



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Energijos kaupiklių įtakos elektros sistemos režimams tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Laurynas Čerškus

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Energijos kaupiklių įtakos elektros sistemos režimams tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Laurynas Čerškus

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Asist. Artūras Baronas

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laurynas Čerškus

Energijos kaupiklių įtakos elektros sistemos režimams 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.

Laurynas Čerškus

Patvirtinta elektroniniu būdu

Čerškus, Laurynas. Energijos kaupiklių įtakos elektros sistemos režimams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: EEK, CES, FPA, HEK, EDLC, ESR, SE.

Kaunas, 2024, 49 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame projekte nagrinėjama elektros energijos kaupiklių įtaka elektros sistemos režimams. Ši tema yra labai aktuali šiais laikais, kadangi vartotojai aktyviai įsirenginėja tiek saulės, tiek vėjo elektrines, kas daro įtaką elektros tinklui ir vartotojams. Literatūros apžvalgoje nagrinėjami šaltiniai, kurie padeda išsiginčyti į temą ir suprasti, kodėl elektros energijos kaupikliai yra neatsiejama šių laikų energetikos sistemos dalis.

Čerškus, Laurynas. Investigation of Energy Storage Batteries Influence on Modes of Electrical System. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area: electrical engineering, engineering science.

Keywords: EEK, CES, FPA, HEK, EDLC, ESR, SE.

Kaunas, 2024, 49 p.

Summary

The master's final project shows the influence of energy storage systems in the mode of the electrical system. These days this topic is very relevant, as consumers have actively installed both solar and wind farms, which affects the electricity grid and consumers. The literature review examines sources that help to delve deeper into the topic and understand why electrical energy storage is an inseparable part of the energy system of today.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalgos dalis	11
1.1. Elektros energijos kaupikliai	11
1.2. Dažnio reguliavimas ir stabilumas	12
1.3. Saulės elektrinių įtaka skirstomajam tinklui	13
1.4. Centralizuotos ir decentralizuotos energijos kaupimo sistemos skirstomajame tinkle	15
1.5. EEK nauda elektros tinklui	18
1.6. Asimetrija trifaziame tinkle	19
1.7. EEK vietos tinkle nustatymo būdai	20
2. Elektros skirstomojo tinklo su energijos kaupikliu modelis	24
2.1. Objekto aprašymas	24
2.2. Skirstomojo tinklo modelis ir jo sudarymas	28
2.3. EEK parinkimas ir pagrindiniai parametrai	30
2.4. Skirstomojo tinklo modelis su EEK	31
3. Elektros skirstomojo tinklo modelio rezultatai	35
3.1. Apkrovų ir SE generacijų duomenys	35
3.2. Modeliavimo rezultatai be EKK	37
3.3. Modeliavimo rezultatai instaliavus EEK	40
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingos EEK technologijos bei jų pranašumai ir trūkumai [2]	11
2 lentelė. Skirtingų sistemų palyginimas	16
3 lentelė. Prijungtų SE galingumai.....	24
4 lentelė. L-600 ir L-700 OL ir KL ilgiai	25
5 lentelė. OL ir KL pagrindiniai elektriniai parametrai	26
6 lentelė. Prijungtų vartotojų leistini galingumai	26
7 lentelė. L-600 ir L-700 supaprastintos schemos OL ir KL ilgiai	27
8 lentelė. Vartotojų leistinosios galios.....	28
9 lentelė. Elektros energijos kaupiklio pagrindiniai parametrai.....	31

Paveikslų sąrašas

1 pav. Nekoordinuoto A) ir centralizuotai koordinuoto B) paskirstytų elektros energijos kaupimo įrenginių veikimo pavyzdys [17]	16
2 pav. EKK valdymo strategijų pavyzdys: a) Vietinė kontrolė, b) Decentralizuota kontrolė, c) Centralizuota kontrolė ir d) Paskirstyta kontrolė [19]	17
3 pav. Priekulės TP L-600 ir L-700 struktūrinė schema.....	24
4 pav. Įrengtų saulės elektrinių vaizdas iš paukščio skrydžio	25
5 pav. Suprastinta nagrinėjamo tinklo struktūrinė schema	27
6 pav. Priekulės TP narvelis Nr. 206.....	28
7 pav. Modeliuojamas skirstomasis tinklas	29
8 pav. Saulės elektrinės modeliavimas.....	29
9 pav. Dinaminės apkrovos veikimo blokas	30
10 pav. Skirstomojo tinklo modelis su EEK.....	32
11 pav. Pirmasis EEK valdymo etapas.....	32
12 pav. Kaupiklio kontrolės blokas.....	33
13 pav. Įkrovimo nakties metu loginis blokas	33
14 pav. Galios ir įtampos sąlygų modeliavimas.....	34
15 pav. AP1 metinis apkrovos grafikas	35
16 pav. AP5 metinis apkrovos grafikas	35
17 pav. SE1 metinis generavimo grafikas	36
18 pav. SE2 metinis generavimo grafikas	36
19 pav. Sausio mėnesio įtampos ir srovės nustatymas (be EKK).....	37
20 pav. Sausio mėnesio aukščiausios įtampos nustatymas (be EKK).....	38
21 pav. Saulės elektrinių generacijos grafikas sausio mėnesį.....	38
22 pav. Liepos mėnesio modeliavimas (be EKK).....	39
23 pav. Liepos mėnesio aukščiausios įtampos verčių nustatymas	39
24 pav. Įtampos matavimas, kai SE2 veikia 43% pajėgumu	40
25 pav. Liepos mėnesio įtampos ir srovės matavimas (su EKK).....	40
26 pav. Liepos mėnesio aukščiausios įtampos verčių nustatymas (su EKK)	41
27 pav. EEK reakcija įtampos pokyčius	41
28 pav. Apkrovos, EEK ir SE būsenų lyginimas	42
29 pav. Būsenų lyginimas, kai EEK įsikrauna priklausomai nuo SE generacijos	42
30 pav. Būsenų lyginimas, kai EEK išsikrauna, esant apkrovos padidėjimui	43
31 pav. EEK įsikrovimas nakties metu.....	43
32 pav. SE2 generacija per metus	44

Santrumpų ir terminų sąrašas

CES – talpusis energijos kaupiklis (angl. Capacitive Energy Storage).

EDLC – elektrinis dvisluoksnis kondensatorius.

EEK – elektros energijos kaupiklis.

HEK – hidroakumuliacinė energijos kaupykla.

IR – inercinė reakcija.

LFC – apkrovos dažnio reguliavimas.

PFR – pirminė dažninė charakteristika.

PID – proporcingasis integralinis išvestinis valdiklis.

ROCOF – dažnio kitimo greitis.

Įvadas

Atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas į energetikos sistemą yra vienas iš būdų panaudoti neišsenkančią gamtos energiją, tačiau reikalauja didelio besisukančios galios rezervo. Siekiant išvengti didelių investicijų į esamų tinklų rekonstrukciją ir siekiant tinklų stabilumo, būtina įtraukti inovatyvius sprendimus, technologijas ir tinklų architektūras. Išmanieji tinklai ir energijos kaupikliai tinkle gali ne tik sumažinti esamo elektros tinklo pertvarkymo poreikį, bet ir sušvelninti pereinamuosius procesus tinkle keičiantis energijos gamybai.

Įdiegus energijos kaupiklius elektros tinkluose, galima pagerinti elektros tinklų ir elektros energijos sistemos darbo režimus, ypač sumažinti aktyvius nuostolius elektros tinkluose, sumažinti elektros tinklų atšakų perkrovas maksimalių apkrovų režimais ir sureguliuoti elektros energijos srautų grafikus elektros tinkluose dienos metu. Tai ypač pastebima elektros tinkluose, kuriuose didelę dalį sudaro atsinaujinantys energijos šaltiniai – elektros energijos kaupikliai gali padidinti elektros tinklų pralaidumą [1]. Dar vienas svarbus jų naudojimo tikslas – sumažinti reikiamą atsinaujinančiųjų šaltinių galios rezervą, kad būtų padengtas trumpalaikis galios deficitas elektros energetikos sistemoje, taip pat tobulinti elektros energijos vartojimo grafiką. Įrengiamos elektros energijos kaupiklių sistemos suteikia didelę naudą ne tik tinklui, bet ir vartotojui. Vartotojas galėtų kaupti gaminamos energijos perteklių kaupiklyje ir sunaudoti ją vakare. Tai sumažintų bendrą elektros kainą, nes sumažintų namų ar objektų naudojimąsi elektros tinklais. Taip pat, naudojant energijos kaupiklius galima įsirengti didesnės galios elektrines nei leidžia skirstomasis tinklas.

Darbo tikslas – ištirti energijos kaupiklių įtaką elektros sistemos režimams.

Darbo uždaviniai:

- palyginti skirtingų energijos kaupiklių technologijas, technines charakteristikas ir panaudojimo galimybes;
- sukurti elektros energijos kaupiklio valdymo algoritmą;
- sudaryti elektros tinklo su saulės elektrine ir elektros energijos kaupikliu modelį;
- nustatyti elektros energijos kaupiklio įtaką skirstomojo elektros tinklo režimo parametrąms;
- nustatyti elektros energijos kaupiklio su valdymo algoritmu įtaką saulės elektrinės darbui.

1. Literatūros apžvalgos dalis

Šioje dalyje nagrinėjama literatūra, apžvelgiami elektros energijos kaupikliai ir jų panaudojimas, saulės elektrinių įtaka skirstomajam tinklui ir fazių asimetrijos sukeltos problemos bei kodėl ji kyla.

1.1. Elektros energijos kaupikliai

Atsinaujinantiems šaltiniams tapus neatsiejamai mūsų gyvenimo daliai, būtina gerinti jų integraciją į tinklus. Elektros tinklų parametrai ne visada gali leisti prijungti tiek saulės elektrinių, kiek reikia ar nori vartotojai, todėl vienas iš būdų praplėsti saulės elektrinių integraciją bei pagerinti perdavimo ar skirstomojo tinklo parametrus yra elektros energijos kaupiklio (EEK) įrengimas. Tai yra ypač svarbu, kai atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminama energija sudaro daugiau nei 20% visos sunaudojamos energijos [2]. Yra daug skirtingų EEK technologijų, tačiau labiausiai yra paplitusios ličio jonų baterijos, kurios naudojamos ir elektromobiliuose.

EEK gali būti skirstomi į tokias kategorijas:

1. elektros kokybės užtikrinimo;
2. trumpalaikės perjungimo energijos;
3. energijos srautų valdymo.

Kaip teigia Adomavičius [2], EEK elektros kokybę išlaiko tiekdami energiją į sistemą per sekundę ar mažiau, nuo tada, kada jos pradeda trūkti ir kuomet turi būti išlaikyti energijos kokybės standartai. Vartotojus, esant trumpalaikiams perjungimams, EEK energija aprūpina maksimaliai iki kelių minučių.

EEK reikalingi dėl energijos srautų valdymo, kad kuo mažiau gamyba priklausytų nuo suvartojimo. EEK įkraunamas, kai elektros kaina yra mažiausia bei iškraunamas, kada vartotojams trūksta energijos. Kaupiklius pritaikant energijos srautų valdymui, vartotojai, ypač tai aktualu pramoniniams vartotojams, yra mažiau priklausomi nuo sistemos bei tinklo. Pirmoje lentelėje pateikiami pagrindiniai skirtingų technologijų teigiami ir neigiami faktoriai.

1 lentelė. Skirtingos EEK technologijos bei jų pranašumai ir trūkumai [2]

Kaupimo technologija	Pagrindiniai pranašumai	Didžiausi trūkumai
Hidroakumuliacinė elektrinė	Didelio galingumo, maža kaina	Ne visos vietovės yra tinkamos
Suslėgto oro	Didelio galingumo, maža kaina	Vietos tinkamumas ir dujinis kuras
Gravitacinės	Didelio galingumo, maža kaina	Įrengimui reikia kalvotos vietovės
Srautinės baterijos	Didelė galia, galia nepriklausoma nuo energijos	Mažas energijos tankis
Metalo oro baterijos	Didelis energijos tankis	Sunkiai įsikrauna
NaS baterijos	Didelis galingumas ir efektyvumas	Brangi gamyba Saugumas

Li-jonų baterijos	Dideli galios ir energijos tankiai, didelis efektyvumas	Gamybos kaina Speciali įkrovimo schema
NiCd baterijos	Dideli galios ir energijos tankiai, didelis efektyvumas	Ciklo naudingumo faktorius yra mažas
NiMH baterijos	Didelis efektyvumas ir galios tankis, nedidelė kaina	Mažas energijos tankis
Rūgtinės švino baterijos	Mažos kapitalinės sąnaudos	Mažas įkrovos ir iškrovos ciklų skaičius, kai iškrovos gilios
Superkondensatoriai	Didelis įkrovos ir iškrovos ciklų skaičius bei efektyvumas	Mažas energijos tankis
Vandenilio kaupikliai	Neribotas sukauptos energijos kiekis	Nepakankami pritaikytos technologijos: labai brangios ir mažas iškrovos ciklų skaičius

Energijos kaupimo sistemų integravimas į paskirstytuosius tinklus padidina prieinamumą elektros energetikos tinkluose. Tinklams ir vartotojams užtikrinamas patikimumas ir aukšta kokybė. Daugiausiai pramonės objektuose energijai kaupti naudojamos Ličio jonų baterijos. Ličio jonų baterijų privalumai: didelis energijos tankis ir didelės apkrovos galimybės, ilgas ciklas ir ilgesnis gyvavimo laikas, nereikalaujantis priežiūros, didelė talpa, maža vidinė varža, didelis efektyvumas, paprastas įkrovimas ir gana trumpas įkrovimo laikas [3]. Todėl ličio jonų akumuliatorius pasižymi dideliu išlaikomuoju krūviu, brandžia technologija ir mažu savaiminiu išsikrovimu, kuris yra dvigubai mažesnis nei NiCd ir NiMH technologijos.

1.2. Dažnio reguliavimas ir stabilumas

Elektros tinklo dažnio stabilumas yra labai svarbus saugiam ir stabiliam elektros sistemos veikimui. Stabilų dažnį lemia subalansuota generatoriaus aktyviosios galios ir apkrovos poreikio sąveika. Apkrovos dažnio reguliavimas (LFC) vaidina svarbų vaidmenį užtikrinant galios balansą tarp generatoriaus pusių ir apkrovos. Energijos kaupimo energijos dalyvavimas dažnio moduliavime gali 17 % sumažinti elektros tinklo dažnio reguliavimo poreikį [4]. Didėjant vėjo ir fotovoltinės energijos integracijai į elektros tinklą, LFC sunkiai gali subalansuoti elektros tinklo išėjimo galią ir apkrovos reikalaujamą galią naudojant tik šiluminius energijos blokus, todėl dažnio nestabilumo rizika didėja. Laimei, siurblinės ir EEK gali greitai reguliuoti savo galią, o tai labai naudinga dažnio reguliavimui. Jei siurblinės ir EEK galėtų dalyvauti dažnio reguliavimo sistemoje, dažnio stabilumas galima pagerinti elektros energijos tinklą], integruotą su didelio masto atsinaujinančiais energijos šaltiniais. LFC naudojamas mikrotinkle, kuriame aktyviosios galios balansavimui naudojami siurbliniai akumuliaciniai įrenginiai. Tiriant siurblinių akumuliacinių įrenginių dažnio reguliavimo valdymą elektros tinkle su didelio masto vėjo jėgainėmis, taikoma patikimo valdymo strategija. Akumuliatorių agregatorius, koordinuoja daugybę paskirstytų EEK, kad būtų teikiamos pagrindinės dažnio reguliavimo paslaugos [5].

Izoliuotose elektros energijos tiekimo sistemose staigus galios disbalansas lemia didelį dažnio pokytį. Norint apriboti nuokrypį, atkurti galios balansą, reikėtų naudoti rankinį / automatinį apkrovos atjungimą, net jei poveikis bus trikdančias vartotojui. Elektros energijos sistemoje elektros energijos

pasiūla ir paklausa visada turi būti subalansuota. Jei atsiranda trikdžių, pasiūlos ir paklausos pusiausvyra sutrinka. Dėl šio disbalanso pirmiausia sureaguos besisukančio generatoriaus ir (arba) variklio kinetinė energija bei inercinė reakcija (IR). Prasidėjus nenumatytam įvykiui, dažnio kitimo greitis (ROCOF) yra tiesiogiai proporcingas pagal nenumatytą įvykį prarastai/padidėjusiai galiai ir atvirkščiai proporcingas besisukančio generatoriaus kinetinei energijai. Taigi ROCOF priklauso nuo to, kiek sinchroniniai generatoriai yra prijungti prie sistemos ir koks galios disbalanso dydis. Kitas mechanizmas, kuriuo bandoma stabilizuoti dažnį iki pastovios būsenos, yra pirminė dažninė charakteristika (PFR) [5]. Šią užduotį atlieka visi generatoriai, turintys greičio reguliatorių. Paprastai vien tik PFR nepavyksta grąžinti sistemos dažnio į nominaliąją vertę. Šiame etape dažnis paprastai sukelia paklaidą nuo nominaliosios dažnio vertės, dažnio reguliavimas priklauso nuo šių dviejų režimų dydžio ir nuo to, kiek laiko jie trunka.

Nuolatinio sistemos dažnio kritimo galima išvengti automatiškai atjungiant apkrovą naudojant žemo dažnio relę. Tai vienintelis būdas, jei generatoriaus pirminis rezervas yra nepakankamas arba per lėtas reaguoti į trikdžius. Apkrovos atjungimo mechanizmas paprastai vykdomas keliais etapais pagal nustatytą dažnio ribą [5]. Sistemos dažnis bus pastovus, jei bendra gamyba bus lygi bendrai apkrovai ir tinklo nuostoliams. Jei gamyba viršija apkrovą ir nuostolius, sistemos dažnis didėja. Jei apkrova plius nuostoliai viršija generaciją, sistemos dažnis mažėja. Siauras dažnio nustatymo diapazonas, reikalingas užtikrinti stabilų tiekimo dažnį visiems tinklo naudotojams ir elektros energijos vartotojams.

1.3.Saulės elektrinių įtaka skirstomajam tinklui

Iššūkis, su kuriuo susiduria skirstomasis tinklas, yra įtampos kilimo problemos atsirandantis dėl didelio kiekio fotovoltinių elektrinių ir jų gaminamos aktyviosios galios pokyčių. Didinant saulės elektrinių (SE) instaliuotą galią įtampa turi didelę riziką viršyti viršutinę įtampos ribą skirstomajame tinkle. O staigus galios sumažėjimas gali sukelti įtampos mažėjimą ir žemesniosios įtampos ribos pasiekimą [6]. Pagal dabartinį standartą, elektros tinklo įtampa neturi viršyti nustatytų ribų, t.y. 10 % UN [7]. Saulės šviesa nėra pastovi, todėl SE turi pertraukimus – nepastovią elektros generaciją, kas sukelia įtampos svyravimus ir disbalansą. Didelis SE išėjimo įtampos ir magistralės įtampos skirtumas sukelia problemų [8]. Pagrindinis fotovoltinės energijos integracijos poveikis gali būti nustatytas kaip įtampos svyravimai ir disbalansas, srovės ir įtampos harmonikos, tinklo izoliavimo apsauga ir kitos energijos kokybės problemos: mirgėjimas ir transformatoriaus gedimai. Šiuos poveikius galima apibendrinti kaip pastovios būsenos arba dinaminio pobūdžio [9]:

- įtampos svyravimai prijunginyje susideda iš įtampos padidėjimo arba kritimo ir nesubalansuotos įtampos;
- įtampos reguliavimo įrangos, pvz., apkrovos atšakų keitiklio, linijos įtampos reguliatorių ir kondensatorių bloką, veikimo sutrikimas;
- skirstomojo tinklo prijunginių perkrovos galimybė;
- reaktyviosios galios srauto kitimas dėl kondensatorių bloką veikimo sutrikimų;
- viršsrovių ir viršįtampių apsaugos įtaisų veikimo sutrikimas;
- atjungimo nuo tinklo;
- skirstomojo tinklo patikimumas ir saugumas.

Todėl skirstomojo tinklo operatorius vaidina gyvybiškai svarbų vaidmenį palaikant tinklo našumą, ypač kai į sistemą patenka didžiulis SE kiekis [10]. Be to, plati generatorių integracija padidina

sistemos trumpojo jungimo stiprumą ir bendrą harmoninį iškraipymą (THD). Trumpojo jungimo srovės ir harmoninių svyravimų padidėjimas turi tiesioginės įtakos apsaugos įtaisų koordinavimui. SE inverteriai yra pagrindiniai THD didėjimo kaltininkai dėl puslaidininkinių įtaisų. Pagal IEEE 519 standartus [11] leistina THD riba tinkle yra 20%. Jei THD viršija leistiną vertę, tai gali sugadinti apsauginius įtaisy ir gali atsirasti papildomų gedimų. Kaip jau minėta, pagrindinis SE sistemų neapibrėžtumo šaltinis yra saulės apšvietos kintamumas dėl klimato sąlygų. Ši neapibrėžtis paprastai įtraukiama į SE aktyviosios ir reaktyviosios galios modeliavimą [12]. Inverteriai yra laikomi harmoniką gaminančiais įtaisais (HPD) ir jų indėlis į elektros energijos kokybę, atsižvelgiant į harmoninius iškraipymus, turėtų būti tinkamai įvertintas tam, kad sumažinti neigiamą įtampos harmonikų ir srovės iškraipymo poveikį nuostoliams ir energijos perdavimo efektyvumui. Dėl iškraipytos srovės daromas papildomas senėjimo ir perkaitimo poveikis maitinimo linijoms ir transformatoriams, jų apkrovos lygis turi būti mažesnis, kai yra iškraipyta srovė, remiantis harmoniniu nuvertėjimo koeficientu (HDF) [13]

Skirstomajame tinkle įtampos pokytis yra jautrus trumpalaikiams svyravimams. Šios problemos taip pat gali sukelti tinkle sumontuotos įtampos reguliavimo įrangos ir jos veikimo sutrikimų galimybes. SE poveikis įtampos problemoms skirstomas į šias kategorijas: įtampos svyravimų poveikis, įtampos kilimas ir įtampos disbalansas. Dėl didelės SE skverbties gaunama galia ne tik atsakinga už apkrovos kompensavimą, bet ir sukelia atvirkštinį galios srautą į skirstomąjį tinklą. Be to, didelis atvirkštinis galios srautas gali sukelti disbalansą, kuris apima:

- įtampos kilimas pastotės prijunginyje;
- sistemos apsaugų sutrikimus;
- padidėja trumpojo jungimo srovė, kuri pasiekus tam tikrą lygį gali stipriai kenkia;

Tačiau įtampos kilimas yra viena iš įtakingiausių skirstomojo tinklo prijunginio problemų. Įtampos kilimas ir reguliavimas priklauso nuo skirtingų SE skverbties lygių paskirstymo prijunginiuose [9]:

- esant žemam skverbties lygiui (5%), keitikliai nedaro didelės įtakos prijunginio įtampos reguliavimui didžiausios apkrovos metu;
- esant vidutiniam skverbties lygiui (10%), keitiklio įtampos palaikymas gali padėti sumažinti įprastų įtampos palaikymo kondensatorių dydį beveik 40%;
- esant dideliame skverbties lygiui (30–50 %), gali pakakti PV keitiklių, kad būtų užtikrinta visa maitinimo įtampa.

Vienas iš pagrindinių veiksnių, turinčių įtakos įtampos reguliavimui - atvirkštinis galios srautas. Jis gali dažniau atsirasti skirstomojo tinklo prijunginiuose didėjant SE skverbties lygiui. Šis atvirkštinis galios srautas sukelia įtampos padidėjimą, dėl kurio gali būti pažeistos nurodytos įtampos ribos. Be to, įtampos reguliavimo įtaisų, tokių kaip apkrovos atšakų keitiklių (OLTC), statiniai įtampos reguliatorių (SVR) ir kondensatorių (SC) veikimui įtakos turi atvirkštinis galios srautas skirstomojo tinklo prijunginiuose [14]. Įtampos disbalansas apibūrinamas kaip atvirkštinės sekos ir teigiamos sekos įtampos komponentų santykis ir pateikiamas procentais kaip įtampos disbalanso koeficientas. Įtampos disbalansas yra laikomas elektros kokybės problema, kuri kelia didelį susirūpinimą tiek aukštos, tiek žemos įtampos skirstomuosiuose tinkluose.

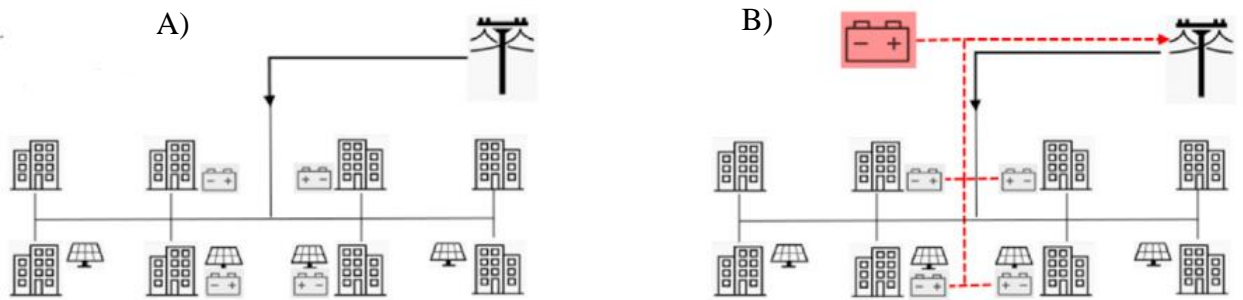
1.4. Centralizuotos ir decentralizuotos energijos kaupimo sistemos skirstomajame tinkle

Centralizuotos energijos kaupimo sistemos gali turėti įvairių privalumų ir įtakos skirstomajam elektros tinklui. Šios sistemos skirtos elektros energijos kaupimui ir naudojimui, taip pat, siekiant optimaliau valdyti elektros energijos tiekimą ir paklausą. EEK gali padėti išlyginti elektros energijos pasiūlą ir paklausą - kaupiamąją energiją surinkti, kai elektros energijos pasiūla viršija paklausą, ir naudoti šią kaupiamąją energiją, kai paklausa yra didesnė nei pasiūla. Tai gali padėti išvengti elektros tinklo perkrovos arba elektros energijos stygiaus. Taip pat, EEK gali būti naudojami avarinės situacijos atveju, kuomet tinkle įvyksta avarija ir pasireiškia arba elektros energijos trūkumas, arba didelis tiekimas. Kaupimo sistemos gali būti naudojamos sujungiant jas su atsinaujinančių energijos šaltinių, pvz., saulės ar vėjo, elektros gamybos sistemomis. Tai padeda išspręsti problemas, susijusias su atsinaujinančių energijos šaltinių kintančia gamyba ir padėti integruoti šią energiją į bendrą elektros tinklą.

Energijos kaupimo sistemos gali būti centralizuotai koordinuojamos, kad tinklui būtų teikiamos įvairios paslaugos, pavyzdžiui, įtampos balansavimo ir energijos taupymo. Elektros energijos gamyba iš saulės fotovoltinių elementų ne visada koreliuoja su elektros energijos pakausa. Pavyzdžiui, Lietuvoje bei kitose panašaus klimato šalyse, elektros energijos poreikio pikas paprastai būna vakarais, kada saulės energijos nėra, ypatingai tai atsispindi žiemos laikotarpiu. Abonentai nori gauti kuo daugiau efektyvumo bei gauti mažesnes sąskaitas mėnesio pabaigoje. Vienas iš dažniausių būdų – perduoti saulės fotovoltinės energijos perteklių į tinklą. Tačiau tuomet susiduriama ir su papildomomis problemomis. Esant didelei saulės elektrinių generacijai, elektros energijos eksportas į skirstomąjį tinklą piko metu sukelia nenumatytus atvejus ir tinklo disbalansą, dėl to sistema patiria papildomų išlaidų. Norint sumažinti papildomas išlaidas bei gerinti skirstomojo tinklo kokybę, vienas iš variantų yra – elektros energijos kaupikliai. Optimizuota saulės energija galėtų užpildyti atsirandantį energijos trūkumą, ypač ten, kur elektros tiekimo patikimumo kategorija turi būti aukšta [15].

EES gali subalansuoti neatitikimą tarp vietoje gaminamos saulės fotovoltinės energijos ir elektros energijos paklausos, kaupdama elektros energiją mažos paklausos valandomis dienos metu ir iškraudama ją vakaro piko metu. Įvairiais tyrimais įrodyta, kad saulės fotovoltinės energijos ir baterijų (PV-EEK) sujungimas didina saulės energijos savikontrolę vietoje [16] ir gali padėti privačiam savininkui sutaupyti nemažai lėšų. Pav. 1 iliustruoja pagrindines dvi schemas, o 2 lentelėje pateikiamos savybės ir teigiami dalykai, ką gali duoti skirtingos energijos kaupimo schemas.

→ Elektra tiekama iš tinklo
 - - - - - EEK paslaugos tinklui



1 pav. Nekoordinuoto A) ir centralizuotai koordinuoto B) paskirstytų elektros energijos kaupimo įrenginių veikimo pavyzdys [17]

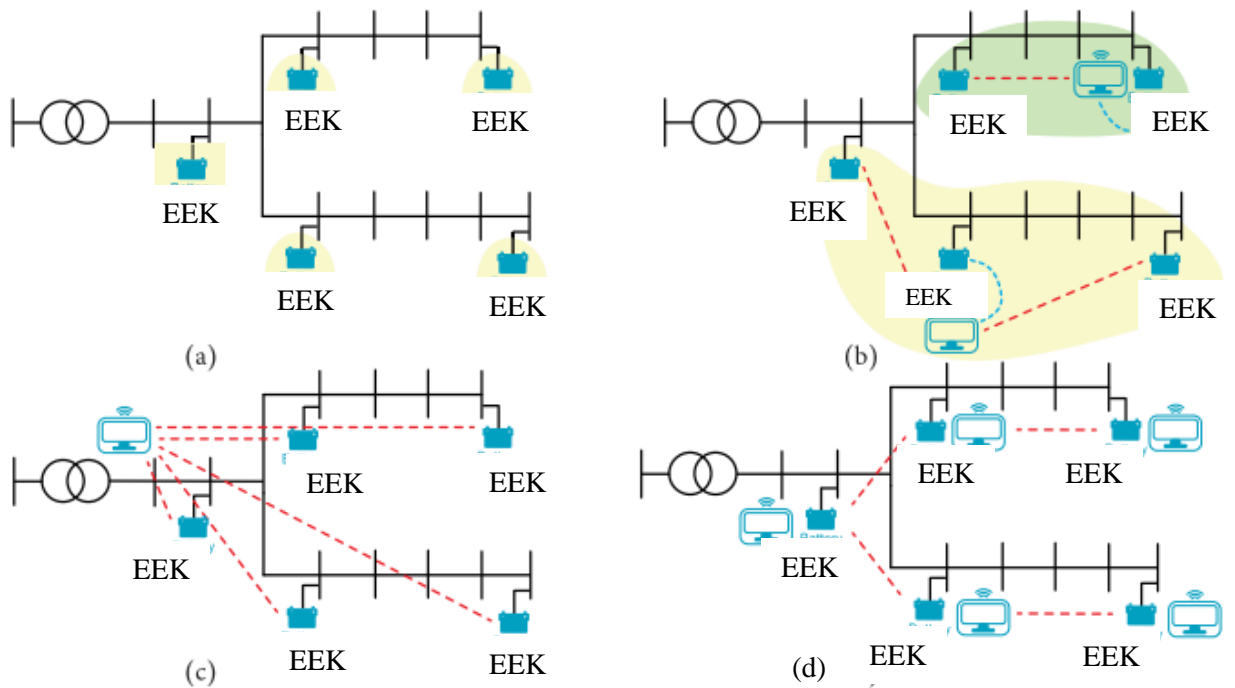
A paveiksle nekoordinuotas (decentralizuotas) EES veikimas, kai keli savininkai dėl savo asmeninės naudos instaliuoja EEK, o B paveiksle vaizduojamas centralizuotai koordinuotas mažų EES sistemų veikimas per agregatorių [17].

2 lentelė. Skirtingų sistemų palyginimas

Privatus vartotojas	A) Nekoordinuotas	B) Centralizuotai koordinuotas
Kaina	Investicijos kaupikliams	Investicijos kaupikliams
Kaupimo strategija	Savo vartojimo optimizacija	Elektros energijos tiekimas į tinklą („sandėliavimo“ funkcija)
Įtaka elektros kainoms	Sumažintos elektros sąnaudos naudojant saugyklą	Sumažintos sąnaudos tinklui ir vartotojams
Pajamos iš kaupyklos prijungimo	-	Taip

Lentelėje pateiktas decentralizuotos ir centralizuotai koordinuotos sistemų palyginimas. Būtent pastarasis daro didesnę naudą tiek tinklui, tiek vartotojams. Baterijų saugojimo modelis gali būti centralizuotas arba decentralizuotas, priklausomai nuo vartotojų poreikių ir fizinės vietos. Tradicinė decentralizuota sistema yra lanksti ir plečiama, tačiau centralizuotas modelis yra labiau ekonomiškasis. [18].

Minėtas sistemas galima išskirti dar plačiau: vietinės kontrolės, decentralizuotos kontrolės, centralizuotos kontrolės ir paskirstytos kontrolės. Kiekviename EEK bloke gali būti įrengta nepriklausoma energijos valdymo sistema (EVS), valdanti saugojimo sistemą pagal vietinius matavimus 2 pav.:



2 pav. EKK valdymo strategijų pavyzdys: a) Vietinė kontrolė, b) Decentralizuota kontrolė, c) Centralizuota kontrolė ir d) Paskirstyta kontrolė [19]

2 paveikslo A schemoje vaizduojama priežiūra ir aptarnavimas, kuriame informacija nėra perduodama nuotoliniu būdu, įvykus gedimams ar esant tinklo parametrų pasikeitimams, reikalinga vykti į vietą bei individualiai vertinti situaciją. 2 paveikslo B strategijoje montuojami keletas elektroninių įtaisų IED, kurie turi ryšį tarpusavyje. Taip pat, gali vienu duomenų perdavimo įrenginiu būti valdomas visas tinklas, kiekvienas įrenginys. 17 pav. D schemoje veikimas apibūdinamas tarpusavio ryšiu, kai turint sprendimų priėmimo algoritmą, įrenginys gali palaikyti ryšį su kaimyninėmis technologijomis [20].

Centralizuoto valdymo atveju, kaip parodyta 2 pav. c), yra vienas centrinis koordinavimas, kuris gauna visus reikiamus tinklo matavimus per išmaniuosius skaitiklius ir nuotolinius įrenginius, gauna valdymo uždavinio sprendimą bei perduoda nustatytas reikšmes į elektroninius įtaisus IED [21]. Centrinis koordinavimas yra vienintelis tinklo komponentas, galintis inicijuoti valdymo veiksmą. Paskirstytajame valdyme, parodytame 2 pav. d) punkte, pažangieji elektroniniai įtaisai IED nėra dispečeriškai valdomi. Vietoj to, visi IED bendradarbiauja, kad priimtų kolektyvinį sprendimą pagal nustatytus tikslus (t. y. tinklo operatoriaus arba galutinio vartotojo). Kiekvienam valdikliui reikia bendrauti tik su kaimyniniais mazgais, todėl valdymo sprendimui nustatyti nereikia globalios tinklo informacijos (t. y. visų mazgų būsenos). Paskirstytosios koordinavimo struktūros tikslas - veiksmingai spręsti galinčias kilti problemas naudodamasis tik vietine sąveika ir užtikrinamas "plug and play" galimybę.

Decentralizuotas valdymas, pavaizduotas 2 pav. b) punkte, vaizduoja tarpinę būseną tarp centralizuoto ir paskirstyto valdymo, t. y. valdymas yra iš dalies centralizuotas ir iš dalies paskirstytas sprendimų, komandų bei informacijos signalų ar skaičiavimų atžvilgiu. Klasikinis decentralizuoto valdymo atvejis yra tinklo suskirstymas į zonas [22], kai kiekvienoje zonoje yra atskiras valdiklis (zonos koordinavimas), kuris veikia taip pat kaip centrinis koordinavimas savo zonoje, o šie valdikliai

gali būti laisvai susieti koordinavimo tikslais, panašiai kaip paskirstytasis valdymas, siekiant konkretaus tikslo.

Paskirstytosios ir decentralizuotos schemas gali užtikrinti patikimą ir lankstų paskirstymo tinklo valdymą. Be to, jos gali veikti esant ribotam ryšiui ir mažam dažnių juostos pločiui, joms daug mažiau įtakos turi ryšio linijų gedimai. Dėl visų šių savybių jos yra labai patrauklios išmaniųjų tinklų taikymui.

1.5.EEK nauda elektros tinklui

Šiais laikais esant dideliame atsinaujinančių energijos šaltinių skverbimuisi, tradicinė paskirstymo sistema rotuoja iš pasyvaus į aktyvų paskirstymo tinklą. Tačiau neapibrėžtas ir nekontroliuojamas atsinaujinančių energijos šaltinių (pvz., vėjo ir fotovoltinės energijos) pobūdis gali reikšmingai paveikti sistemos veikimą, sukeldamas įvairias tinklo problemas. Pagrindinės jų yra: įtampos kilimas, dviejų krypčių galios srautas, galios srauto svyravimai ir pan. Energijos kaupimo sistema (ESS) yra vienas iš efektyviausių sprendimų, padedančių sumažinti minėtas problemas ir lengvai pritaikomas skirstomajame tinkle, siekiant padidinti energijos vartojimo efektyvumą, didinti elektros sistemos patikimumą ir stabilumą, sumažinti didžiausios apkrovos paklausą, subalansuoti pasiūlą bei paklausą. EEK išsiskiria dėl didelio efektyvumo, greito atsako greičio ir pan. Viena iš pagrindinių problemų, susijusių su EEK pritaikymu paskirstymo tinklams, yra optimalus EEK dydžio ir vietos planavimas, atsižvelgiant į naudojimo paskirtį. EEK taip pat gali suteikti papildomos naudos skirstomajame tinkle: efektyvią išplėtimo alternatyvą naudojant didžiausios gaunamos apkrovos tašką ir energijos kokybės problemų mažinimo metodus [23]. Didžiausios apkrovos taškas reiškia energijos mainus tarp bazinių generavimo blokų ir saugojimo įrenginių, siekiant sukaupti tam tikrą galią ne piko laikotarpiais ir iškrauti tada, kai apkrova pasiekia savo piko laikotarpį [24].

Perdavimo ir paskirstymo tinklai šiandieninėje energetikos sistemoje reikalingi siekiant išlaikyti energijos pasiūlos ir paklausos pusiausvyrą, neatsižvelgiant į konkrečias energijai gaminti naudojamų išteklių ypatybes ar vartotojų energijos vartojimo svyravimus [25]. Dėl balansavimo pasitaiko atvejų, kai paklausa šiuose tinkluose pasiekia aukščiausią tašką ir sumažėja, o tai lemia per mažą pagamintos elektros energijos pasiūlą ir perteklių. Bet koks paklausos ir pasiūlos disbalansas pasireiškia elektros kokybe, ty laipsniu, kuriuo vartotojams tiekiamos elektros energijos įtampos dydis (ir kampas) nukrypsta nuo jų skirstymo sistemos operatorių arba perdavimo sistemos nustatytų vardinių tolerancijos ribų [25]. Radialiniuose tinkluose nustatant optimalią integravimo padėtį ir atitinkamą EEK kiekį [17], yra galimybė užtikrinti, kad elektros energijos kokybė neviršytų leistinų ribų, kurias nustato reguliavimo institucijos. Radialiniai elektros skirstomieji tinklai yra pati tradicinė skirstomųjų tinklų konfigūracija, į juos instaliavus EEK galima sėkmingai pagerinti tinklo patikimumą bei sumažinant energijos patikimumo indeksą (ENS).

Energijos sistemose apkrovos profilį, kuomet energijos vartojimas yra didžiausias, galima apibūdinti sistemos „piko apkrovos laikais“ – trumpais laikotarpiais, kai reikia daug energijos [26]. Atsižvelgiant į metų laiką, dienos metą ir esamus vartotojus (gyvenamie, komerciniai ar pramoniniai), didžiausios apkrovos laikotarpiai gali būti skirtingas. Paklausos aukščiausi taškai turi įtakos tinklo planavimui, nes perdavimo ir skirstymo sistemų elektros infrastruktūra turi būti suprojektuota taip, kad atitiktų maksimalią sistemos paklausą ir užtikrintų energijos tiekimą visiems prijungtiems vartotojams. Dėl šios priežasties elektros tinklų infrastruktūra turi paliktą rezervą, dėl kurio tam tikrais atvejais didžiąją laiko dalį gali būti nepakankamai išnaudojama, o apkrovos ribą pasiekti vos

keletą kartų per metus. Todėl komerciniai ir pramoniniai klientai apmokestinami ne tik pagal bendrą energijos suvartojimą, bet ir pagal didžiausią elektros energijos poreikį, leistinąją galią [27].

Įdiegus EEK galima ne tik sumažinti klientų paklausos mokesčius. Pavyzdžiui, sistemos operatoriai gali sumažinti tinklo stiprinimo poreikį, pritaikydami infrastruktūrą didesnėms ateities galimybėms. Priklausomai nuo rinkos sąlygų, galima pasiekti ir kitų privalumų. Klientai gali pasinaudoti energijos naudojimo laiko kaina [28] iškraunant EEK, kai energijos kaina yra didžiausia ir piko laikotarpiais yra brangesnė, nei kaina ne piko laikotarpiais. Dėl to gali sumažėti sąskaita už elektrą.

Nors EEK kaina yra didelė, tačiau esant tinkamoms sąlygoms ir atėjus tinkamam laikui galima neabejoti, kad tai bus vienas iš labiausiai naudojamų būdų norint pagerinti skirstomojo tinklo charakteristikas, plėsti jo galimybes. EEK gali padėti spręsti problemas susijusias su nepakankamu reaktyviosios galios kompensavimo [29] ir dėl to atsiradusio galios trūkumo problema, išleidamas reaktyviąją energija. Taip pat, kaip ir minėta anksčiau, teikia įtampos reguliavimo paslauga gerindamas galinio elektros tinko įtampą ir atidėdamas tinklo plėtrą.

1.6. Asimetrija trifaziame tinkle

Saulės elektrinių integracija į trifazinį elektros tinklą sukelia asimetriją dėl nestabilios elektros energijos gamybos. Kai saulės apšvieta keičiasi arba saulės elektrinės netinkamai sureguliuotos, tai gali sukelti disbalansą tarp trifazinio tinklo fazių, kas gali paveikti tinklo veikimą. Paprastai, šios asimetrijos padariniai apima įtampos ir srovės svyravimus, taip pat galimas problemas su elektros tinklo stabilumu. Todėl svarbu turėti tinkamas saulės elektrinių reguliavimo sistemas ir būdus sinchronizuoti jų veikimą su bendru elektros tinklu, siekiant išlaikyti tinklo simetriją ir efektyvų energijos perdavimą.

Trifaziame tinkle aptinkama įtampų asimetrija ribojama atvirkštinės ir nulinės sekų įtampomis. Pagrindinė to priežastis yra nesimetriinė apkrova, taip pat, gali būti tinklo parametrai. Dėl nesimetriinės apkrovos ir įtampų asimetrijos auga nuostoliai, nes sukuriama stabdantysis magnetinis laukas. [7] IEC – tarptautinė elektrotechnikos komisija rekomenduoja maksimalią įtampos asimetrinę ribą – 2 % [30]. Tarptautiniuose standartuose EN-50160 ir IEC 1 00-3-x s teigiama, kad žemos įtampos ir vidutinės įtampos sistemose, įtampos asimetrinis koeficientas turi būti mažesnis nei 2 % ir mažesnis nei 1 % aukštų įtampų sistemose. Šios ribos yra pagrįstos dešimties minučių intervalu, o didžiausias momentinis – 4 % PVM vertės. THD (suminis įtampos harmonikų iškeipimo faktorius) žemesnėje nei 110 kV tinkle turi neviršyti 8 % [31]. Sistemos savininkas užtikrina, kad įtampa prijungimo taškuose nesukeltų asimetrijos, svyravimo ir negali viršyti sistemos operatoriaus nustatyto lygio.

Atvirkštinės sekos arba nulinės sekos įtampų buvimas trifaziame elektros tinkle yra daug mažesnis nei tiesioginės sekos. Tiesioginės sekos įtampa apibūdina įtampos disbalansą. Nesubalansuota trifazė sistemos įtampa atsiranda dėl tiesioginės sekos įtampų sistemos įvedimo atvirkštine seka, dėl kurios keičiasi fazių ir fazių įtampų absoliučios vertės [32]. Galimi trys trifazių dydžių asimetrijos pasireiškimai – srovės ir įtampos. Pirmasis yra fazių asimetrija kuomet fazių dydžiai nėra pasislinkę vienu trečdaliu vienas kito atžvilgiu. Antra: RMS asimetrija – fazių dydžių RMS reikšmės nėra tarpusavyje lygūs ir trečiasis – fazė ir RMS asimetrija atsiranda vienu metu. Įtampos simetrija tai pastovus dažnis, sinusinė įtampa, labai žema vidinė varža ir tai yra be galo stiprus šaltinis. Jei kuris nors iš paminėtų kiekių nukrypsta, tiekimo kokybė laikoma pablogėjusios tiekimo kokybės šaltiniu. Todėl šių kiekių charakteristikos lemia, ar jų tiekimo kokybė yra gera ar ne [30].

Nulinės sekos įtampa yra būseną, kai vienos ar daugiau trifazio elektros tinklo fazės neturi įtampos santykiui su žeme. Pagrindė tai pagrindė kyla dėl šių priežasčių: gedimų, grandinių pažeidimų, netinkamo tinklo sujungimo. Šis reiškinys gali turėti rimtų padarinių tinklo veikimui. Pavyzdžiui, nulinės sekos įtampa gali sukelti įtampos ir srovės svyravimus tinkle, taip pat sistema gali veikti nestabiliai ar gali sugesti įranga. Be to, tai gali būti pavojus darbuotojų ir aplinkinių saugumui, nes nulinės sekos įtampa gali sukelti elektros smūgį žmonėms ar žalą įrangai. Todėl yra svarbu stebėti ir kontroliuoti nulinės sekos įtampos buvimą trifaziame elektros tinkle naudojant įvairius įrenginius. Visų pirma, tinklas turi būti įrengtas taip, kad būtų sumažinta nulinės sekos įtampos tikimybė, o įvykus tokiai situacijai, būtų imtasi greitų veiksmų jos pašalinimui ir tinklo stabilumui atkurti.

Kai tinklo fazės įtampos santykiui su žeme yra atvirkštinės normaliam veikimui, tai ta būseną vadinama atvirkštinės sekos įtampa. Dažniausiai šios sekos įtampa kyla dėl netinkamai sumontuotų transformatorių, grandinės pažeidimų. Šis reiškinys gali sukelti įtampos ir srovės nestabilumą, kuris gali pakenkti tinklo veikimui ir poveikiui prijungtai įrangai.

Kai visos trifazio tinklo fazės turi santykį su žeme, būseną vadinama tiesioginės sekos. Šia būseną paprastu ir įprastu atveju turėtų veikti tinklas. Tiesioginės sekos įtampa skirta normaliam elektros energijos perdavimui ir prietaisų veikimui, be jokių neigiamų padarinių. Pagrindinis skirtumas tarp tiesioginės, nulinės ir atvirkštinės sekos įtampos yra jų būsenos ir poveikio tinklo veikimui. Tiesioginė sekos įtampa yra pageidautina ir normali būseną, o nulinės ir atvirkštinės sekos įtampos gali sukelti įvairių problemų, dėl kurių gali kilti pavojus tinklo stabilumui ir saugumui.

Atvirkštinės sekos įtampos ir srovės sukeltas linijos dažnio galios svyravimai sukels nuolatinės srovės magistralės įtampos bangavimą [33]. Disbalanso terminas naudojamas kartu su apkrova, todėl apkrovos, kurios turi tarpusavyje skirtingą atskirų fazių varžą, vadinamos nesubalansuotomis. Jei apkrova yra subalansuota, tai varža yra tiesinė, nekintanti laike, nėra aukšto dažnio šaltinis ir nėra pereinamųjų procesų šaltinis bei tai yra ideali pakrovimo kokybė. Jei kuris nors iš šios charakteristikos nėra tenkinamos, tada apkrova laikoma tokia apkrova, kuri yra sumažėjusi kokybės. Pavyzdžiui, jei apkrova nesubalansuota, tai sukels atvirkštinės sekos srovę, srautą ir dėl to sumažės energijos naudojimo efektyvumas.

Jau yra minėta, kad įtampos asimetriją sukelia apkrovų disbalansas, tačiau įtampa gali reaguoti ir į srovės asimetriją. Pavyzdžiui, jei apkrova yra prijungta prie trifazės sistemos vienos fazės taip, kad ji sukelia efektingą srovę didesnę nei kitose fazėse, tai sukels įtampos kritimą kuris sumažins įtampą toje fazėje. Tai sukelia srovės ir įtampos asimetrijos srautus sistemoje. Įtampos asimetrija gali atsirasti gamybos ir perdavimo sistemoje, kaip aptarta aukščiau. Tačiau, nors apkrova subalansuota, dėl to tekės asimetrinė srovė [30]. Atsirandanti įtampos asimetrija taip pat gali sustiprinti srovės asimetriją. To pavyzdys yra indukciniai varikliai, kur 1% įtampos asimetrija sukelia 6–10% srovės asimetriją. Taip yra todėl, kad atvirkštinės sekos varža yra daug mažesnė nei teigiamos sekos varža.

1.7. EEK vietos tinkle nustatymo būdai

Energijos kaupimas suteikia tinklo operatoriams (tiek perdavimo, tiek paskirstymo) pajėgumą valdyti pagamintos energijos nepastovumą ir prijungti galutinius vartotojus prie energijos pagal jų reikalaujamą įtampą. Poveikį elektros energijos kokybei daugiausia lemia tai, kur šios sistemos yra prijungtos prie tinklo, o ne jų pajėgumas [34]. Nors EEK gali būti įdiegtas bet kurioje tinklo vietoje, tinkamas išdėstymas gali palengvinti optimalų ESS veikimą, siekiant pagerinti energijos kokybę, sumažinti didžiausią paklausą, sumažinti bendras tinklo sąnaudas, galimybę integruoti

atsinaujinančių energijos šaltinių ir efektyvinti sistemą [35]. Tinklo struktūra, atsinaujinančių išteklių padėtis ir linijų srauto ribos taip pat gali turėti įtakos optimaliam saugyklų išdėstymui. Dydžio ir vietos nustatymo problemos sprendimo metodikos skirstomos į keturias pagrindines kategorijas: analitinį, matematinį programavimą, išsamios paieškos ir euristinius metodus. ESS vietos ir dydžio nustatymas negali būti apibrėžtas atskirai nuo jų veikimo arba vaidmens / paslaugų, kurias šie padaliniai gali teikti įvairioms sistemos suinteresuotosioms šalims [36]. Saugojimo sistemų optimalaus dydžio ir išdėstymo paskirstymo tinkle problema plačiai tiriama. Norint pasiekti tiksliausią rezultatą, reikia apibrėžti kelis kintamuosius, sprendimo techniką, efektyvumo metriką optimaliam įvertinimui, akumuliatoriaus technologiją ir modeliavimą bei bandymų tinklą, kuriame atlikti tyrimai. Yra du pagrindiniai šios problemos būdai: matematinis programavimas ir euristiniai metodai. Skirtumas tarp šių dviejų yra optimizavimo problemos nustatymas ir sprendimo algoritmas. Kiti metodai, pavyzdžiui, analitiniai metodai, gali gerai veikti mažuose tinkluose, tačiau jie nėra tinkami arba reikalauja daug skaičiavimo sudėtinguose scenarijuose.

Matematinis programavimas susideda iš uždavinio aprašymo lygčių rinkiniu ir, atsižvelgiant į jų charakteristikas, gali būti taikomi skirtingi sprendimo būdai. Kai kurios įprastinės formuluotės yra tiesinė problema, pusiau apibrėžta problema arba antros eilės kūgio problema. Daugelis komercinių sprendimų gali išspręsti optimizavimo problemą [19]. Matematinis programavimas reikalauja aiškios analizės tikslo funkcijos ir apribojimų formulavimo. Euristiniai metodai nereikalauja aiškių matematinų formuluočių ir dėl šios priežasties jie tinka daugiaobjekciniam optimizavimui. Bendras šių algoritmų taikymo modelis yra dirbtinio intelekto metodų taikymas saugojimo sistemų dydžiui ir vietai, o tada kandidatų tinkamumo įvertinimas naudojant klasikinius optimalaus galios srauto algoritmus [19].

ESS optimalus vietos ir dydžio nustatymas, įskaitant galimą tinklo perkonfigūravimą, yra pirmasis iššūkis, kurį reikia išspręsti [37]. Pažangios galios elektronikos technologijos vaidina vis svarbesnį vaidmenį skirstymo sistemos veikloje. Išmanieji keitikliai leidžia lanksčiai valdyti tiek aktyviają, tiek reaktyviają galią. Reaktyvioji galia gali padėti valdyti tinklo perkrovą, sumažinti tinklo nuostolius ir pagerinti įtampos profilį. Naujas naudojamas galios elektroninis įrenginys yra minkšti atviri taškai (SOP) [38], pastaraisiais metais patraukė dėmesį dėl savo stiprios aktyviosios / reaktyviosios galios valdymo tarp prijunginių. SOP paprastai įrengiamas vietoje tradicinio jungiamojo jungiklio [39]. Skirtingai nuo jungiamosios linijos atidarymo ar uždarymo, SOP gali nuolat reguliuoti elektros srautą jungiamojoje linijoje ir optimizuoti aktyviosios bei reaktyviosios galios paskirstymą aktyvus skirstomajame tinkle. Tokia paskirstymo lygio galios elektronika palaiko paskirstytos gamybos augimą [40]. Šie galios elektroniniai įrenginiai užtikrina geresnį sistemos veikimo valdymą, lankstumą bei pakeičia veikimo strategijas.

Tinklo perkonfigūravimas yra efektyvus būdas pagerinti paskirstymo sistemų veikimo efektyvumą. Tradiciškai tinklo topologija išlieka nepakitusi ilgą laiką, pavyzdžiui, mėnesį ar sezoną. Tačiau eksploataavimo sąlygų kaita yra dažnesnė dėl kintamos generuojamos atsinaujinančių energijos išteklių galios [40]. Aktyvaus skirstomojo tinklo galios elektroninių valdymo įrenginių pažanga gali užtikrinti dažnesnį trumpalaikį tinklo perkonfigūravimą valandiniu grafiku. Tinklo perkonfigūravimą verta įtraukti į įprastą aktyvaus paskirstymo tinklo veikimą [41].

Vienas iš būdų optimizuoti prijungtus EEK ir SE yra Markovo grandinės sistema. Ji gali būti naudojama, nes SOC bet kuriuo metu, atsižvelgiant į visus ankstesnius SOC, gali būti aprašytas kaip ankstesnio SOC ir kai kurių atsitiktinių dydžių, kurie nepriklauso nuo praeities, funkcija [42].

Markovo sprendimų procesas gali valdyti tinklo baterijas, kuris maksimaliai padidina jutiklių mazgo gebėjimą aptikti ir perduoti įvykius, gedimus, kartu išlaikant baterijos energijos lygį. Optimali politika turi dviejų slenksčių struktūrą, t.y. baterija turi būti iškrauta, kai SOC viršija tam tikrą slenkstį, ir turi būti įkrauta, kai SOC yra žemiau kitos slenksčio. Dinaminio poslinkio politika, skirta saugyklos planavimui, pagrįsta Markovo sprendimų procesais, pranoksta euristinius metodus, pavyzdžiui, tuos, kuriais siekiama išlaikyti pastovų saugyklos lygį [40].

Euristinis metodas leidžia rasti optimalią daugiafunkcio EEK vietą ir pajėgumą, įskaitant perdavimo ir paskirstymo dalis. Analizė atliekama naudojant sudėtingus neuronų tinklus (CVNN) ir laiko domeno galios srautą (TDPF) [41]. Galios srauto problemą matematiškai galima apibrėžti kaip (1) formulę:

$$[I_{BUS}] = [Y_{BUS}] \times [U_{BUS}]; \quad (1)$$

čia I_{BUS} – srovės vektorius, kuris yra teigiamas generavimo pusėje ir neigiamas apkrovose;

Y_{BUS} – tinklo jėgimo matrica;

U_{BUS} – tinklo įtampos vektorius.

Aktyvios ir reaktyviosios galios srautus (ΔP , ΔQ) galima apskaičiuoti pagal įtampos amplitudės ir kampų pasikeitimo (ΔU , $\Delta \theta$) matricą (2) kuri yra vienas iš būdų išspręsti galios srauto lygtį:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial U} U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta U}{U} \end{bmatrix} \quad (2)$$

čia ΔP – aktyviosios galios srautas;

ΔQ – reaktyviosios galios srautas;

$\Delta \theta$ – kampo pasikeitimas;

ΔU – įtampos pokytis.

Naudojant TDPF atliekami energijos srauto skaičiavimai per tam tikrą laiko intervalą. TDPF modeliavime tinklo įranga modeliuojama dinamiškai, o ne statiškai [41]. Laiko srities modeliavimas aprašomas funkcijomis (3) (4) įprastu laiku t ir laiko žingsnį Δt :

$$f(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t), f(t)) = 0 \quad (3)$$

$$g(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)) = 0 \quad (4)$$

čia f , g – algebrinės ir diferencialinės lygtys laiko srities problemoms spręsti;

Δt – optimizacijos laiko intervalas (val.).

Lygtys(3) ir (4) yra netiesinės ir buvo išspręstos naudojant Niutono - Rafsono metodą. Šis metodas pakartotinai apskaičiuoja (5) Δx^i ir Δy^i būsenos ir algebrinius kintamuosius bei atnaujina faktinius kintamuosius (6) (7):

$$\begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} = [A_C^i]^{-1} \begin{bmatrix} f_n^i \\ g^i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x^{i+1} = x^i + \Delta x^i \quad (6)$$

$$y^{i+1} = y^i + \Delta y^i \quad (7)$$

čia Δx^i ir Δy^i – algebriniai kintamieji;

A_C^i – matrica, priklausanti nuo algebrinės ir būsenos Jacobiano matricos;

x^{i+1} , y^{i+1} – apskaičiuotos x ir y reikšmės laike $t = i+1$.

Ciklas sustoja, kai kintamojo prieaugis yra mažesnis už tam tikrą fiksuotą nuokrypį arba kai iteracijos skaičius pasiekia didžiausią reikšmę. Modeliuojant tinklą su TDPF, analizuojamos dinaminės tinklo elgsenos ir gali būti perkeliamos dinaminės sistemos savosios reikšmės, kad būtų užtikrintas stabilumas. Nenumatytus įvykius ar trikdžius taip pat galima pritaikyti modeliui, kad būtų galima išanalizuoti jų poveikį tinklui.

Paprastai kaupimo sistemos skirstomos į kategorijas pagal du veiksnius, ty saugojimo terpę (sukauptos energijos tipą) ir saugojimo (išskrovimo) trukmę. Pirmojo tipo klasifikacijoje ESS skirstomi į mechanines, chemines ir elektrines kaupimo sistemas pagal energijos kaupimo formą. Mechaninę energijos kaupimą taip pat galima suskirstyti į kinetinę ir potencialinę. Taip pat elektros energijos kaupimas skirstomas į elektrostatinę ir magnetinę [42].

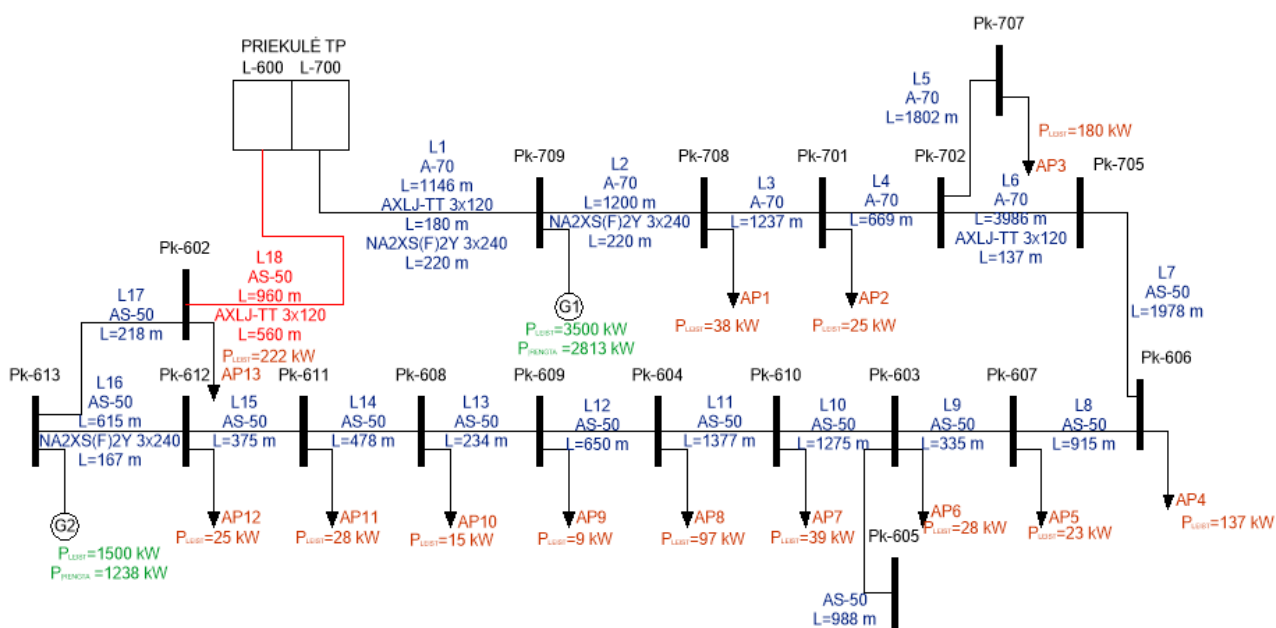
2. Elektros skirstomojo tinklo su energijos kaupikliu modelis

Objektas naudojamas tyrimui yra Priekulėje, Klaipėdos rajono savivaldybėje. Šiame mieste yra įrengta 110/10 kV Priekulės TP skirstykla. Tiriamajam modeliui bus aktualios tik dvi prijungtos linijos: L-700 ir L-600. Tiek vienoje, tiek kitoje linijoje yra instaliuota SE, kurios didina tinklo įtampą. Linija L-600 iš Priekulės TP tapo nebeaktyvi, todėl visa apkrova atiteko linijos L-700 narveliui. Šiuo metu, L-600 linijoje prijungta SE (transformatorinėje Pk-613) gali veikti tik 43% pajėgumu dėl per didelės tinklo įtampos. Vartotojas negauna pilnos naudos iš turimos saulės elektrinės dėl tinklo trūkumų.

Skirstomasis elektros tinklas modeliuojamas naudojant „Matlab/Simulink“ programinę įrangą. Modeliuojama situacija, kuomet dėl didelio kiekio prijungtų saulės elektrinių, tinkle kyla įtampa bei atsiranda fazių asimetrija. Modelis susideda iš transformatorių, laidininkų, apkrovų, saulės elektrinių ir elektros energijos kaupiklio.

2.1. Objekto aprašymas

Minėtoje situacijoje, susiduriama su problema, kad ne tik vartotojas negali savo investicijos paversti nauda, kurios tikėjosi, bet ir kiti vartotojai negali prisijungti daugiau SE dėl tinklo problemų. Su šia problema susiduriama vis dažniau visame skirstomajame tinkle ir būtina ieškoti būdų, kaip pagerinti tinklo būseną. Struktūrinė tinklo dalies schema pavaizduota 3 paveiksle.



3 pav. Priekulės TP L-600 ir L-700 struktūrinė schema

Kaip matoma paveiksle, tinkle prijungtos dvi saulės elektrinės (G1 ir G2). Jų leistinoji galia ir instaliuota galia nurodyta 3 lentelėje.

3 lentelė. Prijungtų SE galingumai

Saulės elektrinės Nr.	P_{LEIST} , kW	P_{INST} , kW
SE1 (G1)	3500	2813

SE2 (G2)	1500	1238
----------	------	------

Abi saulės elektrinės yra vienoje vietoje, prijungtos prie dviejų transformatorinių Pk-709 ir Pk-613. Jos yra sumontuotos ant žemės (4 pav.), optimalus SE pasvyrimo kampas yra nuo 30 iki 40°. Modelio erdvėje priimama, kad pasvyrimo kampas bus lygus 33°.



4 pav. Įrengtų saulės elektrinių vaizdas iš paukščio skrydžio

Nagrinėjamoje skirstomojo tinklo dalyje, transformatorinės iš Priekulės TP prijungtos dažniausiai oro linijomis (OL), taip pat, yra įrengtų ir kabelinių linijų (KL). Yra įrengta 18 linijų OL bei KL nurodytos 4 lentelėje.

4 lentelė. L-600 ir L-700 OL ir KL ilgiai

Linijos Nr.	Kabelio gyslų skaičius, skerspjūvio plotas, mm ²	Ilgis, m
L1	3A-70	1146
	AXLJ-TT 3x120	180
	NA2XS(F)2Y 3x240	220

L2	3A-70 NA2XS(F)2Y 3x240	1200 220
L3	3A-70	1237
L4	3A-70	669
L5	3A-70	1802
L6	3A-70 AXLJ-TT 3x120	3986 137
L7	3AS-50	1978
L8	3AS-50	915
L9	3AS-50	335
L10	3AS-50	1275
L11	3AS-50	1377
L12	3AS-50	650
L13	3AS-50	234
L14	3AS-50	478
L15	3AS-50	375
L16	3AS-50 NA2XS(F)2Y 3x240	615 167
L17	3AS-50	218
L18	3AS-50 AXLJ-TT 3x120	960 560

Kabelių pagrindiniai elektriniai duomenys, atsižvelgiant į skerspjūvį ir paklojimo būdą, nurodyti 5 lentelėje.

5 lentelė. OL ir KL pagrindiniai elektriniai parametrai

Kabelio gyslų skaičius, skerspjūvio plotas, mm ²	Laidininko varža, Ω/km	Induktyvumas, mH/km
A-70	0,48	0,24
AXLJ-TT 3x120	0,253	0,3
NA2XS(F)2Y 3x240	0,0754	0,186
AS-50	0,67	0,25

Linija L18 4 lentelėje yra atjungta. Dėl šios priežasties visas vaizduojamas tinklas yra prijungtas iš Priekulės TP narvelio Nr. 206.

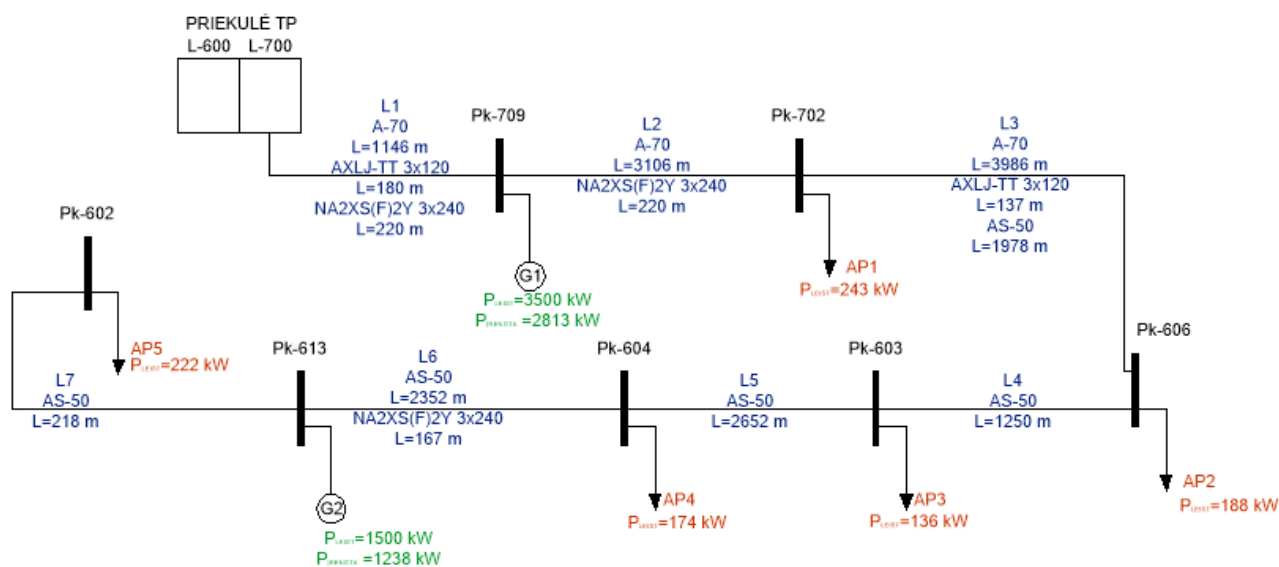
Visų prijungtų apkrovų leistinos galios nurodytos 6 lentelėje. Tai yra AB „Energijos skirstymo operatorius“ pateikiami duomenys. Vartotojų sąrašai kai kuriose lentelėse yra tušti, tad tokiu atveju priimama, kad transformatorinėje prijungtų vartotojų nėra.

6 lentelė. Prijungtų vartotojų leistini galingumai

Apkrovos eil. Nr.	Transformatorinės Nr.	P _{LEIST} , kW
AP1	Pk-708	38
AP2	Pk-701	25
AP3	Pk-707	180
AP4	Pk-606	137

AP5	Pk-607	23
AP6	Pk-603	28
AP7	Pk-610	39
AP8	Pk-604	97
AP9	Pk-609	9
AP10	Pk-608	15
AP11	Pk-611	28
AP12	Pk-612	25
AP13	Pk-602	222

Dėl modelio dydžio ir veikimo laiko nagrinėjamas tinklas sutraukiamas. Jame yra ne viena stulpinė transformatorinė su prijungtais mažo galingumo vartotojais, todėl, kad modelio erdvė veiktų greičiau ir paprasčiau, didelės įtakos nedarantys vartotojai sugrupuojami. Paveiksle 5 pavaizduota supaprastinta nagrinėjamo tinklo struktūrinė schema.



5 pav. Supaprastinta nagrinėjamo tinklo struktūrinė schema

Supaprastintos tinklo schemas duomenys vaizduojami 7 ir 8 lentelėse, kadangi kabelių skerspjūviai ir gyslų skaičius nesikeičia, jų elektriniai parametrai išlieka tokie patys (7 lentelė).

7 lentelė. L-600 ir L-700 supaprastintos schemas OL ir KL ilgiai

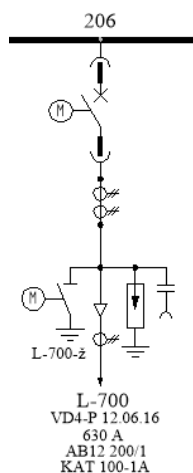
Linijos Nr.	Kabelio gyslų skaičius, skerspjūvio plotas, mm ²	Ilgis, m
L1	3A-70	1146
	AXLJ-TT 3x120	180
	NA2XS(F)2Y 3x240	220
L2	3A-70	3106
	NA2XS(F)2Y 3x240	220
L3	3A-70	3986
	AXLJ-TT 3x120	137
	3AS-50	1978
L4	3AS-50	1250
L5	3AS-50	2652

L6	3AS-50 NA2XS(F)2Y 3x240	2352 167
L7	3AS-50	218

8 lentelė. Vartotojų leistinosios galios

Apkrovos eil. Nr.	Transformatorinės Nr.	P _{LEIST} , kW
AP1	Pk-702	243
AP2	Pk-606	188
AP3	Pk-603	136
AP4	Pk-604	174
AP5	Pk-602	222

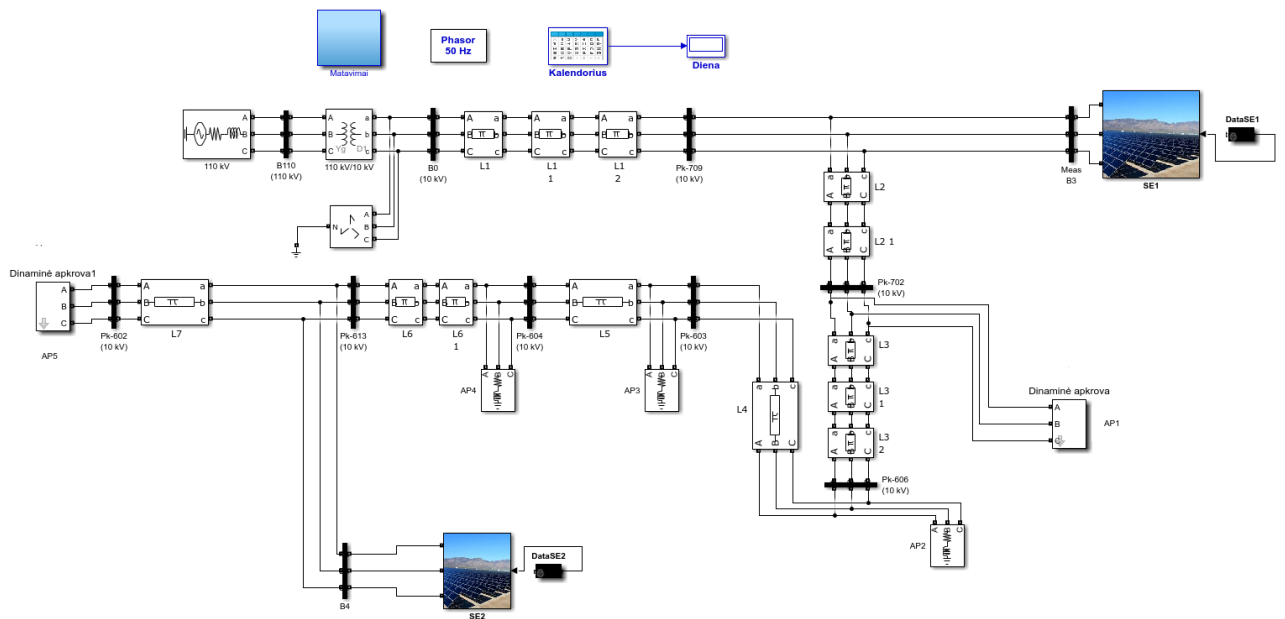
SE leidžiamos ir instaliuotos galios nepakito. Nagrinėjamas tinklas, kaip minėta, prijungtas iš Priekulės TP narvelio Nr. 206 (6 pav.):



6 pav. Priekulės TP narvelis Nr. 206

2.2. Skirstomojo tinklo modelis ir jo sudarymas

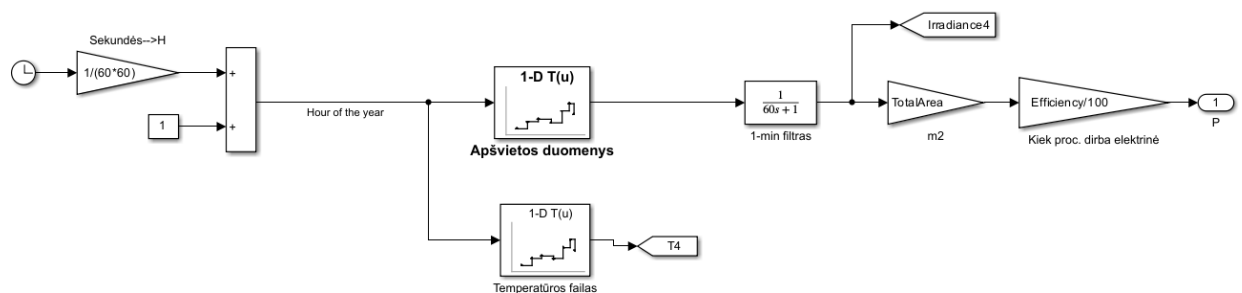
Projektuojami du skirstomojo tinklo modeliai: pirmasis modelis be EEK (7 pav), antrasis su. Lyginamas tarpusavio skirtumas. EEK turi įsikrauti kuomet generuojama galia viršija apkrovos galią, įsikrauti kuomet EEK pasiekia tam tikrą leistiną įtampos ribą. Kuomet diena yra apniukusi ir SE generuoja mažai arba negeneruoja saulės energijos, EEK turi išsikrauti. Taip pat, modeliuojama sąlyga, kad naktį, kuomet apkrova yra minimali, kaupiklis galėtų įsikrauti iš tinklo, jeigu jo įkrovimo būseną $SOC \leq 90\%$. Minimali SOC riba yra $\geq 10\%$. Jeigu ji yra pasiekama kaupiklis taip pat įkraunamas iš tinklo. Šioje potemėje nagrinėjas pirmasis modelis – be elektros energijos kaupiklio.



7 pav. Modeliuojamas skirstomasis tinklas

Tinklas modeliuojamas lygiai toks pat, koks buvo ir struktūrinėje schemoje. Linijos ilgiai ir skerspjūviai paimti iš 7 lentelės, apkrovos iš 8 lentelės, o SE galingumai iš 3 lentelės. Modelyje taip pat yra matavimų erdvė, kurioje bus pavaizduoti visi rezultatai, kalendorius ir diena, nes atliekami bandymai dviem mėnesiams – sausio ir liepos.

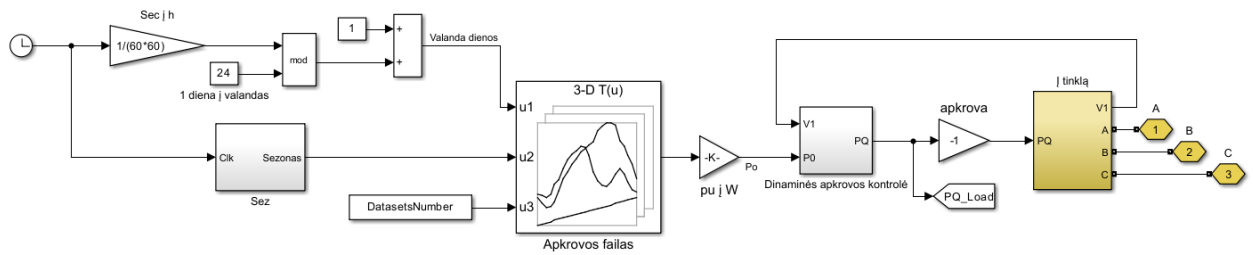
Saulės elektrinės modelyje (8 pav.) modeliuojami saulės elektrinės parametrai. Suvienodinami duomenys, kadangi duomenų faile yra 8760 reikšmės.



8 pav. Saulės elektrinės modeliavimas

Nuskaičius apšvietos ir temperatūros duomenis, atsižvelgiama į SE užimamą plotą bei efektyvumą, kiek procentų SE turi dirbi. Kaip jau minėta anksčiau, SE2 dirba tik 43% savo galimybių. Duomenys iš failo nuskaitomi bloke „Apšvietos duomenys“. Abi elektrinės sumodeliuotos vienodai.

Apkrovos AP1 ir AP5 vaizduojami kaip dinaminiai blokai, nes iš Pk-702, Pk-602 transformatorinių prijungti gyvenamieji kvartalai. Dinaminiam bloke nuskaitomas duomenų failas, t.y. valandinės visų metų apkrovos. Bloko struktūra vaizduojama 9 paveiksle.



9 pav. Dinaminės apkrovos veikimo blokas

Užkraunamas duomenų failas, atsižvelgiama į sezoną bei valandines reikšmes. Blokas „gain“ energiją paverčia į galią. Dinaminės apkrovos kontrolės bloke yra dvi įeinančios reikšmės – įtampa ir minėta galia. Bloke atliekami matematiniai skaičiavimai, kurie išfiltruoja ir apskaičiuoja apkrovos reikšmę „PQ_Load“.

2.3.EEK parinkimas ir pagrindiniai parametrai

Nustatant pagrindinius elektros energijos kaupiklio parametrus prieš naudojimą skirstomajame tinkle, užtikrinama efektyvi energijos panaudojimo kontrolė ir saugumas. Pirmiausia, svarbu apibrėžti kaupiamosios sistemos talpą, kuri nustato, kiek energijos ji gali saugoti. Taip pat būtina įvertinti maksimalų iškrovimo greitį, kad būtų išvengta perkrovos ir pažeidimų. Įvertinant įkrovimo greitį, galima optimaliai naudoti sistemos pajėgumą, kad būtų pasiektas efektyvus energijos kaupimas. Be to, svarbu įvertinti kaupiklio efektyvumą, nes tai tiesiogiai veikia energijos naudojimo išteklius. Nustatant šiuos parametrus, taip pat svarbu atsižvelgti į skirstomųjų tinklų specifikas, kad būtų užtikrintas suderinamumas ir optimalus veikimas.

Valdymo ir diagnostikos blokas turi pateikti informaciją apie įkrovos būseną (SOC) arba apie energijos būseną (SOE). Taip pat naudojamas iškrovimo gylio (DOD) parametras [43]. Norint teisingai apibrėžti tam tikro saugojimo įrenginio taikymą ir turėti aiškius projekto parametrus, reikia techninių apibrėžimų. EEK talpa apskaičiuojama pagal (8) formulę:

$$C = \int_0^t i(t) \times dt \quad (8)$$

čia C – energijos kiekis (Ah).

DOD yra iškrovimo gylis, energijos kiekio skaičiavimas (9), atsižvelgiant į jo dižiausią talpą:

$$DOD = \frac{\int_0^t i_{iškrovimo}(t) \times dt}{C} \quad (10)$$

čia DOD – iškraunamos energijos kiekis (Ah).

Įkrovimo būseną SOC rodo likusią elektros energiją, kurią galima panaudoti iš akumulatoriaus ar baterijos, atsižvelgiant į įrenginio talpą:

$$SOC = \frac{\text{Likusio įkrovimo kiekis}}{\text{Baterijos talpa}}$$

$$SOC = \frac{C - \int_0^t i_{iškrovimo}(t) \times dt}{C} \quad (11)$$

čia SOC – įkrovimo būseną.

Modeliuojant ir įrengus energijos kaupimo sistemą yra būtina apskaičiuoti nuostolius. Paprasčiausiu atveju įkrovimo ir iškrovimo nuostoliai nustatomi (12) taip:

$$P_{\text{įkrovimo/iškrovimo}} \cong \alpha \times P^2 \quad (12)$$

čia P – įkrovimo arba iškrovimo galia (kW);

α – parametras priklausantis nuo energijos būsenos (SOE) ir energijos perdavimo krypties.

Savaiminio išsikrovimo nuostoliai yra tiesiogiai proporcinga SOE. Kuomet didėja SOE, auga ir savaiminio išsikrovimo nuostoliai (13):

$$P_0(SOE) \quad (13)$$

Atsižvelgiant į vieną saugojimo įrenginio veikimo ciklą, kuriam yra būdingas specifinis galios profilis $P(t)$ ir viena energijos būsena $SOE(t)$, visi nuostoliai P_{NUOST} yra lygūs sumai įkrovimo bei iškrovimo nuostolių ir pridėjus savaiminio išsikrovimo nuostolius (14):

$$P_{NUOST} = \alpha P^2(t) + P_0(SOE(t)) \quad (14)$$

Per vieną ciklą išskaidyta energija E_{NUOST_cikl} gali būti apskaičiuojama taip (15):

$$E_{NUOST_cikl} = \int_0^{t_{cikl}} [\alpha P^2(t) + P_0(SOE(t))] dt \quad (15)$$

$P(t)$ yra teigiamas įkrovimo momento metu ir neigiamas, iškrovimo fazės metu. Energijos būsena apskaičiuojama pagal (16) formulę:

$$SOE(t) = SOE(t_0) + \frac{\int [P(t) - P_{NUOST}(t)] dt}{E_{STO}} \quad (16)$$

čia E_{STO} – saugojimo įrenginio energetinė talpa (Ah).

Šiame darbe yra naudojama ličio jonų kaupimo sistema. Kaupikliai parenkami pagal aukščiau pateiktą skaičiavimo metodiką. Kaupiklio parametrai nurodyti 9 lentelėje:

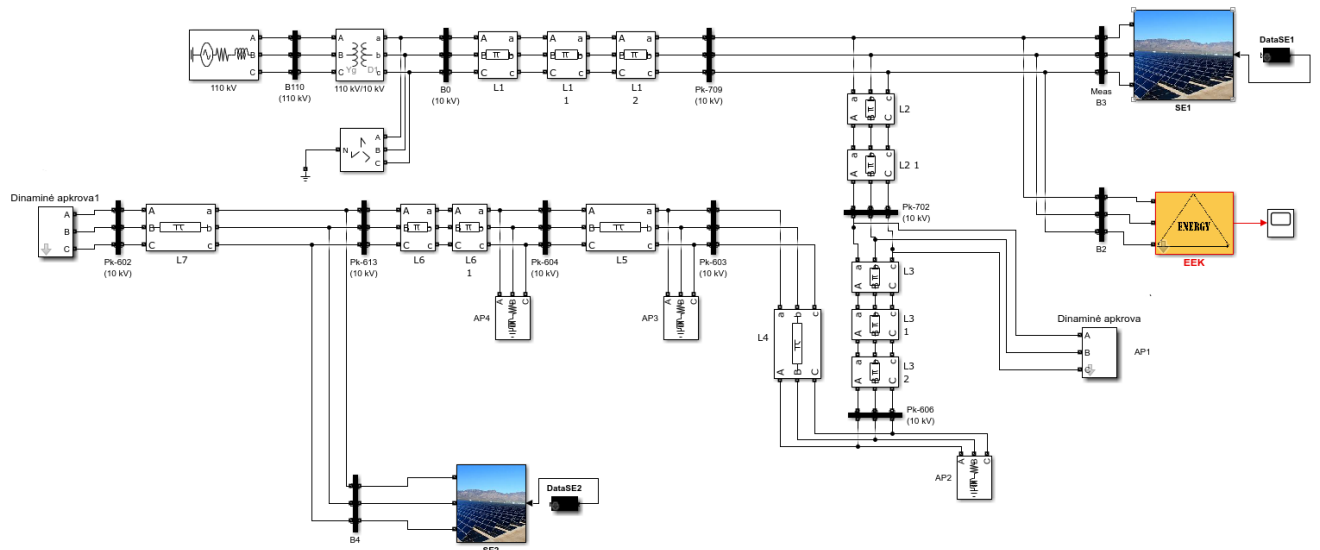
9 lentelė. Elektros energijos kaupiklio pagrindiniai parametrai.

Eil. Nr.	Techniniai parametrai ir reikalavimai	Dydis, sąlyga
1.	Vardinė talpa	1440 Ah
2.	Dydis	6058 x 2438 x 2591 mm
3.	Dažnis	50 Hz
4.	Nominali energija	1106 kWh
5.	Galima naudoti energija	1028 kWh
6.	Baterijų talpa	1000 kWh

2.4. Skirstomojo tinklo modelis su EEK

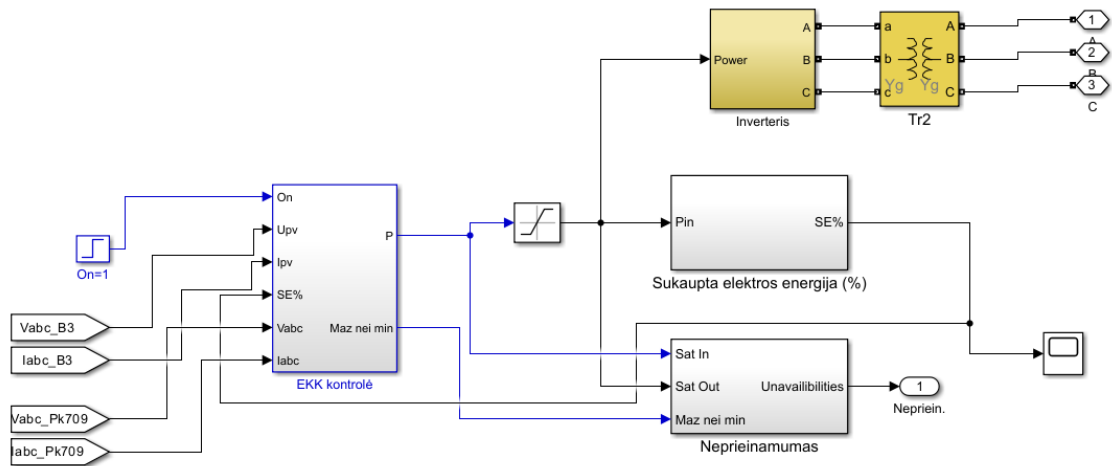
Pats skirstomasis tinklas lieka nepakitęs nuo 10 paveikslo, tačiau parenkama vieta ir pridodamas elektros energijos kaupiklis. Jis parenkamas nustatant parametrus, naudojant skyriaus 2.3. formules.

10 paveiksle vaizduojamas pakitęs skirstomasis tinklas su pridėtu EEK. Linijos, apkrovos, SE galingumai lieka nepakitę.



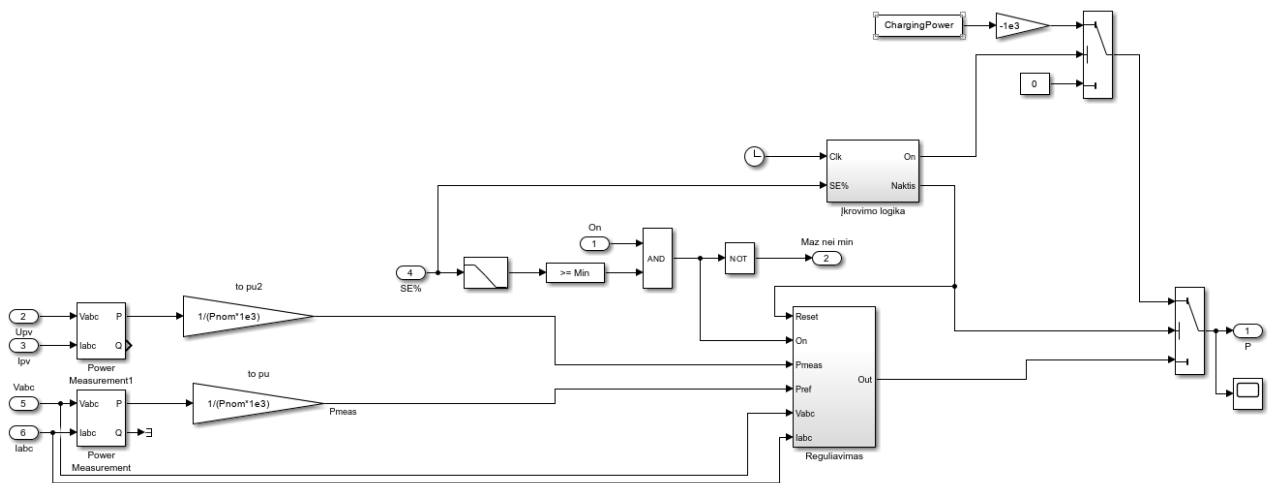
10 pav. Skirstomojo tinklo modelis su EEK

EEK modeliujamas pagal tris uždavinio sąlygas. Modelio erdvėje reaguojama į įtampą Pk-709 transformatorinėje, taip pat, SE generuojamą elektros energiją. Visų pirma modeliujamas inverteris, nepasiekiamumo blokas, pvz.: kada kaupiklis nėra prieinamas, kai yra išsikrovęs iki minimalios vertės. Kaupiklio vieta parenkama atsižvelgiant ir į geografinę padėtį. Šalia SE yra neužstatytas plotas, kuris būtų tinkamas tiek papildomoms SE įrengti, tiek praplėsti generavimo galimybes įrengiant vėjo elektrines. Šalia SE gausu žaliųjų bei atvirųjų plotų, todėl įrengiamas ten būtų geriausias strateginis veiksmas. 11 paveiksle vaizduojamas pirmasis EEK modeliavimo etapas, kuriame yra inverteris, EEK kontrolės blokas, sukauptos energijos skaičiavimo blokas.



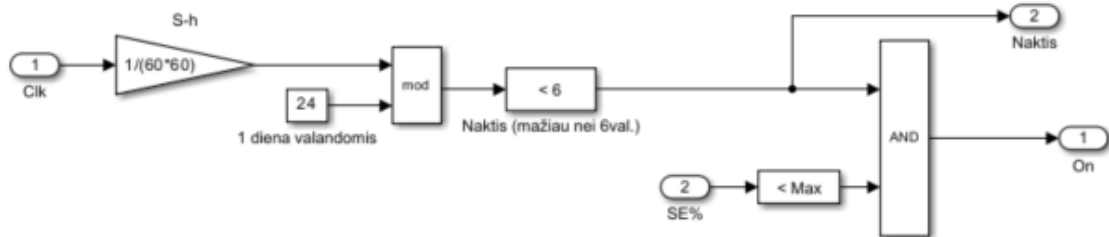
11 pav. Pirmasis EEK valdymo etapas

Inverteris nėra specialiai valdomas reaguojant į pasikeitusius parametrus, visas modelio valdymas vyksta EKK kontrolės dalyje. Kaupiklio kontrolė (12 pav.) yra labai svarbi, nes reikia, kad jis reaguotų į tris skirtingas sąlygas.



12 pav. Kaupiklio kontrolės blokas

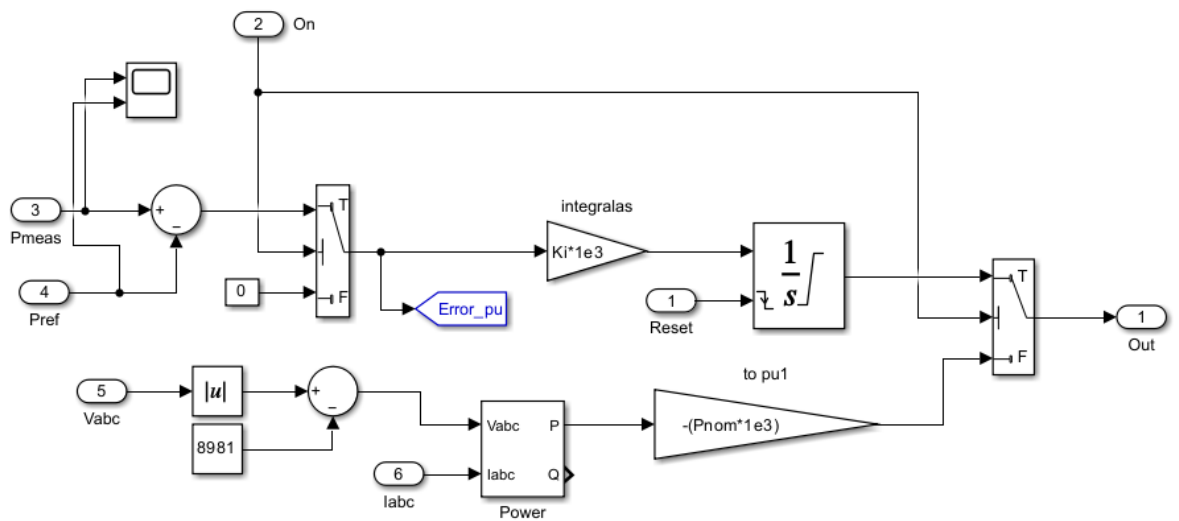
Reaguojant į jėgimo įtampas, „Power Measurement“ blokas, kartu su „Gain“ bloku jėjusius duomenis paverčia į P_{MEAS} , kuris bus naudojamas reguliavimo dalyje. Įkrovimo logikos bloke atsižvelgiama į paros metą bei EKK SOC reikšmę, taip atliekant vieną iš sąlygų: kuomet EEK yra $\leq 90\%$, naktį jis gali būti įkraunamas iš tinklo. Taip pat, atsižvelgiama ar SOC reikšmė nėra pasiekusi minimalios $\leq 10\%$. Patikrinus šias sąlygas perduodamas signalas į reguliavimo bloką arba sąlygoms nepasitvirtinus perduodamas signalas į jungiklį, kad įkrovimas būtų įjungtas. Įkrovimo logikos bloke (13 pav.) tikrinama ar signalas yra mažesnis nei 6, t.y., ar paros metas yra naktis.



13 pav. Įkrovimo nakties metu loginis blokas

Patikrinus ir patvirtinus (ar paneigus) šią sąlygą, signalas perduodamas į jungiklį arba į reguliavimo bloką. Reguliavimo bloke tikrinamos dvi sąlygos bei jos vaizduojamos 14 paveiksle:

- įtampai pasiekus tam tikrą ribą, EEK turi perduoti signalą įsikrauti;
- SE generacijos galiai esant didesnei nei apkrovoms, perduodamas signalas įsikrauti.



14 pav. Galios ir įtampos sąlygų modeliavimas

Trečias ir ketvirtas įėjimo signalai rodo SE ir apkrovos galių reikšmes. Atliekami veiksmai nustatyti, ar SE generuojama galia yra didesnė nei apkrovos, tada perduodama į „Gain“ bloką skaičiuoti integralinę funkciją, kiek energijos perduoti kaupikliui. Penktasis išėjimas vertina įtampos sąlygą ir lygina ją su konstanta 8981. Konstanta 8981 pasirenkama, nes tai yra ribinė fazinė amplitudinė įtampa. Linijinė įtampa apskaičiuojama pagal formulę (17):

$$U_L = \frac{U_{Faz.ampl} \times \sqrt{3}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

čia U_L – linijinė įtampa, V.

$U_{Faz. ampl.}$ – leidžiama fazinė amplitudinė įtampa, V.

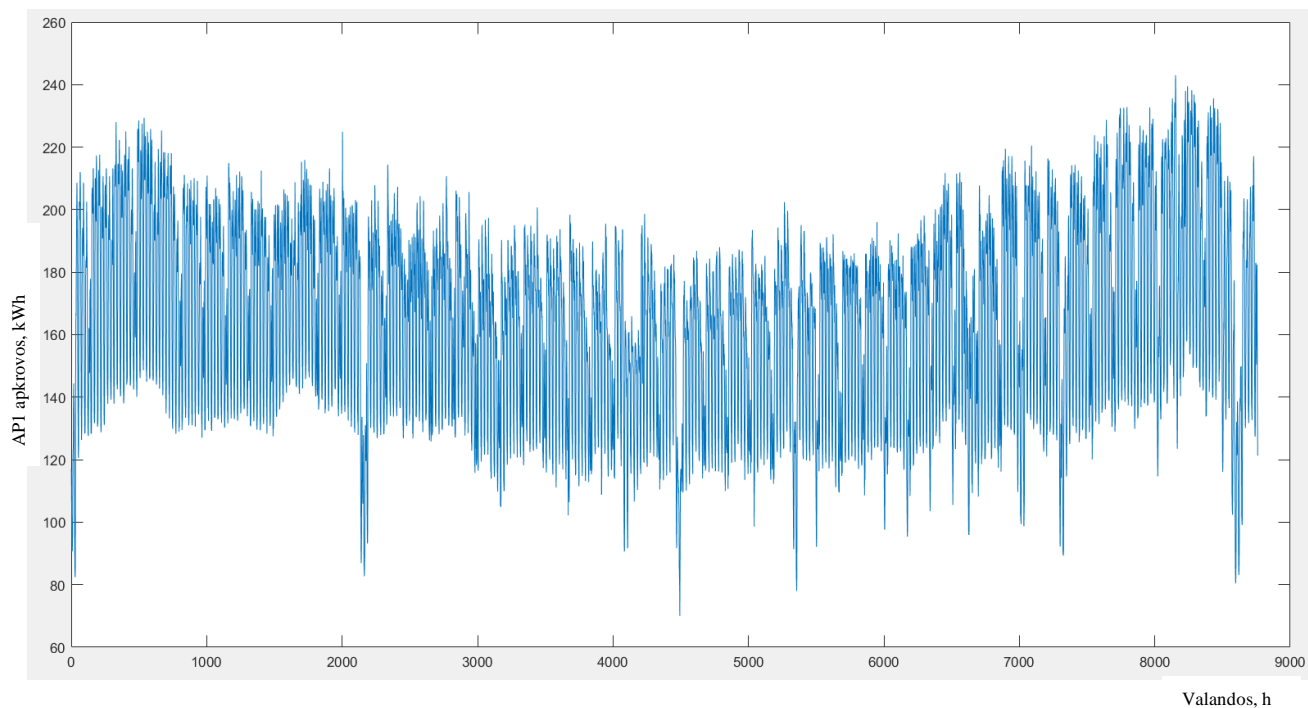
Atlikus matematinius veiksmus ir įvertinus įtampos bei galios sąlygas nustatoma, kiek EEK turi įsikrauti, kad pagerintų tinklo būseną.

3. Elektros skirstomojo tinklo modelio rezultatai

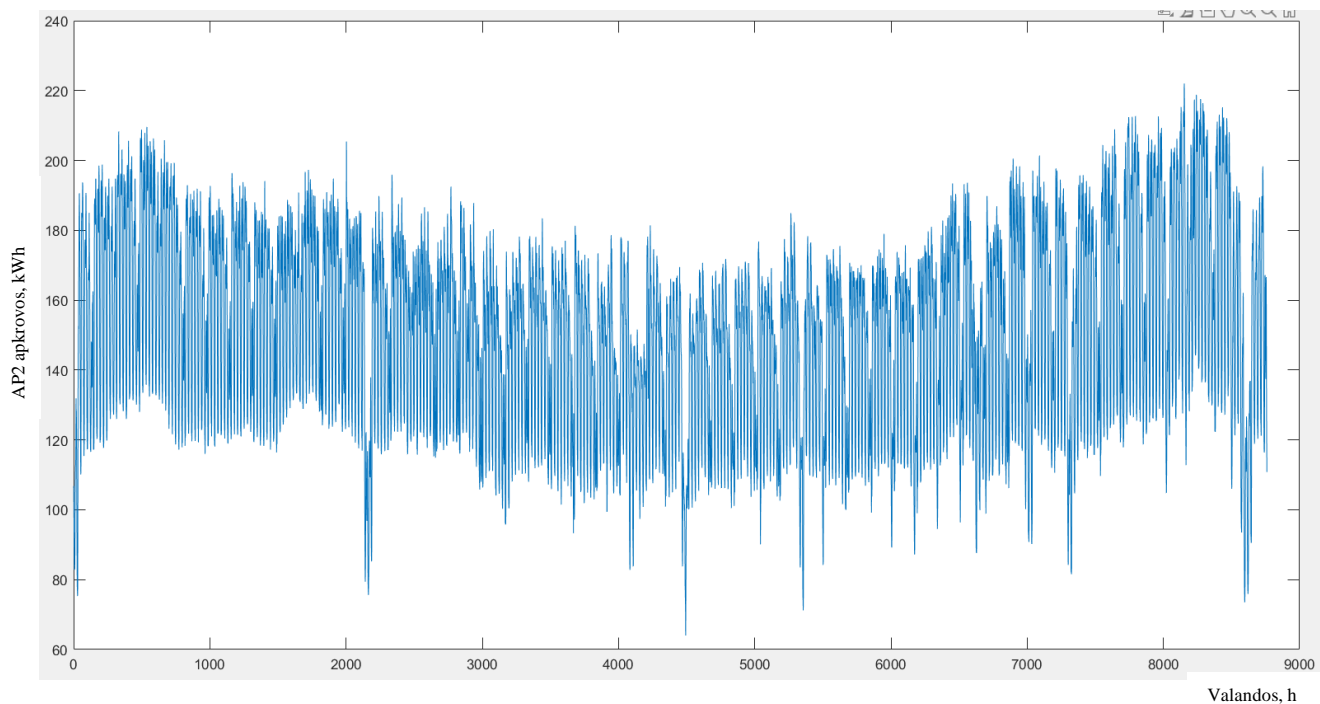
Modeliuojamos dvi situacijos: kaip dirba elektros skirstomasis tinklas naudojant EKK ir be jo. Išskiriamos įkrovimo ir iškrovimo sąlygos, kuriomis nusakoma EKK būseną ir vertinama ar jis gali pagerinti tinklo kokybę. Taip pat, vertinami turimi apkrovų ir SE generacijų valandiniai duomenys.

3.1. Apkrovų ir SE generacijų duomenys

Apdorojami valandinių apkrovų ir SE valandinių generacijų duomenys. Turimos dvi dinaminės apkrovos AP1 bei AP5, todėl duomenys pritaikomi joms.



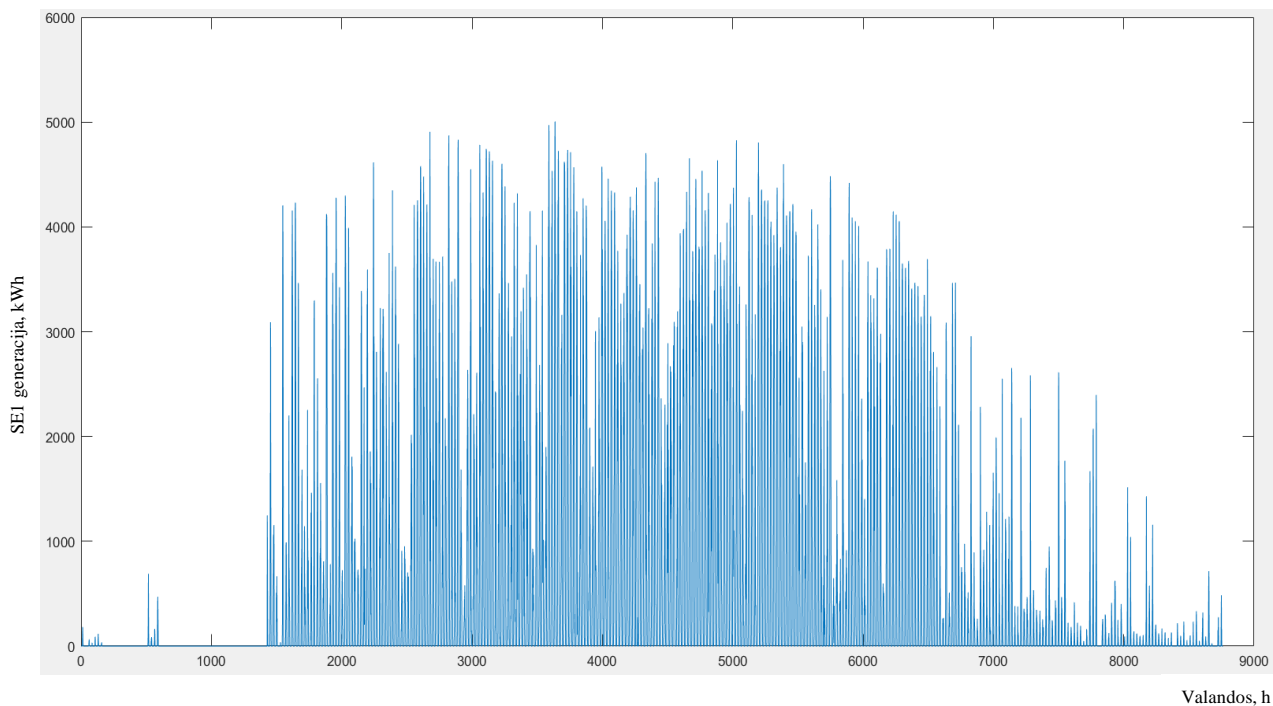
15 pav. AP1 metinis apkrovos grafikas



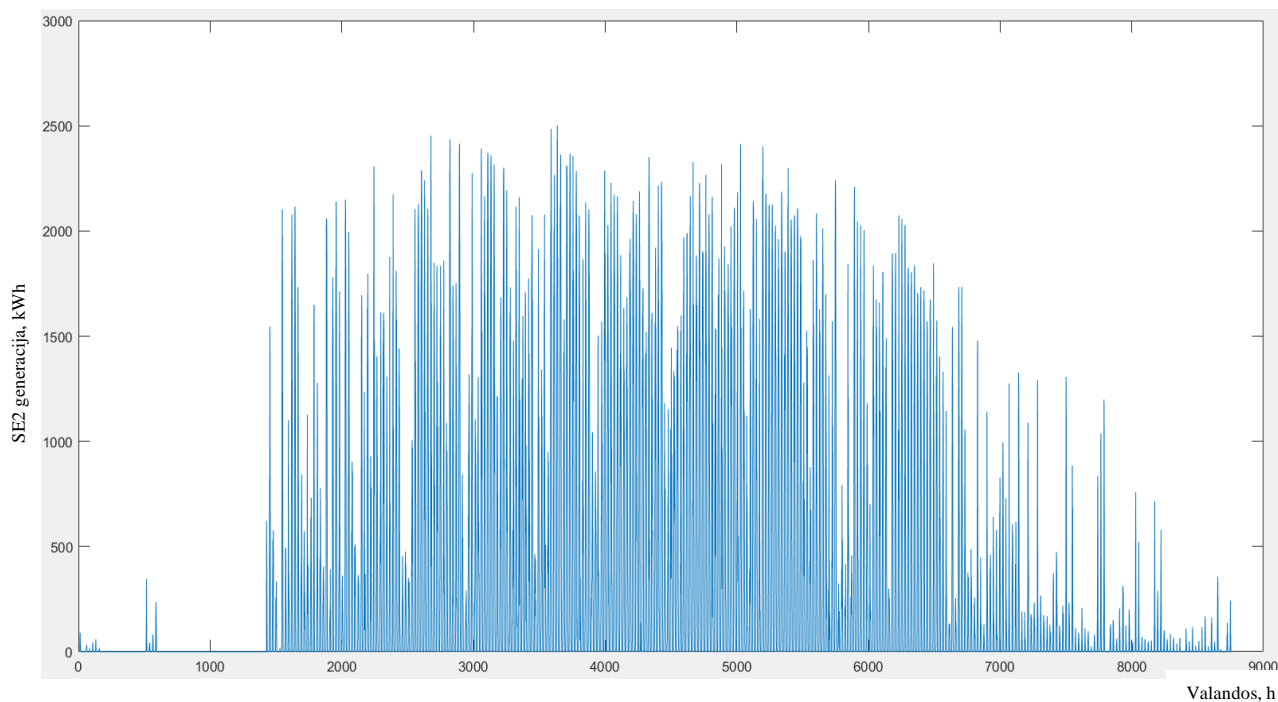
16 pav. AP5 metinis apkrovos grafikas

Horizontali ašis žymi valandines reikšmes, vertikali – apkrovų dydį. Grafike vaizduojami visų metų apkrovų duomenys, kadangi modeliuojama situacija dvejais metų laikais, modelyje naudojami sausio ir liepos mėnesio apkrovos. Antrasis apkrovų (AP5) paveikslas skirasi savo dydžiu ir yra mažesnė nei pirmoji AP1. Matoma, kad apkrovos sumažėjo vasaros laikotarpiu ir padidėjo žiemos laikotarpiu. To priežastys yra vartotojų gyvenimo būdas bei pagrindinė – tamsus ir šviesus paros metas.

SE generacijos yra dvi: SE1 ir SE2. Saulės elektrinių generavimo grafikai vaizduojami 17 ir 18 paveiksluose.



17 pav. SE1 metinis generavimo grafikas



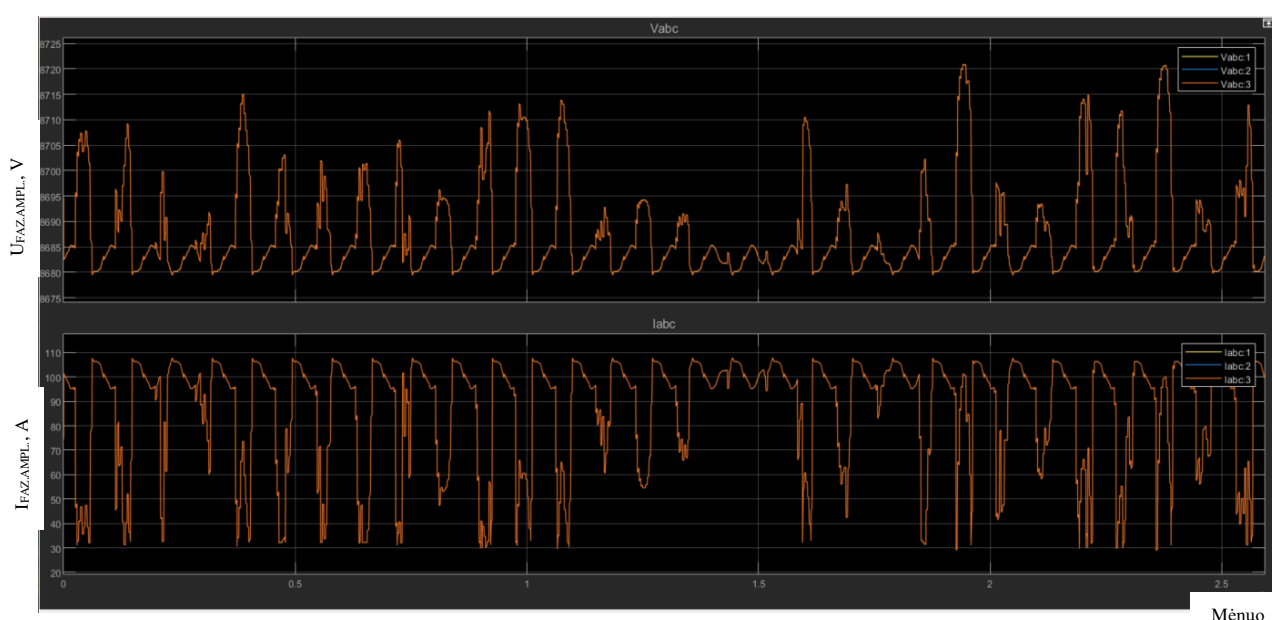
18 pav. SE2 metinis generavimo grafikas

Saulės elektrinių generavimo grafikų horizontali ašis atitinka laiką valandomis, vertikalioji ašis – generuojamą saulės energiją. Grafike matoma, kad SE1 yra didesnė generacija nei SE2, kas yra logiška, nes SE1 parkas yra didesnis savo instaliuotu galingumu. Žiemos laikotarpiu generacija yra lygi nuliui arba minimali, todėl šaltuoju metų sezonu elektros energiją dažniausiai tiekia tik tinklas.

3.2. Modeliavimo rezultatai be EKK

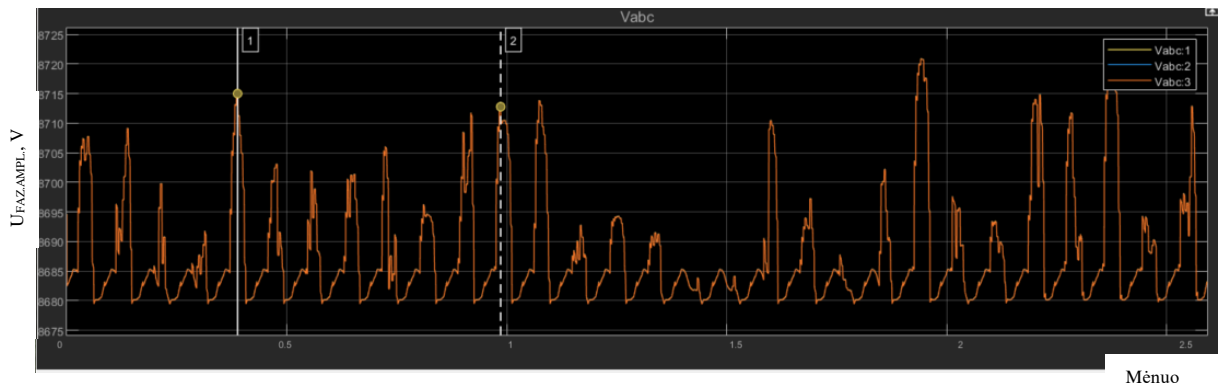
Modeliuojama situacija, kuomet skirstomasis tinklas dirba, kaip ir realiu metu, be EKK. Iš AB „Energijos skirstymo operatorius“ atstovų gauti duomenys, jog SE2 gali veikti tik 43% savo galimo pajėgumo dėl sugedusiuos ir netaisomos L-600 linijos nuo Priekulės TP iki Pk-602. Modelio ir skirstomojo tinklo elementų dydžiai, struktūrinės schemos aptartos antrame skyriuje. SE2 negali dirbti pilnu pajėgumu dėl įtampos kilimo visame tinkle. Sukurtas modelis padės įvertinti, kokie tai yra skirtumai ir ar galima tinkle būseną patobulinti.

Generuojami sausio mėnesio duomenys (19 pav.), kada saulės elektrinių generacija yra labai maža arba kartais – nulinė.



19 pav. Sausio mėnesio įtampos ir srovės nustatymas (be EKK)

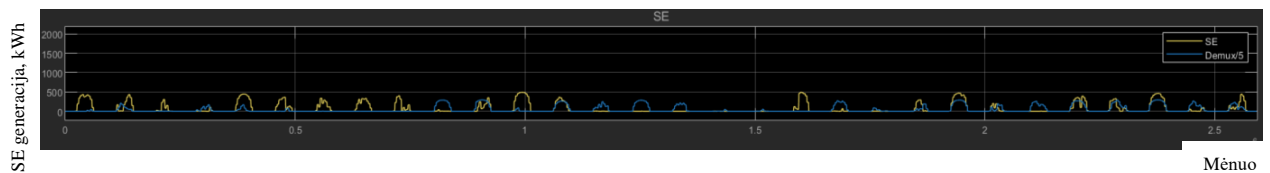
Pirmas grafikas yra transformatorinės Pk-709 fazinės amplitudinės įtampos dydžiai matuojami voltais, antrasis – srovės, matuojami amperais. Įtampos reikšmės neviršija galimos fazinės amplitudinės įtampos ribos $U_{FAZ.AMPL.MAX} = 8981$ V. Srovė, lygiai taip pat kaip įtampa, lyginant dienos ir nakties metą, stipriai skiriasi – šokinėja.



20 pav. Sausio mėnesio aukščiausios įtamos nustatymas (be EKK)

20 paveiksle išmatuota sausio mėnesio maksimalių taškų fazinės amplitudinės įtampa. Išmatuoti dyžiai yra: $U_{FAZ.AMPL.MAX1}=8,701$ kV, $U_{FAZ.AMPL.MAX2}=8,721$ kV. Neiviena reikšmė neviršija ribinės vertės.

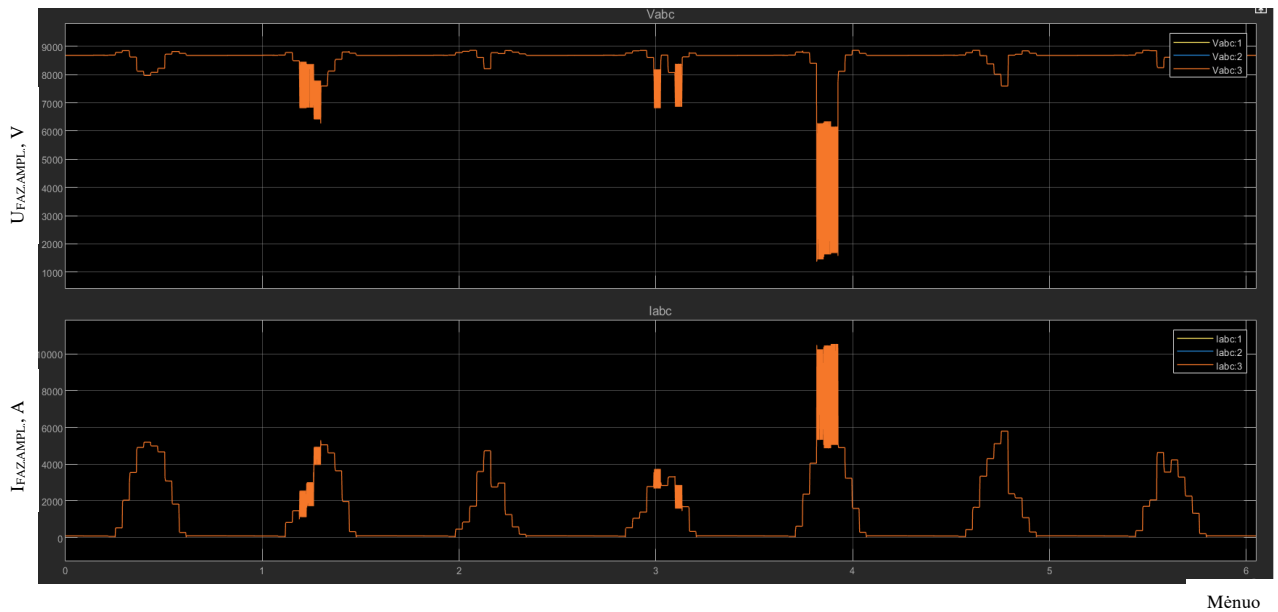
Tiriama saulės elektrinių generacija atsižvelgiant į SE instaliuotą galingumą, apšvietą. Kaip ir valandiniuose generacijos grafikuose, taip ir modelyje, matoma, kad abi SE kai kuriomis dienomis generuoja saulės energijos (21 pav.).



21 pav. Saulės elektrinių generacijos grafikas sausio mėnesį

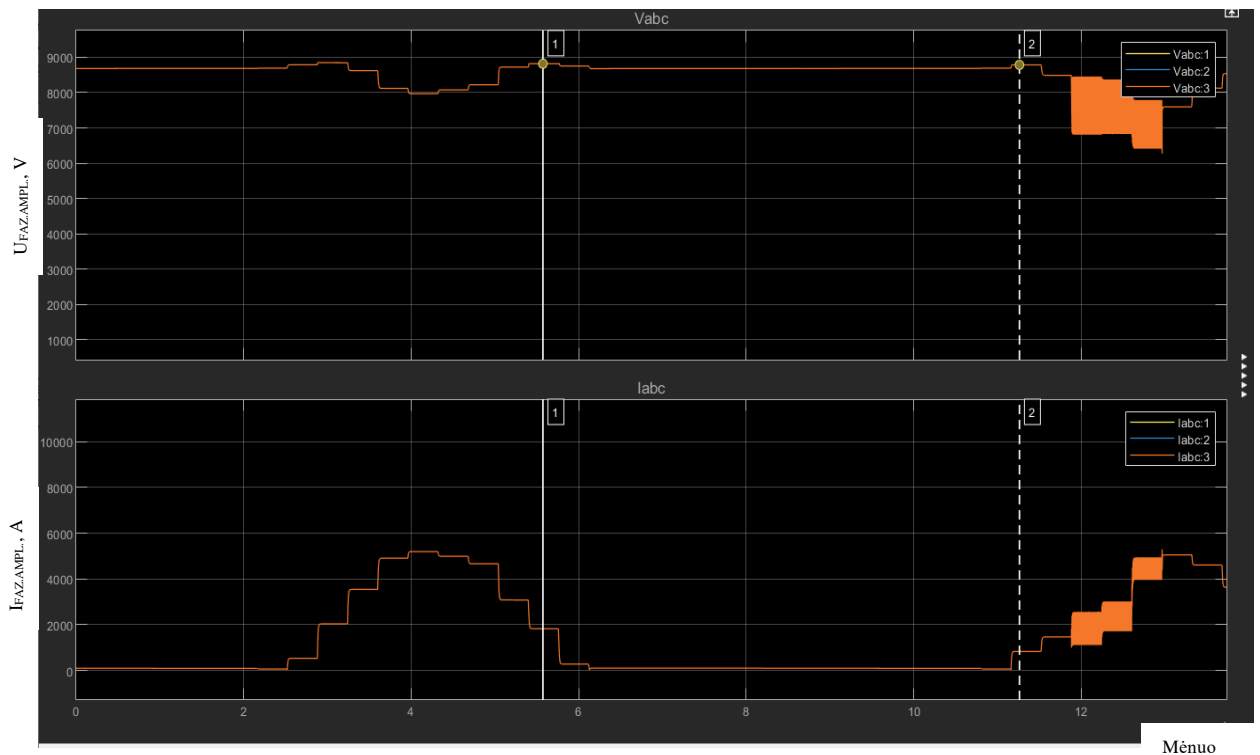
Horizontalioje ašyje atvaizduojamas mėnesio laikotarpis, vertikalioje ašyje sugeneruota energija kWh. Saulės elektrinių generuotos elektros energijos nepakanka visam gyvenamajam kvartalui. Geltona spalva žymimas SE1 generavimo pokytis, mėlyna spalva – SE2 generacija. Iš grafiko galima nustatyti, kad SE generuojama galia geriausiomis sausio mėnesio dienomis (labiausiai saulėtomis) nesiekia net 500 kWh.

Tiriamas liepos mėnesio laikotarpis, kuriame saulės elektrinių generacija turėtų stipriai išaugti dėl saulėtų dienų skaičiaus. Kaip ir sausio mėnesį, 22 paveiksle matuojama Pk-709 transformatorinėje esanti įtampa ir srovė bei nustatoma SE veikla, jeigu abi dirba 100% galimo pajėgumo.



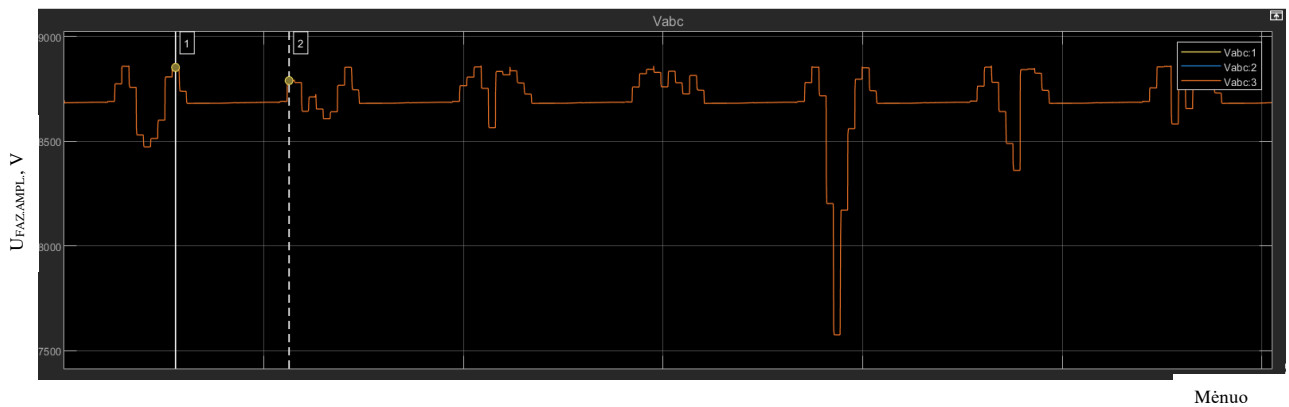
22 pav. Liepos mėnesio modeliavimas (be EKK)

Paveiksle matoma, kad fazinė amplitudinė įtampa yra arti maksimalios ribinės (pirmas grafikas) ir stipriai krenta. Viršyta ir minimali riba, kuri yra 7348 V, srovės reikšmė dažnu atveju lygi nuliui. Modelis sunkiai veikia ir iškraipo rezultatus. Kada diena buvo apniukusi ir SE negeneravo daug elektros energijos, įtampa krito, tačiau, kuomet SE generavimo maksimaliai, įtampa stipriai kilo. 23 paveiksle nustatomi maksimalūs įtampos taškai liepos mėnesio laikotarpiu.



23 pav. Liepos mėnesio aukščiausios įtampos verčių nustatymas

Grafike pažymėti taškai, kada įtampa liepos mėnesį buvo didžiausia. Išmatuoti dyžiai yra: $U_{FAZ.AMPL.1} = 8,997 \text{ kV}$, $U_{FAZ.AMPL.2} = 8,994 \text{ kV}$, tad fazinė amplitudinė įtampa viršija ribinę 8,981 kV. Kaip ir minėta aukščiau, SE2 realiu atveju veikia tik 43% savo galimo pajėgumo. 24 paveiksle vaizduojamas įtampos grafikas ir matavimas, kada nustatytas būtent toks SE2 veikimas.



24 pav. Įtampos matavimas, kai SE2 veikia 43% pajėgumu

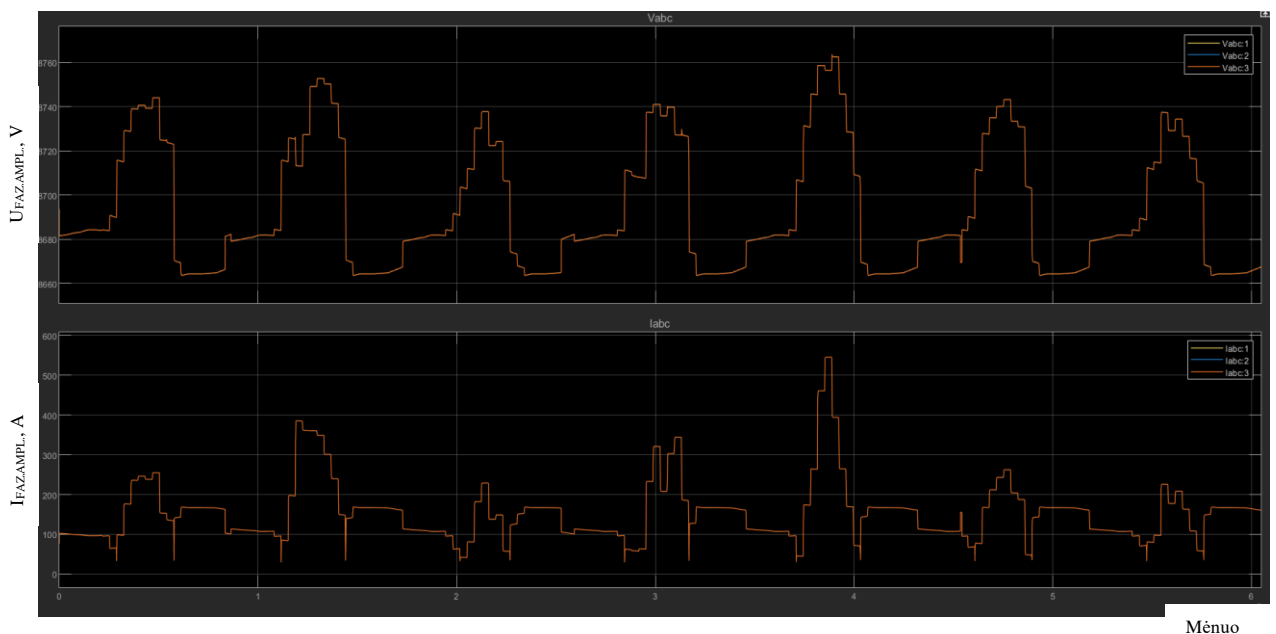
Matuojamos fazinės amplitudinės įtampos aukščiausiuose taškuose. Išmatuoti dyžiai yra: $U_{FAZ.AMPL.1}=8,912$ kV, $U_{FAZ.AMPL.2}=8,897$ kV, tad fazinė amplitudinė įtampa neviršija ribos 8,981 kV. Gavus rezultatus įrodyta, kad maksimalus SE2 generavimo pajėgumas gali būti tik 43% visos generacijos.

3.3. Modeliavimo rezultatai instaliavus EEK

Modelio pagrindinis tikslas – įgyvendinti išsikeltas sąlygas. Kaip ir minėta anksčiau, EEK turi:

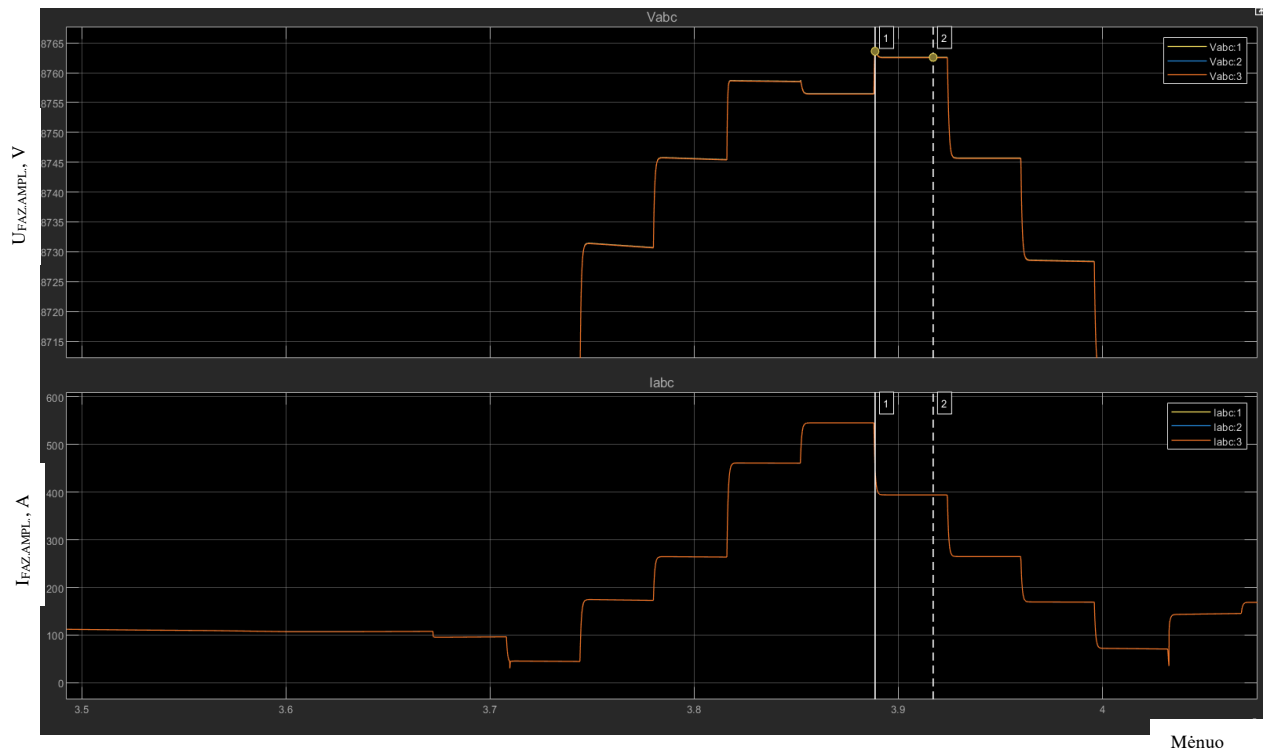
- įsikrauti, kai įtampa pasiekia ribinę vertę;
- įsikrauti, kai SE generacija yra didesnė nei sunaudojama elektros energija;
- išsikrauti, kai SE generacija yra mažesnė nei sunaudojama elektros energija;
- pasiekus būseną SOC 10% įsikrauti arba EKK būnant nepilnai įsikrovus, įkrauti naktį iš tinklo.

Sausio mėnesio matavimų atlikti nėra tikslinga, kadangi SE elektrinės įtaka skirstomajam tinklui nėra didelė ir tinklas gali pilnai funkcionuoti. Atliekami tik liepos mėnesio matavimai, kada įtampa (atvejuje be EEK) viršija leistinas ribas. 25 paveiksle matuojama įtampa ir srovė, kada SE veikia 100%.



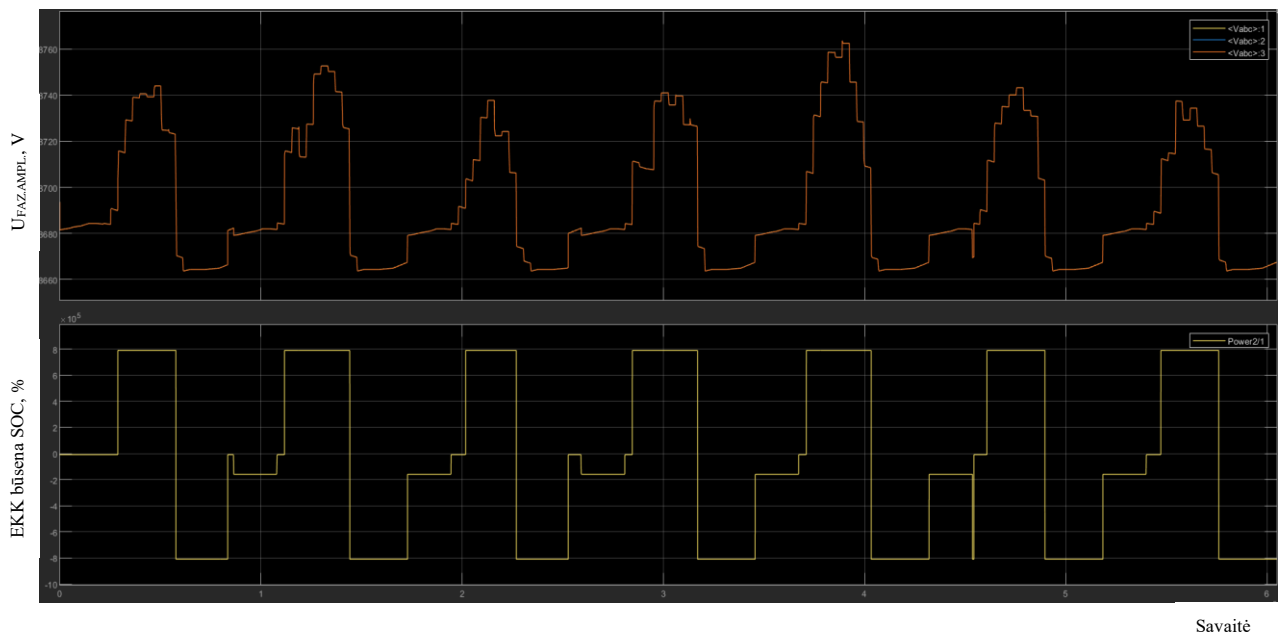
25 pav. Liepos mėnesio įtampos ir srovės matavimas (su EKK)

Įtampa yra arti ribinės, tačiau iš programos modelio parinktų režijų nustatyti reikšmes yra sunku. 26 paveiksle matuojama fazinė amplitudinė įtampa aukščiausiuose taškuose.



26 pav. Liepos mėnesio aukščiausios įtampos verčių nustatymas (su EKK)

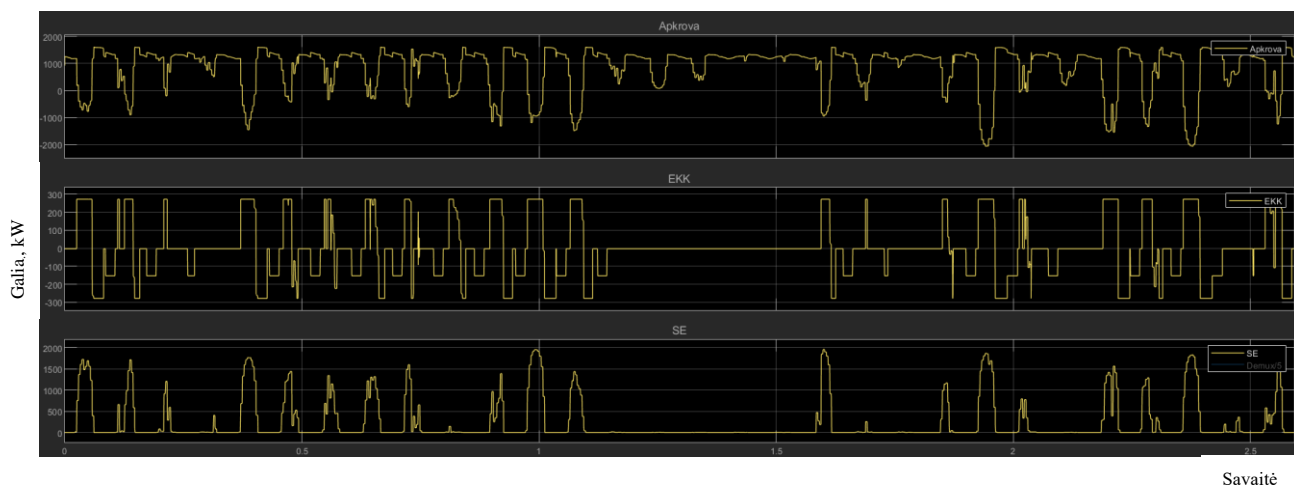
Matuojamos fazinės amplitudinės įtampos taškuose 1 ir 2. Išmatuoti dyžiai yra: $U_{FAZ.AMPL.1}=8,764$ kV, $U_{FAZ.AMPL.2}=8,763$ kV, tad įtampa neviršija ribos 8,981 kV. 27 paveiksle tikrinama, kaip EEK reaguoja į įtampos pokyčius.



27 pav. EEK reakcija įtampos pokyčius

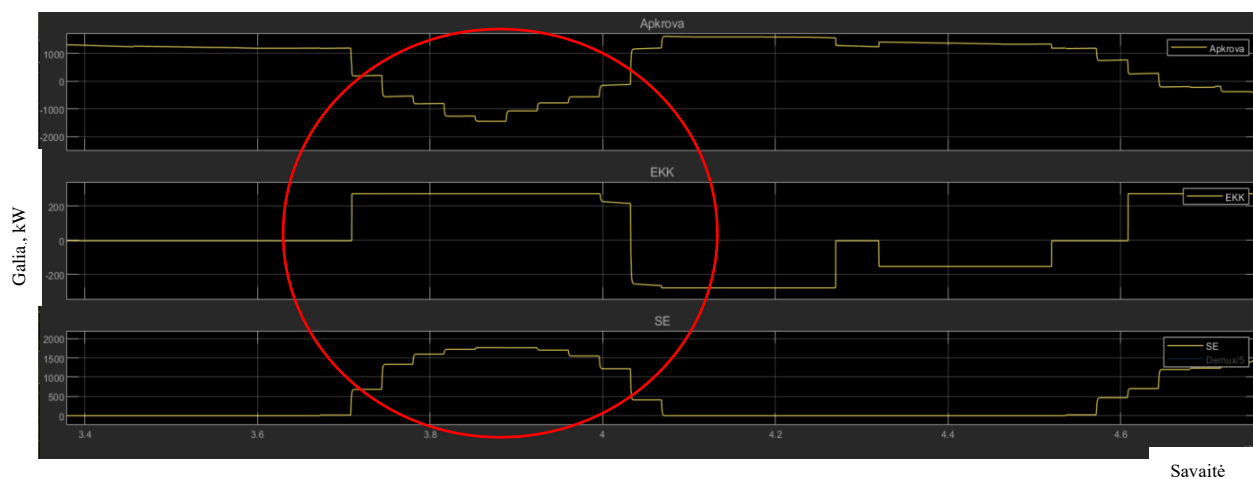
EEK reaguoja į įtampos pokyčius. Kadangi turi būti tenkinamos visos trys sąlygos, įsikrovimo/išsikrovimo procesas yra dažnas, tačiau, įtampa neviršija leistinos ribos, tad galima teigti, kad EEK pirmąją sąlygą tenkina.

Antrąją ir trečiąją sąlygas galima sujungti į vieną, kad EEK turi įsikrauti, kai SE generacija yra didesnė nei sunaudojama elektros energija bei išsikrauti, kada SE generacija yra mažesnė nei reikalinga energijos vartotojams. 28 paveiksle lyginami šie grafikai.



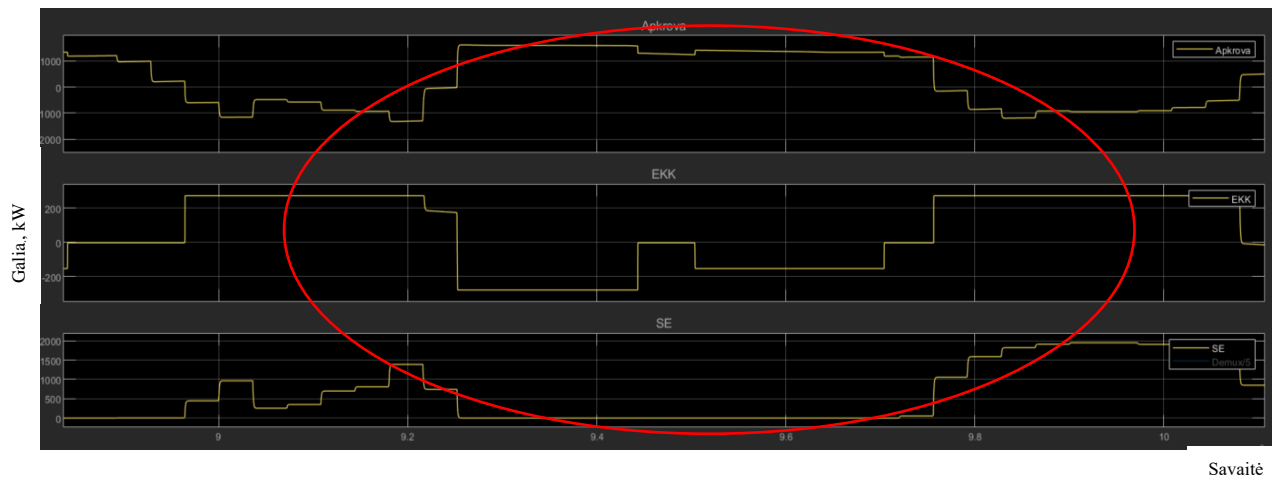
28 pav. Apkrovos, EEK ir SE būsenų lyginimas

Pirmajame grafike vaizduojama apkrova, antrajame kaupiklio įsikrovimas ir išsikrovimas, trečiajame SE generacija. Iš aukščiau pavaizduoto grafiko priartinama dvi vietas, kuriose atsispindi sąlygų įgyvendimas.



29 pav. Būsenų lyginimas, kai EEK įsikrauna priklausomai nuo SE generacijos

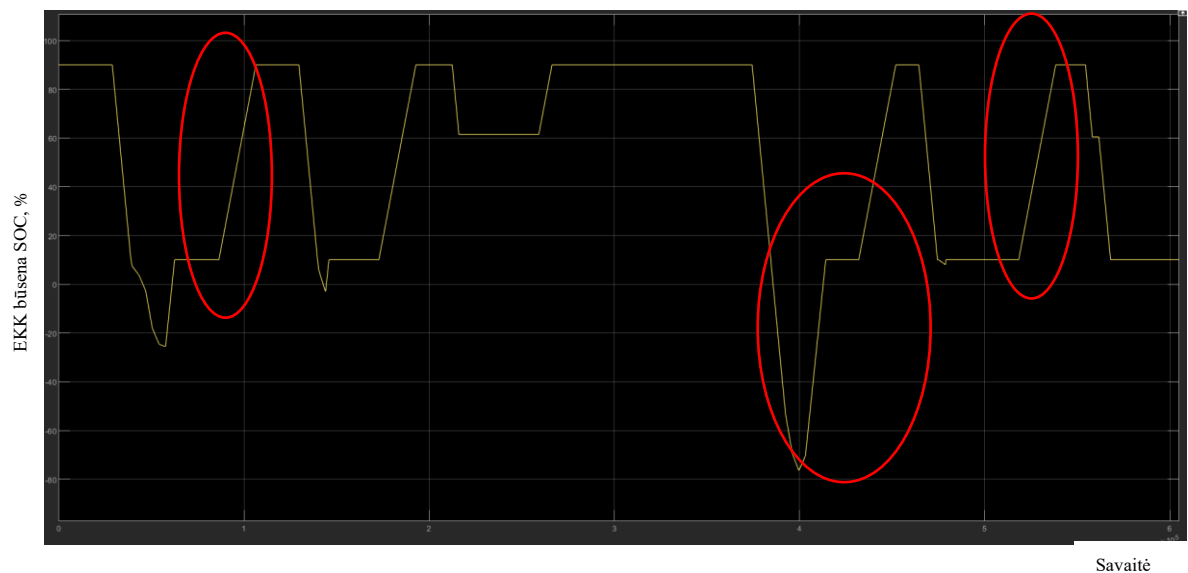
Raudonu ovalu pažymėta būsena, kada yra saulėta diena, o apkrova yra minimali, EEK įsikrauna, tad sąlyga yra tenkinama.



30 pav. Būsenų lyginimas, kai EEK išsikrauna, esant apkrovos padidėjimui

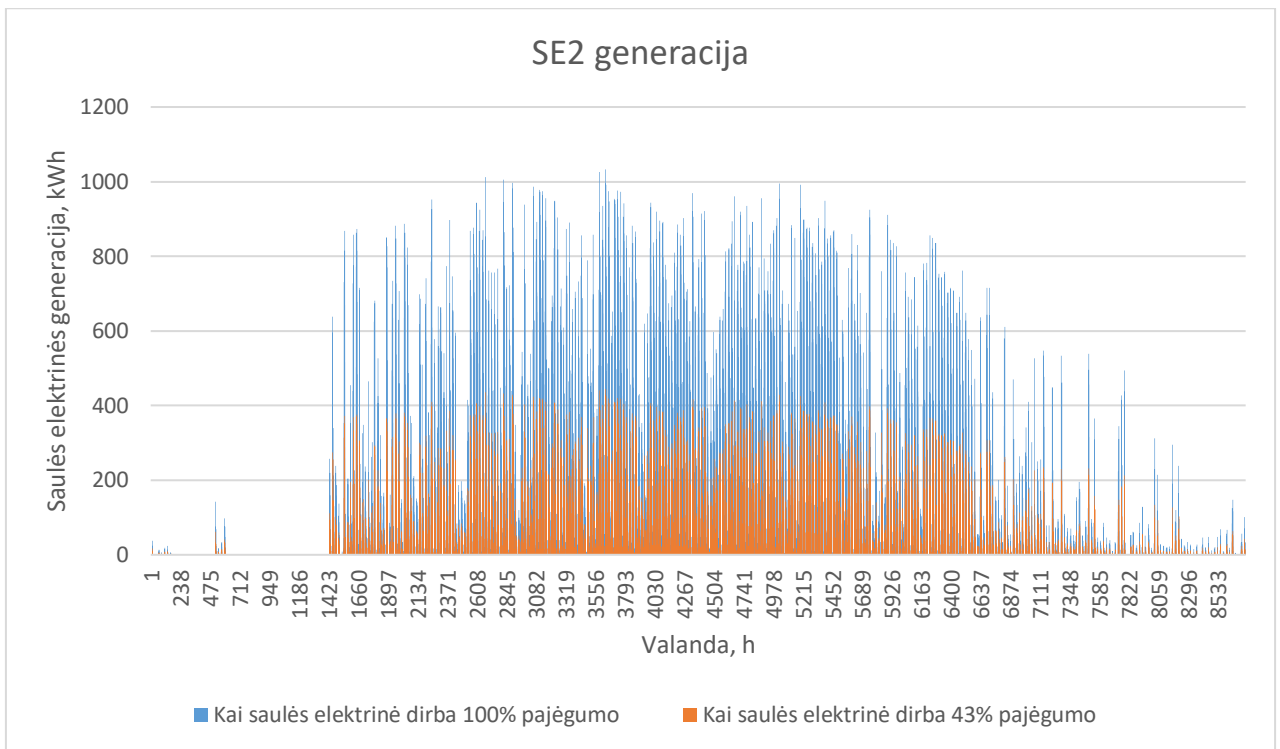
EEK išsikrauna, kada SE negeneruoja energijos, o apkrova yra didelė, tad sąlyga yra tenkinama.

Paskutinės sąlygos įrodymui, kad EEK įsikrauna naktį, kuomet apkrova yra minimali ir SE generacija lygi nuliui, matuojama savaitės režiuose 31 paveiksle.



31 pav. EEK įsikrovimas nakties metu

Skirstomojo tinklo modelyje, SE2 negali veikti pilnu pajėgumu. Vartotojas praranda dalį galimos sugeneruoti energijos dėl tinklo trūkumų, o EKK gali padėti to išvengti. 32 paveiksle vaizduojami sugeneruotos elektros energijos grafikai, kuomet SE2 dirba 100% ir 43% pajėgumais.



32 pav. SE2 generacija per metus

Pirmuoju atveju, SE2 per metus iš viso sugeneruoja 1049092 kWh energijos, antruoju – 451110 kWh. Generacija padidėja kovo mėnesį ir pradeda mažėti spalio mėnesį. Šiuo laikotarpiu generacija yra pastovi, todėl dirbant 100% režimu jau nuo kovo mėnesio įtampa viršija ribines vertes. Įrengus EKK, vartotojas papildomai galėtų sugeneruoti apie 597983 kWh elektros energijos.

Išvados

1. Išanalizuoti literatūros šaltiniai, aptartos pagrindinės problemos. Pagrindinė problema – į skirstomojo tinklo dalį instaliavus daug saulės elektrinių, įtampa kyla ir viršija ribas, todėl mažinami generacijos pajėgumai bei nuo to kenčia vartotojas.
2. Sumodeliuotas skirstomojo tinklo modelis, lyginami skirtingi metų laikotarpiai bei būsenos, kada tinkle yra instaliuotas EEK ir kada nėra. Išsikeltos sąlygos, kurias turi tenkinti valdymo algoritmas. EEK turi įsikrauti, kai įtampa pasiekia ribinę vertę, įsikrauti, kai SE yra didesnė nei vartotojų sunaudojama elektros energija, išsikrauti, kai SE generacija mažesnė nei sunaudojama energija ir įsikrauti naktį, jeigu $SOC \leq 10\%$ arba $SOC \leq 90\%$.
3. Sumodeliuotos situacijos su EKK ir be jo. Skirstomajame tinkle be EKK išmatuota sausio mėnesio fazinė amplitudinė įtampa $U_{FAZ.AMPL.1}$ ir $U_{FAZ.AMPL.2}$, kada abi SE dirba 100%. Nustatytos reikšmės $U_{FAZ.AMPL.1}=8,701$ kV, $U_{FAZ.AMPL.2}=8,721$ kV, kurios neviršija nustatytos ribinės reikšmės 8,981 kV. Tiriama rezultatai vasaros laikotarpiu (liepos mėnesį), kada SE generacija padidėja. Išmatuoti dyžiai yra: $U_{FAZ.AMPL.1}=8,997$ kV, $U_{FAZ.AMPL.1}=8,994$ kV, tad fazinė amplitudinė įtampa viršija maksimalią ribinę vertę 8,981 kV bei viršija minimalią vertę, kuri yra 7,348 kV. SE2 generavimo pajėgumą sumažinus iki 43%, gautos fazinės amplitudinės įtampos reikšmės yra $U_{FAZ.AMPL.1} = 8,912$ kV, $U_{FAZ.AMPL.2} = 8,897$ kV bei neviršija įtampos ribos.
4. Skirstomajame tinkle instaliavus EEK, sausio mėnesio matavimai neatliekami, kadangi ir be EKK tinklas dirba visu pajėgumu. Matuojamos fazinės amplitudinės įtampos reikšmės liepos mėnesio metu: $U_{FAZ.AMPL.1}=8,764$ kV, $U_{FAZ.AMPL.2}=8,763$ kV, tad fazinė amplitudinė įtampa neviršija ribos 8,981 kV. EEK reaguoja į įtampos padidėjimą ir įsikrauna. Kuomet apkrova yra minimali, o SE generacija yra didelė (dienos metu), EEK įsikrauna ir atvirkščiai, kuomet apkrova yra didelė, o SE generacija yra minimali – EEK išsikrauna. Kai SOC parametras pasiekia minimalią reikšmę, EEK įsikrauna iš tinklo, nakties metu.
5. Instaliuota SE2 galia yra 1238 kW, kadangi ji veikia tik 43%, SE2 maksimaliai gali sugeneruoti tik 532,34 kW, kas yra daugiau nei du kartus mažiau galimo pajėgumo. Per metus SE2 dirbant pilnu pajėgumu sugeneruoja 1049092 kWh energijos, antruoju atveju – 451110 kWh. Skirstomajame tinkle instaliavus EKK, papildomai būtų galima sugeneruoti apie 597983 kWh elektros energijos.

Literatūros sąrašas

1. BLINOV I., I. TRACH, Y. PARUS, V. KHOMENKO, V. KUCHANSKY, V. SHKARUPYLO. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* [interaktyvus]. Kharkiv, Ukraine, 2021, [žiūrėta 2023-05-18]. Prieiga per: IEEE Xplore.
2. ADOMAVIČIUS, Vytautas. *Mažosios atsinaujinančių išteklių energijos sistemos*. Kaunas: Technologija, 2013. ISBN 9786090209455.
3. GADALLA A. S., X. YAN, H. HASABELRASUL. Active Power Analysis for the Battery Energy Storage Systems Based on a Modern Cascaded Multilevel Converter. *2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)* [interaktyvus]. Beijing, China, 2018, [žiūrėta 2023-06-03]. Prieiga per: IEEE Xplore.
4. LIU Y., Y. YIN, B. SUN, K. LIN, Y. LI, F. WU, W. HUANG, R. JING. Coordinated Frequency Regulation Strategy of Pumped Storage Units and Battery Energy Storage System. *2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)* [interaktyvus]. Nanjing, China, 2021 [žiūrėta 2023-06-14]. Prieiga per: IEEE Xplore.
5. BRAVO C., S. MANDELLI, M. MERLO. Battery energy storage system for primary control reserve and energy arbitrage, vol. 6, 152-165, [žiūrėta: 2023-06-18]. Prieiga per: Science Direct.
6. Impact of High PV Penetration on Voltage Stability.[žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1771876> 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>
7. SVINKŪNAS, Gytis ir Algimantas NAVICKAS. *Elektros energetikos pagrindai*. Kaunas: Technologija, 2014. ISBN 9786090210017.
8. SHRIVASTAVA, Aayush., et al. Distribution Grid Parameter Variation due to Solar PV Power Integration. *International journal of renewable energy research*. 2020, vol. 10, no. 3.
9. KARIMI M., H. MOKHLIS, K. NAIDU, S. UDDIN, A.H.A. BAKAR. Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review. *Renewable and sustainable energy reviews* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering, 2016, vol. 53, 594-605 [žiūrėta 2023-10-07]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.
10. CHENG D, B. MATHER, R. SEGUIN, J. HAMBRICK, R. BROADWATER. Photovoltaic (PV) Impact Assessment for Very High Penetration Levels. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2016, vol. 6, 295 -300. ISSN 2156-3381.
11. MAVROMATIDISA G., K. OREHOUNIGA, J. CARMELIETA. A review of uncertainty characterisation approaches for the optimal design of distributed energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering, 2018, vol. 88, 258-277 [žiūrėta 2023-10-07]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.
12. KHARRAZI A., V. SREERAM, Y. MISHRA. Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network - A review. *Renewable and sustainable energy reviews* [interaktyvus]. The Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2020, vol. 120 [žiūrėta 2023-10-07]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.

13. HAQUE M., P. WOLFS. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures. *Renewable and sustainable energy reviews* [interaktyvus]. School of Engineering & Technology 2016, vol. 62, 1195-1208 [žiūrėta 2023-10-10]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.
14. PFENNINGER S., I. STAFFELL. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy* [interaktyvus]. Climate Policy Group, Department of Environmental Systems Science 2017, vol. 205, 1560-1570 [žiūrėta 2023-11-21]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: Science Direct.
15. KLINGER A. L., et al. Self-consumption with PV + Battery systems: A market diffusion model considering individual consumer behaviour and preferences. *Applied Energy* [interaktyvus]. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, 2016, vol. 114, 1251-1265 [žiūrėta 2023-11-19]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: Science Direct.
16. ZAKERI B., G. C. GISSEY, P. E. DODDS. Centralized vs. distributed energy storage e Benefits for residential users. *Energy* [interaktyvus]. A Energy, Climate, and Environment Program, International Institute for Applied Systems. 2021, vol. 236, 121443 [žiūrėta 2023-11-19]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: Science Direct.
17. STECCA M., L. R. ELIZONDO, T. B. SOEIRO, P. BAUER, P. PALENSKY. A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2020, vol. 1, 46-65. ISSN 2644-1284.
18. ATONIADOU-PLYTARIA E. K., I. N. KOUVELIOTIS-LYSIKATOS, P. S. GEORGILAKIS, N. D. HATZIARGYRIOU. Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017, 2999-3008. ISSN 1949-3061.
19. KULMALA A., S. REPO, P. JARVENTAUSTA. Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Including Several Distributed Energy Resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014, 2010-2020. ISSN 1949-3061.
20. ABESSI A., V. VAHIDINASAB, M. S. GHAZIZADEH. Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, 178-188. ISSN 1949-3061.
21. ZHANG Y., S. REN, Z. Y. DONG, Y. XU, K. MENG, Y. ZHENG. Optimal placement of battery energy storage in distribution networks considering conservation voltage reduction and stochastic load composition. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017, 11, 3862-3870. ISSN 1751-8687.
22. AWAD S. A. A., T. H. M. EL-FOULY; M. M. A. SALAMA. Optimal ESS Allocation for Load Management Application. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015, 30, 327-336. ISSN 1558-0679.
23. ADEWUMI BABATUNDE O., G. FOTIS, V. VITA, D. NANKOO, L. EKONOMOU. The Impact of Distributed Energy Storage on Distribution and Transmission Networks' Power Quality. *Department of Electrical and Electronic Engineering* [interaktyvus]. University of London, 2022, vol. 12 [žiūrėta 2023-11-28]. doi: 10.3390/app12136466.
24. SABOORI H., R. HEMMATI, M. A. JIRDEHI. Reliability improvement in radial electrical distribution network by optimal planning of energy storage systems. *Energy* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology. 20215, vol. 93, 2299-2312 [žiūrėta 2023-12-02]. ISSN 0360-5442. Prieiga per: Science Direct.

25. RAHMANN C., B. MAC-CLURE, V. VITTAL, F. VALENCIA. Break-Even Points of Battery Energy Storage Systems for Peak Shaving Applications. *Energy Storage and Application* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering, University of Chile, 2017, vol. 10(7), 833 [žiūrėta 2023-12-03]. doi: 10.3390/en10070833
26. ZHANG S., R. MARTINS M. GUL, P. MUSILEK. Economy of residential photovoltaic generation and battery energy storage in Alberta, Canada. Iš: 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), October 22-25, Saskatoon, SK, Canada. IEEE Xplore, 2018, ISBN 978-1-5386-0817-3.
27. LI X., R. MA, W. GAN, S. YAN. Optimal Dispatch for Battery Energy Storage Station in Distribution Network Considering Voltage Distribution Improvement and Peak Load Shifting. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* [interaktyvus]. China, October 2020, vol 10 (1), 131-139 [žiūrėta 2023-12-05]. doi: 10.35833/MPCE.2020.000183
28. PLUMMER, I. Assymetry in distribution systems: causes, harmful effects and remedies. Iš: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, May, 2011, Louisiana, USA. 2011. PP-6-12.
29. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. [O3E-138]. Nutarimas dėl bendrųjų techninių reikalavimų, nustatytų pagal 2016 m. rugpjūčio 26 d. Europos komisijos reglamentą (es) 2016/1447 dėl tinklo kodekso, kuriame nustatomi aukštosios įtampos nuolatinės srovės sistemų ir nuolatinės srovės linija jungiamų elektros jėgainių parko modulių prijungimo prie tinklo reikalavimai, patvirtinimo. Vilnius: Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2019.
30. KHATEVSKIY K. V., A. I. ANTONOV, T. V. GONEKO, V. F. KHATSECKIY. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load. 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) [interaktyvus]. November 14-16, Omsk, Russia [žiūrėta 2023-11-12]. ISBN: 978-1-5386-1820-2. Prieiga per: IEEE Xplore.
31. TUNG Y., T.WEI TSAI; Y. MING CHEN; Y. DER LEE; Y. RUEI CHANG. The reverse zero-sequence current compensation strategy for back-to-back active power conditioners. Iš: 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 18-22, 2016, Milwaukee, USA. IEEE Xplore, 2017.
32. MATTHISS B., A. MOMENIFARAHANI, J. BINDER. Storage Placement and Sizing in a Distribution Grid with High PV Generation. Iš: 20 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2020), November 13, 2021, Madrid, Spain. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart, Germany, 2021. pp. 303.
33. DAS K. C., O. BASS, G. KOTHAPALLI, T. S. MAHMOUD, D. HABIBI. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. School of Engineering, Edith Cowan University, Australia. 2016, vol. 91, 1205-1230 [žiūrėta 2023-12-15]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.
34. ZIDAR, MATIJA, et al. Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research. *The Institution of Engineering and Technology*. 2016, 10 (3), 645-652. ISSN 1751-8687.

35. NICK M., R. CHERKAOUI, M PAOLONE. Optimal Planning of Distributed Energy Storage Systems in Active Distribution Networks Embedding Grid Reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems* [interaktyvus]. 2018, vol. 33 (2). ISSN 1558-0679. Prieiga per: IEEE Xplore.
36. WANG C., G. SONG, P. LI, H. JI, J. ZHAO, J. WU. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks. *Applied Energy* [interaktyvus]. Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, China. 2017, vol. 189, 301-309 [žiūrėta 2024-01-12]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: Science Direct.
37. LONG C., J. WU, L. THOMAS, N. JENKINS. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation. *Applied Energy* [interaktyvus]. Institute of Energy, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff. 2016, vol. 184, 427-437 [žiūrėta 2024-01-12]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: Science Direct.
38. BAI L., T. JIANG, F. LI, G. CHEN, X. LI. Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability. *Applied Energy* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Tennessee, Knoxville, USA. 2017, vol. 210, 1082-1091 [žiūrėta 2024-01-3]. ISSN 0306-2619. Prieiga per: Science Direct.
39. DOROSTKAR-GHAMSARI R. M., M. FOTUHI-FIRUZABAD, M. LEHTONEN, A. SAFDARIAN. Value of Distribution Network Reconfiguration in Presence of Renewable Energy Resources. *IEEE Transactions on Power Systems* [interaktyvus]. 2016, vol 31(3). ISSN 1558-0679. Prieiga per: IEEE Xplore.
40. GRILLO S., A. PIEVATOLO, E. TIRONI. Optimal Storage Scheduling Using Markov Decision Processes. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* [interaktyvus]. Milan, Italy, 2016, vol. 7(2), 755-764 [žiūrėta 2024-02-16]. Prieiga per: IEEE Xplore.
41. MOTALLEB M., E. REIHANI, R. GHORBANI. Optimal placement and sizing of the storage supporting transmission and distribution networks. *Renewable energy* [interaktyvus]. Renewable Energy Design Laboratory (REDLab), Department of Mechanical Engineering, University of Hawai'i Manoa, Honolulu. 2015, vol 94, 651-659 [žiūrėta 2024-02-25]. ISSN 0960-1481. Prieiga per: Science Direct.
42. SABOORI H., R. HEMMATI, S. M. GHIASI, S. DEHGHAN. Energy storage planning in electric power distribution networks – A state of the-art review. *Renewable and Sustainable Energy reviews* [interaktyvus]. Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. 2016, vol. 79, 1108-1121 [žiūrėta 2024-03-02]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: Science Direct.
43. RUFER, Alfred. Energy storage systems and components. New York: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business., 2018. ISBN 978-1-138-08262-5.