement, Final Report, Paul Scherrer Institute, Switzerland, 2000.
- [30] H. Gorgun, Dynamic modeling of proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, *Int. J. Hydrogen Energy* 31 (1) (2006) 29–38.
- [31] Jin-Woo Jung, Ali Keyhani, Modeling and Control of Fuel Cell Based Distributed Generation Systems in a Standalone AC Power Supply, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* -Vol.2-No.1-Spring and Summer 2005