



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη της συμβολής τεχνολογιών υδρογόνου
στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος αιολικού πάρκου
διασυνδεδεμένου στο δίκτυο και στην αποθήκευση ενέργειας
υβριδικού σταθμού παραγωγής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΣΑΚΚΑΣ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη της συμβολής τεχνολογιών υδρογόνου
στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος αιολικού πάρκου
διασυνδεδεμένου στο δίκτυο και στην αποθήκευση ενέργειας
υβριδικού σταθμού παραγωγής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΣΑΚΚΑΣ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Νοεμβρίου 2011

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....
ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΣΑΚΚΑΣ

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

Copyright © ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΣΑΚΚΑΣ 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τεχνολογίες υδρογόνου αποτελούν μια εναλλακτική δυνατότητα υπό εξέταση για την επίλυση των σύγχρονων ενεργειακών προβλημάτων. Η ηλεκτρόλυση μπορεί να παράξει υδρογόνο κατάλληλης καθαρότητας ώστε να αξιοποιηθεί από κυψέλες καυσίμου και ο συνδυασμός τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνιστούν αντικείμενο διερεύνησης διεθνώς. Με τη ραγδαία ανάπτυξη των αιολικών πάρκων στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο συνδυασμός ανεμογεννητριών και ηλεκτρολυτών προσελκύει σημαντικό ενδιαφέρον.

Η αυξανόμενη διείσδυση αιολικής ενέργειας συνοδεύεται με την επίλυση προβλημάτων στην ποιότητα της αποδιδόμενης ισχύος προς το δίκτυο. Σε περιπτώσεις υψηλής διακύμανσης του ανέμου και γρήγορων μεταβολών στην ταχύτητά του, η ισχύς εξόδου ενός αιολικού πάρκου και η τάση στο σημείο σύνδεσης μπορεί να εμφανίσουν σημαντικές διακυμάνσεις, με αποτέλεσμα να πρέπει να εξετασθεί η δυνατότητα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Ειδικότερα σε απομονωμένα δίκτυα ή/και σε περιπτώσεις πολύ υψηλής διείσδυσης αιολικής ενέργειας, καθίσταται σοβαρότερης σημασίας η εξομάλυνση της αποδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο.

Η παρούσα εργασία προτείνει μία μέθοδο για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου ενός αιολικού πάρκου (Α/Π), χρησιμοποιώντας γεννήτρια παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση νερού. Για να επιτευχθεί κατάλληλη εξομάλυνση προσδιορίζεται η ισχύς εξόδου αναφοράς, η οποία προσφέρεται στο δίκτυο, ενώ η υπόλοιπη ισχύς απορροφάται από τους ηλεκτρολύτες της γεννήτριας υδρογόνου. Για τον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς υιοθετείται η μέθοδος του κινούμενου εκθετικού μέσου. Επίσης αναπτύσσεται κατάλληλη στρατηγική διαχείρισης της γεννήτριας υδρογόνου που επιδιώκει τόσο την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της αποδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο όσο και την επέκταση ζωής των ηλεκτρολυτών. Η προσομοίωση του συστήματος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον λογισμικού Matlab/Simulink.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε στη διερεύνηση των επιπτώσεων εγκατάστασης υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα που περιλαμβάνει συμβατικές μονάδες παραγωγής. Στόχος είναι να συγκριθούν διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις ώστε να επιτευχθεί κατά το δυνατόν απεξάρτηση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με ταυτόχρονη διείσδυση συστημάτων παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και επικουρικών συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν τεχνολογίες υδρογόνου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το νησιωτικό σύστημα του Αγ. Ευστρατίου του νομού Λέσβου. Η τεχνικοοικονομική αποτίμηση των εναλλακτικών τοπολογιών βασίζεται στο λογισμικό HOMER.

Λέξεις κλειδιά: Υδρογόνο, Υβριδικά συστήματα ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας, εξομάλυνση ισχύος, διακυμάνσεις ισχύος, διείσδυση αιολικής ενέργειας, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

ABSTRACT

Hydrogen technologies constitute nowadays an attractive possibility under consideration to solve energy problems. Water electrolysis enables production of hydrogen sufficiently pure to be implemented in fuel cells and their combination with renewable energy sources is a preferential research subject internationally. Due to the fast penetration of wind energy in the modern power systems, the combination of wind generators and electrolyzers acquires important interest.

The important integration of wind energy raises problems of power quality to be solved. In cases of high fluctuations of wind and abrupt changes in its speed, the power output of a wind park and the voltage at the interconnection point present also fluctuations. Therefore, the problem of the integration of wind systems in the grid necessitates investigation. Especially in cases of isolated grids or/and very high penetration of wind energy in the grid, the need of wind power conditioning is of crucial importance.

The present work proposes a methodology for minimizing the output power fluctuations of a wind farm (WF) connected to the grid, using a hydrogen generator with multiple electrolyzers. In order to achieve appropriate power quality, the reference power to be delivered to the grid is determined. The remaining power produced is consumed by the hydrogen generator. The calculation of the power reference value is based on the method of the exponential moving average (EMA). Moreover, a particular strategy is developed managing the operation of the hydrogen generator achieving a compromise in the minimization of power fluctuations and the life extension of the electrolyzers. The system modelling has been developed in the software environment of Matlab/Simulink.

The developed methodology has been applied to investigate the impact of a hybrid station integration, in the case of an isolated island system incorporating diesel generators. The objective is to consider different technical solutions enabling minimization of the use of diesel generators through penetration of renewable energy sources combined to hydrogen energy storage systems. The system data implemented correspond to the island Agios Eustratios of Lesvos prefecture. The technical and economical investigation is based on HOMER software.

Keywords: Hydrogen, hybrid systems with renewable sources, energy storage units, power conditioning, power fluctuations, wind energy penetration, electric energy production.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η καθοδήγησή του υπήρξε πολύτιμη. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Οι υποδείξεις του ήταν καθοριστικές. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλους όσους μου στάθηκαν και με ανέχτηκαν όλο το διάστημα πραγματοποίησης της εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	17
1.2 Προβλήματα-Προκλήσεις	17
1.3 Αποθήκευση ενέργειας.....	19
1.4 Το υδρογόνο – ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας.....	20
1.5 Ηλεκτρόλυση.....	21
1.6 Συνδυασμός αιολικής ενέργειας – υδρογόνου	22
1.6.1.Παραγωγή υδρογόνου από αυτόνομο αιολικό σύστημα	23
1.6.2.Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια υποβοηθούμενη και από το δίκτυο.....	23
1.6.3.Διασυνδεδεμένη λειτουργία αιολικού πάρκου και παραγωγή υδρογόνου ..	24
1.6.4.Επικουρική λειτουργία τεχνολογιών υδρογόνου ως αποθηκευτικό υποσύστημα σε αιολικό σύστημα για ομαλότερη διασυνδεδεμένη λειτουργία ...	24
1.6.5.Αυτόνομο σύστημα ΑΓ με παραγωγή υδρογόνου.....	25
1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας	25
2.ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	27
2.1 Γενικά περί αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.....	27
2.2 Συμβολή των αποθηκευτικών συστημάτων	27
2.3 Παράμετροι των μέσων αποθήκευσης	28
2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	28
2.4.1 Αντλησιοταμίευση (Pumped-Hydroelectric Energy Storage-PHES).....	28
2.4.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage – CAES)	30
2.4.3 Μπαταρίες	32
2.4.3.α Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead Acid).....	32
2.4.3.β Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd)	32
2.4.3.γ Μπαταρίες Νατρίου-Θείου (NaS).....	33
2.4.3.δ Μπαταρίες Ροής (Flow Batteries).....	34
2.4.4 Σφόνδυλοι ή Στρεφόμενες μάζες (Flywheels).....	35
2.4.5 Υπεραγώγιμα πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES).37	
2.4.6 Πυκνωτές και Υπερπυκνωτές (capacitors & ultracapacitors)	38

2.4.7 Υδρογόνο (Hydrogen)	39
2.5 Σύνοψη	40
3. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ	
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	43
3.1 Παρουσίαση ενός πραγματικού συστήματος	43
3.1.1. Δεδομένα συστήματος	44
3.1.2. Δεδομένα του ήδη εγκατεστημένου σταθμού παραγωγής	44
3.1.3. Μετεωρολογικά δεδομένα	45
3.2 Μελέτη για την ενσωμάτωση υβριδικού σταθμού στο σύστημα του Αγίου	
Ευστρατίου	46
3.2.1. Α/Γ, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του	
εγκατεστημένου τοπικού σταθμού	47
3.2.2. Α/Γ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας	
παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού	48
3.2.3. Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου και μπαταρίες	48
3.2.4. Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής	
μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού	49
3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων οικονομοτεχνικής μελέτης	49
3.3.1. Συμμετοχή στην παραγωγή ενέργειας	50
3.3.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής κάθε διάταξης	51
3.3.3. Λειτουργικά χαρακτηριστικά των αποθηκευτικών συστημάτων κάθε	
διάταξης	52
3.3.4. Πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος για κάθε περίπτωση	54
3.3.5. Εκπομπές αερίων προς το περιβάλλον	55
3.3.6. Κοστολόγηση της εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού	57
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ	
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	61
4.1 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών	61
4.1.1. Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών	61
4.1.2. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών	62
4.1.3. Α/Γ μεταβλητών στροφών με μετατροπέα συχνότητας μειωμένης	
ικανότητας	63
4.1.4. Α/Γ μεταβλητών στροφών με μετατροπέα συχνότητας πλήρους ικανότητας	
.....	64
4.2 Μοντελοποίηση Α/Γ μεταβλητών στροφών	65

4.2.1 Αεροδυναμικό μέρος Α/Γ	65
4.2.2 Σύστημα μετάδοσης κίνησης.....	66
4.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια με τυλιγμένο δρομέα.....	68
4.2.4 Σύστημα διέγερσης.....	69
4.3 Σύνδεση της Α/Γ στο δίκτυο	70
4.4 Γεννήτρια υδρογόνου	73
4.5 Μοντελοποίηση Γεννήτριας υδρογόνου	75
4.5.1 Τοπολογίες γεννήτριας υδρογόνου.....	75
4.5.2 Τελικό μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου.....	76
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ & ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	79
5.1 Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας	79
5.1.1 Ελεγκτής ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ (MPPT control)	79
5.1.2 Ελεγκτής κλίσης των πτερυγίων της έλικας (pitch control).....	80
5.1.3 Ελεγκτής του μετατροπέα DC/AC της ανεμογεννήτριας στην πλευρά του δικτύου (grid-side converter control system)	80
5.2 Σύστημα ελέγχου γεννήτριας υδρογόνου.....	84
5.2.1 Ελεγκτής για τον καθορισμό της ισχύος αναφοράς	85
5.2.2 Ελεγκτής για τον καθορισμό του αριθμού των ηλεκτρολυτών που πρέπει να ενεργοποιηθούν	87
5.2.3 Έλεγχος του μετατροπέα υποβιβασμού της ηλεκτρολυτικής μονάδας με την μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).....	89
5.2.4 Περιορισμός αριθμού τυχαίων εναύσεων των ηλεκτρολυτικών μονάδων..	90
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	93
7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
Σχ1.1.Αναμενόμενη αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά συστήματα στην Ευρώπη	18
Σχ.1.2 Διείσδυση αιολικής ενέργειας σε ευρωπαϊκές χώρες	18
Σχ.1.3: Οι 10 χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε MW ανά εκατομύριο πληθυσμού.....	18
Σχ.1.4. Αφθονία υδρογόνου στη φύση.....	21
Σχ.1.5. Παραγωγή υδρογόνου από αυτόνομο αιολικό σύστημα	23
Σχ.1.6.Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια υποβοηθούμενη και από το δίκτυο	23
Σχ.1.7.Διασυνδεδεμένη λειτουργία αιολικού πάρκου και παραγωγή υδρογόνου	24
Σχ.1.8.Επικουρική λειτουργία τεχνολογιών υδρογόνου ως αποθηκευτικό υποσύστημα σε αιολικό σύστημα	24
Σχ.1.9. Αυτόνομο σύστημα ΑΓ με παραγωγή υδρογόνου	25
2.ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	27
Σχ.2.1. Αρχή λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης.....	29
Σχ.2.2. Αποθήκευση ενέργειας με συμπίεση αέρα	31
Σχ.2.3. Μπαταρία ροής	34
Σχ.2.4. Διάταξη συστήματος αποθήκευσης με χρήση στρεφόμενης μάζας(αριστερά) και οι σχέσεις που αποδίδουν την αποθηκευμένη ενέργεια (δεξιά)	36
3.ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	43
Σχ.3.1: Μέσες μηνιαίες εντάσεις ανέμου.....	45
Σχ. 3.2: Ηλιακή ακτινοβολία, μέσες μηνιαίες τιμές.....	45
Σχ.3.3: Υβριδικό Σύστημα που προσομοιώθηκε	47
Σχ.3.4:Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο1	47
Σχ.3.5: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο2	48
Σχ.3.6: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο3	48

Σχ.3.7: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο4	49
Σχ.3.8: Ποσοστό παραγωγής ενέργειας από κάθε μονάδα για κάθε σενάριο	51
Σχ.3.9: Εισερχόμενη και εξερχόμενη ενέργεια στο σύστημα των μπαταριών	54
Σχ.3.10: Κατανάλωση παραγόμενης ισχύος για την κάλυψη του φορτίου και την παραγωγή υδρογόνου.....	54
Σχ.3.11:Περίσσεια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.....	55
Σχ.3.12: Συνολική ποσότητα CO ₂ που εκπέμπεται, τόνοι σε ετήσια βάση	56
Σχ.3.13: Συνολική ποσότητα CO ₂ που εκπέμπεται, τόνοι σε ετήσια βάση	57
Σχ.3.14: Συνολικό κόστος από την κατανάλωση πετρελαίου, σε ετήσια βάση.....	58
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	61
Σχ.4.1 :Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού	62
Σχ.4.2 :Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα	62
Σχ.4.3 :Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και σύστημα μετατροπών συχνότητας μειωμένης ονομαστική ισχύος.....	64
Σχ.4.4 :Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια και σύστημα μετατροπών συχνότητας πλήρους ισχύος	64
Σχ.4.5 :Τυπικές καμπύλες μεταβολής του συντελεστή C _p , με παράμετρο την γωνία του βήματος της έλικας β.....	65
Σχ.4.6 :Μοντέλο αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ	66
Σχ.4.7 : Σύστημα δύο μαζών για την μοντελοποίηση του συστήματος κίνησης της Α/Γ	67
Σχ.4.8 :Σύστημα διάδοσης κίνησης	67
Σχ.4.9 :Ηλεκτρικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα στο πλαίσιο dq του δρομέα	69
Σχ.4.10: Σύστημα ελέγχου διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας	70
Σχ.4.11 :Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας, ηλεκτρικό και μηχανικό μοντέλο ..	70
Σχ. 4.12:Σύνδεση Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια στο δίκτυο....	71
Σχ.4.13 : Μοντέλο μέσω των τιμών του DC/DC μετατροπέα	71
Σχ. 4.14: Μοντέλο μέσω των τιμών του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου	72
Σχ.4.15 : Συνολικό μοντέλο μετατροπών συχνότητας AC/DC/AC	72
Σχ. 4.16: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρολύτη	73
Σχ.4.17: 1 ^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου	75
Σχ.4.18: 2 ^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου	76

Σχ. 4.19: Γεννήτρια υδρογόνου	77
Σχ. 4.20: Ηλεκτρολυτική μονάδα	77
Σχ. 4.21: Ηλεκτρολυτική μονάδα με ελεγκτή.....	77
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ & ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	79
Σχ. 5.1: Μοντέλο ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ.....	80
Σχ. 5.2: Μοντέλο ελεγκτή κλίσης των πτερυγίων της έλικας.....	80
Σχ.5.3: Σύστημα για τον συγχρονισμό του αντιστροφέα με την συχνότητα του δικτύου (PLL)	81
Σχ.5.4:Αντιστροφέας συνδεδεμένος στο δίκτυο μέσω φίλτρου και μετασχηματιστή.82	
Σχ. 5.5: Καθορισμός I_{d_ref} , πρώτος βρόχος του ελεγκτή των d-συνιστωσών	82
Σχ. 5.6: Καθορισμός των συνιστωσών dq της τάσης του αντιστροφέα.....	83
Σχ. 5.7: Διανύσματα τάσης και ρεύματος στο dq στρεφόμενο πλαίσιο	84
Σχ.5.8: Στρατηγική εξομάλυνσης της ισχύος εξόδου	86
Σχ. 5.9: Υπολογισμός των Pref και Pc.....	87
Σχ.5.10: Μοντέλο simulink για τον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς	87
Σχ.5.11: Δημιουργία σήματος ελέγχου κάθε ηλεκτρολύτη	88
Σχ5.12: Αλγόριθμος λειτουργίας της γεννήτριας υδρογόνου	89
Σχ.5.13. Ελεγκτής του διακοπτικού στοιχείου της ηλεκτρολυτικής μονάδας.....	89
Σχ.5.14. Περιορισμός τυχαίας έναυσης των ηλεκτρολυτικών μονάδων	90
Σχ.5.15: Μοντέλο ελεγκτή για τον περιορισμό του αριθμού τυχαίων εναύσεων των ηλεκτρολυτικών μονάδων.....	91
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	93
Σχ.6.1: Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης	93
Σχ.6.2: Κυματομορφή ταχύτητας ανέμου 180sec.....	94
Σχ.6.3: Ενεργός ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου [αμ].....	95
Σχ.6.4: Άεργος ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου [αμ]	95
Σχ.6.5: Τάση στον ζυγό συνεχούς ρεύματος κάθε Α/Γ (V).....	96
Σχ.6.6: Τάση στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου [αμ]	96
Σχ.6.7:Ταχύτητα περιστροφής δρομέα [αμ]	97
Σχ.6.8: Άεργος ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου με προσθήκη γεννήτριας υδρογόνου [αμ].....	98
Σχ.6.9: Τάση στον ζυγό συνεχούς ρεύματος κάθε Α/Γ (V).....	98

Σχ.6.10: Τάση στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου, μετά και την προσθήκη της γεννήτριας υδρογόνου [αμ]	99
Σχ.6.11: Ισχύς που απορροφάται από την γεννήτρια υδρογόνου [αμ]	99
Σχ.6.12: Συνολική ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου [Nm ³].....	100
Σχ.6.13: Ισχύς ΑΠ που τελικά φτάνει στο δίκτυο πριν και μετά την διαδικασία εξομάλυνσης	101
Σχ.6.14: Φασματικό περιεχόμενο ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο πριν και μετά την προσθήκη της Γ.Υ.....	101
Σχ.6.15: Φασματικό περιεχόμενο δυναμικού στον κόμβο Β25 πριν και μετά την προσθήκη της Γ.Υ.....	102
7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τεχνολογίες αποθήκευσης και εφαρμογές	40
Πίνακας 2.2: Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, κατάλληλες για αποθήκευση αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας	41
Πίνακας 2.3:Καταλληλότητα συστήματος αποθήκευσης ανάλογα με την εφαρμογή.41	
Πίνακας 3.1: Ήδη εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες παραγωγής	44
Πίνακας 3.2: Μονάδες παραγωγής κάθε σεναρίου.....	46
Πίνακας 3.3:Οικονομικά στοιχεία κάθε συνιστώσας	47
Πίνακας 3.4: Ποσοστά συμβολής κάθε μονάδας παραγωγής.....	50
Πίνακας 3.5: Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων παραγωγής για κάθε σενάριο ..52	
Πίνακας 3.6:Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης για κάθε σενάριο.....	53
Πίνακας 3.7: Κατανάλωση παραγόμενης ενέργειας και περίσσεια, μεγέθη σε ετήσια βάση	55
Πίνακας 3.8: Εκπομπές αερίων σε ετήσια βάση.....	56
Πίνακας 5.1: Στρατηγική ενεργοποίησης των ηλεκτρολυτικών μονάδων	88

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

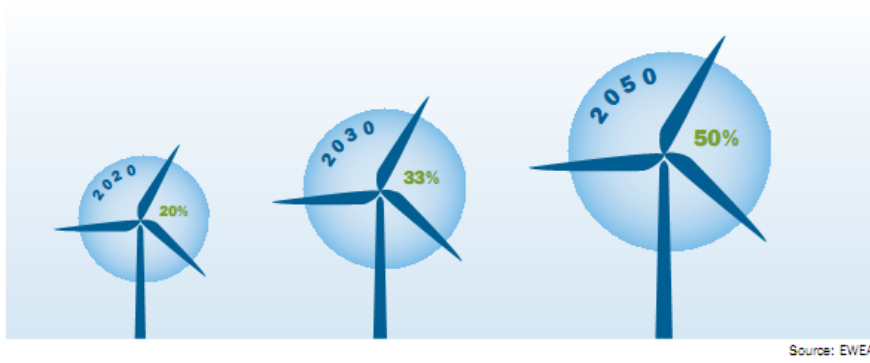
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τις λιγότερες δυνατές εκπομπές αποτελεί φλέγον ζήτημα εξαιτίας της ήδη επιβαρυσμένης κατάστασης του περιβάλλοντος. Η σταδιακή αποδέσμευση από τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής που βασίζονται στην εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων είναι επιτακτική ανάγκη. Η λύση μπορεί να δοθεί με στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς όχι μόνο είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά επιπλέον είναι και ανεξάντλητες. Η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα και από την βιομάζα, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμου είναι οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ.

1.2 Προβλήματα-Προκλήσεις

Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας αυξάνεται συνεχώς. Οι ΑΠΕ θεωρητικά ευνοούν την παραγωγή ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει η κατάλληλη ενεργειακή πηγή. Φέρνοντας ως παράδειγμα την ηλιακή ενέργεια, μια περιοχή με μεγάλες περιόδους ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους θα μπορούσε να αξιοποιηθεί - αν είναι δυνατό γεωγραφικά - ώστε να γίνει εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (ΦΒ), ενώ μια περιοχή με υψηλές ταχύτητες ανέμου μοιάζει λειτουργική για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών (ΑΓ). Φυσικά δεν είναι τόσο απλό το ζήτημα εγκατάστασης μια μονάδας ΑΠΕ. Απαιτούνται μελέτες (οικονομοτεχνικές) και αδειοδοτήσεις.

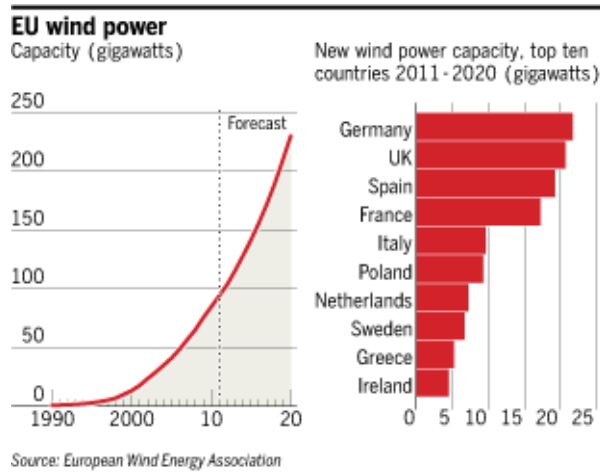
Ειδικότερα η αιολική ενέργεια γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη και τον κόσμο, με τον αριθμό των αιολικών πάρκων να αυξάνονται συνεχώς και τη συνολικά εγκατεστημένη ισχύ να εκτοξεύεται. Επίσης υπάρχει ο στόχος η αιολική ενέργεια να φτάσει σε τέτοιο βαθμό διείσδυσης στο μέλλον στην Ευρώπη ώστε να αποτελεί το 50% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση και οι μελλοντικές τάσεις σχετικά με το μέγεθος εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, στα διαγράμματα που ακολουθούν.

EXPECTED INCREASE IN EU'S SHARE OF ELECTRICITY PROVIDED BY WIND POWER



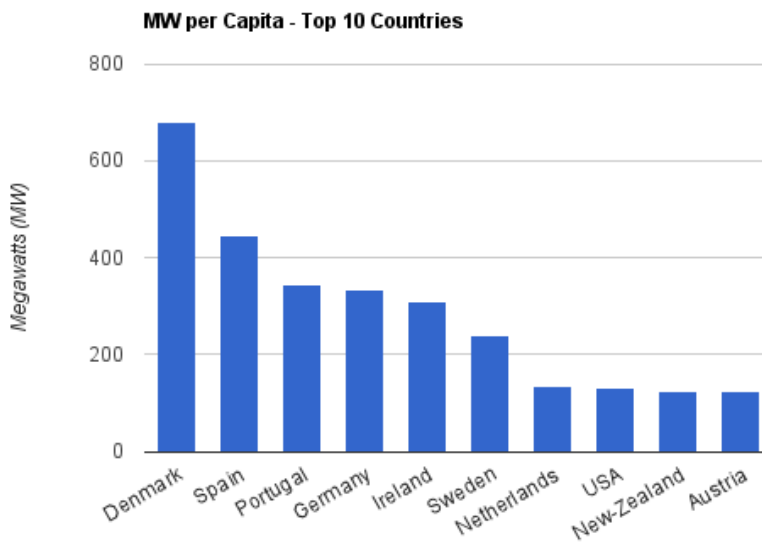
Source: EWEA

Σχ1.1.Αναμενόμενη αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά συστήματα στην Ευρώπη[1]



Source: European Wind Energy Association

Σχ.1.2 Διείσδυση αιολικής ενέργειας σε ευρωπαϊκές χώρες[1]



Σχ.1.3: Οι 10 χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε MW ανά εκατομμύριο πληθυσμού (April 11, 2011, Source: [Clean Technica](#))

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες όμως εξαρτάται από τη μη ελεγχόμενη αλλά και δύσκολα προβλέψιμη ταχύτητα του ανέμου (μεταβολές ανά δευτερόλεπτο, ώρα, ημέρα, εποχή) στην τοποθεσία εγκατάστασης της κάθε μηχανής. Έτσι, η μεταβλητότητα του ανέμου και η δυσκολία πρόβλεψής του επηρεάζουν τη συμπεριφορά των αιολικών σταθμών και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

Η παρουσία ΑΓ επηρεάζει την ικανότητα του κεντρικού δικτύου να διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα, οπότε απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου. Συγκεκριμένα η μεταβλητότητα που παρουσιάζει η ισχύς εξόδου μεταφράζεται σε μεταβολές της συχνότητας του δικτύου, δεδομένου ότι η ζήτηση είναι σταθερή. Οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε περιορισμό της αιολικής διείσδυσης, σε επίπεδα που δεν επηρεάζεται η φυσιολογική λειτουργία του συστήματος. Σε περιπτώσεις μικρής διείσδυσης τα αιολικά πάρκα αντιμετωπίζονται ως αρνητικά φορτία τα οποία σε περιπτώσεις διαταραχών μπορούν να βγουν από την παραγωγή χωρίς προβλήματα ευστάθειας. Αντίθετα, σε περίπτωση πολύ υψηλής διείσδυσης αιολικής ισχύος (τάξης πολλών MW), ή τη σύνδεση ΑΓ σε ασθενή δίκτυα ή αυτόνομα συστήματα (απομονωμένοι υβριδικοί σταθμοί) η απότομη αφαίρεση των αιολικών σταθμών από την συνολική παραγωγή μεταφράζεται ως μια μεγάλη διαταραχή, ένα μεγάλο μεταβατικό φαινόμενο που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε μπλακ άουτ. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη διείσδυση αιολικής ενέργειας στην συνολική παραγωγή και σταδιακά στην αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων, απαιτείται η συμμετοχή των αιολικών σταθμών στον έλεγχο και τη ρύθμιση του συστήματος. Επομένως το ζήτημα της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος είναι θεμελιώδες.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των διακυμάνσεων της ισχύος εξόδου. Μπορεί να πραγματοποιηθεί εξομάλυνση της ισχύος με διατάξεις ελεγκτών στην ίδια την ανεμογεννήτρια (ελεγκτής κλίσης πτερυγίων), αλλά μπορεί να επιτευχθεί και με κατάλληλη χρήση αποθηκευτικών συστημάτων ενέργειας.

1.3 Αποθήκευση ενέργειας

Στο επίκεντρο λοιπόν δεν είναι μόνο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ με τις λιγότερες δυνατές εκπομπές. Σημαντικό ζήτημα αποτελεί και η αποθήκευσή της. Ωστόσο, στόχος των αποθηκευτικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι μόνο η χρησιμοποίησή τους σε χρονικές περιόδους που η απευθείας παραγωγή δεν θα καλύπτει τη ζήτηση του φορτίου, αλλά και η εξομάλυνση της ισχύος εξόδου των συστημάτων ΑΠΕ.

Η απευθείας αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι εφικτή. Πρέπει να μετατραπεί πρώτα σε άλλη μορφή ενέργειας. Μερικά παραδείγματα τρόπων

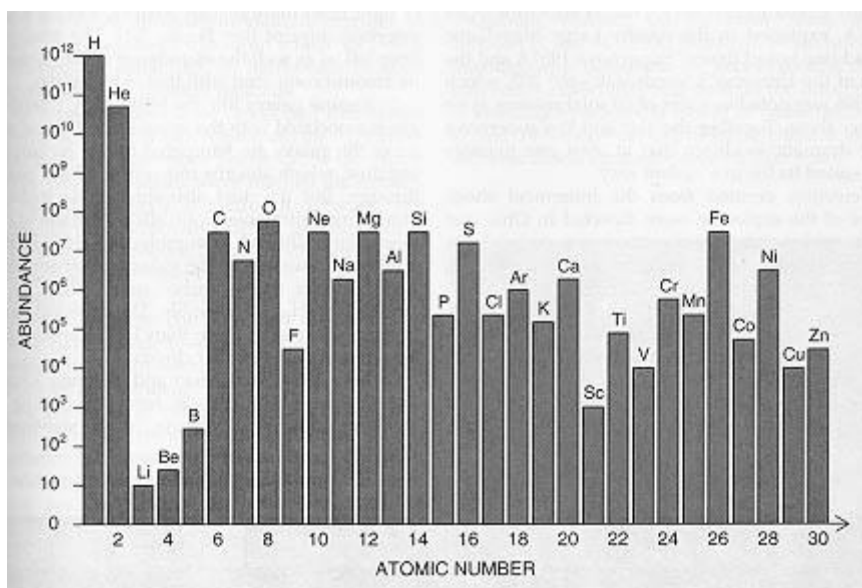
αποθήκευσης είναι: ως χημική ενέργεια (μπαταρίες), ως μηχανική ενέργεια (σφόνδυλοι), σε ηλεκτρικό πεδίο (πυκνωτές) ή σε μαγνητικό πεδίο (μαγνητικοί υπεραγωγοί), με συμπίεση αέρα, με μετατροπή σε υδρογόνο.

1.4 Το υδρογόνο – ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας

Υψηλό ενδιαφέρον παρουσιάζει το υδρογόνο ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, λόγω κάποιων χαρακτηριστικών που μπορούν να το ανάγουν μάλιστα σε ιδανικό φορέα ενέργειας [2]:

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/gr και 3 φορές μεγαλύτερο από αυτό της βενζίνης.
- Συναντάται σε αφθονία στο σύμπαν (σχ. 1), σε συνδυασμό όμως με άλλα στοιχεία.
- Αποτελεί ανανεώσιμο καύσιμο, αφού το προϊόν χρησιμοποίησής του (είτε είναι καύση, είτε είναι ηλεκτροχημική μετατροπή) είναι πάλι νερό ή υδρατμοί.
- Μπορεί να αποθηκευτεί ως αέριο, υγρό και στερεό (υδρίδια μετάλλων).
- Είναι δυνατή η μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις με αγωγούς, δεξαμενές, βυτιοφόρα.
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς αν γίνει καύση με ατμοσφαιρικό αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες παράγει αμελητέες ποσότητες NO_x.

Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών του υδρογόνου, το γεγονός ότι η τεχνολογία για την παραγωγή, αποθήκευση και εκμετάλλευσή του έχουν ήδη αναπτυχθεί και συνεχίζουν να εξελίσσονται, μπορούν να οδηγήσουν στη μετάβαση σε οικονομία υδρογόνου στο προσεχές μέλλον. Ενδεικτικά, η Ισλανδία, προβλέπει υποδομή πλήρως βασισμένη στο υδρογόνο μέχρι το 2030 - 2040, ενώ μέχρι το 2030 στόχος του Υπουργείου Οικονομίας των ΗΠΑ είναι η αντικατάσταση του 10% της ενεργειακής κατανάλωσης από ενέργεια προερχόμενη από υδρογόνο[2].



Σχ.1.4. Αφθονία υδρογόνου στη φύση

Όπως αναφέρθηκε, το υδρογόνο εμφανίζεται μόνο σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία (σε ενώσεις όπως το νερό, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο κ.α). Άφθονη πηγή υδρογόνου είναι το νερό. Όμως για τον διαχωρισμό του νερού απαιτείται κατανάλωση ενέργειας η οποία λόγω των νόμων της θερμοδυναμικής είναι περισσότερη από όση λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το παραγόμενο υδρογόνο. Για το λόγο αυτό δε χαρακτηρίζεται ως πηγή ενέργειας (αφού δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση) αλλά ως φορέας.

1.5 Ηλεκτρόλυση

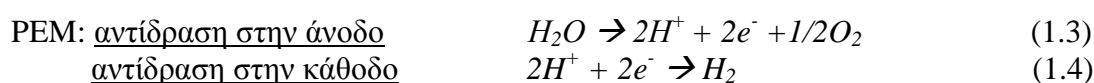
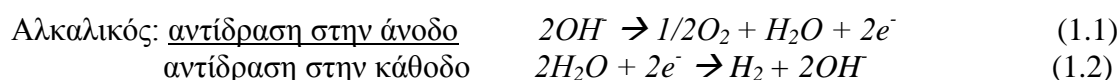
Η απαιτούμενη ενέργεια για τον διαχωρισμό των ενώσεων και την παραγωγή υδρογόνου δίνεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, λιγνίτης) με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής του να εξαρτάται από την τιμή του καυσίμου (6–14\$/GJ [3]). Επιπλέον με τον τρόπο αυτό υπάρχει εκπομπή CO₂ στο περιβάλλον. Ωστόσο η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να γίνει και από μια καθαρή ενεργειακή πηγή (ΑΠΕ) ώστε να είναι απόλυτα φιλική με το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει μια ανεμογεννήτρια ή ένα φωτοβολταϊκό μπορεί να τροφοδοτεί μία συσκευή ηλεκτρόλυσης η οποία διασπά το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στη συνέχεια, το υδρογόνο θα αποθηκεύεται σε κατάλληλες δεξαμενές για να χρησιμοποιηθεί όποτε προκύψει ανάγκη.

Γενικά, η ηλεκτρόλυση με ενέργεια από ΑΠΕ αποτελεί την καθαρότερη από άποψη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τροχοπέδη στην ευρεία εξάπλωση της σε εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η οποία σε γενικές γραμμές κυμαίνεται μεταξύ 4.1-6kWh/Nm³ [3](χωρίς να συνυπολογιστεί η κατανάλωση των βοηθητικών φορτίων της ηλεκτρόλυσης). Για

το λόγο αυτό, το κόστος παραγωγής του υδρογόνου συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες είναι υψηλό. Σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι η παραγωγή υδρογόνου πολύ υψηλής καθαρότητας, που εν γένει είναι μεγαλύτερη από 99.8% [3].

Ηλεκτρολύτες

Κυριότεροι τύποι ηλεκτρολυτικών μονάδων είναι ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης (alkaline) και ο ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους:



Συγκρίνοντας τους δύο τύπους ηλεκτρολυτών αξίζει να σημειωθεί ότι οι αλκαλικοί αποτελούν μια πιο οικονομική λύση, αλλά οι PEM παρουσιάζουν αρκετά λειτουργικά πλεονεκτήματα [4]:

- Υψηλότερος βαθμός ασφάλειας και αξιοπιστίας δεδομένου ότι στα κελιά δεν κυκλοφορεί καυστικός ηλεκτρολύτης.
- Ελαχιστοποίηση προβλημάτων διάβρωσης και περιβαλλοντικών προβληματισμών λόγω της απουσίας καυστικού ηλεκτρολύτη.
- Ευκολότερη συντήρηση.
- Δοκιμές σε PEM ηλεκτρολύτες έχουν δείξει ότι κάποια από τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αντέχουν υψηλότερη διαφορική πίεση και είναι πιο αποτελεσματικά στην αποτροπή της μίξης των αερίων προϊόντων της ηλεκτρόλυσης.
- Παραγωγή υδρογόνου υψηλότερης εν γένει καθαρότητας (99.999%) σε υψηλό βαθμό απόδοσης (95%).
- Υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος.
- Ταχύτερη απόκριση στις μεταβολές της ισχύος εισόδου.

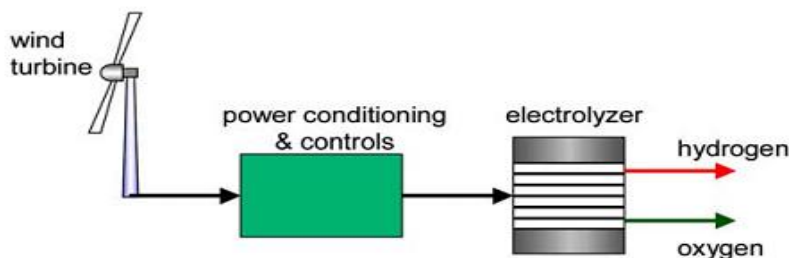
1.6 Συνδυασμός αιολικής ενέργειας – υδρογόνου

Υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από ΑΓ ανεξάρτητα από το αν αυτές είναι σταθερών ή μεταβλητών στροφών. Επίσης η

συνεργασία αιολικής ενέργειας και υδρογόνου μπορεί να υιοθετηθεί και από αυτόνομα συστήματα αλλά και από διασυνδεδεμένα [5-7]. Η συνεργασία αυτή έχει πολύπλευρο χαρακτήρα ανάλογα με το που επικεντρώνεται η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος. Τα κυριότερα σενάρια παρουσιάζονται παρακάτω[3].

1.6.1. Παραγωγή υδρογόνου από αυτόνομο αιολικό σύστημα

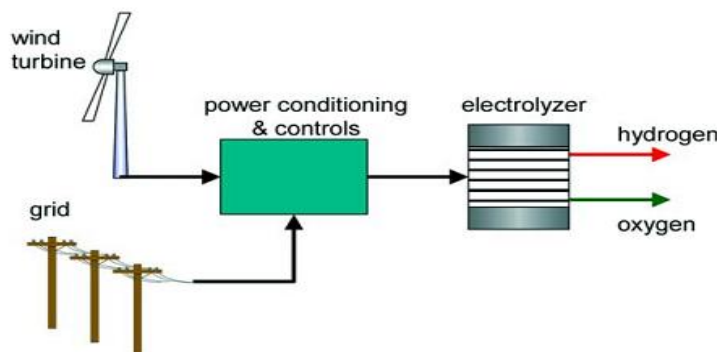
Μια ΑΓ μπορεί αντί να ενσωματωθεί στο δίκτυο, να συνδεθεί με έναν ηλεκτρολύτη, με στόχο την παραγωγή υδρογόνου που θα χρησιμοποιηθεί για διάφορους λόγους (καύσιμο, αποθήκευση κ.ά.). Το σύστημα αυτό δεν αντιμετωπίζει τα προβλήματα που σχετίζονται με την σύνδεση στο δίκτυο αλλά πρέπει να ξεπεράσει το ζήτημα σύνδεσης του ηλεκτρολύτη σε μεταβλητή παροχή. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η χρήση μετατροπέα DC/DC ή AC/DC ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις του ηλεκτρολύτη σε τάση και ρεύμα, σε οποιοδήποτε επίπεδο ισχύος, χωρίς σημαντικές απώλειες.



Σχ.1.5. Παραγωγή υδρογόνου από αυτόνομο αιολικό σύστημα

1.6.2. Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια υποβοηθούμενη και από το δίκτυο

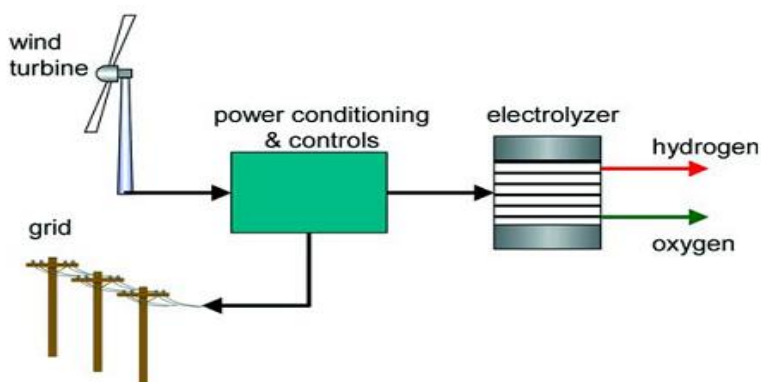
Αν στην παραπάνω διάταξη υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο, συνδυάζοντας την ΑΓ με επιπλέον είσοδο από το δίκτυο, είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί η διακοπτόμενη-κυμαινόμενη λειτουργία του ηλεκτρολύτη. Και πάλι φυσικά απαιτείται ελεγκτής που θα εξασφαλίζει σταθερή DC παροχή προς την ηλεκτρολυτική διάταξη. Με τη σύνδεση στο δίκτυο ο ηλεκτρολύτης θα λειτουργεί κοντά στη μέγιστή απόδοσή του κάτι που ταυτόχρονα σημαίνει βελτίωση στο οικονομικό κομμάτι (μείωση κόστους υδρογόνου).



Σχ.1.6. Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια υποβοηθούμενη και από το δίκτυο

1.6.3. Διασυνδεδεμένη λειτουργία αιολικού πάρκου και παραγωγή υδρογόνου

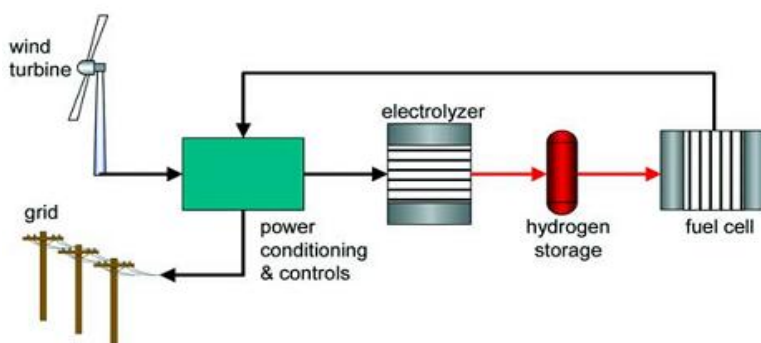
Ένας ηλεκτρολύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εξομάλυνση της ισχύος εξόδου μιας ΑΓ εάν αυτό απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, το πλεόνασμα ενέργειας που στην παρούσα χρονική στιγμή δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο μετατρέπεται σε υδρογόνο. Φυσικά και πάλι παραμένουν τα προβλήματα της κυμαινόμενης λειτουργίας του ηλεκτρολύτη και της χαμηλής αποδοτικότητάς του.



Σχ.1.7. Διασυνδεδεμένη λειτουργία αιολικού πάρκου και παραγωγή υδρογόνου

1.6.4. Επικουρική λειτουργία τεχνολογιών υδρογόνου ως αποθηκευτικό υποσύστημα σε αιολικό σύστημα για ομαλότερη διασυνδεδεμένη λειτουργία

Εξοπλίζοντας μια ΑΓ με μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, όπως για παράδειγμα μια διάταξη ηλεκτρολύτη, κυψέλης καυσίμου και δεξαμενής αποθήκευσης, είναι δυνατό να επιτευχθεί σταθερή παροχή ισχύος προς το δίκτυο, παρά τις όποιες διακυμάνσεις του ανέμου.



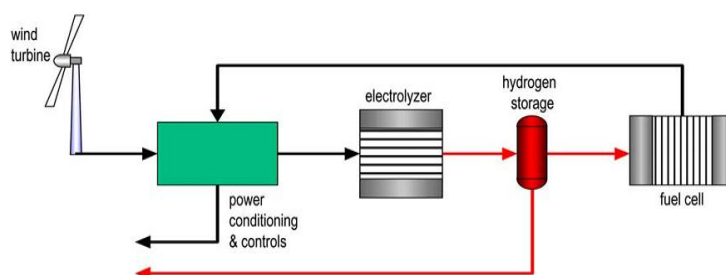
Σχ.1.8. Επικουρική λειτουργία τεχνολογιών υδρογόνου ως αποθηκευτικό υποσύστημα σε αιολικό σύστημα

Εδώ για να γίνει η σύνδεση με τη δεξαμενή αποθήκευσης απαιτείται είτε συμπιεστής στην είσοδό της, είτε ειδικά σχεδιασμένος ηλεκτρολύτης που να παρέχει απευθείας υψηλή πίεση. Στη συγκεκριμένη διάταξη το κόστος είναι υψηλότερο, όχι μόνο λόγω

του υποσυστήματος αποθήκευσης αλλά και λόγω του περίπλοκου ελεγκτή. Το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να ρυθμίζει την είσοδο ενέργειας είτε από την ΑΓ είτε από το δίκτυο, να θέτει σε λειτουργία την κυψέλη καυσίμου όταν η ΑΓ δε μπορεί να καλύψει τη ζήτηση και τέλος να εξασφαλίζει τη μετατροπή AC/DC για τον ηλεκτρολύτη και DC/AC από την κυψέλη στο δίκτυο.

1.6.5.Αυτόνομο σύστημα ΑΓ με παραγωγή υδρογόνου

Η προσθήκη του υποσυστήματος αποθήκευσης έχει νόημα και σε περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας. Εδώ η αποθήκευση επιβάλλεται καθώς πρέπει το αυτόνομο σύστημα να είναι πάντα σε θέση να καλύπτει τη ζήτηση. Αν φυσάει, τότε το αποθηκευτικό σύστημα δρα επικουρικά καλύπτοντας τις απαιτήσεις σε ισχύ στις ώρες αιχμής. Αν ο άνεμος δεν έχει ένταση ικανή ώστε οι ΑΓ να καλύψουν τις απαιτήσεις του φορτίου, το αποθηκευτικό σύστημα αναλαμβάνει το ρόλο της πηγής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η τεχνολογία υδρογόνου έχει να συναγωνιστεί άλλους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες, υπερπυκνωτές, σφονδύλους κ.ά.). Η διαφορά στον ελεγκτή συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι τώρα δε χρειάζεται ο συγχρονισμός με το δίκτυο. Ωστόσο απαιτείται πάλι ο έλεγχος του επιπέδου DC ή AC τάσης.



Σχ.1.9. Αυτόνομο σύστημα ΑΓ με παραγωγή υδρογόνου

1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Θέμα της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συνδυασμένης λειτουργίας ΑΓ με παραγωγή υδρογόνου. Συγκεκριμένα προσεγγίζεται ως μέθοδος για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου ενός αιολικού πάρκου (Α/Π) χρησιμοποιώντας γεννήτρια παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση νερού. Επιπλέον πραγματοποιείται μια οικονομοτεχνική μελέτη ώστε να εξετασθεί το κατά πόσο μια διάταξη ΑΓ και παραγωγής υδρογόνου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα υβριδικό σύστημα είτε αυτόνομο είτε διασυνδεδεμένο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης που μπορούν να εγκατασταθούν ως επικουρικά συστήματα στη διασύνδεση ΑΓ στο δίκτυο. Ακολουθούν συγκρίσεις και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε διάταξης.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία αιολικού συστήματος μαζί με σύστημα εκμετάλλευσης υδρογόνου σε υβριδικό σταθμό σε μη διασυνδεδεμένη λειτουργία. Εξετάζεται η περίπτωση του νησιωτικού δικτύου του Αγίου Ευστρατίου σχετικά με το αν συμφέρει εκτός από τις μπαταρίες, να χρησιμοποιηθεί επιπλέον ηλεκτρολύτης και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου για μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Ο στόχος είναι οι μπαταρίες να χρησιμοποιηθούν για άμεση προσφορά ενέργειας, σε περιόδους αιχμής ενώ το σύστημα υδρογόνου για παροχή ενέργειας σε περιόδους χωρίς άνεμο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αιολικού πάρκου. Χρησιμοποιήθηκε ΑΓ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια. Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου η οποία χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του ΑΠ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου των ΑΓ και της γεννήτριας υδρογόνου που υιοθετήθηκε και οι στόχοι όπου ο έλεγχος αποβλέπει. Για να επιτευχθεί η εξομάλυνση πρέπει αρχικά να οριστεί μια ισχύς εξόδου αναφοράς η οποία τελικά θα προσφέρεται στο δίκτυο, ενώ η υπόλοιπη ισχύς θα απορροφάται από τους ηλεκτρολύτες της γεννήτριας υδρογόνου. Για τον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς χρησιμοποιείται η μέθοδος του κινούμενου εκθετικού μέσου. Επίσης υιοθετείται συγκεκριμένη στρατηγική όσον αφορά στη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου που στοχεύει τόσο στην απορρόφηση της απαιτούμενης ισχύος όσο και στη βιωσιμότητα των ηλεκτρολυτών της.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink. Παρατίθενται οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν στο Simulink και διαγράμματα που επιβεβαιώνουν την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος και του ελεγκτή που σχεδιάστηκε.

Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά σημεία της διπλωματικής εργασίας, συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου και παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας.

2. ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

2.1 Γενικά περί αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας

Οι περισσότερες μορφές ενέργειας προκειμένου να αποθηκευτούν χρειάζεται να μετατραπούν σε μία άλλη «ενδιάμεση» μορφή. Ένα σπάνιο παράδειγμα μορφής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα είναι η θερμότητα. Μπορεί π.χ. να φυλαχτεί στο σκελετό κατάλληλα σχεδιασμένων κτηρίων, στο νερό (όπως στους ηλιακούς-θερμικούς συλλέκτες), ή σε καυτά πετρώματα και βράχους (γεωθερμικώς). Τα απολιθωμένα καύσιμα αντιπροσωπεύουν ένα φυσικό παράδειγμα αποθήκευσης χημικής ενέργειας. Ωστόσο από τότε που ο ηλεκτρισμός καθιερώθηκε καθολικά ως μέσο που μπορεί να μεταφέρει ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις, το ενδιαφέρον για την αποθήκευση ενέργειας εστιάστηκε στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απευθείας αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι εφικτή. Απαιτείται να μετατραπεί πρώτα σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Έτσι για παράδειγμα, μπορεί να αποθηκευτεί:

- ως χημική ενέργεια (μπαταρίες),
- ως μηχανική (σφόνδυλοι),
- σε ηλεκτρικό πεδίο (πυκνωτές) ή σε μαγνητικό πεδίο (μαγνητικοί υπεραγωγοί),
- με συμπίεση αέρα, που στη συνέχεια αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται όταν χρειαστεί.

Ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό χώρο και να είναι σε θέση να διοχετεύει αυτή την ενέργεια ανάλογα με τις απαιτήσεις και πάντα πλήρως ελεγχόμενα. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί με έναν κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης με μεγάλη διάρκεια ζωής και με βαθιά εκφόρτιση χωρίς να καταστρέφεται. Θα πρέπει επίσης να είναι ασφαλές, σχετικά οικονομικό και δίχως απαιτήσεις για συνεχή συντήρηση. Φυσικά δεν υπάρχει αποθηκευτική διάταξη που να συνδυάζει όλους αυτούς τους παράγοντες.

2.2 Συμβολή των αποθηκευτικών συστημάτων

Οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου των ΑΓ μπορούν να σταθούν εμπόδιο την υψηλή διείσδυση των αιολικών συστημάτων στο δίκτυο. Ωστόσο οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν στον έλεγχο και τον περιορισμό αυτών των ανωμαλιών και έτσι να βοηθήσουν στην ενσωμάτωση των ΑΓ. Επιπλέον και σε συνδυασμό με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής (ΣΜΠ), οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να βελτιώσουν και τη συνολική ποιότητα ισχύος

αλλά και την αξιοπιστία των ΣΜΠ, δύο ζητήματα που αφορούν την ομαλή λειτουργία των ΣΗΕ. Τέλος, χάρη στην προσθήκη συστημάτων αποθήκευσης είναι δυνατό να μειωθούν οι εκπομπές που επιβαρύνουν το περιβάλλον, αφού βοηθούν στη μετάβαση στις νέες, καθαρότερες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.3 Παράμετροι των μέσων αποθήκευσης

Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα αποθηκευτικά μέσα είναι πέντε:

- Ικανότητα ισχύος: είναι η μέγιστη δυνατή στιγμιαία έξοδος που δύναται να προσφέρει η διάταξη αποθήκευσης και μετράται ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης, σε kW ή MW.
- Ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας: είναι η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει μια διάταξη, μετρημένη σε kWh ή MWh.
- Απόδοση: πρόκειται για την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει το αποθηκευτικό μέσο ως ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτισή του.
- Χρόνος απόκρισης: το χρονικό διάστημα που χρειάζεται κάθε αποθηκευτικό μέσο για να ξεκινήσει να προσφέρει ενέργεια.

2.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

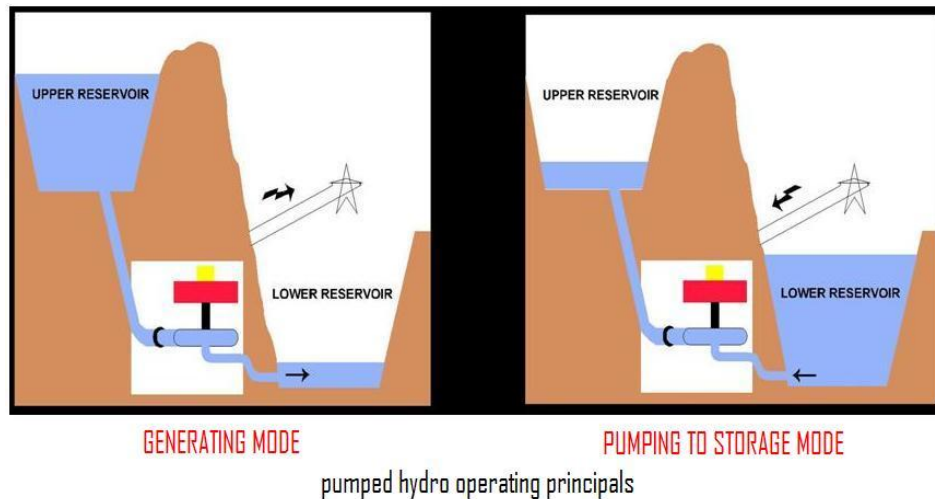
Τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την εφαρμογή, σε μεγάλη, μεσαίας και μικρής κλίμακας, και ανάλογα με τις ανάγκες σε αποθήκευση ενέργειας, σε μακράς και σύντομης διάρκειας αποθήκευσης.

2.4.1 Αντλησιοταμίευση (Pumped-Hydroelectric Energy Storage-PHES)

Πρόκειται για την πιο ώριμη και πιο διαδεδομένη τεχνική αποθήκευσης, ιδανική για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση, γι' αυτό και έχει νόημα σε περιπτώσεις υψηλής διεύθυνσης αιολικών συστημάτων (μόνο τάξεως MW) ή γενικά για σύνδεση σε κύριο δίκτυο. Το σύστημα αποτελείται από δύο μεγάλες δεξαμενές κατασκευασμένες σε διαφορετικό υψόμετρο, αγωγούς νερού, έναν αριθμό από αντλίες, στροβίλους και φυσικά γεννήτριες. Σε περιόδους εκτός αιχμής καταναλώνεται ενέργεια για την άντληση του νερού από την κάτω δεξαμενή στην ψηλότερη, όπου και αποθηκεύεται μέχρι να χρειαστεί. Σε περιόδους αιχμής, αποθηκευμένο νερό στην πάνω δεξαμενή ελευθερώνεται και πέφτοντας από ύψος κινεί τους στροβίλους οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε γεννήτριες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται παραγωγή ενέργειας οποτεδήποτε κριθεί απαραίτητο, χρησιμοποιώντας τις αρχές λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η

απόδοση της διάταξης PHEs ανέρχεται στο 65-85%. Η απόδοση των αντλιών και των στροβίλων είναι αυτή που περιορίζει την απόδοση από υψηλότερα νούμερα [8-10].

Η ικανότητα ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης σε ισχύ εξαρτάται από το ποσοστό της ροής και από την κάθετη απόσταση των δύο δεξαμενών και μετράται σε W. Η ικανότητα αποθηκευμένης ενέργειας (kWh) είναι συνάρτηση του όγκου της υψηλότερης δεξαμενής και της κάθετης απόστασης.



Σχ.2.1. Αρχή λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης

Οι δύο εξισώσεις που δίνουν την ισχύ και την ενέργεια ενός τέτοιου συστήματος είναι οι εξής:

$$P_c = \rho g Q H n \quad (2.1)$$

$$S_c = \frac{\rho g H V n}{3.6 \cdot 10^6} \quad (2.2)$$

Όπου P_c : η ισχύς σε W και S_c : η ενέργεια σε kWh

ρ : η πυκνότητα του νερού kg/m^3

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας m/s^2

Q : οι απώλειες στους στροβίλους m^3/s

H : η κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο δεξαμενών m

n : η απόδοση σε μορφή δεκαδικού

V : ο όγκος νερού που αντλείται και αποθηκεύεται ανά μέρα m^3

(1 kWh = 3.6 MJ)

Το σύστημα της αντλησιοταμίευσης αποτελεί μέσο αποθήκευσης για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (ικανότητα ισχύος συνήθως 100-1000MW). Επίσης έχει σχετικά γρήγορη απόκριση όσον αφορά στην έναυση παροχής ενέργειας (είτε από έναυση από κατάσταση μη λειτουργίας είτε μετάβαση από άντληση σε παραγωγή), και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι κάτι λιγότερο από 10min.

Επιπλέον, με χρήση γεννητριών μεταβλητών στροφών τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να συμβάλλουν στη ρύθμιση της συχνότητας τόσο κατά τη φάση της άντλησης όσο και κατά την παραγωγή. Τέλος έχει υψηλή διάρκεια ζωής (30-60 χρόνια) με χαμηλό κόστος κύκλου (\$0,1-1,4/kWh/κύκλο) [8,9].

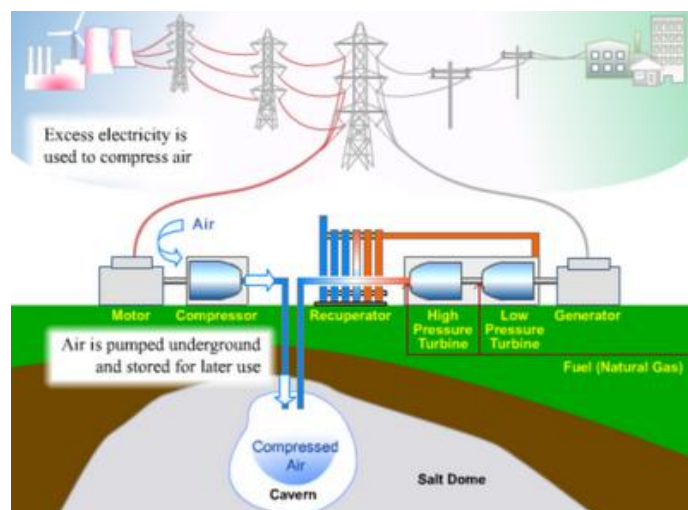
Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η συγκεκριμένη αποθηκευτική διάταξη είναι ο γεωγραφικός περιορισμός. Η κατασκευή του έχει νόημα μόνο σε περιοχή με απότομη υψομετρική διαφορά και δυνατότητα κατασκευής δεξαμενών στο ανώτερο και στο κατώτερο υψομετρικά σημείο. Επιπλέον λόγω των κατασκευών που χρειάζεται στην αρχή (δεξαμενές, κατασκευή αγωγού που ενώνει της δεξαμενές) ο χρόνος κατασκευής είναι μεγάλος (συνήθως 10χρόνια) και το αρχικό κεφάλαιο είναι αρκετά υψηλό (\$600–2000/kW), γι' αυτό και περιορίζονται μόνο σε υψηλής ισχύος εφαρμογές [9].

2.4.2 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage – CAES)

Εδώ η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή συμπιεσμένου αέρα, ο οποίος φυλάσσεται σε υπόγεια δεξαμενή και όταν χρειαστεί ο αέρας ελευθερώνεται και παράγεται εκ νέου, μέσω της περιστροφής αεριοστροβίλων, ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αποτελείται από κινητήρα που οδηγεί τον συμπιεστή, από αεριοστροβίλο υψηλής και χαμηλής πίεσης, χώρο αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα και φυσικά γεννήτρια.

Σε περιόδους με χαμηλή ζήτηση φορτίου ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ενέργεια και οδηγεί τον συμπιεστή, ο οποίος στέλνει στη δεξαμενή αποθήκευσης τον ήδη συμπιεσμένο αέρα. Όταν το δίκτυο απαιτεί ενίσχυση σε περιόδους αιχμής, για να καλύψει τη ζήτηση, η διάταξη λειτουργεί επικουρικά παράγοντας ενέργεια με περιστροφή των αεριοστροβίλων οι οποίοι συνδέονται με το δρομέα της γεννήτριας. Να σημειωθεί ότι κατά την οδήγηση του συμπιεσμένου αέρα στους αεριοστροβίλους, γίνεται μίξη με φυσικό αέριο, για λόγους ομαλότερης λειτουργίας του συστήματος αποσυμπίεσης. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του CAES είναι ότι χρειάζεται συγκεκριμένη υποδομή για τον χώρο αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα.

Η δεξαμενή αποθήκευσης που βρίσκεται στο υπέδαφος μπορεί να κατασκευασθεί τεχνητά κάτι που αυξάνει όμως το κόστος της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό συνήθως η κατασκευή ενός συστήματος CAES γίνεται σε περιοχές όπου υπάρχει κατάλληλος φυσικός γεωλογικός σχηματισμός, όπως σπήλαια ορυκτού άλατος (salt caverns), σπήλαια με ανθεκτικούς βράχους (hard rock caverns).



Σχ.2.2. Αποθήκευση ενέργειας με συμπίεση αέρα

Προς το παρόν υπάρχουν μόνο δύο μονάδες CAES στον κόσμο, μία στις Ηνωμένες Πολιτείες και μία στη Γερμανία. Ωστόσο καμιά από τις δύο δεν κατασκευάστηκε με στόχο να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια. Σχεδιάστηκαν για να εκμεταλλεύονται τις διακυμάνσεις στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η τιμή της είναι χαμηλή λειτουργούν οι συμπιεστές και αποθηκεύεται ενέργεια, για να αποδοθεί κάποια άλλη στιγμή που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι υψηλότερη. Αποθηκεύουν όταν η ηλεκτρική ενέργεια είναι φθηνή και παράγουν όταν είναι ακριβή.

Τα συστήματα CAES έχουν όμοια χαρακτηριστικά με αυτά των συστημάτων αντλησιοταμίευσης σχετικά με την απόδοσή τους. Έχουν μεγάλη ικανότητα ισχύος (50-300MW), μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας (2-50 ώρες), γρήγορη εκκίνηση (9-12 min), δυνατότητα αποθήκευσης για περισσότερο από έναν χρόνο και σχετικά υψηλή απόδοση (60-80%). Επίσης το ύψος του αρχικού κεφαλαίου είναι μικρότερο συγκριτικά με τα συστήματα PHEs (400-800/kW) [8,9].

Το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα συστήματα CAES είναι η εξάρτηση του χώρου αποθήκευσής τους από τη μορφολογία του υπεδάφους. Για να πραγματοποιηθεί η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος χρειάζεται να εντοπισθεί περιοχή με κατάλληλο υπέδαφος, περιορίζοντας έτσι σημαντικά την ευρύτερη εφαρμογή του ως σύστημα αποθήκευσης. Επίσης η χρήση φυσικού αερίου κατά τον κύκλο της εκτόνωσης προκαλεί εκπομπές προς το φυσικό περιβάλλον αλλά επηρεάζει και τη δυνατότητα γρήγορης μεταβολής της ισχύος εξόδου που μπορεί να προσφέρει [9]. Τέλος είναι βιώσιμη επιλογή μόνο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως και η αντλησιοταμίευση, οπότε οι εγκαταστάσεις CAES σε συνδυασμό με ΑΠΕ έχουν νόημα σε περιπτώσεις υψηλής διείσδυσης αιολικών.

2.4.3 Μπαταρίες

Μια μπαταρία αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντάς τη σε χημική. Αποτελείται από τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου, μεταξύ των οποίων υπάρχει κάποιος ηλεκτρολύτης. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να φορτίζονται και να εκφορτίζονται έως κάποιες χιλιάδες φορές, ανάλογα με τον τύπο μπαταρίας και την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται. Ωστόσο βαθύτατες εκφορτίσεις μειώνουν το χρόνο ζωής τους.

2.4.3.α Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead Acid)

Χρησιμοποιούνται για πάνω από 100 χρόνια, είναι οι πιο διαδεδομένες ηλεκτροχημικές συσκευές και οι πιο ώριμες όσον αφορά στην τεχνολογία. Έχουν χαμηλό κόστος (300-600\$/kW), υψηλή αξιοπιστία, χαμηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης (μόλις 1%) και υψηλή απόδοση (65-80%) [8,9]. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση αποθήκευσης μολύβδου-οξέος (10MW/40MWh - \$18.2 million) χρησιμοποιήθηκε το 1988 στην πόλη Chino της Καλιφόρνια για αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους με χαμηλή ζήτηση και παροχή ενέργειας σε διαστήματα αιχμής [9,11].

Το γεγονός όμως ότι έχουν μικρό κύκλο ζωής (500-1000 κύκλοι) τις κάνει ακατάλληλες για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Επίσης, έχουν χαμηλή πυκνότητα ενέργειας (30-50Wh/kg), χρειάζονται συχνή συντήρηση και δεν είναι ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον. Τέλος, παρουσιάζουν σημαντική εξάρτηση από τη θερμοκρασία με αποτέλεσμα η απόδοσή τους να πέφτει πλησιάζοντας προς χαμηλότερες θερμοκρασίες, και επομένως να απαιτείται κατάλληλο σύστημα ρύθμισης. Να σημειωθεί ότι με την εξελιγμένη εκδοχή των μπαταριών μολύβδου-οξέος με ρύθμιση βαλβίδας, έχει επιτευχθεί βελτίωση στα θέματα της συχνότητας συντήρησής τους, της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και της αυτοεκφόρτισης.

2.4.3.β Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου ανταγωνίζονται τις μολύβδου-οξέος γιατί εμφανίζουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας (50-75Wh/kg) και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000-2500 κύκλους). Είναι κατάλληλες για συνεχή παροχή ισχύος και για εφαρμογές εκκίνησης γεννητριών [8,9]. Στο Golden Valley, Fairbanks, AK, υπάρχει η δεύτερη ισχυρότερη μπαταρία παγκοσμίως, η οποία μπορεί να προσφέρει 40MW για 7min και χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση νησιωτικού δικτύου [9,11].

Στη σύγχρονη αγορά οι μπαταρίες NiCd παρουσιάζουν ύφεση εδώ και μία δεκαετία, λόγω των επιπτώσεων του τοξικού καδμίου που οδήγησαν και την Ευρωπαϊκή Ένωση στην απόφαση απαγόρευσής τους (Σεπτέμβριος 2008), και λόγω του ότι η εξέλιξη στην τεχνολογία των μπαταριών δε δικαιολογεί πια το κόστος τους για κάποιες εφαρμογές (\$1000/kWh) [9]. Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, παρουσιάζουν υψηλότερες απώλειες ενέργειας λόγω αυτοεκφόρτισης (2-5% του φορτίου τους σε θερμοκρασία δωματίου, έναντι 1%). Επιπλέον σχετικά με τη χρήση τους σε συστήματα ΑΠΕ, αποδεικνύονται ακατάλληλες λόγω του ιδιαίτερου χαρακτηριστικού «μνήμης» που διαθέτουν: Αν δεν αποφορτιστούν πλήρως πριν αρχίσει νέος κύκλος φόρτισης, οι μπαταρίες αρχίζουν να χάνουν την ισχύ τους. Εφόσον η λειτουργία των φωτοβολταϊκών και των αιολικών συστημάτων συνοδεύεται από διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου λόγω του χαρακτηριστικού μνήμης δεν αποτελούν οικονομικά συμφέρουσα λύση.

2.4.3.γ Μπαταρίες Νατρίου-Θείου (NaS)

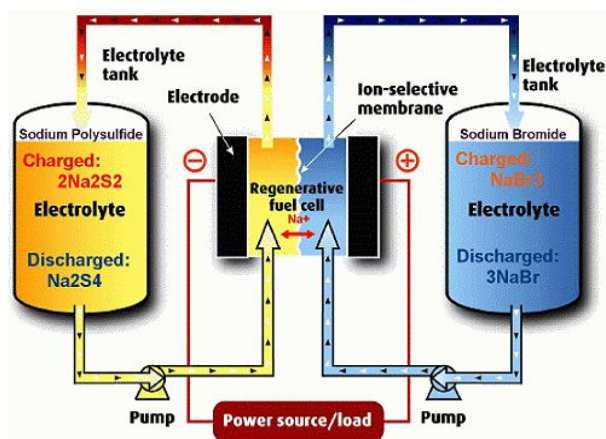
Την τελευταία δεκαετία οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης με τεχνολογία νατρίου-θείου παρουσιάζουν εκθετική αύξηση, από 10MW (1998) σε 305MW (2000MWh) το 2008[9]. Αρχικά έχουν το πλεονέκτημα της μη τακτικής ανάγκης για συντήρηση. Επιπλέον πρόκειται για διατάξεις φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς όντας σφραγισμένες, δεν επιτρέπουν εκπομπές κατά τη λειτουργία τους και διότι το 99% του βάρους της μπαταρίας είναι ανακυκλώσιμα υλικά. Ακόμη παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ισχύος, καθώς υπάρχουν μπαταρίες NaS με μικρή ικανότητα 50kW ενώ η συνήθης ικανότητά τους ανέρχεται στο 1MW.

Το γεγονός ότι παρουσιάζουν τρεις φορές μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος (150-240 W/kg), μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (ανέρχεται στους 2500 κύκλους) και υψηλή απόδοση (75-90%) κάνει τις μπαταρίες νατρίου-θείου κατάλληλες για συνδυασμό με ΑΠΕ [8]. Απόδειξη αποτελεί η εγκατάσταση ενός συστήματος 34MW/245MWh στη βόρεια Ιαπωνία, με στόχο να λειτουργεί επικουρικά για ένα αιολικό πάρκο ικανότητας 51MW, το οποίο είναι και το μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως (εξαιρώντας τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και συμπιεσμένου αέρα) [9,12].

Το μειονέκτημα με τις μπαταρίες νατρίου-θείου είναι η ανάγκη διατήρησης της θερμοκρασίας τους σε υψηλές τιμές (300°C -350°C) για να είναι αποδοτική η λειτουργία τους, κάτι που όμως απαιτεί κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Επίσης το κόστος του αρχικού κεφαλαίου είναι υψηλό και ανέρχεται στα \$2000/kW (ή \$350/kWh) [9].

2.4.3.δ Μπαταρίες Ροής (Flow Batteries)

Οι επόμενες δύο (και τελευταίες) κατηγορίες μπαταριών που αναφέρονται ανήκουν στην πιο εξελιγμένη κατηγορία των μπαταριών ροής, που συνδυάζουν την τεχνολογία των κοινών μπαταριών με αυτή των κυψελών καυσίμου. Ο ένας από τους ηλεκτρολύτες της μπαταρίας βρίσκεται αποθηκευμένος σε υγρή μορφή σε εξωτερικό χώρο και κατά την απορρόφηση ή παραγωγή ενέργειας ρέει προς το κύτταρο όπου συντελείται η ηλεκτροχημική αντίδραση. Αυτό που επιτυγχάνεται με τις μπαταρίες ροής είναι η απεξάρτηση της ικανότητας σε αποθηκευμένη ενέργεια, από την ικανότητα της συσκευής σε ισχύ. Επίσης η αυτοεκφόρτιση είναι πια αμελητέα, ενώ το βάθος της εκφόρτισης δεν επηρεάζει τη βιωσιμότητα της μπαταρίας. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά, κάνουν τις μπαταρίες ροής πιο ευέλικτες για μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών συγκριτικά με τις κοινές. Τέλος, χάρη στον μικρό χρόνο απόκρισής τους (τάξης msec) μπορούν να συνεργαστούν καλύτερα με συστήματα ΑΠΕ.



Σχ.2.3. Μπαταρία ροής

Ψευδαργύρου-Βρωμίου (ZBR)

Οι μπαταρίες ροής ψευδαργύρου-βρωμίου έχουν απόδοση 75%, ικανότητα απόδοσης έως και 200% της ονομαστικής τους ισχύος, ενεργειακή πυκνότητα που ανέρχεται στις 75-85Wh/kg, ενώ όσον αφορά στη διάρκεια ζωής της, φτάνει τους 2000 κύκλους με δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης. Είναι κατάλληλες κυρίως για μικρής κλίμακας εφαρμογές, παρόλα αυτά ήδη από το 1991 έχει δοκιμαστεί και σε μεσαίας κλίμακας (π.χ. Kyushu Electric Power 1MW/4MWh, PG&E California 2005, 2MW), ενώ στο τέλος του 2009 η εγκατεστημένη ισχύς ανά τον κόσμο ήταν 4MW με δυνατότητα αποθήκευσης 8MWh[9,11].

Βαναδίου-Οξειδοαναγωγής (Vanadium redox-VRB)

Έχουν δοκιμαστεί και εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές και έχουν χαρακτηριστεί ως το αποθηκευτικό σύστημα με τις λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απομονωμένα συστήματα, για

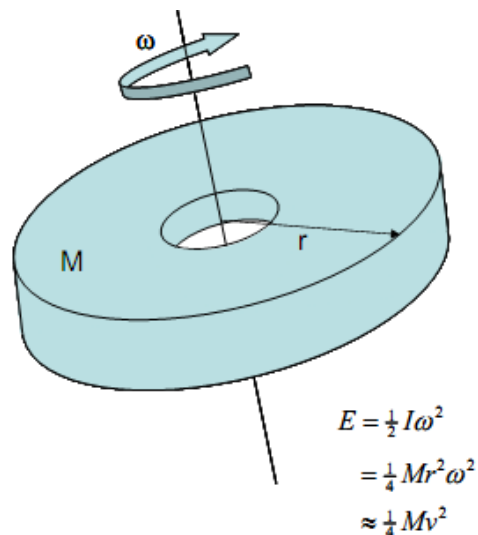
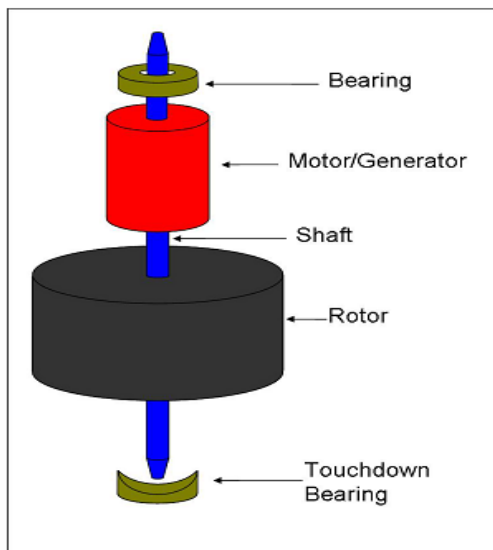
σταθεροποίηση της λειτουργίας των ΑΠΕ απορροφώντας τις διακυμάνσεις, για βελτιστοποίηση ισχύος [8,9]. Κατασκευάζονται σε μονάδες των 5kW/10kWh, έχουν απόδοση 75-80% και με κατάλληλη ετήσια συντήρηση φτάνουν σε υψηλή διάρκεια ζωής (έως 12000 ώρες) και μάλιστα με δυνατότητα πλήρους εκφόρτισης, χωρίς φθορά των ηλεκτρολυτών. Επιπλέον μπορούν να αναβαθμιστούν με σχετικά μικρό κόστος, αντικαθιστώντας τους χώρους αποθήκευσης των ηλεκτρολυτών με άλλους μεγαλύτερου όγκου, ή προσθέτοντας επιπλέον ηλεκτροχημικά κύτταρα προς αύξηση της ισχύος.

Ωστόσο λόγω της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας $16-33\text{kWh/m}^3$, απαιτούν μεγάλο χώρο γι' αυτό και περιορίζονται σε μεσαίας κλίμακας εφαρμογές ΑΠΕ. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση VRB είναι 4MW/6MWh (Tomamae Wind Villa, Japan, 2005) για επικουρική λειτουργία σε ένα αιολικό πάρκο 32MW [9].

2.4.4 Σφόνδυλοι ή Στρεφόμενες μάζες (*Flywheels*)

Η τεχνολογία των συστημάτων σφονδύλων στηρίζεται στην περιστροφική κίνηση μιας μάζας που αποθηκεύει και παράγει ενέργεια ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Η ηλεκτρική ενέργεια εδώ μετατρέπεται και αποθηκεύεται με τη μορφή κινητικής. Το βασικό στοιχείο του συστήματος είναι ο άξονας του δρομέα του κινητήρα/γεννήτριας πάνω στον οποίο βρίσκεται η στρεφόμενη μάζα. Ο άξονας συγκρατείται στο πάνω και στο κάτω μέρος από δύο μαγνητικές βάσεις, προς μείωση της τριβής, και περιστρέφεται στο κενό με στόχο τη μείωση των απωλειών (Σχ13).

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν ενέργεια επιταχύνοντας τον άξονα σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Όσο ο άξονας συνεχίζει να περιστρέφεται, υπάρχει ενέργεια αποθηκευμένη στο σύστημα. Όταν χρειαστεί να παραχθεί ενέργεια ο κινητήρας συνδέεται κατάλληλα ώστε να λειτουργεί ως γεννήτρια. Όσο το σύστημα εκφορτίζεται, ο δρομέας επιβραδύνει έως ότου σταματήσει τελείως.



Σχ.2.4. Διάταξη συστήματος αποθήκευσης με χρήση στρεφόμενης μάζας(αριστερά) και οι σχέσεις που αποδίδουν την αποθηκευμένη ενέργεια (δεξιά)

Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει το σύστημα σφονδύλων καθορίζεται από το δρομέα της διάταξης και είναι ανάλογη της μάζας του και του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής (Σχ13). Προκύπτουν έτσι δύο προσεγγίσεις για τη σχεδίαση τέτοιων συστημάτων: Μεγάλοι σε μέγεθος και μάζα άξονες που στρέφονται αργά και μικροί και ελαφροί άξονες με μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Οι δύο στρατηγικές σχεδίασης μεγαλώνουν το εύρος εφαρμογών τέτοιων συστημάτων.

Η ικανότητα σε ισχύ και σε ενέργεια είναι δυνατό να διαχωριστούν στις διατάξεις των στρεφόμενων μαζών. Αν η εφαρμογή απαιτεί μεγάλη ικανότητα σε ισχύ τότε επιλέγεται σχεδίαση συστήματος χαμηλής ταχύτητας: προτιμάται βαρύς δρομέας από ατσάλι που φτάνει σε ταχύτητες περίπου 10000ΣΑΛ και το σύστημα μπορεί να αποδώσει ως και 1650kW αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα (120sec). Αντίθετα αν στόχος της εφαρμογής είναι αποθήκευση όσο το δυνατό περισσότερης ενέργειας τότε χρησιμοποιούνται συστήματα σφονδύλων μεγάλων ταχυτήτων: ο δρομέας σε αυτή την περίπτωση είναι ελαφρύς και μπορεί να αναπτύξει ταχύτητες τάξης δεκάδων χιλιάδων στροφών ανά λεπτό (80000-100000ΣΑΛ). Το σύστημα μπορεί να προσφέρει ενέργεια όταν ζητηθεί έως και για μία ώρα, αλλά με μέγιστη ισχύ στα 750kW.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά τους, τα συστήματα σφονδύλων έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (15-20 χρόνια) και υψηλή απόδοση 90-95%. Το κόστος αρχικού κεφαλαίου όμως είναι αρκετά μεγάλο (\$1000-5000/kWh), όπως και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης που κυμαίνεται μεταξύ 55% και 100% ανά μέρα [8,9].

Υπάρχουν ήδη παραδείγματα όπου τα εν λόγω συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ΑΠΕ. Στη Νορβηγία υπάρχει εγκατάσταση στρεφόμενης μάζας 5kWh, 200kW που χρησιμοποιείται επικουρικά σε σύστημα αιολικών με τεχνολογίες υδρογόνου για μικρά δίκτυα στο νησί Utsira [9,13]. Υπάρχουν κι άλλα παραδείγματα με εγκαταστάσεις στρεφόμενων μαζών να χρησιμοποιούνται για εξομάλυνση και σταθεροποίηση της ισχύος εξόδου ΑΓ σε μικρό νησιωτικό δίκτυο και μελέτες για την προσθήκη τους και σε ΦΒ συστήματα για αντιμετώπιση φαινομένων σκίασης [14]. Τέλος, υπάρχει και μια μοναδική τεχνική που εφαρμόζεται αποκλειστικά σε αιολικά συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο, σύμφωνα με την οποία το ρόλο των στρεφόμενων μαζών αναλαμβάνουν οι ίδιες οι ΑΓ με στόχο τη μείωση των διακυμάνσεων της συχνότητας [15].

2.4.5 Υπεραγωγία πηνία (*Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES*)

Πρόκειται για συσκευή αποθήκευσης ενέργειας σε μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται με τη βοήθεια υπεραγωγίου πηνίου που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα. Το πηνίο είναι φτιαγμένο από υπεραγωγίο υλικό για μείωση απωλειών θερμότητας ενώ για να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η ιδιότητα της υπεραγωγιμότητας θα πρέπει να βρίσκεται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Η ενέργεια που αποθηκεύεται είναι:

$$E_C = LI^2/2 \quad (2.3)$$

Όπου L: η αυτεπαγωγή,

I: η τιμή του ρεύματος

Η απόδοση των υπεραγωγίων πηνίων είναι 90%-99%, είναι ικανά για ταχύτατη εκφόρτιση (λιγότερο από λεπτό) και αποδίδουν την ονομαστική ισχύ τους αλλά μόνο για μερικά δευτερόλεπτα. Επίσης μπορούν να υποστούν χιλιάδες κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης χωρίς κάποια επίπτωση στο πηνίο επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής στα 20 χρόνια. Ωστόσο έχουν μεγάλη ευαισθησία στη θερμοκρασία η οποία πρέπει να διατηρείται σε πολύ χαμηλές τιμές ώστε να μη χάνεται η ιδιότητα της υπεραγωγιμότητας. Απαιτείται επομένως κατάλληλο σύστημα ψύξης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας, που λόγω και της υψηλής κατανάλωσής του, ανεβάζει το κόστος της διάταξης (\$1000-10000/kW)[9]. Το χαρακτηριστικό αυτό κάνει τα υπεραγωγία πηνία ακατάλληλα για λειτουργία σε καθημερινή βάση όπως σε εφαρμογές εξομάλυνσης ισχύος και γενικά σε συνδυασμό με ΑΠΕ.

Συστήματα υπεραγωγίων πηνίων κλίμακας 1-10MW είναι εμπορικά διαθέσιμα και ήδη χρησιμοποιούνται. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση περιλαμβάνει μονάδες των 3MW/0.83 kWh (Wisconsin by American Superconductor, 2000)[9].

2.4.6 Πυκνωτές και Υπερπυκνωτές (capacitors & ultracapacitors)

Στα αποθηκευτικά συστήματα με πυκνωτές ή υπερπυκνωτές η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη συσσώρευση θετικών και αρνητικών φορτίων. Μπορούν να φορτιστούν ταχύτερα σε σύγκριση με τις κοινές μπαταρίες και αντέχουν πάνω από 100000 κύκλους[9]. Επειδή είναι αποθηκευτικά μέσα με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, είναι κατάλληλα για εφαρμογές με γρήγορες εναλλαγές μεταξύ κατάστασης φόρτισης και εκφόρτισης.

Οι πυκνωτές συσσωρεύουν φορτία σε παράλληλες πλάκες που διαχωρίζονται με διηλεκτρικό υλικό. Έχουν διάρκεια ζωής περίπου 5 χρόνια και η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 60% και 70% [9]. Έχουν αναπτυχθεί για μικρής κλίμακας εφαρμογές (λίγων kW) και βρίσκουν εφαρμογή στα συστήματα ισχύος κυρίως για διόρθωση του συντελεστή ισχύος και για ενίσχυση της τάσης και της αέργου ισχύος. Χρησιμοποιούνται όμως και σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, βοηθητικά σε άλλα αποθηκευτικά συστήματα, για να διευκολύνουν τη διεύθυνση των ΑΠΕ, μέσω της αύξησης της ζωής των μπαταριών και μέσω δυναμικής αποκατάστασης της τάσης. Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή δίνεται από την εξίσωση[8]:

$$E=CV^2/2 \quad (2.4)$$

όπου E: η αποθηκευμένη ενέργεια (σε J), V: η εφαρμοζόμενη τάση και C: η χωρητικότητα του η οποία προκύπτει από την σχέση:

$$C=A\varepsilon_r\varepsilon_0/d \quad (2.5)$$

A: η επιφάνεια των πλακών, d: η μεταξύ τους απόσταση, ε_0 : η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ε_r : η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού.

Οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια με τη βοήθεια διαλύματος ηλεκτρολύτη αντί για στερεό διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών. Έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής συγκριτικά με τους απλούς πυκνωτές (8-10 χρόνια) μεγαλύτερη απόδοση (95%). Επίσης έχουν ικανότητα βαθιάς εκφόρτισης και υπερφόρτισης, πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος (100kW/kg) αλλά υστερούν στην πυκνότητα ενέργειας (20-70 MJ/m³). Ακόμη εμφανίζουν μεγάλες απώλειες ενέργειας που κυμαίνονται μεταξύ 5-40%/μέρα αλλά και υψηλό κόστος που ανέρχεται στα \$20000/kWh [9].

Συνδέοντας πυκνωτές ή υπερπυκνωτές στον κόμβο συνεχούς ρεύματος των γεννητριών ΑΠΕ είναι δυνατό να αποφευχθεί η χρήση μετατροπέα DC/AC και κάποιων ελεγκτικών συστημάτων, μειώνοντας έτσι το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον μπορούν να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση βυθίσεων τάσης του δικτύου και στο φιλτράρισμα υψηλών αρμονικών εξομαλύνοντας έτσι την παραγωγή από ΑΠΕ.

2.4.7 Υδρογόνο (Hydrogen)

Η περίπτωση του υδρογόνου διαφέρει από τη συμβατική ιδέα της αποθήκευσης ενέργειας γιατί χρησιμοποιεί διαφορετικές διεργασίες για το στάδιο της παραγωγής, της αποθήκευσης και της χρήσης. Η παραγωγή μπορεί να γίνει και από ορυκτά καύσιμα αλλά η ηλεκτρόλυση είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον. Κατά τη διαδικασία της παραγωγής υδρογόνου, ο ηλεκτρολύτης απορροφά ενέργεια, διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και διασπά το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο. Το υδρογόνο συλλέγεται και αποθηκεύεται. Για την παραγωγή ενέργειας από υδρογόνο χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου οι οποίες μετατρέπουν ξανά το υδρογόνο και το οξυγόνο σε νερό.

Οι ηλεκτρολυτικές μονάδες είναι κβαντισμένοι μεγέθους κάτι που σημαίνει ότι η συνολική ικανότητα μιας συσκευής αποθήκευσης είναι ανάλογη του αριθμού των κελιών που αποτελούν μια στοίβα ηλεκτρολυτών. Το μεγαλύτερο σύστημα ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί, μπορεί να παράγει $485 \text{ Nm}^3/\text{h}$ που ισοδυναμεί με ισχύ εισόδου 2,5MW. Η ζωή του ηλεκτρολύτη δεν μπορεί να καθοριστεί, καθώς πρόκειται για νέα τεχνολογία, εκτιμάται όμως γύρω στα 5-10 χρόνια [8].

Τα συστήματα υδρογόνου μπορούν να συμβάλλουν στη διεύθυνση των ΑΠΕ με την προϋπόθεση ότι ο ηλεκτρολύτης δύναται να λειτουργήσει:

- Με υψηλή απόδοση
- Με ικανοποιητική δυναμική απόκριση
- Για μεγάλο εύρος εισόδου
- Σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας

Χάρη σε βελτιώσεις στην τεχνολογία των ηλεκτρολυτών, η εξέλιξη από τον αλκαλικό στον ηλεκτρολύτη ανταλλαγής πρωτονίων συνέβαλε στην ικανοποίηση των άνω προδιαγραφών. Το ζήτημα της απόδοσης όμως (40-60%) παραμένει και χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση.

Η μειωμένη απόδοση οφείλεται στις απανωτές μετατροπές ενέργειας που απαιτούνται. Από την παραγωγή μέχρι την εκ νέου χρήση του το υδρογόνου υφίσταται έναν αριθμό διεργασιών: 1) υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με απόδοση 85%, 2) αποθηκεύεται με απόδοση 65-70%, 3) καταναλώνεται από μια κυψέλη καυσίμου για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση 40-80%. Συνολικά ο κύκλος αυτός ρίχνει την απόδοση του υδρογόνου σε τιμές 22-48% [8]. Αν δε μέχρι την τελική χρησιμοποίησή του υπάρξει διαδικασία αποθήκευσης περισσότερες φορές τότε η απόδοση πέφτει κι άλλο.

Το εκτιμώμενο κόστος της αποθήκευσης υδρογόνου κυμαίνεται μεταξύ \$500-10000/kW. Επειδή το ύψος του αρχικού κεφαλαίου είναι (προς το παρόν) υψηλό συγκριτικά με άλλα συστήματα αποθήκευσης και λόγω της χαμηλής απόδοσης, η χρησιμοποίηση συστημάτων υδρογόνου για διεύθυνση των ΑΠΕ δε συμφέρει οικονομικά. Ένα σύστημα με ΑΓ και υδρογόνο θα πρέπει να πουλά την ενέργεια που

παράγεται από την κυψέλη καυσίμου σε τιμή \$1.76-2.5/kWh για να είναι ανταγωνιστικό [9]. Ωστόσο αναμένεται πτώση της τιμής των κυψελών καυσίμου σε επίπεδα \$15-145/kWh την επόμενη δεκαετία [16].

Παρά το υψηλό κόστος υπάρχουν ήδη εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν συστήματα υδρογόνου. Στο νησί Utsira της Νορβηγίας από το 2004 λειτουργεί μονάδα αιολικής ενέργειας-υδρογόνου για απομονωμένο δίκτυο. Μια ΑΓ 600kW συνεργάζεται με ηλεκτρολύτη των 48kW, δεξαμενή αποθήκευσης 12m³ και κυψέλη καυσίμου των 10kW. Το υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή και αρκεί για την πλήρη κάλυψη των αναγκών 10 νοικοκυριών για 2-3 μέρες δίχως άνεμο[13]. Στην πόλη Naksokon στη Δανία ήδη από τον Μάιο του 2007 μια όμοια εγκατάσταση παράγει υδρογόνο. Χρησιμοποιεί ηλεκτρολύτη 8kW, κυψέλη 10,5kW και δεξαμενή 25m³. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους αιχμής ενώ για την αύξηση της απόδοσης υπάρχει στόχος κυψέλες καυσίμου να τοποθετηθούν σε 35 σπίτια για να συνδυάζουν παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας[17].

2.5 Σύνοψη

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί πίνακες όπου γίνεται σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών και διατάξεων αποθήκευσης. Στον πίνακα 2.1 γίνεται σύγκριση των διαφόρων συστημάτων όσον αφορά στο χρονικό διάστημα αποθήκευσης [18]. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται πιθανές εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης και ενδεχόμενα όπου μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά συστήματα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας.

Full Power Duration of Storage	Applications of Storage and Possible Replacement of Conventional Electricity System Controls.	Biomass.	Hydrogen, Electrolysis +Fuel Cell	Large Hydro	Compressed Air Energy Storage (CAES)	Heat Or Cold Store + Heat Pump.	Pumped Hydro	Redox Flow Cells.	New And Old Battery Technologies	Flywheel	Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	Supercapacitor	Conventional Capacitor or Inductor
4 Months	Annual smoothing of loads, PV, wind and small hydro.	✓	✓	✓									
3 Weeks	Smoothing weather effects: load, PV, wind, small hydro.	✓	✓	✓									
3 Days	Weekly smoothing of loads and most weather variations.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					
8 Hours	Daily load cycle, PV, wind, Transmission line repair.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
2 Hours	Peak load lopping, standing reserve, wind power smoothing. Minimisation of NETA or similar trading penalties.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
20 Minutes	Spinning reserve, wind power smoothing, clouds on PV		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
3 Minutes	Spinning reserve, wind power smoothing of gusts.		✓				✓	✓	✓	✓			
20 Seconds	Line or local faults. Voltage and frequency control. Governor controlled generation.							✓	✓	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 2.1: Τεχνολογίες αποθήκευσης και εφαρμογές

Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος των εφαρμογών όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα παραγωγής-αποθήκευσης υδρογόνου είναι το μεγαλύτερο συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του πίνακα. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται κάποια οικονομικά στοιχεία σχετικά με το κόστος ισχύος και ενέργειας 4 συστημάτων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας αιολικής ενέργειας. Είναι φανερό πως προς το παρόν το σύστημα υδρογόνου παρουσιάζει το υψηλότερο κόστος συγκριτικά με την ώριμη τεχνολογία των μπαταριών, της αντλησιοταμίευσης και των συστημάτων συμπίεσης αέρα.

Σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Αποτελεσματικότητα
Μπαταρίες (μολύβδου-οξέος)	175	200	Αρκετές μέρες	0,85
Υδρογόνο	500-10000	15-200	Αρκετές μέρες	0,59
Συμπιεσμένος αέρας	4150	1	Αρκετές μέρες	0,79
Αντλησιοταμίευση (500-1500MW)	1100	10	Αρκετές μέρες	0,87

Πίνακας 2.2: Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, κατάλληλες για αποθήκευση αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας

Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές και η καταλληλότητα των συστημάτων αποθήκευσης [8]. Μπορεί να διακρίνει κανείς την ευελιξία που παρουσιάζουν τα συστήματα εκμετάλλευσης υδρογόνου και οι διάφορες τεχνολογίες μπαταριών.

	Storage Technology	Pumped hydro	Compressed air	Flywheel	Supercapacitors	Superconducting magnets	Lead-acid batteries	Advanced batteries	Flow batteries	Hydrogen fuel cell	Hydrogen engine
Storage Application											
Transit and end-use ride-through				X	X	X	X	X	X	X	X
T&D stabilisation and regulation				X	X	X	X	X	X	X	X
Peak generation		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fast response spinning reserve		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Conventional spinning reserve		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Uninterruptible power supply		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Renewable integration		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Load levelling		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Load following		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Emergency back-up		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Renewables back-up		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Πίνακας 2.3: Καταλληλότητα συστήματος αποθήκευσης ανάλογα με την εφαρμογή

3. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Ένα υβριδικό σύστημα χρησιμοποιεί πάνω από μία μεθόδους παραγωγής ενέργειας για να καλύπτει την απαιτούμενη ενέργεια. Συνήθως, συνδυάζει πηγές ενέργειας όπως ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικροϋδροηλεκτρική ισχύ, υδροηλεκτρική ισχύ ποταμών, βιομάζα. Συχνό φαινόμενο, όμως, είναι να συνδυάζεται μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μία συμβατική πηγή όπως η τροφοδοσία από το τοπικό δίκτυο ή από ηλεκτρογεννήτριες πετρελαίου (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος - H/Z), μπαταρίες και γεννήτριες μετατροπής. Γενικά τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν τις μορφές ενέργειας για να τροφοδοτούν το σύστημα συνεχώς με σταθερή τάση, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους διακοπής της τροφοδοσίας. Χαρακτηρίζονται ως δυναμικά συστήματα, καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσονται ανάμεσα στις διαθέσιμες πηγές ενέργειας ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να εξαρτώνται κατά το ελάχιστο από τις μεταβολές των εξωγενών παραγόντων, όπως το τοπικό δίκτυο, η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, η ροή του νερού κ.τ.λ.[19].

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την εγκατάσταση υβριδικού σταθμού παραγωγής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένο σύστημα στο οποίο χρησιμοποιούνται συμβατικές μονάδες παραγωγής. Στόχος είναι να εξετασθούν διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις ώστε να γίνει ανεξάρτητη από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με ταυτόχρονη διείσδυση συστημάτων παραγωγής ΑΠΕ και επικουρικών συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά εξετάζεται και η αποδοτικότητα των διαφόρων τεχνολογιών. Για να είναι ρεαλιστική η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία για το νησιωτικό σύστημα του Αγ. Ευστρατίου του νομού Λέσβου.

3.1 Παρουσίαση ενός πραγματικού συστήματος

Ο Άγιος Ευστράτιος είναι νησί του βορειοανατολικού Αιγαίου που υπάγεται στο νομό Λέσβου. Το νησί δεν είναι διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και η κάλυψη της ζήτησης βασίζεται σε συμβατικές μονάδες παραγωγής. Στη μελέτη που ακολουθεί στόχος είναι να εξετασθούν διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις ώστε να γίνει ανεξάρτητη από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με ταυτόχρονη διείσδυση συστημάτων παραγωγής ΑΠΕ και επικουρικών συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά εξετάζεται και η αποδοτικότητα των διαφόρων τεχνολογιών.

3.1.1. Δεδομένα συστήματος

Υπάρχουν στοιχεία για τη ζήτηση κατά τη διάρκεια του έτους 2008 από τη ΔΕΗ/ΔΔΝ. Σύμφωνα με αυτά, η χρονοσειρά του φορτίου παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, με τη μέγιστη ζήτηση να παρατηρείται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Αύγουστο. Η αιχμή της ζήτησης το 2008 ανήλθε σε 307kW ως μέση ωριαία τιμή και περίπου 350kW ως μέγιστη τιμή. Ο συντελεστής φορτίου του συστήματος είναι 36%, και κατ' επέκταση το μέσο φορτίο του νησιού είναι $P=126\text{kW}$, ενώ η μέση τιμή του συντελεστή ισχύος είναι 0.938 επαγωγικός. Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας που αντιστοιχεί στη χρονοσειρά αυτή είναι 1023 MWh. Η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου 2800 kWh, με τη μέγιστη τιμή της όμως να ανέρχεται σε 5500 kWh κατά τις ημέρες αιχμής του Αυγούστου [20].

3.1.2. Δεδομένα του ήδη εγκατεστημένου σταθμού παραγωγής

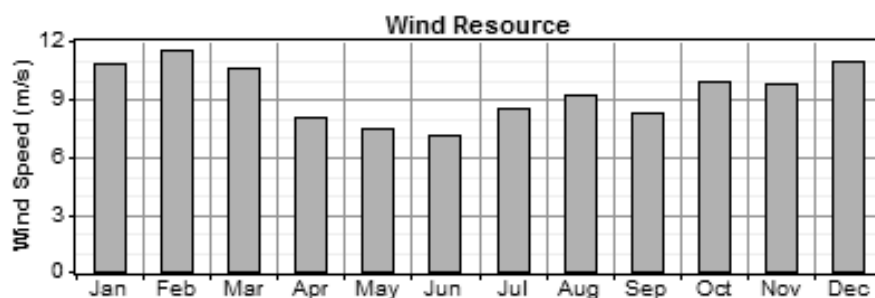
Ο εγκατεστημένος Τοπικός Σταθμός Παραγωγής (ΤΣΠ) του νησιού περιλαμβάνει πέντε μονάδες καύσης πετρελαίου diesel συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 840 kW, τα επιμέρους τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Για το έτος 2008 το μέσο ετήσιο μεταβλητό κόστος (χωρίς το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂) ήταν 331.65 €/MWh και το ανηγμένο ετήσιο σταθερό κόστος λειτουργίας του ΤΣΠ 312 €/MWh. Με βάση τα στοιχεία αυτά το συνολικό κόστος παραγωγής ανέρχεται σε 643.65 €/MWh, τιμή εξαιρετικά υψηλή αλλά μάλλον χαρακτηριστική των νησιών πολύ μικρού μεγέθους με τροφοδότηση από ΤΣΠ [20].

ΜΟΝΑΔΑ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΕΤΟΣ ΕΝΤΑΞΗΣ	ΕΤΟΣ ΛΗΞΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ
MAN D2566/ME	DIESEL	1988	2018	90	90	45
MAN D2566/ME	DIESEL	1988	2018	90	90	45
HYUNDAI KD8AX	DIESEL	2002	2032	220	220	110
HYUNDAI KD8AX	DIESEL	2008	2038	220	220	110
NEA HYUNDAI KD8AX	DIESEL	2008	2038	220	220	110
ΣΥΝΟΛΟ				840	840	-

Πίνακας 3.1: Ήδη εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες παραγωγής

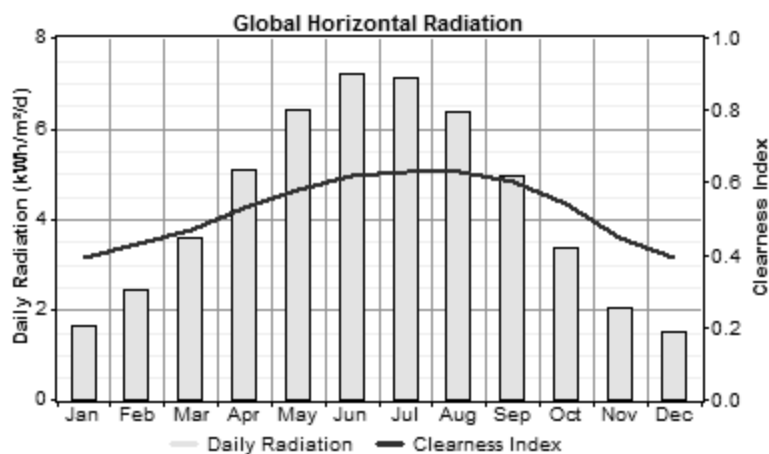
3.1.3. Μετεωρολογικά δεδομένα

Για να περιγραφεί το αιολικό δυναμικό του Αγ. Ευστρατίου ελήφθησαν πληροφορίες από την ΕΜΥ που αναφέρονται σε γειτονικό νησί. Οι τιμές της μέσης μηνιαίας έντασης ανέμου είναι οι παρακάτω:



Σχ.3.1: Μέσες μηνιαίες εντάσεις ανέμου

Για τη μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από μια τεχνική οδηγία (20701-3/2010) του Τεχνικού Επιμελητηρίου σχετικά με κλιματικά δεδομένα διάφορων ελληνικών περιοχών [21]. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ.3.2) παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας μαζί με το μέσο μηνιαίο συντελεστή αιθριότητας.



Σχ. 3.2: Ηλιακή ακτινοβολία, μέσες μηνιαίες τιμές

3.2 Μελέτη για την ενσωμάτωση υβριδικού σταθμού στο σύστημα του Αγίου Ευστρατίου

Εξετάσθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER τα εξής 4 σενάρια υβριδικού σταθμού παραγωγής (πίνακας 2):

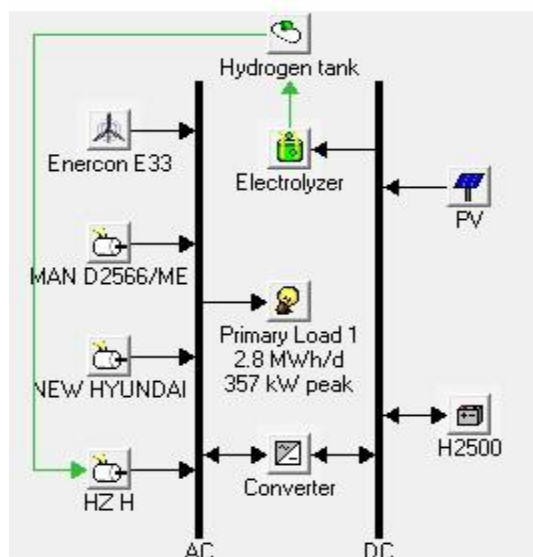
- Με Α/Γ, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού,
- Με Α/Γ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού,
- Με Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου και μπαταρίες,
- Με Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού.

Το σύστημα υδρογόνου περιλαμβάνει ηλεκτρολύτη, δεξαμενή αποθήκευσης και γεννήτρια καύσης υδρογόνου (H/Z υδρογόνου). Οι μονάδες εσωτερικής καύσης υδρογόνου αποτελούν ουσιαστικά τροποποιημένες μονάδες φυσικού αερίου με απόδοση 50%. Για τις συμβατικές μονάδες παραγωγής η απόδοση φτάνει έως 35% (MAN 90kW) και 40% (HYUNDAI 220kW). Σε κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις δίνεται βαρύτητα στο αν καλύπτεται το φορτίο, στο ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ, στην ποσότητα εκπομπών προς το περιβάλλον, στο ποσοστό παραγόμενης ενέργειας που μένει ανεκμετάλλευτο και στο κόστος της όλης εγκατάστασης. Αρχικά παρουσιάζονται τα σενάρια και στη συνέχεια συνοψίζονται και συγκρίνονται σε πίνακες τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης.

	σενάριο1	σενάριο2	σενάριο3	σενάριο4
ΑΓ 330kW	ο	ο	ο	ο
diesel 220kW	ο			
diesel 90kW		ο		ο
ΦΒ 100kW			ο	ο
HZ H ₂ 220kW		ο	ο	ο

Πίνακας 3.2: Μονάδες παραγωγής κάθε σεναρίου

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το υβριδικό σύστημα που προσομοιώθηκε με την βοήθεια του λογισμικού HOMER, με όλες τις συνιστώσες παρούσες. Ανάλογα με το σενάριο που εξετάζεται, τίθεται σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας κάποια μονάδα παραγωγής, σύμφωνα με τον πίνακα 3.2. Στην συνέχεια στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 3.3) καταγράφονται όλα τα οικονομικά στοιχεία που δόθηκαν ως είσοδοι, και που συνέβαλλαν και στην διαστασιολόγηση.



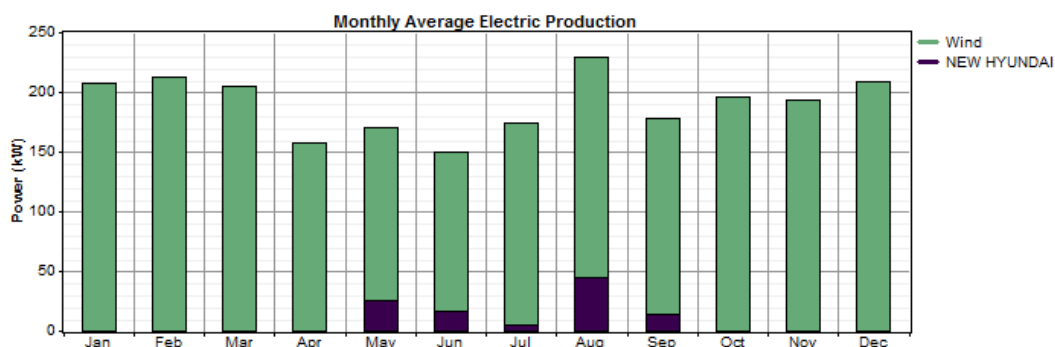
Σχ.3.3: Υβριδικό Σύστημα που προσομοιώθηκε

συνιστώσα	μονάδα	τιμή	διάρκεια ζωής	αντικατάσταση
A/Γ	€/kW	2500	20 έτη	2500
ΦΒ	€/kW	3766	20 έτη	3389
Ηλεκτρολύτης	€/kW	1506	15 έτη	1506
ΗΖ υδρογόνου	€/kW	1506	14000 ώρες λειτ.	1506
Δεξαμενή αποθήκευσης	€/t	7531	25 έτη	7531
Μπαταρίες	€/kWh	45	ελάχιστο 4 έτη	45

Πίνακας 3.3:Οικονομικά στοιχεία κάθε συνιστώσας

3.2.1.Α/Γ, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του εγκατεστημένου τοπικού σταθμού

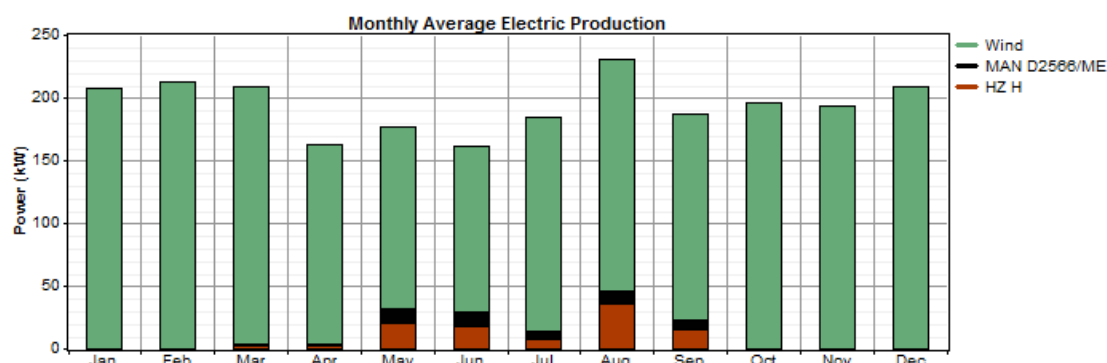
Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η εγκατάσταση Α/Γ 330kW, λειτουργία μίας εκ των ήδη εγκατεστημένων νηζελογεννητριών ικανότητας 220kW και εγκατάσταση μπαταριών χωρητικότητας 5000kWh. Η μηνιαία παραγωγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχ.3.4:Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο1

3.2.2.Α/Γ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού

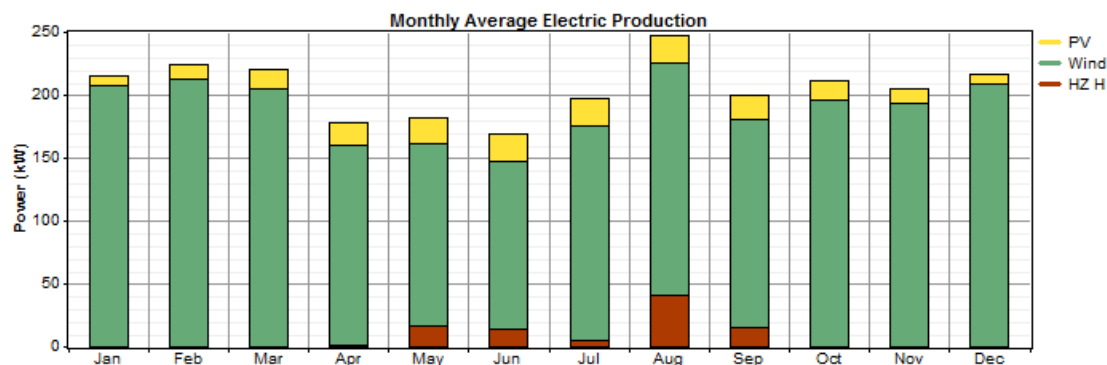
Στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται η εγκατάσταση Α/Γ 330kW, ενός συστήματος παραγωγής και αξιοποίησης υδρογόνου, η λειτουργία μιας ήδη εγκατεστημένης νηξελογεννήτριας 90kW και εγκατάσταση μπαταριών χωρητικότητας 3000kWh. Το σύστημα υδρογόνου αποτελείται από μια μηχανή καύσης υδρογόνου 220kW, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου 5000kg και έναν ηλεκτρολύτη 150kW. Η μηνιαία παραγωγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχ.3.5: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο2

3.2.3.Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου και μπαταρίες

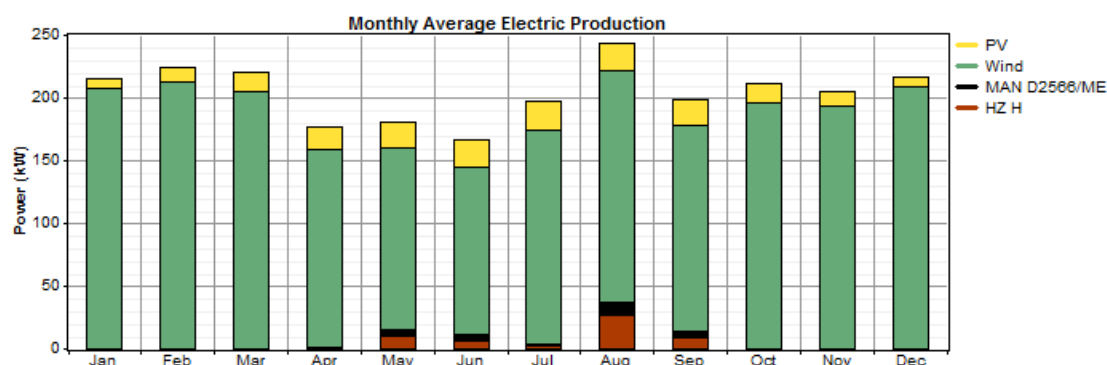
Στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η εγκατάσταση Α/Γ 330kW, ΦΒ μονάδας 100kW, ενός συστήματος παραγωγής και αξιοποίησης υδρογόνου και εγκατάσταση μπαταριών χωρητικότητας 3000kWh. Το σύστημα υδρογόνου αποτελείται από μια μηχανή καύσης υδρογόνου 220kW, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου 4000kg και έναν ηλεκτρολύτη 150kW. Το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει την περίπτωση πλήρους απεξάρτησης από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Η μηνιαία παραγωγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχ.3.6: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο3

3.2.4.Α/Γ, ΦΒ, σύστημα υδρογόνου, μπαταρίες και χρήση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής του ήδη εγκατεστημένου τοπικού σταθμού

Στο τέταρτο σενάριο εξετάζεται η εγκατάσταση Α/Γ 330kW, ΦΒ μονάδας 100kW, ενός συστήματος παραγωγής και αξιοποίησης υδρογόνου, η λειτουργία μιας ήδη εγκατεστημένης νηξελογεννήτριας 90kW και εγκατάσταση μπαταριών χωρητικότητας 3000kWh. Το σύστημα υδρογόνου αποτελείται από μια μηχανή καύσης υδρογόνου 220kW, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου 4000kg και έναν ηλεκτρολύτη 150kW. Η μηνιαία παραγωγή δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχ.3.7: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβολή κάθε μονάδας παραγωγής-σενάριο4

Να σημειωθεί ότι στα σενάρια που εξετάστηκαν και στα οποία γίνεται και χρησιμοποίηση μιας εκ των ήδη εγκατεστημένων νηξελογεννητριών, δίνεται προτεραιότητα στην αξιοποίηση των ΑΠΕ. Δηλαδή εφόσον υπάρχει ικανοποιητική ένταση ανέμου και επαρκής ηλιοφάνεια, η Α/Γ και το ΦΒ παράγουν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια και το ΗΖ πετρελαίου χρησιμοποιείται ως βοηθητικό. Επίσης μεταξύ των ΑΠΕ προτεραιότητα δίνεται στην ανεμογεννήτρια και δευτερεύον ρόλος στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Στα σενάρια 2,3,4 όπου χρησιμοποιείται και το σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκμετάλλευσης του υδρογόνου αξίζει να σημειωθεί πως επιτυγχάνεται ο στόχος της μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί από τις συμβατικές μπαταρίες. Η ποσότητα υδρογόνου που παράγεται κατά τη διάρκεια του έτους, τους μήνες με υψηλότερο άνεμο, αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό αποδεικνύεται στα παραπάνω διαγράμματα, αφού η μηχανή καύσης υδρογόνου χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στο διάστημα Μάιο έως Σεπτέμβρη.

Αναλυτικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού του κάθε σεναρίου δίνονται στην ενότητα που ακολουθεί όπου γίνεται επιπλέον σχολιασμός και συγκρίσεις πάνω σε διάφορα χαρακτηριστικά.

3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων οικονομοτεχνικής μελέτης

Στα διαγράμματα και τους πίνακες που ακολουθούν στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της οικονομοτεχνικής μελέτης για κάθε σενάριο και συγκρίσεις σε διάφορες πτυχές λειτουργίας. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην συμμετοχή κάθε μονάδας στη συνολική παραγωγή ενέργειας, στα λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε σεναρίου, στη λειτουργία των μπαταριών και στη χρησιμοποίηση του συστήματος εκμετάλλευσης υδρογόνου.

3.3.1. Συμμετοχή στην παραγωγή ενέργειας

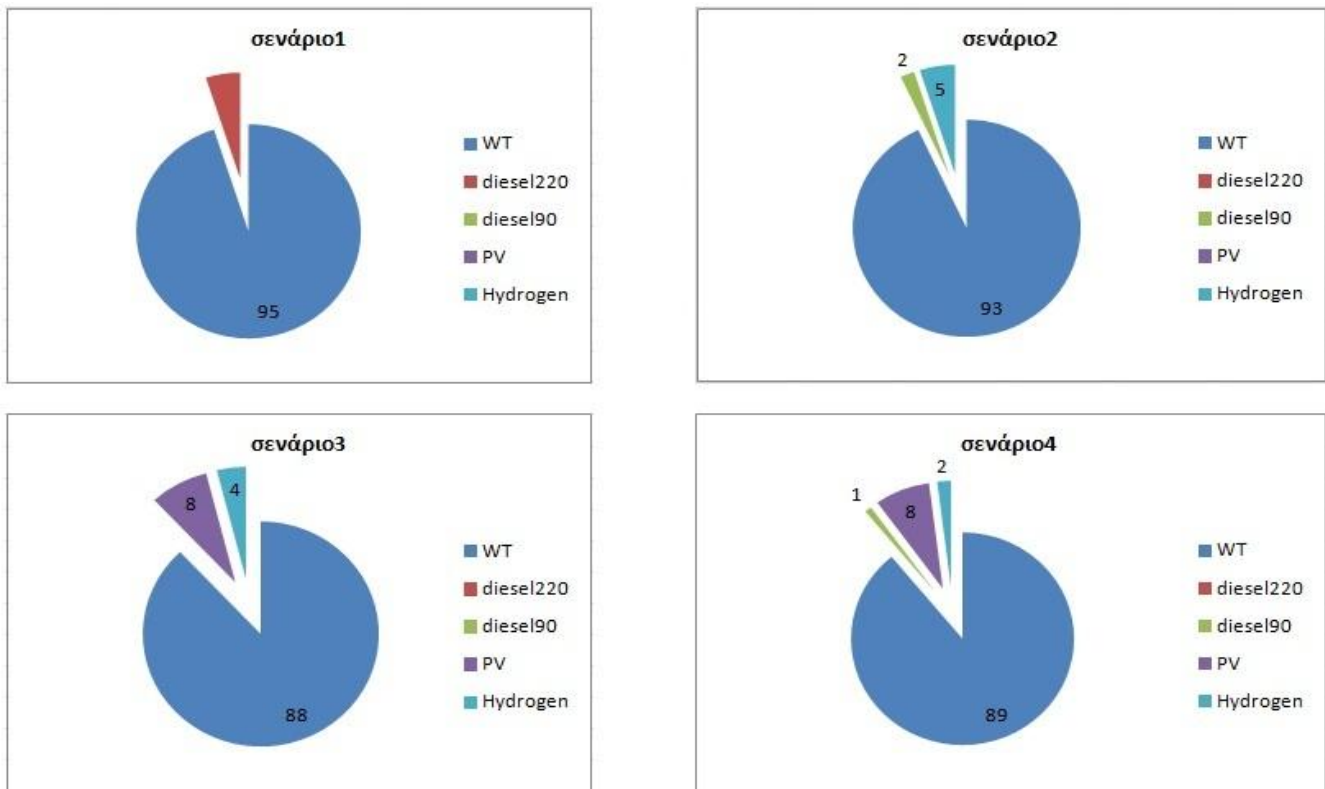
Ανάλογα με τις μονάδες παραγωγής που χρησιμοποιούνται σε κάθε σενάριο υπάρχει και διαφορετική συμβολή στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ για την κάλυψη της ετήσιας ζήτησης.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ποσοστά συμβολής κάθε μονάδας παραγωγής είτε συμβατικής (diesel 220kW – 90kW) είτε ανανεώσιμης (Α/Γ, ΦΒ, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος υδρογόνου) στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ετήσια βάση. Αξίζει να σημειωθεί η εξαιρετικά μικρή συμμετοχή των ΗΖ πετρελαίου που επιτυγχάνεται στην παραγωγή (ποσοστά 1-5%). Επίσης είναι εμφανής η προτεραιότητα που δίνεται στη διάταξη της Α/Γ καθώς το ποσοστό συμμετοχής της στην παραγωγή κυμαίνεται σε τιμές 88-95%.

Μονάδα παραγωγής	σενάριο1		σενάριο2		σενάριο3		σενάριο4	
	kWh/yr	%	kWh/yr	%	kWh/yr	%	kWh/yr	%
Α/Γ 330kW	1591347	95	1591347	93	1591347	88	1591347	89
diesel 220kW	77433	5	-	0	-	0	-	0
diesel 90kW	-	0	37141	2	-	0	21747	1
ΦΒ 100kW	-	0	-	0	141132	8	141132	8
ΗΖ Η ₂ 220kW	-	0	75240	5	69655	4	39820	2
Συνολικά	1668781	100	1703728	100	1802135	100	1794047	100

Πίνακας 3.4: Ποσοστά συμβολής κάθε μονάδας παραγωγής

Τα αριθμητικά δεδομένα με τα ποσοστά συμβολής κάθε μονάδας παραγωγής του πίνακα 3 παρουσιάζονται και ως διαγράμματα στο παρακάτω σχήμα (σχ.3.7)



Σχ.3.8: Ποσοστό παραγωγής ενέργειας από κάθε μονάδα για κάθε σενάριο

3.3.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής κάθε διάταξης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων του υβριδικού σταθμού. Για την Α/Γ και το ΦΒ δίνονται η μέση ισχύς εξόδου (kW) και οι ώρες λειτουργίας. Για τη γεννήτρια καύσης υδρογόνου (ΗΖ υδρογόνου) δίνονται επιπλέον ο αριθμός των εκκινήσεων και ποσότητα υδρογόνου που καταναλώνεται. Επίσης παρουσιάζονται και τα αντιστοιχα μεγέθη για τη συμβατική μονάδα από τις ήδη εγκατεστημένες που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Όλες οι τιμές συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας4) και είναι σε ετήσια βάση.

		σενάριο1	σενάριο2	σενάριο3	σενάριο4
Λειτουργία Α/Γ	μονάδα	330kW	330kW	330kW	330kW
μέση ισχύς εξόδου	kW	182	182	182	182
ώρες λειτουργίας	hr/yr	8322	8322	8322	8322
diesel		220kW	90kW		90kW
ώρες λειτουργίας	hr/yr	402	420	0	245
αριθμός εκκινήσεων	starts/yr	36	129	0	69
μέση ισχύς εξόδου	kW	193	88,4	0	88,8
κατανάλωση καυσίμου	L/yr	20238	10993	0	6434
ΦΒ				100kW	100kW
μέση ισχύς εξόδου	kW	0	0	16,1	16,1
ώρες λειτουργίας	hr/yr	0	0	4371	4371

HZ υδρογόνου			220kW	220kW	220kW
ώρες λειτουργίας	hr/yr	0	342	331	181
αριθμός εκκινήσεων	starts/yr	0	121	47	67
μέση ισχύς εξόδου	kW	0	220	210	220
κατανάλωση υδρογόνου	kg/yr	0	4514	4179	2389

Πίνακας 3.5: Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων παραγωγής για κάθε σενάριο

Σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι ίδια σε κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις, επιτυγχάνοντας λειτουργία 8322 ωρών ετησίως. Στα σενάρια 2,4 επιτυγχάνεται μείωση στο μέγεθος του συμβατικού HZ (ντήζελ) που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου, από 220kW σε 90kW. Επιλογή χάρη στην οποία μειώνεται και η ποσότητα πετρελαίου που καταναλώνεται (μείωση κατά 45% στο σενάριο2 και 68% στο σενάριο 4). Επίσης με την προσθήκη του φωτοβολταϊκού συστήματος, συγκρίνοντας τα σενάρια 2,4 αξίζει να σημειωθεί η μείωση, κατά 45% περίπου, στον αριθμό των εκκινήσεων της γεννήτριας καύσης υδρογόνου. Βέβαια και ο αριθμός ωρών λειτουργίας του HZ υδρογόνου μειώνεται στο μισό σχεδόν. Ο αριθμός των εκκινήσεων είναι σημαντικός καθώς επηρεάζει τη βιωσιμότητα του εξοπλισμού. Το σενάριο 3 το οποίο είναι απαλλαγμένο από τη χρησιμοποίηση συμβατικών μονάδων ντήζελ εξασφαλίζει πολλές ώρες λειτουργίας για το HZ υδρογόνου και παράλληλα τον ελάχιστο αριθμό εκκινήσεων του μεταξύ των σεναρίων 2,3,4.

3.3.3.Λειτουργικά χαρακτηριστικά των αποθηκευτικών συστημάτων κάθε διάταξης

Όπως αναφέρθηκε για την απορρόφηση του πλεονάσματος παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα αποθήκευσης: διατάξεις μπαταριών και σύστημα ηλεκτρόλυσης με δεξαμενή αποθήκευσης του παραγόμενου αερίου υδρογόνου. Για την προσομοίωση του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιήθηκε η στρατηγική που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Σύμφωνα με αυτή, ο ηλεκτρολύτης τίθεται σε λειτουργία είτε σε πλήρες φορτίο είτε καθόλου, κάτι το οποίο αποβλέπει στη βιωσιμότητα του ηλεκτολύτη και στη λειτουργία του με βέλτιστη απόδοση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δύο αποθηκευτικών διατάξεων:

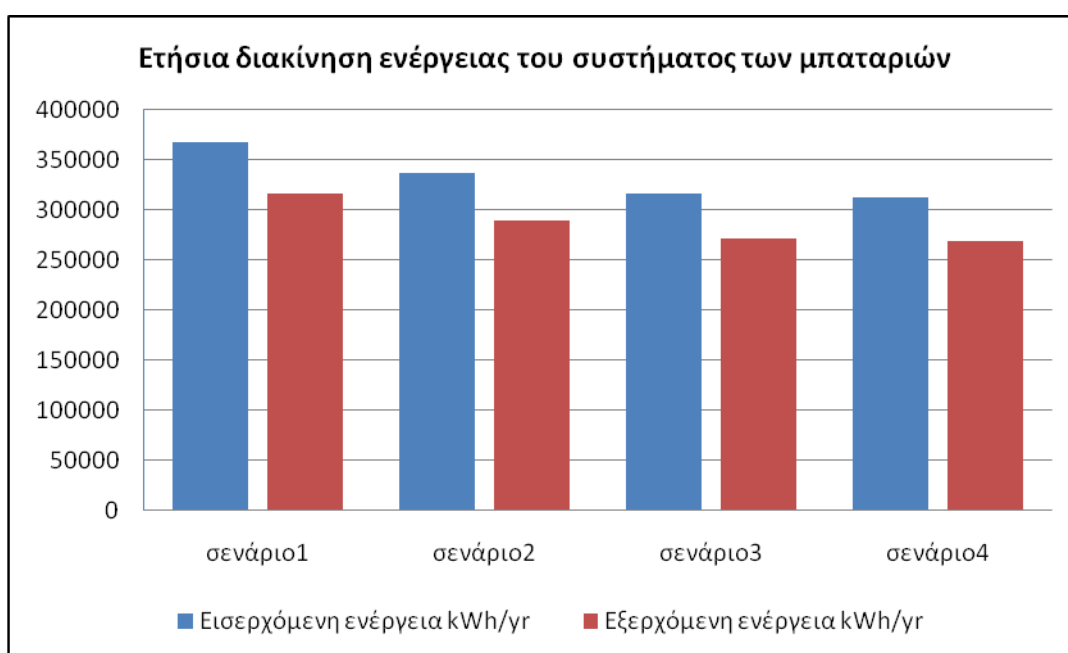
		σενάριο1	σενάριο2	σενάριο3	σενάριο4
ηλεκτρολύτης-δεξαμενή					
συνολική παραγωγή	kg/yr	0	5159	6559	5189

αυτονομία	hr	0	1427	1142	1142
χωρητικότητα δεξαμενής	kg	0	5000	4000	4000
μπαταρίες					
ικανότητα	kWh	5000	3000	3000	3000
αυτονομία	hr	30	18	18	18
Εισερχόμενη ενέργεια	kWh/yr	366988	335689	315016	311683
Εξερχόμενη ενέργεια	kWh/yr	315661	288743	270965	268098

Πίνακας 3.6: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης για κάθε σενάριο

Στο 1^ο σενάριο όπου δεν υπάρχει σύστημα εκμετάλλευσης υδρογόνου, χρησιμοποιείται διάταξη μπαταριών συνολική ικανότητας 5000kWh με αυτονομία 30 ωρών. Με την προσθήκη ηλεκτρολύτη και δεξαμενής αποθήκευσης είναι δυνατή η μείωση των μπαταριών σε συνολική ικανότητα 3000kWh και αυτονομία 18 ωρών. Τα στοιχεία του πίνακα 5 επιβεβαιώνουν τη χρησιμότητα ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης καθώς προσφέρει αυτονομία περισσότερων των 1000 ωρών. Η αυτονομία ενός τέτοιου συστήματος καθορίζεται από το μέγεθος της δεξαμενής με την προϋπόθεση ότι γεμίζει στο 100%.

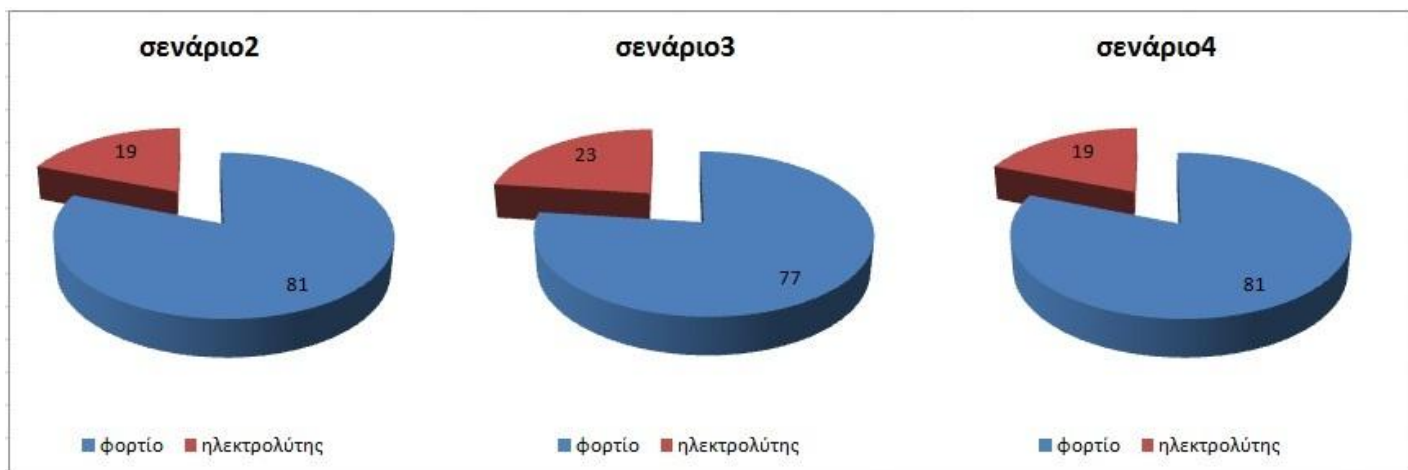
Ο περιορισμός της χρήσης των μπαταριών εκτός από τη μείωση της ικανότητας της διάταξης αποτυπώνεται και με τη μείωση της ποσότητας εξερχόμενης αλλά και εισερχόμενης ενέργειας σε αυτές. Προκύπτει μείωση 8,5-15% στα σενάρια 2,3,4 συγκριτικά με το 1^ο, με τη μεγαλύτερη μείωση να σημειώνεται στο 4^ο σενάριο (σχ.3.8). Παράλληλα, συγκρίνοντας τα σενάρια 2,3,4 μεταξύ τους να σημειωθεί ότι η υψηλότερη χρησιμοποίηση του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου επιτυγχάνεται στο σενάριο 3 όπου η συνολική παραγωγή σε ετήσια βάση φτάνει τα 6559kg/έτος, σχεδόν έναν τόνο περισσότερο από τα σενάρια 2,4.



3.3.4.Πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος για κάθε περίπτωση

Στόχος της χρήσης των αποθηκευτικών διατάξεων εκτός των άλλων είναι να απορροφούν και το πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος σε περιόδους που η ζήτηση είναι χαμηλή και κυμαίνεται σε επίπεδα μικρότερα της αιχμής. Η αποθηκευμένη στις μπαταρίες ηλεκτρική ενέργεια προορίζεται για βραχυπρόθεσμη χρήση, στα διαστήματα αιχμής, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή αερίου υδρογόνου προορίζεται για μακροπρόθεσμη χρήση και για μεγαλύτερες περιόδους αυτονομίας. Είναι σημαντικό λοιπόν να μένει ανεκμετάλλευτη όσο το δυνατόν μικρότερη ποσότητα ενέργειας διότι μπορεί να χρειαστεί οποιαδήποτε στιγμή και για οσοδήποτε χρονικό διάστημα.

Στο διάγραμμα (σχ.3.9) που ακολουθεί παρουσιάζεται το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κάλυψη του φορτίου και το ποσοστό που καταναλώνεται από τον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου. Περαιτέρω αποθήκευση θα απαιτούσε μεγαλύτερη διαστασιολόγηση και κατ' επέκταση αύξηση του κόστους της εγκατάστασης. Στη συνέχεια στον πίνακα 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αριθμητικά δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας και το τελικό πλεόνασμα που προκύπτει.

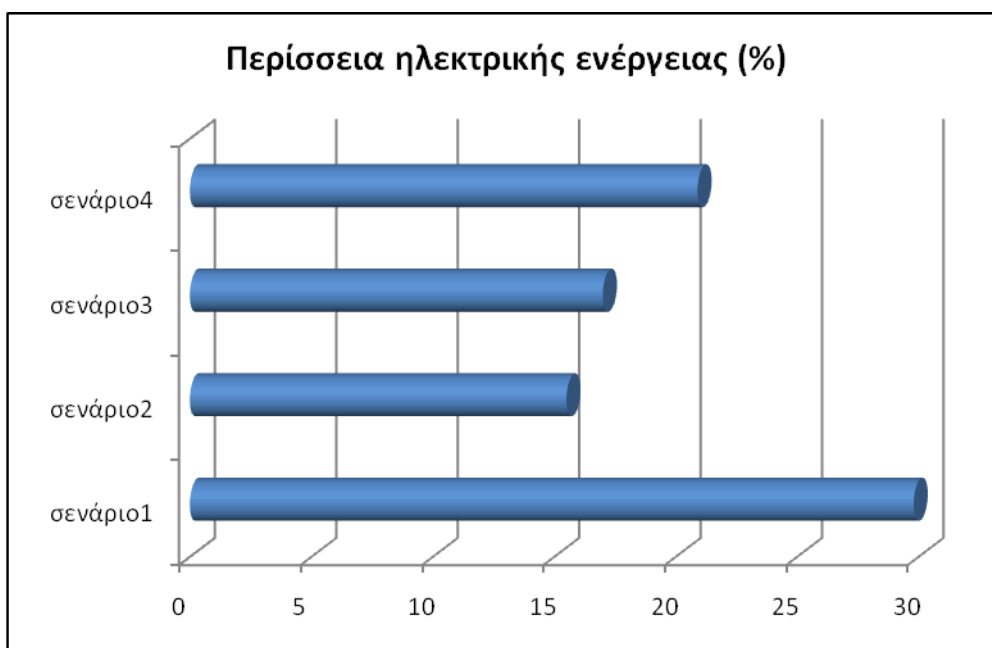


Σχ.3.10: Κατανάλωση παραγόμενης ισχύος για την κάλυψη του φορτίου και την παραγωγή υδρογόνου

	σενάριο1		σενάριο2		σενάριο3		σενάριο4	
	kWh/yr	%	kWh/yr	%	kWh/yr	%	kWh/yr	%
κατανάλωση φορτίο	1023087	100	1023087	81	1023087	77	1023087	81
ηλεκτρολύτης	-	0	239400	19	304350	23	240804	19
Συνολικά			1262487	100	1327438	100	1263891	100
Ποσότητα								
Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας	498056	29,8	263953	15,5	306710	17	374363	20,9

Πίνακας 3.7: Κατανάλωση παραγόμενης ενέργειας και περίσσεια, μεγέθη σε ετήσια βάση

Συγκρίνοντας τα 4 σενάρια αξίζει να σημειωθεί πως με την προσθήκη του συστήματος εκμετάλλευσης υδρογόνου η παραγόμενη ενέργεια που θα έμενε ανεκμετάλλευτη μειώνεται κατά 30-50% στα σενάρια 2,3,4 σε σχέση με το πρώτο (Σχ.3.10). Η μείωση αυτή μπορεί να επιβεβαιώσει τη χρησιμότητα του συστήματος ηλεκτρόλυσης όσον αφορά στην απορρόφηση του πλεονάσματος της παραγωγής και να αποτελέσει απόδειξη στο ότι μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά μέρος των μπαταριών.



Σχ.3.11:Περίσσεια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

3.3.5.Εκπομπές αερίων προς το περιβάλλον

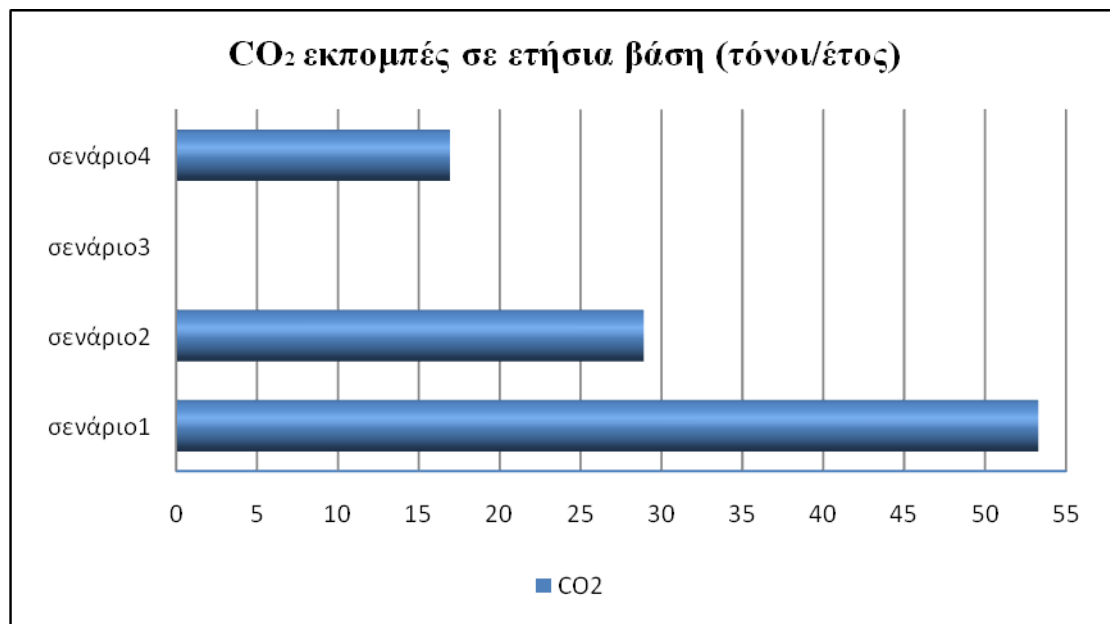
Με τη βοήθεια του HOMER προέκυψαν και κάποια συμπεράσματα σχετικά με τις εκπομπές των συμβατικών μονάδων ντήζελ. Εξήχθησαν αποτελέσματα όσον αφορά στην εκπομπή 5 διαφορετικών αερίων που παράγονται από την καύση πετρελαίου και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 7 για την περίοδο ενός έτους.

	σενάριο1	σενάριο2	σενάριο3	σενάριο4
αέριο	εκπομπές (kg/yr)			
CO ₂	53292	28901	-42,7	16919
CO	132	101	27,2	57,4
άκαυτοι υδρογονάνθρακες	14,6	11,2	3,01	6,35
SO ₂	107	58,1	0	34

Nox	1174	899	242	512
-----	------	-----	-----	-----

Πίνακας 3.8: Εκπομπές αερίων σε ετήσια βάση

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.3.2 η εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της χρησιμοποίησης των συμβατικών μονάδων του ήδη εγκατεστημένου σταθμού παραγωγής ή ακόμη και στη μη χρησιμοποίηση κάποιας μονάδας. Στο σενάριο 3 επιτυγχάνεται η πλήρης εξάρτηση από την κατανάλωση πετρελαίου γι' αυτό και οι εκπομπές είναι σχεδόν αμελητέες. Όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχ.3.11), η μετάβαση από τη χρησιμοποίηση μια γεννήτριας ντήζελ 220kW (σενάριο 1) στη χρησιμοποίηση μιας μικρότερης ισχύος 90kW (σενάριο 2,4) εξασφαλίζει μείωση εκπομπών CO₂ περίπου στο μισό (45,8% για το σενάριο 2 και 68,3% για το σενάριο 4). Αποκορύφωμα αποτελεί το 3^ο σενάριο όπου η παραγωγή ενέργειας, όντας απαλλαγμένη από τις συμβατικές μονάδες, έχει μηδενική εκπομπή CO₂ συνιστώντας έτσι το πιο φιλικό προς το περιβάλλον σενάριο από τα 4.



Σχ.3.12: Συνολική ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται, τόνοι σε ετήσια βάση

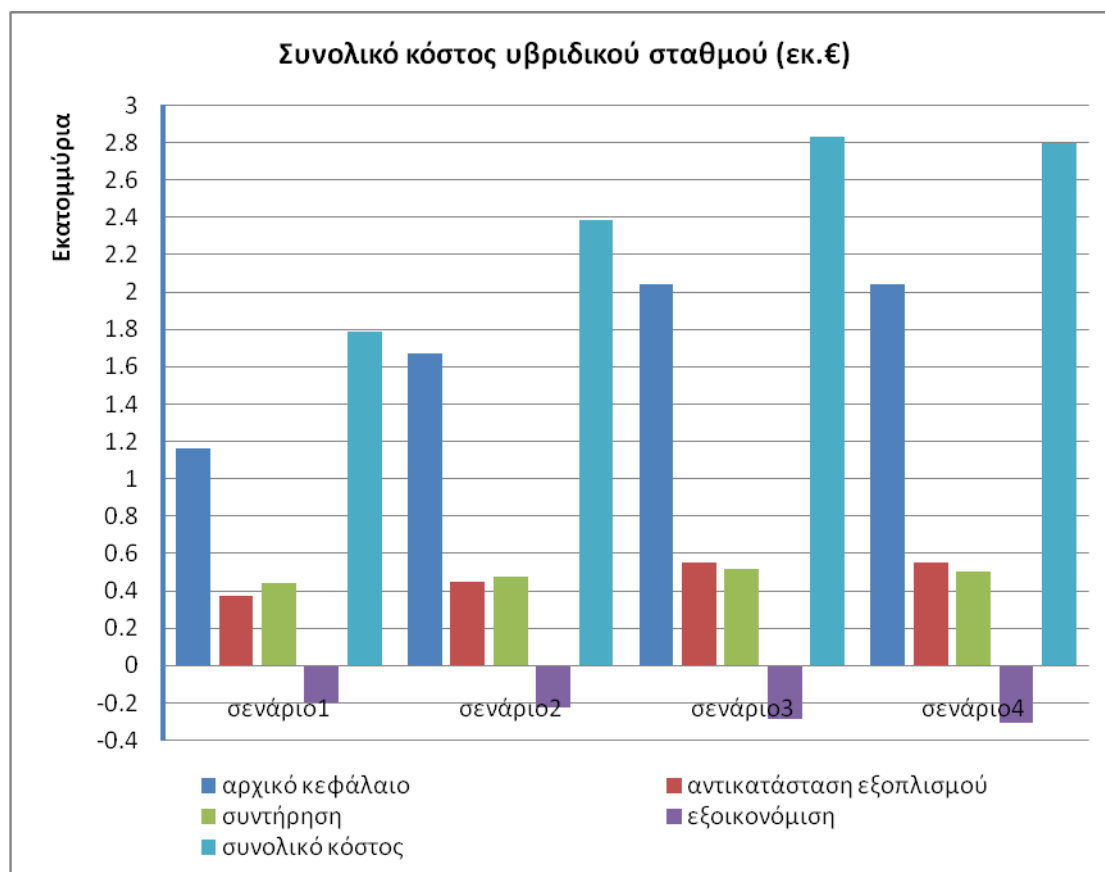
Συνοψίζοντας, να σημειωθεί ότι με την προσθήκη του συστήματος υδρογόνου η παραγόμενη ενέργεια που θα έμενε ανεκμετάλλευτη μειώνεται κατά 30-50%. Επίσης επιτεύχθηκε μείωση του αριθμού των μπαταριών καθώς στο σενάριο 1 η συνολική ικανότητα φτάνει στις 5000kWh, ενώ στα υπόλοιπα τρία μειώνεται στις 3000kWh. Τέλος, είναι εμφανής και ο περιορισμός εκπομπών προς το περιβάλλον

καθώς στα σενάρια 2,4 η λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής μειώνεται, ενώ στο σενάριο 3 οι εκπομπές είναι αμελητέες.

3.3.6.Κοστολόγηση της εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού

Στην ενότητα αυτή γίνεται παρουσίαση των οικονομικών δεδομένων και αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σε πλάνο 25ετών. Στη διαμόρφωση των οικονομικών στοιχείων δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης των συμβατικών μονάδων του ήδη εγκατεστημένου σταθμού παραγωγής. Να σημειωθεί ότι το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ δε συμπεριλαμβάνεται στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε.

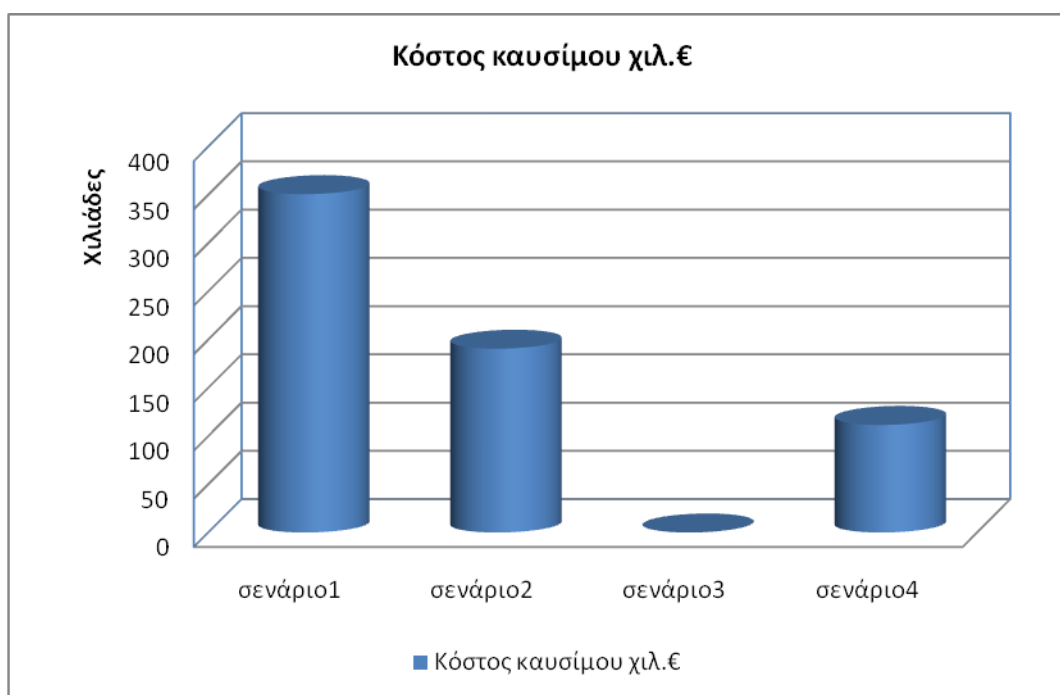
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχ.3.12) παρουσιάζονται οι συντελεστές που διαμορφώνουν το συνολικό κόστος για κάθε περίπτωση από τις τέσσερις που εξετάστηκαν.



Σχ.3.13: Συνολική ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται, τόνοι σε ετήσια βάση

Το βασικότερο μέρος του συνολικού κόστους είναι το αρχικό κεφάλαιο. Ως εξοικονόμηση ορίζεται η αξία που παραμένει στην κάθε συνιστώσα του υβριδικού σταθμού με χρόνο ζωής μεγαλύτερο του ορίζοντα των 25 ετών που έχει το πλάνο που εξετάζεται. Στο 1^ο σενάριο όπου ο υβριδικός σταθμός αποτελείται μόνο από την Α/Γ και τη συστοιχία μπαταριών απαιτείται το μικρότερο αρχικό κεφάλαιο. Στα υπόλοιπα σενάρια όπου μελετάται και η εγκατάσταση συστήματος εκμετάλλευσης υδρογόνου, το αρχικό κόστος είναι εμφανώς υψηλότερο. Ειδικά στα σενάρια 3 και 4 όπου υπάρχει προοπτική εγκατάστασης και φωτοβολταϊκού, εντοπίζεται περαιτέρω αύξηση του κόστους.

Σε αντίθεση με την παραπάνω πορεία του κόστους εγκατάστασης, παρατηρείται μείωση του κόστους όσον αφορά στην κατανάλωση καυσίμου από τον εγκατεστημένο σταθμό παραγωγής των συμβατικών μονάδων (Σχ.3.13). Έτσι ενώ στο 1^ο σενάριο το συνολικό κόστος κατανάλωσης καυσίμου φτάνει τα 350000€ ετησίως, στα σενάρια 2 και 4 με την εγκατάσταση της γεννήτριας καύσης υδρογόνου και των φωτοβολταϊκών επιτυγχάνεται μείωση κατά 45% και 68% αντίστοιχα.



Σχ.3.14: Συνολικό κόστος από την κατανάλωση πετρελαίου, σε ετήσια βάση

Συνοψίζοντας τα παραπάνω δεδομένα, ως πιο οικονομικό παρουσιάζεται το πρώτο σενάριο. Λαμβάνοντας όμως υπόψη επιπλέον τα λειτουργικά δεδομένα και περιβαλλοντικά στοιχεία, τα σενάρια 2 και 3 παρουσιάζονται ως βέλτιστες λύσεις, με το 3^ο σενάριο βέβαια να έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα του τελείως «πράσινου» υβριδικού σταθμού παραγωγής.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται μια μελέτη της συνδυασμένης λειτουργίας ανεμογεννητριών και συστήματος παραγωγής υδρογόνου. Συγκεκριμένα μια γεννήτρια παραγωγής υδρογόνου χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου ενός αιολικού πάρκου (Α/Π) το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Το σύστημα που μοντελοποιήθηκε αποτελείται από το αιολικό πάρκο (10MW), την γεννήτρια υδρογόνου (5,4MW), η οποία συνδέεται στην έξοδο του πάρκου μέσω μετασχηματιστή και ανορθωτικής διάταξης, και το σύστημα ελέγχου και εξομάλυνσης της ισχύος εξόδου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αιολικού πάρκου. Χρησιμοποιήθηκαν 5 ΑΓ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια των 2 MW έκαστη. Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου η οποία χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του Α/Π.

4.1 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

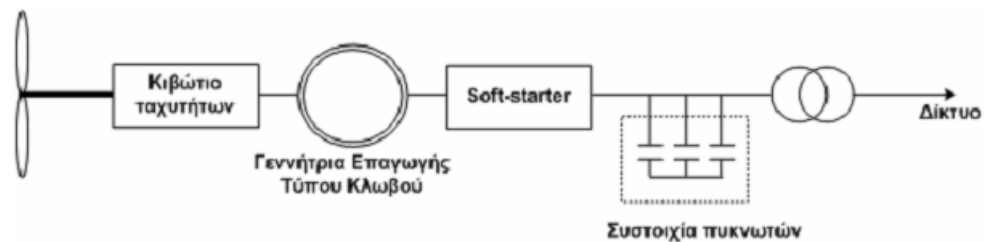
Όσον αφορά στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού τμήματος της ανεμογεννήτριας γίνεται διαχωρισμός σε Α/Γ σταθερών και μεταβλητών στροφών, χαρακτηρισμός που σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Οι Α/Γ σταθερών στροφών αποτελούνται πάντοτε από ασύγχρονη γεννήτρια, κυρίως τύπου κλωβού, η οποία είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, και έχουν πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών μπορεί να διαθέτουν σύγχρονη γεννήτρια (με τυλιγμένο δρομέα ή μόνιμους μαγνήτες) ή ασύγχρονη γεννήτρια (τύπου κλωβού) και συνδέονται με το δίκτυο με κατάλληλες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που στοχεύουν στην αποδέσμευση από την συχνότητα του δικτύου[22-24].

4.1.1. Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

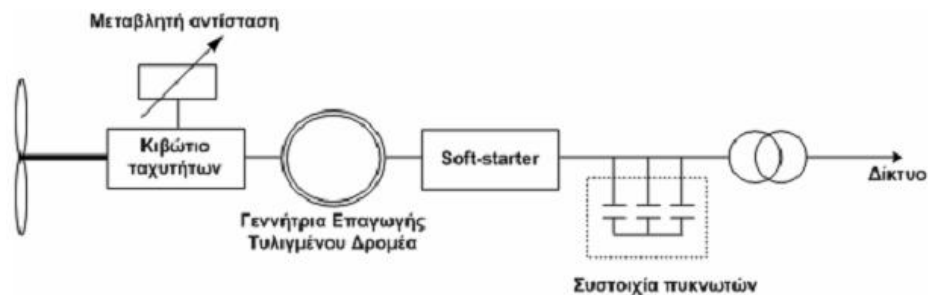
Μια ΑΓ σταθερών στροφών έχει χαμηλό κόστος, μικρό βάρος, είναι απλή στην κατασκευή ενώ δεν έχει υψηλές απαιτήσεις συντήρησης. Συνήθως για γεννήτρια χρησιμοποιείται επαγωγή τύπου κλωβού (Σχ.4.1). Βασικό μειονέκτημά της όμως είναι ότι δεν έχει τη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Ως αποτέλεσμα μεταβολές του ανέμου οδηγούν σε

μεταβολές στην τιμή της ροπής του άξονά της και επομένως αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η προσθήκη κιβωτίου ταχυτήτων ώστε η Α/Γ να είναι πιο ευέλικτη στις διακυμάνσεις του ανέμου. Επίσης λόγω έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος μια ΑΓ σταθερών στροφών δε μπορεί να συμβάλει στη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η προσθήκη πυκνωτών στην έξοδο ώστε να αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ που απορροφά από το δίκτυο η ασύγχρονη γεννήτρια.

Στην παραλλαγή της Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα (Σχ.4.2), είναι δυνατό με την σύνδεση εξωτερικών μεταβλητών αντιστάσεων στους ακροδέκτες του δρομέα να επιτευχθεί μεταβολή στην ταχύτητα του κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου. Ωστόσο η μεταβολή αυτή είναι έως μόλις 10% της σύγχρονης ταχύτητας, οπότε και πάλι το κιβώτιο ταχυτήτων είναι αναγκαίο. Επιπλέον μειονέκτημα εδώ αποτελεί η αύξηση των απωλειών του συστήματος της Α/Γ λόγω των εξωτερικών αντιστάσεων.



Σχ.4.1 :Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού



Σχ.4.2 :Α/Γ σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα

4.1.2.Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Παρά το γεγονός ότι το ένα τρίτο σχεδόν της ήδη εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ευρώπη είναι με γεννήτριες σταθερών στροφών, οι Α/Γ αυτού του είδους αποτελούν μικρό ποσοστό των σύγχρονων μηχανών που εγκαθίστανται κάθε χρόνο (ποσοστό μικρότερο του 20%)[23]. Πλέον οι Α/Γ μεταβλητών στροφών βρίσκονται στο επίκεντρο της σύγχρονης αγοράς αιολικών συστημάτων λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν:

- Με τη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα, η A/G μπορεί να ακολουθεί την ταχύτητα του ανέμου και να λειτουργεί υπό βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή για μεγάλο εύρος εντάσεων ανέμου. Επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της A/G έως και κατά 15%.
- Χάρη στην ευελιξία που παρουσιάζουν στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, επιτυγχάνεται μείωση του ακουστικού θορύβου σε περίπτωση αδύναμου ανέμου με μείωση της ταχύτητας περιστροφής.
- Οι A/G μεταβλητών στροφών προσαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες.
- Η ποιότητα ισχύος που παράγουν είναι καλύτερη, καθώς επιτυγχάνουν μείωση των διακυμάνσεων τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και κατά τους χειρισμούς ζεύξης.
- Δίνουν τη δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων.
- Είναι δυνατός ο άμεσος και αποτελεσματικός έλεγχος ροπής και κατ' επέκταση η απόσβεση μηχανικών ταλαντώσεων και ο περιορισμός των καταπονήσεων.
- Οι μετατροπείς ισχύος δίνουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης (περίπτωση σύνδεσης A/G σε ασθενές δίκτυο) και συχνότητας (περίπτωση σύνδεσης A/G σε αυτόνομα συστήματα).

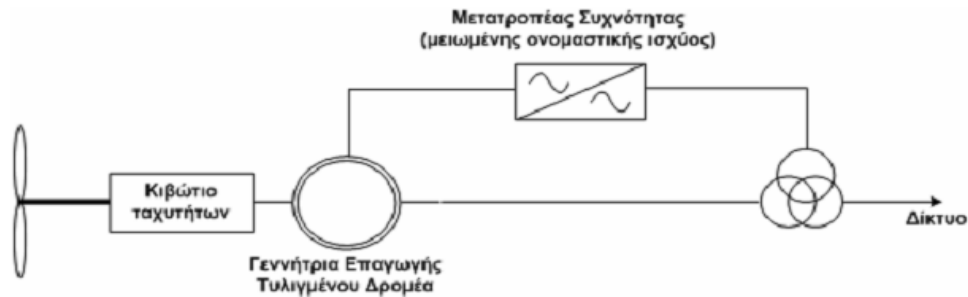
Ωστόσο οι A/G μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα του αυξημένου κόστους και της πολυπλοκότητας λόγω της παρουσίας των μετατροπέων ισχύος και των σύνθετων ελεγκτών που διαθέτουν.

Υπάρχουν δύο είδη τοπολογιών για τις A/G μεταβλητών στροφών, ανάλογα με το μέγεθος του μετατροπέα συχνότητας που χρησιμοποιούν, με ασύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα μειωμένης ικανότητας είτε με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος.

4.1.3. A/G μεταβλητών στροφών με μετατροπέα συχνότητας μειωμένης ικανότητας

Η τοπολογία με τον μετατροπέα μειωμένης ισχύος περιλαμβάνει γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Σχ.4.3). Και ο στάτης και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο με τη διαφορά όμως ότι η σύνδεση του στάτη γίνεται απευθείας ενώ του δρομέα μέσω κατάλληλων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (AC/DC/AC). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται μετατροπείς πηγής τάσης και στην πλευρά του δρομέα και στην πλευρά του δικτύου. Έτσι ο δρομέας τροφοδοτείται με ρεύματα και τάσεις μεταβλητής συχνότητας και επιτυγχάνεται αποδέσμευση της ταχύτητας της γεννήτριας από την πρακτικά σταθερή συχνότητα του δικτύου. Επειδή η ενέργεια μεταξύ γεννήτριας και δικτύου διακινείται κυρίως μέσω του στάτη και κατά ένα μικρότερο ποσοστό ανάλογα με την ολίσθηση μέσω του δρομέα, η ικανότητα των

μετατροπέων συχνότητας δε χρειάζεται να είναι όση και η ονομαστική ισχύς της Α/Γ. Επομένως χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης τοπολογίας συνεπάγεται μείωση του κόστους και των απωλειών ισχύος και ενέργειας λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος, και ταυτόχρονα αύξηση της απόδοσης.



Σχ.4.3 :Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και σύστημα μετατροπέων συχνότητας μειωμένης ονομαστικής ισχύος

4.1.4.Α/Γ μεταβλητών στροφών με μετατροπέα συχνότητας πλήρους ικανότητας

Η τοπολογία με το σύστημα μετατροπέων συχνότητας πλήρους ισχύος περιλαμβάνει είτε γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού είτε σύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα με διέγερση συνεχούς ρεύματος είτε σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (Σχ.4.4). Με τη χρήση των σύγχρονων γεννητριών είναι δυνατό να απαλειφθεί το κιβώτιο ταχυτήτων αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων. Εδώ η ανταλλαγή ενέργειας γίνεται εξ ολοκλήρου μέσω του στάτη, γι' αυτό και ο μετατροπέας συχνότητας είναι πλήρους ισχύος, όσο και η ισχύς της Α/Γ. Με τους μετατροπέες πλήρους ικανότητας επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής και πιο αυξημένες δυνατότητες ελέγχου της αέργου ισχύος, συγκριτικά με τις τοπολογίες μετατροπέων μειωμένης ικανότητας. Ωστόσο εδώ υπάρχει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους και των μεγαλύτερων απωλειών.



Σχ.4.4 :Α/Γ μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια και σύστημα μετατροπέων συχνότητας πλήρους ισχύος

4.2 Μοντελοποίηση Α/Γ μεταβλητών στροφών

Για τη μελέτη που έγινε στην εργασία με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink επιλέχθηκε η μοντελοποίηση Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τυλιγμένο δρομέα. Προτιμήθηκε σύγχρονη γεννήτρια έναντι ασύγχρονης αφού η πρώτη δίνει τη δυνατότητα κατάργησης του κιβωτίου ταχυτήτων, και συγκεκριμένα η διάταξη με το τύλιγμα πεδίου αντί των μονίμων μαγνητών, γιατί η δεύτερη χρησιμοποιείται για εφαρμογές με μικρά επίπεδα ισχύος.

4.2.1 Αεροδυναμικό μέρος Α/Γ

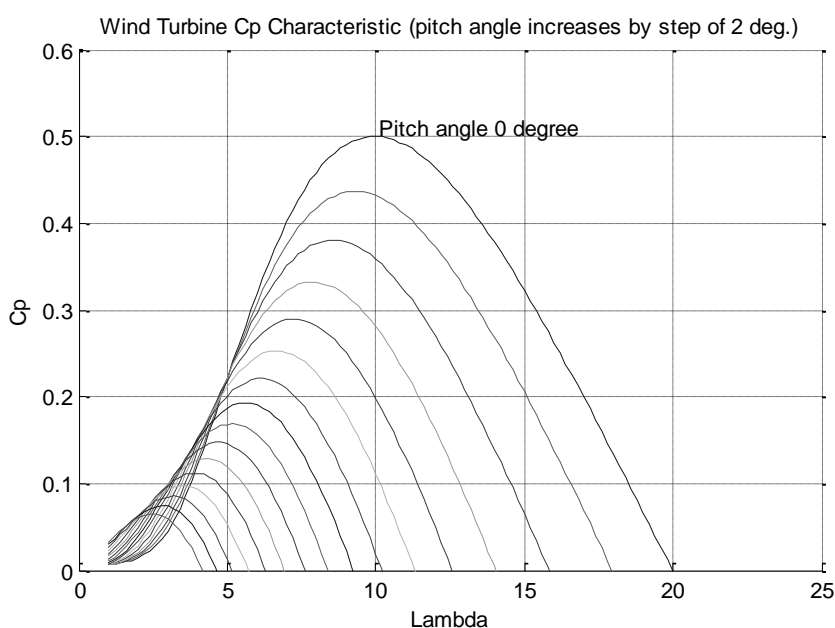
Ανεξάρτητα από τον τύπο της Α/Γ, η παραγόμενη μηχανική ισχύς στον άξονά της δίνεται από την εξίσωση:

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (4.1)$$

Όπου:

- P_m η μηχανική ισχύς που παράγεται στον άξονα του ανεμοκινητήρα,
- ρ η πυκνότητα του αέρα και λαμβάνεται ίση με $1,25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$,
- R η ακτίνα των πτερυγίων [m],
- V_w η ταχύτητα του ανέμου [m/s] και
- C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο ταχυτήτων λ και την κλίση των πτερυγίων β .

Είναι αξιοσημείωτη η έντονη μεταβολή του συντελεστή C_p , άρα και της ισχύος, από τη γωνία βήματος της έλικας β , μέσω της οποίας γίνεται συχνά ο έλεγχος της ροής ισχύος.



Σχ.4.5 :Τυπικές καμπύλες μεταβολής του συντελεστή C_p , με παράμετρο την γωνία του βήματος της έλικας β

Ο λόγος ταχυτήτων λ εκφράζει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου V_w και της ταχύτητας ακροπερυγίου $R\omega$, όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής:

$$\lambda = R\omega_R / V_w \quad (4.2)$$

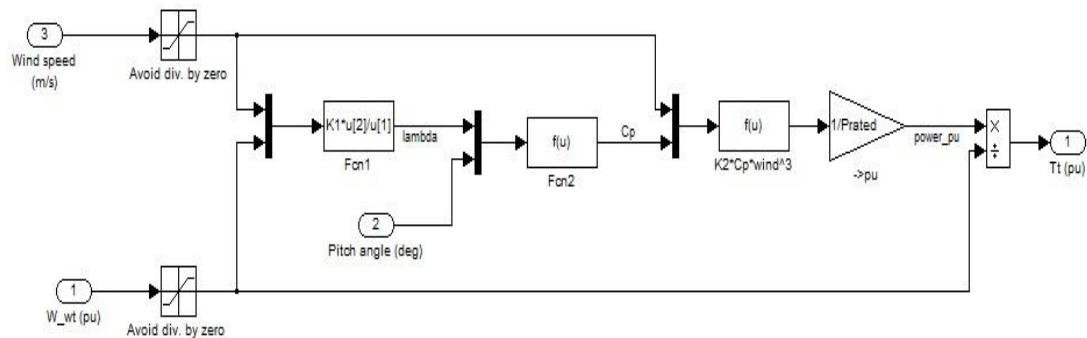
Η μέγιστη δυνατή τιμή που δύναται να πάρει θεωρητικά ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι 0.593, πρακτικά όμως κυμαίνεται μεταξύ 0.3-0.5. Επειδή στόχος του κατασκευαστή είναι η Α/Γ να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο το αιολικό δυναμικό, πρέπει ο συντελεστής C_p να έχει συνέχεια όσο δυνατόν μεγαλύτερη τιμή. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου λ (άρα και συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής) ώστε η Α/Γ να λειτουργεί με μέγιστο συντελεστή C_p και να παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Αυτή είναι και η λογική του ΜΡΡΤ.

Η μηχανική ροπή τελικώς στον άξονα του δρομέα προκύπτει διαιρώντας τη μηχανική ισχύ με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα:

$$T_m = P_m / \omega_R \quad (4.3)$$

Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους Α/Γ

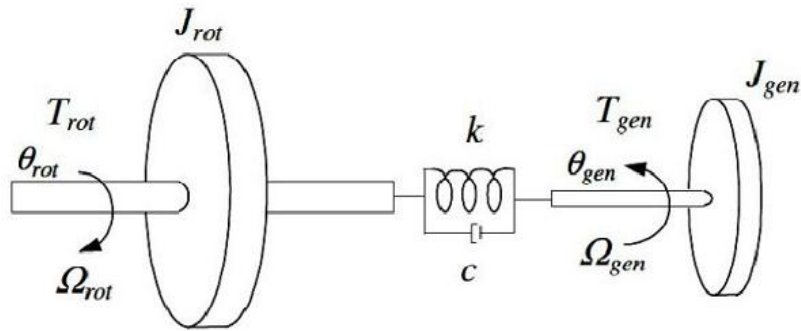
Το μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους δέχεται ως είσοδο τις δύο ταχύτητες, ανέμου και περιστροφής, και το βήμα της έλικας και δίνει στην έξοδο την αντίστοιχη τιμή της μηχανικής ροπής.



Σχ.4.6 :Μοντέλο αεροδυναμικού μέρους της Α/Γ

4.2.2 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Στη μοντελοποίηση που έγινε λαμβάνεται υπόψη και η πραγματική μηχανική ζεύξη φτερωτής-γεννήτριας, η οποία αναπαρίσταται με το ισοδύναμο μοντέλο δύο μαζών (Σχ.4.7).

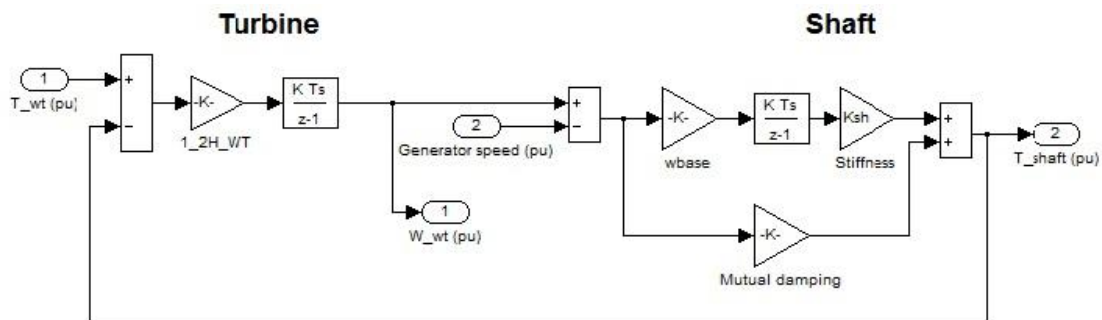


Σχ.4.7 : Σύστημα δύο μαζών για την μοντελοποίηση του συστήματος κίνησης της Α/Γ

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η μία μάζα J_{rot} αναπαριστά την αδράνεια της περρωτής, δηλαδή των τριών ελίκων μαζί με τον άξονα, ενώ η άλλη, J_{gen} , αναπαριστά την αδράνεια της σύγχρονης γεννήτριας. Οι δύο μάζες συνδέονται μέσω ενός ελαστικού άξονα σκληρότητας k και σταθεράς απόσβεσης c . Στην πλευρά της περρωτής ασκείται η αεροδυναμική ροπή στρέψης T_{rot} , ενώ από την πλευρά της γεννήτριας ασκείται η ηλεκτρική ροπή T_{gen} αντίθετης φοράς. Λόγω της ελαστικότητας του άξονα, η Α/Γ είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας, κάθε φορά που η αεροδυναμική ή η ηλεκτρική ροπή μεταβάλλεται απότομα [25].

Μοντελοποίηση συστήματος μετάδοσης κίνησης

Η πρώτη είσοδος είναι η αεροδυναμική ροπή της περρωτής T_{wt} , υπολογισμένη από το αεροδυναμικό υποσύστημα. Αυτή συγκρίνεται με τη ροπή στον άξονα της γεννήτριας T_{shaft} , και η διαφορά τροφοδοτείται σε έναν ολοκληρωτή με κέρδος την σταθερά αδρανείας H της περρωτής. Το αποτέλεσμα είναι η γωνιακή ταχύτητα της περρωτής w_{wt} (4.4). Η δεύτερη είσοδος είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας w_e , η οποία συγκρίνεται την w_{wt} της περρωτής. Η διαφορά τους τροφοδοτεί έναν ΠΙ ελεγκτή με κέρδος ολοκλήρωσης τη σκληρότητα k και αναλογικό κέρδος τη σταθερά απόσβεσης c . Το αποτέλεσμα είναι η ροπή στον άξονα της γεννήτριας T_{shaft} (4.5).



Σχ.4.8 : Σύστημα διάδοσης κίνησης

$$T_{wt} - T_{shaft} = 2H \frac{dw_{wt}}{dt} \Rightarrow w_{wt} = \frac{1}{2H} \int (T_{wt} - T_{shaft}) dt \quad (4.4)$$

$$2J_{gen} \frac{dw_g}{dt} = T_{shaft} + k\theta_{rg} + c(w_{wt} - w_g) \quad (4.5)$$

4.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια με τυλιγμένο δρομέα

Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα

Το ηλεκτρικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα δυναμικά φαινόμενα του στάτη, του πεδίου διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα αναπαρίσταται σε dq-πλαίσιο περιστρεφόμενο με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Όλοι οι παράμετροι του δρομέα και τα ηλεκτρικά μεγέθη είναι ανηγμένα στον στάτη. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα αναφέρονται σε μεγέθη του d και q άξονα, και έχουν ως εξής:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_R \varphi_q \quad (4.6)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_R \varphi_d \quad (4.7)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\varphi'_{fd}}{dt} \quad (4.8)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\varphi'_{kd}}{dt} \quad (4.9)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d\varphi'_{kq1}}{dt} \quad (4.10)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d\varphi'_{kq2}}{dt} \quad (4.11)$$

όπου

$$\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \quad (4.12)$$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq} \quad (4.13)$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \quad (4.14)$$

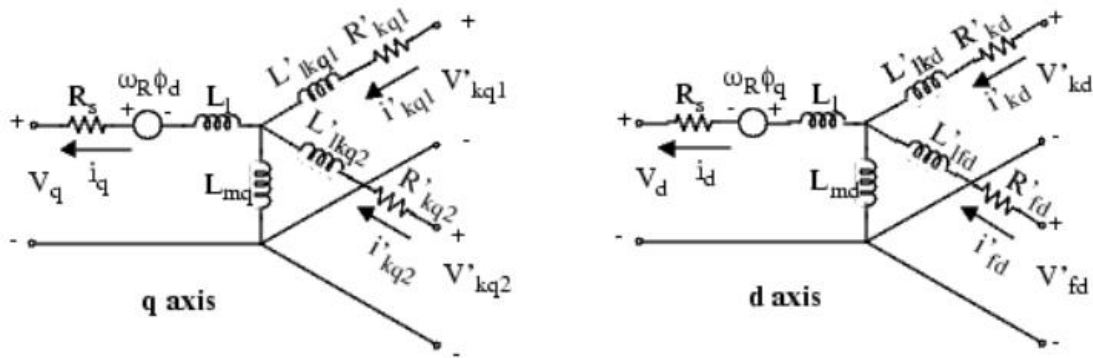
$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \quad (4.15)$$

$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q \quad (4.16)$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q \quad (4.17)$$

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται αναφέρονται σε συνιστώσες:

- d, q : dq πλαίσιο
- R, s : δρομέα και στάτη
- l, m : σκέδασης και μαγνήτισης
- F, k : τυλίγματος πεδίου και απόσβεσης



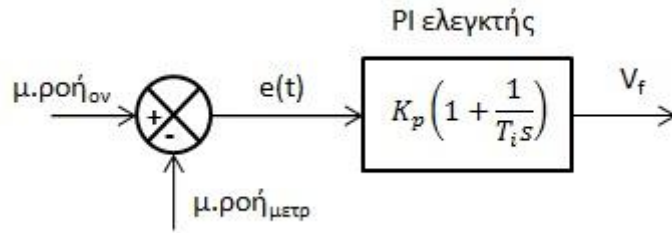
Σχ.4.9 :Ηλεκτρικό μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας με τυλιγμένο δρομέα στο πλαίσιο dq του δρομέα

4.2.4 Σύστημα διέγερσης

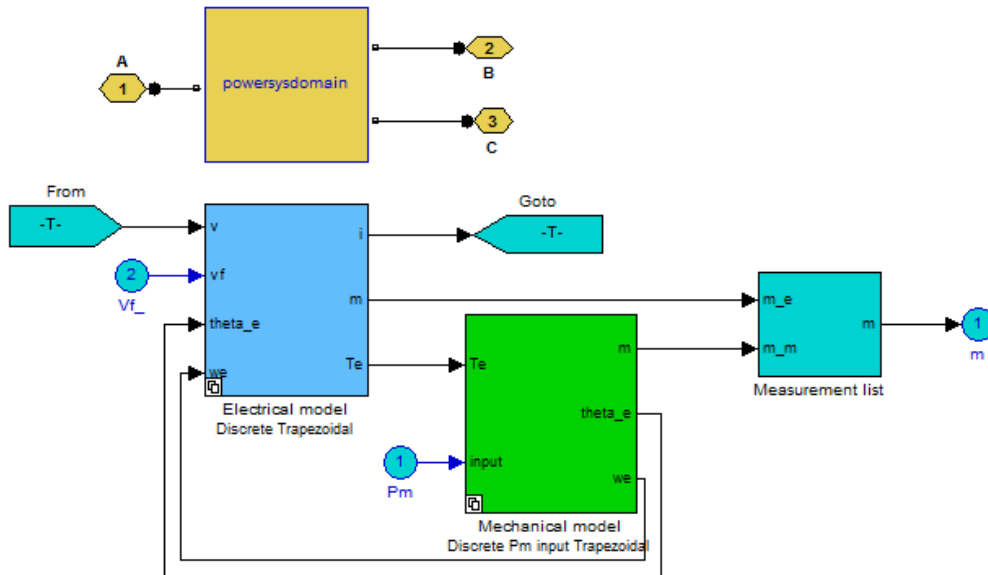
Εκτός από τον έλεγχο των ρευμάτων του στάτη της γεννήτριας από τον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης, είναι απαραίτητος και ο έλεγχος της τάσης στο τυλίγμα διέγερσης στον δρομέα. Γενικά υψηλή τάση διέγερσης αυξάνει τη μέγιστη ηλεκτρική ροπή που μπορεί να παραχθεί από τη γεννήτρια αλλά αυξάνει επίσης και τις απώλειες σιδήρου. Έτσι, σε λειτουργία χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, και κατ' επέκταση χαμηλής ταχύτητας δρομέα, η τάση διέγερσης μπορεί να μειωθεί καθώς οι απαιτήσεις ροπής είναι μικρές. Από την άλλη, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, απαιτείται υψηλή διέγερση ώστε η γεννήτρια να μπορεί να αναπτύξει την πλήρη ροπή[26].

Μοντελοποίηση συστήματος διέγερσης

Το σύστημα έλεγχου της τάσης του τυλίγματος διέγερσης δίνεται στο σχήμα 4.10. Όσο η ταχύτητα του δρομέα βρίσκεται κάτω από την ονομαστική, ο ελεγκτής φροντίζει ώστε η μαγνητική ροή στο στάτη να είναι ίση με την ονομαστική. Έτσι σε περίπτωση μείωσης των στροφών μειώνει αντίστοιχα και την τάση διέγερσης. Όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή, τότε δρα βοηθητικά με το σύστημα ελέγχου της γωνίας pitch φρενάροντας τον δρομέα.



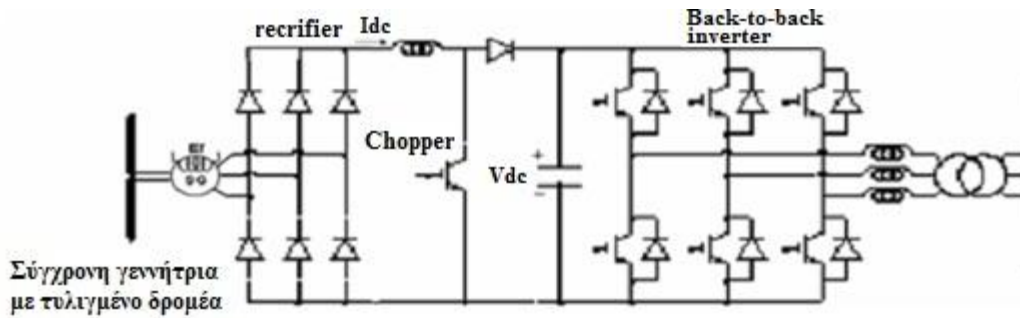
Σχ.4.10: Σύστημα ελέγχου διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας



Σχ.4.11 :Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας, ηλεκτρικό και μηχανικό μοντέλο

4.3 Σύνδεση της A/Γ στο δίκτυο

Η γεννήτρια έχει ηλεκτρική διέγερση συνεχούς ρεύματος στο δρομέα οπότε δε χρειάζεται απορρόφηση αέργου ισχύος για τη μαγνήτισή της. Έτσι στην έξοδό της μπορεί να συνδεθεί ένας μη ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής διόδων. Στην πλευρά του δικτύου χρησιμοποιείται τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης που ελέγχεται με τεχνική PWM και ο οποίος πρέπει στην είσοδό του να έχει σταθερή τάση. Επειδή όμως η έξοδος του ανορθωτή διόδων είναι ευαίσθητη στις μεταβολές του ανέμου δεν είναι δυνατή η απευθείας σύνδεση ανορθωτή και αντιστροφέα. Απαιτείται η παρεμβολή ενός dc/dc μετατροπέα ανύψωσης για να προσαρμόζει τις δύο τάσεις. Η συνολική διάταξη του μετατροπέα AC/DC/AC δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 4.12: Σύνδεση Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια στο δίκτυο

Μοντελοποίηση μετατροπών συχνότητας

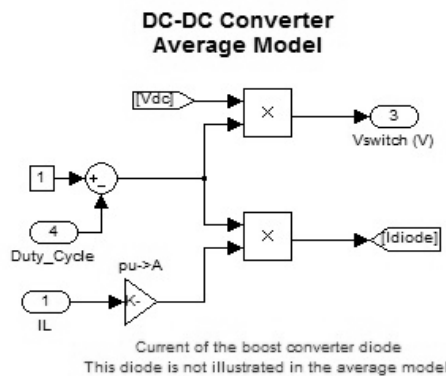
Για τη σχεδίαση των μετατροπών συχνότητας χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο μέσω των τιμών ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση διάρκειας λεπτών (<10min) με βήμα δεκάδων μs (50μs). Να σημειωθεί ότι το μοντέλο μέσω των τιμών δεν αναπαριστά αρμονικές ωστόσο τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος δεν αλλοιώνονται.

Ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης [27] (σχ.4.13) μοντελοποιήθηκε με βάση τις παρακάτω εξισώσεις και θεωρώντας ότι οι απώλειες στο κύκλωμα είναι αμελητέες, ώστε $P_{in}=P_{out}$:

$$V_{switch} = (1 - D)V_{dc} \quad (4.18)$$

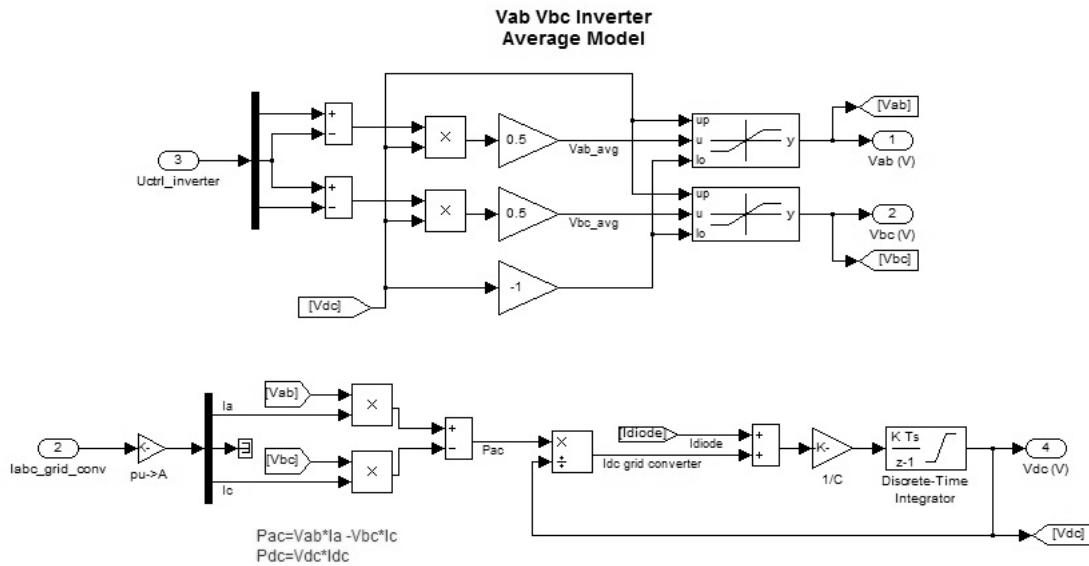
$$I_{diode} = (1 - D)I_L \quad (4.19)$$

Όπου D ο λόγος κατάτμησης που ισούται με το λόγο του χρόνου που το διακοπτικό στοιχείο είναι ανοιχτό t_{on} προς την περίοδο T , V_{dc} και I_{diode} είναι οι τιμές των μεγεθών στην πλευρά του αντιστροφέα (έξοδος του DC/DC μετατροπέα) και V_{switch} και I_L είναι τα μεγέθη στην πλευρά της γεννήτριας (είσοδος του DC/DC μετατροπέα).

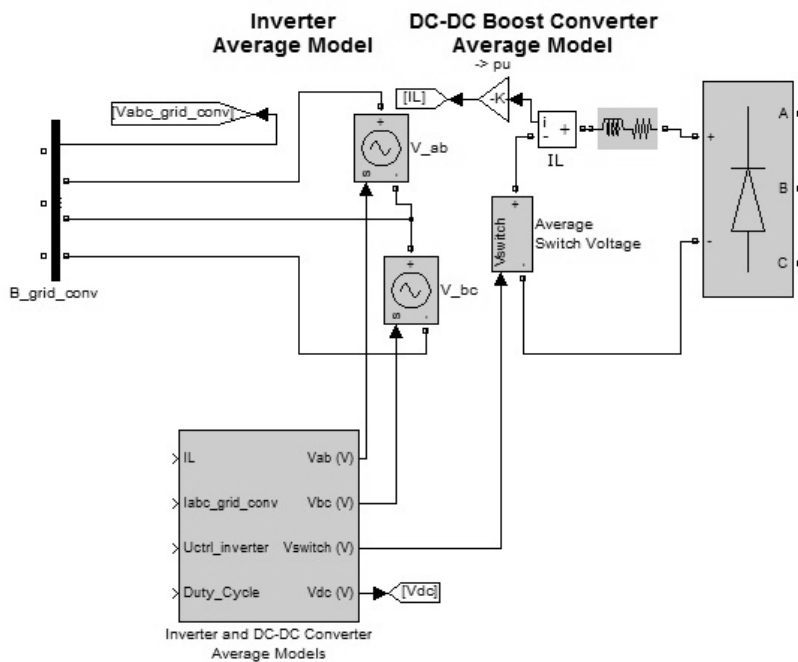


Σχ.4.13 : Μοντέλο μέσω των τιμών του DC/DC μετατροπέα

Οι μετατροπείς πηγής τάσης με IGBTs στην πλευρά του δικτύου μοντελοποιήθηκαν με ισοδύναμες πηγές εναλλασσόμενης τάση τιμής ίσης με τη μέση τιμή σε έναν κύκλο διακοπτικής συχνότητας (σχ.4.14). Και εδώ θεωρείται ότι οι απώλειες στο κύκλωμα είναι αμελητέες, ώστε $P_{dc}=P_{ac}$ (ισχύς εισόδου του αντιστροφέα ίση με ισχύ εξόδου).



Σχ. 4.14: Μοντέλο μέσω τιμών του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου



Σχ.4.15 : Συνολικό μοντέλο μετατροπέων συχνότητας AC/DC/AC

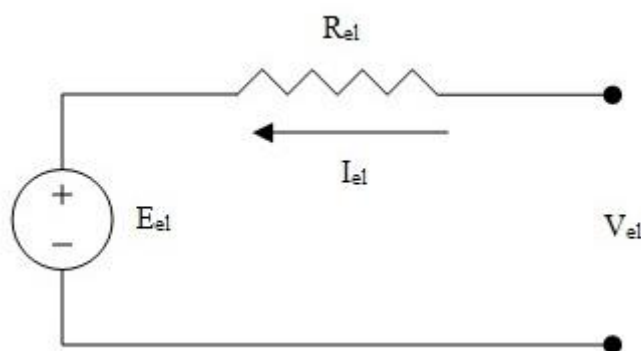
4.4 Γεννήτρια υδρογόνου

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday για την ηλεκτρόλυση, «*Η ποσότητα μιας ουσίας που παράγεται σε ένα ηλεκτρόδιο κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης είναι ανάλογη προς την ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στο ηλεκτρόδιο*». Εν συντομία ο νόμος του Faraday μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$n = \frac{It}{zF} \quad (4.18)$$

Όπου I είναι το ρεύμα σε A, t είναι ο χρόνος σε sec, z είναι ο αριθμός σθένους των ιόντων της ουσίας (ηλεκτρόνια που μεταφέρονται ανά ιόν), F η σταθερά Faraday και n η ποσότητα της ουσίας που παράγεται (αριθμός moles).

Σύμφωνα με το νόμο Faraday είναι δυνατή η παραγωγή αερίου υδρογόνου (H_2) χρησιμοποιώντας ηλεκτρολύτη. Η ποσότητα αερίου υδρογόνου που παράγεται εξαρτάται από το ρεύμα του ηλεκτρολύτη. Η γεννήτρια υδρογόνου μπορεί να μοντελοποιηθεί με ηλεκτρολύτη και κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος που θα παρέχουν σταθερό ρεύμα στον ηλεκτρολύτη. Ηλεκτρικά ο ηλεκτρολύτης μπορεί να προσεγγισθεί ως μια πηγή τάσης εν σειρά με μια αντίσταση. Η πηγή τάσης είναι απλά μια συσκευή με σταθερή τάση, ανεξάρτητα από τη ροή του ρεύματος. Η αντίσταση αναπαριστά την ιονική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων (σχ 4.16) [28].



Σχ. 4.16: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρολύτη

$$V_{el} = E_{el} + I_{el} R_{el} \quad (4.21)$$

Στόχος της γεννήτριας υδρογόνου δεν είναι μόνο η αποθήκευση ενέργειας μέσω της παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου αλλά και η εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου. Για την εξομάλυνση της ισχύος εξόδου δε συνίσταται η χρησιμοποίηση ενός μόνο ηλεκτρολύτη μεγάλης ικανότητας, διότι σε τέτοια περίπτωση θα λειτουργεί κατά κύριο λόγο υπό μερικό φορτίο άρα και με απόδοση μικρότερη της μέγιστης δυνατής. Ένας ηλεκτρολύτης λειτουργεί αποδοτικότερα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να φτάνει και να

διατηρεί αυτή τη θερμοκρασία όταν διαρρέεται από το ονομαστικό ρεύμα [29,30]. Λειτουργώντας με ρεύμα χαμηλότερο του ονομαστικού δε φτάνει στην απαραίτητη θερμοκρασία άρα λειτουργεί με μικρότερη απόδοση.

Επίσης επειδή απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για να φτάσει στην απαραίτητη θερμοκρασία, ο συνδυασμός με τη διακοπτόμενη λειτουργία φωτοβολταϊκών ή αιολικών συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργία υπό χαμηλότερη θερμοκρασία [30,31]. Οπότε και πάλι ο ηλεκτρολύτης θα έχει μειωμένη απόδοση. Η χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας μειώνει επίσης και το ρυθμό παραγωγής υδρογόνου.

Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό το ρεύμα του ηλεκτρολύτη να διατηρείται σταθερό στην ονομαστική τιμή του. Αποφεύγεται λοιπόν η απευθείας σύνδεση της γεννήτριας υδρογόνου στο δίκτυο και γίνεται μόνο με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Επίσης προτιμάται η στρατηγική της χρησιμοποίησης πολλών ηλεκτρολυτικών κελιών μικρότερης ικανότητας παρά ενός μεγάλης ικανότητας ηλεκτρολύτη.

4.5 Μοντελοποίηση Γεννήτριας υδρογόνου

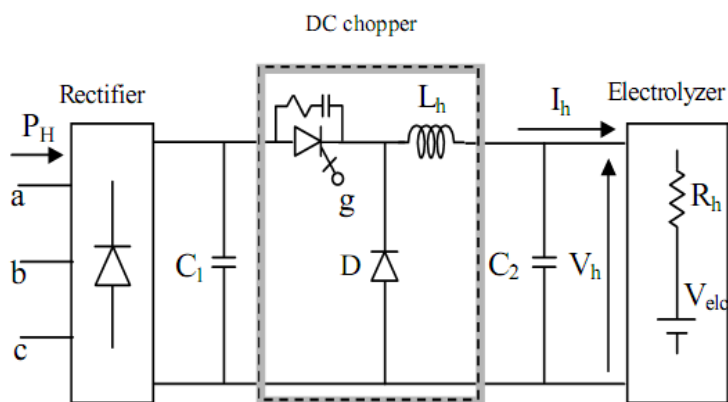
Η γεννήτρια υδρογόνου μπορεί να συνδεθεί είτε στο στάδιο συνεχούς ρεύματος της κάθε Α/Γ είτε στην έξοδο του αιολικού πάρκου [32]. Η σύνδεση της γεννήτριας υδρογόνου στην έξοδο του αιολικού πάρκου γίνεται χρησιμοποιώντας τριφασικό ανορθωτή διόδων. Αυτή η επιλογή όμως έχει το μειονέκτημα της χαμηλότερης απόδοσης και της εμφάνισης ανώτερων αρμονικών στο ρεύμα, λόγω της παρουσίας του σταδίου μετατροπής. Από την άλλη συνδέοντάς τη στον dc-κλάδο κάθε ανεμογεννήτριας θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα συντονισμένο σχέδιο ελέγχου για διαφορετικές ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η σύνδεση της γεννήτριας υδρογόνου στην έξοδο του αιολικού πάρκου.

4.5.1 Τοπολογίες γεννήτριας υδρογόνου

Οι τοπολογίες της γεννήτριας υδρογόνου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου παρουσιάζονται παρακάτω[33].

1^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου (ανορθωτής, DC/DC μετατροπέας και ηλεκτρολύτης)

Το σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17 και αποτελείται από έναν τριφασικό ανορθωτή διόδων, έναν μετατροπέα DC/DC υποβιβασμού και κυκλωματικό ισοδύναμο του ηλεκτρολύτη. Μέρος της εξόδου του αιολικού πάρκου ανορθώνεται και στη συνέχεια ο μετατροπέας DC/DC παρέχει ρεύμα σταθερής τιμής στον ηλεκτρολύτη, για την παραγωγή υδρογόνου σε αέρια μορφή. Η συγκεκριμένη διάταξη απαιτεί και έναν ελεγκτή για το διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα DC/DC, ο οποίος θα φροντίζει ουσιαστικά να διατηρεί σταθερή την τιμή του ρεύματος του ηλεκτρολύτη, ελέγχοντας έτσι και την παραγωγή υδρογόνου. Η διάταξη και ο αλγόριθμος του ελεγκτή παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

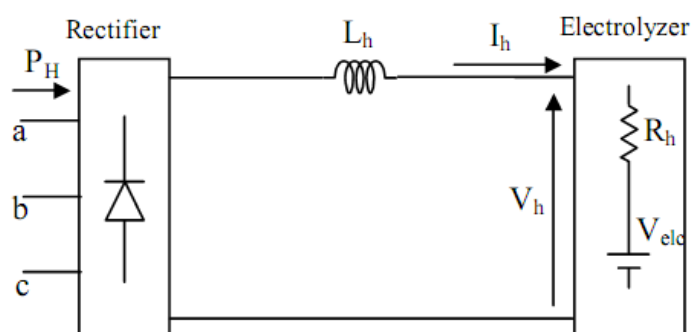


Σχ.4.17: 1^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου

Αυτός ο τύπος γεννήτριας υδρογόνου καταφέρνει να μην επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της τάσης στο σημείο σύνδεσης, διότι ο μετατροπέας DC/DC διατηρεί σταθερό το ρεύμα του ηλεκτρολύτη. Επομένως οι διακυμάνσεις της τάσης στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου που οφείλονται στις τυχαίες μεταβολές του ανέμου δεν επηρεάζουν τη σταθερή παραγωγή υδρογόνου. Ωστόσο η παρουσία των ηλεκτρονικών ισχύος αυξάνει σημαντικά το κόστος του συστήματος.

2^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου (ανορθωτής και ηλεκτρολύτης)

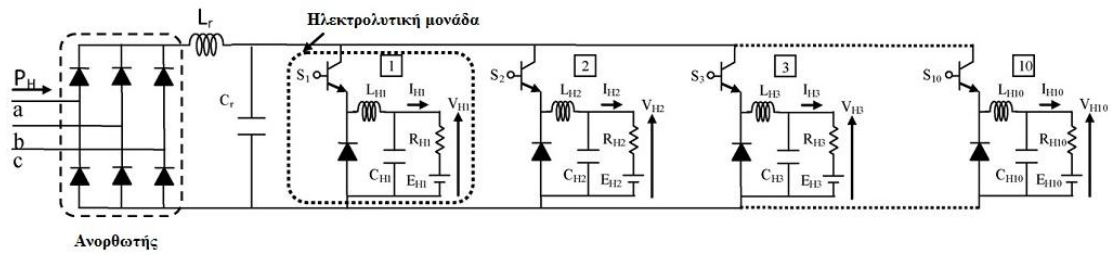
Το σχηματικό διάγραμμα του δεύτερου μοντέλου δίνεται στο σχήμα 4.18 και αποτελείται από έναν τριφασικό ανορθωτή διόδων και το ισοδύναμο κύκλωμα του ηλεκτρολύτη. Μέρος της εξόδου του αιολικού πάρκου ανορθώνεται και το ανορθωμένο ρεύμα παρέχεται απευθείας στον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή αερίου υδρογόνου. Οι διακυμάνσεις της τάσης στο σημείο σύνδεσης της γεννήτριας υδρογόνου μπορούν να επηρεάσουν την ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου και να μειώσουν το χρόνο ζωής του ηλεκτρολύτη. Το κόστος εγκατάστασης εδώ είναι χαμηλότερο λόγω έλλειψης του μετατροπέα DC/DC και του συστήματος ελέγχου του, ενώ η απόδοση της διάταξης υψηλότερη (5-10%) αφού ένα στάδιο μετατροπής (DC σε CD) παραλείπεται.



Σχ.4.18: 2^ο Μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου

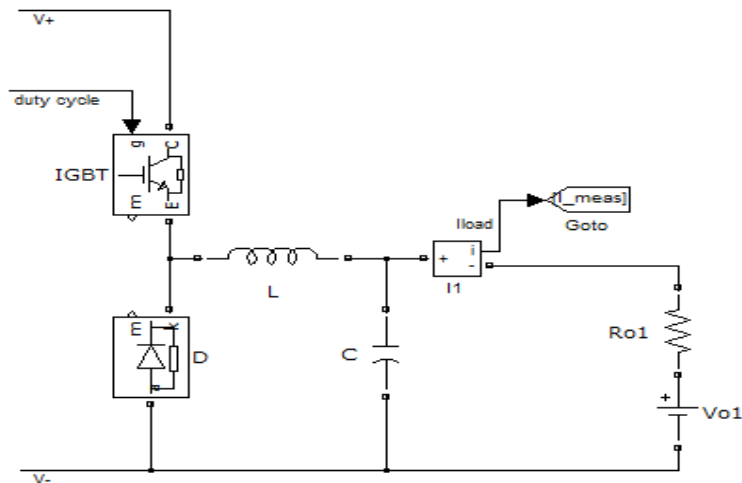
4.5.2 Τελικό μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία σχετικά με τις απαιτήσεις συνθηκών λειτουργίας του ηλεκτρολύτη με σταθερό ονομαστικό ρεύμα, υιοθετήθηκε το πρώτο μοντέλο (ανορθωτής, μετατροπέας DC/DC και ηλεκτρολύτης). Επίσης υιοθετώντας και τη στρατηγική των πολλών ηλεκτρολυτών μικρής ικανότητας αντί της χρησιμοποίησης ενός μεγάλης ικανότητας, προέκυψε η διάταξη που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.

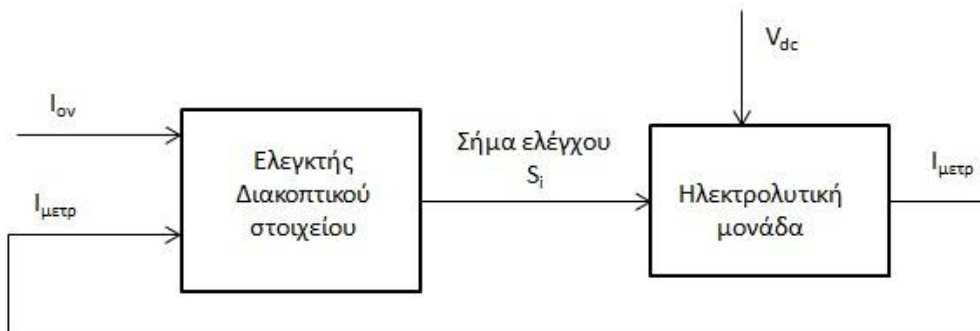


Σχ. 4.19: Γεννήτρια υδρογόνου

Η γεννήτρια υδρογόνου στη συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνει 10 ηλεκτρολυτικές μονάδες οι οποίες συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Ηλεκτρολυτική μονάδα ή ηλεκτρολυτικό κελί καλείται η διάταξη του ηλεκτρολύτη (πηγή τάσης με αντίσταση εν σειρά) μαζί με το ισοδύναμο κύκλωμα του DC/DC μετατροπέα υποβιβασμού. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο Simulink. Στο σχήμα 4.20 δίνεται η διάταξη μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας και στη συνέχεια στο σχήμα 4.21 το σύστημα ηλεκτρολυτικής μονάδας (electrolyzer bank) μαζί με τον ελεγκτή του DC/DC μετατροπέα (curr_controller).



Σχ. 4.20: Ηλεκτρολυτική μονάδα



Σχ. 4.21: Ηλεκτρολυτική μονάδα με ελεγκτή

Είσοδος του μοντέλου της ηλεκτρολυτικής μονάδας είναι η ανορθωμένη τάση του δικτύου και το σήμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου που προκύπτει από τον ελεγκτή. Έξοδος του μοντέλου είναι η τιμή του ρεύματος του ηλεκτρολύτη, η οποία προορίζεται ως είσοδος στον ελεγκτή. Το μοντέλο του ελεγκτή, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) [27] για να παράγει το σήμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των συστημάτων ελέγχου που ρυθμίζουν τη λειτουργία της κάθε ανεμογεννήτριας του αιολικού πάρκου, της γεννήτριας υδρογόνου και των ηλεκτρολυτικών μονάδων της. Επίσης γίνεται παρουσίαση των μοντέλων τους όπως αυτά υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του Matlab/Simulink.

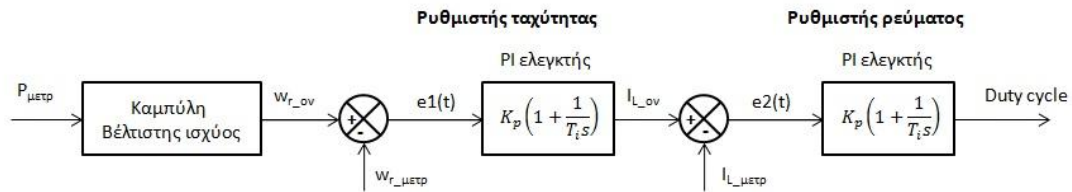
5.1 Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας

Το σύστημα ελέγχου της κάθε ανεμογεννήτριας αποτελείται από τον ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ, από τον ελεγκτή κλίσης των πτερυγίων της έλικας και από τον ελεγκτή του αντιστροφέα στην πλευρά του δικτύου.

5.1.1 Ελεγκτής ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ (MPPT control)

Όπως αναφέρθηκε, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παράγουν ισχύ που εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος C_p , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό ισχύος που εξάγεται από τον άνεμο. Για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου υπάρχει μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος από τον άνεμο. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ (MPPT). Ο έλεγχος MPPT πραγματοποιείται μέσω του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης της Α/Γ.

Είσοδος του ελεγκτή είναι η παραγόμενη ισχύς P_{meas} , η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ w_r και το ανορθωμένο ρεύμα εισόδου του μετατροπέα ανύψωσης I_L . Από τη χαρακτηριστική ροπή στροφών της Α/Γ προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής που χρησιμοποιείται ως αναφορά w_{ref} και η οποία συγκρίνεται με την πραγματική w_r . Το σφάλμα σύγκρισης των ταχυτήτων εισέρχεται σε ένα PI ελεγκτή, η έξοδος του οποίου αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς του συνεχούς ρεύματος I_{Lref} η οποία συγκρίνεται στη συνέχεια με το συνεχές ρεύμα εισόδου I_L . Από το σφάλμα σύγκρισής τους, μέσω ενός PI ελεγκτή και πάλι, προκύπτει το σήμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα ανύψωσης. Το μοντέλο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του MPPT ελεγκτή παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 5.1).

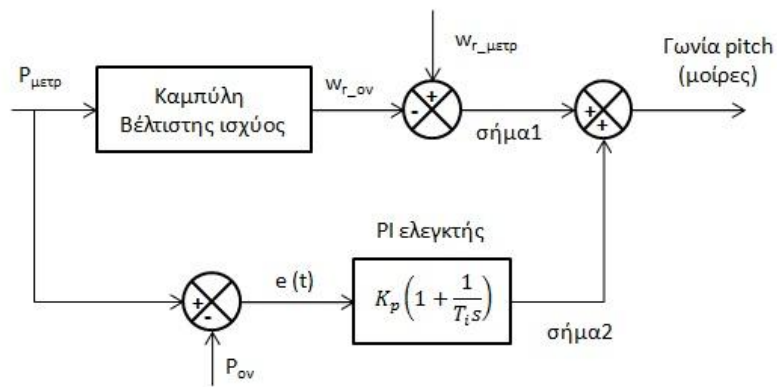


Σχ. 5.1: Μοντέλο ελεγκτή ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ

5.1.2 Ελεγκτής κλίσης των πτερυγίων της έλικας (pitch control)

Ο ελεγκτής κλίσης πτερυγίων δρα σε περιπτώσεις ισχυρού ανέμου όπου η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ αυξάνεται πάνω από την ονομαστική. Αυξάνοντας την κλίση των πτερυγίων η Α/Γ μειώνει την παραγόμενη ισχύ σε μια τιμή αναφοράς κάτω από 1 pu. Αντίθετα σε χρονικά διαστήματα με μικρή ταχύτητα ανέμου επαναφέρει τα πτερύγια σε μηδενική κλίση.

Είσοδος για τον ελεγκτή βήματος είναι η μετρούμενη ισχύς εξόδου P_{meas} και η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας w_r . Η μετρούμενη ισχύς συγκρίνεται με την ονομαστική (1 pu) και η ταχύτητα περιστροφής με την τιμή αναφοράς w_{ref} που έχει προκύψει όπως αναφέρθηκε στον ελεγκτή ΜΡΡΤ από την χαρακτηριστική ροπή στροφών. Τα αποτελέσματα των δύο συγκρίσεων καθορίζουν την κλίση των πτερυγίων της έλικας. Το μοντέλο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του ΜΡΡΤ ελεγκτή παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 5.2).



Σχ. 5.2: Μοντέλο ελεγκτή κλίσης των πτερυγίων της έλικας

5.1.3 Ελεγκτής του μετατροπέα DC/AC της ανεμογεννήτριας στην πλευρά του δικτύου (grid-side converter control system)

Ο αντιστροφέας αποτελεί τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Αυτός ρυθμίζει την ανταλλαγή αέργου και ενεργού ισχύος. Να

σημειωθεί πως χάριν απλοποίησης της ανάλυσης των τριφασικών ρευμάτων και των τάσεων χρησιμοποιείται ο dq-μετασχηματισμός.

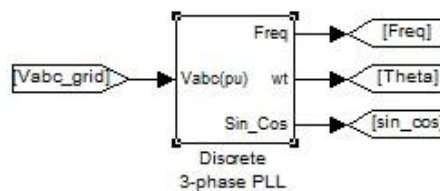
Μετασχηματισμός dq

Ο dq-μετασχηματισμός μετατρέπει με τη βοήθεια της μήτρας T_{abc-dq} τα τριφασικά μεγέθη από ένα abc σταθερό σύστημα συντεταγμένων στο dq στρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων. Η μήτρα μετασχηματισμού δίνεται στη σχέση (5.1).

$$T_{abc-dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) & -\sin(\omega t + \theta) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Συγχρονισμός στην συχνότητα του δικτύου

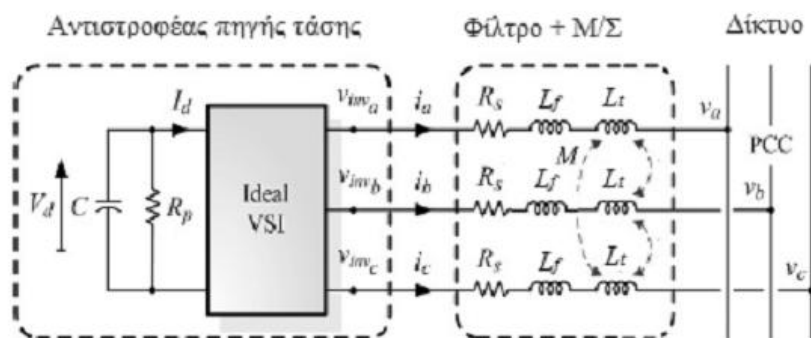
Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του dq-πλασίου πρέπει να είναι ίδια με αυτή της περιστροφής των διανυσμάτων της τάσης του δικτύου. Επομένως είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός του αντιστροφέα μέσω ενός συστήματος ανίχνευσης της τρέχουσας συχνότητας του δικτύου. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει το σύστημα PLL (phase-locked loop) το οποίο δέχεται ως είσοδο το διάνυσμα των τάσεων του δικτύου V_{abc_grid} και δίνει στην έξοδο την τρέχουσα συχνότητα του δικτύου, τη γωνία ωt του πλαισίου dq και το ημίτονο και το συνημίτονο αυτής.



Σχ.5.3: Σύστημα για τον συγχρονισμό του αντιστροφέα με την συχνότητα του δικτύου (PLL)

Έλεγχος των συνιστωσών dq

Σχεδόν πάντα μεταξύ του αντιστροφέα μιας A/Γ και του δικτύου παρεμβάλλεται, εκτός του φίλτρου, και ένας μετασχηματιστής (για προσαρμογή του επιπέδου τάσης εξόδου με αυτής του δικτύου). Έτσι στο ισοδύναμο κύκλωμα λαμβάνονται υπόψη η αντίδραση σκέδασης L_t του M/Σ μαζί με την αντίδραση του φίλτρου L_f οι οποίες συνδέονται εν σειρά με την αντίσταση R_s που απεικονίζει τις συνολικές απώλειες των πηνίων του μετασχηματιστή και του φίλτρου. Επίσης λαμβάνεται υπόψη και η αλληλεπαγωγή M των τριών τυλιγμάτων του μετασχηματιστή (Σχ.5.4).



Σχ.5.4: Αντιστροφείας συνδεδεμένος στο δίκτυο μέσω φίλτρου και μετασχηματιστή

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα προκύπτουν με εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff, και τελικά μετά και την ανεξαρτητοποίηση των συνιστωσών i_d και i_q οπότε τελικά:

$$v_{inv_d} = v_d - R_s i_d + v'_d + \omega L_s i_q \quad (5.2)$$

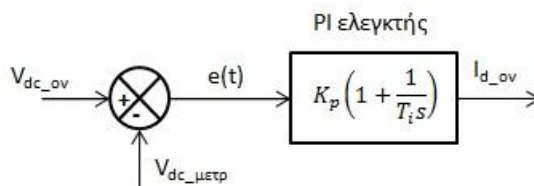
$$v_{inv_q} = v_q - R_s i_q - v'_q - \omega L_s i_d \quad (5.3)$$

Όπου $L_s = \begin{bmatrix} L_f + L_t & M & M \\ M & L_f + L_t & M \\ M & M & L_f + L_t \end{bmatrix}$ και $R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$

Η ανεξαρτητοποίηση των συνιστωσών i_d και i_q είναι απαραίτητη ώστε να ελέγχονται αντίστοιχα ξεχωριστά η ενεργός και η άεργος ισχύς και επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο PI ελεγκτών που παράγουν τα σήματα v'_q και v'_d .

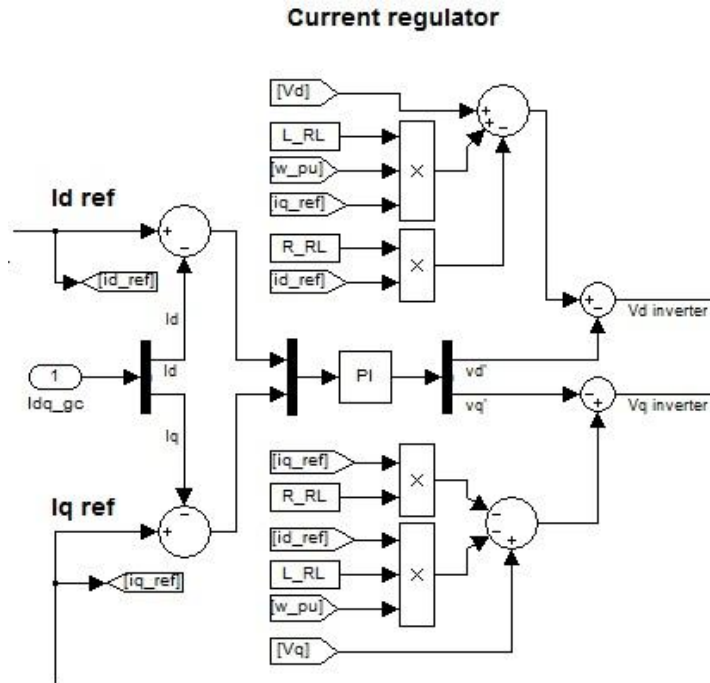
Αφού ο έλεγχος των συνιστωσών d γίνεται ανεξάρτητα από τις q-συνιστώσες, ουσιαστικά προκύπτουν δύο ελεγκτές που λειτουργούν παράλληλα. Ο καθένας έχει δύο βρόχους ελέγχου.

- Ο ελεγκτής των d-συνιστωσών με τον έναν βρόχο κρατά τη συνεχή τάση στην πλευρά του μετατροπέα ανύψωσης V_{dc} στην ονομαστική της τιμή V_{dc_ref} ($=1100V$) και έτσι καθορίζει και την τιμή αναφοράς της d-συνιστώσας ρεύματος i_{d_ref} (Σχ.5.5). Με τον δεύτερο βρόχο ρυθμίζει το ρεύμα i_d και τελικά την τάση v_{inv_d} (Σχ.5.6).



Σχ. 5.5: Καθορισμός I_{d_ref} πρώτος βρόχος του ελεγκτή των d-συνιστωσών

- Ο ελεγκτής των q-συνιστωσών με τον έναν βρόχο καθορίζει την τιμή αναφοράς της q-συνιστώσας ρεύματος i_{q_ref} έτσι ώστε η άεργος ισχύς που καταναλώνεται να διατηρείται στην τιμή που ορίζει η Q_{ref} ($= 0$ pu). Με τον δεύτερο βρόχο ρυθμίζει το ρεύμα i_q και τελικά την τάση v_{inv_q} (Σχ. 5.6).

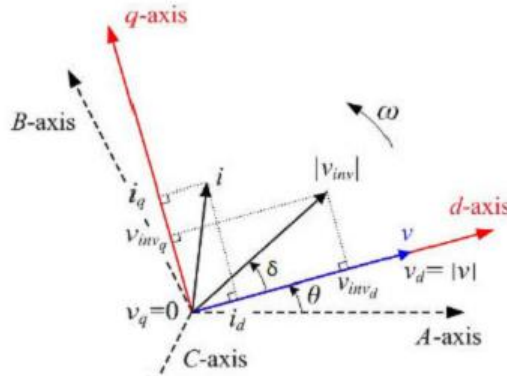


Σχ. 5.6: Καθορισμός των συνιστωσών dq της τάσης του αντιστροφέα

Η d-συνιστώσα του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα σχετίζεται με την ενεργό τιμή που καταλήγει στο δίκτυο, ενώ η q-συνιστώσα με την παραγόμενη άεργο ισχύ. Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 5.7 και την υπόθεση ότι ο d-άξονας ταυτίζεται με το συνιστάμενο διάνυσμα τάσης ($V_d=|V|$ και $V_q=0$) οι εξισώσεις που περιγράφουν την ενεργό και άεργο ισχύ που διακινείται είναι οι:

$$P = \frac{3}{2} |V| I_d \quad (5.4)$$

$$Q = -\frac{3}{2} |V| I_q \quad (5.5)$$



Σχ. 5.7: Διανύσματα τάσης και ρεύματος στο dq στρεφόμενο πλαίσιο

5.2 Σύστημα ελέγχου γεννήτριας υδρογόνου

Κάθε ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ χάρη στον MPPT ελεγκτή. Παρόλα αυτά η ισχύς αυτή, αλλά και η συνολική του αιολικού πάρκου, δεν παύει να παρουσιάζει διακυμάνσεις λόγω των ριπών του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στόχος της γεννήτριας υδρογόνου εκτός από την αποθήκευση ενέργειας είναι και η εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου, με στόχο την αύξηση της διείσδυσης των αιολικών συστημάτων. Η γεννήτρια υδρογόνου αποτελείται από 10 ηλεκτρολυτικές μονάδες μικρής ικανότητας (0,54 MW) αντί μιας μονάδας μεγάλης ισχύος.

Η λειτουργία των ηλεκτρολυτικών μονάδων και κατ' επέκταση της γεννήτριας υδρογόνου πρέπει να γίνεται υπό την επίβλεψη ενός ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει το ποσό της ισχύος που πρέπει να καταναλώσει-απορροφήσει η γεννήτρια υδρογόνου. Απώτερος στόχος είναι στο δίκτυο να φτάνει πιο σταθερή ισχύς σε σχέση με αυτή που θα έφτανε αν υπήρχε απευθείας σύζευξη του αιολικού πάρκου στο δίκτυο, χωρίς την παρουσία της γεννήτριας υδρογόνου. Η ποσότητα της ισχύος που πρέπει να απορροφηθεί είναι ανάλογη του αριθμού των ηλεκτρολυτικών μονάδων της γεννήτριας υδρογόνου που τίθενται σε λειτουργία.

Για να γίνει η εξομάλυνση πρέπει αρχικά να ορισθεί μια ισχύς εξόδου αναφοράς η οποία τελικά θα προσφέρεται στο δίκτυο, ενώ η υπόλοιπη ισχύς θα απορροφάται από τους ηλεκτρολύτες της γεννήτριας υδρογόνου. Για τον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς χρησιμοποιείται η μέθοδος του κινούμενου εκθετικού μέσου. Επίσης υιοθετείται συγκεκριμένη στρατηγική όσον αφορά στη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου που στοχεύει τόσο στην απορρόφηση της απαιτούμενης ισχύος όσο και στη βιωσιμότητα των ηλεκτρολυτών της. Επίσης σύμφωνα με τη στρατηγική των πολλών μικρών ηλεκτρολυτών, μια ηλεκτρολυτική μονάδα είτε ενεργοποιείται σε πλήρες φορτίο, είτε δεν ενεργοποιείται καθόλου. Συνοψίζοντας, ο έλεγχος λειτουργίας της γεννήτριας υδρογόνου επικεντρώνεται στα εξής σημεία:

- Καθορισμός της ισχύος αναφοράς με τη μέθοδο του κινούμενου εκθετικού μέσου (exponential moving average – EMA).
- Έλεγχος του αριθμού των ηλεκτρολυτών που τίθενται σε λειτουργία, ο οποίος εξαρτάται από την ποσότητα κυμαινόμενης ισχύος που πρέπει να απορροφηθεί.
- Έλεγχος του μετατροπέα υποβιβασμού της ηλεκτρολυτικής μονάδας με τη μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)
- Περιορισμός στην υπερβολικά συχνή και τυχαία ενεργοποίηση-απενεργοποίηση κάθε ηλεκτρολυτικής μονάδας για λόγους βιωσιμότητας των ηλεκτρολυτών.
- Ομαλή ενεργοποίηση κάθε ηλεκτρολύτη επίσης για λόγους βιωσιμότητας.

5.2.1 Ελεγκτής για τον καθορισμό της ισχύος αναφοράς

Ο ρόλος της ισχύος αναφοράς είναι καθοριστικός για τον αλγόριθμο εξομάλυνσης της ισχύος εξόδου του Α/Π. Όταν η ισχύς εξόδου υπερβαίνει την τιμή αναφοράς, η επιπλέον ισχύς απορροφάται από τη γεννήτρια υδρογόνου. Να σημειωθεί ότι στόχος είναι ο αριθμός των διακυμάνσεων άνω και κάτω της τιμής αναφοράς να μην είναι μεγάλος καθώς κάτι τέτοιο θα επηρέαζε την όλη διαδικασία εξομάλυνσης.

Αρχικά υπολογίζεται ο εκθετικός κινούμενος μέσος (exponential moving average - χάριν συντομίας EMA) της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου, P_{WF_EMA} , σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$EMA(P_{wt_n}) = [P_{wt_n} - EMA(P_{wt_n-1})]K + EMA(P_{wt_n-1}) \quad (5.6)$$

Όπου $P_{wt}(n)$ είναι η τρέχουσα τιμή ισχύος, $EMA(P_{wt}(n-1))$ είναι η τιμή του EMA της προηγούμενης περιόδου και K ένας συντελεστής βαρύτητας. Ο EMA υπολογίζεται ανά περιόδους δειγμάτων και για N περιόδους ο K δίνεται από την σχέση $K=2/(1+N)$ [33].

Το γεγονός ότι στον EMA χρησιμοποιείται η προηγούμενη τιμή για τον υπολογισμό της επόμενης, κάνει τον συγκεκριμένο αλγόριθμο ικανό να ακολουθήσει τις ταχείες μεταβολές των διακυμάνσεων που προκαλούνται λόγω της υψηλής μεταβλητότητας του ανέμου. Για τον υπολογισμό του EMA της πρώτης περιόδου χρησιμοποιείται ένας απλός μέσος όρος (simple moving average-SMA), εφόσον δεν υπάρχουν προηγούμενες τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το μοντέλο που υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του Simulink για τον υπολογισμό του εκθετικού κινούμενου μέσου στηρίζεται στην εξίσωση 5.6 και δίνεται στο σχήμα (Σχ.5.8) με τον τίτλο “EMA”.

Για να προκύψει η τιμή της ισχύος αναφοράς P_{ref} χρειάζεται και ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης P_{wt_sd} :

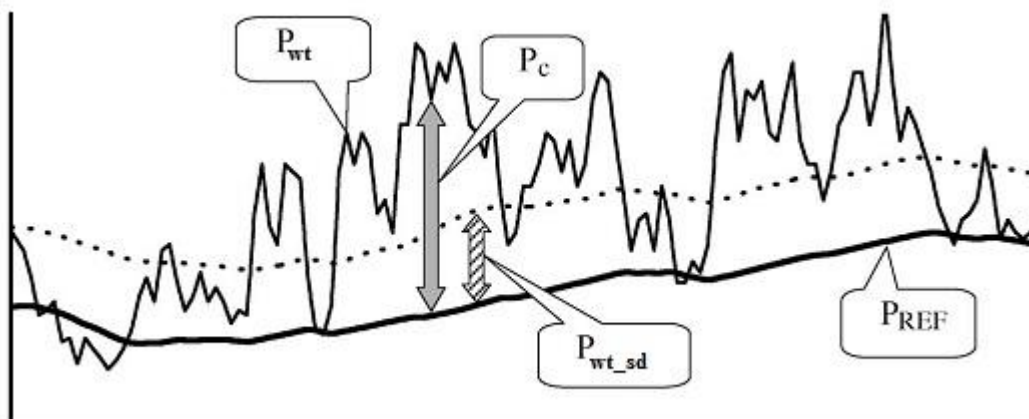
$$P_{wt_sd}(i) = \sqrt{\frac{\sum_{n=i}^{N+i} (P_{wt}(n) - EMA(n))^2}{N}} \quad (5.7)$$

Τελικά αφαιρώντας την τυπική απόκλιση από την τιμή της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου προκύπτει η τιμή αναφοράς της ισχύος, που εκφράζει το ποσό της ισχύος που τελικά θα προσφέρεται στο δίκτυο (σχέση 5.8). Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ποσότητα ισχύος P_c (σχέση 5.9) που πρέπει να απορροφηθεί από τη γεννήτρια υδρογόνου:

$$P_{ref} = P_{wt} - P_{wt_sd} \quad (5.8)$$

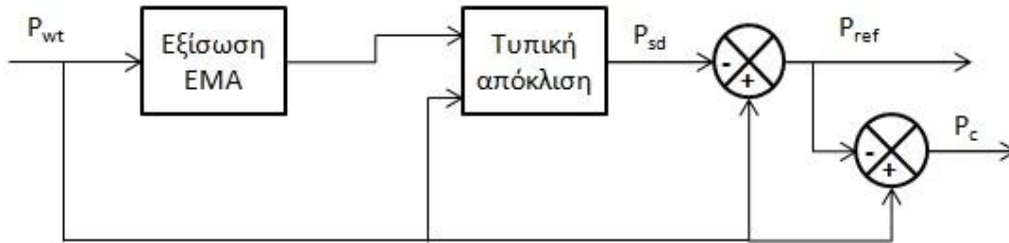
$$P_c = P_{wt} - P_{ref} \quad (5.9)$$

Να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση της τυπικής απόκλισης στον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς και της ισχύος που πρέπει να απορροφήσει η γεννήτρια υδρογόνου στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εξομάλυνσης. Προς το δίκτυο θα μπορούσε να δοθεί η τιμή του EMA της ισχύος P_{wt} αλλά προτιμήθηκε να επιλεγεί η P_{ref} που προκύπτει μετά και την αφαίρεση της τυπικής απόκλισης. Η επιλογή αυτή στοχεύει στο να μειωθούν οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου άνω και κάτω της ισχύος που τίθεται ως τιμή αναφοράς. Έμμεσα η μείωση των διακυμάνσεων αυτών στοχεύει και στον περιορισμό των πολύ συχνών ενεργοποιήσεων και απενεργοποιήσεων των ηλεκτρολυτών [32-34].

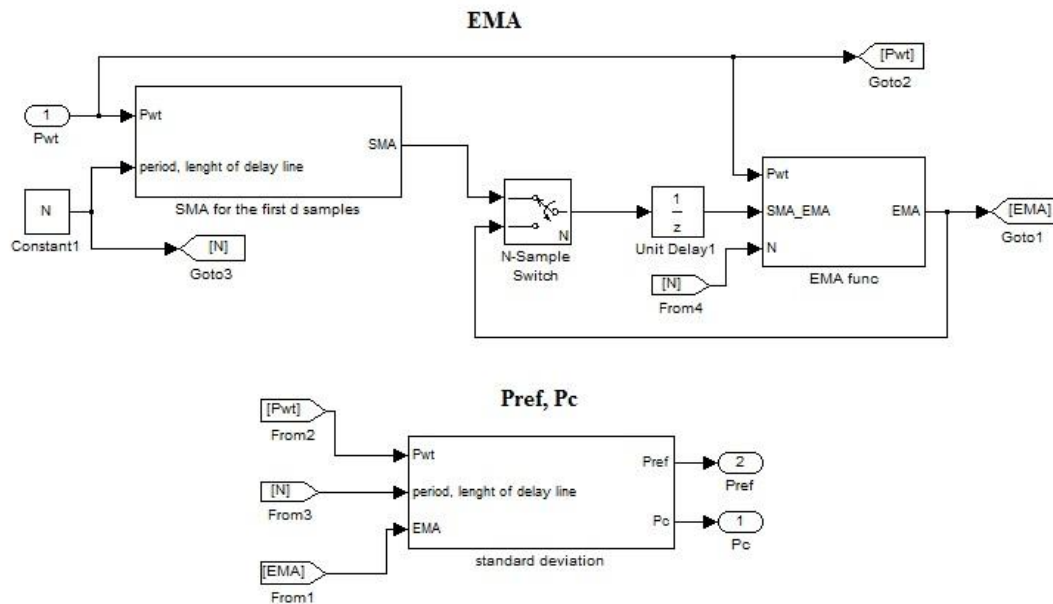


Σχ.5.8: Στρατηγική εξομάλυνσης της ισχύος εξόδου

Στο σχήμα 5.8 δίνεται το μοντέλο που κατασκευάστηκε για τον υπολογισμό των παραπάνω δύο τιμών ενώ στη συνέχεια στο σχήμα 5.9 που ακολουθεί, το μοντέλο ολόκληρου του ελεγκτή.



Σχ. 5.9: Υπολογισμός των Pref και Pc



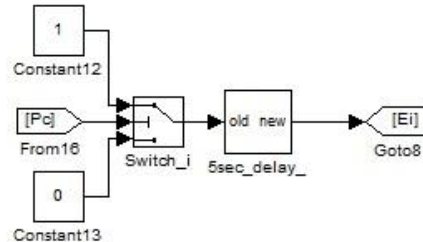
Σχ.5.10: Μοντέλο simulink για τον υπολογισμό της ισχύος αναφοράς

5.2.2 Ελεγκτής για τον καθορισμό του αριθμού των ηλεκτρολυτών που πρέπει να ενεργοποιηθούν

Ουσιαστικά ο συγκεκριμένος ελεγκτής καθορίζει τη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου καθώς λαμβάνει υπόψη του την ποσότητα ισχύος που πρέπει να καταναλώσει η γεννήτρια και αποφασίζει για τον αριθμό των ηλεκτρολυτών που πρέπει να ενεργοποιηθούν. Στο σύστημα που μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε, κάθε ηλεκτρολυτική μονάδα από τις συνολικά 10 θεωρήθηκε ότι έχει ικανότητα 0,54MW.

Η ποσότητα P_c που προέκυψε από τον προηγούμενο έλεγχο συγκρίνεται με την τρέχουσα ισχύ που καταναλώνει η γεννήτρια υδρογόνου. Ο ελεγκτής δίνει σήμα

έναυσης E_i σε μια ηλεκτρολυτική μονάδα αν η τιμή του σήματος P_c είναι μεγαλύτερη από την ισχύ της γεννήτριας υδρογόνου κατά 0,54MW. Στη συνέχεια αν το σήμα ενεργοποίησης διατηρείται για λιγότερο από 5 sec, ο ηλεκτρολύτης δεν τίθεται σε λειτουργία και το σήμα έναυσης αναιρείται. Οι συνθήκες για τον καθορισμό των ενεργών ηλεκτρολυτικών μονάδων συνοψίζονται στον πίνακα 5.1.

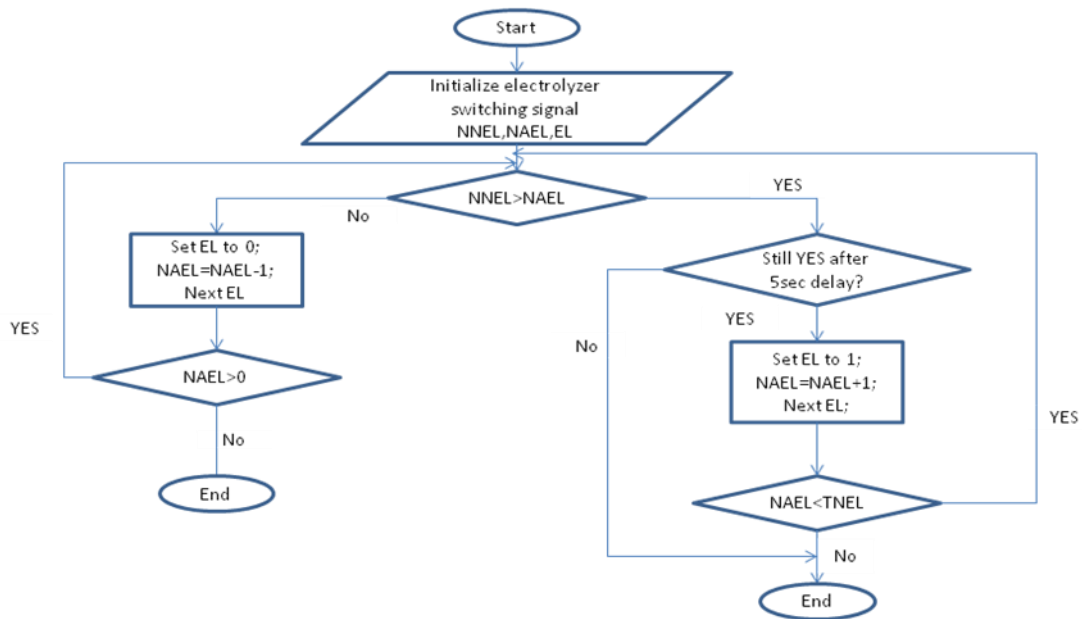


Σχ.5.11: Δημιουργία σήματος ελέγχου κάθε ηλεκτρολύτη

Στρατηγική λειτουργίας ηλεκτρολυτικών μονάδων		
Αριθμός ενεργών μονάδων	Συνθήκη ενεργοποίησης	Συνθήκη απενεργοποίησης
1	$P_c \geq 1.08$ (MW)	$P_c \leq 0.54$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
2	$P_c \geq 1.62$ (MW)	$P_c \leq 1.08$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
3	$P_c \geq 2.16$ (MW)	$P_c \leq 1.62$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
4	$P_c \geq 2.70$ (MW)	$P_c \leq 2.16$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
5	$P_c \geq 3.24$ (MW)	$P_c \leq 2.70$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
6	$P_c \geq 3.78$ (MW)	$P_c \leq 3.24$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
7	$P_c \geq 4.32$ (MW)	$P_c \leq 3.78$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
8	$P_c \geq 4.86$ (MW)	$P_c \leq 4.32$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
9	$P_c \geq 5.40$ (MW)	$P_c \leq 4.86$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$
10	$P_c \geq 5.94$ (MW)	$P_c \leq 5.40$ (MW) ή $\Delta t_{ON} < 5\text{sec}$

Πίνακας 5.1: Στρατηγική ενεργοποίησης των ηλεκτρολυτικών μονάδων

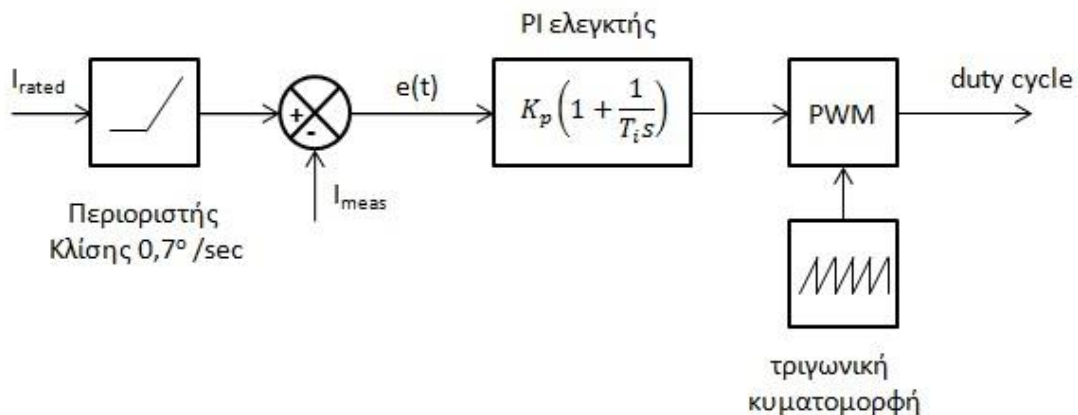
Τελικά αυτό που προκύπτει κάθε στιγμή από τον ελεγκτή είναι ένας πίνακας δέκα στοιχείων E_i με τιμές 0 ή 1, που δείχνει ποιοι ηλεκτρολύτες πρέπει να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν. Στο σχήμα 5.11 δίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου. Όπου $NNEL$ είναι ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρολυτών που πρέπει να είναι ενεργοποιημένοι για να απορροφήσουν την απαιτούμενη ισχύ. $NAEL$ είναι ο αριθμός των ήδη ενεργών ηλεκτρολυτών. EL ένας δείκτης που δείχνει τον ηλεκτρολύτη που ελέγχεται τη συγκεκριμένη στιγμή. $TNEL$ είναι ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρολυτών της γεννήτριας υδρογόνου.



Σχ5.12: Αλγόριθμος λειτουργίας της γεννήτριας υδρογόνου

5.2.3 Έλεγχος του μετατροπέα υποβιβασμού της ηλεκτρολυτικής μονάδας με την μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

Ο ελεγκτής που παράγει το σήμα έναυσης του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα υποβιβασμού κάθε ηλεκτρολυτικής μονάδας χρησιμοποιεί τη μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12. Το σύστημα ελέγχου δέχεται ως είσοδο τη μετρούμενη τιμή του ρεύματος του ηλεκτρολύτη I_{meas} και τη συγκρίνει με το ονομαστικό ρεύμα I_{rated} ($=418A$) και το σφάλμα εισέρχεται σε έναν PI ελεγκτή. Ο PI ελεγκτής δημιουργεί το σήμα που εν συνεχεία συγκρίνεται με μια τριγωνική παλμοσειρά (συχνότητας 4 kHz) και το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι το σήμα ελέγχου του διακοπτικού στοιχείου.



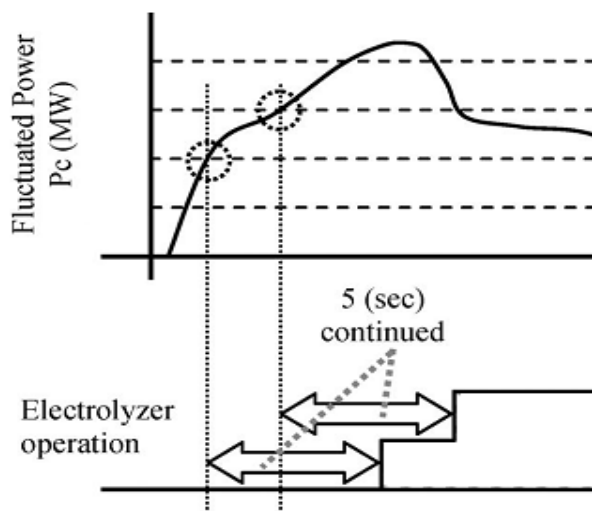
Σχ.5.13. Ελεγκτής του διακοπτικού στοιχείου της ηλεκτρολυτικής μονάδας

Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας έναν περιοριστή κλίσης, για την τιμή της ονομαστικής τιμής ρεύματος λειτουργίας, επιτυγχάνεται ομαλή εκκίνηση του ηλεκτρολύτη αντί για βηματική έναυση.

5.2.4 Περιορισμός αριθμού τυχαίων έναυσεων των ηλεκτρολυτικών μονάδων

Η παραμικρή διακύμανση της ισχύος εξόδου του πάρκου μπορεί να προκαλέσει ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των μονάδων ηλεκτρόλυσης υπερβολικά συχνά. Κάτι τέτοιο θα είχε αντίκτυπο και στην ομαλή λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου αλλά και στην απόδοση κάθε μονάδας αφού σε μια στιγμιαία ενεργοποίηση ο ηλεκτρολύτης δε θα προλάβει να φτάσει στη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

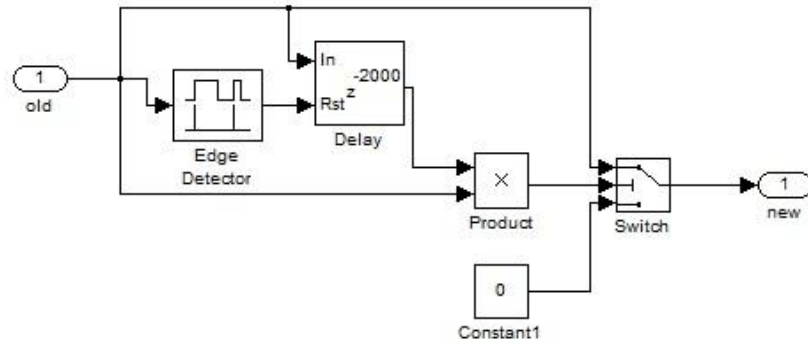
Για να περιοριστεί το παραπάνω πρόβλημα γίνεται ένα φιλτράρισμα των πολύ σύντομων σημάτων έναυσης θέτοντας ένα χρονικό όριο 5 δευτερολέπτων: Το σήμα ελέγχου παίρνει τιμή 1 όταν η P_c ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, αλλά ο ηλεκτρολύτης δεν ενεργοποιείται αμέσως. Αν η τιμή 1 διατηρείται για περισσότερα από 5 sec, τότε ο ηλεκτρολύτης ενεργοποιείται, διαφορετικά το σήμα έναυσης αναιρείται και λαμβάνει τιμή 0. Στο σχήμα 5.13 εξηγείται η ιδέα του περιορισμού των τυχαίων στιγμιαίων ενεργοποιήσεων.



Σχ.5.14. Περιορισμός τυχαίας έναυσης των ηλεκτρολυτικών μονάδων

Στη συνέχεια στο σχήμα 5.14 δίνεται το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο simulink για την προσομοίωση του συγκεκριμένου σταδίου ελέγχου. Δέχεται στην είσοδο το σήμα έναυσης E_i , εντοπίζει τις μεταβάσεις του σήματος από την τιμή 0 στην τιμή 1 και αν η διάρκεια της τιμής 1 είναι πάνω από 5sec επιτρέπει την ενεργοποίηση της τρέχουσας ηλεκτρολυτικής μονάδας. Διαφορετικά αναιρεί το σήμα θέτοντας το στο 0. Η περίοδος δειγματοληψίας του σήματος P_c όπως θα αναφερθεί

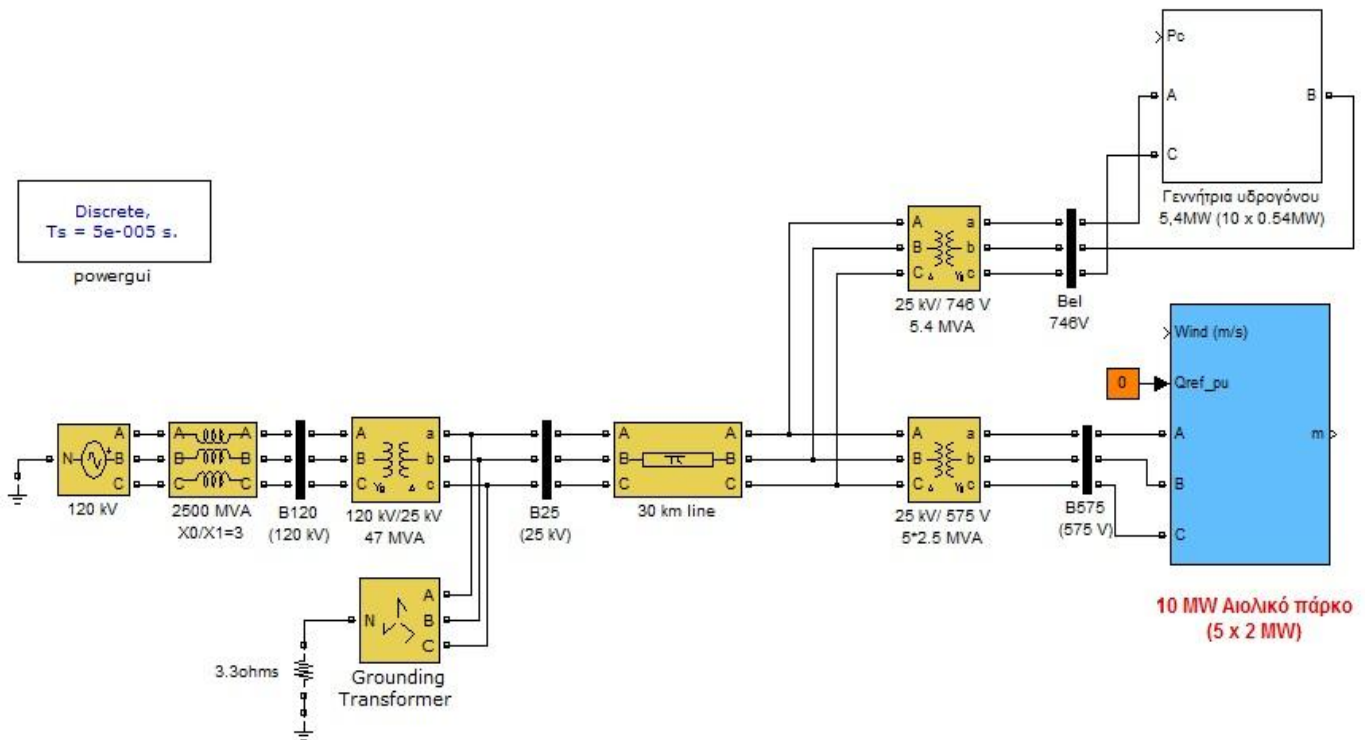
στο επόμενο κεφάλαιο έχει τεθεί στα 0,0025 sec, οπότε η καθυστέρηση 2000 δειγμάτων που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αντιστοιχεί σε 5 δευτερόλεπτα.



Σχ.5.15: Μοντέλο ελεγκτή για τον περιορισμό του αριθμού τυχαίων εναύσεων των ηλεκτρολυτικών μονάδων

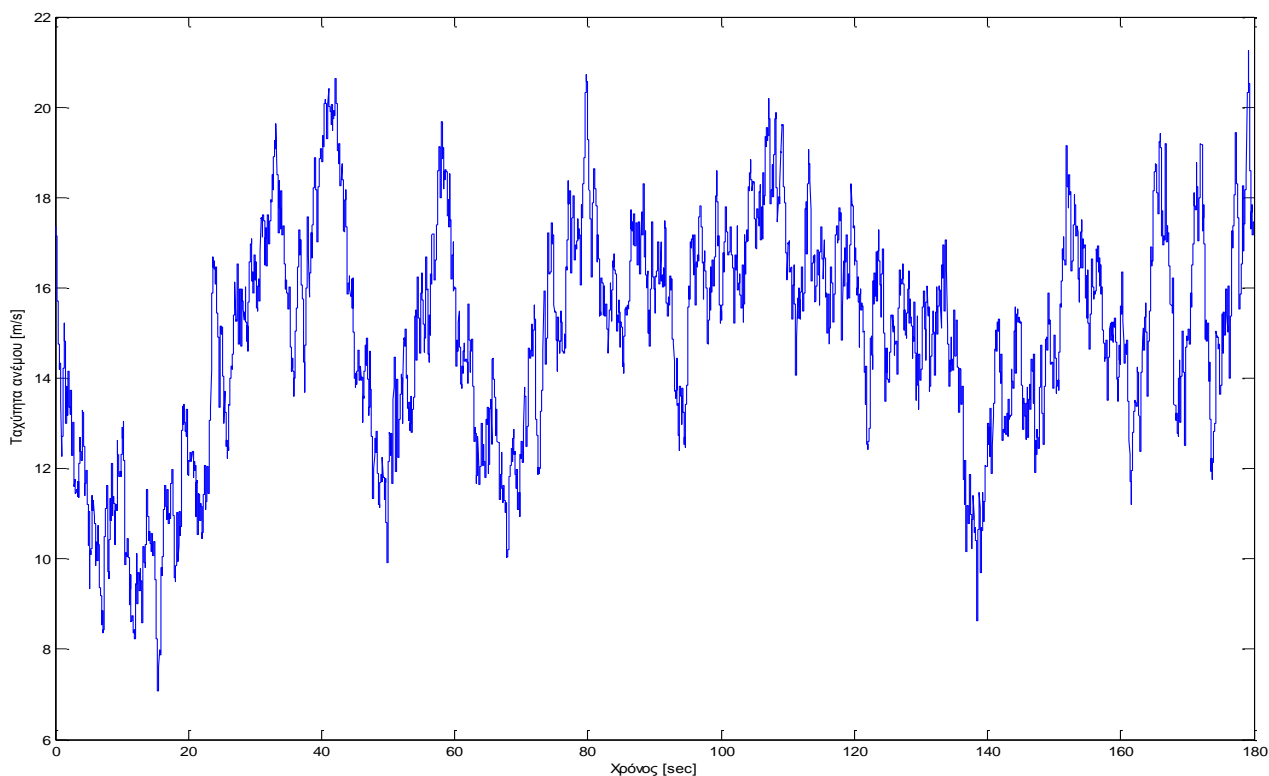
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Για τη δοκιμή της στρατηγικής εξομάλυνσης της ισχύος εξόδου ενός αιολικού πάρκου με χρήση γεννήτριας υδρογόνου, η οποία παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ΑΠ που σχεδιάστηκε στο simulink. Έγινε προσομοίωση συνολικής διάρκειας 180 sec, με βήμα 0,00005 sec. Το αιολικό πάρκο αποτελείται από 5 ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών ικανότητας 2MW η κάθε μία. Το ΑΠ συνδέεται μέσω μετασχηματιστή (25kV/575V) και γραμμής 30 χιλιομέτρων με το δίκτυο, το οποίο αναπαριστάται ως μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης σταθερού πλάτους (120kV). Η γεννήτρια υδρογόνου συνδέεται επίσης μέσω μετασχηματιστή (25kV/746V) και αποτελείται από δέκα ηλεκτρολυτικές μονάδες ικανότητας 0,54 MW η κάθε μία.



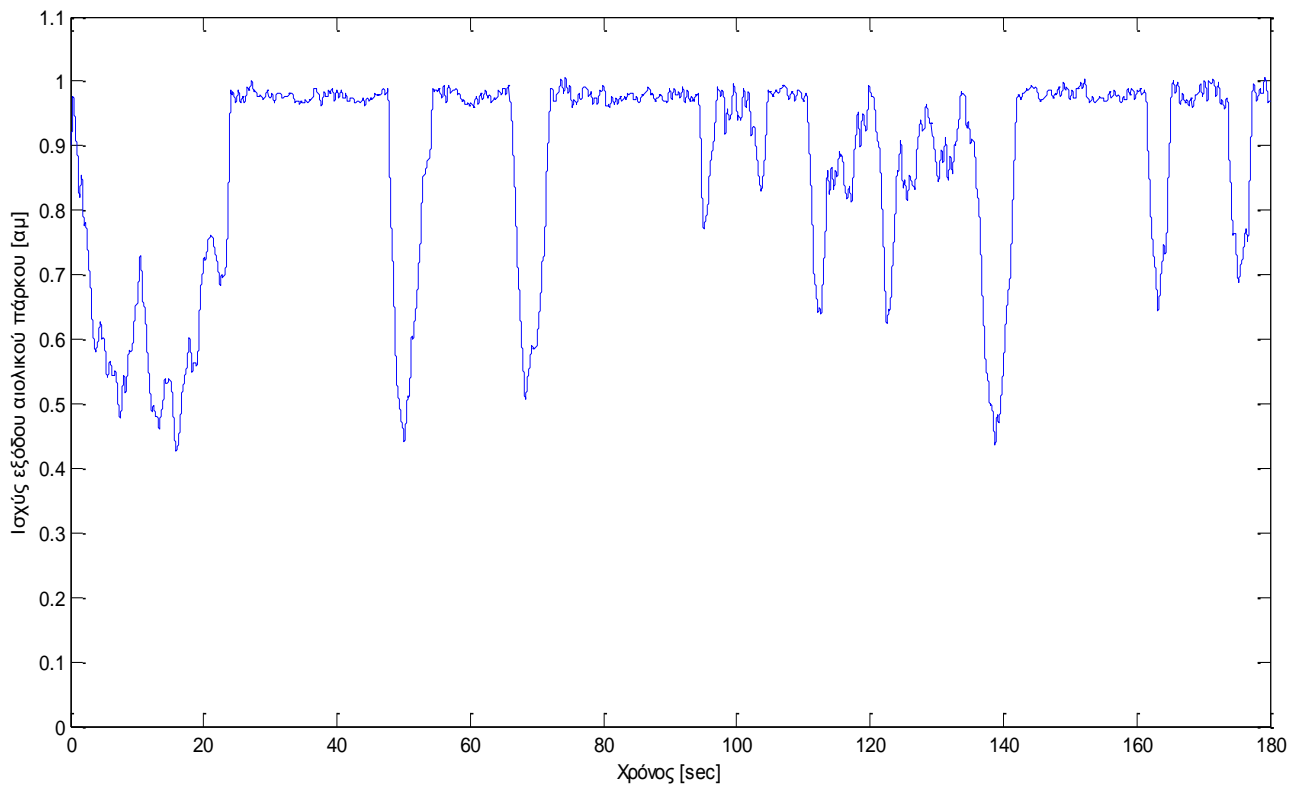
Σχ.6.1: Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης

Αρχικά παρουσιάζονται με διαγράμματα αποτελέσματα από προσομοιώσεις του συστήματος χωρίς την προσθήκη της γεννήτριας υδρογόνου. Ως είσοδος τίθεται μια πραγματική χρονοσειρά ανέμου διάρκειας 180 δευτερολέπτων με δειγματοληψία 0,1 δευτερόλεπτο. Όπως φαίνεται και στο σχ.6.2 ο άνεμος έχει αρκετό εύρος και φτάνει σε αρκετά υψηλές ταχύτητες (έως περίπου 20 m/s) κάτι που βοηθά στο να φανεί η συμβολή της γεννήτριας υδρογόνου στην εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου.

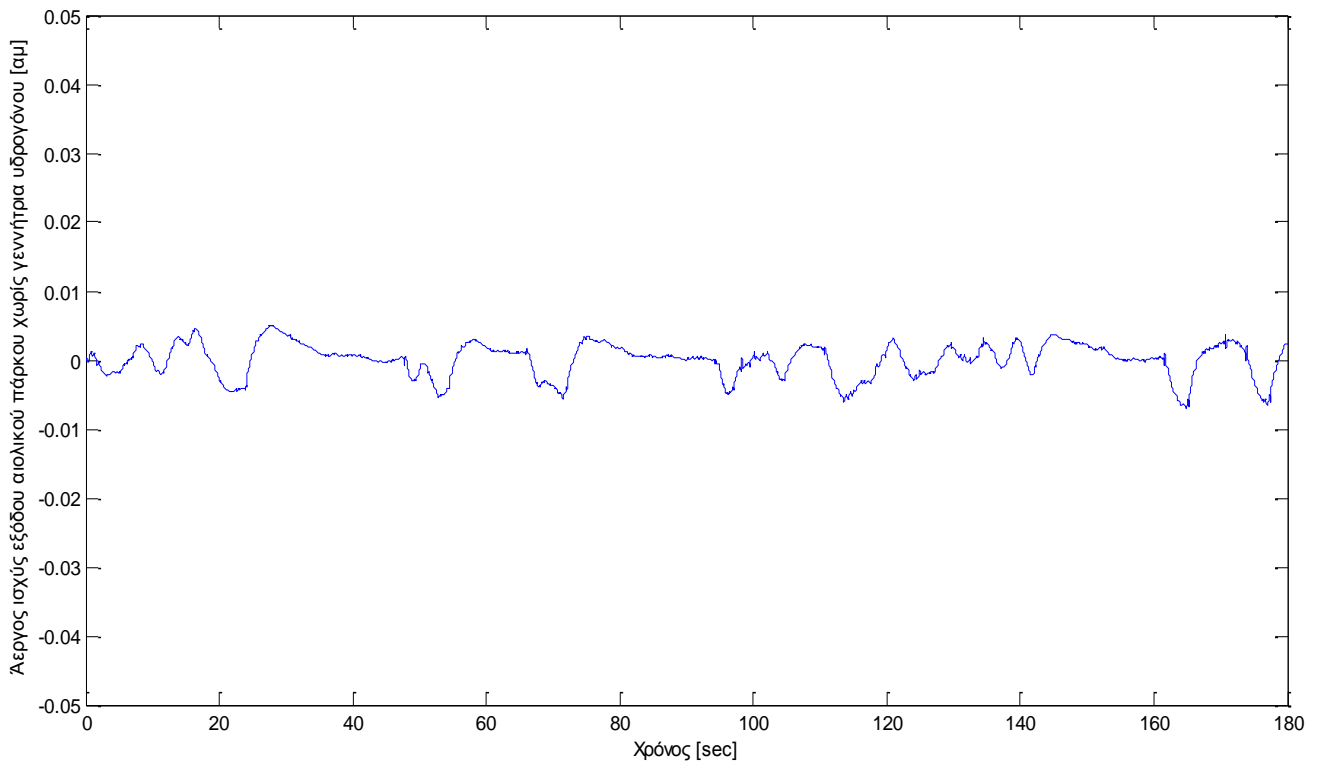


Σχ.6.2: Κυματομορφή ταχύτητας ανέμου 180sec

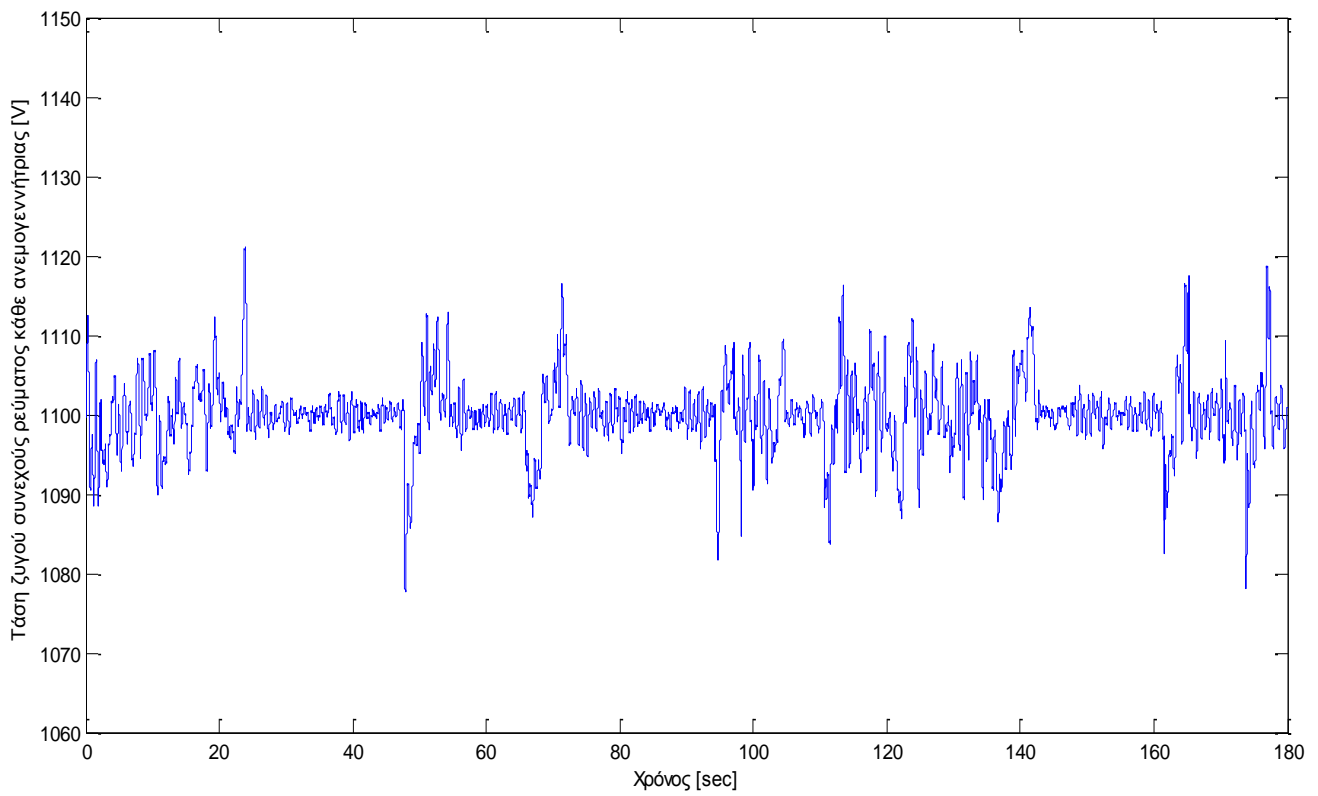
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποια μετρούμενα μεγέθη που περιγράφουν τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών με την παραπάνω χρονοσειρά ανέμου. Αρχικά στο σχήμα 6.3 απεικονίζεται η ενεργός ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου, μετρημένη στον κόμβο B25, στο τέλος της γραμμής σύνδεσης. Να σημειωθεί ότι είναι εμφανής η εφαρμογή του ελέγχου pitch, και ότι παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις. Στη συνέχεια στο σχήμα 6.4 όπου παρουσιάζεται η άεργος ισχύς εξόδου, αξίζει να τονιστεί ότι είναι επιτυχής ο αντίστοιχος έλεγχος καθώς οι διακυμάνσεις της περιορίζονται κάτω από το 1%. Στο διάγραμμα 6.5 δίνεται η τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος κάθε A/Γ, και η οποία είναι αρκετά σταθερή γύρω από την τιμή των 1100V (διακύμανση μικρότερη του 2%) ενώ στο επόμενο σχήμα (σχ.6.6) παρουσιάζεται η τάση στο σημείο σύνδεσης του πάρκου με μεταβολές τιμής και η οποία μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη της γεννήτριας υδρογόνου. Τέλος, στο σχήμα 6.7 υπάρχουν οι τιμές της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα κάθε ανεμογεννήτριας. Ως υποσημείωση να τεθεί το ότι κάθε μέγεθος είναι κοινό για όλες τις A/Γ.



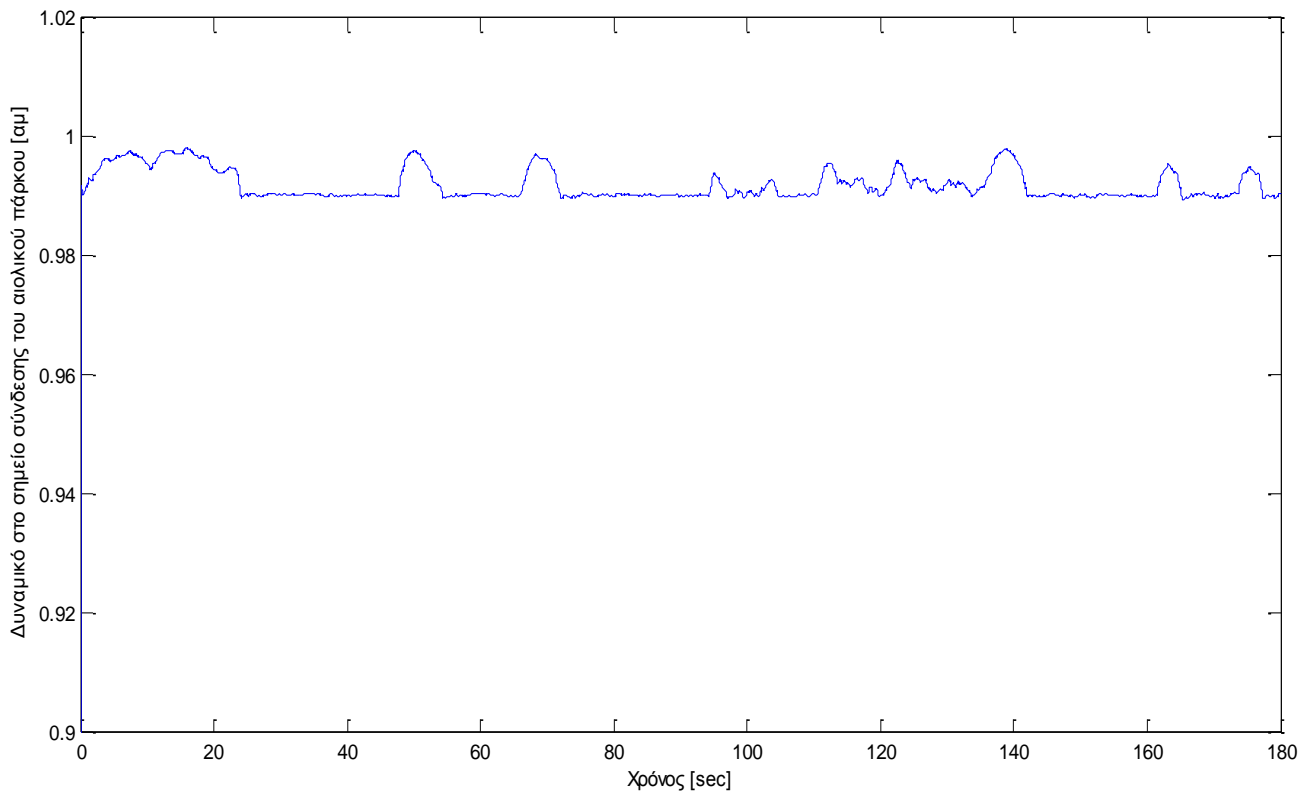
Σχ.6.3: Ενεργός ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου [αμ]



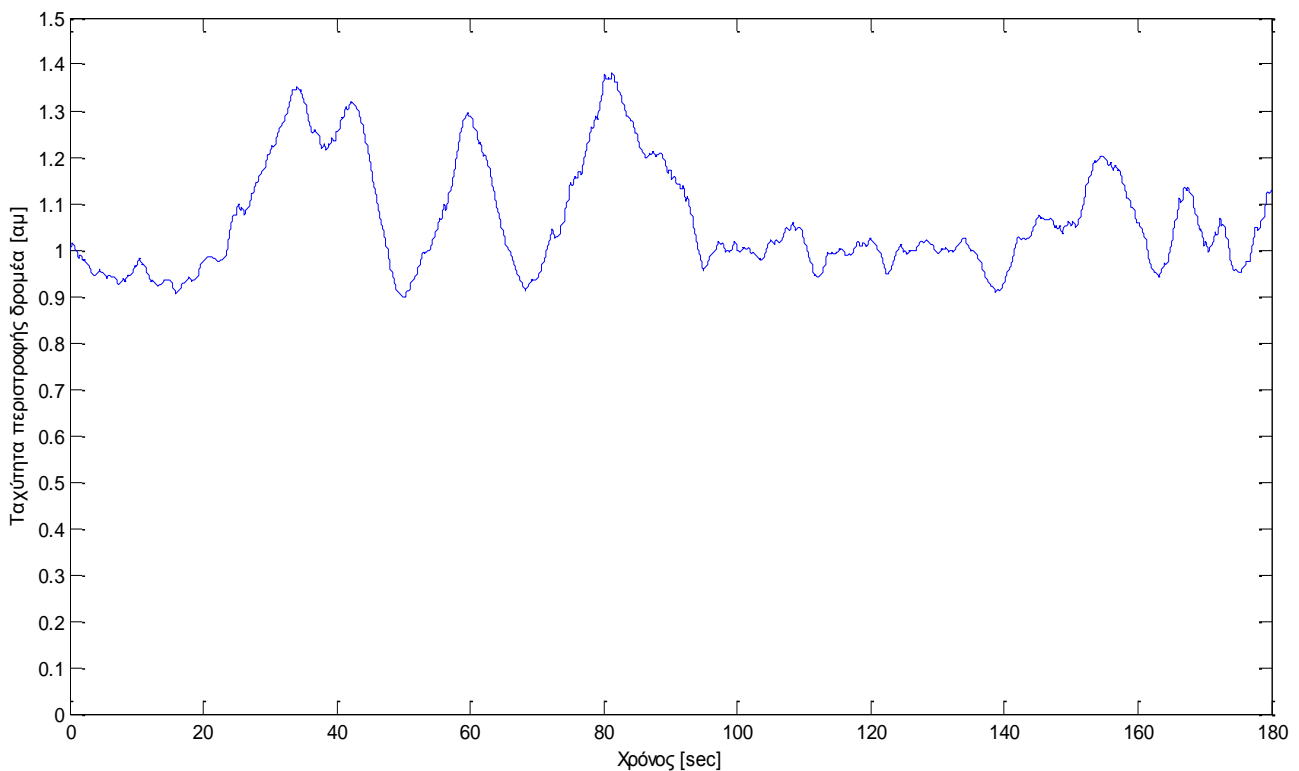
Σχ.6.4: Άεργος ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου [αμ]



Σχ.6.5: Τάση στον ζυγό συνεχούς ρεύματος κάθε Α/Γ (V)



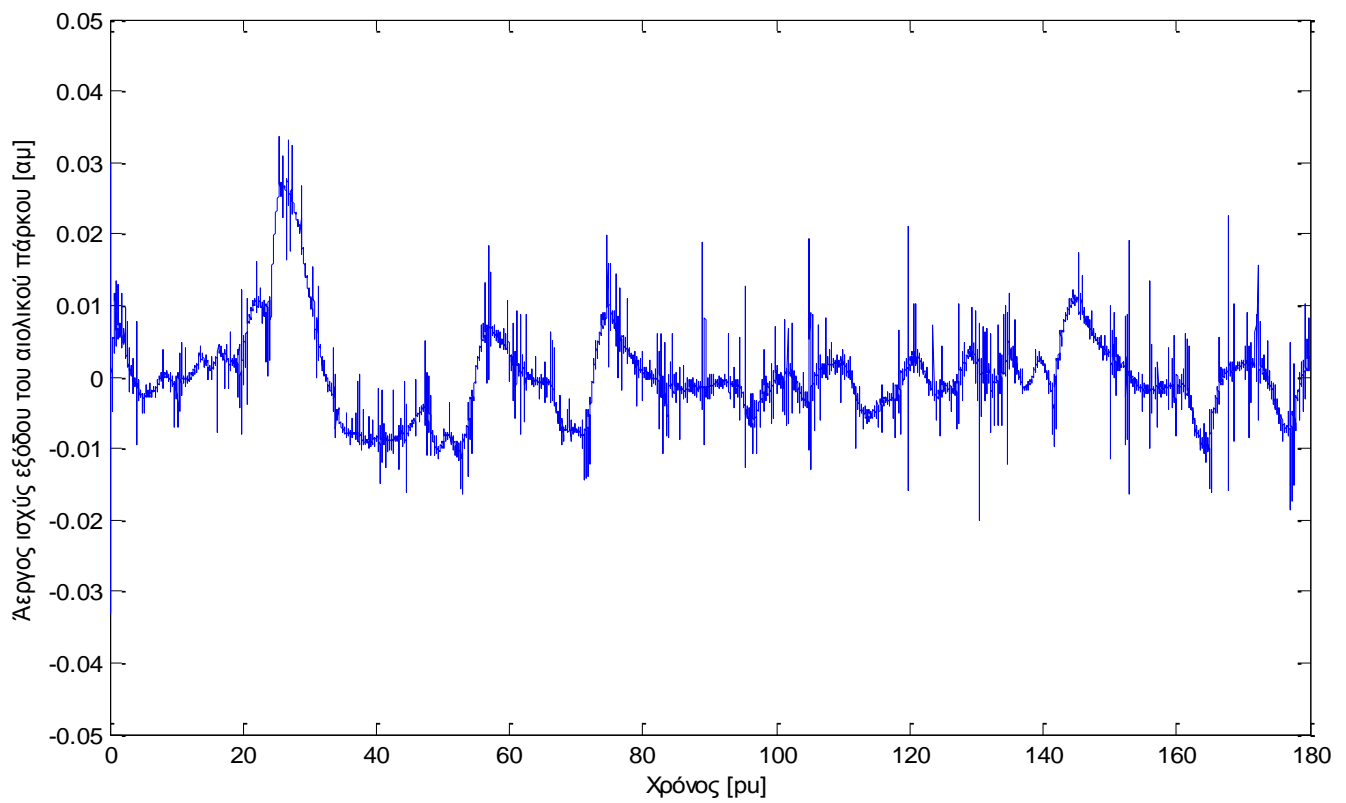
Σχ.6.6: Τάση στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου [μV]



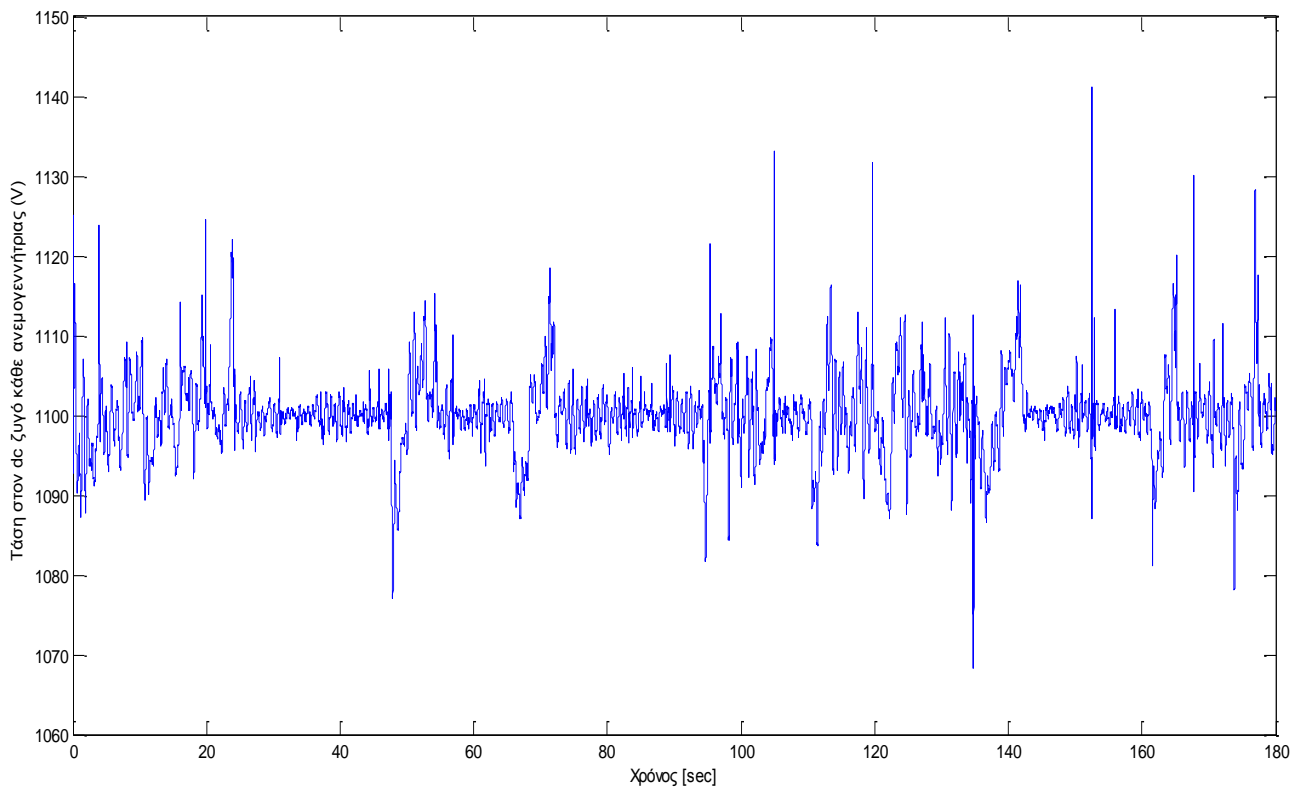
Σχ.6.7: Ταχύτητα περιστροφής δρομέα [μm]

Με την προσθήκη της γεννήτριας υδρογόνου προσομοιώνεται εκ νέου το σύστημα και παρουσιάζονται κάποια μεγέθη που μετρήθηκαν στα διαγράμματα που ακολουθούν. Απεικονίζονται κατά σειρά η άεργος ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου (σχ.6.8) και έπειτα η τάση στον κόμβο B25, που δηλώνει το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο και βρίσκεται μετά τον κοινό κόμβο του παρκου και της γεννήτριας (σχ.6.9). Από την κυματομορφή των δύο μεγεθών παρατηρούμε ότι η παρουσία της γεννήτριας υδρογόνου στο σύστημα δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία της κάθε ανεμογεννήτριας. Να σημειωθεί ότι οι απότομες αιχμές που εμφανίζονται δεν αποτελούν πρόβλημα καθώς είναι διάρκειας ελαχίστων msec.

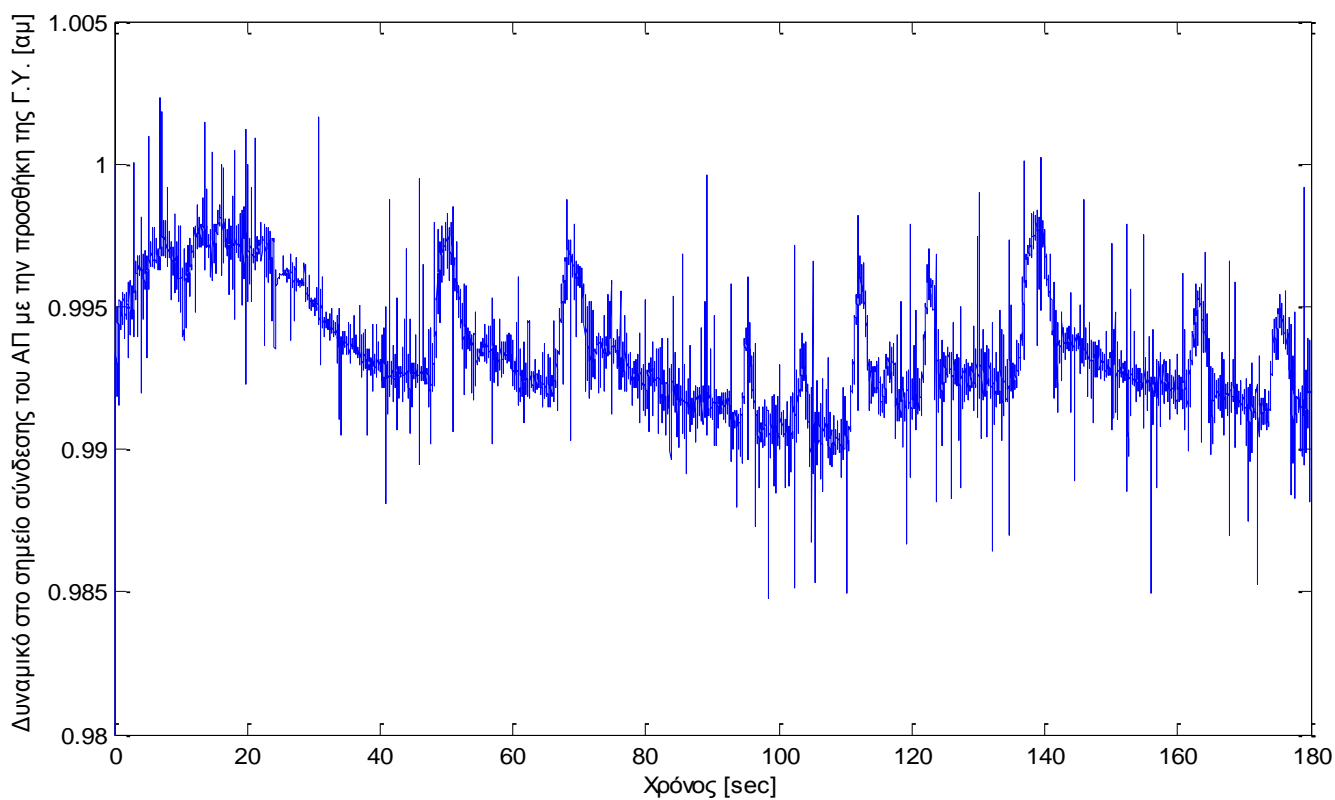
Στη συνέχεια στο διάγραμμα 6.10 απεικονίζεται η τάση στον κόμβο B25 η οποία παρουσιάζεται με μικρότερες διακυμάνσεις συγκριτικά με την κυματομορφή της προσομοίωσης χωρίς την γεννήτρια υδρογόνου. Στο σχήμα 6.11 δίνεται η ποσότητα ισχύος που απορροφά η γεννήτρια υδρογόνου όπως προκύπτει από τον ελεγκτή και τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζεται διαγράμμιση ανά 0,054 αμ που δηλώνει το μέγεθος κάθε ηλεκτρολυτικής μονάδας. Τέλος στο σήμα 6.12 δίνεται η συνολική ποσότητα υδρογόνου που παράγει η γεννήτρια υδρογόνου.



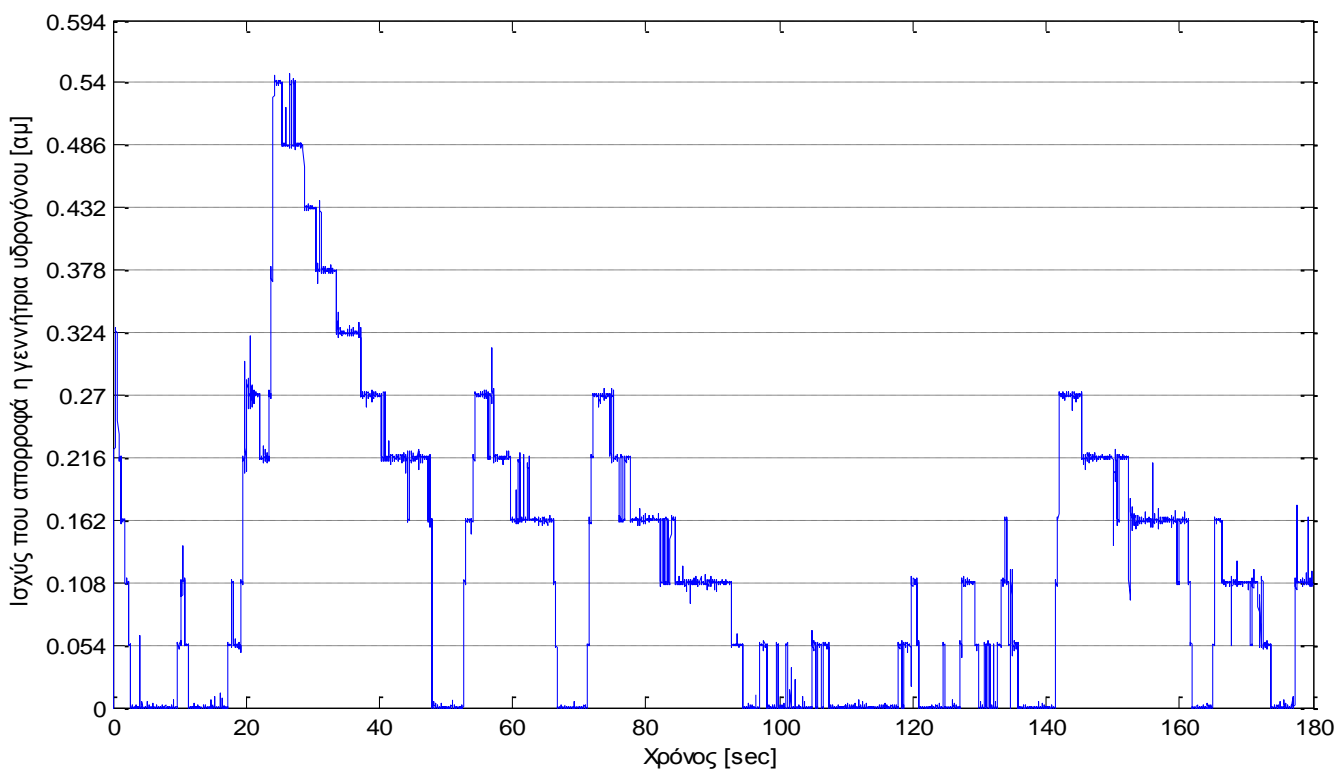
Σχ.6.8: Αεργός ισχύς εξόδου αιολικού πάρκου με προσθήκη γεννήτριας υδρογόνου [αμ]



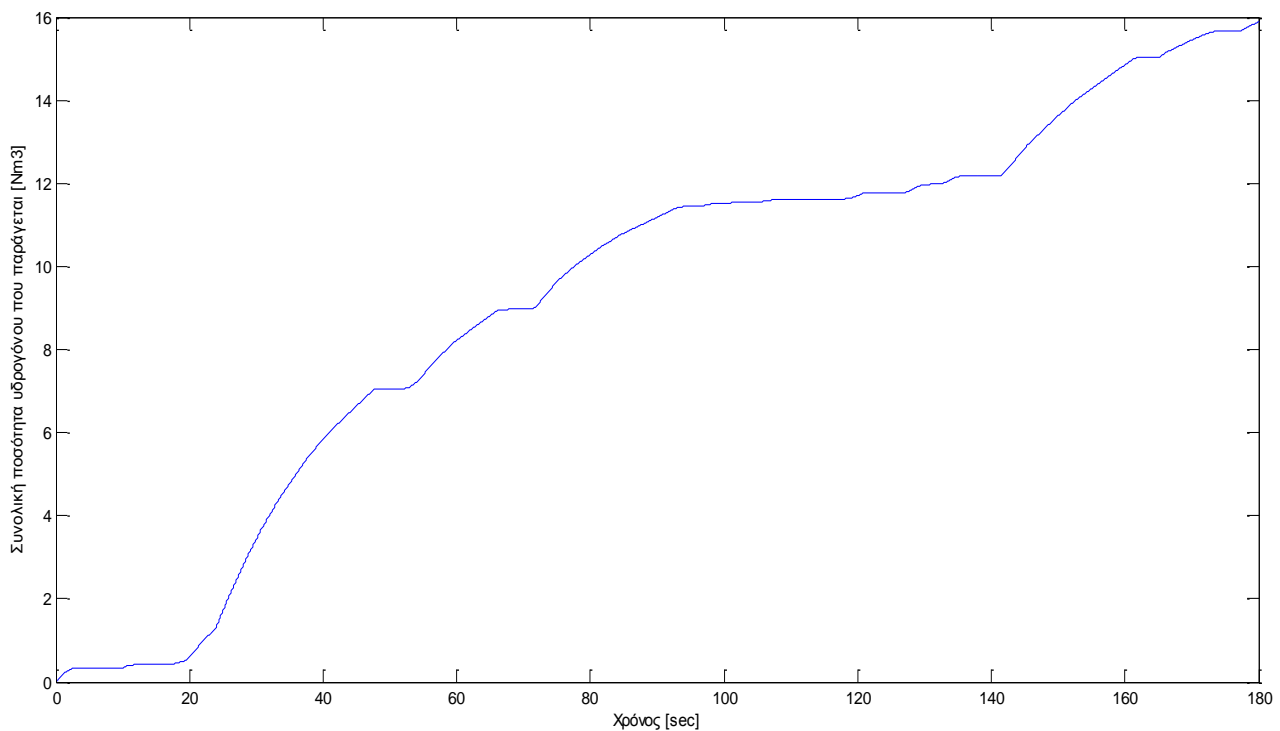
Σχ.6.9: Τάση στον ζυγό συνεχούς ρεύματος κάθε Α/Γ (V)



Σχ.6.10: Τάση στο σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου, μετά και την προσθήκη της γεννήτριας υδρογόνου [αμ]

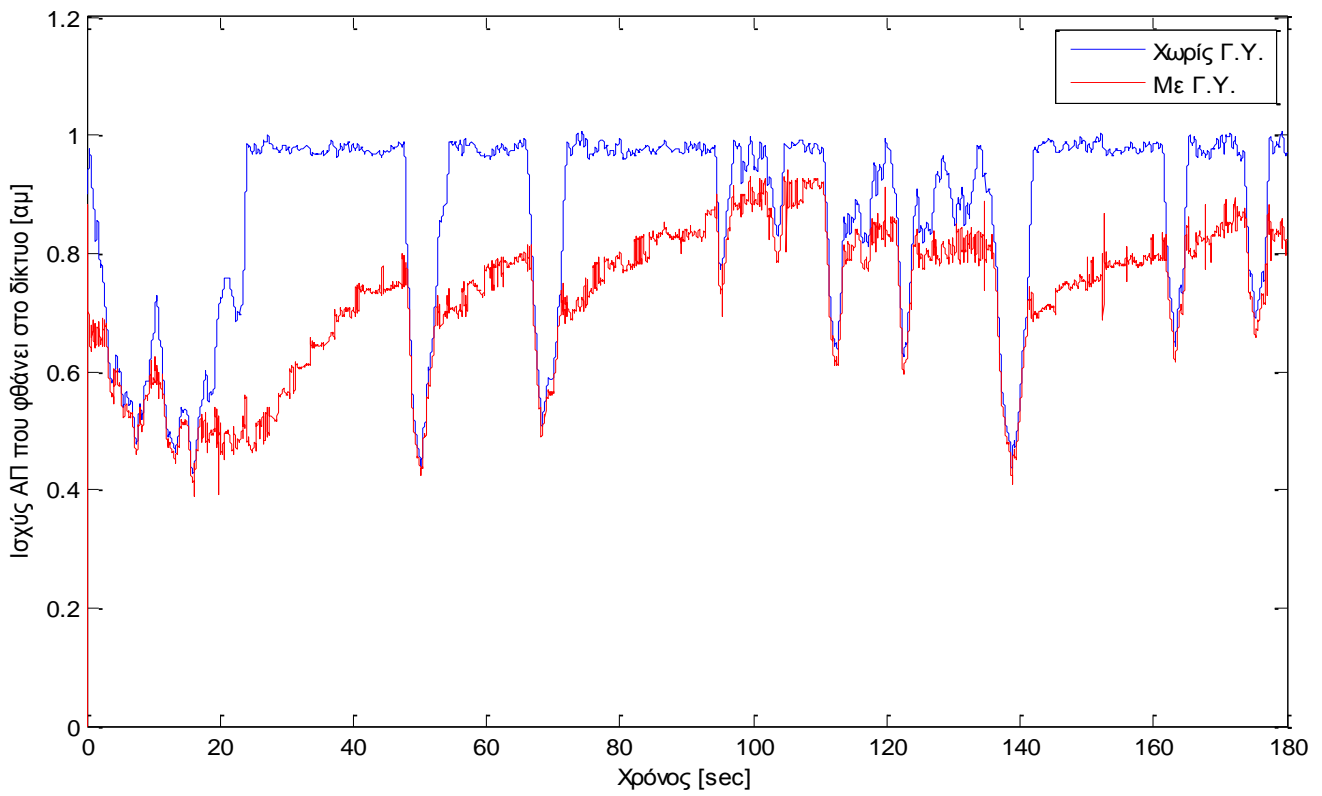


Σχ.6.11: Ισχύς που απορροφάται από την γεννήτρια υδρογόνου [αμ]

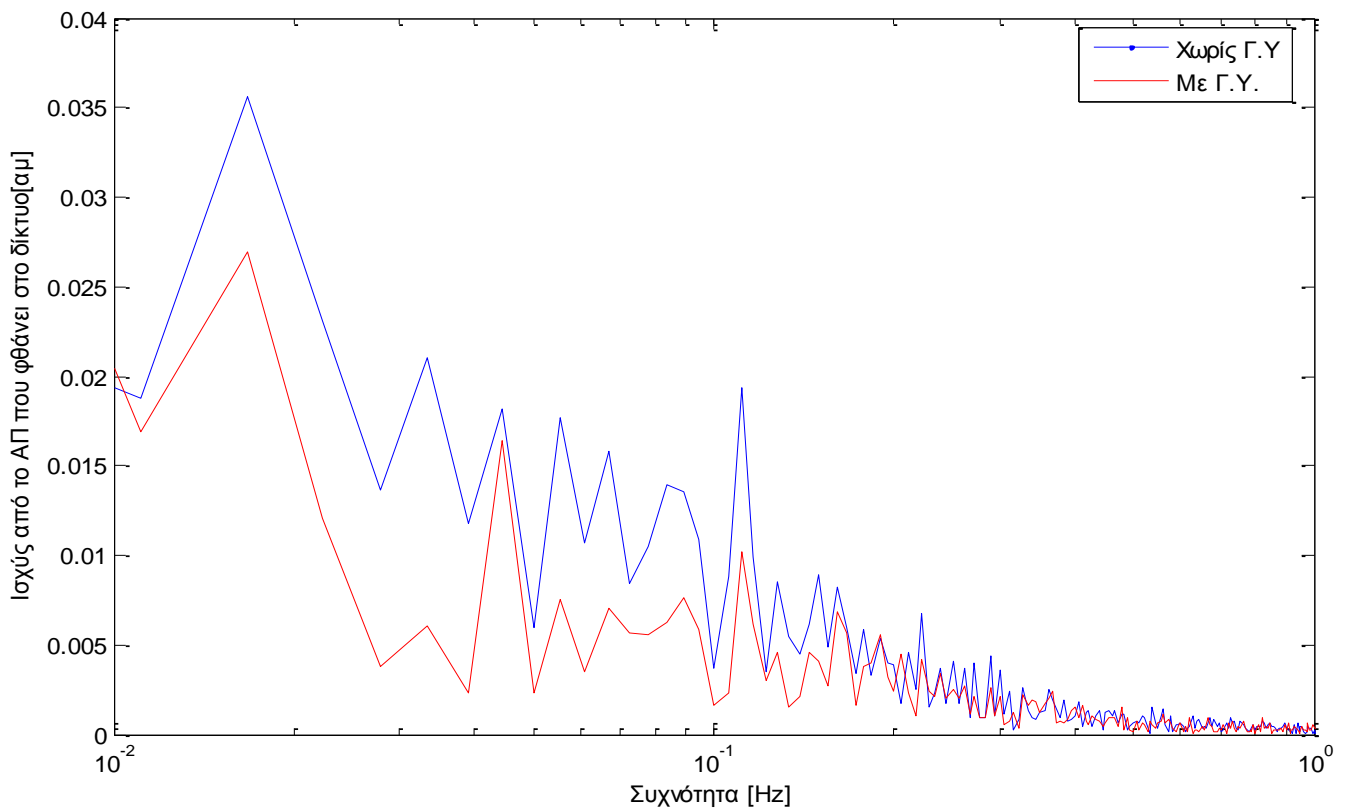


Σχ.6.12: Συνολική ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου [Nm3]

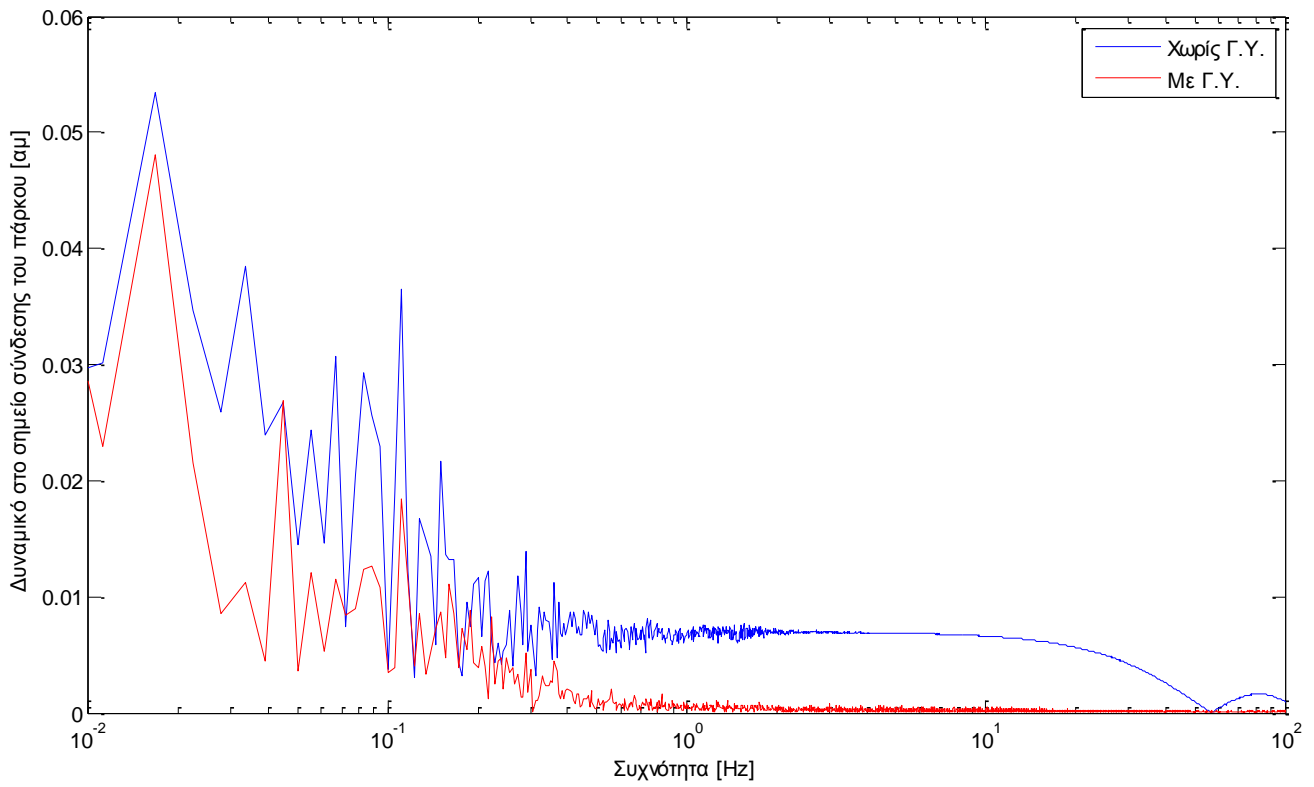
Εφαρμόζοντας την τεχνική εξομάλυνσης που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με τη χρήση γεννήτριας υδρογόνου με 10 ηλεκτρολυτικές μονάδες ικανότητας 0,54MW έκαστη, επιτυγχάνονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Αρχικά συγκρίνεται η ισχύς που φτάνει στο δίκτυο πριν και μετά τη σύνδεση της γεννήτριας υδρογόνου στο σύστημα που προσομοιώνεται, και απεικονίζεται στο σχ.6.12. Προς επιπλέον απόδειξη της εξομάλυνσης και της αποτελεσματικότητας της μεθόδου, παρουσιάζεται το φασματικό περιεχόμενο της ισχύος του Α/Π και της τάσης στον κόμβο B25 χωρίς, και με την πρόσθετη λειτουργία της γεννήτριας υδρογόνου (σχ.6.13 και 6.14 αντίστοιχα). Και τα δύο διαγράμματα στο πεδίο της συχνότητας επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, καθώς και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μείωση του πλάτους των συνιστωσών (και στις δύο περιπτώσεις έως και 75% περίπου).



Σχ.6.13: Ισχύς ΑΠ που τελικά φτάνει στο δίκτυο πριν και μετά την διαδικασία εξομάλυνσης



Σχ.6.14: Φασματικό περιεχόμενο ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο πριν και μετά την προσθήκη της Γ.Υ.



Σχ.6.15: Φασματικό περιεχόμενο δυναμικού στον κόμβο B25 πριν και μετά την προσθήκη της Γ.Υ

7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιολική ενέργεια διεισδύει όλο και περισσότερο στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τα προβλήματα που προκαλούν οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος να απαιτούν διερεύνηση. Επίσης οι τεχνολογίες υδρογόνου αποτελούν μια υπό εξέταση δυνατότητα επίλυσης των ενεργειακών προβλημάτων και μάλιστα ο συνδυασμός τους με μονάδες ΑΠΕ και συγκεκριμένα αιολικής ενέργειας αποκτούν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον διεθνώς. Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τεχνολογιών υδρογόνου για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος ενός αιολικού πάρκου συνδεδεμένου στο δίκτυο σε συνδυασμό με την αποθήκευση ενέργειας, σε υβριδικό σταθμό παραγωγής.

Η εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου εξετάστηκε χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια υδρογόνου, με παράλληλα συνδεδεμένες ηλεκτρολυτικές μονάδες. Η χρήση πολλών μικρών ηλεκτρολυτικών μονάδων έναντι μίας μεγάλης αυξάνει την απόδοση της διάταξης. Επίσης οι ηλεκτρολυτικές μονάδες είτε λειτουργούν σε πλήρες φορτίο είτε είναι εκτός λειτουργίας, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρολυτών. Επιπλέον περιορίστηκε η συχνότητα ενεργοποίησης-απενεργοποίησης των μονάδων. Αποτιμήθηκε μέσω προσομοιώσεων εναλλακτικών τοπολογιών η αποτελεσματικότητα εξομάλυνσης της αποδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο με χρήση γεννήτριας υδρογόνου.

Εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία εξετάζοντας τη δυνατότητα εγκατάστασης υβριδικού σταθμού παραγωγής, ο οποίος χρησιμοποιεί και τεχνολογίες υδρογόνου, σε σύστημα μικρής κλίμακας απομονωμένου νησιωτικού δικτύου. Τα δεδομένα του δικτύου αντιστοιχούν στο σύστημα του Αγ. Ευστρατίου, το οποίο περιλαμβάνει συμβατικό σταθμό παραγωγής με γεννήτριες ντήζελ για την οικονομοτεχνική ανάλυση. Σχετικά με τη δυνατότητα εισαγωγής τεχνολογιών υδρογόνου (ηλεκτρολύτης - δεξαμενή αποθήκευσης - κυψέλη καύσης υδρογόνου), παρότι κρίσιμο κριτήριο σκοπιμότητας αναδεικνύεται η πρακτική διάρκεια ζωής των διατάξεων για την οποία δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία, προέκυψαν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- καλύπτεται το φορτίο με ενέργεια που παράγεται από το υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί τεχνολογίες υδρογόνου
- παράλληλα με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου περιορίζεται ο αριθμός των μπαταριών, ο οποίος κρίνεται σκόπιμος σε μεγάλες διάρκειες ζωής των συνιστωσών υδρογόνου
- περιορίζεται σημαντικά και μπορεί ακόμα να αποφευχθεί πλήρως η χρησιμοποίηση των γεννητριών ντήζελ, επιτυγχάνοντας έως και σε 100% διείσδυση των ΑΠΕ
- περιορίζονται δραστικά οι εκπομπές CO₂

Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν τα παρακάτω σημεία συνεισφοράς στην επιστήμη:

- Κατάλληλο δυναμικό μοντέλο γεννήτριας υδρογόνου.
- Αλγόριθμος για τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος που καταναλώνει η γεννήτρια υδρογόνου και της ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο.
- Αλγόριθμος και ελεγκτής διαχείρισης των ηλεκτρολυτών της γεννήτριας υδρογόνου.
- Οικονομοτεχνική ανάλυση της εγκατάστασης υβριδικού σταθμού που περιλαμβάνει συνιστώσες τεχνολογίας υδρογόνου σε μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα.

Με τη βοήθεια των παραπάνω μεθοδολογιών επιτεύχθηκε:

- Διατήρηση σταθερής τάσεως στο ζυγό ΣΡ των ανεμογεννητριών με μείωση των διακυμάνσεων της αέργου σε χαμηλά επίπεδα (μικρότερα του 0,03αμ).
- Εξομάλυνση της ισχύος εξόδου του αιολικού πάρκου και της τάσεως στο σημείο σύνδεσης χρησιμοποιώντας τη στρατηγική που αναπτύχθηκε (μείωση του φασματικού περιεχομένου έως 50% και 75% αντίστοιχα).
- Επιβεβαίωση της τεχνικοοικονομικής σκοπιμότητας εγκατάστασης τεχνολογιών υδρογόνου σε υβριδικό σταθμό που συνδέεται σε μη διασυνδεδεμένο νησιωτικό σύστημα σε περίπτωση επίτευξης μεγάλης διάρκειας ζωής των διατάξεων τεχνολογίας υδρογόνου.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική υλοποίηση των προτεινόμενων ελεγκτών σε κατάλληλο υβριδικό σύστημα.
- Επιβεβαίωση των δυνατοτήτων επέκτασης ζωής των διατάξεων τεχνολογιών υδρογόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Powering *Europe: wind energy and the electricity grid* - EWEA
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>
- [3] S.A.Sherif, F.Barbir, T. N. Veziroglu, “Wind energy and the hydrogen economy - review of the technology”, *SolarEnergy*78 (2005) 647–660
- [4] Μ. Αντωνακόπουλος, “Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, 2010
- [5] A. González, E. McKeogh and B.Ó. Gallachóir, “The role of hydrogen in high wind energy penetration electricity systems: The Irish case”, *Renew. Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 471-489, April 2004.
- [6] C. Greiner, M. Korpås and A.T. Holen, “A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power”, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 10-11, pp. 1500-1507, July-August 2007.
- [7] L. Aiche-Hamane, M. Belhamela, B. Benyoucef, and M. Hamane, “Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia,” *Int. J. Hydro. Energy* , vol. 34, pp. 4947–4952, Feb. 2009.
- [8] D.Connolly Ph.D project, “A Review of Energy Storage Technologies for the integration of fluctuating renewable energy”, University of Limerick, 2009
- [9] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglabe, W. Rosehart, “Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review”, *Energy for Sustainable Development* (2010), Elsevier doi:10.1016/j.esd.2010.09.007
- [10] Α.Σαγάνη, “Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας-Μέθοδοι Αποθήκευσης και εφαρμογές”, Διπλωματική εργασία, 2009
- [11] Chen H, Cong Y, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y. “Progress in electrical energy storage system: a critical review”. *Prog. Nat. Sci.* 2009;19(3): 291 – 312.
- [12] Dufo-Lopez R, Bernal-Agustin JL, Dominguez-Navarro JA. “Generation management using batteries in wind farms: economical and technical analysis for Spain”. *Energy Policy* 2009; 37(1):126 – 39.
- [13] Nakken T, Strand L, Frantzen E, Rohden R, Eide P. “The Utsira wind-hydrogen systemoperational experience”. *European Wind Energy Conference*; 2006. p. 1 –9.
- [14] BPC. Other flywheel applications. Beacon Power Corp.;2009[Online]. Available:[http:// www.beaconpower.com/solutions/other-flywheel-applications.asp](http://www.beaconpower.com/solutions/other-flywheel-applications.asp).

[15] Abedini A, Mandic G, Nasiri A. “Wind power smoothing using rotor inertia aimed at reducing grid susceptibility”. Proceedings of Industrial Electronics, IECON 2008, 34th Annual Conference of IEEE, pp. 1445 – 51, Nov. 2008.

[16] Tsuchiya H, Kobayashi O. “Mass production cost of pem fuel cell by learning curve”. Int. J. Hydrogen Energy 2004;29(10):9 85– 90.

[17] Alto P, Holeby. “First Danish hydrogen energy plant is operational”. Renewable Energy Access <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/06/first-danish-hydrogen-energy-plant-is-operational-48873>, 2007 Jun. 8.

[18] J.Barton, D.Infield, “Energy storage and its use with intermittent renewable energy”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp.441-448, June 2004.

[19]http://el.wikipedia.org/wiki/Υβριδικά_συστήματα_ισχύος

[20] Ε. Βρεττός, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.

[21] Τεχνική οδηγία Τεχνικού Επιμελητητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.20701-3/2010) “Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών”, Ιούλιος 2010.

[22] Σ. Παπαθανασίου, Μ.Τσίλη, “Τεχνικές απαιτήσεις για την σύνδεση αιολικών σταθμών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας-Επισκόπηση κωδικών άλλων χωρών και διαθέσιμων τεχνολογιών ανεμογεννητριών”, Τεχνική έκθεση, ΡΑΕ, Δεκ. 2006.

[23] Σ. Παπαθανασίου “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας-Σημειώσεις παραδόσεων”, 2008.

[24] Μ. Ντρέκο, “Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.

[25] Othman B.k Hasnaoui, Jamel Belhadj, Mohamed Elleuch, “Direct Drive PMSG Wind Turbine investigation-Low Voltage Ride Through capability Dynamic behavior in presence of grid disturbance”, Journal of Electrical Systems, August 2008.

[26] Stavros B. Papaefthimiou, Stavros A. Papathanasiou, “Simulation and Control of a Variable Speed Wind Turbine with Synchronous Generator” Proc. ICEM 2006, Hania, Crete, Sept. 2006.

[27] Σ.Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007.

[28] L.Fingersh, “Optimized Hydrogen and electricity generation from wind”, technical report, National renewable energy laboratory, Colorado, June 2003.

[29] F. Barbir, “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources”, Solar Energy 78 (May (5)) (2005) 661–669.

- [30] R.E. Clarke, S. Giddey, F.T. Ciacchi, S.P.S. Badwal, B. Paul, J. Andrews, “Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (March (6)) (2009) 2531–2542
- [31] R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, “Studies on the effect of temperature of the electrolytes on the rate of production of hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (March (3)) (2005) 261–263
- [32] S.M. Muyeen, R. Takahashi, J. Tamura, “Electrolyzer switching strategy for hydrogen generation from variable speed wind generator”, *Original Research Article Pages 1171-1179*
- [33] S.M. Muyeen, T. Murata, J. Tamura, “Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm”, Springer-Verlag, London, October 2008, ISBN 978-1-84800-315-6
- [34] R.Takahashi, H. Kinoshita, T. Murata, “Output Power Smoothing and Hydrogen Production by Using Variable Speed Wind Generators”, *Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 441-448, Febr. 2010.