



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Alvydas Samoška

Projekto autorius

Doc. Dr. Renata Miliūnė

Vadovė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Alvydas Samoška

Projekto autorius

Doc. Dr. Renata Miliūnė

Vadovė

Jonas Vaišnys

Recenzentas / Recenzentė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Alvydas Samoška

Saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Alvydo Samoškos, baigiamasis projektas tema „Saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad, išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Autorius Samoška, Alvydas. Saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Renata Miliūnė; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros energetikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: fotomodulis, optimizatorius, mppt, inverteris.

Kaunas, 2019. 51 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe atliekamas tyrimas, kokią įtaką gaunamam elektros energijos kiekiui turi saulės fotomodulio optimizatorius. Tyrimas susideda iš dviejų dalių. Pirmoje dalyje tyrimas atliekamas naudojant realius duomenis, gautus iš skirtingų saulės elektrinių, esančių nedideliu atstumu vienai nuo kitos. Antroje tyrimo dalyje tiriama saulės elektrinė, kurioje sumontuoti galios optimizatoriai, bei jų įtaka pagaminamam energijos kiekiui.

Apžvalginėje magistro darbo dalyje aptariama bendra saulės energetikos sistema, fotomodulio sandara ir darbo veikimo principas, saulės elektrinių prijungimo sistemos bei jų veikimo principai. Išsamiau aptariamas tinklo inverterio veikimo principas, taip pat saulės fotomodulio optimizatoriaus veikimo charakteristika. Trumpai apžvelgiami pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos saulės elektrinės veikimui, šešėlio įtaka saulės elektrinės pagaminamam energijos kiekiui.

Tyrimui atlikti išsamiai aprašomi tiriamieji objektai, jų geografinė padėtis, orientacija, saulės elektrinių instaliuota galia bei pagrindiniai sistemos komponentai. Aptariamos skirtingų objektų sudėtinės dalys, fotovoltinių modulių tipas ir pagrindinės charakteristikos, objektuose naudojami tinklo inverterių tipai, galios optimizatorių tipas ir charakteristika.

Tyrimas saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikai nustatyti buvo atliktas išanalizavus dviejų skirtingų saulės elektrinių realius sugeneruotos energijos kiekius. Vienoje saulės elektrinėje tinklo inverteris prie fotomodulių buvo prijungtas per galios optimizatorius, kitoje saulės elektrinėje buvo naudojamas tinklo inverteris su integruotu maksimalaus galios taško sekimo įrenginiu. Kitoje tyrimo dalyje buvo išanalizuotas fotomodulio optimizatoriaus darbo charakteristikos, kai fotomoduliai yra šešėliuojami skirtingai. Tyrimo metu nustatyta saulės elektrinių sistemų efektyvumas bei galios optimizatorių darbo charakteristikos.

Author's Samoška, Alvydas. Research of Solar Photoconductor Optimizers Performance Characteristics. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Renata Miliūnė; The Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Electrical Power Engineering.

Keywords: photomodule, optimizer, mppt, inverter.

Kaunas, 2019. 51 pages.

Summary

The purpose of this master thesis is to determine, what impact on the total amount of power being produced by the photovoltaic modules does the power optimizer has. Research consist of two parts, where the first part contains real life data analysis, gathered from several individual basic solar panels, and in the second part a research is being done on a solar power plant with a power optimizer installed, which leads to the calculations of additional ammount of power can be made with this technology.

In the conspectus part, basics of solar energetics, fundamentals of PV module structure, installation and operation is being reviewed. Furthermore, an overview of grid inverter and the characteristics of PV optimizer is being presented. In addition - basics of main factors, for instance shadows and etc., that have significant impact on the ammount of power genereated by the solar panels are overviewed.

Objects of the research, their geographic locations, orientations, installed power, main system components and all other characteristics needed for this research, i.e. PV, optimizer and inverter types, are presented in detail.

To analyse and compare characteristics and generated power figures, two different approaches were taken – a comparison was being done between grid with power optimizer installed and grid inverter with power peak seeking device. Furthermore, additional research was made to see the impact of different ammounts of shadows on PV modules. Efficiency and characteristics of power optimizers were determined.

Turinys

Ivadas	10
1. Literatūros apžvalga.....	12
1.1. Bendros žinios apie saulės energiją	12
1.2. Saulės fotomodulio veikimo principas	12
1.3. Fotovoltinių elementų tipai	15
1.3.1. Monokristaliniai silicio fotoelektriniai elementai	15
1.3.2. Polikristaliniai silicio fotoelektriniai elementai.....	15
1.4. Fotomodulių jungimo būdai.....	15
1.4.1. Nuoseklus fotomodulių jungimo būdas	16
1.4.2. Lygiagretus saulės fotomodulių jungimo būdas	16
1.5. Saulės fotomodulių posvyrio kampas.....	17
1.6. Saulės fotomodulių orientacija	17
1.7. Saulės elektrinės inverteris.....	18
1.7.1. Tinklo inverteriai.....	19
1.7.2. Autonominio režimu veikiantys inverteriai	19
1.8. Tinklo inverterių tipai integruotose saulės elektrinėse	20
1.8.1 Centralizuoto tipo ir serijiniai tinklo inverteriai.....	20
1.8.2. Mikro inverteriai.....	21
1.8.3. Tinklo inverteriai jungiami su galios optimizatoriais	22
1.9. Galios optimizatorių veikimo principas	23
1.10. Fotomodulio šešėliavimas.....	24
2. Tyrimo analizė	28
2.1 Tiriamų objektų aprašymas	28
2.1.1 Pirmojo tiriamojo objekto aprašymas	28
2.1.2 Antrojo tiriamojo objekto aprašymas.....	32
2.2. Saulės fotomodulių elektrinės su integruotais optimizatoriais tyrimas	35

2.2.1. Saulės elektrinės su optimizatoriais aprašymas	36
3. Tyrimo rezultatai	37
3.1. Pirmojo tyrimo rezultatai	37
3.2. Antrojo tyrimo rezultatai.....	40
Išvados.....	49
Literatūros sąrašas.....	50

Lentelių sąrašas

2.1.1.1 lentelė. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinio saulės fotomodulio techninės charakteristikos	30
2.1.1.2 lentelė Fronius SYMO 7.0-3-M tinklo inverterio techninės charakteristikos	32
2.1.2.1 lentelė. SolarEdge P300-5R M4M RS optimizatoriaus techninės charakteristikos	34
2.1.2.2 lentelė. Solaredge se9k tinklo inverterio techninės charakteristikos	35
3.1.1 lentelė. Saulės elektrinių pagaminamas elektros energijos kiekis per metus	38
3.1.1 lentelė. Saulės elektrinių pagaminamas elektros energijos kiekis per metus	38
3.1.2 lentelė. Teorinis metinis pagaminamos elektros energijos kiekis	39
3.2.1 lentelė. Tiriamųjų fotomodulių vienos paros pagaminamas elektros energijos kiekis	44
3.2.2 lentelė. Tiriamųjų fotomodulių vieno mėnesio pagaminamas elektros energijos kiekis	45
3.2.3 lentelė. Teorinis vieno mėnesio saulės elektrinės pagaminamas elektros energijos kiekis	46

Paveikslėlių sąrašas

1.2.1. pav. Puslaidininkinių medžiagų draudžiamosios juostos dydžiai	13
1.2.2. pav. Fotovoltinio saulės elemento pjūvis	14
1.4.1.1. pav. Nuosekliai sujungtų fotomodulių schemas ir voltamperinės charakteristikos	16
1.4.2.1. pav. Lygiagrečiai sujungtų fotomodulių schemas ir voltamperinės charakteristikos	17
1.6.1. pav. Fotomodulis orientuotas į saulę.	18
1.6.2. pav. Apšvitos priklausomybė nuo modulių orientacijos	18
1.7.2.1. pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema	20
1.8.1.1. pav. a) centralizuoto tipo tinklo inverterio struktūrinė schema; b) serijinio tipo tinklo inverterio struktūrinė schema.....	21
1.8.3.1. pav. Tinklo inverterio su opimizatoriais struktūrinė schema.....	23
1.9.1 pav. Tipinė žeminančiojo-aukštinančiojo (Buck-boost) keitiklio struktūrinė schema.....	24
1.10.1. pav. Fotomodulis su n fotoelementų, kuriame: a - visi fotoelementai yra apšviesti saulės, b – vienas fotoelementas šešėlyje	25
1.10.2. pav. Įtampos kritimas šešėliuotame ir pilnai apšviestame saulės fotomodulyje.	27
2.1.1.1. pav. Pirmoji tiramoji saulės elektrinė.	29
2.1.1.2. pav. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinis saulės fotomodulis	30
2.1.1.3. pav. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinio saulės fotomodulio voltamperinės charakteristikos: a) srovės ir įtampos priklausomybė nuo apšvietos, b) srovės ir įtampos priklausomybė nuo temperatūros.....	31
2.1.1.4. pav. Fronius Symo 7.0-3-M tinklo inverteris.....	31
2.1.2.1. pav. Antroji tiramoji saulės elektrinė.	33
2.1.2.2. pav. SolarEdge P300-5R M4M RS galios optimizatorius	33
2.1.2.3. pav. Solaredge se9k tinklo inverteris.....	34
2.2.1.1. pav. Tiriamoji saulės elektrinė.	36
3.1.1. pav. Balandžio mėnesio tiriamųjų saulės elektrinių pagaminamos elektros energijos kiekis. 37	
3.1.2. pav. Metinis tiriamųjų saulės elektrinių pagaminamos elektros energijos kiekis.	38
3.1.3. pav. Teorinis metinis elektros energijos kiekis gautas iš 1kW saulės elektrinių.	39
3.2.1. pav. Tiriamosios saulės elektrinės fotomoduliai.....	41
3.2.2. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių įtampos kitimas laiko atžvilgiu.	42
3.2.3. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių srovės kitimas laiko atžvilgiu.	42
3.2.4. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių galios kitimas laiko atžvilgiu	43
3.2.5. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių optimizatorių įtampos kitimas laiko atžvilgiu.....	44

Įvadas

Saulės energija, tai saulės spinduliuotė, galinti gaminti šilumą, sukelti įvairias chemines reakcijas arba generuoti elektros energiją. Visas saulės energijos kiekis, pasiekęs Žemę, stipriai viršija esamus ir prognozuojamus energijos poreikius pasaulyje. Tinkamai panaudojant šį neišsemiamą energijos šaltinį galima aprūpinti visus būsimus energijos poreikius ateityje. Šiame amžiuje tikimasi, kad saulės energija taps dar labiau patrauklesnė kaip atsinaujinančios energijos šaltinis dėl jos neišsenkančio energijos kiekio. Vienas iš pagrindinių tokios energijos privalumų tai, kad ši energijos rūšis yra visiškai švari ir ekologiška, kas visiškai prieštarauja iškastinio kuro, anglies, naftos ir gamtinių dujų išgavimui. [9]

Atsinaujinančiųjų energijos šaltinių sritis, kai saulės šviesos pagalba yra išgaunama elektros energija, vadinama fotovoltine saulės energetika. Saulės energetinėje sistemoje, išgaunant elektros energiją, naudojamos įvairios fotovoltinės elektrinių sistemos. Saulės elektrinė – tai elektros įrenginių visuma, kurios pagrindiniai komponentai yra fotomoduliai, tinklo inverteris bei papildomi sistemos komponentai, skirti padidinti saulės elektrinių efektyvumą, o taip pat įrenginiai, skirti stebėti generuojamą elektros energijos kiekį, kurios pagrindą sudaro fotomoduliai, saulės elektrinės tinklo inverteris bei papildomi komponentai.

Pastaraisiais metais nedideliems gyvenamiesiems namams ar komercinės paskirtiems pastatams yra skiriamos paramos saulės elektrinėms įsirengti. Tai pastūmėjo nemažą dalį žmonių integruotis į elektros energetikos sistemą, įsirengiant saulės elektrines ant pastatų stogų ar statant antžemines saulės elektrinių sistemas. Tačiau sudėtingi fotovoltinių saulės modulių elektrinių projektai ir ne itin palankūs kraštovaizdžiai miestų ir priemiesčių aplinkose dažnai sukuria netinkamas sąlygas integruoti tokias sistemas į elektros energetikos tinklą. Dažnais atvejais produktyviam ir maksimaliam saulės elektrinės darbui trukdo medžiai, aukštesni pastatai ar bokštai kurie sudaro šešėlį. Taip pat sistemos produktyvumui įtakos turi ne itin švari aplinka ar prastas suderinamumas tarp saulės elektrinės komponentų ar jų pasirinkimo. [8]

Tiriamąojo darbo tikslas

Palyginti skirtingų saulės elektrinių pagaminamą elektros energijos kiekį bei apžvelgti saulės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikas.

Tiriamąojo darbo uždaviniai

1. atlikti išsamią saulės elektrinių komponentų apžvalgą, išsiaiškinti jų darbo specifikas, pagrindinių sudedamųjų dalių veikimo principus, bei esminius skirtumus;

2. atlikti išsamią tiriamųjų objektų analizę, įvertinant skirtingų saulės elektrinių specifikas. Aprašyti tiriamųjų objektų saulės elektrinių sudedamąsias dalis, bei sistemos komponentų charakteristikas;
3. atlikus lietratūros apžvalgą, bei tiriamųjų objektų analizę, atlikti tyrimą ir palyginti skirtingų saulės elektrinių sistemų pagaminamą elektros energijos kiekį;
4. nustatyti saulės elektrinės sistemos su prijungtais optimizatoriais darbo charakteristikas, bei įvertinti optimizatorių efektyvumą integruotoje saulės elektrinės sistemoje.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Bendros žinios apie saulės energiją

Atsinaujinančiųjų energijos šaltinių energetika pasaulyje plėtojasi labai dideliu tempu. Ši tendencija ypatingai atsispindi saulės energetikos srityje. Atsinaujinantys energijos ištekliai – tai tam tikru metodu transformuota saulės energija. Kasmet vidutiniškai per metus žemę pasiekia 5,4 mln. EJ (eksadžaulių). Trečdalis visos energijos patenka į kosmosą, o kita dalis, apie 3,8 mln. EJ, tenka žemės paviršiui. Žemei paskirstyta saulės energija padalinama taip: 2,55 mln. EJ tenka tiesioginiam oro, vandens ir žemės šildymui, 1,26 mln. EJ tenka išgarinimo - kondensacijos ciklui, 11 700 EJ tenka vėjo ir bangų atsiradimui, 1 260 EJ tenka fotosintezai, o likusi dalis apie 1 100 EJ tenka vandenynų potvyniams, konvekcijai ugnikalniuose (Boyle ir kt., 2003).

Saulėje vykstančios nepertraukiamos termobranduolinės reakcijos sukelia reiškinį, vadinamą saulės spinduliuote. Saulės spinduliuotė – tai elektromagnetinės bangos, turinčios platų spektrą. Ultravioletinių elektromagnetinių bangų ilgis yra nuo 0,3 μm iki 0,4 μm . Regimųjų elektromagnetinių bangų ilgis – nuo 0,4 μm iki 0,7 μm , o infraraudonųjų spindulių bangų ilgis yra daugiau kaip 0,7 μm . Elektromagnetinę spinduliuotę sudaro trys pagrindinės spinduliuočių rūšys. Tai – tiesioginė, sklaidžioji ir visuminė spinduliuotės. Tiesioginė spinduliuotė – tai tiesioginiai saulės spinduliai. Sklaidžioji spinduliuotė susidaro spinduliams atsispindėjus nuo dulkių, molekulių, atmosferos debesų, pastatų ir kitų objektų. Visuminę spinduliuotę sudaro tiesioginė ir sklaidžioji spinduliuotės. Elektromagnetinės spinduliuotės matavimo vienetas yra vatai, tenkantys kvadratiniam metrui (W/m^2), tai dydis, nusakantis momentinę galią, tenkančią plokštumai, į kurią ji krinta. [1]

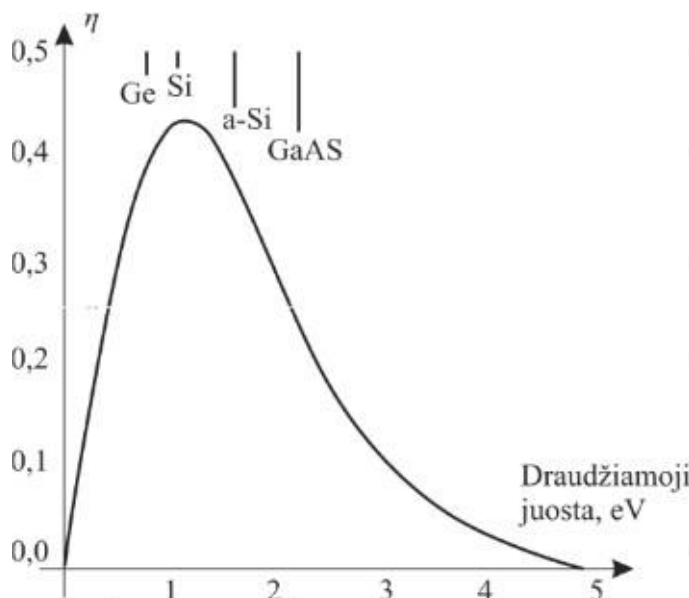
Saulės ekspozicija – tai per tam tikrą laiko tarpą gautas energijos kiekis, veikiant skirtingoms apšvitos sąlygoms. Saulės ekspozijos dydis matuojamas kilovatvalandėmis arba džauliais, tenkančiais kvadratiniam metrui (kWh/m^2 , J/m^2). Saulės ekspoziciją galima apskaičiuoti, naudojant skirtingo laikotarpio duomenis, tačiau tikslesniam prognozavimui tikslingiausia naudoti ilgalaikių stebėjimų (10 metų ir daugiau) vertes, gautas išmatavus jas skirtinguose regionuose. Vidutinė apšvita ties viršutine atmosferos riba, NASOS duomenimis siekia 1 353 W/m^2 . [1]

1.2. Saulės fotomodulio veikimo principas

Saulės fotomodulis – puslaidininkinė medžiaga, kuri šviesos energiją paverčia elektros energija. Fizikinis reiškinys, apibūdinantis šią reakciją, vadinamas - fotoelektriniu efektu. Fotoelektrinį efektą apibūdina silicio pavyzdys. Silicio atomą sudaro 14 protonų ir 14 elektronų. Valentiname silicio sluoksnyje yra išsidėstę 4 elektronai. Silicio fotokristalo formavimosi metu atomai savaime

susitapatina, taip sudarydami kovalentines jungtis su šalia esančiais 4 atomais. Visų silicio elementų išorinis sluoksnis tampa visiškai užpildytu, ko pasekoje atomas pasidaro stabilios būsenos. Jie neturi galimybės klaidžioti tarp atomų, nes yra susieti tarpusavyje. Kad elektronai pradėtų judėti nuo atomo prie atomo jiems yra reikalingas papildomas energijos kiekis. Gavus pakankamą energijos kiekį elektronai peršoka į laidumo juostą. Valentinės ir laidumo juostos energijų skirtumas yra vadinamas draudžiamąja juosta. Draudžiamųjų juostų dydis tiesiogiai proporcingas fotomodulio tuščios veikos įtampai. [1] [15]

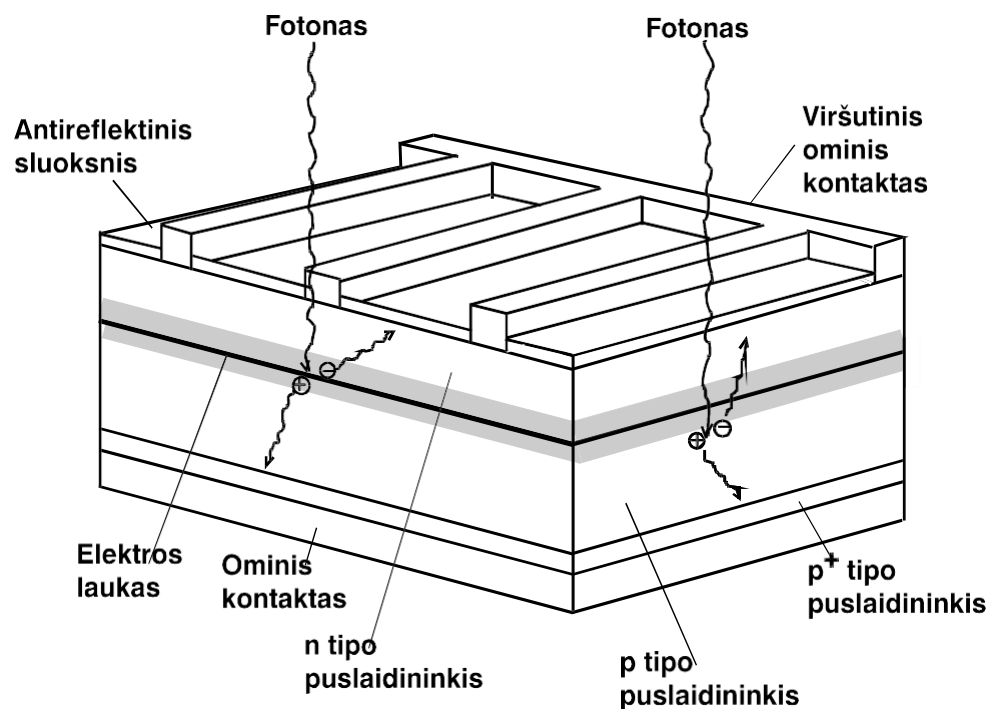
Saulės fotomodulis – puslaidininkinė medžiaga, kuri šviesos energiją paverčia elektros energija. Fizikinis reiškinys apibūdinantis šią reakciją, vadinamas - fotoelektriniu efektu. Fotoelektrinį efektą apibūdina silicio pavyzdys. Silicio atomą, sudaro 14 protonų ir 14 elektronų. Valentiname silicio sluoksnyje yra išsidėstę 4 elektronai. Silicio fotokristalo formavimosi metu, atomai savaime susitapdina, taip sudarydami kovalentines jungtis su šalia esančiais 4 atomais. Visų silicio elementų, išorinis sluoksnis tampa visiškai užpildytu, ko pasekoje atomas pasidaro stabilios būsenos. Jie neturi galimybės klaidžioti tarp atomų, nes yra susieti tarpusavyje. Kad elektronai pradėtų judėti nuo atomo prie atomo jiems yra reikalingas papildomas energijos kiekis. Gavus pakankamą energijos kiekį, elektronai peršoka į laidumo juostą. Valentinės ir laidumo juostos energijų skirtumas yra vadinamas draudžiamąja juosta. Draudžiamųjų juostų dydis tiesiogiai proporcingas fotomodulio tuščios veikos įtampai. [1]



1.2.1. pav. Puslaidininkinių medžiagų draudžiamosios juostos dydžiai [1]

Fotoelektros elemento efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo draudžiamosios juostos dydžio. Didesnė draudžiamoji juosta reiškia didesnę energijos kiekį, kuris reikalingas valentinius elektronus perkelti į laidumo juostą. Kiekvienas išspinduliuotas fotonas turi savo skirtingą energiją, todėl, jeigu išspinduliuoto fotono savitoji energija yra mažesnė nei draudžiamosios juostos dydis, elektronas negali peršokti iš valentinės juostos į laidumo juostą. Fotonas, kurio energija lygi puslaidininkinės draudžiamosios juostos dydžiui turi tikimybę išmušti elektroną iš valentinės juostos ir perkelti elektroną į laidumo juostą. Tačiau elektronui peršokus į laidumo juostą, jo buvusioje vietoje atsiranda skylė, nes toje vietoje lieka jungtis be vieno elektrono. [1]

Saulės energetikoje viena iš dažniausiai naudojamų medžiagų yra legiruotas silicis. Jis gaunamas į skirtingas plokštelių puses įmaišius boro ir fosforo priemaišų. Po šios reakcijos susiformuoja p-n sandūra, kuri užtikrina elektrinio lauko pastovumą. P-n sandūroje susidaręs elektrinis laukas elektronus ir skyles nukreipia atitinkamomis kryptimis, kurias sujungus į grandinę, elementu pradeda tekėti nuolatinė elektros srovė.



1.2.2. pav. Fotovoltinio saulės elemento pjūvis

1.3. Fotovoltinių elementų tipai

1.3.1. Monokristaliniai silicio fotoelektriniai elementai

Monokristaliniai silicio fotoelektriniai elementai yra vieni iš dažniausiai naudojamų. Jie sudaro maždaug trečdalį visų pagaminamų saulės elementų. Populiariausias silicio monokristalo auginimo būdų yra *Czochralski*. Šiuo metodu auginami monokristalai lėtai traukiami iš silicio lydinio, o po to legiriuojami boru. Kai monokristalas yra ištraukiamas, gamybos metu jis yra padalijamas į 0,3 mm pločio plokšteles. Toliau plokštelės yra šlifuojamos ir difuzijos būdu legiriuojamos fosforu. Monokristalinio silicio elemento efektyvumas siekia iki 15 procentų. Norint išgauti didesnę efektyvumą yra taikomas kitas metodas - zoninis lydymas. Šio metodo metu aukštesnės už lydymosi temperatūros zonos slenka apie tris kartus greičiau nei *Czochralski* metodo metu per monokristalinį silicį, tokiu būdu išgaudamos didesnę elemento efektyvumą, kuris siekia iki 20 procentų. [16]

1.3.2. Polikristaliniai silicio fotoelektriniai elementai

Polikristaliniai silicio fotoelektriniai elementai – tai dažniausiai naudojami bei daugiausiai rinkoje paplitę saulės elementai. Polikristalai išgaunami maišant įvairaus dydžio bei formos kristalus. Tokiu būdu išauginami kristalai siekia iki 10 cm. Gamybos metu kristalai toliau yra pjaustomi į atskiras plokšteles, kurios vėliau yra legiriuojamos fosforu. Tokių polikristalinių silicio fotoelektrinių elementų efektyvumas siekia iki 18 procentų. [16]

1.4. Fotomodulių jungimo būdai

Atskiri fotoelektriniai komponentai gamybos būdu yra sujungiami į visumą, taip sudarydami vieną bendrą sistemą, vadinama fotomoduliu. Fotomoduliai saulės šviesos energiją konvertuoja į nedidelės įtampos ir nuolatinės srovės elektros energiją. Praktikoje dažniausiai fotomoduliai yra jungiami nuosekliai arba lygiagrečiai, priklausomai nuo reikiamų parametrų dydžio. Didelės galios saulės elektrinėse fotomoduliai gali būti jungiami į atskirus masyvus, kuriuose jungimo būdai yra kombinuojami. Įtampos dydis tiesiogiai priklauso nuo nuosekliai sujungtų fotomodulių skaičiaus, o srovė nuo lygiagrečiai sujungtų fotomodulių skaičiaus. Vardiniai fotomodulių parametrai nustatomi, taikant standartines aplinkos sąlygas. Fotomodulio galia nustatoma, pritaikant sąlygas: apšvita, krentanti į fotomodulio paviršių – 1000 (W/m²), modulio temperatūra +25° C. Nominalioji galia žymima W_p . [16]

1.4.1. Nuoseklus fotomodulių jungimo būdas

Dažniausiai fotomoduliai yra jungiami nuosekliai. Tokiu būdu sujungti fotomoduliai pasiekia didesnę įtampą, o srovė išlieka lygi vieno elemento srovės dydžiui. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys tokios sistemos efektyvumą, yra apšvita ir temperatūra. Jei šie parametrai visus nuosekliai sujungtus fotomodus veikia vienodai, sistema veikia efektyviai. Srovės ir įtampos dydį galime apskaičiuoti pagal žemiau pateiktas formules:

$$U_{SE} = U_{FVM1} + U_{FVM2} \quad (1.4.1.1)$$

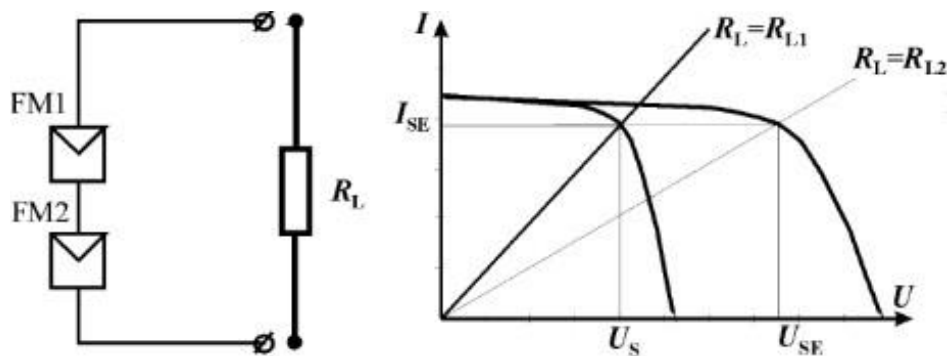
U_{SE} - nuosekliai sujungtų fotomodulių įtampa, V;

U_{FVM1} - n-tojo fotomodulio įtampa, V;

$$I_{SE} = I_{FVM1} = I_{FVM2} \quad (1.4.1.2)$$

I_{SE} - nuosekliai sujungtų fotomodulių srovė, A;

I_{FVM1} - n-tojo fotomodulio srovė, A;



1.4.1.1. pav. Nuosekliai sujungtų fotomodulių schemas ir voltamperinės charakteristikos [1]

1.4.2. Lygiagretus saulės fotomodulių jungimo būdas.

Didelėse saulės elektrinėse ar jų masyvuose fotomoduliai yra jungiami lygiagrečiai. Dažnai pasitaiko, kad fotomoduliai pradžioje yra jungiami į atskiras eiles nuosekliai, o paskui eilės jungiamos lygiagrečiai, norint išlaikyti tą pačią įtampą, o srovę pakelti. Lygiagretaus fotomodulių įtampos ir srovės dydis apskaičiuojamas pagal žemiau pateikiamas formules:

$$U_{SE} = U_{FVM1} = U_{FVM2} \quad (1.4.2.1)$$

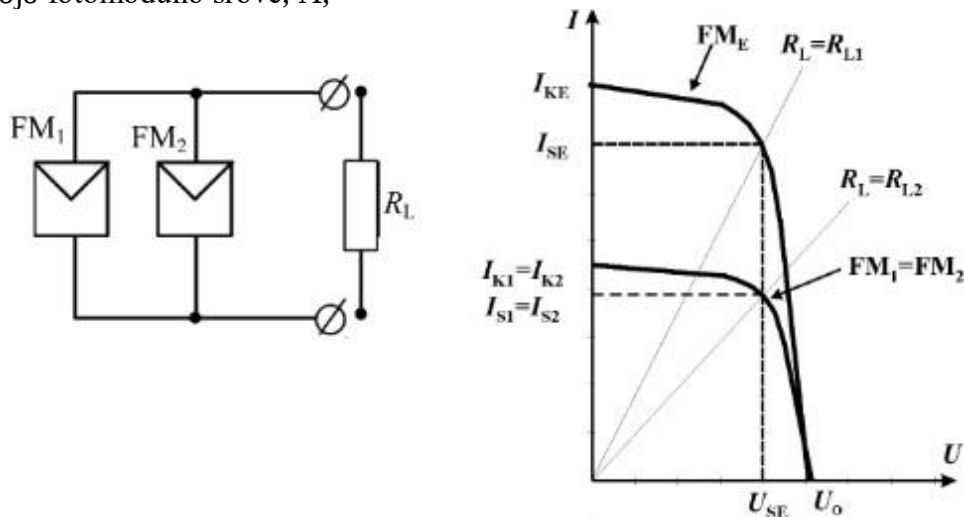
U_{SE} – lygiagrečiai sujungtų fotomodulių įtampa, V;

U_{FVM1} – n-tojo fotomodulio įtampa, V;

$$I_{SE} = I_{FVM1} + I_{FVM2} \quad (1.4.2.2)$$

I_{SE} – lygiagrečiai sujungtų fotomodulių srovė, A;

I_{FVM1} – n-tojo fotomodulio srovė, A;



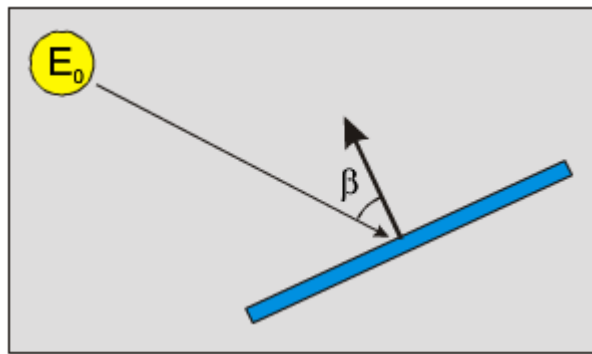
1.4.2.1. pav. Lygiagrečiai sujungtų fotomodulių schemas ir voltamperinės charakteristikos[1]

1.5. Saulės fotomodulių posvyrio kampas

Įrengiant saulės elektrinę labai svarbu parinkti tinkamą fotomodulių posvyrio kampą. Nuo jo priklauso suminės apšvietos kiekis, krentantis į fotomodulių plokštumą. Tinkamai parinktas fotomodulių posvyrio kampas užtikrina, kad fotomodulių plokštumą pasieks maksimalus tiesioginių saulės spindulių kiekis. Kitaip tariant, saulės elektrinė galės pagaminti didžiausią įmanomą elektros energijos kiekį. Optimalus fotomodulių posvyrio kampas parenkamas pagal geografinę padėtį. Dėl saulės padėties žemės atžvilgiu suminė apšvita, pasiekianti žemės paviršių skirtingose vietovėse, skiriasi. Skirtingose vietovėse posvyrio kampas nustatomas pagal daugiamečius tyrimų duomenis.

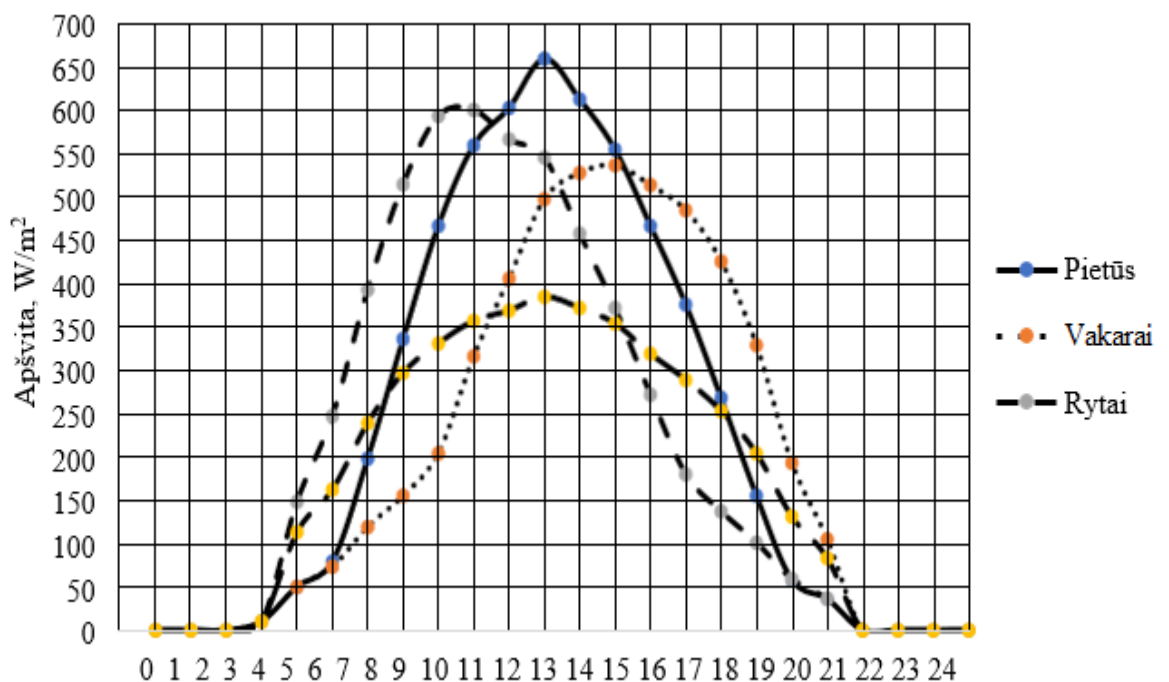
1.6. Saulės fotomodulių orientacija

Saulės fotomodulių orientacija lemia suminę apšvietos kiekį, pasiekiantį modulių paviršių per metus. Didžiausias apšvietos kiekis tenka fotomoduliams, orientuotiems į pietinę pusę, mažiausiai – į šiaurinę. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai fotomodulio plokštuma orientuota į saulę 90 ° kampu.



1.6.1. pav. Fotomodulis orientuotas į saulę. [1]

Skirtingai nuo vietovės, metinė suminė apšvieta keičiasi nevienodai. Norint, kad saulės elektrinė sugeneruotų maksimalų elektros energijos kiekį, yra montuojamos sistemos su sekimo įranga. Ši įranga leidžia fotomodulius orientuoti statmenai į saulę, nepriklausomai nuo dienos ar metų laiko. Šiose sistemose naudojamos dviejų ašių konstrukcijos, kurios, priklausomai nuo saulės padėties, pasikreipia statmenai į saulę. Tiesa, tokios saulės elektrinių sistemos gana brangios ir dėl sudėtingų konstrukcijų gedimo tikimybė kur kas didesnė nei tradicinių saulės elektrinių.



1.6.2. pav. Apšvitos priklausomybė nuo modulių orientacijos

1.7. Saulės elektrinės inverteris

Norint saulės energiją naudoti kaip tinkamą elektros generavimo šaltinį, reikia prie sistemos prijungti tam tikrus elementus, kad ją būtų galima integruoti į bendrą elektros energetikos sistemą. Norint tai

padaryti yra naudojami inverteriai ir papildomi sistemos komponentai. Pagrindinės tinklo inverterio ir pagalbinių sistemos komponentų funkcijos:

1. konvertuoti fotomodulių generuojamą nuolatinę (DC) srovę ir įtampą į tinklo dažnio kintamąją (AC) srovę ir įtampą;
2. inverterio išėjimo įtampą suderinti su tinko įtampa;
3. inverterio išėjimo įtampos fazes suderinti su tinklo įtampos fazėmis;
4. palaikyti reikiamą įtampos dydį, kad saulės elektrinės sistema veiktų efektyviai.

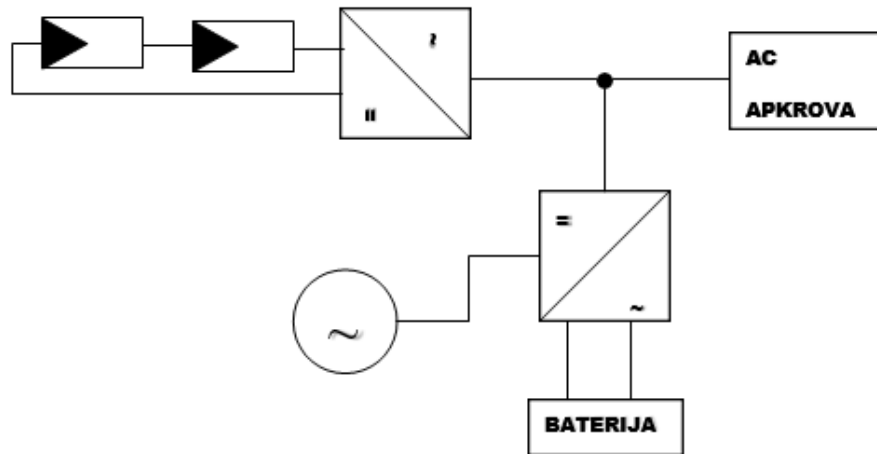
1.7.1. Tinklo inverteriai

Inverteris vienas iš pagrindinių saulės elektrinės sistemos sudedamųjų dalių. Pagrindiniai inverterio komponentai yra: nuolatinės – kintamos (DC/AC) srovės keitimo blokas, valdymo blokas, maksimalaus galios taško sekimo įrenginys bei kiti smulkesni elektroniniai komponentai. DC/AC srovės keitimo blokas atlieka srovės keitimo funkciją iš nuolatinės į kintamąją. Maksimalaus galios taško sekimo įrenginys atsakingas, kad saulės fotomodulių sistema veiktų maksimaliai efektyviai, esant skirtingoms darbo sąlygoms, tokioms kaip laikinas šešėliavimas ar apšvitos intensyvumo sumažėjimas. Pačio tinklo inverterio veikimo principas iš dalies mažai kuo skiriasi nuo kitų galios elektroninių įrenginių: dažnio keitiklių, maitinimo šaltinių ir pan. Inverterio pagrindinė funkcija valdyti srovės ir įtampos paramterus. Šiuos paramterus suvaldyti yra suformuoti vadinamieji *raktai*. Pagal paskirtį inverteriai gali būti autonominio darbo režimo ir integruoto į tinklą darbo režimo. [9]

1.7.2. Autonominiu režimu veikiantys inverteriai

Autonominiai tinklo inverteriai nėra jungiami prie bendro elektros skirstomojo tinklo, todėl šio tipo inverteriuose montuojamos ne tokios sudėtingos valdymo plokštės. Jos neturi elektroninių komponentų, atsakingų už sinchronizaciją su išoriniu elektros tinklu. Tačiau autonominiu režimu veikiantys inverteriai turi būti prijungti ne tik prie saulės fotomodulių, bet taip pat ir prie papildomų generavimo šaltinių. Papildomi generavimo šaltiniai skirti tokiu atveju, kai saulės energijos nepakanka elektros reikmėms padengti arba įvykus saulės elektrinės gedimui.

Autonominio tipo inverteriai turi specialius komponentus, kurie reguliuoja srovės tekėjimo kryptį į naudojamus elektros įrenginius, o ne papildomus generavimo šaltinius. Svarbus tokios autonominės sistemos komponentas yra akumuliatorių baterijos, kurios atlieka elektros energijos saugojimo vaidmenį. Kada saulės elektrinės sistema ar papildomi generavimo šaltiniai neveikia, sukaupta elektros energija gali būti naudojama iš akumuliatorių baterijų.



1.7.2.1. pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema

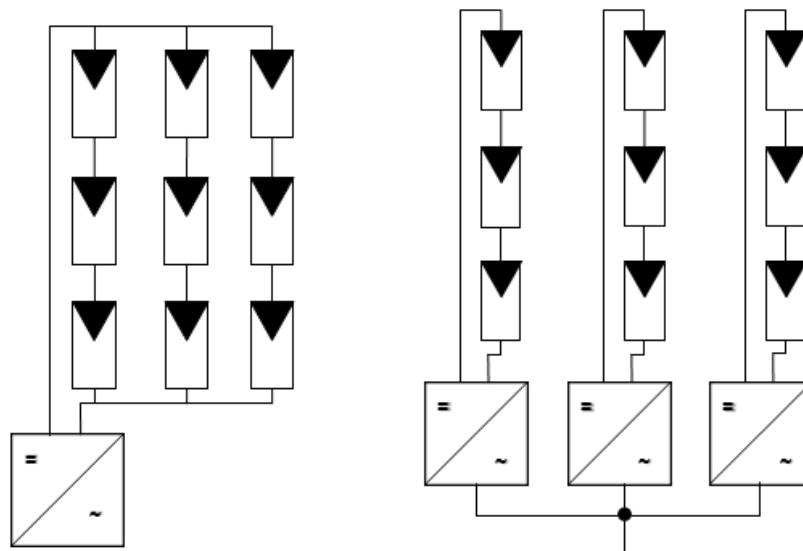
1.8. Tinklo inverterių tipai integruotose saulės elektrinėse

Tinklo inverteriai, kurie yra jungiami prie elektros tinklo būna skirtingų tipų. Esminiai skirtumai tarp tinklo inverterių yra jų prijungimo būdas prie saulės fotomodulių. Pagal prijungimo būdus jie skirstomi į centralizuoto tipo inverterius, serijinius inverterius, mikro inverterius ir serijinius inverterius, jungiamus su galios optimizatoriais.

1.8.1 Centralizuoto tipo ir serijiniai tinklo inverteriai

Nors alternatyvios technologijos sparčiai auga, tačiau inverteriai, jungiami tiesiogiai prie saulės fotovoltinių modulių, iki šiol yra labiausiai paplitusi ir laiko patikrinta galimybė pasaulinėje rinkoje. Jie yra vienas iš pigiausių variantų, ką gali pasiūlyti kompanijos, prekiaujančios saulės elektrinių sistemomis. Centralizuoto tipo tinklo inverteriai veikia panašiu principu kaip ir serijinio tipo inverteriai. Esminis skirtumas yra tai, kad tokio tipo inverteriai gali būti prijungti prie žymiai didesnės galios saulės elektrinės. Atskiri fotomodulių masyvai yra jungiami į komutacinius įrenginius, kuriuose nuolatinės srovės dydis paduodamas į centralizuotą tinklo inverterį, kuriame srovė yra konvertuojama į kintamąją. Tokio tipo tinklo inverteriuose reikalingas mažesnis kiekis laidų ir jungčių, kas sumažina gedimo tikimybę.

Tokio tipo inverteriai puikiai tinka vietose, kuriose nėra pastatų, medžių, bokštų ar kitų objektų, galinčių sudaryti šešėlį ar kitaip trikdyti sklandžiai veikti saulės elektrinės sistemai. Taip pat tokia sistema puikiai gali veikti, jei atskiros modulių eilės yra jungiamos į vieną plokštumą ir nėra išskirstytos po skirtingų orientacijų stogus ar skirtingas plokštumas. Tokio tipo inverterių sistemos yra patikimiausios ir pigiausios, dėl minimalaus elektronikos komponentų kiekio.

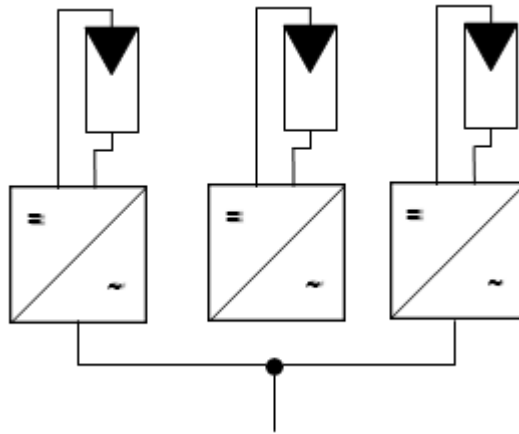


1.8.1.1. pav. a) centralizuoto tipo tinklo inverterio struktūrinė chema; b) serijinio tipo tinklo inveterio struktūrinė schema

Nepaisant, kad tokio tipo inverteriai turi statistiškai mažiau gendamų komponentų, palyginti su kitomis inverterių sistemomis, jų pagrindinis trūkumas yra tas, kad vienas užtamsintas modulis arba neveikiantis, arba kitaip negalintis veikti pilnu pajėgumu, gali turėti neigiamą poveikį visai sistemai. Kitaip tariant, maksimalų sistemos našumą apibrėžia praščiausiai dirbančio modulio našumas. Pavyzdžiui, jei vienas fotovoltinis modulis yra dalinai šešėliuojamas ir praranda 20% savo maksimalios pasiekiamos galios, kiekvienas tos eilės modulis dirbs taip pat 20% mažesniu pajėgumu.

1.8.2. Mikro inverteriai

Kaip alternatyva centralizuoto ir serijinio tipo tinklo inverteriams, jungiamiems tiesiogiai prie saulės fotomodulių, gali būti naudojami mikro inverteriai. Tokio tipo inverteriai dažniausiai montuojami kartu su kiekvienu saulės fotomoduliu, bet pastaruoju metu populiarėja gaminiai, kuriuose mikro inverteriai yra integruoti į saulės fotomodulių komutacines dėžutes. Tokios sistemos privalumas yra mažesnis kiekis jungiamųjų dalių, kas mažina gedimo tikimybę. Mikro inverteriai konvertuoja nuolatinės DC srovės ir įtampos elektros energiją į mūsų naudojamą kintamąją AC. Tokiai sistemai nėra reikalingas pagrindinis tinklo inverteris kaip anksčiau aprašytoje sistemoje. Šios saulės elektrinių sistemos gali būti integruojamos ten, kur vienas ar keli saulės elektrinės fotomoduliai gali būti šešėliuojami ar sumontuojami skirtingomis kryptimis saulės atžvilgiu, taip pat ant skirtingų stogo šlaitų ar skirtingose plokštumose.

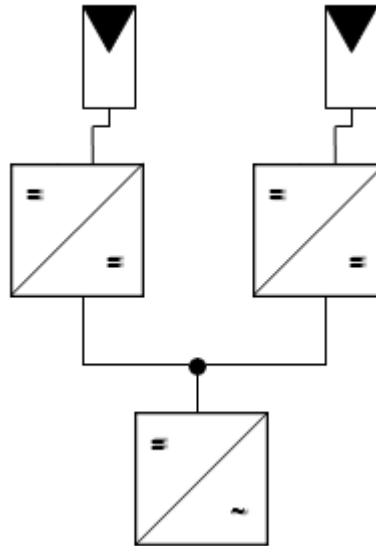


1.8.2.1. pav. Mikro inverterio struktūrinė schema

Vienas iš esminių skirtumų, lyginant centralizuoto ir serijinio tipo tinklo inverterius su mikro inverteriais, tai galimybė atskirai kiekvienam fotomoduliui dirbti maksimaliai efektyviai, nepriklausomai nuo aplinkos sąlygų. Mikro inverteryje sumontuoti MPPT sekikliai leidžia kiekvienam fotomoduliui rasti maksimalų galios tašką ir veikti maksimaliai efektyviai. Vieno ar daugiau sistemos komponentų gedimo atveju, likusi elektrinės dalis turi palyginti nedidelį poveikį bendram sistemos darbui ir toliau gali veikti sklandžiai. Kiekvienas saulės elektrinės fotomodulis, prijungtas prie mikro inverterio, dirba kaip atskiras saulės energijos generavimo šaltinis. Mikro inverteriai taip pat leidžia stebėti kiekvieno saulės fotomodulio energijos generaciją, kai centralizuoto ir serijinio tipo inverteriai suteikia galimybę matyti visų fotomodulių generuojamą galią ir pagamintą elektros energijos kiekį. Pagrindiniai mikro inverterių trūkumai yra didesnės pradinės sąnaudos, integruojant saulės elektrinės sistemą, dažnesni gedimų rodikliai, bei sudėtingesnis aptarnavimas, kai mikro inverteriai yra sumontuojami po saulės fotomoduliais. [11]

1.8.3. Tinklo inverteriai jungiami su optimizatoriais

Saulės energijos optimizavimo įrenginiai yra panašūs į tinklo mikro inverterius, nes jie leidžia optimizuoti ir stebėti kiekvieno atskiro saulės fotomodulio energijos gamybą. Optimizatoriai kaip ir mikro inverteriai turi tuos pačius privalumus, sprendžiant šešėliavimo problemą. Saulės elektrinių sistemose optimizatoriai, kaip ir mikro inverteriai, dažniausiai būna montuojami kartu su saulės fotomoduliais arba šalia jų. Skirtingai nuo mikro inverterių, optimizatoriai turi galimybę naudoti MPPT esant žemesnei įtampai, o tai reiškia, kad jie seka fotomodulio didžiausią galios tašką, net ir esant dideliame šešėliavimui. Saulės fotomodulių optimizatoriai jungiami į vieną grandinę, kuri prijungiama prie centrinio ar serijinio tinklo inverterio. Tokios sistemos efektyvumas yra didžiausias, lyginant su kitomis saulės elektrinių sistemomis. [11]



1.8.3.1. pav. Tinklo inverterio optimizatoriais struktūrinė schema

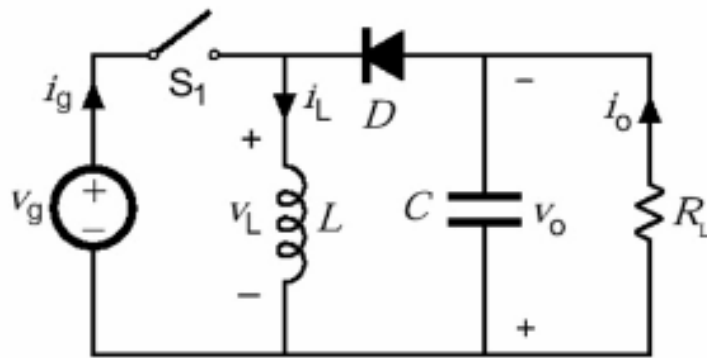
Optimizatoriai kiekvieno modulio išėjimo įtampą optimizuoja atskirai ir tuomet siunčia į serijinį tinklo inverterį, kuriame nuolatinės srovės ir įtampos dydžiai konvertuojami į kintamos srovės ir įtampos dydžius. Šešėliuojamams ar skirtingų šlaitų stogams mikro inverteriai ir optimizatoriai yra žymiai veiksmingesnis sprendimas, lyginant su centralizuoto tipo tinklo inverteriais, tačiau toks sprendimas yra brangesnis ir padidina gedimo riziką, dėl didesnio kiekio elektronikos komponentų.

Saulės fotomodulių optimizatoriai ypatingai didelę reikšmę turi didelėse saulės elektrinių sistemose, kuriose fotomoduliai yra jungiami į masyvus. Pramoninių gamyklų teritorijose ar ant gamybinių patalpų stogų įrengiamos saulės elektrinės neretai susiduria su ne itin palankiomis aplinkos sąlygomis. Optimizatorių integravimas tokiose elektrinėse padeda sumažinti galios nuostolius ir padidinti efektyvumą. Didelis optimizatorių pranašumas, lyginant su mikro inverteriais, yra tai, kad jie gali būti jungiami dviems fotomoduliams iš karto, kai, tuo tarpu, mikro inverteriai gali būti jungiami tik atskirai su kiekvienu fotomoduliu. Šis sprendimas leidžia gerokai sumažinti saulės elektrinės kainą.

1.9. Optimizatorių veikimo principas

Saulės fotomodulių optimizatorių veikimo principas yra pagrįstas fiksuotos išėjimo įtampos procesu, nepriklausomai nuo atskirų saulės fotomodulių darbo charakteristikų ar aplinkos sąlygų. Optimizatoriuje naudojamas dc/dc konverterio tipas su žeminančiuoju-aukštinančiuoju (Buck-boost) keitikliu, kuris leidžia padidinti ar sumažinti įtampą, kad būtų pasiekta reikiama išėjimo įtampa. Tokio tipo konverteris optimizatoriuje leidžia fotovoltinio saulės modulio įtampą ir srovę konverterio įėjime visiškai atjungti nuo konverterio išėjimo įtampos ir srovės. Tai yra pagrindinis skirtumas tarp tokios sistemos ir tradicinių sistemų, kuriose fotomoduliai yra jungiami tiesiogiai prie tinklo

inverterio. Tipinė žeminančiojo-aukštinančiojo (Buck-boost) keitiklio schema pateikiama 1.8.2.1 pav. [17]



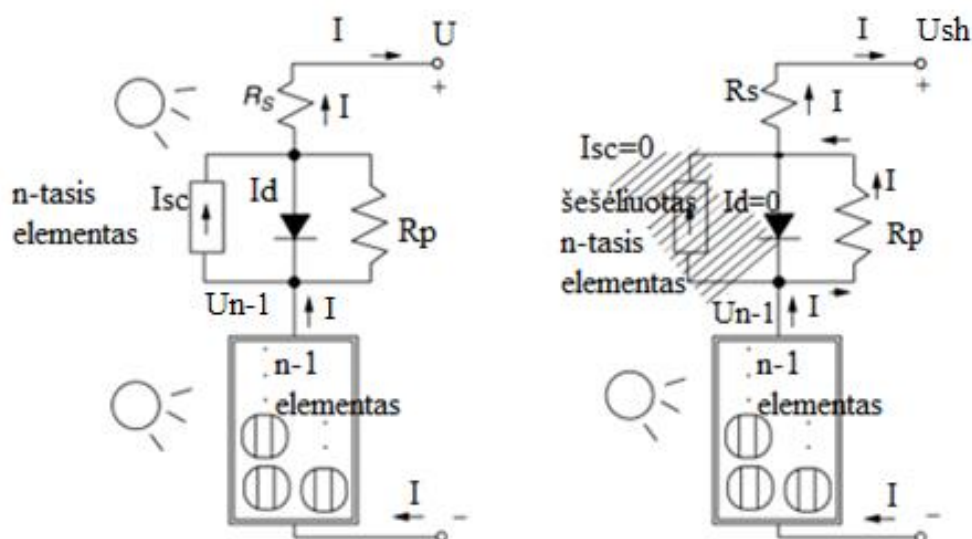
1.9.1 pav. Tipinė žeminančiojo-aukštinančiojo (Buck-boost) keitiklio struktūrinė schema. [17]

Žeminančiojo-aukštinančiojo tipo keitikliuose, jungklį S_1 pakeičia galios tranzistorius. Dažniausiai tai būna metalo oksido tipo tranzistoriai. Tokio tipo tranzistoriai (angl. *MOSFET*), turi didelį privalumą uždaroje būsenoje, kadangi dėl labai mažos varžos $0,002 \, \Omega$ jie pasižymi labai mažais nuostoliais. Diodas D , taip pat veikia jungiklio principu, kadangi pasižymi greita veika ir nedideliais skaidomaisiais nuostoliais.

1.10. Fotomodulio šėšėliavimas

Didžiausią įtaką saulės elektrinės pagaminamam elektros energijos kiekiui turi saulės apšvita. Mažėjant apšvitai į fotomodulių paviršių krenta ir generuojamos elektros energijos kiekis. Viena iš dažniausiai pasitaikančių priežasčių, lemiančių mažesnę saulės spindulių kiekį, pasiekantį fotomodulio paviršių, yra šėšėlis. Šėšėlį gali sukelti įvairūs pastatai, medžiai ar debesys. Tradicinėse saulės elektrinių sistemose, kuriose saulės fotomoduliai yra tiesiogiai jungiami prie tinklo, inverterio šėšėliavimas gali turėti labai didelę įtaką elektros energijos gamybai.

Saulės elektrinių sistemose, kai fotomoduliai yra jungiami nuosekliai, pro juos teka vienoda srovė I , tačiau jei vienas iš fotomodulių patenka į šėšėlį, srovė krenta visoje eilėje. Srovės kritimas turi įtakos ir įtampos sumažėjimui, o tai lemia galios sumažėjimą. Tipinė šėšėliuojamo fotomodulio schema pateikiama 1.10.1 paveikslėlyje.



- (a) Principinė schema, kai fotomoduliai nešešėliuojami
 (b) Principinės schema, kai viršutinis fotomodulis yra šešėliuojamas

1.10.1. pav. Fotomodulis su n fotoelementų, kuriame: a - visi fotoelementai yra apšviesti saulės, b – vienas fotoelementas šešėlyje [18]

Kai saulės spinduliai tiesiogiai krenta į fotomodulio plokštumą, jais teka vienoda srovė I , o įtampos kritimas yra U_{n-1} . Visos fotomodulių eilės įtampos kritimą galime apskaičiuoti pagal žemiau pateiktą formulę.

$$U_{SH} = U_{n-1} - I(R_p + R_s); \quad (1.10.1)$$

U_{SH} - bendra išėjimo įtampa, V;

U_{n-1} - n -tojo elemento įtampa, V;

R_p – lygiagrečiai prijungta varža, Ω ;

R_s - nuosekliai prijungta varža, Ω ;

I – Fotomodulio srovė, A.

Kai visi n fotoelementai yra apšviečiami saulės spindulų, pro juos teka vienoda srovė I , o išėjimo įtampa U . Apatinių fotoelementų $(n - 1)$ įtampą apskaičiuojame:

$$U_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \times U; \quad (1.10.2)$$

n – elementų skaičius;

U - įtampa, V.

Sujungdami 13 ir 14 formules gauname bendrą išraišką:

$$U_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \times U - I(R_P + R_S); \quad (1.10.3)$$

U_{SH} - bendra išėjimo įtampa, V;

U_{n-1} - n-tojo elemento įtampa, V;

R_P - lygiagrečiai prijungta varža, Ω ;

R_S - nuosekliai prijungta varža, Ω ;

I - Fotomodulio srovė, A.

Fotoelemento įtampos kritimą ΔU , kuris atsiranda dėl šešėlio galime apskaičiuoti:

$$\Delta U = U - U_{SH} = U - \left(1 - \frac{1}{n}\right) U + I(R_P + R_S); \quad (1.10.4)$$

ΔU - Įtampos kritimas fotomodulyje, V;

U_{SH} - bendra išėjimo įtampa,

U_{n-1} - n-tojo elemento įtampa, V;

R_P - lygiagrečiai prijungta varža, Ω ;

R_S - nuosekliai prijungta varža, Ω ;

I - fotomodulio srovė, A.

Supaprastinus formulę gauname:

$$\Delta U = \frac{U}{n} + I(R_P + R_S); \quad (1.10.5)$$

Dėl lygiagrečiai prijungtos varžos R_P , kuri yra žymiai didesnė už nuosekliai prijungtą varžą R_S , įtampos kritimo formulę supaprastiname:

$$\Delta U \cong \frac{U}{n} + IR_P; \quad (1.10.6)$$

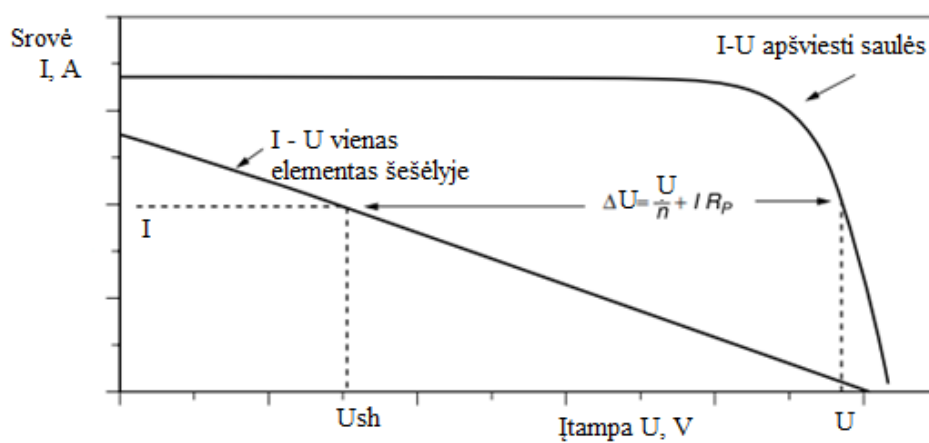
ΔU - Įtampos kritimas fotomodulyje, V;

R_P - lygiagrečiai prijungta varža, Ω ;

I - fotomodulio srovė, A.

Saulės fotomodulio voltamperinė charakteristika pavaizduota 1.10.2 paveikslėlyje, kai vienas iš fotomodulių yra šešėliuojamas, o kitas pilnai apšviestas saulės. Įtampos kritimas tiesiogiai priklauso

nuo srovės dydžio [18]



1.10.2. pav. Įtampos kritimas šėšėliuotame ir pilnai apšviestame saulės fotomodulyje. [18]

2. Tyrimo analizė

Pirmoje tyrimo dalyje apžvelgiame dviejų skirtingų saulės elektrinių sistemų sudedamąsias dalis. Išsamiai aprašomi tiriamieji objektai, jų geografinė padėtis, fotomodulių tipai, posvyrio kampai, orientacija saulės atžvilgiu bei kiti svarbūs aspektai. Šio tyrimo metu specialios įrangos pagalba gaunami realūs elektros energijos generavimo duomenys, kurie lyginami tarpusavyje. Kadangi nagrinėjamų saulės elektrinių instaliuota galia skiriasi, todėl rezultatus lyginame kiek 1 kW saulės elektrinės pagamino per tą patį laiko tarpą. Rezultatai suvedami į lenteles ir pateikiami grafiškai. Šio tyrimo tikslas palyginti dviejų skirtingų saulės elektrinių pagaminamą elektros energijos kiekį, kai vienoje elektrinėje yra naudojama tradicinė sistema su centralizuoto tipo tinklo inverteriu, o kitoje elektrinėje papildomai naudojami optimizatoriai su integruotais MPPT sekikliais.

Tyrimui atlikti priimame šias sąlygas:

1. saulės fotomoduliai tyrimo metu yra toje pačioje aplinkoje;
2. saulės elektrinių sistemos orientacija vienoda, modulių posvyrio kampas labai panašus;
3. fotomodulių temperatūra nekinta, keičiasi tik apšvita į fotomodulio plokštumą;
4. saulės fotomodulių paviršius yra švarus – nėra vertinama dulkių ir sniego įtaka;
5. fotomodulius aplinkos parametrai veikia identišškai, moduliai yra išdėstyti vienoje plokštumoje;

2.1 Tiriamų objektų aprašymas

2.1.1 Pirmojo tiriamojo objekto aprašymas

Pirmoji tirama saulės fotomodulių elektrinė 2.1.1.1 pav. sumontuota ant privataus gyvenamojo namo stogo, esančio Radviliškio rajone, Pakiršinio gyvenvietėje. Elektrinė orientuota į pietinę pusę, o fotomodulių posvyrio kampas apie 55 laipsnius.



2.1.1.1. pav. Pirmoji tiramoji saulės elektrinė.

Saulės elektrinę sudaro 30, 275 W galios polikristaliniai saulės fotomoduliai 2.1.1.2 pav., prijungti prie 7 kW galios tinklo inverterio 2.1.1.4 pav. Prie šios saulės elektrinės sistemos taip pat sumontuota ir speciali stebėjimo įranga, leidžianti matyti saulės elektrinės energijos generaciją.

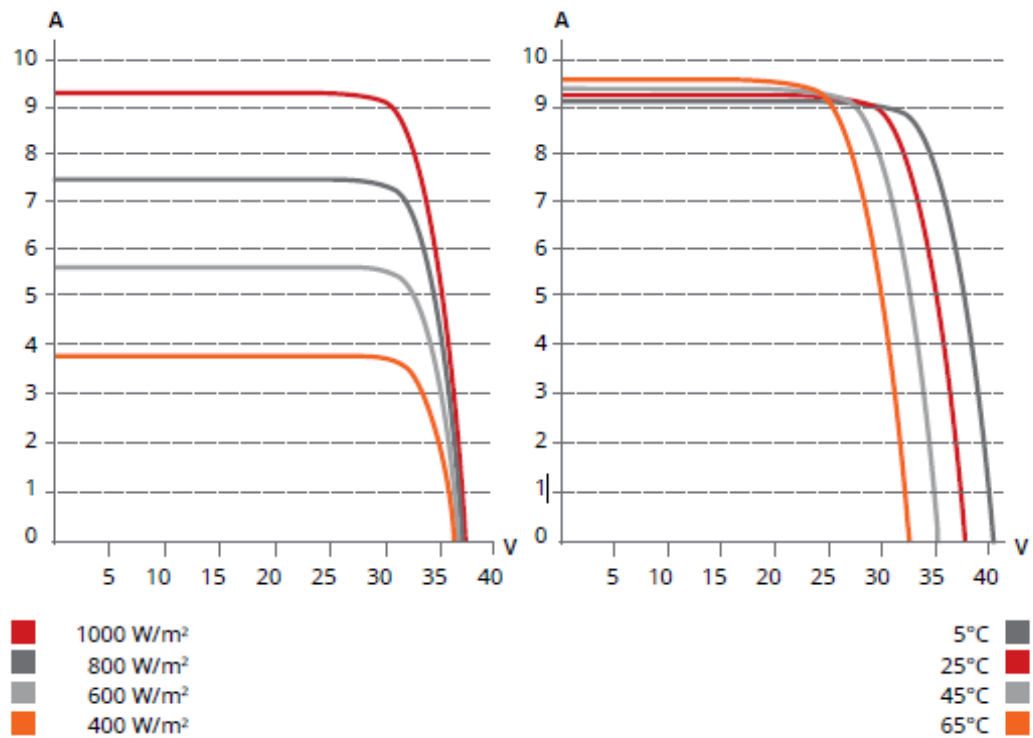
Saulės fotomodulio ir tinklo inverterio techninės charakteristikos pateikiamos 2.1.1.1 ir 2.1.1.2 lentelėse.



2.1.1.2. pav. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinis saulės fotomodulis

2.1.1.1. lentelė. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinio saulės fotomodulio techninės charakteristikos.

Techninis parametras	Dydis
Maksimali modulio galia, P_{max}	275 W
Maksimali modulio galia į kvadratinį metrą, P_{max}	166W/m ²
Efektyvumas, %	16.61 %
Maksimali įtampa, V_{max}	31 V
Maksimali srovė, I_{max}	8,88 A
Trumpojo jungimo srovė, I	9,45 A
Atviros grandinės įtampa, V	38 V



2.1.1.3. pav. Canadian Solar CS6P-275 (275W) polikristalinio saulės fotomodulio voltamperinės charakteristikos: a) srovės ir įtampos priklausomybė nuo apšvietos, b) srovės ir įtampos priklausomybė nuo temperatūros



2.1.1.4. pav. Fronius Symo 7.0-3-M tinklo inverteris

2.1.1.2. lentelė. Fronius SYMO 7.0-3-M tinklo inverterio techninės charakteristikos

Parametras	Dydis
<i>(DC dalis)</i>	
Minimali įėjimo įtampa	150 V
Nominali veikimo įtampa, U_{dc}	595 V
Maksimali įėjimo įtampa, U_{max}	1000 V
Maksimali įėjimo srovė, I_{max}	16 A
MPPT įtampos diapazonas	228 – 800 V
Maksimalus efektyvumas, η_{max}	97,5 %
Maksimali inverterio galia, P_{dc}	14000 W
<i>(AC dalis)</i>	
Nominalioji išėjimo galia, P_{ac}	7000 W
Maksimali išėjimo galia, P_{acmax}	7000 W
Nominalioji AC tinklo įtampa, V_{ac}	400 V
Nominali išėjimo srovė, I_{ac}	10,1 A

2.1.2 Antrojo tiriamojo objekto aprašymas

Antroji tiriama saulės fotomodulių elektrinė sumontuota ant privataus gyvenamojo namo, esančio Pakruojo rajone, Žvirblonių kaime. Saulės elektrinę sudaro 36, 275 W galios polikristaliniai saulės fotomoduliai 2.1.1.1 pav., sujungti su optimizatoriais 2.1.2.1 pav., kurie prijungti prie 9 kW serijinio tipo tinklo inverterio 2.1.2.2 pav. Šioje saulės elektrinės sistemoje, kaip ir prieš tai aprašytoje, yra sumontuota tokia pat įranga, leidžianti stebėti elektros energijos gamybą bei vartotojo elektros energijos suvartojimą. Skirtingai nei prieš tai aprašytoje sistemoje, šioje saulės elektrinėje sumontuoti optimizatoriai papildomai suteikia galimybę stebėti atskirų saulės fotomodulių darbą ir generuojamą elektros energiją. Elektrinė sumontuota ant privataus gyvenamojo namo stogo, 50 laipsnių kampu į pietinę pusę. Techninės saulės elektrinės sistemos komponentų charakteristikos pateikiamos 2.1.2.1 ir 2.1.2.2 lentelėse.



2.1.2.1. pav. Antroji tiramoji saulės elektrinė



2.1.2.2. pav. SolarEdge P300-5R M4M RS optimizatorius

2.1.2.1 lentelė. SolarEdge P300-5R M4M RS optimizatoriaus techninės charakteristikos

Parametras	Dydis
<i>(DC įėjimo dalis)</i>	
Maksimali įėjimo galia, P_{dcmax}	300 W
Maksimali įėjimo įtampa, U_{max}	48 V
Maksimali trumpojo jungimo srovė, I_{ocmax}	11 A
Maksimalus efektyvumas, η_{max}	99,5 %
<i>(DC išėjimo dalis)</i>	
Maksimali išėjimo srovė, I_{dcmax}	15 A
Maksimali išėjimo įtampa, U_{dcmx}	60 V



2.1.2.3. pav. Solaredge se9k inverteris

2.1.2.2 lentelė. Solaredge se9k tinklo inverterio techninės charakteristikos

Parametras	Dydis
<i>(DC dalis)</i>	
Maksimali įėjimo įtampa, U_{max}	900 V
Nominali veikimo įtampa, U_{dc}	750 V
Maksimali inverterio galia, P_{dc}	12150 W
Maksimalus efektyvumas, η_{max}	98 %
Maksimali įėjimo srovė, I_{max}	14,5 A
<i>(AC dalis)</i>	
Nominalioji išėjimo galia, P_{ac}	9000W
Maksimali išėjimo galia, P_{acmax}	9000 W
Nominalioji AC tinklo įtampa, V_{ac}	400 V
Nominali išėjimo srovė, I_{ac}	13 A

2.2. Saulės fotomodulių elektrinės su intergruotais optimizatoriais tyrimas

Antroje tyrimo dalyje nagrinėjame integruotos į elektros tinklą saulės elektrinės sistemą, kurioje prie kiekvieno saulės fotomodulio yra prijungti optimizatoriai. Tokia sistema pasirinkta dėl ne visai palankių saulės elektrinės darbo sąlygų. Saulės elektrinė yra sumontuota ant privataus gyvenamojo namo stogo, tačiau dėl iškilusio kamino pirmąją dienos dalį keletas fotomodulių yra šešėliuojami. Šio tyrimo tikslas išanalizuoti gautus saulės elektrinės elektros energijos generavimo duomenis bei atskirai palyginti šešėliuojamų ir pilnai apšviestų fotomodulių charakteristikas.

Saulės fotovoltinio modulio optimizatoriaus darbo charakteristikoms nustatyti naudojami realios saulės elektrinės skirtingų fotomodulių įvairių parametų duomenys. Jie gaunami iš specialaus įrenginio, prijungto prie tinklo inverterio. Surinkti duomenys perduodami internetu į kompiuterinę programą, kurioje jie apdorojami ir pateikiami grafiškai. Tyrimo metu analizuojamos fotomodulių darbo charakteristikos bei šie parametrai: fotomodulių įtampos ir srovės, optimizatorių įtampos, fotomodulių galios ir kt. Tyrimo rezultatai pateikiami grafiškai, o fotomodulių elektros energijos generacijos pateikiamos vaizdiškai.

Tyrimui atlikti buvo pritaikomos šios sąlygos:

1. saulės fotomoduliai vienodi, tačiau vienas yra šešėliuojamas, kitas ne;
2. saulės fotomodulių temperatūra nekinta, keičiasi tik apšvita į modulio plokštumą;
3. visais laiko momentais saulės fotomodulių paviršius yra švarus – nėra vertinama dulkių ir sniego įtaka;
4. aplinkos parametrai fotomodulius veikia vienodai, moduliai yra sumontuoti vienoje plokštumoje;

Šio tyrimo metu nagrinėjama saulės elektrinės sistema su optimizatoriais, kai dalis elektrinės yra šešėliuojama. Dėl sumontuotų optimizatorių, tokia sistema sklandžiai veikia net ir esant ne visai palankioms elektrinės darbo sąlygoms. Atvejo, kada elektrinė neturi optimizatorių ir yra šešėliuojama, nenagrinėjame, nes tokia sistema yra neefektyvi, o mažiau saulėtomis dienomis apamai gali neveikti dėl per mažos sukeltos įtampos tinklo inverterio įėjime.

2.2.1. Saulės elektrinės su optimizatoriais aprašymas

Tiriamasis objektas yra Kauno rajone, Naujasodžio gyvenvietėje. Saulės elektrinę sudaro 30, 325 W Canadian solar firmos monokristaliniai saulės fotomoduliai, prijungti prie 300 W SE P300-5R M4M RS optimizatorių, kurie prijungti prie 9 kW galios serijinio tipo tinklo inverterio. Saulės elektrinė sumontuota ant namo stogo orientuoto į pietinę pusę. Tiriamoji saulės elektrinė pavaizduota 2.2.1.1 paveikslėlyje.

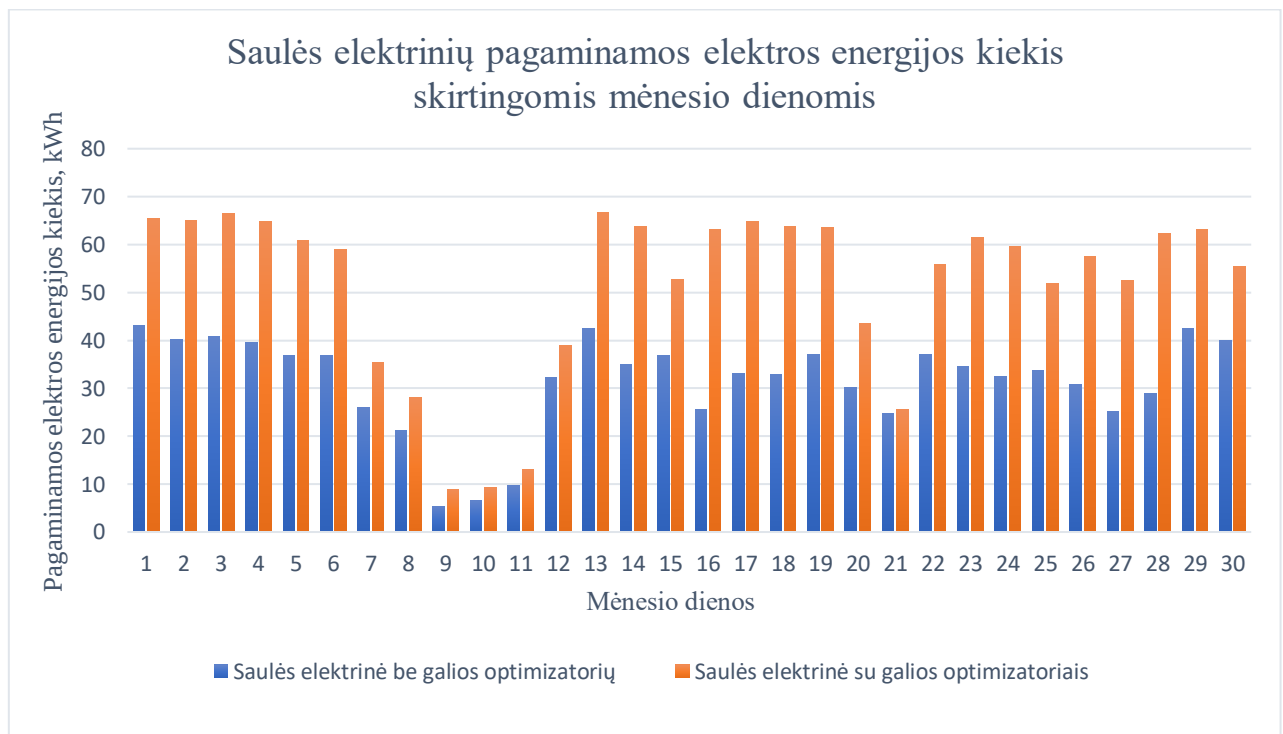


2.2.1.1. pav. Tiriamoji saulės elektrinė

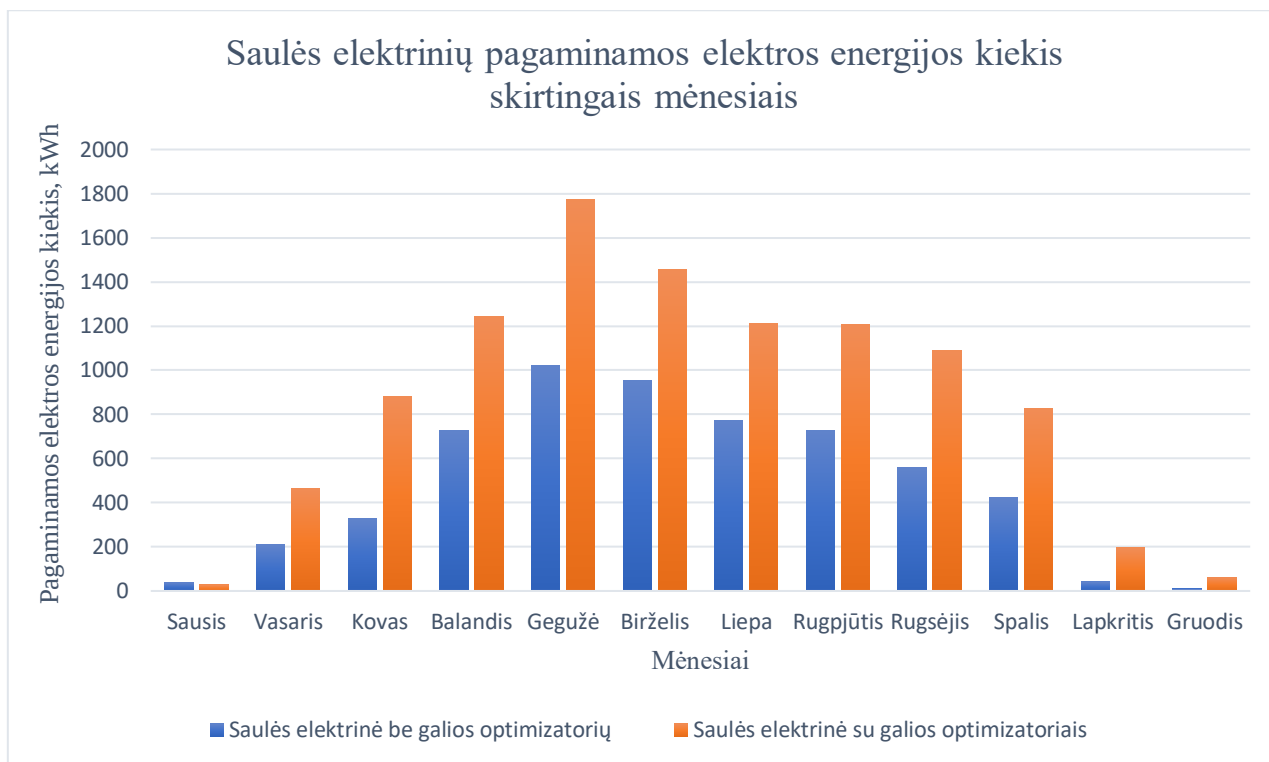
3. Tyrimo rezultatai

3.1. Pirmojo tyrimo rezultatai

Pirmojo tyrimo metu rezultatai buvo gauti išanalizavus dviejų skirtingų saulės elektrinių pagamintą elektros energijos kiekį per tą patį laikotarpį. Tyrimo metu nustatyta, kad saulės elektrinės sistemoje, kurioje yra sumontuoti optimizatoriai, elektrinė pradeda darbą ankščiau ir baigia vėliau. Taip nutinka dėl optimizatoriuose integruotų mppt sekiklių, kuriems užtenka mažesnės startinės įtampos, kad pradėtų maksimalaus galios taško paiešką ir būtų pradėta elektros energijos gamyba. Tyrimo metu, siekiant kuo tiksliau nustatyti saulės elektrinių pagaminamą elektros energijos kiekį, bei ištirti elektrinių efektyvumą, buvo analizuojami vieno mėnesio bei metiniai elektros energijos gamybos duomenys. Rezultatai buvo apdorojami ir pateikiami grafiškai.



3.1.1. pav. Balandžio mėnesio tiriamųjų saulės elektrinių pagaminamos elektros energijos kiekis.



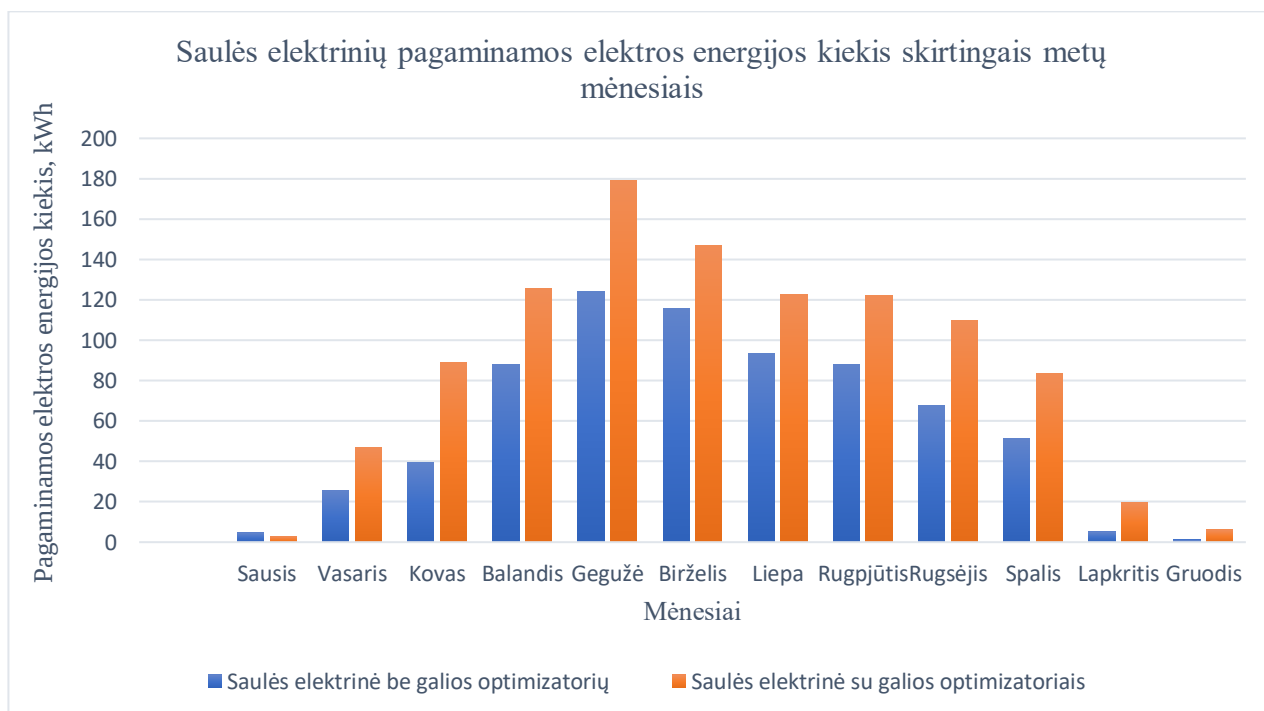
3.1.2. pav. Metinis tiriamųjų saulės elektrinių pagaminamos elektros energijos kiekis

3.1.1. lentelė. Saulės elektrinių pagaminamas elektros energijos kiekis per metus

	Saulės elektrinė su galios optimizatoriais	Saulės elektrinė be galios optimizatorių
Mėnesis	Sugeneruota energija, kw/h	
Sausis	29	39
Vasaris	466	211
Kovas	880	327
Balandis	1245	727
Gegužė	1773	1023
Birželis	1457	955
Liepa	1214	772
Rugpjūtis	1208	727
Rugsėjis	1088	559
Spalis	828	422
Lapkritis	195	42
Gruodis	61	9
VISO:	10444	5813

Iš saulės elektrinių pagamintos elektros energijos kiekio balandžio mėnesį bei metinio 2018m grafiko, matome, kad saulės elektrinės su prijungtais optimizatoriais pagaminamas elektros energijos kiekis stipriai lenkia antrosios elektrinės pagamintą elektros energijos kiekį. Vienas iš veiksnių lemiančių tokį skirtumą yra skirtingas fotomodulių skaičius bei sumontuoti optimizatoriai vienoje iš elektrinių. Siekiant ištirti saulės fotomodulių skaičiaus ir optimizatorių įtaką pagaminam elektros energijos kiekiui, buvo atlikti skaičiavimai, kokį elektros energijos kiekį teoriškai pagamino 1 kW saulės

elektrinė. Skaičiavimai buvo atliekami metinius duomenis padalinant iš saulės elektrinės instaliuotos suminės galios. Gauti rezultatai pateikiami 3.1.3 paveikslėlyje ir 3.1.2 lentelėje.

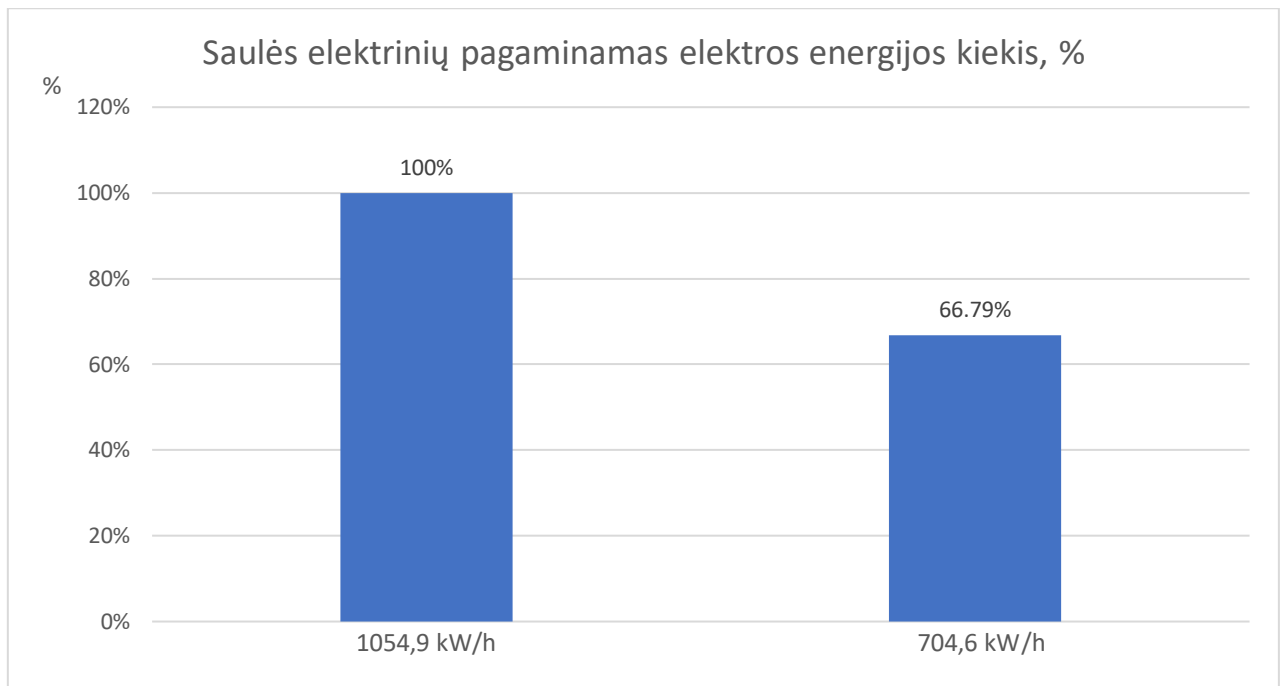


3.1.3. pav. Teorinis metinis elektros energijos kiekis gautas iš 1kW saulės elektrinių

3.1.2. lentelė. Teorinis metinis pagaminamos elektros energijos kiekis

	Saulės elektrinė su galios optimizatoriais	Saulės elektrinė be galios optimizatorių
Mėnesis	Sugeneruota energija, kw/h	
Sausis	2,9	4,72
Vasaris	47,07	25,57
Kovas	88,88	39,63
Balandis	125,75	88,12
Gegužė	179,09	124
Birželis	147,17	115,75
Liepa	122,62	93,57
Rugpjūtis	122,02	88,12
Rugsėjis	109,89	67,75
Spalis	83,63	51,15
Lapkritis	19,69	5,09
Gruodis	6,16	1,09
VISO:	1054,87	704,56

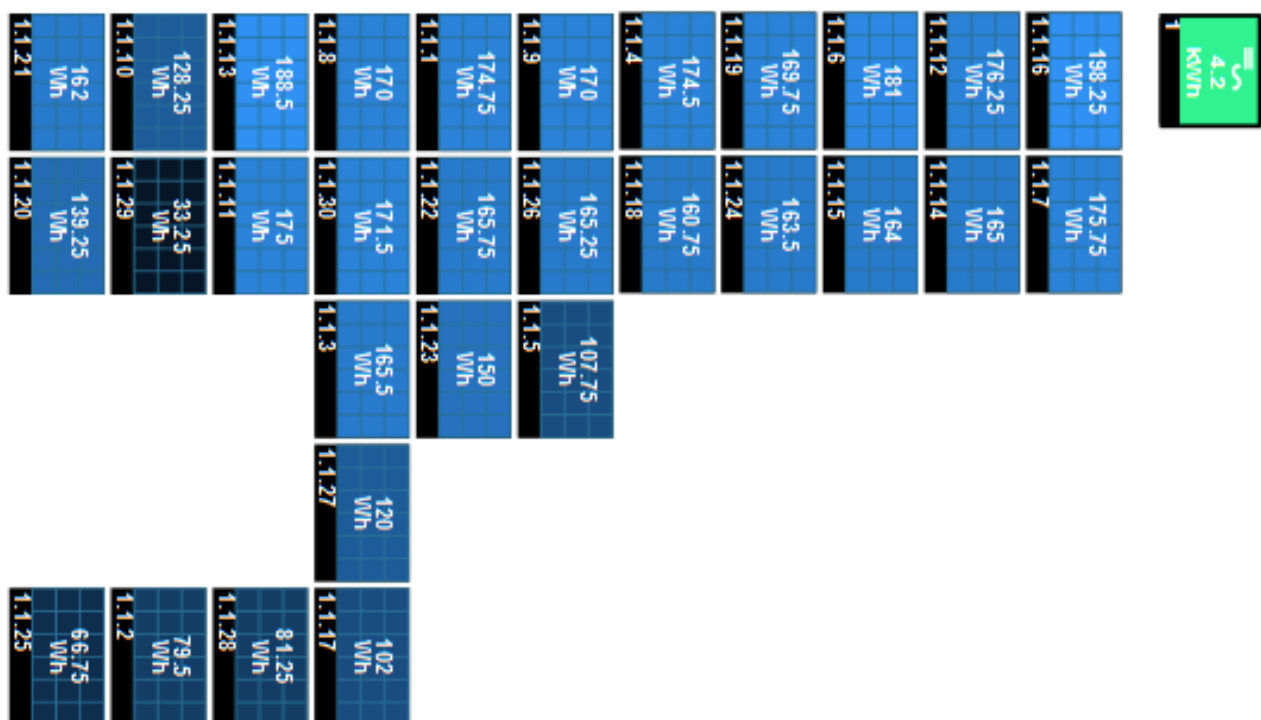
Iš pateiktų duomenų matome, kad tradicine saulės elektrinės sistema, kurioje fotomoduliai jungiami tiesiogiai prie tinklo inverterio, teoriškai pagamina 33% mažiau elektros energijos, nei saulės elektrinė su sumontuotais fotomodulių optimizatoriais. Rezultatai pateikiami 3.1.4 paveikslėlyje.



3.1.4 pav. Teorinis saulės elektrinių pagaminamas elektros energijos kiekis procentais.

3.2. Antrojo tyrimo rezultatai

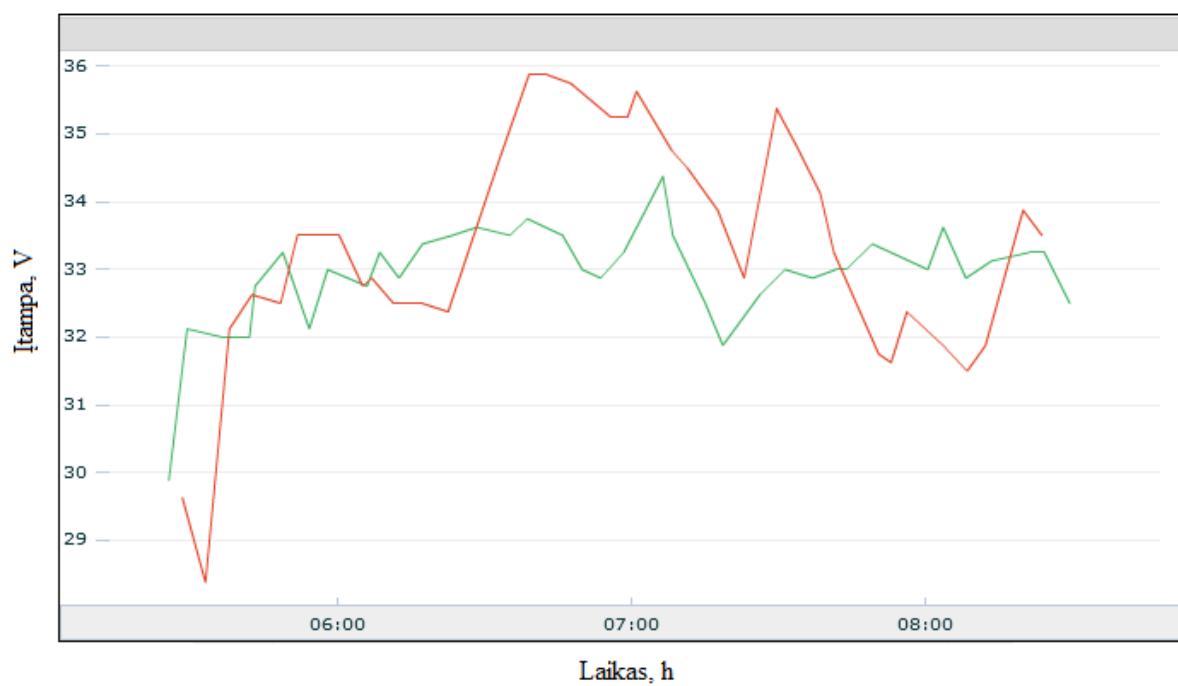
Antrojo tyrimo metu, rezultatai buvo gauti išanalizavus saulės elektrinės sistemą su sumontuotais fotomodulių optimizatoriais. Šiame tyrime buvo analizuojami tos pačios, tačiau skirtingi saulės elektrinės fotomoduliai ir jų optimizatorių darbo charakteristikos. Tyrimo metu nustatyta, kad šėšėliuojami fotomoduliai turi palyginus gana mažai įtakos bendram sistemos darbui. Dėl sumontuotų optimizatorių saulės elektrinės sistema veikia efektyviai net ir esant ne visai palankioms elektrinės darbo sąlygoms. Pagrindinis šio tyrimo uždavinys buvo išanalizuoti optimizatorių darbo charakteristikas bei palyginti šėšėliuojamo ir ne šėšėliuojamo fotomodulių elektros energijos generavimo duomenis. Tyrimo rezultatai pateikiami lentelėse ir grafikuose.



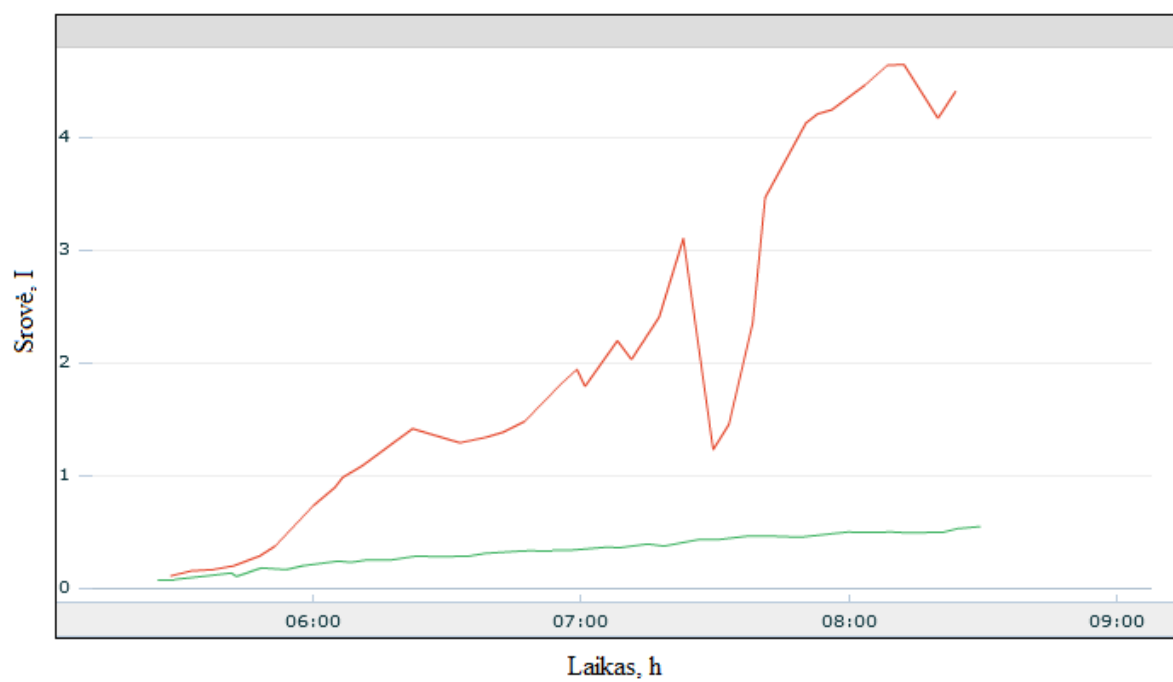
3.2.1. pav. Tiriamosios saulės elektrinės fotomoduliai

3.2.1 paveikslėlyje matome, kad tiriamosios saulės elektrinės fotomoduliai yra netolygiai apšviesti saulės, todėl tyrimui atlikti buvo pasirinkti saulės elektrinės fotomoduliai, atitinkamai generuojantys daugiausiai ir mažiausiai elektros energijos. Mažiausiai elektros energijos generuoja 1.1.29 numeriu pažymėtas fotomodulis. Šis modulis kelias valandas per dieną yra šešėliuojamas dėl kamino, kuris yra iškilęs aukščiau fotomodulio. Antrasis tiriamasis saulės elektrinės fotomodulis pažymėtas 1.1.16 numeriu. Šis fotomodulis dėl strategiškai palankiausios vietos visą dieną, nuo pat elektrinės darbo pradžios iki pabaigos pilnai yra pasiekiamas saulės spindulių, todėl pagamina daugiausiai elektros energijos.

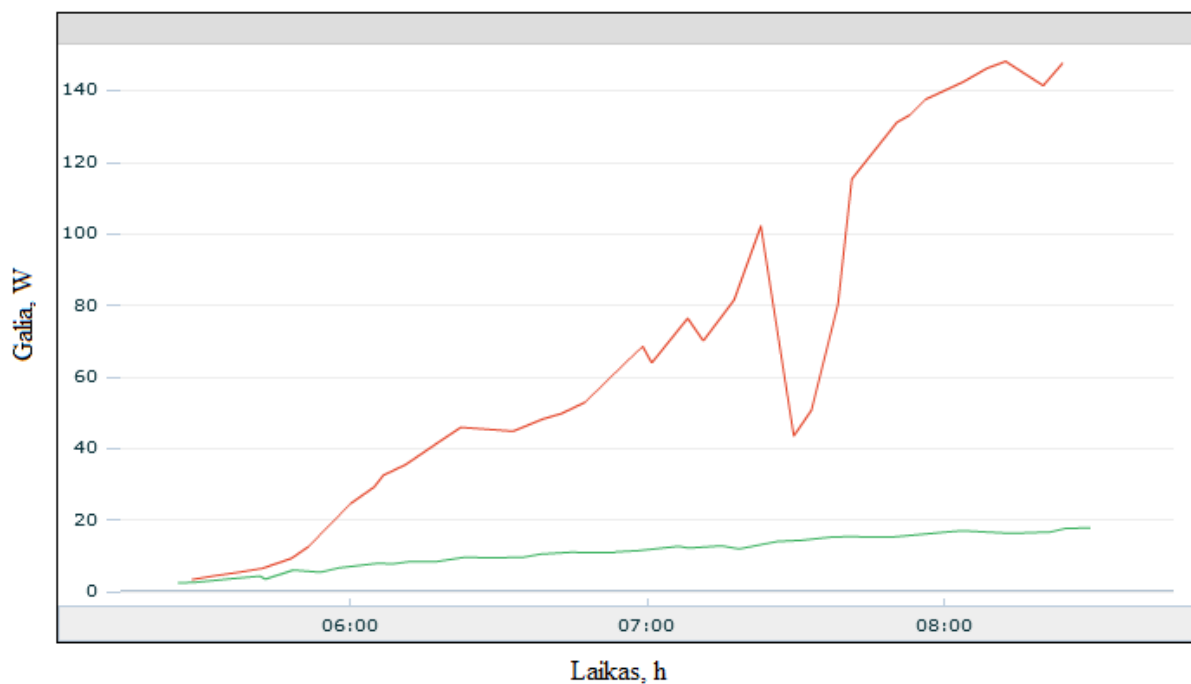
Tyrimo metu buvo analizuojami fotomodulių ir jų optimizatorių parametrų kitimas laiko atžvilgiu. Gauti rezultatai parodė, kad šešėliuojamo saulės fotomodulio įtampas ir srovės dydis 3.2.2 ir 3.2.3 pav., tiesiogiai priklauso nuo saulės apšvitos, krintančios į fotomodulio plokštumą. 3.2.4 paveikslėlyje matome, kad šešėliuojamo fotomodulio generuojama galia ženkliai mažesnė už pilnai apšviesto saulės fotomodulio, kas lemia mažesnę pagaminamos elektros energijos kiekį.



3.2.2. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių įtampos kitimas laiko atžvilgiu [14]

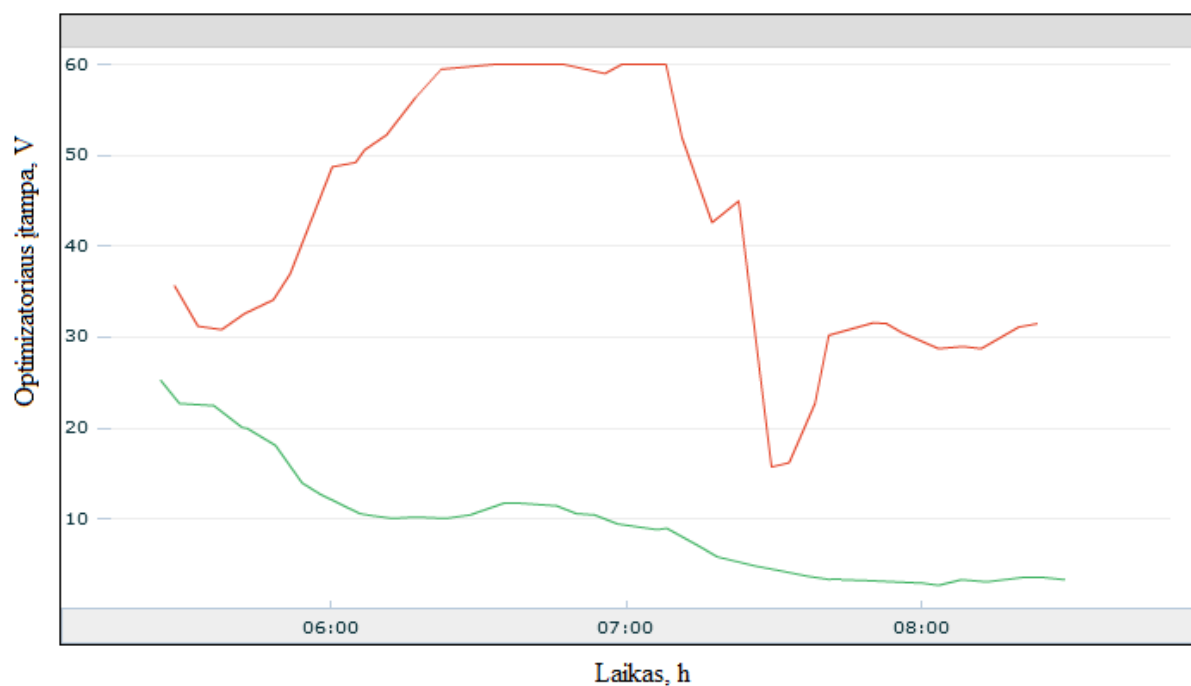


3.2.3. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių srovės kitimas laiko atžvilgiu [14]



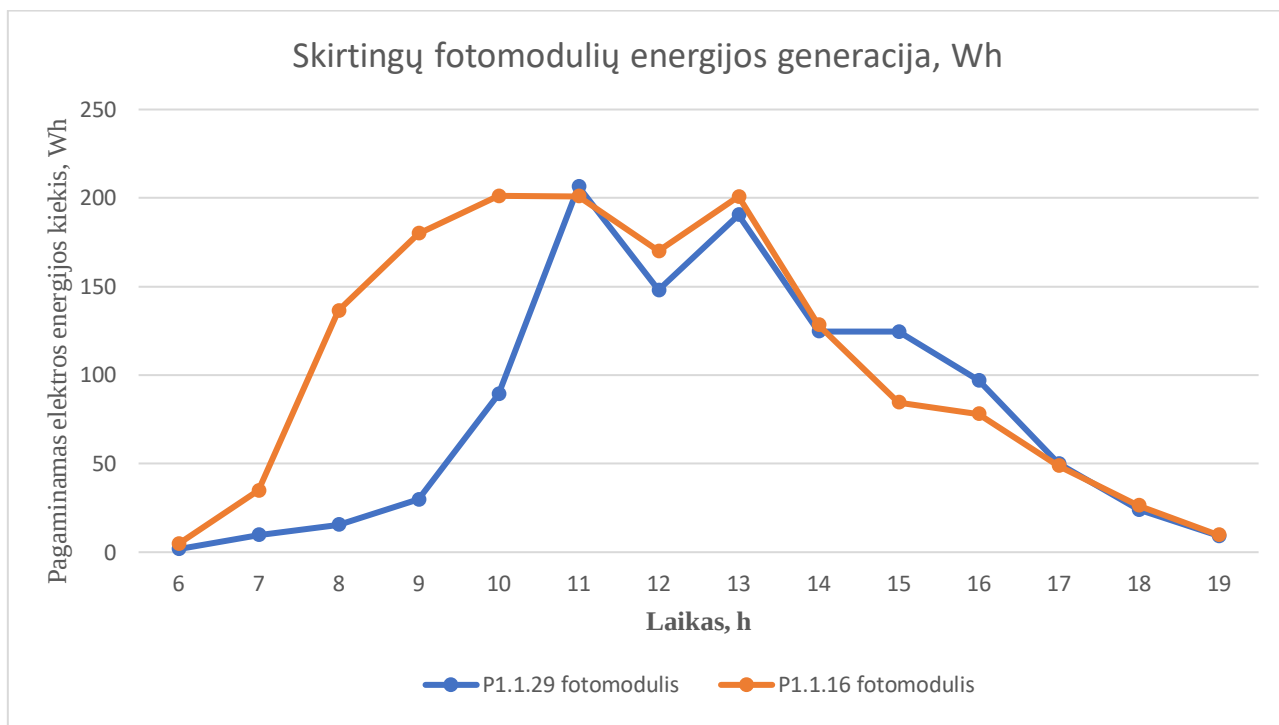
3.2.4. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių galios kitimas laiko atžvilgiu [14]

Tyrimo metu nustatyta, kad saulės fotomodulio optimizatoriaus įtampos kritimas tiesiogiai priklauso nuo saulės fotomodulio įtampos ir srovės kritimo bei visos grandinės bendros įtampos. 3.2.5 paveikslėlyje pateikiami duomenys, kuriuose matome šėšėliuojamo saulės fotomodulio optimizatoriaus išėjimo įtampą, kuri yra ženkliai mažesnė už pilnai apšviesto fotomodulio optimizatoriaus įtampą.



3.2.5. pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių optimizatorių įtampos kitimas laiko atžvilgiu [14]

Išanalizavus fotomodulių ir jų optimizatorių darbo charakteristikas, buvo skaičiuojami tiriamųjų fotomodulių pagaminamos elektros energijos kiekis. Siekiant kuo tikslesnių rezultatų, buvo remtasi vienos dienos bei vieno mėnesio elektros energijos generavimo duomenimis.



3.2.6 pav. Tiriamųjų fotomodulių elektros energijos generacija

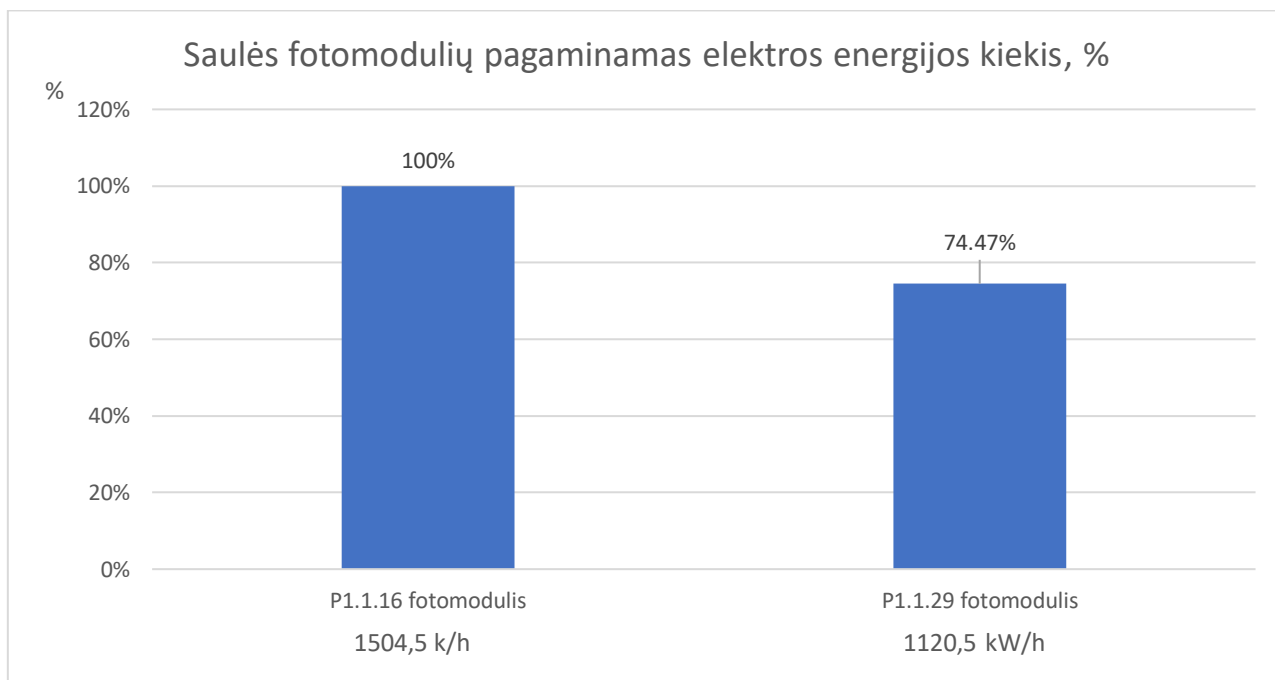
Grafike pavaizduota vienos paros tiriamųjų saulės fotomodulių darbo charakteristikos. Iš pateiktų duomenų matome, kad fotomodulis P1.1.29 pirmoje dienos pusėje generuoja mažiau elektros energijos negu P1.1.16 fotomodulis. Vienos paros, tiriamųjų fotomodulių elektros energijos generavimo duomenys pateikiami 3.2.1 lentelėje.

3.2.1 lentelė. Tiriamųjų fotomodulių vienos paros pagaminamas elektros energijos kiekis

	P1.1.29 fotomodulis	P1.1.16 fotomodulis
Paros laikas, h	Sugeneruota energija, w/h	
6.00	1.75	4.75
7.00	9.75	34.75
8.00	15.5	136.5
9.00	29.75	180
10.00	89.25	201.25
11.00	206.5	201
12.00	148	170
13.00	190.5	200.75
14.00	124.75	128.25
15.00	124.5	84.5
16.00	97	78
17.00	50	48.75

18.00	24	26.25
19.00	9.25	9.75
VISO:	1120.5	1504.5

Iš gautų tiriamųjų saulės fotomodulių generavimo duomenų matome, kad šešėliuojamas fotomodulis pagamina apie 25% mažiau elektros energijos, nei pilnai apšviestas saulės fotomodulis.



3.2.7 pav. Tiriamųjų saulės fotomodulių procentinis pagaminimas elektros energijos kiekis

Tyrimo metu taip pat buvo surinkti vieno mėnesio elektros energijos generavimo duomenys. Siekiant tiksliau ištirti optimizatorių įtaką saulės elektrinės sistemoje, kai vienas ar daugiau fotomodulių yra šešėliuojamas, papildomai buvo analizuojami vieno mėnesio elektros energijos generavimo duomenys. Gauti rezultatai pateikiami 3.2.2 lentelėje.

3.2.2 lentelė. Tiriamųjų fotomodulių vieno mėnesio pagaminamas elektros energijos kiekis

	P1.1.29 fotomodulis	P1.1.16 fotomodulis
Mėnesio dienos	Sugeneruota energija, w/h	
1	993.75	1272.25
2	975.5	1247.5
3	950	1231.5
4	757.5	1072.25
5	822.5	1100
6	817	1091
7	852	1056
8	945.5	1222.25
9	342.5	582.25
10	251.25	513.75
11	336.25	594.5

12	940.25	1259.5
13	310.25	1295.75
14	959	1343
15	921.75	1506.5
16	865.75	900.5
17	974.5	1329.75
18	924.5	1297.75
19	953.5	1332
20	769.5	1158.25
21	617.75	954.5
22	574	1052.75
23	1044.25	1410.5
24	1041.25	1387
25	915.5	1337.25
26	918.25	1274.25
27	1001.5	1305.5
28	909.25	1226.75
29	1195.75	1479
30	1111.25	1449.25
VISO:	24991.5	35283

Gauti duomenys rodo, kad šešėliuojamas saulės elektrinės fotomodulis per mėnesį sugeneruoja apie 26% mažiau elektros energijos.

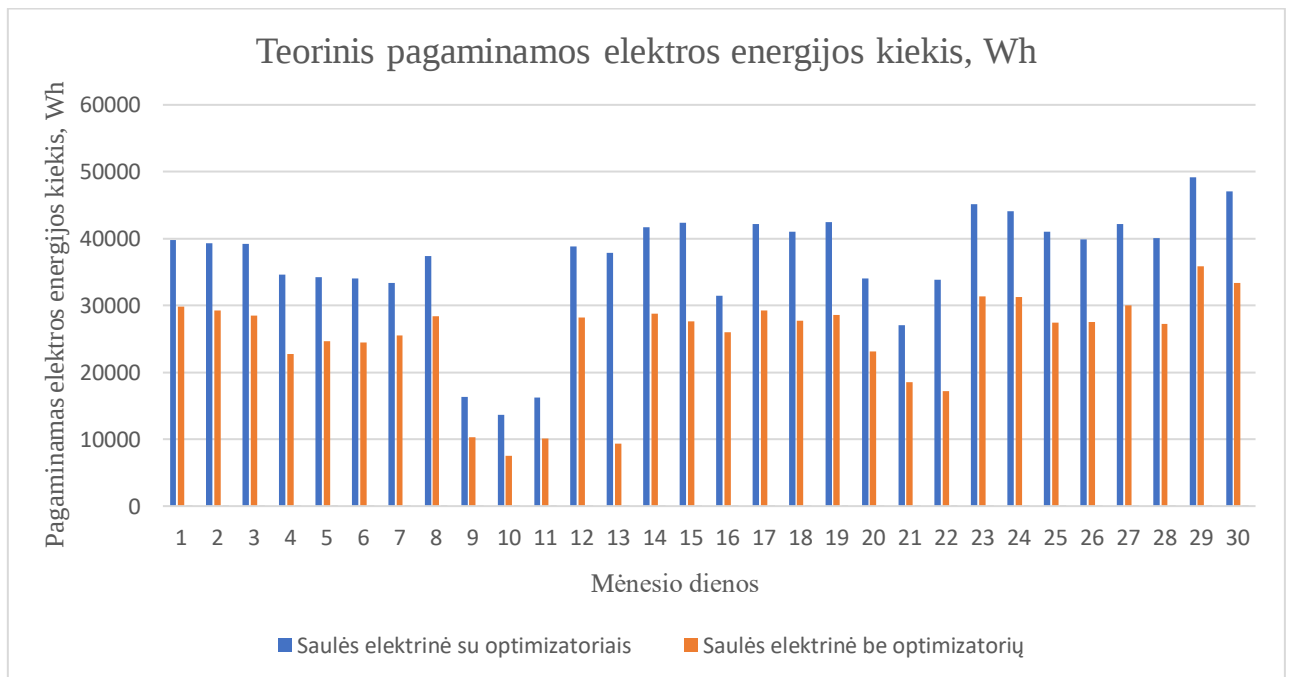
Įvertinus abiejų saulės elektrinės fotomodulių pagaminamą elektros energijos kiekį, teoriškai buvo apskaičiuota, kokį energijos kiekį pagamina saulės elektrinės sistema be fotomodulių optimizatorių.

Atliekant skaičiavimus buvo priimta sąlyga, kad šešėliuojamas fotomodulis turi įtakos visiems sistemoje esantiems fotomoduliams ir generuoja tiek pat elektros energijos, kiek ir mažiausiai generuojantis saulės elektrinės fotomodulis. Remiantis teorinėmis ir praktinėmis žiniomis, kai praščiausiai veikiantis fotomodulis turi įtakos visai saulės elektrinės sistemai, buvo apskaičiuotas teorinis vieno mėnesio pagaminamos elektros energijos kiekis. Gauti rezultatai buvo lyginami su realiais to pačio mėnesio pagaminamu elektros energijos kiekiu, kai saulės elektrinė veikia su optimizatoriais ir kiekvienas fotomodulis veikia nepriklausomai vienas nuo kito. Gauti rezultatai pateikiami 3.2.3 lentelėje ir 3.2.8 paveikslėlyje.

3.2.3 lentelė. Teorinis vieno mėnesio saulės elektrinės pagaminamas elektros energijos kiekis

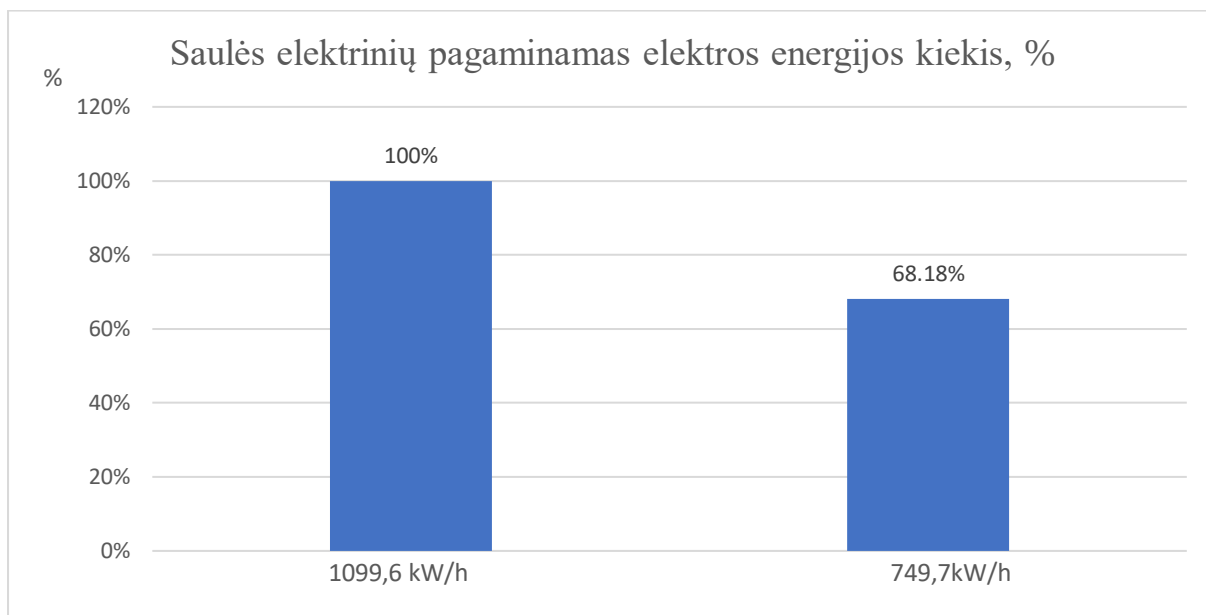
	Saulės elektrinė su optimizatoriais	Saulės elektrinė be optimizatorių
Mėnesio dienos	Sugeneruota energija, w/h	
1	39798	29812.5
2	39266	29265
3	39250	28500
4	34585	22725
5	34208	24675

6	33995	24510
7	33371	25560
8	37426	28365
9	16365	10275
10	13672	7537.5
11	16282	10087.5
12	38820	28207.5
13	37847	9307.5
14	41665	28770
15	42378	27652.5
16	31442	25972.5
17	42163	29235
18	41012	27735
19	42512	28605
20	34062	23085
21	27085	18532.5
22	33807	17220
23	45122	31327.5
24	44074	31237.5
25	41030	27465
26	39920	27547.5
27	42202	30045
28	40056	27277.5
29	49121	35872.5
30	47079	33337.5
VISO:	1099615	749745



3.2.8 pav. Teorinis vieno mėnesio pagaminamos elektros energijos kiekis

Remiantis realiais duomenimis ir teoriniais skaičiavimais, buvo apskaičiuota, kad saulės elektrinėje kurioje nėra sumontuotų fotomodulių optimizatorių, sistema pagamina apie 32% mažiau elektros energijos. Gauti duomenys pateikiami 3.2.9 paveikslėlyje.



3.2.9 pav. Teorinis vieno mėnesio saulės elektrinių pagaminamas elektros energijos kiekis procentais.

Pirmoje tyrimo dalyje, atlikus saulės elektrinės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimą, buvo išanalizuotos dvi skirtingos saulės elektrinių sistemos. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad sistemoje, kurioje prie saulės fotomodulių yra sumontuoti optimizatoriai, pagaminamas elektros energijos kiekis yra didesnis, kas leidžia daryti išvadą, kad saulės fotomodulių optimizatoriai padeda padidinti pagaminamą elektros energijos kiekį. Gauti rezultatai parodė, kad saulės elektrinėje kurioje fotomoduliai yra jungiami tiesiogiai prie tinklo inverterio, teoriškai pagamina 30% mažiau elektros energijos.

Antroje tyrimo dalyje, atlikus saulės elektrinės fotomodulių optimizatorių darbo charakteristikų tyrimą, buvo išanalizuoti dviejų skirtingų tos pačios saulės elektrinės fotomodulių darbo charakteristikos. Tyrimo metu buvo palyginti realūs ir teoriniai saulės elektrinės pagaminamos elektros energijos kiekio duomenys ir apskaičiuoti procentiniai nuostoliai, kuriuos patiria visa saulės elektrinės sistema dėl vieno šėšėliuojamo fotomodulio. Tyrimo metu nustatyta, kad saulės elektrinės sistemoje su sumontuotais fotomodulių optimizatoriais, vienas ar daugiau šėšėliuojamų fotomodulių turi palyginti labai mažai įtakos bendram sistemos darbui, o saulės elektrinėje kurioje nėra sumontuotų fotomodulių optimizatorių šis reiškinys gali turėti didelę įtaką bendram sistemos darbui ir jos bendram sugeneruotam elektros energijos kiekiui. Teoriniai skaičiavimai parodė, kad saulės elektrinėje kurioje fotomoduliai yra jungiami tiesiogiai prie tinklo inverterio, teoriškai pagamina 32% mažiau elektros energijos.

Išvados

1. Atlikus išsamią literatūros analizę, buvo apžvelgtos pagrindinės saulės fotomodulių elektrinės sudedamosios dalys, jų veikimo principai, parametrai bei taikymo būdai. Išanalizavus mokslinius straipsnius, buvo aptarti papildomų sistemos komponentų specifikos, veikimo principai ir darbo charakteristikos. Taip pat aptarti pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos saulės elektrinės elektros energijos generavimui bei sklandžiam sistemos darbui.
2. Tiriamojo darbo metu buvo atlikta tiriamųjų objektų analizė. Išsamiai aprašytos saulės elektrinių sistemos dalys, saulės fotomodulių, inverterių tipai ir pagrindinės charakteristikos. Apžvelgtos tiriamųjų objektų geografinės padėtys, saulės elektrinių orientacija, bei fotomodulių posvyrio kampas.
3. Atlikus tyrimą buvo apskaičiuotas dviejų skirtingų saulės elektrinių metinis sugeneruotos elektros energijos kiekis. Pirmosios saulės elektrinės, kurioje nėra sumontuotų saulės fotomodulių optimizatorių pagamintas elektros energijos kiekis yra 5813 kWh. Antrosios elektrinės, kurioje prie kiekvieno saulės fotomodulio yra prijungtas optimizatorius, pagamintas elektros energijos kiekis yra 10444 kWh. Iš gautų rezultatų matome, kad sugeneruotos energijos kiekis ženkliai skiriasi. Kadangi, nagrinėjamų saulės elektrinių instaliuotos suminės galios skiriasi, todėl atlikome papildomą skaičiavimą, kurio metu nustatėme kiek elektros energijos buvo gauta iš tiriamųjų elektrinių 1 kw. Rezultatai parodė, kad saulės elektrinė su sumontuotais optimizatoriais pagamino 1054,87 kWh, o elektrinė be optimizatorių - 704,56 kWh. Nustatyta, kad elektrinė be sumontuotų optimizatorių sugeneruoja apie 30% mažiau elektros energijos.
4. Atlikus tiriamąjį darbą, buvo nustatytos optimizatorių darbo charakteristikos, kurios tiesiogiai priklauso nuo fotomodulio išėjimo įtampos ir srovės parametrų. Esant mažam fotomodulio apšviestumui, įtampos ir srovės dydis ženkliai krenta, kas lemia generuojamos galios kritimą fotomodulyje ir visoje elektrinės sistemoje. Tyrimo metu nustatyta, kad tos pačios elektrinės šėšėliuojamas fotomodulis per dieną sugeneravo 1120,5 Wh, o pilnai apšviestas fotomodulis 1504,5 Wh. Teorinio skaičiavimo metu nustatyta, kad saulės elektrinės sistemoje su sumontuotais fotomodulių optimizatoriais vieno mėnesio pagaminamas elektros energijos kiekis yra 1099,6 kWh, o sistemoje be fotomodulių optimizatorių – 749,7 kWh. Atlikus lyginamąją analizę, apskaičiuota, kad sistema su optimizatoriais pagamina apie 32% daugiau elektros energijos.

Literatūros sąrašas

1. G. Petrauskas, V. Adomavičius. Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. Kaunas, 2012. [žiūrėta 2019 m. vasario 13 d.]
2. Srushti, R. C.; Uttam B. V. Incremental Conductance MPPT Technique For PV System, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013. Prieiga per internetą: <http://www.rroj.com/open-access/incremental-conductance-mppt-techniquefor-pv-system.php?aid=41625> [žiūrėta 2019 m. kovo 3 d.]
3. Oberto S. Faranda , Hossein Hafezi, Sonia Leva, Marco Mussetta and Emanuele Ogliari, The Optimum PV Plant for a Given Solar DC/AC Converter. 2015 Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/6/4853/pdf> [žiūrėta 2019 m. balandžio 19 d.] Design, Analysis, and Implementation of Solar Power Optimizer for DC Distribution System. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6269108>. [žiūrėta 2019 m. kovo 3 d.]
4. Design and Implementation of Solar Power Optimizer for DC Distribution System using Dual Active Bridge Prieiga per internetą: <http://www.rroj.com/open-access/design-and-implementation-of-solar-poweroptimizer-for-dc-distribution-system-usingdual-active-bridge.php?aid=41930> [žiūrėta 2019 m. kovo 7 d.].
5. Application Note: SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation. Prieiga per internetą: https://www.solaredge.com/sites/default/files/se_application_fixed_string_voltage.pdf [žiūrėta 2019 m. kovo 17 d.]
6. Simulation and Testing of Photovoltaic with Grid Connected System. Prieiga per internetą: https://ieeexplore.ieee.org/document/6112959?tp=&arnumber=%206112959&url=http%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6112959 [žiūrėta 2019 m. kovo 29 d.]
7. Renewable energy discount rate survey results – 2017. Prieiga per internetą: <http://www.cleanenergypipeline.com/Resources/CE/ResearchReports/renewable-energy-discount-rate-survey-2017.pdf> [žiūrėta 2019 m. balandžio 3 d.]
8. Characterization of Power Optimizer Potential to Increase Energy Capture in Photovoltaic Systems Operating Under Nonuniform Conditions: Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6340351&tag=1> [žiūrėta 2019 m. balandžio 6 d.]
9. Reference voltage optimizer for maximum power point tracking in triphase grid-connected photovoltaic systems: Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0142061514001318> [žiūrėta 2019 m. balandžio 7 d.].

10. Prieiga per internetą: <https://help.valentinofware.com/pvsol/en/berechnungsgrundlagen/power-optimizer/> [žiūrėta 2019 m. balandžio 12 d.]
11. Comparing microinverters vs. power optimizers: Prieiga per internetą: <https://www.energysage.com/solar/101/microinverters-vs-power-optimizers/>
12. Solar energy: Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/science/solar-energy> [žiūrėta 2019 m. balandžio 19 d.]
13. Solarweb monitoring Prieiga per internetą: <https://www.solarweb.com/PvSystems/Widgets> [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]
14. Solaredge monitoring Prieiga per internetą: <https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/home> [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]
15. How do Photovoltaics Work? Prieiga per internetą: <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells> [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]
16. Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know Prieiga per internetą: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/> [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]
17. Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. 2006. J.M. Enrique, E. Dura ir kt. 8p. [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]
18. Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, psl. 391-395, psl. 477-483. ISBN 0-471-28060-7 [žiūrėta 2019 m. gegužės 15 d.]