

C2 12

SIMULACIJA RADA ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA U INTERKONEKCIJI PRIMENOM SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB

V. PERIĆ*, F. KULIĆ
DMS Grupa doo, Novi Sad, Srbija

Sadržaj

U ovom radu je predstavljen jedan uprošćeni simulacioni model za analizu prelaznih pojava u sistemu, koje su nastale usled raznih poremećaja potrošnje ili ispada proizvodnih jedinica. Model je prilagođen programskom paketu SIMULINK. Na kraju su prikazani odzivi test sistema na različite poremećaje.

Ključne riječi: Automatska regulacija učestanosti i aktivnih snaga (AGC) – Simulacija - Model - Elektroenergetski sistem

1. UVOD

Osnovni cilj regulacije učestanosti i aktivnih snaga je permanentno održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje električne energije. To se postiže pomoću centralnog mrežnog regulatora regulacione oblasti koji određuje potrebnu proizvodnju pojedinih regulacionih agregata, na osnovu mjerenja učestanosti, snaga razmijene na interkonektivnim vodovima i rezultata funkcije ekonomskog dispečinga. Željene snage se nadzorno upravljačkim sistemom prosleđuju agregatima u vidu postavnih vrijednosti (set point), ili u vidu impulsa za povećanje/smanjenje proizvodnje agregata. Ukoliko je elektrana sa više agregata opremljena sopstvenim centralnim regulatorom, mrežni regulator određuje samo zahtjevanu proizvodnju čitave elektrane, dok je raspodjela proizvodnje na agregate u elektrani u nadležnosti samog centralnog regulatora elektrane [1,2,3,4].

Broj agregata u realnim elektroenergetskim sistemima (EES-ima) može biti izrazito veliki (na primer, u EES Sjedinjenih Američkih Država ima oko 17000 agregata). Detaljno modelovanje svih elemenata sistema zahtjevalo bi rešavanje sistema (ne-)linearnih diferencijalno-algebarskih jednačina veoma visokog reda. Vrijeme potrebno za numeričko rešavanje ovako velikih sistema jednačina može biti veće od trajanja jednog ciklusa automatske regulacije učestanosti i aktivnih snaga (AGC), pa je takav model praktično neupotrebljiv za rad u realnom vremenu. Na sreću, pokazuje se da je u praktičnim problemima ovakva detaljna analiza uglavnom nepotrebna, pošto se zadovoljavajuća tačnost dobija i uprošćenim modelima [5,6,7].

Uslovi u kojima današnji elektroenergetski sistemi rade iziskuje veoma brzu i tačnu analizu njihovog stanja u cilju održavanja stabilnosti i omogućavanja ispunjavanja njihove osnovne funkcije – snabdevanja potrošača dovoljnom količinom električne energije prihvatljivog kvaliteta [8,9]. U tom cilju se u okviru automatske regulacije učestanosti i aktivnih snaga primenjuju različiti upravljački

* Vedran Perić, DMS Grupa doo, Sremska 4, 21000 Novi Sad

algoritmi, počevši od klasičnih PI regulatora [10,11], pa sve do naprednih i inteligentnih tehnika upravljanja [12,13]. Pažnja posvećena proučavanju i rešavanju problema automatske regulacije napona i učestanosti samo potvrđuje njen značaj u radu elektroenergetskih sistema [14,15]. Veoma važno mesto u procesu formiranja nadzorno upravljačkih algoritama ima računarska simulacija rada sistema, kao proces provere ispravnosti predložene metodologije. Danas je najrasprostranjeniji softverski paket za simulaciju ponašanja dinamičkih sistema Matlab, a posebno njegov dodatak Simulink [16,17]. Matlab je pogodan za simulaciju ponašanja velikog spektra sistema, počevši od pojedinačnih električnih mašina pa do multimašinskih sistema sa složenim međuvezama i zavisnostima [7,18]

U ovom radu opisan je jedan od načina modelovanja EES. U razradi problema kreće se sa opisom modela pojedinih elemenata sistema i mogućim zanemarenjima (poglavlje 2), da bi se kasnije došlo do modela čitavog EES (poglavlje 3). Na kraju, u poglavlju 4, prikazani su rezultati simulacije realnog sistema. U poglavljima 5 i 6 su respektivno navedeni zaključci rada i korišćena literatura.

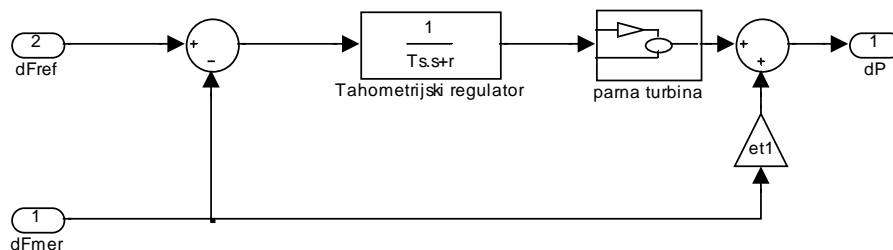
2. MODELOVANJE ELEMENATA

U opštem slučaju, ponašanje EES može se opisati sistemom (ne-)linearnih diferencijalno-algebarskih jednačina. U cilju jednostavnijeg rešavanja sistema jednačina vrši se linearizacija modela oko stabilne radne tačke, pri čemu se pretpostavlja da će sistem raditi sa malim varijacijama oko izabranog stabilnog radnog režima. Vremensko trajanje pojedinih pojava u EES-u međusobno se razlikuje (vremenska dekompozicija problema), što omogućava da se u slučaju analize odziva sistema na poremećaj zanemare brze elektromagnetne pojave, kao i spore pojave vezane za termodinamiku kotlova u termoelektranama.

2.1 Modeli termoelektrana

U termoelektranama (TE) koriste se tahometrijski turbinski regulatori. To su regulatori proporcionalnog dejstva koji utiču na protok radnog fluida u slučaju odstupanja učestanosti sistema u odnosu na referentnu vrednost. Na turbinskim regulatorima podešava se mrtva zona od 20mHz da bi se izbegao nepotreban regulacioni rad.

Turbine TE mogu se modelovati sistemom prvog, drugog ili trećeg reda [1]. Modelom prvog reda modeluje se kondenzaciona turbina sa direktnim tokom pare, modelom drugog reda specijalan slučaj kondenzacione turbine sa međupregrijavanjem pare prilagođene za nuklearne termoelektrane, dok se modelom trećeg reda modeluje kondenzaciona turbina sa međupregrijavanjem pare. Uopšteni model TE dat je na Slici 1.



Slika 1. Model TE

e_t -koeficijent samoregulacije turbine

k_t -koeficijent pojacanja turbine (približno 1r.j.)

2.2 Model hidroelektrana

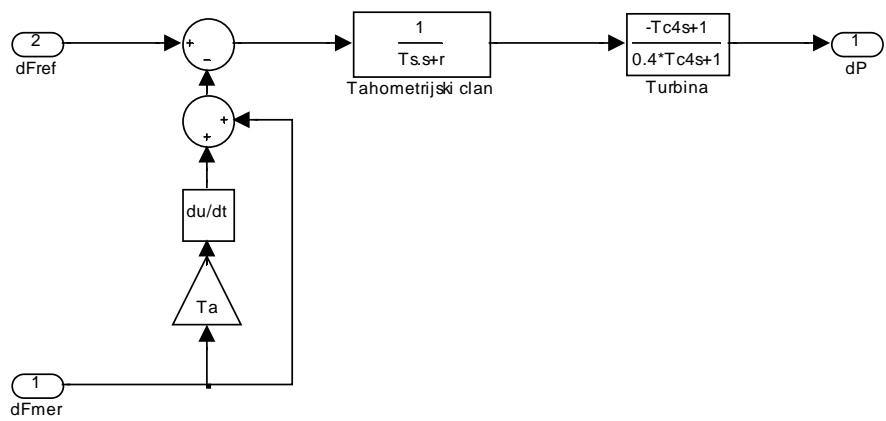
U hidroelektranama (HE) koriste se dvije vrste regulatora :

- 1) Akcelerotahometrijski regulatori djeluju na protok radnog fluida na osnovu formirane linearne kombinacije od dva člana, odstupanja od referentne učestanosti (tahometrijski član) i brzine promjene učestanosti (akcelerotahometrijski član) .

2) Regulatori sa prolaznim statizmom nemaju akcelerotahometrijski član ali im je dodata elastična povratna sprega koja prigušuje brze promjene toka radnog fluida kroz turbinu. Oba regulatora su proporcionalnog dejstva sa podešenom mrtvom zonom od 20mHz.

Jednačine koje opisuju hidrauličku instalaciju i turbinu su izrazito nelinearnog karaktera. Jednačine hidrauličke turbine se određuju eksperimentalnim putem i obično se daju u grafičkoj predstavi kao školjkasti (topografski) dijagrami. U ovom radu koristi se uprošćeni model pribranske hidroelektrane gdje su uvažena brojna zanemarenja [1]

Model HE sa akcelerotahometrijskim regulatorom koji se koristi u simulacionom modelu prikazan je na slici 2, dok model HE sa regulatorom sa prolaznim statizmom nije prikazan u ovom dijelu pošto je, formalno gledano, matematički model jednak modelu termoelektrane :



Slika 2. Model HE sa akcelerotahometrijskim regulatorom

2.3 Model potrošača

EES obezbjeđuje električnu energiju za veliki broj elementarnih potrošača koji su međusobno veoma različitog karaktera. Zbog velikog broja, analitičko uvažavanje karakteristika svakog pojedinačnog potrošača je praktično nemoguće pa se potrošači posmatraju kao jedan agregisani potrošač čije se karakteristike određuju eksperimentalnim putem [1]. U ovom radu se potrošači opisuju sistemom prvog reda. Promjena snage u stacionarnom stanju opisuje se faktorom samoregulacije potrošača usled promjene učestanosti sistema e_p , koji se definiše kao izvod snage potrošača po učestanosti napajanja. Pokazuje se da je ovaj faktor konstantan u dovoljno širokom opsegu (45-55Hz).

Inercija obrtnih masa potrošača i generatora u sistemu uzima se u obzir preko sume pojedinih mehaničkih vremenskih konstanti obrtnih mašina u sistemu

$$T \frac{d(\Delta f)}{dt} + e_p \Delta f = \left(\sum_{i=1}^m (\epsilon_i \Delta p_{ti}) \right) - \Delta p_1 \quad (1)$$

gdje je ϵ_i udio i-te elektrane u ukupnoj snazi sistema u stacionarnom stanju a smatra se da su svi rotori generatora kruto spregnuti. Ovim se osigurava da je učestanost ista u svim dijelovima sistema, što za posledicu ima nulte prigušne momente između generatora. Ovo zanemarenje je opravdano s obzirom da se u ovom radu razmatraju spore dinamičke pojave.

2.4 Model spojnog voda

Snaga koja se prenosi vodom, kod kojeg je zanemarena aktivna otpornost i odvodnost, izračunava se preko poznate formule :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

U ovom radu zanemarene su naponske prilike (smatra se da su naponi jednaki nominalnim), pa se ova jednačina u normalizovanom domenu svodi na

$$p = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{x_{12}}, \quad (3)$$

čime se dobija da je snaga koja se prenosi vodom funkcija samo razlike faznih stavova napona na krajevima posmatranog voda. Linearna zavisnost relativne promjene snage voda od razlike faznih stavova dobija se razvojem izraza u Tejlorov red do drugog člana u tački koja odgovara unaprijed dogovorenoj razmjeni preko spojnog voda. Promjena faznog stava sistema određuje se integraljenjem učestanosti i množenjem sa koeficijentom $2\pi F_0$, kako bi se fazni stavovi izraženi u sekundama izrazili u radijanima. Iz ovoga se dobija da je promjena snage koja se prenosi spojnim vodom jednaka

$$\Delta p = \frac{\cos(\theta_{10} - \theta_{20})}{x_{12}} \Delta \theta_{12}. \quad (4)$$

U ovom trenutku potrebno je naglasiti da su normalizovane vrijednosti označene malim štampanim slovima a veličine u apsolutnom domenu velikim štampanim slovima.

2.5 Formiranje ekvivalentnih agregata

Formiranje ekvivalentnih agregata jednostavna je procedura koja omogućava da se dimenzije sistema jednačina koje treba riješiti značajno umanjuju. Na osnovu razmatranih modela agregata dobijamo da se svaki od agregata može modelovati sa jednim od pet različitih modela, detaljno opisanih u poglavljima 2.1 i 2.2. Ova klasifikacija predstavlja temelj za formiranje ekvivalentnih agregata. Sama procedura bazira se na tzv. paralelnom sprezanju polova a sastoji u zamjenjivanju više istovrsnih agregata jednim zajedničkim čija je forma funkcije prenosa identična formi funkcije prenosa svakog od agregata iz grupe koja se ekvivalentira jednim agregatom [1].

Elektrane u sistemu mogu raditi kao regulacione ili kao bazne. Regulacione elektrane, u sprezi sa AGC-om, učestvuju u otklanjanju regulacione greške oblasti (ACE - Area Control Error). Bazne elektrane imaju zadatak da svoju proizvodnju drže na unaprijed definisanim vrijednostima, čak i u slučajevima kada se pojavi velika vrijednost greške regulacione oblasti. Svi agregati koji učestvuju u sekundarnoj učestvuju i u primarnoj regulaciji, dok bazni agregati mogu ali ne moraju učestvovati u primarnoj regulaciji. Ovakva konfiguracija EES nameće potrebu da se posebno modeluju regulacioni a posebno bazni agregati, što znači da je potrebno deset ekvivalentnih agregata da bi se modelovao čitav proizvodni podsistem EES-a (pet za modelovanje agregata koji učestvuju samo u primarnoj, a pet za modelovanje agregata koji učestvuju u sekundarnoj regulaciji).

Bazne elektrane koje ne učestvuju u primarnoj regulaciji ne nalaze se direktno u dinamičkom sistemu jer je njihova proizvodnja konstantna pa ne utiču na dinamiku sistema kao ostale elektrane.

2.6 Model centralnog mrežnog regulatora

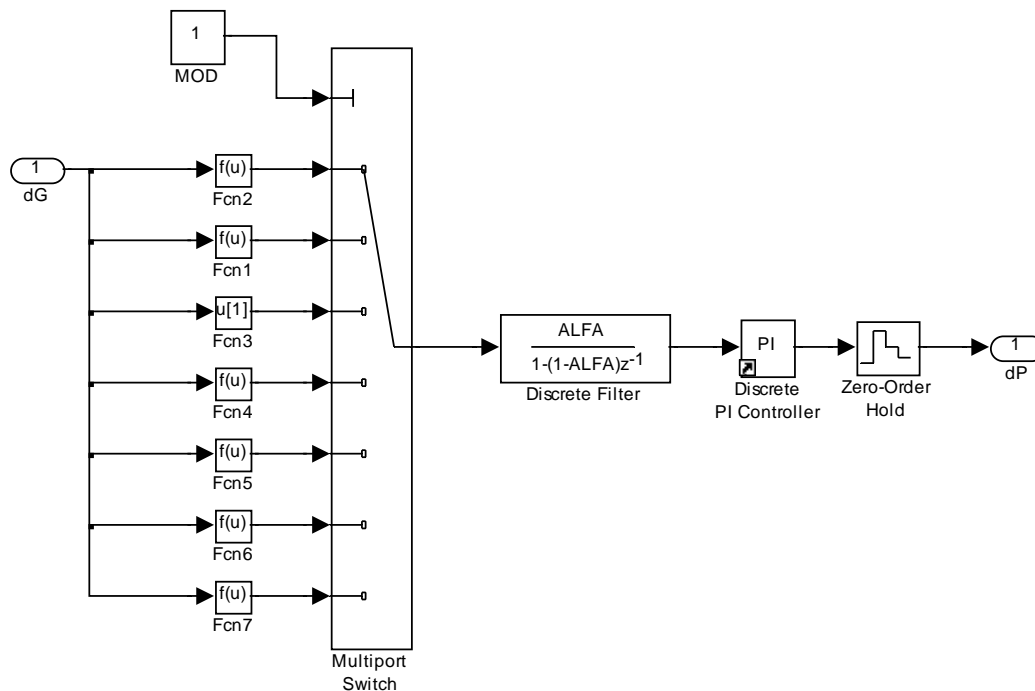
Mrežni regulator, na osnovu mjerenja učestanosti sistema i snage razmjene sa susjednim sistemima, određuje potrebnu promjenu proizvodnje u sistemu. Korišćeni regulator je digitani regulator PI tipa. Ulaz u PI regulator je greška regulacione oblasti (ACE) koja se, u zavisnosti od izabranog moda regulacije, računa na jedan od 7 načina. Mjerenja i komande u stvarnim nadzorno upravljačkim sistemima su diskretnog karaktera što je modelovano diferencnim jednačinama. Mjerenja se odabiruju svake 2 sekunde dok se komande generišu svake 4 sekunde, što je i ustaljena praksa u realnim AGC sistemima. Model mrežnog regulatora korišćenog u simulacijama dat je na slici 3.

3. MODEL EES

Za formiranje dinamičkog modela čitavog EES-a uvedena su dva zanemarenja koja značajno olakšavaju primjenu ovog dinamičkog modela. Prvo zanemarenje se odnosi na neuvazavanje naponskih prilika i reaktivnih snaga. Ovo zanemarenje je opravdano s obzirom na poznatu slabu povezanost

napona i reaktivnih snaga sa tokovima aktivnih snaga i faznih stavova napona u prenosnim visokonaponskim mrežama.

Drugo zanemarenje podrazumjeva neuvažavanje uticaja prenosne mreže (tzv. jednotačkasti model). Ovim zanemarenjem smatra se da je učestanost sistema jednaka u svakoj tački posmatranog EES što je u stvarnosti ispunjeno samo u stacionarnim režimima. Ipak, ovo zanemarenje je opravdano jer je prenosna mreža u velikoj mjeri kruta u električnom smislu, a gubici koji se javljaju u prenosnoj mreži su praktično konstantni u odnosu na ukupnu snagu u sistemu.



Slika 3. Model mrežnog regulatora

3.1 Model dva povezana EES

Na slici 4. dat je konačan simulink model dva međusobno povezana sistema. Ovaj model korišćen je za analizu poremećaja u EES-u, a rezultati analiza su predstavljeni u narednom poglavlju. Vrijednosti parametara pojedinih elemenata sistema su birane tako da zadovoljavaju karakteristične opsege koji se javljaju u praksi. Više o ovoj tematici može se naći u priloženoj literaturi.

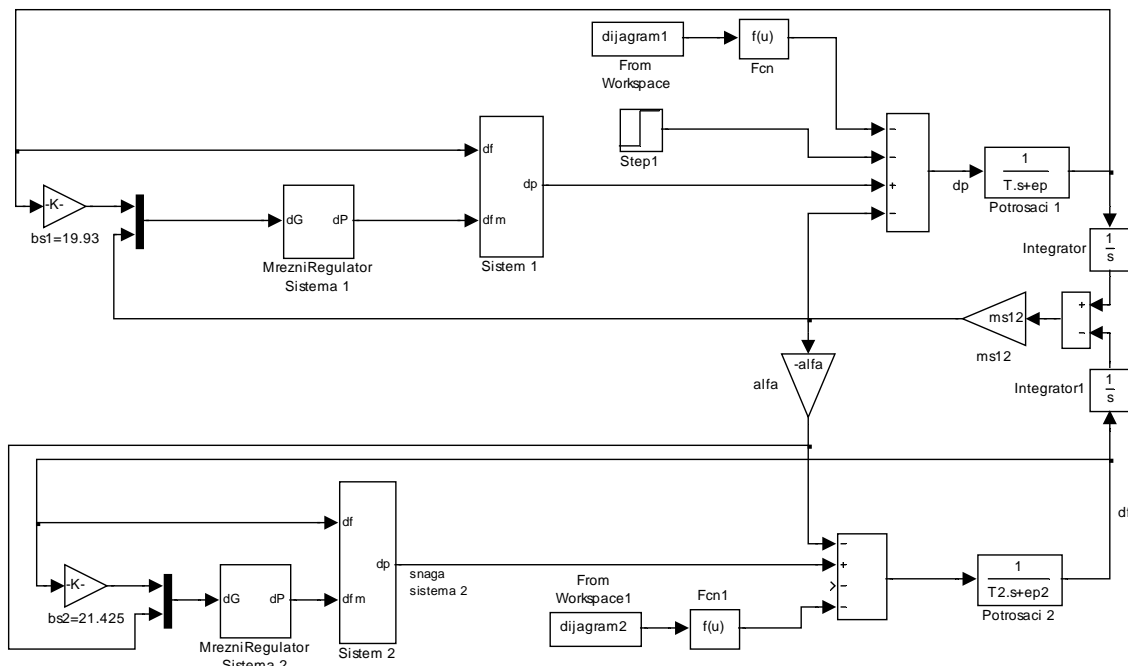
Blokovima „From Workspace” u model se uvalači planirana potrošnja sistema preko hronološkog dijagrama potrošnje. Na planiranu potrošnju se superponiraju poremećaji u sistemu (u ovom radu poremećaji su odskočna i linearna funkcija). Pojedinačni EES su predstavljeni podsistemima koji za ulaz imaju vektor koji sadrži podatke o ukupnoj razmjeni snage sa susjednim sistemima i mjerenoj učestanosti pomnoženoj sa odgovarajućom konstantom b_s . Konstanta b_s je u ovom slučaju izabrana tako da bude jednaka faktoru samoregulacije sistema e_s . Kao što je ranije rečeno, jedan EES je opisan skupom od 10 ekvivalentnih elektrana čija zbirna proizvodnja predstavlja izlaz iz posmatranog bloka.

4. REZULTATI PRORAČUNA

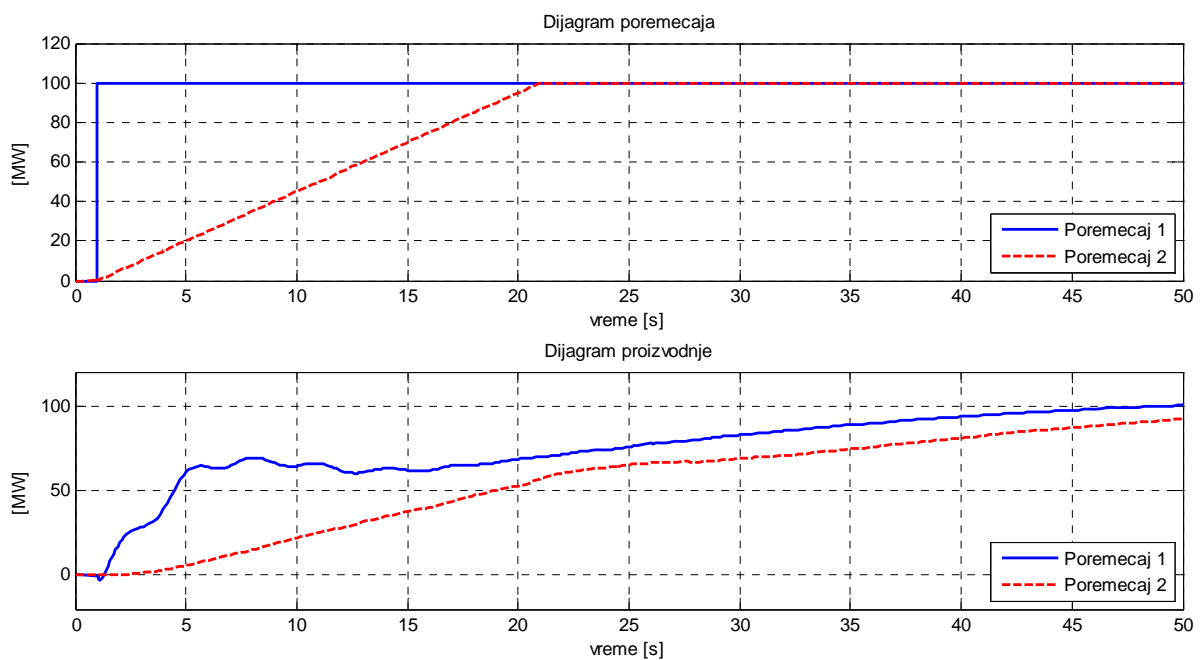
Test sistem koji je analiziran u ovom radu u ustaljenom režimu napaja potrošače električnom energijom (snagom) u iznosu od 1000MW. Na dijagramima su prikazani odzivi sistema na dva karakteristična poremećaja: trenutno povećanje potrošnje (ispad proizvodne jedinice) u iznosu od 100MW i povećanje potrošnje u istom iznosu ali po linearnoj funkciji vremena. U trenutku posle nasatanka poremećaja dolazi do propada učestanosti u interkonekciji kao i do značajnijeg toka snage po spojnomvodu ka sistemu pogođenom poremećajem, što smanjuje maksimalnu vrijednost propada

učestanosti u posmatranom EES. Posle određenog vremena dolazi do izražaja i uticaj mrežnog regulatora koji mijenja vrijednosti na referentnim ulazima elektrana što rezultuje povećanjem proizvodnje u iznosu koji će kompenzovati nedostatak snage u EES-u nastao usled poremećaja. Nakon tranzijentnog perioda i snaga razmjene se vraća na vrijednost koju je imala na neposredno prije poremećaja. Na dijagramima se takođe može uočiti da trenutno povećanje potrošnje izaziva značajne oscilacije učestanosti a samim tim i oscilatorne tokove snaga, što može biti opasnost po stabilnost EES-a.

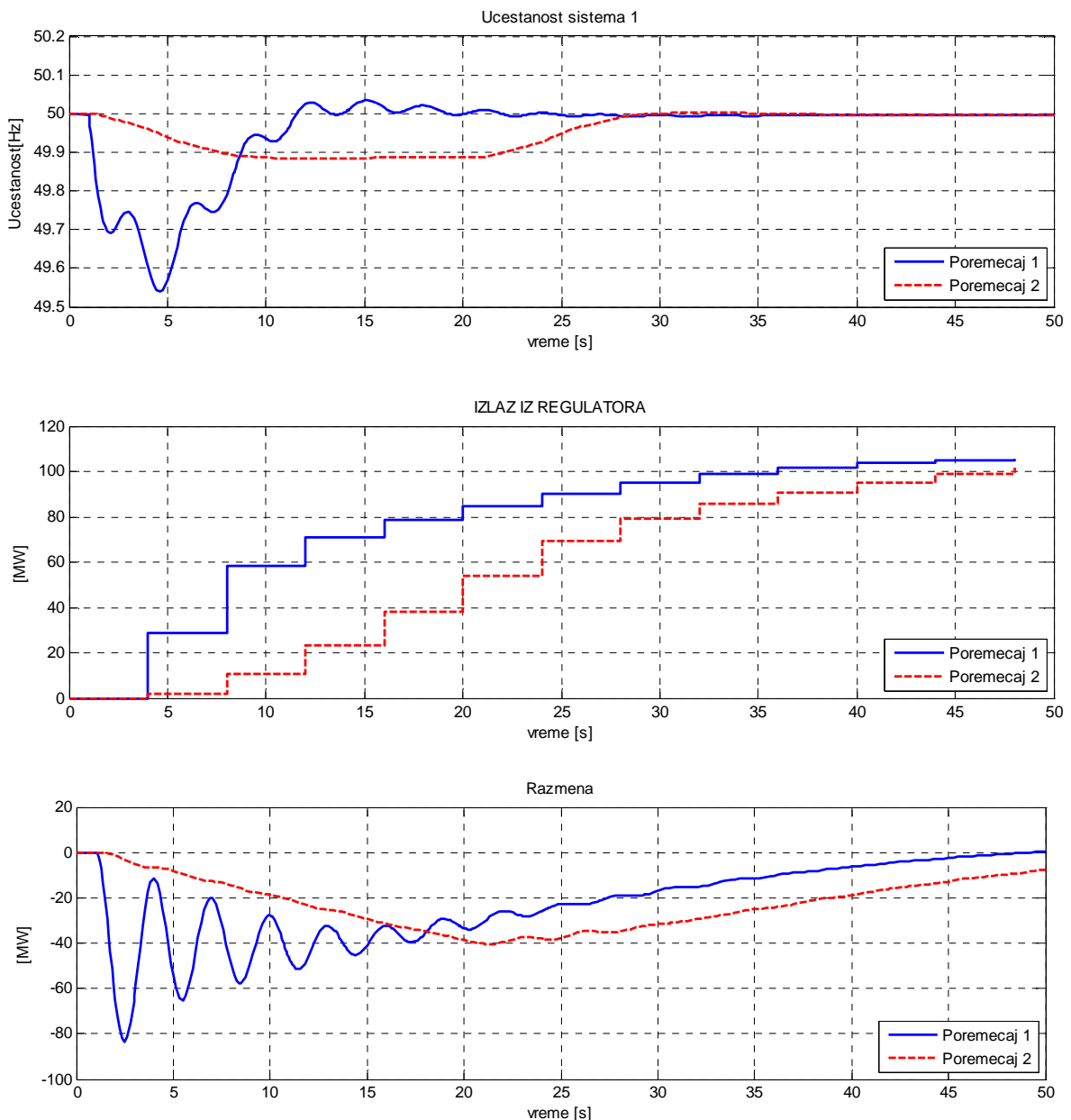
Zahvaljujući mogućnostima programskog paketa Matlab, realizovano je povezivanje postojećeg simulacionog modela s grafičkim interfejsom izrađenim u programskom jeziku Visual Basic. Detaljan prikaz grafičkog interfejsa je dat u [19].



Slika 4. Model dva povezana elektroenergetska sistema



Slika 5. Odzivi sistema na poremećaj



Slika 5. Odzivi sistema na poremećaj

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je jedan jednostavan, brz i efikasan simulacioni model EES-a za analizu dinamičkih odziva sistema na poremećaje u potrošnji ili proizvodnji. U okviru rada krenulo se sa identifikovanjem i formiranjem modela pojedinih elemenata. Razmatranjem pojedinih modela došlo se do zaključka da je potrebno pet ekvivalentnih elektrana kako bi se opisalo ponašanje bilo kakve grupe elektrana koje se uobičajeno koriste u praksi. Ovako formiran model dalje je uopšten modelom mrežnog regulatora kao i uzimanjem u obzir susjednog EES sa kojim je analizirani EES povezan spojnim vodom. Ovim je stvorena osnova za analizu više povezanih EES-a tj. interkonekcija. Na kraju je grafički predstavljeno ponašanje sistema u slučaju dva karakteristična poremećaja u sistemu. Prednost ovakvog modela je njegova velika brzina izvršavanja koja je posledica korišćenja uprošćenih modela. Ovi modeli prilagođeni su programskom paketu SIMULINK čijom je upotrebom omogućena jednostavna manipulacija modelom kao i analiziranje dobijenih rezultata.

6. LITERATURA

- [1] Milan Čalović; Regulacija elektroenergetskih sistema – Tom 1, ETF Beograd, 1997, str.551
- [2] P.M.Anderson, A.A.Fouad; Power System Control and Stability, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2003, p.658.
- [3] J.Machowsky, J.W.Bialek, J.R.Bumby; Power System Dynamics and Stability, John Wiley and Sons, Baffins Lane, Chicester, England, 1997. p.461.
- [4] P.Kundur; Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc, New York, USA, 1994, p.1176.
- [5] Milan Čalović, Andrija Sarić; Eksploatacija elektroenergetskih sistema, Beopres, 1999. str.314.
- [6] Milan Čalović, Andrija Sarić; Osnovi analize elektroenergetskih sistema, Akademski misao Beograd, 2004, str.778
- [7] D.P.Kothari, I.J.Nagrath; Modern Power System Analysis, Tata McGraw-Hill Publishing, New Delhi, India, 2004, p.694.
- [8] D.Popović, F.Kulić, On line monitoring and preventing of voltage stability using reduced system model, (Book of preprints of International Symposium Bulk Power System Dynamics and Control V - IREP 2001, 26-31. VIII 2001, Onomichi, Japan, pp.319-332)
- [9] F.Kulić, D.Popović; Monitoring of Power System Stability Using Reduced System Model, (V International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Szeged, Hungary: Szeged Regional Committee of the Hungarian Academy of Sciences, 4-6 October, 2001)
- [10] Z.Vukić, Lj.Kuljača; Automatsko upravljanje – analiza linearnih sustava, Kigen, Zagreb, 2005, str.870.
- [11] K.J.Astrom, T.Hagglund; Automatic Tuning of PID Controllers, ISA, USA, 1988, p.141.
- [12] E.Yesil, M.Guzelkaya, I.Eksin; Self Tuning fuzzy PID type load and frequency controller, (Energy Conversion and Management 45, 2004, pp.377-390.)
- [13] M.K.El-Sherbiny, G.El-Saady, A.M.Yousef; Efficient Fuzzy Logic Load-Frequency Controller, (Energy Conversion and Management 43, 2002, pp.1853-1863.)
- [14] N.Jaleeli, L.S.VanSlyck, D.N.Ewart, L.H.Fink, A.G.Hoffmann; Understanding automatic generation control, (Vol.7, No.3, 1992, pp.1106-1122)
- [15] The UCTE Operation Handbook – 2nd Progress Report, (11. Regulatory Forum 16./17.September 2004)
- [16] S.E.Lyshevski; Engineering and Scientific Computation Using MATLAB, Wiley Interscience, USA, 2003, p.227.
- [17] S.T.Karris; Introduction to Simulink with Engineering Applications, Orchard Publications, USA, 2006, p.570.
- [18] Chee-Mun Ong; Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall Ptr, Upper Saddle River, New Jersey, 1998, p.626.
- [19] Lj.Francuski, A.Selakov, F.Kulić, V.Perić; Jedno rešenje implementacije i vizuelizacije funkcije regulacije frekvencije i snaga razmene u elektroenergetskom sistemu, (14.Simpozijum upravljanje i telekomunikacije u elektroenergetskom sistemu, Tara, 16-18. jun 2008.)

Abstract

This paper describes the simplified simulation model for transition phenomenon analysis in power systems, which occurs according to a number of disturbances in consumption area or outage of power generating units. Model is convenient for use in software package Matlab – Simulink. At the end, the simulation results for different disturbances in power systems are shown.