



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Tadas Miliauskas

HVDC keitiklių charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. A. Morkvėnas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

HVDC keitiklių charakteristikų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemų programa (621H63005)

Vadovas

..... Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas
(Parašas)

Data:

Recenzentas

..... Prof. dr. Saulius Gudžius
(Parašas)

Data:

Projektą atliko

..... Tadas Miliauskas
(Parašas)

Data:



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Tadas Miliauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemų programa, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. ____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Tado Miliausko** baigiamasis projektas tema „HVDC keitiklių charakteristikų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

Miliauskas, T. HVDC keitiklių charakteristikų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 54 psl.

SANTRAUKA

Pasaulyje sparčiai vystosi HVDC technologija, nuolat daugėja nuolatinės srovės jungčių, sujungiančių skirtingus elektros energijos tinklus ar perduodančios elektros energiją dideliais atstumais. 2016 metais Lietuvoje pradėjo veikti dvi HVDC jungtys: NordBalt – jungtis su Švedija, ir LitPol Link – jungtis su Lenkija.

Šiame darbe plačiau nagrinėjama LitPol Link jungtis, atliekamas šios jungties charakteristikų tyrimas. Siekiant geriau susipažinti su sistema pasinaudojant modeliavimo programa „MICRO-CAP“ sukurtas matematinis modelis, kuris atitinka HVDC Classic jungties darbo režimus. Taip pat atliekamas eksperimentinis tyrimas, kurio rezultatai palyginami su modeliavimo rezultatais. Taip patikrinamas modelio realumas. Ištiriama HVDC keitiklių įtaka elektros tinklui.

Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių):

Nuolatinės srovės jungtis; HVDC; Tiristorinis lygintuvas; Harmonikos.

Miliauskas, T. Research on Characteristics of HVDC Converters. Final project of Master degree / supervisor prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power System
Kaunas, 2016. 54 pages.

SUMMARY

Nowadays HVDC technology are rapidly evolving in the world. Number of HVDC interconnectios are constantly growing and a lot of asychonous systems are connected using the HVDC interconnections. There are two HVDC interconnections started working in Lithuania this year: NordBalt – Connection with Sweden and LitPol Link – connection with Poland.

In this final project are widely considered LitPol Link system, investigating characteristics of this connection. Using modeling program „MICRO-CAP“ there are made a model of HVDC Classic system. Also in this project had been made an experiment of HVDC system in laboratory to make sure of mathematical model reality comparing with real equipment.

Keywords (up to 8 words):

High Voltage Direct Current interconnections; HVDC; Thyristor rectifier; Harmonics.

TURINYS

SANTRUMPOS	8
ĮVADAS.....	9
1. APIE HVDC	10
1.1. HVDC istorija.....	10
1.2. Kodėl HVDC?	11
1.3. HVDC sistemų tipai	14
1.4. HVDC CSC sistema	16
1.4.1. Galios krypties keitimas	18
1.4.2. Išlygintos įtampos vertės priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α	19
1.4.3. Harmonikų analizė ir filtravimas.....	20
1.5. HVDC VSC sistema	24
2. LITPOL LINK JUNGTIES ANALIZĖ	26
2.1. Bendra sistemos apžvalga.....	26
2.2. LitPol Link jungties prijungimo prie tinklo pereinamieji procesai	27
2.2.1. 330 kV tinklo filtrų prijungimas.....	28
2.2.2. 330 kV keitiklių transformatoriaus prijungimas prie tinklo	29
2.2.3. 400 kV tinklo filtrų prijungimas.....	30
2.2.4. 400 kV keitiklių transformatorių prijungimas prie tinklo	31
2.3. LitPol Link jungties galios perdavimo analizė	33
2.3.1. Ventilių deblokavimas.....	33
2.3.2. Keitiklio minimalios galios perdavimas	35
2.3.3. Keitiklio veikimas maksimalia galia	36
3. TIRIAMOJI DALIS	38
3.1. Modeliavimas	38
3.1.1. 6 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis	38
3.1.2. 12 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis	42
3.2. Eksperimentinis tyrimas	45
3.2.1. 6 pulsacijų lygintuvo eksperimentinis tyrimas	45
3.2.2. 12 pulsacijų lygintuvo eksperimentinis tyrimas	48
3.3. Tyrimo rezultatų analizė.....	49
3.3.1. 6 Pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai	49
3.3.2. 12 pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai.....	50
3.4. HVDC sistemų įtaka elektros tinklui.....	51
3.4.1. Harmonikų lygio analizė	51
3.4.2. HVDC filtrų įtakos tinklui tyrimas.....	52
IŠVADOS	53

LITERATŪRA.....	54
PRIEDAI.....	55

SANTRUMPOS

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

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

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

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

LCC – Linijos valdomas (tiristorinis) keitiklis (*angl. Line Comutated Converter*);

CSC – Srovės (tiristorinis) keitiklis (*angl. Current Source Converter*);

VSC – Įtampos (IGBT tranzistorių) keitiklis (*angl. Voltage Source Converter*).

ĮVADAS

Elektros energija – viena iš pagrindinių energijos rūšių, be kurios gyvenimas šiais laikais sunkiai įsivaizduojamas. Visame pasaulyje labai greitai išplito įvairios technologijos bei prietaisai, palengvinantys žmogaus buitį: nuo įvairių elektrinių buities prietaisų iki kompiuterių ar išmaniųjų telefonų. Tačiau visi XX-XXI amžiaus išradimai be elektros energijos prarastų savo vertę, o daugelis žmonių net negalėtų įsivaizduoti savo gyvenimo. Elektros energijai užimant tokią svarbią vietą būtina užtikrinti patikimą jos tiekimą.

Nuo elektros energijos atradimo (IX a. pabaiga) iki šių dienų akivaizdžiai matomas šios rinkos tobulėjimas. Įtampos lygis pasiekė šimtus kilovoltų, o elektros energijos suvartojimo kiekis nuolat didėja. Siekiant išlaikyti stabilų elektros energijos tinklą būtina jį kontroliuoti, t.y. stebėti įvairius tinklo parametrus. Pagrindinė stabilaus tinklo taisyklė – elektros energijos turi būti pagaminama tiek, kiek ir suvartojama, o kuo elektros tinklas didesnis, tuo mažiau jis jautrus elektros energijos vartojimo pokyčiams. Pastebėję šį reiškinį mokslininkai nusprendė, kad reikėtų sujungti atskirus elektros tinkus, taip sukuriant stabilesnį elektros tinklą.

Šiuo metu beveik visose pasaulio elektrinėse (išskyrus didžiąją dalį atsinaujinančių šaltinių elektrinių) generuojama trifazė kintamos srovės elektros energija. Tačiau elektros energijos tinklų negalima tiesiog sujungti į vieną pasaulinį tinklą. Priežastys yra kelių rūšių:

- skirtingų parametrų elektros energija;
- dideli atstumai tarp skirtingų elektros tinklų;
- nuostoliai perduodant kintamos srovės elektros energiją dideliais atstumais;
- ir kita.

Norint sujungti skirtingų elektros energijos parametrų (nesinchroniškas) sistemas naudojami aukštos įtampos nuolatinės srovės (HVDC – *High Voltage Direct Current*) intarpai.

Darbo tikslas. Ištirti HVDC keitiklių charakteristikas ir įtaką elektros energetikos sistemos darbui.

Norint pasiekti užsibrėžtą tikslą išsikelti tokie **uždaviniai**:

1. Apžvelgti HVDC sistemos taikymą elektros energijos tinkluose;
2. Atlikti HVDC Classic (tiristorinės) sistemos analizę;
3. HVDC sistemos matematinio modelio parametrų įvertinimas;
4. Matematinio modelio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas;
5. HVDC sistemų įtakos tinklui tyrimas.

1. APIE HVDC

1.1.HVDC istorija

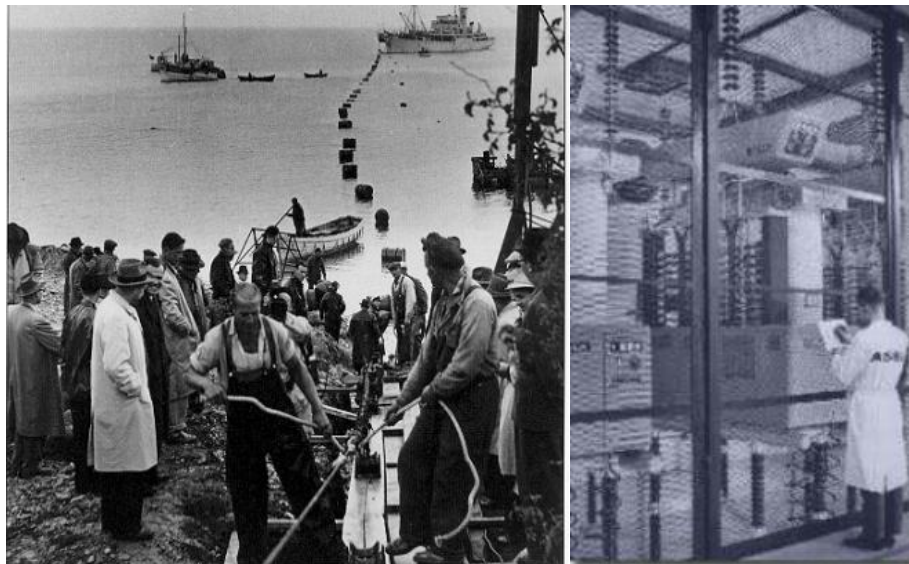
Nuolatinės srovės jungtys elektros tinkluose pradėtos naudoti XIX amžiaus viduryje. Pirmoji komercinė HVDC jungtis buvo įrengta 1954 m. Švedijoje.



1.1 pav. Pirmosios HVDC jungties valdymo įranga

Pagrindiniai pirmosios HVDC jungties vardiniai parametrai:

- Įtampa – 100 kV;
- Galia – 20 MW;
- Kabelio ilgis – 98 km.



1.2 pav. Pirmosios HVDC jungties kabelio klojimo darbai (kairėje) ir nuolatinės srovės įrenginiai (dešinėje).

Anksčiau pateiktame paveiksle matyti aukštos įtampos nuolatinės srovės kabelis, kuris sujungė Gotlando salą su rytine Švedijos pakrante. Keitiklio stotys įrengtos Vasterviko mieste ir

Ygne (saloje). Komutavimui panaudoti Mercury arc tipo ventiliai, kuriuos švedų mokslininkų komanda kūrė 25 metus.

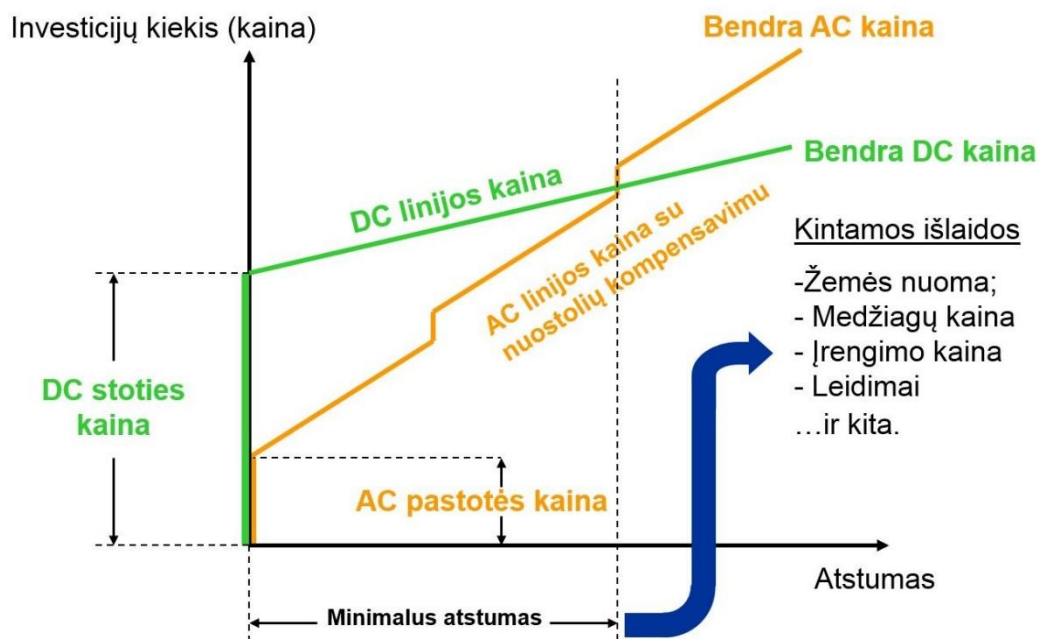
XX amžiaus viduryje prasidėjo puslaidininkinių elementų tobulinimas bei gamyba. Sukūrus didesnės galios tiristorius jie pradėti naudoti HVDC jungtyse.

1970 metais pirmoji komercinės paskirties HVDC jungtis buvo perprojektuota į 30 MW galios ir 150 kV įtampos jungtį, kurioje komutaciniai elementai buvo pakeisti į pusiau valdomus tiristorius.

Nuolat tobulėjanti galios elektronika leido HVDC jungtims pradėti naudoti IGBT tranzistorius (angl. *Isolated Gate Bipolar Transistor*). Tai dar labiau išplėtė aukštos įtampos nuolatinės srovės jungčių panaudojimo galimybes [1].

1.2. Kodėl HVDC?

Didžioji dalis pasaulyje generuojamos elektros energijos yra kintamosios srovės elektros energija. Ta pati kintamos srovės elektros energija yra ir naudojama perdavimo bei skirstomuosiuose tinkluose, kuriais ji pasiekia vartotojus. Tačiau kartais ekonominiu požiūriu yra pigiau perduoti nuolatinės srovės elektros energiją, nes taip eliminuojami kintamos srovės sukuriami nuostoliai. Kadangi nuolatinės srovės intarpo įrengimas yra daug brangesnis už kintamosios srovės pastotę, todėl įrengti nuolatinės srovės linijas ekonomiškiau ten, kur elektros energiją reikia perduoti dideliais atstumais.



1.3 pav. Kintamos ir nuolatinės srovės elektros energijos perdavimo linijų kainos priklausomybė kintant linijos ilgiui

1.3 paveiksle aiškiai matoma, kad esant didesniai linijos ilgiui nei minimalus atstumas ekonomiškiau yra statyti nuolatinės srovės elektros energijos perdavimo liniją. Minimalus atstumas skaičiuojamas konkrečiai kiekvienu atveju ir priklauso nuo linijos įtampos, geografinės padėties bei valstybės reglamentų. HVAC ir HVDC linijų perduodama galia apskaičiuojama pagal šias formules:

$$P_{AC} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_2); \quad (1.1)$$

$$P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC}. \quad (1.2)$$

Čia $U_1 \sin(\alpha_1)$ – įtampa AC linijos pradžioje, V;

$U_2 \sin(\alpha_2)$ – įtampa AC linijos pabaigoje, V;

X – linijos ilgis, km;

$$0 < I_{DC} < I_N.$$

Taip pat nuolatinės srovės linijų privalumas yra tas, kad jos užima mažiau ploto, todėl gamtai padaroma mažesnė žala.



a

b



c

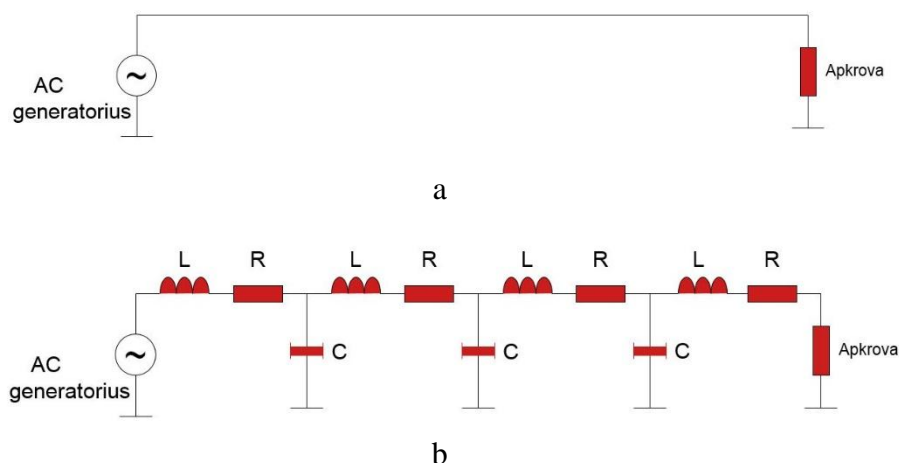
1.4 pav. Elektros perdavimo linijų žala gamtai: a – kintamos srovės elektros energijos perdavimo oro linijos; b – nuolatinės srovės (HVDC) elektros energijos perdavimo oro linijos; c – nuolatinės srovės (HVDC) elektros energijos perdavimo požeminis kabelis

Iš prieš tai pateiktų paveikslų aiškiai matyti, kad nuolatinės srovės elektros energijos perdavimo linijos užima mažesnę plotą, tausojamas miško plotas. Taip pat skiriasi HVAC ir HVDC perdavimo linijų atramų konstrukcijos, kurių pavyzdžiai pateikiami 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Perdavimo linijų atraminių konstrukcijų pavyzdžiai

Naudojant nuolatinės srovės perdavimo linijas panaikinami kintamos srovės sukuriami elektros energijos nuostoliai. Kintamosios srovės perdavimo linijose susidaro induktyvinės bei talpinės varžos, kurios sukuria kampo pokytį tarp įtampos ir srovės. Taip atsiranda vadinama reaktyvioji galia.



1.6 pav. Kintamos srovės perdavimo linijos ekvivalentinė schema:

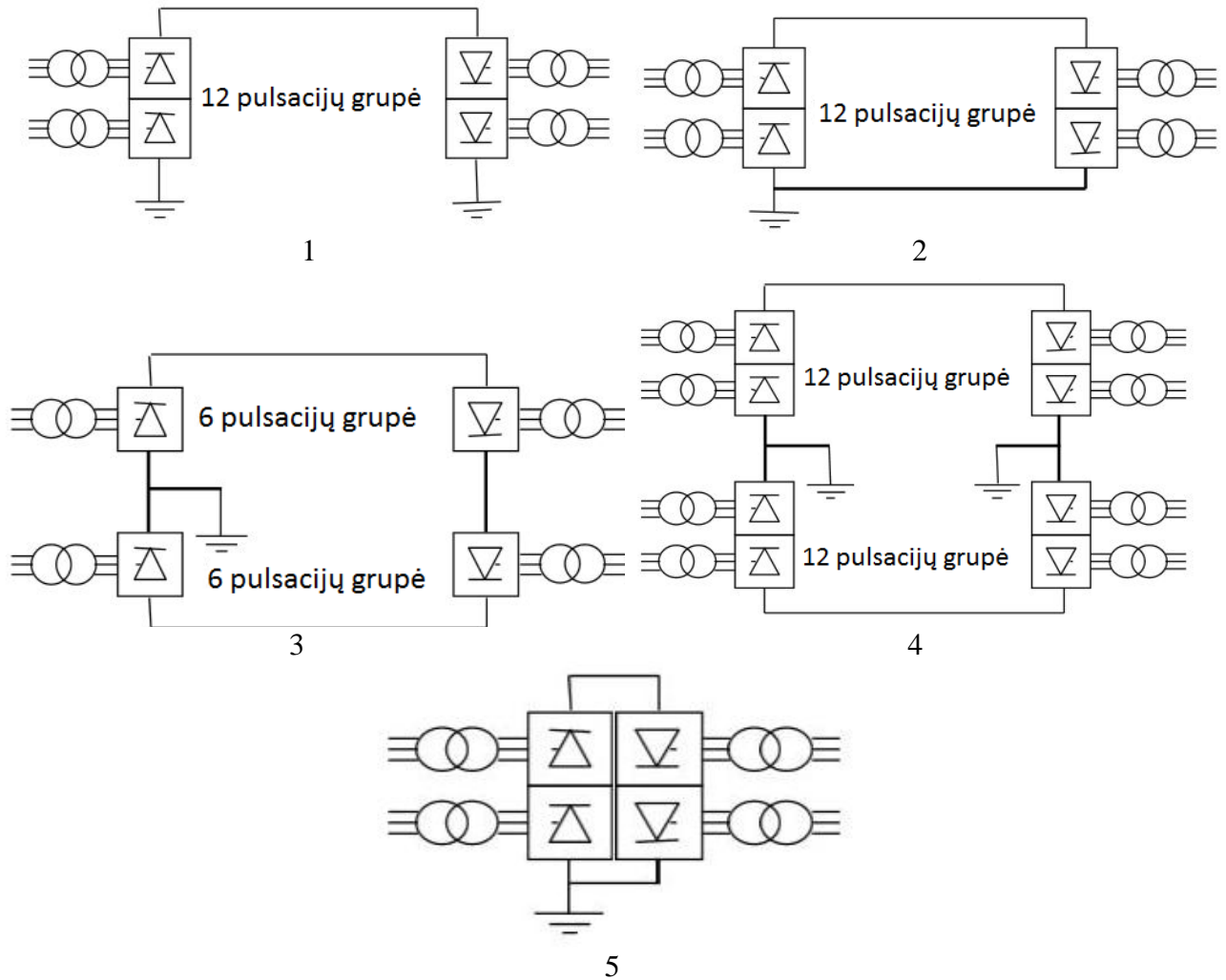
a – ideali schema; b – reali schema

Iš 1.6 paveiksle pateiktų schemų matyti, kad kintamos srovės perdavimo linijos ekvivalentinėje schemoje egzistuoja induktyvumas L ir talpumas C . Induktyvumas pakeičia srovės kampą – tai vadinama induktyviniais nuostoliais. Talpa sąlygoja įtampos pasikeitimą laiko atžvilgiu – tai talpiniai nuostoliai. R – aktyvinė varža, kurios nuostolių išvengti neįmanoma. Talpa ir induktyvumas yra inerciniai parametrai, kurie tinklui įtakos turi tik tuomet, kai keičiasi srovės ir įtampos kryptys. Pakeitus AC perdavimo liniją į HVDC sistemą eliminuojami induktyvieji ir talpos nuostoliai. Tokiu atveju reaktyviosios galios nuostoliai lygūs nuliui.

1.3.HVDC sistemų tipai

Aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemos skirstomos pagal:

- Jungimo būdą;
- Komutacinio įrenginio tipą.



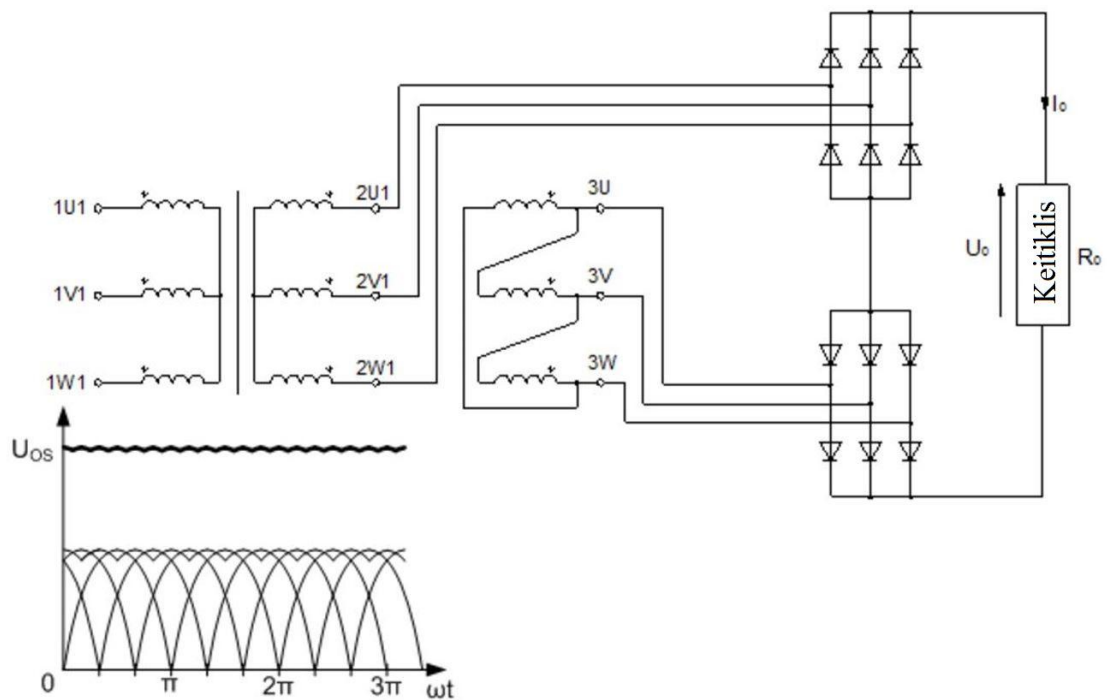
1.7 pav. Pagal jungimo būdą išskiriamų HVDC sistemų pavyzdžiai

Pagal **jungimo būdą** išskiriamos šios sistemos:

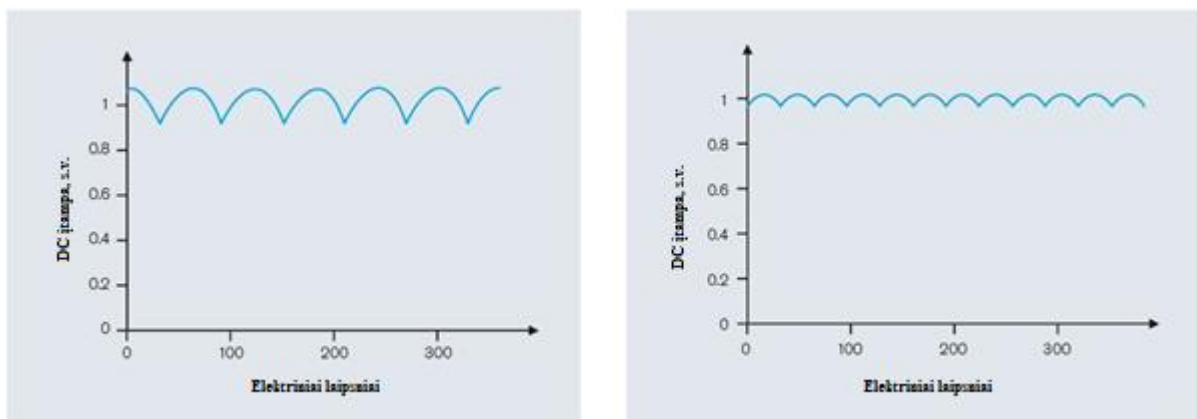
1. Vienpolė dvylikos pulsacijų sistema su įžeminta neutrале be įžeminimo laido (grandinė užsidaro per žemę);
2. Vienpolė dvylikos pulsacijų sistema su įžeminta neutrале bei neutralės laidininku;
3. Vienpolė sistema su įžemintu vidurio tašku;
4. Dvipolė sistema su įžeminta neutrале;
5. *Back to Back* sistema (lygintuvas ir inverteris yra šalia vienas kito (vienoje geografinėje vietoje)) [2].

Pirmosios trys sistemos naudojamos perduoti iki 1500 MW galiai, ketvirtoji – iki 3000 MW, o penktoji – Back to Back – iki 1000 MW. Ši sistema dažniausiai naudojama sujungti skirtingų parametru elektros energijos tinklus [2].

Dvylikos pulsacijų grupė gaunama naudojant galios transformatorių su dviem antrinėmis apvijomis, kurių viena sujungta trikampiui, kita žvaigžde. Taip gaunamas 30° skirtumas tarp apvijų fazorių. susidaro didesnis nuolatinės srovės pulsacijų skaičius ir tuo pačiu mažesnė pulsacijų amplitudė. Be to toks transformatorių apvijų jungimo būdas sumažina harmonikų įtaką elektros tinklui (panaikinama 5 ir 7 harmonikos (žr. 1.4.1 poskyrį)).



1.8 pav. Transformatoriaus su dviem antrinėmis apvijomis jungimo schema ir išlygintos įtampos charakteristikos pavyzdys (12 pulsacijų)



a

b

1.9 pav.. Išlygintos įtampos vertės: a – 6 pulsacijų; b – 12 pulsacijų

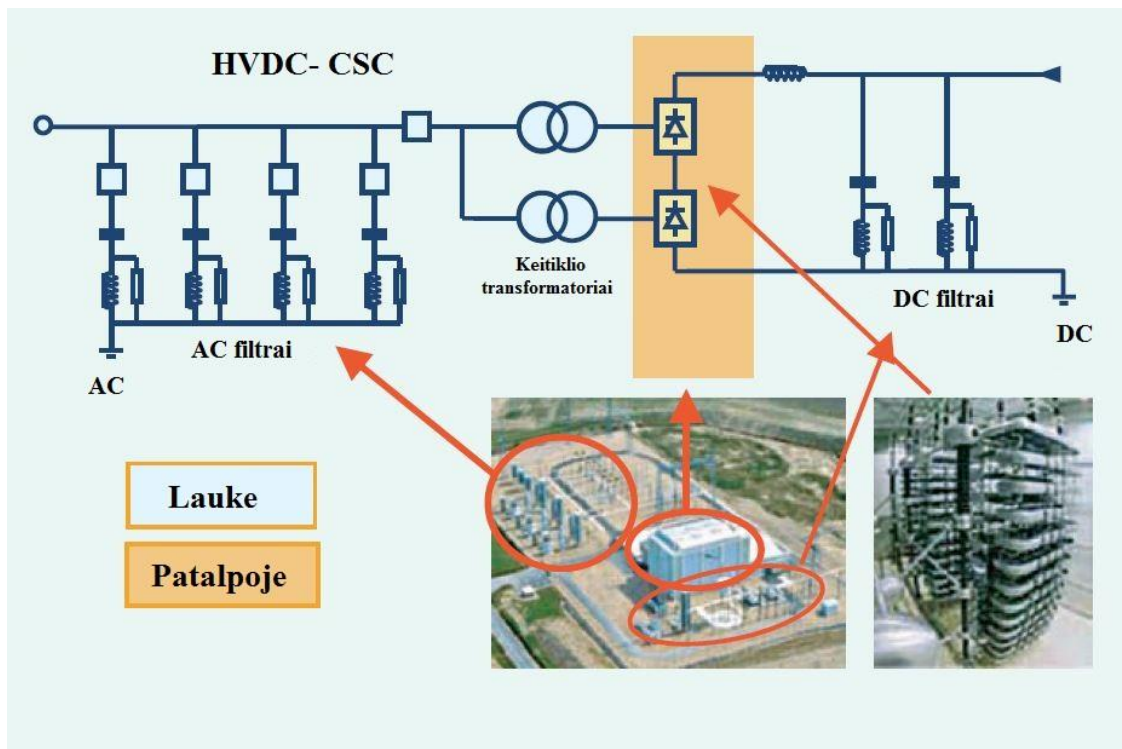
Iš pateiktų paveikslų matyti, kad esant didesniai pulsacijų skaičiui gaunama mažesnė pulsacijų amplitudė, o tai palengvina inverterio darbą, nes gaunama stabilesnė įtampa. Taip pat dėl nuosekliai sujungtų dviejų šaltinių (šiuo atveju tai du tiristoriniai lygintuvai) gaunama didesnė įtampos vertė lyginant su keitikliais, kuriuose naudojama tik viena antrinė apvija.

Pagal **komutacinio įrenginio tipą** išskiriamos dvi pagrindinės sistemos:

- sistema, kurios pagrindinis komutacinis įrenginys – tiristorius;
- sistema, kurios pagrindinis komutacinis įrenginys – tranzistorius.

1.4. HVDC CSC sistema

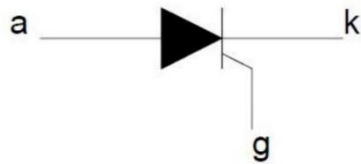
HVDC CSC – tai tokia sistema, kurios pagrindinis komutacinis įrenginys yra tiristorius. Ši sistema dar vadinama tiristorinio valdymo arba srovės keitikliu (*angl. Current Source Converter*).



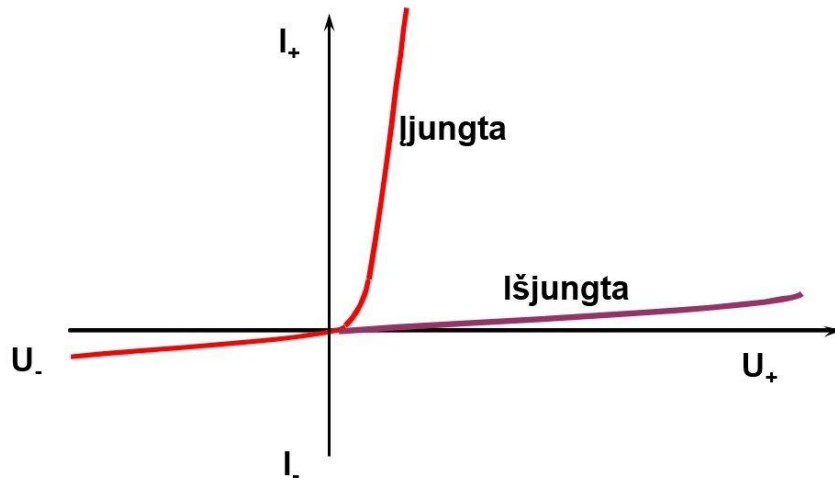
1.10 pav. HVDC Classic sistemos struktūrinė schema [3]

Tiristorius – tai valdomas diodas. Tiristorius turi tris elektrodus:

- a - anodas;
- k - katodas;
- g (*gate*) – bazė (valdymo elektrodas).



1.11 pav. Tiristoriaus žymėjimas schemose



1.12 pav. Tiristoriaus voltamperinė charakteristika

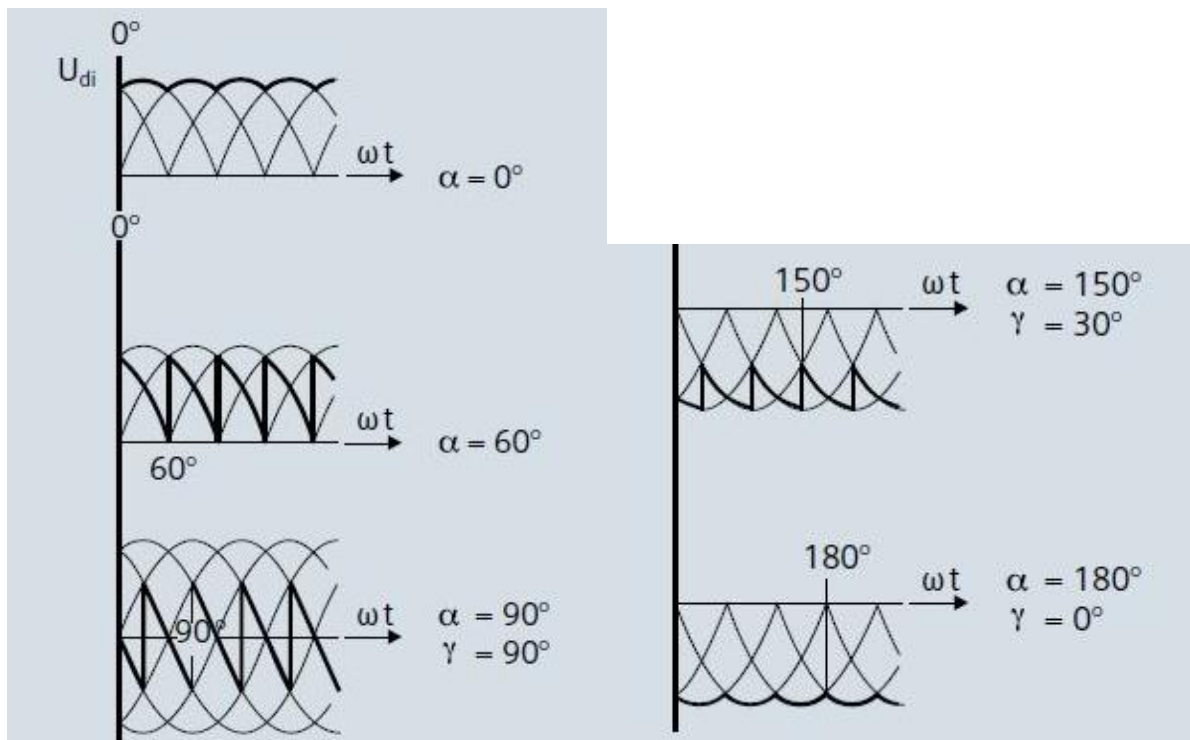
Pagrindinės tiristoriaus funkcijos:

- Atlaiko dideles įtampas abiem kryptimis;
- Praleidžia srovę tik į vieną pusę;
- Atsidaro tik tuomet, kai į valdymo elektrodą paduodamas srovės impulsas ir tiristorių veikia teigiama įtampa;
- Užsidaro kai tiristoriaus srovė kerta abscisių ašį.



1.13 pav. HVDC sistemose naudojamas tiristorius

Tiristorius laikomas įjungtu tuomet, kai ant anodo esant didesniai įtampos potencialui nei ant katodo paduodamas srovės impulsas į valdymo elektrodą. Tuomet tiristoriumi pradeda tekėti srovė. Jis išsijungia kai pasikeičia poliarumas anodo ir katodo atžvilgiu ir nustoja tekėti srovė. Esant induktyviajai apkrovai srovė dar kurį laiką teka net ir tuomet, kai pasikeičia įtampos poliarumas, todėl reguliuojant tiristoriaus atidarymo kampą galima pakeisti įtampos poliarumą (įtampos poliarumas keičiasi kai $\alpha > 90^\circ$).



1.14 pav. Išėjimo įtampos lygio priklausomybė nuo tiristorių įjungimo kampo [3]

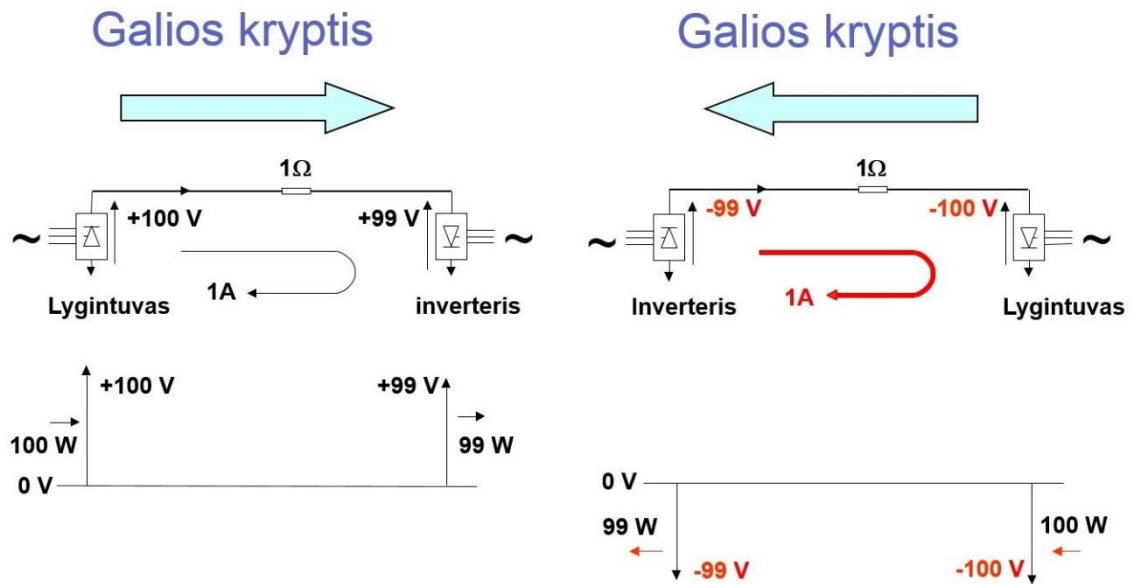
α – lygintuvo tiristorių įjungimo kampas;
 γ – inverterio tiristorių įjungimo kampas.

1.4.1. Galios krypties keitimas

Tiristorius yra puslaidininkinis elementas, kuris elektros srovę praleidžia tik viena kryptimi. Kadangi

$$P = U \cdot I, \quad (1.3)$$

o srovės krypties HVDC sistemose pakeisti neįmanoma, todėl norint pakeisti galios kryptį yra keičiamas įtampos poliarumas. Esant neigiamai įtampai gaunama neigiama galia, o tai reiškia kad galios srautas teka į priešingą pusę.



1.15 pav. Galios krypties keitimo pavyzdys

1.15 paveiksle pateiktas pavyzdys, kaip esant tai pačiai srovės kryptčiai gaunama skirtinga galios kryptis. Pateiktame pavyzdyje įvertinamas įtampos kritimas linijoje, o pakeitus įtampos poliarumą pakeičiama ir galios srauto kryptis.

1.4.2. Išlygintos įtampos vertės priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α

Kaip minėta anksčiau – įtampos vertė priklauso nuo tiristorių įjungimo kampo α . Kai $\alpha = 0^\circ$, tuomet:

$$U_d = \frac{1}{T} U_i \cdot \sqrt{2} \int_{\omega t_1}^{\omega t_1 + T} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1.4)$$

$$U_d = \frac{3}{\pi} U_i \cdot \sqrt{2} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1.5)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_i \cdot \cos 0^\circ \quad (1.6)$$

$$U_d = 1,35 \cdot U_i \quad (1.7)$$

Kai $\alpha = 15^\circ$, tuomet:

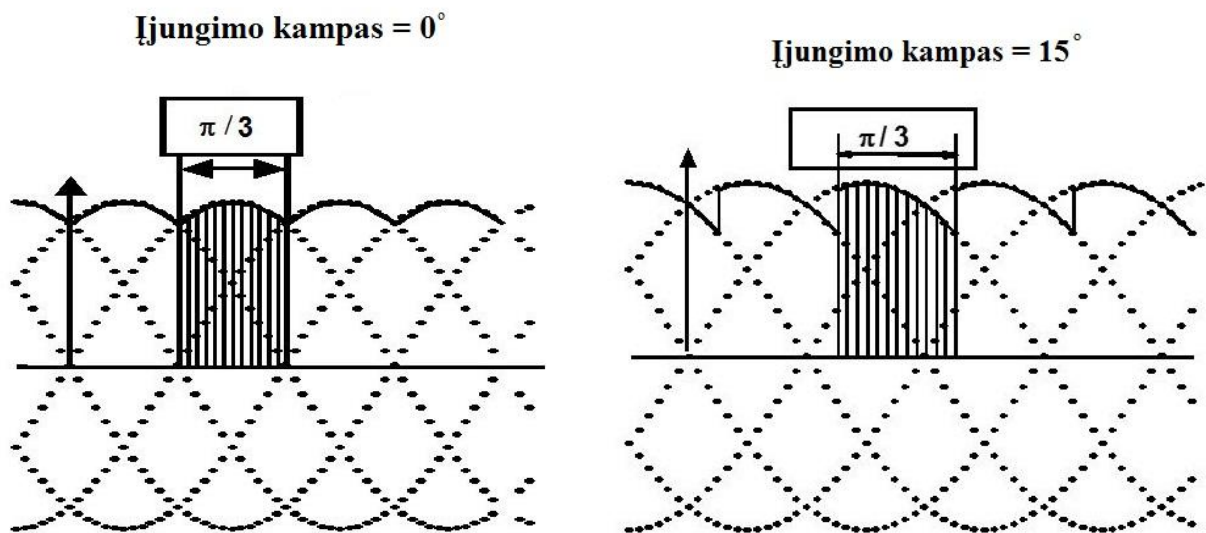
$$U_d = \frac{1}{T} U_i \cdot \sqrt{2} \int_{\omega t_1 + \alpha}^{\omega t_1 + T + \alpha} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1.8)$$

$$U_d = \frac{3}{\pi} U_l \cdot \sqrt{2} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1.9)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_l \cdot \cos 15^\circ \quad (1.10)$$

$$U_d = 1,35 \cdot U_l \cdot \cos 15^\circ \quad (1.11)$$

Pastaba. 1.4 formulės išvedimas atliktas 6 pulsacijų lygintuvui.

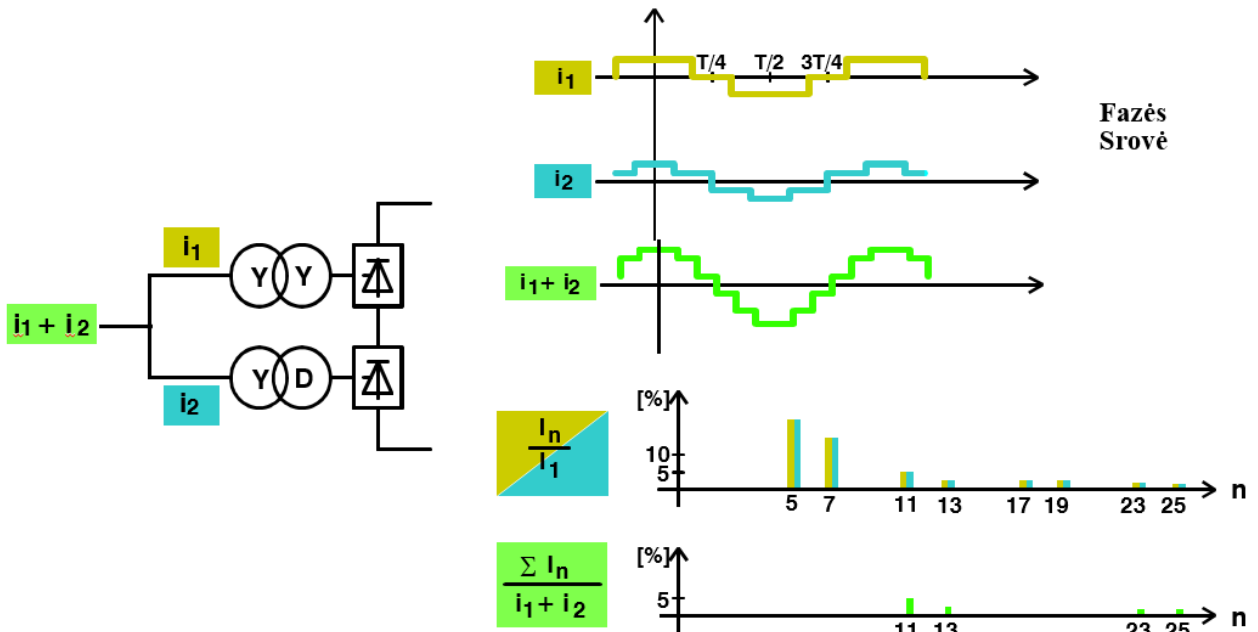


1.16 pav. Integralo plotas po kreive, kai $\alpha = 0^\circ$ ir kai $\alpha = 15^\circ$

Pagrindinis tokios sistemos trūkumas – ji negali veikti jei bent vienoje keitiklio pusėje nėra įtampos. Dėl šios priežasties ši sistema dar vadinama HVDC LCC (*Line Commutated current-source Converter*). Taigi, įvykus dideliai avarijai HVDC LCC sistema išsijungia. Nėra užtikrinamas energijos tiekimas ir negalimas sistemos atstatymas iš visiško atsijungimo (*Power Blackout*).

1.4.3. Harmonikų analizė ir filtravimas

HVDC keitikliuose dažniausiai naudojamas dviejų apvijų galios transformatorius, kuris yra suprojektuotas taip, kad pats eliminuoja 5 ir 7 srovės harmonikas.



1.17 pav. 12 pulsacijų lygtuovo AC dalies srovės charakteristikos

Iš anksčiau pateikto grafiko matyti, kad i_1 ir i_2 srovės viena kitą papildo ir taip iš tinklo imamos srovės forma gaunama artimesnė sunusoidei. Keitiklis į tinklą įneša tik aukštesnės eilės harmonikas. 12 pulsacijų lygtuovas į tinklą įneša šias harmonikas:

$$n = 12 \cdot k \pm 1; k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.12)$$

Čia n – harmonikos eilės numeris.

Taigi, pasinaudojant 1.12 formule randami į tinklą įnešamų harmonikų eilės numeriai:

11; 13;
 23; 25;
 35; 37;
 47; 49;

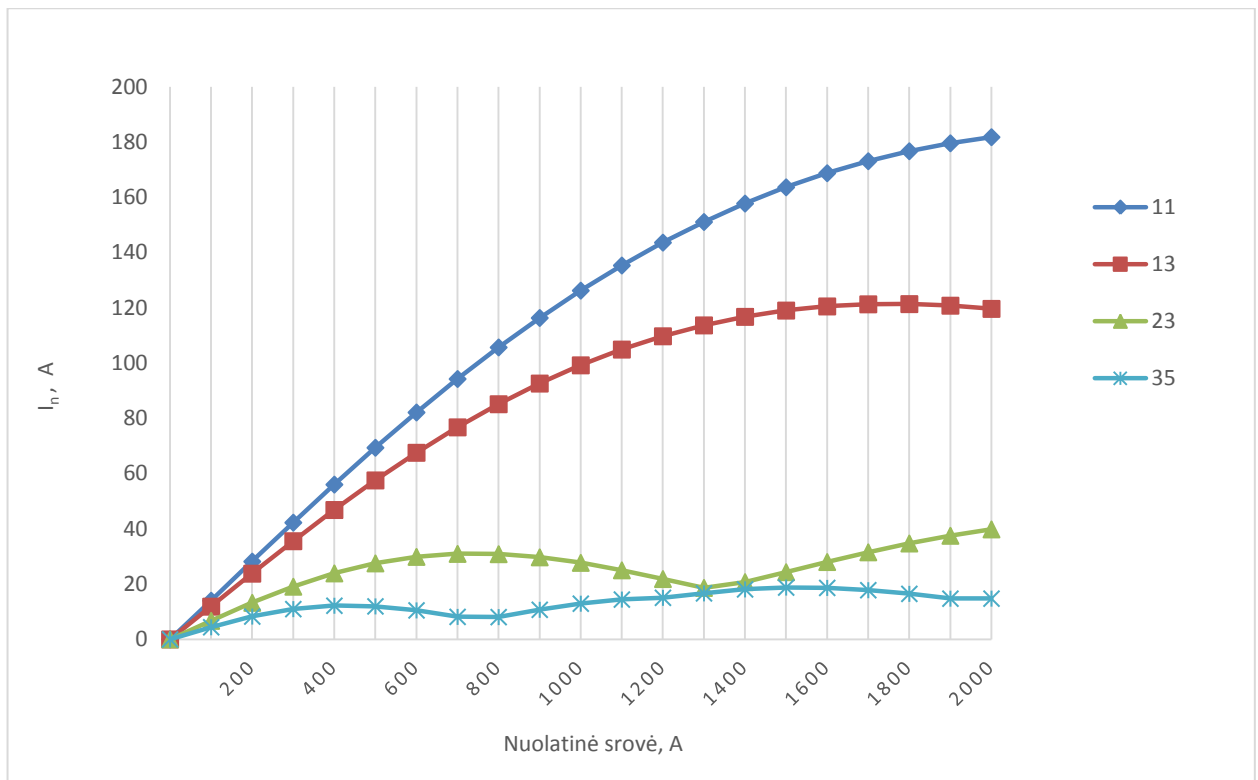
Didėjant harmonikos eilės numeriui mažėja pačios harmonikos įtaka tinkui:

$$I_n = K_n \cdot \frac{I_1}{n} \quad (1.13)$$

Čia I_n – harmonikos srovė, A;

K_n – slopinimo faktorius (≤ 1);

I_1 – pirmosios (pagrindinės) harmonikos srovė, A.



1.18 pav. 12 pulsacijų lygintuvo harmonikų verčių priklausomybė didėjant keitiklio nuolatinėi srovei

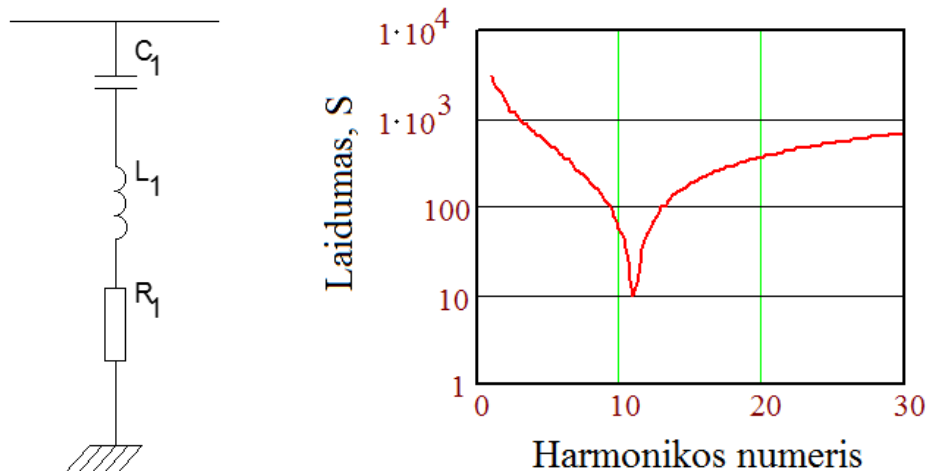
Harmonikų eliminavimui naudojami AC filtrai. Filtrai turi dvi funkcijas:

- harmonikų filtravimas;
- reaktyviosios galios kompensavimas.

Išskiriamos šios filtrų rūšys:

- Vienos dažnio filtrai:

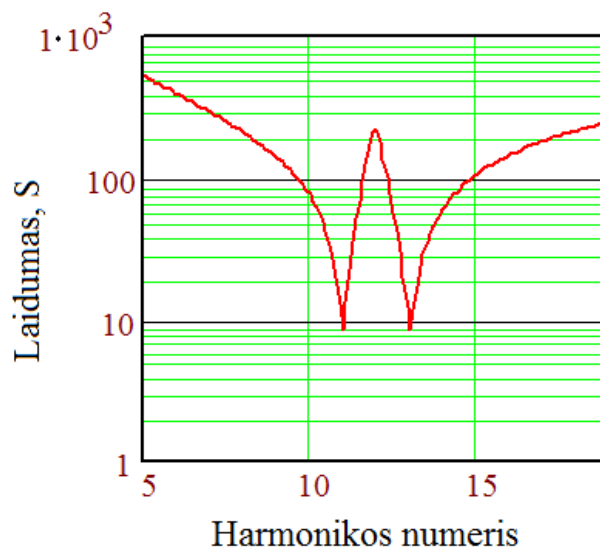
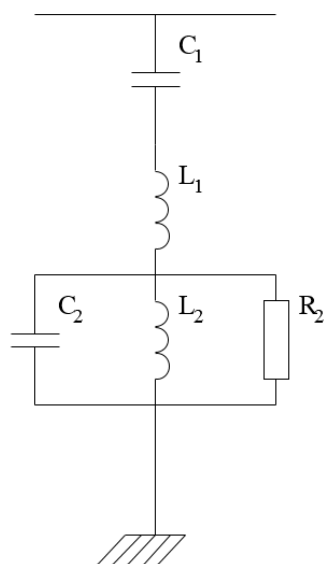
Šie filtrai skirti konkrečiai harmonikai filtruoti. Filtro elementai sujungiami nuosekliai.



1.19 pav. vieno dažnio filtro elementų jungimo schema ir charakteristika

➤ Dviejų dažnių filtrai:

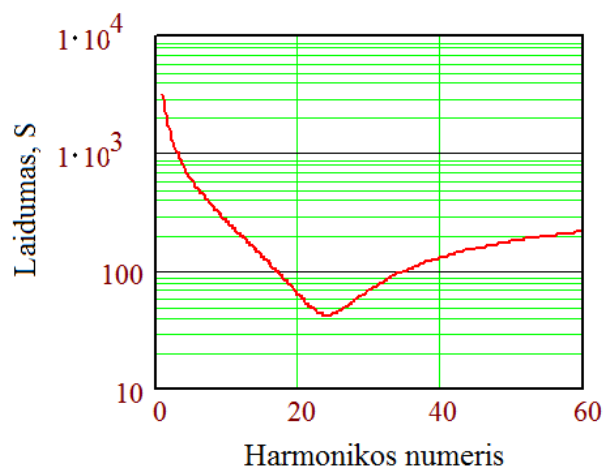
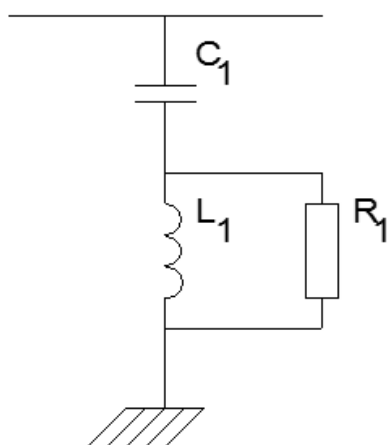
Šie filtrai naudojami vienu metu filtruoti dviems harmonikoms. Tai priklauso nuo elementų jungimo būdo. Filtras dirba rezonanciniame taške, kuriame sukiamas varžos padidėjimas prie tam tikro dažnio.



1.20 pav. dviejų dažnių filtro elementų jungimo schema ir charakteristika

➤ Aukšto dažnio filtrai:

Šie filtrai skirti aukšto dažnio harmonikoms filtruoti. Filtrų elementų vertės parenkamos tokios, kad susidarytu rezonancas prie aukštesnių dažnių.

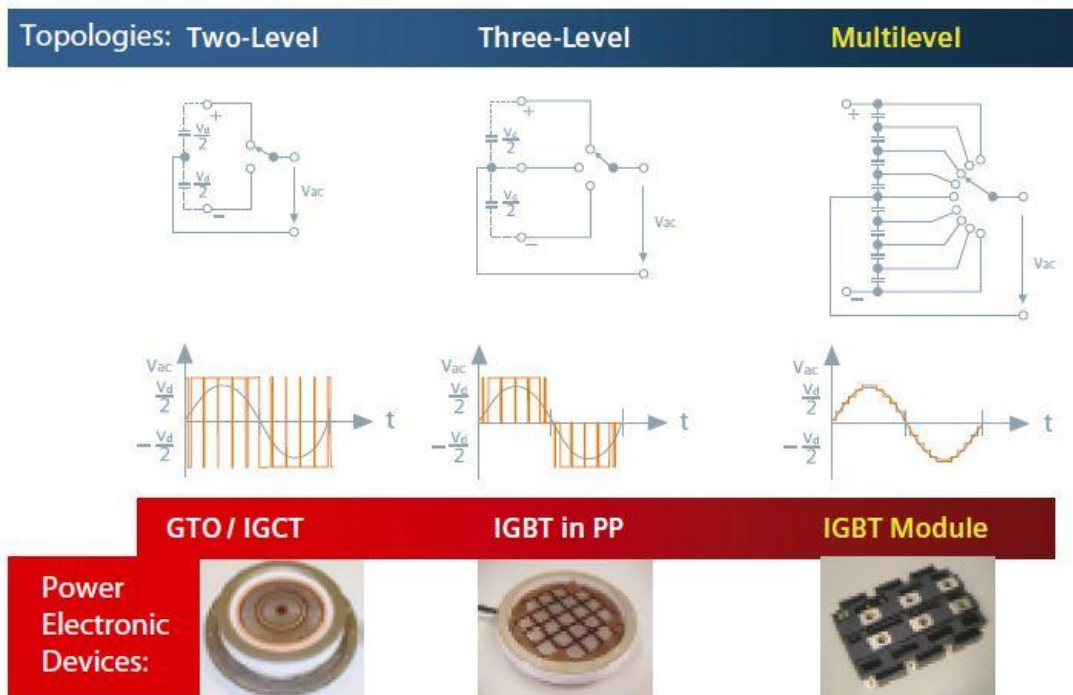


1.21 pav. Aukšto dažnio filtro elementų jungimo schema ir charakteristika

1.5. HVDC VSC sistema

HVDC VSC sistema – tai tokia aukštos įtampos nuolatinės srovės sistema, kurios pagrindinis komutacinis įrenginys – tranzistorius. Šioje sistemoje naudojami IGBT tranzistoriai (*angl. Isolated Gate Bipolar Transistor*), o sistema vadinama tranzistorinio valdymo arba įtampos keitikliu (*VSC – Voltage Source Converter*).

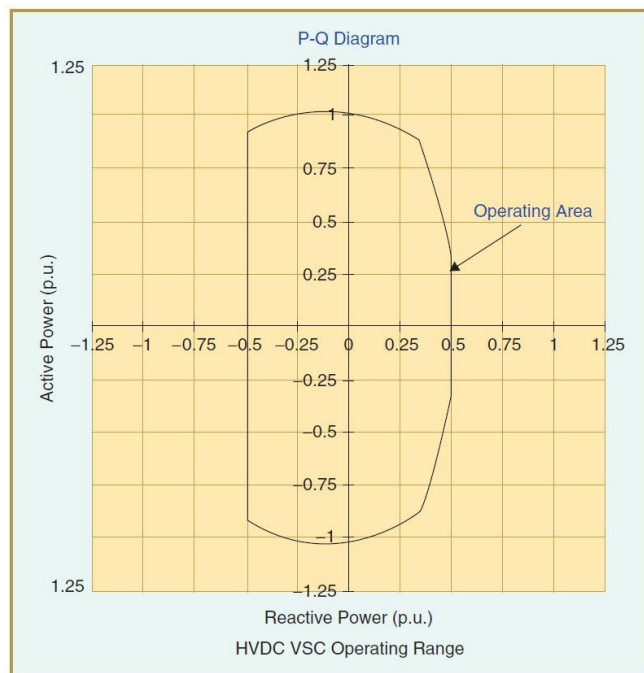
Tokios sistemos valdymas pagrįstas impulso pločio moduliacija (*PWM – Pulse Width Modulation*). Naudojant šią moduliaciją formuojami tranzistorių valdymo impulsai, kurie išėjime suformuoja kreivę, labai artimą sinusoidei.



1.22 pav. Tranzistorių išėjimo įtampų pavyzdžiai [4]

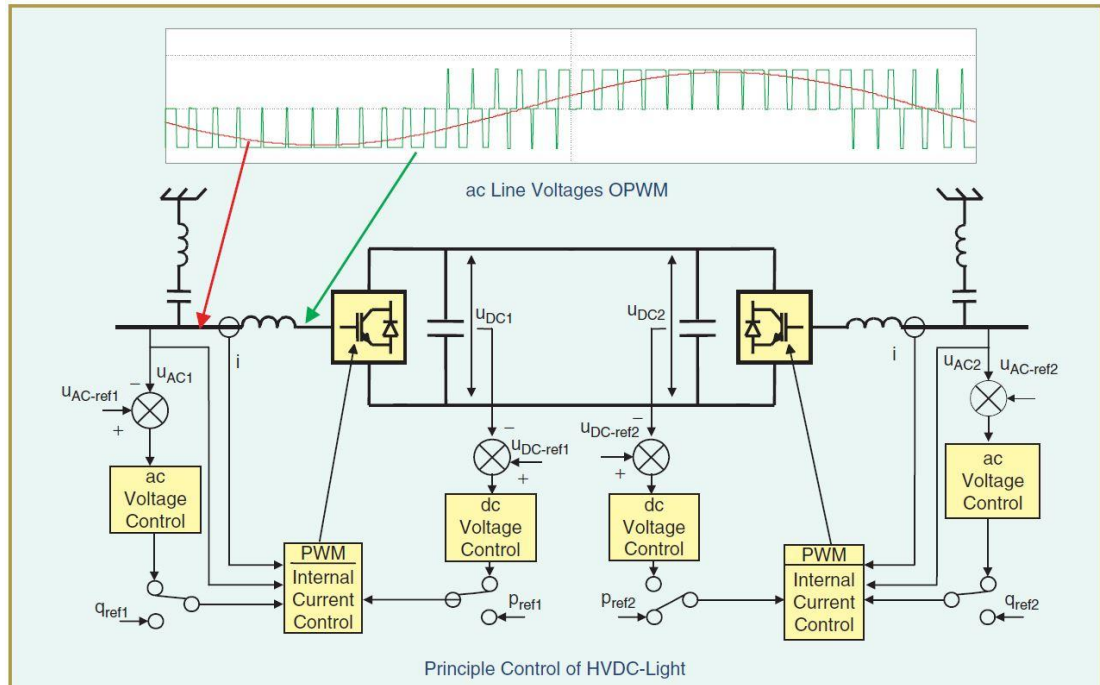
Tranzistorinės sistemos valdymas yra sudėtinga kompleksinių procesų visuma, tačiau ši sistema yra gerokai pranašesnė už HVDC Classic (tiristorinę) sistemą. Išskiriami šie sistemos privalumai:

- reaktyviosios ir aktyviosios galios valdymas;
- tinklo atstatymas po visiško atsijungimo (*Power Blackout*);
- galimas veikimas STATCOM režimu (reaktyviosios galios valdymas);
- nereikalingi brangūs ir masyvūs AC filtrai.



1.23 pav. HVDC VSC darbo zonos charakteristika [4]

Iš pateikto paveikslo matyti, kad reaktyviosios galios valdymas galimas esant plačioms riboms. Tai sistemai suteikia lankstumo ir pagerina abiejų HVDC jungtimi sujungtų tinklų kokybę bei patikimumą.



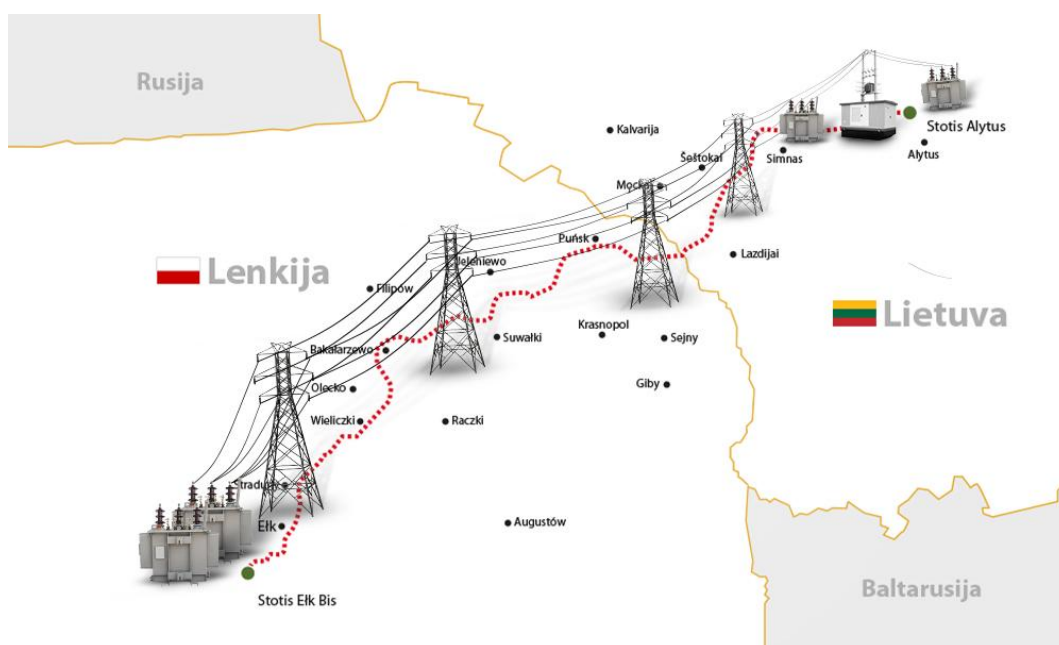
1.24 pav. HVDC VSC valdymo sistema [4]

Kaip matyti iš anksčiau pateikto paveikslo, pagrindiniai HVDC VSC sistemos elementai yra tranzistoriniai ventiliai, reaktoriai bei kondensatoriai nuolatinės srovės dalyje, kurie skirti pulsacijų filtravimui ir harmonikų mažinimui.

2. LITPOL LINK JUNGTIES ANALIZĖ

2.1. Bendra sistemos apžvalga

Labai svarbi HVDC jungčių savybė yra ta, kad panaudojant šias jungtis galima sujungti skirtingų parametru elektros energijos tinklus. Taip išsprendžiama nesinchronizuotų tinklų sujungimo problema. Esant tokiai situacijai neatsižvelgiama į 1.3 paveiksle pateikto grafiko duomenis – HVDC jungties atstumas ekonominiu atžvilgiu tampa ne pagrindinis kriterijus. Naudojant HVDC intarpus sujungiami skirtingų dažnių bei nesinchroniškai veikiantys elektros energijos tinklai.



2.1 pav. Skirtingų parametru elektros energijos tinklų sujungimo pavyzdys

Šiame paveiksle pateiktas LitPol Link jungties grafinis vaizdas su pavaizduotais linijos elementais, kurių pagrindinis – nuolatinės srovės keitiklis Alytuje.

Pagrindiniai šios jungties parametrai pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. LitPol Link jungties pagrindiniai parametrai

Parametras	Lenkijos pusė	Lietuvos pusė
Tinklo įtampa, kV	400 kV	330 kV
Galia, MW	500	
Minimali galia, MW	50	
Nominali įtampa (už transformatoriaus), kV	69,1	
Maksimali įtampa (už transformatoriaus), kV	70,3	
Nominali srovė, A	3600	
Trumpojo jungimo galia, MVA	1982	3756
Maksimali įtampa, kV	420	362

2.1 lentelė. LitPol Link jungties pagrindiniai parametrai (tęsinys)

Parametras	Lenkijos pusė	Lietuvos pusė
Didžiausias reaktyviosios galios filtras, Mvar	71,25	95
Įtampos kritimas dėl induktyvumo, d_x	8,5 %	8,5 %
Nominalus tiristorių atidarymo kampas α	15°	15°
Nominalus tiristorių gesinimo kampas γ	17°	17°

Prie keitiklio iš abiejų pusių (Lenkijos 400 kV ir Lietuvos 330 kV) yra prijungti galios transformatoriai. Transformatorių parametrai pateikiami 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. LitPol Link jungties transformatorių pagrindiniai parametrai

Parametras	400 kV trijų apvijų vienfazis transformatorius	330 kV trijų apvijų vienfazis transformatorius
Nominali galia, MVA	198,1	198,1
Nominali įtampa, kV	$\frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{58,4}{\sqrt{3}} / 58,4$	$\frac{330}{\sqrt{3}} / \frac{58,4}{\sqrt{3}} / 58,4$
Apvijų perjungiklis	+12/-9	+16/-8
Apvijų perjungimo žingsnis	1,25%	1,25%
Transportavimo matmenys		
Plotis, m	3,5	3,5
Aukštis, m	4,9	4,9
Ilgis, m	5,9	5,9
Svoris, tonos	115	115

LitPol Link jungtį sudaro standartiniai HVDC Classic Back to Back elementai:

- 400 kV elektros energijos skirstykla;
- 400 kV filtrų įrenginiai;
- 400 kV transformatoriai (trys vienfaziai);
- Keitiklių pastatas;
- 330 kV transformatoriai (trys vienfaziai);
- 330 kV filtrų įrenginiai.

2.2. LitPol Link jungties prijungimo prie tinklo pereinamieji procesai

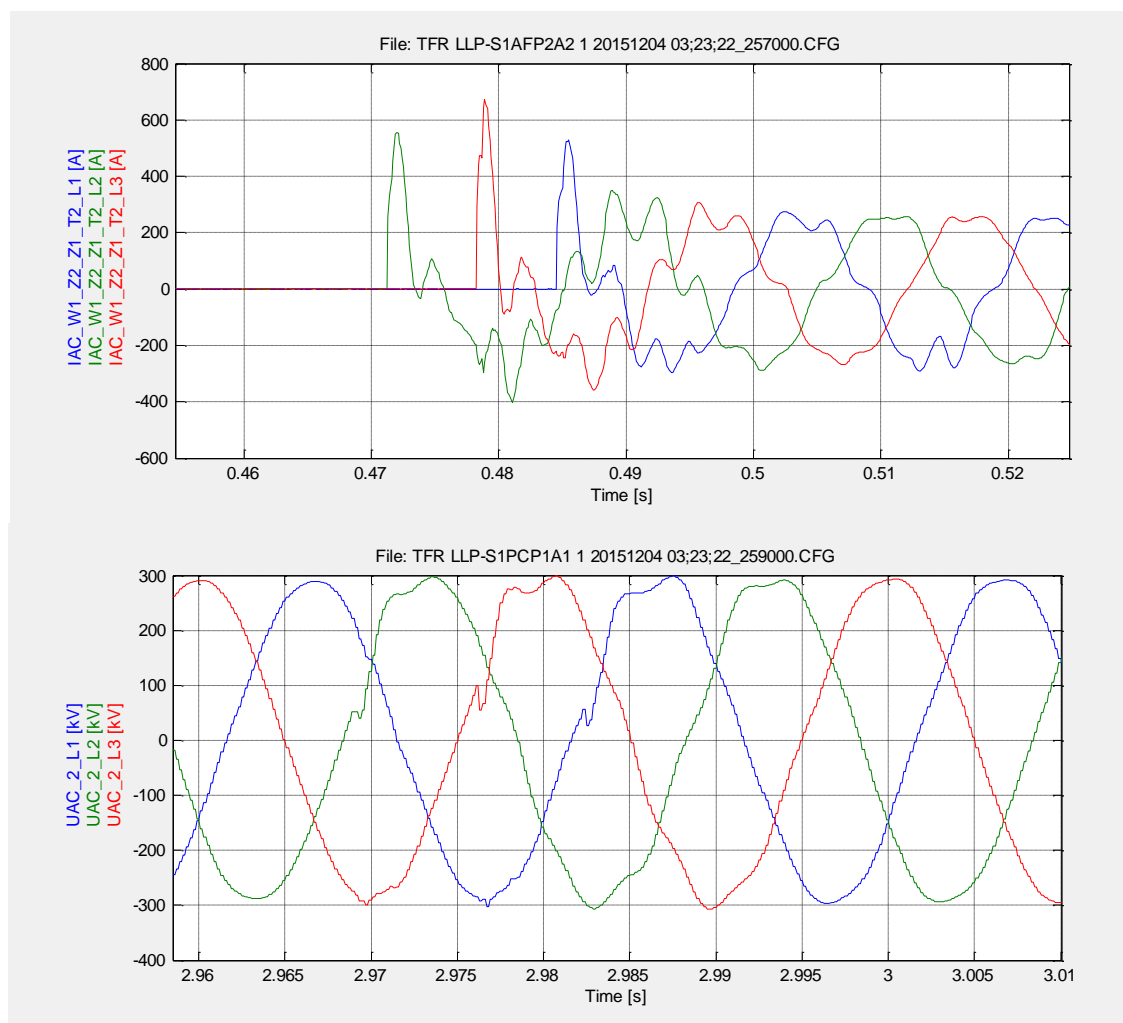
Naujos sistemos prijungimas prie bendro tinklo yra labai svarbus viso tinklo darbui, todėl būtina išanalizuoti visas charakteristikas. Pagrindinis tikslas yra ištirti sistemos parametru priklausomybę nuo nuolatinės srovės keitiklio kiekvieno elemento (filtrų, transformatorių, tiristorių)

prijungimo. Taip pat patikrinamas ir visų skyriklių, jungtuvų bei matavimo transformatorių darbas. Pirmojo prijungimo metu patikrinama ar visi matavimo įrenginiai tinkamai atvaizduoja visų matuojamų reikšmių dydžius bei poliaringumus. Taip pat atliekant pirmojo prijungimo prie tinklo bandymą patikrinama avarinio išjungimo funkcija [5].

LitPol Link sistemos prijungimas buvo atliktas palaipsniui prijungiant po vieną elementą.

2.2.1. 330 kV tinklo filtrų prijungimas

Kintamos srovės filtrai privalo būti įjungti tuomet, kai įtampos reikšmė yra artima nuliui (sinusoidė kerta abscisių ašį). Žemiau pateiktuose grafikuose matyti, kad jungtuvai išsijungia ganėtinai tiksliai.

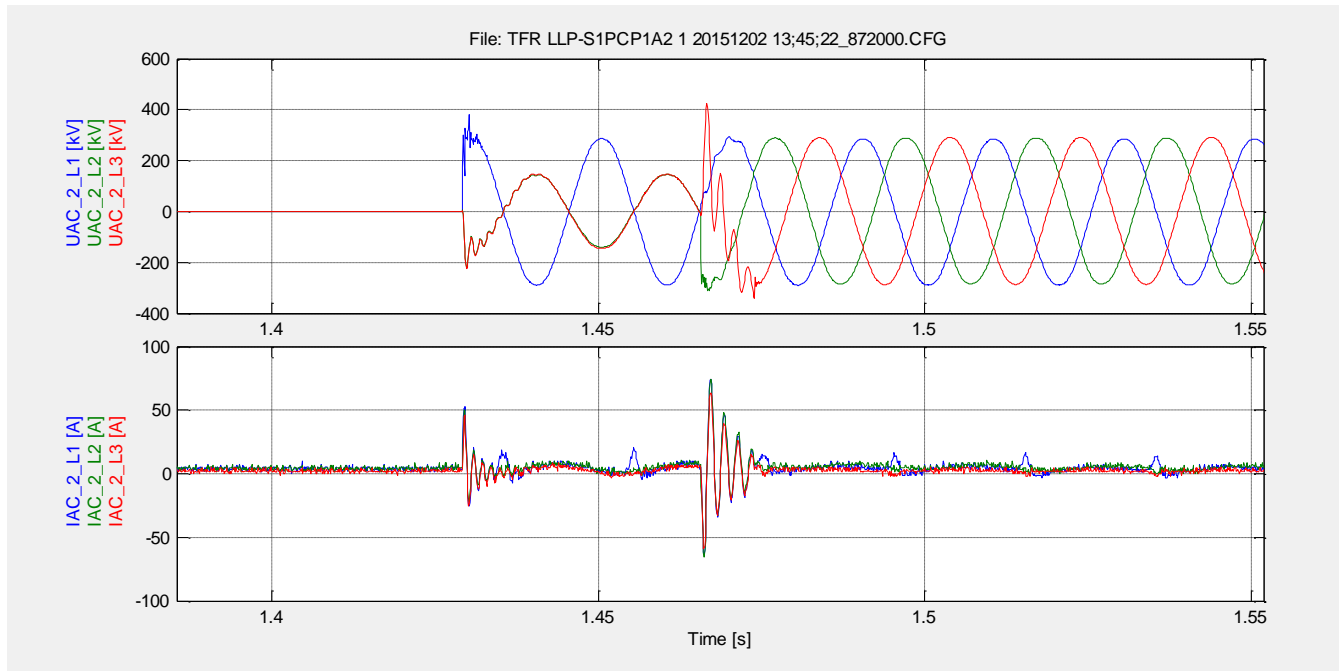


2.2 pav. 330 kV tinklo filtrų srovės ir įtampos charakteristikos

Viršutinis grafikas vaizduoja filtrų sroves, o apatinis – tinklo įtampas filtrų prijungimo metu. Pastebėta, kad grafikai nėra visiškai sinchronizuoti, todėl vėliau buvo atlikti matavimo sistemos pakeitimai ir pašalinti neatitikimai. Prijungus kitus filtrus (Lietuvos ir Lenkijos pusėse yra po tris filtrų blokus) gautos panašios charakteristikos.

2.2.2. 330 kV keitiklių transformatoriaus prijungimas prie tinklo

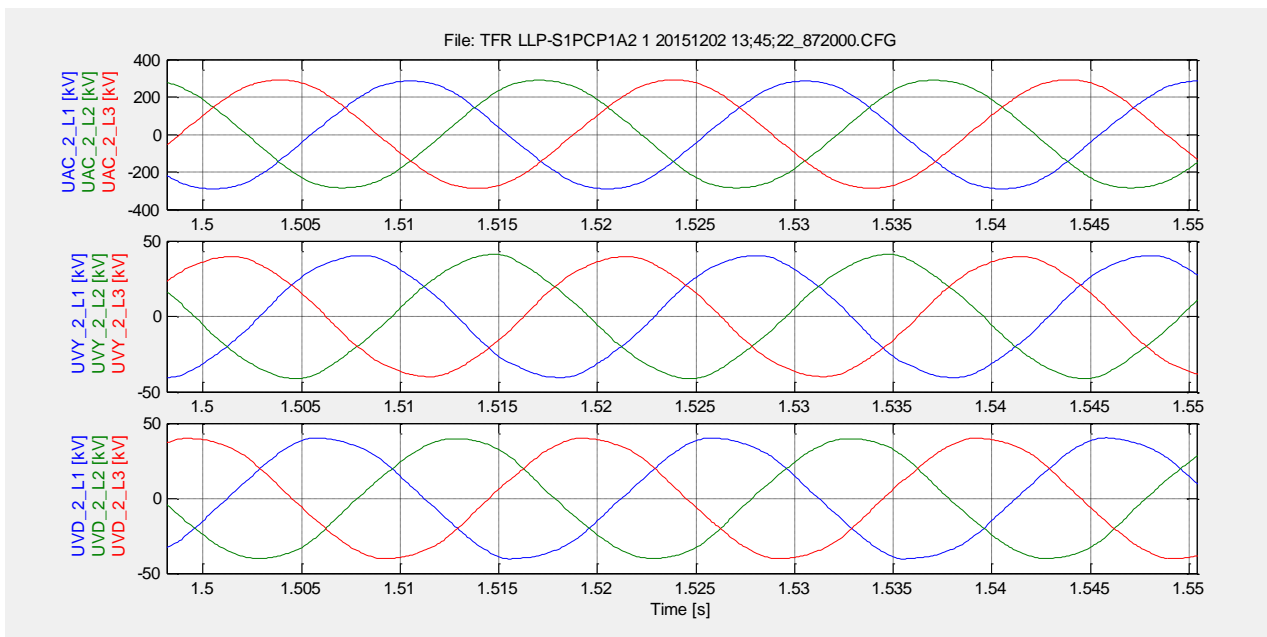
Visi trys vienfaziai transformatoriai prie tinklo prijungiami fiksuotu laiku siekiant išvengti išlyginamųjų srovių tarp fazių. Žemiau pateikiamos transformatoriaus įtamos ir išlyginamosios srovės charakteristikos. Svarbu, kad transformatoriai būtų prijungti prie tinklo tuomet, kai sinusoidės vertė artima maksimaliai, kad išvengti viršįtampių [5].



2.3 pav. 330 kV keitiklio transformatoriaus įtamos ir išlyginamosios srovės charakteristikos

A fazė prijungiama esant teigiamam sinusoidės pusperiodžiui, o B ir C fazės prijungiamos kai sinusoidės yra neigiamuose pusperiodžiuose. Tokie reikalavimai pateikti projektavimo užduotyje [5].

2.3 paveiksle matyti, kad išlyginamosios srovės vertės yra santykinai mažos, todėl galima teigti, kad transformatorius prie tinklo prijungtas sėkmingai.

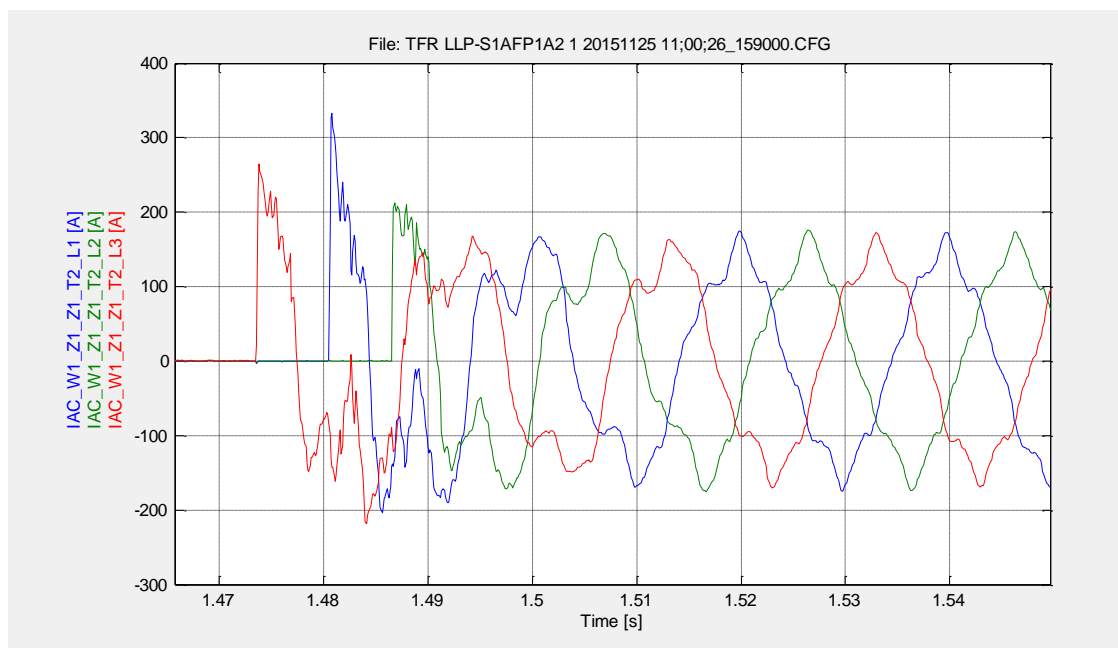


2.4 pav. 330 kV keitiklio transformatoriaus visų apvijų įtampos charakteristikos

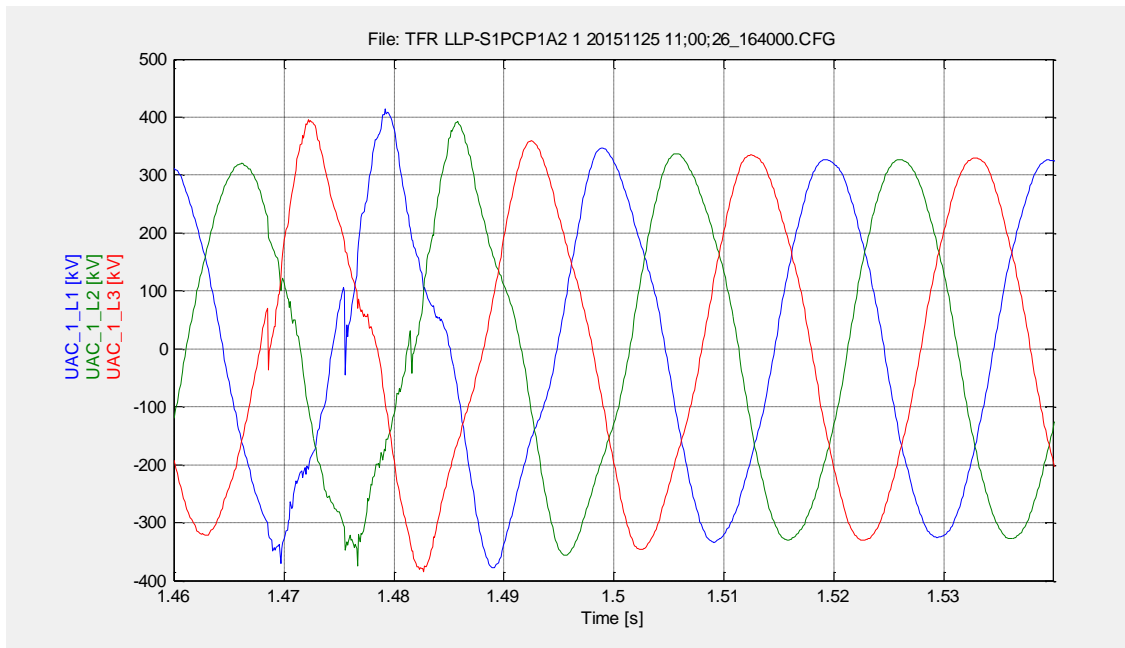
2.4 paveiksle pateiktas pirmasis grafikas vaizduoja pirminių apvijų įtampos vertes, antrasis – antrinių žvaigžde sujungtų apvijų įtampos vertes, o trečiasis – antrinių trikampių sujungtų apvijų įtampos vertes. Antrinių apvijų grafikai patvirtina, kad trikampių sujungtų apvijų įtampa pralenkia žvaigžde sujungtų apvijų įtampos reikšmes.

2.2.3. 400 kV tinklo filtrų prijungimas

Tie patys reikalavimai galioja ir kitoje keitiklio pusėje – filtrai turi būti įjungti tuomet, kai įtampos vertė yra lygi nuliui.



2.5 pav. 400 kV tinklo filtrų prijungimo srovių charakteristika

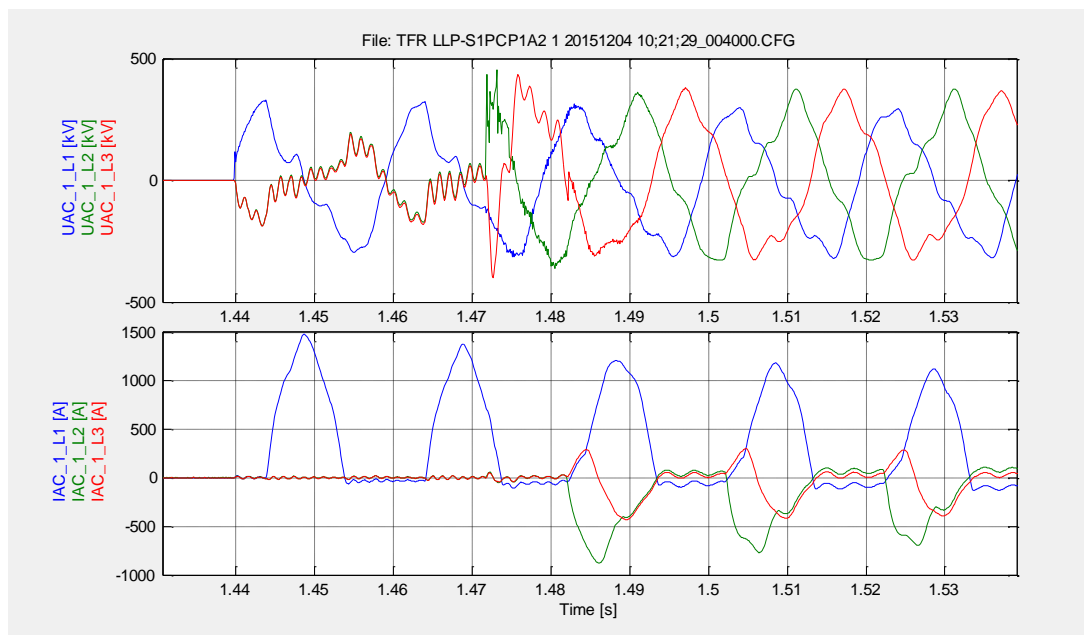


2.6 pav. Įtampos verčių iškraipymas prijungus filtrus

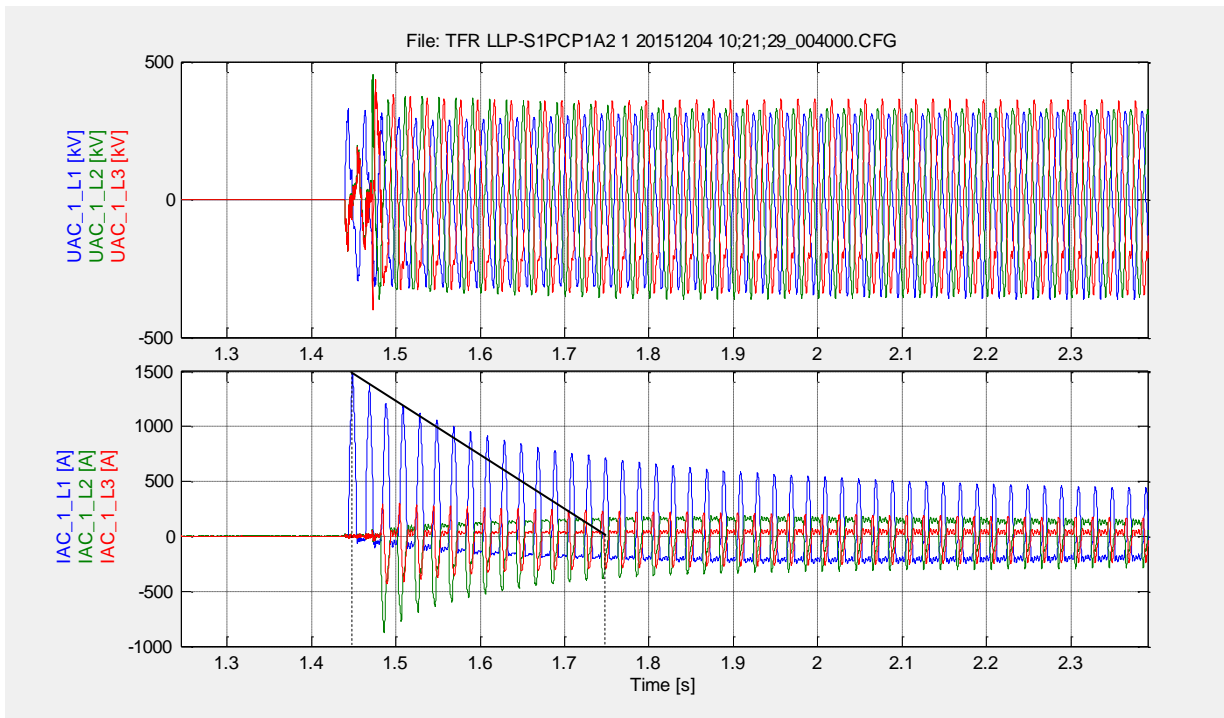
Prijungus kiekvieną filtrų bloką tinklo įtampa padidėja apytiksliai 6 kV (priklausomai nuo tuo metu esamos reaktyviosios galios vertės), todėl svarbu, kad prieš prijungiant filtrus įtampos lygis būtų kontroliuojamas. Įtampos padidėjimas gaunamas dėl filtrų talpinio pobūdžio [6].

2.2.4. 400 kV keitiklių transformatorių prijungimas prie tinklo

Pirmą kartą prijungiant transformatorius prie Lenkijos tinklo (400 kV) A fazės jungtuvas įsijungė neviseškai tiksliai (sinusoidės vertė nebuvo artima maksimaliai), todėl gauta santykinai didelė išlyginamoji srovė.

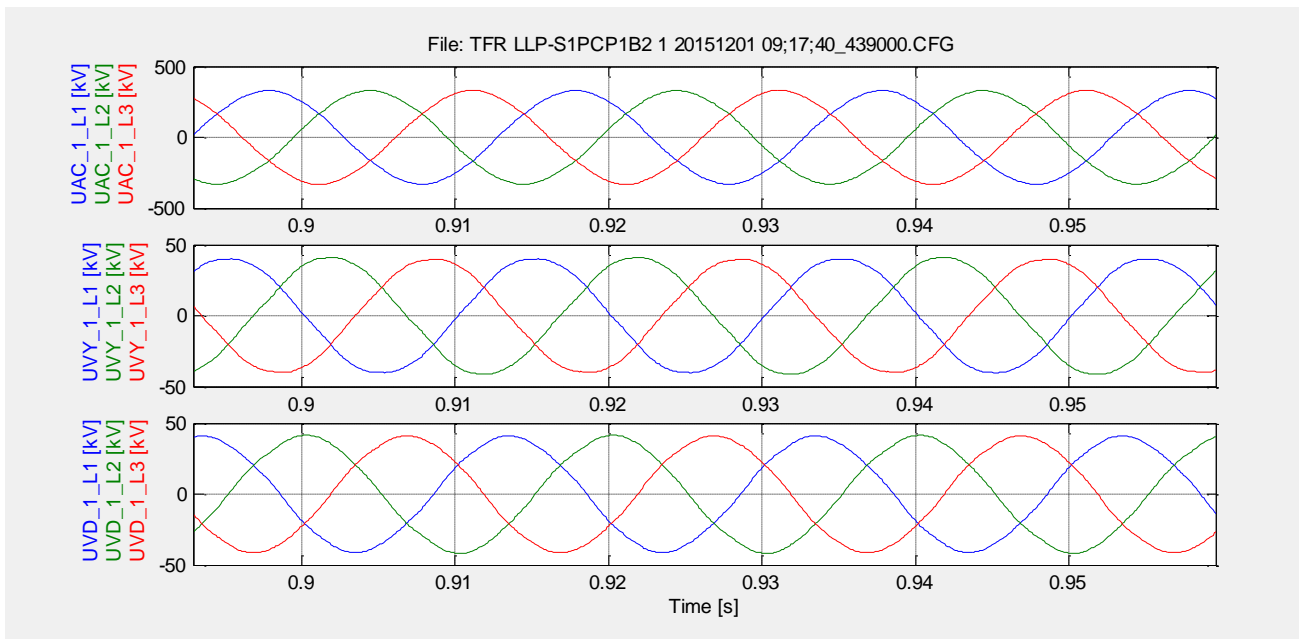


2.7 pav. 400 kV keitiklio transformatoriaus įtampos ir išlyginamosios srovės charakteristikos



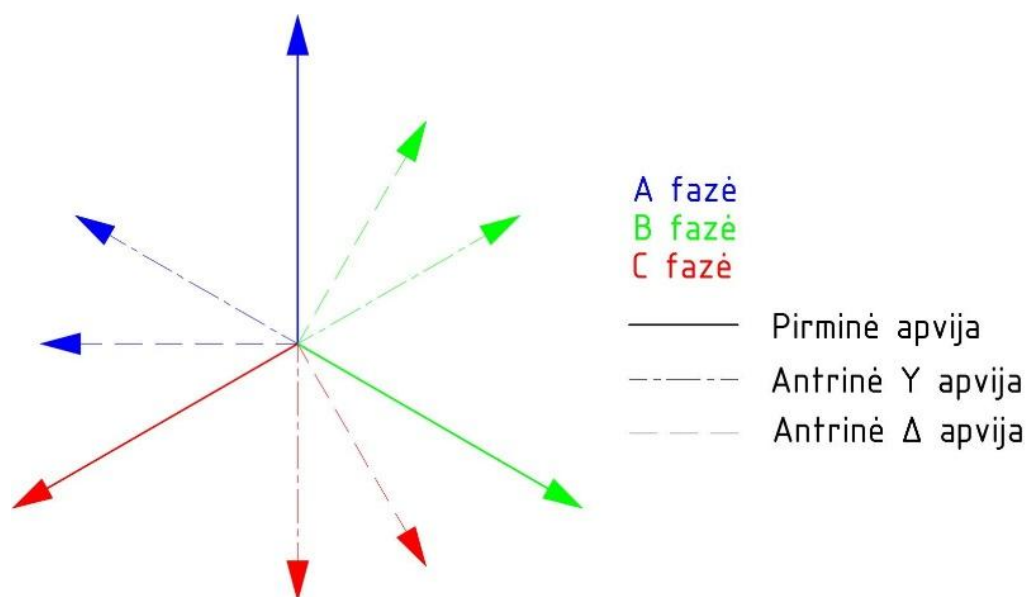
2.8 pav. 400 kV keitiklio transformatoriaus įtampos ir išlyginamosios srovės charakteristikos

2.8 paveiksle pateiktos tos pačios transformatoriaus charakteristikos kaip ir 2.7 paveiksle, tik parinktas didesnis laiko ašies mastelis. Iš išlyginamųjų srovių grafiko nustatoma laiko pastovioji $t_p = 0,3$ sek. Pereinamasis procesas laikomas nusistovėjusiu po $7 \cdot t_p$. Kaip matome, po 2,1 sek. išlyginamoji srovė nusistovi ir pasiekia leidžiamą lygį. Nepaisant to buvo nuspręsta koreguoti jungtuvo valdymo plokštės nustatymus ir įrengti papildomus „Early make“ kontaktus. Atlikus pakeitimus transformatoriaus prijungimas buvo sklandus.



2.9 pav. 400 kV keitiklio transformatoriaus visų apvijų įtampų charakteristikos

400 kV keitiklio transformatoriaus visų apvijų įtampos stabilios bei, kaip ir 330 kV keitiklio transformatoriaus, antrinių trikampių sujungtų apvijų įtampa pralenkia žvaigžde sujungtų apvijų įtampos reikšmes. Tai nesudėtinga nustatyti iš fazorių diagramos, pateiktos 2.10 paveiksle.



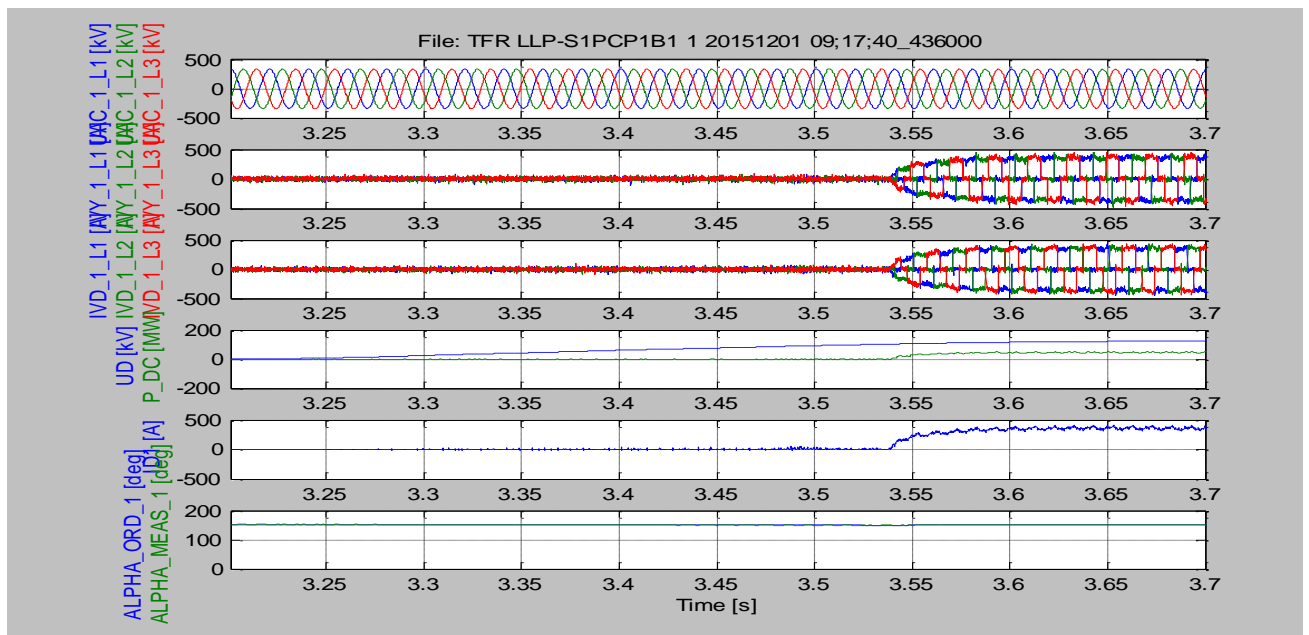
2.10 pav. Keitiklio transformatoriaus įtampų fazorių diagrama

2.3. LitPol Link jungties galios perdavimo analizė

Galios perdavimo analizės pagrindinis tikslas yra nustatyti stabilaus darbo ribas, iširti tinklo reakciją į tam tikrus sistemos pasikeitimus.

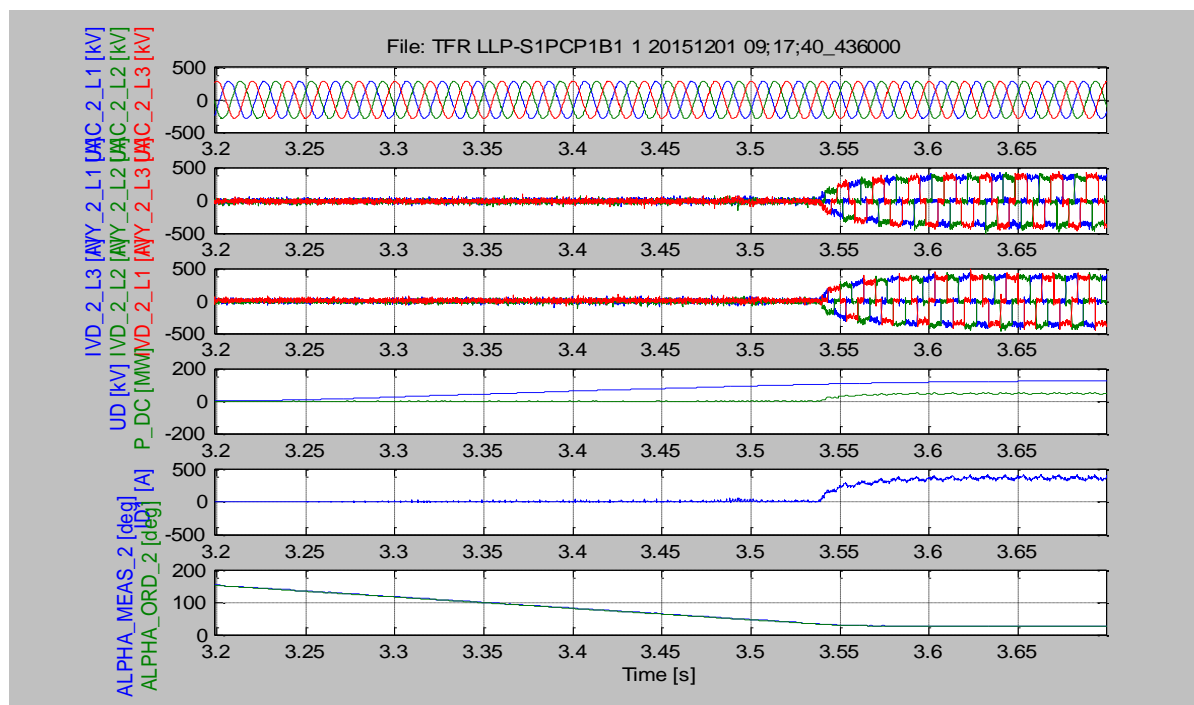
2.3.1. Ventilių deblokavimas

Pirmasis ventilių deblokavimas veikė taip kaip ir tikėtasi, įtampos ir srovės vertės stabilios. Pirmiausiai deblokuojamas lygintuvas, kad įkrauti DC grandį, tada siunčiamas signalas į inverterį, kuris atidaro tiristorius ir taip pradedamas galios perdavimas. Normali galios kryptis laikoma iš Lietuvos į Lenkiją.



2.11 pav. 400 kV tinklo keitiklio prijungimo charakteristikos

2.11 paveiksle pateikta pirmoji charakteristika vaizduoja 400 kV tinklo kintamosios įtampos vertes, kV; antroji ir trečioji – keitiklio transformatoriaus antrinės, sujungtos žvaigžde ir antrinės, sujungtos trikampiū apvijomis tekančių srovių charakteristikas, A; ketvirtasis grafikas vaizduoja išlygintos įtampos, kV (mėlyna kreivė) ir keitiklio perduodamos galios, MW (žalia kreivė) reikšmes; penktasis grafikas vaizduoja srovę, tekančią pro tiristorius, A; Šeštasis grafikas – tai keitiklio pusės (Lenkija) tiristorių valdymo kampo α reikšmės.

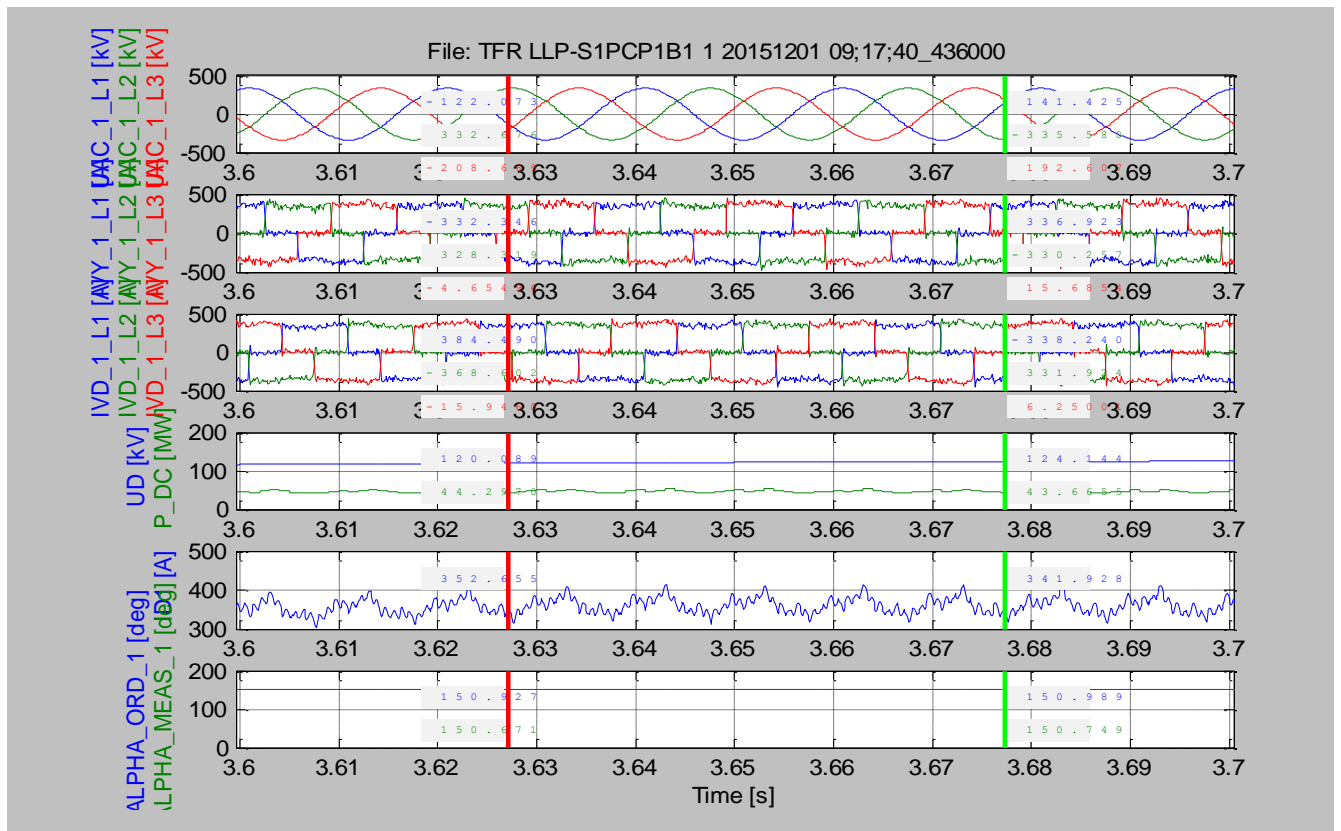


2.12 pav. 330 kV tinklo keitiklio prijungimo charakteristikos

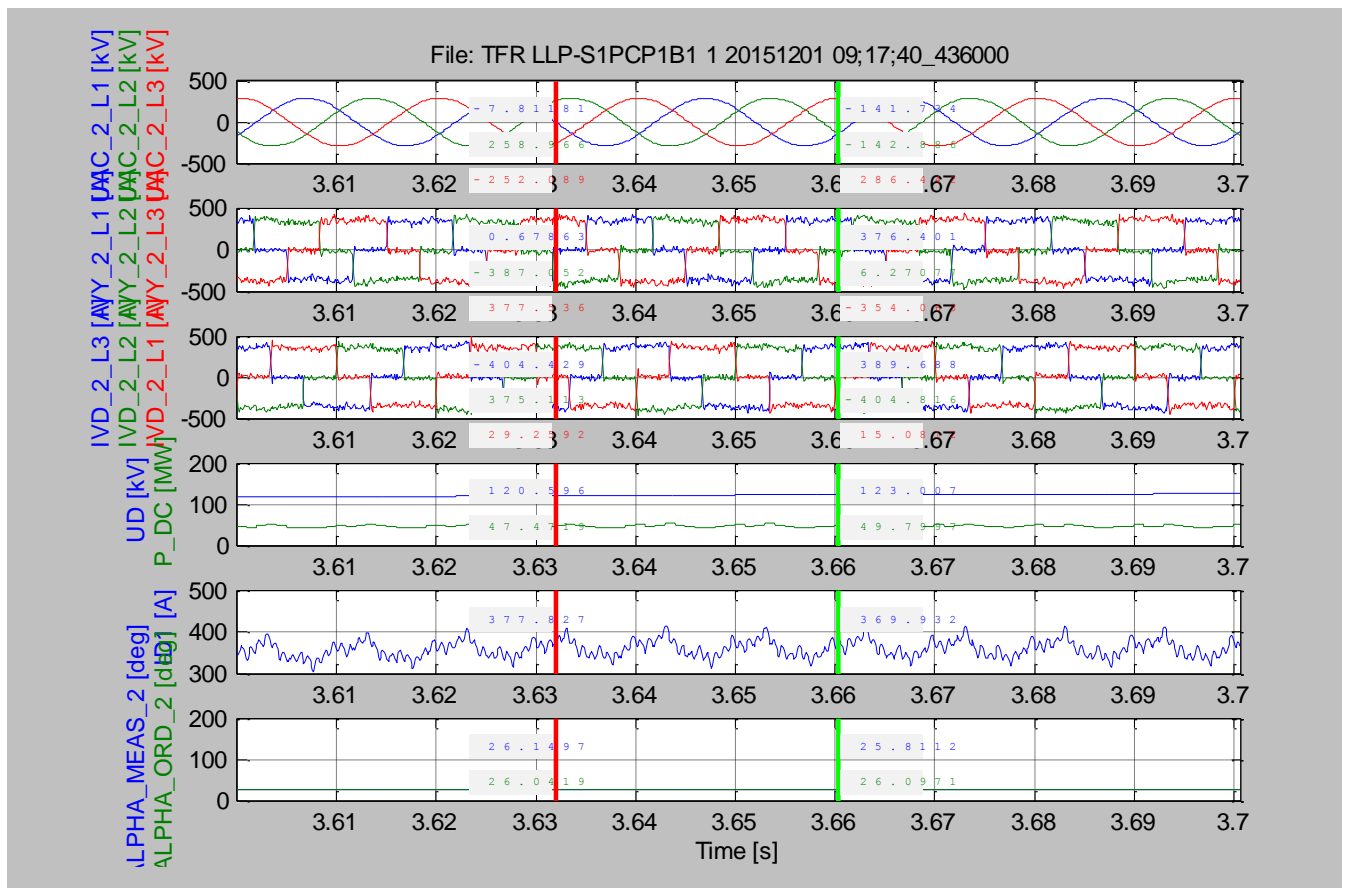
2.12 paveiksle pateiktos tokios pačios charakteristikos kaip ir 2.11 paveiksle, tik jos vaizduoja vertes lygintuvo (Lietuvos) pusėje. Kaip matome α kampas palaipsniui mažinamas iki pasiekiamos minimali reikiama įtampa ir tuomet keitiklis pilnai deblokuojamas (pradeda tekėti srovė).

2.3.2. Keitiklio minimalios galios perdavimas

Minimali gala, kurią gali perduoti LitPol Link keitiklis yra 50 MW. Esant mažesnei galiai sistemos valdymas tampa sudėtingesnis ir gaunamas nestabilus darbo režimas.



2.13 pav. 400 kV tinklo keitiklio charakteristikos

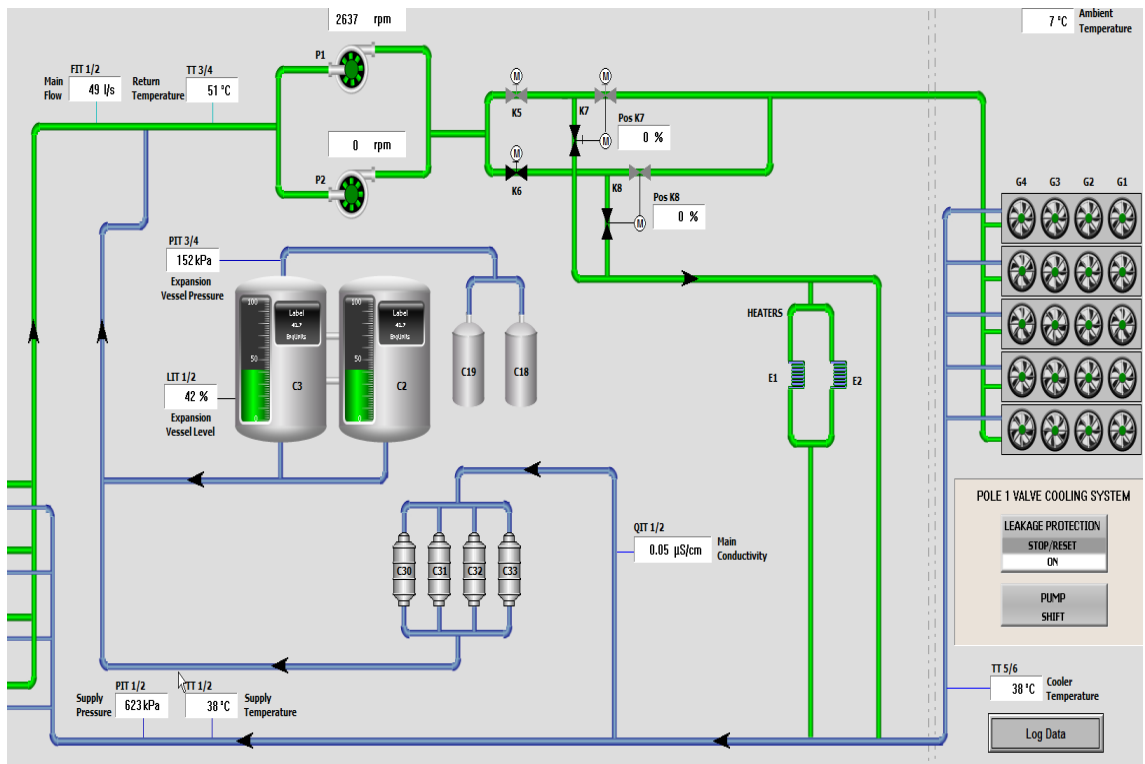


2.14 pav. 330 kV tinklo keitiklio charakteristikos

2.13 ir 2.14 paveiksluose pateiktuose grafikuose matyti, kad keitiklio darbas yra stabilus. Perduodama minimali galia, $U_D = 122$ kV, $I_D = 377,8$ A. Lygintuvo pusėje $\alpha = 26^\circ$, Inverterio – $150,9^\circ$ ($\gamma = 29,1^\circ$).

2.3.3. Keitiklio veikimas maksimalia galia

Siekiant ištirti keitiklio reakciją į didelę apkrovą buvo atliktas maksimalios galios perdavimo bandymas, kuris truko 10 valandų. Išmatuotos visų sistemos elementų temperatūros prieš keitiklio įjungimą ir po jo. Užfiksuotas vidutinis aušinimo sistemos skysčio temperatūros prieaugis – $34,2$ °C.



2.15 pav. LitPol Link jungties aušinimo sistemos parametrai po 10 val keitiklio veikimo maksimalia galia

2.15 paveiksle pateikiama LitPol Link sistemos aušinimo schema bei pagrindiniai jos parametrai, t. y. aušinimo skysčio kiekis, slėgis, tekėjimo srautas bei temperatūra.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1. Modeliavimas

Šioje darbo dalyje nagrinėjamas AC-DC lygintuvas su tiristoriniais ventiliais. Tokie lygintuvai naudojami vadinamose HVDC LCC (*Line Commutated Converter*) arba CSC (*Current Source Converter*) sistemose. Kadangi tiristorius yra elektronikos komponentas, todėl modeliavimui buvo pasirinkta galios elektronikos modeliavimo programa „MicroCap“.

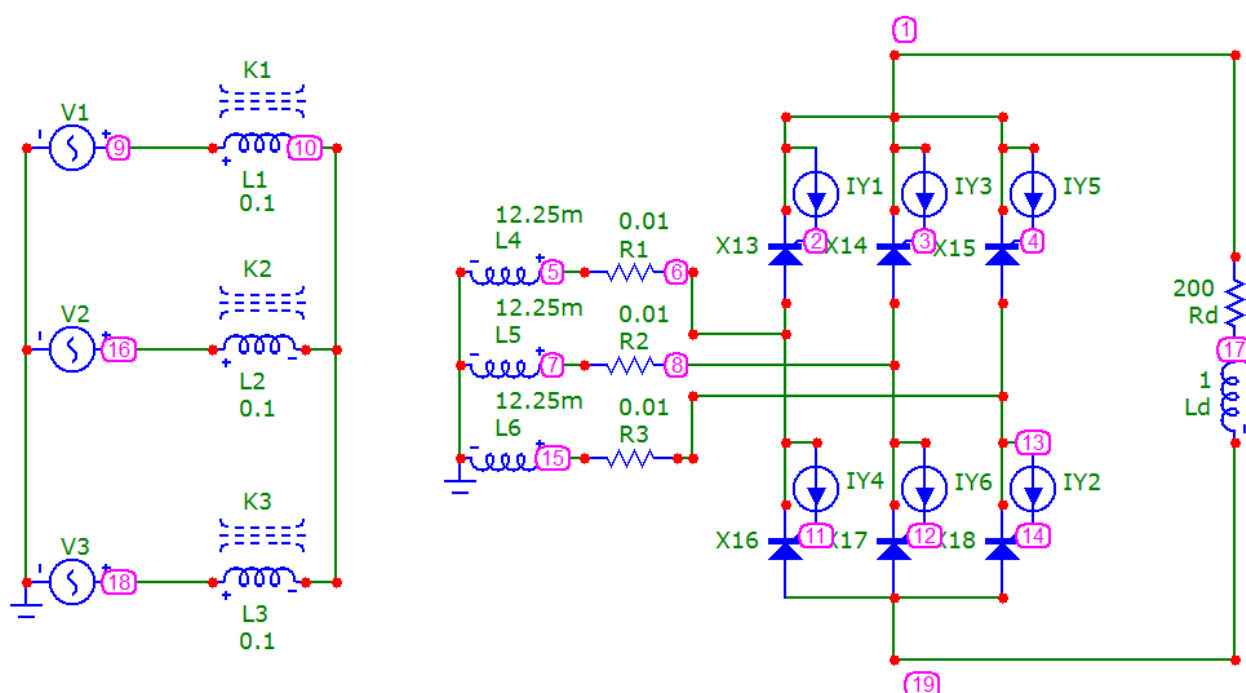
Darbo tikslas yra ištirti lygintuvo išlygintos įtampos priklausomybę nuo tiristorių atidarymo kampo α bei nustatyti stabilaus darbo ribas. Taip pat atliekamas tyrimas, kurio metu nustatoma, kaip kinta lygintuvo darbas keičiantis apkrovos pobūdžiui (aktyvioji ar aktyvioji-induktyvioji apkrova).

Išskiriamos dvi tiristorinių lygintuvų grupės:

- 6 pulsacijų lygintuvas;
- 12 pulsacijų lygintuvas.

3.1.1. 6 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis

Panaudojant programinę įrangą „MicroCap“ sumodeliuojamas 6 pulsacijų lygintuvas.



3.1 pav. 6 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis

Anksčiau pateiktame modelyje matyti trifazis tinklas, prie kurio prijungtas galios transformatorius. Transformatoriaus antrinė apvija sujungta žvaigžde, prie kurios prijungtas tiristorinis lygintuvas. Tarp (1) ir (19) mazgų prijungta apkrova.

Transformacijos faktorius randamas naudojantis šiomis formulėmis:

$$K_T = \frac{U_2}{U_1}; \quad (3.1)$$

$$K_T = N \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}; \quad (3.2)$$

$$L_2 = K_T^2 \cdot L_1. \quad (3.3)$$

Čia:

K_T – transformacijos faktorius;

N – galios naudingumo faktorius;

L_1, L_2 – pirminės ir antrinės apvijų induktyvumai, H;

U_1, U_2 – pirminės ir antrinės apvijų įtampos, V.

Modelio įtampos parinktos tokios, kad vėliau pagal tą patį modelį būtų galima atlikti eksperimentinį tyrimą. Tinklo įtampa parinkta pagal esamą Lietuvoje vartojamą įtampą $U_1 = 400$ V. Transformatoriaus antrinė įtampa parinkta pagal laboratorijoje esamą įrangą, kad modelį būtų galima patikrinti eksperimentiniu būdu. Galios transformatoriaus antrinės apvijos induktyvumas L_2 apskaičiuojama panaudojant 3.1 – 3.3 formules.

$$U_1 = 400 \text{ V};$$

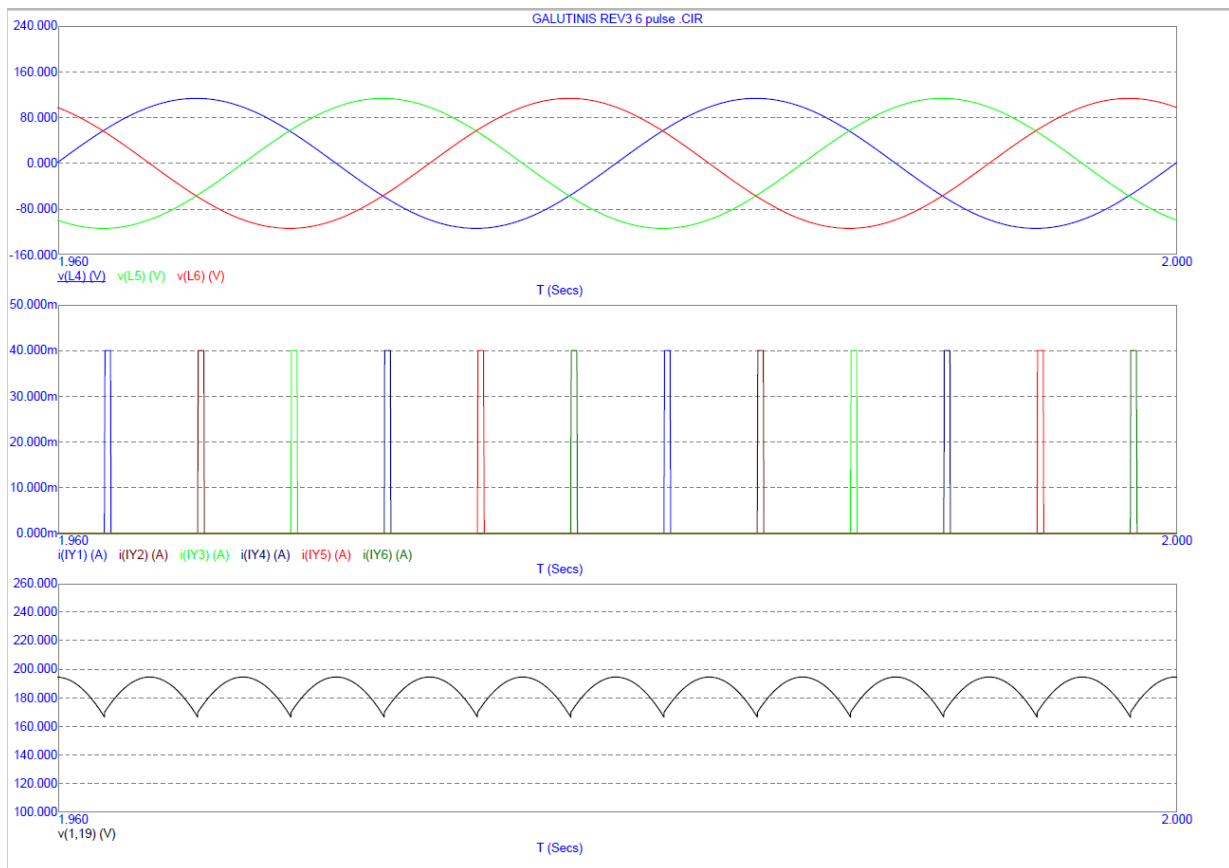
$$U_{2Y} = 140 \text{ V};$$

$$L_1 = 0,1 \text{ H}.$$

$$K_{TY} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{140}{400} = 0,35; \quad (3.4)$$

$$L_{2Y} = K_{TY}^2 \cdot L_1 = 0,35^2 \cdot 0,1 = 12,25 \text{ mH}. \quad (3.5)$$

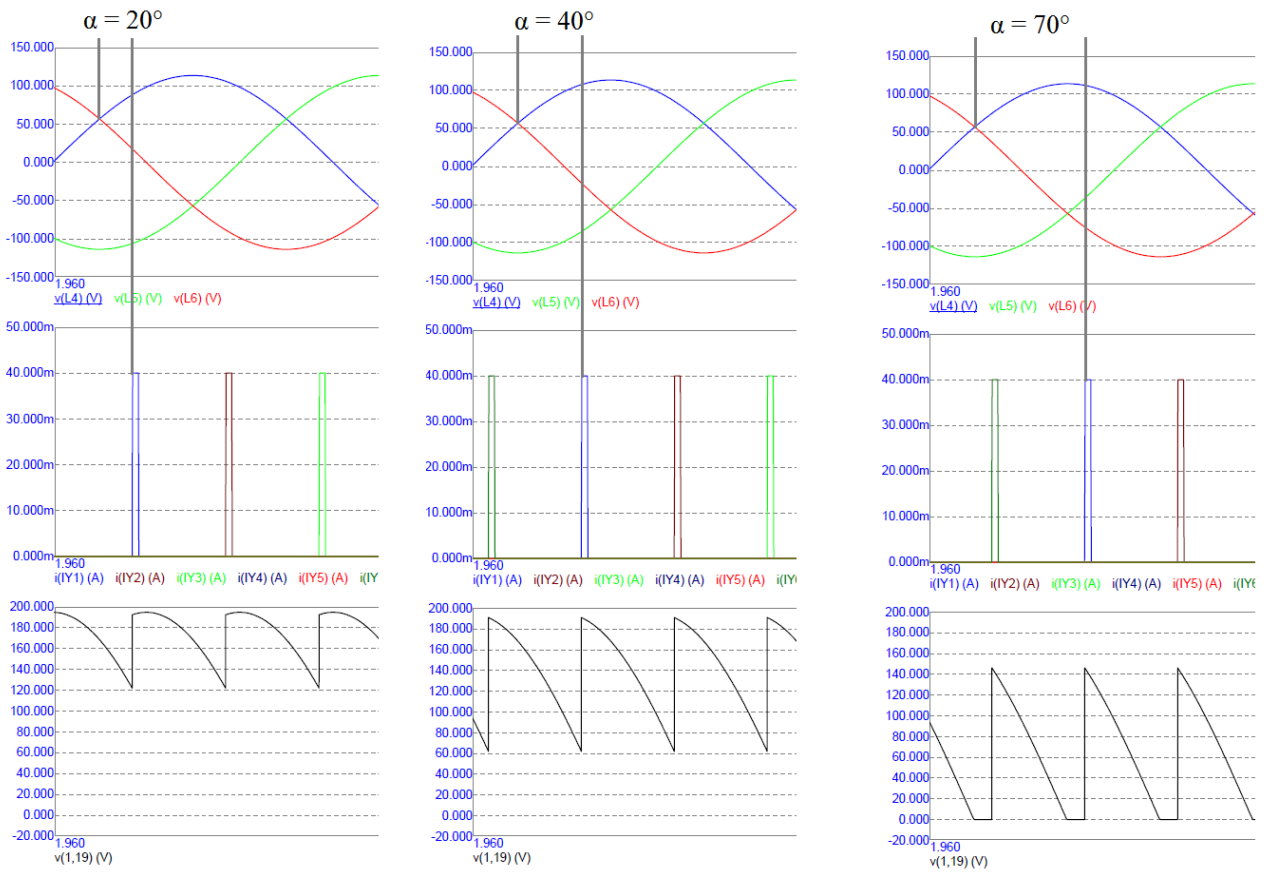
Modelio galios transformatoriaus antrinėje apvijoje įvedama apskaičiuota reikšmė. Tiristoriai atidaromi kas 60 laipsnių.



3.2 pav. 6 pulsų lygintuvo charakteristikos

3.2 paveikslo pirmame grafike pateiktos transformatoriaus antrinės apvijos įtampos (fazinės) charakteristikas, antrajame – tiristorių atidarymo impulsai ($\alpha = 0$), trečiajame – apkrovos įtampa.

Apkrovos įtampos reikšmė priklauso nuo tiristorių atidarymo kampo α .

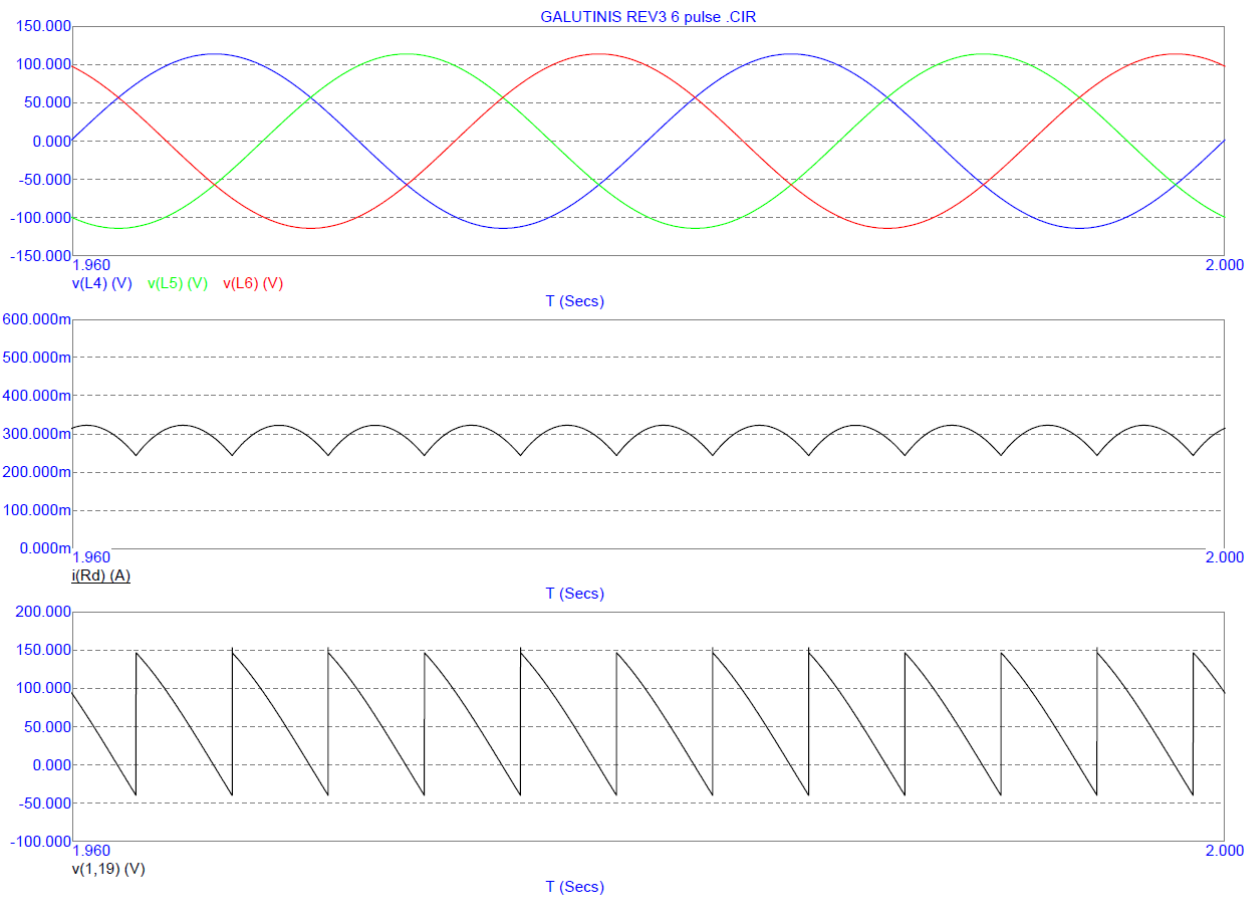


3.3 pav. 6 pulsų lygintuvo DC įtampos priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α

Iš anksčiau pateikto grafiko matyti, kad išlygintos įtampos lygis atvirkščiai proporcingas tiristorių valdymo kampui α .

Modeliavimo metu ištiriama įtampos priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α bei palyginama su teorinėmis reikšmėmis (apskaičiuotos naudojantis 1.4 – 1.6 formulėmis) ir eksperimentinio tyrimo metu gautais rezultatais (žr. 3.3 skyrių).

Kai apkrova yra aktyvinio-induktyvinio pobūdžio, tuomet tiristorius neužsidaro net esant neigiamai įtampai, nes tuo metu per jį dar teka elektros srovė.

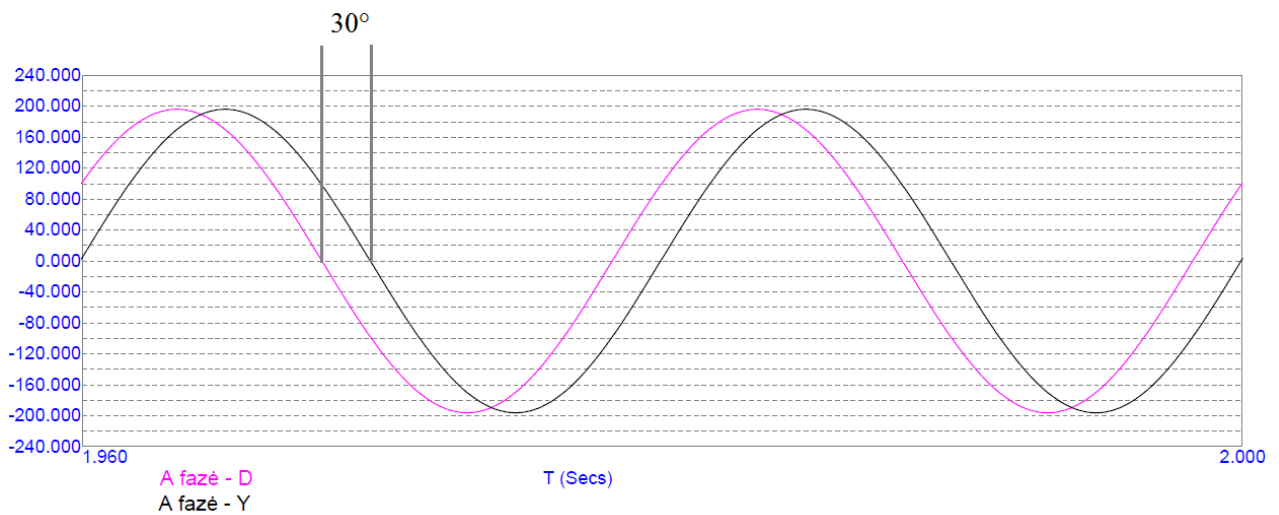


3.4 pav. 6 pulsų lygintuvo DC įtampos charakteristika kai $L > 0$

Anksčiau pateiktame paveiksle matome transformatoriaus antrinės apvijos įtampos charakteristikas, per apkrovą tekančios srovės charakteristiką bei išlygintos įtampos charakteristiką. Tokios parametrų reikšmės gaunamos tada, kai tiristorių valdymo kampas $\alpha = 70^\circ$, apkrovos $R_d = 200 \Omega$, $L_d = 1 \text{ H}$.

3.1.2. 12 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis

12 pulsacijų lygintuvas gaunamas panaudojant galios transformatorių su dviem antrinėmis apvijomis, kurių viena sujungta žvaigžde, kita – trikampi. Naudojant tokią apvijų jungimo kombinaciją gaunamas 30° kampas tarp tos pačios fazės skirtingų apvijų įtampos charakteristikų. Dvylikos pulsacijų lygintuvo išėjimo įtampos charakteristikos pulsacijų amplitudė yra mažesnė. Be to gaunama didesnė išlygintos įtampos reikšmė bei naudingumo faktorius.



3.5 pav. skirtingų apvijų vienos fazės įtampos kampo skirtumas

3.1 paveiksle pateiktas matematinis modelis papildomas pridedant trečiąją transformatoriaus apviją, kuri sujungiama trikampiū. Prie šios apvijos prijungiamas dar vienas tiristorinis lygintuvas, kuris su prieš tai sumodeliuotu tiristoriniu lygintuvu sujungiamas nuosekliai. Trikampiū sujungtos apvijos transformacijos koeficientas apskaičiuojamas taip, kad apvijų įtampa būtų $\sqrt{3}$ karto didesnė:

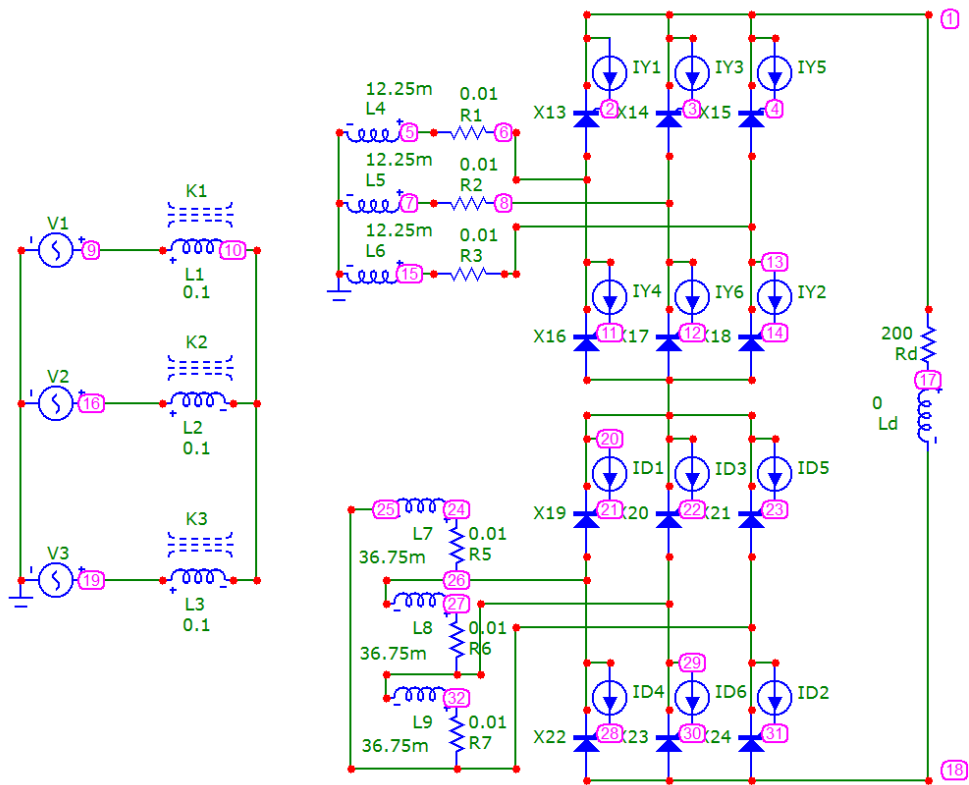
$$U_1 = 400 \text{ V};$$

$$U_{2\Delta} = 140 \cdot \sqrt{3} \text{ V};$$

$$L_1 = 0,1 \text{ H}.$$

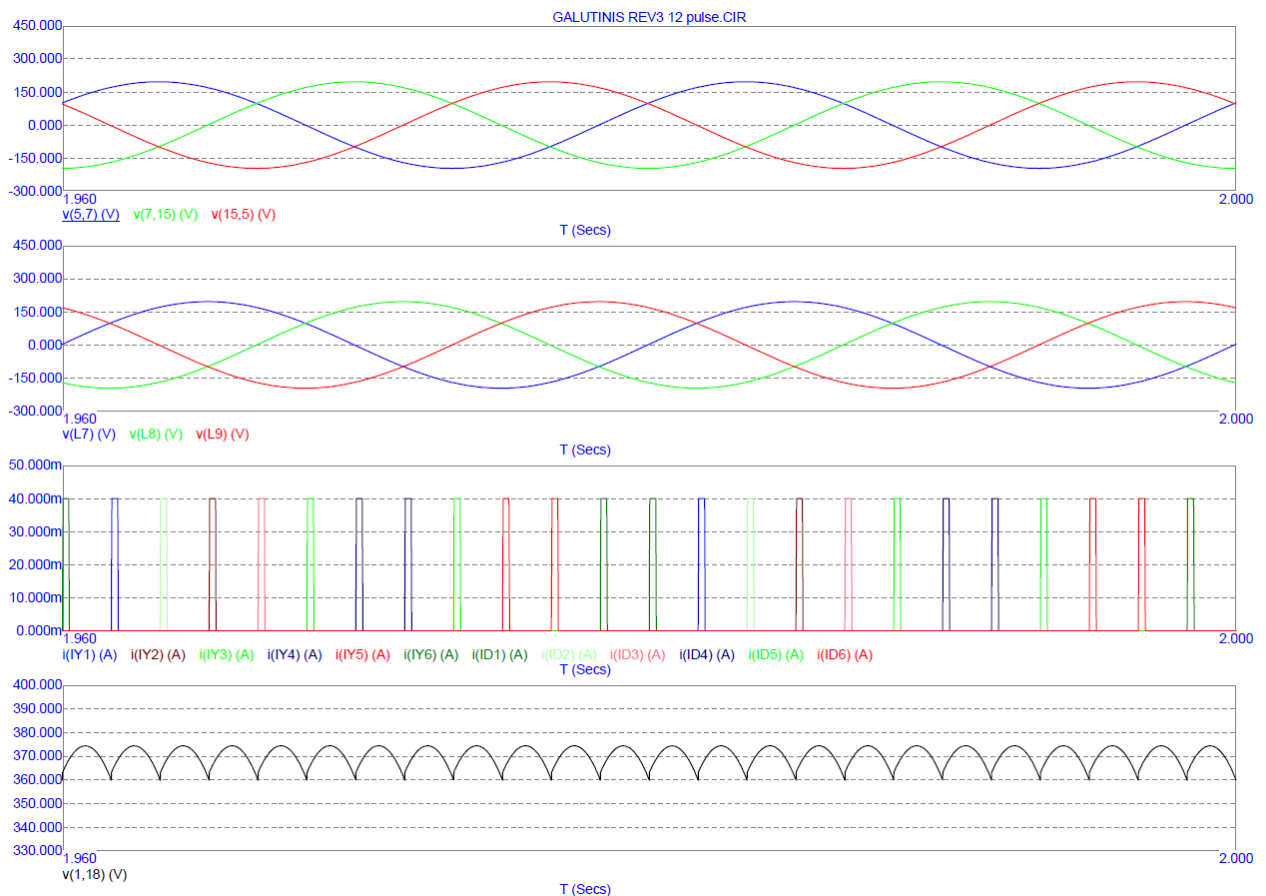
$$K_{T\Delta} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{140 \cdot \sqrt{3}}{400} = 0,6062; \quad (3.6)$$

$$L_{2\Delta} = K_{T\Delta}^2 \cdot L_1 = 0,35^2 \cdot 0,1 = 36,75 \text{ mH}. \quad (3.7)$$



3.6 pav. 12 pulsacijų lygintuvo matematinis modelis

3.6 paveiksle pateiktas matematinis modelis sudarytas iš trifazio tinklo, prie kurio prijungtas galios transformatorius su dviem antrinėmis apvijomis, kurių viena sujungta žvaigžde, o kita – trikampiū. Prie abiejų apvijų prijungti tiristoriniai lygintuvai, kurie tarpusavy sujungti nuosekliai. Toks jungimas formuoja 12 pulsacijų išlygintą įtampą apkrovoje. Tiristoriai atidarinėjami kas 30° .



3.7 pav. 12 pulsacijų lygintuvo charakteristikos

3.7 paveikslo pirmame grafike matome transformatoriaus antrinės žvaigžde sujungtos apvijos linijinės įtampos charakteristikas, antrajame – transformatoriaus antrinės trikampių jungtos apvijos įtampos charakteristikas, trečiajame – tiristorių atidarymo impulsai ($\alpha = 0$), ketvirtajame – apkrovos įtampa. Aiškiai matyti, kad vieno sinusoidės periodo metu išėjimo įtampoje yra 12 impulsų.

3.2. Eksperimentinis tyrimas

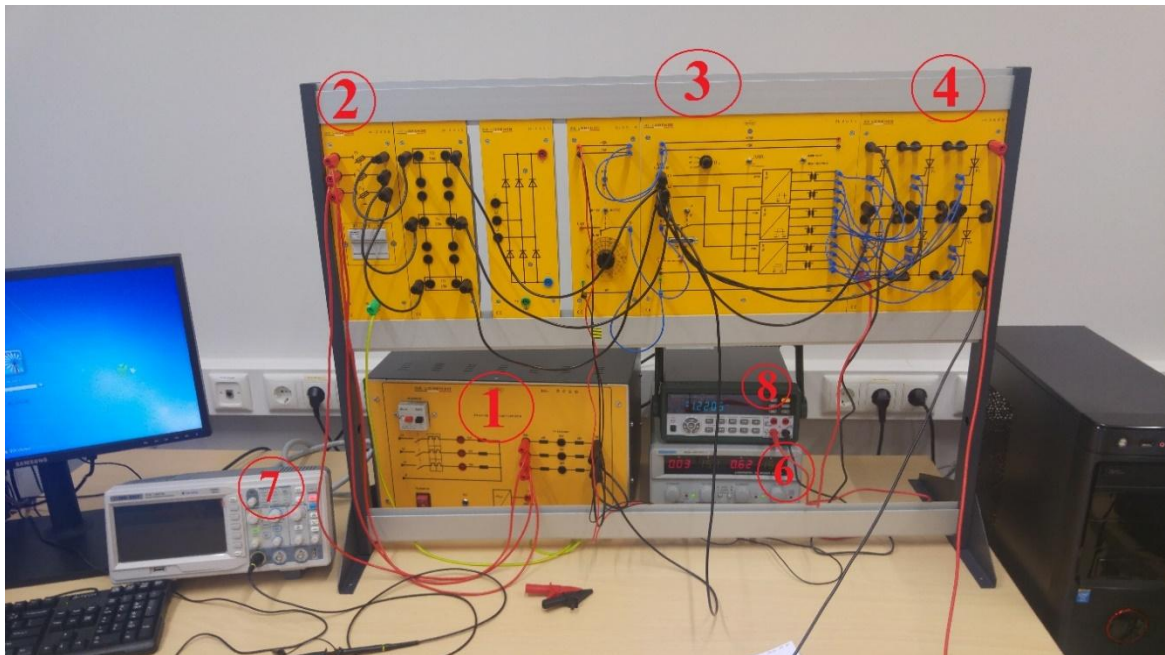
3.2.1. 6 pulsacijų lygintuvo eksperimentinis tyrimas

Eksperimentinis tyrimas atliekamas naudojantis laboratorijoje esama įranga. Sujungiama schema, atitinkanti anksčiau sumodeliuotą 6 pulsacijų lygintuvą (3.1 pav). Eksperimento tikslas – naudojantis realiais elementais patikrinti lygintuvo darbą bei ištirti išėjimo įtampos priklausomybę nuo tiristorių valdymo kampo α .

3.8 paveiksle pateikiama eksperimentinio tyrimo darbo vieta. Eksperimentinio tyrimo darbo vietą sudaro:

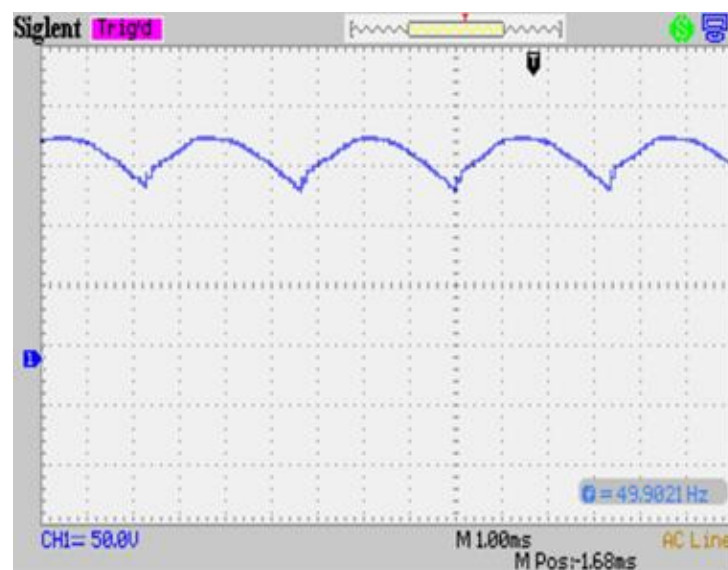
1. Galios transformatorius;
2. Saugiklių-kirtiklių blokas;
3. Tiristorių valdymo blokas;
4. Tiristorinis tiltelis (lygintuvas);

5. Kompiuteris;
6. Srovės šaltinis;
7. Oscilografas;
8. Multimetras.



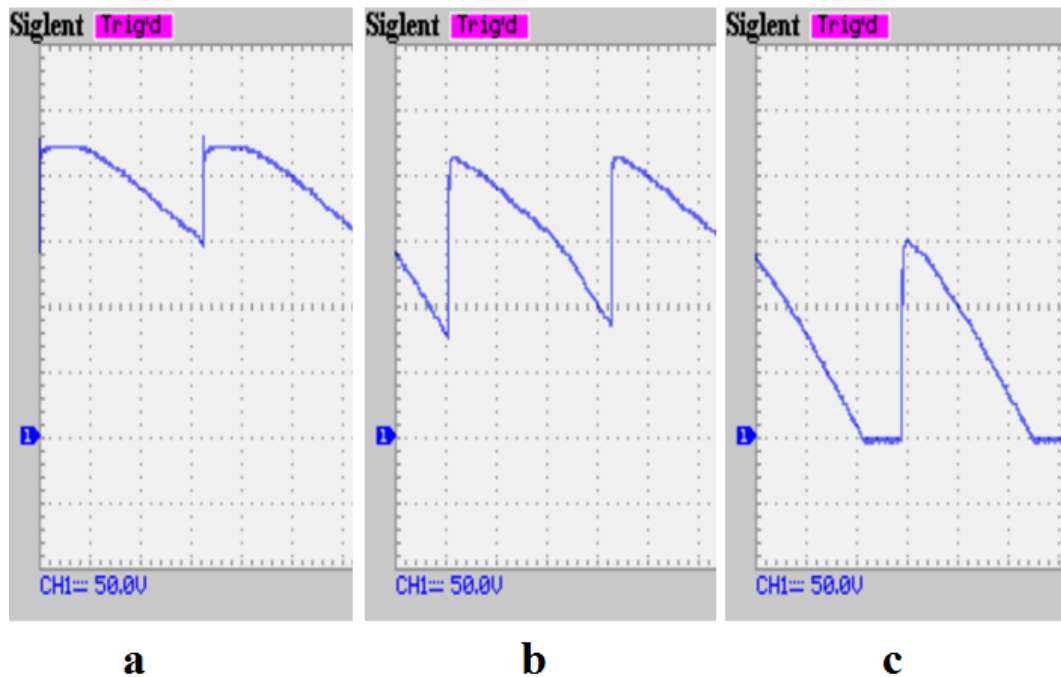
3.8 pav. Eksperimentinio tyrimo darbo vieta

Galios transformatoriaus pirminė apvija prijungiama prie tinklo, o antrinė apvija sujungiama žvaigžde. Antrinės apvijos fazinė įtampa $U_{2f} = 80$ V. Saugiklių-kirtiklių blokas skirtas apsaugoti laboratorijos įrangą nuo per didelių srovių, kurios gali atsirasti klaidingai sujungus schemą arba dėl neteisingų skaičiavimų. Kompiuteris naudojamas oscilografo reikšmėms išsaugoti. Srovės šaltinis skirtas tiristorių valdymui – srovės impulsams sudaryti.



3.9 pav. 6 pulsų lygintuvo eksperimentinio tyrimo išlygintos įtampos charakteristika ($\alpha = 0$)

Kaip matome, 3.9 paveiksle pateikta charakteristika artima matematinio modeliavimo metu gautai išėjimo (išlygintos) įtampos charakteristikai.



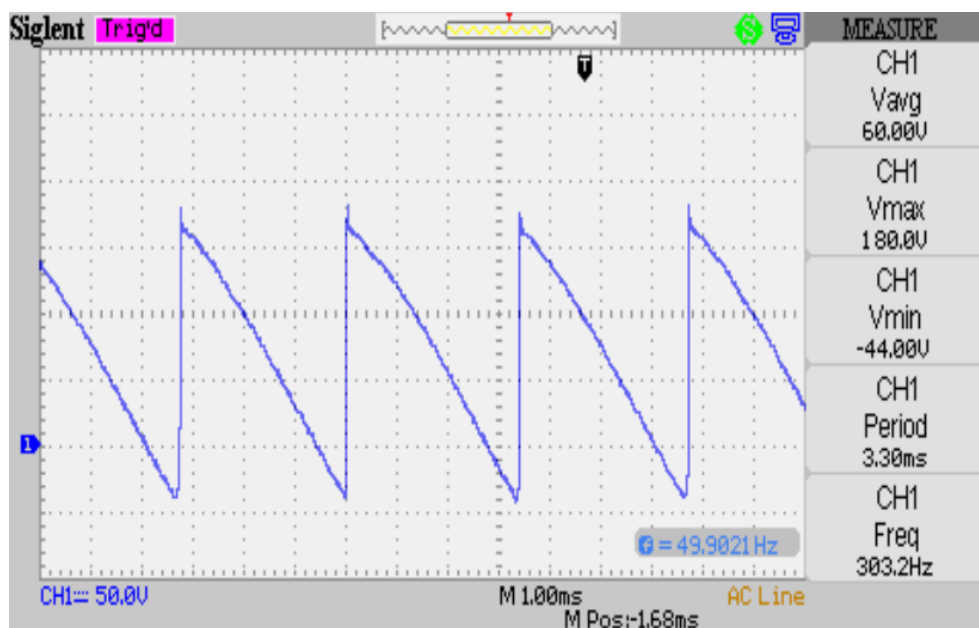
3.10 pav. 6 pulsų lygintuvo eksperimentinio tyrimo išlygintos įtampos charakteristikos, kai:

a) $\alpha = 20^\circ$; b) $\alpha = 40^\circ$; c) $\alpha = 70^\circ$

b)

Kaip jau aptarta modeliavimo dalyje, esant aktyviajai apkrovai įtampa negali būti neigiama (tistorius užsidaro kai per jį nustoja tekėti srovė).

Atliktas eksperimentinis tyrimas kai prijungta aktyvioji-induktyvioji apkrova $R_d = 200\Omega$, $L_d = 0,1$ H. Gauta įtampos charakteristika pateikiama 3.11 paveiksle.



3.11 pav. 6 pulsų lygintuvo įtampos charakteristika, kai $L_d > 0$

3.2.2. 12 pulsacijų lygintuvo eksperimentinis tyrimas

Dvylikos pulsacijų lygintuvo eksperimentinis tyrimas atliekamas naudojant du laboratorinius standus. Sujungiama schema, kuri sumodeliuota 3.1.2 poskyryje, tačiau vietoj trijų apvijų galios transformatoriaus naudojamas papildomas autotransformatorius, kurio antrinė apvija sujungiama trikampiū, nes laboratorijoje nėra galimybės nustatyti skirtingus transformacijos koeficientus dviem antrinėms to paties transformatoriaus apvijoms.

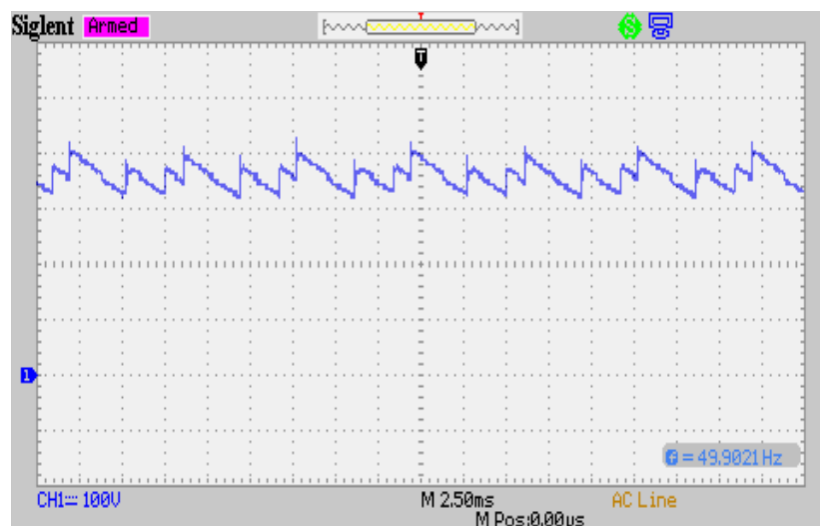


3.12 pav. Laboratorijoje naudojamas autotransformatorius

Anksčiau pateiktame paveiksle matome autotransformatorių, kurio antrinė apvija sujungta trikampiū. Transformacijos faktorius parenkamas toks, kad

$$U_{2Af} = \sqrt{3} \times U_{2Yf}. \quad (3.8)$$

Sujungus dvi darbo vietas į vieną bendrą schemą (pagal 3.1.2. poskyryje pateiktą modelio schemą) tikimasi gauti dvylikos pulsacijų išlygintą įtampą, tačiau U_d išėjimo charakteristika nesutampa su matematinio modeliavimo metu gauta charakteristika (palyginami 3.7 ir 3.13 paveikslai). Tikėtina, kad pagrindinė nesutapimo priežastis yra ta, jog naudoti du skirtingi galios transformatoriai, kas apsunkino viso eksperimento eigą bei tiristorių valdymo kampo reguliavimą.



3.13 pav. 12 pulsacijų lygintuvo išėjimo įtampos charakteristika

Kaip matome anksčiau pateiktame paveiksle – įtampos reikšmė gaunama gerokai didesnė nei naudojant 6 pulsacijų lygintuvo schemą.

Tyrimo rezultatai aptariami 3.3. dalyje.

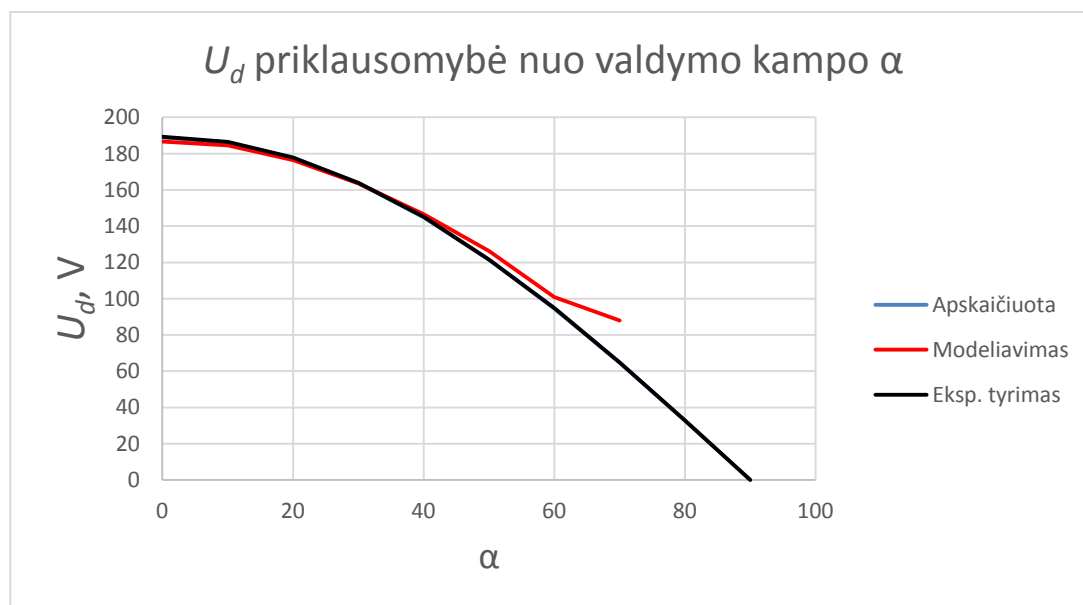
3.3. Tyrimo rezultatų analizė

3.3.1. 6 Pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai

3.1 lentelė. 6 pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai

	α	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Apskaičiuota	U_d, V	189	186,1	177,6	163,7	144,8	121,5	94,5	64,6	32,8	0
Modeliavimas		186,6	184,6	176,4	163,6	146,5	126,3	100,8	87,9	-	-
Eksp. tyrimas		189,3	186,5	177,8	163,8	145,2	121,5	94,8	64,8	32,9	0

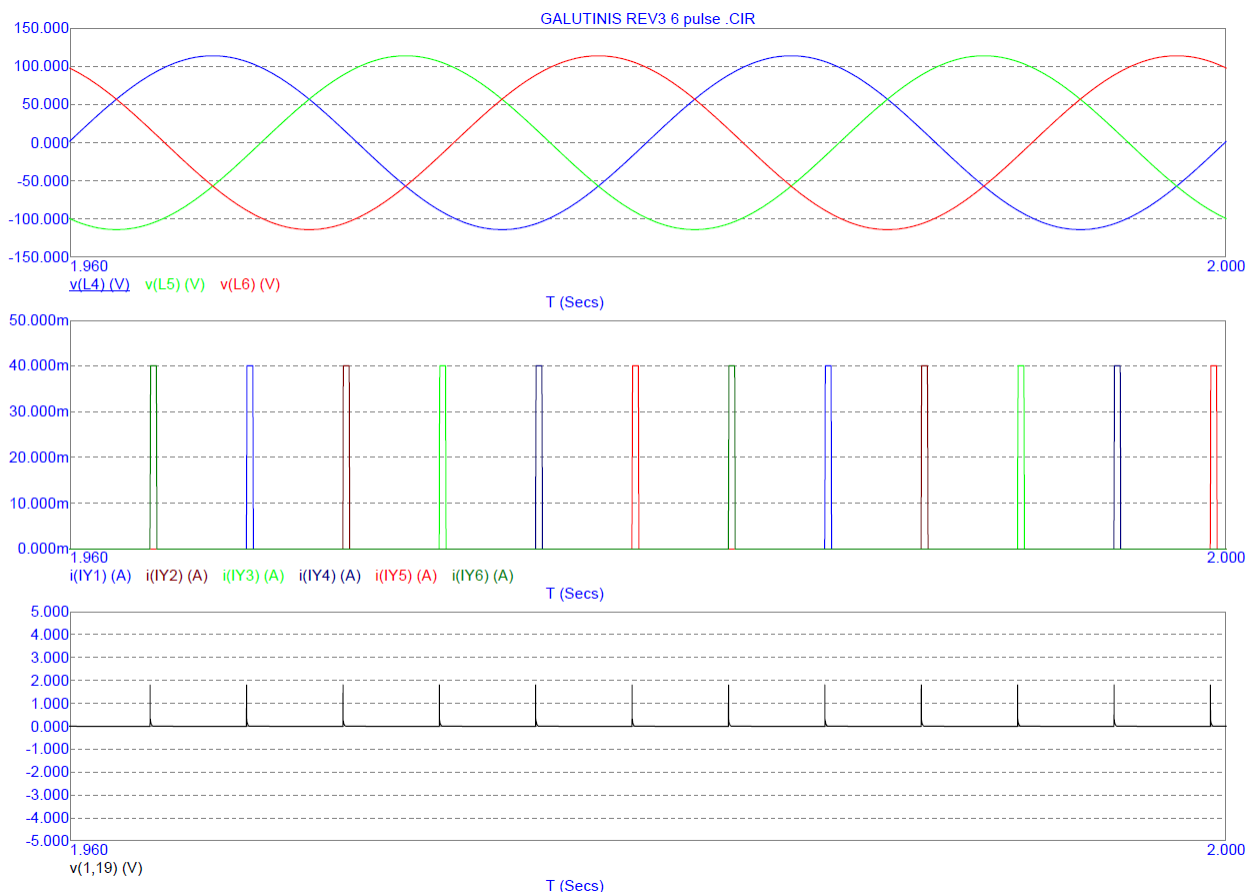
Teorinės reikšmės apskaičiuotos naudojantis 1.4 formule. Modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo metu apkrova pastovi – $R_d = 200 \Omega$, $L_d = 0$.



3.14 pav. Apkrovos įtampos U_d priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α

Anksčiau pateiktame paveiksle matyti, kad rezultatai visais trimis metodais gauti gana panašūs (apskaičiuotos ir eksperimentinio tyrimo reikšmės dengia viena kitą), todėl galima teigti, jog tyrimas atliktas teisingai. Tam tikri nesutapimai gaunami dėl apvalinimo skaičiuojant, o eksperimentinio tyrimo metu – dėl žmogiško faktoriaus nustatant tiristorių valdymo kampą α .

Modeliavimo metu nustatyta, kad maksimalus tiristorių valdymo kampas, kuriam esant tiristoriai atidaromi yra $\alpha = 76^\circ$. Esant tokiam tiristorių valdymo kampui išėjimo įtampa $U_d = 67,3 V$.



3.15 pav. 6 pulsacijų lygintuvo charakteristikos, kai $\alpha = 80^\circ$

3.15 paveiksle matyti, kad esant didesniai tiristorių valdymo kampui α tiristoriai neatsidaro ir apkrovos įtampa $U_d = 0$ (kai apkrova aktyvinio pobūdžio).

Eksperimentinio tyrimo metu patikrinamas realaus lygintuvo darbas, tuo pačiu patikrinamas matematinio modelio sutapimas su realių elementų darbu.

3.3.2. 12 pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai

Teorinės reikšmės apskaičiuojamos pasinaudojant 1.4 formule:

$$U_d = \frac{6}{\pi} U_l \cdot \sqrt{2} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{6}} \sin(\omega t) d(\omega t) \tag{3.9}$$

$$U_d = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_l \cdot \cos 0^\circ \tag{3.10}$$

$$U_d = 2,7 \cdot U_l \tag{3.11}$$

3.2 lentelė. 12 pulsacijų lygintuvo tyrimo rezultatai

	α	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Apskaičiuota	U_d, V	378	372,2	355,2	327,4	289,6	243	189	129,3	65,6	0
Modeliavimas		369,2	365,4	348,1	320	282,3	237,6	187,1	136	-	-
Eksp. tyrimas		360									

Kadangi eksperimentinio tyrimo metu nepavyko tinkamai sureguliuoti transformatorių transformacijos koeficientų (naudoti du skirtingi transformatoriai, kurių vieno antrinė apvija buvo sujungta žvaigžde, kito – trikampiui) bei tiristorių valdymo kampų, todėl negalima nustatyti 12 pulsacijų lygintuvo įtampos priklausomybės nuo tiristorių atidarymo kampo α .

3.13 paveiksle matyti, kad eksperimentinio tyrimo metu nepavyko gauti 12 pulsacijų įtampos charakteristikos, tačiau įtampos reikšmė apytiksliai panaši teorinei ir modeliavimo metu gautoms reikšmėms.

3.4. HVDC sistemų įtaka elektros tinklui

3.4.1. Harmonikų lygio analizė

Eksperimentinio tyrimo metu buvo atlikta į tinklą įnešamų triukšmų (harmonikų) analizė. Harmonikų lygis nustatomas panaudojant oscilografą. Atliekamas 6 pulsacijų lygintuvo tyrimas, kurio metu nustatoma harmonikų lygio priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α . Matuojama antrinės apvijos srovė. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.

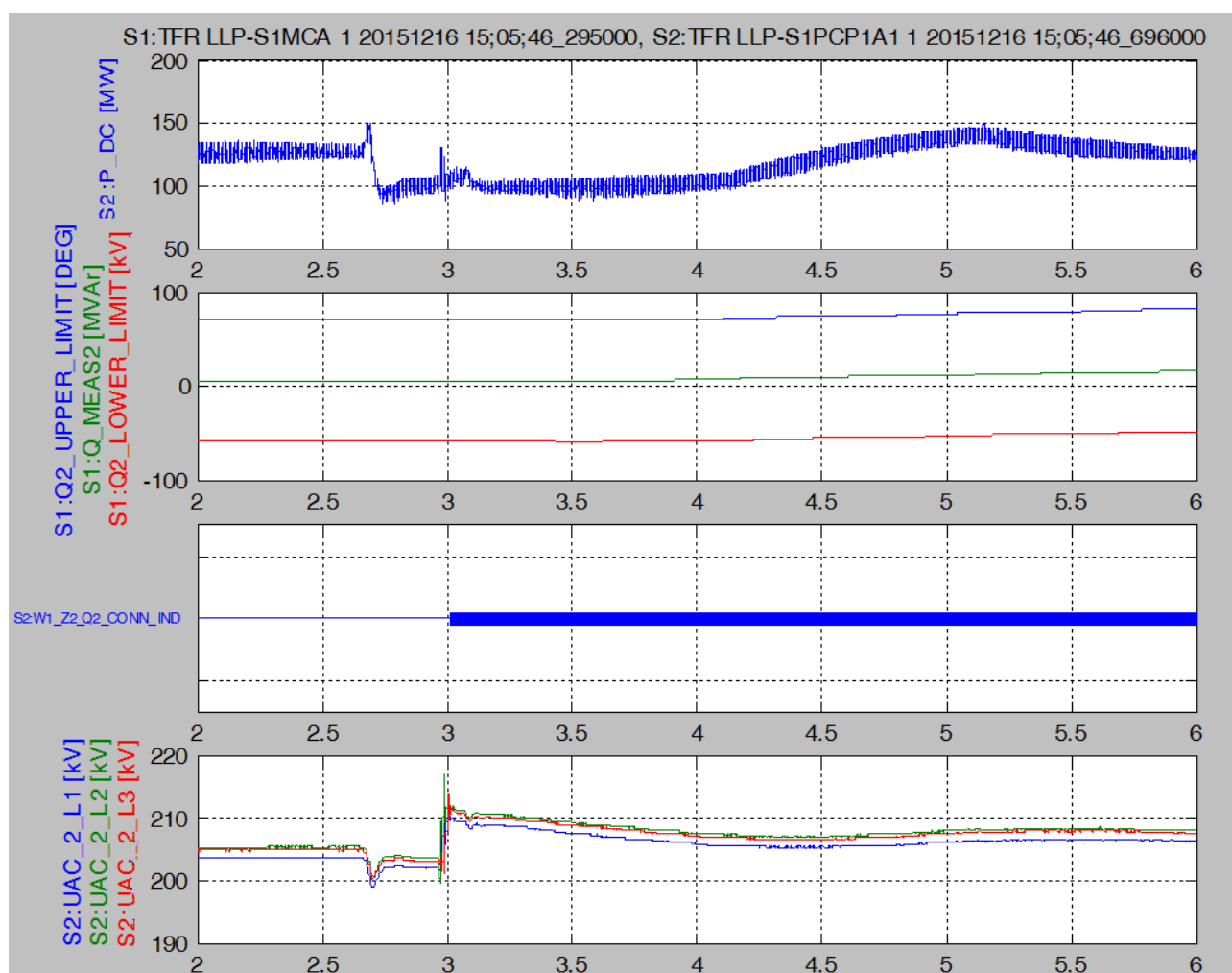
3.3 lentelė. Į tinklą įnešamos harmonikos

Harm nr. \ $\alpha, ^\circ$	0	20	40	70
1	1,6	1,5	1,2	0,53
3	0	0	0	0
5	0,3	0,3	0,29	0,28
7	0,14	0,15	0,15	0,19
9	0	0	0	0
11	0,08	0,1	0,09	0,07
13	0,06	0,09	0,08	0,06
15	0	0	0	0

Atlikus šį tyrimą pastebėta, kad didėjant tiristorių valdymo kampui α mažėja pagrindinės (pirmosios) harmonikos srovė, tačiau aukštesniųjų harmonikų lygis išlieka panašus. Daroma išvada, kad didėjant tiristorių valdymo kampui α gaunamas didesnis harmonikų iškraipymas.

3.4.2. HVDC filtrų įtakos tinklui tyrimas

Anksčiau minėta, kad priklausomai nuo keitiklio galios yra prijungiamas atitinkamas kiekis filtrų (filtrų prijungimo vieta pateikiama LitPol Link vienlinijinėje schemoje – PRIEDAS Nr. 1). Filtrai dažniausiai yra talpinio pobūdžio ir skirti tinklo reaktyviajai galiai reguliuoti. Kuo didesnė keitiklio galia (mažesnis tiristorių valdymo kampas α), tuo daugiau reaktyviosios galios reikia kompensuoti.



3.16 pav. LitPol Link keitiklio filtrų prijungimas Lietuvos tinklo pusėje

Anksčiau pateiktame paveiksle matyti, kad kintant keitiklio galiai prisijungia filtrai, dėl kurių tinklo įtampa tuo momentu padidėja apytiksliai 2 % nuo nominalios. Toliau didėjant keitiklio galiai tinklo įtampa nusistovi iki nominalios tinklo įtampos.

IŠVADOS

1. Naudojant HVDC jungtis galima sujungti skirtingų parametrų elektros energijos tinklus, perduoti elektros energiją dideliais atstumais. Tokiu būdu sumažinami perduodamos elektros energijos kaštai bei eliminuojami reaktyviosios galios nuostoliai;
2. Išanalizavus HVDC sistemų valdymą pastebėta, kad tiristorinių keitiklių valdymas atliekamas keičiant tiristorių atidarymo kampą α , o keitiklio darbas negalimas jei bent vienoje keitiklio pusėje nėra įtampos;
3. Panaudojant modeliavimo programa „MICRO-CAP“ sukurti du matematiniai modeliai – 6 pulsacijų tiristorinis lygintuvas ir 12 pulsacijų tiristorinis lygintuvas. Išanalizavus šiuos du modelius daroma išvada, kad 12 pulsacijų lygintuvas yra labiau priimtinas ekonominiu požiūriu (didesnė išlygintos įtampos vertė – didesnė perduodama galia) bei sumažina į tinklą įnešamų triukšmų (harmonikų) lygį;
4. Eksperimentinio tyrimo metu su laboratorijoje esama įranga nepavyko sujungti 12 pulsacijų lygintuvo, tačiau palyginus eksperimento metu sukurto 6 pulsacijų lygintuvo charakteristikas su sumodeliuoto 6 pulsacijų lygintuvo charakteristikomis daroma išvada, kad modeliavimas atliktas teisingai. Palyginama išlygintos įtampos forma ir verčių priklausomybė nuo tiristorių valdymo kampo α (žr. 3.1 lentelę). Modeliavimo duomenys nuo eksperimentinio tyrimo duomenų santykinai nesiskiria ir yra artimi teorinių skaičiavimų duomenims.
5. Dvylikos pulsacijų lygintuvo galios transformatorių jungimo būdas (dvi antrinės apvijos) eliminuoja 5 ir 7 harmonikas, taip sumažinamas triukšmų, įnešamų į tinklą lygis. Aukštesnėms harmonikoms filtruoti naudojami specialūs filtrai, kurie tuo pačiu atlieka ir reaktyviosios galios kompensavimo funkciją.

LITERATŪRA

1. W. Long, S. Nilsson, HVDC transmission: yesterday and today. Power and Energy Magazine, IEEE, 2007. 22-31 psl.
2. M. Bahrman and B. Johnson, "The ABCs of HVDC Transmission Technologies: An Overview of High Voltage Direct Current Systems and Applications," IEEE Power and Energy Magazine, 2007, Kovo/Balandžio leidinys;
3. M. Szechtman, M. Zavahir, and J. Jyrinsalo, "The role of SC B4 – HVDC and Power Electronics in Developing the Power Grid for the Future," Electra, June 2008;
4. M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation. Mokslinis straipsnis;
5. 1JNL249566 High Voltage Energization of station – ITP. ABB techninė dokumentacija.
6. 1JNL316380 HV energization of HVDC Classic station Alytus – ITR. ABB techninė dokumentacija.
7. Paulo Fischer de Toledo „Modeling and control of a line-commutated HVDC transmission system interacting with a VSC STATCOM“ 2007, Stokholmas;
8. J. Arrillaga, Y.H. Liu, N.R. Watson. Flexible Power Transmission. The HVDC Options 2007 Anglija;
9. Tatjana Kalitjuka, Control of Voltage Source Converters for Power System Applications 2011. Mokslinis straipsnis;
10. HÉCTOR F. LATORRE S. Modeling and Control of VSC-HVDC Transmissions 2011 Svedija;
11. Owen Peake The History of High Voltage Direct Current Transmission 2009 Australijos konferencija;
12. Randy Wachal. Voltage Source Converter (VSC) Tutorial. Presentation 2014

PRIEDAI

1. LitPol Link jungties vienlinijinė schema

INDEX

<u>Description</u>	<u>Sheet</u>
Summary	2
<small>2</small>	
400 kV AC Switchyard	3
<small>3</small>	
330 kV AC Switchyard	4
<small>4</small>	
Filter	5
<small>5</small>	
Converter Area	6
<small>6</small>	
Legends	7
<small>7</small>	
Revision Information	8
<small>8</small>	

Main Circuit
Index

Approved by ABB

Arunkumar B

Drawn by

Sukant Prasad Pati

Single Line Diagram

LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard
Alytus

ABB AB, HVDC

Resp dept

PSDC/DCTSD

Create date

2012-04-20

=S1

1JNL222668

Rev Id

P

Sheet

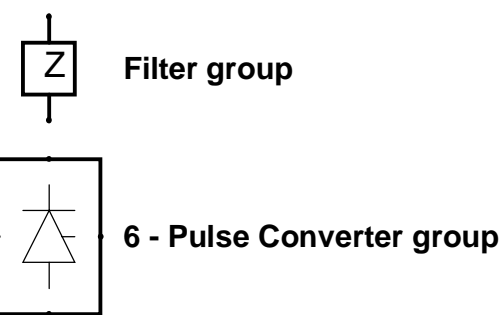
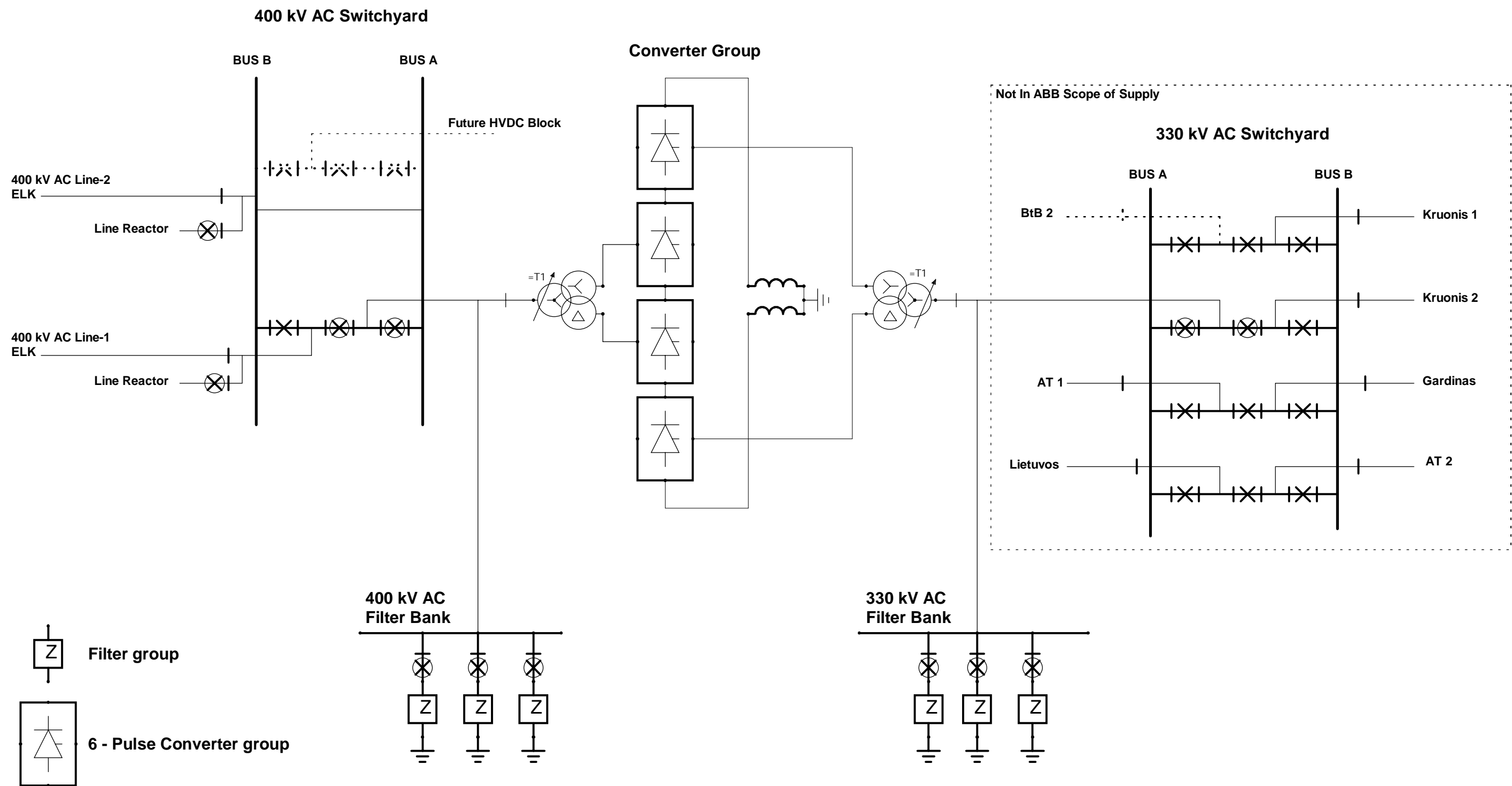
1

Cont

2

SUMMARY

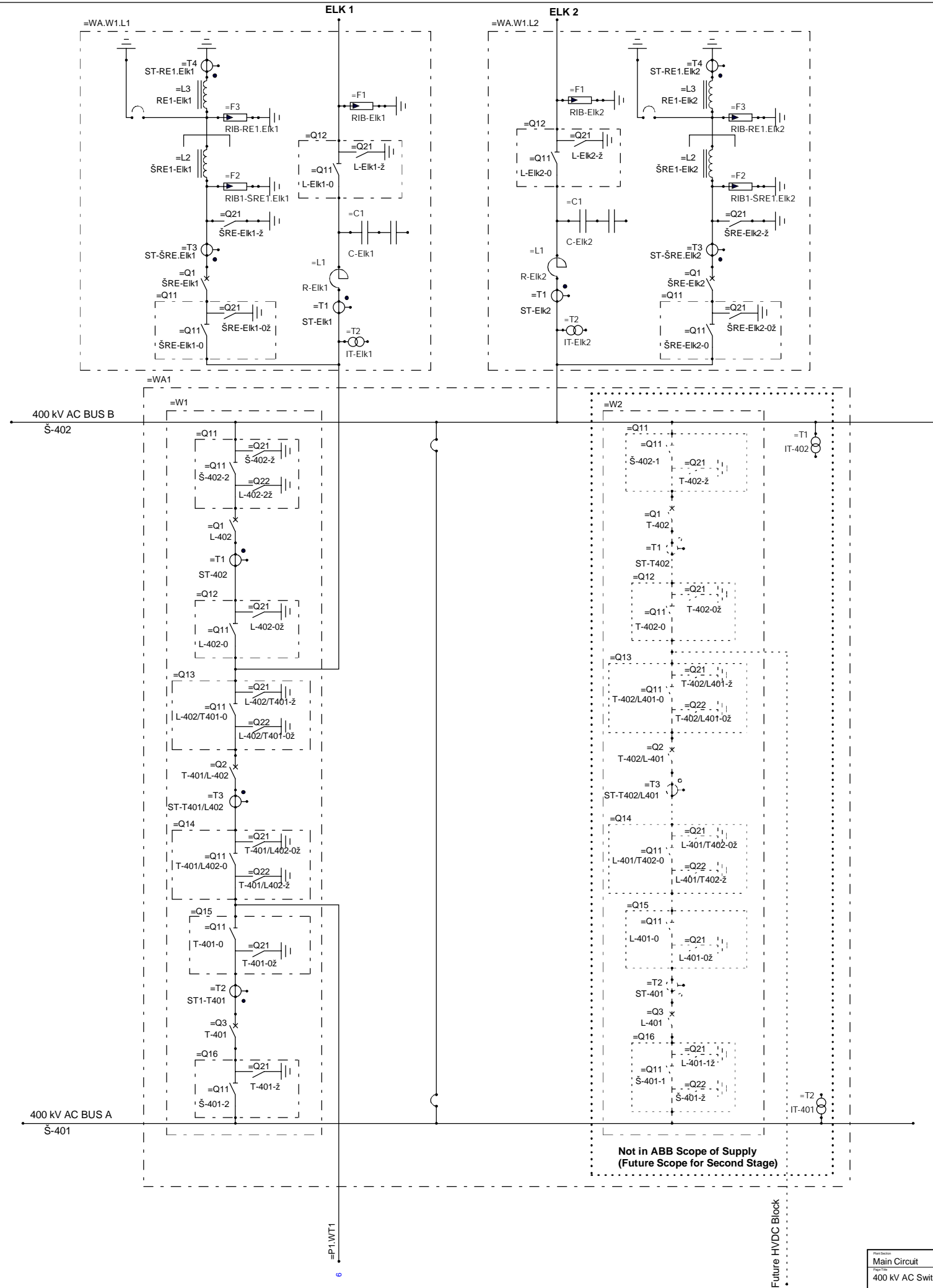
LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard



- | AC Disconnectors with earthing switch
- ⊗ Breaker without synchronising
- ⊗ Breaker with synchronising

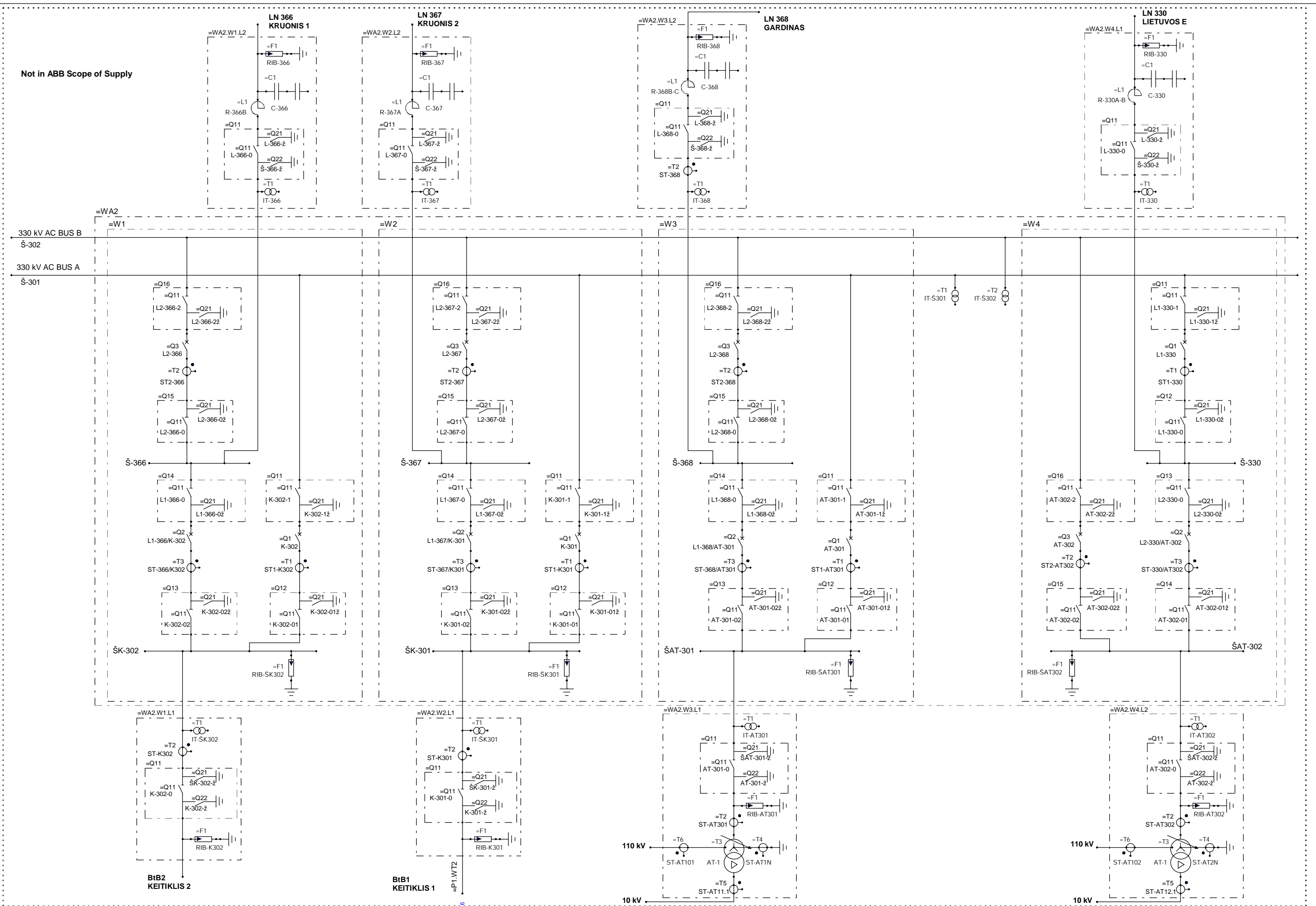
Plant Section Main Circuit Page Title Summary	Approved by ABB Arunkumar B Drawn by Sukant Prasad Pati	Single Line Diagram LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard Alytus ABB AB, HVDC Ring Dept PSDC/DCTSD Create date 2012-04-20	Plant Section Item Designation =S1 Drawing number 1JNL222668 Rev Ind P Sheet 2 Cont 3
--	--	--	--

We reserve all rights in this document and in the information contained herein. Reproduction, use or distribution of this document without the written authority of ABB AB (SE) is strictly prohibited.

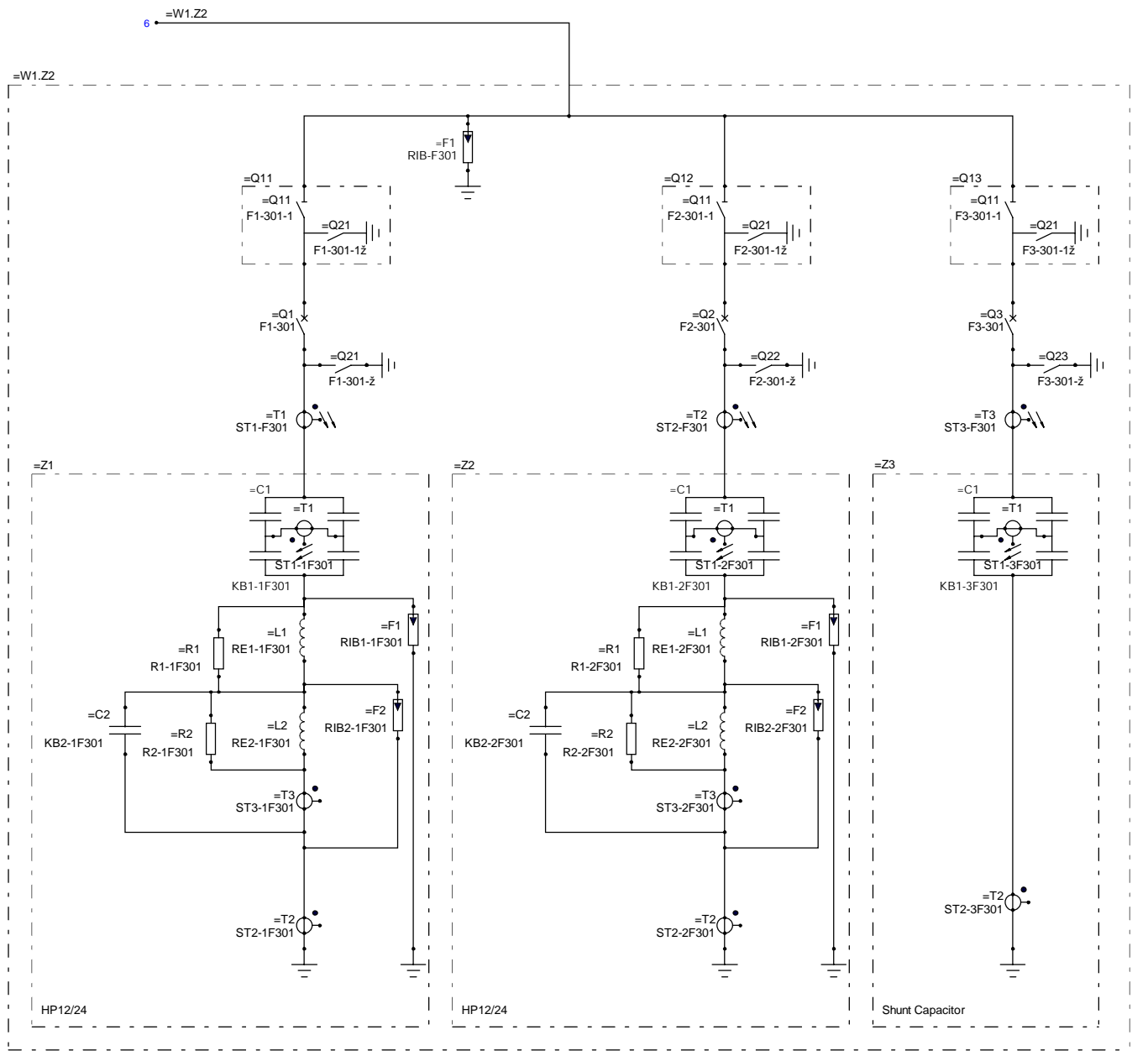
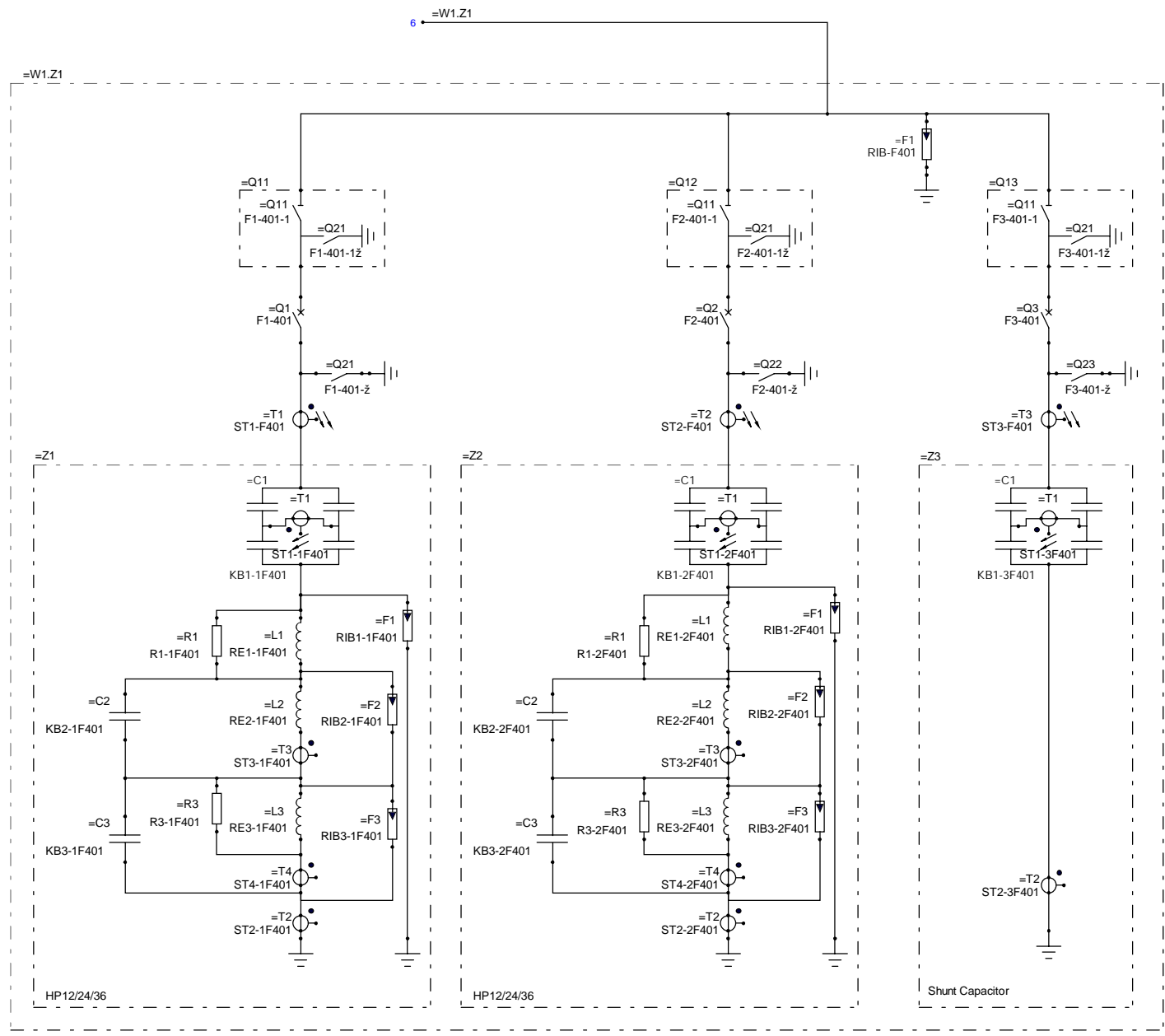


Project Name	Arunkumar B	Project Description	Single Line Diagram LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard	Revision	S1
Location	400 kV AC Switchyard	Client	Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station	Page No.	3
Author	Sukant Prasad Pati	Company	ABB AB, HVDC	Scale	P 4
Checked By		Project No.	PSDC/DCTSD	Date	2012-04-20
Approved By		Drawing No.	1JNL222668		

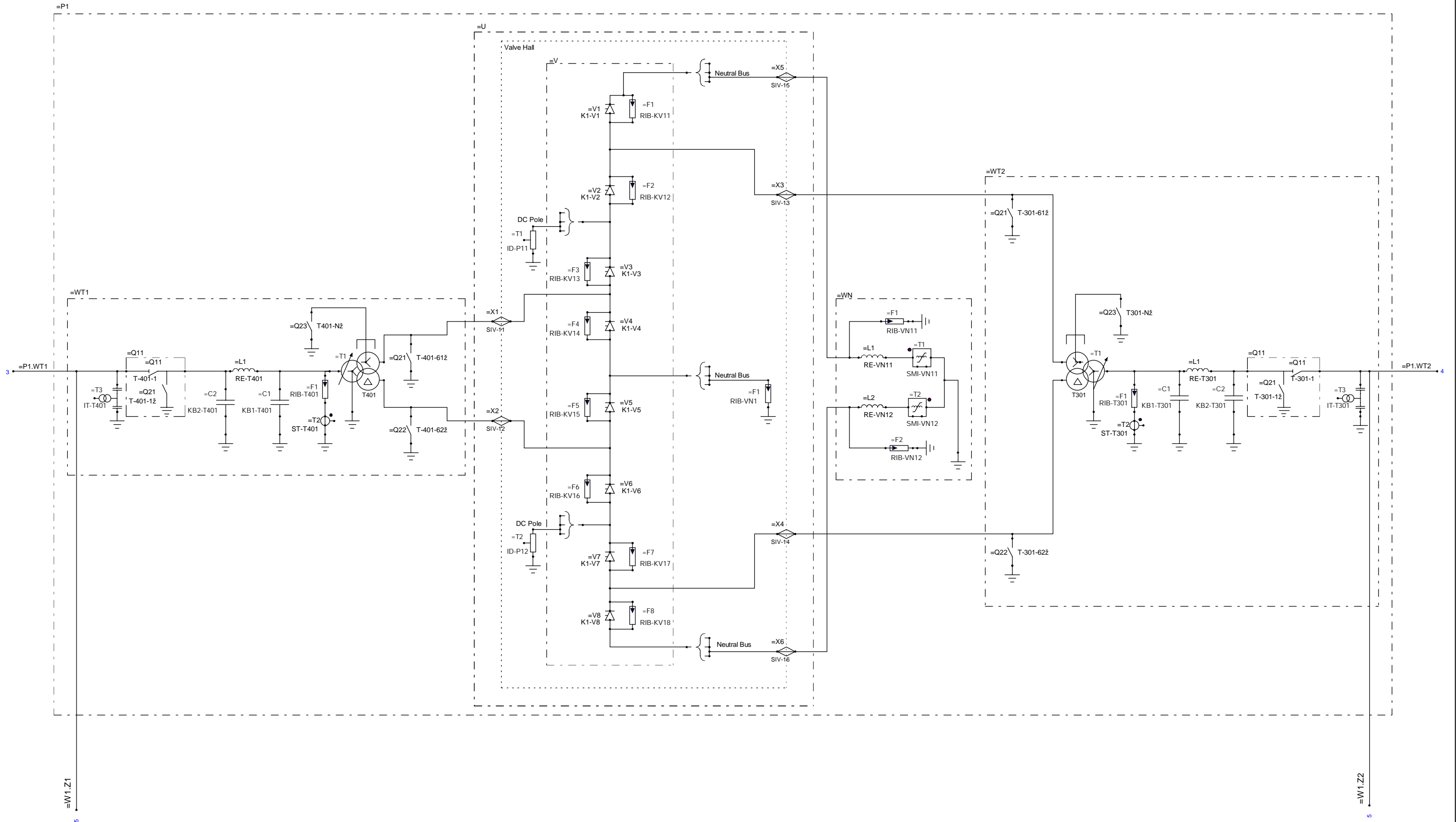
We reserve all rights in this document and in the information contained herein. Reproduction, use or distribution of this document without the written authority of ABB AB (S1) is strictly prohibited.



Main Circuit 330 kV AC Switchyard	Arunkumar B	Single Line Diagram LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station	S1	4	
	Sukant Prasad Pati				ABB AB, HVDC
		PSDC/DCTSD	2012-04-20	1JNL222868	5



Revision	Arunkumar B	Single Line Diagram	Part Number for Drawing
Main Circuit	Arunkumar B	LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard	=S1
Filter	Sukant Prasad Pati	Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station	5
		ABB AB, HVDC	P 6
		PSDC/DCTSD	2012-04-20
		1JNL222868	



Revision	Arunkumar B	Single Line Diagram	Part Name for Drawing
Main Circuit		LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard	=S1
Converter Area		Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station	6
Author	Sukant Prasad Pati	ABB AB, HVDC	P 7
Checked		PSDC/DCTSD	
Date	2012-04-20	1JNL222668	

Functional blocks

- =W AC Switchyard
- =P Pole Area
- =WT Transformer Area
- =Z Filter Area

Components

- =C Capacitor
- =L Reactor
- =Q Switch
- =R Resistor
- =T Transformer
- =X Bushings
- =V Thyristor valve











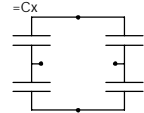








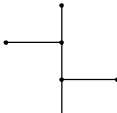

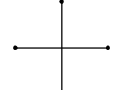
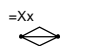

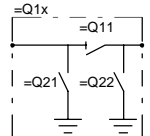

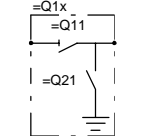
Miscellaneous

- HP High Pass

Phase Designation

- A (yellow), B (green), C (red) AC-phases all other areas

Symbols

	=Fx	Arrester		Earth
	=Qx	Breaker		Earthing Switch
	=Tx	Capacitive Voltage Transformer		Optical Current Transformer
	=Cx	Coupling Capacitor		Voltage Transformer
	=Cx	Capacitor		Resistor
	=Cx	Reactor		Reactor
	=Tx	Current Measuring Device		Thyristor Valve
	=Tx	Current Transformer		Disconnecting Circuit Breaker
	=Tx	Converter Transformer, three windings		Removable Link
	=Tx	Direct Voltage Divider		Connection between lines
	=Lx	Line Trap		No connection between lines
	=Xx	Wall Bushing		Transition between one-line and three-line representation
	=Q1x	Disconnecter with two Earthing Switches		Shunt Reactor / Neutral Grounding Reactor
	=Q1x	Disconnecter with one Earthing Switch		

Rev. no.	Date	Rev Order	Rev Designer	Rev Approver	Comment
B	2012-05-24	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	In summary: 400 kV converter breaker and 330 kV AC yard breaker changed to synchronising. In page 3: =WA1.W2.Q11 and =WA1.W1.Q16 to AC disconnecter with two earthing switches. In page 4: Two shunt capacitor bank added instead of one HP 12/24/36 and HP 3 filter at 400 kV side. One shunt capacitor bank added instead of HP 3 filter bank at 330 kV side. In page 5: One DCCT (=P1.U.T4) added in neutral bus; =P1.WN DCCT is removed and transition between one-line and three line representation changed.
C	2012-06-05	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	In page 3: Future scope covers two circuit breakers and =WA1.W1.Q16 changed to AC disconnecter with one earthing switch. =WA1.W2.Q16 changed to AC disconnecter with two earthing switch. In page 4: =W1.Z2.Z3 Shunt Capacitor removed and HP3/5 filter bank added. Conventional Circuit Breaker changed to Disconnecting Circuit Breaker. AC disconnecter removed from AC disconnecter with one earthing switch. In page 5: =P1.WT(1,2). Z1 AC PLC filter tuning unit added.
D	2012-06-14	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	In page 4: Removed the filter sub-bank earthing switches close to the filter bus.
E	2012-06-19	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	In page 4: =W1.Z2.Z3, HP3/5 filter replaced by shunt capacitor.
F	2012-10-04	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	Summary page modified; =W1.Z1.(Z4,T4,Q4,Q24), =W1.Z1.Z3.(L1,F1), =WA1.T(1,2) and =P1.Q1 removed. =P1.(WT1,WT2).Q11 place changed. In AC Switchyard page, =WA1.W1.(Q11,Q1,T1,Q12) came under future scope. ELK line 1 connected to 400kV bus B and 400kV bus A & B are directly connected. 330 kV switchyard (=WA2, =WA2.W1.L(1,2), =WA2.W2.L(1,2), =WA2.W3.L(1,2) and WA2.W4.L(1,2) added. =WA.W1.L(1,2).(L2,F2,Q11,Q21,Q1,T3) added. =WA1.W2.Q16 changed from disconnecter with two earthing switch to disconnecter with one earthing switch.
G	2012-12-19	N.A.	Sukant Prasad Pati	Chandra-Mohan S	In summary page, 330 kV switchyard modified; In AC switchyard, lines are interchanged in 400 kV & 330 kV switchyard; In filter, =W1.Z(1,2). T(1,2,3) are changed to optical current transformer.
H	2013-03-05	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	Older revisions can be seen in 1JNL201291. In page 4, Disconnecting Circuit Breaker (=W1.Z(1,2).Q(1,2,3)) changed to Conventional Circuit Breaker (=W1.Z(1,2).Q(1,2,3)) and AC disconnecter with one earthing switch (W1.Z(1,2).Q(11,12,13)) added. In page 5, Neutral bus current measuring device (=P1.U.T(3,4)) removed and added at =P1.WN.T(1,2).
I	2013-05-22	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	In page 3, AC disconnecter with one earthing switch (=WA.W1.L(1,2).Q12) added. =WA.W1.L(1,2).L1 symbol changed and =WA.W1.L(1,2).C1 changed to =WA.W1.L(1,2).T4. Summary page modified.
J	2013-05-30	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	In page 3, line trap [=WA.W1.L(1,2).L1] and coupling capacitor [=WA.W1.L(1,2).T4] are under ABB scope of supply. =WA.W1.L(1,2).T4 changed to coupling capacitor =WA.W1.L(1,2).C1. The order of =WA.W1.L(1,2).[T1,T2,L1&C1] rearranged.
K	2013-07-05	N.A.	Sukant Prasad Pati	Hossein Bayervand	In page 2, Added additional explanation for symbols. In page 6, Shunt reactor symbol added. In page 5, interchange the position of AC disconnecter with one earthing switch [=P1.WT(1,2).Q11] and CVT [=P1.WT(1,2).T3].
L	2013-09-23	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	In page 3, Added NGR with arrester [=WA.W1.L(1,2).L3 & F3], Interchange the name of 400 kV line ELK 1 & ELK 2 and =WA1.W1 & =WA1.W2.. In page 5, Added PLC capacitor [=P1.WT(1,2).C2] and deleted capacitor tuning unit [=P1.WT(1,2).Z1].
M	2014-01-02	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	AC switchyard split into 400 kV & 330 kV AC switchyard respectively. Customer's item designation added. Index and Summary page modified.
N	2014-02-17	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	Changed the customer item designation of arrester at line reactor [=WA.W1.L(1,2).F(2,3)]; AC line current transformer [=WA.W1.L(1,2).T3] and neutral bus current measuring device [=P1.WN.T(1,2)]. Added CT [=WA.W1.L(1,2).T4] at NGR.
O	2014-03-04	N.A.	Sukant Prasad Pati	Anders L Henriksson	Changed the customer item designation of 330kV switchyard of 330kV bus bar voltage transformer ID-Š-301 to IT-Š301 and ID-Š-302 to IT-Š302. and 330kV bus bar ŠK-367 to Š-367 and ŠK-368 to Š-368. In page6, added earthing switch [=P1.WT(1,2).Q23]. Direction of current transformer at =WA1.W1.T3 changed. Separate removable link added at shunt reactor [=WA.W1.L(1,2).L2].
P	2014-05-20	N.A.	Sukant Prasad Pati	Arunkumar B	Connection of HP12/24 resistor [=W1.Z2.Z(1,2).R2] changed.

Plant Section Main Circuit	Approved by ABB Arunkumar B	Single Line Diagram LitPol Link Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station and 400 kV Switchyard			Plant Section Item Designation =S1
Page Title Revision Information		Alytus HVDC Back-to-Back Converter Station			Sheet 8
	Drawn by Sukant Prasad Pati	ABB AB, HVDC	Resp dept PSDC/DCTSD	Create date 2012-04-20	Drawing number 1JNL222668
					Rev Ind P
					Cont ---