

VPLIV GENERACIJE JALOVE MOČI FOTONAPETOSTNEGA SISTEMA NA GENERACIJO DELOVNE MOČI IN PRENOSNE IZGUBE V NIZKONAPETOSTNEM OMREŽJU

Ernest BELIČ, Jurček VOH, Primož SUKIČ, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V delu je obravnavan vpliv generacije jalove moči fotonapetostnega sistema na generacijo delovne moči in prenosne izgube, ki se zaradi pretakanja energije pojavijo v nizkonapetostnem omrežju. Predstavljen je eksperimentalni sistem, ki je sestavljen iz dveh večjih sklopov. V prvem sklopu je fotonapetostni sistem, v katerem je vsak fotonapetostni modul priključen v nizkonapetostno omrežje preko svojega mikropretvornika. Z vsakim izmed mikropretvornikov dvosmerno komunicira komunikacijski vmesnik. Drugi sklop predstavlja krmilni sistem s sistemom za zajem podatkov. Eksperimentalni sistem ponuja možnostjo dodajanja povezav in izvedbe prevezav. S njim je mogoče realizirati enofazno ali trifazno pametno omrežje. V okviru tega dela je bilo s pomočjo dodatnega kabla izvedeno enofazno nizkonapetostno omrežje, ki ima priključen fotonapetostni sistem na eni strani ter omrežje na drugi. Rezultati analize in meritev obratovanja takšnega omrežja kažejo, da je s pomočjo generacije jalove moči mogoče povečati proizvedeno delovno moč. Oba ukrepa pa imata za posledico povečanje izgub v omrežju.

ABSTRACT

This paper evaluates the impact of photovoltaic systems' reactive power generation on active power generation and transmission losses in the low voltage distribution network. The introduced experimental system consists of two major parts. The photovoltaic system represents the first part, in which every photovoltaic module is connected to the low voltage network by the individual microinverter. Two way communication is established to each microinverter by the communication gateway. The second part consists of a control system with data acquisition system. The flexible experimental system offers a possibility to add and establish different network connections of the single-phase or three-phase smart grids. Within the scope of this work, additional cable was installed to establish one phase low voltage network with the photovoltaic system on one side and network on the other. The results of the analysis and measurements performed for operation of experimental low voltage network show that the reactive power generation in photovoltaic systems increases the amount of active power that can be generated in photovoltaic systems without to violate voltage profile. However, with both of these actions transmission losses in the low voltage network increase.

1. UVOD

Jalova moč ima v elektroenergetskem sistemu pomembno vlogo, saj njena recipročna izmenjava (pretok) preko povezav elektroenergetskega sistema (omrežja) direktno vpliva na napetostne razmere v omrežju. Zaradi tega se jo skuša v srednje in visokonapetostnem omrežju vzdrževati v ustreznih mejah, kar ima za posledico vzdrževanje ustreznih napetostnih razmer v omrežju. Na pretoke jalove moči v elektroenergetskih omrežjih je mogoče vplivati z priključevanjem elementov elektroenergetskega sistema, ki so viri jalove moči. Glavni viri jalove moči v elektroenergetskem sistemu so: sinhronski generator, sinhronski kompenzator, paralelno vezana dušilka, paralelno vezan kondenzator, statični var kompenzator in statični sinhronski kompenzator [1]. Sinhronski generator, sinhronski kompenzator, statični var kompenzator in statični sinhronski kompenzator lahko generirajo jalovo moč induktivnega značaja (so porabnik jalove moči) ali jalovo moč kapacitivnega značaja (so generator jalove moči). Le jalovo moč induktivnega značaja lahko generira paralelna dušilka, paralelni kondenzator pa lahko generira le jalovo moč kapacitivnega značaja. S priključitvijo v omrežje in ustreznim vodenjem omenjenih elementov je mogoče v posameznih vozliščih omrežja vplivati na pretoke jalove moči ter posledično na napetosti v teh vozliščih. V nizkonapetostnih omrežjih se omenjeni elementi redkeje priključujejo z izjemo paralelnih kondenzatorjev, ki tu prvenstveno služijo za kompenzacijo jalove moči (zmanjševanje izgub) in ne za regulacijo napetosti. Razlog za to je nizko razmerje med reaktanco in upornostjo voda omrežja ki povzroči, da ima vpliv pretoka jalove moči v omrežju bistveno manjši vpliv na napetostne razmere, kot pa sprememba pretokov delovne moči [2], drugi razlog pa je visoka cena omenjenih virov jalove moči.

S širšim priključevanjem fotonapetostnih sistemov, so se tudi v nizkonapetostna omrežja pričeli vključevati pretvorniški sistemi, ki so po strukturi zgradbe deloma podobni statičnemu sinhronskemu kompenzatorju. Omenjeni fotonapetostni sistemi lahko v točki priključitve zraven delovne moči, zagotavljajo tudi jalovo moč kapacitivnega ali induktivnega značaja. Do sedaj je bil vpliv generirane jalove moči fotonapetostnih sistemov na nizkonapetostno obravnavan predvsem teoretično v delih [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. S pomočjo izračunov pretokov energije je bilo ugotovljeno, da se z nižanjem razmerja med reaktanco in upornostjo voda omrežja vpliv jalove moči na napetostni profil zmanjšuje, vsaka generacija jalove moči, ki ne ustreza trenutnim razmeram pa bo povzročila dodatne izgube v nizkonapetostnem omrežju.

V tem delu so zgoraj omenjeni teoretični fizikalni vplivi jalove moči na nizkonapetostno omrežje preskušeni na laboratorijskem eksperimentalnem sistemu za razvoj pametnih omrežij. V razdelku 2 je podrobneje opisan eksperimentalni sistem, ki ga sestavljata sklop fotonapetostnega sistema s komunikacijskim vmesnikom in sklop krmilnega sistema s sistemom za zajem podatkov. Razdelek 3 opisuje izvedbo enofaznega nizkonapetostnega omrežja, ter pripadajoče rezultate meritev. Na koncu, v razdelku 4, je podan sklep.

2. OPIS EKSPERIMENTALNEGA SISTEMA

Za eksperimentalno določanje vplivov jalove moči na nizkonapetostno omrežje je v prvi vrsti potrebno imeti ustrezno infrastrukturo. Takšno infrastrukturo ima Laboratorij za energetiko na UM FERI. Sestavljena je iz fotonapetostnega sistema z ustreznim komunikacijskim vmesnikom ter krmilnega sistema z zajemom podatkov in možnostjo dodajanja povezav. Oba sistema sta predstavljena v nadaljevanju.

2.1 Fotonapetostni sistem in komunikacijski vmesnik

Obstoječi fotonapetostni sistem je sestavljen iz 15 fotonapetostnih modulov. Dvanajst fotonapetostnih modulov je pritrjenih na fiksno konstrukcijo obrnjeno proti jugu z naklonom 30° , trije fotonapetostni moduli pa so pritrjeni na dvoosni sledilni sistem. Na dvoosnem sledilnem sistemu je pritrjen še manjši fotonapetostni modul, ki polni baterijo pogona dvoosnega sledilnega sistema. Omenjen fotonapetostni sistem je prikazan na sl. 1.



Sl. 1: Postavitev fotonapetostnih modulov v fotonapetostnem sistemu

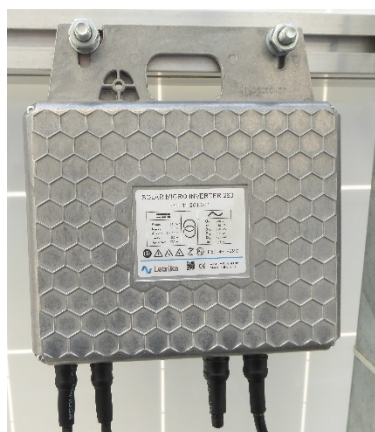
Iz sl. 1 je razvidno, da je na fiksno postavljeno konstrukcijo, ob premaknitvi obstoječih, mogoče še dodatno pritrditi 3 fotonapetostne module. Prav tako je mogoče še tri dodatne module pritrditi na dvoosni sledilni sistem.

Vsi fotonapetostni moduli (rezen manjšega na dvoosnem sledilnem sistemu) so proizvod podjetja Bisol nazivne moči $P_{MPP} = 250 \text{ W}$. Na fiksno postavljeno konstrukcijo je pritrjenih 10 polikristalnih in dva monokristalna fotonapetostna modula. Na dvoosni sledilni sistem pa sta pritrjena dva polikristalna in eden monokristalni fotonapetostni modul. Podrobnejši tehnični podatki fotonapetostnih modulov so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Podatki fotonapetostnih modulov uporabljenih v fotonapetostnem sistemu

Tip modula	Polikristalni	Monokristalni
Proizvajalec	Bisol	Bisol
Oznaka modula	BMU-250	BMO-250
Nazivna moč P_{MPP} (W)	250	250
Toleranca izhodne moči (W)	+5/-0	+5/-0
Tok kratkega stika I_{SC} (A)	8,7	8,8
Napetost odprtih sponk U_{DC} (V)	38,4	37,9
Nazivni tok I_{MPP} (A)	8,2	8,2
Nazivna napetost U_{MPP} (V)	30,4	30,5

Vsak fotonapetostni modul je opremljen z mikropretvornikom 'Solar Micro Inverter 260' [10] proizvajalca podjetja Letrika Sol, d.o.o, ki je prikazan na sl. 2. Njegove tehnične podrobnosti so prikazane v preglednici 2.



Sl. 2: Mikropretvornik 'Solar Micro Inverter 260' podjetja Letrika Sol, d.o.o

Preglednica 2: Tehnični podatki mikropretvornika Solar Micro Inverter 260

Enosmerni del:	Maksimalna moč P_{max} (W)	310
	Maksimalna napetost U_{max} (V)	60
	Napetost sledenja točki maksimalne moči U_{MPPT} (V)	21-55
	Maksimalni tok I_{max} (A)	10,5
	Maksimalni kratkostični tok $I_{SC, max}$ (A)	12,5
Izmenični del:	Nazivna napetost U_n (V)	230
	Nazivna frekvenca f_n (Hz)	50
	Nazivna navidezna moč S_n (VA)	290
	Nazivna delovna moč P_n (W)	260
	Nazivna jalova moč Q_n (VAr)	128
	Nazivni tok I_n (A)	1,15

Mikropretvornik, prikazan na sl. 2, ima v primerjavi s centralnimi pretvorniki številne prednosti. Največja je seveda možnost prilagajanja točke maksimalne moči posameznemu fotonapetostnemu modulu. Ostale prednosti so možnost nastavitve omejitve generirane delovne moči, možnost generiranja jalove moči po statični karakteristiki, s fiksnim faktorjem moči ali fiksno nastavljeno referenčno vrednostjo. Vse nastavitve je mikropretvorniku mogoče poslati preko komunikacijskega vmesnika 'Communication Gateway' [11] podjetja Letrika Sol, d.o.o, ki z mikropretvorniki v fotonapetostnem sistemu komunicira preko WMBUS komunikacije. Omenjen komunikacijski vmesnik je prikazan na sl. 3.



Sl. 3: Komunikacijski vmesnik 'Communication Gateway' podjetja Letrika Sol [12]

Na komunikacijskem vmesniku je inštaliran operacijski sistem Embedded Linux z integriranim spletnim strežnikom. Uporabnik lahko komunikacijski vmesnik poveže v splet preko WiFi ali ethernet povezave ter tako preko spleta dostopa do najrazličnejših podatkov o fotonapetostnem sistemu. Ista povezava pa tudi služi za nastavljanje zgoraj omenjenih nastavitev posameznega mikropretvornika ali celotnega fotonapetostnega sistema. Da lahko omenjen fotonapetostni sistem obratuje, morajo biti posamezni mikropretvorniki na izmeničnem delu povezani v elektroenergetsko omrežje. Izvedba te povezave je podrobneje predstavljena v naslednjem razdelku.

2.2 Krmilni sistem z zajemom podatkov in možnostjo dodajanja povezav

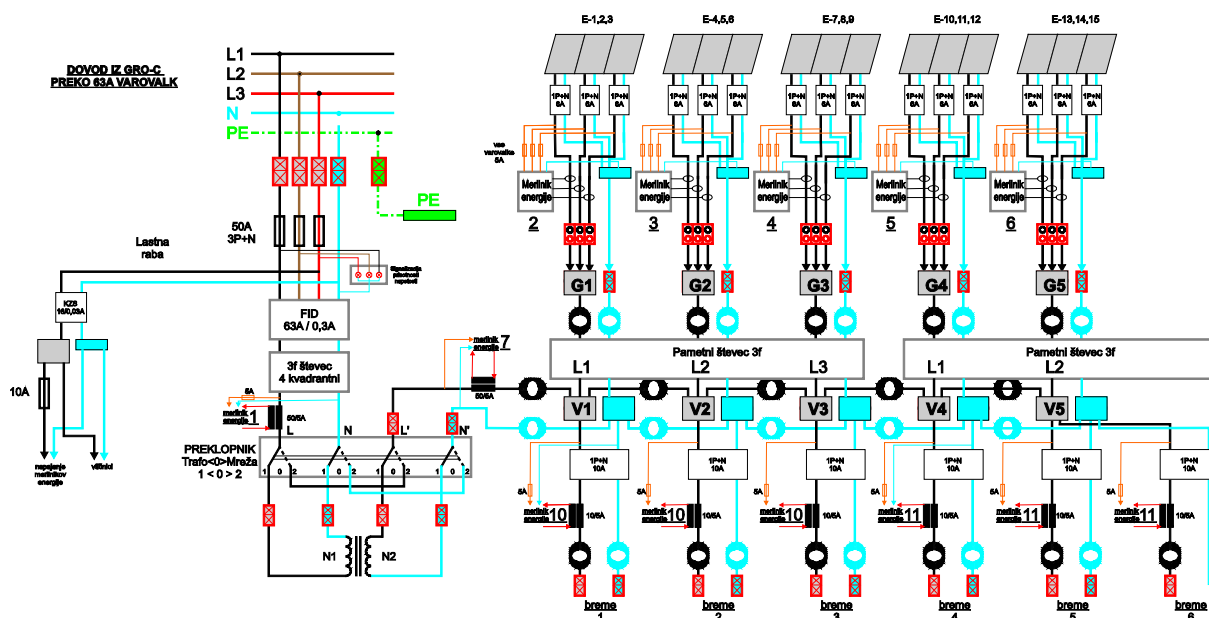
Pomemben del eksperimentalnega sistema predstavlja merilni sistem, katerega osnova so merilniki ElNet LT [13]. Vsak fazni in nevtralni vodnik posameznega mikropretvornika sta povezana v merilno omaro v prostorih Laboratorija za energetiko, kjer so nameščeni omenjeni merilniki, prikazani na sl. 4.



Sl. 4: Namestitev merilnikov ElNet LT v merilno omaro

Ti merilniki zajemajo električne veličine kot so efektivna vrednost napetosti, toka, delovne moči, jalove moči za osnovni in vsoto vseh harmonikov ter faktor celostnega harmonskega popačenja za tok in napetost. Izmerjene sekundne vrednosti se preko TCP/IP omrežja prenašajo v strežniško aplikacijo, kjer se zadnjih 400 vrednosti za vsak merilnik shranjuje v podatkovno bazo, trajno pa se beležijo minutna povprečja izmerjenih vrednosti. Na takšen način je mogoče dolgoročno opazovati delovanje posameznih modulov fotonapetostnega sistema, sekundne vrednosti pa je v navezavi s pošiljanjem referenčnih vrednosti omejitve delovne moči ter generacije jalove moči posameznim mikropretvornikom mogoče uporabiti za izvajanje regulacije v eksperimentalnem omrežju.

Natančna povezava posameznih mikropretvornikov in merilnikov je prikazana na sl.Sl. 5 zgoraj desno. Petnajst fotonapetostnih modulov z mikropretvornikom je oštevilčenih z oznakami E-1, E-2, ..., E-15. Pod njimi so priključeni ElNet merilniki (oznaka merilnik energije) s številkami 2, 3, ..., 6.



Sl. 5: Shema povezave eksperimentalnega sistema v elektroenergetsko omrežje

Po trije mikropretvorniki so za tem povezani v tako imenovana generatorska vozlišča označena z oznakami G1, G2, ..., G5. Za generatorskimi vozlišči sta priključena dva omrežna trifazna pametna števci podjetja Iskraemeco [14], enofazni pa je priključen na mesto, kjer je na sl. 5 označen trifazni 4 kvadrantni števec. Pametni števci podjetja Iskraemeco so prikazani na sl. 6 in so tipa ME381 (enofazni) in MT381 (trifazni). Za trifaznima števčema podjetja Iskraemeco sledijo vozlišča omrežja označena z oznakami V1, V2, ..., V5. Iz druge strani vozlišč omrežja pa je 6 priključnih mest za bremena, katera so prav tako opremljena z merilniki ElNet. Povezave med posameznimi vozlišči in vozlišči omrežja, med vozlišči omrežja in generatorskimi vozlišči ter med vozlišči omrežja in bremenami je mogoče poljubno podaljševati in tako simulirati elektroenergetsko omrežje. V omrežje je predvidena tudi priključitev enofaznega transformatorja označenega na sl. 5 z možnostjo serijskega vsiljevanja toka.



Sl. 6: Omrežni pametni števeci podjetja Iskraemeco

V merilni omari se za namene regulacije omrežja periodično berejo merilni podatki pametnih števecov podjetja Iskraemeco, s katerimi je mogoče komunicirati preko PLC (power line communication) povezave. Ta je izvedena preko PLC modema v števcih in dodatnega PLC modema v merilni omari, ki je priključen na osebni računalnik. Na osebni računalnik teče programski paket Sep2 z spletnim strežnikom, ki po eni strani bere merilne podatke števecov in jih nato po drugi strani pošilja v splet za uporabo v regulacijski aplikaciji.

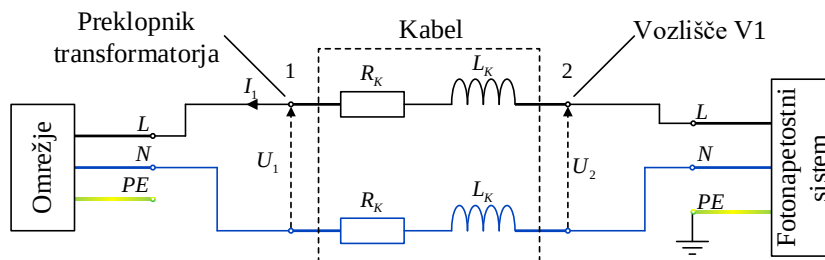
Eksperimentalni sistem, predstavljen v tem poglavju, omogoča z oblikovanjem povezav izvedbo enofaznega ali trifaznega elektroenergetskega omrežja, napreden zajem podatkov pa omogoča izvedbo regulacije. Primer obratovanja enofaznega nizkonapetostnega omrežja je prikazan v naslednjem poglavju.

3. OVREDNOTENJE VPLIVA GENERACIJE JALOVE MOČI

V tem poglavju predstavljeno ovrednotenje generacije jalove moči je izvedeno na eksperimentalnem sistemu, predstavljenem v poglavju 2. Izvedba meritev je podrobneje predstavljena v razdelku 3.1, rezultati meritev pa v razdelku 3.2.

3.1 Opis izvedbe meritev

Simulacija elektroenergetskega omrežja je izvedena s pomočjo opletenega energetskega kabla $7 \times 4 \text{ mm}^2$ okvirne dolžine 300 m. Za simulacijo omrežja so uporabljeni le 4 vodniki omenjenega kabla tako, da se meritve izvajajo na eni strani kabla, na drugi pa sta paroma po dva vodnika povezana skupaj. Na takšen način je izvedeno podaljševanje faznega kot tudi nevtralnega vodnika. Kabel je v eksperimentalni sistem priključen med vozlišče V1 in preklopnik transformatorja (glej sl. 5). Vse meritve napetosti in toka so izvedene z merilnim sistemom Sirius (serijska številka D00C018079). Pri tem se merilne napetostne sponke direktno priključijo v merilni sistem, meritev toka pa je izvedena s tokovnimi klešči Chauvin Arnoux 10A/1V-100A/1V. Poenostavljena merilna shema je prikazana na sl. 7.

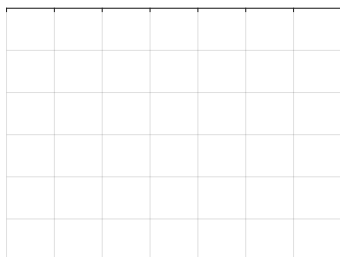


Sl. 7: Poenstavljena merilna shema

Kot je razvidno iz sl. 7, je za vozliščem V1 enofazno priključen celoten fotonapetostni sistem nazivne moči 3750 W (15x250 W) z možnostjo generacije jalove moči ± 2000 Var (15x130 Var). Omenjen fotonapetostni sistem je dalje preko obravnavanega kabla povezan v omrežje v skladu s shemo na sl. 7. Rezultati vpliva generirane jalove moči na simulirano omrežje so prikazani v naslednjem razdelku.

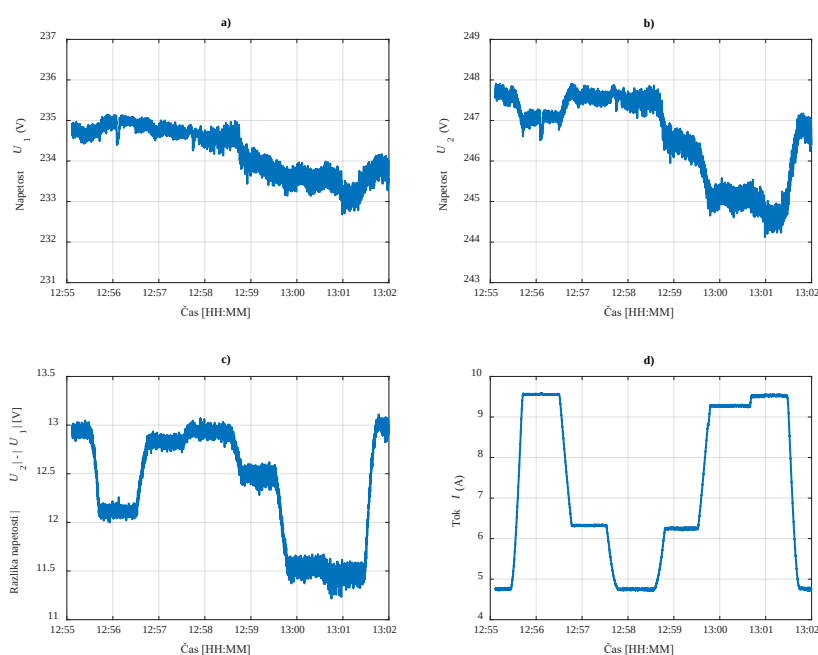
3.2 Rezultati

V nadaljevanju so prikazani rezultati meritev, pri katerih se spreminja generacija jalove moči fotonapetostnega sistema priključenega v točko 2 na sl. 7. Glede na označeno smer toka, bo pozitivni predznak jalove moči označeval generirano jalovo moč kapacitivnega značaja (proizvodnja jalove moči), negativni predznak pa jalovo moč induktivnega značaja (poraba jalove moči). Vsota referenčnih vrednosti, ki so bile poslane fotonapetostnemu sistemu v posameznem trenutku znašajo 0, 1950, 975, 0, -975, -1950 in 0 var. Odziv generirane jalove moči v omrežju je za točki 1 in 2 prikazan na sl. 8 a).



Sl. 8: Rezultati meritev delovnih in jalovih moči v omrežju

Generirana delovna moč fotonapetostnega sistema, je bila v tem eksperimentu omejena na 1200 W, njen časovni potek na obeh straneh kabla pa je prikazan na sl. 8 b). Izgube delovne moči za osnovni harmonik so prikazane na sl. 8 c), izgube jalove moči za osnovni harmonik pa so prikazane na sl. 8 d). Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da generirana jalova moč induktivnega ali kapacitivnega značaja povečuje izgube delovne moči, medtem ko se izgube jalove moči ne spreminjajo bistveno. Iz rezultatov je tudi razvidno, da fotonapetostni sistem ne sledi popolnoma nastavljeni omejitvi delovne moči, ta je očitno odvisna od generirane jalove moči fotonapetostnega sistema. Napetosti in tok pri izvajanju eksperimenta sta prikazana na sl. 9. Na sl. 9. a) in b) sta prikazani efektivni vrednosti napetosti na obeh straneh kabla, na sl. 9. c) je prikazana razlika napetosti, na sl. 9. d) pa je prikazan tok skozi kabel.



Sl. 9: Rezultati meritev napetosti in toka v omrežju

Iz rezultatov na sl. 9. c) je razvidno, da bo pri tej vrsti kabla generiranje jalove moči kapacitivnega kot tudi induktivnega značaja povzročilo nižanje napetosti pri fotonapetostnem sistemu, vendar pa bo generacija jalove moči induktivnega značaja bolj učinkovita. Razlog zakaj je vpliv jalove moči na napetost tako majhen je nizko razmerje med reaktanco in upornostjo kabla, ki je pri tem kablu še posebej nizko. Iz prikazanih rezultatov lahko zaključimo, da bo generirana jalova moč omogočila večjo generirano delovno moč v omrežju, vendar na račun izredno povečanih izgub v omrežju.

4. SKLEP

Za eksperimentalno določanje vplivov generacije jalove moči na niskonapetostna omrežja so potrebni eksperimentalni sistemi. Eden izmed takšnih eksperimentalnih sistemov je prikazan in opisan v predstavljenem delu. Iz rezultatov preskusov je razvidno, da tudi v niskonapetostnem omrežju jalova moč vpliva na napetostne razmere v omrežju, vendar pa

povzroča velike dodatne izgube v omrežju. Večji vpliv na napetost bi jalova moč imela, v primeru uporabe kabla z večjim razmerjem med reaktanco in upornostjo omrežja. Vse omenjene vplive bo mogoče preveriti pri nadaljnjem delu z eksperimentalnim sistemom.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] D. Banović, Lokalna sekundarna regulacija napetosti elektroenergetskega sistema z upoštevanjem vpliva sončnih elektrarn (magistrsko delo), Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2014.
- [2] E. Demirok, P. C. González, K. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez in R. Teodorescu, „Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids,“ *IEEE Journal of Photovoltaics*, Izv. 1, št. 2, pp. 174-182, 2011.
- [3] E. Belič, K. Deželak in G. Štumberger, „Analiza vpliva pretoka energije preko različnih nizkonapetostnih vodov na napetostni profil omrežja,“ v *23. mednarodno posvetovanje Komunalna energetika*, Maribor, 13. do 15. maj, 2014.
- [4] E. Belič, K. Dežan, N. Lukač in G. Štumberger, „Analiza prihrankov energije v nizkonapetostnem omrežju, deseženih z optimalno energijo jalove moči fotovoltaičnih sistemov,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 83, št. 1/2, pp. 37-41, 2016.
- [5] E. Demirok, D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez in U. Borup, „Clustered PV inverters in LV networks: An overview of impacts and comparison of voltage control strategies,“ v *Electrical power & energy conference (EPEC)*, 2009.
- [6] A. Gross, J. Bogenberger in D. Thyr, „Impacts of large scale photovoltaic systems on the low voltage network,“ *Solar Energy*, Izv. 59, št. 4-6, pp. 143-149, 1997.
- [7] A. Canova, L. Giacccone, F. Spertino in M. Tartaglia, „Electrical impact of photovoltaic plant in distribution network,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Izv. 45, št. 1, pp. 341-347, 2009.
- [8] F. M. González-Longatt, „Impact of distributed generation over power losses on distribution system,“ v *9th International Conference Electrical Power Quality and Utilization*, Barcelona, 2007.
- [9] S. Cobben, B. Gaidon in H. Laukamp, „Impact of photovoltaic generation on power quality in urban areas with high PV population, Results from monitoring campaigns,“ *PV - Upscale, PV in Urban Policies - Strategic and Comprehensive Approach for Long-term Expansion*, 2008..

- [10] „Lertika Sol, Solar Micro Inverter 260,“ [Elektronski]. Available: <http://www.letrikasol.com/sl/#/solar-microinverter-260>. [Poskus dostopa 7. april 2016].
- [11] „Letrika Sol, Communication Gateway,“ [Elektronski]. Available: <http://www.letrikasol.com/sl/#/communication-gateway>. [Poskus dostopa 7. april 2016].
- [12] „Letrika Sol,“ [Elektronski]. Available: http://www.letrikasol.com/media/img/0000011970-Cover_banner_izdelki_slo.jpg. [Poskus dostopa 7. april 2016].
- [13] „Merlniki Elnet LT,“ [Elektronski]. Available: <http://elnet.feniks-pro.com/Elnet-LT-slo.php>. [Poskus dostopa 7. april 2016].
- [14] „Iskraemeco pametni števcı serije Mx38y,“ [Elektronski]. Available: <http://www.iskraemeco.com/si/portfelj/stevci-elektricne-energije/pametni-gospodinjski-stevci/mx38y/>. [Poskus dostopa 8. april 2016].

NASLOV AVTORJEV

Ernest Belič, mag. inž. el.

Jurček Voh

Primož Sukič, mag. inž. el.

red. prof. dr. Gorazd Štumberger, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 7175

Elektronska pošta: ernest.belic@um.si