



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros tinklo su lanksčiais kintamos srovės perdavimo įrenginiais režimų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Laura Platakytė

Projekto autorė

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros tinklo su lanksčiais kintamos srovės perdavimo įrenginiais režimų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Laura Platakytė

Projekto autorė

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Prof. Saulius Gudžius

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laura Platakytė

Elektros tinklo su lanksčiais kintamos srovės perdavimo įrenginiais režimų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Laura Platakytė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Platakytė, Laura. Elektros tinklo su lanksčiais kintamos srovės perdavimo įrenginiais režimų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: FACTS, STATCOM, UPFC, SVC, reaktyvioji galia, aktyvioji galia, įtampos reguliavimas.

Kaunas, 2023. 57 p.

Santrauka

Šiame tiriamajame darbe nagrinėjamos lanksčių kintamosios srovės perdavimo sistemų (FACTS) galimybės valdyti elektros tinklo parametrus siekiant padidinti perdavimo tinklo galimybes integruoti didelės galios atsinaujinančius šaltinius. Tyrime nagrinėjami iššūkiai, susiję su didelės galios atsinaujinančių šaltinių integravimu į tinklą, ir nagrinėjami pagrindiniai tinklo parametrai. Apžvelgiami pagrindiniai FACTS įrenginiai ir jų funkcijos. Atliekama statinio sinchroninio kompensatoriaus (STATCOM) ir vieningo galios srauto valdiklio (UPFC) veikimo analizė naudojant Matlab Simulink programinės įrangos paketą. Naudojant PowerFactory programinį paketą analizuojamas 27 mazgų elektros perdavimo tinklo statinis modelis. Tinklo mazguose didinama generacija ir nustatomos maksimalios leistinos perdavimo linijų galimybės perduoti reikiamą galios srautą. Nustatomos UPFC įrenginio galimybės pagerinti tinklo galios perdavimo galimybes.

Platakytė, Laura. Research of Modes of Electrical Network with Flexible Alternating Current Transmission Systems. Master's Final Degree Project / supervisor assoc.prof. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: FACTS, STATCOM, UPFC, SVC, reactive power, active power, voltage regulation.

Kaunas, 2023. 57 p.

Summary

This research paper explores the potential of flexible alternating current transmission systems (FACTS) in enhancing power grid parameters to facilitate the integration of high-power renewable sources. The study addresses the challenges associated with integrating renewable sources into the grid and examines fundamental network parameters. The key FACTS devices and their functionalities are reviewed. Performance analysis of the static synchronous compensator (STATCOM) and unified power flow controller (UPFC) is conducted using the Matlab Simulink software package. Furthermore, a static model of a 27-node electricity transmission network is analyzed utilizing the PowerFactory software package. The study investigates the impact of increased generation at the network nodes and determines the maximum power transmission capabilities of the transmission lines. Finally, the paper assesses the potential of the UPFC device to enhance the power transmission capabilities of the grid.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Atsinaujinančių šaltinių plėtra ir susijusios problemos	12
1.2. Elektros tinklo parametrai	13
1.3. Galios srautai perdavimo linijose	14
1.4. Reaktyvios galios reguliavimas	15
1.4.1. Šuntinis kompensavimas	15
1.4.2. Nuoseklus kompensavimas	16
1.5. FACTS sistemos	17
1.5.1. SVC	19
1.5.2. STATCOM.....	21
1.5.3. SSSC.....	25
1.5.4. UPFC	27
2. Metodinė dalis.....	30
2.1. FACTS įrenginių charakteristikų tyrimo metodika.....	30
2.1.1. STATCOM modelio veikimo analizė	30
2.1.2. UPFC modelio veikimo analizė.....	34
2.2. Tiriamasis objektas.....	37
2.3. UPFC modelis	37
3. Eksperimentinė dalis	42
3.1. Esamo elektros tinklo analizė	42
3.2. Tinklo su padidinta generacija tyrimas.....	43
3.2.1. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 81.....	43
3.2.2. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 82.....	44
3.2.3. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 83.....	45
3.2.4. Apibendrinimas	46
3.3. Tinklo su padidinta vėjo generacija ir prijungtu UPFC tyrimas.....	48
3.3.1. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 102 ir Nr. 105.....	48
3.3.2. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 101 ir Nr. 106.....	50
3.3.3. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 111 ir Nr. 115.....	51
3.3.4. Apibendrinimas	52
Išvados	54
Literatūros sąrašas	55
Priedai.....	58
1 priedas. STATCOM modelis.....	58
2 priedas. STATCOM valdymo modelis.....	59
3 priedas. UPFC modelis	60
4 priedas. Tinklo schemas	61
5 priedas. Tinklo modelis programiniame pakete PowerFactory	65
6 priedas. UPFC prijungimas prie tinklo PowerFactory modelyje.....	66
7 priedas. Tyrimo rezultatai.....	69

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įtampos intervalai prijungimo prie elektros tinklo taške 110–300 kV [15]	13
2 lentelė. Įtampos intervalai prijungimo prie elektros tinklo taške 300-400 kV [15]	14
3 lentelė. Sinchroninių zonų dažnio palaikymo kokybės nustatymo parametrai [15]	14
4 lentelė. SVC ir STATCOM palyginimas [29].....	24

Paveikslų sąrašas

1 pav. Atsinaujinančių šaltinių instaliuotos galios pokytis Lietuvoje 2013-2022 metais [3]	12
2 pav. Ekvivalentinė galios srautų skaičiavimo schema [14]	14
3 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama be reaktyviosios galios kompensavimo [16]	15
4 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama su šuntiniu reaktyviosios galios kompensavimu[16]	16
5 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama su nuosekliu reaktyviosios galios kompensavimu[16]	16
6 pav. FACTS sistemų klasifikavimas pagal prijungimą prie elektros tinklo: (a) nuosekli, (b) šuntinė, (c) nuosekli-nuosekli, (d) nuosekli-šuntinė [17]	19
7 pav. Principinė SVC schema [20]	20
8 pav. SVC V-I charakteristika [20]	21
9 pav. STATCOM struktūrinė schema [23]	22
10 pav. Keitiklio išėjimo įtampa (V_S), tinklo įtampa (V_t) ir keitiklio srovė (I_q), kai (a) STATCOM veikia budėjimo režime, (b) talpiniu režimu, (c) induktyviu režimu [25]	23
11 pav. Vektorių diagrama, kai STATCOM dirba (a) talpiniu režimu, (b) induktyviu režimu [26]	23
12 pav. Jordanijos elektros sistemos mazgų įtampos be FACTS įrenginių, su prijungtu STATCOM 65 mazge ir su prijungtu SVC 80 mazge [30]	24
13 pav. SVC ir STATCOM V-I charakteristikų palyginimas [14]	25
14 pav. SSSC struktūrinė schema [23]	26
15 pav. a) SSSC veikimo režimai dviejų generatorių sistemoje ir vektorių diagramos, kai b) nėra kompensavimo, c) talpinis kompensavimas, d) induktyvus kompensavimas [32]	26
16 pav. UPFC struktūrinė schema [35]	27
17 pav. Vektorių diagramos atspindinčios skirtingus UPFC valdymo režimus a) įtampos valdymas, b) linijos varžos kompensavimas, c) fazės kampo keitimas, d) mišrus valdymas [36]	28
18 pav. Elektros tinklo su prijungtu STATCOM įrenginiu modelis	30
19 pav. 48 impulsų VSC modelis	31
20 pav. STATCOM valdymo schema [38]	33
21 pav. STATCOM įrenginio reaktyviosios galios kreivė	33
22 pav. Tinklo realios ir nustatytos įtampos kreivės	33
23 pav. STATCOM išėjimo įtampos (V_S), tinklo įtampos (V_t) ir STATCOM srovės (I_S) charakteristikos	34
24 pav. Elektros tinklo su prijungtu UPFC įrenginiu schema	34
25 pav. Aktyvioji galia linijoje L2	36
26 pav. Reaktyvioji galia linijoje L2	36
27 pav. Linijų aktyviosios galios srautai	36
28 pav. Linijų reaktyviosios galios srautai	37
29 pav. Dviejų įtampos šaltinių UPFC modelis [39]	38
30 pav. Nuosekliai prijungto VSC schema [40]	38
31 pav. Įtampos šaltinio pakeitimas srovės šaltiniu [39]	39
32 pav. Nuosekliaus įtampos šaltinio modelis [40]	40
33 pav. Statinis UPFC modelis [40]	41
34 pav. Perdavimo linijų apkrovos	42

35 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 81	43
36 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 81	44
37 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 82.....	44
38 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 82.....	45
39 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 83.....	45
40 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 83.....	46
41 pav. Tinklo aktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83.	47
42 pav. Tinklo reaktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83	47
43 pav. Tinklo mazgų įtampų vertės, kai generuojama maksimali galima galia mazguose Nr. 81-83	48
44 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 81.....	49
45 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 81.....	49
46 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 82.....	50
47 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 82.....	50
48 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 83.....	51
49 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 83.....	51
50 pav. Tinklo aktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr. 81-83, kai tinklas dirba su prijungtu UPFC	52
51 pav. Tinklo reaktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83, kai tinklas dirba su prijungtu UPFC	53
52 pav. Tinklo mazgų įtampų vertės, kai prijungtas prie tinklo UPFC ir generuojama maksimali galima galia mazguose Nr. 81-83 žiemos sezono metu	53

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AC – kintama srovė;

DC – nuolatinė srovė;

FACTS – lanksti kintamos srovės perdavimo sistema (ang. *flexible alternating current transmission system*);

GTO – pilnai valdomi tiristoriai (ang. *gate turn-off thyristor*);

HVDC – aukštos įtampos nuolatinė srovė (ang. *High-voltage direct current*)

IGBT – izoliuotosios užtūros dvipolis tranzistorius (angl. *Insulated-Gate Bipolar Transistor*);

IPFC – tarplinijiniai galios srauto valdikliai (ang. *interline power flow controller*);

PWM – impulso pločio moduliacija (ang. *pulse width modulation*)

SSSC – statinis sinchroninis nuoseklusis kompensatorius (ang. *static synchronous series compensator*);

STATCOM – statinis sinchroninis kompensatorius (ang. *static synchronous compensator*);

SVC – statinis reaktyviosios galios kompensatorius (ang. *static VAR compensator*);

TCPS – tiristoriais valdomas fazės keitiklis (ang. *thyristor controlled phase shifter*);

TCSC – tiristoriais valdomas nuoseklus kompensatorius (ang. *Thyristor-Controlled Series Capacitor*);

TOV – pereinamieji viršįtampiai (ang. *transient overvoltages*)

TSC – tiristoriais valdomas kondensatorius (ang. *thyristor-switched capacitor*);

TSR – tiristoriais valdomas reaktorius (ang. *thyristor-switched reactor*);

UPFC – vieningas galios srauto valdiklis (ang. *unified power flow controller*);

VE – vėjo elektrinė;

VSC – įtampos šaltinio keitiklis.

Įvadas

Dėl spartaus ekonominio augimo, energijos tiekimas tapo svarbiu veiksniu, lemiančių tvarią ekonomikos plėtrą. Didelis tradicinių išteklių naudojimas sukėlė problemas susijusias su išteklių trūkumu ir aplinkosauga.[1] Dėl šių priežasčių pasirašyti Kioto protokolas ir Paryžiaus susitarimas, kurių tikslas sumažinti į atmosferą išmetamų teršalų kiekį ir iki 2050 m neutralizuoti poveikį aplinkai. Susitarimai paskatino šalis sukurti naujas strategijas, susijusias su atsinaujinančių šaltinių plėtra ir vystymu, kad energetikos sistema taptų švaresnė, saugesnė ir tvaresnė.

Didėjantis elektros energijos poreikis ir diegiamų atsinaujinančių šaltinių kiekis tinkle sukelia didelius iššūkius elektros energetikos sistemai, kurie susiję su elektros energijos nuostoliais, įtampos stabilumu, sistemos patikimumu ir kokybe. Vienas iš sprendimų elektros sistemos stiprinimui – lanksčios kintamos srovės perdavimo sistemos (FACTS), kurių paskirtis valdyti sistemos parametrus ir padėti sistemai perduoti reikiamą galią, padidinant sistemos perdavimo pajėgumus. Šios sistemos gali padėti valdyti linijų pralaidumus, tinklo mazgų fazės kampą ir įtampos dydį.

Diegiant ir integruojant atsinaujinančius šaltinius ir FACTS atsižvelgiama į penkis pagrindinius reikalavimus [2]:

1. Kokie atsinaujinantys šaltiniai ir FACTS sistemos turėtų būti įdiegtos?
2. Kuriame sistemos taške turėtų būti įdiegtos?
3. Kaip ekonomiškai įvertinti jų reikiamą kiekį ir dydį?
4. Kaip koordinuoti kelių skirtingų tipų atsinaujinančių šaltinių, FACTS įrenginių ir tinklo sąveiką, kad geriausiai būtų išnaudotas jų veikimas ir pagerintas elektros sistemos patikimumas?
5. Kaip sureguliuoti apsaugos įtaisus, kad būtų išlaikytas tinklo patikimumas ir tinklo kokybės parametrai nustatytoje vertėse?

Tinkamas prijungimo vietos ir galios parinkimas sistemoje gali sumažinti eksploatacines išlaidas, užtikrinti aplinkos apsaugą, pagerinti įtampos valdymą ir galios nuostolius. Šiame darbe aptarti pagrindiniai elektros tinklo parametrai, apžvelgtos FACTS sistemos ir jų galimybės valdyti tinklo parametrus, atliktas tyrimas nustatant FACTS įtaką elektros perdavimo sistemos pralaidumui.

Baigiamojo darbo tikslas - ištirti lankstaus kintamosios srovės perdavimo sistemų (FACTS) galimybes valdyti elektros perdavimo tinklo parametrus, siekiant padidinti tinklo galimybes integruoti didelės galios atsinaujinančius šaltinius.

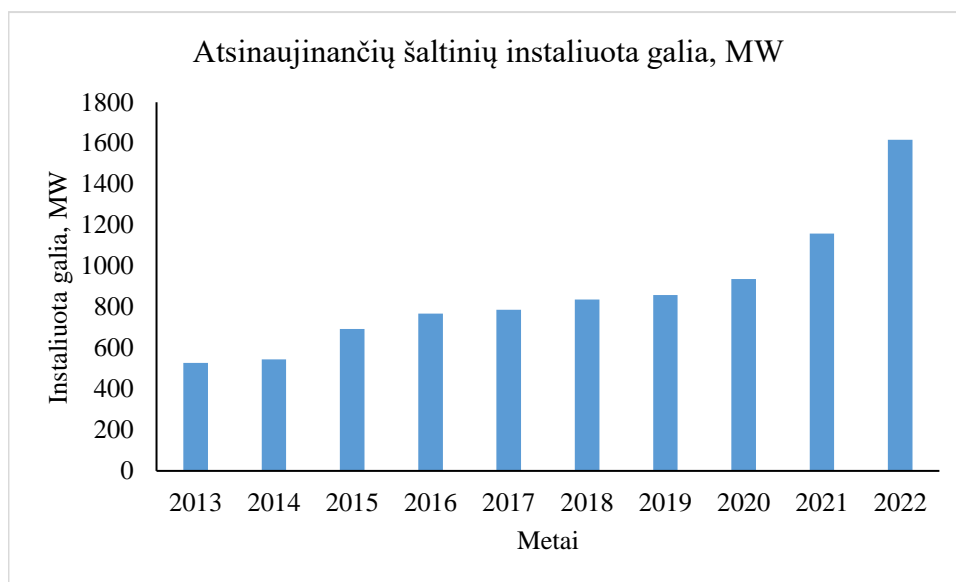
Uždaviniai:

1. išanalizuoti elektros tinklo ribinius režimus įtakojančius faktorius;
2. išnagrinėti FACTS technologijas ir jų galimybes valdyti elektros tinklo režimo parametrus;
3. išanalizuoti FACTS modelius, leidžiančius keisti elektros tinklo režimo parametrus;
4. sumodeliuoti elektros tinklą su prijungtais atsinaujinančiais šaltiniais ir FACTS sistemomis;
5. ištirti FACTS sistemų įtaką elektros tinklo pralaidumui, siekiant padidinti atsinaujinančių energijos šaltinių plėtros galimybes.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Atsinaujinančių šaltinių plėtra ir susijusios problemos

Norint neutralizuoti poveikį aplinkai iki 2050 m, tinkle pradėta sparčiai diegti atsinaujinančių šaltinių technologijos. 1 paveiksle pateiktas instaliuotos galios pokytis perdavimo tinkle 2013-2022 metais. Grafike matyti, jog atsinaujinančių šaltinių instaliuota galia sparčiai didėja. [3]



1 pav. Atsinaujinančių šaltinių instaliuotos galios pokytis Lietuvoje 2013-2022 metais [3]

Pagal Lietuvos nacionalinę energetinės nepriklausomybės strategiją prognozuojama, kad iki 2030 metų ne mažiau kaip 45 % Lietuvoje suvartojamos elektros energijos bus pagaminta iš atsinaujinančių šaltinių ir tai sudarys nemažiau kaip 7 TWh. Prognozuojama, kad didžiąją dalį – ne mažiau kaip 53 % elektros energijos, galėtų sudaryti vėjo energija. Iki 2050 metų numatyta, kad visa elektros energija bus pagaminama iš atsinaujinančių energijos šaltinių ir bus pagaminama nemažiau kaip 18 TWh.[4]

Sparčiausiai kinta saulės ir vėjo elektrinių instaliuotoji galia. [3] Numatoma sparti vėjo ir saulės energetikos plėtra apsunkina tinklo planavimą dėl energijos šaltinio nepastovumo, atsitiktinumo ir nekontroliavimo. Pagrindinės problemos susijusios su atsinaujinančių šaltinių plėtra yra šios:

1. Elektrinių kintamumas ir nenuspėjamumas. Ši problema susijusi su vėjo greičio ir saulės intensyvumo svyravimais, kuriuos prognozuoti sunku. Gali būti atliekamos metų, sezoninės ar kelių dienų prognozės. Trumpalaikiai svyravimai sunkiai nuspėjami ir turi įtakos tinklo kokybei, sukelia problemų balansuojant tinklą.[5]–[7]
2. Elektros tinklo stabilumas ir patikimumas. Staigūs vėjo ir saulės elektrinių galios pokyčiai gali sukelti problemas susijusias su įtampos ir dažnio svyravimais. Tai gali sukelti tinklo prastovas ir pažeisti elektros sistemos įrangą. [6]–[10]
3. Linijų perkrova. Didelės galios elektrinių parkų prijungimas gali sukelti problemų, tokių kaip perdavimo linijų perkrovimas. Dėl prijungtos didelės galios linijos pasieks savo perdavimo galimybių ribas ir susidarys tinklo perkrova. Šiai problemai spręsti yra du būdai – naujų perdavimo linijų statyba arba esamų elektros tinklų perdavimo galimybių didinimas.[7], [10], [11]

4. Energijos kaupimas ir balansavimas. Vėjo ir saulės energija yra nepastovi ir turi būti subalansuota su elektros tinklo paklausa. Tai sukelia problemų, nes vėjo ir saulės stiprumas ne visada gali būti pakankamas elektros energijos poreikiams tinkle. Energijos kaupimo sistemos tokios kaip kuro elementai ar vandenilio kaupimas, gali padėti sumažinti šiuos svyravimus. Tačiau šios technologijos yra brangios ir ne visada prieinamos. [6], [10], [12]
5. Aplinkosaugos problemos. Ši problema susijusi su vėjo elektrinių eksploatacija tinkle. Pagrindinės aplinkosaugos problemos yra gamtosauga, biologinių sistemų trikdymas, triukšmas, vizualinė tarša ir elektromagnetiniai trukdžiai. Šios problemos turi būti išspręstos siekiant užtikrinti, kad vėjo energija būtų tvarus ir aplinkai nekenksmingas energijos šaltinis.[13]

Darbe plačiau nagrinėjamas reaktyviosios ir aktyviosios galios valdymas tinkle. Dažnai dėl aplinkosauginių veiksnių ribojamos galimybės statyti naujas perdavimo linijas galios perdavimo galimybėms didinti. Dėl šios priežasties svarbu didinti esamų linijų perdavimo galimybes, kad būtų pagerinta atsinaujinančių išteklių integracija. Norint efektyviai išnaudoti esamus tinklus reikalingos sudėtingos, pažangios galios srautų ir įtampos valdymo sistemos – lanksčios kintamos srovės perdavimo sistemos (FACTS). Jos plačiau aptariamos 1.5 skyriuje.

1.2. Elektros tinklo parametrai

Pagrindiniai tikslai bet kurioje elektros energetikos sistemoje yra šie [14]:

1. Sistemos dažnis turi būti pastovus, nuolat reguliuojat generaciją ir apkrovas. Generuojama galia turi būti lygi prijungtomis apkrovoms.
2. Srovės srautai visose elektros sistemos taškuose turi būti stebimi ir kontroliuojami taip, kad nei vienas elektros sistemos elementas nebūtų perkrautas.
3. Įtampa visoje elektros sistemoje turi būti reguliuojama siaurame diapazone nuo 95% iki 105% vardinės įtampos vertės. Išskirtiniais atvejais, esant tam tikriems nenormaliems ar mažos apkrovos režimams gali būti leidžiamas nominalios įtampos svyravimas tarp 90% ir 110%.
4. Elektros sistema turi neprarasti stabilumo ir patikimai tiekti energiją vartotojams praradus bet kurią sistemos elementą. Sistema turi dirbti normaliu režimu net ir atsijungus didžiausiam sistemos generacijos blokui. Tai vadinama N-1 sistemos darbo režimu. Didelėse sistemose gali būti taikomas N-2 kriterijus, sistema turi sugebėti veikti be jokių rimtų sistemos sutrikimų ir nuostolių, kai du elementai atjungti.

Kiekvienoje elektros energetikos sistemoje taikomi skirtingi įtampos ir dažnio reikalavimai. Leistinos įtampos ir dažnio vertės Europoje aprašytos 2017 m. rugpjūčio 2 d. Komisijos reglamente (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės. Leistini dažnio ir įtampos parametrai pateikiami 1-3 lentelėje.

1 lentelė. Įtampos intervalai prijungimo prie elektros tinklo taške 110–300 kV [15]

Sinchroninė zona	Įtampos intervalas (santykiniais vienetais)
Žemyninės Europos	0,90-1,118
Šiaurės Europos	0,90-1,05
Didžiosios Britanijos	0,90-1,10
Airijos ir Šiaurės Airijos	0,90-1,118
Baltijos	0,90-1,118

2 lentelė. Įtampos intervalai prijungimo prie elektros tinklo taške 300-400 kV [15]

Sinchroninė zona	Įtampos intervalas (santykiniais vienetais)
Žemyninės Europos	0,90-1,05
Šiaurės Europos	0,90-1,05
Didžiosios Britanijos	0,90-1,05
Airijos ir Šiaurės Airijos	0,90-1,05
Baltijos	0,90-1,097

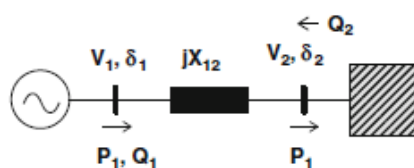
3 lentelė. Sinchroninių zonų dažnio palaikymo kokybės nustatymo parametrai [15]

	Žemyninė Europa	Didžioji Britanija	Airija ir Šiaurės Airija	Šiaurės Europa
Standartinio dažnio diapazonas	± 50 mHz	± 200 mHz	± 200 mHz	± 100 mHz
Didžiausias momentinis dažnio nuokrypis	800 mHz	800 mHz	1 000 mHz	1 000 mHz
Didžiausias nusistovėjusio dažnio nuokrypis	200 mHz	500 mHz	500 mHz	500 mHz
Dažnio susigrąžinimo laikas	naudojamas	1 minutė	1 minutė	naudojamas
Dažnio atkūrimo diapazonas	naudojamas	± 500 mHz	± 500 mHz	naudojamas
Dažnio atkūrimo laikas	15 minučių	15 minučių	15 minučių	15 minučių
Dažnio atkūrimo diapazonas	naudojamas	± 200 mHz	± 200 mHz	± 100 mHz
Pavojaus būsenos suaktyvinimo laikas	5 minutės	10 minučių	10 minučių	5 minutės

Aukščiau išvardyti reikalavimai turi būti tenkinami esant normaliam sistemos darbui, atsižvelgiant į planinius sistemos atjungimo grafikus. Taip pat šie reikalavimai turi būti tenkinami ir esant neplanuotam didelės apkrovos ar generacijos bloko atsijungimui.

1.3. Galios srautai perdavimo linijose

2 paveiksle pateiktos sistemos aktyvioji ir reaktyvioji galia apskaičiuojama pagal 1.1. ir 1.2. formules.



2 pav. Ekvivalentinė galios srautų skaičiavimo schema [14]

1.1. lygtis apibūdina galios srautus be nuostolių per trumpą perdavimo liniją. Pagal šią formulę matoma, kad norint perduoti aktyviąją galią reikalingas poslinkis tarp šaltinio ir apkrovos pusės fazinio kampo. Jei abejuose pusėse – tiek šaltinio, tiek apkrovos, įtampos fazė sutampa, aktyvioji galia negali būti perduota. Dėl šios priežasties tinkle reaktyvioji varža yra būtina, norint perduoti galios srautus kintamos srovės grandinėse. 3.2. lygytyje yra aprašoma reaktyvioji galia, kuri reikalinga abejuose linijos pusėse, kad galėtų tekėti aktyvioji galia. Ši lygtis apibūdina galios srautus simetrinėse grandinėse, kuriose įtampos dydis abejuose pusėse yra lygus. [14]

$$|P_1| = |P_2| = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) = \frac{V^2}{X} \sin\delta; \quad (1.1.)$$

$$|Q_1| = |Q_2| = \frac{V^2}{X_{12}} (1 - \cos\delta); \quad (1.2.)$$

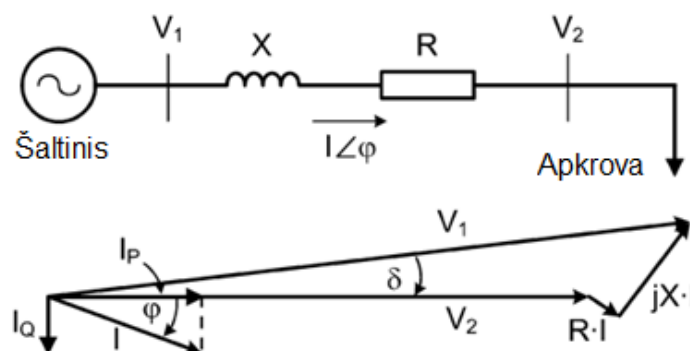
- čia V_1 – įtampa šaltinio taške, kurios amplitudė V_1 ir kampas δ_1 ;
- V_2 – įtampa apkrovos taške, kurios amplitudė V_2 ir kampas δ_2 ;
- X_{12} – linijos reaktyvioji varža;
- δ – elektrinis kampas tarp šaltinio ir apkrovos galų ($\delta = \delta_1 - \delta_2$);
- P_1 – aktyvioji galia perduodama iš šaltinio;
- P_2 – aktyvioji galia, kurią vartoja apkrova;
- Q_1 – reaktyvioji galia perduodama iš šaltinio;
- Q_2 – reaktyvioji galia perduodama iš apkrovos.

Įtampos dydis yra susijęs su reaktyviosios galios dydžiu. Kuo didesnis įtampos dydis, tuo daugiau reaktyviosios galios sukuriama. Tačiau tinkle yra svarbu palaikyti pakankamai aukštą įtampą, kad būtų išlaikomos apkrovos tinkle, tačiau ne per aukštą, kad įranga nebūtų sugadinta. Taip pat per didelis reaktyviosios galios kiekis riboja oro linijų ir požeminių kabelių ilgį, todėl kintamos srovės grandinėse turi būti kontroliuojamas reaktyvas, tam kad būtų galima perduoti reikiamą kiekį energijos per perdavimo linijas. Aktyviajai galiai perduoti reikalingas fazinis įtampos poslinkis ir jos dydis susijęs su dažniu. Visuose tinklo taškuose turi būti kontroliuojami aktyviosios ir reaktyviosios galios srautai, kurie yra susiję su įtampos ir dažnio verte.

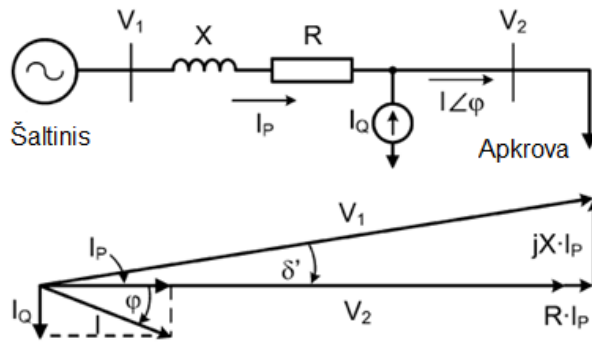
1.4. Reaktyvios galios reguliavimas

Reaktyvioji galia susidaro induktyviuose ir talpiniuose sistemos elementuose. Reaktyvioji galia perduodama kintamos srovės grandinėse. Ketvirtį periodo reaktyvioji galia kaupiama induktyviuose arba talpiniuose elementuose, o kitą ketvirtį – gražinama į tinklą. Prijungiant nuoseklius arba šuntinius kompensavimo įrenginius reaktyvioji galia gali būti valdoma sistemoje. 1.4.1. ir 1.4.2. skyreliuose aptartas teorinis šuntinis ir nuoseklus reaktyviosios galios kompensavimas.

1.4.1. Šuntinis kompensavimas



3 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama be reaktyviosios galios kompensavimo [16]



4 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama su šuntiniu reaktyviosios galios kompensavimu[16]

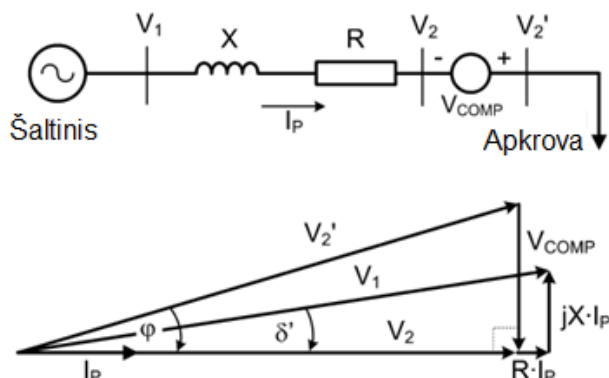
3 paveiksle pateikta schema ir vektorių diagrama, kai nėra atliekamas reaktyviosios galios kompensavimas. 4 paveiksle pateiktas principinis šuntinis reaktyviosios galios kompensavimas. Sistema sudaryta iš šaltinio (V_1), perdavimo linijos ir induktyvios apkrovos. Srovės vektorius nuo įtampos V_2 atsilieka tam tikru kampu, nes apkrova yra induktyvaus pobūdžio.

Jei reaktyvioji galia būtų tiekama netoli apkrovos, linijos srovė galėtų būti sumažinta iki minimumo, taip pat sumažėtų nuostoliai ir būtų pagerintas įtampos reguliavimas apkrovos taške. Tai gali būti atlikta prijungiant kondensatorių, ar įtampos šaltinį, ar srovės šaltinį. 3 paveiksle prijungiamas srovės šaltinis, kurio paskirtis kompensuoti apkrovos reaktyviają dedamąją (I_Q). Prijungus šaltinį, sistemos įtampos reguliavimas pagerinamas ir beveik pašalinama reaktyviosios srovės dedamoji iš šaltinio. Taip pat šuntiniu metodu gali būti kompensuojama ir talpinio pobūdžio dedamoji, kai srovės vektorius lenkia įtampos V_2 vektorių. [16]

Šuntinis kompensavimas naudojamas [16]:

- stabiliam ir dinaminiam įtampos valdymui;
- dinamių apkrovų reaktyviosios galios valdymui;
- aktyviosios galios svyravimų slopinimui;
- sistemos stabilumui gerinti.

1.4.2. Nuoseklus kompensavimas



5 pav. Ekvivalentinė sistemos schema ir vektorių diagrama su nuosekliu reaktyviosios galios kompensavimu[16]

Nuosekliam reaktyviosios galios kompensavimui taip pat gali būti naudojamas srovės ir įtampos šaltinis. Analizuojant nuoseklų kompensavimą naudojama ta pati sistema pateikta 3 paveiksle. 5 paveiksle pateikta nuoseklaus reaktyviosios galios kompensavimo schema ir vektorinė diagrama. Šiuo atveju įtampos šaltinis, kuris skirtas reaktyviosios galios kompensavimui, prijungiamas nuosekliai tarp linijos ir apkrovos. Šaltinio generuojama įtampa V_{COMP} yra priešingos krypties nei įtampos kritimas linijos induktyvumuose. Pridėjus generuojamą įtampos dedamąją V_{COMP} , pakeičiamas kampas ir apkrovos pusėje įtampa tampa V_2' . Įtampos šaltinis gali perduoti į sistemą norimo dydžio ir fazės įtampą, todėl gali veikti kaip kondensatorius arba induktorius. Tokiu būdu atliekamas nuoseklus reaktyviosios galios valdymas. Nuoseklus kompensavimas naudojamas [16]:

- sumažinti įtampos pasikeitimus tinkle dėl apkrovų (įtampos stabilumui gerinti);
- perdavimo sistemos varžai sumažinti;
- sistemos pereinamojo proceso stabilumui pagerinti;
- galios valdymui pasirinktose perdavimo linijose;
- sistemos svyravimų slopinimui.

1.5. FACTS sistemos

Pagrindinis elektros perdavimo tinklo uždavinys yra perduoti elektrinėse pagamintą energiją į paklausos centrus ir užtikrinti dviejų skirtingų elektros sistemų susijungimą, kad būtų užtikrintas patikimas, ekonomišką ir nenutraukiamas elektros energijos perdavimas vartotojams. Norint užtikrinti šias funkcijas, perdavimo tinklai turi gebėti lanksčiai ir efektyviai valdyti energijos srautus (reaktyviąją ir aktyviąją galią). Patikimam galios valdymui naudojamos lanksčios kintamos srovės perdavimo sistemos – FACTS. FACTS sistemos sudarytos iš elektroninių ir statinių valdiklių, kurių pagrindinė paskirtis pagerinti sistemos valdymą ir padidinti sistemos galios perdavimo galimybes.

Priklausomai nuo FACTS tipo ir paskirties, šios sistemos gali pagerinti perdavimo tinklo darbą šiais būdais [14]:

- gali atlikti pastovų reaktyviosios galios valdymą;
- gali atlikti pastovų kintamos srovės perdavimo linijų galios srautų valdymą;
- gali vienu metu valdyti ir aktyviąją, ir reaktyviąją galią;
- FACTS sistemos gali greitai reaguoti į sistemos pasikeitimus (per periodą ir trumpiau);
- šias sistemas galima įdiegti, atjungti ir vėl prijungti prie tinklo be jokių apribojimų;
- FACTS sistemos gali atlikti vidinę diagnostiką, todėl sistemos operatorius gali būti užtikrintas, kad valdikliai prireikus atliks savo funkcijas.

Pastovus FACTS sistemų valdymas padeda greitai elektros sistemą gražinti į stabilų režimą, atstatyti pagrindinius sistemos parametrus – dažnį ir įtampą. FACTS sistemos gali būti naudojamos galios srautams valdyti tarp perdavimo linijų. Dėl šios priežasties elektros energijos srautai gali būti perduoti iš didesnių nuostolių ir ribotas galios perdavimo galimybes turinčių sistemų taškų į patikimesnius ir didesnes galios perdavimo galimybes turinčius taškus. Tai leidžia sumažinti nuostolius ir padaryti ekonomišką elektros tinklą.

Pagrindiniai elementai, iš kurių susideda FACTS sistemos yra galios elektronikos elementai sudaryti iš puslaidininkių, kurie gali greičiau reaguoti nei elektromechaniškai valdomi įrenginiai, kurie įprastai naudojami elektros sistemos parametrų valdyme. Greitas valdiklių reagavimas į sistemos pokyčius leidžia pagerinti trumpalaikį sistemos stabilumą ir slopinti nuokrypius atsirandančius dėl trumpalaikių trikdžių.

Šių sistemų trūkumas – didelė kaina. Dėl šios priežasties svarbus tinkamas prijungimo vietos parinkimas. Blogai parinkus prijungimo vietą, investiciniai kaštai gali viršyti sutaupytos elektros energijos kainą. Šie įrenginiai gali leisti sumažinti papildomų perdavimo linijų tiesimą ir padėti sumažinti sistemos stiprinimo sąnaudas. Norint suprasti FACTS valdiklių taikymo efektyvumą kainos atžvilgiu, projektuotojai turi atlikti tinkamą tinklo analizę.[2]

Siūlomas dvejopas FACTS sistemų klasifikavimas [17]:

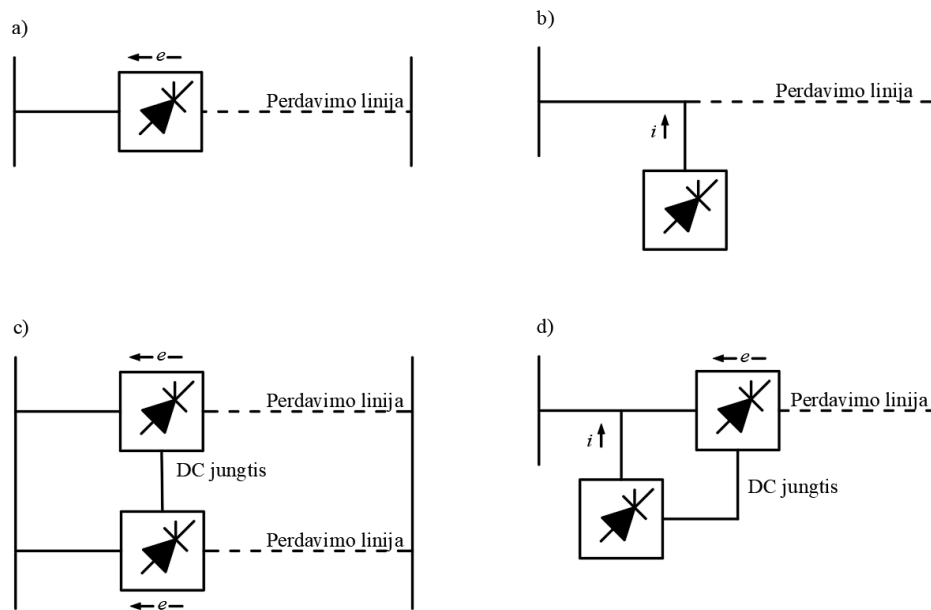
- pagal elementus naudojamus FACTS sistemoje;
- pagal prijungimo būdą prie tinklo.

Pagal naudojamus elementus FACTS sistemos gali būti klasifikuojamos į dvi kartas. Pirmajai kartai priskiriami elementai – tiristoriais valdomi kondensatoriai, reaktoriai ir reguliuojami fazės keitimo transformatoriai. Naudojant šiuos įrenginius buvo suskurtas statinis reaktyviosios galios kompensatorius (SVC), tiristoriais valdomas nuoseklus kondensatorius (TCSC) ir tiristoriais valdomas fazės keitiklis (TCPS). Antrajai kartai priskiriami keitikliai, kurie valdymui naudoja pilnai valdomus tiristorius (GTO). Šiai grupei priklauso statiniai sinchroniniai kompensatoriai (STATCOM), statiniai sinchroniniai nuoseklūs kompensatoriai (SSSC), vieningi galios srauto valdikliai (UPFC), tarplinjiniai galios srauto valdikliai (IPFC) ir kt. [17]

Pagal prijungimą prie elektros tinklo šios sistemos skirstomos į keturias grupes [17], [18]:

1. Nuoseklios FACTS sistemos. Tai gali būti valdomi kondensatoriai, reaktoriai ar galios elektronikos valdomas kintamas šaltinis. Šios sistemos prie tinklo jungiamos nuosekliai ir į tinklą nuosekliai perduoda įtampą. Vienos dažniausiai naudojamų sistemų yra tiristoriais valdomi nuoseklūs kondensatoriai (TCSC) arba statiniai sinchroniniai nuoseklūs kompensatoriai (SSSC), kurie bus aptarti 1.5.3. skyriuje.
2. Šuntinės FACTS sistemos. Jos taip pat sudarytos iš kondensatorių, reaktorių, galios elektronikos valdomų šaltinių. Ši sistema prie tinklo jungiama lygiagrečiai. Dažniausiai naudojami statiniai sinchroniniai kompensatoriai (STATCOM) ir statiniai reaktyviosios galios kompensatoriai (SVC), kurie bus aptarti 1.5.1. ir 1.5.2. skyriuose.
3. Nuoseklios-nuoseklios FACTS sistemos. Tai nuoseklių valdiklių junginys. Jis gali koordinuotai valdyti kelias perdavimo linijas. IPFC yra labiausiai paplitusi tokio tipo sistema;
4. Nuosekli-šuntinė FACTS sistema. Šios sistemos susideda iš nuosekliai ir lygiagrečiai prie tinklo prijungtų valdiklių, kurie koordinuotai valdomi kartu. Labiausiai paplitusi tokio tipo sistema – vieningas galios srauto valdiklis (UPFC), kuris aptartas 1.5.4. skyriuje.

Šių sistemų prijungimas prie tinklo atvaizduotas 6 paveiksle.



6 pav. FACTS sistemų klasifikavimas pagal prijungimą prie elektros tinklo: (a) nuosekli, (b) šuntinė, (c) nuosekli-nuosekli, (d) nuosekli-šuntinė [17]

Jei tinkle vyrauja problemos susijusios su aktyviosios galios valdymu, turi būti naudojami nuoseklūs valdikliai. Jei tinkle vyrauja problemos susijusios su įtampos, reaktyviosios galios valdymu – šuntiniai valdikliai.

1.5.1. SVC

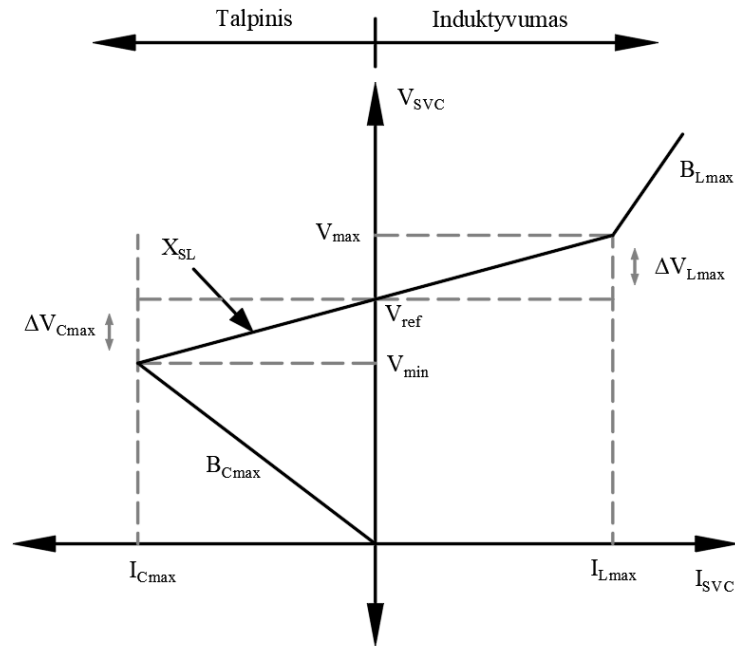
Vienas labiausiai paplitusių valdiklių yra statinis reaktyviosios galios kompensatorius (SVC). SVC gali vartoti arba tiekti reaktyviąją galią į tinklą ir valdyti sistemos įtampos dydį nustatytame lygyje. SVC privalumai [19]:

- reguliuoja įtampą tinkle;
- pagerina sistemos pereinamųjų procesų stabilumą;
- sumažina laikinuosius viršįtampius;
- slopina sub-sinchroninį rezonansą;
- gerina galios koeficientą;
- kompensuoja neigiamos sekos sroves, kurias sukelia asimetrinės apkrovos.

Tačiau šis įrenginys turi ir trūkumų, tokių kaip lėta reakcija, ribotas pralaidumas, didelė srovės harmonikų generacija dėl tiristoriais valdomo reaktoriaus. [19]

Šiame įrenginyje reaktyviosios galios valdymas realizuotas naudojant tiristorius, kurių persijungimų greitis didelis. SVC susideda iš tiristoriais valdomų reaktorių (TCR), tiristoriais valdomų kondensatorių (TSC), harmonikų filtrų ir/arba valdomu arba fiksuotų kondensatorių. Principinė schema pateikta 7 paveiksle.

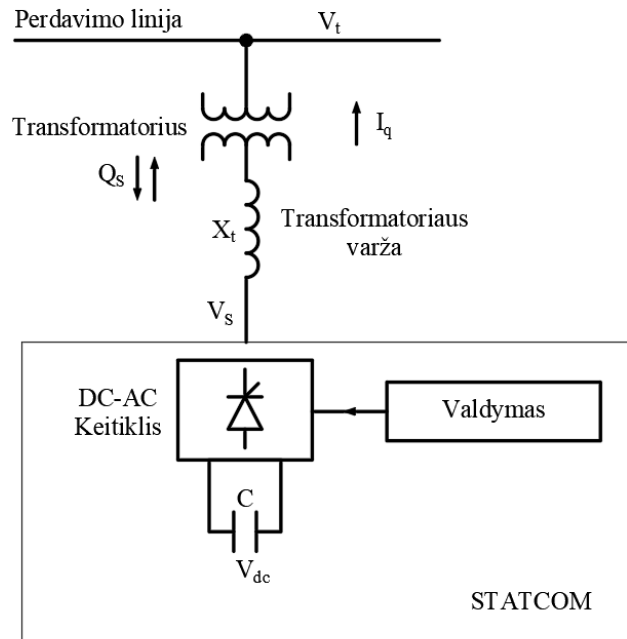
B_{SVC} reikšmė valdoma ir kinta $B_{SVC}^{min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC}^{max}$ ribose. SVC perduodama srovė į tinklą priklauso nuo TSC skaičiaus ir TCR atsidarymo kampo.



8 pav. SVC V-I charakteristika [20]

1.5.2. STATCOM

Statinis sinchroninis kompensatorius (STATCOM) yra skirtas reaktyviosios galios reguliavimui. Šis valdiklis naudojamas sistemos įtampai reguliuoti ir stabilumui padidinti. Jį sudaro iš galios elektronikos elementų sudarytas sinchroninės įtampos generatorius, kuris generuoja trifazę įtampą nuolatinės srovės jungtyje esančių kondensatorių pagalba. Generuojama įtampa yra sinchroniška prijungimo taške esančiai tinklo įtampai ir yra perduodama per transformatorių. STATCOM schema pateikta 9 paveiksle. Pagrindinis STATCOM elementas yra keitiklis. Kiekvienas keitiklis sudarytas iš tam tikro skaičiaus nuolatinės srovės kondensatorių su galios elektronikos jungikliais (GTO arba IGBT). Naudojant PWM technologiją, gaunama norimo dydžio sinusoidinė įtampa, kurios fazės poslinkis sutampa su prijungimo taške esančia įtampa. Keitiklio išėjimo įtampa beveik nepriklauso nuo įtampos prijungimo taške. [21], [22]



9 pav. STATCOM struktūrinė schema [23]

STATCOM įrenginys keičia įtampą prijungimo taške generuodamas į tinklą arba vartodamas iš tinklo reaktyviosios galios kiekį. Kai elektros tinklo įtampa žema, STATCOM generuoja reaktyviąją galią į tinklą, kai elektros tinklo įtampa aukšta – vartoja reaktyviąją galią. Perduodamas reaktyviosios galios kiekis (Q_s) išreiškiamas [24]:

$$Q_s = \frac{V_t^2}{X} - \frac{V_t V_s}{X} \cos \delta; \quad (1.8.)$$

čia V_t – įtampa prijungimo taške;

V_s – STATCOM įtampos šaltinio generuojama įtampa;

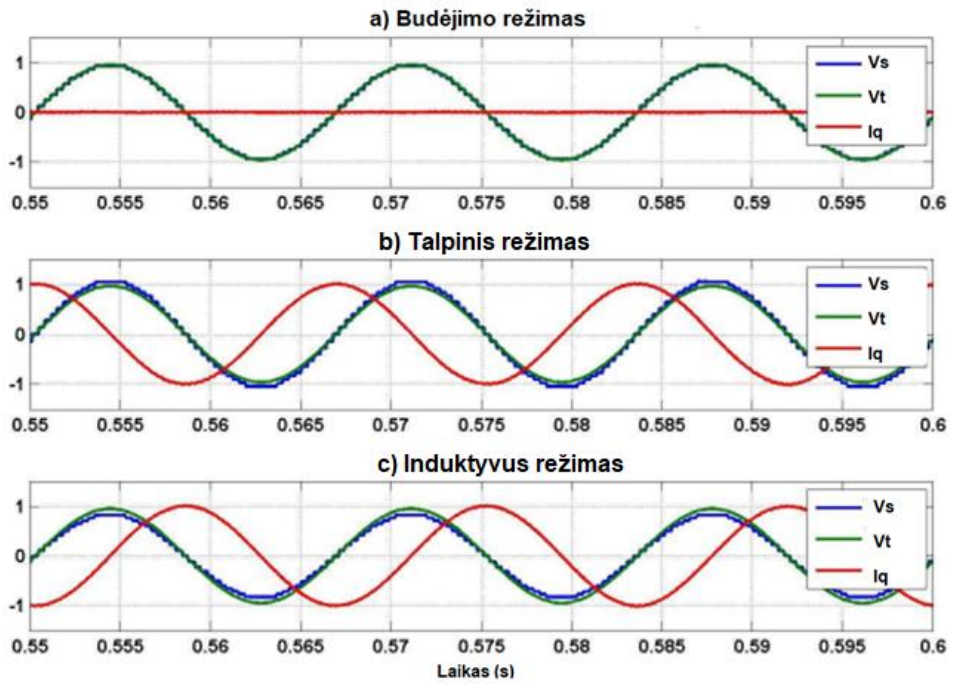
X_t – transformatoriaus varža;

δ – fazių skirtumas tarp keitiklio ir tinklo įtampos.

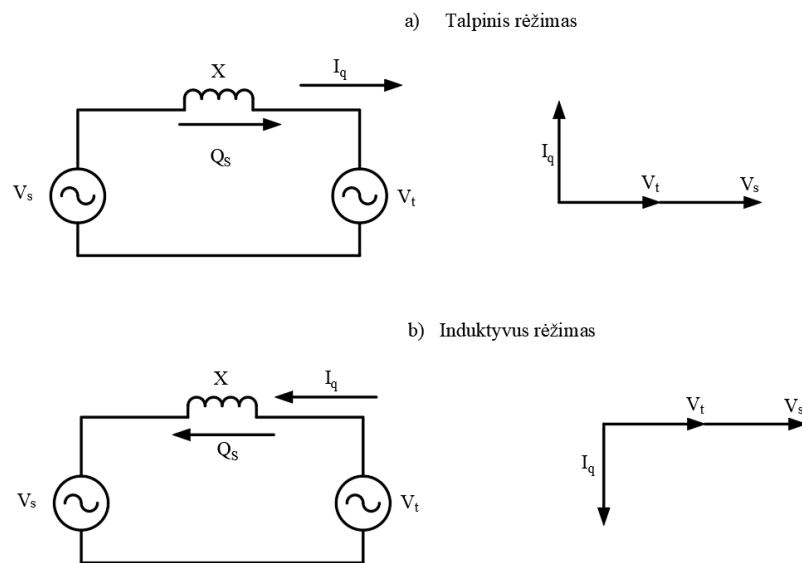
Kai STATCOM yra budėjimo režime, V_t ir V_s yra vienodo dydžio ir fazės. Nevyksta reaktyviosios galios mainai tarp STATCOM ir tinklo, kaip pateikta 10 (a) paveiksle. Kai STATCOM išėjimo įtampos amplitudė didesnė nei elektros tinklo ($V_s > V_t$), srovė (I_q) teka iš STATCOM į elektros tinklą, reaktyvioji galia perduodama į tinklą ir STATCOM dirba talpiniu režimu. Priešingu atveju, kai ($V_s < V_t$), srovė teka iš tinklo į keitiklį ir STATCOM vartoja reaktyviąją galią ir dirba induktyviu režimu. STATCOM išėjimo srovė (I_q) priklauso nuo tiristorių atsidarymo kampo, kurį lemia fazės poslinkis tarp keitiklio įtampos V_s ir tinklo V_t . Priklausomai nuo tiristorių atsidarymo kampo, keičiasi nuolatinės srovės kondensatoriaus įkrovimo būseną ir kartu kinta keitiklio išėjimo įtampa. Srovė gali būti išreiškiama[24]:

$$I_q = \frac{V_t - V_s}{X}; \quad (1.9.)$$

Kietiklio srovė, tinklo ir keitiklio išėjimo įtampos pateikiamos 10 paveikslėlio grafikuose. Vektorių diagramos dirbant talpiniu ir induktyviu režimu pateiktos 11 paveiksle.



10 pav. Keitiklio išėjimo įtampa (V_S), tinklo įtampa (V_t) ir keitiklio srovė (I_q), kai (a) STATCOM veikia budėjimo režime, (b) talpiniu režimu, (c) induktyviu režimu [25]



11 pav. Vektorių diagrama, kai STATCOM dirba (a) talpiniu režimu, (b) induktyviu režimu [26]

STATCOM atlieka panašias funkcijas kaip ir SVC [14]:

- įtampos reguliavimas ir valdymas;
- stabilios sistemos galios perdavimo galimybių padidinimas;
- pereinamojo sistemos proceso stabilumo pagerinimas;
- sistemos svyravimų slopinimas;
- sub-sinchroninių elektros sistemų svyravimų slopinimas;
- kiekvienos fazės apkrovos subalansavimas;

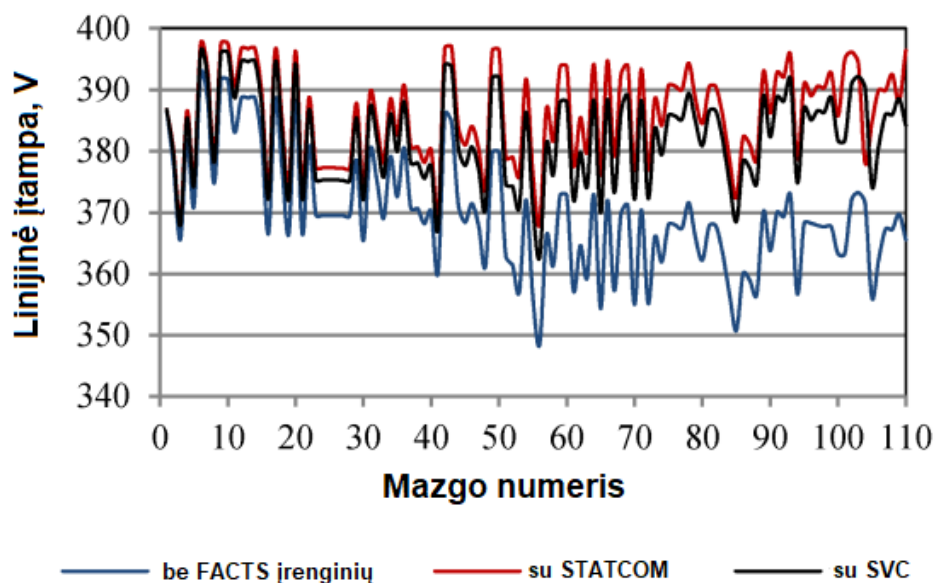
- AC-DC keitiklių ir HVDC jungčių reaktyviosios galios kompensacija;
- elektros kokybės gerinimas;
- galimybė taikyti su energijos kaupimu.

Visas šias funkcijas išskyrus paskutinę gali atlikti ir SVC valdikliai. Galimas energijos kaupimas tik jei VSC yra prijungtas prie energijos šaltinio, pvz. akumuliatorių baterijos. STATCOM gali kaupti ir vėliau perduoti energiją į elektros tinklą.

Atlikti tyrimai rodo, jog STATCOM atlieka reaktyviosios galios valdymą geriau nei SVC. STATCOM gali suteikti daugiau reaktyviosios galios esant vienodoms sąlygoms ir įrenginių talpumams. Taip pat STATCOM greičiau reaguoja į pasikeitimus sistemoje lyginant su SVC, todėl turi pranašumą avarijų metu [27]–[29]. Įrenginių skirtumai dinaminio stabilumo metu gali būti apibendrinti 4 lentelėje. Taip pat atlikti tyrimai parodė STATCOM pranašumą gerinant sistemos galios perdavimo galimybes. 12 paveiksle pateiktas Jordanijos elektros sistemos mazgų įtampos prijungus prie sistemos SVC ir STATCOM įrenginius optimaliausiuose prijungimo taškuose. Iš grafiko matyti, kad STATCOM poveikis elektros sistemos įtampų pasikeitimui yra ryškesnis nei SVC. [30]

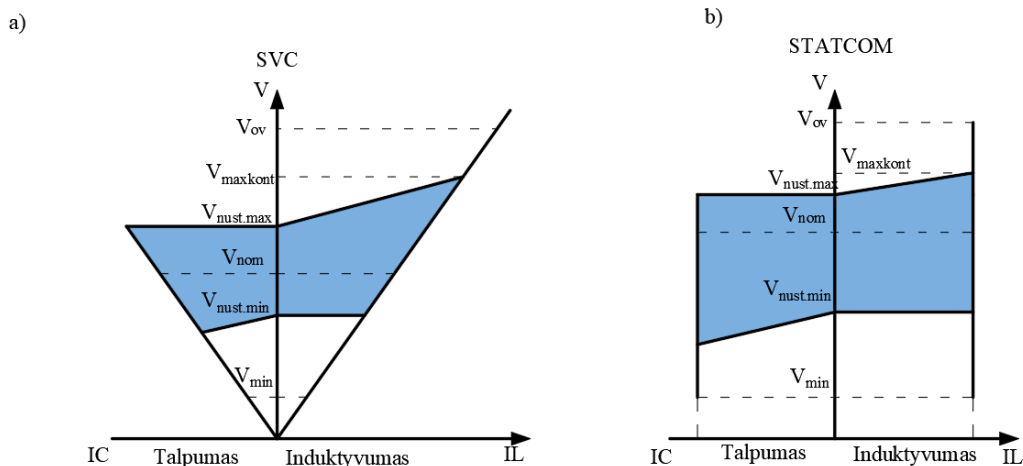
4 lentelė. SVC ir STATCOM palyginimas [29]

SVC	STATCOM
Lėtesnė reakcija nei STATCOM.	Greita reakcija pereinamųjų procesų metu.
Sukuria daugiau harmonikų.	Sukuria mažiau harmonikų.
Ribotas valdymas esant žemoms įtampoms.	Net kai įtampa artima 0 STATCOM gali generuoti nominalią srovę.
Šuntinio ar talpinio pobūdžio valdomas šuntas.	Įtampos šaltinis, kuris sinchronizuojasi su elektros sistema per šuntą.



12 pav. Jordanijos elektros sistemos mazgų įtampos be FACTS įrenginių, su prijungtu STATCOM 65 mazge ir su prijungtu SVC 80 mazge [30]

STATCOM ir SVC galima palyginti pagal V-I charakteristikas (žr. 13 pav).



13 pav. SVC ir STATCOM V-I charakteristikų palyginimas [14]

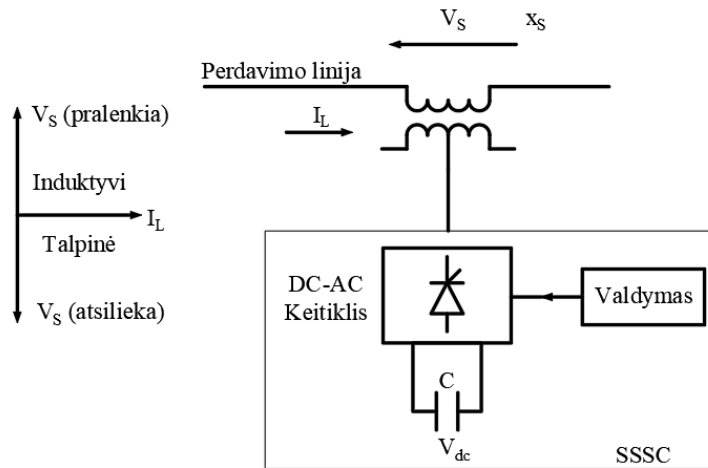
Šiose charakteristikose parametrai:

- V_{nom} – nominali AC sistemos įtampa;
- $V_{maxkont}$ – maksimali įtampa, prie kurios sistema gali dirbti nepertraukiamai;
- $V_{nust.max}$ – maksimali valdymo sistemos atskaitinė įtampa;
- $V_{nust.min}$ – minimali valdymo sistemos referencinė įtampa;
- V_{ov} – maksimalus viršįtampis, prie kurio sistema suprojektuota veikti;
- V_{min} – minimali įtampa prie, kurios galima valdyti puslaidininkinius elementus;
- I_C – talpuminė išėjimo srovė;
- I_L – induktyvinė išėjimo srovė.

STATCOM veikimo charakteristika platesnė, jis gali užtikrinti vardinę išėjimo reaktyviają srovę net ir esant labai žemai įtampai. Tačiau daugumoje perdavimo sistemų šuntinio tipo FACTS valdiklių veikimas yra ribotas, kai įtampa žemesnė nei 80% nominalios vertės. Tačiau dėl puslaidininkinių naudojamų STATCOM įrenginiuose, šios sistemos sunkiau reaguoja į viršįtampius. Šiai problemai išspręsti kuriamos hibridinės STATCOM sistemos su TSR ir TSC įrenginiais, kurios leidžia valdyti didelius pereinamuosius viršįtampius (TOV). Sujungus STATCOM ir SVC technologijas gaunamas patikimesnis, pranašesnis, tvirtesnis, greitesnis ir mažesnius nuostolius turintis valdiklis, kuris gali geriau valdyti įtampos sumažėjimą ir padidėjimą tinkle, atlikti TOV šalinimą. [14] Dėl STATCOM pranašumų prieš SVC 2.1.1. skyriuje analizuojamas šios sistemos veikimas.

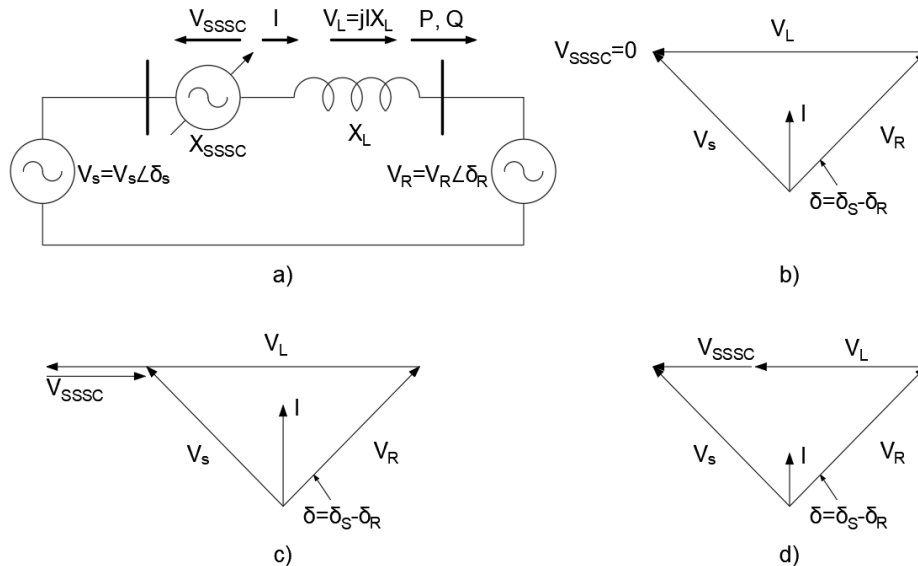
1.5.3. SSSC

Statinis sinchroninis nuoseklus kompensatorius (SSSC) yra nuosekliai prijungtas FACTS valdiklis. Jis į tinklą perduoda kintančios amplitudės beveik sinusoidinę įtampą. SSSC prilygsta kintamai induktyvaus arba talpinio pobūdžio reaktyviajai varžai, kuri prijungta nuosekliai prie tinklo. SSSC susideda iš įtampos šaltinio, kuris prie perdavimo linijos prijungtas nuosekliai per transformatorių. Taip pat sudarytas iš energijos kaupiklio, kuris gali būti akumuliatorius arba kondensatorius. Keitiklis gali nuosekliai į tinklą perduoti kintamą kiekį įtampos, kuri nepriklauso nuo linijos srovės. Tai leidžia SSSC sparčiai ir efektyviai valdyti reaktyvą tarp linijos galų ir pakankamai gerai dirbti su didelėmis ir mažomis apkrovomis [31], [32]. 14 paveiksle pateikta SSSC struktūrinė schema.



14 pav. SSSC struktūrinė schema [23]

15 paveiksle pateikti įvairūs SSSC veikimo principai paprastame dviejų generatorių modelyje esant statiniam režimui. SSSC vaizduojamas kaip kintamos įtampos šaltinis, kuris į tinklą perduoda kompensacinę įtampa (V_{SSSC}). Perduodama įtampa (V_{SSSC}) pralenkia arba atsilieka nuo perdavimo linija tekančios srovės ir veikia induktyviu arba talpiniu režimu. Kai nėra atliekamas reaktyviosios galios kompensavimas $V_{SSSC} = 0$ (žr. 15 (b) pav.). Talpinis kompensavimas pateiktas 15 (c) paveiksle. Šiuo režimu sumažėja induktyvioji varža ir padidėja linijos srovė. Tai leidžia padidinti linijos perdavimo galimybes. 15 (d) paveiksle pavaizduotas SSSC induktyvus režimas. Šiuo režimu perduodama galia sumažėja dėl į liniją perduoto induktyvaus pobūdžio reaktyvo.



15 pav. a) SSSC veikimo režimai dviejų generatorių sistemoje ir vektorių diagramos, kai b) nėra kompensavimo, c) talpinis kompensavimas, d) induktyvus kompensavimas [32]

Reaktyviosios (Q) ir aktyviosios (P) galios mainai prijungimo mazge apskaičiuojami pagal 4.8. ir 4.9. formules. SSSC reaktyvioji varža (X_{SSSC}) yra induktyvaus arba talpinio pobūdžio, nuosekliai prijungta prie perdavimo linijos, kurios induktyvioji varža X_L . [31]

$$P = \frac{V^2}{X_{eff}} \sin \delta = \frac{V^2}{X_L \left(1 - \frac{X_{SSSC}}{X_L}\right)} \sin \delta; \quad (1.10.)$$

$$Q = \frac{V^2}{X_{efff}} (1 - \cos\delta) = \frac{V^2}{X_L(1 - \frac{X_{SSSC}}{X_L})} (1 - \cos\delta); \quad (1.11.)$$

čia P - aktyvioji galia SSSC prijungimo mazge;

V – įtampa prijungimo mazge;

X_{efff} – linijos efektyvusis reaktyvas;

δ - elektrinis kampas tarp dviejų mazgų;

X_L – linijos induktyvioji varža;

X_{SSSC} – SSSC įrenginio reaktyvioji varža;

Q – reaktyvioji galia SSSC prijungimo mazge.

X_{efff} yra linijos efektyvusis reaktyvas tarp sistemos mazgų įvertinus į liniją perduodamą kintamą reaktyvumą iš keitiklio įtampos šaltinio. SSSC keitiklio sukuriama reaktyvioji varža (X_{SSSC}) yra neigiama, kai dirba induktyviu režimu, teigiama – kai dirba talpiniu režimu.

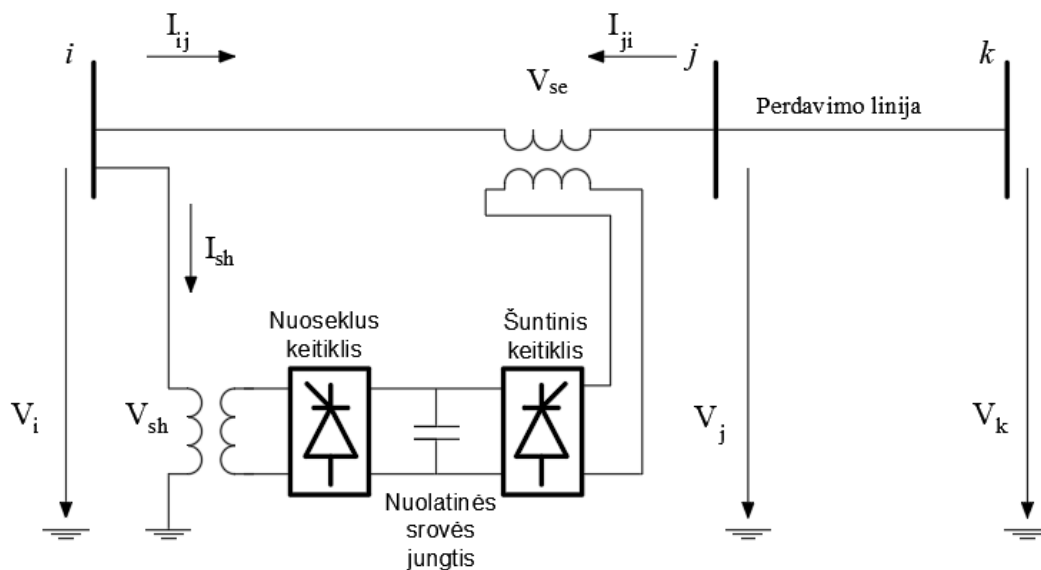
SSSC funkcijos [14], [31], [32]:

- ilgų perdavimo linijų kompensavimas, kad būtų padidintas pralaidumas;
- galios srautų valdymas, kad būtų išvengta galios žiedinių srautų (ang. *Loop-flows*) arba sumažinta linijų perkrova;
- įtampos reguliavimas linijos gale radialiniame tinkle;
- pereinamojo ir dinaminio stabilumo gerinimas (galios svyravimų slopinimas).

1.5.4. UPFC

Vieningas galios perdavimo valdiklis (UPFC), tai kombinuotas nuoseklus – šuntinis kompensavimo įrenginys, kuris gali atlikti abiejų tipų (šuntinio ir nuoseklaus) valdiklių funkcijas, kurios aptartos 1.5.2.-1.5.3. skyriuose. Pagrindinės šio įrenginio funkcijos [14], [33], [34]:

- pereinamųjų procesų stabilumo pagerinimas;
- galios svyravimų slopinimas;
- įtampos stabilumo pagerinimas.

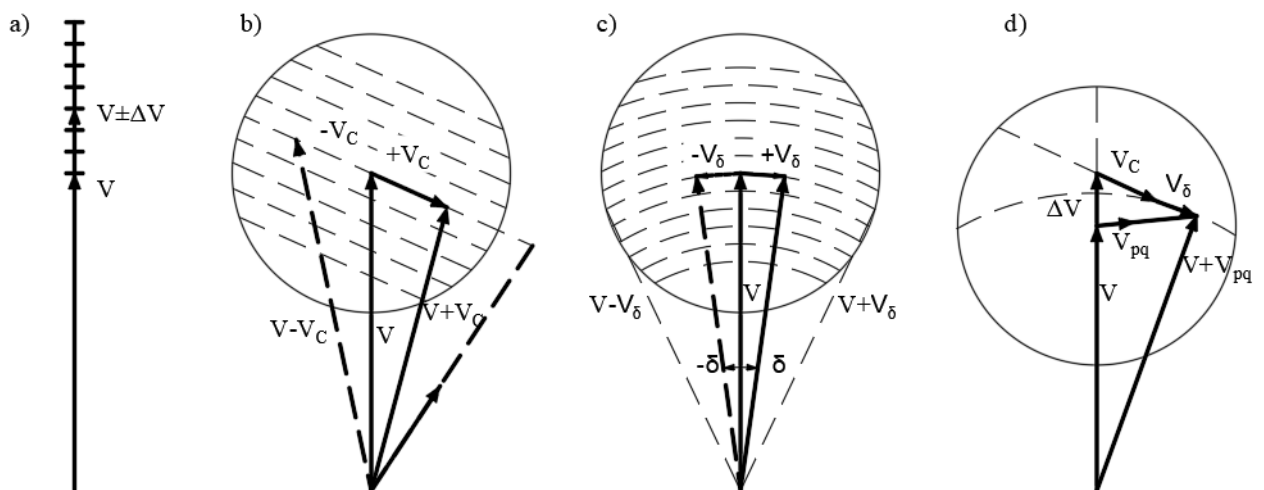


16 pav. UPFC struktūrinė schema [35]

UPFC susideda iš nuoseklaus ir šuntinio keitiklio (žr. 16 pav.), kurie sujungti per nuolatinės srovės jungtį. Pirmasis keitiklis naudojamas aktyviajai galiai perduoti iš elektros tinklo į DC jungtį, kad būtų užtikrinami 2 keitiklio poreikiai. Taip pat jis gali vartoti arba generuoti reaktyvią galią prijungimo taške. 2 keitiklis veikia kaip įtampos šaltinis, kuris generuoja kintamo dydžio ir fazės kampo įtampą, kuri perduodama per nuosekliai prie perdavimo tinklo prijungtą transformatorių.[35]

UPFC režimai [34]:

1. Šuntinis keitiklis. Šuntinis keitiklis veikia taip, kad į perdavimo liniją perduotų valdomą srovę (I_{sh}). Ši srovė susideda iš dviejų komponentių. Viena šios srovės komponentė skirta subalansuoti nuoseklaus keitiklio aktyviają galią. Kita srovės komponentė skirta reaktyviosios galios valdymui prijungimo taške ir gali būti talpinio ar induktyvaus pobūdžio. Šuntinio keitiklio reaktyvo kompensavimo režimai panašūs į prieš tai aptartų STATCOM ir SVR įrenginių kompensavimą.
 - a. Reaktyvo valdymo režimas. Šio režimo metu reguliuojamas reaktyvios galios (induktyvaus arba talpinio pobūdžio) srautas į perdavimo liniją. Šuntinis keitiklis reguliuodamas srovę I_{sh} į tinklą perduoda reikiamą kiekį reaktyvo.
 - b. Automatinis įtampos valdymo režimas. I_{sh} automatiškai valdoma, kad prijungimo taške palaikytų nustatytą įtampos vertę.
2. Nuoseklus keitiklis. Šis keitiklis į tinklą perduoda reikiamo dydžio ir fazės kampo įtampą. Galimi keli valdymo būdai:
 - a. Tiesioginis įtampos perdavimo režimas. Perduodama nustatytos vertės ir fazės kampo įtampa į tinklą.
 - b. Fazinio kampo keitimo režimas. Fazės kampo tarp linijos abiejų galų keitimas pagal nustatytą vertę.
 - c. Linijos varžos keitimo režimas. Keičiama linijos varža pagal nustatytą vertę.
 - d. Automatinis galios valdymo režimas. Reaktyvios ir aktyvios galios palaikymas nustatytose vertėse perdavimo linijoje nepriklausomai nuo elektros tinklo pasikeitimų.



17 pav. Vektorių diagramos atspindinčios skirtingus UPFC valdymo režimus a) įtampos valdymas, b) linijos varžos kompensavimas, c) fazės kampo keitimas, d) mišrus valdymas [36]

17 paveikslas atspindi valdymo režimus. 17 (a) paveiksle pateiktas įtampos valdymas, kai iš nuoseklaus keitiklio į sistemą perduodama reikiamo dydžio įtampa ΔV , kuri yra tokio pat fazės kampo, kaip ir tinklo įtampa. Šiuo atveju tarp nuoseklaus keitiklio ir sistemos yra aktyviosios galios mainai, kuriuos kompensuoja šuntinis keitiklis.

17 (b) paveiksle pateiktas linijos varžos kompensavimas. Tinkle nustatomas fazės poslinkis tarp tinklo įtampos ir srovės, kuris atsiranda dėl linijos reaktyvumo. Į tinklą perduodama tokio fazės kampo įtampa, kad panaikintų šį reaktyvumą. Ši įtampa veikia kaip reaktyvioji varža, kuri pakeičia perdavimo linijos varžą. Tai padeda sumažinti ilgų linijų nuostolius ir įtampos pasikeitimus linijos gale, kurie susidaro dėl linijos reaktyvumo.

17 (c) paveiksle pateiktas fazės kampo keitimas. Nustačius fazės kampą, kuriuo turi veikti sistema, apskaičiuojama įtampa, kuri turi būti perduodama į tinklą, kad būtų pasiektas nustatytas sistemos kampas. Šiuo atveju įtampos dydis sistemoje nepasikeičia, keičiasi tik fazės kampas.

17 (d) paveiksle pateiktas mišrus valdymas. Pagrindinis UPFC įrenginio privalumas yra galimybė vienu metu atlikti daugiau nei vieno parametro valdymą. Vektorių diagramoje pateiktas įtampos valdymas, nuoseklus talpinės varžos kompensavimas ir fazės kampo keitimas. Šios funkcijos leidžia valdyti reaktyviąją ir aktyviąją galią. UPFC galios valdymo modelis analizuojamas 2.1.1. skyriuje. 2.3. skyriuje aprašomas UPFC matematinis modelis skirtas galios valdymui statiniame sistemos režime.

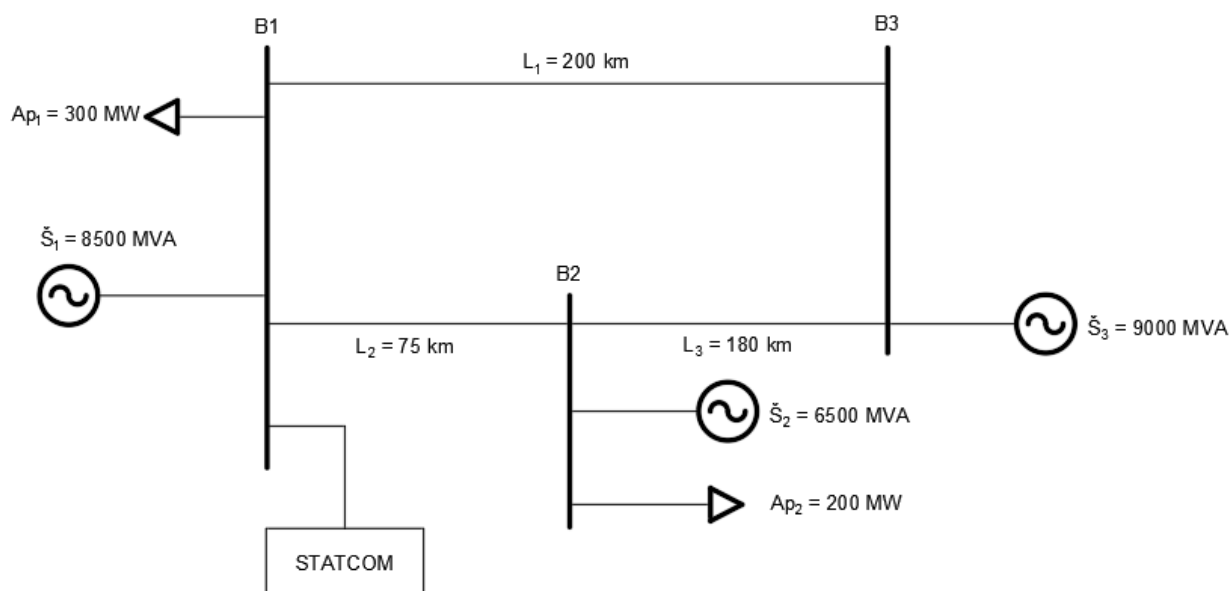
2. Metodinė dalis

2.1. FACTS įrenginių charakteristikų tyrimo metodika

2.1.1. STATCOM modelio veikimo analizė

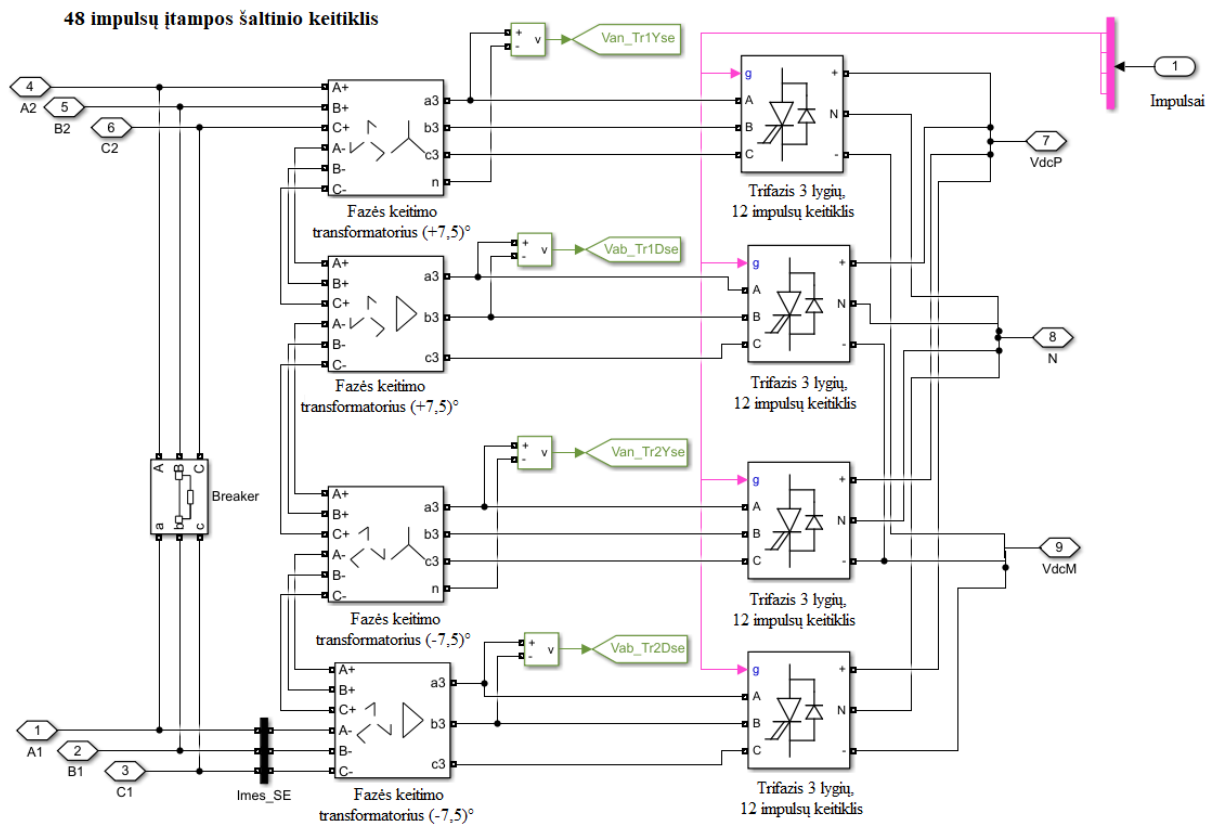
1.5.2. skyriuje aptartas statinis sinchroninis kompensatorius reguliuoja sistemos įtampą generuodamas arba vartodamas reaktyviają galią. STATCOM gali reguliuoti išėjimo srovę (talpinio arba induktyvaus pobūdžio) nepriklausomai nuo kintamos srovės sistemos įtampos.

STATCOM modeliuojamas Matlab Simulink programiniame pakete. Tinklas sudarytas iš trijų šaltinių, kurių galios yra atitinkamai lygios 8500 MVA, 6500 MVA ir 9000 MVA. Prie tinklo prijungiamas 100 MVar galios STATCOM įrenginys (žr. 18 pav.). Matlab Simulink modelis pateiktas 1 priede.



18 pav. Elektros tinklo su prijungtu STATCOM įrenginiu modelis

STATCOM įtampos šaltinis sudarytas iš pilnai valdomų tiristorių (GTO, ang. *Gate turn-off thyristor*). Trijų lygių 48 impulsų įtampos šaltinis (VSC) naudojamas norint gauti sinusoidinę įtampą su mažu harmonikų kiekiu. VSC susideda iš keturių trifazių, 3 lygių 12 impulsų keitiklių, kurie sujungti su fazių perjungimo transformatoriais (PST, ang. *phase shifting transformers*) sudarančiais $\pm 7,5^\circ$ fazės kampo poslinkį (žr. 19 pav.). 12 impulsų keitikliai jungiami nuosekliai vienoje pusėje su atitinkamais fazių poslinkiais tarp jų, kad sudarytų 48 impulsų įtampos šaltinio keitiklį. Dviejų transformatorių antrinės apvijos sujungtos trikampiui, o kitų dviejų nežeminta žvaigžde. Toks metodas yra vienas paprasčiausių. Nuolatinės srovės jungtį atitinka kondensatoriai, kurie nuosekliai prijungti prie STATCOM.



19 pav. 48 impulsų VSC modelis

Kiekvienas 3 lygių keitiklis generuoja tris kvadratinės įtampos, kurių reikšmė gali būti teigiama ($+V_{DC}$), neigiama ($-V_{DC}$) ir lygi 0. Kiekvienos įtampos ($+V_{DC}$ ir $-V_{DC}$) lygio trukmė gali būti reguliuojama nuo 0° iki 180° priklausomai nuo perduodamų impulsų į keitiklius. STATCOM valdiklio blokas (žr. 2 priedą) generuoja impulsus, kurie perduodami į keitiklius. Kiekvienas keitiklis susideda iš GTO ir diodų elementų porų. GTO elementai veikia kaip jungikliai, kurie pagal gaunamus impulsus junginėjasi ir formuoja skirtingus įtampos lygius ($+V_{DC}$, 0, $-V_{DC}$).

Kiekvienas keitiklis išėjime formuoja kintamos srovės įtampą, kuri perduodama į transformatorių antrines apvijas. Šių transformatorių pirminės apvijos sujungtos nuosekliai. Transformatoriuose 12 impulsų keitiklių perduodamų įtampų fazės pasukamos taip, kad šių keturių įtampų dedamosios sumuotųsi pirminės apvijos pusėje.

Veikimo metu harmonikos sumažinamos naudojant kelis impulsus kiekviename įtampos cikle. Išėjime susidaro mažas harmonikų kiekis ir dėl šios priežasties šie keitikliai gali būti naudojami didelės galios FACTS įrenginiuose be kintamos srovės filtrų.

Išėjimo įtampa turi normalias harmonikas $n=48k+1$, kai $k=0,1,2,\dots$, pavyzdžiui, 47, 49, 95, 97..., kurių dydžiai atitinkamai yra lygus $1/47$, $1/49$, $1/95$, $1/97,\dots$, atitinkamai atsižvelgiant į pagrindinę harmoniką nuolatinės srovės pusėje. [37]

Kiekvieno 12 impulsų keitiklio išėjimo įtampos išreiškiamos 2.1-2.4 formulėse [37]:

Pirmojo 12 impulsų keitiklio išėjimo įtampa:

$$v_{ab12}(t)_1 = 2[V_{ab1} \sin(\omega t + 30^\circ) + V_{ab11} \sin(11\omega t + 195^\circ) + V_{ab13} \sin(13\omega t + 255^\circ) + V_{ab23} \sin(23\omega t + 60^\circ) + V_{ab25} \sin(25\omega t + 120^\circ) + \dots]; \quad (2.1.)$$

Antrojo 12 impulsų keitiklio AC išėjimo įtampa:

$$v_{ab12}(t)_2 = 2[V_{ab1} \sin(\omega t + 30^\circ) + V_{ab11} \sin(11\omega t + 15^\circ) + V_{ab13} \sin(13\omega t + 75^\circ) + V_{ab23} \sin(23\omega t + 60^\circ) + V_{ab25} \sin(25\omega t + 120^\circ) + \dots]; \quad (2.2.)$$

Trečiojo 12 impulsų keitiklio AC išėjimo įtampa:

$$v_{ab12}(t)_3 = 2[V_{ab1} \sin(\omega t + 30^\circ) + V_{ab11} \sin(11\omega t + 285^\circ) + V_{ab13} \sin(13\omega t + 345^\circ) + V_{ab23} \sin(23\omega t + 240^\circ) + V_{ab25} \sin(25\omega t + 300^\circ) + \dots]; \quad (2.3.)$$

Ketvirtojo 12 impulsų keitiklio AC išėjimo įtampa:

$$v_{ab12}(t)_4 = 2[V_{ab1} \sin(\omega t + 30^\circ) + V_{ab11} \sin(11\omega t + 105^\circ) + V_{ab13} \sin(13\omega t + 165^\circ) + V_{ab23} \sin(23\omega t + 240^\circ) + V_{ab25} \sin(25\omega t + 300^\circ) + \dots]; \quad (2.4.)$$

Dėl transformatorių nuoseklaus jungimo šių keitiklių įtampos sudedamos. Taip gaunama 48 impulsų išėjimo įtampa [37]:

$$v_{ab48}(t) = v_{ab12}(t)_1 + v_{ab12}(t)_2 + v_{ab12}(t)_3 + v_{ab12}(t)_4; \quad (2.5.)$$

$$v_{ab48}(t) = 8[V_{ab1} \sin(\omega t + 30^\circ) + V_{ab47} \sin(47\omega t + 150^\circ) + V_{ab49} \sin(49\omega t + 210^\circ) + V_{ab95} \sin(95\omega t + 330^\circ) + V_{ab97} \sin(97\omega t + 30^\circ) + \dots];$$

STATCOM modelio 48 impulsų kintamos srovės išėjimo įtampa tarp fazės ir žemės[37]:

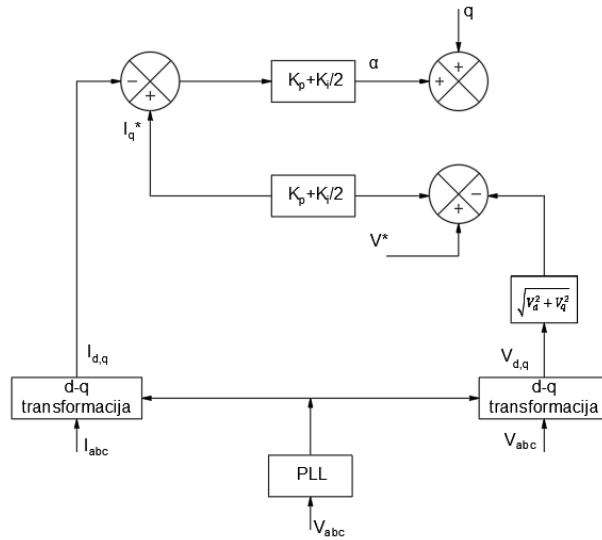
$$v_{an48}(t) = \frac{8}{\sqrt{3}} \sum_{n=1}^{\infty} V_{abn} \sin(n\omega t + 18,75^\circ n - 18,75^\circ i); \quad (2.6.)$$

$$\forall n = 48r \pm 1, r = 0,1,2 \dots$$

čia $i = 1$, teigiamos sekos harmonikoms ir $i = -1$, neigiamoms sekos harmonikoms.

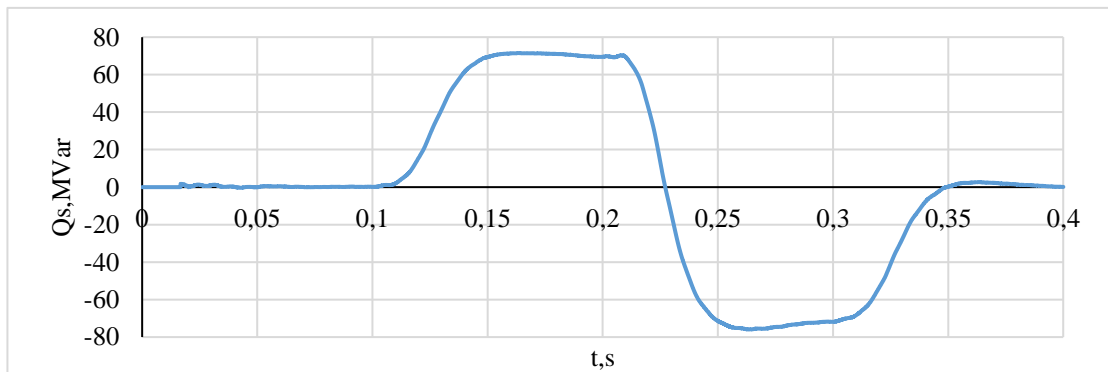
Įtampos kitose fazėse $v_{bn48}(t)$, $v_{cn48}(t)$ yra panašios, beveik sinusoidės formos, tačiau sudaro fazės poslinkį atitinkamai 120° ir 240° nuo a fazės.

STATCOM atliekamas pastovus tinklo parametrų matavimas. Pagal mazgo parametrus (įtampą, srovę, fazę ir dažnį) apskaičiuojami ir perduodami signalai į valdymo blokus, kurie formuoja STATCOM išėjimo signalą. STATCOM supaprastinta valdymo schema pateikta 20 paveiksle. Įtampa (V_{abc}) ir valdiklio srovė (I_{abc}) yra nuolat matuojamos ir atliekama d-q transformacija, kuri iš trifazės lygčių sistemos vertes pakeičia į atitinkamą dviejų lygčių sistemą atskaitininėje d-q sistemoje. Fazės valdymo kontūras – PLL (ang. *Phase locked loop*) naudojamas apskaičiuoti atskaitininį kampą – θ . Šis kampas naudojamas d ir q ašyse įtampoms ir srovėms skaičiuoti. Įtampos reikšmė (V_{dq}) lyginama su nustatyta įtampa – V^* ir paklaidos signalas, kuris valdomas per PI įtampos grandinę, suformuoja atraminės srovės (I_q^*) signalą. Šis signalas lyginimas su srovės verte – I_q ir susidariusi paklaida valdoma per PI valdiklį formuoja valdymo kampą (α) GTO tiristoriams. Nuolatinės srovės grandinės kondensatorius atsižvelgiant į keitiklio įtampą nustatomas į atitinkamas vertes.

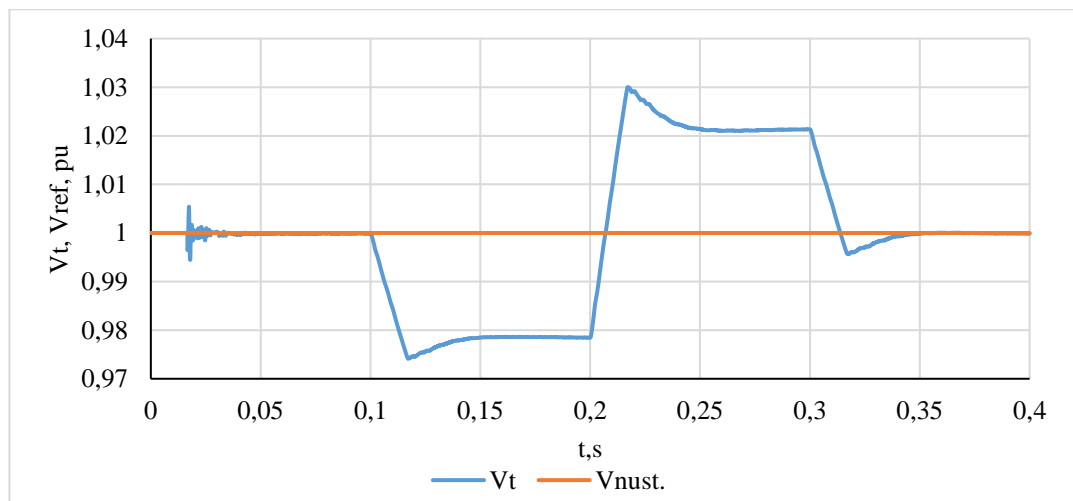


20 pav. STATCOM valdymo schema [38]

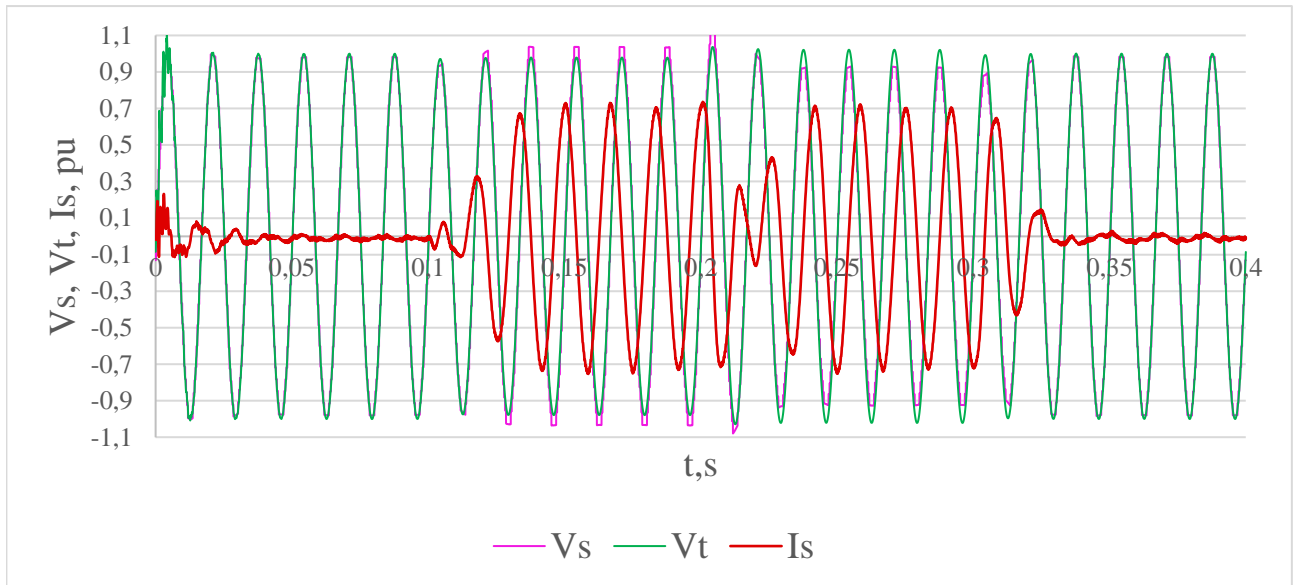
Įtampos valdymas atspindi charakteristikose, kurios pateiktos 21-23 paveiksluose. STATCOM, kuris prijungtas prie šynų B1, generuoja arba vartoja reaktyviąją galią ir prisideda prie įtampos valdymo tinkle.



21 pav. STATCOM įrenginio reaktyviosios galios kreivė



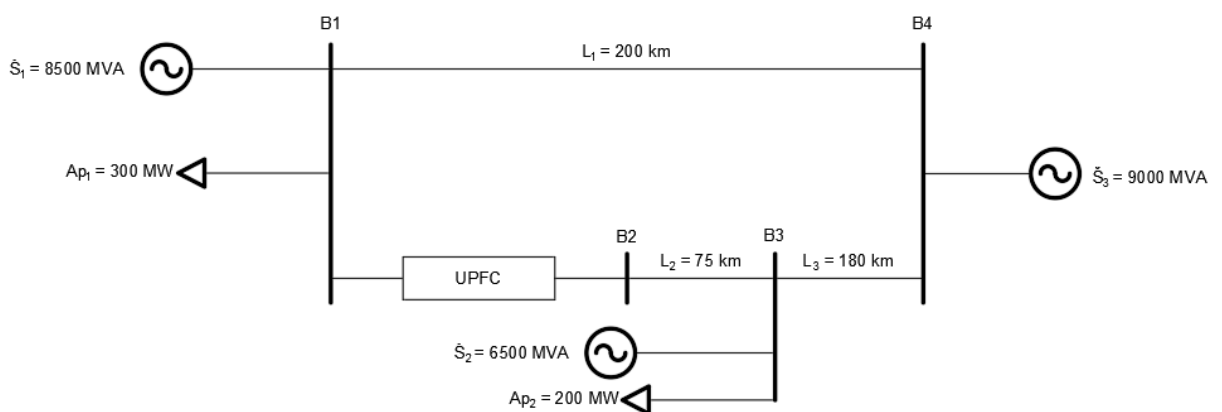
22 pav. Tinklo realios ir nustatytos įtampos kreivės



23 pav. STATCOM išėjimo įtampa (V_s), tinklo įtampa (V_t) ir STATCOM srovės (I_s) charakteristikos

Keičiama 8500MVA šaltinio įtampa po 0,1, 0,2 ir 0,3 sekundės į atitinkamas reikšmes – 0,955 s.v., 1,045 s.v. ir 1 s.v. Kai įtampa STATCOM prijungimo taške pradeda mažėti po 0,1 s, įrenginys pradeda generuoti reaktyviąją galią į tinklą, kad įtampa taptų kuo artimesnė nustatytai įtampai – 1 s.v. Po 0,15 s stabilizuojasi įtampa tinkle. Kai po 0,2 s prijungimo taške įtampa pradeda staigiai didėti, STATCOM įrenginys vartoja reaktyviąją galią ir po 0,25 s sistemos įtampa stabilizuojasi. STATCOM įrenginys vartodamas/ generuodamas reaktyviąją galią padeda išlaikyti sistemą stabilią ir išlaikyti įtampą +/-5 % ribose išvengiant sistemos griūties. Pagal B1 šynų įtampas (V_t) kreivę ir STATCOM išėjimo įtampas (V_s) ir srovės (I_s) (žr. 23 pav.) kreives galima nustatyti 1.5.2 skyriuje aptartus STATCOM veikimo režimus – budėjimo, talpinį ir induktyvų (žr. 10 pav.).

2.1.2. UPFC modelio veikimo analizė



24 pav. Elektros tinklo su prijungtu UPFC įrenginiu schema

Analizuojamas UPFC modelis (žr. 3 priedą) naudojant MATLAB Simulink programinį paketą

Šis UPFC modelis gali dirbti skirtingais režimais:

- UPFC režimu, kai abu valdikliai sujungti per DC jungtį veikia kartu ir atlieka aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymą;
- STATCOM režimu, kai DC jungtis atjungta ir valdiklis atlieka įtampos reguliavimą šynose B1.
- SSSC režimu, kai DC jungtis atjungta ir valdiklis perduoda į tinklą įtampą, kuri priklauso nuo linija tekančios srovės fazės.

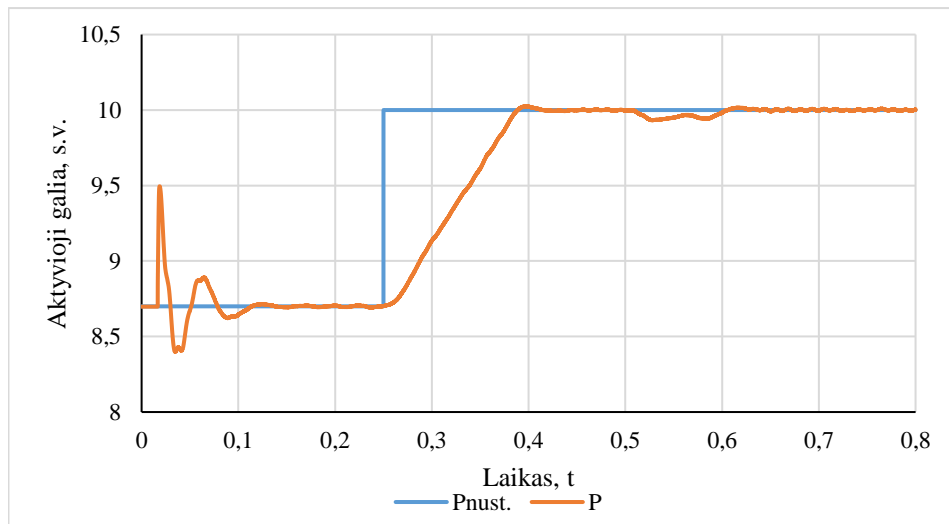
Atliekama UPFC režimo analizė. Analizuojamo tinklo schema pateikta 24 paveiksle. UPFC prijungtas tarp B1 ir B2 šynų ir naudojamas aktyviosios ir reaktyviosios galios srautams reguliuoti, kad būtų geriau išnaudojami linijų pralaidumai sistemoje. Taip pat atliekama įtampos kontrolė šynose B1. UPFC susideda iš dviejų 100 MVA trijų lygių 48 impulsų GTO valdiklių, kurių veikimas analogiškas STATCOM modelyje naudojamam valdikliui (žr. 2.1.1. skyrių). Vienas valdiklis atitinka šuntinį valdiklį – STATCOM ir jungiamas prie B1 šynų, o antrasis atitinka nuoseklų valdiklį SSSC ir jungiamas tarp šynų B1 ir B2. Šie valdikliai yra sujungti per DC jungtį ir per ją gali atlikti galios srautų mainus.

Analizuojamas UPFC režimas ir atliktas reaktyviosios ir aktyviosios galios srautų valdymas. Reguluojamos UPFC nustatytos galios: aktyvioji galia – $P_{nust.} = +8,7$ s.v. (870 MW), kuri po 0,25 s pakeista į +10 s.v. (100MW), reaktyvioji galia – $Q_{nust.} = -0,6$ s.v. (60 MVar), kuri po 0,5 s pakeista į +0,7 s.v. (70 MVar) vertės. Modeliavimas atliekamas 0,8 s.

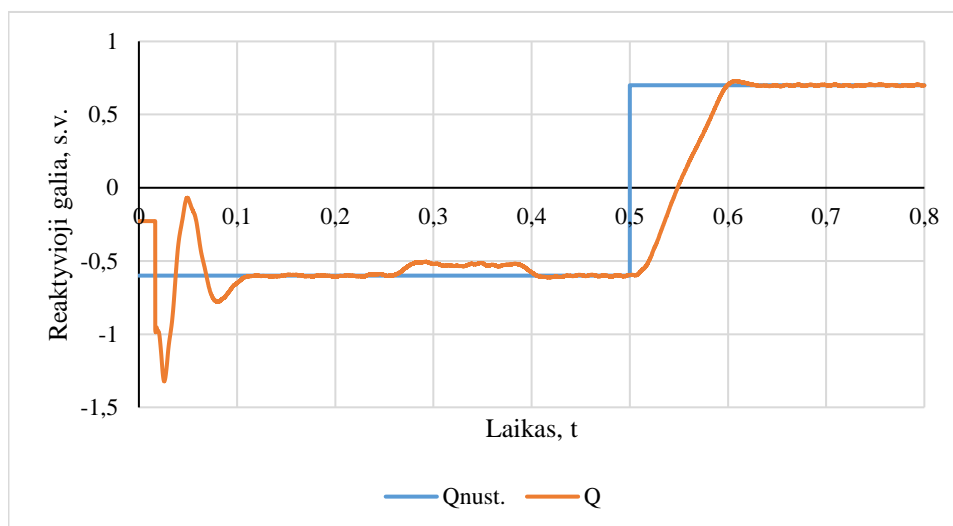
25-26 paveiksle pateiktas aktyviosios ir reaktyviosios galios srautas linijoje L2 (mėlyna kreivė žymimos nustatytos galios vertės – $P_{nust.}$ ir $Q_{nust.}$, o oranžine – reali). Po pereinamojo proceso, kuris trunka apie 0,15 s, sistema pasiekia stabilią būseną, aktyvioji galia nusistovi linijoje ties +8,7 s.v. verte, o reaktyvioji galia ties -0,6 s.v. verte. Po nustatyto laiko tarpo – 0,25 s, UPFC įrenginys perskirsto aktyviosios galios srautus, kad būtų pasiekta +10 s.v. vertė. Po 0,5 s pastebimas UPFC veikimas, kai reaktyvioji galia linijoje keičiasi nuo -0,6 s.v. vertės į +0,7 s.v. vertę.

Taip pat grafikuose galima pastebėti nedidelius reaktyviosios galios pokyčius 0,25 s – 0,4 s laikotarpyje. Kadangi linijoje atliekamas aktyviosios galios reguliavimas, reaktyvioji galia nežymiai nukrypsta nuo savo stabilios būsenos, tačiau nusistovi pasibaigus reguliavimui. Analogiškas pokytis pastebimas aktyviosios galios kreivėje 0,5 – 0,6 s laikotarpyje, kuris įvyksta dėl reaktyviosios galios reguliavimo perdavimo linijoje.

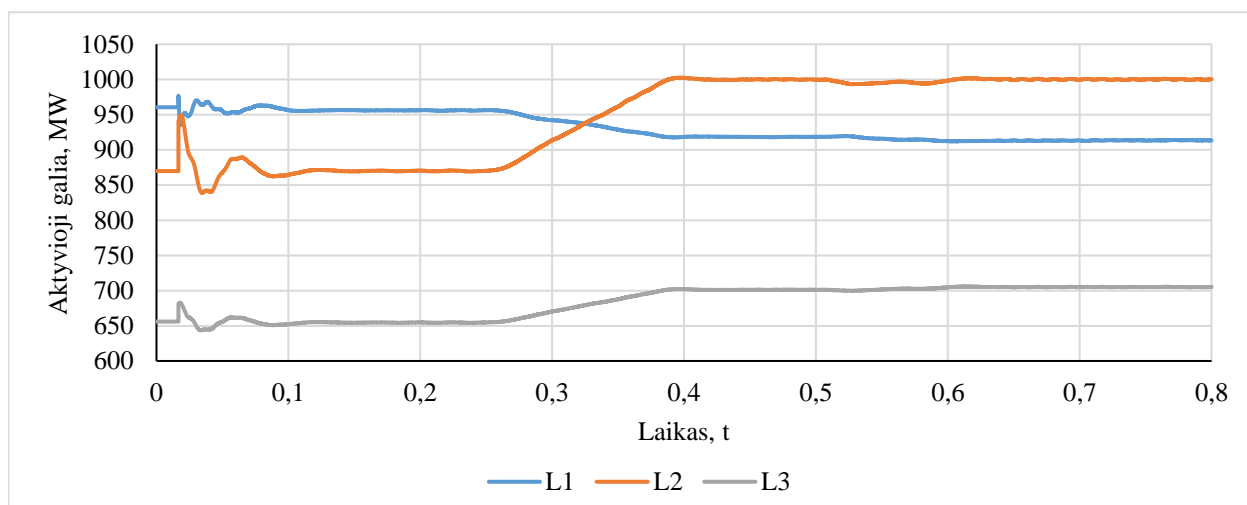
Šis aktyviosios ir reaktyviosios galios srautų pasikeitimas turi įtakos tinkle prijungtų linijų darbui (25 pav.). Linijoje L1 aktyvioji galia sumažėjo nuo 956MW iki 914 MW, o linijoje L3 aktyvioji galia padidėjo nuo 652 MW iki 705MW. Linijoje L1 reaktyvioji galia iš -7 MVar pasikeičia į -40 MVar, o linijoje L3 iš -45 MVar į beveik 0 MVar. Toks UPFC valdymas gali perskirstyti galios srautus linijose ir sumažinti linijų apkrovimą.



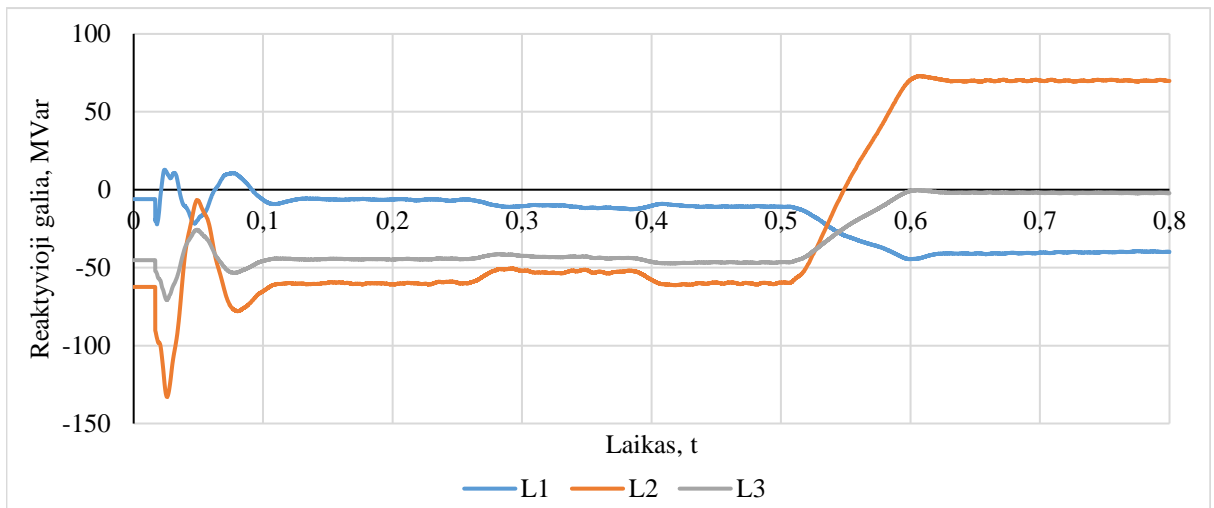
25 pav. Aktyvioji galia linijoje L2



26 pav. Reaktyvioji galia linijoje L2



27 pav. Linijų aktyviosios galios srautai



28 pav. Linijų reaktyviosios galios srautai

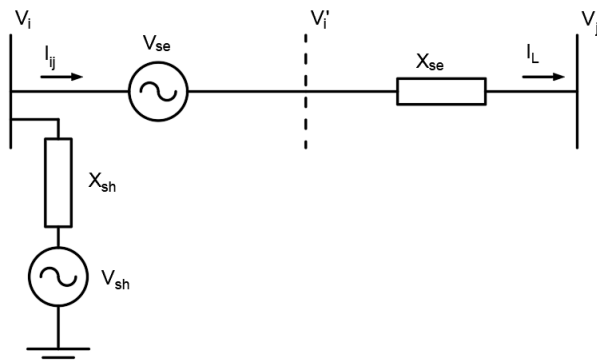
2.2. Tiriamasis objektas

2.1 skyriuje aptartas FACTS įrenginių veikimas mažose sistemose. Didesnių elektros sistemų modeliavimui naudojamas patogesnis programinis paketas – PowerFactory.

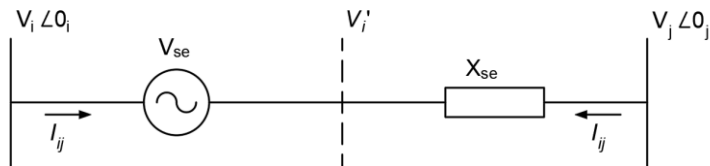
Tyrimui sudaromas tinklas, kuris atitinka Lietuvos šiaurės vakarų elektros tinklo realius duomenis. Tinklas supaprastintas, kad apimtų tik pagrindinius mazgus ir linijas. Tinklo mazgai identifikuojami numeriais ir tikri pavadinimai yra neminimi. Tinklą sudaro 27 mazgai, iš kurių 18 yra 110 kV įtampos, 5 – 330 kV, 3 – 20 kV ir 1 – 10,5 kV. Tinkle modeliuojamos 3 vėjo elektrinės ir viena termofikacinė elektrinė. Šaltiniai, kurie prijungti 305 ir 301 mazguose atitinka jungtis su likusia tinklo dalimi. Tinklą sudaro 5 autotransformatoriai ir 4 galios transformatoriai. Tinklą sudaro 32 linijos, kurių bendras ilgis yra 1502,7 km. Bendra elektros sistemos apkrova vasaros sezonu metu 185,35 MW ir 55,67 MVar, žiemos sezono metu – 383,81 MW ir 107,3 MVar. Tinklo schema pateikta 4 priede, modelis pateiktas 5 priede.

2.3. UPFC modelis

Tinklo parametrus reguliuoti naudojamas UPFC įrenginys dėl savo universalumo vienu metu valdyti aktyviosios ir reaktyviosios galios srautus tinkle. Tyrime nagrinėjama stabili sistemos būseną. Stabilesnės sistemos būsenoje UPFC atitinka du įtampos šaltinius (nuoseklų ir šuntinį) ir varžą (žr. 29 pav.). Varžos atitinka transformatorius, per kuriuos keitikliai prijungti prie tinklo. Apskaičiuoti UPFC modelio perduodamą galią naudojama superpozicijos teorema.



29 pav. Dviejų įtampos šaltinių UPFC modelis [39]



30 pav. Nuosekliai prijungto VSC schema [40]

Nuosekliai prijungtą įtampos šaltinio keitiklį atitinka įtampos šaltinis (V_{se}) ir varža (x_{se}) (žr. 30 pav.). Jie prijungiami tarp mazgų i ir j . Priimta, jog įtampa mazge i yra atraminė ($V_i = |V| \angle 0^\circ$). Likusių mazgų kampai priimami atsižvelgiant į šį atraminį kampą. Įtampa mazge V_i' išreiškiama [39]:

$$V_i' = V_i + V_{se}; \quad (2.7.)$$

čia V_i' – įtampa mazge i' ;

V_i – įtampa mazge i ;

V_{se} – nuoseklaus šaltinio įtampa.

Nuoseklus įtampos šaltinis gali valdyti įtampos dydį ir fazę. V_{se} išreiškiamas [41]:

$$V_{se} = rV_i e^{j\gamma}; \quad (2.8.)$$

čia r – nuoseklaus įtampos šaltinio koeficientas, kuris kinta ($0 < r < r_{max}$) ribose;

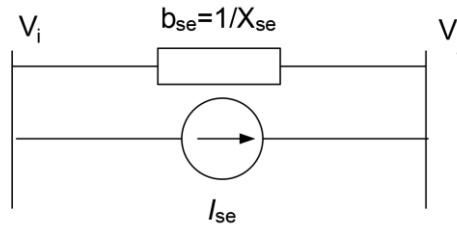
γ – nuoseklaus įtampos šaltinio kampas (kampas tarp įtampos V_i ir V_{se}), kuris kinta ($0 < \gamma < 2\pi$) ribose.

Stabilaus režimo UPFC modelis gaunamas pakeitus įtampos šaltinį į srovės šaltinį naudojant dualumo principą (žr. 31 pav.). Srovės šaltinio srovė išreiškiama [39]:

$$I_{se} = -jb_{se}V_{se}; \quad (2.9.)$$

čia $b_{se} = \frac{1}{x_{se}}$.

Neigiamas ženklas rodo, jog srovė perduodama iš mazgo i .



31 pav. Įtampos šaltinio pakeitimas srovės šaltiniu [39]

Mazguose i ir j galia gali būti išreiškiama:

$$S_{ise} = V_i(-I_{se})^*; \quad (2.10.)$$

$$S_{jse} = V_j(I_{se})^*; \quad (2.11.)$$

Perduodama galia S_{ise} pagal formules 2.8. ir 2.9. išreiškiama:

$$S_{ise} = V_i(jb_{se}rV_i e^{j\gamma})^*; \quad (2.12)$$

Pagal Eulerio tapatybę [39]:

$$e^{j\gamma} = \cos\gamma + jsin\gamma; \quad (2.13)$$

$$S_{ise} = V_i(e^{-j(\gamma+90^\circ)} b_{se} r V_i^*); \quad (2.14.)$$

Todėl galia išreiškiama:

$$S_{ise} = -rb_{se}V_i^2(\cos(-\gamma - 90) + jsin(-\gamma - 90)); \quad (2.15.)$$

Kadangi $\cos(-\gamma - 90) = -sin\gamma$ ir $\sin(-\gamma - 90) = -cos\gamma$, tai galia išreiškiama [39]:

$$S_{ise} = -rb_{se}V_i^2 sin\gamma - jrb_{se}V_i^2 cos\gamma; \quad (2.16.)$$

Kadangi pilnutinė galia susideda iš aktyviosios (P_{ise}) ir reaktyviosios (Q_{ise}) galių:

$$S_{ise} = P_{ise} + jQ_{ise}; \quad (2.17.)$$

Tai aktyvioji galia iš 2.16 formulės išreiškiama:

$$P_{ise} = -rb_{se}V_i^2 sin\gamma; \quad (2.18.)$$

Reaktyvioji galia:

$$Q_{ise} = -rb_{se}V_i^2 cos\gamma; \quad (2.19.)$$

Įtampa mazge i ir j turi tam tikrą fazės kampą ($V_j = V_j \angle \theta_j$ ir $V_i = V_i \angle \theta_i$). Galia mazge j išreiškiama įvertinus 2.8., 2.9. ir 2.11. formules:

$$S_{jse} = V_j \angle \theta_j (-jb_{se}rV_i \angle \theta_i e^{j\gamma})^*; \quad (2.20.)$$

Supaprastinus 2.20. formulę, galia mazge j išreiškiama [39]:

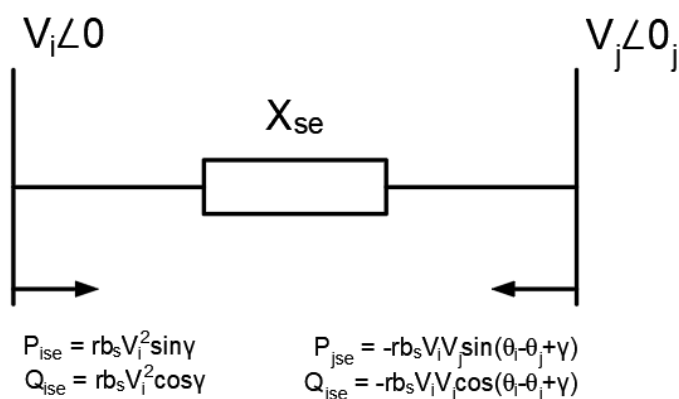
$$S_{jse} = V_i V_j b_{se} r \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) + j V_i V_j b_{se} r \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma); \quad (2.21.)$$

Aktyvioji ir reaktyvioji galia mazge j išreiškiama:

$$P_{jse} = V_i V_j b_{se} r \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma); \quad (2.22.)$$

$$Q_{jse} = j V_i V_j b_{se} r \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma); \quad (2.23.)$$

Pagal 2.18-2.19 ir 2.22.-2.23. formules nuosekliai prijungto įtampos šaltinio keitiklio modelis gali būti vertinamas kaip dvi nepriklausomos apkrovos mazguose i ir j (žr. 32 pav.).



32 pav. Nuoseklus įtampos šaltinio modelis [40]

Šuntinis UPFC keitiklis naudojamas siekiant užtikrinti nuoseklus keitiklio aktyviosios galios poreikius ir kompensuoti UPFC nuostolius. Nustatyta, kad abiejų keitiklių (nuoseklus ir šuntinio) perjungimo nuostoliai sudaro 2 % perduodamos galios. Jei šie nuostoliai įtraukti į šuntinio įtampos šaltinio perduodamos galios kiekį, tai šuntinio keitiklio perduodama galia lygi [39]:

$$P_{K1} = -1,02 P_{K2}; \quad (2.24.)$$

čia P_{K1} – šuntinis keitiklis;

P_{K2} – nuoseklus keitiklis.

Apytikslė šuntinio keitiklio galia lygi [41]:

$$P_{K2} = V_{se} V_{ij}^*; \quad (2.25.)$$

Srovė tarp mazgų i ir j :

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{j x_{se}}; \quad (2.26.)$$

Tai perduodama galia išreiškiama:

$$P_{K2} = r e^{j\gamma} V_i \left(\frac{V_i - V_j}{j x_{se}} \right)^* = r V_i e^{j\gamma} \left(\frac{V_i + V_{se} - V_j}{j x_{se}} \right)^*; \quad (2.27.)$$

Įvertinus formulę 2.8., galia išreiškiama:

$$S_{K2} = rV_i e^{j\gamma} \left(\frac{V_i + V_{se} - V_j}{jx_{se}} \right)^*; \quad (2.28.)$$

Įvertinus įtampų kampus 2.28 formulė išreiškiama:

$$S_{K2} = rV_i \angle \theta_i e^{j\gamma} \left(\frac{V_i \angle \theta_i + rV_i \angle \theta_i e^{j\gamma} - V_j \angle \theta_j}{jx_{se}} \right)^*; \quad (2.29.)$$

2.29 formulė supaprastinama ir keitiklio aktyvioji ir reaktyvioji galia apskaičiuojamos [41]:

$$P_{K2} = rb_{se} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_{se} V_i^2 \sin \gamma; \quad (2.30.)$$

$$Q_{K2} = -rb_{se} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_{se} V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_{se} V_i^2; \quad (2.31.)$$

Šuntinio įtampos šaltinio perduodama arba vartojama reaktyvioji galia gali būti valdoma nepriklausomai nuo bendro UPFC modelio. Gali būti modeliuojamas atskiras valdomas šuntinis reaktyviosios galios šaltinis šiai galiai reguliuoti. Šiame modelyje priimama prielaida, kad šuntinis keitiklis papildomai nevykdys reaktyvios galios mainų ($Q_{K1} = 0$). [41]

Bendras statinis UPFC modelis sudaromas derinant nuoseklų ir šuntinį galios perdavimą mazguose i ir j . (žr. 33 pav.). Mazge i perduodama aktyvioji galia sudaryta iš nuoseklus šaltinio ir šuntinio keitiklio perduodamos galios:

$$\begin{aligned} P_{i,UPFC} &= -rb_{se} V_i^2 \sin \gamma - 1,02rb_{se} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) + 1,02rb_{se} V_i^2 \sin \gamma = \\ &= 0,02rb_{se} V_i^2 \sin \gamma - 1,02rb_{se} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma); \end{aligned} \quad (2.32.)$$

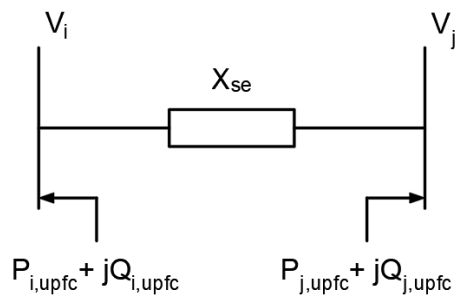
Mazge i perduodama reaktyvioji galia sudaryta tik iš nuoseklus šaltinio perduodamos galios:

$$Q_{i,UPFC} = Q_{ise} = -rb_{se} V_i^2 \cos \gamma; \quad (2.33.)$$

Prie mazge j prijungtas tik nuoseklus įtampos šaltinis, todėl galia UPFC mazge j išreiškiama:

$$P_{j,UPFC} = P_{jse} = rb_{se} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma); \quad (2.34.)$$

$$Q_{j,UPFC} = Q_{jse} = rb_{se} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma); \quad (2.35.)$$



33 pav. Statinis UPFC modelis [40]

3. Eksperimentinė dalis

Tyrimo tikslas – ištirti lankstaus kintamosios srovės perdavimo (FACTS) įrenginių galimybes valdyti elektros tinklo režimo parametrus siekiant padidinti tinklo galimybes integruoti didelės galios atsinaujinančius šaltinius. Tyrime analizuojami šie tinklo scenarijai:

1. Esamas elektros tinklas;
2. Elektros tinklas su padidinta generacija;
3. Elektros tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu.

Atliekamas statinis elektros tinklo tyrimas ir naudojant PowerFactory programinį paketą skaičiuojami galios srautai tinkle. Visose scenarijuose analizuojamas elektros linijų pralaidumas ir tinklo nuostoliai. Perdavimo linijų apkrovimas apskaičiuojamas:

$$I_{\%} = \frac{I_{Sk.}}{I_L} \cdot 100\%; \quad (7.1.)$$

čia $I_{\%}$ – perdavimo linijos apkrovimas;

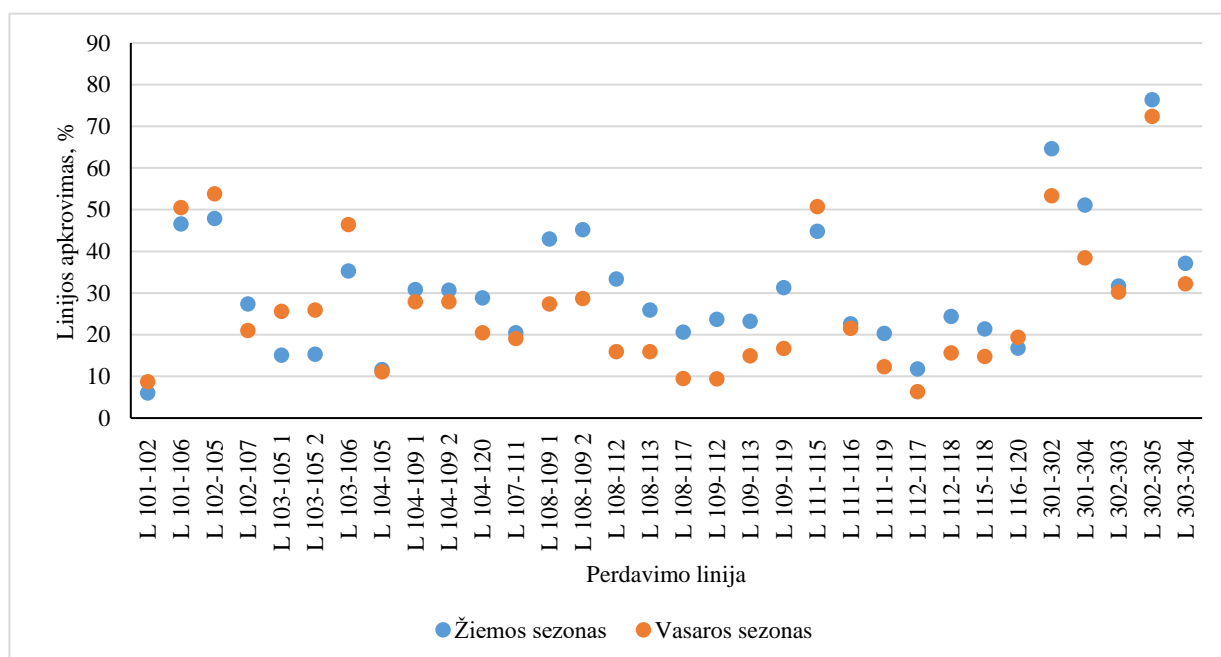
$I_{Sk.}$ – perdavimo linija tekanti srovė;

I_L – maksimali galima perduoti srovė.

2-3 scenarijuose nustatoma maksimali galima generacija tinkle. 3 scenarijuje prijungiamas UPFC įrenginys sistemos galios perdavimo galimybės padidinti ir nustatoma UPFC optimali nustatyta aktyviosios galios reikšmė ($P_{nuost.}$) prie kurios tinkle susidaro mažiausi nuostoliai.

3.1. Esamo elektros tinklo analizė

Elektros sistemoje apskaičiuojami perdavimo linijų pralaidumai vasaros ir žiemos sezono metu (žr. 34 pav.). Vasaros sezono metu tinkle apkrovos mažesnės, todėl dauguma perdavimo linijų yra mažiau apkrautos nei žiemos sezono metu. Aktyvieji tinklo nuostoliai vasaros metu: $P_{nuost.} = 41,3$ MW, reaktyvieji – $Q_{nuost.} = 150,9$ MVar. Žiemos sezono metu tinklo nuostoliai $P_{nuost.} = 60,8$ MW ir $Q_{nuost.} = 272,7$ MVar. Linijų apkrovų duomenys pateikiami 5 priede.



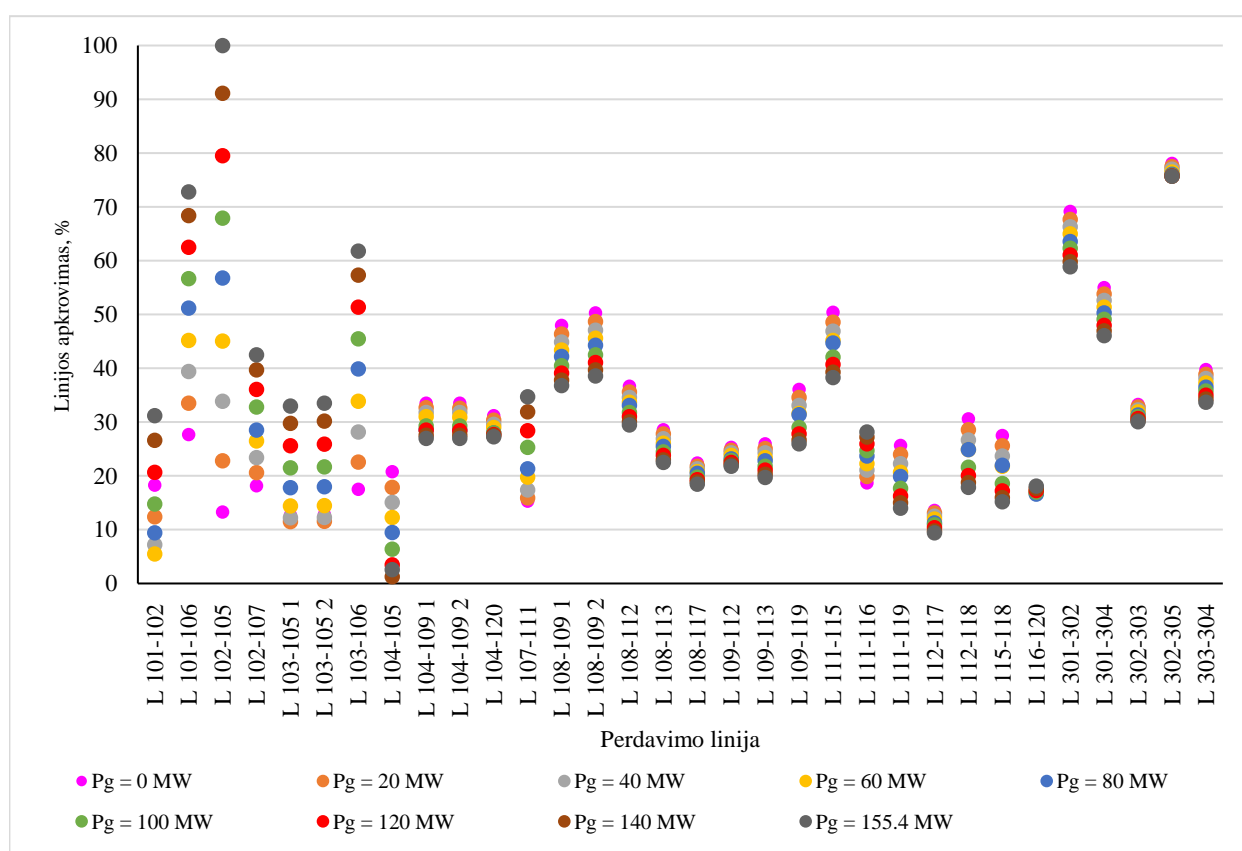
34 pav. Perdavimo linijų apkrovos

3.2. Tinklo su padidinta generacija tyrimas

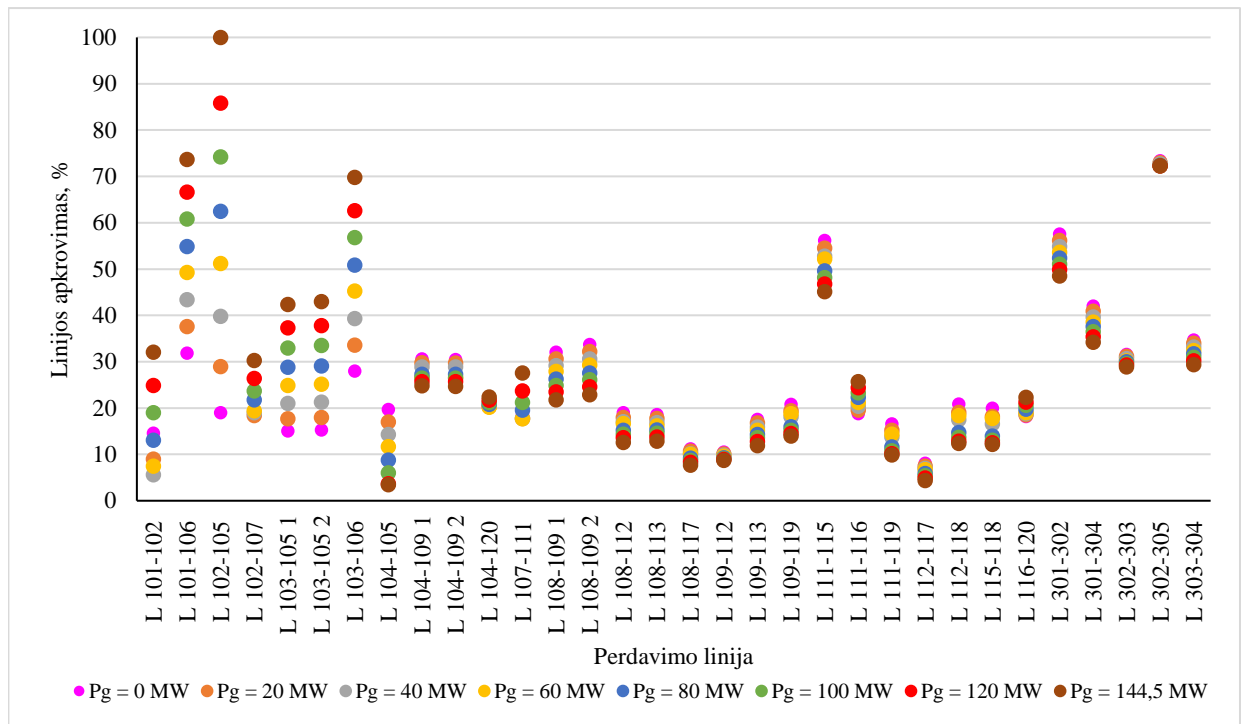
Nustatoma, kiek maksimaliai būtų įmanoma padidinti generaciją mazguose Nr.81-83, prie kurių esamame tinkle prijungtos vėjo elektrinės. Galia didinama tol, kol bent viena perdavimo linija pasiekia maksimalų galimą apkrovimą – 100 %.

3.2.1. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 81

35-36 paveiksluose pateikiamas grafikas, kaip linijų apkrovimas priklauso nuo generacijos mazge Nr. 81 žiemos ir vasaros sezono metu. Žiemos sezono metu, kai generacija mazge Nr. 81 $P_g = 155,4$ MW, perdavimo linija L 102-105 pasiekia maksimalias apkrovimo ribas. Vasaros sezono metu šiame mazge maksimali galima generacija – $P_g = 144,5$ MW. Nustatyta, jog generacija mazge Nr. 81 labiausiai paveikia linijų L 103-106, L 101-106, L 102-105 apkrovimą. Duomenys pateikiami 5 priede.



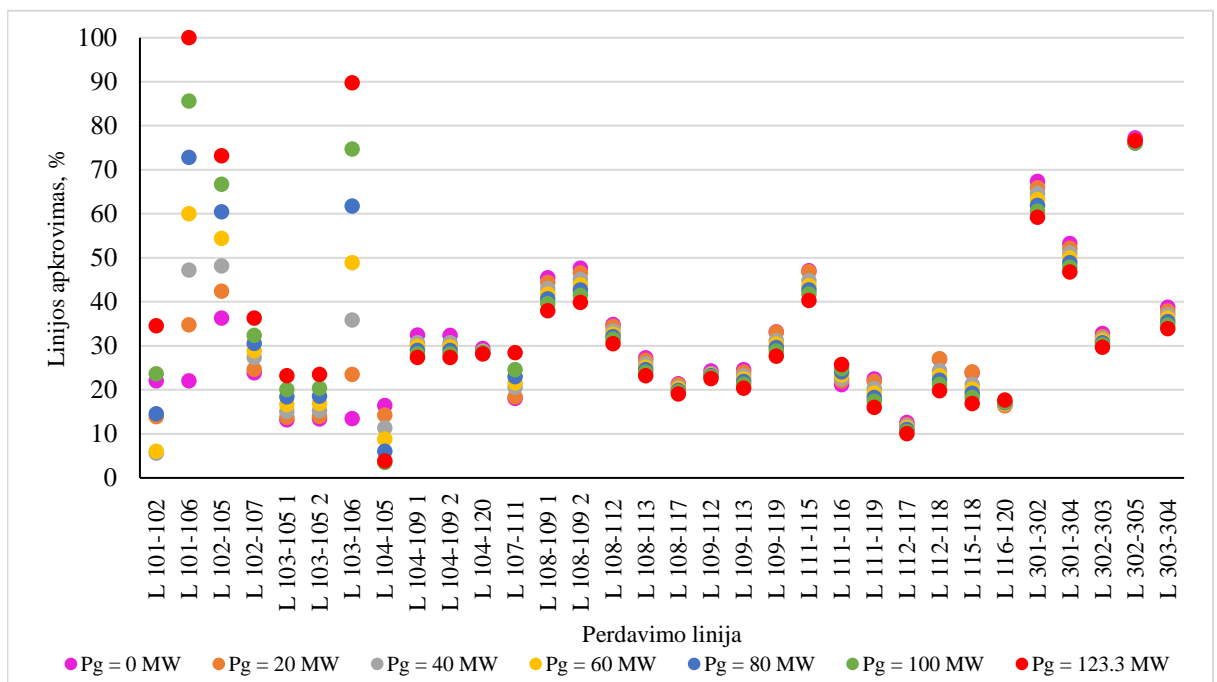
35 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 81



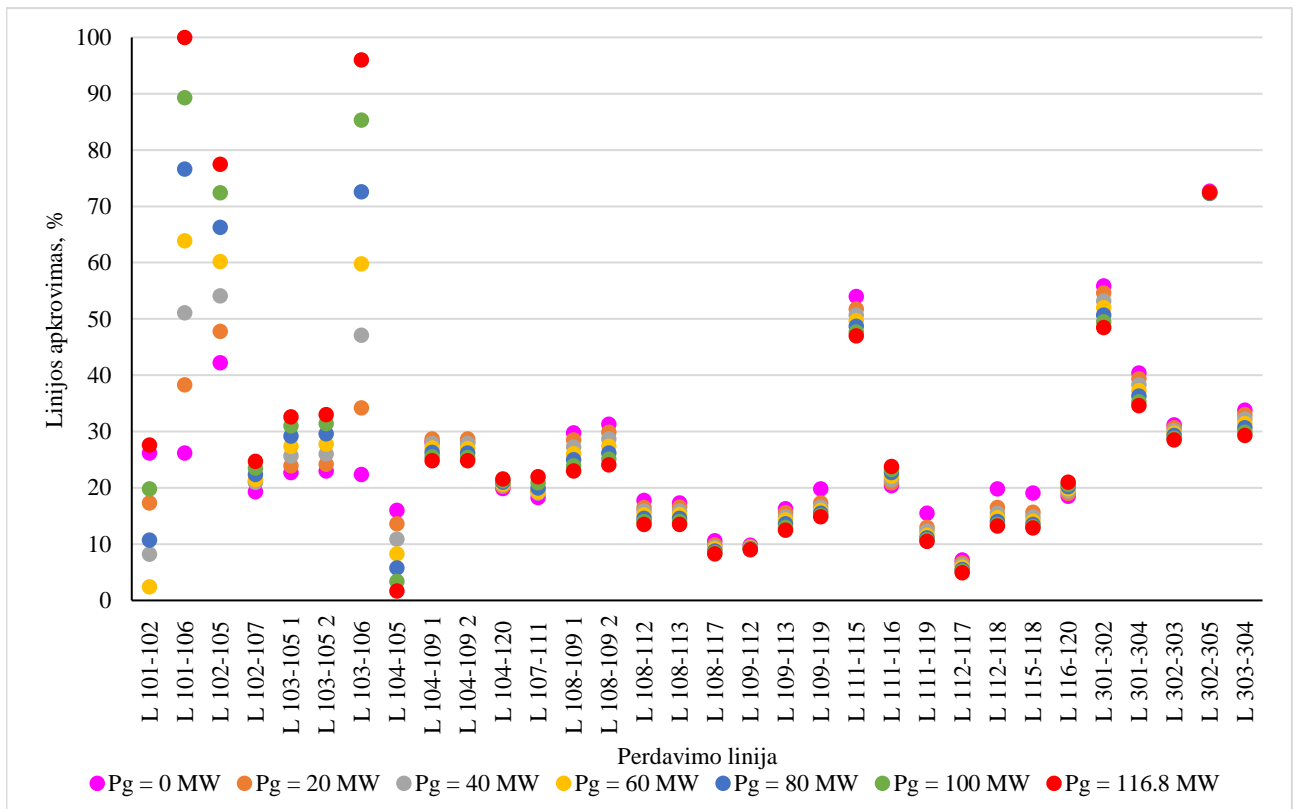
36 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 81

3.2.2. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 82

Analogiškai didinama generacija mazge Nr. 82. Nustatyta, jog maksimali galima generacija mazge Nr. 82 vasaros sezono metu gali pasiekti $P_g = 123,4$ MW, žiemos sezono metu – $P_g = 116,8$ MW. Šiuo atveju maksimaliai apsikrauna linija L 101-106. Perdavimo linijų L 103-106, L 101-106, L 102-105 apkrovimas stipriai koreliuoja su generacija mazge Nr. 82. Šios linijos analogiškos 3.2.1. sk. aptartam atvejui, nes tinklo mazgai yra netoli vienas nuo kito.



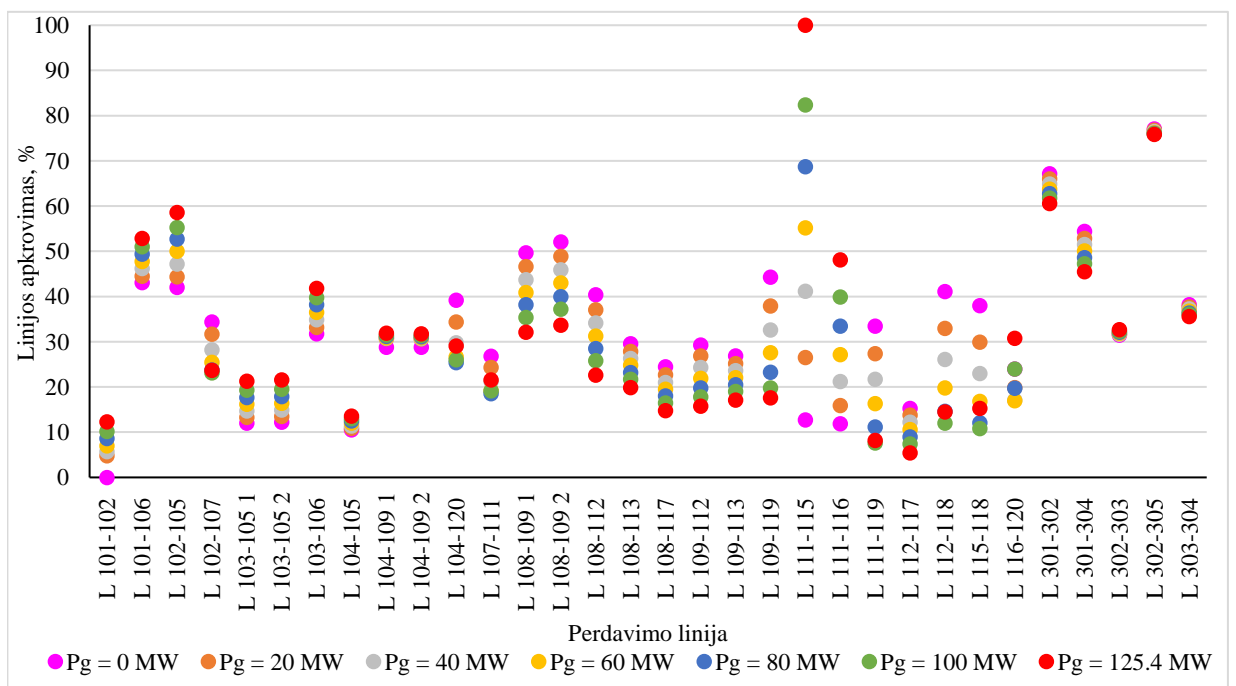
37 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 82



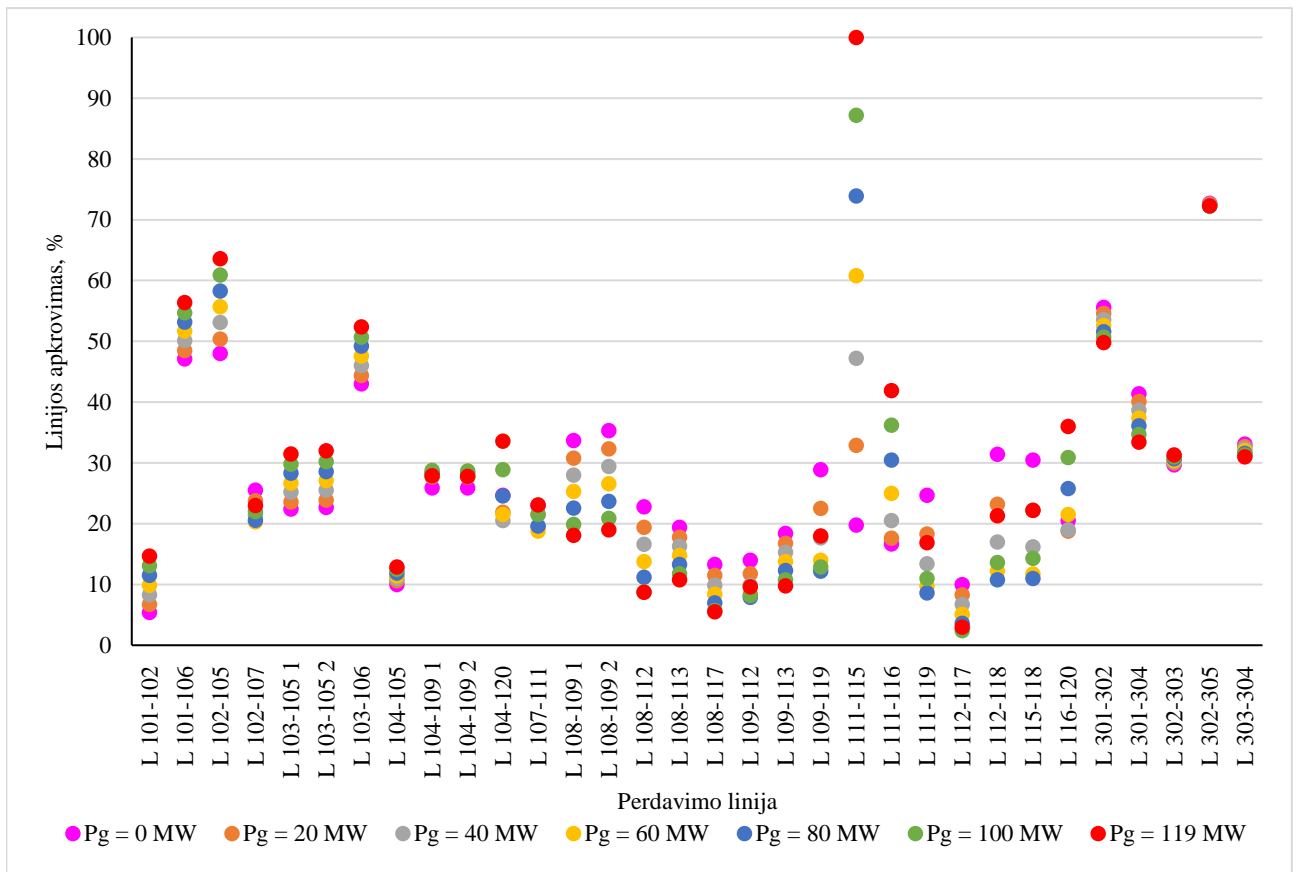
38 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 82

3.2.3. Tinklas su padidinta generacija mazge Nr. 83

Žiemos sezono metu mazge Nr. 83 generaciją maksimaliai galima padidinti iki $P_g = 125,4$ MW galios, o vasaros sezono metu – $P_g = 119$ MW. Šiuo atveju persikrauna linija L 111-115. Nustatyta, jog generuojama galia mazge Nr. 83 ryškiausiai įtaką turi linijų L 111-115 ir L 111-116 apkrovimui.



39 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 83

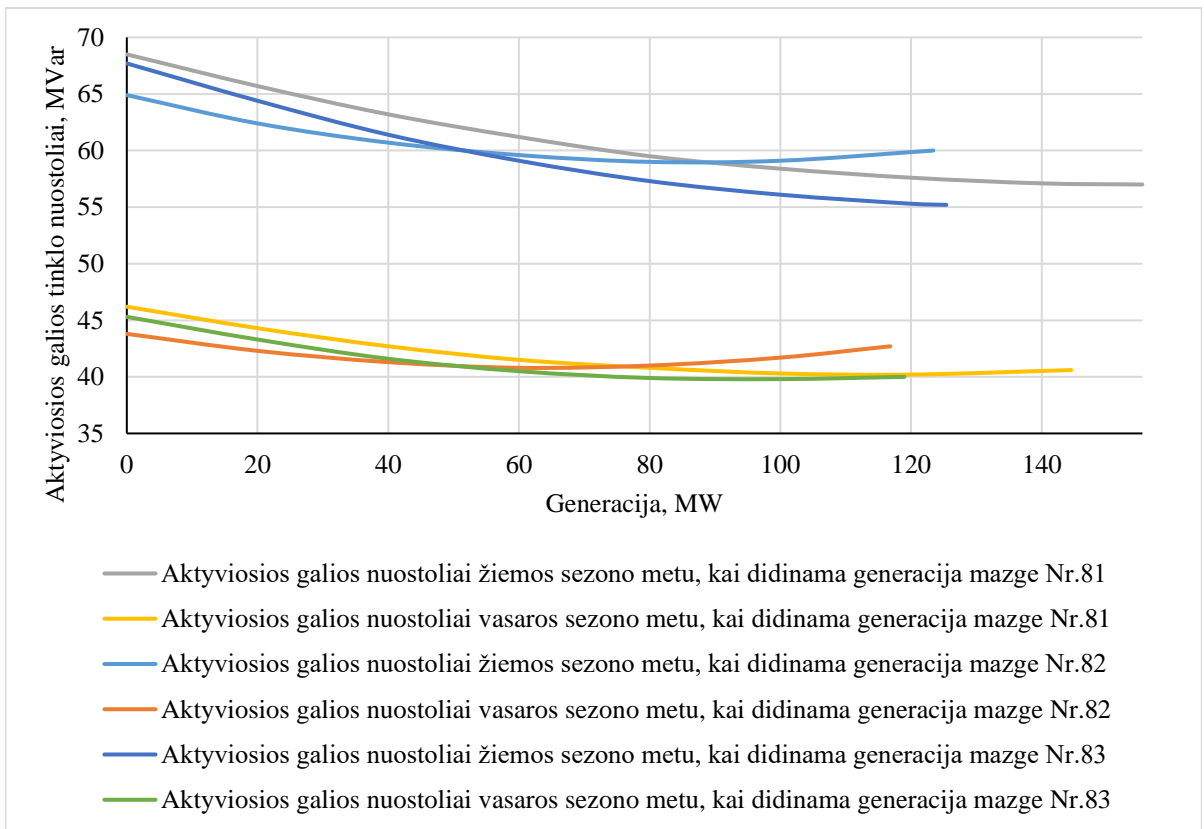


40 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai keičiama generuojama galia mazge Nr. 83

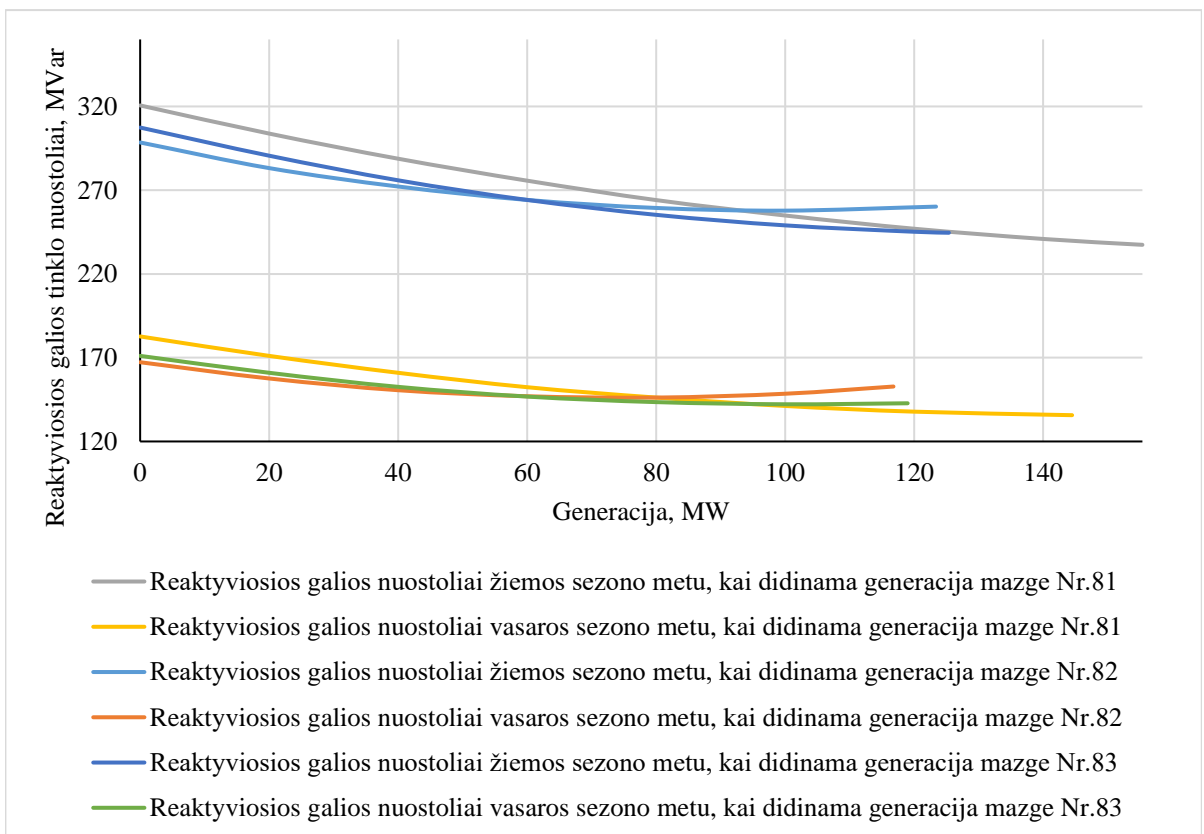
3.2.4. Apibendrinimas

Nustatyta, kad iš visų analizuojamų mazgų, daugiausiai atsinaujinančių šaltinių galios galima prijungti prie mazgo Nr. 81. Generuojama galia šiame mazge galėtų būti 155,4 MW galios žiemos sezono metu ir 144,5 MW galios vasaros metu. Apskaičiuota, kad mažiausiai generaciją galima padidinti mazge Nr. 83 (vasaros sezono metu 125,4 MW, žiemos – 119 MW).

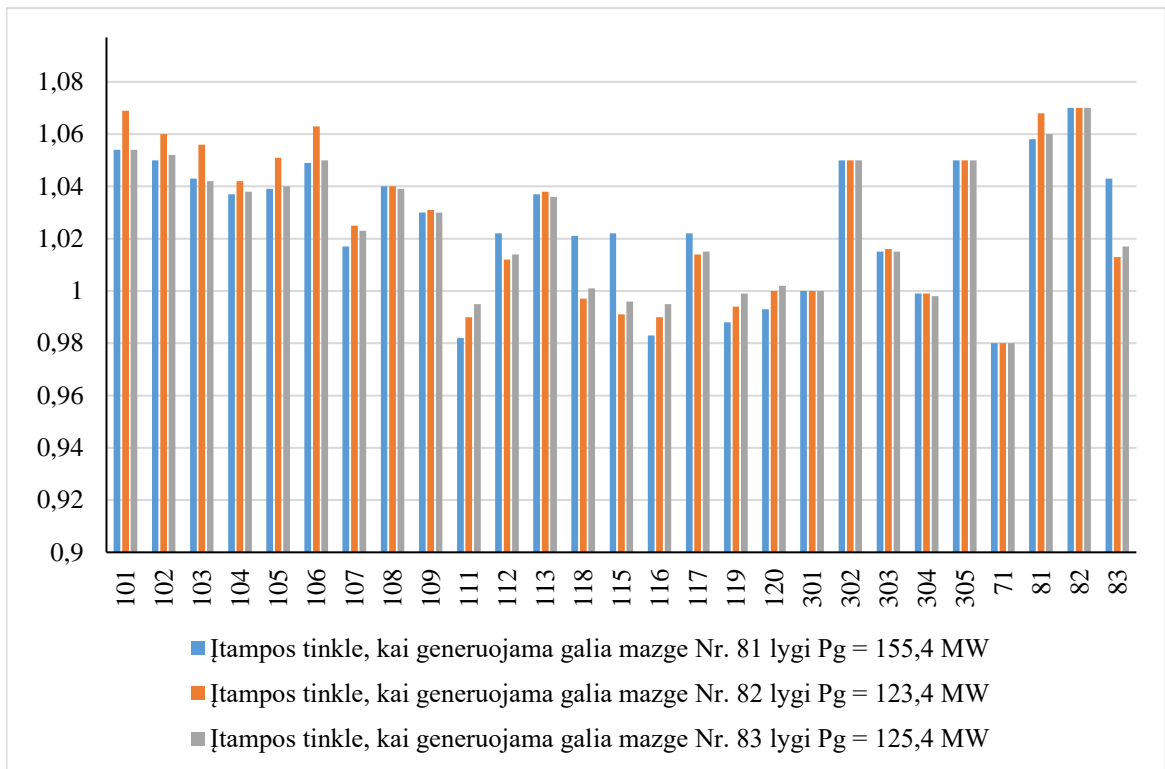
Paveiksluose 41-42 pateikta, kaip aktyvieji ir reaktyvieji nuostoliai tinkle priklauso nuo generacijos. Nustatyta, kad tinklo darbas efektyvesnis, kai generacija prijungimo mazge didėja, nes reaktyvieji ir aktyvieji tinklo nuostoliai mažėja. Mažiausi tinklo nuostoliai susidaro žiemą, kai mazge Nr. 81 padidinama generacija iki 120 MW galios (aktyvieji nuostoliai – 40,2 MW, reaktyvieji – 137,8 MVar). Vasarą mažiausi tinklo nuostoliai susidaro, kai generacija mazge Nr. 83 lygi 100 MW galios (aktyvieji nuostoliai – 39,8 MW, reaktyvieji – 142,2 MVar). 43 paveiksle pateiktos tinklo mazgų įtampos prie maksimalių galimų generacijų. Įtampos išlieka normaliose ribose.



41 pav. Tinklo aktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83



42 pav. Tinklo reaktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83



43 pav. Tinklo mazgų įtampų vertės, kai generuojama maksimali galima galia mazguose Nr. 81-83

3.3. Tinklo su padidinta vėjo generacija ir prijungtu UPFC tyrimas

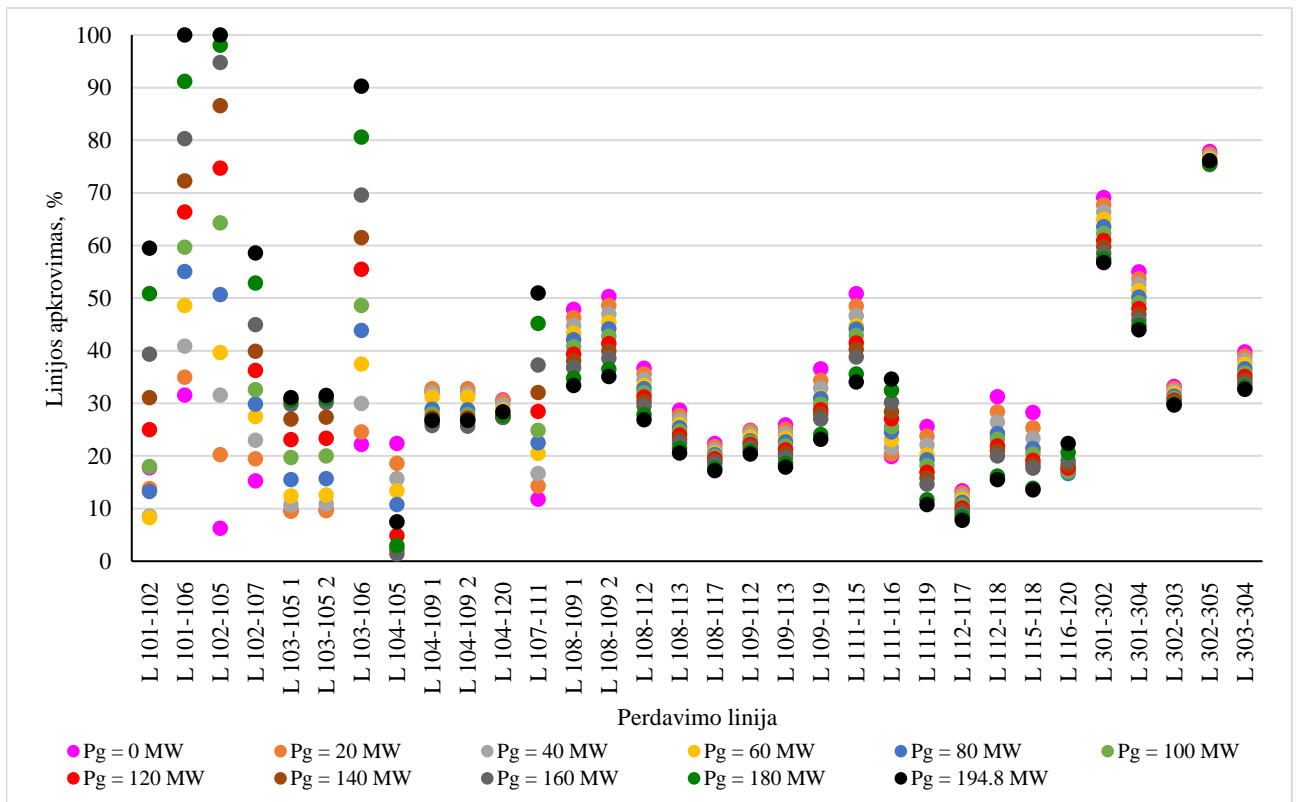
Nustatyta, jog didinant generaciją mazguose Nr. 81-83 persikrauna perdavimo linijos. Linijų perkrovos problemai spręsti tarp tinklo mazgų prijungiamas UPFC įrenginys. UPFC dirba galios valdymo režimu ir reguliuoja linijose perduodamus galios srautus. Įtampos valdymas neatliekamas, nes nustatyta, jog esant maksimaliai ir minimaliai galimai generacijai tinkle įtampos išlieka normaliose ribose. Keičiant UPFC nustatytas aktyviosios ($P_{nust.}$) galios reikšmes, nustatoma maksimali galima generacija mazguose Nr. 81-83. Visais atvejais nustatomos optimaliausios FACTS valdiklio $P_{nust.}$ vertės, kad tinkle susidarytų mažiausi nuostoliai.

3.3.1. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 102 ir Nr. 105

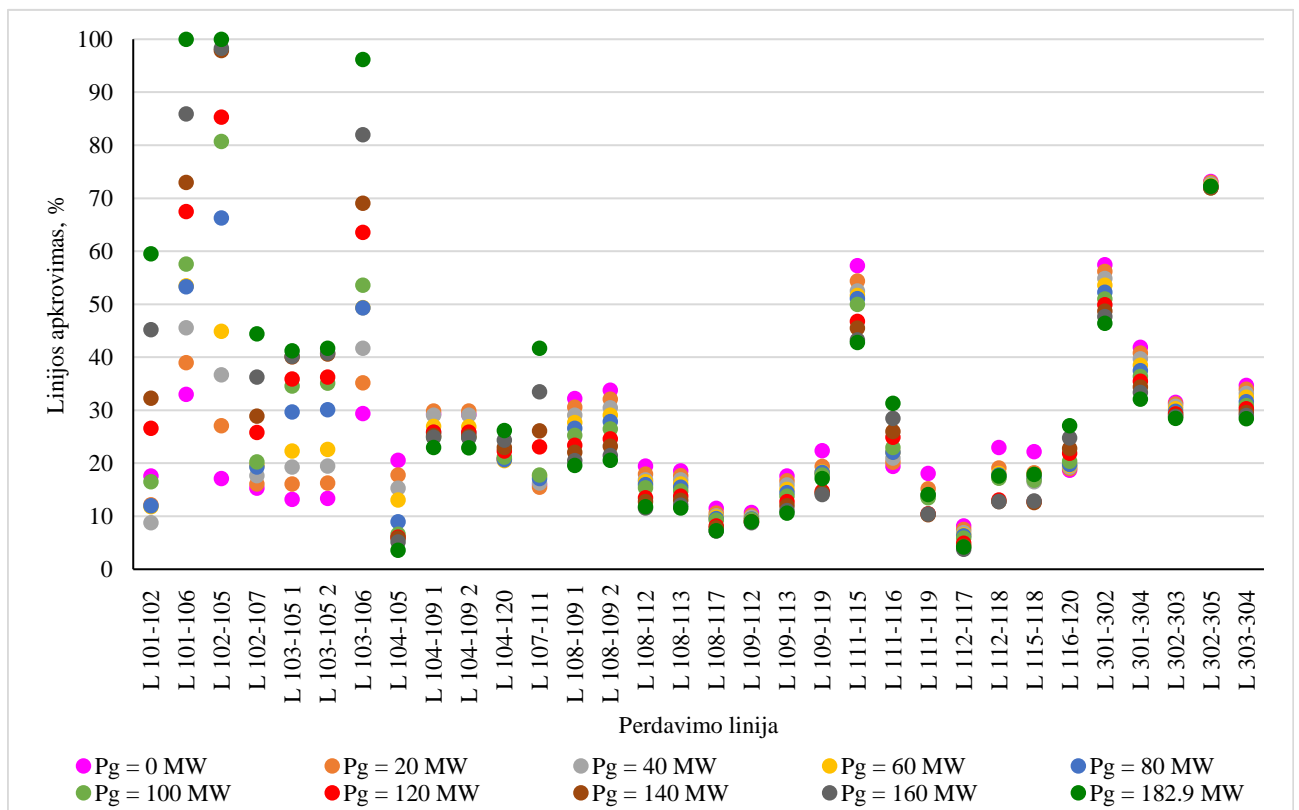
Iš 35 ir 36 paveiksluose pateiktų grafikų nustatyta, jog didinant generaciją mazge Nr. 81 persikrauna linija L 102-105. Šios linijos perkrovos problemai spręsti tarp tinklo mazgų Nr. 102 ir Nr. 105 prijungiamas UPFC įrenginys. Tinklo schema pateikta 4 priede.

Nustatoma maksimali galima generacija mazge Nr. 81, kai UPFC prijungtas linijoje L 102-105. Prijungus UPFC galios srautai tinkle persiskirsto ir dalis galios srauto tekančio per perdavimo liniją L 102-105 UPFC pagalba nukreipiami į perdavimo liniją L 101-106. Dėl šios priežasties ženkliai išauga srautai linijoje L 103-106.

Nustatyta, kad prijungus UPFC maksimali generacija mazge Nr.81 žiemos sezono metu gali būti padidinta 25,4 %, vasaros sezono metu – 26,6 %. Perdavimo linijos L 102-105 ir L 101-106 pasiekia maksimalias galimas perdavimo ribas, kai generacija mazge Nr. 81 žiemos sezono metu yra $P_g = 194,8$ MW, vasaros – $P_g = 182,9$ MW.



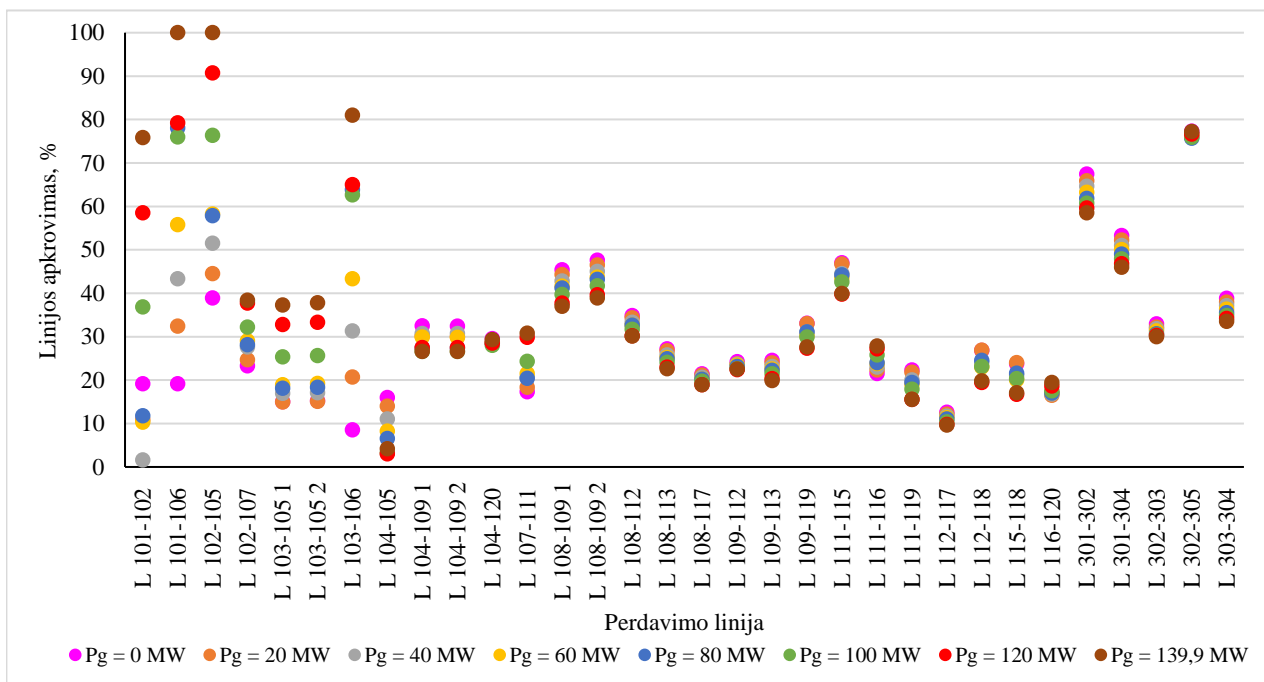
44 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 81



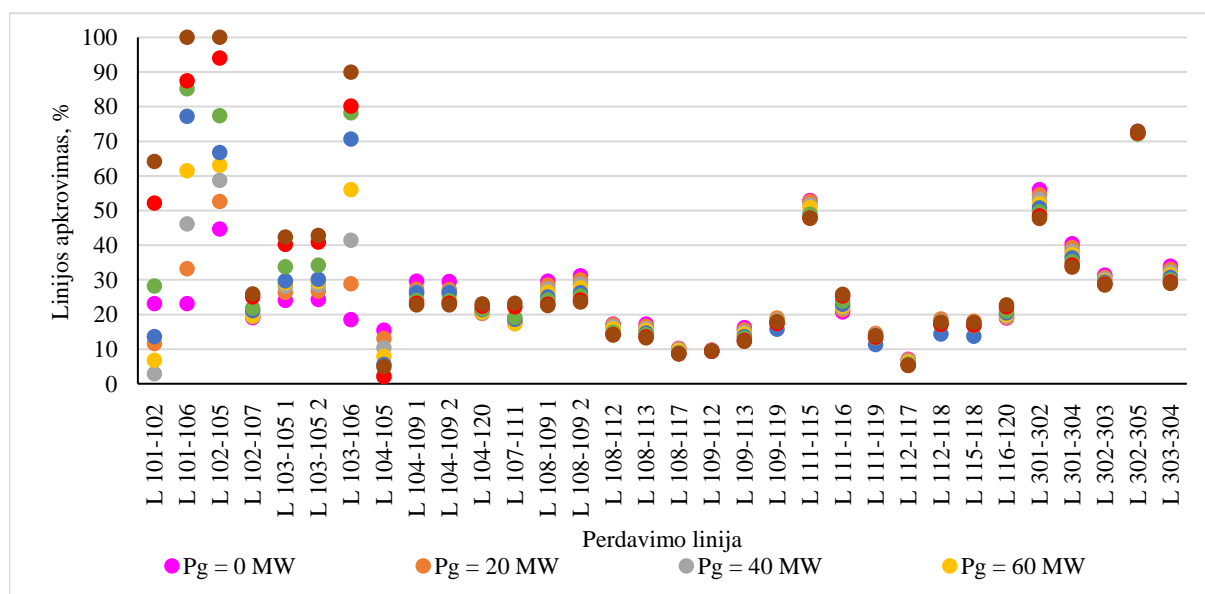
45 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 81

3.3.2. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 101 ir Nr. 106

UPFC įrenginys prijungiamas prie tinklo tarp mazgų Nr. 101 ir Nr. 106, nes didinant generaciją mazge Nr. 82 persikrauna linija L 101-106. Prijungus UPFC įrenginį dalis galios srauto tekančio per liniją L 101-106 keitiklio pagalba nukreipiami į liniją L 102-105. Maksimalias galimas perdavimo ribas linijos L 101-106 ir L 102-105 pasiekia, kai generacija mazge Nr. 82 lygi $P_g = 139,9$ MW žiemos sezono metu ir $P_g = 133,5$ MW vasaros sezono metu. Taigi, UPFC įrenginys leidžia padidinti generaciją mazge Nr. 82 13,4 % žiemos sezono metu ir 14,3 % vasaros metu.



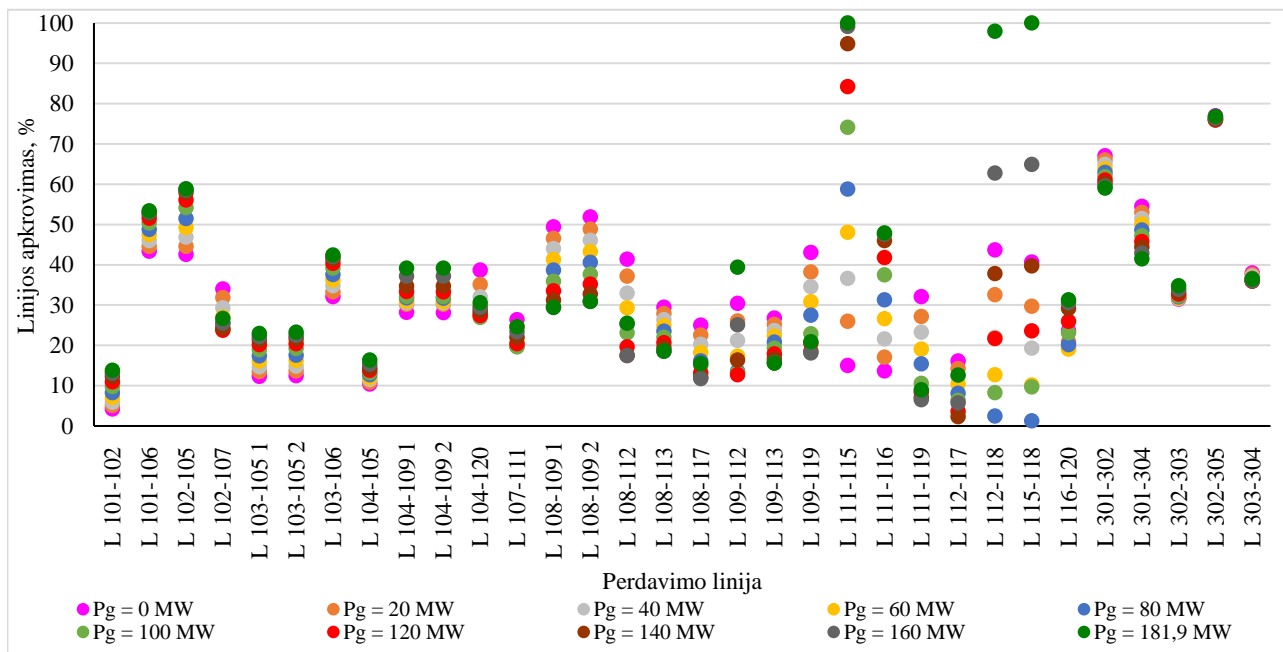
46 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 82



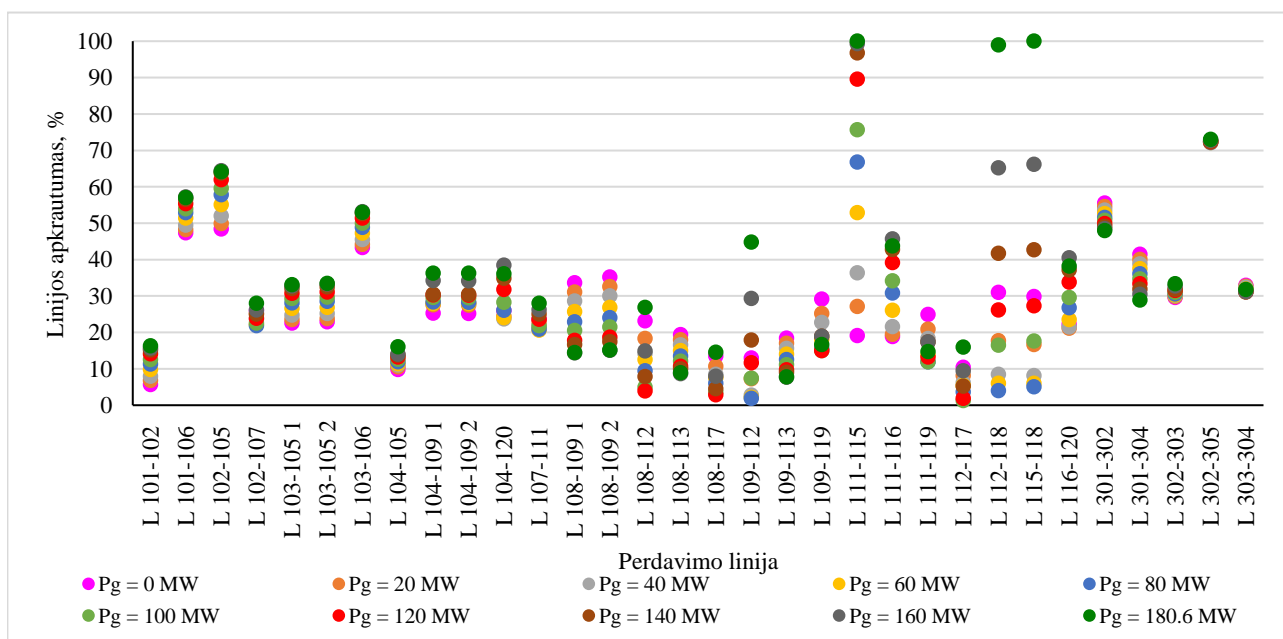
47 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 82

3.3.3. Tinklas su prijungtu UPFC įrenginiu tarp mazgų Nr. 111 ir Nr. 115

Kadangi linija L 111-115 persikrauna, prijungiamas UPFC įrenginys tarp mazgų Nr. 111 ir Nr. 115 perdavimo linijos galios srautams reguliuoti. Prijungus keitiklį prie tinklo generaciją mazge Nr. 83 galima padidinti 45 % žiemos sezono metu ir 51,8 % vasaros sezono metu. Dalis galios srauto tekančio per perdavimo liniją L 111-115 UPFC pagalba nukreipiami į perdavimo liniją L 115-118. Perdavimo linijos L 111-115 ir L 115-118 maksimaliai apkrautos, kai generacija mazge Nr. 83 $P_g = 181,9$ MW žiemos metu, $P_g = 180,6$ MW vasaros metu.



48 pav. Perdavimo linijų apkrovimas žiemos sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 83



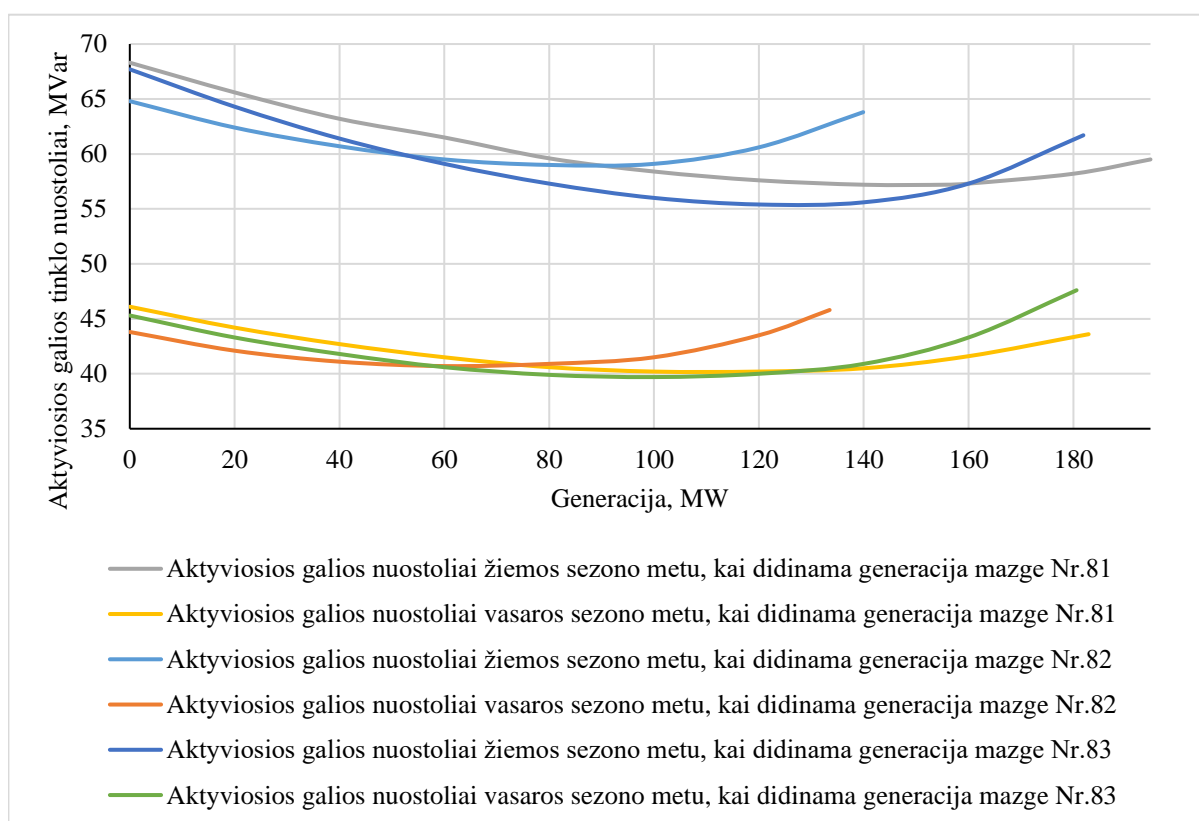
49 pav. Perdavimo linijų apkrovimas vasaros sezono metu, kai prie tinklo prijungtas UPFC ir keičiama generuojama galia mazge Nr. 83

3.3.4. Apibendrinimas

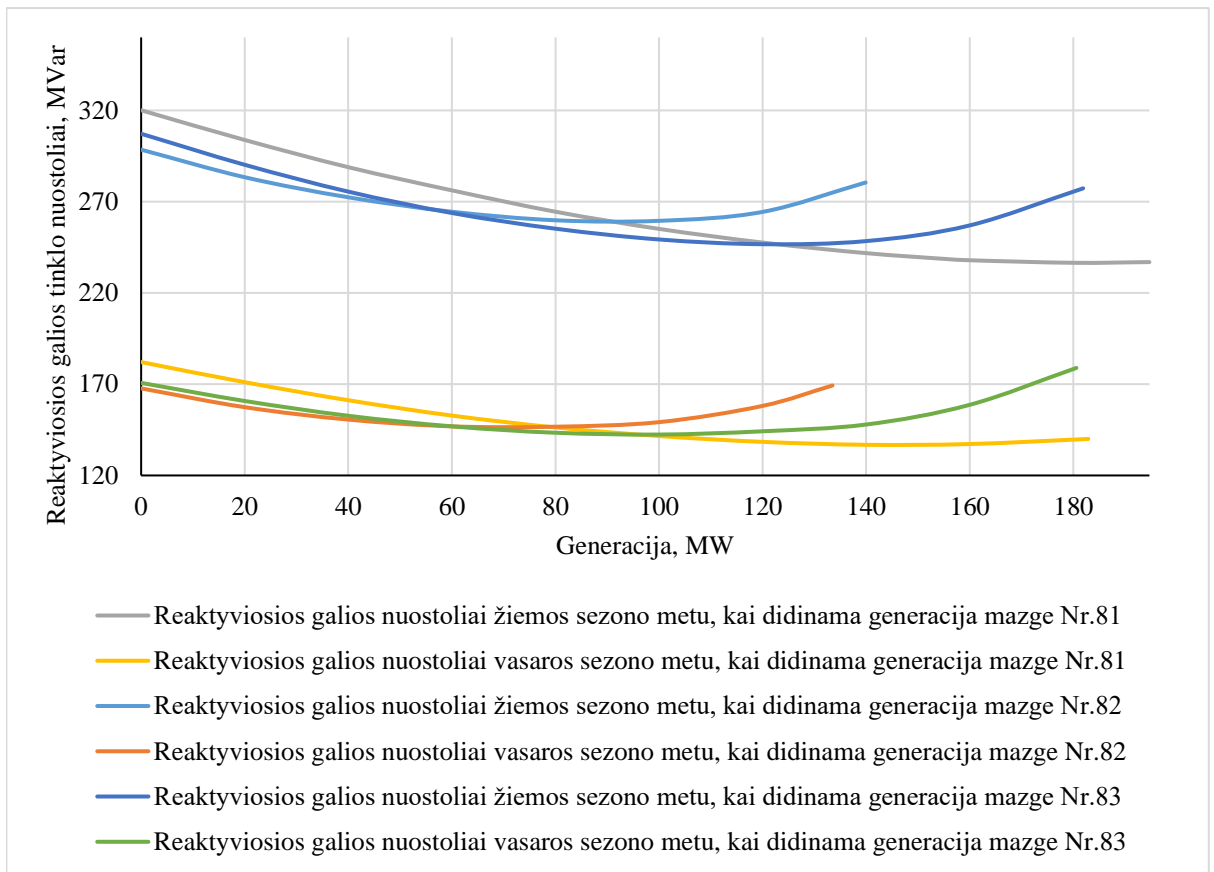
Prijungus UPFC įrenginį skirtinguose sistemos mazguose, nustatyta, kad didžiausia generuojama galia gali būti perduota tinklo mazge Nr. 81 (žiemos metu – 194,8 MW galios, vasaros – 182,9 MW). Iš visų analizuotų atvejų, UPFC prijungimas tarp mazgų Nr. 111 ir Nr. 115 turi didžiausią įtaką linijų apkrovimui. Prijungus UPFC tarp šių mazgų žiemos sezono metu generuojamą galią mazge Nr. 83 galima padidinti 45 % ir vasaros metu – 51,8 %.

Nustatyta, kad UPFC įrenginio prijungimas neturi didelės įtakos tinklo nuostoliams. Prijungus UPFC susidaro panašaus dydžio reaktyvieji ir aktyvieji nuostoliai, kaip ir dirbant tinklui be UPFC. Aktyvioji galia pasikeičia iki 0,2 MW, o reaktyvioji iki 1,7 MVar. (žr. 5 priedą).

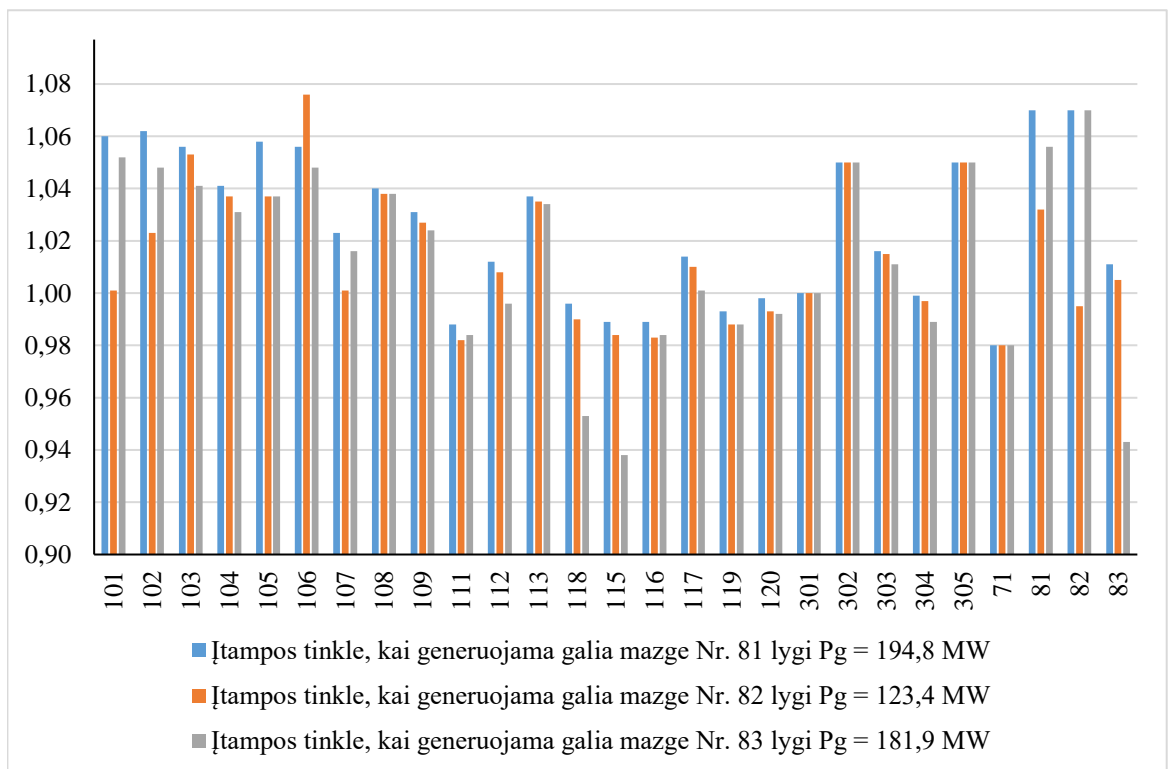
Prijungus keitiklių ženkliai padidinamos tinklo perdavimo galimybės, tačiau padidėja tinklo nuostoliai. Didžiausi nuostoliai tinkle susidaro žiemos sezono metu, kai generacija mazge Nr. 83 $P_g = 181,9$ MW (aktyvieji – $P_{nuost.} = 61,7$ MW, reaktyvieji – $Q_{nuost.} = 277,3$ MVar). Vasaros sezono metu didžiausi nuostoliai susidaro, kai generacija mazge Nr. 83 $P_g = 180,6$ MW (aktyvieji – $P_{nuost.} = 47,6$ MW, reaktyvieji – $Q_{nuost.} = 178,9$ MVar). Mažiausi aktyvieji tinklo nuostoliai žiemos sezono metu susidaro, kai generacija mazge Nr. 83 $P_g = 120$ MW ($P_{nuost.} = 55,4$ MW), vasaros sezono metu – 100 MW ($P_{nuost.} = 39,7$ MW). Mažiausi reaktyvieji nuostoliai susidaro, kai generacija mazge Nr. 81 yra $P_g = 180$ MW ($Q_{nuost.} = 236,5$ MVar) žiemos metu, vasaros metu – $P_g = 140$ MW ($Q_{nuost.} = 136,8$ MVar). Prijungus UPFC ir padidinus generaciją, tinklo mazgų įtampų vertės atitinka perdavimo tinklų reikalavimus (žr. 52 pav.). Turi būti užtikrintas UPFC nustatytos aktyviosios galios ($P_{nust.}$) valdymas priklausomai nuo generacijos, kad būtų užtikrinti kuo mažesni nuostoliai tinkle.



50 pav. Tinklo aktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr. 81-83, kai tinklas dirba su prijungtu UPFC



51 pav. Tinklo reaktyviosios galios nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazguose Nr. 81-83, kai tinklas dirba su prijungtu UPFC



52 pav. Tinklo mazgų įtampų vertės, kai prijungtas prie tinklo UPFC ir generuojama maksimali galima galia mazguose Nr. 81-83 žiemos sezono metu

Išvados

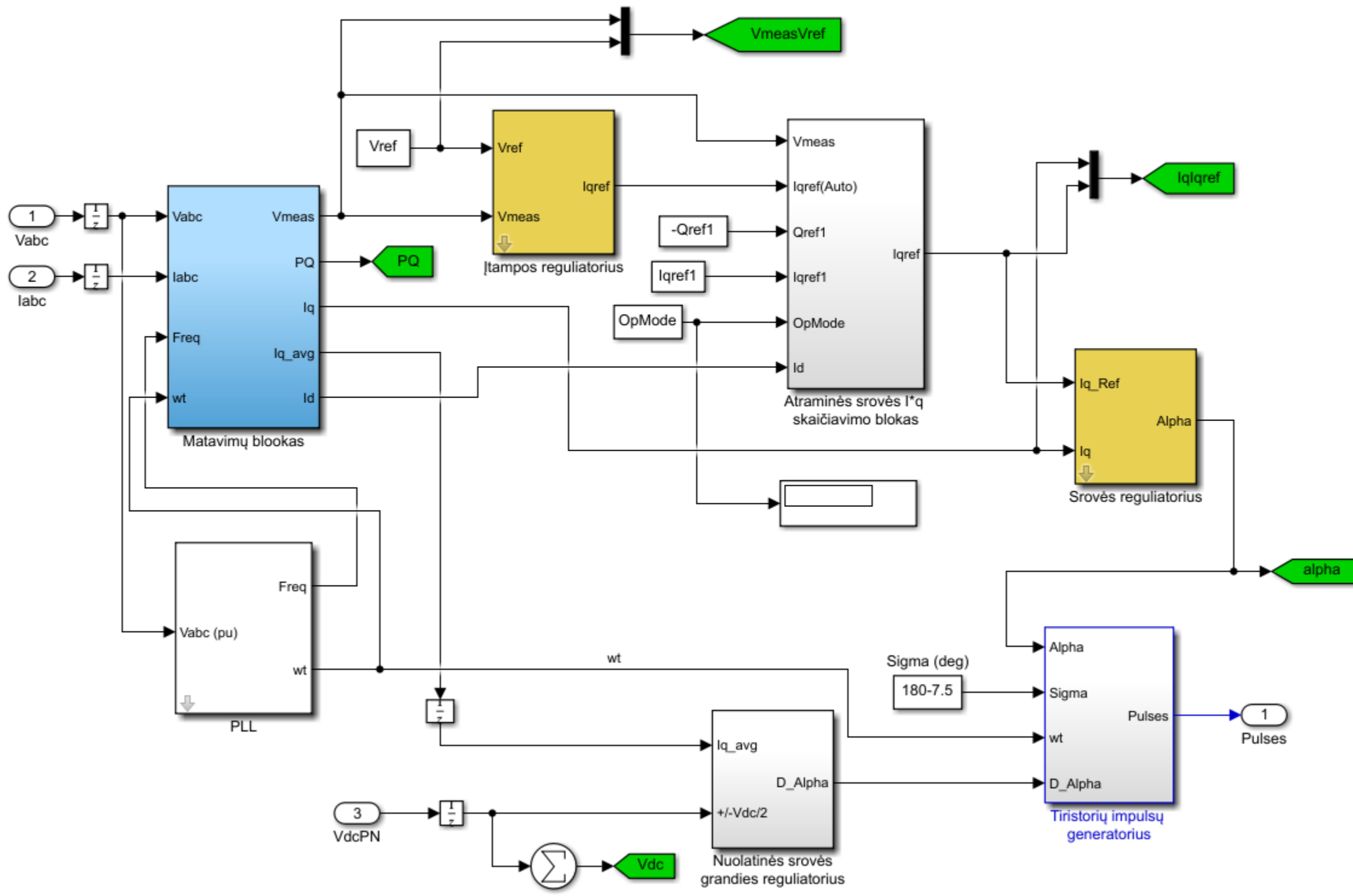
1. Norint palaikyti stabilų elektros tinklo darbą turi būti reguliuojama generacija ir apkrova, kontroliuojami srovės srautai, kad nebūtų perkrauti sistemos elementai, išlaikyta įtampa $\pm 5\%$ nominalios vertės ir užtikrintas (N-1) sistemos darbas.
2. FACTS įrenginiai skirstomi į keturis pagrindinius tipus: nuoseklieji, šuntiniai, nuoseklūs-nuoseklūs ir šuntiniai – nuoseklūs. Problemoms susijusioms su įtampos ir reaktyviosios galios valdymu naudojami šuntiniai valdikliai. Jei tinkle vyrauja problemos susijusios su aktyviosios galios valdymu, naudojami nuoseklūs FACTS įrenginiai.
3. Atlikta MATLAB Simulink FACTS modelių analizė. Nustatyta, kad STATCOM įrenginys palaiko įtampą $\pm 5\%$ ribose, nes sumažėjus tinklo įtampai, STATCOM įrenginys pradeda generuoti reaktyviąją galią (+70MVar) į tinklą, kad išlaikyti įtampą prie 0.979 s.v. vertės, o padidėjus tinklo įtampai, STATCOM vartoja reaktyviąją galią (-70MVar) ir palaiko įtampą prie 1.021 s.v. vertės. Nustatyta, kad UPFC palaiko nustatytas aktyviasias ir reaktyviasias galias ir perskirsto galios srautus gretimose linijose. Padidinus UPFC, prijungto prie linijos L2, nustatytas reaktyviosios ir aktyviosios galios vertes, pasikeičia galios srautai linijoje L1 ir L3.
4. Sumodeliuotas 27 mazgų tinklas ir nustatyta maksimali galima generacija tinklo mazguose Nr. 81-83. Nustatyta, kad daugiausiai atsinaujinančių šaltinių galima prijungti mazge Nr. 81 (vasaros sezono metu 144,5 MW, žiemos –155,4 MW).
5. Nustatyta, kad prijungus prie tinklo UPFC padidinama maksimali galima generacija mazguose Nr. 81-83. Mazge Nr. 81 generacija žiemos metu gali būti padidinta 25,4 %, vasaros – 26,6 %. Mazge Nr. 82 perduodama galia žiemos sezono metu gali būti padidinta 13,4 %, vasaros – 14,3 %. Mazge Nr. 83 žiemos metu – 45 %, vasaros metu 51,8 %. Prijungus UPFC prie tinklo ir ženkliai padidinus generaciją, išauga tinklo nuostoliai. Nustatyta, kad kai generacija mazge Nr. 83 yra lygi 181,9 MW, didžiausi aktyvieji tinklo nuostoliai yra 61,7 MW, reaktyvieji – 277,3 MVar.

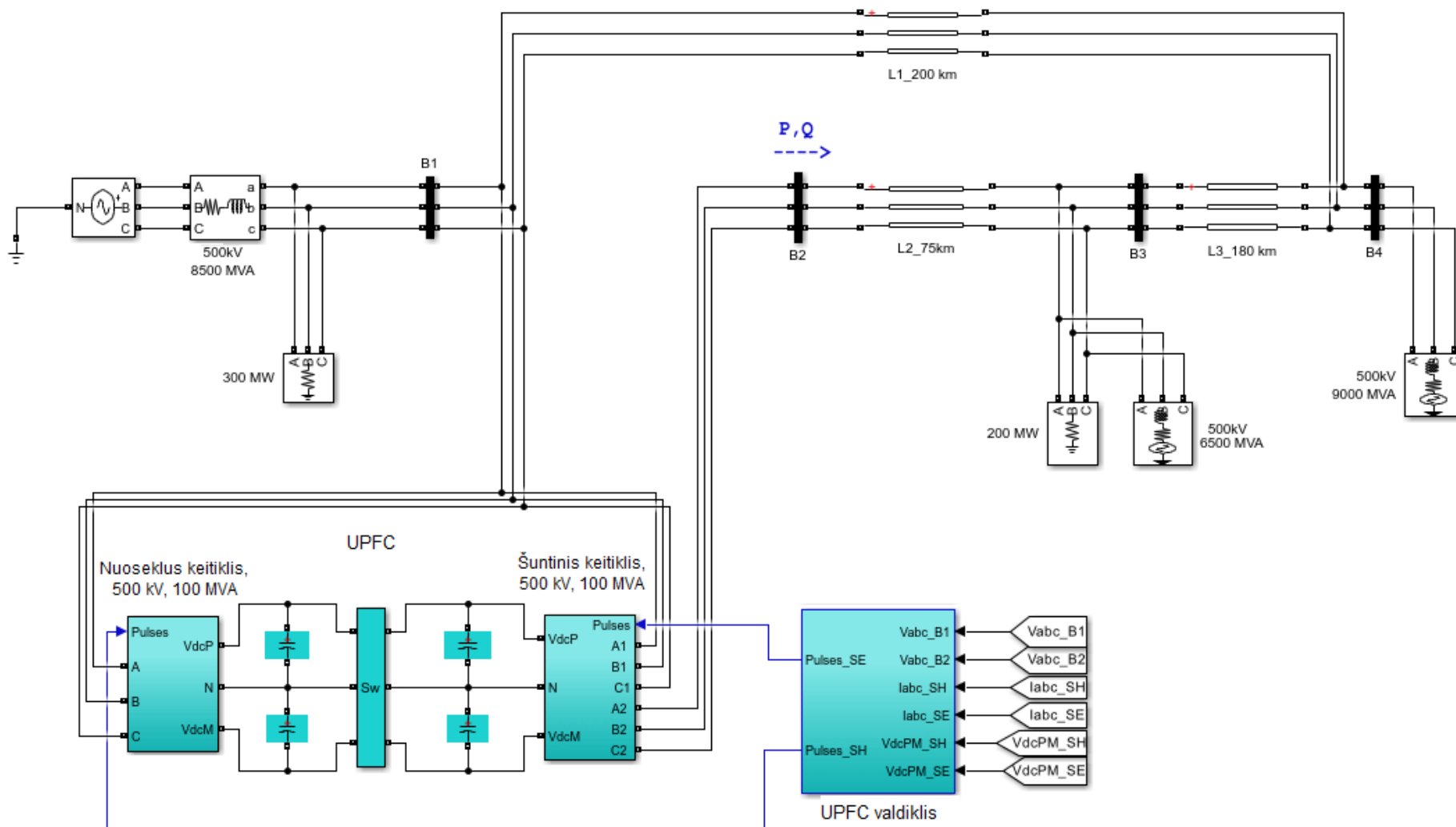
Literatūros sąrašas

1. OLABI, A.G. et al. *Critical review of energy storage systems* [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.energy.2020.118987
2. MAHDAD, B. *Contribution to the improvement of power quality using multi hybrid model based wind-shunt FACTS* [interaktyvus]. 2011, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874810
3. IRENA. *Renewable capacity statistics 2023*, 2013. ISBN: 978-92-9260-525-4.
4. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTREIJA. *Nacionalinė energetikos nepriklausomybės strategija*, 2018.
5. ALBADI, M.H. ir E.F. EL-SAADANY, *Overview of wind power intermittency impacts on power systems* [interaktyvus]. 2010, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.epsr.2009.10.035
6. IMPRAM, S. et al. *Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey*. [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.esr.2020.100539
7. KAMIL, K. et al. *Analysis on the voltage stability on transmission network with PV interconnection* [interaktyvus]. 2019, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.esr.2020.100539
8. LUHANA, P.P. ir M.J. SHAH. *Stability improvement of fixed speed induction generator based wind farm using statcom for different types of fault* [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754825
9. DANGAR, P. ir J. SARVAIYA. *Review on DG optimal planning strategy considering the bus voltage stability improvement of a radial type network* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICIRCA48905.2020.9182965
10. KEOKHOUNGNING, T. et al. *Transmission Network Expansion Planning with High-Penetration Solar Energy Using Particle Swarm Optimization in Lao PDR toward 2030* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.3390/en15228359
11. ZHOU, J. et al. *Research on transmission congestion of power system containing wind farms based on genetic algorithm* [interaktyvus]. 2011, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1109/DRPT.2011.5993871
12. SHUANG YU et al. *A new methodology for designing hydrogen energy storage in wind power systems to balance generation and demand*. [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1109/SUPERGEN.2009.5348061
13. DAI, K. et al. *Environmental issues associated with wind energy – A review*. [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi:10.1016/j.renene.2014.10.074
14. CIGRE GREEN BOOKS *Flexible AC Transmission Systems* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1007/978-3-030-35386-5
15. EUROPOS SAJUNGOS OFICIALUSIS LEIDINYS. *Komisijos reglamentas (ES) 2017/1485 2017 m. rugpjūčio 2 d. kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės*, 2017, Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1485>
16. DIXON, J. et al. *Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review* [interaktyvus]. 2005, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/JPROC.2005.859937

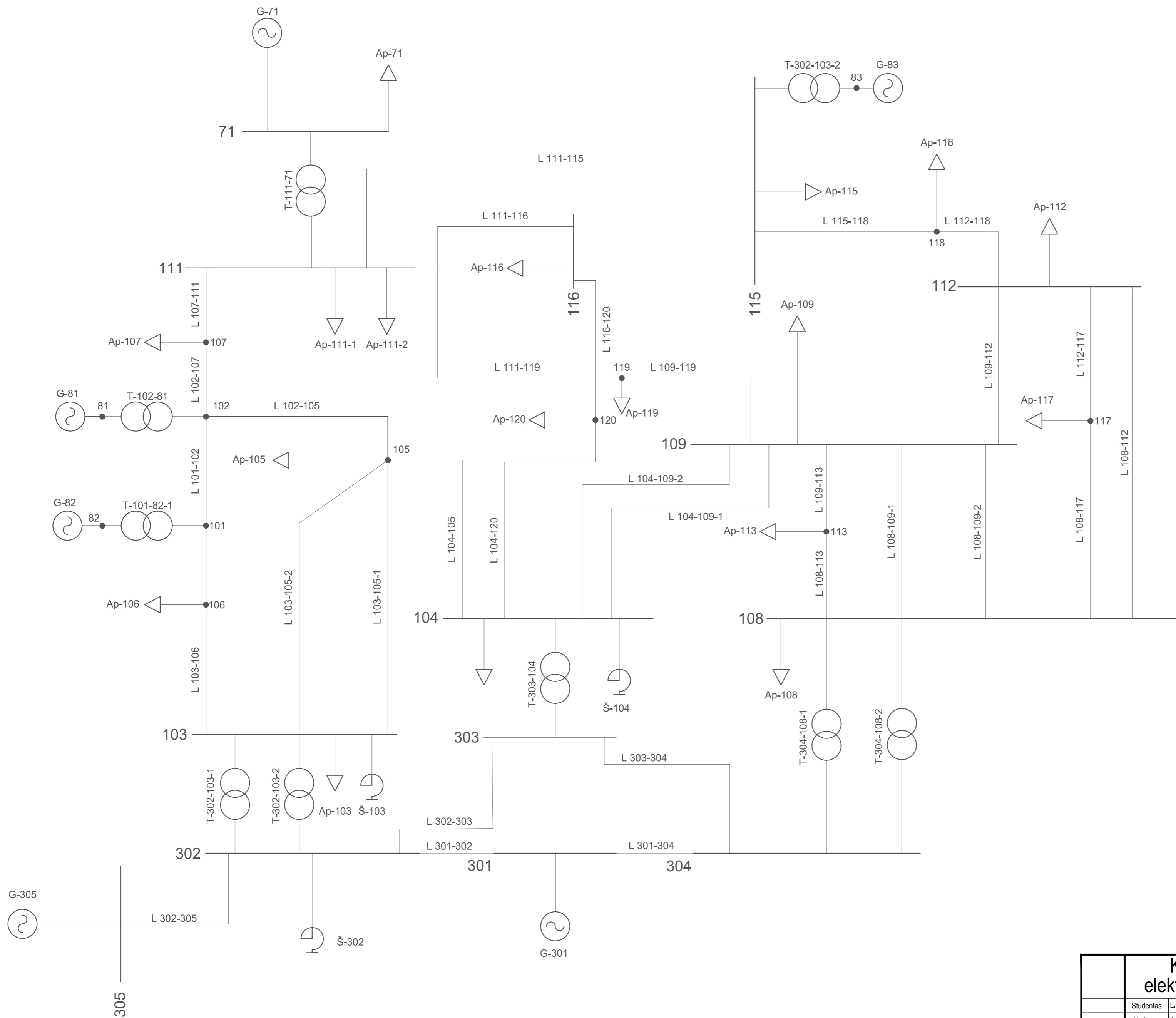
17. MIRSAEIDI, S. et al. *A Review on Optimization Objectives for Power System Operation Improvement Using FACTS Devices* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.3390/en16010161
18. AISHVARYA N. ir S. K. SRIVASTAVA *An Overview of Facts Devices used for Reactive Power Compensation Techniques* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.17577/IJERTV4IS120071
19. CHAKRABORTY, S. et al. *Coordination of D-STATCOM & SVC for Dynamic VAR Compensation and Voltage Stabilization of an AC Grid Interconnected to a DC Microgrid* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/TIA.2021.3123264
20. DAHAT, S.A. ir A. DHABALE. *Co-ordinated Control of Combination of SSSC and SVC for Enhancement of Power System Voltage Stability* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/PESGRE52268.2022.9715881
21. MA, Y. et al. *A review of STATCOM on the electric power system* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICMA.2015.7237475
22. LANGNER, D. et al. *Application benefits of Line- or self-commutated Static Var Compensator* [interaktyvus]. 2014, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/PESGM.2014.6938988
23. A.H. NOROUZI ir A.M. SHARAF *Two control schemes to enhance the dynamic performance of the STATCOM and SSSC* [interaktyvus]. 2005, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/TPWRD.2004.839725
24. B. U. MUSA ir M. MUSTAPHA *Modelling and Simulation of STATCOM for Reactive Power and Voltage Control* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: <https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42350466.pdf>
25. ZHENGPING XI ir S. BHATTACHARYA. *STATCOM Control and Operation with Series Connected Transformer Based 48-pulse VSC* [interaktyvus]. 2007, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/TPWRD.2004.839725
26. RUPESH U. P. et al. *Analysis of T-STATCOM-6, 12, 48 Pulse* [interaktyvus]. 2018, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: <http://www.ijmtst.com/volume4/issue12/1.IJMTST041201.pdf>
27. EBRAHIMI, R. et al. *A Robust Fuzzy-based Control Technique for Wind Farm Transient Voltage Stability Using SVC and STATCOM: Comparison Study.* [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215750
28. BELHAMIDI, M. et al. *Examining the effects of utilizing “D-STATCOM and D-SVC” in the grid power connected to the wind farm.* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/EDiS57230.2022.9996499
29. BELHAMIDI, M. et al. *Analysis of D-SVC and D-STATCOM in Microgrids with Wind Farm Integration* [interaktyvus]. 2022, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/CISTEM55808.2022.10043943
30. QATAMIN, A. et al. *SVC versus STATCOM for improving power system loadability: A case study* [interaktyvus]. 2017, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/IREC.2017.7926048.
31. AZIZ BIABANI, M.A.K. et al. *Power system stability enhancement using static synchronous series compensator* [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/SCOPE5.2016.7955875.
32. JADHAV, A.K. ir V.A. KULKARNI. *Review on Improvement in Rotor Angle and Power System Stability Using SSSC Based Controller.* [interaktyvus]. 2018, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/ICCPEIC.2018.8525167.

33. ALIDEMAJ, A. et al. *Control Active and Reactive Power Flow with UPFC connected in Transmission Line* [interaktyvus]. 2012, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1049/cp.2012.2015.
34. ABDELOUAHED, T. et al. *Enhancement of Active and Reactive Power Flow Control over the Transmission Line using UPFC* [interaktyvus]. 2018, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.21608/bfemu.2020.117016.
35. ALIDEMAJ, A. et al. *Control Active and Reactive Power Flow with UPFC connected in Transmission Line.* [interaktyvus]. 2012, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1049/cp.2012.2015.
36. K.N.BABU et al. *Power System Based Simulation Study of UPFC in a Single Transmission Line System* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.15662/IJAREEIE.2015.0404021
37. SAHOO, A.K. et al. *Modeling and simulation of 48-pulse VSC based STATCOM using simulink's power system blockset* [interaktyvus]. 2006, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/IICPE.2006.4685386
38. ABDELLAOUI, A. et al. *STATCOM-based 48-pulses three level GTO dedicated to VAR compensation and power quality improvement.* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1109/SMART.2015.7399248
39. TANUSHREE, K. ir R. PAWAN. *Modeling, Analysis and Optimal Location of UPFC for Real Power Loss Minimization* [interaktyvus]. 2013, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: <https://www.ijaiem.org/volume2issue7/IJAIEM-2013-07-16-050.pdf>
40. CH. CHENGAIHAH et al. *Control Setting of Unified Power Flow Controller Through Load Flow Calculation* [interaktyvus]. 2008, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/241596076_CONTROL_SETTING_OF_UNIFIED_POWER_FLOW_CONTROLLER_THROUGH_LOAD_FLOW_CALCULATION
41. SUNIL, K.A. V et al. *Transmission Loss Allocation and Loss Minimization By Incorporating UPFC* [interaktyvus]. 2011, [žiūrėta 2023 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per: doi: 10.1088/0967-3334/23/2/309



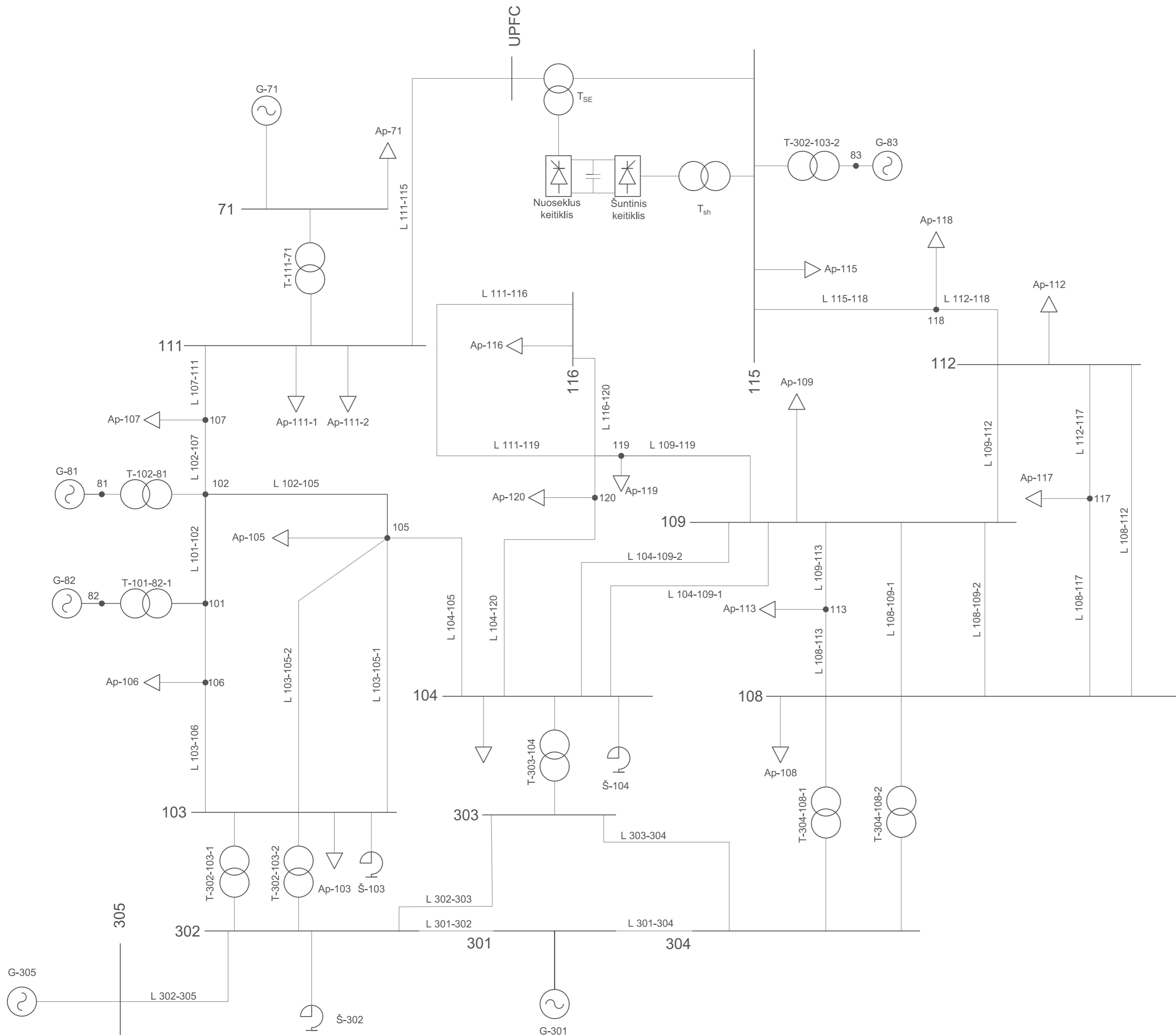


Tinklo schema



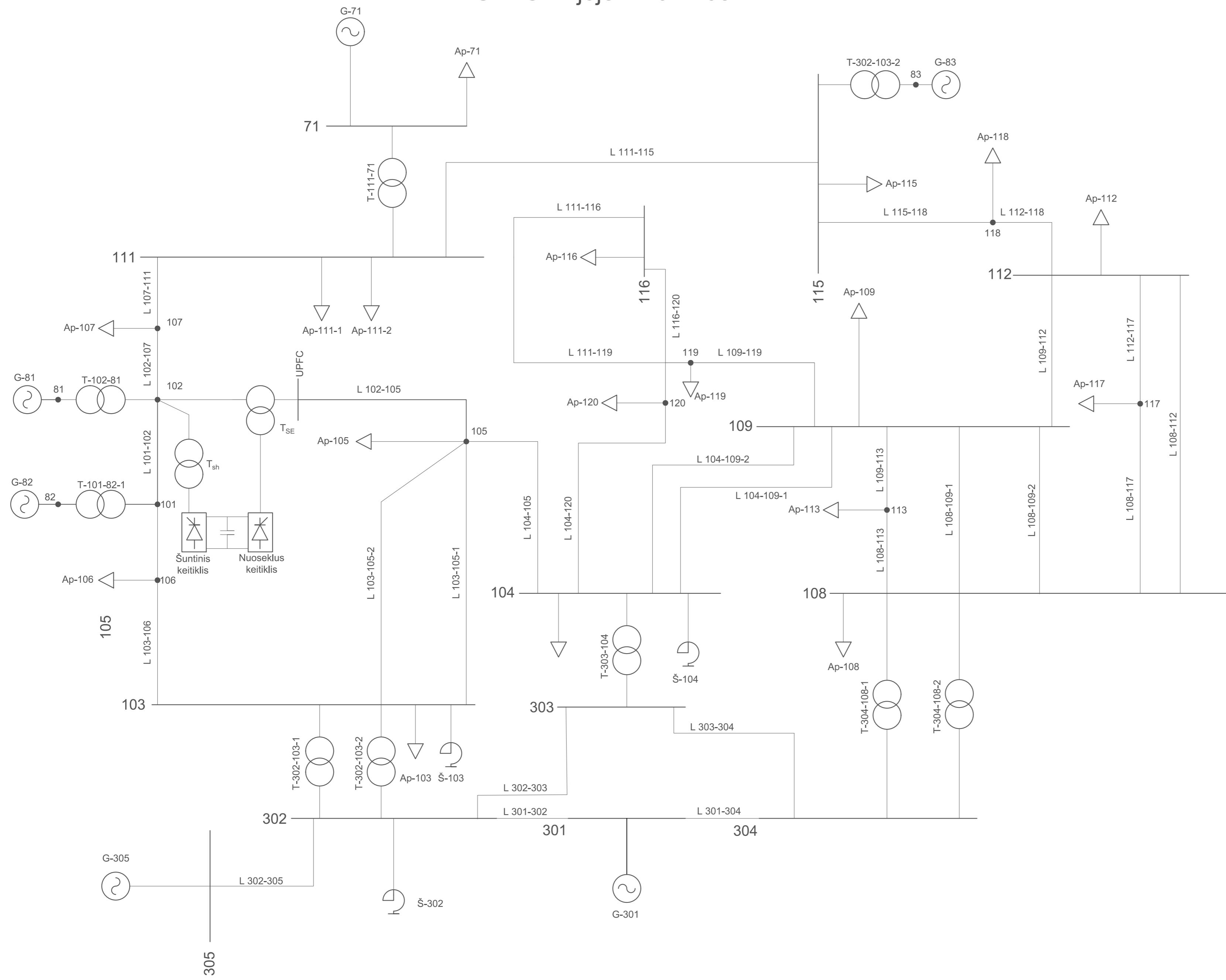
		KTU Elektros ir elektronikos fakultetas			
	Studentas	L. Platakytė		Tinklo schemas	
	Vadovas	A. Jonaitis			
				0	
Proj. dalis				Priedas Nr. 4	
Pavardė					
Parašas				1	Lapų
Data				1	1

Tinklo schema su prijungtu UPFC linijoje L 111-115



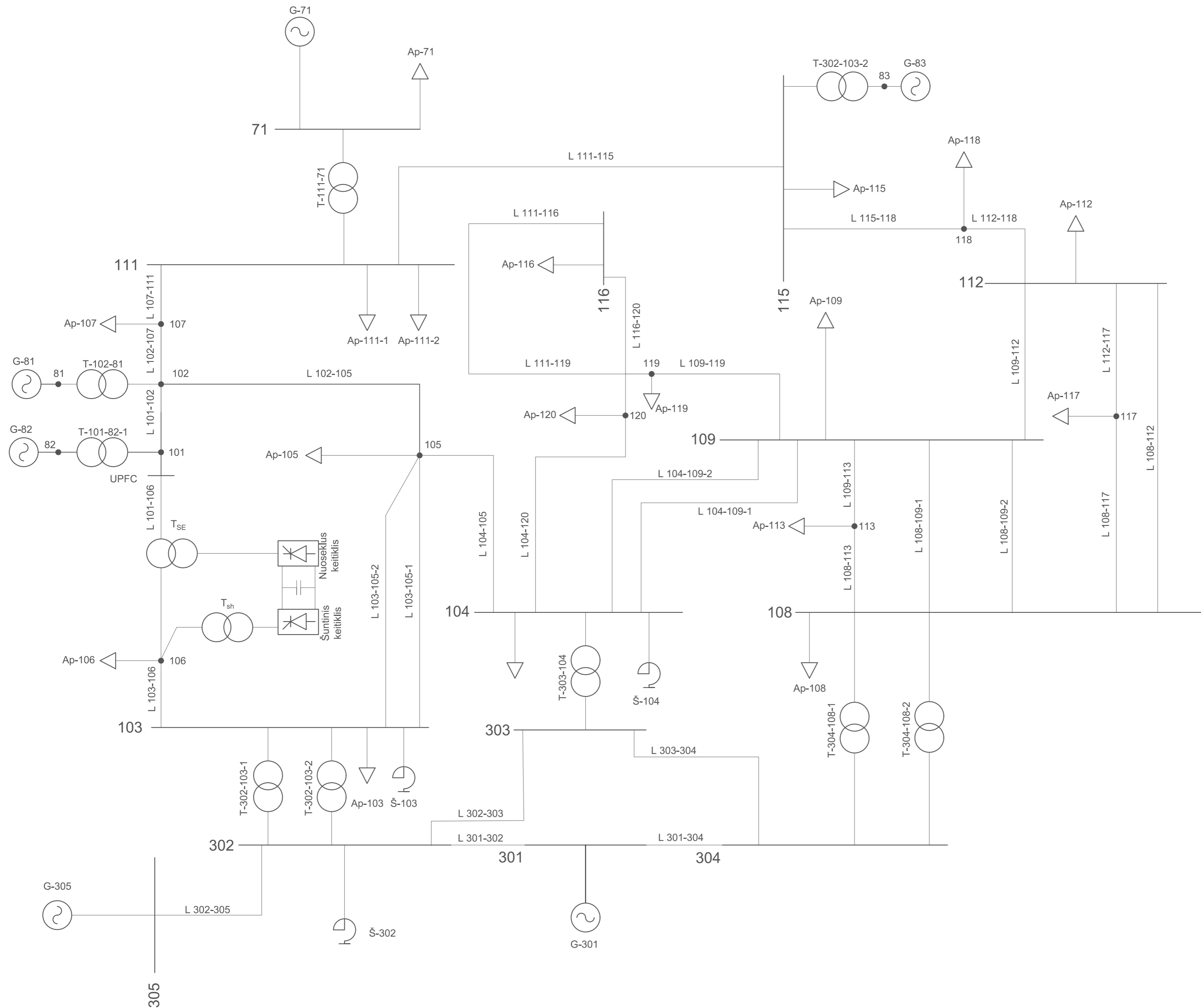
Proj. dalis	
Pavardė	
Parašas	
Data	

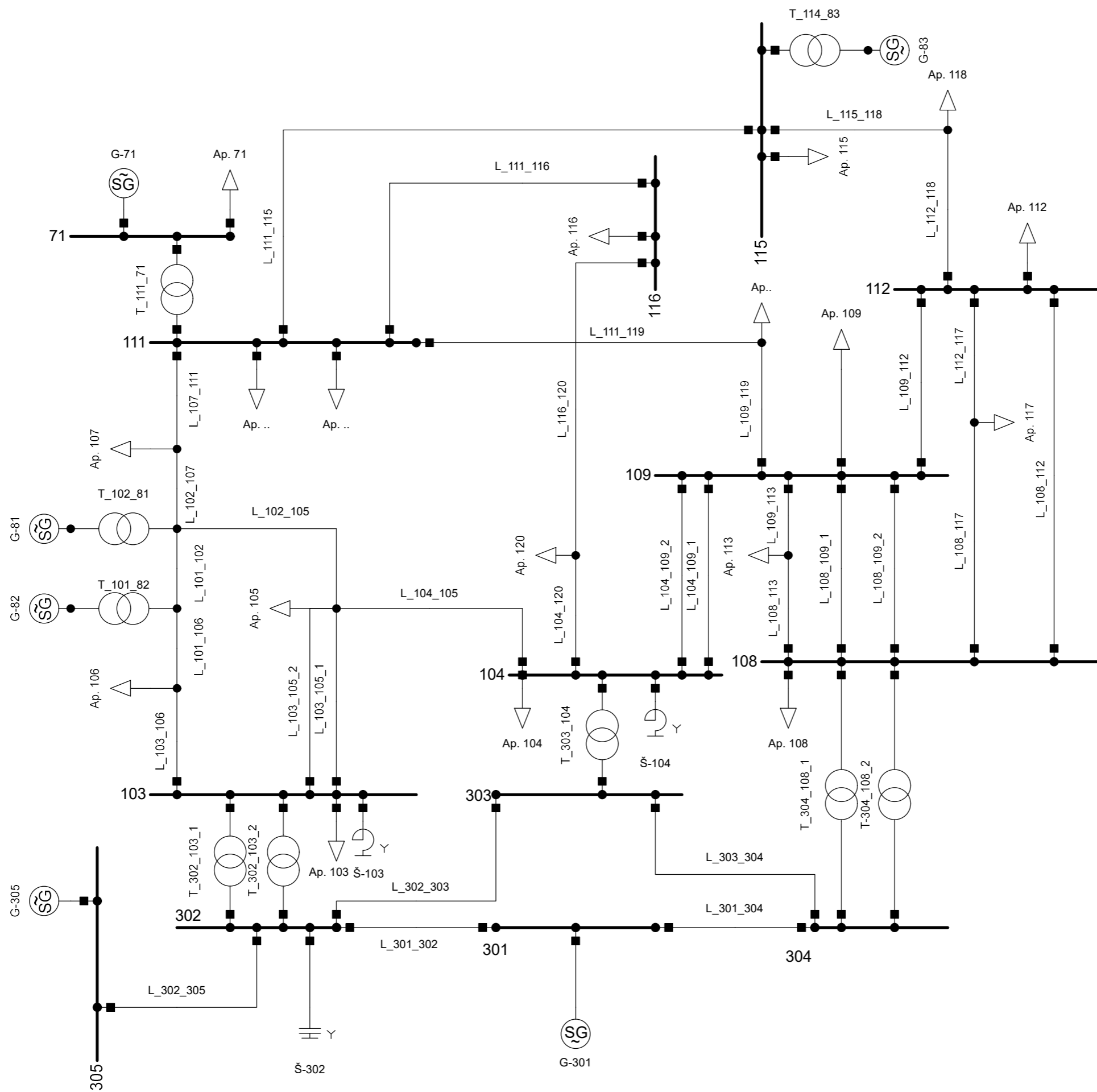
Tinklo schema su prijungtu UPFC linijoje L 102-105

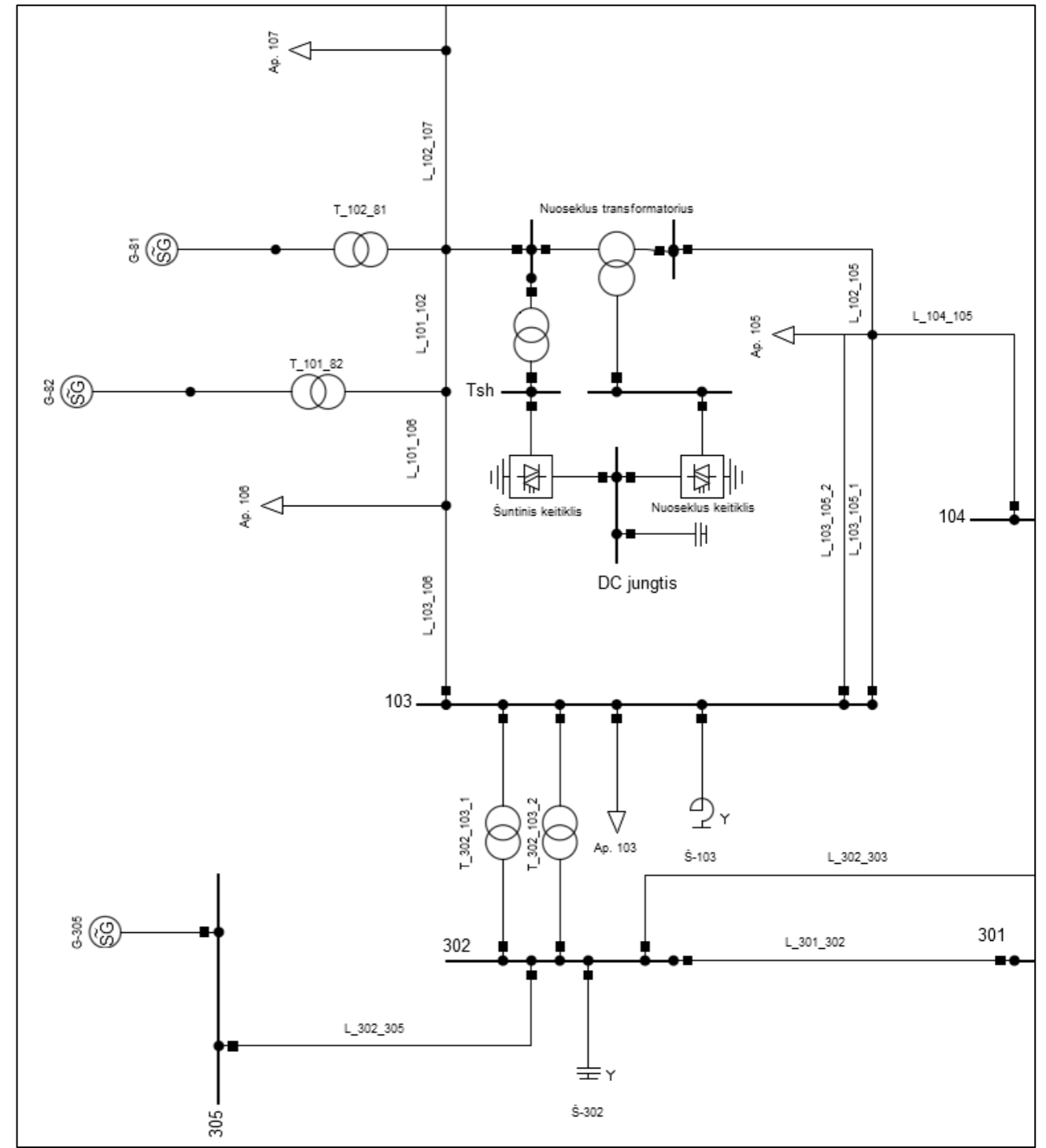
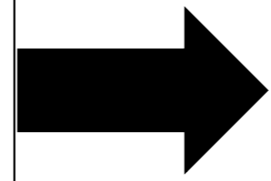
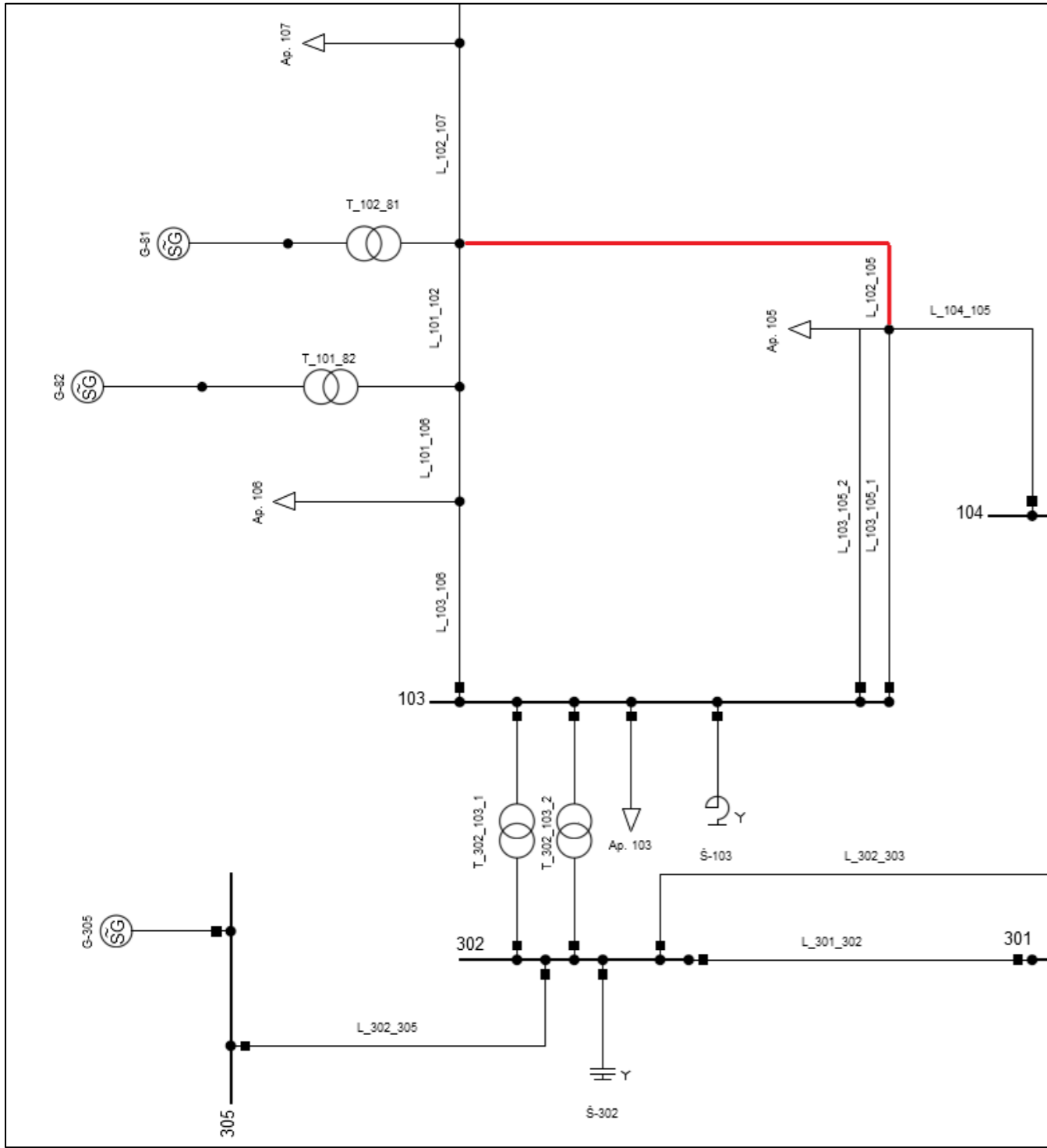


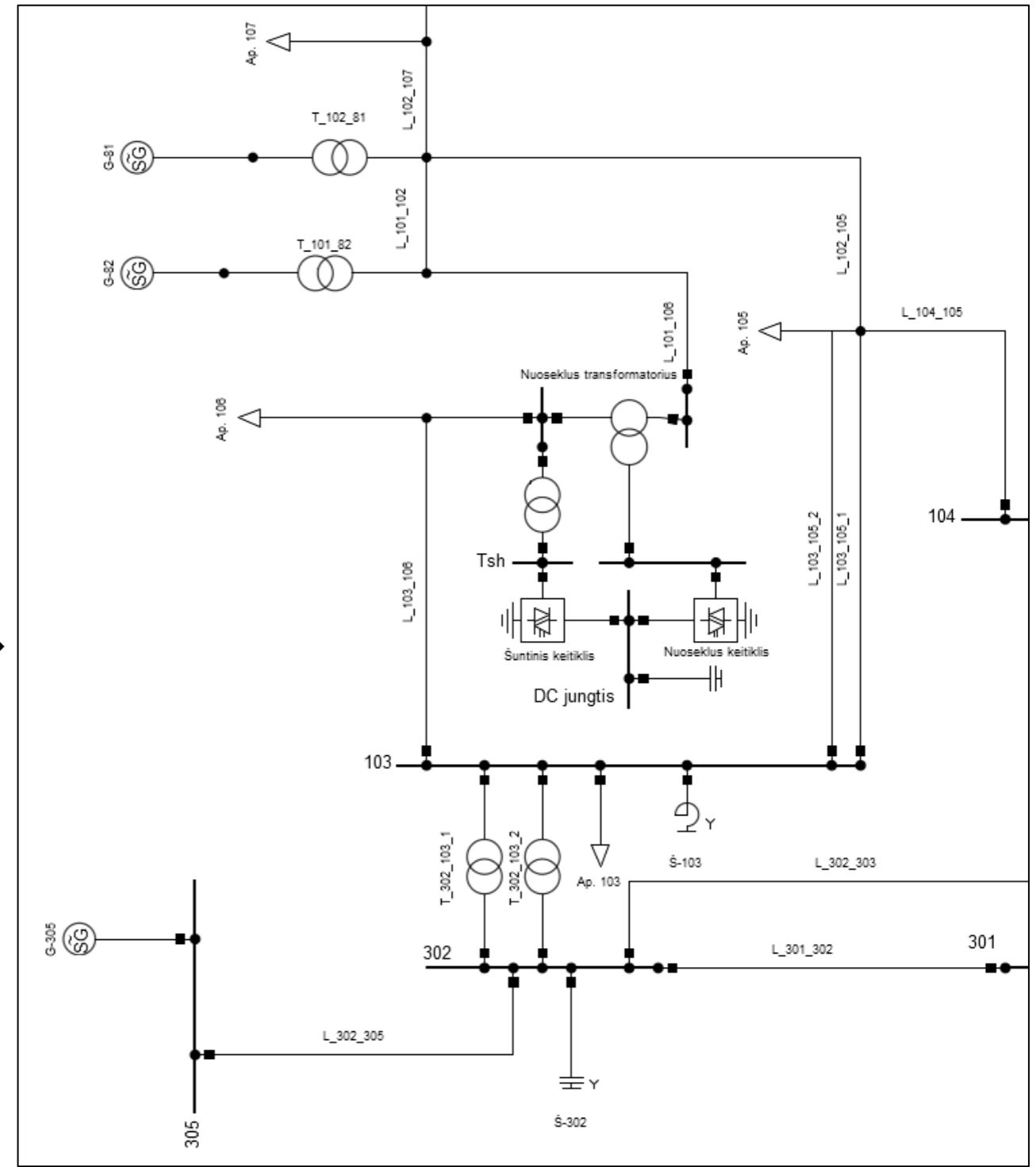
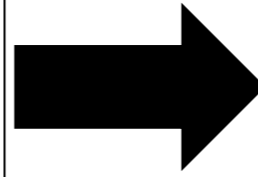
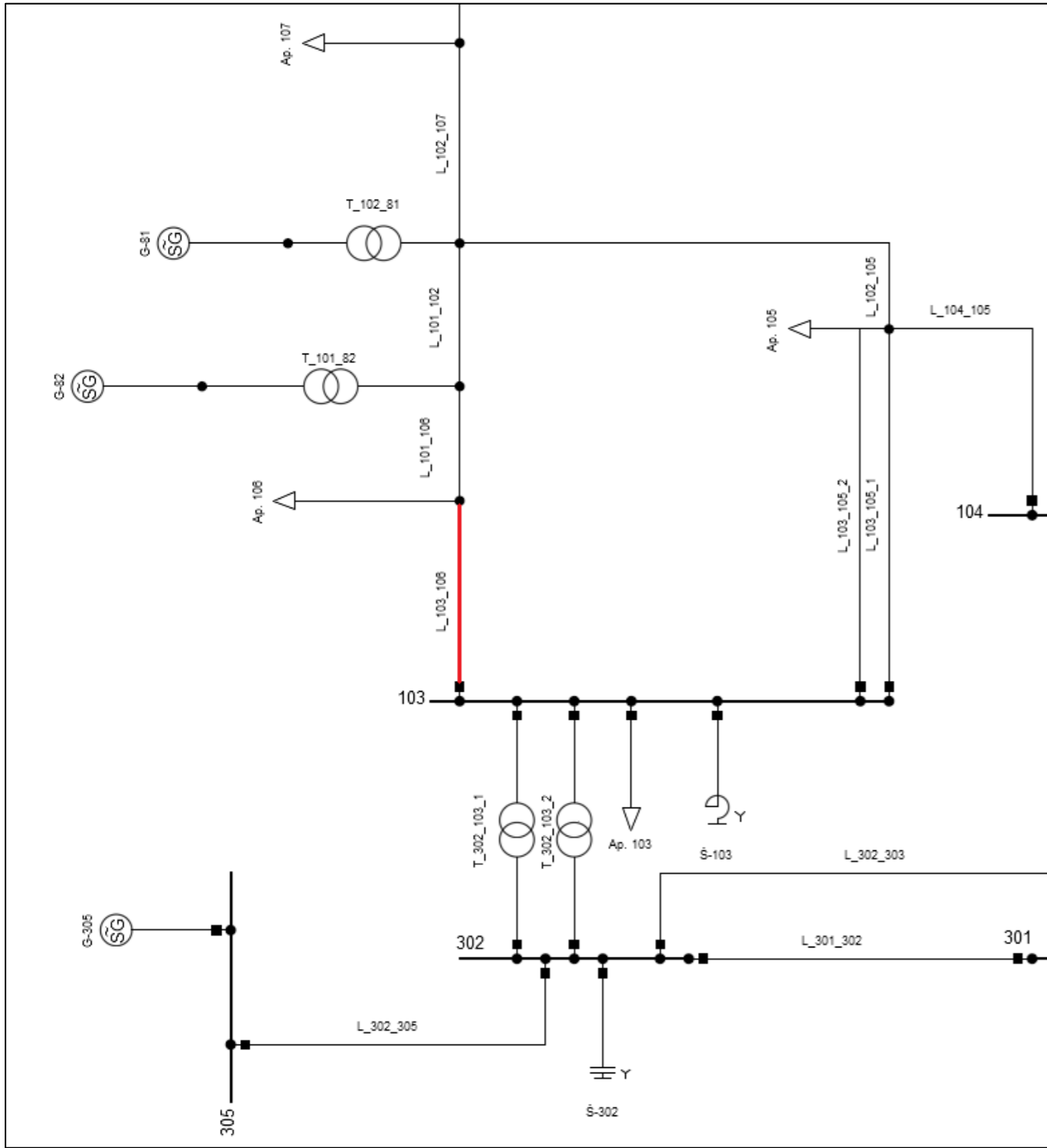
Proj. dalis	Data
Pavardė	Parašas

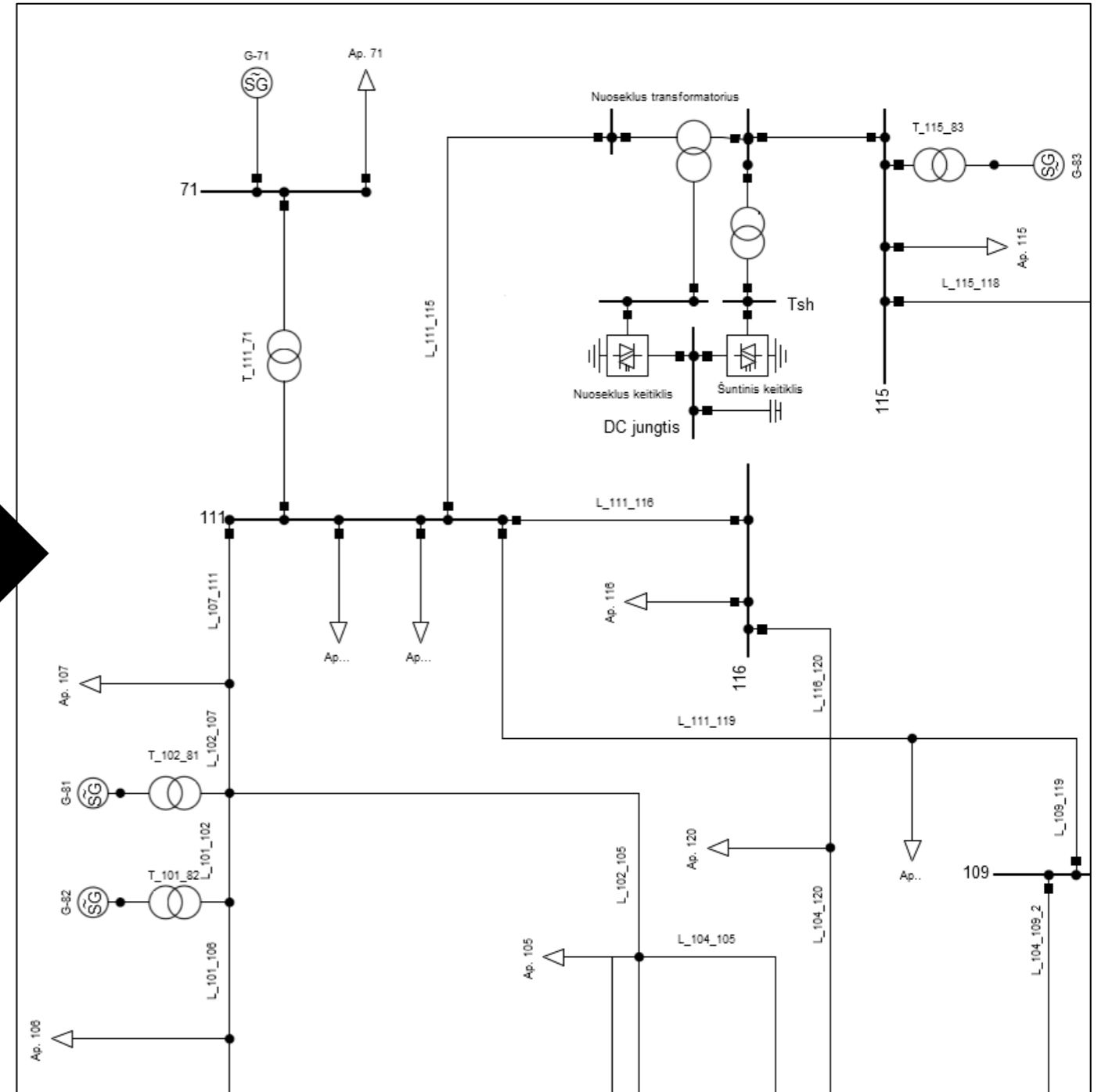
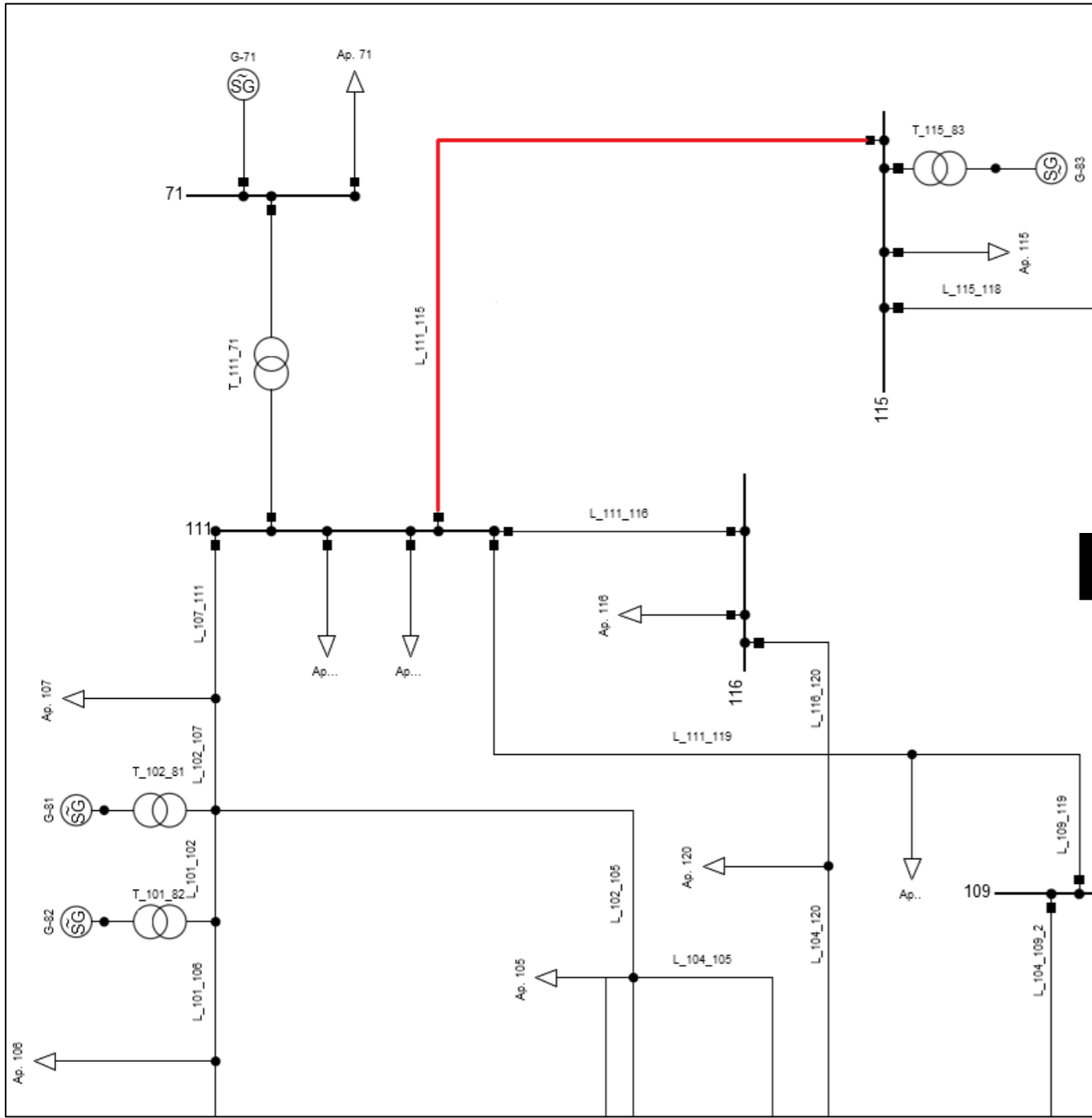
Tinklo schema su prijungtu UPFC linijoje L 101-106











Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 81 vasaros sezono metu , kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 81, MW							
	0	20	40	60	80	100	120	144.5
L 101-102	14.6	9	5.6	7.5	13.1	19	24.9	32.1
L 101-106	31.9	37.6	43.4	49.3	54.9	60.8	66.6	73.7
L 102-105	19	29	39.8	51.2	62.5	74.2	85.8	100
L 102-107	18.8	18.4	19	19.4	21.8	23.7	26.4	30.3
L 103-105 1	15.1	17.7	21	24.9	28.8	33	37.3	42.4
L 103-105 2	15.3	18	21.3	25.2	29.1	33.5	37.8	43
L 103-106	28	33.6	39.3	45.3	50.9	56.8	62.6	69.8
L 104-105	19.7	17	14.3	11.7	8.8	6	3.7	3.5
L 104-109 1	30.6	29.8	28.9	26.7	27.3	26.5	25.7	24.8
L 104-109 2	30.5	29.7	28.9	26.6	27.3	26.5	25.7	24.7
L 104-120	20.4	20.3	20.4	20.2	20.8	21.2	21.7	22.4
L 107-111	18.9	17.8	17.8	17.7	19.6	21.2	23.7	27.6
L 108-109 1	32.1	30.6	29.2	27.9	26.3	24.9	23.5	21.8
L 108-109 2	33.7	32.2	30.6	29.3	27.6	26.1	24.6	22.9
L 108-112	19	18	17.1	16.7	15.2	14.4	13.6	12.6
L 108-113	18.6	17.8	16.9	16.2	15.3	14.6	13.8	12.9
L 108-117	11.2	10.7	10.2	10	9.2	8.7	8.3	7.7
L 109-112	10.5	10.1	9.8	9.6	9.3	9.1	8.9	8.7
L 109-113	17.6	16.8	15.9	15.2	14.3	13.6	12.8	11.9
L 109-119	20.8	19.4	18.1	18.8	16	15.2	14.5	14
L 111-115	56.2	54.5	52.8	52.2	49.6	48.2	46.8	45.1
L 111-116	18.8	19.6	20.4	21.2	22.3	23.3	24.4	25.7
L 111-119	16.6	15.2	13.8	14.4	11.6	10.8	10.2	9.9
L 112-117	8.1	7.5	7	6.7	5.9	5.4	4.9	4.4
L 112-118	20.9	19.1	17.5	18.4	14.7	13.7	12.9	12.4
L 115-118	20	18.2	16.6	17.8	14	13.1	12.5	12.2
L 116-120	18.2	18.5	18.8	19	19.8	20.6	21.3	22.3
L 301-302	57.6	56.2	54.9	53.6	52.4	51.1	49.9	48.5
L 301-304	42	40.9	39.7	38.6	37.6	36.5	35.4	34.2
L 302-303	31.6	31.2	30.7	30.2	30	29.6	29.3	28.9
L 302-305	73.4	73	72.7	72.4	72.4	72.3	72.3	72.3
L 303-304	34.7	34	33.2	32.4	31.7	31	30.2	29.4

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 81 žiemos sezono metu, kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr 81, MW								
	0	20	40	60	80	100	120	140	155.4
L 101-102	18.3	12.4	7.2	5.5	9.4	14.8	20.7	26.6	31.2
L 101-106	27.7	33.5	39.4	45.2	51.2	56.7	62.5	68.4	72.8
L 102-105	13.3	22.8	33.9	45.1	56.8	67.9	79.5	91.1	100
L 102-107	18.2	20.6	23.4	26.5	28.5	32.8	36.1	39.7	42.5
L 103-105 1	12.7	11.5	12.2	14.4	17.8	21.5	25.6	29.8	33
L 103-105 2	12.8	11.6	12.3	14.5	18	21.7	25.9	30.2	33.5
L 103-106	17.5	22.6	28.2	33.9	39.9	45.5	51.4	57.3	61.8
L 104-105	20.8	17.9	15.1	12.3	9.5	6.4	3.5	1.3	2.6
L 104-109 1	33.5	32.7	31.8	31	28.6	29.3	28.5	27.6	27
L 104-109 2	33.5	32.6	31.8	30.9	28.5	29.3	28.4	27.6	27
L 104-120	31.2	30.4	29.6	29	28	28	27.7	27.5	27.3
L 107-111	15.3	15.9	17.4	19.8	21.3	25.3	28.4	31.9	34.7
L 108-109 1	48	46.4	44.9	43.4	42.2	40.5	39.1	37.8	36.8
L 108-109 2	50.3	48.7	47.1	45.6	44.3	42.5	41.1	39.7	38.6
L 108-112	36.7	35.6	34.6	33.7	33.1	31.8	31	30.1	29.5
L 108-113	28.6	27.8	26.9	26.1	25.5	24.5	23.8	23	22.5
L 108-117	22.4	21.8	21.3	20.8	20.5	19.8	19.3	18.9	18.5
L 109-112	25.3	24.8	24.3	23.8	23.2	22.9	22.5	22.1	21.8
L 109-113	26	25.1	24.3	23.4	22.8	21.8	21.1	20.3	19.7
L 109-119	36.1	34.6	33.1	31.6	31.4	29	27.8	26.7	26
L 111-115	50.4	48.6	46.9	45.2	44.7	42.1	40.7	39.3	38.3
L 111-116	18.7	19.9	21.1	22.3	23.7	24.7	26	27.2	28.2
L 111-119	25.7	24	22.3	20.7	19.9	17.7	16.3	15	14
L 112-117	13.6	13.1	12.5	12	11.3	10.9	10.4	9.8	9.4
L 112-118	30.6	28.6	26.7	24.9	24.9	21.6	20.1	18.8	17.9
L 115-118	27.5	25.6	23.7	21.8	22	18.6	17.2	16	15.2
L 116-120	17.5	17.1	16.9	16.8	16.6	17	17.3	17.7	18.1
L 301-302	69.2	67.7	66.3	65	63.6	62.3	61.1	59.8	58.9
L 301-304	55	53.8	52.6	51.4	50.3	49.1	48	47	46.1
L 302-303	33.3	32.8	32.3	31.9	31.3	31	30.7	30.3	30.1
L 302-305	78.1	77.5	77	76.5	76.1	75.9	75.8	75.7	75.7
L 303-304	39.8	38.9	38.1	37.3	36.5	35.8	35	34.3	33.7

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 81 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 81, MW									
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	182.9
L 101-102	17.6	12.2	8.8	11.8	12	16.5	26.6	32.3	45.2	59.5
L 101-106	33	39	45.6	53.5	53.3	57.6	67.5	73	85.9	100
L 102-105	17.1	27.1	36.7	44.9	66.3	80.7	85.3	97.9	98.3	100
L 102-107	15.3	16.1	17.7	19.6	19.3	20.3	25.8	28.9	36.3	44.4
L 103-105 1	13.2	16.1	19.3	22.3	29.7	34.6	35.9	40.1	40.2	41.2
L 103-105 2	13.4	16.3	19.5	22.6	30.1	35.1	36.3	40.6	40.8	41.7
L 103-106	29.4	35.2	41.7	49.4	49.3	53.6	63.6	69.1	82	96.2
L 104-105	20.6	17.8	15.3	13.1	9	6.6	6.1	5.9	5.2	3.6
L 104-109 1	29.3	29.9	29.1	27	25.8	24.9	25.9	25.2	24.9	23
L 104-109 2	29.2	29.9	29.1	26.9	25.7	24.9	25.9	25.1	24.8	22.9
L 104-120	20.8	20.9	20.8	20.5	20.7	21.2	22.3	23	24.4	26.2
L 107-111	15.9	15.5	16.3	17.6	17.1	17.8	23.1	26.1	33.5	41.7
L 108-109 1	32.2	30.6	29.1	27.7	26.6	25.3	23.4	22.1	20.5	19.6
L 108-109 2	33.8	32.1	30.5	29.1	27.9	26.5	24.6	23.2	21.5	20.6
L 108-112	19.5	18	16.9	16.5	16	15.4	13.5	12.8	11.6	11.8
L 108-113	18.6	17.7	16.9	16.1	15.5	14.8	13.8	13	12.1	11.6
L 108-117	11.5	10.6	10.1	9.9	9.6	9.3	8.2	7.8	7.2	7.3
L 109-112	10.7	10.2	9.8	9.5	9.5	9.4	9	9	8.8	9
L 109-113	17.6	16.7	15.9	15.1	14.5	13.8	12.8	12	11.1	10.6
L 109-119	22.4	19.4	18	18.4	18.3	17.8	14.7	14.4	14.1	17.1
L 111-115	57.3	54.4	52.5	51.7	51.1	50	46.8	45.5	43.3	42.8
L 111-116	19.4	20.2	21	22.1	22.1	23	24.9	26	28.5	31.3
L 111-119	18.1	15.2	13.7	14	13.9	13.5	10.5	10.3	10.4	14.1
L 112-117	8.2	7.5	6.9	6.5	6.3	5.9	4.9	4.4	3.8	4.2
L 112-118	23	19.1	17.3	18.1	17.8	17.2	13.1	12.8	12.8	17.6
L 115-118	22.2	18.2	16.5	17.5	17.3	16.8	12.8	12.6	12.9	17.9
L 116-120	18.7	19	19.3	19.6	19.8	20.4	21.9	22.8	24.8	27.1
L 301-302	57.5	56.2	54.9	53.6	52.3	51	49.9	48.7	47.7	46.4
L 301-304	41.9	40.8	39.7	38.5	37.5	36.4	35.5	34.4	33.4	32.1
L 302-303	31.5	31.2	30.8	30.3	29.8	29.4	29.3	28.9	28.8	28.5
L 302-305	73.2	73	72.7	72.4	72.1	72	72.1	72	72.2	72.3
L 303-304	34.7	34	33.2	32.5	31.6	30.9	30.3	29.6	29	28.4

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 81 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 81, MW										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	194.8
L 101-102	17.8	13.8	8.6	8.3	13.3	18	25	31.1	39.4	50.9	59.5
L 101-106	31.6	35	40.9	48.6	55.1	59.7	66.4	72.3	80.3	91.2	100
L 102-105	6.3	20.3	31.6	39.7	50.7	64.3	74.7	86.6	94.8	98.1	100
L 102-107	15.3	19.5	23	27.5	29.9	32.6	36.3	39.9	45	52.9	58.6
L 103-105 1	9.7	9.5	10.7	12.4	15.5	19.7	23.1	27	29.8	30.6	31.1
L 103-105 2	9.8	9.6	10.9	12.6	15.7	20	23.4	27.4	30.2	31	31.5
L 103-106	22.2	24.6	30	37.5	43.9	48.6	55.5	61.5	69.6	80.6	90.3
L 104-105	22.4	18.6	15.7	13.4	10.8	7.5	4.9	2.3	1.4	3	7.5
L 104-109 1	32.3	32.8	32	31.2	28.9	28	27.2	26.4	25.8	26.9	26.8
L 104-109 2	32.3	32.8	31.9	31.2	28.8	27.9	27.2	26.4	25.7	26.9	26.8
L 104-120	30.7	30.5	29.7	28.7	27.7	27.6	27.4	27.4	27.3	27.7	28.4
L 107-111	11.8	14.3	16.7	20.5	22.5	24.9	28.5	32.1	37.3	45.2	51
L 108-109 1	47.9	46.3	44.8	43.3	42.1	40.8	39.4	38.1	36.8	34.8	33.4
L 108-109 2	50.3	48.6	47	45.4	44.2	42.8	41.4	40	38.6	36.5	35.1
L 108-112	36.7	35.6	34.5	33.4	32.8	32	31.2	30.4	29.5	27.9	26.9
L 108-113	28.7	27.7	26.9	26	25.4	24.7	24	23.2	22.5	21.4	20.6
L 108-117	22.4	21.8	21.2	20.6	20.3	19.9	19.5	19	18.6	17.7	17.2
L 109-112	24.9	24.8	24.2	23.6	22.9	22.6	22.2	21.8	21.3	20.9	20.4
L 109-113	25.9	25.1	24.2	23.4	22.7	21.9	21.2	20.5	19.7	18.6	17.9
L 109-119	36.6	34.4	32.9	31.1	30.9	29.9	28.8	28	27	24.1	23.2
L 111-115	50.9	48.5	46.7	44.7	44.1	42.9	41.5	40.3	38.8	35.6	34.1
L 111-116	19.9	20.4	21.6	23.1	24.6	25.6	27.1	28.4	30.2	32.5	34.6
L 111-119	25.6	23.8	22.1	20.2	19.3	18.2	16.9	15.8	14.7	11.7	10.8
L 112-117	13.4	13	12.4	11.8	11.2	10.7	10.1	9.6	9.1	8.4	7.8
L 112-118	31.3	28.4	26.5	24.3	24.3	23.2	21.9	21	20	16.2	15.5
L 115-118	28.3	25.4	23.4	21.3	21.4	20.4	19.2	18.4	17.7	13.9	13.6
L 116-120	17.5	17.4	17.1	16.8	16.7	17.1	17.7	18.3	19.2	20.7	22.4
L 301-302	69.1	67.7	66.4	65	63.6	62.3	61	59.8	58.6	57.5	56.8
L 301-304	55	53.7	52.6	51.4	50.2	49.1	48	46.9	45.8	44.8	44
L 302-303	33.2	32.8	32.3	31.9	31.4	31	30.6	30.3	30	29.9	29.7
L 302-305	77.9	77.4	76.9	76.5	76.1	75.8	75.7	75.5	75.4	75.6	76.1
L 303-304	39.8	39	38.2	37.4	36.6	35.8	35.1	34.4	33.7	33.1	32.7

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 82 vasaros sezono metu , kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 82, MW						
	0	20	40	60	80	100	116.8
L 101-102	26.2	17.3	8.2	2.4	10.7	19.8	27.6
L 101-106	26.2	38.3	51.1	63.9	76.6	89.3	100
L 102-105	42.2	47.8	54.1	60.2	66.3	72.4	77.5
L 102-107	19.3	21	21	21.5	22.4	23.5	24.7
L 103-105 1	22.7	23.9	25.7	27.4	29.2	31	32.6
L 103-105 2	23	24.2	26	27.8	29.6	31.4	33
L 103-106	22.4	34.2	47.1	59.8	72.6	85.3	96
L 104-105	16	13.6	10.9	8.3	5.8	3.4	1.7
L 104-109 1	28.2	28.7	27.9	27.1	26.3	25.5	24.8
L 104-109 2	28.1	28.7	27.9	27	26.2	25.4	24.8
L 104-120	19.9	20.3	20.5	20.7	21	21.3	21.6
L 107-111	18.3	19.4	19.1	19.3	20	20.9	22
L 108-109 1	29.8	28.5	27.3	26.1	25	23.9	23
L 108-109 2	31.3	29.9	28.7	27.4	26.2	25.1	24.1
L 108-112	17.8	16.5	15.9	15.2	14.6	14	13.5
L 108-113	17.3	16.6	15.9	15.3	14.6	14	13.5
L 108-117	10.6	9.9	9.5	9.2	8.8	8.5	8.3
L 109-112	9.8	9.6	9.4	9.3	9.2	9.1	9
L 109-113	16.3	15.6	14.9	14.3	13.6	13	12.5
L 109-119	19.8	17.3	16.6	16	15.5	15.1	14.9
L 111-115	54	51.8	50.7	49.7	48.7	47.7	47
L 111-116	20.4	20.9	21.5	22.1	22.7	23.3	23.8
L 111-119	15.5	13	12.3	11.6	11.1	10.8	10.5
L 112-117	7.2	6.7	6.3	5.9	5.5	5.2	4.9
L 112-118	19.8	16.5	15.5	14.7	14	13.5	13.2
L 115-118	19.1	15.7	14.8	14.1	13.5	13.1	12.9
L 116-120	18.5	19	19.4	19.8	20.2	20.6	21
L 301-302	55.9	54.6	53.2	52	50.7	49.5	48.5
L 301-304	40.4	39.4	38.3	37.3	36.3	35.3	34.6
L 302-303	31.2	30.7	30.2	29.7	29.3	28.8	28.5
L 302-305	72.7	72.5	72.4	72.3	72.3	72.4	72.5
L 303-304	33.8	33	32.2	31.4	30.7	29.9	29.3

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 82 žiemos sezono metu, kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 82, MW						
	0	20	40	60	80	100	123.4
L 101-102	22.1	13.9	5.6	6.1	14.6	23.7	34.6
L 101-106	22.1	34.8	47.2	60	72.8	85.6	100
L 102-105	36.3	42.4	48.2	54.4	60.5	66.7	73.2
L 102-107	23.9	24.7	27.4	28.9	30.6	32.4	36.3
L 103-105 1	13.2	13.8	15.1	16.7	18.4	20.1	23.2
L 103-105 2	13.4	14	15.3	16.9	18.6	20.4	23.5
L 103-106	13.5	23.5	35.9	48.9	61.8	74.7	89.8
L 104-105	16.5	14.3	11.4	8.8	6.1	3.5	3.9
L 104-109 1	32.5	30.1	30.7	29.9	29	28.2	27.4
L 104-109 2	32.4	30	30.7	29.8	29	28.2	27.4
L 104-120	29.4	28.6	28.8	28.6	28.5	28.4	28.2
L 107-111	18.1	18.4	20.6	21.6	23	24.6	28.5
L 108-109 1	45.5	44.4	43	41.8	40.7	39.6	38
L 108-109 2	47.7	46.6	45.1	43.9	42.7	41.5	39.9
L 108-112	34.9	34.4	33.4	32.7	32.1	31.5	30.5
L 108-113	27.3	26.7	25.9	25.2	24.6	24	23.2
L 108-117	21.4	21.2	20.6	20.3	19.9	19.6	19.1
L 109-112	24.3	23.7	23.7	23.4	23.2	23	22.6
L 109-113	24.6	24	23.2	22.5	21.9	21.3	20.4
L 109-119	33.2	33.1	31.2	30.4	29.6	28.8	27.7
L 111-115	47.1	46.9	44.8	43.7	42.7	41.8	40.3
L 111-116	21.2	22.1	22.6	23.4	24.1	24.8	25.8
L 111-119	22.5	21.9	20.3	19.3	18.3	17.4	16
L 112-117	12.6	12.1	11.8	11.4	11	10.6	10.1
L 112-118	27	27.1	24.4	23.2	22.2	21.3	19.8
L 115-118	23.9	24.1	21.3	20.2	19.2	18.3	16.9
L 116-120	16.7	16.4	16.8	16.9	17.1	17.3	17.7
L 301-302	67.4	65.9	64.6	63.2	61.9	60.6	59.2
L 301-304	53.3	52.2	51.1	50	48.9	47.9	46.8
L 302-303	32.8	32.1	31.7	31.2	30.7	30.3	29.7
L 302-305	77.3	76.6	76.4	76.2	76.1	76.1	76.6
L 303-304	38.8	37.9	37.1	36.3	35.5	34.7	33.9

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 82 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 82, MW							
	0	20	40	60	80	100	120	133.5
L 101-102	23.1	11.5	2.9	6.7	13.6	28.2	52.1	64.1
L 101-106	23.1	33.2	46.1	61.5	77.2	85.1	87.4	100
L 102-105	44.6	52.6	58.7	63	66.7	77.4	94	100
L 102-107	19	19.3	19.4	19.6	21.1	21.8	25	25.9
L 103-105 1	24	26.3	28.1	29.1	29.7	33.7	40.2	42.3
L 103-105 2	24.3	26.7	28.5	29.5	30.1	34.2	40.8	42.8
L 103-106	18.5	28.8	41.4	56	70.6	78.2	80.1	89.9
L 104-105	15.4	13	10.3	7.8	5.5	2.2	2	4.9
L 104-109 1	29.6	27.3	26.4	25.6	26.2	24	23.2	22.7
L 104-109 2	29.5	27.2	26.4	25.5	26.2	23.9	23.2	22.7
L 104-120	20.4	20.2	20.5	20.7	21.3	21.5	22.4	23
L 107-111	17.8	17.7	17.4	17.3	18.6	19.1	22.2	23.2
L 108-109 1	29.6	28.5	27.3	26.3	25	24.1	22.9	22.5
L 108-109 2	31.1	29.9	28.7	27.6	26.2	25.3	24.1	23.6
L 108-112	17.2	17	16.4	15.8	14.6	14.8	14.1	14
L 108-113	17.2	16.5	15.9	15.3	14.6	14.1	13.5	13.2
L 108-117	10.2	10.1	9.8	9.5	8.9	8.9	8.6	8.6
L 109-112	9.7	9.6	9.5	9.4	9.3	9.3	9.3	9.4
L 109-113	16.2	15.5	14.9	14.3	13.6	13.1	12.5	12.2
L 109-119	18.1	18.9	18.4	18	15.7	17.5	17.4	17.9
L 111-115	52.9	52.6	51.6	50.8	48.8	48.9	47.8	47.8
L 111-116	20.7	21.3	21.9	22.4	22.9	23.8	25.3	25.8
L 111-119	13.8	14.5	14	13.7	11.3	13.2	13.4	13.9
L 112-117	7	6.8	6.5	6.2	5.5	5.6	5.3	5.3
L 112-118	17.5	18.7	18	17.6	14.3	17	17.1	17.7
L 115-118	16.7	18	17.4	17.1	13.7	16.7	16.9	17.6
L 116-120	18.9	19.1	19.5	19.9	20.4	21	22.2	22.7
L 301-302	56	54.5	53.2	51.9	50.7	49.5	48.4	47.7
L 301-304	40.4	39.3	38.2	37.2	36.3	35.2	34.2	33.6
L 302-303	31.3	30.7	30.2	29.7	29.3	28.9	28.7	28.5
L 302-305	72.8	72.4	72.2	72.1	72.1	72.1	72.5	72.8
L 303-304	33.9	33	32.2	31.4	30.7	29.9	29.3	28.9

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 82 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 82, MW							
	0	20	40	60	80	100	120	139.9
L 101-102	19.1	10.9	1.6	10.3	11.8	36.8	58.5	75.8
L 101-106	19.1	32.4	43.3	55.8	78	76	79.2	100
L 102-105	38.9	44.5	51.5	58.2	57.8	76.3	90.7	100
L 102-107	23.3	24.7	27.6	29	28.1	32.2	37.7	38.4
L 103-105 1	15	14.9	16.9	18.9	18.1	25.3	32.8	37.3
L 103-105 2	15.2	15.1	17.1	19.2	18.3	25.6	33.3	37.8
L 103-106	8.5	20.7	31.3	43.3	63.8	62.6	65	81
L 104-105	16	14	11	8.2	6.5	3.2	3	4.2
L 104-109 1	32.5	30.1	30.7	29.9	27.4	26.6	27.5	26.6
L 104-109 2	32.4	30	30.7	29.8	27.4	26.6	27.5	26.6
L 104-120	29.5	28.6	28.8	28.6	28.4	28	28.5	29.3
L 107-111	17.3	18.3	20.5	21.5	20.4	24.3	29.8	30.8
L 108-109 1	45.4	44.3	42.8	41.6	41.2	39.7	37.7	37
L 108-109 2	47.6	46.5	45	43.7	43.2	41.7	39.6	38.9
L 108-112	34.8	34.3	33.3	32.6	32.6	31.7	30.2	30.1
L 108-113	27.2	26.7	25.8	25.2	24.9	24.1	23	22.6
L 108-117	21.4	21.1	20.6	20.2	20.2	19.7	18.9	18.9
L 109-112	24.2	23.7	23.6	23.4	23.1	22.6	22.4	22.5
L 109-113	24.5	23.9	23.1	22.5	22.2	21.4	20.3	19.9
L 109-119	33.1	33	31	30.2	31.1	29.9	27.3	27.6
L 111-115	47	46.7	44.5	43.5	44.2	42.6	39.8	39.9
L 111-116	21.5	22.3	23	23.8	24	25.8	27.2	27.8
L 111-119	22.3	21.8	20	19	19.4	17.9	15.5	15.5
L 112-117	12.6	12.1	11.7	11.3	11	10.4	9.8	9.6
L 112-118	26.8	26.9	24.1	23	24.5	23.1	19.4	19.8
L 115-118	23.7	24	21.1	20	21.6	20.3	16.7	17.1
L 116-120	16.9	16.5	16.8	17.1	17	17.5	18.6	19.4
L 301-302	67.4	65.9	64.6	63.2	61.8	60.7	59.6	58.5
L 301-304	53.3	52.2	51	50	49	47.9	46.8	46
L 302-303	32.9	32.2	31.8	31.3	30.6	30.4	30.3	30
L 302-305	77.3	76.6	76.3	76.1	75.7	75.9	76.6	77.2
L 303-304	38.8	37.9	37.1	36.3	35.5	34.8	34.2	33.5

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 83 vasaros sezono metu , kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 83, MW						
	0	20	40	60	80	100	119
L 101-102	5.4	6.7	8.3	9.9	11.5	13.1	14.7
L 101-106	47.1	48.5	50.1	51.7	53.2	54.7	56.4
L 102-105	48	50.4	53.1	55.7	58.3	60.9	63.6
L 102-107	25.5	23.8	21.4	20.3	20.6	22	23
L 103-105 1	22.4	23.6	25.2	26.7	28.3	29.8	31.5
L 103-105 2	22.7	23.9	25.5	27.1	28.6	30.2	32
L 103-106	43	44.4	46	47.6	49.2	50.7	52.4
L 104-105	10	10.6	11	11.4	11.9	12.5	12.9
L 104-109 1	25.9	27.7	27.9	28.1	28.4	28.8	27.9
L 104-109 2	25.9	27.7	27.8	28.1	28.4	28.7	27.8
L 104-120	24.7	21.9	20.5	21.5	24.6	28.9	33.6
L 107-111	23	21.5	19.5	18.8	19.6	21.5	23.1
L 108-109 1	33.7	30.8	28	25.3	22.6	19.9	18.1
L 108-109 2	35.3	32.3	29.4	26.6	23.7	20.9	19
L 108-112	22.8	19.4	16.6	13.8	11.2	8.8	8.7
L 108-113	19.4	17.8	16.3	14.8	13.3	11.8	10.8
L 108-117	13.3	11.5	9.9	8.4	7	5.7	5.5
L 109-112	14	11.8	9.9	8.5	7.9	8.2	9.6
L 109-113	18.4	16.8	15.3	13.8	12.3	10.8	9.8
L 109-119	28.9	22.5	17.7	14	12.2	12.9	18
L 111-115	19.8	32.9	47.2	60.8	73.9	87.2	100
L 111-116	16.7	17.6	20.5	25	30.5	36.2	41.9
L 111-119	24.7	18.3	13.4	9.7	8.6	11	16.9
L 112-117	10	8.3	6.7	5.1	3.6	2.4	3
L 112-118	31.4	23.2	17	12.2	10.8	13.6	21.3
L 115-118	30.5	22.2	16.2	11.7	11	14.3	22.2
L 116-120	20.5	18.8	19	21.5	25.8	30.9	36
L 301-302	55.6	54.6	53.6	52.6	51.6	50.7	49.8
L 301-304	41.4	40.1	38.7	37.4	36.1	34.7	33.4
L 302-303	29.7	30	30.2	30.4	30.7	31	31.3
L 302-305	72.7	72.6	72.4	72.3	72.3	72.3	72.3
L 303-304	33.1	32.7	32.3	32	31.6	31.3	31

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 83 žiemos sezono metu, kai neprijungtas UPFC

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 83, MW							
	0	20	40	60	80	100	120	125.4
L 101-102	3.9	4.8	5.7	7	8.6	10.2	11.9	12.3
L 101-106	43.1	44.5	46.2	47.8	49.4	51	52.5	52.9
L 102-105	42	44.4	47.2	50	52.7	55.3	57.9	58.6
L 102-107	34.4	31.7	28.2	25.5	23.8	23.1	23.4	23.7
L 103-105 1	12	13.3	14.7	16.2	17.7	19.3	20.8	21.3
L 103-105 2	12.2	13.5	14.9	16.4	17.9	19.5	21.1	21.6
L 103-106	31.8	33.2	34.9	36.5	38.2	39.8	41.4	41.8
L 104-105	10.5	10.9	11.4	12	12.5	13	13.5	13.6
L 104-109 1	28.8	30.7	30.8	30.9	31.2	31.5	31.8	31.9
L 104-109 2	28.8	30.6	30.7	30.9	31.1	31.4	31.8	31.8
L 104-120	39.2	34.4	29.8	26.7	25.4	26	28.3	29.1
L 107-111	26.8	24.3	21.2	19.2	18.5	19.2	20.9	21.6
L 108-109 1	49.7	46.6	43.7	40.9	38.2	35.4	32.8	32.1
L 108-109 2	52.1	48.9	45.9	43	40	37.2	34.4	33.7
L 108-112	40.4	37.1	34.2	31.3	28.5	25.8	23.3	22.6
L 108-113	29.6	27.9	26.3	24.8	23.2	21.7	20.3	19.9
L 108-117	24.5	22.7	21	19.5	18	16.5	15.2	14.8
L 109-112	29.3	26.9	24.3	21.9	19.8	17.8	16.2	15.8
L 109-113	26.9	25.2	23.6	22.1	20.5	19	17.5	17.1
L 109-119	44.3	37.9	32.6	27.6	23.3	19.8	17.8	17.6
L 111-115	12.7	26.5	41.2	55.2	68.7	82.4	96.2	100
L 111-116	11.9	15.9	21.2	27.2	33.5	39.9	46.3	48.1
L 111-119	33.5	27.4	21.7	16.3	11.2	7.6	7.5	8.2
L 112-117	15.3	13.8	12.2	10.6	9	7.4	5.8	5.4
L 112-118	41.1	33	26.1	19.8	14.6	12	13.5	14.5
L 115-118	38	29.9	23	16.8	12.1	10.8	13.9	15.3
L 116-120	24	19.9	17.1	17	19.7	24	29.3	30.8
L 301-302	67.2	66	64.9	63.8	62.8	61.8	60.8	60.6
L 301-304	54.4	52.9	51.5	50.1	48.6	47.3	45.9	45.5
L 302-303	31.5	31.7	31.7	31.9	32.1	32.3	32.6	32.7
L 302-305	77.1	76.8	76.5	76.2	76.1	76	75.9	75.9
L 303-304	38.2	37.7	37.3	36.8	36.4	36.1	35.7	35.6

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 83 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC.

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 83, MW									
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180.6
L 101-102	5.7	6.8	8	9.8	11.3	12.5	14.1	15.2	15.7	16.3
L 101-106	47.4	48.2	49.5	51.4	52.9	54	55.4	56.6	57.2	57
L 102-105	48.4	49.9	52	55.1	57.8	59.6	62	63.8	64.4	64.2
L 102-107	26	25.2	23.7	22.1	21.9	22.6	23.9	25	26.2	28
L 103-105 1	22.6	23.5	24.8	26.6	28.1	29.3	30.7	32.1	32.8	33.1
L 103-105 2	22.9	23.8	25.2	26.9	28.5	29.7	31.1	32.5	33.3	33.5
L 103-106	43.3	44.2	45.5	47.3	48.9	50	51.4	52.6	53.2	53
L 104-105	9.8	10.5	11	11.4	11.9	12.6	13.2	13.8	14	16.1
L 104-109 1	25.3	27.6	28.1	27.9	28.4	29.6	30.3	30.5	34.3	36.3
L 104-109 2	25.2	27.5	28	27.9	28.3	29.5	30.2	30.5	34.2	36.3
L 104-120	26	24.5	23.7	24.1	26.1	28.3	31.8	34.9	38.5	36.1
L 107-111	23.6	22.9	21.6	20.6	20.9	21.9	23.6	25	26.3	28
L 108-109 1	33.6	31.1	28.6	25.7	22.9	20.5	17.8	16.7	14.4	14.5
L 108-109 2	35.2	32.6	30	26.9	24.1	21.5	18.7	17.5	15.1	15.2
L 108-112	23.2	18.3	14.2	12.5	9.5	5	3.9	7.9	14.9	26.9
L 108-113	19.4	18	16.6	15	13.5	12.1	10.7	10	8.7	8.9
L 108-117	13.5	10.7	8.5	7.5	6	3.6	2.9	4.5	8	14.6
L 109-112	13	7.3	2.8	2.2	1.9	7.4	11.7	17.9	29.3	44.8
L 109-113	18.4	17	15.6	14	12.5	11.1	9.7	9	7.7	7.8
L 109-119	29.2	25.2	22.7	18.1	15.6	15	15	19	19	16.7
L 111-115	19.1	27.1	36.4	52.9	66.8	75.7	89.6	96.8	99.3	100
L 111-116	18.9	19.5	21.6	26.1	30.8	34.2	39.2	42.8	45.7	43.8
L 111-119	24.9	20.9	18.3	13.8	11.9	11.9	13.2	17.4	17.4	14.7
L 112-117	10.4	8.1	6.2	5.4	3.7	1.3	1.9	5.2	9.5	16
L 112-118	31	17.7	8.5	6	4	16.5	26.2	41.7	65.2	99
L 115-118	29.9	16.7	8.1	6	5.1	17.6	27.3	42.7	66.2	100
L 116-120	22.2	21.2	21.5	23.5	26.8	29.6	33.8	37.2	40.5	38.2
L 301-302	55.5	54.6	53.6	52.6	51.6	50.8	49.9	49.1	48.5	48
L 301-304	41.5	40.1	38.8	37.5	36.1	34.7	33.4	31.9	30.5	28.9
L 302-303	29.6	29.9	30.1	30.3	30.6	31	31.5	31.8	32.8	33.4
L 302-305	72.6	72.5	72.3	72.2	72.2	72.3	72.3	72.4	72.8	73
L 303-304	32.9	32.7	32.4	31.9	31.6	31.5	31.2	31.1	31.2	31.8

Perdavimo linijų apkrovimas mazge Nr. 83 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC.

Perdavimo linija	Generacija mazge Nr. 83, MW									
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	181.9
L 101-102	4.2	5.1	5.9	7.1	8.3	9.8	11	12.3	13.1	13.8
L 101-106	43.4	44.6	46	47.5	48.8	50.4	51.6	52.6	53.1	53.4
L 102-105	42.6	44.6	46.9	49.3	51.5	54.2	56.1	57.9	58.6	58.9
L 102-107	34	31.9	29.3	27	25.4	24	23.8	24.3	25.5	26.7
L 103-105 1	12.3	13.5	14.7	16.1	17.4	18.9	20.2	21.4	22.2	23
L 103-105 2	12.5	13.7	14.9	16.3	17.6	19.2	20.4	21.7	22.5	23.3
L 103-106	32.1	33.3	34.8	36.2	37.6	39.2	40.4	41.5	42	42.4
L 104-105	10.4	10.9	11.5	12	12.7	13.2	13.8	14.5	15.3	16.4
L 104-109 1	28.2	30.2	30.5	31	31.8	32.2	33.4	34.7	37.2	39.2
L 104-109 2	28.1	30.2	30.5	30.9	31.7	32.1	33.3	34.7	37.2	39.2
L 104-120	38.7	35.1	32	29.4	27.9	26.9	27.4	28.6	29.5	30.6
L 107-111	26.4	24.6	22.3	20.6	19.8	19.6	20.4	21.9	23.4	24.6
L 108-109 1	49.4	46.6	44	41.3	38.7	35.9	33.5	31.2	29.4	29.5
L 108-109 2	51.9	48.9	46.1	43.3	40.6	37.7	35.2	32.7	30.9	30.9
L 108-112	41.4	37.2	33	29.3	25.3	23.1	19.6	17.5	17.5	25.5
L 108-113	29.5	27.9	26.4	24.9	23.5	22	20.7	19.4	18.5	18.6
L 108-117	25	22.6	20.3	18.2	16.1	15	13.2	12.1	11.8	15.5
L 109-112	30.4	26.1	21.2	17.3	13.6	13.3	12.7	16.4	25.1	39.4
L 109-113	26.8	25.2	23.7	22.3	20.8	19.3	17.9	16.6	15.7	15.6
L 109-119	43.1	38.2	34.6	30.8	27.5	22.9	20.6	18.5	18.1	20.9
L 111-115	15	26	36.6	48.1	58.8	74.1	84.2	94.9	99.2	100
L 111-116	13.7	17.1	21.6	26.6	31.3	37.5	41.8	46	47.6	47.9
L 111-119	32.1	27.2	23.3	19.1	15.4	10.6	8.4	7.1	6.5	9
L 112-117	16.1	14.2	12.3	10.4	8.1	6.4	3.6	2.3	5.7	12.6
L 112-118	43.7	32.6	22	12.7	2.5	8.3	21.7	37.8	62.8	98
L 115-118	40.7	29.7	19.3	10.2	1.3	9.7	23.6	39.7	64.9	100
L 116-120	23.7	20.9	19.3	19.1	20.2	23.1	26	29.2	30.6	31.3
L 301-302	67.1	66	64.9	63.8	62.9	61.9	61	60.2	59.5	59
L 301-304	54.5	53	51.5	50.1	48.6	47.2	45.8	44.4	42.9	41.5
L 302-303	31.5	31.6	31.6	31.8	32	32.3	32.7	33.2	33.9	34.8
L 302-305	77	76.7	76.4	76.1	76	76	76	76.1	76.4	76.8
L 303-304	38	37.6	37.2	36.8	36.6	36.2	36	35.9	36.1	36.5

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.81 vasaros sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	46.2	182.7
20	44.3	171.1
40	42.7	161
60	41.5	152.4
80	40.8	146.2
100	40.3	141.2
120	40.2	137.8
144.5	40.6	135.7

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.81 žiemos sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	68.5	320.6
20	65.7	303.8
40	63.2	288.8
60	61.2	275.7
80	59.5	264.1
100	58.4	254.9
120	57.6	247
140	57.1	240.9
155.4	57	237.4

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.82 vasaros sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	43.8	167.3
20	42.3	157.6
40	41.3	150.6
60	40.8	147
80	41	146.2
100	41.7	148.5
116.8	42.7	152.8

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.82 žiemos sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	64.9	298.5
20	62.4	283.2
40	60.7	272.2
60	59.6	264.2
80	59	259.4
100	59.1	257.8
123.4	60	260.2

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.83 vasaros sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	45.3	171.1
20	43.3	161
40	41.6	152.6
60	40.5	146.8
80	39.9	143.5
100	39.8	142.2
119	40	142.8

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.83 žiemos sezono metu

Generuojama galia, MW	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	67.7	307.4
20	64.4	290.6
40	61.4	275.9
60	59.1	264.2
80	57.3	255.3
100	56.1	249
120	55.3	245.2
125.4	55.2	244.6

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.81 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	14.6	46.1	182.1
20	23.4	44.2	171.1
40	32.1	42.7	161.2
60	39.9	41.5	152.8
80	57.8	40.6	146.3
100	69.5	40.2	141.6
120	73.4	40.2	138.4
140	83.3	40.5	136.8
160	84.1	41.6	137.2
182.9	86	43.6	140

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.81 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	5.3	68.3	320.1
20	17.5	65.6	303.8
40	27.5	63.2	288.9
60	27.5	61.5	276.2
80	44.9	59.6	264.5
100	56.1	58.4	255.1
120	65.3	57.6	247.6
140	74.8	57.2	241.8
155.4	80.6	57.2	238.6
160	83.6	57.3	237.9
180	84.1	58.2	236.5
194.7	85.25	59.5	236.9

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.82 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	23.3	43.8	167.7
20	29.9	42.1	157.4
40	41.3	41.1	150.6
60	54.3	40.7	146.9
80	67	40.9	146.7
100	73.6	41.5	149.2
120	74.3	43.5	158.1
133.5	80.8	45.8	169.3

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.82 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	16.7	64.8	298.5
20	29	62.4	283.4
40	38.7	60.7	272.4
60	49.4	59.5	264.5
80	59.4	59	259.8
100	66	59.1	259.5
120	67.6	60.6	264.4
139.9	78.2	63.8	280.5

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.83 vasaros sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	19.4	45.3	170.7
20	28	43.3	160.8
40	38.7	41.8	152.7
60	56.1	40.6	146.9
80	70	39.9	143.4
100	78.7	39.7	142.4
120	90.7	40	144.2
140	98.4	40.9	147.9
160	98.9	43.3	158.7
180.6	94.2	47.6	178.9

Nuostolių priklausomybė nuo generacijos mazge Nr.83 žiemos sezono metu, kai prijungtas UPFC

Generuojama galia, MW	UPFC nustatyta aktyvioji galia, Pnust.	Aktyvieji nuostoliai, MW	Reaktyvieji nuostoliai, Mvar
0	14.5	67.7	307.2
20	25.6	64.3	290.2
40	37.1	61.4	275.5
60	49.3	59.1	263.8
80	60.1	57.3	255.2
100	74.1	56	249.3
120	82.7	55.4	246.7
140	90.3	55.6	248.4
160	91	57.3	257
181.9	88.2	61.7	277.3