

# Haotični optimizacioni metod za sintezu PID regulatora kod upravljanja frekvencijom dvogeneratorskih sistema u interkonekciji

Milica Bulatović

Sektor za razvoj

Crnogorski elektroodistributivni sistem d.o.o. Podgorica  
Podgorica, Crna Gora  
milica.bulatovic95@gmail.com

Martin Ćalasan, Vesna Rubežić i Luka Lazović

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet Crne Gore  
Podgorica, Crna Gora  
martinc@ac.me;vesnar@ac.me;lukal@ac.me

**Sažetak - U ovom radu predložen je haotični optimizacioni metod za podešavanje parametara proporcionalno-integralnog i proporcionalno-integralno-diferencijalnog regulatora kod automatskog upravljanja frekvencijom dva simetrična termogeneratorska sistema u interkonekciji. Algoritam je zasnovan na jednačinama koje opisuju logističko preslikavanje. Na početku opisan je predloženi pristup i određeni su parametri regulatora uz uvažavanje ITAE kriterijumske funkcije. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima koji se dobijaju primjenom drugih poznatih optimizacionih metoda. Štaviše, u radu je predložena i nova kriterijumska funkcija koja značajno utiče na poboljšanje performansi regulatora.**

**Ključne riječi-automatsko upravljanje frekvencijom, PID regulator, haotični optimizacioni metod**

## I. UVOD

Regulacija frekvencije je veoma važan zadatak svakog elektroenergetskog sistema (EES-a), jer frekvencija predstavlja globalni parametar čija se vrijednost mora održavati na 50Hz (odnosno 60Hz). Do njenog odstupanja od nominalne vrijednosti dolazi onda kada postoji disbalans između snage proizvodnje i snage potrošnje. Zbog toga se regulacija frekvencije realizuje kroz dvije etape – primarnu regulaciju kada regulatori pogonskih mašina kontrolišu protok radnog fluida (vodene pare, vrelog gasa, vode) i sekundarnu regulaciju koju vrši centralizovani regulator mijenjajući referentni ulaz primarnog (turbinskog) regulatora [1]. Ovaj rad tiče se sekundarne regulacije frekvencije, tj. tiče se dizajna PID regulatora kod dvogeneratorskih sistema u interkonekciji.

Zbog stalnog širenja modernih elektroenergetskih sistema, povećanja njihove kompleksnosti i rasta broja interkonekcija upravljanje tokovima aktivnih snaga danas postaje sve teže. Svi elektroenergetski sistemi koji su međusobno povezani imaju zadatku da u svakom trenutku održavaju frekvenciju i sumu snaga razmjene u interkonektivnim vodovima na planiranim vrijednostima. Ovaj problem podstakao je mnoge autore da razviju različite metode i strategije upravljanja frekvencijom elektroenergetskih sistema u interkonekciji.

U literaturi se može naći veliki broj optimizacionih metoda kojima se pokušavaju odrediti optimalne vrijednosti za podešavanje parametara PID regulatora kod generatorskih sistema u interkonekciji. Mnogi od tih algoritama zasnivaju se na ponašanju insekata i životinja i na raznim prirodnim pojavama. U [2] implementiran je BFOA (*engl. Bacterial Foraging Optimization Algorithm*) koji modeluje ponašanje bakterije *Escherichia coli*, u [3] PSO algoritam (*engl. Particle Swarm Optimization*) inspirisan je jatom ptica, FA u [4] (*engl. Firefly Algorithm*) inspirisan je svicima, a IGWO u [5] (*engl. Improved grey wolf optimization*) ponašanjem čopora vukova. Osim toga, u [6] se za sintezu PID regulatora koristi genetički algoritam GA (*engl. Genetic Algorithm*), a u [7] TLBO (*engl. Teaching Learning Based Optimization*), algoritam zasnovan na osnovu odnosa učenika i učitelja. Prethodno navedene metode poznate su kao metaheurističke, a osim njih u literaturi se mogu pronaći i pristup direktnе sinteze [8], upravljanje na bazi internog modela [9] i fazi logičkih kontrolera [10]. Fazi logičke kontrolere su mnogi autori dodali na strukturu klasičnih PID regulatora i iskoristili za poboljšanje njihovih preformansi [5].

Posljednjih nekoliko godina teorija haosa ima sve veću primjenu u različitim oblastima, pa se tako došlo na ideju da se uz pomoć haotičnih sekvenci razviju moderne metaheurističke optimizacione metode. Jedan ovakav metod predložen u [11] odnosi se upravo na regulaciju frekvencije kod sistema u interkonekciji, a zasnovan je na Lozi preslikavanju; metod zasnovan na jednačinama koje opisuju Chuain oscilator našao je primjenu u automatskoj regulaciji naponu u [12], dok je u [13] opisan haotični PSO algoritam.

U ovom radu za podešavanje parametara PI i PID regulatora predložen je haotični optimizacioni metod zasnovan na Logističkom preslikavanju. Razmatrana je interkonekcija između dva simetrična termogeneratorska sistema bez pregrijavanja pare. Dobijeni rezultati upoređeni su sa drugim optimizacionim metodama kao što su GA, BFOA, PSO, FA, TLBO, IGWO, kao i sa konvencionalnom metodom Zigler-Nikolsona (ZN).

Rad je organizovan na sljedeći način: u drugom poglavlju opisan je razmatrani sistem, struktura PID regulatora i data je odabrana kriterijumska funkcija. Predloženi optimizacioni metod opisan je u trećem, dok su rezultati simulacija i komparativna analiza rezultata dati u četvrtom poglavlju. Zaključci istraživanja izvedeni su u petom poglavlju.

## II. RAZMATRANI SISTEM

Na Sl. 1. šematski je prikazana interkonekcija između dva simetrična termogeneratorska sistema bez pregrijavanja vodene pare, koja je predmet istraživanja ovoga rada [2]. Posmatrani su linearni sistemi, odnosno nijesu uzete u obzir nelinearnosti koje se u njima javljaju kao posljedica ograničenja generatora, mrtve zone i kašnjenja koja u sistem unose upravljači, turbine, filtri, termodinamički procesi i komunikacioni kanali. Krajnji cilj regulacije jeste da odstupanje frekvencije od nominalne vrijednosti u oba sistema bude što bliže nuli, pa su regulisane veličine u ovom slučaju  $\Delta F_i$  i  $\Delta F_2$  i greške regulacionih zona (*engl. Area Control Error*)  $ACE_i$  i  $ACE_2$ . Izraz za  $ACE_i$  dat je jednačinom (1)

$$ACE_i = B_i \Delta F_i + \Delta P_{tie}, \quad (1)$$

gdje je  $B_i$  konstanta regulacije frekvencije u i-toj oblasti,  $i=1,2$ . Poremećaji opterećenja  $\Delta P_{D1}$  i  $\Delta P_{D2}$ , kao i greška snage razmjene u interkonektivnom vodu  $\Delta P_{tie}$  predstavljaju ulazne signale.

Tri glavne komponente termogeneratorskog sistema su upravljač, turbina i generator. Turbina ima funkciju prenosa datu u (2)

$$G_{Ti}(s) = \frac{1}{1+sT_{Ti}}, \quad (2)$$

gdje je  $T_{Ti}$  vremenska konstanta turbine. Funkcija prenosa upravljača je (3)

$$G_{Gi}(s) = \frac{1}{1+sT_{Gi}}, \quad (3)$$

gdje  $T_{Gi}$  predstavlja vremensku konstantu upravljača. Upravljač ima dva ulazna signala,  $\Delta P_{refi}(s)$  i  $\Delta F_i(s)$ , i jedan izlazni signal  $\Delta P_{Gi}(s)$  koji se može izraziti kao (4)

$$\Delta P_{Gi}(s) = G_{Gi}(s) \left[ \Delta P_{refi}(s) - \frac{1}{R_i} \Delta F_i(s) \right]. \quad (4)$$

$R_i$  označava karakteristiku opadanja brzine. Generator i opterećenje predstavljeni su jednom funkcijom prenosa (5)

$$G_{Pi}(s) = \frac{K_{PSi}}{1+sT_{PSi}}, \quad (5)$$

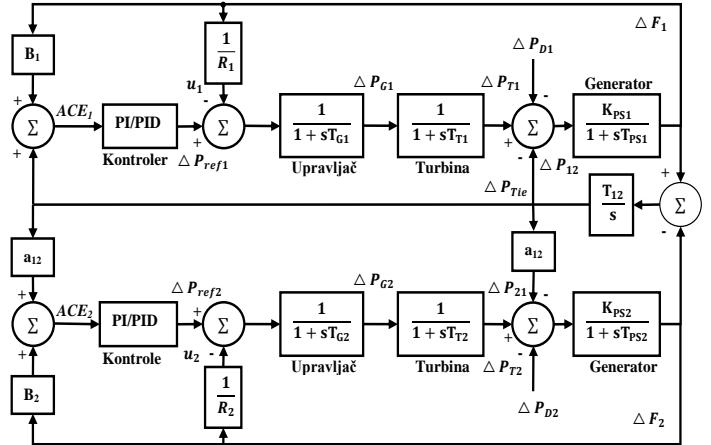
gdje su pojačanje generatora  $K_{PSi} = 1/D_i$  i vremenska konstanta generatora  $T_{PSi} = 2H_i/F_i D_i$ , a  $D_i$  i  $H_i$  predstavljaju koeficijent prigušenja i ekvivalentnu konstantu inercije, respektivno.

Sistem generatora i opterećenja ima dva ulazna,  $\Delta P_{Ti}(s)$  i  $\Delta P_{Di}(s)$ , i jedan izlazni signal  $\Delta F_i(s)$  dat jednačinom (6)

$$\Delta F_i(s) = G_{Pi}(s) [\Delta P_{Ti}(s) - \Delta P_{Di}(s)]. \quad (6)$$

Na Sl. 1.  $T_{12}$  označava sinhronizacijski moment, a  $a_{12}$  odnos opterećenja dva sistema. Usvojeni parametri sistema dati su u Dodatku A.

Četvrta važna komponenta sistema, jeste regulator. Zakon upravljanja PID regulatora dat je jednačinom (7), gdje su  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  proporcionalno, integralno i diferencijalno pojačanje, respektivno.



Slika 1. Dva termogeneratorska sistema u interkonjenkciji

U slučaju PI regulatora, diferencijalno pojačanje ne postoji.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (7)$$

Prilikom odabira parametara kontrolera, važno je prvo definisati kriterijumsku funkciju. Kriterijumska ili *cost* funkcija definiše se prema željenim specifikacijama i zahtjevima kada su u pitanju robustnost i osjetljivost sistema na šumove. U literaturi, najčešće korišćena kriterijumska funkcija je ITAE, integralna apsolutna greška pomnožena vremenom (*engl. Integral Time multiplied Absolute Error*). Zato je radi jednostavnije komparacije predloženog metoda sa drugim metodama i ovdje odabrana upravo ova kriterijumska funkcija. Jednačina koja opisuje ITAE kriterijumsku funkciju data je u (8).

$$J_1 = ITAE = \int_0^{t_{sim}} (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|) t dt. \quad (8)$$

U ovom radu, u cilju poboljšanja performansi regulatora predložena je i kriterijumska funkcija nastala modifikovanjem ITAE. Kriterijumska funkcija  $J_2$ , osim odstupanja frekvencije oba sistema i odstupanja snage u interkonektivnom vodu, uzima u obzir i njihove najveće preskoke, a data je jednačinom (9).

$$J_2 = \int_0^{t_{sim}} (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|) t dt + \omega \left( |\Pi_{f1}| + |\Pi_{f2}| + |\Pi_{p_{tie}}| \right), \quad (9)$$

gdje je  $\omega$  težinski koeficijent koji se bira u zavisnosti od željenih performansi.

### III. PREDLOŽENI METOD

Optimizacioni algoritmi zasnovani na teoriji haosa, razlikuju se od svih tradicionalnih stohastičkih optimizacionih metoda. Haotični signal ima izgled sličan šumu i karakteriše ga dugovremenska nepredvidljivost, a pokazuje i veliku zavisnost od početnih uslova.

Jedna od najvažnijih osobina haotičnog optimizacionog algoritma (HOA) je neponovljivost haosa, što znači da haotična trajektorija u prostoru stanja nikada neće sjeći samu sebe. Ovaj algoritam lakše izbjegava preuranjenu konvergenciju ka lokalnom minimumu, pa stoga ima znatno preciznije rezultate, dok je istovremeno i brzina pretraživanja, odnosno brzina konvergencije, kod njega veća nego kod ostalih stohastičkih optimizacionih metoda.

U literaturi su razmatrani različiti tipovi jednačina koje se mogu implementirati u haotičnim optimizacionim metodama, a to su Logističko, Lozi, Tent, Gausovo i razlicita iterativna preslikavanja, Lorensov sistem, Chuain oscilator, itd. Jednačina predložena u ovom radu zasniva se na Logističkom preslikavanju.

Logističko preslikavanje [15] je jedan od najjednostavnijih dimačkih sistema koji pokazuje haotično ponašanje i primjer je kako se iz jednog veoma prostog sistema bez ikakvih šumova može pojaviti haos. Jednačina (10) opisuje logističko preslikavanje

$$y_{k+1} = ay_k(1 - y_k). \quad (10)$$

Za vrijednost parametra  $a$  usvojeno je  $a=4$ , dok je za početnu vrijednost  $y_0$  usvojen nasumični broj između 0 i 1.

```

Start
While K≤Mg
  While k<N
    xi(k)=Li+yi(k) (Ui-Li) , i=1...n
    if f(X(k))<f**
      f**=f(X(k))
      X**=X(k)
    end if
    k=k+1
  end while
  f(X(K))=f**
  if f(X(K))<f*
    f*=f(X(K))
    X*=X(K)
  end if
  K=K+1
end while

```

Slika 2. Globalna pretraga

Krajnji cilj optimizacije jeste pronaći takvo  $X$  da vrijednost kriterijumske funkcije  $f$  bude minimalna.  $X$  je vektor koji se sastoji od parametara čije optimalne vrijednosti želimo da pronađemo,  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ , a u našem slučaju to je  $X=[K_p, K_i, K_d]$ . Pretraga se može podjeliti u tri koraka: inicijalizaciju varijabli i početnih uslova, globalnu pretragu (Sl.2.) i lokalnu pretragu (Sl.3.). Određivanje ovih parametara

je trodimenzionalni problem za PID, odnosno dvodimenzionalni problem za PI regulator, stoga će  $n$  imati vrijednost  $n=3$ , odnosno  $n=2$ . Osim toga, potrebno je uspostaviti gornje i donje granice parametara,  $L_i$  i  $U_i$ .

$M_g$  i  $M_l$  označavaju broj iteracija globalnog i lokalnog pretraživanja, respektivno, dok  $N$  predstavlja broj tačaka haotične sekvene, odnosno broj predloženih rješenja tokom jedne iteracije. Prvo se za svaku iteraciju globalne pretrage određuje minimalna kriterijumska funkcija  $f^{**}$  i parametri za koje je ona dobijena  $X^{**}$ , a zatim se među njima pronađe najbolje rješenje na nivou svih iteracija ( $f^*$  i  $X^*$ ). Nakon toga se rezultati globalne pretrage prosljeđuju u lokalnu pretragu, gdje se vrše „fina“ podešavanja – rješenja se traže u okolini tačke  $X^*$ . Korak  $\lambda$  definiše veličinu opsega oko  $X^*$  u kojem se vrši novo pretraživanje, a znak koraka određuje se nasumično – u zavisnosti od veličine slučajno generisanog broja  $r$ .

```

Start
While K≤Ml
  While k<N
    if r<0.5
      xi(k)=xi*+λyi(k) | Ui-xi* |
    else if
      xi(k)=xi*-λyi(k) | xi*-Li | , i=1...n
    end if
    if f(X(k))<f**
      f**=f(X(k))
      X**=X(k)
    end
    k=k+1
  end while
  f(X(K))=f**
  if f(X(K))<f*
    f*=f(X(K))
    X*=X(K)
  end if
  K=K+1
end while

```

Slika 3. Lokalna pretraga

### IV. REZULTATI SIMULACIJA

U ovom poglavlju prikazani su simulacioni rezultati dobijeni kada se na sistem upravljan idealnim PID regulatorom, dovede step promjena opterećenja od 10%. Parametri regulatora izabrani su u opsegu [-2,2]. Broj iteracija globalnog pretraživanja je  $M_g=50$ , lokalnog  $M_l=10$ , a haotična sekvenca sadrži  $N=100$  tačaka. Optimizacija je ponovljena 50 puta, pa je za krajnje vrijednosti parametara izabran najbolji rezultat. Korak lokalnog pretraživanja  $\lambda$  kretao se između 0.1 i 0.05. Simulacije su izvršene na Intel core i5 cpu, od 2.5GHz i 8GB RAM računaru i u MATLAB R2017a okruženju.

Prvo je simuliran odziva sistema koji je regulisan PI regulatorom. Za sintezu regulatora uzeta je ITAE kriterijumska funkcija, a vrijednosti dobijenih parametara date su u Tabeli I. Dobijeni rezultati upoređeni su sa ostalim,

literaturno poznatim metoda sa apekta vremena smirenja (Tabela II). Radi slikevitijskog prikaza za neke metode data je promjena frekvencije prvog sistema na Sl.4, promjena frekvencije drugog sistema na Sl.5. i promjena snage u interkonektivnom vodu na Sl.6.

Sistem će naravno imati bolje performanse kada se regulator dopuni diferencijalnom granom. Podešavanje parametara PID regulatora uz pomoć HOA takođe je prikazano u Tabeli I, dok je njegovo poređenje sa drugim metodama dato u Tabeli III. Osim toga, na Sl.7. i Sl.8. prikazana je promjena frekvencije prvog i drugog sistema, respektivno, a na Sl.9. promjena snage razmjene.

Rezultati regulacije su značajno poboljšani primjenom predložene kriterijumske funkcije umjesto ITAE, što se može i vidjeti na Sl. 10, Sl. 11. i Sl. 12, kao i u Tabeli III. Za vrijednost težinskog koeficijenta  $\omega$  usvojeno je  $\omega=0.1$ .

TABELA I. PARAMETRI REGULATORA

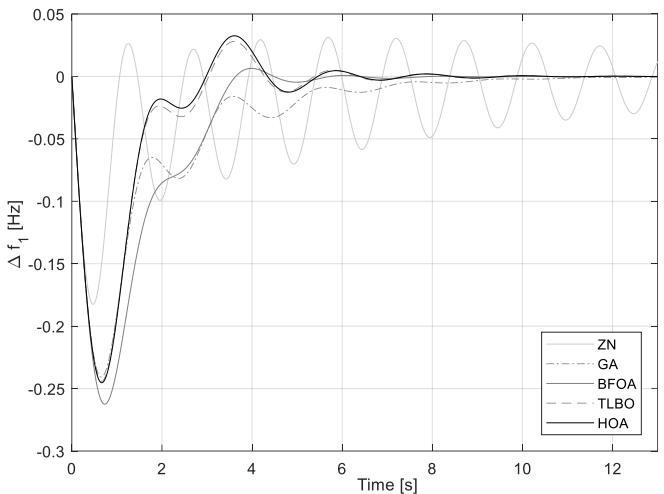
Regulator	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PI ITAE	-0.3119	0.4587	/
PID ITAE	1.0962	1.9998	0.3939
PID $J_2$	1.9920	1.9933	1.1606

TABELA II. POREDENJE METODA ZA PI

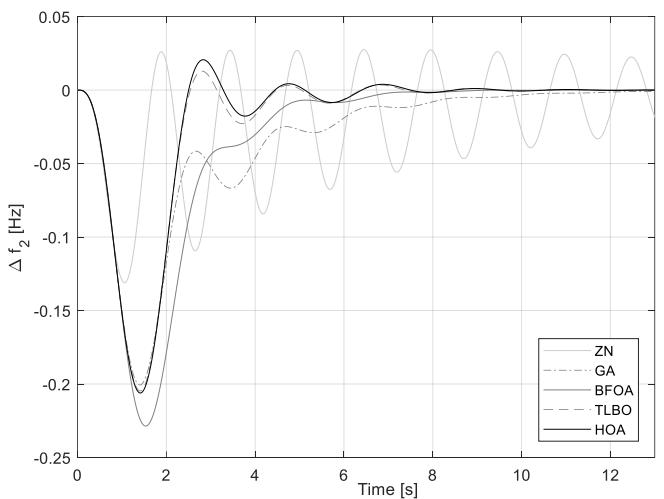
PI		METODA						
		ZN [2]	GA [2]	BFOA [2]	PSO [14]	FA [4]	TLBO [7]	HOA
$T_s$ [s]	$\Delta F_1$	42.6	10.57	5.466	7.129	7.123	7.09	7.123
	$\Delta F_2$	42.6	11.37	7.015	7.539	7.227	7.146	7.257
	$\Delta P_{tie}$	26.508	9.37	6.274	4.858	5.629	5.639	5.604

TABELA III. POREDENJE METODA ZA PID

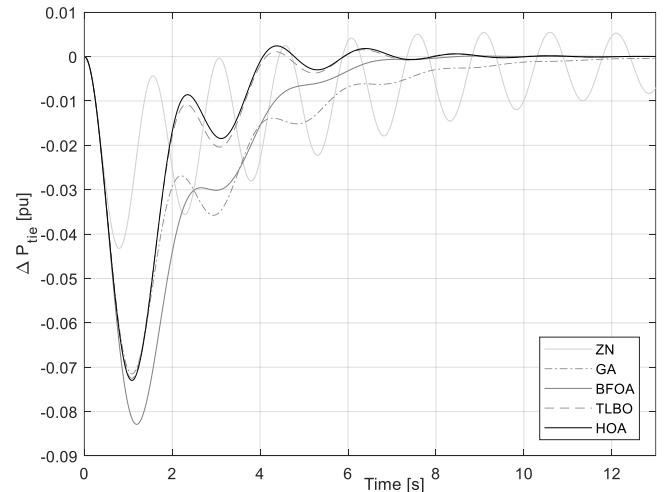
PID		METODA			
		FA[4] ITAE	TLBO[7] ITAE	HOA ITAE	HOA $J_2$
$T_s$ [s]	$\Delta F_1$	4.25	4.836	2.645	2.677
	$\Delta F_2$	5.502	5.133	2.759	3.908
	$\Delta P_{tie}$	4.793	3.025	2.484	3.338



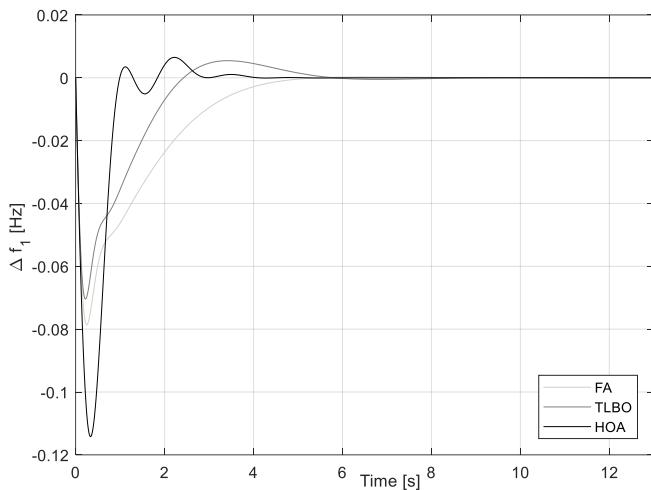
Slika 4.  $\Delta F_1$  za sistem sa PI regulatorom



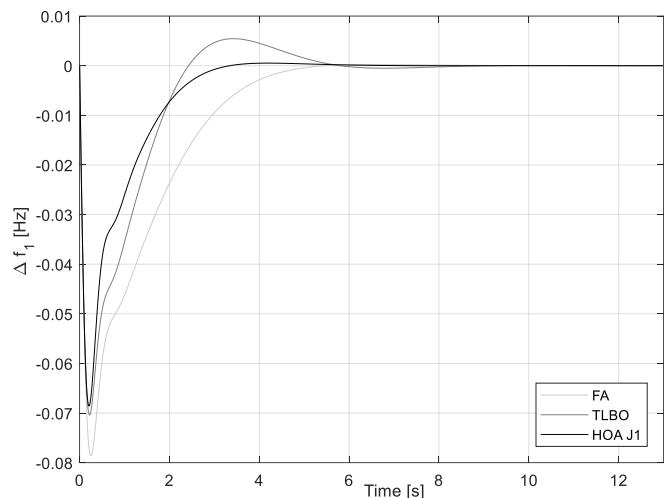
Slika 5.  $\Delta F_2$  za sistem sa PI regulatorom



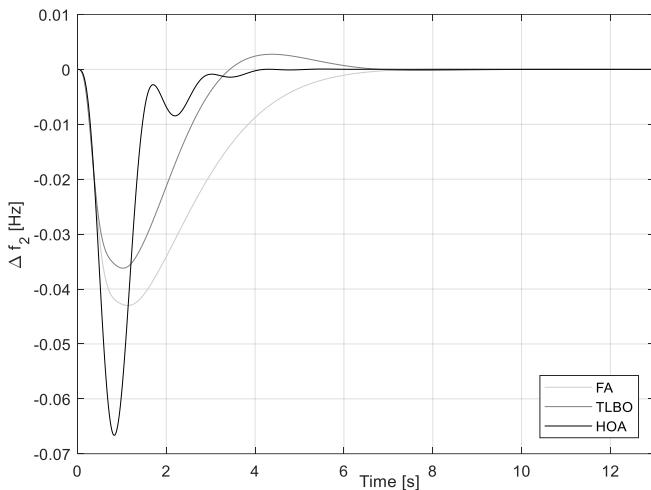
Slika 6.  $\Delta P_{tie}$  za sistem sa PI regulatorom



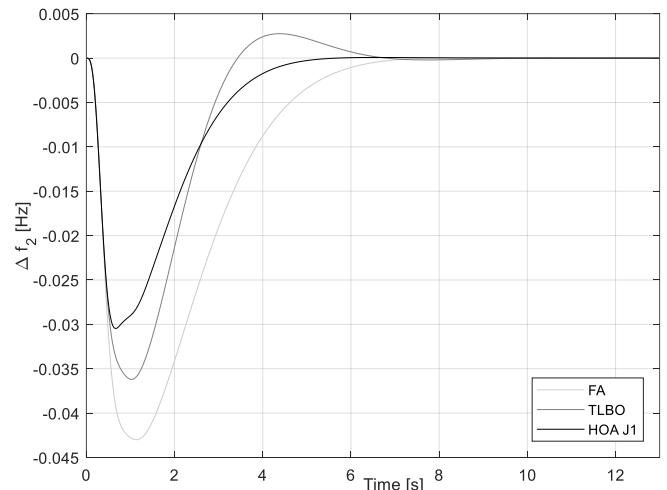
Slika 7.  $\Delta f_1$  za sistem sa PID regulatorom



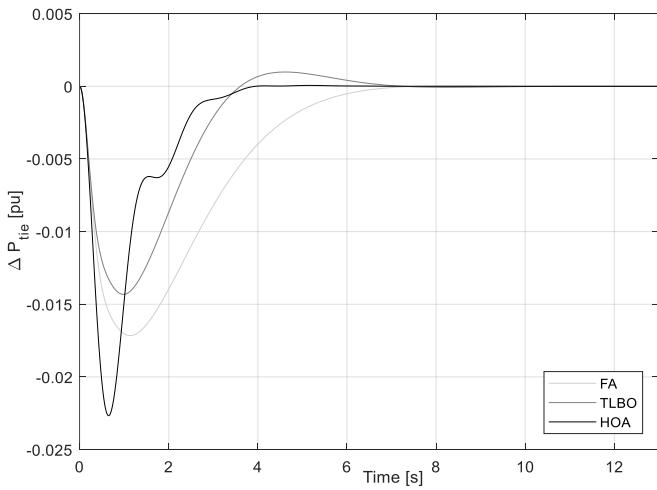
Slika 10.  $\Delta f_1$  za sistem sa PID regulatorom i  $J_2$



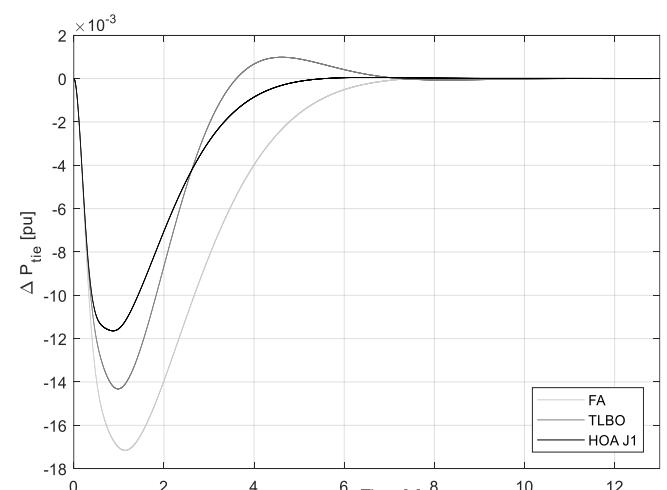
Slika 8.  $\Delta F_2$  za sistem sa PID regulatorom



Slika 11.  $\Delta f_2$  za sistem sa PID regulatorom i  $J_2$



Slika 9.  $\Delta P_{tie}$  za sistem sa PID regulatorom



Slika 12.  $\Delta P_{tie}$  za sistem sa PID regulatorom i  $J_2$

Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da je haotični optimizacioni algoritam zasnovan na logističkom preslikavanju veoma efikasan metod u automatskoj regulaciji frekvencije.

Rezultati do kojih se došlo prilikom upravljanja PI regulatorom, iako sasvim zadovoljavajući, nijesu se značajno izdvojili među rezultatima ostalih metoda. Sa druge strane, upravljanje uz pomoć PID regulatora i uz uvažavanje ITAE kriterijumske funkcije pokazalo se jako dobro sa aspekta vremena smirenja, ali i jako loše kada su u pitanju oscilacije u prelaznom procesu. Međutim, usvajanjem predložene kriterijumske funkcije  $J_2$  postignuta je ravnoteža između vremena smirenja i oscilatornosti sistema. Naime, nova  $cost$  funkcija obezbijedila je odzive koji imaju nešto veće vrijeme smirenja od onih postignutih uz pomoć ITAE, ali zato i značajno manje oscilacije. Na kraju, kada se konačni rezultati uporede sa drugim metodama podešavanja parametara PID regulatora, kao što su FA i TLBO, mora se primijetiti da je postignut značajan napredak u težnji da se minimizuje kako vrijeme smirenja, tako i oscilatornost sistema.

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu implementiran je haotični optimizacioni metod za određivanje parametara PI i PID regulatora u cilju

## LITERATURA

- [1] I. Vujošević "Analiza elektroenergetskih sistema I", Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
- [2] E.S. Ali, S.M. Abd-Elazim "Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 33, Issue 3, March 2011, Pages 633-638
- [3] D. Sharma, B. Kumar "PSO Optimized PID Controller for Load Frequency Control", European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2015, 2(11): 43-48
- [4] S.Padhana, R.Kumar Sahua & S. Pandaa "Application of Firefly Algorithm for Load Frequency Control of Multi-area Interconnected Power System," Electric Power Components and Systems, 42(13):1419–1430, 2014.
- [5] B.P. Sahoo, S. Panda "Improved grey wolf optimization technique for fuzzy aided PID controller design for power system frequency control," Sustainable Energy, Grids and Networks Volume 16, December 2018, Pages 278-299
- [6] H. Golpîra, H. Bevrani, H. Golpîra, "Application of GA optimization for automatic generation control design in an interconnected power system," Energy Conversion and Management Volume 52, Issue 5, May 2011, Pages 2247-2255
- [7] R. Kumar Sahu, S. Panda, U. Kumar Rout, D. K. Sahoo "Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller," International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 77, May 2016, Pages 287-301
- [8] M. N. Anwar, S. Pan, "A new PID load frequency controller design method in frequency domain through direct synthesis approach," International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 67, May 2015, Pages 560-569
- [9] W. Tan, "Unified Tuning of PID Load Frequency Controller for Power Systems via IMC," IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 25, Issue: 1 , Feb. 2010.
- [10] K.R.M.Vijaya Chandrakala, S. Balamurugan, K. Sankaranarayanan "Variable structure fuzzy gain scheduling based load frequency controller for multi source multi area hydro thermal system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 53, December 2013, Pages 375-381

regulacije frekvencije dva termogeneratorska sistema u interkonekciji. Izvršene su simulacije upavljanja sistemom uz pomoć idealnih regulatora dizajniranih na osnovu ITAE, a zatim i na osnovu novog, predloženog kriterijuma. Iako je i prva kriterijumska funkcija dala dovoljno dobre odzive i dokazala veliku efikasnost predloženog metoda u svrhu regulacije frekvencije, najbolji rezultat postignut je upotrebom PID regulatora i predloženog kriterijuma. Krajnji ishod istraživanja je upravljanje koje u poređenju sa drugim metodama daje rezultate bolje i u pogledu trajanja prelaznog procesa i u pogledu preskoka.

Takođe, može se zaključiti da je za sintezu kontrolera, osim optimizacione metode, veoma važan odabir njegove strukture i kriterijumske funkcije. Upravo ti izazovi predstavljaju smjernice za dalja istraživanja i stavljuju naglasak na predlaganje novih algoritama, kriterijuma i unapređenja strukture regulatora.

## DODATAK A

Korišćeni parametri su [2]:  $B_1 = B_2 = 0.425 \text{ p.u.MW/Hz}$ ,  $R_1 = R_2 = 2.4 \text{ Hz/p.u.}$ ,  $T_{G1} = T_{G2} = 0.08 \text{ s}$ ,  $T_{T1} = T_{T2} = 0.3 \text{ s}$ ,  $T_{PS1} = T_{PS2} = 20 \text{ s}$ ,  $K_{PS1} = K_{PS2} = 120 \text{ Hz/p.u.MW}$ ,  $T_{12} = 0.545$  i  $a_{12} = -1$ .

- [11] M. Farahani, S. Ganjefar, M. Alizadeh, "PID controller adjustment using chaotic optimisation algorithm for multi-area load frequency control," IET Control Theory and Applications 6(13):1984-1992, September 2012
- [12] M. Radulović, V. Rubežić, M. Čalasan, "Haotični optimizacioni metod sinteze PID regulatora u AVR sistemu," Informacione tehnologije IT'14
- [13] P. Acharjee, S.K. Goswami "Chaotic particle swarm optimization based robust load flow," International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 32, Issue 2, February 2010, Pages 141-146
- [14] S.Panda, B.Mohanty and P.K. Hota "Hybrid BFOA-PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power systems," Applied Soft Computing, Vol. 13, Issue 12, December 2013, pp. 4718-4730
- [15] K. T. Alligood, T. D. Sauer, J. A. Yorke "CHAOS: An Introduction to Dynamical System," 1996

## ABSTRACT

In this paper, a chaotic optimization method for adjusting parameters of a proportional-integral and proportional-integral-differential controller is proposed for the automatic generation control of two symmetric thermal power systems in the interconnection. The algorithm is based on logistic map. Initially, the proposed approach is described and regulator parameters are defined with respect to the ITAE objective function. The obtained results are compared with other known optimization methods. Finally, a new objective function, that significantly improves the performance of the regulator, is proposed.

## Chaotic optimization method for tuning PID controller for automatic generation control of two-generator systems in the interconnection

Milica Bulatović, Martin Čalasan, Vesna Rubežić i Luka Lazović