

Karakteristike i mogućnosti računarskog programa za brzu ocenu rada i efekata primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih interkonekcija

Milan Ivanović, Dragan P.Popović, Saša Minić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
mivanovic@ieent.org
dpopovic@ieent.org
sasa.minic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu se izlažu karakteristike i praktične mogućnosti računarskog programa za brzu ocenu rada i efekata primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih interkonekcija. On je baziran na dve metode. Prva metoda spada u kategoriju analitičkih metoda, u kojoj formirani analitički izrazi, za početne uslove koji nisu nulti, uz niz pogodnosti koje pruža sama analitička forma, omogućavaju uvažavanje eventualnih strukturnih promena u EES tokom analiziranog procesa. Druga metoda je simulaciona metoda, koja se svodi na rekurentnu primenu pogodno koncipiranih, potpuno raspregnutih diferencnih jednačina. Mogućnosti i karakteristike ovog računarskog programa utvrđuju se najpre za slučaj izolovanog rada EES Srbije, a zatim za slučaj uvažavanja njegovog širokog okruženja.

Ključne reči: računarski program, ocena, rad, efekti, primarna regulacija, učestanost, elektroenergetska interkonekcija

1. Uvod

U elektroenergetskoj interkonekciji koja radi u sinhronom paralelnom 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 elektroenergetskom sistemu (EES) je i funkcionisanje njene primarne regulacije. Osnovna uloga primarne regulacije učestanosti je održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje u elektroenergetskoj interkonekciji.

Povezivanjem EES u sinhroni paralelni rad u okviru većih interkonekcija, veoma složena problematika primarne regulacije učestanosti zadržala je veliki značaj i aktuelnost koji je ranije imala. Otuda je i dalje u praksi neophodno respektovati stroge kriterijume, standarde i zahteve za agregate i pripadajuću regulacionu opremu (vezane za veličine rotacione rezerve, mrtve zone, brzine reagovanja, statizme i dr.).

Najveća evropska elektroenergetska interkonekcija, koja pokriva prostor od Portugala do Poljske i od Holandije do Bugarske i Grčke, je UCTE. EES Srbije je, kao značajni deo EES bivše SFRJ, postao punopravni član interkonekcije UCTE (tada je to bila asocijacija UCPT) početkom sedamdesetih godina prošlog veka.

Aktuelna važeća regulativa koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti u EPS-u (kriterijumi, zahtevi, standardi i procedure) definisana je u dokumentu [1], koji je napisan tako da bude usaglašen sa aktuelnim i važećim dokumentom UCTE [2]. Međutim, potrebno je napomenuti da je asocijacija UCTE prestala da funkcioniše 1. jula 2009. godine, kada je sve svoje nadležnosti i funkcije prenela na novo formiranu asocijaciju ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). Dakle, i dalje su validna i važeća prethodno pomenuta UCTE dokumenta.

Metodološki gledano, mogući su različiti načini (po vrsti i složenosti) analiza prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, u okviru kojih spadaju i analize kako samog rada, tako i finalnih efekata primarne regulacije učestanosti.

Za inženjersku praksu su veoma interesantni i praktičniji jednostavniji prilazi analizi prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, ali i dovoljno tačni, za ciljeve analiza za koje se koriste. Reč je o prilazima u kojima se svesno uvode odgovarajuća uprošćenja i pretpostavke, čija opravdanost proizilazi iz sagledavanja prirode i karaktera tretiranog prelaznog procesa, pri čemu se ne narušava željena tačnost, kao na primer [3-9]. U dosadašnjoj praksi analiza primarne regulacije učestanosti EES, po pravilu su dominirali ovi uprošćeni prilazi, koji su omogućili formiranje odgovarajućih analitičkih izraza za praćenje dinamike promene jedinstvene učestanosti EES, nakon pojave poremećaja.

Ovi uprošćeni prilazi imaju svoju praktičnu upotrebnu vrednost, pre svega u kontekstu sagledavanja globalnih aspekata razmatranog fenomena. Ta upotrebna vrednost je utoliko veća, ako je izvršena dovoljno tačna estimacija prisutnih ekvivalentnih parametara, koji se javljaju kao neposredna posledica odgovarajućih uprošćenja, svesno uvedenih u cilju dobijanja jednostavnih analitičkih izraza. Takvi matematički izrazi daju dobru globalnu sliku o samom toku i finalnim efektima primarne regulacije učestanosti, uz uočavanje i mogućnost pojedinačne kvantifikacije ključnih faktora od uticaja na različite vremenske periode analiziranog prelaznog procesa.

U ovom radu daje se najpre kraći prikaz jedne analitičke metode za brzu procenu rada i efekata primarne regulacije učestanosti [6, 7, 8]. Zatim, daje se kraći prikaz jedne, takođe uprošćene, simulacione metode za brzu ocenu dinamike promene učestanosti, koja se svodi na rekurentnu primenu pogodno koncipiranih, potpuno raspregnutih diferencnih jednačina [9]. I ova, kao i prethodno pomenuta metoda,

na veoma jednostavan način, omogućava uvažavanje eventualnih strukturnih promena u EES tokom analiziranog prelaznog procesa, i konsekvntno tome, omogućava utvrđivanje i njihovih posledica.

Na bazi prethodno pomenutih metoda, u Institutu "Nikola Tesla" realizovan je računarski program PRIMFAST. Za unos podataka i za prikaz dobijenih rezultata razvijena je posebna aplikacija.

Mogućnosti i karakteristike ovog računarskog programa, što je i ključna preokupacija ovoga rada, utvrđuju se najpre za slučaj izolovanog rada EES Srbije, jer se u okviru toga rada mogu preciznije kvantifikovati uticaji relevantnih parametara ove vrste regulacije.

Zatim, analizirana je realna interkonekcija. Formiranom modelu EES Srbije, pridodati su modeli EES Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Grčke, Bugarske i Albanije. U okviru ovih analiza, vršeno je poređenje sa strožim prilazom, koji detaljnije prati rad i efekte primarne regulacije učestanosti. To je omogućilo ocenu tačnosti ovih uprošćenih metoda i definisanje domena i načina njihove efikasne praktične primene.

2. Jedna analitička metoda za brzu ocenu rada i efekata primarne regulacije učestanosti

2.1. Uvedena uprošćenja i pretpostavke

Bazna pretpostavka kod razvoja ove metode jeste uniformnost (sinfaznost) kretanja rotora sinhronih mašina tokom procesa primarne regulacije učestanosti (u praksi savremenih EES, to vreme ne prelazi 30 s). To znači da se zanemaruju međusobne oscilacije generatora trajanja nekoliko sekundi, koje su moguće nakon pojave debalansa, uz napomenu da su one znatno manjeg intenziteta nego u slučajevima kratkih spojeva. Prati se kretanje centra inercije EES, odnosno jedinstvene učestanosti (a ona se uspostavlja praktično nakon nekoliko sekundi po nastanku poremećaja), posredstvom jednačine kretanja ekvivalentnog agregata EES, 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 koncipiranog jednog ekvivalentnog regulacionog kola, sa estimiranim ekvivalentnim parametrima. Dalje, uveden je ekvivalentni (ili globalni) koeficijent samoregulacije potrošača (koji, u stvarnosti, nije vezan samo za promenu učestanosti, već i za promene napona, čiji je uticaj značajniji, posebno u početnoj fazi prelaznog procesa).

Naravno, prethodno pomenute pretpostavke i uprošćenja uvedena su svesno, sa ciljem dobijanja jednostavnog modela, a prva praktična iskustva, o čemu je bilo

reči u radovima [6, 7, 8, 10, 11, 12, 13], omogućila su sagledavanje daljih pravaca istraživanja u pogledu postizanja višeg stepena tačnosti.

2.2. Analitički izrazi za praćenje promena učestanosti i ukupne mehaničke snage generatora

U [6, 7, 8] detaljno je opisan proces formiranja analitičkih izraza, počev od polaznog matematičkog modela, saglasno uvedenim pretpostavkama i uprošćenjima, za opšti slučaj kada početni uslovi nisu nulti. Kao rezultat, dobijeni su sledeći analitički izrazi:

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_0 s_{ne}}{P_{ne} + k_i P_{lo} s_{ne}} e^{-\alpha(t-t_0)} \cdot \left\{ \sqrt{A_0^2 + B_0^2} \cos[\beta(t-t_0) + \theta_0] + \frac{\Delta P_0}{T_e} \sqrt{A^2 + B^2} \cos[\beta(t-t_0) + \theta] \right\} \quad (1)$$

$$\Delta P_{me}(t) = -\frac{P_{ne}}{P_{ne} + k_i P_{lo} s_{ne}} \Delta P_0 + e^{-\alpha(t-t_0)} \cdot \left\{ \sqrt{C_0^2 + D_0^2} \cos[\beta(t-t_0) + \psi_0] + \Delta P_0 \sqrt{\left(\frac{C}{\Delta P_0}\right)^2 + \left(\frac{D}{\Delta P_0}\right)^2} \cos[\beta(t-t_0) + \psi] \right\} \quad (2)$$

gde je:

- ΔP_0 - debalans aktivne snage u momentu t_0 ;
- s_{ne} - statizam primarne regulacije učestanosti ekvivalentnog agregata sveden na nominalnu aktivnu snagu;
- P_{ne} - nominalna aktivna snaga ekvivalentnog agregata;
- k_i - koeficijent samoregulacije ukupne aktivne snage potrošača EES;
- P_{lo} - ukupna aktivna snaga potrošača, uključujući gubitke, u momentu t_0 ;
- Δf_0 - odstupanje kvazistacionarne vrednosti učestanosti od njene nominalne vrednosti u momentu t_0 ;
- ΔP_{me0} - promena mehaničke snage ekvivalentnog agregata u momentu t_0 ;
- T_e - vremenska konstanta inercije ekvivalentnog agregata EES;
- T_{se} - svedena vremenska konstanta servomotora regulacionog sistema ekvivalentnog agregata.

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_{se}} + \frac{k_l P_{l0}}{T_e} \right) & \beta &= \sqrt{\frac{P_{ne}}{s_{ne} T_{se} T_e} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_{se}} - \frac{k_l P_{l0}}{T_e} \right)^2} \\
A_0 &= \Delta f_0 & B_0 &= \frac{1}{\beta} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_{se}} - \frac{k_l P_{l0}}{T_e} \right) \Delta f_0 + \frac{\Delta P_{m0}}{T_e} \right] \\
A &= -\frac{s_{ne} T_e}{P_{ne} + k_l P_{l0} s_{ne}} & B &= \frac{1}{\beta} \left[\frac{s_{ne} (T_e + k_l P_{l0} T_{se})}{2 T_{se} (P_{ne} + k_l P_{l0} s_{ne})} - 1 \right] \\
\theta_0 &= \arctg \frac{B_0}{A_0} & \theta &= \arctg \frac{B}{A} \\
C_0 &= \Delta P_{meo} & D_0 &= \frac{1}{\beta} \left[\frac{P_{ne}}{T_{se} s_{ne}} \Delta f_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_{se}} - \frac{k_l P_{l0}}{T_e} \right) \Delta P_{meo} \right] \\
C &= \frac{P_{ne}}{P_{ne} + k_l P_{l0} s_{ne}} \Delta P_0 & D &= -\frac{P_{ne} \left(\frac{1}{T_{se}} + \frac{k_l P_{l0}}{T_e} \right)}{2\beta (P_{ne} + k_l P_{l0} s_{ne})} \Delta P_0 = -\frac{\alpha}{\beta} C \\
\psi &= \arctg \frac{D}{C} & \psi_0 &= \arctg \frac{D_0}{C_0}
\end{aligned} \tag{3}$$

2.3. Interpretacija izvedenih analitičkih izraza

Izvedeni analitički izrazi (1) i (2) pokazuju da se promene jedinstvene učestanosti i ukupne mehaničke snage odvijaju po eksponencijalnom zakonu, uz prisustvo harmonijskih komponenti, što je utvrđeno u nizu eksperimenata u realnim EES [4, 14, 15]. Pogodnost ovih izraza ogleda se najpre u dobijanju dobre globalne fizikalne slike o samom toku primarne regulacije učestanosti, uz uočavanje i mogućnost kvantifikacije ključnih faktora od uticaja na različite periode dinamike promena učestanosti i mehaničke snage.

Formirani analitički izrazi, za početne uslove koji nisu nulti, uz niz pogodnosti koje pruža sama analitička forma, omogućavaju uvažavanje eventualnih strukturnih promena u EES tokom analiziranog procesa, čime je omogućeno da se prate, između ostalog, i efekti reagovanja automatskog frekventnog rasterećenja potrošača i/ili frekventne zaštite generatorskih jedinica. Tada je neophodno, uz korekciju debalansa ΔP_0 (za iznos isključene potrošnje), preračunavati i koeficijente (3) u skladu sa nastalim strukturnim promenama u EES.

Pogodnost izraza (1) i (2) leži i u mogućnosti jednostavnog analitičkog određivanja vremena, u kojima promene učestanosti i mehaničke snage u početnom periodu imaju ekstremne vrednosti. Iz uslova $d(\Delta f)/dt=0$, ekstremna promena učestanosti se dostiže za vreme:

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta} \left(\arctg \left(-\frac{\alpha}{\beta} \right) + k\pi - \theta \right) \quad (4)$$

a iz uslova $d(\Delta P_{me})/dt=0$, dobija se vreme kada promena mehaničke snage ima najveću vrednost:

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta} \left(\arctg \left(-\frac{\alpha}{\beta} \right) + k\pi - \psi \right) \quad (5)$$

gde je k prirodan broj.

Izrazi (4) i (5) pokazuju da vremena dostizanja ekstremnih vrednosti ne zavise od veličine debalansa.

Dalje, potrebno je napomenuti da za slučaj nultih početnih uslova (odnosno kada za vreme $t_0=0$, veličine Δf_0 i ΔP_{me0} imaju nulte vrednosti, što sa sobom povlači i nulte vrednosti koeficijenata A_0 i B_0 , kao C_0 i D_0), izraz (1) dobija poznati oblik [3, 4], koji se široko koristio u dosadašnjoj praksi.

Takođe, iz izraza (1) i (2) neposredno se uočavaju dostignute kvazistacionarne vrednosti promena učestanosti Δf_{st} i mehaničke snage ΔP_{mest} u ostvarenom postdinamičkom stanju (a to je u praksi za vreme od oko 25 s od nastanka debalansa), odnosno:

$$\Delta f_{st} = \frac{S_{ne}}{P_{ne} + k_l P_{lo} S_{ne}} \Delta P_0 \quad (6)$$

$$\Delta P_{mest} = -\frac{P_{ne}}{P_{ne} + k_l P_{lo} S_{ne}} \Delta P_0 \quad (7)$$

uz napomenu da debalans aktivne snage ΔP_0 u slučaju ispada generatorskih jedinica ima negativni predznak (odnosno Δf_{st} će imati negativnu a ΔP_{mest} pozitivnu vrednost).

Izrazi (6) i (7) jasno pokazuju faktore od ključnog uticaja na dostignute kvazistacionarne vrednosti Δf_{st} i ΔP_{mest} (veličina debalansa ΔP_0 , ekvivalentni statizam s_{ne} , kao i koeficijent samoregulacije potrošača k_l). Količnik ovih izraza, uz odgovarajuće sređivanje, daje sledeći poznati odnos, koji važi za uspostavljeno kvazistacionarno stanje:

$$S_{ne} = -\frac{\Delta f_{st}}{\Delta P_{mest} / P_{ne}} \quad (8)$$

odnosno dobija se poznati izraz za ekvivalentni statizam razmatrane interkonekcije, uz napomenu da su veličine Δf_{st} , ΔP_{mest} i P_{ne} date u relativnim

vrednostima, a veličina ΔP_{fst} , za debalans tipa ispada generatorskih jedinica, ima negativnu vrednost.

O pogodnosti izvedenih analitičkih izraza svedoči dalja analiza izraza (7). Naime, imajući u vidu da se njegov imenilac može napisati u obliku:

$$P_{ne} = \left(\frac{\Delta P_{gst} + \Delta P_{lst}}{\Delta P_{gst}} \right)$$

gde ΔP_{gst} i ΔP_{lst} predstavljaju promene ukupne aktivne snage generatora (jednake promenama ukupne mehaničke snage) i ukupne aktivne snage potrošača (efekat samoregulacije) tokom procesa primarne regulacije, izraz (7) dobija veoma jednostavan oblik:

$$\Delta P_{mest} = \frac{\Delta P_{gst}}{\Delta P_{gst} + \Delta P_{lst}} \Delta P_0 \quad (9)$$

Dakle, ako efekat samoregulacije potrošača ne bi postojao ($\Delta P_{lst}=0$), nastali deficit bi pokrili samo generatori ($\Delta P_{mest}=\Delta P_0$). Međutim, kako on u praksi stvarno postoji, odnosno $\Delta P_0=\Delta P_{gst}+\Delta P_{lst}$, iz relacije (9) dobija se sledeća jednakost:

$$\Delta P_{mest} = \Delta P_{gst} \quad (10)$$

koja se i stvarno uspostavlja u ostvarenom postdinamičkom kvazistacionarnom stanju.

3. Jedna simulaciona metoda za brzu ocenu rada i efekata primarne regulacije učestanosti

3.1. Uvedena uprošćenja i pretpostavke

Razvoj ove metode takođe polazi od strožih prilaza analizi prelaznih elektromehaničkih procesa, nastalih nakon pojave većih debalansa snage, uz uvođenje takvih pretpostavki i uprošćenja, koja neposredno proizilaze iz same prirode i karaktera razmatranog fenomena.

Bazna pretpostavka kod razvoja ove metode, kao i kod prethodne, jeste uniformnost (sinfaznost) kretanja rotora sinhronih mašina tokom procesa primarne regulacije.

Sledeća pretpostavka je da se odziv agregata (promena mehaničke snage) tokom procesa primarne regulacije kvantifikuje na bazi pogodno koncipiranih

ekvivalentnih regulacionih kontura, čiji broj direktno proizilazi iz broja skupova agregata sličnih po regulacionim karakteristikama. Uvedeni koeficijent samoregulacije potrošača (koji nije vezan samo za promenu učestanosti, već i za promene napona, čiji je uticaj značajniji) ima konstantnu vrednost tokom celog procesa primarne regulacije.

Prethodno pomenute pretpostavke i uprošćenja uvedena su svesno u cilju dobijanja jednostavnog modela. Taj model se svodi na ekvivalentni generator, čiji rotor se relativno pokreće usled postojanja razlike između ukupne mehaničke snage svih generatora (čija se promena određuje preko odgovarajućeg broja regulacionih grupa) i električne snage, jednake zbiru ukupne aktivne snage potrošača i gubitaka aktivne snage.

3.2. Polazni oblik matematičkog modela

U skladu sa prethodno navedenim pretpostavkama i uprošćenjima, za analizu toka primarne regulacije učestanosti merodavna su sledeća dva sistema diferencijalnih jednačina [8, 9]:

$$\dot{f} = \frac{f_n^2 P_{ae}}{f M_e} \quad (11)$$

$$\dot{x}_{ei} = A_{ei} x_{ei} + B_{ei} u_{ei}; \quad i = 1, m \quad (12)$$

Jednačina (11) je diferencijalna jednačina prvoga reda, koja obuhvata kretanje ekvivalentnog generatora, odnosno prati dinamiku promene jedinstvene učestanosti EES f . Oznake u njoj imaju sledeća značenja:

P_{ae} = $P_{me} - P_{LO}(1 + k_f \Delta f)$ - snaga akceleracije ekvivalentnog agregata;

P_{me} - mehanička snaga ekvivalentnog agregata;

P_{LO} - ukupna aktivna snaga potrošača, uključujući gubitke;

k_f - koeficijent samoregulacije ukupne aktivne snage potrošnje EES;

NG - ukupan broj generatora u EES;

Δf - odstupanje učestanosti f od svoje početne vrednosti f_n ;

$M_e = \sum_{i=1}^{NG} M_i$ - konstanta ekvivalentnog agregata EES;

$M = T_j S_n$ - konstanta sinhronne masine;

T_j - vremenska konstanta inercije agregata ;

S_n - nominalna prividna snaga generatora .

Drugi sistem jednačina (12), koji u opštem slučaju može da ima m podistema (m - broj ekvivalentnih regulacionih grupa), merodavan je za praćenje dinamike promene mehaničke snage. Kao izlaz daje veličinu ukupne mehaničke snage, odnosno njenu promenu ΔP_{me} . Dakle, red sistema (12) zavisio bi od broja

uvršćenih ekvivalentnih regulacionih grupa m , kao i od reda modela svake od tih grupa. U slučaju da se ne vrši ekvivalentiranje, $m=NG$, odnosno broj regulacionih grupa bio bi jednak ukupnom broju generatora, koji nakon analiziranog poremećaja, ostaju u pogonu.

U slučaju uvršćenja dve ekvivalentne regulacione konture (jedna, koja odgovara termopostrojenjima, a druga, hidropostrojenjima), što realno postojeće strukture proizvodnog dela EES najčešće omogućuju, broj ekvivalentnih regulacionih grupa bi iznosio $m=2$. Tada bi sistem jednačina (12) se transformisao u sledeći, znatno jednostavniji oblik:

$$\dot{x}_{te} = A_{te}x_{te} + B_{te}u_{te} \quad (13)$$

$$\dot{x}_{he} = A_{he}x_{he} + B_{he}u_{he} \quad (14)$$

Korišćenjem standardnih modela za turbine (hidro i termo) i njihovu regulaciju, preporučenih od Radne grupe za performanse sistema IEEE Komiteta za EES [16, 17, 18], došlo se i do reda podсистema (13) i (14). Podsystem (13) je četvrtoga reda, i on prati promenu mehaničke snage (ΔP_{met}) u ekvivalentnom regulacionom kolu svih termoelektrana (indeks "t"). Podsystem (14) je trećeg reda, i prati promene mehaničke snage (ΔP_{meh}) svih hidroelektrana (indeks "h"). Time se dobija i promena ukupne mehaničke snage ($\Delta P_{me} = \Delta P_{met} + \Delta P_{meh}$), koja figuriše u jednačini (11). Elementi vektora i matrica, koji figurišu u jednačinama (13) i (14) bili su dati u [8, 9].

Na taj način, formiran je uprošćeni matematički model za praćenje rada i efekata primarne regulacije učestanosti EES, koga čini sistem simultanih diferencijalnih jednačina osmoga reda, formiran od jednačina (11), (13) i (14).

3.3. Postupak rešavanja formiranog matematičkog modela

Za rešavanje prethodno formiranog sistema simultanih diferencijalnih jednačina stoji na raspolaganju niz standardnih metoda numeričke integracije. Međutim, sama specifičnost modela, s jedne strane (prisustvo "mrtve zone" i niz ograničenja), kao i karakteristike tretiranog procesa, s druge strane, upućivali su na razvoj specijalne procedure numeričke integracije, odnosno na razvoj takve metode koja će najbolje da se adaptira prirodi razmatranog fenomena. Suština razvijene metode, sastojala se najpre u dekompoziciji prethodno formiranog polaznog simultanog sistema na tri podсистema, za pogodno odabrani korak numeričke integracije h , odnosno u formalnom smislu to su već date jednačine oblika (11), (13) i (14).

Dalje, struktura podсистema (13) i (14) omogućila je uvođenje odgovarajućih matrica linearne transformacije T_{te} i T_{he} , četvrtoga, odnosno trećega reda, čije su

kolone sopstveni vektori sopstvenih vrednosti matrica A_{te} (λ_{t1} , λ_{t2} , λ_{t3} i λ_{t4}) i A_{he} (λ_{h1} , λ_{h2} i λ_{h3}). Tada podsistemi (13) i (14) dobijaju sledeći, novi oblik:

$$\dot{x}'_{te} = A'_{te} x'_{te} + B'_{te} u_{te} \quad (15)$$

$$\dot{x}'_{he} = A'_{he} x'_{he} + B'_{he} u_{he} \quad (16)$$

gde je:

$$x_{te} = T_{te} x'_{te}; \quad x_{he} = T_{he} x'_{he} \quad (17)$$

$$A'_{te} = T_{te}^{-1} A_{te} T_{te} = \text{diag} [\lambda_{t1}, \lambda_{t2}, \lambda_{t3}, \lambda_{t4}] \quad (18)$$

$$A'_{he} = T_{he}^{-1} A_{he} T_{he} = \text{diag} [\lambda_{h1}, \lambda_{h2}, \lambda_{h3}] \quad (19)$$

$$B'_{te} = T_{te} B_{te}; \quad B'_{he} = T_{he} B_{he} \quad (20)$$

Na taj način, izvršena je dijagonalizacija aktuelnih matrica stanja, čime je postignuto potpuno raspredanje novouvedenih varijabli x'_{te} i x'_{he} , uz nepromenjene vrednosti "upravljanja". Primena poznate formule Cauchy-a, na podsisteme (11), (15) i (16), uz pretpostavku o linearnoj promeni "upravljanja" tokom izabranog koraka integracije h , dovodi do sledećih jednostavnih diferencnih jednačina:

$$f_{(n+1)} = f_{(n)} + \frac{f n^2}{2 M_e} \left(\frac{P_{ae(n+1)}}{f_{(n+1)}} + \frac{P_{ae(n)}}{f_{(n)}} \right) h \quad (21)$$

$$x'_{te i(n+1)} = \exp(\rho_{ti} h) x'_{te i(n)} - \frac{1}{\lambda_{ti}} [1 - \exp(\rho_{ti} h)] b_{tei} \frac{u_{te(n)} + u_{te(n+1)}}{2} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (22)$$

$$x'_{he i(n+1)} = \exp(\rho_{hi} h) x'_{he i(n)} - \frac{1}{\lambda_{hi}} [1 - \exp(\rho_{hi} h)] b_{hei} \frac{u_{he(n)} + u_{he(n+1)}}{2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (23)$$

u kojima indeksi (n) i $(n+1)$ označavaju veličine na početku naznačenih vremenskih intervala, međusobno "udaljenih" za korak numeričke integracije h .

Izvedene diferencne jednačine (21), (22) i (23) omogućuju određivanje dinamike promene učestanosti i ukupne mehaničke snage, primenom postupka korišćenog kod metoda numeričke integracije tipa predictor-corrector ili primenom odgovarajućih iterativnih procedura.

Međutim, sama "fizika" tretiranog problema omogućila je dalja uprošćenja, koja se ogledaju u načinu estimacije veličine "upravljanja" u diferencnoj jednačini (21).

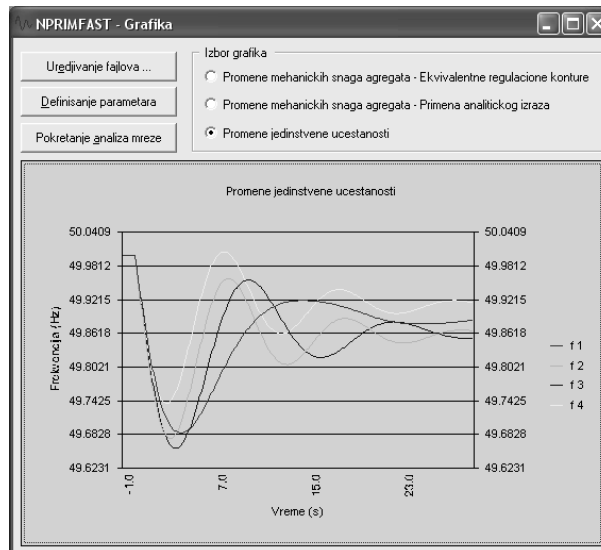
Pokazalo se da je kod njegove kvantifikacije, za pogodno izabranu vrednost koraka numeričke integracije h (0.05-0.1 s), sasvim pogodna primena drugog Newton-ovog interpolacionog polinoma drugoga reda, kada relacija (21) prelazi u sledeći oblik:

$$f_{(n+1)} = f_{(n)} + \frac{f_n^2}{2M_e} \left[\frac{4P_{ae(n)}}{f_{(n)}} - \frac{3P_{ae(n-1)}}{f_{(n-1)}} + \frac{P_{ae(n-2)}}{f_{(n-2)}} \right] h \quad (21')$$

Dakle, razvijena je jedna veoma jednostavna metoda numeričke integracije, koja se sastoji u sukcesivnoj primeni diferencnih jednačina (21'), (22) i (23). Po dobijanju vrednosti učestanosti $f_{(n+1)}$, primenom diferencne jednačine (21'), ta vrednost se dalje koristi kod sračunavanja potrebnih vrednosti "upravljanja" u transformisanim modelima ekvivalentnih regulacionih kontura ("upravljanja" $u_{te(n+1)}$ i $u_{he(n+1)}$, koja figurišu u diferencnim jednačinama oblika (22) i (23)).

4. Računarski program PRIMFAST

Na bazi prethodno izloženih metoda, u Institutu "Nikola Tesla" razvijen je računarski program PRIMFAST. Korišćen je Visual Fortran Professional Edition 6.0.0., uz mogućnost obuhvatanja interkonekcija sa 10 000 čvorova, 30 000 grana, 2 000 generatora, 4 000 transformatora i 200 regulacionih basena. Omogućen je interaktivni rad, razvojem posebne aplikacije za unos podataka, koji se prosleđuju programu PRIMFAST, i za prikaz dobijenih rezultata. Za razvoj aplikacije korišćen je Microsoft Visual Studio 6, Professional Edition.

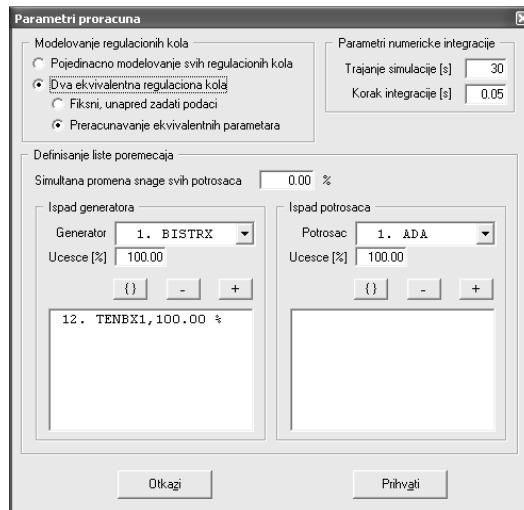


Slika 1. Izgled osnovne radne površine računarskog PRIMFAST

Na slici 1 je dat prikaz osnovne radne površine razvijene aplikacije. U zaglavlju radne površine nalaze se tasteri za izbor osnovnih opcija rada programa PRIMFAST. Izabrani rezultati proračuna se prikazuju u donjem delu radne površine, u formi vremenskih dijagrama.

Opcija Uređivanje fajlova služi za uređivanje tekstualnih datoteka koje koristi računarski program PRIMFAST. Opcija Definisiranje parametara (slika 2) služi za definisanje tri grupe parametara:

- način modelovanja regulacionih kola;
- parametri numeričke integracije;
- definisanje liste ispada.



Slika 2. Izgled obrasca za definisanje parametara proračuna

Okvir *Modelovanje regulacionih kola* služi za definisanje načina na koji će regulacione konture biti ekvivalentnirane za potrebe simulacionog modela. Postoji mogućnost pojedinačnog modelovanja svih regulacionih kontura ili formiranje dve ekvivalentne regulacione konture, o čemu je bilo reči u prethodnom poglavlju. Trajanje simulacije i korak numeričke integracije definišu se u okviru *Parametri numeričke integracije*.

U okviru programa *PRIMFAST* moguće je specificirati tri vrste poremećaja:

- simultana promena snage svih potrošača, u okviru koje se modelovano opterećenje povećava ili smanjuje u zadanom iznosu;
- ispad generatora u zadanom iznosu, čime se simulira ispad određenog broja jedinica;
- ispad potrošača u zadanom iznosu.

Na taj način, korisniku ovoga računarskog programa omogućeno je da na jedan jednostavan i brz način definiše poremećaj koji se razmatra, i da na veoma brz i pregledan način sagleda njegove efekte, primenom prikazanih metoda (analitička i simulaciona), u kontekstu praćenja rada primarne regulacije učestanosti.

5. Primeri praktične primene računarskog programa *PRIMFAST*

Mogućnosti i karakteristike ovog računarskog programa utvrđivane se u okviru studije "Sistemski parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a" (faza I), koja se radi za potrebe Elektroprivrede Srbije. Karakteristični primeri njegove praktične primene odnose se najpre za slučaj izolovanog rada EES Srbije, za maksimalno stanje EES Srbije, koje je ostvareno 31 decembra 2010. godine u 17:30 h. To je učinjeno svesno, jer u okviru tzv. "ostrvskog" rada mogu preciznije da se kvantifikuju uticaji relevantnih parametara ove vrste regulacije u EES koji se observira (na primer, veličine mrtve zone i veličine statizma turbinskih regulatora).

Od niza razmatranih poremećaja tipa ispada generatora velikih snaga, izabran je slučaj ispada jednog agregata u TE Nikola Tesla B, angažovanog sa 577 MW i 297 Mvar. Kao ilustracija nekih od interesantnih i dovoljno indikativnih rezultata, poslužiće tabela 1 i slike 3 i 4.

Tabela 1 daje karakteristične vrednosti učestanosti i promene ukupne mehaničke snage i vremenske trenutke njihovog nastajanja, za različite načine modelovanja praćenja procesa primarne regulacije učestanosti. Oznaka A se odnosi na rezultate primene analitičkih izraza (1) i (2), a oznake B i C, na primenu prethodno izložene simulacione metode. Slučaj kada broj ekvivalentnih regulacionih kontura odgovara ukupnom broju angažovanih agregata označen je sa B, a oznaka C se odnosi na dve ekvivalentne regulacione konture. Uvedene oznake u tabeli 1 imaju sledeća značenja:

f_{min} - minimalne vrednosti učestanosti, nastale u momentu t_{min} , od nastanka poremećaja;

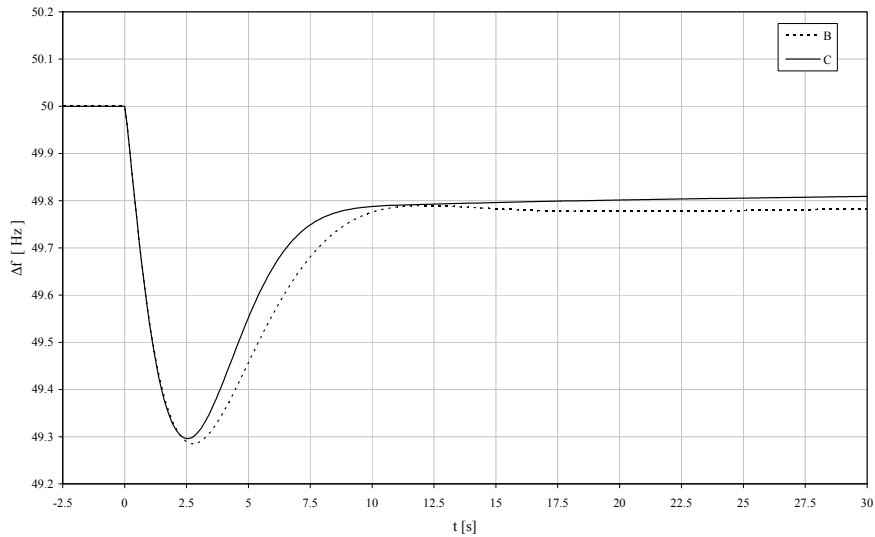
f_{st} - kvazistacionarne vrednosti učestanosti, uspostavljene nakon 30 s;

ΔP_{mst} - ukupne promene mehaničke snage u momentu praktičnog uspostavljanja kvazistacionarnih vrednosti učestanosti.

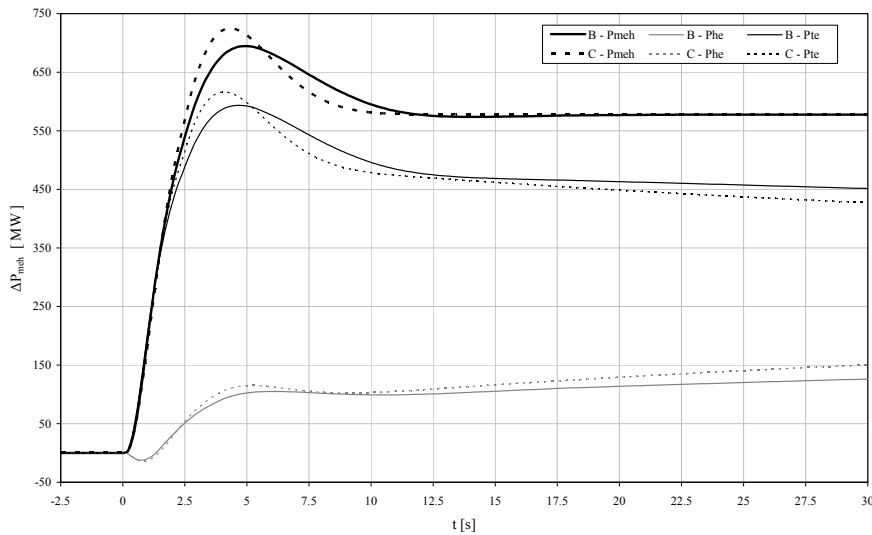
Tabela 1. Karakteristične vrednosti učestanosti i promena ukupne mehaničke snage; ispad jednog agregata u TE N.Tesla B

Karakteristične vrednosti	Tip modela		
	A	B	C
f_{min} [Hz]	49.322	49.285	49.306
t_{min} [s]	2.1	2.8	2.9
f_{st} [Hz]	49.841	49.782	49.809
ΔP_{mst} [MW]	568.6	577.6	577.7

Slike 3 i 4 daju grafičku interpretaciju rezultata, datih u tabeli 1. Slika 3 daje dinamiku promene učestanosti, a slika 4 dinamiku promena ukupne mehaničke snage i ukupnih mehaničkih snaga hidro i termo agregata, za modele označene sa B i C.



Slika 3. Dinamika promene jedinstvene učestanosti; ispad jednog agregata u TE N. Tesla B

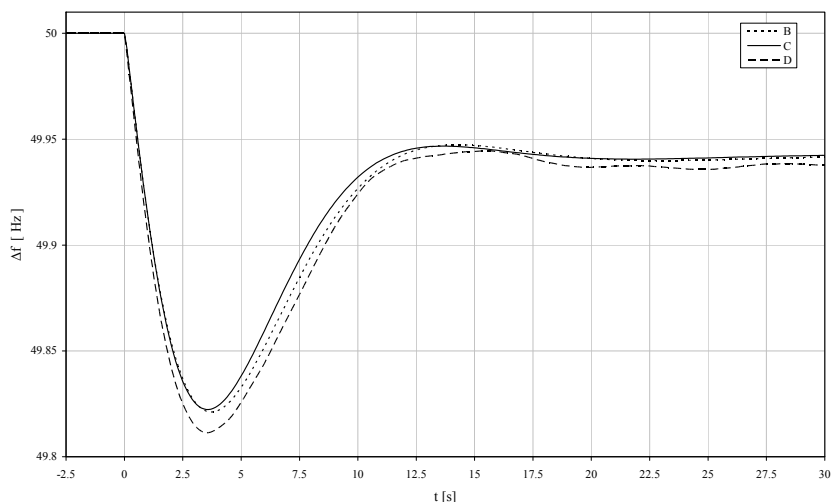


Slika 4. Promene ukupne mehaničke snage agregata; ispad jednog agregata u TE N. Tesla B

Prikazani rezultati odnose se na slučaj konstantne snage potrošača, tako da se oni nalaze na strani sigurnosti. Odnose se i na slučaj kada su svi turbinski regulatori "slobodni" i kada postoji dovoljno rotacione rezerve kod angažovanih agregata. Svi turbinski regulatori hidroagrega i turboagrega imali su statizme u iznosu od 4%, odnosno 6 %, a veličine mrtve zone regulatora iznosile su 10 mHz. Statizmi i mrtve zone bile su u skladu sa zahtevima iz važeće regulative [1].

Analizirajući pokazatelje date u tabeli 1, uočava se relativno visoka podudarnost dobijenih rezultata primene analitičkih izraza (1) i (2) i simulacione metode, kod određivanja ekstremnih i kvazistacionarnih vrednosti učestanosti i vremena njihovih nastanaka. Dalje, saglasno slikama 2 i 3, uočava se visoka podudarnost dobijenih rezultata primene simulacione metode u dva slučaja. U prvom slučaju (B), broj ekvivalentnih regulacionih kontura bio je jednak ukupnom broju angažovanih agregata, a u drugom (C), bile su dve ekvivalentne regulacione konture (jedna, koja odgovara termopostrojenjima, a druga, hidropostrojenjima).

Zatim, analizirana je realna interkonekcija, kada su prethodno pomenutom modelu EES Srbije, pridodati modeli EES Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije.

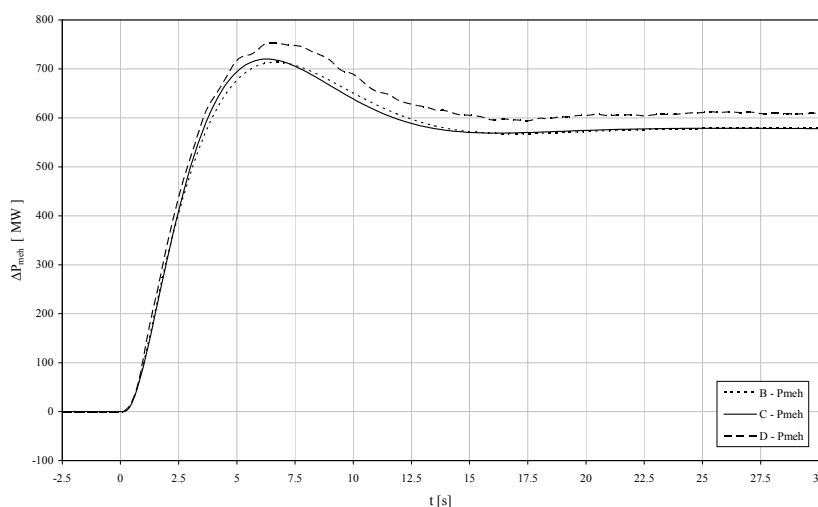


Slika 5. Dinamike promene jedinstvene učestanosti razmatrane interkonekcije; ispad jednog agregata u TE N. Tesla B

Tačnije praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, odnosno analiza rada i efekata primarne regulacije učestanosti, kada se zahteva i praćenje stanja u pojedinim (ili svim) elementima EES, tokom odvijanja prelaznog procesa (a što prethodno izložene uprošćene metode evidentno nisu u stanju), neophodni su stroži prilazi. Zbog toga je izvršeno poređenje sa strožim prilazom, koji detaljnije prati rad i efekte primarne regulacije učestanosti [8, 19]. U tom prilazu modeluje se kompletna električna mreža EES sa svim relevantnim komponentama i odgovarajućim regulacione uređaje. To je omogućilo ocenu tačnosti prikazanih uprošćenih metoda i definisanje domena i način njihove efikasne praktične primene.

I dalje je razmatran slučaj ispada jednog agregata u TE Nikola Tesla B, angažovanog sa 577 MW i 297 Mvar. Kao ilustracija nekih, od takođe interesantnih i dovoljno indikativnih rezultata, poslužiće slike 5 i 6. Prikazani rezultati odnose se takođe na slučaj konstantne snage potrošača i prethodno navedene vrednosti statizama i mrtvih zona turbinskih regulatora.

Slika 5 daje dinamike promene učestanosti, a slika 6 dinamike promena ukupne mehaničke snage, za modele označene sa B, C i D. Oznaka D se odnosi na rezultate primene pomenutog strožeg prilaza analizi prelaznih procesa relativno dužeg trajanja.



Slika 6. Promene ukupne mehaničke snage agregata razmatrane interkonekcije; ispad jednog agregata u TE N. Tesla B

Analizirajući pokazatelje date na slikama 5 i 6, uočava se visoka podudarnost dobijenih rezultata primene simulacionog postupka i strožeg prilaza. Neizbežne, naravno i očekivane razlike u dobijenim rezultatima su, u prvom redu, vezane za neuvažavanje promene ukupnih gubitaka aktivne snage u simulacionoj metodi, a koje u realnosti svakako postoje.

U slučaju razmatranog ispada jednog agregata u TE N. Tesla B, promena ukupnih gubitaka aktivne snage je iznosila 33 MW na nivou razmatrane interkonekcije. Praktično je reč o odgovarajućem porastu (srazmerno malom) stvarnog debalansa snage, ako se zanemari zavisnost snage potrošača od napona i učestanosti, kako je to urađeno u ovom slučaju. Međutim, u realnosti, snage potrošača su odgovarajuće funkcije i napona i učestanosti, tako da u slučaju ispada agregata dolazi do redukcije njihovih vrednosti, a time i do redukcije nastalog debalansa snage. Dakle, to je na strani kompenzacione porasta ukupnih gubitaka aktivne snage.

Na kraju, naravno, ako to uopšte treba posebno naglašavati, odabrani praktični primeri nemaju pretenziju da budu u funkciji neposrednog i celovitog rešavanja

problematike primarne regulacije učestanosti EES Srbije. To je predmet prethodno pomenute studije, koja se radi za potrebe Elektroprivrede Srbije.

Primeri su, dakle u prvom redu birani tako, da ilustruju karakteristike i mogućnosti predloženih metoda, dovodeći ih do velikih iskušenja, a da se ujedno sagledaju i njihove upotrebne vrednosti, u kontekstu šire celine koju daje računarski program PRIMFAST.

6. Zaključci

U radu su prikazane mogućnosti i karakteristike računarskog programa PRIMFAST, razvijenog u Institutu "Nikola Tesla", koji je namenjen za analize primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih interkonekcija. On je baziran na specijalno razvijenim metodama (analitičkoj i simulacionoj), koje omogućuju ekstremno brzo dolaženje do traženih rezultata. Na primeru realne interkonekcije, kroz poređenje sa strožim prilazom analizi prelaznih procesa relativno dužeg trajanja, utvrđena je upotrebna vrednost ovog računarskog programa.

7. Literatura

- [1] "Pravila o radu prenosnog sistema", Elektromreža Srbije, Verzija 1.0, april 2008.
- [2] "UCTE Operation Handbook, Policy 1: Load-Frequency Control and Performance; A. Primary Control", Final Version (approved by SC on 19 March 2009)
- [3] Venikov V.A. i dr: "Metodika proračuna stabilnosti automatizovanih elektroenergetskih sistema" (knjiga na ruskom), "Viša škola", Moskva, 1966.
- [4] Sovalov S.A. i dr: "Eksperimentalno ispitivanje režima elektroenergetskih sistema" (knjiga na ruskom), "Energomizdat", Moskva, 1985.
- [5] Anderson P.M, Mirheydar M., "A Low-order System Frequency Response Model", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.5, No.3, August 1990., pp. 720-729.
- [6] Popović D.P., Mijailović S.V., "Brza evaluacija dinamike promene učestanosti EES-a u procesu njene primarne regulacije" časopis "Elektroprivreda", br. 1, 1996., str. 3-12.
- [7] Popović D.P., Mijailović S.V., "Fast Evaluation of Dynamic Changes of the Electric Power Systems Frequency during Primary Control", International Journal of Electric Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 8, November 1997., pp. 525-532.

- [8] Popović D.P., "Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008. godine, str.255.
- [9] Popović D.P., "Jedna metoda za brzu ocenu toka i efekata primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br.2, 2001., str.3-15.
- [10] Popović D.P., "Uključivanje efekata automatskog frekventnog rasterećenja potrošača u analize statičke sigurnosti EES-a", XXXII jugoslovenska konferencija za ETAN, Sarajevo, 1988.
- [11] Popović D.P., "Automatsko frekventno rasterećenje potrošača u studijama statičke sigurnosti elektroenergetskih sistema", časopis "Elektroprivreda", br. 5-6, 1988., str. 183-190.
- [12] Popović D.P., Đukanović M., "Underfrequency Load Shedding in Steady-State Security Assessment of Power Systems", IMACS-IFAC SYMPOSIUM, Lille-France, May 7-10, 1991., paper PM2.J.A.02.
- [13] Đukanović M., Popović D.P., Šobajić D., Pao Y., "Prediction of Power System Frequency Response after Generator Outages using Neural-Nets", IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 5, September 1993., pp. 389-398.
- [14] "Trial Operation of the Bulgarian Electric Power System with the Electric Power Systems of Greece, Albania and ex-Yugoslav Republics", NEK, PPC, JUGEL/ECC/EPS, Belgrade, March, 1994.
- [15] "Preliminary Trial Parallel Operation of the Electric Power Systems of Romania with the Electric Power Systems of Albania, Greece and ex-Yugoslav Republics", RENEL, JUGEL/ECC/EPS, Belgrade, March 1994.
- [16] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbine in Power System Studies", IEEE Transaction, Vol.PAS-92, Dec.1972. pp. 1904-1915
- [17] IEEE Working Group Report: "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No.1, February 1992., pp.167-179
- [18] "Dynamic Models for Fossil Fueled Steam Units in Power System Studies", Working Group on Prime Mover and Energy Supply, Models for System Dynamic Performance Studies, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No.2, May 1991., pp.753-761.
- [19] Popović D.P., Mijailović S.V., "An Efficient Methodology for the Analysis of Primary Frequency Control of Electric Power System", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, 22(2000), pp 331-341.

Abstract. This paper presents the possibilities and practical features of a computer program for fast assessment of the effects of primary frequency regulation of electric power interconnections. It is based on two

methods. The first one is the analytical method, which applies analytical expressions for the non-zero initial conditions, with a range of benefits provided by the analytical form, allowing consideration of possible structural changes in the power system during the analysis process. The second is a simulation method, with recurrent application of suitable drafted, fully decoupled difference equations. Capabilities and features of this computer program have been identified in case of isolated power system of Serbia, and then for the case of a widespread appreciation of its surrounding.

Keywords: computer program, assessment, primary frequency control, electric power interconnection

Characteristics and Possibilities of Computer Program for Fast Assessment of Primary Frequency Control of Electric Power Interconnections

Rad primljen u uredništvo 15.09.2011. godine
Rad prihvaćen 25.10.2011. godine