

ISPITIVANJA TURBINSKOG REGULATORA U HE „ĐERDAP 2“

S. Bogdanović¹, Z. Stanojević², D. Cojkić², D. Arnautović¹, D. Džepčeski¹
¹Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, ²HE „Đerdap 2“, Negotin

Kratak sadržaj: U radu se prikazuje novi sistem turbinske regulacije u hidroelektrani „Đerdap 2“ i posebno novi regulator brzine i aktivne snage agregata. Prikazuju se osnovne karakteristike novog digitalnog turbinskog regulatora i navode njegovi parametri. Detaljno je prikazan obim izvršenih ispitivanja regulatora u fabrici proizvođača, u elektrani pred puštanje u rad i u okviru primopredajnih ispitivanja. U radu je svaka grupa ispitivanja ilustrovana opisom postupka ispitivanja i prikazivanjem rezultata ispitivanja neke od karakteristika turbinskog regulatora ili nekog od parametara regulatora.

Ključne reči: regulacija turbine, regulacija brzine, regulacija snage

1. UVOD

U hidroelektrani „Đerdap 2“ instalirano je 10 cevnih agregata snage 27 MW pri $\cos \varphi = 0,98$. Cevne turbine rade pri neto padu vode u rasponu 1,4 m do 12,75 m, a nominalni neto pad iznosi 7,45 m. U sastav sistema turbinske regulacije u ovoj elektrani ubraja se turbinski regulator, sistem za pripremu ulja pod pritiskom i sistem automatike turbine. Sredinom osamdesetih godina prošlog veka na osam agregata u osnovnoj elektrani pušteni su u rad elektrohidraulički turbinski regulatori. Turbinski regulator sastoji se iz električnog dela i bloka hidromehaničkog upravljanja. Zadatak turbinskog regulatora je da reguliše protok vode kroz turbinsko kolo, dakle da reguliše brzinu i snagu turbine, i obezbedi proticanje vode sa najvećim stepenom iskorišćenja. Ulazni signal u električni deo starih turbinskih regulatora je signal brzine turbine, koji se formira na osnovu merenja napona regulacionog generatora, a izlazni signal o zahtevanom položaju klipa servomotora usmernog aparata pretvara se, pojačava i izvršava u hidromehaničkom bloku i servomotoru usmernog aparata. Obezbeđivanje uslova za optimalno iskorišćenje energetskog potencijala vode, odnosno dovođenje lopatica radnog kola u tačno zadani položaj u zavisnosti od otvora usmernog aparata i neto pada vode, realizovano je u starom regulatoru mehanički u hidromehaničkom bloku. Radni pritisak u sistemu regulacije turbine je 4,0 MPa, puni hod servomotora usmernog aparata 780 mm i puni hod servomotora radnog kola 280 mm.

U drugoj polovini devedesetih godina u dodatnoj elektrani puštena su u rad dva turbinska regulatora drugog proizvođača. Jedan od njih je digitalni regulator, a drugi neki prelaz između analognog i digitalnog regulatora. U oba regulatora ulazni signal brzine turbine formiran je na osnovu merenja napona regulacionog generatora. U digitalnom regulatoru optimalan odnos između položaja lopatica servomotora usmernog aparata i lopatica radnog kola realizovan je u električnom delu regulatora. Radni pritisak, hodovi servomotora, načini regulacije i upravljanja regulatora u dodatnoj elektrani su isti kao kod turbinskih regulatora u osnovnoj elektrani.

2. NOVI SISTEM TURBINSKE REGULACIJE

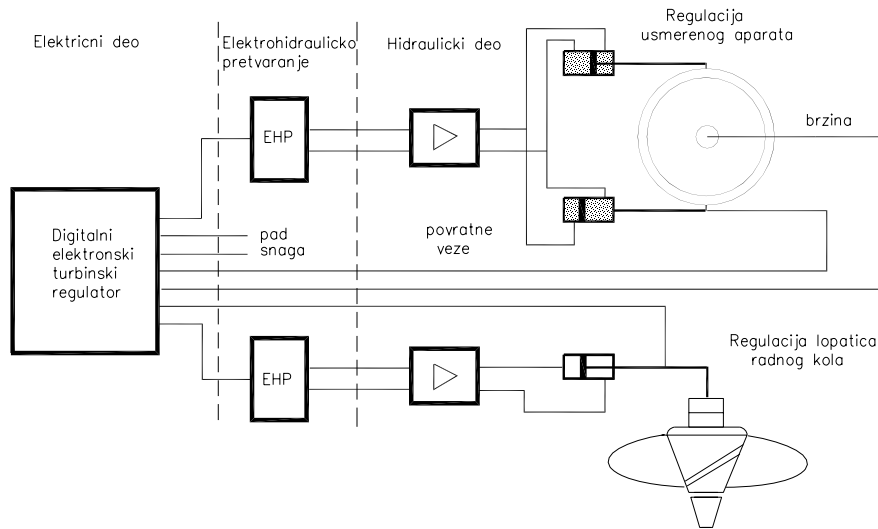
Osnovni problem u eksploataciji turbinskih regulatora u osnovnoj elektrani bila je nemogućnost da se kombinatorna veza ostvaruje automatski po neto padu. Merenje neto pada vode u uslovima u elektrani nije dalo zadovoljavajuće rezultate i uvođenje signala o neto padu u regulator izazivalo je nestabilan rad agregata. Veličinu neto pada vode postavljalo je pogonsko osoblje „ručno“ u hidromehaničkom bloku. I sama realizacija kombinatorne veze bila je sporna, pošto nije mogla da se održava u projektovanim vrednostima. Na regulatorima u dodatnoj elektrani dolazilo je izuzetno često do otkaza. Učestalost kvarova regulatora u osnovnoj elektrani, pojave oscilovanja snage agregata pri radu agregata na mreži, tehnološka prevaziđenost, zatim neažurnost isporučioaca opreme regulatora u dodatnoj elektrani oko servisiranja i isporuke rezervnih delova su bili osnovni razlozi za njihovu zamenu.

U okviru rekonstrukcije sistema turbinske regulacije do sada je na devet agregata izvršena kompletna zamena električnog dela turbinskog regulatora, bloka hidromehaničkog upravljanja, zamena elektroopreme sistema za pripremu ulja i kompletna zamena elektroopreme sistema automatike turbine. U sistemu za pripremu ulja postavljen je novi orman sa opremom za upravljanje radom ovog sistema, postavljeni su novi davači položaja rasteretnih ventila pumpi za ulje, novi davači nivoa ulja i havarijski niskog nivoa ulja u hidroakumulatoru, novi ventil za upuštanje vazduha i novi davači pritiska u hidroakumulatoru. Izvršena su prilagođenja postojećih tiristorških upuštača motora za pogon pumpi za ulje, a u slivnom rezervoaru postavljeni su novi davači temperature, nivoa ulja i prisustva vode u ulju [1]. Upravljanje radom opreme sistema za pripremu ulja realizovano je u PLC-u pomoću odgovarajuće programske podrške. Komunikacija operator-oprema za upravljanje ostvaruje se pomoću panel računara sa ekranom osjetljivim na dodir, koji je postavljen na prednja vrata ormara upravljanja. U okviru opreme automatike turbine zamenjeno je svih 16 davača loma čepova, 10 davača za reze servomotora usmernog aparata i servomotora radnog kola, zamenjeni su davači za prisustvo vode u generatorskom i turbinskom delu kapsule i u zaptivači vratila. Sistem za procurno ulje dopunjen je sa još jednim elektromotornim pogonom pumpe, zamenjeni su davači nivoa ulja u rezervoaru za procurno ulje i lokalni pult za upravljanje pogonima pumpi za procurno ulje. Upravljanje opremom automatike turbine i sistema za procurno ulje ostvareno je pomoću posebnog PLC-a smeštenog u orman u kome je smeštena oprema električnog dela turbinskog regulatora, a komunikacija operator-oprema automatike turbine ostvarena je pomoću panel računara na prednjim vratima ormara sa električnim delom turbinskog regulatora.

2.1. Digitalni turbinski regulator

Novi digitalni regulator brzine i aktivne snage agregata sastoji se od ormara u kome je smeštena oprema električnog dela turbinskog regulatora i modernizovanog hidromehaničkog bloka upravljanja. Regulator može da radi u automatskoj ili ručnoj regulaciji turbine, a upravljanje regulatorom može se vršiti lokalno sa ormara sa električnim delom turbinskog regulatora ili daljinski sa višeg nivoa upravljanja agregatom. Komunikacija sa opremom turbinskog regulatora vrši se pomoću panel računara sa ekranom osjetljivim na dodir koji je postavljen na prednja vrata ormara sa električnim delom regulatora [2]. Uprošćeni blok dijagram novog digitalnog turbinskog regulatora prikazan je na slici 1. U hidrauličkom delu turbinskog regulatora realizuje se pretvaranje električnih signala iz električnog dela u hidromehaničko delovanje

regulatora koje se prenosi na servomotore usmernog aparata i radnog kola u režimu automatskog upravljanja turbinom. Ručno upravljanje hidroturbinom vrši se mehanički pomoću zamajca reduktora ograničenja i ručice mehanizma za upravljanje lopaticama radnog kola sa hidromehaničkog bloka ili sa panela električnog dela regulatora posredstvom električnih signala koji dolaze od izlaznog stepena električnog dela regulatora u hidromehanički blok upravljanja.



Sl. 1. Uprošćeni blok dijagram turbinskog regulatora

Sistem za havarijsko zatvaranje vrši zaštitu hidroagregata. Osnovne komponente ovog sistema su havarijski razvodnik i razvodnik programskog zatvaranja. Pri havarijskom zaustavljanju usmerni aparat se zatvara, a lopatice radnog kola razvrću na ugao puštanja nezavisno od delovanja električnog dela regulatora. Pri aktiviranju havarijskog razvodnika isključuje se glavni razvodnik usmernog aparata. Razvodnik za programsko zatvaranje obezbeđuje da se uspostave dve brzine kretanja servomotora usmernog aparata u raznim područjima hoda servomotora.

Turbinski regulator održava brzinu agregata pri radu agregata u praznom hodu, pri radu u izolovanom sistemu i pri radu agregata na mreži kada se učestanost mreže razlikuje od 50 Hz za iznos veći od postavljene veličine. Optimalna veza između položaja lopatica radnog kola i otvora usmernog aparata za sve padove u opsegu 1,4 m do 12,75 m realizovana je programski u okviru električnog dela regulatora. Regulator je predviđen da radi i u režimu grupe regulacije aktivne snage elektrane. Za svaki od četiri režima automatske regulacije turbine postavlja se, na osnovu rezultata ispitivanja regulatora, poseban skup parametara. Prelazak iz jednog režima rada regulatora u drugi režim obavlja se automatski i bez promene položaja klipa servomotora usmernog aparata. Koeficijent pojačanja proporcionalnog dejstva pri regulaciji snage K_{pi} može se podešavati u opsegu 0,01 do 5, a vremenska konstanta integralnog dejstva T_{di} u opsegu 0,02 sec do 5 sec. Koeficijent pojačanja proporcionalnog dejstva pri regulaciji brzine

K_p podešava se u opsegu 0,1 do 10, a vremenska konstanta integralnog dejstva T_d u opsegu 1 sec do 60 sec. Vremenska konstanta filtera T_f i parametri prenosne funkcije za kompenzaciju vodenog udara K_{wk} , T_{wk} postavljaju se prema uslovima u elektrani.

Električni deo regulatora komunicira sa višim nivoom upravljanja preko računarske mreže i preko ožičenja kablovima. Opremljen je modulom za monitoring ispravnosti rada električnog dela regulatora pomoću koga se vrši monitoring ispravnosti kontrolera regulatora, elektrohidrauličkog sistema za praćenje, izlaznih modula i komunikacionog modula. U zavisnosti od događaja u procesu rada agregata regulator sprovodi normalno, brzo ili havarijsko zaustavljanje agregata izvršavajući komande od višeg nivoa upravljanja.

3. ISPITIVANJA TURBINSKOG REGULATORA

Cilj ispitivanja turbinskog regulatora je, kao i za sve druge industrijske proizvode, provera da li je ispitivani regulator podesan za način i uslove eksploatacije koje je propisao proizvođač. Kriterijumi za ocenu podesnosti zasnivaju se na ocenama o zadovoljavanju niza tehničkih zahteva koji su utvrđeni u tehničkoj dokumentaciji turbinskog regulatora i koji određuju njegovo projektovanje, izradu i eksploataciju. Tehnički dokumenti u kojima su specificirani tehnički zahtevi u vezi turbinskog regulatora su standardi [3] i tehnički uslovi. Tehničke uslove sastavlja i predlaže po pravilu proizvođač uz učešće, ako je potrebno, korisnika opreme i oni se odnose samo na određeni tip regulatora, a u njima se utvrđuju posebni zahtevi specifični za konkretni tip i namenu opreme. Korisnik turbinskog regulatora takođe doprinosi formiranju konačne verzije tehničkih uslova dostavljanjem primedbi na početni predlog, usaglašavanjem tehničkih uslova i formalnim prihvatanjem konačne verzije tehničkih uslova potpisivanjem ugovora. Rezultati ispitivanja sistema turbinske regulacije, posebno ispitivanja u elektrani, daju važan doprinos u proveri rada proizvođača opreme pri proračunavanju, projektovanju i izradi sistema turbinske regulacije i posebno turbinskog regulatora. Ispitivanja obuhvataju određivanje statičkih i dinamičkih karakteristika i proveru opsega i određivanje niza parametara turbinskog regulatora.

Ispitivanja sistema turbinske regulacije i posebno ispitivanja novih turbinskih regulatora za HE „Đerdap 2“ izvršena su u fabrici proizvođača i u elektrani. U elektrani izvršena su ispitivanja pred puštanje u rad i primopredajna ispitivanja. Ispitivanja su vršena sa ciljem da se odrede opsezi podešavanja parametara i odrede i podese najbolje veličine parametara turbinskog regulatora tako da se obezbedi stabilan i kvalitetan rad agregata pri startovanju, radu u praznom hodu, pri sinhronizaciji i uključenju agregata na mrežu, pri opterećivanju i rasterećivanju agregata kada agregat radi na mreži ili na izolovanom opterećenju. Posebna pažnja posvećuje se ispitivanju zaštitne funkcije regulatora u odnosu na turbinu u havarijskim situacijama.

3.1. Ispitivanja turbinskog regulatora u fabrici

U fabrici proizvođača izvršena su obimna i detaljna ispitivanja ispravnosti izvršavanja funkcija regulatora i njegovih karakteristika i parametara. Na ispitnom polju fabrike proizvođača opreme turbinskog regulatora postavljeni su električni i hidromehanički deo regulatora i povezani sa instalacijom na ispitnom polju. Kao izvršni organi regulatora na ispitnom polju korišćeni su hidraulički servomotori čiji je pun hod 500 mm.

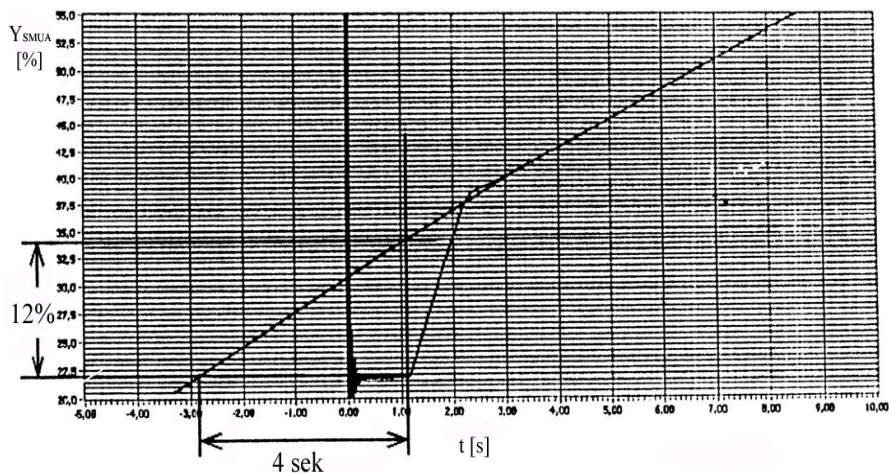
Pritisak regulacionog ulja na ispitnom polju iznosi 4,0 Mpa. Električni signali o položaju klipova servomotora usmernog aparata i radnog kola su ulazni signali u računar na kojem je postavljen matematički model turbine, generatora i karakteristika potrošnje. Izlazni signali iz računara koji daju podatke o izračunatoj veličini brzine turbine i o aktivnoj snazi generatora uvode se (kao ulazni signali) u električni deo turbinskog regulatora. Osim toga na posebnom pultu postavljena je oprema za upravljanje radom agregata i za signalizaciju stanja agregata.

U toku izrade komponenata turbinskog regulatora vršena su ispitivanja kvaliteta materijala od kojih se izrađuju komponente, provera kvaliteta izrade na osnovu rezultata ispitivanja pojedinih komponenti prema odgovarajućim tehničkim standardima i ispitivanja parametara i karakteristika komponenata. Izvršena su ispitivanja elektrohidrauličkih pretvarača usmernog aparata i radnog kola (merenja vibracija klipa pretvarača, protoka ulja, zone neosetljivosti, statičke karakteristike za male i velike promene ulaznog električnog signala, koeficijent pojačanja pretvarača), ispitivanja mehanizma pokretanje-zaustavljanje agregata, blokova upravljanja, pobudnih razvodnika usmernog aparata i radnog kola, glavnih razvodnika usmernog aparata i radnog kola, merenje karakteristike mehaničkog ograničenja otvaranja usmernog aparata u zavisnosti od neto pada i funkcionalna ispitivanja kompletnog hidromehaničkog bloka regulatora.

Po završenoj izradi opreme turbinskog regulatora na ispitnom polju proizvođača izvršena su ispitivanja regulatora radi određivanja statičke karakteristike i stalnog statizma regulatora i provera kombinatorne karakteristike pri različitim neto padovima. Zatim su izvršena merenja radi odabiranja skupa parametara regulatora pri radu u praznom hodu agregata, pri radu agregata u elektroenergetskom sistemu, pri radu agregata u izolovanom sistemu i pri radu u slaboj mreži. Parametri regulatora odabirani su prema kvalitetu regulacije pri malim promenama regulisane veličine, pa je zatim vršena provera rada turbinskog regulatora i odvijanje procesa u regulisanom sistemu pri velikim promenama regulisane veličine. U uslovima koji postoje na ispitnom polju ispitivani su dinamičko ponašanje regulatora i dinamičko ponašanje agregata u širokom opsegu padova, sa različitim podešenjima regulatora, pri otkazima pojedinih komponenti regulatora, pri prekidima ulaznih signala i pri raznim havarijskim situacijama. Takođe, izvršena su merenja kašnjenja regulatora, zone neosetljivosti regulatora, provera veličina različitih postavljenih veličina mrtve zone regulatora, provera rada regulatora pri prelasku iz automatske regulacije u ručnu regulaciju i obratno, provera veličine prvog i drugog startnog otvora usmernog aparata pri raznim neto padovima vode i provera rada regulatora u havarijskim situacijama. Na kraju izvršena su merenja postavljenih veličina parametara regulatora pri radu agregata u praznom hodu, pri radu u elektroenergetskom sistemu, pri radu u izolovanom sistemu i pri radu u slaboj mreži. Osim toga na ispitnom polju proizvođača turbinskog regulatora izvršena su i ispitivanja rada brzinskog releja i komandnog aparata.

Na slici 2 prikazani su rezultati merenja dva parametra turbinskog regulatora postavljenih na električnom delu regulatora kada agregat radi u slaboj mreži. Merenja su izvršena u skladu sa međunarodnim tehničkim standardima za ispitivanja turbinskih regulatora hidrauličkih turbina IEC 60308 i IEC 61632. U uslovima koji postoje na ispitnom polju simulira se da agregat radi u slaboj mreži. Postavljeno je da je aktivna snaga generatora $0,7 P_{nom}$, da ona iznosi 25% snage cele mreže i odabrano je da koeficijent pojačanja proporcionalnog dejstva regulatora iznosi $K_p = 5,8$, a vremenska konstanta integralnog dejstva $T_d = 4$ sec. Pri merenjima K_p i T_d prema uslovima

standarda postavlja se veličina stalnog statizma $b_p = 0\%$ i vremenska konstanta diferencijalnog dejstva na minimalno moguću veličinu što je pri ovom merenju bilo $T_v = 0,02$ sec. Na slici 2 prikazana je promena položaja klipa servomotora usmernog aparata posle odskočne promene signala zadate učestanosti sa 50 Hz na 49 Hz.



Sl. 2. Merenje koeficijenta pojačanja i vremenske konstante integralnog dejstva

Posle obrade rezultata merenja sračunava se da je izmerena veličina koeficijenta pojačanja proporcionalnog dejstva

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta f} = \frac{0,12}{0,02} = 6$$

a vremenska konstanta integralnog dejstva

$$T_d = \frac{\Delta t K_p \Delta f}{\Delta y} = \frac{4 \text{ sec} \times 6 \times 0,02}{0,12} = 4 \text{ sec}$$

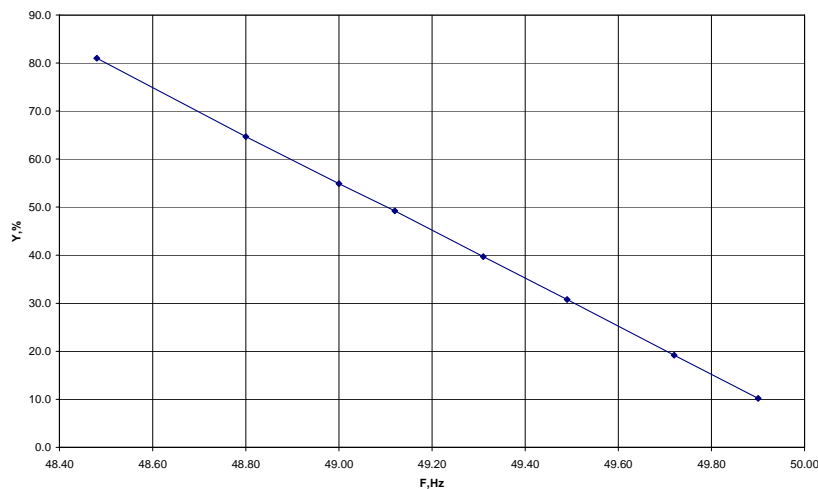
Izmerene veličine K_p i T_d nalaze se u opsegu $\pm 10\%$ oko postavljenih veličina tih parametara, koliko je i dozvoljeno prema tehničkim standardima [4].

3.2. Ispitivanja turbinskog regulatora pred puštanje u rad

Po završetku montaže opreme regulatora u elektrani izvršena su ispitivanja regulatora i podešavanje njegovih parametara pred puštanje modernizovanog sistema turbinske regulacije u rad. Na hidrauličkom delu regulatora podešeni su srednji položaji glavnih razvodnika usmernog aparata i radnog kola, elektrohidraulički pretvarači usmernog aparata i radnog kola, mehanizam pokretanja-zaustavljanja i mehanizam upravljanja lopaticama radnog kola, vremena otvaranja i zatvaranja usmernog aparata i radnog kola, mehanizam podešavanja regulatora po padu, aktiviranje kola automatike i sistem za havarijsko zaustavljanje. U okviru ispitivanja električnog dela regulatora izvršena su umeravanja ulaznih mernih signala brzine od svih davača brzine, aktivne

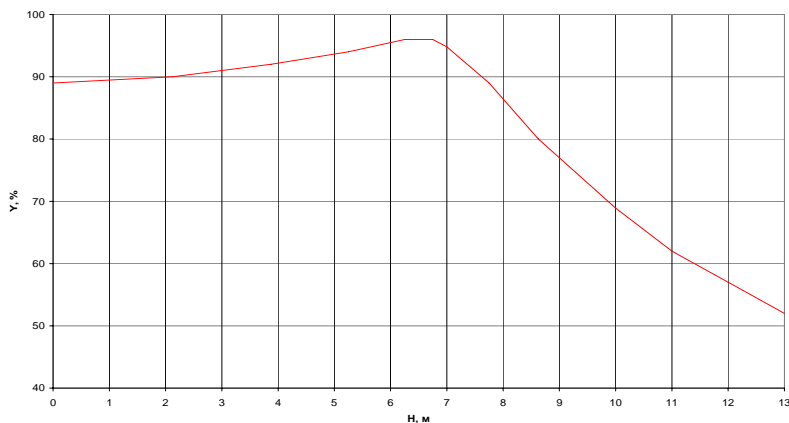
snage generatora, neto pada vode i položaja klipa servomotora usmernog aparata i radnog kola. Zatim je izvršeno podešavanje dinamičkog ponašanja lokalne i glavne konture regulatora položaja klipa servomotora usmernog aparata i radnog kola, simulacija pokretanja agregata do praznog hoda, simulacija normalnog, brzog i havarijskog zaustavljanja agregata i provera delovanja regulatora u simuliranim havarijskim situacijama. Pre pokretanja agregata u prazan hod sa nominalnom brzinom izvršena su merenja statičke karakteristike, zatim karakteristike ograničenja otvora usmernog aparata po padu, provera ostvarene kombinatorne karakteristike za različite neto padove i provera komunikacije regulatora sa višim nivoom upravljanja agregatom. Pri pokretanju agregata u prazan hod sa nominalnom brzinom izvršeno je podešavanje parametara u algoritmu za pokretanje agregata, zatim izbor i podešavanje parametara regulatora sa kojima je obezbeđeno kvalitetno regulisanje brzine agregata u praznom hodu i kvalitetno dinamičko odvijanje procesa. Zatim je izvršeno ispitivanje regulatora pri sinhronizaciji generatora. Na kraju ove grupe ispitivanja izvršena su ispitivanja rada regulatora pri zbacivanjima snage i pri havarijskom zaustavljanju.

Na slici 3 prikazani su rezultati merenja statičke karakteristike regulatora kada je postavljena veličina stalnog statizma $b_p = 4\%$. Merenja radi utvrđivanja statičke karakteristike turbinskog regulatora izvode sa ciljem da se proveriti da li se izmerena veličina stalnog statizma podudara sa postavljenom veličinom stalnog statizma. Ispitivanja se sprovode na zaustavljenom agregatu. Simulira se da agregat radi u praznom hodu, kada regulator reguliše brzinu agregata, dovede se klip servomotora usmernog aparata na polovinu svog ukupnog hoda, prekine se povratna veza po brzini i menja se u određenim iznosima učestanost ulaznog signala iz spoljnog izvora promenljive učestanosti. Kada servomotor pređe u novi stacionarni položaj mere se učestanost ulaznog signala i položaj klipa servomotora. Na osnovu rezultata merenja crta se statička karakteristika regulatora, pa se iz nagiba statičke karakteristike određuje izmerena veličina stalnog statizma. Izmerena veličina stalnog statizma iznosi 4,03 %.



Sli.3. Statička karakteristika regulatora pri $b_p = 4\%$

Na slici 4 prikazana je karakteristika električnog ograničenja otvora usmernog aparata za razne veličine neto pada vode. Signal o veličini neto pada vode formira se u posebnom bloku za merenje hidrauličkih veličina i uvodi se u električni deo regulatora. Osim toga predviđeno je da se veličina neto pada može formirati zadavanjem veličine neto pada kao parametra. Tačke na ovoj karakteristici izmerene su tako što su u električnom delu regulatora postavljane razne veličine neto pada.



Sl. 4. Karakteristika ograničenja otvora usmernog aparata po neto padu

Kapsulni agregati u HE „Đerdap 2“ imaju mali moment inercije. Osim toga vremenska konstanta agregata je oko tri puta manja od vremenske konstante cevovoda za dovodenje vode u radno kolo turbine. Ove okolnosti stvaraju teške uslove za ispunjavanje zahteva u vezi tačnosti regulacije brzine agregata u praznom hodu. Uslovi rada regulatora u elektrani su još dodatno otežani jer u okviru projekta modernizacije sistema turbinske regulacije nije predviđena zamena servomotora usmernog aparata i radnog kola niti revizija usmernog aparata. Zbog svega toga prilikom puštanju u rad prvih regulatora nije se mogla postići tačnost regulacije brzine agregata u praznom hodu od 0,1 % od nominalne brzine. Sprovedena su dodatna ispitivanja na osnovu kojih su utvrđeni uzroci ovog problema.

3.3. Primopredajna ispitivanja turbinskog regulatora

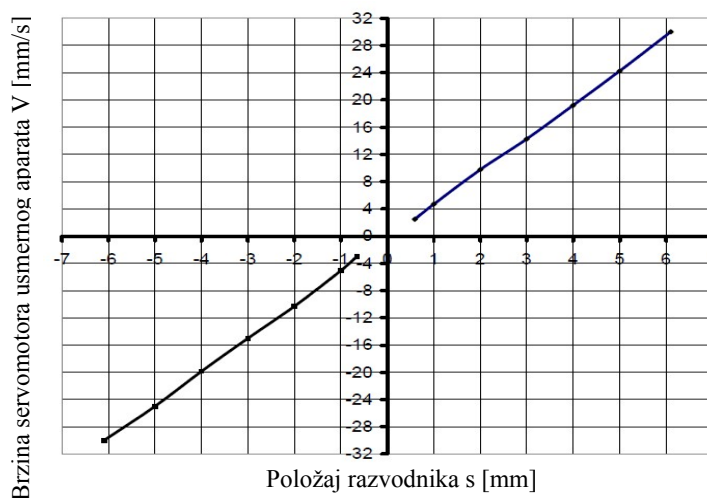
U okviru sprovođenja programa primopredajnih ispitivanja regulatora izvršena su ispitivanja pri zaustavljenom agregatu i osušenom protočnom traktu, pri radu agregata u praznom hodu i pri radu agregata u elektroenergetskom sistemu.

Ispitivanja turbinskog regulatora kada je spušten predturbinski zatvarač, osušen protočni trakt i agregat zaustavljen obuhvataju proveru opsega promena parametara regulatora koji određuju njegovo funkcionisanje u raznim režimima rada agregata, merenje postavljenih veličina parametara za razne režime rada i merenje parametara izvršnih organa turbinskog regulatora. Tokom primopredajnih ispitivanja na zaustavljenom agregatu u HE „Đerdap 2“ izvršena su merenja vremenskih konstanti servomotora usmernog aparata i servomotora radnog kola na osnovu rezultata merenja brzinskih karakteristika servomotora usmernog aparata i servomotora radnog kola, merenja vremena otvaranja i vremena zatvaranja servomotora usmernog aparata i

radnog kola usled delovanja regulatora, merenja vremena otvaranja i vremena zatvaranja servomotora usmernog aparata i radnog kola usled delovanja sistema havarijskog zatvaranja, provera realizacije kombinatorne karakteristike za različite neto padove, provera karakteristike električnog ograničenja otvaranja usmernog aparata od neto pada, provera zavisnosti prvog i drugog startnog otvora usmernog aparata od neto pada, merenje kašnjenja servomotora usmernog aparata i servomotora radnog kola, određivanje zone neosetljivosti regulatora, merenje postavljene veličine stalnog statizma i provera rada regulatora i sistema havarijskog zatvaranja usmernog aparata pri normalnom, brzom i havarijskom zaustavljanju agregata.

U ovom radu prikazuju se rezultati merenja vremenske konstante servomotora usmernog aparata. Vremenska konstanta servomotora usmernog aparata T_{SMUA} je vreme potrebno da klip servomotora pređe svoj puni hod kada se klip glavnog razvodnika tog servomotora nalazi na teoretski maksimalnom (ne na konstruktivno maksimalnom) odstojanju od svog neutralnog položaja. Vremenska konstanta servomotora usmernog aparata izračunava se na osnovu maksimalnog hoda klipa servomotora Y_{max} , maksimalnog teoretskog hoda klipa glavnog razvodnika $s_{teor,max}$ i nagiba brzinske karakteristike servomotora usmernog aparata dv/ds . Brzinska karakteristika servomotora grafički prikazuje zavisnost brzine pomeranja (na otvaranje i na zatvaranje) klipa servomotora usmernog aparata od veličine pomeranja klipa glavnog razvodnika od njegovog neutralnog položaja. Pri izvodenju merenja radi određivanja brzinske karakteristike servomotora pomeranje klipa servomotora na otvaranje ili na zatvaranje, pri izabranoj veličini odstupanja položaja klipa glavnog razvodnika od njegovog neutralnog položaja, vršeno je delovanjem na mehanizam ograničenja otvaranja usmernog aparata u zahtevanom smeru. Pomoću akvizicionog sistema registrovan je položaj klipa servomotora, pa se na osnovu tako dobijenih podataka merila veličina pomeranja klipa ΔY ostvarena za vremenski interval Δt , odnosno izračunavala brzina v pomeranja klipa servomotora pri određenom (postavljenom, zadatom) odstupanju klipa razvodnika od neutralnog položaja. Pri ovim merenjima odabrana veličina odstupanju klipa razvodnika od njegovog neutralnog položaja obezbeđivana je postavljanjem graničnika određene debljine. Ukupan hod klipa glavnog razvodnika na otvaranje i na zatvaranje iznosio je 12,2 mm., Stvarnom neutralnom (srednjem) položaju klipa glavnog razvodnika, pri jednakim preklapanjima na otvaranje i na zatvaranje odgovara hod klipa 6,1 mm, od graničnog položaja, a ukupno preklapanje glavnog razvodnika iznosi 0,8 mm. Na osnovu merenja brzine klipa servomotora usmernog aparata na otvaranje i na zatvaranje pri nekoliko različitih veličina odstupanja klipa glavnog razvodnika od neutralnog položaja konstruisana je brzinska karakteristika servomotora usmernog aparata prikazana na slici 5.

Sa prikaza brzinske karakteristike servomotora mogu se uočiti male razlike u veličinama brzine klipa servomotora pri pomeranju na otvaranje i na zatvaranje pri jednakim veličinama odstupanja klipa razvodnika od njegovog neutralnog položaja. Konstruktivne površine servomotora na otvaranje i na zatvaranje su međusobno jednake. Razlike u veličinama brzine klipa servomotora na otvaranje i na zatvaranje nastale su zbog vrlo velikih praktičnih teškoća da se pre svakog merenja brzine klipa servomotora sasvim tačno utvrdi srednji položaj klipa razvodnika uz pretpostavku da je glavni razvodnik u potpunosti izrađen prema tehničkoj dokumentaciji u kojoj je navedeno da su preklapanja razvodnika na otvaranje i na zatvaranje međusobno jednaka i da iznose 0,4 mm.



Sl. 5 Brzinska karakteristika servomotora usmernog aparata

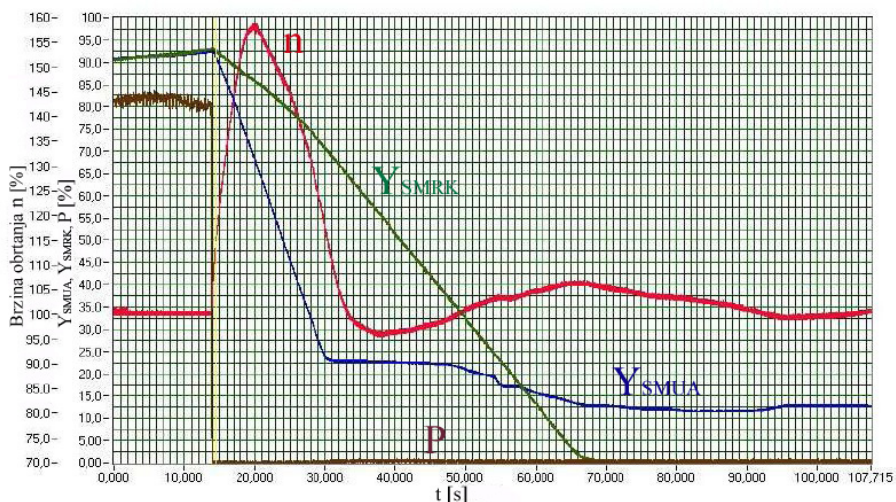
Teoretski maksimalni hod klipa glavnog razvodnika jednak je proizvodu koeficijenta pojačanja električnog signala na ulazu elektrohidraulički pretvarač, punog opsega promene tog signala, koeficijenta pojačanja elektrohidrauličkog pretvarača i koeficijenta prenosa poluga u hidromehaničkom pultu (odnos dužine poluge od osovine klipa elektrohidrauličkog pretvarača do osovine klipa glavnog razvodnika i dužine poluge od osovine klipa elektrohidrauličkog pretvarača do osovine klipa pobudnog razvodnika). Veličina $s_{teor.max}$ dakle zavisi od konstrukcije hidromehaničkog bloka regulatora i pojačanja ulaznog električnog signala i za ispitivani regulator ona iznosi 1104 mm. Prema tome izmerena veličina vremenske konstante servomotora usmernog aparata iznosi

$$T_{SMUA} = \frac{Y_{max}}{\frac{dv}{ds} s_{teor.max}} = 0,141 \text{ sec}$$

i nalazi se u opsegu veličina koji se preporučuje u tehničkim standardima za turbinske regulatore hidrauličkih turbina.

Pri ispitivanju turbinskog regulatora pri radu agregata u praznom hodu i pri radu agregata u elektroenergetskom sistemu analizira se uticaj podešenja parametara regulatora na dinamičko odvijanje procesa regulacije brzine i snage agregata. Određuje se skup najboljih podešenja parametara za rad agregata u praznom hodu, na mreži, u izolovanom sistemu i na slaboj mreži tako da se obezbedi stabilan rad agregata u svim režimima rada, siguran start agregata, sinhronizacija na mrežu i stabilno opterećivanje i rasterećivanje agregata. Posebna pažnja posvećuje se ispitivanju rada regulatora u havarijskim situacijama. U hidroelektrani “Đerdap 2” izvršena su u okviru ispitivanja turbinskog regulatora pri radu agregata u praznom hodu proverena opsega rada zadavača brzine, proverena rada regulatora u procesu sinhronizacije agregata pri radu automatskog sinhronizatora i pri automatskom podešavanju učestanosti napona generatora na učestanost sistema i proverena stabilnosti regulacije brzine. Pri ispitivanju turbinskog regulatora pri radu agregata u elektroenergetskom sistemu izvršena su ispitivanja stabilnosti regulacije aktivne snage generatora, proverena rada zadavača aktivne snage u

opsegu do linije ograničenja otvora usmernog aparata, ispitivanja rada regulatora pri opterećivanju i pri rasterećivanju agregata, ispitivanja rada regulatora pri zbacivanjima snage i pri aktiviranju sistema havarijskog zatvaranja usmernog aparata. Na slici 6 prikazani su rezultati merenja brzine agregata, položaja klipa servomotora usmernog aparata i položaja klipa servomotora radnog kola pri zbacivanju snage 22 MW na agregatu 9 pri neto padu $H = 6,56$ m.



Sl. 6 Zbacivanje snage 22 MW pri neto padu $H=6,56$ m.

Maksimalna brzina agregata od 1,58 n_{nom} postignuta je za 6,5 sec. posle isključenja prekidača generatora, radno kolo se zatvorilo i servomotor usmernog aparata prešao je u novi stacionarni položaj za 53 sec. posle potpunog rasterećenja agregata.

4. ZAKLJUČAK

U okviru projekta modernizacije sistema turbinske regulacije u hidroelektrani „Đerdap 2“ izvršena je zamena turbinskih regulatora. Novi digitalni turbinski regulator je robustan i fleksibilan regulator u smislu jednostavne izmene parametara regulatora i parametara algoritma regulacije agregata. Novi regulator realizuje dovoljno tačnu regulaciju brzine po PID zakonu i dovoljno tačnu regulaciju aktivne snage po PI zakonu. Izvršena su obimna i detaljna ispitivanja komponenta regulatora i kompletnog regulatora u fabrici proizvođača. Takođe su izvršena ispitivanja turbinskog regulatora tokom montaže regulatora u elektrani, zatim podešavanja parametara regulatora i provera funkcija i karakteristika regulatora pred puštanje u rad. Primopredajna ispitivanja regulatora izvršena su posle oko 24 meseci eksploatacije regulatora. U okviru svih ovih ispitivanja ispitivani su statičko i dinamičko ponašanje turbinskog regulatora, mereni njegovi parametri i karakteristike i vršen izbor parametara regulatora sa kojima se ostvaruje kvalitetan rad regulatora i sistema koji on reguliše. Posebna pažnja posvećena je ispitivanjima rada regulatora u havarijskim situacijama. Rezultati ispitivanja pokazuju da turbinski regulator obezbeđuje siguran i stabilan rad agregata pri pokretanju agregata, radu u mreži i pri normalnom, brzom i havarijskom zaustavljanju.

LITERATURA

- [1] S. Bogdanovic, Z. Stanojevic, D. Cojkic: „Modernization of hydro-turbine governor“, The 8th international Power Systems Conference, Timisoara, Romania, 4-6 November, 2009., p.p. 85-93.
- [2] Panel upravljanja EGR MP-2-1-220/50-1-0-26-UHL4. Uputstvo za eksploataciju, Silovite mašine, 2008.
- [3] CEI IEC 61362 International Standards „Guide to specification of hydraulic turbine control systems“, 1998.
- [4] CEI IEC 60308 International Standards „Hydraulic turbines- Testing of control systems“, 2005.

Abstract: In the paper new turbine governing system at HPP „Derdap 2“ and particularly new turbine governor are presented. Characteristics and parameters of new digital turbine governor are described. Measurements performed at manufacturer test field, tests before putting regulator into operation and warranty tests are presented. In this paper each group of tests is illustrated with description of test procedures and with presentation of results of some characteristics measurements and turbine governor parameters measurements.

Key words: turbine regulation, speed regulation, power regulation

TESTS OF TURBINE GOVERNOR AT HPP „DJERDAP 2“

S. Bogdanović¹, Z. Stanojević², D. Cojkić², D. Arnautović¹, D. Džepčeski¹

¹Electrical engineering institute “Nikola Tesla“, Beograd, ²HE “Derdap 2“, Negotin