

Primerjalna analiza vplivov napajanja bremen z modificirano sinusno napetostjo in omrežno napetostjo

Andraž Rihar¹, Denis Sušin¹, Klemen Drobnič¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Comparative analysis of influences on loads supplied with modified sine wave inverter and grid

Abstract. *The paper presents a study of influences on typical consumer electronics' loads, when being powered with grid and modified sine wave voltage, respectively. Comparison results demonstrate that use of the tested commercially available inverter with modified sine wave can incur plenty of disadvantages, such as up to 7-times higher THD factor (powering the lamp), current spikes up to 9 A (powering the laptop charger), and additional vibrations (powering the induction motor). Use of such inverters could harm the loads in the long run. Therefore, when powering such loads, it is recommended to use pure sine wave inverters or additional output filters.*

1 Uvod

Dandanes uporaba in številčnost razsmernikov v svetu naraščata izredno hitro. Eden izmed poglavitnih razlogov za to je izreden porast uporabe v fotovoltaičnih (PV) elektrarnah [1, 2], kjer instalirana moč v svetu že presega 500 GW [3]. Razsmerniki se uporabljajo tudi v najrazličnejših aplikacijah potrošniške elektronike, tako doma kot tudi v prevoznih sredstvih (avtomobili, avtodomi, jadrnice, čolni, letala, itn.) [4]. Pomembno področje uporabe predstavljajo tudi sistemi neprekinjenega napajanja (angl. uninterruptible power supply – UPS) [5].

Razsmernik v tem kontekstu predstavlja močnostni pretvornik, ki pretvarja enosmerno napetost (U_{DC}) v izmenično (U_{AC}). To je mogoče izvesti z različnimi topologijami na različne načine, ki na izhodu pretvornika torej zagotovijo različne oblike izmenične napetosti [6, 7, 8, 9, 10]. Med pogostejšimi oblikami so:

- Preprost kvadratni val (angl. square wave), kjer se napetost spreminja med $+U_{DC}$ in $-U_{DC}$ s frekvenco osnovne harmonske komponente (npr. 50 Hz).
- Modificirana sinusna napetost (angl. modified sine wave), kjer ima napetost tri nivoje in sicer $+U_{DC}$, 0 V in $-U_{DC}$. Ti nivoji se spreminjajo s frekvenco osnovne harmonske komponente (npr. 50 Hz).
- Čista sinusna napetost (angl. pure sine wave), ki je običajno generirana z uporabo sinusne pulzno širinske modulacije (SPWM), kjer je modulatorska frekvenca nekaj velikostnih razredov večja od osnovne harmonske komponente (npr. 20 kHz).

Možne so tudi druge rešitve, ki pa so manj pogoste ali pa zaenkrat še manj uveljavljene. Vsaka od zgoraj

navedenih izvedb ima določene prednosti in slabosti. Razsmerniki s preprostim kvadratnim valom in modificirano sinusno napetostjo so običajno občutno cenejši in preprostejši. Na drugi strani so razsmerniki s t. i. čisto sinusno napetostjo dražji, kvalitetnejši, imajo nižje harmonsko popačenje (angl. total harmonic distortion – THD) ter omogočajo tudi sinhronizacijo na omrežje z namenom vračanja električne energije, npr. v PV elektrarnah [11]. Dražji razsmerniki imajo običajno tudi možnost osnovne ali naprednejše tokovne regulacije [12].

Pomembno področje uporabe razsmernikov je režim otočnega obratovanja. Takšna aplikacija je zanimiva tudi za številne uporabnike v široki potrošnji, zato je uporaba razsmernikov z modificirano sinusno napetostjo zaradi občutno nižje cene pogosta. Tipičen primer uporabe je na primer razsmerjanje baterijske napetosti v prevoznih sredstvih, kjer lahko razsmerniki skrbijo za napajanje najrazličnejših bremen: polnilniki za telefone, napajalniki za prenosne računalnike, izmenični motorji (črpalke, ventilatorji, klime, orodja), grela, svetila, pečice, itn. Bremena so v osnovi običajno izdelana za uporabo na omrežni sinusni napetosti, ki ima razmeroma nizek THD (upoštevajoč prvih 40 višjih harmonskih komponent), pogojen s standardom EN61000-3-2 [13].

V literaturi je že možno zaslediti nekaj ugotovitev glede kakovosti napetosti posameznih tipov razsmernikov [14] in nekaj primerjalnih analiz različnih napetosti [10, 15]. Avtorji ugotavljajo, da so razsmerniki s čisto sinusno napetostjo najprimernejši za uporabo, imajo najmanjši THD in povzročajo najmanj težav na bremenski strani. Na drugi strani so razsmerniki s kvadratnim valom oziroma modificirano sinusno napetostjo manj primerni za uporabo zaradi višjega THD, imajo pa nižje stikalne izgube in so predvsem cenovno dostopnejši. Analize v literaturi so večinoma omejene na simulacije z idealiziranimi modeli [10, 15], opaziti pa je pomanjkanje eksperimentalnih meritev in testiranja delovanja posameznih konceptov razsmernikov, še posebej v luči vpliva na tipično uporabljena bremena.

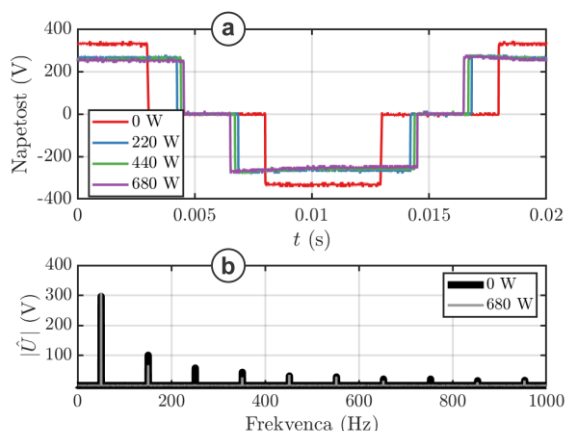
Namen članka je torej dopolniti pomanjkljivo raziskano področje iz literature ter predstaviti primerjalno analizo vplivov napajanja tipičnih bremen (žarnica, napajalnik za prenosni računalnik, izmenični motor) z modificirano sinusno napetostjo ter omrežno sinusno napetostjo, s poudarkom na ugotovitvah na podlagi eksperimentalnih meritev.



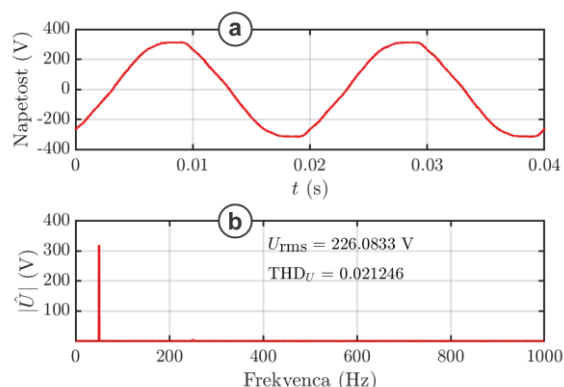
Slika 1. Komercialni razsmernik z modificirano sinusno napetostjo podjetja EnjoySolar.

2 Metodologija

Za preizkuse z modificirano sinusno napetostjo je uporabljen komercialno dostopen razsmernik podjetja EnjoySolar z 2000 W trajne moči, 4000 W vršne moči (slika 1) [16], ki je pri nižani moči napajan z enosmernim laboratorijskim virom ITECH IT6512 (80 V/60 A/1200 W). Delovanje dotičnega razsmernika temelji na vzporedni vezavi več t.i. »push-pull« vhodnih pretvornikov, kateri dvignejo vhodno enosmerno napetost 12 V na višjo enosmerno vrednost. Takšna topologija hkrati zagotavlja tudi galvansko ločitev in s tem zmanjšanje verjetnosti električnega udara. Zvišana enosmerna napetost je nato razsmerjena z dvema izhodnima H-mostičema v vzporedni vezavi, ki na izhodu zagotovita modificirano sinusno napetost 230 V s primerno tokovno zmogljivostjo. Izhodna napetost je regulirana tako, da je ne glede na obremenitev, na izhodu približno konstantna efektivna napetost 230 V (slika 2). Ob večji obremenitvi se rahlo zmanjša maksimalna napetost razsmernika, skrajša pa se tudi trajanje intervala, ko je izhodna napetost enaka 0 V.



Slika 2. a) Oscilogram izhodne modificirane sinusne napetosti in b) pripadajoč frekvenčni spekter napetosti komercialnega razsmernika EnjoySolar ob različni izhodni moči.



Slika 3. Oscilogram omrežne sinusne napetosti (a) in pripadajoči frekvenčni spekter napetosti (b).

Omrežna sinusna napetost je bila zagotovljena neposredno iz vtičnice v laboratoriju na Fakulteti za elektrotehniko (slika 3).

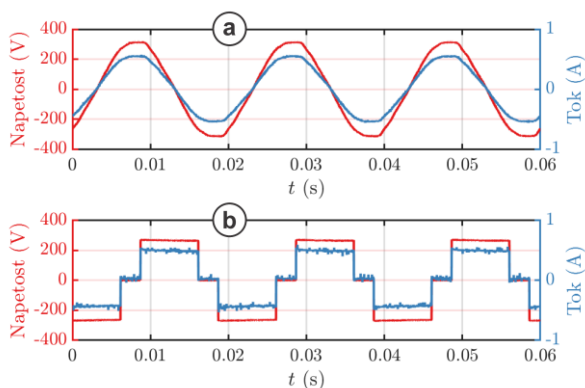
Eksperimentalne meritve so bile izvedene na treh primerih obremenitve, ki predstavljajo tipična bremena v široki potrošnji. V prvem primeru je bila uporabljena navadna žarnica (Osram, 230 V, 100 W). V drugem primeru je bila uporabljena obremenitev z napajalnikom za prenosni računalnik (DELL, 65 W, 100 V_{AC}–240 V_{AC} na 19,5 V_{DC}, model LA65NS0-00) brez priključenega računalnika. V tretjem primeru je bil priključen manjši enofazni asinhronski motor (230 V_{AC}, 50 Hz, 55 W, 2700 min⁻¹).

V nadaljevanju je bila izvedena analiza vplivov različnih oblik napajalne napetosti na navedena bremena. V primeru obremenitve z žarnico je bila analiza osredotočena na časovni potek in frekvenčni spekter toka. Prav tako je bila ocenjena svetilnost žarnice na razdalji 41 cm, za kar sta bila uporabljena aplikacija Lux Light Meter in vgrajeni svetlobni senzor telefona MOTO G5 plus. V primeru obremenitve z napajalnikom je bila analiza osredotočena na potek toka v napajalnik brez priključenega računalnika. V primeru obremenitve z izmeničnim motorjem je bila analiza osredotočena na obratovanje motorja v prostem teku v smislu analize frekvenčne vsebine faznega toka ter analize obratovanja z vidika vibracij. Vibracije so bile izmerjene s 3-osnim pospeškometro (DYTRAN model 3133B1). Izračunane so bile efektivne vrednosti in THD faktorji frekvenčnih spektrov, kjer so bile upoštevane zgolj višje harmonske komponente do frekvence 450 Hz.

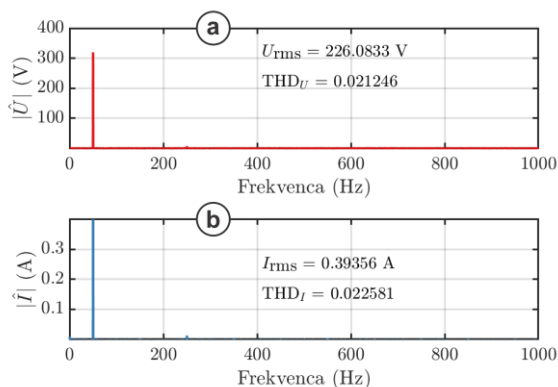
3 Rezultati in diskusija

Rezultati napajanja žarnice z omrežno napetostjo in razsmernikom potrjujejo, da je žarnica povsem ohmsko breme, saj sta napetost in tok v obeh primerih fazno praktično poravnana, po obliki pa je tok enak pritisnjeni napetosti (slika 4). Efektivna vrednost napetosti razsmernika je za približno 3,5 V višja v primerjavi z omrežno napetostjo, posledično je višja tudi efektivna vrednost toka (slika 5 in slika 6). Meritve svetilnosti žarnice za oba primera napajanja so pokazale, da je v

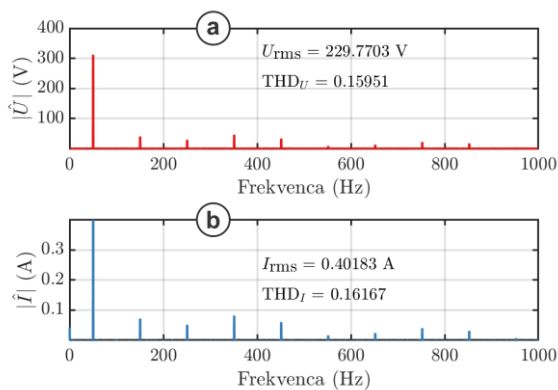
primeru napajanja z omrežno napetostjo izmerjena svetilnost 6462 lux, ob napajanju z razsmernikom pa 6760 lux, torej kar 5 % višja. Harmonsko popačenje toka je v primeru napajanja žarnice z razsmernikom več kot 7-krat višje (slika 6).



Slika 4. Oscilogram napetosti in toka napajanja žarnice z a) omrežno napetostjo in b) z razsmernikom.



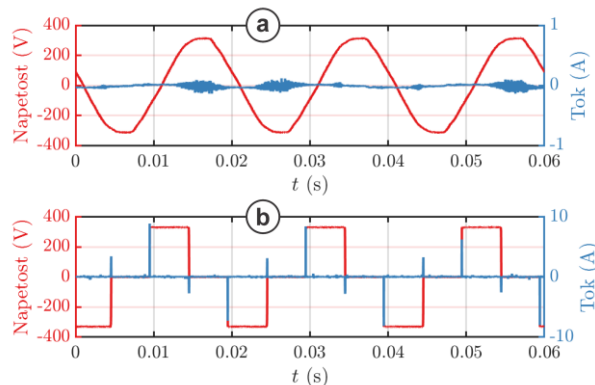
Slika 5. Frekvenčni spekter napetosti (a) in toka (b) napajanja žarnice z omrežno napetostjo.



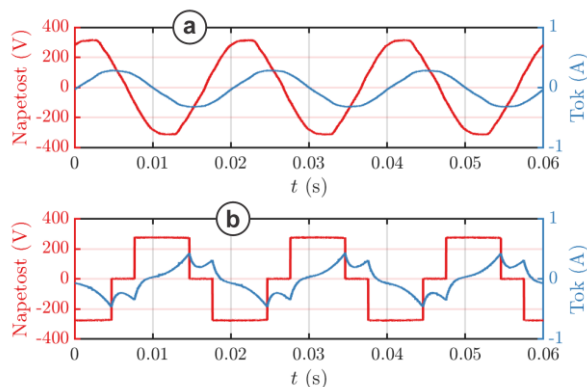
Slika 6. Frekvenčni spekter napetosti (zgoraj) in toka (spodaj) napajanja žarnice z razsmernikom.

Rezultati napajanja napajalnika za prenosni računalnik kažejo, da je v primeru omrežne napetosti tok v napajalnik relativno majhen (slika 7). Glede na to, da napajalnik ni priklopljen na računalnik, lahko na podlagi poteka sklepamo, da gre za tok v vhodne podporne kondenzatorje, ki običajno sledijo usmerniški stopnji napajalnika. V primeru napajanja z razsmernikom rezultati kažejo, da so tokovni pulzi precej veliki in segajo do približno 9 A, kar je posledica izredno hitrih

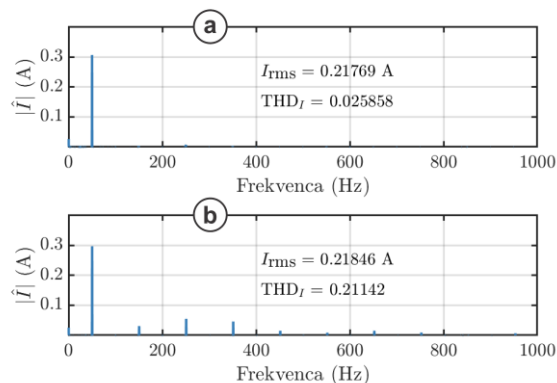
preklopov tranzistorjev izhodnega H-mostiča in razmeroma velike kapacitivnosti vhodne stopnje napajalnika. Kapacitivnost na vходу napajalnika je bila izmerjena z namenskim RLC-metrom pri frekvenci 1 kHz in znaša 278 nF. Tranzistorji v približno 10 μ s preklopijo nivo izhodne napetosti z 0 V na približno 300 V, kar ob upoštevanju kapacitivnosti napajalnika znese približno 8,90 A ($i_C = C \cdot du / dt = 278 \text{ nF} \cdot 320 \text{ V} / 10 \mu\text{s}$) in potrjuje rezultate s slike 7.



Slika 7. Oscilogram napetosti in toka v neobremenjen napajalnik za prenosni računalnik ob napajanju z omrežno napetostjo (a) in z razsmernikom (b).



Slika 8. Oscilogram napetosti in toka v enofazni asinhronski motor ob napajanju z omrežno napetostjo (a) in z razsmernikom (b).

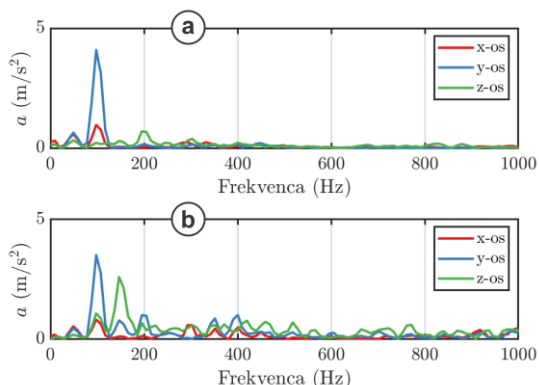


Slika 9. Frekvenčni spekter toka v enofazni asinhronski motor ob napajanju z omrežno napetostjo (a) in z razsmernikom (b).

Rezultati časovnih potekov in frekvenčnih spektrov toka v primeru napajanja asinhronskega motorja z omrežno napetostjo potrjujejo, da je le-ta obremenjen s praktično sinusnim tokom (slika 8) z nizkim THD (slika 9). Tok

zaostaja za napetostjo za približno 90° , kar je posledica prevladujočega induktivnega karakterja bremena. V primeru napajanja z razsmernikom je tok zaradi nesinusnega napajanja in induktivnega karakterja izrazito popačen (slika 8), posledično je tudi THD toka za kar 8-krat višji (slika 9). Efektivne vrednosti toka so kljub vsemu približno enake.

Meritve vibracij motorja s triosnim pospeškomerom na ohišju motorja potrjujejo višjo vsebnost višje harmonskih komponent vibracij v motorju (slika 10). Vibracije so bržkone posledica višje harmonskih komponent toka, ki pa praktično niso odvisne od obremenitve in predvidoma povzročajo tudi dodaten hrup (ki pa v študiji ni bil izmerjen).



Slika 10. Frekvenčni spekter pospeška (vibracij) motorja ob napajanju z omrežno napetostjo (a) in z razsmernikom (b).

4 Sklepne ugotovitve

Članek predstavlja študijo vplivov napajanja tipičnih bremen z omrežno napetostjo in z razsmernikom z modificirano sinusno napetostjo. Izsledki kažejo, da taki razsmerniki sicer omogočajo napajanje bremen tudi, če omrežje ni dostopno, žal pa uporaba prinaša številne slabosti. V primeru napajanja žarnic lahko visok di/dt v primeru parazitnih induktivnosti povzroči neželene prenapetosti. Napajanje napajalnikov za prenosnike lahko zaradi velike tokovne obremenitve vhodnih podpornih kondenzatorjev precej skrajša življenjsko dobo napajalnikov. Ob napajanju motorjev se pojavijo višje harmonske komponente toka in vibracije. Hitri preklopi lahko v primeru morebitnih kapacitivnih sklopitev motorjev povzročijo dodatne kapacitivne tokove, ki so lahko za motor škodljivi. Na podlagi rezultatov je možno sklepati, da so taki razsmerniki za napajanje večine tipičnih bremen lahko škodljivi in bi jih bilo vsekakor smiselno nadgraditi s primernimi izhodnimi filtri. Alternativa je seveda uporaba razsmernikov s čisto sinusno napetostjo, kjer so zaradi višjih stikalnih frekvenc tudi izhodni filtri lahko manjši. V smislu nadaljnjega dela so predvidene dodatne analize segrevanja motorjev in drugih vrst bremen.

Literatura

[1] V. K. Chinnaiyan, J. Jerome, J. Karpagam. An experimental investigation on a multilevel inverter for

solar energy applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 47, str. 157-167, 2013.

- [2] A. S. K. Chowdhury, M. S. Shehab, M. A. Awal, M. A. Razzak. Design and implementation of a highly efficient pure sine-wave inverter for photovoltaic applications. V: *International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, str. 1-6, Maj, 2013, IEEE.
- [3] N. M. Haegel, H. Atwater, T. Barnes, C. Breyer, A. Burrell, Y. M. Chiang, J. C. Goldschmidt *et al.*: Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. *Science*, 364(6443), str. 836-838, 2019.
- [4] <https://mascot.no/catalog/dcac-inverters/mod.-sine-wave/2985/c-24/c-1306/p-277>. Dostopano dne: 8.7.2019.
- [5] https://www.amp-solar.com/ups_inverter500w/en. Dostopano dne: 8.7.2019.
- [6] S. S. Shema, I. Daut, M. Irwanto, C. Shatri, N. Syafawati, N. Ashbahani. Study of inverter design and topologies for photovoltaic system. V: *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (InECCE)*, str. 501-504, Jun. 2011, IEEE.
- [7] R. Haider, R. Alam, N. B. Yousuf, K. M. Salim. Design and construction of single phase pure sine wave inverter for photovoltaic application. V: *2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, str. 190-194, Maj 2012, IEEE.
- [8] <http://www.dieselduck.info/machine/04%20auxiliary/2000%20Inverter%20technology.pdf>. Dostopano dne: 8.7.2019
- [9] S. Maheshri, P. Khampariya. Simulation of single phase SPWM (Unipolar) inverter. *International journal of innovative research in advanced Engineering (IJIRAE)*, 1(3), 2014.
- [10] S. Phogat. Analysis of single-phase SPWM inverter. *International Journal of Science and Research*, 3(8), str. 1793-1798, 2014.
- [11] T. F. Wu, K. H. Sun, C. L. Kuo, C. H. Chang. Predictive current controlled 5-kW single-phase bidirectional inverter with wide inductance variation for DC-microgrid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12), str. 3076-3084, 2010.
- [12] K. Zhang, Y. Kang, J. Xiong, J. Chen. Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(3), str. 784-792, 2003.
- [13] [http://www.epsma.org/PFC%20Guide_03032018%20\(3\)%20final%207-7.pdf](http://www.epsma.org/PFC%20Guide_03032018%20(3)%20final%207-7.pdf); Dostopano dne: 9.7.2019
- [14] M. Yumurtaci, S. V. Ustun, S. V. Nese, H. Cimen. Comparison of output current harmonics of voltage source inverter used different PWM control techniques. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 3(11), str. 695-704, 2008.
- [15] M. B. Cheema, S. A. Hasnain, M. M. Ahsan, M. Umer, G. Ahmad. Comparative analysis of SPWM and square wave output filtration based pure sine wave inverters. V: *15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, str. 38-42, Jun. 2015, IEEE.
- [16] <https://www.amazon.de/Spannungswandler-EnjoySolar-2000-4000-12V-230V-Zertifiziert/dp/B00MA4Y2I0>