

Vedran Bakarić
Brodarski institut d.o.o.
vedran.bakaric@hrbi.hr

Ivan Mišković
Brodarski institut d.o.o.
ivan.miskovic@hrbi.hr

Krunoslav Horvat
Brodarski institut d.o.o.
kruno@hrbi.hr

Davor Bojić
HEP Proizvodnja d.o.o.
davor.bojic@hep.hr

Držislav Šikić
HEP Proizvodnja d.o.o.
drzislav.sikic@hep.hr

Milan Stojsavljević
Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.
milan.stojsavljevic@ie-zagreb.hr

HIL ISPITIVANJA SUSTAVA TURBINSKE REGULACIJE HE LEŠĆE

SAŽETAK

Hardware-in-the-loop (HIL) ispitivanje rada sustava turbinske regulacije (STR) napravljenih za sva tri agregata hidroelektrane Lešće obavljeno je u prostoru Brodarskog instituta u sklopu tvorničkih ispitivanja STR. Ovim ispitivanjima bilo je moguće ispitati rad hardvera i softvera sustava kao cjeline prilikom različitih karakterističnih događaja i pod raznovrsnim režimima rada, a sve pod simuliranim laboratorijskim uvjetima. Ispitivanju su podvrgnuti ormar turbinske regulacije, ormar pomoćnih pogona i hidraulički agregat, dok su preostali elementi STR i njegove okoline simulirani pomoću laboratorijske opreme i računalnog simulacijskog modela s izvedbom u stvarnom vremenu (*real-time*) na zasebnom procesoru. Prilikom ispitivanja regulacije mogla se pratiti ostvarena kvaliteta regulacije i grubo podesiti podesive parametre regulatora. Ispitivanja su potvrdila valjanost izvedene koncepcije i realizacije STR, kao i ukazala na neke manje probleme koji su potom mogli biti otklonjeni, te time ubrzala kasnije puštanje u rad STR na elektrani.

Ključne riječi: Hardware-in-the-loop ispitivanje, sustav turbinske regulacije, simulacijski model

HIL TESTINGS OF TURBINE GOVERNING SYSTEM OF HPP LEŠĆE

SUMMARY

Hardware-in-the-loop (HIL) testings of turbine governing systems (TGS) made for all three units of hydro power plant Lešće were conducted at the Brodarski Institute as a part of the factory acceptance tests of TGS. These testings enabled to check operation of hardware and software of the system as the whole during various characteristic events and under various operating modes, all within simulated laboratory environment. Turbine governor cubicle, cubicle of auxiliary drives and hydraulic power unit were subjected to the testings, while remaining components of TGS and its environment were simulated using laboratory equipment and computer-based simulation model with real-time implementation on a dedicated processor. During testings it was possible to evaluate achieved governing quality and make rough adjustment of variable controller parameters. The testings validated design and implementation of TGS, as well as showed some minor problems which could be eliminated thereafter, and thus quickened later TGS commissioning at the power plant.

Key words: Hardware-in-the-loop testing, turbine governing system, simulation model

1. UVOD

Hidroelektrana Lešće građena je na rijeci Gojačkoj Dobri u slivu rijeke Kupe, nizvodno od hidroelektrane Gojak [1]. Gradnja elektrane trajala je od 2005. do 2010. godine. Elektrana je akumulacijsko-protočnog tipa, uz akumulaciju duljine 12,6 km ostvarenu pregradnjom prirodnog kanjona kojeg je rijeka usjekla u kršku zaravan. Elektrana ima dva glavna agregata snage 21 MW svaki, te agregat biološkog minimuma snage 1 MW. Sustav upravljanja elektranom je projektiran kao visoko automatiziran, bez stalne ljudske posade i uz daljinsko upravljanje iz kontrolnog centra HE Gojak. Dodatni tehnički podaci o elektrani i njezinim agregatima navedeni su u tablici I (dodatak).

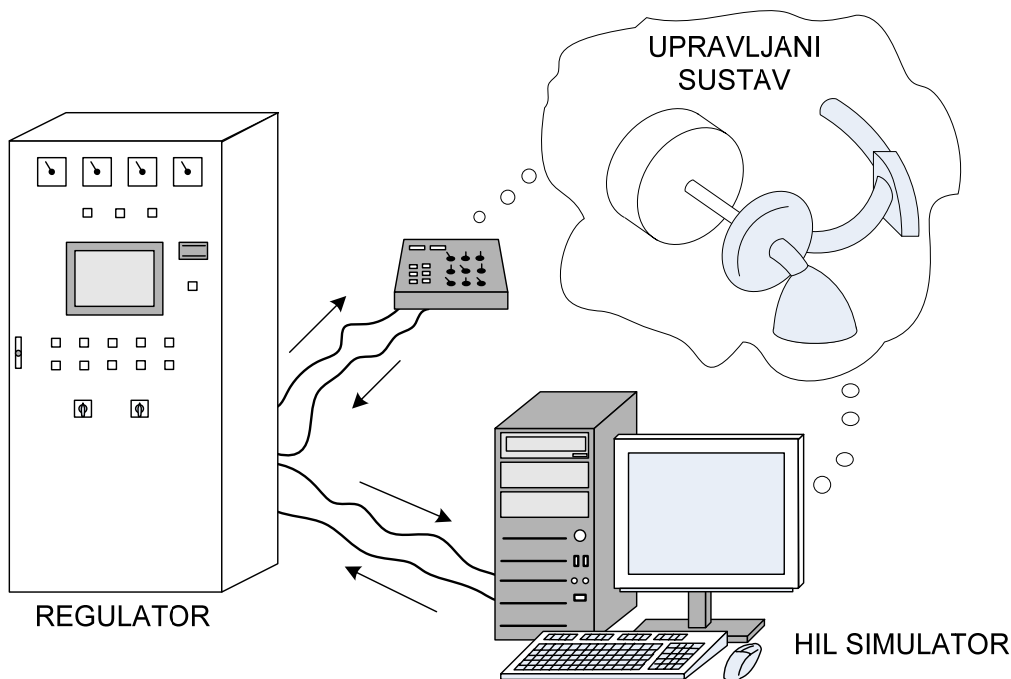
Brodarski institut je projektirao, izradio i pustio u rad sustav turbinske regulacije (STR) za sva tri agregata elektrane [2], [3]. Tvornička ispitivanja STR, koja su predmet ovog članka, obavljena su u lipnju 2009. godine. Glavni dio tvorničkih ispitivanja izvršen je pomoću HIL (hardware-in-the-loop) simulacija. Nakon tvorničkih ispitivanja uslijedila je isporuka opreme na elektranu, ugradnja i primopredaja STR u ljeto 2010. godine.

U ovom članku je, nakon uvoda u problematiku HIL simulacija, predstavljen simulacijski model razvijen za potrebe tvorničkih ispitivanja STR za HE Lešće. Potom je opisan način provedbe tih ispitivanja. Prikazani su karakteristični odzivi STR dobiveni pomoću simulatora. U zaključku su ponovljena najvažnija zapažanja vezana uz ispitivanja, te dan pregled simulacijskih ispitivanja koja su u Brodarskom institutu provedena u međuvremenu za druge hidroelektrane.

2. ZNAČENJE HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULACIJA

Hardware-in-the-loop (HIL) način ispitivanja regulacijskog sustava izvodi se tako da se ispitivani regulacijski sustav poveže sa simulatorom reguliranog sustava i njegove okoline [4]. Za razliku od klasične simulacije, kod ovih ispitivanja regulacijski sustav nije dio simulatora, već je izveden na istoj hardverskoj platformi na kojoj će kasnije obavljati svoju funkciju u stvarnom svijetu. Simulacija se izvodi u stvarnom vremenu, a povezana je s regulacijskim sustavom istim signalima koji će kasnije povezivati regulacijski sustav sa stvarnim svijetom – sensorima i upravljačkim organima na upravljanoj sustavu.

Način provedbe HIL simulacije za slučaj sustava turbinske regulacije prikazan je na slici 1. Ispitivani regulator izveden je preko PLC-a (*programmable logic controller*) i ugrađen u pripadni ormar. HIL simulator se povezuje s regulatorom i predstavlja upravljani sustav (turbinu), njegovu okolinu, kao i sve one dijelove STR koji nisu bili dostupni u vrijeme izvođenja simulacijskih ispitivanja. Najvažniji dio simulatora izveden je kao računalna aplikacija s izvedbom u stvarnom vremenu, povezana s ormarom turbinske regulacije preko prikladnog sučelja. Dodatni vanjski signali potrebni za željeni opseg ispitivanja postavljaju se preko simulacijske ploče s potencimetrima, prekidačima i žaruljicama.



Slika 1. Način provedbe HIL ispitivanja sustava turbinske regulacije

Osnovna prednost ovakve simulacije je mogućnost ispitivanja rada potpunog, završenog regulacijskog sustava bez stvarnog pokusa na upravljanoj uređaju. Pritom je važno naglasiti da se regulacijski sustav ispituje kao već završena cjelina, tako da je moguće uočiti i na vrijeme ispraviti većinu grešaka i nedostataka koji su se u njemu pojavili. Na taj način postiže se bitno smanjenje broja i ukupnog trajanja pokusa potrebnih pri konačnom puštanju upravljanog sustava u rad (prema [4], moguće je obaviti i do 95% potrebnih testova bez rada na stvarnom sustavu). HIL ispitivanja nezamjenjiva su u simuliranju uvjeta kakvi se javljaju pri teško ostvarivim, nepoželjnim ili potencijalno opasnim radnim režimima i situacijama bez izazivanja opasnosti, moguće štete ili velikih troškova koji bi bili potrebni da se to ispitivanje mora obaviti na stvarnom sustavu. Nadalje, ispitivanja se mogu provesti paralelno razvoju upravljanog uređaja, tako da sa ispitivanjima ne treba čekati na završetak izrade upravljanog sustava ili njegova prototipa. Zahvaljujući tome značajno se ubrzava razvojni ciklus, što u današnje vrijeme tijesnih rokova za velike razvojne projekte ima golemu financijsku važnost. Također, budući da se u tipičnoj HIL simulaciji regulacijski sustav ispituje s već završenim sučeljem prema ljudskom operateru, dotjerivanje i optimizacija operaterskog sučelja provode se u fazi HIL ispitivanja, kada je to mnogo jednostavnije obaviti nego prilikom kasnijeg puštanja u rad.

HIL simulacije najviše dolaze do izražaja pri razvoju složenih sustava nadzora i upravljanja namijenjenih složenim, skupim i osjetljivim upravljanim sustavima. Ovaj način ispitivanja tradicionalno se koristi pri razvoju letjelica i brodova i njihovih podsustava, kao i raznovrsnih obrambenih sustava. Njegova najmasovnija komercijalna upotreba danas je, međutim, u području automobilske industrije. HIL simulacije su povrh toga rasprostranjene i u drugim područjima, osobito robotici i energetici, uključujući turbinsku regulaciju.

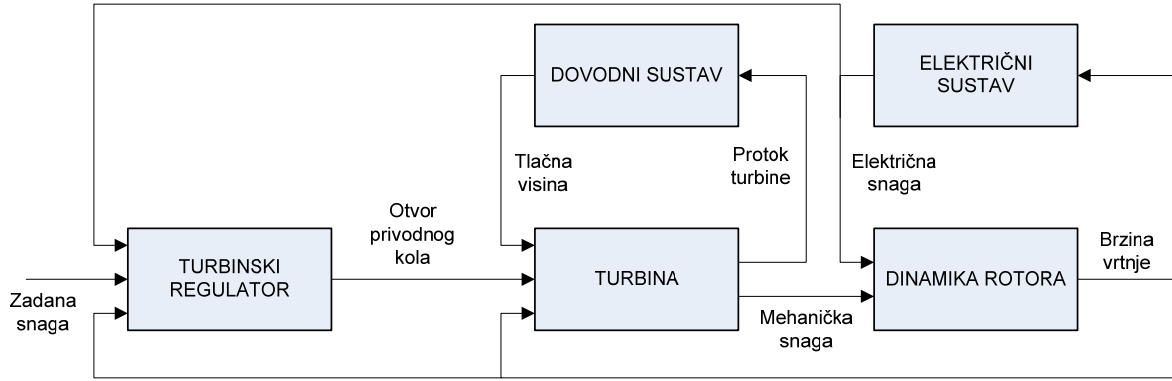
Ovisno o predviđenom programu ispitivanja i sustavu koji treba ispitati, HIL simulator može biti izveden u različitim stupnjevima složenosti, uz veću ili manju vjernost simuliranim sustavima i procesima. Najjednostavnija ispitivanja ovakve vrste tradicionalno se izvode pomoću simulacijskih ploča s prekidačima, potenciometrima i žaruljicama pomoću kojih je moguće provjeriti povezivanje ulaznih i izlaznih signala regulatora, reakciju na alarmna stanja i jednostavne regulacijske petlje. Suvremeno HIL ispitivanje, međutim, podrazumijeva upotrebu simulacijskog modela izvedenog na digitalnom procesoru kao središnjeg elementa simulatora, što je mnogo fleksibilnije i moćnije rješenje od onih koja ne uključuju računalni model. Budući da regulacijski sustavi postaju sve složeniji, a zahtjevi na kvalitetu upravljanja sve stroži, tražena složenost HIL simulatora i njegova vjernost ispitivanim procesima sve više raste. Za najkritičnije aplikacije, kao što je razvoj zrakoplova i njihovih motora, HIL simulatori mogu biti vrlo složeni i skupi; za manje kritične probleme jednostavniji, manje savršen simulator može biti posve zadovoljavajući. Pritom se već vrlo kvalitetan simulator danas može sastaviti od komercijalno dostupnog hardvera uvezanog s pripadnim softverskim paketima. Najzahtjevniji dio organizacije HIL ispitivanja čini razvoj i potonje podešavanje simulacijskog matematičkog modela simuliranog sustava.

U svim ovim slučajevima vrijedi pravilo da je HIL simulator višestruko jeftiniji od prototipa upravljanog sustava, kao i da se isti simulator tek uz manje prilagodbe može koristiti za provedbu ispitivanja različitih regulacijskih sustava iz iste familije.

3. MODELIRANJE SUSTAVA TURBINSKE REGULACIJE

Gledano sa stanovišta matematičkog modeliranja, vodna turbina je izrazito nelinearni uređaj sa složenim međuovisnostima između pojedinih veličina. Jednostavni model koji bi pokrio sva radna područja turbine ne postoji. U praksi se najčešće koriste pojednostavljeni nelinearni modeli koji dovoljno dobro opisuju rad turbine u području redovnog rada na brzini vrtnje blizu nazivne [5] – [7]. Ove modele moguće je linearizirati oko promatrane radne točke za potrebe pobliže analize. Za HIL ispitivanja, međutim, simulacija mora pokriti i pokretanje, zaustavljanje, sinkronizaciju i velike poremećaje u radu turbine, te postići gladak prijelaz između svih tih područja i područja redovnog rada turbine. Poseban problem pritom čini nalaženje i podešavanje parametara modela, jer je najčešće za vrijednosti nekih važnih parametara dostupna samo bolja ili lošija procjena.

Osnovni izgled modela STR Francisove turbine prikazan je na slici 2 [5]. Turbinski regulator se sastoji od elektroničkog i hidrauličnog dijela, a njegova je zadaća da preko otvora privodnog kola y_P regulira protok kroz turbinu q_T . Pod otvorom privodnog kola y_P se ovdje misli na položaj klipa servomotora, koji direktnom mehaničkom vezom određuje položaj lopatica statora turbine. S protokom se mijenja i mehanička snaga turbine P_m . Model dovodnog sustava spregnut je s modelom turbine, jer je tlačna visina h_T (neto pad, mjera potencijalne energije vode dostupne za pretvorbu u mehaničku energiju na turbini) spregnuta s protokom. Brzina vrtnje agregata w_N je diktirana frekvencijom električne mreže (mrežni rad) ili se mijenja ovisno o razlici mehaničke i električne snage agregata (otočni rad), dok je električna snaga P_e određena brzinom vrtnje agregata i njegovom vezom s električnom mrežom.



Slika 2. Pojednostavljena blok-shema modela sustava turbinske regulacije

Matematički model same turbine opisuju dvije složene nelinearne funkcije, karakteristika protoka i karakteristika snage ili momenta (često zadana preko korisnosti):

$$\begin{aligned} q_T &= f_q(y_P, h_T, w_N) \\ P_m &= f_P(y_P, h_T, w_N) \end{aligned} \quad (1)$$

Najprecizniji postojeći prikaz relacija (1) daje školjkasti dijagram, prikaz ovisnosti otvora i korisnosti turbine o bezdimenzionalnim veličinama protoka i tlačne visine kao površina u topografskom prikazu funkcije dvije varijable [5]. Školjkasti dijagram je, međutim, sastavljen za nazivnu brzinu vrtnje turbine i njegova izravna primjena nije moguća za brzine vrtnje manje od oko 90% nazivne. Manje precizan IEEE model [6], zapisan za rad s normiranim varijablama, karakteristike (1) aproksimira kao

$$\begin{aligned} q_T &= y_P \sqrt{h_T} \\ P_m &= A_T h_T (q_T - q_{NL} w_N) - D_a y_P (w_N - w_B) \end{aligned} \quad (2)$$

Ovdje su podesivi parametri modela pojačanje turbine A_T , protok praznog hoda q_{NL} i koeficijent prigušenja turbine D_a , dok je w_B nominalna brzina vrtnje agregata. Ovaj model također nije valjan za male brzine vrtnje. Za potrebe modeliranja kočenja agregata stoga se uvodi dodatna modifikacija pojačanja turbine A_T za područje malih otvora:

$$A_T = \begin{cases} A_{T0} & , \quad y_P > y_{P0} \\ A_{T0} \frac{y_P}{y_{P0}} + \frac{D_{Pw}}{h_S q_{NL}} \left(1 - \frac{y_P}{y_{P0}}\right) & , \quad 0 \leq y_P \leq y_{PT} \end{cases} \quad (3)$$

Ovdje je A_{T0} vrijednost parametra A_T podešena za veće otvore turbine, y_{P0} granična vrijednost otvora za djelovanje dodatnog prigušenja, D_{Pw} koeficijent kočenja turbine i h_S statička tlačna visina (koja je jednaka neto tlačnoj visini h_T uz zatvoreno privodno kolo). Uz navedenu modifikaciju i dodatno filtriranje signala otvora privodnog kola, IEEE model turbine parametara podešenih da se ostvari čim bolje slaganje sa školjkastim dijagramom dao je zadovoljavajuće ponašanje i na kraju bio korišten za HIL simulacije.

Općenito gledano, dovodni sustav se modelira diferencijalnim jednadžbama s raspodijeljenim parametrima. Međutim, za promatrani problem zadovoljavajući stupanj preciznosti dobiva se uz model s dvije obične diferencijalne jednadžbe prvog reda uz uvođenje jedne dodatne varijable, protoka na početku dovodnog cjevovoda q_D :

$$\begin{aligned} \frac{dh_T}{dt} &= \kappa(q_D - q_T) \\ \frac{dq_D}{dt} &= \frac{1}{T_w}(h_S - h_T - h_G) \end{aligned} \quad (4)$$

Parametri modela, ovisni o geometrijskim odnosima i konstrukciji dovodnog sustava, jesu parametar širenja tlačnog vala κ i vremenska konstanta ubrzanja mase vode u sustavu T_w . Statička tlačna visina vode h_s ovisi o razini vode u akumulaciji i promatra se kao konstanta. Sveukupni tlačni gubitci u dovodnom sustavu predstavljeni su s h_G . Osnovna relacija za gubitke pretpostavlja ovisnost gubitaka o kvadratu protoka uz koeficijent gubitaka k_{GD} , $h_G = k_{GD} q_T |q_T|$. Za male vrijednosti protoka potrebno je uvesti dodatno prigušenje, koje treba pažljivo podesiti.

Pri modeliranju ponašanja brzine vrtnje agregata moguća su dva slučaja. Ako je agregat spojen na punu električnu mrežu, tada se može pretpostaviti da je utjecaj agregata na frekvenciju mreže zanemariv i da brzinu vrtnje određuje frekvencija mreže (hipoteza beskonačne električne mreže). Označimo li s f_N frekvenciju mreže preračunatu na ekvivalentnu brzinu vrtnje agregata, u tom slučaju vrijedi jednostavno $w_N = f_N$. S druge strane, ako je agregat jedini proizvođač spojen na električnu mrežu, tada vrijedi relacija

$$\frac{dw_N}{dt} = \frac{1}{T_m} \frac{P_m - P_e}{w_N} \quad (5)$$

Ovdje je T_m mehanička vremenska konstanta agregata, određena njegovim momentom inercije. Jednadžba (5) vrijedi i za slučaj kada je agregat odspojen s mreže uz uvrštenje $P_e = 0$; kočenje agregata se tada postiže uz $P_m < 0$. Za male brzine vrtnje w_N nazivnik jednadžbe (5) treba ograničiti na neki $w_\varepsilon > 0$, kako bi se izbjeglo dijeljenje s nulom.

Električna snaga agregata se modelira u skladu s radnim režimom. Ako je generatorski prekidač isključen, agregat je odspojen s mreže i električna snaga jednaka je nuli ($P_e = 0$). Ako je agregat u otočnom režimu rada, električna snaga ovisi o snazi vanjskog tereta spojenog na agregat P_L uz uračunat utjecaj prigušenja (samoregulacije) mreže

$$P_e = P_L + D_p (w_N - f_N) \quad (6)$$

Ovdje je D_p koeficijent prigušenja električne mreže. Pritom se iznos snage tereta za vrijeme simulacije postavlja i potom mijenja po volji. I na kraju, pri radu agregata na beskonačnoj mreži, električna snaga agregata se zasniva na mehaničkoj snazi agregata P_m . Uz pretpostavku da brzina vrtnje agregata ne odstupa od vrijednosti diktirane frekvencijom mreže ($w_N = f_N$) i da su gubici pretvorbe mehaničke snage u električnu uračunati u ranijem koraku proračuna, može se pretpostaviti da je električna snaga jednaka mehaničkoj, $P_e = P_m$.

Model turbine i okolnih sustava namijenjen za HIL ispitivanja HE Lešće zasniva se na jednadžbama (2) – (6), uz dodatna filtriranja i skaliranja signala. Parametri modela navedeni su u tablici I. U skladu s metodologijom HIL ispitivanja, ovaj model namijenjen je radu u stvarnom vremenu i povezivanju s vanjskim regulatorom. Za potrebe analize STR, pored spomenutog modela sastavljen je i potpuni model STR koji u sebe uključuje turbinski regulator. Ovaj model se izvodi kao nezavisna računalna simulacija, a namijenjen je analizi ponašanja STR i preliminarnom podešavanju regulatora.

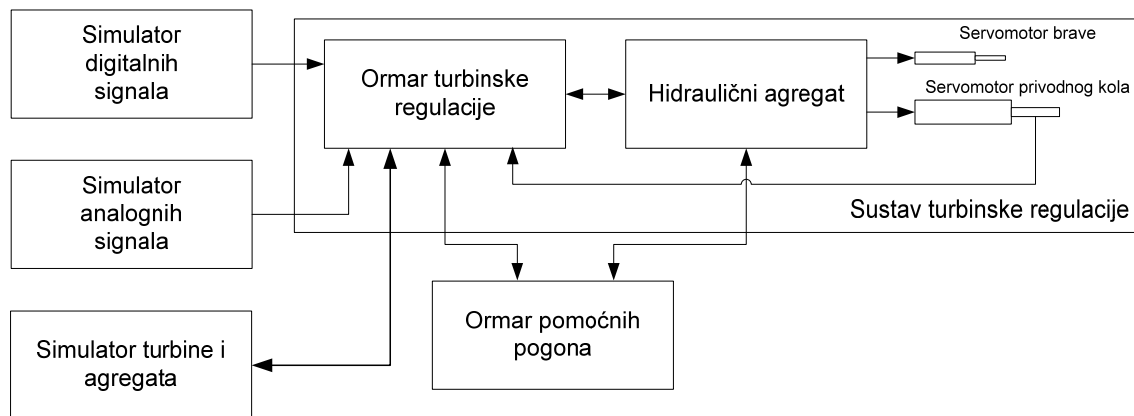
4. PROVEDBA ISPITIVANJA

Blok-shema ispitivanja STR HE Lešće obavljenih u Brodarskom institutu, Zagreb, od 16. do 19. lipnja 2009. godine prikazana je na slici 3. Predmet ispitivanja bili su ormar turbinske regulacije s pripadnim turbinskim regulatorom i ormar pomoćnih pogona za sva tri agregata HE Lešće (slika 4). Ispravnost ožičenja ormara provjerena je prije početka ispitivanja. Hidraulični agregati, koji su već bili prošli ispitivanja kod svog proizvođača (Dorninger, Linz, Austrija), bili su također uključeni u ispitivani sustav kako bi se ostvarila HIL simulacija najvećeg dijela STR kao cjeline. Servomotor privodnog kola pri ispitivanjima je bio izveden kao hidraulični cilindar postavljen na hidrauličnom ispitnom stolu. Jezgru HIL simulatora činio je simulator turbine i agregata, pobliže opisan u nastavku (slika 5). Simulator dodatnih digitalnih i analognih signala izveden je preko simulacijskih ploča s prekidačima i potenciometrima; pomoću njega su ručno postavljani signali mjerenja i alarma koji dolaze s vanjskih senzora.

Blok shema simulatora turbine i agregata prikazana je na slici 6. Simulacijski model, koji opisuje turbinu s dovodnim sustavom i agregat s utjecajem električne mreže (slika 7), sastavljen je u programskom okružju Matlab/Simulink (*The MathWorks, Inc*). Pripremljeni model se potom kompajlira u kod za rad u stvarnom vremenu (*real-time*, RT), prilagođen RT procesoru dSPACE-ove (*dSPACE GmbH*) kartice DS 1104 *R&D controller board*. Kartica je ugrađena u PC računalo na kojem je instaliran i programski paket Matlab/Simulink. Kartica koristi vanjske analogne i digitalne ulazne i izlazne signale kao vezu s ispitivanim objektom (ormarom turbinske regulacije); signalni vodovi se do kartice dovode preko

dSPACE-ove konektorske ploče (slika 5). Pritom je potrebna prilagodba signala, budući da kartica DS 1104 koristi analogne naponske signale raspona ± 10 V i logičke signale 0 – 5 V, što nisu razine signala koje se koriste u ormaru turbinske regulacije. Za ova ispitivanja vezu između turbinskog regulatora i simulatora čine četiri signala (slika 6, lijevo). Brzinu i snagu turbine računa simulator i prosljeđuje ih regulatoru. Otvor privodnog kola se ostvaruje na hidrauličnom cilindru, mjeri, dovodi regulatoru i preko njega prosljeđuje simulatoru. Položaj generatorskog prekidača je vanjski signal potreban i regulatoru i simulatoru; on se ručno postavlja u sklopu simulatora i prosljeđuje regulatoru kao logički signal.

Simulacijom se potom upravlja iz dSPACE-ovog softvera *ControlDesk* na baznom PC računalu, koji također pruža korisničko sučelje preko kojeg se može pratiti rad simulatora i zadavati dodatne parametre, logičke i numeričke (slika 8; slika 6, gore). Istovremeno, rad regulacijskog sustava se prati preko komunikacijskog adaptera spojenog na PLC regulatora i softvera za obradu i pohranjivanje signala *ServiceLab*. Promatrani signali se preko *ServiceLab*-a snimaju na tvrdi disk računala za potonju analizu i prikaz u izvještaju s ispitivanja (slika 9 – 10).



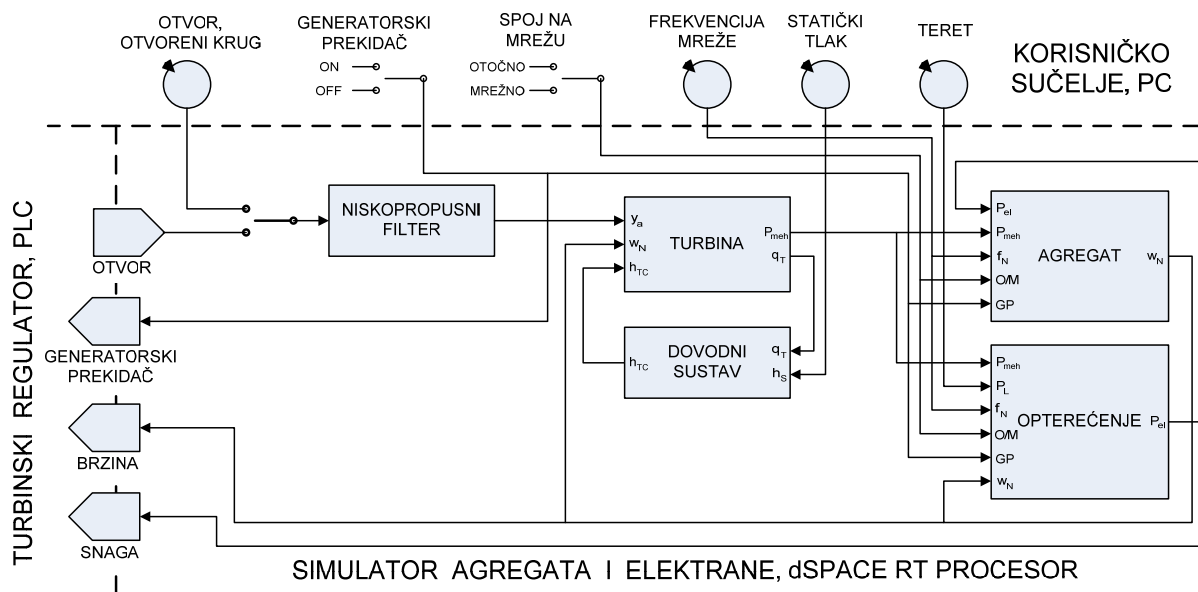
Slika 3. Blok-shema HIL ispitivanja STR HE Lešće



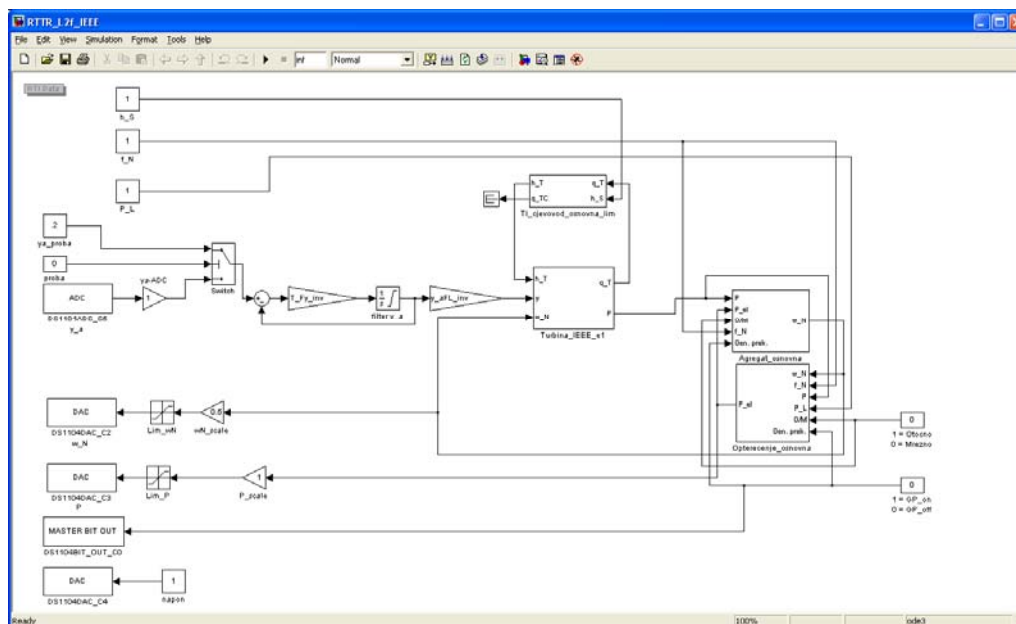
Slika 4. Ormari turbinske regulacije glavnog agregata (lijevo) i ABM (desno) u pripremi za tvornička ispitivanja; na stolu odostraga ormari pomoćnih pogona



Slika 5. Desktop računalo sa HIL simulatorom STR; lijevo dSPACE-ova konektorska ploča za povezivanje ispitivanog regulatora i simulatora



Slika 6. Blok shema simulatora turbine i agregata HE Lešće



Slika 7. Simulacijski model turbine i njezine okoline pripremljen za HIL ispitivanje (Simulink)

Tvoričko ispitivanje svakog od tri agregata obuhvaćalo je sljedeće cjeline:

- Ispitivanje sekvenci: pokretanje; sinkronizacija; rad na mreži (reakcija na promjenu zadane vrijednosti djelatne snage); otočni rad (reakcija na promjenu zadane vrijednosti brzine vrtnje); zaustavljanje; brzo zatvaranje
- Ispitivanje reakcije na alarmne signale postavljene preko simulacijske ploče
- Ispitivanje regulacije otvora
- Ispitivanje regulacije brzine vrtnje: pokretanje i zaustavljanje agregata; odziv na manje promjene zadane brzine vrtnje; udarne promjene opterećenja pri otočnom radu (radu u izoliranom sustavu); otočni rad agregata sa astatičkom i sa statičkom karakteristikom (samo za glavne agregate)
- Ispitivanje prijelaza iz rada na električnoj mreži (regulacije na elektroenergetskom sustavu) na otočni način rada i obratno
- Ispitivanje regulacije djelatne snage: sinkronizacija; odziv pri promjenama zadane vrijednosti djelatne snage; reakcija na odstupanje frekvencije mreže preko doprinosa statike (samo za glavne agregate)

- Ispitivanje udarnih rasterećenja (ispada) agregata
- Ispitivanje rada registratora prijelaznih pojava

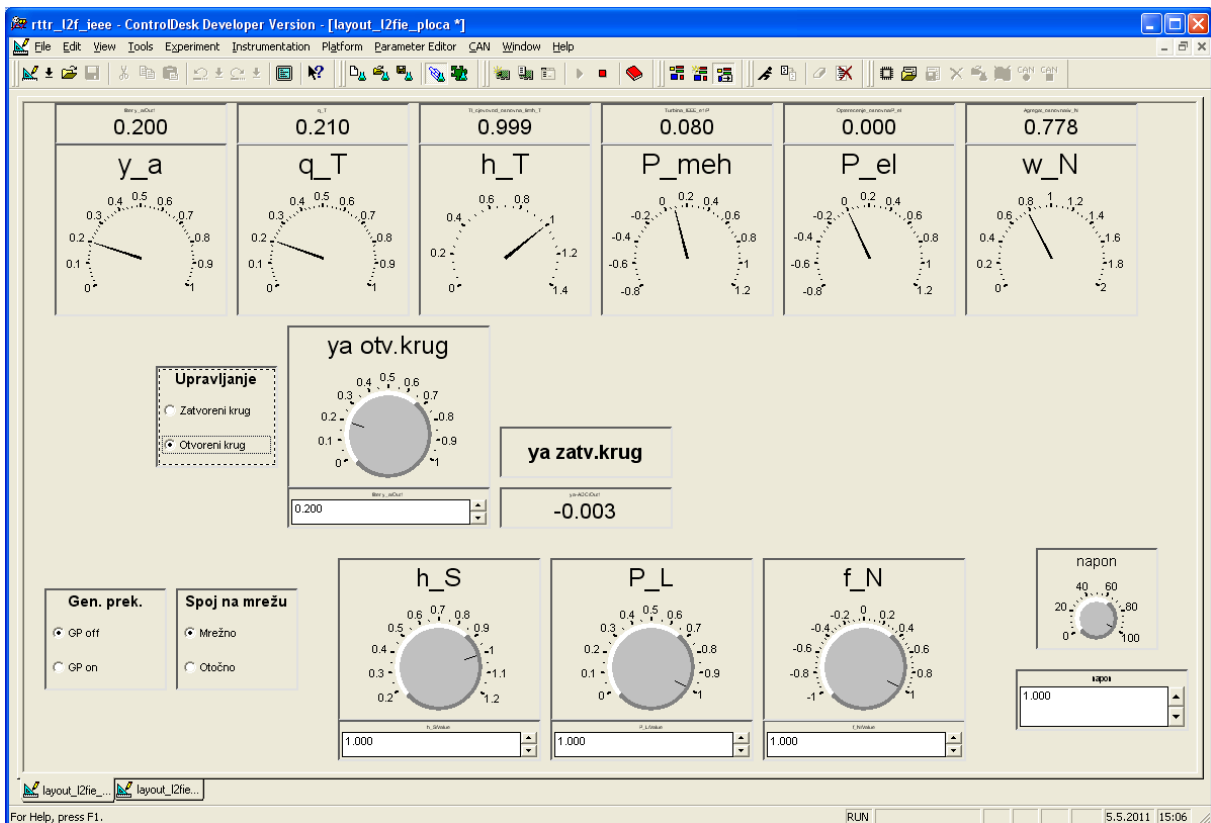
Program ispitivanja agregata biološkog minimuma pritom nije uključivao ispitivanje funkcija statike, budući da taj agregat male snage nema potrebe za tim funkcijama.

Na početku ispitivanja svakog agregata provedeno je ispitivanje sekvenci i alarma s ciljem provjere ispravnosti logike pokretanja pojedinih koraka u sekvencama i pri reakciji na alarme. Nakon toga su uslijedila ispitivanja regulacije, kod kojih se podešavaju vrijednosti parametara regulatora i provodi gruba provjera može li STR ostvariti željene pokazatelje kvalitete regulacije. Dalje podešavanje i prilagodba parametara došli su na red prilikom puštanja STR u rad i primopredajnih ispitivanja na elektrani.

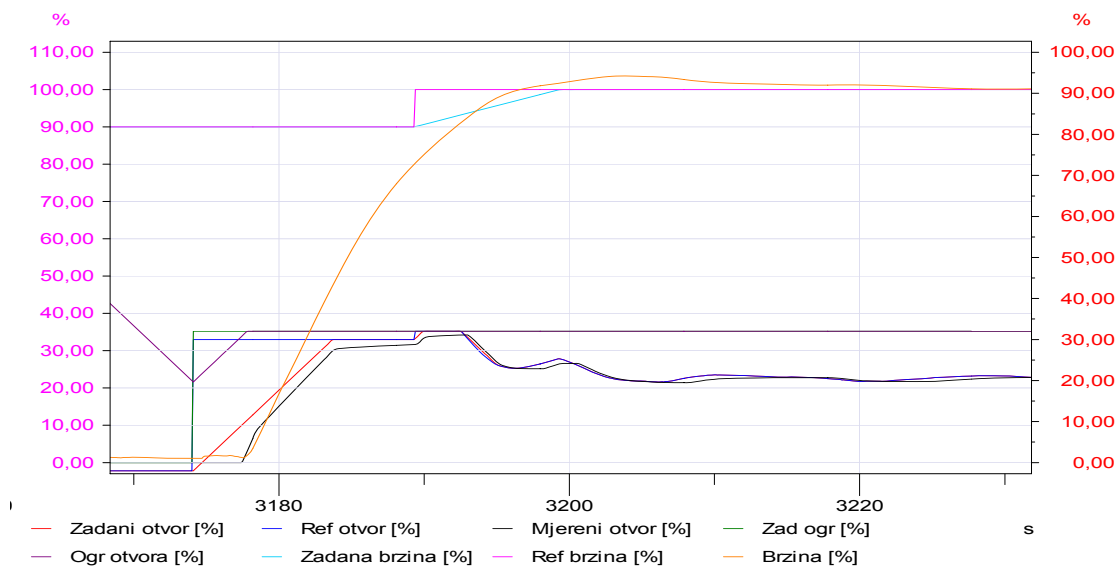
5. REZULTATI ISPITIVANJA

STR za sva tri agregata prošao je tvornička ispitivanja bez nekih većih zapaženih nedostataka i primjedbi, i to prema predviđenom rasporedu od jednog dana završnih ispitivanja po agregatu. Potvrđena je valjanost projekta STR i njegove izvedbe, nakon čega se moglo prijeći na isporuku STR naručitelju i na njegovu ugradnju u elektranu. Zahvaljujući pripremljenoj HIL simulaciji, ova ispitivanja su bila ostvarena na visokoj profesionalnoj razini. Predstavnici proizvođača (Brodarski institut) su imali prvu priliku da predstavnicima naručitelja (HEP-Proizvodnja) i predstavnicima nadzora (Institut za elektroprivredu i energetiku) prikažu izgled i rad STR kako će on biti izveden na elektrani. U ovoj fazi bilo je moguće zapaziti, raspraviti i potom provesti nekoliko prijedloga za dotjerivanje i poboljšavanje izgleda operatorskog sučelja (ekrana operatorskog panela) i u sekvencama upravljanja (npr. način ubrzavanja postizanja nazivne brzine vrtnje pri prijelazu na regulaciju brzine nakon ispada agregata s mreže).

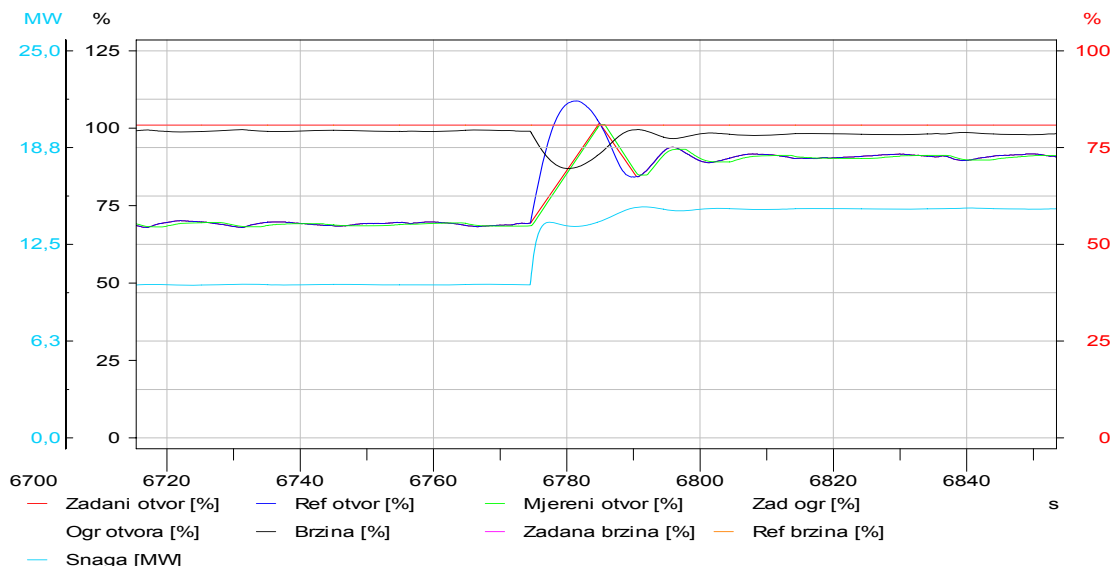
Primjeri oscilograma snimljenih prilikom ispitivanja dani su na slikama 9 i 10. Ostvoreni odzivi prilično vjerno oslikavaju odzive koji bi bili snimljeni provedbom istih pokusa na stvarnom agregatu. Brodarski institut koristi isti alat (*ServiceLab*) za mjerenja STR na stvarnim agregatima hidroelektrana.



Slika 8. Korisničko sučelje HIL simulatora (*ControlDesk*)



Slika 9. Pokretanje agregata A na nazivnu brzinu vrtnje (*ServiceLab*)



Slika 10. Udarno opterećenje agregata A s 10 MW na 15 MW u otočnom radu (*ServiceLab*)

6. ZAKLJUČAK

Uspješna provedba hardware-in-the-loop ispitivanja novog sustava turbinske regulacije HE Lešće postigla je sljedeće:

- potvrđeno je da STR funkcioniра u ispitivanim radnim područjima bez uočljivih krupnih grešaka
- parametri turbinskog regulatora su grubo podešeni
- demonstriran je izgled i rad STR predstavnicima naručitelja i nadzora
- dogovorena su manja poboljšanja sekvenci upravljanja i izgleda operatorskog sučelja

Valja zapaziti da je STR nakon provedenih HIL ispitivanja i ugradnje još potrebno fino podesiti na samoj elektrani. Upravo zbog toga što su predviđena ova dodatna podešavanja, bilo je moguće upotrijebiti prilično jednostavan simulacijski model turbine. U stvari, zbog nedovoljno poznatih parametara sustava u trenutku provedbe ispitivanja upotreba složenijeg modela ne bi mogla jamčiti veću vjernost simuliranom sustavu i stoga ne bi bila opravdana.

Brodarski institut je tijekom 15 godina prije ovog projekta projektirao, napravio i pustio u rad STR za 18 agregata hidroelektrana u Hrvatskoj. Simulator razvijen za potrebe HIL ispitivanja STR za HE

Lešće podigao je već uhodani proces tvorničkih ispitivanja STR na jednu višu razinu. Poslije ovog projekta, simulator je dosada upotrijebljen za još dva nova projekta.

Pri zamjeni softvera turbinske regulacije za HE Senj provedena su simulacijska podešavanja parametara regulatora. U usporedbi s HE Lešće, ova elektrana ima mnogo dulji i složeniji dovodni sustav kod kojeg zajednički tlačni cjevovod poslužuje tri glavna agregata elektrane. Ispitivanja su izvedena na računalnom modelu bez HIL simulacije.

Pri zamjeni STR za HE Čakovec, obavljena su HIL ispitivanja ormara turbinske regulacije agregata B. Isti tip ispitivanja predviđen je kasnije i za agregat A. Ispitivanju je podvrgnut ormar turbinske regulacije bez hidrauličnog podsustava, koji je ovom prilikom bio uključen u simulator. Za razliku od HE Lešće, HE Čakovec ima mali pad, kratak dovodni sustav i dvostruko reguliranu turbinu cijevnog agregata.

7. LITERATURA

- [1] Č. Radić, M. Ivica, M. Burić, S. Mačković, S. Šutila, B. Dadasović, D. Šikić, "HE Lešće – izgradnja nove hrvatske hidroelektrane", EGE, br. 2/2007, str. 115-130
- [2] K. Horvat, D. Korlević, I. Mišković, Z. Fabeković, D. Bojić, D. Šikić, M. Stojsavljević, D. Nemeč, "Sustavi turbinske regulacije za HE Lešće", 10. savjetovanje HRO CIGRÉ, zbornik radova, Cavtat, Hrvatska, 11. 2011., referat 25080 (prihvaćeno za objavljivanje)
- [3] L. Stipišić, D. Korlević, D. Kosić, S. Mačković, N. Abramović, „Hidraulički dio sustava turbinske regulacije za HE Lešće“, 10. savjetovanje HRO CIGRÉ, zbornik radova, Cavtat, Hrvatska, 11. 2011., referat 25124 (prihvaćeno za objavljivanje)
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware-in-the-loop_simulation
- [5] K. Horvat, „Na kvarove tolerantan sustav turbinske regulacije vodne turbine“, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2006.
- [6] IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, „Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies“, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, No 1, February 1992, pp. 167-179
- [7] P.M. Anderson, A.A. Fouad, „Power System Control and Stability“, IEEE Press, 1994.

DODATAK

Tablica I. Izabrani podaci za modeliranje agregata HE Lešće

Parametar	Simbol	Glavni agregati	Agregat biološkog minimuma
Tip turbine		Francisova okomita	Francisova vodoravna
Izlazni promjer turbinskog kola	D_V	2950 mm	650 mm
Nazivna snaga na vratilu	P_B	20,95 MW	1,006 MW
Nazivna brzina vrtnje	w_B	187,5 o/min	750 o/min
Brzina vrtnje pobjega	w_P	360 o/min	1340 o/min
Nazivni protok	Q_B	60 m ³	2,7 m ³
Nazivni neto pad	H_B	38,18 m	41,32 m
Ekvivalentni promjer dovoda	D_C	3,7 m	1,2 m
Ukupna duljina dovodnog sustava	L_C	72 m	61 m
Koeficijent pojačanja turbine	A_{TO}	1,27 p.u.	1,27 p.u.
Protok praznog hoda	q_{NL}	0,213 p.u.	0,213 p.u.
Koeficijent prigušenja turbine	D_a	0,5 p.u.	0,5 p.u.
Koeficijent kočenja turbine	D_{PW}	0,075 p.u.	0,094 p.u.
Granični otvor područja kočenja	y_{P0}	20 %	20 %
Koeficijent širenja tlačnog vala	K	203,8 p.u. s ⁻¹	264,7 p.u. s ⁻¹
Vremenska konstanta ubrzanja vodne mase	T_w	1,28 p.u. s	0,359 p.u. s
Koeficijent gubitaka dovoda	k_{GD}	0,0225 p.u.	0,02 p.u.
Mehanička vremenska konstanta	T_m	6,19 p.u. s	7,79 p.u. s
Koeficijent prigušenja mreže	D_p	0,5 p.u.	0,5 p.u.

Napomena: parametri modela navedeni su u relativnim jedinicama (p.u.), normirani na nazivnu radnu točku agregata P_B , w_B , Q_B , H_B .