

Ispitivanje električnog dela turbinskog regulatora na ispitnom polju

Dane Džepčeski, Jelena Pavlović, Dušan Arnautović,
Slobodan Bogdanović¹

¹Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
dane.dzepceski@ieent.org

Kratak sadržaj: Radi razvoja novog digitalnog regulatora hidraulične turbine, proveravanja njegovih funkcija i ispitivanja karakteristika formiran je fizički model okoline turbinskog regulatora. Fizički model okoline turbinskog regulatora je sastavni deo ispitnog polja na kome se vrši ispitivanje elektronskih sklopova i izvršnog programa turbinskog regulatora. U radu je prikazana struktura i način realizacije fizičkog modela okoline turbinskog regulatora kao i rezultati ispitivanja i rada turbinskog regulatora na ispitnom polju.

Ključne reči: turbina, turbinski regulator, fizički model, fuzzy logika;

1. Uvod

Razvoj novog digitalnog turbinskog regulatora temelji se na višegodišnjem iskustvu saradnika Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ na poslovima modelovanja, ispitivanja, proračuna parametara i podešavanja različitih turbinskih regulatora u elektranama EPS-a [1-5]. Razvoj, izrada i ispitivanje novog električnog dela turbinskog regulatora hidraulične turbine, predstavlja sistematizaciju i realizaciju predhodno stečenog znanja i iskustva. Sistematizovane su funkcije i karakteristike turbinskog regulatora, odabrani su opsezi veličina parametara regulatora, odabrana je hardverska platforma i razvijen je izvršni program turbinskog regulatora.

Za potrebe ispitivanja kvaliteta rada novog digitalnog regulatora formiran je fizički model njegove okoline koji je sastavni deo ispitnog polja. Fizički model realizovan je izradom računarskog programa za simulaciju nelinearnog matematičkog modela okoline turbinskog regulatora uz obezbeđivanje fizičke veze električnog dela turbinskog regulatora i matematičkog modela na digitalnom računaru. Veza je ostvarena električnim signalima pomoću

prilagodnih D/A kartica elektronike. Poređenjem rezultata ispitivanja, sprovedenih na sistemu za turbinsku regulaciju agregata sopstvene potrošnje u HE „Bistrica“ i rezultata rada novog regulatora na ispitnom polju, izvršena je korekcija postavljenih parametara fizičkog modela okoline turbinskog regulatora i na taj način obezbeđena njegova visoka verodostojnost. Tokom ispitivanja, svi relevantni signali registrovani su u merno-akvizicionom uređaju. Snimci prelaznih pojava, koji su dobijeni pri ispitivanjima na ispitnom polju, korišćeni su za dalje unapređenje fizičkog modela i regulatora.

2. Fizički model okoline turbinskog regulatora

2.1. Opis i namena fizičkog modela

Fizički model okoline turbinskog regulatora izrađen je za potrebe razvoja i ispitivanja turbinskog regulatora u laboratorijskim uslovima [2], [6]. Fizički model omogućava proveru rada regulatora u svim predviđenim režimima rada agregata kao i pri delovanju velikih spoljnih poremećaja. Takođe, pomoću fizičkog modela, moguće je formirati skup parametara regulatora koji će se uz veću ili manju izmenu koristiti pri probnom i trajnom radu turbinskog regulatora. Pod pojmom okoline turbinskog regulatora podrazumeva se hidro sistem, hidraulična turbina, servomotor, generator i opterećenje generatora. Konkretno, model je realizovan u svrhu razvoja i ispitivanja novog digitalnog turbinskog regulatora Peltonove turbine za agregat sopstvene potrošnje u HE „Bistrica“ [2], [3], ali je formiran tako da se jednostavno može prilagoditi drugim tipovima turbine. Prilikom projektovanja fizičkog modela cilj je bio da se realizuje takav fizički model koji verno reprodukuje procese koji se odvijaju u sistemima u okolini turbinskog regulatora, a koji je istovremeno univerzalan i jednostavan.

U osnovi, matematički model okoline turbinskog regulatora, implementiran u fizičkom modelu, je nelinearan i može se primeniti za velike i male poremećaje i odstupanja oko nominalnih vrednosti [4], [5]. On se sastoji iz nekoliko podmodela: podmodela servomotora, podmodela turbine i podmodela u čijoj je osnovi elektromehanička jednačina.

2.2. Prikaz podmodela i njihova međusobna povezanost

Prilikom formiranja svakog od podmodela usvojena su određena uprošćenja sa ciljem da se formiraju nelinearni matematički modeli koji verno prikazuju odvijanje fizičkih procesa u okolini turbinskog regulatora, pre svega za potrebe ispitivanja funkcija i karakteristika električnog dela turbinskog

regulatora. Fizičke veličine koje figuriraju u modelu predstavljene su svojim normalizovanim vrednostima.

Prilikom modelovanja servomotora uzeta su u obzir ograničenja maksimalne brzine otvaranja i zatvaranja servomotora, kao i ograničenje maksimalnog hoda klipa servomotora. Dinamička svojstva servomotora modelovana su funkcijom prenosa prvog reda $1/(1+T_y s)$, gde je T_y vremenska konstanta servomotora.

Elektromehanički podmodel zasniva se na jednačini:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{T_a} \cdot (p_g - p_l),$$

gde je φ normalizovano odstupanje brzine obrtanja

turbine od nominalne vrednosti, T_a vremenska konstanta inercije hidroagregata, p_g aktivna snaga generatora i p_l opterećenje generatora. Snaga turbine definisana je kao $p_t = qh\eta$, gde je q protok vode, h neto pad i η stepen korisnog dejstva. Aktivna snaga generatora modelovana je kao: $p_g = p_t - p_{gub}$. Uz određene pretpostavke, snaga gubitaka p_{gub} može se predstaviti konstantnom vrednošću u kvazistacionarnim stanjima agregata. Zbog prisustva ograničenja veličina realnih fizičkih veličina, prilikom integracije elektromehaničke jednačine, uvedena su ograničenja tipa zasićenja. Postojanje ograničenja i ovaj podmodel čine nelinearnim.

Vodeni udar modeluje se kao veličina superponirana efektivnom padu vode i on zavisi od promene protoka vode u vremenu $\Delta h = T_w \frac{dq}{dt}$, gde je T_w vremenska konstanta hidraulične inercije cevovoda. T_w zavisi od karakteristika cevovoda, brzine vode kroz cevovod i aktuelne vrednosti neto pada. Posmatran je slučaj krutog vodenog udara pri kome ne dolazi do deformacije cevovoda. Ovaj podmodel je od ključne važnosti prilikom testiranja dela algoritma rada regulatora koji se odnosi na kompenzaciju vodenog udara.

Model okoline turbinskog regulatora je inkrementalnog tipa, što znači da njegov ulazni signal predstavlja normalizovanu razliku između trenutne i zadate vrednosti položaja klipa servomotora. Izlazni signali fizičkog modela su brzina obrtanja turbine, aktivna snaga generatora i položaj servomotora. Smatra se da je veza između položaja klipa servomotora y i otvora usmernog aparata α linearna, $\alpha = Ky$. Generatorski prekidač realizovan je kao hardverski prekidač čiji položaj predstavlja digitalni ulaz u fizički model. Uslov da je agregat vezan na mrežu zadaje se kao digitalna vrednost.

Podmodel turbine realizovan je u fuzzy logici sa ciljem da verno predstavi protočno-eksploatacionu karakteristiku turbine, odnosno zavisnosti $q = q(h, \alpha)$ i $\eta = \eta(h, \alpha)$, u svakoj realnoj radnoj tački turbine. Navedene zavisnosti su nelinearne. Budući da je protočno-eksploataciona karakteristika turbine grafički prikaz odnosa navedenih veličina, gde su tačne vrednosti veličina jednoznačno određene samo u presečnim tačkama krivih karakteristike, fuzzy logika je pogodna za njihovo izračunavanje u preostalim radnim tačkama.

2.3. Primena fuzzy logike u realizaciji simulatora

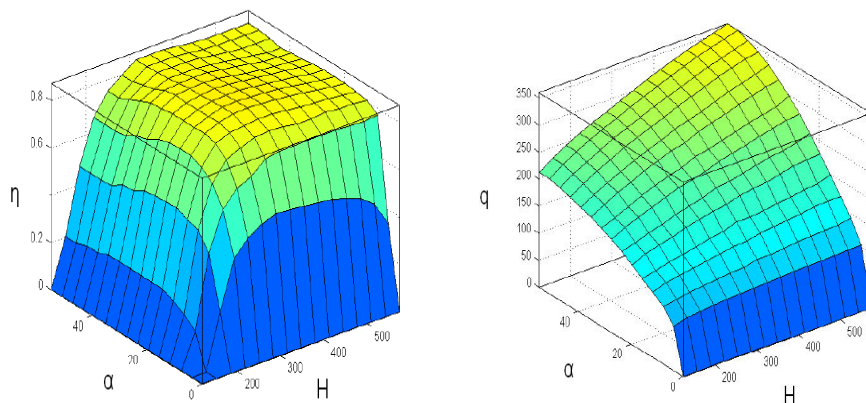
U fuzzy odlučivanju relacije jednakosti ili pripadanja nisu diskretne (1 sa značenjem jednakosti, ili 0 sa značenjem nejednakosti), već su kontinualne. Takav pristup predstavlja matematičku formalizaciju nepreciznosti ljudskog govora i omogućava uvođenje faktora iskustva i empirijskih rezultata u stroga pravila regulacije [7], [8]. To znači da se svakoj izjavi, odnosno relaciji pridružuje funkcija pripadanja.

Na primer, pod pojmom „Nominalni pad“ može se smatrati H_{nom} sa vrednošću funkcije pripadanja 1, $1,1H_{nom}$ sa vrednošću funkcije pripadanja 0,7, ili $1,2H_{nom}$ sa vrednošću funkcije pripadanja 0,2. Slično, pojam „Pad veći od nominalnog“ za pad od $1,2H_{nom}$ važi sa funkcijom pripadanja 0,4, a za pad $1,8H_{nom}$ ili veći sa funkcijom pripadanja 1. Može se zaključiti da formiranje funkcije pripadanja dozvoljava neku meru proizvoljnosti u pogledu njenog domena i oblika, ali da se formiranje funkcije pripadanja ipak mora odvijati po jasno utvrđenim pravilima.

Vrednosti, odnosno izjave iz predefinisano skupa, za koje su definisane funkcije pripadanja, organizovane su u strogo određena pravila odlučivanja. Na primer, ako su tačne izjave: „Pad ima vrednost H_{nom} “ i „Otvor servomotora ima vrednost $a_{max}/2$ “, odluka prema pravilu odlučivanja bi bila: „Protok vode ima vrednost q_1 “. Međutim, uzimajući u obzir način definisanja funkcija pripadanja, za isti ulaz je u manjoj ili većoj meri tačno više izjava istovremeno. Na primer, pad od $1,2H_{nom}$ se u nekoj meri (0,4) može smatrati padom većim od nominalnog, ali i nominalnim padom u nekoj manjoj meri (0,2), pa se u tom slučaju može primeniti više pravila odlučivanja. Budući da izlaz mora uzeti konkretnu vrednost, svi kandidati za izlaz se uzimaju u obzir u skladu sa tim u kolikoj su meri zadovoljili njima pridružena pravila odlučivanja i na osnovu toga izračunava se konačna izlazna vrednost.

Fuzzy logika omogućava donošenje odluka i procenu nedefinisanih vrednosti bez poznavanja tačnih analitičkih zavisnosti ulaza i izlaza, putem prepoznavanja sličnosti sa primerima koji su iskustveno poznati i koji su definisani kao pravila odlučivanja. Stoga ova tehnika ima široku primenu u ekspertskim sistemima.

U modelu turbine fuzzy odlučivanje je iskorišćeno za estimaciju svih radnih tačaka od interesa iz nelinearnih zavisnosti protočno- eksploatacione karakteristike. Površi po kojima se vrši računanje vrednosti radnih tačaka od interesa prikazane su na sl.1. Pravila odlučivanja definisana su u presečnim tačkama dijagrama, a funkcije pripadanja, koje određuju tip interpolacije, su linearne. Nelinearne funkcije pripadanja daju bolju estimaciju zavisnosti definisanih karakteristikom turbine, ali su zahtevnije za izračunavanje i zauzimaju više procesorskog vremena, što je bitan činilac, budući da je potrebno da se proračun vrednosti promenljivih veličina fizičkog modela izvršava u realnom vremenu, sa što manjom periodom odabiranja. Podmodel hidraulične turbine je po svojoj prirodi takođe nelinearan.



Slika 1. Površni mogućih vrednosti stepena korisnosti η i protoka kroz turbinu q u zavisnosti od neto pada h i otvora usmernog aparata turbine α

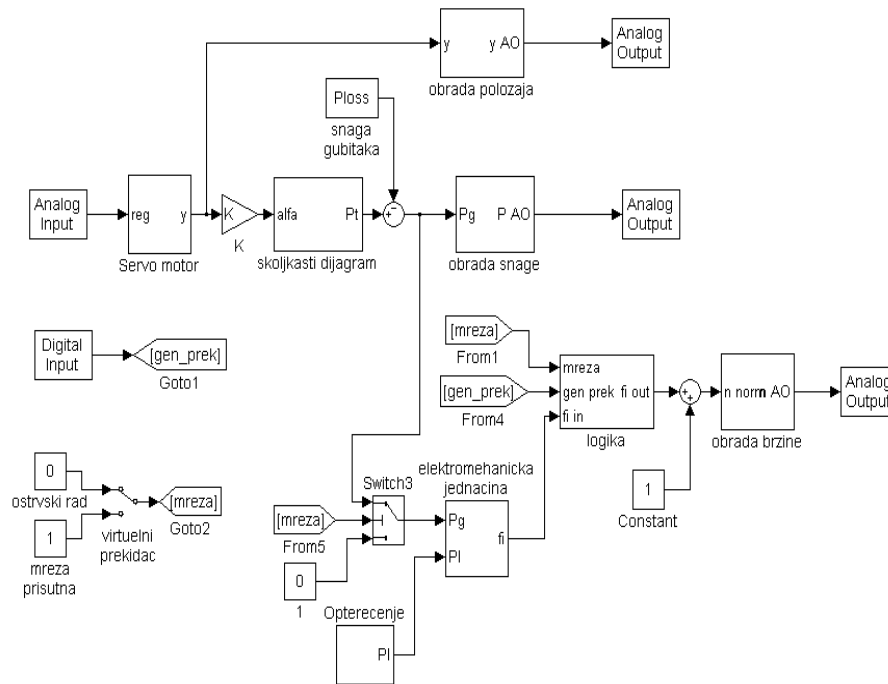
2.4. Realizacija ispitnog polja sa fizičkim modelom okoline

Model je realizovan u programskom paketu Matlab-Simulink®, kao aplikacija koja se izvršava u realnom vremenu, sa periodom odabiranja za dva reda veličine manjom od najmanje vremenske konstante u modelu, vremenske konstante servomotora. Principijelna šema modela prikazana je na sl. 2. Povezivanje modela sa hardverom, A/D i D/A konverzija, vrši se pomoću prilagodnih kartica. Analogni izlazni signali fizičkog modela, koji su srazmerni brzini obrtanja, aktivnoj snazi generatora i položaju servomotora povezani su direktno na analogne ulaze PLC-a na kojem je realizovan algoritam rada turbinskog regulatora. Signal željenog položaja klipa servomotora usmernog aparata iz regulatora se sa analognog izlaza PLC-a uvodi u fizički model.

Analogni izlaz iz modela, srazmeran brzini obrtanja turbine, najpre se transformiše u povorku pravougaonih impulsa čija frekvencija zavisi od vrednosti analognog izlaznog signala, pa se uvodi u brojački modul PLC-a. Ovakvom realizacijom ispitnog polja i njegovih ulaza i izlaza postignuta je visoka verodostojnost modela okoline turbinskog regulatora pri testiranju turbinskog regulatora, bez potrebe za dodatnim prilagođavanjem hardvera turbinskog regulatora laboratorijskim uslovima ili izmene nekih od njegovih programskih funkcija za potrebe ispitivanja.

Postojeći fizički model može se prilagoditi svakom tipu hidraulične turbine. Takođe, izmena matematičkih modela ostalih elemenata, koji pored turbine čine okolinu turbinskog regulatora, moguća je i relativno je

jednostavna za izvođenje. Izmene su kako parametarskog tako i strukturnog tipa, što ovaj fizički model čini univerzalnim alatom za testiranje turbinskog regulatora u laboratorijskim uslovima.



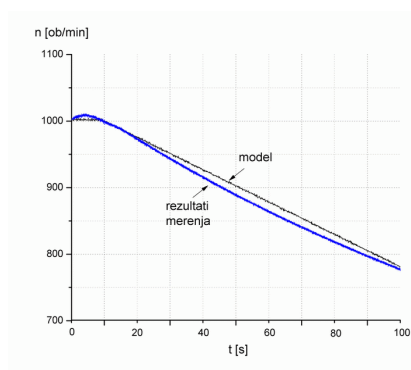
Slika 2. Model okoline turbinskog regulatora

3. Ispitivanje regulatora na ispitnom polju

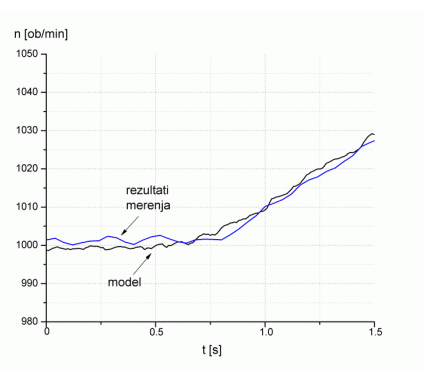
3.1. Testiranje ispitnog polja i provera izbora parametara fizičkog modela

Nakon formiranja fizičkog modela i ispitnog polja, bilo je potrebno sprovesti testiranje ispitnog polja, izvršiti izbor parametara fizičkog modela i proveru postavljenih parametara modela. Parametri korišćeni u ovom modelu predstavljaju parametre okoline turbinskog regulatora agregata sopstvene potrošnje u HE „Bistrica“. Parametri modela dobijeni su na osnovu dostupne

dokumentacije, na osnovu proračuna i na osnovu brojnih merenja veličina od interesa tokom namenski sprovedenih ispitivanja na predmetnom agregatu [9], [10]. Izvršena je analiza rezultata merenja sa konkretnog objekta i u razmatranje su uzeti isključivo rezultati merenja, u kojima je jednoznačno određen uticaj postojećeg turbinskog regulatora. Izvršen je znatan broj oglada provere fizičkog modela i ispitnog polja kao celine. Rezultati nekih oglada prikazani su na sl.3 i sl.4.



Slika 3. Zaustavljanje agregata nalogom na zatvaranje



Slika 4. Trenutak zbacivanja snage isključenjem generatorskog prekidača

Na sl. 3 prikazano je zaustavljanje agregata zadavanjem naloga za normalno zaustavljanje sa operatorskog panela turbinskog regulatora. Prikazani snimak korišćen je za određivanje veličine gubitaka na trenje i ventilaciju u obrtnim delovima agregata. Na sl. 4 prikazan je trenutak zbacivanja snage, približno $30\%P_n$, isključenjem generatorskog prekidača. Izvođenjem oglada zbacivanja snage agregata, isključenjem generatorskog prekidača, određena je vremenska konstanta agregata.

Na osnovu analize rezultata sprovedenih oglada provere, utvrđeno je da je veličina odstupanja vrednosti izlaznih signala iz fizičkog modela u odnosu na izmerene vrednosti signala na konkretnom agregatu vrlo mala i da se ispitno polje, kao takvo, može koristiti za dalji razvoj i ispitivanje novog digitalnog turbinskog regulatora.

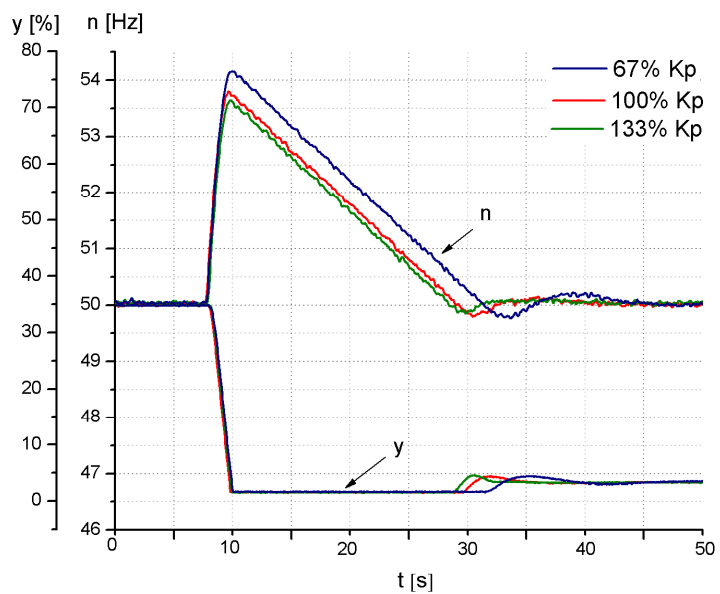
3.2. Rezultati ispitivanja regulatora na ispitnom polju

Na ispitnom polju vršena su različita ispitivanja funkcionalnosti i podešenja novog turbinskog regulatora. Izbor veličina parametara regulatora je od suštinskog značaja za kvalitet regulacije.

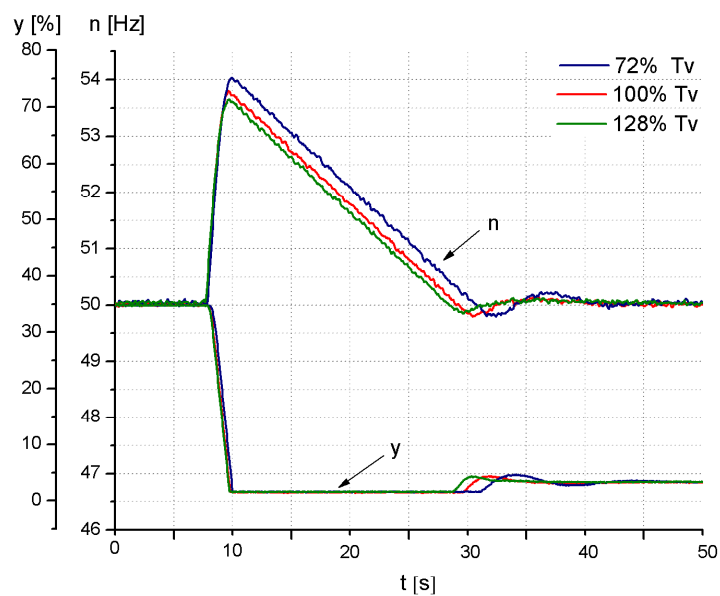
Na sl.5 i sl.6 prikazan je ogled naglog rasterećenja agregata isključenjem generatorskog prekidača. Ogled predstavlja veoma važan pokazatelj kvaliteta regulacije brzine obrtanja agregata pri velikim poremećajima. Naglim rasterećenjem agregata, isključenjem generatorskog prekidača, praktično se unosi step poremećaj regulisane veličine koji može biti i u vrednosti od $100\%P_n$. Naglim rasterećenjem snage simulira se najnepovoljniji slučaj, sa stanovišta turbinske regulacije, kada je došlo do isključenja generatorskog prekidača pri nominalnom opterećenju usled dejstva zaštita agregata. Na primer, prorada zaštite od previsokog napona na statorskim izvodima generatora direktno će delovati na isključenje generatorskog prekidača. U prelaznom procesu koji nastaje nakon naglog rasterećivanja agregata, brzina agregata ne treba da premaši postavljene vrednosti električne i/ili mehaničke zaštite od pobega, a nakon završetka prelaznog režima, potrebno je da se brzina obrtanja vrati na zadatu vrednost brzine obrtanja u praznom hodu i da agregat bude spreman za ponovno vezivanje na mrežu.

Na sl.5 prikazan je uticaj promene parametra proporcionalnog pojačanja K_p na regulaciju brzine obrtanja n , odnosno regulaciju položaja klipa servomotora y pri rasterećenju agregata. Proporcionalno pojačanje menjano je u opsegu približno $\pm 30\%$ od izabrane početne vrednosti pojačanja. Početna veličina proporcionalnog pojačanja može se smatrati i najboljom veličinom pojačanja za neke režime rada regulatora. Sa slike je očigledno da se povećanjem K_p dobija sve manji porast brzine nakon naglog rasterećenja agregata. Takođe, brzina obrtanja nakon manjeg propada, približno asimptotski prilazi referentnoj vrednosti brzine obrtanja u praznom hodu. Uočljivo je i kraće trajanje prelaznog procesa i smanjenje veličine preskoka. Sa povećanjem K_p došlo je i do poboljšanja kvaliteta regulacije brzine prilikom naglog rasterećenja agregata. Prilikom podešavanja veličine K_p treba napraviti kompromis između što manjeg porasta brzine obrtanja agregata pri zbacivanju snage, što manjeg naprezanja hidrauličnih komponenti sistema i sprečavanja pojave većeg hidrauličnog udara u cevovodu. Do sličnog zaključka može se doći i kada se menja veličina vremenske konstante diferencijalnog dejstva T_v , sl. 6. Veličina vremenske konstante T_v menjana je u opsegu približno $\pm 30\%$ od odabrane početne vrednosti.

Skup vrednosti parametara regulatora dobija se proračunom, ali se izbor najbolje veličine parametara, iz računski određenog skupa vrednosti, konačno vrši empirijski.



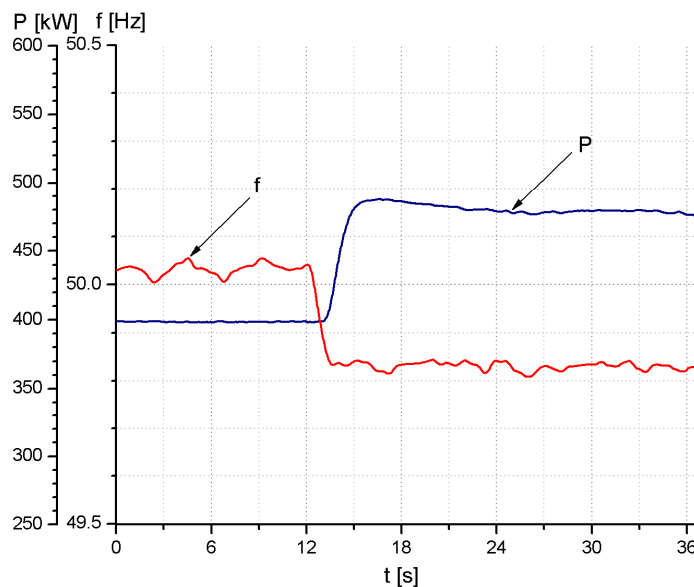
Slika 5 – Uticaj promene parametra K_p na kvalitet regulacije



Slika 6 - Uticaj promene parametra T_v na kvalitet regulacije

Predhodno opisana ispitivanja imala su za cilj prikaz nekih od kriterijuma izbora parametara turbinskog regulatora za specifične režime rada agregata.

U cilju ispitivanja funkcije turbinskog regulatora, namenjene primarnoj regulaciji učestanosti, izvršen je ogled na ispitnom polju, učešća agregata u primarnoj regulaciji učestanosti u elektroenergetskom sistemu, iako predmetni agregat, kao agregat sopstvene potrošnje koji pretežno radi na izolovanom opterećenju, nije predviđen za učešće u primarnoj regulaciji učestanosti. Prilikom izvršenja funkcije primarne regulacije učestanosti, turbinski regulator angažuje rezervu snage agregata prema statičkoj karakteristici, kao odgovor na odstupanje učestanosti mreže od referentne vrednosti. Promena veličine aktivne snage generatora u funkciji promene učestanosti mreže prikazana je na sl.7. Promena veličine učestanosti od 200mHz u odnosu na 50Hz, izabrana je kao referentno odstupanje učestanosti mreže od nominalne vrednosti, pri kojoj dolazi do angažovanja rezerve snage agregata u primarnoj regulaciji učestanosti, unutar jedne regulacione oblasti. Tokom oglada zadata vrednost aktivne snage agregata iznosila je $P_{ref}=0,5P_n$. Sa sl.7 se vidi da je do angažovanja primarne rezerve snage agregata prema statičkoj karakteristici regulatora došlo za manje od 15s, čime je zadovoljen osnovni kriterijum kvaliteta primarne regulacije učestanosti.



Slika 7 – Ogled provere stalnog statizma regulatora (bp=4%)

Ispitivanje turbinskog regulatora na ispitnom polju u kvazistacionarnom stanju i prelaznim režimima rada regulatora, pokazalo je da su rezultati ispitivanja u okviru željenih vrednosti. Proveren je kvalitet samih uređaja pojedinačno, ispitnog polja i turbinskog regulatora, kao i kvalitet njihove međusobne interakcije.

4. Zaključak

Projektovano je ispitno polje i izvršen je izbor parametara fizičkog modela okoline turbinskog regulatora tako da odgovara realnom okruženju agregata sopstvene potrošnje u HE „Bistrica“. Poređenjem merenih vrednosti signala fizičkog modela sa nizom rezultata merenja izvršenih u elektrani, uočena su mala odstupanja u vrednostima i dinamičkom ponašanju ovih veličina. Na osnovu sprovedenih oglada provere rada fizičkog modela u različitim režimima rada agregata utvrđeno je da se ispitno polje sa fizičkim modelom može koristiti kao veran model okoline turbinskog regulatora za svrhu ispitivanja turbinskog regulatora u laboratorijskim uslovima.

Literatura

- [1] D. Arnautović and D. Škatarić, "Suboptimal design of hydroturbine governors", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 6, no. 3, pp. 438–444, Sept. 1991.[]
- [2] D. Džepčeski, J. Pavlović, D. Arnautović, S. Bogdanović, "Novel Digital Governor for Hydraulic Turbines", *Međunarodna konferencija Elektrane 2010*, Vrnjačka Banja, Srbija, 26-29 oktobar 2010.
- [3] D. Džepčeski, S. Bogdanović, D. Arnautović, J. Pavlović, J. Dragosavac, "Digitalni turbinski regulator za agregat sopstvene potrošnje u HE „Bistrica“, *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“*, knjiga 19, str. 181-194, 2008-2009.
- [4] R. Milijanović, D. Arnautović, Podešavanje turbinskog regulatora pomoću analognog modela regulisanog sistema, *Elaborat Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ 1977.*
- [5] R. Milijanović, D. Arnautović, Proučavanje turbinskog regulatora i sistema koji on reguliše u hidroelektrani Đerdap 2, *Elaborat Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ 1980.*
- [6] M. Brezovec, I. Kuzle, and T. Tomisa, "Nonlinear digital simulation model of hydroelectric power unit with Kaplan turbine", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 235–241, Mar. 2006.
- [7] J. Yan, M. Ryan and J. Power, "Using Fuzzy Logic – Towards Intelligent Systems", Prentice-Hall, 1995.
- [8] B. Kosko, "Fuzzy Thinking", Hyperion, 1993.
- [9] Guide to specification of hydraulic turbine control system, International Standard IEC61362, 1998-03.

[10] Hydraulic turbines – Testing of control systems, International Standard IEC60308, 2005-01.

Abstract: As the tool for development of novel digital governor for hydraulic turbine, verification of its functions and testing of its characteristics, the simulator of turbine governor surroundings is developed. The simulator is integral part of the test field where tests of electronic parts and executive program of turbine governor are performed. In this paper the simulator structure and its realization are shown as well as the testing results and behavior of the turbine governor on the test field.

Key words: turbine, turbine governor, simulator, fuzzy logic;

Test of the Electrical Turbine Governor on the Test Field

Rad primljen u uredništvo 10.11.2010. godine
Rad prihvaćen 16.11.2010. godine