

# Primena Astromove varijante Smith-ovog prediktora u regulaciji frekvencije jednomašinskog izolovanog elektroenergetskog sistema

Stefan S. Stanković  
Student master studija  
Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
stefa990@hotmail.com

*Sadržaj*—Ovaj rad se bavi problemom regulacije frekvencije u izolovanom jednomašinskom elektroenergetskom sistemu. Ovakav sistem je nelinearan i poseduje transportna kašnjenja (odziv agregata, telekomunikacione veze) što otežava efikasnu, brzu i robusnu regulaciju frekvencije. Kao rešenje problema, predložena je upotreba Astromove varijante Smith-ovog prediktora i feedback linearizacije. Kroz Matlab Simulink simulaciju pokazan je odziv ovakvog načina regulacije kao i robusnost ovakvog sistema na lošu identifikaciju parametara sistema.

*Ključne reči*—regulacija frekvencije; izolovani sistem; Smith-ov prediktor; feedback linearizacija

## I. UVOD

Razvoj industrijske elektronike i njena sve veća primena u elektroenergetskim sistemima omogućava da isti prerastaju u inteligentne sisteme. Ovakvi sistemi, koji predstavljaju spoj telekomunikacione i elektroenergetske mreže, se mogu okarakterisati kao potpuno automatizovani sistemi sposobni da sami donose odluke u cilju poboljšanja kvaliteta i pouzdanosti elektroenergetskog sistema. Da bi ovakvi sistemi funkcionisali, potrebno je razviti niz upravljačkih algoritama kao i algoritama veštačke inteligencije.

U modernim elektroenergetskim sistemima sve je veći udeo obnovljivih izvora energije i distribuirane proizvodnje električne energije. Distribuirana proizvodnja osim što utiče na poboljšanje naponskih prilika i smanjenje gubitaka u mreži, mogla bi da poveća i pouzdanost isporuke električne energije. U slučaju kvara u mreži može se desiti da jedan deo mreže ostane odsečen od ostatka i tako ostane bez napajanja. Ukoliko bi se u tom delu nalazilo nešto od distribuirane proizvodnje, ta proizvodnja bi mogla da obezbedi ostrvski rad tog dela sistema za vreme dok se kvar u mreži ne otkloni. Ovakve mreže su poznate pod nazivom MicroGrid.[1] Ostrvski rad dela mreže prate mnogi problemi i zbog toga on kao takav nije dozvoljen u elektromreži Srbije. Jedan od problema je i održavanje frekvencije izolovanog sistema u propisanim granicama.

Ovaj rad se bavi problemom regulacije frekvencije u izolovanom jednomašinskom sistemu. Problemi upravljanja ovakvim sistemom se pre svega odnose na nelinearne modele i pojavu transportnih kašnjenja u sistemu. U cilju prevazilaženja istih, koristi se Astromova varijanta Smithovog prediktora kao i feedback linearizacija sistema. Ispituju se osobine regulacije, pre svega brzina i robusnost ovakvog rešenja. Zaključci ovoga rada se lako mogu proširiti na regulaciju frekvencije u višemašinskim sistemima.

## II. MODEL UPRAVLJANOG SISTEMA

Za definisanje upravljanog sistema, krenuće se od mehaničke jednačine generatora:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_{opt} \quad (1)$$

Gde su :

$J$  – moment inercije rotora generatora + turbine

$\omega$  – ugaona brzina okretanja rotora

$M_t$  – moment turbine

$M_{opt}$  – elektromagnetni moment reakcije indukta

Množenjem jednačine (1) sa  $\omega$  dobija se :

$$J \frac{d\omega}{dt} \omega = P_g - P_{opt} \quad (2)$$

Gde je:

$P_g$  – snaga proizvodnje električne energije

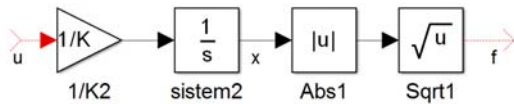
$P_{opt}$  – snaga potrošnje električne energije

Integraljenjem jednačine (2) uzimajući da je  $\omega=2\pi f/p$  i  $K=2J\pi^2/p^2$  nakon sređivanja se dobija :

$$f^2 = \frac{1}{K} \int (P_g - P_{opt}) dt \quad (3)$$

gde je  $p$ - broj pari polova mašine.

Ukoliko se uzme da je  $P_g - P_{opt}$  ulazna a  $f$  izlazna veličina sistema može se formirati Simulink model (Sl. 1).



Slika 1. Simulink model upravljanog sistema

Sistem je nelinearan i da bi se mogao upravljati nekom od poznatih metoda upravljanja linearnih sistema potrebno ga je linearizovati. Pogodna metoda linearizacije ovog sistema bi bila feedback linearizacija.[2] Uzimajući da je ulaz sistema  $u = P_g - P_{opt}$  a izlaz  $y = f$ , jednačine stanja sistema glase:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{K} u \quad (4)$$

$$f = \sqrt{|x|} \quad (5)$$

Diferenciranjem jednačine (5) i zamenom jednačine (4) u diferenciranu jednačinu (5) dobija se:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{|x|}} \frac{1}{K} u \quad (6)$$

Linearizacija ovakvog sistema je moguća uvođenjem veštačkog ulaza  $v$  tako da je:

$$u = 2\sqrt{|x|} v \quad (7)$$

Ovim se problem upravljanja sistemom svodi na problem upravljanja sistema koji je čist integrator (astatizam prvog reda).

### III. SMITH-OV PREDIKTOR

U cilju održavanja frekvencije, aktivna snaga generatora treba da prati aktivnu snagu potrošnje u sistemu. Aktivnu snagu generator dobija preko vratila kojim je povezan na turbinu. Turbina kao takva nije u mogućnosti da trenutno

obezbedi zahtevanu snagu. Ona zadatu snagu obezbedjuje sa nekim kašnjenjem koje mora biti uzeto u obzir pri analizi upravljačkog sistema. Još jedno kašnjenje u sistemu odnosi se na kašnjenje signala u telekomunikacionim vezama. Dakle, sistem kojim se treba upravljati je integratorski sistem sa transportnim kašnjenjem. Za upravljanje ovakvim sistemom pogodno je koristiti Astrom-ovu varijantu Smith-ovog prediktora[3]. Predloženi model sistema upravljanja je prikazan na Sl. 2.

Ovakav sistem efikasno kontroliše sisteme sa velikim transportnim kašnjenjima kakva se mogu pojaviti u elektroenergetskim sistemima. Druga dobra osobina ovakve konfiguracije je da se regulator za odziv na poremećaj potpuno nezavisno projektuje u odnosu na regulator za odziv na referencu. Regulator za odziv na referencu prema Sl. 2 treba da vrši regulaciju čisto integralnog procesa bez kašnjenja. Odavde proizilazi da je sasvim dovoljno koristiti običan PI regulator. Projektovanje regulatora za odziv na poremećaj zasniva se na principima opisanim u radovima[4]-[5]. Kontroler  $M(s)$  se prema ovim radovima projektuje u obliku:

$$M(s) = \frac{N(s)}{P(s) - N(s)e^{-\tau s}} \frac{1}{G_p(s)} \quad (8)$$

Polinom  $N(s)$  bi trebalo da je istog reda kao i proces  $G_p(s)$  dok polinom  $P(s)$  treba da bude dvostrukog reda u odnosu na proces  $G_p(s)$ . Za proces analiziran u ovom radu polinomi  $N(s)$  i  $P(s)$  imaju oblik:

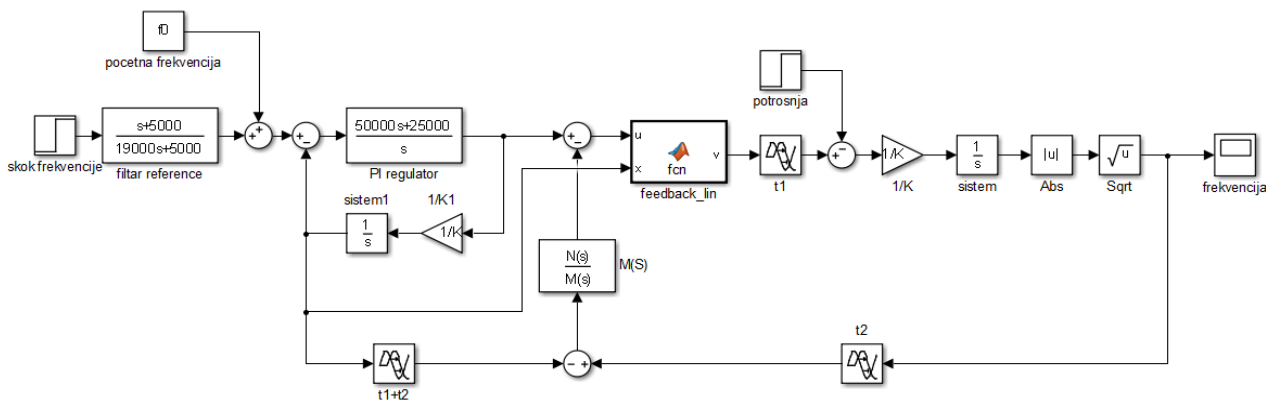
$$N(s) = \eta s + 1 \quad (9)$$

$$P(s) = \lambda^2 s^2 + 2\xi\lambda s + 1 \quad (10)$$

Kako bi se dobila racionalna funkcija  $M(s)$ , iracionalni član koji predstavlja kašnjenje se aproksimira *Pade*-ovom aproksimacijom. Postupak podešavanja regulatora  $M(s)$  se zasniva na eliminaciji polova procesa  $G_p(s)$  i postavljanju novih polova definisanih polinomom  $P(s)$ . Prvo se vrši izbor parametara  $\lambda$  i  $\xi$  u odnosu na dinamiku sistema, željeni odziv sistema i željenu robusnost sistema. Zatim se bira parametar  $\eta$  koji u slučaju sistema sa astatizmom prvog reda treba da zadovolji sledeću jednačinu :

$$\left. \frac{\partial}{\partial s} (P(s) - N(s)e^{-\tau s}) \right|_{s=0} = 0 \quad (11)$$

Po formiranju regulatora  $M(s)$  dobija se konačan izgled upravljačke strukture. Treba primetiti da se stanje koje se koristi za feedback linearizaciju uzima kao opservirano stanje iz Smith-ovog prediktora bez kašnjenja.



Slika 2. Predloženi sistem upravljanja sa Astrom-ovom varijantom Smith-ovog prediktora i feedback linearizacijom

#### IV. SIMULACIJA I ANALIZA SISTEMA UPRAVLJANJA

Analiza predloženog sistema upravljanja se vrši na Simulink modelu sa parametrima bliskim parametrima koji se mogu naći u praksi. Za svaki agregat definiše se koeficijent inercije  $H$ . Koeficijent inercije agregata i moment inercije su povezani formulom:

$$J = \frac{2HS_{nom}}{\left(\frac{2\pi f_{nom}}{p}\right)^2} \quad (12)$$

Gde je:

$H$  – koeficijent inercije agregata

$S_{nom}$  – prividna nominalna snaga agregata

$f_{nom}$  – nominalna frekvencija agregata

$p$  – broj pari polova generatora

Koeficijent inercije agregata u praktičnim primenama uzima vrednosti između 2.5 – 6 za turbogeneratore i parne turbine i od 2 – 4 za hidroagregate. U analizama je usvojen koeficijent inercije agregata  $H=4$ .

Od ostalih parametara usvojeno je  $S_{nom}=20$  MVA,  $f_{nom}=50$ Hz,  $p=1$ . Za transportna kašnjenja u sistemu uzeto je transportno kašnjenje aktuatora (vreme potrebno agregatu da postigne zahtevanu snagu)  $t1=3s$  i transportno kašnjenje u komunikacionim vezama od  $t2=1s$ .

Parametri regulatora su usvojeni tako da pružaju dovoljno dobar odziv uz zadovoljavajuću robusnost sistema. Za PI regulator koji reguliše odziv na referencu usvojeni su parametri  $k_p=50000$  i  $k_i=25000$ . Regulator za otklanjanje poremećaja je podešen na način opisan u tački 3 uz parametre  $\lambda=2.8$ ,  $\xi=0.8$ . Računom se dolazi da je parameter  $\eta=8.48$  [4]-[5]. Pade-ova aproksimacija transportnog kašnjenja uzima stepen u brojiocu 5 i stepen u imeniocu 5.

Uz sve prethodno navedene parametre, polovi prenosne funkcije regulatora za otklanjanje poremećaja su:

$$s_1 = 0;$$

$$s_{2/3} = -0.4118 \pm j 3.0160j;$$

$$s_{4/5} = -0.1099 \pm j 1.2285j;$$

$$s_6 = -26.5651$$

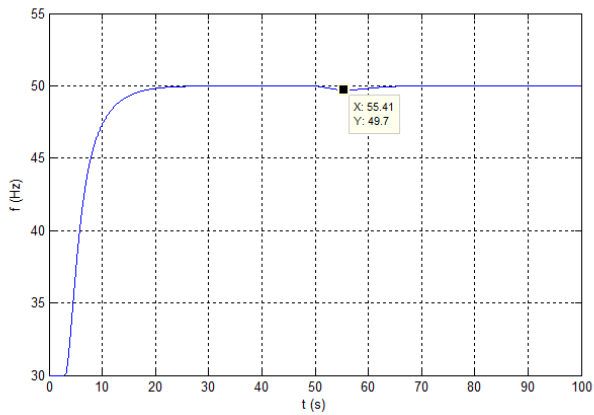
Svi polovi se nalaze u levoj kompleksnoj poluravni tako da je regulator stabilan.

Kao poremećaj, sistemu se dovodi povećanje potrošnje (hevisajdova funkcija) od 2MW. Ovo odgovara 10% nominalne snage agregata što je sasvim dovoljno za analizu uticaja poremećaja na regulaciju.

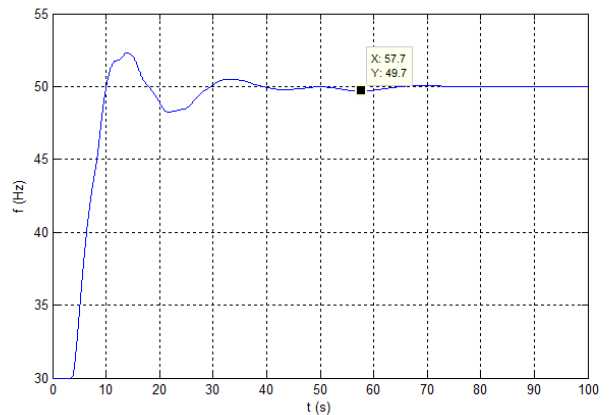
Sl. 3 pokazuje odziv sistema pri dobroj proceni parametara. Može se videti da je i odziv na referencu kao i eliminacija poremećaja aperiodična i s obzirom na vremensko kašnjenje zadovoljavajuće je brzine. Frekvencija pri naletu poremećaja ostaje u granicama dozvoljenog.

U procesu procene parametara može doći do grešaka. Parametri se u toku vremena mogu menjati. Primera radi, kašnjenje u telekomunikacionim mrežama je promenljivog karaktera. Ovakav promenljivi karakter parametara zahteva da sistem upravljanja bude robusan. Treba ispitati robusnost na lošu procenu transportnog kašnjenja, kao i na lošu procenu momenta inercije mašine.

Sl. 4 prikazuje odziv sistema pri pogrešnoj proceni ukupnog transportnog kašnjenja u sistemu od +20%. Pri ovakvoj grešci u sistemu dolazi do oscilacija pri odzivu na referencu. Ovaj deo krive nije toliko bitan pa i sam preskok jer je uglavnom u tom režimu (zaletanju) generator odvojen od mreže. Bitna stvar je kako se sistem ponaša po nailasku poremećaja. Može se videti da je maksimalna greška odstupanja frekvencije ista i da dolazi do jako prigušenih oscilacija u odzivu koje se mogu zanemariti. Može se zaključiti da je sistem robusan u odnosu na greške u proceni



Slika 3. Odziv sistema pri dobro procenjenim parametrima



Slika 4. Odziv sistema pri lošoj proceni transportnog kašnjenja  $t_1+t_2$  od 20%

transportnog kašnjenja.

Različiti agregati imaju različitu brzinu reagovanja na zahtevanu snagu. Zbog toga su neki povoljniji u regulaciji od drugih. Kao vrlo povoljni agregati (elektrane) izdvajaju se gasne elektrane i hidroelektrane. Za razliku od njih termoelektrane dosta se sporije odazivaju u pogledu zahteva snage. Zbog ovih problema, interesantno je videti kako se sistem odaziva na različitu brzinu odziva aktuatora snage proizvodnje tj. agregata elektrane.

Na Sl. 5 i Sl. 6 prikazani su odzivi na poremećaj u slučaju kašnjenja aktuatora od  $t_l = 2s$  i  $t_l = 5s$  respektivno.

Primećuje se da je sa većim transportnim kašnjenjem u sistemu sporija eliminacija poremećaja. Pored toga, maksimalno odstupanje frekvencije za isti poremećaj je duplo veće u slučaju kad je kašnjenje 6s u odnosu na slučaj kad je transportno kašnjenje 3s.

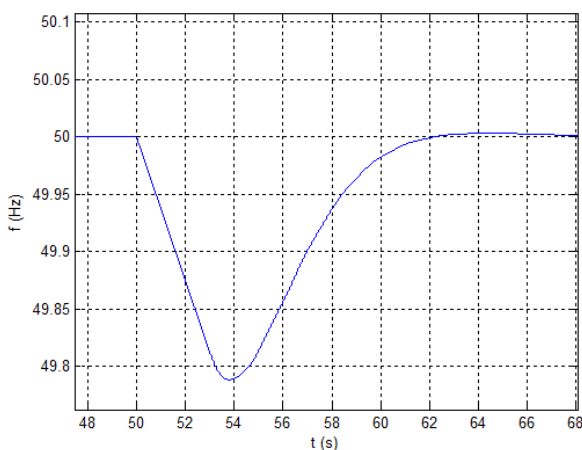
Da se primetiti sa Sl. 5. i Sl. 6 da je brzina opadanja frekvencije ista, tj. da ne zavisi od transportnog kašnjenja. Brzina promene frekvencije pri poremećaju zavisi samo od

konstante  $K$  (Sl. 2). Što je veća konstanta  $K$  to je brzina promene frekvencije manja. Ovo samo znači da su agregati koji brže reaguju na zahtevanu snagu bolji u regulaciji i da omogućavaju manja maksimalna odstupanja frekvencije. U odnosu na konstantu  $K$ , što je veća instalisana snaga agregata, odnosno što je manji procentualni poremećaj na sistem, to će i odstupanje frekvencije od nominalne biti manje.

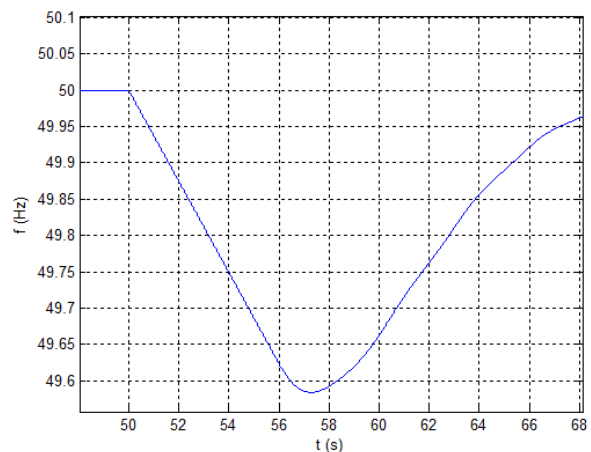
## V. ZAKLJUČAK

Predložena struktura Astromove varijante Smith-ovog prediktora pokazuje se kao vrlo efikasan način za regulaciju frekvencije izolovanih "slabih" mreža. Iako su u radu izvučeni zaključci koji se tiču jednomašinskog sistema, oni se mogu generalizovati i primeniti na višemašinske sisteme.

Mane sistema se odnose samo na fizička ograničenja istog. U cilju regulacije ovakvih sistema povoljno je koristiti kombinaciju više agregata gde će brzi agregati eliminisati brze komponente poremećaja, a spori, spore komponente poremećaja.



Slika 5. Odziv na poremećaj sistema kada je ukupno transportno kašnjenje  $t_1+t_2=3s$



Slika 6. Odziv na poremećaj sistema kada je ukupno transportno kašnjenje  $t_1+t_2=6s$

## ZAHVALNICA

Zahvalio bih se prof. dr. Tomislavu Šekari na pomoći i korisnim sugestijama pri izradi ovoga rada. Ovaj rad predstavlja deo seminarskog rada na predmetu *Distribuirani i frakcioni sistemi upravljanja* koji predaje prof. dr. Tomislav Šekara.

## LITERATURA

- [1] P. Piagi, R. H. Lasseter, "Autonomous Control of Microgrids", IEEE PES Meeting, Montreal, June 2006
- [2] J. K. Hedrick, A. Girard, "Control of Nonlinear Dynamic Systems: Theory and Applications", Berkeley, 2005
- [3] K. J. Astrom, C. C. Hang and B. C. Lim, "A New Smith Predictor for Controlling a Proces with an Integrator and Long Dead-Time", IEEE transactions on automatic control, vol. 39, No. 2, February 1994
- [4] T. B. Šekara, M. B. Trifunović, V. Govedarica, "Projektovanje složenog regulatora u frekvencijskom domenu pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na meri šum", INFOTEH, Ref. A-2, p. 6-11, March 2011.
- [5] M. Bošković, T. B. Šekara, M. M. Rapaić, B. Jakovljević, "Rational approximations to design controllers for unstable processes, including dead-time", INDEL, Ref T- 07, November 2014

## ABSTRACT

This paper deals with a problem of control of frequency in an isolated single-machine power system. This system is nonlinear and it posses transport delays (response speed of generator, telecommunication link delay) which makes it harder to have efficient, fast and robust control of frequency. As a solution to the problem, use of Astrom's New Smith predictor and feedback linearization is proposed. Through Matlab Simulink simulation, response of this kind of control system as well as robustness to a bad assumption of parameters of the system is shown.

### **APPLICATION OF ASTROM'S NEW SMITH PREDICTOR ON FREQUENCY CONTROL OF SINGLE-MACHINE ISOLATED POWER SYSTEM**

Stefan S. Stankovic