



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos valdymo priemonių parinkimas

Baigiamasis magistro projektas

Deividas Šikšnys

Projekto autorius

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos valdymo priemonių parinkimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Deividas Šikšnys

Projekto autorius

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Prof. Saulius Gudžius

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Deividas Šikšnys

Reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos valdymo priemonių parinkimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Deividas Šikšnys, baigiamasis projektas tema „Reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos valdymo priemonių parinkimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Šikšnys, Deividas. Reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos valdymo priemonių parinkimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: perdavimo tinklo optimizavimas, įtampos valdymas, reaktyviosios galios kompensavimas.

Kaunas, 2020. 49 p.

Santrauka

Šiame darbe tiriamas reaktyviosios galios elektros perdavimo tinkle optimizavimas ir įtampos priemonių parinkimas. Šis tyrimas padės pasiekti didesnę tinklo efektyvumą sumažinant patiriamus nuostolius iki minimumo. Visada tinklo efektyvumas yra siejamas su ekonomine nauda, todėl didinant efektyvumą yra atliekami ekonominiai skaičiavimai, norint išsiaiškinti, kaip reikėtų optimizuoti tinklą.

Perdavimo tinkle nuostoliai susidaro dėl reaktyviosios galios pertekliaus ar trūkumo, dėl kurio mūsų galios faktorius nėra lygus vienam, todėl yra siekiama rasti optimalių metodų reaktyviosios galios optimizavimui perdavimo tinkle. Įvertinami ir išanalizuojami optimalaus sprendimo algoritmai. Aprašoma taikoma optimizacinio metodo tikslo funkcija. Optimizacinis modelis pritaikytas teoriniame tinklo IEEE – 23 modelyje, o vėliau perkeltas į Lietuvos perdavimo tinklo modelį, įvertinant rezultatus vasaros minimalių apkrovų režimu ir maksimalių žiemos apkrovų režimu. Gauti rezultatai pateikė įtampos valdymo priemonių parinkimo vietą ir dydį tinkle. Lyginami skirtingi įtampos valdymo įrenginių parinkimo tinkle ekonominiai rezultatai.

Sukuriamas perspektyvinis Lietuvos tinklo modelis, įvertinant augantį vartojimą 18 % ir generavimą šalyje. Didžioji dalis augančios generacijos šalyje yra atsinaujinantys energijos šaltiniai. Atliekamas perspektyvinio tinklo optimizavimas ir lyginami gauti rezultatai su esamo tinklo rezultatais.

Šikšnys, Deividas. Reactive Power Optimization in transmission Network and Selection of Voltage Control Devices. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: transmission network optimization, voltage control, reactive power compensation.

Kaunas, 2020. 49.

Summary

This work investigates the optimization of reactive power transmission network and the selection of voltage equipment. This study will help achieve greater network efficiency while minimizing losses. Network efficiency is always associated with economic benefits, so economic calculations are performed to increase efficiency to find out how the network should be optimized.

Transmission network losses are caused by excess or shortage of reactive power, due to which our power factor is not equal to one. The aim is to find optimal methods for optimizing reactive power in the transmission network. Algorithms for the optimal solution are evaluated and analyzed. The objective function of the optimization method is described. The optimization model was applied in the theoretical model of the network IEEE – 23, and later transferred to the Lithuanian transmission network model, evaluating the results in the summer minimum load mode and the maximum winter load mode the obtained results provided the location and size of the selection of voltage control measures in the network. The different economic results of the selection of voltage control devices in the network are compared.

A perspective model of the Lithuanian network is being developed, estimating the growing consumption by 18% and growing generation in the country. Much of the growing generation in the country is renewable energy. The optimization of the perspective network is performed and the obtained results are compared with the results of the existing network.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Reaktyviosios galios įtaka tinklui.....	11
1.1. Įtampos stabilumas	12
1.2. Atsinaujinančių šaltinių įtaka įtampai ir reaktyviajai galiai	13
1.3. Sinchroniniai generatoriai	13
1.4. Reaktoriai	16
1.5. Kondensatoriai.....	16
1.6. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius (SVC)	17
1.7. Statinis sinchroninis kompensatorius (STATCOM)	18
1.8. Neigiami kompensavimo įrenginių požymiai	20
1.9. Įtampos reguliavimas ir reaktyviosios galios valdymas Lietuvoje.....	21
2. Tinklo optimizavimo aktualumas ir metodų taikymas	23
3. Optimalių uždavinių sprendimo algoritmai.....	25
3.1. Optimalaus galių pasiskirstymo sprendimas	26
3.2. Galios srauto pasiskirstymo modelis	27
3.3. Galios srautų pasiskirstymo modelis tinklui su kompensatoriais mazguose.....	27
3.4. Lagrange'o funkcijos pritaikymas optimizavime.....	28
3.5. Tikslų funkcijos formavimas	30
4. Tiriamoji dalis.....	31
4.1. Ekonominiai skaičiavimai teoriniame modelyje	36
5. Lietuvos perdavimo tinklo optimizavimas	38
5.1. Šuntinio reaktoriaus veikimo parinkimas perdavimo tinkle.....	40
5.2. Ekonominiai skaičiavimai įrengiant šuntinį reaktorių pastotėje – 433	41
5.3. Optimizacinio modelio taikymas Lietuvos perdavimo tinklui	43
5.4. Lietuvos tinklo optimizacinio modelio ekonominė analizė.....	45
6.2. Lietuvos perspektyvinio modelio optimizavimas.....	49
Išvados	56
Literatūros sąrašas	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Statinio sinchroninio kompensatoriaus ir statinio reaktyviosios galios kompensatoriaus palyginimas.....	20
2 lentelė. Teorinio IEEE – 23 modelio duomenys	31
3 lentelė. Viso tinklo nuostolių sumažinimas aktyviosios ir reaktyviosios atžvilgiu	33
4 lentelė. Sumažėjusių generatorių reaktyviosios galios dalis tiekama į tinklą.....	34
5 lentelė. Lietuvos tinklo 2018 metų faktiniai generacijos šaltinių dydžiai MW	38
6 lentelė. Vasaros min. apkrovų metu sumažėję tinklo nuostoliai dėl šuntinio reaktoriaus	41
7 lentelė. SK veikimo sumažinimas šuntiniu reaktoriumi	41
8 lentelė. Lietuvos EES tinklo nuostolių sumažėjimas po optimizavimo.....	45
9 lentelė. Ekonominė analizė Lietuvos tinklo optimizavime	46
10 lentelė. Projektų atsipirkimo laikas	48
11 lentelė. Minimalus nuostolių sumažinimas tinkle, kuriam esant projektai būtų pelningi.....	49
12 lentelė. Perspektyvinio Lietuvos modelio 2028 metams generavimo šaltinių dydžiai MW.....	50
13 lentelė. Pastotėje – 436 įrengiamo kompensatoriaus ekonominių skaičiavimų parametrai.....	54

Paveikslų sąrašas

1 pav. a) Sistema, kuri turi induktyvinio tipo varžą, prie kurios prijungta apkrova ir matoma apkrovoje esanti įtampa V_t . b) vektorių atvaizdavimas išaugus sistemoje esančio reaktyvio elemento srovei I_q' . c) vektorių atvaizdavimus padidėjus aktyviosios srovės dedamajai I_p'	11
2 pav. Sinchroninio generatoriaus žadinimo schema	14
3 pav. Generatoriaus galių ribų schema	14
4 pav. Reaktyviosios galios kitimas lyginant su įmagnetinimo srove	15
5 pav. Šuntinio reaktoriaus pajungimas perdavimo sistemoje	16
6 pav. Kondensatorių pajungimo galimybės elektros sistemoje	16
7 pav. Statiniai reaktyviosios galios kompensatoriai	18
8 pav. Supaprastinta statinio sinchroninio kompensatoriaus schema	19
9 pav. Statinio sinchroninio kompensatoriaus įtampos reguliavimo ir reaktyviosios galios kompensavimo grafikas	19
10 pav. Lietuvos 330kV perdavimo tinklo įtampų histograma	21
11 pav. Skirtingų metodų pagalba gauti rezultatai sprendžianti tikslo funkciją	24
12 pav. Optimizavimo grafinė schema	28
13 pav. IEEE-23 modelio principinė schema	32
14 pav. IEEE-23 modelio įtampų grafiko pasikeitimas po optimizavimo	33
15 pav. Aktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose	34
16 pav. Aktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose	35
17 pav. Reaktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose	35
18 pav. Reaktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose	36
19 pav. Papildomai įrengiamos kondensatorių baterijos grynoji dabartinė vertė	37
20 pav. Lietuvos perdavimo tinklo principinė schema	38
21 pav. Šuntinio reaktoriaus perkėlimo įtaką įtampoms 330kV tinkle vasaros minimalių apkrovimų metu	40
22 pav. Grynujų pinigų srautas įrengus šuntinį reaktorių pastotėje – 433	42
23 pav. Grynujų pinigų srautas įrengus šuntinį reaktorių pastotėje – 433 nevertinant sumažintu sisteminių paslaugų	43
24 pav. Optimizavimas Lietuvos EES esant vasaros minimalių apkrovų režimui	44
25 pav. Optimizavimas Lietuvos EES esant žiemos maksimalių apkrovų režimui	44
26 pav. Šuntinio reaktoriaus grynoji dabartinė vertė	47
27 pav. Kondensatorių baterijų grynoji dabartinė vertė	47
28 pav. Sinchroninio kompensatoriaus grynoji dabartinė vertė	48
29 pav. Prognozuojamas bendras elektros energijos suvartojimo iki 2030 metų	50
30 pav. Perspektyvinė 2028 metų Lietuvos perdavimo tinklo schema	52
31 pav. Perspektyvinio Lietuvos tinklo modelio optimizavimas pasirenkant pastotę – 438	52
32 pav. Šuntinio reaktoriaus projekto grynoji dabartinė įvertinus perspektyvinio modelio rezultatus	53
33 pav. Perspektyvinio Lietuvos tinklo modelio optimizavimas pasirenkant pastotę – 436	54
34 pav. Pastotėje – 436 įrengto kompensavimo įrenginio projekto grynoji dabartinė vertė	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

EES – elektros energetikos sistema;

ST – srovės transformatorius;

SK – sinchroninis kompensatorius;

AĮR – automatinis įtampos reguliatorius;

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

VERT – valstybinė energetikos reguliavimo taryba;

VŠR – valdomas šuntinis reaktorius;

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė;

NPV – vertė (*angl. net present value*) dabartinė grynoji vertė;

IRR – (*angl. internal rate of return*) vidinė gražos norma.

Įvadas

Elektros sistema yra sudėtingiausia žmogaus sukurta sistema pagal savo dydį, veikimo principus ir valdymą. Elektros vartojimo augimas yra siejamas su šalies ekonomikos augimu ir vystymusi. Augant tinklams ir didėjant elektros energijos vartojimui elektros tinklas auga kartu. Jau 1980 metais pradėta vis labiau gilintis ir ieškoti kelio efektyvesniam elektros naudojimui ir transportavimui. Keliami trys pagrindiniai ir svarbiausi reikalavimai elektros energetikos sistemoms: saugumas, patikimumas ir efektyvumas. Norint pasiekti kuo didesnę efektyvumą reikia sumažinti patiriamus nuostolius iki minimumo. Visada tinklo efektyvumas yra siejamas su ekonomine nauda, todėl didinant efektyvumą yra atliekami ekonominiai skaičiavimai, norint išsiaiškinti, kaip reikėtų optimizuoti tinklą.

Perdavimo tinkle nuostoliai susidaro dėl reaktyvios galios pertekliaus ar trūkumo, dėl kurio mūsų galios faktorius nėra lygus vienam, todėl yra siekiama rasti optimalių metodų reaktyviosios galios optimizavimui perdavimo tinkle. Be efektyvumo tinkle, kitas labai svarbus reikalavimas – patikimumas, kuris yra neatsiejamas su stabilium įtampos palaikymu perdavimo tinkle. Norint išlaikyti tinklo įtampą reikiamuose režimuose privaloma tinkle turėti įrenginius, kurių pagalbą būtų galima valdyti įtampos kitimą tinkle.

Tiriamojo darbo tikslas – ištirti reaktyvios galios optimalaus valdymo elektros perdavimo tinkle metodus.

Tiriamojo darbo uždaviniai:

- išnagrinėti reikalavimus ir taikomas priemones reaktyviosios galios ir įtampos valdymui;
- ištirti matematinius metodus, nustatyti kriterijus leidžiančius optimaliai valdyti galios srautus elektros sistemoje;
- sudaryti elektros tinklo modelį reaktyviosios galios optimizavimo metodo verifikavimui;
- parinktą reaktyviosios galios optimalaus valdymo metodą pritaikyti Lietuvos EES dabartinėmis ir perspektyvinėmis sąlygomis;
- atlikti ekonominę analizę optimizuoto tinklo tyrimo rezultatams įvertinti.

1. Reaktyviosios galios įtaka tinklui

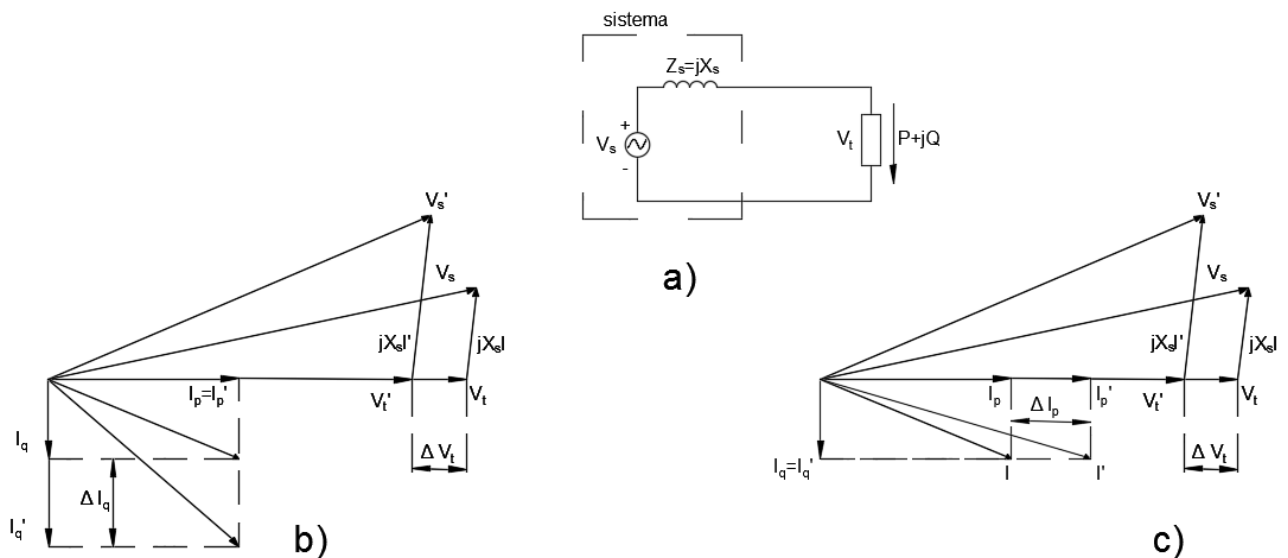
Reaktyviosios galios kompensavimas yra svarbi problema esanti elektros sistemoje. Ši problema apima tinklo valdymo, ekonominius ir elektros kokybės aspektus. Elektros tinkle pagaminamos aktyviosios ir reaktyviosios energijos kiekis yra nustatomas pagal vartotojų vartojimo paklausa, kuri susideda iš aktyviają ir reaktyviają galia naudojančių vartotojų komponentų sumos.

Reaktyvioji galia (Q) – tai galia, kuria keičiasi reaktyvieji komponentai, induktoriai ir talpumas, kuriuos galima išreikšti:

$$Q = I^2X = \frac{V_S^2}{X} \text{ VAR} \quad (1)$$

Matavimo vienetai yra reaktyviniai voltamperai (VAR). Q yra neigiamas atitinkamai tapluminiams komponentams ir teigiamas induktoriniams komponentams [1]. Reaktyvioji galia yra matuojama Mvar ir ji nuolat dalyvauja galios mainuose tarp elektrinių ir vartotojų, kurie vartoja elektros energiją. Pilnutinė elektros galia S (MVA) susideda iš aktyviosios galios P (MW) ir reaktyviosios galios (Mvar).

Pateiktame pirmame paveikslėlyje galima matyti kokią svarbą įtampai turi aktyviosios galios ir reaktyviosios galios elementai. Vaizduojama sistema, kurioje yra induktyvinio pobūdžio varža Z_s ir prijungta apkrova, kurios įtampa yra lygi V_t reikšmei. Dalyje b) yra vektorių schema, kurioje matoma, kad padidėjus Q_Δ reaktyviajai varžai padidėjo srovė $I_q + \Delta I_q$, o aktyviosios dalies srovė I_p nepakito. Šis pokytis matomas sumažėjusioje ΔV_t įtampoje. Dalyje c) pateiktoje vektorių diagramoje išauga aktyviosios dalies srovė, tekanti apkrova $I_p + \Delta I_p$, o reaktyviosios lieka nepakitusi I_q .



1 pav. a) Sistema, kuri turi induktyvinio tipo varžą, prie kurios prijungta apkrova ir matoma apkrovoje esanti įtampa V_t . b) vektorių atvaizdavimas išaugus sistemoje esančio reaktyvinio elemento srovei I_q' . c) vektorių atvaizdavimus padidėjus aktyviosios srovės dedamajai I_p'

Elektros sistemoje apie 10% visos generuojamos galios sudaro nuostoliai dėl aktyviųjų ir reaktyviųjų srovės komponentų. Atliktuose tyrimuose yra įrodyta, kad tinkamoje vietoje įrengus kompensavimo įrenginį galima sumažinti nuostolius. Atitinkamai įrengiant kondensatorių baterijas

tinkamoje vietoje yra sumažinami ne tik patiriami nuostoliai, bet ir pakeliamas įtampos lygis [2,3]. Kondensatorių baterijų įrengimas tinkamoje vietoje pagerina perduodamos energijos kokybę ir sumažina įtampos harmoninius iškraipymus [4,5]. Ieškant optimalaus sprendimo ir norit pasiekti maksimalią naudą tinkle reikia rasti tinkamas vietas, optimalų dydį ir kompensavimo įrenginių skaičių.

Atliktame tyrime, kuris pateiktas [6] šaltinyje siekiama rasti optimalų sprendimą tinklo nuostoliams sumažinti, kartu sumažinant ir generatorių išlaidas. Aprašytame modulyje taikomos dvi tikslo funkcijos, vienu metu siekiant rasti geriausią sprendimą. Nurodytame 330kV perdavimo tinkle tinkamiausias sprendimas rastas, papildomai nustatant, kad atitinkamoje vietoje turi būti įrengtas apskaičiuoto galingumo šuntinis reaktorius. Įvertinus visas korekcijas tinkle buvo pagerinti įtampų lygiai atitinkamuose mazguose, tai pat sumažėjo linijose esantys nuostoliai ir keliais procentais buvo sumažintas generatorių darbas, kas lėmė sutaupytas išlaidas. Sprendžiant minėtus tikslo uždavinius gali būti taikomas ne vienas matematinis skaičiavimo metodas. Pagrindiniai optimizavimo metodai aptariami 3-iaame skyriuje.

Rinkoje perdavimo sistemos operatorius yra atsakingas už įtampos palaikymo lygį tinkle ir reaktyviosios galios srautus. Reaktyviosios galios palaikymas ir valdymas perdavimo tinkle yra techniškai ir finansiškai svarbus. Teisingas jos parinkimas sumažina nuostolius perdavimo tinkle, kurie sumažina finansines išlaidas. Sistemos patikimumas ir efektyvumas gali būti patenkinamas tik subalansavus reaktyviosios galios srautus ir išlaikant įtampą leistinose ribose. Perdavimo tinkle reikalaujama, kad normalus įtampos dydis nuo nominalios nenukryptų daugiau nei $\pm 10\%$. Įtampą tinkle gali keisti keičiantis apkrovai ar atsiradus gedimui linijoje. Svarbu įtampą išlaikyti leistinose ribose, nes jai išaugus atsiranda pavojus trumpajam jungimui, kuris gali sugadinti transformatorius ir kitą įrangą. Kintamosios srovės tinkle įtampa yra stipriai priklausoma nuo reaktyviosios srovės linijose ir linijų varžų dydžio.

Norint reguliuoti tinklo įtampą reikia, jog sugeneruota reaktyvioji energija būtų suvartota, nes jos perteklius kelia įtampos lygį, o jos trūkumas ją mažina [7,8,16].

1.1. Įtampos stabilumas

Įtampos stabilumas – sistemos savybė visuose šynose išlaikyti įtampą leistinose ribose, kada sistemoje įvyksta avarijos ar atsiranda sutrikimai. Tai vienas svarbiausių tinklo parametrų, kuris privalo būti išlaikomas savo riboje kiekviename mazge, nes nuostoliai, kai įtampos stabilumas tinkle prarandamas gali būti labai dideli. Vienas iš pavyzdžių, 2003-iais metais Amerikoje ir Kanadoje, įvykęs įtampos stabilumo praradimas (*angl. blackout*), kai elektros tinklas turėjo išsidalinti. Tinklo įtampa gali tapti nestabili, kai staigiai išauga apkrova ar įvyksta avarija. Pagrindinis ir svarbiausias veiksnys, lemiantis įtampos stabilumą, yra reikiamos reaktyviosios galios kiekio pateikimas tinkle. Nestabilumas gali progresuoti iki įtampos griuvimo tinkle, kada visuose šynose nesustabdomai pradeda kristi įtampa. Prijungti prie tinklo šuntiniai reaktoriai, kondensatoriai ar reaktyviosios galios kontroleriai gali padėti išvengti įtampos griūties tinkle. Šių įrenginių tikslas sugeneruoti reikiamą reaktyviosios galios kiekį tinkle, kad įtampos kritimas būtų sumažintas. Reaktyviosios galios kompensavimo technologija gali padėti išvengti įtampos nestabilumo tinkle ir leisti sistemai dirbti patiriant mažesnius nuostolius.

1.2. Atsinaujinančių šaltinių įtaka įtampai ir reaktyviajai galiai

Norint gaminti energiją, sukelti kuo mažiau žalos aplinkai, vis labiau didėja AEI plėtra. Ši energetikos sritis labiausiai patobulėjo per paskutinį dešimtmetį. Pradžioje saulės panelės buvo naudojamos tik individualių poreikių patenkinimui ir net nebuvo svarstoma, kad jos gali būti vienu iš galimų generacijos šaltinių tinkle. Šiuo metu įkurti saulės elektrinių parkai, kurie jungiami į elektros tinklą ir jų galia yra pakankamai didelė, dėl to juos reikėtų vertinti, kaip atskirus generavimo šaltinius.

Saulės elektrinės prijungiamos prie tinklo inverterių pagalba, kurių galios faktorius yra lygus vienetui, todėl jie į tinklą generuoja tik aktyviąją galią. Tačiau, kai yra generuojama tik aktyvioji galia į tinklą, susiduriama su kitomis problemomis. Pavyzdžiui, turint mažai apkrautas tinklo oro linijas, jos generuoja reaktyviąją galią ir įtampa tinkle kyla. Mažai apkrautos linijos dažniausiai būna vasaros savaitgalių dienomis, kai saulės parkai gamina didelius elektros kiekius, todėl teigiama, kad ateityje inverterių galios faktorius nebus lygus vienetui ir jų pagalba bus galima sumažinti išaugusią įtampą tinkle [9].

Dideli vėjo parkai statomi visame pasaulyje, dauguma jų indukciniai generatoriai turi dvigubą maitinimą (*angl. DFIG – doubly fed induction generator*) [10]. Šie generatoriai turi privalumų lyginant su nereguliuojamo greičio generatoriais [11]. Dvigubą maitinimą turintys generatoriai gali reguliuoti greitį, aktyvinę ir reaktyvinę galią. Jie turi galimybę vidutiniškai 30 % ribose reguliuoti rotoriaus keitiklį ir keisti generatoriaus sukimosi greitį +/- 25 % ribose.

Naujai projektuojami vėjo parkai nutolę dešimčia kilometrų nuo tinklo turi techninių, ekonominių ir ekologinių iššūkių. Dažniausiai vėjo parkai būdavo sujungiami kintamos srovės kabeliais, nes tai yra patikima ir pigi technologija, kurią patogiu eksploatuoti. Tačiau dideli vėjo parkai nutolę nuo tinklo turi trūkumų:

- ilgi kabeliai turi dideles talpumines sroves, kurias reikia kompensuoti;
- kintama srove tiesiai sujungtas vėjo parkas su tinklu turi sąsają. Kai tinkle įvyks avarijos, jos tiesiogiai paveiks ir vėjo parką arba priešingai.

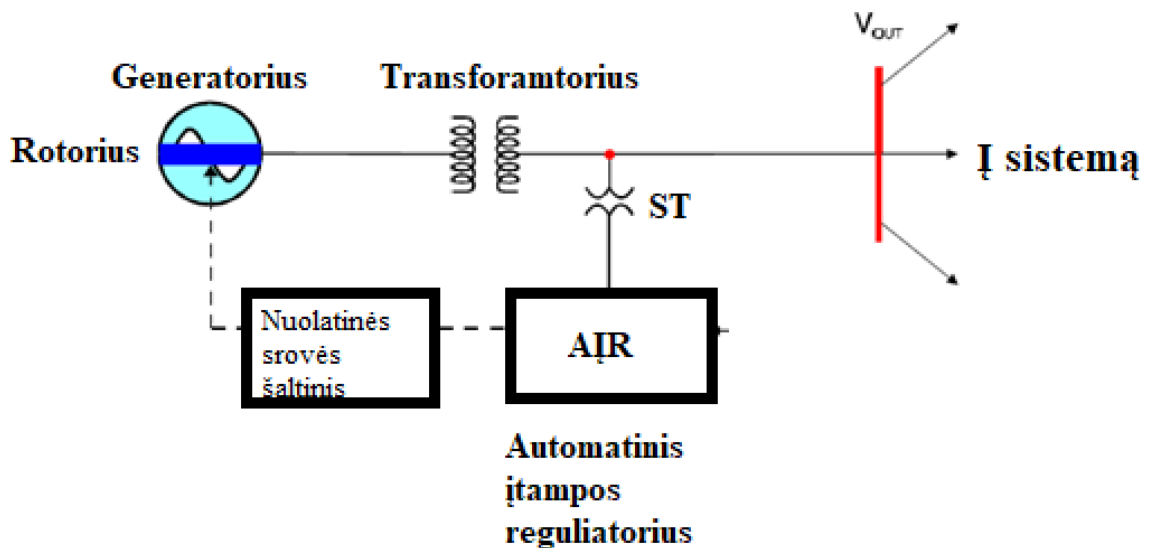
Kaip alternatyva šiuo metu yra siūloma vėjo parkus prijungti naudojantis aukštos įtampos nuolatine srove per keitiklių sujungimą (*angl. HVDC – high voltage direct current*). Tai suteikia šiuos privalumus:

- sistemos perdavimo galia yra kontroliuojama ir pastovi;
- nuolatinės srovės perdavimo linija nėra paveikiama talpuminių srovių;
- reikia mažiau kabelių ir patiriami mažesni galios nuostoliai;
- modernūs vėjo parkai turi galimybę reguliuoti tinklo įtampą [12].

Toliau bus apžvelgiami įrenginiai galintys tinkle reguliuoti įtampą ir kompensuoti reaktyviąją galią perdavimo tinkle.

1.3. Sinchroniniai generatoriai

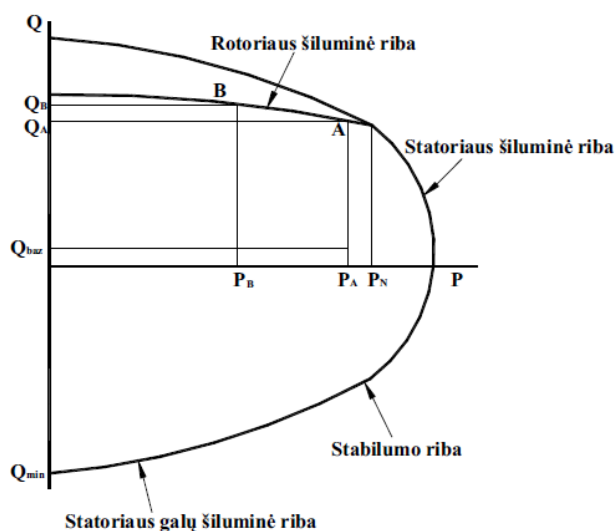
Sinchroniniai generatoriai yra pagrindiniai įrenginiai, kurie gali tiek vartoti, tiek generuoti reaktyviąją galią. Generatoriaus veikimas ir įtampos reguliavimas pateiktas antrame paveikslėlyje.



2 pav. Sinchroninio generatoriaus žadinimo schema

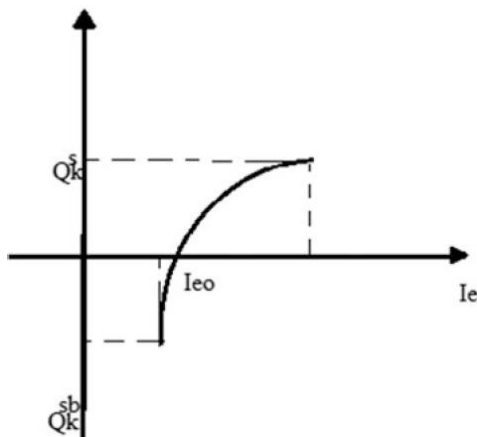
Ši sistema matuoja tinklo įtampą per ST ir tikrina ar įtampa yra nustatytame lygyje. Ši įtampos diapazoną nustato operatorius. Jeigu tinkle yra įtampos sumažėjimas, automatinis įtampos reguliatorius AĮR padidina nuolatinę įtampą į rotoriaus vijas, taip sukurdamas stipresnį magnetinį lauką tarp statoriaus ir rotoriaus ir padidindamas reaktyviosios galios kiekį. Minimalaus apkrovimo metu generatorius dirba nepakankamai sužadintas. Šiomis sąlygomis jis yra induktyvinio pobūdžio vartotojas ir padidina tinklo reaktyvinį galingumą.

Kiekvienas generatorius turi savo ribas, kuriuose gali vartoti reaktyviają galią – mažinti įtampą arba generuoti reaktyviają – didinti įtampą. Kaip matoma 3 paveikslėlyje generatoriaus reguliavimą apriboja ribos, kurioms įtakos turi tai, kaip generatorius yra vėsinamas, kokia yra aplinkos temperatūra. Peržengus šias ribas iškyla pavojus sudeginti generatorių. Dažniausiai generatorių saugo apsaugos, kurios neleidžia jam veikti už šio grafiko ribų [7,8].



3 pav. Generatoriaus galių ribų schema

Sinchroniniai kompensatoriai dažniausiai yra hidroelektrinių generatoriai, kurie esant poreikiui gali atlikti sistemos paslaugą tiekdami ar tik vartodami reaktyviąją galią. Paveikslėlyje žemiau parodyta reaktyviosios galios tiekimo ar kompensavimo ribos su įsimagnetinimo srove. Įmagnetinimo srovei esant I_{e0} reaktyviosios galios dydis yra lygus nuliui. Jei $I_e > I_{e0}$ sinchroninis kompensatorius tiekia į tinklą reaktyviąją galią, jei $I_e < I_{e0}$ sinchroninis kompensatorius ją naudoja iš tinklo.



4 pav. Reaktyviosios galios kitimas lyginant su įmagnetinimo srove

Žvelgiant iš ekonominės pusės reaktyviosios galios kompensavimas sinchroniais generatoriais reikalauja papildomų išlaidų. Paprastai generatoriai gamina aktyviąją galią pagal nustatytą galios koeficientą. Vis dėlto generatorius dėl sistemos reikalavimų gali sumažinti aktyviosios galios gamybą ir padidinti reaktyviąją galią. Kuomet generatorius dirba P_A, Q_{baz} taške ir dėl reaktyviosios galios paklausos pereina į tašką P_A, Q_A patiria nuostolius. Šie nuostoliai susidaro apvijose ir lemia didesnes išlaidas. Tai yra nuostolių išlaidos, kurios patiriamos tiek gaminant, tiek vartojant reaktyviąją galią. Nuostolius galima apskaičiuoti taip:

$$C_Q = \frac{P_{nQ}}{Q} * \lambda \quad (2)$$

Čia:

P_{nQ} – Reaktyviosios galios sukelti nuostoliai generatoriaus statoriaus ir rotoriaus apvijose;

Q – generuojama reaktyvioji galia Mvar;

λ – aktyviosios galios kaina elektrinėje eur/MW.

Kitu atveju generatorius esantis darbo taške A yra ant ribinės kreivės taške (P_A, Q_A) ir tinklui pareikalavus didesnio kiekio reaktyviosios galios kiekio Q_B darbo taškas turės slinkti ribine kreive iki naujo darbo taško B, kuris yra P_B, Q_B . Šiame taške aktyviosios galios dalis $P_B < P_A$, todėl generatorius turi susimąžinti savo generuojamą aktyviąją galią, už kurios nesugeneravimą gali būti prarandami pinigai. Toks pajamų praradimas vadinamas alternatyviosiomis išlaidomis. Tai reiškia, kad aktyviosios galios pelno sumažėjimas buvo patirtas per tą laikotarpį, kai padidėjo reaktyviosios galios generavimas. Tai galime aprašyti matematiškai:

$$C_{AK} = \lambda(P_A - P_B) - [C(P_A) - C(P_B)] \quad (3)$$

Čia:

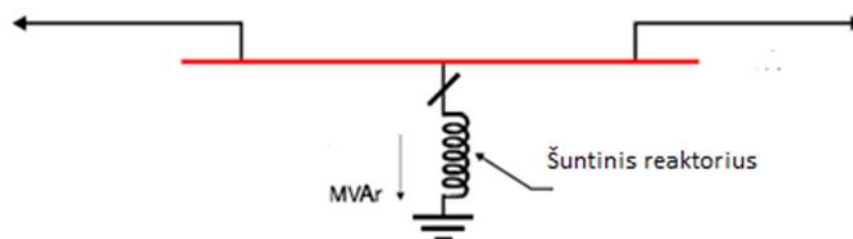
λ – Aktyviosios galios kaina eur/MW;

C(P)- gamybos išlaidų priklausomybė nuo aktyviosios galios gamybos funkcijos [13].

1.4. Reaktoriai

Reaktoriai yra reaktyviosios galios vartotojai, kurie dažniausiai įrengiami pastotėse arba ilgų linijų galuose. Šuntiniai reaktoriai naudojami kompensuoti reaktyviają elektros energiją perdavimo tinklo oro linijose ir reguliuoti įtampą linijos galuose [14].

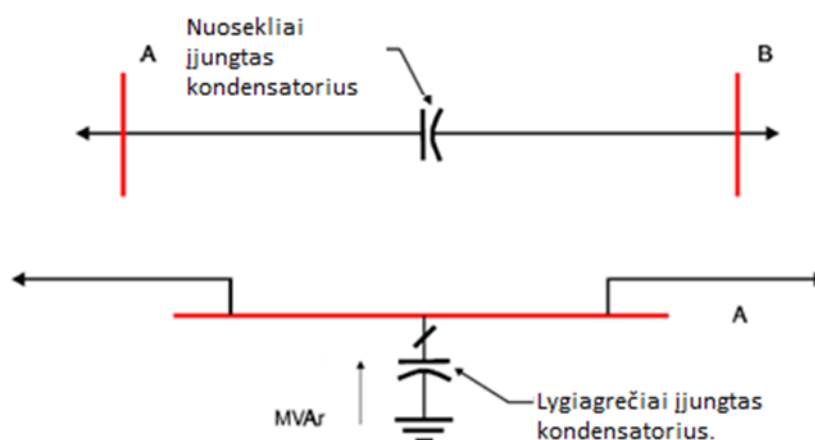
Reaktoriai gali būti jungiami į sistemą tiek nuosekliai, tiek lygiagrečiai į šynas. Nuosekliai jungiamas reaktorius būna skirstomajame tinkle. Taip gali būti daroma tam, kad būtų padidinta linijos varža prie jos pridendant induktyvinės varžos (X_L) dedamąją. Padidinus linijos varžą galima sumažinti trumpojo jungimo srovę linijoje. Tai pat nuosekliai įjungta varža sumažina svyravimus tarp generatorių. Perdavimo tinkle reaktoriai jungiami lygiagrečiai suteikdami galimybę sumažinti įtampą linijų galuose arba vartoti reaktyviają galią. Šuntinio reaktoriaus jungimas perdavimo tinkle lygiagrečiai pavaizduotas 5-ame paveikslėlyje [15].



5 pav. Šuntinio reaktoriaus pajungimas perdavimo sistemoje

1.5. Kondensatoriai

Kondensatoriai yra reaktyviosios galios šaltiniai. Jie taip pat gali būti prijungiami į tinklą nuosekliai ir lygiagrečiai, kaip pateikta 6-ame paveikslėlyje.



6 pav. Kondensatorių pajungimo galimybės elektros sistemoje

Nuosekliai jungiami kondensatoriai linijose reikalingi tam, kad būtų sumažinta linijų induktyvinė varža, jeigu turimas jos perteklius. Sumažinus šią varžą galima padidinti sistemos linijų perduodamą galią. Tai pat, jie yra naudojami dinaminiam stabilumui tinkle. Jungiant kondensatorius lygiagrečiai tikslas yra pakelti įtampą prijungimo taške, kaip yra daroma skirstomajame tinkle. Todėl šie kondensatoriai yra statomi tolimesnėse tinklo vietose, kuriose gali įvykti įtampos kritimas. Tai pat jie puikiai pasitarnauja, esant apkrovos pasikeitimams tinkle.

Reaktyviosios galios išlaidos šuntiniuose reaktoriuose ar kondensatoriuose taip pat gali būti pastovios ir kintamos. Reaktyviosios galios įrenginio investicijų išlaidos (įskaitant įrengimo išlaidas) yra pastovioji šio įrenginio kainos dalis:

$$C_{p(i)} = C_i Q_i \quad (4)$$

Čia:

$C_{p(i)}$ – pastovioji reaktyviosios galios kainos dalis reaktyviosios galios šaltinio mazge – i ;

C_i – įrenginio investicijų išlaidos apkrovos mazge – i (eur/Mvar);

Q_i – kondensatoriaus ar reaktoriaus reaktyvioji galia mazge – i .

Kintamosios reaktyviosios galios paslaugos išlaidos apibrėžiamos, remiantis kondensatoriaus ar reaktoriaus galia ir jų indeliu gerinant sistemos darbą. Šis įnašas gali būti skaičiuojamas kaip tikslo funkcijos jautris teikiamos ar vartojamos reaktyviosios galios atžvilgiu. Ši kintamoji dalis yra skaičiuojama mazge, kuriame įdiegus įrenginį išlaidos sumažėja:

$$C_{k(i)}(t) = -\lambda \frac{\partial P_n}{\partial Q_n} |t * Q_i(t) \quad (5)$$

Čia:

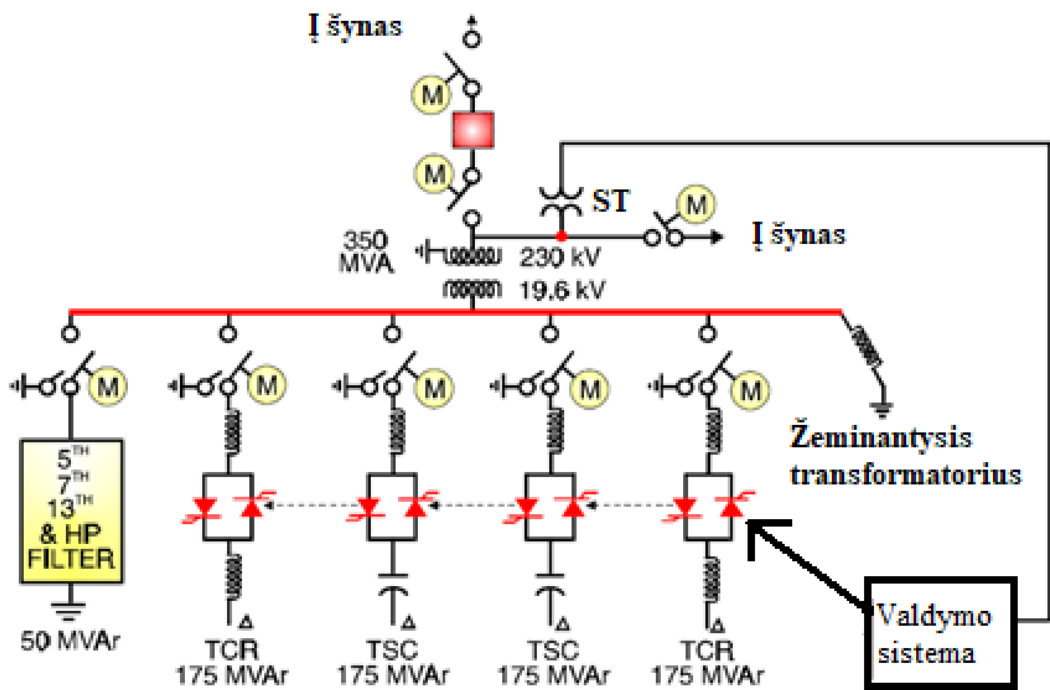
$C_{k(i)}(t)$ – kintamoji reaktyviosios galios kainos dalis reaktyviosios galios šaltinio mazge i laiko momentu t ;

λ – elektros energijos kaina (eur/kWh);

$\partial P_n / \partial Q_n$ – sistemos aktyviosios galios nuostolių jautrio funkcija, kuri priklauso nuo tiekiamos reaktyviosios galios [13].

1.6. Statinis reaktyviosios galios kompensatorius (SVC)

SVC (*angl. Static VAR compensators*) – tai įrenginiai panašūs į sinchroninius kompensatorius, galinčius reguliuoti reaktyviąją galią. Šie įrenginiai turi galimybę automatiškai reguliuoti nustatytą įtampos lygį, 7-ame paveikslėlyje pateiktas pavyzdinis jo modelis. Jis susideda iš dviejų šuntinių kondensatorių ir dviejų šuntinių reaktorių. Veikimas pagrįstas tuo, kad yra matuojamas įtampos lygis ir jam pakitus tiristorių pagalba keičiama tekanti srovė kondensatoriuose ir reaktoriuose. Jeigu turimas įtampos sumažėjimas tada reikia didinti reaktyviąją galią, kad įtampa padidėtų. Viena iš problemų esanti šiame pavyzdyje, tai tiristorių sukelti harmonikų iškrypimai, kurių suregulavimui naudojamas harmonikų filtras (*angl. high pass filtre*).



7 pav. Statiniai reaktyviosios galios kompensatoriai

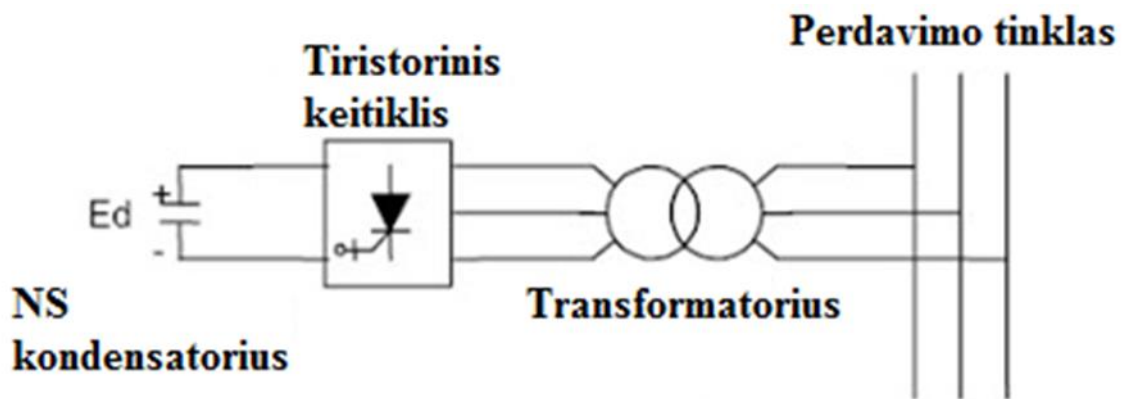
1.7. Statinis sinchroninis kompensatorius (STATCOM)

Statinis sinchroninis kompensatorius arba kondensatorius (*angl. STATCOM – A static synchronous compensator. STATCON – a static synchronous condenser*) yra perdavimo tinkle naudojamas įrenginys įtampos palaikymui ir reaktyviosios galios kompensavimui. Statinis sinchroninis kompensatorius yra prijungiamas kaip šuntuojamas įrenginys prie perdavimo tinklo. Šis įrenginys yra sinchroninis tai leidžia generuoti arba suvartoti reaktyviąją galią pagal tuo metu atsiradusią paklausą ir momentaliai stabilizuoti įtampą tinkle.

Statinį sinchroninį kompensatorių sudaro įtampos keitiklis (*angl. VSC – a voltage source converter*), kuris konvertuoja įeinančią nuolatinę įtampą į kintamą įtampą. Tai yra atliekama tiristorinių keitiklių pagalba. Nuolatinė įtampa į tiristorinį keitiklį patenka per nuolatinės srovės kondensatorius. Šis įrenginys prie tinklo yra prijungiamas per transformatorių. Statinis sinchroninis kompensatorius turi harmonikų filtrus, kurie sugeria dėl inverterio atsiradusius iškreipimus.

Statinio sinchroninio kompensatoriaus veikimas, esant įtampos kritimui sistemoje:

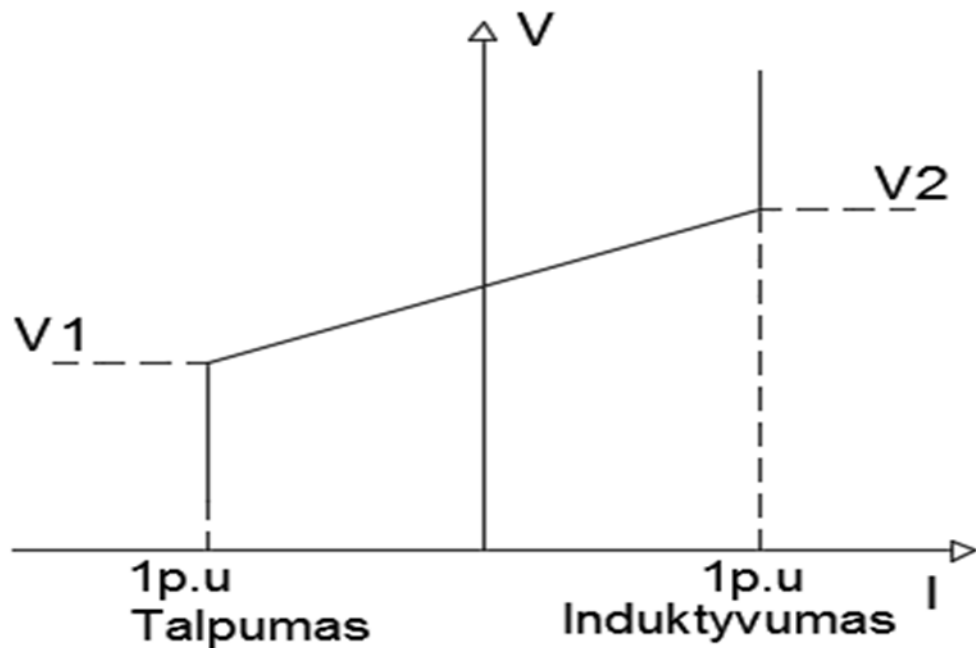
- Šiuo atveju, kai atsiranda įtampos kritimas, sistemoje trūksta reaktyviosios galios ir į tai reaguodamas įrenginys sukelia įtampą pasitelkdamas reaktyviąją galią. Kitu atveju, kada įtampa tinkle išauga virš leistinų normų, reaktyviosios galios tinkle atsiranda perteklius ir statinis sinchroninis kompensatorius tą perteklių sumažina stabilizuodamas įtampą tinkle.



8 pav. Supaprastinta statinio sinchroninio kompensatoriaus schema

Statinis sinchroninis kompensatorius gali būti naudingas:

- reguliuojant tinklo įtampą, palaikant ją nurodytuose ribose. 9-ame paveikslėlyje pavaizduota, kai įtampa yra palaikoma tarp V_1 ir V_2 ribų;
- tai pat jis gali veikti kaip reaktyviosios galios kompensatorius, kuris išlaiko tinkle balansą nurodytuose ribose.



9 pav. Statinio sinchroninio kompensatoriaus įtampos reguliavimo ir reaktyviosios galios kompensavimo grafikas

1 lentelė. Statinio sinchroninio kompensatoriaus ir statinio reaktyviosios galios kompensatoriaus palyginimas

	Statinis sinchroninis kompensatorius (<i>angl. STATCOM</i>)	Statinis reaktyviosios galios kompensatorius (<i>angl. Static VAR compensator</i>)
Reagavimas į tinklo pasikeitimus	Greitas	Lėtesnis
Įrenginio kaina	Didelė	Mažesnė nei statinio sinchroninio kompensatoriaus
Vidiniai nuostoliai	Dideli	Mažesni
Veikimo charakteristikos	Geros	Blogesnės
Gali dirbti su energijos šaltiniais	Baterijos, kiti energijos šaltiniai	Negali

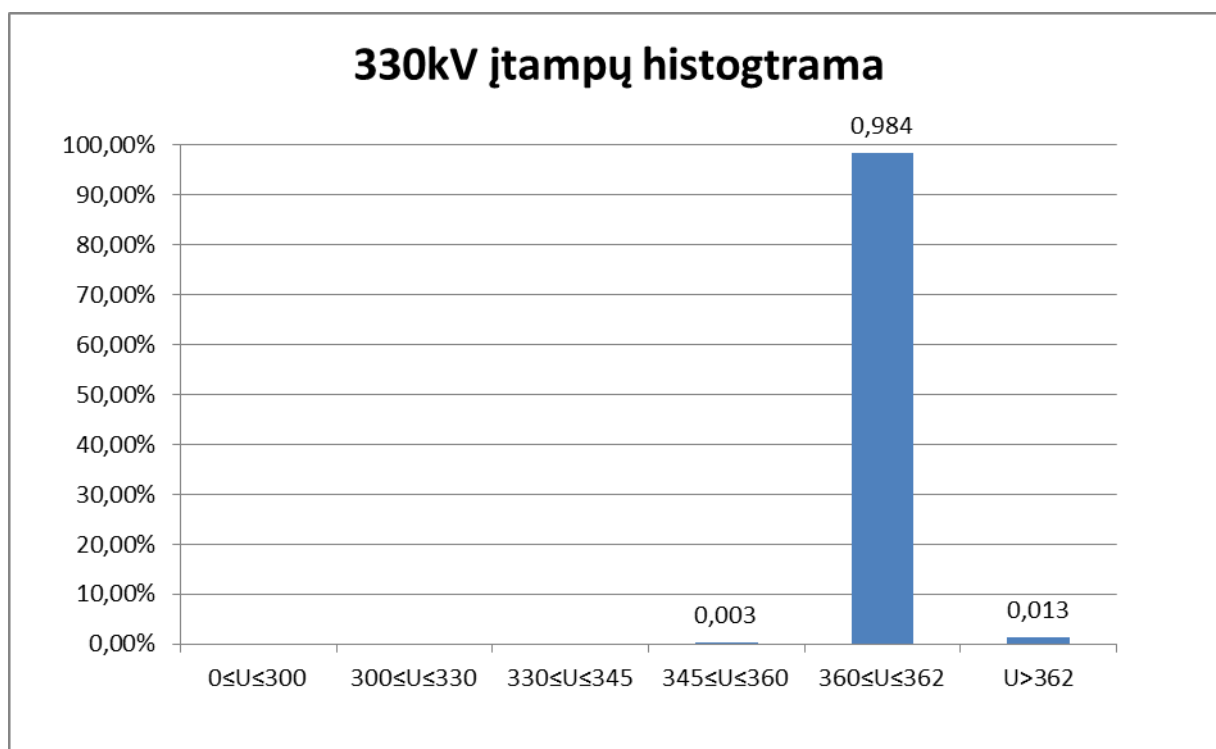
1.8. Neigiami kompensavimo įrenginių požymiai

Apžvelgta, kokios naudos gali būti teikiamos tinklui su papildomai įrengtais kompensavimo įrenginiais, tačiau kartais kompensavimo įrenginiai gali sukelti ir papildomų problemų:

- **rezonansas** – tai savybė atsirandanti tuomet, kai talpuminės ir induktyvinės varžos dydžiai kompensuoja vienas kitą ir tinkle lieka tik aktyvinio tipo varža. Tokioms sąlygoms esant tinkle, atsiranda vadinamas rezonansinis dažnis, kuris gali sugadinti ne tik įdiegtus kompensavimo įrenginius, bet ir kitą tinkle veikiančią įrangą. Esant rezonansui tinkle gali būti patiriami dideli nuostoliai;
- **harmoninis rezonansas** – jeigu rezonansinis dažnis sutampa su šalia generuojamu harmoniniu šaltiniu tuomet srovė ir įtampos tinkle išauga neproporcingai, sukeldamos tinkle nuostolius ne tik kompensavimo, bet ir visai tinkle esančiai įrangai;
- **viršįtampiai** – tinkle įtampa yra palaikoma tarp nustatytų viršutinės ir apatinės įtampos ribų. Kondensatorių baterijos, ypatingai reguliuojamo dydžio, kurios tiekia reaktyviąją galią į tinklą, gali sukelti viršįtampius tinkle. Įtampai išaugus daugiau nei nustatyta viršutinė įtampos vertės riba ir kilus problemų tinkle galimai būtų sugadinta įranga.

1.9. Įtampos reguliavimas ir reaktyviosios galios valdymas Lietuvoje

Išnagrinėjus 2020-01-28 paskelbtą valstybinės energetikos reguliavimo tarybos (VERT), suderintą Lietuvos elektros energetikos sistemos 400-100kV tinklų plėtros planą 2019-2028 metams, kuris yra paruoštas „Litgrid“ įmonės, kartu su metais senesniu plėtros planu 2018-2027, įžvelgiamos tendencijos reaktyviosios galios reguliavime ir įtampos valdyme [17]. Įtampos stabilumas perdavimo tinkle, nenukrypstant nuo leistinų ribų, parodo tinklo patikimumą ir adekvatumą. Pateiktoje ataskaitoje yra pavaizduota Lietuvos EES perdavimo tinklo 330 kV įtampų histograma, kuri yra pateikta 10-ame paveikslėlyje.



10 pav. Lietuvos 330kV perdavimo tinklo įtampų histograma

Iš šios histogramos matyti, kad didžiąją laiko dalį (apie 98,7 proc.) tinklo įtampos buvo leistinose ribose ir tik labai nedidelė dalis (apie 1,3 proc.), kai įtampa viršijo „Litgrid“ avarijų ir technologinių sutrikimų likvidavimo instrukcijoje numatytą leistiną ilgalaikę darbo įtampą – 362 kV. Reikėtų išskirti liepos mėnesį, kai 330 kV tinkle nuokrypis siekė apie 4 proc. Vasaros mėnesiais, sumažėjus apkrovai elektros tinkluose, aukštų įtampų valdymas yra sudėtingesnis. Lietuvos EES tinklo įtampos yra valdomos išnaudojant elektrinių generuojamos reaktyviosios galios valdymo galimybes, taip pat reguliuojant šuntinių reaktorių ir kondensatorių baterijų darbą. Tai parodo, kad Lietuvos perdavimo operatorius užtikrina stabilią įtampą tinkle. Siekiant užtikrinti tinklo adekvatumą ir padidinti tinklo generacijos galią kritiniais tinklo momentais, Lietuvoje paruoštas projektas sumontuoti 1MW dydžio kondensatorių baterijas. Kaip teigiama, šios baterijos padėtų dažnio valdymui, galios kitimo kompensavimui ir užtikrintų avarinį rezervą [18].

Šiuo metu esantis aukštos įtampos keitiklis – „Nordbalt“, jungia Lietuvos tinklą su Švedija. Šis keitiklis tai pat gali padėti reguliuoti tinklo įtampą. Didžiausias reaktyviosios galios generavimo šaltinis – Kruonio HAE agregatai, kurių vieno agregato generuojamos reaktyviosios galios ribos yra -120÷180 Mvar, dirbant sinchroninio kompensatoriaus režimu. Iš viso 2018 m. Kruonio HAE agregatai sinchroninio kompensatoriaus režimu dirbo apie 2198 valandas, tai 25% daugiau nei 2017

metais. Matoma tendencija, jog valandų kiekis stipriai išaugo. Darbo valandų skaičius išaugo pagrinde dėl atsiradusios „LitPol Link“ jungties. Tam, kad „LitPol Link“ keitiklis tinkamai veiktų, būtina įjungti specialius harmonikų filtrus, kurie yra reaktyviosios galios generavimo šaltiniai. Reaktyviosios galios valdymo požiūriu sunkiausias režimas yra „LitPol Link“ jungties veikimas nakties ar ankstauro ryto valandomis, kai perduodami nedideli kiekiai elektros energijos su Lenkijos EES. Nakties valandomis, kai siurblio režimu neveikia Kruonio HAE, įtampų lygiai 330 kV mazguose stipriai padidėja ir priartėja prie didžiausių leistinų verčių. Norint įjungti „LitPol Link“ keitiklį būtina sumažinti tinklo įtampas. Šiuo metu vienintelė priemonė tą padaryti yra išnaudoti Kruonio HAE SK režimu [17]. Minėtai problemai spręsti perdavimo sistemos operatorius vykdo projektą, kurio apimtyje esamas Ignalinos valdomas šuntinis reaktorius (VŠR) bus pervežtas į Lietuvos E 330 kV skirstyklą, o Ignalinoje bus įrengtas naujas 10 kV 30 Mvar šuntinis reaktorius. Ignalinos VŠR veikdamas Lietuvos E skirstykloje bus pajėgus pakeisti beveik du Kruonio HAE agregatus, veikiančius SK režimu. Taip pat Lietuvoje atliekant pirmąjį etapą iš trijų, kuriais siekiama pasiruošti 2025 metais prisijungimui prie kontinentinės Europos yra planuojama įrengti 3 sinchroninius kompensatorius, kurie bus Telšiuose, Alytuje ir Neries pastotėje. Naujai įrengti SK padės valdyti tinklo dažnį ir išlaikyti tinklo stabilumą [19].

2. Tinklo optimizavimo aktualumas ir metodų taikymas

Šiuo metu atsinaujinančios energijos sritis energetikos sistemoje užima vis svarbesnę vietą. Europos vėjo energetikos asociacija yra užsibrėžusi tikslą iki 2030 metų, 25% elektros energijos Europoje pagaminti iš vėjo jėgainių. Šią sąlygą puikiai sekasi įgyvendinti Danijai, kuri jau 2035 metais pilnai aprūpins šildymo sektorių AEI, o 2050 metams siekia būti 100% nepriklausoma nuo iškastinio kuro visose sektoriuose.

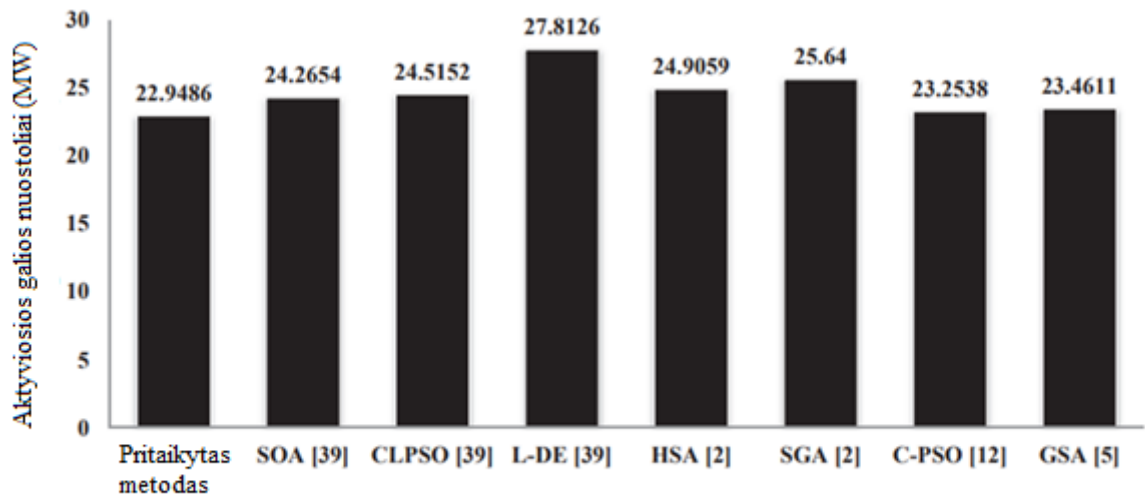
Didelis kiekis vėjo generacijos integravimo sukelia rimtų iššūkių. Elektros energetikos tinklo įtampą, reaktyviąją galią ir stabilumą užtikrindavo tradicinės generacijos elektrinės, tačiau didėjant vėjo generacijai, kurios elektros gamybos kaštai yra labai maži, tradicinėms elektrinėms sukelia konkurenciją, dėl kurios jos yra išstumiamos iš rinkos.

Vėjo parkai generuoja aktyviąją galią ir dažnai (priklausomai nuo vėjo generatoriaus tipo) vartoja reaktyviąją galią, kas mažina įtampą ir kelia nestabilumą tinkle. Šaltinyje [20] yra pateikiamas optimalus dinaminis reaktyviosios galios pasiskirstymas elektros perdavimo tinkle, kuriame yra didelis vėjo generacijos kiekis. Šis uždavinys sprendžiamas naudojantis mišriųjų sveikųjų skaičių optimizavimo metodu (*angl. mixed integer dynamic optimization method*). Taikant šį metodą yra atsižvelgiama į geresnį esamų vėjo parkų panaudojimą, kurie turi galimybę suteikti tinklui reikiamą dinaminį stabilumą (reaktyviosios galios generavimas). Vertinamas investavimas į esamų tradicinių elektrinių atsinaujinimą, siekiant tinkle turėti sinchroninius kondensatorius galinčius spręsti tinkle esamas įtampos problemas, tai pat ir užtikrinant tinklo dinaminį stabilumą (tinklo inercijos užtikrinimas ir kt). Taikant šį metodą yra ieškoma, kokio dydžio ir kur tinkle turėtų būti įrenginys, padėsiantis užtikrinti reaktyviąją galią tinkle ir išsprendžiantis didelių vėjo parkų sukeliamas problemas perdavimo tinklui. Yra išsprendžiamos ir kitos problemos, tokios kaip ekonominių kaštų sumažinimas ar dinaminės įtampos stabilumas. Pasitelkiant mišrių sveikųjų skaičių optimizavimo metodą elektros tinklui, kuriame yra integruoti dideli vėjo parkai, galima rasti sprendinį, kuris išspręstų perdavimo tinkle kilusias problemas, išvengiant naujų papildomų tradicinės generacijos šaltinių atsiradimą, tačiau yra stengiamasi modernizuoti esamas elektrines ir panaudoti jas kaip SK tinklo poreikiams pildyti.

Į elektros energetikos sistemą integruotas didelis kiekis vėjo generacijos sukelia problemas, nes generacija yra nepastovi tai pat kaip ir apkrovos kitimas tinkle. Šios stochastinio daugialypio tikslo problemos yra sprendžiamos šaltinyje [21], naudojantis ϵ -apribojimo metodu ir norint rasti geriausią sprendinį. Tai yra viena iš dirtinio intelekto skaičiavimo metodų (*angl. artificial intelligence-based method*) rūšių. Sprendžiant problemą yra išskiriami du pagrindiniai tikslai:

- sumažinti aktyviosios galios nuostolius;
- sumažinti įtampos stabilumo koeficientą (apibrėžiamas kaip L-koeficientas).

Šis problemos sprendimas buvo pritaikytas IEEE-57 mazgų schemeje, tai pat GAMS programos aplinkoje. Šiuo metodu išspręstas tikslo funkcijos uždavinys, kuris leidžia sumažinti tinklo nuostolius.



11 pav. Skirtingų metodų pagalba gauti rezultatai sprendžianti tikslo funkciją

Paveikslėlyje yra atvaizduoti visi metodai ir gauti atitinkami rezultatai. Pritaikytas metodas [21] šaltinyje, aktyviosios galios nuostolius tinkle sugebėjo sumažinti iki 22.9486 MW ir tai buvo geriausias rezultatas iš visų atliktų metodų.

3. Optimalių uždavinių sprendimo algoritmai

Reaktyviosios galios optimizavimas yra svarbi funkcija tiek planuojant, tiek šiuo metu valdant elektros tinklą. Naudojantis reaktyviosios galios kompensavimo šaltiniais ir parenkant tinkamą vietą tinkle, bei tinkamą kompensavimo įrenginio dydį, galima stabilizuoti įtampą ir valdyti galios srautus tinkle. Reaktyviosios galios ir įtampos valdymas yra papildomos paslaugos, siekiant palaikyti reikiamą įtampos lygį, generuojant arba absorbuojant reaktyviąją galią tinkle. Daugybė optimizavimo metodų su skirtingais algoritminiais pagrindais yra taikomi šiam uždaviniui spręsti, pagrindinius algoritminius metodus yra šie:

- analitinis metodas (*angl. analytical method*) – vienas pirmųjų metodų taikytų optimaliam kompensatorių parinkimui, kai apkrovos kitimai vyksta tiesine priklausomybe. Šis metodas taikytas, kada nebuvo naudojami kompiuteriai ar tai kainavo per daug. Atliekami analitinio požiūrio skaičiavimai, siekiant nustatyti maksimalią kompensatorių taupymo funkciją. Taupymo funkcija dažniausiai yra apibrėžiama:

$$S = K_E \Delta E + K_P \Delta P - K_C C \quad (6)$$

Čia:

$K_E \Delta E$, $K_P \Delta P$ – šie koeficientai atspindi ekonominius energijos ir maksimalios galios nuostolių sumažėjimus dėl įrengto kompensavimo įrenginio;

$K_C C$ – kompensatoriaus įrengimo išlaidos.

Pirmieji skaičiavimai atlikti [22,23] pakankamai paprastai, siekiant maksimaliai padidinti išlaidų funkciją. Tai, kad srovė tekanti apkrovomis laikoma pastovia ir kompensatorių dydis parenkamas remiantis trečdaliu maksimalios reaktyviosios galios apkrovos dydžio, buvo pirminės prielaidos. Vėliau šios sąlygos pasikeitė įvertinus, kad apkrovomis gali tekėti skirtingos srovės ir, kad kompensavimo įrenginių galia yra reguliuojama [24,25]. Žinoma šis skaičiavimo metodas turi trūkumų. Apskaičiuoto kompensatoriaus dydis gali neatitikti standartizuotų dydžių ir reikėtų rinktis artimiausią variantą, tai pat ir vietovės parinkimas gali būti ne visiškai tikslus.

- skaitmeninis programavimo metodas (*angl. numerical programming method*) – šis skaičiavimo metodas tapo prieinamu, kai prasidėjo kompiuterių naudojimas ir išlaidos, naudojantis šiuo skaičiavimu sumažėjo. Tai yra iteracinis skaičiavimo metodas, siekiant atitinkamai minimizuoti ar pasiekti maksimalią naudą apibrėžtam tikslo uždaviniui. Optimaliam kompensatorių parinkimui tikslo funkcija sutaupo išlaidas ir atsižvelgia į tinklo apribojimus, tokius kaip vietovės parinkimą, dydį, įrenginių skaičių, šynų įtampą ir sroves. Skaičiavimai šiuo metodu gali nustatyti ne vieną tikslo funkciją vienu metu, o net kelias, tai pat kaip ir taikant atitinkamus tinklo apribojimus. Šis metodas ieškant sprendimo optimaliam kompensatorių įrengimui yra suformuojamas:

$$\text{Maksimaliai padidinti } S = K_L \Delta L - K_C C \quad (7)$$

$$\text{Taikant apribojimus } \Delta V_{\min} \geq \Delta V \leq \Delta V_{\max} \quad (8)$$

Čia:

$K_L \Delta L$ – išlaidų mažinimas, kuris susijęs su galios srautų nuostolių sumažėjimu, įrengus kompensavimo įrenginį;

$K_C C$ – kompensavimo įrenginio įrengimo kaštai;

ΔV – įtampos pasikeitimas įrengus kompensavimo įrenginį, kuris negali būti didesnis ar mažesnis nei yra nustatytos ribos.

Tobulėjant skaičiavimo metodui pradėti atlikinėti mišriųjų sveikųjų skaičių programavimai (*angl. Mixed integer programming*), siekiant gauti dar tikslesnius rezultatus [26,27].

- euristicinis metodas (*angl. heuristic method*) – išrastas atliekant eksperimentus, pasikliaujant intuicija ir priimant skaičiavimuose gautus nuosprendžius. Išskirtinis privalumas tas, kad labai greitai atliekami skaičiavimai, kurių rezultatai gali nurodyti pakankamai tikslus optimalaus uždavinio sprendimus. Taikant šį metodą mažame tinkle dažniausiai parenkamas mažas keikis mazgų, kuriuose gali būti įrengiami kompensavimo įrenginiai. Euristicinis metodas dėl atliekamų skaičiavimų spartos ir pakankamai tikslaus rezultato dažnai yra naudojamas sprendžiant uždavinius dideliuose sistemose [28,29]. Nors euristicinis metodas yra lengviau suprantamas ir vykdomas nei analitinis ar skaitmeninis programavimo metodai, tačiau ne visada gauti rezultatai būna patys optimaliausi. Galima išskirti kelis neigiamus aspektus:

- ✓ nuostolių mažinimas atliekamas remiantis sumažintu jų kiekiu, bet ne sutaupytais kaštais, pinigų atžvilgiu;
- ✓ skaičiavimuose vertinami tik pastovaus dydžio kompensavimo įrenginiai.

- dirbtinio intelekto skaičiavimo metodas (*angl. artificial intelligence-based method*) – šiuo metu šis skaičiavimas naudojamas plačiausiai ir yra pritaikytas elektros sistemų inžinieriams spręsti uždavinius. Tai programiniais kodais grįsta metodika, todėl yra sukurta ne viena skaičiavimo atmaina. Pačios populiariausios ir dažniausiai naudojamos elektros sistemos optimizavimo uždaviniams spręsti yra šios:

- ✓ genetinis algoritmas (*angl. genetic algorithm*) – algoritmas paremtas biologinėmis žiniomis apie gyvybės evoliuciją;
- ✓ ekspertinė sistema (*angl. expert systems*) – žiniomis grindžiama sistema. Tai kompiuterinė programa daranti išvadas arba sprendžianti uždavinius, naudodamasi žiniomis ir analizės taisyklėmis;
- ✓ dirbtinių neuroninių tinklų metodas (*angl. artificial neural networks*) – buvo sukurtas, remiantis žmogaus smegenų veikimo principais. Abiejų veikimas yra grindžiamas neuronų, pačių mažiausių sudedamųjų dalių, tarpusavio sąveika. Nors tai visiškai paprasti elementai (apsiribojantys tik signalų perdavimu), tačiau dideli tinklai sudaryti iš daugybės neuronų gali greitai ir tiksliai apdoroti nemažus kiekius informacijos. Taip pat jie toleruoja klaidas ir gali interpretuoti netikslią informaciją arba prisitaikyti prie naujų situacijų. Šiam metodui sudėtingiausia yra nustatyti sąlygas mokintis įvertinti naujai tiekiamus duomenų srautus.

3.1. Optimalaus galių pasiskirstymo sprendimas

Pirmieji apie optimalų galios pasiskirstymo sprendimą paskelbė H.W.Dommel ir W.F.Tinney [30]. Remiantis Newtono ir optimaliu valdymo parametrų reguliavimu gradiento metodu yra sprendžiamas minimalus išlaidų ir nuostolių patyrimas reguliuojant aktyviają ir reaktyviają galią.

Atliekant optimalų galios srautų skaičiavimą, kiekvienas mazgas yra aprašomas keturiais dydžiais, P_{NETk} , Q_{NETk} , V_k , θ_k , iš kurių du yra žinomi, o kiti du yra apskaičiuojami. Elektros sistemos mazgų parametrus galime klasifikuoti į tris tipus:

- pagrindinis mazgas, kuriame žinome įtampą V ir įtampos kampą θ . Kiti du dydžiai P_{NET} ir Q_{NET} yra nežinomi;
- aktyvioji galia P ir reaktyvioji galia Q žinoma, o įtampą V ir įtampos kampas nežinomas θ ;
- aktyviosios galios P ir įtampos V dydžiai žinomi, o reaktyviosios galios Q ir įtampos kampas θ nežinomi.

Optimalus galios srauto uždavinys sprendžia netiesines problemas, kurios pagal aprašytą funkciją turi būti minimizuojamos:

$f(x,y)$ – Šią funkciją galima apibrėžti viena ar daugiau minimizavimo uždavinių, tokių kaip perdavimo nuostolių mažinimas tinkle ar iškastinio kuro rūšies sumažinimas ir kiti.

3.2. Galios srauto pasiskirstymo modelis

Šis modelis yra taikomas tinklo ekonomiškumui, tai yra nuostolių ir išlaidų sumažinimui. Šis modelis yra formuojamas kiekvienam sistemos mazgui:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{maz}} V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (9)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_{maz}} V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (10)$$

Čia:

P_i, Q_i – i-ojo mazgo aktyvioji ir reaktyvioji galia (apkrova);

V_i – i-ojo mazgo įtampos modulis;

θ_i – i-ojo mazgo įtampos fazės kampas;

G_{ij} – tinklo šakos (i,j) laidumas (aktyvusis laidumas);

B_{ij} – tinklo šakos (i,j) laidumas (reaktyvusis laidumas);

N_{maz} – mazgų skaičius.

Šiuose galių lygtyse galios P_i ir Q_i yra žinomi dydžiai, o sprendiniai yra įtampos V_i, V_j ir fazės kampai θ_i, θ_j . Radus šiuos dydžius galima skaičiuoti srautų pasiskirstymą. Šis modelis yra gana tikslus, nes vertina reaktyviasias galias ir reaktyviusius laidumus.

3.3. Galios srautų pasiskirstymo modelis tinklui su kompensatoriais mazguose

Šis modelis yra praeito modelio modifikacija. Šių modelių skirtumas tas, kad šiame modelyje vertinamas srautas tekantis per kompensatorius, kurie yra prijungti prie mazgų.

$$P_{ij} = -V_i V_j Y_{ij \text{ ser}} \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) + V_i V_i (Y_{ij \text{ ser}} \cos(-\beta_{ij}) + Y_{ij \text{ ser}} \cos(-\alpha_{ij})) \quad (11)$$

$$Q_{ij} = -V_i V_j Y_{ij \text{ ser}} \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) + V_i V_i (Y_{ij \text{ sh}} \sin(-\beta_{ij}) + Y_{ij \text{ ser}} \sin(-\alpha_{ij})) \quad (12)$$

$$P_i = V_i V_i Y_i \cos(\gamma_i) + \sum P_{ij} \quad (13)$$

$$Q_i = -V_i V_i Y_i \sin(\gamma_i) + \sum Q_{ij} \quad (14)$$

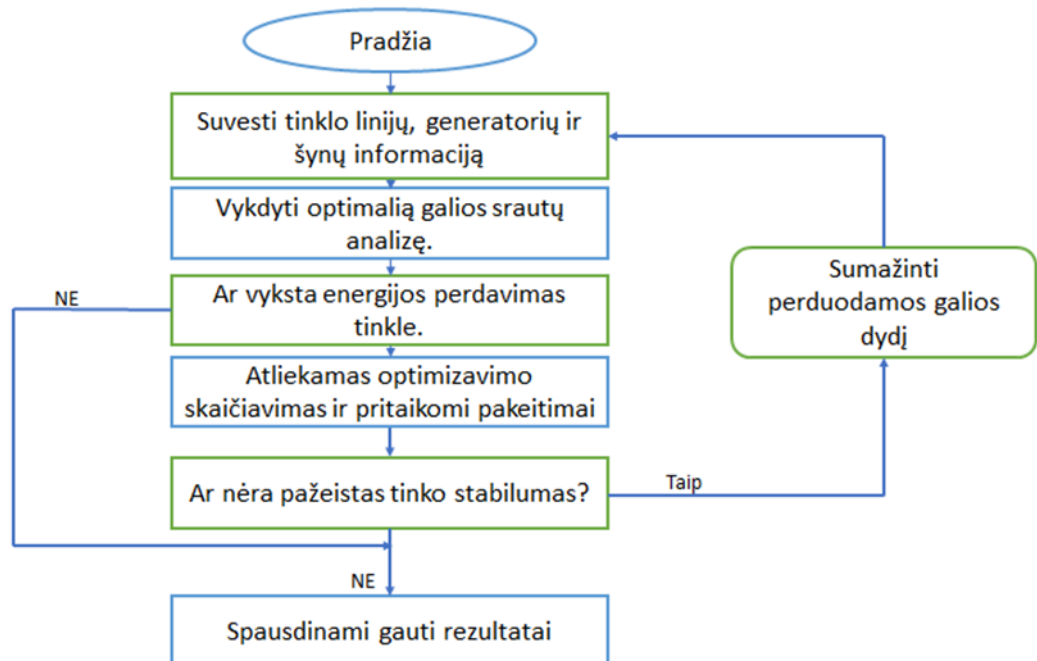
Čia:

$Y_{ij\ ser}, Y_{ij\ sh}$ – šakos (i,j) schemas nuoseklus ir skersinio laidumo moduliai;

α, β – šakos (i,j) schemas nuoseklus ir skersinio laidumo elektriniai kampai;

Y_i, γ_i -i-ojo mazgo kompensatoriaus laidumo modulis ir elektrinis kampas.

Supaprastinta optimizavimo schema pateikiama 12-ame paveikslėlyje, kuriame matomi visi etapai, dalyvaujantys optimizavime.



12 pav. Optimizavimo grafinė schema

3.4. Lagrange'o funkcijos pritaikymas optimizavime

Pagrindinis uždavinys, siekiant optimizuoti reaktyviąją galią yra sumažinti reaktyviosios galios srautus tinkluose, perdavimo linijose, transformatoriuose ir t.t. Tai sumažina aktyviosios galios nuostolius. Rezultatą pasiekti galime parinkdami reikiamus reaktyviosios galios dydžius kompensavimo įrenginiuose ir kituose reaktyviąją galią reguliuojančiuose prietaisuose. Iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad sukompensavus reaktyviąją galią šalia generuojamų šaltinių, būtų galima sumažinti aktyviosios galios nuostolius ir išspręsti šią problemą, tačiau viskas yra sudėtingiau, nes reaktyvioji galia yra susijusi ne tik su aktyviąją galia, bet ir su kitais tinklo parametrais, kurie yra svarbūs, norint turėti stabilų ir patikimą tinklą. Vienas iš tokių parametru susijusių su reaktyviąją galia yra tinklo įtampa.

Norint atlikti optimizavimo problemos skaičiavimus reaktyviosios galios sumažinimui, reikia pasitelkti Lagrange'o funkciją. Atliekant skaičiavimus visų generatorių aktyvioji galia yra žinoma ir fiksuota, išskyrus balansiniame mazge. Todėl atliekant reaktyviosios galios optimizavimą ir atsiradus pasikeitimams aktyviosios galios dydžiuose, tai būtų matoma balansiniame mazge. Viena pagrindinių sąlygų, atliekant optimizavimo uždavinius Lagrange'o metodu, yra reaktyviosios galios balansas pateiktas formulėje (15):

$$\sum_{i=1}^M Q_{Gi} = Q_D + Q_L \quad (15)$$

Čia:

Q_D - Apkrovų reaktyviosios galios poreikis;

Q_G – Visi reaktyviosios galios šaltiniai;

Q_L – Reaktyviosios galios nuostoliai perdavimo tinkle.

Sprendžiant Lagrange'o funkciją prie tikslo funkcijos yra pridedama apribojimo funkcija, kuri yra padauginama iš Lagrange'o daugiklių. Tai yra pavaizduota formulėje (16):

$$L = F_T + \lambda\phi \quad (16)$$

Čia:

F_T - yra tikslo funkcija, kuria siekiama optimizuoti;

λ – neapibrėžtas kintamasis daugiklis, kitaip Lagrange'o daugiklis;

ϕ - yra visos apribojimo funkcijos, kurias reikia įvykdyti optimizacijos metu.

Formuojama Lagrange'o funkcija sumažinti aktyviosios galios nuostolius tolygiai paskirstant reaktyviosios galios vartojimą ir generavimą. Tai pateikiama formulėje (17):

$$L = P_L - \lambda(\sum_{i=1}^M Q_{Gi} - Q_D - Q_L) \quad (17)$$

Taikant šį metodą elektros tinklui, kuris turi pakankamą kiekį reaktyviąją galią kompensuojančių įrenginių, klasikinis Lagrange'o funkcijos optimizacinis metodas atrodo taip:

- atliekant šiuos skaičiavimus visų generatorių generuojama galia yra žinoma ir laikoma, kad skaičiavimo metu tokia ir bus, išskyrus balansiniame mazge esančio generatoriaus. Šis generatorius vienintelis nėra griežtai apibrėžtas aktyviosios galios dydžiu taikant reaktyviosios galios optimizavimą;
- λ koeficientas turėtų būti visada skaičiuojamas kiekviename reaktyviosios galios šaltinio taške. Jeigu $\lambda < 0$, tai reiškia, kad norint sumažinti aktyviosios galios nuostolius tinkle reikia padidinti reaktyviosios galios kiekį. Jei $\lambda > 0$, tai norint sumažinti aktyviosios galios nuostolius reikės sumažinti reaktyviosios galios dydį tinkle. Kiekvieną kartą, kai $\lambda < 0$ bus pasirenkama didinti generuojamą galią šaltinio, kuriame λ vertė yra mažiausia. Kuomet turime $\lambda > 0$, tada siekiama mažinti taške, kuriame λ yra didžiausia, nes ten bus didžiausia dalis generuojamos reaktyviosios galios tinkle. Galiausiai atlikti optimizavimo skaičiavimai pateikia rezultata, kuris parodo optimizuoto tinklo vertes;
- naudojant galios srautų metodą gali būti apskaičiuojami aktyviosios galios nuostoliai tinkle. Kadangi visų šaltinių aktyvioji galia yra apibrėžta, išskyrus balansinio mazgo, tai visus aktyviosios galios pasikeitimus galima stebėti šio taško atžvilgiu. Šis optimizavimas yra skaičiuojamas iki tol, kol aktyviosios galios nuostoliai nebegali būti daugiau sumažinti.

Modeliuojant optimalų reaktyviosios galios srautą nebuvo paminėta apie reaktyviosios galios apribojimus kiekvienam šaltiniui.

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \quad (18)$$

Šioje formulėje pateikiamas reaktyviosios galios generavimo ir vartojimo apribojimas. Atliekant kiekviena iteraciją ir ieškant optimaliausio sprendimo būtina atsižvelgti į (18) formulėje pateiktą apribojimą. Priklausomai nuo λ koeficiento ar i -tojoje šakoje trūksta generacijos ar yra perteklius ir iteracijos būdu yra keičiamas kompensuojamos galios dydis, kuris negali viršyti tame taške esančios

įrangos ribų. Jeigu tame taške jau yra pasiekta maksimali arba minimali vertė toliau atliekant reaktyviosios galios optimizavimo uždavinius šis taškas nebebus įtraukiamas.

Taikant šį klasikinį Lagrange'o metodą galima atlikti skaičiavimus teoriniam tikslui, kuris yra pakankamai paprastas ir nesudėtingas, tačiau tai norint padaryti realiam tinklui būtų gana sudėtinga. Atliekant skaičiavimus realiam tinklui yra parenkami labiau pritaikomi optimizavimo modeliai, kurie naudoja euristinius algoritmus. Euristiniai algoritmai yra naudojami matematiname optimizavime. Euristika yra technika, skirta greičiau išspręsti problemą, kai klasikiniai metodai yra per lėti arba norint rasti apytikslį sprendimą, kai klasikiniai metodai neranda tikslaus sprendimo. Daugybė optimizavimo metodų yra pateikta šaltinyje – [31].

3.5. Tikslo funkcijos formavimas

Ne visi tinkle esantys mazgai gali būti pritaikyti ir naudojami šuntiniams kompensavimo įrenginiams įrengti. Būtina nustatyti tuos mazgus, kurie gali būti naudojami šuntinių kompensavimo įrenginių įrengimui sprendžiant tikslo funkciją. Tikslo funkcijoje yra sprendžiamas minimalus kiekis šuntinių reaktorių ar kondensatorių baterijų, kuris gali būti įrengtas nurodytuose mazguose. Ši funkcija taikoma siekiant užtikrinti įtampos stabilumą tinkle, sumažinti nuostolius linijose. Taikant tikslo funkciją ir ieškant optimalaus sprendinio būtina nustatyti transformatorių ir reguliuojamų šuntinių reaktorių atšakų perjungimą pastovioje padėtyje, kad būtų rastas optimalus sprendimas.

Tikslo funkcija apibrėžiama:

$$F(B) = \sum_{i=1}^{N\text{VARS}} |B_i| C_i \quad (19)$$

Taikomi funkcijos ribojimai:

$$B_{\text{IND,MAX}i} \leq B_i \leq B_{\text{CAP,MAX}i} \quad (20)$$

Čia:

B – mazgai, kuriuose gali būti įrengti kompensavimo įrenginiai;

$B_{\text{CAP,MAX}i}$ – talpinė riba atitinkamame mazge;

$B_{\text{IND,MAX}i}$ – induktyvinė riba atitinkamame mazge;

C – kompensavimo įrenginio kaina;

$N\text{VARS}$ – kiekis nurodytų mazgų, kuriuose gali būti įrengiami kompensavimo įrenginiai.

Tikslo funkcijoje naudojama įrenginio kaina atitinkamai gali priklausyti nuo to ar kompensavimo įrenginys bus įrengtas mazge, kuriame nėra jokio kompensavimo įrenginio ar taške, kur galbūt jis yra per mažas ir turi būti pakeistas į didesnį.

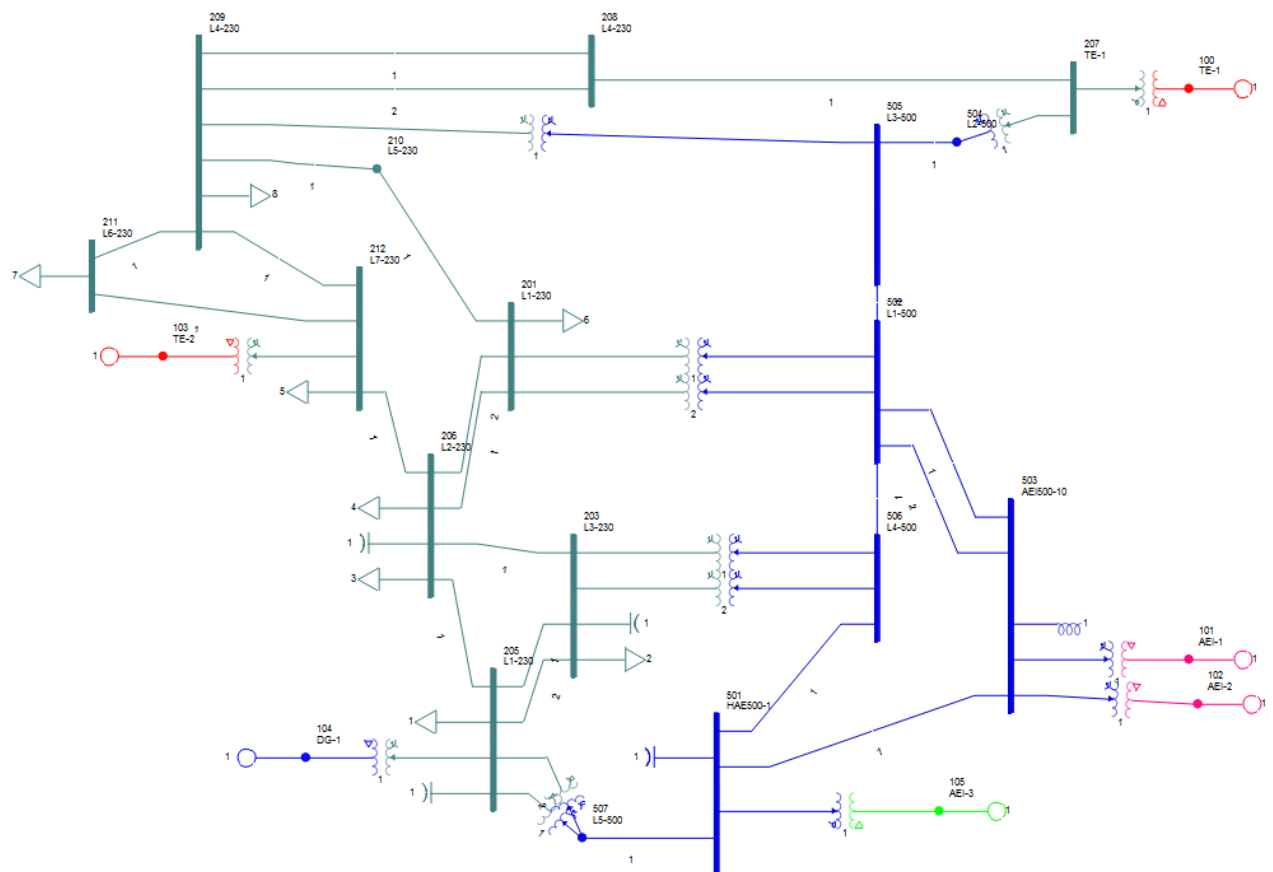
Atliekant tinklo optimizavimą nustatant tikslo funkciją yra taikomi papildomi apribojimai reaktyviosios galios kiekiui, kaip yra apibrėžtas (20) formulėje. Kitas nustatomas apribojimas yra įtampos ribų diapazonas, kuris šiuo atveju kiekviename mazge bus nustatytas nedidesnis nei 10 % nuo vardinės įtampos.

4. Tiriamoji dalis

Tyrimas atliekamas *PSSe Siemens* programiniu paketu. Atliekant modeliavimo uždavinį buvo pasitelktas teorinis IEEE – 23 mazgų tinklo modelis. Šis modelis buvo sukurtas Amerikoje, Naujosios Anglijos valstijos tinklo daliai. Pasinaudojus šiuo teoriniu modeliu, jis buvo modifikuotas ir pritaikytas pagal Lietuvos perdavimo tinklo parametrus. Naudojamo teorinio modelio parametrai pateikti lentelėje:

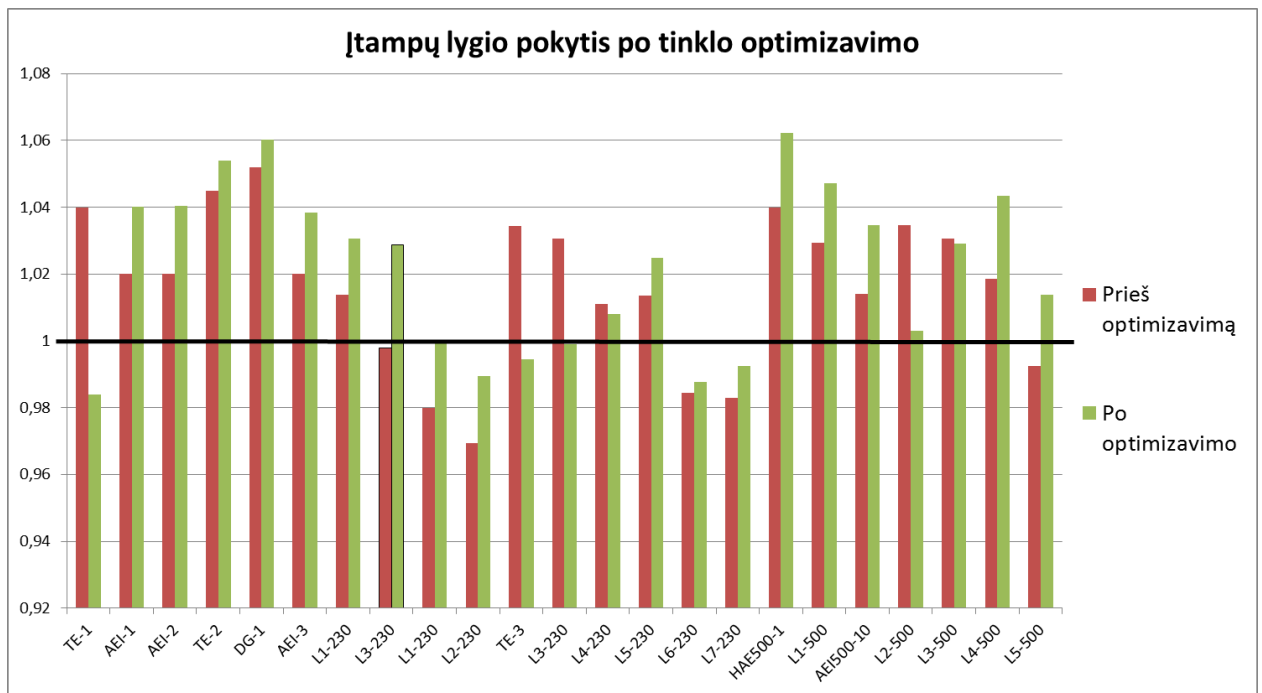
2 lentelė. Teorinio IEEE – 23 modelio duomenys

Šynos numeris	Šynos pavadinimas	Įtampa (pu)	Įtampos kampas laipsniais	Įtampa V_{\max} (pu)	Įtampą V_{\min} (pu)
100	TE-1	1,0400	0,00	1,1000	0,9000
101	AEI-1	1,0200	15,38	1,1000	0,9000
102	AEI-2	1,0200	15,38	1,1000	0,9000
103	TE-2	1,0450	-3,48	1,1000	0,9000
104	DG-1	1,0520	-1,92	1,1000	0,9000
105	AEI-3	1,0202	11,85	1,1000	0,9000
201	L1-230	1,0137	-2,93	1,1000	0,9000
203	L3-230	0,9978	-5,54	1,1000	0,9000
205	L7-230	0,9800	-7,77	1,1000	0,9000
206	L2-230	0,9694	-8,58	1,1000	0,9000
207	TE-1	1,0345	-1,35	1,1000	0,9000
208	L4-230	1,0306	-2,18	1,1000	0,9000
209	L8-230	1,0111	-4,97	1,1000	0,9000
210	L5-230	1,0135	-3,52	1,1000	0,9000
211	L6-230	0,9845	-7,97	1,1000	0,9000
212	L7-230	0,9830	-8,22	1,1000	0,9000
501	HAE500-1	1,0400	4,92	1,1000	0,9000
502	L1-500	1,0293	-1,97	1,1000	0,9000
503	AEI500-10	1,0141	9,74	1,1000	0,9000
504	L2-500	1,0347	-1,83	1,1000	0,9000
505	L3-500	1,0306	-3,58	1,1000	0,9000
506	L4-500	1,0185	-2,54	1,1000	0,9000
507	L5-500	0,9925	-5,12	1,1000	0,9000



13 pav. IEEE-23 modelio principinė schema

EEI – 23 modelis buvo ištirtas bandant nustatyti, kurioje tinklo vietoje turėtų būti įrengiamas kompensavimo įrenginys, leidžiantis sumažinti tinkle esančius nuostolius ir išlaikyti tinklo įtampą leistinuose režimuose. Skaičiavimai atliekami *PSSe* programinės įrangos *OPF* (angl. *optimal power flow*) paketu. Atliekant skaičiavimus yra nustatoma tikslo funkcija, kuri pasirinktuose šynose suskaičiuoja reikiamo dydžio kompensavimo įrenginio vertę ir ją prideda į modelį, siekiant sumažinti nuostolius ir palaikyti įtampos stabilumą. Ištyrus visą tinklą nustatyta, kad nuostoliai yra patys mažiausi, kai buvo pasirinkta *L3-230* šyna ir suskaičiuota, kad joje turėtų būti įrengta 150 Mvar kondensatorių baterija. Šiame mazge jau buvo prijungta 50 Mvar vertės kondensatorių baterija, bet nustatyta, kad turi būti padidinta kompensavimo galia iki 200 Mvar dydžio. Įrengus šį įrenginį tinkle pastebimas įtampų pasikeitimas (14 pav.):



14 pav. IEEE-23 modelio įtampų grafiko pasikeitimas po optimizavimo

Pateiktame paveikslėlyje žalia spalva vaizduojama kaip išaugo įtampos po kondensatorių baterijų įrengimo, išskyrus šynas prie kurių prijungti generavimo šaltiniai – juose įtampa sumažėjo, nes generatoriuose sumažėjo generuojamos reaktyviosios galios dydis.

Tai pat tinkle sumažėjo patiriami aktyviosios P ir reaktyviosios Q nuostoliai pavaizduoti žemiau:

3 lentelė. Viso tinklo nuostolių sumažinimas aktyviosios ir reaktyviosios atžvilgiu

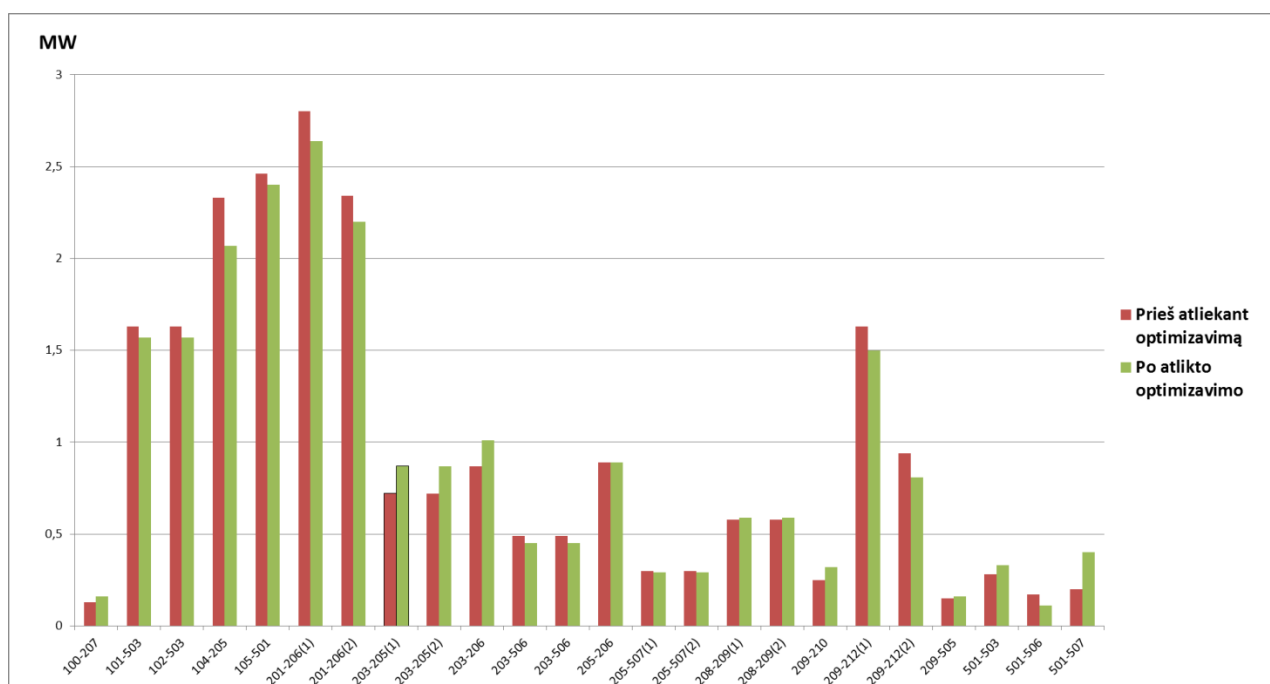
	Tinklo linijose esantys reaktyviosios nuostoliai (Mvar)	Tinklo linijose esantys aktyviosios nuostoliai (MW)
EEE-23 tinklo duomenys prieš optimizavimą	998,3	54,4
EEE-23 tinklo duomenys po optimizavimo	958,5	52,8
Sumažėjusių nuostolių dydis	39,8	1,6

Sumažėjo ir generatorių į tinklą tiekiamos reaktyviosios galios dalis:

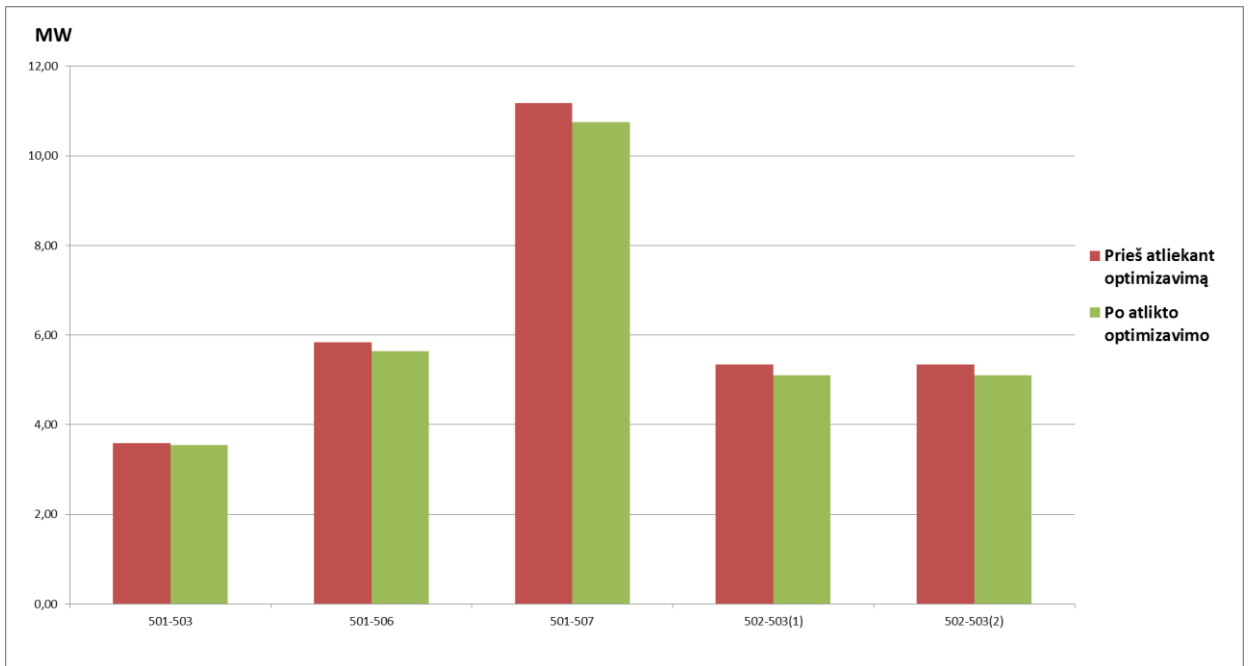
4 lentelė. Sumažėjusių generatorių reaktyviosios galios dalis tiekama į tinklą

Generatoriai	Q (Mvar) prieš atliekant optimizavimą	Q (Mvar) po atlikto optimizavimo	Q (Mvar) skirtumas
TE-1	55,2	-89,69	-144,9
AEI-1	64,9	78,13	13,2
AEI-2	64,9	81,92	16,9
TE-2	80	80,5	0,5
DG-1	592,7	492	100,7
AEI-3	-78,4	-171,1	92,5

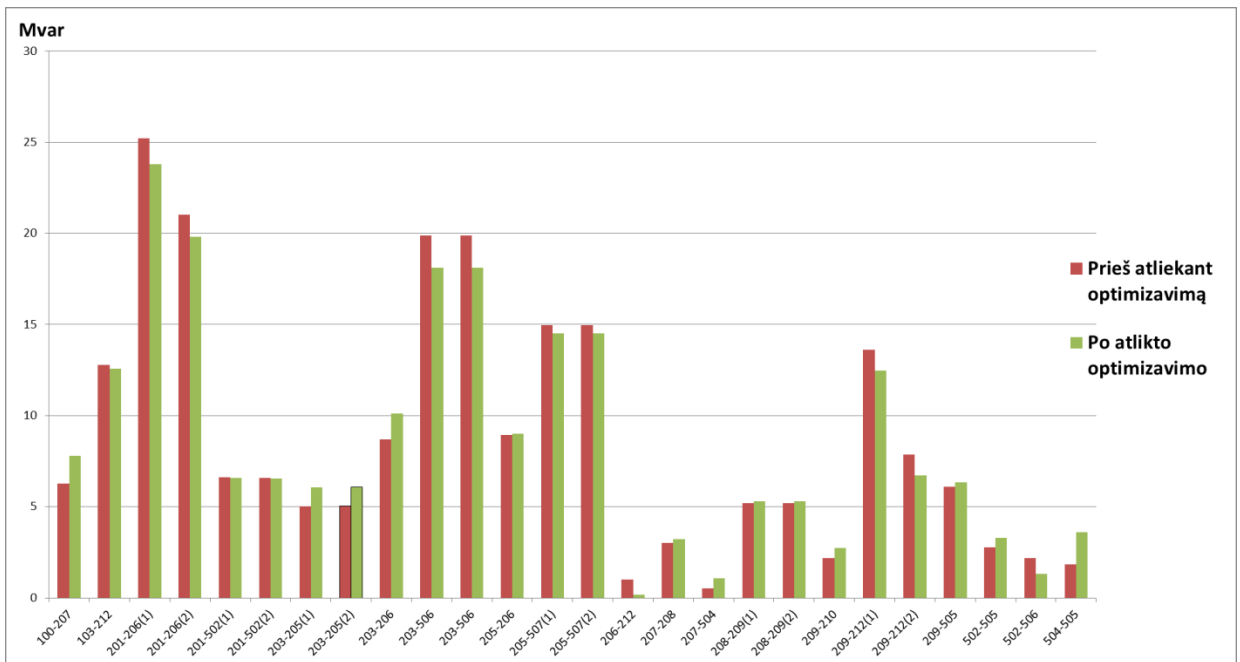
Tinklo linijose padidėjo galios srautų dydis dėl sumažėjusių nuostolių, kurie atitinkamai pavaizduoti grafike žemiau:



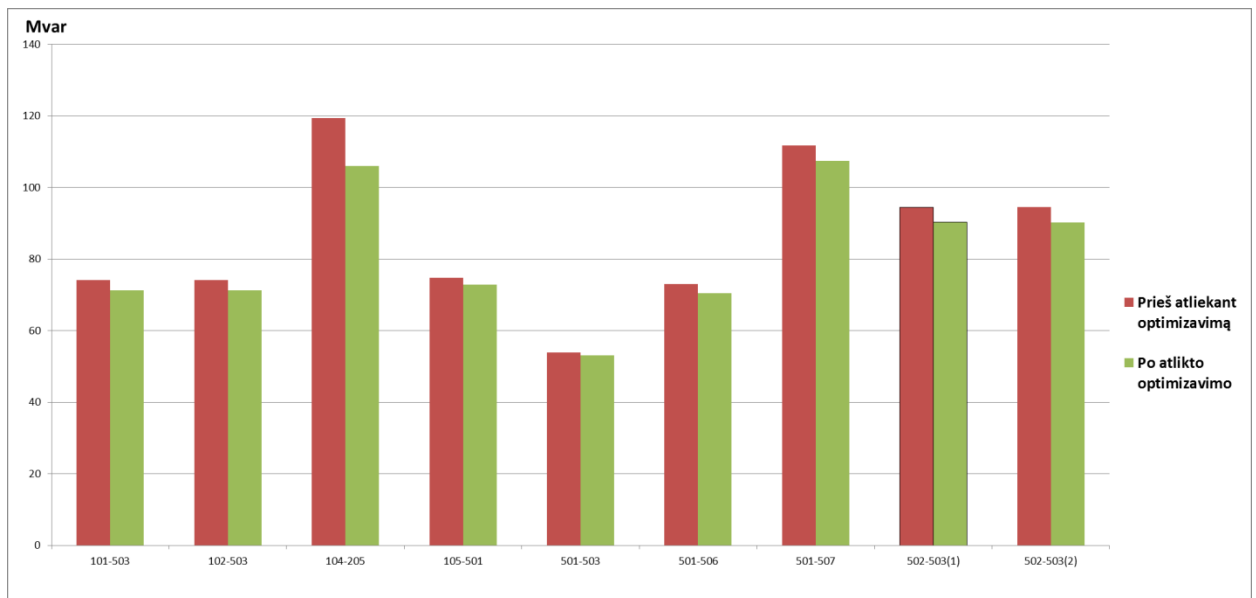
15 pav. Aktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose



16 pav. Aktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose



17 pav. Reaktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose



18 pav. Reaktyviosios galios nuostolių sumažėjimas linijose

Aktyviosios ir reaktyviosios galių nuostolių sumažėjimo atvaizdavimas išskaidant visas tinklo linijas atskirai parodo, jog nuostoliai sumažinami ne tik lokaliai, bet ir visame tinkle. Penkioliktame paveikslėlyje dalyje linijų aktyviosios galios nuostoliai išaugo, dėl to, kad atlikus optimizavimą tinkle pasikeitė galios srautai.

4.1. Ekonominiai skaičiavimai teoriniame modelyje

Atlikti ekonominiai skaičiavimai papildomos įrangos įrengimui tinkle. Pagal šaltinyje [32] pateiktus duomenis, šuntinio kompensatoriaus kaina yra 10-30 €/kVar, priklausomai nuo įtampos lygio – kuo didesnė įtampa tuo įrenginys yra brangesnis. Atsižvelgiant į 2020-ųjų metų gegužės valiutų kursą Lietuvos centriniame banke [33], šuntinio kompensavimo įrenginio kaina būtų 9,3-27,84 €/kVar. Šiame modelyje papildomai statoma 150 Mvar kondensatorių baterija, 330 kV įtampos mazge, todėl jos kaina C_{kond} :

$$C_{kond} = (150 \text{ Mvar} \cdot 1000) \cdot 25 \text{ €/kVar} = 3,75 \text{ mln. €}$$

Imtas beveik maksimalus koeficientas, atsižvelgiant į įtampos lygį, prie kurio yra jungiamas įrenginys. Tai pat nevertintos aptarnavimo išlaidos, kurios šiai įrangai yra labai minimalios.

Kaip pateikta 3-ioje lentelėje, įrengus kondensatorių baterija tinkle, aktyviosios galios nuostoliai sumažėjo 1,6 MW, o reaktyviosios 39,8 Mvar. Atitinkamai remiantis Lietuvos tinklo operatoriaus „Litgrid“ paslaugos kainos viršutinės ribos 2020 metams koregavimo pažyma [34], kurioje yra nurodyta prognozuojama elektros įsigijimo kaina 46,38 eur/MWh 2020-iesiems metams, galima apskaičiuoti dėl tinkle sumažėjusios aktyviosios galios atsiradusias papildomas pajamas:

$$I_{pkond} = 1,6 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h} \cdot 46,38 \text{ €/MWh} = 6,5 \text{ mln. € per metus.}$$

Skaičiuojant pajamas reikėtų įvertinti, kad apkrova bei generacija realiu laiku keičiasi ir nebūna tokia pati kaip ir nuostoliai, tačiau daroma prielaida, kad aktyviosios galios nuostoliai sumažinami vienodai visus metus. Galima atlikti skaičiavimus, kad įrenginys tinklo operatoriumi atsiperka:

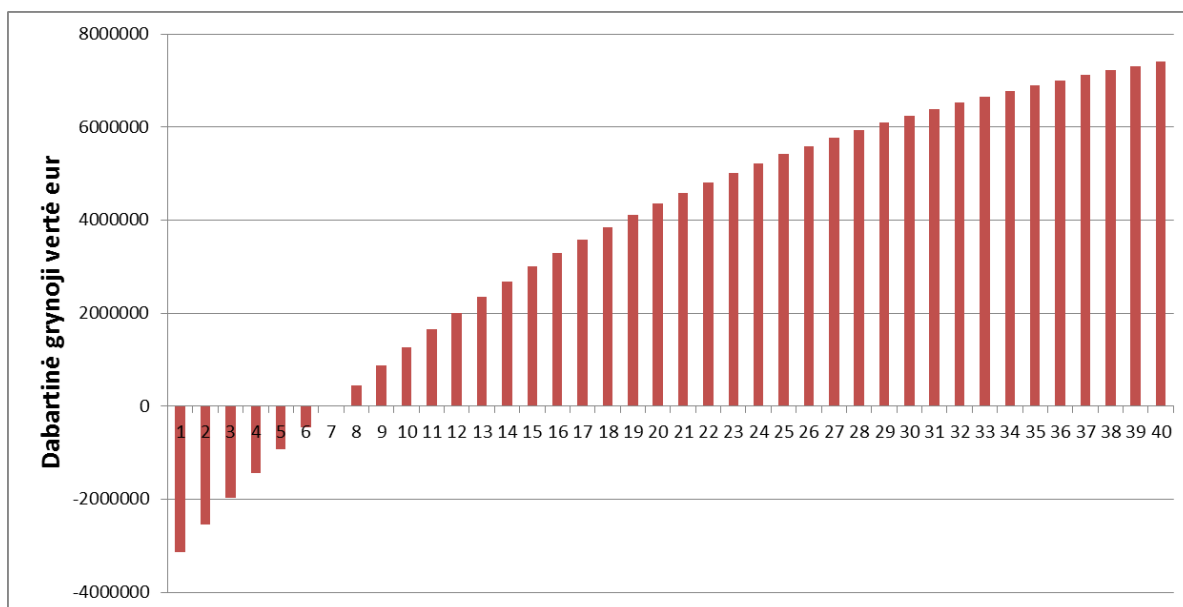
$$\text{Atsiperkimo laikas} = \text{investicijos/pajamų.} \quad (21)$$

Atsipirkimas = $3\,750\,000/650062 = 5,77$ metai.

Šis projektas atsipirktu mažiau nei per šešis metus. Atliekant ekonominius skaičiavimus svarbu įvertinti ir dabartinę grynąją vertę (*angl. net present value – NVP*):

$$NPV = \text{išlaidos} + \frac{\text{metinės pajamos}}{(1+\text{diskonto norma})^{\text{metai}}} \dots \frac{\text{metinės pajamos}}{(1+\text{diskonto norma})^{\text{metai}+n}} \dots \quad (22)$$

Skaičiavimuose diskonto norma 5 % remiantis VERT, nustatyta norma Lietuvos perdavimo tinklo skirstymo operatoriaus vykdomiems projektams [35]. Atlikus analizes įvertinta, kad įranga vidutiniškai gali veikti apie 40 metų perdavimo tinkle [37,38]. Įvertinus visus rodiklius gryoji dabartinė vertė laiko atžvilgiu pasiskirsto taip:



19 pav. Papildomai įrengiamos kondensatorių baterijos gryoji dabartinė vertė

Pateiktame grafike matoma, kad projektas yra pelningas skaičiuojant, remiantis 5 % diskonto norma. Projektas yra pasirenkamas, kai gryoji dabartinė vertė yra > 0 , kaip ir šiuo atveju.

Kitas svarbus ekonominis rodiklis – vidinė grąžos norma. Šis rodiklis nusako investicijų rentabilumą ir parodo maksimalų leistiną santykinę investicijų kainos lygį, kurį viršijus, projektas tampa nerentabilus. Vidinė grąžos norma apskaičiuojama:

$$IRR = i_1 + \left[(i_2 - i_1) \left(\frac{PV_1}{PV_1 - PV_2} \right) \right] \quad (23)$$

Čia:

i_1 – žemesnė diskonto norma;

i_2 – aukštesnė diskonto norma;

PV_1 – gryoji dabartinė vertė prie žemesnės diskonto normos;

PV_2 – gryoji dabartinė vertė prie aukštesnės diskonto normos.

$$IRR = 17 + \left[(18 - 17) \left(\frac{66731,976}{66731,976 - (-143356,85)} \right) \right] = 17,32 \%$$

Esant šiai apskaičiuotai diskonto normai, projekto gryoji dabartinė vertė būtų lygi nuliui.

5. Lietuvos perdavimo tinklo optimizavimas

Išnagrinėtas optimizavimo modelis pritaikomas Lietuvos perdavimo tinklo sistemoje. Nagrinėjami trys statiniai Lietuvos sistemos modeliai ir kokią poveikį tai turėtų kiekvienam atskirai:

- 2019 metų vasaros minimalių apkrovų režimas (apima laikotarpį nuo balandžio 15 d. iki spalio 15 d) [41];
- 2019 metų žiemos maksimalių apkrovų režimas (apima laikotarpį nuo spalio 15 d. iki balandžio 15 d);
- 2028 metų perspektyvinis tinklo modelio režimas (apima laikotarpį nuo spalio 15 d. iki balandžio 15 d).

Naudojamas BRELL elektros sistemos perdavimo tinklo skaitmeninis modelis, priimta prielaida, kad Lietuvos sistema šiuose modeliuose veikia sinchroniškai su IPS/UPS sistema. Lietuvos elektros perdavimo sistemos principinė schema pavaizduota 20-ame paveikslėlyje. Žalia spalva pateiktos 330kV linijos, o punktyrinės žymi statomas arba planuojamas linijas.



20 pav. Lietuvos perdavimo tinklo principinė schema

Šiame modelyje generacijos šaltinių vertės atitinkamai įvertintos pagal pateiktus „Litgrid“ 2019-2028 metų tinklų plėtros plane, esančius nurodytus generacijos dydžius [17]:

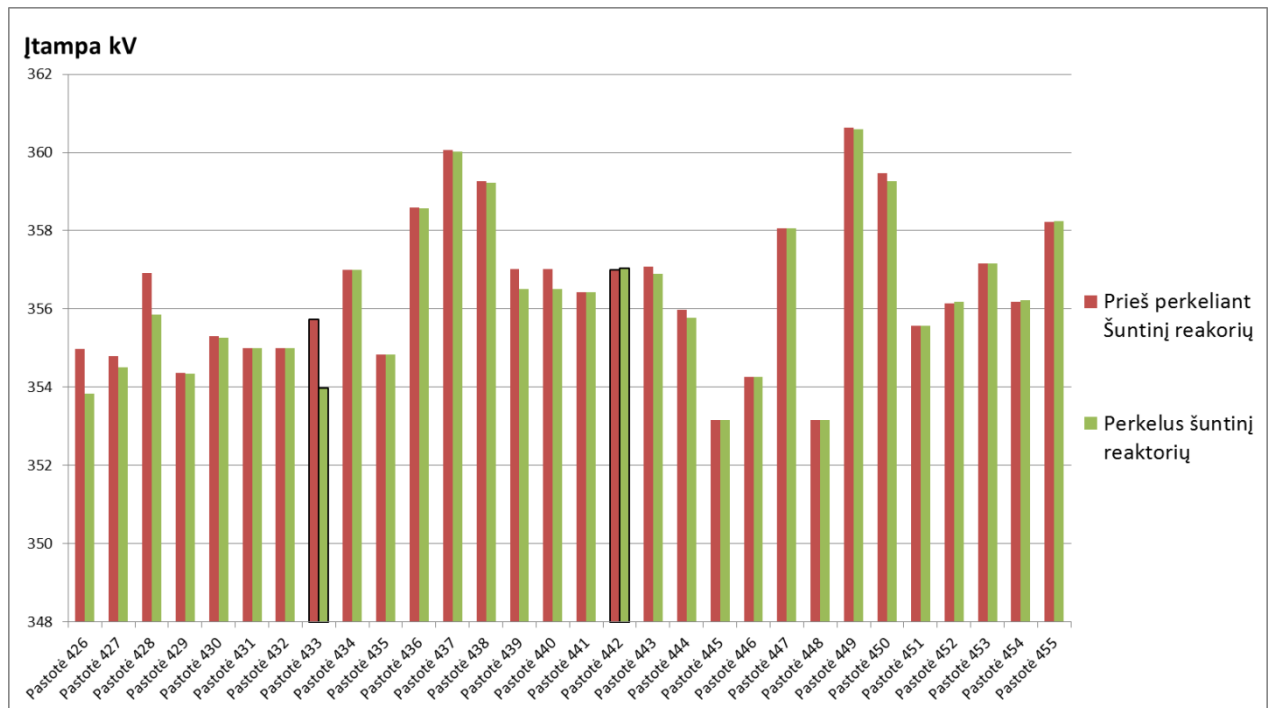
5 lentelė. Lietuvos tinklo 2018 metų faktiniai generacijos šaltinių dydžiai MW

Elektrinių turimoji galia MW:	3553
Šiluminės E	1798

Lietuvos	1002
Vilniaus E3	324
Kauno E	148
Panevėžio E	30
Kitos ŠE	292
Kruonio HAE	900
Atsinaujinantis energijos išteklius naudojančios elektrinės	855
Kauno HE	99
Mažos HE	27
Vėjo E	533
Saulės E	83
Biokuro E	93
Biomosės E	52
Vilniaus E2	21
Vilniaus kogeneracinė jėgainė (biomasę deginantis blokas)	-
Šiaulių E	9
Mažosios biomasės	22
Biodujų E	41
Atliekų deginimo E	20
Vilniaus kogeneracinė jėgainė (atliekas deginantis blokas)	-
Klaipėda "Fortum"	19
Mažos atliekų deginimo elektrinės	1

5.1. Šuntinio reaktoriaus veikimo parinkimas perdavimo tinkle

Lietuvos 330 kV elektros perdavimo tinkle yra vienas kompensavimo įrenginys – šuntinis reaktorius. Kaip minėta šio darbo 2-ame skyriuje jis yra perkeliamas į kitą tinklo dalį tam, kad būtų pilnai išnaudojamas. Naudojantis optimizaciniu modeliu parenkama pastotė – 433 ir nustatoma galima reaktyviosios galios kompensavimo riba tame mazge. Gautas rezultatas yra 160 Mvar dydžio šuntinio reaktoriaus įrengimas pastotėje. Tai yra beveik pilnutinė perkeliamo šuntinio reaktoriaus galia ir parodo, jog jis bus tikrai pilnai išnaudojamas. Grafikuose žemiau pateikiamas 330 kV tinklo įtampų lygio pasikeitimas šuntiniui reaktoriui esant senoje tinklo vietoje ir naujoje



21 pav. Šuntinio reaktoriaus perkėlimo įtaką įtampoms 330kV tinkle vasaros minimalių apkrovimų metu

Žvelgiant į įtampos lygius tinkle, kuomet jis yra optimizuojamas ir iš pastotės – 442 šuntinis reaktorius yra perkeliamas į pastotę – 433, dauguma pastočių įtampų yra sumažinama. Šis pasikeitimas matomas tik vasaros minimalių apkrovimų metu, esant išaugusioms įtampoms tinkle, nes žiemą prie maksimalių tinklo apkrovimų įtampos yra žemesnės ir šuntinis reaktorius tuo metu neveikia. Tai pat vasaros minimalių apkrovimų modelyje šis pasikeitimas sumažina tinkle esančius nuostolius:

6 lentelė. Vasaros min. apkrovų metu sumažėję tinklo nuostoliai dėl šuntinio reaktoriaus

	Tinkle esantys reaktyviosios galios nuostoliai (Mvar)	Tinkle esantys aktyviosios galios nuostoliai (MW)
Lietuvos tinklo modelis kuomet šuntinis reaktorius yra pastotėje 442	190,3	32,7
Lietuvos tinklo modelis kuomet šuntinis reaktorius yra pastotėje 433	184,9	32,6
Sumažėjusių nuostolių dydis	5,4	0,1

Vasaros metu, kai tinkle yra išaugusios įtampos, pastotėje – 432 esantys hidroakumuliacinės elektrinės agregatai pradeda veikti kaip SK sumažindami išaugusią įtampą ir kompensuodami reaktyviąją galią. Atlikta SK paslauga yra apmokestinta ir operatorius atitinkamai turi susimokėti [35]. Tai, koks poveikis pastebimas įrengus šuntinį reaktorių į pastotę – 433 pateiktas lentelėje:

7 lentelė. SK veikimo sumažinimas šuntiniu reaktoriumi

	Agregatų reaktyviosios galios naudojimas iš perdavimo tinklo Mvar
Pastotėje 432 agregatų veikimas kaip SK prieš atliekant pakeitimus tinkle	-164,24
Pastotėje 432 agregatų veikimas kaip SK po atliktų pakeitimų tinkle	-36,34
Skirtumas	-127,9

Atitinkamai šuntinis reaktorius tuo metu dirba pilnu pajėgumu, kompensuodamas tinkle 160 Mvar reaktyviosios galios, kuomet būdamas pastotėje – 442 kompensuodavo tik 12 Mvar reaktyviosios galios. Tai yra dar viena, šio reaktoriaus perkėlimo į kitą tinklo vietą, nauda. Septintoje lentelėje nurodomas sumažėjusio SK kompensuojamas reaktyviosios galios kiekis, kuris sumažina tinklo operatoriaus patiriamas išlaidas. Šis pokytis pastebėtas tik vasaros minimalių apkrovimu metu, nes žiemą esant žemesnėmis įtampomis šuntinis reaktorius neveikia.

5.2. Ekonominiai skaičiavimai įrengiant šuntinį reaktorių pastotėje – 433

Šiuo atveju atliekant ekonominius skaičiavimus vertinama ar būtų naudinga įrengti 180 Mvar šuntinį reaktorių pastotėje – 433. Kompensavimo įrenginio įrengimo kaštai [38]:

$$C_{\text{šunt}} = (180 \text{ Mvar} * 1000) * 27 \text{ €/kVar} = 4,86 \text{ mln. €}$$

Šios įrangos įrengimo nauda tinkle yra nuostolių sumažinimas, kuris pateiktas lentelėje 6. Šie nuostoliai tinkle sumažinami vasaros laikotarpiu, kada tinkle yra išaugusios įtampos. Kaip išnagrinėta šio darbo 4.1 skyriuje nuostolių sumažinimas tinkle pajamų atžvilgiu perskaičiuojamas:

$$I_{\text{Pšunt}} = 0,1 \text{ MW} * 4380 \text{ h} * 46,38 \text{ €/MW} = 20,3 \text{ tūkst. €}$$

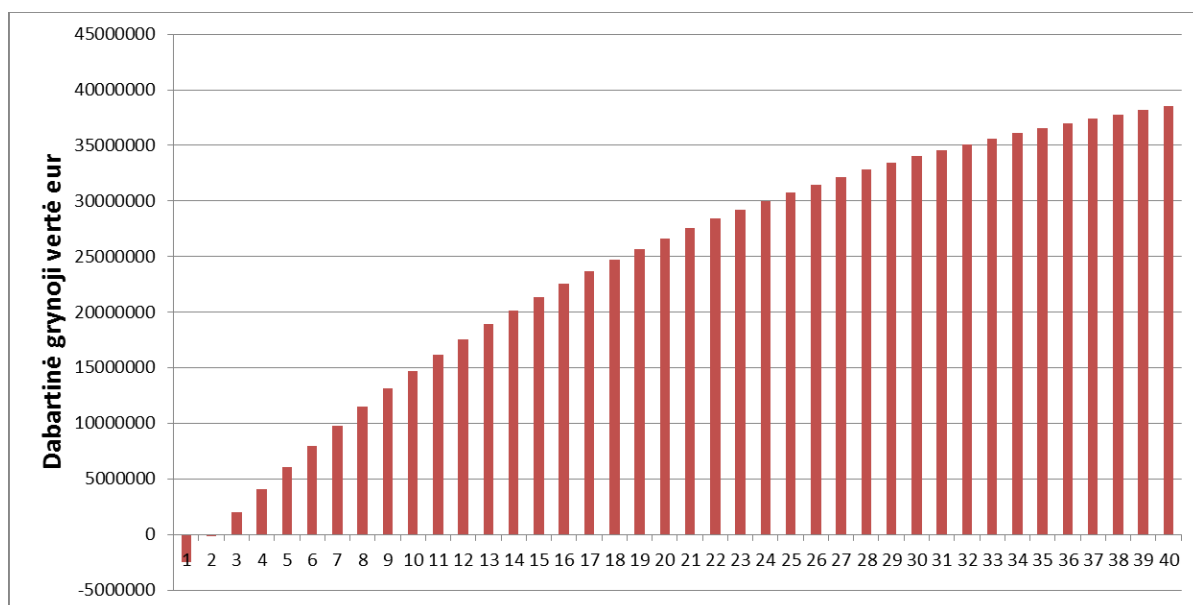
Skaiciuojant šio projekto ekonominę naudą tinklo operatoriaus atžvilgiu galima įvertinti sisteminės paslaugos mokamos pastotėje – 442 SK įrenginiams dėl tinkle esančios reaktyviosios galios kompensavimo [40]. Kaip pateikta lentelėje 7 SK darbas atitinkamai yra sumažinamas optimizavus tinklą ir įrengus šuntinį reaktorių pastotėje – 433. Ši sisteminė paslauga teikiama tik kalendoriniu vasaros laikotarpiu (2160 valandų), papildomai remiantis 2 skyriuje paminėtu SK išnaudojimo valandų skaičiumi (2198 valandos) priimama, jog tai bus 2160 valandų. Žinodami laiką ir paslaugos vertę galima apskaičiuoti kaštų sumažėjimą:

$$I_{\text{Qšunt}} = 2160 \text{ h} * 1161 \text{ €/h} = 2,5 \text{ mln. €}$$

Projekto atsipirkimo laikas gaunamas:

$$\text{Atsipirkimo laikas} = C_{\text{šunt}} / (I_{\text{Pšunt}} + I_{\text{Qšunt}}) = \sim 1,9 \text{ metai.}$$

Naudojant 5 % diskonto norma galima atvaizduoti grafiškai šio projekto grynujų pinigų srautus[35].



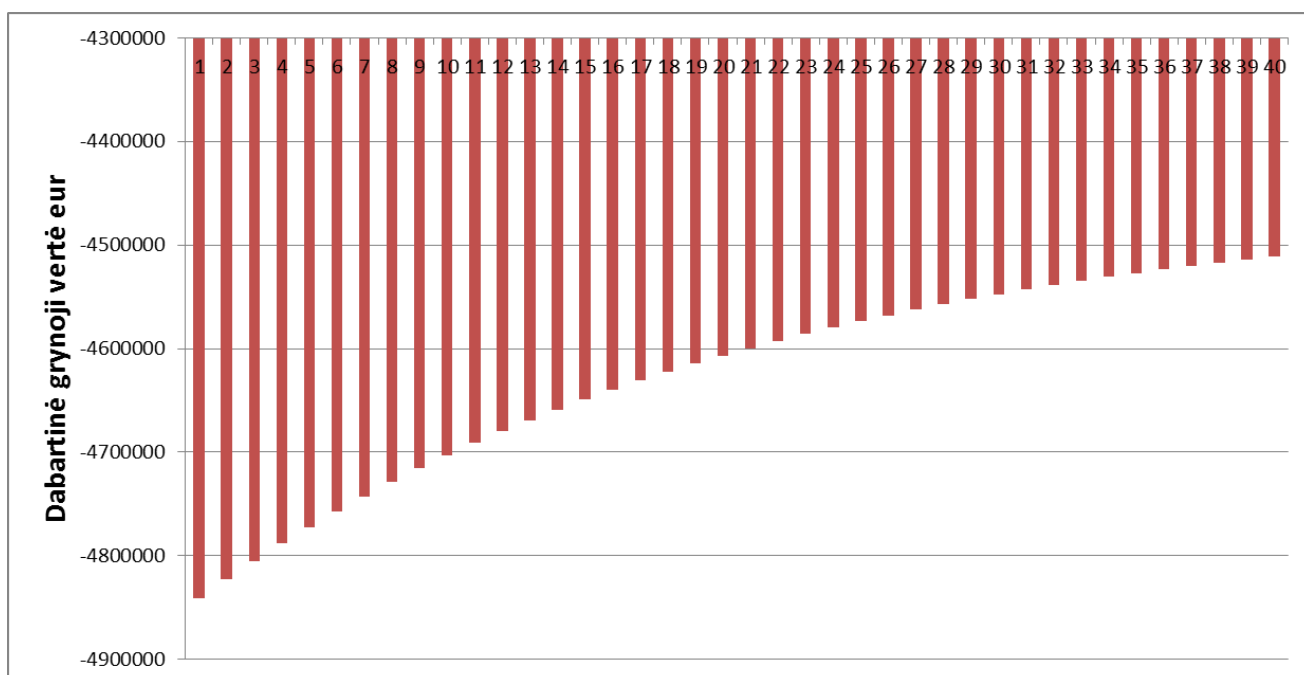
22 pav. Grynujų pinigų srautas įrengus šuntinį reaktorių pastotėje – 433

Šio projekto grynujų pinigų srautai yra teigiami, kas rodo, jog projektas yra tikrai priimtinas. Kitas svarbus ekonominis parametras vidinė grąžos norma yra:

$$IRR = 50 + \left((60 - 50) \left(\frac{196148}{196148 - (-646543)} \right) \right) = 52,3 \%$$

Projekto nauda yra akivaizdi atlikus ekonominius skaičiavimus, tačiau verta įsitikinti ar šis projektas būtų naudingas jeigu nevertintume sumažintų sisteminių paslaugų kaštų. Atsipirkimo

laikas išaugą ir viršija įrangos veikimo laiką, o 23 paveikslėlyje matoma kaip grynujų pinigų srautas išlieka neigiamas.



23 pav. Grynujų pinigų srautas įrengus šuntinį reaktorių pastotėje – 433 nevertinant sumažintu sisteminių paslaugų

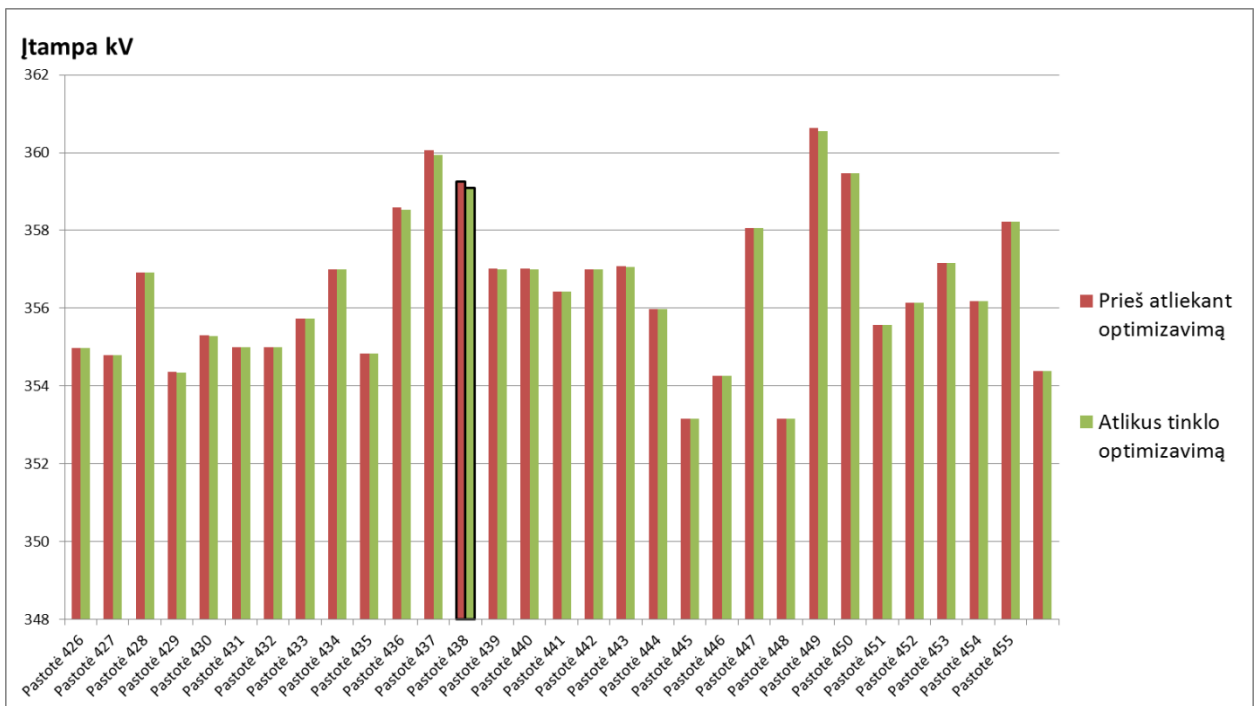
Nevertinant sisteminių paslaugų kaštų sumažinimo projektas yra nepelningas. Svarbu paminėti, jog atliekant ekonominę analizę šiam optimizavimo projektui šuntinio reaktoriaus įrengimas skaičiuotas kaip naujai statomo, o ne perkeliama iš vienos tinklo vietos į kitą. Įrangos perkėlimo kaštai būtų daug mažesni, nei naujai įrengiamo, kas padarytų projektą pelningą.

5.3. Optimizacinio modelio taikymas Lietuvos perdavimo tinklui

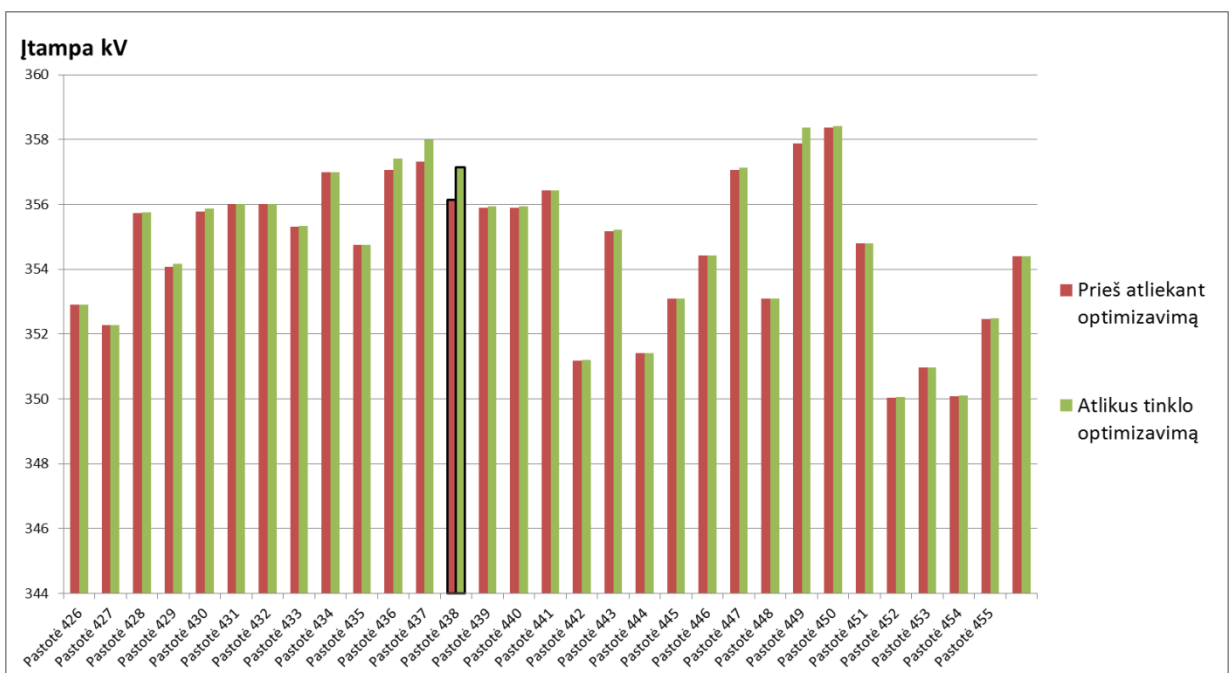
Optimizuojant Lietuvos EES ieškoma mazgų, kurių įtampą nėra leistinuose ribose arba arti jų viršijimo. Optimizavimas atliekamas dvejais tinklo režimais:

- 2019 metų vasaros minimaliu apkrovos režimu (apima balandžio nuo spalio 15 d. iki laikotarpį 15 d) [41];
- 2019 metų žiemos maksimaliu apkrovos režimu (apima laikotarpį nuo spalio 15 d. iki balandžio 15 d).

Atitinkamai parinkus 330 kV pastotes ir nustačius optimizavimo ribas gaunamas sprendimas, kad dauguma tinklo vietų nereikalauja papildomos kompensavimo įrangos. Vienintelėje pastotėje – 438 vasaros minimaliu apkrovos režimu optimizacinio skaičiavimo rezultatai nurodo, jog reikėtų sumažinti 3,2 Mvar reaktyviosios galios. Šiame mazge įrengus šuntinio kompensavimo įrenginį yra sumažinamos įtampos. Tačiau sprendžiant optimizavimo uždavinį žiemos maksimaliu apkrovos režimu, kai įtampos tinkle visur yra žemesnės pastotėje – 438 nustatytas reaktyviosios galios trūkumas ir papildomai turėtų būti įrengiama 18 Mvar dydžio kondensatorių baterija. Įvertinus optimizavimo sprendimo rezultatus tinklo įtampos pasikeičia taip:



24 pav. Optimizavimas Lietuvos EES esant vasaros minimalių apkrovų režimui



25 pav. Optimizavimas Lietuvos EES esant žiemos maksimalių apkrovų režimui

Po tinklo optimizavimo pateiktuose grafikuose pastebimas įtampos pasikeitimas. Įtampos vasaros minimaliu apkrovos režimu sumažėjo pridėjus šuntinį reaktorių su nustatytu kompensavimo dydžiu -3,2 Mvar, o žiemos maksimalių apkrovų režimu įtampa padidėjo nustačius, kad toje pačioje pastotėje – 438 turētu būti įrengtos kondensatorių baterijos su 18 Mvar reaktyviosios galios tiekimu į tinklą. Taip pat atlikus optimizavimą šiais dviem tinklo režimais, tinkle sumažinti nuostoliai pateikti lentelėje:

8 lentelė. Lietuvos EES tinklo nuostolių sumažėjimas po optimizavimo

	Tinkle esantys reaktyviosios galios nuostoliai (Mvar)	Tinkle esantys aktyviosios galios nuostoliai (MW)
Lietuvos EES tinklo nuostoliai esant vasaros minimalių apkrovų režimui	32,7	190,3
Lietuvos EES tinklo nuostoliai esant vasaros minimalių apkrovų režimui atlikus optimizavimą	32,6	190,2
Lietuvos EES tinklo nuostoliai esant žiemos maksimalių apkrovų režimui	46,9	294,5
Lietuvos EES tinklo nuostoliai esant žiemos maksimalių apkrovų režimui atlikus optimizavimą	46,8	294,3

Pateiktoje lentelėje matoma, kad abejais režimais po optimizavimo buvo sumažinti nuostoliai:

- aktyviosios galios 0,1 MW dydžiu;
- reaktyviosios 0,1 Mvar minimalių apkrovų režimu ir 0,2 Mvar maksimalių apkrovų režimu.

Šiuose modeliuose buvo naudojami atitinkamai du atskiri kompensavimo įrenginiai: šuntinis reaktorius ir kondensatorių baterija. Naudoti toje pačioje pastotėje 2 skirtingus kompensavimo įrenginius yra neekonomiška, todėl galima pasirinkti kompensavimo įrenginį, kuris galėtų vasaros metu vartoti reaktyviąją galią ir sumažinti tinkle įtampas, o žiemą generuoti reaktyviąją ir pakelti įtampas tinkle. Šiuo atveju tai galėtų būti atliekama pasitelkiant sinchroninio kompensatoriaus pagalbą. Koks sprendimas yra geriausias, bus nustatyta atliekant ekonominę analizę.

5.4. Lietuvos tinklo optimizacinio modelio ekonominė analizė

Lietuvos perdavimo tinklo optimizavimo ekonominę analizę galima atlikti trimis skirtingai pjūviais:

- įrengus tik šuntinį reaktorių tinkle;
- įrengus tik kondensatorių baterijas tinkle;
- įrengus sinchroninį kompensatorių tinkle.

Visais trimis atvejais apskaičiuosime, kokia būtų ekonominė nauda ir investicijos. Siekiant įrengti šuntinį reaktorių 330 kV tinkle, rinkoje sunku rasti reikiamo dydžio įrenginį, todėl pastotėje – 438 tektų įrengti 100 Mvar šuntinį reaktorių, nes mažesnių gabaritų kompensavimo įrenginio pagaminimas būtų sudėtingas [38]. Tai pat antruoju atveju daroma prielaida, kad 100 Mvar būtų

įrengiamos kondensatorių baterijos. Remiantis 4.1 skyriuje nurodyta investicijų apskaičiavimo metodika šių įrenginių investicijos būtų:

$$C_{\text{kond}} = (100 \text{ Mvar} * 1000) * 25 \text{ €/kVar} = 2,5 \text{ mln. €}$$

$$C_{\text{šunt}} = (100 \text{ Mvar} * 1000) * 27 \text{ €/kVar} = 2,7 \text{ mln. €}$$

Trečioji alternatyva – sinchroniniai kompensatoriai yra brangesni ir investicijos į juos yra žymiai didesnės [32]. Atitinkamai kainos ribos yra nuo 9,3 €/kVar iki 37,4 €/kVar. Tai pat reikia įvertinti ir šių įrenginių nuostolius, kurie yra nuo 0,38 €/kVar iki 0,75 €/kVar per metus. Siekiant palyginti 3 kompensavimo įrenginius sinchroninio kompensatoriaus parenkamas 50 Mvar dydžio, o jo pradinės pirmų metų išlaidos:

$$C_{\text{sinch}} = (50 \text{ Mvar} * 1000 * 35 \text{ €/kVar}) + (0,4 \text{ €/kVar} * 50 \text{ Mvar} * 1000) = 1,77 \text{ mln. €}$$

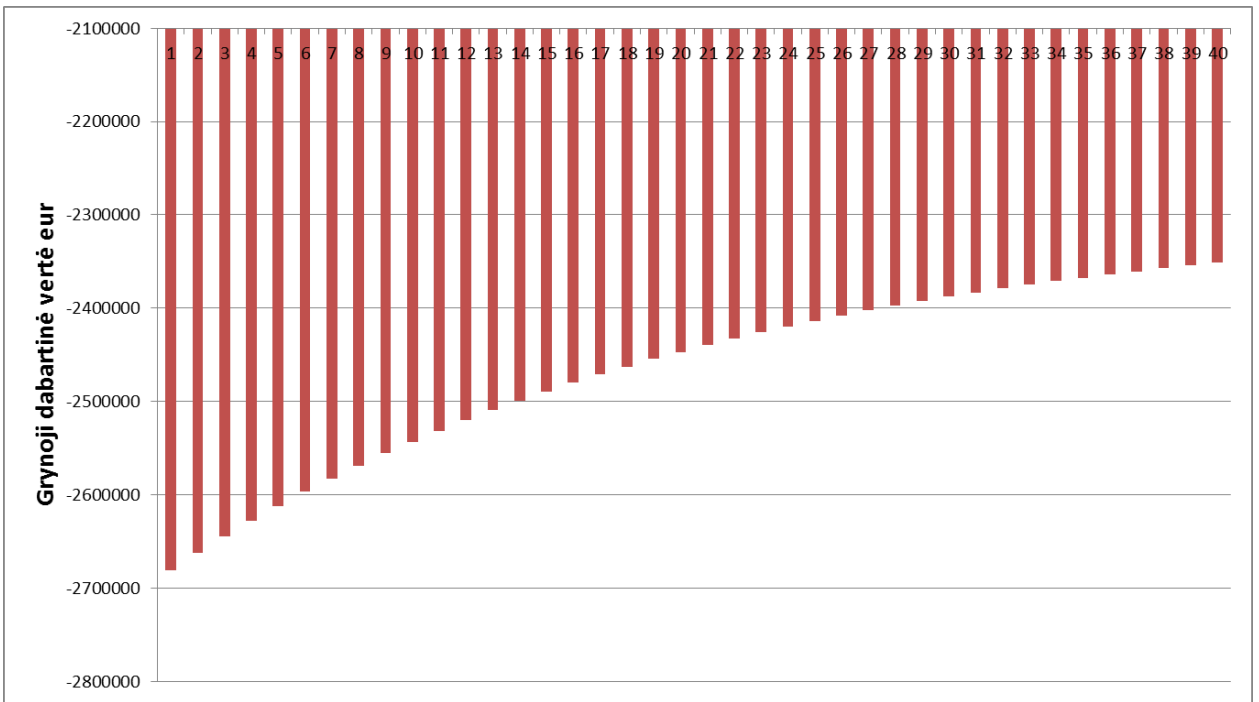
Apskaičiavus investicijas, lentelėje žemiau pateikiamos naudos piniginiu atžvilgiu, įrengus šiuos įrenginius. Atliekant skaičiavimus priimamos šios prielaidos:

- nuostolių sumažėjimas minimalių apkrovos režimu išsilaiko pusę metų, 4380h;
- nuostolių sumažėjimas maksimaliu apkrovos režimu išsilaiko pusę metų, 4380h;
- aktyviosios galios kainą 46,38 eur/MWh [34];
- visų trijų įrenginių tarnavimo trukmė 40 metų [38];
- visų projektų diskonto normą yra 5 % [36].

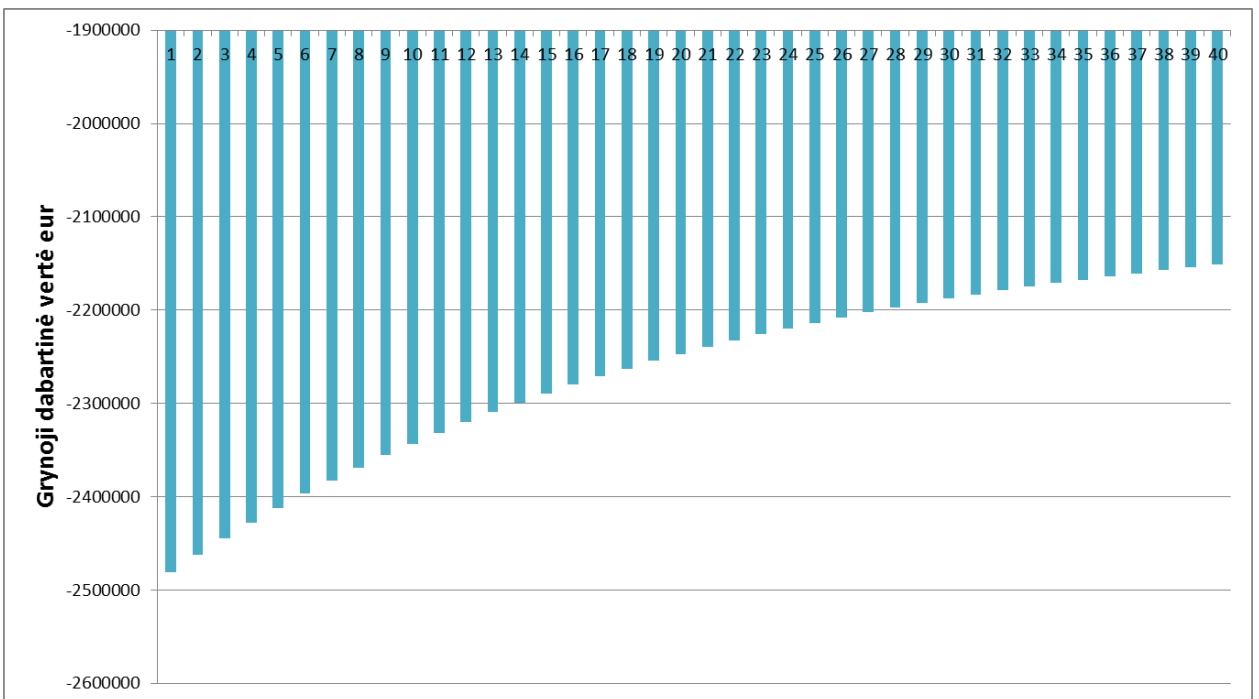
9 lentelė. Ekonominė analizė Lietuvos tinklo optimizavime

	Šuntinio reaktoriaus įrengimas pastotėje 438	Kondensatorių baterijų įrengimas pastotėje 438	Sinchroninio kompensatoriaus įrengimas pastotėje 438
Sumažėjusių aktyviosios galios nuostolių kiekis tinkle įrengus kompensavimo įrenginį. (MW)	0,1	0,1	0,1
Sumažintų nuostolių kiekis valandomis.	4380	4380	8760
Aktyviosios galios nuostolių sumažinimas. tūkst.€/metus	20,3	20,3	40,6

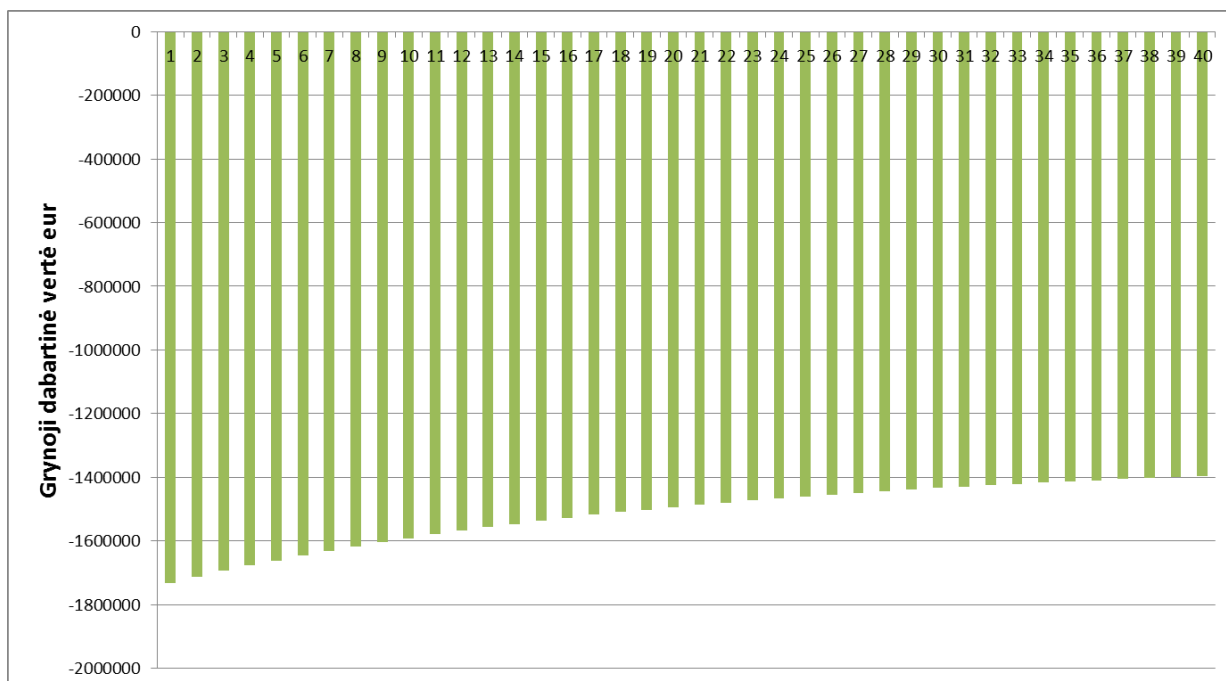
Kaip skirtingų įrangos projektų grynoji dabartinė vertė pasiskirsto laike pateikiama paveikslėliuose:



26 pav. Šuntinio reaktoriaus grynoji dabartinė vertė



27 pav. Kondensatorių baterijų grynoji dabartinė vertė



28 pav. Sinchroninio kompensatoriaus grynoji dabartinė vertė

Iš pateiktų grafikų matoma, jog visi projektai yra nepelningi. SK grynoji dabartinė vertė auga mažiausiai, nes kiekvienus metus yra skaičiuojami pastovūs įrangos aptarnavimo kaštai. Šių projektų atsipirkimo laikas pateiktas lentelėje:

10 lentelė. Projektų atsipirkimo laikas

	Projektų atsipirkimo laikas metais
Šuntinio reaktoriaus įrengimas	132,9
Kondensatorių baterijų įrengimas	123
Sinchroninio kompensatoriaus įrengimas	44

Analizuojant atsipirkimo laiką, jis yra ilgesnis nei įrenginių gyvavimo laikotarpis, kas parodo šių projektų neatsipirkimą.

Atlikus analitinius sprendimus nustatyta, kokia minimali nuostolių dalis tinkle turėtų būti sumažinama per metus, kad esant tai pačiai 5 % diskonto normai šie projektai atsipirktų.

11 lentelė. Minimalus nuostolių sumažinimas tinkle, kuriam esant projektai būtų pelningi

	Minimalus nuostolių kiekio sumažinimas tinkle, MW/metus	Grynoji dabartinė vertė, tūkst.eur	Atsipirkimo laikas, metais
Šuntinio reaktoriaus įrengimas	3416,4	18,9	17
Kondensatorių baterijų įrengimas	3153,6	9,75	17,1
Sinchroninio kompensatoriaus įrengimas	2645,5	11,27	14,4

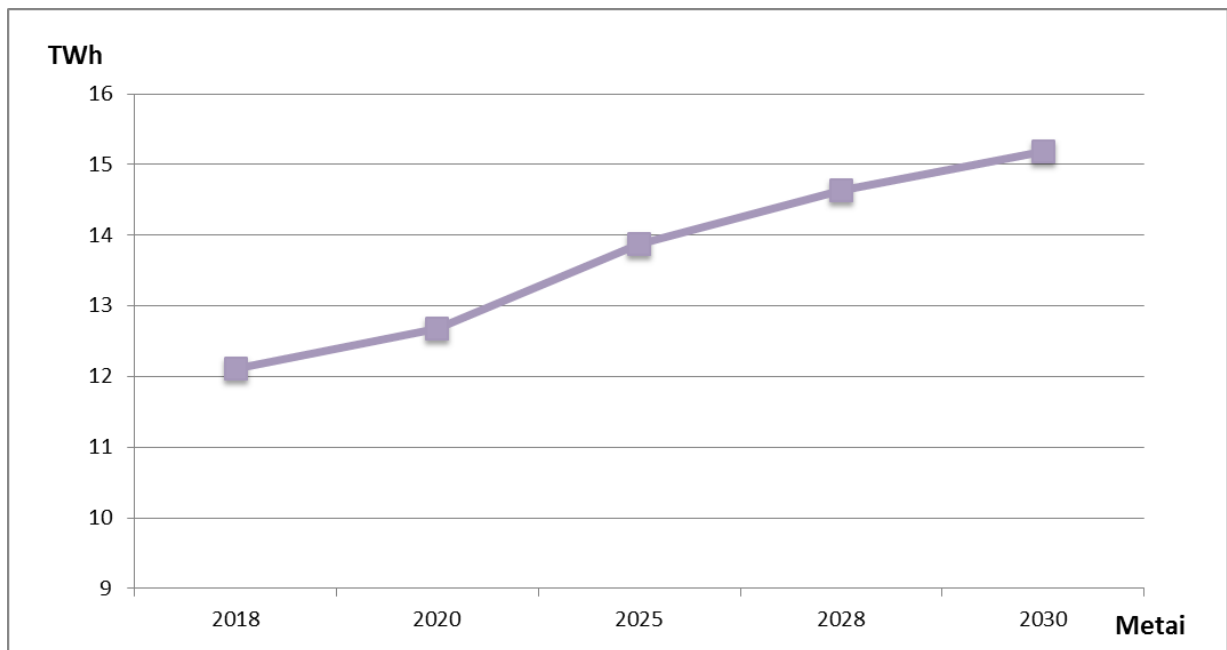
Analitiniai sprendimai parodė, kad sinchroninio kompensatoriaus atsipirkimas tinkle yra galimas prie mažiausio kiekio sukompensuotų nuostolių.

6.2. Lietuvos perspektyvinio modelio optimizavimas

Įvertinant Lietuvos EES tinklo plėtros planus sudarytas perspektyvinis modelis [17]. Šis modelis nuo prieš tai naudotų Lietuvos tinklo modelių skiriasi tuo, kad turi atliktas modifikacijas:

1. išaugusią tinklo apkrovą. Atliekant elektros energijos suvartojimo ir didžiausios sistemos pareikalaujamos galios poreikio prognozę 2028 metams yra vertinami veiksniai, turintys įtakos būsimai elektros energijos paklausai. Šiuos veiksnius galima išskirti į penkias grupes:
 - ✓ BVP augimo tendencijas;
 - ✓ elektros energijos efektyvumas;
 - ✓ elektra varomų automobilių skaičius ir jų suvartojamas elektros energijos kiekis;
 - ✓ šilumos siurblių skaičius ir jų suvartojamas elektros energijos kiekis;
 - ✓ paskirstytoji generacijos, kuri šiuo metu sudaro labai mažą dalį ir vertinama, jog ateityje ji reikšmingos įtakos neturės.

Remiantis šiais veiksniais pateiktame 29 paveikslyje pavaizduotas bendras elektros energijos suvartojimas ir jo prognozė iki 2030 metų.



29 pav. Prognozuojamas bendras elektros energijos suvartojimo iki 2030 metų

Atsižvelgiant į šią prognozę iki 2028 metų energijos suvartojimas išaugs 18 %. Tinkle esančių apkrovų dydis yra padidintas 18 % kuriant perspektyvinį Lietuvos tinklą. Tinklo modelis atitiks perspektyvinį žiemos maksimalių apkrovų režimo modelį.

2. išaugusią vidinę sistemos generaciją. Išaugusių generacijos šaltinių duomenys pateikti 12 lentelėje;

12 lentelė. Perspektyvinio Lietuvos modelio 2028 metams generavimo šaltinių dydžiai MW.

Elektrinių turimoji galia MW:	3868
Šiluminės E	747
Lietuvos	432
Vilniaus E3	0
Kauno E	0
Panevėžio E	32
Kitos ŠE	283
Kruonio HAE	900
Atsinaujinantis energijos išteklius naudojančios elektrinės	2221
Kauno HE	99

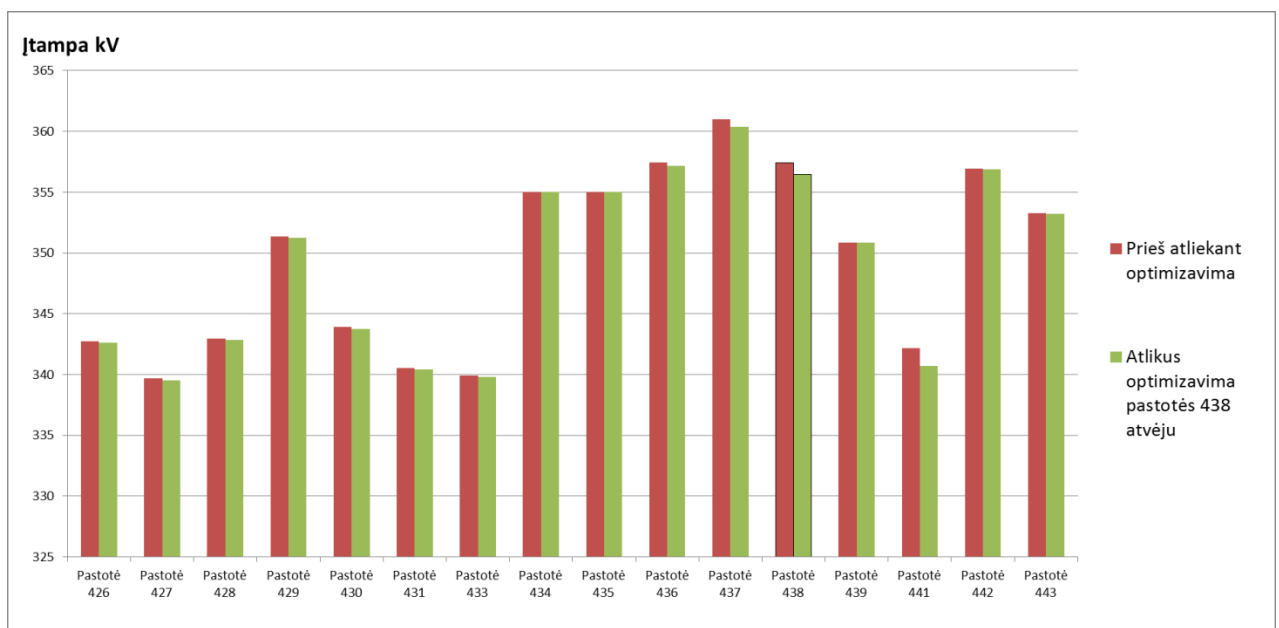
Mažos HE	27
Vėjo E	1700
Saulės E	180
Biokuro E	156
Biomosės E	115
Vilniaus E2	21
Vilniaus kogeneracinė jėgainė (biomasę deginantis blokas)	63
Šiaulių E	9
Mažosios biomasės	22
Biodujų E	41
Atliekų deginimo E	59
Vilniaus kogeneracinė jėgainė (atliekas deginantis blokas)	16
Klaipėda "Fortum"	19
Fortum kogeneracinė jėgainė (Kaunas, Biruliškių TP)	23
Mažos atliekų deginimo elektrinės	1

3. įvertinta nauja jungtis ir papildomos 330 kV linijos.



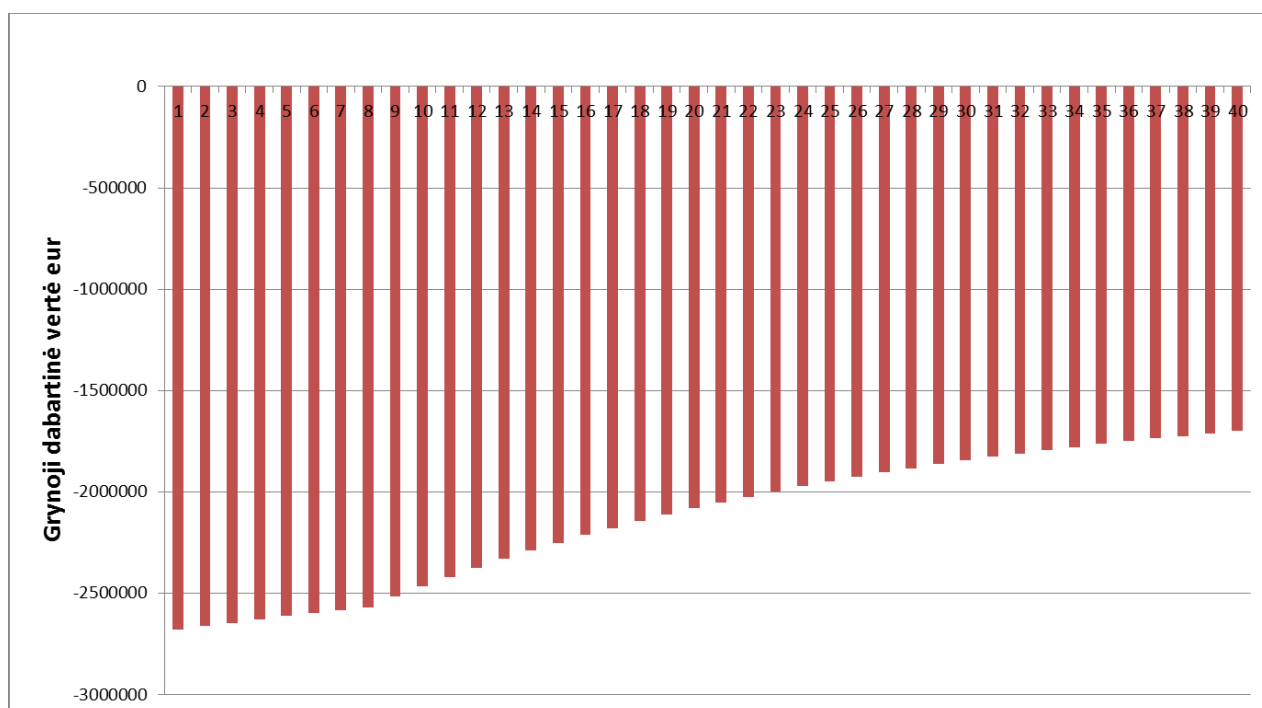
30 pav. Perspektyvinė 2028 metų Lietuvos perdavimo tinklo schema

Pasirenkama ankščiau išanalizuota pastotė – 438, nes norima įsitikinti ar pasikeitus tinklui apskaičiuotų kompensavimo įrenginių poreikis joje išaugtų ar sumažėtų. Nustatyta, kad ten reikėtų šuntinio reaktoriaus, kuris sukompensuotų 18,5 Mvar reaktyviosios galios perteklių. Kompensavimo kiekis išaugo nuo 3,2 Mvar iki 18,5 Mvar. Atliekant tinklo optimizavimą sumažinami nuostoliai iki 27,1 MW ir 237,7 Mvar. Optimizacinio modelio papildomo kompensavimo įrenginio veikimas sumažintų įtampas veikimo taške ir pastotėse esančiose netoliese.



31 pav. Perspektyvinio Lietuvos tinklo modelio optimizavimas pasirenkant pastotę – 438

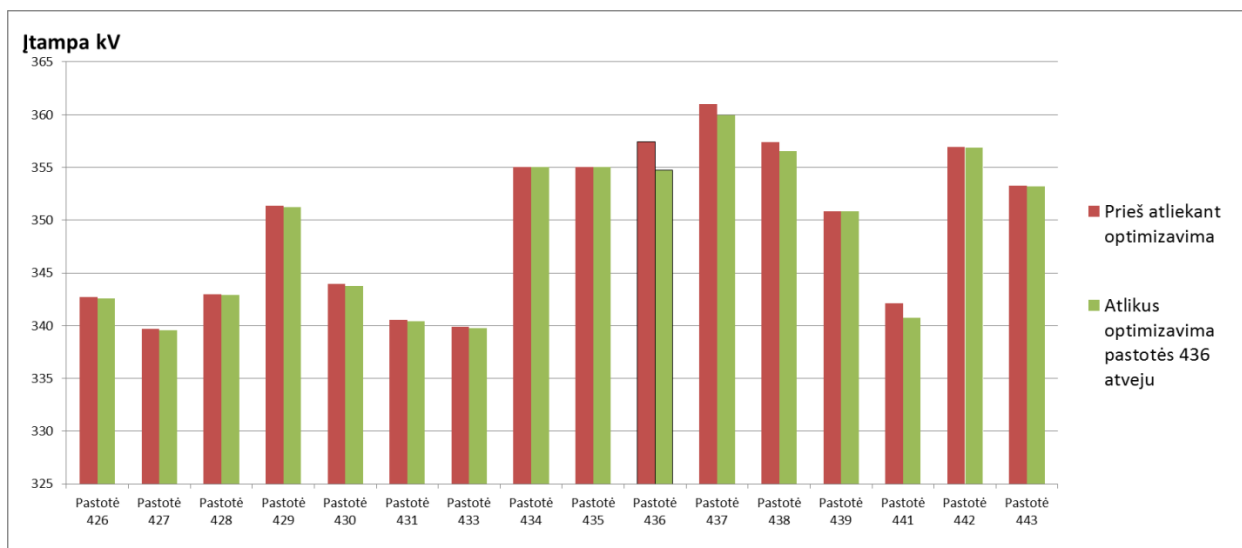
Iš pagrindinių parametų išvelgiama, kad kompensavimo įrenginio aktualumas perspektyviniame tinklo modelyje dar labiau išauga. Šio darbo 5.4 skyriuje atlikus ekonominę analizę trijų skirtingų kompensavimo įrenginių papildomą įdiegimą, pastotėje – 438 gauta, kad visais atvejais projektas yra nepelningas. Atliktas perspektyvinio modelio optimizacinis skaičiavimas parodė išaugusį poreikį šuntinio reaktoriaus lyginant su 2019 metų vasaros minimalių apkrovų režimo modeliu. Šiame mazge yra sumažinamas didesnis nuostolių kiekis tinkle, nei praeitame modelyje. Todėl patikrinti ekonominiai skaičiavimai atlikus papildomas prielaidas, įrengiant 100 Mvar šuntinį reaktorių šiame tinkle. Vasaros minimalių apkrovimų režimu apskaičiuotų nuostolių dydis turėtų būti vertinamas 8-iems metams, o likusiems 32-iems šuntinio reaktoriaus metams nuostolių sumažinimas taikomas pagal perspektyvinio modelio rezultatus (0,4 MW 4380 h per metus). Įvertinus nuostolių sumažinimo pasikeitimą šio projekto grynoji dabartinė vertė vaizduojama 32 paveikslėlyje.



32 pav. Šuntinio reaktoriaus projekto grynoji dabartinė įvertinus perspektyvinio modelio rezultatus

Projekto grynoji dabartinė vertė išlieka neigiama, o vidinė gražos norma 1,1 % kas tik patvirtina, jog šio projekto nereikėtų vykdyti.

Atliekant perspektyvinio tinklo analizę ir taikant optimizacinį modelį rastas mazgas, kuriame įrengus kompensavimo įrenginį poveikis būtų didžiausias. Pastotėje – 436 papildomai sumodeliuotas 53 Mvar kompensavimo įrenginys sumažinantis reaktyviosios galios perteklių tinkle. Papildžius modelį šiuo įrenginių tinklo nuostoliai sumažėjo iki 26,4 MW ir 230,3 Mvar, o tinklo įtampos sumažėjimas matomas 33-ame paveikslėlyje:



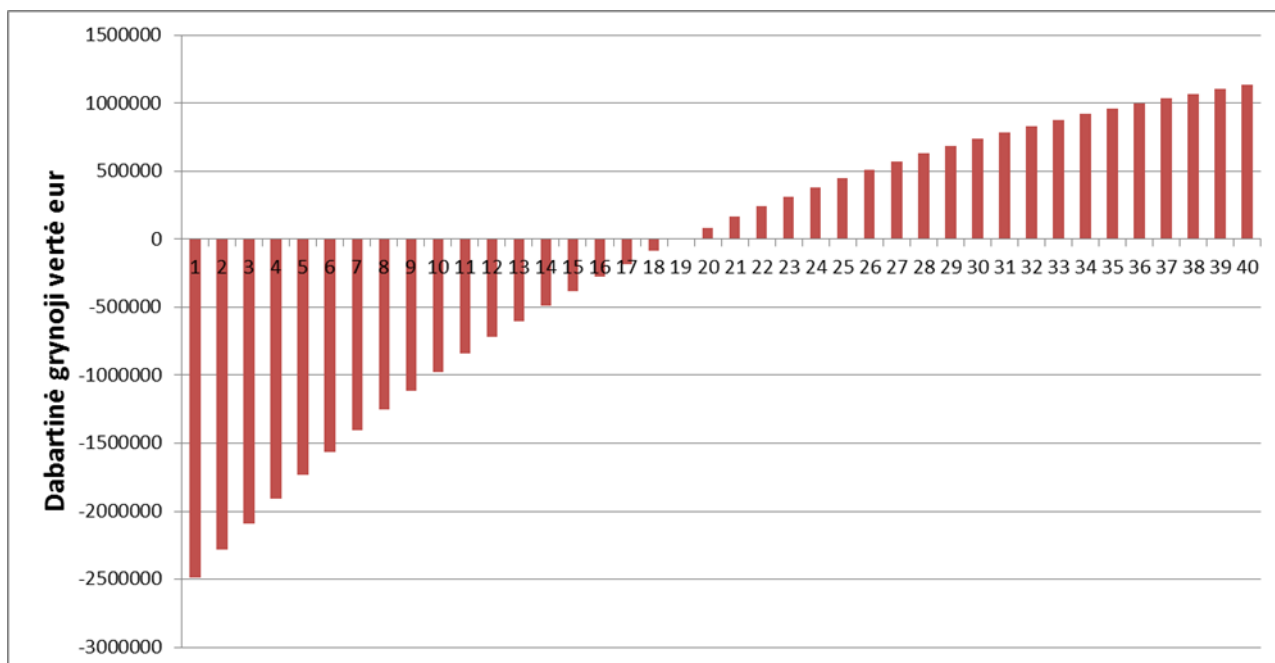
33 pav. Perspektyvinio Lietuvos tinklo modelio optimizavimas pasirenkant pastotę – 436

Vertinant, ar šis optimizavimo sprendimas būtų ekonomiškai, reikėtų numatyti sąlygas, kurios pateikiamos lentelėje.

13 lentelė. Pastotėje – 436 įrengiamo kompensatoriaus ekonominių skaičiavimų parametrai.

Ekonominių skaičiavimų pagrindiniai dydžiai	
Šuntinio reaktoriaus įrenginio galia Mvar	100
Sumažintas aktyviosios galios kiekis tinkle, MW	1,1
Valandų skaičius per metus, kiek yra sumažinti nuostoliai	4380
Diskonto norma, %	5
Įrenginio tarnavimo laikotarpis, metais	40
Įrenginio įrengimo kaštai, mln. €	2,7

Įvertinus šiuos parametrus projekto grynoji dabartinė vertė pavaizduota 34 paveikslėlyje.



34 pav. Pastotėje – 436 įrengto kompensavimo įrenginio projekto grynoji dabartinė vertė

Esant teigiamai grynajai dabartinei projekto vertei jis vertinamas palankiai ir turėtų būti įgyvendintas. Šio projekto atsipirkimo laikas yra 12 metų. Vidinės pelno normos skaičiavimai parodė, kad projekto grynoji dabartinė vertė lygi nuliui tada kai diskonto norma yra 7,89 %. Šis projektas yra aktualus nuo 2028 metų, kuomet tinke padidėja AEI generacijos šaltinių kiekis ir išaugą įtampą bei nuostoliai tinkle. Šie atlikti skaičiavimai turėtų būti patikslinti, kai bus žinomi detalūs tinklo sprendimai ir pasikeitimai.

Išvados

1. Nustatyta, kad statinis sinchroninis kompensatorius ir statinis reaktyviosios galios kompensatorius yra greičiausiai reaguojantys įtampos valdymo įrenginiai, tačiau šių technologijų kaštai yra dideli ir tinkle naudingiau yra įrengti sinchroninius kompensatorius, šuntinis reaktorius ar kondensatorių baterijas.
2. Išanalizavus literatūrą tiksliausias, geriausias rezultatus pasiekiantis ir dažniausiai naudojamas matematinis optimizavimo metodas yra grįstas dirbtinio intelekto skaičiavimo metodu. Naudojantis dirbtinio intelekto skaičiavimais sukurta skirtingų metodo rūšių, tačiau visi yra sudėtingi ir reikalaujantys daug duomenų ir resursų sprendžiant tinklo optimizavimo problemas. Nustatyta tikslo funkcija taikomam optimizaciniam metodui ir jos apribojimais skirtingais atvejais.
3. Sudarytas teorinis IEEE – 23 mazgų elektros tinklo modelis, naudojantis programine įranga *PSSE* ir atliktas tinklo optimizavimas, pritaikant įtampos valdymo priemones. Šio tyrimo metu nustatyta, kad reikia papildomai įrengti 150 Mvar kondensatorių bateriją, kuri pakeltų tinklo įtampą ir sumažintų aktyviosios ir reaktyviosios galios nuostolius 1,6 MW ir 39 Mvar .
4. Pritaikius pasirinktą optimizavimo metodą Lietuvos perdavimo 330kV tinklui nustatyta, kad:
 - pastotėje – 433 turi būti įrengtas 160 Mvar šuntinis reaktorius, kuris sumažintų išaugusias tinklo įtampas ir nuostolius vasaros minimaliu apkrovos režimu. Tai pat įrodyta, jog tai sumažintų pastotėje – 432 esančių SK darbą vasaros minimaliu apkrovų režimu;
 - detalesnė tinklo optimizavimo analizė nustatė, kad pastotėje – 438 yra poreikis įtampos valdymo įrangai. Nustatyta, jog efektyviausia būtų įrengti SK dėl skirtingų tinklo režimų optimizavimo;
 - sukurto Lietuvos perspektyvinio perdavimo tinklo optimizavime pasirinkus pastotę – 438 nustatyta, kad kompensavimo įrenginio poreikis išauga nuo 3,2 Mvar iki 18,5 Mvar, kas lemia ir didesnių nuostolių tinkle sumažinimą;
 - ištirta, kad optimaliausia vieta perspektyviniame tinklo modelyje įtampos valdymo įrangai yra pastotėje – 436. Nustatyta, kad optimaliausias kompensavimo įrenginio dydis turėtų būti 53 Mvar, tai leistų tinkle sumažinti išaugusias įtampas ir sumažinti nuostolius 1,1 MW dydžiu;
 - ištirta, kad atliekant tinklo optimizacinį tyrimą svarbu įvertinti dabartinio tinklo poreikius ir esamų nuostolių sumažinimo galimybes ir tai, ar tinklui keičiantis šis sprendimas bus reikšmingas. Tinkle yra dvi vietos, kuriose gali būti įrengiami kompensavimo įrenginiai, pastotė – 433 ir nuo 2028 metų pastotė– 436, kurios aktualumą reikėtų peržvelgti ateityje.
5. Nustatyta, kad atliekant ekonominę analizę ne visi optimizavimo projektai yra priimtini:
 - šuntinio reaktoriaus įrengimo pastotėje – 433 skaičiavimai parodė, kad atsipirkimo laikas yra du metai, o NPV – 38,5 mln. €. Šis projektas būtų toks pelningas ne tik dėl sumažinamų nuostolių dydžio tinkle, bet ir dėl sumažintų sisteminių paslaugų, kurias atlikinėdavo SK, esantis pastotėje – 432;
 - pastotėje – 438 nustatytiems trims skirtingiems įtampos valdymo įrenginiams atlikti ekonominiai skaičiavimai parodė neigiamą projektų NPV. Po pastebėto poreikio išaugimo ateityje šioje pastotėje perskaičiavus projekto ekonomine naudą ji išlieka neigiama, NPV -1,7 mln. € ;
 - perspektyviniame Lietuvos EES modelyje optimizavimo metu nustatyta, kad pastotėje – 436 įrengus įtampos valdymo įrenginį nuostolių sumažinimas būtų teigiamas ir įranga atsipirktų per dvyliką metų, NPV būtų 1,13 mln. €, o IRR 7,9 %.

Literatūros sąrašas

1. Khader, S. H.; Daud, A. K. K. Single-Phase AC Supply. In *Electric Renewable Energy Systems*; Elsevier, 2016; pp 156–182. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804448-3.00009-8>.
2. Schmill, J. V. Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1965, 84 (9), 825–832. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766262>.
3. Ng, H. N.; Salama, M. M. A.; Chikhani, A. Y. Classification of Capacitor Allocation Techniques. *IEEE Trans. Power Delivery* 2000, 15 (1), 387–392. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/61.847278>.
4. Masoum, M. A. S.; Ladjevardi, M.; Fuchs, E. F.; Grady, E. M. Optimal Placement and Sizing of Fixed and Switched Capacitor Banks under Nonsinusoidal Operating Conditions. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*; IEEE: Chicago, IL, USA, 2002; Vol. 2, pp 807–813. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043439>.
5. Masoum, M. A. S.; Ladjevardi, M.; Jafarian, A.; Fuchs, E. F. Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms. *IEEE Trans. Power Delivery* 2004, 19 (4), 1794–1801. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835438>.
6. Adedayo Ajenikoko, G.; Olakunle, O.; Olabode, E. Optimal Power Flow with Reactive Power Compensation for Cost and Loss Minimization On Nigerian Power Grid System. *IJEEI* 2017, 5 (3), 236–247. Prieiga per: <https://doi.org/10.11591/ijeei.v5i3.284>.
7. Bucciero, J.; Terbrueggen M. *Interconnected Power System Dynamics Tutorial 3 Edition*, 2015, 114–417.
8. *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*; Eremia, M., Shahidehpour, M., Eds.; IEEE Press Series on power engineering; IEEE Press/Wiley: Hoboken, New Jersey, 2013.
9. Jenkins, N.; Thornycroft, J. *Grid Connection of Photovoltaic Systems: Technical and Regulatory Issues 3 Edition*, 2018, 847-877.
10. Xu, L.; Yao, L.; Sasse, C. Grid Integration of Large DFIG-Based Wind Farms Using VSC Transmission. *IEEE Trans. Power Syst.* 2007, 22 (3), 976–984. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901306>.
11. Muller, S.; Deicke, M.; De Doncker, R. W. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2002, 8 (3), 26–33. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/2943.999610>.
12. Guo, Y.; Gao, H.; Wu, Q.; Østergaard, J.; Yu, D.; Shahidehpour, M. Distributed Coordinated Active and Reactive Power Control of Wind Farms Based on Model Predictive Control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2019, 104, 78–88. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.043>.
13. Šablinskas A.; Deksnys R.. Reaktyviosios galios ir energijos įkainojimas. *Energetika* 2002, 3, 22–29, 0235–7208.
14. Feng Guihong; Wang Fengxiang; Wang Jin. Design Principles of Magnetically Controlled Reactor. In *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical*

- Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501); Int. Acad. Publishers: Shenyang, China, 2001; Vol. 1, pp 212–214. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2001.970648>.
15. Z.Gajic.; B.Hillstrom,; F.Mekic. „HV shunt reactor secrets for protection engineers“
 16. Bačauskas A. Apie elektros energetikos sistemų technologijas be formulių. Vilnius: „Lietuvos energija“ (2010).
 17. LITGIRD. Lietuvos elektros perdavimo tinklų 10 metų plėtros planas [interaktyvus]. 2013–2015 [Žiūrėta 2019-11-11] Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/lietuvos-elektros-perdavimo-tinklu-10-metu-pletros-planas-/3850>
 18. LITGIRD. Baterijų energijos kaupimo sistema [interaktyvus]. 2013–2015 [Žiūrėta 2019-10-19] Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/naujienos-ir-ivykiai/naujienos/perdavimo-sistemos-operatorius-isbandys-naujove-bateriju-energijos-kaupimo-sistema/10128>
 19. VERSLO ŽINIOS. Sinchroninių kompensatorių pirkimas Lietuvoje [interaktyvus]. 2013–2015 [Žiūrėta 2019-09-19] <https://www.vz.lt/pramone/energetika/2020/02/17/technines-sinchroniniu-kompensatoriu-pirkimo-salygas-parengs-italijos-cesi>
 20. Rather, Z. H.; Chen, Z.; Thogersen, P.; Lund, P. Dynamic Reactive Power Compensation of Large-Scale Wind Integrated Power System. *IEEE Trans. Power Syst.* 2015, 30 (5), 2516–2526. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2365632>.
 21. Mohseni-Bonab, S. M.; Rabiee, A.; Mohammadi-Ivatloo, B. Voltage Stability Constrained Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch under Load and Wind Power Uncertainties: A Stochastic Approach. *Renewable Energy* 2016, 85, 598–609. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.021>.
 22. Neagle, N. M.; Samson, D. R. Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders [Includes Discussion]. *Trans. AIEE, Part III: Power Appar. Syst.* 1956, 75 (3), 4499390. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1956.4499390>.
 23. BAE, Y. G. Analytical method of capacitor allocation on distribution primary feeders. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, 97 (4), 1232–1238.
 24. Lee, S.; Grainger, J. Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.* 1981, PAS-100 (1), 345–352. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316862>.
 25. Salama, M. M. A.; Mansour, E. A. A.; Chikhani, A. Y.; Hackam, R. Control of Reactive Power in Distribution Systems with an End-Load and Varying Load Condition. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.* 1985, PAS-104 (4), 941–947. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319095>.
 26. Baran, M. E.; Wu, F. F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. *IEEE Trans. Power Delivery* 1989, 4 (1), 725–734. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/61.19265>.
 27. Ponnasikko, M.; Rao, K. S. Optimal Choice of Fixed and Switched Shunt Capacitors on Radial Distributors by the Method of Local Variations. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.* 1983, PAS-102 (6), 1607–1615. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317890>.
 28. Abdel-Salam, T. S.; Chikhani, A. Y.; Hackam, R. A New Technique for Loss Reduction Using Compensating Capacitors Applied to Distribution Systems with Varying Load Condition. *IEEE Trans. Power Delivery* 1994, 9 (2), 819–827. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/61.296262>.

29. Chis, M.; Salama, M. M. A.; Jayaram, S. Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies. *IEE Proc., Gener. Transm. Distrib.* 1997, 144 (3), 225. Prieiga per: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19970945>.
30. Tinney, William.; Hart, C. Power Flow Solution by Newton's Method. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.* 1967, PAS-86 (11), 1449–1460. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1967.291823>.
31. Saadat, H. *Power System Analysis*; McGraw-Hill series in electrical and computer engineering; WCB/McGraw-Hill: Boston, 1999.
32. Igbinoia, F. O.; Fandi, G.; Muller, Z.; Svec, J.; Tlustý, J. Cost Implication and Reactive Power Generating Potential of the Synchronous Condenser. In *2016 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*; IEEE: Prague, Czech Republic, 2016; pp 1–6. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2016.7539450>.
33. LIETUVOS BANKAS. Europos centrinio banko valiutų santykiai [interaktyvus]. 2020-05-07 [Žiūrėta 2020-05-15] Prieiga per internetą: https://www.lb.lt/lt/currency?class=Eu&type=day&date_day=2020-05-07¤cy=
34. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Dėl Litgrid AS perdavimo paslaugos kainos viršutinės ribos 2020 metams koregavimo [interaktyvus]. 2019-10-01 Nr. O5E-438 [Žiūrėta 2020-05-15] Prieiga per internetą: https://www.vert.lt/SiteAssets/posedziai/2019-10-02/1_litgrid_pazyma.pdf
35. LITGRID. Paslaugų palyginamasis kainoraštis [interaktyvus]. 2019-2020 [Žiūrėta 2020-05-15] Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/paslaugos/paslaugu-palyginamasis-kainorastis/2473>
36. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Dėl energetikos įmonių investicijų projektų derinimo valstybėje [interaktyvus]. 2019-04-01 Nr.O3E-94 [Žiūrėta 2020-05-10] Prieiga per internetą: https://www.vert.lt/Docs/nutarimas_2019_O3E-94.pdf
37. TASNWORKS. High voltage (HV) shunt capacitor bank standard R522695 [interaktyvus]. 2018-07 [Žiūrėta 2020-05-05] Prieiga per internetą: <https://www.tasnetworks.com.au/config/getattachment/b2593e7b-0e36-4db3-bd5e-4b5dc14f2a7e/HV-Shunt-Capacitor-Bank-Standard-pdf.pdf>
38. ABB. Shunt reactors. Proven history for future success [interaktyvus]. 2018 [Žiūrėta 2020-04-05] Prieiga per internetą: <https://library.e.abb.com/public/ffd575ce1063469ab24a6f94dd0cafd8/Shunt%20reactors%20brochure%202018.pdf>
39. LITGRID. Sisteminės paslaugos [interaktyvus]. 2020 [Žiūrėta 2020-05-15] Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/paslaugos/sistemines-paslaugos/31055>
40. KTU atliktas Lietuvos elektros energetikos sistemos adekvatumo vertinimas tikimybinio metodu [interaktyvus]. 2019-2030 [Žiūrėta 2020-05-15] Prieiga per internetą: https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/LEES_adekvatumo_vertinimo_santrauka.pdf?fbclid=IwAR1E7sMw3p9ADqOgSe4PRrk3zqxkEUbAGv3mKAHbw4-7ZuRU62VF-Hzq3LM