

**PRIMARNA I SEKUNDARNA KONTROLA ZA KOMPENZACIJU NESIMETRIJE NAPONA ZAJEDNIČKE SABIRNICE SADEJSTVOM PRETVARAČA U MIKROMREŽI****PRIMARY AND SECONDARY CONTROL FOR VOLTAGE UNBALANCE COMPENSATION AT THE POINT OF COMMON COUPLING IN A MICROGRID**Aleksandar Džever, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Ovaj rad predstavlja metodu kompenzacije nesimetrije napona zajedničke sabirnice sadejstvom pretvarača energetske elektronike u mikromreži koja radi u ostrvskom režimu. Prikazan je simulacioni model mikromreže sa hijerarhijskom arhitekturom upravljanja, njen rad kada se priključi neuravnotežen potrošač a zatim i dejstvo sekundarne kontrole.

**Ključne reči:** Energetski pretvarači, hijerarhijska arhitektura, centralizovana sekundarna kontrola, kompenzacija neuravnoteženosti napona, mikromreže

**Abstract** – This paper showcases a voltage unbalance compensation method at the point of common coupling using power converters in an islanded microgrid. A simulation model of the grid with hierarchical control architecture is presented, followed by its operation when an unbalanced load is connected and the subsequent compensation effect from the secondary control.

**Keywords:** Power converters, hierarchical architecture, centralized secondary control, voltage unbalance compensation, microgrids

**1. UVOD**

Usled kontinuiranog razvoja upravljačkih algoritama, decentralizacije elektroenergetskih sistema, ekonomskih podsticaja i opadanja investicionih troškova vezanih za izgradnju obnovljivih izvora energije mikromreže postaju sve zastupljenije [1]. Njihova integracija u distributivne mreže unosi nove kvalitete koji transformišu tradicionalnu topologiju na srednjem i niskom naponskom nivou u aktivne distributivne mreže, ali unose i potencijalne rizike i probleme, kojima se mora pravilno pristupiti u cilju održanja stabilnosti mikromreža i distributivne mreže, vodeći računa da se ne naruši kvalitet električne energije i ekonomska isplativost rada istih. Kako je kvalitet električne energije disciplina koja pokriva širok opseg problema, u ovom radu će pažnja biti usmerena ka smanjenju uticaja režima nesimetričnih napona po amplitudi, čije dejstvo ostavlja posledice po potrošače, iako su oni neretko uzrok tog režima.

**NAPOMENA:**

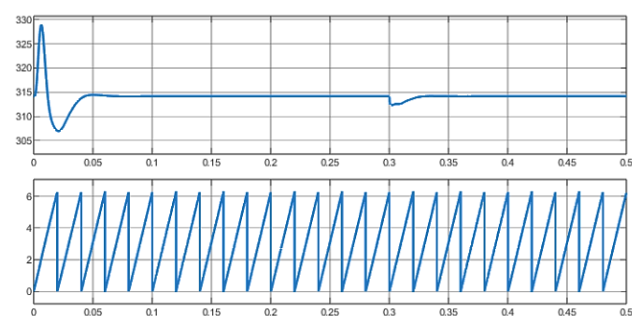
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, vanr. prof.

**1.1. Zadatak rada**

Pristup kojim se vrši kompenzacija nesimetrije napona po amplitudi na zajedničkoj sabirnici zasnovan je na upotrebi centralizovane sekundarne kontrole koja merene fazne napone transformiše u direktne i poprečne komponente napona direktnog i inverznog redosleda, vrši proračun faktora neuravnoteženosti napona a on se zajedno sa referentnom vrednošću dovodi na PID regulator, na čijem izlazu se generiše korekcionni signal napona i prosleđuje naponskim petljama svakog energetskog pretvarača u datoj mikromreži. Prvo je prikazan rad jednog pretvarača sa poremećajem i bez kompenzacije, zatim rad više pretvarača sa droop kontrolom bez poremećaja i dejstvo sekundarne kontrole za kompenzaciju nesimetrije napona.

**2. RAD PRETVARAČA SA POREMEĆAJEM I BEZ KOMPENZACIJE NESIMETRIJE NAPONA**

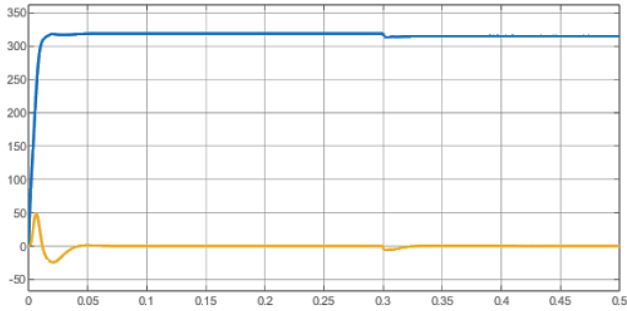
Inicijalni model sastoji se od idealnog naponskog izvora jednosmernog napona, energetskog pretvarača, LC filtra, uravnoteženog trofaznog i neuravnoteženog, jednofaznog potrošača. Primarna kontrola sastoji se od sklopa fazno zaključane petlje sa dvostrukim uopštenim integratorom drugog reda, to jest *DSOGI – PLL* i regulacionih petlja napona i struje sa proporcionalno-rezonantnim regulatorima. Po priključenju neuravnoteženog potrošača trenutku  $t = 0.3s$ , *DSOGI – PLL* nakon kratkotrajnog propada učestanosti, nastavlja sa pravilnim radom i sinhronizacijom sa učestanošću mreže (slika 2.1.).



Slika 2.1. Učestanost i ugao mrežnog napona *DSOGI – PLL* sklopa pri naponskom poremećaju

To potvrđuje i slika 2.2. na kojoj se vidi direktna i poprečna komponenta napona dobijena Parkovom transformacijom nad proračunatim  $\alpha\beta$  komponentama sa izlaza *SOGI-QSG* estimatora koji su eliminisali oscilacije na dvostrukoj učestanosti mreže. Ovom simulacijom je prikazan uticaj poremećaja bez kompenzacije i sposobnost *DSOGI – PLL* sklopa da efikasno radi uprkos nesimetrije napona, što će

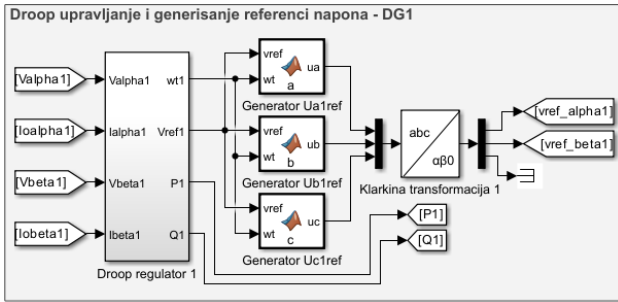
biti od značaja kada se upravljanje simulacione mreže proširi sa *droop* regulacijom i sekundarnom kontrolom.



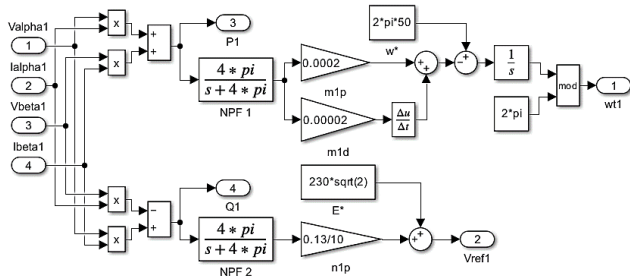
Slika 2.2. Direktna i poprečna komponenta napona sa SOGI – QSG estimatorima pri naponskom poremećaju

### 3. DVA PRETVARAČA U MIKROMREŽI SA DROOP UPRAVLJANJEM BEZ POREMEĆAJA

Proširenje modela dodatnim pretvaračem, *droop* regulacijom (slike 3.1., 3.2.) i virtuelnim impedansama je izvršeno kako bi se dobio referentni model mreže za proveru delovanja sekundarne kontrole. Korišćenje *droop*

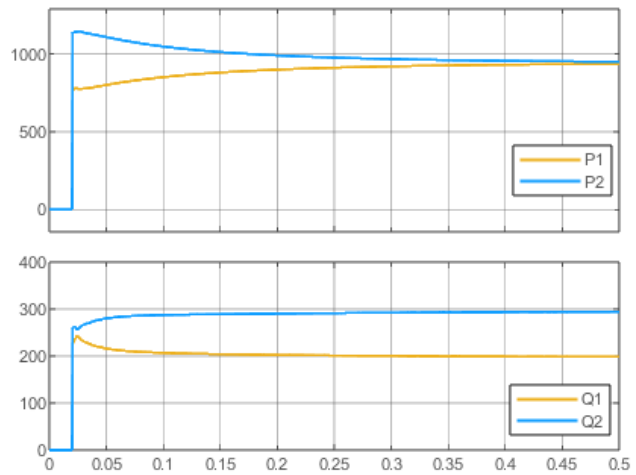


Slika 3.1. Droop upravljanje i generisanje referenci napona jednog pretvarača



Slika 3.2. Unutrašnja struktura Droop regulacije jednog pretvarača

regulacije u mikromrežama je dobro prihvaćena metoda i pruža dobru regulaciju napona i učestanosti uz postojanje male greške u ustaljenom stanju, što se može kompenzovati uvođenjem struktura u sekundarnu kontrolu [2]. Dodavanjem virtuelnih impedansi u primarnu kontrolu, postignuto je poboljšanje dinamike i preciznija podela aktivne i reaktivne snage između pretvarača. (slika 3.2.). Ipak, i sa virtuelnom impedansom, precizna podela proizvodnje reaktivne snage može biti problematična pri pojavi nesimetričnog režima, te se virtuelna impedansa može poboljšati nekim naprednijim algoritmom poput [3] gde je na *droop* regulaciju primenjena adaptivna virtuelna impedansa sa konsenzusnom kontrolom reaktivne snage.



Slika 3.1. Aktivne i reaktivne snage pretvarača DG<sub>1</sub> i DG<sub>2</sub>

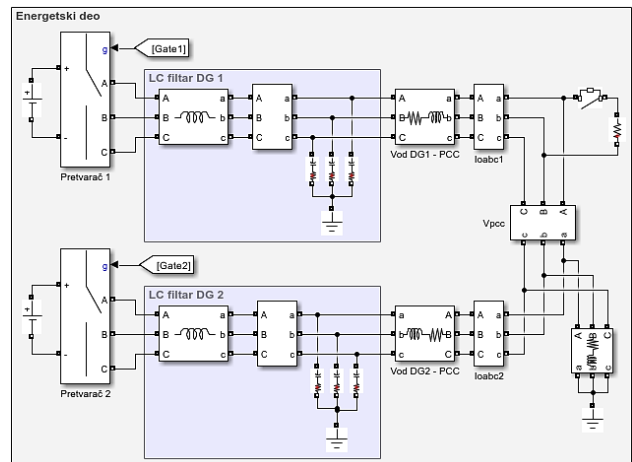
### 4. KOMPENZACIJA NESIMETRIJE NAPONA ZAJEDNIČKE SABIRNICE SADEJSTVOM DVA PRETVARAČA SEKUNDARNOM KONTROLOM

Model mikromreže sa primarnom i sekundarnom kontrolom, prikazan je na slikama (4.1.), (4.2.), (4.3.). Filtrirani naponski signali dobijaju se iz direktno i poprečne komponente napona direktnog i inverznog redosleda koji se dovode na kaskadno vezane pokretne usrednjavajuće filtre (*MAF*) (slika 4.4.) i filtre nepropusnika opsega učestanosti (*Notch filter*) (slika 4.5.) i oni su ulazne veličine za blok kompenzacije nesimetrije napona [4], koji jednačinama 4.1. i 4.2. a zatim njihovim deljenjem i množenjem sa 100 (jednačina 4.3.) daje koeficijent neuravnoteženosti napona (*VUF*).

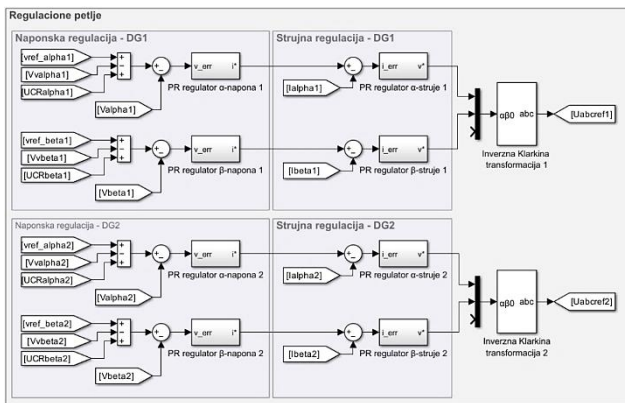
$$V_{dq+} = \sqrt{(V_{d+})^2 + (V_{q+})^2} \quad (4.1.)$$

$$V_{dq-} = \sqrt{(V_{d-})^2 + (V_{q-})^2} \quad (4.2.)$$

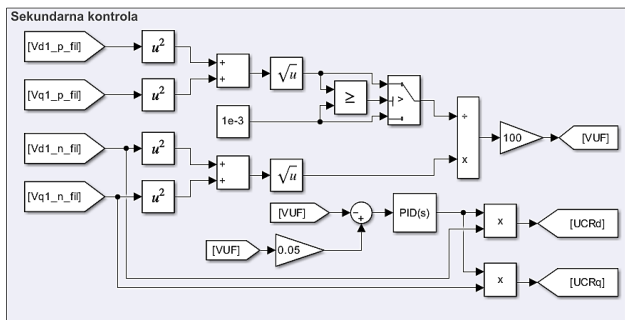
$$VUF = \frac{V_{dq-}}{V_{dq+}} \cdot 100 \quad (4.3.)$$



Slika 4.1. Energetski deo modela

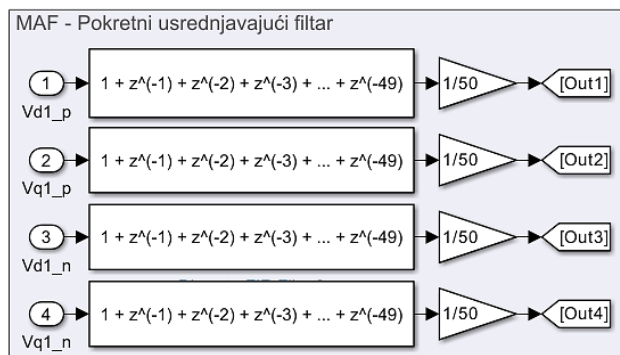


Slika 4.2. Regulacione petlje primarne kontrole

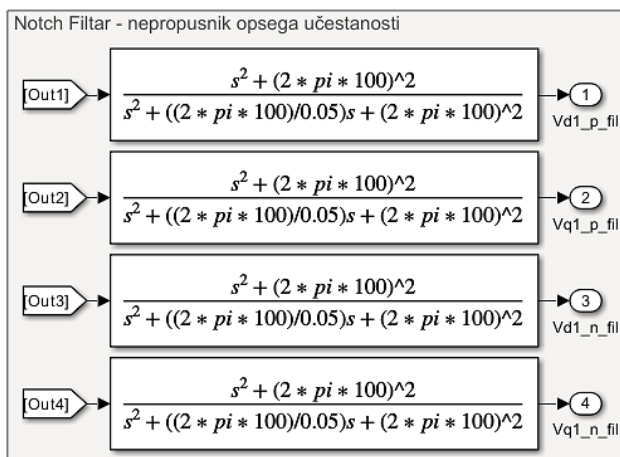


Slika 4.3. Sekundarna kontrola za kompenzaciju nesimetrije napona

Korekcijski signali za naponsku regulaciju svakog pretvarača dobijaju se od strane PID regulatora nakon Inverzne Parkove transformacije čime se prilagođavaju PR regulatorima u  $\alpha\beta$  domenu.

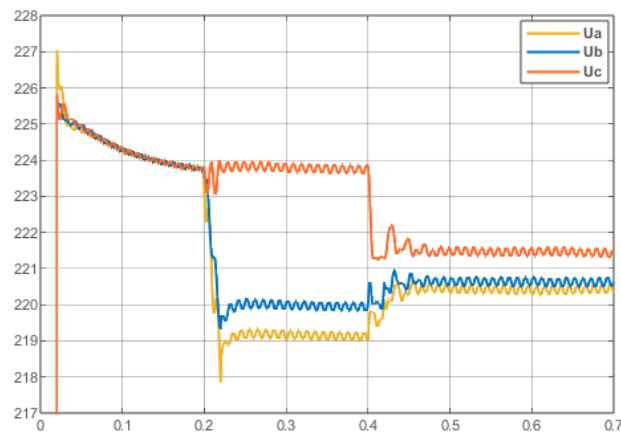


Slika 4.4. Pokretni usrednjavajući filtar

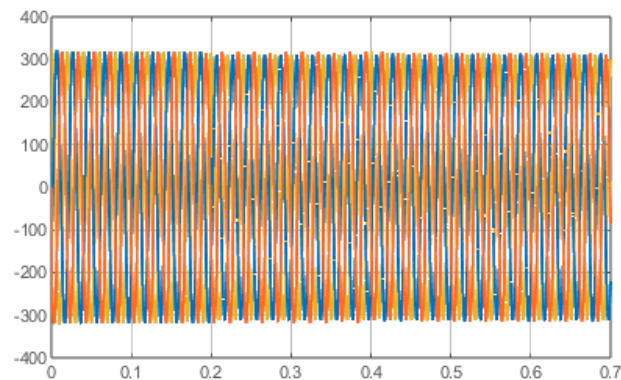


Slika 4.5. Filtar nepropusnik opsega učestanosti

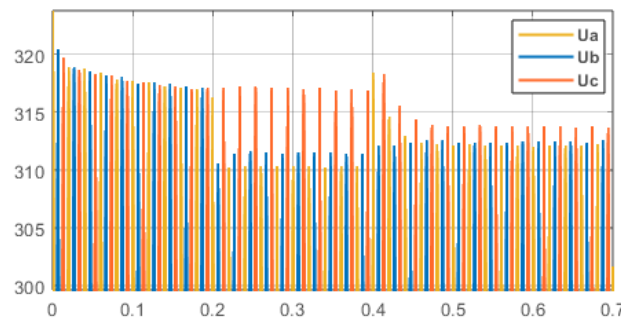
Sa slika 4.6., 4.7., 4.8. se vidi uspešno smanjenje nesimetrije napona ispod graničnih vrednosti koje propisuju međunarodni standardi poput [5-7]. U trenutku  $t = 0.2s$  je priključen neuravnotežen potrošač, a u  $t = 0.4s$  je uključena sekundarna kontrola. Dodatnim podešavanjem parametara virtuelne impedanse i parametara PID regulatora sekundarne kontrole, može se uticati na odzive napona. U slučaju gde su virtuelna impedanse istih parametara, zabeležena je bolja kompenzacija nesimetrije, po ceni malo lošije raspodele proizvodnje aktivne i reaktivne snage (tabela 5.1.). Kada se pogledaju odzivi napona na izlazu pretvarača, zaključuje se da ova metoda kompenzacije nesimetrije, blago uvećava nesimetriju napona na izlazima pretvarača (slika 5.3.) uz bolju kompenzaciju nesimetrije na zajedničkoj sabirnici.



Slika 4.5. Efektivna vrednost napona zajedničke sabirnice pre i posle delovanja kompenzacije nesimetrije napona



Slika 4.6. Napon na zajedničkoj sabirnici pre i posle dejstva sekundarne kontrole



Slika 4.7. Napon na zajedničkoj sabirnici pre i posle dejstva sekundarne kontrole, uveličano

Koliko je bitna dobra parametrizacija virtualne impedanse, govori i činjenica da je nesimetrija napona na izlazu pretvarača koji je električno udaljeniji od neuravnoteženog potrošača, više umanjena od nesimetrije napona prvog pretvarača.

Veličina	Iste impedanse	Različite impedanse
Nesimetrija $V_{abcRMS}$ - pre	1.25 %	1.81 %
Nesimetrija $V_{abcRMS}$ - posle	0.23 %	0.36 %
Nesimetrija $V_{oabc1RMS}$ - pre	1.21 %	1.75 %
Nesimetrija $V_{oabc1RMS}$ - posle	1.31 %	1.89 %
Nesimetrija $V_{oabc2RMS}$ - pre	1.47 %	2.06 %
Nesimetrija $V_{oabc2RMS}$ - posle	0.69 %	0.72 %

Tabela 4.1. Napon zajedničke sabirnice, pretvarača i nesimetrija napona pre i posle sekundarne kontrole

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je za cilj imao predstavu hijerarhijske arhitekture upravljanja sa primarnom kontrolom i centralizovanom sekundarnom kontrolom za kompenzaciju nesimetrije napona zajedničke sabirnice sadejstvom dva pretvarača, u ostvrskoj mikromreži. Pripremanje simulacionog modela mreže za sekundarnu kontrolu započeto je sa jednim pretvaračem i projektovanjem primarne kontrole koja se sastoji od *DSOGI-PLL* sklopa fazno zaključane petlje sa ulogom precizne i pouzdane sinhronizacije pretvarača i učestanosti mreže, *LC* filtra za poboljšanje kvaliteta napona i struje na izlazu pretvarača, naponskih i strujnih regulacionih petlja sa *PR* regulatorima i blokom za filtriranje direktne i poprečne komponente napona direktnog i inverznog redosleda. Dalje proširenje modela postignuto je sa *droop* regulatorima i virtuelnim impedansama i na kraju dodavanjem sekundarne kontrole za kompenzaciju nesimetrije napona. Rezultati simulacije pokazuju uspešno suzbijanje nesimetrije napona zajedničke sabirnice ispod graničnih vrednosti koje preporučuju međunaradni standardi i propisi [5,6] uz povećanje nesimetrije napona na izlazima pretvarača. Usavršavanje celokupne kontrole potencijalno bi se usmerilo na rešavanje ostalih problema kvaliteta električne energije poput izobličenja napona i struje od strane viših harmonika, međuharmonika, naponskih skokova, ulegnuća, šuma, korišćenjem naprednih algoritama *droop* regulacije i virtualne impedanse [3]-[7].

## 6. LITERATURA

- [1] Guchhait, R., Sarkar, B., *Increasing Growth of Renewable Energy: A State of Art*. Energies 2023, 16, 2665.
- [2] Ghosh, A., Zare, F., *Control of Power Electronic Converters with Microgrid Applications*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2023.
- [3] Lyu Z, Wei Q, Zhang Y, Zhao J, Manla E. *Adaptive Virtual Impedance Droop Control Based on*

*Consensus Control of Reactive Current*. Energies. 2018; 11(7):1801.

- [4] Savaghebi, M., Alireza, J., Juan Carlos, V., Josep M., G., *Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid*, IEEE Transactions on Smart Grid, vol 3, no. 2, Jun. 2012.
- [5] ANSI C84.1-2020, *American National Standard for Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hz)*
- [6] IEC 60034-26, *Rotating electrical machines - Part 26: Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*
- [7] J. He and Y. W. Li, *An enhanced microgrid load demand sharing strategy*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, pp. 3984–3995, Sept. 2012.

### Kratka biografija:



**Aleksandar Džever** rođen je u Subotici 1996. godine. Osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu završio je 2022. godine na studijskom programu energetika, elektronika i telekomunikacije. Iste godine je upisao master akademske studije na studijskom programu energetska elektronika i električne mašine.



**dr Marko Vekić** je vanredni profesor na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Diplomirao je 2005. godine na Fakultetu tehničkih nauka, smer energetska elektronika i električne mašine. Doktorske studije završio je 2014. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika u prenosnim i distributivnim mrežama, mikromreže i kvalitet električne energije.