



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Elektros energijos tiekimo ribojimų analizė, siekiant padidinti
atsinaujinančių energijos išteklių gamybos dalį**

Baigiamasis magistro projektas

Laurynas Lazauskas

Projekto autorius

Vyr. lekt. Vaišnorienė Aistija

Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros energijos tiekimo ribojimų analizė, siekiant padidinti atsinaujinančių energijos išteklių gamybos dalį

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Laurynas Lazauskas

Projekto autorius

Vyr. lekt. Vaišnorienė Aistija

Vadovė

Doc. Eimantas Neniškis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laurynas Lazauskas

Elektros energijos tiekimo ribojimų analizė, siekiant padidinti atsinaujinančių energijos išteklių gamybos dalį

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;
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 Lazauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Lazauskas, Laurynas. Elektros energijos tiekimo ribojimų analizė, siekiant padidinti atsinaujinančių energijos išteklių gamybos dalį. Magistro baigiamasis projektas / vadovė vyr. lekt. dr. Aistija Vaišnorienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos ištekliai, AEI ribojimai, 110 kV perdavimo tinklas, galios srautų analizė, PSS/E, tinklo pralaidumas, baterijų energijos kaupimo sistema, BESS, tinklo stiprinimas, elektromobilių lankstumas.

Kaunas, 2026. 60 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame projekte analizuojama, kaip 110 kV perdavimo tinklo techniniai ribojimai gali riboti atsinaujinančių energijos išteklių integraciją. Tyrimui sudarytas supaprastintas 110 kV tinklo zonos modelis PSS/E aplinkoje ir atlikta stacionari galios srautų analizė. Darbe vertinami skirtingi tinklo darbo režimai ir AEI plėtros scenarijai. Nustačius kritinį režimą, palygintos trys ribojimų mažinimo priemonės: baterijų energijos kaupimo sistema, tinklo stiprinimas ir elektromobilių įkrovimo lankstumas.

Rezultatai parodė, kad pagrindiniai ribojimai nagrinėjamoje zonoje kyla dėl 110 kV linijų pralaidumo. Techniniu požiūriu ribojimus gali pašalinti tiek BESS, tiek kritinių linijų stiprinimas, tačiau orientacinė ekonominė analizė parodė, kad racionaliausia priemonė yra tinklo pralaidumo didinimas. EV lankstumo poveikis priklauso nuo prijungimo vietos, todėl netinkamai parinkta lanksti apkrova gali ribojimų nesumažinti.

Lazauskas, Laurynas. Analysis of Electricity Supply Constraints to Increase Share of Renewable Energy Generation. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. pract. dr. Aistija Vaišnorienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: renewable energy sources, RES curtailment, 110 kV transmission grid, power flow analysis, PSS/E, grid capacity, battery energy storage system, BESS, grid reinforcement, electric vehicle flexibility.

Kaunas, 2026. 60 p.

Summary

This master's thesis analyses how technical constraints in a 110 kV transmission network can limit the integration of renewable energy sources. A simplified model of 110 kV network area was developed in the PSS/E environment, and a steady-state power flow analysis was performed. The study evaluates different network operating conditions and renewable energy expansion scenarios. After identifying the critical operating regime, three mitigation measures were compared: a battery energy storage system, network reinforcement, and electric vehicle charging flexibility.

The results show that the main constraints in the analyzed network area are caused by the limited capacity of 110 kV lines. From a technical perspective, both BESS and reinforcement of critical lines can eliminate the constraints. However, the indicative economic analysis shows that increasing network capacity is the most rational measure. The impact of EV flexibility depends strongly on its connection point; therefore, incorrectly located flexible demand may fail to reduce network constraints.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Naudojamų trumpinių sąrašas	9
Įvadas.....	12
1. AEI ribojimų priežastys ir mažinimo priemonės	14
1.1. Kaupimo ir lankstumo priemonių integracija.....	18
1.2. Tinklo pralaidumo didinimas.....	19
1.3. Elektromobilių ir V2G integracija.....	20
2. AEI generacijos ribojimų 110 kV perdavimo tinkle tyrimo metodika.....	23
2.1. Tyrimo etapai.....	24
2.2. Modeliuojama sistema ir tyrimo ribos.....	24
2.3. Duomenų šaltiniai ir prielaidos	26
2.4. Režimų parinkimo principai	27
2.5. Scenarijų sudarymo metodika	27
2.6. Techniniai ir ekonominiai vertinimo kriterijai (KPI)	28
2.7. Rezultatų palyginimo metodas	30
3. AEI generacijos ribojimų 110 kV perdavimo tinkle modeliavimo rezultatai ir mažinimo priemonių palyginimas.....	31
3.1. Modeliuojama sistema ir jos supaprastinimo logika	31
3.2. Modelio aprašas.....	32
3.3. Modeliuoti režimai ir scenarijai.....	34
3.3.1. S0 scenarijaus analizė.....	35
3.3.2. S1 scenarijus - AEI plėtra iki ribojimo.....	36
3.3.3. Kritinio AEI lygio ir kritinių elementų suvestinė.....	38
3.3.4. S2: BESS poveikis ribojimams	39
3.3.5. S3 scenarijus - tinklo stiprinimas	40
3.3.6. S4 scenarijus - EV lankstumas	41
3.4. Techniniai KPI ir rezultatų palyginimas.....	42
3.4.1. Bendras scenarijų techninis palyginimas.....	43
3.5. Priemonių techninė-ekonominė analizė	43
3.5.1. Rezultatų interpretavimas	45
3.5.2. Tyrimo ribotumai.....	46
3.5.3. Ekonominio vertinimo prielaidos	46
3.5.4. Alternatyvų kaštų analizė	49
3.5.5. Alternatyva S3-REC: Oro linijų rekonstrukcija	50
3.5.6. Alternatyva S3-NEW: Nauja paralelinė oro linija.....	51
3.5.7. Daugiakritinė jautrumo analizė	52
3.5.8. Socialinės-ekonominės naudos (angl. <i>co-benefits</i>) kiekybinis įvertinimas.....	53
Išvados	56
Literatūros sąrašas	58

Paveikslų sąrašas

1 pav. Mažai anglies dioksido išskiriančios elektros energijos sistemos optimizavimo modelio schema [8]. Paveiksle pateiktas modelis atskleidžia, kad AEI integracija turi būti vertinama kartu su tinklo investicijomis, kaupimo sistemų valdymu, emisijų mažinimu ir tradicinės generacijos pertvarka.	14
2 pav. Įrenginių išėjimo galios ir apkrovos palyginimas tarp skirtingų atvejų [8].	15
3 pav. GESS įkrovimo ir iškrovimo laikas 5-ajame scenarijuje [8].	16
4 pav. Anglies dioksido emisijų sumažėjimas skirtingais atvejais [8].	17
5 pav. Anglies dioksido emisijų mažinimas ir sąnaudos [8].	18
6 pav. Tinklo topologija ir plėtra 2010, 2020, 2035 ir 2050 metams [1].	20
7 pav. Integruotos energetikos sistemos metodologinė schema, apimanti AEI, elektromobilius ir tinklo dinamiką [6].	21
8 pav. Pagrindinės kilpos, identifikuojančios svertinius taškus ir galimus sistemos archetipus [7].	22
9 pav. PSS/E modelio pavyzdys [27].	23
10 pav. Vakarinės Lietuvos dalies perdavimo tinklo generacijos pralaidumų žemėlapis [28].	25
11 pav. LITGRID sistemos duomenys [28].	26
12 pav. Supaprastinta 110 kV perdavimo tinklo zona	32
13 pav. AEI plėtros analizės rezultatai.	38
14 pav. BESS scenarijų analizė.	40

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Tiriamųjų scenarijų aprašymas.....	28
2 lentelė. Pagrindiniai vertinimo rodikliai	29
3 lentelė. Modelio aprašas.....	32
4 lentelė. Modelio topologija	33
5 lentelė. Pagrindiniai duomenų šaltiniai ir jų panaudojimas	33
6 lentelė. Tiriamieji režimai	34
7 lentelė. Režimų sudarymo logika pagal modelio mazgus.....	34
8 lentelė. Tiriamųjų scenarijų logika.....	35
9 lentelė. S0 scenarijų analizės rezultatai.....	35
10 lentelė. S1 AEI plėtros analizės rezultatai.....	36
11 lentelė. Kritinio AEI lygio ir kritinių elementų suvestinė.....	38
12 lentelė. S2 BESS scenarijų analizė.....	39
13 lentelė. S3 tinklo stiprinimo scenarijų analizė	40
14 lentelė. S4 EV lankstumo scenarijų analizė	41
15 lentelė. Pagrindiniai techniniai ir ekonominiai KPI.....	42
16 lentelė. Bendras scenarijų techninis palyginimas.....	43
17 lentelė. Duomenys ekonominei analizei	44
18 lentelė. Kritinio režimo trukmės jautrumo scenarijai.....	45
19 lentelė. Ekonominių skaičiavimų prielaidų suvestinė.....	47
20 lentelė. S2-BESS CAPEX sudedamosios dalys	50
21 lentelė. Gyvavimo ciklo kaštų analizė ir pagrindiniai rezultatai.....	51
22 lentelė. Paramos scenarijų poveikis S2-BESS ekonominiams rodikliams	52
23 lentelė. Parametrinė jautrumo analizė	52
24 lentelė. CO ₂ emisijų mažinimo nauda pagal kritinio režimo trukmę	53
25 lentelė. Socialinės-ekonominės naudos vertinimo apimtis	54
26 lentelė. Alternatyvų techninis-ekonominis palyginimas	54

Naudojamų trumpinių sąrašas

AEI - atsinaujinantys energijos ištekliai

BESS - baterijų energijos kaupimo sistema (*Battery Energy Storage System*)

CAPEX - investicinės sąnaudos (*Capital Expenditure*)

CFPP - anglimi kūrenama elektrinė (*Coal-Fired Power Plant*)

CO₂ - anglies dioksidas

C_AEI - priemonės sąnaudų rodiklis vienam sumažintam AEI ribojimui (€/MWh), pagal (1) formulę

C_loss - prarastos (ribojamos) energijos ekonominė vertė, pagal (2) formulę

ΔE_curt - metinis ribojimo sumažėjimas (MWh/metus)

E_curt - ribojama energija (MWh)

ENTSO-E - Europos elektros perdavimo sistemos operatorių tinklas (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*)

ES - Europos Sąjunga

EV - elektromobiliai (*Electric Vehicles*)

GESS - tinklo energijos kaupimo sistema (*Grid Energy Storage System*)

IEA - Tarptautinė energetikos agentūra (*International Energy Agency*)

JRC - Europos Komisijos Jungtinis tyrimų centras (*Joint Research Centre*)

kV - kilovoltai

KPI - pagrindiniai vertinimo rodikliai (*Key Performance Indicators*)

Litgrid - Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatorius („Litgrid AB“)

M\$ - milijonai JAV dolerių

Mton - milijonai tonų

MWh - megavatvalandės

MW - megavatai

NREL - JAV Nacionalinė atsinaujinančios energijos laboratorija (*National Renewable Energy Laboratory*)

P2G - energijos konvertavimas į dujas (*Power-to-Gas*)

P_el - vidutinė elektros energijos kaina (€/MWh)

PSE - Lenkijos perdavimo sistemos operatorius (*Polish TSO*, „Polskie Sieci Elektroenergetyczne“)

p.u. - per vieneta, santykinis dydis (*per unit*)

PV - fotovoltinė energija (*Photovoltaics*)

PVGIS - fotovoltinės geografinės informacijos sistema (*Photovoltaic Geographical Information System*)

PSS/E - „Siemens PTI“ elektros sistemų modeliavimo programinė įranga (*Power System Simulator for Engineering*)

ŠESD - šiltnamio efektą sukeliančios dujos

TSO - perdavimo sistemos operatorius (*Transmission System Operator*)

TYNDP - dešimties metų tinklo plėtros planas (*Ten-Year Network Development Plan*)

V2G - transporto priemonė-tinklas (*Vehicle-to-Grid*)

NPV - grynoji dabartinė vertė (Net Present Value)

EAC - lygiavertis metinis kaštas (Equivalent Annual Cost)

LCOS - suvestinis energijos kaupimo kaštas (Levelized Cost of Storage)

LCC - gyvavimo ciklo kaštai (Life Cycle Cost)

OPEX - veiklos sąnaudos / eksploatacinės sąnaudos (Operational Expenditure)

WACC - vidutinė svertinė kapitalo kaina (Weighted Average Cost of Capital)

RTE - pilno ciklo efektyvumas (Round-Trip Efficiency)

EU ETS - Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų prekybos sistema (European Union Emissions Trading System)

EEA - Europos aplinkos agentūra (European Environment Agency)

NECP - Nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas (National Energy and Climate Plan)

CEF - Europos infrastruktūros tinklų priemonė (Connecting Europe Facility)

RRF - Ekonomikos gaivinimo ir atsparumo didinimo priemonė (Recovery and Resilience Facility)

BOP - pagalbinių elektrinės įranga ir darbai (Balance of Plant)

PCS - galios konversijos sistema (Power Conversion System)

LFP - ličio geležies fosfato baterijų technologija (Lithium Iron Phosphate)

CATL - baterijų gamintojas „Contemporary Amperex Technology Co. Limited“

BYD - baterijų ir elektromobilių gamintojas „BYD Company Limited“

ECB - Europos Centrinis Bankas (European Central Bank)

RAW - PSS/E tinklo modelio duomenų failo formatas

RATE1 - PSS/E linijos ilgalaikė leistina apkrovos riba

SOC - kaupiklio įkrovos būseną (State of Charge)

Įvadas

Klimato kaita šiandien yra vienas didžiausių globalių iššūkių, verčiantis valstybes ir energetikos sektorių imtis esminių pertvarkų. Atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) plėtra laikoma kertine strategija, siekiant sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijas ir pasiekti Europos Sąjungos (ES) užsibrėžtus klimato tikslus. 2015 m. Paryžiaus susitarime ES įsipareigojo apriboti pasaulinės temperatūros kilimą iki 1,5 °C, o iki šio amžiaus vidurio siekti anglies dioksido neutralumo [44]. Šiuos tikslus dar labiau įtvirtino 2021 m. priimta Europos klimato teisė, kuri įpareigoja ES iki 2030 m. sumažinti ŠESD emisijas bent 55 %, palyginti su 1990 m. lygiu, ir užtikrinti klimato neutralumą iki 2050 m. [45]. Tai tapo pagrindu spartesnei AEI plėtrai visose ES valstybėse narėse.

Vis dėlto AEI plėtra išryškino esminę problemą: elektros tinklų infrastruktūros, balansavimo pajėgumų ir kitų elektros gamybos šaltinių valdymo ribojimus. Literatūroje pabrėžiama, kad AEI generacijos ribojimai atsiranda tada, kai sistemoje sutampa didelė nepastovi generacija, ribotas perdavimo tinklo pralaidumas, maža momentinė paklausa ir nepakankamas eksploatacinis lankstumas [1, 2, 3, 4]. Tai reiškia, kad dalis pagamintos žaliosios energijos lieka nepanaudota, o tai stabdo AEI plėtrą ir mažina investicinį patrauklumą.

Lietuvos kontekste ši problema kol kas pasireiškia silpniau nei kai kuriose Vakarų ar Vidurio Europos šalyse, tačiau jos aktualumas sparčiai didėja. „Litgrid“ duomenimis, ypač sparčiai auga saulės elektrinių prijungimo mastas, todėl regioniniai tinklo pralaidumo klausimai ir balansavimo pajėgumai artimiausiais metais gali tapti viena svarbiausių AEI integracijos kliūčių [5].

Kitų šalių patirtis rodo, kad AEI integracijai nepakanka vien naujų generacijos pajėgumų prijungimo. Kai saulės ar vėjo generacija sparčiai didėja, mažiau lankstūs iškastinio kuro blokai gali tapti papildomu sistemos apribojimu, todėl turi būti peržiūrimas jų apkrovimas, veikimo valandos ir balansavimo vaidmuo [8, 9, 21]. Lenkijos ir kitų regiono valstybių patirtis taip pat rodo, kad be tinklo modernizacijos ir aiškių eksploatavimo taisyklių AEI prioritetas praktikoje lieka ribotas. Li ir bendraautorai [4] pabrėžia, kad AEI plėtrai būtina ne tik tinklo plėtra, bet ir koordinuotas sisteminių apribojimų valdymas, o Lietuvos atveju papildomą reikšmę įgauna regioniniai pralaidumo „butelio kakliukai“ ir sparčiai augantys prijungimo poreikiai [5].

Grįžtant prie Lietuvos, kol kas AEI generacijos ribojimas tinklo stabilumui užtikrinti nėra dažnas reiškinys, tačiau AEI augant ir tinklo plėtros tempams atsiliekant, ši problema gali tapti opi. Kita vertus, Lietuvoje taip pat trūksta praktikos, kaip riboti kitų šaltinių (pvz., dujinių ar biokuro elektrinių) generaciją AEI naudai. Praktikoje tai reiškia, kad norint sudaryti palankias sąlygas AEI plėtrai, Lietuvai teks spręsti ne tik AEI ribojimo klausimus, bet ir ieškoti būdų, kaip strategiškai riboti tradicinių šaltinių gamybą dienos metu, kai AEI generacija būna didžiausia.

Apibendrinant galima teigti, kad Lietuvos sąlygomis esminė kliūtis sparčiau didinti AEI dalį tampa ne vien naujų elektrinių prijungimas, bet ir perdavimo tinklo gebėjimas priimti bei persikirstyti papildomą saulės ir vėjo generaciją. Todėl šiame darbe nagrinėjami ne vartotojų aprūpinimo patikimumo sutrikimai, o techniniai perdavimo tinklo ribojimai, lemiantys AEI generacijos ribojimą ir apribojantys tolesnę AEI integraciją.

Darbo tikslas - įvertinti, kaip 110 kV perdavimo tinklo pralaidumo ir skirtingų darbo režimų apribojimai lemia AEI generacijos ribojimą, ir nustatyti, kurios techninės bei ekonominės priemonės

yra tinkamiausios šiems ribojimams mažinti, siekiant padidinti atsinaujinančių energijos išteklių gamybos dalį elektros sistemoje.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę ir institucinę literatūrą apie elektros energijos tiekimo ribojimų ir AEI generacijos ribojimų priežastis, išskiriant tinklo pralaidumo, apkrovos režimų, generacijos pasiskirstymo, kaupimo, tinklo stiprinimo ir paklausos lankstumo reikšmę.
2. Sudaryti supaprastintą 110 kV perdavimo tinklo modelį PSS/E aplinkoje, tinkamą stacionariai galios srautų analizei ir AEI generacijos ribojimų vertinimui.
3. Suformuoti reprezentatyvius tinklo darbo režimus ir AEI plėtros scenarijus, leidžiančius nustatyti kritinį režimą, ribojančius tinklo elementus ir ribojamos AEI generacijos mastą.
4. Įvertinti BESS, tinklo stiprinimo ir EV įkrovimo lankstumo priemonių poveikį tam pačiam kritiniam režimui, palyginant jų techninį efektyvumą pagal linijų apkrovas, mazgų įtampas ir AEI ribojimo sumažėjimą.
5. Atlikti techniškai veiksmingų alternatyvų orientacinę techninę-ekonominę analizę ir nustatyti racionaliausią priemonę AEI generacijos ribojimams mažinti bei AEI gamybos daliai didinti.

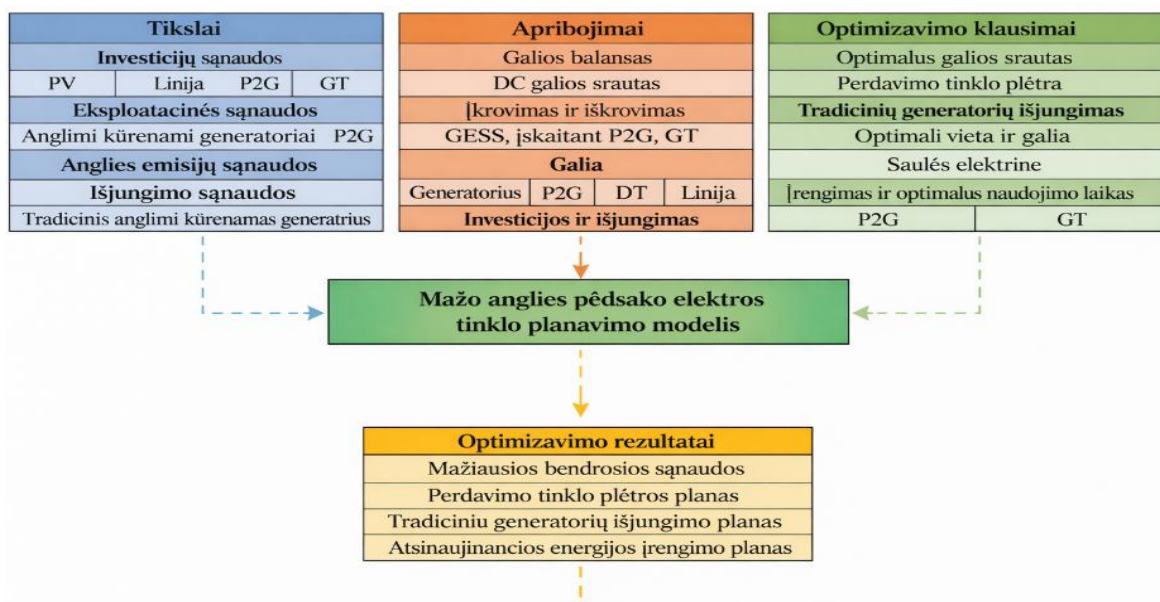
Darbe taikoma mokslinės ir institucinės literatūros analizė, skirta nustatyti pagrindines AEI generacijos ribojimų priežastis ir jų mažinimo priemones. Praktinei tyrimo daliai taikomas scenarijų analizės metodas: skirtingais 110 kV perdavimo tinklo darbo režimais nuosekliai didinama AEI generacija ir nustatomas techninių ribojimų atsiradimo momentas. Tinklo techninei būklei įvertinti taikoma stacionari galios srautų analizė PSS/E aplinkoje, pagal kurią vertinamos 110 kV linijų apkrovos, mazgų įtampos, kritiniai tinklo elementai ir ribojamos AEI generacijos mastas. Ribojimų mažinimo priemonės vertinamos lyginamuoju metodu, analizuojant BESS, tinklo stiprinimo ir elektromobilių įkrovimo lankstumo poveikį tam pačiam kritiniam režimui. Ekonominiam alternatyvų palyginimui taikoma orientacinė techninė-ekonominė analizė, pagrįsta investicinių sąnaudų, gyvavimo ciklo kaštų, NPV, EAC, LCOS ir sąnaudų vienai sumažinto AEI ribojimo MWh rodikliais. Darbą sudaro trys pagrindinės dalys. Pirmajame skyriuje analizuojamos AEI generacijos ribojimų priežastys ir pagrindinės jų mažinimo priemonės: kaupimo sistemos, tinklo pralaidumo didinimas ir elektromobilių lankstumas. Antrajame skyriuje aprašoma AEI generacijos ribojimų 110 kV perdavimo tinkle tyrimo metodika: modeliuojamos tinklo zonos ribos, duomenų šaltiniai, tyrimo prielaidos, darbo režimų ir scenarijų sudarymo logika bei techniniai ir ekonominiai vertinimo rodikliai. Trečiajame skyriuje pateikiami PSS/E galios srautų analizės rezultatai, nustatomas kritinis AEI integracijos režimas, įvertinamas BESS, tinklo stiprinimo ir EV lankstumo poveikis bei atliekamas techninis-ekonominis alternatyvų palyginimas. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados, apibendrinančios techniškai ir ekonomiškai pagrįstą priemonę AEI generacijos ribojimams mažinti nagrinėtoje 110 kV perdavimo tinklo zonoje.

1. AEI ribojimų priežastys ir mažinimo priemonės

Literatūroje AEI generacijos ribojimas apibrėžiamas kaip sisteminė problema, kylanti tada, kai perdavimo galios, vietinio tinklo pralaidumo arba lankstumo priemonių nepakanka perteklinės generacijos laikotarpiams suvaldyti. Beckeris ir kt. [1] parodė, kad net Europos mastu vien esamo pralaidumo nepakanka didelėms vėjo ir saulės generacijos dalims integruoti, o Alkhalidis ir kt. [2] pateikia praktinį pavyzdį, kai ribojimai pasireiškia dėl mažos apkrovos ir nepakankamo tinklo lankstumo. Šie darbai leidžia daryti išvadą, kad AEI ribojimai nėra pavienė eksploatacinė anomalija, bet struktūrinė aukštos AEI skvarbos pasekmė.

Scenarijais grįsta analizė ypač svarbi vertinant, kaip keičiasi generacijos ir apkrovos santykis skirtingais režimais. Denholmas ir Handas [3] pabrėžia, kad didėjant nepastovios generacijos daliai kritinę reikšmę įgauna sistemos lankstumas, o Li, J., Liu, F., Li, Z., Shao, C., & Liu, X. [4] bei „Litgrid“ [5] rodo, kad AEI integracijos ribos priklauso ne tik nuo naujų elektrinių prijungimo, bet ir nuo perdavimo tinklo plėtros tempo, eksploataavimo taisyklių ir regioninių silpnųjų vietų. Lietuvos atveju tai ypač aktualu dėl sparčiai augančių saulės ir vėjo projektų bei nevienodo generacijos pasiskirstymo tarp regionų.

Papildomą problemos dimensiją atskleidžia lankstumo priemonių tyrimai. Dik ir kt. [6] rodo, kad elektromobilių integracija gali veikti kaip perteklinės AEI energijos sugėriklis, o Laimonas [7] leidžia vertinti, kaip ribojimai veikia emisijas, ekonominius nuostolius ir sistemos elgseną ilgesniame laikotarpyje. Todėl AEI ribojimų analizė turi apimti ne tik tinklo elementų perkrovas, bet ir lankstumo priemonių poveikį visai sistemai.



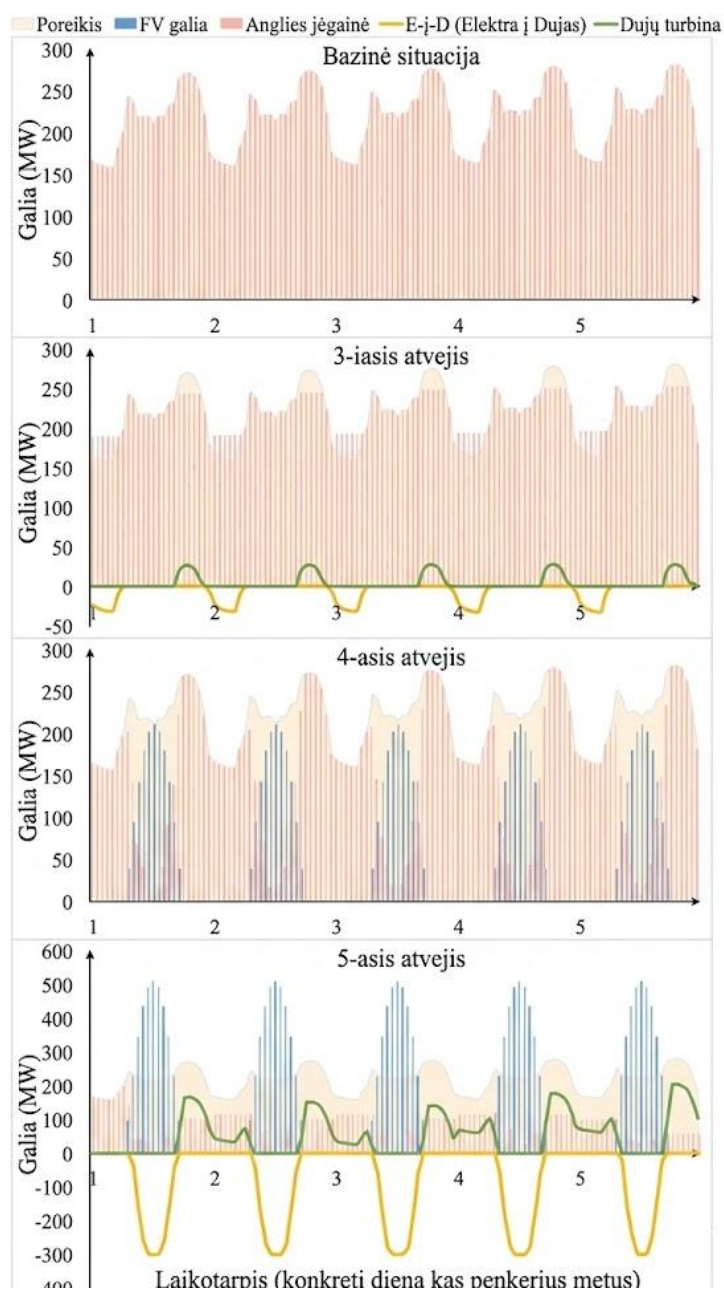
1 pav. Mažai anglies dioksido išskiriančios elektros energijos sistemos optimizavimo modelio schema [8]. Paveiksle pateiktas modelis atskleidžia, kad AEI integracija turi būti vertinama kartu su tinklo investicijomis, kaupimo sistemų valdymu, emisijų mažinimu ir tradicinės generacijos pertvarka.

Tradicinės generacijos vaidmuo pereinamuoju laikotarpiu literatūroje vertinamas kaip glaudžiai susijęs su tinklo plėtra ir lankstumo priemonėmis. Mažo anglies pėdsako elektros energetikos sistemos optimizavimo modelio struktūra pateikiama 1-ame paveikslėlyje. Jame matyti, kad AEI integracija turi būti vertinama kartu su tinklo investicijomis, kaupimo sistemų valdymu, emisijų

mažinimu ir tradicinės generacijos pertvarka. Yangas ir kt. [8] parodė, kad didžiausias efektas pasiekiamas derinant tinklo plėtrą, kaupimą ir generacijos struktūros pokyčius, o Brownas ir kt. [9] pabrėžė, kad perdavimo stiprinimas ir sektorių integracija turi būti vertinami kartu, o ne atskirai. Šis integruoto planavimo požiūris svarbus ir nagrinėjamam darbui, nes leidžia vienoje analizėje vertinti ne tik ribojimų mažinimą, bet ir tai, kokią vietą bendroje sistemos transformacijoje užima tinklo stiprinimas, kaupimas ir kitų šaltinių generacijos koregavimas.

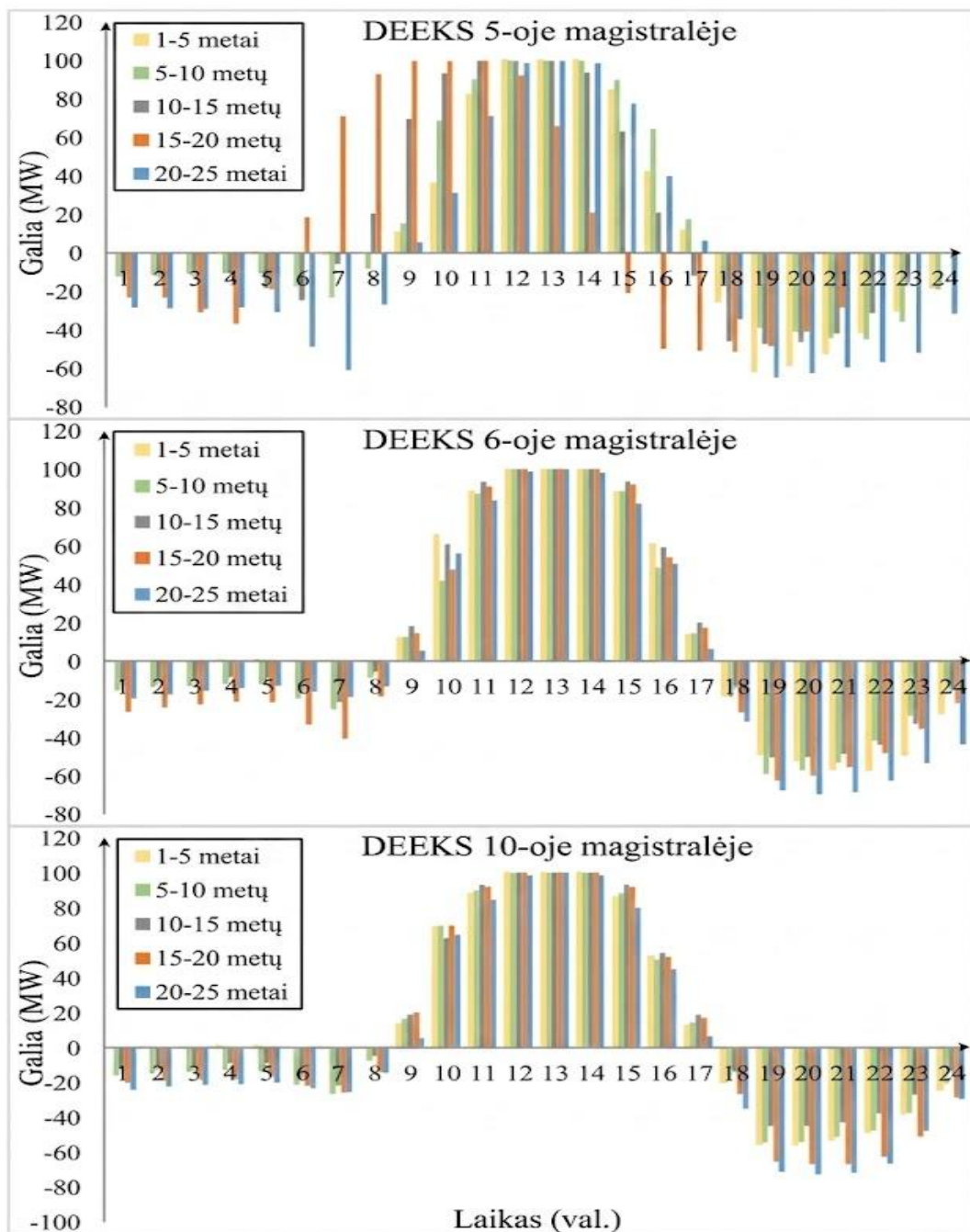
Skirtingų scenarijų palyginimas leidžia įvertinti, kaip keičiantis technologijų deriniui kinta sistemos apkrovos padengimas ir atskirų įrenginių galia. Įrenginių išėjimo galios ir apkrovos palyginimas tarp nagrinėjamų atvejų pateiktas 2 pav.

Elektros energetika ir energetinės sistemos 124 (2021) 106409



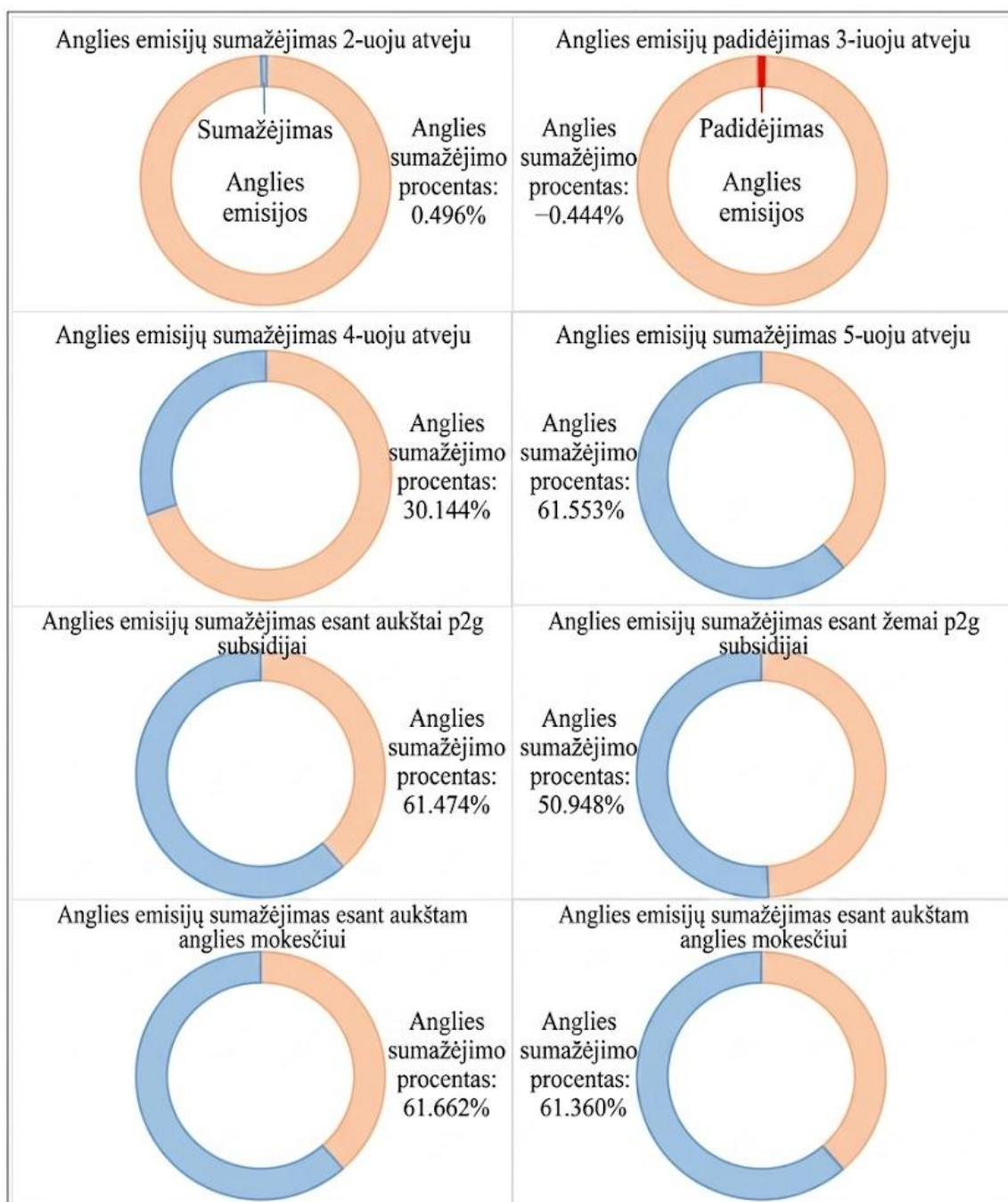
2 pav. Įrenginių išėjimo galios ir apkrovos palyginimas tarp skirtingų atvejų [8].

Scenarijų palyginimas rodo, kad ribojant tradicinių elektrinių generaciją AEI dalis sistemoje didėja, tačiau kartu išauga poreikis lanksčioms balansavimo priemonėms ir geresniam srautų valdymui [3], [8]. Analitinė šių rezultatų vertė slypi ne vien kiekybiniuose pokyčiuose, bet ir pačioje logikoje: AEI plėtra tampa efektyvi tada, kai keičiama visa generacijos struktūra, o ne vien prijungiami papildomi vėjo ar saulės pajėgumai.



3 pav. GESS įkrovimo ir iškrovimo laikas 5-ajame scenarijuje [8].

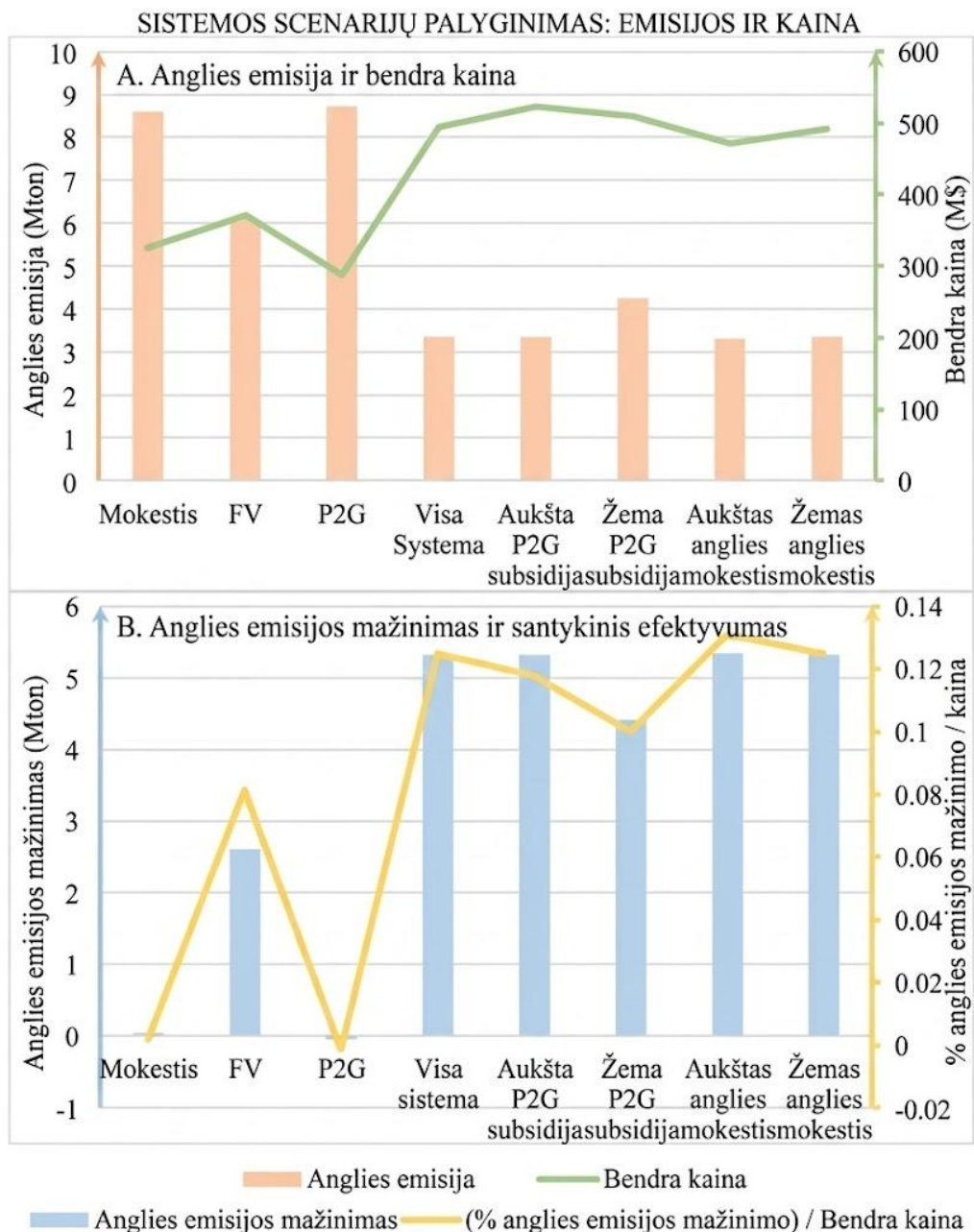
Kaip matyti iš 3 pav., kaupimo sistema įkraunama tomis valandomis, kai sistemoje susidaro perteklinė AEI generacija, o iškraunama padidėjus apkrovai arba sumažėjus atsinaujinančių išteklių gamybai. Tai rodo, kad kaupimo sistemos veikia kaip tarpinis lankstumo sluoksnis, mažinantis AEI ribojimų mastą aukštos gamybos valandomis ir padedantis užtikrinti galios balansą skirtingose tinklo magistralėse.



■ Anglies emisijos
 ■ Anglies emisijų sumažėjimas
 ■ Anglies emisijų padidėjimas

4 pav. Anglies dioksido emisijų sumažėjimas skirtingais atvejais [8].

Kaip matyti iš 4 pav., didžiausias anglies dioksido emisijų sumažėjimas pasiekiamas tais atvejais, kai AEI plėtra derinama su kaupimo sistemomis, tinklo pralaidumo didinimu ir tradicinės iškastinio kuro generacijos mažinimu. Rezultatai rodo, kad vien tinklo pertvarkos nepakanka, jeigu kartu nekeičiama iškastinio kuro generacijos struktūra ir nenaudojamos papildomos lankstumo priemonės.



5 pav. Anglies dioksido emisijų mažinimas ir sąnaudos [8].

5 pav. parodo, kad emisijų mažinimo priemonės turi būti vertinamos kartu su jų kaina. Tai leidžia nustatyti, kurie sprendimai yra ne tik techniškai veiksmingi, bet ir ekonomiškai pagrįsti. Politinių ir technologinių priemonių derinimo analizė leidžia įvertinti ne tik techninį efektą, bet ir tai, kokia kaina pasiekiamas AEI integracijos ir emisijų mažinimo rezultatas.

Apibendrinant, pirmoji literatūros grupė rodo, kad AEI ribojimų problemos negalima aiškinti vien techniniu tinklo pajėgumo trūkumu. Ji apima ir sistemos valdymo logiką, tradicinės generacijos lankstumą, kaupimo prieinamumą bei ekonominių sprendinių suderinimą.

1.1. Kaupimo ir lankstumo priemonių integracija.

Dik ir kt. [6] pateikia EV, AEI ir miesto energijos sistemos sąveikos analizę Europos kontekste. Tyrime parodyta, kad elektromobilių plėtra kartu su AEI didina tiek lankstumo poreikį, tiek vietinių

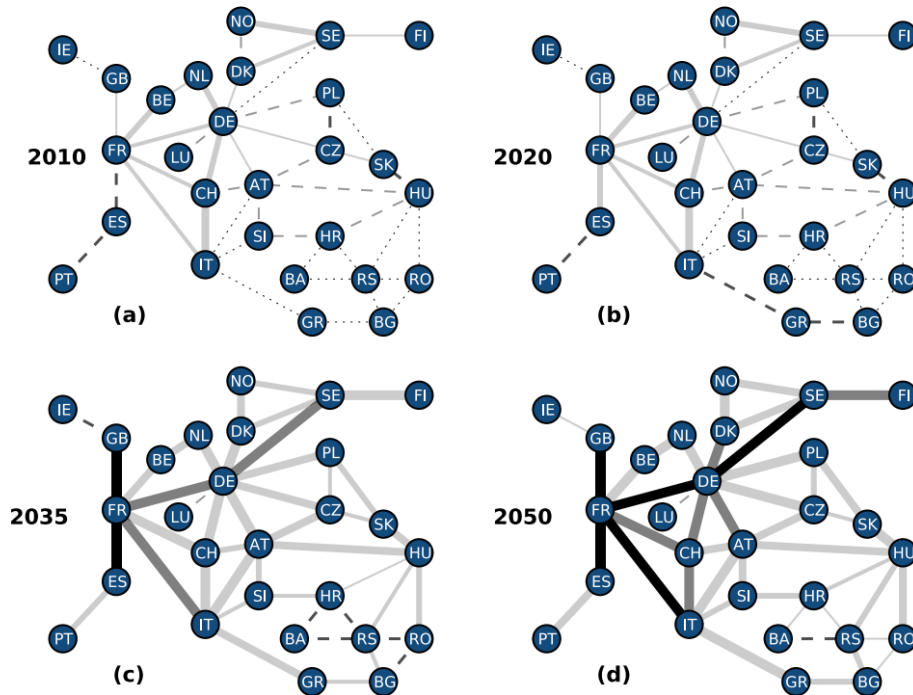
perkrovų riziką, todėl EV turi būti vertinami ne tik kaip nauja apkrova, bet ir kaip potencialus lankstumo išteklius.

Autoriai pabrėžia, kad V2G ir išmanusis įkrovimas gali mažinti energijos disbalansą, tačiau vien šių priemonių nepakanka, jei jos nėra derinamos su tinklo plėtra ir kitais sektorių integracijos sprendiniais [6, 9, 15]. Kongas ir kt. [10] parodė, kad įkrovimo infrastruktūra išmaniojo tinklo kontekste yra tarpinė grandis tarp EV parko ir elektros tinklo, todėl jos išdėstymas bei techninės charakteristikos lemia, ar elektromobiliai bus vertinami kaip fiksuota apkrova, lanksti apkrova ar mobilus kaupimo išteklius. Šį požiūrį papildė Johnsenas ir kt. [18] bei Mahmud ir kt. [20], kurie pabrėžia, kad išmanusis įkrovimas ir tinklui suderinamos priemonės yra esminės norint išvengti vietinių perkrovų. Danese ir kt. [11] apžvalga rodo, kad didelės galios įkrovimo stotelių planavimas turi būti grindžiamas ne vien transporto paklausa, bet ir tinklo galimybėmis, apkrovų profiliais bei ilgalaikiais elektrifikacijos scenarijais. Tai ypač svarbu, kai EV integracija siejama su AEI pertekliaus panaudojimu. Wolbertus ir kt. [19] taip pat pažymi, kad įkrovimo infrastruktūros modeliavimo pasirinkimai tiesiogiai veikia išvadas apie reikalingą stotelių skaičių, vietą ir apkrovų pasiskirstymą. V2G paslaugų potencialą išsamiai nagrinėja Sortomme ir El-Sharkawi [12] bei Kempton ir Tomic [13], o Dik ir kt. [14] ir Lund ir kt. [15] šias įžvalgas išplečia iki platesnio energetikos sistemos lankstumo konteksto. Šie darbai leidžia teigti, kad EV lankstumas yra prasminga AEI ribojimų mažinimo priemonė tik tada, kai jis derinamas su sisteminiu planavimu.

Apibendrinant galima teigti, kad lankstumo priemonės literatūroje vertinamos kaip būtina sąlyga AEI ribojimams mažinti, tačiau jų efektyvumas priklauso nuo to, ar jos derinamos su tinklo ir generacijos valdymo sprendimais. Būtent todėl šiame darbe toliau nagrinėjamos ne tik atskiros priemonės, bet ir jų palyginimas to paties tinklo bei to paties režimo sąlygomis.

1.2. Tinklo pralaidumo didinimas.

Perdavimo tinklo plėtra išlieka viena nuosekliausiai literatūroje pagrįstų AEI ribojimų mažinimo priemonių. Beckeris ir kt. [1] parodė, kad tarpsisteminių perdavimo pajėgumų didinimas mažina balansavimo poreikį ir leidžia geriau paskirstyti nepastovią vėjo bei saulės generaciją erdvėje, o Brown ir kt. [9] nustatė, kad perdavimo stiprinimas išlieka ekonomiškai naudingas net ir tuo atveju, kai sistemoje jau diegiamos sektorių integracijos priemonės. Svarbu tai, kad perdavimo sprendinių nauda priklauso nuo sistemos konteksto. „Smart energy systems“ tyrimas [15] rodo, kad perdavimo plėtra duoda didžiausią efektą tada, kai ji derinama su aktyviu vartotojų lankstumu, kaupimu ir kitų sektorių elektrifikacija. Todėl šiame darbe tinklo stiprinimas bus vertinamas ne kaip vienintelis sprendimas, o kaip viena iš alternatyvų, lyginama su kaupimu ir valdomu EV įkrovimu.



6 pav. Tinklo topologija ir plėtra 2010, 2020, 2035 ir 2050 metams [1].

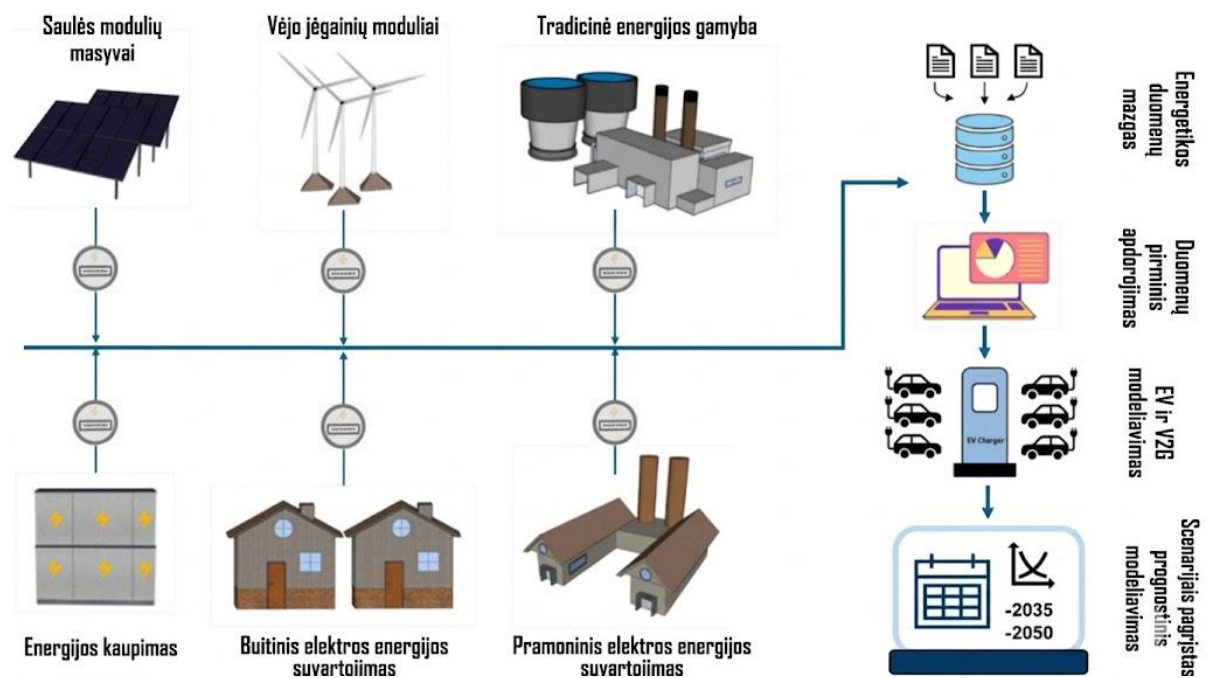
Europos masto tinklo plėtros scenarijai patvirtina, kad didėjanti AEI dalis keičia ir pageidaujama tinklo architektūrą: stiprėja tarpvalstybinės jungtys (6 pav.), didėja poreikis perkelti energijos srautus tarp regionų, o perdavimo sistema tampa svarbi ne tik saugumui, bet ir ekonominiam AEI panaudojimui [1]. Lietuvos kontekste ši logika aktuali regioniniu mastu, nes vietiniai 110 kV tinklo apribojimai gali tapti pagrindine kliūtimi dar iki tol, kol kritiniai taps nacionalinio lygmens balansavimo ištekliai. Todėl literatūros apžvalga leidžia formuluoti aiškia tyrimo prielaidą: kai AEI integraciją pradeda riboti konkretūs tinklo elementai, būtina lyginti ne abstrakčias technologijas, o labai konkrečius sprendinius, tokius kaip linijų ar kitų kritinių tinklo elementų stiprinimas, lokalus kaupimas ir lankstus papildomos apkrovos valdymas.

Apibendrinant, tinklo pralaidumo didinimas literatūroje laikomas būtina, bet ne pakankama sąlyga AEI integracijai. Dėl to šiame darbe tinklo stiprinimas vertinamas kartu su kitomis lankstumo priemonėmis ir lyginamas techniniu bei ekonominiu požiūriu.

1.3. Elektromobilių ir V2G integracija.

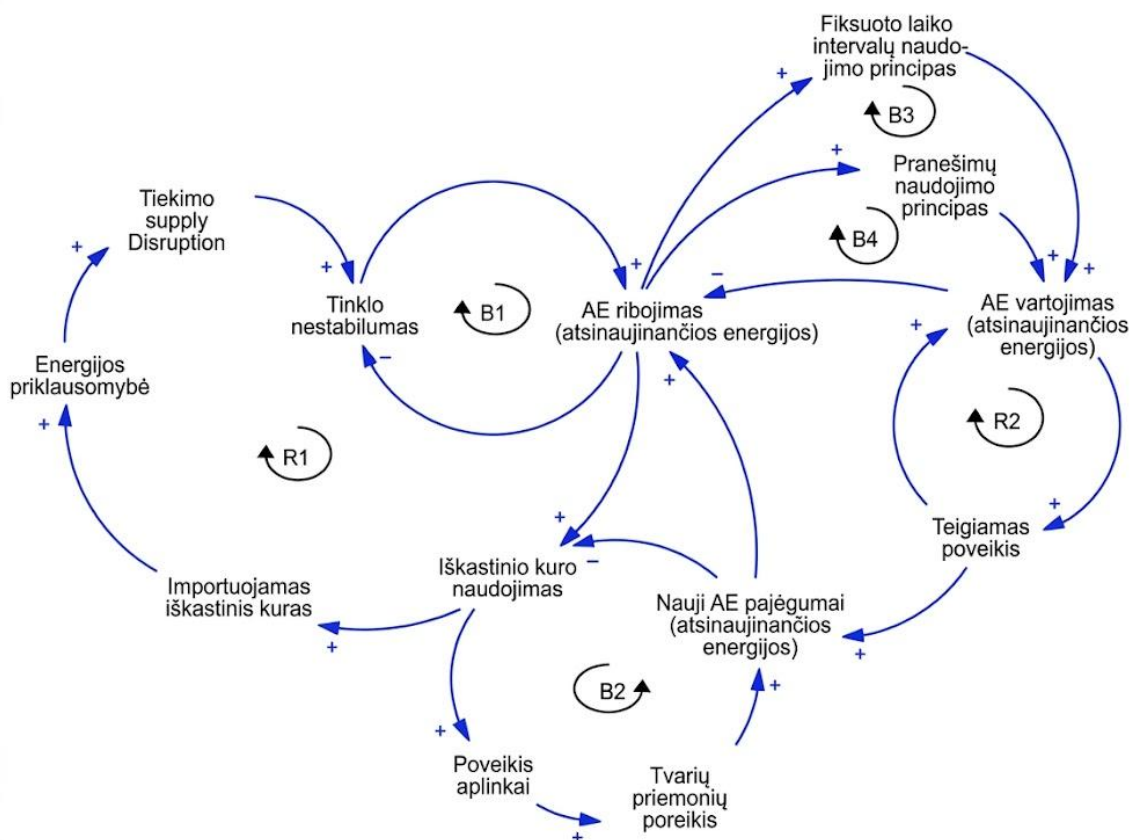
Elektromobilių integracija mokslinėje literatūroje vis dažniau vertinama kaip tinklo lankstumo priemonė, o ne vien papildoma apkrova. Kongas ir kt. [10], Danese ir kt. [11], Johnsenas ir kt. [18], Wolbertus ir kt. [19] bei Mahmud ir kt. [20] teigia, kad įkrovimo infrastruktūros planavimas turi būti derinamas su tinklo apribojimais, nes netinkamas stotelių išdėstymas gali didinti vietines perkrovas, o koordinuotas planavimas padeda geriau išnaudoti AEI gamybą.

Elektromobilių ir V2G integracija gali būti vertinama kaip platesnės energetikos sistemos lankstumo dalis, kurioje kartu nagrinėjami AEI šaltiniai, kaupimo sistemos, vartojimo valdymas ir tinklo apribojimai. Tokios integruotos metodologinės sistemos struktūra pateikta 7 pav.



7 pav. Integruotos energetikos sistemos metodologinė schema, apimanti AEI, elektromobilius ir tinklo dinamiką [6].

Institucinį ir rinkos aspektą akcentuoja Sovacool ir Hirsh [17], kurie parodė, kad V2G plėtrą riboja ne tik technologiniai, bet ir vartotojų elgsenos, standartizacijos bei verslo modelių klausimai. Tai svarbi pastaba ir Lietuvos atvejui, nes net techniškai pagrįsta lankstumo priemonė gali likti neefektyvi, jei jos neparems aiški reguliavimo ir rinkos struktūra. Klasikinėje V2G literatūroje Kempton ir Tomic [13] pabrėžia, kad elektromobiliai gali teikti ne tik energijos kaupimo, bet ir rezervų, reguliavimo bei balansavimo paslaugas. Jų darbai padėjo pagrindą požiūriui, kad didelis prijungtų transporto priemonių parkas gali veikti kaip paskirstytas sistemos lankstumo šaltinis, ypač tais laikotarpiais, kai AEI generacija viršija momentinę paklausą. Didelės AEI skvarbos sąlygomis lankstumo poreikį patvirtina ir Denholmas bei Handas [3], kurie parodė, kad be apkrovos perkėlimo, kaupimo ir lankstesnės tradicinių elektrinių eksploatacijos dalis vėjo ir saulės energijos išlieka ribojama. Šias išvalgas papildė Dikas ir kt. [6], Sortomme ir El-Sharkawi [12] bei Dikas ir kt. [14], kurių darbuose EV įkrovimas vertinamas kaip valdoma apkrova, galinti sugerti perteklinę AEI generaciją ir mažinti ribojimų mastą, jei jis susiejamas su sistemos būseną ir kainų signalais.



8 pav. Pagrindinės kilpos, identifikuojančios svertinius taškus ir galimus sistemos archetipus [7].

Kaip matyti iš 8 pav., AEI ribojimai susiję ne su vienu veiksmu, o su kelių sistemos dalių tarpusavio sąveika: tinklo pralaidumu, iškastinio kuro naudojimu, AEI pajėgumų augimu, vartojimo valdymu ir bendru sistemos lankstumu. Todėl elektromobilių lankstumas šiame darbe pirmiausia vertinamas kaip iš anksto planuojamas įkrovimo grafiko perkėlimas ir valdoma apkrova, galinti sugerti perteklinę AEI generaciją [12, 13]. Papildomų sisteminių paslaugų potencialas literatūroje pripažįstamas, tačiau šiame darbe detalai nemodeliuojamas. Vis dėlto EV poveikis priklauso nuo to, kiek sparčiai auga elektromobilių parkas ir viešoji bei privati įkrovimo infrastruktūra. IEA „Global EV Outlook 2024“ [16] teigia, kad įkrovimo infrastruktūros mastas artimiausiais metais sparčiai didės, todėl tinklo operatorių požiūriu svarbu iš anksto vertinti, ar ši apkrova didins ribojimus, ar taps priemone jiems mažinti. Aukštos AEI skvarbos atveju šią ribą lemia bendras sistemos lankstumas [3].

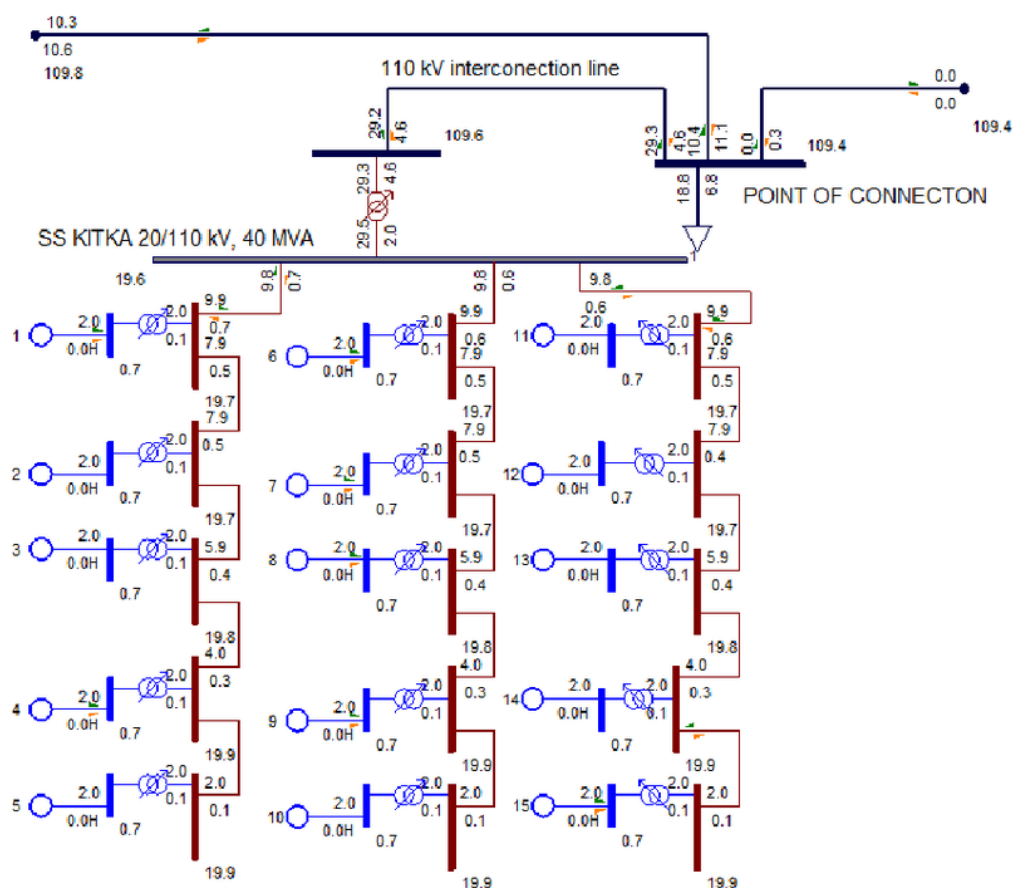
Taigi literatūra leidžia formuluoti nuoseklią loginę grandinę: AEI ribojimus lemia perdavimo ir vietinio tinklo apribojimai, o juos mažinti galima derinant tinklo plėtrą, kaupimą, EV integraciją ir išmanesnę paklausos valdymą [6, 7, 9, 15, 17].

Apžvalga parodo ir tyrimo spragą: Lietuvos kontekste dar trūksta darbų, kuriuose tos pačios tinklo zonos, tų pačių režimų ir tų pačių AEI plėtros lygių sąlygomis būtų tiesiogiai palygintos pagrindinės priemonės. Būtent šią spragą ir siekiama užpildyti tolesnėje metodikos dalyje, taikant PSS/E pagrindu atliktą scenarijų ir galios srautų analizę [5].

2. AEI generacijos ribojimų 110 kV perdavimo tinkle tyrimo metodika

Šiame darbe nagrinėjama, kaip elektros tinklo ribojimai veikia AEI panaudojimą ir kurios priemonės efektyviausiai mažina AEI ribojimus skirtingomis sistemos būsenomis. Kadangi saulės ir vėjo gamyba yra nepastovi, tyrimas grindžiamas scenarijų principu, kuris dažnai taikomas aukštos AEI skvarbos analizei [3, 15]. Metodikos pagrindui taip pat bus naudojami viešieji duomenų ir planavimo šaltiniai: ENTSO-E duomenų platforma [22], PVGIS [23], NREL kaupimo sąnaudų projekcijos [24], IEA baterijų vaidmens analizė [25], ENTSO-E TYNDP scenarijų metodika [26], PSS/E vartotojo vadovas [27], Litgrid infrastruktūros informacija [28], IRENA kaštų duomenys [29], ENTSO-E tinklo planavimo metodika [30] ir vėjo generacijos vertinimo literatūra [31].

Pagrindinis metodas, kuriuo bus remiamasi, yra galios srautų (angl. Power Flow) analizė. Šis metodas leidžia apskaičiuoti, kaip pasiskirsto galia tinkle, kuriose linijose atsiranda perkrovos ir ar įtampos mazguose išlieka normos ribose. PSS/E aplinkoje atliekama stacionarių režimų analizė yra tinkama tokiems uždaviniams spręsti, nes leidžia nuosekliai vertinti tinklo darbą pagal planavimo ir eksploataavimo metodiką [27, 30].



9 pav. PSS/E modelio pavyzdys [27].

Modeliavimas bus atliekamas PSS/E programa (pavyzdys 9 pav.). Joje bus sudarytas elektros tinklo modelis ir apskaičiuoti galios srautai skirtingiems režimams. Tyrimas prasidės nuo bazinio scenarijaus, kuris atspindės pradinę tinklo situaciją, o vėliau bus didinama AEI generacija, kad būtų galima nustatyti, kada pradeda atsirasti tinklo ribojimai. Tokia modeliavimo logika atitinka PSS/E taikymo principus stacionarių režimų analizei [27].

Rezultatai bus lyginami pagal techninius rodiklius, tokius kaip ribojamos AEI energijos kiekis, kritinių linijų apkrovos bei mazgų įtampos, taip pat pagal ekonominį vertinimą. Ekonominė dalis bus naudojama ne investicijų grąžai prognozuoti, o palyginti, kiek kainuoja sumažinti ribojimus ir kiek energijos realiai pavyksta išsaugoti, remiantis viešais kaštų įverčiais [24, 29].

2.1. Tyrimo etapai

Kad tyrimas būtų nuoseklus ir aiškus, darbas bus atliekamas etapais. Tokia seka leidžia pirmiausia susikurti veikiantį modelį, tada sistemingai nustatyti, kada atsiranda ribojimai, o galiausiai patikrinti, kurios priemonės šiuos ribojimus mažina efektyviausiai. Toliau pateikiami pagrindiniai tyrimo etapai.

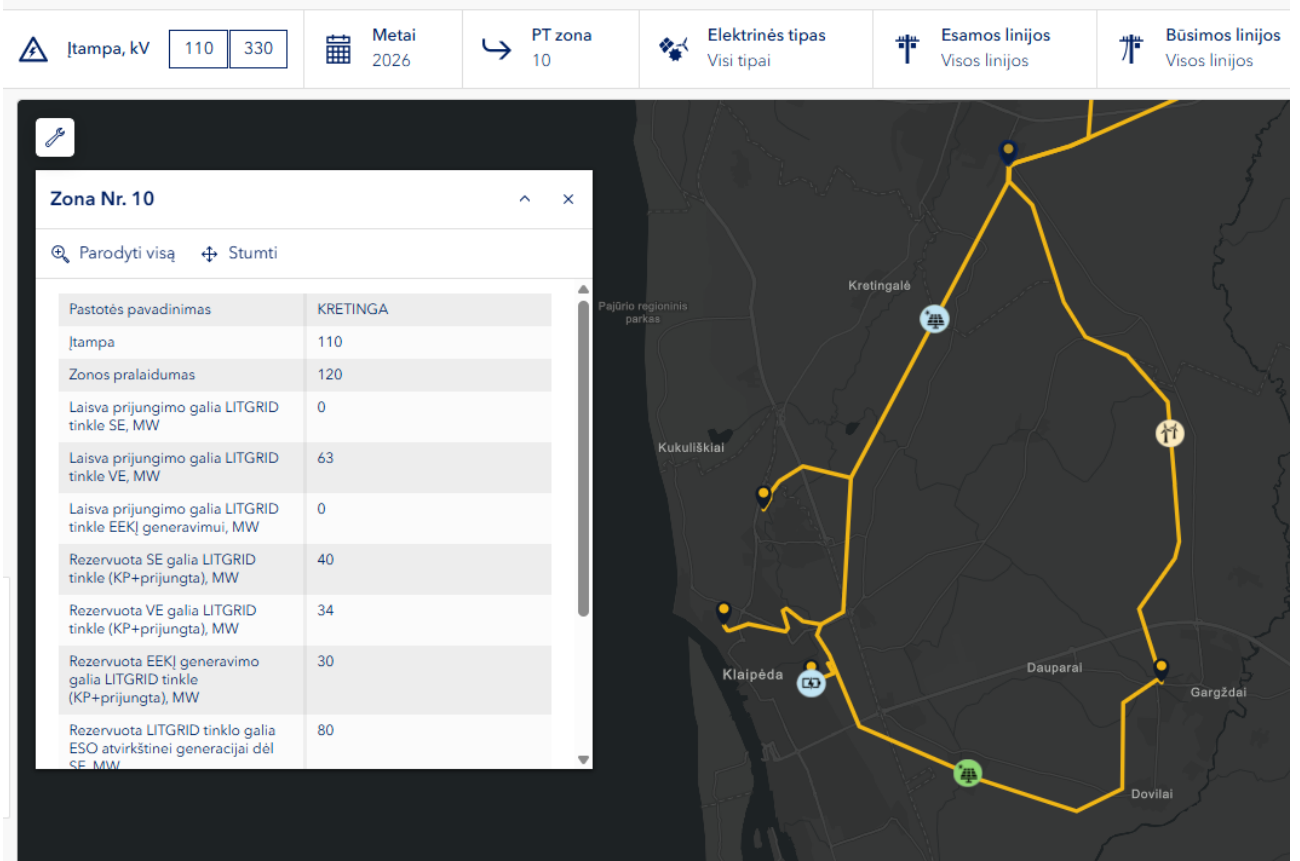
Pirmiausia bus sudaromas bazinis elektros tinklo modelis PSS/E aplinkoje. Šiame etape tikslas yra turėti veikiantį tinklo modelį, kuris be klaidų susiskaičiuoja galios srautus ir parodo realistišką tinklo būklę (linijų apkrovas, įtampas, balansą). Bazinis modelis bus naudojamas kaip atskaitos taškas visiems vėlesniems scenarijams. Toliau bus parenkami keli svarbiausi elektros sistemos režimai, kuriuose AEI ribojimai yra labiausiai tikėtini. Tai gali būti vasaros vidurdienis, kai saulės gamyba didžiausia, minimalios apkrovos režimas ir režimas su padidinta vėjo generacija. Toks režimų parinkimas remiasi viešais apkrovos ir generacijos duomenimis bei tipiniais saulės ir vėjo profiliais [22, 23, 31]. Kai bazinis modelis ir režimai bus paruošti, bus atliekama AEI pajėgumų didinimo analizė, kol tinklas pradės rodyti perkrovas, įtampos viršijimus arba poreikį riboti generaciją. Nustačius ribojimus, bus pereinama prie ribojimus mažinančių priemonių analizės. Bus išbandomos trys pagrindinės priemonių grupės: energijos kaupimas (BESS), tinklo pralaidumo didinimas ir elektromobilių įkrovimo lankstumas. Toks priemonių rinkinys pasirinktas remiantis literatūra, kurioje šios priemonės dažniausiai išskiriamos kaip perspektyviausios AEI integracijai didinti [6, 12, 15].

Galiamiausiai bus atliekamas scenarijų palyginimas pagal techninius ir ekonominius rodiklius. Techniniai rodikliai parodys, kaip keičiasi AEI ribojimų mastas, perkrovų skaičius ir įtampų būklė, o ekonominis vertinimas padės palyginti priemones pagal tai, kiek kainuoja sumažinti ribojimus. Remiantis šiais rezultatais bus formuluojamos išvados ir rekomendacijos, kurios sprendimų kryptys galėtų būti praktiškai naudingos AEI integracijai didinti [24, 29].

2.2. Modeliuojama sistema ir tyrimo ribos

Šiame darbe bus modeliuojama supaprastinta elektros tinklo dalis, kuri leidžia įvertinti AEI integracijos ribojimus ir jų mažinimo priemones. Kadangi pagrindiniai AEI ribojimai dažnai atsiranda prijungimo ir regioninio perdavimo lygyje, tyrime pagrindinis dėmesys skiriamas 110 kV tinklui ir jo mazgams, kuriuose prijungiamos saulės ir vėjo elektrinės. Tokia pasirinkta tinklo dalis leidžia modeliuoti realias situacijas, kai ribojimai kyla dėl linijų pralaidumo, įtampos svyravimų bei riboto tinklo lankstumo.

Darbo objektu pasirenkama 110 kV perdavimo tinklo zona, identifikuota pagal „Litgrid“ skelbiamą generacijos pralaidumų žemėlapi (pav. 10). Zonos pasirinkimą pagrindžia didelė AEI koncentracija ir vykdomi 110 kV tinklo patikimumo didinimo projektai [28]. Tiriamojoje dalyje ši zona atvaizduojama supaprastintu šešių mazgų ir šešių linijų modeliu, kuris perteikia pagrindinius galios srautų koridorius, bet nėra skirtas geografiniam realaus tinklo atkartojimui.



10 pav. Vakarinės Lietuvos dalies perdavimo tinklo generacijos pralaidumų žemėlapis [28].

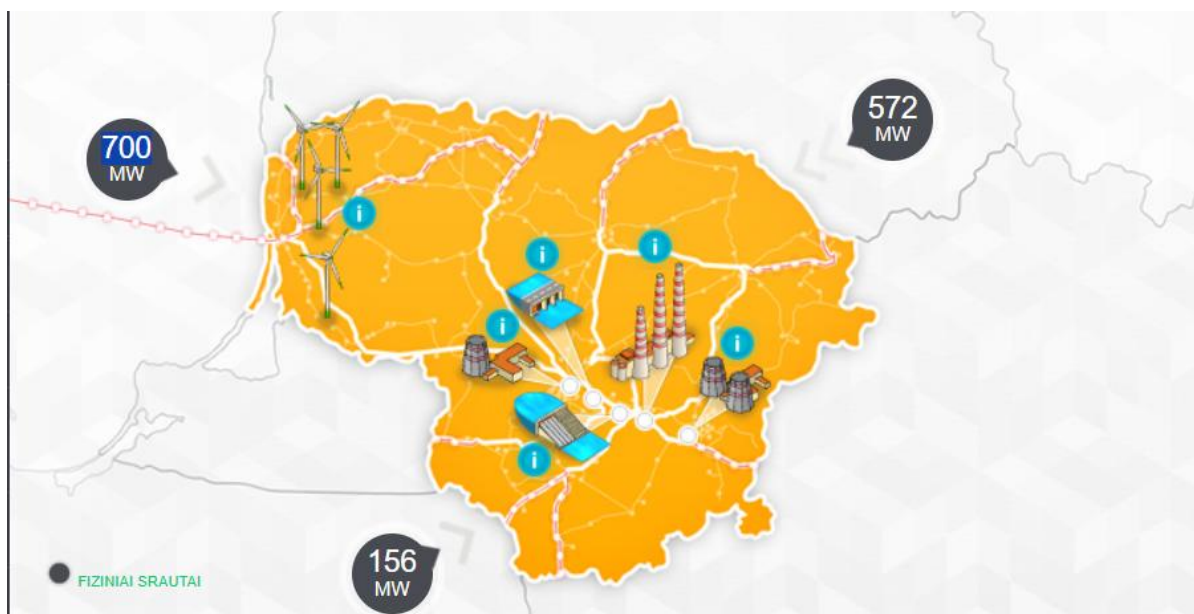
Modeliuojama sistema apims pagrindinius elementus, kurie reikalingi ribojimų analizei:

1. tinklo mazgus,
2. 110 kV linijas,
3. vartotojų apkrovas,
4. AEI generacijos šaltinius (saulės ir / arba vėjo parkus),
5. papildomas priemones (energijos kaupimo įrenginį ir elektromobilių įkrovimą kaip lankstumo priemonę, jei bus įtraukiama).

Kad tyrimas būtų įgyvendinamas su prieinamais duomenimis ir būtų aiškiai interpretuojamas, tinklo modelis bus sudaromas kaip supaprastintas. Tai reiškia, kad jis bus orientuotas į pagrindinę logiką: kaip atsiranda ribojimai ir kaip jie keičiasi taikant skirtingas priemones. Pagrindinis tikslas nėra atkurti Lietuvos elektros sistemos, o sukurti modelį kuris leistų palyginti scenarijus ir pagrįsti išvadas. Šiame darbe daugiausia dėmesio skiriama stacionarių režimų analizei (Power Flow), todėl tyrimo ribose nėra nagrinėjami kai kurie sudėtingesni aspektai, tokie kaip dinaminis ar dažnio stabilumas. Šie aspektai yra svarbūs realiame sistemos planavime, tačiau jų įtraukimas reikalautų papildomų duomenų, didesnės modelio apimties ir atskiros metodikos. Todėl šiame darbe jie laikomi už tyrimo ribų, o rezultatai interpretuojami kaip stacionarių režimų analizės pagrindu gautos išvalgos [30].

2.3. Duomenų šaltiniai ir prielaidos

Kad modeliavimas būtų įmanomas ir rezultatai būtų palyginami, šiame darbe naudojami keli pagrindiniai duomenų tipai: tinklo struktūra ir parametrai, apkrovos režimai, AEI generacijos režimai bei ekonominiai duomenys priemonių palyginimui. Kadangi detalių tinklo parametrų viešai dažnai nėra, dalis informacijos bus imama iš viešų šaltinių, o trūkstami parametrai parenkami pagal tinklo planavimo dokumentus ir tipines reikšmes [26, 28, 30]. Visos tokios prielaidos bus aiškiai nurodomos, kad būtų galima suprasti modelio ribas ir rezultatų interpretaciją. Lietuvos elektros perdavimo sistemos duomenys naudojami kaip pagrindas tinklo struktūrai, srautų kryptčiai ir galimiems ribojimams įvertinti. Bendras LITGRID sistemos vaizdas pateiktas 11 pav.



11 pav. LITGRID sistemos duomenys [28].

Tinklo topologija (mazgai, linijos) bus sudaroma remiantis viešai prieinama informacija apie Lietuvos perdavimo tinklą, „Litgrid“ skelbiamais infrastruktūros ir generacijos pralaidumų duomenimis bei ENTSO-E tinklo planavimo metodiniais principais [26, 28, 30]. Jei konkrečių linijų parametrų ar tikslių pralaidumų nebus galima gauti, bus naudojamos tipinės 110 kV linijų charakteristikos, kurios leidžia išlaikyti realistišką srautų ir įtampų elgesį.

Apkrovos režimams sudaryti bus naudojami viešai skelbiami elektros sistemos duomenys iš ENTSO-E platformos [22]. Režimams parinkti bus atsižvelgiama į tipines situacijas, tokias kaip vasaros diena, minimalios apkrovos režimas. AEI generacijos režimai bus formuojami remiantis PVGIS saulės gamybos profiliais [23] ir tipinėmis vėjo generacijos techninėmis prielaidomis, taikomomis vėjo elektrinių modeliavime [31].

Ekonominei daliai bus naudojami supaprastinti, viešai pateikiami priemonių kaštų duomenys, ypač energijos kaupimo įrenginių investicinės sąnaudos ir AEI technologijų sąnaudų lygiai [24, 25, 29]. Prarastos ribojamos energijos ekonominei vertei įvertinti bus naudojamos viešos elektros energijos kainos ir rinkos duomenys [22]. Ekonominė analizė šiame darbe nėra skirta tiksliai investicijų gražai ar rinkos prognozėms, todėl ji bus naudojama kaip palyginimo priemonė tarp skirtingų techninių sprendimų.

2.4. Režimų parinkimo principai

Kadangi AEI generacija ir elektros vartojimas kinta priklausomai nuo paros laiko, sezono ir oro sąlygų, AEI ribojimai tinkle pasireiškia ne visada. Todėl šiame darbe bus nagrinėjami keli tipiški režimai, kurie labiausiai atspindi situacijas, kai tikėtina, kad tinklas nebegalės priimti visos pagaminamos AEI energijos. Režimai parenkami taip, kad būtų aišku, kada atsiranda ribojimai ir kokie jų pagrindiniai mechanizmai (linijų perkrovos, įtampos pakilimas).

Tyrimė numatoma analizuoti tris pagrindinius reprezentatyvius režimus: vasaros vidurdienio, minimalios apkrovos ir padidintos vėjo generacijos režimus. Papildomai bus sudaromas kombinuotas R4 režimas, skirtas vienalaikiam didelės vėjo ir saulės generacijos poveikiui įvertinti kritiniame techniniame ir ekonominiame palyginime.

1. Pirmasis režimas yra vasaros vidurdienis, kai saulės elektrinių gamyba būna didžiausia, o vartojimas dažnai yra vidutinis arba net mažesnis nei žiemą. Šis režimas yra vienas svarbiausių, nes būtent tada dažnai pasireiškia įtampos kilimo problema ir gali atsirasti situacijos, kai tinklas nebegali priimti visos saulės generacijos be ribojimų. Šio režimo parinkimą pagrindžia PVGIS pagrindu formuojami saulės generacijos profiliai [23].
2. Antrasis režimas yra minimalios apkrovos režimas, kuris gali atitikti nakties laiką arba savaitgalį, kai vartojimas yra mažiausias. Šis režimas svarbus todėl, kad esant mažai apkrovai tinkle dažnai padidėja rizika viršyti įtampos ribas, o bet kokia papildoma AEI generacija greičiau sukelia ribojimus, nes sistemoje trūksta natūralios paklausos. Tokių režimų identifikavimui bus naudojami ENTSO-E apkrovos duomenys [22].
3. Trečiasis režimas yra padidintos vėjo generacijos režimas, kai vėjo elektrinės gamina daugiau nei įprastai, ypač jei tuo metu apkrova nėra didelė. Šis režimas leidžia įvertinti, ar ribojimai atsiranda dėl tinklo pralaidumo ir kaip situacija skiriasi nuo saulės generacijos dominavimo režimo. Vėjo režimo formavimui bus taikomos tipinės techninės prielaidos, naudojamos vėjo elektrinių modeliavime [31].

Kiekviename pagrindiniame režime bus atliekami galios srautų skaičiavimai baziniam scenarijui ir vėliau scenarijams su didesne AEI generacija bei ribojimus mažinančiomis priemonėmis. Papildomas R4 režimas bus naudojamas tada, kai reikės tiesiogiai palyginti priemones, esant vienalaikiam abiejų AEI šaltinių poveikiui. Tokiu būdu bus galima palyginti, kaip skirtingos priemonės veikia skirtingomis sistemos sąlygomis.

2.5. Scenarijų sudarymo metodika

Tyrimė scenarijai bus sudaromi taip, kad būtų galima aiškiai palyginti, kaip didėjant AEI pajėgumams atsiranda tinklo ribojimai ir kaip skirtingos priemonės šiuos ribojimus mažina. Pirmiausia S0 ir S1 scenarijai vertinami visuose tiriamuosiuose režimuose, siekiant nustatyti kritinį režimą ir ribojančius tinklo elementus. Nustačius kritinį režimą ir kritinį AEI lygį, S2, S3 ir S4 priemonės vertinamos tame pačiame R4_4 režime. Tokia logika leidžia priemones palyginti vienodomis tinklo ir AEI generacijos sąlygomis. Toks scenarijų sudarymas dera su tinklo planavimo metodiniu principu, taikomu ENTSO-E studijose [26, 30].

1 lentelė. Tiriamųjų scenarijų aprašymas

Scenarijus	Aprašymas	Papildomos priemonės	Tikslas
S0 - Bazinis	Esama tinklo būseną	Nėra	Atskaitos taškas
S1 - AEI plėtra	Didinama AEI generacija iki atsiranda ribojimai	Nėra	Nustatyti ribojimų atsiradimo ribą
S2 - AEI + BESS	AEI plėtra su energijos kaupimu	BESS	Įvertinti kaupimo poveikį ribojimams
S3 - AEI + tinklo stiprinimas	AEI plėtra su pralaidumo didinimu	Linijų stiprinimas	Įvertinti tinklo plėtros efektą
S4 - AEI + EV lankstumas	AEI plėtra su lankščia EV apkrova	EV įkrovimo perkėlimas	Įvertinti paklausos lankstumo naudą

Pirmiausia bus sudarytas bazinis scenarijus, kuris atspindi pradinę tinklo situaciją ir esamą AEI generacijos lygį. Šis scenarijus bus naudojamas kaip atskaitos taškas ir leis įvertinti, kokia tinklo būklė yra be papildomų AEI plėtros priemonių. Toliau bus sudaromi AEI plėtros scenarijai, kuriuose AEI pajėgumai bus didinami etapais. Tokiu būdu bus galima nustatyti, nuo kokio AEI kiekio pradeda atsirasti ribojimai. AEI pajėgumų didinimo logika bus vienoda visuose režimuose: kiekvieną kartą padidinus AEI generaciją, atliekamas galios srautų skaičiavimas ir užfiksuojama, ar atsirado perkrovos, įtampos viršijimai ir ar reikia riboti generaciją [26, 30].

Kai bus nustatyta AEI plėtros riba, bus pereinama prie scenarijų, kuriuose įtraukiamos ribojimus mažinančios priemonės. Šių scenarijų tikslas - patikrinti, kiek galima sumažinti AEI ribojimus ir pagerinti tinklo būklę taikant realistiškus sprendimus. Tokių priemonių lyginimą pagrindžia aukštos AEI skvarbos lankstumo literatūra [3, 15].

Energijos kaupimo scenarijuje bus įtraukiamas kaupimo įrenginys (BESS), kuris šiame darbe modeliuojamas kaip įkrovimo režimu veikianti priemonė, sugerianti perteklinę AEI generaciją ir mažinanti eksportą į tinklą kritiniame režime. Tinklo pralaidumo didinimo scenarijuje bus modeliuojamas linijų sustiprinimas, o elektromobilių lankstumo scenarijuje elektromobilių įkrovimas bus vertinamas kaip lanksti apkrova. Šių priemonių pasirinkimas remiasi ankstesniais tyrimais apie kaupimą, EV valdymą ir sisteminių lankstumą [6, 9, 12, 24, 25].

Visi scenarijai bus palyginami tarpusavyje, naudojant techninius ir ekonominius rodiklius. Tai leis nustatyti ne tik, kuri priemonė labiausiai sumažina ribojimus techniniu požiūriu, bet ir kuri yra labiausiai pagrįsta ekonominiu požiūriu.

2.6. Techniniai ir ekonominiai vertinimo kriterijai (KPI)

Kad būtų galima palyginti skirtingus scenarijus ir aiškiai įvertinti, ar pasirinktos priemonės tikrai mažina AEI ribojimus, tyrime bus naudojami keli pagrindiniai vertinimo rodikliai (KPI). Rodikliai bus skirstomi į dvi grupes: techninius (tinklo darbui) ir ekonominius (sprendimų palyginimui pagal kainą). Techniniai rodikliai parodys, kaip keičiasi tinklo būklė ir AEI panaudojimas, kai didinama AEI generacija arba įdiegiamos papildomos priemonės (kaupimas, tinklo stiprinimas, EV lankstumas). Pagrindiniai techniniai rodikliai bus šie: AEI ribojimo mastas - kiek energijos (MWh) arba galios (MW) nepriimama į tinklą dėl ribojimų. Šis rodiklis yra pagrindinis, nes jis tiesiogiai

parodo, kiek „žalios“ energijos prarandama. Linijų apkrova - vertinama, ar tinklo elementai viršija leistinas apkrovos ribas, ir kurie elementai yra kritiniai. Mazgų įtampos - vertinama, ar įtampa mazguose išlieka normos ribose, ar atsiranda per aukštos / per žemos įtampos.

Papildomai bus taikomas supaprastintas ekonominis vertinimas. Jo tikslas - ne prognozuoti rinką ar skaičiuoti tikslią investicijų grąžą, o paprastai palyginti sprendimus tarpusavyje: kiek kainuoja pasiekti tam tikrą ribojimų sumažėjimą. Vertinant priemonių kaštus bus remiamasi viešais BESS ir AEI technologijų kaštų šaltiniais [24, 29].

Ekonominiam vertinimui taikoma orientacinė techninė-ekonominė analizė. Ji nėra skirta detaliam investiciniam projektui pagrįsti, tačiau leidžia palyginti alternatyvas pagal gyvavimo ciklo kaštus ir sąnaudų efektyvumą. Todėl naudojami ne tik €/MWh sumažinto ribojimo ir prarastos energijos vertės rodikliai, bet ir NPV, EAC, o BESS atveju papildomai LCOS. CO₂ emisijų mažinimo nauda vertinama kaip papildomas socialinis-ekonominis jautrumo rodiklis. Pirmasis rodiklis - investicijų kaštai vienam sumažinto AEI ribojimo energijos vienetui (€/MWh). Jis parodo, kiek kainuoja išsaugoti 1 MWh energijos nuo ribojimų, pritaikius konkrečią priemonę (pvz., BESS arba tinklo stiprinimą). Šis rodiklis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_{AEI} = \frac{CAPEX}{\Delta E_{curt} \cdot T} \quad (1)$$

kur:

CAPEX- priemonės investicijų kaštai (€),

ΔE_{curt} - metinis ribojimo sumažėjimas (MWh/metus),

T- priemonės naudojimo laikotarpis (metais).

Antrasis rodiklis - prarastos ribojamos energijos ekonominė vertė, apskaičiuojama kaip ribojamos energijos kiekis padaugintas iš vidutinės elektros kainos. Vidutinė metinė elektros energijos kaina bus imama iš viešų rinkos duomenų [22]:

$$C_{loss} = E_{curt} \cdot P_{el} \quad (2)$$

kur:

E_{curt} - ribojama energija (MWh),

P_{el} - vidutinė metinė elektros energijos kaina (€/MWh).

Šie rodikliai leis palyginti priemones pagal tai, ar techninis efektas (ribojimų sumažėjimas) yra pasiekiamas ekonomiškai racionaliai.

2 lentelė. Pagrindiniai vertinimo rodikliai

KPI	Vienetai	Ką parodo
Ribojama AEI galia	MW	kada atsiranda ribojimas
Ribojama AEI energija	MWh	kiek energijos prarandama
Ribojimų dalis	%	AEI panaudojimo lygis

Linijų apkrova	%	kur riboja pralaidumas
Mazgų įtampa	p.u. / kV	ar viršijamos normos
€/MWh sumažinto ribojimo	€/MWh	priemonės sąnaudų efektyvumas
Prarastos energijos vertė	€/metus	ribojimų ekonominė reikšmė
NPV	€	Gyvavimo ciklo kaštų dabartinė vertė
EAC	€/metus	Lygiavertis metinis kaštas
LCOS	€/MWh	BESS patiektos energijos kaštas

2.7. Rezultatų palyginimo metodas

Gauti rezultatai bus lyginami tarp scenarijų taip, kad būtų aišku, kaip skiriasi bazinė situacija ir kaip ją keičia AEI plėtra bei ribojimus mažinančios priemonės. Palyginimas bus atliekamas naudojant tuos pačius tiriamuosius režimus (aprašytus 3.5 skyriuje), kad scenarijų skirtumai būtų nulemti pasirinkto sprendimo, o ne skirtingų pradinių sąlygų.

Pirmiausia bus lyginamas bazinis scenarijus su AEI plėtros scenarijais. Tokiu būdu bus galima nustatyti, nuo kokio AEI pajėgumų lygio atsiranda ribojimai ir kokio tipo ribojimai yra dominuojantys (linijų perkrovos, įtampos ribų viršijimas). Šiame etape bus identifikuojami kritiniai tinklo elementai ir „silpnosios vietos“ (bottleneck), kurios riboja AEI integraciją. Toliau bus lyginami priemonių scenarijai su tuo pačiu AEI lygiu (pavyzdžiui, tas pats AEI kiekis, bet skirtingos priemonės). Tai leis aiškiai įvertinti priemonių efektą ir palyginti, kuri priemonė sumažina ribojimų mastą labiausiai bei kuriose situacijose ji efektyviausia. Palyginimas bus atliekamas pagal techninius rodiklius (ribojama galia/energija, perkrovų pokytis, įtampos), o papildomai bus atliekamas ir ekonominis palyginimas (€/MWh sumažinto ribojimo bei prarastos energijos vertė). Rezultatai bus pateikiami keliomis formomis: pagrindiniai rodikliai bus apibendrinami lentelėse, o skirtumai tarp scenarijų bus parodomi grafiškai. Taip pat bus pateikiami pavyzdiniai PSS/E modeliavimo rezultatai, pavyzdžiui, vienos linijos schemos fragmentai ar ataskaitų išvestys, kad būtų aišku, kaip konkrečiai nustatyti ribojimai ir kokie elementai buvo kritiniai [27].

Galutinės išvados bus formuluojamos remiantis tuo, kurie sprendimai:

1. labiausiai sumažina AEI ribojimus techniniu požiūriu,
2. pagerina tinklo būklę (mažiau perkrovų, stabilesnės įtampos),
3. turi geriausią sąnaudų ir poveikio santykį (ekonominiu požiūriu).

Tokiu būdu rezultatų palyginimas leis ne tik įvertinti AEI integracijos ribojimus, bet ir pagrįsti, kurios priemonės yra perspektyviausios AEI ribojimų mažinimui ir tinklo lankstumo didinimui.

3. AEI generacijos ribojimų 110 kV perdavimo tinkle modeliavimo rezultatai ir mažinimo priemonių palyginimas

Šios darbo dalies tikslas - praktiškai įvertinti, kaip pasirinktoje supaprastintoje 110 kV perdavimo tinklo zonoje didėjanti atsinaujinančių energijos išteklių generacija pradeda kelti techninius tinklo ribojimus, kokie tinklo elementai tampa kritiniai ir kurios priemonės šiuos ribojimus mažina efektyviausiai. Tiriama dalis grindžiama stacionaria galios srautų analize, atliekama PSS/E aplinkoje [27, 30].

Tyrimo ribojimas laikomas pasiektu tuomet, kai tenkinama bent viena iš šių sąlygų:

1. bent vienos linijos apkrova viršija 100 % leistinos ilgalaikės apkrovos;
2. bent vieno mazgo įtampa išeina už 0,95-1,05 p.u. intervalo ribų.

Tokia ribojimų identifikavimo logika atitinka metodinėje darbo dalyje apibrėžtą galios srautų analizės principą: kiekvienam scenarijui nustatoma tinklo elementų apkrova, mazgų įtampos ir kritiniai tinklo elementai. Kadangi šiame darbe nagrinėjami stacionarūs režimai, pagrindinis dėmesys skiriamas linijų pralaidumo ir įtampos riboms, o dinaminis stabilumas, dažnio stabilumas, apsaugų veikimas ir trumpųjų jungimų režimai į šio tyrimo ribas neįtraukiami [27, 30].

Tyrimas atliekamas etapais. Pirmiausia sudaromas bazinis tinklo modelis ir patikrinama, ar jis veikia be techninių pažeidimų. Toliau pasirenkami reprezentatyvūs darbo režimai, kuriuose AEI ribojimai yra labiausiai tikėtini. Tuomet AEI generacija didinama etapais, kol nustatomas pirmasis techninis ribojimas. Nustačius kritinį režimą, tame pačiame AEI lygyje lyginamos trys ribojimus mažinančios priemonės [27, 30].

1. baterijų energijos kaupimo sistema, toliau - BESS;
2. tinklo pralaidumo didinimas;
3. elektromobilių įkrovimo lankstumas, toliau - EV lankstumas.

Pagal atliktų PSS/E skaičiavimų rezultatus pagrindiniu kritiniu režimu pasirinktas R4_4 atvejis. Šiame režime vėjo generacija ties 200 mazgu sudaro 160 MW, saulės generacija ties 500 mazgu taip pat sudaro 160 MW, o bendra AEI generacija siekia 320 MW. Šiuo atveju perkraunamos dvi tinklo linijos: L6 500-100 apkraunama 116,3 %, o L4 600-200 apkraunama 106,0 %. Todėl R4_4 režimas naudojamas kaip pagrindinis palyginamasis taškas BESS, tinklo stiprinimo ir EV lankstumo priemonių poveikiui įvertinti.

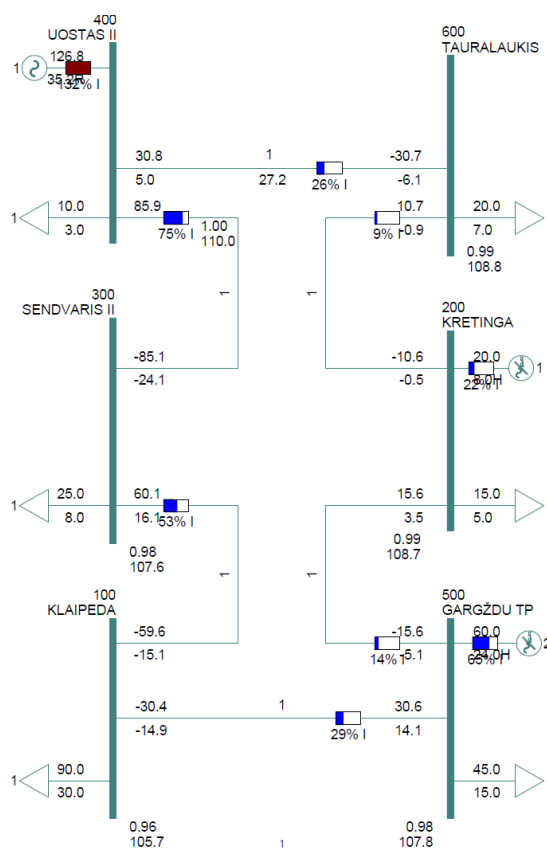
Svarbu pabrėžti, kad priemonių poveikis vertinamas ne abstrakčiai, o to paties kritinio režimo ir to paties AEI generacijos lygio sąlygomis. Tai leidžia užtikrinti, kad skirtumus tarp scenarijų lemia ne skirtingos pradinės sąlygos, o konkrečios ribojimus mažinančios priemonės poveikis tinklui.

3.1. Modeliuojama sistema ir jos supaprastinimo logika

Šiame darbe modeliuojama supaprastinta 110 kV perdavimo tinklo zona. Modelis sudarytas iš šešių 110 kV mazgų ir šešių 110 kV oro linijų, sujungtų žiedine struktūra. Modelis nėra skirtas tiksliai atkartoti visą Lietuvos elektros energetikos sistemą ar konkrečią realaus tinklo schemą su visais jos elementais. Jo paskirtis - sudaryti pakankamai realistišką tinklo fragmentą, kuriame būtų galima

vertinti AEI generacijos didinimo poveikį, nustatyti kritinius elementus ir palyginti ribojimų mažinimo priemones [28, 30].

Supaprastintos 110 kV perdavimo tinklo zonos struktūra, naudojama scenarijų ir galios srautų analizei, pateikta 13 pav.



12 pav. Supaprastinta 110 kV perdavimo tinklo zona

Nors mazgų pavadinimai parinkti pagal realius 110 kV tinklo objektus, šiame darbe jie naudojami supaprastintam reprezentatyviam tinklo modeliui sudaryti, todėl rezultatai interpretuojami ne kaip konkretaus tinklo projekto skaičiavimas, o kaip scenarijų palyginimo analizė. Pasirinkta žiedinė tinklo struktūra yra tinkama šiam tyrimui, nes joje galios srautai gali pasiskirstyti keliais perdavimo keliais. Dėl to galima stebėti ne tik vienos linijos perkrovą, bet ir tai, kaip pašalinus vieną ribojimą apkrovos persiskirsto į kitus tinklo elementus. Tai ypač svarbu vertinant tinklo stiprinimo scenarijus, nes vieno elemento sustiprinimas ne visada pašalina bendrą tinklo ribojimą - jis gali tik perkelti problemą į kitą liniją. Modeliuojama sistema taip pat leidžia atskirti skirtingų AEI šaltinių poveikį. Saulės generacija modeliuojama 500 mazge, vėjo generacija - 200 mazge, o pagrindinis vartojimo centras priskiriamas 100 mazgui. Tokia struktūra leidžia įvertinti, kaip skiriasi saulės ir vėjo generacijos sukelti galios srautai bei kurie tinklo koridoriai tampa labiausiai apkrauti [27, 30].

3.2. Modelio aprašas

3 lentelė. Modelio aprašas

Bus Nr.	PSS/E pavadinimas	Funkcinis vaidmuo	Paaškinimas
100	KLAIPEDA	Pagrindinis vartojimo centras	Didžiausias apkrovos mazgas. Šiame mazge modeliuojamas EV lankstumas S4 scenarijuje.

Bus Nr.	PSS/E pavadinimas	Funkcinis vaidmuo	Paiškinimas
200	KRETINGA	Vėjo generacijos prijungimo mazgas	Mazgas, kuriame modeliuojama dominuojanti vėjo generacija.
300	SENDVARIS II	Tarpinis 110 kV mazgas	Viršutinės tinklo šakos perdavimo grandis tarp vartojimo centro ir atraminio mazgo.
400	UOSTAS II	Atraminis / išorinio tinklo mazgas	Swing mazgas, per kurį balansuojamas aktyviosios ir reaktyviosios galios perteklius arba trūkumas.
500	GARGŽDŲ TP	Saulės generacijos prijungimo mazgas	Mazgas, kuriame modeliuojama dominuojanti saulės generacija. S2 scenarijuje čia prijungiamas BESS įkrovimas.
600	TAURALAUKIS	Tarpinis 110 kV mazgas	Dešinės tinklo šakos perdavimo grandis tarp atraminio mazgo ir vėjo generacijos mazgo.

Toks mazgų vaidmenų paskirstymas leidžia aiškiai interpretuoti modeliavimo rezultatus. Jeigu ribojimai atsiranda L6 linijoje, jie daugiausia siejami su saulės generacijos eksportu iš 500 mazgo. Jeigu ribojimai atsiranda L4 arba L5 linijose, jie siejami su vėjo generacijos eksportu iš 200 mazgo. Mišrios generacijos atveju vienu metu gali būti apkraunami abu tinklo koridoriai.

4 lentelė. Modelio topologija

Linija	Nuo bus	Iki bus	Paskirtis	Bazinė riba, MVA
L1	100	300	Vartojimo centro jungtis su viršutine tinklo šaka	120
L2	300	400	Viršutinės šakos ryšys su atraminiu mazgu	120
L3	400	600	Atraminio mazgo jungtis su dešine tinklo šaka	120
L4	600	200	Dešinysis perdavimo koridorius į vėjo generacijos mazgą	120
L5	200	500	Apatinis ryšys tarp vėjo ir saulės generacijos mazgų	120
L6	500	100	Ryšys tarp saulės generacijos mazgo ir vartojimo centro	120

Tokia topologija leidžia stebėti kelis svarbius galios srautų mechanizmus. Saulės generacijos didinimas 500 mazge pirmiausia didina L6 500-100 linijos apkrovą, nes perteklinė generacija perduodama vartojimo centro kryptimi. Vėjo generacijos didinimas 200 mazge labiausiai veikia L4 600-200 ir L5 200-500 koridorius. Kai vienu metu didinama tiek vėjo, tiek saulės generacija, formuojasi mišrus srautų pasiskirstymas, todėl gali atsirasti ne vienas, o keli kritiniai tinklo elementai.

5 lentelė. Pagrindiniai duomenų šaltiniai ir jų panaudojimas

Duomenų tipas	Šaltinis	Paskirtis modelyje	Kaip panaudota šiame tyrime
Apkrovos duomenys	ENTSO-E ir metodinės prielaidos	Reprezentatyvių režimų sudarymas	Modeliuose naudojami keli apkrovos lygiai: 205 MW, 138,3 MW, 184,5 MW ir papildoma lanksti apkrova S4 scenarijuje.
Saulės generacija	PVGIS ir metodinės prielaidos	Vasaros vidurdienio ir mišrios AEI režimų sudarymas	Saulės generacija modeliuojama 500 mazge. R1 serijoje ji didinama etapais, o R4 kritiniame taške sudaro 160 MW.
Vėjo generacija	Vėjo generacijos literatūra ir metodinės prielaidos	Vėjo dominavimo režimų sudarymas	Vėjo generacija modeliuojama 200 mazge. R2 ir R3 serijose ji didinama etapais, o R4 kritiniame taške sudaro 160 MW.

Duomenų tipas	Šaltinis	Paskirtis modelyje	Kaip panaudota šiame tyrime
Tinklo topologija ir linijų ribos	PSS/E RAW modelis, Litgrid ir tipinės 110 kV prielaidos	Tinklo elementų, linijų ir pralaidumo ribų parinkimas	Modelyje naudojami 6 mazgai ir 6 linijos. Bazinė visų linijų RATE1 vertė yra 120 MVA.
Galios srautų metodika	PSS/E Power Flow principai	Stacionarios analizės pagrindas	Linijų apkrovos apskaičiuojamos pagal mazgų režimo dydžius ir linijų parametrus.

Kad modeliavimas būtų įmanomas ir rezultatai būtų palyginami, dalis parametrų parenkama pagal tipines 110 kV tinklo prielaidas. Šis darbas nėra skirtas tiksliai rekonstruoti realią perdavimo tinklo schemą, todėl supaprastinimai laikomi priimtinais, jei jie netrukdo pasiekti pagrindinio tyrimo tikslo - palyginti skirtingų priemonių poveikį AEI ribojimams [28, 30].

3.3. Modeliuoti režimai ir scenarijai

Metodikoje numatyti trys pagrindiniai reprezentatyvūs režimai: vasaros vidurdienis, minimalios apkrovos režimas ir padidintos vėjo generacijos režimas. Atliekant modeliavimą papildomai įtrauktas ketvirtas režimas R4. Jis nelaikomas metodikos pakeitimu, o naudojamas kaip papildomas kombinuotas jautrumo režimas, leidžiantis įvertinti vienalaikį vėjo ir saulės generacijos poveikį tinklo srautams [22, 23, 31].

6 lentelė. Tiriamieji režimai

Režimas	Esmė	Labiausiai tikėtinas ribojimas
R1 - vasaros vidurdienis	Didinama saulės generacija 500 mazge, vėjo generacija laikoma maža	L6 500-100 linijos pralaidumo ribojimas
R2 - minimali apkrova	Sumažinta apkrova, didinama vėjo generacija 200 mazge	Pradinis įtampos jautrumas ir vėliau L4 600-200 perkrova
R3 - padidintos vėjo generacijos režimas	Didinama vėjo generacija 200 mazge, saulės generacija laikoma maža	L4 600-200 ir L5 200-500 pralaidumo ribojimai
R4 - mišrios didelės AEI generacijos režimas	Vienu metu didinama vėjo ir saulės generacija	L6 500-100 ir L4 600-200 koridorių perkrova

7 lentelė. Režimų sudarymo logika pagal modelio mazgus

Režimas	Dominuojantis AEI mazgas	Vartojimo lygis	Naudojimas darbe
R1	500 mazgas, saulė	Bazinis, apie 205 MW	Saulės dominavimo scenarijams vertinti
R2	200 mazgas, vėjas	Minimali apkrova, apie 138,3 MW	Mažos apkrovos ir vėjo generacijos jautrumui vertinti
R3	200 mazgas, vėjas; 500 mazge maža saulės generacija	Sumažintas / vidutinis, apie 184,5 MW	Vėjo dominavimo scenarijams vertinti
R4	200 ir 500 mazgai kartu	Sumažintas / vidutinis, apie 184,5 MW	Kritiniam mišrios AEI režimui ir priemonių palyginimui

Tiriamieji režimai parinkti taip, kad atspindėtų skirtingas AEI dominavimo ir tinklo apkrovimo situacijas. R1 režimas parodo saulės generacijos poveikį, R2 ir R3 režimai - vėjo generacijos poveikį, o R4 režimas leidžia įvertinti kombinuotą dviejų AEI šaltinių įtaką. Dėl šios priežasties R4 režimas pasirinktas tolesniam BESS, tinklo stiprinimo ir EV lankstumo priemonių palyginimui.

8 lentelė. Tiriamųjų scenarijų logika

Scenarijus	Aprašymas	Papildoma priemonė	Tikslas	Naudoti modeliavimo atvejai
S0	Bazinė tinklo būseną pasirinktame režime	Nėra	Patikrinti, ar pradinis režimas neturi perkrovų ir įtampos pažeidimų	S0_R1-S0_R4
S1	Nuosekliai didinama AEI generacija iki ribojimo	Nėra	Nustatyti kritinį AEI lygį ir ribojantį elementą	R1_2-R1_10, R2_1-R2_13, R3_2-R3_11, R4_2-R4_4
S2	Tas pats R4_4 kritinis AEI lygis ir BESS įkrovimas	BESS 500 mazge	Įvertinti kaupimo poveikį L6 ir L4 ribojimams	S2_1-S2_6
S3A	Tas pats R4_4 kritinis AEI lygis ir vienos kritinės linijos stiprinimas	Stiprinama tik L6 linija	Patikrinti, ar vienos linijos stiprinimo pakanka	S3A_1-S3A_3
S3B	Tas pats R4_4 kritinis AEI lygis ir dviejų kritinių linijų stiprinimas	Stiprinamos L6 ir L4 linijos	Patikrinti, ar abiejų kritinių linijų stiprinimas pašalina ribojimus	S3B_1-S3B_3
S4	Tas pats R4_4 kritinis AEI lygis ir EV įkrovimo perkėlimas	EV lankstumas 100 mazge	Įvertinti paklausos pusės lankstumo poveikį ribojimams	S4_1-S4_4

Pirmiausia kiekviename režime sudaromas bazinis S0 scenarijus. Toliau AEI generacija didinama etapais, kol nustatomas pirmasis ribojimas. Nustačius kritinį AEI lygį, tame pačiame režime tikrinamos ribojimus mažinančios priemonės. Toks scenarijų sudarymas leidžia priemones palyginti tiesiogiai, nes jų poveikis vertinamas tomis pačiomis tinklo sąlygomis [27, 30]. S3 scenarijų atveju svarbu atskirti techninio modeliavimo bandymus nuo ekonominės analizės alternatyvų. Techninėje dalyje S3A žymi vienos kritinės linijos L6 stiprinimo bandymą, o S3B - dviejų kritinių linijų L6 ir L4 stiprinimo bandymą. Kadangi S3A techniniu požiūriu nepašalina visų perkrovų, jis nėra laikomas galutine tinkama ekonominės analizės alternatyva. Ekonominėje dalyje tinklo stiprinimo alternatyvos pervadinamos taip: S3-REC - abiejų kritinių linijų L6 ir L4 rekonstrukcija, o S3-NEW - naujos paralelinės linijos arba papildomos grandinės įrengimas tame pačiame kritiniame koridoriuje. Tokiu būdu išvengiama painiavos tarp techninių modeliavimo bandymų ir ekonominių investicinių alternatyvų.

3.3.1. S0 scenarijaus analizė

S0 scenarijus skirtas patikrinti, ar pradinis modelis yra techniškai tinkamas tolesnei analizei. Šiame etape vertinama, ar modelis susiskaičiuoja be techninių pažeidimų, ar mazgų įtampos išlieka leistinose ribose ir ar nė viena linija nėra perkrauta [27].

9 lentelė. S0 scenarijų analizės rezultatai

Režimas	Dominuojantis AEI	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Labiausiai apkrauta linija	Swing P/Q	Pastaba
S0_R1	Saulė 60 MW + vėjas 20 MW	0,961	1,000	L2 300-400 - 75,1 %	126,8 MW / 35,2 Mvar	Ribojimų nėra
S0_R2	Vėjas 40 MW, minimali apkrova	0,951	1,000	L2 300-400 - 67,2 %	99,9 MW / 50,5 Mvar	Ribojimų nėra

Režimas	Dominuojantis AEI	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Labiausiai apkrauta linija	Swing P/Q	Pastaba
S0_R3	Vėjas 80 MW + saulė 10 MW	0,956	1,000	L2 300-400 - 72,4 %	96,6 MW / 37,3 Mvar	Ribojimų nėra
S0_R4	Mišri AEI: vėjas 100 MW + saulė 100 MW	0,973	1,000	L6 500-100 - 70,5 %	-13,0 MW / 42,6 Mvar	Ribojimų nėra

S0 rezultatai rodo, kad pradiniai režimai yra techniškai priimtini. Visais atvejais mazgų įtampos išlieka 0,95-1,05 p.u. intervale, o linijų apkrovos neviršija 100 %. Tai reiškia, kad bazinis modelis nėra perkrautas ir gali būti naudojamas tolesnei AEI generacijos didinimo analizei. S0_R4 atveju swing mazgo aktyvioji galia yra neigiama, nes mišrios AEI generacijos lygis jau yra pakankamai didelis ir modeliuojama tinklo zona pradeda eksportuoti perteklinę aktyviają galią į išorinį tinklą. Tai yra logiškas rezultatas, rodantis, kad didėjant AEI generacijai zona iš vartojančios tampa generuojančia.

3.3.2. S1 scenarijus - AEI plėtra iki ribojimo

S1 scenarijuje AEI generacija didinama etapais, o po kiekvieno žingsnio atliekama galios srautų analizė. Šio scenarijaus tikslas - nustatyti, nuo kokio AEI lygio tinkle atsiranda techninis ribojimas ir kuris elementas tampa kritinis [27].

10 lentelė. S1 AEI plėtros analizės rezultatai

Režimas	Byla	AEI lygis, MW	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Kritinė linija / elementas	Apkrova, %	Ribojimo tipas	Ar reikia riboti generaciją
R1	R1_2	100	0,970	1,000	L2 300-400	64,3	Nėra	Ne
R1	R1_3	120	0,973	1,000	L2 300-400	54,8	Nėra	Ne
R1	R1_4	140	0,973	1,000	L6 500-100	56,2	Nėra	Ne
R1	R1_5	160	0,972	1,000	L6 500-100	65,2	Nėra	Ne
R1	R1_6	180	0,972	1,000	L6 500-100	74,3	Nėra	Ne
R1	R1_7	200	0,971	1,000	L6 500-100	83,6	Nėra	Ne
R1	R1_8	220	0,971	1,000	L6 500-100	92,9	Nėra	Ne
R1	R1_9	240	0,970	1,000	L6 500-100	102,3	Linijos perkrova	Taip
R1	R1_10	260	0,969	1,000	L6 500-100	111,7	Linijos perkrova	Taip
R2	R2_1	20	0,946	1,000	L2 300-400	74,2	Įtampa < 0,95 p.u.	Reikalinga režimo korekcija
R2	R2_2	40	0,951	1,000	L2 300-400	67,2	Nėra	Ne
R2	R2_3	60	0,956	1,000	L2 300-400	60,3	Nėra	Ne
R2	R2_4	80	0,959	1,000	L2 300-400	54,6	Nėra	Ne
R2	R2_5	100	0,959	1,000	L5 200-500	52,1	Nėra	Ne
R2	R2_6	120	0,959	1,000	L5 200-500	57,6	Nėra	Ne
R2	R2_7	140	0,958	1,000	L5 200-500	63,1	Nėra	Ne
R2	R2_8	160	0,958	1,000	L5 200-500	68,8	Nėra	Ne

Režimas	Byla	AEI lygis, MW	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Kritinė linija / elementas	Apkrova, %	Ribojimo tipas	Ar reikia riboti generaciją
R2	R2_9	180	0,957	1,000	L5 200-500	74,5	Nėra	Ne
R2	R2_10	200	0,956	1,000	L5 200-500	80,3	Nėra	Ne
R2	R2_11	220	0,956	1,000	L4 600-200	90,9	Nėra	Ne
R2	R2_12	240	0,955	1,000	L4 600-200	101,7	Linijos perkrova	Taip
R2	R2_13	260	0,953	1,000	L4 600-200	112,5	Linijos perkrova	Taip
R3	R3_2	110	0,956	1,000	L2 300-400	67,4	Nėra	Ne
R3	R3_3	130	0,956	1,000	L2 300-400	62,5	Nėra	Ne
R3	R3_4	150	0,955	1,000	L5 200-500	65,8	Nėra	Ne
R3	R3_5	170	0,955	1,000	L5 200-500	71,5	Nėra	Ne
R3	R3_6	190	0,954	1,000	L5 200-500	77,3	Nėra	Ne
R3	R3_7	210	0,954	1,000	L5 200-500	83,1	Nėra	Ne
R3	R3_8	230	0,953	1,000	L5 200-500	88,9	Nėra	Ne
R3	R3_9	250	0,952	1,000	L4 600-200	95,7	Nėra	Ne
R3	R3_10	270	0,951	1,000	L4 600-200	106,4	Linijos perkrova	Taip
R3	R3_11	290	0,950	1,000	L4 600-200	117,2	Įtampa arti ribos ir linijos perkrova	Taip
R4	R4_2	240	0,972	1,000	L6 500-100	85,6	Nėra	Ne
R4	R4_3	280	0,971	1,000	L6 500-100	100,9	Linijos perkrova	Taip
R4	R4_4	320	0,969	1,000	L6 500-100	116,3	Linijos perkrova	Taip

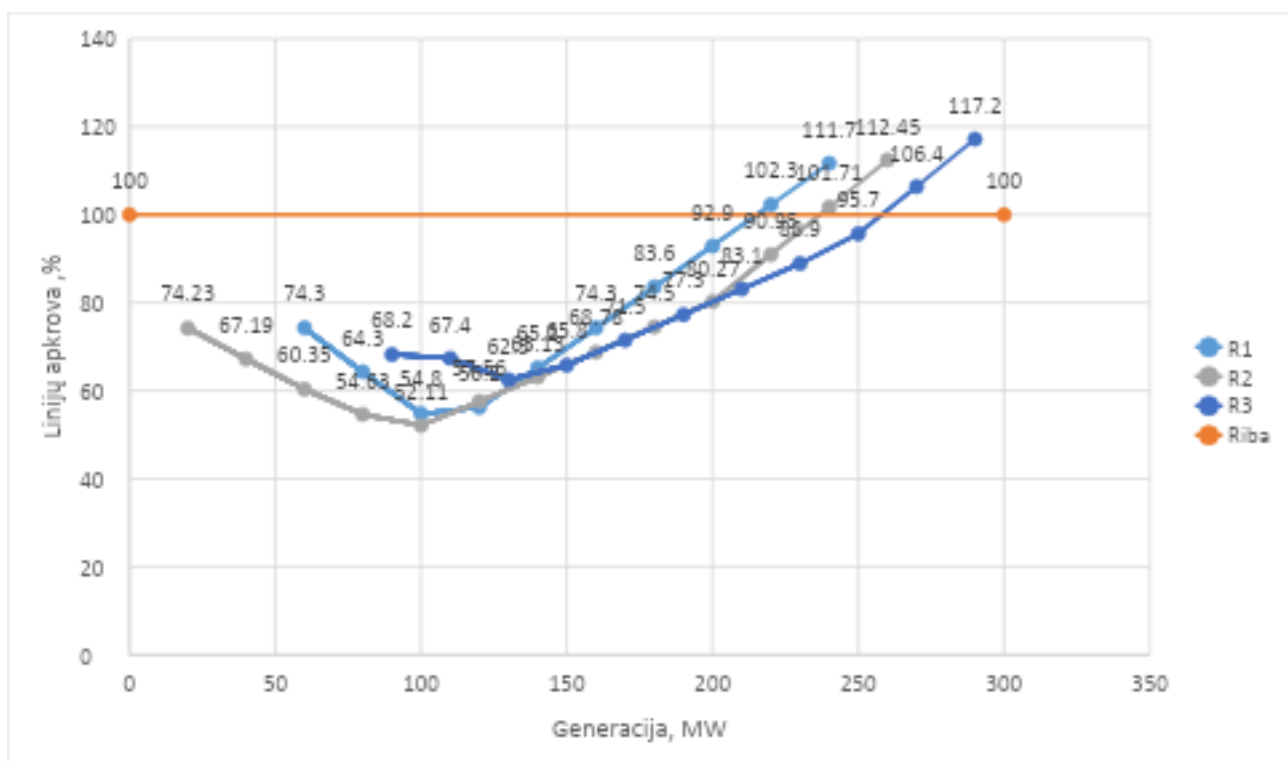
R1 rezultatai rodo, kad saulės generacijos didinimas pirmiausia apkrauna L6 500-100 liniją. Iki 220 MW AEI lygio ribojimų nėra, tačiau pasiekus 240 MW L6 apkrova padidėja iki 102,3 %. Tai reiškia, kad saulės dominavimo režime pirmasis ribojimas yra linijos pralaidumo pobūdžio.

R2 režime išskirtinis yra R2_1 atvejis, kuriame minimali mazgo įtampa sumažėja iki 0,946 p.u. Šis rezultatas rodo, kad minimalios apkrovos režime įtampos profilis priklauso ne tik nuo aktyviosios galios apkrovos, bet ir nuo lokalių generacijos pasiskirstymo bei reaktyviosios galios balanso. Didėjant vėjo generacijai 200 mazge, dalis galios poreikio padengiama lokaliai, todėl įtampos profilis pagerėja. Dėl šios priežasties R2 pradžioje pastebimas įtampos ribos jautrumas, o toliau didinant vėjo generaciją pagrindiniu ribojimu tampa L4 600-200 linijos perkrova.

R3 režime didėjanti vėjo generacija palaipsniui didina L5 ir L4 koridorių apkrovas. Pirmasis aiškus pralaidumo ribojimas atsiranda R3_10 atveju, kai L4 600-200 linijos apkrova pasiekia 106,4 %. Tai rodo, kad vėjo dominavimo atveju ribojimas formuojasi dešiniajame perdavimo koridoriuje.

R4 režimas parodo mišrios AEI generacijos poveikį. Jame vienu metu didinama tiek vėjo, tiek saulės generacija, todėl apkraunami abu pagrindiniai perdavimo keliai. R4_3 atveju L6 apkrova jau pasiekia

100,9 %, o R4_4 atveju L6 apkrova padidėja iki 116,3 %, kartu atsiranda ir L4 perkrova. Dėl to R4_4 režimas yra tinkamiausias priemonių palyginimui.



13 pav. AEI plėtros analizės rezultatai

3.3.3. Kritinio AEI lygio ir kritinių elementų suvestinė

11 lentelė. Kritinio AEI lygio ir kritinių elementų suvestinė

Režimas	Kritinis AEI lygis, MW	Pirmas ribojimas	Kritinis elementas 1	Kritinis elementas 2	Dominuojantis mechanizmas
R1	240	Linijos perkrova	L6 500-100, 102,3 %	—	Saulės generacijos eksportas per L6
R2	240	Linijos perkrova	L4 600-200, 101,7 %	—	Vėjo generacijos eksportas per L4; pradžioje pastebimas įtampos jautrumas
R3	270	Linijos perkrova	L4 600-200, 106,4 %	L5 200-500 kaip antrinis stebimas koridorius	Vėjo generacijos sukeltas regioninis pralaidumo ribojimas
R4	280	Linijos perkrova	L6 500-100, 100,9 %	R4_4 taške papildomai L4 600-200, 106,0 %	Mišrus AEI eksportas per L6 ir L4 koridorius

S1 analizė leidžia daryti tris pagrindines išvadas. Pirmą, visais pagrindiniais AEI didinimo atvejais dominuojantis ribojimas yra linijų pralaidumas, o ne įtampos viršijimas. Antra, ribojimo vieta priklauso nuo to, kuriame mazge koncentruojama generacija. Trečia, mišrios AEI generacijos režime ribojimai tampa sudėtingesni, nes perkraunamas ne vienas elementas, o keli perdavimo koridoriai.

3.3.4. S2: BESS poveikis ribojimams

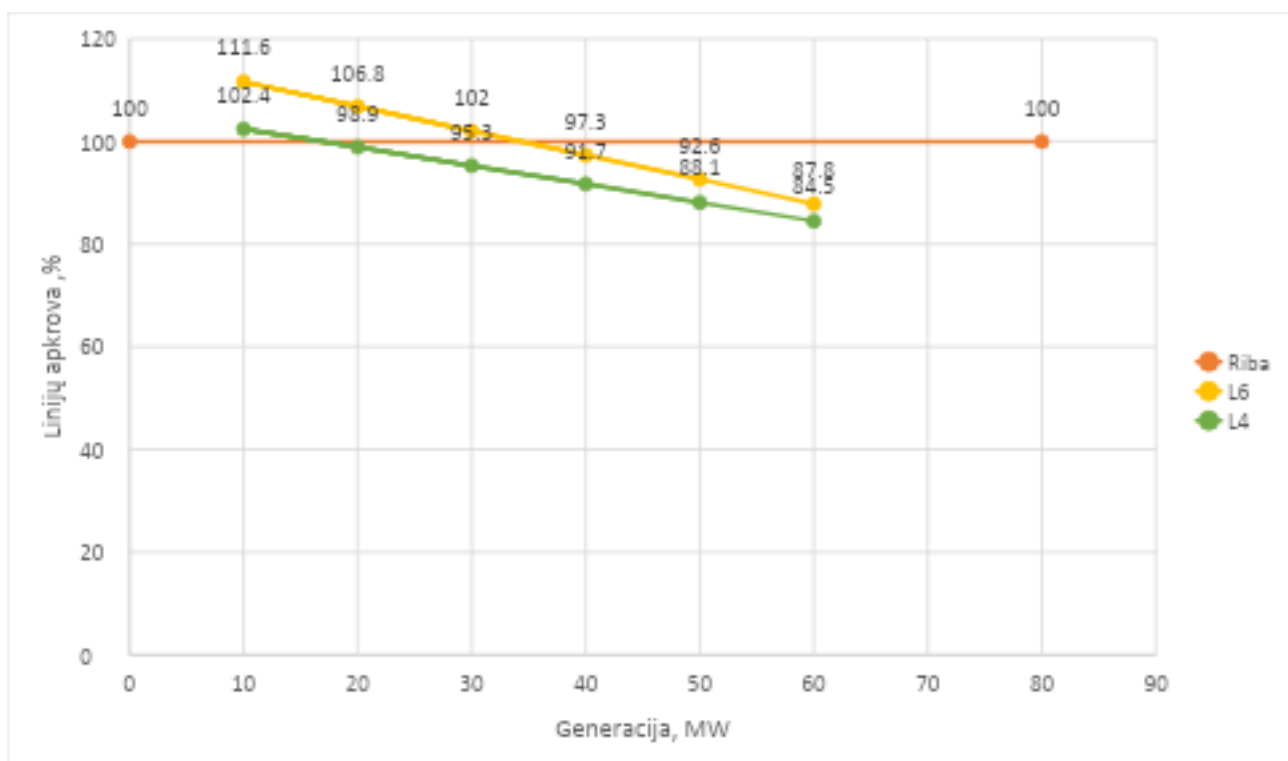
S2 scenarijuje vertinama, kaip baterijų energijos kaupimo sistema keičia kritinio R4_4 režimo galios srautus. BESS modeliuojamas 500 mazge, t. y. tame pačiame mazge, kuriame prijungta saulės generacija. Šiame darbe BESS Power Flow skaičiavimuose vertinamas kaip aktyviosios galios įkrovimo režimu veikianti priemonė, sugerianti perteklinę AEI generaciją ir mažinanti eksportą į tinklą [24, 25, 27].

12 lentelė. S2 BESS scenarijų analizė

BESS galia, MW	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Kritinė linija 1, %	Kritinė linija 2, %	Swing PG, MW	Swing QG, Mvar	Ribojimo sumažėjimas
0	0,969	1,000	L6 116,3	L4 106,0	-126,6	78,9	Bazinis S1 kritinis taškas
10	0,970	1,000	L6 111,6	L4 102,4	-117,3	75,5	Perkrova sumažėja, bet dar išlieka
20	0,970	1,000	L6 106,8	L4 98,9	-107,9	72,1	L4 perkrova pašalinama, L6 dar viršija 100 %
30	0,971	1,000	L6 102,0	L4 95,3	-98,5	68,8	L6 perkrova dar išlieka
40	0,971	1,000	L6 97,3	L4 91,7	-89,1	65,6	Perkrova pašalinama
50	0,972	1,000	L6 92,6	L4 88,1	-79,6	62,5	Perkrova pašalinama, papildoma nauda mažėja
60	0,972	1,000	L6 87,8	L4 84,5	-70,0	59,5	Perkrova pašalinama, didėja tinklo rezervas

BESS rezultatai rodo nuoseklų kritinių linijų apkrovos mažėjimą. Pradiniame R4_4 taške L6 apkrova siekia 116,3 %, o L4 - 106,0 %. Didinant BESS įkrovimo galią, abi apkrovos mažėja. 20 MW BESS galia jau pašalina L4 perkrovą, tačiau L6 linija vis dar lieka perkrauta. 40 MW BESS galia sumažina L6 apkrovą iki 97,3 %, o L4 apkrovą iki 91,7 %, todėl perkrovos visiškai pašalinamos. Techniniu požiūriu 40 MW BESS yra racionaliausias iš bandytų variantų, nes tai mažiausia bandyta BESS galia, kuri pašalina abu kritinius ribojimus. Didesnė BESS galia, pavyzdžiui, 50 arba 60 MW, dar labiau sumažina linijų apkrovas, tačiau ribinė nauda mažėja, nes pagrindinis techninis ribojimas jau yra pašalintas. Šie rezultatai rodo, kad BESS yra efektyvus tada, kai jis prijungiamas arti perteklinės

generacijos mazgo. Šiuo atveju BESS 500 mazge sumažina saulės generacijos eksportą per L6 liniją ir kartu sumažina bendrą mišrios AEI generacijos poveikį tinklo koridoriams.



14 pav. BESS scenarijų analizė

3.3.5. S3 scenarijus - tinklo stiprinimas

S3 scenarijuje vertinama, kaip kritinių tinklo elementų pralaidumo padidinimas keičia R4_4 kritinio režimo rezultatus. Atliekami du techniniai bandymai [27].

- S3A - stiprinama tik viena kritinė linija L6 500-100;
- S3B - stiprinamos dvi kritinės linijos L6 500-100 ir L4 600-200.

Toks atskyrimas leidžia patikrinti, ar ribojimą lemia tik viena linija, ar platesnis perdavimo koridorius. Jeigu vienos linijos stiprinimo nepakanka, tai reiškia, kad tinklo ribojimas persikelia į kitą elementą ir reikalingas platesnis infrastruktūrinis sprendimas.

13 lentelė. S3 tinklo stiprinimo scenarijų analizė

Scenarijus	L6 riba, MVA	L4 riba, MVA	Max apkrova po stiprinimo	Min V, p.u.	Ribojimo sumažėjimas	Pastaba
S3A_140	140	120	L4 600-200 - 106,0 %	0,969	L6 perkrova sumažinama, bet bendra perkrova išlieka	Vienos linijos stiprinimo nepakanka
S3A_160	160	120	L4 600-200 - 106,0 %	0,969	L6 nebėra ribojanti, bet L4 vis dar perkrauta	Ribojimas persikelia į L4
S3A_180	180	120	L4 600-200 - 106,0 %	0,969	Vienos linijos stiprinimas nepašalina bendro ribojimo	Lieka L4 perkrova

Scenarijus	L6 riba, MVA	L4 riba, MVA	Max apkrova po stiprinimo	Min V, p.u.	Ribojimo sumažėjimas	Pastaba
S3B_140	140	140	L6 500-100 - 99,7 %	0,969	Perkrova pašalinama	Mažiausias techniškai pakankamas stiprinimo variantas
S3B_160	160	160	L3 400-600 - 91,7 %	0,969	Perkrova pašalinama, atsiranda didesnis rezervas	Perkrova pašalinta
S3B_180	180	180	L3 400-600 - 91,7 %	0,969	Perkrova pašalinama, papildomas rezervas didėja	Perkrova pašalinta

S3A rezultatai rodo, kad vien tik L6 500-100 linijos stiprinimas nėra pakankamas. Nors L6 perkrova sumažinama, bendra tinklo problema išlieka, nes L4 600-200 linija lieka apkrauta 106,0 %. Tai reiškia, kad R4_4 režime ribojimas nėra vieno elemento problema - jis susijęs su platesniu galios srautų pasiskirstymu tinkle.

S3B rezultatai rodo, kad abiejų kritinių linijų L6 ir L4 stiprinimas pašalina perkrovas jau tada, kai jų ribos padidinamos iki 140 MVA. S3B_140 atveju L6 apkrova sumažėja iki 99,7 %, o L4 taip pat neviršija leistinos ribos. Taigi 140 MVA dviejų linijų stiprinimas yra mažiausias iš bandytų infrastruktūrinių sprendinių, kuris techniškai pašalina R4_4 režime nustatytas perkrovas.

Šie rezultatai yra svarbūs, nes parodo ribojimo persikėlimo efektą. Jeigu stiprinamas tik vienas elementas, problema gali išlikti kitame tinklo koridoriuje. Todėl tinklo stiprinimo priemonės turi būti vertinamos ne izoliuotai, o atsižvelgiant į bendrą srautų persiskirstymą tinkle.

3.3.6. S4 scenarijus - EV lankstumas

S4 scenarijuje elektromobilių įkrovimo lankstumas modeliuojamas kaip papildoma aktyvioji apkrova 100 mazge. Ši apkrova interpretuojama ne kaip naujas nuolatinis vartojimas, o kaip į perteklinės AEI generacijos laiką perkeltas EV įkrovimas. Tokia prielaida atitinka paklausos pusės lankstumo logiką: vartojimas perkeliamas į laiką, kai sistemoje yra perteklinė atsinaujinanti generacija [10, 11, 17, 18].

Svarbu pabrėžti, kad šiame tyrime nagrinėjama tik viena EV lankstumo prijungimo vieta - 100 mazgas. Todėl S4 rezultatai neturėtų būti interpretuojami kaip bendra išvada, kad EV lankstumas visada yra neefektyvus. Jie parodo konkretaus EV prijungimo taško poveikį nagrinėjamai tinklo topologijai.

14 lentelė. S4 EV lankstumo scenarijų analizė

EV lankstumo galia, MW	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Kritinė linija 1, %	Kritinė linija 2, %	Swing PG, MW	Ribojimo sumažėjimas	Pastaba
0	0,969	1,000	L6 116,3	L4 106,0	-126,6	Bazinis S1 kritinis taškas	—
10	0,968	1,000	L6 118,4	L4 104,0	-116,7	Pablogėja pagal L6	EV 100 mazge didina L6 apkrovą
20	0,967	1,000	L6 120,4	L4 102,0	-106,9	Pablogėja pagal L6	L4 mažėja, bet L6 didėja

EV lankstumo galia, MW	Min V, p.u.	Max V, p.u.	Kritinė linija 1, %	Kritinė linija 2, %	Swing PG, MW	Ribojimo sumažėjimas	Pastaba
30	0,966	1,000	L6 122,5	L4 100,0	-97,0	Pablogėja pagal L6	L4 beveik pašalinama, tačiau L6 blogėja
40	0,965	1,000	L6 124,6	L4 98,0	-87,1	Pablogėja pagal L6	L4 pašalinama, bet pagrindinė L6 perkrova padidėja

S4 rezultatai rodo, kad EV lankstumas, prijungtas 100 mazge, nagrinėjamoje topologijoje nepašalina AEI ribojimo. Didinant EV apkrovą, L4 600-200 apkrova mažėja nuo 106,0 % iki 98,0 %, tačiau L6 500-100 linijos apkrova didėja nuo 116,3 % iki 124,6 %. Tai reiškia, kad viena ribojimo vieta pagerinama kitos sąskaita. Šis rezultatas yra logiškas, nes EV apkrova 100 mazge didina galios srautą per L6 500-100 liniją, kuri jau baziniame R4_4 režime yra pagrindinis ribojantis elementas. Todėl šiame konkrečiame modelyje EV lankstumas netinkamoje vietoje ne tik nesumažina ribojimo, bet ir padidina pagrindinės kritinės linijos apkrovą. Ši išvada neturėtų būti suprantama kaip bendras EV lankstumo paneigimas. Priešingai, rezultatas parodo, kad paklausos lankstumo efektyvumas labai priklauso nuo jo prijungimo vietos. Jeigu EV apkrova būtų prijungta arčiau perteklinės saulės generacijos mazgo, pavyzdžiui, 500 mazge, jos poveikis galėtų būti panašesnis į BESS įkrovimo poveikį. Todėl ateities tyrimuose būtų tikslinga įvertinti alternatyvų EV apkrovos paskirstymą keliuose mazguose arba EV įkrovimo perkėlimą arčiau AEI generacijos šaltinių.

3.4. Techniniai KPI ir rezultatų palyginimas

Tyrime naudojami techniniai ir ekonominiai KPI leidžia palyginti scenarijus pagal vienodus kriterijus. Pagrindinis techninis vertinimo rodiklis yra linijų apkrova, nes būtent linijų pralaidumo ribojimai daugeliu atvejų tampa dominuojančiu AEI integracijos apribojimu [27, 30].

15 lentelė. Pagrindiniai techniniai ir ekonominiai KPI

KPI	Vienetai	Ką parodo
Ribojama AEI galia	MW	Kiek AEI galios turi būti sumažinta kritinę valandą, kad neliktų tinklo pažeidimų
Ribojama AEI energija	MWh	Ribojama galia, padauginta iš kritinio režimo trukmės
Ribojimų dalis	%	Kuri AEI potencialo dalis nepanaudojama dėl tinklo ribojimų
Linijų apkrova	%	Kurie tinklo elementai riboja AEI integraciją
Mazgų įtampa	p.u. / kV	Ar laikomasi 0,95-1,05 p.u. įtampos intervalo
€/MWh sumažinto ribojimo	€/MWh	Priemonės sąnaudų efektyvumas
Prarastos energijos vertė	€/metus	Ribojamos energijos ekonominė reikšmė

R4 kritiniame taške ribojama AEI galia gali būti įvertinta interpoliuojant tarp R4_2 ir R4_3 rezultatų. R4_2 atveju, kai AEI galia yra 240 MW, L6 apkrova siekia 85,6 %. R4_3 atveju, kai AEI galia yra 280 MW, L6 apkrova siekia 100,9 %. Pagal tiesinę interpoliaciją leistinas AEI lygis iki pirmo L6 ribojimo yra apie 277,6 MW. Todėl R4_4 atveju, kai bendra AEI generacija sudaro 320 MW, apytikslė ribojama AEI galia yra:

$$P_{\text{curt}} \approx 320 - 277,6 = 42,4 \text{ MW}$$

$$P_{curt,eco} = 40 \text{ MW}$$

Ekonominėje dalyje šią reikšmę galima naudoti kaip techninį įėjimą. Jei siekiama paprastesnio palyginimo, ji gali būti apvalinama iki 40 MW, nes tai atitinka bandytų priemonių žingsnius ir minimalų efektyvų BESS dydį.

3.4.1. Bendras scenarijų techninis palyginimas

16 lentelė. Bendras scenarijų techninis palyginimas

Scenarijus	Režimas	Priemonė	Kritinė linija 1, %	Kritinė linija 2, %	Min V, p.u.	Ribojama AEI galia, MW	Ribojama AEI energija, MWh/metus	Pastaba
S1 kritinis	R4_4	Nėra	L6 116,3	L4 106,0	0,969	≈42,4	≈42,4 × H_R4	Bazinis ribojimo taškas
S2 racionalus	R4_4	BESS 40 MW 500 mazge	L6 97,3	L4 91,7	0,971	0	0	Mažiausia BESS galia, pašalinanti perkrovas
S3-REC techninis pagrindas	R4_4	L6 ir L4 iki 140 MVA	L6 99,7	L4 <100	0,969	0	0	Mažiausias tinklo stiprinimas, pašalinantis perkrovas
S4 geriausias iš bandytų	R4_4	EV 10 MW 100 mazge	L6 118,4	L4 104,0	0,968	>42,4	>42,4 × H_R4	Ribojimo nepašalina ir blogina L6 apkrovą

Čia H_R4 žymi metinį valandų skaičių, kuriomis pasikartoja R4 tipo kritinis režimas.

Bendras scenarijų palyginimas rodo, kad tiek BESS, tiek koordinuotas L6 ir L4 linijų stiprinimas gali visiškai pašalinti R4_4 režime nustatytas perkrovas. BESS atveju mažiausia pakankama galia yra 40 MW, o tinklo stiprinimo atveju pakanka abiejų kritinių linijų ribas padidinti iki 140 MVA. EV lankstumo scenarijus, kai lanksti apkrova prijungta 100 mazge, ribojimo nepašalina.

Techniniu požiūriu BESS ir tinklo stiprinimas yra veiksmingos, bet skirtingo pobūdžio priemonės. BESS yra operacinė ir lanksti priemonė, kuri gali būti valdoma pagal konkrečius sistemos poreikius. Tinklo stiprinimas yra ilgalaikis infrastruktūrinis sprendimas, kuris padidina fizinį tinklo pralaidumą. EV lankstumas gali būti naudinga priemonė tik tuo atveju, jei jo prijungimo vieta ir valdymo logika mažina, o ne didina kritinių linijų apkrovą.

3.5. Priemonių techninė-ekonominė analizė

Atlikus techninių scenarijų analizę nustatytas kritinis AEI integracijos režimas, identifikuoti pagrindiniai tinklo ribojimai ir įvertintas ribojimus mažinančių priemonių poveikis. Toliau šie rezultatai naudojami orientacinei techninei-ekonominei analizei. Nors ekonominėje dalyje taikomi gyvavimo ciklo kaštų, NPV, EAC ir LCOS rodikliai, analizė išlieka palyginamojo pobūdžio, nes šiame darbe nėra modeliuojamos valandinės rinkos pajamos, balansavimo paslaugų pajamos, leidimų rizikos, rangos rizikos ir detalūs projektiniai kaštai. Todėl ekonominė analizė skirta ne investiciniam

projektui pagrįsti, o palyginti, kuri techninė priemonė mažiausiomis sąnaudomis pašalina nustatytą AEI ribojimą.

Ekonominei analizei atrenkami tik techniškai veiksmingi sprendiniai:

- S2-BESS - 40 MW / 160 MWh baterijų energijos kaupimo sistema 500 mazge. 160 MWh talpa pasirinkta darant prielaidą, kad 40 MW BESS turi veikti iki 4 valandų per kritinį AEI pertekliaus laikotarpį;
- S3-REC - abiejų kritinių linijų L6 500-100 ir L4 600-200 rekonstrukcija, padidinant jų pralaidumą bent iki 140 MVA;
- S3-NEW - naujos paralelinės linijos arba papildomos grandinės įrengimas tame pačiame kritiniame koridoriuje.

EV lankstumo alternatyva į detalią ekonominę analizę neįtraukiama, nes techninėje analizėje nustatyta, kad nagrinėtoje prijungimo vietoje, 100 mazge, ji nepašalina pagrindinio L6 ribojimo ir net padidina šios linijos apkrovą.

17 lentelė. Duomenys ekonominei analizei

Priemonė	Investiciniai kaštai, €	Metinis ribojimo sumažėjimas, MWh/metus	Priemonės naudojimo laikotarpis, metai	€/MWh sumažinto ribojimo	Pastaba
S2-BESS, 40 MW / 160 MWh 500 mazge	31,50 mln.	$40 \times H_R4$	25	$31\,500\,000 / (40 \times H_R4 \times 25)$	Techniškai pašalina L6 ir L4 perkrovas
S3-REC, L6 ir L4 rekonstrukcija	11,40 mln.	$40 \times H_R4$	25	$11\,400\,000 / (40 \times H_R4 \times 25)$	Ekonomiškai pagrindinė tinklo stiprinimo alternatyva
S3-NEW, nauja paralelinė linija	14,40 mln.	$40 \times H_R4$	25	$14\,400\,000 / (40 \times H_R4 \times 25)$	Alternatyva, jei rekonstrukcija techniškai ar praktiškai nebūtų tinkama. Kaina pagrįsta [40, 41] projektų analogija ir 25 % priedu naujos paralelinės grandinės įrengimui.

Techninėje dalyje pagal interpoliaciją nustatyta ribojama AEI galia yra apie 42,4 MW. Ekonominėje analizėje ši reikšmė apvalinama iki 40 MW, nes toks dydis atitinka bandytų priemonių žingsnius ir minimalų efektyvų BESS dydį, reikalingą perkrovoms pašalinti.

Čia:

- H_R4 - metinis valandų skaičius, kuriomis pasikartoja R4 tipo kritinis režimas;
- C_BESS, C_REC ir C_NEW - atitinkamai S2-BESS, S3-REC ir S3-NEW investiciniai kaštai;

- N_{BESS} , N_{REC} ir N_{NEW} - atitinkamų priemonių naudojimo laikotarpis metais;
- $E_{curt} = 40 \times H_{R4}$ - metinis ribojamos AEI energijos kiekis.

Priemonės sąnaudos vienai sumažinto ribojimo MWh apskaičiuojamos taip:

$$C_{AEI} = C / (\Delta E_{curt} \cdot N) \quad (3)$$

čia:

- C_{AEI} - sąnaudos vienai sumažinto ribojimo MWh, €/MWh;
- C - priemonės investiciniai kaštai, €;
- ΔE_{curt} - metinis sumažintos ribojamos energijos kiekis, MWh/metus;
- N - priemonės naudojimo laikotarpis metais.

Prarastos ribojamos energijos vertė apskaičiuojama taip:

$$C_{loss} = E_{curt} \cdot P_{el} \quad (4)$$

čia:

- C_{loss} - prarastos energijos ekonominė vertė, €;
- E_{curt} - ribojamos energijos kiekis, MWh;
- P_{el} - vidutinė elektros energijos kaina, €/MWh.

Kadangi kritinio režimo metinė trukmė yra viena jautriausių ekonominės analizės prielaidų, rekomenduojama ekonominėje dalyje vertinti kelis H_{R4} scenarijus, pavyzdžiui:

18 lentelė. Kritinio režimo trukmės jautrumo scenarijai

Scenarijus	Kritinio režimo trukmė, h/metus	Paaiškinimas
Mažos trukmės	500	Kritinis režimas pasikartoja retai
Vidutinės trukmės	1000	Kritinis režimas pasikartoja reikšmingą, bet ne dominuojančią metų dalį
Didelės trukmės	2000	Kritinis režimas pasikartoja dažnai ir turi didelę ekonominę reikšmę

Toks jautrumo vertinimas yra patikimesnis negu vienos fiksuotos trukmės prielaida, nes reali kritinių AEI režimų trukmė priklauso nuo oro sąlygų, apkrovos profilio, generacijos struktūros ir rinkos dispečerizacijos.

3.5.1. Rezultatų interpretavimas

Atlikta galios srautų analizė parodė, kad nagrinėjamoje 110 kV tinklo zonoje pagrindiniai AEI integracijos ribojimai yra linijų pralaidumo pobūdžio. Baziniuose S0 scenarijuose visų mazgų įtampos išlieka 0,95-1,05 p.u. intervale, o linijų apkrovos neviršija 100 %. Tai rodo, kad pradinis modelis yra tinkamas tolesnei AEI plėtros analizei. Didinant AEI generaciją, ribojimai atsiranda

skirtingose tinklo vietose priklausomai nuo to, kuriame mazge koncentruojama generacija. Saulės dominavimo atveju kritinė tampa L6 500-100 linija, nes perteklinė saulės generacija iš 500 mazgo perduodama vartojimo centro kryptimi. Vėjo dominavimo atveju pagrindiniai ribojimai formuojasi L4 600-200 ir L5 200-500 koridoriuose. Mišrios AEI generacijos atveju vienu metu apkraunamos abi tinklo dalys, todėl R4_4 režime ribojamos dvi linijos: L6 500-100 ir L4 600-200. Kritiniu tolesnei priemonių analizei pasirinktas R4_4 režimas, nes jis sukuria aiškų dviejų elementų ribojimą. Šiame režime L6 500-100 apkrova siekia 116,3 %, o L4 600-200 - 106,0 %. Toks ribojimas yra tinkamas palyginti skirtingas priemones, nes leidžia įvertinti, ar priemonė pašalina tik vieną ribojimą, ar išsprendžia ir galimą ribojimo persikėlimą į kitą tinklo elementą.

BESS scenarijus parodė, kad kaupiklis yra efektyvus, kai jis prijungiamas arti perteklinės generacijos mazgo. 40 MW BESS 500 mazge sumažina L6 apkrovą iki 97,3 %, o L4 apkrovą iki 91,7 %, todėl perkrovos visiškai pašalinamos. Tai rodo, kad BESS gali būti veiksminga operacinė priemonė AEI ribojimams mažinti, ypač kai ribojimas susijęs su lokaliu perteklinės generacijos eksportu.

Tinklo stiprinimo scenarijus parodė, kad vienos kritinės linijos stiprinimas nėra pakankamas. Sustiprinus tik L6 liniją, ribojimas išlieka L4 linijoje. Tai rodo, kad nagrinėjamu atveju problema yra ne vieno elemento, o perdavimo koridoriaus pobūdžio. Tik abiejų kritinių linijų L6 ir L4 stiprinimas iki 140 MVA pašalina perkrovą. Todėl tinklo stiprinimas turi būti planuojamas atsižvelgiant į bendrą srautų pasiskirstymą, o ne tik į pirmą aptiktą perkrautą elementą.

EV lankstumo scenarijus parodė, kad paklausos lankstumo poveikis priklauso nuo jo vietos tinkle. EV apkrova 100 mazge mažina L4 apkrovą, tačiau dar labiau apkrauna L6 liniją. Todėl šiame konkrečiame modelyje EV lankstumas 100 mazge ribojimo nepašalina. Ši išvada nereiškia, kad EV lankstumas apskritai nėra naudingas; ji reiškia, kad EV lankstumo vieta ir valdymo logika turi būti parenkama pagal tinklo ribojimų vietą.

3.5.2. Tyrimo ribotumai

Šio tyrimo rezultatai turi būti interpretuojami, atsižvelgiant į taikytus supaprastinimus.

- Pirmiausia, darbe atliekama stacionari galios srautų (angl. power flow) analizė, todėl rezultatai parodo tik pastovios būsenos tinklo apkrovas ir mazgų įtampas. Dinaminis stabilumas, dažnio stabilumas, apsaugų veikimas, trumpųjų jungimų srovės ir pereinamieji procesai šiame tyrime nevertinami [27, 30].
- Antra, modelis yra supaprastintas ir sudarytas iš šešių 110 kV mazgų bei šešių linijų. Tai leidžia aiškiai palyginti scenarijus, tačiau rezultatai neturėtų būti suprantami kaip detalus realaus tinklo plėtros projektas [28, 30].
- Trečia, BESS šiame darbe modeliuojamas kaip aktyviosios galios įkrovimo priemonė. Galios srautų analizė nevertina kaupiklio įkrovos būsenos, ciklą, degradacijos ar valandinio veikimo grafiko. Todėl BESS techniniai rezultatai parodo jo momentinį poveikį kritiniam režimui, o ne visą metinį darbo ciklą [25, 29].

3.5.3. Ekonominio vertinimo prielaidos

Analizė atliekama taikant gyvavimo ciklo kaštų (angl. Life Cycle Cost, LCC) metodiką, kuri yra tarptautiniu mastu pripažintas įrankis ilgalaikėms infrastruktūros investicijoms vertinti. LCC

metodika leidžia objektyviai palyginti skirtingos tarnavimo trukmės ir kaštų struktūros priemonės, įvertinant visas išlaidas nuo pradinės investicijos iki eksploatacijos ir likutinės vertės [29, 25].

Pagrindiniai ekonominiai parametrai:

- Analizės laikotarpis (N): 25 metai. Tai yra kompromisinis laikotarpis tarp trumpesnio BESS baterijų tarnavimo laiko (15-20 m.) ir ilgesnio oro linijų eksploatacijos laikotarpio (40-55 m.). 25 metai šiame darbe pasirinkti kaip orientacinis analizės horizontas, suderinantis trumpesnį kaupimo įrenginių ir ilgesnį tinklo turto gyvavimo ciklą [29, 25].
- Realioji diskonto norma (r): 5,0 %. Ši norma parenkama kaip orientacinė, atitinkanti Europoje taikomą reguliuojamų infrastruktūrinių energetikos investicijų diskonto lygį ir suderinama su Lietuvos TSO reguliuojamos gražos aplinka [32, 5].

19 lentelė Ekonominių skaičiavimų prielaidų suvestinė

Prielaida	Reikšmė	Pagrindimas
Kainų bazė	2024-2025 m. EUR, nominaliai	Investiciniai kaštai paimti iš artimiausių prieinamų 2024-2025 m. šaltinių: „Energy cells“, BloombergNEF ir „Litgrid“ projektų duomenų. Kadangi analizė yra orientacinė, papildomas kainų indeksavimas neatliekamas.
PVM	Be PVM	Alternatyvos lyginamos pagal investicines sąnaudas be PVM, nes PVM nėra technologinis kaštas. „Litgrid“ linijų projektų vertės darbe pateikiamos be PVM, todėl toks pats principas taikomas visoms alternatyvoms [40, 41].
Diskonto norma	5 %	Taikoma kaip centrinė realioji diskonto norma orientacinei gyvavimo ciklo kaštų analizei. Ji nėra laikoma tiksliai konkretaus projekto finansavimo kaštu, o naudojama palyginimui tarp skirtingų priemonių. Diskonto normos jautrumas papildomai tikrinamas 3 % ir 7 % scenarijais, todėl išvada nepriklauso nuo vienos fiksuotos diskonto normos.
Infliacija	Nevertinama	Kadangi naudojama realioji diskonto norma, skaičiavimai atliekami realiaisiais dydžiais. Metinis kainų augimas ir infliacijos poveikis atskirai nemodeliuojami.
Analizės laikotarpis	25 metai	Pasirinktas kaip bendras palyginimo horizontas tarp trumpesnio BESS technologinio gyvavimo ciklo ir ilgesnio 110 kV oro linijų eksploatacijos laikotarpio. Darbe šis laikotarpis apibrėžtas kaip kompromisas tarp BESS baterijų 15-20 m. tarnavimo ir oro linijų 40-55 m. gyvavimo.
BESS galia ir talpa	40 MW / 160 MWh	40 MW galia parinkta pagal techninėje dalyje nustatytą minimalų BESS dydį, pašalinantį L6 ir L4 perkrovas. 160 MWh talpa atitinka 4 valandų trukmės kaupimo sistemą: 40 MW × 4 h = 160 MWh.
BESS trukmė	4 h	Pasirinkta kaip orientacinė trukmė kritiniam AEI pertekliaus epizodui sugerti. Ši prielaida naudojama ekonominėje analizėje ir LCOS skaičiavime, bet nekeičia PSS/E galios srautų rezultatų.
RTE	92 %	Taikoma kaip tipinė ličio jonų BESS pilno ciklo efektyvumo prielaida. Ji naudojama tik LCOS skaičiavime, o ne techninėje galios srautų analizėje.
BESS ciklai	250 ciklų/metus	Ši reikšmė išvedama iš vidutinio $H_{R4} = 1000$ h/metus scenarijaus: 40 MW × 1000 h = 40 000 MWh/metus; 40 000 MWh / 160 MWh = 250 ciklų/metus.
BESS degradacija	0,5 %/metus	Taikoma kaip konservatyvi orientacinė prielaida LCOS skaičiavimui, leidžianti įvertinti, kad per eksploatacijos laikotarpį efektyviai naudojama baterijos talpa mažėja.
Linijų ilgis	40 km	Ekonominėje analizėje daroma prielaida, kad stiprinamos dvi kritinės 110 kV linijos / koridoriai, kiekvienas po 20 km. Šis dydis naudojamas tik investicinių kaštų palyginimui.

Prielaida	Reikšmė	Pagrindimas
S3-REC rekonstrukcijos kaina	285 000 EUR/km	Kaina pagrįsta „Litgrid“ viešai paskelbtais 110 kV linijų rekonstrukcijos projektais: Panevėžio projekto ir Kuršėnų-Kanteikių 30 km linijos rekonstrukcijos duomenimis [40, 41].
S3-NEW paralelinės linijos kaina	360 000 EUR/km	Kaina nustatoma remiantis S3-REC 285 000 EUR/km rekonstrukcijos kaina ir taikant 25 % priedą dėl didesnės naujos paralelinės grandinės įrengimo apimties: $285\,000 \times 1,25 = 356\,250$ EUR/km, apvalinama iki 360 000 EUR/km.
H_R4	500 / 1000 / 2000 h/metus	Tai jautrumo scenarijai, o ne empirinė metinė prognozė. Jie naudojami, nes šiame darbe neatliekamas pilnas valandinis metų rinkos ir generacijos modeliavimas.
Bazinis H_R4 scenarijus	1000 h/metus	Naudojamas kaip vidutinės trukmės scenarijus ekonominiam palyginimui. Jam tiesiogiai atitinka 250 BESS ciklų/metus prielaida.
S3-REC likutinė vertė	50 % CAPEX po 25 m.	Kadangi oro linijų gyvavimo laikotarpis yra ilgesnis nei 25 m. analizės horizontas, po analizės laikotarpio lieka dalis turto vertės. Rekonstrukcijos atveju taikoma 50 % CAPEX likutinė vertė.
S3-NEW likutinė vertė	60 % CAPEX po 25 m.	Naujos paralelinės linijos atveju taikoma didesnė likutinė vertė, nes naujas turtas po 25 m. dar turi reikšmingą likusį techninį tarnavimo laiką.
Ekonominės analizės paskirtis	Alternatyvų palyginimas	Analizė nėra skirta pilnam investiciniam projektui pagrįsti. Ji naudojama palyginti, kuri priemonė mažiausiomis gyvavimo ciklo sąnaudomis pašalina nustatytą AEI ribojimą.

Analizėje naudojami keturi pagrindiniai rodikliai, kurių kiekvieno matematinė išraiška pateikiama žemiau.

Grynoji dabartinė vertė (NPV):

$$NPV = CAPEX_0 + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t}{(1+r)^t} + \sum_k \frac{CAPEX_{keitimo,k}}{(1+r)^{T_k}} - \frac{RV}{(1+r)^N} \quad (5)$$

Kur:

$CAPEX_0$ - pradinės investicijos;

$OPEX_t$ - metinės veiklos išlaidos;

$CAPEX_{keitimo,k}$ - planuojamos kapitalinio remonto išlaidos metais T_k ; RV - likutinė turto vertė analizės laikotarpio pabaigoje.

Pastovių metinių išlaidų (OPEX) NPV skaičiuojamas taikant anuiteto formulę su koeficientu 14,0939 (kai $r = 5\%$, $N = 25$). Vienkartinių išlaidų diskonto faktorius, pavyzdžiui, 15 metų: $(1,05)^{-15} \approx 0,4810$.

Lygiavertis metinis kaštas (EAC):

$$EAC = NPV \times \frac{r}{1 - (1+r)^{-N}} = NPV \times 0,070952 \quad (6)$$

Suvestinis energijos kaupimo kaštas (LCOS):

LCOS yra rodiklis, leidžiantis palyginti skirtingų energijos kaupimo technologijų ekonominį efektyvumą. Kaip pažymi Lazard [33], LCOS atspindi vienos MWh, patiektos iš kaupimo sistemos,

kaštus, įskaitant įkrovimo energijos sąnaudas. Ember [34] pateikia alternatyvų LCOS apibrėžimą, neįskaitantį įkrovimo energijos sąnaudų, ir pabrėžia, kad LCOS yra pagrindinis rodiklis, leidžiantis nustatyti, ar nauja energijos kaupimo sistema būtų pelninga per savo gyvavimo ciklą. Migliari ir kt. [35] rodo, kad LCOS reikšmės stipriai priklauso nuo taikymo scenarijaus ir saulės bei baterijų sąveikos.

$$LCOS = \frac{NPV_{\text{viso ciklo}}}{\sum_{t=1}^N E_{\text{iškrovimo},t}} \quad (7)$$

Vidutinė metinė iškrovos apimtis apskaičiuota darant prielaidą, kad baterijos ciklas atliekamas 250 kartų per metus, esant vidutinei 150 MWh talpai ir taikant konservatyvią 0,5 % metinio degradavimo prielaidą. Taip pat daroma prielaida, kad pilnas sistemos efektyvumas (RTE) yra 92 %. Visas iškrovos kiekis per 25 metus sudaro 862 500 MWh [25, 33].

LCOS rodiklis šiame darbe naudojamas kaip papildomas BESS gyvavimo ciklo kaštų indikatorius, tačiau jis nėra tiesiogiai tapatus €/MWh sumažinto AEI ribojimo rodikliui. LCOS parodo, kiek kainuoja viena iš BESS patiekta MWh, kai kaupiklis naudojamas pagal pasirinktą ciklą skaičių. Tuo tarpu AEI ribojimų mažinimo ekonomikoje pagrindinis dydis yra metinis sumažintas ribojamos energijos kiekis, priklausantis nuo kritinio režimo trukmės (H_R4). Todėl galutiniame priemonių palyginime LCOS vertinamas kaip papildomas, o ne pagrindinis rodiklis.

Specifinė NPV (NPV/MW_{AEI}):

$$NPV_{\text{spec}} = \frac{NPV_{\text{priemonė}}}{\Delta P_{AEI}} = \frac{NPV}{40 MW} \quad (8)$$

kur $\Delta P_{AEI} = 40 MW$ - papildoma AEI galia, kurią leidžia integruoti priemonė (skirtumas tarp projekcinio 160/160 MW ir pirmo ribojimo taško 140/140 MW).

3.5.4. Alternatyvų kaštų analizė

Alternatyva S2-BESS: Baterijų energijos kaupimo sistema.

BESS kainodara yra dinamiška ir priklauso nuo sparčiai kintančių rinkos sąlygų. Šiame darbe atlikta analizė remiasi dviem pagrindiniais duomenų šaltiniais: oficialiai paskelbtais „Energy cells“ projekto finansiniais duomenimis ir tarptautinėmis baterijų kainų tendencijomis [37, 36].

- Faktinė BESS Lietuvos projekto kaina (viršutinė CAPEX riba): Didžiausias Europoje BESS projektas „Energy cells“ (200 MW/200 MWh) Lietuvoje kainavo 96,3 mln. EUR, o galutinėje ataskaitoje patvirtinta, kad ES parama sudarė 79,5 mln. EUR. Projekto pradžioje planuotos investicijos siekė 105,2 mln. EUR, todėl galutinė suma buvo mažesnė nei planuota. Tai yra 1 valandos trukmės sistema, todėl galios dedamoji čia dominuoja [37].
- Tarptautinės 2025 m. kainų tendencijos: BloombergNEF [36] duomenimis, pasaulinė ličio jonų baterijų paketo kaina 2025 m. nukrito iki 108 USD/kWh, o stacionarių BESS segmentas - iki 70 USD/kWh. Šie dydžiai rodo, kad stacionarūs kaupikliai tampa vis konkurencingesni, tačiau galutinė projekto kaina vis tiek stipriai priklauso nuo regioninių sąlygų, integracijos darbų ir galios elektronikos kainos.

Tačiau būtina pabrėžti regioninius kainų skirtumus. BloombergNEF [36] nurodo, kad Europoje baterijų paketų kainos išlieka didesnės nei Kinijoje, todėl pasauliniai kainų vidurkiai negali būti

tiesiogiai perkeliama į Lietuvos kaupimo sistemų projektus. Atsižvelgiant į tai, šiame darbe CAPEX struktūra sudaryta konservatyviai, naudojant viešai paskelbtų projektų ir rinkos apžvalgų derinį.

20 lentelė. S2-BESS CAPEX sudedamosios dalys

Dedamoji	Kiekis	Vieneto kaina	Suma, mln. EUR	Pagrindimas
LFP baterijų moduliai	160 MWh	110 EUR/kWh	17,60	110 EUR/kWh reikšmė taikoma kaip orientacinė baterijų modulių kainos prielaida, paremta tarptautinėmis baterijų kainų tendencijomis ir pakoreguota Europos rinkos sąlygoms.
Galios elektronika (PCS, inverteriai)	40 MW	180 000 EUR/MW	7,20	Tarptautiniai gamintojų (Siemens/ABB) vidurkiai; 15 metų garantija (kaip Energy Cells sutartyje).
Montavimas, prijungimas (BOP)	-	~17 % įrangos	4,20	Pagal „Energy cells“ projekto analogiją ir tipinę stacionarių BESS BOP dedamąją.
Projektavimas, leidimai	-	~ % techninės įrangos	2,50	Tipinė inžinerinių projektų praktika.
VISO CAPEX			31,50	197 EUR/kWh

Veiklos išlaidų (OPEX) ir keitimo vertinimas:

- Metinis OPEX: Priimama, kad jis sudaro apie 1,46 % pradinio CAPEX ir apima techninę priežiūrą, draudimą bei tinklo mokesčius. Tai sudaro 0,46 mln. EUR per metus. „Energy cells“ projekte rangovas - „Siemens Energy“ ir „Fluence“ konsorciumas - įsipareigojo teikti aptarnavimo ir priežiūros paslaugas 15 metų, todėl tokia prielaida laikoma pagrįsta [39, 38].
- Inverterių keitimas (13 metai): Galios elektronikos tarnavimo laikas yra trumpesnis nei baterijų - apie 12-15 metų. Jo keitimas po 13 metų įvertintas 4,0 mln. EUR. Diskontuota vertė: $4,0 \times (1,05)^{-13} \approx 2,12$ mln. EUR.
- Pilnas baterijų keitimas (15 metai): Tai yra kritiškai svarbi išlaidų dedamoji. Kadangi BESS baterijų tarnavimo laikas yra apie 15 metų, po šio laikotarpio numatomas pilnas jų pakeitimas, kurio kaina, dėl technologinės pažangos ir numatomo tolesnio kainų kritimo, vertinama 60 % pradinio CAPEX (18,9 mln. EUR). Tai atitinka IRENA [29] ir Lazard [33] pateikiamą ilgalaikės BESS ekonomikos logiką.
- Likutinė vertė (25 metai): Po 25 metų eksploatacijos BESS vertinama tik antrinių žaliavų (metalo laužo) verte, priimta 5 % pradinio CAPEX.

3.5.5. Alternatyva S3-REC: Oro linijų rekonstrukcija

Techninė apimtis: Abiejų kritinių 110 kV linijų (100-500 ir 200-600, kiekviena po 20 km) laidų keitimas į didesnio skerspjūvio (pvz., AC-120 → AC-240), panaudojant esamas atramas. Šis sprendimas eliminuoja šiluminius ribojimus nekeičiant trasos.

CAPEX pagrindžiamas dviem faktiniais 2025 m. „Litgrid“ viešai paskelbtais rekonstrukcijos projektais, kas užtikrina aukštą duomenų patikimumą [40, 41]:

- Panevėžio projektas (2025 m. spalio): 6,229 mln. EUR be PVM už dviejų 110 kV linijų Panevėžys-Ekranas II ir Panevėžys-Velžys I rekonstravimą. Vieneto kaina įvertinta pagal projekto apimtį ir viešai paskelbtą sutarties vertę [40].
- Kuršėnų projektas (2025 m. liepa): 7,68 mln. EUR be PVM už 30 km ilgio 110 kV linijos Kuršėnai-Kanteikiai rekonstrukciją. Vieneto kaina apskaičiuota remiantis viešai paskelbta projekto verte ir linijos ilgiu [41].

Taikoma pasverta vidutinė kaina 285 000 EUR/km. Bendra CAPEX suma: $40 \text{ km} \times 285 \text{ kEUR/km} = 11,40 \text{ mln. EUR}$.

OPEX ir likutinė vertė:

- Metinis OPEX: 0,3 % CAPEX (0,034 mln. EUR), įvertinus, kad po rekonstrukcijos priežiūros išlaidos iš esmės nesikeičia.
- Likutinė vertė (25 metai): Kadangi linijos po 25 metų dar turės likusį ~50 % tarnavimo laiką, jų likutinė vertė priimama kaip 50 % CAPEX. Diskontuota vertė: $5,70 \times (1,05)^{-25} \approx 1,68 \text{ mln. EUR}$.

3.5.6. Alternatyva S3-NEW: Nauja paralelinė oro linija

Techninė apimtis: Naujos 110 kV grandinės statyba tuose pačiuose koridoriuose, reikalaujanti naujų arba praplatintų atramų, identiškomis varžomis. Pralaidumas efektyviai padvigubėja.

Atsižvelgiant į tai, kad naujos paralelinės linijos alternatyva paprastai reikalauja didesnės statybos apimties negu esamos linijos rekonstrukcija, šiame darbe jos vieneto kaina nustatoma remiantis S3-REC rekonstrukcijos alternatyvai taikoma 285 000 EUR/km kaina, kuri pagrįsta „Litgrid“ viešai paskelbtais 110 kV linijų rekonstrukcijos projektais [40, 41]. Kadangi S3-NEW alternatyva apima naujos 110 kV grandinės įrengimą tame pačiame kritiniame koridoriuje, galimą naujų arba praplatintų atramų poreikį, papildomus projektavimo, leidimų ir statybos neapibrėžtumus, rekonstrukcijos vieneto kainai taikomas 25 % priedas: $285\,000 \times 1,25 = 356\,250 \text{ EUR/km}$. Toliau skaičiavimuose ši reikšmė apvalinama iki 360 000 EUR/km. Bendra CAPEX suma: $40 \text{ km} \times 360\,000 \text{ EUR/km} = 14,40 \text{ mln. EUR}$. Dėl didesnio kaštų neapibrėžtumo S3-NEW alternatyva šiame darbe laikoma papildomu infrastruktūriniu jautrumo scenarijumi, o ne detaliu projektiniu įverčiu. OPEX: 0,5 % CAPEX (0,072 mln. EUR).

- Likutinė vertė: 60 % CAPEX, diskontuota: $8,64 \times (1,05)^{-25} \approx 2,55 \text{ mln. EUR}$.

21 lentelė. Gyvavimo ciklo kaštų analizė ir pagrindiniai rezultatai

Komponentas, mln. EUR	S2-BESS	S3-REC Rekonstrukcija	S3-NEW Paralelinė linija
CAPEX	31,50	11,40	14,40
NPV(OPEX, 25 m.)	6,48	0,48	1,01
NPV(Inverterių keitimas)	2,12	-	-
NPV(Baterijų keitimas)	9,09	-	-
NPV(Likutinė vertė)	-0,47	-1,68	-2,55
VISO NPV	48,72	10,20	12,86
EAC (mln. EUR/metus)	3,46	0,72	0,91

Komponentas, mln. EUR	S2-BESS	S3-REC Rekonstrukcija	S3-NEW Paralelinė linija
LCOS (EUR/MWh)	56,5	-	-

Svarbu pažymėti, kad šiame darbe NPV rodiklis taikomas ne kaip klasikinis investicinis grynosios dabartinės vertės rodiklis, apimantis pajamas ir sąnaudas, o kaip dabartinė gyvavimo ciklo sąnaudų vertė. Kadangi rinkos pajamos, balansavimo paslaugų pajamos ir kiti piniginiai srautai nėra modeliuojami, mažesnė NPV reikšmė reiškia mažesnes diskontuotas sąnaudas tam pačiam techniniam efektui pasiekti.

Rezultatų interpretavimas: S3-REC yra 4,8 karto pigesnė už BESS pagal NPV. Šis skirtumas yra reikšmingas ekonominiu požiūriu ir išlieka net kintant pagrindinėms prielaidoms (žr. jautrumo analizę). S3-NEW yra brangesnė už S3-REC alternatyvą, nes jos NPV siekia 12,86 mln. EUR, palyginti su 10,20 mln. EUR S3-REC atveju. Tai reiškia, kad S3-NEW yra apie 26 % brangesnė už rekonstrukciją, tačiau vis dar apie 3,8 karto pigesnė už S2-BESS alternatyvą pagal NPV.

Šiame darbe apskaičiuotas BESS LCOS (56,5 EUR/MWh) yra artimas apatinei Lazard [33] nurodyto intervalo ribai (115-254 USD/MWh, t. y. 110-242 EUR/MWh), tačiau yra žymiai mažesnis už Migliari ir kt. [35] tyrime nustatytus dydžius (180-410 EUR/MWh Kalyje, 200-750 EUR/MWh Berlyne). Šis skirtumas paaiškinamas šiame darbe naudojamu ilgesniu analizės laikotarpiu, konservatyvia, bet vis tiek palankia 250 ciklų per metus prielaida ir tuo, kad vertinama stacionari 4 valandų kaupimo sistema konkrečiam tinklo perkrovų mažinimo uždaviniui.

3.5.7. Daugiakritinė jautrumo analizė

Investicinės paramos poveikis BESS ekonominiam patrauklumui, atsižvelgiant į aktyvią valstybės ir ES paramą energetikos projektams, modeliuojami trys realistiniai paramos scenarijai BESS:

22 lentelė. Paramos scenarijų poveikis S2-BESS ekonominiams rodikliams

Scenarijus	CAPEX, mln. EUR	NPV, mln. EUR	LCOS, EUR/MWh
Be paramos	31,50	48,72	56,5
Nacionalinė parama (NECP 40 %)	18,90	36,12	41,9
ES Parama (CEF/RRF 82,5 %)	5,51	22,73	26,4
Kombinuotas optimistinis (150 EUR/kWh + CEF 82,5 %)	4,20	14,02	16,3

Net ir gavus 82,5 % investicinę paramą, BESS NPV (22,73 mln. EUR) vis tiek išlieka 2,2 karto didesnė už linijų rekonstrukcijos NPV (10,20 mln. EUR). Tai patvirtina ankstesnę šiame darbe atliktos analizės išvadą apie S3-REC ekonominį pranašumą, o didelės apimties saugyklų projektų paramos precedentą Lietuvoje rodo „Energy cells“ atvejis [37].

23 lentelė. Parametrinė jautrumo analizė

Keičiamas parametras	Pokytis	S2-BESS NPV, mln. EUR	S3-REC NPV, mln. EUR	Įtaka išvadai
Bazinis atvejis	-	48,72	10,20	S3-REC yra optimali
Diskonto norma (WACC)	3 %	53,84	11,32	Išvada nesikeičia

Keičiamas parametras	Pokytis	S2-BESS NPV, mln. EUR	S3-REC NPV, mln. EUR	Įtaka išvadai
Diskonto norma (WACC)	7 %	44,47	9,26	Išvada nesikeičia
Baterijų CAPEX (be paramos)	+20 %	55,01	-	Išvada nesikeičia
Baterijų CAPEX (be paramos)	-20 %	42,43	-	Išvada nesikeičia
S3-REC rekonstrukcijos kaina	+30 %	-	12,62	Išvada nesikeičia
S3-REC rekonstrukcijos kaina	-30 %	-	7,78	Išvada nesikeičia

Visais atvejais S3-REC išlieka ekonomiškai optimaliausia priemone. Tai patvirtina analizės išvadų patikimumą ir atsparumą prielaidų pokyčiams.

3.5.8. Socialinės-ekonominės naudos (angl. *co-benefits*) kiekybinis įvertinimas

AEI generacijos ribojimas (40 MW) reiškia, kad ši energija pakeičiama iškastinio kuro generacija. Remiantis EEA [42] elektros gamybos emisijų intensyvumo rodikliu, konservatyviam vertinimui taikomas 0,4 t CO₂/MWh faktorius. Kadangi tikslus kritinio R4 režimo pasikartojimo valandų skaičius šiame darbe nenustatomas valandiniu rinkos ir generacijos modeliavimu, metinis AEI ribojimo energijos kiekis vertinamas pagal jautrumo scenarijus.

$$E_{\text{curt}} = 40 \times H_{\text{R4}}$$

Kai H_{R4} = 500 h/metus, ribojama energija sudaro 20 000 MWh/metus. Kai H_{R4} = 1000 h/metus, ribojama energija sudaro 40 000 MWh/metus. Kai H_{R4} = 2000 h/metus, ribojama energija sudaro 80 000 MWh/metus. EU ETS (Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų prekybos sistema) 2025 m. pabaigoje svyravo apie 78 EUR/t CO₂. Ilgalaikėje perspektyvoje aukštesni lygiai išlieka tikėtini, tačiau šiame darbe taikoma konservatyvi 78 EUR/t CO₂ reikšmė, suderinama su 2025 m. rinkos tendencijomis [36, 42].

24 lentelė. CO₂ emisijų mažinimo nauda pagal kritinio režimo trukmę

H _{R4} , h/metus	Ribojama AEI energija, MWh/metus	CO ₂ faktorius, t/MWh	Išvengiamas CO ₂ , t/metus	CO ₂ vertė, kai 78 €/t, mln. €/metus
500	20 000	0,4	8 000	0,62
1000	40 000	0,4	16 000	1,25
2000	80 000	0,4	32 000	2,50

Toliau ekonominiame palyginime baziniu laikomas vidutinės trukmės scenarijus (H_{R4} = 1000) h/metus, o 500 ir 2000 h/metus naudojami kaip jautrumo ribos.

Tiekimo patikimumo nauda šiame darbe kiekybiškai nevertinama, nes nagrinėjami AEI ribojimai pirmiausia būtų sprendžiami generacijos mažinimu, o ne vartotojų apkrovos atjungimu. Todėl VOLL rodiklis gali būti minimas tik kaip platesnio sisteminio patikimumo aspektas, tačiau į bazinius ekonominius skaičiavimus neįtraukiamas. Detalesnis VOLL vertinimas reikalautų atskiros patikimumo analizės, apimančios gedimų tikimybes, N-1 kriterijų ir vartotojų atjungimo scenarijus [43].

25 lentelė. Socialinės-ekonominės naudos vertinimo apimtis

Naudos kategorija	Ar kiekybiškai vertinama šiame darbe?	Pastaba
CO ₂ emisijų mažinimas	Taip, jautrumo scenarijais	Vertinama pagal sumažintą AEI ribojimą ir 0,4 t CO ₂ /MWh faktorių
Tiekimo patikimumo didinimas, VOLL	Ne	Minima tik kokybiškai, nes tyrime neanalizuojami vartotojų atjungimai

CO₂ emisijų mažinimo nauda šiame darbe vertinama kaip papildomas socialinis-ekonominis efektas pagal H_R4 jautrumo scenarijus. VOLL rodiklis į bazinius ekonominius skaičiavimus neįtraukiamas, nes tyrime neanalizuojami vartotojų atjungimai.

26 lentelė. Alternatyvų techninis-ekonominis palyginimas

Kriterijus	S2-BESS	S3-REC Rekonstrukcija	S3-NEW Paralelinė linija
Techninis efektyvumas	Pašalina ribojimus	Pašalina ribojimus	Pašalina ribojimus
Ekonominis efektyvumas (NPV)	48,72 mln. EUR	10,20 mln. EUR	12,86 mln. EUR
EAC, mln. EUR/metus	3,46	0,72	0,91
LCOS, EUR/MWh	56,5	-	-
Jautrumas rinkos svyravimams	Labai didelis	Mažas	Mažas
Įgyvendinimo trukmė	Trumpa (modulinis)	Vidutinė	Ilga
Ilgalaikiškumas (>25 m.)	Žemas (reikia keisti)	Aukštas (>40 m.)	Labai aukštas (>50 m.)
Papildoma sisteminė nauda	Taip (jei teikia antrines paslaugas)	Ne	Ne

Atlikus orientacinę trijų techniškai veiksmingų alternatyvų ekonominę analizę, taikant gyvavimo ciklo kaštų, NPV, EAC ir papildomą LCOS vertinimą, galima daryti šias išvadas:

Ekonomiškai palankiausia alternatyva yra S3-REC - abiejų kritinių 110 kV linijų rekonstrukcija. Jos NPV siekia 10,20 mln. EUR, o EAC - 0,72 mln. EUR/metus. Ši priemonė yra pigesnė už S2-BESS ir pagal techninę analizę pašalina R4_4 režime nustatytas L6 bei L4 perkrovas.

S2-BESS yra techniškai efektyvi, bet ekonomiškai brangesnė alternatyva. 40 MW / 160 MWh BESS 500 mazge pašalina perkrovas, tačiau dėl didesnio CAPEX, inverterių ir baterijų keitimo poreikio jos NPV yra didesnė nei tinklo rekonstrukcijos. BESS ekonominis patrauklumas galėtų padidėti tik tuo atveju, jei būtų įtraukiamos papildomos pajamos iš balansavimo, dažnio reguliavimo ar kitų sisteminių paslaugų.

S3-NEW - nauja paralelinė linija - yra brangesnė už S3-REC rekonstrukcijos alternatyvą, tačiau vis dar išlieka ekonomiškai reikšmingai palankesnė už S2-BESS. Jos NPV siekia 12,86 mln. EUR, o EAC - 0,91 mln. EUR/metus. Ši alternatyva gali būti pagrįsta tuo atveju, jei esamos linijos rekonstrukcija būtų techniškai neįmanoma, jei reikėtų didesnio ilgalaikio pralaidumo rezervo arba jei būtų numatomas gerokai didesnis ilgalaikis AEI augimas.

EV lankstumas 100 mazge į detalią ekonominę analizę neįtraukiamas, nes techninėje dalyje nepašalino pagrindinio L6 ribojimo. Tai nereiškia, kad EV lankstumas apskritai nėra naudingas, tačiau rodo, kad jo efektyvumas priklauso nuo prijungimo vietos ir valdymo logikos.

CO₂ emisijų mažinimo nauda gali būti vertinama kaip papildomas socialinis-ekonominis efektas, tačiau ji priklauso nuo kritinio režimo trukmės. Todėl šiame darbe ją tikslinga pateikti ne kaip vieną fiksuotą reikšmę, o kaip jautrumo scenarijų rezultata.

Galutinė rekomendacija: siekiant ekonomiškai efektyviausiu būdu užtikrinti 160 MW vėjo ir 160 MW saulės generacijos integravimą R4_4 režime be AEI generacijos ribojimų, prioritetine priemone laikytina abiejų kritinių 110 kV linijų L6 500-100 ir L4 600-200 rekonstrukcija, ekonominėje analizėje žymima kaip S3-REC. S2-BESS turėtų būti vertinama kaip lankstesnė, bet brangesnė operacinė alternatyva, kurios ekonominis patrauklumas padidėtų tik įvertinus papildomas sisteminės paslaugas. S3-NEW gali būti svarstoma kaip brangesnė, tačiau ilgalaikiškai tvirtesnė infrastruktūrinė alternatyva tuo atveju, jei esamos linijos rekonstrukcija būtų techniškai nepakankama, nepraktiška arba jei būtų reikalingas didesnis ilgalaikis pralaidumo rezervas.

Išvados

1. Atlikta mokslinės ir institucinės literatūros analizė parodė, kad didėjant atsinaujinančių energijos išteklių gamybos daliai elektros sistemoje pagrindiniu ribojančiu veiksniu tampa ne vien naujų elektrinių prijungimo galimybės, bet ir perdavimo tinklo gebėjimas priimti, paskirstyti ir perduoti nepastovią generaciją. AEI ribojimai dažniausiai atsiranda tada, kai didelė vėjo arba saulės generacija sutampa su ribotu tinklo pralaidumu, maža vietine apkrova ir nepakankamu sistemos lankstumu. Todėl realiame elektros sistemos planavime AEI plėtra turi būti vertinama kartu su tinklo stiprinimo, kaupimo ir paklausos lankstumo priemonėmis, o ne tik kaip papildomų generacijos pajėgumų prijungimas.
2. Sudarytas supaprastintas 110 kV perdavimo tinklo modelis PSS/E aplinkoje parodė, kad net ir nedidelės apimties reprezentatyvus tinklo fragmentas leidžia atskleisti realioms perdavimo sistemoms būdingus galios srautų persiskirstymo ir pralaidumo ribojimo mechanizmus. Modelio rezultatai patvirtino, kad AEI integracijos ribos priklauso ne tik nuo bendros prijungiamos generacijos galios, bet ir nuo jos prijungimo vietos tinkle, vietinės apkrovos lygio ir perdavimo koridorių pralaidumo. Tai reiškia, kad praktikoje AEI plėtros galimybės turėtų būti vertinamos ne tik nacionaliniu balanso lygmeniu, bet ir regioninių 110 kV tinklo mazgų bei linijų apkrovimo požiūriu.
3. Atlikta scenarijų analizė parodė, kad skirtingi AEI generacijos ir apkrovos režimai sukuria skirtingo pobūdžio tinklo ribojimus. Saulės generacijos dominavimo atveju ribojimai pirmiausia formuojasi arčiau saulės generacijos prijungimo taško, o vėjo generacijos dominavimo atveju apkraunami kiti perdavimo koridoriai. Mišrios vėjo ir saulės generacijos režimas pasirodė kritiškiausias, nes vienu metu apkraunami keli tinklo keliai. Tiriamajame modelyje kritiniu atveju, kai bendra AEI generacija siekė 320 MW, nustatytos dvi linijų perkrovos, o apytikslė ribojama AEI galia sudarė apie 42,4 MW. Šis rezultatas rodo, kad realiose sistemose didelės AEI gamybos dalies integracijai būtina vertinti ne vien atskirus saulės ar vėjo scenarijus, bet ir jų vienalaikio veikimo poveikį tinklui.
4. Ribojimų mažinimo priemonių palyginimas parodė, kad techninis priemonės efektyvumas priklauso nuo jos vietos tinkle ir nuo to, ar ji veikia būtent tą perdavimo koridorių, kuriame susiformuoja ribojimas. Tiriamajame modelyje 40 MW BESS, prijungta prie perteklinės AEI generacijos mazgo, pašalina kritines perkrovas, nes sumažino generacijos eksportą per apkrautus tinklo elementus. Tinklo stiprinimo analizė parodė, kad vieno elemento sustiprinimas ne visada išsprendžia problemą - ribojimas gali persikelti į kitą to paties koridoriaus elementą. Todėl realiame tinklo planavime efektyviausios yra ne pavienės, o koordinuotos priemonės, nukreiptos į visą ribojantį perdavimo kelią. EV lankstumo rezultatai papildomai parodė, kad paklausos lankstumas nėra automatiškai naudingas: jei lanksti apkrova prijungiama netinkamoje tinklo vietoje, ji gali sumažinti vieną ribojimą, bet padidinti kitą.
5. Orientacinė techninė-ekonominė analizė parodė, kad techniškai veiksmingos priemonės gali labai skirtis savo ekonominiu pagrįstumu. Nors BESS techniniu požiūriu pašalina kritines perkrovas, vien AEI ribojimų mažinimo funkcijai ši alternatyva buvo brangesnė už tinklo pralaidumo didinimą. Tiriamuoju atveju ekonomiškai racionaliausia priemone nustatyta koordinuota kritinių 110 kV linijų rekonstrukcija, kurios NPV sudarė 10,20 mln. EUR, kai

BESS alternatyvos NPV siekė 48,72 mln. EUR. Todėl galima teigti, kad realiame perdavimo tinklo planavime, kai pagrindinė problema yra ilgalaikis pralaidumo trūkumas, pirmiausia turėtų būti vertinamas tinklo stiprinimas. BESS tikslinga laikyti lankstesne, bet brangesne priemone, kurios ekonominė vertė didėtų tik tada, jei būtų įtraukiamos papildomos paslaugos, tokios kaip balansavimas, dažnio reguliavimas ar energijos pirkimas pigesnėmis valandomis ir pardavimas brangesnėmis valandomis.

Literatūros sąrašas

1. BECKER, S.; RODRIGUEZ, R. A.; ANDRESEN, G. B.; SCHRAMM, S.; GREINER, M. Transmission grid extensions during the build-up of a fully renewable pan-European electricity supply. *Energy*, 2014, 64: 404-418.
2. ALKHALIDI, A.; AL-SALAYMEH, A.; AL-KOUZ, W.; JALLAD, J. Renewable energy curtailment practices in Jordan and proposed solutions. *Renewable Energy*, 2022, 189: 1266-1281.
3. DENHOLM, P.; HAND, M. M. Grid Flexibility and Storage Required to Achieve Very High Penetration of Variable Renewable Electricity. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1817-1830.
4. LI, J.; LIU, F.; LI, Z.; SHAO, C.; LIU, X. Grid-side flexibility of power systems in integrating large-scale renewable generations: A critical review on concepts, formulations and solution approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 272-284.
5. LITGRID. Atsinaujnančių energijos išteklių centras [žiūrėta 2025-03-19]. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/index.php/aei-centras/32046>
6. DIK, A.; SUN, H.; CALAUTIT, J. K.; KUTLU, C.; BOUKHANOUF, R.; OMER, S. A. Sustainable urban energy dynamics: Integrating renewable energy and electric vehicles in a European context. *Energy Conversion and Management*, 2025, 340: 119972.
7. LAIMON, M. Renewable energy curtailment: a problem or an opportunity? *Results in Engineering*, 2025, 26: 104925.
8. YANG, Y.; QIU, J.; MA, J.; ZHANG, C. Integrated grid, coal-fired power generation retirement and GESS planning towards a low-carbon economy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124: 106409.
9. BROWN, T.; SCHLACHTBERGER, D.; KIES, A.; SCHRAMM, S.; GREINER, M. Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 2018, 160: 720-739.
10. KONG, Q.; FOWLER, M.; ENTCHEV, E.; RIBBERINK, H.; MCCALLUM, R. The Role of Charging Infrastructure in Electric Vehicle Implementation within Smart Grids. *Energies*, 2018, 11(12): 3362.
11. DANESE, A.; TORSÆTER, B. N.; SUMPER, A.; GARAU, M. Planning of High-Power Charging Stations for Electric Vehicles: A Review. *Applied Sciences*, 2022, 12(7): 3214.
12. SORTOMME, E.; EL-SHARKAWI, M. A. Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 351-359.
13. KEMPTON, W.; TOMIC, J. Vehicle-to-Grid Power Implementation: From Stabilizing the Grid to Supporting Large-Scale Renewable Energy. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 280-294.
14. DIK, A.; OMER, S.; BOUKHANOUF, R. Electric Vehicles: V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration. *Energies*, 2022, 15(3): 803.
15. LUND, H.; ØSTERGAARD, P. A.; CONNOLLY, D.; MATHIESEN, B. V. Smart Energy and Smart Energy Systems. *Energy*, 2017, 137: 556-565.
16. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2024. International Energy Agency, 2024. Prieiga per: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
17. SOVACOOOL, B. K.; HIRSH, R. F. Beyond Batteries: An Examination of the Benefits and Barriers to Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) and a Vehicle-to-Grid (V2G) Transition. *Energy Policy*, 2009, 37(3): 1095-1103.

18. JOHNSEN, J. K.; NESHATI, N.; LUTZENHISER, L.; MWASILU, F. Review on Smart Charging of Electric Vehicles via Market-Based Incentives, Grid-Friendly and Grid-Compatible Measures. *World Electric Vehicle Journal*, 2023, 14(1): 25.
19. WOLBERTUS, R.; KROESEN, M.; VAN DEN HOED, R.; CHORUS, C. G. Too much or not enough? Planning electric vehicle charging infrastructure: A review of modeling options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111719.
20. MAHMUD, K.; KHAN, B.; RAVISHANKAR, J.; AHMADI, A.; SIANO, P. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120: 109618.
21. DENHOLM, P.; BRINKMAN, G.; MAI, T. How low can you go? The importance of quantifying minimum generation levels for renewable integration. *Energy Policy*, 2018, 115: 249-257.
22. ENTSO-E. Transparency Platform - Load, Generation and Day-Ahead Prices Data. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2023 [žiūrēta 2026-01-22]. Prieiga per: <https://transparency.entsoe.eu/>
23. EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE. PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System: User Manual and Data. European Commission, Joint Research Centre, 2023. Prieiga per: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
24. COLE, W.; RAMASAMY, V.; TURAN, M. Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2025 Update. National Renewable Energy Laboratory, 2025.
25. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Batteries and Secure Energy Transitions. International Energy Agency, 2024. Prieiga per: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
26. ENTSO-E. Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2024. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2024 [žiūrēta 2026-01-19]. Prieiga per: <https://tyndp.entsoe.eu/>
27. SIEMENS PTI. PSS/E Power Flow and Steady-State Analysis - User Manual. Siemens Power Technologies International, 2019.
28. LITGRID AB. Lietuvos elektros perdavimo tinklo infrastruktūros apžvalga. Litgrid AB, 2023 [žiūrēta 2026-05-19]. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/>
29. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Power Generation Costs in 2022. International Renewable Energy Agency, 2023 [žiūrēta 2026-03-12]. Prieiga per: <https://www.irena.org/>
30. ENTSO-E. Methodology for System Adequacy and Network Planning Studies. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2021.
31. LI, F.; WANG, H.; WANG, D.; LIU, D.; SUN, K. A Review of Wind Power Prediction Methods Based on Multi-Time Scales. *Energies*, 2025, 18(7): 1713.
32. COUNCIL OF EUROPEAN ENERGY REGULATORS. Report on Regulatory Frameworks for European Energy Networks 2024. Council of European Energy Regulators, 2025. Prieiga per: <https://www.ceer.eu/publication/report-on-regulatory-frameworks-for-european-energy-networks-2024/>
33. LAZARD. Lazard's Levelized Cost of Energy+ (LCOE+). Lazard, 2025. Prieiga per: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/>

34. EMBER. The age of storage: Batteries primed for India's power markets. Ember, 2025. Prieiga per: <https://ember-energy.org/latest-insights/the-age-of-storage-batteries-primed-for-indias-power-markets/chapter-3-the-economics-of-merchant-bess/>
35. MIGLIARI, L.; COCCO, D.; PETROLLESE, M. Levelized Cost of Storage (LCOS) of Battery Energy Storage Systems (BESS) Deployed for Photovoltaic Curtailment Mitigation. *Energies*, 2025, 18(14): 3602.
36. BLOOMBERGNEF. 2025 Lithium-Ion Battery Price Survey. BloombergNEF, 2025.
37. ENERGY CELLS. Europos Komisija patvirtino - „Energy cells“ kaupimo sistemos projektas įgyvendintas tinkamai, finansuos 79,5 mln. EUR. Energy cells, 2024. Prieiga per: <https://www.energy-cells.eu/energy-cells-didziausia-europoje-kaupimo-sistema-kainavo-maziau-nei-planuota/>
38. ENERGY CELLS. „Energy cells“ energijos kaupimo sistema pradeda veiklą - izoliuoto darbo rezervo paslaugą teikia visa 200 MW galia. Energy cells, 2022. Prieiga per: <https://www.energy-cells.eu/energy-cells-energijos-kaupimo-sistema-pradeda-veikla-izoliuoto-darbo-rezervo-paslauga-teikia-visa-200-mw-galia/>
39. EPSO-G. Lietuvos elektros energijos kaupimo įrenginių sistemą įrengs „Siemens Energy“ ir „Fluence“. EPSO-G, 2021 [žiūrėta 2026-03-20]. Prieiga per: <https://www.epsog.lt/lt/naujienos/lietuvos-elektros-energijos-kaupimo-irenginiu-sistema-irengs-siemens-energy-ir-fluence>
40. LITGRID. „Litgrid“ pradeda elektros perdavimo linijų rekonstrukcijos darbus Panevėžyje. Litgrid, 2025. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/index.php/naujienos/naujienos/litgrid-pradeda-elektros-perdavimo-liniju-rekonstrukcijos-darbus-panevezyje/36303>
41. LITGRID. „Litgrid“ rekonstruos 30 km ilgio elektros liniją Šiaulių ir Akmenės rajonuose. Litgrid, 2025. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/index.php/naujienos/naujienos/litgrid-rekonstruos-30-km-ilgio-elektros-linija-siauliu-ir-akmenes-rajonuose/36205>
42. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe (ENER 038). European Environment Agency, 2024. Prieiga per: <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/thematic-briefings/climate-change/trends-in-the-energy-system/greenhouse-gas-emission-intensity>
43. ACER. Variation in the VOLL in Member States. ACER Data Item Details, 2024. Prieiga per: <https://aegis.acer.europa.eu/chest/dataitems/644/view>
44. COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Paris Agreement on climate change. Council of the European Union, 2025. Prieiga per: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/paris-agreement-climate/>
45. EUROPEAN COMMISSION. European Climate Law. Directorate-General for Climate Action, 2021. Prieiga per: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en