



TEMPERATŪROS ĮTAKA FOTOVOLTINEI JĖGAINEI

Modestas PIKUTIS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas modestas.pikutis@dok.vgtu.lt

Santrauka. Fotovoltinėse jėgainėse naudojami įvairaus tipo skirtingo veikimo efektyvumo saulės elementai. Nors šie elementai pagal tipą ir efektyvumą skirtingi, tačiau visiems jiems didelę įtaką daro aplinkos sąlygos. Pagrindinė priemonė fotovoltinės jėgainės (FJ) efektyvumui didinti yra didžiausios galios taško sekimas (DGT). Dauguma valdiklių, skirtų didžiausios galios taškui sekti fotovoltinėje jėgainėje, yra lėti arba netikslūs – negali palaikyti fotovoltinės jėgainės didžiausios galios režimo. Tai pagrindinė fotovoltinės jėgainės neefektyvaus veikimo priežastis. Fotovoltinių jėgainių tyrimams realiomis eksploataavimo sąlygomis ieškant efektyvesnių valdymo algoritmų būtinos didelės investicijos į įrangą, ir tai ilgai trunka. Tyrimams paspartinti kuriami imitaciniai modeliai. Šiame darbe aprašomas sukurtas temperatūros poveikiui tirti skirtas saulės modulio temperatūros kitimo blokas. Tai galimybė imituoti procesus, trunkančius mėnesį ar net kelerius metus. Darbe analizuojamą FJ modelį sudaro keturi struktūriniai blokai: saulės galios srautą imituojantis blokas, temperatūros kitimą imituojantis blokas, saulės modulį imitatorius ir valdymo algoritmas, kuriame didžiausios galios taškas nustatomas pagal *IncCond* algoritmą. Visas fotovoltinės jėgainės modelis, įgyvendintas *Matlab/Simulink* terpėje, leido analizuoti fotovoltinės jėgainės veikimo efektyvumą giedrą dieną, kai modulio temperatūra buvo pastovi arba kito.

Reikšminiai žodžiai: saulės elemento temperatūra, saulės elementai, didžiausios galios taško sekimas.

Įvadas

Rinkoje esama įvairaus tipo saulės elementų: amorfinių, kurie yra labai pigūs ir kol kas mažiausiai efektyvūs; brangesnių – silicio monokristalinių, daug geresnių saulės energijos vertimo į elektros energiją savybių, bei daugelis kitų (Chu, Meisen 2011).

Intensyviai ieškoma būdų pagerinti saulės elementų fizikines savybes. Daugumos elementų naudingumo koeficientas kol kas neviršija 20 %. Kadangi saulės elementų naudingumo koeficientas nedidelis, ypač yra svarbu, kad jie visada veiktų jų galiai pasiekus aukščiausiąją tašką. Tokiam režimui palaikyti naudojami valdikliai. Valdikliai taiko skirtingus didžiausios galios taško sekimo algoritmus (Esrām, Chapman 2007). Nuo valdymo algoritmo priklauso, kaip greitai bus aptiktas saulės modulio didžiausios galios taškas ir kaip tiksliai jis bus sekamas.

Fotovoltinės jėgainės DGT sekimą apsunkina neprognozuojamai kintančios aplinkos sąlygos ir įvairių saulės elementų ar modulių itin skirtingos veikimo charakteristikos. Šių pavienių saulės elementų ar saulės modulių skirtumų gali atsirasti, kai dalis fotovoltinės jėgainės dėl išorinių veiksnių patenka į šešėlį, padengiama sniego, šerkšno, dulkių ar tiesiog ant kai kurių saulės elementų prilimpa nukritę medžio lapai. Šie veiksniai yra ypatingi tuo, kad

jų negalima numatyti iš anksto, be to, šios sąlygos niekada identiškai neatsikartoja. Dėl šių priežasčių nėra galimybės iš anksto numatyti fotovoltinės jėgainės apkrovos tam tikrais laiko intervalais.

Tinkamai parinkti saulės modulio apkrovą yra itin svarbu, nes tik tada pasiekiamas jėgainės veikimo didžiausiosios galios taškas, kai ji geba maksimaliai panaudoti krintantį saulės galios srautą (SGS).

Didžiausiosios galios taškas saulės elemente, esant skirtingoms jo temperatūroms, gali kisti (Buday 2011). Ankstesnių tyrimų metu buvo atliekami įvairūs bandymai laikant, kad modulio temperatūra yra nekintanti ir lygi 25 °C (Vasarevičius *et al.* 2012). Buvo tiriamas fotovoltinės jėgainės algoritmo veikimas atsižvelgiant tik į saulės galios srauto kitimą. Tačiau norint tiksliai iširti ir įvertinti fotovoltinės jėgainės veikimą tokiomis aplinkos sąlygomis, kurios artimos realioms, būtina įvertinti modulio temperatūros kitimą (Siddiqui, Bajpai 2012).

Tirti fotovoltinės jėgainės veikimą realiomis aplinkos sąlygomis itin brangu ir sudėtinga, procesas ilgai trunka. To galima išvengti tyrimų metu imituojant realias darbo sąlygas sudarytame matematiname fotovoltinės jėgainės modelyje. Nesudėtingai galima palyginti saulės jėgainės

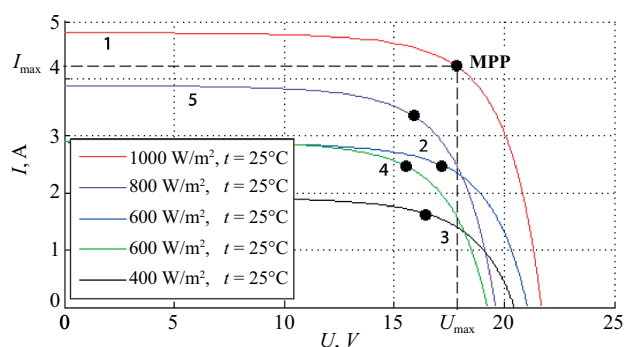
veikimą atitinkamais laiko momentais, kai keičiami tik norimi parametrai.

Darbe siekiama ištirti temperatūros įtaką pavieniam saulės moduliui bei visos fotovoltinės jėgainės valdymui. Tikslui įgyvendinti naudojamas ankstesniuose tyrimuose sukurtas Matlab/Simulink modelis (Pikutis *et al.* 2014), papildytas bloku, imituojančiu modulio temperatūros pokyčius atitinkamu laiko momentu.

Temperatūros įtaka saulės moduliui

Žinoma (Vasarevičius *et al.* 2012), kad jėgainės valdiklis jautriai reaguoja į greitus saulės galios srauto pokyčius. Tačiau nėra žinoma, kaip valdiklis veikia, kai vienu metu keičiasi du pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos jo veikimui – pakinta SGS ir modulio temperatūra. Jėgainės veikimas tiriamas tokiu nuoseklumu: pirmiausia tiriamas aplinkos poveikis pavieniam saulės moduliui, vėliau – iš trijų saulės modulių (SM) sudarytai jėgainei.

Tyrimo metu buvo imituojama, kad į saulės modulį patenka skirtingas saulės galios srautas, kai modulio temperatūra yra 25 °C ir kai ji padidėja iki 50 °C. Gautos voltamperinės charakteristikos pateiktos 1 pav. Jose tašku pažymėtas didžiausios galios taškas. Pirmoji kreivė apibūdina didžiausios galios tašką, kai modulio temperatūra 25 °C ir į jį patenka 1000 W/m² saulės galios srautas. Antroji kreivė atvaizduoja modulio DGT, kai į jį krinta 600 W/m² saulės galios srautas esant tokiai pat 25 °C temperatūrai. Trečioji kreivė atvaizduoja DGT, kai saulės galios srautas tik 400 W/m², o temperatūra išlikusi 25 °C. Šiose kreivėse nustatytas didžiausios galios veikimo taškas nusako modulio veikimą esant skirtingam apšviestumui ir tai pačiai temperatūrai. Ketvirtoji kreivė atvaizduoja modulio veikimą, kai į jį patenka 600 W/m² saulės galios srautas ir pakinta tik modulio temperatūra – pakyla iki 50 °C. Penktoji kreivė apibūdina dviejų faktorių poveikį



1 pav. DGT esant skirtingiems saulės galios srautams ir temperatūroms

Fig. 1. MPP depending on a different solar radiation and temperature

saulės modulio veikimui – saulės galios srautas padidėja nuo 600 W/m² iki 800 W/m², o modulio temperatūra pakyla nuo 25 °C iki 50 °C.

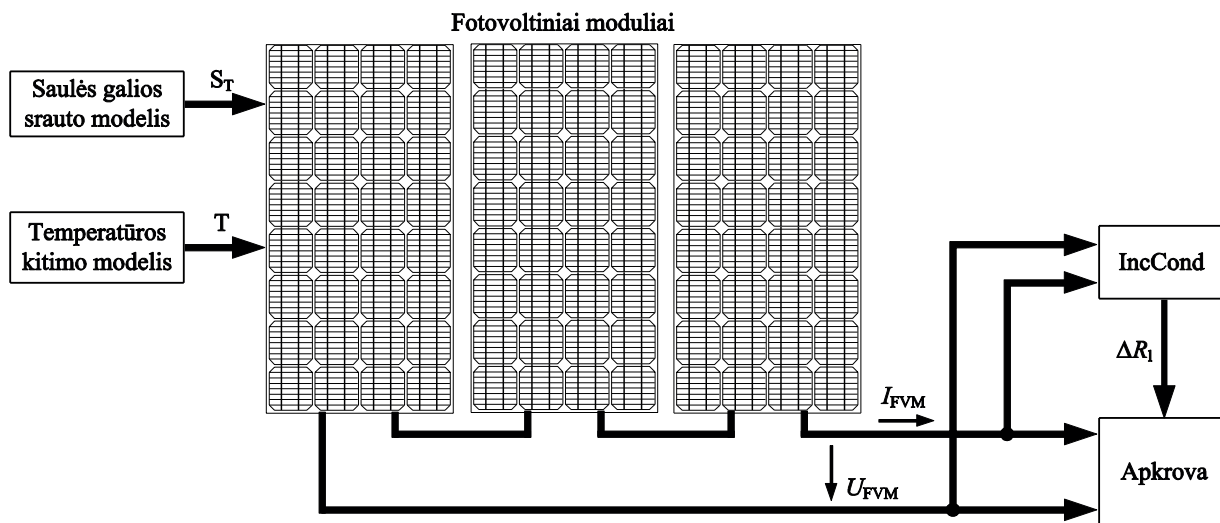
Lyginant pirmą, antrą ir trečią kreives matyti, kad esant vienodai modulio temperatūrai ir mažėjant tik saulės galios srautui, žymiai krinta modulio srovė. SGS sumažėjus nuo 1000 W/m² iki 600 W/m² (žr. kreives 1 ir 2) srovė sumažėja 1,9 A – tai 45 % pokytis. Įtampos pokytis mažesnis – įtampa sumažėja vos 1,1 V (apie 6 %). Šiuo atveju galia sumažėja 32,7 W. Kai modulio temperatūra siekia 50 °C, o SGS sumažėja nuo 800 W/m² iki 600 W/m² (žr. kreives 4 ir 5) – srovė sumažėja 0,97 A, o įtampa pakinta vos 0,6 V. Galia sumažėja 14,2 W. Kai saulės galios srautas nekinta ir yra lygus 600 W/m², o temperatūra pakyla nuo 25 °C iki 50 °C (žr. kreives 2 ir 4), srovė beveik nepakinta, tačiau modulio įtampa sumažėja net 2,3 V, dėl to 9 W sumažėja galia.

Iš 2 ir 4 kreivės matyti, kad esant 600 W/m² SGS modulio momentinė galia yra didesnė, kai jo temperatūra yra žemesnė. Atlikti išsamesni tyrimai didinant modulio temperatūrą patvirtino, kad didėjant modulio temperatūrai jo gaminama galia, esant tokiam pačiam saulės galios srautui, dar daugiau sumažėja. Taigi galima teigti, kad optimizuojant fotovoltinės jėgainės veikimą būtina įvertinti modulio charakteristikų priklausomybę ne tik nuo saulės galios srauto, bet ir nuo modulio temperatūros.

Modelio struktūrinė schema

2 pav. pateikta matematinio modelio struktūrinė schema temperatūros įtakai fotovoltinės jėgainės veikimui ištirti. Čia saulės jėgainę sudaro trys nuosekliai sujungti saulės moduliai. Kiekvieną SM sudaro 36 saulės elementai, kurių bendra galia esant standartinėms testavimo sąlygoms lygi 150 W. Taigi bendra jėgainės galia siekia 450 W. Į kiekvieną saulės modulį siunčiamas vienodą saulės galios srautą imituojantis signalas S_{r} . Šį signalą generuoja SGS blokas. Bloko parametrai parinkti taip, kad jo generuojamas signalas imituotų SGS Lietuvos sąlygomis. Tam, kad modelis imituotų fotovoltinės jėgainės veikimą kintančioje aplinkos temperatūroje, papildomai sudaromas ir prijungiamas saulės modulio temperatūros kitimo blokas. Kadangi laikoma, kad visi modelio saulės moduliai yra to paties tipo ir juos veikia vienodos aplinkos sąlygos, tas pats temperatūros kitimo signalas siunčiamas į visus FJ modulius. Taigi šie blokai imituoja SGS ir modulių įšilimo signalus atitinkamu laiko momentu.

Saulės moduliai, veikiami saulės galios ir temperatūros signalų, generuoja įtampą U_{FVM} ir kuria srovę I_{FVM} , kuri teka per apkrovą. Didžiausios galios taško sekimą



2 pav. Matematinio modelio struktūrinė schema
 Fig. 2. Structural diagram of a mathematical model

jėgainėje atlieka *IncCond* algoritmas (Zegaoui *et al.* 2010) – lyginamos fotovoltinės jėgainės išmatuotos trumpojo jungimo srovės I_{tr} ir tuščiosios veikos įtamos U_{at} vertės su prieš tai buvusiomis, atitinkamai reguliuojama jėgainės apkrova, ji padidinama arba sumažinama žingsniu ΔR .

Matematinis fotovoltinės jėgainės modelis

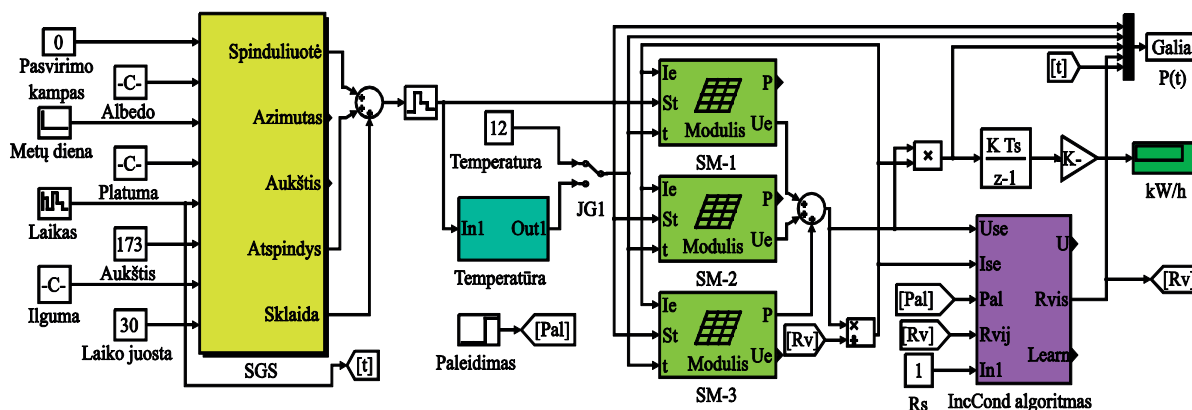
Saulės modulio temperatūros kitimo įtakai fotovoltinėje jėgainėje ištirti sudarytas matematinis fotovoltinės jėgainės modelis pateiktas 3 pav. Remiantis struktūrine schema (2 pav.), modelis įgyvendintas *Matlab/Simulink* terpėje. Modelį sudaro saulės galios srautą imituojantis SGS blokas. Generuojamam signalui priartinti prie realių sąlygų naudojami papildomi įvesties blokai: pasvirimo kampas, albedas, metų diena, geografinė platumą, paros laikas, aukštis virš jūros lygio, geografinė ilguma, laiko juosta. Keičiant šiuos parametrus, generuojamas signalas, imituo-

jantis saulės galios srautą, patenkančią į skirtingas žemės paviršiaus vietas atitinkamu laiko momentu.

Temperatūros įtaka fotovoltinės jėgainės valdymui imituojama laikant, kad diena yra giedra ir be kritulių.

Modelyje generuojamas SGS signalas imituoja saulės patekėjimą 6:00 val., o nusileidimą – 20:00 val. Taigi didžiausios galios taškas jėgainėje sekamas visą 14 val. trunkantį šviesųjį paros laiką. Saulės galios srauto bloke generuojamas signalas siunčiamas į Gauso filtrą, iš kurio patenka į kiekvieną saulės modulį.

Modulio temperatūrą jėgainės modelyje nustato temperatūros blokas, kurio generuojamas tolygus saulės patekėjimą ir nusileidimą imituojantis signalas siunčiamas į kiekvieną jėgainės saulės modulį. Temperatūros blokas sudarytas taip, kad pagal saulės galios srauto intensyvumą kistų modulio temperatūra. Kadangi tyrimo metu siekiama ištirti temperatūros įtaką fotovoltinei jėgainei, imituojama, kad saulės galios srautas kinta tolygiai. Šiuo atveju jam



3 pav. *Matlab/Simulink* modelis, atspindintis temperatūros kitimą
 Fig. 3. *Matlab/Simulink* model with temperature block

neturi įtakos šalutiniai veiksniai – vėjas, debesys ir nenumatyta susidarantys šešėliai. Modelyje imituojama, kad kiekvienas saulės modulis, reaguodamas į SGS atitinkamu laiko momentu, išyla ar pradeda vėsti.

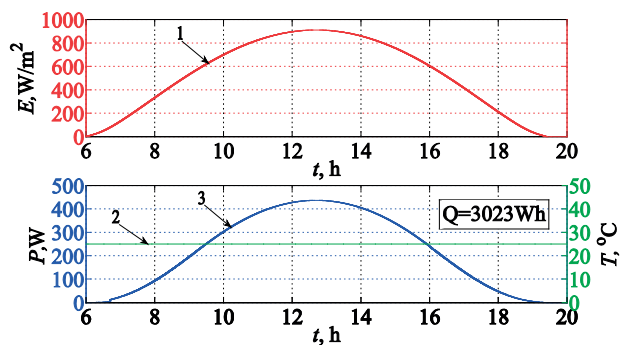
Fotovoltinėje jėgainėje moduliai yra sujungti nuosekliai, todėl išėjime jų įtampa yra sumuojama. Gauta įtampos vertė siunčiama į *IncCond* algoritmo bloke įdiegtą didžiausiosios galios taško sekimo valdiklį.

Temperatūros įtaka fotovoltinės jėgainės našumui

Tyrimo metu pavieniais bandymais imituotos įvairios aplinkos sąlygos. Pirmasis bandymas buvo imituojant, kad fotovoltinė jėgainė veikia, kai modulių temperatūra nekinta ir atitinka standartinę 25 °C testavimo sąlygų temperatūrą (4 pav., 2 kreivė). 4 pav. 1 kreivė žymi tolygų saulės galios srauto kitimą nuo 0 iki 900 W/m² šviesiuoju paros laiku. 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę galią, kurią generuoja valdiklio valdoma fotovoltinė jėgainė.

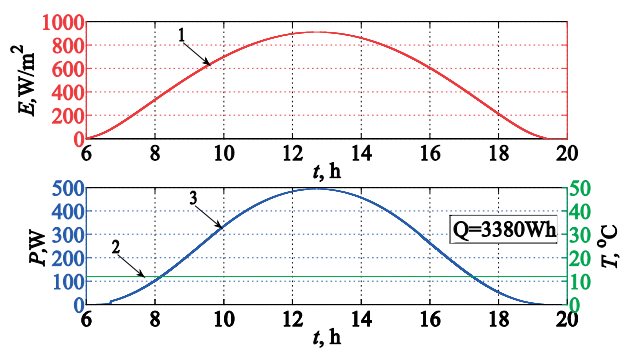
Iš galios charakteristikos, atvaizduotos 4 pav. 3 kreivė, matyti, kad, saulės galios srautui tolygiai kintant ir esant pastoviai 25 °C temperatūrai, valdiklis be nukrypimų geba sekti DGT. Šiomis sąlygomis fotovoltinė jėgainė pagamina 3023 Wh elektros energijos.

5 pav. pateikti antrojo bandymo rezultatai. Imituojamas fotovoltinės jėgainės veikimas nekintamoje 12 °C modulių temperatūroje (2 kreivė). Šiame paveiksle saulės galios srauto kitimą žymi 1 kreivė. Ji yra tokia pati kaip ir pirmojo bandymo metu. 3 kreivė 5 pav. vaizduoja fotovoltinės jėgainės generuojamą momentinę galią. Taigi esant



4 pav. Charakteristikos, apibūdinančios fotovoltinės jėgainės veikimą giedrą dieną, kai modulių temperatūra nekinta ir lygi 25 °C: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra veikiant fotovoltinei jėgainėi; 3 – momentinė fotovoltinės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu

Fig. 4. Solar power plant working characteristic on a bright day, when photovoltaic module temperature is constant and 25 °C: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant



5 pav. Charakteristikos, apibūdinančios fotovoltinės jėgainės veikimą giedrą dieną, kai modulių temperatūra nekinta ir lygi 12 °C: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra fotovoltinės jėgainės veikimo metu; 3 – momentinė fotovoltinės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu

Fig. 5. Solar power plant working characteristic on a bright day, when photovoltaic module temperature is constant and 12 °C: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant

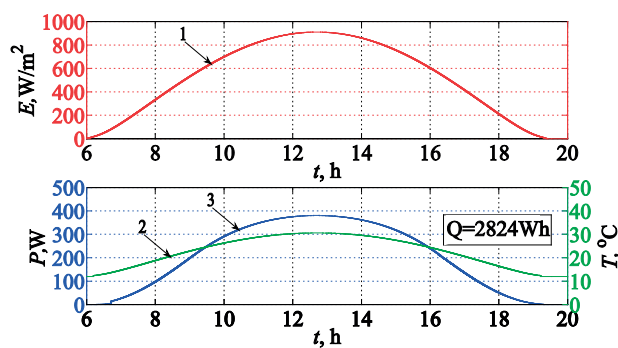
tokiam pačiam saulės galios srautui kaip ir pirmojo bandymo metu, jėgainė pagamina 3380 Wh elektros energijos.

Lyginant 4 ir 5 pav. galios charakteristikas matyti, kad fotovoltinė jėgainė daugiau elektros energijos pagamina, kai modulių temperatūra yra žemesnė. Matyti, kad kai modulių temperatūra žemesnė nei 13 °C, jėgainė gali pagaminti 357 Wh elektros energijos daugiau. Taigi rekomenduojama esant galimybei saulės modulius aušinti.

Paskutinio, trečiojo, bandymo metu imituojama, kad modulių temperatūra tolygiai kinta. Tai būdinga giedrai dienai – intensyvėjant SGS didėja modulio temperatūra. 6 pav. 1 kreivė atvaizduoja SGS kitimą tokiu pat dėsningumu kaip ir ankstesniuose bandymuose. Šiame paveiksle 2 kreivė žymi modulių temperatūros kitimą, atsižvelgiant į saulės galios srauto intensyvumą. 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę jėgainės galią esant atitinkamoms aplinkos sąlygoms laiko momentu t .

Apskaičiuota, kad fotovoltinė jėgainė per 14 val. pagamina 2824 Wh elektros energijos. Tai yra 199 Wh mažiau nei tada, kai modulių temperatūra pastovi ir lygi 25 °C, ir net 556 Wh mažiau, kai modulių temperatūra visą fotovoltinės jėgainės veikimo laiką buvo lygi 12 °C.

Visų bandymų metu FJ valdiklis gebėjo aptikti didžiausios galios tašką ir jį sekti. Galima teigti, kad tolygus modulių temperatūros kitimas neturi įtakos fotovoltinės jėgainės valdymo algoritmui, tačiau turi didelę įtaką modulių efektyvumui.



6 pav. Charakteristikos, apibūdinančios fotovoltinės jėgainės veikimą giedrą dieną, kai modulių temperatūra kinta priklausomai nuo saulės galios srauto intensyvumo:

1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra fotovoltinės jėgainės veikimo metu; 3 – momentinė fotovoltinės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu

Fig. 6. Solar power plant working characteristic on a bright day, when photovoltaic module temperature is changing depending on solar irradiance: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant

Išvados

1. Pavienio saulės elemento gaminamai elektros energijai turi įtakos ne tik saulės galios srautas, bet ir jo temperatūra. Esant didesnei temperatūrai, saulės elemento efektyvumas mažėja.
2. Saulės modulių temperatūrai pakilus nuo 12 °C iki 25 °C jėgainė pagamina 10,6 % mažiau elektros energijos nei gamintų esant pastoviai 12 °C temperatūrai.
3. Fotovoltinės jėgainės valdymo algoritmui tolygus modulių temperatūros kitimas, kai diena giedra, reikšmingos įtakos neturi.

Literatūra

- Buday, M. S. 2011. *Measuring irradiance, temperature and angle of incidence effects on photovoltaic modules in Auburn Hills, Michigan*: Thesis for the degree of master of science [interaktyvus]. Michigan: University of Michigan. 62 p. [žiūrėta 2014 m. spalio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://hdl.handle.net/2027.42/86065>
- Chu, Y.; Meisen, P. 2011. *Review and comparison of different solar energy technologies* [interaktyvus]. Global Energy Network Institute (GENI). 52 p. [žiūrėta 2015 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solar-technologies/Review-and-Comparison-of-Different-Solar-Technologies.pdf>
- Esrām, T.; Chapman, P. L. 2007. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22(2): 439–449. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>

Pikutis, M.; Vasarevičius, D.; Martavičius, R. 2014. Maximum power point tracking in solar power plants under partially shaded condition, *Elektronika ir elektrotechnika* 20(4): 49–52. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.4.6677>

Siddiqui, R.; Bajpai, U. 2012. Deviation in the performance of solar module under climatic parameter as ambient temperature and wind velocity in composite climate, *International Journal of Renewable Energy Research* 2(3): 486–490. <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/277/0>

Vasarevičius, D.; Martavičius, R.; Pikutis, M. 2012. Application of artificial neural networks for maximum power point tracking of photovoltaic panels, *Elektronika ir elektrotechnika* 18(10): 65–68. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3065>

Zegaoui, A.; Petit, P.; Sawicki, J. P.; Charles, J. P.; Aillerie, M.; DellaKrachai, M.; Belarbi, A. O. 2010. Simulation of photovoltaic generators and comparison of two common maximum power point trackers, *Renewable Energies and Power Quality Journal* 8 [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. kovo 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.icrepq.com/icrepq10/533-Zegaoui.pdf>

TEMPERATURE EFFECT TO SOLAR POWER PLANT

M. Pikutis

Abstract

There are a lot of different efficiency photovoltaic cells, which are used in solar power plants. All of these different photovoltaic cells are affected by different environment conditions. Maximum power point tracking is the main way to increase solar power plant efficiency. Mostly systems of maximum power point tracking are slow or inaccurate, that means the system cannot stay in maximum power point in solar power plant. This is the main reason why mostly of solar power plants are working not efficiently. The use of real working solar power plant with aim to find more efficient control algorithms is very expensive and requires long development period. Mathematical modeling makes research and investigation faster. In this article a temperature changing block of photovoltaic module that can simulate temperature changing process for month or even a few years was proposed. This temperature block was used in a solar power plant model which was created in previous investigations. Now, solar power plant model has four structural blocks: solar irradiance block, temperature of photovoltaic module block, photovoltaic module block and controller block. IncCond algorithm is used for maximum power point tracking. Solar power plant model is implemented in Matlab/Simulink environment. This model enables to analyze solar power plant working efficiency, when there are no clouds and the temperature is changing or stays constant.

Keywords: temperature of solar cell, solar cells, maximum power point tracking.