

## Funkcionisanje primarne regulacije učestanosti u EPS-u

Nikola Georgijević

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a  
11000 Beograd, Srbija  
[nikola.georgijevic@ieent.org](mailto:nikola.georgijevic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Elektroprivreda Srbije (EPS) obavlja sistemske usluge za potrebe Elektromreže Srbije (EMS), odnosno Operatora prenosnog sistema (OPS). U okviru ovih usluga posebno značajno mesto ima primarna regulacija učestanosti. Regulacija snage proizvodnje električne energije i nadgledanje tokova električne energije u okviru interkonekcije jeste problem koji dobija na sve većem značaju usled deregulacije i promena u konceptu upravljanja savremenih elektroenergetskih sistema. Cilj rada je da prouči karakteristike sistema primarne regulacije učestanosti EES-a Srbije kao osnovu za njegovo unapređenje.

**Ključne reči:** regulacija učestanosti, primarna regulacija

### 1. Uvod

Osnovna funkcija regulacije učestanosti i aktivnih snaga elektroenergetskog sistema je održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Ova regulacija je neophodna zbog toga što se ukupne potrebe potrošača tokom vremena menjaju u dnevnim, sedmičnim i godišnjim ciklusima, koji opet zavise od ciklusa ljudskih aktivnosti u istim vremenskim periodima

U procesu stalnih promena proizvedenih i utrošenih aktivnih snaga i održavanja ravnoteže između proizvodnje generatora i zahteva potrošača, postoje tri aspekta regulacije odatih snaga proizvodnih jedinica, to su primarna, sekundarna i tercijarna regulacija [1].

U elektroenergetskoj interkonekciji koja radi u sinhronom radu, vrednost učestanosti, koja je generalno gledano jedinstvena za ceo povezani sistem, predstavlja jedan od bitnih kriterijuma za ocenu kvaliteta rada tretirane interkonekcije. U tesnoj vezi sa kvalitetom i ponašanjem učestanosti u EES, je i funkcionisanje njene primarne regulacije. Dva osnovna cilja koja treba da se

ispune radom primarne regulacije učestanosti odnose se na sigurnosti rada interkonekcije i na obezbeđenje neophodne solidarnosti svih EES-a koji rade u sinhronom paralelnom radu. Nastali debalans u sistemu, odnosno naglo rasterećenje, ne bi smeo da izazove promenu učestanosti koja bi prelazila unapred određenu minimalnu (povezanu sa aktiviranjem automatskog frekventnog rasterećenja potrošača), odnosno propisanu maksimalnu vrednost. Takođe, u povezanim sistemima sa dve ili više nezavisno kontrolisanih oblasti uz kontrolu frekvencije, potrebno je kontrolisati i generisanje u okviru svake oblasti tako da se održi planirana razmena energije. Odstupanje učestanosti u uspostavljenom postdinamičkom kvazistacionarnom stanju trebalo bi da bude u okviru zadatih granica (princip sigurnosti). Suština principa solidarnosti se ogleda u obavezi svakog EES-a u interkonekciji da učestvuje u kompenzaciji poremećaja sa istim udelom sa kojim učestvuje u ukupnoj proizvodnji [2].

Cilj primarne regulacije je da održava ravnotežu između proizvodnje i (zahteva) potrošnje u okviru sinhronne oblasti. Združivanjem akcija svih delova povezanih u interkonekciju, primarna regulacija poboljšava operacionu pouzdanost elektroenergetskog sistema iz sinhronne oblasti i stabilise frekvenciju posle poremećaja, ali bez povraćaja frekvencije na sistemsku i bez povraćaja tokova snaga na njihove referentne vrednosti.

U slučaju primarne regulacije učestanosti, promena opterećenja sistema dovodi do odstupanja frekvencije u stanju mirovanja, u zavisnosti od statizma turbinskih regulatora i faktora samoregulacije opterećenja. Sve jedinice koje učestvuju u primarnoj regulaciji frekvencije će doprineti ukupnoj promeni generisanja, bez obzira na lokaciju promene opterećenja. [3]

## **2. Simulacije dinamičkih stanja**

Za potrebe tačnijeg praćenja prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, odnosno analiza toka i efekata primarne regulacije učestanosti, kada se zahteva i praćenje stanja u pojedinim elementima EES-a tokom odvijanja prelaznog procesa, neophodni su strožiji prilazi. U njima se modeluje kompletna električna mreža EES-a i sve njegove relevantne komponente, uključujući odgovarajuće regulacione i zaštitne uređaje. Program PRIMCONT je razvijen u Institutu "Nikola Tesla", a koristi se za praćenje toka i efekata primarne regulacije učestanosti [2]. Osnovu ovog računarskog programa čine matematički modeli sinhronih mašina, njihovih regulacionih sistema, kao i interkonektivni matematički modeli električne mreže.

Simulacije dinamičkih stanja, za potrebe analiza rada i efekata primarne regulacije učestanosti su izvršene na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. U okviru analiza toka i efekata primarne regulacije učestanosti na pomenutim

dinamičkim modelima, su analizirane ispunjenosti kriterijuma, zahteva i standarda iz važeće regulative, koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti.

### **2.1. Simulacija ispada jednog bloka TE "Nikola Tesla B"**

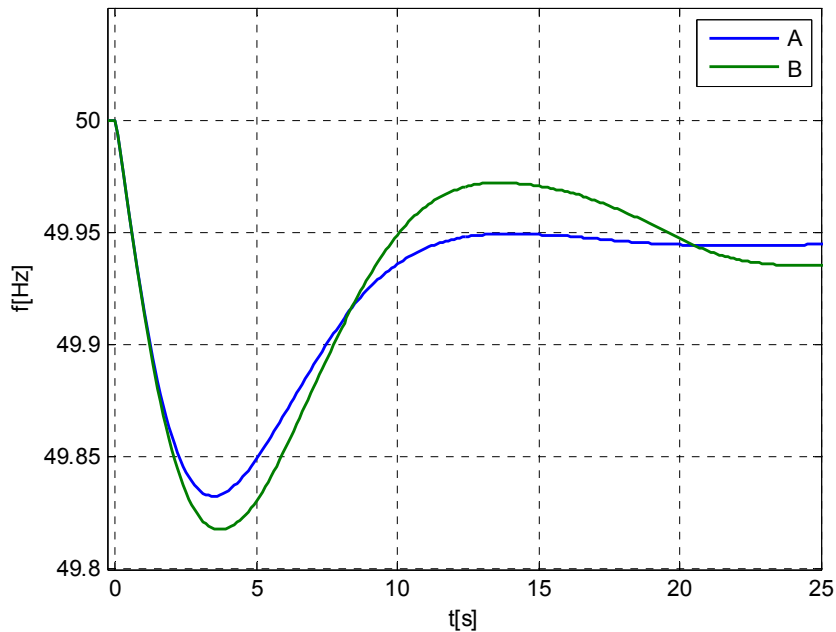
TE "Nikola Tesla B" raspolaže sa 2 bloka ukupne snage 1.160 MW, a godišnje učestvuje u proizvodnji električne energije sa 7.728 GWh.

U trenutku simuliranog poremećaja injektiranja jednog agregata TE "Nikola Tesla B" su imala vrednost od 577 MW i 247 Mvar.

Na slici 1 prikazana je dinamika promene jedinstvene učestanosti razmatrane interkonekcije za slučaj navedenog ispada, dobijena proračunom programa PRIMCONT. Kriva B na slici 1 dobijena je uz pretpostavku da su "mrtve zone" turbinske regulacije hidrogeneratora i turbogeneratora jednake 10 mHz, dok je kriva A dobijena za nulte vrednosti ovih parametara. Slučaj A je ekstremni slučaj za koji je pretpostavljeno da je uređaj za merenje frekvencije idealan, što nije slučaj u praksi.

Nastali debalans u sistemu ne bi smeo da izazove promenu učestanosti koja bi prelazila unapred određenu minimalnu, odnosno maksimalnu propisanu vrednost. Takođe, odstupanje učestanosti u uspostavljenom postdinamičkom kvazistacionarnom stanju trebalo bi da bude u okviru granica zadatih standardom.

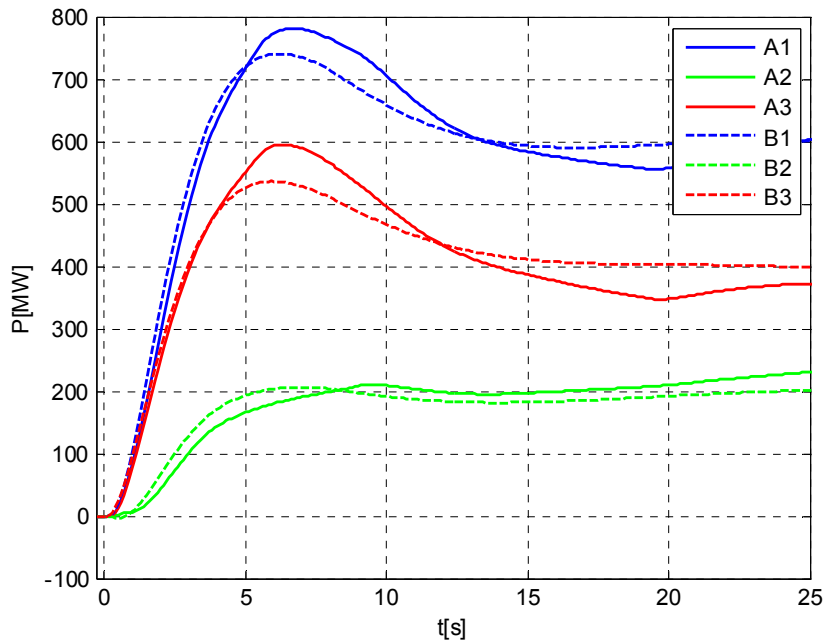
U modelima u kojima se pretpostavlja da je odsutan efekat samoregulacije potrošnje (što je ovde slučaj), maksimalna dozvoljena kvazistacionarna vrednost devijacije frekvencije iznosi 200 mHz, a maksimalno dozvoljena trenutna devijacija učestanosti iznosi 800 mHz. Na slici 1 se jasno vidi da su oba ova uslova zadovoljena u slučajevima A i B.



Slika 1. Dinamika promene učestanosti pri ispadu jednog bloka TE "Nikola Tesla B"

Promena vrednosti aktivnih snaga agregata interkonekcije koji su ostali u pogonu u toku prelaznog procesa nakon nastalog poremećaja prikazana je na slici 2. Ukupna promena mehaničke snage, promena snage hidropostrojenja i termopostrojenja, obeležene su redom sa 1, 2 i 3.

Prema UCTE standardima, aktiviranje 50% obrtne rezerve se mora obaviti za 15 ili manje sekundi, a od 50% do 100%, maksimalno vreme aktiviranja treba da raste linearno do 30 sekundi. Ispad bloka TE "Nikola Tesla B" je mali da bi izazvao aktiviranje nekog značajnog procenta obrtne rezerve interkonekcije, te se sa grafika može samo primetiti da se za ispad ovog bloka kompletan debalans snage anulira za oko 15 sekundi, što je manje od maksimalno dozvoljenog vremena aktiviranja celokupne rezerve.



Slika 2. Promene ukupnih mehaničkih snaga agregata interkonekcije pri ispadu jednog bloka TE "Nikola Tesla B"

Opšti zaključak koji se može odavde izvući je taj da deblans aktivne snage od 577 MW izazvan ispadom bloka TE "Nikola Tesla B" neće prouzrokovati značajnije promene usled reagovanja frekventnih releja u interkonekciji, ali se mora uzeti u obzir prilikom proračuna margine pouzdanosti sistema, to jest uticaja dodatnih tokova snaga razmene usled primarne regulacije učestanosti.

## 2.2. Moguća poboljšanja rada primarne regulacije

Na dinamiku promene učestanosti utiču stalni statizmi turbinskih regulatora i "mrtve zone", veličine koje spadaju u kategoriju podesivih parametara. Adekvatnim izborom ovih parametara moguće je poboljšanje kvaliteta rada primarne regulacije učestanosti.

U cilju optimalnog izbora parametara, potrebno je definisati neki kriterijum po kome bi se vršila optimizacija. Kao ilustrativni primer za optimizaciju uzet je kriterijum minimalne vrednosti srednjekvadratnog odstupanja frekvencije  $\Delta f$  na intervalu od 0 do 30 sekundi od nastanka poremećaja (1).

$$\min_{\beta \in R} \left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \Delta f(t, \beta)^2 dt} \right). \quad (1)$$

Gde je:

$\beta$  – vektor podesivih parametara čije se optimalne vrednosti traže.

Kako je prilikom optimizacionog procesa potrebno izvršiti veliki broj simulacija, za ove potrebe formiran je uprošćeni matematički model u MATLAB-u, preuzet iz [2], na kome se proces simulacije odvija znatno brže. Upotrebnost vrednosti ovog modela je detaljno predstavljena u [2].

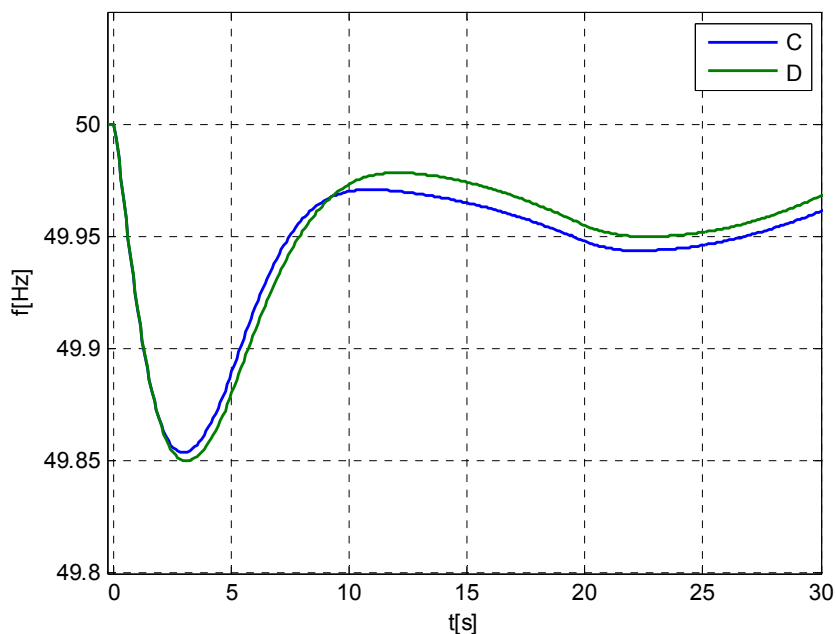
Bazna pretpostavka kod formiranja ovog modela jeste uniformnost (sinfaznost) kretanja rotora sinhronih mašina tokom procesa primarne regulacije učestanosti u okviru prikladno odabranih sinhronih grupa (u praksi savremenih EES-a, to vreme ne prelazi 30 s). To znači da se zanemaruju međusobne oscilacije generatora jedne sinhronne grupe trajanja nekoliko sekundi, koje su moguće nakon pojave debalansa. Prati se kretanje centra inercije EES-a, posredstvom jednačine kretanja ekvivalentnog agregata, na koju se svode jednačine kretanja svih angažovanih agregata, za ispunjen uslov njihove sinfaznosti.

Sledeća pretpostavka je da se odziv po mehaničkoj snazi angažovanih agregata, tokom procesa primarne regulacije, kvantifikuje na bazi pogodno koncipiranih ekvivalentnih regulacionih kola, čiji broj direktno proizilazi iz broja skupova agregata sličnih po regulacionim karakteristikama sa estimiranim ekvivalentnim parametrima.

Konačno, model je sveden na jednu sinhronu grupu sa dve regulacione konture i to jedne koja odgovara hidropostrojenjima i jedne koja odgovara termopostrojenjima.

Ideja je da se za isti poremećaj u iteracijama vrši simulacija, pri čemu bi se u svakoj iteraciji varirale veličine stalnih statizama i "mrtvih zona" ekvivalentnih hidropostrojenja i termopostrojenja, kako bi se pronašao uslov (1). Za varirane parametre su preuzeta ograničenja iz [4] kako bi se dobila rešenja u okviru realnih mogućnosti. U procesu optimizacije iskorišćena je Nelder–Mead metoda za minimizaciju nelinearnih funkcija (integrisana u Optimization Toolbox u okviru MATLAB-a) [5]. Važno je napomenuti da ova metoda pronalazi ne globalni, već lokalni minimum funkcije koja se optimizuje.

Po završetku optimizacionog procesa, dobijene vrednosti su ubačene u računarski program PRIMCONT, odakle su dobijeni rezultati prikazani na slikama 3 i 4.

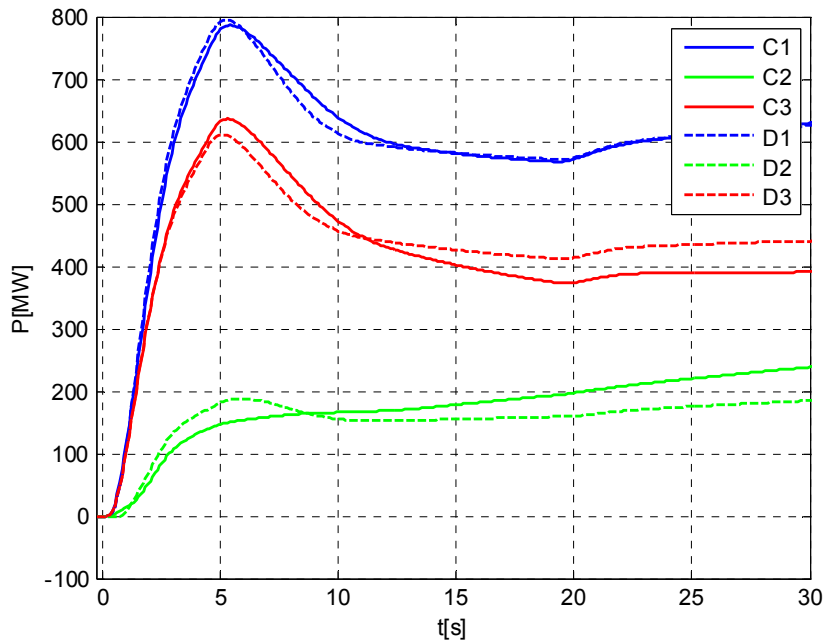


Slika 3. Dinamika promene učestanosti prilikom ispada jednog bloka TE "Nikola Tesla B" za promenjene vrednosti parametara "mrtve zone" i stalnih statizama

Pretpostavljene vrednosti stalnih statizama su jednake u slučajevima C i D i iznose 0.049 i 0.0519 za sva hidropostrojenja i termopostrojenja redom. "Mrtve zone" termoelektrane i hidroelektrane za slučaj C iznose po 10 mHz, a u slučaju D 10 i 51.9 mHz.

Poređenjem rezultata sa slika 3 i slike 1, zaključujemo da su smanjene i maksimalna trenutna i kvazistacionarna devijacija učestanosti. Ovo je posledica manjeg ekvivalentnog statizma u slučajevima C i D.

Primetno je da je u slučaju D manja devijacija učestanosti u kvazistacionarnom stanju nego u slučaju C, iako je jedna od vrednosti "mrtvih zona" veća.



Slika 4. Promene ukupnih mehaničkih snaga agregata interkonekcije za promjenjene vrednosti parametara "mrtve zone" i stalnih statizama

### 3. Zaključak

U ovom radu su izvršene simulacije računarskim programom PRIMCONT na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i ostatka UCTE interkonekcije. Rezultati simulacija su iskorišćeni za analizu ispunjenosti kriterijuma, zahteva i standarda iz važeće regulative koja se odnosi na primarnu regulaciju kroz razmatranja uticaja poremećaja nastalog unutar jednog sistema na sisteme u okruženju.

Simulacije istih poremećaja na uprošćenom modelu su izvedene i računarskim programom MATLAB. Jedna od pogodnosti simulacije na modelu u MATLAB-u je u tome da se vrlo lako mogu izvršiti analize osetljivosti dobijenih rezultata na varijacije relevantnih regulacionih parametara i karakteristika (veliçine "mrtve" zone i statizma turbinskih regulatora). Takođe, moguće je istovremeno koristiti i brojne druge pogodnosti MATLAB-a. Na primeru je prikazana združena upotreba Simulink-a i Optimization Toolbox-a



za pronalaženje parametara koji optimalno zadovoljavaju jedan ilustrativno zadati kriterijum.

Uzimajući u obzir poboljšanja rada primarne regulacije učestanosti nakon izvršenog optimizacionog procesa, može se doći do zaključka da rezultati sprovedenih analiza osetljivosti na promenu stalnih statizama i "mrtve zone" ukazuju na postojanje realnih mogućnosti za dalja unapređenja kvaliteta rada primarne regulacije učestanosti.

## Literatura

- [1] Čalović M., "Regulacija elektroenergetskih sistema", Tom 1: "Regulacija učestanosti i aktivnih snaga", ETF, Beograd, 1997.
- [2] Popović D.P., "Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 255 str., ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008.
- [3] Kundur P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
- [4] "Pravila o radu prenosnog sistema", Elektromreža Srbije, Verzija 1.0, april 2008.
- [5] MATLAB – The language of technical computing, The Math Works Inc., 2000.

**Abstract.** Electric Power Industry of Serbia (EPS) performs a variety of system services for the Serbia's Transmission System Operator (EMS). As part of these services, primary frequency control takes very important place. Control of electricity generation and monitoring of electricity flows in the interconnection is problem whose importance is increasing due to deregulation and changes in the concept of management of modern power systems. The aim of this paper is to study the characteristics of the primary frequency control of power system in Serbia as the basis for its improvement.

**Keywords:** frequency control, primary regulation

## Operation of Frequency Primary Control in EPS

Rad primljen u uredništvo 19.10.2011. godine  
Rad prihvaćen 29.10.2011. godine