3. konferenca z mednarodno udeležbo
Konferenca VIVUS – s področja kmetijstva, naravovarstva, hortikulture in floristike ter živilstva in prehrane
»Prenos inovacij, znanja in izkušenj v vsakdanjo rabo«
14. in 15. november 2014, Biotehniški center Naklo, Strahinj 99, Naklo, Slovenija

3rd Conference with International Participation
Conference VIVUS – on Agriculture, Environmentalism, Horticulture and Floristics, Food Production and Processing and Nutrition
»Transmission of Innovations, Knowledge and Practical Experience into Everyday Practice«
14th and 15th November 2014, Biotechnical Centre Naklo, Strahinj 99, Naklo, Slovenia

Metoda za izračun učinka zamenjave solarnega razsmernika

Klemen Ajdovec
Gorenjske elektrarne d.o.o., Slovenija, klemen.ajdovec@gek.si
Miha Flegar
Gorenjske elektrarne d.o.o., Slovenija, miha.flegar@gek.si

Izvleček

V življenjski dobi sončne elektrarne se njihovi lastniki srečajo z dilemo ustrezne izbire novega omrežnega razsmernika, saj njegov izkoristek vpliva na energijski in posledično tudi finančni izplen. Učinek zamenjave razsmernika običajno ugotavljamo s pomočjo specializiranih programskih produktov, ki pa povprečnemu lastniku sončne elektrarne predstavljajo prevelik finančni zalogaj. Izračun lahko izvedemo z upoštevanjem »Evro« izkoristka, vendar pri tem predpostavimo konstanten izkoristek v celotnem obratovalnem območju razsmernika. Raziskovalno delo poizkuša z uporabo enostavnih matematičnih operacij razviti natančnejši postopek za izračun vpliva zamenjave razsmernika na energijski izplen, pri čemer upoštevamo nelinearno odvisnost med izkoristkom in obremenitvijo razsmernika. Metoda temelji na uporabi »trendne črte« programskega produkta Excel. Kljub enostavnosti postopka trdimo, da je izračun natančen saj upošteva izkoristek razsmernika pri poljubni obremenitvi. Teoretična podlaga je bila preizkušena na primeru 15-minutnega obremenilnega diagrama dejanske sončne elektrarne, kjer smo primerjali tri tipe razsmernikov in ugotavljali njihov vpliv na proizvodnjo električne energije. Pri uporabi polinomske funkcije je izračunana proizvodnja večja kot v primeru poenostavljenega izračuna z uporabo Evro izkoristka. Dva od analiziranih razsmernikov sta imela enak Evro izkoristek, kar teoretično predstavlja enako proizvodnjo. Z upoštevanjem polinomske funkcije pa ugotovimo, da se proizvodnji razlikujeta za eno odstotno točko.

Ključne besede: Izkoristek razsmernika, polinomska funkcija

Yield evaluation for exchanged solar inverter

Abstract

Solar plant operators face a dilemma how to optimally choose grid inverters, because its efficiency has great effect on yield. Special software solutions are used for this type of analysis, but professional software usually turns out to be too expensive for average plant operator. When comparing two inverters, Euro efficiency is used, which is given for average load and is considered constant throughout operating range.
This paper shows efficient way of calculating efficiency of different inverters used in a solar power plant. Despite its simplicity, this method is precise because inverter efficiency is calculated for every single operating point. Developed method was tested using 15-minutes load profile of actual solar power plant. The goal was to determine effect of different inverters on solar plant yield. Its increase is larger when polynomial function is used. Two inverters that were used in yield evaluation have equal

Euro efficiency, which in theory represents equal yield increase. When polynomial function was applied, actual yield differs by one percentage point.

Key words: inverter efficiency, polynomial function

1 Uvod

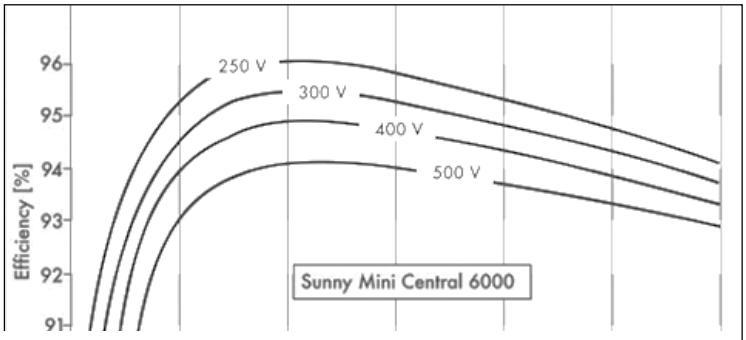
Sončne elektrarne so med leti 2005 in 2012 doživele pravi razcvet. Kljub visoki ceni izgradnje se je investicija v nekaj letih poplačala z visokimi državnimi podporami. Višine podpor so v letu 2013 drastično padle, čemur je sledil tudi trend izgradnje sončnih elektrarn. V ospredje so stopila popravila, zamenjave in nadgradnje sistemov sončnih elektrarn s ciljem povečanega izkoristka. Ker sončne elektrarne nimajo možnosti shranjevanja primarne energije, je potrebno razpoložljivo sončno energijo čim bolj optimalno pretvoriti v električno.
Omrežni razsmernik v sončni elektrarni je eden najpomembnejših členov pri pretvorbi sončne energije v električno, saj enosmerno napetost PV generatorja pretvori v izmenično in s tem primerno za priključitev na elektroenergetsko omrežje. Pretvorba energije poteka z določenim izkoristkom, ki vpliva na končni energijski izplen elektrarne. V nadaljevanju prispevka bodo predstavljene značilnosti krivulje izkoristka razsmernika, teoretično ozadje metode ter analiza z rezultati.

1.1 Izkoristek solarnega razsmernika

Ker so stroški razsmernika v primerjavi s celotno sončno elektrarno majhni, se velikokrat zanemari kako pomembna je pravilna izbira razsmernika iz vidika izkoristka oziroma samega izplena sončne elektrarne. Najpomembnejša lastnost razsmernika je visok izkoristek pretvorbe iz enosmerne v izmenično veličino. Pomembnejše izgube moči se pojavijo zaradi padcev napetosti na polprevodniških elementih kot so tranzistorji in diode, ter zaradi stikalnih izgub DC/DC pretvornikov in razsmerniškega mostiča. Pri višjih obremenitvah in posledično tokovih pa so močneje izražene ohmske izgube, ki se povečujejo s kvadratom bremenskega toka [1].
Izkoristek je parameter, ki kaže na učinkovitost pretvorbe moči v razsmernikih. Določen je s kvocientom izhodne in vhodne moči enačba 1.

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (1)$$

Kjer je:
P_{AC} … izhodna moč na izmenični strani
P_{DC} … vhodna moč na enosmerni strani
Izkoristek je odvisen od tehnologije razsmernika, vhodne moči in napetosti ter je podan na različne načine, a vedno tudi v grafu v obliki krivulje kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Izkoristek razsmernika kot funkcija izhodne moči P_{AC} in napetosti PV generatorja U_{DC}

Pri majhnih močeh se velik del energije potroši za delovanje naprave, zato je izkoristek nizek. Pri približno 10 % vhodne moči izkoristek preseže 90 % in doseže vrh med 45 % in 65 % vhodne moči. Pri primerjalnih analizah največkrat zasledimo maksimalni izkoristek η_{max} in Evro uteženi izkoristek η_{Euro}, ki je za te analize ustreznejši [2].

1.2 Maksimalni in Evro izkoristek

Za primerjavo med razsmerniki se poslužujemo izključno Evro uteženega izkoristka (η_{Euro}), ki je sestavljen iz vsote uteženih izkoristkov pri različnih vhodnih močeh. Evro izkoristek upošteva tipične pogoje delovanja sončne elektrarne v osrednji Evropi. Uteži delnih izkoristkov so določili na inštitutu JRC (JointResearch Center, Ispra, Italija) na podlagi dolgoletnih meritev jakosti in trajanja sončnega sevanja. Pri izračunu Evro izkoristka se tako upošteva, da bo razsmernik:
100 % obremenjen 20 % časa,
50 % obremenjen 48 % časa,
30 % obremenjen 10 % časa,
20 % obremenjen 13 % časa,
10 % obremenjen 6 % časa,
5 % obremenjen 3 % časa.

Razsmerniki brez omrežnega transformatorja dosegajo η_{Euro} med 95 % in 98,5 %, razsmerniki s transformatorjem pa med 93 % in 95,5 %. Enote z visokofrekvenčnim transformatorjem dosegajo izkoristke do 95 % [1].

2 Metoda

Raziskovalno delo sloni na analizi izkoristka obstoječega in predvidenega novega razsmernika, kjer s pomočjo razmerja izkoristkov izračunamo predvideno letno proizvodnjo. Z razliko proizvedene energije dokažemo učinek zamenjave razsmernika. Pri enostavnejših izračunih običajno upoštevamo Evro izkoristek, ki je podrobneje predstavljen v prejšnjem poglavju. Kljub temu, da Evro izkoristek upošteva značilno obremenitev razsmernika, predpostavlja konstanten izkoristek preko celotnega obratovalnega območja. Slednje ne drži, v kar se lahko prepričamo na sliki 1, zato matematično zapišemo formulo(2).

$$\eta = f(P_{AC}, U_{DC}) \quad (2)$$

3.1 Vhodna napetost razsmernika

V predstavljenem primeru smo z uporabo Excelove funkcije trendne črte določili matematični izraz krivulje izkoristka razsmernika. S pomočjo izraza lahko natančno določimo izkoristek razsmernika pri poljubni obremenitvi.
V primeru razsmernika na sliki 1 proizvajalec poda tudi odvisnost izkoristka od vhodne napetosti U_{DC}, kar pa ni pravilo. Za nadaljnje analize lahko povprečno vhodno napetost približno izračunamo z naslednjim izkustvenim izrazom.

$$U_{DC} = N \cdot U_{mpp} \cdot (30 \cdot \alpha U_{mpp})$$
(3)

Kjer je:
N … število modulov v nizu PV generatorja
U_{mpp} … nazivna napetost PV modula

$\alpha_{U\text{mpp}}$ … temperaturni koeficient nazivne napetosti PV modula

Izraz (3) je bil določen na podlagi dejanskih meritev vhodne napetosti in dejstva, da je napetost obremenjenega PV generatorja dokaj konstantna in le malo odvisna od jakosti sončnega sevanja. Zahtevani vhodni podatki so dostopni v tehnični dokumentaciji sončne elektrarne in specifikacijah PV modula.

3.2 Teoretično ozadje

Izračun učinka zamenjave razsmernika sloni na dejstvu, da je energija na izmenični strani enaka produktu energije na enosmerni strani, ter izkoristku razsmernika v dani točki. Ker je energija produkt moči in časa, lahko enačbo (1) preoblikujemo in jo zapišemo v obliki enačbe (4).

$$E_{\text{AC}} = E_{\text{DC}} \cdot \eta \quad (4)$$

Kjer je:
E_{AC} … energija na izmenični strani razsmernika (izhodna stran)
E_{DC} … energija na enosmerni strani razsmernika (vhodna stran)
η … Izkoristek razsmernika

Enačbo (4) zapišemo za poljubna razsmernika in dobimo enačbi (5) in (6). Pri tem upoštevamo, da je energija na enosmerni strani enaka za oba razsmernika, saj sta nameščena na isti lokaciji.

$$E_{\text{ACstari}} = E_{\text{DC}} \cdot \eta_{\text{stari}} \quad (5)$$

$$E_{\text{ACnovi}} = E_{\text{DC}} \cdot \eta_{\text{novi}} \quad (6)$$

Kjer je:
E_{ACstari}… Energija na izmenični strani obstoječega razsmernika (izhodna stran)
E_{ACnovi}… Energija na izmenični strani analiziranega razsmernika (izhodna stran)
E_{DC}… Energija na enosmerni strani (vhodna stran)
η_{stari} … Izkoristek obstoječega razsmernika
η_{novi} … Izkoristek analiziranega razsmernika

Enačbi (5) in (6) z enostavno matematično operacijo zapišemo v obliki enačbe (7), ki predstavlja izhodno energijo poljubnega razsmernika E_{ACnovi}.

$$E_{\text{ACnovi}} = E_{\text{ACstari}} \frac{\eta_{\text{novi}}}{\eta_{\text{stari}}} \quad (7)$$

Izhodna moč sončne elektrarno se običajno spreminja zelo dinamično in sicer v odvisnosti od trenutnih vremenskih razmer, to je jakosti sončnega sevanja. Posledično se spreminja tudi izkoristek razsmernika, zato je podatek o matematični odvisnosti med obremenitvijo in izkoristkom zelo pomemben za natančno analizo.

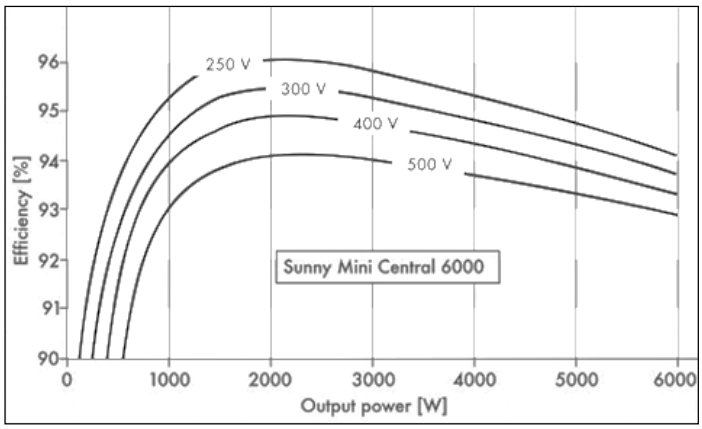
3.3 Izkoristek kot polinomska funkcija

V nadaljevanju je predstavljen postopek za določanje matematične funkcije $\eta = f(P_{\text{AC}})$, kjer najprej izračunamo srednjo vrednost vhodne napetosti U_{DC} in izberemo ustrezno krivuljo na sliki 1. V našem primeru je bila izbrana krivulja izkoristka pri vhodni napetosti 300 V.

Iz grafa na sliki 1 odčitamo vrednosti izkoristka pri določeni moči in pri tem izberemo ustrezen korak. Vrednosti moči in izkoristkov vnesemo v Excel, izrišemo graf in mu dodamo polinomsko trendno črto, ki naj se čim bolj ujema z izvornim grafom. Temu primerno izberemo stopnjo polinoma. Vrednost R^2(koeficient odločitve) nam pove natančnost ujemanja trendne črte z izvornimi podatki, zato naj bo R^2>0,98. V primeru nenatančnosti trendne črte je smiselno izvorni graf razdeliti na dva ali več območij in funkcijo izkoristka zapisati z več trendnimi črtami.
Matematična funkcija polinomske trendne črte je zapisana v obliki enačbe (8), kjer so koeficienti *c* realna števila.

$$y = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5 + c_6x^6 \quad (8)$$

Za predstavljen primer in z upoštevanjem enačbe(8) so na sliki 2 koeficienti polinomske funkcije.



100 – 1000 W	1000 – 6000 W
c_0 = 76,16	c_0 = 94,21
c_1 = $8{,}627\cdot10^{-2}$	c_1 = $-1{,}988\cdot10^{-3}$
c_2 = $-1{,}793\cdot10^{-4}$	c_2 = $4{,}141\cdot10^{-6}$
c_3 = $1{,}759\cdot10^{-7}$	c_3 = $-2{,}435\cdot10^{-9}$
c_4 = $-6{,}468\cdot10^{-11}$	c_4 = $6{,}416\cdot10^{-13}$
c_5 = 0	c_5 = 0
c_6 = 0	c_6 = 0
R^2 = 0,995	R^2 = 0,998

Slika 2: Funkcija izkoristka razsmernika SMC 6000 in pripadajoči koeficienti polinoma

Vrednosti R^2 razkrivata, da so ocenjene vrednosti trendne črte praktično enake vhodnim podatkom. S polinomskima funkcijama lahko izkoristek razsmernika izračunamo pri poljubni obremenitvi, kar je izhodišče na nadaljnje analize smiselnosti zamenjave razsmernika.

3 Analiza

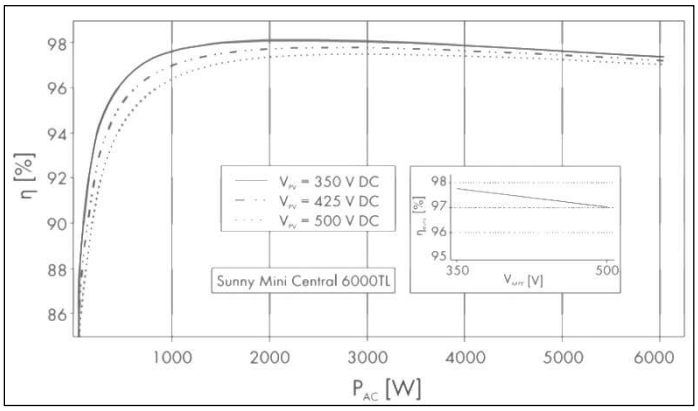
Sončna elektrarna Radovljica obratuje od aprila 2005 in je bila ena prvih omrežnih sončnih elektrarn v Sloveniji. Njena instalirana moč je 17,3 kWp. Na južni strehi krajevnega elektro nadzorništva je nameščenih 99 PV modulov Shell Solar 175 W, ki so razdeljeni v devet nizov, oziroma tri polja PV modulov. Posamezno polje je priključeno na razsmernik Sunny Mini Central (SMC) 6000 proizvajalca SMA. Starejša tehnologija vgrajenih razsmernikov omogoča nekoliko nižje izkoristke v primerjavi z novejšimi napravami, kar je bil eden od razlogov za morebitno zamenjavo. Drugi razlog pa so bile pogostejše okvare na razsmerniških enotah in posledično izpadi proizvodnje.
V ožjem izboru primernih razsmernikov so bili trije cenovno primerljivi razsmerniki proizvajalca SMA in sicer enofazni razsmernik SMC 6000TL, SMC 11000TL in trifazni razsmernik Sunny Tripower (STP) 17000TL. Izbrani razsmerniki so novejše tehnologije in glede na tovarniške podatke zagotavljajo višji Evro izkoristek. V tabeli 1 so zbrani izkoristki obstoječega in analiziranih razsmernikov.

Tabela 1:Primerjava izkoristkov

	η_{max} [%]	η_{EUR} [%]
SMC 6000	**96,1**	**95,1**

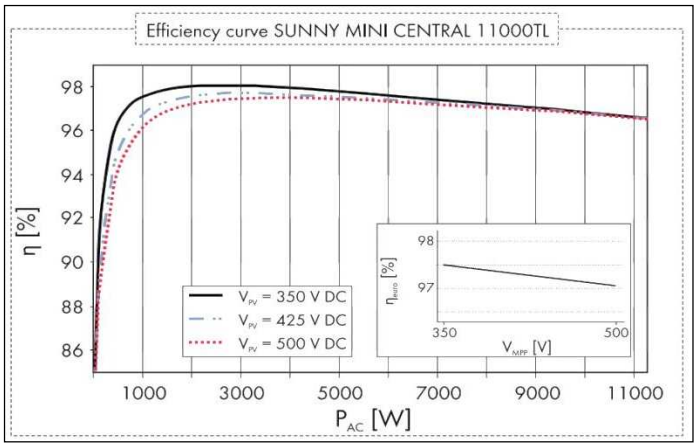
SMC 6000 TL	98,0	97,7
SMC 11000 TL	98,0	97,5
STP 17000 TL	98,1	97,5

Z metodo polinomske funkcije določimo matematično obliko funkcije $\eta = f(P_{AC})$ potencialnih novih razsmernikov.



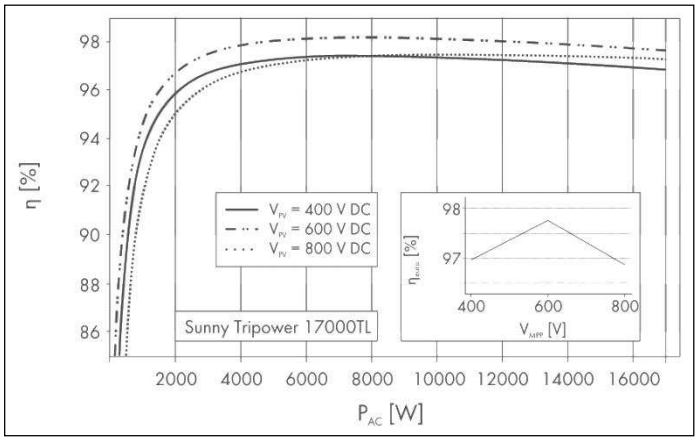
100 – 1000 W	1000 – 6000 W
$c_0 = 86{,}65$	$c_0 = 96{,}22$
$c_1 = 6{,}865 \cdot 10^{-1}$	$c_1 = 2{,}149 \cdot 10^{-3}$
$c_2 = -8{,}797 \cdot 10^{-4}$	$c_2 = -8{,}919 \cdot 10^{-7}$
$c_3 = 1{,}776 \cdot 10^{-6}$	$c_3 = 1{,}062 \cdot 10^{-10}$
$c_4 = -1{,}983 \cdot 10^{-9}$	$c_4 = 2{,}309 \cdot 10^{-14}$
$c_5 = 1{,}151 \cdot 10^{-12}$	$c_5 = -7346 \cdot 10^{-18}$
$c_6 = -2{,}708 \cdot 10^{-16}$	$c_6 = 5{,}281 \cdot 10^{-22}$
$R^2 = 0{,}999$	$R^2 = 0{,}995$

Slika 3: Funkcija izkoristka razsmernika SMC 6000TL in pripadajoči koeficienti polinoma.



100 – 1000 W	1000 – 6000 W
$c_0 = 84{,}323$	$c_0 = 99{,}17$
$c_1 = 8{,}079 \cdot 10^{-2}$	$c_1 = 4{,}625 \cdot 10^{-3}$
$c_2 = 2{,}849 \cdot 10^{-4}$	$c_2 = 4{,}625 \cdot 10^{-6}$
$c_3 = 6{,}276 \cdot 10^{-7}$	$c_3 = -2{,}031 \cdot 10^{-9}$
$c_4 = 8{,}105 \cdot 10^{-10}$	$c_4 = 4{,}473 \cdot 10^{-13}$
$c_5 = 5{,}551 \cdot 10^{-13}$	$c_5 = -4{,}868 \cdot 10^{-17}$
$c_6 = -1{,}548 \cdot 10^{-16}$	$c_6 = 2{,}086 \cdot 10^{-21}$
$R^2 = 0{,}995$	$R^2 = 0{,}993$

Slika 4: Funkcija izkoristka razsmernika SMC 11000TL in pripadajoči koeficienti polinoma.



100 – 1000 W	1000 – 17000 W
c_0 = 64,12	c_0 = 89,59
c_1 = $1{,}141 \cdot 10^{-1}$	c_1 = $5{,}536 \cdot 10^{-3}$
c_2 = $-2{,}050 \cdot 10^{-4}$	c_2 = $1{,}631 \cdot 10^{-6}$
c_3 = $1{,}808 \cdot 10^{-7}$	c_3 = $2{,}475 \cdot 10^{-10}$
c_4 = $-6{,}060 \cdot 10^{-11}$	c_4 = $-2{,}026 \cdot 10^{-14}$
c_5 = 0	c_5 = $8{,}465 \cdot 10^{-19}$
c_6 = 0	c_6 = $-1{,}413 \cdot 10^{-23}$
R^2 = 0,999	R^2 = 0,983

Slika 5: Funkcija izkoristka razsmernika SMC 17000TL in pripadajoči koeficienti polinoma.

4 Rezultati

V prejšnjem poglavju so predstavljeni koeficienti polinomske funkcije izkoristka posameznega razsmernika. Kvocient izkoristka potencialnega novega in obstoječega razsmernika pri določeni obremenitvi nam že poda razmerje med proizvodnjo z novim razsmernikom in dejansko proizvodnjo. Zaradi visoke dinamike trenutne moči sončne elektrarne je smiselno za vhodni podatek o dejanski proizvodnji električne energije uporabiti čim krajšo merilno periodo. V našem primeru smo za podatke o dejanski proizvodnji uporabili 15-minutne obračunske podatke iz števca električne energije za leto 2012 (E_{letna} = 19.222 kWh), kjer 15-minutna količina energije predstavlja produkt povprečne moči ter časa trajanja t = 0,25 h.
Z upoštevanjem 15-minutnih vrednosti delovne moči, izkoristka razsmernika pri tej obremenitvi ter enačbe (7), smo izračunali količino energije E_{letna}, ki bi jo proizvedli s poljubnim razsmernikom v letu 2012. Pri tem je potrebno upoštevati, da je izkoristek posameznega razsmernika določen z dvema polinomskima funkcijama. Izračuni so bili izdelani v programu Excel. Rezultati so predstavljeni v Tabeli 2, kjer je ΔE_{letna} razlika med proizvodnjo novega in obstoječega razsmernika.

Tabela 2: Primerjava letne proizvodnje z uporabo polinomske funkcije

	E_{letna} [kWh]	ΔE_{letna} [kWh]	ΔE_{letna}[%]
SMC 6000	**19.222**	/	/
SMC 6000 TL	19.856	634	3,29
SMC 11000 TL	19.848	625	3,25
STP 17000 TL	19.679	456	2,37

Ker pri enostavnejših analizah vpliva razsmernika na proizvodnjo elektrike običajno uporabljamo Evro izkoristek, so za primerjavo v tabeli 3 predstavljeni rezultati poenostavljenega izračuna. Pri tem upoštevamo le razmerje Evro izkoristkov novega in obstoječega razsmernika.

Tabela 3: Primerjava letne proizvodnje z uporabo Evro izkoristka

	E_{letna} [kWh]	ΔE_{letna} [kWh]	ΔE_{letna} [%]
SMC 6000	**19.222**	/	/
SMC 6000 TL	19.747	525	2,73
SMC 11000 TL	19.707	485	2,52
STP 17000 TL	19.707	485	2,52

Uporaba polinomske funkcije je, v primerjavi s klasično analizo, pri dveh razsmernikih vrnila višje doprinose k proizvodnji. Kljub temu, da je, ne glede na analizo, najbolj optimalen razsmernik SMC 6000TL, so v primeru razsmernika SMC 11000TL razlike v rezultatih analize občutne.

6 Diskusija

Rezultati analize z uporabo polinomske funkcije so pričakovano različni od klasične analize razsmernikov. Pri primerjavi rezultatov obeh analiz se seveda pojavi vprašanje, katera od analiz je natančnejša. Zagotovo lahko trdimo, da je metoda s polinomsko funkcijo natančnejša, saj upošteva dejstvo, da izkoristek razsmernika ni konstanten v celotnem obratovalnem območju. Poleg tega pri metodi uporabimo podatke o četrturni proizvodnji, s čimer upoštevamo dinamičen diagram moči med obratovanjem sončne elektrarne. Strokovna literatura metode s polinomsko funkcijo ne navaja, ampak se priporoča uporaba Evro izkoristka. Profesionalne programske rešitve nelinearnost izkoristka sicer upoštevajo, vendar le kot vsoto več linearnih funkcij [3]. Dva od analiziranih razsmernikov sta imela enak Evro izkoristek, kar teoretično predstavlja enako proizvodnjo. Z upoštevanjem polinomske funkcije pa ugotovimo, da se proizvodnji razlikujeta za eno odstotno točko.
Ker se podjetja večkrat soočajo z odločitvijo o zamenjavi razsmernikov na obstoječih sončnih elektrarnah, priporočamo predstavljeno metodo kot stalno metodo za vse presoje o zamenjavi – nadgradnji razsmernikov. Omenjena metoda je za oceno proizvodnje natančnejša, kot do sedaj obravnavane metode, s tem pa ponuja učinkovitejši mehanizem za presojo učinka zamenjave razsmernikov.
Za nadaljnje raziskovalno delo avtorja predlagava vpeljavo matematične funkcije, ki bi natančno opisala napetostno odvisnost izkoristka poljubnega razsmernika. S tem bi natančnost polinomske metode še izboljšali.

Literatura in viri

[1] Earthscan, Planning and installing photovoltaic systems: a guideforinstallers. Architectsandengineers, 2ndedition“, 2008, Berlin
[2] Lenardič, D. *Fotonapetostni sistemi.* Priročnik. Ljubljana: Agencija Poti, 2012. ISBN 978-961-90747-8-7.
[3] Pvsyst, Photovoltaic system study: PVsyst Help Content http://files.pvsyst.com/help/