

Nedjeljko Perić  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
[nedjeljko.peric@fer.hr](mailto:nedjeljko.peric@fer.hr)

Željko Ban  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
[zeljko.ban@fer.hr](mailto:zeljko.ban@fer.hr)

Branimir Matijašević  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
[branimir.matijasevic@fsb.hr](mailto:branimir.matijasevic@fsb.hr)

Stjepan Mikac  
ProAs d.o.o., Varaždin  
[proas@vz.htnet.hr](mailto:proas@vz.htnet.hr)

Mate Jelavić  
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb  
[mjelavic@koncar-institut.hr](mailto:mjelavic@koncar-institut.hr)

Hrvoje Domitrović  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
[hrvoje.domitrovic@fer.hr](mailto:hrvoje.domitrovic@fer.hr)

Milan Kostelac  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
[milan.kostelac@fsb.hr](mailto:milan.kostelac@fsb.hr)

## LABORATORIJ ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE NA FAKULTETU ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

### SAŽETAK

U radu je opisan Laboratorij za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Laboratorij predstavlja mikromrežu koja se sastoji od specijalno projektiranog vjetroagregata, elektrolizatora za proizvodnju vodika povezanog s agregatom gorivnih članaka, te mrežom fotonaponskih panela. Laboratorij ima za cilj istraživanje obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije zasnovanih na energiji vjetra, vodikovoj energiji te energiji Sunca. Istraživanju u Laboratoriju naglašeno su usmjerena na povećanje efikasnosti pretvorbe energije obnovljivih izvora pomoću naprednih metoda upravljanja i estimacije.

**Ključne riječi:** Obnovljivi izvori energije, mikromreža, vjetroagregat, agregat gorivnih članaka, fotonaponski članci

## LABORATORY FOR THE RENEWABLE ENERGY SOURCES AT FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING, UNIVERSITY OF ZAGREB

### SUMMARY

The paper deals with Laboratory for the renewable energy sources built at the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. Laboratory is designed as a micro grid consisting of custom made wind turbine energy source, electrolyser for hydrogen production, hydrogen fuel cell stack energy source and photovoltaic energy source. The purpose of the Laboratory is research and development of the renewable energy sources based on the wind, hydrogen and sun energy. The Laboratory researches are concern on increasing energy conversion efficiency for the renewable energy sources using advanced control and estimation techniques.

**Key words:** Renewable energy sources, micro grid, wind turbine, fuel cell stack, photovoltaic.

## 1. UVOD

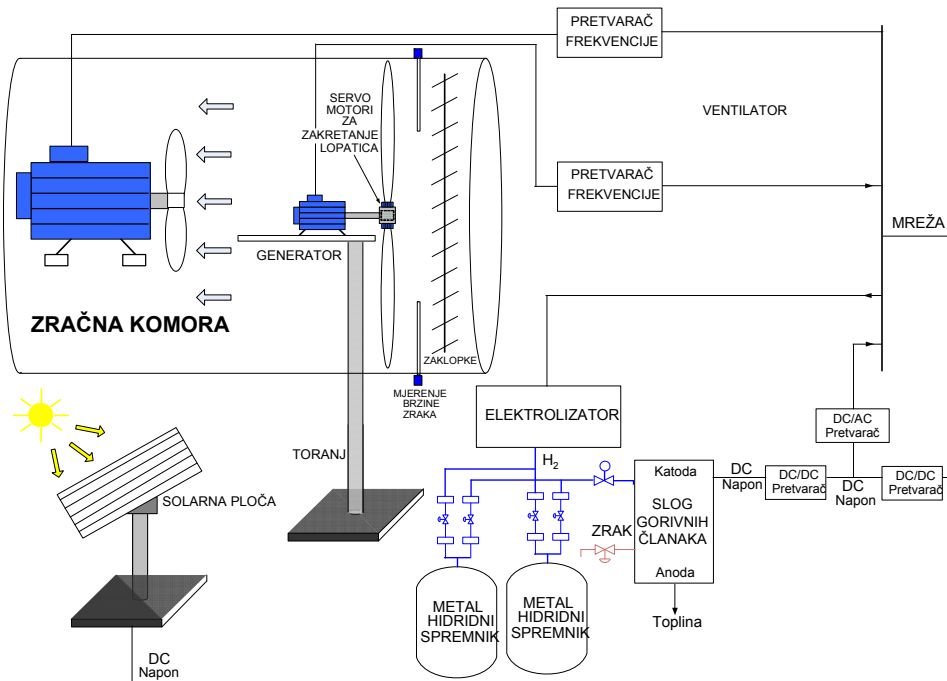
Uzimajući u obzir zalihe konvencionalnih izvora energije kao i ekološke zahtjeve, obnovljivi izvori energije dobivaju sve više na važnosti. Da bi se uključilo u svjetske trendove razvoja i iskorištavanja obnovljivih izvora energije potrebno je ubrzano raditi na istraživanju obnovljivih izvora energije te povećavati njihovu efikasnost u svrhu smanjenja cijene tako dobivene energije. Uključivanje u svjetski trend takvih istraživanja izazvalo je potrebu za izgradnjom laboratorija koji omogućuje specifična istraživanja vezana uz energiju vjetra i Sunca, kao i razmatranje različitih oblika pohrane energije. Budući da se raspoloživa energija vjetra i Sunca mijenja, postoji potreba za spremnicima energije, koji se razlikuju po brzini reakcije, količini energije koja se može spremati kao i po cijeni spremanja i pretvorbe energije.

Laboratorij realiziran na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) u Zagrebu omogućuje eksperimentalno istraživanje rada vjetroagregata, agregata zasnovanog na energiji Sunca, kao i pohranu energije u superkondenzatore, baterije i spremnike vodika. Osim toga, Laboratorij omogućuje razvoj specifičnih naprednih algoritama upravljanja pojedinim agregatom, kao i njihovo vezanje u mikromrežu. Uzimajući sve agregate Laboratorija kao cjelinu, stvorene su mogućnosti razvoja algoritama upravljanja mikromrežom, kao i algoritama optimalne pretvorbe energije unutar mikromreže, uvažavajući energetske, ekonomske odnosno ekološke kriterije. Tako realizirana mikromreža predstavlja osnovu za razvoj upravljanja virtualnim elektranama.

U radu je detaljno opisan vjetroagregat sa svojim karakterističnim svojstvima, kao i energetski izvor zasnovan na vodikovom gorivnom članku. Sustav energetskog izvora zasnovan na fotonaponskim člancima u fazi je projektiranja te se za njega daju samo naznake vezane za njegove osnovne karakteristike i njegovu ulogu u cjelokupnom sustavu Laboratorija.

## 2. OPIS LABORATORIJSKOG POSTROJENJA

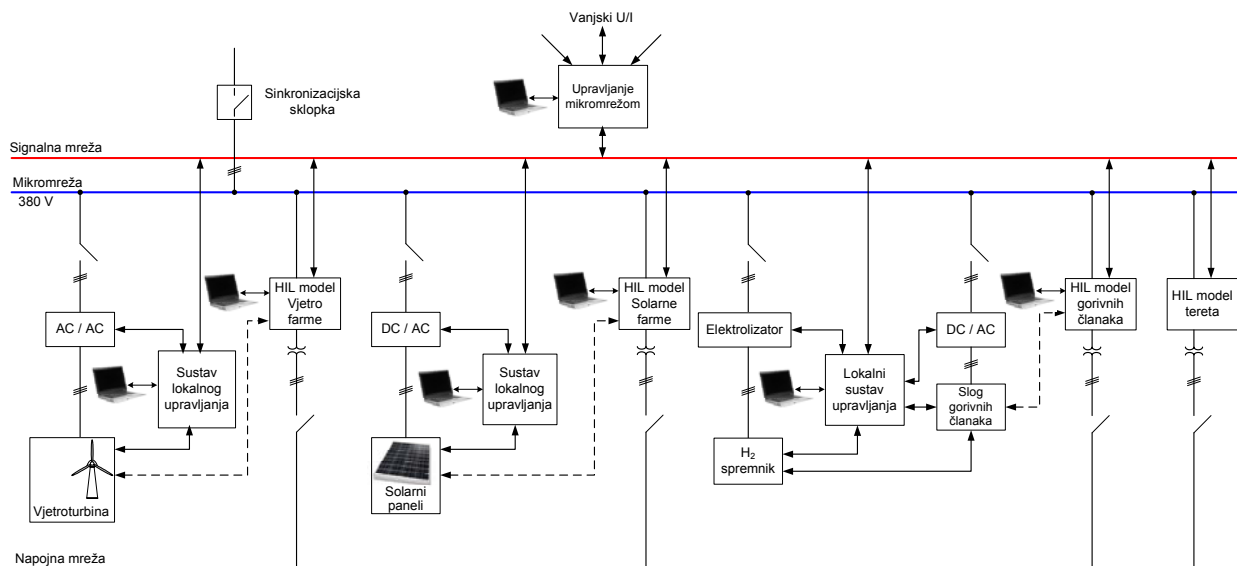
Laboratorij za obnovljive izvore energije na FER-u u Zagrebu prvenstveno je namijenjen za istraživanja obnovljivih izvora energije usmjerena na tri glavna područja: korištenje energije vjetra, energije Sunca te energije vodika primjenom vodikovih gorivnih članaka uz pohranu vodika u metalhidridnim spremnicima. Načelna shema strukture Laboratorija prikazana je na slici 1.



Slika 1. Načelna shema strukture laboratorijskog postrojenja.

Iz sheme na slici 1 vidljivo je da sustav predstavlja mikromrežu u kojoj se energija vjeta i Sunca može predavati vanjskoj mreži, ili se može pomoću elektrolizatora pretvarati u vodik koji se sprema u metalhidridne spremnike. U slučaju nedostatne energije vjeta i Sunca, energija pohranjena u vodik u može

se pomoću sloga gorivnih članaka pretvoriti u električnu energiju, koja se pomoću pretvarača napona predaje u vanjsku mrežu. Svako od navedenih postrojenja omogućuje razvoj i testiranje upravljačkih algoritama specifičnih za pojedino postrojenje, dok laboratorijska cjelina omogućuje istraživanja vezana uz mikromrežu što može postati temeljem razvoja upravljanja virtualnom elektranom. Jednopolna shema mikromreže laboratorija koja, osim vjetroagregata, fotoelektričnog agregata te agregata vodikovih gorivnih članaka, sadrži i emulatore (*Hardware in the loop – HIL*), prikazana je slikom 2.



Slika 2. Jednopolna shema mikromreže Laboratorija.

Emulatori pojedinih energetske agregata omogućuju razvoj i testiranje upravljačkih algoritama za agregate ili skupove agregata, uključivo i sigurnosne funkcije, omogućujući na taj način modeliranje raznih konfiguracija mikromreža.

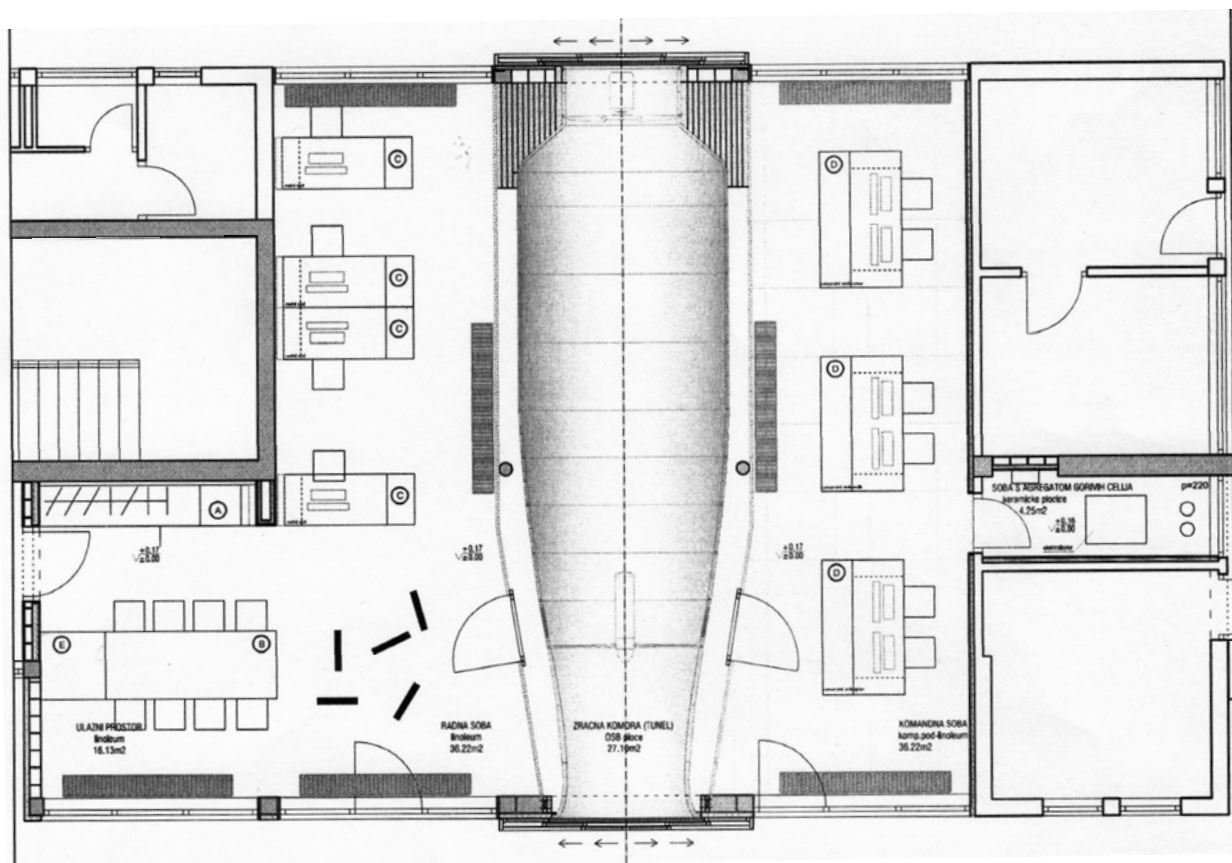
Tlocrt Laboratorija površine 150 četvornih metara u kojem je smještena vjetrokomora s vjetroagregatom i agregat zasnovan na vodikovim gorivnim člancima kao i pripadni upravljački pultovi za sva tri agregata prikazan je slikom 3, dok je smještaj fotonaponskih panela predviđen na krovu zgrade Fakulteta.

## 2.1. Vjetroagregat

Vjetroagregat je dio Laboratorija za obnovljive izvore energije na FER-u namijenjen za istraživanje energije vjetra. Riječ je o laboratorijskom vjetroagregatu smještenom u ispitnoj stanici-vjetrokomori (slika 4.) Laboratorijski vjetroagregat ima nazivnu snagu 300W te nazivnu brzinu vrtnje 240 o/min. Važno je istaknuti da je vjetroagregat projektiran po kriterijima modelski sličnog rada vjetroagregata iz megavatne klase. Elektromagnetski moment generatora moguće je mijenjati preko pripadajućeg frekvencijskog pretvarača što omogućava dodatnu fleksibilnost sustava upravljanja vjetroagregatom. Također, svaka lopatica vjetroturbine ima istosmjerni servo pogon pomoću kojeg je moguće pojedinačno zakretati lopaticu oko njezine uzdužne osi. Time su stvorene podloge za realizaciju sustava upravljanja koji će uvažavati vertikalni profil vjetra. Vjetar koji pokreće vjetroagregat generira se pomoću ventilatora smještenog na jednom kraju ispitne stanice. Preko frekvencijskog pretvarača moguće je na proizvoljan način mijenjati brzinu vrtnje ventilatora, a samim tim i brzinu vjetra u komori. Time je omogućeno eksperimentalno istraživanje rada vjetroagregata u uvjetima približno stohastične naravi vjetra.

### 2.1.1. Opis sustava upravljanja laboratorijskim vjetroagregatom

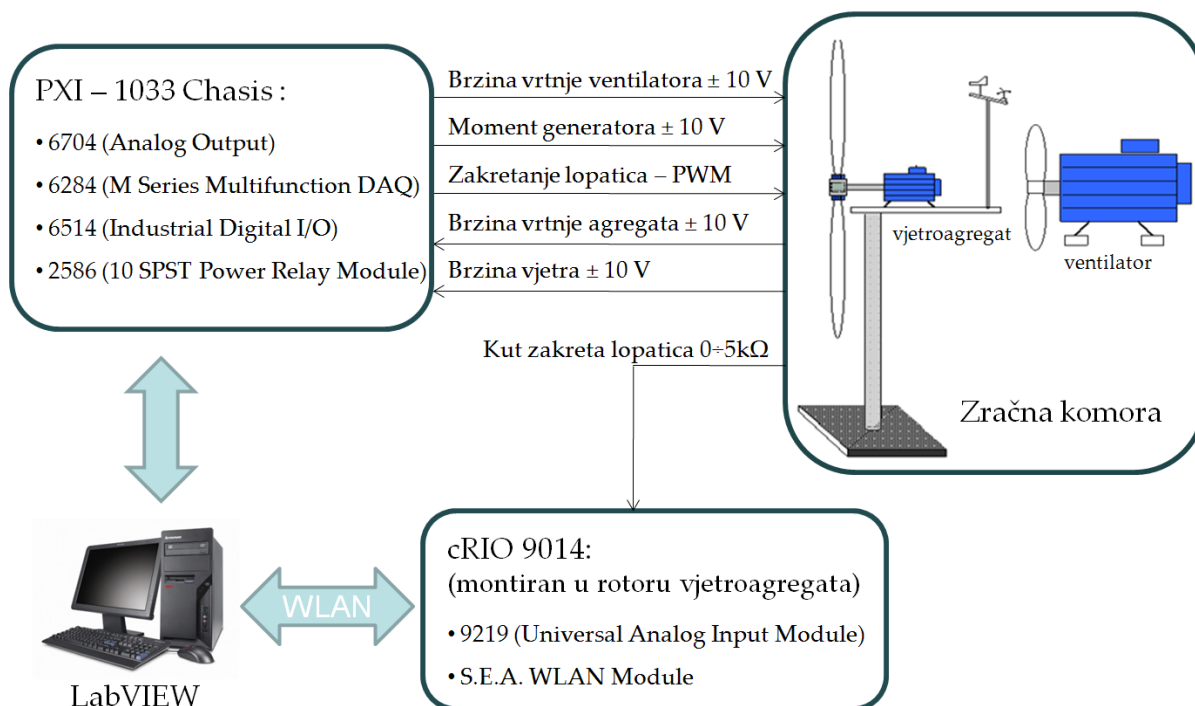
Realizacija algoritama upravljanja laboratorijskim postrojenjem zasniva se platformi LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, National Instruments) instaliranim na osobnom računalu. Na računalu se obavlja obrada mjernih signala te izvođenje algoritama upravljanja dok se prikupljanje i generiranje električnih signala obavlja u namjenskom ulazno/izlaznom sklopovlju. Načelna struktura upravljanja vjetroagregatom prikazana je slikom 5.



Slika 3. Tlocrt Laboratorija za obnovljive energije na FER-u.



Slika 4. Smještaj vjetroturbine u vjetrokomori Laboratorija.



Slika 5. Načelna struktura upravljanja vjetroagregatom.

Oprema za generiranje i prikupljanje signala može se podijeliti na dva dijela. Prvi dio obuhvaća NI PXI-1033 kućište koje služi za komunikaciju između osobnog računala i izlazno/ulaznih modula. Unutar PXI-1033 kućišta, korišteni su sljedeći moduli:

- Modul analognog izlaza PXI-6704 – koristi se za zadavanje brzine vrtnje ventilatora i elektromagnetskog momenta generatora vjetroagregata odgovarajućim frekvencijskim pretvaračima;
- Višefunkcionalni modul za prikupljanje podataka serije M PXI-6284 – koristi se za analogne ulaze (očitanje brzine vrtnje generatora, položaja rotora, brzine vjetra...), ali i za generiranje triju nezavisnih PWM (Pulse Width Modulation) signala za zakretanje lopatica;
- Industrijski ulazno/izlazni digitalni modul PXI-6514 – koristi se za prikupljanje digitalnih signala koji prikazuju trenutno stanje sustava (ventilator spreman, ventilator radi...);
- Relejni modul PXI-2586 – koristi se za generiranje digitalnih signala za pokretanje ventilatora i generatora vjetroagregata.

Drugi dio opreme koristi se za mjerenje kuta zakreta lopatica. Naime, s obzirom da se lopatice nalaze na rotirajućem dijelu vjetroagregata, mjerenje njihova kuta zakreta i prijenos te informacije na osobno računalo predstavlja problem. Stoga se u tu svrhu koristi cRIO 9014 (Compact Reconfigurable Input/Output) uređaj od National Instrumentsa, koji je montiran u rotoru vjetroagregata. Riječ je o uređaju namijenjenom za rad u stvarnom vremenu opremljenom FPGA (Field-Programmable Gate Array) sklopovljem, što omogućava brzi rad s ulaznim i izlaznim signalima. Kut zakreta lopatice mjeri se pomoću potencijometra ugrađenog u korijen lopatice – zakretanjem lopatice mijenja se otpor potencijometra. U tu je svrhu cRIO uređaj opremljen dvama univerzalnim modulima analognih ulaza 9219 koji služe za očitavanje otpora mjernih potencijometara. Također se koristi i S.E.A. WLAN modul koji služi za bežično povezivanje cRIO uređaja s osobnim računalom korištenjem WLAN protokola odnosno bežični prijenos informacije o zakretu lopatice.

Kao što je oprema podijeljena u dvije cjeline, tako možemo i upravljački program rastaviti u dvije cjeline. Prva se cjelina odnosi na cRIO, koji se nalazi u rotoru vjetroagregata. Naime, unutar cRIO uređaja izvršava se program neovisno o programu na osobnom računalu. Taj program u beskonačnoj petlji očitava vrijednosti otpora, koji odgovaraju vrijednostima kuta zakreta lopatica, i lokalno ih pohranjuje u odgovarajuće varijable.

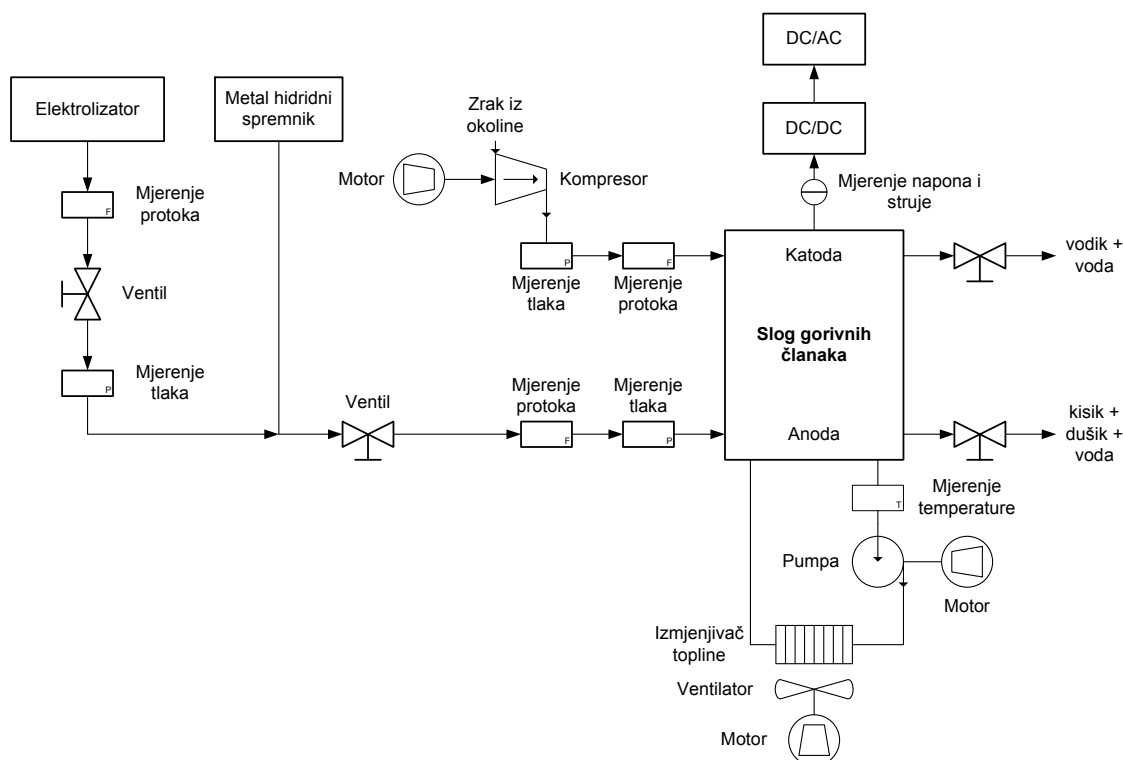
Druga se cjelina odnosi na upravljački program koji se izvršava na osobnom računalu. U tom je programu realizirano prikupljanje i generiranje signala na modulima unutar PXI-1033 kućišta te bežična komunikacija s cRIO 9014 uređajem s ciljem očitavanja trenutnog kuta zakreta lopatica (odnosno



odgovarajućeg otpora). Drugim riječima, svi algoritmi za upravljanje vjetroagregatom trebaju biti realizirani unutar ovog programa. Također, unutar tog programa realizirano je i grafičko sučelje čovjek-stroj koje prikazuje glavne mjerene veličine procesa te omogućava korisniku interakciju s procesom, npr. uključivanje i isključivanje postrojenja ili ručno postavljanje određenih vrijednosti.

## 2.2. Agregat vodikovih gorivnih članaka

Agregat vodikovih gorivnih članaka dio je Laboratorija za obnovljive izvore energije na FER-u predviđen za proizvodnju i pohranu vodika te za pretvaranje energije sadržane u vodik u električnu i toplinsku energiju. Funkcionalna shema vodikovog agregata prikazana je slikom 6.



Slika 6. Funkcionalna shema agregata zasnovanog na vodikovom gorivnom članku.

Agregat vodikovih gorivnih članaka projektiran je tako da omogućuje proizvodnju vodika iz raspoložive električne energije pomoću elektrolizatora (Hogen GC 600, tvrtka H2 Industries) te pohranu vodika u metalhidridne spremnike od 900 norma litara. Metal hidridni spremnici, u usporedbi s klasičnim spremnicima, omogućuju spremanje iste količine vodika u znatno manjem volumenu i pri znatno manjim tlakovima. Vodik je iz spremnika moguće dovesti odvojnim i regulacijskim ventilima na slog gorivnih članaka gdje zajedno s komprimiranim kisikom iz zraka proizvodi električnu energiju, toplinu i vodu. Upotrijebljen je gorivni članak sa samoovlaživanjem membrane (FCS6432, tvrtka BCS Fuel Cells Inc., snaga 500W). Gorivni članak pripada grupi članaka s Proton Elektron Membranom (PEM), čija je radna temperatura 65°C. Krug hlađenja gorivnog članka zasnovan je na hlađenju tekućinom, što omogućuje mjerenje proizvedene toplinske energije, te se mogu provesti i eksperimenti važni za kogeneracijski rad agregata. Izlazni napon gorivnog članka iznosi od 18V do 30V te se preko istosmjerno/istosmjernog uzlaznog pretvarača pretvara u napon istosmjernog međukruga od 48V. Iz istosmjernog se međukruga upravljivim istosmjerno/izmjeničnim pretvaračem električna energija predaje vanjskoj mreži. U istosmjerni međukrug mogu se po potrebi dodati akumulatorske baterije sa svrhom kompenzacije kraćih i bržih opterećenja prouzročenih mrežom. Izgled dijela agregata vodikovog postrojenja prikazan je slikom 7.



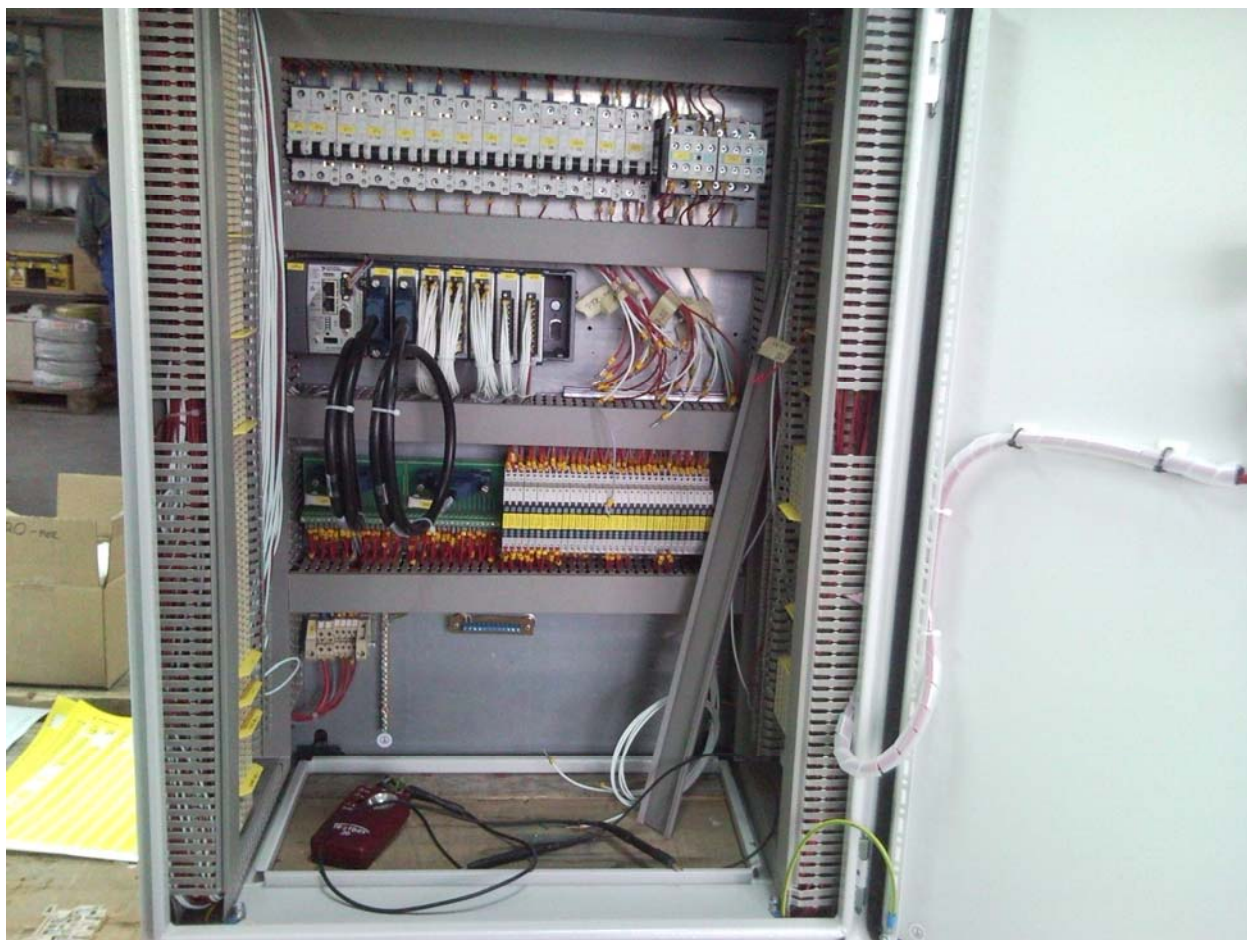
Slika 7. Smještaj dijela agregata zasnovanog na vodikovom gorivnom članku.

U prostoriji s vodikovim agregatom izveden je i odgovarajući sigurnosni sustav ventilacije i detekcije vodika. U svrhu zaštite od požara i eksplozije, paralelno upravljačkom sustavu postoji sklopovski odvojeni sigurnosni sustav, koji u slučaju kvara upravljačkog sustava dovodi postrojenje u sigurno stanje.

### 2.2.1. Upravljanje agregatom vodikovih gorivnih članaka

Zahtjevi PEM gorivnog članka, koji je upotrijebljen u agregatu, diktiraju da vodik bude čistoće klase 4, dok zrak mora imati čistoću laboratorijskog zraka, tj. mora biti u potpunosti eliminirano prisustvo ulja, ugljičnog monoksida i sumpornih spojeva. Vodikov krug u gorivnom članku izveden je kao zatvoreni krug s periodičnim otpuštanjem vodika radi pročišćavanja membrane članka, dok krug zraka završava regulacijskim ventilom kako bi se mogao regulirati i tlak i protok zraka kroz gorivni članak. S obzirom na potrebu za identifikacijom matematičkog modela gorivnog članka, upotrijebljeni su brzi regulacijski ventili s vremenom odziva od 20ms, kako bi se moglo djelovati u vremenskim mjerilima relevantnim za gorivni članak. Isto tako, za protok plinova upotrijebljena su masena mjerila protoka plina. Na postrojenju su upotrijebljeni izvršni i mjerni elementi veće brzine od onih potrebnih u komercijalnoj eksploataciji gorivnog članka kao energetskog izvora sa svrhom da omoguće mjerenja i pobude u sustavu potrebne za precizno određivanje matematičkog modela sustava pomoću postupaka identifikacije.

Za upravljanje postrojenjem upotrijebljen je Power PC Controller tvrtke National instruments. Upotrijebljen je model cRIO-9024 koji radi na 800MHz te ima 512MB dinamičke RAM memorije, te 4GB permanentne memorije. Uz procesorsku jedinicu upotrijebljeni su analogni i digitalni ulazni i izlazni moduli. U cRIO mikrokontroleru odvijaju se u realnom vremenu svi upravljački algoritmi potrebni za upravljanje gorivnim člankom, temperaturom i izmjenama zraka u prostoriji gorivnih članaka te energetskim pretvaračima napona priključenim na izlaz gorivnog članka. Upravljački sustav cRIO s pripadnim modulima prikazan je slikom 8.



Slika 8. Smještaj upravljačkog cRIO Power PC Controller-a.

Na grivnom članku upravlja se tlakom vodika, tlakom i protokom zraka, regulacijom temperaturnog kruga gorivnog članka kao i naponom i snagom izlaznih energetske pretvarača. Osim regulacijskih funkcija, cRIO mikrokontroler obavlja i cijeli niz funkcija sekvencijalnog upravljanja kao što su postavljanje željenih putova protoka plinova pomoću ON/OFF ventila, upravljanje elektrolizatorom te cijeli niz nadzornih i zaštitnih funkcija. Zaštitne i sigurnosne funkcije sustava redundantno se nadziru posebnim PLC-om.

### 2.3. Agregat zasnovan na fotonaponskim člancima

Agregat zasnovan na iskorištavanju energije Sunca predviđen je kao treći agregat mikromreže Laboratorija za obnovljive izvore energije. Predviđeno je postavljanje fotonaponskih panela na krov zgrade Fakulteta. Upravljanje položajem panela provodit će se pomoću servo uređaja za pozicioniranje panela u dvije osi. Time će se omogućiti optimalan položaj panela prema Suncu odnosno učinkovitija pretvorba energije Sunca u električnu energiju. Napon fotoelektričnih panela dovodit će se preko energetske pretvarača na mrežu Laboratorija. Upravljanjem zakretom panela kao i upravljanje izlaznom snagom odnosno rekonfiguracijom smjerova toka energije u mikromreži provodit će se mikrokontrolerskim uređajima iz Laboratorija. Ovim agregatom omogućit će se i istraživanje modela predikcije raspoložive količine energije Sunca ovisno o dobu godine i dobu dana te o vremenskoj prognozi, kao i preciznija identifikacija matematičkog modela panela potrebnih za razvoj algoritama upravljanja solarnih elektrana.

## 3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorij opremljen opisanim agregatima i odgovarajućim emulatorima omogućuje istraživanje i razvoj na razini pojedinih agregata, kao i istraživanja vezana uz mikromrežu, odnosno uz virtualnu elektranu sastavljenu od više mikromreža.



Specifična svojstva izvedbe vjetroagregata omogućuju provedbu ispitivanja pri kontroliranim uvjetima vjetra, kao i niz ispitivanja vezanih za smanjenje strukturnih vibracija i naprezanja konstrukcije vjetroagregata primjenom naprednih algoritama upravljanja. Uz neuniformni gradijent vjetra po visini moguće je kontinuiranom korekcijom zakreta lopatica unutar svakog okreta rotora postići uniformnost aerodinamičkog momenta na svim lopaticama. Time će se omogućiti da se primjenom algoritama upravljanja zasnovanim na pojedinačnom zakretanju lopatica istražuju metode i načini smanjenja strukturnih vibracija konstrukcije, odnosno zamora materijala konstrukcije što će sve doprinosti povećanju životnog vijeka vjetroagregata.

Izvedba agregata zasnovanog na gorivnim člancima vodika omogućuje provedbu identifikacije matematičkog modela gorivnog članka koji je potreban za razvoj algoritama upravljanja. Brzi ventili i precizni mjerni članovi tlaka i protoka plinova omogućuju postizanje potrebne pobude za identifikaciju sustava kao i dovoljno točno mjerenje signala za identifikaciju. Niz temperaturnih senzora unutar gorivnog članka i u sustavu hlađenja, kao i upravljivost sustava hlađenja omogućuju i ispitivanje temperaturnih karakteristika članka. Cjelokupna struktura sustava omogućuje razvoj adaptivnih i optimalnih algoritama upravljanja, kao i ekstremalnih algoritama upravljanja po snazi. Potpuna upravljivost izlaznih energetske pretvarača pomoću centralne upravljačke jedinice omogućuje i razvoj algoritama upravljanja koji uzimaju u obzir gradijent struje gorivnog članka u svrhu produljenja trajnosti membrana u samom gorivnom članku.

Pojedini algoritmi moći će se ispitivati i na emulatorima pojedinih agregata prije primjene na same agregate u svrhu sprečavanja havarije zbog mogućih pogrešaka u razvoju algoritama. S druge strane, kod razvoja algoritama vezanih za upravljanje mikromrežom, emulatori mogu poslužiti za formiranje zasebne mikromreže koja će zajedno s mikromrežom triju osnovnih agregata laboratorija moći tvoriti laboratorijsku virtualnu elektranu.

Razvoj algoritama upravljanja mikromrežom prvenstveno će se zasnivati na višekriterijskom optimiranju algoritama upravljanja, uzimajući u obzir, tehničke, ekonomske i ekološke kriterije upravljanja. Tim algoritmima određivat će se tokovi energije unutar mikromreže ovisno o raspoloživoj snazi i potražnji te o mogućnostima pohrane energije u različite medije.

#### **4. ZAKLJUČAK**

Laboratorij za obnovljive izvore energije izgrađen na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu omogućuje istraživanje i razvoj algoritama upravljanja proizvodnjom električne energije iz vjetra, Sunca i vodika, kao i problematiku pohrane energije u vodik, odnosno drugim pohrambenim medijima.

Fleksibilan ustroj agregata Laboratorija omogućuje istraživanje i razvoj novih algoritama naprednog upravljanja u svrhu povećanja efikasnosti samih agregata te povećanja njihove trajnosti, što ujedno znači i smanjenje cijene tako proizvedene energije. Razvoj algoritama je olakšan mogućnošću izvođenja brojnih mjerenja na pojedinim agregatima kao i korištenjem blokovski orijentiranog programiranja u programskom okruženju LabView.

Osim razvoja algoritama upravljanja pojedinim agregatima laboratorij omogućuje i razvoj algoritama upravljanja mikromrežom koji će postati podlogom za upravljanje virtualnom elektranom zasnovanoj na nizu mikromreža.