



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Nuolatinės srovės jungčių įtakos elektros sistemų stabilumui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Rimvydas Urbutis**

Projekto autorius

**Doc. Mindaugas Ažubalis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Nuolatinės srovės jungčių įtakos elektros sistemų stabilumui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

---

**Rimvydas Urbutis**

Projekto autorius

**Doc. Mindaugas Ažubalis**

Vadovas

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Recenzentas

---

**Kaunas. 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rimvydas Urbutis

## **Nuolatinės srovės jungčių įtakos elektros sistemų stabilumui tyrimas**

### **Akademinio sąžiningumo deklaracija**

Patvirtinu, kad mano, Rimvydo Urbutio, baigiamasis projektas tema „Nuolatinės srovės jungčių įtakos elektros sistemų stabilumui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Urbutis, Rimvydas. Nuolatinės srovės jungčių įtakos elektros sistemų stabilumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Elektros sistema, dažnio stabilumas, jungtinės energetikos sistemos, nuolatinės srovės jungtis.

Kaunas, 2020. 53p.

## **Santrauka**

Baigiamajame magistro darbe yra atliekamas tyrimas, kurio tikslas yra išsiaiškinti kokią įtaką sistemų stabilumui turi nuolatinės srovės jungtys, kai jomis yra sujungiamos dvi asinchroniniais režimais veikiančios kintamosios srovės elektros sistemos. Kadangi sunkiausi trumpųjų jungimų atvejai yra trifaziai trumpieji jungimai arčiausiai generatorių, trumpųjų jungimų modeliavimas bus atliekamas generatorių mazguose keliais skirtingais atvejais: kai generatorius dirba normaliu režimu ir kai yra maksimaliai apkrautas, taip pat kai veikia dvi tarpsteminės nuolatinės srovės jungtys arba viena tarpsteminė nuolatinės srovės jungtis. Kiekvienu atveju bus ieškomas ribinis trumpojo jungimo atjungimo laikas ir tikrinama, ar visi sistemos parametrai visuose sistemos mazguose neviršija kritinių reikšmių pereinamojo proceso metu ir jam nusistovėjus.

Urbutis, Rimvydas Study of DC Connections Impact on Power System Stability. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Mindaugas Ažubalis; Electricity and electronics faculty, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Power system, Frequency stability, Interconnected energy systems, Direct current link.

Kaunas, 2020. 53p.

### **Summary**

In the master thesis the study will be done, whose purpose is to research what impact DC lines has on power systems stability, when they connect two asynchronous AC power systems. Whereas the most difficult faults in power system are near generators, disturbances will be modeled in generators buses in few different cases: when generator in bus of the fault works on normal mode and maximum mode, as well when one or two DC links operates between systems. Critical clearing times will be searched in every case, as well it will be checked, that all the variables of the systems are within the limits during fault and after it.

## Turinys

<b>Turinys</b> .....	<b>6</b>
<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Elektros energetikos sistema ir jos stabilumas</b> .....	<b>11</b>
1.1. Elektros sistemos inercija .....	12
1.2. Elektros sistemos dažnio stabilumas .....	13
<b>2. Nuolatinės srovės jungtys</b> .....	<b>16</b>
2.1. Nuolatinės srovės jungčių klasifikacija .....	18
2.1.1. “Back-to-back” sistema .....	18
2.1.2. Vienpolė nuolatinės srovės sistema.....	19
2.1.3. Dvipolė nuolatinės srovės sistema.....	19
2.1.4. Tiristorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai .....	20
2.1.5. Tranzistorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai.....	22
2.1.6. VSC HVDC valdymas.....	24
<b>3. Elektros sistemos stabilumo tyrimo metodika</b> .....	<b>26</b>
3.1. Elektros sistemos dinaminis modelis.....	27
<b>4. Dinaminio stabilumui tyrimas</b> .....	<b>29</b>
4.1. Sistemos duomenys .....	29
4.2. Dinaminio stabilumo tyrimas eiga.....	30
4.3. Trumpųjų jungimų modeliavimas pirmojoje sistemoje.....	31
4.4. Rezultatų analizė .....	40
4.5. Trumpųjų jungimų modeliavimas jungtinėje elektros sistemoje.....	40
4.6. Rezultatų analizė .....	46
<b>Išvados</b> .....	<b>48</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>49</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>52</b>
1 priedas. Tiriamos jungtinės elektros sistemos schema .....	52
2 priedas. Sistemos elementų dinaminiai modeliai .....	53

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Lietuvos nuolatinės srovės jungtys ir jų parametrai .....	18
<b>2 lentelė.</b> Jungtinės elektros sistemos generatorių duomenys.....	29
<b>3 lentelė.</b> Jungtinės elektros sistemos apkrovų duomenys.....	30
<b>4 lentelė.</b> Generatorių mazgų stabilumo ribos.....	31
<b>5 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 101 mazge.....	32
<b>6 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 151 mazge.....	34
<b>7 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 206 mazge.....	35
<b>8 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 211 mazge.....	36
<b>9 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge.....	39
<b>10 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3018 mazge.....	39
<b>11 lentelė.</b> Sistemos mazgų ribiniai trumpojo jungimo atjungimo laikai. ....	41
<b>12 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 101 mazge.....	41
<b>13 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 151 mazge.....	42
<b>14 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 206 mazge.....	43
<b>15 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 211 mazge.....	43
<b>16 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge.....	44
<b>17 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 402 mazge.....	45
<b>18 lentelė.</b> Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 408 mazge.....	45

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Elektros sistemos darbo režimai.....	11
<b>2 pav.</b> Elektros sistemos stabilumo klasifikacija.....	12
<b>3 pav.</b> Generatorių sukauptos kinetinės energijos įtaka stabilizuojant dažnį.[3].....	13
<b>4 pav.</b> Nuolatinės ir kintamos srovės elektros linijų nuostolių priklausomybė nuo atstumo.....	17
<b>5 pav.</b> Nuolatinės ir kintamos srovės elektros linijų investicijų priklausomybė nuo atstumo.....	18
<b>6 pav.</b> “Back-to-back” HVDC keitiklio schema. [1].....	19
<b>7 pav.</b> Vienpolė nuolatinės srovės jungtis. [1].....	19
<b>8 pav.</b> Dvipolė nuolatinės srovės jungtis. [1].....	20
<b>9 pav.</b> Trifazio LCC keitiklio principinė schema. [1].....	21
<b>10 pav.</b> Principinė tarpsteminės LCC nuolatinės srovės jungties schema. [1].....	22
<b>11 pav.</b> VSC HVDC keitiklio principinė schema. [30].....	23
<b>12 pav.</b> Dvejų lygių VSC keitiklis [31].....	23
<b>13 pav.</b> Trijų lygių nuolatinės srovės VSC keitiklio schema. [31].....	24
<b>14 pav.</b> VSC nuolatinės srovės keitiklio galios valdymo schema. [31].....	24
<b>15 pav.</b> VSCDC dinaminio modelio principinė schema [29].....	28
<b>16 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 101 mazge, kai $P_{GEN} = P_N$ .....	33
<b>17 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 101 mazge, kai $P_{GEN} = P_{MAX}$ .....	33
<b>18 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 151 mazge, kai $P_{GEN} = P_N$ .....	34
<b>19 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 151 mazge, kai $P_{GEN} = P_{MAX}$ .....	35
<b>20 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 206 mazge, kai $P_{GEN} = P_N$ .....	36
<b>21 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 206 mazge, kai $P_{GEN} = P_{MAX}$ .....	36
<b>22 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 211 mazge, kai $P_{GEN} = P_N$ .....	37
<b>23 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 211 mazge, kai $P_{GEN} = P_{MAX}$ .....	38
<b>24 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge, kai $P_{GEN} = P_N$ .....	38
<b>25 pav.</b> Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge, kai $P_{GEN} = P_{MAX}$ .....	39



## Santrumpų ir terminų sąrašas

AĮNS — Aukštos įtampos nuolatinė srovė.

HVDC — Aukštos įtampos nuolatinė srovė (High Voltage Direct Current).

VSC — Įtampos šaltinio keitiklis (Voltage Source Converter).

KS — Kintamoji srovė.

NS — Nuolatinė srovė.

IGBT — Izoliuoto įėjimo bipolinis tranzistorius (Isolated Gate Bipolar Transistor).

LCC — Linija komutuojamas keitiklis (Line Commutated Converter).

EES — Elektros energetikos sistema.

IPS/UPS — „Integruota elektros sistema/ Jungtinė elektros sistema” (Integrated Power System/ United Power System) — Elektros energetikos sistema, jungianti buvusias Sovietų sąjungos šalis.

PSS/e — PTI „Power System Simulator for Engineering” — programinė įranga, skirta modeliuoti elektros sistemas ir atlikti su jomis susijusius skaičiavimus.

ADN — Automatinis dažnio nukrovimas.

AŽR — Automatinis žadinimo reguliavimas.

AKĮ — Automatinis kartotinis įjungimas.

## Įvadas

Elektros energetikos sistema — tai tarpusavyje technologiškai susijusių elektros įrenginių — generatorių, perdavimo ir skirstymo tinklų, ir vartotojų — visuma. Elektros energetikos sistemos viena iš pagrindinių savybių yra tai, jog kiekvienu laiko momentu turi būti išlaikomas balansas tarp generuojamos ir vartojamos galios. Jei balanso tarp generacijos ir vartojimo nėra, gali būti pažeistas sistemos stabilumas. Kadangi elektros energetika yra viena svarbiausių ūkio šakų, jai yra taikomi aukšti stabilumo ir patikimumo reikalavimai. Įvykusios avarijos elektros sistemoje gali taip pat pažeisti sistemos stabilumą, taigi po avarijos pašalinimo sistema turi išlikti stabili.

Šiuo metu visame pasaulyje vykdoma nemažai projektų, kur elektros sistemose naudojamos aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtys. AĮNS jungtys yra statomos vietoj KS linijų, kai norima dideliais atstumais perduoti didelį elektros energijos kiekį, kai norima prie perdavimo tinklo prijungti vėjo elektrinių parkus, ypač tuos, kurie yra įrengti jūroje, o taip pat AĮNS yra naudojama, kai norima sujungti dvi asinchroniškai veikiančias kintamosios įtampos sistemas.

### **Darbo tikslas:**

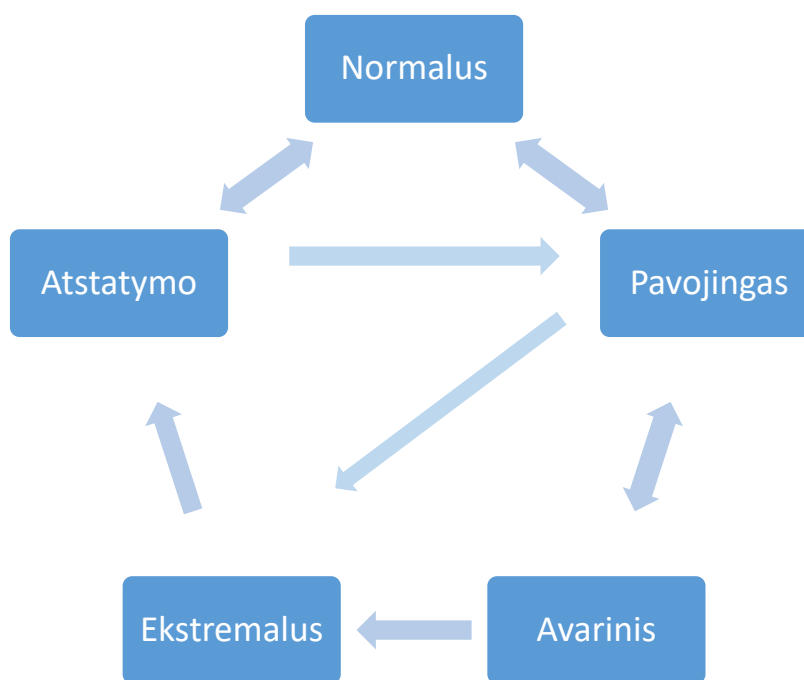
Ištirti kokią įtaką jungtinių elektros sistemų stabilumui daro nuolatinės srovės jungtys.

### **Darbo uždaviniai:**

1. atlikti elektros energetikos sistemos ir jos stabilumo apžvalgą;
2. atlikti nuolatinės srovės jungčių tipų apžvalgą;
3. atlikti jungtinės elektros sistemos su nuolatinės srovės jungtimis modeliavimą ir sudaryti balansinį darbo režimą;
4. atlikti pirmosios sistemos izoliuoto darbo stabilumo tyrimą sumodeliuojant trumpuosius jungimus generatorių mazguose;
5. patikrinti nuolatinės srovės jungčių įtaką elektros sistemoms, kai veikia dvi arba viena nuolatinės srovės jungtis.

## 1. Elektros energetikos sistema ir jos stabilumas

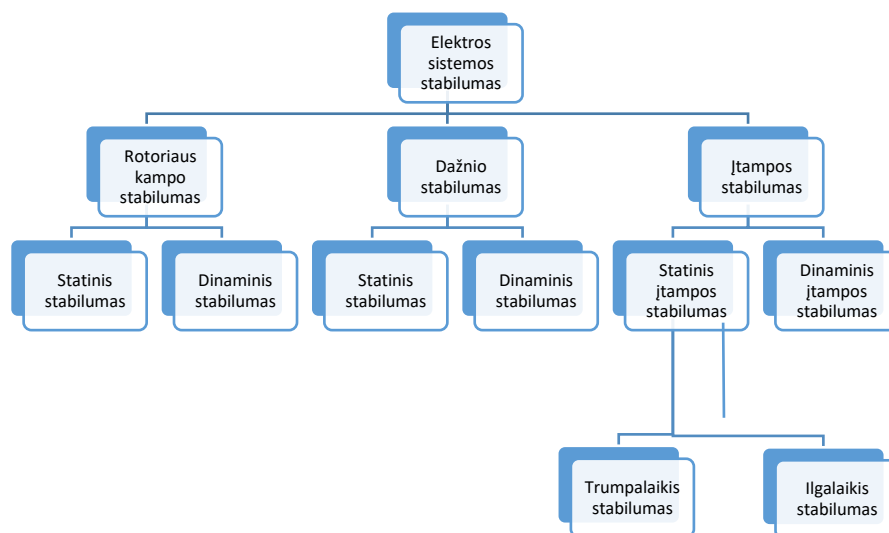
Elektros energetikos sistemą sudaro elektrinės, aukštos, vidutinės ir žemos įtampos tinklai bei elektros energijos vartotojai. Elektros sistemos darbas gali būti suskirstytas į 5 skirtingus režimus: normalų, pavojingą, avarinį, ekstremalų ir atstatymo. Normalus elektros sistemos darbo režimas skaitomas, kai visi tinklo rodikliai yra pastovūs ir nominalių reikšmių. Pavojingas darbo režimas skaitomas, kai atsiranda elektros sistemos tinklo rodiklių pakitimų, bet jie nėra kritiniai. Avarinis režimas atsiranda tada, kai sistema susilpnėja įvykus nedideliam trikdžiui. Jei nedideli trikdžiai sukelia didesnius ir kyla pavojus elektros sistemos stabilumui, tada elektros sistema pradeda veikti ekstremaliu režimu. Ir galiausiai elektros sistema veikia atstatymo režimu, kai reikia atstatyti elektros sistemos pradinę topologiją prijungiant į tinklą visus atjungtus įrenginius [4].



1 pav. Elektros sistemos darbo režimai.

Elektros sistema yra laikoma netiesine sistema, nes jos parametrai — generacija, apkrovos ir topologija — nuolat kinta. Kad sistema veiktų stabiliai ir patikimai, turi būti išlaikomas 50 Hz dažnis. Dažnio svyravimai galimi esant nebalansui tarp gamybos ir vartojimo, taip pat įvykus trikdžiams elektros tinkle. Trikdžiai elektros tinkle klasifikuojami į didelius ir nedidelius. Prie nedidelių trikdžių priskiriami apkrovų kitimai, sistemos elementų perkrova ar jų atjungimas. Prie didelių elektros sistemos trikdžių yra priskiriami trumpieji jungimai perdavimo tinkle, didelės generacijos praradimas ir nesinchroniškas generatoriaus prijungimas. Elektros sistemos savybė išlikti gyvybinga įvykus neplanuotam generacijos ar apkrovos praradimui bei įvykus avarijai elektros tinkle yra vadinama elektros sistemos stabilumu [1]. Elektros sistemos stabilumas yra skirstomas į dvi rūšis: statinį, kai įvyksta nedidelis trikdys elektros sistemoje ir dinaminį, kai įvyksta didelis trikdys. Trikdžius elektros sistemoje gali sukelti daugelis skirtingų veiksnių. Norint juos kuo tiksliau išanalizuoti, jie yra klasifikuojami remiantis stabilumo problemų analize. Sistemos stabilumo klasifikacija atliekama remiantis tokiomis prielaidomis: pasirenkamas tinklo rodiklis, pagal kurį vertinamas sistemos stabilumas; atsižvelgiant į trikdžio dydį, nustatomas labiausiai tinkamas stabilumo skaičiavimo

metodas; vertinant perdavimo sistemos stabilumą, turi būti atsižvelgta į pereinamuosius procesus ir jų trukmę, kurie įvyksta po trikdžio atsiradimo. Įvertinus šias sąlygas galima atlikti elektros sistemos stabilumo klasifikaciją (pav. 2) [2].



2 pav. Elektros sistemos stabilumo klasifikacija.

### 1.1. Elektros sistemos inercija

Elektros sistemos inercija yra apibrėžiama kaip sistemos savybė priešintis dažnio kitimui, panaudojant besisukančių generatorių masių kinetinę energiją. Kai elektros sistemoje atsiranda skirtumas tarp generacijos ir apkrovos, generatorių inercija sumažina ir sulėtina dažnio svyravimus. (1) formulė apibūdina ryšį tarp generatoriaus sukauptos kinetinės energijos, jo inercijos ir sukimosi greičio. Iš formulės matosi, jei sistemos dažnis mažėja, taip pat ir generatoriaus sukimosi greitis mažėja, tada generatorius pradeda naudoti sukauptą kinetinę energiją kompensuoti elektros energijos trūkumui esančiam elektros sistemoje. Dažnio didėjimo atveju, vyksta atvirkščias procesas — generatoriaus sukimosi greitis didėja kartu didindamas sukauptos kinetinės energijos kiekį. Svarbus dydis vertinant elektros sistemos inerciją yra inercijos laiko pastovioji  $H$ . Šis dydis apibūdina teorinį laiko tarpą, kurį generatorius gali tiekti į tinklą savo vardinę galią naudodamas tik sukauptą savo kinetinę energiją, kol jo sukimosi greitis pasiekia 0 ((2) formulė). Inercijos laiko pastovioji yra skirtinga priklausomai nuo generatorių dydžio, tipo, inercijos ir nominalaus sukimosi greičio. Šiluminių elektrinių, kurių sukimosi greitis 3000 aps/min, inercijos laiko pastovioji svyruoja tarp 2,5-6s, šiluminių elektrinių, kurių sukimosi greitis yra 1500 aps/min — 4-10s, o hidrogenatorių inercijos laiko pastovioji — nuo 2 iki 4s [8], [10]. Generatorių sukauptos kinetinės energijos įtaka sistemos dažnio pokyčiui pavaizduota 3 paveikslėlyje.

$$E_k = \frac{J * w^2}{2}; \quad (1)$$

Čia:

$E_k$  — generatoriaus sukaupta kinetinė energija, J;

$J$  — generatoriaus inercija,  $kg \cdot m^2$ ;

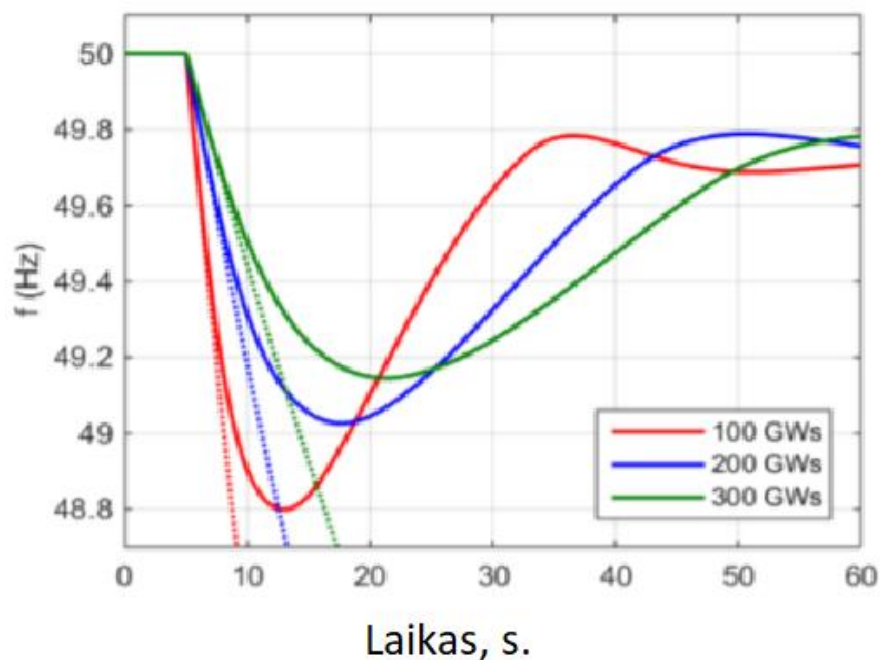
$w$  — generatoriaus sukimosi greitis, aps/min;

$$H = \frac{J * w^2}{2S_b}; \quad (2)$$

Čia:

$H$  — inercijos laiko pastovioji, s;

$S_b$  — nominali generatoriaus galia, MW;



3 pav. Generatorių sukauptos kinetinės energijos įtaka stabilizuojant dažnį.[3]

## 1.2. Elektros sistemos dažnio stabilumas

Elektros sistemos dažnio stabilumas — tai elektros sistemos savybė išlaikyti stabilų dažnį įvykus dideliam trikdžiui, kuris įtakoja didelį generacijos ir apkrovos nesutapimą. Dažnio stabilumas priklauso nuo sistemos gebėjimo išlaikyti ar atkurti pusiausvyrą tarp generacijos ir apkrovos su minimaliu apkrovos praradimu. Nestabilumas sistemoje pasireiškia ilgalaikiu dažnio svyravimu. Jungtinėse energetikos sistemose dažnio nestabilumas gali atsirasti, kai sistema yra padalinama į nepriklausomas salas. Atlikus padalinimą pagrindinis stabilumo klausimas yra, ar kiekviena sala

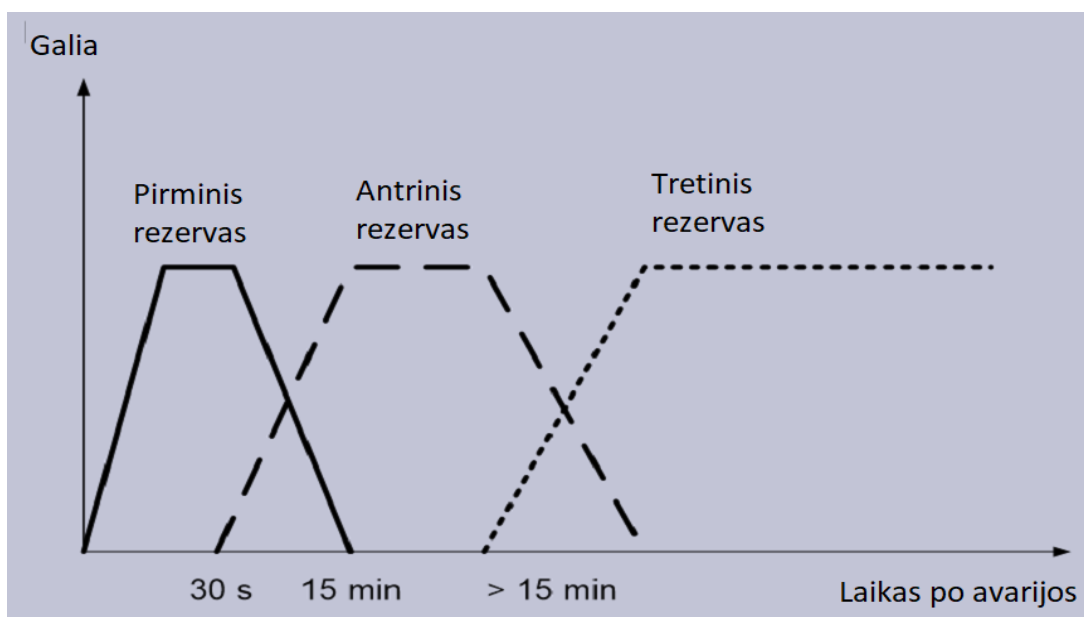
pasieks savo dažnio pusiausvyros būseną su minimaliu apkrovos praradimu. Šiam tikslui pasiekti gali kliudyti prastas generatorių reguliavimas, netinkamas valdymo ir apsaugos įrangos koordinavimas arba nepakankamas galios rezervas. Sistemoje įvykus trikdžiui, dažnio atstatymui yra naudojami dažnio reguliavimo galios rezervai. Jie yra skirstomi į pirminį, antrinį ir tretinį. Pirminį rezervą sudaro elektrinės, kurios veikia ne pilnu pajėgumu ir gali per 5-30 sekundžių laiko tarpą padidinti gamybos pajėgumus. Toks rezervas yra valdomas automatikos, kuri matuoja sistemos dažnį ir jam pakitus iškart imasi priemonių jam tvarkyti. Prie tokių elektrinių yra priskiriamos kondensacinės ir kombinuoto ciklo elektrinės, dujų turbinos bei hidroelektrinės. Pirminis rezervas sustabdo dažnio svyravimus, bet negražina nominalios dažnio reikšmės. Pirminis rezervas pradeda veikti tada, kai sistemos dažnis pakinta nuo 20 iki 200 mHZ ribose. Pirminio generacijos rezervo dydis turi būti toks, kad pilnai padengtų galimą didžiausią momentinį nuokrypį tarp generacijos ir apkrovos. Galimas didžiausias momentinis nuokrypis priklauso nuo elektros sistemos dydžio, didžiausio generatoriaus galingumo ir labiausiai apkrautų linijų. Kai pirminis rezervas stabilizuoja dažnį, jį pakeičia antrinis galios rezervas, kad atstatytų dažnį į nominalią reikšmę, taip pat kompensuoti apkrovos bei generacijos kitimus. Antrinius rezervavimo įrenginius sudaro elektrinės, kurios gali būti paleistos per 5—15 minučių laiko tarpą. Tai gali būti hidroakumuliacinės ir hidroelektrinės, kondensacinės ir kombinuoto ciklo elektrinės, taip pat garo turbinos. Antrinio generacijos rezervo dydis turi būti toks, kad padengtų netikėtus gamybos pajėgumų praradimus ar elektros energijos paklausos svyravimus. Rezervo dalis, kuri turi rezervuoti generacijos praradimus, turi būti lygi didžiausiam elektros generatoriui, o paklausos svyravimams reikalingo galios rezervo dydis apskaičiuojamas pagal (3) formulę. Tretinis rezervas yra naudojamas pirminio ir antrinio rezervo atstatymui arba papildymui. Šis rezervas yra aktyvuojamas operatoriaus ir trunka apie 15 minučių. Tretinį rezervavimą atlieka kondensacinės elektrinės ir greitai paleidžiamos dujų turbinų elektrinės. Tretinio generacijos rezervo dydis turi būti ne mažesnis nei antrinio generacijos rezervo dydis, kad esant reikalui tretinis rezervas galėtų pakeisti antrinį (4 pav.) [3].

$$P_{rez} = \sqrt{aP_{max} + b^2} - b \quad (3)$$

Čia:

a ir b — empiriniai elektros sistemos parametrai;

$P_{max}$  — maksimalus elektros energijos praradimas tam tikroje zonoje, MW;



4 pav. Galios rezervų klasifikacija pagal laiką [3]

Dažnio stabilumo kokybę pagerinti galima panaudojant automatikos priemones, tokias kaip: automatinį dažnio nukrovimą, automatinį žadinimo reguliavimą ir automatinį pakartotinį įjungimą. Automatinis dažnio nukrovimas — tai greitas elektros sistemos vartotojų atjungimas, kai dažnis krenta žemiau nustatytos ribos. ADN yra pradedamas vykdyti nuo mažiausiai svarbios 3 kategorijos vartotojų. AŽR automatika padeda sumažinti įtampos kitimą bei išlaikyti nominalias tinklo įtampos reikšmes. AKĮ yra naudojamas atsijungus linijai greitam pakartotiniam jos įjungimui. Jei įvykdomas sėkmingas AKĮ, tai būna atstatoma prieš atjungimą buvusi tinklo topologija ir taip išlaikomas sistemos patikimumas. Yra keli faktoriai, į kuriuos reikia atsižvelgti, norint pagerinti sistemos dažnio stabilumą ir sumažinti dažnio svyravimų amplitudę įvykus trikdžiui:

1. Tradicinių elektrinių generatorių našumas ganėtinai stipriai priklauso nuo visų pagalbinių elektros įrenginių veikimo. Šie pagalbiniai įrenginiai gali tiekti orą ir degalus į katilą, alyvuoti guolius ar aušinti. Jei sumažėjus dažniu pakis šių įrenginių greitis ir našumas, tai turės įtakos elektros generatorių gamybai, kas gali sukelti kaskadinę griūtį.
2. Kai sistemos dažnis nukrenta žemiau 47 Hz, yra pažeidžiamos garo turbinos, o hidroelektrinės ir šiluminės elektrinės yra labiau patvarios.
3. Galios transformatoriai yra jautrūs dažnio pokyčiams ir gali būti perkauti, jei dažnio nuokrypis pasiekia kritinę reikšmę [15].

## 2. Nuolatinės srovės jungtys

Aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtys (AĮNS) yra vis svarbesnė technologija, naudojama elektros energijai perduoti. Jos yra naudojamos, kai norima sujungti asinchroniškai veikiančias atskiras elektros sistemas, perduoti elektros energiją ilgais atstumais ar prie perdavimo tinklo prijungti vėjo elektrines. Naujų nuolatinės srovės jungčių įrengimas yra vienas iš pagrindinių tikslų norint pagerinti Europos tinklo kokybę ir plėsti prekybos elektros energija rinką. Taip pat šių jungčių pažangių funkcinų savybių naudojimas turi nemažą įtaką saugiam ir efektyviam elektros tinklo veikimui. Taip pat tai padeda spręsti esamus ir būsimus iššūkius susijusius su išmetamo anglies dioksido mažinimu ir atsinaujinančios energijos išteklių integracija.

Yra galimos dvi skirtingos aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo technologijos: klasikinė linijos komutuojamo keitiklio (LCC — line commutated converter) ir daug naujesnė įtampos šaltinio keitiklio (VSC — voltage source converter). Abi technologijos turi nemažai panašumų, tačiau turi ir esminių skirtumų: LCC technologijai reikia, kad prie jos prijungtos kintamosios įtampos sistemos būtų labai stabilios, o VSC technologija gali veikti prijungta prie labai silpnos ar net pasyvios elektros sistemos. Tai leidžia VSC technologijai būti greitai paleistai („Black Start“ paleidimas). VSC technologijos nuolatinės srovės keitikliai taip pat gali valdyti aktyviają ir reaktyviają galią nepriklausomai ir taip pat gali veikti statinio sinchroninio kompensatoriaus režimu. Bet tai nereiškia, jog VSC technologija yra geriausia kiekvienu atveju. LCC technologija kai kuriais atvejais yra palankesnė nei VSC dėl mažesnių veikimo nuostolių.

Lietuvoje yra įrengtos dvi aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtys: „LitPol link“ su Lenkija ir „NordBalt“ su Švedija. Nuolatinės srovės jungčių įrengimas leido prekiauti elektros energija su kitomis elektros sistemomis, kurios nėra sinchronizuotos su Baltijos šalių elektros sistema, taip pat šios jungtys leido sustiprinti šalių energetinį savarankiškumą, padidino elektros energijos tiekimo patikimumą ir saugumą, taip pat leidžia diversifikuoti elektros energijos šaltinius.

„LitPol link“ jungtis su Lenkija buvo pirmoji Lietuvos ir tuo pačiu Baltijos šalių jungtis su kontinentinės Europos elektros tinklais. Lietuva elektros tinklas su Lenkijos elektros tinklu yra sujungtas 150 kilometrų ilgio 400 kV kintamosios srovės oro linija. Pagrindinis šios jungties elementas — tai Alytaus transformatorių pastotėje stovintis 500 MW galios keitiklis, kuris yra paremtas HVDC Classic technologija, kurios pagrindas yra tiristoriniai galios jungikliai, sujungti pagal „Back-To-Back“ topologiją. Šį keitiklį pagamino ir į Lietuvą atgabeno įmonė „ABB“. Nuolatinės srovės jungtis su Švedija „NordBalt“ sujungė Baltijos šalių ir Skandinavijos šalių elektros rinkas. Tai leido Baltijos šalims pirkti elektrą iš Šiaurės Europos šalių, kurios didžiąją dalį elektros energijos pagamina hidroelektrinėse. Nuolatinės srovės jungtį sudaro du 300 kV 400 kilometrų ilgio po vandeniu bei 50 kilometrų ilgio po žeme esantys kabeliai ir dvi keitiklių pastotys po 700 MW, esančios Klaipėdoje ir Nybru mieste Švedijoje. Šias keitiklių pastotis taip pat sukūrė įmonė „ABB“, panaudojant HVDC Light technologiją.

Nuolatinės srovės jungtys taip pat yra naudojamos šiems tikslams:

- Perduoti elektros energiją ilgais atstumais sausuma ir vandeniu;
- Perduoti elektros energiją tarp asinchroniškai veikiančių elektros sistemų;
- Prijungti vėjo jėgainių parkus prie perdavimo ar skirstomojo tinklo;
- Prijungti nutolusias apkrovas ar generatorius prie perdavimo ar skirstomojo tinklo.

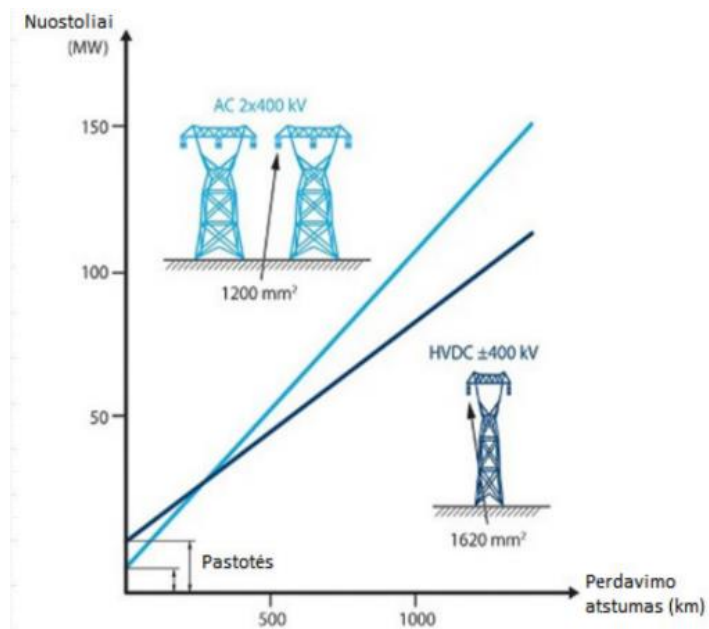


Vertinant nuolatinės srovės jungtis su kintamos srovės jungtimis, galima išvelgti tokius nuolatinės srovės privalumus:

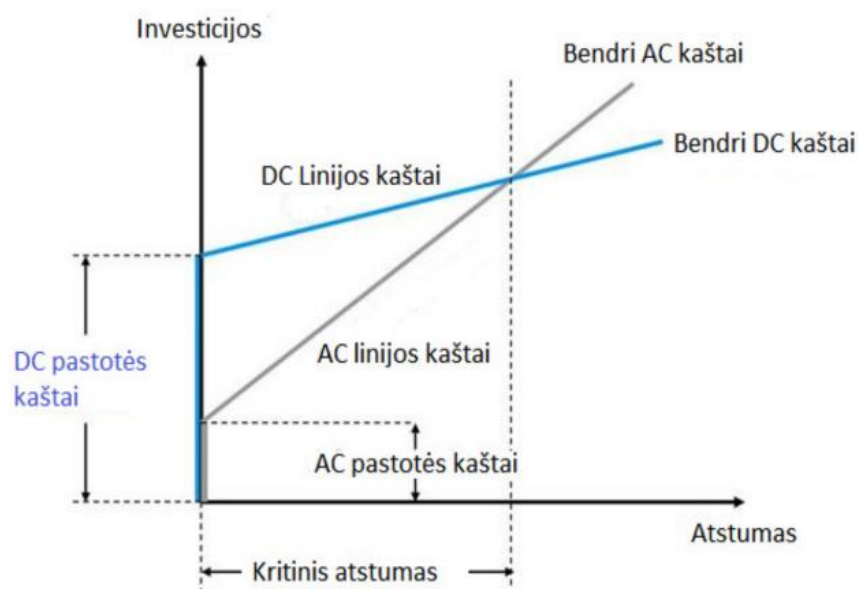
- kuo ilgesnės nuolatinės srovės linijos, tuo jų investicijos yra mažesnės lyginant su kintamos srovės linijomis;
- nuolatinės srovė linijomis galima perduoti didesnę galią ir ją reguliuoti;
- nuolatinės srovės linijomis galima sujungti skirtingų dažnių elektros sistemas ir tai atliekant yra optimizuojamas šiluminių ir hidroelektrinių bendras darbas;
- taip pat vertinama, jog nuolatinės srovės linijos turi mažesnę poveikį aplinkai, nes tokiai pačiai galiai perduoti užtenka mažiau oro linijų.

Nuolatinės srovės jungtys taip pat susiduria su šiais trūkumais:

- mažesnis patikimumas dėl keitiklių įrenginių;
- keitiklių pastotės yra brangios ir turi ribotas perkrovimo galimybes;
- sudėtingos konstrukcijos nuolatinės srovės jungtuvai ir apsaugos įrenginiai.



**4 pav.** Nuolatinės ir kintamos srovės elektros linijų nuostolių priklausomybė nuo atstumo.



5 pav. Nuolatinės ir kintamos srovės elektros linijų investicijų priklausomybė nuo atstumo.

1 lentelė. Lietuvos nuolatinės srovės jungtys ir jų parametrai

Pagrindiniai parametrai	LitPol link	NordBalt
Jungties ilgis, km	163 km oro linija	453 (apie 400 km povandeninis kabelis ir 53 km požeminis kabelis)
Jungties galia, MW	500	700
Jungties įtampa, kV	400 nuolatinė	300 nuolatinė
Technologija	LCC	VSC
Numatoma naudojimo trukmė	50 metų	30 metų
Investicijos	370 mln. Eur.	550 mln. Eur.

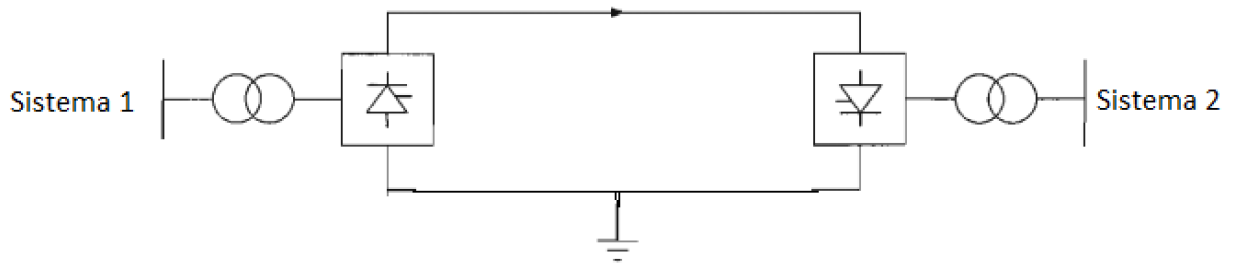
## 2.1. Nuolatinės srovės jungčių klasifikacija

Nuolatinės srovės sistemos pagal jungimo būdą yra skirstomos į šias kategorijas:

- “Back-to-Back” nuolatinės srovės sistema;
- Vienpolės nuolatinės srovės sistema;
- Dvipolės nuolatinės srovės sistema;
- Mišrios nuolatinės srovės sistema.

### 2.1.1. “Back-to-back” sistema

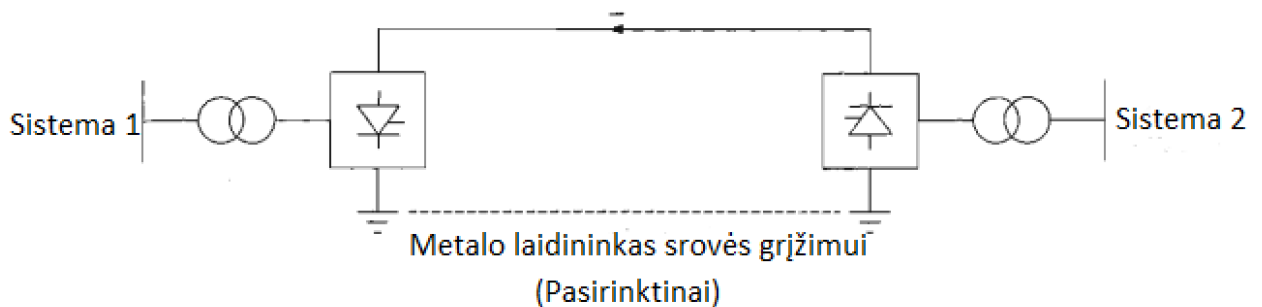
Nuolatinės srovės “Back-to-back” sistema — tai tokia sistema, kai inverteris ir lygintuvas stovė toje pačioje pastotyje. Tokio tipo keitikliai dažniausiai naudojami, kai norima perduoti elektros energiją tarp šalia esančių asinchroniškai veikiančių elektros sistemų.



6 pav. “Back-to-back” HVDC keitiklio schema. [1]

### 2.1.2. Vienpolė nuolatinės srovės sistema

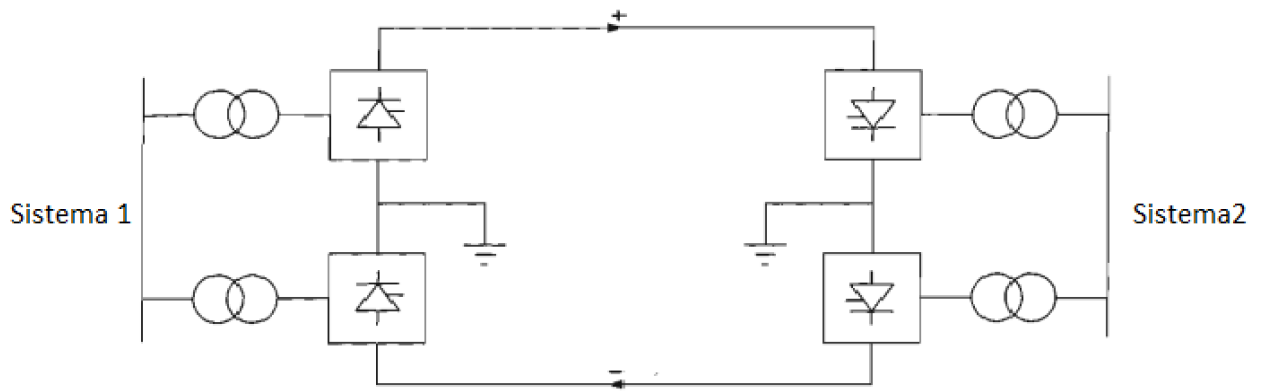
Vienpolei nuolatinės srovės jungčiai yra naudojamas tik vienas laidininkas, dažniausiai neigiamo poliariškumo, o srovės grįžimui yra panaudojama žemė arba vanduo. Taip pat kartais yra naudojamas metalinis laidininkas srovės grįžimui, kai žemės varža yra per didelė. Kadangi šiai jungčiai yra naudojamas tik vienas laidininkas, tai labai sumažina jungties kainą. Taip pat vienpolė nuolatinės srovės jungtis gali būti kaip pirminis etapas, vėliau įrengiant dvipolę nuolatinės srovės jungtį.



7 pav. Vienpolė nuolatinės srovės jungtis. [1]

### 2.1.3. Dvipolė nuolatinės srovės sistema

Dvipolė nuolatinės srovės jungtis turi du laidininkus — vieną teigiamą ir kitą neigiamą. Abejose jungties galuose yra terminalai, kurie turi po 2 vienodos įtampos keitiklius, kurie yra sujungti nuosekliai nuolatinės srovės pusėje. Taip pat keitikliai yra sužeminti. Normaliu režimu, abejais laidininkais teka vienodos srovės, o per žemę neteka jokia srovė. Pagrindinis tokios nuolatinės srovės jungties privalumas yra toks, jog jei praradus bent vieną laidininką, jungtis pradeda veikti kaip vienpolė jungtis, o srovė grįžta per žemę. Taip išlaikoma pusė nominalios galios tiekimo. Tai yra dažniausiai naudojama nuolatinės srovės jungtis.



8 pav. Dvipolė nuolatinės srovės jungtis. [1]

Nuolatinės srovės keitiklių sistemos taip pat gali būti skirstomos pagal tai, koks komutacinis įrenginys juose yra naudojamas. Pagrindė yra išskiriamos dvi grupės:

- Tiristorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai;
- Tranzistorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai.

#### 2.1.4. Tiristorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai

Tiristorinio valdymo keitikliai yra vadinami LCC tipo (linijos komutuojami keitikliai). Tokiame keitiklyje yra naudojama trijų fazių ir pilnos bangos tiltelio grandinė. Toks ventilių tiltelis gali veikti ir lygintuvo ir inverterio režimu, todėl nuolatinės srovės sistema su tokiu keitikliu gali perduoti galią abejomis kryptimis. Tai yra atliekama keičiant ventilių atidarymo kampus — esant ventilių atidarymo kampui  $< 90^\circ$ , jungtimi tekės nuolatinė srovė, o esant  $> 90^\circ$  kampui keičiasi nuolatinės įtampos poliarumas ir srovė nuolatinės srovės keitiklio dalyje tekės iš neigiamo poliškumo jungties. Keitiklio nuolatinė įtampa gali būti apskaičiuota pagal formulę (1):

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{3}U_{max}}{\pi} * \cos\alpha; \quad (4)$$

Čia:

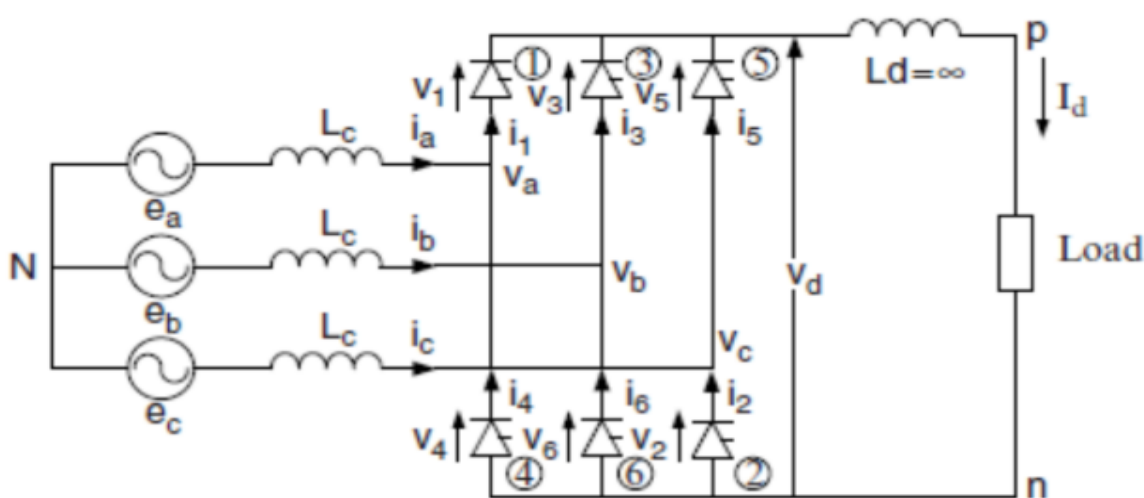
$U_{DC}$  — nuolatinė keitiklio įtampa, kV;

$U_{max}$  — maksimali kintamosios įtampos tinklo įtampa, kV;

$\alpha$  — tiristorių atidarymo kampas,  $^\circ$ .

9 paveikslėlyje pavaizduota trifazio tiltelinio keitiklio ekvivalentinė schema. Pagrindinę keitiklio dalį sudaro puslaidininkinė įranga. Ją sudaro 6 tiristoriniai ventiliai, kurie prijungti prie trifazės elektros sistemos. Jų įtampa 3-5 kV, o srovė 2,5-3 kA. Norint pasiekti reikiamus įtampos ir srovės dydžius, keitiklių moduliai jungiami nuosekliai ir lygiagrečiai. Srovė teka nuosekliai sujungta apkrovos ir dvejų ventilių grandine, kurios potencialų skirtumas yra didžiausias. Pavyzdžiui, pirmu laiko intervalu didžiausias potencialų skirtumas yra tarp A ir B fazių, todėl srovė tekės per 1 ir 6 ventilius. Antro intervalo metu didžiausias potencialų skirtumas bus tarp A ir C fazių, todėl srovė tekės per 1 ir

2 ventilius. Taip keičiasi srovės kelias kiekvieną periodo šeštadalį. Tokie keitikliai naudoja daug reaktyviosios galios — nominaliu darbo režimu vartojama reaktyvioji galia gali siekti iki 50% perduodamos aktyviosios galios. Šiam tikslui prie keitiklių yra statomi reaktyviosios galios šaltiniai. Toks šių keitiklių reaktyviosios galios vartojimas yra laikomas vienas didžiausių šių jungčių trūkumų. Kompensuoti reaktyviajai galiai yra statomi didelio talpumo kintamos įtampos kondensatoriai, kurie padidina ir taip nemažus keitiklių pastochių kaštus ir pastotės plotą. Taip pat šiems keitikliams nemažą įtaką daro kintamos įtampos tinklai, kurie gali sukelti komutavimo klaidas. Tinklo įtampos kritimas ir fazių kampo pokytis gali daryti įtaką keitiklio ventiliams sumažinant jų sužadavimo laiką. Tokiu atveju yra galimi jau suveikusių ventilių pakartotiniai atidarymai, kurie gali sukelti komutavimo klaidas. Taip pat LCC nuolatinės srovės jungtims įtaką turi ir kintamosios įtampos tinklo trumpojo jungimo srovė. Kuo mažesnė trumpojo jungimo srovė kintamosios įtampos tinkle, tuo ji labiau įtakoja sąveiką tarp kintamosios ir nuolatinės įtampos tinklų.



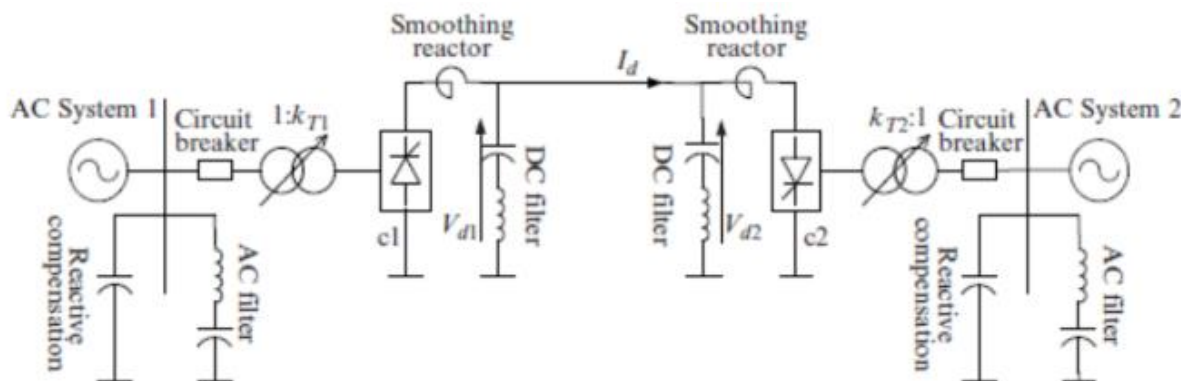
9 pav. Trifazio LCC keitiklio principinė schema. [1]

10 paveikslėlyje pavaizduota principinė vienpolės nuolatinės srovės perdavimo tinklo schema, sudaryta iš vieno laidininko, kuris yra neigiamo poliškumo. Schema sudaro šie elementai:

- Dvi atskiros kintamos srovės sistemos,
- Du dažnio keitikliai — jie keičia kintamą srovę į nuolatinę ir atvirkščiai. Pagrindinę keitiklio dalį sudaro ventilių tilteliai, kurie yra sudaryti iš vidutinės įtampos (3-5 kV) ventilių.
- Išlyginamieji reaktoriai — tai aukšto induktyvumo reaktoriai, kurių induktyvumas gali siekti iki 1H;
- Nuolatinės ir kintamos srovės filtrai — jie yra naudojami, kad panaikinti įtampos ir srovės harmonikas abejose keitiklio pusėse;
- Reaktyviosios galios kompensatoriai — kadangi keitikliai naudoja labai daug reaktyviosios galios (normaliu režimu gali naudoti apie 50% nuo perduodamos aktyviosios galios, o esant kritiniams režimams, gali vartoti ir daugiau. Kintamos srovės pusėje yra naudojami šuntiniai

kondensatoriai, o nuolatinės srovės pusėje yra naudojami sinchroniniai kondensatoriai arba VAR kompensatoriai.

- Keitiklių autotransformatoriai — pakeičia įtampą į tokia, kokia yra reikalinga ventiliams, kad būtų išlaikomas pastovus nuolatinės įtampos lygis arba pakelti nuolatinės įtampos lygį, iki kintamosios įtampos tinklo lygio.
- Jungtuvai — atjungti įvykus transformatoriaus gedimui ar norint išjungti NS jungtį. Jie yra naudojami kintamos įtampos tinklo pusėje. [23], [24].



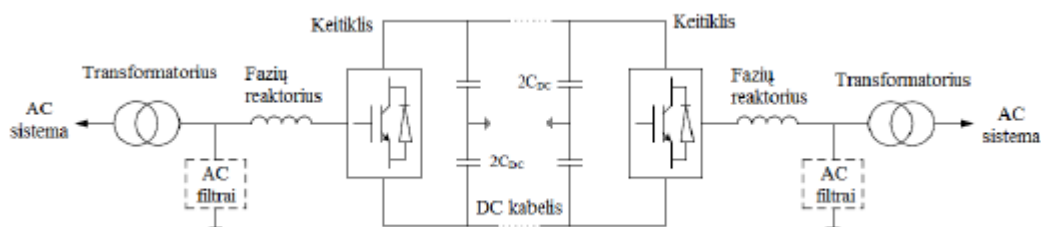
10 pav. Principinė tarpusisteminės LCC nuolatinės srovės jungties schema. [1]

### 2.1.5. Tranzistorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai

Tranzistorinio valdymo nuolatinės srovės keitikliai yra vadinami VSC tipo (įtampos šaltinio keitikliais). Tai šiek tiek naujesnė technologija, kuri pradėta naudoti apie 1990 metus. Šią technologiją nuolatinės srovės keitikliams pirmoji pritaikė įmonė ABB ir ją pavadino “HVDC light” technologija. Kitos kompanijos, gaminančios nuolatinės srovės keitiklius, šią technologiją vadina skirtingai: “Siemens” — “HVDC Plus”, o “Alstom” — HVDC MaxSine”. Principinė VSC keitiklio schema pavaizduota 11 paveikslėlyje. Ją sudaro:

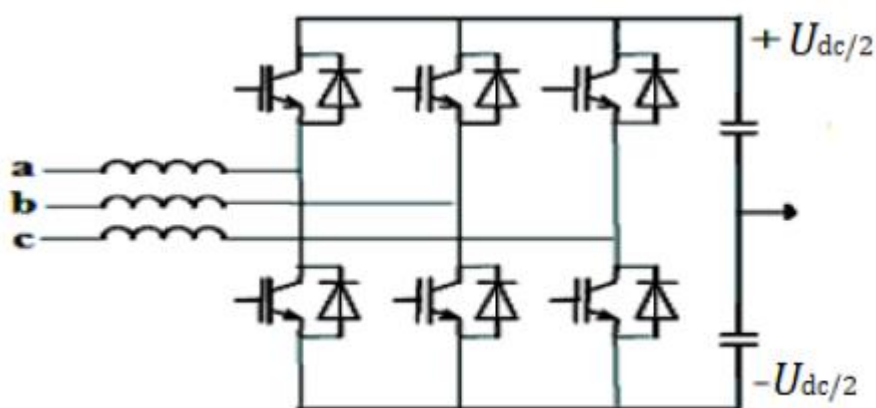
- Galios transformatoriai — taip pat kaip ir “LCC HVDC” technologijoje, transformatoriai pakeičia kintamą įtampą į reikiamas reikšmes.
- Fazių reaktorių — šis įrenginys yra skirtas aktyviosios ir reaktyviosios galių valdymui, taip pat jis filtruoja žemo dažnio šalutines harmonikas ir mažina trumpojo jungimo sroves.
- DC kondensatoriai — jie yra naudojami keitiklio nuolatinės srovės dalyje, kad kauptų energiją ir esant reikalui galėtų valdyti perdavinėjamą aktyviają galią.
- VSC keitikliai — keičia kintamą srovę į nuolatinę ir atvirkščiai. Keitiklyje yra naudojami izoliuoti užtūriniai bipoliniai tranzistoriai (IGBT), su kuriais galima valdyti išjungimą ir įjungimą. Taip pat iš jų galima padaryti keitiklius, kurie komutuotų savaime. Šiame keitiklyje nuolatinės įtampos poliškumas yra nekintantis, o nuolatinė įtampa, kurią išlygina didelės kondensatorinės talpos, yra išlaikoma pastovi. Todėl tokio tipo keitikliai su IGBT yra vadinami VSC (įtampos šaltinio keitikliais). Kadangi šie keitikliai turi papildomą valdymą ir gali būti savaime komutuojami, jų veikimas nepriklauso nuo sinchroninių kintamosios įtampos sistemos variklių, taip pat toks keitiklis gali perduoti galią į tinklą, kurį sudaro tik

pasyviosios apkrovos, o LCC keitikliai tokios funkcijos atlikti negali. Taip pat VSC keitikliai užima mažiau vietos nei LCC keitikliai dėl mažesnio reikalingų filtravimo įrenginių kiekio, todėl VSC keitikliai dažniau yra naudojami ten, kur yra mažiau vietos. Kaip minėta, VSC keitikliai išlaiko įtampos poliškumą pastovų, o galios srauto kryptis yra reguliuojama pagal srovės kryptį. VSC keitikliuose dažniausiai yra naudojama 6 ventilių tiltelio schema, kuri šioje technologijoje sukuria žymiai mažiau harmonikų, nei 6 ventilių tiltelio schema LCC technologijoje, todėl šiuo atveju 12 ventilių tiltelio schema nėra reikalinga.



11 pav. VSC HVDC keitiklio principinė schema. [30]

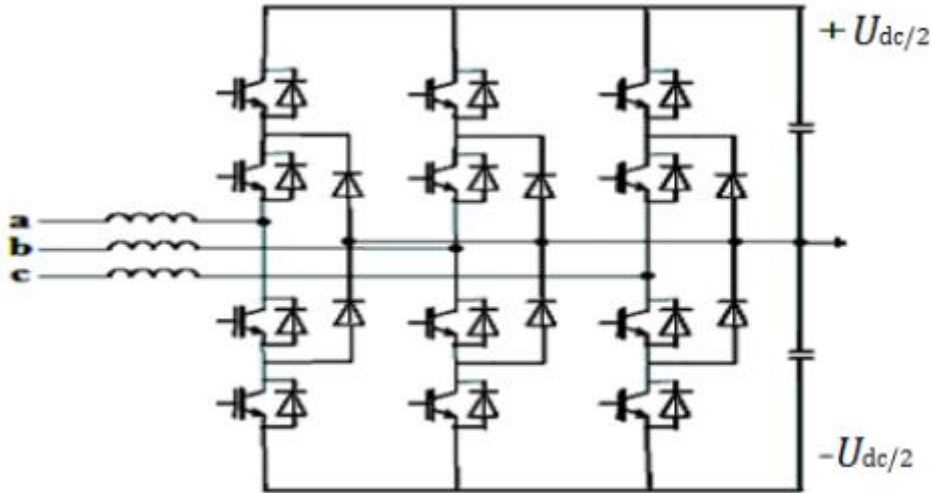
Pagrindė yra naudojamos 2 VSC nuolatinės srovės keitiklių konfigūracijos: dvejų ir trijų lygių keitikliai. Dvejų lygių VSC keitiklis yra tarsi 6 ventilių tiltelis, tik jame tiristoriai yra pakeisti IGBT tranzistoriais ir priešingos krypties diodais, kurie yra sujungti lygiagrečiai, o vietoj DC reaktoriaus yra DC kondensatoriai. Tokio tipo keitiklio pavadinimas atsirado dėl to, jog kiekvienos fazės kintamoji įtampa yra vis perjunginėjama tarp dvejų skirtingų įtampos lygių, kurie atitinka keitiklio nuolatinės įtampos teigiamą ir neigiamą poliškumus. Toks keitiklis išgauna stačiakampės bangos formos kintamąją įtampą, taigi kad įtampa būtų sinusoidės formos, yra panaudojama impulse pločio moduliacija.



12 pav. Dvejų lygių VSC keitiklis [31]

Trijų lygių VSC keitiklis yra naudojamas, kai norima sumažinti harmonikų iškraipymus, kurie atsiranda naudojant dvejų lygių keitiklį. Jo principinė schema pavaizduota 13 paveikslėlyje. Toks

keitiklis gali teikti trijų lygių įtampas kiekvienai kintamosios įtampos terminalo fazei:  $-0,5U_{DC}$ , 0 ir  $0,5U_{DC}$ . Kai norima gauti teigiamą nuolatinę įtampą, turi būti įjungti 2 viršutiniai IGBT tranzistoriai, o per du apatinius IGBT tranzistorius yra išgaunama neigiama nuolatinė įtampa. 0 įtampai išgauti yra panaudojami du viduriniai IGBT tranzistoriai.

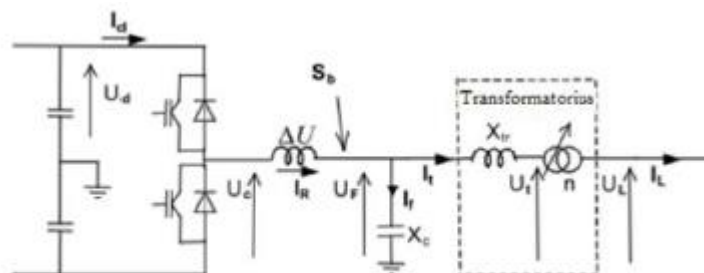


13 pav. Trijų lygių nuolatinės srovės VSC keitiklio schema. [31]

### 2.1.6. VSC HVDC valdymas

VSC nuolatinės srovės keitiklis yra sudarytas iš šių pagrindinių dalių:

- Nuolatinės srovės skirstykla, kurioje yra nuolatinės srovės filtrai ir jungtuvai;
- Keitikliai su IGBT tranzistoriais ir reaktoriais;
- Kintamosios srovės filtrai;
- Galios transformatoriai ir kintamosios srovės jungtuvai.



14 pav. VSC nuolatinės srovės keitiklio galios valdymo schema. [31]

Aktyvioji jungties galia tarp reaktoriaus ir kintamosios srovės filtrų yra apskaičiuojama pagal (5) formulę:



$$S = P + jQ = \sqrt{3} * U_F I_R; \quad (5)$$

Aktyvioji ir reaktyvioji galia tarp keitiklio ir filtrų yra apskaičiuojama pagal (6) ir (7) formules:

$$P = \frac{U_F * U_C * \sin(\delta)}{\omega L}; \quad (6)$$

$$Q = \frac{U_F * (U_F - U_C * \cos(\delta))}{\omega L}; \quad (7)$$

Čia:

$U_F$  — filtro įtampa, kV;

$U_C$  — keitiklio įtampa, kV;

$\delta$  — fazes kampas tarp filtro įtampos  $U_F$  ir keitiklio įtampos  $U_C$ , °;

$L$  — keitiklio reaktoriaus induktyvumas, L.

Aktyvioji galia yra reguliuojama keičiant  $\delta$  fazes kampą, o reaktyvioji galia yra reguliuojama keičiant įtampos amplitudę ir kampą. Tai leidžia atskirai reguliuoti aktyviają ir reaktyviają galią.

### 3. Elektros sistemos stabilumo tyrimo metodika

Kaip minėta, elektros sistemos stabilumas būna dvejų rūšių — statinis ir dinaminis. Statinis sistemos režimas yra aprašomas esant pastoviams sistemos parametrams. Kintant elektros apkrovai ir generacijai dienos bėgyje, režimo parametrai keičiasi lėtai, tai tokie režimai gali būti nagrinėjami kaip nusistovėję. Kadangi nedideli trikdžiai elektros sistemoje būna visą laiką, yra priimta, jog normalaus režimo būtina sąlyga yra nusistovėjusių režimų stabilumas. Tiriant elektros sistemos statinį stabilumą, reikia sudaryti charakteringąją elektros sistemos lygtį, kuri sudaroma pagal ištiesintąją diferencialinių lygčių sistemą (8). Šios lygties sprendinys yra  $n$  skaičius šaknų  $p_n$ , kurios gali būti realios ir kompleksinės. Pagal jas yra sprendžiama ar elektros sistema yra statiškai stabili, ar ne. Įvykus nedideliui trikdžiui elektros sistemoje, režimo parametro  $y$  pokytis  $\Delta y$  gali būti aprašomas lygtimi (9). Jeigu visų kompleksinių šaknų realios dalys ir visos realios šaknys yra gaunamos neigiamos, tai pokytis  $\Delta y$  mažėja laike ir sistema išlaiko statinį stabilumą. Jeigu yra gaunama bent viena teigiama kompleksinė šaknis, tai sistemos kintamųjų dydžiai didės kol sistema išeis iš sinchronizmo [1].

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0; \quad (8)$$

Čia:

$a_n$  — charakteringosios lygties koeficientai;

$p^n$  — lygties sprendinio šaknys.

$$\Delta y(t) = \sum_{i=1}^m C_i * e^{\alpha_i t} + \sum_{i=m+1}^m C_i * e^{\alpha_i t} * \sin(\omega_i t + \varphi_i); \quad (9)$$

Čia:

$\Delta y(t)$  — režimo parametro  $y$  pokytis laike;

$t$  — laikas, s;

$m$  ir  $n$  — elektros sistemos bendras charakteringosios lygties realiųjų šaknų kiekis;

$C_i$  — normalaus režimo parametrų dedamosios pokyčio koeficientas;

$\alpha_i$  — laisvojo svyravimo slopinimas;

$\omega_i$  — kampinis dažnis, rad/s;

$\varphi_i$  — pradinis kampas, rad.

Elektros sistemos dinaminio stabilumo tyrimas yra atliekamas esant apkrovų ribiniams režimams — žiemos ir vasaros minimumai ir maksimumai. Esant nusistovėjusiam sistemos režimui, generatorių gaminama galia ir galios srautai su kaimyninėmis sistemomis yra parenkami atsižvelgiant į apkrovų dydį. Pagal ribinę sistemos generuojamą ar perduodamą galią bei ribinę trumpojo jungimo atjungimo trukmę, kiekvienam darbo režimui yra nustatomas ribinis trumpojo jungimo atjungimo laikas. Ją nustatant yra pasirenkamas trikdys tokioje vietoje, kad avarija būtų sunkiausia, pavyzdžiui trifazis trumpasis jungimas generatoriaus mazge. Jei atlikus tyrimą paaiškėja, kad pereinamojo proceso metu

ir po jo sistemos parametrai neviršija kritinių reikšmių, toks trumpojo jungimo atjungimo laikas yra priimamas kaip ribinis ir kiti avarijos atvevai nėra analizuojami.

Norint rasti režimo stabilumo atsargą, reikia ištirti sistemos dinaminį stabilumą skirtingais režimais ir rasti ribinį režimą, kuris nėra dinamiškai stabilus. Dinaminis stabilumas gali būti vertinamas pagal kelis kriterijus — ribinę trikdžio trukmę arba trikdžio dinaminio stabilumo trukmės atsargos koeficientą. Trikdžio trukmės atsargos koeficientas gali būti apskaičiuojamas pagal (10) formulę, o ribinė trikdžio trukmė gaunama, kai atliekant modeliavimą trikdžio trukmė yra didinama iki tos ribos, kai režimas vis dar išlieka stabilus. Elektros sistemos stabilumo sąlyga pažeidžiama, kai bet kuris sistemos generatorius pradeda sukintis nesinchroniškai kitų generatorių atžvilgiu arba pažeidžiamos sistemos parametrų ribinės reikšmės.

$$K_T = \frac{t_{rib} - t}{t_{rib}}; \quad (10)$$

Čia:

$K_T$  — trikdžio trukmės atsargos koeficientas, s;

$t_{rib}$  — ribinė trikdžio trukmė, s;

$t$  — trikdžio trukmė, s.

Generatoriaus dinaminio stabilumo riba gali būti randama ištyrus dažnio dinaminį stabilumą atliekant generatoriaus galios didinimą. Didinant generatoriaus galią, yra randama riba, kuriai esant dažnis yra dinamiškai nestabilus. Atliekant dinaminio stabilumo tyrimą, dažnio svyravimai pereinamojo proceso metu negali viršyti 0,8Hz, o jam nusistovėjus dažnio pokytis negali būti didesnis nei 0,5Hz. Ribinė generatoriaus galia  $P_G$  — tai stabilaus veikimo maksimali santykinė generatoriaus galia. Ji pateikta (11) formulėje [28].

$$P_g = \frac{P_{rib}}{P_N}; \quad (11)$$

Čia:

$P_{rib}$  — generatoriaus galia, kuriai esant yra išlaikomas dinaminis stabilumas;

$P_N$  — nominali generatoriaus galia.

### 3.1. Elektros sistemos dinaminis modelis

Norint atlikti elektros sistemos statinio bei dinaminio dažnio stabilumo tyrimą, reikia paruošti elektros sistemos elementų matematinius modelius ir juos sujungti į vieną bendrą sistemą. Tai bus atliekama panaudojant SIEMENS PSS/E programinę įrangą. Kad būtų gaunami kuo tikslesni tyrimo rezultatai, reikia kuo tiksliau įvertinti atskirus sistemos elementus. Atliekant statinio stabilumo tyrimą, programoje bus sudaromas statinis sistemos modelis iš šių elementų ir įvedant jų parametrus: mazgų, generatorių, apkrovų, linijų, transformatorių, reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių ir nuolatinės srovės intarpų. Pagrindiniai dinaminiai programos modeliai yra: generatoriai, turbinos, žadinimo sistemos, kompensatoriai, stabilizatoriai ir reguliavimo sistemų modeliai. Atliekant elektros sistemos dinaminio stabilumo tyrimą, procesų modeliavimui yra naudojami šie generatorių modeliai:

- GENSAL ir GENROU — neryškiapoliaus generatoriaus modeliai, naudojamo norint tirti dažnį;
- GENSAE — ryškiapoliaus generatoriaus modelis, kurio eksponentinis įsisotinimas yra d ir q ašyse;
- GENCLS — ryškiapoliaus generatoriaus modelis su įsisotiniu tik d ašyje.

Žadinimo sistemų modeliai ir jų tikslumas yra parenkamas pagal tai, koks kiekis duomenų turimas. Jei neturima pakankamai informacijos apie žadinimo sistemas, tokiu atveju naudojami paprastesni modeliai. Pagrindiniai modeliai naudojami žadinimo sistemoms yra:

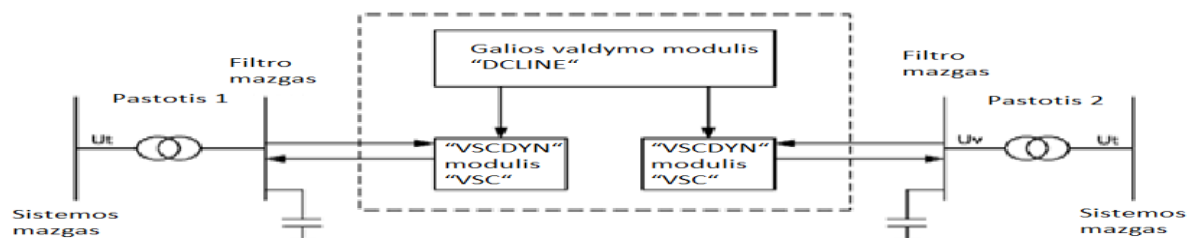
- ESST1A — modelis, kuris yra skirtas žadinimo sistemų modeliavimui, kurios yra valdomos nuo generatoriaus ar savųjų reikmių maitinamų lygintuvų;
- SCRX — tai žadinimo sistemų modeliai, kurie naudojami kai žadinimo sistemų tikslumas nėra svarbus;
- EXAC1 — modelis, skirtas modeliuoti kintamosios srovės žadinimo sistemoms;
- ESAC8B — modelis, skirtas nepriklausomoms žadinimo sistemoms

Taip pat yra ir ESAC5A, IEET1A, REXSYS, SEXS, ESST2A bei ESST4B modeliai, bet jie naudojami rečiau [28].

PSSE programoje nuolatinės srovės jungčių dinaminiam modeliavimui yra pateikta 12 “Two-Terminal dc Line”, 3 “Multi-Terminal dc Line” ir 2 VSC dc Line” modeliai. Nuolatinės srovės dinaminė jungčių modeliai taip pat yra parenkami pagal tai, koks kiekis duomenų yra turimas. Kuo mažiau duomenų apie nuolatinės srovės jungtis turima, tuo paprastesnis jungties dinaminis modelis yra parenkamas. Dažniausiai naudojami yra šie nuolatinės srovės jungčių dinaminiai modeliai:

- “Two-Terminal dc Line” — CDC1T, CDC4T, CDC6T, CDC6TA, CDC7T;
- “Multi-Terminal dc Line” — MTDC1T, MTDC2T, MTDC3T;
- “VSC dc Line” — HVDCPL1, VSCDCT.

“VSC dc Line” dinaminis modelis yra skirtas įvertinti nuolatinės srovės sistemos, kurioje yra naudojamas įtampos šaltinio keitiklis, sąveika su kintamos srovės sistema. VSCDCT — tai nuolatinės srovės perdavimo linijos dinamikos modelis, kurį sudaro trijų modulių integraciją: du įtampos šaltinio keitikliai ir vienas nuolatinės srovės perdavimo linijos modulis. Šie modelio moduliai yra pavaizduoti 15 paveikslėlyje. [29]



15 pav. VSCDCT dinaminio modelio principinė schema [29]

## 4. Dinaminio stabilumui tyrimas

### 4.1. Sistemos duomenys

Nuolatinės srovės jungčių įtakai sistemos stabilumui ištirti buvo pasirinkta ir šiek tiek pakoreguota pavyzdinė jungtinė elektros sistema, sudaryta iš dvejų atskirų asinchroniškai veikiančių elektros sistemų. Tiriamosios jungtinės elektros sistemos schema yra pridėta 1 priede. Priimta, jog tyrimas bus atliekamas žiemos maksimumo atveju. Pirmoji sistema yra sudaryta iš 23 mazgų, 8 apkrovų, 6 generatorių, 14 dvejų apvijų transformatorių, 5 šuntinių reaktorių ir 23 perdavimo linijų. Antroji sistema yra mažesnė ir ją sudaro 10 mazgų, 5 apkrovos, 3 generatoriai 5 dvejų apvijų transformatoriai ir 7 perdavimo linijos. Šios sistemos yra sujungtos dvejomis nuolatinės srovės “VSC HVDC” jungtimis. Šios jungtys buvo pasirinktos dėl to, jog ši technologija yra vis dažniau naudojama, taip pat turi pažangesnę aktyviosios galios valdymo technologiją, galimas nepriklausomas aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymas, taip pat ši technologija yra labiau tinkama, kai viena iš sujungiamų sistemų yra palyginus silpna ir turi nedidelę generaciją ir naudojant šio tipo keitiklį yra galimas tinklo atstatymas po visiškos sistemos griūties. Atlikus skaičiavimus, buvo įvertinta, jog kiekvienos jungties galingumas bus 230MW, taigi suminis abiejų jungčių galingumas sieks 460MW. Atliekant “VSC HVDC“ modeliavimą, yra galima pasirinkti jungties valdymo būdą. Aktyviosios galios kilpa gali būti nustatyta, jog valdytų jungties aktyviąją galią arba jungties nuolatinę įtampą. Vienas jungties terminalas valdo aktyviąją galią, o kitas nuolatinę įtampą. Reaktyviosios galios kilpa gali būti nustatyta, jog valdytų reaktyviąją galią arba kintamąją įtampą. Šiuo atveju tiriamoje elektros sistemoje pirmosios nuolatinės srovės jungties pirmasis terminalas valdys aktyviąją galią ir kintamąją įtampą, o antrasis terminalas nuolatinę jungties įtampą ir reaktyviąją galią. Taip pat yra nustatomas ir antrosios jungties terminalų valdymas. Kadangi yra priimama, kad antroji sistema bus su generacijos trūkumu, jos normalus darbo režimas atskirai nebus vertinamas. Vertinama bus tik tada, kai sistemos yra sujungiamos nuolatinės srovės jungtimis. Jungtinės elektros sistemos balanso duomenys skirtingais darbo režimais pateikiami 2 ir 3 lentelėse. Iš 2 lentelėje pateiktų duomenų matyti, jog didžiausi sistemos generatoriai yra 206 ir 3011 mazguose, bet didžiausią galią esant normaliam darbo režimui generuoja 206 mazge esantis generatorius, o generatoriaus mazgas 3011 yra priimamas kaip balansinis sistemos mazgas. Kai tarp elektros sistemų veikia bent viena nuolatinės srovės jungtis, reikalingą galią perduoti per nuolatinės srovės jungtis, pagamina 3011 mazge esantis generatorius.

**2 lentelė.** Jungtinės elektros sistemos generatorių duomenys.

Generatoriaus mazgas	Įrengtoji galia, MW	Generacija normaliu sistemos darbo režimu, MW	Generacija normaliu sistemos darbo režimu, kai veikia abi NS jungtys, MW	Generacija normaliu sistemos darbo režimu, kai veikia viena NS jungtis, MW
<b>Pirmoji elektros sistema</b>				
101	810	750	750	750
102	810	750	750	750
206	900	800	800	800

211	616	600	600	600
3011	900	254.42	717	487
3018	117	100	100	100
<b>Viso:</b>	4153	3254.42	3717	3487
<b>Antroji elektros sistema</b>				
403	150	-	100	100
407	150	-	100	100
408	250	-	68.78	298.78
<b>Viso:</b>	550	-	268.78	498.78

**3 lentelė.** Jungtinės elektros sistemos apkrovų duomenys.

Sistemos mazgas	Apkrovos galia, MW
<b>Pirmoji elektros sistema</b>	
153	200
154	400
154	600
203	300
205	1200
3005	100
3007	200
3008	200
Viso:	3200
<b>Antroji elektros sistema</b>	
402	150
404	300
406	150
409	120
Viso:	720

#### 4.2. Dinaminio stabilumo tyrimo eiga

Dinaminio stabilumo tyrimo metu yra nagrinėjami pereinamieji procesai, kurie yra sukeliama įvykus dideliu trikdžiu elektros sistemoje. Jei po tokių trikdžių elektros sistema išlieka stabili, tai taip pat ir mažesnių trikdžių sukelti pereinamieji procesai elektros sistemos dinaminio stabilumo nepažeis. Taigi ištirti didžiausių trikdžių įtaką bus modeliuojami trumpieji jungimai generatorių mazguose, labiausiai apkrautose linijose bei arti didžiausios apkrovos. Taip pat tiriant jungtinės elektros sistemos stabilumą, bus modeliuojamas vienos nuolatinės srovės jungties praradimas.

Skaičiavimas yra pradamas nuo sistemos elementų — mazgų, apkrovų, generatorių, linijų, transformatorių ir kompensavimo įrenginių — duomenų suvedimo. Vienas iš sistemos generatorių

mazgų yra parenkamas, kaip balansinis mazgas. Balansinio mazgo generatorius turi būti suderintas taip, kad normaliaame režime jo gaminama reaktyvioji galia neviršytų jo reaktyviosios galios ribų. Pagrindinis tikslas modeliuojant normalų sistemos darbo režimą, yra parinkti tokias generatorių gnybtų įtampas ir transformatorių transformacijos koeficientus, kad įtampos elektros sistemos mazguose būtų išlaikomos  $\pm 10\%$   $U_N$  ribose, o generatorių įtampos išlaikomos  $\pm 5\%$  ribose.

Įvykus trumpajam jungimui ir atsijungus generatoriui, kiti sistemos generatoriai turi sugebėti pagaminti trūkstamą elektros energijos kiekį, kad nebūtų pažeistas sistemos stabilumas ir išvengta visiškos sistemos griūtis. Atliekant sistemos stabilumo tyrimą, trumpasis jungimas yra sumodeliuojamas 1 sekundę. Iki to laiko sistema veikia normaliu režimu, kai visų sistemos elementų parametrai yra nominaliose reikšmėse ir sistemos suminė generacija atitinka suminę apkrovą. Tada kaip minėta pirmąją sekundę sumodeliuojamas trumpasis jungimas. Nuo šio momento iki atjungimo momento, sistema veikia darbo režimu su trumpuoju jungimu. Atliekant tyrimą bus ieškoma ribinių trumpojo jungimo atjungimo laikų, kada atjungus trumpąjį jungimą, sistema vis dar sugeba grįžti į normalų režimą.

Pirmiausia bus ištirtas pirmosios elektros sistemos dinaminis stabilumas. Didžiausias šios sistemos generatorius yra 206 mazge, taigi didžiausias elektros sistemos trikdys bus trifazis trumpasis jungimas šiame mazge. Kadangi sistemoje yra tik 5 generatoriai, sistemos stabilumas bus patikrintas 5 skirtingais atvejais, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta prie kiekvieno generatoriaus. Taip pat bus patikrintas sistemos stabilumas įvykus trumpajam jungimui labiausiai apkrautoje linijoje ir mazge su didžiausia apkrova. Trumpojo jungimo atjungimo laiko reikšmė yra tokia, prie kurios sistema po avarijos pašalinimo nusistovi į normalų režimą.

### 4.3. Trumpųjų jungimų modeliavimas pirmojoje sistemoje

Pirmiausia trumpieji jungimai yra modeliuojami pirmosios sistemos generatorių mazguose. Kiekvieno trumpojo jungimo atveju yra surandami laikai, prie kurio režimas išlieka stabilus. Ar režimas išlieka stabilus yra stebima ne tik avarijos mazge, bet ir kituose sistemos mazguose. Jei bent vienas sistemos mazgas išlieka nestabilus, priimama, kad sistema nėra stabili. Generatoriaus stabilumas bus tikrinamas dvejais skirtingais atvejais, kai jo  $P_{GEN} = P_N$  ir kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ . Pagal ENTSO-E reglamentus, didžiausias avarinis leistinas dažnio pokytis negali viršyti 0,8Hz, o kai pereinamasis procesas nusistovi, normalaus režimo dažnio pokytis neturi būti didesnis nei 0.5Hz.

4 lentelė. Generatorių mazgų stabilumo ribos.

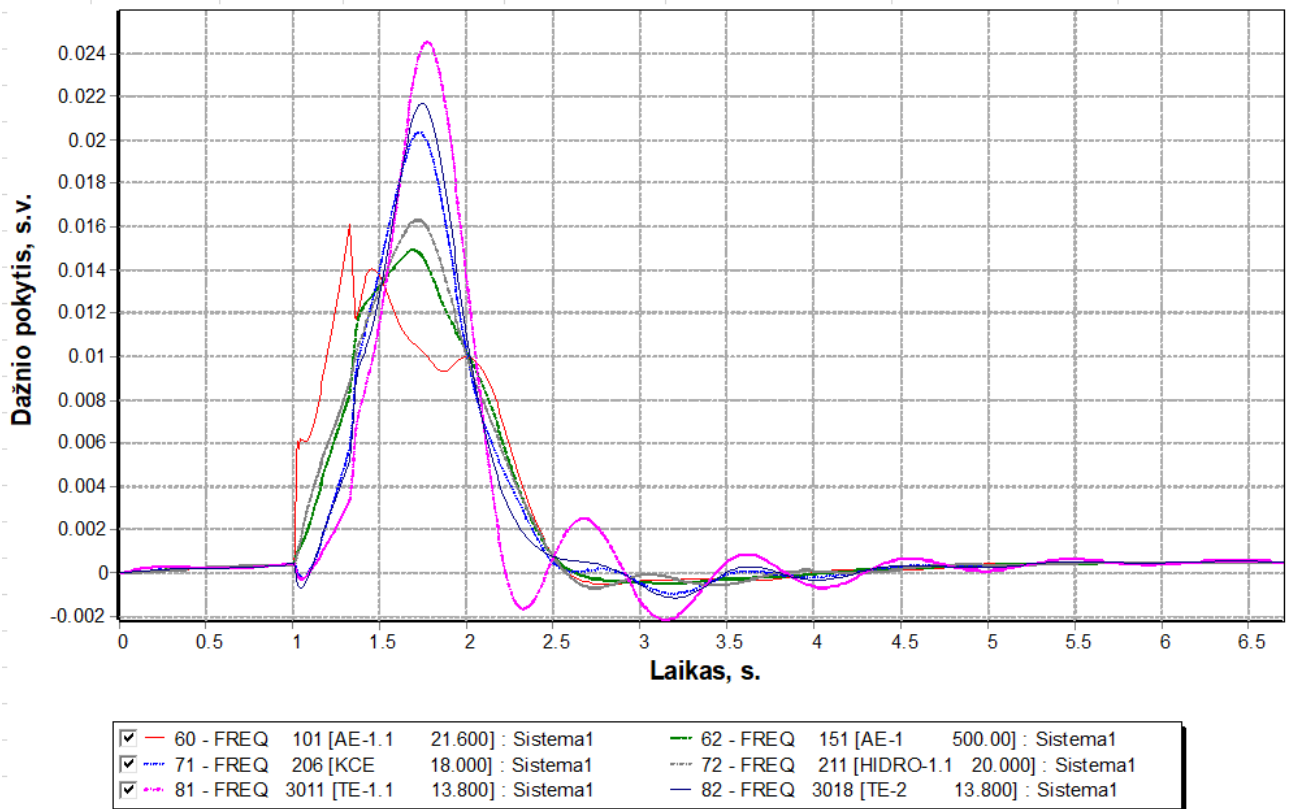
Trumpojo jungimo vieta	Trumpojo jungimo atjungimo laikas, s.	
	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	0.32	0.31
151	0.27	0.23
206	0.29	0.25
211	0.32	0.31
3011	0.68	0.67
3018	0.4	0.24

Įvykus trumpajam jungimui generatoriaus mazge, kai jis dirba maksimaliu režimu, visų generatorių mazgų trumpojo jungimo atjungimo laikai yra gauti trumpesniu nei tuo atveju, kai generatorius dirba normaliu režimu. Tai yra todėl, jog labiau apkrautas generatorius turi didesnę įtaką sistemos stabilumui ir jį praradus, sistema sunkiau grįžta į normalų režimą. Didžiausią įtaką sistemos stabilumui daro 151 mazgas, kuris apima 101 ir 102 mazgu generatorius. Bendra 101 ir 102 įrengtoji generatoriaus galia — 1620MW, tačiau normaliu režimu jų generacija siekia 1500MW. Tai sudaro 46% visos sistemos generacijos normaliu sistemos darbo režimu, taigi praradus tokią didelę dalį galios, sistema greičiau praranda stabilumą.

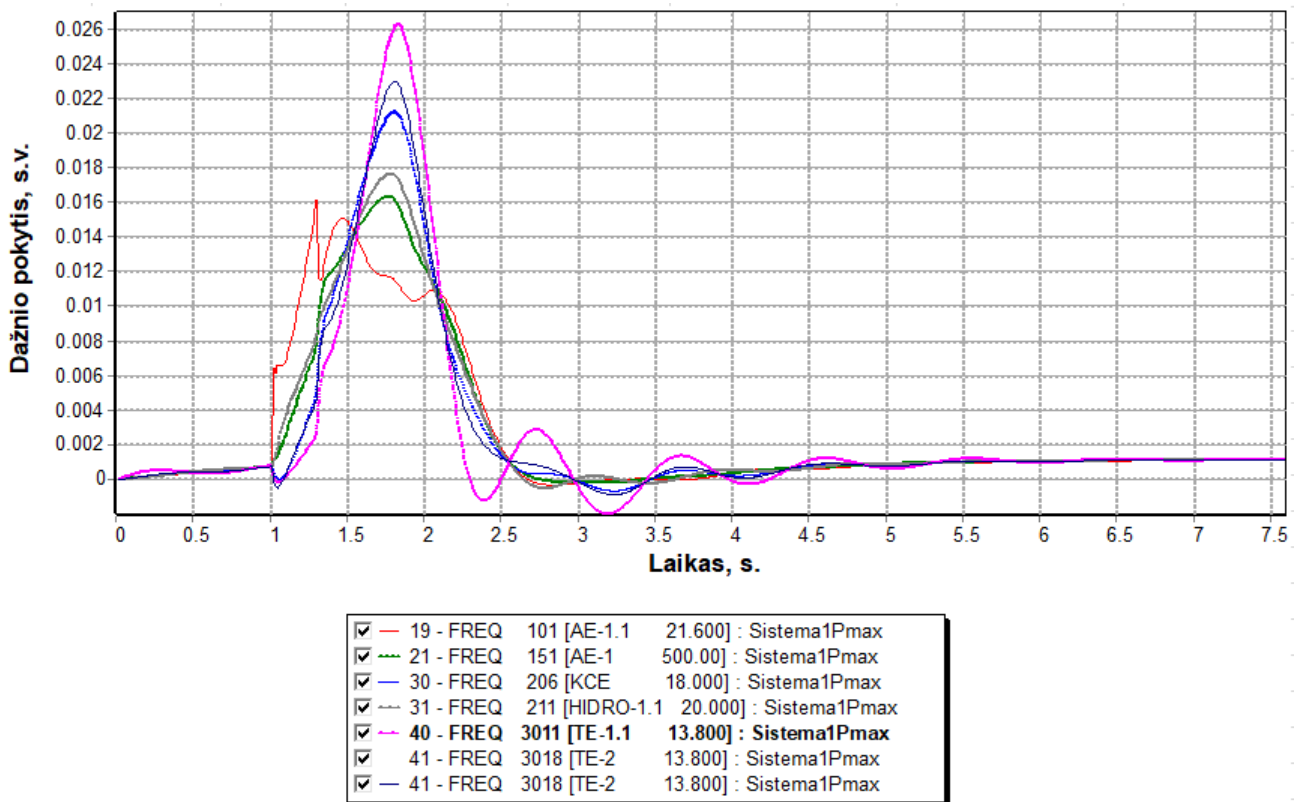
**5 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 101 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas	
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.804	50.809
	Nusistovėjęs	50.035	50.064
151	Maksimalus	50.746	50.820
	Nusistovėjęs	50.035	50.064
206	Maksimalus	51.017	51.062
	Nusistovėjęs	50.035	50.064
211	Maksimalus	50.816	50.884
	Nusistovėjęs	50.035	50.064
3011	Maksimalus	51.084	51.314
	Nusistovėjęs	50.035	50.064
3018	Maksimalus	51.228	51.149
	Nusistovėjęs	50.035	50.064





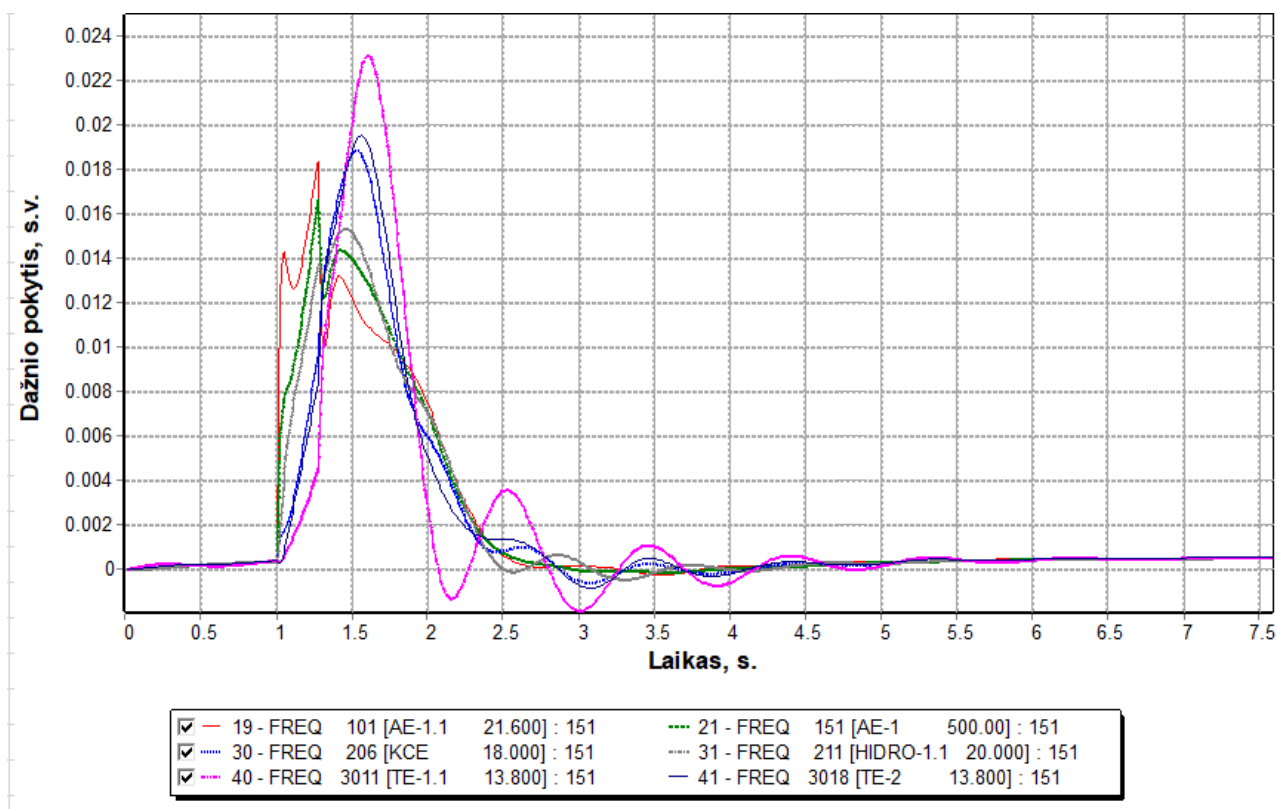
16 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 101 mazge, kai  $P_{GEN} = P_N$ .



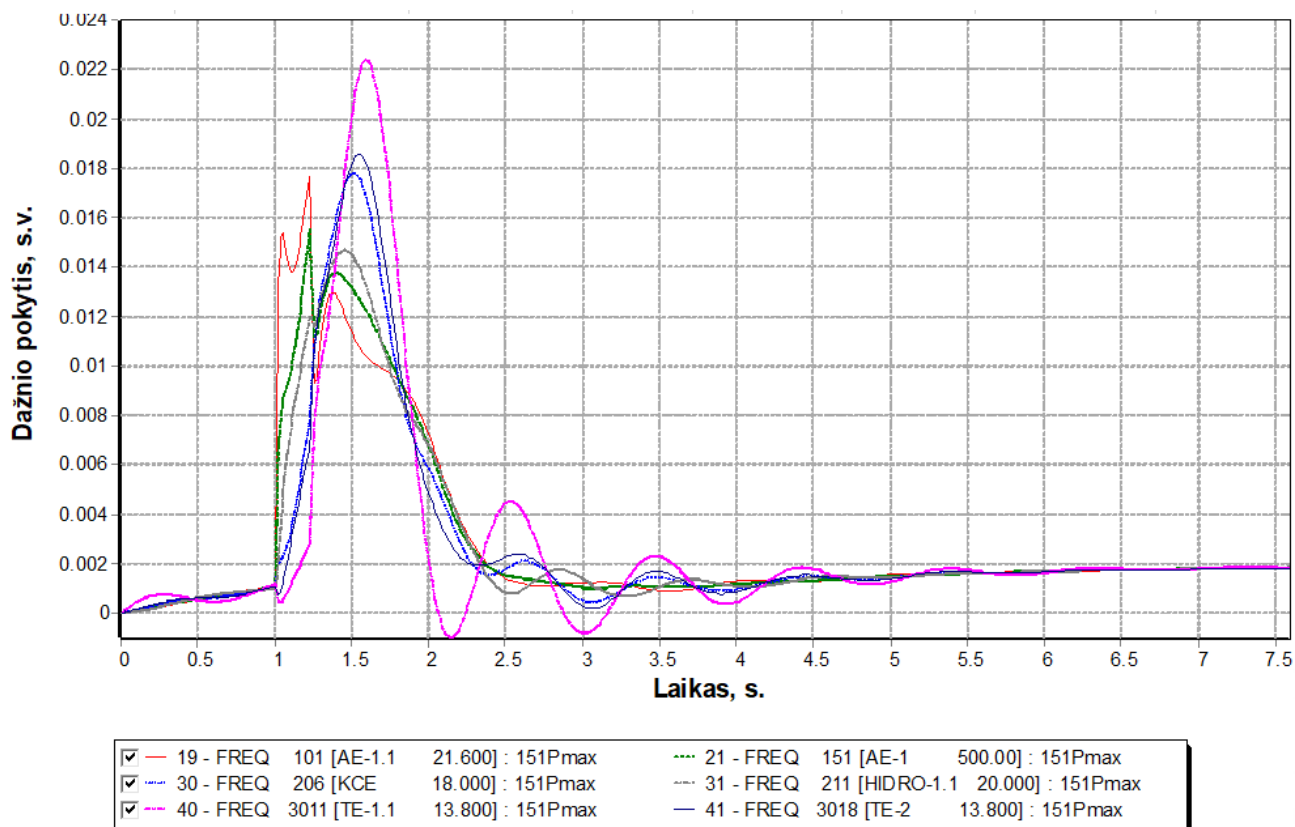
17 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 101 mazge, kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .

6 lentelė. Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 151 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas	
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.920	50.885
	Nusistovėjęs	50.028	50.105
151	Maksimalus	50.835	50.775
	Nusistovėjęs	50.028	50.105
206	Maksimalus	50.944	50.890
	Nusistovėjęs	50.028	50.105
211	Maksimalus	50.768	50.733
	Nusistovėjęs	50.028	50.105
3011	Maksimalus	51.156	51.119
	Nusistovėjęs	50.028	50.105
3018	Maksimalus	50.979	50.929
	Nusistovėjęs	50.028	50.105



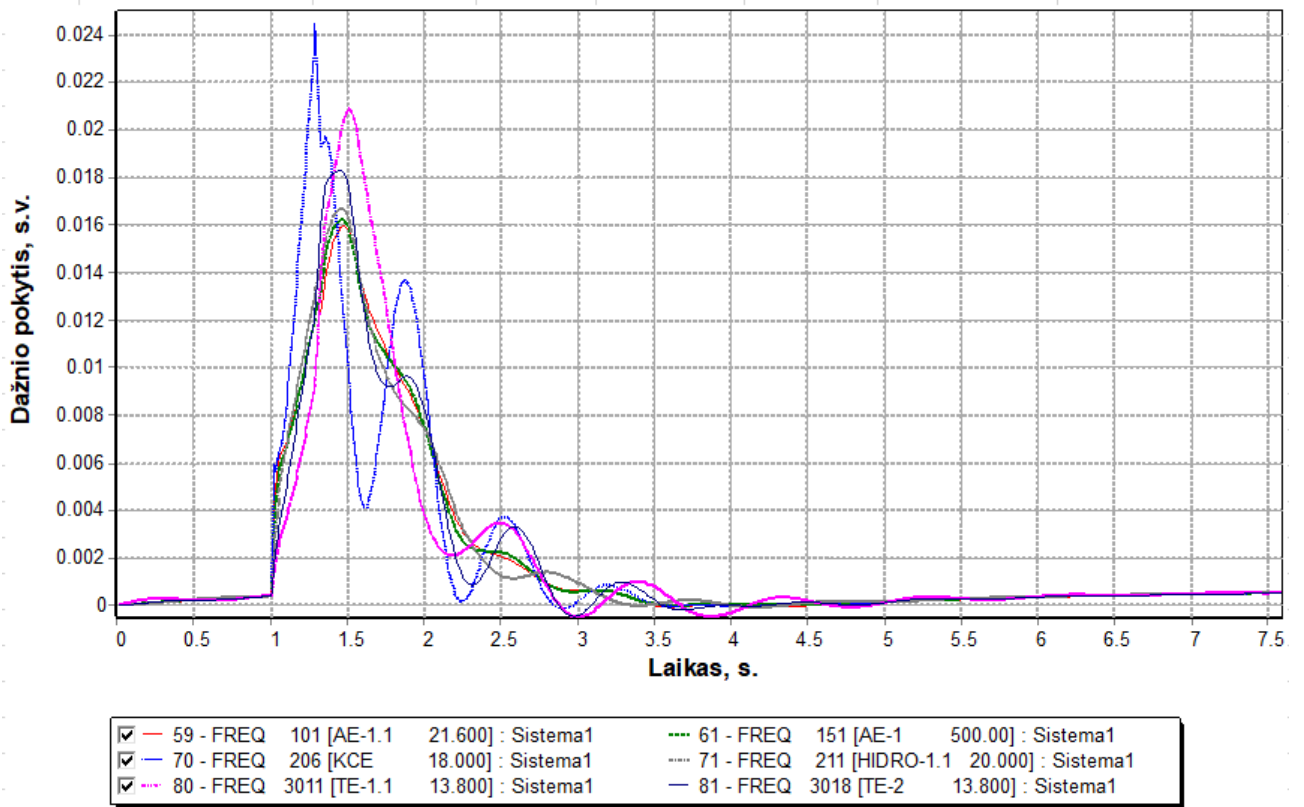
18 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 151 mazge, kai  $P_{GEN} = P_N$ .



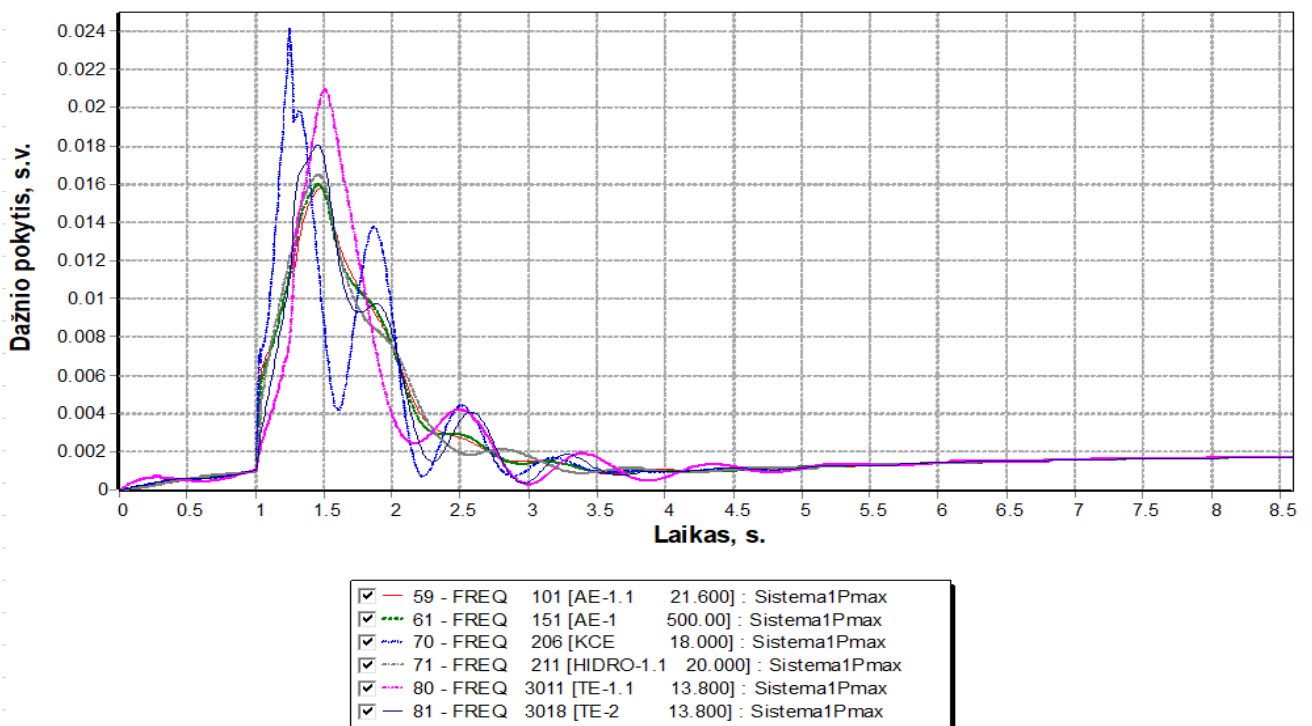
19 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 151 mazge, kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .

7 lentelė. Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 206 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas	
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.796	50.788
	Nusistovėjęs	50.035	50.095
151	Maksimalus	50.811	50.800
	Nusistovėjęs	50.035	50.095
206	Maksimalus	51.220	51.208
	Nusistovėjęs	50.035	50.095
211	Maksimalus	50.834	50.825
	Nusistovėjęs	50.035	50.095
3011	Maksimalus	51.043	51.047
	Nusistovėjęs	50.035	50.095
3018	Maksimalus	50.916	50.900
	Nusistovėjęs	50.035	50.095



20 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 206 mazge, kai  $P_{GEN} = P_N$ .

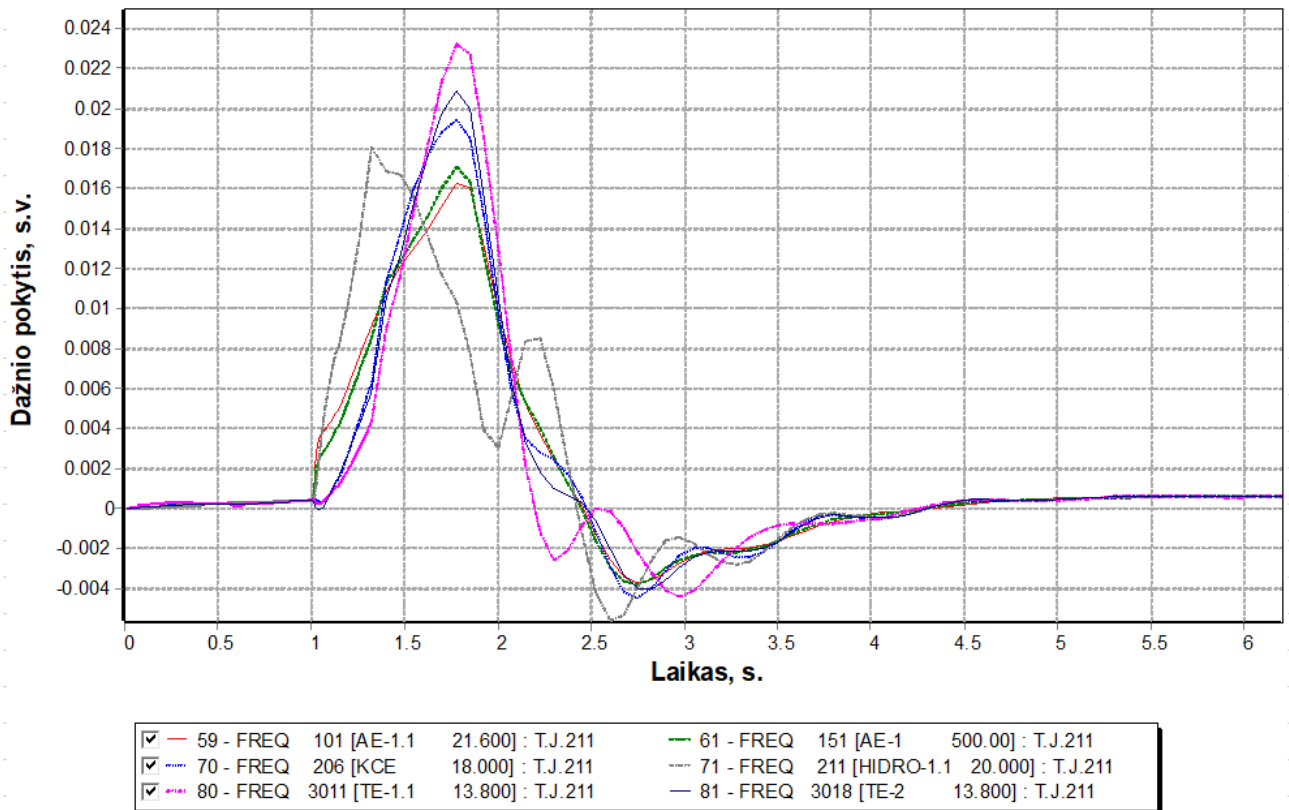


21 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 206 mazge, kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .

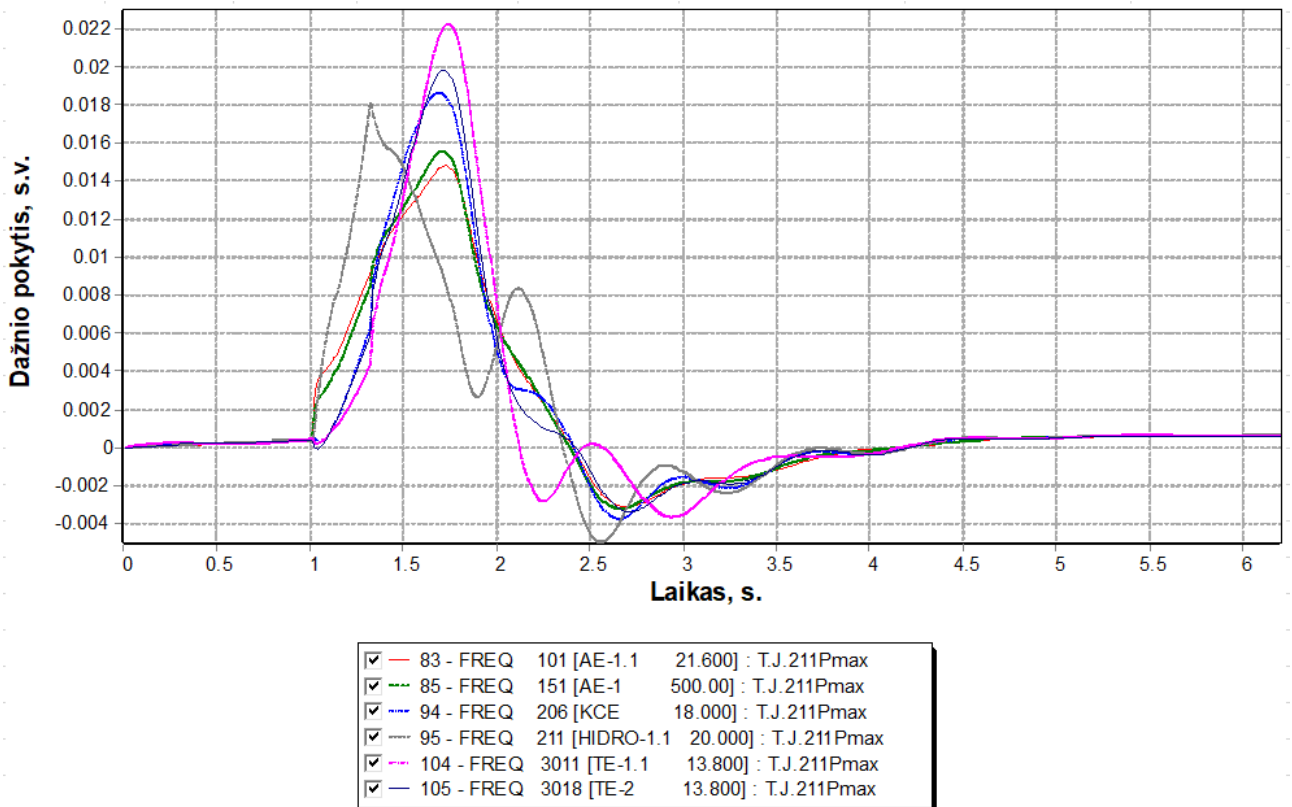
8 lentelė. Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 211 mazge.

Sistemos mazgų dažnis	Sistemos darbo režimas
-----------------------	------------------------

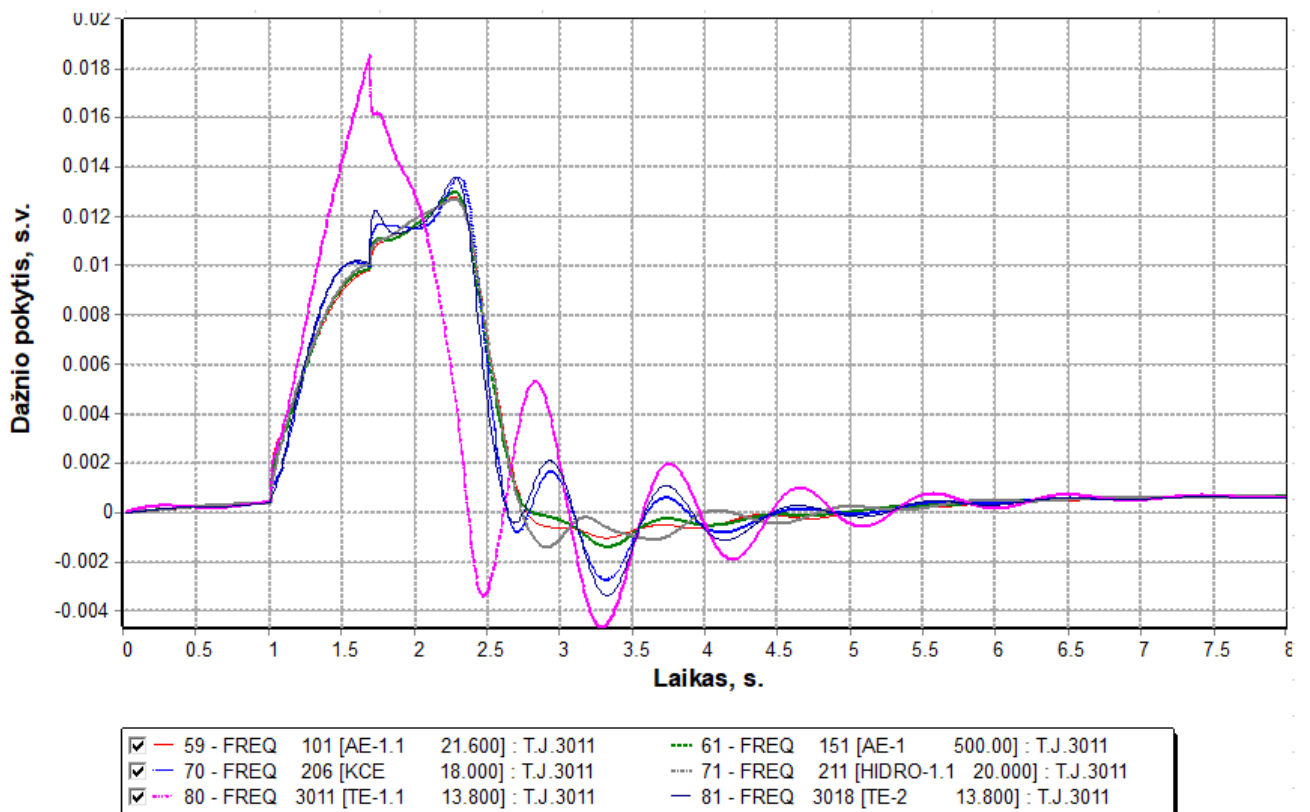
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.812	50.740
	Nusistovėjęs	50.032	50.042
151	Maksimalus	50.855	50.779
	Nusistovėjęs	50.032	50.042
206	Maksimalus	50.971	50.933
	Nusistovėjęs	50.032	50.042
211	Maksimalus	50.904	50.904
	Nusistovėjęs	50.032	50.042
3011	Maksimalus	51.144	51.111
	Nusistovėjęs	50.032	50.042
3018	Maksimalus	51.044	50.991
	Nusistovėjęs	50.032	50.042



22 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 211 mazge, kai  $P_{GEN} = P_N$ .



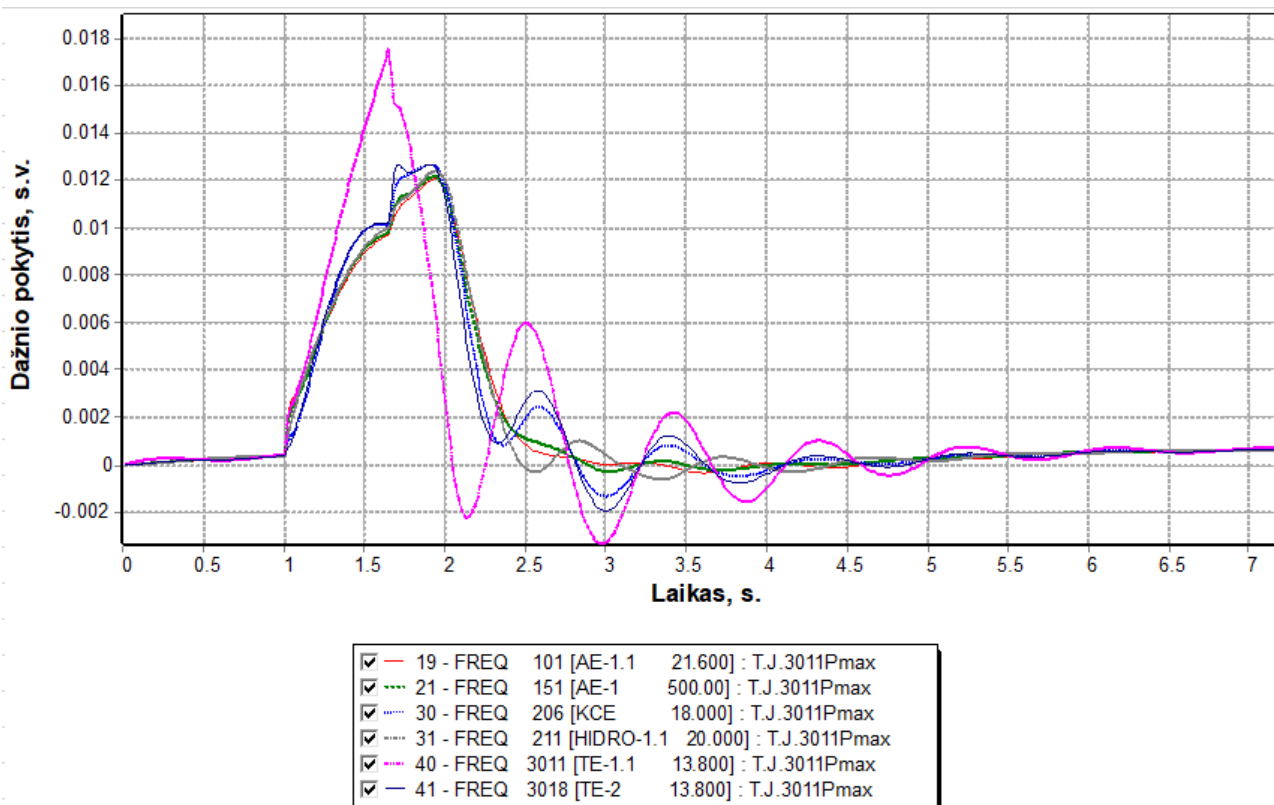
23 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 211 mazge, kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .



24 pav. Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge, kai  $P_{GEN} = P_N$ .

**9 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas	
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.639	50.603
	Nusistovėjęs	50.035	50.044
151	Maksimalus	50.648	50.609
	Nusistovėjęs	50.035	50.044
206	Maksimalus	50.680	50.634
	Nusistovėjęs	50.035	50.044
211	Maksimalus	50.634	50.619
	Nusistovėjęs	50.035	50.044
3011	Maksimalus	50.926	50.877
	Nusistovėjęs	50.035	50.044
3018	Maksimalus	50.678	50.633
	Nusistovėjęs	50.035	50.044



**25 pav.** Santykinis dažnio pokytis sistemos mazguose įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge, kai  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .

**10 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3018 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas	
		Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.206	50.168
	Nusistovėjęs	50.029	50.051
151	Maksimalus	50.237	50.198
	Nusistovėjęs	50.029	50.051
206	Maksimalus	50.224	50.197
	Nusistovėjęs	50.029	50.051
211	Maksimalus	50.211	50.171
	Nusistovėjęs	50.029	50.051
3011	Maksimalus	50.878	50.312
	Nusistovėjęs	50.029	50.051
3018	Maksimalus	50.228	50.209
	Nusistovėjęs	50.029	50.051

#### 4.4. Rezultatų analizė

Atlikus trumpųjų jungimų tyrimą pirmosios sistemos generatorių mazguose, gauti ribiniai trumpojo jungimo atjungimo laikai, kai pašalinus trikdį sistema dar išlieka stabili. Esant trumpojo jungimo laikui ilgesniam, sistema į normalų režimą nebegrižta. Trumpųjų jungimų modeliavimas buvo atliktas visų generatorių mazguose, kai  $P_{GEN}=P_N$  ir kai  $P_{GEN}=P_{MAX}$ . Pastebėta, jog kuo didesnė generatoriaus galia ir kuo trumpasis jungimas yra toliau, tuo lengviau generatoriaus mazgas reaguoja į trumpąjį jungimą. Kai įvyksta trumpas jungimas 101, 151, 206 ir 211, dažnio pokyčio riba pereinamojo proceso metu yra viršijama šiuose sistemos mazguose: 206, 211, 3011 ir 3018. Taip pat dažnio pokyčio riba yra viršijama 3018 mazge, kai avarija įvyksta 3011 mazge. Šiuose mazguose pereinamasis procesas pilnai nusistovi per 6.5 sekundės. Visuose kituose mazguose dažnis pereinamojo proceso metu neviršija 0.8Hz ribos, o kai nusistovi normalus režimas, dažnio pokytis taip pat neviršija  $\pm 0.5$ Hz ribos. Didžiausias dažnio pokytis nusistovėjus normaliam sistemos režimui, yra 0,105Hz trumpojo jungimo 151 mazge atveju, kai 101 ir 102 mazguose esančių generatorių  $P_{GEN} = P_{MAX}$ . Didžiausia amplitudinė dažnio reikšmė yra pasiekama įvykus trumpajam jungimui taip pat 206 mazge — dažnis pereinamojo proceso metu padidėja iki 51,220Hz. Iš šiame skyriuje pateiktų grafikų (paveikslai 16 — 25) matyti, jog labiausiai į avariją elektros sistemoje reaguoja 3011 mazgas, kuris yra balansinis sistemos mazgas. Šiame mazge visų trumpųjų jungimų atveju, išskyrus trumpąjį jungimą 206 mazge, dažnio amplitudė yra aukščiausia ir pereinamasis procesas nusistovi lėčiausiai.

Taip pat šių mazgų kiti sistemos parametrai neviršija leistinų ribų. Visų generatorių mazgų įtampų vertės neviršija  $\pm 5\%$  ribos, o mazgų be generatorių įtampos taip pat neviršija  $\pm 10\%$  ribos.

#### 4.5. Trumpųjų jungimų modeliavimas jungtinėje elektros sistemoje

Toliau bus atliekamas trumpųjų jungimų modeliavimas jungtinėje elektros sistemoje. Šiam tyrimui yra pasirenkami 4 pirmosios sistemos generatorių mazgai. 101, 151, 206 ir 211 dėl sunkiausių režimų



įvykus trumpajam jungimui ir 3011 mazgas. Šis mazgas yra parenkamas todėl, kad kai sistema dirba jungtinėje elektros sistemoje su antrąja sistema, šio mazgo generatorius gamina visą reikalingą galią antrosios sistemos apkrovoms. Taip pat trumpieji jungimai bus sumodeliuojami dvejuose antrosios sistemos generatorių mazguose. Tyrimas bus atliekamas keturiais skirtingais variantais — kai veikia abi nuolatinės srovės jungtys ir generatorius trumpojo jungimo mazge dirba normaliu režimu ( $P_{GEN}=P_N$ ), kai veikia abi nuolatinės srovės jungtys ir generatorius trumpojo jungimo mazge dirba maksimaliu režimu ( $P_{GEN}=P_{MAX}$ ), kai veikia viena nuolatinės srovės jungtis ir generatorius trumpojo jungimo mazge dirba normaliu režimu ( $P_{GEN}=P_N$ ) ir kai veikia viena nuolatinės srovės jungtis ir generatorius trumpojo jungimo mazge generuoja maksimalią galią ( $P_{GEN}=P_{MAX}$ ). Kadangi antroji sistema yra sumodeliuota su generacijos trūkumu ir yra pilnai priklausoma nuo pirmosios schemos, jos darbas izoliuotu režimu nėra tiriamas.

**11 lentelė.** Sistemos mazgų ribiniai trumpojo jungimo atjungimo laikai.

Trumpojo jungimo vieta	Trumpojo jungimo atjungimo laikas, s.					
	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_N$	Kai sistema dirba izoliuotu režimu, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Kai veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_N$	Kai veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Kai veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Kai veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	0.32	0.31	0.41	0.39	0.43	0.41
151	0.27	0.23	0.35	0.32	0.36	0.32
206	0.29	0.25	0.34	0.28	0.34	0.29
211	0.32	0.31	0.33	0.31	0.35	0.32
3011	0.68	0.67	0.25	0.25	0.27	0.25
402	-	-	0.26	0.23	0.24	0.19
408	-	-	0.29	0.25	0.25	0.22

Kai tarp sistemų veikia abi tarp sisteminės jungtys, visų pirmosios sistemos mazgų trumpojo jungimo atjungimo laikas pailgėja. Išskirtinis yra tik trumpojo jungimo 3011 mazge atvejis. Kai tarp sistemų veikia abi nuolatinės srovės jungtys, į antrąją sistemą yra perduodama 460MW galia, kurią visą ir pagamina 3011 mazge esantis generatorius. Kadangi tokiu atveju generatoriaus generuojama galia išauga iki 714,42MW, tai ypač padidina šio generatoriaus reikšmę elektros sistemos stabilumui, todėl įvykus trumpajam jungimui šio generatoriaus mazge, sistema greičiau išeina iš stabilaus režimo, todėl yra mažinamas trumpojo jungimo atjungimo laikas. Trumpojo atjungimo laikas šiam mazgui, kai generuojama maksimali galia, pasikeičia iš 0,67s izoliuoto sistemos darbo režimu į 0,25s, kai sistema veikia jungtinėje elektros sistemoje su dvejomis tarp sisteminėmis jungtimis. Kai veikia viena tarp sisteminė jungtis, galios srautas į antrąją sistemą sumažėja iki 230MW. Visą šią galią taip pat pagamina 3011 mazge esantis generatorius. Šiuo atveju, kai generatorius yra mažiau apkrautas ir turi šiek tiek mažesnę įtaką sistemos stabilumui, įvykus trumpajam jungimui jo mazge stabilumas yra išlaikomas šiek tiek ilgiau ir trumpojo jungimo laikas pailgėja iki 0,27s.

**12 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 101 mazge.

	<b>Sistemos darbo režimas</b>
--	-------------------------------

Sistemos mazgų dažnis		Izoliuotas, $P_{GEN} = P_N$	Izoliuotas, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.804	50.809	50.593	50.580	50.618	50.638
	Nusistovėjęs	50.035	50.064	49.997	49.998	49.997	49.997
151	Maksimalus	50.746	50.820	50.562	50.547	50.591	50.599
	Nusistovėjęs	50.035	50.064	49.997	49.998	49.997	49.997
206	Maksimalus	51.017	51.062	50.907	50.882	50.955	50.982
	Nusistovėjęs	50.035	50.064	49.997	49.998	49.997	49.997
211	Maksimalus	50.816	50.884	50.614	50.588	50.630	50.621
	Nusistovėjęs	50.035	50.064	49.997	49.998	49.997	49.997
301	Maksimalus	51.084	51.314	50.933	50.901	50.298	50.277
	Nusistovėjęs	50.035	50.064	49.997	49.998	49.997	49.997
402	Maksimalus	-	-	50.833	50.896	50.962	51.127
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894
408	Maksimalus	-	-	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894

13 lentelė. Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 151 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas					
		Izoliuotas, $P_{GEN} = P_N$	Izoliuotas, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.920	50.885	50.623	50.608	50.652	50.658
	Nusistovėjęs	50.028	50.105	49.998	49.998	49.999	49.999
151	Maksimalus	50.835	50.775	50.603	50.592	50.644	50.623
	Nusistovėjęs	50.028	50.105	49.998	49.998	49.999	49.999
206	Maksimalus	50.944	50.890	50.852	50.831	50.877	50.892
	Nusistovėjęs	50.028	50.105	49.998	49.998	49.999	49.999
211	Maksimalus	50.768	50.733	50.518	50.502	50.570	50.582
	Nusistovėjęs	50.028	50.105	49.998	49.998	49.999	49.999

301 1	Maksimalus	50.979	50.929	50.958	50.931	50.956	50.977
	Nusistovėjęs	50.028	50.105	49.998	49.998	49.999	49.999
402	Maksimalus	-	-	50.833	50.896	50.962	51.127
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894
408	Maksimalus	-	-	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894

**14 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 206 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas					
		Izoliuotas, $P_{GEN} = P_N$	Izoliuotas, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.796	50.788	50.533	50.553	50.571	50.588
	Nusistovėjęs	50.035	50.095	49.997	49.997	49.998	49.998
151	Maksimalus	50.811	50.800	50.512	50.538	50.571	50.592
	Nusistovėjęs	50.035	50.095	49.997	49.997	49.998	49.998
206	Maksimalus	51.220	51.208	50.922	50.939	50.944	50.958
	Nusistovėjęs	50.035	50.095	49.997	49.997	49.998	49.998
211	Maksimalus	50.834	50.825	50.631	50.644	50.658	50.744
	Nusistovėjęs	50.035	50.095	49.997	49.997	49.998	49.998
301 1	Maksimalus	50.916	50.900	50.911	50.932	50.938	50.662
	Nusistovėjęs	50.035	50.095	49.997	49.997	49.998	49.998
402	Maksimalus	-	-	50.833	50.896	50.962	51.127
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894
408	Maksimalus	-	-	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894

**15 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 211 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas				
		Izoliuotas, $P_{GEN} = P_N$	Izoliuotas, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia abi tarp sisteminės	Veikia abi tarp sisteminės	Veikia viena tarp sisteminė

				s jungtys $P_{GEN} = P_N$	s jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	ė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	ė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.812	50.740	50.574	50.587	50.592	50.614
	Nusistovėjęs	50.032	50.042	49.997	49.997	49.998	49.998
151	Maksimalus	50.855	50.779	50.571	50.579	50.592	50.600
	Nusistovėjęs	50.032	50.042	49.997	49.997	49.998	49.998
206	Maksimalus	50.971	50.933	50.913	50.931	50.955	50.982
	Nusistovėjęs	50.032	50.042	49.997	49.997	49.998	49.998
211	Maksimalus	50.904	50.904	50.933	50.958	50.922	50.933
	Nusistovėjęs	50.032	50.042	49.997	49.997	49.998	49.998
3011	Maksimalus	51.044	50.991	50.933	50.951	50.298	50.277
	Nusistovėjęs	50.032	50.042	49.997	49.997	49.998	49.998
402	Maksimalus	-	-	50.833	50.896	50.962	51.127
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894
408	Maksimalus	-	-	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894

16 lentelė. Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 3011 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas					
		Izoliuotas, $P_{GEN} = P_N$	Izoliuotas, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.639	50.603	50.346	50.402	50.315	50.400
	Nusistovėjęs	50.035	50.044	49.995	49.994	49.998	49.997
151	Maksimalus	50.648	50.609	50.392	50.463	50.392	50.442
	Nusistovėjęs	50.035	50.044	49.995	49.994	49.998	49.997
206	Maksimalus	50.680	50.634	50.447	50.484	50.414	50.465
	Nusistovėjęs	50.035	50.044	49.995	49.994	49.998	49.997
211	Maksimalus	50.634	50.619	50.476	50.492	50.383	50.454
	Nusistovėjęs	50.035	50.044	49.995	49.994	49.998	49.997
	Maksimalus	50.678	50.633	50.360	50.468	50.427	50.489

301 1	Nusistovėjęs	50.035	50.044	49.995	49.994	49.998	49.997
402	Maksimalus	-	-	50.833	50.896	50.962	51.127
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894
408	Maksimalus	-	-	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	-	-	49.924	49.923	49.896	49.894

**17 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 402 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas			
		Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.412	50.433	50.452	50.466
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
151	Maksimalus	50.362	50.377	50.391	50.399
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
206	Maksimalus	50.507	50.532	50.555	50.582
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
211	Maksimalus	50.414	50.448	50.430	50.421
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
3011	Maksimalus	50.633	50.651	50.698	50.677
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
402	Maksimalus	51.131	51.154	51.232	51.273
	Nusistovėjęs	49.919	49.930	49.888	49.882
408	Maksimalus	50.762	50.801	50.912	50.131
	Nusistovėjęs	49.919	49.930	49.888	49.882

**18 lentelė.** Sistemos mazgų duomenys įvykus trumpajam jungimui 408 mazge.

Sistemos mazgų dažnis		Sistemos darbo režimas			
		Veikia abi tarp sisteminės jungtys $P_{GEN} = P_N$	Veikia abi tarp sisteminės jungtys, $P_{GEN} = P_{MAX}$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_N$	Veikia viena tarp sisteminė jungtis, $P_{GEN} = P_{MAX}$
101	Maksimalus	50.412	50.433	50.452	50.466
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
151	Maksimalus	50.362	50.377	50.391	50.399
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998

206	Maksimalus	50.507	50.532	50.555	50.582
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
211	Maksimalus	50.414	50.448	50.430	50.421
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
3011	Maksimalus	50.633	50.651	50.698	50.677
	Nusistovėjęs	49.999	49.999	49.998	49.998
402	Maksimalus	51.131	51.154	51.172	51.193
	Nusistovėjęs	49.919	49.930	49.888	49.882
408	Maksimalus	51.117	51.133	51.158	51.192
	Nusistovėjęs	49.919	49.930	49.888	49.882

#### 4.6. Rezultatų analizė

Sumodeliavus trumpuosius jungimus jungtinėje elektros sistemoje, gauti ribiniai trumpojo jungimo atjungimo laikai, kai pašalinus trikdį sistema dar išlieka stabili. Kai trumpojo jungimo atjungimo laikas yra ilgesnis, sistema praranda stabilumą ir normalus sistemos darbo režimas nebusistovi arba yra viršijamos sistemos parametrų leistinos ribos. Trumpųjų jungimų modeliavimas buvo atliktas 5 pirmosios sistemos generatorių mazguose, kuriuose trumpojo jungimo sukelti sistemos parametrų svyravimai buvo didžiausi sistemos izoliuoto darbo režimu, ir 2 antrosios sistemos generatorių mazguose. Kai trumpasis jungimas yra modeliuojamas bet kuriame pirmosios sistemos generatoriaus mazge ir tarp sistemų veikia bent viena nuolatinės srovės jungtis, maksimalus dažnio pokytis pirmosios sistemos mazguose, lyginant su izoliuotu darbo režimu, sumažėja, bet vis tiek viršija 0.8Hz ribą 206 ir 3011, kai trumpasis jungimas įvyksta 151 ir 206 mazge, taip pat dažnis viršija šią ribą 206 ir 211 mazge, kai trumpasis jungimas įvyksta 211 mazge. Visais kitais atvejais pereinamojo proceso metu, dažnis neviršija 0.8Hz ribos, o nusistovėjęs dažnis taip pat neviršija 0.5Hz ribos.

Kadangi antroji sistema yra su trūkstama generacija ir yra pilnai priklausoma nuo pirmosios sistemos, ji į trpuosius jungimus reaguoja sunkiau, ypač, kai trumpasis jungimas įvyksta antrojoje sistemoje. 4 iš 5 trumpųjų jungimų pirmojoje sistemoje atveju, antrosios sistemos dažnis pereinamojo proceso metu viršija 0.8Hz ribą, o kai trumpasis jungimas įvyksta antrojoje sistemoje, pereinamojo proceso metu dažnis padidėja iki 51.273Hz (402 mazge, kai trumpasis jungimas įvyksta šiame mazge, o generatoriaus  $P_{GEN} = P_{MAX}$ .) Iš dvejų tirtų antrosios sistemos generatorių, į trumpąjį jungimą sunkiau reaguoja mažesnio galingumo 402 mazge esantis generatorius. Jo generuojama galia normaliu darbo režimu  $P_{GEN} = 100MW$ , o maksimaliu darbo režimu  $P_{MAX} = 150MW$ . Šis generatorius sunkiau reaguoja į trumpąjį jungimą dėl to, jog dėl savo mažesnės galios ir gabaritų sukaupia mažesnę kinetinės energijos kiekį, kuris sumažintų ir pristabdytų dažnio svyravimus. Antrojo tirtos antrosios sistemos generatoriaus, esančio 408 mazge, normaliu režimu generuojama galia yra  $P_{GEN} = 250MW$ , o maksimali generuojama galia  $P_{MAX} = 500MW$ . Tačiau kai neveikia viena iš nuolatinės srovės jungčių, galios trūkumą kompensuoja šis generatorius, taigi tokiu atveju jo gaminama galia siekia  $P_{GEN} = 480MW$ . Kadangi šio generatoriaus gabaritai ir galia yra didesni, jo sukauptos kinetinės energijos kiekis yra didesnis, šio generatoriaus trumpojo jungimo atjungimo laikas yra šiek tiek ilgesnis, kuomet nusistovėjęs pereinamajam procesui jis vis dar išlieka stabilus.

Taip pat nuolatinės srovės jungčių įtaka elektros sistemų stabilumui priklauso ir nuo HVDC jungčių valdymo strategijos. Neteisingas ribinių srovių nustatymas mažinant aktyviają ar reaktyviają galią,

gali pabloginti elektros sistemų stabilumą. Taip pat elektros sistemų stabilumas gali būti pagerintas panaudojant šias išplėstinio nuolatinės srovės jungčių valdymo programas:galios virpesių slopinimas, sub-sinchroninis slopinimas, avarinis galios valdymas, dažnio ribojimo rezervai, sintetinė inercija, kintamosios įtampos linijų emuliacija ir reaktyviosios galios padidinimas.

## Išvados

1. Atlikus elektros energetikos sistemos stabilumo tyrimų apžvalgą nustatyta, jog labiausiai tikslinga tirti trifazį trumpąjį jungimą generatoriaus mazge, nes jis yra laikomas didžiausiu trikdžiu elektros sistemoje ir gali lengviausiai pažeisti elektros sistemos dinaminį stabilumą.
2. Atlikus nuolatinės srovės jungčių ir jų technologijų apžvalgą, išskirti skirtingų technologijų pagrindiniai privalumai. „LCC“ technologija išsiskiria tuom, jog šios technologijos keitikliai gali būti didesnio galingumo ir turi didesnę perkrovimo ribą, taip pat tokia nuolatinės srovės sistema turi mažesnius nuostolius ir ši technologija yra ilgiau naudojama ir labiau išplėta. „VSC“ technologijos nuolatinės srovės jungtis turi pažangią aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymo technologiją, taip pat yra galimas nepriklausomas aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymas, šio tipo jungtis turi greito paleidimo galimybę ir ši technologija yra priimtinesnė, kai viena iš sujungiamų asinchroniškų kintamosios įtampos sistemų yra sąlyginai silpna ir turi mažą generaciją. Dėl šių priežasčių „VSC“ technologijos nuolatinės srovės jungtys ir buvo pasirinktos dinaminio stabilumo tyrimui atlikti.
3. Naudojantis PSS\ę programinės įrangos paketu, kuris yra skirtas elektros sistemų modeliavimui ir skaičiavimams, buvo paruošta tiriamoji schema, sudaryta iš dvejų asinchroniškais režimais veikiančių elektros sistemų, sujungtų dvejomis tarpsteminėmis nuolatinės srovės jungtimis. Antroji sistema sumodeliuota su generacijos trūkumu tam, kad būtų nuolatinis galios srautas iš pirmosios sistemos į antrąją per nuolatinės srovės jungtis. Priimta, jog elektros sistemų stabilumas yra atliekamas esant žiemos maksimumo režimui, nes tuo metu vyrauja didžiausios galios, kas leidžia tikėtis, jog praradus generatorių įvykus trumpajam jungimui, elektros sistemoje gali įvykti didžiausi ir pavojingiausi dažnio ir kitų elektros sistemos parametrų nuokrypiai.
4. Sudarius sistemų normalaus darbo režimo balansą, buvo atliktas pirmosios sistemos izoliuoto darbo stabilumo tyrimas, rastos visų generatorių trumpojo jungimo atjungimo laiko stabilumo ribos, taip pat išsiaiškinti silpniausi sistemos mazgai, su kuriais buvo pasirinkta atlikinėti tolimesnius tyrimus jungtinėje elektros sistemoje. Įvykus trumpajam jungimui generatoriaus mazge, kai generatorius yra maksimaliai apkrautas ( $P_{GEN} = P_{MAX}$ ), ribinis trumpojo jungimo atjungimo laikas kiekvienu atveju sumažėja. Tai įvyksta todėl, kad generatoriui esant maksimaliai apkrautam, jis turi didesnę įtaką sistemos stabilumui, ir jį praradus, sistema išlaiko stabilumą trumpiau. Kai trumpasis jungimas yra modeliuojamas šiuose mazguose: 101, 151, 206, 211, pereinamojo proceso metu visuose generatorių mazguose (101, 151, 206, 211, 3011, 3018) yra viršijama ribinė dažnio pokyčio reikšmė (0,8Hz.), tačiau per 5 — 7 sekundes pereinamasis procesas nusistovi ir visi sistemos parametrai išlieka leistinose ribose.
5. Atlikus trumpųjų jungimų modeliavimus pirmojoje sistemoje, kai sistemos dirba sujungtos bent viena nuolatinės srovės jungtimi, pastebėta, jog pereinamojo proceso metu sumažėja dažnio kitimo amplitudė, sumažėja nusistovėjusio dažnio pokytis. Tiriant pirmosios sistemos dinaminį stabilumą jai veikiant izoliuotu režimu, dažnio pokytis nusistovėjus pereinamajam procesui kito nuo 0,028Hz iki 0,105Hz. Veikiant bent vienai nuolatinės srovės jungčiai, dažnio pokyčio ribos sumažėjo iki 0,001Hz. — 0,003Hz. Taip pat padidėja ir ribiniai trumpojo jungimo atjungimo laikai — jų pokytis atitinkamuose mazguose siekia nuo 0,01s. iki 0,09s. Tai įvyksta todėl, kad sistemai veikiant jungtinėje elektros sistemoje, sumažėja trumpojo jungimo srovės ir sistema yra labiau stabili. Taip pat prie sistemos stabilumo prisideda ir nuolatinės srovės jungtys. Iš visų mazgų išsiskiria tik 3011 mazgas. Kadangi jame esantis generatorius gamina reikalingą galią perduoti į antrąją sistemą (460MW), darbo režimu, kai veikia bent viena nuolatinės srovės jungtis, jo trumpojo jungimo atjungimo laikas sumažėja nuo 0,68s iki 0,25s.



## Literatūros sąrašas

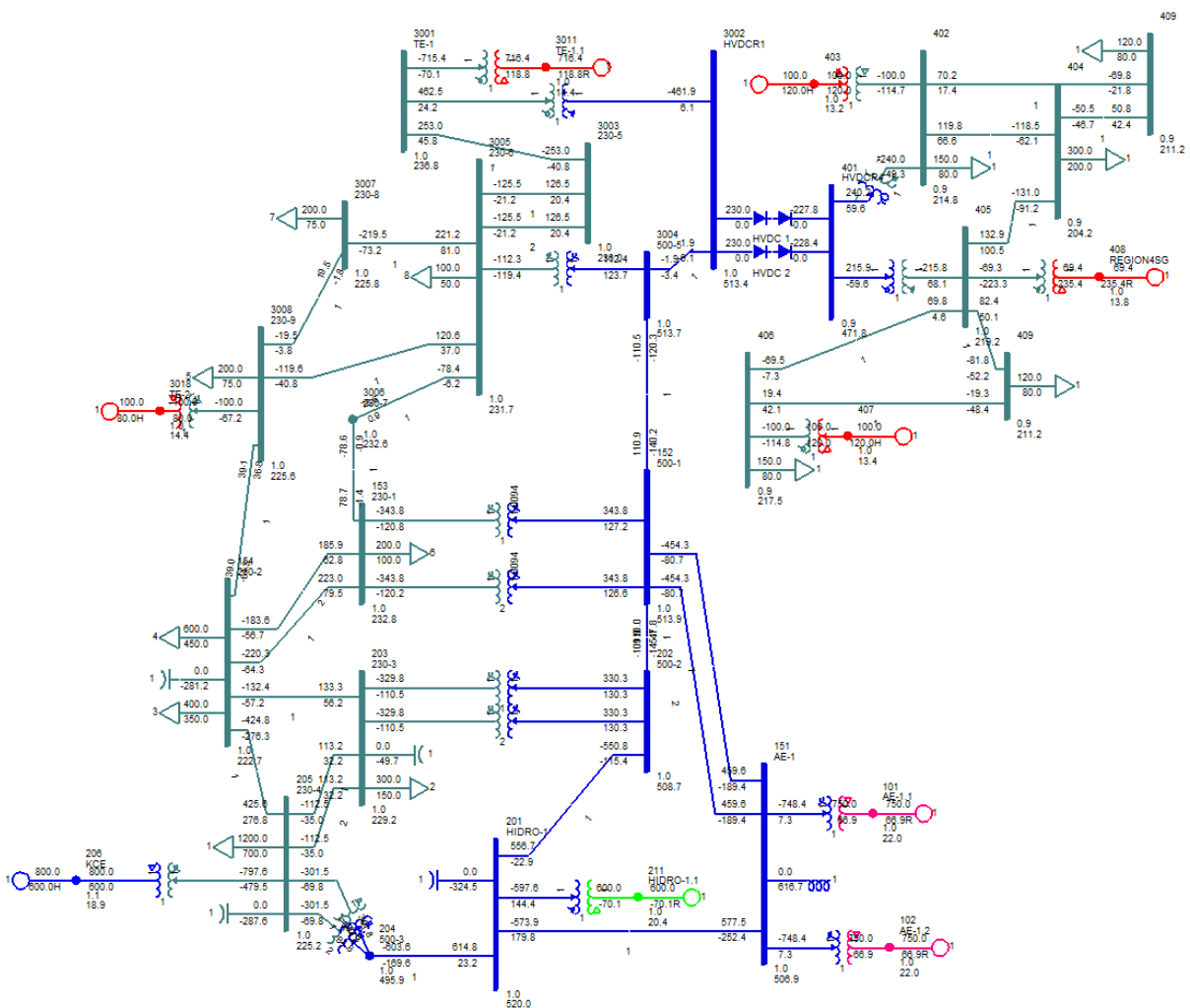
1. Kundur P. Power system stability and control. [Žiūrėta 2020-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.elcomhu.com/Electrical/Power%20System%20Stability/%5Bprabha%20kundur%5D%20power%20system%20stability%20and%20control.pdf>
2. Kundur P., Paserba J., Ajjarapu V. Definition and Classification of Power System Stability. [Žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/c21a/5e9ed02416f2560acb64ebd87e39548eb61c.pdf>
3. Kilk K., Valdma M. Determination of Optimal Operating Reserves in Power Systems. [Žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/e996/f9934dc2e9ac6255e87f0c47405c7d7b34a6.pdf>
4. Abdurraheem B. S., Gan Ch. K. Power System Frequency Stability and Control: Survey. [Žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/303811158\\_Power\\_System\\_Frequency\\_Stability\\_and\\_Control\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/303811158_Power_System_Frequency_Stability_and_Control_Survey)
5. Current situation with operation of Baltic States in synchronous mode with IPS/UPS power system. [Žiūrėta 2020-05-05]. Prieiga per internetą: <https://tyndp.entsoe.eu/2016/insight-reports/baltic-synchronisation/>
6. Bompard E., Zalzar S., Huang T., Purvins A., Masera M. Baltic Power Systems' Integration into the EU Market Coupling under Different Desynchronization Schemes: A Comparative Market Analysis.
7. Thiesen H., Jauch C., Gloe A. Design of a System Substituting Today's Inherent Inertia in European Continental Synchronous Area.
8. Ulbig A., Borsche T. S., Andersson G. Impact of Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation. [Žiūrėta 2020-05-08]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/1312.6435.pdf>
9. Orum E., Kuivaniemi M., Laasonen M. Future system inertia. ENTSOE report. [Žiūrėta 2020-05-06]. Prieiga per internetą: [https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/SOC/Nordic/Nordic\\_report\\_Future\\_System\\_Inertia.pdf](https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/SOC/Nordic/Nordic_report_Future_System_Inertia.pdf)
10. Porretta B., Porretta S. Calculation of Power Systems Inertia and Frequency Response. [Žiūrėta 2020-02-07]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/323713791\\_Calculation\\_of\\_power\\_systems\\_inertia\\_and\\_frequency\\_response](https://www.researchgate.net/publication/323713791_Calculation_of_power_systems_inertia_and_frequency_response)
11. Chown G., Wright J. G., van Heerden R., Coker M. System inertia and Rate of Change of Frequency with increasing non-synchronous renewable energy penetration. [Žiūrėta 2020-05-08]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/324280415\\_System\\_inertia\\_and\\_Rate\\_of\\_Change\\_of\\_Frequency\\_RoCoF\\_with\\_increasing\\_non-synchronous\\_renewable\\_energy\\_penetration](https://www.researchgate.net/publication/324280415_System_inertia_and_Rate_of_Change_of_Frequency_RoCoF_with_increasing_non-synchronous_renewable_energy_penetration)
12. Hirth L., Ziegenhagen I. Balancing Power and Variable Renewables: Three Links. [Žiūrėta 2020-05-02]. Prieiga per internetą: <https://www.neon-energie.de/Hirth-Ziegenhagen-2015-Balancing-Power-Variable-Renewables-Links.pdf>
13. Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe. Requirements and impacting factors. ENTSOE report. [Žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per internetą:

- [https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/RGCE\\_SPD\\_frequency\\_stability\\_criteria\\_v10.pdf](https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/RGCE_SPD_frequency_stability_criteria_v10.pdf)
14. Radu D. C. Strategies for Provision of Secondary Reserve Capacity to Balance Short-Term Fluctuations of Variable Renewable Energy. [Žiūrėta 2020-04-04] Prieiga per internetą: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1152864/FULLTEXT01.pdf>
  15. Policy 1: Load-Frequency Control and Performance. [Žiūrėta 2020-05-06] Prieiga per internetą: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_final.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf)
  16. Lackovic V. Power System Transient Stability Study Fundamentals. [Žiūrėta 2020-05-03] Prieiga per internetą: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Power%20System%20Transient%20Stability%20Study%20Fundamentals.pdf>
  17. Sauer P. W., Pai M. A. Power System Dynamics and Stability. [Žiūrėta 2020-05-11] Prieiga per internetą: <https://courses.engr.illinois.edu/ece576/sp2018/Sauer%20and%20Pai%20book%20-%20Jan%202007.pdf>
  18. Okedu K. E. Introductory Chapter: Power System Stability. [Žiūrėta 2020-03-02] Prieiga per internetą: <https://www.intechopen.com/books/power-system-stability/introductory-chapter-power-system-stability>
  19. Shenkman A. Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook. [Žiūrėta 2020-03-07] Prieiga per internetą: [http://s1.nonlinear.ir/epublish/book/transient\\_Analysis\\_of\\_electric\\_power\\_circuits\\_handbook\\_9780387287997.pdf](http://s1.nonlinear.ir/epublish/book/transient_Analysis_of_electric_power_circuits_handbook_9780387287997.pdf)
  20. Shoaf J. H. Specification and Measurement of Frequency Stability. [Žiūrėta 2020-03-11] Prieiga per internetą: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-6d08b51202cd928185d0c0856302d5f1/pdf/GOVPUB-C13-6d08b51202cd928185d0c0856302d5f1.pdf>
  21. Mynuddin M., Roknuzzaman K. M., Biswas P., Tanjimuddin M. Stability Study of Power System. [Žiūrėta 2020-03-05] Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/279271539\\_Stability\\_Study\\_of\\_Power\\_System](https://www.researchgate.net/publication/279271539_Stability_Study_of_Power_System)
  22. Ufa R., Andreev M., Ruban N. The Hybrid Model of VSC HVDC. [Žiūrėta 2020-02-12] Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/330590875\\_The\\_hybrid\\_model\\_of\\_VSC\\_HVDC](https://www.researchgate.net/publication/330590875_The_hybrid_model_of_VSC_HVDC)
  23. Barnard M. Future of Electricity Transmission is HVDC. [Žiūrėta 2020-02-12] Prieiga per internetą: <https://medium.com/predict/future-of-electricity-transmission-is-hvdc-9800a545cd18>
  24. HVDC Transmission. [Žiūrėta 2020-04-13] Prieiga per internetą: <https://circuitglobe.com/hvdc-high-voltage-direct-current.html>
  25. Nordic and Baltic HVDC Utilisation and Unavailability Statistics 2017. ENTSOE report. [Žiūrėta 2020-01-21]. Prieiga per internetą: <https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/SOC/Nordic/Nordic-and-Baltic-HVDC-Disturbance-Statistics-2017.pdf>
  26. Graham J., Biledit G., Johansson J. Power System Interconnections using HVDC Links. [Žiūrėta 2020-03-17]. Prieiga per internetą: <https://library.e.abb.com/public/4ba810f6a8c67b6ec1256fff0022485b/Power%20System%20Interconnections%20using%20HVDC%20Links.pdf>

27. Callavik M. HVDC Interconnectors Enable a Stronger Smarter and Greener Grid. [Žiūrėta 2020-03-15] Prieiga per internetą: <https://www.abb-conversations.com/2017/11/hvdc-interconnectors-enable-a-stronger-smarter-and-greener-grid/>
28. ENTSO-E. Incidents Clasification scale methodology. [Žiūrėta 2020-01-20]. Prieiga per internetą: [https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Incident\\_Classification\\_Scale/2014\\_IC\\_S\\_Methodology.pdf](https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Incident_Classification_Scale/2014_IC_S_Methodology.pdf)
29. PSS/E User Manual. [Žiūrėta 2020-01-23]. Prieiga per internetą: <http://read.pudn.com/downloads182/ebook/854216/PSSE%E5%82%BB%E7%93%9C%E6%95%99%E7%A8%8B/USERS.pdf>
30. Ana – Irina Stan, Daniel – Ioan Stroe. Control of VSC-based HVDC transmission system for offshore wind power platns. Master Thesis. Department of Energy Technology – Pontoppidanstraede 101 Aalborg University, Denmark, 2010.
31. Shri Harsha J., Shilpa G. N., Ramesh E., Dayananda L. N., Natajara C. Voltage Source Converter Based HVDC Transmission. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 1, Issue 1, September 2012. ISSN: 2319-5967.

# Priedai

## 1 priedas. Tiriamos jungtinės elektros sistemos schema



## 2 priedas. Sistemos elementų dinaminiai modeliai

Mazgo numeris	Generatoriaus modelis	Žadinimo sistemos modelis	Turbinos modelis	Nuolatinės srovės jungties modelis
101	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
102	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
206	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
211	GENSAL	SCRX	HYGOV	-
3011	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
3018	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
403	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
407	GENROU	IEEET1	TGOV1	-
408	GENROU	IEEET1	TGOV	-
3002	-	-	-	VSCDCT
401	-	-	-	VSCDCT