

## Ocena mogućnosti revitalizovanih agregata u HE Zvornik u uslovima ostrvskog rada

Milan Ivanović, Dragan P.Popović, Saša Minić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a  
11000 Beograd, Srbija

[mivanovic@ieent.org](mailto:mivanovic@ieent.org)

[dpopovic@ieent.org](mailto:dpopovic@ieent.org)

[sasa.minic@ieent.org](mailto:sasa.minic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu se daje osvrt sa kvalitativnom ocenom sposobnosti rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik, sa predloženim parametrima i karakteristikama, u uslovima "ostrvskog" rada. Za izabrani scenario i karakteristične poremećaje, primenom računarskog programa PRIMCONT utvrđivani su dinamički odzivi agregata, u dovoljno dugom vremenskom periodu. Dobijeni rezultati govore o sposobnosti "ostrvskog" rada HE Zvornik, za razmatrani jedan, od velikog niza, mogućih scenarija. Međutim, kompleksnost ove problematike zahteva njenu širu kvantitativnu obradu, koja se apostrofira na kraju rada.

**Ključne reči:** ocena, ostrvski rad, regulacija, revitalizacija, HE Zvornik

### 1. Uvod

Osnovni cilj Studije [1] je bio da izvrši izbor, odnosno definisanje najpovoljnijih vrednosti relevantnih parametara i karakteristika agregata i njihovih blok-transformatora u HE Zvornik, predviđenih za revitalizaciju, sa aspekta zahteva EES-a Srbije, a sve u cilju izrade odgovarajuće specifikacije za potrebe tenderske procedure.

Revitalizovane turbine u HE Zvornik imaće nominalnu snagu  $P_{t,n}$  u iznosu od 31.36 MW. Taj podatak se odnosi na režim kada sva četiri revitalizovana agregata rade na mreži sa radom turbina sa pojedinačnim instalisanim protokom od 170 m<sup>3</sup>/s (ukupan protok elektrane je 680 m<sup>3</sup>/s), pri padu od 20,22m. Konsekventno tome, nominalna aktivna snaga pojedinog generatora će iznositi  $31.36 \times 0.977 = 30.64$  MW (0.977 - stepen korisnosti generatora), a elektrana će, u celini, imati nominalnu aktivnu snagu u iznosu od 122.6 MW. Pre revitalizacije, generatori u HE Zvornik su imali nominalnu prividnu snagu u iznosu  $4 \times 30$  MVA, a nominalni faktor snage je iznosio 0.80.

U pomenutom kontekstu izbora najpovoljnijih vrednosti ključnih parametara i karakteristika agregata, prvi i jedan od najznačajnijih, a reklo bi se i jedan od najdelikatnijih zadataka je izbor najpovoljnijih vrednosti nominalnog faktora snage generatora, koji je morao da se vrši simultano sa izborom parametara i karakteristika njihovih blok-transformatora [1, 2].

Dalje, u Studiji [1] je izvršen izbor najpovoljnijih vrednosti vremenske konstante inercije, vrednosti odnosa kratkog spoja, odnosno sinhronih reaktansi i tranzijentnih reaktansi, kao i izbor najpovoljnijih karakteristika sistema regulacije pobude razmatranih hidrogenatora [3].

Pomenuti izbori urađeni su sa aspekta zahteva EES-a Srbije, i to je predstavljalo prvi, veoma važan korak u daljoj evaluaciji i definitivnom izboru razmatranih parametara i karakteristika.

Uz prethodno navedeno, bilo je potrebno da se, između ostalog, ispune i zahtevi tačke 15. Programskog zadatka Studije [1], koji je doslovno glasio: "U Studiji dati i osvrt sa kvalitativnom ocenom sposobnosti rada revitalizovanih (novih) agregata u HE Zvornik sa predloženim parametrima i karakteristikama u uslovima ostrvskog izolovanog dela EES".

Pre prelaska na realizaciju ove obaveze iz Programskog zadatka, potrebno je posebno naglasiti, da je problematika "ostrvskog" rada izuzetno složena, počev od metodoloških, modelskih, algoritamskih, numeričkih, pa sve do praktičnih aspekata. Sigurno je da korektna i temeljna obrada ove problematike zahteva posebnu studiju (ili njihov niz, obzirom na niz raznorodnih aspekata, od procesa dezintegracije EES-a, daljeg "ostrvskog" rada niza njegovih delova, pa sve do njegove obnove, odnosno reintegracije).

Za potrebe Studije [1], obrada ove problematike je relaksirana, jer se samo tražio odgovarajući osvrt, sa kvalitativnom ocenom (ili bolje rečeno, sa preliminarnom ocenom). Međutim, obrađivači Studije [1] su učinili posebne napore, da se ova problematika malo šire obradi, uključujući i odgovarajuće simulacije, smatrajući da to može da posluži kao dobar uvod u posebnu studiju, koja će se baviti, između ostalog, i detaljnom kvantitativnom ocenom sposobnosti "ostrvskog" rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik. O tome, u tekstu koji sledi.

## **2. Preliminarna ocena sposobnosti ostrvskog rada revitalizovane HE Zvornik**

### **2.1. Izbor scenarija i karakterističnih poremećaja**

Od niza mogućih scenarija dezintegracije EES-a Srbije, kao dobra ilustracija za postavljeni cilj, odabran je scenario gde je HE Zvornik ostala u "ostrvskom" radu, sa dalekovodima 110 kV HE Zvornik - Loznica, HE Zvornik - Loznica 2 i HE Zvornik - Ljubovija i TS 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija. Razmatrano je maksimalno stanje, koje se očekuje 2020. godine. Opterećenja TS 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija su iznosila: 35.1 MW, 13.8 Mvar, 18.4 MW, 6.9 Mvar i 8.2 MW, 3.0 Mvar, respektivno.

Agregati u HE Zvornik su imali predložene nominalne parametre generatora i blok-transformatora (nominalni faktor snage generatora u iznosu 0.90; fiksna vrednost prenosnih odnosa blok-transformatora u iznosu  $U_{gr}/121$  kV/kV). Vremenske konstante inercije agregata su iznosile 6.0 s, a vrednosti zasićenih podužnih tranzijentnih reaktansi generatora su iznosile 0.40 r.j.

Dalje, razmatrano je da revitalizovani generatori u HE Zvornik imaju statičke poluprovodničke (tiristorske) samopobude sisteme, sa elektronskim (digitalno-mikroprocesorskim) regulatorom pobude, čija se regulaciona greška u osnovi formira na bazi otklona napona na krajevima generatora ("proporcionalna" regulacija). Step en forsiranja pobude je iznosio 1.0. Takođe, razmatrano je da generatori u HE Zvornik imaju savremene elektrohidraulične (digitalno-mikroprocesorske) turbinske regulatore, sa stalnim statizmom od 5% i "mrtvom" zonom od  $\pm 10$  mHz.

Poznato je da karakteristike potrošača (njihove zavisnosti od napona i učestanosti) mogu da imaju znatno veći uticaj na odvijanje prelaznih stanja i na dostignuto kvazistacionarno stanje, u uslovima "ostrvskog" rada, nego što je taj uticaj, u uslovima rada jedinstvenog EES-a, u okviru interkonekcije, u kojoj participira. Iz toga razloga, obuhvaćeni su sledeći načini modelovanja potrošača:

- A) aktivne i reaktivne snaga su konstantne veličine;
- B) aktivne i reaktivne snage su linerano zavisne od napona i učestanosti;
- C) aktivne snage su linerano zavisne od napona i učestanosti, a reaktivne snage linerano zavise od učestanosti i od kvadrata napona.

Simultano (hipotetičko) povećanje, odnosno smanjenje aktivne i reaktivne snage potrošača u transformatorskim stanicama 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija za 10%, je uvršćeno kao karakteristični poremećaj. Traženi odzivi agregata u HE Zvornik, u dovoljno dugom vremenskom periodu nakon ovih poremećaja, dobijeni su primenom računarskog programa PRIMCONT, razvijenog u Institutu "Nikola Tesla" [4, 5], o kome će ukratko biti reči u narednom tekstu.

## **2.2. Kraći opis računarskog programa PRIMCONT**

Za potrebe tačnijih praćenja prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, odnosno analiza toka i efekata primarne regulacije učestanosti, kada se zahteva i praćenje stanja u pojedinim (ili svim) elementima EES-a, tokom odvijanja prelaznog procesa (a što najčešće korišćene u praksi uprošćene metode evidentno nisu u stanju), neophodni su stroži prilazi. U njima je neophodno modelovati kompletnu mrežu EES i sve njegove relevantne komponente, uključujući odgovarajuće regulacione i zaštitne uređaje.

U radu na ovoj problematici, u Institutu "Nikola Tesla" razvijena je metodologija i računarski program PRIMCONT za strože praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, koja omogućuje i praćenje toka i efekata primarne regulacije učestanosti. Detaljniji prikaz metodoloških i praktičnih aspekata, veza njih za računarski program PRIMCONT, nalazi se u referenci [4].

Ova metodologija omogućuje praćenje elektromehaničkog prelaznog procesa EES, nastalog nakon tipičnih poremećaja (pojava većih debalansa snaga) sa aspekta analize dinamike promene učestanosti, uz tretiranje individualne dinamike svake od sinhronih mašina. Uz određivanje dinamike promene njihovih sopstvenih učestanosti, prati se kretanje tzv. "centra inercije" kompletnog EES-a, koje je indikativno za sagledavanje globalnih efekata primarne regulacije učestanosti. Takođe, prate se i stanja na svim relevantnim elementima tokom odvijanja prelaznog elektromehaničkog procesa, čime se dobija detaljni uvid u tok odvijanja prelaznog procesa, odnosno i procesa primarne regulacije učestanosti.

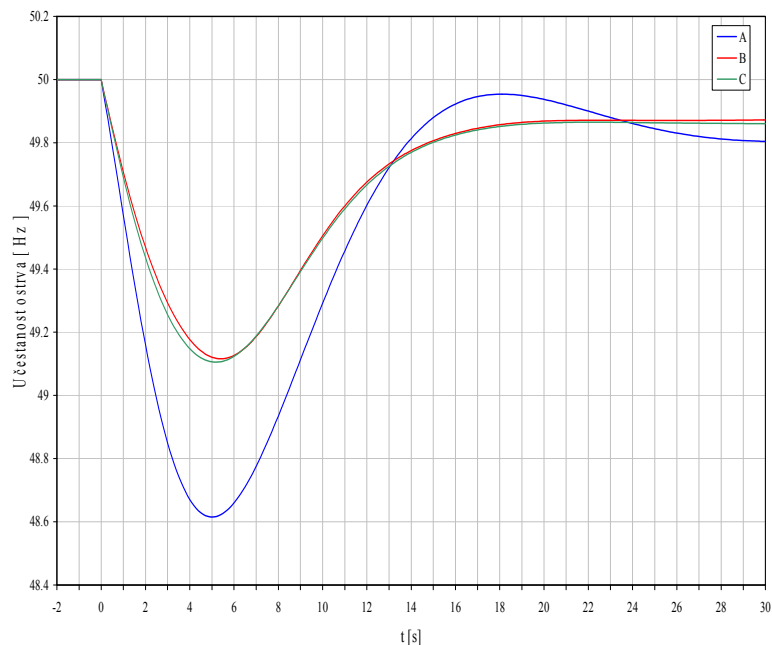
Jednačine balansa su formirane preko prirodnih fizičkih veličina, injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga, respektujući suštinska svojstva kratkotrajnih [6] i dugotrajnih [7] dinamičkih procesa, koji se odvijaju u prirodnom kontinuitetu [5]. Za rešavanje tako koncipiranih matematičkih modela, uvodeći opravdana uprošćenja kod formiranja odgovarajućih matrica Jakobijana, koja proizilaze iz same "fizike" tretiranih fenomena i strukturnih osobina EES, razvijeni su brzi, veoma konvergentni postupci sa razdvajanjem varijabli tokom pojedine iteracije [6, 7].

Suština uvedenih unapređenja, najpre se svodi na striktno respektovanje same fizičke prirode i toka odvijanja analiziranog elektromehaničkog prelaznog procesa. Naime, konsekventno se modeluje kratkotrajni dinamički proces, nastao neposredno nakon pojave debalansa, u kome dominira individualna dinamika sinhronih mašina, kao i dalji tok prelaznog stanja, u kome je već uspostavljena jedinstvena učestanost EES [5]. Prelazak sa jedne vrste dinamike na drugu, različite po karakteru i trajanju, obavlja se automatski po zadovoljenju zadatih kriterijuma (praktično uspostavljena sinfaznost kretanja rotora angažovanih sinhronih generatora i završetak prelaznih stanja u njihovim sistemima regulacije pobude).

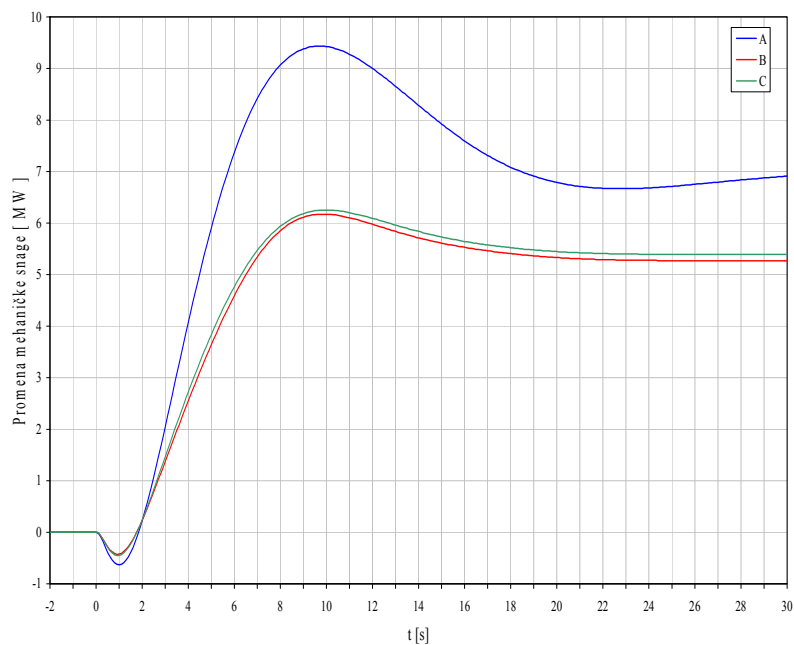
U kategoriju osobenosti računarskog programa PRIMCONT spada i razvijeni posebni prilaz numeričkoj integraciji aktuelnih diferencijalnih jednačina, koji je respektovao "fiziku" problema koji je rešavan. U pitanju je tzv. nestandardni prilaz numeričkoj integraciji [8, 9], Proces numeričke integracije aktuelnih diferencijalnih jednačina obavlja se brzo i efikasno, rekurentnom primenom jednostavnih raspregnutih diferencnih jednačina.

### **2.3. Prikaz rezultata primene računarskog programa PRIMCONT**

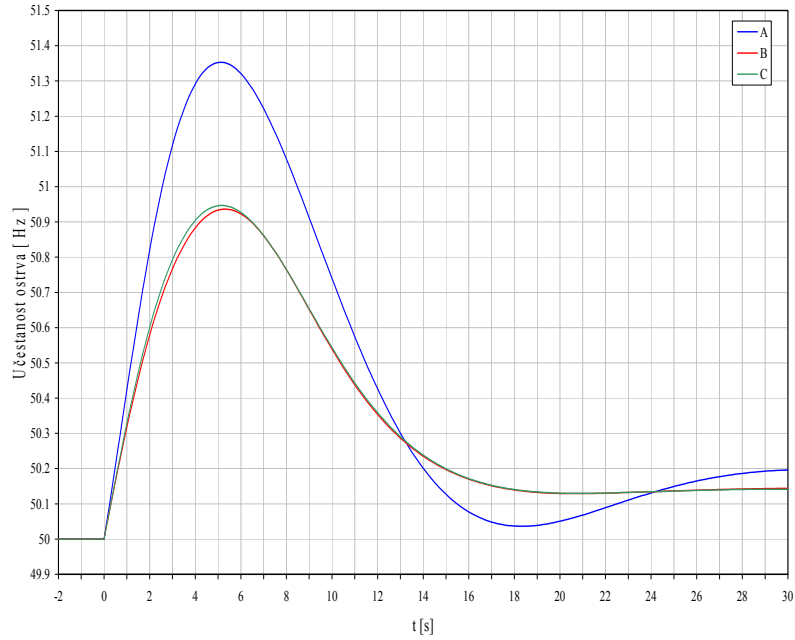
Grafička interpretacija rezultata, dobijenih primenom računarskog programa PRIMCONT, a koji su indikativni za postavljeni cilj preliminarnih analiza, daju se na slikama 1 - 4. Na slici 1 je data dinamika promene učestanosti u razmatranom "ostrvu", nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača u TS 110/35 kV/kV Loznica, Loznica 2 i Ljubovija za 10% (ukupni porast od 6.2 MW i 2.4 Mvar). Na slici 2 je data dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik, za simultani porast potrošnje. Na slici 3 je data dinamika promene učestanosti u razmatranom "ostrvu", nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača u ovim TS 110/35 kV/kV, a slika 4 prikazuje dinamiku promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik, za simultani "pad" potrošnje od 10%. Oznake A, B i C govore koje su karakteristike razmatrane potrošnje.



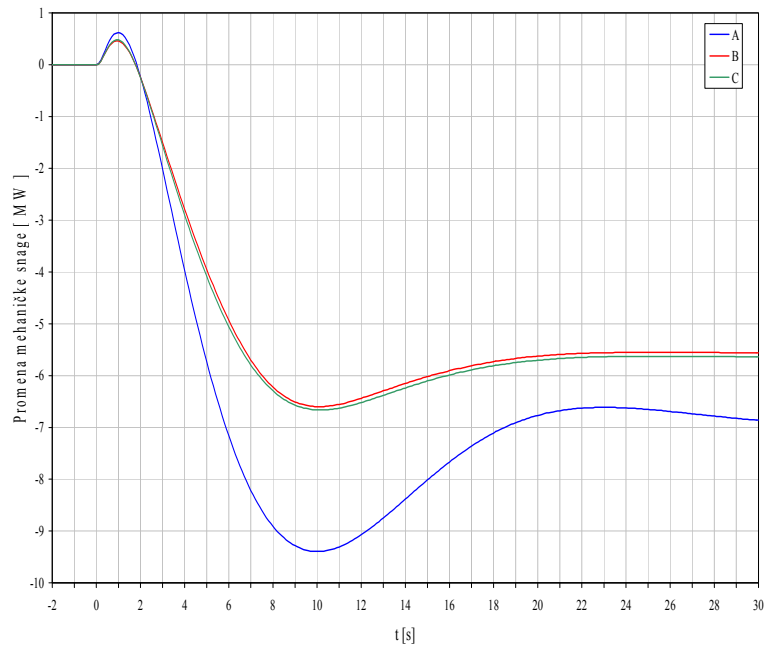
Slika 1. Dinamika promene učestanosti nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%



Slika 2. Dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik nakon simultanog povećanja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%



Slika 3. Dinamika promene učestanosti nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%



Slika 4. Dinamika promene mehaničke snage agregata u HE Zvornik nakon simultanog smanjenja aktivne i reaktivne snage potrošača za 10%

Prikazani rezultati govore o sposobnosti "ostrvskog" rada HE Zvornik, za jedan od velikog niza mogućih scenarija. To se uočava preko relativno brze obnove vrednosti učestanosti (za vreme do 30 s), nastale nakon odgovarajućih promena mehaničke snage agregata u HE Zvornik usled razmatranih simultanih promena snaga potrošača. Takođe, uočava se i značajan uticaj karakteristika potrošača na sam tok i ishod prelaznih stanja, nastalih nakon razmatranih poremećaja.

Prethodno izloženo je podmirilo zahteve tačke 15. Programskog zadatka Studije [1]. Međutim, kako je to već rečeno, bilo bi neophodno da se ova veoma kompleksna problematika mnogo šire obradi, u okviru posebne studije, koja bi se bavila i detaljnom kvantitativnom ocenom sposobnosti "ostrvskog" rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik.

### **3. Mogući pravci daljeg rada na ovoj problematici**

U okviru prethodno apostrofirane studije, posebni akcenat bio bi dat turbinskoj regulaciji HE Zvornik, sa utvrđivanjem najpovoljnijeg podešenja parametara regulacije, koji spadaju u kategoriju podesivih veličina. Tome bi prethodila analiza toka moguće dezintegracije EES Srbije i formiranja niza "ostrva", a zatim i analiza mogućnosti efikasne obnove pogona, kada se vrši sinhronizacija "ostrva", uz prethodnu proveru ispunjenosti relevantnih uslova za to. U okviru ove obnove pogona, posebno bi se analizirali relevantni aspekti i mogućnosti tzv. "black" starta agregata u HE Zvornik. Za izradu studija ove vrste i složenosti, u Institutu "Nikola Tesla" postoje odgovarajući resursi [10, 11, 12].

U [10,11], dat je prikaz jedne nove metodologije (i odgovarajućeg računarskog programa RESTOR), za utvrđivanje toka dezintegracije i obnove pogona elektroenergetskih interkonekcija. Ona je bazirana na jednoj efikasnoj metodi za simultanu analizu kvazistacionarnih stanja u proizvoljnom broju "ostrva", nastalih tokom procesa dezintegracije, kao i u stanjima obnove pogona razmatrane elektroenergetske interkonekcije. Osnovu ove metodologije čine jednačine balansa snaga i tehnika njihovog rešavanja, koje su analogne sa procedurom koja je validna za interkonekciju, koja je sačuvala svoj integritet. Jedina razlika je u tome, što sada umesto jedinstvene vrednosti učestanosti, figuriše onoliki broj pojedinačnih učestanosti, koji je jednak broju "ostrva", nastalih tokom procesa dezintegracije, a kasnije, nastalih tokom procesa obnove pogona.

Za rešavanje formiranog nestandardnog modela tokova snaga, razvijena je jedna jednostavna iterativna procedura, koja simultano određuje stanja u svakom od formiranih "ostrva", zadržavajući istu polaznu numeraciju čvorova. Ne treba posebno da se naglašava koliko je takav prilaz praktičniji i racionalniji u odnosu na pojedinačnu analizu svakog od formiranih "ostrva".

Višestrukost namene razvijene metodologije, koja spada u prilaze bazirane na analitičkim alatima (analytical tools approach), ogleda se najpre u mogućnosti njene efikasne primene u analizama postdinamičkih kvazistacionarnih stanja elektroenergetskih interkonekcija, u kojima je došlo do formiranja niza "ostrva". Takva višestrukost omogućuje i analize efekata dejstva uređaja protivhavarijske

automatike i zaštite, kao i utvrđivanje efekata niza mogućih dispečerskih akcija. Posebna pogodnost ogleda se u njenoj mogućnosti za utvrđivanje najpovoljnijeg scenarija toka obnove pogona, ali, uz proučavanje i utvrđivanje svih potrebnih i dovoljnih uslova za nesmetanu sinhronizaciju formiranih "ostrva".

Karakteristike i svojstva razvijene metodologije, odnosno računarskog programa RESTOR, inkorporiranog u odgovarajuće informaciono i softversko okruženje, mogle bi da budu od značajne pomoći Operatoru prenosne mreže, za potrebe operativnog planiranja pogona, upravljanja i trening dispečera. Pomenuta svojstva takođe mogu da budu u funkciji poboljšanja postojećih i eventualnog razvoja novih procedura obnove pogona EES Srbije, u novom okruženju i novim uslovima rada, u okviru formiranog tržišta električne energije u jugoistočnoj Evropi.

#### **4. Zaključci**

U radu dat je preliminarni osvrt sa kvalitativnom ocenom sposobnosti rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik, sa predloženim parametrima i karakteristikama, u uslovima "ostrvskog" rada.

Međutim, bilo bi neophodno da se ova veoma kompleksna problematika "ostrvskog" rada mnogo šire obradi, u okviru posebne studije, koja bi se bavila, između ostalog, i detaljnom kvantitativnom ocenom sposobnosti "ostrvskog" rada revitalizovanih agregata u HE Zvornik. U okviru nje, posebni akcenat bi se dao turbinskoj regulaciji HE Zvornik, sa utvrđivanjem najpovoljnijeg podešenja parametara ove regulacije, koji spadaju u kategoriju podesivih veličina. Tome bi prethodila analiza toka moguće dezintegracije EES Srbije i formiranja niza "ostrva", a zatim i analiza mogućnosti efikasne obnove pogona, kada se vrši sinhronizacija "ostrva", uz prethodnu proveru ispunjenosti relevantnih uslova za to. U okviru ove obnove pogona, posebno bi se analizirali relevantni aspekti u mogućnosti tzv. "black" starta agregata u HE Zvornik.

#### **5. Literatura**

- [1] "Definisanje najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika revitalizovanih agregata u HE Zvornik priključenih na prenosnu mrežu 110 kV sa aspekta zahteva EES-a Srbije", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2011.
- [2] D.P.Popović, M.Ivanović, P.Kovačević. G.Radović, S.Ivković, S. Minić, R. Petrović, M. Dragić, "Izbor nominalnog faktora snage generatora i karakteristika blok-transformatora u revitalizovanoj HE Zvornik", 30 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29. maj-3. juni, 2011., referat RA1-11.
- [3] D.P.Popović, M.Ivanović, P.Kovačević. G.Radović, S.Ivković, S.Minić, R. Petrović, M.Dragić, "Izbor vremenske konstante inercije, sinhronih i tranzijentnih reaktansi i sistema regulacije pobude revitalizovanih agregata u HE Zvornik", 30 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29. maj-3. juni, 2011., referat RA1-12.



- [4] D.P.Popović, "Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 255 str., ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008.
- [5] D.P.Popović, S.Mijailović, "An Efficient Methodology for the Analysis of Primary Frequency Control of Electric Power System", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 22, 2000., pp. 331-341.
- [6] D.P.Popović, M. Stefanović, "A Fast Network Solution by the Decoupled Procedure During Short-term Dynamic Processes in Power Systems", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 12, No. 1, January 1990., pp 25-30
- [7] D.P.Popović, "An Efficient Decoupled Procedure for Solving the Load-flow Problems During Long-term Dynamic Processes in Power Systems", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.9 No.3, July, 1987., pp 173-179
- [8] D.P.Popović, "An Approach to the Evaluation of Electromechanical Transient Processes in Power Systems", Electric Power Systems Research, Vol.7, No.2.1984., pp 141-151.
- [9] D.P.Popović, "A Simple and Reliable Procedure for the Evaluation of Short-term Dynamic Processes in Power Systems", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 8, No.4, October, 1986., pp 195-204.
- [10] D.P.Popović, S.Mijailović, "Jedan prilaz utvrđivanju toka dezintegracije i obnove pogona elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br.1, 2005., str. 20 – 31.
- [11] D.P.Popović, S.Mijailović, "Evaluation of Post-Dynamic Quazi-Stationary State during the Islands Operation of Power System Parts", FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics, Vol. 18, No. 1, April 2005., pp.71-86.
- [12] D.P.Popović, M.Đukanović, "Fast Solution Method for Evaluation of Long - term Dynamic Processes in Power Systems with Provision for Island Operation", Electric Power Systems Research, Vol.21, No 3, 1991., pp. 217-224.

**Abstract.** This paper presents the evaluation of revitalized units in HPP Zvornik for islanding, with proposed parameters and characteristics. For the selected scenario and specific disturbances, dynamic response of aggregates have been identified for sufficiently long period, by using the computer program Primcont. Achieved results show the ability of HPP Zvornik islanding, for one scenario considered. However, the complexity of this problem requires its general quantitative treatment, which was emphasized at the end of the paper.

**Keywords:** evaluation, island operation, control, revitalization, HPP  
Zvornik

## **Evaluation of Possibilities of Revitalized HPP Zvornik in Island Operation Conditions**

Rad primljen u uredništvo 19.09.2011. godine  
Rad prihvaćen 15.10.2011. godine