

## Estimacija ugla snage sinhronog generatora

Slavko Veinović<sup>1,2</sup>, Žarko Janda<sup>2</sup>, Đorđe Stojić<sup>2</sup>, Jasna Dragosavac<sup>2</sup>,  
Dušan Joksimović<sup>2</sup>, Ilija Klasnić<sup>2</sup>, Milan Đorđević<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kralja Aleksandra 73,  
11000 Beograd, Srbija

[slavko.veinovic@ieent.org](mailto:slavko.veinovic@ieent.org)

<sup>2</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija

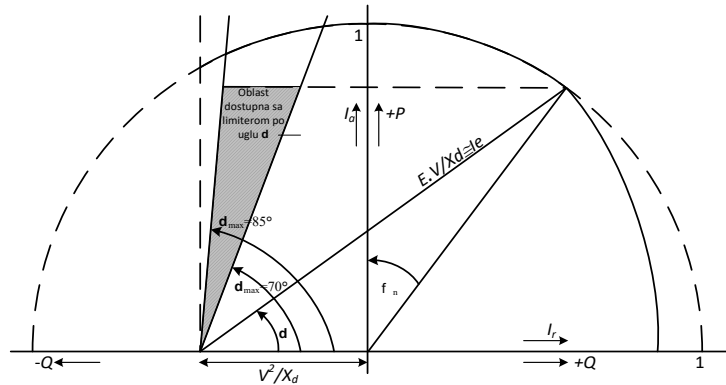
<sup>3</sup> JP EPS, Balkanska 13,  
11000 Beograd, Srbija

**Kratak sadržaj:** Metoda estimacija ugla snage sinhronne mašine generatora sa cilindričnim rotorom za potrebe implementacije limitera po uglu snage u okviru pobudnog sistema je prikazana u ovom radu. Da bi se izračunao ugao snage potrebno je poznavati vrednost jednog međufaznog napona, vrednost jedne fazne struje kao i vrednost sinhronne reaktanse u q osi u određenim trenucima. Pomenute električne veličine su dobijene metodom sinhronog semplovanja i digitalnom Furijeovom transformacijom. Za tačnost algoritma od presudnog značaja je detekcija prolaska kroz nulu jedne faze statorskog napona i iz toga određene učestanosti osnovnog harmonika. Prednost pomenutog algoritma je neosetljivost na prisustvo viših harmonika i potreba za samo dva merna kanala u odnosu na metode koje se baziraju na proračunu u dq ili  $\alpha\beta$  koordinatnom sistemu. Međutim algoritam je osetljiv na faznu nesimetriju struja i ponuđeno je rešenje kojim se prevazilazi ovaj nedostatak.

**Ključne reči:** estimacija, sinhroni generator, ugao snage, sinhrono semplovanje, digitalna Furijeova transformacija

### 1. Uvod

Prema standardu [1], rad generatora u kapacitivnoj oblasti ograničen je limiterom minimalne pobude koji definiše pomenutu oblast u ravni aktivna-reaktivna snaga (P-Q karakteristika). Međutim, pogonska oblast može da se proširi ukoliko je pobudni sistem opremljen limiterom po uglu snage (LUS).



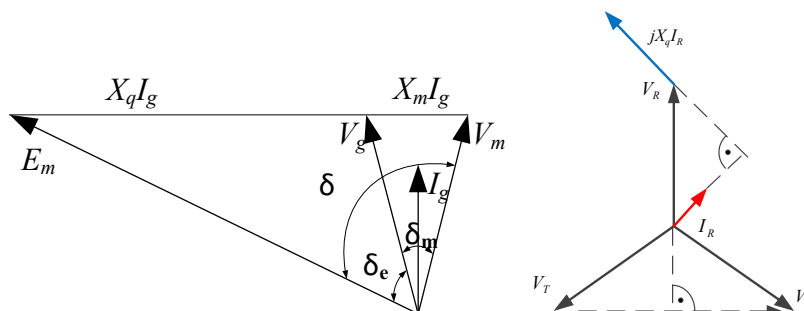
Slika 1. Pogonski dijagram mašine sa i bez limitera po uglu snage

Na primeru generatora 2 u termoelektrani Nikola Tesla B (TENT B2), proizvođač generatora je definisao pogonski dijagram sa i bez limitera po uglu snage. Sa limiterom LUS granica je određena uglom od  $85^\circ$  dok je bez limitera LUS granica na  $70^\circ$ , Slika 1.

Ugao snage, može da se meri ili estimira na osnovu izmerenih električnih veličina. Merenje ugla snage zahteva instalaciju induktivnih davača ili nekog drugog senzora ugaone pozicije na vratilu generatora, kao i odgovarajuće elektronike za obradu merenja i implementaciju algoritma za dobijanje informacije o uglu. Sa druge strane, estimaciju ugla je moguće realizovati mnogo lakše jer sva potrebna merenja i resursi su već dostupni upravljačkom delu pobudnog sistema (AVR), gde je još potrebno znati reaktansu generatora u q osi,  $X_q$ . Uređaji za merenje i estimaciju ugla snage su razvijeni u Institutu Nikola Tesla i testirani na realnom objektu tako što je dobijena estimirana vrednost ugla snage poređena sa merenom. Razliku između dve vrednosti koja nastaje zbog nelinearnosti generatora (zasićenja) i zavisi od njegove radne tačke moguće je korigovati kako bi se kompenzovao uticaj zasićenja generatora na tačnost estimacije ugla snage.

Prema [2], za potrebe estimacije potrebno je poznavati fazor napona statora, aktivnu i reaktivnu snagu, gde postoji više načina za njihovo računanje. U ovom radu je prikazana metoda koja fazni stav između fazora napona statora i elektromotorne sile računa sinhronim semplovanjem međufaznog napona  $v_{ST}$  i struje  $i_R$  i digitalnom Furijeovom transformacijom (DFT). Za pomenuti algoritam potrebna su samo dva analogna merna kanala, takođe algoritam je inherentno imun na prisustvo viših harmonika. Za sinhrono semplovanje tačna detekcija prolaska kroz nulu je preduslov za tačnost celog algoritma. Pokazano je da je samo osam sinhronih odbiraka statorskog napona i struje dovoljno za tačnu procenu ugla snage. Posebno je analiziran slučaj fazne nesimetrije struja na koji je ovaj algoritam osetljiv. Ovaj nedostatak je moguće prevazići merenjem tri fazne struje i algoritmom razdvajanja direktne i inverzne komponente. Pored statičkih osobina estimatora testirane su i dinamičke karakteristike. Uređaj je eksperimentalno

testiran u laboratorijskim uslovima pomoću trofaznog strujno-naponskog izvora kao i na realnom objektu TENT B2.



Slika 2. a) Fazorski dijagram sinhronne mašine spojen na jaku mrežu, b) grafički prikaz kašnjenja fazora  $V_R$  za  $90^\circ$ .

## 2. Predloženi algoritam

Ugao snage se sastoji iz unutrašnjeg i spoljašnjeg ugla sinhronne mašine spojene na jaku mrežu:

$$\delta = \delta_e + \delta_m. \quad (1)$$

Prema fazorskom dijagramu sa Slike 2. estimacija ugla sinhronog turbo generatora može da se izračuna na sledeći način:

$$\delta_e = \arccos\left(\frac{E_m^2 + V_g^2 - (X_q I_g)^2}{2E_m V_g}\right), \quad (2)$$

dok se spoljašnji ugao računa kao:

$$\delta_m = \arccos\left(\frac{V_m^2 + V_g^2 - (X_m I_g)^2}{2V_m V_g}\right), \quad (3)$$

gde su:  $V_g$  - napon statora,  $I_g$  - struja statora,  $E_m$  - indukovana elektromotorna sila (q osa),  $V_m$  - napon mreže,  $X_q$  i  $X_m$  su sinhrona reaktansa generatora u q osi i reaktansa mreže. Sve pomenute vrednosti predstavljaju module trofaznih fazora.

Ugao  $\delta_e$  je ugao između fazora  $\underline{E}_m$  i  $\underline{V}_g$ , dok je ugao  $\delta_m$  ugao između fazora  $\underline{V}_g$  i  $\underline{V}_m$ . Meranjem faznog stava između ovih fazora možemo da odredimo ugao  $\delta_e$ . Ako pretpostavimo da je trofazni sistem simetričan i da je napon  $\underline{V}_g$  fazor napona  $\underline{V}_R$  a da je struja  $\underline{I}_g$  fazor struje  $\underline{I}_R$ , možemo odrediti fazore  $\underline{E}_m$  i  $\underline{V}_m$  na osnovu merenja trenutnih vrednosti napona  $v_{ST}$  i struje  $i_R$ ,

videti Sliku 2b). Naime, pomeranje struje  $i_R$  za  $90^\circ$  električno unapred je ekvivalentno sa pomeranjem napona  $v_R$  električno unazad, po pogledu faznih stavova. Kako se pomeranje unazad realizuje kao kašnjenje, realizacija na taj način je lako izvodljiva. Fazor napona  $v_R$  pomeren unazad za  $90^\circ$  je jednak fazoru napona  $v_{ST} / \sqrt{3}$ . Stoga, trenutne vrednosti  $e_m$  i  $v_m$  se računaju pomoću trenutnih vrednosti  $v_{ST}$  i  $i_R$  na sledeći način:

$$e_m = v_{ST} / \sqrt{3} + X_q i_R, \quad (4)$$

$$v_m = v_{ST} / \sqrt{3} - X_m i_R. \quad (5)$$

Fazni stav između  $v_m$  i  $e_m$  ćemo izračunati pomoću DFT algoritma na osnovnoj frekvenciji  $f_1$ .

## 2.1. DFT algoritam

Pretpostavljamo da imamo sinhrono semplovanje veličina  $v_{ST}$  i  $i_R$  sa intervalom semplovanja od  $T/N$ , gde je  $T$  perioda osnovnog harmonika statorskih veličina generatora. Tačno određivanje ovog intervala biće objašnjeno u sledećem poglavlju. Na osnovu jednačina (4) i (5) dobijamo vrednosti za  $e_m$  i  $v_m$  u trenucima semplovanja  $n$ :

$$e_{m,n} = v_{ST,n} / \sqrt{3} + X_q i_{R,n}, \quad (6)$$

$$v_{m,n} = v_{ST,n} / \sqrt{3} - X_m i_{R,n}. \quad (7)$$

Definicija DFT za sekvencu odbirka  $x_n$  gde je  $n = 0..N-1$  glasi:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}}, \quad k = 0 \dots N-1. \quad (8)$$

Izračunaćemo DFT samo za jednu tačku  $k = 1$  po definiciji (8), i tako dobiti realne i imaginarne delove  $V_{m1}$  i  $E_{m1}$  na osnovu kojih možemo izvući informaciju o argumentima  $V_{m1}$  i  $E_{m1}$ .

Realni delovi transformata  $E_{m1}$  i  $V_{m1}$  se računaju na sledeći način:

$$\text{Re}(E_{m1}) = \sum_{n=0}^{N-1} e_{m,n} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad (9)$$

$$\operatorname{Re}(V_{m1}) = \sum_{n=0}^{N-1} v_{m,n} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (10)$$

Dok se imaginarni delovi transformata  $E_{m1}$  i  $V_{m1}$  računaju kao:

$$\operatorname{Im}(E_{m1}) = -\sum_{n=0}^{N-1} e_{m,n} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}(V_{m1}) = -\sum_{n=0}^{N-1} v_{m,n} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (12)$$

Argumenti od  $E_{m1}$  i  $V_{m1}$  su sada:

$$\arg(E_{m1}) = \operatorname{atan}(\operatorname{Im}(E_{m1}) / \operatorname{Re}(E_{m1})) \quad (13)$$

$$\arg(V_{m1}) = \operatorname{atan}(\operatorname{Im}(V_{m1}) / \operatorname{Re}(V_{m1})) \quad (14)$$

Ugao između fazora  $V_m$  i  $E_m$ , odnosno ugao snage sinhronne mašine se računa na sledeći način [3]:

$$\delta = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(E_{m1}) \operatorname{Re}(V_{m1}) - \operatorname{Re}(E_{m1}) \operatorname{Im}(V_{m1})}{\operatorname{Re}(V_{m1}) \operatorname{Re}(E_{m1}) + \operatorname{Im}(V_{m1}) \operatorname{Im}(E_{m1})}\right) \quad (15)$$

Kompajleri koji podržavaju funkciju  $\operatorname{atan2}()$  vode računa o znaku imenioca i brojioca funkcije  $\operatorname{atan}()$  i na taj način je lako ostvariti da ugao  $\delta$  može da uzima vrednosti veće od  $90^\circ$ . Isto važi i za jednačine (13) i (14). Opisani algoritam je efikasan po pitanju procesorskog vremena kada se transformati računaju samo u jednoj tački na osnovu malog broja odbiraka u vremenu. Eksperimentalni rezultati su dobijeni za  $N = 8$ .

## 2.2. Sinhrono semplovanje i merenje frekvencije

Da bi precizno odredili prolazak kroz nulu signala  $v_{ST}$  potrebo je da ga odabiramo sa visokom učestanosti, u ovom primeru  $f_0 = 5\text{kHz}$ . Ako pretpostavimo da se u okolini nule sinusna funkcija može dobro aproksimirati linearnom funkcijom, uticaj mernog šuma na detekciju prolaska kroz nulu eliminiše se linearnom regresijom [4]. Naime, kada se detektuje pozitivna promena znaka ( $v_{ST,j-1} < 0$  i  $v_{ST,j} > 0$ ) uzima se još 3 odbirka pre trenutka  $j-1$  i 3 odbirka posle odbirka  $j$  i na osnovu osam odbiraka ( $j-4, j-3, j-2, j-1, j, j+1, j+2, j+3$ ) se računa mesto prolaska kroz nulu. U [4] je prikazan način računanja

parametara prave  $y = at + b$ . Mesto prolaska kroz nulu  $t_0$  se dobija pomoću relacije:

$$t_0 = -\frac{\Delta A}{\Delta B}, \quad (16)$$

gde su determinante  $\Delta A$  i  $\Delta B$  determinante promenljivih  $a$  i  $b$  respektivno, [4]. Kada imamo detekciju dva sukcesivna prolaska kroz nulu uzlazne ivice, periodu  $T$  osnovnog harmonika možemo odrediti formulom:

$$T = (m-7)T_0 + (7T_0 - t_{0_{-1}}) + t_0 = mT_0 - t_{0_{-1}} + t_0, \quad (17)$$

gde je  $m$  broj odbiraka između dva prolaska kroz nulu a vreme  $t_{0_{-1}}$  zapamćena poslednja vrednost dobijena metodom linearne regresije.

Kada imamo tačan trenutak prolaska kroz nulu, odbirke dobijamo odabiranjem signala  $v_{ST}$  i  $i_R$  u trenucima:

$$\frac{T}{N} - 7T_0 + t_0, \frac{2T}{N} - 7T_0 + t_0, \dots, \frac{(N-1)T}{N} - 7T_0 + t_0, T - 7T_0 + t_0. \quad (18)$$

### 3. Uticaj nesimetrije struja

Zbog nesimetričnog opterećenja moguće je da se javi fazna nesimetrija statorskih struja sinhronog generatora. Trajni rad generatora je dozvoljen u slučaju maksimalne fazne nesimetrije od 10% te je neophodno analizirati ovaj slučaj [5]. Inverzna komponenta struje unosi grešku u proceni ugla snage i treba je eliminisati iz proračuna tj. treba uzeti u obzir samo direktnu komponentu struje. Takođe, neophodno je meriti sve tri statorske struje.

Primenom Fortescue-ove transformacije možemo da razdvojimo direktnu i inverznu komponentu struja [6]:

$$\begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{s+} \\ I_{s-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}, \underline{a} = e^{j2\pi/3} \quad (19)$$

Pošto su nam potrebni odbirci struja u trenucima  $2\pi/3$  i  $4\pi/3$  broj odbiraka treba da je deljiv sa tri, stoga smo umesto osam izabrali 12 odbiraka po periodu za DFT. Direktna komponenta struje je tada jednaka:

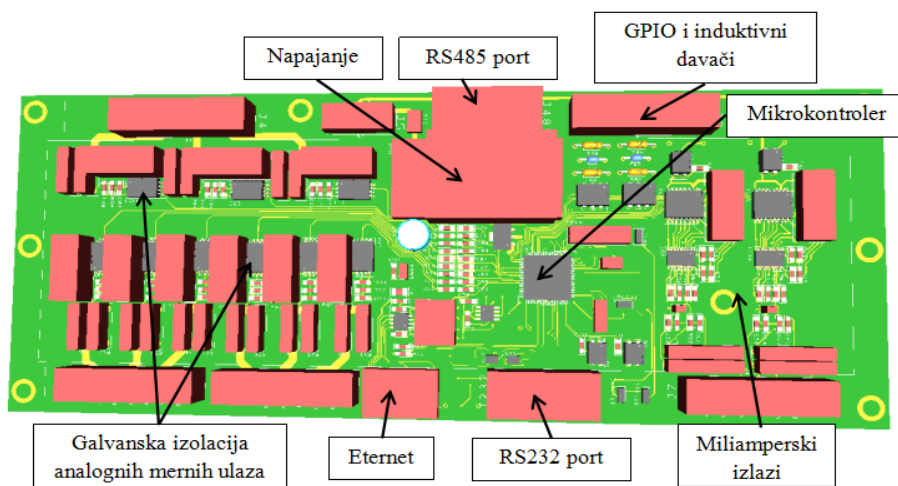
$$I_{R+}(t) = I_R(t) + I_S(t + 4T/12) + I_T(t + 8T/12). \quad (20)$$

Sada se odbirci uzimaju u trenucima  $t$  definisanim sa (18) za  $N = 12$ . U jednačinama (6) i (7) sada figurišu odbirci  $i_{R+}$  umesto odbiraka  $i_R$ . Struje  $i_{R+}$  i  $i_R$  su u fazi ali im se amplitude razlikuju u slučaju prisustva nesimetrije u bilo kojoj od struja  $i_R$ ,  $i_S$  ili  $i_T$ .

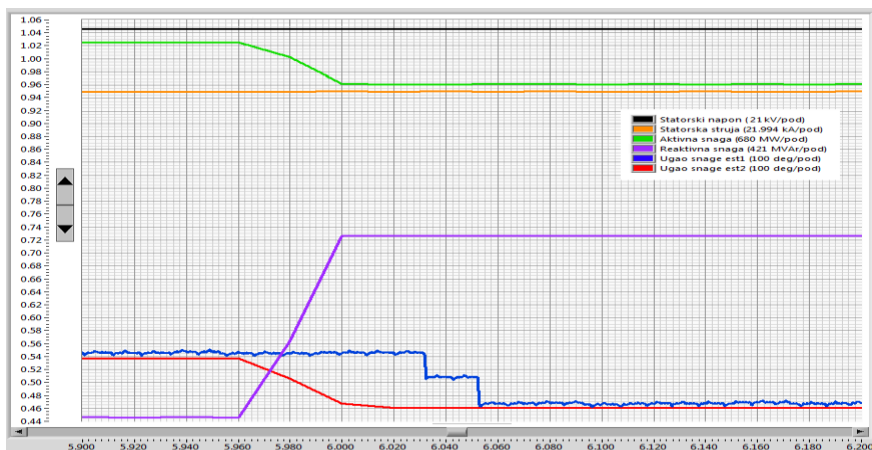
Ovakav način izračunavanja direktne i inverzne komponente iz sinhrono semplovanih trofaznih signala daje sinhrono semplovane trenutne diskretne vrednosti direktne i inverzne komponente, ali sa kašnjenjem koje iznosi minimalno dve trećine periode fundamentalna. Takođe, da bi se dobile efektivne vrednosti iz sinhrono semplovanih diskretnih signala potrebno je izračunati DFT koeficijent prvog reda a za to je potreban vremenski interval u trajanju jedne periode, pa se time i određuje realni opseg vremenskog kašnjenja ovako realizovanog algoritma.

#### 4. Eksperimentalni rezultati

Uređaj za estimaciju ugla je realizovan na mikroprocesorskoj kartici sa TIVA C familijom mikrokontrolera (TM41294NCPDT) čiji je izgled prikazan na Slici 3. Analogni ulazi su galvanski izolovani izolacionim pojačavačima, potom su dovedeni na pinove AD konvertora kontrolera. Napon statora je naposkim transformatorom smanjen na nivo od 100 V za nominalni napon pre nego što je doveden na karticu. Struja statora je merena pomoću strujnog transformatora i šanta od 5 mΩ. Miliamperski izlazi su formirani pomoću eksternog DA konvertora.



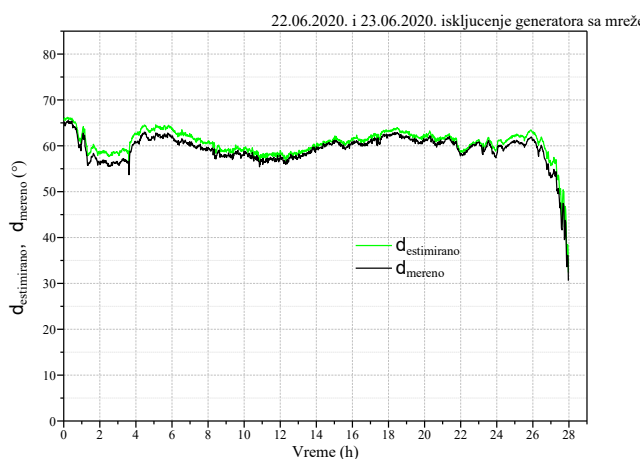
Slika 3. Izgled mikroprocesorske kartice za estimaciju ugla.



Slika 4. Dinamički odziv ugla snage pri promeni faktora snage u laboratoriji ( $N = 8$ ). Crvenom linijom je prikazana estimacija ugla bazirana na  $\alpha\beta$  transformaciji dok je plavom linijom prikazan odziv ugla predloženom estimacijom.

Dinamički odziv estimatora ugla snage je testiran u laboratoriji pomoću trofaznog izvora. Na Slici 4. je prikazan odziv estimiranog ugla na skokovitu promenu faktora snage. Može se uočiti da estimacija kasni za 2 do 3 periode u odnosu na algoritme koji računaju ugao iz tri fazna napona i tri fazne struje. Na osnovu promene aktivne snage (zelena) može se detektovati trenutak promene faktora snage (ljubičasta).

Statička procena ugla snage  $\delta$  je dobijena sa realnog objekta poređenjem estimirane i merene vrednosti, što je prikazano na Slici 5. Sa oba uređaja (za merenje i estimaciju) miliamperski signali su dostavljeni Scada sistemu (DCS) elektrane TENT B2 gde su logovani podaci.



Slika 5. Poređenje merene i estimirane vrednosti ugla snage na TENT B2 ( $N = 8$ ).

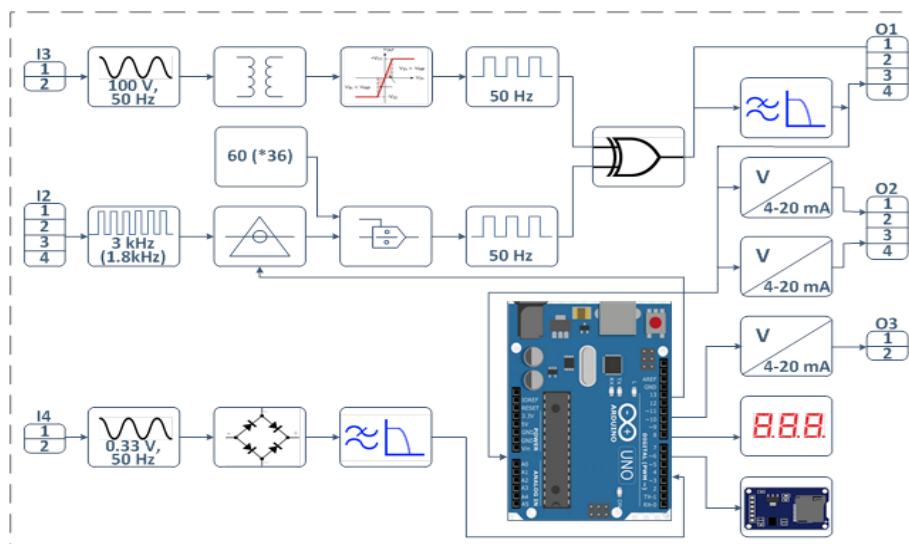


Merenje ugla se realizuje kroz merenje faznog pomaka između signala dobijenog sa naponskog mernog transformatora koji daje signal napona sa priključaka generatora i signala sa induktivnog impulsnog davača brzine obrtanja rotora. Ovaj fazni pomak odgovara uglu između fazora elektromotorne sile i fazora napona statora, odnosno uglu snage  $\delta$ . Koristite se postojeći davači za merenje brzine obrtanja turbine. Mereni algoritam deli frekvenciju impulsnog signala dobijenog sa induktivnog davača sa brojem zubaca (36 ili 60). Tako dobijeni signal predstavlja četvrtasti talasni signal čija je frekvencija uporediva sa frekvencijom generatorskog napona i koji zauzima odgovarajući fazni ugao ispred sinusoide generatorskog napona.

S obzirom da se na osnovu signala sa davača za merenje brzine može dobiti samo informacija o relativnom položaju rotora, izmerenu faznu razliku je potrebno korigovati za aditivnu grešku koja odgovara izmerenom faznom pomaku u trenutku kada je fizička vrednost ugla snage jednaka nuli. Za eliminaciju greške početnih uslova neophodno je znati trenutak sinhronizacije tj. trenutak promene uklopnog stanja generatorskog prekidača koji se može detektovati pomoću merenja struje statora.

Na Slici 6. je prikazan detaljan principski dijagram uređaja. Signal sa naponskog mernog transformatora se dovodi na klemu I3, signal sa induktivnog davača na klemu I2, dok naponski signal sa strujnog pretvarača na klemu I1.

Na merenu vrednost ugla snage  $\delta$  utiče i stepen zasićenja sinhronog generatora po poprečnoj osi, koji u ovom slučaju nije veliki. Taj efekat doprinosi razlici između merene i estimirane veličine ugla snage, razlika je uočljiva na grafiku sa Slike 5.



Slika 6. principski blok dijagram uređaja za merenje ugla snage.

## 5. Zaključak

U radu je prikazana jedna novorazvijena metoda estimacija ugla snage sinhronne mašine generatora sa cilindričnim rotorom za potrebe implementacije limitera po uglu snage kao dodatak pobudnog sistema.

Ugao snage se izračunava pomoću merene vrednosti jednog međufaznog napona, jedne fazne struje koja pripada trećoj fazi i vrednosti sinhronne reaktanse u  $q$  osi. Pomenute električne veličine su dobijene metodom sinhronog semplovanja i naknadnom obradom pomoću diskretne Furijeove transformacije, čime se postiže veliko potiskivanje celobrojnih viših harmonika u snimljenom signalu. Za tačnost algoritma od presudnog značaja je detekcija prolaska kroz nulu jedne faze statorskog napona i iz toga određene učestanosti osnovnog harmonika.

Prednost pomenutog algoritma je neosetljivost na prisustvo viših harmonika i potreba za samo dva merna kanala u odnosu na metode koje se baziraju na proračunu u  $dq$  ili  $\alpha\beta$  koordinatnom sistemu.

Prikazani su eksperimentalni rezultati dobijeni na laboratorijskom modelu, gde je predmetni algoritam poređen sa algoritmima koji koriste sve tri fazne struje i sva tri napona, u slučaju kada nema viših harmonika.

Nedostatak algoritma je osetljivost na faznu nesimetriju struja. U radu je ponuđeno jedno moguće rešenje kojim se prevazilazi ovaj nedostatak i jedan od pravaca daljeg razvoja je kreiranje bržeg algoritma za ekstrakciju direktne i inverzne komponente iz nesimetričnog trofaznog signala.

## Literatura

- [1] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) , vol., no., pp.1-207, 26 Aug. 2016, [doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7553421).
- [2] Kundur, P., Balu, N.J. and Lauby, M.G., 1994. *Power system stability and control* (Vol. 7). New York: McGraw-hill.
- [3] M. Đurić, V. Terzija, Z. Radojević, Ž. Đurišić, Z. Stojanović, S. Zubić, V. Bajić, *ALGORITMI ZA DIGITALNE RELEJNE ZAŠTITE*, monografija, ETA, Beograd, 2012
- [4] Yan, Xin, and Xiaogang Su. *Linear regression analysis: theory and computing*. World Scientific, 2009.
- [5] IEEE Guide for AC Generator Protection," in IEEE Std C37.102-2006 (Revision of IEEE Std C37.102-1995) , vol., no., pp.1-177, 2006.

- [6] Fortescue, Charles L. "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks." *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 37, no. 2 (1918): 1027-1140.

**Abstract.** In this paper a load angle estimation method of round rotor synchronous generator is presented, for load angle limiter in AVR systems design purpose. To get information of load angle, it is necessary to have values of the one terminal voltage, one phase current and q-axis reactance  $X_q$ . Mentioned values are acquired by synchronous sampling technique and processed by discrete Fourier transformation. The accuracy of presented method highly depends on quality of zero-crossing detection of the input voltage signal and on the calculation estimation of the fundamental frequency. This method is of reduced sensitivity to higher harmonics presence content in voltages and current waveforms. Another advantage, when compared to other dq or  $\alpha\beta$  based calculations estimations, is the necessity of use only two measurement channels. Drawback of described approach is lack of immunity to current asymmetry. However, a solution to overcome this problem is offered by introducing the additional measurements into the algorithm to extract the synchronous sampled direct components of all three phase currents.

**Keywords:** estimation, synchronous generator, load angle, zero crossing, digital Fourier transformation

## Load Angle Estimation of Synchronous Generator

Slavko Veinović, Žarko Janda, Đorđe Stojić, Jasna Dragosavac,  
Dušan Joksimović, Ilija Klasnić, Milan Đorđević

Rad primljen u uredništvo: 30.10.2020. godine.

Rad prihvaćen: 23.12.2020. godine.

