



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Optimalaus paskirstytos generacijos kiekio nustatymo 0,4 kV skirstomajame tinkle tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Tautvydas Klusas

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Optimalaus paskirstytos generacijos kiekio nustatymo 0,4 kV skirstomajame tinkle tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Tautvydas Klusas

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Doc. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tautvydas Klusas

Optimalaus paskirstytos generacijos kiekio nustatymo 0,4 kV skirstomajame tinkle tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) 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 (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tautvydas Klusas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Klusas, Tautvydas. Optimalaus paskirstytos generacijos kiekio nustatymo 0,4 kV skirstomajame tinkle tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: „PowerFactory“, fotovoltinių saulės elektrinių poveikis, žemos įtampos tinklas, aplikacijų programavimo sąsaja, Python, darbo režimų tyrimas

Kaunas, 2023. 52 p.

Santrauka

Šiame baigiamajame projekte aptariamos pagrindinės problemos atsirandančios dėl įrengiamų saulės elektrinių žemos įtampos tinkle. Naudojant „PowerFactory“ programą sumodeliuojamas realus elektros tinklas su apkrovos ir generacijos duomenis gaunamais iš išmaniųjų skaitiklių. Atliekamas metinis elektros tinklo darbo režimų tyrimas. Šis ciklas kartojamas nuosekliai didinant įrengtų saulės elektrinių galią kiekvienais metais. Analizuojami gauti duomenys: galios srautai, įtampos vertės, nuostoliai, linijų apkrovos ir t.t.

Klusas, Tautvydas. Research of Determining Optimal Amount of Distributed Generation in 0.4 kV Distribution Network. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: PowerFactory, impact of photovoltaic power plants, low voltage network, application programming interface, Python, simulation, power network analysis

Kaunas, 2023. 52 pages.

Summary

This final project addresses the main problems arising from the installation of solar power plants in the low voltage network. PowerFactory software simulates power grid with load and generation data from smart meters. An annual simulation is performed. This cycle is repeated by successively increasing the power of installed solar power plants every year. The received data are analyzed: power flows, voltage values, losses, line loads and so on.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Saulės elektrinių įrengiamų į elektros skirstomąjį tinklą problemos.....	11
1.1.1. Įtampos padidėjimas.....	11
1.1.2. Įtampos mirgėjimai.....	12
1.1.3. Harmonikos	13
1.1.4. Atvirkštiniai galios srautai.....	14
1.1.5. Elektros energijos kokybės problemos.....	15
1.2. Saulės elektrinių atstojamieji modeliai.....	16
1.3. Sprendimai siekiant padidinti SE integraciją	18
1.4. Įrengiamų saulės elektrinių skverbties limitas skirstomajame tinkle.....	20
2. „PowerFactory“ programos taikomų komponentų aprašai.....	23
2.1. Elektros energijos laidininkai	23
2.2. Transformatorius	25
2.3. Fotovoltinių modulių saulės elektrinė	25
2.4. Išorinis elektros tinklas.....	26
2.5. Elektros energijos kaupiklis	26
2.6. Žemos įtampos apkrova.....	27
2.7. Galios srautų skaičiavimai.....	27
3. Tyrimo rezultatai.....	29
3.1. Skaičiavimų algoritmas	30
3.2. Skaičiavimų rezultatai	32
3.2.1. Neleistinų per žemų įtampos verčių skaičius	32
3.2.2. Neleistinų per aukštų įtampos verčių skaičius.....	33
3.2.3. Vidutinės įtampos vertės	35
3.2.4. Vidutiniai nuostoliai	37
3.2.5. Maksimalios įrenginių apkrovos	39
3.2.6. Vidutinės įrenginių apkrovos	41
3.2.7. Transformatoriaus galių kryptys.....	43
3.2.8. Reikšmių kitimas laiko atžvilgiu	43
3.3. Optimali saulės šviesos elektrinių galia linijose ir transformatoriuose	46
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48
Priedai.....	53

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindinės elektros energijos kokybės pasitaikančios problemos	15
2 lentelė. Tiriamojo elektros tinklo duomenys.....	29
3 lentelė. Transformatoriaus parametrai	29
4 lentelė. Neleistinų per žemų įtampos verčių skaičius	32
5 lentelė. Neleistinų per aukštų įtampos verčių skaičius.....	33
6 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutinės įtampos vertės	35
7 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutiniai nuostoliai.....	37
8 lentelė. Linijų ir transformatorių maksimalios apkrovos	39
9 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutinės apkrovos.....	41
10 lentelė. Transformatorių vidutinės teigiamos galios generuojama elektros energija.....	43
11 lentelė. Optimali saulės elektrinių galia linijose ir transformatoriuose.....	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. Saulės elektrinių instaliuotos galios megavatais pokytis nuo 2000 iki 2021 metų [21]	11
2 pav. Įtampos pasiskirstymas fotovoltinių elektrinių gyvenamuose rajonuose ir jų priklausomybė kintant atstumui nuo transformatoriaus [13]	12
3 pav. Įtampos mirgėjimų kreivė [53].....	13
4 pav. Generuojamos harmonikos su filtrais ir be [28].....	14
5 pav. Optimalios talpos elektros energijos kaupiklio parinkimo grafikas [49]	15
6 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės modelis [29]	16
7 pav. DC-DC žeminančio keitiklio principinė schema[30].....	17
8 pav. DC-DC aukštinančio keitiklio principinė schema[30]	17
9 pav. Voltamperinė fotovoltinių celių galios kreivė keičiantis temperatūrai [32].....	18
10 pav. Elektros energijos valdymo pavyzdžiai [54].....	19
11 pav. Transformatoriaus įtampų valdymų reikšmės	19
12 pav. Efektyvus elektros energijos kaupiklio panaudojimo[51].....	20
13 pav. Reikšmių dik' , dik , hi matuojami atstumai [36].....	24
14 pav. Idealių baterijų modelio vizualizacija [41].....	27
15 pav. Tiriamojo elektros tinklo schema	30
16 pav. Skaičiavimų algoritmas.....	31
17 pav. Linijų per žemų įtampos verčių taškinis grafikas.....	32
18 pav. Transformatorių per žemų įtampos verčių taškinis grafikas	33
19 pav. Linijų per aukštų įtampos verčių taškinis grafikas	34
20 pav. Transformatorių per aukštų įtampos verčių taškinis grafikas	34
21 pav. Linijų vidutinės įtampos	36
22 pav. Transformatorių vidutinės įtampos	36
23 pav. Linijų vidutiniai nuostoliai	38
24 pav. Transformatorių vidutiniai nuostoliai.....	38
25 pav. Maksimalios linijų apkrovos	40
26 pav. Maksimalios transformatorių apkrovos.....	40
27 pav. Vidutinės linijų apkrovos	42
28 pav. Vidutinės transformatorių apkrovos	42
29 pav. Transformatorių vidutinių teigiamų galios srautų grafikas	43
30 pav. Vidutinės apkrovos reikšmės laiko atžvilgiu.....	44
31 pav. Vidutinės nuostolių reikšmės laiko atžvilgiu	44
32 pav. Vidutinės įtampos reikšmės laiko atžvilgiu.....	44
33 pav. Linijos vartotojo vidutinės apkrovos grafikas laiko atžvilgiu.....	45

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Prof. – profesorius;

Doc. – docentas;

APVA – Lietuvos Respublikos aplinkos ministerijos aplinkos projektų valdymo agentūra;

DC – nuolatinė srovė;

AC – kintama srovė;

BHI – bendras harmoninis iškraipymas;

FE – fotovoltinė elektrinė;

ESO – energijos skirstomasis operatorius;

MPPT – maksimalaus galios taško sekimas (angl. maximum power point tracking);

EEK – elektros energijos kaupiklis;

Įvadas

Iškastinio kuro naudojimas privedė pasaulį prie globalinių problemų. Didėjant šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekiui (tokioms kaip anglies dioksidas, metanas, ozonas, azoto oksidas), naujos emisijos paskatino klimato atšilimą. Siekiant sumažinti kietojo kuro įtaką klimatui, atsinaujinančioji energetika tapo viena iš alternatyvių sričių pakeičiant kietojo kuro išteklius. Daugelis šalių išsikėlė tikslą iki 2050-ųjų metų tapti klimatui neutraliomis šalimis. Europos sąjunga skatina bendruomenę ir teikia kompensacijas atsinaujinančių energetikos šaltinių įsidiegimui, todėl didėja saulės elektrinių paklausa. 2022 metais APVA sulaukė didžiausio iki šiol buvusio paraiškų skaičiaus. Fizinių asmenų buvo užpildyta 20 tūkstančių paraiškų, pretenduojančių iki ≤ 10 kW galios saulės elektrinių įsirengimui. Didelis susidomėjimas kelia iššūkius skirstomųjų ir perdavimo tinklų operatoriams. Nėra atlikta išsamių tyrimų, siekiant apskaičiuoti optimalų, galimą įsirengti saulės elektrinių kiekį, elektros skirstomajame tinkle. Taigi šiame tiriamajame darbe atliekama statinio elektros tinklo modeliavimas palaiptiesiui didinant atsinaujinančių šaltinių galią. Bus panaudojami galios srautų duomenys, kuriuos pateiks energijos skirstomasis operatorius. Darbe siekiama išanalizuoti tinklo parametrus, keičiantis saulės elektrinių galiai. Naudojant modeliavimo duomenis, bus parenkamas optimalus saulės elektrinių kiekis pasirinktame skirstomajame tinkle.

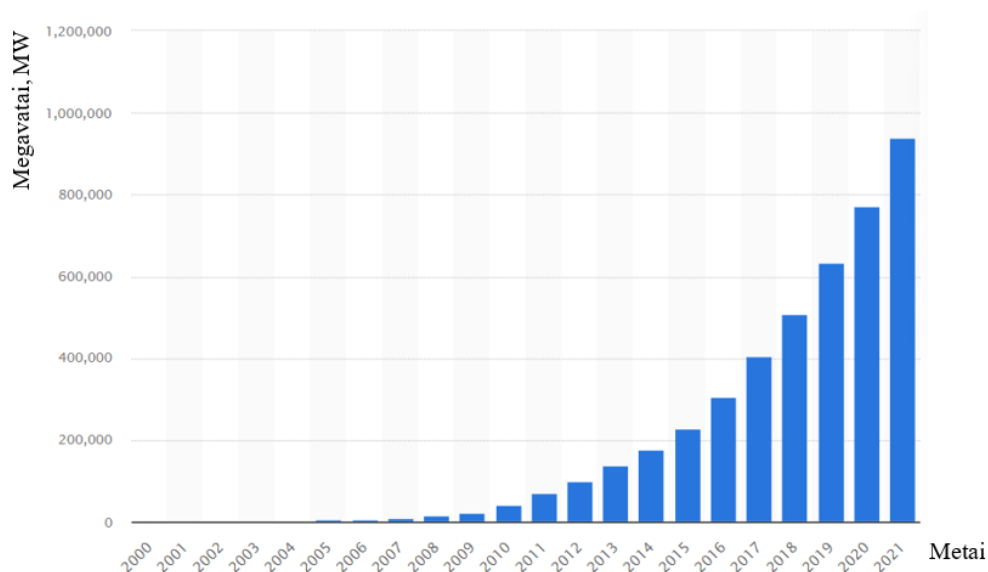
Pagrindinis tikslas – nustatyti optimalią saulės šviesos elektrinių suminę instaliuotą galią tiriamame skirstomajame elektros tinkle modeliuojant skirtingus jo režimus

Uždaviniai:

1. Apžvelgti paskirstytos generacijos įtaką skirtomojo tinklo darbo režimams.
2. Sudaryti skirstomojo tinklo su paskirstyta generacija matematinį modelį.
3. Atlikti skirtingas nagrinėjamo skirstomojo tinklo režimų analizes ir nustatyti optimalų saulės šviesos elektrinių suminę instaliuotą galią elektros tinkle.

1. Saulės elektrinių įrengiamų į elektros skirstomąjį tinklą problemos

Prieš 184 metus mokslininkas Aleksandras Edmondas Bekerelis pirmasis pastebėjo fotovoltinį reiškinį, naudodamas elektrodą laidžiame elektros srovei tirpale, kuris buvo veikiamas šviesos. 1950 metais pagamintos pirmosios fotovoltinės celės, kurios buvo pritaikytos kosminėse stotyse. Nuo 1981 metų fotovoltinės elektrinės pradėtos įrenginėti dideliais mastais. Per dvidešimt metų (pradedant nuo 2000 metų) fotovoltinių modulių efektyvumas išaugo beveik dvigubai, o įrengtoji saulės elektrinių galia padidėjo beveik tūkstantį kartų (žr. 1 pav.). Reikia paminėti, kad kiekvienais metais fotovoltinių modulių gamybos technologija atpigo, todėl investicijų į saulės elektrinės grąžą vyko greičiau. Susidomėjimas saulės elektrinėmis vis didėjo. Nuosava saulės elektrinė buvo ir išliko puikia investicija siekiant sumažinti elektros energijos išlaidas gaminantiems vartotojams ir išnaudoti nereikalingą plotą ant gyvenamo arba negyvenamo namo stogo.



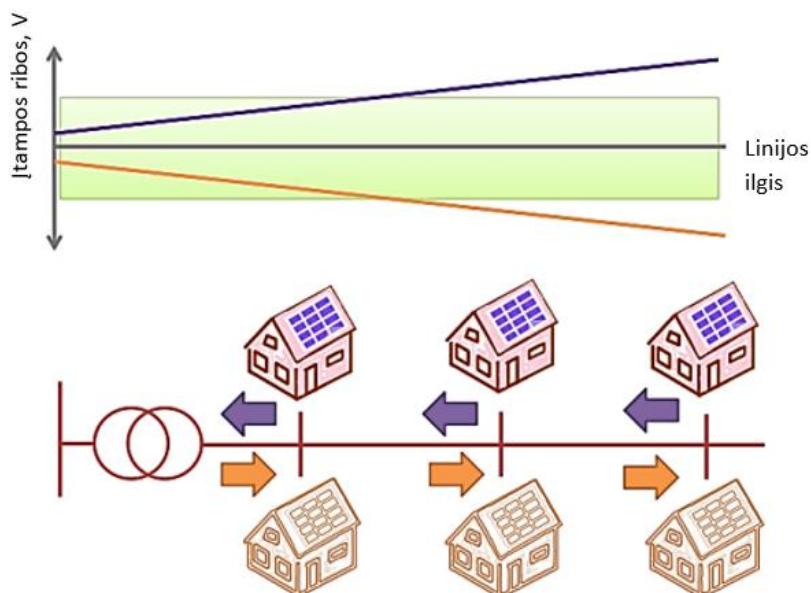
1 pav. Saulės elektrinių instaliuotos galios megavatais pokytis nuo 2000 iki 2021 metų [21]

Elektros skirstomajame tinkle daugėja paskirstytos generacijos šaltinių. Paskirstytos generacijos šaltiniai, tai mažos galios generacijos šaltiniai, kurie yra prijungti prie vietinio tinklo ir dažniausiai įrengiami šalia vartojamos apkrovos. Vienas iš paskirstomųjų generacijos šaltinių yra saulės elektrinės. Gaminantys vartotojai įsirengę saulės elektrinę, generacijos metu momentiskai kompensuoja vartojamą apkrovą (jei generuojama didesnė galia, nei vyraujanti apkrova) ir perteklinę elektros energiją tiekia į skirstomojo operatoriaus tinklą, todėl atsiranda papildomi galios srautai t.y. dviejų kryptių. Bendru atveju saulės elektrinės sumažina tinklo nuostolius, bet gali juos ir padidinti, todėl reikia išsamesnės analizės. Gaminantys vartotojai elektros skirstomajame tinkle, suformuoja neišvengiamus pokyčius elektros energijos sistemoje: padidėja ir svyruoja įtampa, harmonikų emisija iš įtampos keitiklių ir t.t.

1.1.1. Įtampos padidėjimas

Iš pradžių skirstomieji tinklai buvo projektuojami, taip, kad galios srautas tekėtų viena kryptimi. Tipiniu tinklo darbo režimu, srovė teka per oro ar kabelinę liniją iki galutinio vartotojo. Dėl laidininkuose esančios varžos atsiranda įtampos kritimai vartotojų maitinamojoje linijoje, kad kompensuotume įtampos kritimą naudojami specialūs įrenginiai: pakopinis įtampos reguliatorius,

transformatoriai su atšakų perjungikliais ir t. t. Šių įrenginių tikslas – maitinamos linijos galė padidinti įtampa, kad įtampa būtų išlaikyta leistinose ribose. Integruojant vis daugiau saulės elektrinių į skirstomąjį tinklą, pradinis tradicinis skirstomųjų tinklų modelis, kur buvo planuotas tik vienos krypties galios srautų tekėjimas, kardinaliai pakeičiamas, vartotojams įsirenginėjant papildomą elektros energijos šaltinį, galios srautai pradeda tekėti dviem kryptimis. Papildomas saulės elektrinių įrengimas ne tik keičia galios srautų tekėjimo kryptis, bet ir padidina įtampą vartotojų maitinamoje linijoje. Kad galėtume perduoti sugeneruotą elektros energiją iš fotovoltinių modulių, saulės elektrinės naudoja įtampos keitiklius, kurie perduoda aktyvią galią prijungimo taške, taip pat gali koreguoti ir reaktyvią galią, tai leidžia minimaliai reguliuoti įtampą. Integruojant vis daugiau saulės elektrinių, reikia keisti ir viso elektros tinklo strategiją, papildomai instaliuoti įrenginius, t.y. elektros energijos kaupiklius, kurie galėtų esant staigiam saulės spinduliuotės pokyčiui, kompensuoti momentinį energijos trūkumą. Kitas įrenginys – statinis sinchroninis kompensatorius, kuris padėtų lygiagrečiai valdyti reaktyvią galią ir įtampą. Standartinė žemosios įtampos leistinoji vertė yra $\pm 10\%$ nuo vardinės įtampos. Vizualus įtampos kitimas esant elektros energijos generacijai ir tik vartojimui atvaizduojamas 2 paveikslėlyje (žr. 2 pav.). Jeigu elektros energija yra tik vartojama maitinamoje linijoje, įtampa sumažėja. Jeigu tinkle yra gaminančių vartotojų, tokiu atveju linijoje įtampa padidėja.



2 pav. Įtampos pasiskirstymas fotovoltinių elektrinių gyvenamuose rajonuose ir jų priklausomybė kintant atstumui nuo transformatoriaus [13]

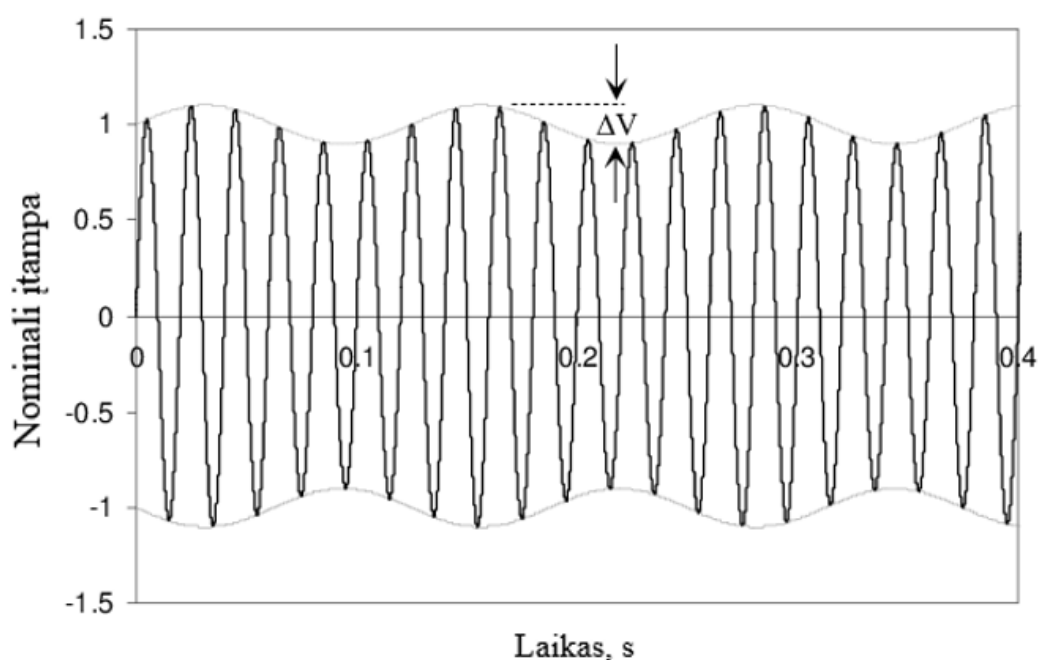
Šiuolaikiniai įtampos keitikliai gali koreguoti įtampos reikšmę keičiant sinusoidinės fazės kampą srovės išvestyje vartojant arba generuojant reaktyvią galią. Reaktyvios galios vartojimo arba generavimo funkcija įtampos keitiklyje padeda išlaikyti įtampą leistinosiose ribose.

1.1.2. Įtampos mirgėjimai

Kita įrengiamų saulės elektrinių pasekmė, tai nevienodas elektros energijos tiekimas dėl sezoniškumo ir kitų gamtos veiksnių: debesų, temperatūros, drėgmės ir kita. Bandytas nuspėti generaciją iš atsinaujinančių energijos šaltinių yra sudėtingas procesas, todėl elektros tinklų balansavimas tampa kompleksiniu veiksniu. Trumpalaikiai įtampos svyravimai turi didelę įtaką elektros skirstomajam tinklui. Tiesioginės saulės šviesos ir debesų kaitos procesas sukelia sistemos disbalansą, kuris lemia

įtampos reguliavimo įtaisų eksploatacijos laikotarpį arba gali sugadinti pačius įrenginius. Fotovoltinių modulių saulės elektrinės ne taip, kaip daugelis kitų elektros generacijos šaltinių, neturi besisukančios masės, kuri palaikytų inerciją sistemoje.

Įtampos mirgėjimus lengviausia pastebėti kaitrinėse lemputėse. Staigius įtampos pakitimus galima pamatyti stebint kaitrinės lemputės apšvietą. Keičiantis apšvietai matomas vizualus įtampos svyravimų padarinys. Įtampos mirgėjimas aprašomas kaip dydis nusakantis įtampos svyravimų kiekį ir vertę, per tam tikrą laiko tarpą. Įtampos mirgėjimų kreivė pateikta 3 paveikslėlyje (žr. 3 pav.). Sinusoidinėje kreivėje įtampa skirtinguose taškuose turi skirtingą reikšmę, todėl atsiranda įtampos potencialų skirtumas, ko pasekoje matome šviesos mirgėjimą kaitrinėse lemputėse.



3 pav. Įtampos mirgėjimų kreivė [53]

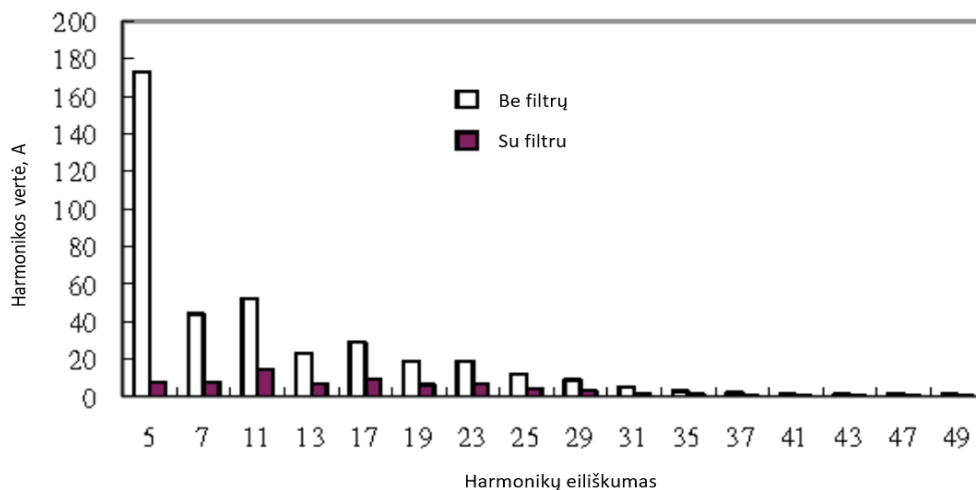
1.1.3. Harmonikos

Galios elektronikos įrenginių, transformatorių ir netiesinių apkrovų naudojimas elektros tinkle sukelia harmonikas. Harmonikos ypač pastebimos žemos įtampos skirstomajame tinkle su didelės vertės reaktyvios ir aktyvios varžų santykiu.

Tipinę saulės elektrinę sudaro maksimalaus galios taško sekimo valdiklis, nuolatinę – kintamos įtampos ir pakopinis keitikliai. Jie tarpusavyje sąveikauja su filtrais, kurie skirti sumažinti harmonikas. Harmonikų generacija iš keitiklių tiesiogiai priklauso nuo keitiklių technologijos naujumo, taip pat įtakos turi saulės elektrinės dydis.

Saulės elektrinės generacija yra nepastovi ir tiesiogiai priklauso nuo apšvietos, todėl kintančios oro sąlygos sąlygoja harmonikų emisiją. Paminėtina tai, kad mažo dažnio keitiklio komponentai generuoja didesnius harmoninius iškreipimus, todėl yra labai svarbu numatyti skirtingomis sąlygomis atsiradusias harmonikas. Kiekvienoje sistemoje harmonikų susidarymas yra kompleksinis reiškinys, todėl norint gauti suminį harmonikų iškreipimą pirmiausiai reikia išskirti dedamąsias.

Harmoninės srovės gali turėti įvairių neigiamų pasekmių elektros įrenginiams. Padidėję energijos nuostoliai, nenumatyti rezonansai, elektroninės įrangos trikdžiai, transformatorių perkrovos, variklių ir generatorių veikimo sutrikimai, atsitiktiniai automatinų jungiklių ir saugiklių suveikimai. Norint išvengti šių padarinių, svarbu naudoti priemones, kurios sumažina harmonikų įtaką. Dažniausiai naudojami „LC“ filtrai, kurie sudaryti iš kondensatoriaus ir ritės. „LC“ filtras praleidžia žemo dažnio signalą ir pašalina aukšto dažnio signalą ir atsiradusias aukštesnes harmonikas, kurias sukuria netiesiniai komponentai. Filtrų įtaką harmonikoms galima matyti 4 paveikslėlyje (žr. 4 pav.).

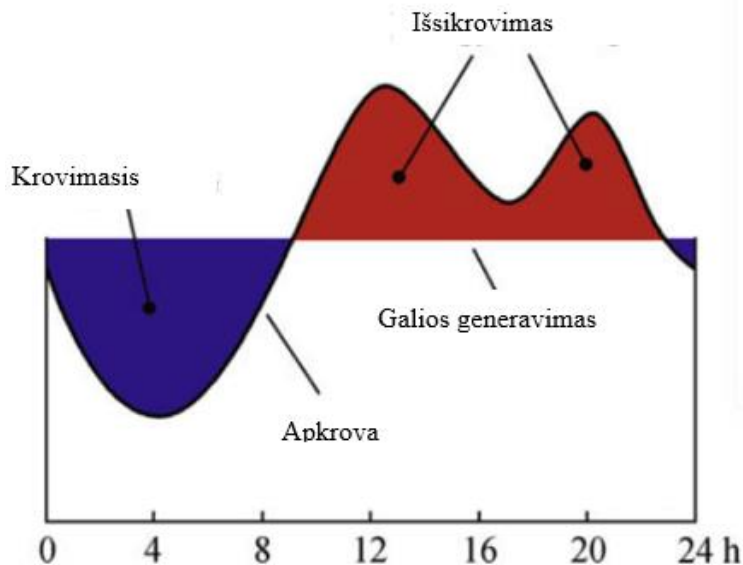


4 pav. Generuojamos harmonikos su filtrais ir be [28]

1.1.4. Atvirkštiniai galios srautai

Klasikiniame elektros tinklų modelyje galios srautai teka iš aukštesnės įtampos į žemesnę. Tačiau atsiradus gaminantiems vartotojams, galios srautai tapo dviejų kryptių. Gaminančių vartotojų iš atsinaujinančių energijos šaltinių generuojamas galios srautas dažnu atveju nėra pilnai momentiška suvartojamas, todėl elektros energijos perteklius yra generuojamas atgal į elektros tinklą.

Naudojant elektros energijos kaupiklius galima sumažinti atvirkštinio srauto kiekį generuojamą į tinklą. Kadangi elektros energijos kaupiklis yra ribotos talpos, turi būti parinkta optimali talpa, siekiant, kad elektros energijos iš kaupiklių užtektų visai dienai, esant elektros energijos tiekimo gedimui iš elektros tinklo operatoriaus. Optimalios talpos elektros energijos parinkimo grafikas pateiktas 5 paveikslėlyje (žr. 5 pav.)

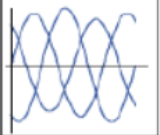
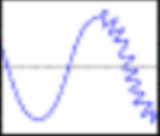
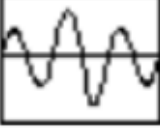
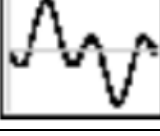
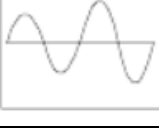


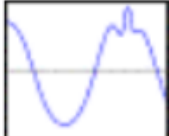


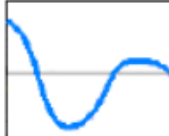
5 pav. Optimalios talpos elektros energijos kaupiklio parinkimo grafikas [49]

1.1.5. Elektros energijos kokybės problemos

Šiuolaikinėje elektros energijos sistemoje susiduriama su kokybės problemomis, kurios atsiranda dėl apkrovos tipų įvairovės, tokių kaip reguliuojamų greičio pavarų, galios elektronikos, programuojamų loginių valdiklių, LED lempučių ir t.t. Dėl savo netiesiškumo minėtos apkrovos sukelia įtampos formos trikdžius, o tai ir yra pagrindinė elektros energijos kokybės problemų priežastis.

1 lentelė. Pagrindinės elektros energijos kokybės pasitaikančios problemos

	<p>Įtampų asimetrija. Trifazėje sistemoje įtampų asimetrija, atsiranda kai viena įtampa ar fazės kampas skiriasi nuo kitų dviejų įtampų. Priežastys: didelė apkrova vienoje fazėje (netinkamas apkrovos paskirstymas)</p>
	<p>Trikdžiai. Aukšto dažnio signalų generacija fazėse. Priežastys: mikrobangų krosnelė, suvirinimo aparatų naudojimas ir t.t. Netinkamas įrenginių įžeminimas.</p>
	<p>Įtampos mirgėjimas. Įtampos vertės svyravimas. Priežastys: elektrinių variklių, kintančių apkrovos verčių prietaisų naudojimas, atsinaujinantys energijos šaltiniai</p>
	<p>Harmoninis iškraipymas. Įtampos arba srovės asimetrinės formos. Bangos forma atitinka skirtingų sinusinių formų bangų fazių ir dydžių dažnio kartotinių visumą. Priežastys: DC elektros varikliai, suvirinimo aparatai, elektros energijos lygintuvai, aukšto dažnio įrenginiai.</p>
	<p>Įtampos padidėjimas. Laikinas įtampos padidėjimas virš leistinų normų, trumpalaikis, trunkantis mažiau nei porą sekundžių. Priežastys: netinkamas transformatorių reguliavimas, didelių verčių apkrovų išjungimas, netinkamas generacijos šaltinių parinkimas.</p>

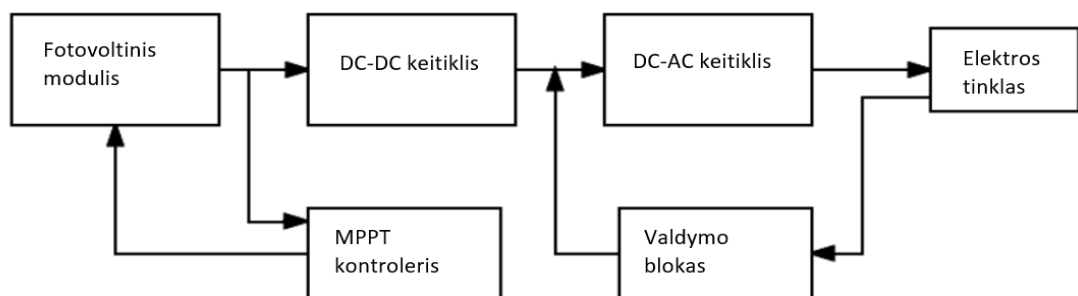
	<p>Įtampos šuoliai. Greitas įtampos padidėjimas trunkantis nuo kelių mikrosekundžių iki kelių milisekundžių.</p> <p>Priežastys: žaibo išlydis, didelės verčių apkrovų išjungimas, galios faktoriaus korekcijos.</p>
	<p>Ilgį pertraukimai. Elektros energijos nutrūkimas ilgiau, nei 1-2 sekundes.</p> <p>Priežastys: gamtos pasekmės, pažeidžiant elektros energijos tiekimo linijas, įrangos sutrikimai elektros tinkle, žmonių sukelti gedimai.</p>
	<p>Trumpi pertraukimai. Trumpi elektros energijos šaltinių sutrikimai nuo kelių milisekundžių iki dviejų sekundžių trukmės.</p> <p>Priežastys: dažniausiai dėl automatikos įjungimo ir išjungimo laiko uždelimo.</p>
	<p>Įtampos kritimas. Įtampos kritimas nuo 10% iki 90% nominalios įtampos vertės, trukmė nuo pusė sinusoidės ciklo iki vienos minutės.</p> <p>Priežastys: gedimas perdavimo arba skirstomajame tinkle, didelės galios verčių apkrovos ar elektrinių variklių įjungimas.</p>

Apie devyniasdešimt procentų trikdžių trunka mažiau nei vieną sekundę. Trikdžiai gali sukelti papildomus finansinius nuostolius elektros energijos vartotojams. Nekokybiška elektros energija gali sutrikdyti elektros prietaisų darbą arba paveikti prietaisų ilgaamžiškumą. Norint pagerinti elektros energijos kokybę naudojami: inerciniai diskai, superkondensatoriai.

1.2. Saulės elektrinių atstojamieji modeliai

Fotovoltinių modulių saulės elektrinės susideda iš šių pagrindinių komponentų: fotovoltinių modulių ir įtampos keitiklio. Fotovoltiniai moduliai keičia iš šviesos gautą energiją į elektros energiją (generuoja nuolatinę srovę). Fotovoltiniai moduliai sudaryti iš fotovoltinių celių arba kitaip vadinamu puslaidininkiu su P-N (skylių ir elektronų) jungtimi. Fotovoltiniai moduliai ir celės tarpusavyje sujungiamos nuosekliai arba lygiagrečiai, nuo to priklauso grandinės suminė įtampa arba srovė. Sujungiant modulius nuosekliai didėja įtampa, sujungiant modulius lygiagrečiai didėja srovė grandinėje.

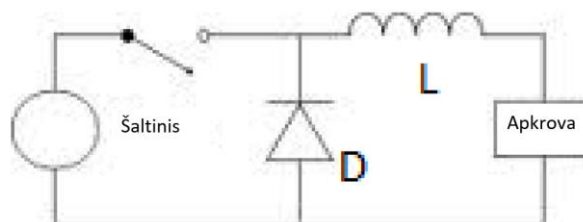
Kadangi skirstomieji elektros tinklai naudoja kintamąją įtampą, o fotovoltiniai moduliai generuoja nuolatinę įtampą, reikalingas įtampos keitiklis, kuris nuolatinę įtampą pakeistų į kintamąją. Įtampos keitiklis sudarytas iš DC-DC, DC-AC keitiklio ir MPPT valdiklio. Principinė schema fotovoltinių modulių saulės elektrinių pateikta 6 paveikslėlyje (žr. 6 pav.).



6 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės modelis [29]

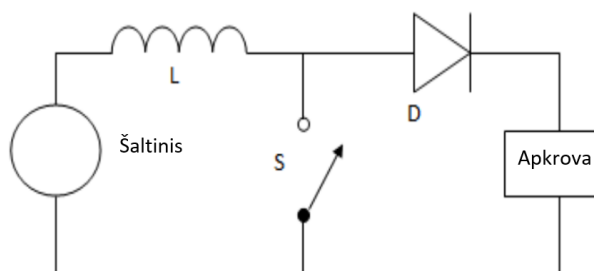
Šiuolaikinėje pramonėje daugelyje įrenginių naudojami DC-DC keitikliai, tam, kad būtų galima pakeisti pastovios įtampos vertę į kitos įtampos vertę, nuolatinėje įtampos grandinėje. DC-DC keitikliui panašios funkcijos įrenginys yra transformatorius. DC-DC keitiklių pagrindiniai tipai: žeminantys ir (angl. buck converter) aukštinantysis (angl. boost converter) keitikliai.

Paprasčiausias DC-DC žeminantysis keitiklis sudarytas iš keturių komponentų: diodo (D), tranzistoriaus, šaltinio ir ritės (L). Diodas ir tranzistorius kontroliuoja ritę, keičiant jungties padėtį tarp ritės ir šaltinio. Šaltinis įkrauna, o apkrova iškrauna ritę. Kai tranzistoriaus jungiklis yra įjungtas, srovė tekanti rite tiesiškai didėja, o diodas neleidžia tekėti srovei priešinga kryptimi. Principinė schema DC-DC žeminančio keitiklio pateikta 7 paveikslėlyje (žr. 7 pav.).



7 pav. DC-DC žeminančio keitiklio principinė schema[30]

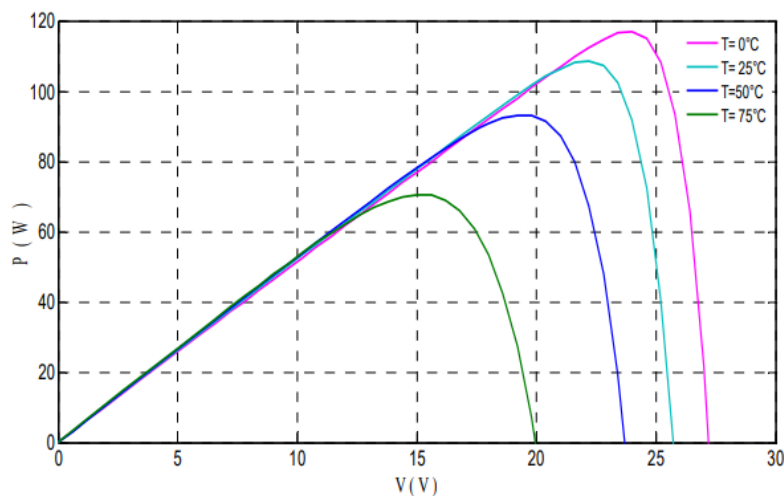
Taip pat naudojamas aukštinantysis DC-DC keitiklis, kuris skirtas padidinti nuolatinę įtampą elektros įrenginyje. DC-DC aukštinantysis keitiklis sudarytas iš tokių pat komponentų kaip ir DC-DC žeminantysis keitiklis, skiriasi tik išdėstymas. Dažnai šiame keitiklyje pridedamas kondensatorius, skirtas sumažinti įtampos pulsacijas. Tranzistoriaus jungiklio įjungimo metu, ritėje didėja tekanti srovė. Tranzistoriaus jungiklio išjungimo metu, srovė teka per diodą, perduodama įgyta energija į apkrovą. Principinė DC-DC aukštinamojo keitiklio principinė schema pateikta 8 paveikslėlyje (žr. 8 pav.).



8 pav. DC-DC aukštinančio keitiklio principinė schema[30]

Fotovoltinių modulių saulės elektrinės yra sudarytos iš puslaidininkinių celių, kurios turi voltamperinę charakteristiką. Tai kreivė, kuri parodo, jog celių galia, keičiantis įtampos ir srovės vertei yra skirtinga. Voltamperinė fotovoltinių celių galios kreivė atvaizduota 9 paveikslėlyje (žr. 9 pav.). Kreivėje atvaizduotas kitimas, esant skirtingai celių temperatūrai, keičiasi ir galios kreivė. Voltamperinės charakteristikos pokyčius įtakoja ne tik celių temperatūra, bet ir apšvieta. Todėl reikalingas algoritmas, sekantis MPPT tašką, siekiant tiekti maksimalią galią esant skirtingomis oro sąlygomis iš fotovoltinių celių, nepriklausomai nuo apkrovos dydžio. MPPT valdymo blokas seka įtampos ir srovės vertes, taip koreguodamas galios vertę su DC-DC aukštinamuoju arba

žeminančiuoju keitikliu, gaunant maksimalią galios vertę arba siekiant apriboti galią, ties nustatyta verte.

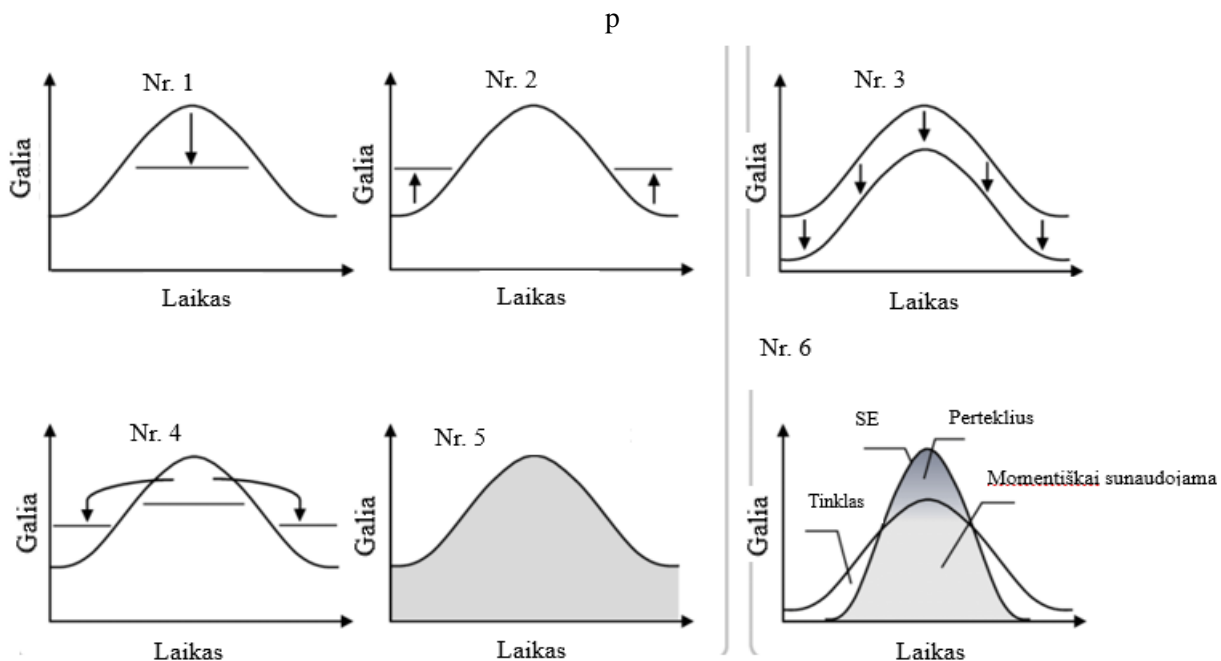


9 pav. Voltamperinė fotovoltinių celių galios kreivė keičiantis temperatūrai [32]

1.3. Sprendimai siekiant padidinti SE integraciją

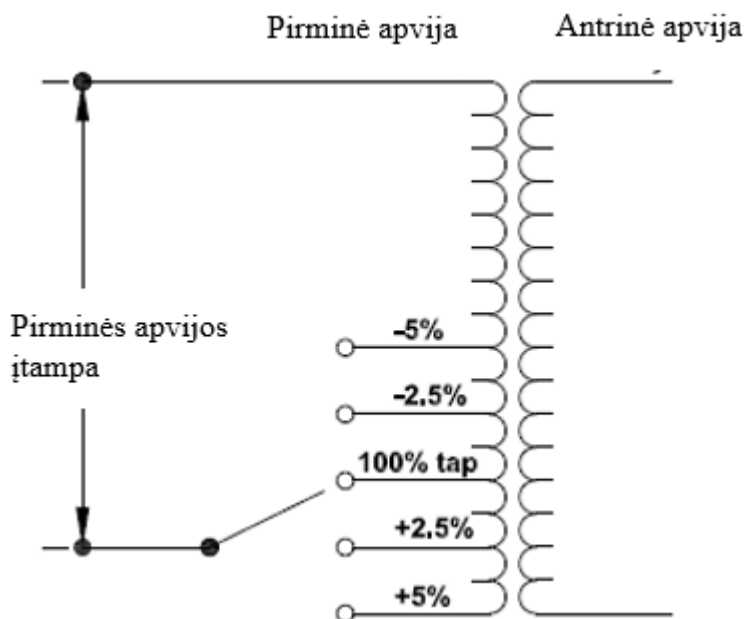
Iš aptartų poskyrių, žinoma, kad saulės elektrinių įrengimas sukelia negrįžtamų pokyčių skirstomajame elektros tinkle. Todėl reikalingi sprendimai, kurie leistų integruoti naujas saulės elektrines į skirstomąjį elektros tinklą. Sprendimai:

1. **Energijos paklausos valdymas.** Elektros energijos gamybos ir vartojimo disbalansas sukelia techninius iššūkius elektros tinkle. Todėl tinkamas energijos paklausos valdymas ne tik sumažina techninius iššūkius tinkle, bet taip pat sumažina vartotojo elektros kaštus. Šio metodo tikslas yra kuo mažiau naudoti įrenginius, didžiausios elektros energijos paklausos metu. Pateikiami šeši grafikai elektros energijos paklausos valdymo metodų (žr. pav. 10). Kiekvienas grafikas parodo, kaip galima efektyviai koreguoti apkrovą, kad sumažintume elektros įrenginių naudojimą didžiausios elektros paklausos metu. Esant gaminančiu vartotoju, elektros įrenginius naudingiausia naudoti, kai saulės elektrinė generuoja didžiausią elektros energijos kiekį, kadangi pagamintos saulės elektros energija pirmiausia tiekama arčiausiai esančiam vartotojui, tai yra elektrinės savininkui, o perteklinė elektros energija tiekama į skirstomąjį tinklą pasaugojimui. Priklausomai nuo saulės elektrinės azimuto, tai yra kurioje pasaulio kryptyje yra orientuota SE: vakarai, rytai, pietai nuo to priklausys elektrinės didžiausios galios generacija dienos metu. Jei elektrinė orientuota vakaruose, tai didžiausia SE generacija – vakare. Pagal SE generacijos maksimumą, optimaliai pasirenkamas laikas, kada naudingiausia sunaudoti daugiausiai elektros energijos.



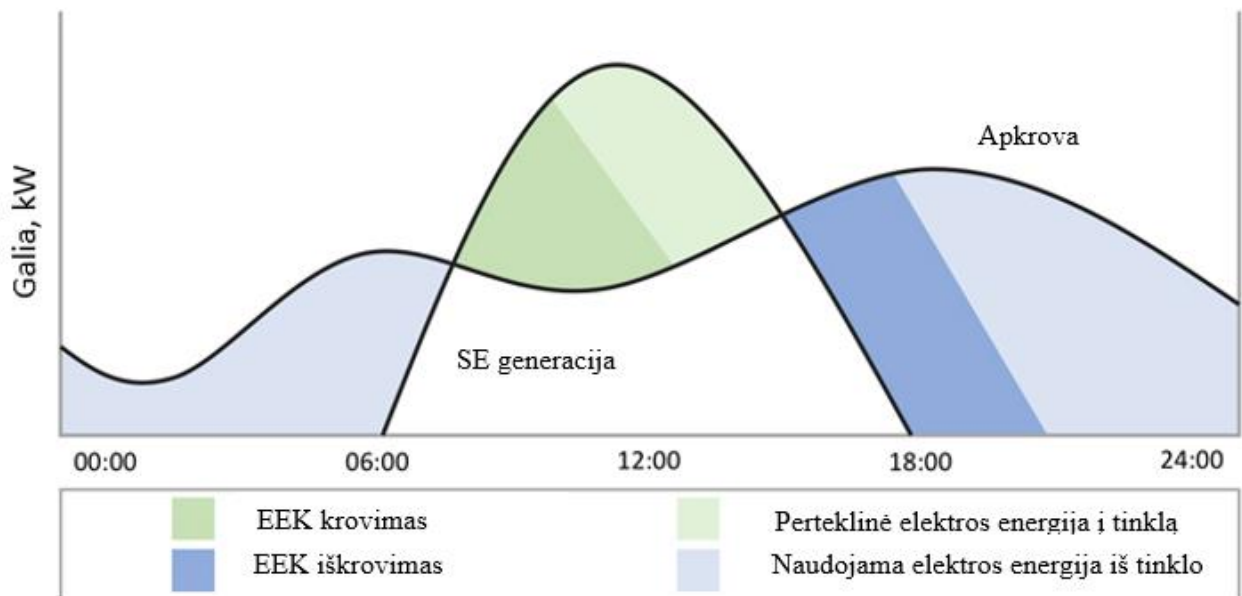
10 pav. Elektros energijos valdymo pavyzdžiai [54]

2. **Transformatoriaus atšakų perjungimas.** Didėjant saulės elektrinių kiekiui, atsiranda tinklo problemų, tokių kaip įtampos padidėjimas ir svyravimai. Siekiant išspręsti šią problemą naudojamas transformatoriaus atšakų perjungimas, šio įrenginio pagalba galima reguliuoti įtampą linijoje. Dažnai perjungiant atšakas, mažėja transformatoriaus eksploatacijos laikas, todėl reikia pasirinkti optimalią įtampą kuo ilgesniam laikui. Transformatoriaus atšakų įtampų valdymų reikšmės pateiktos 11 paveikslėlyje (žr. 11 pav.).



11 pav. Transformatoriaus įtampų valdymų reikšmės

3. **Reaktyvios galios valdymas.** Fotovoltiniai moduliai generuoja aktyvią galią, įrengus didelį kiekį saulės elektrinių padidėja aktyvios galios kiekis tinkle. Norint valdyti tinklo įtampa dažniausiai ribojama tik aktyvioji galia, tačiau labai svarbu reguliuoti ir reaktyviąją galią, kad būtų išlaikoma leistinoji įtampų vertė elektros tinkle. Reaktyvios galios valdymas aukštos įtampos tinkle yra efektyvesnis, nei žemos įtampos tinkle, nes reaktyviųjų ir aktyviųjų varžų santykis yra mažesnis. Įtampos keitikliai reguliuoja įtampą, ribodami aktyviąją ir vartodami reaktyviąją galią. Įtampa reguliuojama dar efektyviau, jei saulės elektrinė yra hibridinė, tai yra naudojamas elektros energijos kaupiklis.
4. **Elektros energijos kaupikliai.** Rekomenduotina saulės elektrines įrenginėti papildomai su elektros energijos kaupikliais, kad būtų galima efektyviai valdyti perteklinę elektros energiją iš atsinaujinančių šaltinių. Elektros energijos kaupikliai pagerina elektros tinklo stabilumą, sumažina įtampų svyravimus, sprendžia perteklinės elektros energijos problemas. Dėl saulės elektrinių dažnai nenuspėjamos ir nepastovios generacijos (kurias lemia meteorologinės sąlygos) elektros energijos sistemoje atsiranda įtampos ir dažnio svyravimai, pasiūlos ir paklausos disbalansas. Dažniausiai įtampos svyravimai trunka mažiau nei minutę, todėl elektros energijos kaupikliai, tokie kaip: ličio, švino rūgšties akumuliatoriai, superkondensatoriai padeda pagerinti elektros tinklo stabilumą. Elektros energijos kaupikliais galima valdyti elektros energijos srautus, kaupti elektros energiją, kai ji yra pigiausia arba kaupti perteklinę elektros energiją iš atsinaujinančių šaltinių ir panaudoti kaupiklyje sugeneruotą energiją nakties metu. Efektyvus elektros energijos kaupiklio panaudojimo grafikas pateiktas 12 paveikslėlyje (žr. 12 pav.)



12 pav. Efektyvus elektros energijos kaupiklio panaudojimo[51]

1.4. Įrengiamų saulės elektrinių skverbties limitas skirstomajame tinkle

Nėra absoliučių ribų nustatančių maksimalų įrengiamų saulės elektrinių kiekį žemos įtampos tinkle, kadangi ribą apibrėžia daugelis dedamųjų. Fotovoltinių saulės elektrinių maksimalią skverbtį vartotojų rajonuose galima nustatyti analizuojant vietinį elektros tinklą. Bendru atveju 15 – 20 %

saulės elektrinių skverbtis tinkle laikoma saugia, įvertinant ir debesų įtaką, kai generacija smarkiai sumažėja, keičiantis apšvietai. Priklausomai nuo apkrovos, generacijos ir elektros tinklo konfigūracijos saulės elektrinių skverbtis gali kisti. Saulės elektrinių įrengiamos galios skverbtis elektros tinkle apskaičiuojama pagal tryliką formulę.

$$S_{\%} = \frac{S_{PV}}{S_a} \cdot 100 \quad (13)$$

Čia:

$S_{\%}$ – saulės elektrinių skverbtis elektros tinkle, %;

S_{PV} – saulės elektrinių maksimali momentinė galia, W;

S_a – vartotojų didžiausia momentinė galia, W;

Analizuojamuose moksliniuose straipsniuose buvo aptarta saulės elektrinės įtaka elektros tinklui ir buvo pateiktą keletas realių pavyzdžių:

1. Miesto, kuriame naudojama tinklinė elektros sistema (kiekvienas transformatorius išdėstytas spindulio principu) turinti 169 vidutinės/žemos įtampos transformatorius. Buvo tiriami trys skirtingi fotovoltinių elektrinių scenarijai. Pirmas scenarijus buvo vadinamas „paskirstytu“, kur skirtinguose mazguose buvo sumontuotos 228 saulės elektrinės. Pagal antrąjį scenarijų mazguose buvo sumontuotos 56 saulės elektrinės su didelėmis apkrovomis, o pagal trečiąjį scenarijų 172 saulės elektrinės, kuriuose gyvenamųjų namų momentinė apkrova mažesnė, nei 200 kW. Rezultatai parodė, kad fotovoltinių modulių saulės elektrinių skverbčių kitimas 15 – 30 %, 45 – 60 % ir 75 – 90 % buvo toleruoti pagal scenarijų 1, 2 ir 3 įtampos kitimo ribos nebuvo viršytos
2. „DigSilent“ programos pagalba buvo sumodeliuotas spindulinis realus elektros tinklas su dviem 630 kVA vidutinės/žemos įtampos transformatoriais ir 312 vartotojų. Šiame tyrime įrengiamų fotovoltinių saulės elektrinių galios limitas buvo apibrėžtas kaip santykis tarp saulės elektrinių pagamintos metinės energijos ir visos sunaudotos energijos. Gauta reikšmė 43 %. Įtampos svyravimo ribos nebuvo viršytos.
3. Dar vienas tyrimas buvo atliktas su spinduliniu tinklu. Atliktas modeliavimas su 50 % fotovoltinių elektrinių skverbtimi. Tyrimo metu nebuvo pastebėta įtampos svyravimo ribų viršijimas, kol skverbties limitas nebuvo padidintas iki 70 – 80 %, šiuo atveju beveik 45 % elektros tinkle vartotojų, prijungimo taškuose turėjo viršįtampius ir fotovoltinės elektrinės privalėjo nutraukti generaciją. Kiekvienam namui buvo pasiūlyta 9 kWh elektros energijos kaupiklis, tai sumažino viršįtampius tinkle nuo 45 % iki 28 %.
4. Kitas modeliavimas atliktas su Jungtinėje Karalystėje esančiu žemos įtampos elektros tinklu. Kai fotovoltinių elektrinių skverbties limitas 50 %, tai įtampos svyravimai viršijo 3 %. Kito tyrimo rezultatai parodė, kad 30 % skverbtis fotovoltinių elektrinių gyvenamuose rajonuose nesukėlė viršįtampių, kol keitiklio galios koeficientas buvo laikomas 0.92. Taip pat, tinklas toleravo 100 % skverbties limitą, kai buvo naudojamas transformatorius su kintamų apvijų technologija.

Šių tyrimų tikslas, buvo ištirti problemas, susijusias su skirtingais fotovoltinių elektrinių skverbties limitu lygiais žemos įtampos skirstomajame tinkle. Tyrimas atskleidė, kad saulės elektrinių integracija į elektros tinklą tampa sudėtingu procesu, jei skverbties limitas fotovoltinių elektrinių viršija 20 %. Pagrindinė problema yra nesugebėjimas reaguoti akimirksniu į sumažėjusią saulės

elektrinių generaciją, tarkim dėl staigaus debesų susidarymo. Vidutinės įtampos tinkle, priešingai, nei žemos įtampos tinkle, viršįtampiai gali būti išvengti, esant dideliame fotovoltinių elektrinių pralaidumo lygiui net 90 %. Įtampos svyravimai labai priklauso nuo išsidėstymo ir koncentracijos saulės elektrinių pagal transformatorių. Pagrindinė problema įrengiant didesnę nei 20% saulės elektrinių skverbtį yra įtampos valdymas.

2. „PowerFactory“ programos taikomų komponentų aprašai

Skirstomojo elektros tinklo modeliavimas atliekamas naudojant „PowerFactory“ programą. Sumodeliuojamas realus elektros tinklas panaudojant galios srautų duomenis, pateiktus iš išmaniųjų skaitiklių. Taikomi elektros tinklo komponentai: elektros energijos laidininkai, transformatoriai, fotovoltinių modulių saulės elektrinės, apkrovos ir t.t.

2.1. Elektros energijos laidininkai

Elektros energijos laidininkai, tai laidai ir kabeliai, kurie yra pagrindiniai komponentai, reikalingi sujungti visą elektros energijos sistemą. Laidininkai turi varžą, kurie sudaro sistemos nuostolius. „Powerfactory“ programoje laidininko nuostoliai susideda iš trijų dedamųjų:

1. Vidinė laidininko pilnutinė varža dėl kurios atsiranda įtampos kritimas linijoje priklauso nuo laidininko tipo (tai yra nuo medžiagos iš ko pagamintas) ir nuo magnetinių laukų, kurie susidaro laidininke.

$$Z'_{Int} = R'_{Int} + j\omega L'_{Int}; \quad (14)$$

$$R'_{Int} = R_{DC}; \quad (15)$$

$$L'_{Int,s} = \frac{\mu_0}{8\pi}; \quad (16)$$

$$L'_{Int,t} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{q^4}{(r^2 - q^2)^2} \cdot \ln \frac{r}{q} - \frac{3q^4 - r^2}{4 \cdot (r^2 - q^2)}; \quad (17)$$

Čia:

Z'_{Int} – pilnutinė vidinė varža, Ω ;

R'_{Int} – vidinė laidininko varža, Ω/km ;

$L'_{Int,s}$ – laidininko be izoliacijos induktyvumas, H;

$L'_{Int,t}$ – laidininko su izoliacija induktyvumas, H;

q – laidininko spindulys, m;

r – laidininko su izoliacija spindulys m;

μ_0 – magnetinė konstanta;

2. Geometrinė pilnoji varža aprašoma, kaip idealaus laidininko be magnetinio lauko viduje ir idealaus laidumo žemę.

$$Z'_{Gii} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} N_{ii}; \quad (18)$$

$$Z'_{Gik} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} N_{ik}; \quad (19)$$

$$N_{ii} = \ln \frac{2h_i}{r_i}; \quad (20)$$

$$N_{ik} = \ln \frac{d'_{ik}}{d_{ik}}; \quad (21)$$

Čia:

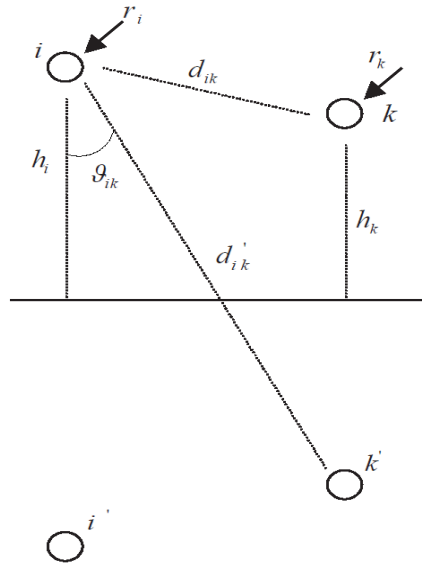
Z'_{Gii} – pilnutinė geometrinė varža, Ω ;

Z'_{Gik} – vidinė laidininko varža, Ω/km ;

N_{ii} – dažnio atsparumo koeficientas, i situacija;

N_{ik} – dažnio atsparumo koeficientas, k situacija;

r_i – laidininko spindulys, m;



13 pav. Reikšmių d'_{ik} , d_{ik} , h_i matuojami atstumai [36]

3. Žemės grįžtamoji pilnutinė varža. Priklausantis nuo žemės varžos ir linijos geometrijos.

Žemės grįžtamoji pilnutinės varžos formulė:

$$Z'_E = w \frac{\mu_0}{\pi} (P + jQ); \quad (22)$$

$$P = \frac{\pi}{8} - b_1 x \cos \theta + b_2 [(c_2 - \ln x) x^2 \cos 2\theta + x^2 \theta \sin 2\theta] + \dots; \quad (23)$$

$$Q = \frac{1}{2} (k - \ln x) + b_1 x \cos \theta - d_2 x^2 \cos 2\theta + b_3 x^3 \cos 3\theta - \dots; \quad (24)$$

$$x = 2h_i \sqrt{\mu \cdot k \cdot w}; \quad (25)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{h_i + h_k}{d'_{ik}} \right); \quad (26)$$

Čia:

Z'_E – žemės grįžtamoji pilnutinė varža, Ω ;

2.2. Transformatorius

Galios transformatoriai naudojami visoje elektros energetikos sistemoje. Galios transformatoriai keičia įtampą iš vieno lygio į kitą, dažniausiai: 0.4, 10, 35, 110, 330 kilovoltų ribose. Įtampos transformatoriai sumažina perdavimo nuostolius, kadangi naudojant aukštesnę įtampą, sumažėja srovė. Srovės dydis tiesiogiai koreliuoja su perdavimo nuostoliais.

„Powerfactory“ programoje galima įvesti tokius transformatoriaus parametrus: nominalią įtampą, galią skirtingose transformatoriaus pusėse, tuščiosios eigos nuostolius, trumpojo jungimo galios nuostolius, atšakų perjungimo funkciją, aktyvios ir reaktyvios varžos santykio vertę skirtingose transformatoriaus pusėse, trumpojo jungimo įtampa (išreikšta procentais), ši vertė parenkama mažiausia tai yra pradinė, esant šiai vertei įvyksta trumpasis jungimas.

Nominali srovė transformatoriuje apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}; \quad (27)$$

Čia:

I_n – nominali transformatoriaus srovėje, žemojoje arba aukštojoje pusėje, A;

S_n – nominali transformatoriaus galia, W;

U_n – nominali transformatoriaus įtampa, V;

2.3. Fotovoltinių modulių saulės elektrinė

Viena iš atsinaujinančios elektros energijos rūšių, tai saulės elektrinės. „Powerfactory“ programoje fotovoltinių modulių aktyvioji galia aprašoma 28 formule. Saulės elektrinės generacija priklauso nuo daugelio skirtingų kintamųjų tokių kaip: apšvieta, saulės šviesos kritimo kampas į modulius, modulių temperatūra.

$$P_{modulis} = \frac{E_{g,pv} \cdot P_{pk,modulio} \cdot \eta_{rel} \cdot \eta_{inv}}{E_{STD}}; \quad (28)$$

$$P_{sistema} = P_{modulis} \cdot N_{modulių,sk}; \quad (29)$$

$$\eta_{rel} = \left(1 + c_T \cdot 0.01 \cdot (T_c - T_r) \right) \cdot \left(1 + k_1 \cdot \ln \left(\frac{E_{g,pv}}{E_{STD}} \right) - k_2 \cdot \left(\frac{E_{g,pv}}{E_{STD}} - 1 \right) \right); \quad (30)$$

Čia:

$P_{modulis}$ – fotovoltinio modulio aktyvioji momentinė galia, kW;

$P_{sistema}$ – fotovoltinės modulių sistemos aktyvioji momentinė galia, kW;

$N_{modulių,sk}$ – bendras modulių skaičius vienam inverteriui;

$E_{g,pv}$ – momentinė apšvietos vertė ant fotovoltinio modulio paviršiaus, W/m^2 ;

E_{STD} – standartinė apšvietos vertė $1000 W/m^2$;

$P_{pk,modulio}$ – pikinė fotovoltinio modulio galia, kW;

η_{rel} – fotovoltinio modulio efektyvumas;

η_{inv} – įtampos keitiklio galios faktoriaus vertė;
 c_T – fotovoltinio modulio temperatūros koeficientas, %/°C;
 T_c – vidutinė fotovoltinio modulio temperatūra, °C;
 T_r – atskaitinė temperatūra 25 °C;
 k_1, k_2 – efektyvumo koeficientai;

2.4. Išorinis elektros tinklas

Kadangi elektros energijos tinklas yra labai didelis, o sistemoje naudojama tik labai maža dalis tinklo, tai likusi tinklo dalis, kuri nenaudojama skaičiavimuose aprašoma kaip išorinis elektros tinklas. Pagal išorinio tinklo jungčių tipą priskiriami trys variantai: PQ, PV, SL.

PQ jungties tipo atveju išorinis tinklas modeliuojamas kaip pastovios aktyviosios ir reaktyviosios galios perdavimas. Teigiama aktyvioji galia – generuojama, o neigiama – suvartojama.

PV jungties tipo atveju išorinis tinklas perduoda pastovią aktyviąją galią ir kontroliuoja prijungimo taške šynų įtampą.

SL jungties tipo atveju išorinis tinklas kontroliuoja įtampą, kampą ir dažnį prijungimo taško, tai yra šynų.

Be to naudotojas gali įvesti aktyviosios ir reaktyviosios galios reikšmes, naudojant šiuos derinius: P ir $\cos(\varphi)$, Q ir $\cos(\varphi)$, S ir P. Jeigu aktyviajai galiai nustatoma nulinė reikšmė, tokiu atveju įtampos ir dažnio reikšmės nebus kontroliuojamos

2.5. Elektros energijos kaupiklis

Elektros energijos kaupiklis, tai įrenginys galintis išlaikyti elektros energiją, ne tik momentiška, bet ir ilguoju laikotarpiu. Elektros energijos kaupikliai tinkle naudojami kompensuoti staigią momentinę apkrovą arba kaip perteklinės energijos kaupiklis. Baterijos “Powerfactory” programoje naudojamos simetriniams ir nesimetriniams galios srautų skaičiavimams. Idealaus baterijų modelio vizualizacija pateikta 14 paveikslėlyje (žr. 14 pav.). Vidinis baterijos induktyvumas L_i yra ignoruojamas, bet vidinė varža įvertinama. Vidinė baterijos įtampa išlaikoma pastovi ir aprašoma šia formule:

$$U_i = U_{nom} \cdot u_{set}; \quad (31)$$

$$U_{DC} = U_i \cdot I_{DC} \cdot R_i; \quad (32)$$

Čia:

U_i – vidinė įtampa, V;

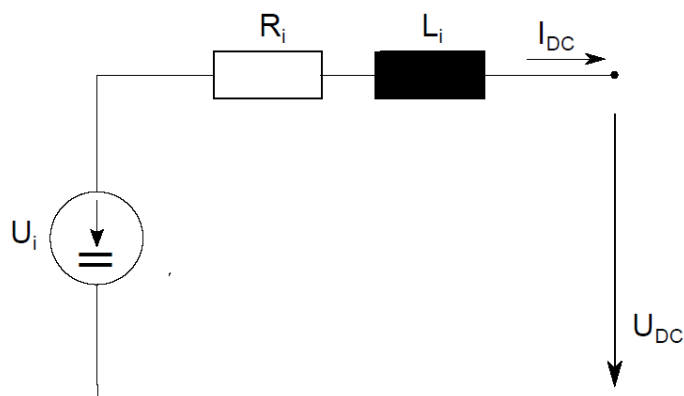
u_{set} – nustatytos įtampos taškas;

U_{nom} – nominali baterijos įtampa, V;

U_{DC} – nuolatinė įtampa, V;

I_{DC} – nuolatinė srovė, A;

R_i – vidinė varža, Ω ;



14 pav. Idealių baterijų modelio vizualizacija [41]

2.6. Žemos įtampos apkrova

Apkrovos srauto skaičiavimų žemos įtampos sistemose tikslas – nustatyti didžiausias linijų sroves ir įtampos kritimą, o aktyvios ir reaktyvios varžos santykis tokiose sistemose yra gerokai didesnis, nei 1. Įtampos kritimas daugiausia priklauso nuo aktyviosios varžos, o reaktyvioji varža sudaro mažiau įtakos. Skirstomųjų elektros tinklų modeliavimas yra sudėtingas uždavinys, ypač žemos įtampos pakopose, kuriose dėl priklausomybės nuo laiko atsiranda stochastinis komponentas. Šis stochastinis komponentas išreiškiamas naudojant sutapimo koeficientą, kuris atsižvelgia į tai, kad vyrauja labai mažai tikimybė, jog visos apkrovos bus maksimalios vertės.

„Powerfactory“ programa pateikia unikalų žemos įtampos apkrovos modelį, kuris apibrėžiamas tiekiamų jungčių skaičiumi ir apkrovos kategorija. Kiekvienai kategorijai didžiausia jungties apkrova ir sutapimo koeficientas apibrėžiami begaliniam jungčių skaičiui. Tai leidžia nustatyti vidutinės ir didžiausios apkrovos santykį. Atsižvelgiant į stochastinį nepriklausomą žemos įtampos apkrovų komponentą, didžiausią apkrovą (kuri priklauso nuo jungčių skaičiaus) galima apibūdinti taip:

$$S_{max}(n) = n \cdot g(n) \cdot S_{max}(1); \quad (33)$$

$$g(n) = g_{\infty} + \frac{1 - g_{\infty}}{\sqrt{n}}; \quad (34)$$

Čia:

n – jungčių skaičius;

$g(n)$ – sutapimų skaičius;

2.7. Galios srautų skaičiavimai

Elektros tinklo modeliavimo programa apskaičiuoja galios srautus pagal žemiau pateiktas formules.

Pilnutinė galia apskaičiuojama taip:

$$S = 3 \cdot U_1 \cdot I; \quad (35)$$

Čia:

U_1 – teigiamos sekos įtampa;

Pilnutinė galia išskirtoma į aktyviąją ir reaktyviąją taip:

$$S = \sqrt{S_a^2 + S_r^2}; \quad (36)$$

Čia:

S_a – aktyvioji galia, W;

S_r – reaktyvioji galia, Var;

Aktyviają galią apibrėžia P žymėjimas:

$$P = S_a; \quad (37)$$

Reaktyviają galią apibrėžia Q žymėjimas:

$$Q = S_r; \quad (38)$$

$\cos\varphi$ apskaičiuojama taip:

$$\cos\varphi = \cos\left(\arctan\left(\frac{Q}{P}\right)\right) = \frac{P}{S}; \quad (39)$$

Čia:

$\cos\varphi$ – galios faktorius;

$\tan\varphi$ apskaičiuojama taip:

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P}; \quad (40)$$

3. Tyrimo rezultatai

Buvo tiriama Vokietijos miestelio skirstomojo tinklo su 145 vartotojais ir 21 saulės elektrine. Vartotojai prijungti prie keturių transformatorių 10/0.4 kilovoltų įtampos. Vidutinė metinė vartotojų apkrova lygi 0.45 kW. Vidutinė metinė 1 kW saulės elektrinės generacija lygi 0.11 kW. Duomenys surinkti iš išmaniosios apskaitos prietaisų. Duomenų apskaita vykdoma kas valandą, metiniuose skaičiavimuose tiriama viso 8760 rezultatų pasirinktos galios generacijai. Kiekvienai elektros tinklo metų laikotarpio modeliavimui, nuosekliai didinama saulės elektrinių galia t.y. 0, 1, 10, 30, 50, 70 kW. Skaičiavimai atliekami simetrinio elektros tinklo. Iš modeliavimų gautų skaičiavimų, analizuojamos elektros tinklo linijų įtampos, nuostoliai, apkrovos ir transformatorių galios srautai. Elektros tinklo modeliavimui naudojama PowerFactory programa, skaičiavimai automatizuojami su Python programa.

2 lentelė. Tiriamojo elektros tinklo duomenys

Elektros linija, nr.	Linijos ilgis, metrai	Saulės elektrinės, sk.	Vartotojai, sk.
1	289.6	7	23
2	140.7	1	8
3	280.3	1	7
4	306.8	3	27
5	14.9	0	1
6	154.2	0	2
7	412.4	6	33
8	190.2	3	14
9	19.5	0	1
10	41.9	0	1
11	64.2	0	2
12	179.3	0	5
13	120.2	0	21
Viso	2213.8	21	145

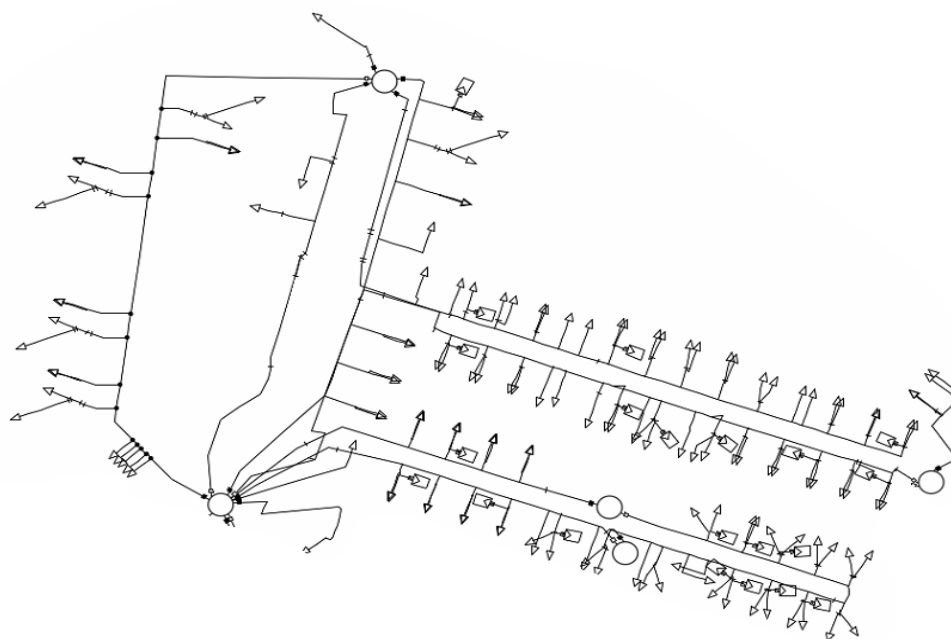
Prie transformatorių prijungtų linijų sąrašas:

1. Transformatorius nr. 1, prijungtos linijos: 1
2. Transformatorius nr. 2, prijungtos linijos: 2
3. Transformatorius nr. 2, prijungtos linijos: 3, 4, 5, 6,
4. Transformatorius nr. 4, prijungtos linijos: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13

3 lentelė. Transformatoriaus parametrai

Transformatoriaus vardinė galia, MVA	Nominalus dažnis, Hz	Aukštoji įtampos pusė, kV	Žemoji įtampos pusė, kV	Vektorių grupė	Santykinė trump. jung. įtampa, %	Atšakų perjugimo, pakopos įtampa, %
0.63	50	10	0.4	D-Yn11	4	1.125 (± 5)

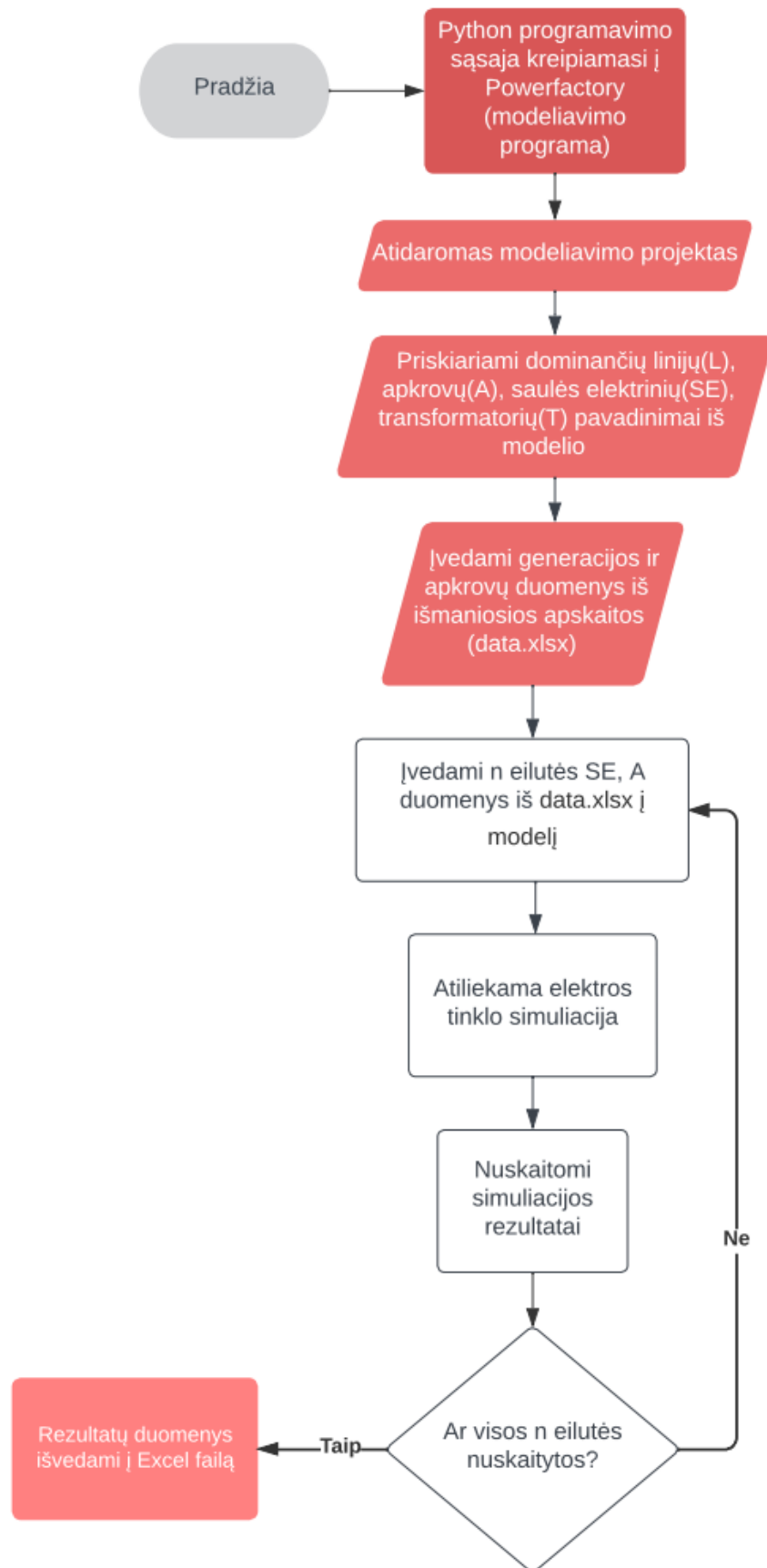
Tiriamoji elektros tinklo schema pateikta 15 paveikslėlyje (žr. 15 pav.).



15 pav. Tiriamoji elektros tinklo schema

3.1. Skaičiavimų algoritmas

Norint atlikti metinius skaičiavimus, reikia pakeisti kiekvienos elektrinės generaciją ir vartotojų apkrovos reikšmę kiekvieną valandą, todėl keičiant reikšmę mechaniškai, tai yra neefektyvu. Metiniai skaičiavimai automatizuojami su Python programa. Python programa krepiamasi į Powerfactory programą, taip susiejamos aplikacijų programavimo sąsajos (angl. Application Programming Interface). Buvo atlikta detali analizė Powerfactory programos kodų galimybių. Kiekvienas elektros įrenginys Powerfactory programoje turi atskirą kodą, kurį panaudojant galime keisti pasirinktą parametą. Pateikiama trumpa algoritmo vizualizacija (žr. 16 pav.).



16 pav. Skaičiavimų algoritmas

3.2. Skaičiavimų rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami skaičiavimų rezultatai: linijų ir transformatorių. Įtampų, apkrovų, nuostolių vertės analizuojamos minimalios, vidutinės ir maksimalios skaičiavimų reikšmės. Stebimi nuokrypiai nuo leistinų normų.

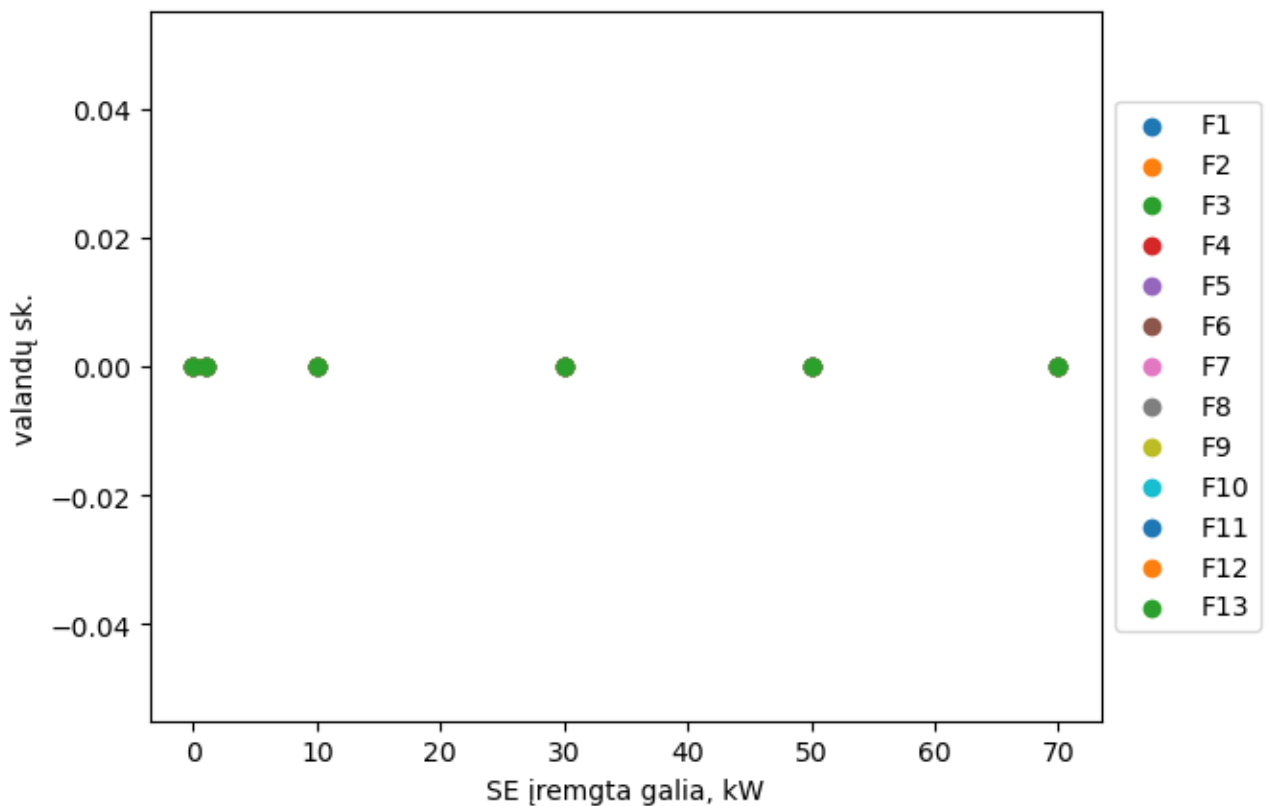
3.2.1. Neleistinų per žemų įtampos verčių skaičius

Skirstomojo tinklo žemos įtampos leistinos vertės yra $\pm 10\%$ ribose, taigi buvo stebima ar įtampa nėra žemesnėje, nei 0.36 kV vertėje. Atlikus skirtingų galių elektrinių nuo 0 iki 70 kW modeliavimą elektros tinkle, nustatyta, kad neleistinų įtampos verčių nebuvo.

4 lentelė. Neleistinų per žemų įtampos verčių skaičius

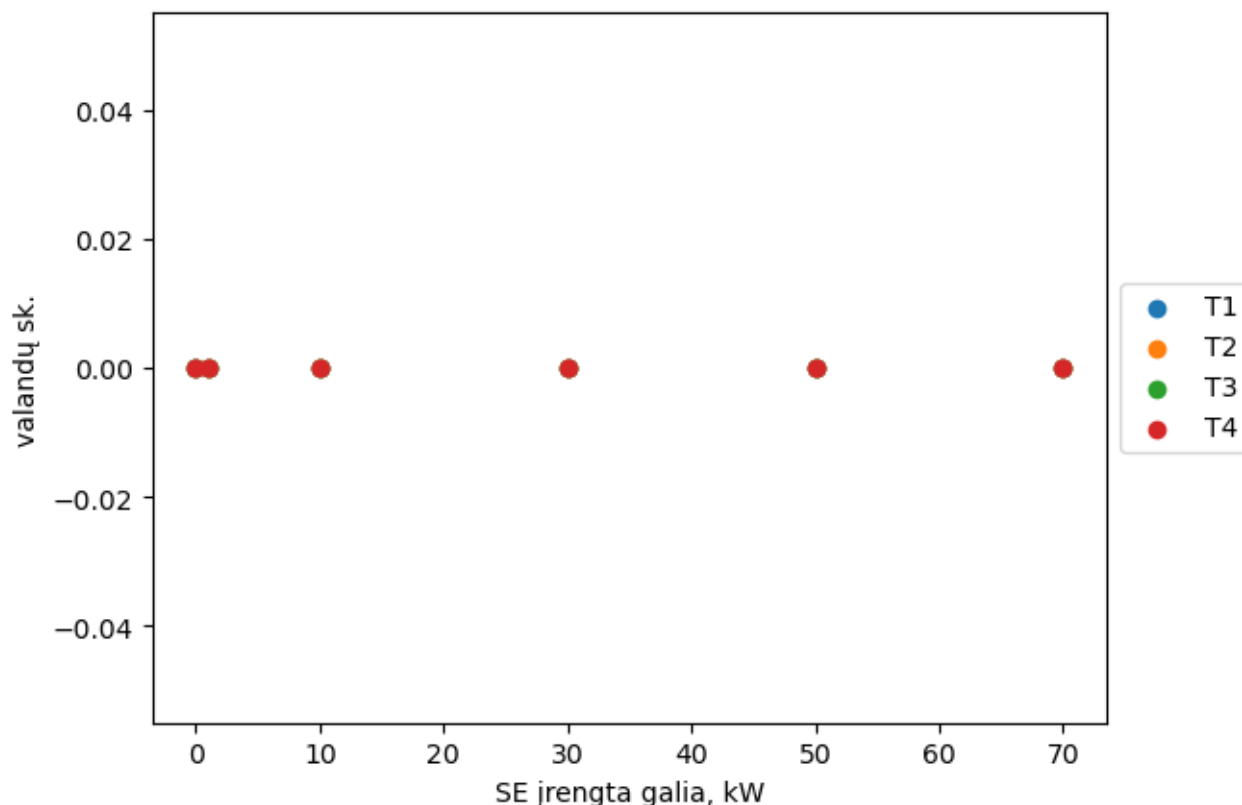
Parametro pavadinimas	Per žemos įtampos					
	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Elektrinės galia	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Neleistinų įtampos verčių sk. linijose	0	0	0	0	0	0
Neleistinų įtampos verčių sk. transformatoriuose	0	0	0	0	0	0

Linijose per žemų (neleistinų) įtampos verčių skirtingose generacijose nebuvo (žr. 17 pav.).



17 pav. Linijų per žemų įtampos verčių taškinis grafikas

Transformatoriuose per žemų (neleistinų) įtampos verčių skirtingose generacijose nebuvo (žr. 18 pav.).



18 pav. Transformatorių per žemų įtampos verčių taškinis grafikas

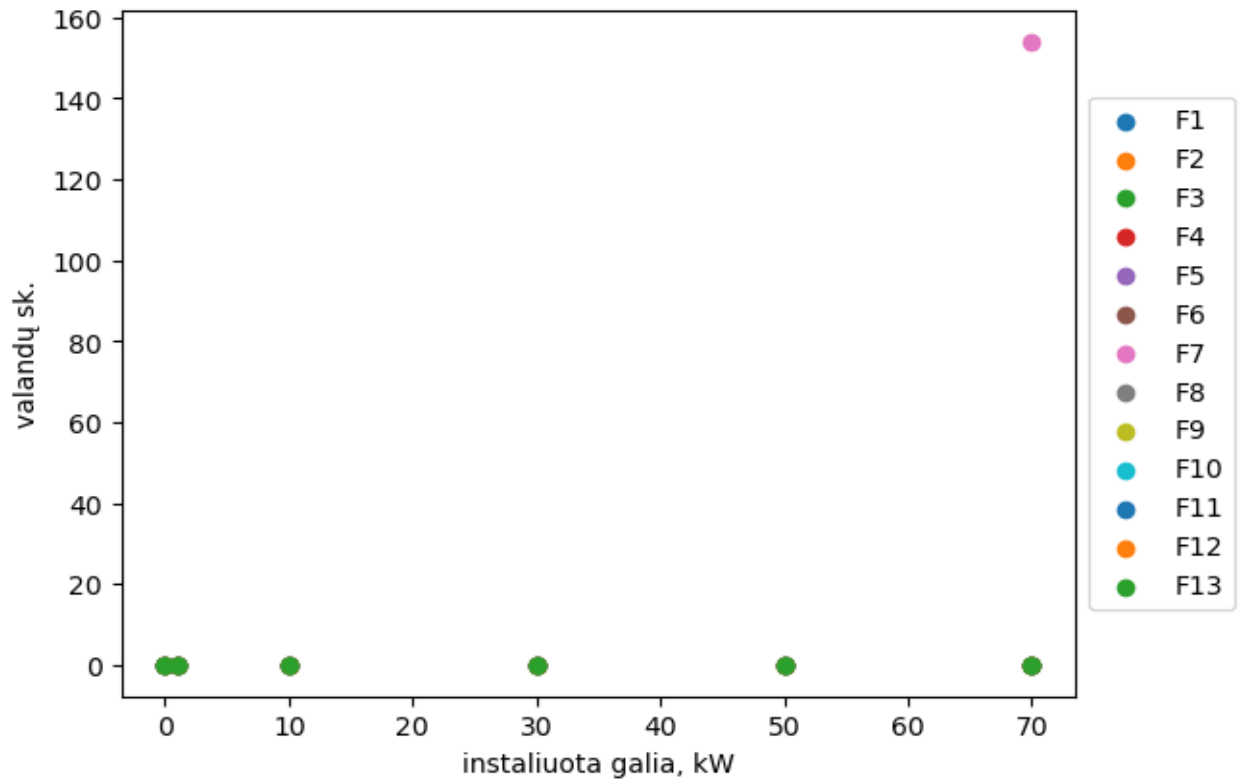
3.2.2. Neleistinų per aukštų įtampos verčių skaičius

Skirstomojo tinklo žemos įtampos leistinos vertės yra $\pm 10\%$ ribose, taigi buvo stebima ar įtampa nėra aukštesnėje, nei 0.44 kV. Atlikus skirtingų galių elektrinių nuo 0 iki 70 kW modeliavimą elektros tinkle, nustatyta, kad neleistinos įtampos vertės aptiktos 7 linijoje, per metus beveik 160 valandų, įtampos leistinoji reikšmė buvo viršijama.

5 lentelė. Neleistinų per aukštų įtampos verčių skaičius

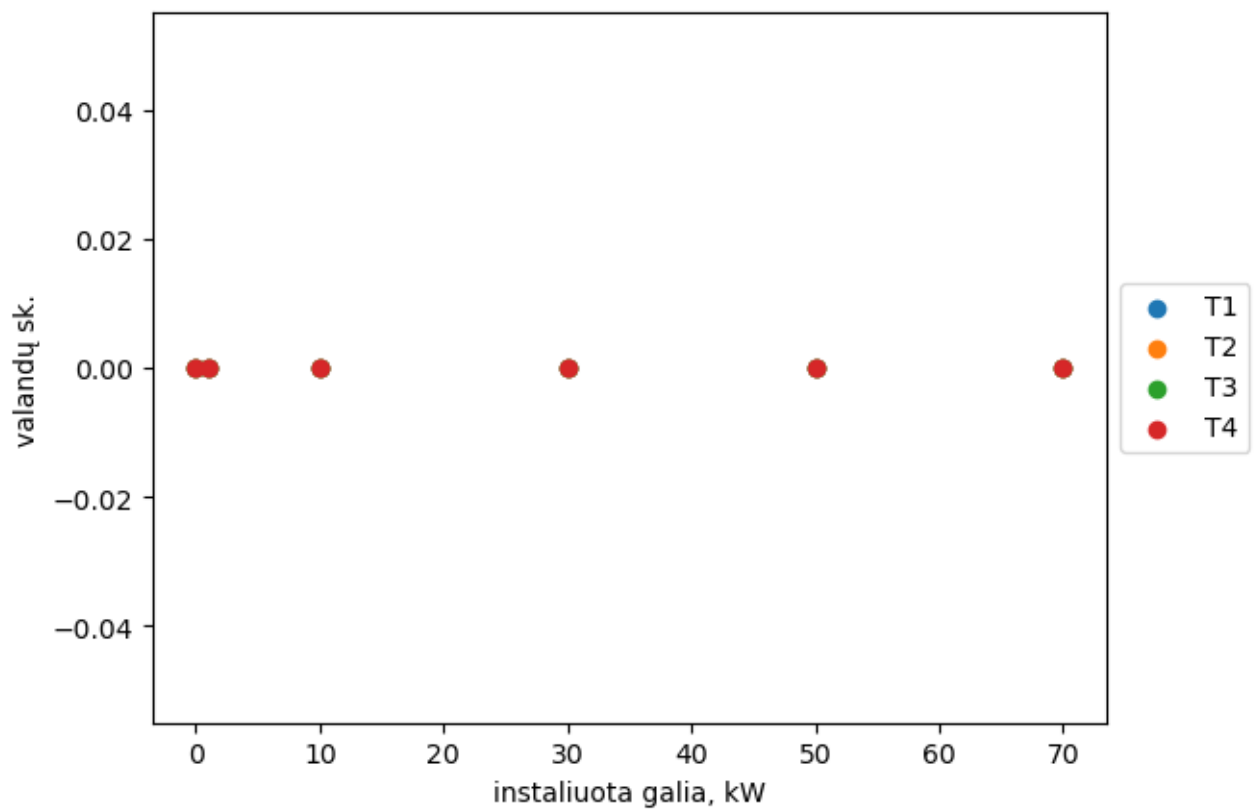
Parametro pavadinimas	Per aukštos įtampos					
	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Neleistinų įtampos verčių sk. linijose	0	0	0	0	0	158 (7 linija)
Neleistinų įtampos verčių sk. transformatoriuose	0	0	0	0	0	0

Linijose per aukštos įtampos vertės buvo 7 linijoje 160 valandų per metus prie 70 kW generacijos (žr. 19 pav.)



19 pav. Linių per aukštų įtampos verčių taškinis grafikas

Transformatorių per aukštų įtampos verčių nebuvo (žr. 20 pav.)



20 pav. Transformatorių per aukštų įtampos verčių taškinis grafikas

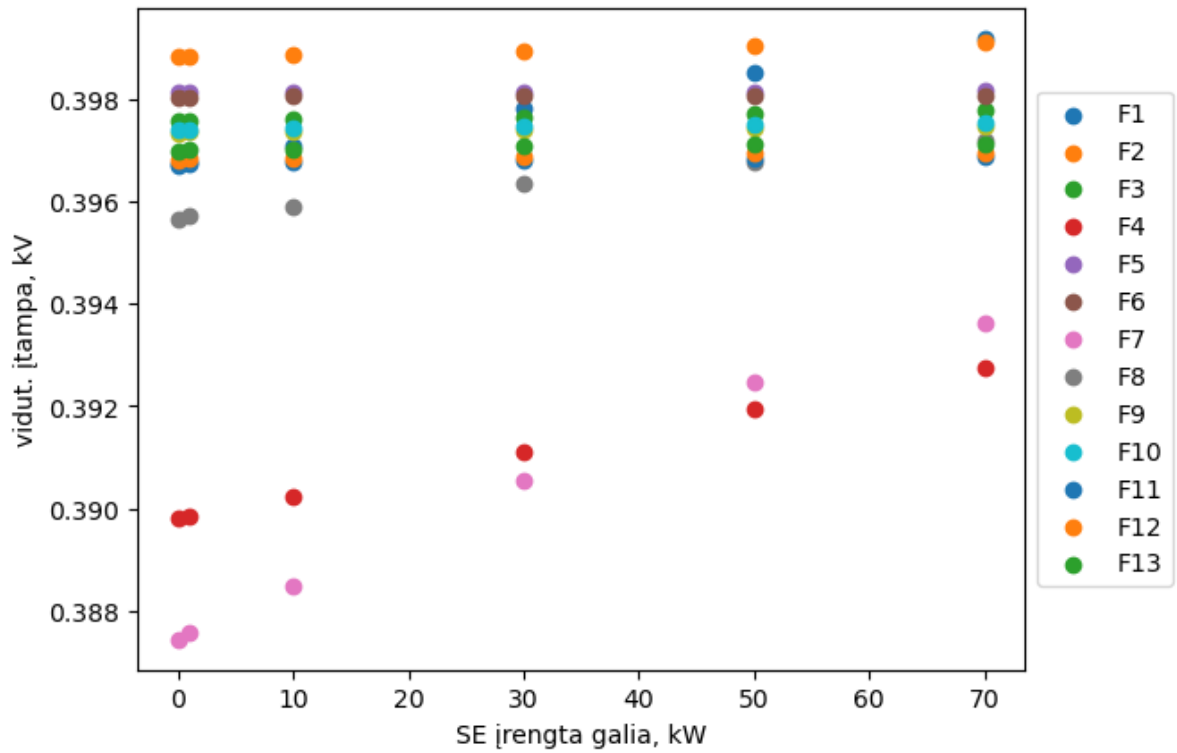
3.2.3. Vidutinės įtampos vertės

Apskaičiuotos linijų ir transformatorių vidutinės įtampos vertės. Linijose ir transformatoriuose vidutinės įtampos vertės nepadidėjo, daugiau, nei 1.5 % prie skirtingų generacijų, lyginant vertes elektros tinklo be saulės elektrinių ir su saulės elektrinėmis. Didžiausias vidutinės įtampos pokytis pastebėtas 7 linijoje, įtampos vertė keitėsi nuo 0.387 iki 0.393 kV.

6 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutinės įtampos vertės

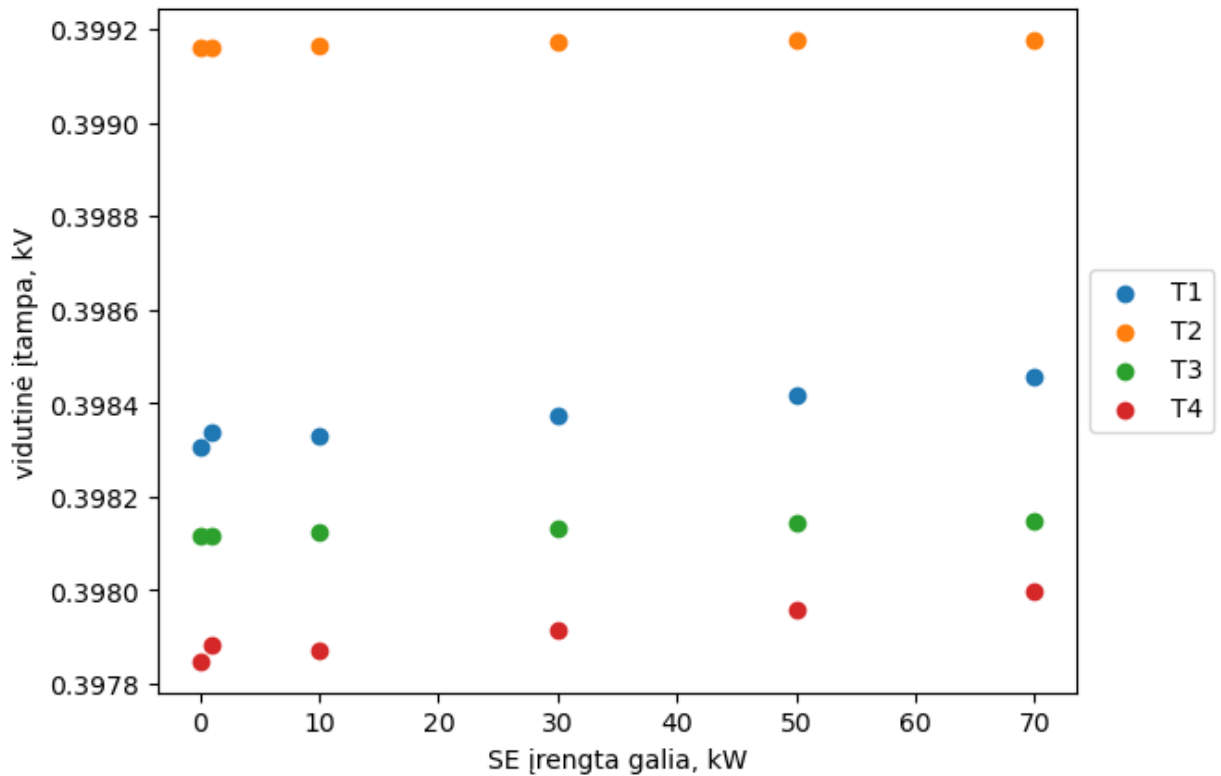
Elektrinės galia	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
1 linija, vid. įtampa, kV	0.396	0.396	0.397	0.397	0.398	0.399
2 linija, vid. įtampa, kV	0.398	0.398	0.398	0.398	0.399	0.399
3 linija, vid. įtampa, kV	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397
4 linija, vid. įtampa, kV	0.389	0.389	0.390	0.391	0.391	0.392
5 linija, vid. įtampa, kV	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
6 linija, vid. įtampa, kV	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
7 linija, vid. įtampa, kV	0.387	0.387	0.388	0.390	0.392	0.393
8 linija, vid. įtampa, kV	0.395	0.395	0.395	0.396	0.396	0.397
9 linija, vid. įtampa, kV	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397
10 linija, vid. įtampa, kV	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397
11 linija, vid. įtampa, kV	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396
12 linija, vid. įtampa, kV	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396
13 linija, vid. įtampa, kV	0.396	0.397	0.397	0.397	0.3971	0.397
1 transformatorius, vid. įtampa, kV	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
2 transformatorius, vid. įtampa, kV	0.399	0.399	0.399	0.399	0.399	0.399
3 transformatorius, vid. įtampa, kV	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
4 transformatorius, vid. įtampa, kV	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397

Linijų vidutinės įtampos vertės didėjo nuosekliai didinant generacijos galią (žr. 21 pav.).



21 pav. Linijų vidutinės įtampos

Transformatorių vidutinės įtampos vertės didėjo nuosekliai didinant generacijos galią (žr. 22 pav.).



22 pav. Transformatorių vidutinės įtampos

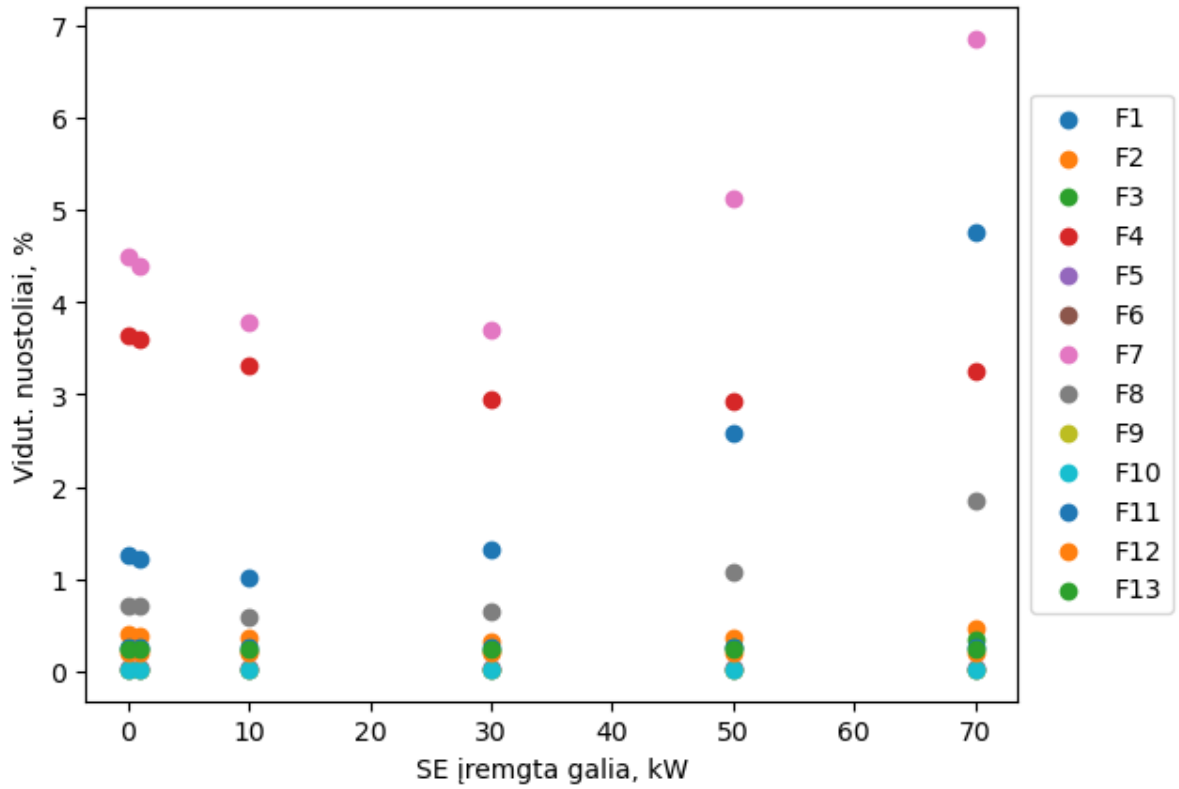
3.2.4. Vidutiniai nuostoliai

Apskaičiuoti linijų ir transformatorių vidutiniai nuostoliai. 1 ir 8 linijos nuostoliai buvo mažiausi prie 10 kW, 4 linijoje prie 50 kW, 7 linijoje prie 30 kW SE galios, toliau didinant saulės šviesos elektrinių galią, nuostoliai didėjo. Bendru atveju linijose vidutiniai nuostoliai sumažėjo apie 20% prie tinkamiausios SE generacijos. 2 ir 3 transformatoriuose vidutiniai nuostoliai nuosekliai mažėjo prie visų SE galių. 1 transformatoriuje nuostoliai buvo mažiausi prie 10 kW galios, 4 transformatoriuje prie 1 kW galios.

7 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutiniai nuostoliai

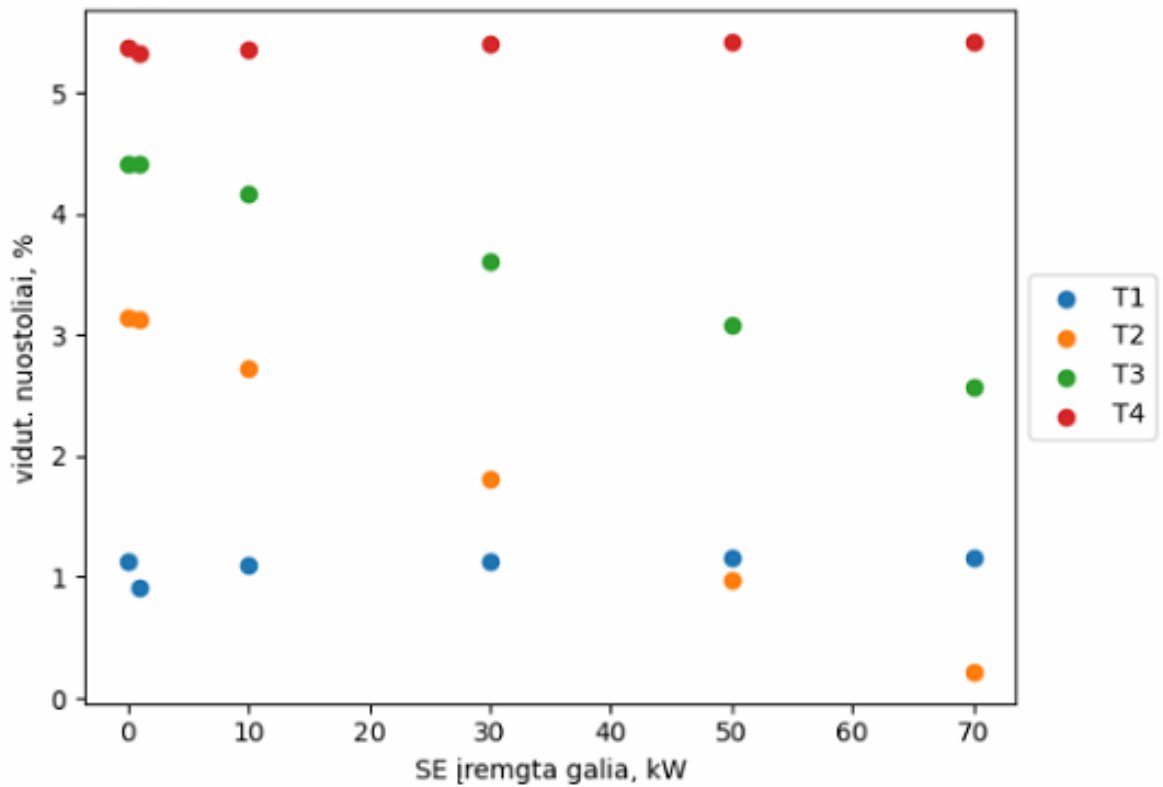
Elektrinės galia	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
1 linija, vid. nuostoliai, %	1.25	1.21	1.01	1.31	2.58	4.75
2 linija, vid. nuostoliai, %	0.39	0.39	0.36	0.33	0.36	0.46
3 linija, vid. nuostoliai, %	0.24	0.24	0.22	0.21	0.26	0.34
4 linija, vid. nuostoliai, %	3.64	3.60	3.31	2.94	2.92	3.24
5 linija, vid. nuostoliai, %	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
6 linija, vid. nuostoliai, %	0.02	0.02	0.02	0.02	0.20	0.02
7 linija, vid. nuostoliai, %	4.48	4.38	3.77	3.69	5.12	6.84
8 linija, vid. nuostoliai, %	0.72	0.70	0.59	0.64	1.06	1.85
9 linija, vid. nuostoliai, %	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
10 linija, vid. nuostoliai, %	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
11 linija, vid. nuostoliai, %	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.27
12 linija, vid. nuostoliai, %	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
13 linija, vid. nuostoliai, %	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
1 transformatorius, vid. nuostoliai, % 10^{-1}	1.13	0.91	1.10	1.13	1.15	1.15
2 transformatorius, vid. nuostoliai, % 10^{-1}	3.14	3.12	2.27	1.84	0.98	0.21
3 transformatorius, vid. nuostoliai, % 10^{-1}	4.41	4.40	4.15	3.60	3.07	2.57
4 transformatorius, vid. nuostoliai, % 10^{-1}	5.37	5.33	5.36	5.40	5.42	5.41

Linijos vidutiniai nuostoliai keičiantis generacijos galiai primena parabolę. Linijos nuostoliai mažėja nuosekliai didinant SE galią ir tam tikrame taške vėl pradeda didėti (žr. 23 pav.)



23 pav. Linijų vidutiniai nuostoliai

Transformatorių vidutiniai nuostoliai didinant SE galią nuosekliai mažėjo (žr. 24 pav.)



24 pav. Transformatorių vidutiniai nuostoliai

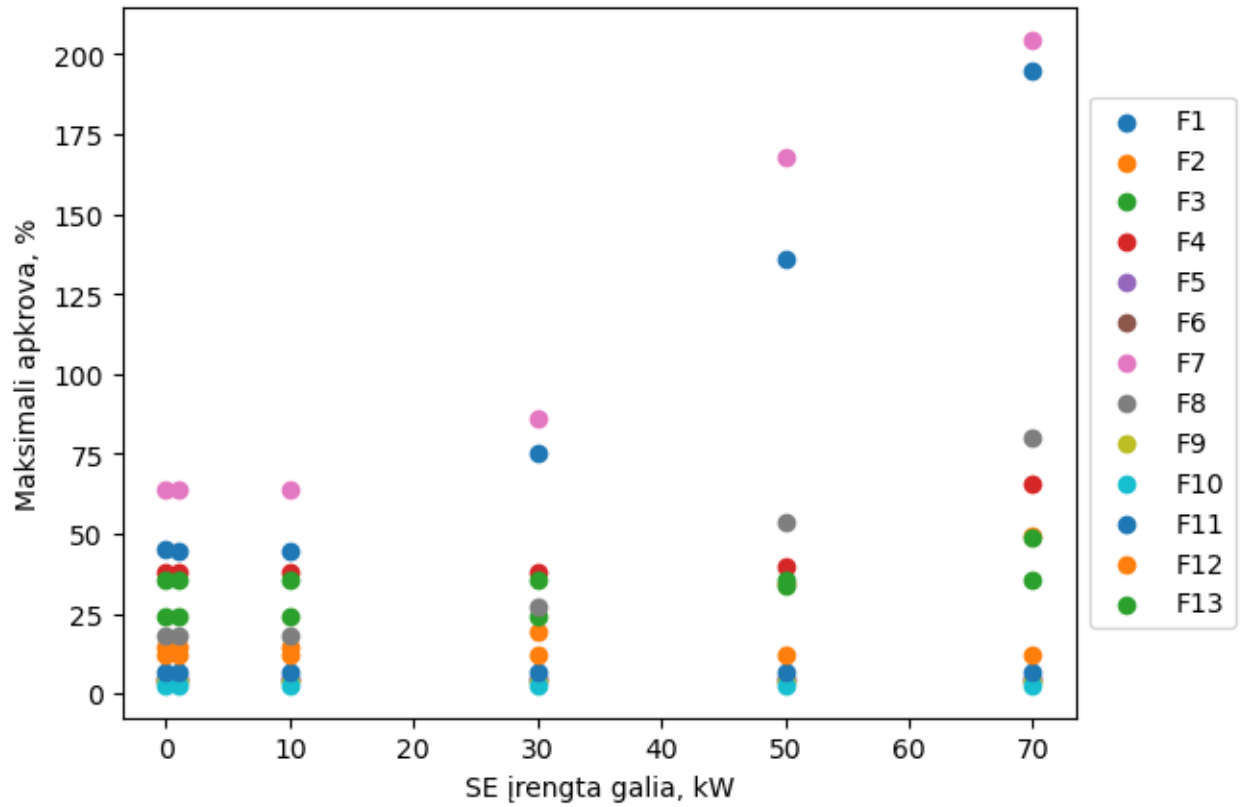
3.2.5. Maksimalios įrenginių apkrovos

Apskaičiuotos linijų ir transformatorių maksimalios apkrovos. Maksimalios apkrovos linijoje ir transformatoriuose. 1 ir 7 linijose pasiektos perkrovos prie 50 kW SE generacijos. Transformatoriai nebuvo perkrauti prie visų skirtingų generacijų.

8 lentelė. Linijų ir transformatorių maksimalios apkrovos

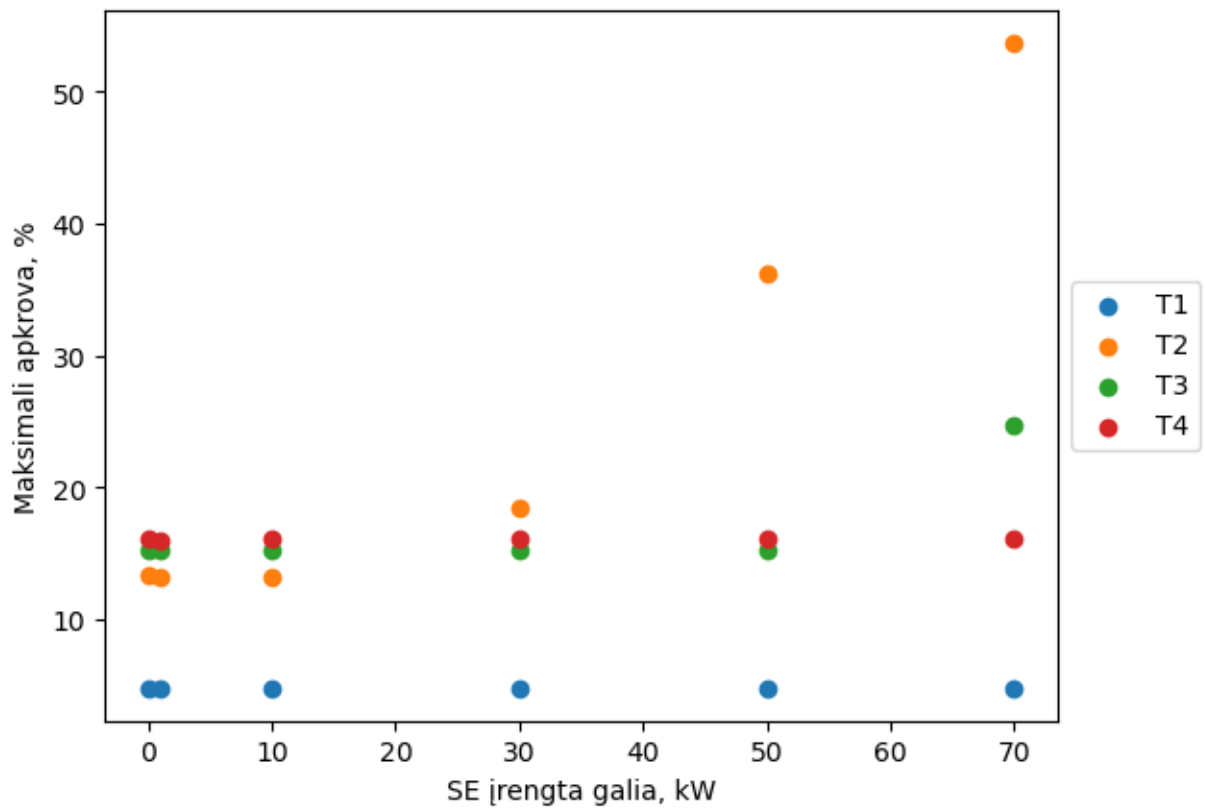
Parametro pavadinimas	Maksimali apkrova					
	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Elektrinės galia,						
1 linija, apkrova %	45.35	44.65	44.65	74.92	135.73	194.85
2 linija, apkrova %	14.49	14.49	14.49	19.38	34.53	49.61
3 linija, apkrova %	23.98	23.98	23.98	23.98	33.53	48.68
4 linija, apkrova %	37.92	37.92	37.92	37.92	39.72	65.30
5 linija, apkrova %	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65
6 linija, apkrova %	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08
7 linija, apkrova %	63.96	63.96	63.96	85.95	167.54	204.49
8 linija, apkrova %	17.82	17.82	17.82	27.19	53.63	80.16
9 linija, apkrova %	3.38	3.38	3.38	3.38	3.383	3.38
10 linija, apkrova %	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51
11 linija, apkrova %	6.57	6.57	6.57	6.57	6.57	6.57
12 linija, apkrova %	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31
13 linija, apkrova %	35.38	35.38	35.37	35.38	35.38	35.38
1 transformatorius, apkrova %	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77
2 transformatorius, apkrova %	13.38	13.35	13.16	18.42	36.26	53.67
3 transformatorius, apkrova %	15.21	15.21	15.21	15.21	15.21	24.68
4 transformatorius, apkrova %	16.15	16.15	15.95	16.15	16.15	16.15

Linijų maksimalios apkrovų vertės didėjo didinant generacijos galią (žr. 25 pav.). Linijos perkrovos buvo pasiektos prie 50 kW generacijos, linijose: 1 ir 7.



25 pav. Maksimalios linijų apkrovos

Transformatorių maksimalios apkrovų vertės didėjo didinant generacijos galią (žr. 26 pav.). Perkrova nebuvo pasiekta.



26 pav. Maksimalios transformatorių apkrovos

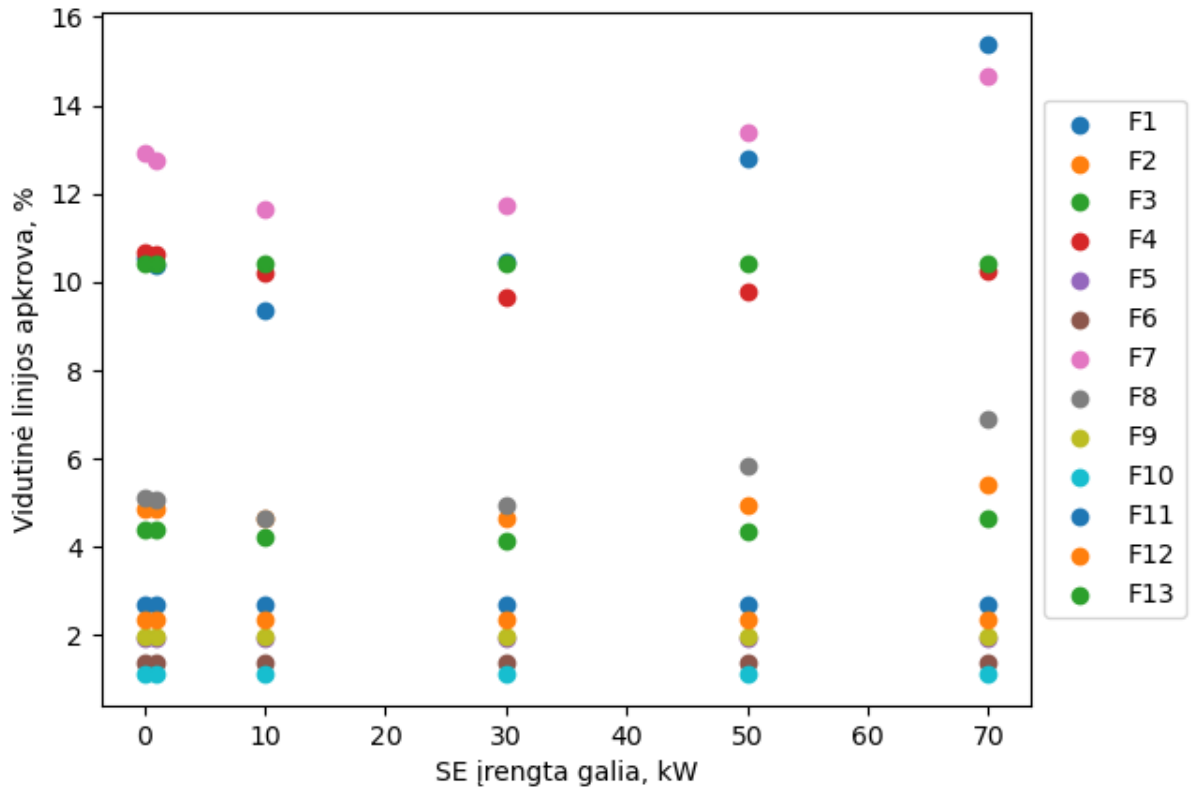
3.2.6. Vidutinės įrenginių apkrovos

Apskaičiuotos linijų ir transformatorių vidutinės apkrovos. Vidutinės apkrovos 1, 7 ir 8 linijoje buvo mažiausios prie 10 kW generacijos, 4 linijoje prie 30 kW generacijos. Apkrovos linijose prie tinkamiausių generacijų vidutiniškai sumažėjo apie 10 %. 1 ir 4 transformatorių apkrovos išliko beveik nepakitusios prie skirtingų SE generacijų. 2 transformatoriaus vidutinė apkrova buvo mažiausia prie 10 kW generacijos, o 3 transformatoriaus prie 50 kW SE generacijos. 2 ir 3 transformatorių vidutinės apkrovos pamažėjo apie 13 %.

9 lentelė. Linijų ir transformatorių vidutinės apkrovos

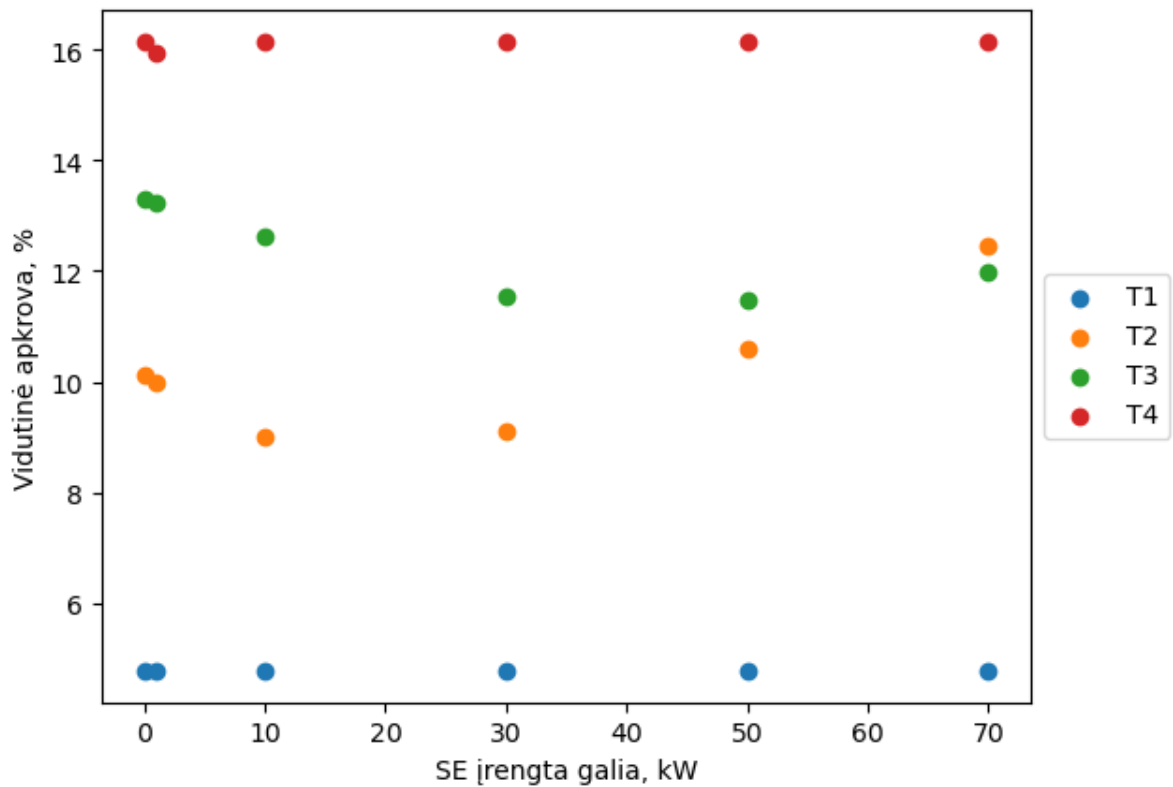
Parametro pavadinimas	Vidutinė apkrova					
	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
Elektrinės galia	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
1 linija, apkrova %	10.53	10.38	9.35	10.46	12.78	15.38
2 linija, apkrova %	4.87	4.84	4.63	4.62	4.95	5.39
3 linija, apkrova %	4.40	4.38	4.29	4.135	4.34	4.65
4 linija, apkrova %	10.67	10.62	10.18	9.64	9.76	10.26
5 linija, apkrova %	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
6 linija, apkrova %	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
7 linija, apkrova %	12.90	12.76	11.64	11.74	13.36	14.64
8 linija, apkrova %	5.12	5.06	4.62	4.95	5.84	6.88
9 linija, apkrova %	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
10 linija, apkrova %	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
11 linija, apkrova %	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
12 linija, apkrova %	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36
13 linija, apkrova %	10.41	10.41	10.41	10.40	10.40	10.40
1 transformatorius, apkrova %	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77
2 transformatorius, apkrova %	10.10	9.98	9.00	9.11	10.60	12.44
3 transformatorius, apkrova %	13.30	13.23	12.62	11.53	11.45	11.98
4 transformatorius, apkrova %	16.14	16.14	15.95	16.14	16.14	16.14

Linijų vidutinės apkrovos vertės kaip ir vidutiniai nuostoliai kito pagal parabolės kreivę nuosekliai didinant saulės šviesos elektrinių galią (žr. 27 pav.).



27 pav. Vidutinės linijų apkrovos

Transformatorių vidutinės apkrovos verčių grafikas panašus į linijų vidutinių apkrovos verčių grafiką, nes grafikas primena parabolės kreivę (žr. 28 pav.).



28 pav. Vidutinės transformatorių apkrovos

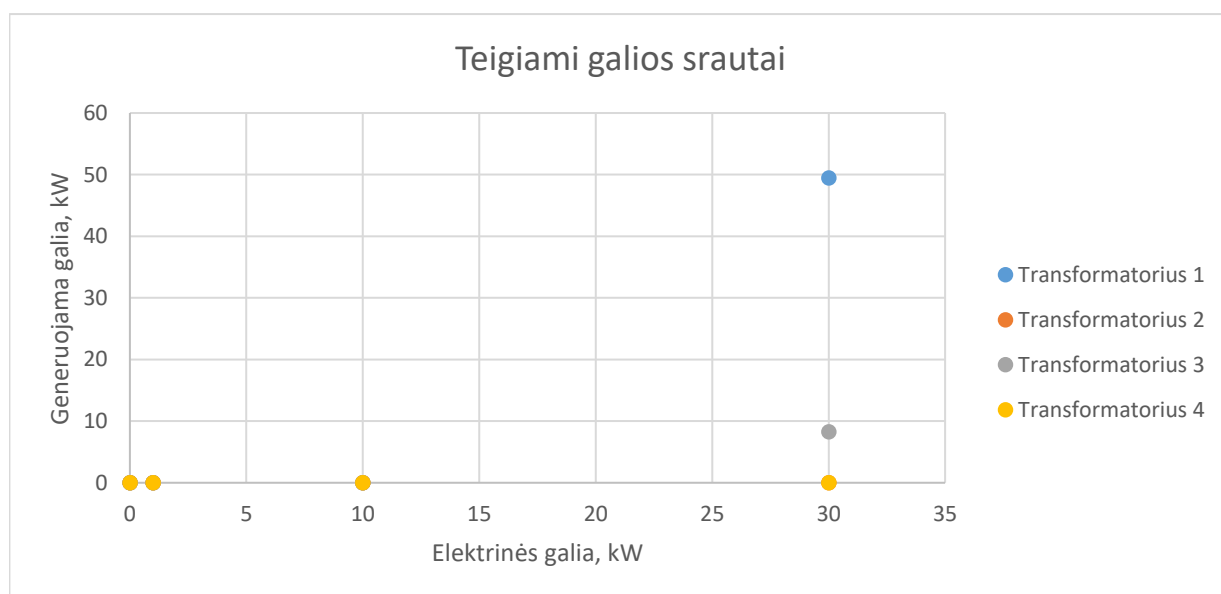
3.2.7. Transformatoriaus galių kryptys

Modeliavimo metu buvo stebimos transformatorių galių kryptys. Jeigu galia nurodoma su minusine reikšme, tai reiškia, kad visa elektros energija buvo suvartojama transformatoriaus žemoje įtampos pusėje, jei kryptis teigiama, elektros energija perduodama atgal į aukštesnę įtampos pakopą. 10 lentelėje pažymėta skliausteliuose kiek valandų buvo generuojama teigiama galia į 10 kV elektros tinklą.

10 lentelė. Transformatorių vidutinės teigiamos galios generuojama elektros energija

Elektrinės galia	0 kW	1 kW	10 kW	30 kW	50 kW	70 kW
1 transformatorius, generuojama teigiama vid. galia, kW	0	0	0	0	0	0
2 transformatorius, generuojama teigiama vid. galia, kW	0	0	0	49.44 (1399 valandų)	94.91 (1882 valandų)	134.04 (2202 valandų)
3 transformatorius, generuojama teigiama vid. galia, kW	0	0	0	8.27 (317 valandų)	37.01 (1067 valandų)	65.82 (1402 valandų)
4 transformatorius, generuojama teigiama vid. galia, kW	0	0	0	0	0	0

Transformatorių teigiamų galios srautai buvo pastebimi prie 30, 50, 70 kW generacijos (žr. 29 pav.).

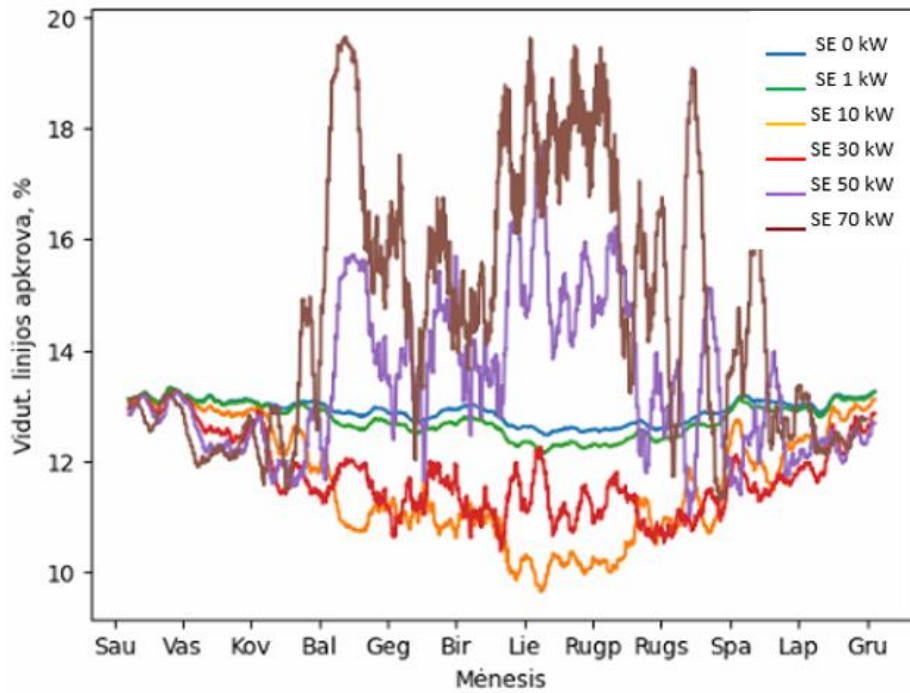


29 pav. Transformatorių vidutinių teigiamų galios srautų grafikas

3.2.8. Reikšmių kitimas laiko atžvilgiu

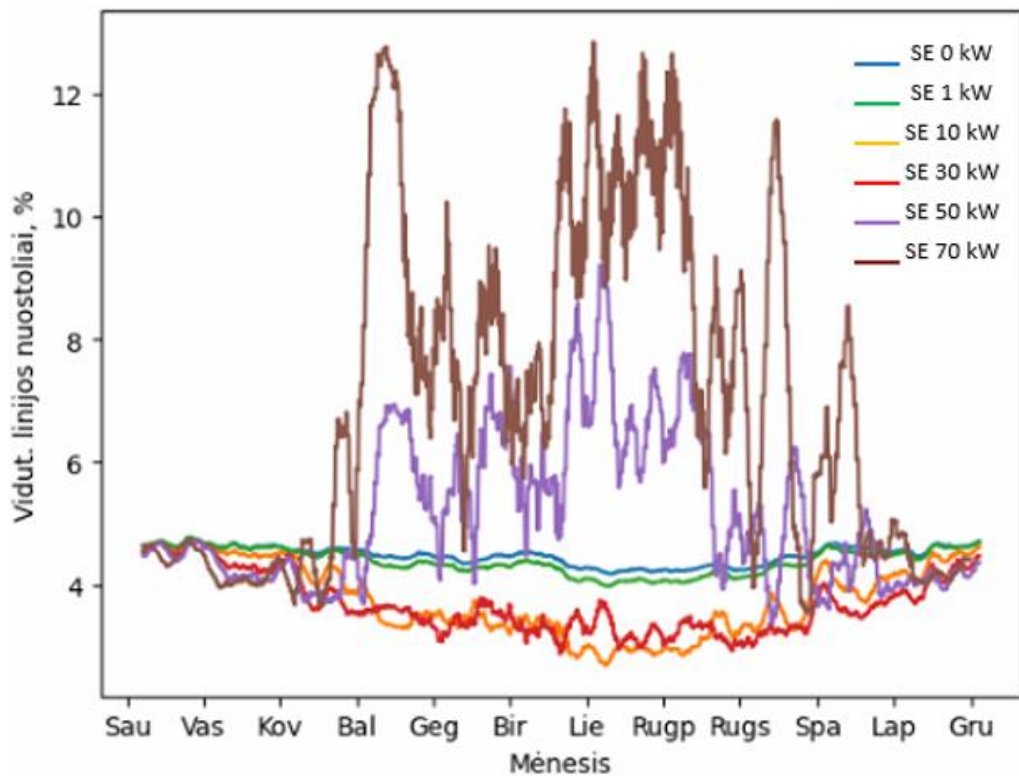
Apžvelgiamos 7 linijos įtampos, nuostolių ir apkrovos reikšmės laiko atžvilgiu. Grafike matomos reikšmių padidėjimas arba sumažėjimas priklausomai nuo saulės elektrinės generacijos.

Vidutinės apkrovos reikšmės laiko atžvilgiu matomos 30 paveikslėlyje (žr. 30 pav.). Pastebima, kad prie 1, 10, 30 kW SE generacijos reikšmės mažėjo lyginant su 0 kW generacija.



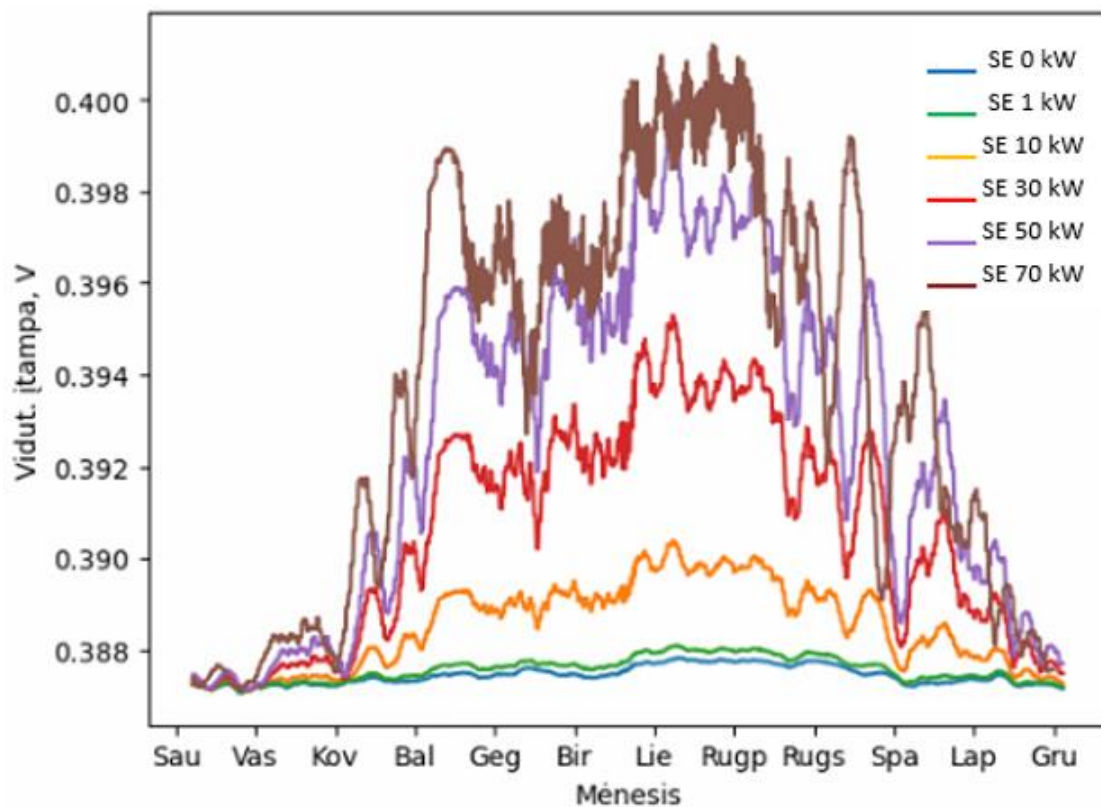
30 pav. Vidutinės apkrovos reikšmės laiko atžvilgiu

Vidutinės nuostolių reikšmės laiko atžvilgiu grafikas pateiktas 31 paveikslėlyje (žr. 31 pav.). Pastebima, kad nuostoliai mažėjo esant 1, 10, 30 kW generacijai lyginant su 0 kW generacija.



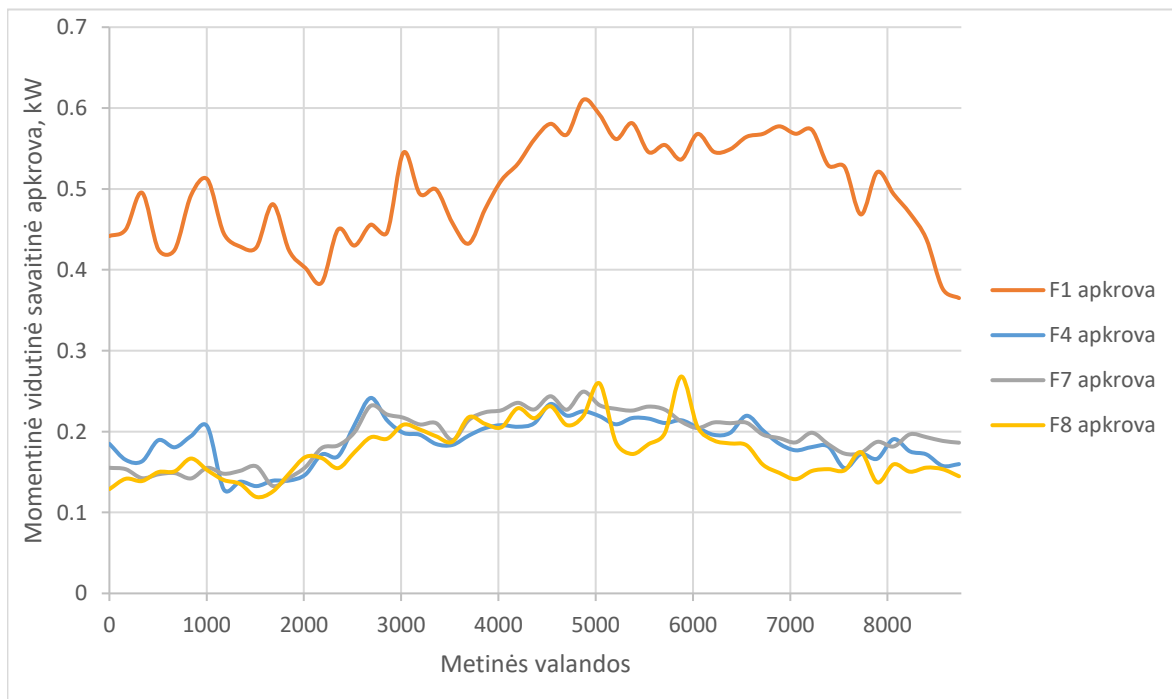
31 pav. Vidutinės nuostolių reikšmės laiko atžvilgiu

Vidutinės įtampos reikšmės laiko atžvilgiu grafikas pateiktas 32 paveikslėlyje (žr. 32 pav.). Matoma, kad didinant saulės elektrinių galią nuosekliai didėja ir įtampų reikšmės.



32 pav. Vidutinės įtampos reikšmės laiko atžvilgiu

Linijos vartotojų apkrovų grafikas laiko atžvilgiu pateiktas 33 paveikslėlyje (žr. 33 pav.). Pastebima, kad pirmos linijos vidutinė vartotojo apkrova yra dvigubai didesnė, nei kitų linijų vartotojų.



33 pav. Linijos vartotojo vidutinės apkrovos grafikas laiko atžvilgiu

3.3. Optimali saulės šviesos elektrinių galia linijose ir transformatoriuose

Parenkamos mažiausios linijų ir transformatorių vidutinių nuostolių ir apkrovų reikšmės pagal palankiausią saulės elektrinės galią.

11 lentelė. Optimali saulės elektrinių galia linijose ir transformatoriuose

Parametro pavadinimas	Vidutiniai nuostoliai	Vidutinė apkrova
1 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	10	10
2 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	30	30
3 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	30	30
4 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	50	30
5 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
6 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
7 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	30	10
8 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	10	10
9 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
10 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
11 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
12 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
13 linija, palankiausia elektrinės galia, kW	–	–
1 transformatorius, palankiausia elektrinės galia, kW	1	–
2 transformatorius, palankiausia elektrinės galia, kW	70	10
3 transformatorius, palankiausia elektrinės galia, kW	70	50
4 transformatorius, palankiausia elektrinės galia, kW	1	10

Išvados

1. Apžvelgus saulės šviesos elektrinių įtaką skirstomajam elektros tinklui pastebėta, kad saulės šviesos elektrinės padidina elektros tinklo įtampą (gali atsirasti ir viršįtampiai), sukelia įtampos mirgėjimus dėl nepastovios generacijos, perteklinė elektros energija (nesunaudota arčiausiai esančiam vartotojui) gali būti generuojama iš žemesnės įtampos pakopos į aukštesnę pakopą dėl netinkamai parinktos paskirstytos generacijos, tačiau tinkamai parinkus saulės šviesos elektrinių galią elektros skirstomajame tinkle, sumažinami elektros tinklo nuostoliai.
2. Sudarytas matematinis modelis, kuris įvertina pagrindines elektros tinklo sudedamąsias dalis: linijas, transformatorius, elektrines, vartotojus. Modelis geba skaičiuoti esminius elektros tinklo parametrus: vyraujančius galios srautus, įtampas, įrenginių ir linijų apkrovas, bei nuostolius, taip pat modelis pritaikytas skaičiuoti skirtingų konfigūracijų elektros tinklus, todėl galima įvertinti naujų įrenginių, vartotojų ar gaminančių vartotojų įtaką elektros tinklo darbo režimams.
3. Atlikus elektros tinklo modeliavimo analizę su skirtingų galių saulės šviesos elektrinėmis, pastebėta, kad prie 30 kW elektrinių galios, galios srautai perduodami iš žemesnės įtampos pakopos į aukštesnę pakopą, esant 50 kW elektrinių galiai elektros tinkle atsiranda linijų perkrovos, esant 70 kW elektrinių galiai, elektros tinkle atsiranda viršįtampiai. Taigi optimali tiriamojo elektros tinklo saulės šviesos elektrinių galia yra 10 kW. Esant 10 kW elektrinių galiai, gaminančių vartotojų linijų apkrovos vidutiniškai sumažėjo 7.1 %, o nuostoliai 13 %.

Literatūros sąrašas

1. Solar and high grid voltage. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://renew.org.au/renew-magazine/solar-batteries/solar-and-high-grid-voltage/>
2. The Technical Challenges Facing the Integration of Small-Scale and Large-scale PV Systems into the Grid: A Critical Review. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/12/1443>
3. Saulės elektrinių aukso amžius: gaminančių vartotojų skaičius augs dvigubai. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://am.lrv.lt/lt/naujienos/saules-elektriniu-aukso-amzius-gaminanciu-vartotoju-skaicius-augs-dvigubai>
4. Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems-A Review. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544503>
5. A Review of Strategies to Increase PV Penetration Level in Smart Grids.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/339014880_A_Review_of_Strategies_to_Increase_PV_Penetration_Level_in_Smart_Grids
6. PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8022856>
7. Total Harmonic Distortion. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/total-harmonic-distortion>
8. Integration of Photovoltaic System in Low Voltage Electrical Network of the Electrical Engineering Building. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8851564>
9. Voltage Rise Issue with High Penetration of Grid Connected PV.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667016423839?token=C8F12857FCCACA280838C2444D773C217D53B54202400900C914DCF420722B95657CAFB2EFFD00B4E189FD3D3738DE6E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220615213555>
10. Impact of High PV Penetration on Voltage Stability.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1771876>
11. A Novel Methodology to Determine the Maximum PV Penetration in Distribution Networks [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9020948>
12. A New Tool to Assess Maximum Permissible Solar PV Penetration in a Power System.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą https://www.researchgate.net/publication/357181144_A_New_Tool_to_Assess_Maximum_Permissible_Solar_PV_Penetration_in_a_Power_System
13. Decentralized Fuzzy-Based Voltage Control for LV Distribution Systems [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: [researchgate.net/publication/320057704_Decentralized_Fuzzy-Based_Voltage_Control_for_LV_Distribution_Systems](https://www.researchgate.net/publication/320057704_Decentralized_Fuzzy-Based_Voltage_Control_for_LV_Distribution_Systems)
14. Performance evaluation of PV penetration at different locations in a LV distribution network connected with an off-load tap changing transformer.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per

interneta:

<https://www.researchgate.net/publication/348938794> Performance evaluation of PV penetration at different locations in a LV distribution network connected with an off-load tap changing transformer

15. Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0142061519331266?token=36967DB97BF258A84408E010D709F158303AC76AF6C30342EB5995A5FCE4A4791A86CF5594F310060954D366ABAC56DC&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220616130531>
16. Facilitating higher photovoltaic penetration in residential distribution networks using demand side management and active voltage control. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://research.tees.ac.uk/ws/portalfiles/portal/25864747/Facilitating_higher_photovoltaic_penetration_in_residential_distribution_networks_using_demand_side_management_and_active_voltage_control.pdf
17. Steady-State Analysis of Maximum Photovoltaic Penetration Levels on Typical Distribution Feeders. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.academia.edu/28274884/Steady-State_Analysis_of_Maximum_Photovoltaic_Penetration_Levels_on_Typical_Distribution_Feeders
18. Determination of PV Hosting Capacity in Rural Distribution Network: A Study Case for Bantul Area. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.ijrer.com/index.php/ijrer/article/download/9385/pdf>
19. Effects of high solar photovoltaic penetration on distribution feeders and the economic impact. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120303129>
20. Steady state analysis of high penetration PV on utility distribution feeder. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/311532694> Steady state analysis of high penetration PV on utility distribution feeder
21. Cumulative installed solar PV capacity worldwide from 2000 to 2021 [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/>
22. Voltage Rise Issue with High Penetration of Grid Connected PV. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.academia.edu/84385055/Voltage_Rise_Issue_with_High_Penetration_of_Grid_Connected_PV
23. Assessing distribution network sensitivity to voltage rise and flicker under high penetration of behind-the-meter solar. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/338339928> Assessing distribution network sensitivity to voltage rise and flicker under high penetration of behind-the-meter solar/figures?lo=1
24. Investigating the power quality of an electrical distribution system stressed by non-linear domestic appliances

- [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/316869160> Investigating the power quality of an electrical distribution system stressed by non-linear domestic appliances
25. Assessments for the impact of harmonic current distortion of non linear load in power system harmonics. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4641724>
26. Harmonics: Causes, Effects and Minimization
[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
[https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01_whitepaper-armonics_\(1\).pdf](https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a01_whitepaper-armonics_(1).pdf)
27. Application of LC filter in harmonics reduction.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1461656>
28. Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-Filters-for-Reducing-Harmonic-Distortion-Hsiao/29c0e1c69a01f6c0a74c60aab791441516c3b6ac>
29. A grid-connected photovoltaic system: Mathematical modeling using MATLAB/Simulink.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/321999819> A grid-connected photovoltaic system Mathematical modeling using MATLABSimulink
30. Design and Simulation of DC-DC Converters. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/291757375> Design and Simulation of DC-DC Converters
31. A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/336884550> A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms
32. MPPT Techniques for PV Systems. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.researchgate.net/publication/279764230> MPPT Techniques for PV Systems
33. Elektros energetikos pagrindai. Gytis Svinkūnas, Algimantas Navickas. 2011. KTU leidykla „Technologija“.
34. Three Phase Asymmetrical Load Flow for Four-Wire Distribution Networks. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4076029>
35. Unbalanced Three Phase Circuit Analysis. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://www.eeeguide.com/unbalanced-three-phase-circuit-analysis/>
36. PowerFactory 2022 Technical Reference. Overhead Line Constants. TypGeo, TypTow, TypCon. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą:
<https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>
37. PowerFactory 2022. Technical Reference. Three-Winding Transformer ElmTr3, TypTr3. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>
38. PowerFactory 2022. Technical Reference. PV System ElmPvsys, TypPvpanel. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>
39. PowerFactory 2022. Technical Reference. External Grid ElmXnet. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>

40. PowerFactory 2022. Technical Reference. Low-Voltage Load and Partial LV-Load ElmLodlv, ElmLodlv. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>
41. PowerFactory 2022. Technical Reference. Battery ElmBattery, ElmBatterybi. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://digsilent.com.au/en/newsreader/digsilent-releases-powerfactory-2022-sp4.html>
42. Development of photovoltaic technologies for global impact.[žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148119301740?token=DF5CD029827CF6F695F57C57A4AF32D918EDACD1EE7F0E59D60E7204BD70A645C0918947DAE6A31EBAF502662DA4722F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230322202746>
43. History of Solar Cell Development. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/274961489_Chapter_1_History_of_Solar_Cell_Development
44. Power Quality Problems and New Solutions. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/228559771_Power_Quality_Problems_and_New_Solutions
45. High Performance Flywheel Energy Storage Systems: Temporal Power. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.ieso.ca/en/Powering-Tomorrow/2017/High-Performance-Flywheel-Energy-Storage-Systems-Temporal-Power>
46. Emerging Issues and Challenges in Integrating Solar with the Distribution System. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65331.pdf>
47. Schematic diagram of a supercapacitor system. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-supercapacitor-system_fig5_267048009
48. Rooftop Solar PV Penetration Impacts on Distribution Network and Further Growth Factors—A Comprehensive Review [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://mdpi-res.com/d_attachment/electronics/electronics-10-00055/article_deploy/electronics-10-00055-v3.pdf?version=1610095010
49. Progress in electrical energy storage system: A critical review. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>
50. Effect of Demand Side Management on the Operation of PV-Integrated Distribution Systems. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7551>
51. Energy transformation and energy storage in the Midwest and beyond [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-energy-and-sustainability/article/abs/energy-transformation-and-energy-storage-in-the-midwest-and-beyond/907678E0DE43A06630441B17C3CEE1E2#article>
52. Static Synchronous Compensators. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/static-synchronous-compensators>
53. Sinusoidal voltage flicker 50Hz AC voltage modulated with 8Hz sinusoidal waveform. [žiūrēta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Sinusoidal-voltage-flicker-50Hz-ac-voltage-modulated-with-8Hz-sinusoidal-waveform-and-a_fig1_254440418

54. Demand-side-management-and-load-shape-objectives [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Demand-side-management-and-load-shape-objectives_fig2_340836619/download

Priedai

Trumpas kodo aprašas:

1. Įkeliamos mus dominančios programavimo bibliotekos, pasirenkama programos lokacija, iššaukiama Powerfactory programa ir aktyvuojamas projektas

```
import numpy as np
import pandas as pd
import sys
sys.path.append(r'C:\Program Files\DIgSILENT\PowerFactory 2022 SP4\Python\3.9')
import powerfactory as pf
app=pf.GetApplication()
app.Show()
user=app.GetCurrentUser()
project=user.GetContents('*.IntPrj')[6]
project.Activate()
```

2. Importuojami apkrovų ir generacijos duomenys (išmaniosios apskaitos) iš data.xlsx failo.

```
df = pd.read_excel('data.xlsx')
```

3. Saulės elektrinėms, linijoms, apkrovoms ir transformatoriams priskiriami numeriai iš elektros tinklo schemos Powerfactory programoje

```
pv1.mode_pgi = 0
pv2.mode_pgi = 0
pv3.mode_pgi = 0
pv4.mode_pgi = 0
pv5.mode_pgi = 0
pv6.mode_pgi = 0
pv7.mode_pgi = 0
pv8.mode_pgi = 0
pv9.mode_pgi = 0
pv10.mode_pgi = 0
pv11.mode_pgi = 0
pv12.mode_pgi = 0
pv13.mode_pgi = 0

PV = [pv1, pv2, pv3, pv4, pv5, pv6, pv7, pv8, pv9, pv10, pv11, pv12, pv13, pv14, pv15, pv16,
pv17, pv18, pv19, pv20, pv21]
PVpv21 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys')[20]
```

Linijos

ln500 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[499]
ln1337 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1336]
ln420 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[419]
ln1240 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1239]
ln341 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[340]
ln1086 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1085]
ln252 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[251]
ln865 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[864]
ln178 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[177]
ln659 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[658]
ln86 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[85]
ln934 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[933]
ln179 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[178]
ln1125 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1124]
ln342 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[341]
ln1274 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1273]
ln421 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[420]
ln1380 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[1379]
ln501 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLne')[500]

Pirmas transformatorius

tf15 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTr2')[14]

Antras transformatorius

tf14 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTr2')[13]

Trečias transformatorius

tf24 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTr2')[23]

Ketvirtas transformatorius

tf19 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTr2')[18]

Linijos apkrovos

l125 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[124]
l137 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[136]
l147 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[146]
l149 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[148]
l151 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[150]
l153 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmLodlv')[152]

Saulės elektrinės

pv1 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys')[0]
pv2 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys')[1]
pv3 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys')[2]
pv4 = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys')[3]

4. Sukuriamos tuščios skiltys rezultatų įvedimui

```
rezL_voltage = [[]for l in L]
rezL_P = [[]for l in L]
rezL_Q = [[]for l in L]
rezL_loading = [[]for l in L]
rezL_losses = [[]for l in L]

rezB_voltage = [[]for b in B]

rezT_voltage = [[]for t in T]
rezT_P = [[]for t in T]
rezT_Q = [[]for t in T]
rezT_loading = [[]for t in T]
rezT_losses = [[]for t in T]
```

5. Atliekamas simuliacijų ciklas

```
for i,row in df.iterrows():

    for pv in PV:
        pv.SetAttribute('pgini', row['generacija']*50)

    for j,d in enumerate(D):
        d.SetAttribute('plini', row[row.index[j+1]])

    oLoadflow=app.GetFromStudyCase('ComLdf')
    oLoadflow.Execute()

    for k,l in enumerate(L):
        rezL_voltage[k].append(getattr(l, 'm:U1:bus1'))
        rezL_P[k].append(getattr(l, 'm:P:bus1'))
        rezL_Q[k].append(getattr(l, 'm:Q:bus1'))
        rezL_loading[k].append(getattr(l, 'c:loading'))
        rezL_losses[k].append(getattr(l, 'c:Ploss'))

    for k,b in enumerate(B):
        rezB_voltage[k].append(getattr(b, 'm:U1'))

    for k,t in enumerate(T):
        rezT_voltage[k].append(getattr(t, 'm:U1:buslv'))
        rezT_P[k].append(getattr(t, 'm:P:buslv'))
        rezT_Q[k].append(getattr(t, 'm:Q:buslv'))
        rezT_loading[k].append(getattr(t, 'c:loading'))
        rezT_losses[k].append(getattr(t, 'c:Ploss'))
```