



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Aukštosios įtampos nuolatinės srovės keitiklio komutacinių  
gedimų identifikavimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Danas Černeckas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Aukštosios įtampos nuolatinės srovės keitiklio komutacinių gedimų identifikavimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Danas Černeckas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

**Prof. Robertas Lukočius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Danas Černeckas

## **Aukštosios įtampos nuolatinės srovės keitiklio komutacinių gedimų identifikavimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Danas Černeckas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Černeckas, Danas. Aukštosios įtampos nuolatinės srovės keitiklio komutacinių gedimų identifikavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: HVDC, LCC, THD, Furjė transformacija, harmonikos, komutacinis gedimas, ribinis įžeminimo induktyvumas.

Kaunas, 2024. 47 psl.

### **Santrauka**

Tiriamąjį projekto darbo metu peržvelgiama aukštos įtampos nuolatinės srovės intarpų taikymą Lietuvoje ir technologijas kurias šiuo naudoja ir planuoja naudoti ateityje. Atliekami harmonikų poveikiai HVDC sistemai, besiremiant Furjė transformacija. Naudojant MATLAB Simulink programinę įrangą, sumodeliuotas HVDC LCC „back-to-back“ intarpas paremtas Lietuvoje esančiu „LitPol Link“ keitikliu. Iš sudaryto HVDC jungties modelio atlieka harmonikų analizę, gautos antros ir trečios eilės harmonikos yra naudojamos apskaičiuoti komutacinių gedimų prognozę. Eksperimentinio modelio rezultatai yra lyginami su to pačio keitiklio CFPREV komutacinių gedimų aptikimų metodo duomenimis. Gauti tyrimo rezultatai parodo didesnę eksperimentinio modelio gebėjimą aptikti komutacinius gedimus nei standartinis CFPREV metodas.

Černeckas, Danas. Identification of HVDC Converter Commutation Faults. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: HVDC, LCC, THD, CFPREV, Fourier transformation, harmonics, commutation failure, critical grounding inductance.

Kaunas, 2024. 47 pages.

### **Summary**

The research project is an analysis the application of high-voltage direct current (HVDC) links in Lithuania and the technologies that are currently in use and are planned for future use. The effects of harmonics on the HVDC system are investigated based on the Fourier transform. Using MATLAB Simulink software, a back-to-back HVDC LCC inserter based on the „LitPol Link“ converter in Lithuania is modelled. Harmonic analysis is performed on the existing model to detect commutation faults in the HVDC system. From the constructed HVDC link model, a harmonic analysis is performed and the resulting second and third order harmonics are used to calculate the fault prediction. The results of the experimental model are compared with the results of the CFPREV commutational fault detection method for the same converter. The obtained results show the higher capeability of the experimental model to detect commutational faults over the standard CFPREV method

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Apžvalginė dalis.....</b>	<b>12</b>
1.1. HVDC perdavimo sistema.....	12
1.2. HVDC perdavimo sistemos Lietuvoje.....	13
1.3. HVDC sistemų klasifikavimas .....	15
1.3.1. „Back-to-back“ sistema .....	15
1.3.2. Vienpolė HVDC sistema .....	15
1.3.3. Dvipolė HVDC sistema.....	16
1.4. HVDC technologijos .....	16
1.4.1. VSC tipo HVDC keitikliai.....	17
1.4.2. LCC tipo HVDC keitikliai.....	19
1.5. Harmonikos .....	21
1.5.1. Harmonikų žala ir jos mažinimas .....	21
1.5.2. Suminis harmonikų iškraipymas .....	23
1.5.3. Furjė analizė .....	24
1.6. Komutaciniai gedimai .....	24
1.6.1. Komutacinių gedimų valdymas.....	25
1.6.2. Komutacinių gedimų nustatymas elektros tinklų sistemose.....	26
1.6.3. Įprasti komutacinių gedimų identifikavimai .....	26
1.6.4. Komutacinių gedimų aptikimas naudojant įtampos harmonikas.....	28
<b>2. Modeliavimas ir harmonikų analizė .....</b>	<b>29</b>
2.1. Modelio sudarymas .....	29
2.2. Harmonikų gavimas pagal FFT .....	31
2.3. Komutacinių gedimų aptikimo schemas sudarymas .....	33
<b>3. Tyrimų analizė ir rezultatai.....</b>	<b>34</b>
3.1. Komutacinių gedimų aptikimo sistemos tyrimas .....	34
3.2. Modelio sistemos reakcijų komutaciniams gedimams palyginimas .....	38
<b>Išvados .....</b>	<b>42</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>43</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>47</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> „NordBalt“ ir „LitPol Link“ parametrai .....	15
<b>2 lentelė.</b> Skirtingų pralaidumų varžų vertės.....	26
<b>4 lentelė.</b> Modelio eksperimentinio ir standartinio metodų komutacinių gedimų aptikimo rezultatai 400 kV keitiklio pusėje.....	34
<b>5 lentelė.</b> Modelio eksperimentinio ir standartinio metodų komutacinių gedimų aptikimo rezultatai 330 kV keitiklio pusėje.....	36
<b>6 lentelė.</b> Modelio antros ir trečios harmonikos įtaka komutacinių gedimų aptikimui (vienfaziai gedimai). .	41
<b>7 lentelė.</b> Modelio antros ir trečios harmonikos įtaka komutacinių gedimų aptikimui (trifaziai gedimai).....	41

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> DC ir AC elektros linijų nuostolių priklausomybė nuo linijos ilgio [3].....	13
<b>2 pav.</b> DC ir AC elektros linijų investicijų priklausomybė nuo linijos ilgio [3].....	13
<b>3 pav.</b> „Nordbalt“ jungties atvaizdavimas [5].....	14
<b>4 pav.</b> „LitPol Link“ jungties atvaizdavimas [5].....	14
<b>5 pav.</b> HVDC „back-to-back“ sistemos schema [6].....	15
<b>6 pav.</b> HVDC vienpolės sistemos schema [6].....	15
<b>7 pav.</b> HVDC dvipolės sistemos schema [6].....	16
<b>8 pav.</b> HVDC dvipolės „back-to-back“ sistemos schema [8].....	16
<b>9 pav.</b> VSC HVDC sistemos schema [12] .....	17
<b>10 pav.</b> Dviejų lygių VSC sistemos schema [11].....	18
<b>11 pav.</b> Trijų lygių VSC sistemos schema [11] .....	18
<b>12 pav.</b> Nuolatinės srovės tiristorinių jungiklių įtampos priklausomybė nuo atidarymo kampo $\alpha$ [14] .....	19
<b>13 pav.</b> LCC HVDC sistemos schema [15] .....	20
<b>14 pav.</b> Šešių tiristorių tiltelio schema .....	20
<b>15 pav.</b> Dvylikos tiristorių tiltelio schema [17] .....	21
<b>16 pav.</b> Iškraipytos sinusinės bangos sudedamosios dalys, $h$ žymi harmonikos eilės numerį [18]..	21
<b>17 pav.</b> CFPREV metodo blokinė schema.....	27
<b>18 pav.</b> Linijos įtampos harmonikų įtaka komutacijos procesui [33].....	28
<b>19 pav.</b> MATLAB „Simulink“ HVDC tinklo modelis .....	29
<b>20 pav.</b> Sumodeliuoto HVDC tinklo lygintuvo valdymo blokas .....	30
<b>21 pav.</b> Sumodeliuoto HVDC tinklo inverterio valdymo blokas.....	31
<b>21 pav.</b> Modeliuojamo nuolatinės srovės keitiklio įtampos priklausomybė nuo laiko.....	32
<b>22 pav.</b> Modeliuojamo HVDC keitiklio lygintuvo tiristorių atsidarymo kampo $\alpha$ priklausomybė nuo laiko, stabilium darbo režimo metu .....	32
<b>23 pav.</b> Modeliuoto tinklo įtampos harmonikų išsidėstymas, kai $L_f = 0,1$ H.....	32
<b>25 pav.</b> Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra vienfaziai 400 kV keitiklio pusėje .....	35



<b>26 pav.</b> Gautų eksperimentinio aptikimo metodo rezultatų palyginimas su standartinio aptikimo metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra trifaziai 400 kV keitiklio pusėje .....	36
<b>27 pav.</b> Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra vienfaziai 330 kV keitiklio pusėje .....	37
<b>28 pav.</b> Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra trifaziai 330 kV keitiklio pusėje .....	38
<b>29 pav.</b> Standartinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 400 kV dalyje, kai $L_f = 0,60$ H.....	39
<b>30 pav.</b> Standartinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 330 kV dalyje, kai $L_f = 0,50$ H.....	39
<b>31 pav.</b> Eksperimentinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 400 kV dalyje, kai $L_f = 0,60$ H40	
<b>32 pav.</b> Eksperimentinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 330 kV dalyje, kai $L_f = 0,50$ H40	

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

HVDC - Aukštos įtampos nuolatinė srovė (*angl. High Voltage Direct Current*);

AC – Kintamoji srovė (*angl. Alternating Current*);

DC – Nuolatinė srovė (*angl. Direct Current*);

IGBT – Izoliuotos užtūros dvipolis tranzistorius (*angl. Isolated Gate Bipolar Transistor*);

LCC – Linija komutuojamas keitiklis (*angl. Line Commutated Converter*);

VSC – Įtampos šaltinio keitikliai (*angl. Voltage Source Converter*);

THD – Suminis harmonikų iškreipymas (*angl. Total Harmonic Distortion*);

TDD – Santykinis suminis harmonikų iškreipymas (*angl. Total Demand Distortion*);

FFT – spačioji Furjė transformacija (*angl. Fast Fourier Transformation*);

DFT – diskrečioji Furjė transformacija (*angl. Discrete Fourier Transformation*).

## **Ivadas**

Šiais laikais neįsivaizduotume gyvenimo be elektros energijos. Buityje labai išplite yra elektros energiją naudojančių prietaisų, todėl be el. energijos visi paskutinio amžiaus išradimai neturėtų tokios stiprios vertės, kokią turi dabar. Todėl yra svarbu stiprinti ir užtikrinti patikimą elektros energijos teikimą.

Vienas iš būdų teikti kokybišką elektrą yra naudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės intarpus. Su HVDC tinklai galima gan efektyviai ir ekonomiškai teikti elektros energiją. Tačiau, dėl papildomų įrenginių prijungimo prie sistemos sukelia tiek harmoninius nuokrypius, tiek galimybės sistemai prarasti savo stabilumą. Siekiant didinti šios sistemos patikimumą šiandienos inžinieriai sprendžia sudėtingus ir kompleksiškus klausimus. Vienas iš jų yra harmonikų analizės metodai skirti aptikti potencialius sistemos trigdžius ir didinti sistemos patikimumą. Moderniosios technologijos mum leidžia efektyviau ir sparčiau stebėti bei prižiūrėti mūsų sistemą. Tačiau, einant laikui labai mažai kinta dabartinė elektros energetikos sistemos apsauga nuo komutacinių gedimų. Atsirado daug naujų metodų, kurie efektyviau pastebi tokius gedimus, kurie gali sukelti nenumatytas pasekmes mūsų aukštos įtampos nuolatinės srovės tinklui.

**Darbo tikslas:** Taikant harmonikų analizės metodus, sudaryti modelį gebanti identifikuoti komutacinius gedimus HVDC perdavimo tinkle naudojant HVDC keitiklio generuojamas įtampos harmonikas.

### **Darbo uždaviniai:**

- Sudaryti stabiliai veikianti HVDC LCC modelį, kuris atitiktų 400-330 kV perdavimo tinklo sistemą, naudojant MATLAB kompiuterinę programą;
- Ištirti modelio harmonikas taikant Furjė analizės metodus;
- Ištirti komutacinių gedimų pastebėjimą naudojant įtampos harmonikas;
- Sudaryti komutacinių gedimų identifikavimo sistemą;
- Palyginti metodo rezultatus su standartiškai naudojamų metodų rezultatais.

## 1. Apžvalginė dalis

Aukštos įtampos nuolatinės srovės HVDC linijos naudojamos yra perduoti elektros energiją tolimais atstumais tiek oro linijomis, tiek povandeniu esančiais kabeliais. Todėl, HVDC intarpai dažnai yra pagrindinė elektros energetikos sistemos dalis, kadangi tokie intarpai pasižymi ilgu eksploatavimo laiku, aukštu patikimumu bei ekonomišku naudingumu.

### 1.1. HVDC perdavimo sistema

Įprastoje aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemoje kintamoji srovė ir įtampa yra perduodama į lygintuvą, kuris yra viename HVDC intarpo gale. Elektros energiją, lygintuvo pagalba, yra pakeičiama iš kintamosios į nuolatinę. Nuolatinės elektros energijos srautas perduodamas per visą intarpą. Intarpo ilgis visiškai neturi įtakos, jis gali siekti kelis metrus arba net kelis šimtus kilometrų. Intarpo gale inverteris srovę ir įtampą vėl pakeičia iš nuolatinės į kintamąją [1].

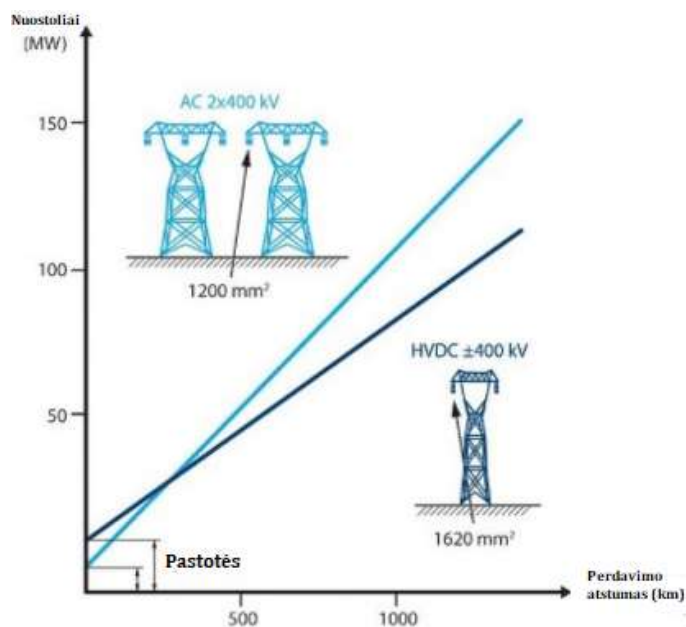
Pagrindiniai HVDC sistemos privalumai:

- Efektyvus perduoti el. energija dideliais atstūmais tiek žeme, tiek povandeniu;
- Didesnios galios perdavimas ir jos reguliavimas;
- Lengvai sujungia asinchroniškai veikiančias elektros sistemas;
- Atstumas tarp linijos galų nedaro didžiules įtakos tinklo kokybei;
- DC intarpas nesukelia aukštų trumpojo jungimo srovių AC dalyje;
- Geresnis stabilumas kintamosios srovės tinkle;
- Mažas jautrumas kintant įtampai ar dažniui;
- Patogu, kai reikia sinchronizuoti tinklą;
- Sistema neperduoda, bet sunaudoja reaktyvinę galią.

Svarbu paminėti, jog aukštos įtampos DC sistema negali tiekti elektros srovės į AC sistemą, jei nėra prijungtų generatorių. Kadangi, sistemos didelis privalūmas yra sunaudoti visą reaktyvinę galią, tai įprastai sistemoje yra įrengiamas reaktyvinės galios šaltinis. Atsižvelgiant į perduodamą galią, palaipsniui yra jungiami kondensatoriai bei filtrai skirti mažinti harmonikas [2].

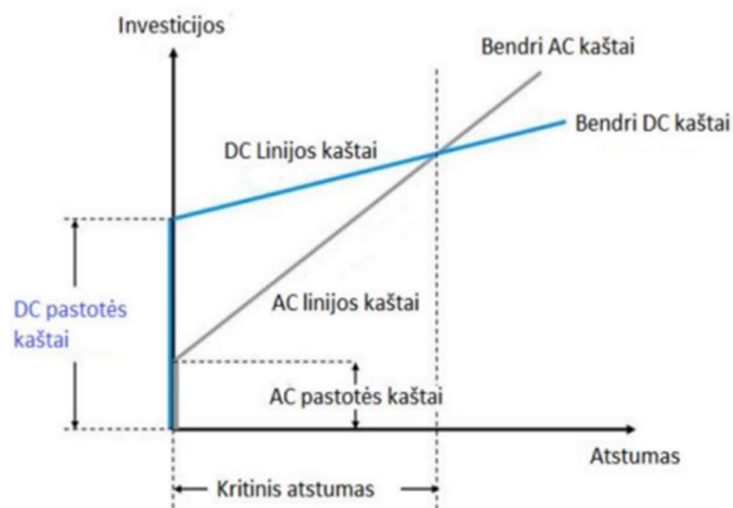
Esminiai HVDC sistemos trūkumai:

- Sumažėja patikimumas dėl keitiklyje esančių įrenginių;
- DC jungtuvai ir apsaugos įrenginiai yra sudėtingos konstrukcijos;
- Keitkliuose ribotos galimybės perkrovimui.



1 pav. DC ir AC elektros linijų nuostolių priklausomybė nuo linijos ilgio [3]

Taip pat, palyginus su AC sistemomis, atstumo atžvilgiu, HVDC sistemos ženkliai atsiperka, kai naudojame perduoti energiją dideliais atstumais (2 pav.). Ekonominė vertė pasireiškia dar labiau, kai norime tiesti elektros kabelius povandeniu [4].



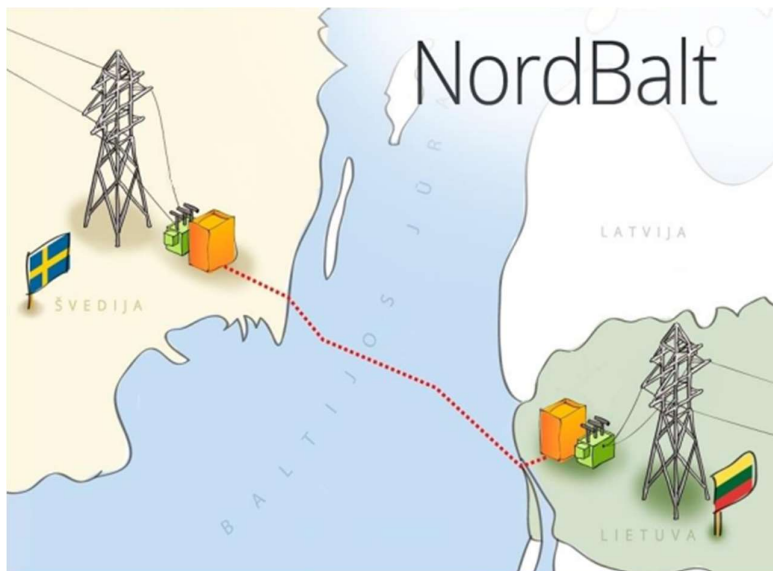
2 pav. DC ir AC elektros linijų investicijų priklausomybė nuo linijos ilgio [3]

## 1.2. HVDC perdavimo sistemos Lietuvoje

Pagal Lietuvos nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategiją matome, jog HVDC perdavimas tampa dažniau taikomas Lietuvos elektros energetikos sektoriuje. [2] Numatytas 700 MW „Harmony link“ projektas žada sudaryti jungtį naudojant keitiklius ir HVDC kabelius [3].

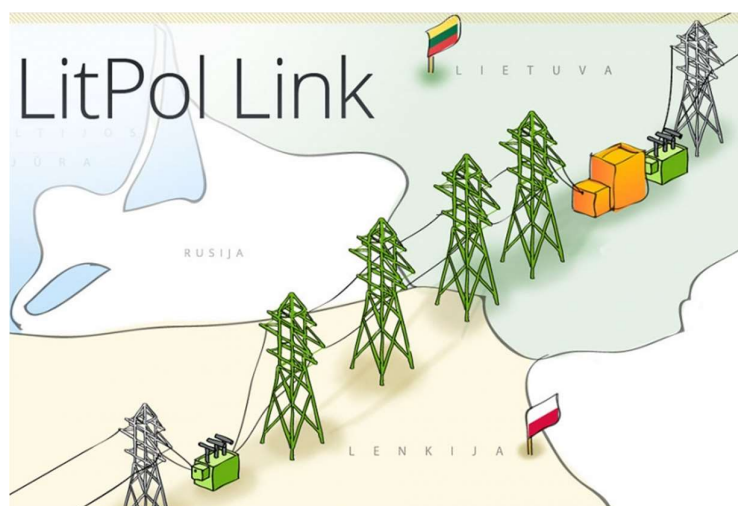
Šiuo metu Lietuvoje yra dvi veikiančios HVDC jungtys, tai jungtis su Švedija „Nordbalt“ ir jungtis su Lenkija „LitPol Link“, kurias įgyvendino Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatorius „Litgrid“.

„Nordbalt“ jungtis, pavaizduota 3-ame paveikslėlyje, yra ilgiausia pasaulyje jungtis naudojanti HVDC „Light“ technologijas. Ši jungtis jungia 700 MW  $\pm$  300 MW keitiklių stotis. 700 MW stotis yra Nybru, Švedijoje, o 300 MW Lietuvoje, Klaipėdoje. Intarpas eina per Baltijos jūrą ir jos ilgis yra 453 km [9].



3 pav. „Nordbalt“ jungties atvaizdavimas [5]

„LitPol Link“ jungtis, pavaizduota 4-tame paveikslėlyje, naudoja HVDC „Classic“ technologija, kuri taiko tiristorinius galios jungiklius sujungtu „back-to-back“ principu. Alytaus, Lietuvoje, 500 MW galios keitiklis yra sujungta 163 km oro linija su Elko transformatorių pastote, Lenkijoje [9]. Ši elektros jungtis suteikia galimybę Lietuvos tinklui sinchroniškai veikti su kontinentines Europos tinklu.



4 pav. „LitPol Link“ jungties atvaizdavimas [5]

Šių HVDC jungčių įrengimas sustiprino energetinį savarankiškumą, padidino teikiamos elektros energijos saugumą ir patikimumą. 1-oje lentelėje yra pateikiami detalesni jungčių parametrai [9].

**1 lentelė.** „NordBalt“ ir „LitPol Link“ parametrai

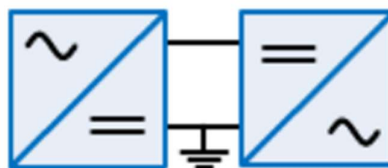
	„NordBalt“	„LitPol Link“
<b>Ilgis, km</b>	Povandeninis kabelis, 400 km Požeminis kabelis, 53 km	Oro linija, 163 km
<b>Įtampa, kV</b>	300 DC	400/330 DC
<b>Galia, MW</b>	700	500
<b>Naudojama HVDC technologija</b>	VSC	LCC
<b>Kaina, Eur</b>	550 mln.	370 mln.

### 1.3. HVDC sistemų klasifikavimas

Aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemos gali būti: „back-to-back“, vienpolė ar dvipolė.

#### 1.3.1. „Back-to-back“ sistema

„Back-to-back“ sistemose lygintuvai ir inverteriai yra įrengti toje pačioje pastotėje (5 pav.). Šie keitikliai plačiausiai naudojami el. energijos perdavimui tarp greta esančių asinchroninių kintamosios srovės sistemų [5].



**5 pav.** HVDC „back-to-back“ sistemos schema [6]

#### 1.3.2. Vienpolė HVDC sistema

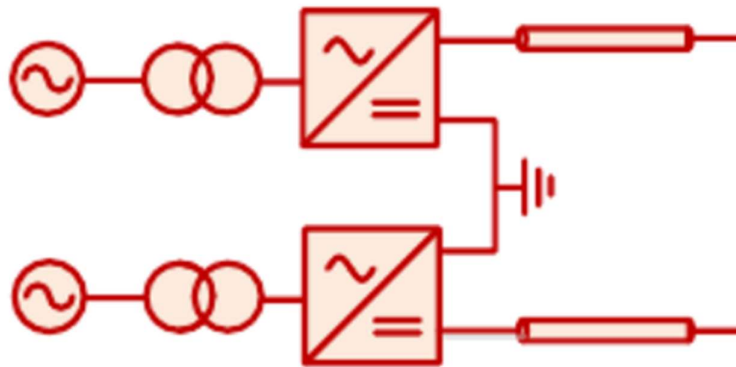
Vienpoles sistemas sudaro vienas laidininkas ir du elektrodai, uždariantys grandinę per žemę ar jūrą, kaip parodyta paveiksle (6 pav.). Ši sistema yra paprastesnės konstrukcijos su vienu (teigiamo arba neigiamo poliariškumo) aukštos įtampos laidininku, todėl bendra sistemos kaina yra mažesnė. [6]



**6 pav.** HVDC vienpolės sistemos schema [6]

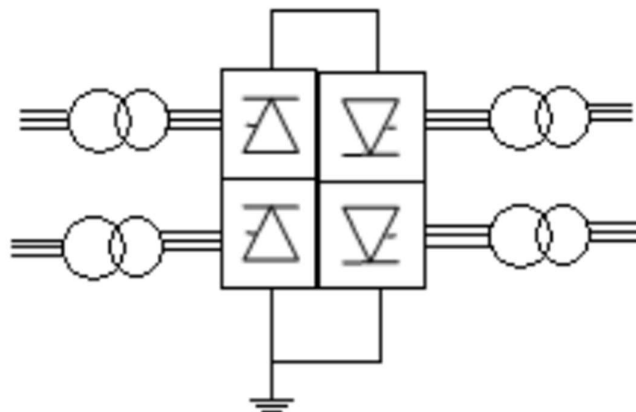
### 1.3.3. Dvipolė HVDC sistema

Dvipolėje sistemoje vienas polius yra teigiamo, o kitas – neigiamo poliariškumo. Tarp keitiklių jungtis yra įžeminta ir įprastai žeme neteka srovė. Poliai gali veikti atskirai, todėl trumpojo jungimo atveju kiti poliai gali veikti kartu su žeme ir perduoti dalį galios. Dvipolis keitiklis tinkle sukelia mažesnes harmonikas nei vienpolė sistema [6].



7 pav. HVDC dvipolės sistemos schema [6]

Dvipoliai HVDC intarpai gali būti „back-to-back“ (8 pav.) [7]. Lygintuvo, ir keitiklio intarpai yra toje pačioje vietoje. Naudojamas vienpolis blokas, tačiau lygiagrečiai galima įrengiami keli keitiklių blokai, kur kiekvienas turi atskirą nuolatinės srovės grandinę [8]. Tokios konfigūracijos tikslas - sujungti dvi asinchronines sistemas ir vykdyti elektros energijos mainus abejomis kryptimis. Dėl to sumažėja bendros sistemos sąnaudos. Toks keitiklis yra naudojamas „LitPol Link“ jungtyje [9].



8 pav. HVDC dvipolės „back-to-back“ sistemos schema [8]

### 1.4. HVDC technologijos

DC keitiklių sistemos dar gali būti skirstomos pagal jų komutacinius įrenginius. Pagrindinės technologijos yra dvi:

- Įtampos šaltinių keitikliai (VSC);
- Linijos komutuojami keitikliai (LCC).



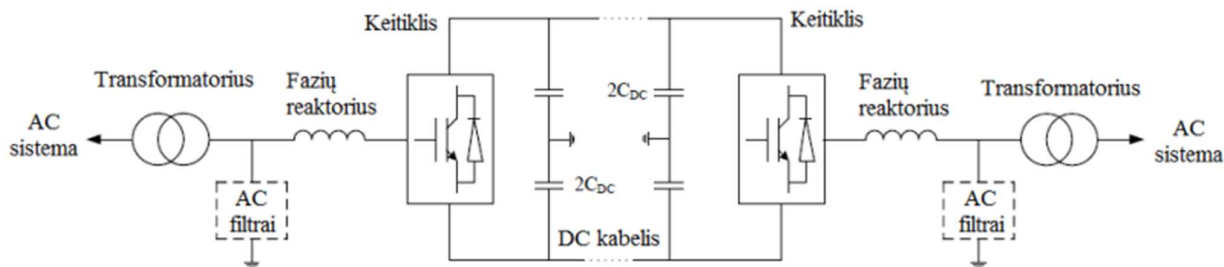
### 1.4.1. VSC tipo HVDC keitikliai

Įtampos šaltinio keitikliai (VSC) - tai savaiminio įjungimo keitikliai, skirti HVDC sistemoms sujungti, kuriuose naudojami didelės galios elektronikai tinkami įtaisai, pavyzdžiui, IGBT tranzistoriai [10].

Keitiklyje esančius IGBT tranzistorius galima panaudoti valdant tiek įjungimą bei išjungimą, jų pagalba keitiklis gali būti sąvarankiškai komutuojamas ir turi galimybę paleisti visiškai išjungtą kintamosios srovės tinklą [13]. Nuolatinės srovės įtampos poliškumas yra fiksuotas, kur nuolatinės srovės įtampa yra laikoma pastovi, nes ji dėl kondensatoriaus talpos, įtampa yra išlyginama. Taip atsiranda galimybė generuoti kintamąją įtampą, nesiremiant į kitas šalia esančias asinchronines AC sistemas. Tai leidžia nepriklausomai greitai valdyti aktyviają ir reaktyviają galią. Įtampos šaltinio keitikliai geba išlaikyti pastovų įtampos poliškumą, o jos galios kryptis galima valdyti keičiant srovės kryptį [12].

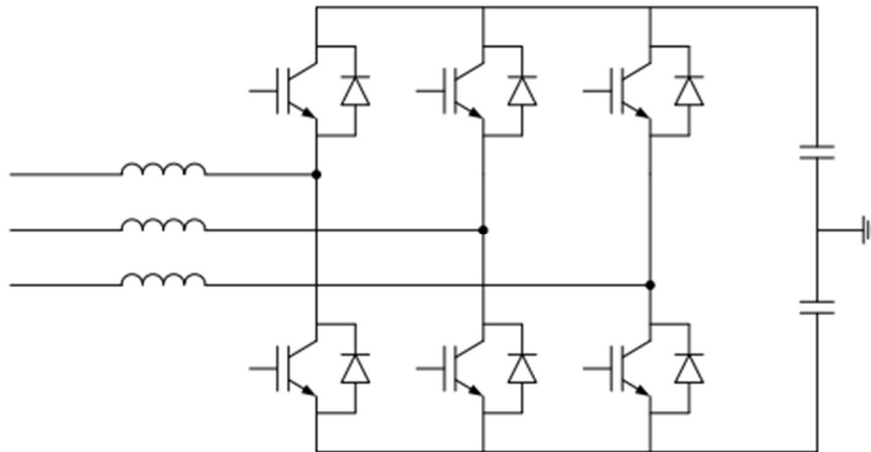
Į VSC HVDC sistema įeina (9 pav.):

- Du įtampos šaltinio keitikliai;
- Transformatoriai;
- Faziniai reaktoriai;
- Kintamosios srovės filtrai;
- Nuolatinės srovės kondensatoriai;
- Nuolatinės srovės kabeliai.



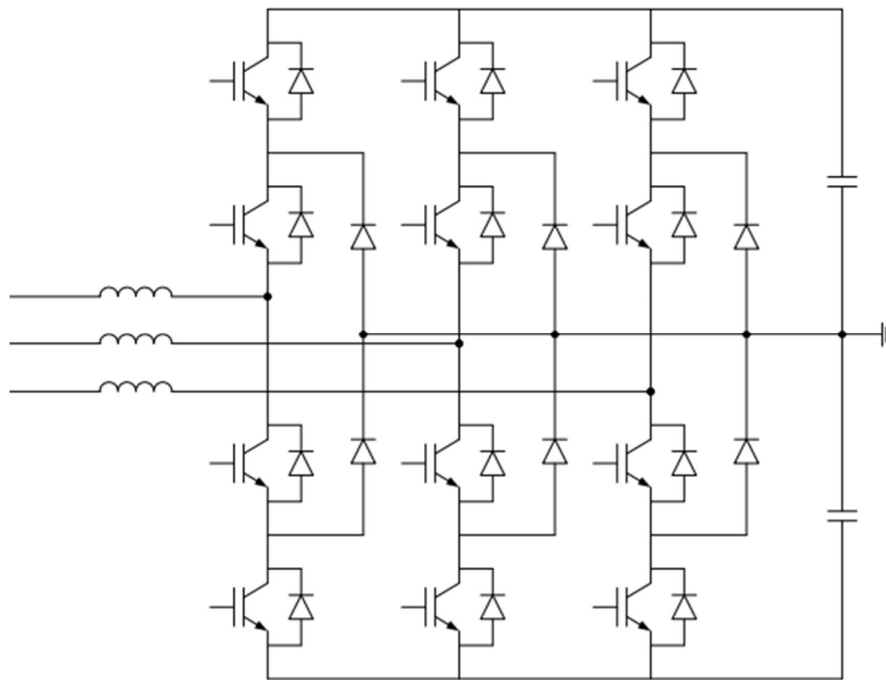
9 pav. VSC HVDC sistemos schema [12]

Praktikoje sutinkami yra dviejų ir trijų lygių VSC keitikliai. Dviejų lygių VSC (10 pav.), dar vadinamas trijų fazių, dviejų lygių, šešių impulsų tiltu, yra paprasčiausia konfigūracija, tinkama HVDC perdavimui. Tokį keitiklį sudaro šeši ventiliai (ventilį sudaro lygiagrečiai sujungti IGBT tranzistorius ir priešingos krypties diodas) ir jis gali generuoti dviejų lygių įtampas  $-0,5 - U_{DCn}$  ir  $+0,5 - U_{DCn}$ .



10 pav. Dviejų lygių VSC sistemos schema [11]

Didelės galios įrenginiuose trijų lygių VSC konfigūracija (10 pav.) yra patikimesnė nei dviejų lygių VSC, nes faziniai potencialai gali būti moduluojami tarp trijų lygių:  $-0,5 U_{DCn}$ ,  $0$  ir  $+0,5 U_{DCn}$ . Šioje konfigūracijoje, vieną keitiklio petį sudaro keturi ventiliai. Dažniausiai taikomas norint sumažinti harmoninius iškreipymus, kurie atsiranda jeigu naudojamas yra dviejų lygių VSC keitiklis. Norint išgauti teigiama DC įtampą, viršutiniai IGBT tranzistoriai turi būti įjungti. Tuo tarpu neigiama DC įtampa išgaunama per du apatinius IGBT tranzistorius. Kad išgauti nulinę įtampą turi būti įjungti du viduriniai tranzistoriai.



11 pav. Trijų lygių VSC sistemos schema [11]

### 1.4.2. LCC tipo HVDC keitikliai

Elektros energetikoje didžioji dalis HVDC sistemų naudoja linijos komutuojamų keitiklių pagrindą. LCC keitiklis yra sudarytas iš nevaldomų jungiklių, kurių pagrindinę dalį sudaro tiristoriai. Toks keitiklis turi trijų fazių ir pilnos bangos tiltelį. Ventiliniai atlieka tiek lygintuvo, tiek inverterio darbą, todėl DC sistema gali perduoti galią abejomis kryptimis. Galios perdavimas yra atliekamas keičiant ventilių atidarymo kampus. Kai ventilių atidarymo kampas yra  $< 90^\circ$ , jungtini tekės nuolatinė srovė. Kampui esant  $> 90^\circ$ , keičiasi įtampos poliarumas, to pasekoje, DC srovė tekės iš neigiamo polio galo [13].

Keitiklio nuolatinė įtampą apskaičiuojama pagal formulę (1):

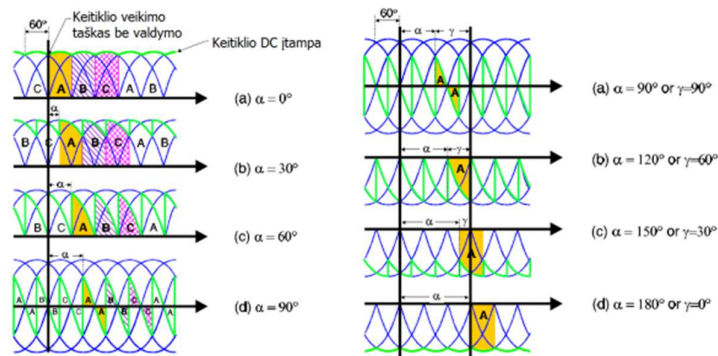
$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{3}U_{max}}{\pi} \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

čia  $U_{DC}$  – keitiklio nuolatinė įtampa, kV;

$U_{max}$  – kintamosios įtampos maksimali tinklo įtampa;

$\alpha$  – tiristoriaus atidarymo kampas,  $^\circ$ .

12-tame paveikslėlyje pateiktų grafikų galima pastebėti kaip kinta nuolatinės srovės įtampa priklausomai nuo tiristorių atidarymo kampo.



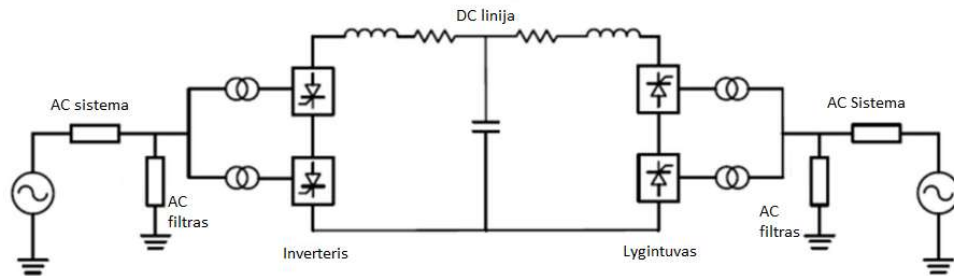
**12 pav.** Nuolatinės srovės tiristorinių jungiklių įtampos priklausomybė nuo atidarymo kampo  $\alpha$  [14]

Padidinus atidarymo kampą, keitiklio nuolatinė srovė pradeda vis daugiau atslikti nuo kintamosios srovės įtampos. Todėl iš sistemos pradeda vartoti reaktyvią galią. Eksploatuojant šią sistemą inžinieriai siekia sumažinti reaktyviosios galios poreikį. Nevisuomet pavyksta palaikyti mažą  $\alpha$ , nes galios poreikis gali būti didelis. Šiai problemai spręsti naudojami transformatorių atšakų perjungikliai.

Į LCC HVDC sistemą įeina (13 pav.):

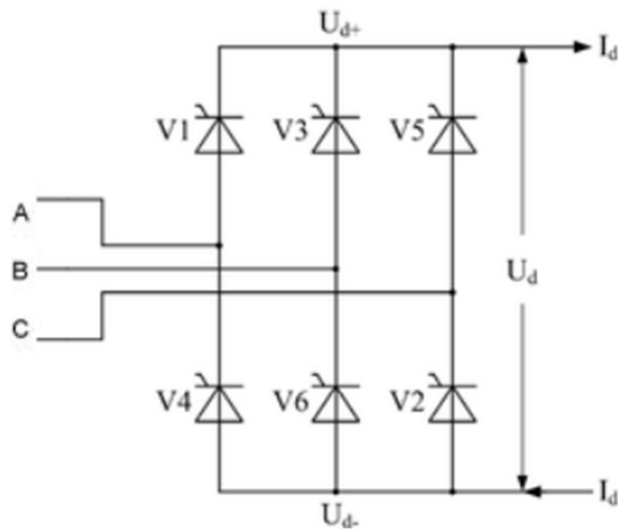
- Dvi kintamos srovės sistemos;
- Dažnio keitikliai;
- Išlyginamieji reaktoriai;

- AC ir DC filtrai;
- Reaktyvios galios kompensatoriai;
- Keitiklių autotransformatoriai.



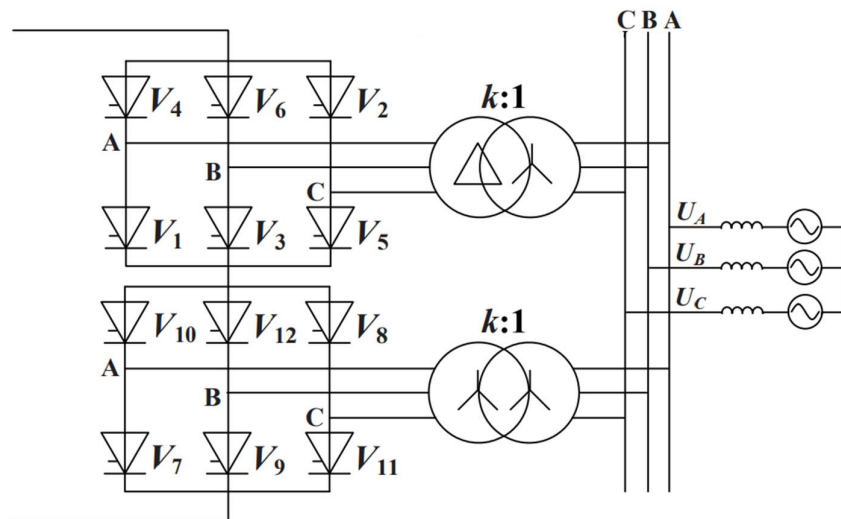
**13 pav.** LCC HVDC sistemos schema [15]

LCC Sistema gali būti sudaryta iš šešių (14 pav.) ar dvylikos tiristorių tiltelių.



**14 pav.** Šešių tiristorių tiltelio schema

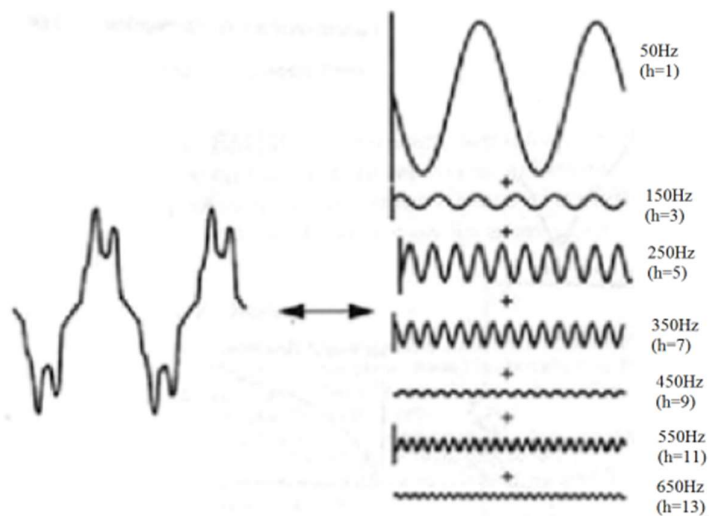
HVDC tinklų praktikoje galime pastebėti tik dvylikos tiristorių tiltelius (15 pav.), nes šešių tiristorių tilteliai sukelia didelius harmoninius nuokrypius AC tinkle dalyje, o DC dalyje atsiranda didelės pulsacijos. Pulsacijų ir harmonikų sumažinimui naudojami AC ir DC filtrai. Reaktorių kintamosios srovės dalyje saugo tinklą nuo srovės nutrūkimo, kai apkrova keitiklių yra maža. Taip pat, yra ribojamos t.j srovės ir harmonikos [16].



15 pav. Dvylikos tiristorių tiltelio schema [17]

### 1.5. Harmonikos

Harmonikos yra apibrežiamos, kaip periodinio įtampos arba srovės sinusinės dedamosios, kurių dažnis gali skirtis sveikuoju daugikliu nuo pradinės bangos pagrindinio dažnio, dar vadinamo pirmąją harmonika. Sinusinės bangos iškraipymą galima gauti kai sujungiame pirmos eilės harmoniką su aukštesnių eilių harmonikomis (16 pav.) [2].



16 pav. Iškraipytos sinusinės bangos sudedamosios dalys, h žymi harmonikos eilės numerį [18]

#### 1.5.1. Harmonikų žala ir jos mažinimas

HVDC intarpuose harmoninių iškraipymų įprastai nėra daug, tačiau intarpuose naudojami keitikliai sukelia nepageidaujamas aukštesnės eilės harmonikas. Dažniausi gedimai HVDC sistemose yra komutaciniai gedimai. Jie gali laikinai nutraukti el energijos tiekimą, kurio metu keitiklio įranga

patiria didelius nuostolius. Trumpi komutaciniai gedimai sikelia didelas galios ir įtampos pulsacijas, o ilgalaikiai gali sukelti net viso HVDC intarpo sustabdymą [19].

Besiplečiant elektros energetikos rinkai, matome ir padidėjusią instaliuojamą įrenginių galią, didėja ir įrenginių pavojus dėl sinusinių bangų iškraipymo. Pagrindiniai elektros energetikos sistemos įrenginiai, kurie darbo metu didina harmonikas yra įvairūs inverteriai, lygintuvai, dažnio keitikliai, baterijų krovimo sistemos, reaktyviosios galios kompensatoriai ir t.t. [20].

Harmonikos taip pat gali sukelti:

- Netikslumus ir paklaidas matavimose;
- Kondensatoriaus baterijų darbo sutrikimus;
- Neteisingai suveikiančias tinklo apsaugos sistemas.

Vienas iš metodų mažinti harmonikas yra naudojant pasyviuosius ar aktyviuosius filtrus. Jų pagrindiniai uždaviniai yra:

- Mažinti harmonikų keliamas problemas tinkle;
- Kompensuoti reaktyviąją galią.

Šiems uždaviniams išspręsti yra naudojami pasyvieji arba aktyvieji filtrai. Pasyvieji filtrai mažina harmoninius nuokrypius naudojant įprastus rezistorius, kondensatorius ir induktorius. Jiems papildomo žadinimo nereikia.

**Pasyviųjų filtrų privalumai:**

- Maža kaina;
- Paprastas projektavimas ir eksploatacija;
- Suteikia galios koeficiento koreliaciją;
- Vienas filtras gali kompensuoti harmonikų iškraipymus daugeliui įrenginių.

**Pasyviųjų filtrų trūkumai:**

- Reikalingas atskiras montavimas bei apsaugos įrenginys (automatukas ar saugiklis);
- Pasyvusis filtras gali sumažinti tik vienos eilės harmonikus;
- Daugiau pritaikytas mažų apkrovų sistemoms.

Tuo tarpu aktyvieji filtrai mažina harmonikas siūsdami harmonikai priešingu parametru bangą. Aktyviems filtrams yra reikalingas papildomas maitinimo šaltinis.

**Aktyviųjų filtrų privalumai:**

- Mažina maitinimo šaltinių sukeltus įtampos mirgėjimus;
- Galimas 2-50 eilės harmonikų sumažinimas;

- Montavimas nereikalauja sistemos perdirbimo ar sutrikdymo;
- Suteikia reaktyviosios galios kompensavimą;

#### Aktyviųjų filtrų trūkumai:

- Lyginant su pasyvaisiais filtrais, ženkliai didesnį kainą;
- Negeba išfiltruoti labai didelės įtampų ir srovių harmonikų vertės
- Sudėtinga eksploatacija.

#### 1.5.2. Suminis harmonikų iškraipymas

Norint nusakyti įtampos ir srovės sinusoidinius iškraipymus, naudojamas yra suminis harmonikų iškraipymas THD. Tai santykis tarp šaknies iš sumos visų harmonikų srovių ar įtampos verčių ir sinusinės formos srovės ar įtampos vertės [21].

Srovės suminis harmonikų iškraipymas apskaičiuojamas pagal formulę (2):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_F} \cdot 100\% \quad (2)$$

čia  $THD_I$  – srovės suminis harmonikų iškraipymas, %;

$I_n$  – n-tosios eilės srovės harmonika, A;

$I_F$  – pagrindinė srovės harmonika, A;

Įtampos suminis harmonikų iškraipymas apskaičiuojamas pagal formulę (3):

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_F} \cdot 100\% \quad (3)$$

čia  $THD_U$  – įtampos suminis harmonikų iškraipymas, %;

$U_n$  – n-tosios eilės įtampos harmonika, A;

$U_F$  – pagrindinė įtampos harmonika, A;

Su santykiniu suminiu harmonikų iškraipymu TDD galime rasti priklausomybę nuo maksimalios srovės ar įtampos vertės ir aukštesnės eilės harmonikos reikšmių. [22] TDD yra apskaičiuojamas pagal formulę (4):

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (4)$$

čia  $TDD_I$  – santykinis srovės suminis harmonikų iškraipymas, %;

$I_n$  – n-tosios eilės įtampos harmonika, A;

$I_L$  – Maksimali srovės reikšmė, A;

Pagal Lietuvoje galiojanti standartą LST EN 50160, įtampos suminis harmoninis iškraipymas negali viršyti 8% [5]. Srovės THD nėra griežtai reglamentuota, tačiau kuriant patikimą sistemą, siekama jas generuoti kuo mažesnes.

### 1.5.3. Furjė analizė

HVDC intarpo periodiniams signalams idealiausia analizuoti su Furjė eilutėmis. Su šiuo analizės metodu gauniami amplitudžių ir fazių spektrai. Toliau pritaikant Furjė eilutes išskaidome įtampos ar srovės sinusoide į pagrindinę ir aukštesnės eilės harmonikas [23].

Siekiant išanalizuoti ne periodines funkcijas reikia taikyti integralinę Furjė transformaciją kuri apibrezta formule (5):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

Čia  $S(f)$  – funkcijos transformacija dažnio  $f$  atžvilgiu;

$t$  – laikas.

Tiksliau skaitmeniniams duomenims tirti, naudojama yra diskrečioji Furjė transformacija DFT. Šiame metode dingsta tolydumas Furje eilutes ir vietoj to atsiranda atskaitų masyvai. DFT yra apibrezama pagal formulę (6):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\frac{k}{N}n} \quad (6)$$

čia  $N$  – masyvo ilgis periode  $T$ ;

$k$  – diskretaus spektro eilės numeris, kai  $K = N/2$ .

Jeigu vykdome spektrine analizę kompiuteriu, apskaičiuojant srovės ir įtampos suminius harmoninius iškraipymus naudojame spačiąja Furjė transformaciją FFT. Taip yra sumažinamas skaičiavimų kiekis, o galutinis atsakymas lieka toks pat kaip ir sprendžiant uždavinį su DFT [23].

### 1.6. Komutaciniai gedimai

Komutacijos gedimai HVDC sistemose dažniausiai įvyksta dėl įtampos kritimo, kurį lemia kintamosios srovės sistemos gedimai arba perjungimo veiksmai netoli keitiklio stoties. Kadangi dėl kintamosios įtampos kritimų sumažėja įtampos dydis ir pasislenka fazės kampas, jie gali turėti įtakos komutavimo procesui ir dėl to gali atsirasti komutavimo sutrikimų [24].

Iš esmės prieš komutavimo proceso metu gali įvykti trijų tipų gedimai:

- Komutacinės įtampos sumažėjimas;
- Staigus nuolatinės srovės padidėjimas;
- Įrenginių gedimas uždegimo valdiklyje.

Komutacinės įtampos trikdžiai yra labiausiai paplitęs iš visų trijų reiškinių, jie atsiranda dėl simetrinių ir nesimetrinių gedimų prijungtose kintamosios srovės sistemose ir niekada negali būti visiškai išvengiami [25]. Įprastai inverteriui veikiant, vardinis uždegimo arba vėlinimo kampas kruopščiai



parenkamas taip, kad būtų gautas pakankamas kampas, leidžiantis išvengti komutacijos sutrikimų. Tačiau kai prieš komutavimą arba jo metu staiga pasikeičia sistemos sąlygos, likusios įtampos gali nepakakti sėkmingam komutavimui.

Dėl simetrinių trifazių gedimų, visų fazių įtampos dydžiai tolygiai sumažėja, tačiau, tai neiškraipo fazių kampų. Atsiradus šiems gedimams, sumažėja kintamosios srovės sistemos įtampa, taip pat laikinai padidėja nuolatinė srovė inverteryje.

Dažniausiai pasitaikantys nesimetriniai gedimai elektros energijos sistemose, sukelia komutacinės įtampos iškreipimus. Dėl šių gedimų ne tik sumažėja komutacinė įtampa, bet ir atsiranda fazės kampo poslinkis. Be to, iškreipoma komutacinė įtampa ir atsiranda nesinusoidinė įtampos forma. Trukdžiai taip pat gali atsirasti dėl komutavimo operacijų, pvz. transformatoriaus įjungimo inverterio stotyje arba netoli jos [4].

Antrasis įvykis, dėl kurio gali sutrikti komutacija, yra staigus keitiklio stoties nuolatinės srovės padidėjimas. Šis įvykis paprastai įvyksta dėl sistemos gedimų, tačiau jį gali sukelti ir labai greitas valdymo sistemos veikimas [4]. Padidėjus nuolatinėi srovei, pailgėja komutavimo laikas. Darant prielaidą, kad įjungimo kampas nesikeičia, išjungimo kampas mažėja. Siekiant užtikrinti, kad likusios įtampos laiko srities pakaktų sėkmingai komutacijai, žadinimo kampas koreguojamas pagal naująjį nuolatinės srovės lygį.

Galiausiai, dėl vidinio keitiklio degimo valdymo sistemos gedimo arba apsaugos funkcijos veikimo gali sutrikti komutacija. Komutacinių gedimų valdymo sutrikimas reikštų, kad kitam vožtuvui, esančiam degimo sekoje, nesuteikiamas žadinimo impulsas [26].

### **1.6.1. Komutacinių gedimų valdymas**

Komutacijos sutrikimas įvyksta, jei po uždegimo likusi įtampos laiko sritis yra nepakankama. Kai kurie iš įprastų komutacijos gedimo rizikos mažinimo būdų aprašyti toliau.

Atliekamas darbas su didele komutacijos atsarga -  $\gamma$ , kad trikdžiai nesukeltų komutacijos gedimų. Siekiant sumažinti komutacijos gedimų riziką, didinama nusistovėjusios būsenos komutacijos atsarga. Kuo didesnė ši atsarga, tuo stipresni trikdžiai gali būti be komutacijos sutrikimų. Tačiau dirbant su didesne komutacijos atsarga padidėja įrangos kaina ir nuostoliai [4].

Be to, komutacijos sutrikimų galima išvengti laikinai padidinus komutacijos atsargą prieš pat planuojamą perjungimo veiksmą. Tai sumažins komutacijos gedimų, susijusių su planiniu perjungimu, riziką. Po suplanuoto perjungimo komutacinė atsarga atstatoma iki nusistovėjusios vertės.

Siekiant sumažinti nuolatinės srovės kitimo greitį trikdžių ir (arba) sistemos gedimų metu, galima imtis tokių priemonių kaip nuolatinės srovės reaktorių su dideliu induktyvumu įrengimo. Didelis induktyvumas užtikrina, kad staigus srovės padidėjimas dėl gedimų vyktų palyginti lėtai, todėl komutacijos procesas gali būti sėkmingai užbaigtas. Jei srovės padidėjimą nurodo valdymo sistema, komutacijos sutrikimų galima išvengti tinkamai sureguliuojant valdymo reakciją.

Komutacijos sutrikimų, atsirandančių dėl HVDC valdymo sistemos vidinio gedimo ar netinkamo veikimo, galima išvengti projektuojant didelio patikimumo valdymo sistemas ir numatant atsargines

sistemas [4]. Paprastai HVDC sistemose komutacijos gedimų rizikai sumažinti taikomas pirmiau minėtų priemonių derinys.

### 1.6.2. Komutacinių gedimų nustatymas elektros tinklų sistemose

Siekiant ištirti kintamosios srovės tinklo trumpojo jungimo pralaidumo įtaką komutacinių gedimų nustatymo funkcijos veikimui, buvo ištirti keturi kintamosios srovės tinklai su skirtingais trumpojo jungimo koeficientais [27]. Kintamosios srovės tinklo trumpojo jungimo pralaidumas, SCR, buvo keičiamas keičiant kintamosios srovės tinklo varžą. Pralaidumas apskaičiuojamas pagal formulę (7):

$$SCR = \frac{S_{cp}}{P_n} \quad (7)$$

čia  $S_{cp}$  - tinklo trumpojo jungimo galia;

$P_n$  - vardinė keitiklio stoties galia.

Atlikus mokslinio straipsnio analizę, pagal 13 paveikslėlio schemą, buvo sudaryta 2 lentelė, kurioje pateiktos ir palygintos kelių LCC-AC tinklų, su skirtingais trumpaisiais jungimais, gautos varžos.

**2 lentelė.** Skirtingų pralaidumų varžų vertės

SCR	$Z_{G1}$	$Z_{G2}$	Varžos kampas, °
3	0,00033	0,00033	83,15
5	0,00020	0,00020	83,15
7	0,00014	0,00014	83,15
10	0,00010	0,00010	83,15

### 1.6.3. Įprasti komutacinių gedimų identifikavimai

Kadangi dauguma komutacijos gedimų įvyksta dėl įtampos kritimo, kurį sukelia kintamosios srovės sistemos gedimai, siekiant ištirti komutacijos gedimus, sudaromos komutacinių gedimų valdymo sistemos.

Įprastai, siekiant išvengti komutacijos sutrikimų dėl kintamosios srovės gedimų ir kitų sistemos trikdžių, dėl kurių sumažėja kintamosios srovės įtampa, naudojama komutacinio gėdimo prognozės funkcija. Šią funkciją sudaro dvi lygiagrečios dalys, t. y. nulinės sekos aptikimas ir alfa-beta aptikimas [28]. Pirmoji dalis pagrįsta nulinės sekos aptikimu, kad būtų galima nustatyti, ar įvyko nesimetrinių (nesubalansuotų) gedimų, o antroji dalis pagrįsta kintamosios srovės įtampų  $\alpha\beta$  transformacija, kuria siekiama nustatyti simetrinių gedimų atsiradimą.

Taip pat, komutacijų gedimus galima nustatyti naudojant komutacijos gedimo aptikimo metodą. Tai veikia tada, kai prognozuojančiajam įrenginiui nepavyko išvengti komutacijos gedimo. Komutacijos gedimas aptinkamas lyginant nuolatinę srovę su kintamąja srove transformatoriaus vožtuvo pusėje. Jei įvyksta komutacijos sutrikimas, DC srovė padidėja, o AC srovė sumažėja. [28]

17-tame paveikslėlyje pavaizduotas HVDC tinkluose dažnai naudojamas CFPREV metodas (angl. Commutation Failure Prevention Control Module). Pagrindinis šio metodo principas yra nulinės sekos įtampos ir  $abc-\alpha\beta$  transformacijos panaudojimas atitinkamai vienfaziams ir trifaziams gedimams aptikti.

Įvykus vienfaziams gedimams, pavaizduotose trifazėse inverterio šynos įtampose  $U_a$ ,  $U_b$  ir  $U_c$  paprastai būna nulinės sekos įtampa  $U_0$ . Ši įtampa apskaičiuojama kaip  $U_a$ ,  $U_b$  ir  $U_c$  sumų absoliutinė vertė pagal formulę (8).

$$U_0 = |U_a + U_b + U_c| \quad (8)$$

Jei  $U_0$  tampa didesnė už iš anksto nustatytą slenkstinę vertę, reiškias įvyko vienfazis gedimas [29].

Įvykus trifaziams gedimams,  $abc-\alpha\beta$  transformacija iš tikrųjų atliekama transformuojant  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$   $abc$  plokštumoje į jų ekvivalentinį sukimosi vektorių  $U_{\alpha\beta}$   $\alpha\beta$  plokštumoje. atitinkamai  $U_\alpha$  ir  $U_\beta$ ,  $U_\alpha$  ir  $U_\beta$  galima išreikšti taip:

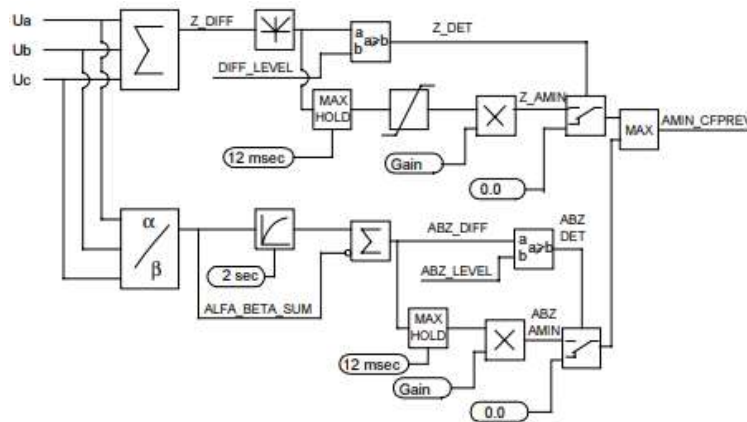
$$U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}(U_b + U_c) \quad (9)$$

$$U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c) \quad (10)$$

Toliau  $U_{\alpha\beta}$  dydį galima apskaičiuoti pagal (11) formulę:

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \quad (11)$$

Trifazio gedimo metu  $U_{\alpha\beta}$  turėtų mažėti. Dėl to  $U_{\alpha\beta}$  skirtumas tam tikrame laiko tarpe gali būti naudojamas aptikti trifazius komutacinius gedimus.



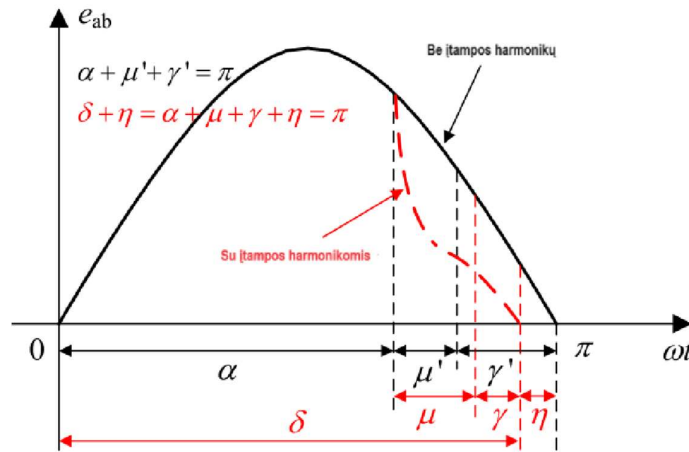
17 pav. CFPREV metodo blokinė schema

Svarbu atkreipti dėmesį, kad nors ir šitas metodas iš esmės gali aptikti komutacinius gedimus prieš jiems prasidedant, tačiau tikslumas teoriškai yra akivaizdžiai ribotas. Taip yra todėl, kad šiame metode nepakankamai atsižvelgta į įtampos harmonikas keitiklio šynose [30]. Šį metodą naudosime palyginimui su mūsų eksperimentiniu modeliu.

#### 1.6.4. Komutacinių gedimų aptikimas naudojant įtampos harmonikas

Įtampos harmonikos keitiklių šynose gali sukelti komutacinius gedimus daugiafazėse LCC-HVDC sistemose, įprastuose komutacinio gedimo aptikimo metoduose ir valdymo strategijose į jas nėra pakankamai atsižvelgta. Dėl to gedimų aptikimo tikslumas ir valdymo efektyvumas akivaizdžiai ribotas. Atsižvelgiant į šias aplinkybes, sudaryti šių gedimų valdymo strategiją, atsižvelgiant į įtampos harmonikas daugiafazėse LCC-HVDC sistemose [31].

Svarbu įsivertinti, kad žemesnės eilės harmoninės įtampos (ypač antros ir trečios eilės), kai jų vidutinė kvadratinė vertė yra tokia pati, keitikliuose paprastai sukelia mažesnę komutacijos atsargą nei aukštesnės eilės įtampos. Tai kaip tik buvo teoriškai išanalizuota pagal komutacijos įtampos-laiko srities metodą, naudojamą komutacinių gedimų vertinimui [32]. Be to, inverterio pereinamųjų charakteristikų teorinė analizė rodo, kad ir antros, ir trečios eilės harmoninių įtampų turinys yra didesnis nei aukštesnės eilės [33]. Įtampos harmonikos įtaką komutacijos procesui atvaizduojama 18-tame paveikslėlyje.



18 pav. Linijos įtampos harmonikų įtaka komutacijos procesui [33]

Atsižvelgiant į šias aplinkybes, galime pasiremti mokslinėmis analizėmis ir susidaryti žadinimo  $\alpha$  ir komutacijos  $\mu$  persidengimo kampų skaičiavimo formulę [34]:

$$\sqrt{2}X_C I_d = U[\cos(\alpha + \varphi) - \cos(\alpha + \mu + \varphi)] + \sum_{k=2}^3 \frac{U_{hk}}{k} [\cos(k\alpha + k\varphi) - \cos(k\alpha + k\mu + k\varphi)] \quad (12)$$

Čia  $\delta$  yra komutacinės įtampos bangos formos su įjungtomis įtampos harmonikomis nulinis kirtis. Kai  $U_{ab}$  lygus nuliui,  $\delta$  galima apytiksliai išspręsti iš šios lygties:

$$\sqrt{2}U \sin(\alpha + \varphi) + \sum_{k=2}^3 \sqrt{2}U_{hk} \sin(\alpha + \varphi) \quad (13)$$

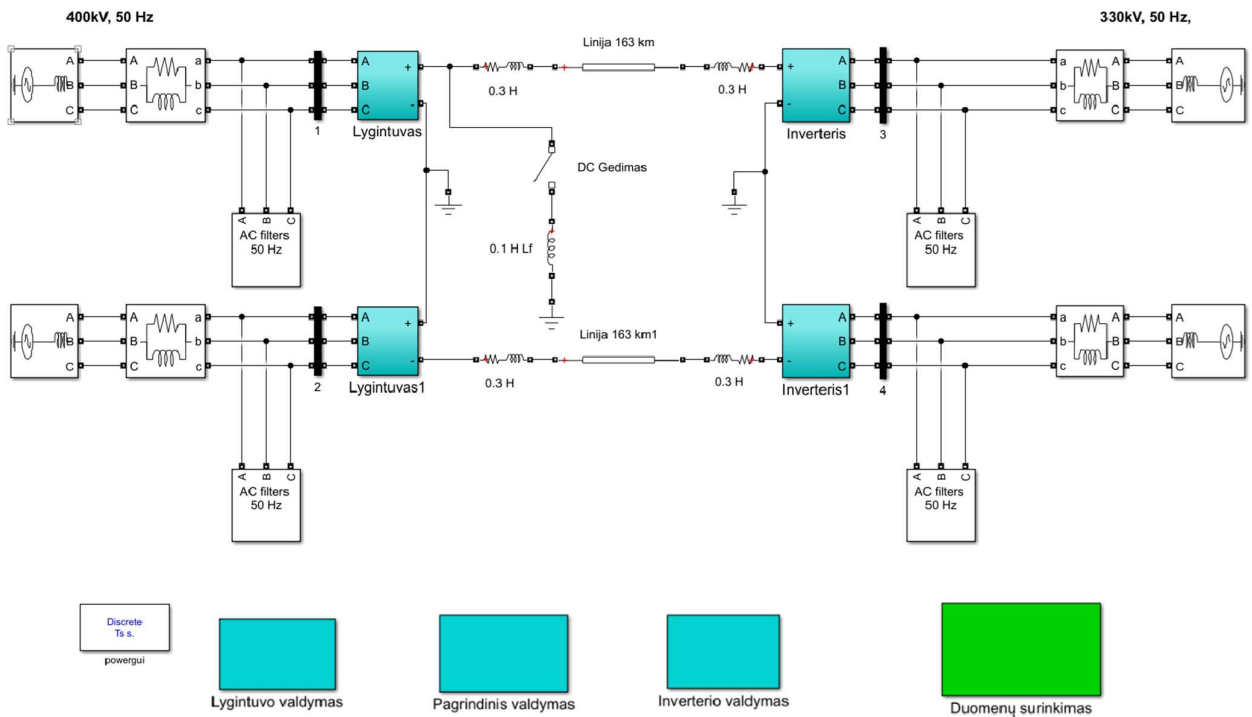
Kai žinomi  $I_d$ ,  $U$ ,  $\varphi$ ,  $U_{hk}$ ,  $\varphi_k$  ( $k = 2, 3$ ) ir  $\alpha$ ,  $\mu$  gali apskaičiuoti pagal (12). Išjungimo kampas, kuris reikalingas nustatyti galutinę prognozę, yra apibreziamas taip:

$$\gamma_{pred} = \delta - (\alpha + \mu) \quad (14)$$

## 2. Modeliavimas ir harmonikų analizė

### 2.1. Modelio sudarymas

Norint atlikti komutacijos prognozę ir įtampos harmonikų nustatymą naudosime programinės įrangos paketo MATLAB įrankį „Simulink“. Šis modelis, pavaizduotas 19-tame paveikslėlyje, sudarytas besiremiant Lietuvoje eksploatuojamą HVDC jungtį „LitPol Link,,.



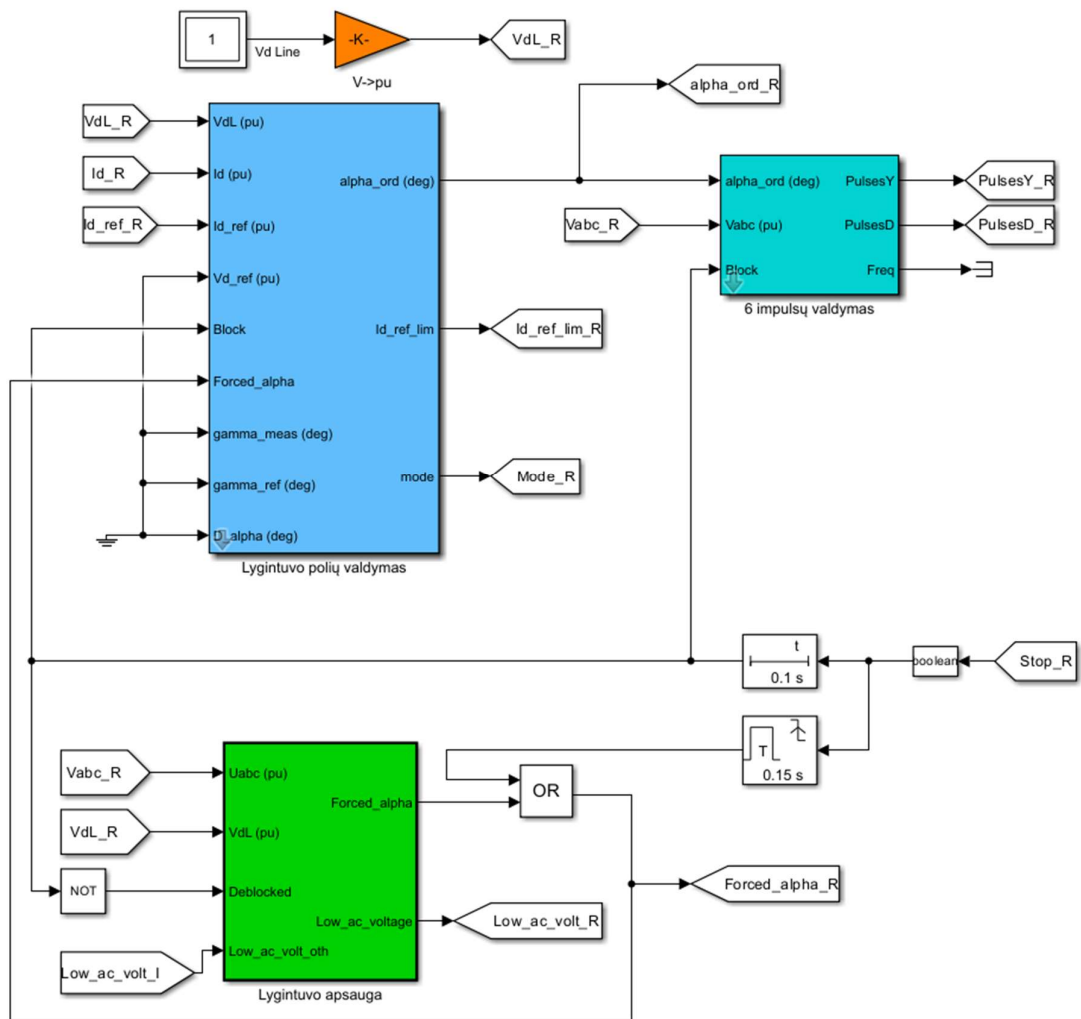
19 pav. MATLAB „Simulink“ HVDC tinklo modelis

Modeliuojamo HVDC intarpo lygintuvo pusėje nustatoma 400 kV tinklo įtampa, o už inverterio nustatoma 330 kV tinklo įtampa, kai dažnis sistemoje – 50 Hz. Taip pat, norint toliau atlikti analizę reikės šios „LitPol Link“ jungties pagrindinių parametų. Šie parametrai pateikti 3-ioje lentelėje.

3 lentelė. HVDC jungties „LitPol Link“ pagrindiniai parametrai

Parametras	400 kV pusė	330 kV pusė
Galia, MW		500
Minimali galia, MW		50
Nominali įtampa, kV		69,1
Maksimali įtampa, kV		70,3
Nominali srovė, kA		3,6
Trumpojo jungimo galia, MVA	1982	3756

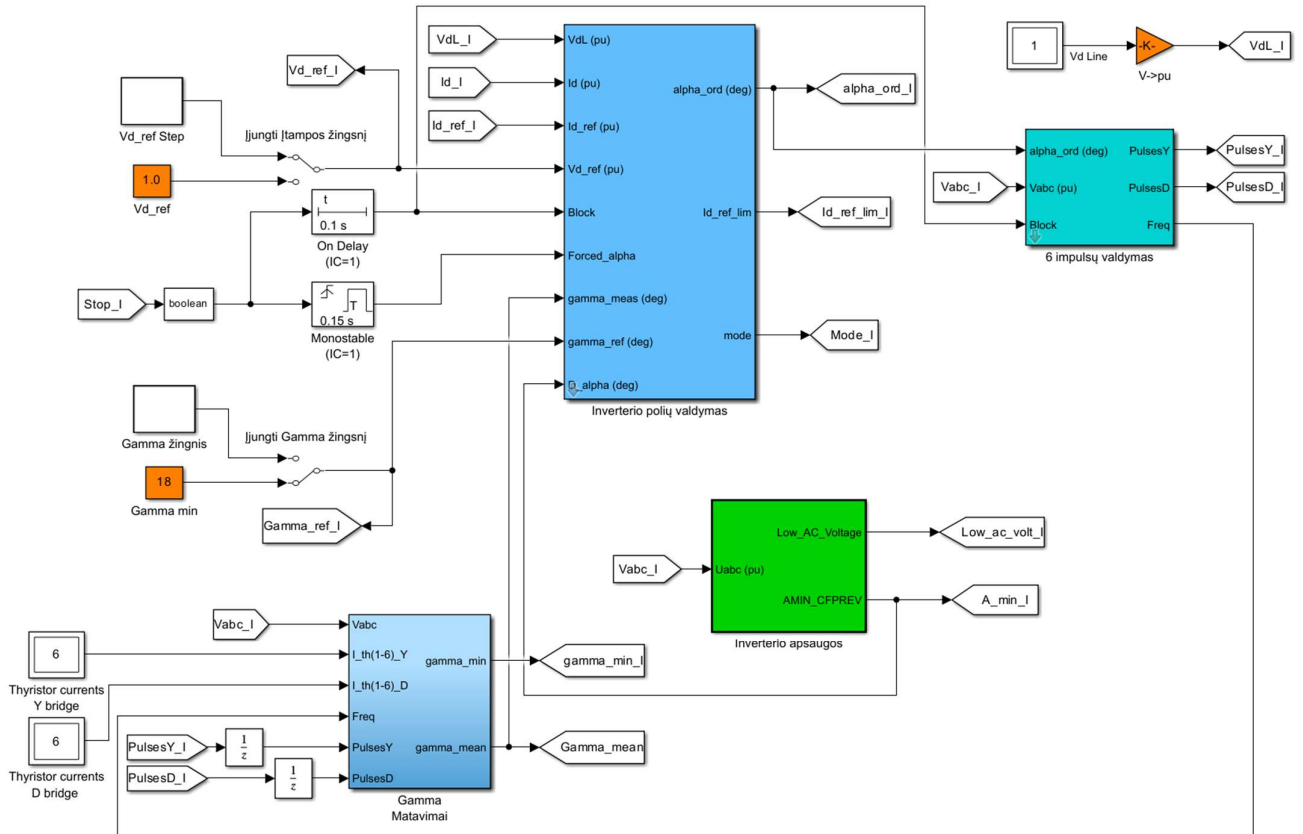
Įprastai LitPol Link jungtis yra back-to-back, tačiau šiame tyrime įtakos didžiulės gautos harmonikos nepadarys todėl paprasčiau sudarytame modelyje rezultatai nepakis ženkliai, nagrinėsime tik tą atvejį kai elektros energija tiekama iš 400 kV įtampos sistemos į – 330 kV, kurios galia yra 500 MW



20 pav. Sumodeliuoto HVDC tinklo lygintuvo valdymo blokas

Sistemos blokuose „Lygintuvo valdymas“ ir „Inverterio valdymas“ (atvaizduoti 20 ir 21 paveikslėliuose) yra sudaryti iš nuosekliai sujungtų 6 pulsacijų tiristorinių tipo keitiklių. Kadangi yra po du lygintuvus ir du inverterius, taip gauname mums reikiama 12 pulsacijų keitiklį. Čia galima reguliuoti tiristorių atsidarymo ir užsidarymo kampus, pulsacijos plotį ir apsaugą. Bloke „Pagrindinis valdymas“ yra skirtas valdyti HVDC sistemos paleidimą ir stabdymą, keičiant darbo režimo ir stabdymo parametrus.

Atsidarius sistemos blokus „Lygintuvus“ ar „Inverteris“ matomi po du 6 pulsacijų nuosekliai sujungtus tiristorinio tipo keitiklius. Taip gaunami 12 pulsacijų keitikliai. Lygintuvo ir keitiklio darbo režimo nustatymai keičiami valdymo blokuose.



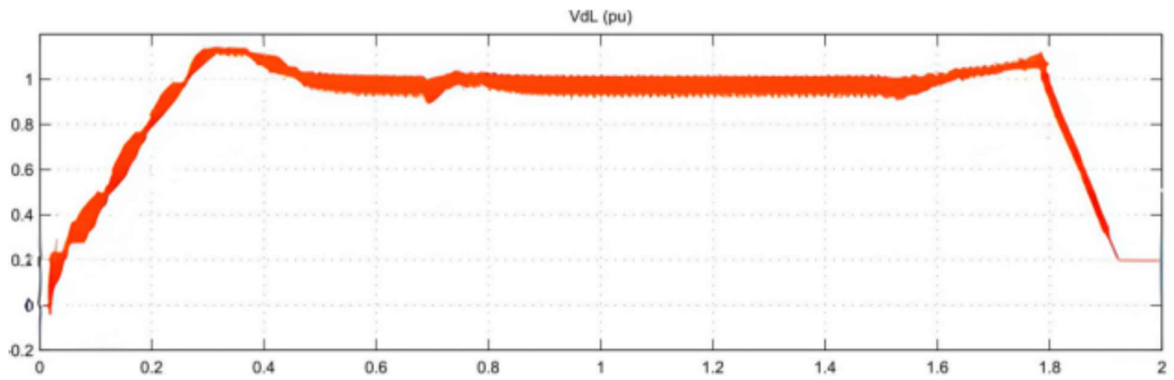
**21 pav.** Sumodeliuoto HVDC tinklo inverterio valdymo blokas

Čia galima keisti tiristorių atsidarymo kampo nustatymus, pulsacijos plotį, lygintuvo ir inverterio apsaugų parametrus. Pagrindinio valdymo bloke keičiami visos HVDC sistemos paleidimo ir stabdymo laikai, užsikrovimo iki darbinio režimo ir stabdymo parametrai.

Abejose DC linijos pusėse, iškart už lygintuvo ir keitiklio sumontuoti po 3mH lyginimo reaktoriai. Šie reaktoriai reikalingi iš lygintuvo išėjusiai pulsuojančiai srovei lyginti. Atstumas tarp lygintuvo ir inverterio – 163 km

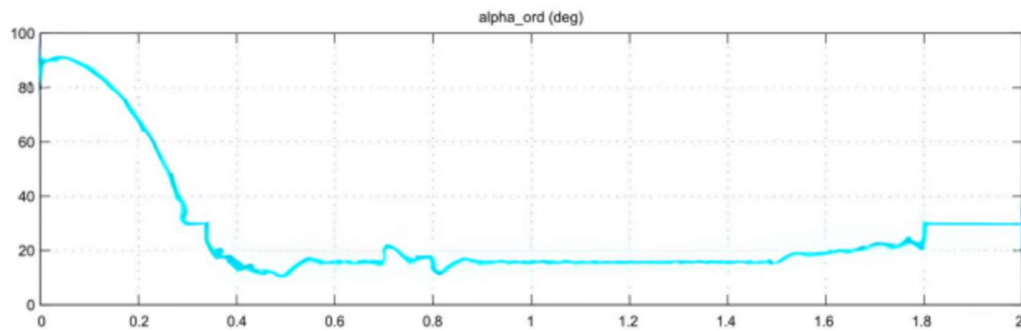
## 2.2. Harmonikų gavimas pagal FFT

Paleidžiame simuliacija nuo laiko momento 0,2 s. Įtampa tuo metu pasiekia nustatytą nominalią vertę, kuri yra 0,3 s.v., matuojama santykiniais vienetais. Susidaro stabilus darbo režimas ir lygintuve nusistovi tiristorių atsidarymo kampas,  $\alpha = 15^\circ$ . Įtampos priklausomybę nuo laiko galima pamatyti 22-tame paveikslėlyje.



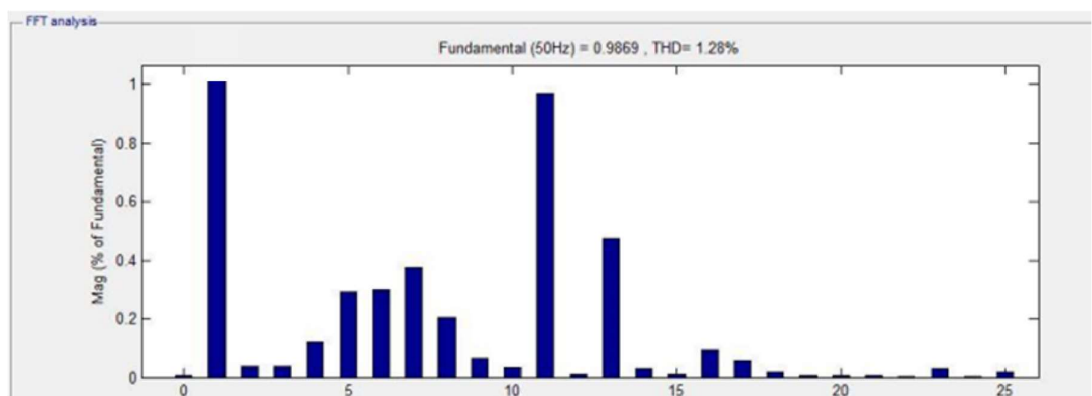
21 pav. Modeliuojamo nuolatinės srovės keitiklio įtampos priklausomybė nuo laiko.

Iš priklausomybės galime matyti, jog keitiklių valdymo blokas užtiko nestabilų darbo režimą, todėl, automatiškai yra keičiami tiristorių atsidarymo kampai. Taip yra siekiama išlaikyti nominalią įtampą. Laiko momentu 0,8 s, galime pastebėti, jog nusistovi stabilus darbo režimas ir tiristorių atsidarymo kampas yra arti  $15^\circ$ .



22 pav. Modeliuojamo HVDC keitiklio lygintuvo tiristorių atsidarymo kampo  $\alpha$  priklausomybė nuo laiko, stabiliu darbo režimo metu

Toliau, pagal anksčiau aptartą sparčiąją Furjė transformaciją gauname įtampos signalus, šie signalai išskaidomi taip, jog yra matomi visi harmonikos eilių dydžiai. Harmonikų amplitudžių išsidėstymas pateikiamas 23-tame paveikslėlyje.



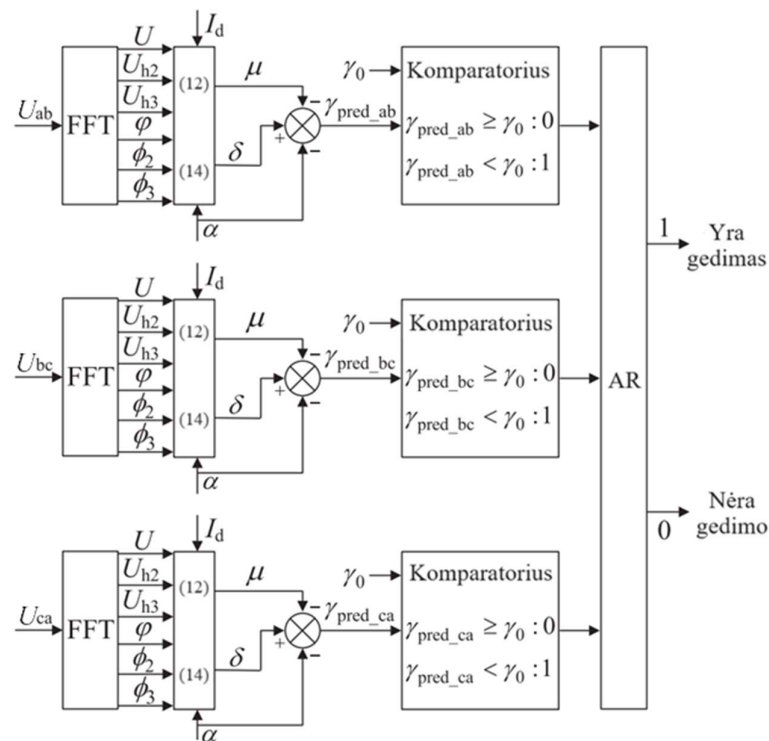
23 pav. Modeliuoto tinklo įtampos harmonikų išsidėstymas, kai  $L_f = 0,1$  H



Tolimesniems tyrimams bus svarbiausios žemiausios eilės harmonikos (2 ir 3), nes bus reikalingos komutaciniams gedimams aptikti.

### 2.3. Komutacinių gedimų aptikimo schemos sudarymas

Kai prognozuojamas įjungimo kampas  $\gamma_{\text{pred}}$  tampa mažesnis už ribinį išjungimo kampą  $\gamma_0$ , reikalingas sėkmingai komutacijai, įvyksta komutacinis gedimas [35]. Kad būtų aiškiau, MATLAB „Simulink“ platformoje sudaroma eksperimentinė komutacinių gedimų aptikimo metodo schema ir pateikiama 24-tame paveikslėlyje.



24 pav. Eksperimentinio komutacinių gedimų aptikimo metodo blokinė schema

Pagal blokinę schemą šio metodo įgyvendinimo procedūra apibendrinama taip:

- 1) Iš srauto duomenų gaunamos trys komutacines įtampos ( $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  ir  $U_{ca}$ ),  $I_d$  ir  $\alpha$ ; tada apskaičiuojamos  $U$ ,  $\phi$ ,  $U_{hk}$ ,  $\phi_k$  ( $k = 2, 3$ ). Išgaunamos komutacines įtampos naudojant spačiąją Furjė transformaciją.
- 2) Apskaičiuojamos  $\mu$  ir  $\delta$  kiekvieno tiristorinio vožtuvui, esančiam trijų fazių komutaciniuose tiltuose, atitinkamai pagal (12) ir (13) formules. Toliau, apskaičiuojamas  $\gamma_{\text{pred}}$  kiekvienam tiristoriniam vožtuvui, esant dviejoms komutacinėms įtampoms, naudodami (14) formulę ( $\gamma_{\text{pred\_ab}}$ ,  $\gamma_{\text{pred\_bc}}$  ir  $\gamma_{\text{pred\_ca}}$ ).
- 3) Palyginami  $\gamma_{\text{pred\_ab}}$ ,  $\gamma_{\text{pred\_bc}}$  ir  $\gamma_{\text{pred\_ca}}$  su  $\gamma_0$ , kad nustatytumėte ar tam tikrame tiristoriniame vožtuve įvyks gedimas bet kurios fazės komutaciniame tiltelyje, ar ne. Jei bet kuris iš pirmiau minėtų prognozuojamų išjungimo kampų yra mažesnis už  $\gamma_0$ , gedimas yra turėtų įvykti inverteryje.

### 3. Tyrimų analizė ir rezultatai

Siekiant patvirtinti komutacinių gedimų aptikimo metodą, šio atvejo tyrimui naudojama MATLAB „Simulink“ programoje sukurta LCC-HVDC sistema su dviem maitinimo šaltiniais, kurios atitinkama principinė schema yra pateikta 19 pav.

Pagrindiniai parametrai yra imti iš 3 lentelės duomenų, o visi kiti sistemos parametrai yra kintamieji, kurie bus išreikškiami santykiniais vienetais. Kintamosios srovės posistemių trumpojo jungimo koeficientas (SCR) yra atitinkamai 3 (t. y.  $SCR_1 = z_1 - 1 = 3$ ;  $SCR_2 = z_2 - 1 = 3$ , kur  $z_1$  ir  $z_2$  yra atitinkami ekvivalentinės varžos dydžiai modelyje atvaizduojami, kaip lygintuvo lyginimo reaktoriai).

Kiti sistemos parametrai ir kintamieji vardiniai parametrai paimti iš 2021 m. „LitPol Link“ keitiklio elektros perdavimo linijų apkrovų duomenų.

#### 3.1. Komutacinių gedimų aptikimo sistemos tyrimas

Tyrimas atliekamas stebint komutacinius gedimus vienos fazės sistemoje bei trijų fazių sistemoje. Modelyje gedimas yra sukuriamas prie 400 kV keitiklio šynos ir jo stiprumas yra reguliuojamas keičiant įžeminimo induktyvumą,  $L_f$  [36]. Ar esant kiekvienam pasirinktam įžeminimo induktyvumui įvyksta komutacinis gedimas, ar ne, galima spręsti taikant pirmiau minėtus du metodus ir analizuojant modeliavimo rezultatus. Tokiu būdu kiekvienu gedimo laiko momentu galima nustatyti  $L_f$  intervalą, rodantį gedimo atsiradimą.

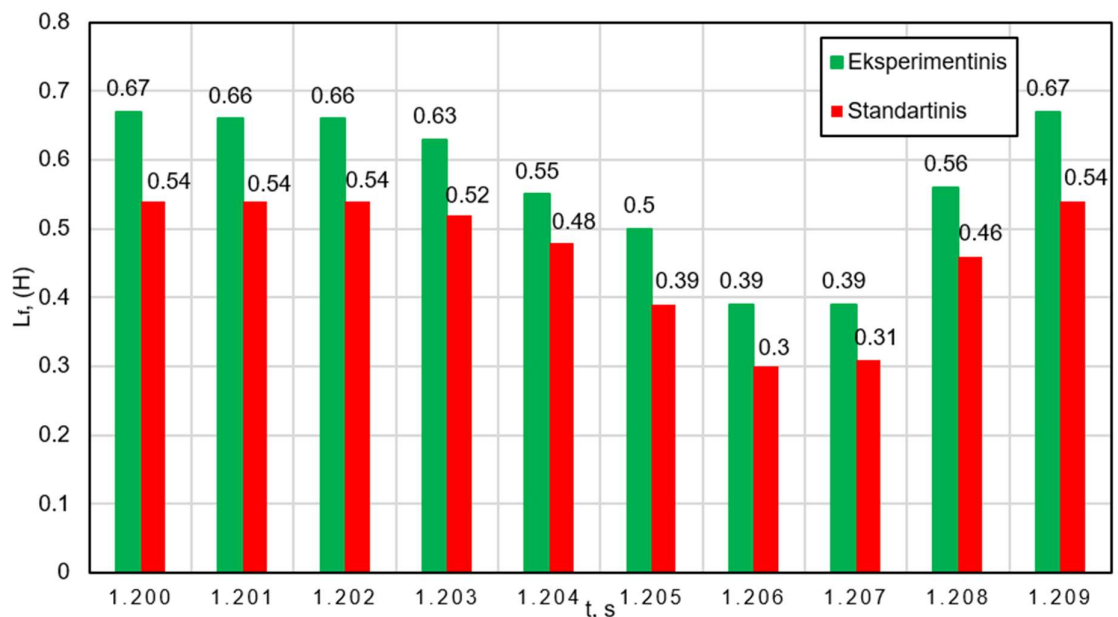
Kiekvienam gedimo laiko momentui modeliavimas atliekamas nuosekliai, didant įžeminimo induktyvumą palaipsniui iki 1,0 H, 0,1 H žingsniu. Taip pat, teoriškai yra apibrėžta, jog didesnė  $L_f$  vertė nurodo, kad komutacinis gedimas sistemoje yra smulkesnis [37]. Stebėsimė laiko tarpą tarp 1,200 s iki 1,209, nes 1,200 s įvyksta komutacinis gedimas, laiko žingsnis yra 0.001 s.

Eksperimentinio metodo gauti duomenys vėliau yra lyginami su ankščiau minėtu standartinių HVDC komutacinių gedimų aptikimo metodu. Gauti eksperimentinio metodo tyrimų rezultatai atvaizduojami 25 ir 26 grafikuose ir 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Modelio eksperimentinio ir standartinio metodų komutacinių gedimų aptikimo rezultatai 400 kV keitiklio pusėje.

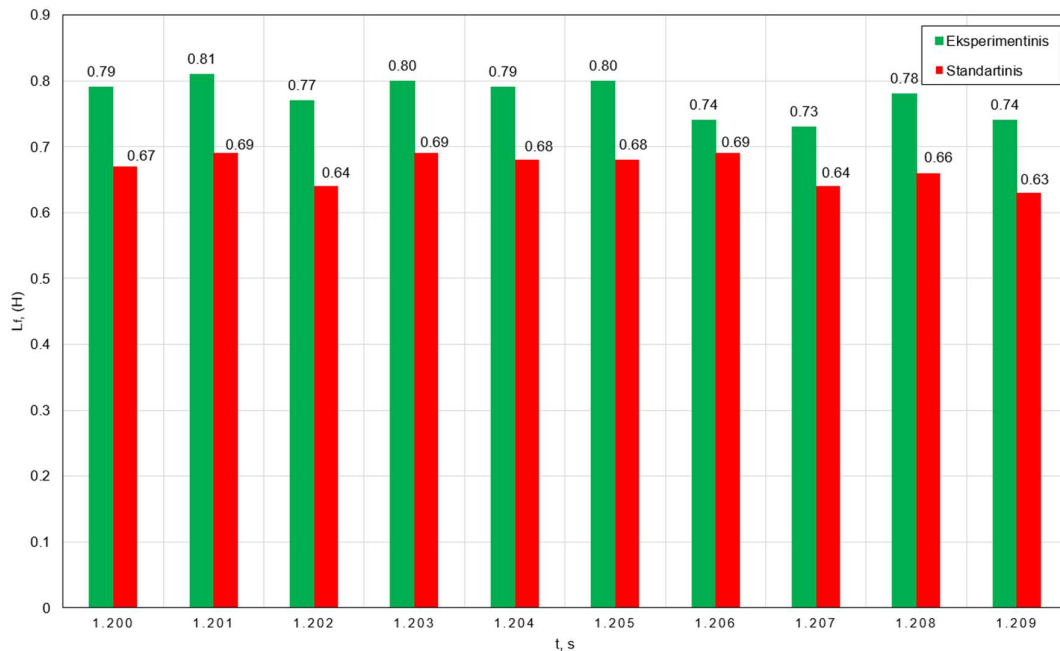
	t, s	Eksperimentinio metodo	Standartinio metodo
		$L_f$ , H	
Vienfaziai gedimai	1,200	0,67	0,54
	1,201	0,66	0,54
	1,202	0,66	0,54
	1,203	0,63	0,52
	1,204	0,55	0,48
	1,205	0,50	0,39
	1,206	0,39	0,30
	1,207	0,39	0,31
	1,208	0,56	0,46
	1,209	0,67	0,54

Trifaziai gedimai	1,200	0,79	0,67
	1,201	0,81	0,69
	1,202	0,77	0,64
	1,203	0,80	0,69
	1,204	0,79	0,68
	1,205	0,80	0,68
	1,206	0,74	0,69
	1,207	0,73	0,64
	1,208	0,78	0,66
	1,209	0,74	0,63



**25 pav.** Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra vienfaziai 400 kV keitiklio pusėje

Gautus rezultatus išanalizavus galime pirmiausia matyti, kad kai vienfazis gedimas įvyksta  $t = 1,200$  s, eksperimentiniu metodu nustatytas ribinis žemėjimo induktyvumas  $L_{fc}$  yra 0,67 H. Tai reiškia, kad kai  $L_f$  yra mažesnis nei 0,67 H, keitiklyje pastebimas komutacinis gedimas. Tačiau, kai  $L_f$  didesnis nei 0,67 H, komutacinis gedimas nepasireiškia. [37]



**26 pav.** Gautų eksperimentinio aptikimo metodo rezultatų palyginimas su standartinio aptikimo metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra trifaziai 400 kV keitiklio pusėje

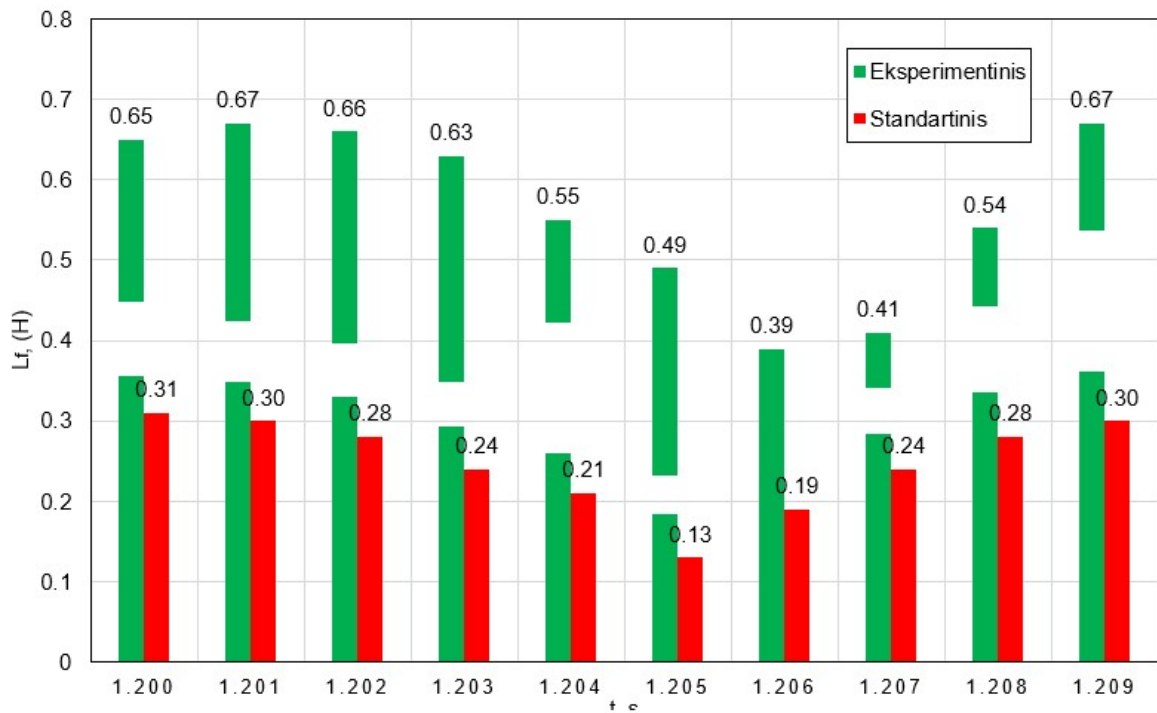
Tuo tarpu, standartiniu metodu nustatytas  $L_{fc}$  yra 0,54 H. Absoliuti paklaida tarp abiejų metodų yra 0,13 H. Besiremiant mokslinio tyrimo skaičiavimais, 400 kV keitiklio sistemoje teorinis  $L_{fc}$  turėtų būti maždaug 0,62 H [38]. Galima matyti, kad absoliučioji paklaida eksperimentiniame metode yra mažesnė, 0,05 H (kur standartiniame metode yra 0,08 H). Tai reiškia, kad gauti rezultatai eksperimentinio metodo yra su mažesne paklaida [39]. Analogišką situaciją galime pamatyti ir trifazio gedimo tyrime (26 pav.), kur  $L_{fc}$  vertės yra didesnės.

Tačiau, 330 kV keitiklio pusėje galime pamatyti įdomesnius rezultatus (27, 28 pav. ir 5 lentelė).

**5 lentelė.** Modelio eksperimentinio ir standartinio metodų komutacinių gedimų aptikimo rezultatai 330 kV keitiklio pusėje.

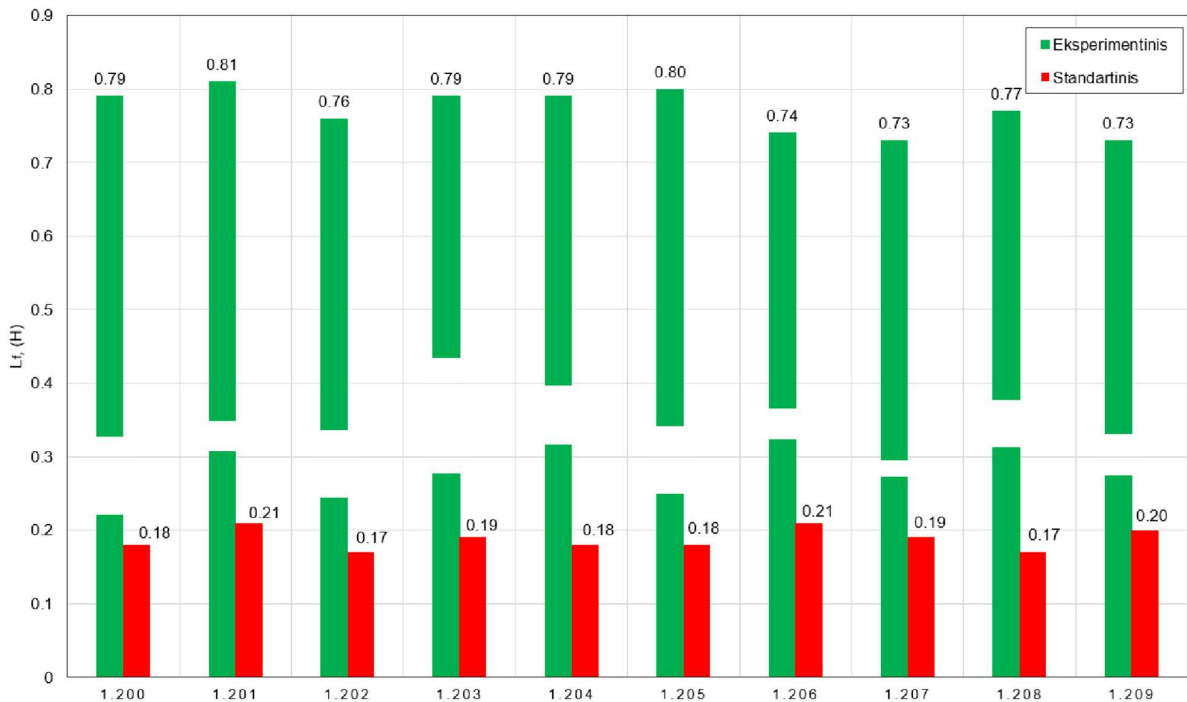
	t, s	Eksperimentinio metodo	Standartinio metodo
		$L_{fc}, H$	
Vienfaziai gedimai	1,200	0,65	0,31
	1,201	0,67	0,30
	1,202	0,66	0,28
	1,203	0,63	0,24
	1,204	0,55	0,21
	1,205	0,49	0,13
	1,206	0,39	0,19
	1,207	0,41	0,24
	1,208	0,54	0,28
	1,209	0,67	0,30

Trifaziai gedimai	1,200	0,79	0,18
	1,201	0,81	0,21
	1,202	0,76	0,17
	1,203	0,79	0,19
	1,204	0,79	0,18
	1,205	0,80	0,18
	1,206	0,74	0,21
	1,207	0,73	0,19
	1,208	0,77	0,17
	1,209	0,73	0,20



**27 pav.** Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra vienfaziai 330 kV keitiklio pusėje

330 kV keitiklio pusėje matome, kad susidaręs komutacinis gedimas palaipsniui didėja (tai rodo mažėjantis  $L_f$ ). Tai reiškia, kad keitiklyje komutacinis gedimas pirmiausia atsiranda, kai  $L_{fc2} < L_f < L_{fc1}$ , tada išnyksta, kuomet esame  $L_{fc3} < L_f < L_{fc2}$  intervale. Galiausiai atsiranda vėl, kai  $L_f < L_{fc3}$ .



**28 pav.** Gautų eksperimentinio metodo rezultatų palyginimas su standartinio metodo rezultatais, kai komutaciniai gedimai yra trifaziai 330 kV keitiklio pusėje

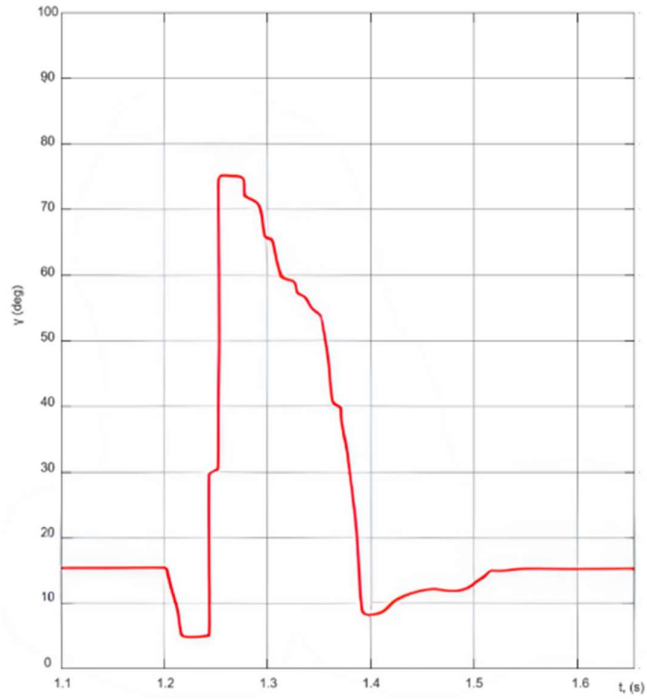
Ši neįprastą gedimų rezultatą visų pirma lemia sudėtinga abiejų keitiklių harmoninė sąveika, atsirandanti dėl komutacinių gedimų 400 kV keitiklio dalyje [38].

Iš grafikų matome, kad keitiklio komutaciniai gedimai, atsirandantis  $L_f$  intervale nuo  $L_{fc2}$  iki  $L_{fc1}$ , visų pirma atsiranda dėl įtampos harmonikų, standartiniu metodu nepavyksta nustatyti  $L_{fc1}$  ir  $L_{fc2}$ , nes šiuo metodu nėra pilnai atsižvelgiama į įtampos harmonikas. Reiškias platesnį spektrą gedimų galime užtikti naudojant eksperimentinį metodą.

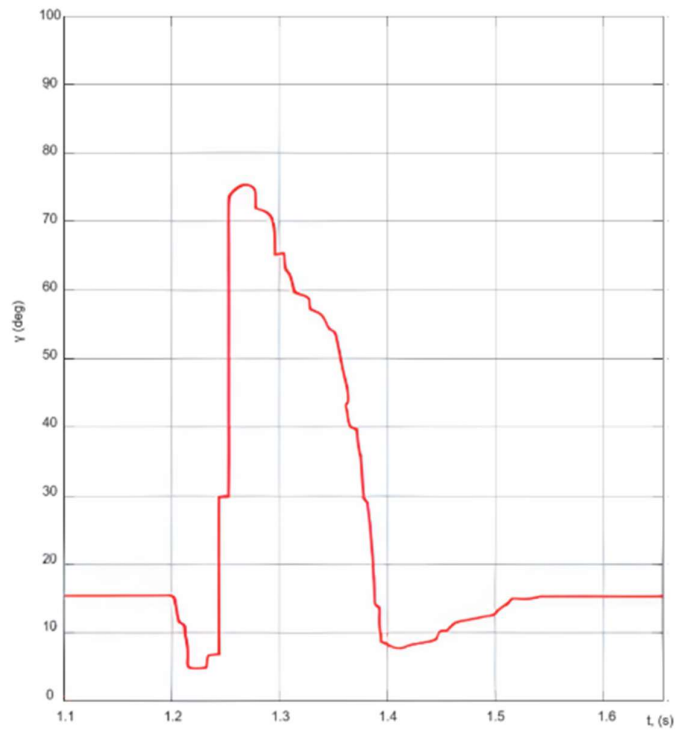
### 3.2. Modelio sistemos reakcijų komutaciniams gedimams palyginimas

Dėl komutacinių gedimų smarkiai padidėja DC srovė 400 kV keitiklio dalyje. Taigi egzistuoja didelė trifazių kintamųjų srovių, asimetrija, kuri, naudojant FFT, daugiausia išskaidoma į žemesnės eilės harmoninių srovių komponentus (ypač antros ir trečios eilės) [39].

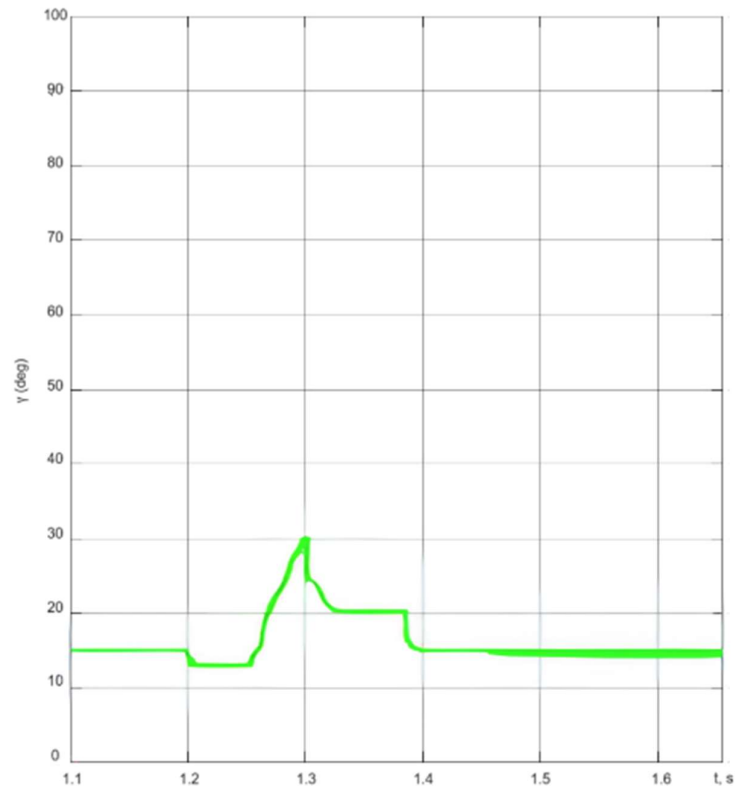
Norint pamatyti ar mūsų sudarytas Matlab „Simulink“ modelis yra iš tikrųjų kokybiškesnis ir tikslesnis reikia taip pat palyginti abiejų metodų sistemų reagavimą gedimams. Taip padarysime, kai su modeliu atliksime FFT analizę, prie skirtingų įžeminimo induktyvumo verčių (nuo 0,1 H iki 0,6 H, žingsniu 0,1 H). Atlikus analizę turėtume gauti maksimalias antros ir trečios eilės harmonikas, kurias vėliau naudosime nustatant ar įvyko gedimas abiejuose keitiklio pusėse ar ne. Kadangi įdomesni rezultatai yra matomi 330 kV keitiklio dalyje grafiškai atvaizduosime abiejų metodų išjungimo kampo  $\gamma$  priklausomybę nuo laiko.



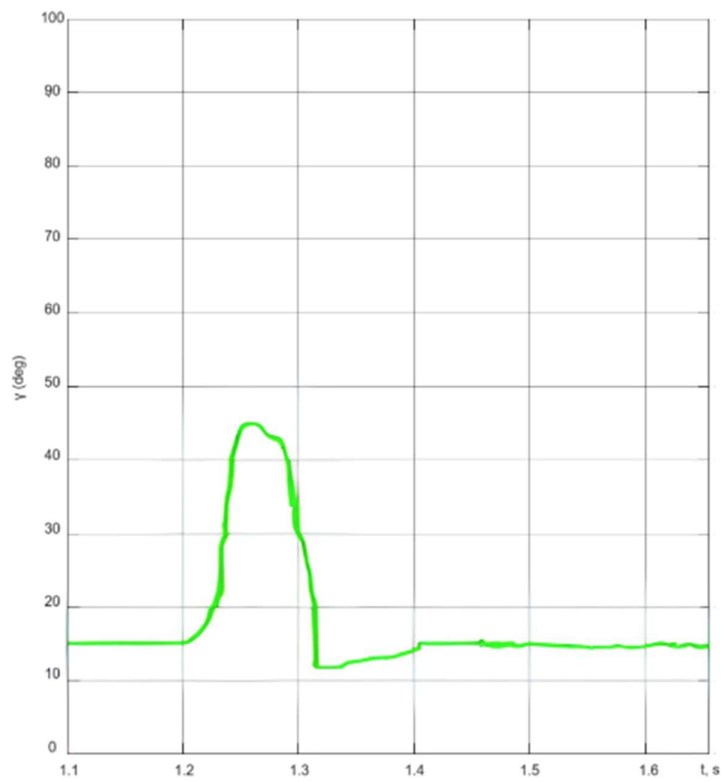
**29 pav.** Standartinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 400 kV dalyje, kai  $L_f = 0,60$  H



**30 pav.** Standartinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 330 kV dalyje, kai  $L_f = 0,50$  H



**31 pav.** Eksperimentinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 400 kV dalyje, kai  $L_f = 0,60$  H



**32 pav.** Eksperimentinio metodo sistemos atsako gedimui grafikas 330 kV dalyje, kai  $L_f = 0,50$  H



Aiškumo dėlei, 29-31 pav. imituojamas 100 ms trifazis gedimas, kurio  $L_f = 0,6$  H, ir atitinkami sistemos atsakai. Kaip matyti iš  $\gamma$  grafikų, taikant eksperimentinį metodą (31 pav.) 400 kV ir 330 kV keitiklio dalių komutaciniai gedimai yra veiksmingai slopinami, nes  $\gamma$  išlieka didesnis už  $\gamma_0$  viso kintamosios srovės gedimo pereinamojo proceso metu. Iš  $\gamma$  grafikų matyti, kad gedimas ir jo slopinimas pasireiškia sekundžių intervale 1,2 ir 1,3.

Pasiremiant 24 pav. modelio bloko prognozėmis ir gautais modeliavimo rezultatais, sudaroma 6 ir 7 lentelės nurodančios tyrimo antros ir trečios harmonikos įtaką komutacinių gedimų aptikimui.

**6 lentelė.** Modelio antros ir trečios harmonikos įtaka komutacinių gedimų aptikimui (vienfaziai gedimai).

$L_f$ , H		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
400 kV dalies	$U_{h2}$ s.v.	0,007	0,010	0,013	0,016	0,024	0,028
	$U_{h3}$ s.v.	0,005	0,008	0,010	0,013	0,019	0,025
	Standartiniu metodu	1	1	1	1	1	0
	Eksperimentiniu metodu	1	1	1	1	1	1
330 kV dalies	$U_{h2}$ s.v.	0,012	0,015	0,030	0,033	0,045	0,059
	$U_{h3}$ s.v.	0,009	0,011	0,028	0,031	0,030	0,051
	Standartiniu metodu	1	1	1	0	0	0
	Eksperimentiniu metodu	1	1	1	0	1	1

**7 lentelė.** Modelio antros ir trečios harmonikos įtaka komutacinių gedimų aptikimui (trifaziai gedimai).

$L_f$ , H		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
400 kV dalies	$U_{h2}$ s.v.	0,011	0,015	0,017	0,025	0,029	0,038
	$U_{h3}$ s.v.	0,010	0,011	0,016	0,020	0,027	0,034
	Standartiniu metodu	1	1	1	1	1	0
	Eksperimentiniu metodu	1	1	1	1	1	1
330 kV dalies	$U_{h2}$ s.v.	0,020	0,033	0,052	0,060	0,076	0,097
	$U_{h3}$ s.v.	0,018	0,028	0,031	0,034	0,061	0,080
	Standartiniu metodu	1	1	1	0	0	0
	Eksperimentiniu metodu	1	1	1	0	1	1

Pastaba, kad keitiklio 400 kV ir 330 kV dalių analizėje įrašas „1“ reiškia, kad įvyko komutacinis gedimas, o „0“ reiškia, kad komutacinio gedimo nėra.

Kaip matome iš lentelių, didėjant  $L_f$ , didėja antros ir trečios eilės harmoninių įtampų lygiai. Taip yra todėl, kad kuo didesnis  $L_f$ , tuo labiau didėja antrosios ir trečiosios eilės harmonikų vertės abiejuose keitiklio dalyse [40]. Taip pat, matome, kad antros ir trečios eilės įtampos harmonikos yra perduodamos iš 400 kV keitiklio dalies į 330 kV.

## Išvados

1. HVDC perdavimo sistemos plėtros analizė, parodė, jog šio tipo tinklai yra ekonomiškėsi negu AC ir idealiausi taikant ilgo atstumo tinklams. Tačiau, dėl šalia sistemos prijungiamu įrenginių, sistemos stabilizavimas sudėtingesnis.
2. Atlikus HVDC LCC technologijų apžvalgą, išskirti skirtingų technologijų pagrindiniai privalumai. LCC technologija skiriasi tuom, kad 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 išplėtotą. Taip pat, Lietuvos „LitPol Link“ keitiklis naudoja HVDC LCC principus. Dėl šių rodiklių ir pasirinkome LCC technologijas atlikti tyrimą.
3. Išsiaiškinta, jog daugiafazėse LCC-HVDC keitiklių šnose gali įvykti komutaciniai gedimai dėl sistemoje egzistuojančių įtampos harmonikų, įprastuose komutacinio gedimo aptikimo metoduose ir valdymo strategijose į jas nėra pakankamai atsižvelgta. Todėl, galime teigti, jog yra poreikis ir galimybė komutacinius gedimus kokybiškiau nustatyti naudojant įtampos harmonikas.
4. Atlikus teorinę apžvalgą apie komutacinius gedimus, įsivertinome, kad žemesnės eilės harmoninės įtampos (ypač antros ir trečios eilės), kai jų vidutinė kvadratinė vertė yra tokia pati, inverteriuose paprastai sukelia mažesnę komutacijos atsargą nei aukštesnės eilės įtampos.
5. Furjės analizės metu, buvo išsiaiškinta, jog vykdant spektrinę analizę kompiuteriu, šiuo atveju skaičiuojant srovės ir įtampos THD, galima naudoti sparčiąją Furjė transformaciją. Šiuo būdu sumažinamas skaičiavimo operacijų kiekis, tačiau galutinis atsakymas lieka toks pat kaip ir taikant diskretinę Furjė transformaciją.
6. Iš gautų komutacinių gedimų prognozės rezultatų galime pastebėti, jog standartiniu CFPREV metodu, neįmanoma nustatyti komutacinių gedimų priimančioje dalyje keitiklio. Tai yra dėl to, jog standartinis metodas įtampos harmonikų stipriai nevertina. Eksperimentinis metodas 330 kV keitiklio pusėje aptiko du kartus daugiau gedimų.
7. Gauti rezultatai parodė, jog absoliuti paklaida tarp abiejų metodu yra apie 0,10-0,13 H, kur eksperimentiniai rezultatai gali aptikti didesnę kiekį gedimų dėl didesnio ribinio įžeminimo induktyvumo  $L_{fc}$ . Aišku, abu metodai tinka aptikti rimtus gedimus, aukštesnė  $L_{fc}$  vertė didina tikimybę aptikti ir mažesnio masto komutacinius gedimus.
8. Rezultatai patvirtino, jog didėjant  $L_f$ , didėja antros ir trečios eilės harmoninių įtampų lygiai. Taip yra todėl, kad kuo didesnis  $L_f$ , tuo labiau didėja antrosios ir trečiosios eilės harmonikų vertės abiejuose keitiklio dalyse.

## Literatūros sąrašas

1. Chan-Ki, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim, Seok-Jin Lee. HVDC Transmission; Power Conversion Applications in Power Systems [Žiūrėta 2023-04-20] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5681191>
2. Leonard L. Grigsby. Electric Power Generation, Transmission, and Distribution [Žiūrėta 2023-04-24] Prieiga per: [https://www.academia.edu/49047523/Electric\\_Power\\_Generation\\_Transmission\\_and\\_Distribution](https://www.academia.edu/49047523/Electric_Power_Generation_Transmission_and_Distribution)
3. U.S. Energy Information Administration. Assessing HVDC Transmission for Impacts of Non-Dispatchable Generation [Žiūrėta 2023-04-03] Prieiga per: <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/hvdc/assessment/pdf/transmission.pdf>
4. Oana Udrea, Gabriela Ungureanu, George C. Lazaroiu, Mihnea Costoiu. AC vs. HVDC Back to Back Interconnection cost benefit analysis [Žiūrėta 2023-04-17] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6842834>
5. Ruslan Ufa, Alexandr Gusev, Ahmed A. Zaki Diab, Aleksey Suvorov, Nikolay Ruban, Mikhail Andreev, Alisher Askarov, Vladimir Rudnik, Omer Abdalla, Ziad M. Ali, Ahmed Ibrahim, Raef Aboelsaud. Analysis of applications of back-to-back HVDC system in Tomsk electric power system [Žiūrėta 2023-05-10] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719303956>
6. Pingyang Sun, Felipe Arrano-Vargas, Harith Wickramasinghe, Georgios Konstantinou. Benchmark Models for HVDC Systems and DC-Grid Studies [Žiūrėta 2023-05-24] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/341844978\\_Benchmark\\_Models\\_for\\_HVDC\\_Systems\\_and\\_DC-Grid\\_Studies](https://www.researchgate.net/publication/341844978_Benchmark_Models_for_HVDC_Systems_and_DC-Grid_Studies)
7. Joaquim Monteiro, V. Fernao Pires, J. Fernando Silva, Sonia Pinto. Multilevel Bipolar Back-to-Back HVDC Transmission System Based on the Dual Inverter Converter Structure with Model Predictive Control [Žiūrėta 2023-06-03] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9968963>
8. Arunkumar Muthusamy. Selection of Dynamic performance Control Parameters for Classic HVDC in PSS/E [Žiūrėta 2023-05-30] Prieiga per: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/173969/173969.pdf>
9. NATO Energy Security, Justinas Juozaitis, Baltic States' Synchronisation with Continental European Network: Navigating the Hybrid Threat Landscape [Žiūrėta 2023-05-14] Prieiga per: [https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1\\_baltic-states-synchronization-with-continental-european-network-navigating-the-hybrid-threat-landscape.pdf](https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1_baltic-states-synchronization-with-continental-european-network-navigating-the-hybrid-threat-landscape.pdf)
10. Kundur P. Power system stability and control. [Žiūrėta 2023-05-14] Prieiga per: <http://powerunit-ju.com/wp-content/uploads/2018/01/Power-System-Stability-and-Control-by-Prabha-Kundur.pdf>
11. Anil Choubey, Rohit Gupta. VOLTAGE SOURCE CONVERTER BASED HVDC TRANSMISSION [Žiūrėta 2023-06-03] Prieiga per: <https://ijtre.com/wp-content/uploads/2021/11/2016040107.pdf>
12. Cuiqing Du, Math H. J. Bolen, Evert Anghelom, Ambra Sannino. A New Control Strategy of a VSC-HVDC System for High-Quality Supply of Industrial Plants [Žiūrėta 2023-06-01] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4302517>

13. Oluwafemi E. Oni, Innocent E. Davidson, Kamati N.I. Mbangula. A Review of LCC-HVDC and VSC-HVDC Technologies and Applications [Žiūrėta 2023-06-01] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7555677>
14. Jie Song. Analysis of Hybrid LCC-VSC HVDC Transmission Systems [Žiūrėta 2023-06-02] Prieiga per: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/120390/tfm-jie-song-final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
15. J. Bucciero, M. Terbrueggen. Interconnected power system dynamics tutorial. Third edition. [Žiūrėta 2023-05-12] Prieiga per: [https://relayman.org/temp/d/EPRI\\_Interconnected\\_Power\\_Systems\\_Dynamics\\_Tutorial\\_TR-107726-R1.pdf](https://relayman.org/temp/d/EPRI_Interconnected_Power_Systems_Dynamics_Tutorial_TR-107726-R1.pdf)
16. Shahil Shah, Jian Sun. HVDC transmission system architectures and control - A review [Žiūrėta 2023-05-14] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/260730717\\_HVDC\\_transmission\\_system\\_architectures\\_and\\_control\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/260730717_HVDC_transmission_system_architectures_and_control_-_A_review)
17. Wei Yao, Chang Liu, Jiakun Fang, Xiaomeng Ai. Probabilistic Analysis of Commutation Failure in LCC-HVDC System Considering the CFPREV and the Initial Fault Voltage Angle [Žiūrėta 2023-05-30] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/334070208\\_Probabilistic\\_Analysis\\_of\\_Commutation\\_Failure\\_in\\_LCC-HVDC\\_System\\_Considering\\_the\\_CFPREV\\_and\\_the\\_Initial\\_Fault\\_Voltage\\_Angle](https://www.researchgate.net/publication/334070208_Probabilistic_Analysis_of_Commutation_Failure_in_LCC-HVDC_System_Considering_the_CFPREV_and_the_Initial_Fault_Voltage_Angle)
18. Joao Felicio, Vendramini Ferreira, Jose Carlos Oliveira. UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS DE SEQUÊNCIA ZERO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS [Žiūrėta 2023-05-14] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/268355743\\_UMA\\_NOVA\\_ABORDAGEM\\_A\\_FILT\\_RAGEM\\_DE\\_HARMONICOS\\_DE\\_SEQUENCIA\\_ZERO\\_ATRAVES\\_DE\\_DISPOSITIVOS\\_ELETROMAGNETICOS](https://www.researchgate.net/publication/268355743_UMA_NOVA_ABORDAGEM_A_FILT_RAGEM_DE_HARMONICOS_DE_SEQUENCIA_ZERO_ATRAVES_DE_DISPOSITIVOS_ELETROMAGNETICOS)
19. Feng Wang, Tian-qi Liu, Xing-yuan Li. Decreasing the frequency of HVDC commutation failures caused by harmonics. [Žiūrėta 2023-06-04] Prieiga per: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-pel.2016.0230>
20. IEEE. Power System Harmonics: An Overview. [Žiūrėta 2023-05-30] Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/Power-System-Harmonics%3A-An-Overview-Harmonics/2268a25e1a707ee6931a879eb59278964c53429d>
21. S. F. Mekhamer, Almoataz Y Abdelaziz, Sherif Mohsen Ismael. Technical Comparison of Harmonic Mitigation Techniques for Industrial Electrical Power Systems. [Žiūrėta 2023-05-10] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/280841080\\_Technical\\_Comparison\\_of\\_Harmonic\\_Mitigation\\_Techniques\\_for\\_Industrial\\_Electrical\\_Power\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/280841080_Technical_Comparison_of_Harmonic_Mitigation_Techniques_for_Industrial_Electrical_Power_Systems)
22. Zia Hameed, Adnan Yousaf, Muhammad Rafay Khan Sial. Harmonics in Electrical Power Systems and how to remove them by using filters in ETAP [Žiūrėta 2023-04-03] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/313129662\\_Harmonics\\_in\\_Electrical\\_Power\\_Systems\\_and\\_how\\_to\\_remove\\_them\\_by\\_using\\_filters\\_in\\_ETAP](https://www.researchgate.net/publication/313129662_Harmonics_in_Electrical_Power_Systems_and_how_to_remove_them_by_using_filters_in_ETAP)
23. Jianquan Liao, Niancheng Zhou, Qianggang Wang. DC-side harmonic analysis and DC filter design in hybrid HVDC transmission systems [Žiūrėta 2023-05-14] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518330230>

24. Zidi Sis Ahmed., Khatir Mohammed, Hadjeri S., Karim-Fellah Mohammed. Study of Commutation Failures in an HVDC Inverter due to AC System Faults. [Žiūrėta 2023-06-01] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/272201790\\_Study\\_of\\_Commutation\\_Failures\\_in\\_an\\_HVDC\\_Inverter\\_due\\_to\\_AC\\_System\\_Faults](https://www.researchgate.net/publication/272201790_Study_of_Commutation_Failures_in_an_HVDC_Inverter_due_to_AC_System_Faults)
25. Can Ding, Zhenyi Wang, Qingchang Ding, Zhao Yuan. Convolutional neural network based on fast Fourier transform and gramian angle field for fault identification of HVDC transmission line [Žiūrėta 2023-06-10] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467722001461>
26. Hongyu Zhou, Wei Yao, Xiaomeng Ai, Dahu Li, Jinyu Wen, Chenghao Li. Comprehensive review of commutation failure in HVDC transmission systems [Žiūrėta 2023-08-10] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779621007495>
27. Kimbark Wilson Edward. Direct Current Transmission [Žiūrėta 2023-09-07] Prieiga per: <https://www.scribd.com/doc/74777195/Direct-Current-Transmission-Kimbark>
28. Oketch Innocent. Commutation Failure Prevention for HVDC, Improvement in algorithm for commutation failure prevention in LCC HVDC [Žiūrėta 2023-10-14] Prieiga per: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/242743/242743.pdf>
29. Lidong Zhang, Lars Dofnas. A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems [Žiūrėta 2023-10-20] Prieiga per: <https://library.e.abb.com/public/8c3756e770b7d516c1256fda004aeab9/A%20Novel%20Method%20to%20Mitigate%20Commutation%20Failures%20in%20HVDC%20Systems.pdf>
30. Wei Yao, Chang Liu, Jiakun Fang, Xiaomeng Ai, Jinyu Wen, Shijie Cheng. Probabilistic Analysis of Commutation Failure in LCC-HVDC System Considering the CFPREV and the Initial Fault Voltage Angle. [Žiūrėta 2023-11-02] Prieiga per: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8747540?casa\\_token=L6wb15\\_cF18AAAAA:thaeO0ZAYhMMB7WsRzq9PTfq0IIJvyZqOYOIDJFsWSNQ9dS\\_Vsto1gGIvCygrMVQReQJeWHCPA](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8747540?casa_token=L6wb15_cF18AAAAA:thaeO0ZAYhMMB7WsRzq9PTfq0IIJvyZqOYOIDJFsWSNQ9dS_Vsto1gGIvCygrMVQReQJeWHCPA)
31. Dui Liu, Xiaohua Li. Multiple commutation failure suppression method of LCC-HVDC transmission system based on fault timing sequence characteristics [Žiūrėta 2023-11-07] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522001697>
32. Weichen Yang, Shihong Miao, Shixu Zhang, Yaowang Li, Ji Han, Hanping Xu, Dongyin Zhang. A commutation failure risk analysis method considering the interaction of inverter station [Žiūrėta 2023-11-28] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519326626>
33. Computationally Efficient and Accurate Approach for Commutation Failure Risk Areas Identification in Multi-Infeed LCC-HVDC Systems [Žiūrėta 2023-12-02] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8846720>
34. Enhanced Commutation Failure Predictive Detection Method and Control Strategy in Multi-Infeed LCC-HVDC Systems Considering Voltage Harmonics [Žiūrėta 2024-01-03] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9139407>
35. Hansen Arne, Havemann Henrik. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems. [Žiūrėta 2023-12-17] Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/3273967\\_Decreasing\\_the\\_commutation\\_failure\\_frequency\\_in\\_HVDC\\_transmission\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/3273967_Decreasing_the_commutation_failure_frequency_in_HVDC_transmission_systems)

36. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [Žiūrėta 2024-01-07] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039091>
37. Design a Fuzzy Controller to Minimize the Effect of HVDC Commutation Failure on Power System [Žiūrėta 2024-01-07]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4400720>
38. Computationally Efficient and Accurate Approach for Commutation Failure Risk Areas Identification in Multi-Infeed LCC-HVdc Systems [Žiūrėta 2024-03-13] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8846720>
39. A commutation failure risk analysis method considering the interaction of inverter stations [Žiūrėta 2024-04-20] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061519326626>
40. The mechanism and solution of the anomalous commutation failure of multi-infeed HVDC transmission systems [Žiūrėta 2024-04-21] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061518328734>

## Informacijos šaltinių sąrašas

1. <https://www.epsog.lt/lt/projects/sinchronizacija-su-kontinentines-europos-tinklais>
2. <https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=TAR.E151BC09AE62>
3. <https://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2021-metai/2021-spalis/2021-10-28/suderintas-2021-2030-m-lietuvos-elektros-energetikos-sistemas-400%E2%80%92110-kv-tinklu-pletros-planas.aspx>
4. <https://www.e-cigre.org/publications/detail/103-commutation-failures-causes-and-consequences.html>
5. [https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAD/TAIS.392276/format/ISO\\_PDF/](https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAD/TAIS.392276/format/ISO_PDF/)