

# Modelovanje sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora primjenom nelinearnog ARX modela

Mihailo Micev, *Student Member, IEEE*, Martin Čalasan i Milovan Radulović, *Member, IEEE*

**Apstrakt**—U ovom radu prikazana je primjena nelinearnog auto – regresionog modela sa spoljašnjim ulazom (ARX) u cilju modelovanja sinhronog generatora tokom rada sa opterećenjem. Ulazni signal u sinhroni generator predstavljen je naponom pobude, dok je izlazni signal ustvari napon na krajevima generatora. Stoga je za estimaciju parametara usvojenog modela neophodno koristiti samo napon pobude i izlazni napon generatora, koji predstavljaju ulazno – izlazni set podataka. Dodatno, predložena identifikaciona procedura se bazira na promjeni referentnog napona sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Opisana procedura je implementirana u programskom paketu MATLAB Simulink. Rezultati dobijeni korišćenjem nelinearnog ARX modela sinhronog generatora se sa velikom tačnošću poklapaju sa rezultatima koji su dobijeni u Simulink-u.

**Ključne reči**—nelinearni ARX model; sinhroni generator; sistem za regulaciju pobude.

## I. UVOD

ELEKTROENERGETSKI sistem je složen, dinamički sistem čija je glavna funkcija da sigurno, kvalitetno, pouzdano i ekonomično snabdijeva potrošače električnom energijom. Kompletan elektroenergetski sistem se sastoji iz podsistema proizvodnje, distribucije, prenosa i potrošnje električne energije. Proizvodnja električne energije se odvija u elektranama, u kojima se različiti oblici primarne energije, pomoću električnih generatora, transformišu u električnu energiju. Najčešće korišćeni električni generator je klasični sinhroni generator, dok se rjeđe u upotrebi mogu sresti asinhroni generator (najčešće dvostrano napajani), sinhroni generator sa stalnim magnetima, generator jednosmjerne struje itd. [1].

Brojne studije vezane za analizu elektroenergetskih sistema, kao što su studije stabilnosti, planiranja, testiranja sistema, analize dinamičkog odziva prilikom prelaznih procesa, zahtijevaju precizno i tačno modelovanje svake komponente sistema. Stoga, modelovanje sinhronog

generatora, kao jednog od najvažnijih elemenata elektroenergetskog sistema, predstavlja veoma važan i zahtjevan zadatak [1], [2].

Zbog važnosti i velikog značaja modelovanja sinhronog generatora, brojne procedure za određivanje njegovih parametara su standardizovane i sublimirane u IEEE [3] i IEC standardima [4]. Osim toga, značajan broj naučnih radova je posvećen problematici modelovanja, odnosno estimacije parametara generatora. Metod baziran na naglom uklanjanju opterećenja je demonstriran u [5], dok je estimacija parametara na osnovu ogleđa kratkog spoja prikazana u [6]. Procedura identifikacije parametara generatora kada se na ulaz dovode sinusoide različite frekvencije, tzv. *standstill frequency response test* (SSFR) demonstriran je u [7]. Jedan od modernijih i novijih identifikacionih metoda baziran je na podacima koji se dobijaju sa *phasor measurement unit*-a (PMU) (fazor napona, aktivna snaga, itd.) [8]. Takođe, u literaturi se mogu sresti i identifikacione procedure prilikom kojih se na namotaj pobude dovode signali različitih oblika: *chirp* signal [9], *sinc* signal [10], *pseudorandom binary sequence* (PRBS) signal [11], itd.

U ovom radu sinhroni generator se modeluje pomoću nelinearnog auto – regresionog modela sa spoljašnjim ulazom (ARX), čiji opis se može naći u [12], [13]. Kao ulazni signal u sinhroni generator koristi se napon pobude, dok je izlazni signal predstavljen preko napona na namotaju statora generatora. Ulazno – izlazni set podataka je dobijen modelovanjem sinhronog generatora, zajedno sa sistemom za automatsku regulaciju pobude generatora, u programskom paketu MATLAB Simulink. Na osnovu dobijenog seta podataka pomoću simulacionog modela, generator se modeluje pomoću pomenutog nelinearnog ARX modela, koji pokazuje izuzetno veliki stepen tačnosti. Sličan pristup se može sresti u [14], gdje se za modelovanje sinhronog generatora koristi takođe nelinearni ARX model, ali kod kojeg su nelinearnosti predstavljene stepenim funkcijama. Takođe, u pomenutom radu parametri modela su estimirani korišćenjem  $H_{\infty}$  identifikacionog metoda.

Ovaj rad je organizovan na sljedeći način: u drugom poglavlju su date osnovne informacije o modelu koji je formiran u Simulink-u u cilju dobijanja seta ulazno-izlaznih mjerenja. Treće poglavlje je posvećeno prikazu korišćenog nelinearnog modela, dok su u četvrtom prikazani dobijeni rezultati. Na kraju, u Zaključku su ukratko sumirani rezultati i dati komentari vezani za budući rad.

Mihailo Micev – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e-mail: mihailom@ucg.ac.me).

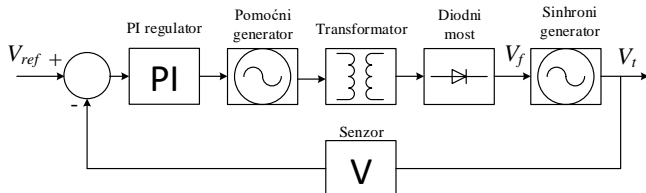
Martin Čalasan – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e-mail: martinc@ucg.ac.me).

Milovan Radulović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora (e-mail: milovanr@ucg.ac.me).

## II. SIMULACIONI MODEL SINHRONOG GENERATORA

Kvalitet električne energije, kao i stabilnost elektroenergetskog sistema, u velikoj mjeri zavise od dva parametra, a to su napon i frekvencija. Frekvencija se smatra globalnim parametrom, jer je njena nazivna vrijednost jednaka u cijelom elektroenergetskom sistemu. Međutim, za napon se može reći da je lokalni parametar, jer njegova nazivna vrijednost zavisi od naponskog nivoa u svakom dijelu sistema pojedinačno. Zbog važnosti ova dva parametra, veoma je bitno održavati njihove vrijednosti na vrijednostima koje su bliske nazivnim, pri čemu je za napon dozvoljeno nešto veće odstupanje nego za frekvenciju. Regulacija frekvencije, tj. njeno održavanje na konstantnoj vrijednosti (50 ili 60 Hz, zavisno od sistema), vrši se pomoću turbinskog regulatora djelovanjem na mehaničku snagu vratila rotora. Odnosno, frekvencija primarno zavisi od tokova aktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu, čime se formira takozvana  $P-f$  regulaciona kontura. Sa druge strane, djelovanjem na pobudu sinhronog generatora, može se uticati na tokove reaktivnih snaga, čime se definiše i naponski profil mreže. Na ovaj način može se definisati i druga regulaciona kontura koja predstavlja vezu između napona i reaktivnih snaga, odnosno  $Q-U$  kontura. Osim sinhronog generatora, za regulaciju tokova reaktivnih snaga mogu se koristiti redna i otočna baterija kondenzatora, sinhroni kompenzator, regulacioni transformator, statički VAR kompenzator, reaktor, itd.

U ovom radu se razmatra sinhroni generator kao najčešće korišćeno naponsko – reaktivno regulaciono sredstvo. Sinhroni generator je glavna komponenta sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora, čija blok šema je prikazana na Slici 1.



Sl. 1. Blok šema sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora.

Prethodno prikazana šema je samo jedna od mogućih šema sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora. Bitno je naglasiti da je prikazana struktura sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora uprošćena u odnosu na onu koja se primjenjuje u stvarnim elektranama. Izlazni napon generatora  $V_t$ , tj. napon na namotajima statora, mjeri se pomoću senzora i upoređuje sa referentnim naponom  $V_{ref}$ . U komparatoru se, na osnovu te razlike, formira signal greške koji predstavlja ulaz u PI regulator. Dalje, regulator na svom izlazu daje upravljački signal, koji ustvari predstavlja pobudni napon za pomoćni sinhroni generator, čija snaga je značajno manja od snage glavnog sinhronog generatora. Pomoćni generator na svom izlazu daje naizmjenični napon, koji se pomoću transformatora i ispravljačkog diodnog mosta pretvara u jednosmjerni napon. Ovako dobijeni jednosmjerni napon  $V_f$  služi za napajanje pobudnog namotaja glavnog sinhronog generatora, tako da napon na izlazu što bolje prati

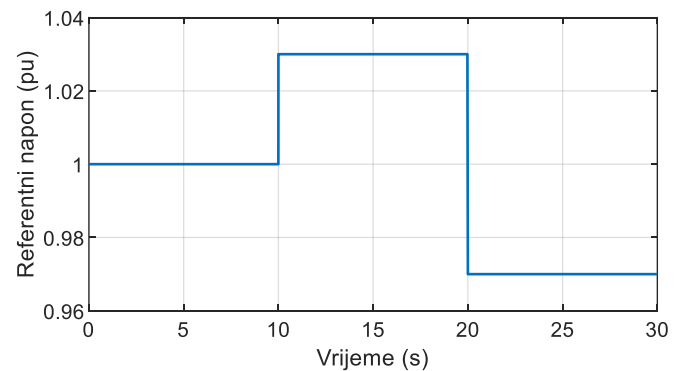
referentni napon.

Prethodno opisana blok šema implementirana je u programskom paketu MATLAB Simulink. Podaci o korišćenim elementima su sljedeći:

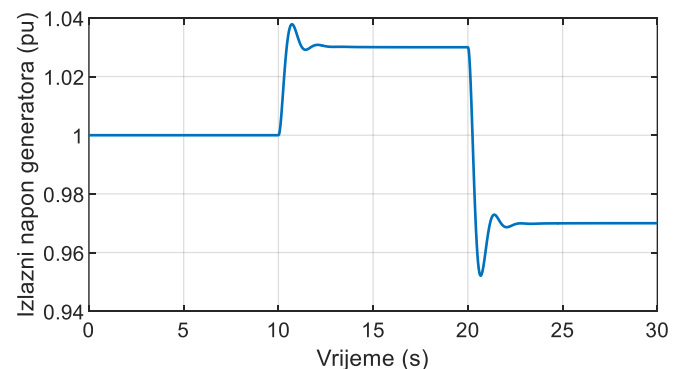
- Glavni sinhroni generator:  $S_n=2$  MVA,  $U_n=400$  V,
- Pomoćni sinhroni generator:  $S_n=8.1$  kVA,  $U_n=400$  V,
- Trofazni transformator: sprega Yd1,  $S_n=10$  kVA,  $U_{n1}/U_{n2}=400$  V/12 V,
- Diskretni PI regulator:  $K_p=10$ ,  $K_i=8$ .
- Opterećenje koje napaja generator je čisto aktivno, snage 500 kW.

U sprovedenim simulacijama referentni napon  $V_{ref}$  je najprije podešen na nazivnu vrijednost (tj. 1 pu), zatim se nakon 10 s poveća na 1.03 pu, da bi se nakon dodatnih 10 s referentni napon smanjio na 0.97 pu. Tokom ovakvog režima rada generatora, neophodno je snimiti talasne oblike napona pobude  $V_f$  i izlaznog napona  $V_t$ . Cilj ovog rada je da se, na osnovu ovako snimljenih talasnih oblika, estimiraju parametri nelinearnog matematičkog modela generatora koji će biti opisan u narednom poglavlju.

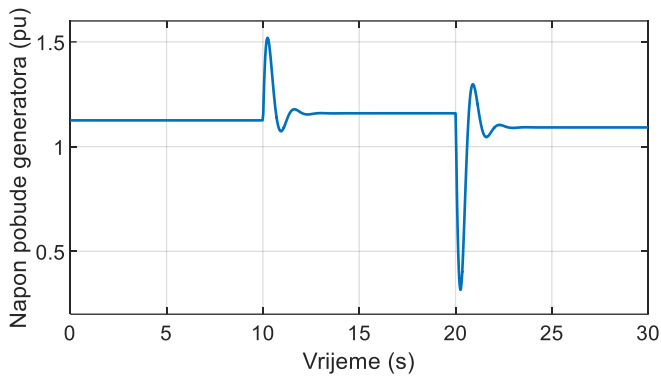
Kao što je i prethodno opisano, referentni napon generatora prikazan je na Slici 2. Nakon toga, na Slici 3 prikazan je izlazni napon generatora, dok je na Slici 4 prikazan napon pobude generatora u ovakvom režimu rada.



Sl. 2. Referentna vrijednost napona generatora.



Sl. 3. Izlazni napon generatora dobijen u Simulink-u.



Sl. 4. Napon pobude generatora dobijen u Simulink-u.

### III. NELINEARNI ARX MODEL

U ovom poglavlju prikazan je nelinearni ARX model koji je korišćen u radu u cilju modelovanja sinhronog generatora na osnovu mjerenih ulaznih i izlaznih podataka. Set ulazno – izlaznih podataka neophodan za estimaciju parametara nelinearnog ARX modela dobijen je iz simulacije rada sinhronog generatora u Simulink-u, kao što je i opisano u prethodnom poglavlju.

U cilju boljeg razumijevanja nelinearnog modela, korisno je prvo ukratko prikazati linearni ARX model. Naime, ukoliko se sa  $u(k)$  i  $y(k)$  označe diskretna ulazna i izlazna mjerenja u trenutku  $k$ , respektivno, veza između izlaza i ulaza data je na sljedeći način:

$$A(z)y(k) = B(z)u(k) + e(k), \quad (1)$$

gdje  $e(k)$  predstavlja poremećaj, a  $A(z)$  i  $B(z)$  su polinomi reda  $n_a$  i  $n_b$ , respektivno, po promjenljivoj  $z^{-1}$  koja predstavlja jedinično kašnjenje:

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}, \quad (2)$$

$$B(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} = \sum_{i=1}^{n_b} b_i z^{-i}. \quad (3)$$

Koristeći prethodne definicije polinoma  $A(z)$  i  $B(z)$ , (1) se može zapisati i na sljedeći način:

$$\left[ 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i} \right] y(k) = \sum_{i=1}^{n_b} b_i z^{-i} u(k) + e(k), \quad (4)$$

odakle slijedi:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i} y(k) + \sum_{i=1}^{n_b} b_i z^{-i} u(k) + e(k), \quad (5)$$

ili uzimajući u obzir značenje operatora kašnjenja  $z^{-1}$ :

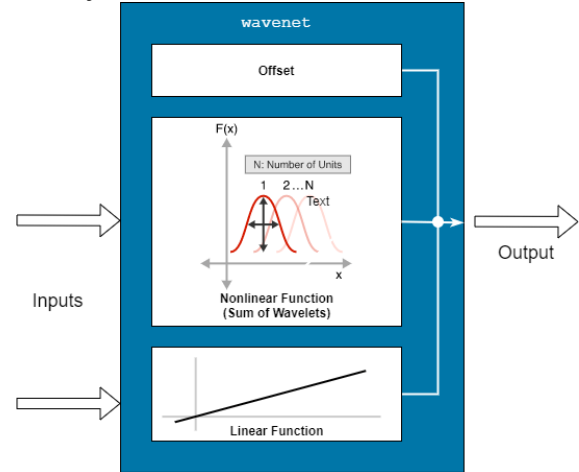
$$y(k) = -\sum_{i=1}^{n_a} a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n_b} b_i u(k-i) + e(k). \quad (6)$$

Kao što se može zaključiti na osnovu (6), kod linearnog ARX modela izlaz  $y(k)$  predstavlja linearnu kombinaciju izlaza u prethodnim trenucima  $y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_a)$ , kao i ulaza  $u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b)$ . Ovi članovi se jednim imenom nazivaju regresori, tako da se može reći da je kod ARX modela izlaz u trenutku  $k$  linearna funkcija ostalih regresora.

Za razliku od prethodno opisanog modela, kod nelinearnog ARX modela postoji nelinearna funkcija mapiranja  $F$  između izlaza  $y(k)$  i ostalih regresora:

$$y(k) = F \left[ \begin{matrix} y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_a), \\ u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b) \end{matrix} \right]. \quad (7)$$

U ovom radu se kao nelinearna funkcija mapiranja  $F$  koristi tzv. *wavenet* funkcija, koja ustvari predstavlja mrežu, tj. sumu *wavelet* funkcija. Struktura ovakvog nelinearnog ARX modela ilustrovana je na Slici 5.



Sl. 5. Struktura nelinearnog ARX modela sa *wavenet* funkcijom mapiranja.

Sa matematičkog aspekta, *wavenet* mapiranje se može prikazati sljedećom relacijom:

$$y(k) = y_0 + (X(k) - \bar{X})^T PL + W[X(k)] + S[X(k)], \quad (8)$$

gdje  $X(k)$  predstavlja vektor od ukupno  $m$  regresora, a  $\bar{X}$  njegovu srednju vrijednost,  $y_0$  je izlazni ofset (skalar),  $P$  je projekciona matrica dimenzija  $m \times p$  ( $p$  – broj linearnih regresora), a  $L$  je vektor težinskih koeficijenata dimenzija  $p \times 1$ . Nelinearni dio *wavenet* funkcije mapiranja ogleda se u funkcijama  $W[X(k)]$  i  $S[X(k)]$ . Preciznije, funkcija  $W[X(k)]$  predstavlja sumu proširenih i transliranih *wavelet*-a, dok funkcija  $S[X(k)]$  predstavlja sumu proširenih i transliranih funkcija skaliranja, odnosno *scalelet*-a. Matematičke formulacije funkcija  $W[X(k)]$  i  $S[X(k)]$  definisane su pomoću (9) i (10):

$$W[X(k)] = \sum_{i=1}^{d_w} w_i f_w \left( b_i (X - \bar{X})^T Q - c_i \right), \quad (9)$$

$$S[X(k)] = \sum_{i=1}^{d_s} s_i f_s \left( d_i (X - \bar{X})^T Q - e_i \right). \quad (10)$$

Oznake koje se pojavljuju u (9) i (10) imaju sljedeća značenja:

- $Q$  je projekciona matrica dimenzija  $m \times q$  ( $q$  – proizvoljan parametar manji ili jednak od  $m$ ),
- $w_1 - w_{d_w}$  su skalarni *wavelet* koeficijenti,
- $s_1 - s_{d_s}$  su skalarni *scaling* koeficijenti,
- $b_1 - b_{d_w}$  su skalari pod nazivom *wavelet* proširenja, dok su  $d_1 - d_{d_s}$  skalari koji se zovu *scaling* proširenja koji množe ulaznu matricu,

- $c_1 - c_{dw}$  je vektor pod nazivom *wavelet* translacija,
- $e_1 - e_{ds}$  je vektor *scaling* translacija,
- $f_w$  i  $f_s$  su funkcije definisane pomoću sljedećih relacija:

$$f_w(x) = e^{-xx^T/2}, \quad (11)$$

$$f_s(x) = (\dim(x) - xx^T) e^{-xx^T/2}. \quad (12)$$

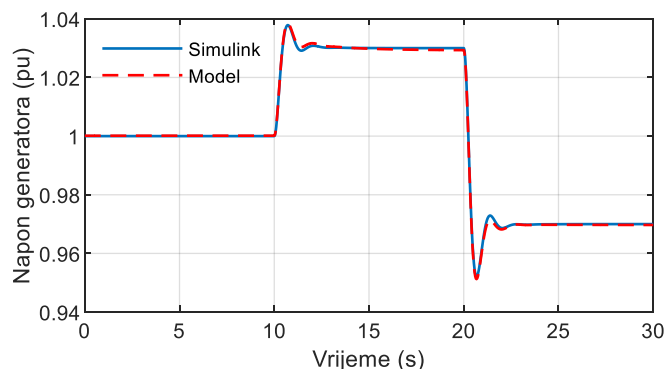
Estimacija parametara nelinearnog ARX modela izvršena je korišćenjem Levenberg – Marquardt algoritma [15], [16]. Ovaj algoritam je izuzetno pogodan za rješavanje nelinearnog problema najmanjih kvadrata prilikom tzv. *curve fitting*.

#### IV. REZULTATI SIMULACIJA

U ovom poglavlju prikazanu su rezultati dobijeni modelovanjem sinhronog generatora pomoću nelinearnog ARX modela. Naime, blok šema opisana u drugom poglavlju implementirana je u Simulink-u i dobijeni su napon pobude i napon na izlazu generatora koji su prikazani na Slikama 3 i 4. Ovako dobijeni napon pobude i izlazni napon generatora formiraju set ulazno – izlaznih podataka pomoću kojeg se vrši estimacija parametara nelinearnog ARX modela.

Važno je ukazati da relacija (8) predstavlja najopštiju formu *wavenet* mapiranja kod nelinearnog ARX modela. U ovom radu nelinearni ARX model predstavljen je samo funkcijom  $W[X(k)]$  iz relacije (8). Stoga, parametri koji su estimirani su matrica  $Q$  i vektori skalarnih *wavelet* koeficijenata  $w$ , *wavelet* proširenja  $b$  i *wavelet* translacija  $c$ . Korišćeno je  $m=28$  regresora ( $n_a=14$  i  $n_b=14$ ), pri čemu su svi usvojeni kao nelinearni, a broj  $q$  je podešen na 19, čime je ispunjen uslov da je  $q \leq m$ .

Poređenje izlaznog napona generatora dobijenog u Simulink-u sa izlaznim naponom generatora koji je dobijen pomoću nelinearnog ARX modela dato je na Slici 6.



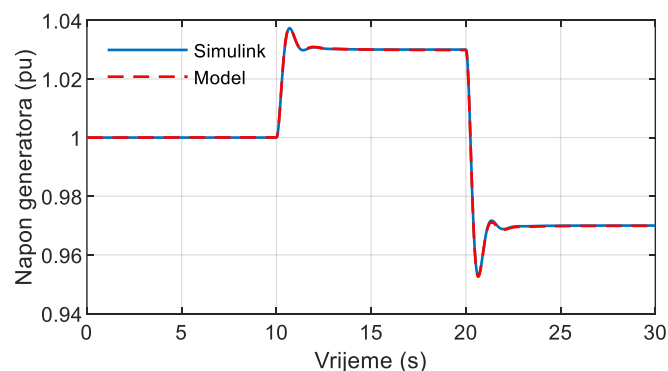
Sl. 6. Poređenje izlaznog napona generatora iz Simulink-a i izlaznog napona dobijenog primjenom nelinearnog ARX modela.

Na osnovu prethodno prikazanog grafika, jasno je da je korišćeni nelinearni ARX model izuzetno tačan i precizan jer su odstupanja od rezultata dobijenih pomoću Simulink-a veoma mala.

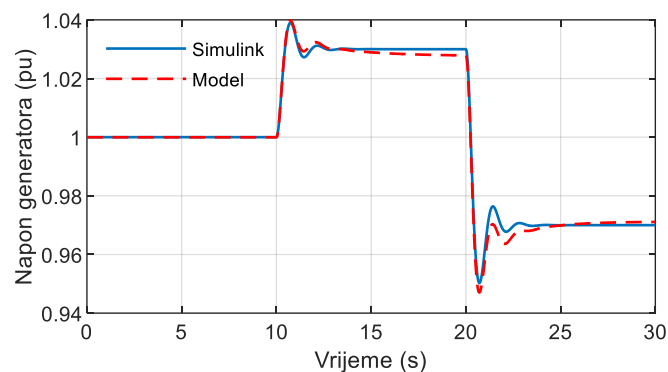
Nakon toga, ispitana je i mogućnost primjene nelinearnog ARX modela pri različitim uslovima u elektroenergetskom sistemu. Naime, estimacije parametara nelinearnog ARX modela izvršena je i u slučaju promjene opterećenja generatora. Razmatrana su dva slučaja: u prvom slučaju je opterećenje prepolovljeno, tj. smanjeno sa 500 kW na 250

kW, dok je u drugom slučaju opterećenje generatora udvostručeno, tj. iznosi 1000 kW. U oba slučaja izvršen je isti test: referentni napon je u početku jednak 1 pu, nakon 10 s se poveća na 1.03 pu, i nakon dodatnih 10 s se smanji na 0.97 pu. Odgovarajuća poređenja izlaznog napona iz Simulink-a sa naponom koji je dobijen primjenom nelinearnog ARX modela data su na Slikama 7 i 8. Na Slici 7 razmatran je slučaj opterećenja od 250 kW, dok je na Slici 8 analiziran slučaj kada je opterećenje generatora 1000 kW.

Kao što se može uočiti sa grafika, nelinearni ARX model omogućava odlično poklapanje rezultata sa onima dobijenim u Simulink-u i za različite uslove rada u elektroenergetskom sistemu. Time je pokazano da se ovaj model uspješno može adaptirati na promjenu uslova i da je pogodan za *online* primjenu u modelovanju sinhronog generatora.



Sl. 7. Poređenje izlaznog napona generatora iz Simulink-a i izlaznog napona dobijenog primjenom nelinearnog ARX modela (za opterećenje 250 kW).



Sl. 8. Poređenje izlaznog napona generatora iz Simulink-a i izlaznog napona dobijenog primjenom nelinearnog ARX modela (za opterećenje 1000 kW).

Na ovaj način pokazano je da estimirani parametri pri određenim uslovima rada (opterećenju na krajevima generatora) daju zadovoljavajuće rezultate i kada dođe do promjene radnih uslova, odnosno promjene opterećenja. Takođe, sa prethodnih grafika uočljivo je da je stepen poklapanja rezultata tokom dinamičkih procesa u prelaznom režimu veoma veliki.

#### V. ZAKLJUČAK

U ovom radu razvijen je nelinearni ARX model pomoću kojeg se adekvatno može modelovati sinhroni generator.

Parametri ovog matematičkog modela estimirani su na osnovu napona pobude i napona na izlazu generatora, koji su dobijeni simulacijom sistema za regulaciju pobude sinhronog generatora u Simulink-u. Dobijeni rezultati pokazuju veliki stepen tačnosti i preciznosti korišćenog nelinearnog modela. U budućem radu biće razmotrena robusnost ovog modela u slučaju promjene parametara PI regulatora. Još jedan pravac istraživanja je primjena istog modela na eksperimentalno dobijene rezultate iz realne hidroelektrane.

#### LITERATURA

- [1] T. A. Lipo, *Analysis of synchronous machines: Second Edition*. 2017.
- [2] B. Adkins and R.G. Harley, *The General Theory of Alternating Current Machines: Applications to Practical Problems*, Springer-Science+Business Media, B.V.,1975.
- [3] *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Standard 115-1995, 1995.
- [4] *Rotating Electrical Machines—Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Tests*, IEC Standard, IEC-60034-4 2008, 2008.
- [5] M. Giesbrecht and L. A. E. Meneses, "Detailed derivation and experimental validation of a method for obtaining load conditions for salient pole synchronous machine quadrature axis parameters determination," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 7, pp. 5049–5056, 2019.
- [6] V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, and E. C. Bortoni, "Parameter estimation of synchronous machines considering field voltage variation during the sudden short-circuit test," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 114, no. July 2019, p. 105421, 2020.
- [7] T. L. Vandoorn, F. M. De Belie, T. J. Vyncke, J. A. Melkebeek, and P. Lataire, "Generation of multisinusoidal test signals for the identification of synchronous-machine parameters by using a voltage-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 430–439, 2010.
- [8] B. Ahmadzadeh-Shooshtari, R. Torkzadeh, M. Kordi, H. Marzoughi, and F. Eghtedarnia, "SG parameters estimation based on synchrophasor data," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 12, pp. 2958–2967, 2018.
- [9] M. Cisneros-González, C. Hernandez, R. Morales-Caporal, E. Bonilla-Huerta, and M. A. Arjona, "Parameter estimation of a synchronous-generator two-axis model based on the standstill chirp test," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 44–51, 2013.
- [10] M. A. Arjona, M. Cisneros-Gonzalez, and C. Hernandez, "Parameter estimation of a synchronous generator using a sine cardinal perturbation and mixed stochastic deterministic algorithms," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 486–493, 2011.
- [11] M. Hasni, O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel, and S. Caux, "Estimation of synchronous machine parameters by standstill tests," *Math. Comput. Simul.*, vol. 81, no. 2, pp. 277–289, 2010, doi: 10.1016/j.matcom.2010.05.010.
- [12] [https://www.mathworks.com/help/ident/index.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://www.mathworks.com/help/ident/index.html?s_tid=CRUX_lftnav)
- [13] B. Kovačević and G. Kvaščev, *Identifikacija procesa*, Akademska misao, Beograd, 2018.
- [14] M. Dehghani, M. Karrari, W. Rosehart, and O. P. Malik, "Synchronous machine model parameters estimation by a time-domain identification method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 524–529, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2009.07.010.
- [15] K. Levenberg, "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares," *The Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 2, pp 164-168, 1944.
- [16] D.W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431-441, 1963.

#### ABSTRACT

In this paper, the application of a nonlinear auto – regression model with external input (ARX) in order to model a loaded synchronous generator is presented. The input signal to the synchronous generator is represented as the field voltage, while the output signal is actually the terminal voltage of the generator. Therefore, to estimate the parameters of the adopted model, it is necessary to use the field voltage and the terminal voltage signals, which form the input – output data set. Additionally, the proposed experiment is based on changing the reference voltage of the synchronous generator excitation control system. The described procedure is implemented in the MATLAB Simulink software package. The results obtained using the proposed model of the synchronous generator coincide with high accuracy with the results obtained in Simulink.

#### Modelling of synchronous generator excitation control system using nonlinear ARX model

Mihailo Micev, Martin Čalasan, Milovan Radulović