

DOI: 10.46793/CIGRE37.C2.16

C2.16**POBOLJŠANJE STABILNOSTI GRID-FOLLOWING INVERTORA KOD OBNOVLJIVIH
IZVORA ENERGIJE****IMPROVING THE STABILITY OF GRID-FOLLOWING INVERTERS IN RENEWABLE
ENERGY SOURCES****Jasna Dragosavac, Žarko Janda, Ilija Klasnić, Anita Mijajlović***

Kratak sadržaj: Sve veće učešće obnovljivih izvora energije (OIE) u proizvodnom miksu modernih elektoroenergetskih sistema zahteva napredne tehnologije upravljanja energetskim pretvaračima koje i omogućavaju njihovu pouzdanu integraciju. OIE su priključeni na mrežu preko invertora koji imaju ključnu ulogu u ovoj integraciji i poznavanje njihovih različitih tipova, njihovih prednosti i mana, omogućava efikasno upravljanje što doprinosi povećanju stabilnosti celokupnog sistema. U situaciji kada je više invertora povezano na mrežu, mogu se javiti razni tipovi nestabilnosti, sa rasponom frekvencija od niskih do visokih. U radu se razmatraju fenomeni nestabilnosti koje unose Grid-Following invertori u sistemu sa velikim udelom OIE (vetroelektrane i solarne elektrane). Rad pruža uvid u prednosti i mane ovog tipa invertora, u odnosu na Grid-Forming invertore, i njihovog uticaja na stabilnost sistema kao i na intermitentan način rada OIE. Predložena su moguća unapređenja u načinu upravljanja ovim pretvaračima uvođenjem dodatnih upravljačkih kola koja emuliraju sinhronverter, što potvrđuju prikazani rezultati simulacija.

Ključne reči: *Grid-Following inverter, Grid-Forming inverter, stabilnost sistema, upravljačka struktura, simulacije*

Abstract: The increasing participation of renewable energy sources (RES) in the production mix of modern electricity systems requires advanced converter control technologies, which enable their reliable integration. RES are connected to the grid via inverters, which play a crucial role in this integration. Understanding the different types of inverters, their advantages and disadvantages, allows for efficient management, contributing to the increased stability of the overall system. When multiple inverters are connected to the grid, various types of instability can occur, with frequency ranges from low to high. This paper discusses the instability phenomena introduced by Grid-Following inverters in systems with a high share of RES (wind farms and solar power plants). The paper provides insight into the advantages and disadvantages of this type of inverter compared to Grid-Forming inverters, their impact on

* Jasna Dragosavac, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, jasna.dragosavac@ieent.org

Žarko Janda, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, zarko.janda@ieent.org

Ilija Klasnić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, ilija.klasnic@ieent.org

Anita Mijajlović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, anita.mijajlovic@ieent.org

system stability, and the intermittent operation of RES. Possible improvements in managing these converters are proposed by introducing additional control circuits that emulate a synchronverter, as confirmed by the simulation results presented.

Key words: *Grid-Following inverter, Grid-Forming inverter, stability of the system, control structure, simulations*

1 UVOD

Obnovljivi izvori energije (OIE), u koje se ubrajaju solarne i vetroelektrane, su povezane na elektroenergetski sistem preko energetske pretvarača. OIE koji su na mrežu povezani preko invertora (IBR – *Inverter based resources*) imaju sve veći udeo u modernim elektroenergetskim sistemima bogatim upravo OIE. Stoga, razumevanje prednosti i mana odnosno ograničenja različitih tipova invertora znatno olakšava efikasno upravljanje OIE što doprinosi stabilnom i održivom sistemu napajanja. U osnovi postoje dve grupe invertora koji su povezani na mrežu, a razlike se ogledaju u različitim veličinama koje se regulišu, ponašanju pri radu u uslovima priključenja na mrežu pri različitim vrednostima impedanse mreže kao i u načinu sinhronizacije sa mrežom:

- Invertori koji prate mrežu (GFLI - *Grid-following inverter*)
- Invertori koji formiraju mrežu (GFMI - *Grid-forming inverter*)

Invertori koji prate mrežu su projektovani da prate napon mreže i injektuju određenu struju u mrežu. Snaga ovih invertora se reguliše injektiranjem određene struje u mrežu pa se oni mogu aproksimirati strujno kontrolisanim izvorom sa velikom impedansom u paraleli.

U radu se proučavaju problemi sa stabilnošću koje unose invertori koji prate mrežu kada su povezani na mrežu preko impedanse velike vrednosti. Da bi se ovi invertori savršeno sinhronizovali sa mrežnim naponom, potrebno je identifikovati ugao mrežnog napona kako bi se proračunao fazni pomerač struje za injektovanje zadate aktivne i reaktivne snage invertora. Informacija o uglu mrežnog napona se dobija pomoću jedinice za sinhronizaciju tj. najčešće preko fazno sinhronizovane petlje (PLL - *phase locked loops*). Međutim, upravo je ona izvor problema sa stabilnošću, naročito u slučajevima slabe mreže sa velikom vrednošću impedanse [1].

U radu je predložena unapređena upravljačka struktura invertora koji prate mrežu koja se zasniva na konceptu virtuelnog sinhronog generatora (VSG - *Virtual Synchronous Generator*) – sinhronverter [2]. Praktično, ova metoda se zasniva na oponašanju rada sinhronog generatora, odnosno, dinamika GFL invertora koja se vidi od strane mreže ekvivalentna je dinamici sinhronog generatora. Ispitan je uticaj promene impedanse mreže na stabilnost GFL invertora i određena su ograničenja u aktivnoj snazi koju GFL invertori injektuju u mrežu. Prikazani su rezultati simulacija za različite vrednosti reference aktivne snage i vrednosti impedanse mreže na osnovu kojih se može zaključiti da se sa povećanjem impedanse mreže smanjuje granica stabilnosti. Dodatno, razmatrano je i predloženo rešenje upravljanja koje se bazira na konceptu VSG-a u okviru kojeg su dati predlozi za podešenje virtuelne inercije i faktora prigušenja u cilju poboljšanja stabilnosti. Rezultati simulacija potvrđuju da se optimalnim izborom vrednosti

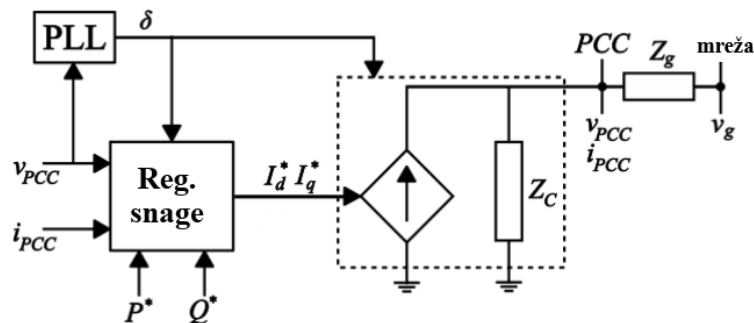
parametara virtuelne inercije i faktora prigušenja može dobiti stabilan odziv čak i u slučajevima velike vrednosti reference aktivne snage invertora i impedanse mreže.

Rad je strukturiran na sledeći način: U prvom poglavlju, **Uvod**, predstavljena je osnovna motivacija i ciljevi istraživanja. Drugo poglavlje, **Grid-Following invertori**, obuhvata opis rada GFL invertora s akcentom na opis jedinice za sinhronizaciju sa mrežnim naponom. U trećem poglavlju, **Virtuelni sinhroni generator**, dat je kratak opis VSG-a, uz opis unapređenog modela VSG-a u cilju unapređenja upravljačke strukture ovih invertora. U četvrtom poglavlju, **Rezultati**, prikazani su rezultati simulacija koji imaju za cilj da ukažu na razlike u odzivu GFL invertora sa P-Q i VSG upravljanjem. Konačno, u petom poglavlju, **Zaključak**, sumirani su ključni zaključci istraživanja.

2 GRID-FOLLOWING INVERTORI

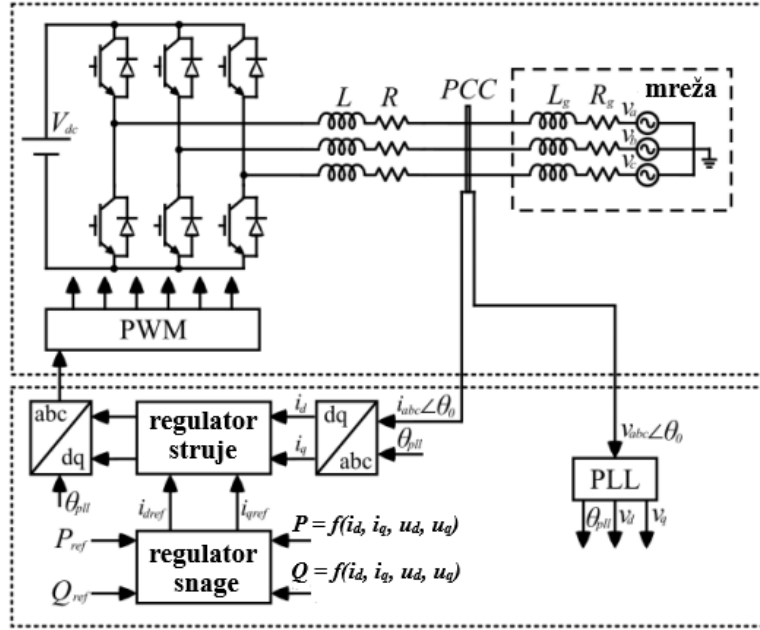
Većina današnjih invertora povezanih na mrežu dizajnirana je tako da prati napon mreže i injektuje odgovarajuću struju u mrežu, zbog čega se nazivaju mrežni invertori. Kod ovakvih uređaja, regulacija snage se ostvaruje injektovanjem određene struje u mrežu, što omogućava da se inverter posmatra kao strujni izvor velike impedanse priključene paralelno [3].

Jedinica za sinhronizaciju predstavlja ključnu komponentu GFL invertora, čija je uprošćena šema prikazana na Slici 1. Njena funkcija je prikupljanje podataka o uglu napona mreže, koji se zatim koristi za izračunavanje potrebnog faznog pomeraja struja kako bi se u mrežu injektirala željena snaga. PLL je rešenje koje se standardno koristi za potrebe sinhronizacije na mrežu, ali može negativno uticati na stabilnost invertora [4].



Slika 1: Aproksimacija GFL invertora

Na Slici 2 prikazan je jedan od najčešće primenjivanih kontrolnih algoritama za GFL invertore. Upravljanje se vrši u dq koordinatnom sistemu, koji je usklađen sa uglom mrežnog napona V_{PCC} , generisanim pomoću PLL-a.



Slika 2: P-Q kontrolni algoritam GFL invertora

3 VIRTUELNI SINHRONI GENERATOR

Virtuelni sinhroni generatori (VSG) su tehnologija koja simulira ponašanje tradicionalnih sinhronih generatora u elektroenergetskim mrežama. Njihova glavna uloga je da obezbede stabilnost frekvencije i napona u mreži, posebno u sistemima sa velikim udelom OIE. VSG koriste algoritme za emulaciju inercije, što omogućava da se ponašaju kao fizičke mašine koje reaguju na promene u mreži.

3.1 Unapređen model virtuelnog sinhronog generatora

Na Slici 3 prikazan je blok dijagram unapređenog modela VSG-a. Razlike u formiranju GFL i GFM invertora ilustrovane su crvenom i plavom bojom na Slici 3, respektivno. Kod formiranja GFL-a, umesto nominalnog koristi se prvi izvod ugla napona mreže dobijen pomoću PLL-a. Dodatno, petlja naponskog statizma se zanemaruje u slučaju GFL-a. Koeficijent naponskog statizma D_q predstavlja odnos promene reaktivne snage ΔQ i promene napona Δv , odnosno:

$$D_q = -\frac{\Delta Q}{\Delta v} \quad (3.1)$$

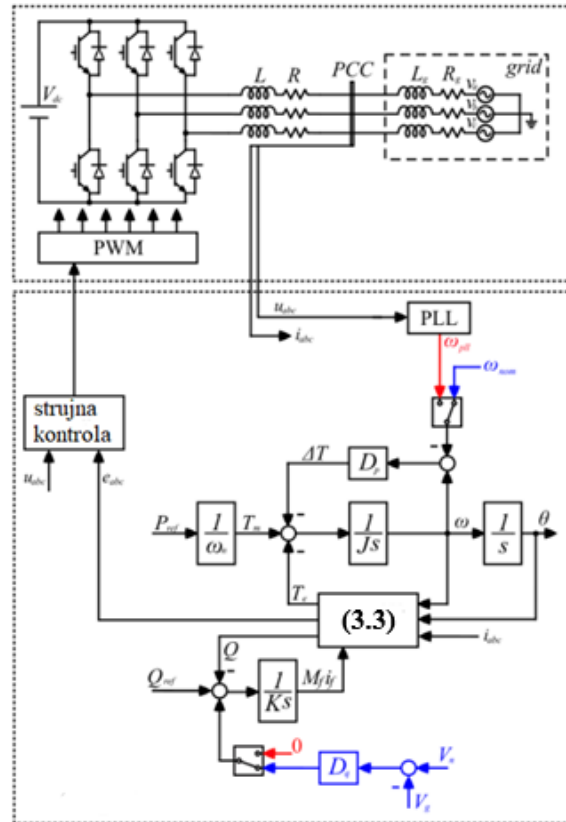
Značajan mehanizam za ravnomernu raspodelu opterećenja kod SG je promena snage koja se isporučuje mreži u skladu sa promenom frekvencije mreže. Ta kontrolna petlja naziva se statizam (*frequency droop*). Konstantna D_p (faktor prigušenja) predstavlja zbir virtuelnog faktora prigušenja i koeficijenta statizma, gde je drugi sabirak značajno veći. Deljenjem promene ukupnog obrtnog momenta ΔT koji deluje na imaginarni rotor sa promenom ugaone učestanosti $\Delta \theta$ dobija se:

$$D_p = -\frac{\Delta T}{\Delta \theta} \quad (3.2)$$

Parametar J označava virtuelni moment inercije. U narednom poglavlju prikazani su rezultati uticaja ovih parametara na stabilnost invertora, sa poređenjem između implementacija GFM-a

i GFL-a. Simulacija je izvršena za različite vrednosti reference aktivne snage i poremećaja u mreži, pri čemu se variraju parametri D_p , J i L_m , gde L_m označava induktivnost mreže. Set jednačina (3.3) sa Slike 3 predstavljen je sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}
 e_a &= -M_f i_f \sin(\theta_d) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d) \\
 e_b &= -M_f i_f \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 e_c &= -M_f i_f \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \\
 T_e &= p M_f i_f [i_a \sin(\theta_d) + i_b \sin\left(\theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right)] \\
 Q &= \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c]
 \end{aligned} \tag{3.3}$$



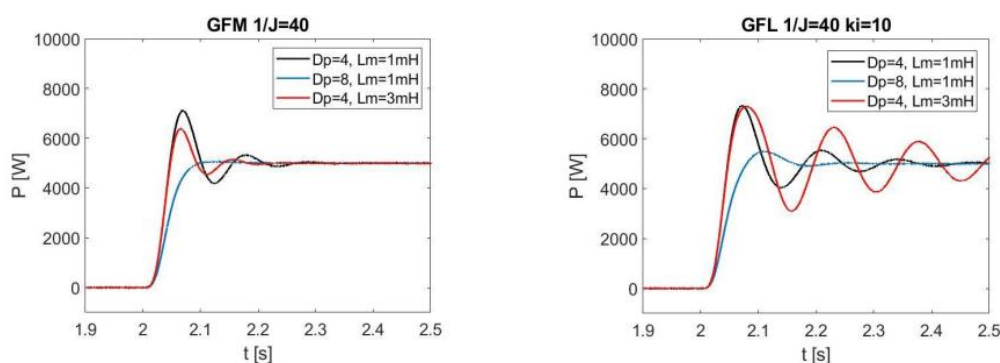
Slika 3: Formiranje upravljačkog signala GFL (crvena) i GFM (plava) invertora koristeći koncept VSG

4 REZULTATI

4.1 Poređenje odziva GFM i GFL invertora realizovanih kao virtuelni sinhroni generator

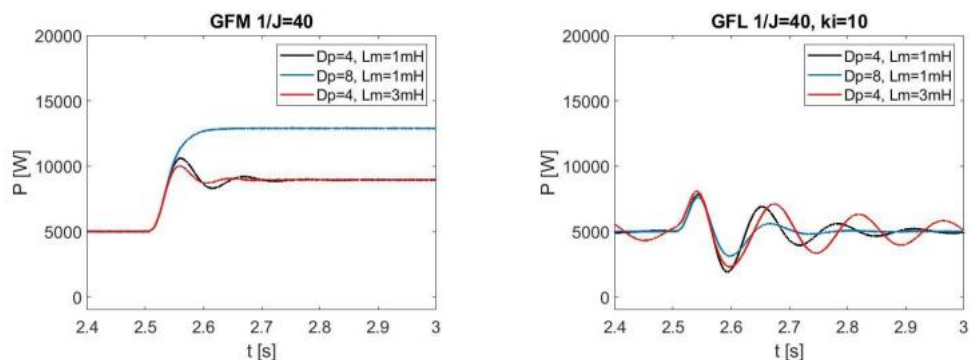
Simulacija je sprovedena korišćenjem softverskog alata Matlab/Simulink. Invertor je povezan na distributivnu mrežu (400 V, 50 Hz) preko LCL filtera, dok je mreža modelovana korišćenjem Tevenenovog generatora. Usvojen je odnos $X/R = 1$ [5]. Simulirane su sledeće promene: u trenutku $t_1 = 2$ s, zadata je referenca aktivne snage od 5 kW invertoru koji je prethodno bio neopterećen. Poremećaj u vidu naglog smanjenja frekvencije napona mreže za 1 % uveden je u trenutku $t_2 = 2.5$ s.

Na Slici 4 prikazani su odzivi na promenu aktivne snage za GFM i GFL invertor, respektivno, za različite vrednosti parametara D_p i L_m . Na osnovu prikazanih odziva na Slici 4 može se zaključiti da povećanje koeficijenta prigušenja D_p rezultuje sporijim i prigušenijim odzivom u oba slučaja. Uticaj promene induktivnosti mreže L_m je različit. Kako se induktivnost mreže povećava, stabilnost GFL invertora se smanjuje zbog nedovoljnog prigušenja odziva. Nasuprot tome, GFM invertor pokazuje stabilniji odziv sa većim vrednostima induktivnosti mreže.



Slika 4: Odziv na step promenu reference aktivne snage GFM invertora (levo) i GFL invertora (desno)

Odziv na poremećaj u vidu smanjenja frekvencije prikazan je na Slici 5. Promena frekvencije mreže ima različit uticaj na dva analizirana tipa invertora. Kod GFM invertora, koji se može aproksimirati kao naponski izvor, radi postizanja regulacije napona i frekvencije, aktivna i reaktivna snaga se menjaju. Na osnovu odziva prikazanih na slici 5 može se zaključiti da se sa smanjenjem učestanosti mreže vrednost aktivne snage povećava, a to povećanje zavisi od parametra D_p (za $D_p = 8$ se dostiže veća vrednost aktivne snage nego za $D_p = 4$). S druge strane, kod GFL invertora, koji se može aproksimirati kao strujni izvor, osnovni cilj je regulisanje snage injektirane u mrežu, dok je podrška mreži sekundarni cilj. Uočava se da se aktivne snage održavaju na zadatim vrednostima i posle poremećaja u mreži.



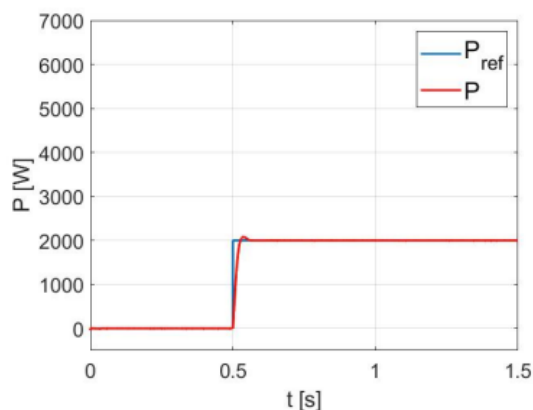
Slika 5: Odziv na step promenu frekvencije mreže GFM invertora (levo) i GFL invertora (desno)

4.2 Poređenje odziva GFL invertora realizovanog standardnim P-Q upravljanjem i korišćenjem modela VSG-a

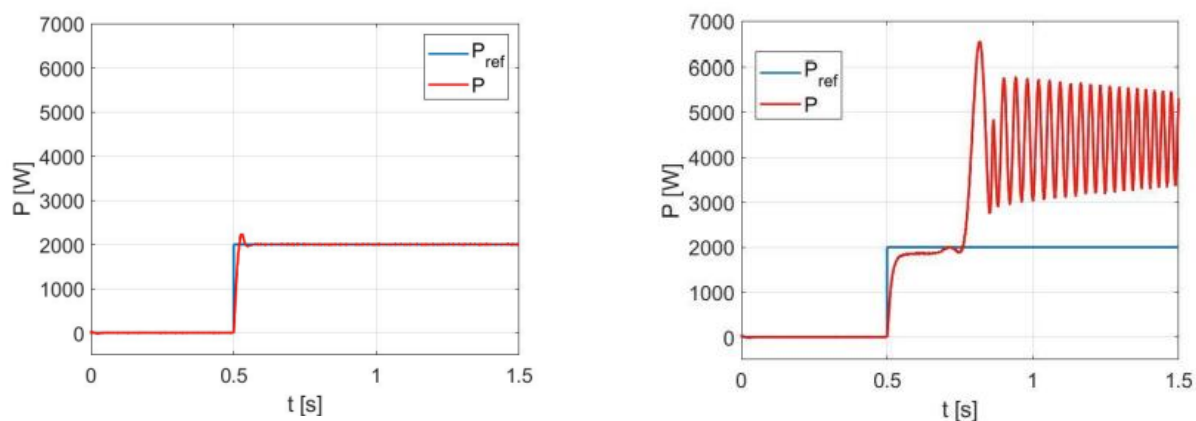
Na Slici 6 su prikazani rezultati simulacija GFL invertora, zasnovanog na standardnom P-Q algoritmu. U trenutku $t = 2$ s, prethodno neopterećenom invertoru postavljena je referentna vrednost aktivne snage P_{ref} . Na Slici 6 prikazan je brz odziv invertora sa malim preskokom, kada je zadata referentna vrednost aktivne snage $P_{ref} = 2$ kW, a induktivnost mreže iznosi $L_m = 0.1$ mH.

Uticaj impedanse mreže na odziv invertora proučavan je kroz promenu otpornosti i induktivnosti mreže, uz održavanje odnosa $\omega L_m/R_m = 1$. Na Slici 7 prikazani su odzivi za impedansu mreže od $L_m = 0.5$ mH i $L_m = 1$ mH, uz referentnu aktivnu snagu od $P_{ref} = 2$ kW. Veća impedansa uzrokuje izraženiji preskok u odzivu, a daljim povećanjem odziv postaje oscilatoran, bez dostizanja zadate vrednosti aktivne snage, što ističe bitan uticaj impedanse mreže na stabilnost invertora.

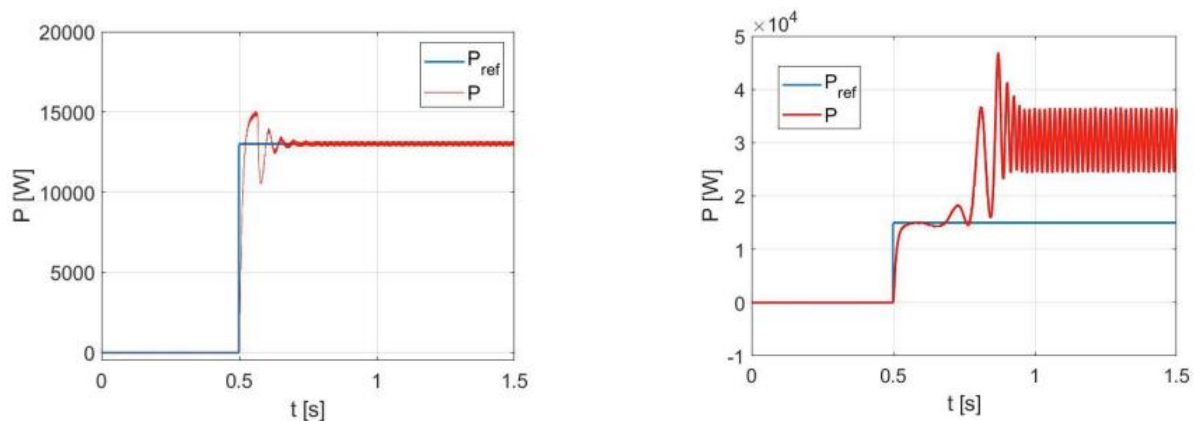
Na Slici 8 analiziran je odziv za različite reference aktivne snage pri impedansi $L_m = 1$ mH. Za $P_{ref} = 13$ kW, odziv postiže stabilno stanje nakon kratkih oscilacija (levo), dok za $P_{ref} = 15$ kW odziv postaje oscilatoran i ne dostiže zadatu vrednost (desno).



Slika 6: Odziv invertora za $P_{ref} = 2$ kW, $L_m = 0.1$ mH

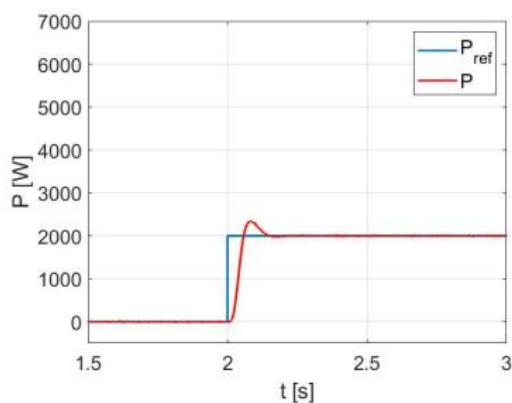


Slika 7: Odziv invertora za $P_{ref} = 2 \text{ kW}$, $L_m = 0.5 \text{ mH}$ (levo), $L_m = 1 \text{ mH}$ (desno)

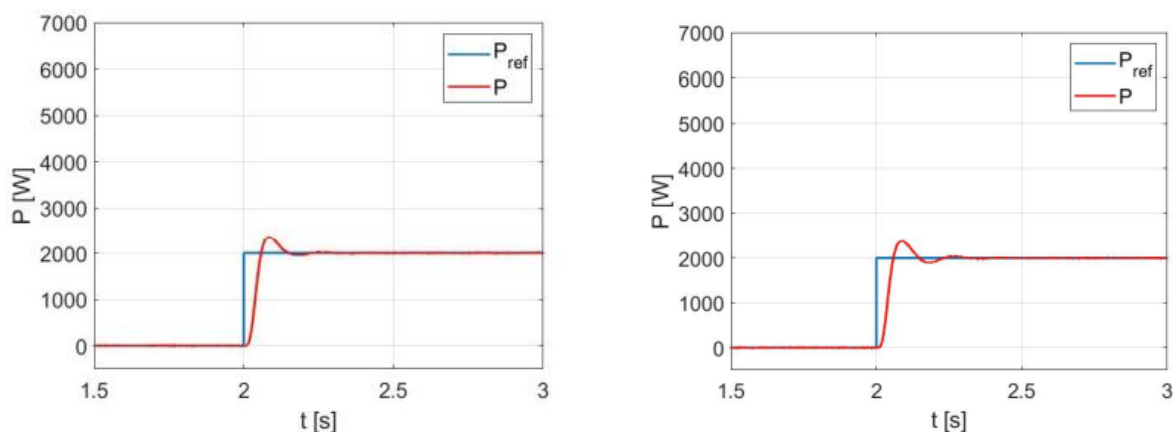


Slika 8: Odziv invertora za $L_m = 0.1 \text{ mH}$, $P_{ref} = 13 \text{ kW}$ (levo), $P_{ref} = 15 \text{ kW}$ (desno)

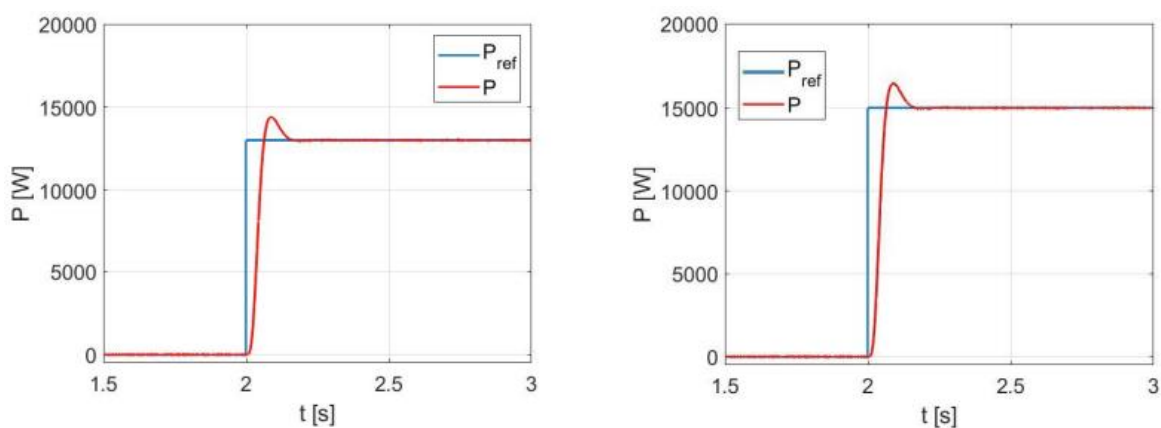
Rezultati simulacija GFL invertora, zasnovanog na konceptu unapređenog VSG-a, prikazani su na slikama 9, 10 i 11, pod istim uslovima kao i u prethodnoj analizi. Iako inverter funkcioniše sporije, uspešno dostiže željenu aktivnu snagu, čak i pri većim vrednostima impedanse mreže i zadate snage, što ga čini pogodnim za mreže sa visokom impedansom i invertore većih snaga.



Slika 9: Odziv VSG invertora za $P_{ref} = 2 \text{ kW}$, $L_m = 0.1 \text{ mH}$

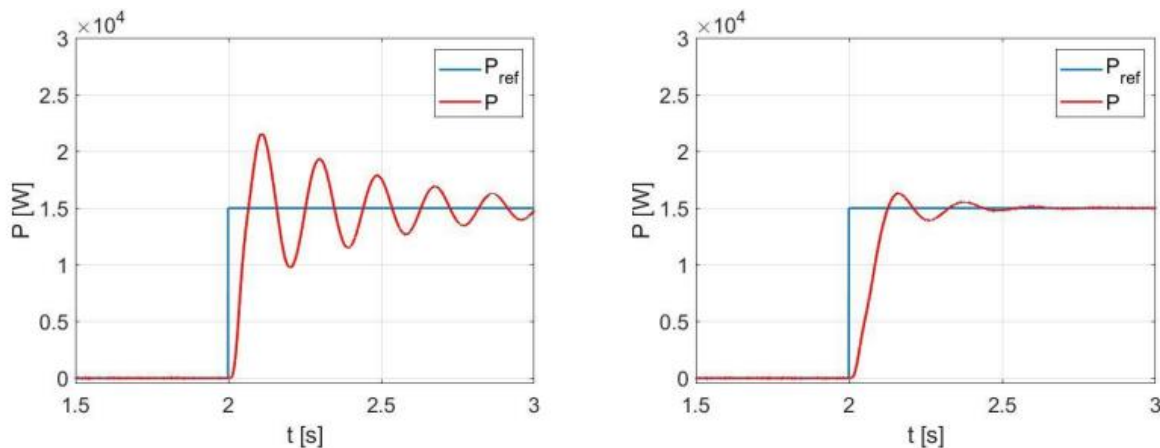


Slika 10: Odziv VSG invertora za $P_{ref} = 2 \text{ kW}$, $L_m = 0.5 \text{ mH}$ (levo), $L_m = 1 \text{ mH}$ (desno)



Slika 11: Odziv invertora za $L_m = 0.1 \text{ mH}$, $P_{ref} = 13 \text{ kW}$ (levo), $P_{ref} = 15 \text{ kW}$ (desno)

Povećanjem koeficijenta D_p , odziv invertora se usporava, ali se oscilacije značajno smanjuju. Na Slici 12 prikazan je odziv invertora za dve različite vrednosti parametra D_p , na osnovu kojih se vidi da i za jako velike vrednosti impedanse mreže i snage inverter može dostići željenu vrednost aktivne snage.



Slika 12: Uticaj parametra D_p na odziv invertora, $D_p = 6$ (levo), $D_p = 16$ (desno)

5 ZAKLJUČAK

Fokus rada je ispitivanje *Grid-following* invertora koristeći unapređeni koncept virtuelnog sinhronog generatora. Kontrolna šema analizirana je putem simulacija, fokusirajući se na uticaj parametara D_p i L_m . Dodatno, analiziran je uticaj pomenutih parametara na odzive *Grid-following* i *Grid-forming* invertora, radi njihovog međusobnog poređenja. Rezultati simulacije pokazuju da pristup VSG-a u upravljačkom algoritmu GFL invertora poboljšava stabilnost u odnosu na standardno upravljanje, čak i pri visokim referentnim vrednostima snage i velikoj impedansi mreže. Dobijeni rezultati mogu poslužiti kao pokazatelj značaja pravilnog odabira parametara pretvarača realizovanih na ovaj način, kako bi se obezbedila optimalna integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem i ubrzao strateški napredak ka zelenoj agendi.

6 LITERATURA

- [1] B. Wen, D. Boroyevich, R. Burgos, P. Mattavelli and Z. Shen, "Analysis of D-Q SmallSignal Impedance of Grid-Tied Inverters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 1, pp. 675-687, Jan. 2016.
- [2] Q. -C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, April 2011.
- [3] D. B. Rathnayake et al., "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," in IEEE Access, vol. 9, pp. 114781-114807, 2021.
- [4] Y. Li, Y. Gu and T. C. Green, "Revisiting Grid-Forming and Grid-Following Inverters: A Duality Theory," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 6, pp. 4541-4554, Nov. 2022.
- [5] Birchfield, A.B.; Schweitzer, E.; Athari, M.H.; Xu, T.; Overbye, T.J.; Scaglione, A.; Wang, Z. A Metric-Based Validation Process to Assess the Realism of Synthetic Power Grids. Energies 2017, 10, 1233