

Primjena LabVIEW programskog alata za razvoj HIL strukture upravljanja brzinom vrtnje vjetroagregata

V. Petrović, N. Hure, i M. Baotić

Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo

Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Telefon: +385-1 6129 529 Fax: +385-1 6129 809 E-mail: vlaho.petrovic@fer.hr, nikola.hure@fer.hr, mato.baotic@fer.hr

Sažetak - U radu je opisana primjena LabVIEW programskog alata za razvoj Hardware-in-the-Loop strukture upravljanja brzinom vrtnje vjetroagregata. Klasični algoritmi upravljanja vjetroagregatom zasnivaju se na upravljanju brzinom vrtnje vjetroagregata. Pritom se razlikuju dva različita radna područja u kojima se vjetroagregat može nalaziti: 1) područje slabih vjetrova u kojem je važno maksimalno iskoristiti raspoloživu energiju vjetra; u ovom području rada lopatice vjetroagregata miruju i postavljene su na kut koji osigurava optimalnu pretvorbu energije, dok se elektromehanički moment generatora može postavljati prema preglednoj tablici u ovisnosti o brzini vrtnje; i 2) područje jakih vjetrova u kojem je snaga vjetra prevelika i potrebno je ograničiti energiju koja se preuzima iz vjetra. Razvijena struktura upravljanja provjerena je na vjetroagregatu koji je dio Laboratorija za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

I. 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. Pritom energija vjetra ima vodeću ulogu među obnovljivim izvorima energija, a očekuje se da će sa ta uloga u budućnosti i povećati [1].

Da bi se ostvarila veća iskoristivost energije vjetra, potrebno je koristiti vjetroagregate većih nazivnih snaga, a ujedno i većih dimenzija (npr. moderni vjetroagregati od 5 MW imaju visinu tornja preko 100 m i duljinu lopatica preko 60 m). Zbog većih dimenzija te zbog promjenjive prirode vjetra, aerodinamička opterećenja postaju sve izraženiji problem kod modernih vjetroagregata te ujedno predstavljaju glavnu prepreku za daljnji rast dimenzija i nazivne snage vjetroagregata. Stoga je nužno razviti napredne algoritme upravljanja vjetroagregatima, koji će osigurati maksimalno iskorištenje energije vjetra te u isto vrijeme smanjiti opterećenja na konstrukciju. Zbog velike složenosti i cijene sustava poput vjetroagregata, nove upravljačke algoritme potrebno je detaljno testirati prije korištenja na stvarnom sustavu.

U ovom radu opisana je Hardware-in-the-Loop (HIL) simulacijska struktura za testiranje sustava upravljanja vjetroagregatom, primijenjena u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. HIL simulacijska

struktura je fleksibilna te omogućuje brzo i jednostavno ispitivanje različitih algoritama upravljanja. Osnovna značajka HIL strukture jest korištenje ispitivanih komponenti sustava unutar simulacijske petlje. To omogućuje smanjenje troškova razvoja te jednostavnije i sustavnije testiranje, zbog čega HIL struktura postaje izrazito važna stepenica u projektiranju tehničkih sustava. Najčešće se koristi u automobilskoj, zrakoplovnoj i vojnoj industriji [2].

Za realizaciju HIL simulacijske strukture, korišten je programski alat LabVIEW (engl. *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) te sklopovlje tvrtke National Instruments. LabVIEW se pokazao kao prikladan alat za HIL simulacije zbog podrške za široki spektar sklopova za prikupljanje i generiranje signala te zbog specifičnog načina programiranja. Naime, LabVIEW se zasniva na grafičkom programiranju te se jednostavno mogu realizirati programske petlje predviđene za paralelno izvođenje, odnosno moguće je realizirati dijelove programa s većim i manjim prioritetom. Također, LabVIEW ima podršku za vizualizaciju procesnih veličina te je moguće napraviti SCADA sustav koji dodatno olakšava testiranje sustava upravljanja [3].

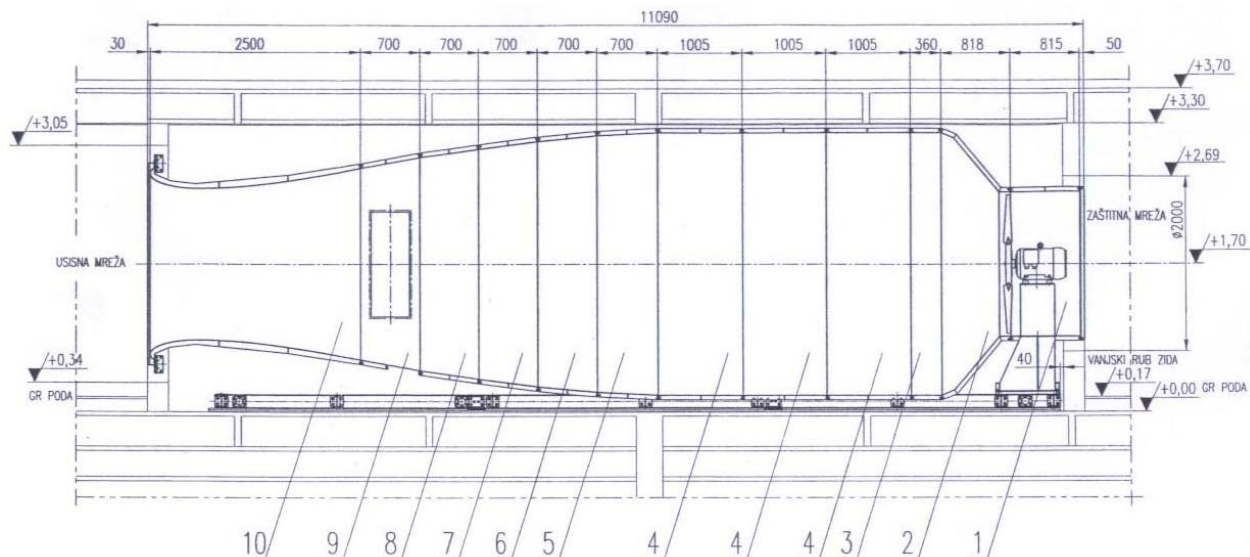
II. OPIS LABORATORIJSKOG POSTROJENJA

Laboratorij za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu prvenstveno je namijenjen za istraživanja obnovljivih izvora energije: 1) vjetra, 2) sunca, i 3) vodika primjenom vodikovih gorivnih članaka uz pohranu vodika u metalhidridnim spremnicima.

U ovom radu opisan je laboratorijski vjetroagregat - dio Laboratorija namijenjen za proučavanje energije vjetra. Vjetroagregat je smješten u zračni tunel (vidi Sl. 1) koji je projektiran uvažavajući Betzov zakon strujanja zraka [4]. Laboratorijski vjetroagregat je projektiran kao umanjena verzija vjetroagregata iz megavatne klase, pri čemu su zadržana su sva bitna svojstva magavatnog vjetroagregata, od aerodinamičke karakteristike vjetroagregata, preko napadnih kutevi lopatica do omjera obodne brzine rotora i brzine vjetra. Nadalje, toranj laboratorijskog vjetroagregata izveden je tako da su zadržana oscilatorna

TABLICA I
NAZIVNE VRIJEDNOSTI LABORATORIJSKOG
VJETROAGREGATA

Snaga	180 W
Brzina vrtnje	240 o/min
Moment generatora	7.16 Nm
Brzina vjetra	5.2 m/s



Sl. 1. Skica zračnog tunela s označenim segmentima; vjetroatregat se nalazi u segmentu 9, a ventilator u segmentu 1.

gibanja karakteristična za vjetroatregate iz megavatne klase. Skaliranje je obavljeno prema vjetroatregatu iz [5], a nazivne vrijednosti vrijednosti skaliranog laboratorijskog vjetroatregata prikazane su u Tablici I.

Nazivni podaci korištenog generatora dani su u Tablici II. Elektromehanički moment generatora moguće je mijenjati preko frekvencijskog pretvarača. Lopatice vjetroatregata napravljene su od lijevanog aluminija i duge su 1,2 m. Za izradu lopatica korišteni su NACA (engl. *National Advisory Committee for Aeronautics*) aeroprofil, koji predstavlja standard u aeronautici. Odabir aeroprofila predstavlja ključan čimbenik kod projektiranja lopatica, jer upravo aeroprofil definiše geometriju lopatica, a time i aerodinamičko vladanje vjetroatregata. Također, uz svaku lopaticu korišten je istosmjerni servo motor pomoću kojeg je moguće lopaticu zakretati oko njezine uzdužne osi. Upravljanje vjetroatregatom pomoću elektromehaničkog momenta generatora i zakretanja lopatica, predstavlja standardno rješenje kod modernih vjetroatregata iz megavatne klase. Vjetar koji pokreće vjetroatregat moguće je generirati pomoću ventilatora smještenog na kraju zračnog tunela (segment 1 na Sl. 1). Parametri motora ventilatora dani su u Tablici III. Preko frekvencijskog pretvarača, moguće je mijenjati brzinu vrtnje ventilatora, a samim tim i brzinu vjeta u tunelu. Upravljanje motorom ventilatora, odnosno generatorom vjetroatregata realizirano je preko Siemensove SINAMICS S120 opreme i nije područje ovog rada.

III. POVEZIVANJE RAČUNALA S PROCESOM

Upravljanje laboratorijskim postrojenjem obavlja se programskim alatom LabVIEW instaliranim na osobnom računaru. Na računaru se obavlja obrada mjernih signala te izvođenje regulacijskih algoritama dok se prikupljanje i generiranje električnih signala obavlja u namjenskom

ulazno/izlaznom sklopovlju koje proizvodi National Instruments. Načelna struktura upravljanja vjetroatregatom prikazana je na Sl. 2.

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 ulazno/izlaznih modula. PXI-1033 kućište se povezuje s računalom preko PCIe (engl. *Peripheral Component Interconnect Express*) utora na matičnoj ploči te može prihvatiti do pet ulazno/izlaznih modula. U opisanoj HIL strukturi koriste se sljedeća četiri modula:

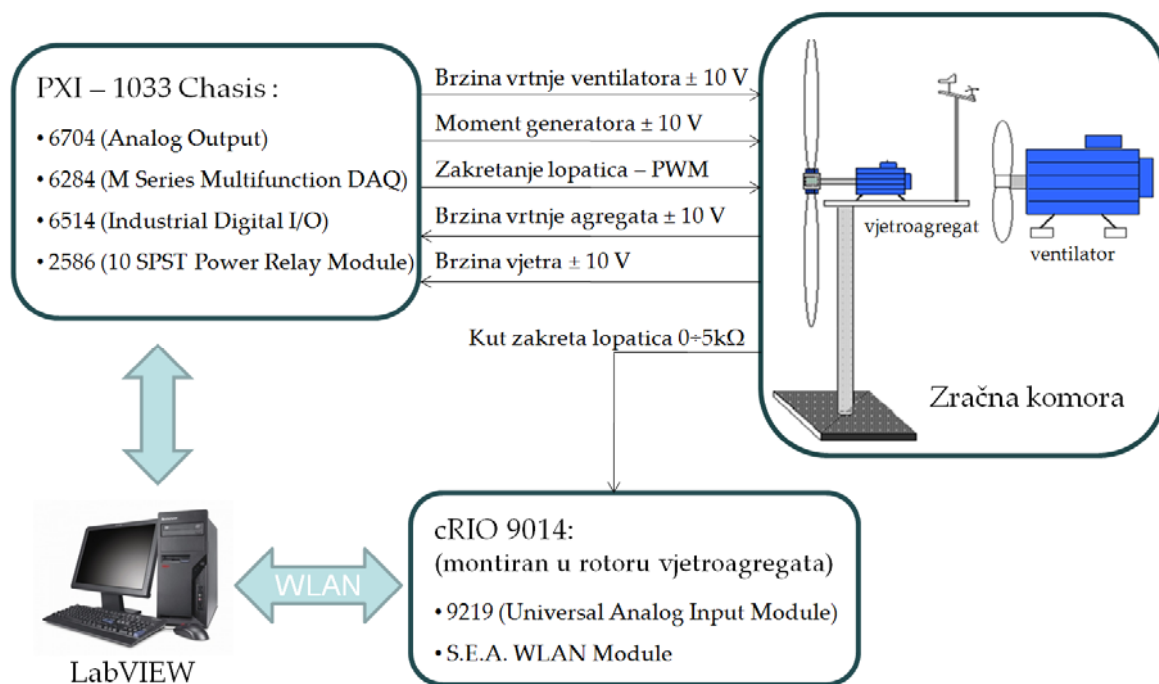
- Modul analognog izlaza PXI-6704: Sadrži 16 naponskih i 16 strujnih kanala uz rezoluciju D/A pretvornika od 16 bita. Moguće je podesiti digitalne i analogne filtre s ciljem generiranja glatkog signala na izlazu.
- Multifunkcionalni modul za prikupljanje podataka serije M PXI-6284: Sadrži 32 analogna kanala uz rezoluciju A/D pretvornika od 18 bita te 48 dvosmjerna digitalna kanala. Modul također sadrži dva brojila (engl. *counter*) te interni generator takta frekvencije 80 MHz, što omogućava mjerenje i generiranje frekvencijski ovisnih signala poput PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) signala.
- Industrijski ulazno/izlazni digitalni modul PXI-6514: Sadrži 32 digitalna ulaza i 32 digitalna izlaza. Među dodatnim funkcijama modula su sklop za upozoravanje (engl. *watchdog*), detektor brida, generiranje prekida (engl. *interrupt*) te digitalni filtri.
- Relejni modul PXI-2586: Sadrži 10 nezavisnih SPST (engl. *Single Pole Single Throw*) releja, čiji rad je moguće u potpunosti softverski programirati.

TABLICA II
PARAMETRI GENERATORA

Nazivna snaga	3.77 kW
Nazivna struja	8.00 A
Nazivni moment	12.00 Nm
Broj pari polova	4

TABLICA III
PARAMETRI MOTORA VENTILATORA

Nazivna snaga	11.0 kW
Nazivna struja	25.5 A
Nazivni moment	143.9 Nm
Broj pari polova	4



Sl. 2. Načelna struktura upravljanja vjetroatregatom.

Opisana oprema koristi se za cjelokupnu komunikaciju s procesom izuzev mjerenja kuta zakreta lopatica. Naime, pošto se lopatice nalaze na rotirajućem dijelu vjetroatregata, mjerenje njihovog kuta zakreta i prijenos te informacije na osobno računalo predstavlja značajan tehnički izazov. Stoga se u tu svrhu koristi cRIO 9014 (engl. *Compact Reconfigurable Input/Output*), koji je montiran u rotoru vjetroatregata. Riječ je o National Instruments uređaju namijenjenom za rad u stvarnom vremenu opremljenom FPGA (engl. *Field-Programmable Gate Array*) sklopovljem, što omogućava brz rad s ulaznim i izlaznim signalima. Kut zakreta lopatice određuje se očitavanjem otpora potencijometra ugrađenog u korijen lopatice – zakretanjem lopatice mijenja se otpor na potencijometru. U tu svrhu je cRIO uređaj opremljen dvama univerzalnim modulima analognih ulaza 9219 koji služe za očitavanje otpora spomenutih potencijometara. Riječ je o modulima s četiri kanala s rezolucijom A/D pretvornika od 24 bita. Također se koristi i S.E.A. WLAN modul koji služi za bežično povezivanje cRIO uređaja s osobnim računalom korištenjem WLAN protokola.

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

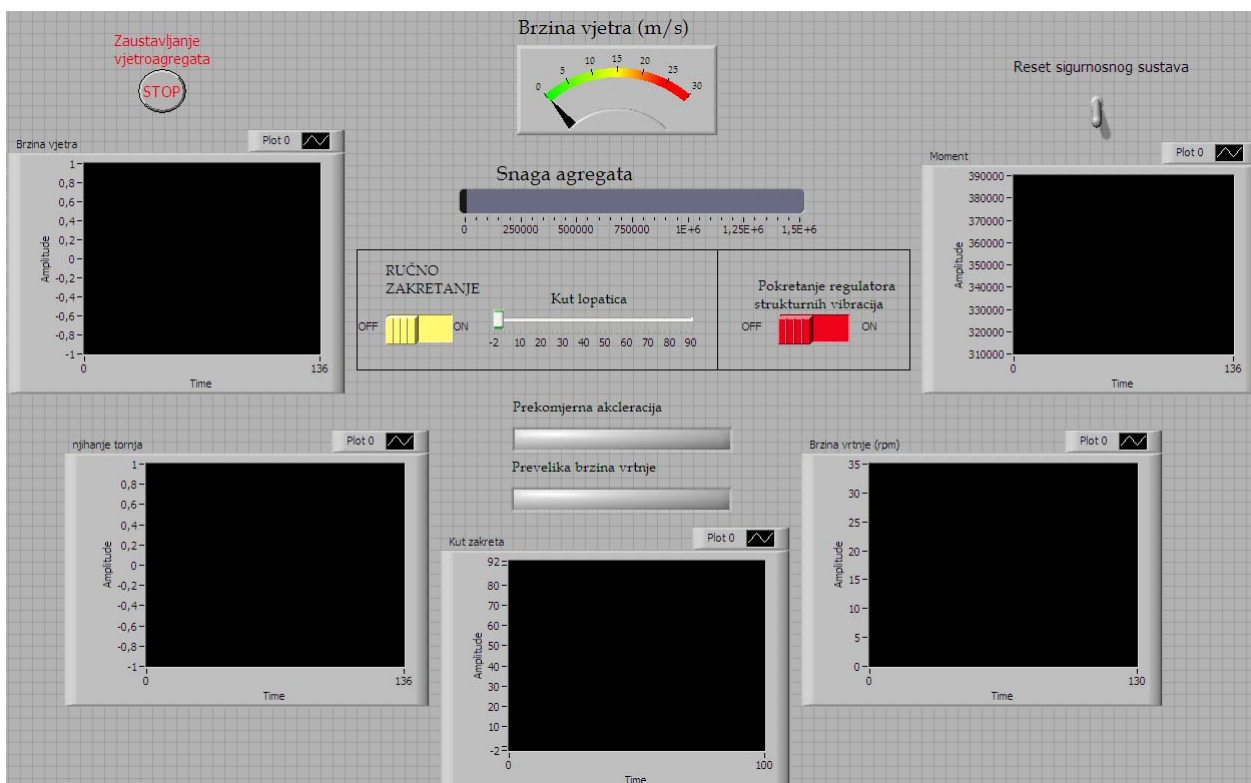
Druga cjelina se odnosi na upravljački program koji se izvršava na osobnom računalu. Unutar tog programa je realizirano prikupljanje i generiranje signala na modulima unutar PXI-1033 kućišta te bežična komunikacija s cRIO 9014 uređajem s ciljem očitavanja trenutnog kuta zakreta lopatica (odnosno odgovarajućeg otpora). Drugim riječima, svi algoritmi za upravljanje vjetroatregatom 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.

IV. REALIZACIJA UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

Klasični algoritmi upravljanja vjetroatregatom zasnivaju se na upravljanju brzinom vrtnje vjetroatregata. Pritom se razlikuju dva različita radna područja u kojima se vjetroatregat može nalaziti [6]. Prvo radno područje je za vrijeme slabih vjetrova kada je važno maksimalno iskoristiti raspoloživu energiju vjetra. U tom radnom području potrebno je postavljati elektromehanički moment generatora da bi se ostvarila optimalna brzina vrtnje vjetroatregata. U tom području lopatice vjetroatregata miruju i postavljene su na kut koji osigurava optimalnu pretvorbu energije, dok se elektromehanički moment generatora može postavljati prema preglednoj tablici (engl. *Look-up Table*) u ovisnosti o brzini vrtnje. S druge strane, za vrijeme jakih vjetrova, snaga vjetra je prevelika i potrebno je ograničiti energiju koja se preuzima iz vjetra. To se postiže zakretanjem lopatica vjetroatregata, čime se smanjuje aerodinamička učinkovitost pretvorbe energije vjetra u mehaničku energiju. Cilj sustava upravljanja u ovom radnom području jest održati nazivnu brzinu vrtnje, a time i snagu proizvedene električne energije na nazivnom iznosu. Standardno rješenje koje se koristi u praksi je kaskadna struktura upravljanja: vanjska petlja regulira brzinu vrtnje vjetroatregata te postavlja referentnu vrijednost kuta zakreta lopatica koju unutarnja petlja mora odraditi. Regulatori koji se najčešće koriste u praksi za upravljanje vjetroatregatima su PI(D) tipa, a zbog izražene nelinearnosti, često se koristi adaptacija parametara regulatora (engl. *Gain Scheduling*) [7].

Realizaciju upravljačkog algoritma u LabVIEW-u moguće je raščlaniti na dvije cjeline, slično kao što je



Sl. 3. Grafičko sučelje čovjek-stroj.

upravljačka oprema podijeljena na dvije cjeline. Prva cjelina odnosi se na cRIO, koji se nalazi u rotoru vjetroagregata. Unutar cRIO uređaja izvršava se program neovisno o programu na osobnom računalu. Taj program u beskonačnoj petlji očitava vrijednosti otpora koji odgovaraju vrijednosti kuta zakreta lopatica i lokalno pohranjuje ih u odgovarajuće varijable.

Druga cjelina se odnosi na upravljački program koji se izvršava na osobnom računalu. Prilikom pokretanja ovoga programa, najprije se odvija faza inicijalizacije ulazno/izlaznih jedinica. To uključuje ostvarivanje bežične veze s cRIO uređajem smještenim u rotoru vjetroagregata te definiranje ulaznih i izlaznih kanala koji će se koristiti u programu, odnosno njihovo povezivanje s odgovarajućim modulima u PXI-1033 kućištu.

Nakon faze inicijalizacije, program započinje komunikaciju s procesom. U tu svrhu napravljene su petlje s točno određenim vremenom ponavljanja i definiranim prioritetom. Na taj način moguće je odvojiti petlje koje obavljaju vremenski kritične zadatke od petlji koje služe npr. za vizualizaciju stanja u kojem se nalazi vjetroagregat. Unutar upravljačke petlje, najprije se odvija čitanje trenutnih procesnih veličina poput brzine vrtnje vjetroagregata i elektromehaničkog momenta generatora, koje se dovode na modul PXI-6284 u obliku naponskih signala raspona ± 10 V. U isto vrijeme, bežično se komunicira s cRIO uređajem te očitava zadnje mjerenje kuta zakreta lopatica. Očitani podaci zatim se prosljeđuju jezgri upravljačkog algoritma, gdje se proračunavaju referentne vrijednosti momenta generatora i kuta zakreta lopatica. Referentna vrijednost momenta generatora se u obliku naponskog signala (opseg ± 10 V) preko modula PXI-6704 prosljeđuje generatorskom frekvencijskom pretvaraču. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem s

ciljem ostvarivanja zadanog momenta generatora nije u obuhvaćeno ovim radom.

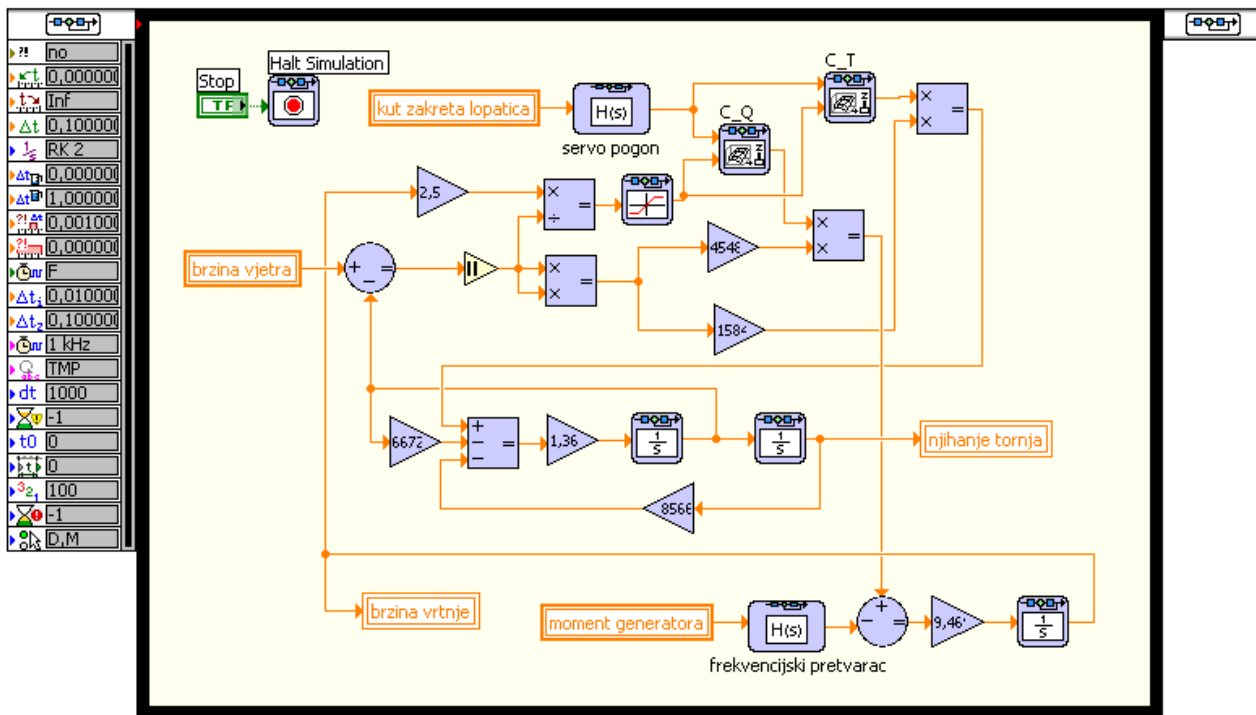
S druge strane, dobivena referentna vrijednost kuta zakreta lopatica prosljeđuje se podređenoj regulacijskoj petlji za zakret lopatica. Zadaća podređene petlje je da na temelju mjerenja kuta zakreta lopatica određuje trenutke propaljšivanja čopera preko kojih su spojena tri istosmjerna motora za zakret lopatica. Pritom treba napomenuti da je svaku lopaticu moguće zakretati neovisno o drugim lopaticama. PWM signali realiziraju se preko modula PXI-6248 uz frekvenciju 2 kHz te mogućnost mijenjanja popunjenosti signala u koracima od 0.1%.

Gore opisani algoritam ponavlja se sve dok korisnik ne pritisne tipku za zaustavljanje programa. Tada se isključuje ventilator, zaustavlja se zakretanje lopatica te se moment generatora spušta na 0 Nm. Nakon što je cijeli sustav zaustavljen, prekida se komunikacija računala s procesom i program se zaustavlja.

Uz opisani algoritamski dio, program sadrži i grafičko sučelje čovjek-stroj na kojem su vizualizirane važnije veličine iz procesa te koje omogućava interakciju s procesom. Izgled navedenog sučelja prikazan je na Sl. 3.

V. OPIS HIL SIMULACIJSKE STRUKTURE

U Laboratoriju za obnovljive izvore energije, HIL simulacijsku strukturu se koristi prvenstveno za ispitivanje upravljačkih algoritama. U prethodnom poglavlju opisan je klasični algoritam upravljanja vjetroagregatom, ali modifikacijom LabVIEW programa, moguće je realizirati bilo koji napredni algoritam upravljanja. Pritom se dijelovi programa za komunikaciju s procesom ne moraju mijenjati, već se modificira samo dio koji se odnosi na upravljački algoritam. Na taj način je postignuta



Sl. 4. Simulator laboratorijskog vjetroagregata u LabVIEW-u.

fleksibilnost jer je uz manje programske preinake moguće testirati vrlo različite algoritme upravljanja.

Prije uključivanja laboratorijskog vjetroagregata u HIL simulacijsku strukturu, potrebno se osigurati da nisu napravljene greške u upravljačkom algoritmu. To se prvenstveno odnosi na greške u komunikaciji s procesom, ali treba ispitati i da li je moguće dovesti proces u nedozvoljeno stanje poput prekomjerne brzine vrtnje vjetroagregata. U tu svrhu u LabVIEW-u je razvijen simulator vjetroagregata. Za simulator vjetroagregata moguće je koristiti isto računalo kao za upravljački algoritam ili se može koristiti zasebno računalo.

A. Simulator vjetroagregata

Simulator vjetroagregata temelji se na pojednostavljenom matematičkom modelu vjetroagregata. Naime, detaljni modeli vjetroagregata temelje se na složenim implicitnim jednadžbama [8] koje znatno usložnjavaju i usporavaju proračun. Pošto se simulator koristi prvenstveno za grubu ocjenu upravljačkog algoritma te za traženje eventualnih grešaka u algoritmu, dok će se laboratorijski vjetroagregat koristiti za detaljno ispitivanje vladanja sustava, korištenje pojednostavljenog matematičkog modela je posve opravdano.

Uz zanemareno trenje, dinamiku rotora moguće je opisati jednadžbom:

$$J_t \dot{\omega} = M_a - M_g, \quad (1)$$

gdje je J_t moment inercije turbine, ω brzina vrtnje turbine, M_g elektromehanički moment generatora te M_a aerodinamički moment koji nastaje pod djelovanjem vjetra. Prilikom modeliranja vjetroagregata, nužno je uzeti u obzir elastičnost tornja. Pošto je prva vlastita frekvencija tornja najizraženija, dinamika tornja može se pojednostavljeno opisati sustavom drugog reda:

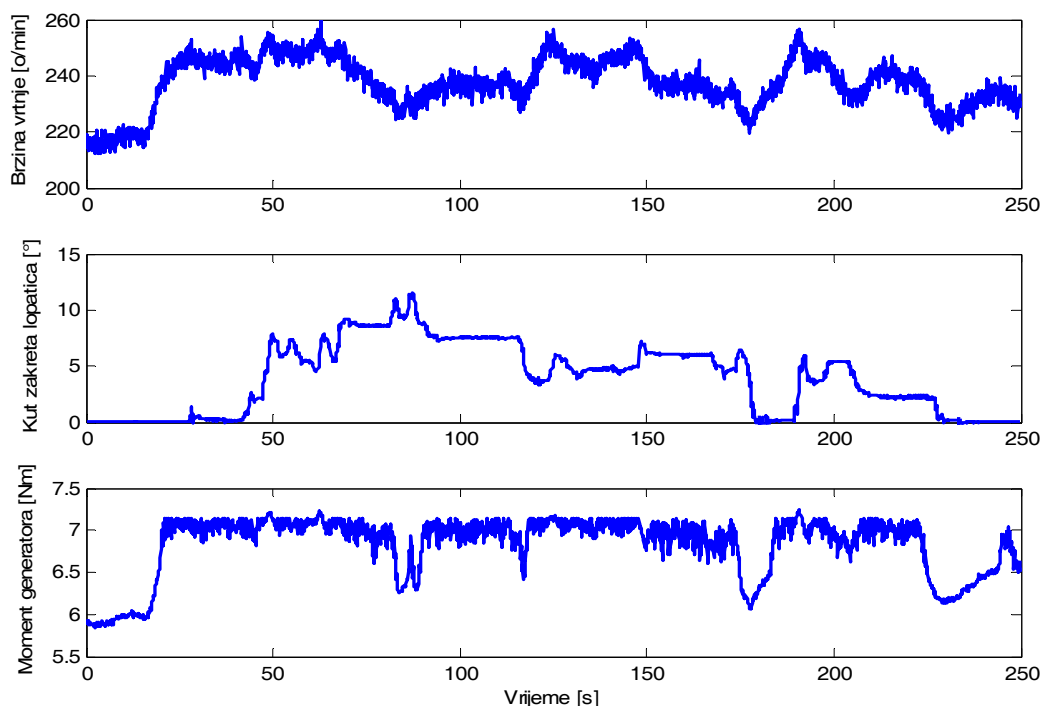
$$M\ddot{x}_t + D\dot{x}_t + Cx_t = F_p, \quad (2)$$

gdje je x_t pomak vrha tornja, aerodinamička F_p sila potiska na rotor te M , D i C modalna masa, konstanta prigušenja te konstanta krutosti tornja. Aerodinamički moment i sila potiska u relacijama (1) i (2) ovise o brzini vjetra, brzini vrtnje te kutu zakreta lopatica vjetroagregata, a izračunavaju se preko pojednostavljenih nelinearnih relacija i preglednih tablica. Pritom je važno ispravno modelirati aerodinamička svojstva lopatica vjetroagregata. Realizacija simulatora laboratorijskog vjetroagregata u LabVIEW-u zasnovanom na opisanom matematičkom modelu, prikazana je na Sl. 4. Iako je kod klasičnih upravljačkih algoritama kao izlaz simulatora dovoljno koristiti brzinu vrtnje vjetroagregata, uz opisani simulator moguće je koristiti i druge izlaze, poput informacije o nihanju tornja ili aerodinamičkom momentu turbine. To omogućava primjenu simulatora i za testiranje naprednih algoritama upravljanja.

Da bi se opisani simulator mogao koristiti unutar HIL simulacijske strukture, potrebno je omogućiti povezivanje simulatora s upravljačkim algoritmom. Naime, ulazi u simulator poput referentnog elektromehaničkog momenta generatora ili kuta zakreta lopatica očitavaju se s ulaznih modula, dok se izlazi iz simulatora šalju na analogne izlazne module. Tada je moguće fizički povezati simulator vjetroagregata s upravljačkim algoritmom opisanim u prethodnom poglavlju. Na taj način može se testirati komunikacija između upravljačkog algoritma i procesa te se mogu jednostavno primijetiti greške u programu koje bi vjetroagregat mogle dovesti u nedopušteno stanje [9].

B. Korištenje laboratorijskog vjetroagregata

Pošto se simulator vjetroagregata opisan u prethodnom potpoglavlju temelji na pojednostavljenom matematičkom modelu vjetroagregata, nije ga moguće koristiti za detaljno ispitivanje vladanja vjetroagregata uz različite algoritme upravljanja. Stoga je upravljački algoritam, nakon provjere na simulatoru vjetroagregata, potrebno ispitati i na laboratorijskom vjetroagregatu.



Sl. 5. Odzivi laboratorijskog vjetroagregata uz promjenjivu brzinu vjetra iznad nazivnog iznosa.

Uz upravljački program opisan u prethodnom poglavlju, laboratorijski vjetroagregat se može uključiti u HIL simulacijsku strukturu na jednostavan način. Naime, upravljački program već ima realiziran prihvata mjernih signala i generiranje upravljačkih veličina pa ga ne treba dodatno prilagođavati. Zbog načina na koji je laboratorijski vjetroagregat projektiran, rezultati dobiveni na opisanoj HIL strukturi usporedivi su s vladanjem vjetroagregata iz megavatne klase. To je razlog što HIL struktura iz ovog rada predstavlja dobru podlogu za razvijanje novih sustava upravljanja vjetroagregatima.

Na Sl. 5. prikazan je primjer odziva laboratorijskog vjetroagregata na promjenjivu brzinu vjetra iznad nazivnog iznosa. Primjećuje se da sustav upravljanja reagira zakretanjem lopatica i promjenom elektromehaničkog momenta generatora s ciljem održavanja brzine vrtinje na nazivnom iznosu. Pošto realizirani klasični sustav upravljanja zadovoljavajuće funkcionira, može se zaključiti da opisana HIL struktura dobro realizirana te da ju je moguće koristiti i za ispitivanje naprednih algoritama upravljanja.

VI. ZAKLJUČAK

Iscrpno je opisan laboratorijski vjetroagregat smješten u Laboratoriju za obnovljive izvore energije, FER Zagreb. Opisano je sklopovlje tvrtke National Instruments koje je korišteno u HIL simulacijskoj strukturi kao i realizacija upravljačkog programa u programskom alatu LabVIEW. Naposljetku je opisana HIL struktura upravljanja brzinom vrtinje vjetroagregata uz korištenje simulatora te uz korištenje laboratorijskog vjetroagregata. Budući da je laboratorijski vjetroagregat projektiran uz zadržavanje svih bitnih svojstva vjetroagregata iz megavatne klase, realizirana HIL simulacijska struktura predstavlja dobru podlogu za ispitivanje i provjeru naprednih sustava upravljanja vjetroagregatima.

ZAHVALA

Ovaj rad je podržan NZZ projektom „Višekriterijsko upravljanje vjetroagregatom“ (voditelj: prof. dr. sc. N. Perić) i projektom 036-0361621-3012 MZOŠ Republike Hrvatske (voditelj: prof. dr. sc. N. Perić).

LITERATURA

- [1] A. Zervos, C. Kjaer, S. Azau, J. Scola, J. Quesada, R. Bianchin, “Pure Power: Wind energy targets for 2020 and 2030”, European Wind Energy Association, 2009, [online: <http://www.ewea.org>].
- [2] M. Schlager, *Hardware-in-the-Loop Simulation*, VDM Verlag Dr. Mueller, 2008.
- [3] G. Johnson, R. Jennings, *LabVIEW Graphical Programming*, 4th Edn., McGraw-Hill, New York, 2006.
- [4] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, Berlin, 2006.
- [5] G. Lalić, *Vjetroturbina za pogon električnog generatora*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [6] V. Petrović, *Smanjenje opterećenja konstrukcije i zamora materijala vjetroagregata primjenom naprednih metoda upravljanja*, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2008.
- [7] M. Jelavić, *Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjenja dinamičkih opterećenja*, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.
- [8] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] N. Hure, *Ispitivanje upravljanja brzinom vrtinje vjetroagregata iznad nazivne brzine vrtinje pomoću HIL strukture*, završni rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.