

ZAGOTAVLJANJE USTREZNIH NAPETOSTNIH PROFILOV V DISTRIBUCIJSKEM OMREŽJU S POMOČJO FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV

Nevena SREČKOVIĆ, Mislav TRBUŠIČ, Ernest BELIČ, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Pospešeno vključevanje razpršenih virov (RV) električne energije zahteva ovrednotenje različnih učinkov, ki jih RV imajo na obratovanje električnega omrežja. Pravilno umeščeni fotonapetostni (PV) sistemi z ustreznimi sistemi vodenja lahko ugodno vplivajo na napetostni profil ter zmanjšanje izgub električne energije na elementih omrežja. Ta prispevek obravnava možnosti zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov v sredjenapetostnem delu distribucijskega omrežja, in sicer z optimalno generacijo jalove moči in/ali redukcijo generacije delovne moči PV sistemov. Časovno diskretni izračuni obratovalnih stanj skozi leto so bili opravljeni na realnih primerih dveh sredjenapetostnih omrežjih. Določitev optimalnih vrednosti generacije jalove in redukcije delovne moči je izvedena s pomočjo diferencne evolucije v časovnih točkah, kjer nastopijo napetosti, večje od dovoljenih. Dobljeni rezultati kažejo na smiselnost generacije jalove moči PV sistemov pri zagotavljanju ustreznih napetostnih profilov. Omejevanje generacije delovne moči je smiselno šele, ko z generacijo jalove moči ni mogoče zagotoviti ustreznih napetostnih profilov.

ABSTRACT

Proliferation of the distributed electric power generation (DG) units requires the evaluation of different effects that DG units may have on the electricity network operation. Photovoltaic (PV) systems that are properly placed and sized, as well as equipped with the suitable control systems, may have positive impact on the voltage profiles and the reduction of losses of electric energy within the network. This paper discusses the possibility of providing the proper voltage profiles within the medium voltage distribution network, using the optimal reactive power generation and/or optimal reduction of active power generation from PV systems. Time – discrete calculation of the network operating conditions throughout the year were performed on two existing medium voltage distribution networks. Optimal values of reactive power generation and the reduction of active power generation were determined using the differential evolution in time points, where voltage rise, higher than the allowed, occurred. The results obtained suggest that reactive power generation from the existing PV systems should be used in voltage control, followed by the reduction of active power generation when necessary.

1. UVOD

Z direktivo Evropskega parlamenta in sveta Evropske unije [1] se je začelo z aktivnim spodbujanjem povečevanje deleža proizvedene električne energije iz obnovljivih virov. V prvih letih po objavi le te, je v Sloveniji bil zabeležen hiter porast števila priključenih fotonapetostnih (PV) sistemov, vendar je ta trend trenutno upočasnen, zaradi močnega znižanja podpornih shem, do katerega je prišlo koncem leta 2012. Kljub temu je število PV sistemov, priključenih v distribucijsko omrežje že v letu 2012 preseglo cilje, zastavljene za leto 2020 [2].

Pravilna umestitev novih proizvodnih enot v distribucijsko omrežje lahko ima številne tehnične in ekonomske koristi za delovanje omrežja [3], [4], vendar pa predstavlja izziv s stališča zagotovitve ustreznih napetostnih profilov in preprečevanja preobremenitev posameznih elementov sistema [5], [6]. Z novimi pristopi aktivnega sodelovanja v omrežje priključenih PV sistemov [7], [8] se lahko zagotovita stabilno delovanje omrežja in zanesljiva oskrba porabnikov, brez večjih investicij in posegov v samo omrežje. Primeri nacionalnih navodil za vključevanje PV sistemov, ki jih že upoštevajo kot aktivne dele omrežja podaja [9], [10], [11].

Z nezanemarljivim številom priključenih PV sistemov v slovenskem distribucijskem omrežju narašča potreba po analizi vpliva PV sistemov na obratovanje realnih delov distribucijskega omrežja. Ta prispevek je nastal na osnovi delov izsledkov študijske naloge [12], ki je ovrednotila različne učinke generacije jalove moči v PV sistemih na obratovanje razdeljevalnega omrežja. Njegov osnovni cilj je prikazati možnosti zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov v distribucijskem omrežju s pomočjo v omrežje priključenih PV sistemov. Drugo poglavje prispevka poda opis treh obratovalnih scenarijev zagotavljanja napetostnih profilov z optimalno generacijo jalove in/ali optimalno redukcijo generacije delovne moči v PV sistemih. Dva modela realnih SN izvodov ter časovno odvisni profili odjema in proizvodnje PV sistemov, dobljenih na osnovi meritev, sta predstavljena v tretjem poglavju. Četrto poglavje poda rezultate opravljenih izračunov, čemur sledi peto poglavje, ki poda zaključne ugotovitve.

2. OBRATOVALNI SCENARIJI ZAGOTAVLJANJA USTREZNIH NAPETOSTNIH PROFILOV

Ovrednotenje obratovalnih stanj omrežij se opravlja na osnovi časovno diskretnih izračunov pretokov energije. V ta namen je v prispevku uporabljena »backward – forward sweep« (BFS) metoda [13], ki predstavlja primerno izbiro za obravnavo radialnih omrežij. V primeru, ko je v določenem časovnem trenutku na osnovi izračuna obratovalnega stanja določeno, da so dovoljeni napetostni profili preseženi, se v tej obratovalni točki ustrezni napetostni profili zagotovijo z generacijo jalove moči oz. z redukcijo generacije delovne moči v omrežju obstoječih PV sistemov. Določitev optimalnih vrednosti generacije in redukcije je narejena s pomočjo optimizacijske metode – diferenčne evolucije (DE) [14]. DE, predstavlja postopek iskanja optimalnih rešitev izbrane kriterijske funkcije q_{fun} , na osnovi posnemanja naravnih procesov mutacije, križanja in selekcije iskanih parametrov. V tem prispevku so bila

obravnavana tri obratovalna scenarija zagotavljanja napetostnih profilov s pomočjo PV sistemov, in sicer:

- 1) s pomočjo optimalne generacije jalove energije (**Q-opt**)
- 2) s pomočjo optimalne redukcije generacije delovne energije (**P-opt**)
- 3) s pomočjo optimalne kombinacije generacije jalove in omejevanja generacije delovne moči (**PQ-opt**).

Kriterijski funkciji, uporabljeni v navedenih obratovalnih scenarijih, podaja Tabela 2.1. V obeh enačbah parameter p predstavlja penale, s katerimi se zagotovi, da so različni obratovalni parametri znotraj predpisanih mej (napetostni profili, tokovne omejitve, $\cos \varphi \leq 0,8$).

Tabela 2.1: Kriterijski funkciji za zagotavljanje optimalne generacije jalove in/ali redukcije delovne moči.

Obratovalni scenarij	Kriterijska funkcija
Q-opt P-opt	$q_{\text{fun}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_1^n W_{\text{genPO_OPT},n}}} + p \quad (2.1)$
PQ-opt	$q_{\text{fun}} = \frac{W_{\text{izgPO_OPT}} + (\sum_1^n W_{\text{genPRED_OPT},n} - \sum_1^n W_{\text{genPO_OPT},n})}{W_{\text{izgPRED_OPT}} + \sum_1^n W_{\text{genPRED_OPT},n}} + p \quad (2.2)$

V primeru zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov z generacijo jalove moči (**Q-opt**) ali z redukcijo delovne moči (**P-opt**), uporabimo enako kriterijsko funkcijo, ki poskrbi, da je zmanjšanje proizvodnje PV sistemov, zaradi vpliva zmanjšanja izkoristka mikroinverterjev zaradi generacije jalove moči [15] pri **Q-opt**, oz. direktno zaradi redukcije delovne moči pri **P-opt**, najmanjše. Kriterijska funkcija je za ta dva primera podana z (2.1) in je pri tem iskana le en parameter, ki predstavlja relativni delež generacije jalove oz. relativni delež zmanjšanja proizvodnje delovne moči. Določitev le enega iskalnega parametra zagotovi, da je sprememba obratovanja PV sistemov pravično razporejena med vsemi elektrarnami. V (2.1) je $W_{\text{genPO_OPT},n}$ [kWh] energija fotonapetostnih sistemov, prisotnih v n vozlišč sistema, dobljena s pomočjo DE v vsakem obravnavanem enournem časovnem intervalu, v katerem je napetost vozlišč bila presežena.

Pri **PQ-opt** sta hkrati iskana relativna deleža generacije jalove in redukcije delovne moči, ki sta za vse PV sisteme enaki, in ki bosta zagotovila najmanjšo izgubo električne energije (v omrežju in na distribucijskih transformatorjih) ter hkrati najmanjše zmanjšanje proizvodnje električne energije iz PV sistemov. V kriterijski funkciji (2.2) so uporabljene oznake:

- n število vozlišč s priključenimi fotonapetostnimi elektrarnami,
 $W_{\text{genPO_OPT},n}$ energija, proizvedena v PV sistemih po optimizaciji [kWh],

$W_{\text{genPRED_OPT},n}$ energija, proizvedena v PV sistemih pred optimizacijo [kWh],

$W_{\text{izgPO_OPT}}$ izgube energije v omrežju in na transformatorjih po optimizaciji [kWh],

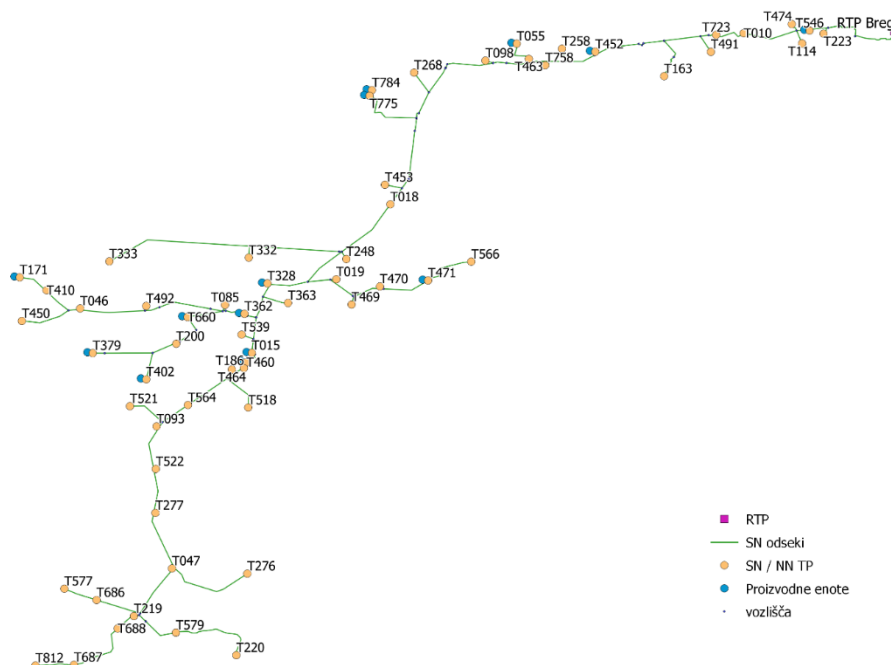
$W_{\text{izgPRED_OPT}}$ izgube energije v omrežju in na transformatorjih pred optimizacijo [kWh].

3. TESTNA RAZDELJEVALNA OMREŽJA

Pri analizi zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov s pomočjo optimalne generacije jalove in/ali redukcije generacije delovne moči PV sistemov, sta uporabljena modela dveh SN izvodov ter časovno odvisnih profilov odjema in proizvodnje električne energije. Izvoda sta v izračunu predstavljena z enofaznimi modeli, pri izračunu izgub so upoštevane izgube zaradi tokov, ki tečejo prek RTP, SN/NN transformatorskih postaj ter vodnikov.

3.1 Modeli omrežij

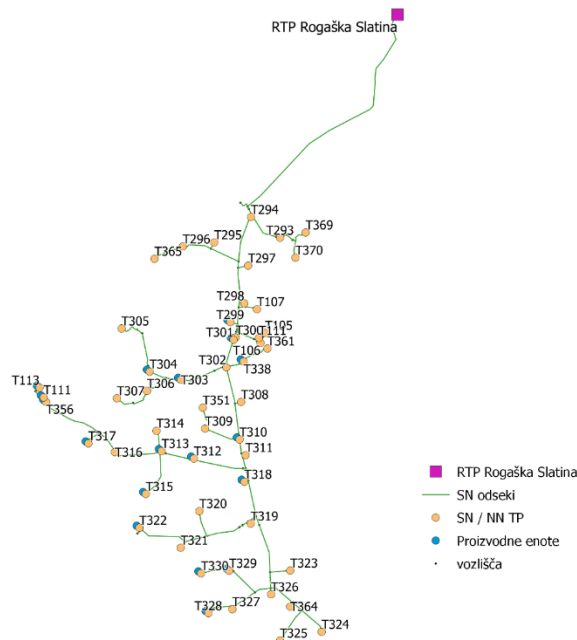
SN izvod Majšperk je podeželski tip omrežja, napajan iz 110/20 kV RTP Breg, moči 31,5 MVA. Izvedba omrežja je večinoma z golimi Al/Fe vodniki, skupne dolžine 58,8 km. Izvod napaja 61 transformatorskih postaj 20/0,4 kV in eno 1/0,4 kV, s konično obremenitvijo izvoda v letu 2013 3,80 MVA. Na izvod je priključenih 28 proizvodnih enot, skupne inštalirane moči 3,82 MW (25 PV sistemov in tri plinske kogeneracije), v 14 vozliščih sistema. Enopolno shemo omrežja kaže Slika 3.1



Slika 3.1: Enopolna shema SN omrežja izvoda Majšperk.

Podčetrtek, radialni, 20 kV izvod iz 110/20 kV RTP Rogaška Slatina, moči 31,5 MVA, napaja 52 SN/NN transformatorskih postaj, konične obremenitve 2,50 MW, in je deloma

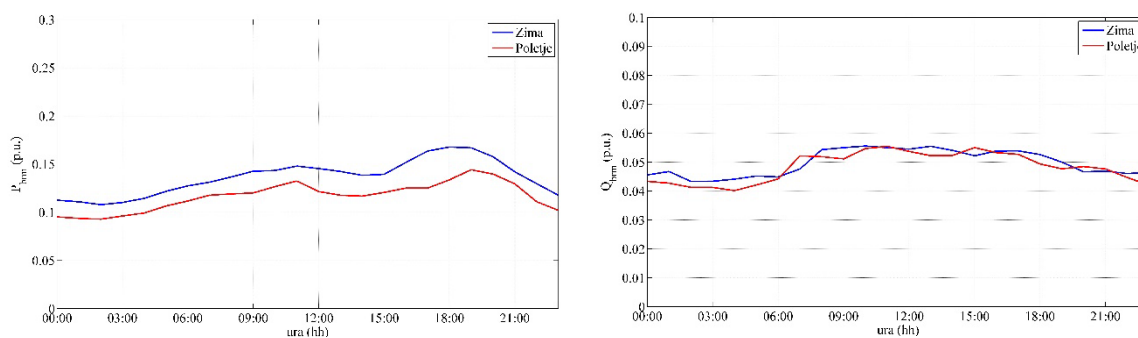
zračne, deloma kableske izvedbe (večinoma Al/Fe vodniki ter XHE49A kabli), skupne dolžine 59,7 km. Na izvod je priključenih 27 PV sistemov v 18 vozliščih izvoda, skupne inštalirane moči 1,97 MWp. Enopolno shemo omrežja kaže Slika 3.2.



Slika 3.2: Enopolna shema SN izvoda Podčetrtek.

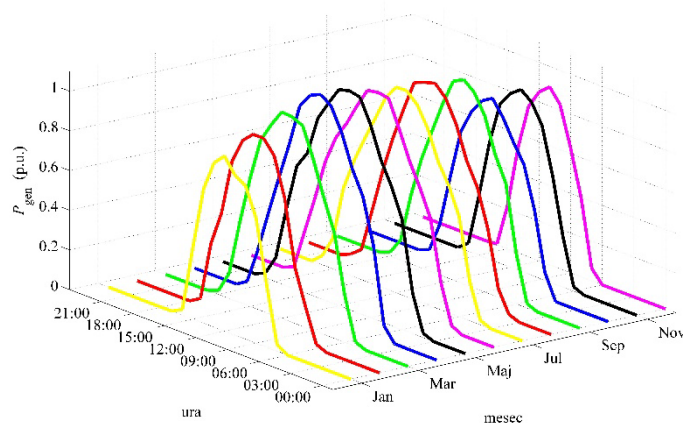
3.2 Časovno odvisni profili odjema in osončenja

Izračuni obratovalnih stanj testnih omrežij so bili opravljeni v enournih intervalih za povprečni dan vsakega meseca. Pri tem sta bila upoštevana minimalna diagrama odjema električne energije, določena za povprečni poletni mesec (maj, junij, julij, avgust, september, oktober) ter povprečni zimski mesec (november, december, januar, februar, marec, april). Diagrame minimalnega odjema delovne in jalove moči, določene na osnovi enoletnih meritev v več točkah obstoječega SN omrežja, normirane na nazivno moč transformatorske postaje, poda Slika 3.3.



Slika 3.3: Diagrami minimalne obremenitve za delovno (levo) ter jalovo moč (desno).

Diagrami relativnega maksimalnega osončenja (Slika 3.4) so določeni na osnovi meritev moči na večjem številu PV sistemov. Zaradi neenakih nazivnih moči PV sistemov so izmerjeni diagrami osončenja normirani na maksimalno moč in so nato določeni povprečni normirani profili osončenja po posameznih mesecih.

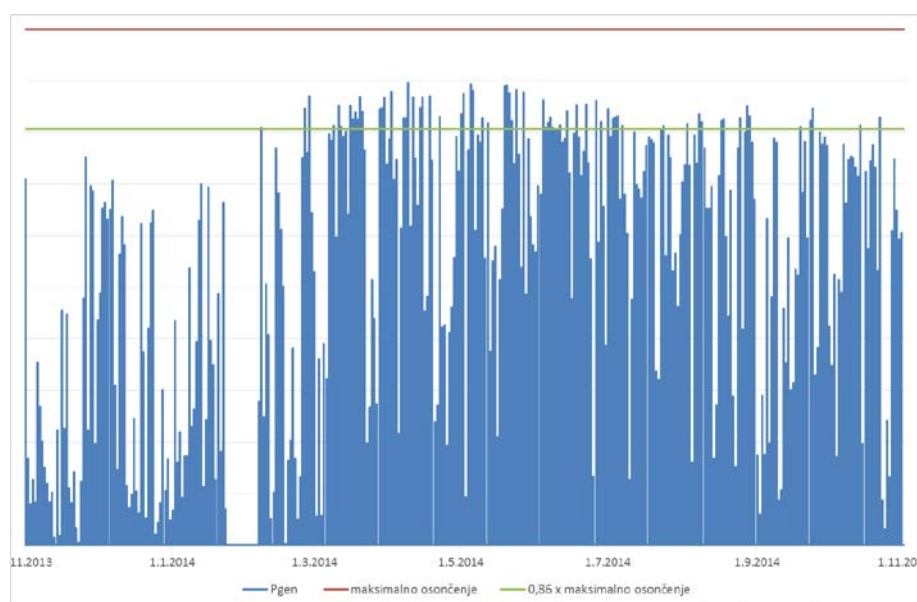


Slika 3.4: Diagram relativnega maksimalnega osončenja.

4. REZULTATI

V primeru, da je v določenem delu omrežja proizvodnja električne energije večja od porabe, pride do povišanja napetosti, ki je lahko večje od dovoljenega odstopanja. V Sloveniji je v SN delu omrežja dovoljeno odstopanje od nazivne vrednosti napetosti $\pm 10\%$, oz. $20 \text{ kV} \pm 2 \text{ kV}$. Ker se izkaže, da v obravnavanih omrežjih ni dovolj proizvodnih enot, ki bi povzročile takšne dvige napetosti, je tolerančno območje znižano na $\pm 3\%$. Hkrati je upoštevana 50% večja nazivna moč v omrežjih obstoječih PV sistemov. Na ta način so ustvarjene težave z napetostnimi profili in so lahko analizirane možnosti zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov s pomočjo aktivnega sodelovanja v omrežju obstoječih PV sistemov. Pri tem je treba izpostaviti tudi dejstvo, da SN omrežja običajno obratujejo pri višjih izhodiščnih napetostih, tudi okrog $21,3 \text{ kV}$, vendar se je izkazalo, da upoštevanje izbranega tolerančnega pasu napetosti okrog $21,3 \text{ kV}$ vodi do podobnih izsledkov kot okrog 20 kV .

Izračuni obratovalnih stanj so bili opravljeni za vsako uro povprečnega dne v mesecu, ob upoštevanju minimalnega profila obremenitve in maksimalnega profila osončenja. Izkaže se, da do težav z napetostmi pri obeh testnih omrežjih, ob opisanem obratovalnem scenariju pride, kadar osončenje preseže 86% maksimalne vrednosti osončenja v letu. Glede na podatke meritev se to dogaja približno 127 ur v letu.



Slika 4.1: Prikaz določitve števila ur, v katerih lahko prihaja do težav z dvigom napetosti, na primeru enoletnih meritev proizvodnje PV sistema.

Tabela 4.1: Sprememba proizvodnje in izgub električne energije za dve omrežji in tri scenarija zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov.

Omrežje	Obratovalni scenarij	ΔW_{izg} (kWh)	ΔW_{gen} (kWh)
MAJŠPERK	Q-opt	199,31	-2,03
	P-opt	-496,49	-7092,99
	PQ-opt	177,64	-4,33
PODČETRTEK	Q-opt	81,25	-0,32
	P-opt	-257,39	-3866,95
	PQ-opt	73,22	-1,50

Rezultate letnih vrednosti sprememb proizvodnje delovne moči PV sistemov ΔW_{gen} ter spremembo izgub električne energije v vodih ter transformatorskih postajah omrežij ΔW_{izg} , podaja tabela Tabela 4.1. Ustrezni napetostni profili so v prvem primeru zagotovljeni z optimalno generacijo jalove moči induktivnega značaja (**Q-opt**), ki ima za posledico nižje napetosti vozlišč sistema, vendar hkrati povzroči povečanje prenosnih izgub v omrežju, zaradi upoštevanja bremen induktivnega značaja. Kljub temu se celotne izgube v transformatorjih in omrežju na letni ravni povečajo le za 200 kWh v primeru Majšperka oz. za 80 kWh v primeru Podčetrka. Pri tem se proizvodnja električne energije zaradi generacije jalove moči in posledično zmanjšanja izkoristka pretvornikov nekoliko zmanjša (le 2 kWh, oz 0,32 kWh na letni ravni).

Pri **P-opt** se dovoljene napetosti zagotovijo samo z omejevanjem proizvodnje PV sistemov. Za to je na letni ravni potrebno generacijo delovne moči v primeru omrežja Majšperk zmanjšati za 7,1 MWh, oz. 3,9 MWh v primeru Podčetrka. Zaradi zmanjšane proizvodnje električne

energije in posledično manjših tokov skozi elemente omrežja so tudi izgube v omrežju manjše, vendar na nezanemarljivo škodo lastnikom proizvodnih enot.

Pri **PQ-opt** je optimalno obratovanje bilo tisto, pri katerem so izgube v omrežju in izgube proizvedene energije najmanjše. Glede na to, da redukcija delovne moči obravnavanih omrežij ima majhen vpliv na zmanjšanje prenosnih izgub v omrežju (1 kW zmanjšanja generacije delovne moči ima za posledico zmanjšanje prenosnih izgub v omrežju za manj kot 0,1 kW), se prenosne in izgube proizvodnje najmanj spremenijo z generacijo jalove moči. Zato so dobljeni rezultati **PQ-opt** zelo podobni rezultatom **Q-opt** s tem, da **PQ-opt** povzroči manjše povečanje izgub pri prenosu električne energije ob nekoliko večjem zmanjšanju proizvodnje PV sistemov. Zato je s stališča lastnikov PV sistemov najbolj smiselno uporabiti **Q-opt**, in šele, če ta ne bi bila zadostna za zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov tudi omejiti generacijo delovne moči.

5. SKLEP

Prispevek analizira možnost zagotavljanja ustreznih napetostnih profilov na primeru dveh realnih SN omrežjih z obstoječimi PV sistemi. Na napetosti se je vplivalo na tri načina: z optimalno generacijo jalove moči (**Q-opt**), z optimalno redukcijo generacije delovne moči (**P-opt**), ter z optimalno kombinacijo generacije jalove in redukcijo delovne moči PV sistemov (**PQ-opt**). Pri ovrednotenju obratovalnih stanj so upoštevani iz meritev določeni minimalni profili obremenitve ter maksimalni profili osončenja. Ker v obravnavanih SN omrežjih ne pride do dviga napetosti, ki bi bil večji od dovoljenega deset procentnega, smo obratovalne scenarije nekoliko prilagodili, tako da so se pojavile težave, ki so omogočale analizo zastavljenega problema. Nato je ovrednoteno obratovalno stanje v vsaki uri povprečnega dneva v mesecu in v primeru, ko so zastavljeni pogoji prekršeni, so uporabljeni opisani scenariji optimizacij.

Rezultati nakazujejo, da se z aktivnim sodelovanjem PV sistemov lahko zagotovijo ustrezni napetostni profili. Rezultati so v primerih **Q-opt** ter **PQ-opt** zelo podobni, tako glede povečanja izgub v omrežju kot tudi glede zmanjšanja proizvodnje PV sistemov. **P-opt** prinaša znatno zmanjšanje izgub kot tudi proizvodnje, in jo je zato smiselno uporabiti le, če ni druge rešitve za zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov. Glede na dobljene rezultate je za zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov najprej smiselno uporabiti generacijo jalove moči in za tem še kombinacijo generacije jalove moči in redukcije delovne moči. Hkrati je potrebno tudi pripomniti, da so dobljene vrednosti spremembe prenosnih izgub in izgub proizvodnje odvisne od upoštevanih obratovalnih razmer, kot tudi značaja priključenih bremen in vodov.

6. LITERATURA

- [1] "Direktiva 2009/28/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. aprila 2009 o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov, spremembi in poznejši razveljavitvi direktiv 2001/77/ES in 2003/30/ES (Besedilo velja za EGP)." Uradni list Evropske unije, 06-May-2009.

- [2] F. Al-Mansour, B. Sucic, and M. Pusnik, "Challenges and prospects of electricity production from renewable energy sources in Slovenia," *Energy*, vol. 77, pp. 73–81, Dec. 2014.
- [3] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and Strbac, *Embedded Generation*. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [4] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin, and A. H. A. Bakar, "Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 594–605, Jan. 2016.
- [5] C. L. Masters, "Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines," *Power Eng. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–12, Feb. 2002.
- [6] E. J. Coster, J. M. A. Myrzik, B. Kruimer, and W. L. Kling, "Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 28–39, Jan. 2011.
- [7] P. M. S. Carvalho, P. F. Correia, and L. A. F. M. Ferreira, "Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 766–772, May 2008.
- [8] T. Stetz, M. Kraiczy, M. Braun, and S. Schmidt, "Technical and economical assessment of voltage control strategies in distribution grids," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 21, no. 6, pp. 1292–1307, Sep. 2013.
- [9] "Act on granting priority to renewable energy sources (Renewable Energy Sources Act – EEG) - EEG_2012_Englische_Version.pdf." [Online]. Available: https://www.clearingstelle-eeeg.de/files/node/8/EEG_2012_Englische_Version.pdf. [Accessed: 27-Jan-2016].
- [10] CEI 0-16 (Norma Italiana CEI), "Reference technical rules for the connection of active and passive users to the MV electrical utilities." 2012.
- [11] CEI 0-21 (Norma Italiana CEI), "Reference technical rules for the connection of active and passive users to the LV electrical utilities." 2012.
- [12] E. Belič, K. Dežan, K. Deželak, N. Srečković, P. Sukič, G. Štumberger, J. Voh, and J. Voršič, "Ovrednotenje učinkov generacije jalove moči v fotonapetostnih elektrarnah na razdeljevalno omrežje: študijska naloga za SODO d.o.o.: končno poročilo," Maribor: UM FERI, Laboratorij za energetiko, 2015.
- [13] D. Thukaram, H. M. Wijekoon Banda, and J. Jerome, "A robust three phase power flow algorithm for radial distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 227–236, Jun. 1999.
- [14] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces," *J. Glob. Optim.*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, Dec. 1997.
- [15] G. Štumberger, M. Rošer, P. Sukič, T. Marčič, D. Drevenšek, and V. Blažič, "Generacija jalove moči fotovoltaičnih sistemov v nizkonapetostnem omrežju – posledice za fotovoltaični sistem," presented at the Dvanajsta konferenca slovenskih elektroenergetikov, Portorož, 2015, pp. 1–14.

NASLOV AVTORJEV

Nevena Srečković, mag. inž. el.

Mislav Trbušić, univ. dipl. inž. el.

Ernest Belič, 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 70 56

Fax: + 386 2 252 54 81

Elektronska pošta: nevena.sreckovic@um.si