ANALIZA PRIHRANKOV ENERGIJE V NIZKONAPETOSTNEM OMREŽJU DOSEŽENIH Z OPTIMALNO GENERACIJO JALOVE MOČI FOTOVOLTAIČNIH SISTEMOV

Ernest BELIČ, Katarina DEŽAN, Niko LUKAČ in Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V delu je predstavljena analiza prihrankov energije v nizkonapetostnem omrežju, ki bi jih bilo mogoče doseči s pomočjo generacije jalove moči fotovoltaičnih sistemov (PVS) glede na potrebe v omrežju. Celotna analiza je narejena na modelu realnega nizkonapetostnega distribucijskega omrežja, v katerega sta priključena dva 50 kWp PVS. Prihranki energije so določeni za časovni okvir enega leta. Pri tem so delovne moči PVS določene na podlagi povprečnih vrednosti izmerjenega sončnega obsevanja v polurnih intervalih, delovne moči bremen pa na podlagi profila obremenitve. Zaradi relativno velike moči trenutno inštaliranih PVS je analiza narejena tudi za primer, ko bi v omrežje bili priključeni manjši PVS z nazivno močjo 5 kWp. Rezultati kažejo, da je s pomočjo optimalne generacije jalove moči mogoče doseči prihranke energije. Ti pa se še lahko povečajo, če so v omrežje namesto velikih PVS inštalirani manjši na mestih, kjer je prisotna poraba.

ABSTRACT

This paper deals with the evaluation of energy savings that can be achieved in low voltage distribution network by photovoltaic systems (PVS) reactive power generation according to the network needs. Whole analysis is done on the model of real low voltage distribution network, where two 50 kWp PVS are installed. For evaluation of energy savings, time frame of one year is considered. Active powers of PVS are determined on the basis of average measured solar irradiance in half hour intervals and loads active powers on the basis of load profile. Since installed photovoltaic systems are relatively large, the analysis is also performed for smaller PVS with rated power of 5 kWp. The presented results shows, that energy savings can be even improved if instead of big, smaller PVS are installed at sites where consumption is present.

1. UVOD

Fotovoltaični sistemi (PVS) predstavljajo obnovljivi vir energije, ki pri svojem obratovanju ne povzroča dodatnega onesnaževanja okolja z emisijami toplogrednih plinov in hrupa. Zaradi tega so takšni PVS primerni za inštalacijo tudi v najbolj urbanih okoljih. V Sloveniji je bil dosedanji trend vključevanja PVS naklonjen množičnemu priključevanju enot

1

inštalirane moči med 10 in 50 kWp [1], [2]. Pri analizi podatkov Agencije za energijo o PVS z deklaracijo [3] za moči med 0 in 250 kWp na sl. 1 a) vidimo, da je do sedaj bilo priključeno največje število PVS z nazivnimi močmi med 0 in 50 kWp. Če podrobneje pogledamo ta interval, ki ga prikazuje slika sl. 1 b), je iz njega jasno razvidno, da je največ priključenih sistemov ravno nazivne moči med 47,5 in 50 kWp. Takšni sistemi so povečini inštalirani na večje namensko zgrajene ali industrijske objekte in ne na stanovanjske hiše.



Sl. 1: Število priključenih fotovoltaičnih sistemov v Sloveniji z deklaracijo za nazivne moči a) med 0 in 250 kWp in b) nazivne moči med 0 in 50 kWp [3]

Zaradi svoje relativno velike nazivne moči so ti PVS vključeni v nizkonapetostno omrežje v bližino transformatorske postaje ali postajo samo, priključeno pa je lahko le manjše število PVS. S takšnim načinom obratovanja je glede na trenutno regulacijo napetosti v distribucijskem omrežju zagotovljen ustrezen napetostni profil omrežja v vseh obratovalnih stanjih. Slabost takšnega načina priključitve in obratovanja PVS je, da niso dosežene prednosti PVS kot so izboljšanje napetostnega profila omrežja in zmanjšanje prenosnih izgub [4]. Omenjene prednosti bi bilo mogoče doseči, če bi bili PVS manjših moči, inštalirani na stanovanjske zgradbe in priključeni v omrežje tam, kjer je prisotna poraba.

PVS v Sloveniji morajo po navodilih SODO [5] poleg delovne moči zagotavljati tudi jalovo moč do $\cos\varphi = 0.8$ po vnaprej določeni napetostno odvisni karakteristiki. Slabost takšnega obratovanja PVS v nizkonapetostnih omrežjih je, da generirana jalova moč s strani PVS zelo malo vpliva na napetostni profil omrežja, zraven tega pa lahko povzroči dodatne izgube v omrežju [6]. Za takšne razpršene vire bi bilo zaželeno, da bi se generirana jalova moč prilagajala potrebam v omrežju, saj bi se s tem lahko zmanjšale izgube v omrežju.

V tem delu so obravnavani prihranki energije na račun zmanjšanja prenosnih izgub, ki bi jih bilo mogoče doseči v nizkonapetostnem omrežju v primeru, če bi PVS generirali jalovo moč glede na potrebe v omrežju. Vsa analiza je narejena za obdobje enega leta na modelu

realnega nizkonapetostnega omrežja, v katerega sta priključena dva 50 kWp PVS. Zaradi relativno velike moči posameznih PVS so tem delu analizirani tudi prihranki energije, ki bi jih bilo mogoče doseči, če bi namesto velikih PVS bili inštalirani manjši PVS na mestih, kjer je prisotna poraba.

Predstavljeno delo je sestavljeno na naslednji način. V razdelku 2 je podrobneje opisana določitev prihrankov energije, v razdelku 3 pa je predstavljen model omrežja z vhodnimi podatki sončnega obsevanja ter profila porabe. Rezultati prihrankov energije so predstavljeni v razdelku 4, v razdelku 5 pa je zapisan sklep.

2. DOLOČITEV PRIHRANKOV ENERGIJE

Prihranke energije v distribucijskih omrežjih je mogoče doseči s pomočjo zmanjšanja izgub, ki se v splošnem delijo na tehnične in netehnične [7]. Tehnične izgube se dalje delijo na izgube, ki so neodvisne in odvisne od obremenitve omrežja. Netehnične izgube pa predstavljajo komercialne izgube. Računsko je mogoče ovrednotiti le tehnične izgube. Zaradi tega so v tem delu prihranki energije določeni na podlagi zmanjšanja prenosnih izgub nizkonapetostnega omrežja v enem letu. Posamezna obratovalna stanja so dobljena s pomočjo metode izračuna pretokov energije Backward-forward sweep [8]. Zaradi enostavnejših izračunov, je časovno obdobje enega leta predstavljeno kot 12 karakterističnih dni (en dan za vsak mesec) v polurnih intervalih.

2.1 Izgube v nizkonapetostnem omrežju

Nizkonapetostna omrežja večinoma obratujejo radialno, zaradi tega se energija do porabnikov prenaša preko distribucijskega transformatorja in preko povezav omrežja. Izgube v omrežju $P_{izg,OMR}$ je po izračunanih pretokih energije mogoče določiti z (1)

$$P_{izg,OMR} = \sum_{n=1}^{N_b} \left| \underline{L}_n \right|^2 R_n, \qquad (1)$$

pri čemer \underline{I}_n in R_n predstavljata fazor toka in upornost veje n, N_b pa število vej v omrežju. Izgube v transformatorju $P_{izg,TR}$ (2) so sestavljene iz dveh delov, in sicer izgub v železu P_{Fe} in izgub v bakru P_{Cu} [9].

$$P_{izg,TR} = P_{Fe} + P_{Cu} \tag{2}$$

Za izgube v železu transformatorja (3) velja, da so odvisne od efektivne vrednosti napetosti $|\underline{U}|$, nazivne napetosti U_N in izgub določenih pri nazivni napetosti (prostem teku) transformatorja P_{Fe0} .

$$P_{Fe} = P_{Fe0} \frac{|\underline{U}|}{U_N}$$
(3)

Izgube v bakru pa so odvisne od toka oziroma od trenutne obremenitve |S|, nazivne navidezne moči S_N transformatorja in izgub določenih pri nazivni moči transformatorja P_{Cu} .

$$P_{Cu} = P_{Cu0} \frac{|\underline{S}|^2}{S_N^2}$$
(4)

V tem delu so v izračunih pretokov energije izgube v železu transformatorja upoštevane kot breme konstantne moči z vrednostjo P_{Fe0} . Razlog za to je, da se napetost na sponkah distribucijskega transformatorja zelo malo spreminja kar pomeni, da bo imela enačba (3) približno konstantno vrednost. Za razliko od izgub v železu so izgube v bakru odvisne od obremenitve transformatorja. Zaradi tega so v izračunih pretokov energije zajete s pomočjo kratkostične impedance transformatorja, ki upošteva upornosti navitij in razsipane reaktance transformatorja. Kratkostična impedanca transformatorja je določena s pomočjo kratkostične napetosti u_k , nazivne napetosti U_N in moči S_N transformatorja (5).

$$Z_{TR} = \frac{u_k}{100} \frac{U_N^2}{S_N}$$
(5)

Njen ohmski del R_{TR} je določen s pomočjo izgub pri nazivni moči P_{Cu0} in nazivnega toka transformatorja I_N (6).

$$R_{TR} = \frac{P_{Cu0}}{3I_N^2} \tag{6}$$

Induktivni del ali reaktanca X_T pa je nato določena z (7).

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2}$$
(7)

S tako določenimi parametri je določeno nadomestno vezje transformatorja uporabljeno v izračunu pretokov energije, ki ga predstavlja sl. 2.



Sl. 2: Nadomestno vezje transformatorja uporabljeno v izračunu pretokov energije

2.2 Optimalna generacija jalove moči fotovoltaičnih sistemov

PVS lahko v splošnem generirajo jalovo moč $|Q_G|$ induktivnega ali kapacitivnega značaja, ki je omejena z njihovo navidezno močjo $S_{G,N}$ in trenutno generirano delovno močjo P_G [10] (8).

$$|Q_{G}| = \sqrt{S_{G,N}^{2} - P_{G}^{2}}$$
(8)

Ob upoštevanju omejitve (8) bi lahko fotovoltaični sistemi generirali tudi jalovo moč, ki je večja od trenutne generirane delovne moči. Takšno obratovanje po trenutnih navodilih za obratovanje [5] ni predvideno. Zaradi tega je v tem delu upoštevana dodatna omejitev generirane jalove moči PVS v skladu s [5] ki pravi, da morajo PVS biti sposobni generirati jalovo moč do $\cos\varphi = 0.8$.

Če želimo, da PVS v opazovanem časovnem intervalu PVS generirajo jalovo moč glede na potrebe v omrežju, je potrebno minimizirati kriterijsko funkcijo (9)

$$q = \min\left(P_{izg}\right),\tag{9}$$

v kateri P_{izg} predstavlja vsoto izgub v transformatorju in v omrežju (10).

$$P_{izg} = P_{izg,OMR} + P_{izg,TR} \tag{10}$$

S pomočjo (9) so najdene takšne generirane jalove moči PVS, da so izgube v omrežju in izgube v transformatorju minimalne. Ker iskanje ustreznih generiranih jalovih moči poteka s pomočjo izračunov pretokov energije, so pri tem upoštevane še dodatne omejitve. Te predstavljajo omejitve napetostnega profila omrežja, ki mora ustrezati standardu SIST EN 50160 [11] in pa maksimalne tokovne obremenitve elementov omrežja.

Prihranke energije dobljene s pomočjo optimalne generacije jalove moči PVS je mogoče določiti za posamezni časovni interval *m* kot integral razlike izgub transformatorja in omrežja pred optimizacijo (oznaka 0) in po optimizaciji (oznaka 1) (11).

$$\Delta W_{izg,m} = \int_{t_m}^{t_{m+1}} \left(P_{izg,m}^0 - P_{izg,m}^1 \right) dt$$
(11)

Prihranki energije, doseženi v poljubnem daljšem časovnem obdobju v katerem je N_t število časovnih intervalov *m*, so določeni z (12).

$$W_{izg} = \sum_{m=1}^{N_t} \Delta W_{izg,m} \tag{12}$$

Predstavljeni način izračuna prihrankov energije je mogoče uporabiti za kakršno koli časovno obdobje, vendar pa vsaj časovno obdobje enega leta zajame vplive proizvodnje PVS, ki jih povzroči spreminjajoče sončno obsevanje v enem letu. Podrobneje je obravnavani primer nizkonapetostnega omrežja s priključenimi PVS predstavljen v naslednjem razdelku.

3. OBRAVANAVANI MODEL NIZKONAPETOSNTEGA OMREŽJA

Analiza prihrankov energije, ki je predstavljena v tem delu, je narejena na modelu realnega nizkonapetostnega omrežja Mihovce v katerega sta priključena dva PVS moči $P_{G,N} = 50$ kWp. Omenjena PVS sta na enočrtni shemi omrežja na Sl. 3 priključena v vozlišče 5 in 23.



Sl. 3: Enočrtna shema nizkonapetostnega omrežja Mihovce z obstoječimi in manjšimi (modra barva) PVS

Ta dva PVS sta uporabljena v prvem delu analize. V drugem delu analize sta omenjena PVS nadomeščena z manjšimi enotami moči $P_{G,N} = 5$ kWp, katerih priključitev je na Sl. 3 označena z modro barvo. Predstavljeno omrežje je v vključeno v srednje napetostno omrežje preko 250 kVA transformatorja Dyn5, 20kV/0.4 kV, $u_k = 4,0$ %, $P_{Fe0} = 0,6$ kW in $P_{Cu0} = 3,25$ kW. Dolžine in tipi povezav omrežja so prikazani na Sl. 3. V omrežje je priključenih tudi 31 porabnikov, katerih lokacija je označena s puščicami na Sl. 3. Njihova skupna konična moč znaša 115 kWp. V obravnavanem obdobju enega leta so vhodni podatki moči sončnih elektrarn določeni na podlagi 10 letnih meritev sončnega obsevanja *J*, ki so na Sl. 4 prikazane kot 12 karakterističnih dni pripadajočih posameznemu mesecu v letu. Posamezen dan je razdeljen na polurne intervale, pri tem pa so upoštevane povprečne vrednosti osončenja v vsakem polurnem intervalu.



Sl. 4: Povprečne izmerjene vrednosti sončnega obsevanja

V izračunu letnih prihrankov so prihranki energije, doseženi v posameznem karakterističnem dnevu, pomnoženi s številom dni v pripadajočem mesecu. Zaradi nepoznavanja časovne funkcije porabnikov v omrežju, so pri analizi prihrankov energije le ti določeni glede na posamezne priključne moči z upoštevanjem faktorja istočasnosti. Časovna funkcija posameznih porabnikov pa je določena z uporabo profila obremenitve [12] prikazanega na Sl. 5. V izračunih je upoštevana tudi jalova moč bremen, ki je določena s pomočjo coso, ki zavzame vrednost 0,95 ali 0,9.



Sl. 5: Profil obremenitve uporabljen pri analizi

Ko so tako določeni vhodni podatki posameznih PVS in porabnikov v omrežju je mogoče določiti prihranke energije v enem letu. Potek izračunov za posamezni časovni interval je shematično prikazan na Sl. 6.



Sl. 6: Potek izračuna optimalne generacije jalove moči PVS za posamezni časovni interval

Potek izračunov, ki je prikazan na Sl. 6, je enak v primeru obstoječih PVS kot tudi v primeru, ko so PVS porazdeljeni po omrežju. Tako izračunani prihranki energije so prikazani v naslednjem razdelku.

4. REZULTATI ANALIZE

V tem razdelku so prikazani prihranki energije, ki bi jih bilo mogoče doseči z generiranjem jalove moči PVS, v omrežju Mihovce prikazanem na Sl. 4. Pri tem so analizirani prihranki, ki bi jih bilo mogoče doseči z obstoječima PVS in PVS, ki so porazdeljeni po omrežju a skupno enake moči kot obstoječa PVS. Zaradi analiziranega obdobja enega leta so v karakterističnih dnevih moči PVS določene na podlagi povprečnih karakteristik sončnega obsevanja na Sl. 4. Vrednosti porabe v omrežju so določene glede na priključno moč z upoštevanjem faktorja istočasnosti in profila porabe na Sl. 5. Pri tem sta analizirana dva primera. V prvem primeru obratujejo bremena s $\cos\varphi = 0.95$, v drugem primeru pa s $\cos\varphi = 0.9$. Prihranki energije za primer ko bremena obratujejo s $\cos\varphi = 0.95$ za obstoječe in manjše PVS so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Prihranki energije	doseženi v enem le	etu z optimalno	generacijo	jalove moči i	n
$\cos\varphi$ bremen 0,95					

	W _{izg} [kWh]	W _{izg,OMR} [kWh]	W _{izg,TR} [kWh]
Obstoječi PVS	736,0	554,2	181,8
Manjši PVS	1078,9	890,1	188,8

V preglednici 2 pa so prikazani prihranki energije za primer, ko bremena obratujejo s $\cos \varphi = 0.9$.

Preglednica 2: Prihranki energije doseženi v enem letu z optimalno generacijo jalove moči in $\cos\varphi$ bremen 0,9

	W _{izg} [kWh]	W _{izg,OMR} [kWh]	W _{izg,TR} [kWh]
Obstoječi PVS	1354,7	1012,4	342,3
Manjši PVS	2000,8	1642,0	358,8

Iz rezultatov v preglednicah 1 in 2 vidimo, da so v obeh primerih bili doseženi večji prihranki energije na račun zmanjšanja izgub v omrežju $W_{izg,OMR}$ kot v transformatorju $W_{izg,TR}$.

Takšni prihranki so lahko doseženi le, če so PVS priključeni stran od transformatorske postaje. V primeru da so PVS priključeni v transformatorsko postajo, bi njihova generacija jalove moči lahko vplivala le na izgube v transformatorju, ki so posledica zagotavljanja jalove moči preko srednje napetostnega omrežja. V omrežju pa bi učinek tako generirane jalove moči bil zanemarljiv.

Lokalno generiranje jalove moči je lahko učinkovito le, če so v omrežju prisotne potrebe po jalovi moči. Če primerjamo rezultate dobljene z obratovanjem bremen s $\cos\varphi = 0.95$ in $\cos\varphi = 0.9$ vidimo, da so v primeru $\cos\varphi = 0.9$ prihranki energije skoraj 2 krat večji zaradi večjih potreb po jalovi moči omrežju. Iz rezultatov je tudi razvidno, da na prihranke energije ugodno vpliva inštalacija manjših PVS.

5. SKLEP

V nizkonapetostna omrežja Slovenije je že sedaj priključenih večje število PVS, ki pa na obstoječ način obratovanja predstavljajo motnjo za omrežje. V tem delu sta prikazana dva ukrepa (generacija jalove moči PVS in inštalacija manjših PVS), ki bi lahko pripomogla k temu, da bi PVS predstavljali korist za omrežje. Z njimi bi torej bilo mogoče popravljati napetostni profil omrežja, hkrati pa zmanjševati izgube v omrežju. Omejitev predlaganega obratovanja PVS predstavlja odjem, ki vedno ne sledi proizvodnji PVS, prav tako pa so v nekaterih nizkonapetostnih omrežji potrebe po jalovi moči tako majhne, da z predlaganim načinom obratovanja nebi bilo mogoče doseči opaznih prihrankov. Možno uporabo predlaganega obratovanja bi omogočala uvedba net meteringa, s katero bi lahko v omrežje priključili večje število PVS. Tem bi se v obdobjih problemov z napetostnimi profili proizvodnja ustrezno omejila, njihova proizvodnja preko leta pa bi še vedno pokrivala porabo. Tako bi bile dosežene koristi tako za upravljalce omrežja, kot tudi porabnike oz. proizvajalce električne energije.

6. LITERATURA

- A. Vilman, "Vključevanje razpršenih virov v distribucijsko elektroenergetsko omrežje. Izkušnje pri vključevanju v omrežje Elektro Gorenjske," v Enajsta konferenca slovenskih elektroenergetikov CIGRÉ - CIRED, Laško, 27.-29. maj 2013.
- [2] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, "Sončne elektrarne v Sloveniji, Stanje na dan 1.12.2014," PVportal, Slovenski portal za fotovoltaiko, 2015. [Online]. Available: http://pv.fe.uni-lj.si/SEvSLO.aspx. [Accessed: 11-Mar-2015].
- [3] Agencija za energijo, "Register deklaracij za proizvodne naprave," Spletna stran agencije za energijo, 2015. [Online]. Available: https://porocila.agenrs.si/deklaracije/RegisterDeklaracij.aspx. [Accessed: 11-Mar-2015].
- [4] P. P. Barker and R. W. de Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems," Power Eng. Soc. Summer Meet. 2000. IEEE, vol. 3, pp. 1645–1656, 2010.

- [5] SODO sistemski operater distribucijskega omrežja, Priloga 5: Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn do moči 10 MW. Maribor: SODO sistemski operater distribucijskega omrežja, 2010.
- [6] S. Weckx, C. Gonzalez, and J. Driesen, "Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, no. 3, pp. 776–784, 2014.
- [7] S. Gašperič and I. Volf, "Primerjava izračunanih in izmerjenih izgub delovne energije v nizkonapetostnem omrežju," v Deseta konferenca slovenskih elektroenergetikov CIGRÉ
 - CIRED, Ljubljana, 30. maj-1. junij 2011.
- [8] 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.
- [9] A. Vargas and M. E. Samper, "Real-time monitoring and economic dispatch of smart distribution grids: High performance algorithms for DMS applications," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 866–877, 2012.
- [10] M. Braun, "Reactive power supply by distributed generators," 2008 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. - Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, pp. 1–8, Jul. 2008.
- [11] SIST EN 50160:2011, "Značilnosti napetosti v javnih razdelilnih omrežjih Voltage characteristics of electricity spupplied by public distribution networks," SIST, Ljubljana, 2011.
- [12] F. Gubina, S. Gašperič, and D. Gerbec, Izdelava nadomestnih obremenitvenih diagramov za slovensko distribucijsko omrežje," Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. Študijska naloga, Ljubljana, 2004.

NASLOV AVTORJEV

Ernest Belič, mag. inž. el.

Katarina Dežan, mag. ekon. in posl. ved

Niko Lukač, mag. inž. rač. in inf. tehnol.

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 71 75 Fax: + 386 2 252 54 81 Elektronska pošta: <u>ernest.belic@um.si</u>