

Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια

Ε. Βαρκαράκη¹, Ε. Ζούλιας¹, Ν. Λυμπερόπουλος^{1*}, Γ. Καραγιώργης², Χ. Χριστοδούλου², Ε. Καλύβας³

1 Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19009 Πικέρμι

2 Frederick Institute of Technology, 2324 Λευκωσία, Κύπρος

3 ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ, 15233 Χαλάνδρι

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με Ευρωπαϊκούς φορείς υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η εγκατάσταση αναπτύχθηκε στο πάρκο δοκιμών ανεμογεννητριών του ΚΑΠΕ στο Λαύριο Αττικής και αποτελείται από τα εξής βασικά τμήματα:

- ανεμογεννήτρια Enercon E-40 ισχύος 500 kW,
- μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης ισχύος 25 kW, με ονομαστική παραγωγή 5 Nm³/h H₂ στα 20 bar,
- μονάδα αποθήκευσης 40 Nm³ υδρογόνου σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων (υπεύθυνος φορέας, FIT, Κύπρος)
- συμπιεστή υδρογόνου ενός σταδίου από τα 18 bar στα 220 bar, με σταθμό εμφιάλωσης υδρογόνου (υπεύθυνος φορέας, ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ)
- κεντρικό σύστημα αυτόματου ελέγχου και καταγραφής δεδομένων

Ο εξοπλισμός έχει τοποθετηθεί και συνδεθεί όσον αφορά τα ηλεκτρικά δίκτυα για ισχύ και έλεγχο, τα δίκτυα αερίων (υδρογόνου /αζώτου και πεπιεσμένου αέρα) και τα δίκτυα θερμού και κρύου νερού.

Παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα του εξοπλισμού και η διαδικασία ανέγερσης της εγκατάστασης καθώς και η εμπειρία που αποκτήθηκε από την όλη διαδικασία. Επιπλέον παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα από την λειτουργία της εγκατάστασης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι ευρέως πλέον αποδεκτό ότι η αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων έχει επιβαρύνει ανεπανόρθωτα το περιβάλλον και θα συνεχίσει και στο άμεσο μέλλον με γοργούς ρυθμούς. Η παραγωγή του υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για χρήση ως καύσιμο είναι μια από τις πιο ενδιαφέρουσες λύσεις στο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής μόλυνσης αλλά και της ενεργειακής επάρκειας.

Στη διάρκεια των τελευταίων είκοσι χρόνων, έχουν μελετηθεί διάφορα συστήματα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά κελιά. Η πρώτη αυτόνομη εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια τέθηκε σε λειτουργία το 2003 στο νησί Utsira της Νορβηγίας¹. Αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια Enercon E-40 των 600 kW, μια αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης της Norsk Hydro ισχύος 48 kW που παράγει 10 Nm³/h υδρογόνο, ένα συμπιεστή 6 kW και μια δεξαμενή 12 m³ για αποθήκευση του υδρογόνου στα 200 bar, έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου των 55 kW και μια κυψέλη καυσίμου PEM των 10 kW. Μια δεύτερη αυτόνομη εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια μπήκε σε λειτουργία πρόσφατα στα νησιά Shetland². Αποτελείται από 2 ανεμογεννήτριες Proven LTD των 15 kW, μια αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης της AccaGen μεγίστης ισχύος 15 kW στα 55 bar, δεκαέξι κυλίνδρους των 50 l συνολικής ικανότητας 44 Nm³ H₂ και μια κυψέλη καυσίμου PEM της Plug-Power ισχύος 5 kW DC.

Στα πλαίσια του πενταετούς Ευρωπαϊκού προγράμματος RES2H2, που ξεκίνησε το 2001, το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς, σχεδίασε και υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια... Μια δεύτερη εγκατάσταση στα Κανάρια Νησιά, που προβλέπεται στα πλαίσια του ίδιου έργου, με χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου, δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα, εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων.

Στην Ελλάδα, η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ κοντά στο Λαύριο, συνολικής εγκαταστημένης ισχύος 3 MW. Η εταιρεία ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ ανέλαβε την προμήθεια και εγκατάσταση του συμπιεστή υδρογόνου, του σταθμού πλήρωσης φιαλών και του δικτύου υδρογόνου. Το Frederick Institute of Technology (FIT) σχεδίασε και εγκατέστησε την μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλοϋδρίδια. Το ΚΑΠΕ ανέλαβε την μελέτη και εγκατάσταση της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση, την ηλεκτρολογική εγκατάσταση και σύνδεση με την ανεμογεννήτρια, το κεντρικό σύστημα ελέγχου και τα περιφερειακά συστήματα.

Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε και τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ένα-ένα στο διάστημα Μάιος-Ιούλιος 2005. Στην πορεία, προέκυψαν διάφορες μικρο-εργασίες, οπότε η λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ξεκίνησε στο τέλος Σεπτεμβρίου 2005.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ «ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ»

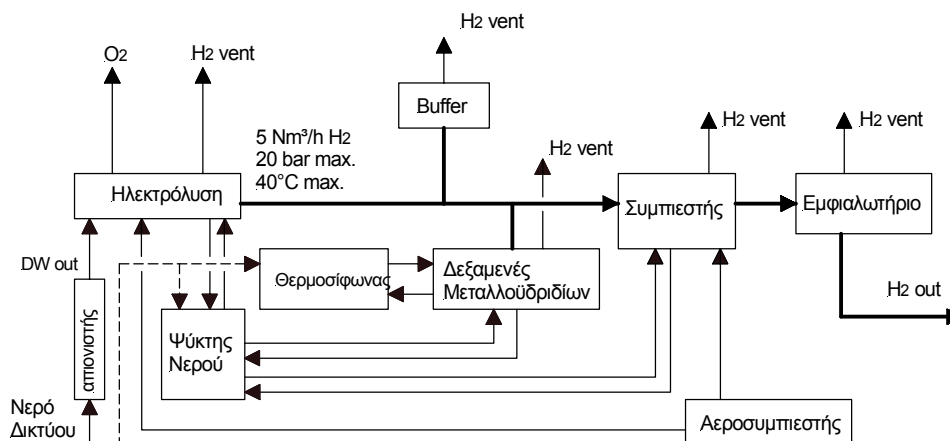
Το σύστημα αποτελείται βασικά από τρεις ενότητες:

- την χημική εγκατάσταση παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με τα απαραίτητα περιφερειακά
- τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα, που περιλαμβάνει την σύνδεση με την ανεμογεννήτρια και την παροχή ρεύματος σε όλους τους χρήστες
- το κεντρικό σύστημα ελέγχου και καταγραφής δεδομένων

Μια μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού των 25 kW είναι συνδεδεμένη στην έξοδο 400 V μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας Enercon E-40 των 500 kW. Η ηλεκτρόλυση παράγει 5 Nm³/h υδρογόνου στα 19 bar, που περνάει από επιπλέον καθαρισμό και είτε αποθηκεύεται σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων ικανότητας 40 Nm³ H₂, είτε συμπιέζεται σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης, στα 220 bar.

Ένα απλό διάγραμμα της χημικής εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

1. την ηλεκτρόλυση του νερού
2. τις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων
3. μια συμβατική δεξαμενή υδρογόνου
4. τον συμπιεστή υδρογόνου
5. τον σταθμό πλήρωσης φιαλών
6. το κλειστό σύστημα ψύξης νερού
7. το σύστημα πεπιεσμένου αέρα



Σχήμα 1. Απλό διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΙΠΕ

2.1. ΜΟΝΑΔΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Η μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης κατασκευάστηκε από την Casale Chemicals, Ελβετία, και έχει ονομαστική παραγωγή 0.45 kg/h (5 Nm³/h) υδρογόνου υπό πίεση 19 barg. Το ηλεκτρολυτικό υδρογόνο καθαρότητας 99.98 κ.ο. περνάει από καταλυτικό αντιδραστήρα για την καύση του οξυγόνου σε επίπεδα κάτω των 10 ppm και από ξηραντήρα, για να κατέβει το ατμοσφαιρικό σημείο δρόσου του υδρογόνου στους -40°C. Η μονάδα μπορεί να απορροφήσει τις αλλαγές ηλεκτρικής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μέσα σε ένα εύρος από 15 έως 100% της ονομαστικής της ισχύος σε ένα δευτερόλεπτο. Η λειτουργία της ηλεκτρόλυσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα με ισχύ χαμηλότερη του 15%, δημιουργεί προβλήματα στην καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 80°C και ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα ΚΟΗ 30% κ.β. Το νερό του δικτύου, που διοχετεύεται στην ηλεκτρόλυση, περνάει από μια στήλη εναλλαγής ιόντων έτσι ώστε η αγωγιμότητά του να πέσει στα 5 μS/cm.

Οι τεχνικές προδιαγραφές ήταν πολύ αυστηρές όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος, και η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με όλους τους κανόνες ασφαλείας. Σε περίπτωση οποιασδήποτε ανωμαλίας, η μονάδα σταματάει τη λειτουργία της αυτομάτως, κάνει αποσυμπίεση και γεμίζει το σύστημα με άζωτο. Τα μετρητικά ασφαλείας είναι διπλά, με το βασικό σύστημα να λειτουργεί χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου ή λογισμικού. Όλες οι βάνες είναι πνευματικού τύπου, έτσι ώστε να ελαττωθεί στο ελάχιστο ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο. Όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ισχύουν για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι κατασκευασμένη για λειτουργία σε εξωτερικό χώρο, αλλά χρειάζεται προστασία από τον ήλιο, οπότε προστατεύεται από ένα κουβούκλιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Σε πρώτο πλάνο και κάτω, φαίνεται η δεξαμενή απιονισμένου νερού και λίγο ψηλότερα φαίνονται τα δοχεία διαχωρισμού αερίου/ηλεκτρολύτη για το υδρογόνο και το οξυγόνο. Στο βάθος δεξιά, φαίνεται η στήλη απιονισμού του νερού. Στο κάτω μέρος βρίσκονται οι συνδέσεις του νερού και στο πάνω μέρος οι συνδέσεις των αερίων.



Εικόνα 1. Η αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

2.2. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΔΡΙΔΙΩΝ

Οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων σχεδιάστηκαν από το FIT, Κύπρο, και κατασκευάστηκαν από την Labtech SA, Βουλγαρία. Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από 6 κυλινδρικές δεξαμενές από ατσάλι, που περιέχουν ένα κράμα μετάλλου τύπου AB_5 , με προσμείξεις $La_{1-x}Ce_xNi$. Κατά τη διάρκεια της εξωθερμικής προσρόφησης υδρογόνου, οι δεξαμενές ψύχονται από κρύο νερό. Για να μπορέσουν να εκρρόφησουν το υδρογόνο, χρειάζεται ζεστό νερό στους $75^{\circ}C$, από έναν απλό θερμοσίφωνα ισχύος 4 kW. Η πίεση εκρόφησης σχεδιασμού είναι 14 bar και αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία $50-60^{\circ}C$, και οι δεξαμενές χρειάζονται 5-15 λεπτά προθέρμανσης πριν αρχίσουν να αποδίδουν το υδρογόνο με την ονομαστική ροή των 0.45 kg/h υδρογόνου.

Η κάθε δεξαμενή έχει ονομαστική ικανότητα προσρόφησης 0.62 κιλών υδρογόνου ($7 Nm^3$) οπότε η εγκατάσταση έχει συνολική ικανότητα αποθήκευσης 3.7 κιλών υδρογόνου ($42 Nm^3$). Η ειδική ικανότητα προσρόφησης του μεταλλικού κράματος είναι 1.28% κ.β. και της πλήρους δεξαμενής είναι 0.66% κ.β., λαμβάνοντας υπόψη το βάρος των κυλίνδρων. Η ενθαλπία σχηματισμού του μεταλλοϋδριδίου είναι $\Delta H_f = 28 kJ/mol H_2$, και η απαιτούμενη θερμική ισχύς για την εκρόφηση του υδρογόνου στην ονομαστική ροή είναι περίπου 2 kW.

Τα μεταλλοϋδρίδια δεν πρέπει να έρθουν σε επαφή με τον αέρα ούτε με νερό, γιατί μπορεί να αντιδράσουν εκρηκτικά. Η παρουσία μικρών ποσοτήτων οξυγόνου και νερού μέσα στο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει στην σταδιακή μείωση της ικανότητας αποθήκευσης των μεταλλοϋδριδίων.

Οι έξι δεξαμενές διαθέτουν χειροκίνητη βάνα αποκλεισμού, αλλά λειτουργούν όλες μαζί σαν μία μοναδική δεξαμενή, με τη βοήθεια αυτόματης βάνας εισόδου και αυτόνομης βάνας εξόδου. Οι δεξαμενές πρέπει να ψύχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσρόφησης υδρογόνου, καθώς και για λίγο διάστημα μετά το πέρας της προσρόφησης, μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του μεταλλοϋδριδίου.

Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, η πίεση στο κενό διάστημα των μεταλλοϋδριδίων είναι ίση με την πίεση του κυκλώματος. Όσο τα μεταλλοϋδρίδια δεν είναι γεμάτα, η πίεση ισορροπίας των μεταλλοϋδριδίων είναι χαμηλότερη από την πίεση του κενού διαστήματος. Όταν οι δύο αυτές πιέσεις γίνονται ίσες, το μεταλλικό κράμα δεν θα μπορεί να απορροφήσει περισσότερο υδρογόνο, αλλά η στιγμή αυτή της εξισορρόπησης δε μπορεί να προβλεφθεί εύκολα. Έτσι, το επίπεδο πλήρωσης των μεταλλοϋδριδίων υπολογίζεται με ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της ροής.

2.3. ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Μια μικρή συμβατική δεξαμενή υδρογόνου σχεδιάστηκε για να διευκολύνει τη λειτουργία του συμπιεστή. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι ο μόνος χρήστης ηλεκτρικής ισχύος της διάταξης που μπορεί να απορροφήσει μεγάλες μεταβολές ισχύος. Όταν η ισχύς μειώνεται, μειώνεται ανάλογα και η παραγωγή υδρογόνου, αλλά η πίεση λειτουργίας δεν αλλάζει. Ο συμπιεστής υδρογόνου μπορεί να δεχθεί ένα εύρος πιέσεων και ροών στην είσοδο, έτσι ώστε σε χαμηλές πιέσεις (έως 10 barg) να συμπιέζει μικρές ροές και σε υψηλότερες πιέσεις (έως 18 barg) να συμπιέζει μεγαλύτερες ροές, τείνοντας προς μια ισορροπία. Αν όμως η πίεση του υδρογόνου στην είσοδο πέσει κάτω από το χαμηλό όριο, ο συμπιεστής σταματάει αυτομάτως τη λειτουργία του. Επειδή δεν ενδείκνυται από τον κατασκευαστή η έναρξη/στάση του συμπιεστή περισσότερο από τρεις φορές την ώρα, σχεδιάστηκε μια μικρή συμβατική δεξαμενή για να επιτρέψει στο συμπιεστή να λειτουργεί για αρκετό χρονικό διάστημα, ακόμα και αν η παραγωγή υδρογόνου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για πολλή ώρα.

Η συμβατική δεξαμενή αποτελείται από 8 κυλίνδρους των 50 λίτρων, που μπορούν να αποθηκεύσουν περίπου 0.3 κιλά υδρογόνου ανάμεσα στα 10 και τα 19 barg. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετή για περίπου 40 λεπτά λειτουργίας του συμπιεστή.

2.4. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Ο συμπιεστής υδρογόνου τριπλού μεταλλικού διαφράγματος έχει μόνο ένα στάδιο συμπίεσης, χάρη στην μέση πίεση παροχής της ηλεκτρόλυσης. Κατασκευάστηκε από την PDC Machines Inc., ΗΠΑ και ολόκληρη η ηλεκτρολογική του εγκατάσταση είναι αντιακρηκτικού τύπου. Ο μεταλλικός σκελετός και οι σωληνώσεις είναι από ατσάλι SS316, και είναι τοποθετημένος πάνω σε αντικραδασμικές βάσεις από καουτσούκ.

Έχει ονομαστική ικανότητα 0.45 kg/h H₂ (5 Nm³/h) για πίεση εισόδου 14 barg στους 40°C και για πίεση εξόδου 220 barg στους 65°C. Μπορεί να ανεχτεί ένα εύρος πίεσης στην είσοδο από 10 έως 18 barg, με αντίστοιχα μειωμένη ή αυξημένη ροή, οπότε η λειτουργία τείνει να «σταθεροποιηθεί» στη μέση τιμή των 14 barg. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ισχύ 5.6 kW (7.5 hp).

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με πολύ αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων. Οι βάνες ελέγχου είναι πνευματικές και σε περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας τίθεται αυτομάτως εκτός λειτουργίας μέσω των κατάλληλων οργάνων μέτρησης.

Ο συμπιεστής φαίνεται στην Εικόνα 2, πριν γίνουν οι συνδέσεις με το υπόλοιπο σύστημα και κατασκευαστεί ένα κουβούκλιο προστασίας από τον ήλιο, όπως για την ηλεκτρόλυση.



Εικόνα 2. Ο συμπιεστής υδρογόνου στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

2.5. ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΦΙΑΛΩΝ

Ένας τοίχος από τούβλα, ύψους 2 μέτρων, χωρίζει τον σταθμό πλήρωσης από τον συμπιεστή υδρογόνου, έτσι ώστε να μειωθεί η απόσταση μεταξύ τους, σύμφωνα με τους κανόνες. Ο σταθμός αποτελείται από έναν σωλήνα με τρεις αναμονές σύνδεσης για μεμονωμένες φιάλες ή διατάξεις φιαλών. Στην παρούσα φάση, έχουν συνδεθεί δύο μεμονωμένες φιάλες και μια συστοιχία 12 φιαλών. Η διάταξη υψηλής πίεσης περιλαμβάνει απαγωγή για ελεγχόμενη εκκένωση των φιαλών, καθώς και τα απαραίτητα ασφαλιστικά και όργανα μέτρησης.

Κάθε φιάλη έχει όγκο 50 λίτρων και χωρητικότητα 0.8 kg H₂ (9 Nm³), οπότε η μέγιστη αποθηκευόμενη ποσότητα υδρογόνου υπό υψηλή πίεση είναι 11 κιλά (126 Nm³). Το παραγόμενο υδρογόνο είναι υψηλής καθαρότητας (99.999% κ.ο.), και έχει προβλεφθεί η ακριβής ανάλυσή του, προκειμένου να διερευνηθεί η επίπτωση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης στην καθαρότητα του υδρογόνου.

2.6. ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΨΥΞΗΣ ΝΕΡΟΥ

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης, οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων και ο συμπιεστής υδρογόνου απαιτούν ψύξη με κρύο νερό. Η σωστή ψύξη είναι ουσιαστικό στοιχείο για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απευθείας το νερό δικτύου, όμως, το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για να μπορεί να εγκατασταθεί και σε περιοχές δύσβατες, οπότε η παρουσία δικτύου δεν είναι εγγυημένη. Επίσης, η ελάχιστη πίεση νερού που απαιτείται για την σωστή τροφοδοσία των μηχανημάτων είναι περίπου 3 bar, και στην περιοχή του αιολικού πάρκου η πίεση πέφτει απροειδοποίητα κάτω από αυτό το όριο. Άλλωστε, και οι διακοπές παροχής νερού δεν είναι πολύ σπάνιες. Έτσι, σχεδιάστηκε ένα κλειστό σύστημα ψύξης νερού, που αυξάνει την ασφάλεια της εγκατάστασης.

Για θερμοκρασία νερού 20°C, η μονάδα ηλεκτρόλυσης μαζί με το τμήμα περαιτέρω καθαρισμού του υδρογόνου χρειάζεται περίπου 0.4 m³/h νερού, όταν λειτουργεί σε πλήρη ισχύ. Αντίστοιχα, ο

συμπιεστής υδρογόνου χρειάζεται περίπου 0.45 m³/h και η ψύξη των μεταλλοϋδριδίων περίπου 0.5 m³/h νερού. Η ηλεκτρόλυση και ο συμπιεστής υδρογόνου καλούν αυτόματα κρύο νερό με τη βοήθεια κατάλληλων βανών, μόνο όταν το χρειαστούν, ενώ οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων ψύχονται καθόλη τη διάρκεια της πλήρωσης. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, δεν ψύχονται ποτέ συγχρόνως και οι τρεις μονάδες. Μπορεί όμως να χρειάζεται συγχρόνως ψύξη της ηλεκτρόλυσης και των μεταλλοϋδριδίων, ή ψύξη της ηλεκτρόλυσης και του συμπιεστή. Έτσι, η μέγιστη κατανάλωση του συστήματος αντιστοιχεί σε 0.8 – 1.0 m³/h νερού 20°C.

Ο βιομηχανικός ψύκτης νερού τύπου ACN της εταιρείας Epsi είναι ρυθμισμένος για να αποθηκεύει νερό στους 9-13°C. Η πίεση στο κύκλωμα ρυθμίζεται με τη βοήθεια μιας βάνας bypass του κυκλοφορητή. Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει ο ψύκτης καταγράφεται με τη βοήθεια ενός ισχυομέτρου. Η ονομαστική ισχύς είναι 5.5 kW, αλλά όταν δεν δουλεύει ο ψυκτικός συμπιεστής πέφτει στο 1 kW περίπου.

2.7. ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης και ο συμπιεστής υδρογόνου διαθέτουν βάνες ελέγχου πνευματικού τύπου, που δέχονται σήμα μέσω πεπιεσμένου αέρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άζωτο από τις φιάλες που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα για αυτόματη αδρανοποίηση, αλλά η κατανάλωση αζώτου για τις ανάγκες ελέγχου κρίθηκε υπερβολική, οπότε εγκαταστάθηκε ξεχωριστό κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα.

Το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα αποτελείται από τον αεροσυμπιεστή με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο 150 λίτρων, τον ξηραντή καταψυκτικού τύπου, φίλτρα, και τις σωληνώσεις από χαλκό, με αναμονές σύνδεσης για την ηλεκτρόλυση και τον συμπιεστή υδρογόνου. Ο εμβολοφόρος, λιπαινόμενος αεροσυμπιεστής είναι μονοφασικός, με ισχύ κινητήρα 2.2 kW. Έχει ονομαστική πίεση λειτουργίας 10 bar και παροχή 225 l/min στα 10 bar. Η ισχύς του ψυκτικού συμπιεστή είναι 0.139 kW. Η καθαρότητα του πεπιεσμένου αέρα για πνευματικά συστήματα είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές κατά ISO 8573.1 class 1.4.1, δηλαδή σωματίδια έως 0.01 μm, λάδια έως 0.01 mg/m³ και σημείο δρόσου 3°C. Ο πεπιεσμένος αέρας στο αεροφυλάκιο διατηρείται υπό πίεση 6-8 bar με κατάλληλους διακόπτες πίεσης.

2.8. ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ο κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας τροφοδοτείται από την ανεμογεννήτρια Enercon στα 400 V, και έχει διαστασιολογηθεί για 100 KW. Από τον πίνακα αυτόν τροφοδοτούνται όλοι οι χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης υδρογόνου, ακόμα και το κλιματιστικό της αίθουσας ελέγχου. Μέσα στο ίδιο πεδίο βρίσκεται και το σύστημα ελέγχου, που βασίζεται σε ένα Programmable Logic Controller (PLC) Simatic S7 της εταιρείας Siemens. Το PLC λαμβάνει σήματα από διάφορα όργανα μέτρησης (πίεσης, θερμοκρασίας, ροής, ανάλυσης αερίων, ρεύματος, τάσης, και ηλεκτρικής ενέργειας) και στέλνει τα απαραίτητα σήματα για τον έλεγχο της εγκατάστασης. Επικοινωνεί με έναν υπολογιστή, στον οποίο καταγράφονται τα δεδομένα, και από τον οποίο στέλνονται οι κατάλληλες διαταγές για τη λειτουργία του συστήματος.

3. ΠΡΩΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα διάφορα τμήματα της εγκατάστασης τέθηκαν σε λειτουργία ξεχωριστά, για να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία τους πριν την ενσωμάτωση στο ολοκληρωμένο σύστημα.

Οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων εγκαταστάθηκαν και ενεργοποιήθηκαν τον Μάιο του 2005. Για τη μεταφορά στο πάρκο, οι δεξαμενές με το μεταλλικό κράμα ήταν αδρανοποιημένες με αργό. Πριν την ενεργοποίηση, αφαιρέθηκε το αργό με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού, και κατόπιν ξεκίνησε η ενεργοποίησή τους με υδρογόνο υπό πίεση, με συνεχή κυκλοφορία κρύου νερού. Η πρώτη πλήρωση

των δεξαμενών, δηλαδή η ενεργοποίησή τους, γίνεται συνήθως με υδρογόνο υπό πίεση υψηλότερη της συνηθισμένης πίεσης λειτουργίας. Για αυτόν το λόγο, δεν ήταν δυνατή η χρήση του υδρογόνου της ηλεκτρόλυσης, και η πλήρωση έγινε από φιάλες υδρογόνου υψηλής πίεσης. Η τελική πίεση των δεξαμενών στους 30°C περίπου ήταν 20 bar. Η συνολική ποσότητα υδρογόνου που αποθηκεύτηκε ήταν 40 Nm³ H₂, όπως μετρήθηκε με βάση τη διαφορά πίεσης των φιαλών υδρογόνου. Η ποσότητα αυτή του υδρογόνου έχει μείνει αποθηκευμένη έκτοτε στις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων, και κατά διαστήματα μετράται η πίεση στις μεμονωμένες δεξαμενές, που εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, και κυμαίνεται μεταξύ 17 και 20 bar.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παραδόθηκε από τον κατασκευαστή τον Μάρτιο, σε τρία τμήματα, τη μονάδα ηλεκτρόλυσης αυτή καθαυτή, το πεδίο παροχής ισχύος και το πεδίο ελέγχου. Τα δύο πεδία εγκαταστάθηκαν στην αίθουσα ελέγχου, και έγιναν όλες οι συνδέσεις με την ηλεκτρόλυση και με το κεντρικό σύστημα ελέγχου.

Η λειτουργία της μονάδας ελέγχθηκε πλήρως από τον ίδιο τον κατασκευαστή πριν από την παράδοση, και κυρίως όλα τα συστήματα ελέγχου. Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας της μονάδας σε διάφορες θερμοκρασίες, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στον πίνακα αναγράφονται το επιβαλλόμενο ρεύμα λειτουργίας I, η αντίστοιχη συνεχής τάση, η ωριαία παραγωγή υδρογόνου, η θερμοκρασία ηλεκτρόλυσης, η πίεση λειτουργίας, και η απόδοση της ηλεκτρόλυσης ως προς τη χαμηλή θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου (Low Heating Value).

U (V)	I (A)	Nm ³ /h	T (oC)	P (bar)	eff LHV
97	180	3.52	33	3.4	60.48
94	180	3.52	45	10.7	62.41
91	186	3.64	54	14	64.52
90	187	3.66	60	17.5	65.25
88	188	3.68	63	18.4	66.74
88	260	5.14	76	10.6	67.34
88	282	5.59	78	10.8	67.52
86	285	5.65	80	10.8	69.12

Πίνακας 1. Πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης 25 kW

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η μονάδα ηλεκτρόλυσης παράγει έως και 10% περισσότερο υδρογόνο από την ονομαστική ικανότητα των 5 Nm³/h. Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας είναι περίπου 69% ως προς τη χαμηλή θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου. Μια προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μια αύξηση της απόδοσης της ηλεκτρόλυσης, η αύξηση της πίεσης δεν έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση. Η απόδοση της αλκαλικής αυτής μονάδας προηγμένης τεχνολογίας είναι υψηλή ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας είναι περιορισμένη.

Ο συμπιεστής τέθηκε σε λειτουργία επιτυχώς τον Σεπτέμβριο, χρησιμοποιώντας άζωτο. Εξίσου καλά δουλεύουν και όλα τα βοηθητικά μηχανήματα όπως ο ψύκτης νερού και ο αεροσυμπιεστής. Στην εγκατάσταση έχουν προβλεφθεί κάποιες μετρήσεις, που, από όσο γνωρίζουμε, δεν έχουν γίνει ή δημοσιευθεί ακόμη, σχετικά με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των βοηθητικών συστημάτων. Με τις μετρήσεις αυτές, μπορεί να γίνει μια πιο σωστή εκτίμηση της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος για την παραγωγή υδρογόνου.

Με βάση τις πρώτες μετρήσεις, η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση για την παραγωγή του περιβαλλοντικά φιλικού υδρογόνου και την εμφιάλωση σε φιάλες στα 200 bar είναι περίπου 6.4 kWh/Nm³ H₂, που αντιστοιχεί σε μια απόδοση 47% (ως προς την LHV) του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης κρύου νερού για την ψύξη των μηχανημάτων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Μια πρωτοποριακή μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου από αιολική ενέργεια σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ στο Λαύριο. Η κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας, παρόλα τα πρακτικά προβλήματα υλοποίησης που προκύπτουν από την εμπλοκή πλήθους διαφορετικών φορέων, ολοκληρώθηκε επιτυχώς, ακριβώς χάρη στην άψογη συνεργασία όλων των φορέων. Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας είναι πολύ ενθαρρυντικά, και αποδεικνύουν ότι η μονάδα έχει πολύ υψηλή απόδοση, όπως είχε σχεδιαστεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eide P., Fjermestad Hagen E., Kuhlmann M., Rohden R., European Wind Energy Conference **2004**
- [2] AccaGen, personal communication, summer **2005**