

Uporaba fotonapetostnih omrežnih mikro razsmernikov v posebnih aplikacijah

Marko Petkovšek, Danjel Vončina

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana
E-pošta: marko.petkovsek@fe.uni-lj.si

Implementation of solar micro inverters in special applications

In the last years we have witnessed a huge development in the photovoltaic (PV) industry. Here, not only the materials and technologies for PV modules production, but also the accompanying power electronics made a significant step resulting in higher PV module efficiencies, lower prices of PV modules, robust and cost effective power electronics with a number of various control and monitoring features.

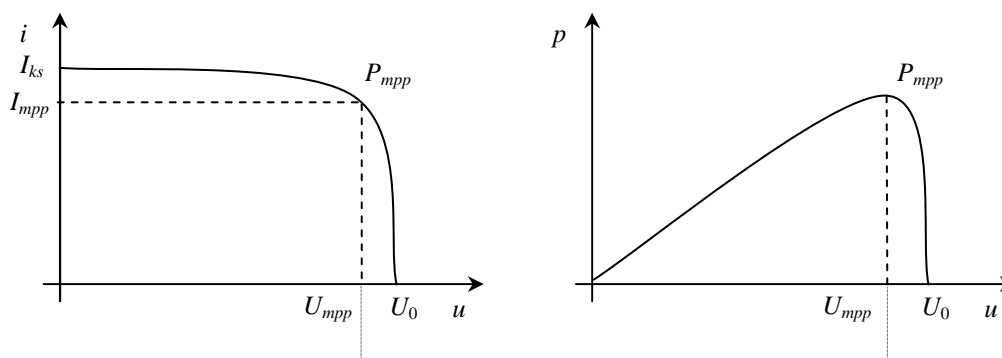
The paper gives a short insight into a basic principle of solar micro inverters that are designed for direct integration under the PV module. In that way, no DC voltage installation between the PV modules is required. In the experimental part, measurement results for two micro inverters that were connected to a typical 240 W PV module are given. They are built for practically the same nominal power, but the control and protection capabilities differ significantly. Of course, they both have the maximum power point tracking (MPPT) algorithm implemented, but the significant difference is in the possibility to wirelessly monitor the operation behavior and capability to control the power factor of the inverter.

In the final part of the paper, the potential use of micro PV inverters in cardiovascular devices as a part of an "electro-mechanical" burden was investigated.

1 Uvod

V zadnjih nekaj letih je bil na področju izkoriščanja energije sonca s fotonapetostnimi moduli dosežen silovit preskok. Razvoju materialov in tehnologij izdelave fotonapetostnih modulov, ki so botrovali višjim energijskim izkoristkom in tudi nižji specifični ceni modula (W_p/m^2), je seveda sledil tudi razvoj pripadajoče močnostne elektronike. S slednjo je mogoče v principu precej neugodno izhodno karakteristiko modula v pogledu izhodne napetosti u , predvsem pa razpoložljive maksimalne moči (P_{mpp}) glede na bremenski tok (slika 1) prilagoditi specifičnim zakonitostim narave delovanja fotonapetostnega sistema in v končni fazi zahtevam uporabnika.

Če so na začetku prevladovali otočni sistemi z ali brez možnosti shranjevanja energije za napajanje manjših (večinoma enosmernih) električnih porabnikov, so dandanes prevladujoč segment fotonapetostni sistemi z možnostjo povezave na javno (izmenično) električno omrežje. Tudi tu pot razvoja ni bila in ni enoznačno določena, saj lahko ob hitrem pregledu znanstvene literature in ponudb ključnih proizvajalcev močnostnih pretvornikov zasledimo (vsaj) dve poti [1, 2].



Slika 1: Tipična izhodna karakteristika fotonapetostnega modula

Prva možnost je uporaba centralnega pretvornika enosmerne napetosti v izmenično napetost (string inverter), ki je priključen na niz fotonapetostnih modulov, druga, novejša, pa uporaba ti. mikro omrežnega razsmernika (solar micro inverter), ki je prigraven neposredno pod posamezni fotonapetostni modul.

Seveda lahko za obe rešitvi najdemo določene prednosti in slabosti oz. pomanjkljivosti. V prvem primeru je npr. električna povezava med moduli in do pretvornika podvržena pravilom za izvedbo instalacij z enosmerno (relativno visoko – 600 V!) napetostjo, v drugem pa je med moduli s prigrajenim razsmernikom prisotna pravzaprav omrežna napetost. Prva rešitev v primeru okvare (centralnega) razsmernika seveda zahteva takojšen odklop od omrežja in s tem prekinitvev oddajanja električne energije, v drugem primeru pa okvara razsmernika na posameznem modulu ob primerni povezovalni matriki med moduli omogoča nemoteno delovanje preostalih razsmernikov in s tem le minimalen izpad zmogljivosti elektrarne. Prav tako je slednja varianta v prednosti tudi pri neoptimalnem delovanju posameznega fotonapetostnega modula (napaka v modulu, senčenje modula,...). Ker je v tem primeru delovanje razsmernika naravnano na posamezen modul, je npr. algoritem iskanja maksimalne moči (MPPT, *maximum power point tracking*) precej bolj učinkovit kot pri centralnem razsmerniku [2]. Mikro razsmerniki so grajeni (skoraj izključno, ne pa vedno [3]) za enofazni priklop na izmenično električno omrežje (lahko sicer enakomerno porazdelimo posamezne module na vse tri faze), za razliko od centralnih razsmernikov, ki so za moči nad $\approx 3 \text{ kW}_p$ večinoma trifazne izvedbe.

Na trgu so prisotni tudi omrežni razsmerniki za priklop na vetrne elektrarne [4] z močjo od (nekaj) 100 W navzgor, ki se glede na specifično izhodno karakteristiko vetrne elektrarne od solarnih razsmernikov razlikujejo predvsem v regulacijskem algoritmu oz. načinu vodenja.

2 Značilnosti omrežnih fotonapetostnih mikro razsmernikov

Večina sodobnih omrežnih mikro razsmernikov je prilagojena delovanju s fotonapetostnimi moduli s 60 oz. 72 celicami in maksimalno močjo med 240 W_p in 300 W_p , ki so dandanes med najbolj pogosto uporabljanimi modeli.

Zagon razsmernika je pogojen s prisotnostjo omrežne napetosti, ki (po navadi) hkrati tudi služi za vzpostavitev napajalne napetosti za krmilno elektroniko razsmernika, in ustrezno enosmerno napetostjo na DC vhodu (najpogosteje je to med 20 V in 60 V). Ključnega pomena za delovanje razsmernika je torej prisotnost omrežne napetosti – brez nje razsmernik ne deluje! Notranja zgradba in regulacijski algoritem posledično narekujejo princip delovanja in nekatere lastnosti oz. zmogljivosti, ki pa se seveda razlikujejo od proizvajalca

do proizvajalca. Razsmerniki se tako razlikujejo po stopnji vgrajene zaščite v primeru napake v razsmerniku ali različnih obratovalnih stanj na omrežju [5] (npr. anti-islanding!), za uporabnika pa je predvsem zanimiva možnost daljinskega nadzora (monitoring) in krmiljenja razsmernika (daljinski vklop/izklop, nastavitve faktorja moči, ...).

3 Uporaba mikro razsmernika v posebnih aplikacijah

Glede na to, da so mikro razsmerniki v fotonapetostnih sistemih vedno bolj pogosti, kar se posledično odraža tudi na njihovi tržni ceni, je seveda kar nekaj poskusov, da bi omenjene razsmernike lahko uporabili tudi na področjih, ki primarno niso vključevali takih pretvornikov močnostne elektronike. Primer take rabe so kardiovaskularne naprave za dvig funkcionalnih zmogljivosti srčno-žilnega in dihalnega sistema posameznika (sobna kolesa, eliptični trenerji, simulatorji veslanja, teka na smučeh, smučanja,...). Nastavitev obremenitve je pri klasičnih izvedbah izvedena z mehanskimi utežmi ali elektromehanskimi obremenilnimi/zavornimi sistemi (magnetna zavora, zavora na vrtnične tokove,...). Povsem drugačen pristop pa je mogoč z aktivno pretvorbo mehanske energije v električno in neposrednim oddajanjem le-te v omrežje s pomočjo ustreznega (mikro) razsmernika. Uspešnost oziroma primernost take integracije mikro razsmernika v sistem pa se razlikuje od primera do primera, saj je seveda treba imeti v mislih osnovni princip delovanja mikro razsmernikov, ki je večinoma vezan na sledenje točki maksimalne moči (MPPT) fotonapetostnega modula ali pa na karakteristiko vetrnice v primeru vetrne elektrarne. Stabilno delovno točko pri klasičnem omrežnem razsmerniku je tako možno doseči le s sistemom, katerega izhodna karakteristika je podobna karakteristiki fotonapetostnega modula.

4 Rezultati

V nadaljevanju so najprej podani eksperimentalni rezultati meritev bremenske karakteristike $i(u)$ polikristalnega fotonapetostnega modula (Huashun Solar, SH-240P6-20) z nazivnimi podatki, ki so razvidni iz tabele 1, nato pa je opravljena primerjava med delovanjem dveh mikro omrežnih razsmernikov.

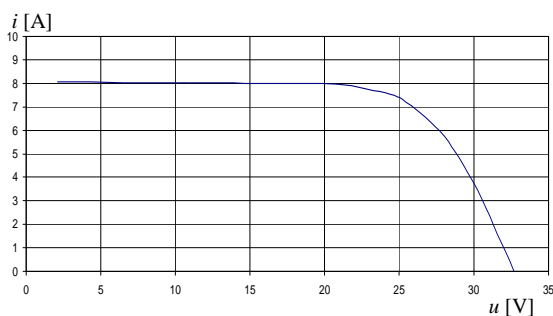
Tabela 1. Karakteristični podatki fotonapetostnega modula

parameter	
maksimalna moč, P_{mpp}	240 W
napetost pri maks. moči, U_{mpp}	30,5 V
tok pri maks. moči, I_{mpp}	7,858 A
napetost odprtih sponk, U_0	36,75 V
tok kratkega stika, I_{ks}	8,824 A
izkoristek celice	16,7 %
izkoristek modula	14,66 %

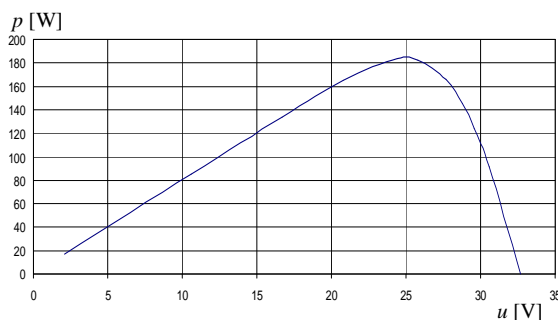
Meritve so bile izvedene 16.7.2014 med 10.30 in 11.30. Fotonapetostni modul je bil postavljen na streho Laboratorija za električne stroje na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kot vpadne svetlobe je odstopal od idealne postavitve za 20° . Po podatkih s spletnega portala za fotovoltaike (pv.fe.uni-lj.si) je bilo globalno sončno sevanje v času meritev $G_{glob} = 835,7 \text{ W/m}^2$.

Bremenska karakteristika fotonapetostnega modula je podana na sliki 3, izhodna moč modula v odvisnosti od napetosti pa na sliki 4.

Z obeh slik je razvidno, da je med izvajanjem meritev bila maksimalna moč modula 185 W, pri čemer je bil bremenski tok 7,4 A in napetost 25 V. Dosežena maksimalna moč je bila tudi skladna s preračunom, ki upošteva globalno sevanje, postavitev modula in nazivno (vršno) moč fotonapetostnega modula.



Slika 3: Bremenska karakteristika fotonapetostnega modula.



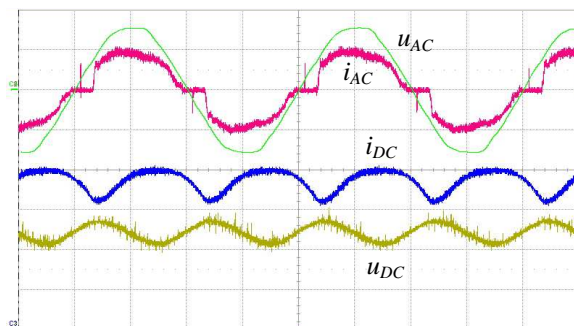
Slika 4: Karakteristika moči v odvisnosti od napetosti fotonapetostnega modula

Po opravljenih meritvah bremenske karakteristike fotonapetostnega modula smo želeli opraviti primerjavo med dvema mikro razsmernikoma, sicer podobne nazivne moči, a različnih principov delovanja. V ta namen smo uporabili razsmernik SUN-300G_WDL (Sunshine Technology Co.) in razsmernik Solar Micro Inverter 260 (Letrika). Pri slednjem nismo testirali možnosti za krmiljenje in nadzor delovanja s posebnim komunikacijskim modulom, ki jih na spletni strani ponuja proizvajalec, saj je komunikacijski modul (Communication Gateway) trenutno še v fazi zaključnih industrijskih testiranj.

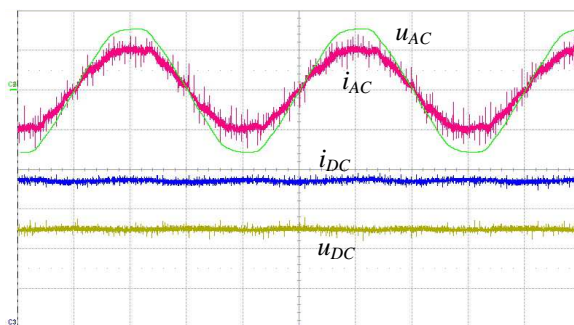
V obeh primerih smo razsmernik najprej priključili na omrežno napetost in šele nato na vhodni sponki priključili enosmerno napetost iz fotonapetostnega panela. Zagona procedura je bila pri obeh razsmernikih končana po nekaj sekundah, ko je bilo tudi doseženo stabilno delovanje in je regulacijski algoritem poiskal točko maksimalne moči.

Pri testiranju delovanja razsmernika SUN-300G_WDL (slika 5) je v nasprotju s pričakovanji bilo opaziti, da vhodni tok i_{DC} kot tudi napetost u_{DC} razsmernika nista konstantna, saj so v obeh veličinah bile prisotne oscilacije z dvojno frekvenco omrežne napetosti u_{AC} . Regulacijski algoritem iskanja točke maksimalne moči je korektno poiskal optimalno delovno točko pri vrednosti $P_{mpp} = 179,8 \text{ W}$ (izračunana vrednost na podlagi meritve toka i_{DC} in napetosti u_{DC}), kar je sicer nekoliko manj od vrednosti moči pri meritvi bremenske karakteristike.

V drugem nizu meritev je razsmernik Micro Solar Inverter 260 dosegel stabilno delovno točko pri nekoliko višji izhodni moči fotonapetostnega modula, in sicer $P_{mpp} = 183,6 \text{ W}$ (izračunana vrednost na podlagi meritve toka in napetosti). Časovna poteka toka i_{DC} in napetosti u_{DC} sta skoraj popolnoma konstantna, oblika omrežnega toka i_{AC} pa lepo sledi obliki omrežne napetosti u_{AC} .



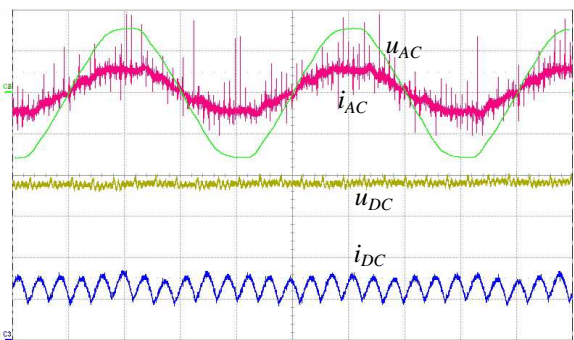
Slika 5: Časovni poteki napetosti in tokov pri razsmerniku SUN-300 G_WDL (omrežna napetost u_{AC} (200 V/d) in tok i_{AC} (1 A/d) ter vhodna enosmerna napetost u_{DC} (10 V/d) in tok i_{DC} (2 A/d), $k_t = 5 \text{ ms/d}$)



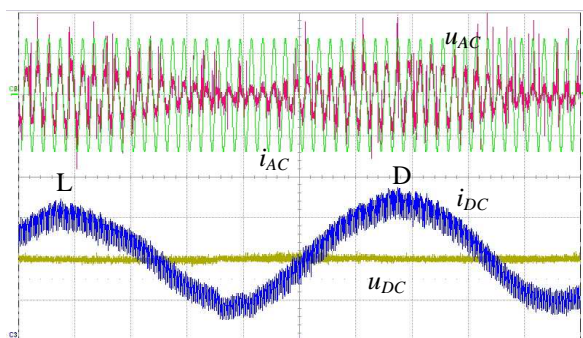
Slika 6: Časovni poteki napetosti in tokov pri razsmerniku Solar Micro Inverter (omrežna napetost u_{AC} (200 V/d) in tok i_{AC} (1 A/d) ter vhodna enosmerna napetost u_{DC} (10 V/d) in tok i_{DC} (2 A/d), $k_t = 5 \text{ ms/d}$)

V sklepnem delu testiranj smo želeli na sobnem električnem trenažerju preveriti primernost uporabe mikro razsmernika za neposredni priklop na električno omrežje. Sobni trenažer smo simulirali tako, da smo uporabili cestno električno kolo, ga postavili na podstavek in v pesto vgrajeni trifazni sinhronski stroj s trajnimi magneti odklopili od napajalne elektronike. Proste sponke sinhronskega stroja (zdaj v funkciji generatorja napetosti) smo preko trifaznega diodnega mostiča priklopili na vhod u_{DC} razsmernika Micro Solar Inverter 260.

Po vzpostavitvi zadostne enosmerne napetosti na vhodu razsmernika (min. 20 V) se je razsmernik sinhroniziral na omrežje in pričel oddajati električno energijo. Na sliki 7 je podan časovni potek karakterističnih veličin takoj po začetku delovanja razsmernika. Na sliki 7 je prikazana sekvenca, ko razsmernik obremenjuje uporabnika s povprečno močjo 97 W, hitrost vrtenja pedal je 1,5 vrt./s, pedala pa so v »neaktivnem« položaju – takrat na pedala dovajamo minimalno mehansko moč. Ko so pedala v »aktivnem« položaju, je trenutna moč razsmernika 285 W, kar je blizu zgornje meje moči razsmernika. Ker uporabnik kolesa ni bil več sposoben vzdrževati s strani razsmernika »zahtevane« moči, se je zaradi delovanja regulacijskega algoritma MPPT delovna točka »generatorja« z vrednosti 38 V v nekaj sekundah spustila na vrednost okoli 20 V. Časovni potek veličin za nekoliko daljše obdobje je podan na sliki 8. Uporabnik je poganjal pedala s hitrostjo 0,83 vrt./s (pol vrtljaja v 600 ms). Razsmernik deluje na spodnji meji napetostnega območja, obremenitev uporabnika niha med maksimumom moči levega (L) in desnega pedala (D), ki znaša ~130 W (pri toku $i_{DC} \approx 6,5$ A) in »neaktivnim« področjem (tok $i_{DC} \approx 2$ A) z močjo ~ 40 W.



Slika 7: Začetek delovanja razsmernika (omrežna napetost u_{AC} (200 V/d) in tok i_{AC} (1 A/d) ter vhodna enosmerna napetost u_{DC} (10 V/d) in tok i_{DC} (2 A/d), $k_t = 5$ ms/d)



Slika 8: Stacionarno stanje (omrežna napetost u_{AC} (200 V/d) in tok i_{AC} (1 A/d) ter vhodna enosmerna napetost u_{DC} (10 V/d) in tok i_{DC} (2 A/d), $k_t = 100$ ms/d)

5 Zaključek

V prispevku je podan kratek oris ključnih značilnosti mikro omrežnih razsmernikov za fotonapetostne sisteme. Njihovo delovanje je podrejeno sledenju točki maksimalne moči posameznega fotonapetostnega modula, kar v končni fazi omogoča večji izplen kot v primeru fotonapetostne elektrarne s centralnim omrežnim razsmernikom. Primerjava med delovanjem dveh na trgu dostopnih mikro omrežnih razsmernikov za fotonapetostne module je pokazala nekaj razlik v delovanju, ki se odražajo v časovnem poteku ključnih električnih veličin. Žal v času izvajanja meritev še ni bilo možno testirati vseh funkcionalnosti, ki jih z dodatkom komunikacijskega modula omogoča eden od testiranih razsmernikov.

V drugem delu testiranj smo poskušali preučiti možnost uporabe mikro fotonapetostnih razsmernikov v sistemih za nastavitve mehanske obremenitve kardiovaskularnih naprav. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov na »simuliranem« električnem trenerju je očitno, da fotonapetostni omrežni razsmernik ni ravno primerna izbira pri vgradnji (lahko tudi naknadni) v naprave z možnostjo aktivnega oddajanja električne energije v omrežje, saj uporabnik nima možnosti vplivati na postavitev delovne točke razsmernika in s tem posledično na višino mehanske obremenitve med vadbo. Pogoji za morebitno nadaljnje raziskovalno delo v tej smeri je vsekakor razsmernik, kateremu je mogoče prosto nastavljati delovno točko glede na trenutne zahteve uporabnika.

Literatura

- [1] F. Blaabjerg, Zhe Chen, S.B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.19, no.5, pp.1184,1194, Sept. 2004.
- [2] S. Strache, R. Wunderlich, S. Heinen, "A Comprehensive, Quantitative Comparison of Inverter Architectures for Various PV Systems, PV Cells, and Irradiance Profiles," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol.5, no.3, pp.813,822, July 2014.
- [3] C. Lin, A. Amirahmadi, Z. Qian, N. Kutkut, I. Batarseh, "Design and Implementation of Three-Phase Two-Stage Grid-Connected Module Integrated Converter," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.29, no.8, pp.3881,3892, Aug. 2014
- [4] C. Hsuang-Chang, T. Hsuan-Yu, "Design and implementation of a grid-tied wind power micro-inverter," *IET Renewable Power Generation*, vol.7, no.5, pp.493,503, Sept. 2013.
- [5] Y. Yang, F. Blaabjerg, H. Wang, "Low-Voltage Ride-Through of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.50, no.3, pp.1942,1952, May-June 2014.