

Optimalno sledenje sončnih modulov Soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa

Sebastijan Seme^{1,2}, Gorazd Štumberger², Jože Voršič²

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko, Hočvarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta:sebastijan.seme@uni-mb.si

Povzetek. V delu je obravnavan dvo-osni sledilni sistem za sledenje sončnih modulov trajektoriji Sonca. Pri tem je predstavljena nova metoda za optimalno sledenje trajektoriji Sonca, ki upošteva tudi izgube pogonskega sklopa dvo-osnega sledilnega sistema. Cilj optimalnega sledenja je maksimalna pretvorba energije sončnega sevanja v električno energijo upoštevajoč na električne izgube pogonskega sklopa. Določitev trajektorije sledilnega sistema predstavlja v optimizaciji nelinearni in omejen problem, kjer ciljna funkcija ni na voljo v eksplicitni obliki. Za optimizacijski postopek se je uporabila stohastična metoda imenovana diferenčna evolucija. Pri tem je ciljna funkcija podana z napovedjo razpoložljivega sončnega sevanja, izgubami pogonskega sklopa in izkoristkom sončne elektrarne. Omejitve problema predstavljajo konstantna hitrost premikanja in minimalna sprememba kota premika pogonskega sklopa sledilnega sistema. Podani rezultati kažejo, da je optimalna trajektorija sledilnega sistema, odvisna predvsem od razpoložljivega sončnega sevanja, izkoristka sončne elektrarne, izgub pogonskega sklopa in omejitev, ki jih upoštevamo v sami optimizaciji.

Ključne besede: fotonapetostni sistem, sončno sevanje, sledenje, optimizacijska metoda, izgube

Optimal sun-tracking of solar modules considering the electric drive losses

This work deals with the efficiency increase of the photovoltaic (PV) systems. The efficiency of PV systems depends mainly on the solar radiation reaching, the solar module, the efficiency and the types of solar panels, its temperature, DC/DC converter and DC/AC inverter. The efficiency of the solar radiation that reaches the module is the highest when the sunbeams fall aligned with the normal of the module. The influence of the technology and its usefulness is presented in [1], while the impact of the solar cell temperature on the energy conversion efficiency is discussed in [2]. The efficiency of the PV systems depends also on the impedance matching. The articles [3] - [5] deal with the determination of the electrical parameters to achieve maximum energy from the PV system through the Maximum Power Point Tracking (MPPT). The efficiency of the PV system can also be increased by the tracking systems. Primarily the one and two-axis tracking systems are used. The authors in [7] - [11] increased the efficiency of the solar energy conversion from 20% to 50% by using the tracking systems compared to the fixed PV systems. The tracking systems use closed- and open-loop control systems. The closed-loop control systems [12] use photo sensors to position the solar panels while the open-loop control systems [13] based on the mathematical algorithm provide predefined trajectories for the tracking systems. Both control systems have imperfections. When the weather is changing, such systems can spend more energy than they gain. This paper presents a new method for determining the optimal trajectories of the open-loop control system of the two-axis sun tracking system (Fig. 1) that assures the maximum efficiency of the solar energy conversion. For the two-axis sun tracking system the energy

losses are determined as a function of angle (Figure 2). The aim is to determine the trajectory (tilt β and azimuth a_w) of the solar modules where in a specified period the energy production is maximum. To achieve the result a method for predicting the direct and diffuse solar radiation on the Earth's surface in the form of the time dependent function is needed. The mentioned method was already presented in [17]. Using the predictions of direct and diffuse solar radiation on the Earth's surface and (1) the solar radiation on the tilt surface is calculated. The angles described in (1) are also shown in Fig. 3. To solve the nonlinear and bounded optimization problem the method called Differential Evolution (DE) [18] is used. In the optimization process the target function is given by (5). Its value is evaluated by calculated prediction of the available solar radiation, the electric drive losses and the efficiency of the PV system. The problem bounds are given in the form of angular speed, lower and upper bounds for the both angles and angle quantization. The results are given for the two-axis tracking system of an active surface 7 m^2 and the total efficiency of the PV system $\eta = 0.085$. The results presented in Figs 4 and 5 show that the trajectory determined by the proposed method gives the best results in terms of the increased energy production of the PV system. In this case the increased energy production compared to the step by step tracking system is not substantial. The ratio may change for the different types and numbers of the solar modules or the different energy consumption of the electric drive.

1 UVOD

Vse večja energetska odvisnost in omejena količina fosilnih goriv ter, posledično rast njihovih cen, so glavni razlogi za iskanje novih virov energije. Obnovljivi viri energije so praktično neizčrpn potencial in energijski vir prihodnosti. Med obnovljivimi viri je energija Sonca tista, ki v današnjem času obeta največ. Energijo Sonca neposredno pretvarjamo v električno energijo s

sončnimi moduli. Sončni moduli so, zraven razsmernika, glavni sestavni del vsake sončne elektrarne. Izkoristek sončne elektrarne je tako odvisen predvsem od razpoložljivega sončnega sevanja, ki doseže sončni modul, kakovosti in vrste uporabljenih sončnih modulov, njihove temperature, DC/DC pretvornika in DC/AC razsmernika.

Na gostoto moči sončnega sevanja, ki doseže Zemeljsko površino ne moremo neposredno vplivati, saj je odvisna predvsem od razmer v atmosferi in geografske lege. Vplivamo lahko na gostoto moči sončnega sevanja, ki doseže površino sončnih modulov, s pomočjo sledilnega sistema. Gostota moči sončnega sevanja, ki doseže površino sončnih modulov je največja, če žarki padaje pravokotno na površino modula. Slednje dosežemo, s pravilno uporabo in vodenjem pogonskega sklopa sledilnega sistema.

Različni tipi sončnih modulov in njihova uporaba so predstavljeni v [1], med tem ko je vpliv temperature modulov na izkoristek pretvorbe predstavljen v [2]. Ob znanih tehnologija in drugih vplivih na sončne module je izkoristek pretvorbe, energije sončnega sevanja v električno energijo, odvisen predvsem od impedančne prilagoditve. Z drugimi besedami to imenujemo tudi doseganje točke maksimalne moči (angleško: Maximum Power Point Tracking – MPPT). Mnogi članki, med njimi [3] - [5], predstavljajo optimizacijo električnih parametrov, da bi dosegli maksimum proizvodnje električne energije iz sončne elektrarne s pomočjo MPPT sistema.

Delo je osredotočeno na sistem za sledenje sončnih modulov soncu. Sledilni sistem uporablja znanja različnih ved: mehanike, elektronike in informacijske tehnologije [6]. V grobem poznamo eno- in dvo-osne sledilne sisteme. Avtorji v [7],[8] so izdelali in testirali eno-osni sledilni sistem, avtorja v [9] – [11] pa dvo-osni sledilni sistem. Z uporabo sledilnih sistemov so avtorji v [7] – [11] povečali izkoristek od 20 % do 50 %, v primerjavi s fiksnimi sistemi.

Za vodenje pogonskih sklopov sledilnega sistema se uporablja zaprtizančni in odprtozančni sistemi vodenja. Zaprtizančni sistemi vodenja uporabljajo fotosenzorje, ki določajo položaj panelov. Fotosenzorji pri tem pošiljajo signal električnemu pogonu o spremembi položaja [12]. Slabost tovrstnih sistemov se kaže v primeru spreminjajočega se vremena. Takrat lahko, v določenem časovnem obdobju, porabijo več električne energije, kot jo proizvede sončna elektrarna. Druga možnost je odprtozančni sistem vodenja [13], ki temelji na matematičnem algoritmu, in zagotavlja v naprej podatek pogonskemu sklopu o položaju. Položaj modulov sledilnega sistema je mogoče natančno določiti, saj se da relativni položaj Sonca natančno določi za katero koli lokacijo na Zemlji [14]. Kombinacija, tako odprtozančnega sistema, kakor tudi zaprtizančnega sistema vodenja je hibridni sistemi predstavljen v [15].

V delu je predstavljena nova metoda za določitev optimalne trajektorije odprtozančnega sistema vodenja

pogonskega sklopa. Za določitev optimalne trajektorije pogonskega sklopa odprtozančnega sistema vodenja je potrebno poznati gostoto moči sončnega sevanja pri tleh. Izrazi za izračun sončnega sevanja na zunanjem robu Zemljine atmosfere so dobro znani in so opisani v [14]. Vendar se sončno sevanje v atmosferi spreminja zaradi absorpcij v vodni pari, v ogljikovem dioksidu in absorpcij v aerosolu. K slabitvi prispeva tudi sipanje na molekulah plinov ozračja in na večji ali manjši količini aerosola v ozračju. Vse to vzdolž daljše ali krajše poti skozi ozračje. K temu lahko prištejemo vplive zaradi oblakov in megle. Tako se pokaže, da so procesi, ki slabijo sončno sevanje skozi ozračje navzdol, zelo zapleteni. Kljub temu pa poleg inštrumentov za merjenje sončnega sevanj, kot sta piranometer (*pyranometer*) in pirheliometer (*pyrheliometer*), obstajajo tudi različni modeli za ocenjevanje (napoved) sončnega sevanja. Starejši modeli temeljijo na linearni aproksimaciji merjenih podatkov o sončnem sevanju, medtem ko relativno nove metode temeljijo na nevronske omrežjih ANN [16].

Cilj predlagane metode je določiti trajektorijo dvo-osnega sledilnega sistema, pri kateri bo proizvodnja električne energije v določenem časovnem obdobju maksimalna. Za doseg želenega cilja potrebujemo metodo za napoved direktnega in difuznega sončnega sevanja na Zemeljsko površino v obliki časovno odvisne funkcije. Omenjeno metodo smo že podrobneje predstavili v [17], pri čemer so zahtevani parametri prilagojeni tako, da je srednji kvadratični pogrešek med izmerjenim in napovedanim sončnim sevanjem za odboje petih let minimalen. Metoda je bila v [17] tudi potrjena s primerjavo med izmerjenim in napovedanim sončnim sevanjem.

Dvo-osni sledilni sistem s sončnimi moduli, sledi trajektoriji sonca v dveh oseh, po naklonu in azimutu. Pri tem za sledenje uporablja pogonski sklop, ki je porabnik električne energije. Poraba električne energije sledilnega sistema predstavlja za sončno elektrarno električne izgube. Za tovrstno sledenje se običajno uporablja enosmerni motor s trajnimi magneti (PMDC), katerega izgube v odvisnosti od spremembe kota smo izmerili na realnem dvo-osnem sistemu.

Metodo za napoved sončnega sevanja na Zemeljsko površino in električne izgube sledilnega sistema smo uporabili za določitev trajektorije sledilnega sistema. Za doseg cilja nelinearnega in omejenega problema smo uporabili optimizacijsko metodo imenovano Diferenčna Evolucija (DE) [18].

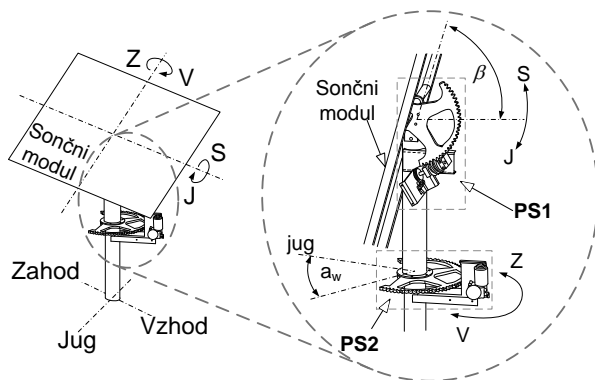
2 SISTEM ZA SLEDENJE

V tem poglavju je predstavljen postopek za določitev trajektorije sledilnega sistema, ki zagotavlja da je pretvorba energije sončnega sevanja v električno maksimalna. Pri določitvi trajektorije so bile uporabljene določene predpostavke. Postopek je primeren samo za jasne dni, brez oblakov. Gostoto moči sončnega sevanja, ki doseže Zemljino površino smo

napovedati z metodo predstavljeno v [17]. Izgube pogonskih sklopov sledilnega sistema so predstavljene kot funkciji spremembe kota. Pri tem je sprememba kota mogoča zgolj z vklopom in izklopom napajanja PMDC-ja. Ob zagonu PMDC-ja je kotna hitrost konstantna, minimalna sprememba kota pa je omejena z dvema stopinjama.

2.1 Dvo-osni sledilni sistem

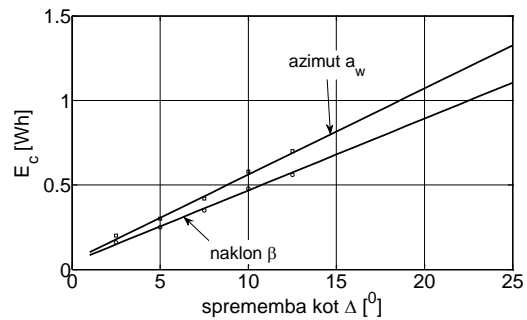
Obravnani dvo-osni sledilni sistem je predstavljen na sliki 1, kjer je β naklon, a_w pa azimut sončnih modulov. Zgornji pogonski sklop (PS1) na sliki 1, ki spreminja naklon β , se premika v smeri sever-jug, medtem ko se spodnji pogonski sklop (PS2), ki spreminja azimut a_w , premika v smeri vzhod-zahod. Prestavno razmerje zgornjega pogonskega sklopa PS1 je 12:40:30, spodnjega pogonskega sklopa PS2 pa 12:40:52. Obravnani dvo-osni sledilni sistem je industrijski proizvod, kupljen na trgu, kateremu smo dodali, v delu predstavljen, odprtozankni sistem vodenja.



Slika 1. Dvo-osni sledilni sistem.

Slika 2 prikazuje električne izgube pogonskih sklopov PS1 in PS2 sledilnega sistema v odvisnosti od spremembe naklona β in azimuta a_w . Obe karakteristiki, na sliki 2, sta bili določeni z meritvami na obravnavanem sledilnem sistemu prikazanem na sliki 1. Za napajanje motorjev smo uporabili 24 V enosmerno napetost. S stikalnimi manipulacijami, torej vklopom in izklopom motorja, mogoče doseči minimalno spremembo kota $\Delta = 2^\circ$. Sledenje je pogojeno s hitrostjo stikalnih manipulacij in prestavnim razmerjem pogonskega sklopa.

V idealnem primeru, ko električnih izgub pogonskega sklopa sledilnega sistema ne upoštevamo in je sprememba kota neskončno majhna se trajektorija sončnih modulov spreminja zvezno. V tem primeru sončni žarki ves čas padajo pravokotno na površino modulov. V realnem primeru seveda vsaka sprememba položaja pomeni porabo električne energije in posledično dodatne izgube v sončni elektrarni. V ta namen želimo določiti optimalno število preklapov, kakor tudi spremembe naklona in azimuta. S tem bo



Slika 2. Električne izgube pogonskega sklopa v odvisnosti od spremembe kota.

določena trajektorija sledilnega sistema, ki bo pokazala, kdaj in za koliko stopinj naj se spremeni kot, da bo pri tem pretvorba sončne energije v električno največja, upoštevajoč še izgube pogonskega sklopa.

2.2 Metoda za napoved sončnega sevanja

V [17] je že podrobneje opisana metoda za napoved sončnega sevanja na Zemeljsko površino v obliki časovno odvisne funkcije. Tako v nadaljevanju podajamo zgolj postopek za izračun sončnega sevanja na poljubno nagnjeno in orientirano površino. Napoved celotnega sončnega sevanja na vodoravno površino I_h , ki je vsota direktnega $I_{b,h}$ in difuznega $I_{d,h}$ sončnega sevanja, je osnovni podatek za izračun skupnega sončnega sevanja I_c na površino, pod naklonom β in orientirano glede na azimut a_w . Opisani koti so predstavljeni na sliki 3, pri čemer je sončno sevanje I_c podano z (1) [14]:

$$I_c = I_{b,h} \frac{\cos i}{\sin \alpha} + I_{d,h} (1 + \cos \beta) / 2 + \rho I_h (1 - \cos \beta) / 2 \quad (1)$$

kjer je ρ faktor refleksije in i je vpadni kot sončnih žarkov na nagnjeno površino podan z (2).

$$\cos i = \cos \alpha \cos(a - a_s) \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad (2)$$

a_s je azimutni kot sonca in α kotna višina sonca podana s (3).

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta_s + \cos L \cos \delta_s \cos h_s \quad (3)$$

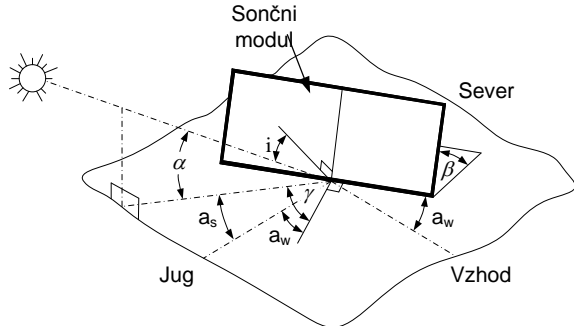
$$h_s = 15^\circ (12 - T)$$

L je zemljepisna širina, δ_s deklinacija, h_s urni kot in T lokalni čas.

Matematični model za napoved sončnega sevanja opisan v [17] in izrazi od (1) do (3) so osnova za določitev sončnega sevanja, na poljubno nagnjeno in orientirano površino, v časovnem intervalu $[t_0, t_0 + \Delta t]$. Glede na izkoristek uporabljenih sončnih modulov, DC/DC pretvornika, razsmernika in ob predpostavki pravilnega delovanja MPPT sedaj s (4) izračunamo proizvedeno električna energija sončne elektrarne E_{PV} v časovnem intervalu $[t_0, t_0 + \Delta t]$ (4):

$$E_{PV} = \eta_{PV} A_{PV} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} I_c(\tau) d\tau \quad (4)$$

kjer je η_{PV} izkoristek sončne elektrarne in A_{PV} površina sončne elektrarne.



Slika 3. Definicije uporabljenih kotov za nagnjeno površino.

2.3 Določitev trajektorije, naklona in azimuta, s pomočjo diferencialne evolucije

V tem razdelku predstavljen postopek za določitev trajektorije sledilnega sistema, ob največji pretvorbi sončne energije v električno upošteva še izgube, ki nastanejo zaradi premikanja pogonskih sklopov. Upoštewane so električne izgube pogonskih sklopov, ki nastanejo čez opazovani interval $[t_0, t_0+\Delta t]$, kakor tudi izgube, ki nastanejo, ob koncu dneva, zaradi premika v prvotno lego. Kot smo omenili v idealnem primeru, ko ne upoštevamo izgub pogonskih sklopov, sončni moduli zvezno sledijo trajektoriji sonca, tako da je vpadni kot sončnih žarkov na površino modula ves čas pravokoten. V tem primeru je proizvodnja električne energije sončne elektrarne maksimalna in jo označimo s $E_{PV\ ideal}$. Ker ima obravnavan dvo-osni sledilni sistem omejitve, ga ne moremo uporabiti za zvezno sledenje. Shematska predstavitev trajektorije Sonca je predstavljena na sliki 4.

Da se čim bolj približali idealnim pogojem, idealni trajektoriji, vklapljam in izklapljam pogonska sklopa, pri čemer nastajajo električne izgube. Tako sta naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ funkciji časa in se spreminjata po korakih. Višine posameznih sprememb $\Delta\beta$ in Δa_w , kakor tudi časi med posameznimi spremembami Δt_β in Δt_{a_w} so določeni s pomočjo optimizacijskega postopka imenovanega diferencialna evolucija (DE) [18]. Kot kriterijsko funkcijo q (5), smo izbrali razmerje med idealno $E_{PV\ ideal}$ in optimalno (izračunano) E_{PV} proizvodnjo električne energije zmanjšano za izgube pogonskih sklopov E_c .

$$q = E_{PV\ ideal} / (E_{PV} - E_c) \quad (5)$$

DE pri tem generira naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ kot vektorja podana s (6). Z drugimi besedami DE določi število preklpov n , spremembe kotov ($\Delta\beta_1, \Delta\beta_2, \Delta a_{w1}, \Delta a_{w2}, \dots$) in čase med posameznimi koti ($\Delta t_{\beta1}, \Delta t_{\beta2}, \Delta t_{a_{w1}}, \Delta t_{a_{w2}}, \dots$).

$$\beta(t) = [\beta_1(\Delta t_{\beta1}), \beta_2(\Delta t_{\beta2}), \dots, \beta_n(\Delta t_{\beta n})] \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_w(t) = [a_{w1}(\Delta t_{a_{w1}}), a_{w2}(\Delta t_{a_{w2}}), \dots, a_{wn}(\Delta t_{a_{wn}})]$$

Časovni interval je omejen na 24 ur, pri čemer je čas diskretizacije $\Delta t = 0,5$ s. Za vsak sklop, DE generira naklon $\beta(t)$ in azimut $\mathbf{a}_w(t)$ iz katerega izračunamo skupno sončno sevanje $I_c(t_0, t_0+\Delta t)$ (1) na površino modula. Z integriranjem sončnega sevanja, znanem izkoristku η_{PV} in površini A_{PV} sončne elektrarne izračunamo proizvedeno električno energijo E_{PV} (4). Glede na izbrani optimizacijski postopek, ki simulira evolucijo v naravi, DE obdrži le najboljše vektorje $\beta(t)$ in $\mathbf{a}_w(t)$ in jih uporabi za ustvarjanje novih generacij osebkov (vektorjev). Na koncu procesa ostanejo le najboljši osebki, ki minimizirajo vrednost kriterijske funkcije q (5). Tako dobimo trajektorijo, naklon $\beta(t)$ in azimut $\mathbf{a}_w(t)$, ki daje optimalno proizvodnjo električne energije iz sončne elektrarne, upoštevajoč še električnih izgub, ki nastanejo na pogonskih sklopih.

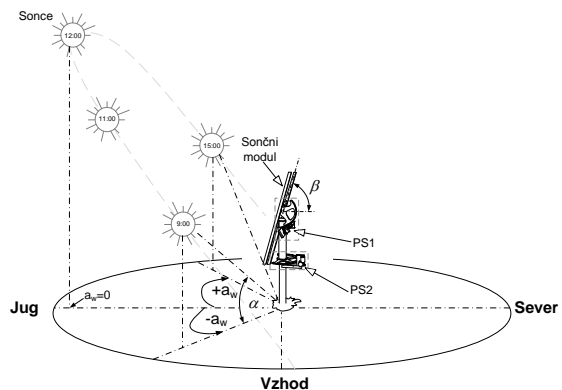
Za ovrednotenje dobljenih rezultatov je v [3] definiran izkoristek (7), kot razlika med električno energijo proizvedene iz fiksne sončne elektrarne $E_{PV\ fiks}$ in sončne elektrarne s sledilnim sistemom E_{PV} skupaj z izgubami pogonskih sklopov E_c .

$$\varepsilon = (E_{PV} - E_{PV\ fiks}) - E_c \quad (7)$$

3 REZULTATI

Rezultati podani v tem poglavju so podani za mesto Maribor (S 46°33' in V 15°39'). Slika 5 kaže rezultate izračuna opravljene po postopku opisanem v razdelku 2. Pri tem je izvedena primerjava med idealnim sledenjem dvo-osnega sledilnega sistema, sledenjem po optimalni trajektoriji dvo-osnega sledilnega sistema in fiksnim sistemom.

Rezultati so izvedeni za sončno elektrarno aktivne površine 3,4 m² in skupnega izkoristka $\eta_{PV} = 0,085$. Pri tem skupni izkoristek upošteva izkoristek sončnih modulov, izkoristek DC/DC pretvornika, izkoristek razsmernika in delovanja MPPT.



Slika 4. Shematska predstavitev trajektorije Sonca.

Na sliki 5 sta predstavljena dva primera, ki se med seboj razlikujeta zgolj po električnih izgubah pogonskih sklopov. Za prvi primer na sliki 5 (a, b in c) so električne izgube pogonskih sklopov upoštevane v skladu s sliko 2, medtem ko so za drugi primer na sliki 5 (d, e in f) električne izgube 10 krat večje od dejanskih izmerjenih izgub.

Slika 5a kaže naklon $\beta(t)$, slika 5b azimut $a_w(t)$ in slika 5c trenutno moč sončne elektrarne za prvi primer, medtem ko slika 5d kaže naklon $\beta(t)$, slika 5e azimut $a_w(t)$ in slika 5f trenutno moč sončne elektrarne za drugi primer.

Predstavljeni rezultati na sliki 5 in v tabeli 1 kažejo, da je trajektorija sledilnega sistema odvisna od izgub pogonskega sklopa. Kar nadalje pomeni, da je pri načrtovanju odprtozančnega sistema vodenja sledilnih sistemov smiselno upoštevati tudi slednje. Iz tega lahko zaključimo, da je pri načrtovanju vodenja sledilnih sistemov potrebno upoštevati tudi različne tipe sončnih modulov, različno število uporabljenih sončnih modulov in različne električne izgube pogonskih sklopov.

Predlagana metoda za določitev trajektorije sledilnih sistemov, tako omogoča upoštevanje vseh zgoraj navedenih parametrov, ki so za sistem vodenja pogonskih sklopov bistvenega pomena.

4 ZAKLJUČEK

V delu je predlagana nova metoda za določanje trajektorije sledilnega sistema, ki sledi trajektoriji Sonca. Omenjena metoda zagotavlja največjo pretvorbo sončne energije v električno energijo upoštevajoč še izgube pogonskega sklopa.

Predlagana metoda daje dobre rezultate za dvo-osni sledilni sistem in je prav tako uporabna za analizo

Tabela 1: Primerjava proizvedene električne energije sončnih elektrarn.

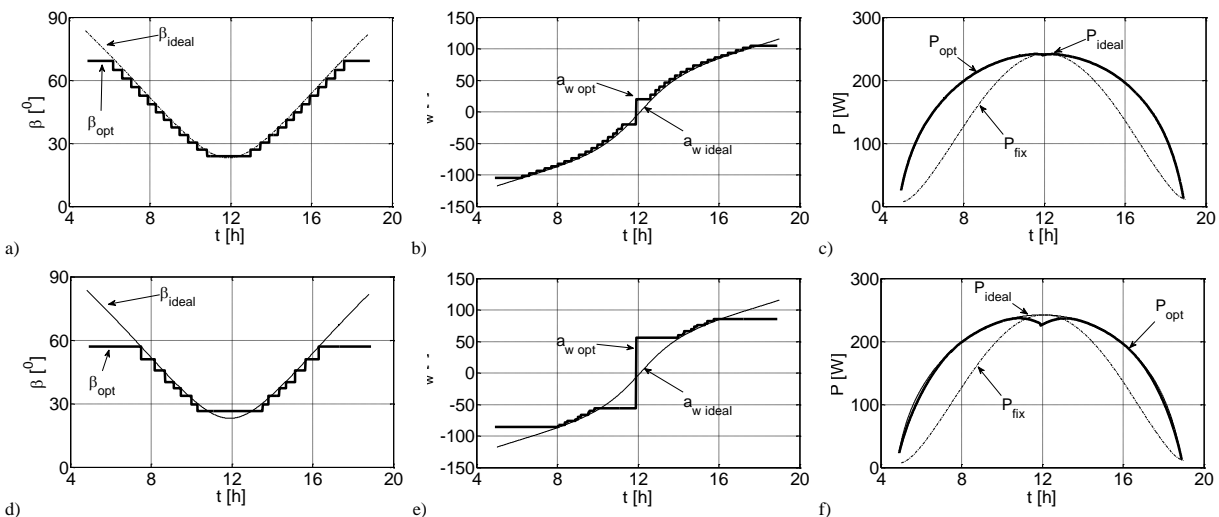
	<i>PV system</i> $\eta = 8,5\%$, $E_c = 0,05 \text{ Wh/deg}$	<i>PV system</i> $\eta = 8,5\%$, $E_c = 0,5 \text{ Wh/deg}$
Fiksni sistem ($E_{pv \text{ fiks}}$) [kWh]	1,998	
Dvo-osni sistem ($E_{PT} - E_c$) [kWh]	2,631	2,588
PS (E_c) [Wh]	23,6	29,5
Izkoristek [%] ($E_{PT} - E_c$) / $E_{pv \text{ fiks}}$	131,7	129,5
ε [Wh]	609,3	443,8

eno-osnih sledilnih sistemov. Predstavljeni rezultati kažejo povečanje pretvorbe sončne energije v električno z uporabo sledilnih sistemov. Metoda je bila preizkušena na jasnih dnevih in jo lahko dopolnimo tudi za primere, ko se razmere na nebu spreminjajo (oblačnost).

Na podlagi napovedi sončnega sevanja za oblačne dni, lahko omenjena metoda odpravi pomanjkljivosti tako zaprtotzančnega kot tudi odprtozančnega sistema vodenja, kjer so izgube pogonskih sklopov lahko višje od prirastka pretvorbe sončne energije v električno.

LITERATURA

- [1] J. Nijs, S. Sivoththaman, J. Szlufcik, K. De Clercq, F. Duerinckx, E. VaN Kerschaever, R. Einhaus, J. Poortmans, T. Vermeulen, R. Mertens, "Overview of solar cell technologies and results on high efficiency multicrystalline silicon substrates", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 48, pp. 199-217, 1997.



Slika 5. Primer I – $A_{PV}=3,4\text{m}^2$, $\eta_{PV} = 0,085$, $E_c=0,05\text{Wh/deg}$; a) trajektorija naklona β , b) trajektorija azimuta a_w , c) trenutna moč sončne elektrarne P . Primer II – $A_{PV}=3,4\text{m}^2$, $\eta_{PV} = 0,085$, $E_c=0,5\text{Wh/deg}$; d) trajektorija naklona β , e) trajektorija azimuta a_w , f) trenutna moč sončne elektrarne P

- [2] M. K. El-Adawi, I. A. Al-Nuaim, "The temperature functional dependence of VOC for a solar cell in relation to its efficiency new approach", *Desalination*, vol. 209, pp. 91-96, 2007.
- [3] A. Pandey, N. Dasgupta, A. K. Mukerjee, "A simple single-sensor MPPT solution", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 698-700, Mar. 2007.
- [4] G. de Cesare, D. Caputo, A. Nascetti, "Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load", *Solar energy*, 80 (2006), pp. 982-988.
- [5] J. W. Kimball P. T. Krein, "Discrete-time ripple correlation control for maximum power point tracking", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2353-2362, Sep. 2008.
- [6] C. Alexandru and C. Pozna, "Different Tracking Strategies for Optimizing the Energetic Efficiency of a Photovoltaic System", 16-th IEEE International Conferenc on Automation, Quality and Testing, Robotics – AQTR 2008, IEEE/TTTC – Test Technology Technical Council, Cluj, 2008, pp. 434-439.
- [7] I. Sefa, M. Demirtas, I. Colak, "Application of one-axis sun tracking system", *Energy Conversion and Management*, (2009).
- [8] S. Abdallah, O. O. Badran, "Sun tracking system for productivity enhancement of solar still", *Desalination*, vol. 220, 2008, pp. 669-679.
- [9] P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov, "Design and construction of a system for sun-tracking", *Renewable energy*, 29 (2004), pp. 393-402.
- [10] G. C. Bakos, "Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement", *Renewable energy*, 31 (2006), pp. 2411-2421.
- [11] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, S. Demirkol, "Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey", *Renewable energy*, vol. 29, 2004, pp. 1265-1275.
- [12] Kh. S. Karimov, M. A. Saqib, P. Akhter, M.M. Ahmed, J. A. Chattha, S. A. Yousafzai, "A simple photo-voltaic tracking system", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 87 (2005), pp. 49-59.
- [13] T. T. N. Khatib, A. Mohamed, R. J. Khan, N. Amin, "A novel active sun tracking controller for photovoltaic panels", *Journal of Applied Sciences*, vol. 9 (22), 2009, 4050-4055.
- [14] Y. Goswami, F. Kreith and J. Kreder, "Principles of Solar Engineering", *Fundamentals of Solar Radiation*, Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.
- [15] F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, M. Lopez-Martinez, "Application of new control strategy for sun tracking", *Energy Conversion and Management*, vol. 48, 2007, pp. 2174-2184.
- [16] F. S. Tymvios, C. P. Jacovides, S. C. Michaelides, C. Scouteli, "Comparative study of Angstrom's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation", *Solar energy*, 78 (2005), pp. 752-762.
- [17] S. Seme, G. Štumberger, J. Voršič, "Napoved porazdelitve oddane moči sončne elektrane, temelječa na napovedi porazdelitve moči globalnega sončnega sevanja", *Elektrotehniški vestnik*, 75(5) 2008, pp. 271-276.
- [18] K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen, "Differential Evolution: A Practical Approach to Gloabal Optimization (Natural Computing Series)", Springer, 2005

Sebastijan Seme je leta 2006 diplomiral in leta 2011 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Od leta 2012 je zaposlen na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru. Raziskovalno se ukvarja predvsem z obnovljivimi viri energije.

Gorazd Štumberger je diplomiral leta 1989 in magistriral leta 1992 na oddelku FERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 1996 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, kjer je tudi zaposlen kot redni profesor. Ukvarja se z modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Dr. Gorazd Štumberger je član slovenskega komiteja CIGRE ter mednarodnih združenj Compumag in IEEE.

Jože Voršič je magistriral leta 1982 na zagrebški univerzi in obrnil doktorsko disertacijo leta 1983 na Univerzi v Mariboru. Je redni profesor za področje močnostne elektrotehnike na FERI Univerze v Mariboru in vodja Laboratorija za energetiko. Njegovo področje dela je obratovanje EES, meritve kakovosti el. energije, VN tehnika, zanesljivost, preskrba z energijo in obnovljivi viri. Je član mednarodnih strokovnih organizacij IEEE, CIGRE in WEC ter slovenskih ED Maribor, Slovenski E-Forum in SDVD.