ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SIMULINK ΤΗΣ MATLAB

Θεοδωρογλάκης Εμμανουήλ 2002030081

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Σταυρακάκης
Εξεταστές: Δρ. Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης
Δρ. Θεοχάρης Τσούτσος

Οκτώβριος 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται λόγος για ένα υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από μία ανεμογεννήτρια και από μια στοίβα κυψελών καυσίμου. Το σύστημα αυτό είναι αυτόνομο, δηλαδή δεν είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, και παράγει ενέργεια καλύπτοντας τις ανάγκες ενός εικονικού χρήστη. Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η μοντελοποίηση, η ανάλυση και η προσομοίωση του συστήματος αυτού.

Το εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για όλα αυτά είναι το λογισμικό simulink της Matlab. Το simulink είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο μπορεί να μετατρέψει την προσομοίωση σε παιχνίδι χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού για τον χειρισμό του, αλλά σε περίπτωση που υπάρχουν, κάνουν το simulink ένα πολυεργαλείο πάνω στο οποίο μπορείς να προσομοιώσεις σχεδόν τα πάντα.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τον τελευταίο καιρό γίνεται ιδιαίτερος λόγος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ως ένα μέρος εχουν μπει στη ζωή μας. Όλοι έχουμε δει πλέον ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, ή φωτοβολταϊκά σε στέγες ή ακόμα ένα αιολικό πάρκο έστω και από μακρυά, κάτι που πριν λίγα χρόνια ήταν άγνωστο στον περισσότερο κόσμο. Στον τομέα αυτόν λοιπόν αρχίζει να πραγματοποιείται μία επανάσταση. Η επανάσταση αυτή ξεκίνησε λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την παρούσα εξάρτηση των διαφόρων κρατών για την παραγωγή ενέργειας από τις κλασσικές πηγές, καθώς και η συνεχόμενη εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, η εκτεταμένη χρήση των οποίων έχει προκαλέσει τεράστια οικολογικά προβλήματα στο περιβάλλον σε ολόκληρο τον πλανήτη. Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική, προέρχονται 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]

Ακόμα όμως, δυστυχώς, δεν μπορούμε να μιλάμε για μεγάλους βαθμούς απόδοσης στις διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσής τους δεν ξεπερνάει το 30%. Επίσης εξαρτώνται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής που είναι εγκατεστημένα. Έτσι, καμία μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι δυνατόν να καλύψει από μόνη της τις ενεργειακές ανάγκες ενός χρήστη. Αντιθέτως, ένας συνδυασμός από περισσότερες του ενός μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα βοηθούσε πολύ στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων. Ας πάρουμε για παράδειγμα έναν συνδυασμό συλλεκτών ηλιακής ενέργειας και αννεμογεννητριών. Αυτό το σύστημα θα μπορούσε να παράγει ενέργεια το καλοκαίρι, σε περιόδους ηλιοφάνειας όπου οι ανεμογεννήτριες θα υπολειτουργούν αλλά και το χειμώνα όπου τα φωτοβολταϊκά δεν θα παράγουν αρκετή ενέργεια αλλά οι άνεμοι θα είναι ισχυρότεροι και έτσι θα λειτουργούν ικανοποιητικά οι ανεμογεννήτριες.

Ένα τέτοιο συνδυασμό πραγματοποιούμε και εδώ. Θα χρησιμοποιήσουμε μία ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος, οριζόντιου άξονα περιστροφής και μια στοίβα από 712 κυψέλες καυσίμου η οποία θα λειτουργεί παράλληλα με την ανεμογεννήτρια. Συνοπτικά η ιδέα έχει ως εξής: Όταν η ανεμογεννήτρια θα παράγει παραπάνω ενέργεια από αυτή που χρειάζεται ο χρήστης, το περίσευμα θα αποθηκεύεται με την μορφή υδρογόνου (H) για μελλοντική χρήση από την κυψέλη καυσίμου. Όταν τώρα, η ανεμογεννήτρια δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του χρήστη, τότε θα παίρνουμε την επιπλέον ενέργεια που χρειαζόμαστε από τις κυψέλες καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι Proton Exchange Fuel Cells κυρίως λόγω της απλότητάς τους και της δυνατότητας εφαρμογής τους οπουδήποτε υπάρχει σαν καύσιμο, καθαρό υδρογόνο (H).

Κεφάλαιο 2: Αιολική Ενέργεια

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, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολυ αργότερα οι ανεμόμυλοι στην ξηρά. Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου. [2]

Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις Ήπιες μορφές ενέργειας. Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. [2]

2.2: Άνεμος

Με τον όρο άνεμος εννοούμε τον ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος βρίσκεται σε κίνηση. Η κίνηση αυτή οφείλεται στην περιστροφή της γης και στην ηλιακή ακτινοβολία. Χαρακτηρικά του ανέμου είναι η ταχύτητα, η κατεύθυνση, η ανατάραξη, ο στροβιλισμός και η κατανομή του. [3]

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου για μια χρονική στιγμή t δίνεται από τη σχέση

$$V(t)=\bar{V}+V'(t) \qquad \text{εξ. (1)}$$

Ενώ η μέση ταχύτητα του ανέμου για μια χρονική περίοδο από t_0 μέχρι T δίνεται από τη σχέση

$$\bar{V}=\frac{1}{T}\int_{to}^{to+T} V(t)dt \qquad \text{εξ. (2)}$$

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. [3]

2.3: Κατανομή ανέμου

Το μοντέλο που συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου είναι μια κατανομή Weibull δύο παραμέτρων γιατί είναι ικανή να προσαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος κατανομών από γκαουσιανή έως εκθετική. Το μοντέλο Rayleigh, είναι ειδική περίπτωση της συνάρτησης Weibull στην οποία η παράμετρος μορφοποίησης έχει την τιμή 2, και περιγράφει πολύ καλά την πραγματική ωριαία κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε πολλές περιοχές. [7]

2.4: Αιολική ισχύς

Ο τύπος της κινητικής ενέργειας ειναι $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$ εξ. (3)

Ισχύει $m = \rho \cdot U = \rho \cdot A \cdot S = \rho \cdot A \cdot V \cdot t$ εξ. (4)

με A την περιοχή που διαπερνά κάθετα ο άνεμος με ταχύτητα V=S/t

Έτσι η εξ. (3) της κινητικής ενέργειας γίνεται

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \qquad \text{εξ. (5)}$$

Και συνεπώς με βάση την εξ. (2) και την εξ. (5) έχουμε τον τύπο της αιολικής ισχύος:

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 \Rightarrow P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [V(t)]^3 dt \qquad \text{εξ. (6)}$$

[4]

2.5: Όριο του Betz

Καθώς η ανεμογεννήτρια απορροφά ενέργεια από τον άνεμο, αυτός επιβραδύνεται, γεγονός που τον αναγκάζει να διαχέεται και να αποκλίνει τριγύρω από την ανεμογεννήτρια σε κάποιο βαθμό. Ο Γερμανός φυσικός Albert Betz προσδιόρισε το 1919 ότι μια ανεμογεννήτρια μπορεί να απορροφήσει το πολύ το 59% της ενέργειας που, σε άλλη περίπτωση, θα διερχόταν από την διατομή της (Νόμος του Betz). Το όριο του Betz είναι ανεξάρτητο από τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. [7] Στην πράξη βέβαια το όριο του Betz είναι η καλύτερη περίπτωση καθώς υπάρχουν και άλλες απώλειες (αντίσταση των καλωδίων, τριβή κτλ.) [8]

Το όριο Betz προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ενέργειας και υπολογίζεται ως το ακρότατο της γραφικής παράστασης dCp / dα ,και το ακρότατο της γραφικής dCτ / dα όπου

Cp , είναι ο συντελεστής ισχύος και ορίζεται ως $Cp = 4α*(1-α)^2$ εξ. (7)

Cτ , είναι ο συντελεστής αντίστασης ο οποίος ορίζεται ως Cτ = 4α*(1-α) εξ. (8)

Και α είναι ο λόγος $$a = \frac{U - V_s}{U}$$ εξ. (9)

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 Vs 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 α = 1/3 και είναι $C_{p\,max}$ = 59%.

Η τιμή αυτή είναι και το όριο Betz της αιολικής μηχανής. Προκύπτει λοιπόν ότι :

$$P_{\max} = C_{P\max} \cdot \bar{P}$$ εξ. (10)

όπου $\bar{P}$ η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου. Η εξίσωση αυτή αποτελεί το άνω όριο απόδοσης της ανεμογεννήτριας. [5]

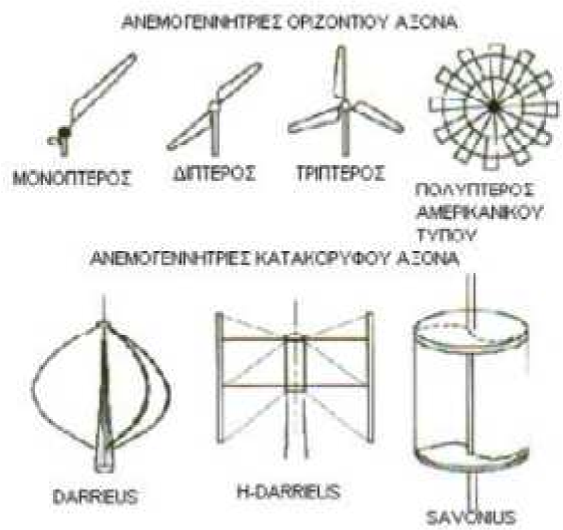
Κεφάλαιο 3: Αιολικές Μηχανές

3.1: Γενικά

Αιολική μηχανή λέγεται κάθε σύστημα που μπορεί να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια για να παράγει έργο. Οι αιολικές μηχανές είναι γνωστές από την αρχαιότητα, χρησιμοποιούμενες για την άντληση νερού και την άλεση των δημητριακών. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). [8]

3.2: Τύποι αιολικών μηχανών

Οι αιολικές μηχανές διακρίνονται σε δυο κύριους τύπους: κατακόρυφου άξονα περιστροφής και οριζόντιου άξονα περιστροφής. Στις Α/Γ οριζοντίου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Στις Α/Γ κατακόρυφου άξονα ο δρομέας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 1: Αιολικές Μηχανές οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα περιστροφής

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα για την ηλεκτροπαραγωγή, σε ποσοστό 90%. Η ισχύς τους φτάνει τα 5 MWatt, η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ 40 και 120 μέτρων, το ύψος του πύργου εγγίζει τα 120 μέτρα και λειτουργούν σε ένα παράθυρο ταχυτήτων ανέμου 3 ως 30 m/s. Μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. [8]

Η ισχύς των μικρών Α/Γ κυμαίνεται από 400 W ως 50 kW (συνήθως 1-10 kW). Είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τις Α/Γ που προορίζονται για τη στελέχωση Αιολικών Πάρκων και έχουν ισχύ συνήθως πάνω από 700 kW. Οι Α/Γ μικρής ισχύος διαθέτουν 3 ή 4 κινούμενα μέρη, ώστε να έχουν πολύ χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Έχουν 2 ή 3 πτερύγια, η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ 1 και 15 μέτρων και το ύψος του πύργου μεταξύ 5 και 30 μέτρων. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 12 - 16 m/s. Συνήθως επιθεωρούνται κάθε 2 έτη και η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 ετών. Αν και δεν είναι στο προσκήνιο όσο άλλες τεχνολογίες, οι μικρές Α/Γ έχουν αποδείξει την ικανότητά τους να παράγουν ενέργεια αξιόπιστα και με χαμηλό κόστος. Υπάρχει μεγάλη εμπειρία στην λειτουργία τους αφού πάνω από 150.000 μονάδες έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως. Δεδομένου ότι η ζήτηση για μικρά συστήματα αιολικής ενέργειας αυξάνεται, το κόστος αυτών των συστημάτων αναμένεται να μειωθεί στο μισό κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. [9]

Εικόνα 2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

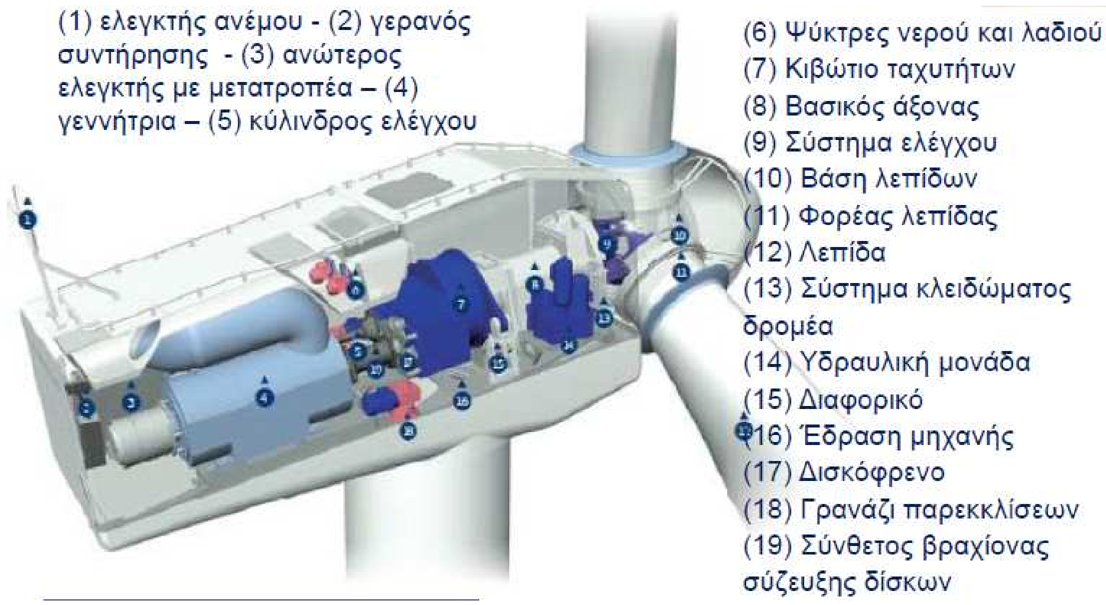
3.3 Ηλεκτρικό και μηχανικό σύστημα ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν δύο ή τρία πτερύγια τα οποία προσδένονται σταθερά ή με τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη γωνία τους σε σχέση με τον άνεμο. Ο δρομέας και η γεννήτρια τοποθετούνται στην κορυφή του πύργου ώστε να εκμεταλλεύονται καλύτερα τον διαθέσιμο αέρα. Στον πύργο τοποθετείται και στηρίζεται όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.

Στο αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ ο δρομέας περιστρέφεται εκμεταλλευόμενος την ταχύτητα του ανέμου. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται από την περιστροφική του κίνηση μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγής. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρή σε σχέση με την απαιτούμενη για τη λειτουργία της γεννήτριας. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ενδιάμεσα κιβώτιο ταχυτήτων.

Το ηλεκτρικό σύστημα της Α/Γ περιλαμβάνει εκτός από την γεννήτρια, τους μετατροπείς ισχύος, πυκνωτές αντιστάθμισης, φίλτρα αρμονικών, διακόπτες, διατάξεις προστασίας και τον μετασχηματιστή.

Το ηλεκτρονικό σύστημα επίβλεψης και ελέγχου της λειτουργίας της Α/Γ χωρίζεται σε επιμέρους συστήματα, κάθε ένα από τα οποία εκτελεί ξεχωριστή λειτουργία. Το σύστημα προσανατολισμού συνήθως διαθέτει αισθητήρα ανέμου ώστε να διατηρείται πάντα ο δρομέας παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου. Σε μικρές Α/Γ η αλλαγή του προσανατολισμού γίνεται με ανεμοδείκτη. Η ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων στη βέλτιστη θέση (αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα) μεγιστοποιεί την ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αν υπάρχουν μετατροπείς ισχύος, η λειτουργία τους ελέγχεται από ξεχωριστό σύστημα ελέγχου. [10]



Εικόνα 3: Εσωτερικό ανεμογεννήτριας

3.4: Απόδοση ανεμογεννήτριας

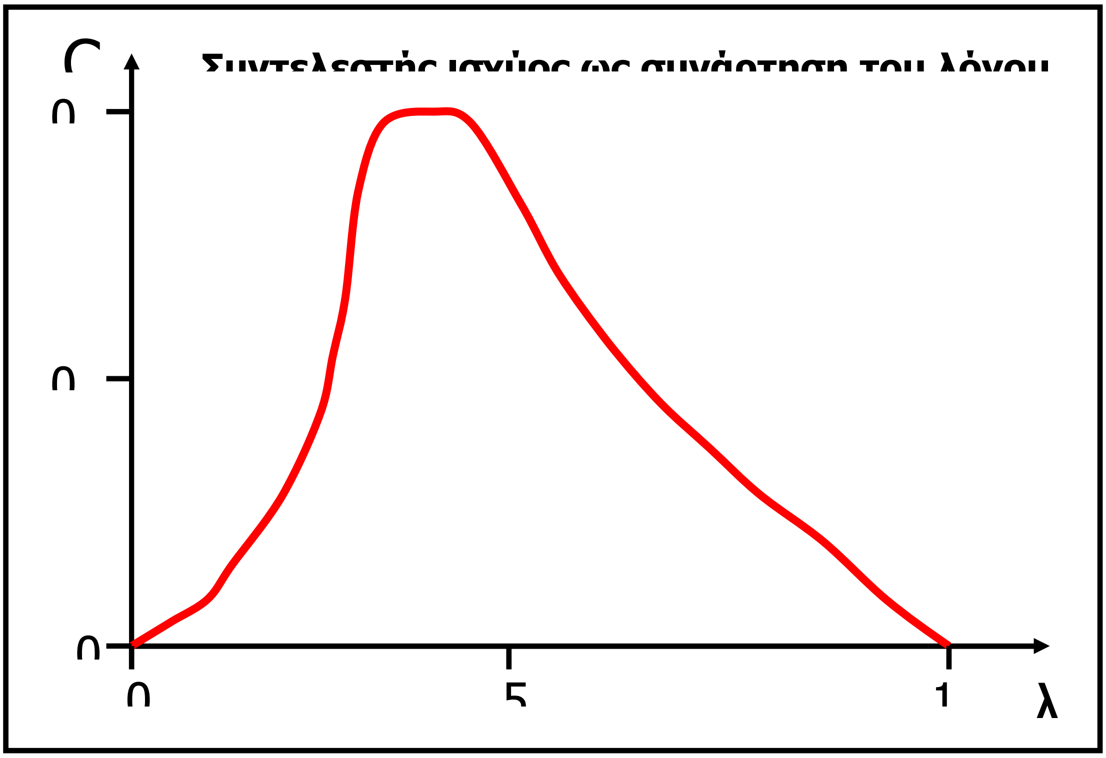
Η απόδοση μίας αιολικής μηχανής επηρεάζεται από την απόσταση των πτερυγίων για δεδομένες ταχύτητες ανέμου. Η συχνότητα της περιστροφής των πτερυγίων της αιολικής μηχανής πρέπει να προσαρμόζεται με την ταχύτητα του ανέμου ανά πάσα στιγμή. Ο συντελεστής απόδοσης μίας μηχανής εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ, τη γωνία πρόσπτωσης α, και τις δυνάμεις που ασκούνται επάνω στην πτερωτή.

Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ ορίζεται ως $\lambda = \dfrac{\text{ταχύτητα ακρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \dfrac{R\omega}{u}$

Για τη μέγιστη ισχύ έχουμε $\lambda = \dfrac{2\pi R}{nd} = \dfrac{2\pi}{kn}$

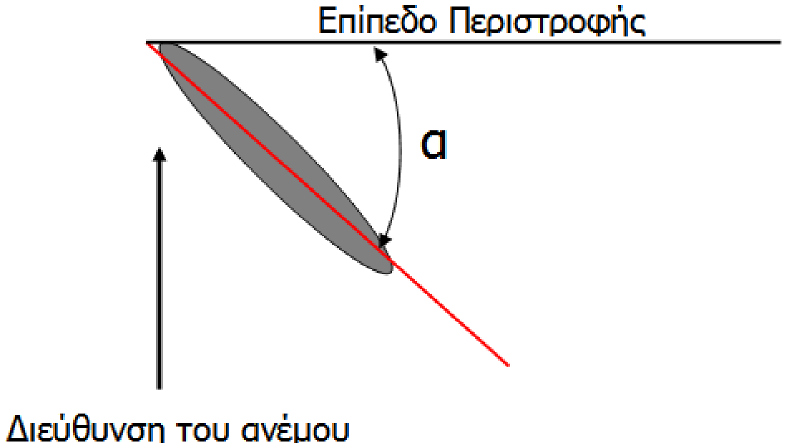
Με n τον αριθμό των ακροπτερυγίων, d το πλάτος του ακροπτερυγίου και k=d/R. Όταν k=1/2 το λ παίρνει τη μέγιστη τιμή του οπότε έχουμε $\lambda_{0\_max}= 4\pi/n$.

Το διάγραμμα του συντελεστή ισχύος c_p της ανεμογεννήτριας σε συνάρτηση με το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ είναι το εξής



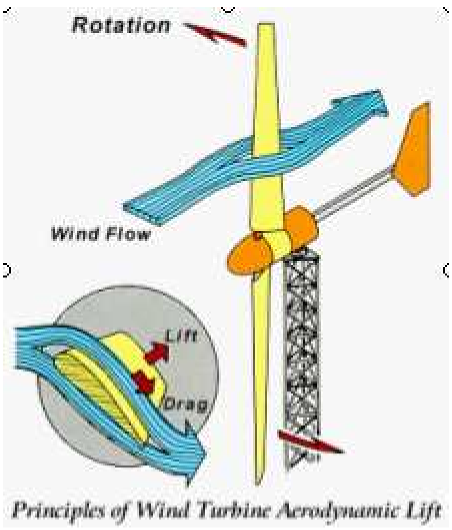
Εικόνα 4: διάγραμμα συντελεστή ισχύος με το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου

Η γωνία πρόσπτωσης α ορίζεται ως η γωνία μεταξύ χορδής πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής του πτερυγίου. [5]



Εικόνα 5: η γωνία πρόσπτωσης

Οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται επάνω στην πτερωτή είναι κυρίως δύο, η ανωστική 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. Ο αέρας ολισθαίνει κατά μήκος της άνω επιφάνειας του πτερυγίου με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι στην κάτω επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση είναι μικρότερη στην άνω επιφάνεια του πτερυγίου από ότι στην κάτω με συνέπεια να ασκείται μία ανωστική δύναμη από κάτω πρός τα πάνω. Η ανωστική δύναμη είναι κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 6: Δυνάμεις ανωστική και οπισθέλκουσα

Ο συντελεστής άνωσης είναι $$c_L = \frac{L}{1/2\rho u^2 S}$$

Όπου u ταχύτητα του ανέμου ως προς την αεροτομή και S η επιφάνεια προβολής της αεροτομής στον άνεμο. Η οπισθέλκουσα δύναμη είναι ουσιαστικά η αντίσταση που εμφανίζει αεροτομή στον αέρα που προσπέφτει στην πτερωτή. Η οπισθέλκουσα αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας προσβολής. Είναι εξίσου σημαντική για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό. Αντίστοιχα υπάρχει και ο συντελεστής οπισθέλκουσας ο οποίος είναι αδιάστατος:

$$c_D = \frac{D}{1/2\rho u^2 S}$$

[11]

3.5: Ηλεκτρική και μηχανική ισχύς

Η μέγιστη αιολική ενέργεια που μπορεί να δεσμεύσει μια αιολική μηχανή είναι

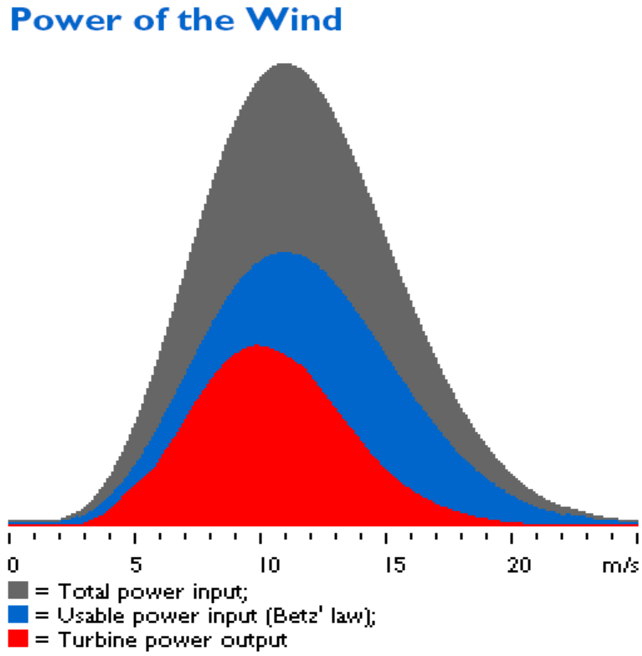
$E_{max}=C_p*E_{wind}$ με $C_p=0{,}59$ το όριο του Betz.

Η ηλεκτρική ισχύς που παίρνουμε από μία αιολική μηχανή είναι

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

με $n_{gearbox}$ την απόδοση του πολλαπλασιαστή στροφών, $n_{generator}$ την απόδοση της γεννήτριας, $n_{accumulator}$ την απόδοση των συσσωρευτών και P_{wind} την ισχύ του ανέμου. [5]

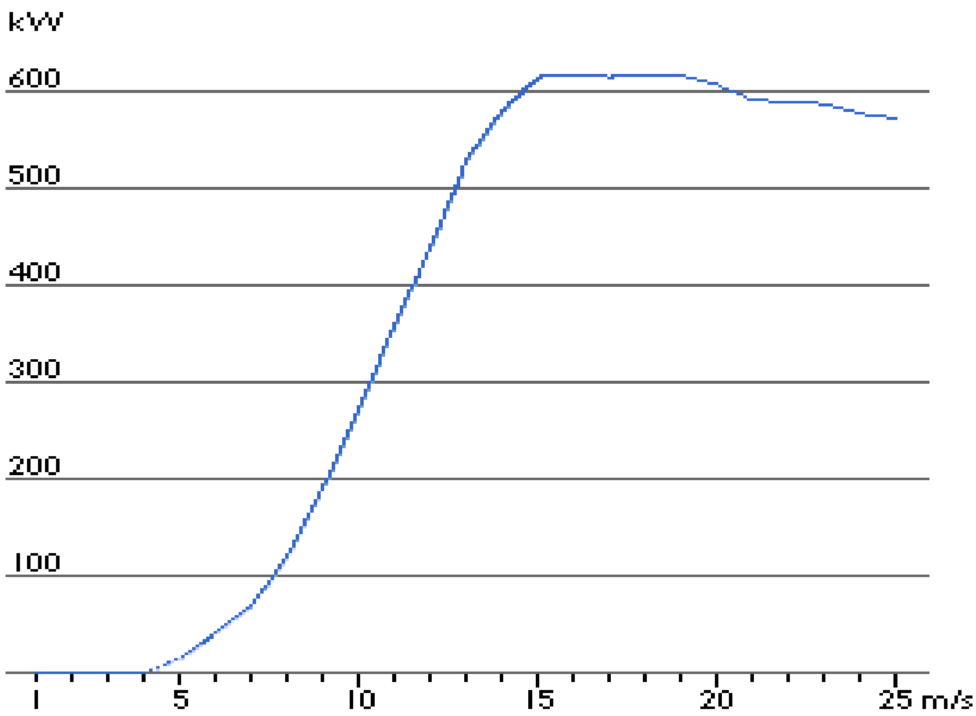
Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε μια σχηματική απεικόνιση της αρχικής συνολικής ενέργειας του ανέμου και της τελικής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Με γκρι χρώμα είναι η κατανομή Weibull η οποία αντιπροσωπεύει την διαθέσιμη αιολική ενέργεια, με μπλε χρώμα η μέγιστη 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.



Εικόνα 7: Ενέργεια ανέμου και ισχύς αιολικής μηχανής

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. [5]

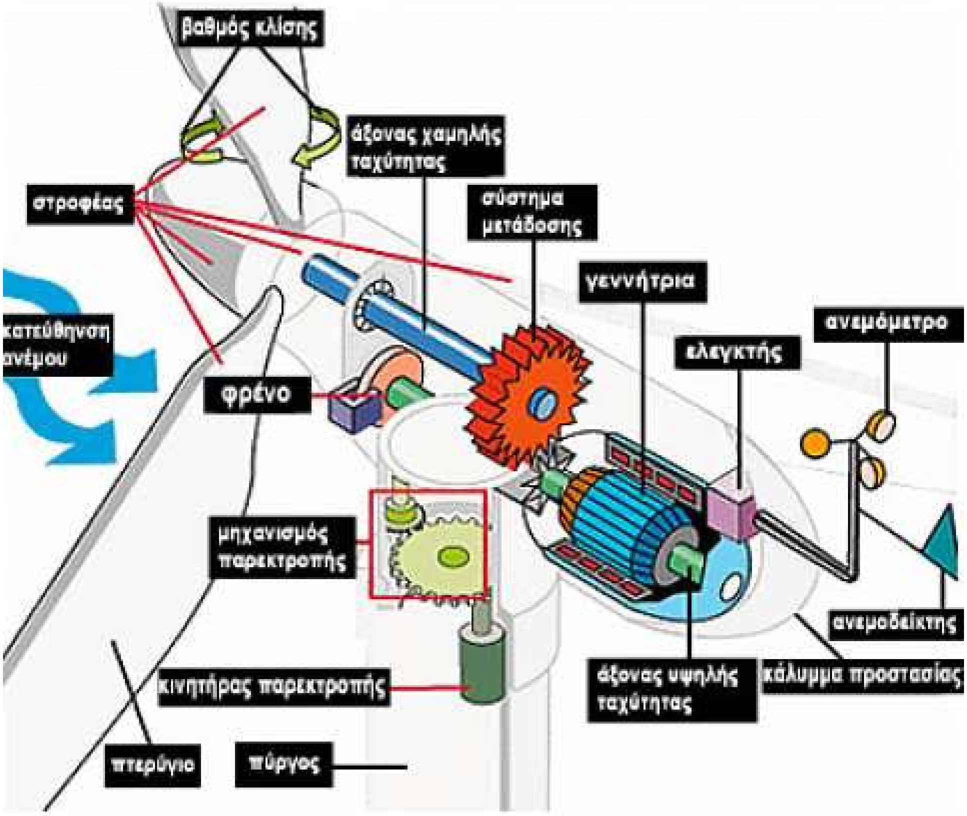
Ένα βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας όλων των αιολικών μηχανών είναι οι χαρακτηριστικές ταχύτητες, οι οποίες είναι τρεις : Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{in}), η ονομαστική ταχύτητα (V_R) και η ταχύτητα εξόδου (V_{out}). Ταχύτητα έναρξης V_{in} είναι η ταχύτητα εκείνη του ανέμου για την οποία 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 $V_R = 1.9<V>$, όπου $<V>$ 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 οποιεσδήποτε ταχύτητες ανέμου. [5]



Εικόνα 8: Χαρακτηριστικές ταχύτητες αιολικών μηχανών

3.6: Δομή ανεμογεννήτριας

Όπως προείπαμε, οι αιολικές μηχανές που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια ειναι 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. Παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. [6]



Εικόνα 9: Δομή ανεμογεννήτριας

3.6.1: Η πτερωτή

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 (Cp). Ο αριθμός των πτερυγίων όπως αναφέραμε και πιο πριν κυμαίνεται από 2 έως 4 πτερύγια και ο συντελεστής απόδοσης είναι περίπου 4.

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. [6]

Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι το αεροδυναμικό τους σχήμα που παίζει ρόλο στην απόδοσή τους. Ακόμη και μικρές αλλαγές στο σχεδιασμό τους μπορούν να αλλάξουν την καμπύλη της ασκούμενης δύναμης και τα επίπεδα του θορύβου. Η πίσω πλευρά των πτερυγίων είναι πιο κυρτή από την μπροστινή ενώ η βάση τους είναι στερεωμένη στην πλήμνη.

Όσον αφορά τώρα το υλικό που κατασκευάζεται η πτερωτή, στις μηχανές μικρής ισχύος είναι 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.

3.6.2: Ο πύργος

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι κυλινδρικός ή ελαφρά κωνικός. Χρησιμοποιείται για τη στήριξητης ανεμογεννήτριας. Ο άνεμος έχει μεγαλύτερες ταχύτητες σε μεγάλα ύψη. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι με το διπλασιασμό του ύψους του πύργου, αυξάνει η αναμενόμενη ταχύτητα του ανέμου κατά 10% και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά 34%. Βέβαια από το διπλασιασμό του ύψους συνεπάγεται και διπλασιασμός της διαμέτρου, δηλαδή χρησιμοποιείται περισσότερο υλικό και άρα μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. [12]

Οι πύργοι για τις μεσαίας και μεγάλης ισχύος Α/Γ είναι κυρίως σωληνοειδής, χαλύβδινοι και συνήθως κατασκευάζονται ανά τμήματα 20-30 μέτρων και συνενώνονται όλα μαζί κατά την εγκατάσταση της Α/Γ.

Εικόνα 10: Σωληνοειδής χαλύβδινοι πύργοι

Ακόμη χρησιμοποιούνται οι πύργοι δικτυωτού πλέγματος οι οποίοι αποτελούνται από κομμάτια χάλυβα συγκολλημένα μεταξύ τους. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το κόστος καθώς ένας πύργος δικτυωτού πλέγματος απαιτεί την μισή ποσότητα υλικών από ένα χαλύβδινο ίδιου ύψους. Το κυριότερο μειωνέκτημά τους είναι η εμφάνισή τους γι’ αυτό κυρίως συναντούμε τους χαλύβδινους, σωληνωτούς πύργους.

Εικόνα 11: Πύργος δικτυωτού πλέγματος

Τέλος, στις μικρές ανεμογεννήτριες συναντούμε και καλωδιωτούς πύργους. Αυτοί είναι στενοί πύργοι που στηρίζονται με συρμάτινα καλώδια. Το πλεονέκτημά τους και εδώ είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής.

Εικόνα 12: Καλωδιωτός πύργος

3.6.3: 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. [6]

3.6.4: 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. [6]

3.6.5: 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. [6]

3.6.6: Σύστημα πέδησης

Το σύστημα πέδησης μπορεί να είναι η μεταβολή του βήματος του πτερυγίου, ακροπτερυγίου ή αεροπέδη ή η στροφή του δρομέα παράλληλα στον άνεμο ή η 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). [6] Το δισκόφρενο κατασκευάζεται από ατσάλι. Επειδή το φρενάρισμα προκύπτει από τριβή μεταξύ του φρένου και του δίσκου, τα φρένα των ανεμογεννητριών δέχονται μεγάλες πιέσεις. Για αυτό το λόγο κατασκευάζονται από ειδικό μεταλλικό κράμα, ώστε να αντέχουν ακόμα και θερμοκρασίες της τάξης των 700 ^{o}C.

3.6.7: Ηλεκτρική γεννήτρια

Οι δύο τύποι γεννήτριας που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ είναι η σύγχρονη και η ασύγχρονη. Η μηχανική ισχύς μεταφέρεται από τον πολλαπλασιαστή στροφών στην ηλεκτρική γεννήτρια μέσω ενός άξονα μετάδοσης. Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Σύγχρονη:

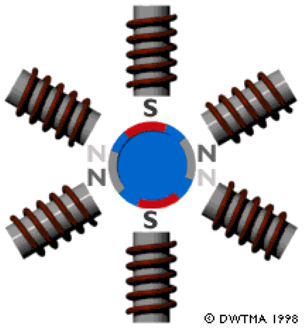
Οι σύγχρονες γεννήτριες, σε αντίθεση με τις ασύγχρονες, δεν απαιτούν εξωτερική τάση για την διέγερσή τους. Η διέγερση είναι συνεχούς ρεύματος και παράγεται από την ίδια την γεννήτρια. Όταν ο αιολικός σταθμός είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο τότε οι συχνότητες του δικτύου και της γεννήτριας ταυτίζονται.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

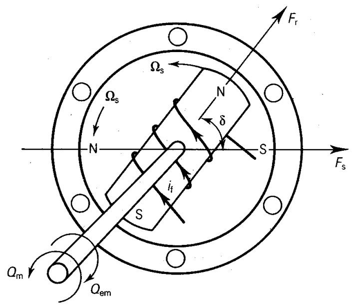
Στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, όταν δηλαδή δεν υπάρχει διασύνδεση με το δίκτυο ρεύματος, είναι απαραίτητη η περιστροφή των ρότορα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα για να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Στην πράξη οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιούνται 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

$$\Omega_S = \frac{P}{2}\Omega_m \qquad \text{και} \qquad f = \frac{P}{2}\frac{n}{60}\ Hz$$





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. [6]

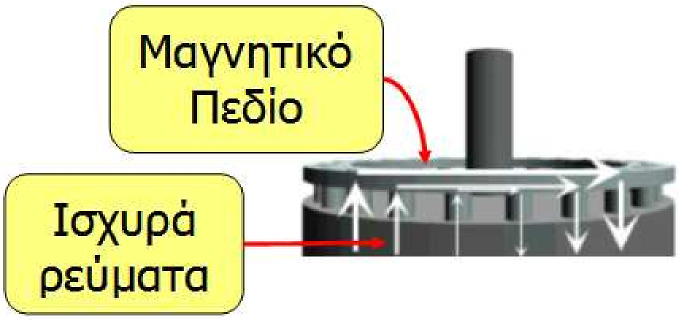
Ασύγχρονη:

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 μεταβάλει 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 $\Omega r = (1\text{-}s)\ \Omega s$ και $s = (\Omega s – \Omega r)/\ \Omega s$ όπου Ωs (rad/sec) η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη, Ω_r (rad/sec) η ταχύτητα περιστροφής του ρότοτα και s (slip) η ολίσθηση της γεννήτριας.



3.6.8: 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). [6]

3.6.9: Σύστημα ελέγχου 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). [6] Ουσιαστικά πρόκειται για ένα τροχό που περιστρέφει ολόκληρη τη νασέλα.

3.6.10: 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. Είναι από τις σημαντικότερα τμήματα της ανεμογεννήτριας καθώς παίρνει αποφάσεις για όλα τα ζητήματα ασφάλειας της ανεμογεννήτριας. Ανάλογα από τα δεδομένα που λαμβάνει από το ανεμόμετρο, είτε θέτει σε λειτουργία τον στροφέα, είτε ενεργοποιεί το φρένο για να σταματήσει την περιστροφή του στροφέα για πολύ μεγάλες ή για μικρές ταχύτητες ανέμου. Εκτός από αυτά, το σύστημα ελέγχου μετράει και άλλες παραμέτρους είτε ως αναλογικά είτε ως ψηφιακά σήματα. Αυτές είναι η τάση, το ρεύμα, η θερμοκρασία της νασέλας και της γεννήτριας, το επίπεδο δόνησης, την συστροφή των καλωδίων ισχύος και άλλα.

Κεφάλαιο 4: Κυψέλες καυσίμου

4.1: Γενικά

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Sir William Grove, το 1839. Ωστόσο η συστηματική έρευνα πάνω σε αυτές άρχισε μόλις τη δεκαετία του '60, όταν η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στο διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo ως φθηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια.

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%. [13][14]

Όσον αφορά τις κυψέλες καυσίμου αυτές ειναι οι:

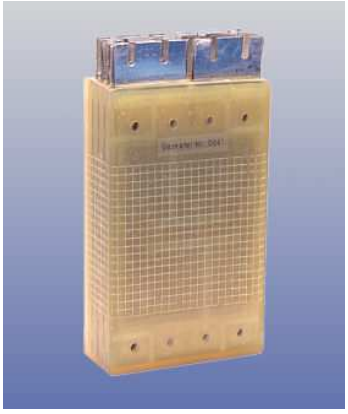
- Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC)
- Alkaline Fuel Cells (AFC)
- Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)
- Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)
- Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

4.2: Είδη κυψελών καυσίμου

Στις PEFC ο ηλεκτρολύτης είναι μια μεμβράνη από κάποιο πολυμερές που είναι πολύ καλός αγωγός πρωτονίων. Τα ηλεκτρόδια στην άνοδο και στην κάθοδο είναι συνήθως κατασκευασμένα από άνθρακα με ηλεκτροκαταλύτη λευκόχρυσο. Το μόνο υγρό στο εσωτερικό της κυψέλης είναι το νερό που προκύπτει σαν προϊόν της αντίδρασης. Η διαχείρηση του νερού πρέπει να γίνει με προσοχή. Το νερό δεν πρέπει να εξατμίζεται με τον ίδιο ρυθμό πουπαράγεται γιατί η μεμβράνη πρέπει να παραμένει ενυδατωμένη για να λειτουργεί σωστά η κυψέλη. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 60 και 80°C. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους, η υψηλή πυκνότητα ισχύος ($2W/cm^2$), το χαμηλό κόστος κατασκευής τους και η δυνατότητα εφαρμογής τους οπουδήποτε υπάρχει διαθέσιμο καθαρό υδρογόνο. Τα μειωνεκτήματά τους είναι η δυσκολία στη διαχείρηση του νερού και ότι το καύσιμο θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα καθαρό με ελάχιστη περιεκτικότητα σε θείο, μονοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία.

Εικόνα 13: Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC)

Στις AFC ο ηλεκτρολύτης είναι το υδροξείδιο του καλίου. Οι θερμοκρασία λειτουργίας του είναι 250°C για υψηλές συγκεντρώσεις KOH και 120°C για χαμηλές συγκεντρώσεις. Στα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά υλικά σαν ηλεκτροκαταλύτες όπως νικέλιο, άργυρος, οξείδια μετάλλων ή ευγενή μέταλλα. Το προτιμώμενο καύσιμο είναι το υδρογόνο, ωστόσο υπάρχουν AFC που χρησιμοποιούν στερεό άνθρακα σαν καύσιμο (DCFC). Τα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή τους απόδοση όταν χρησιμοποιούν υδρογόνο σαν καύσιμο και οξυγόνο ως οξειδωτική ουσία και η πληθώρα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ηλεκτρόδια. Στα μειωνεκτήματά τους συγκαταλέγονται η ευαισθησία τους στο διοξείδιο του άνθρακα και έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας ως οξειδοτική ουσία.



Εικόνα 14: Alkaline fuel cell

Στις PAFC ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το φωσφορικό οξύ. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι 150-220°C. Στα ηλεκτρόδιά του χρησιμοποιείται λευκόχρυσος. Επειδή η χρήση φωσφορικού οξέος με συγκέντρωση 100% μειώνει την πίεση των υδρατμών που παράγονται, δεν υπάρχει πρόβλημα στη διαχείρηση του νερού. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 37-42%. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η αντοχή στο μονοξείδιο του άνθρακα μέχρι και 1% και η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Σαν μειωνεκτήματα μπορούμε να αναφέρουμε την αναγκαία χρήση ακριβών υλικών λόγω ύπαρξης φωσφορικού οξέως το οποίο προκαλεί διαβρώσεις και την χρήση λευκόχρυσου στην κάθοδο επειδή η αντίδραση μείωσης οξυγόνου στην κάθοδο είναι αργή.

Εικόνα 15: Phosphoric Acid fuel cell

Στις MCFC ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζεται από αλκαλικά ανθρακικά άλατα. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 600-700°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία ο ηλεκτρολύτης είναι λιωμένος. Στην άνοδο χρησιμοποιείται νικέλιο και στην κάθοδο οξείδια του νικελίου. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι δυνατή η χρήση υδρογονανθράκων σαν καύσιμο, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να γίνει στο εσωτερικό της κυψέλης. Στα πλεονεκτήματά τους μπορούμε να αναφέρουμε ότι δεν χρειάζονται ακριβά υλικά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, την δυνατότητα χρήσης υδρογονανθράκων ως καύσιμα και την υψηλή τους απόδοση, η οποία ξεπερνάει το 45%. Λόγω τώρα των υψηλών θερμοκρασιών είναι απαραίτητη η χρήση ανθεκτικών υλικών, η κυψέλη έχει μικρή διάρκεια ζωης και η αντίσταση της κυψέλης είναι αρκετά μεγάλη, έτσι η πυκνότητα ισχύος περιορίζεται σε 100-200mW/cm^2.

Εικόνα 16: Molten Carbonate fuel cells

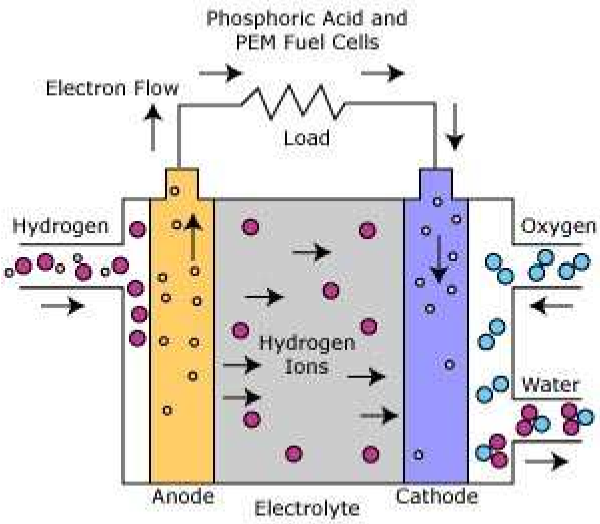
Στις SOFC ο ηλεκτρολύτης είναι κάποιο στερεό, μη πορώδες οξείδιο μετάλλου. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 600-1000°C. Λόγω του στερεού ηλεκτρολύτη δεν υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης, ούτε και «πλημμύρας» του ηλεκτρολύτη (flooding) και επίσης μπορεί να πάρει διάφορα σχήματα. Άλλα πλεονεκτήματά τους είναι ότι τα υλικά τους δεν είναι ιδιαίτερα ακριβά, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές πυκνότητες ρεύματος και οι υψηλές τους αποδόσεις 40-50%. Στα μειωνεκτήματά τους είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας που συνεπάγονται μικρή διάρκεια ζωής υλικών.

Εικόνα 17: Solid oxide fuel cells

Επιλέξαμε για το σύστημά μας μία κυψέλη με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEMFC) λόγω της απλότητας στην λειτουργία της και της πληθώρας επιστημονικών μελετών που υπάρχει για αυτές. [Gregor Hoogers Fuel Cell Technology Handbook, 2003 CRC Press]

4.3: 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 ηλεκτρο-καταλύτης (ηλεκτρόδια) που βρίσκεται ανάμεσα στα δυο παραπάνω στρώματα και οι πλάκες ροής καυσίμου και οξειδωτικής ουσίας και σύνδεσης των κυψελών μεταξύ τους (interconnects και Flowplates).



Εικόνα 18: Λειτουργία PEMFC

4.3.1: Μεμβρανη ανταλλαγης ιοντων (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.

4.3.2: 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 αγώγιμα 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.

4.3.3: 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.

4.3.4: 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.

4.4: Φυσική Εξήγηση της Λειτουργίας μιας PEMFC

Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό μιας PEMFC είναι:

Στην άνοδο : $\mathbf{H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-}$ ή $\mathbf{2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-}$

Στην κάθοδο : $\mathbf{1/2\ O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O}$ ή $\mathbf{O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O}$

Η συνολική αντίδραση είναι: $\mathbf{H_2 + 1/2\, O_2 \rightarrow H_2O}$ ή $\mathbf{2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O}$

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: $W = \Delta G = -nFE$ 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 (TΔS) που «χάνεται» από τις μη αναστρέψιμες μεταβολές τις εντροπίας του συστήματος. Η ποσότητα TΔS 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 $\Delta G° = -nFE°$ 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° = 1.229 V για προϊόν νερό σε υγρή μορφή και E° = 1.18 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 αΑ + βΒ → γΓ + δΔ είναι :

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT*\ln\frac{f_{\Gamma}^{\gamma}*f_{\Delta}^{\delta}}{f_{A}^{\alpha}*f_{B}^{\beta}}$$

όπου f είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται fugacity. Μερικές φορές αναφέρεται και ως δραστηριότητα (activity) που μπορεί να συμβολιστεί με α. Η δραστηριότητα έχει σχέση με τον τρόπο που αλληλεπιδρούν τα μόρια σε ένα μη ιδανικό αέριο. Δίνεται από τον τύπο $\alpha_i = \gamma_i * x_i *p/p_o$. 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 $\gamma_i = 1$, $x_i *p$ είναι η μερική πίεση σε atm και διαιρούμενη με ρo προκύπτει ένα αδιάστατο μέγεθος με τιμή ίση με τη μερική πίεση.

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

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

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 αΑ + βΒ → γΓ + δΔ που αναφέρθηκε παραπάνω.
Συγκεκριμένα για την αντίδραση που συμβαίνει στο εσωτερικό μιας PEMFC ισχύει:

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT * \ln\frac{f_{H_2} * \sqrt{f_{O_2}}}{f_{H_2O}}$$

και

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} * \ln\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} * \sqrt{f_{O_2}}} \qquad \text{ή} \qquad E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} * \ln\frac{f_{H_2} * \sqrt{f_{O_2}}}{f_{H_2O}}$$

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:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} * \ln\frac{p_{H_2} * \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}}$$

[15]

4.5: Υπολογισμός Απόδοσης μιας Κυψέλης Καυσίμου

Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δίνεται από τον τύπο:

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 ΔG = 237.1 KJ/mol και ΔH = 285.8 KJ/mol στους 25°C θερμοκρασία και πίεση 1 atm. Με τις τιμές αυτές προκύπτει η = 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 (KJ/(mol*sec)). Με την ίδια λογική η ενέργεια Gibbs θα εκφράζεται κι αυτή σε μονάδες KJ/(mol*sec). Έτσι προκύπτει:

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

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

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

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.

4.6: Η Χρησιμοποίηση

Η χρησιμοποίηση ενός καυσίμου ορίζεται ως : $u_f = \frac{H_{2_{in}} - H_{2_{out}}}{H_{2_{in}}} = \frac{H_{2_r}}{H_{2_{in}}}$

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:

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

4.7: Υπολογισμός Απωλειών

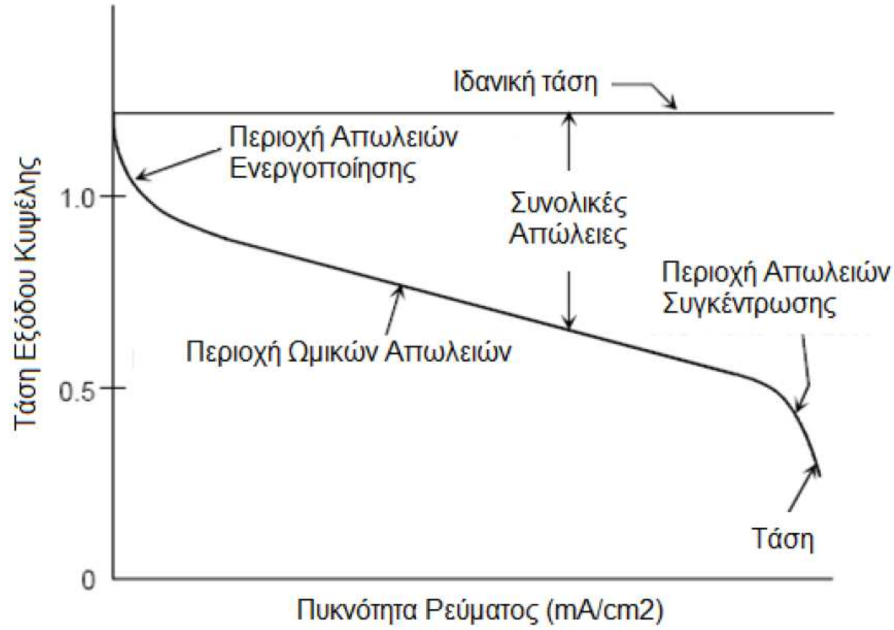
Τα κυριότερα είδη απωλειών είναι πέντε:

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 ηλεκτρο-καταλύτη, 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 ηλεκτρο-καταλύτη και τη μεμβράνη.

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

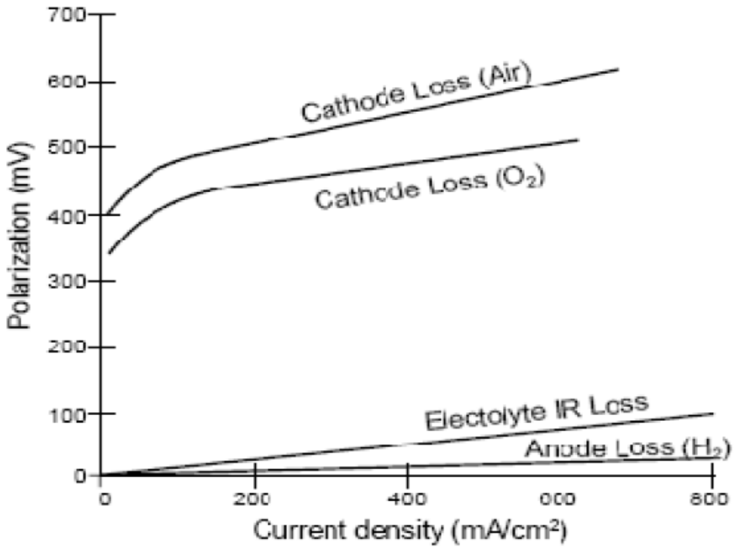


Οι συνολικές απώλειες προκύπτουν αν από το τελικό δυναμικό τις καθόδου, το οποίο προκύπτει από την πρόσθεση των απωλειών ενεργοποίησης και συγκέντρωσης στο δυναμικό της καθόδου, αφαιρέσουμε το δυναμικό της ανόδου, το οποίο επίσης προκύπτει από την πρόσθεση των απωλειών ενεργοποίησης και συγκέντρωσης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

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

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 : $V_{cell} = V_{cathode} - V_{anode} - iR$.

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.

Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση Συστήματος

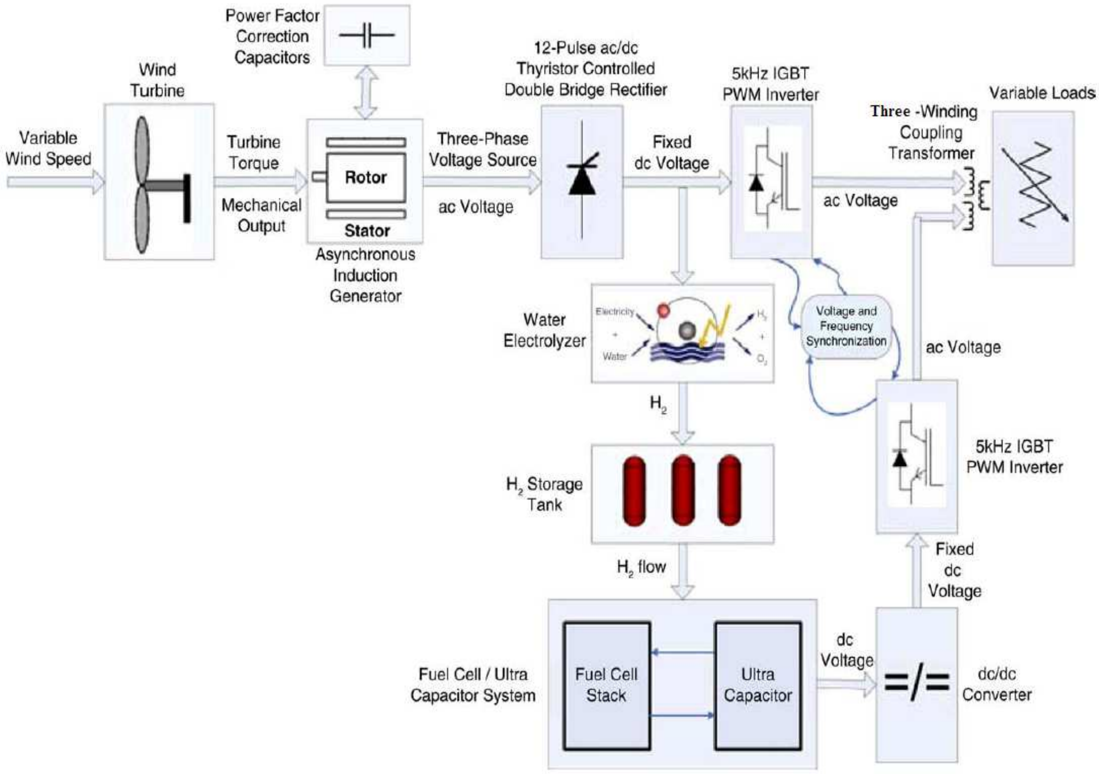
Για την μοντελοποίηση του υβριδικού μας συστήματος χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό simulink της Matlab. Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό simulink είναι ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο το οποίο διευκολύνει πολύ την διαδικασία της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης μιας μεγάλης γκάμας συστημάτων. Η γνώση προγραμματισμού δεν είναι απαραίτητη αλλά διευκολύνει ακόμη περισσότερο την προσομοίωση.

5.1: Λειτουργία συστήματος και παραδοχές

Το σύστημά μας αποτελείται καταρχήν από μία ανεμογεννήτρια μεσαίας ισχύος η οποία στην έξοδό της παράγει ισχύ, ανάλογα βέβαια με την ένταση του ανέμου. Συμπληρωματικά λειτουργεί μία στοίβα από 712 κυψέλες καυσίμου. Εάν η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του χρήστη, τότε συνεισφέρουν και οι κυψέλες καυσίμου στην παραγωγή ενέργειας. Εάν η ανεμογεννήτρια παράγει περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειαζόμαστε, τότε το περίσσευμα ενέργειας αποθηκεύεται, με την μορφή υδρογόνου σε μία δεξαμενή, για μελλοντική χρήση από τις κυψέλες καυσίμου. Σε περίπτωση τώρα που ούτε η ανεμογεννήτρια, ούτε οι κυψέλες καυσίμου δεν μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του χρήστη, υπάρχει και μια δεξαμενή από 148 υπερ-πυκνωτές οι οποίοι συνεισφέρουν και αυτοί συμπληρωματικά.

Το σύστημά μας έχει δύο εισόδους, την ένταση του ανέμου και τη ζήτηση φορτίου του χρήστη. Η απαίτηση της στοίβας κυψελών καυσίμου σε ενέργεια για να είναι συνεχώς σε λειτουργία, έτοιμη να συμβάλλει στην παραγωγή ενέργειας, είναι 2 kW, ενέργεια η οποία παρέχεται από την ανεμογεννήτρια. Η περίσσεια ενέργεια στέλνεται στον ηλεκτρολύτη, ο οποίος χρειάζεται με τη σειρά του 18 kW για να λειτουργήσει, και από εκεί παράγεται υδρογόνο για μελλοντική χρησιμοποίηση από τη στοίβα κυψελών καυσίμου. Παράλληλα αποθηκεύεται ενέργεια και στους υπερ-πυκνωτές από την κυψέλη.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα μοντέλα στο simulink της ανεμογεννήτριας, της στοίβας από κυψέλες καυσίμου, των υπερ-πυκνωτών καθώς και τους μετατροπείς (converters) τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους.[16]



Εικόνα 19: Συνολικό μοντέλο συστήματος

5.2: Το μοντέλο της αιολικής μηχανής

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιεί το μοντέλο μας για τον υπολογισμό της μηχανικής ροπής σε σχέση με τον άνεμο είναι

$$P_m = c_p(\lambda, \beta)\frac{\rho A}{2}\upsilon_{wind}^3 \quad [16][17]$$

Με P_m , η μηχανική ισχύς στην έξοδο της αιολική μηχανής σε Watt (W)

A , το εμβαδόν κάλυψης της πτερωτής σε m^2

C_p , ο συντελεστής χρησιμοποίησης της ανεμογεννήτριας

λ, ο λόγο 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/m^3

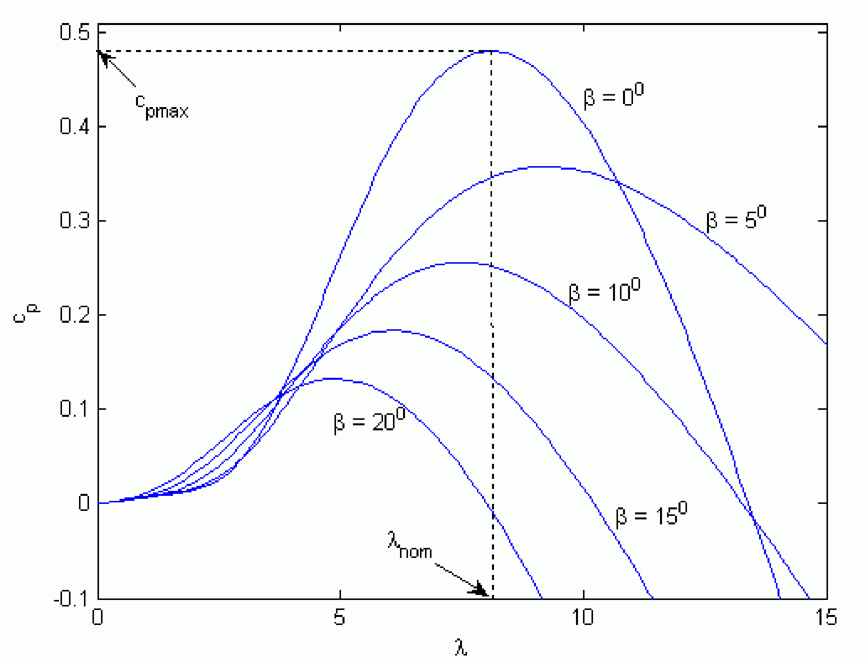
υ_{wind} , η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

Για τον υπολογισμό του C_p χρησιμοποιείται η εξίσωση [16]

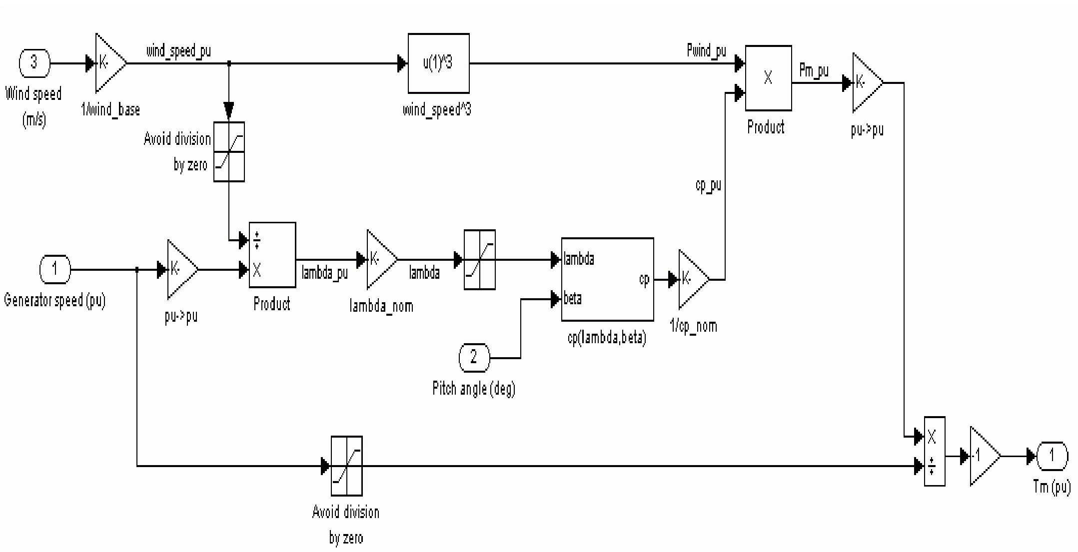
$$c_p(\lambda, \beta) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda$$

Με το λ_i να 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 C_p 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}). [18]



Το μοντέλο simulink για την ανεμογεννήτρια είναι το ακόλουθο

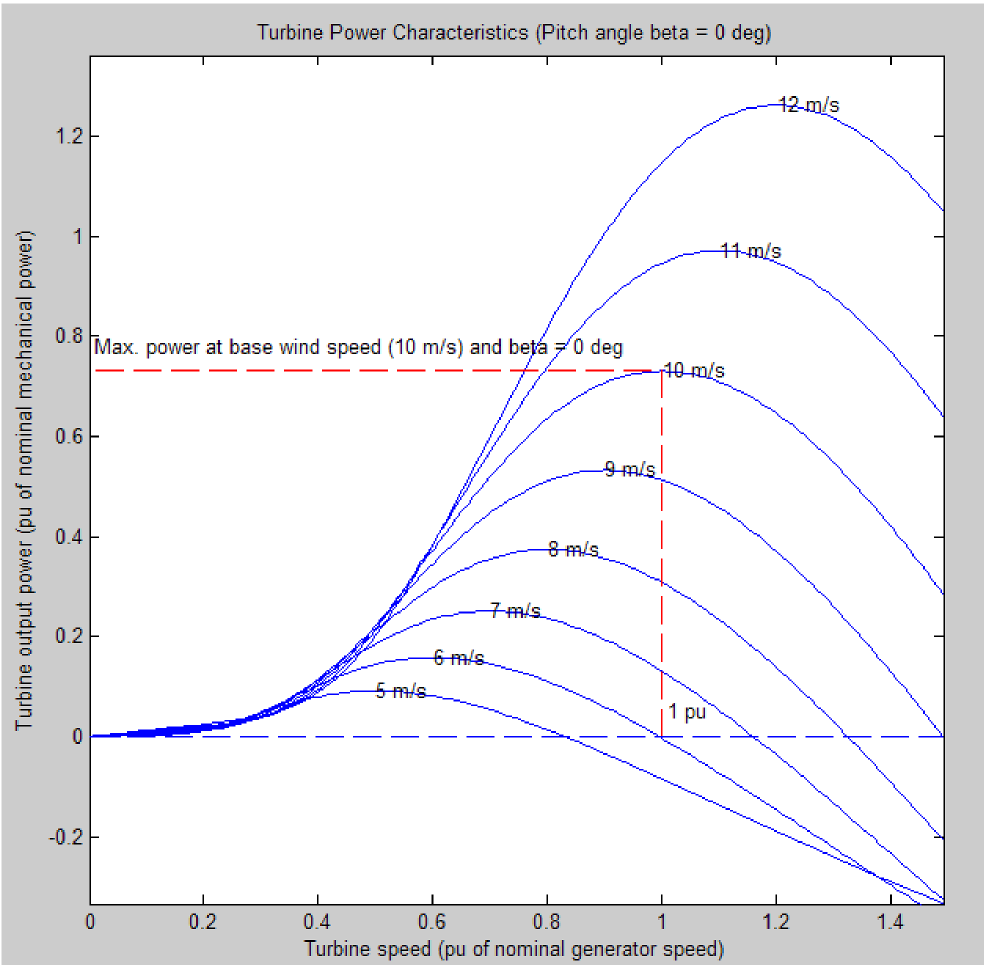


Εικόνα 20: μοντέλο simulink ανεμογεννήτριας

[16]

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^{o}. 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*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 β=0 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα: [18]



5.2.1: Ασύγχρονη γεννήτρια

Για να μοντελοποιήσουμε την ασύγχρονη γεννήτρια της αιολικής μηχανής χρησιμοποιούμε το block του simulink, asynchronous machine.
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

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

με n_s τον αριθμό των σύγχρονων περιστροφών ανά λεπτό,
p, τον αριθμό των ζευγών πόλων της ασύγχρονης μηχανής
f_n, την ονομαστική συχνότητα και
ω_m, την 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 Tm 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

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

με H την σταθερά συνδυασμένης αδράνειας φορτίου και ρότορα,
T_e την ηλεκτρομαγνητική ροπή,
F τον συντελεστή συνδυασμένης τριβής μεταξύ ρότορα και φορτίου,
θ_m την γωνιακή θέση του ρότορα

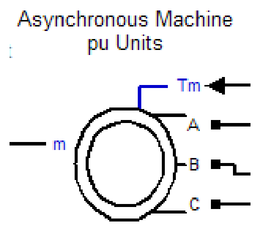
Η σχέση μεταξύ της τάσης που παράγεται στον στάτορα και της τελικής τάσης στην έξοδο της γεννήτριας είναι $V_s = E_s - (R'_s + j2\pi f L'_s)I_s$, με

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.

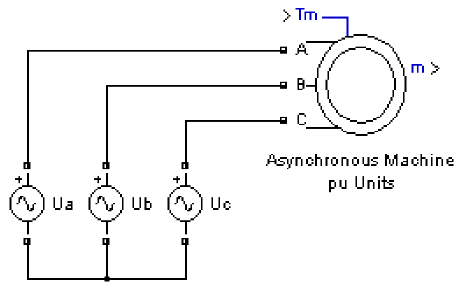
Τέλος η ενεργός ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο

$$P_e = 3\frac{E_s V_s}{\sqrt{R'^2_s + (2\pi f L'_s)^2}} \sin\delta.$$ όπου δ, η γωνία της ισχύος.

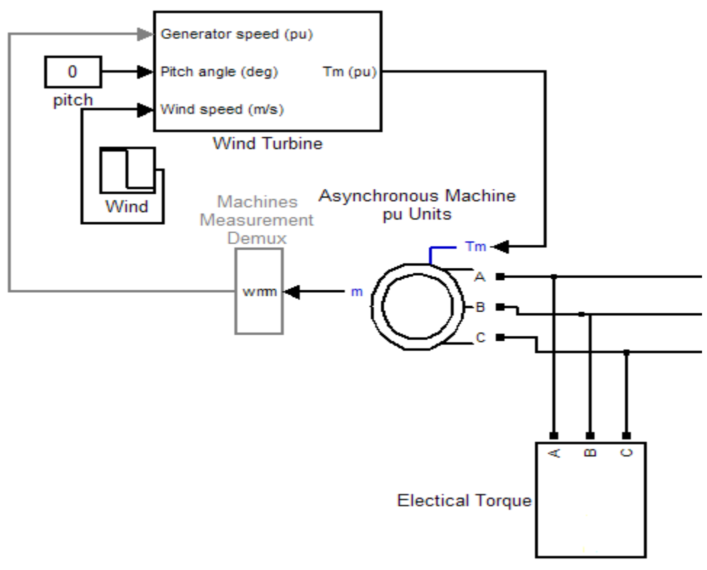
Η ασύγχρονη μηχανή του Simulink έχει μία είσοδο η οποία είναι η μηχανική ροπή η οποία ενεργεί πάνω στην μηχανή σε μονάδες p.u., τρεις εξόδους οι οποίες αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις της παραγόμενης τάσης καθώς μία έξοδο m την οποία αντιστοιχούμε με την χρήση ενός demux στην γωνιακή ταχύτητα του ρότορα,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



Για να δουλέψει μια ασύγχρονη γεννήτρια, εκτός από μηχανική ροπή, είναι απαραίτητο στα άκρα της να υπάρξει και μία ηλεκτρική διέγερση. Στην πράξη αυτή η διέγερση 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 όσων αφορά την διέγερση της γεννήτριας, η ηλεκτρική ισχύς πρέπει να παρέχεται από τριφασική ηλεκτρική γεννήτρια σε τοπολογία αστέρα.

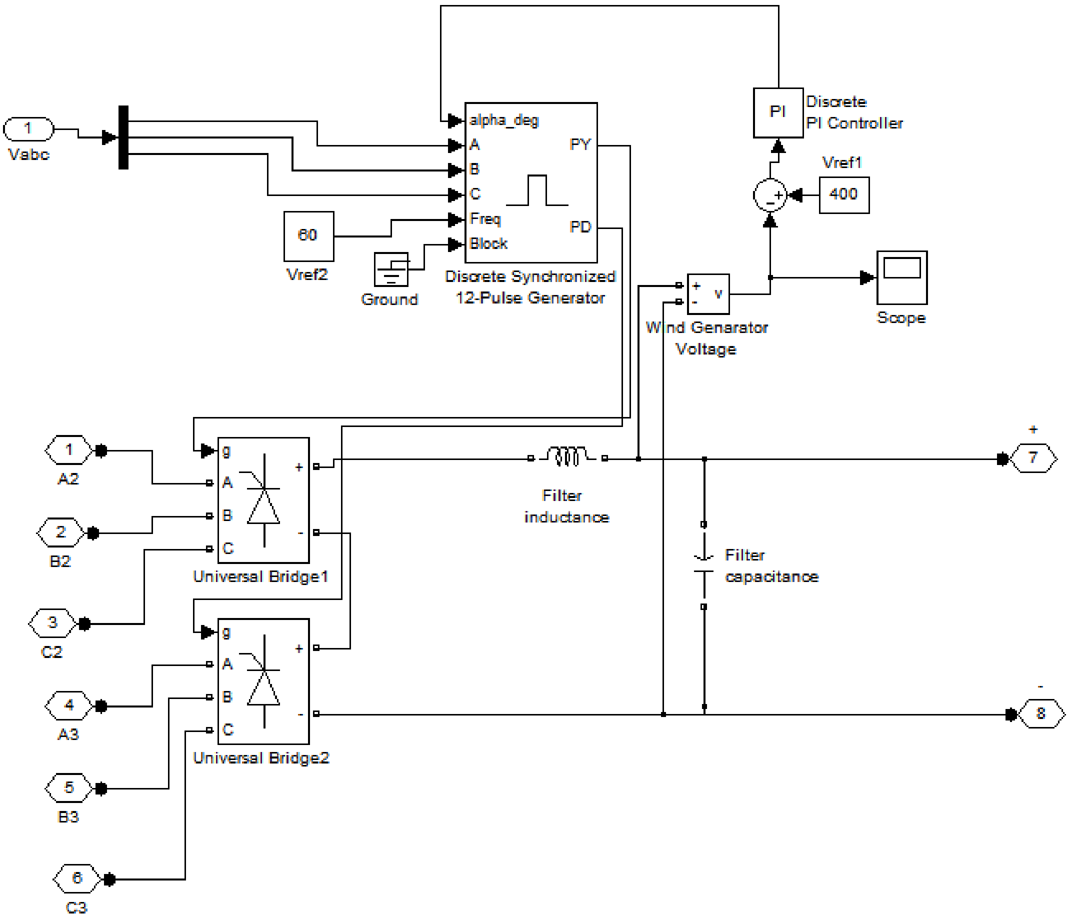


Το τελικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας είναι το παρακάτω



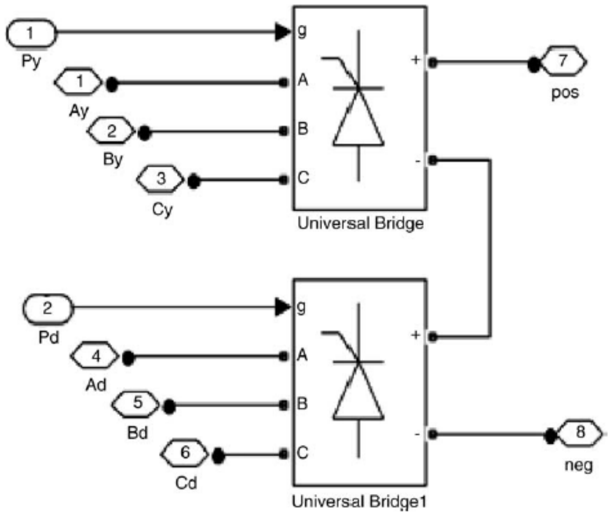
5.2.2: Ο AC/DC Μετατροπέας

Το μοντέλο του ac/dc μετατροπέα είναι το ακόλουθο:

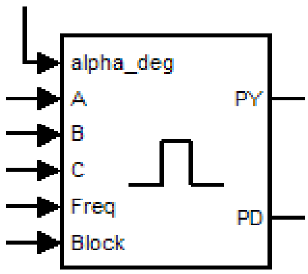


[16]

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.

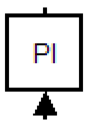


Για την παραγωγή των παλμών οι οποίοι ελέγχουν τον μετατροπέα χρησιμοποιήσαμε μία 12-παλμική γεννήτρια παλμών.



Discrete Synchronized
12-Pulse Generator

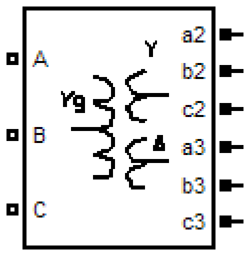
Το πλάτος των παλμών του block ρυθμίστηκε στις 80^{o} και η συχνότητα αναφοράς της εισόδου στα 60 Hz.Η γωνία των παλμών της γεννήτριας ελέγχεται από έναν PI ελεγκτή ο οποίος είναι ρυθμισμένος έτσι ώστε να κρατάει την dc τάση στην έξοδο του συστήματος σταθερή στα 400 V.



Discrete
PI Controller

Ο PI ελεγκτής δέχεται σαν είσοδό του την διαφορά της dc τάσης του μετατροπέα από την τάση αναφοράς, η οποία στην περίπτωσή μας είναι τα 400 V τα οποία θέλουμε να έχουμε στην έξοδο.

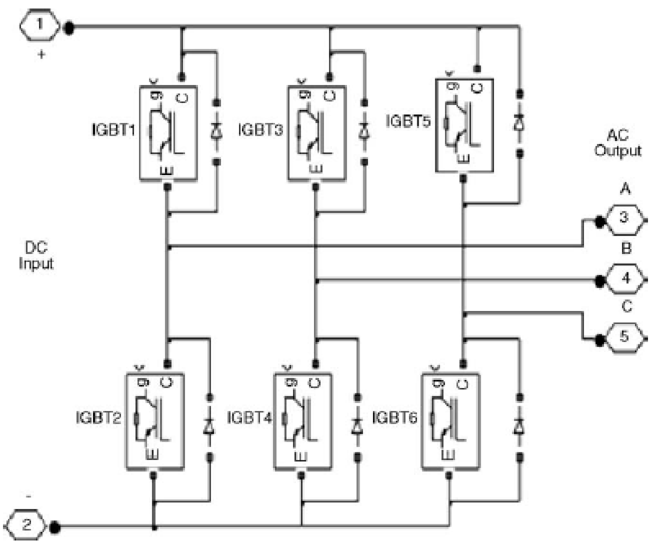
Το block three phase transformer που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω:



Three-Phase
Transformer
(Three Windings)

5.2.3: Ο DC/AC μετατροπέας

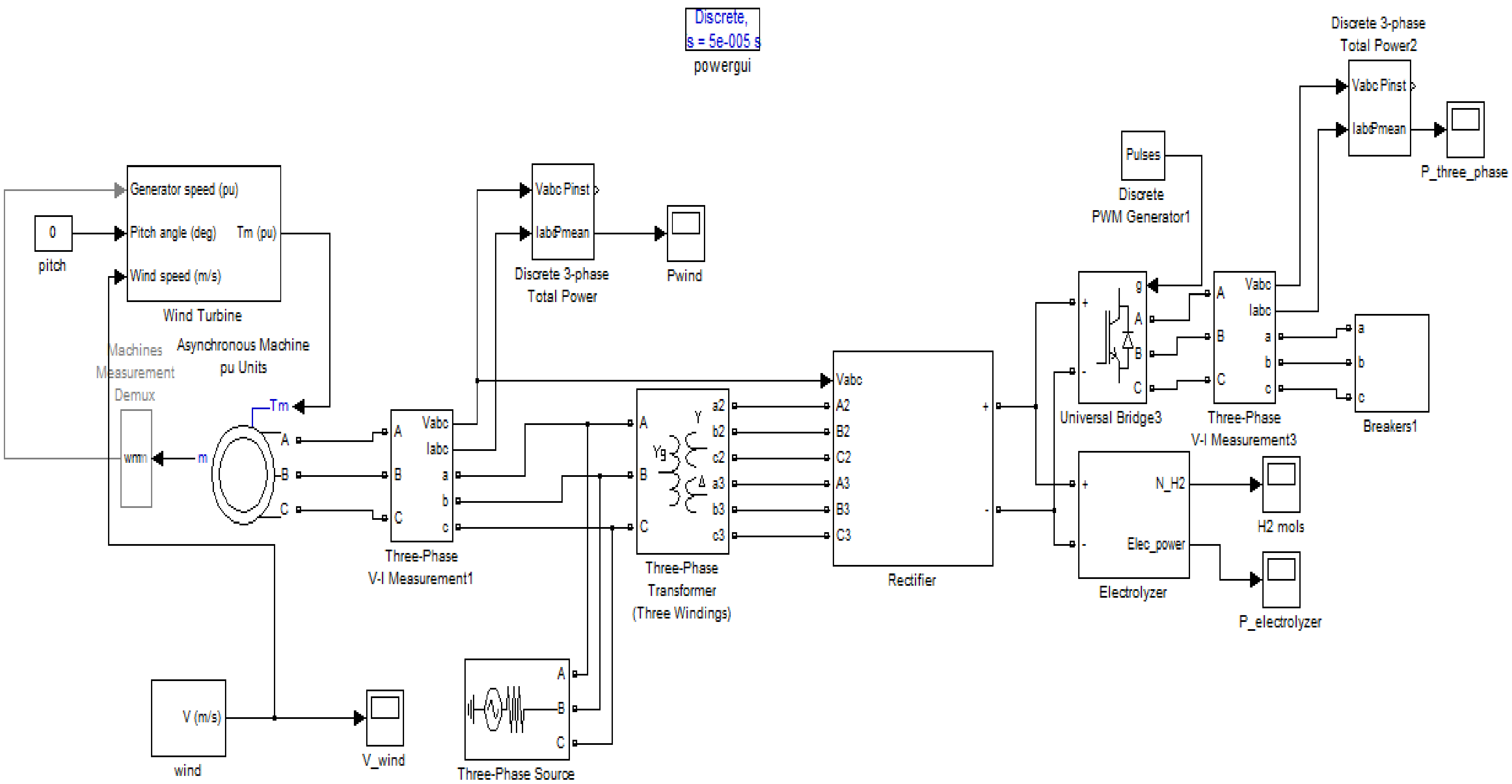
Αφού αποφύγαμε τις διακυμάνσεις στις τάσεις της γεννήτριας το ρεύμα μετατρέπεται πάλι σε ac με τη βοήθεια ενός dc/ac μετατροπέα. Η τοπολογία του είναι η ακόλουθη: [16][19]



Για την παραγωγή σημάτων ελέγχου χρησιμοποιείται μία γεννήτρια παλμών PWM discrete generator στο μοντέλο του τριφασικού IGBT inverter.

5.2.4: Συνολικό μοντέλο ανεμογεννήτριας

Τέλος το συνολικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας είναι το ακόλουθο:


Discrete,
s = 5e-005 s
powergui
Generator speed (pu)
Pitch angle (deg)
Tm (pu)
Wind speed (m/s)
0
pitch
Wind Turbine
Machines
Measurement
Demux
wmm
Asynchronous Machine
pu Units
Tm
m
A
B
C
Vabc
Iabc
a
b
c
Three-Phase
V-I Measurement1
Vabc Pinst
IabcPmean
Discrete 3-phase
Total Power
Pwind
Yg
Y
Δ
a2
b2
c2
a3
b3
c3
Three-Phase
Transformer
(Three Windings)
Three-Phase Source
V (m/s)
wind
V_wind
Vabc
A2
B2
C2
A3
B3
C3
+
-
Rectifier
Pulses
Discrete
PWM Generator1
g
Universal Bridge3
Three-Phase
V-I Measurement3
Discrete 3-phase
Total Power2
P_three_phase
Breakers1
N_H2
Elec_power
Electrolyzer
H2 mols
P_electrolyzer

5.3: Το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου

5.3.1: Η στοίβα κυψελών καυσίμου

Η στοίβα των κυψελών καυσίμου δέχεται σαν είσοδο το dc ρεύμα της κυψέλης και βγάζει στην έξοδο τη συνολική τάση. Το υδρογόνο το οποίο καταναλώνεται υπολογίζεται με βάση την εξίσωση $H^2 = N_o * I_{FC}/(2*F*U)$ 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 75 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

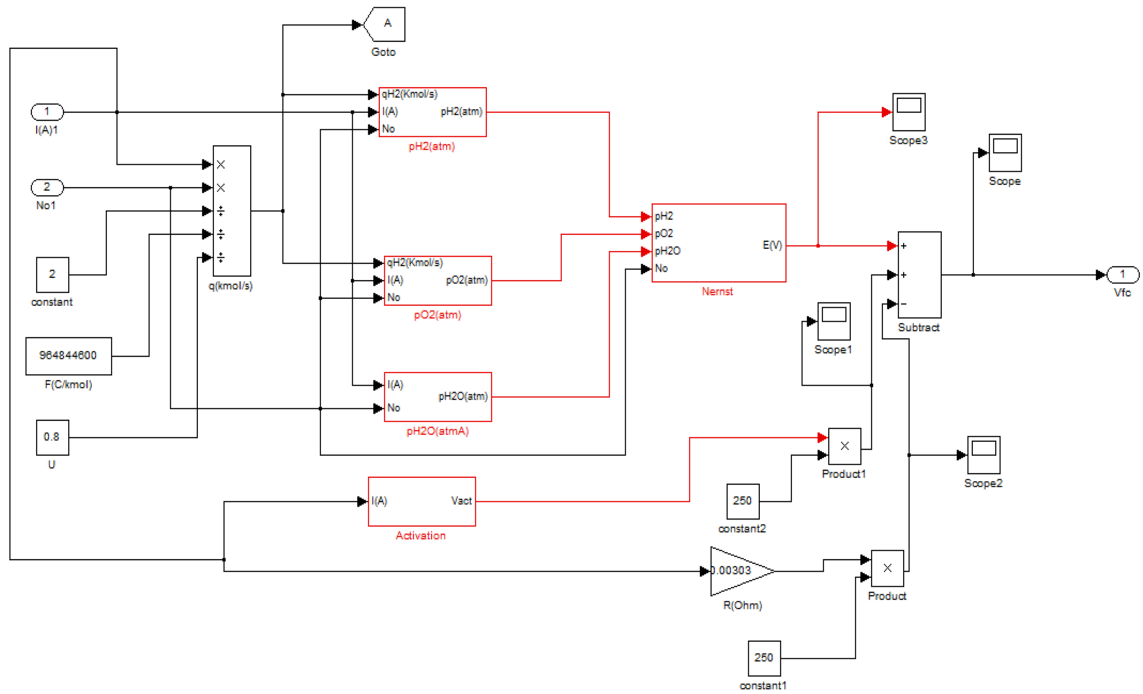
Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη εμπειρική τιμή χρησιμοποίησης (U = 0.8) είναι για να γίνει προσομοίωση της κυψέλης με βάση τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες λειτουργούν οι κυψέλες καυσίμου. Αν η χρησιμοποίηση είναι μεγάλη (>1.2) υπάρχει κίνδυνος να λιώσει η κυψέλη ενώ αν είναι υπερβολικά μικρός δεν γίνεται κατανάλωση υδρογόνου μέσα στην κυψέλη.[20][21]

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

E^o, 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_{H2}, η πίεση του υδρογόνου σε atm
P_{O2}, η πίεση του οξυγόνου σε atm και
P_{H2O}, 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:

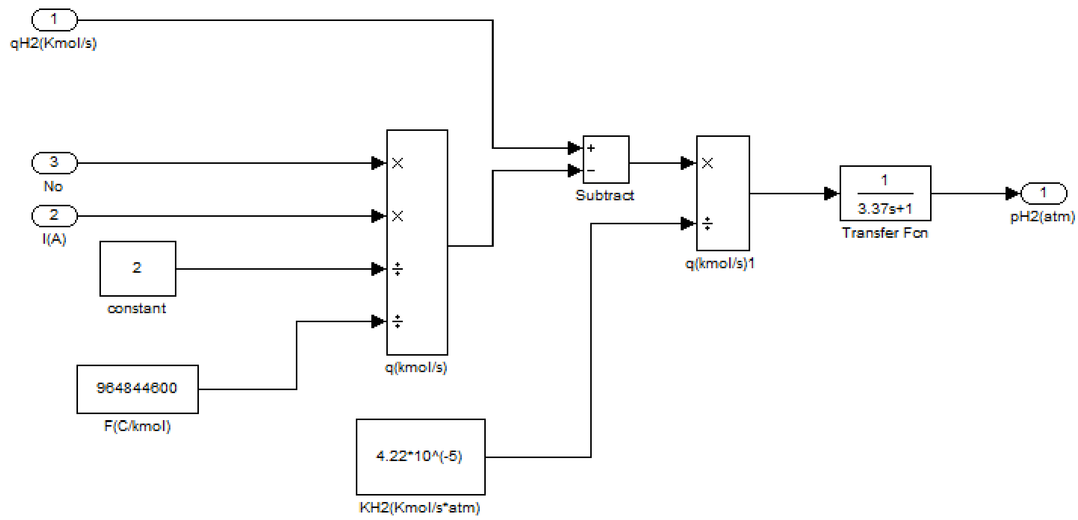


Ο υπολογισμός της πίεσης του υδρογόνου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

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

KH2 , σταθερά βαλβίδας υδρογόνου , $4.7955*10^{-7}$ kmol/(atm*s)
τH2 , χρονική σταθερά υδρογόνου , 3.37 sec
q^{in}H2 , ρυθμός ροής εισόδου υδρογόνου kmol/sec
q^{r}H2 , ρυθμός με τον οποίο αντιδρά το υδρογόνο

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

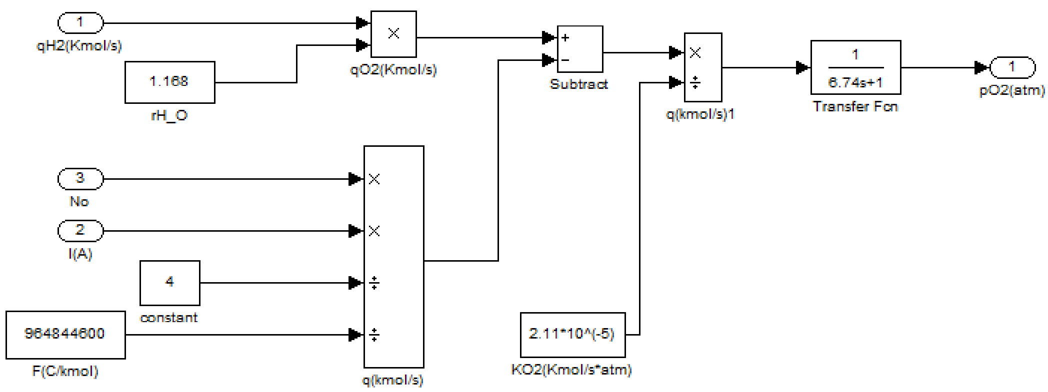


Ο υπολογισμός της πίεσης του οξυγόνου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

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

K_{O2} , σταθερά βαλβίδας οξυγόνου , $2.11*10^{-5}$ kmol/(atm*s)
τ_{O2} , χρονική σταθερά οξυγόνου , 6.74 sec
q^{in}_{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

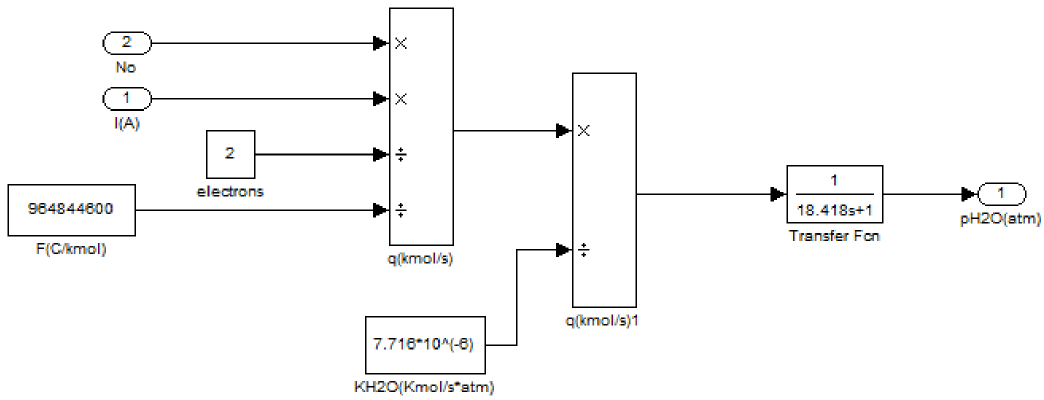


Ο υπολογισμός της πίεσης του νερού γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

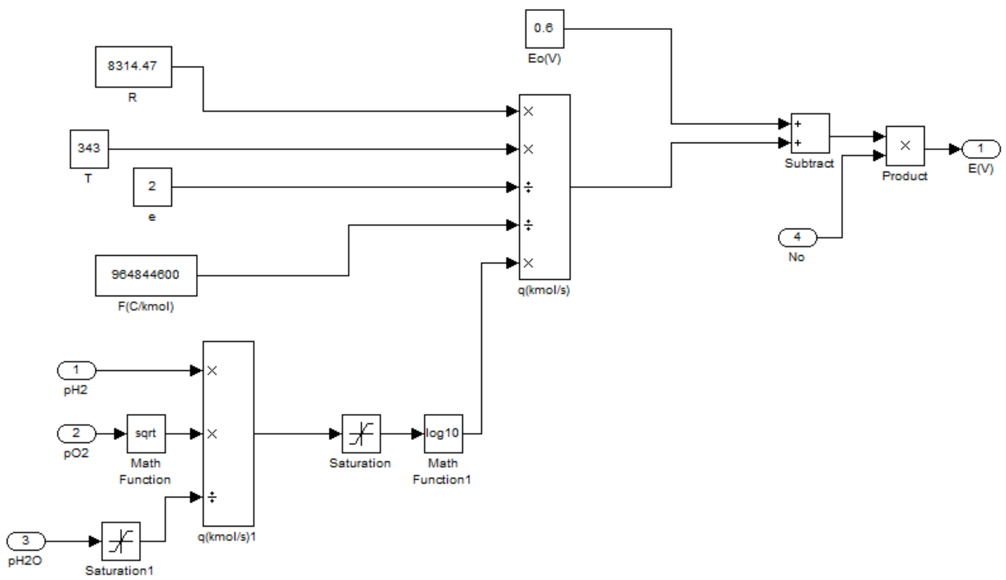
$$p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1+\tau_{H_2O}s}(q^{in}_{H_2O} - q^{r}_{H_2O}) \text{ , όπου} \qquad \tau_{H_2O} = \frac{V_c}{K_{H_2O}RT} [s] \text{ και } q^{r}_{H_2O} = - \frac{I}{2F}$$

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

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

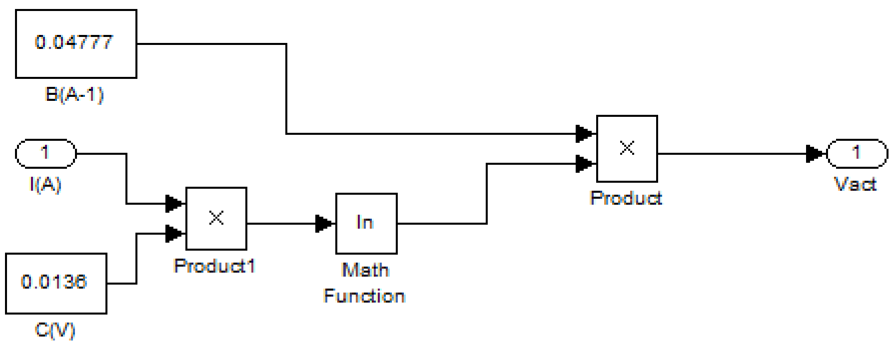


Έχοντας υπολογίσει τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού μπορούμε με την εξίσωση του Nernst να υπολογίσουμε την τάση E της κυψέλης. Ο υπολογισμός της τάσης E φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



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



5.3.2: Ο ηλεκτρολύτης

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

$$H_2O(l) + \text{electrical energy} \Rightarrow H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g).$$

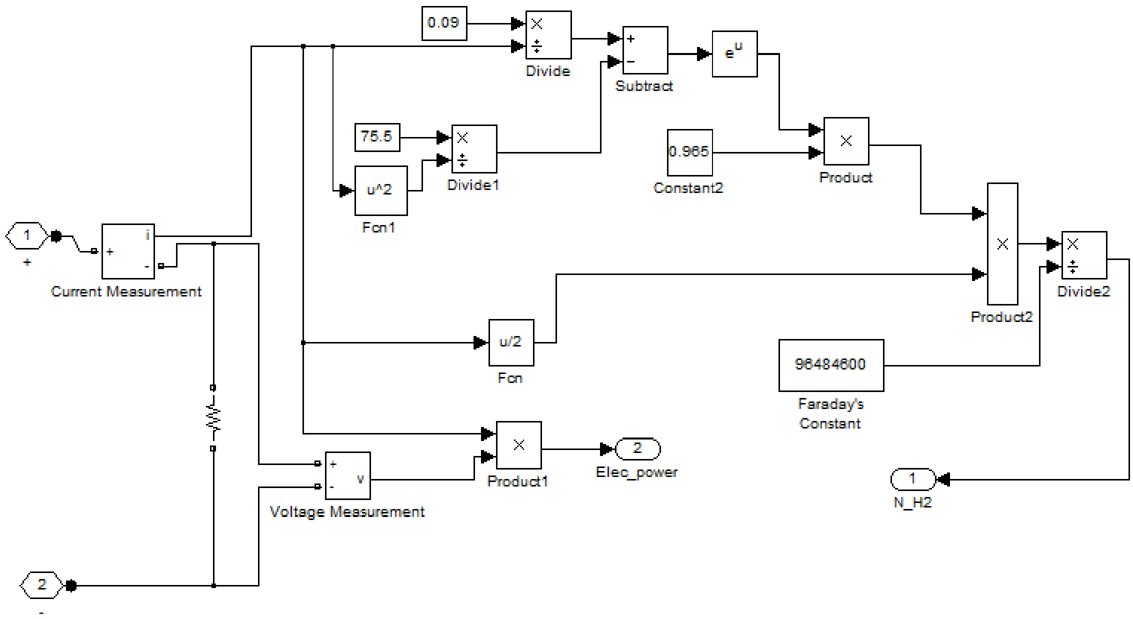
Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου από έναν ηλεκτρολύτη είναι ανάλογος του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο τον διαπερνά σύμφωνα με τον

τύπο $n_{H_2} = \frac{\eta_F n_C i_e}{2F}$ με

F , την σταθερά Faraday
i_e, την ένταση του ρεύματος
n_c, τον αριθμό των ηλεκτρολυτών σε σειρά
n_F, η απόδοση Faraday
n_{H2}, 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^{O}C , η απόδοση Faraday εκφράζεται ως

$\eta_F = 96.5e^{(0.09/i_e - 75.5/i_e^2)}$. 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 για θερμοκρασίες μεταξύ 39 και 52^{o}C. Στο μοντέλο αυτό ο ηλεκτρολύτης έχει σημείο λειτουργίας τα 45A και 50V. Η είσοδος του ηλεκτρολύτη είναι η σταθερή dc τάση του η οποία έχει σταθερή τιμή 400 V.

5.3.3: 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.

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)

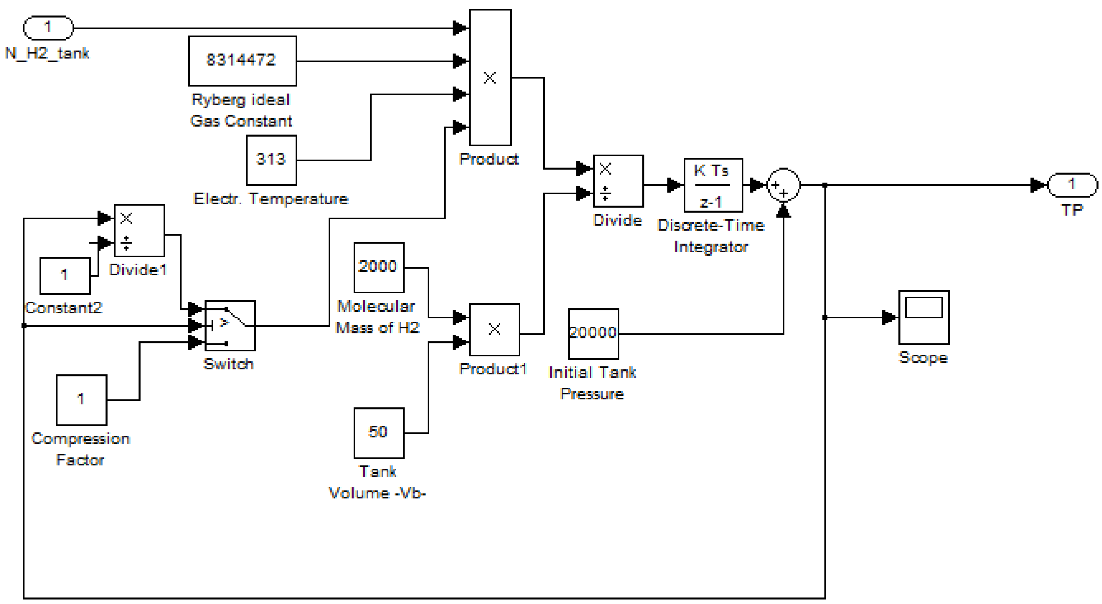
N_{H2}, τα mol υδρογόνου τα οποία παραδίδονται στην δεξαμενή από το σύστημα ανά δευτερόλεπτο (kmol/sec)

R , σταθερά του Rydberg για τα ιδανικά αέρια , 8314472 J/(kmol ^{o}K)

T_b , η θερμοκρασία λειτουργίας της δεξαμενής , 313 ^{o}K

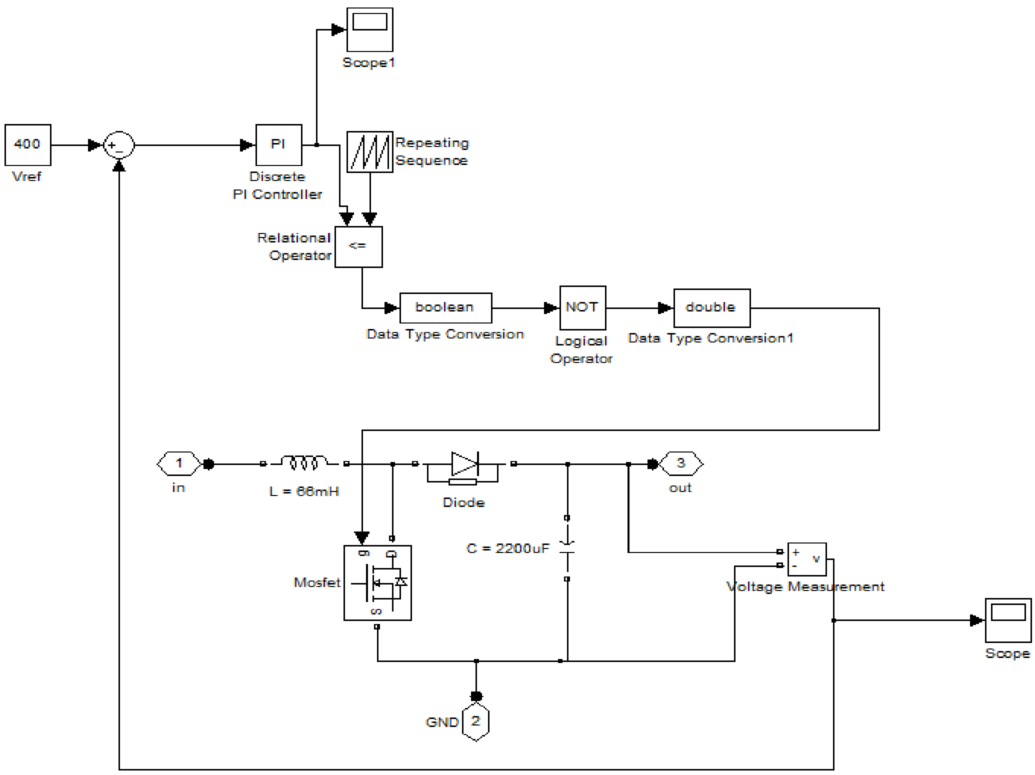
Vb , όγκος της δεξαμενής , 50 lt
M_{H2}, μοριακή μάζα υδρογόνου , 2 gr/mol
Z , συντελεστής συμπίεσης αερίου σαν συνάρτηση της πίεσης

Ο παράγοντας z εκφράζει τις απώλειες της καταστατικής εξίσωσης καθώς το H_2 δεν είναι ιδανικό αέριο. Για τα ιδανικά αέρια z=1. Εφόσον η θερμοκρασία παραμένει σταθερή , ο z αυξάνεται όσο αυξάνεται η πίεση. [24]
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:



5.3.4: O dc/dc boost converter

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:



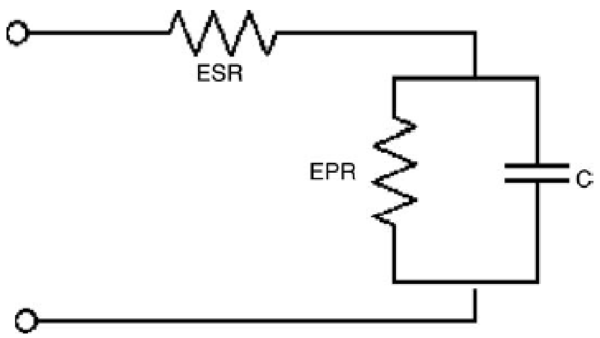
5.3.5: Ο dc/ac converter

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).

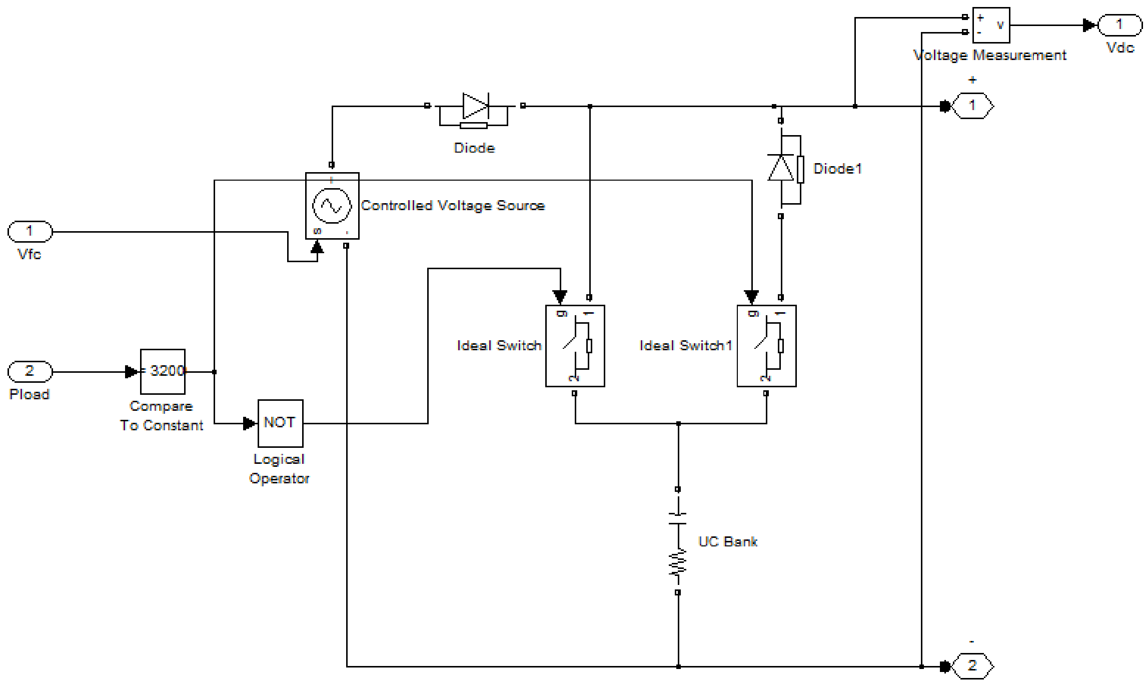
5.3.6: Οι υπερ-πυκνωτές

Το κλασσικό ισοδύναμο μοντέλο ενός υπέρ-πυκνωτή είναι το ακόλουθο

[16]

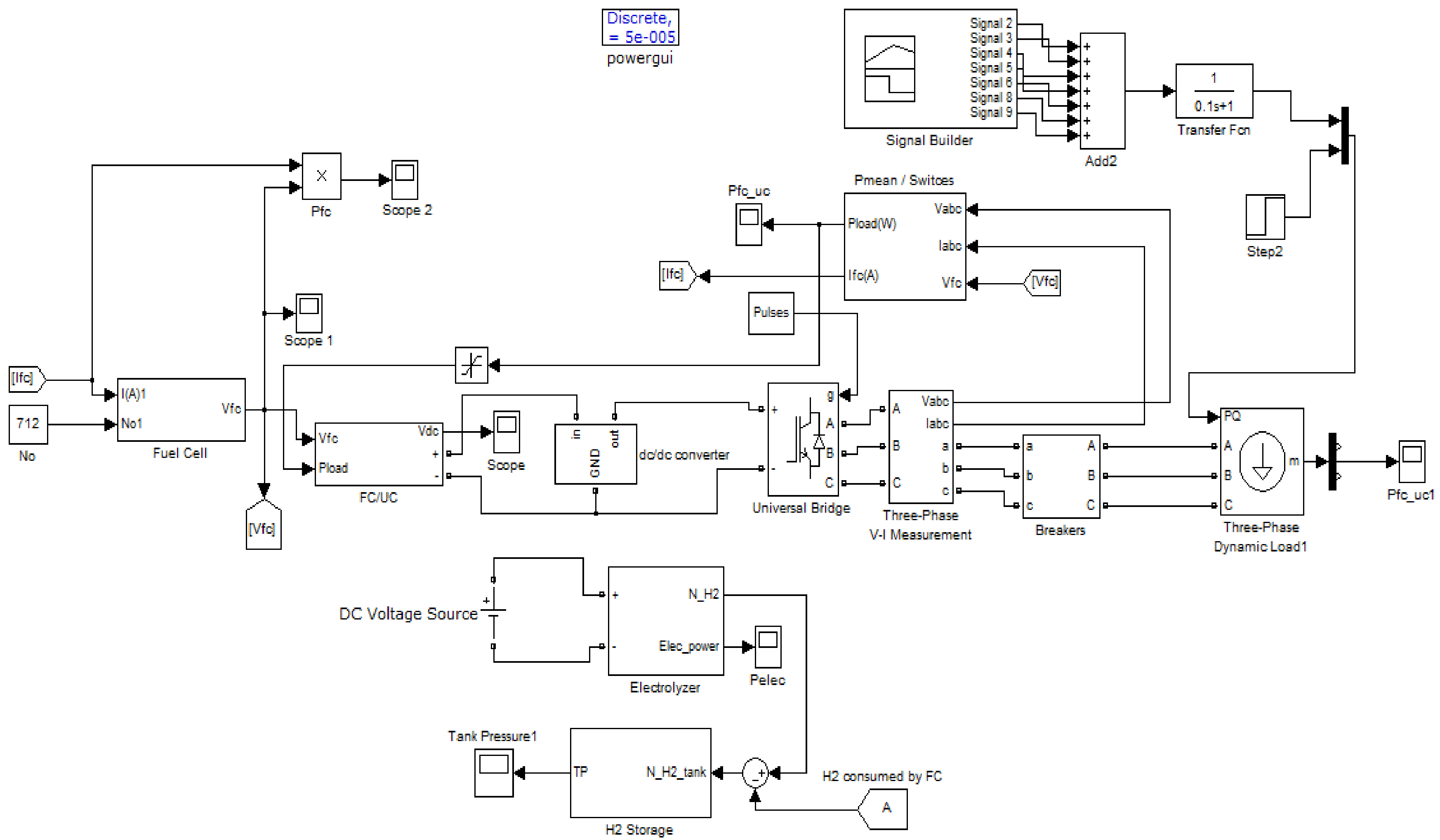


με C, την συνολική χωρητικότητα του πυκνωτή, ESR, την ισοδύναμη σειριακή αντίσταση και EPR, την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση. Η ESR αντίσταση αντιπροσωπεύει την αντίσταση του πυκνωτή κατά την φόρτιση και εκφόρτιση του ενώ η EPR αντίσταση αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας του πυκνωτή λόγω διαρροής και επηρεάζει μόνο της μακροχρόνια χρήση του. [22][23]
Το ποσό ενέργειας το οποίο παρέχουν οι πυκνωτές δίνεται από τον τύπο
$E_{\mathrm{UC}} = \frac{1}{2}C(V_{\mathrm{i}}^2 - V_{\mathrm{f}}^2)$ όπου Vi η αρχή τάση πριν ξεκινήσει η εκφόρτιση τους και V_f η τελική τάση μόλις τελειώσει η εκφόρτιση. [22]
Στο σύστημά μας ο τρόπος με τον οποίο η κυψέλη καυσίμου και οι πυκνωτές μοιράζονται την ζήτηση φορτίου καθορίζεται με την χρήση διακοπτών . 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 μπορούνε να δώσουνε 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:



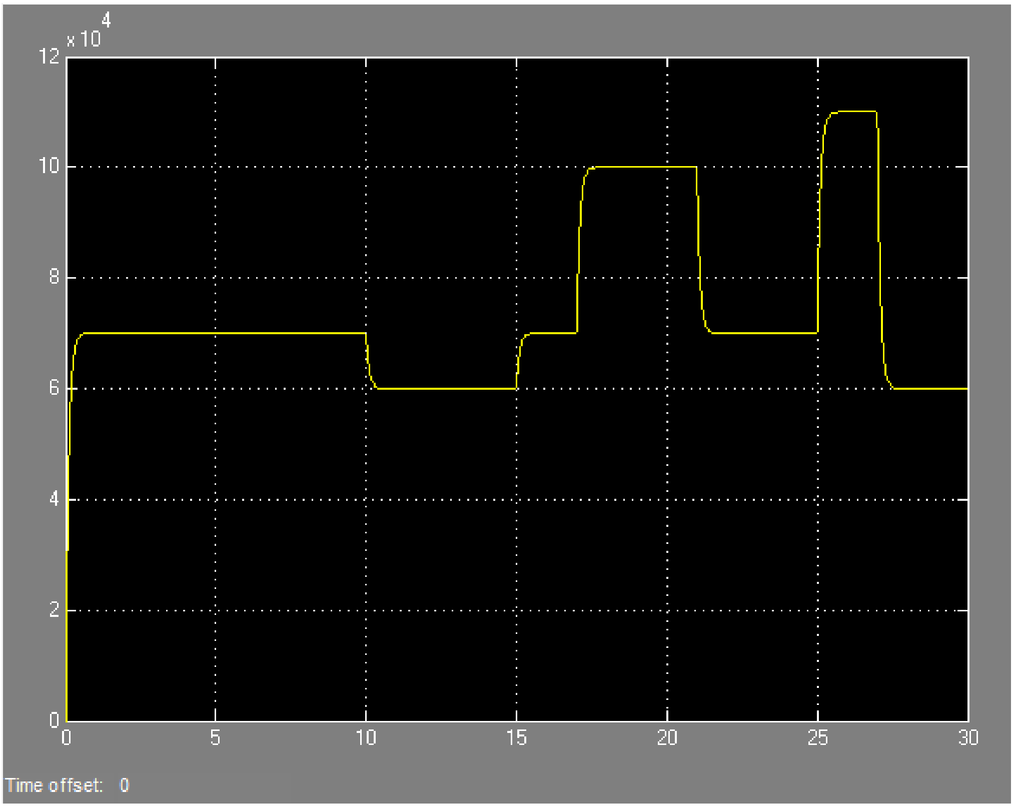
5.3.7: Το συνολικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου

Το συνολικό μοντέλο του συστήματος της κυψέλης καυσίμου 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.

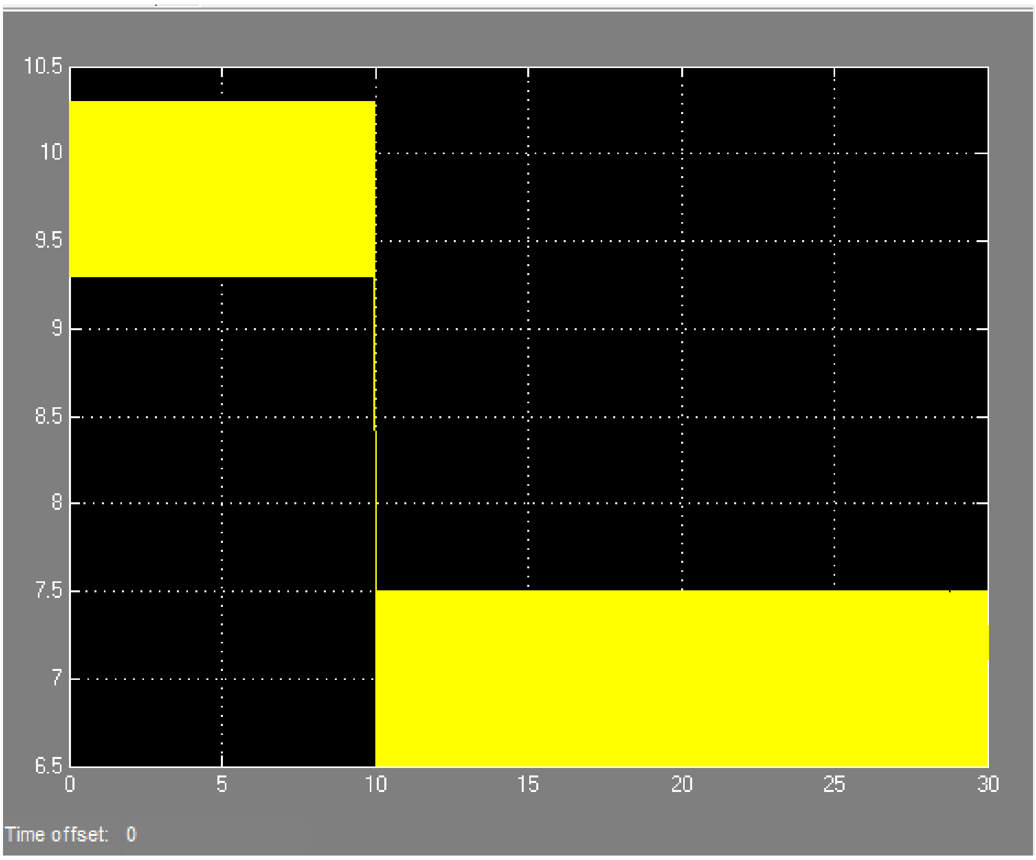

Discrete,
= 5e-005
powergui
Signal 2
Signal 3
Signal 4
Signal 5
Signal 6
Signal 8
Signal 9
Signal Builder
Add2
1
0.1s+1
Transfer Fcn
Step2
Pfc
Scope 2
Pfc_uc
Pmean / Switces
Pload(W)
Vabc
Iabc
Ifc(A)
Vfc
[Ifc]
[Vfc]
Pulses
Scope 1
I(A)1
No1
Vfc
Fuel Cell
712
No
FC/UC
Pload
Vdc
Scope
in
out
GND
dc/dc converter
Universal Bridge
g
Three-Phase
V-I Measurement
Breakers
PQ
m
Three-Phase
Dynamic Load1
Pfc_uc1
DC Voltage Source
N_H2
Elec_power
Electrolyzer
Pelec
Tank Pressure1
TP
N_H2_tank
H2 Storage
H2 consumed by FC
A

Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση Συστήματος

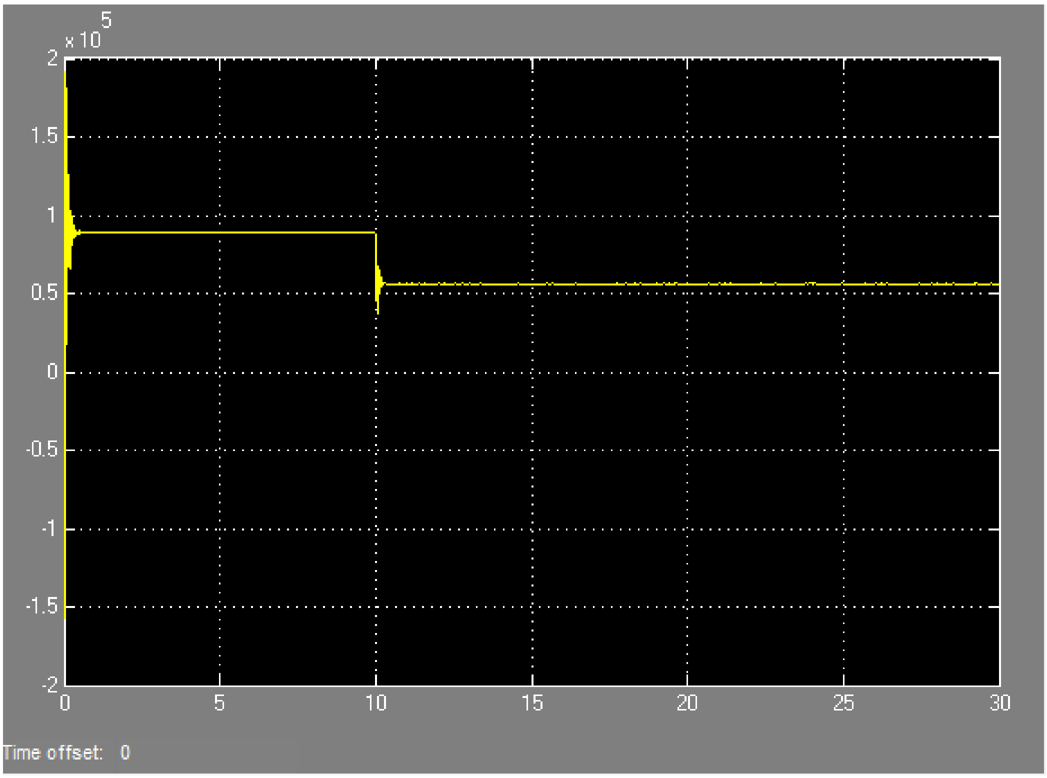
Η συνολική ζήτηση φορτίου του χρήστη κυμαίνεται από 60kW μέχρι 120kW σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα [16]



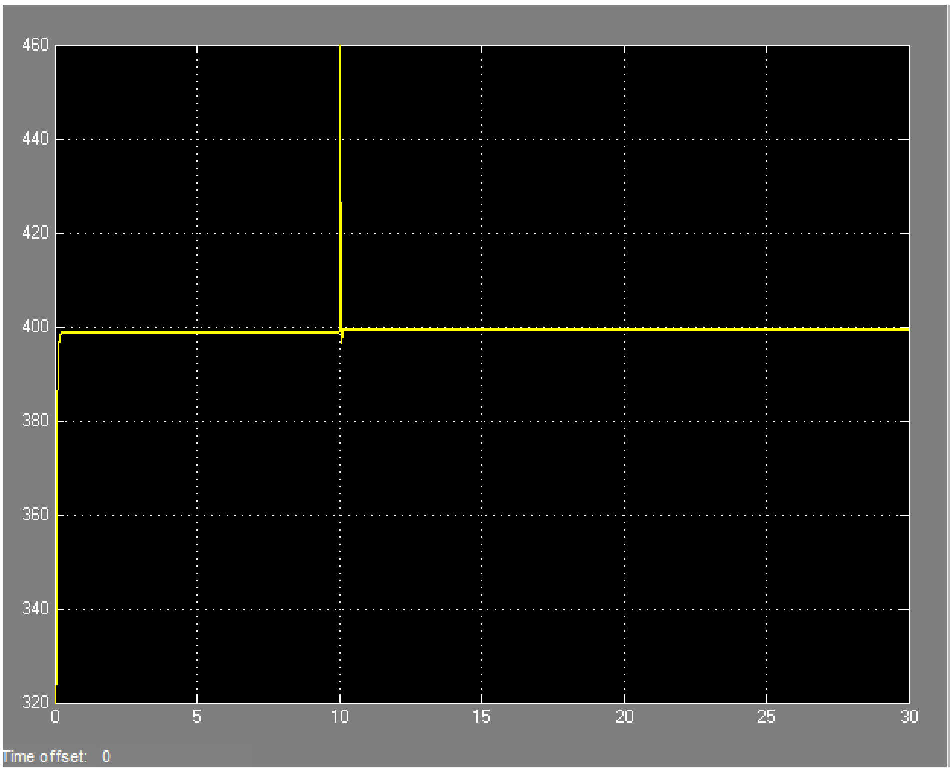
Όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, χρησιμοποιήθηκε μία μέτρηση 30 δευτερολέπτων στην οποία συμβαίνει μία σημαντική πτώση μετά το δέκατο δευτερόλεπτο



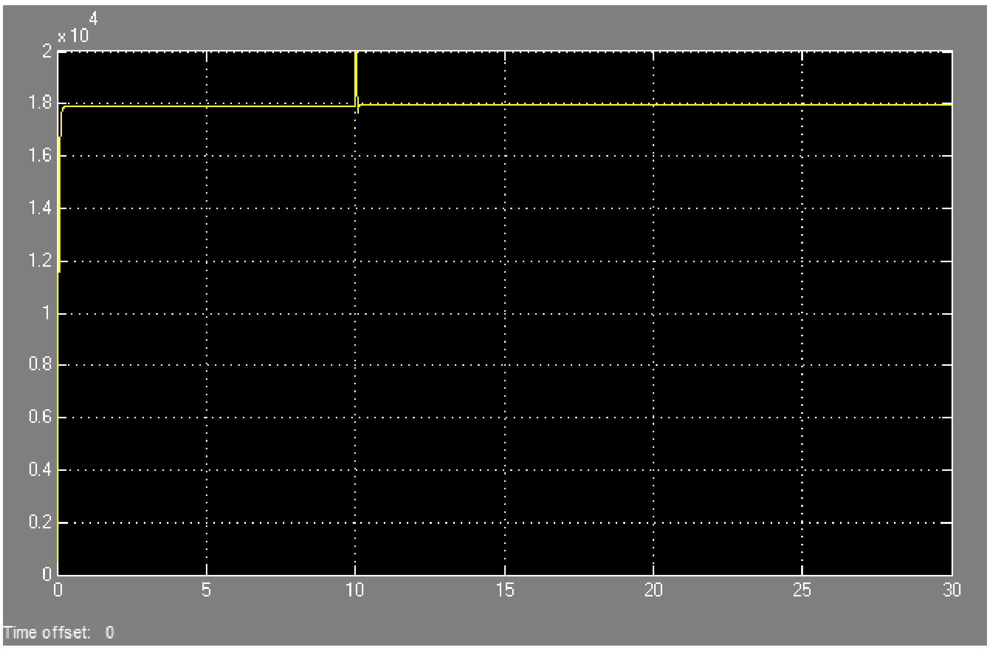
Η ισχύς η οποία παράγεται από την ανεμογεννήτρια για την συγκεκριμένη κατανομή ανέμου είναι η εξής



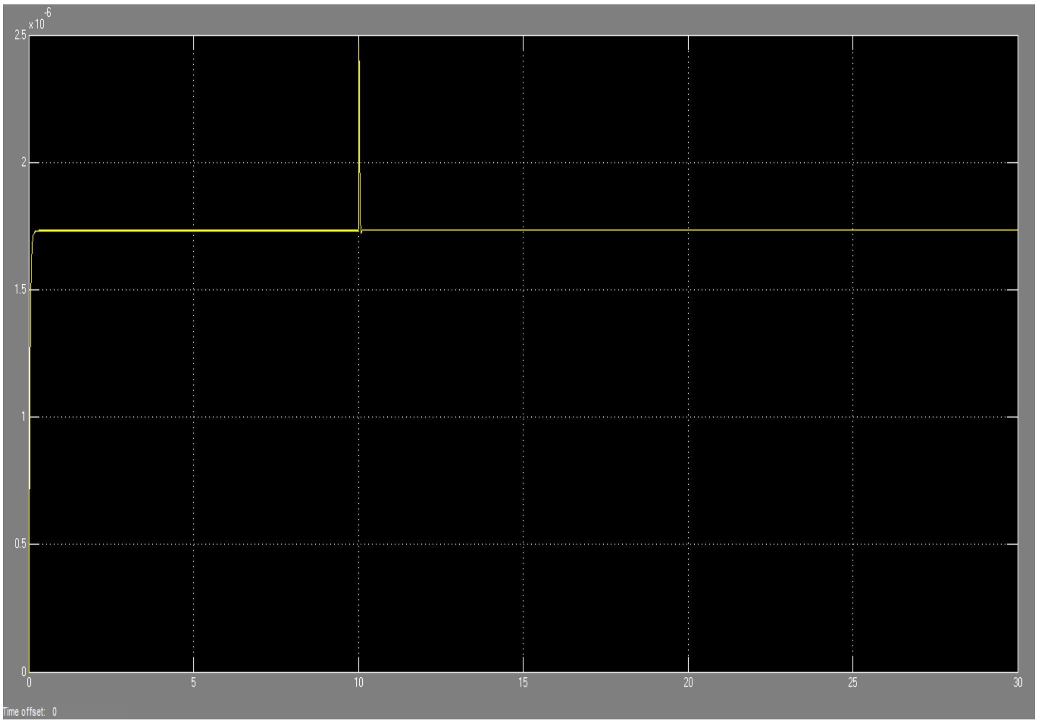
Η τάση η οποία φτάνει στον ηλεκτρολύτη είναι σταθερή και είναι της τάξης των 400V μετά από την μετατροπή που γίνεται στον ανορθωτή κυκλώματος της ανεμογεννήτριας.



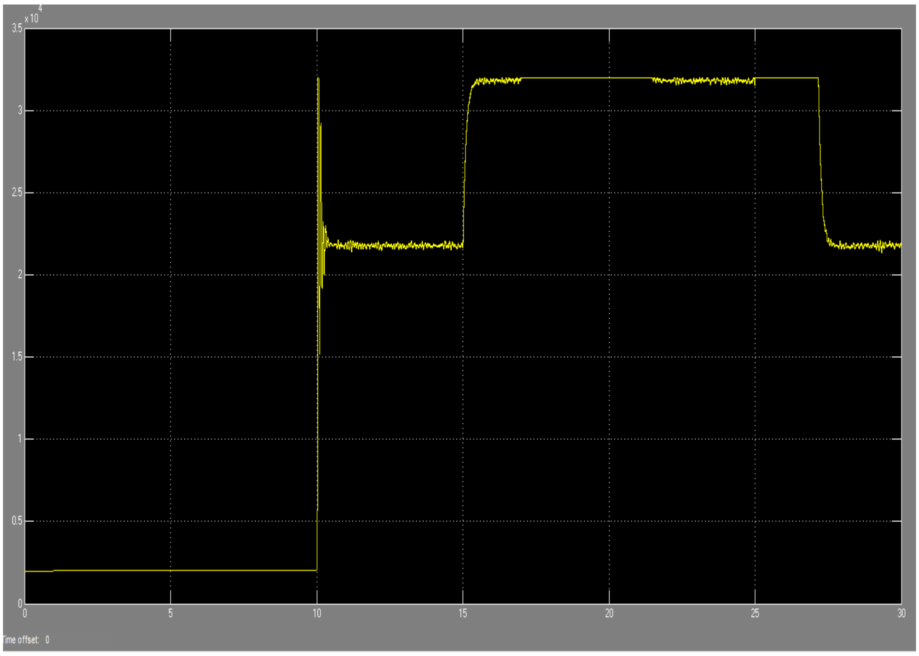
Η ισχύς η οποία καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης είναι σταθερή της τάξης των 18kW



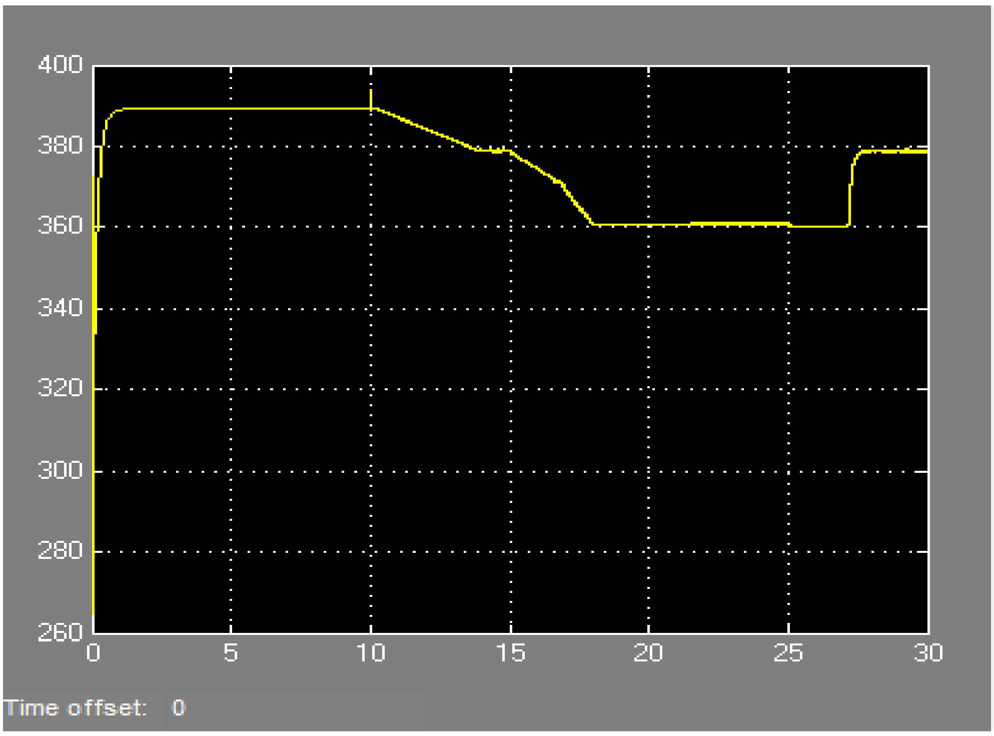
Εφόσον η ισχύς την οποία καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης και η τάση στα άκρα του παραμένει σταθερή, είναι λογικό να παραμένει σταθερή και η ποσότητα των mol υδρογόνου τα οποία παράγονται κατά την λειτουργία του συστήματος ($1,8*10^{-6}$ kmol/sec).



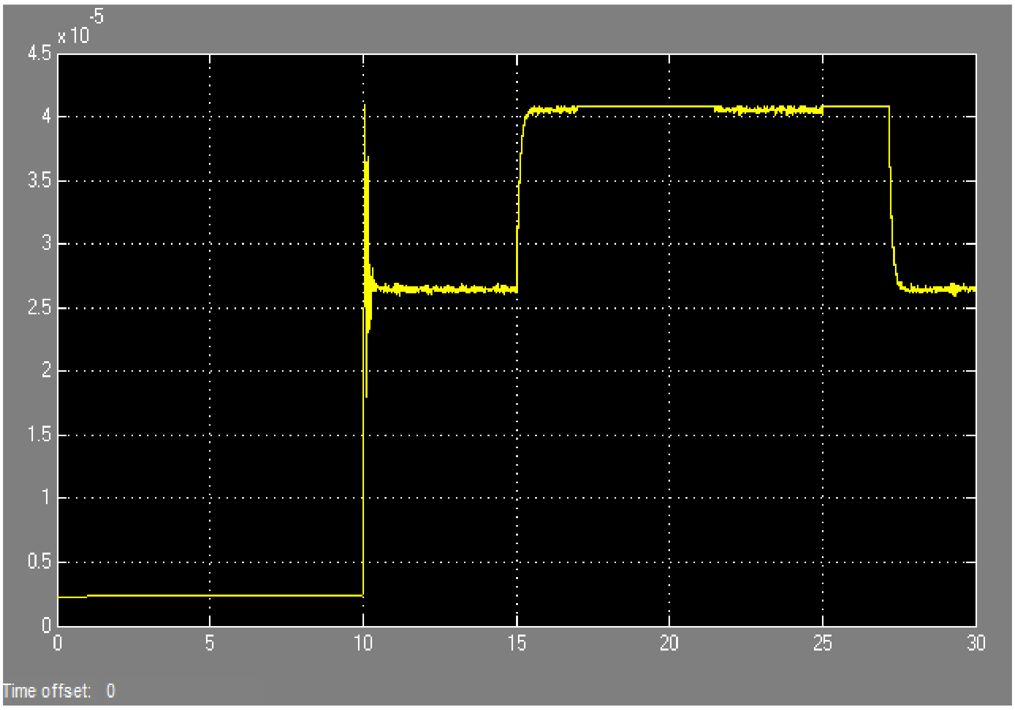
Κατά τα πρώτα δέκα δευτερόλεπτα, η ανεμογεννήτρια καλύπτει όλη την απαιτούμενη ισχύ. Μετά τα δέκα δευτερόλεπτα, που ο άνεμος έχει μια σημαντική πτώση στην ταχύτητά του και η ισχύς την οποία μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια πέφτει, αναλαμβάνει η κυψέλη καυσίμου να καλύψει την διαφορά μεταξύ του φορτίου 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.



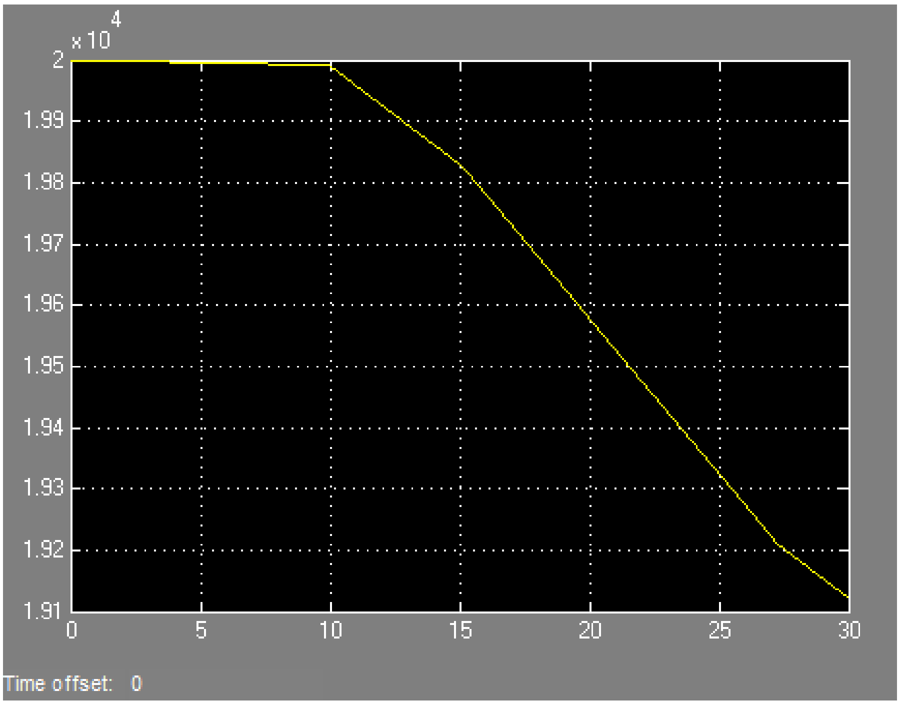
Η εσωτερική τάση της κυψέλης καυσίμου μειώνεται όταν αυξάνεται η ισχύς εξόδου. Αυτή η σχέση μεταξύ ισχύος και τάσης του συστήματος κυψελών καυσίμου πιστοποιεί την αξιοπιστία του μοντέλου. Η παροδική απόκριση της τάσεως του συστήματος στις αλλαγές του φορτίου ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα του ρεύματος που παρέχεται από το FC σύστημα όπως φαίνεται στο σχήμα.



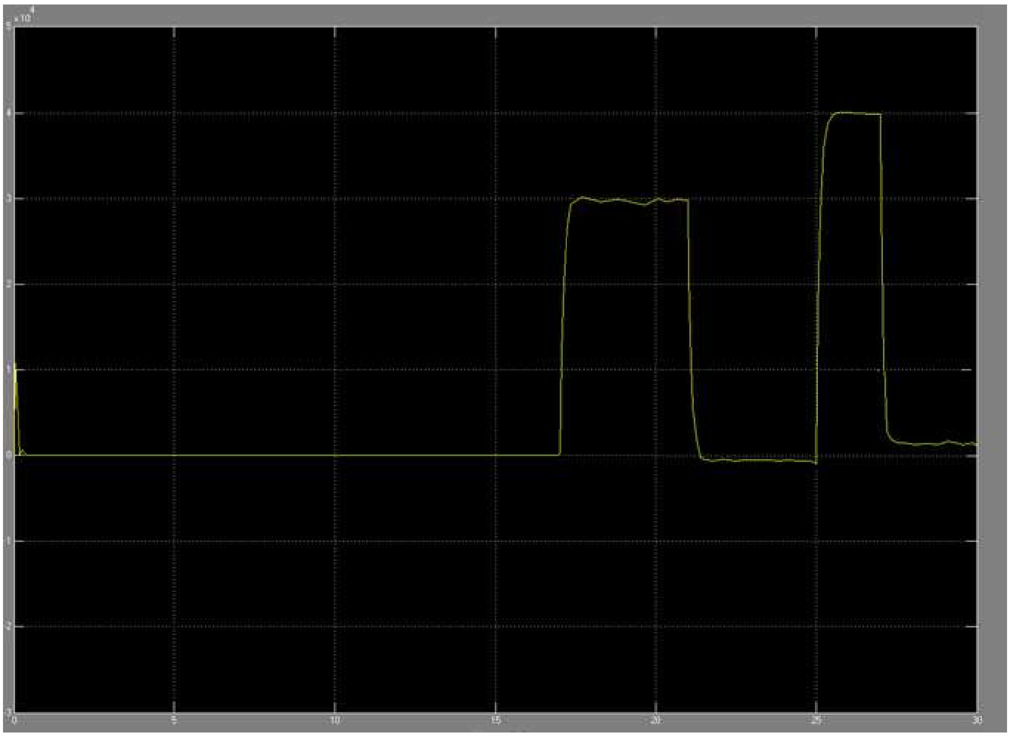
Η ποσότητα των moles υδρογόνου που καταναλώνεται από το σύστημα κυψελών καυσίμου είναι ανάλογη προς την κατανάλωση ισχύος από το σύστημα. Τα moles του υδρογόνου που καταναλώνονται φαίνονται παρακάτω.



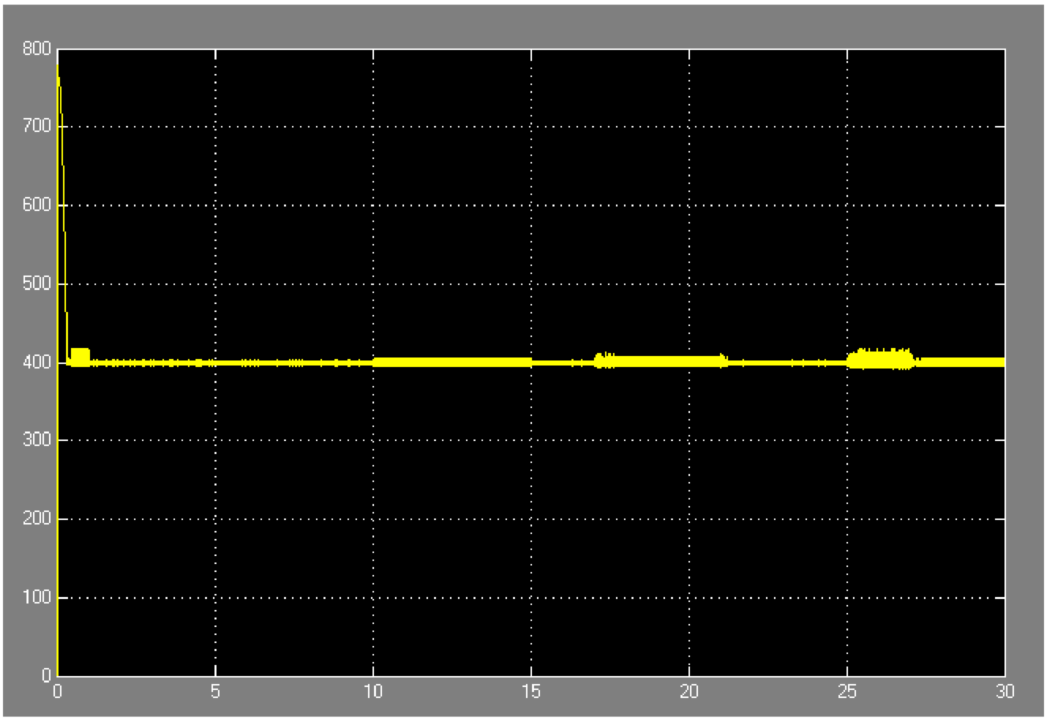
Η πίεση στην δεξαμενή καυσίμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η ποσότητα του υδρογόνου που θα αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθηκεύσεως αντιστοιχεί με τη διαφορά μεταξύ του υδρογόνου που παράγεται από την ηλεκτρόλυση και το υδρογόνο που καταναλώνεται από το σύστημα κυψελών καυσίμου.



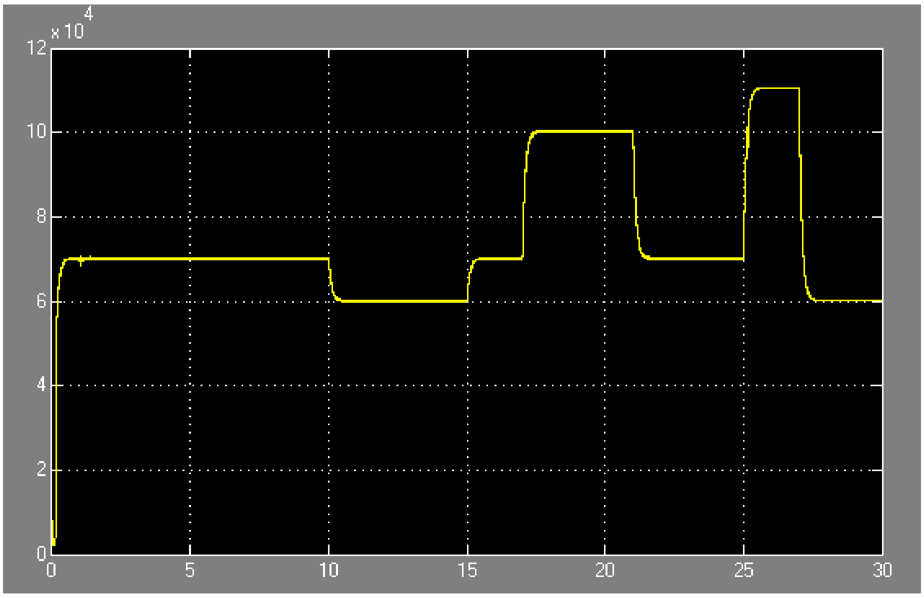
Σύμφωνα με την συνολική ζήτηση φορτίου, έχουμε δύο περιόδους μεγάλης ενεργειακής απαίτησης από τον χρήστη, η πρώτη μεταξύ 17ου και 21ου δευτερολέπτου και η δεύτερη μεταξύ 25ου και 27ου. Εφόσον η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να δώσει παραπάνω ενέργεια και η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στο όριό της εκείνη 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.



Η dc τάση που βγαίνει στην έξοδο του dc/dc converter είναι σταθεροποιημένη στα 400V. Το διάγραμμα της τάσης σε συνάρτηση με το χρόνο φαίνεται παρακάτω.



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 αλλά και την πολυπλοκότητα του μοντέλου του συστήματός μας.



Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Βελτίωση

Όσον αφορά το υβριδικό μας σύστημα, παρατηρούμε ότι η απόκρισή του στις ενεργειακές ανάγκες του χρήστη είναι άμεση, ακόμη και όταν οι απαιτήσεις του χρήστη σε ενέργεια είναι σχετικά μεγάλες. Επίσης το σύστημά μας λειτουργεί ικανοποιητικά και σε περιπτώσεις όπου ο άνεμος έχει μικρή ισχύ. Επιπλέον, 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.

Τώρα για να βελτιώσουμε ακόμη το υβριδικό μας σύστημα, θα μπορούσαμε να θέσουμε κάποια όρια για τις ταχύτητες του ανέμου μέσα στις οποίες θα λειτουργεί η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιούμε. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή η ανεμογεννήτρια θα μπορούσε να τίθεται εκτός λειτουργίας.

Επιπροσθέτως στο υπάρχον σύστημα θα μπορούσε να προστεθεί μια φωτοβολταϊκή μονάδα η οποία να συμβάλει και αυτή. Έτσι η κυψέλη καυσίμου θα λειτουργούσε λιγότερο, καθώς τις καλοκαιρινές περιόδους που οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρές, οι ανάγκες του χρήστη θα καλύπτονταν από τον ήλιο!

Βιβλιογραφία

[1] http://el.wikipedia.org/wiki, ήπιες μορφές ενέργειας

[2] http://wikipedia.org/wiki , hybrid systems

[3] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Α, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης

[4] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Β, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης

[5] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Γ, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης

[6] Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – Αιολική Ενέργεια Δ, Πολυτεχνείου Κρήτης, Γ. Σταυρακάκης

[7] http://www.aenaon.net/gr/content/view/125/29/, Ενέργεια από Ανεμογεννήτριες

[8] http://www.anemogennitria.gr/ypologismos-isxyos.htm, υπολογισμός ισχύος ανεμογεννήτριας

[9] http://el.wikipedia.org/wiki, αιολικές μηχανές

[10] http://electroepistimi.blogspot.gr/search/label , ανεμογεννήτριες μεσαίας ισχύος

[11] http://ape.chania.teicrete.gr/gr/ , hpies.ppt, τει κρήτης

[12] http://www.daviddarling.info , ENCYCLOPEDIA OF SCIENCE

[13] U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)

[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell , κυψέλες καυσίμου

[15] Gregor Hoogers Fuel Cell Technology Handbook, 2003 CRC Press

[16] O.C. Onar, M. Uzunoglou, 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

[17] 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

[18] MATLAB SimPowerSystems for Use with Simulink User's Guide,Version 4.1.1 MATLAB SimPowerSystems for Use with Simulink User's Guide,Version 4.1.1. http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf.doc/physmod/powersys/powersys.pdf.

[19] Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System, M. J. Khan, Faculty of Engineering & Applied Science Electrical Engineering, Memorial University of Newfoundland

[20] 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.

[21] 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

[22] 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

[23] 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

[24] H. Gorgun, Dynamic modeling of proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, Int. J. Hydrogen Energy 31 (1) (2006) 29-38