

Poređenje performansi jednofaznih SRF-PLL struktura sa DC-SOGI i VS-OSG dvofaznim generatorom za generisanje kvadrature signala

Slobodan Lubura, Srđan Lale, Milomir Šoja, Čedomir Milosavljević

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

slubura@etf.unssa.rs.ba, srdjan.lale@etf.unssa.rs.ba, milomir.soja@etf.unssa.rs.ba, cedomir.milosavljevic@elfak.ni.ac.rs

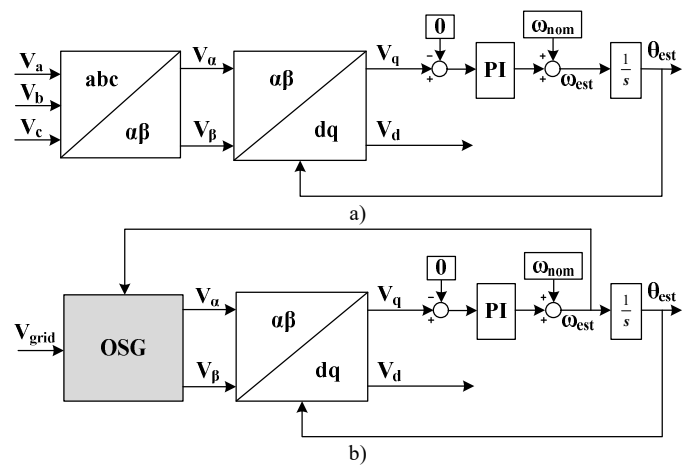
Sažetak— Jedna od ključnih komponenti jednofaznih SRF-PLL (engl. *Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop*) struktura, koje se koriste za estimaciju parametara mreže i sinhronizaciju pretvarača sa mrežom, je dvofazni generator za dobijanje dva kvadratura signala neophodna za rad SRF-PLL struktura. U ovom radu data je uporedna analiza dvije različite SRF-PLL strukture, jedna sa DC-SOGI (engl. *Direct Current - Second Order Generalized Integrators*), a druga sa VS-OSG (engl. *Variable Structure - Orthogonal Signal Generator*) dvofaznim generatorom. Prikazani su simulacioni rezultati ponašanja SRF-PLL strukture u ustaljenim i prelaznim režimima. VS-OSG kao nelinearna struktura za generisanje kvadrature signala pokazala se kao superiornija, što je i očekivano s obzirom da su SRF-PLL inherentno nelinearne strukture.

Ključne riječi - dvofazni generator; klizni režim; fazno-zaključana petlja;

I. UVOD

Jednofazne fazno-zaključane petlje (PLL) su sastavni dio upravljačkih struktura jednofaznih pretvarača povezanih sa mrežom. Zadatak im je da ostvare sinhronizaciju pretvarača sa mrežom, a neke od PLL struktura mogu da se upotrijebe i za estimaciju parametara mreže: faze, frekvencije i amplitude. Najjednostavnija jednofazna PLL struktura je tzv. pPLL [1], gdje se kao fazni detektor koristi množač. Međutim, osnovni nedostatak pPLL strukture je nedopustiva talasnost estimiranih parametara sa dvostrukom mrežnom frekvencijom. Za eliminisanje talasnosti u estimiranim parametrima mreže, u [2] je predložena metoda zasnovana na detekciji trenutne vrijednosti mrežnog napona, a u [3] je predložena modifikovana pPLL sa dvostrukom kompenzacijom frekvencije i amplitude mrežnog napona. S druge strane, kao rješenje pomenutog nedostatka pPLL pojavile su se SRF-PLL strukture, gdje se kao fazni detektor koristi sinhroni obrtni referentni sistem, na čijem izlazu se dobiju dva jednosmjerna signala $v_d(t)$ i $v_q(t)$ [4]. Signal $v_d(t)$ predstavlja estimiranu amplitudu mreže, dok se signal $v_q(t)$ koristi za estimaciju mrežne frekvencije i faze. Blok šeme trofazne i jednofazne SRF-PLL strukture prikazane su na Sl. 1 a) i b) respektivno. Ove SRF-PLL strukture zbog prirode rada inherentno su bile podesne za primjenu u trofaznim pretvaračima. Međutim, da bi ih primijenili u jednofaznim pretvaračima, potrebno je napraviti njihovu modifikaciju, odnosno zamijeniti Klarkinu

transformaciju ($abc/\alpha\beta$ blok) sa dvofaznim generatorom (OSG blok) za dobijanje dva kvadratura signala $v_\alpha(t)$ i $v_\beta(t)$, koji su potrebni za rad faznog detektora (SRF blok – $\alpha\beta/dq$).



Slika 1. a) Blok šema trofazne SRF-PLL strukture; b) Blok šema jednofazne SRF-PLL strukture.

Prva i vjerovatno najjednostavnija realizacija OSG bloka je umetanje faznog kašnjenja od $\pi/2$ za generisanje kvadrature signala, što je predloženo u [5]. Predloženi OSG korektno radi samo pri nominalnoj mrežnoj frekvenciji, tj. nije frekventno adaptivan. OSG blok zasnovan na Hilbertovoj transformaciji, predložen u [6], kompleksan je za realizaciju i takođe nije frekventno adaptivan. U literaturi mogu se naći i specifične realizacije OSG-a: OSG kao Kalmanov filter [7], OSG kao opserver stanja [8], OSG kao propusnik opsega učestanosti [9].

Posebno interesantna realizacija OSG-a predložena je u [10]. OSG čine dva filtra, jedan je niskofrekventni, a drugi je propusnik opsega učestanosti. Ta struktura nazvana je SOGI. Dobre osobine predložene strukture su adaptivnost po frekvenciji, jednostavna realizacija i imunost na šumove u mjerenom mrežnom naponu. U [11] opisana je unaprijeđena verzija SOGI-a, koja je imuna i na postojanje jednosmjerne (DC) komponente u mjerenom mrežnom naponu, a nazvana je DC-SOGI. Ova realizacija OSG-a biće predmet poređenja sa tzv. VS-OSG, koji je opisan u nastavku rada.

Gotovo sve SOGI strukture pripadaju klasi kontinualnih ili diskretnih LTI (engl. *Linear Time Invariant*) sistema, dok je sam postupak estimacije parametara mreže kod SRF-PLL struktura nelinearan, što znatno komplikuje proceduru projektovanja cjelokupne PLL strukture. Od interesa je bilo pronaći neku specifičnu realizaciju OSG-a, koja je robusna na promjenu parametara mreže i ima superiornije performanse u odnosu na SOGI. U [12] opisana je jedna takva struktura, nazvana dvofazni harmonijski oscilator, koja bi se mogla iskoristiti kao OSG blok u SRF-PLL strukturama. Ta struktura u ovom radu nazvana je VS-OSG.

II. MATEMATIČKI OPIS DC-SOGI I VS-OSG DVOFAZNIH GENERATORA

DC-SOGI dvofazni generator može se opisati funkcijama prenosa [11]:

$$W_{\alpha}(s) = \frac{V_{\alpha}(s)}{V_g(s)} = \frac{k\omega s^2}{s^3 + (k\omega + k_i)s^2 + \omega^2 s + k_i\omega^2} \quad (1)$$

$$W_{\beta}(s) = \frac{V_{\beta}(s)}{V_g(s)} = \frac{k\omega^2 s}{s^3 + (k\omega + k_i)s^2 + \omega^2 s + k_i\omega^2}.$$

Filteri dati sa (1) moraju biti adaptivni, jer rezonantna frekvencija ω u stacionarnom stanju (zaključanom stanju petlje) mora biti jednaka estimiranoj frekvenciji mreže ω_{est} . To znači da se prilikom realizacije funkcija prenosa (1) parametar ω ne tretira kao konstanta, već se dovodi kao signal ω_{est} dobijen iz ostatka PLL strukture (Sl. 1 b)). Lako je pokazati da se uvrštavanjem $s=j\omega$ u (1) dobije signal $v_{\alpha}(t)$ u fazi sa mrežnim naponom $v_g(t)$ i signal $v_{\beta}(t)$, koji za mrežnim naponom $v_g(t)$ kasni za $\pi/2$. Takođe, očigledno je da DC-SOGI opisan sa (1) ima dva podesiva parametra k i k_i . Parametrom k podešava se propusni opseg filtera, a diskusija oko njegovog izbora data je u [10]. Parametar k_i koristi se za eliminaciju jednosmjerne komponente, koja se može pojaviti u mjerenom signalu mrežnog napona $v_g(t)$ na ulazu SRF-PLL strukture. Rigorozna procedura izbora parametra k_i data je u [11].

Konzervativni harmonijski oscilator u prostoru stanja opisan je sa [12]-[14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_g \\ -\omega_g & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rješavanjem (2), promjenljive stanja x_1 i x_2 harmonijskog oscilatora u vremenskom domenu date su sa:

$$\begin{aligned} x_1 &= A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ x_2 &= A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

Iz (3) je očigledno da konzervativni harmonijski oscilator na svom izlazu generiše dva kvadratura signala amplitude A , nominalne frekvencije ω_0 i početne faze φ_0 (zavise od početnih uslova), i da bi mogao da ima ulogu OSG-a u SRF-PLL strukturi. Da bi se promjenljive stanja x_1 i x_2 harmonijskog oscilatora podudarile sa signalima $v_{\alpha}(t)$ i $v_{\beta}(t)$ kao kod SOGI dvofaznog generatora, potrebno je strukturu (2) proširiti sa odgovarajućim upravljačkim dejstvom koje će osigurati da se stanja x_1 i x_2 podudare sa referentnim vrijednostima datim sa:

$$\begin{aligned} v_{\alpha}(t) &= A_r \sin(\omega_r t + \varphi_r) \\ v_{\beta}(t) &= A_r \cos(\omega_r t + \varphi_r) \end{aligned} \quad (4)$$

U [12] je predloženo upravljanje sa promjenljivom strukturom tako da sistem (2) poprima oblik:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & \omega_g + u_2 \\ -(\omega_g + u_2) & u_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdje su u_1 i u_2 upravljanja određena shodno teoriji sistema sa promjenljivom strukturom. Očigledno je da upravljanja u_1 i u_2 daju dva stepena slobode da bi se napravila potpuna koincidencija između (3) i (4). Drugim riječima, upravljanje u kliznom režimu je organizovano na presjeku dvije klizne površi $s_1(x_1, x_2)=0$ i $s_2(x_1, x_2)=0$, koje su date sa [12]:

$$\begin{aligned} s_1(x_1, x_2) &= v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 - (x_1^2 + x_2^2) = A_r^2 - A^2 \\ s_2(x_1, x_2) &= 1 - \cos(\varphi_r - \varphi_0) \end{aligned} \quad (6)$$

Koristeći metodu Ljapunova za utvrđivanje stabilnosti sistema upravljanja, određena su upravljanja u_1 i u_2 kao:

$$\begin{aligned} u_1 &= \alpha_1 \operatorname{sgn}(s_1(x_1, x_2)) \\ u_2 &= \alpha_2 \operatorname{sgn}(s_2(x_1, x_2)) \end{aligned} \quad (7)$$

Vrijednosti parametara α_1 i α_2 rigorozno su određena i data u [12].

Ukoliko su zadovoljeni uslovi egzistencije kliznog režima, dinamičko ponašanje parametara harmonijskog oscilatora (5) može se opisati sa:

$$\begin{aligned} \dot{A}_r &= \alpha_1 A_r \operatorname{sgn}[s_1(x_1, x_2)], \\ \dot{\varphi}_r &= \omega_r + \alpha_2 \operatorname{sgn}[s_2(x_1, x_2)] \end{aligned} \quad (8)$$

Iz posljednje jednačine je evidentno da opisano upravljanje omogućava nezavisno podešavanje brzine dostizanja stacionarnih referentnih vrijednosti amplitude i faze opisanog VS-OSG-a, što ga potencijalno čini superiornijim u odnosu na DC-SOGI.

III. REZULTATI SIMULACIJA

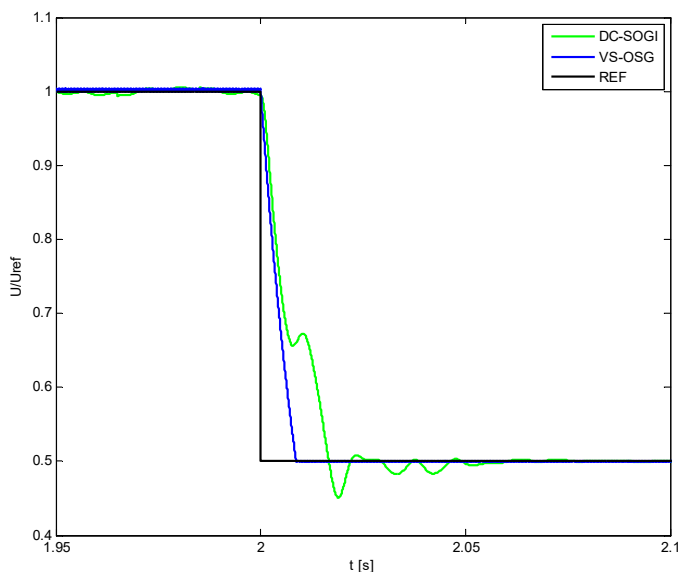
PLL strukture čine sastavni dio upravljačkih struktura pretvarača spojenih na mrežu, kao što su npr. fotonaponski invertori. U takvim primjenama PLL strukture potrebno je da se provjere njene performanse, sa aspekta brzine sinhronizacije, detekcije ostrvskog režima rada, abnormalnih naponskih uslova mreže, itd., a sve to da bi fotonaponski inverter zadovoljio zahtjeve standarda koji propisuju uslove spajanja takvih uređaja sa mrežom. U te standarde ubrajaju se IEEE 1547 [15], IEC 61727 [16], IEC 61000-3-2:2014 [17].

Poređenje performansi jednofaznih SRF-PLL struktura, sa DC-SOGI i VS-OSG blokom za generisanje kvadrature signala, izvršene su u Matlab/Simulink-u. U Tabeli 1 date su promjene parametara mreže, koje su propisane navedenim standardima, pri kojima su dobijeni odzivi SRF-PLL struktura. Prilikom simulacija korišćene su skalirane vrijednosti napona mreže u odnosu na njenu referentnu vrijednost ($U_g = 230$ V).

TABELA I. PROMJENE PARAMETARA MREŽE ZA OCJENU DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA SRF-PLL STRUKTURA SA DC-SOGI I VS-OSG DVOFAZNYM GENERATORIMA

Parametri mreže	Propisano maksimalno vrijeme djelovanja
Napon	
$U < 50\%$	0.1 s
$50\% \leq U \leq 85\%$	2 s
$85\% \leq U \leq 110\%$	-
$110\% \leq U \leq 135\%$	2 s
$135\% < U$	0.05 s
Frekvencija	
$49 \text{ Hz} \leq f \leq 51 \text{ Hz}$ (IEC 61727)	0.2 s
$47 \text{ Hz} \leq f \leq 51 \text{ Hz}$ (Danska)	1.5 s/0.5 s
Skok faze	
$-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$	-
Jednosmjerna komponenta	
$1\% (0.5\%)*I_{\text{nom}}$	

SFR-PLL strukture su prvo testirane pri skokovitom padu mrežnog napona sa referentne vrijednosti 1 na 50% te vrijednosti. Dobijeni odzivi prikazani su na Sl. 2.

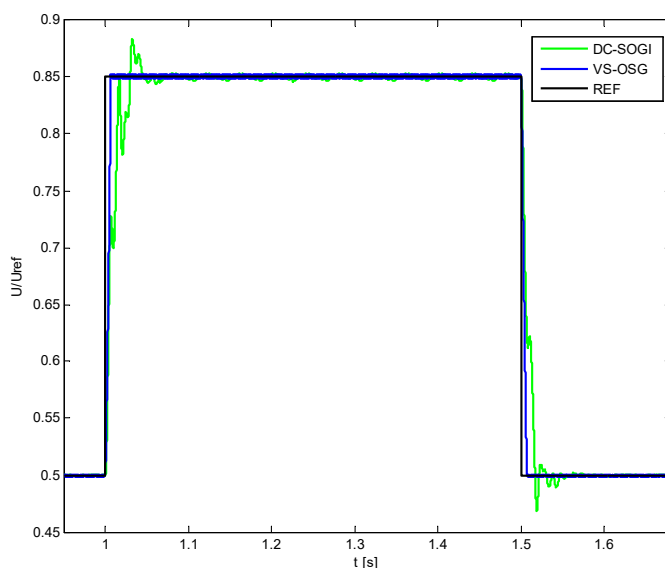


Slika 2. Odzivi SRF-PLL strukture pri skokovitom padu mrežnog napona sa referentne vrijednosti 1 na 50%.

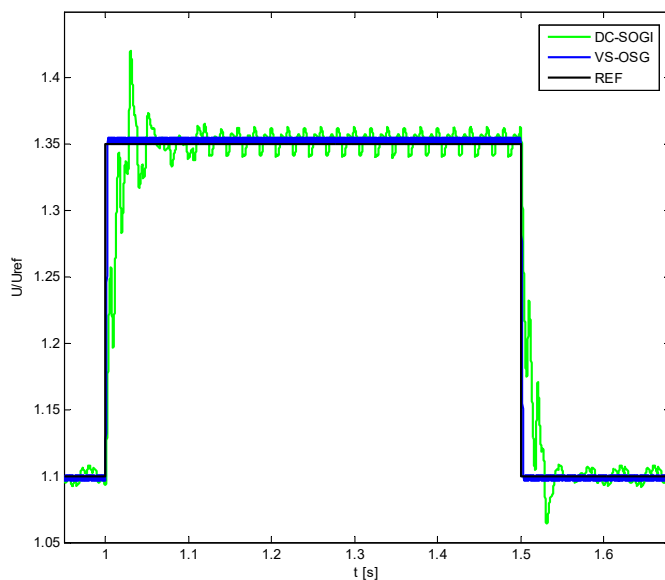
Na osnovu odziva može se zaključiti za iste vrijednosti parametara filtra petlje (PI regulator) estimirana vrijednost mrežnog napona kod SRF-PLL strukture sa VS-OSG ima aperiodski odziv pri skokovitom poremećaju napona mreže, što je svakako prednost pomenute strukture. Takav tip odziva se mogao naslutiti na osnovu jednačine (8) kojom je određeno ponašanje VS-OSG dvofaznog generatora. Takođe, na osnovu odziva estimirane vrijednosti mrežnog napona kod SRF-PLL strukture sa DC-SOGI blokom, može se zaključiti da se

očigledno radi o nelinearnom sistemu i da odzivi zavise od amplitude promjene mrežnog napona, što će biti i pokazano u nastavku rada. Sa aspekta brzine dostizanja stacionarnog stanja, obje strukture zadovoljavaju uslove date u Tabeli 1.

Na Sl. 3 i Sl. 4 prikazani su odzivi estimirane vrijednosti mrežnog napona SRF-PLL strukture pri skokovitoj promjeni napona mreže sa 50% na 85% referentne vrijednosti i obrnuto, odnosno promjeni napona mreže sa 110% na 135% referentne vrijednosti. Zaključci su identični kao i u prethodnom slučaju. I u ovom dijapazonu promjene mrežnog napona obje strukture zadovoljavaju uslove pomenutih standarda, sa aspekta brzine reagovanja.



Slika 3. Odzivi SRF-PLL strukture pri skokovitoj promjeni mrežnog napona sa 50% na 85% referentne vrijednosti, i obrnuto.

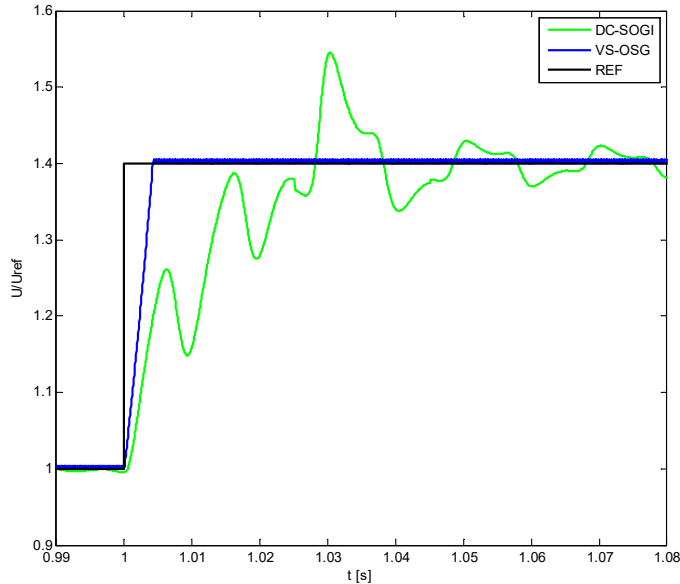


Slika 4. Odzivi SRF-PLL strukture pri skokovitoj promjeni mrežnog napona sa 110% na 135% referentne vrijednosti.

Takođe, sa Sl. 4 uočljivo je da estimirana vrijednost mrežnog napona kod SRF-PLL strukture sa DC-SOGI

dvofaznim generatorom ima talasnost u stacionarnom stanju, a uzrok tome je nejednakost amplituda signala $v_a(t)$ i $v_\beta(t)$ na izlazu iz DC-SOGI-a. Detaljna analiza pomenutog problema data je u [18], [19].

Posebno rigorozan zahtjev po brzini odziva PLL strukture je na skokovite promjene mreznog napona preko 135% referentne vrijednosti. Odgovarajući odzivi dati su na Sl. 5.

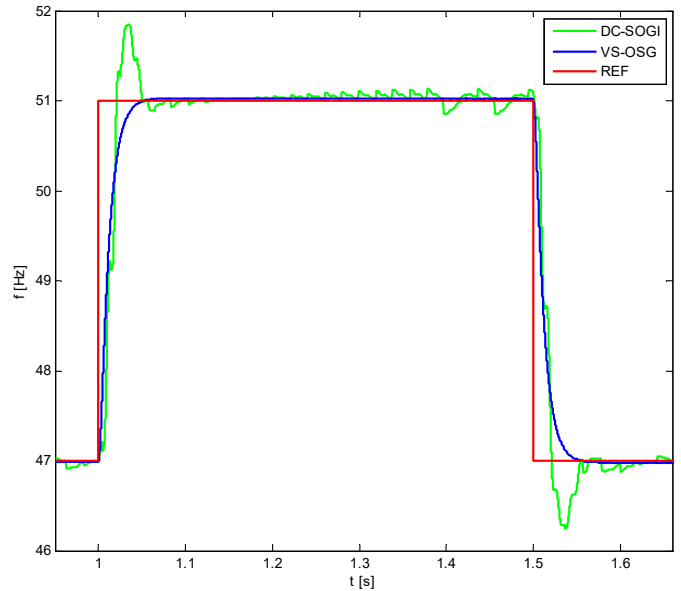


Slika 5. Odstivi SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni mreznog napona sa referentne na 140% referentne vrijednosti.

Sa Sl. 5 je evidentno da estimirana vrijednost mreznog napona kod SRF-PLL strukture sa DC-SOGI blokom tek nakon 0.08 s ulazi u stacionarno stanje sa talasnošću čiji je uzrok već apostrofirano u ovom radu, pa stoga ova PLL struktura u fotonaponskom invertoru ne bi se mogla iskoristiti za detekciju prenapona preko 135% referentne vrijednosti prema standardu IEC 61727. S druge strane, estimirana vrijednost mreznog napona kod SRF-PLL strukture sa VS-OSG ima aperiodski odziv i ulazi u stacionarno stanje za svega 0.005 s, što je znatno brže u odnosu na vrijeme definisano pomenutim standardom.

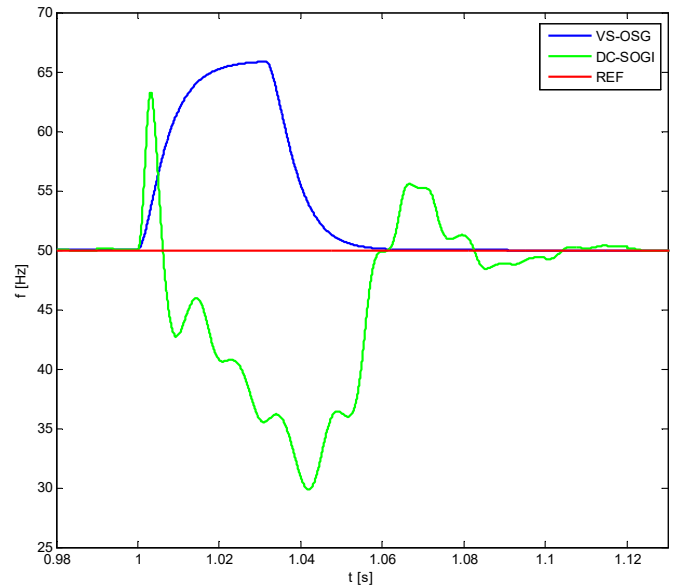
Nakon simulacionih testiranja ponašanja pomenutih SRF-PLL struktura na skokovite promjene mreznog napona, izvršena su testiranja SRF-PLL struktura na skokovite promjene mrežne frekvencije, prema Tabeli 1. Dobijeni odzivi SRF-PLL struktura prikazani su na Sl. 6.

SRF-PLL struktura sa VS-OSG dvofaznim generatorom u slučaju skokovite promjene mrežne frekvencije ima aperiodski odziv u prelaznom režimu, kao što je to bio slučaj i pri skokovitim promjenama mreznog napona. Ovo je već diskutovano u ovom radu, shodno jednačinama (8). S druge strane, SRF-PLL struktura sa DC-SOGI dvofaznim generatorom ima lošije ponašanje u prelaznom režimu i talasnost u stacionarnom stanju, koja je objašnjena u [18], [19].

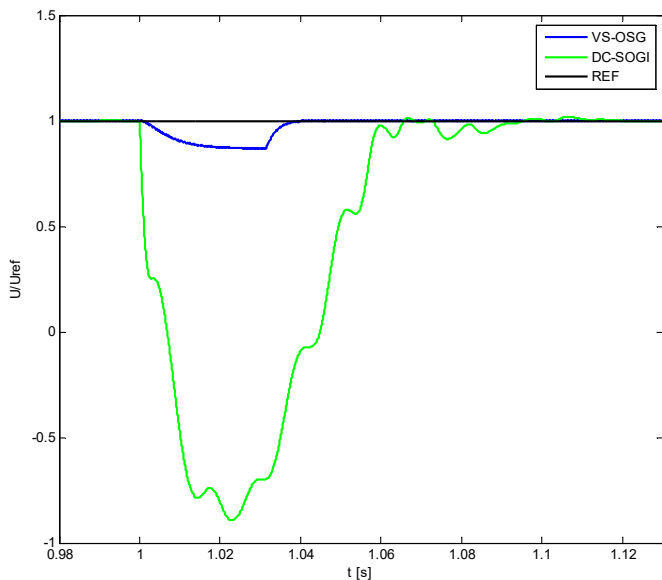


Slika 6. Odstivi SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni mrežne frekvencije sa 47 Hz na 51 Hz.

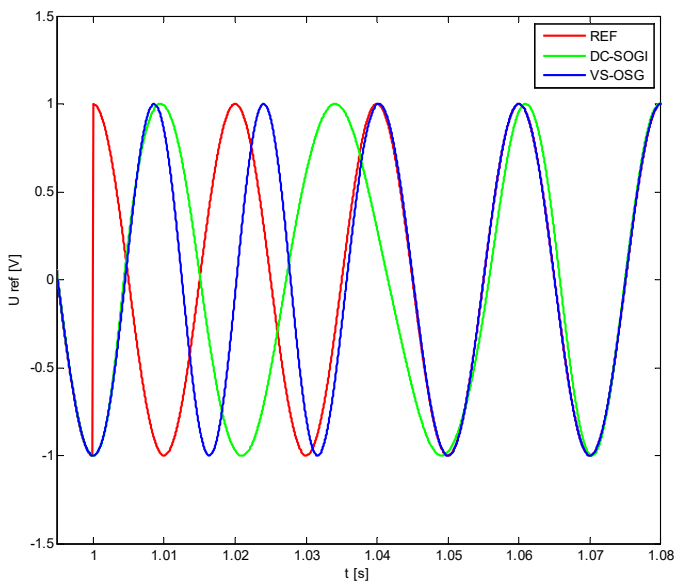
Takođe, od interesa je bilo provjeriti odziv SRF-PLL struktura pri skokovitim promjenama faze u ulaznom mrežnom naponu. Izvršene su simulacije ponašanja SRF-PLL struktura za kritični slučaj skokovite promjene faze mreznog napona sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$ rad, pri nominalnoj frekvenciji mreže od 50 Hz. Odgovarajući odzivi prikazani su na Sl. 7, Sl. 8 i Sl. 9, respektivno.



Slika 7. Estimirana mrežna frekvencija (50 Hz) na izlazu SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni faze mreznog napona sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$ rad.



Slika 8. Estimirana referentna normalizovana vrijednost mrežnog napona na izlazu SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni faze mrežnog napona sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$ rad.

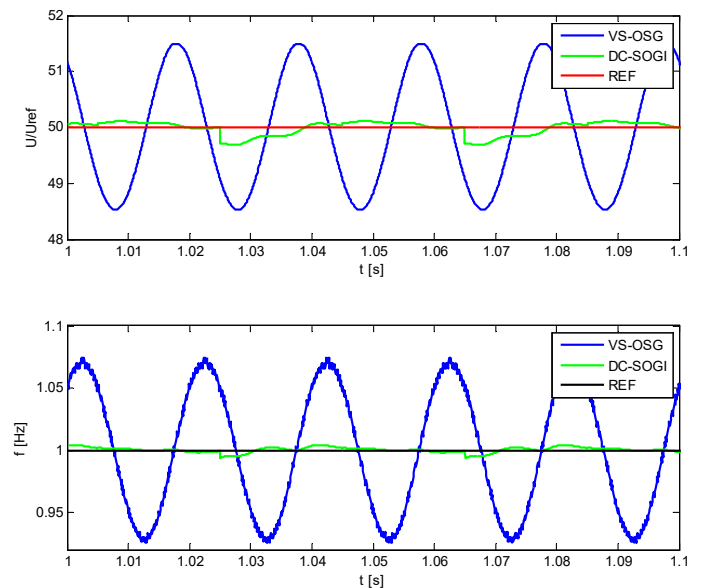


Slika 9. Brzina sinhronizacije SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni faze mrežnog napona sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$ rad.

Na Sl. 7 prikazane su dinamičke promjene u estimiranoj mrežnoj frekvenciji (50 Hz), pri skokovitoj promjeni faze mrežnog napona. Za slučaj SRF-PLL struktura sa VS-OSG dvofaznim generatorom, trajanje poremećaja u estimiranoj mrežnoj frekvenciji je svega 0.07 s i duplo je kraće nego u slučaju SRF-PLL struktura sa DC-SOGI dvofaznim generatorom. Na Sl. 8 prikazane su promjene u estimiranoj referentnoj normalizovanoj vrijednosti mrežnog napona na izlazu SRF-PLL struktura pri skokovitoj promjeni faze mrežnog napona. Za slučaj SRF-PLL struktura sa VS-OSG, trajanje poremećaja je svega 0.05 s i ponovo je dosta manje nego kod SRF-PLL struktura sa DC-SOGI. Takođe, sa Sl. 8 je uočljivo da je amplituda poremećaja u estimiranoj referentnoj

normalizovanoj vrijednosti mrežnog napona kod SRF-PLL struktura sa DC-SOGI višestruko veća nego u slučaju SRF-PLL struktura sa VS-OSG, gdje iznosi svega oko 13% normalizovane vrijednosti mrežnog napona. Na Sl. 9 prikazana je brzina sinhronizacije za obje SRF-PLL struktura sa referentnim mrežnim naponom pri skokovitoj promjeni faze mrežnog napona sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$ rad. SRF-PLL struktura sa VS-OSG uspijeva da se potpuno sinhronizuje sa referentnim mrežnim naponom za oko 0.045 s, što iznosi negdje dvije i po periode mrežnog napona (50 Hz), dok SRF-PLL strukturi sa DC-SOGI za sinhronizaciju treba oko 0.072 s, odnosno negdje oko tri i po periode mrežnog napona.

Kao posljednja performansa SRF-PLL struktura, testirana je njihova osjetljivost na pojavu jednosmjerne komponente u mjerenom mrežnom naponu, a koja se može preslikati u neželjenu jednosmjernu komponentu u sinusnoj struji koju fotonaponski inverter daje u mrežu. Naime, ova jednosmjerna komponenta struje je ograničena prema standardu IEC 61727 na 1%, a prema standardu IEEE 1547 na 0.5% nazivne struje fotonaponskog invertora. Dakle, pošto PLL struktura na svom izlazu generiše sinusni signal koji predstavlja referentnu struju fotonaponskog invertora, to znači da se u ovoj referentnoj vrijednosti ne smije pojaviti jednosmjerna komponenta veća od one koja je propisana pomenutim standardima. Na Sl. 10 prikazani su odzivi na izlazu SRF-PLL struktura za 5% umetnute jednosmjerne komponente u referentnom mrežnom naponu.



Slika 10. Estimirane vrijednosti mrežnog napona i frekvencije na izlazu SRF-PLL struktura pri 5% umetnute jednosmjerne komponente u mjerenom mrežnom naponu.

Očigledno je da postojanje jednosmjerne komponente u mjerenom mrežnom naponu izaziva talasnost u estimiranim vrijednostima mrežnog napona i frekvencije kod SRF-PLL struktura sa VS-OSG, dok to nije slučaj kod SRF-PLL struktura sa DC-SOGI, jer DC-SOGI ima sposobnost eliminacije jednosmjerne komponente u mjerenom mrežnom naponu na ulazu u SRF-PLL strukturu [11].

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je uporedna analiza performansi jednofaznih SRF-PLL struktura sa DC-SOGI i VS-OSG dvofaznim generatorima, koje mogu predstavljati dio upravljačke strukture fotonaponskih invertora i drugih uređaja koji rade sinhrono sa mrežom. Rezultati analize su pokazali da SRF-PLL struktura sa VS-OSG ima superiornije performanse od SRF-PLL strukture sa DC-SOGI. Drugim riječima dobijeni odzivi estimiranih vrijednosti parametara mreže su pokazali da prelazni procesi kod SRF-PLL strukture sa VS-OSG su aperiodski i kraće traju. Ovakvi rezultati su bili i očekivani imajući u vidu da ova SRF-PLL struktura za razliku od SRF-PLL struktura sa DC-SOGI dvofaznim generatorom ima dva dodatna parametra za podešavanje brzine i kvaliteta prelaznog procesa. Jedini uočeni nedostatak SRF-PLL strukture sa VS-OSG je nemogućnost potiskivanja jednosmjerne komponente koja se može pojaviti u mjerenom mrežnom naponu na ulazu SRF-PLL strukture. Prevazilaženju ovog nedostatka biće posvećena pažnja u daljim istraživanjima.

LITERATURA

- [1] R. M. Santos Filho, P. F. Seixas, P. C. Cortizo, L. A. B. Torres and A. F. Souza, "Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 8, pp. 2923-2932, Aug. 2008. doi: 10.1109/TIE.2008.924205.
- [2] T. Thacker, D. Boroyevich, R. Burgos and F. Wang, "Phase-Locked Loop Noise Reduction via Phase Detector Implementation for Single-Phase Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 6, pp. 2482-2490, June 2011. doi: 10.1109/TIE.2010.2069070.
- [3] S. Golestan, M. Monfared, F. D. Freijedo and J. M. Guerrero, "Design and Tuning of a Modified Power-Based PLL for Single-Phase Grid-Connected Power Conditioning Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 8, pp. 3639-3650, Aug. 2012. doi: 10.1109/TPEL.2012.2183894.
- [4] Y. Han, M. Luo, X. Zhao, J. M. Guerrero and L. Xu, "Comparative Performance Evaluation of Orthogonal-Signal-Generators-Based Single-Phase PLL Algorithms—A Survey," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 5, pp. 3932-3944, May 2016. doi: 10.1109/TPEL.2015.2466631.
- [5] R. Zhang, M. Cardinal, P. Szczytny and M. Dame, "A grid simulator with control of single-phase power converters in D-Q rotating frame," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), 2002, pp. 1431-1436 vol.3. doi: 10.1109/PSEC.2002.1022377.
- [6] M. Saitou and T. Shimizu, "Generalized theory of instantaneous active and reactive powers in single-phase circuits based on Hilbert transform," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), 2002, pp. 1419-1424 vol.3. doi: 10.1109/PSEC.2002.1022375.
- [7] K. De Brabandere et al., "Design and Operation of a Phase-Locked Loop with Kalman Estimator-Based Filter for Single-Phase Applications," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, 2006, pp. 525-530. doi: 10.1109/IECON.2006.348099.
- [8] B. Saritha and P. A. Jankiraman, "Observer based current control of single-phase inverter in DQ rotating frame," 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, New Delhi, 2006, pp. 1-5. doi: 10.1109/PEDES.2006.344427.
- [9] Rae-Young Kim, See-Young Choi and In-Young Suh, "Instantaneous control of average power for grid tie inverter using single phase D-Q rotating frame with all pass filter," 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, 2004, pp. 274-279 Vol. 1. doi: 10.1109/IECON.2004.1433322.
- [10] M. Ciobotaru, R. and F. Blaabjerg, "A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator," 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp. 1-6. doi: 10.1109/PESC.2006.1711988.
- [11] S. Lubura, M. Soja, S. Lale and M. Ikić, "Single-phase phase locked loop with dc offset and noise rejection for photovoltaic inverters," in IET Power Electronics, vol. 7, no. 9, pp. 2288-2299, September 2014. doi: 10.1049/iet-pel.2013.0413.
- [12] B. Veselic, G. Golo and C. Milosavljevic, "Synchronization of two-phase harmonic oscillator using sliding mode vector control," 2000 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521), St. Petersburg, 2000, pp. 471-474 vol.3. doi: 10.1109/COC.2000.874297.
- [13] B. Z. Kaplan and S. T. Bachar, "A simple oscillator based on conservative models for generating three phase waveforms," in Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 10, pp. 1446-1448, Oct. 1979. doi: 10.1109/PROC.1979.11484.
- [14] C. Milosavljevic, G. Golo and B. Veselic, "Sliding mode harmonic oscillators," 2000 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521), St. Petersburg, 2000, pp. 160-161 vol.1. doi: 10.1109/COC.2000.873545.
- [15] IEEE Std 1547-2003: "IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," 2003, pp. 0_1-16, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94285.
- [16] IEC 61727-2004: "Photovoltaic (PV) systems – characteristics of the utility interface".
- [17] IEC 61000-3-2:2014: "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions".
- [18] M. R. Krstić, S. Lubura, S. Lale, M. Šoja, M. Ikić and D. Milovanović, "Analysis of discretization methods applied on DC-SOGI block as part of SRF-PLL structure," 2016 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/INDEL.2016.7797771.
- [19] S. Lale, M. Šoja, M. Ikić, D. Milovanović, "Uporedna analiza metoda diskretizacije dvofaznog generatora kao dijela jednofazne faznozaključanepetlje," XV međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2016. Vol. 15, No. ELS-9, pp. 45-50, ISBN 978-99955-763-9-4, 2016.

ABSTRACT

The key component of single-phase synchronous reference frame phase locked loop (SRF-PLL) structure, which is used for estimation of grid voltage parameters and synchronization of power electronics converters with the grid, is a two-phase generator. In this paper a comparative analysis of two different SRF-PLL structures, one with DC-SOGI (Direct Current - Second Order Generalized Integrator) and a second with VS-OSG (Variable Structure - Orthogonal Signal Generator), as two phase generator, is given. Simulation results of behavioral of SRF-PLL structures in steady and transient states are shown. The VS-OSG as nonlinear structure for generating quadrature signals has been superior, that is expected having in the mind that SRF-PLLs are inherently nonlinear structures.

COMPARISON OF THE PERFORMANCES OF THE SINGLE-PHASE SRF-PLL STRUCTURES WITH DC-SOGI AND VS-OSG TWO-PHASE GENERATOR FOR GENERATING QUADRATURE SIGNALS

Slobodan Lubura, Srđan Lale, Milomir Šoja,
Čedomir Milosavljević