



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Skirstomojo tinklo pralaidumų padidinimas, pasinaudojant saulės  
elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo funkcijomis**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Evaldas Birbilas**

Projekto autorius

**Doc. prakt. Aistija Vaišnorienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Skirstomojo tinklo pralaidumų padidinimas, pasinaudojant  
saulės elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo  
funkcijomis**

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

---

**Evaldas Birbilas**

Projekto autorius

**Doc. prakt. Aistija Vaišnorienė**

Vadovė

**Lekt. Eimantas Neniškis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Evaldas Birbilas

## **Skirstomojo tinklo pralaidumų padidinimas, pasinaudojant saulės elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo funkcijomis**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autorius ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Evaldas Birbilas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Birbilas, Evaldas. Skirstomojo tinklo pralaidumų padidinimas, pasinaudojant saulės elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo funkcijomis. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. prakt. dr. Aistija Vaišnorienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: skirstomasis tinklas, reaktyviosios galios valdymas, saulės elektrinės, inverteriai.

Kaunas, 2024. 81 p.

### Santrauka

Baigiamajame magistro darbe atliekamas skirstomojo tinklo pralaidumų padidinimo tyrimas, pasinaudojant saulės elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo funkcijomis. Tyrimas apėmė vienos paros simuliaciją, kuri atskleidžia ribinę situaciją, kuomet vyrauja labai palankios meteorologinės sąlygos saulės elektrinių generacijai, momentinis elektros energijos suvartojimas yra nežymus, o pradinė 10 kV įtampa ties Riešės TP siekia maksimalią palaikomą įtampą (10,4 kV). Tyrimui atlikti pasirinkta dideliu saulės elektrinių kiekiu (189 vnt.) pasižyminti 10 kV linija L-1200 iš Riešės TP su visomis 0,4 kV linijomis. Pasirinktoje elektros tinklo modeliavimo programoje „NEPLAN“ sukurtas pasirinktos linijos modelis įvedus visus linijos ir saulės elektrinių duomenis. Pagal galiojančius teisės aktus pasirinktos trys reaktyviosios galios funkcijos:  $Q(U)$ ,  $\cos\varphi(U)$  ir  $\cos\varphi(P)$ . Jų charakteristikos nustatytos pagal galiojančius teisės aktus, mokslinių straipsnių analizės ir praktinius bandymus. Sudarytas elektrinių gamybos profilio grafikas 1 parai kas 10 minučių pagal esamų saulės elektrinių išmaniųjų skaitiklių momentinės atiduodamos galios kiekius. Tyrimas susidėjo iš 5 režimų: pirmas režimas yra įprastinis be įtampos ribojimų, antras yra įprastinis tik taikant įtampos ribojimus, trečias yra taikant  $Q(U)$  funkciją visoms elektrinėms, ketvirtas taikant  $\cos\varphi(U)$  ir penktas taikant  $\cos\varphi(P)$ . 3 – 5 režimuose gautos vertės buvo lyginamos su pirmu režimu (baziniu) ir gauti procentiniai pokyčiai. Pagrindiniai rodikliai, kurie buvo apskaičiuoti – sugeneruota energija, suvartota reaktyvioji energija, reaktyviosios – aktyviosios galios nuostoliai, linijų ir transformatorių apkrovimai, atsijungusių elektrinių skaičius ir minimalus įtampos sumažinimas. Paskutinėje darbo dalyje įvertintas investicijų į saulės elektrinę atsipirkimas taikant ir netaikant reaktyviosios galios valdymo funkcijas, nustatant, kiek vidutiniškai per parą nepagamina elektros energijos leistinos generuoti galios 1 kW ir kiek tokių parų per metus potencialiai gali būti. Gautas metinis nepagamintos energijos kiekis (vidurkis išvestas iš kiekvienoje elektrinėje pirmo ir antro režimų metu sugeneruotos el. energijos skirtumo) atimamas iš sumodeliuotos saulės elektrinės metinės gamybos prognozės, kurioje atsižvelgiama tik į meteorologines sąlygas ir elektrinės konfigūraciją.

Birbilas, Evaldas. Enlargement of Distribution Network Capacity by Using Reactive Power Control Functions for Solar Power Inverters. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. pract. dr. Aistija Vaišnorienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): energy engineering, engineering science.

Keywords: distribution network, reactive power control, solar power plants, inverters.

Kaunas, 2024. 81 p.

### **Summary**

The final master's thesis examines the increase in the capacities of the distribution network using the reactive power control functions of solar power inverters. The study included a one-day simulation, which reveals a critical situation when highly favourable meteorological conditions prevail for solar power generation, instantaneous electricity consumption is insignificant and the initial voltage of 10 kV at the Riešė TP reaches the maximum maintained voltage (10.4 kV). For the study the 10 kV line L-1200 from the Riešė TP including all 0.4 kV lines was selected. This electric line was chosen because of large number of solar power plants (189 units). Using an electrical network modelling program "NEPLAN," the model of the selected line was created by entering all the line and solar power plant data. According to the applicable regulations, three reactive power functions were selected:  $Q(U)$ ,  $\cos\phi(U)$ , and  $\cos\phi(P)$ . Their characteristics were determined based on applicable regulations, analysis of scientific articles and practical experiments. A graph of the electrical generation profile for 1 day evaluating the data every 10 minutes was created based on the instantaneous output power quantities of the existing smart meters of solar power plants. The study consisted of 5 regimes: the first regime is normal without voltage restrictions, the second is normal with voltage restrictions, the third applies the  $Q(U)$  function to all power plants, the fourth applies  $\cos\phi(U)$ , and the fifth applies  $\cos\phi(P)$ . Values obtained in modes 3-5 were compared with the first (reference) mode and percentage changes were calculated. The main indicators that were calculated include generated energy, consumed reactive energy, losses of reactive and active power, loads on lines and transformers, number of disconnected power plants and minimum voltage reduction. In the final part of the work, the profitability of investments in the solar power plant was evaluated. The calculations were performed by applying and not applying reactive power control functions, in addition the average number of days per year when 1 kW of allowable generation power is not generated was determined, it was also evaluated how many such days per year could potentially occur. The annual amount of ungenerated energy (average derived from the difference in electricity generated during the first and second modes in each power plant) is subtracted from the modelled annual production forecast of the solar power plant, which considers only meteorological conditions and the electrical configuration.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Teorinė dalis</b> .....	<b>10</b>
1.1. Atsinaujinantys energijos šaltiniai.....	10
1.1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių skirstymas .....	11
1.1.2. Saulės energetika .....	11
1.1.3. Elektrinių iš atsinaujinančių išteklių plėtra Lietuvoje .....	13
1.1.4. Saulės fotovoltinių elektrinių inverteriai .....	17
1.2. Skirstomieji tinklai .....	19
1.2.1. Apibūdinimas .....	19
1.2.2. Linijų pralaidumus ribojantys veiksniai .....	19
1.2.3. Reaktyvioji galia ir jos kompensavimas naudojant saulės elektrinių inverterius.....	21
1.2.4. Reaktyviosios galios įtaka įtampai .....	26
<b>2. Tyrimo metodika</b> .....	<b>29</b>
2.1. Tyrimo objektas ir tikslai.....	29
2.2. Naudojama programinė įranga .....	30
2.3. Modelio sudarymas .....	31
2.4. Gamybos profilio sudarymas.....	35
2.5. Reaktyviosios galios valdymo charakteristikos.....	38
<b>3. Tyrimo rezultatai</b> .....	<b>46</b>
3.1. Įprastiniai režimai .....	46
3.2. Įprastiniai režimai .....	46
3.3. Režimas $Q(U)$ .....	50
3.4. Režimas $\cos\varphi(U)$ .....	54
3.5. Režimas $\cos\varphi(P)$ .....	58
3.6. Reaktyviosios galios režimų palyginimas .....	61
3.7. Reaktyviosios galios valdymo įtaka saulės elektrinių atsiperkamumui .....	68
<b>Išvados</b> .....	<b>74</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>75</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>78</b>
1 priedas. Generacijos koeficientai laiko momentu .....	78
2 priedas. Elektrinių sąrašas .....	79

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Valstybės sprendimai, skatinantys gaminančių vartotojų plėtrą Lietuvoje [11] .....	16
<b>2 lentelė.</b> 10 kV linijos laidininkų duomenys.....	33
<b>3 lentelė.</b> 10/0,4 kV transformatorinių duomenys.....	33
<b>4 lentelė.</b> 0,4 kV linijų laidininkų duomenys .....	34
<b>5 lentelė.</b> $Q(U)$ funkcijos charakteristika B tipo elektrinėms.....	40
<b>6 lentelė.</b> $\cos\varphi(U)$ funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms.....	42
<b>7 lentelė.</b> Tipinė $\cos\varphi(P)$ funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms .....	43
<b>8 lentelė.</b> Modifikuota $\cos\varphi(P)$ funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms .....	44
<b>9 lentelė.</b> Įprastinių režimų bendriniai rodikliai .....	46
<b>10 lentelė.</b> Įprastinių režimų įtampos rodikliai .....	47
<b>11 lentelė.</b> Įprastinio režimo su įtampos ribojimais saulės elektrinių atsijungimų trukmė .....	48
<b>12 lentelė.</b> Įprastinių režimų maksimalių apkrovimų rodikliai .....	48
<b>13 lentelė.</b> Įprastinių režimų sugeneruotos elektros energijos rodikliai.....	49
<b>14 lentelė.</b> Režimo $Q(U)$ bendriniai rodikliai .....	50
<b>15 lentelė.</b> Režimo $Q(U)$ įtampos rodikliai .....	51
<b>16 lentelė.</b> Režimo $Q(U)$ saulės elektrinių atsijungimų trukmė .....	52
<b>17 lentelė.</b> Režimo $Q(U)$ maksimalių apkrovimų rodikliai.....	52
<b>18 lentelė.</b> Režimo $Q(U)$ elektros energijos rodikliai .....	53
<b>19 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(U)$ bendriniai rodikliai.....	54
<b>20 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(U)$ įtampos rodikliai .....	55
<b>21 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(U)$ saulės elektrinių atsijungimų trukmė .....	55
<b>22 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(U)$ maksimalių apkrovimų rodikliai .....	56
<b>23 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(U)$ elektros energijos rodikliai.....	57
<b>24 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(P)$ bendriniai rodikliai .....	58
<b>25 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(P)$ įtampos rodikliai .....	58
<b>26 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(P)$ saulės elektrinių atsijungimų trukmė.....	59
<b>27 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(P)$ maksimalių apkrovimų rodikliai.....	60
<b>28 lentelė.</b> Režimo $\cos\varphi(P)$ elektros energijos rodikliai .....	61
<b>29 lentelė.</b> Potencialiai ribinę situaciją turinčių dienų skaičius .....	69
<b>30 lentelė.</b> Vidutinės 2023 m. elektros energijos kainos žemos įtampos buitiniams vartotojams ....	70
<b>31 lentelė.</b> Nesugeneruoto elektros energijos kiekio piniginiai nuostoliai .....	70
<b>32 lentelė.</b> Energijos generavimo, vartojimo ir finansiniai rodikliai .....	71
<b>33 lentelė.</b> Saulės elektrinės įrengimo sąmata.....	72
<b>34 lentelė.</b> Energijos generavimo, vartojimo ir finansiniai rodikliai įvertinus apribotos generacijos kiekį .....	72

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Instaliuota galia elektrinės iš atsinaujinančių energijos šaltinių Lietuvoje .....	10
<b>2 pav.</b> Horizontalios saulės apšvietos pasiskirstymas pasaulyje [4] .....	12
<b>3 pav.</b> Saulės elemento principinė schema.....	13
<b>4 pav.</b> Atsinaujinančių išteklių elektrinių instaliuotos galios prieaugis skirtingais laikotarpiais [40] .....	14
<b>5 pav.</b> Siekiami rezultatai Lietuvos energetikos sektoriuje 2020, 2030 ir 2050 metais (Šaltinis – LR energetikos ministerija) .....	15
<b>6 pav.</b> Gaminančių vartotojų statistika.....	17
<b>7 pav.</b> Vienfazis tiltelinis tinklo inverteris .....	18
<b>8 pav.</b> Linijų pralaidumus ribojantys faktoriai.....	20
<b>9 pav.</b> Įtampos $u$ , srovės $i$ ir akimirkinės galios $p$ grafikai, kai grandinėje vyrauja aktyvioji varža. 21	
<b>10 pav.</b> Įtampos $u$ , srovės $i$ ir akimirkinės galios $p$ grafikai kai grandinėje vyrauja reaktyvieji elementai (šiuo atveju induktyvumas).....	22
<b>11 pav.</b> Galių trikampis .....	22
<b>12 pav.</b> Principinė AVC sistemos duomenų srautų schema.....	24
<b>13 pav.</b> Apibendrinta inverterio valdymo struktūra .....	25
<b>14 pav.</b> Prie tinklo prijungto inverterio vektorinio vaizdavimo modelis: (a) ekvivalentinė keitiklio grandinė ir (b) vektorinė diagrama .....	26
<b>15 pav.</b> Pavyzdinė tinklo schema .....	26
<b>16 pav.</b> 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP trasa („ESO“ duomenys).....	32
<b>17 pav.</b> 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP modelis.....	33
<b>18 pav.</b> Pavyzdinis 0,4 kV tinklo modelis „NEPLAN“ programoje iš transformatorinės Rš-1252 . 35	
<b>19 pav.</b> Vidutinė generacija (Wh) valandomis pasirinktoje vietoje pamėnesiui.....	36
<b>20 pav.</b> Vilniaus AMS istoriniai duomenys .....	37
<b>21 pav.</b> Paros gamybos grafikas.....	38
<b>22 pav.</b> A ir B tipo P-Q/ $P_{MAX}$ charakteristikos profilis.....	39
<b>23 pav.</b> Q(U) valdymo kreivė B tipo elektrinėms .....	41
<b>24 pav.</b> Q charakteristikų pavyzdžiai $\cos\varphi$ valdymo režimui .....	42
<b>25 pav.</b> $\cos\varphi(U)$ valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms .....	43
<b>26 pav.</b> Rekomenduojama mokslinėje literatūroje ir teisės aktuose $\cos\varphi(P)$ valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms .....	44
<b>27 pav.</b> Modifikuota $\cos\varphi(P)$ valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms.....	45
<b>28 pav.</b> Sugeneruotos energijos sumažėjimas .....	62
<b>29 pav.</b> Sugeneruotos energijos nuostolių padidėjimas .....	62
<b>30 pav.</b> Suvartota reaktyvioji energija .....	63
<b>31 pav.</b> Suvartotos reaktyviosios energijos nuostoliai .....	63
<b>32 pav.</b> Momentinės maksimalios aktyviosios galios sumažėjimas .....	64
<b>33 pav.</b> Momentinės maksimalios aktyviosios galios nuostolių padidėjimas.....	64
<b>34 pav.</b> Momentinė maksimali reaktyvioji galia.....	65
<b>35 pav.</b> Momentinės maksimalios reaktyviosios galios nuostoliai .....	65
<b>36 pav.</b> Atsijungusių elektrinių skaičius .....	66
<b>37 pav.</b> Maksimalios įtampos linijų taškuose minimalus sumažėjimas.....	66
<b>38 pav.</b> Transformatorių apkrovimų maksimalus padidėjimas .....	67
<b>39 pav.</b> Linijų apkrovimų maksimalus padidėjimas .....	67



## Ivadas

Žmonijos pastangos kurti švaresnę aplinką bei sumažinti iškastinio kuro naudojimą skatina tradicinę elektros energetikos sistemą pereiti prie atsinaujinančios energijos šaltinių. Galima teigti, kad atsinaujinanti energetika šiai dienai išgyvena aukso amžių, kai naftos, anglių ar dujų kuro šaltiniai yra pakeičiami atsinaujinančios energijos šaltiniais. Įprastiniai iškastinio kuro šaltiniai yra viena iš pagrindinių priežasčių lemiančių milžinišką šiltnamio efektą sukeliančių dujų išsiskyrimą. Beveik visos pasaulio šalys pabrėžia poreikį mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją, todėl skiria reikšmingas investicijas į naujo tipo elektrines, kurios elektros energiją gamina pasitelkiant atsinaujinančius energijos šaltinius. Tarp turimų atsinaujinančios energijos šaltinių, šiai dienai populiariausi yra vėjo energija ir saulės fotovoltinė energija. Dėl lengvo prieinamumo, paprastesnio įgyvendinimo ir patogesnių dizaino sprendimų, saulės fotovoltinė energija yra daugiausia tyrinėjama atsinaujinančios energijos šaltinių rūšis, kuri dažniausiai integruojama į elektros sistemą. Tačiau, sprendžiant klimato kaitos problemą, sukuriamos kitos problemos, susijusios su elektros tinklų pralaidumais ir įtampos kokybe. Kadangi atsinaujinantys energijos šaltiniai stipriai surišti su gamtos sąlygomis ir elektros energiją gamina ne tuo metu kai jos labiausiai reikia, tokio tipo elektrinių integravimas į elektros tinklą gali sukelti didelius techninius iššūkius. Priešingai nei atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinės, tradicinės iškastinio kuro elektrinės gali reguliuoti savo gamybą pagal apkrovos paklausą ir netrikdyti elektros tinklo veikimo. Todėl, žengiant į priekį su atsinaujinančia energetika, elektros tinklų valdymas ir reguliavimas turi būti pritaikytas prie šių naujų energijos šaltinių, kad būtų užtikrintas reikiamas pralaidumo kiekis, o įtampa palaikoma leistinų normų ribose.

**Šio tyrimo tikslas** – ištirti skirstomojo elektros tinklo pralaidumų padidinimo galimybes, pasinaudojant saulės elektrinių keitiklių reaktyviosios galios valdymo funkcijomis.

### **Tikslui pasiekti keliami uždaviniai:**

1. Išanalizuoti elektrinių iš atsinaujinančių energijos išteklių paplitimą ir plėtros tendencijas, saulės elektrinių veikimo principus;
2. Apibrėžti skirstomųjų elektros tinklų ribas, įvardinti jų pralaidumą ribojančius veiksnius bei apibūdinti reaktyviąją galią ir jos įtaką skirstomiesiems tinklams;
3. Sudaryti tyrimo metodiką, kurią apimtų skirstomojo tinklo pasirinktos 10 kV linijos modelio, reaktyviosios galios valdymo funkcijų charakteristikų nustatymo bei gamybos profilio sudarymo aprašai;
4. Apibendrinti rezultatus, kuriuose atsispindėtų reaktyviosios galios valdymo funkcijų įtaka pasirinktos linijos įtampoms, apkrovimams, sugeneruotos energijos kiekiui;
5. Atlikti finansinę-ekonominę analizę, nustatant kiek reaktyviosios galios valdymo funkcijos padeda sumažinti investicijas į saulės elektrinę ir kaip įtakoja atsipirkimo trukmę.

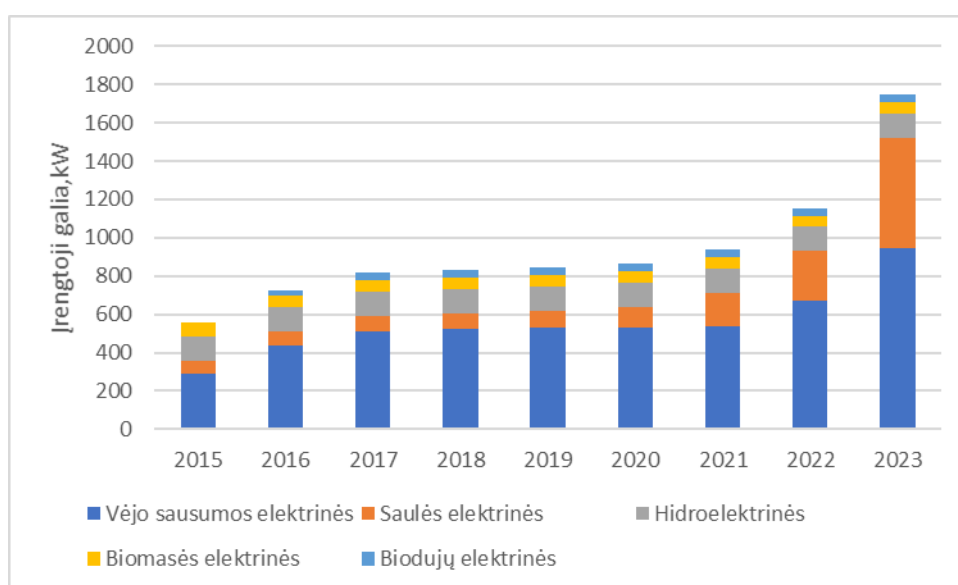
## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Atsinaujinantys energijos šaltiniai

Atsinaujinančios energetikos istorija siekia jau keletą tūkstantmečių, kai senovės civilizacijos naudojo saulės, vėjo ir vandens energiją įvairioms reikmėms patenkinti, pavyzdžiui senovės graikai ir romėnai pasitelkę vėją varydavo laivus per jūras, o kinai ir persai išnaudodavo vandens tėkmę grūdams malti. Tačiau XVIII-XIX a. vykusios pramonės revoliucija bei laipsniška jos plėtra sukūrė milžinišką naftos ir anglies poreikį, kuris sužlugdė atsinaujinančios energijos naudojimą.

XX a. su klimato kaitos problemomis ir ekologinio judėjimo populiarėjimu, didėjo susidomėjimas atsinaujinančia energija. 1970-aisiais, naftos krizė lėmė alternatyvių energijos šaltinių plėtojimo poreikį, kad valstybės sumažintų priklausomybę nuo naftos importo ir užtikrintų energetinį saugumą. Visame pasaulyje sparčiai pradėjo augti investicijos į atsinaujinančios energijos technologijų tyrimus ir plėtrą.

Ne išimtis ir Lietuvoje. Per pastaruosius 10 metų pastebimas nuolatinis augimas elektrinių, kurios elektros energiją gamina pasitelkiant atsinaujinančios energijos išteklius. Ypač stiprus augimas pastebimas 2022 m., kuomet vyravo energetikos krizė atsiradusi dėl karo Ukrainoje. 1 pav. pateikiamas elektrinių, kurios gamina elektros energiją iš atsinaujinančių energijos išteklių, instaliuotos galios kitimas 10 metų laikotarpiu Lietuvoje [13].



1 pav. Instaliuota galia elektrinės iš atsinaujinančių energijos šaltinių Lietuvoje

Atsinaujinančios energijos tema yra viena svarbiausių ir aktualiausių šiandienos energetikos srityje. Didėjantis susirūpinimas dėl klimato kaitos ir naftos išteklių baigties, taip pat didėjantis elektros energijos poreikis, skatina mokslinių tyrimų augimą atsinaujinančios energetikos srityje [22]. Nuo 2010 m. pastebimas pastoviai augantis poreikis naujiems moksliniams tyrimams, kurie nagrinėja atsinaujinančių energijos šaltinių sritį. Ši tendencija dar labiau paspartėjo po Paryžiaus susitarimo dėl klimato kaitos 2015 m., kuriame dauguma pasaulio valstybių susitarė dėl bendro siekio mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą į aplinką ir atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimo.

Moksliniai tyrimai atsinaujinančios energijos srityje apima įvairias temas, tokias kaip šių šaltinių gamybos ir panaudojimo efektyvumas, investicijų į šias technologijas grąža, elektros tinklų

integracija, saugumas ir kt. Dauguma mokslinių tyrimų, skirtų atsinaujinančios energijos šaltinių naudojimui, grindžiami inovatyviomis technologijomis ir metodais, tokiais kaip duomenų analizė, matematiniai modeliai, simuliacijos.

### 1.1.1. Atsinaujinančių energijos šaltinių skirstymas

Šiuolaikinėje energetikoje yra įvairių atsinaujinančių energijos išteklių rūšių, kurie padeda mažinti priklausomybę nuo neatsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip nafta, anglis ar gamtinė dujos, ir prisideda prie tvarios elektros energijos gamybos. Toliau bus aptariami pagrindiniai ir plačiausiai taikomi atsinaujinančios energijos šaltiniai [2]:

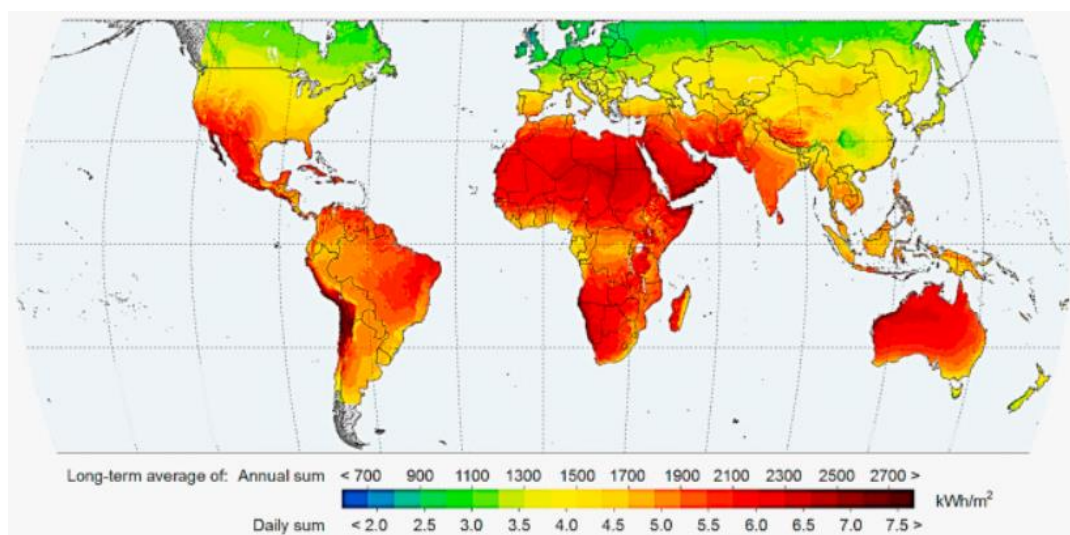
1. **Saulės energija:** Saulės spinduliai gali būti panaudoti fotovoltinėse (saulės elementuose) ir termosaulės (saulės kolektoriuose) sistemose. Fotovoltinės sistemos paverčia saulės šviesą tiesiogiai į elektrinę energiją, o termosaulės sistemos naudoja šilumą, sukurtą iš saulės spindulių, šildymui arba elektros energijos gamybai.
2. **Vėjo energija:** Vėjo jėgainės naudoja vėjo sukuriamą kinetinę energiją, kad sukurtų elektros energiją. Vėjo veikiamos turbinos sukuria mechaninę energiją, kuri generatoriuje konvertuojama į elektros energiją. Vėjo energija yra viena iš greičiausiai augančių atsinaujinančių energijos rūšių.
3. **Hidroenergija:** Hidroelektrinės jėgainės išnaudoja vandens tėkmės energiją, kad sukurtų elektrą. Dažniausiai būna naudojamos užtvankos tipo hidroelektrinės, kai yra užtvankiamos upės ir susidaro du skirtingi aukščių lygiai – tekantis vanduo įsuka turbina, o ši generatorių, kuris gamina elektros energiją.
4. **Geoterminė energija:** Geoterminės jėgainės naudoja žemės šilumą, esančią po žemės paviršiumi. Šilumą, vandens arba garų pavidalu, galima gauti iš giliai išgręžtų šulinių ir ją panaudoti šildymui arba elektros energijos gamybai.
5. **Biomasės energija:** Biomasė apima organinius medžiagų šaltinius, tokius kaip mediena, biomasės degalai, atliekų produktai ir net biomasės kuras, gautas iš augalų ir gyvūnų atliekų. Biomasė gali būti naudojama šildymui, elektros energijos gamybai arba biodegalų gamybai.
6. **Bangų energija:** Bangų energija išnaudoja bangų judėjimą vandens telkinio paviršiuje, kad sukurtų elektrinę energiją.

Šios atsinaujinančių energijos išteklių rūšys skiriasi pagal savo technologiją, kaštus, veikimo principus ir taikymo sritis. Jų naudojimas skatina tvarią energetiką ir prisideda prie mažesnio anglies dioksido išmetimo, mažinant neigiamą poveikį aplinkai. Tačiau, skirstomajame elektros tinkle labiausiai paplitusi yra saulės energetika, todėl tolesniame darbe labiau bus akcentuojama būtent ši rūšis.

### 1.1.2. Saulės energetika

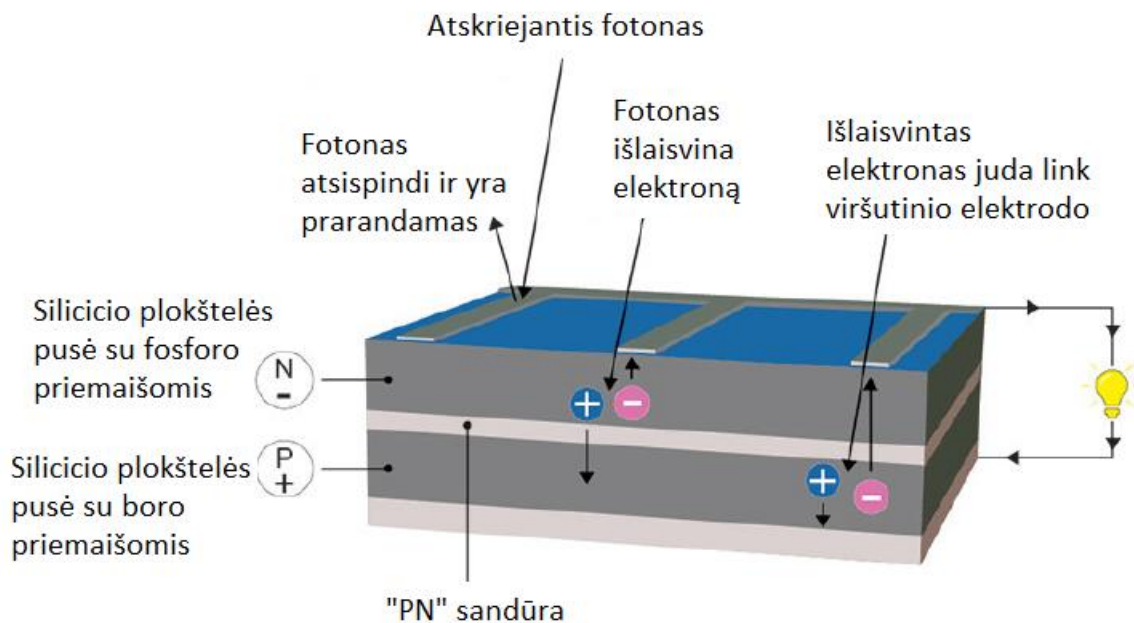
Norint žengti švaresniu ir tvaresniu elektros energijos gamybos keliu, būtina pereiti nuo iškastinio kuro prie atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip saulės, vėjo ar vandens energija. Tačiau saulės energija gali būti patrauklesnis pasirinkimas dėl keleto priežasčių. Visų pirma, tai dėl milžiniško galios kiekio – Saulė išspinduliuoja  $3,8 \times 10^{23}$  kW galios energijos kiekį, kai  $1,8 \times 10^{14}$  kW yra perimama Žemės atmosferos ir tik 60 % ( $1,08 \times 10^{14}$  kW) galios prasiskverbia iki Žemės paviršiaus,

o likusi dalis arba sugerama atmosferos, arba atsispindi atgal į kosmosą [27]. Saulės energija pasiekia žemę įvairiomis formomis, tokiomis kaip šiluma ir šviesa. Keliaudama, didžioji jos dalis prarandama dėl sklaidos, atspindžio ir debesų sugėrimo. Tyrimai atskleidė, kad visą pasaulio energijos paklausą galima patenkinti vien tik saulės energija, dėl didelės gausos gamtoje, lengvo prieinamumo ir nedidelių sąnaudų [14]. Antra, tai yra perspektyvus energijos šaltinis pasaulyje, kuris pasibaigtų tik tuo atveju, jei užgestų Saulė ir suteikia pastovų bei, progresuojant technologijoms, didėjančią pagaminamos energijos kiekį, lyginant su kitais energijos šaltiniais. Pagrindiniai kriterijai, kurie apibūdina saulės elektrinių efektyvumą tai saulės spinduliavimo pasiskirstymas ir intensyvumas. Tačiau šie kriterijai labai priklauso nuo lokacijos, pavyzdžiui Afrikos žemyne kur kas efektyviau vystyti saulės energetiką, nei didžiojoje dalyje Europos žemyno ar Kanadoje, dėl kur kas didesnės saulės spinduliuotės intensyvumo (žiūrėti į 2 pav.)



**2 pav.** Horizontalios saulės apšvietos pasiskirstymas pasaulyje [4]

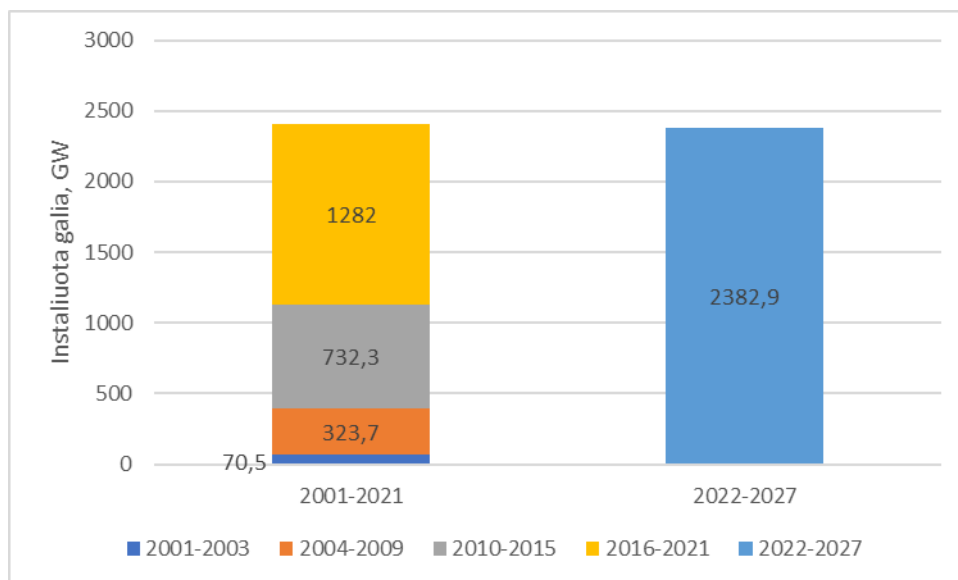
Norint konvertuoti saulės energiją į elektros energiją pasitelkiama saulės elektrinė. Tai elektros įrenginių sistema, kurią sudaro fotovoltiniai moduliai, įtampos keitiklis ir įrenginius jungiantis laidynas. Pagrindinis komponentas yra būtent fotovoltiniai moduliai, kurie puslaidininkių pagalba konvertuoja saulės šviesos energiją į elektros energiją. Šių modulių veikimas yra pagrįstas fotoefektu. Šis fizikinis reiškinys apibūdinamas kaip šviesos dalelių (fotonų) energijos perdavimas medžiagos (šiuo atveju puslaidininkio) elektronams, kurie dėl to arba išlekia iš jos (išorinis fotoefektas), arba joje tampa laisvi (vidinis fotoefektas). Elementuose esanti puslaidininkių „pn“ sandūra (pvz. esant legiruotai silicio plokštei, kai viena jos pusė padengiama boru, o kita fosforu) sukuria pastovų elektrinį lauką, kuris nukreipia laisvus elektronus į vieną pusę, o „skyles“ į kitą pusę. Pridėjus laidžius kontaktus ir padarius uždara elektros grandinę, elementu teka elektros srovė. Priekinis kontaktas (į saulę nukreiptas) turi gebėti praleisti atskriejančius fotonus, todėl yra tinklelio formos, o apatinis yra vientisa elektrai laidžios medžiagos plokštė [19]. Paprasčiausia saulės elemento principinė schema pavaizduota 3 pav.



3 pav. Saulės elemento principinė schema

### 1.1.3. Elektrinių iš atsinaujinančių išteklių plėtra Lietuvoje

Pastaruoju metu sparčiai augant žmonių skaičiui, gyvenimo kokybei bei spartėjant technologijų vystymuisi didėja ir reikalingos elektros energijos poreikis. Lyg šios dienos milžinišką žmonijos progreso mašiną varantis iškastinis kuras sukuria vis dažniau plika akimi pastebimą klimato kaitos problemą. Neaprėpiamo masto miškų gaisrai, uraganai, sulyginantys su žeme ištisas gyvenvietes, sausras, nualinančios dirvožemius – tai tik dalelė to, kas laukia ateityje nesilaikant ryžtingų sprendimų klimato kaitos mažinimui. Nors, iškastinis kuras yra sąlyginai pigus ir reikalauja mažiau investicijų, tačiau, visuomenei darantis vis sąmoningesnei aplinkosauginiais klausimais, ieškoma alternatyvų, kurios padėtų pakeisti taršų kurą į tvarius, aplinkai draugiškus energijos šaltinius. Šiam tikslui paspartinti buvo pasiūlyta daugybė tarptautinių ir nacionalinių susitarimų, teisės aktų, aplinką tausojančios politikos ir kitų iniciatyvų visame pasaulyje, Europos sąjungoje ir Lietuvoje, pavyzdžiui, žaliojo kurso ar žiedinės ekonomikos idėjos [10]. Tarptautinės energetikos agentūros sumodeliuotos situacijos duomenimis, 2022 – 2027 m. bus instaliuota atsinaujinančių išteklių elektrinių galios beveik tiek pat, kiek tai yra padaryta per 2001 – 2022 m. laikotarpį, t. y., per 5 metus planuojama prijungti 2382,9 GW galios, kai per 20 metų jau yra prijungta 2408,5 GW galios (žiūrėti į 4 pav.).



**4 pav.** Atsinaujinančių išteklių elektrinių instaliuotos galios prieaugis skirtingais laikotarpiais [40]

Kalbant apie atsinaujinančių išteklių plėtrą Lietuvoje, analogiškai kaip ir visame pasaulyje, pastaruoju metu stebimas intensyvus augimas (žiūrėti į 1 pav.). Priešlaidų, kurios tai galėtų nulemti, yra ne viena, todėl žemiau yra pateikiami pagrindiniai, didžiausią poveikį darantys, įvykiai.

**Paryžiaus susitarimas dėl klimato kaitos.** 2015 m. gruodžio 11 d. 195 valstybės pasiekė susitarimą dėl klimato kaitos mažinimo. Tai yra pirmasis XXI amžiaus tokio didelio masto daugiašalis susitarimas, kuriame yra išdėstytas visuotinis veiksmų planas, kaip neleisti globaliam atšilimui priartėti prie 2°C ir taip išvengti galimai katastrofiškus klimato kaitos padarinius. Paryžiaus susitarimas duoda aiškų signalą visų šalių politikams, pramonei, investuotojams, kad finansiniai ir ekonominiai išteklių turi būti nukreipti nuo daug anglies dioksido išskiriančių investicinių projektų, susijusių su iškastinio kuro naudojimu, į klimatui draugiškus projektus – atsinaujinančių energijos išteklių, didelio energetinio efektyvumo, mažą anglies dioksido kiekį išskiriančių technologijų diegimą. Pagrindiniai punktai, dėl kurių buvo susitarta [13]:

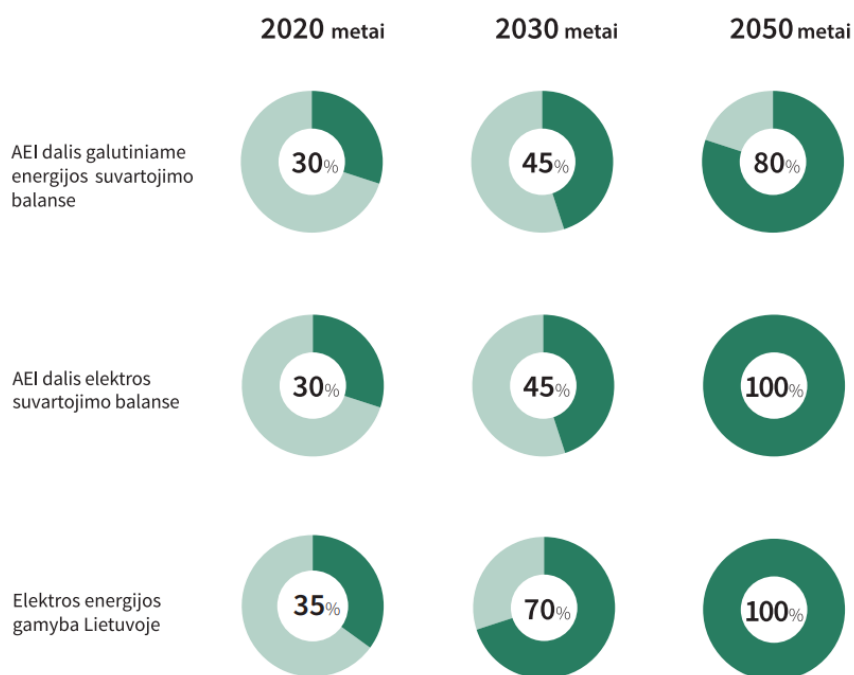
- pasaulis sieks išlaikyti klimato kaitos sukeltas temperatūras žemiau 1,5°C;
- visos dalyvavusios šalys buvo paprašytos peržiūrėti savo nacionalinius klimato planus 2018 metais, kurie turės įsigaliooti 2020 m.;
- vyks penkerių metų apskaitos, norit įvertinti kaip šalys tvarkosi su savo klimato planais, kai pirmoji įvyks 2023 metais;
- sukurtas naujas žalos svarstymo būdas „Nuostoliai ir žala“, kuris padės įvertinti žalą, kurią patyrė šalys dėl ekstremalių oro sąlygų ar kitų klimato kaitos sukeltų padarinių;
- numatoma parama besivystančioms valstybėms kovoti su klimato kaita.

Paryžiaus susitarimo dėka pasaulyje ženkliai padidėjo susidomėjimas atsinaujinančių išteklių technologijomis [8] – investuotojai plačiau pradėjo domėtis aplinkosauga ir „žaliosiomis“ technologijomis. Toks dėmesio pritraukimas reikš kylančias investicijas, kurios būtų skirtos kūrimui naujų technologinių sprendimų atsinaujinančių išteklių efektyvumui ir plėtrai gerinti.

**Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija.** Šiame, LR energetikos ministerijos 2012 m. parengtame, o 2018 m. pakoreguotame, dokumente yra išdėstomos keturios pagrindinės šalies strateginės energetikos vystymosi kryptys: konkurencingumas, patikimumas, įtakos klimato kaitai ir aplinkos oro taršai mažinimas, šalies verslo dalyvavimas siekiant energetikos pažangos. Atsinaujinančių energijos išteklių tema yra viena svarbiausių, nes siekiama didinti gaminančių vartotojų skaičių, elektros energijos gamybą transformuoti į aplinkai draugišką ir netaršią, mažinti transporto sektoriaus priklausomybę nuo iškastinio kuro. Lietuvos energetikos sektoriaus vizijos pagrindą sudaro [16]

- Paryžiaus susitarimas dėl klimato kaitos, priimtas pagal Jungtinių Tautų bendrąją klimato kaitos konvenciją;
- strateginės nuostatos dėl ES energetikos ir klimato kaitos politikos iki 2030 metų tikslų;
- ES energetikos srities ir energetikos sąjungos teisės aktų nuostatos.

Vertinant metinį atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą energijos gamybai, matyti, kad Lietuva 2020 m. pasiekė ir viršijo užsibrėžtą Europos Sąjungos tikslą – energijos gamyba iš atsinaujinančių energijos šaltinių turi sudaryti ne mažiau kaip 23 proc. Atsinaujinantys energijos šaltiniai šalyje 2020 m. galutiniame energijos balanse sudarė 27,36 proc. Tačiau AEI dalis elektros gamyboje sudarė 20,17% (pagal 2021 m. Lietuvos energetikos agentūros bei LR Energetikos ministerijos duomenis). Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos tikslai numato, kad iki 2030 metų AEI dalis galutiniame elektros energijos balanse turėtų siekti 45%, o 2050 metais – 80% (žiūrėti į 5 pav.). Remiantis ateities perspektyvomis ir tyrėjų nuomonėmis, tikėtina, kad daugiausia dėmesio bus skiriama vėjo ir saulės energijai [18].



**5 pav.** Siekiami rezultatai Lietuvos energetikos sektoriuje 2020, 2030 ir 2050 metais (Šaltinis – LR energetikos ministerija)

Paryžiaus susitarimas yra viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl Lietuvai reikalinga ilgalaikė energetikos strategija. Jos paskirtis nėra vien tik apibrėžti kryptis, kuriomis šalis turi vystytis, kad

pasiektų strategijoje išskeltus tikslus, tačiau ir paskleisti žinių investuotojams, jog yra aiškus planas ir valstybės palaikymas tiek finansine parama, tiek biurokratijos mažinimu norint investuoti.

**Valstybės skiriamos finansinės paramos.** Tyrimai atskleidžia, kad valstybių parama mokesčių mažinimo ir subsidijų forma yra svarbūs atsinaujinančios energetikos srities finansavimo šaltiniai. Ekonomiškai pažengusios šalys, siekdamos paspartinti atsinaujinančių išteklių plėtrą šalyje, naudoja įvairesnius finansavimo kanalus ir priemones [5]. Pirmoji šalyje energijos gamybos atsinaujinančių išteklių plėtros rėmimo programa prasidėjo 2009 m., kuomet valstybei nustatius tarifus, pagal kuriuos supirkinės pagamintą elektros energiją (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija 2002 m. vasario 11 d. nutarimu Nr. 7 „Dėl viešuosius interesus atitinkančių paslaugų elektros energetikos sektoriuje kainų“). Tuo metu (naudojant tuometę Lito valiutą) tarifai hidroelektrinėms siekė 26 ct/kWh, vėjo jėgainėms – 30 ct/kWh, elektrinėms, kuriose elektros energija gaminama naudojant biokurą – 30 ct/kWh, saulės (fotoelektrinėms) elektrinėms pagal pikinę elektros galią: iki 100 kW – 1,63 Lt/kWh, nuo 100 kW iki 1 MW – 1,56 Lt/kWh, nuo 1 MW – 1,51 Lt/kWh.

Sekantis svarbus žingsnis, kuris leido palengvinti prisijungimą prie elektros tinklų finansinę naštą, buvo nuo 2004 m. skiriama iki 40 % nuolaida mokesčio reikalingo prisijungti prie skirstomųjų elektros energijos tinklų planuojamai elektrinei iš atsinaujinančių išteklių (Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2001 m. gruodžio 5 d. nutarimu Nr. 1474 „Dėl teisės aktų, būtinų Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymui įgyvendinti, patvirtinimo“).

Palankios sąlygos galiojo iki 2013 m. ir per šį laikotarpį įrengtų elektrinių galia Lietuvoje pasiekė 69 MW. Įsigaliojus AIE įstatymo pataisoms, kurios panaikino beveik visas lengvatas, ši plėtra sustojo [11]. Sekantis plėtros etapas prasidėjo su gaminančio vartotojo statuso atsiradimu 2015 m. Tais metais startavus dvipusei elektros energijos apskaitos schemai, LR energetikos ministerija įtvirtino gaminančius vartotojus kaip fizinius ar juridinius asmenis, kurie ne tik vartoja elektros energiją, tačiau ir gamina savo poreikių tenkinimui, o susidariusi perteklių atiduoda į skirstomąjį elektros tinklą pasaugoti. Kadangi, Lietuvos „Nacionaliniame energetinės nepriklausomybės strategijoje“ išsikeltas tikslas iki 2050 m. pasiekti 50 proc. gaminančių vartotojų kiekį nuo visų elektros energijos vartotojų, diegiamos įvairios novatoriškos priemonės, kurios skirtos palengvinti procesą vartotojams sumažinant administracinę ir finansinę naštą ir taip elektros energijos gamybą padaryti labiau pasiekiamą visiems. Nuo 2015 m. priimti sprendimai pateikiami 1 lentelėje.

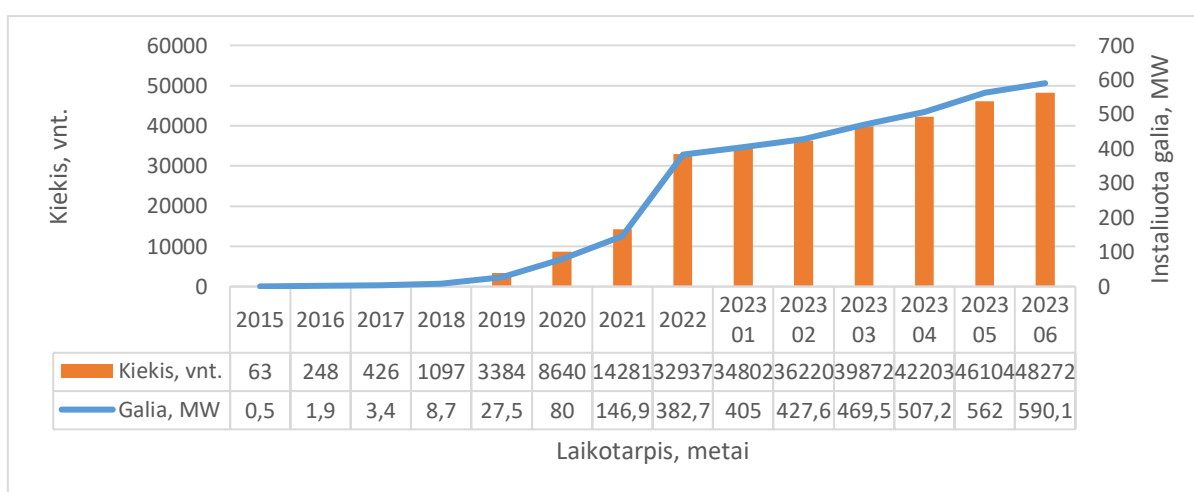
**1 lentelė.** Valstybės sprendimai, skatinantys gaminančių vartotojų plėtrą Lietuvoje [11]

Data	Pakeitimai, skatinantys gaminančių vartotojų plėtrą Lietuvoje
2015	Dvipusės apskaitos pradžia Lietuvoje
2017	Gaminančiais vartotojais gali tapti ir juridiniai asmenys; supaprastinta pridavimo tvarka elektrinėms iki 5 kW; gaminančio vartotojo galios apribojimas (100 kW – juridiniam asmeniui; 10 kW – fiziniam asmeniui)
2018	Keturi gaminančio vartotojo atsiskaitymo būdai už pasinaudojimą tinklais; fiksuota parama (3,3 mln. Eur) investicijoms už įrengtą elektrinės galią
2019	Skiriama fiksuota parama (17 mln. Eur) investicijoms už įrengtą elektrinės galią (nuolatinis kvietimas); gaminančio vartotojo galios apribojimas fiziniam asmeniui 30 kW; supaprastinta elektrinių pridavimo tvarka iki 30 kW; gaminančio vartotojo didžiausioji galia 500 kW; nutolusios saulės elektrinės gyventojams
2020	Nutuliosios saulės elektrinės verslui; dvejų laiko zonos tarifų taikymas gaminantiems vartotojams
2021	Gaminančių vartotojų prijungimo prie tinklo kaštai yra 50 % visų kaštų (vietoj dabartinių 100 %); saulės elektrinėms supaprastintas žemės naudojimo paskirties keitimas



Data	Pakeitimai, skatinantys gaminančių vartotojų plėtrą Lietuvoje
2022	Suteikti galimybę gaminantiems vartotojams dalytis savo sukauptą elektros energiją su kitais gaminančiais ir (arba) elektros vartotojais bei priskirti generaciją iš kelių šaltinių

Kalbant apie pasiektą rezultatą, tai gaminančių vartotojų programa susilaukė išties didelio pasisekimo, nes galimybė susimąžinti sąskaitą už suvartotą elektros energiją, tapimas mažiau priklausomais energetiškai bei prisidėjimas prie klimato kaitą mažinančios iniciatyvos žmonės paskatino vis drąsiau rinktis saulės elektrinių įsirengimą ant namų stogų ar tuščio žemės ploto. Tačiau, norint šaliai pasiekti išsikeltą tikslą dėl gaminančių vartotojų kiekio, būtina taikyti papildomas skatinamąsias priemones, tokias kaip APVA (Aplinkos projektų valdymo agentūra) skiriamas dalines kompensacijas už patirtas finansines išlaidas įsirengiant saulės elektrinę. Pasinaudojant „Energijos skirstymo operatoriaus“ pateiktais statistiniais duomenimis, šiai dienai yra prijungta 48272 gaminančių vartotojų, kurių bendra instaliuota galia siekia 590,1 MW (žiūrėti į 6 pav.).



6 pav. Gaminančių vartotojų statistika

#### 1.1.4. Saulės fotovoltinių elektrinių inverteriai

Nors saulės elektrinių fotovoltiniai moduliai ir gamina elektros energiją, tačiau, norint ja pasinaudoti, būtinas techninių parametru pritaikymas prie esamų el. tinklo parametru. Esminis dalykas, kuris turi būti užtikrinamas tai tinkamas tinklo tipas. Pasaulyje yra žinomi du tipai [32]:

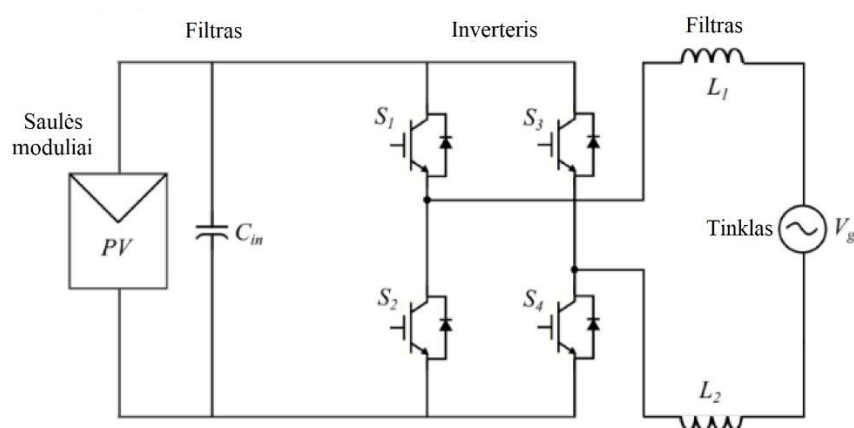
- Nuolatinė srovės tipas (DC), kuris yra apibrėžiamas kaip elektros srovės srautas tekantis tik viena kryptimi ir laikui bėgant nekintantis;
- Kintamosios srovės tipas (AC) yra priešingas nuolatinei srovei ir srovės kryptis šiuo atveju nėra pastovi, o periodiškai keičia kryptį.

Didžioji dalis pasaulyje naudojamos elektronikos naudoja būtent nuolatinę srovę, dėl tinkamo elektroninių komponentu, tokiu kaip tranzistoriai ar diodai, veikimo. Tačiau, kai elektros energija reikia perduoti didesnę atstumą, šioje vietoje pasitarnauja kintamoji srovė, kuri palengvina elektros energijos transportavimą, be to, kintamąją srovę galima naudoti elektros varikliuose, kurie elektros energiją paverčia į mechaninę energiją.

Saulės elektrinės generuoja elektros energiją prie nuolatinės srovės, tačiau visa elektros energetikos sistema yra sukurta ant kintamosios srovės pagrindo, tad, norint sujungti šias dvi sistemas, būtinas inverteris, kurio pagrindinės funkcijos yra [15]:

1. Nuolatinės srovės, gaunamos iš saulės elektrinės modulių, konvertavimas į kintamąją srovę, užtikrinant, kad kintamosios srovės ciklą dažnis būtų 50 ciklų per sekundę (50 Hz);
2. Įtampos svyravimų mažinimas;
3. Užtikrinti, kad kintamosios srovės bangos forma būtų tinkama taikymui.

Saulės elektrinės sugeneruota nuolatinė srovė yra paduodama į inverterį, kuris sudarytas iš MOSFET ar IGBT tipo tranzistorių valdomų specialiais valdymo algoritmais arba kontrolės grandinėmis. Šie tranzistoriai poromis įsijungdami ir išsijungdami formuoja srovę taip, kad išėjime susidarytų sinusoidinis srovės signalas. Kontroliuojant tranzistorių įjungimo ir išjungimo laikus, yra gaunama tinkamos formos sinusoidė, kuri atitinka elektros tinklo įtampos ir dažnio reikalavimus [28]. Tipinė inverterio principinė schema pateikiama 7 paveiksle [24].



7 pav. Vienfazis tiltelinis tinklo inverteris

Matome, kad 7 paveiksle pavaizduota inverterio sistema turi tris pagrindinius komponentus: kondensacinį filtrą, tranzistorius ir induktyvinį filtrą. Tranzistoriai, kaip ir minėta aukščiau, įsijungdami ir išsijungdami formuoja sinusoidinį srovės signalą, kondensacinis filtras, kuris skirtas suteikti žemos varžos kelią aukšto dažnio srovėms ir induktyvinis filtras, kuris pagerina sinusoidės formą.

Yra naudojami trys pagrindiniai saulės jėgainių inverterių tipai: salos režimu veikiantys inverteriai (izolijuoti nuo tinklo), tinklo inverteriai ir hibridiniai inverteriai, kurie gali veikti tiek elektros tinkle, tiek autonominiame režime [41].

**Salos režimu veikiantis inverteris.** Elektros energijos perteklius privalo būti suvartotas vidaus tinkle ir negali būti perduotas į el. tinklą. Šie inverteriai dažniausiai sujungia saulės elektrines ir elektros energijos kaupimo įrenginį ir keičia į kintamą elektros tinklo įtampą. Kai akumulatoriai yra įkrauti ir nėra naudojami jokie elektros imtuvai, saulės moduliai nustoja gaminti elektros energiją. Kol nėra elektros poreikio, perteklinę energiją galima nukreipti pvz. vandens šildymui.

**Tinklo inverteris.** Tinklo inverteris yra sinchronizuojamas su elektros tinklu, todėl perteklinė elektros energija gali būti perduodama į tinklą. Tokia sistema neturi akumuliatorių ir yra visiškai

priklausoma nuo elektros tinklo. Sugedus elektros tinklui, saulės jėgainė taip pat nustos veikti, atsijungs visi elektros imtuvai. Tokia sistema yra naudojama elektros energijos pardavimui.

**Hibridinis inverteris.** Sistema veikia sinchroniškai su elektros tinklu ir nepriklausomai nuo jo – salos režimu. Energijos buferio vaidmenį atlieka akumuliatorių baterija. Perteklinė elektros energija yra kaupiama akumuliatoriuose, o kai akumuliatoriai įkrauti – perduodama į elektros tinklą arba nukreipiama vandens šildymui. Atsijungus elektros tinklui, sistema persijungia į salos režimą ir elektros imtuvai yra maitinami iš saulės modulių gaminamos ir akumuliatoriuose sukauptos elektros energijos.

## 1.2. Skirstomieji tinklai

### 1.2.1. Apibūdinimas

Skirstomųjų tinklų paskirtis yra paskirstyti elektros energiją nedideliais atstumais galutiniam vartotojui. Dažniausiai elektros energija perduodama per esančias oro linijas arba, daugelyje miesto teritorijų, kabelinėmis linijomis po žeme. Skirstomieji tinklai skiriasi nuo perdavimo tinklų savo įtampos lygiu ir topologija. Skirstomiesiems tinklams naudojamos žemesni įtampų lygiai, kadangi perduodama mažesnė galia kuri paskirstoma plačiam ratui vartotojų, kuriems nėra poreikio prisijungti nuo magistralinių perdavimo linijų. Įprastai, skirstomajame tinkle palaikomi šie įtampų lygiai [26]:

- 0,23 kV;
- 0,4 kV;
- 6 kV;
- 10 kV;
- 35 kV.

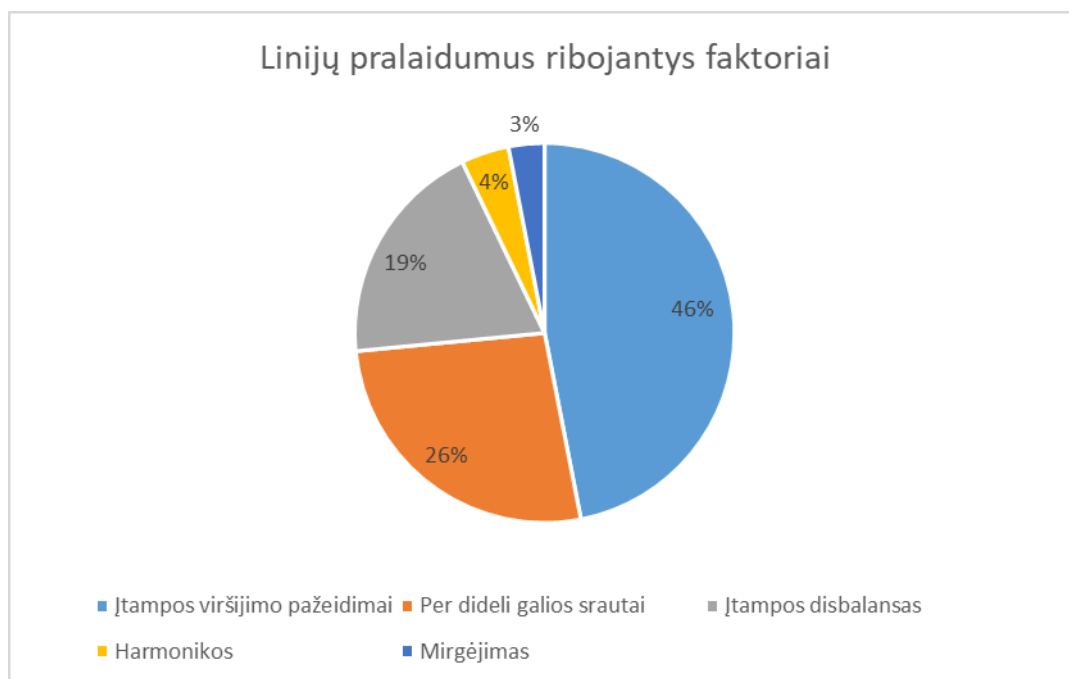
0,23 ir 0,4 kV tinklais teikiama elektros energija visiems buitiniams vartotojams ir daliai mažai galingiems nebuitiniams vartotojams (dažniausiai iki 200 kW). 6 ir 10 kV tinklai naudojami rajoninėms 110/10-6 kV transformatorių pastotėms sujungti su mažesnėmis 10/0,4 kV transformatorinėmis arba užmaitinami stambesni nebuitiniai vartotojai. 35 kV linijos dažniausiai teikia elektros energiją provincijose esančioms gyvenvietėms, kurios nepasižymi dideliu vartojimu, tačiau galią reikia perduoti dideliais atstumais (15 ir daugiau km).

Ryšys tarp skirstomųjų tinklų ir perdavimo tinklų vyksta rajoninėse transformatorių pastotėse (toliau – TP). TP turi galios transformatorius, kurie sumažina įtampą iki pagrindinio skirstomosios įtampos lygio (dažniausiai iki 10 arba 35 kV), turi sudėtingas tinklo apsaugos ir valdymo sistemas, nuotolinį valdymą iš dispečerinio centro. Skirstomojo tinklo transformatorinės dažniausiai būna 10/0,4 kV, kurios yra žymiai paprastesnės, nes neužima didelių žemės plotų, įrenginiai skirti mažesnei galiai praeiti, todėl investicijos į juos yra kur kas mažesnės, o įrenginių apsaugai dažniausiai naudojami automatiniai jungikliai arba saugikliai lydžiuosiuose įdėkluose.

### 1.2.2. Linijų pralaidumus ribojantys veiksniai

Siekiant įgyvendinti atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinių plėtros išsikeltus tikslus atsirado įvairūs finansinės paramos projektai, įstatymų pakeitimai supaprastinantys prijungimo tvarką. Šios

iniciatyvos davė stiprų impulsą saulės elektrinių plėtrai Lietuvoje. Tačiau vis dažniau susiduriama su situacijomis, kai nei papildoma finansinė parama padeda įsirengti saulės elektrinę, nei įstatymų pakeitimai supaprastina prisijungimą prie elektros tinklų. Į paviršių iškyla įvairūs ribojantys faktoriai, kurie, dėl techninių priežasčių, neleidžia efektyviai išnaudoti visų galimų tinklo pajėgumų. Analizuojant mokslinius tyrimus [9], didžiausią įtaką elektrinių neprijungimui prie skirstomųjų tinklų daro būtent padidėjusios įtampos pažeidimai, kurie sudaro 46% atvejų, kita didelė dalis trikdžių, 26% atvejų, atsiranda dėl per didelių galios srautų laidininke. Į šį sąrašą patenka ir įtampos tarpfazinis išsikraipymas sudarantis 19% atvejų. Mažiausią dalį sudaro harmonikos ir įtampos mirgėjimas atitinkamai 4% ir 3%. Grafinis pasiskirstymas pateiktas 8 paveiksle.



8 pav. Linijų pralaidumus ribojantys faktoriai

**Įtampos viršijimo pažeidimai.** Dėl prijungiamų saulės elektrinių prie skirstomojo tinklo kyla atvirkštinio galios srauto (iš elektrinės į tinklo transformatorinę) problema, dėl kurios kyla įtampa elektros linijose. Kad įtampos nuokrypiai nepadarytų žalos pačiam elektros tinklui ir prijungtų vartotojų elektros įrenginiams, privaloma nustatyti keistinus įtampos nuokrypius. Yra penki plačiai naudojami įtampos standartai:

- Europos standartas EN-50160 ( $\pm 10\%$  vardinės įtampos);
- Vokietijos standartas VDE-AR-N 4105 ( $+3\%$  vardinės įtampos);
- Amerikos standartas ANSI C84.1 ( $\pm 5\%$  vardinės įtampos);
- Australijos standartas AS 60038 ( $-6/+10\%$  vardinės įtampos);
- Kanados standartas CAN3-C235 ( $\pm 6\%$  vardinės įtampos).

**Perkrovos pažeidimai.** Elektros linijų ir transformatorių perkrovos ribos yra antras pagal svarbą saulės elektrinių prijungimą ribojantis veiksnys po įtampos pažeidimų. Transformatorių apkrovimo ribos priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant transformatoriaus tipą, dydį, konstrukciją, izoliacijos lygį, aplinkos sąlygas ir kitas gamintojo specifikacijas. Maksimaliai leistina elektros linijų apkrova

irgi priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant linijos charakteristikas, konstrukciją, aplinkos sąlygas, elektros tinklo būklę ir reguliavimo reikalavimus. Tačiau mokslinėje literatūroje dažniausiai limitai aprašomi kaip procentinė išraiška nuo nominalaus įrenginio galingumo, kur siekiamybė yra neviršyti 100% ribos. Pavyzdžiui transformatoriaus galingumas yra 100 kVA, tai maksimalus pilnutinės galios srautas pratekantis pro transformatorių negali viršyti 100 kVA arba procentine išraiška 100% nuo nominalios galios. Elektros linijoms galioja ta pati logika, tik čia figūruoja srovė, tad jei maksimali leistina laidininko srovė yra 200 A, tai ir jame tekanti srovė negali viršyti 200 A arba 100% nuo leistinos srovės.

### 1.2.3. Reaktyvioji galia ir jos kompensavimas naudojant saulės elektrinių inverterius

Neretai dalis žmonių išgirdę žodį „galia“, dažnu atveju pagalvoja apie elektros energiją. Perkant naują elektros įrenginį yra susiformavęs įprotis būtinai pasižiūrėti to įrenginio elektrinę galią, nes pagal tai sprendžiama kiek prietaisas yra našus atlikti tam tikrą darbą bei kiek elektros energijos gali vartoti [31]. Tačiau tai tėra tik viena iš galios komponentų – aktyvioji galia. Ji yra žinoma kaip naudinga galia, kuri atlieka darbą kaip pavyzdžiui šviečianti elektros lemputė, veikiantis televizorius ar šaldytuvas. Elektrotechnikoje ji apibrėžiama kaip kitų energijos rūšių keitimo į elektros energiją (arba atvirkščiai) sparta. Aktyvioji galia ( $P$ ) yra tiesiogiai proporcinga srovei ir įtampai [30]:

$$P = UI \cos \varphi \quad (1)$$

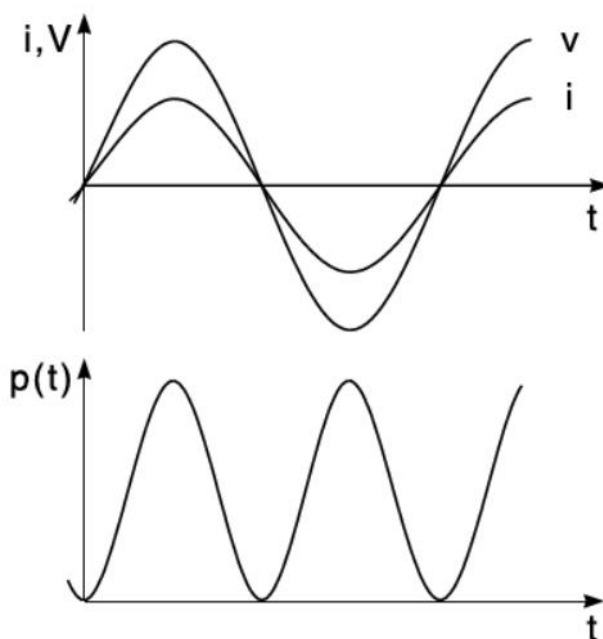
Čia  $P$  – aktyvioji galia, W (vatai);

$U$  – įtampa, V (voltai);

$I$  – srovė, A (amperai);

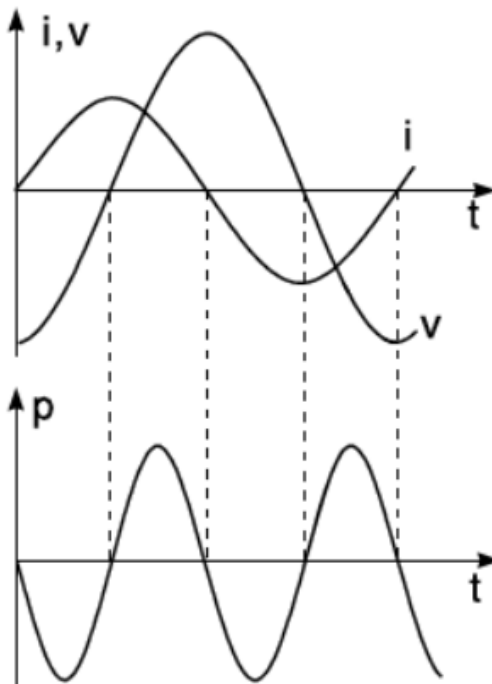
$\varphi$  – fazių skirtumo kampas, laipsniais.

Kad lengviau suprasti fazių skirtumo esmę pateikiamas įtampos ir srovės akimirkinių verčių grafikas, kuris pateikiamas 9 paveiksle [25].



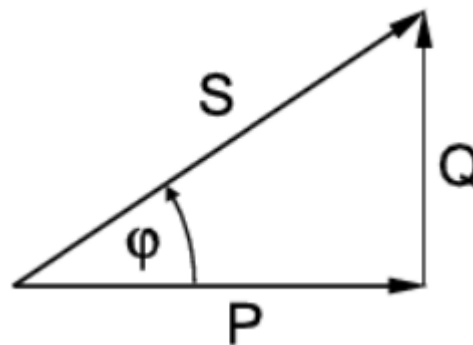
9 pav. Įtampos  $u$ , srovės  $i$  ir akimirkinės galios  $p$  grafikai, kai grandinėje vyrauja aktyvioji varža

Pagal 9 paveikslo duomenis pastebima, kad srovė ir įtampa kerta x ašį tame pačiame taške, tai reiškia, kad jų fazės sutampa ir fazių skirtumo nėra –  $\varphi = 0^\circ$ , tad  $\cos \varphi = 1$ , o aktyvioji galia lygi srovės ir įtampos sandaugai. Tačiau, kai grandinėje yra prijungti induktyviniai ar talpiniai elementai, įtampos ir srovės fazės nebesutampa, tarp jų atsiranda skirtumas, kuris pavaizduotas 10 paveiksle.



**10 pav.** Įtampos  $u$ , srovės  $i$  ir akimirkinės galios  $p$  grafikai kai grandinėje vyrauja reaktyvieji elementai (šiuo atveju induktyvumas)

Pagal 10 paveikslo duomenys pastebima, kad srovė ir įtampa kerta x ašį skirtinguose taškuose, vadinasi jų fazės nesutampa ir atsiranda skirtumas. Šis skirtumas parodo, kad visa galia nėra panaudojama vien tik naudingam darbui atlikti, dalis jos grįžta atgal į grandinę ir ši grįžtanti į grandinę galia vadinama reaktyviaja galia ( $Q$ ). Todėl tikslingiau naudoti pilnutinės galios sąvoka, kuri apibūdina ryšį tarp aktyviosios ir reaktyviosios galios. Šis ryšys yra atvaizduojamas galios trikampyje, kuris pavaizduotas 11 paveiksle.



**11 pav.** Galių trikampis

Analizuojant 11 paveikslą matoma, kad galios trikampis yra statusis, todėl galima taikyti Pitagoro teoremą. Tokiu atveju statiniai yra aktyvioji galia ir reaktyvioji galia, o įžambinė yra pilnutinė galia, kurios matematinė formulė (2) pateikiama žemiau [25].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

Čia  $S$  – pilnutinė galia, VA (voltamperai);

$P$  – aktyvioji galia, W (vatai);

$Q$  – reaktyvioji galia, VAr (reaktyvieji voltamperai).

Tuomet aktyviosios galios (3) ir reaktyviosios galios (4) yra išreiškiamos žemiau.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

Elektrotechnikoje daugiau yra žinomas  $\cos \varphi$  dydis, kurs turi atskirą pavadinimą – galios faktorius. Jis parodo kokią dalį pilnutinės galios siekia aktyvioji, naudingoji, galia. Siekiamybė šį koeficientą visada palaikyti 1 arba kiek įmanoma arčiau 1 [42].

Grįžtant prie reaktyviosios galios, tai ją apibūdinti galima kaip galios rūšį, kuri neatlieka realaus darbo, tačiau yra būtina tinkamam elektros sistemų funkcionavimui, kaip įtampos ir srovės palaikymas. Kadangi aktyvioji galia dalyvauja energijų mainuose (pavyzdžiui elektros energija virsta mechanine energija), tai reaktyvioji galia cirkuliuoja grandinėje tarp šaltinio bei apkrovos, tad pasiekus apkrovą neišsisklaido. Vietoj to, ji sukuria bei palaiko reaktyviųjų elementų (induktoriai ir kondensatoriai) magnetinius ir elektrinius laukus. Fizikinis reaktyviosios galios pagrindimas yra tas, kad kai į induktorių patiekama srovė arba kondensatorių patiekama įtampa, energija atitinkamai kaupiama magnetiniame arba elektriniame lauke, o vėliau, pasikeitus įtampos ar srovės poliškumui, išleidžiama atgal į grandinę.

Kalbant apie saulės elektrinių inverterius, tai visi paskirstyti generatoriai, prijungti prie elektros tinklo per galios keitiklius, įprastai gali tiekti reaktyviają galią [6]. Galima sukurti valdymo sistemą ir suprogramuoti saulės elektrinių keitiklius statinės reaktyviosios galios kompensavimui, naudojant keturias skirtingas valdymo strategijas:

- Fiksuotas  $Q$ ;
- Fiksuotas  $\cos \varphi$ ;
- $\cos \varphi(P)$  ir  $\cos \varphi(U)$ ;
- $Q(U)$ .

Visų valdymo strategijų atveju pirmenybė teikiama MPPT (angl. – „*Maximum Power Point Tracking*“), inverterio mechanizmas, kuris išgauna didžiausią galią iš saulės modulio, veikimui, o tai reiškia, kad jei yra intensyvi saulės apšvieta (tarkime, nuo  $1000 \text{ W/m}^2$  iki  $800 \text{ W/m}^2$ ) ir tinklo įtampa neviršija leistinų ribų, tada visa saulės elektrinės galia generuojama į tinklą yra aktyviosios galios pavidalu [7]. Tačiau, esant prastai situacijai tinkle (per aukštos įtampos) skirstomojo tinklo

operatorius gali pareikalauti įjungti vieną iš aukščiau nurodytų reaktyviosios galios valdymo funkcijų, kad būtų pagerintos įtampos tinkle. Toliau bus aptariamose keturios valdymo strategijos.

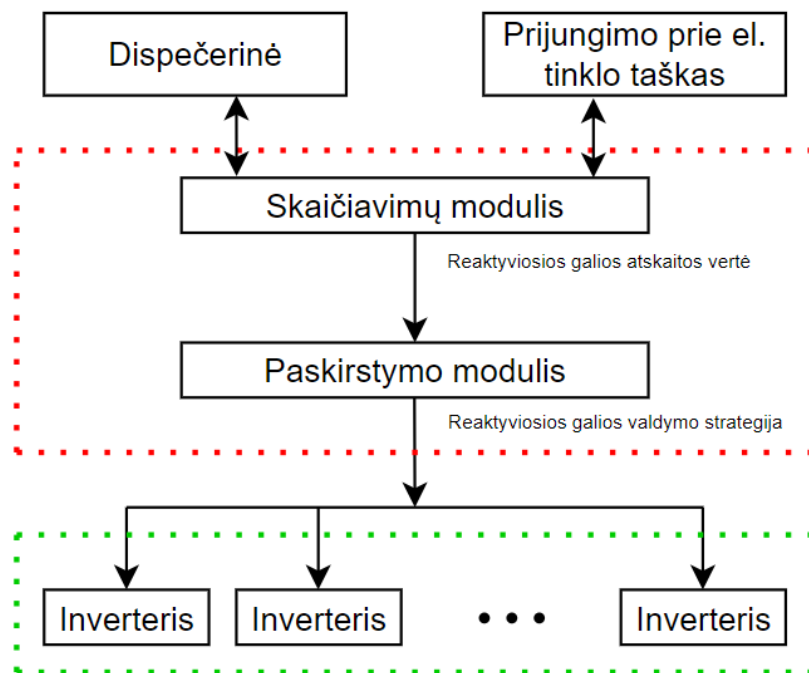
**Fiksuotas Q.** Kai inverteris suprogramuotas veikti fiksuotu reaktyviosios galios (Q) metodu, nepriklausomai nuo saulės modulių generuojamos galios, inverteris tiekis arba sugers fiksuotą nustatytos reaktyviosios galios kiekį, kuris yra apribotas tik inverterio maksimalios pilnutinės galios kiekiu. Reaktyviosios galios vertę nustato elektros tinklo operatorius, atsižvelgdamas į apkrovos prognozavimą ir apkrovų planavimą kas valandą.

**Fiksuotas  $\cos\phi$ .** Saulės elektrinių inverteris gali būti užprogramuotas veikti fiksuotu galios koeficientu. Šiuo režimu keitiklis keičia reaktyviąją išėjimo galią, kad išlaikytų pastovų vartotojo nustatytą galios koeficientą. Sugeneruota ar suvartota reaktyvioji galia yra proporcinga aktyviajai galiai. Galios koeficiento vertę nustato elektros tinklo operatorius.

**$\cos\phi(P)$  ir  $\cos\phi(U)$ .** Šiuose veikimo režimuose inverteris keičia savo galios koeficientą pagal generuojamos aktyviosios galios vertę arba el. tinklo įtampą. Šias kreives turi pateikti el. tinklų operatorius. Tikslas yra keisti galios koeficientą, kai aktyvioji galia arba el. tinklo įtampa pasiekia tam tikras, iš anksto nustatytas.

**Q(U).** Šis metodas taip pat vadinamas Volt-VAR funkcija, kurios metu inverteris pateikia reaktyviosios galios kiekį kaip įtampos funkciją prijungimo taške pagal inverteryje nustatytus kreivės taškus. Pagal šią kreivę keitiklis generuos arba vartos reaktyviąją galią, kai elektros tinklo įtampos atitiks kreivėje apibrėžtą veikimo diapazoną. Kreivės parametrus pateikia el. tinklų operatorius.

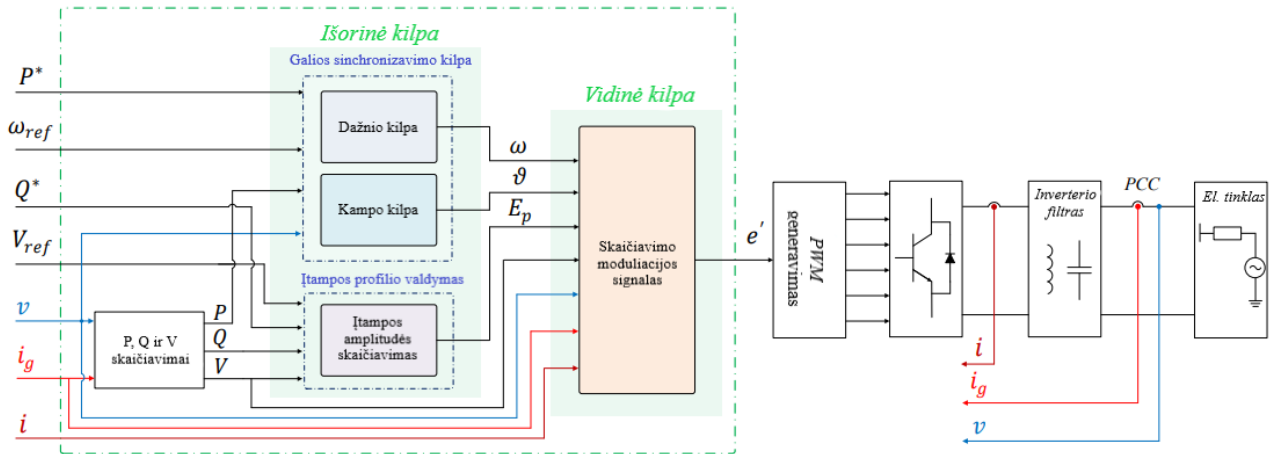
Kalbant apie inverterio funkcionalumą reaktyviosios galios valdymo metu, tai šiuo etapu didžiausią darbą atlieka automatinis įtampos valdymo modulis (angl. „*automatic voltage control (AVC)*“), kuris gali koordinuotai naudoti skirtingas reaktyviosios galios valdymo funkcijas norimam rezultatui pasiekti [17]. Principinė AVC sistema susideda iš skaičiavimo modulio ir paskirstymo modulio, kurių schema pateikiama 12 paveiksle [12].



12 pav. Principinė AVC sistemos duomenų srautų schema



Skaičiavimų modulis apskaičiuoja reikalingą reaktyviosios galios poreikį pagal prijungimo taške su el. tinklu nuskaitytas elektrinių dydžių (pvz. įtampa) vertes bei atsižvelgdamas į saulės elektrinės veikimo apribojimus. Be to, skaičiavimų modulis gali tiesiogiai gauti reaktyviosios galios valdymo nurodymus, išduotus el. tinklą valdančios ir prižiūrinčios dispečerinės. Paskirstymo modulis, gavęs suskaičiuotą reikalingą reaktyviosios galios kiekį, suformuoja instrukcijas inverteriui (-iams) pagal nustatytą reaktyviosios galios valdymo strategiją. Struktūrinis inverterio valdymo sistemos išsidėstymas pateikiamas 13 paveiksle [23].



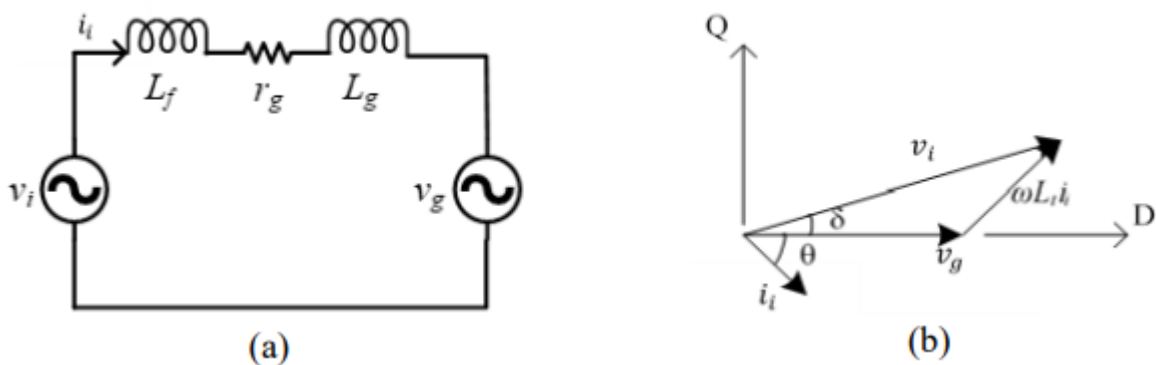
13 pav. Apibendrinta inverterio valdymo struktūra

13 pav. parodyta apibendrinta inverterio valdymo struktūra. Išmatuotos inverterio išėjime ir susijungimo su el. tinklu taške tekančios srovės ( $i$ ,  $i_g$ ), taip pat prijungimo taške su el. tinklu esanti įtampa  $v$ , panaudojamos kaip valdymo modulių įvestys. Kitos valdymo įvestys yra inverterio nominalūs dydžiai, tokie kaip aktyvioji galia  $P^*$ , reaktyvioji galia  $Q^*$ , kampinis dažnis  $\omega_{ref}$  ir įtampa  $V_{ref}$ . 13 paveiksle nurodytos dvi valdymo kilpos: išorinė valdymo kilpa, apskaičiuojanti fazės skirtumą tarp šaltinio įtampos ir tinklo įtampos kampą  $\delta$ , kampinį dažnį  $\omega$ , šaltinio vidinės įtampos amplitudę  $E_p$  ir vidinė valdymo kilpa, kuri apima visus tolesnius valdymo veiksmus, skirtus sukurti tinkamą moduliacijos signalą  $e'$ , reikalingą impulso pločio moduliacijos (angl. „pulse width modulation (PWM)“) vertei gauti. Supaprastinus, inverteris reaktyviają ir aktyviają galią gali valdyti pagal šias (5) ir (6) formules [20]:

$$P = \frac{V_i V_g}{2X_t} \sin \delta, \quad (5)$$

$$Q = \frac{V_g(V_i \cos \delta - V_g)}{2X_t}. \quad (6)$$

Principinė inverterio atstojamoji schema ir fazorių diagrama, skirta (5) ir (6) formulėms paaiškinti, pavaizduota 14 paveiksle

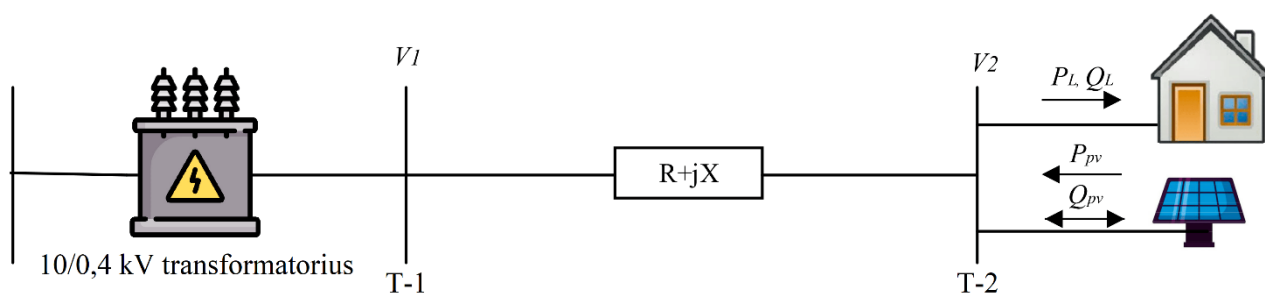


**14 pav.** Prie tinklo prijungto inverterio vektorinio vaizdavimo modelis: (a) ekvivalentinė keitiklio grandinė ir (b) vektorinė diagrama

Iš pateiktų (5) ir (6) formulių ir 14b paveikslo pastebima, kad inverterio ir tinklo įtampų fazių skirtumo kampas ( $\delta$ ) gali būti naudojamas aktyviajai galiai ( $P$ ) ir reaktyviajai galiai ( $Q$ ) valdyti. Taip pat, inverteris gali atiduoti arba vartoti reaktyviają galią priklausomai nuo įtampų  $V_i$  ir  $V_g$  amplitudinių verčių. Kai  $V_i$  yra didesnė už  $V_g$ , reiškia, kad inverteris tiekia reaktyviają galią į tinklą, jei  $V_i$  mažesnis už  $V_g$ , reiškia, kad inverteris vartoja reaktyviają galią iš tinklo [1].

#### 1.2.4. Reaktyviosios galios įtaka įtampai

Siekiant parodyti kaip naudojant saulės elektrinių inverterius reaktyviosios galios kompensavimas įtakoja įtampą skirstomojo tinklo linijoje, yra sudaroma supaprastinta tinklo schema, kuri pavaizduota 15 paveiksle. Sakykime, šioje pavyzdinėje linijoje yra vienas elektros energijos vartotojas su  $P_L$  ir  $Q_L$  vartojimo apkrova, yra prijungtas nuo 0,4 kV skirstomojo tinklo linijos, kurio varža yra  $R+jX$ . Be to, yra tame pačiame prijungimo taške yra įsirengęs  $P_{pv}$  galios elektrinė su galimybe priimti arba atiduoti į tinklą  $Q_{pv}$  reaktyviosios galios kiekį [3].



**15 pav.** Pavyzdinė tinklo schema

Darant prielaidą, kad saulės elektrinė prijungta prie el. tinklo, įtampos nuokrypį linijoje galima aprašyti taip:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = I^* \times (R + jX). \quad (7)$$

Čia  $V_1$  – linijos taško T-1 įtampa;

$V_2$  – linijos taško T-2 įtampa;

$I^*$  - linija tekančios srovė;

R – linijos aktyvioji varža;

X – linijos reaktyvioji varža.

Linijos srovę išsireiškiame:

$$I^* = \left( \frac{(P_L - P_{pv}) + j(Q_L - Q_{pv})}{V_2} \right)^* \quad (8)$$

(7) lygtyje pakeitus  $I^*$  į (8) lygtį:

$$\Delta V = \frac{((P_L - P_{pv}) + j(Q_L - Q_{pv}))^*}{V_2} \times (R + jX), \quad (9)$$

$$\Delta V = \frac{(P_L - P_{pv})R + j(Q_L - Q_{pv})X}{V_2} + \frac{(P_L - P_{pv})R - j(Q_L - Q_{pv})X}{V_2}. \quad (10)$$

Atsižvelgiant į realiąją ir menamąją dalis,  $\Delta V$  galima išreikšti:

$$\Delta V = \Delta V_{real} + j\Delta V_{img}, \quad (11)$$

Kur:

$$\Delta V_{real} = \frac{(P_L - P_{pv})R + j(Q_L - Q_{pv})X}{V_2}; \quad \Delta V_{img} = \frac{(P_L - P_{pv})R - j(Q_L - Q_{pv})X}{V_2}. \quad (12)$$

Taigi  $V_1$  dydį galima apskaičiuoti taip:

$$V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_{real})^2 + \Delta V_{img}^2}. \quad (14)$$

Kadangi žemos įtampos tinklų reaktyviosios ir aktyviosios varžų santykis ( $X/R$ ) yra sąlyginai mažas ( $\Delta V_{img} \approx 0$ ),  $V_2$  galima supaprastinti:

$$V_2 = V_1 - \Delta V_{real}. \quad (15)$$

Be to,  $\Delta V_{real}$  galima apytiksliai apskaičiuoti  $V_2$  pakeičiant  $V_1$ :

$$\Delta V_{real} \approx \frac{(P_L - P_{pv})R + (Q_L - Q_{pv})X}{V_1}. \quad (16)$$

Tuomet prijungimo taško įtampą  $V_2$  apytiksliai galima apskaičiuoti:

$$V_2 \approx V_1 - \frac{(P_L - P_{pv})R + (Q_L - Q_{pv})X}{V_1}. \quad (17)$$

Kai vartojimas didesnis nei generavimas, įtampa krenta palei el. liniją, kaip parodyta (17) lygtyje. Tačiau, kai saulės elektrinės generavimas viršija vartojimą, galia teka į pastotę, todėl prijungimo taške  $V_2$  pakyla įtampa.

Ši problema paaštrėja, kai įtampa pakyla virš įstatymų nustatytų ribų, didėjant saulės elektrinės generacijos lygiui ( $P_{pv} \gg P_L$ ). Pagal (17) lygtį saulės elektrinės inverterio tiekiamą arba vartojama reaktyvioji galia turi reikšmingą įtaką prijungimo taško įtampai. Taigi inverterio reaktyviosios galios valdymas galėtų būti panaudotas prijungimo taško įtampai palaikyti leistinose ribose. Jei prijungimo taško įtampa nukrenta žemiau apatinės įtampos ribos, inverteris gali tiekti į tinklą reaktyviają galia,

kad padidintų įtampą. Tačiau, jei prijungimo taško įtampa viršija viršutinę įtampos ribą, inverteris gali pasiimti iš tinklo reaktyviają galią, kad sumažintų įtampą.

## 2. Tyrimo metodika

### 2.1. Tyrimo objektas ir tikslai

Siekiant pasiekti valstybės iškeltus tikslus, būtina spartinti elektrinių iš atsinaujinančių energijos išteklių plėtrą visoje Lietuvoje. Plėtros augimo tempo palaikymui reikia tobulinti teisinį reguliavimą, finansinės paramos schemas, didinti piliečių sąmoningumą švarios energetikos srityje ar tobulinti techninę infrastruktūrą. Tačiau didžiausią įtaką lemia ne biurokratiniai jėgainių prijungimo prie elektros tinklų aspektai ar finansinės paramos trūkumas, o techniniai iššūkiai, kurie su kiekviena prijungta elektrine darosi vis didesni.

Tyrimas bus atliekamas pasinaudojant elektros tinklo analizės, planavimo, optimizavimo ir modeliavimo programiniu įrankiu „NEPLAN“. Esminis principas yra susimodeliuoti elektros tinklą su saulės elektrinėmis, atlikti skaičiavimus pakaitomis taikant skirtingas reaktyviosios galios valdymo funkcijas, pasižymėti gautus rezultatus ir nustatyti labiausiai linijos pralaidumus pagerinančią funkciją. Modeliavimui bus naudojami realiai egzistuojančios linijos duomenys, tai yra, laidininkų elektrotechniniai duomenys bei transformatoriai, jų tipai ir kiti svarbiausi reikalingi duomenys. Kadangi ne visuose linijos taškuose yra prijungtos saulės elektrinės, modelis sudaromas tik iš tų linijos taškų ir atkarpų, kuriuose yra prijungtų arba planuojamų prijungti saulės elektrinių. Skaičiavimams bus panaudojami saulės elektrinių leistinų generuoti galių duomenys bei, pritaikius galios koeficientą  $\cos\varphi=0,9$ , suskaičiuojama kiekvienos saulės elektrinės inverterio pilnutinė galia pritaikius (3) formulę. Kadangi reaktyvioji galia inverteryje valdoma pagal iš anksto nustatytus duomenis, išanalizavus šiai dienai egzistuojančias reaktyviosios galios valdymo taisykles atsinaujinančių išteklių inverteriams, bus sudaromos pasirinktų funkcijų valdymo kreivės. Analizė apims vienos paros laikotarpį, kuris kiek įmanoma labiau sukuria palankiausias sąlygas saulės elektrinių veiklai, t. y. elektros energijos generavimui. Bus sudaromas saulės elektrinių paros gamybos grafikas, kuris koeficientų pagalba nustato kokia saulės elektrinės generuojama momentinė galia yra tam tikru paros laiko momentu. Turint tokį grafiką, galima nustatyti kiek energijos generavo kiekviena saulės elektrinė paros laikotarpyje. Prieš atliekant skaičiavimus yra sudaromi 5 režimai: du įprastiniai režimai, skirti parodyti situaciją prieš leistinos įtampos ribų ribojimų taikymą ir po ribojimų taikymo, bei 3 reaktyviosios galios valdymo režimai siekiant juos tarpusavyje palyginti. Sekantis žingsnis yra skaičiavimai, kurie atliekami pasitelkiant galios srautų (angl. „Load flow“) metodą. Atlikus skaičiavimus, esminiai duomenys išsaugomi ir pateikiami rezultatų skiltyje.

#### **Tyrimo eigos planas:**

1. Duomenų rinkimas:
  - a. Atrenkama 10 kV linija, kuri pasižymi dideliu kiekiu prijungtų ir planuojamų prijungti saulės elektrinių bei surenkami visi reikalingi duomenys: principinė schema, laidininkai, transformatoriai, saulės elektrinių duomenys;
  - b. Pagal potencialios saulės energijos duomenų svetainę „GLOBAL SOLAR ATLAS“, nustatomas intensyviausias (saulės apšvietos atveju) metuose mėnesis ir pagal Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos istorinius duomenis parenkama labiausiai saulėta diena;

- c. Nustačius datą, toliau nuskaitomi tą dieną prijungtų saulės elektrinių išmaniųjų skaitiklių duomenys (momentinės galios „P-“), kurie toliau bus panaudojami gamybos paros profilio sudarymui;
- d. Analizuojami teisės aktai, kuriuose reglamentuotos reaktyviosios galios valdymo funkcijų veikimo charakteristikos ir analogiškai sudaromos tyrimui naudojamos funkcijų valdymo kreivės.

## 2. Elektros tinklo modeliavimas:

- a. Pagal pasirinktą liniją, sudaromas detalus linijos modelis programinėje įrangoje „NEPLAN“, kurį sudaro 10 ir 0,4 kV linijos, galios transformatoriai;
- b. Prie sudaryto modelio pridedamos prijungtos ir planuojamos prijungti saulės elektrinės, jų inverteriuose nustatomos leistinos generuoti galios, įtampos vertė, prie kurios inverteris atsijungia nuo tinklo, nominali inverterio galia bei įrašomi reaktyviosios galios valdymo funkcijų kreivių duomenys su gamybos profilio duomenimis;

## 3. Skaičiavimai:

- a. Skaičiavimai atliekami pagal 5 scenarijus: įprastinis režimas be įtampos ribojimų, įprastinis režimas su įtampos ribojimais, režimas  $Q(U)$ , režimas  $\cos\phi(U)$  ir režimas  $\cos\phi(P)$ ;
- b. Taikant įprastinius režimus, reaktyviosios galios valdymo funkcijos nėra nustatomos, nes šių režimų tikslas pamatyti realią situaciją ir gautus duomenis panaudoti palyginimams su reaktyviosios galios valdymo funkcijų duomenimis;
- c. Sekantys režimai yra reaktyviosios galios valdymo funkcijų taikymo režimai, kurios panaudojamos viena po kitos, tačiau vienu metu visos saulės elektrinės naudoja tą pačią funkciją.

## 4. Rezultatai:

- a. Po kiekvieno režimo skaičiavimų duomenys yra išsaugojami;
- b. Gauti duomenys yra panaudojami palyginimui tarpusavyje, siekiant nustatyti kuri funkcija padėjo daugiausiai padidinti tinklo pralaidumus.

**Tyrimo objektas** – 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP (ir visų susijusių 0,4 kV linijų) įtampos, apkrovos, galių srantai, el. energijos generacija ir suvartota reaktyvioji el. energija prieš panaudojant keitiklių funkcijas ir po panaudojimo.

### 2.2. Naudojama programinė įranga

Minėtiems tyrimo tikslams pasiekti naudojama „NEPLAN“ programinė įranga, kuri skirta analizuoti, planuoti, optimizuoti ir modeliuoti elektros tinklus. Programinės įrangos privalumas – itin patogi grafinė sąsaja su plačiomis tinklo elementų, apsaugos įtaisų ir valdymo grandinių bibliotekomis, leidžiančiomis vartotojui efektyviai atlikti tyrimo atvejus. Programinė įranga turi modulinę koncepciją, pagrįsta tarptautiniais standartais, tokiais kaip IEC, ANSI, IEEE ir kt. ir yra pritaikoma

Europos bei JAV rinkai. Programa pritaikoma perdavimo, skirstymo, gamybos ar pramonės tinkluose, kuriuose galima planuoti elektros tinklus ir investicijas, įvertinti perduodamos energijos kokybę optimizuojant kelis periodus, nustatyti ir įvertinti apsaugas ir t. t. [33].

Galimi pagrindinių atliekamų analizių pasirinkimai:

1. Galios srautų (angl. „*Load flow*“);
2. Trumpo jungimo;
3. Galios srauto laike;
4. Variklio paleidimo;
5. Kabelių parinkimo.

Pasirinktam tyrimui bus naudojama galios srautų analizė, kuri naudojama energijos sistemos pastovios būsenos elgsenai analizuoti. Ji nustato įtampas, sroves ir galios srautus visame tinkle normaliomis darbo sąlygomis. Sprendžiant galios srauto lygčių rinkinį, galios srauto analizė atskleidžia svarbią informaciją apie aktyviosios ir reaktyviosios galios paskirstymą, linijose susidarantį nuostolius, įtampos lygius ir fazių kampus įvairiose susimodeliuotos linijos taškuose [29].

Galios srautų analizė galima išreikšti matematiškai kaip galios srauto uždavinį, kurio esmė yra išspręsti netiesinių algebrinių lygčių sistemą. Jo sprendimas paprastai negali išvengti tam tikro iteracijų proceso. Taigi, patikima konvergencija tampa pagrindiniu kriterijumi galios srauto analizės skaičiavimo metodui. Tad pagrindiniai „NEPLAN“ programoje naudojami skaičiavimo metodai yra:

1. Newton–Raphson;
2. Srovių iteracijos;
3. Įtampos kritimo.

Galios srautų analizei pasirenkamas Newton–Raphson skaičiavimo metodas, dėl savo gerų konvergencijos charakteristikų ir sprendimo algoritmo patikimumo, palyginti su kitais metodais.

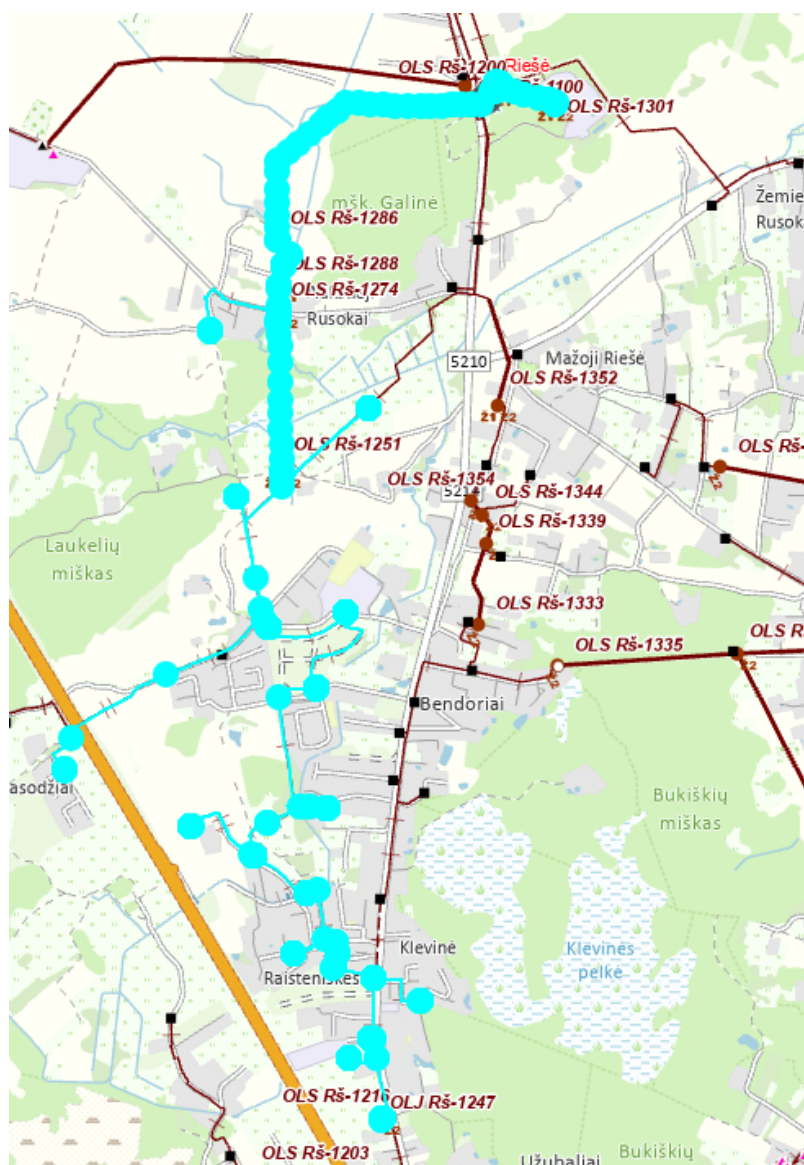
### **2.3. Modelio sudarymas**

Šis tyrimas atliekamas atsižvelgiant į šiuos aspektus:

1. Skaičiavimai bus atliekami vienos paros periode;
2. Elektrinių generacijos profilis sudaromas vienai parai, kuri atspindi didžiausią įmanomą generaciją pagal meteorologines sąlygas ir pasyvius elektros vartotojų vartojimo įpročius;
3. Elektrinių generacija yra apibrėžta gamybos paros profiliu, kur kiekvienu laiko momentu elektrinės generacija lygi maksimaliai leistinos generuoti galios ir generacijos koeficiento pagal gamybos profilio grafiką sandaugai;

4. Pasirinktos linijos modelio sudarymui naudojamos tiek esamos (prijungtos) elektrinės, tiek planuojamos prijungti (rezervuota galia) elektrinės. Kartu įvertinami ir numatyti plėtros darbai, kurie skirti rezervuotų generacijos galingumų prijungimui;
5. Vertinant funkcijų įtaką, visos elektrinės naudoja vieną funkciją vienu metu;
6. Funkcijų charakteristikos visoms elektrinėms yra vienodos;
7. Saulės elektrinių keitiklių galingumas ( $S_{MAX}$ ) nustatomas kiekvienai elektrinei atskirai pagal jos leistiną generuoti galią ir privalomas keitiklio veikimo ribas pagal 22 paveiksle pavaizduotą P-Q/ $P_{MAX}$  charakteristiką.

Tyrimui įgyvendinti pasirinkta Vilniaus rajone esanti 10 kV mišraus tipo (oro ir kabelių linija) linija L-1200 iš Riešės 110/10 kV transformatorių pastotės (toliau – TP) su visomis 0,4 kV tinklo linijomis, kuriose yra prijungtų generacijos galingumų. 10 kV linijos trasa pavaizduota 16 paveiksle.



**16 pav.** 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP trasa („ESO“ duomenys)

Pagal turimus „ESO“ duomenis, viso yra prijungta 189 saulės elektrinės, kurių suminė leistina generuoti į tinklą galia šiai linijai siekia 2567,29 kW. Detalus elektrinių sąrašas pateiktas 2 priede.



Nusistatoma pradinė įtampa linijai L-1200 iš Riešės TP, kuri yra 10,4 kV. Ši įtampa gauta pasinaudojant „ESO“ dispečerinės palaikomų įtampų transformatorių pastočių 10 kV skirstyklose duomenimis.

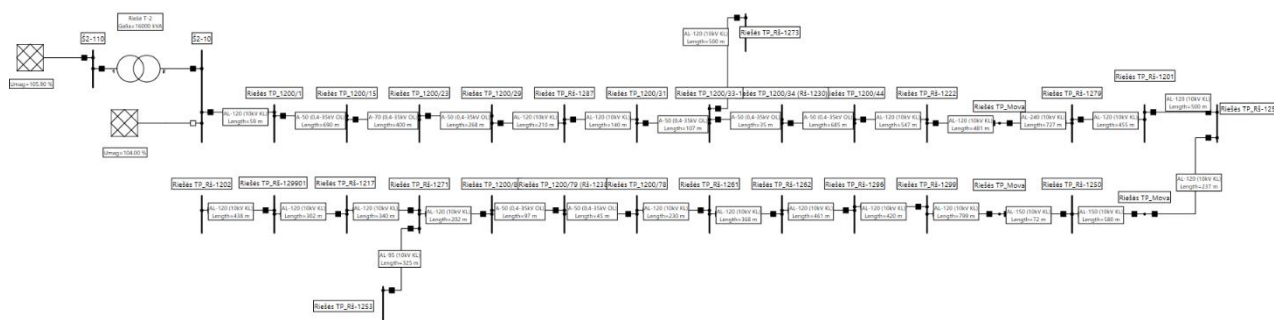
Linijos ilgis nuo linijos pradžios iki tolimiausios saulės elektrinės yra 11,3 km, naudojamų (visoje 10 kV linijoje) laidininkų sąrašas, pagal esamus „ESO“ duomenis, pateiktas 2 lentelėje.

**2 lentelė.** 10 kV linijos laidininkų duomenys

Markė	Tipas	Aktyvioji varža, Ω/km	Reaktyvioji varža, Ω/km	Leistina srovė, A	Bendras ilgis, m
Al-240	Kabelių linija	0,125	0,09	318,75*	727
Al-150	Kabelių linija	0,206	0,097	238*	652
Al-120	Kabelių linija	0,253	0,1	216,75*	6689
Al-95	Kabelių linija	0,32	0,103	187*	325
A-70	Oro linija	0,43	0,341	265	400
A-50	Oro linija	0,59	0,355	215	1927

\* – leistina laidininko, kuris paklotas vamzdyje, srovė

Sudaromas 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP modelis programoje „NEPLAN“, kuris pateiktas 17 paveiksle.



**17 pav.** 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP modelis

10 kV tinklą su 0,4 kV tinklu jungia 16 transformatorių, kurių parametrai ir prijungtų elektrinių skaičius, pagal esamus „ESO“ duomenis, pridėtas 3 lentelėje.

**3 lentelė.** 10/0,4 kV transformatorių duomenys

Eil. Nr.	Transformatorinė	Transformatoriaus galia, kVA	Įtampa, kV	Apvijų jungimo grupė	Nustatyta atšakos padėtis	Prijungta saulės elektrinių
1	RŠ-1201	160,0	10/0,4	Yyn0	2	4
2	RŠ-1202	400,0	10/0,4	Yyn0	3	12
3	RŠ-1217	630,0	10/0,4	Yyn0	3	2
4	RŠ-1222	160,0	10/0,42	Yyn0	1	3
5	RŠ-1230	160,0	10/0,4	Dyn11	3	15
6	RŠ-1238	400,0	10/0,4	Yyn0	3	7

Eil. Nr.	Transformatorinė	Transformatoriaus galia, kVA	Įtampa, kV	Apvijų jungimo grupė	Nustatyta atšakos padėtis	Prijungta saulės elektrinių
7	Rš-1250	250,0	10/0,4	Yyn0	3	5
8	Rš-1252	400,0	10/0,42	Yyn0	1	20
9	Rš-1253	160,0	10/0,4	Yyn0	2	8
10	Rš-1261	250,0	10/0,42	Yyn0	1	21
11	Rš-1262	400,0	10/0,42	Yyn0	1	10
12	Rš-1271	630,0	10/0,4	Yyn0	3	49
13	Rš-1273	160,0	10/0,4	Dyn11	3	1
14	Rš-1279	400,0	10/0,42	Yyn0	1	19
15	Rš-1296	250,0	10/0,4	Dyn11	3	12
16	Rš-1299	800,0	10/0,4	Dyn11	3	1

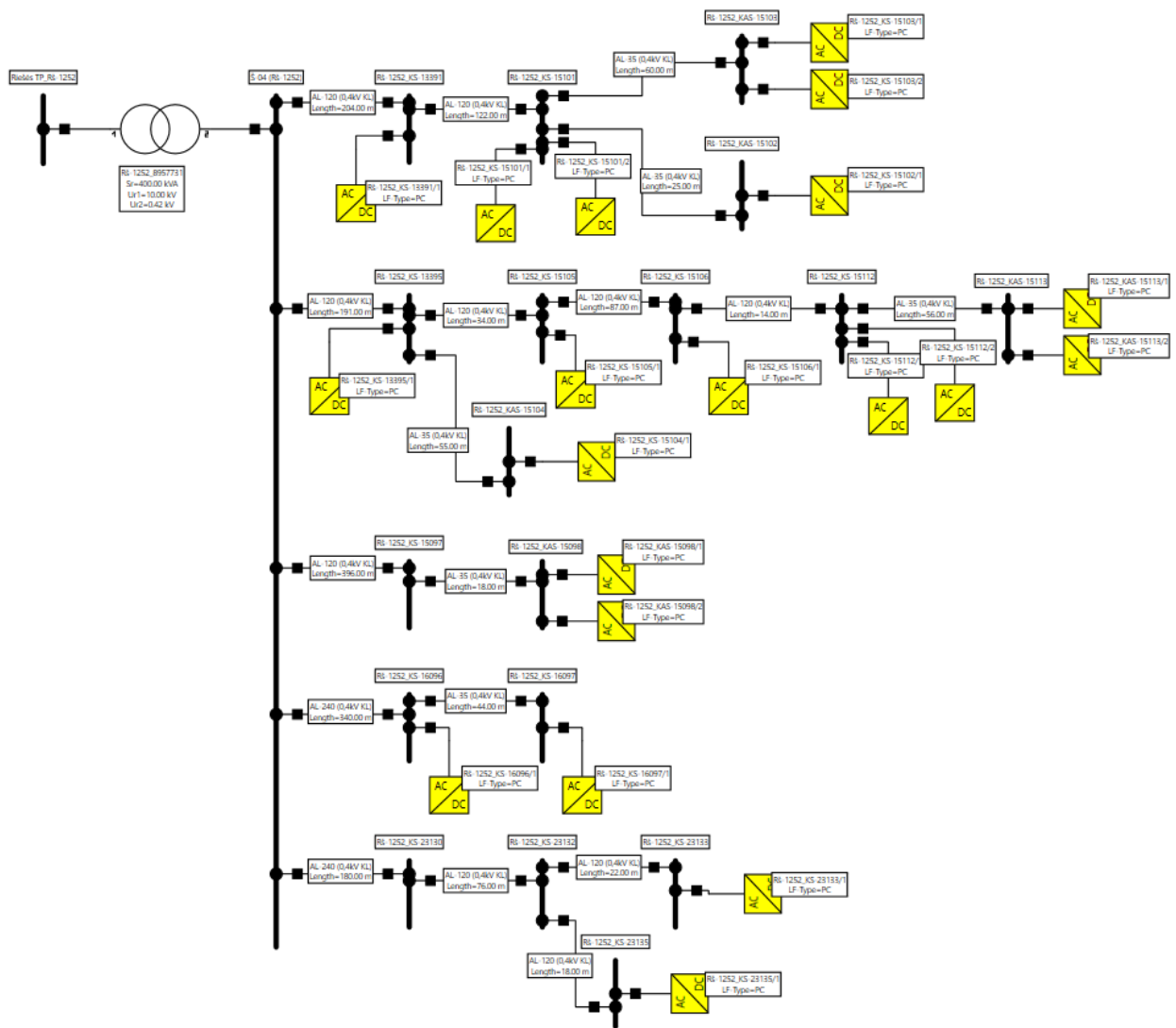
Kadangi, 0,4 kV tinklas yra labai platus, tad nebūtų tikslinga pateikti visų linijų duomenis. Todėl, analogiškai 2 lentelei, pateikiamas visų panaudotų laidininkų sąrašas bei jų parametrai, pagal esamus „ESO“ duomenis. Duomenys pateikiami 4 lentelėje.

**4 lentelė.** 0,4 kV linijų laidininkų duomenys

Markė	Tipas	Aktyvioji varža, $\Omega/\text{km}$	Reaktyvioji varža, $\Omega/\text{km}$	Leistina srovė, A	Bendras ilgis, m
Al-240	Kabelių linija	0,125	0,0745	319*	5170
Al-185	Kabelių linija	0,164	0,075	281*	245
Al-150	Kabelių linija	0,206	0,0758	238*	714
Al-120	Kabelių linija	0,253	0,0755	217*	7188
A-35	Oro linija	0,85	0,366	170	75
AMKA-120	Oro kabelių linija	0,253	0,09	250	298
AMKA-35	Oro kabelių linija	0,868	0,107	115	147
AMKA-25	Oro kabelių linija	1,2	0,107	90	130

\* – leistina laidininko, kuris paklotas vamzdyje, srovė

Sudaromi 0,4 kV linijų, kuriose yra saulės elektrinės, modeliai programoje „NEPLAN“, bei vienas iš 16 modelių pateikiamas 18 paveiksle.



18 pav. Pavyzdinis 0,4 kV tinklo modelis „NEPLAN“ programoje iš transformatorinės Rš-1252

## 2.4. Gamybos profilio sudarymas

Gamybos profilio sudarymui bus pasitelkiami esamų saulės elektrinių išmaniųjų elektros energijos apskaitos prietaisų duomenimis. Pradžiai yra nusistatoma data, pagal kurią duomenys ir bus imami iš išmaniųjų skaitiklių „ESO“ duomenų bazės. Data nusistatoma pasinaudojant internetinės svetainės „GLOBAL SOLAR ATLAS“, kurios paskirtis yra suteikti greitą ir lengvą prieigą prie saulės energijos potencialo duomenų visame pasaulyje. Pasirinkama vietovė, kurioje yra linija L-1200 iš Riešės TP ir gaunami vidutiniai valandiniai saulės elektrinių generacijos duomenys (Wh) kiekvienam mėnesiui, duomenys pateikiami 19 paveiksle.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5						4						
5 - 6					20	29	19	3				
6 - 7				35	73	82	64	42	6			
7 - 8			38	138	192	193	164	142	93	22		
8 - 9		40	179	280	325	320	288	273	210	129	16	
9 - 10	78	168	302	410	438	433	404	396	324	219	93	47
10 - 11	153	245	395	493	516	504	480	471	403	279	133	107
11 - 12	177	272	427	522	539	529	513	502	421	288	134	118
12 - 13	172	281	433	511	520	515	496	487	413	294	142	123
13 - 14	164	274	425	478	486	486	469	458	393	285	130	108
14 - 15	124	246	379	418	423	424	418	403	330	220	93	71
15 - 16	60	162	272	323	336	341	338	321	242	136	33	9
16 - 17		68	162	214	243	254	251	222	146	35		
17 - 18			54	105	135	154	152	122	49			
18 - 19				20	47	62	62	34	2			
19 - 20					12	25	22	3				
20 - 21						2	1					
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	929	1,756	3,066	3,947	4,305	4,357	4,140	3,878	3,032	1,907	774	583

**19 pav.** Vidutinė generacija (Wh) valandomis pasirinktoje vietoje pamėnesiui

Iš 19 paveikslo pastebima, kad didžiausia vidutinė generacija yra birželio mėnesį ir siekia 4357 Wh per parą. Tokiu atveju birželio mėnėsis bus naudojamas tolimesniam datos nustatymui. Konkrečios dienos nustatymui bus pasirinkta diena, kuri buvo mažiausiai debesuota pradėdant ieškoti nuo pirmos mėnesio dienos ir sustojant radus debesuotumą lygų 0%. Tam tikslui pasitelkiama Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos istorinių duomenų bazė, kurioje pasirenkama artimiausia orų stebėjimo stotis (Vilniaus meteorologijos stotis) ir nustatoma, kad birželio 13 dieną debesuotumo nebuvo visiškai (duomenys pateikiami 20 paveiksle).

Stotis: Vilniaus AMS

Data: 11/06/2023

Rodyti



Vilniaus AMS, 2023-06-11										
Stebėjimų laikas (UTC)	Oro temp.	Junt. temp.	Vėjo greitis	Vėjo gūsis	Vėjo kryptis	Debesuotumas	Slėgis jūros lygyje	Santykinis oro drėgnis	Kritulių kiekis	Orų sąlygos
00:00	10.9 °C	10.9 °C	2.5 m/s	6.2 m/s	39°	0 %	1026.3 hPa	51 %	0 mm	giedra
01:00	10 °C	10 °C	2.6 m/s	5.9 m/s	31°	0 %	1026.4 hPa	55 %	0 mm	giedra
02:00	9.4 °C	9.4 °C	2.2 m/s	5.1 m/s	36°	0 %	1026.7 hPa	58 %	0 mm	giedra
03:00	9.4 °C	9.4 °C	2.5 m/s	5.8 m/s	36°	0 %	1027.1 hPa	59 %	0 mm	giedra
04:00	10.6 °C	10.6 °C	3 m/s	6.6 m/s	46°	0 %	1027.3 hPa	56 %	0 mm	giedra
05:00	12.4 °C	12.4 °C	3.7 m/s	7 m/s	49°	0 %	1027.3 hPa	51 %	0 mm	giedra
06:00	14.4 °C	14.4 °C	3.7 m/s	8.8 m/s	70°	0 %	1027.3 hPa	45 %	0 mm	giedra
07:00	16 °C	16 °C	4.3 m/s	10.2 m/s	65°	0 %	1027.5 hPa	39 %	0 mm	giedra
08:00	16.7 °C	16.7 °C	4.5 m/s	11.1 m/s	68°	0 %	1027.4 hPa	34 %	0 mm	giedra
09:00	18 °C	18 °C	3 m/s	11.1 m/s	73°	0 %	1027.1 hPa	31 %	0 mm	giedra
10:00	18.5 °C	18.5 °C	4.4 m/s	10.4 m/s	73°	0 %	1026.7 hPa	28 %	0 mm	giedra
11:00	19.2 °C	19.2 °C	4.1 m/s	11.5 m/s	73°	0 %	1026.2 hPa	26 %	0 mm	giedra
12:00	19.8 °C	19.8 °C	4.1 m/s	10 m/s	53°	0 %	1025.7 hPa	26 %	0 mm	giedra
13:00	20.5 °C	20.5 °C	3 m/s	8.7 m/s	64°	0 %	1025.2 hPa	25 %	0 mm	giedra
14:00	20.5 °C	20.5 °C	3.9 m/s	8.7 m/s	78°	0 %	1025.1 hPa	24 %	0 mm	giedra
15:00	20.5 °C	20.5 °C	2.8 m/s	9.1 m/s	80°	0 %	1025 hPa	24 %	0 mm	giedra
16:00	19.9 °C	19.9 °C	3 m/s	8 m/s	78°	0 %	1025 hPa	23 %	0 mm	giedra
17:00	19.1 °C	19.1 °C	2.8 m/s	7.3 m/s	72°	0 %	1025 hPa	24 %	0 mm	giedra
18:00	17.7 °C	17.7 °C	2.2 m/s	8.5 m/s	59°	0 %	1025.4 hPa	26 %	0 mm	giedra
19:00	16 °C	16 °C	1.3 m/s	5.1 m/s	62°	0 %	1025.7 hPa	30 %	0 mm	giedra
20:00	14.4 °C	14.4 °C	1.5 m/s	3.4 m/s	36°	0 %	1025.9 hPa	35 %	0 mm	giedra
21:00	12.8 °C	12.8 °C	1.4 m/s	3 m/s	27°	0 %	1026.2 hPa	41 %	0 mm	giedra
22:00	11.3 °C	11.3 °C	1.1 m/s	2.6 m/s	28°	0 %	1026.5 hPa	49 %	0 mm	giedra
23:00	8.9 °C	8.9 °C	1 m/s	2.1 m/s	10°	0 %	1026.4 hPa	61 %	0 mm	giedra

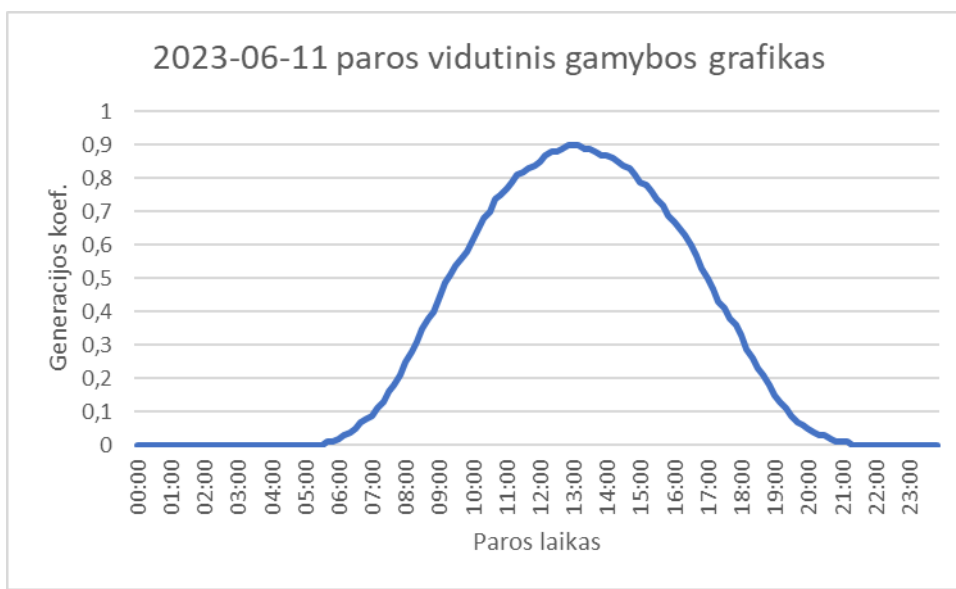
### 20 pav. Vilniaus AMS istoriniai duomenys

Tuomet pasirenkama data tolimesniam darbui yra 2023-06-13. Paros generacijos profilio sudarymui taikomi kriterijai:

- Elektrinių duomenys imami būtent iš linijos L-1200 iš Riešės TP, iki 2023-06-13 dienos prijungtų elektrinių;
- Imami atvirkštinės galios (iš elektrinės vidaus tinklo į „ESO“ tinklus) duomenys, kurių intervalas yra 10 min.;
- Vertinami tik tų elektrinių 2023-06-13 sugeneruotos energijos kas 10 min. duomenys, kurių generacijai neturėjo įtakos per didelis vartojimas ar elektrinės atsijungimas nuo tinklo, t. y. generacijos grafikas neturėjo trūkių ir buvo vientisa kreivė;

- Generacijos koeficientai yra nustatomi pasinaudojant gautos generacijos kiekį padalinant iš nustatytos leistinos generuoti galios.

Gavus kiekvienos elektrinės generacijos koeficientus kas 10 min, išvedama kiekvieno laikotarpio vidutinė generacijos koeficiento reikšmė (pvz. 10 val. elektrinės „A“ generacijos koef. Buvo 0,7, o elektrinės „B“ – 0,8, tai 10 val. vidutinis elektrinių generacijos koeficientas yra 0,75). Šios vidutinės reikšmės toliau bus taikomos kiekvienai elektrinei vienodai. Gauti vidutinių generacijos koef. verčių duomenys pateikiami 1 priede. Pagal 1 priedo duomenis sudaromas generacijos koeficientų grafikas, kuris ir yra gamybos grafikas (pavaizduotas 21 paveiksle)



21 pav. Paros gamybos grafikas

## 2.5. Reaktyviosios galios valdymo charakteristikos

Atsižvelgiant į sparčią atsinaujinančios energetikos plėtrą ir siekiant užtikrinti aiškų teisinį prijungimo prie elektros tinklo pagrindą 2016 m. balandžio 14 d. Europos Komisija priėmė oficialų reglamentą (ES) 2016/631 dėl tinklo kodekso, kuriame nustatomi generatorių prijungimo prie elektros energijos tinklo reikalavimai [38]. Lietuvoje jis buvo patvirtintas Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos 2023 m. gegužės 26 d. nutarimu „Dėl Bendrųjų techninių reikalavimų, nustatytų pagal 2016 m. balandžio 14 d. Europos komisijos reglamentą (ES) 2016/631 dėl tinklo kodekso, kuriame nustatomi generatorių prijungimo prie elektros energijos tinklo reikalavimai, patvirtinimo“ Nr. O3E-684 [43].

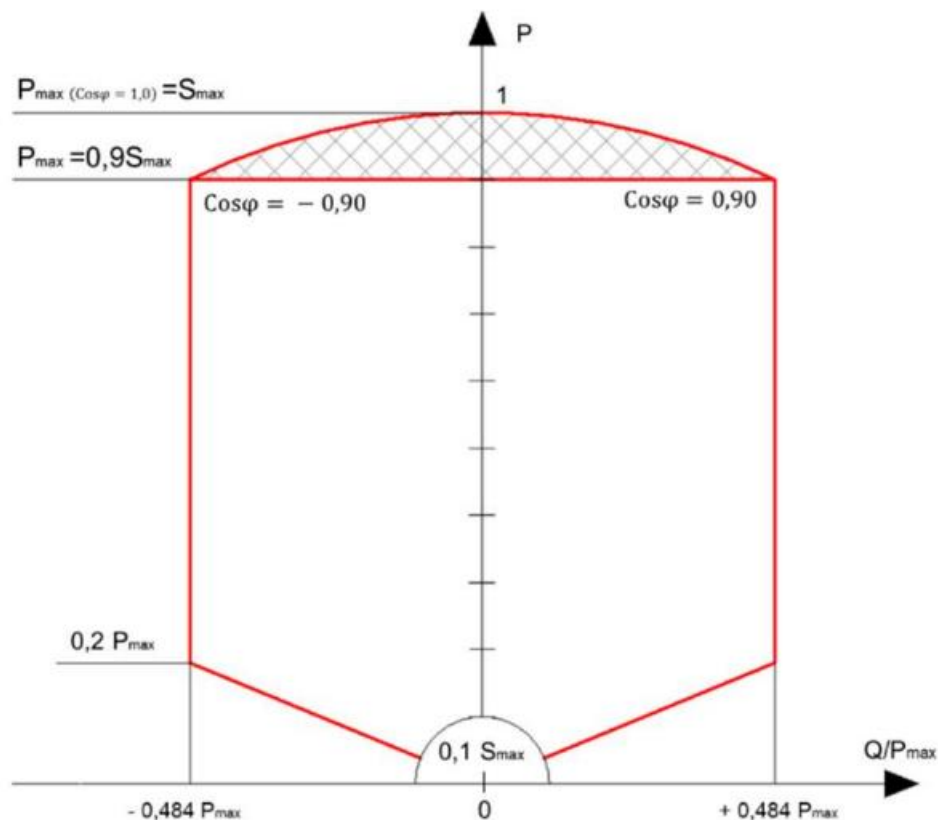
Elektrinės, kurios yra prijungiamos prie Lietuvos elektros tinklų yra skirstomos į 4 tipus pagal didžiausią elektrinės pajėgumą ( $P_{MAX}$ ):

1. A tipo – elektrinės, kurių didžiausias pajėgumas yra 0,8 – 249,99 kW ribose ir prijungimo taško įtampa mažesnė kaip 110 kV;
2. B tipo – elektrinės, kurių didžiausias pajėgumas yra 250 – 4999,99 kW ribose ir prijungimo taško įtampa mažesnė kaip 110 kV;
3. C tipo – elektrinės, kurių didžiausias pajėgumas yra 5000 – 14999,99 kW ribose ir prijungimo taško įtampa mažesnė kaip 110 kV;

4. D tipo – elektrinės, kurių didžiausias pajėgumas yra lygus arba didesnis už 15000 kW ir prijungimo taško įtampa lygi arba didesnė už 110 kV;

Apibendrinus, prie skirstomojo tinklo yra prijungiamos A, B ir C tipo elektrinės, o D tipo elektrinės jungiamos prie perdavimo tinklų. Kadangi atliekamame tyrime bus prijungiamos elektrinės, kurių  $P_{MAX}$  bus iki 250 kW (imtinai), todėl tolimesnis reikalavimų, skirtų įtampos valdymui, nagrinėjimas bus siejamas tik su A ir B tipo elektrinėmis.

Atsižvelgiant į Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos nutarimą ir atskirus skirstomojo tinklo operatoriaus AB „ESO“ reikalavimus saulės elektrinių prijungimui prie elektros tinklų A ir B tipui yra nustatomas bendras P-Q/ $P_{MAX}$  charakteristikos profilis, kuris pateiktas 22 paveiksle:



22 pav. A ir B tipo P-Q/ $P_{MAX}$  charakteristikos profilis

Pateiktas P-Q/ $P_{MAX}$  charakteristikos profilis nustato aktyviosios ir reaktyvios galios ribas, kuriose turi veikti saulės elektrinės keitiklis. Ši charakteristika parodo, kad keitiklis privalo užtikrinti veikimą prie galios faktoriaus  $\cos\varphi = \pm 0,9$ . Galios faktoriaus zona tarp  $\cos\varphi = \pm 0,9$  ir  $\cos\varphi = 1$  yra laisvai pasirenkama, tačiau pasirenkat galios faktorių šioje zonoje turi būti naudojamos reaktyvios galios valdymo funkcijos. Galios faktoriaus zonai iki  $\cos\varphi = \pm 0,1$  (imtinai) reikalavimai nėra nustatomi.

EK reglamentas ir VERT nutarimas numato galimybę valdyti įtampą, keičiant reaktyviają galią, tik B tipo elektrinėms pagal pateiktus valdymo algoritmus:

1.  $Q_{fix}$  – išlaikyti pastovią reaktyviają galią P/Q charakteristikos galimybių ribose;
2.  $Q(U)$  – valdyti reaktyviają galią per įtampą P/Q charakteristikos galimybių ribose;

3.  $Q(P)$  – valdyti reaktyviają galią per aktyviają galią  $P/Q$  charakteristikos galimybių ribose;
4.  $\cos\varphi \text{ fix}$  – išlaikyti pastovią  $\cos\varphi$   $P/Q$  charakteristikos galimybių ribose;
5.  $\cos\varphi(U)$  – palaikyti tam tikrą  $\cos\varphi$  nuolydį pagal įtampą  $P/Q$  charakteristikos galimybių ribose;
6.  $\cos\varphi(P)$  – palaikyti tam tikrą  $\cos\varphi$  nuolydį, priklausomai nuo aktyviosios galios  $P/Q$  charakteristikos galimybių ribose.

Valdymo algoritmą ir jo charakteristikas leidžiama pasirinkti skirstomojo tinklo operatoriui, todėl B tipo elektrinėms vyrauja,  $Q(U)$  ir  $\cos\varphi \text{ fix}$  funkcijos.  $Q(U)$  funkcija daugiau naudojama elektrinėms, kurių prijungimo taškas yra linijoje, o  $\cos\varphi \text{ fix}$  transformatorinės skirstykloje arba privačiame vidaus tinkle, kai  $\cos\varphi$  nustatymas yra valdomas nuotoliu iš dispečerinio centro, todėl tiriamajame darbe ši funkcija nebus naudojama.

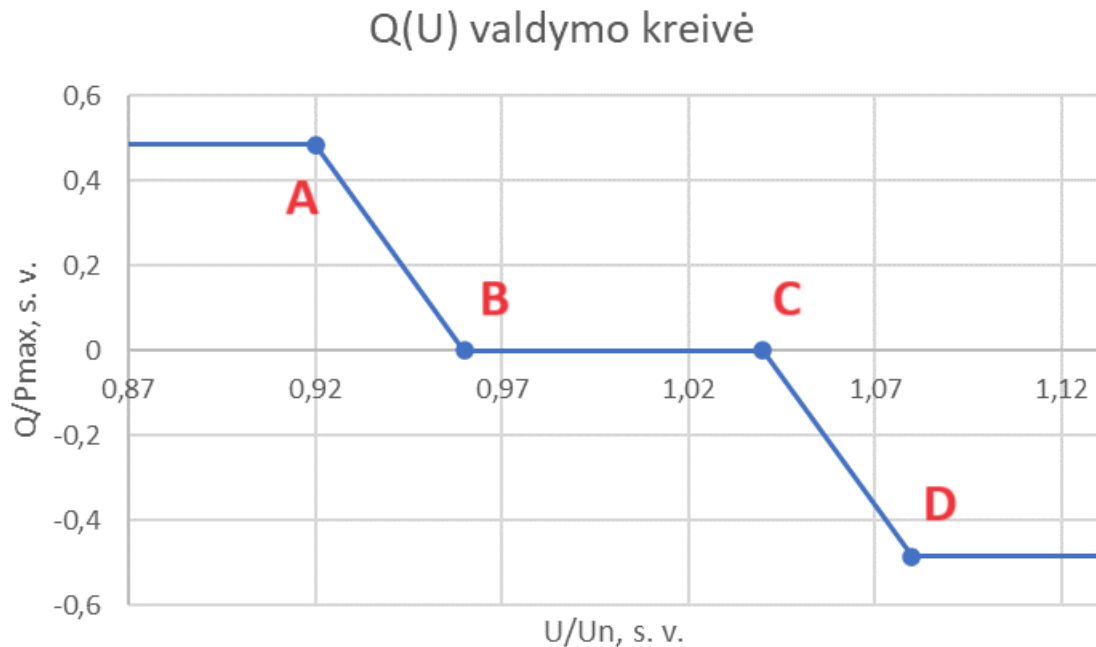
B tipo elektrinėms, kurios įrengtos žemos įtampos elektros tinkle, reaktyviosios galios funkcijos  $Q(U)$  parametrai pateikti 5 lentelėje.

**5 lentelė.**  $Q(U)$  funkcijos charakteristika B tipo elektrinėms

Kreivės taškas	Įtampa $U/U_N$ , s. v.	Reaktyvioji galia $Q/P_{MAX}$ , s. v.
A	0,91 (0,92)	0,484
B	0,95 (0,96)	0
C	1,05 (1,04)	0
D	1,09 (1,08)	-0,484

Esant poreikiui, atsižvelgiant į skirstomųjų elektros tinklų įtampos stabilumą prijungimo taške, skirstomųjų tinklų operatorius gali pareikalauti nustatyti parametų reikšmes, pateiktas lentelės skliaustuose (0,92; 0,96; 1,04; 1,08). Šiame tiriamajame darbe bus naudojamos skliausteliuose nurodytos vertės dėl didelio kiekio saulės elektrinių. Sudaroma  $Q(U)$  valdymo kreivė pagal 5 lentelės duomenis (žiūrėti į 23 pav.).

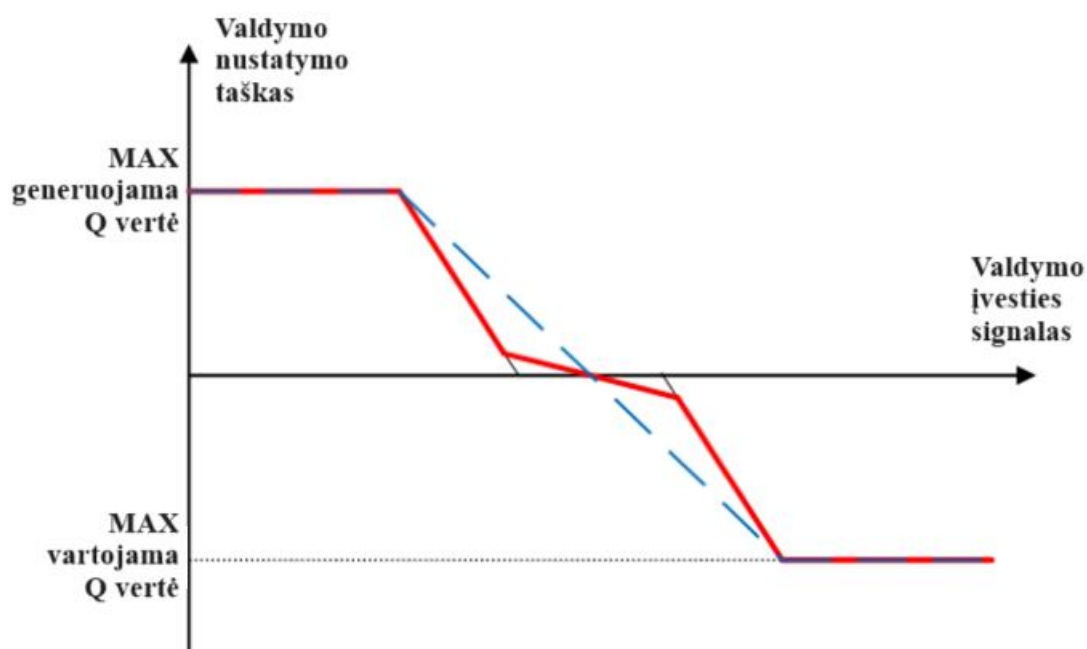




**23 pav.** Q(U) valdymo kreivė B tipo elektrinėms

A tipo elektrinių reaktyviosios galios valdymas, reglamentuotas Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos 2023 m. kovo 3 d. nutarimu „Dėl AB „Energijos skirstymo operatorius“ pasinaudojimo elektros skirstomaisiais tinklais tvarkos aprašo tvirtinimo“ Nr. O3E-252 [36], atliekamas taikant tik Q(U) valdymo funkcija,  $\cos\phi$  fix funkcija, priešingai B tipo elektrinėms, nėra taikoma, nes A tipo elektrinės nėra valdomos iš skirstomojo tinklo operatoriaus dispečerinio centro. A tipo elektrinėms, kurios įrengtos žemos įtampos elektros tinkle, reaktyviosios galios funkcijos Q(U) parametrai atitinka B tipo elektrinių parametrus, tad tyrimui atlikti bus naudojami 5 lentelėje pateikti duomenys.

Funkcijos  $\cos\phi(U)$  parametrai nėra reglamentuoti teisės aktais, tik nurodoma, kad suteikiama teisė tokią funkciją naudoti, kurios parametrai apibrėžiami P-Q/P<sub>MAX</sub> veikimo charakteristikos ribose. Tačiau, pagal 2019 m. balandžio 30 d. išleistą LST EN 50549-1 „Reikalavimai, keliami elektrinių prijungimui prie skirstomųjų tinklų. 1 dalis. Prijungimas prie žemosios įtampos skirstomojo tinklo. Elektrinės iki B tipo imtinai“ [39] standartą, pateikiamos pavyzdinės, tokio tipo funkcijos, valdymo kreivės, kurios pavaizduotos 24 paveiksle.



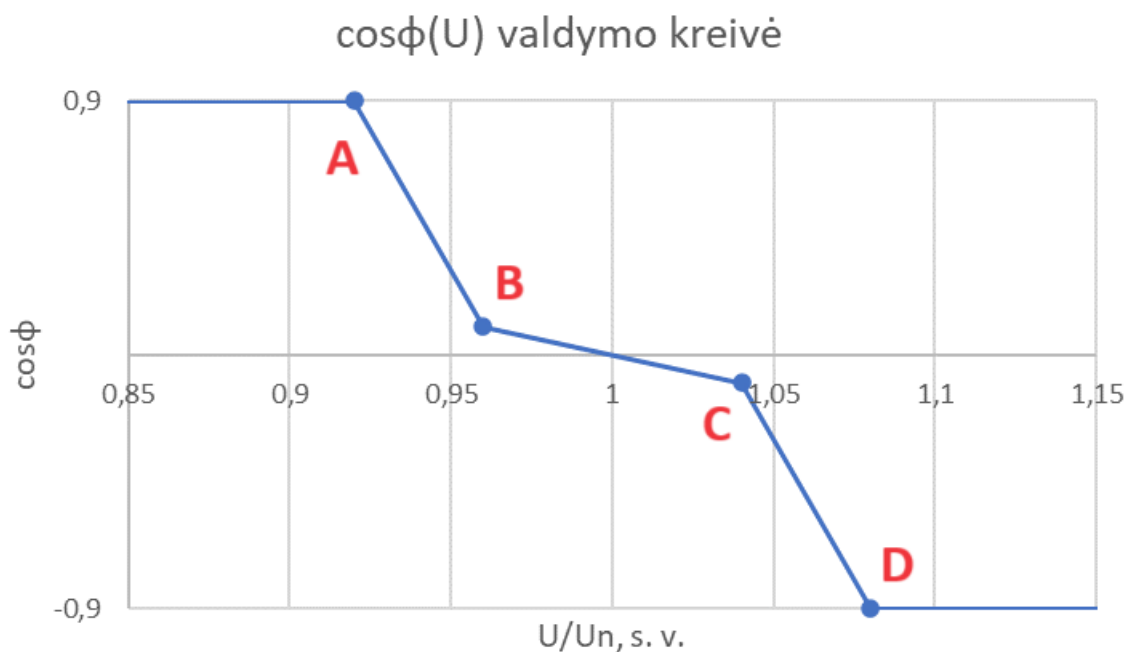
24 pav. Q charakteristikų pavyzdžiai  $\cos\phi$  valdymo režimui

Nagrinėjant 24 paveiksle pateiktas galimas  $\cos\phi(U)$  funkcijai valdymo kreives, pasirenkama raudona linija pavaizduota kreivės forma dėl mažesnio reaktyviosios galios vartojimo/generavimo esant įtampoms, kurios arti nominalios tinklo įtampos. Pasinaudojant  $P-Q/P_{MAX}$  veikimo ribų charakteristika bei parenkant įtampos slenkstinius taškus pagal 5 lentelės duomenis, nustatomi  $\cos\phi(U)$  funkcijos parametrai A ir B tipo elektrinėms, kurie pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė.  $\cos\phi(U)$  funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms

Kreivės taškas	Įtampa $U/U_N$ , s. v.	Galios faktorius $\cos\phi$
A	0,92	0,9
B	0,96	0,99
C	1,04	-0,99
D	1,08	-0,9

Pagal 6 lentelės duomenis nubraižoma  $\cos\phi(U)$  valdymo kreivė, kuri pateikiama 25 paveiksle.



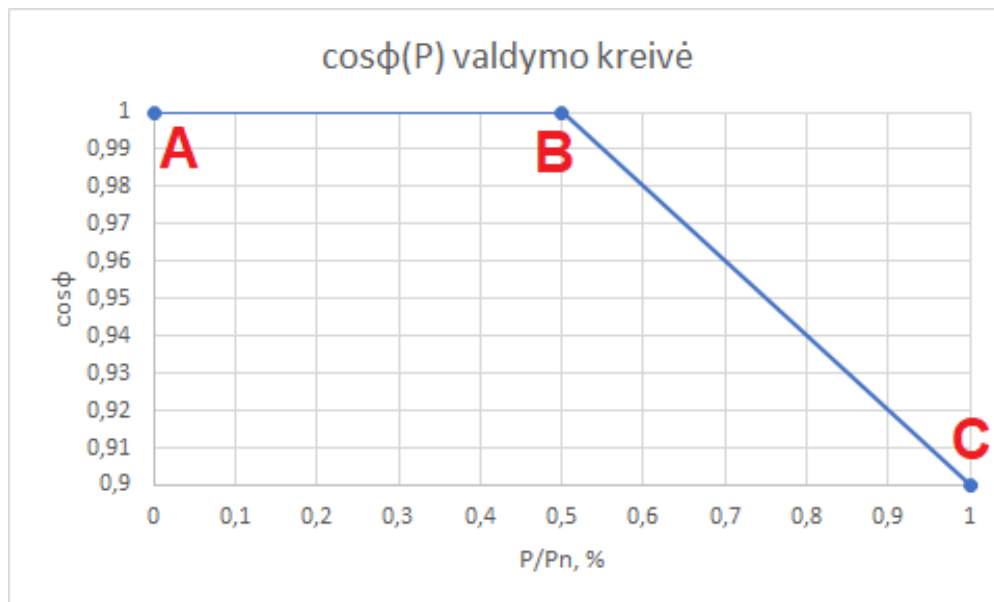
**25 pav.**  $\cos\phi(U)$  valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms

Kalbant apie  $\cos\phi(P)$  valdymo funkciją, konkrečių funkcijos parametrų galima rasti tiek mokslinėje literatūroje [21], tiek el. tinklų valdymo teisiniuose reglamentuose. Tipiniai  $\cos\phi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkcijos kreivės parametrai pateikiami 7 lentelėje.

**7 lentelė.** Tipinė  $\cos\phi(P)$  funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms

Kreivės taškas	P/Pn, %	cosφ
A	0	1
B	0,5	1
C	1	0,9

Pagal 7 lentelės duomenis nubraižoma  $\cos\phi(P)$  valdymo kreivė, kuri pateikiama 26 paveiksle.



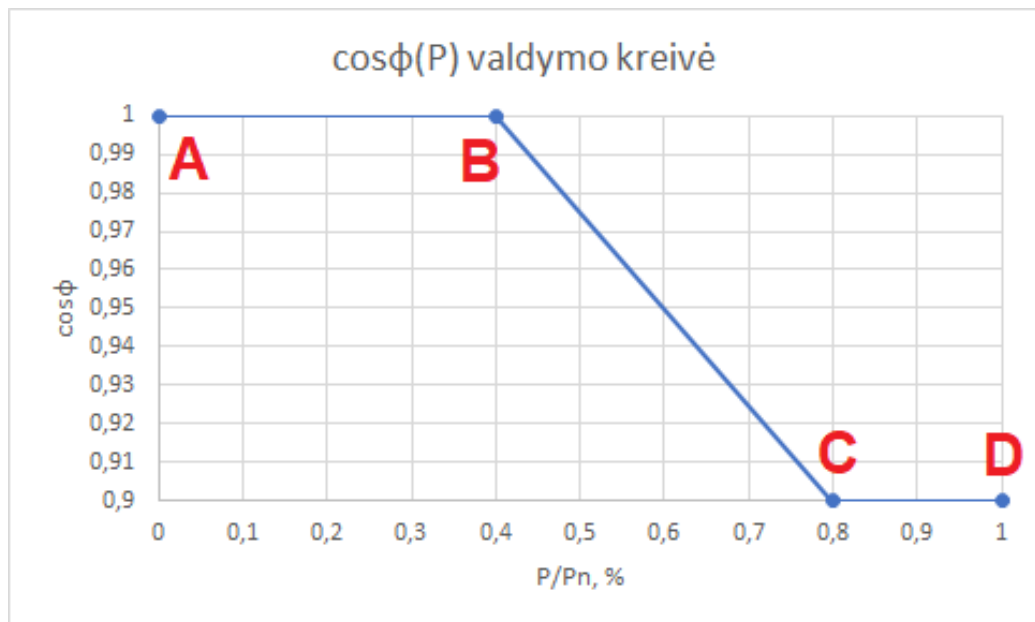
**26 pav.** Rekomenduojama mokslinėje literatūroje ir teisės aktuose  $\cos\phi(P)$  valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms

Atliekant tyrimo praktinius bandymus nustatyta, kad pritaikius 7 lentelėje pateiktą charakteristiką skaičiavimams nustatyta, kad ši funkcija pasirodo reikšmingai silpniau nei  $Q(U)$  ir  $\cos\phi(U)$  funkcijos. Taip nutiko todėl, kad  $\cos\phi(P)$  funkcija pilnai pradėdavo veikti tik tada, kai saulės elektrinės generuodavo el. energiją maksimaliu pajėgumu. Todėl priimtas sprendimas modifikuoti  $\cos\phi(P)$  kreivės charakteristiką pritaikant panašią logiką, kuri buvo taikoma ir  $Q(U)$  ir  $\cos\phi(U)$  funkcijų charakteristikoms sudaryti – maksimalus  $\cos\phi(P)$  veikimas nustatomas dar prieš pasiekiant maksimalią leistiną generaciją. Modifikuota funkcijos  $\cos\phi(P)$  charakteristika pateikiama 8 lentelėje.

**8 lentelė.** Modifikuota  $\cos\phi(P)$  funkcijos charakteristika A ir B tipo elektrinėms

Kreivės taškas	P/P <sub>N</sub> , s. v.	cosφ
A	0	1
B	0,4	1
C	0,8	0,9
D	1	0,9

Pagal 8 lentelės duomenis nubraižoma modifikuota  $\cos\phi(P)$  valdymo kreivė, kuri pateikiama 27 paveiksle.



**27 pav.** Modifikuota  $\cos\phi(P)$  valdymo kreivė A ir B tipo elektrinėms

### 3. Tyrimo rezultatai

Sudarius 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP ir visų prijungtų 0,4 kV linijų modelį atliekami skaičiavimai šiems režimams:

1. Įprastinis, kai elektrinių inverteriai neatjungiami nuo el. tinklo viršijus leistinos įtampos ribas;
2. Įprastinis, kai elektrinių inverteriai yra atjungiami nuo el. tinklo viršijus leistinos įtampos ribas;
3. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $Q(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija;
4. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $\cos\phi(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija;
5. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $\cos\phi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija.

#### 3.1. Įprastiniai režimai

Sudarius 10 kV linijos L-1200 iš Riešės TP ir visų prijungtų 0,4 kV linijų modelį atliekami skaičiavimai šiems režimams:

6. Įprastinis, kai elektrinių inverteriai neatjungiami nuo el. tinklo viršijus leistinos įtampos ribas;
7. Įprastinis, kai elektrinių inverteriai yra atjungiami nuo el. tinklo viršijus leistinos įtampos ribas;
8. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $Q(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija;
9. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $\cos\phi(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija;
10. Režimas, kai elektrinių inverteriai yra įjungta  $\cos\phi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija.

#### 3.2. Įprastiniai režimai

Pirmieji skaičiavimai atliekami taikant vieną paskui kitą įprastinius režimus. Pradžiai paskaičiuojamas įprastinis režimas, kai netaikomi leistinų įtampos ribų ribojimai. Šių skaičiavimų tikslas yra nustatyti įtampos viršijimų mastą bei maksimalų elektrinių sugeneruotą elektros energijos kiekį prieš pritaikant ribojimus. Sekančiu atveju skaičiuojamas įprastinis režimas, kuomet jau yra taikomi leistinų įtampos ribų ribojimai, siekiant nustatyti maksimalų sugeneruotos el. energijos kiekį, įtampas linijos taškuose, galios srautus. Bendri el. energijos ir galios srautų rodikliai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Įprastinių režimų bendriniai rodikliai

Režimas:	Įprastinis (be įtampos ribojimo)	Įprastinis (su įtampos ribojimu)	Pokytis*
<b>Aktyvioji energija:</b>			
Sugeneruota	19018,54 kWh	12872,68 kWh	-32,32%
Nuostoliai	1508,89 kWh	1008,53 kWh	-33,16%
Perduota į 110 kV tinklą	17509,65 kWh	11864,15 kWh	-32,24%
<b>Aktyvioji galia:</b>			

Režimas:	Įprastinis (be įtampos ribojimo)	Įprastinis (su įtampos ribojimu)	Pokytis*
Maksimali momentinė	2310,17 kW	1472,9 kW	-36,24%
Nuostoliai	161,66 kW	80,78 kW	-50,03%
Maksimali momentinė perduota į 110 kV tinklą	2148,51 kW	1392,26 kW	-35,20%

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir įprastinio režimo su įtampos ribojimu.

Pagal 9 lentelės duomenis pastebima, kad pritaikius įtampos ribojimus saulės elektrinių inverteriams, sugeneruotos elektros energijos kiekis sumažėja 32,32%, o nuostoliai 33,16%. Aktyviosios galios srautas sumenksta 36,24%, o nuostoliai linijose sumažėja 50%. Siekiant nustatyti rodiklių sumažėjimo priežastis atliekama įtampų pokyčio analizė šiems įprastiniams režimams. Duomenys pateikiami 10 lentelėje.

**10 lentelė.** Įprastinių režimų įtampos rodikliai

Transformatorinė	Nominali įtampa	Įprastinis (be įtampos ribojimo)			Įprastinis (su įtampos ribojimu)			
		Maksimali įtampa*, %	Taškų rodikliai**		Maksimali įtampa*		Elektrinių rodikliai ***	
			Santykis	Procentinis	Faktinė, %	Pokytis, %	Santykis	Procentinis
Riešės TP	10 kV	109,03	30 / 0	0,0%	107,41	-21,9%	0 / 0	0,0%
Rš-1273	0,4 kV	106,65	1 / 0	0,0%	105,97	-11,4%	1 / 0	0,0%
Rš-1230		111,47	10 / 4	40,0%	109,69	-18,4%	15 / 8	53,3%
Rš-1222		107,81	3 / 0	0,0%	106,77	-15,4%	3 / 0	0,0%
Rš-1279		110,73	15 / 6	40,0%	108,98	-19,5%	19 / 9	47,4%
Rš-1201		105,85	3 / 0	0,0%	104,61	-26,9%	4 / 0	0,0%
Rš-1252		109,85	15 / 0	0,0%	108,25	-19,4%	20 / 0	0,0%
Rš-1250		108,70	5 / 0	0,0%	107,32	-18,9%	5 / 0	0,0%
Rš-1299		108,47	1 / 0	0,0%	107,09	-19,5%	1 / 0	0,0%
Rš-1296		111,41	9 / 8	88,9%	109,34	-22,2%	12 / 11	91,7%
Rš-1262		110,83	7 / 2	28,6%	108,86	-22,2%	10 / 3	30,0%
Rš-1261		111,59	12 / 12	100%	109,43	-22,9%	21 / 21	100,0%
Rš-1238		109,94	5 / 0	0,0%	108,13	-22,3%	7 / 1	14,3%
Rš-1271		113,74	31 / 28	90,3%	109,97	-37,8%	49 / 47	95,9%
Rš-1253		108,07	7 / 0	0,0%	106,10	-32,3%	8 / 0	0,0%
Rš-1217		109,41	1 / 0	0,0%	107,47	-26,0%	2 / 1	50,0%
Rš-1202		113,42	9 / 9	100,0%	109,95	-34,9%	12 / 12	100,0%
<b>Viso:</b>		<b>113,74</b>	<b>164 / 69</b>	<b>42,07%</b>	<b>109,97</b>	<b>-37,8%</b>	<b>189 / 113</b>	<b>59,8%</b>

\* - nuo transformatorinės prijungtų el. linijų maksimali fiksuota įtampa;

\*\* - nuo transformatorinės prijungtų linijų taškų (kurie turi prijungtas elektrines) bendro kiekio santykis su taškais, kurių įtampa viršijama 10% leistiną ribą;

\*\*\* - nuo transformatorinės prijungtų saulės elektrinių bendro kiekio santykis su atsijungusiomis.

Matant 10 lentelės duomenis, įtampos įprastiniame režime be ribojimų pasiskirsto tarp 105,85% ir 113,74% nuo nominalių, atitinkamų taškų, įtampų, leistinų įtampų viršijimų mastas siekia 69 taškus\*\* iš 164 taškų, kas atitinka 42,07%. Sumodeliavus įprastinį režimą su įtampos ribojimais, įtampos linijose sumažėja ir pasiskirsto tarp 104,61% ir 109,97% nuo nominalių, atitinkamų taškų. Kadangi leistinų įtampos ribų viršijimų nėra, nustatomas atsijungusių saulės elektrinių mastas, kuris siekia 113 elektrinių iš 189, kas atitinka 59,8%. Kadangi žinomas elektrinių atsijungimo mastas dėl leistinų įtampų viršijimo, būtų pravartu nustatyti atsijungimo trukmę platesniam problemos vaizdui susidaryti. Elektrinių atsijungimo trukmės duomenys pateikiami 11 lentelėje.

**11 lentelė.** Įprastinio režimo su įtampos ribojimais saulės elektrinių atsijungimų trukmė

<b>Daugiausiai atsijungusių elektrinių skaičius:</b>	113
<b>Laikas, kada atsijungė daugiausiai:</b>	13:10
<b>Atsijungimų trukmės:</b>	
Trumpiausias laikas, min.	10
Vidutinis laikas, min.	280,8
Ilgiausias laikas, min.	430
<b>Atsijungusių el. skaičius laiko intervale:</b>	
10-140 min.	11
150-290 min.	45
300-430 min.	57

Nagrinėjant 11 duomenis nustatoma, kad daugiausiai saulės elektrinių atsijungė 13:10 laiku ir, kaip minėta anksčiau, atsijungė 113 saulės elektrinių. Atsijungimų trukmė svyruoja nuo 10 min. iki 430 min. (7 val. ir 10 min.), vidutinis atsijungimo laikas siekia 280,8 min. Pagal gautą minimalų ir maksimalų atsijungimo intervalą, nustatomi trys mažesni intervalai bei priskiriamas atsijungusių elektrinių kiekis: nuo 10 min. iki 140 min. atsijungė 11 saulės elektrinių, nuo 150 min. iki 290 min. atsijungė 45 saulės elektrinės, o nuo 300 min. iki 430 min. atsijungė 57 saulės elektrinės.

Sekanti rodiklių grupė yra transformatorių ir linijų apkrovimai. Šių rodiklių pagalba galima įvertinti elektros įrenginių apkrovimų pasikeitimus įjungus reaktyviosios galios valdymo funkcijas saulės elektrinių inverteriuose ir išaugus galios srautams. Kadangi, įprastiniuose režimuose nebus naudojamos minėtos funkcijos, tad šių skaičiavimų metu nustatoma esama situacija, kuri bus lyginama su režimais, kurie naudoja reaktyviosios galios valdymo funkcijas. Įprastinių režimų apkrovų rodikliai pateikiami 12 lentelėje.

**12 lentelė.** Įprastinių režimų maksimalių apkrovimų rodikliai

Transformatorinė	Įprastinis (be įtampos ribojimo)				Įprastinis (be įtampos ribojimo)			
	Trans. apkrovis, %	Linijos apkrovis, %	Akt. galios srautas, kW	Reakt. galios srautas, kVAr	Trans. apkrovis, %	Linijos apkrovis, %	Akt. galios srautas, kW	Reakt. galios srautas, kVAr
Riešės TP	-*	55,97%	2169,26	-134	0,00%	36,45%	1412,01	-38,42
Rš-1273	7,01%	6,68%	10,63	0	6,99%	6,75%	10,63	0



Transformatorinė	Įprastinis (be įtampos ribojimo)				Įprastinis (be įtampos ribojimo)			
	Trans. apkrovimas, %	Linijos apkrovimas, %	Akt. galios srautas, kW	Reakt. galios srautas, kVAr	Trans. apkrovimas, %	Linijos apkrovimas, %	Akt. galios srautas, kW	Reak. galios srautas, kVAr
Rš-1230	77,59%	57,98%	107,6	0	60,07%	45,23%	83,15	0
Rš-1222	16,73%	11,41%	27,01	0	16,73%	11,59%	27,01	0
Rš-1279	42,72%	39,97%	91,07	0	36,96%	35,13%	78,86	0
Rš-1201	24,98%	8,45%	17,97	0	24,98%	8,62%	17,97	0
Rš-1252	27,39%	23,84%	38,72	0	27,38%	24,34%	38,7	0
Rš-1250	19,30%	9,90%	17,7	0	19,31%	10,13%	17,7	0
Rš-1299	22,36%	-**	178,88	0	22,36%	-**	178,9	0
Rš-1296	40,95%	28,40%	68,43	0	31,56%	24,60%	58,05	0
Rš-1262	21,86%	18,92%	30,99	0	18,52%	16,39%	26,3	0
Rš-1261	71,37%	61,66%	73,79	0	54,23%	52,85%	61,72	0
Rš-1238	13,55%	18,73%	21,86	0	13,31%	19,29%	21,47	0
Rš-1271	74,49%	79,71%	188,1	0	44,64%	48,92%	112,9	0
Rš-1253	50,16%	23,33%	55,19	0	50,14%	24,02%	55,17	0
Rš-1217	51,11%	-**	321,87	0	38,98%	-**	245,6	0
Rš-1202	65,54%	65,04%	157,77	0	39,16%	63,20%	149,08	0
<b>Viso:</b>	<b>77,59%</b>	<b>79,71%</b>	<b>2169,26</b>	<b>-134,00</b>	<b>60,07%</b>	<b>63,20%</b>	<b>1412,01</b>	<b>-38,42</b>

\* - duomenys nepateikiami, nes nuo Riešės TP transformatoriaus yra daugiau prijungta 10 kV linijų, kurios šiame tyrime yra nevertinamos;

\*\* - duomenys nepateikiami, nes šios elektrinės prijungtos tiesiogiai nuo transformatorinių 0,4 kV šynų.

Pagal pateiktus aukščiau rezultatus pastebima, kad nei transformatoriai, nei el. linijos esamoje situacijoje nėra perkrauti, nes įprastiniame režime be ribojimų maksimalus transformatoriaus apkrovimas siekia 77,59%, o linijos apkrovimas siekia 79,71%, o įprastiniame režime su įtampos ribojimais situacija dar pagerėja, nes sumažėja galios srautai: maksimaliai transformatorius apkrautas 60,07%, o linija 62,2%.

Sekanti rodiklių grupė yra sugeneruota el. energija. Jų pagalba yra įvertinamas saulės elektrinių efektyvumas – kuo daugiau energijos sugeneruojama, tuo greitesnis elektrinių atsipirkimas ir pelno gavimas. Įprastiniame režime be ribojimų tikslas nustatyti kiek maksimaliai saulės elektrinės gali sugeneruoti el. energijos netaikant įtampos apribojimų, o įprastinio režimo su įtampos ribojimais tikslas pamatyti realią situaciją. Elektrinių sugeneruotos elektros energijos kiekis pateikiamas 13 lentelėje.

**13 lentelė.** Įprastinių režimų sugeneruotos elektros energijos rodikliai

Transformatorinė	Sugeneruota el. energija, kWh		
	Įprastinis (be įtampos ribojimo)	Įprastinis (su įtampos ribojimais)	
		Faktinė reikšmė	Pokytis
Rš-1273	87,16	87,16	0,00%

Transformatorinė	Sugeneruota el. energija, kWh		
	Įprastinis (be įtampos ribojimo)	Įprastinis (su įtampos ribojimais)	
		Faktinė reikšmė	Pokytis
Rš-1230	1046,9	738,78	-29,43%
Rš-1222	220,89	220,89	0,00%
Rš-1279	1421,87	1147,27	-19,31%
Rš-1201	329,07	329,07	0,00%
Rš-1252	909,22	909,22	0,00%
Rš-1250	399,75	399,75	0,00%
Rš-1299	1462,38	1462,38	0,00%
Rš-1296	852,15	498,18	-41,54%
Rš-1262	724,86	601,21	-17,06%
Rš-1261	1481,95	848,69	-42,73%
Rš-1238	450,86	437,95	-2,86%
Rš-1271	3926,79	1535,77	-60,89%
Rš-1253	664,21	664,21	0,00%
Rš-1217	2636,64	1503,08	-42,99%
Rš-1202	2173,56	1258,52	-42,10%
<b>Viso:</b>	<b>19018,54</b>	<b>12872,68</b>	<b>-32,32%</b>

Pagal 13 lentelės duomenis pastebima, kad saulės elektrinės, pritaikius įtampos ribojimus, sugeneravo 32,32% mažiau elektros energijos nei netaikant šių ribojimų. Didžiausias elektros energijos generavimo sumažėjimas juntamas 10 kV linijos pabaigoje, kur vos ne dauguma elektrinių turėjo atsijungti bent kažkuriam laiko tarpui.

### 3.3. Režimas Q(U)

Sekanti tyrimo dalis atliekama taikant Q(U) reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams. Pradžiai pateikiami bendriniai Q(U) režimo rodikliai, kurie atvaizduoti 14 lentelėje.

14 lentelė. Režimo Q(U) bendriniai rodikliai

Rodikliai	Q(U) režimas	Pokytis*
<b>Aktyvioji energija:</b>		
Sugeneruota	18940,65 kWh	-0,41%
Nuostoliai	1695,91 kWh	12,39%
Perduota į 110 kV tinklą	17244,74 kWh	-1,51%
<b>Aktyvioji galia:</b>		
Maksimali momentinė	2268,92 kW	-1,79%
Nuostoliai	186,17 kW	15,16%
Maksimali momentinė perduota į 110 kV tinklą	2083,22 kW	-3,04%
<b>Reaktyvioji energija:</b>		

Suvargota	8319,71 kVArh
Nuostoliai	490,8 kVArh
Paimta iš 110 kV tinklo	8810,51 kVArh
<b>Reaktyvioji galia:</b>	
Maksimali momentinė	957,7 kVAr
Nuostoliai	131,31 kVAr
Maksimali momentinė paimta iš 110 kV tinklo	1089,01 kVAr

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir Q(U) režimo.

Pagal 14 lentelės duomenis pastebima, kad pritaikius Q(U) reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams, sugeneruotos elektros energijos kiekis išlieka beveik nepakitęs (lyginant su įprastiniu režimu be ribojimų) ir sumažėja tik 0,41%, tačiau aktyviosios energijos nuostoliai pakyla 12,39%. Aktyviosios galios srautas sumenksta 1,79%, o nuostoliai linijose išauga 15,16%. Kadangi, šio režimo metu yra paimama iš tinklo reaktyvioji galia, įtraukiami ir šie rodikliai: maksimaliai suvargota reaktyvioji energija siekia 8319,71 kVArh, o energijos nuostoliai siekia 490,8 kVArh, maksimalus momentinis vartojamos reaktyviosios galios srautas siekia 957,7 kVAr, o galios nuostoliai 131,31 kVAr. Toliau atliekama įtampų pokyčio analizė Q(U) režimui. Duomenys pateikiami 15 lentelėje.

**15 lentelė.** Režimo Q(U) įtampos rodikliai

Transformatorinė	Nominali įtampa	Elektrinių santykis*		Maksimali įtampa**, %	
		Santykinis	Procentinis	Faktinė	Pokytis***
Riešės TP	10 kV	0 / 0	0,0%	107,3	-23,9%
Rš-1273	0,4 kV	1 / 0	0,0%	105,4	-22,7%
Rš-1230		15 / 0	0,0%	108,4	-36,9%
Rš-1222		3 / 0	0,0%	106,1	-27,4%
Rš-1279		19 / 0	0,0%	108	-34,8%
Rš-1201		4 / 0	0,0%	104,4	-33,9%
Rš-1252		20 / 0	0,0%	107,7	-27,9%
Rš-1250		5 / 0	0,0%	106,8	-27,6%
Rš-1299		1 / 0	0,0%	106,3	-34,9%
Rš-1296		12 / 0	0,0%	108,7	-31,8%
Rš-1262		10 / 0	0,0%	108,5	-27,9%
Rš-1261		21 / 0	0,0%	108,5	-36,5%
Rš-1238		7 / 0	0,0%	107,9	-25,8%
Rš-1271		49 / 1	2,0%	109,5	-44,3%
Rš-1253		8 / 0	0,0%	105,9	-36,3%
Rš-1217		2 / 0	0,0%	107	-33,7%
Rš-1202		12 / 4	33,3%	109,6	-40,4%
<b>Viso:</b>		<b>189 / 5</b>	<b>2,6%</b>	<b>109,6</b>	<b>-44,3%</b>

\* - nuo transformatorinės prijungtų saulės elektrinių bendro kiekio santykis su atsijungusiomis;

\*\* - nuo transformatorinės prijungtų el. linijų maksimali fiksuota įtampa;

\*\*\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir Q(U) režimo.

Matant rezultatus, pateiktus 15 lentelėje, galima teigti Q(U) funkcijos veikimas stipriai sumažino atsijungusių saulės elektrinių skaičių – nuo 113 atsijungusių elektrinių sumažėjo iki 5 saulės elektrinių. Priežastis šio sumažėjimo yra ženkliai sumažėjusios įtampos visoje linijoje, kurios svyruoja nuo 104,4% iki 109,6% nuo nominalios įtampos. Lyginant su įprastinio režimo taikant įtampos ribojimus duomenimis, įtampos mažėjo nuo 22,7% iki 44,3%. Toliau bus nagrinėjamos elektrinių atsijungimo trukmės, kurių duomenys pateikiami 16 lentelėje.

**16 lentelė.** Režimo Q(U) saulės elektrinių atsijungimų trukmė

<b>Daugiausiai atsijungusių elektrinių skaičius:</b>	5
<b>Laikas, kada atsijungė daugiausiai:</b>	13:10
<b>Atsijungimų trukmės:</b>	
Trumpiausias laikas, min	10
Vidutinis laikas, min	116
Ilgiausias laikas, min	180
<b>Atsijungusių el. skaičius laiko intervale:</b>	
10-60 min	1
70-120 min	0
130-180 min	4

Nagrinėjant 16 lentelės duomenis nustatoma, kad daugiausiai saulės elektrinių atsijungė 13:10 laiku ir, kaip minėta anksčiau, atsijungė 5 saulės elektrinės. Atsijungimų trukmė svyruoja nuo 10 min. iki 180 min. (3 val.), vidutinis atsijungimo laikas siekia 116 min. Pagal gautą minimalų ir maksimalų atsijungimo intervalą, nustatomi trys mažesni intervalai bei priskiriamas atsijungusių elektrinių kiekis: nuo 10 min. iki 60 min. atsijungė 1 saulės elektrinė, nuo 70 min. iki 120 min. nebuvo atsijungusių saulės elektrinių, o nuo 130 min. iki 180 min. atsijungė 4 saulės elektrinės. Sekanti rodiklių grupė yra transformatorių ir linijų apkrovimai, kurių duomenys pateikiami 17 lentelėje.

**17 lentelė.** Režimo Q(U) maksimalių apkrovimų rodikliai

Transformatorinė	Transformatoriaus apkrovimas, %		Linijos apkrovimas, %		Aktyviosios galios srautas, kW		Reak. galios srautas, kVAr
	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, kW	Pokytis*, %	
Riešės TP	-**	-**	60,54%	4,57%	2104,15	-3,09%	-995,07
Rš-1273	7,55%	0,5%	6,89%	0,21%	10,63	0,00%	-2,07
Rš-1230	85,26%	7,7%	64,44%	6,46%	106,64	-0,90%	-47,73
Rš-1222	17,43%	0,7%	12,02%	0,61%	27	-0,04%	-7,48
Rš-1279	46,45%	3,7%	46,21%	6,24%	90,34	-0,81%	-48,02
Rš-1201	25,00%	0,0%	8,59%	0,14%	17,97	0,00%	-0,7

Transformatorinė	Transformatoriaus apkrovimas, %		Linijos apkrovimas, %		Aktyviosios galios srautas, kW		Reak. galios srautas, kVAr
	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, kW	Pokytis*, %	
Rš-1252	29,87%	2,5%	26,57%	2,73%	38,6	-0,31%	-17,31
Rš-1250	20,79%	1,5%	10,75%	0,85%	17,69	-0,06%	-6,55
Rš-1299	23,66%	1,3%	-***	-***	179,81	0,52%	-59,33
Rš-1296	46,44%	5,5%	32,49%	4,09%	68,14	-0,43%	-34,62
Rš-1262	24,42%	2,6%	21,98%	3,06%	30,8	-0,62%	-17,15
Rš-1261	80,50%	9,1%	69,94%	8,28%	73,62	-0,23%	-34,51
Rš-1238	15,49%	1,9%	20,90%	2,17%	21,82	-0,18%	-10,92
Rš-1271	84,28%	9,8%	93,53%	13,82%	185,36	-1,48%	-101,1
Rš-1253	51,55%	1,4%	24,38%	1,05%	55,15	-0,07%	-11,77
Rš-1217	56,09%	5,0%	-***	-***	324,2	0,72%	-140,52
Rš-1202	68,17%	2,6%	73,20%	8,16%	157,58	-0,12%	-71,08
<b>Viso:</b>	<b>85,26%</b>	<b>9,79%</b>	<b>93,53%</b>	<b>13,82%</b>	<b>2104,15</b>	<b>-3,09%</b>	<b>-995,07</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir Q(U) režimo;

\*\* - duomenys nepateikiami, nes nuo Riešės TP transformatoriaus yra daugiau prijungta 10 kV linijų, kurios šiame tyrime yra nevertinamos;

\*\*\* - duomenys nepateikiami, nes šios elektrinės prijungtos tiesiogiai nuo transformatorinių 0,4 kV šynų.

Pagal pateiktus aukščiau rezultatus pastebima, kad nei transformatoriai, nei el. linijos nėra perkrauti, nes Q(U) režimo metu maksimalus transformatoriaus apkrovimas siekia 85,26% (maksimalus padidėjimas transformatorių apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 9,79%), o linijos apkrovimas siekia 93,53% (maksimalus padidėjimas linijų apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 13,82%). Kalbant apie galių srautus, maksimalus aktyviosios galios srautas 2104,15 kW ir yra 3,09% mažesnis nei įprastiniame režime be įtampos ribojimų, maksimalus reaktyviosios galios vartojimo srautas siekė 995,07 kVAr. Toliau bus analizuojami sugeneruotos energijos rodikliai, kurių duomenys pateikiami 18 lentelėje.

**18 lentelė.** Režimo Q(U) elektros energijos rodikliai

Transformatorinė	Sugeneruota aktyvioji el. energija		Suvartota reaktyvioji el. energija, kVAr
	Faktinė, kWh	Pokytis*	
Rš-1273	87,16	0,00%	17,11
Rš-1230	1046,9	0,00%	430,03
Rš-1222	220,89	0,00%	63,55
Rš-1279	1421,87	0,00%	591,32
Rš-1201	329,07	0,00%	2,23
Rš-1252	909,22	0,00%	387,37
Rš-1250	399,75	0,00%	150,55
Rš-1299	1462,38	0,00%	510,54
Rš-1296	852,15	0,00%	456,49

Transformatorinė	Sugeneruota aktyvioji el. energija		Suvartota reaktyvioji el. energija, kVAr
	Faktinė, kWh	Pokytis*	
Rš-1262	724,86	0,00%	362,96
Rš-1261	1481,95	0,00%	748,79
Rš-1238	450,86	0,00%	216,92
Rš-1271	3925,37	-0,04%	2009,8
Rš-1253	664,21	0,00%	86,08
Rš-1217	2636,64	0,00%	1204,91
Rš-1202	2096,98	-3,52%	1081,06
<b>Viso:</b>	<b>18940,65</b>	<b>-0,41%</b>	<b>8319,71</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir Q(U) režimo.

Pagal 18 lentelės duomenis pastebima, kad aktyviosios elektros energijos generacija yra beveik identiška ir Q(U) reaktyviosios galios valdymo funkcija efektyviai atlieka savo darbą, tačiau sunaudoja 8319,71 kVArh reaktyviosios energijos.

### 3.4. Režimas $\cos\varphi(U)$

Sekanti tyrimo dalis atliekama taikant  $\cos\varphi(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams. Pradžiai pateikiami bendriniai  $\cos\varphi(U)$  režimo rodikliai, kurie atvaizduoti 19 lentelėje.

**19 lentelė.** Režimo  $\cos\varphi(U)$  bendriniai rodikliai

Rodikliai	Režimas $\cos\varphi(U)$	Pokytis*
<b>Aktyvioji energija:</b>		
Sugeneruota	18748,34 kWh	-1,42%
Nuostoliai	1623,52 kWh	7,60%
Perduota į 110 kV tinklą	17124,82 kWh	-2,20%
<b>Aktyvioji galia:</b>		
Maksimali momentinė	2203,08 kW	-4,64%
Nuostoliai	175,21 kW	8,38%
Maksimali momentinė perduota į 110 kV tinklą	2027,86 kW	-5,62%
<b>Reaktyvioji energija:</b>		
Suvartota	6908,71 kVArh	
Nuostoliai	420,97 kVArh	
Paimta iš 110 kV tinklo	7329,68 kVArh	
<b>Reaktyvioji galia:</b>		
Maksimali momentinė	913,7 kVArh	
Nuostoliai	121,07 kVArh	
Maksimali momentinė paimta iš 110 kV tinklo	1034,77 kVArh	

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\varphi(U)$  režimo.

Pagal 19 lentelės duomenis pastebima, kad pritaikius  $\cos\phi(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams, sugeneruotos elektros energijos kiekis yra nežymiai pakitęs (lyginant su įprastiniu režimu be ribojimų) ir sumažėja tik 1,42%, tačiau aktyviosios energijos nuostoliai pakyla 7,6%. Aktyviosios galios srautas sumenksta 4,64%, o nuostoliai linijose išauga 8,38%. Kadangi, šio režimo metu yra paimama iš tinklo reaktyvioji galia, įtraukiami ir šie rodikliai: maksimaliai suvartota reaktyvioji energija siekia 6908,71 kVArh, o energijos nuostoliai siekia 420,97 kVArh, maksimalus momentinis vartojamos reaktyviosios galios srautas siekia 913,7 kVAr, o galios nuostoliai 121,07 kVAr. Toliau atliekama įtampų pokyčio analizė  $\cos\phi(U)$  režimui. Duomenys pateikiami 20 lentelėje.

**20 lentelė.** Režimo  $\cos\phi(U)$  įtampos rodikliai

Transformatorinė	Nominali įtampa	Elektrinių santykis*		Maksimali įtampa**, %	
		Santykinis	Procentinis	Faktinė	Pokytis***
Riešės TP	10 kV	0 / 0	0,0%	107,3	-24,6%
Rš-1273	0,4 kV	1 / 0	0,0%	105,4	-23,1%
Rš-1230		15 / 0	0,0%	108,4	-35,9%
Rš-1222		3 / 0	0,0%	106,1	-28,7%
Rš-1279		19 / 0	0,0%	108	-34,1%
Rš-1201		4 / 0	0,0%	104,3	-35,1%
Rš-1252		20 / 0	0,0%	107,7	-28,3%
Rš-1250		5 / 0	0,0%	106,8	-28,5%
Rš-1299		1 / 0	0,0%	106,4	-32,3%
Rš-1296		12 / 0	0,0%	108,7	-31,0%
Rš-1262		10 / 0	0,0%	108,5	-27,9%
Rš-1261		21 / 0	0,0%	108,5	-36,0%
Rš-1238		7 / 0	0,0%	107,9	-26,5%
Rš-1271		49 / 5	10,2%	109,5	-45,1%
Rš-1253		8 / 0	0,0%	105,7	-41,3%
Rš-1217		2 / 0	0,0%	107,1	-32,2%
Rš-1202		12 / 4	33,3%	109,6	-40,4%
<b>Viso:</b>		<b>189 / 9</b>	<b>4,8%</b>	<b>109,6</b>	<b>-45,1%</b>

\* - nuo transformatorinės prijungtų saulės elektrinių bendro kiekio santykis su atsijungusiomis;

\*\* - nuo transformatorinės prijungtų el. linijų maksimali fiksuota įtampa;

\*\*\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\phi(U)$  režimo.

Matant rezultatus, pateiktus 20 lentelėje, galima teigti  $\cos\phi(U)$  funkcijos veikimas stipriai sumažino atsijungusių saulės elektrinių skaičių – nuo 113 atsijungusių elektrinių sumažėjo iki 9 saulės elektrinių. Priežastis šio sumažėjimo yra ženkliai sumažėjusios įtampos visoje linijoje, kurios svyruoja nuo 104,3% iki 109,6% nuo nominalios įtampos. Lyginant su įprastinio režimo taikant įtampos ribojimus duomenimis, įtampos mažėjo nuo 23,1% iki 45,1%. Toliau bus nagrinėjamos elektrinių atsijungimo trukmės, kurių duomenys pateikiami 21 lentelėje.

**21 lentelė.** Režimo  $\cos\phi(U)$  saulės elektrinių atsijungimų trukmė

<b>Daugiausiai atsijungusių elektrinių skaičius:</b>	9
<b>Laikas, kada atsijungė daugiausiai:</b>	12:20 – 13:40
<b>Atsijungimų trukmės:</b>	
Trumpiausias laikas, min	90
Vidutinis laikas, min	155,56
Ilgiausias laikas, min	250
<b>Atsijungusių el. skaičius laiko intervale:</b>	
90-140 min	5
150-190 min	0
200-250 min	4

Nagrinėjant 21 lentelės duomenis nustatoma, kad daugiausiai saulės elektrinių atsijungė laiko intervale nuo 12:20 iki 13:40 ir, kaip minėta anksčiau, atsijungė 9 saulės elektrinės. Atsijungimų trukmė svyruoja nuo 90 min. iki 250 min. (4 val. ir 10 min), vidutinis atsijungimo laikas siekia 155,56 min. Pagal gautą minimalų ir maksimalų atsijungimo intervalą, nustatomi trys mažesni intervalai bei priskiriamas atsijungusių elektrinių kiekis: nuo 90 min. iki 140 min. atsijungė 5 saulės elektrinės, nuo 150 min. iki 190 min. nebuvo atsijungusių saulės elektrinių, o nuo 200 min. iki 250 min. atsijungė 4 saulės elektrinės. Sekanti rodiklių grupė yra transformatorių ir linijų apkrovimai, kurių duomenys pateikiami 22 lentelėje.

**22 lentelė.** Režimo  $\cos\varphi(U)$  maksimalių apkrovimų rodikliai

Transformatorinė	Transformatoriaus apkrovimas, %		Linijos apkrovimas, %		Aktyviosios galios srautas, kW		Reak. galios srautas, kVAr
	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, kW	Pokytis*, %	
Riešės TP	-**	-**	58,66%	2,69%	2048,67	-5,89%	-943,24
Rš-1273	7,83%	0,8%	7,01%	0,33%	10,62	-0,09%	-2,93
Rš-1230	85,51%	7,9%	64,39%	6,41%	106,74	-0,81%	-47,27
Rš-1222	17,70%	1,0%	12,21%	0,80%	26,99	-0,07%	-8,94
Rš-1279	46,57%	3,9%	45,44%	5,47%	90,42	-0,72%	-44,94
Rš-1201	25,02%	0,0%	8,63%	0,18%	17,97	0,00%	-1,42
Rš-1252	29,90%	2,5%	26,49%	2,65%	38,61	-0,28%	-16,96
Rš-1250	20,96%	1,7%	10,82%	0,92%	17,69	-0,06%	-6,88
Rš-1299	23,90%	1,5%	-***	-***	179,81	0,52%	-64,82
Rš-1296	45,74%	4,8%	32,11%	3,71%	68,17	-0,38%	-32,57
Rš-1262	24,19%	2,3%	21,51%	2,59%	30,83	-0,52%	-15,47
Rš-1261	79,60%	8,2%	69,47%	7,81%	73,64	-0,20%	-33,21
Rš-1238	15,34%	1,8%	20,80%	2,07%	21,83	-0,14%	-10,11
Rš-1271	79,98%	5,5%	86,84%	7,13%	176,54	-6,55%	-87,81
Rš-1253	52,32%	2,2%	24,73%	1,40%	55,14	-0,09%	-14,89



Transformatorinė	Transformatoriaus apkrovimas, %		Linijos apkrovimas, %		Aktyviosios galios srautas, kW		Reak. galios srautas, kVAr
	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, kW	Pokytis*, %	
Rš-1217	55,86%	4,8%	-***	-***	324,2	0,72%	-136,92
Rš-1202	64,01%	-1,5%	72,89%	7,85%	157,59	-0,11%	-69,12
<b>Viso:</b>	<b>85,51%</b>	<b>8,23%</b>	<b>86,84%</b>	<b>7,85%</b>	<b>2048,67</b>	<b>-6,55%</b>	<b>-943,24</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\varphi(U)$  režimo;

\*\* - duomenys nepateikiami, nes nuo Riešės TP transformatoriaus yra daugiau prijungta 10 kV linijų, kurios šiame tyrime yra nevertinamos;

\*\*\* - duomenys nepateikiami, nes šios elektrinės prijungtos tiesiogiai nuo transformatorinių 0,4 kV šynų.

Pagal pateiktus aukščiau rezultatus pastebima, kad nei transformatoriai, nei el. linijos nėra perkrauti, nes  $\cos\varphi(U)$  režimo metu maksimalus transformatoriaus apkrovimas siekia 85,51% (maksimalus padidėjimas transformatorių apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 8,23%), o linijos apkrovimas siekia 86,84% (maksimalus padidėjimas linijų apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 7,85%). Kalbant apie galių srautus, maksimalus aktyviosios galios srautas 2048,67 kW ir yra 6,55% mažesnis nei įprastiniame režime be įtampos ribojimų, maksimalus reaktyviosios galios vartojimo srautas siekė 943,24 kVAr. Toliau bus analizuojami sugeneruotos energijos rodikliai, kurių duomenys pateikiami 23 lentelėje.

**23 lentelė.** Režimo  $\cos\varphi(U)$  elektros energijos rodikliai

Transformatorinė	Sugeneruota aktyvioji el. energija		Suvartota reaktyvioji el. energija, kVAr
	Faktinė, kWh	Pokytis*	
Rš-1273	87,16	0,00%	21,15
Rš-1230	1046,9	0,00%	378,87
Rš-1222	220,89	0,00%	64,97
Rš-1279	1421,87	0,00%	517,05
Rš-1201	329,07	0,00%	5,64
Rš-1252	909,22	0,00%	333,81
Rš-1250	399,75	0,00%	136,81
Rš-1299	1462,38	0,00%	479,65
Rš-1296	852,15	0,00%	359,73
Rš-1262	724,86	0,00%	291
Rš-1261	1481,95	0,00%	609,6
Rš-1238	450,86	0,00%	176,94
Rš-1271	3775,21	-3,86%	1572,83
Rš-1253	664,21	0,00%	121,82
Rš-1217	2636,64	0,00%	998,58
Rš-1202	2054,69	-5,47%	840,26
<b>Viso:</b>	<b>18748,34</b>	<b>-1,42%</b>	<b>6908,71</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\varphi(U)$  režimo.

Pagal 23 lentelės duomenis pastebima, kad aktyviosios elektros energijos generacija nežymiai skiriasi nuo maksimaliai galimos sugeneruoti el. energijos ir  $\cos\varphi(U)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija efektyviai atlieka savo darbą, tačiau sunaudoja 6908,71 kVArh reaktyviosios energijos.

### 3.5. Režimas $\cos\varphi(P)$

Sekanti tyrimo dalis atliekama taikant  $\cos\varphi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams. Pradžiai pateikiami bendriniai  $\cos\varphi(P)$  režimo rodikliai, kurie atvaizduoti 24 lentelėje.

24 lentelė. Režimo  $\cos\varphi(P)$  bendriniai rodikliai

Rodikliai	Režimas $\cos\varphi(P)$	Pokytis*
<b>Aktyvioji energija:</b>		
Sugeneruota	18684	-1,76%
Nuostoliai	1662,6	10,19%
Perduota į 110 kV tinklą	17021,39	-2,79%
<b>Aktyvioji galia:</b>		
Maksimali momentinė	2160,64	-6,47%
Nuostoliai	175,24	8,40%
Maksimali momentinė perduota į 110 kV tinklą	1985,4	-7,59%
<b>Reaktyvioji energija:</b>		
Suvargota	8554,43	
Nuostoliai	471,55	
Paimta iš 110 kV tinklo	9025,98	
<b>Reaktyvioji galia:</b>		
Maksimali momentinė	1052,55	
Nuostoliai	121,52	
Maksimali momentinė paimta iš 110 kV tinklo	1174,07	

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\varphi(P)$  režimo.

Pagal 24 lentelės duomenis pastebima, kad pritaikius  $\cos\varphi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkciją saulės elektrinių inverteriams, sugeneruotos elektros energijos kiekis yra nežymiai pakitęs (lyginant su įprastiniu režimu be ribojimų) ir sumažėja tik 1,76%, tačiau aktyviosios energijos nuostoliai pakyla 10,19%. Aktyviosios galios srautas sumenksta 6,47%, o nuostoliai linijose išauga 8,4%. Kadangi, šio režimo metu yra paimama iš tinklo reaktyvioji galia, įtraukiami ir šie rodikliai: maksimaliai suvargota reaktyvioji energija siekia 8554,43 kVArh, o energijos nuostoliai siekia 471,55 kVArh, maksimalus momentinis vartojamos reaktyviosios galios srautas siekia 1052,55 kVAr, o galios nuostoliai 121,52 kVAr. Toliau atliekama įtampų pokyčio analizė  $\cos\varphi(P)$  režimui. Duomenys pateikiami 25 lentelėje.

25 lentelė. Režimo  $\cos\varphi(P)$  įtampos rodikliai

Transformatorinė	Nominali įtampa	Elektrinių santykis*		Maksimali įtampa**, %	
		Santykinis	Procentinis	Faktinė	Pokytis***
Riešės TP	10 kV	0 / 0	0,0%	107,1	-27,4%
Rš-1273	0,4 kV	1 / 0	0,0%	105,2	-27,2%
Rš-1230		15 / 0	0,0%	108,3	-37,9%
Rš-1222		3 / 0	0,0%	105,9	-31,7%
Rš-1279		19 / 0	0,0%	108,1	-33,0%
Rš-1201		4 / 0	0,0%	103,8	-56,0%
Rš-1252		20 / 0	0,0%	107,4	-32,9%
Rš-1250		5 / 0	0,0%	106,7	-30,6%
Rš-1299		1 / 0	0,0%	106,2	-37,3%
Rš-1296		12 / 0	0,0%	108,8	-29,8%
Rš-1262		10 / 0	0,0%	108,2	-31,8%
Rš-1261		21 / 0	0,0%	108,8	-31,4%
Rš-1238		7 / 0	0,0%	107,7	-29,4%
Rš-1271		49 / 5	10,2%	109,29	-47,9%
Rš-1253		8 / 0	0,0%	105,3	-51,1%
Rš-1217		2 / 0	0,0%	106,9	-35,6%
Rš-1202		12 / 6	50,0%	109,5	-41,9%
<b>Viso:</b>			<b>189 / 11</b>	<b>5,8%</b>	<b>109,5</b>

\* - nuo transformatorinės prijungtų saulės elektrinių bendro kiekio santykis su atsijungusiomis;

\*\* - nuo transformatorinės prijungtų el. linijų maksimali fiksuota įtampa;

\*\*\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\phi(P)$  režimo.

Matant rezultatus, pateiktus 25 lentelėje, galima teigti  $\cos\phi(P)$  funkcijos veikimas stipriai sumažino atsijungusių saulės elektrinių skaičių – nuo 113 atsijungusių elektrinių sumažėjo iki 11 saulės elektrinių. Priežastis šio sumažėjimo yra ženkliai sumažėjusios įtampos visoje linijoje, kurios svyruoja nuo 103,8% iki 109,5% nuo nominalios įtampos. Lyginant su įprastinio režimo taikant įtampos ribojimus duomenimis, įtampos mažėjo nuo 27,2% iki 56%. Toliau bus nagrinėjamos elektrinių atsijungimo trukmės, kurių duomenys pateikiami 26 lentelėje.

**26 lentelė.** Režimo  $\cos\phi(P)$  saulės elektrinių atsijungimų trukmė

<b>Daugiausiai atsijungusių elektrinių skaičius:</b>	11
<b>Laikas, kada atsijungė daugiausiai:</b>	12:40 - 13:30
<b>Atsijungimų trukmės:</b>	
Trumpiausias laikas, min	60
Vidutinis laikas, min	150,9
Ilgiausias laikas, min	250

Atsijungusių el. skaičius laiko intervale:	
60-110 min	2
120-190 min	5
200-250 min	4

Nagrinėjant 26 lentelės duomenis nustatoma, kad daugiausiai saulės elektrinių atsijungė laiko intervale nuo 12:40 iki 13:30 ir, kaip minėta anksčiau, atsijungė 11 saulės elektrinių. Atsijungimų trukmė svyruoja nuo 60 min. iki 250 min. (4 val. ir 10 min), vidutinis atsijungimo laikas siekia 150,9 min. Pagal gautą minimalų ir maksimalų atsijungimo intervalą, nustatomi trys mažesni intervalai bei priskiriamas atsijungusių elektrinių kiekis: nuo 60 min. iki 110 min. atsijungė 2 saulės elektrinės, nuo 120 min. iki 190 min. atsijungė 5 saulės elektrinės, o nuo 200 min. iki 250 min. atsijungė 4 saulės elektrinės. Sekanti rodiklių grupė yra transformatorių ir linijų apkrovimai, kurių duomenys pateikiami 27 lentelėje.

**27 lentelė.** Režimo  $\cos\phi(P)$  maksimalių apkrovimų rodikliai

Transformatorinė	Trans. apkrovimas, %		Linijos apkrovimas, %		Aktyviosios galios srautas, kW		Reak. galios srautas, kVAr
	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, %	Pokytis*, %	Faktinis, kW	Pokytis*, %	
Riešės TP	..**	..**	55,05%	-0,92%	1926,64	-12,59%	-1081,65
Rš-1273	8,70%	1,7%	7,55%	0,87%	10,61	-0,19%	-4,91
Rš-1230	85,72%	8,1%	64,02%	6,04%	106,81	-0,74%	-51,97
Rš-1222	17,69%	1,0%	12,24%	0,83%	26,98	-0,11%	-12,49
Rš-1279	45,86%	3,1%	42,83%	2,86%	90,65	-0,46%	-44,03
Rš-1201	28,00%	3,0%	9,62%	1,17%	17,96	-0,06%	-8,24
Rš-1252	30,79%	3,4%	27,20%	3,36%	38,58	-0,36%	-18,04
Rš-1250	21,09%	1,8%	10,44%	0,54%	17,69	-0,06%	-8,12
Rš-1299	25,03%	2,7%	..***	..***	179,21	0,18%	-81,93
Rš-1296	44,03%	3,1%	31,88%	3,48%	68,19	-0,35%	-32,19
Rš-1262	24,58%	2,7%	21,64%	2,72%	30,82	-0,55%	-14,56
Rš-1261	74,34%	3,0%	64,66%	3,00%	73,74	-0,07%	-34,05
Rš-1238	15,03%	1,5%	21,36%	2,63%	21,82	-0,18%	-10,07
Rš-1271	73,61%	-0,9%	79,77%	0,06%	164,94	-14,04%	-88,95
Rš-1253	53,56%	3,4%	25,45%	2,12%	55,13	-0,11%	-25,51
Rš-1217	56,55%	5,4%	..***	..***	324,2	0,72%	-147,71
Rš-1202	50,93%	-14,6%	66,99%	1,95%	157,73	-0,03%	-72,77
<b>Viso:</b>	<b>85,72%</b>	<b>8,13%</b>	<b>79,77%</b>	<b>6,04%</b>	<b>1926,64</b>	<b>-14,04%</b>	<b>-1081,65</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\phi(P)$  režimo;

\*\* - duomenys nepateikiami, nes nuo Riešės TP transformatoriaus yra daugiau prijungta 10 kV linijų, kurios šiame tyrime yra nevertinamos;

\*\*\* - duomenys nepateikiami, nes šios elektrinės prijungtos tiesiogiai nuo transformatorių 0,4 kV šunų.

Pagal pateiktus aukščiau rezultatus pastebima, kad nei transformatoriai, nei el. linijos nėra perkrauti, nes  $\cos\phi(P)$  režimo metu maksimalus transformatoriaus apkrovimas siekia 85,72% (maksimalus

padidėjimas transformatorių apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 8,13%), o linijos apkrovimas siekia 79,77% (maksimalus padidėjimas linijų apkrovimuose lyginant su įprastiniu režimu be ribojimu siekia 6,04%). Kalbant apie galių srautus, maksimalus aktyviosios galios srautas 1926,64 kW ir yra 12,59% mažesnis nei įprastiniame režime be įtampos ribojimų, maksimalus reaktyviosios galios vartojimo srautas siekė 1081,65 kVAr. Toliau bus analizuojami sugeneruotos energijos rodikliai, kurių duomenys pateikiami 28 lentelėje.

**28 lentelė.** Režimo  $\cos\phi(P)$  elektros energijos rodikliai

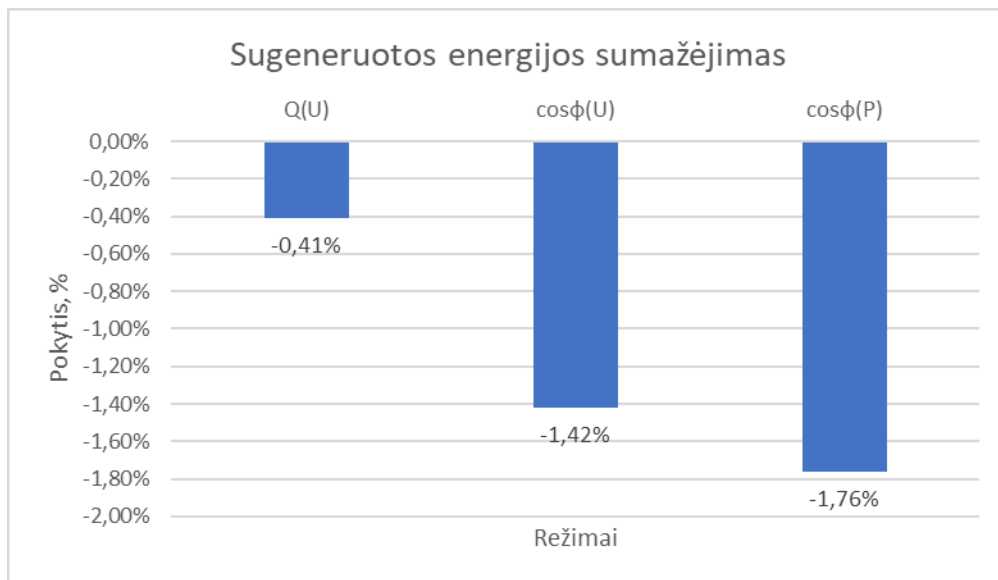
Transformatorinė	Sugeneruota aktyvioji el. energija		Suvartota reaktyvioji el. energija, kVAr
	Faktinė, kWh	Pokytis*	
Rš-1273	87,16	0,00%	39,68
Rš-1230	1046,9	0,00%	476,66
Rš-1222	220,89	0,00%	100,57
Rš-1279	1421,87	0,00%	647,41
Rš-1201	329,07	0,00%	149,83
Rš-1252	909,22	0,00%	413,99
Rš-1250	399,75	0,00%	182,01
Rš-1299	1462,38	0,00%	665,82
Rš-1296	852,15	0,00%	388
Rš-1262	724,86	0,00%	330,05
Rš-1261	1481,95	0,00%	674,72
Rš-1238	450,86	0,00%	205,28
Rš-1271	3729	-5,04%	1787,93
Rš-1253	664,21	0,00%	302,41
Rš-1217	2636,64	0,00%	1200,46
Rš-1202	2036,59	-6,30%	989,61
<b>Viso:</b>	<b>18684</b>	<b>-1,76%</b>	<b>8554,43</b>

\* - procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo ir  $\cos\phi(P)$  režimo.

Pagal 28 lentelės duomenis pastebima, kad aktyviosios elektros energijos generacija nežymiai skiriasi nuo maksimaliai galimos sugeneruoti el. energijos ir  $\cos\phi(P)$  reaktyviosios galios valdymo funkcija efektyviai atlieka savo darbą, tačiau sunaudoja 8554,43 kVArh reaktyviosios energijos.

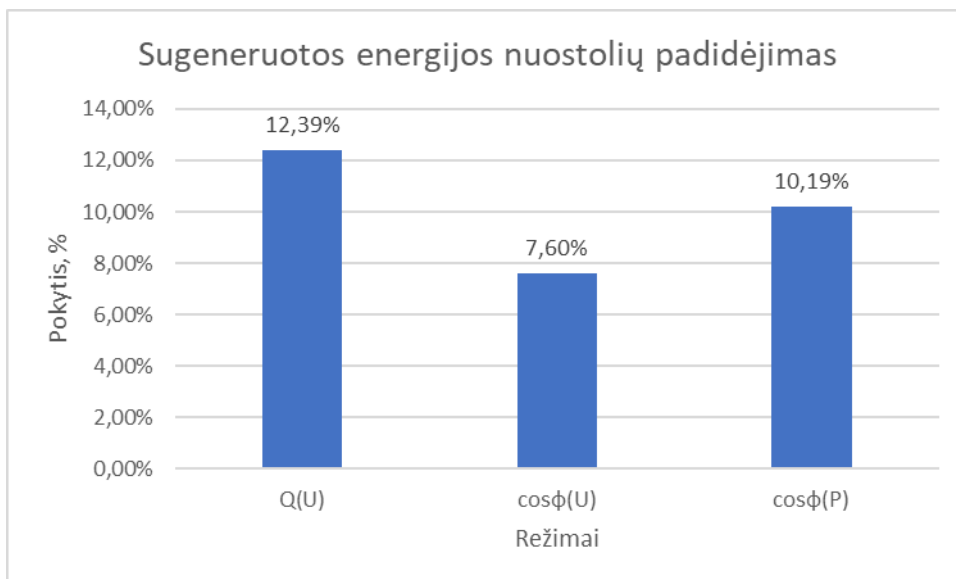
### 3.6. Reaktyviosios galios režimų palyginimas

Šiame skyrelyje bus atliekama 3.1 – 3.4 skyreliuose gautų rezultatų analizė tiesiogiai palyginant tarpusavyje tris skirtingus režimus:  $Q(U)$ ,  $\cos\phi(U)$  ir  $\cos\phi(P)$ . **Visuose šio poskyrio (3.5) paveiksluose matomas pokytis yra apibrėžiamas kaip tam tikro dydžio procentinis pokytis tarp įprastinio režimo be įtampos ribojimo vertės ir atitinkamo reaktyviosios galios valdymo režimo vertės.** Pirmiausia bus palyginamos elektrinių sugeneruotos energijos skirtingiems režimams. Palyginimas pateikiamas 28 paveiksle.



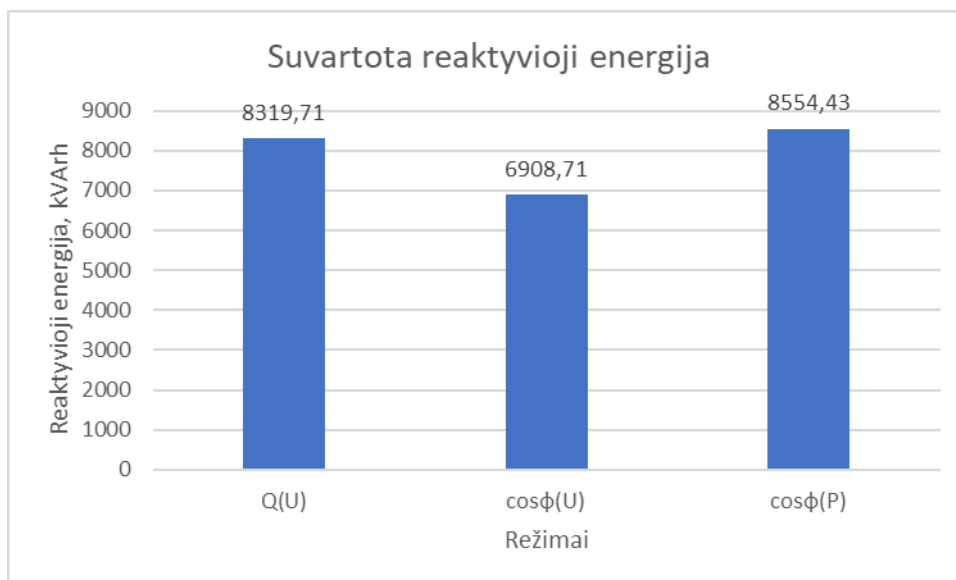
**28 pav.** Sugeneruotos energijos sumažėjimas

Nagrinėjant 28 paveikslo duomenis pastebima, kad visi režimai veikė efektyviai ir sugeneruota el. energija skyrėsi labai nežymiai nuo maksimaliai galimos sugeneruoti energijos (19018,54 kWh), tačiau geriausiai pasirodė Q(U) režimas, kurio sugeneruota el. energija buvo 0,41% mažesnė, nei maksimaliai galimos energijos kiekis. Sekantis palyginimas bus el. energijos generavimo nuostolių ir duomenis pateikiami 29 paveiksle.



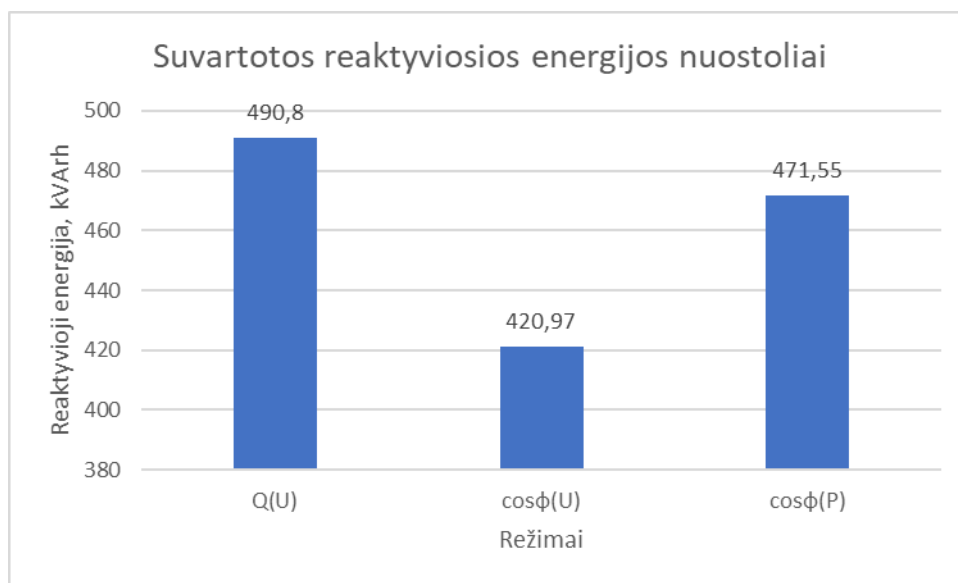
**29 pav.** Sugeneruotos energijos nuostolių padidėjimas

29 paveiksle pateikti duomenys rodo, kad didžiausias el. energijos nuostolių padidėjimas yra Q(U) režime, nes analogiškai ir daugiausiai sugeneruoja el. energijos (pagal 28 paveikslo duomenis). Antroje vietoje yra cosφ(P) režimas (nors el. energijos generacija yra mažiausia), kur el. energijos nuostolių padidėjimas yra daugiau siejamas su didesniu reaktyviosios galios vartojimu (pagal 30 paveikslo duomenis). Trečioje vietoje yra cosφ(U) režimas, kurio mažą rodiklį įtakoja priešingai nei cosφ(P) situacijoje – mažas reaktyviosios energijos vartojimas. Sekanti rodiklis bus reaktyviosios galios vartojimo, kurio rezultatai pateikiami 30 paveiksle.



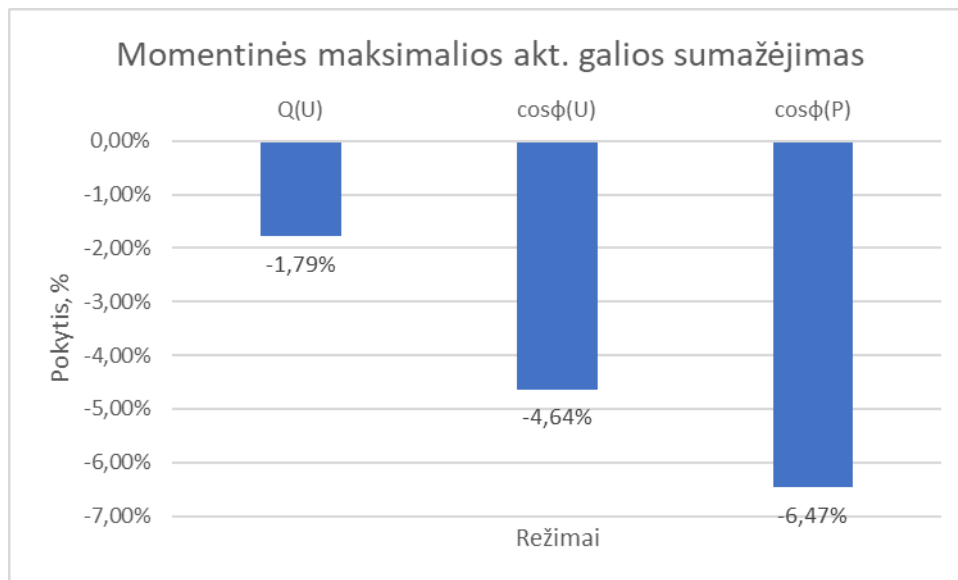
**30 pav.** Suvartota reaktyvioji energija

30 paveikslas duomenys pateikiami matavimo vienetais, nes įprastiniuose režimuose nėra reaktyviosios galios vartojimo. Tad nagrinėjant rezultatus pastebima, kad daugiausiai reaktyviosios energijos vartojo  $\cos\phi(P)$  režimas, nors aktyviosios el. energijos buvo sugeneruota mažiausiai (28 paveikslas). Tai būtų galima paaiškinti pačiu funkcijos veikimu – reaktyvioji energija vartojama pagal generuojamą aktyviąją galią neatsižvelgiant į įtampas tinkle. Tokiu atveju, reaktyviosios energijos apkrova gali atsirasti net ir tada, kai situacija tinkle nėra bloga ir elektrinės gali sklandžiai veikti. Mažiausiai reaktyviosios energijos suvartojo  $\cos\phi(U)$ , kas kartu yra labai teigiama savybė siekiant nustatyti efektyviausią reaktyviosios galios valdymo funkciją. Sekantis rodiklis yra reaktyviosios energijos vartojimo nuostoliai ir gauti rezultatai pateikiami 31 paveiksle.



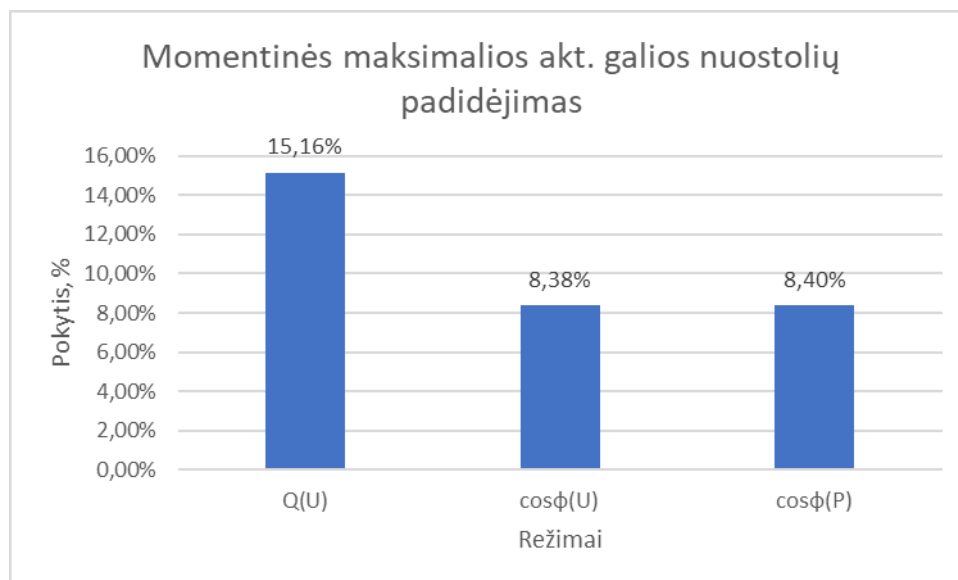
**31 pav.** Suvartotos reaktyviosios energijos nuostoliai

Tyrinėjant 31 paveikslas duomenis, grafikų išsidėstymas analogiškas kaip 29 paveiksle. Pirmoje vietoje yra  $Q(U)$  funkcija dėl didelio aktyviosios ir reaktyviosios energijos kiekio, o paskutinėje vietoje yra  $\cos\phi(U)$  funkcija, dėl mažo reaktyviosios energijos vartojimo. Sekantis palyginimas bus tarp aktyviosios galios srautų skirtinguose režimuose, duomenys pateikiami 32 paveiksle.



**32 pav.** Momentinės maksimalios aktyviosios galios sumažėjimas

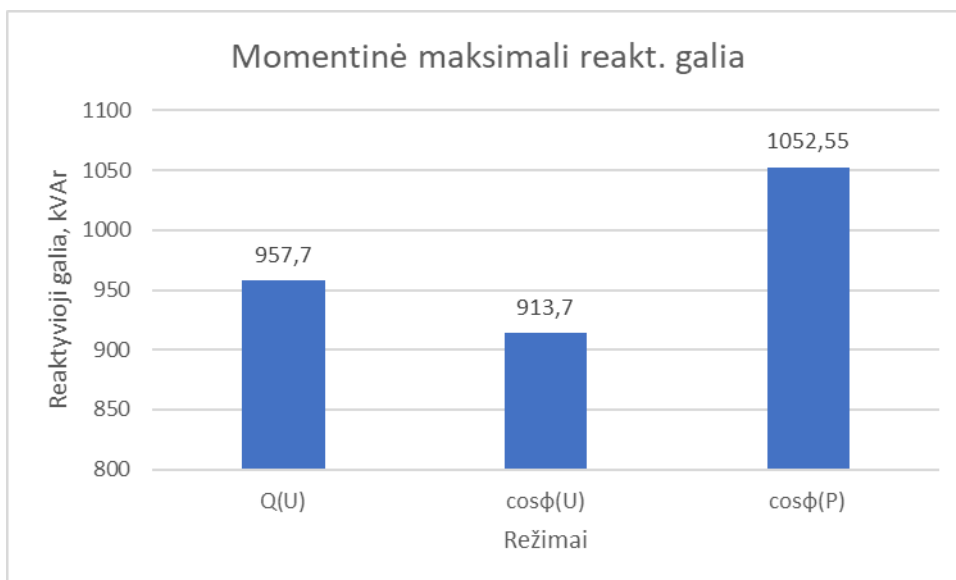
Pagal 32 paveikslo duomenis pastebima, kad augant sugeneruotos el. energijos kiekiui (28 paveikslas) auga ir maksimali elektrinių momentinė aktyvioji galia, nes didesnis kiekis elektrinių veikia intensyviausiu generacijos laiko momentu. Sekantis palyginimas atliekamas momentinės galios nuostolių pasiskirstyme tarp režimų, duomenys pateikiami 33 paveiksle.



**33 pav.** Momentinės maksimalios aktyviosios galios nuostolių padidėjimas

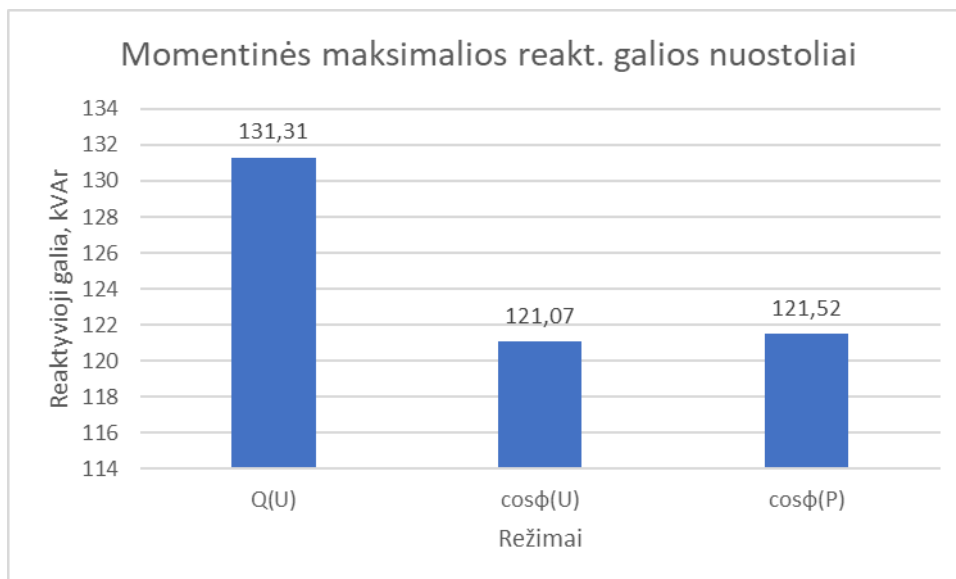
Vertinant 33 paveikslo rodiklius, matoma, jog labiausiai į priekį įsiveržė  $Q(U)$  funkcija momentinės maksimalios aktyviosios galios nuostolių padidėjime, likusios dvi funkcijos yra apylygės, nors maksimalios momentinės galios skiriasi labiau. Tikėtina, kad apylygius nuostolius galėjo lemti reaktyviosios ir aktyviosios galių persidengimu –  $\cos\phi(U)$  turi didesnę maksimalią momentinę aktyviąją galią nei  $\cos\phi(P)$  funkcija, tačiau turi žymiai mažesnę maksimalią momentinę reaktyviąją galią nei  $\cos\phi(P)$  funkcija. Toliau bus palyginamos momentinės maksimalios reaktyviosios galios, duomenys pateikiami 34 paveiksle.





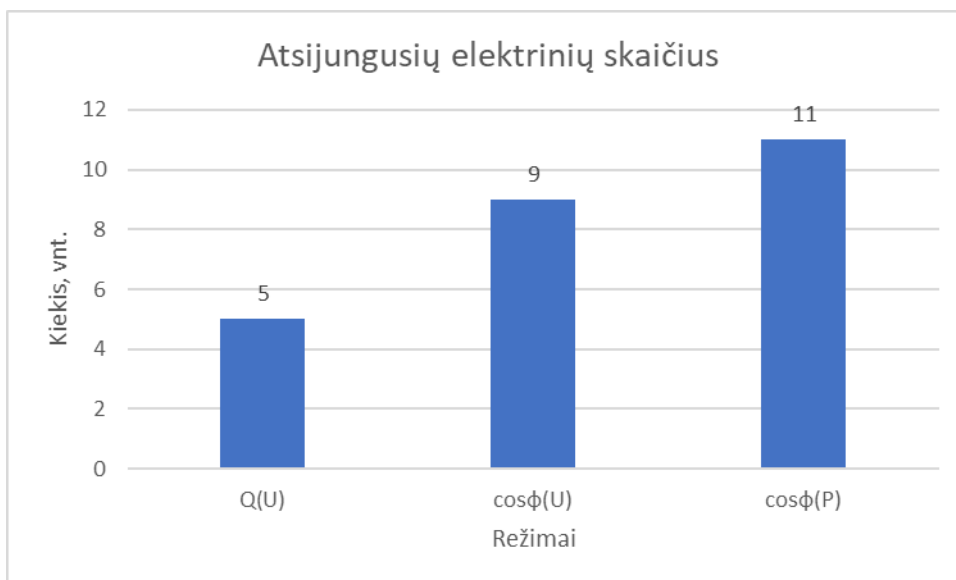
**34 pav.** Momentinė maksimali reaktyvioji galia

Stebint 34 paveikslo duomenis, matoma, kad didžiausias reaktyviosios galios poreikis buvo  $\cos\phi(P)$  režimo metu ir tą būtų galima paaiškinti taip pat kaip ir analogiška 30 paveikslo situacija, jog taip yra dėl pačios funkcijos veikimo principo. Sekantis palyginimas atliekamas tarp maksimalių momentinių reaktyviosios galios nuostolių, duomenis pateikiami 35 paveiksle.



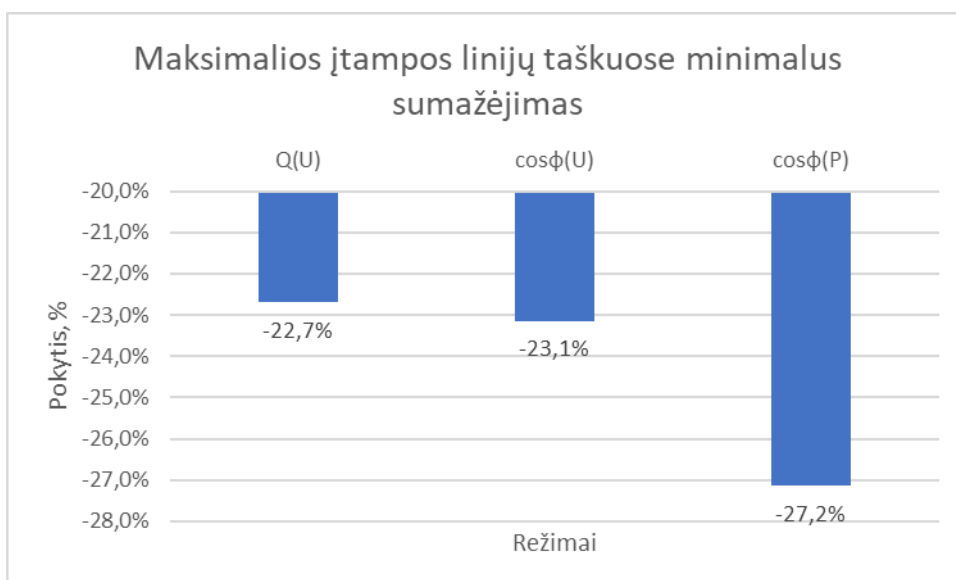
**35 pav.** Momentinės maksimalios reaktyviosios galios nuostoliai

Analizuojant 35 paveikslo duomenis matoma analogiška situacija 33 paveiksliui (maksimalios momentinės aktyviosios galios) – Q(U) režimo maksimalūs momentiniai reaktyviosios galios nuostoliai didžiausi, o  $\cos\phi(U)$  ir  $\cos\phi(P)$  nuostoliai yra apylygiai. Toliau lyginami atsijungusių elektrinių kiekiai, kurių rezultatai pavaizduoti 36 paveiksle.



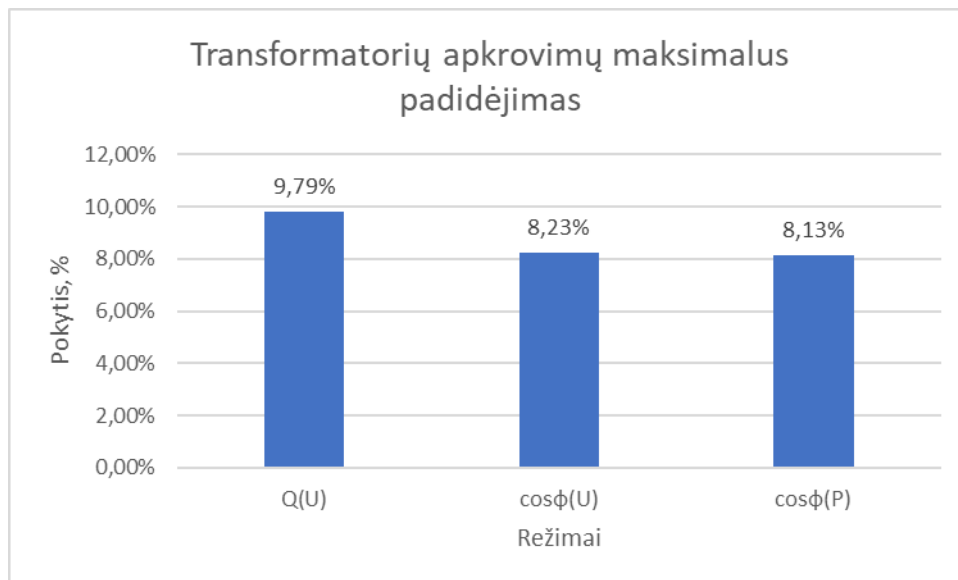
**36 pav.** Atsijungusių elektrinių skaičius

Tyrinėjant 36 paveikslo duomenis matoma, kad daugiausiai elektrinių atsijungė nuo elektros tinklo elektrinių funkcijos  $\cos\phi(P)$  veikimo metu, mažiausiai atsijungė funkcijos  $Q(U)$  veikimo metu. Kadangi  $\cos\phi(P)$  veikimo metu yra suvartojama daugiausiai reaktyviosios galios, tai rodo, kad funkcija neveikia efektyviai. Sekantis palyginimas atliekamas įtampų mažinime ir duomenys pateikiami 37 paveiksle.



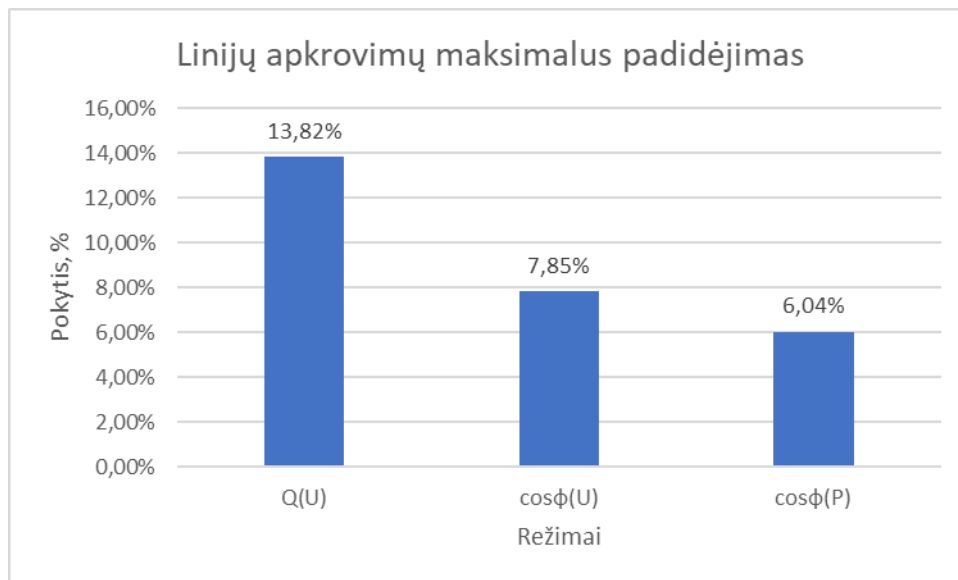
**37 pav.** Maksimalios įtampos linijų taškuose minimalus sumažėjimas

Stebint 37 paveikslo duomenis matomas funkcijos  $\cos\phi(P)$  pirmavimas, tačiau praeitose analizėse stebimas prastas veiksmingumas tiek energijos generavimo, tiek elektrinių atsijungimo nuo tinklo rodikliuose. Tokį įtampų mažinimą galima paaiškinti funkcijos veikimo principu, kada įtampa mažinama ne visada reikiamu metu (esant per aukštoms įtampoms tinkle). Toliau palyginami transformatorių maksimalių apkrovimų pokyčiai, kurių duomenys pateikiami 38 paveiksle.



**38 pav.** Transformatorių apkrovimų maksimalus padidėjimas

Iš 38 paveikslo duomenų pastebima, kad didžiausia maksimali apkrova transformatoriams buvo Q(U) režimo metu, o  $\cos\phi(U)$  ir  $\cos\phi(P)$  režimuose maksimali apkrova pasiskirstė apylygiai. Paskutinis duomenų palyginimas atliekamas linijų apkrovimuose, rezultatai pateikiami 39 paveiksle.



**39 pav.** Linijų apkrovimų maksimalus padidėjimas

Analizuojant 39 paveikslo duomenis, daugiausiai linijas apkrovė Q(U) funkcija, antroje vietoje buvo  $\cos\phi(U)$  funkcija, o geriausiai pasirodė  $\cos\phi(P)$  funkcija linijas apkraudama mažiausiai.

Vertinant 28 – 39 paveiksluose pateiktus rezultatus, visos funkcijos daugiau mažiau pasirodė apylygiai ir pakankamai efektyviai padėjo sumažinti elektrinių atsijungimų skaičių. Tačiau yra niuansų, kurie padeda išskirti stipriąsias ir silpnąsias reaktyviosios galios valdymo funkcijų savybes. Pradedant nuo sugeneruotos elektros energijos, geriausiai pasirodė Q(U) funkcija, kuri leido sugeneruoti tik 0,41% mažiau nei maksimalus galimas energijos kiekis, kitą vertus, likusios dvi funkcijos  $\cos\phi(U)$  ir  $\cos\phi(P)$  efektyvumu skiriasi nedaug (1,42% ir 1,76%) nuo pirmosios, tad didelio esminio skirtumo nėra. Kalbant apie suvartotą reaktyviąją energiją, tai šioje vietoje atsiranda jau

didesni skirtumai. Žiūrint į 30 paveikslą,  $Q(U)$  ir  $\cos\phi(P)$  funkcijos vartojo apylygiai reaktyviosios energijos (8554,43 kVArh ir 8319,71 kVArh), kai tuo tarpu  $\cos\phi(U)$  funkcija suvartojo beveik 20% mažiau reaktyviosios energijos ir rodiklis siekė 6908,71 kVArh. Žvelgiant į likusias rodiklių analizes, būtų galima iškart atmesti  $\cos\phi(P)$  funkciją, nes iš esmės, ji pasirodo labiausiai neefektyvi lyginant visas tris reaktyviosios galios valdymo funkcijas.  $\cos\phi(P)$  funkcija ne tik kad mažiau padeda sugeneruoti el. energijos, sumažinti elektrinių atsijungimų kiekį, tačiau, kad pasiektų esamus rodiklius, suvartoja daugiau reaktyviosios galios ir lemia didesnius nuostolius pačiam el. tinklui. Kalbant apie likusias dvi funkcijas ( $Q(U)$  ir  $\cos\phi(U)$ ), galima teigti, kad nors ir  $Q(U)$  funkcija padeda sugeneruoti daugiau el. energijos ir sumažina atsijungusių elektrinių kiekį tinkle, tačiau skirtumas nuo  $\cos\phi(U)$  funkcijos nėra didelis. Bet  $\cos\phi(U)$  funkcija yra akivaizdžiai pranašesnė kalbant apie reaktyviosios galios vartojimą ir skirtumai su  $Q(U)$  funkcija lengvai pastebimi. Būtent dėl šios priežasties efektyviausia reaktyviosios galios funkcija pasirenkama  $\cos\phi(U)$  funkcija, kurios esminis privalumas yra mažesni kuriami nuostoliai elektros tinklui.

### **3.7. Reaktyviosios galios valdymo įtaka saulės elektrinių atsiperkamumui**

Poskyryje 3.1 pateikti įprastinių režimų (be įtampos ribojimo ir su įtampos ribojimu) skaičiavimų rezultatai, iš esmės, išskyrė dvi skirtingas situacijas: pirmojoje situacijoje gautas pagamintos energijos kiekis, kurį turi gaminti saulės elektrinės nepaisant tinkle vyraujančių įtampų, o antroji parodė arčiau realybės esančią situaciją, kuomet elektrinių gamybos pajėgumai yra ribojami dėl per aukštų įtampų tinkle. Susidaręs elektros energijos skirtumas tarp planuojamos gamybos kiekio (pirma situacija) ir realiai gaminamo kiekio (antra situacija) yra finansiniai nuostoliai saulės elektrinių savininkams, kurie ilgina piniginių investicijų atsipirkimo laikotarpį. Šiame darbe tyrinėtos reaktyviosios galios valdymo funkcijos, kaip parodė rezultatai, beveik visiškai panaikino susidariusį skirtumą, vadinasi kompensuoja patirtus finansinius nuostolius. Kadangi, 3.5 poskyryje buvo išanalizuota reaktyviosios galios valdymo funkcijų nauda iš elektrotechninės pusės, tai šiame poskyryje bus nustatyta jų finansinė nauda.

Tyrime atliekami skaičiavimai apima skaičiavimus vienai parai. Tai yra ribinė situacija, kuomet vyrauja labai palankios meteorologinės sąlygos saulės elektrinių generacijai, momentinis elektros energijos suvartojimas yra nežymus, o pradinė 10 kV įtampa ties Riešės TP siekia maksimalią palaikomą įtampą (10,4 kV). Didžiausia tikimybė susidaryti tokiai ribinei situacijai yra gegužės – rugpjūčio mėnesiais, nes būtent šiuo metų laiku saulės elektrinės gamina elektros energiją efektyviausiai. Likusiais mėnesiais energijos gamyba stipriai sumažėja dėl pasikeitusių meteorologinių sąlygų, įtampos elektros tinkluose tampa žemesnės ir nebetrikdo elektrinių darbo. Kadangi, dėl elektrotechninių priežasčių nepagamintas elektros energijos yra vienos paros laikotarpio, būtina nustatyti parų, kurios atitinka aukščiau išdėstytus ribinės situacijos kriterijus, skaičių per metus, t. y. gegužės – rugpjūčio mėnesiais, kai tokios ribinės situacijos rizika yra didžiausia.

Šiam tikslui pasiekti, bus pasitelkiama saulės elektrinių projektavimo ir modeliavimo programinė įranga „PV\*SOL“. Su „PV\*SOL“ galima suprojektuoti ir atlikti elektrotechninių parametru skaičiavimus visų tipų šiuolaikines saulės elektrinių sistemoms – nuo mažos sistemos ant namo stogo iki didelių saulės elektrinių parkų, kuriuose yra iki 100 000 modulių [37]. Naudojantis šia programa, bus gaunamas tipinės saulės elektrinės ant stogo eksportuojamos į elektros tinklus galios kiekis vieneriems metams skirtas nustatyti dienų su ribine situacija skaičiui gegužės – rugpjūčio mėnesiais. Toliau aprašomi žingsniai, kaip tai bus įgyvendinama:

- Pasirenkama geografinė lokacija modeliuojamos saulės elektrinės (Bendorių kaimas, Vilniaus raj. savivaldybė), kad būtų paimami artimiausios meteorologinių stebėjimų stoties istoriniai duomenys, kurie yra svarbūs saulės elektrinės gamybos apimtims apskaičiuoti;
- Sudaromas tipinis saulės elektrinės ant gyvenamojo namo stogo modelis, kurio duomenys:
  - Saulės panelių skaičius 25 vnt., kurių kiekvienos nominali galia yra 400 W (bendra galia 10 kW);
  - Inverteris, kurio nominali aktyvioji galia ( $P_{MAX}$ ) yra 10 kW;
  - Saulės panelių orientacija yra pietų kryptimi, nuolydžio kampas – 37°.
- Simuliacijos metu apskaičiuotas galios kiekis kas 1 val. vienerių metų laikotarpiui bus padalinamas iš nominalios inverterio galios. Gautą koeficientą galima laikyti saulės elektrinės efektyvumo rodikliu, kur „1“ parodo maksimalų saulės elektrinės efektyvumą laiko momentu, o „0“ – elektrinė neveikia;
- Pagal aukščiau nustatytą metų laikotarpį (gegužės – rugpjūčio mėnesiai) atrenkami koeficientai, kurių reikšmės yra daugiau nei „0,9“. Prie tokių inverterio veikimo reikšmių labiausiai tikėtina, kad tinklo įtampos elektrinės prijungimo taške viršys įtampų kokybės standarte LST EN 50160:2010 "Viešųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos" [34] nustatyta maksimalią 253 V ribą (arba 10% nuo nominalios 230 V įtampos);
- Suskaičiuojamas dienų skaičius, kurių metu buvo bent kartą pasiekta 0,9 ir daugiau koeficiento reikšmė.

Taigi, atlikus visus veiksmus apskaičiuota, kad dienų, kurios labiausiai tikėtina, jog turi aukščiau aprašytą ribinę situaciją, skaičius yra 40, kurių pasiskirstymas kiekvieną mėnesį pateikiamas 29 lentelėje.

**29 lentelė.** Potencialiai ribinę situaciją turinčių dienų skaičius

Mėnesis	Dienų skaičius
Gegužė	12
Birželis	10
Liepa	11
Rugpjūtis	7
<b>Viso:</b>	<b>40</b>

Sekančiu žingsniu bus paskaičiuojamas nesugeneruotos elektros energijos kiekis per parą, kuris bus skirtas paskaičiuoti metiniam nesugeneruotos elektros energijos kiekiui.

Pirmiausiai bus paskaičiuojamas skirtumas tarp planuojamos gamybos kiekio (aukščiau išdėstyta pirma situacija) ir realiai gaminamo kiekio (aukščiau išdėstyta antra situacija). Kadangi tyrime yra prijungta daug skirtingos galios elektrinių į 0,4 kV tinklus, tikslingiau paskaičiuoti vidutinį nesugeneruotos elektros energijos kiekį tenkantį elektrinių leistinos galios 1 kW. Šiam tikslui pasiekti, atliekami veiksmai:

- Paskaičiuojamas skirtumas planuojamos gamybos kiekio ir realiai gaminamo kiekio kiekvienai saulės elektrinei (toliau bus vertinami tik tie skirtumai, kurių reikšmė nelygi 0 kWh);
- Gautas skirtumas yra padalinamas iš elektrinės leistinos generuoti galios kiekio;
- Iš gautų duomenų išvedamas aritmetinis vidurkis.

Atlikus skaičiavimus pagal išdėstytus veiksmus gauta, kad vidutiniškai 1 kW leistinos generuoti galios dėl per aukštų įtampų nepagamina 3,87 kWh elektros energijos per parą. Padauginus šį skaičių iš ribinės situacijos dienų skaičiaus per metus, gaunama 154,71 kWh per metus.

Kadangi nesugeneruotas elektros energijos kiekis yra finansiniai nuostoliai elektrinės savininkui, tiksliau nesugeneruotą energijos kiekį išreikšti pinigine išraiška. Šiam tikslui pasiekti nustatomos vidutinės elektros energijos kainos pasinaudojant 2023 m. „Nord Pool“ biržos duomenis ir pritaikant 2023 m. taikytą elektros energijos persiuntimo paslaugos kainą, kuri siekė 0,07022 Eur/kWh. Tuomet kiekvienam 2023 m. mėnesiui vidutinės kainos pateikiamos 30 lentelėje.

**30 lentelė.** Vidutinės 2023 m. elektros energijos kainos žemos įtampos buitiniams vartotojams

Mėnesis	„Nord Pool“ kaina		Persiuntimo paslaugos kaina, Eur/kWh	Bendra kaina, kWh
	Eur/MWh	Eur/kWh		
Sausis	102,97	0,10	0,07022	0,17
Vasaris	114,71	0,11	0,07022	0,18
Kovas	88,73	0,09	0,07022	0,16
Balandis	67,19	0,07	0,07022	0,14
Gegužė	78,02	0,08	0,07022	0,15
Birželis	98,69	0,10	0,07022	0,17
Liepa	83,84	0,08	0,07022	0,15
Rugpjūtis	102,49	0,10	0,07022	0,17
Rugsėjis	117,41	0,12	0,07022	0,19
Spalis	87,36	0,09	0,07022	0,16
Lapkritis	105,05	0,11	0,07022	0,18
Gruodis	89,10	0,09	0,07022	0,16

Turint vidutines elektros energijos kainas, paskaičiuojama nesugeneruotos elektros energijos (nuostoliai) kiekio pinigine išraiška, kuri pateikiama 31 lentelėje.

**31 lentelė.** Nesugeneruoto elektros energijos kiekio piniginiai nuostoliai

Mėnesis	Dienų skaičius	Vidutinė el. energijos kaina, Eur/kWh	Nuostoliai 1 kW įrengtosios galios, Eur	Nuostoliai tipinei 10 kW elektrinei, Eur
Gegužė	12	0,15	6,88	68,84
Birželis	10	0,17	6,54	65,37
Liepa	11	0,15	6,56	65,58
Rugpjūtis	7	0,17	4,68	46,79
<b>Viso:</b>			<b>24,66</b>	<b>246,58</b>

Prieš tai atliktos tipinės 10 kW leistinos generuoti galios saulės elektrinės vienerių metų simuliacijos, buvo gautas maksimalus pagamintos elektros energijos kiekis vieneriems metams, kuris siekė 10804 kWh. Padauginus 154,71 kWh iš 10 kW (elektrinės leistina generuoti galia) gaunama, kad per metus 10 kW elektrinė nepagamintų 1547,1 kWh, o tai atitinka 14,32% nuo 10804 kWh.

Siekiant paskaičiuoti kiek pakinta 10 kW saulės elektrinės atsipirkimas priimama, kad gyvenamojo namo įvado galia yra 11 kW, tad apytikslis vidutinis metinis elektros energijos suvartojimas gali siekti 11000 kWh per metus. Pateikiamas mėnesinis suvartotos ir sugeneruotos elektros energijos kiekis bei paskaičiuoti finansiniai rodikliai 32 lentelėje.

**32 lentelė.** Energijos generavimo, vartojimo ir finansiniai rodikliai

Mėnesis	Vartojimas, kWh	Pagaminta el. energija, kWh	Atiduota į tinklą el. energija, kWh		Paimta iš tinklo el. energija, kWh		Sutaupomi pinigai, Eur
			Kas mėnesį	Kaupimas	Turimas likutis	Perkama energija	
Balandis	-898	1225	327	327	327	0	133,85 €
Gegužė	-793	1395	602	929	929	0	106,62 €
Birželis	-775	1394	619	1548	1548	0	81,97 €
Liepa	-760	1422	662	2210	2210	0	60,42 €
Rugpjūtis	-771	1322	551	2761	2761	0	77,66 €
Rugsėjis	-808	1003	196	2956	2956	0	123,45 €
Spalis	-934	632	0	2956	2654	0	143,86 €
Lapkritis	-997	289	0	2956	1946	0	172,25 €
Gruodis	-1106	231	0	2956	1071	0	207,54 €
Sausis	-1123	347	0	2956	295	0	176,99 €
Vasaris	-1046	513	0	2956	0	-238	141,67 €
Kovas	-986	1030	43	3000	43	0	154,25 €
<b>Viso:</b>	<b>-10999</b>	<b>10804</b>	<b>3000</b>		<b>-238</b>		<b>1 580,52 €</b>

Analizuojant 32 lentelėje pateiktus duomenis, suvartota energija kiekvienam mėnesiui yra skirtinga dėl sezoniškumo ir paskaičiuota pagal tipinius metinius apkrovų grafikus. Sugeneruota elektros energija atitinka „PV\*SOL“ programoje anksčiau atliktos 10 kW saulės elektrinės simuliacijos duomenis. Kadangi gyvenamieji namai dalyvauja gaminančių vartotojų programoje, tai visa perteklinė sugeneruota elektros energija yra atiduodama į elektros tinklą „pasaugojimui“ pritaikant VERT (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba) nustatytą pasaugojimo mokestį, kuris nustatomas 0,06655 Eur/kWh. Elektros energijos vartojimo kaina pritaikoma pagal 30 lentelės duomenis. Turint mokestinius tarifus, paskaičiuojamas sutaupymas, t. y. kaina, kurią vartotojas turėtų sumokėti už suvartotą elektros energiją, tačiau, dėka saulės elektrinės, ši suma susitaupo. Tad 10 kW saulės elektrinė gyvenamajam namui per metus sutaupo 1580,52 Eur elektros energijos išlaidų. Sekantis žingsnis yra paskaičiuoti 10 kW saulės elektrinės įrengimo medžiagų ir darbų sąmatą, kuri pateikiama 33 lentelėje.

**33 lentelė.** Saulės elektrinės įrengimo sąmata

Įrenginys/paslauga	Kiekis, vnt.	Kaina vieneto, Eur	Suma, Eur
Saulės fotovoltinės moduliai 400 W	25	150,00 €	3 750,00 €
10 kW galios inverteris	1	1 900,00 €	1 900,00 €
Saulės elektrinės konstrukcijos (komplektai)	25	30,00 €	750,00 €
Jungiamieji laidai (metrais)	50	0,20 €	10,00 €
Darbų kaina (kaina pagal galingumą)	10	115,00 €	1 150,00 €
Transportavimas	1	200,00 €	200,00 €
<b>Viso:</b>			<b>7 760,00 €</b>

Taigi, 2024 m. kainomis 10 kW saulės elektrinę kainuoja įsirengti apie 7760 Eur. Tačiau, valstybė skatina atsinaujinančių išteklių plėtrą ir skiri kompensaciją už patirtas išlaidas saulės elektrinės įsirengimui iki 10 kW galios. 2024 m. parama saulės elektrinėms siekė 323,01 Eur už 1 kW saulės elektrinės įrengtosios galios. Todėl, įvertinus valstybės paramą, elektrinės įrengimo sąmata siekia 4530 Eur.

Norint paskaičiuoti atsipirkimą, įrengimo sąmata (išlaidos) dalinama iš sutaupymo elektros energijos išlaidoms ir gaunamas rezultatas siekia 2,87 metų arba 2 metus ir 10 mėnesių.

Tačiau, jei reaktyviosios galios valdymo funkcijos nebūtų naudojamos, elektrinės veikimas būtų apribotas dėl per aukštų įtampų tinkle. Per metus 10 kW elektrinė vidutiniškai netektų 1547,1 kWh elektros energijos. Įvertinus šią energijos netekimą, perskaičiuojami metiniai sutaupymai dėl elektros energijos išlaidų, kurie pateikti 34 lentelėje.

**34 lentelė.** Energijos generavimo, vartojimo ir finansiniai rodikliai įvertinus apribotos generacijos kiekį

Mėnesis	Vartojimas, kWh	Pagaminta el. energija, kWh	Atiduota į tinklą el. energija, kWh		Paimta iš tinklo el. energija, kWh		Sutaupomi pinigai, Eur
			Kas mėnesį	Sumavimas	Turimas likutis	Perkama energija	
Balandis	-898	1225	327	327	327	0	133,85 €
Gegužė	-793	931	138	464	464	0	137,52 €
Birželis	-775	1007	232	696	696	0	107,72 €
Liepa	-760	996	236	933	933	0	88,75 €
Rugpjūtis	-771	1051	280	1213	1213	0	95,68 €
Rugsėjis	-808	1003	196	1408	1408	0	123,45 €
Spalis	-934	632	0	1408	1106	0	143,86 €
Lapkritis	-997	289	0	1408	398	0	172,25 €
Gruodis	-1106	231	0	1408	0	-477	118,08 €
Sausis	-1123	347	0	1408	0	-776	54,69 €
Vasaris	-1046	513	0	1408	0	-533	89,95 €
Kovas	-986	1030	43	1452	43	0	154,25 €
<b>Viso:</b>	<b>-10999</b>	<b>9256</b>	<b>1452</b>		<b>-1786</b>		<b>1 420,06 €</b>



Iš 34 lentelės duomenų pastebima, kad metiniai sutaupymai sumažėja iš 1580,52 Eur į 1420,06 Eur (skirtumas 160,46 Eur), analogiškai investicijų į saulės elektrinę atsipirkimas pailgėja nuo 2 metų ir 10 mėnesių iki 3 metų ir 2 mėnesių (skirtumas 4 mėnesiai).

## Išvados

1. Per pastarąjį dešimtmetį atsinaujinančių energijos išteklių (toliau – AEI) energetika Lietuvoje išaugo beveik iki trijų kartų – nuo 585 MW instaliuotos galios 2015 m. iki 1745 MW 2023 m. Perspektyvoje numatoma, kad 2022 – 2027 m. laikotarpyje atsinaujinančių išteklių elektrinių bus pastatyta tiek pat, kiek tai buvo padaryta 2001 – 2021 m. periodu.
2. Skirstomasis tinklas prasideda nuo 35 kV įtampos lygio, baigiasi ties 0,23 kV įtampos lygiu ir skirtas perduoti el. energiją vartotojams mažais atstumais (iki 15 km). Esminiai elektrinių prijungimą ribojantys veiksniai: leistinų įtampos ribų pažeidimai (sudaro 46% atvejų) ir per dideli galios srautai (sudaro 26% atvejų). Reaktyvioji galia apibūdinama kaip galia, kuri neatlieka naudingo darbo tačiau cirkuliuoja elektros grandinėje, padeda palaikyti įtampą bei srovę reikiamose ribose.
3. Tyrimo skaičiavimams atlikti pasirenkama elektros tinklo modeliavimo programinė įranga „NEPLAN“. Pasirenkama 10 kV linija, kurioje prijungta 189 saulės elektrinės (2567,29 kW). Tyrime naudojamos reaktyviosios galios valdymo funkcijos:  $Q(U)$ ,  $\cos\phi(U)$  ir  $\cos\phi(P)$ . Gamybos profilis sudaromas pagal realiai veikiančių saulės elektrinių išmaniųjų skaitiklių duomenis išvedant gamybos koeficientus kas 10 minučių vienos paros trukmės.
4. Atlikus visus skaičiavimus nustatyta, kad visos funkcijos apylygiai padidino linijos pralaidumą, tačiau šiuo klausimu geriausiai pasirodė  $Q(U)$  funkcija, nes generavo daugiausiai el. energijos (tik 0,41% mažiau nei įprastiniame režime be įtampos ribojimo), atsijungė mažiausiai saulės elektrinių (tik 5) bei buvo didžiausias momentinis galios srautas (tik 3,09% mažiau nei įprastiniame režime be įtampos ribojimo). Tačiau praktiniam naudojimui tinkamesnė būtų  $\cos\phi(U)$  funkcija, nes nors ir sugeneruotas el. energijos kiekis visų funkcijų veikimo metu buvo apylygis, tačiau  $\cos\phi(U)$  funkcijai prireikė pastebimai mažesnio reaktyviosios galios kiekio pralaidumų padidinimui.
5. Atliekant finansinę analizę nustatyta, kad vidutiniškai 1 kW leistos generuoti galios dėl per aukštų įtampų nepagamina 154,71 kWh per metus. Susimodeliuotos tipinės 10 kW saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis normaliomis sąlygomis siekia 2 metus ir 10 mėnesių, o atmetus nesugeneruotą 1547,1 kWh elektros energijos kiekį siekia 3 metus ir 2 mėnesius. Vadinasi reaktyviosios galios funkcijos padėjo sumažinti atsipirkimą 4 mėnesiais.

## Literatūros sąrašas

1. ABDELSLAM ELGOHARY, A. ir kt. Controlled Reactive Power Supplied to Grid by Photovoltaic Connected . 2019. [žiūrėta 2024-05-14].
2. ADOMAVIČIUS, V. Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos. *Mažosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos* . 2013. [žiūrėta 2023-05-17].
3. ALMEIDA, D. ir kt. Comparison of Reactive Power Control Techniques for Solar PV Inverters to Mitigate Voltage Rise in Low-Voltage Grids. *Electronics 2021, Vol. 10, Page 1569*. 2021. Vol. 10, no. 13, p. 1569. [žiūrėta 2024-05-14]. . Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/13/1569/htm>.
4. ALSHAHRANI, A. ir kt. The technical challenges facing the integration of small-scale and large-scale PV systems into the grid: A critical review. *Electronics (Switzerland)* . 2019. Vol. 8, no. 12. [žiūrėta 2024-05-14].
5. BOBINAITE, V. - TARVYDAS, D. Financing instruments and channels for the increasing production and consumption of renewable energy: Lithuanian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 38, p. 259–276. [žiūrėta 2023-06-17].
6. BRAUN, M. [interaktyvus]. 2009. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/46038289>.
7. DHANERIA, A. Grid connected PV system with reactive power compensation for the grid. *2020 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2020* . 2020. [žiūrėta 2024-05-14].
8. FAHMY, H. The rise in investors' awareness of climate risks after the Paris Agreement and the clean energy-oil-technology prices nexus. *Energy Economics* . 2022. Vol. 106, p. 105738. [žiūrėta 2023-06-16].
9. FATIMA, S. ir kt. Review on the PV Hosting Capacity in Distribution Networks. *Energies 2020, Vol. 13, Page 4756* [interaktyvus]. 2020. Vol. 13, no. 18, p. 4756. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4756/htm>.
10. GECEVIČIUS, G. - KAVALIAUSKAS, Ž. Development of Renewable Energy in Lithuania: Experience, State and Trends. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2021. Vol. 77, no. 4, p. 64–72.
11. GUIGAITĖ, A. - JAKUBAVIČIUS, A. SAULĖS ENERGETIKOS PROJEKTŲ PLĖTROS TENDENCIJOS LIETUVOJE. *Economics and Management* [interaktyvus]. 2021. Vol. 14, p. 1–7. Prieiga per internetą: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/MLA/article/view/15857>.
12. HUANG, J. ir kt. Analysis and field test on reactive capability of photovoltaic power plants based on clusters of inverters. [žiūrėta 2024-05-14].
13. JANARDHAN BHORE, S. Paris Agreement on Climate Change: A Booster to Enable Sustainable Global Development and Beyond. *J. Environ. Res. Public Health* [interaktyvus]. 2016. Vol. 13. [žiūrėta 2023-06-16]. Prieiga per internetą: [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph).
14. KANNAN, N. - VAKEESAN, D. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62, p. 1092–1105. [žiūrėta 2023-05-16].
15. L ASHOK KUMAR *Solar PV System: Design, Installation, Operation and Maintenance*. New York: Nova, 2022.
16. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija. 2018. p. 56. Prieiga per internetą: [http://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Nacionaline\\_energetines\\_nepriklausomybes\\_strategija\\_2018\\_LT.pdf](http://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Nacionaline_energetines_nepriklausomybes_strategija_2018_LT.pdf).

17. LIU, S. - WEI, H. Application of AGC/AVC in Photovoltaic Power Station. *Applied Mechanics and Materials* [interaktyvus]. 2014. Vol. 614, p. 151–154. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.scientific.net/AMM.614.151>.
18. MARČIUKAITIS, M. ir kt. Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo Lietuvoje patirtis, reikšmė ir siekiai. *Energetika* . 2016. Vol. 62, no. 4, p. 247–267.
19. PETRAUSKAS, G. - ADOMAVIČIUS, V. Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti* . 2013. [žiūrėta 2023-05-17].
20. RADWAN, E. ir kt. Direct control of active and reactive power for a grid-connected single-phase photovoltaic inverter Direct control of active and reactive power for a grid-connected single-phase photovoltaic inverter Maximum power tracking Photovoltaic array Reactive power Renewable energy Single-phase inverter. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. 2021. Vol. 12, no. 1, p. 139–150. [žiūrėta 2024-05-14].
21. RESCH, M. ir kt. Techno-Economic Assessment of Flexibility Options Versus Grid Expansion in Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems* . 2021. Vol. 36, no. 5, p. 3830–3839. [žiūrėta 2024-05-14].
22. RIZZI, F. ir kt. The production of scientific knowledge on renewable energies: Worldwide trends, dynamics and challenges and implications for management. *Renewable Energy* . 2014. Vol. 62, p. 657–671.
23. ROSSO, R. ir kt. Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends-A Review. [žiūrėta 2024-05-14].
24. SALEM, A. - SEDRAOUI, K. Highly Efficient Transformerless Inverter with Flying-Capacitor Buck–Boost for Single-Phase Grid-Connected PV Systems. *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 10841* [interaktyvus]. 2021. Vol. 11, no. 22, p. 10841. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/22/10841/htm>.
25. SCHMIDT-WALTER, Heinz. ir kt. Electrical engineering : a pocket reference. 2007. p. 666. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: [https://books.google.com/books/about/Electrical\\_Engineering.html?hl=lt&id=MMQeAQAIAAJ](https://books.google.com/books/about/Electrical_Engineering.html?hl=lt&id=MMQeAQAIAAJ).
26. SVINKŪNAS, G. - NAVICKAS, A. Elektros energetikos pagrindai. *Elektros energetikos pagrindai* . 2013. [žiūrėta 2024-05-14].
27. THIRUGNANASAMBANDAM, M. ir kt. A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2010. Vol. 14, no. 1, p. 312–322. [žiūrėta 2023-05-16].
28. TOM MARKVART - LUIS CASTANER *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Oxford: Elsevier, 2003.
29. WANG, X.-F. ir kt. Load Flow Analysis. *Modern Power Systems Analysis* . 2008. p. 71–128. [žiūrėta 2024-05-14].
30. ZAVECKAS, V. Elektrotechnikos pagrindai. *Elektrotechnikos pagrindai* . 2012. [žiūrėta 2024-05-14].
31. 19.4 Electric Power - Physics | OpenStax. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://openstax.org/books/physics/pages/19-4-electric-power>.
32. 20.5 Alternating Current versus Direct Current - College Physics 2e | OpenStax. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/20-5-alternating-current-versus-direct-current>.
33. Electricity. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.neplan.ch/neplanproduct/en-electricity/#pa>.
34. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.

35. Naujiena - Lietuvos energetikos agentūra. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/Naujiena/neet-kainos-20240213/>.
36. O3E-252 [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/0dc73261ba0311ed924fd817f8fa798e?positionInSearchResults=0&searchModelUUID=eba435c2-b0a9-4daf-bce7-dc0aaf7b4cca>.
37. PV\*SOL | Photovoltaic design and simulation. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol/>.
38. Reglamentas - 2016/631 - EN - EUR-Lex. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0631>.
39. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
40. Renewables - Fuels & Technologies - IEA. [žiūrėta 2023-06-13]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>.
41. Saulės jėgainių inverterių tipai - GIMINIJA. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.giminija.lt/saules-jegainiu-inverteriu-tipai/>.
42. Use the Phase Angle Formula to Understand Power Delivery. [žiūrėta 2024-05-14]. Prieiga per internetą: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-use-the-phase-angle-formula-to-understand-power-delivery>.
43. VALSTYBINĖ ENERGETIKOS REGULIAVIMO TARYBA. [žiūrėta 2024-05-14].

## Priedai

### 1 priedas. Generacijos koeficientai laiko momentu

Laikas	Gen. koef.	Laikas	Gen. koef.	Laikas	Gen. koef.	Laikas	Gen. koef.
00:00	0	06:00	0,02	12:00	0,85	18:00	0,33
00:10	0	06:10	0,03	12:10	0,87	18:10	0,29
00:20	0	06:20	0,04	12:20	0,88	18:20	0,26
00:30	0	06:30	0,05	12:30	0,88	18:30	0,23
00:40	0	06:40	0,07	12:40	0,89	18:40	0,21
00:50	0	06:50	0,08	12:50	0,9	18:50	0,18
01:00	0	07:00	0,09	13:00	0,9	19:00	0,15
01:10	0	07:10	0,11	13:10	0,9	19:10	0,13
01:20	0	07:20	0,13	13:20	0,89	19:20	0,11
01:30	0	07:30	0,16	13:30	0,89	19:30	0,09
01:40	0	07:40	0,18	13:40	0,88	19:40	0,07
01:50	0	07:50	0,21	13:50	0,87	19:50	0,06
02:00	0	08:00	0,25	14:00	0,87	20:00	0,05
02:10	0	08:10	0,28	14:10	0,86	20:10	0,04
02:20	0	08:20	0,31	14:20	0,85	20:20	0,03
02:30	0	08:30	0,35	14:30	0,84	20:30	0,03
02:40	0	08:40	0,38	14:40	0,83	20:40	0,02
02:50	0	08:50	0,4	14:50	0,81	20:50	0,01
03:00	0	09:00	0,44	15:00	0,79	21:00	0,01
03:10	0	09:10	0,49	15:10	0,78	21:10	0,01
03:20	0	09:20	0,51	15:20	0,76	21:20	0
03:30	0	09:30	0,54	15:30	0,74	21:30	0
03:40	0	09:40	0,56	15:40	0,72	21:40	0
03:50	0	09:50	0,58	15:50	0,69	21:50	0
04:00	0	10:00	0,62	16:00	0,67	22:00	0
04:10	0	10:10	0,65	16:10	0,65	22:10	0
04:20	0	10:20	0,68	16:20	0,63	22:20	0
04:30	0	10:30	0,7	16:30	0,6	22:30	0
04:40	0	10:40	0,74	16:40	0,57	22:40	0
04:50	0	10:50	0,75	16:50	0,53	22:50	0
05:00	0	11:00	0,77	17:00	0,5	23:00	0
05:10	0	11:10	0,79	17:10	0,47	23:10	0
05:20	0	11:20	0,81	17:20	0,43	23:20	0
05:30	0	11:30	0,82	17:30	0,41	23:30	0
05:40	0,01	11:40	0,83	17:40	0,38	23:40	0
05:50	0,01	11:50	0,84	17:50	0,36	23:50	0

## 2 priedas. Elektrinių sąrašas

Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė	Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė
1	250	277,74	Rš-1217	96	10	11,11	Rš-1252
2	199,67	221,83	Rš-1299	97	10	11,11	Rš-1271
3	176	195,53	Rš-1202	98	10	11,11	Rš-1271
4	110	122,21	Rš-1217	99	10	11,11	Rš-1262
5	30	33,33	Rš-1271	100	10	11,11	Rš-1262
6	30	33,33	Rš-1271	101	10	11,11	Rš-1271
7	30	33,33	Rš-1271	102	10	11,11	Rš-1262
8	24,96	27,73	Rš-1202	103	10	11,11	Rš-1201
9	18	20,00	Rš-1253	104	10	11,11	Rš-1271
10	18	20,00	Rš-1261	105	9,99	11,10	Rš-1201
11	17,43	19,36	Rš-1271	106	9,99	11,10	Rš-1261
12	17	18,89	Rš-1271	107	9,99	11,10	Rš-1202
13	15	16,66	Rš-1253	108	9,98	11,09	Rš-1271
14	15	16,66	Rš-1262	109	9,96	11,07	Rš-1222.
15	15	16,66	Rš-1230	110	9,96	11,07	Rš-1271
16	15	16,66	Rš-1296	111	9,92	11,02	Rš-1202
17	14,99	16,65	Rš-1271	112	9,9	11,00	Rš-1253
18	14,94	16,60	Rš-1201	113	9,9	11,00	Rš-1253
19	14,87	16,52	Rš-1230	114	9,9	11,00	Rš-1202
20	14,85	16,50	Rš-1261	115	9,88	10,98	Rš-1271
21	14,78	16,42	Rš-1250	116	9,88	10,98	Rš-1202
22	14,44	16,04	Rš-1238	117	9,87	10,97	Rš-1271
23	14,17	15,74	Rš-1262	118	9,84	10,93	Rš-1230
24	14	15,55	Rš-1271	119	9,84	10,93	Rš-1230
25	14	15,55	Rš-1252	120	9,84	10,93	Rš-1230
26	12,4	13,78	Rš-1202	121	9,84	10,93	Rš-1230
27	12	13,33	Rš-1271	122	9,84	10,93	Rš-1261
28	11,9	13,22	Rš-1273	123	9,79	10,88	Rš-1261
29	11,89	13,21	Rš-1238	124	9,78	10,87	Rš-1271
30	10,53	11,70	Rš-1271	125	9,78	10,87	Rš-1271
31	10,36	11,51	Rš-1202	126	9,78	10,87	Rš-1261
32	10,24	11,38	Rš-1271	127	9,75	10,83	Rš-1271
33	10,22	11,35	Rš-1261	128	9,72	10,80	Rš-1250
34	10,2	11,33	Rš-1222.	129	9,72	10,80	Rš-1271
35	10,13	11,25	Rš-1261	130	9,72	10,80	Rš-1296
36	10,1	11,22	Rš-1279	131	9,72	10,80	Rš-1261

Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė	Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė
37	10,08	11,20	Rš-1250	132	9,72	10,80	Rš-1230
38	9,84	10,93	Rš-1279	133	9,63	10,70	Rš-1296
39	9,55	10,61	Rš-1279	134	9,63	10,70	Rš-1253
40	9,84	10,93	Rš-1279	135	9,6	10,67	Rš-1202
41	10	11,11	Rš-1279	136	9,6	10,67	Rš-1238
42	10	11,11	Rš-1279	137	9,43	10,48	Rš-1271
43	10	11,11	Rš-1279	138	9,36	10,40	Rš-1253
44	10	11,11	Rš-1279	139	9	10,00	Rš-1261
45	9,84	10,93	Rš-1279	140	9	10,00	Rš-1238
46	9,88	10,98	Rš-1279	141	9	10,00	Rš-1230
47	15	16,66	Rš-1279	142	8,9	9,89	Rš-1253
48	9	10,00	Rš-1279	143	8,8	9,78	Rš-1271
49	10,2	11,33	Rš-1279	144	8,74	9,71	Rš-1261
50	9,89	10,99	Rš-1279	145	8,4	9,33	Rš-1296
51	10	11,11	Rš-1279	146	8	8,89	Rš-1252
52	10	11,11	Rš-1279	147	7,65	8,50	Rš-1261
53	10,05	11,17	Rš-1261	148	7,22	8,02	Rš-1271
54	10,05	11,17	Rš-1261	149	7,2	8,00	Rš-1202
55	10	11,11	Rš-1296	150	7	7,78	Rš-1296
56	10	11,11	Rš-1279	151	7	7,78	Rš-1252
57	10	11,11	Rš-1279	152	7	7,78	Rš-1261
58	10	11,11	Rš-1262	153	6,75	7,50	Rš-1271
59	10	11,11	Rš-1238	154	6,66	7,40	Rš-1261
60	10	11,11	Rš-1250	155	6,6	7,33	Rš-1296
61	10	11,11	Rš-1279	156	6,56	7,29	Rš-1202
62	10	11,11	Rš-1201	157	6,44	7,15	Rš-1271
63	10	11,11	Rš-1252	158	6,4	7,11	Rš-1252
64	10	11,11	Rš-1262	159	10	11,11	Rš-1296
65	10	11,11	Rš-1222	160	6	6,67	Rš-1252
66	10	11,11	Rš-1230	161	6	6,67	Rš-1252
67	10	11,11	Rš-1296	162	6	6,67	Rš-1271
68	10	11,11	Rš-1230	163	5,92	6,58	Rš-1271
69	10	11,11	Rš-1296	164	5,92	6,58	Rš-1261
70	10	11,11	Rš-1250	165	8	8,89	Rš-1271
71	10	11,11	Rš-1271	166	5,12	5,69	Rš-1238
72	10	11,11	Rš-1271	167	5,1	5,67	Rš-1252
73	10	11,11	Rš-1271	168	5,1	5,67	Rš-1230



Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė	Eil. Nr.	Leist. gen. galia, kW	Keitiklio galia, kVA	Transformatorinė
74	10	11,11	Rš-1271	169	5	5,55	Rš-1262
75	10	11,11	Rš-1271	170	5	5,55	Rš-1252
76	10	11,11	Rš-1253	171	5	5,55	Rš-1252
77	10	11,11	Rš-1271	172	4,95	5,50	Rš-1230
78	10	11,11	Rš-1271	173	4,95	5,50	Rš-1261
79	10	11,11	Rš-1230	174	4,94	5,49	Rš-1230
80	10	11,11	Rš-1202	175	4,92	5,47	Rš-1252
81	10	11,11	Rš-1271	176	4,86	5,40	Rš-1271
82	10	11,11	Rš-1296	177	4,8	5,33	Rš-1252
83	10	11,11	Rš-1261	178	4,8	5,33	Rš-1252
84	10	11,11	Rš-1271	179	4,8	5,33	Rš-1252
85	10	11,11	Rš-1271	180	4,8	5,33	Rš-1252
86	10	11,11	Rš-1271	181	4,8	5,33	Rš-1271
87	10	11,11	Rš-1271	182	4,8	5,33	Rš-1262
88	10	11,11	Rš-1296	183	4,68	5,20	Rš-1252
89	10	11,11	Rš-1230	184	4,62	5,13	Rš-1252
90	10	11,11	Rš-1261	185	4,62	5,13	Rš-1252
91	10	11,11	Rš-1271	186	4,6	5,11	Rš-1271
92	10	11,11	Rš-1271	187	4,51	5,01	Rš-1238
93	14	15,55	Rš-1271	188	4,42	4,91	Rš-1271
94	10	11,11	Rš-1261	189	3,6	4,00	Rš-1252
95	10	11,11	Rš-1262				