

MALA HIDROELEKTRANA U ULOZI KUĆNOG AGREGATA

Dane Džepčeski¹, Vladimir Stanojčić, Nemanja Miločić, Marko Mijić²,
Mladenko Đaković³, Nedeljko Todić, Anđelko Grahovac

¹ Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija

² ELNOS BL, Banja Luka, Republika Srpska, BiH

³ ZP „Hidroelektrane na Vrbasu“ A. D. Mrkonjić Grad, Republika Srpska, BiH

Stručni rad

DOI: 10.5937/termoteh_____

Mala hidroelektrana (mHE) koja se nalazi u okviru objekta HE „Bočac“ izgrađena je sa idejom o mogućoj višenamenskoj upotrebi. Jedan od načina upotrebe mHE, koji je predviđen projektom, je rad mHE u ulozi kućnog agregata HE „Bočac“. Pre tehničkog prijema objekta mHE, izvršena su neophodna podešavanja i ispitivanja opreme hidroagregata pred njegovo puštanje u rad. U radu je prikazan deo rezultata navedenih ispitivanja, koji se pre svega odnosi na režim rada mHE u ulozi kućnog agregata, odnosno kada agregat mHE napaja potrošače u ostrvskoj mreži. Navedeni režim rada agregat je sa stanovišta opreme najzahtevniji i kao takav je za analizu najinteresantniji. Prikazani su rezultati ispitivanja rada agregata prilikom trenutnog opterećenja i rasterećenja agregata, uključanjem i isključenjem različitih delova izolovane 35kV mreže, uključanjem i isključenjem potrošača u 0,4kV razvodu sopstvene potrošnje i potrošača u pomoćnim objektima HE „Bočac“.

Ključne reči: Mala hidroelektrana, kućni agregat, ostrvski rad.

UVOD

Agregati koji se koriste za obezbeđivanje električne energije neophodne za pokretanje elektroenergetskog objekta od velikog značaja, kakav je elektrana, iz beznaponskog stanja, moraju biti pouzdani i sa gotovo stalnom potpunom raspoloživošću. Agregati sa navedenom primenom, bilo da su dizel električni, turbo ili hidroagregati, najčešće se u inženjerskoj praksi označavaju jedinstvenim pojmom „Kućni agregati“. Hidroagregati, koji se koriste kao kućni agregati u hidroelektranama, trebalo bi da imaju najviši stepen raspoloživosti, jer koriste već postojeći vodni resurs koji je podrazumevano raspoloživ u svakoj hidroelektrani.

Korišćenje male hidroelektrane, pored njene osnovne uloge proizvodnje električne energije iz obnovljivog izvora, kao kućnog agregata, je pozitivan pristup projektu objekta ove vrste. Objekat mHE „Bočac“ sagrađen je kao višenamenski. Između ostalih, jedna od predviđenih namena je i upotreba mHE kao kućnog agregata za pokretanje iz beznaponskog stanja HE „Bočac“ i buduće HE „Bočac 2“.

Rad kućnog agregata je u osnovi rad agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem. Navedeni način rada predstavlja najzahtevniji način rada svakog agregata. Ovde se pre svega misli na zahtevnost režima ostrvskog rada u smislu stalno prisutnih promena učestanosti i napona. Promene učestanosti i napona su posledica promena aktivnog i reaktivnog opterećenja generatora. Promene opterećenja su slučajne prirode. Slučajne su kako po vremenu svog pojavljivanja tako i po veličini same promene. Zadatak naponske i turbinske regulacije je da navedene promene budu u prihvatljivom opsegu odstupanja čije su granične vrednosti veličina manje od vrednosti veličina pri kojima dolazi do prorade električnih i hidromehaničkih zaštita agregata. Zbog razlike u vremenu odziva, koja je u slučaju sistema za turbinsku regulaciju, najmanje za red veličine, duže nego u slučaju odziva sistema za naponsku regulaciju, brz, precizan i stabilan odziv sistema za turbinsku regulaciju je, prilikom rada agregata u ostrvu, od kritične važnosti.

Rezultati ispitivanja rada agregata i rezultati podešavanja primarne opreme agregata, prilikom rada agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem, prikazani su u daljem tekstu. Prilikom prikaza i komentara rezultata, zbog njihovog značaja, naglasak je stavljen na rezultate ispitivanja i podešavanja sistema za turbinsku regulaciju.

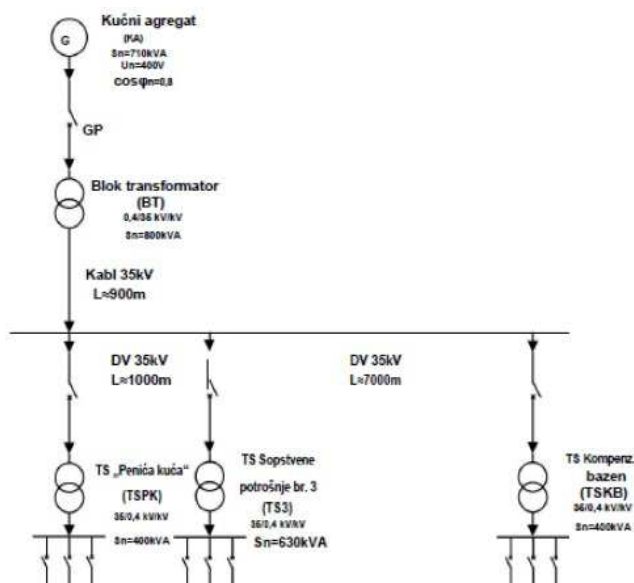
Tabela 1: Osnovni tehnički podaci o objektu mHE „Bočac“

Parametar	Oznaka	Veličina	Jedinica
Dovod vode			
Neto maksimalna visinska razlika	H_{net}^{max}	46	m
Neto nominalna visinska razlika	H_{net}^{min}	38	m
Instalirani protok	Q_i	1400	l/s
Prečnik cevovoda	D_c	0,8	m
Dužina cevovoda	H_c	168	m
Turbina			
Turbina, vrsta	Francis		
Nominalni pad	H_n	46	m
Nominalni protok	Q_n	1,4	m ³ /s
Nominalna snaga turbine	P_n	560	kW
Prečnik radnog kola turbine	D_o	550	mm
Masa rotora turbine	m_r	180	kg
Generator			
Generator, vrsta	Sinhroni		
Nominalna prividna snaga	S_n	710	kVA
Nominalni faktor snage	$\cos\phi_n$	0,8	
Nominalni broj obrtaja	n_n	750	min ⁻¹
Moment inercije rotora generatora	I	90	kgm ²
Prečnik zamajca	D_z	0,5	m
Masa zamajca	m_z	140	kg

Sistem za turbinsku regulaciju je po svojoj konstrukciji elektrohidrauličkog tipa. Električni deo turbinske regulacije realizovan je kao hardverski i programski modul na PLC-u (Programmable Logic Controller) koji je deo integrisanog sistema upravljanja, regulacije i zaštite hidroagregata. Osnovu programskog modula čini PID (Proporcional-Integral-Diferencijal) algoritam regulacije, kombinovane redno-paralelne strukture. Hidraulični deo sistema za turbinsku regulaciju realizovan je korišćenjem elektrohidrauličnih razvodnika. Aktuator servomotora sprovodnog aparata turbine je elektrohidraulični razvodnik proporcionalnog dejstva. Opseg radnog pritiska hidrauličnog ulja je 90+110bar.

OPIS STRUKTURE I KONFIGURACIJE OSTRVSKE MREŽE

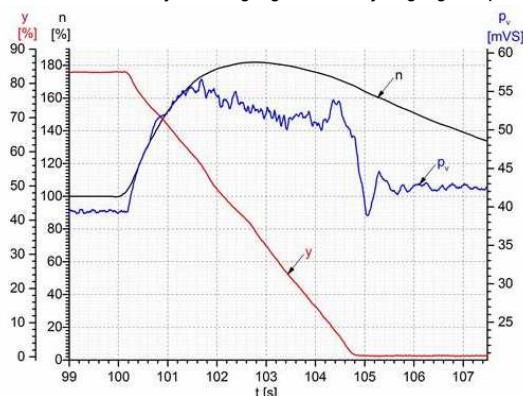
predstavljaju tačke priključenja krajnjih potrošača čiji je rad neophodan u procesu pokretanja proizvodnih agregata u HE „Bočac“ iz beznaponskog stanja. Da bi električna energija bila isporučena krajnjim potrošačima, moraju se izvršiti dve transformacije napona 0,4/35 kV/kV i 35/0,4 kV/kV. Ova činjenica je nepovoljna prevashodno sa stanovišta sistema za naponsku regulaciju kućnog agregata. Ukupna prividna snaga transformatora, uključujući i blok transformator, koja se napaja sa statorskih izvoda generatora kućnog agregata je veća od 2,2MVA. Uključenja, dva najveća od prikazanih transformatora, u prazan hod, manifestuje se kao odskočni poremećaji veći od -10%Un i -5%nn Takođe, da bi svi potrošači u ostrvu bili napojeni, u praznom hodu mora se još uključiti približno 0,9km 35kV-nog kabla, podužnog opterećenja 70-90kVAr/km kapacitivno i nadzemni 35kV-ni vod ukupne dužine 8km, podužnog opterećenja 3-5kVAr/km kapacitivno. Prisustvo navedenog kapacitivnog opterećenja donekle olakšava uključnje transformatora u praznom hodu. Ova činjenica je najviše izražena prilikom jednovremenog uključjenja blok transformatora i kabla 35kV.



Slika 1: Jednopolna šema ostrvske mreže

REZULTATI ISPITIVANJA

Pre nego što se pristupilo ispitivanju i podešavanju algoritma turbinske regulacije, koji je kao programski modul implementiran u PLC-u integrisanog sistema upravljanja, regulacije i zaštita agregata, kada agregat radi u ostrvu sa izolovanim opterećenjem, izvršena su detaljna ispitivanja i podešavanja primarne i pomoćne agregatne opreme na zaustavljenom agregatu, kada je agregat u praznom hodu i kada je agregat na mreži [1-3].



Slika 2: Zbacivanje nominalne snage generatora sa havarijskim zatvaranjem

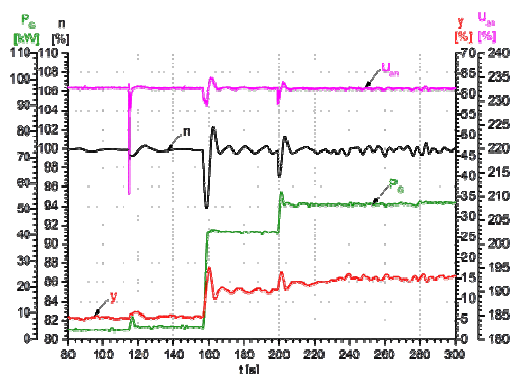
je odnos T_m/T_w blizak jedinici, potrebno koristiti elektrohidraulične regulatore sa realizovanim PID algoritmom regulacije da bi se ostvario zadovoljavajući kvalitet regulacije. Na istom mestu, navodi se da je odnos $T_m/T_w \approx 1$ donja granica za mogućnost ostvarivanja zadovoljavajućeg kvaliteta regulacije. U literaturi se kao kriterijum za mogućnost dobre regulacije navodi odnos $T_m/T_w \geq 3$, dok se u [5] preporučuje da navedeni odnos bude $T_m/T_w \geq 4$. Provera verodostojnosti rezultat proračuna, koji se odnosi na vremensku konstantu agregata T_m , izvršena je na osnovu rezultata ogleđa zbacivanja nominalne snage agregata isključenjem generatorskog prekidača. Sa Slike 2 može se videti da je strmina krive brzine obrtanja agregata, prilikom porasta brzine, vrlo velika i da je maksimalna brzina, od gotovo $182\%n_n$, postignuta pre isteka treće sekunde nakon izazivanja poremećaja. Takođe, sa Slike 2 može se videti da je sa minimalnim vremenom zatvaranja sprovodnog aparata turbine od $T_r=5,8s$ dostignuta preporučena granica dinamičkog porasta relativnog pritiska vode ispred predturbinskog zatvarača od 35%.

Imajući u vidu nepovoljni odnos T_m/T_w , proračun i izbor opsega parametara PID regulatora, za rad agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem, izvršen je pažljivo, uz uvažavanje konstrukcionih osobina hidromehaničke opreme. Izbor parametara regulatora, koji su obezbeđivali zadovoljavajući kvalitet regulacije i stabilan rad, izvršen je nakon izvođenja niza ogleđa delimičnog opterećivanja i rasterećivanja agregata prikazanih na Slikama 3-6. Rezultati navedenih ogleđa preuzeti su iz izveštaja o sprovedenim ispitivanjima prilikom rada agregata u ostrvu [6]. Na Slikama 2-6 sa n je označena brzina obrtanja agregat, sa y je označen položaj klipa servomotora sprovodnog aparata turbine, sa P_G aktivna snaga generatora i sa U_{an} fazni napon statora generatora. U nazivu navedenih slika korišćene su skraćenice, odnosno akronimi, imena transformatorskih stanica prikazanih na jednopolnoj šemi ostrva, videti Sliku 1.

Na Slici 3 prikazano je uključivanje blok transformatora BT, zatim uključivanje TSPK sa pripadajućim stalnim opterećenjem i na kraju uključivanje asinhronih motora u 0,4kV podrazvodu TSPK. Na opterećenju agregat od

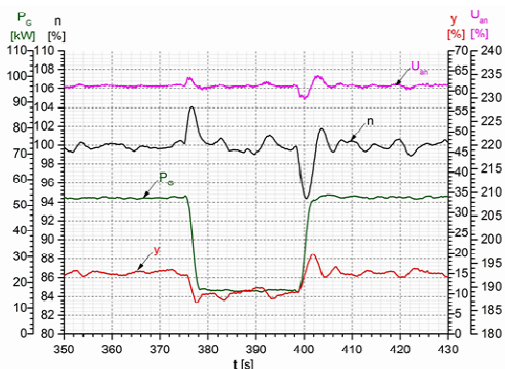
Ulazni podaci za proračun vremenskih konstanti od interesa, preuzeti su iz dostupne tehničke dokumentacije proizvođača opreme, kao i iz projekta ulazne građevine i cevovoda pod pritiskom. Proračun je jednim delom mogao biti proveren poređenjem rezultata proračuna sa rezultatima ispitivanja koja su sprovedena prilikom rada agregata na mreži [3].

Rezultat proračuna vremenske konstante agregata T_m i vremenske konstante dovoda vode T_w , odnosno njihovog odnosa T_m/T_w , ukazivao je na nedostatak ukupne zamajne mase obrtnih delova agregata koja je potrebna za ostvarivanje kvalitetne regulacije brzine obrtanja agregata prilikom rada agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem. Izračunati odnos $T_m/T_w=1,2\pm 0,1$ može se smatrati vrlo nepovoljnim. U važećoj tehničkoj regulativi [4] navodi se da je u slučaju da



Slika 3: Uključenje BT sa 35kV-nim kablom do TSPK, uključivanje TSPK sa potrošačima i uključivanje pumpi za vodu podrazvodu 0,4kV TSPK

približno 10%PGn, izvršen je ogled sa uključanjem i isključenjem čisto otpornog opterećenja koje je za potrebe ispitivanja bilo namenski priključeno na jedan od izvoda u 0,4kV podrazvodu TSPK. Sprovedenjem opisanog ogleda,

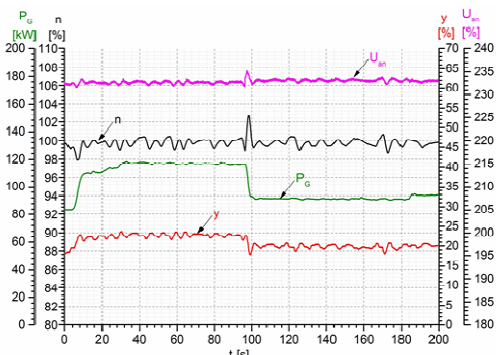


Slika 4. Uključivanje i isključivanje čisto rezistivnog tereta u 0,4kV razvodu TSPK na već postojeće opterećenje prikazano na Slici 2.

ispitivanja odziva agregata prilikom manipulacije potrošačima na 35kV i 0,4kV u različitim delovima napojenog ostrva. Na slikama 5 i sl. 6 prikazani su rezultati



Slika 5. Uključivanje TSPK sa potrošačima i TSKB. Manipulacija hidrauličnim pumpama u 0,4kV podrazvodu TSKB



Slika 6. TSPK, TSKB i TS3 napojene. Uključenje i isključenje opterećenja koje je priključeno u 0,4kV razvodu TS3

ispitano je ponašanje regulatora kada je na agregat priključeno čisto omsko opterećenje koje najnepovoljnije utiče na stabilnost regulacije i čiji je koeficijent samoregulacije, pri konstantnom naponu $e_g = -1$. Dodatna otežavajuća okolnost je bila ta da je otporno opterećenje, vezano praktično na red sa induktivnostima namotaja transformatora BT i TSPK, tako da je ukupni koeficijent samoregulacije opterećenja u navedenom slučaju $e_n \leq -1$. Rezultati ogleda prikazani su na Slici 4.

Korišćeno je čisto omsko opterećenje približne snage 6%PGn. Propadi i porasti brzine obrtanja prilikom nagle promene opterećenja od 6%PGn su u granicama od +4 do -5,5%nn, odnosno od +2 do -2,75Hz, dok je tačnost regulacije u kvazistacionarnom stanju u opsegu koji je manji od $\pm 1\%nn$, odnosno $\pm 0,5Hz$.

Na slikama 5 i sl. 6 prikazani su rezultati ispitivanja odziva agregata prilikom manipulacije potrošačima na 35kV i 0,4kV u različitim delovima napojenog ostrva. Na sl. 5 prikazano je uključivanje TSPK sa potrošačima, uključivanje TSKB i manipulacija hidrauličnim pumpama u 0,4kV podrazvodu TSKB. Na sl. 6 prikazano je uključivanje i isključenje opterećenja koje je priključeno u 0,4kV podrazvodu TS3 kada su TSPK, TSKB i TS3 već bile napojene.

KOMENTAR REZULTATA ISPITIVANJA

Prilikom sprovođenja svih ogleda, sa planskim uključanjem opterećenja, koje je po veličini do 6%PGn, trenutni propadi i porasti brzine su bili u opsegu od $\pm 6\%nn$, odnosno $\pm 3Hz$. Odzivi su dinamični i stabilni. Postoji određena nesimetričnost odziva po brzini obrtanja agregata, između slučaja opterećenje i slučaja rasterećenja agregata. Porasti brzina su po apsolutnoj vrednosti nešto manji od propada brzine. Takođe, može se uočiti postojanje prebačaja po brzini, nakon prethodnog propada brzine koje je posledica naglog opterećenja agregata. I jedna i druga pojava posledica su osobina dovoda vode kao i činjenice da je vreme otvaranja sprovodnog aparata oko 20% duže u odnosu na vreme njegovog zatvaranja.

Najveće odstupanje brzine obrtanja agregata, od nominalne vrednosti, traje dovoljno kratko tako da ne dolazi do prorade vremenskog člana nadfrekventne, odnosno podfrekventne zaštite. Takođe, promena brzina, odnosno brzina promene njene vrednosti, je manja od postavljene granične vrednosti u članu koji reaguje po gradijentu promene brzine u nadfrekventnoj i podfrekventnoj zaštiti. Praktična iskustva, prilikom rada agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem, koja su

prezentovana u člancima i literaturi su veoma oskudna. U [7] prezentovan je slučaj rada u ostrvu jednog ili dva agregata zajedno, u mHE sa ukupno instalirana tri agregata. U navedenom slučaju, promena brzine obrtanja agregata, odnosno učestanosti napona u ostrvu, kretala se u granicama -6,2 do +7,5% u odnosu na svoju nominalnu vrednost. Što se tiče preporučenih vrednosti za podešavanje električnih nadfrekventnih i podfrekventnih zaštita u [8] je navedeno da opseg podešenja treba da bude u granicama od -6% do +5%, sa vremenskim zatezanjem do 0,5s, dok je za graničnu vrednost gradijenta promene brzine obrtanja agregata, preporučeno da bude manja ili jednaka 2,5Hz/s sa vremenskim zatezanjem koje nije veće od 0,5s. Takođe, na istom mestu je navedeno da su naznačena podešenja zaštita primenjiva za promene opterećenja agregata u opsegu 4-15% PGn, u zavisnosti od ukupne zamajne mase prisutne u ostrvu.

ZAKLJUČAK

Agregat koji je projektovan za rad u mHE sa podrazumevanim režimom rada na mreži, može se upotrebiti i u radu u ostrvu sa izolovanim opterećenjem. Ukoliko se agregat namerava upotrebiti za rad u ostrvu, u vidu se mora imati činjenica da agregat, koji je projektovan samo za uobičajeni rad na mreži, može imati ozbiljan nedostatak zamajne mase u svojim rotirajućim delovima, koja je kao takva potrebna za ostvarivanje kvalitetne regulacije brzine obrtanja prilikom rada agregata u ostrvu. Naknadno dodavanje rotirajućih masa, ukoliko se uopšte može izvesti, često je veoma ograničeno postojećom konstrukcijom agregata. Odgovarajućim izborom delova sistema za turbinsku regulaciju, kao i pravilnim izborom realizacije i strukture regulacione funkcije kao i njenom pažljivom parametrizacijom, može se do određene granice uspešno nadomestiti nedostatak zamajnih masa i postići zadovoljavajući rezultati u regulaciji brzine obrtanja agregata i prilikom rada agregata u ostrvu sa izolovanim opterećenjem. Poštujući ograničenja kakva jedan ovakav pogon može imati, agregati u mHE koji su namenjeni prevashodno za rad na mreži, mogu se uspešno upotrebiti i kao kućni agregati koji obezbeđuju pokretanje većih elektroenergetskih objekata iz beznaponskog stanja.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansijsku potporu, projekat TR33024. Takođe, autori se zahvaljuju ZP „Hidroelektrane na Vrbasu“ A. D. Mrkonjić Grad, posebno upravniku i osoblju HE „Bočac“ na saradnji i tehničkoj podršci.

REFERENCE

- [1] -Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ A.D., *Izveštaj o podešavanju, ispitivanju i puštanju u rad sistema pobude kućnog agregata HE „Bočac“*. Beograd. 2016. Elaborat 216052, jul, str. 12..
- [2] -Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ A.D., *Izveštaj o podešavanju, ispitivanju i puštanju u rad generatorskih zaštita kućnog agregata HE „Bočac“*. Beograd. 2016. Elaborat 216053, jul, str. 2..
- [3] -Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ A.D., *Izveštaj o podešavanju, ispitivanju i puštanju u rad sistema turbinske regulacije kućnog agregata HE „Bočac“*. Beograd. 2016. Elaborat 216054, jul, str. 6..
- [4] , *Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units*. 2004. IEEE Standard 1207-2004, 20.6.2011. ISBN: 978-0-7381-7046-6, p 24..
- [5] -European Small Hydropower Association (ESHA), *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. 2004.
- [6] -Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ A.D., *Izveštaj o ispitivanju kućnog agregata HE „Bočac“ prilikom rada agregata sa izolovanim opterećenjem*. Beograd. 2016 Elaborat 216056, jul, str. 5-11..
- [7] R. Jutras, C. Lafond, M. Plamondon, S. Proulx and K. Srinivasan, "Islanding tests near a mini hydro generating plant", u *Proceedings of 1996 IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 1996, str. 167-171 doi: 10.1109/icps.1996.533951
- [8] -Indian Institute of Technology - Alternate Hydro Energy Center, *Guidelines for small hydro development*. Roorkee. 2008. September 19.

Paper submitted: May 12, 2016
Paper revised: July 30, 2016
Paper accepted: August 27, 2016

Copyrights © 2017 Society of Thermal Engineers of Serbia
Published by the VINCA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia
This is an open access article distributed under the CC BY-NC-ND 4.0 terms and conditions