



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Kipras Išora

MATRICINIO KEITIKLIO NAUDOJAMO TARPSISTEMINĖJE
NUOLATINĖS SROVĖS JUNGTYJE TYRIMAS

Magistro projektas

Vadovas

lekt. Gytis Petrauskas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

MATRICINIO KEITIKLIO NAUDOJAMO TARPSISTEMINĖJE
NUOLATINĖS SROVĖS JUNGTYJE TYRIMAS

Magistro projektas

Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

lekt. Gytis Petrauskas

Recenzentas

prof. dr. Arūnas Lipnickas

Projektą atliko

Kipras Išora

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir Elektronikos Fakultetas

Kipras Išora

Valdymo technologijos, 621H66001

Baigiamojo projekto

„Matricinio keitiklio naudojamo tarpsisteminėje nuolatinės srovės jungtyje tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. birželio 1 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Kipro Išoros baigiamasis projektas tema „Matricinio keitiklio naudojamo tarpsisteminėje nuolatinės srovės jungtyje 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.

Kipras Išora
(vardas ir pavardė)

(parašas)

Išora, Kipras. Matricinio keitiklio naudojamo tarpsisteminėje nuolatinės srovės jungtyje tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / lekt. Gytis Petrauskas; Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir Elektronikos Fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 62 psl.

SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriama netiesioginio matricinio keitiklio parametrų įtaka elektros energijos srautams ir elektros energijos kokybiniai parametrams tarpsisteminėje nuolatinės srovės jungtyje. Tyrimo metu apžvelgtos aukštos įtampos nuolatinės srovės technologijos, bei matricinių keitiklių technologija. Tyrimui atlikti sudarytas matematinis modelis, veikiantis Matlab/Simulink programinio paketo aplinkoje.

Reikšminiai žodžiai: Aukšta įtampa, nuolatinė srovė, matricinis keitiklis.

Išora, Kipras. Research of matrix converter in a interconnected direct current link. Final project of control systems master degree / supervisor lekt. Gytis Petrauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Automation.

Kaunas, 2016. 62p.

SUMMARY

The main goal of the presented thesis is the investigation of the indirect matrix converter parameter impact on power flow and power quality parameters in an interconnect direct current link. The study analyzed the high-voltage direct current technology, and the matrix converter technology. In order to complete the analysis of the mathematical simulation a model in Matlab/Simulink software package was created.

Keywords: High voltage, direct current, matrix converter.

TURINYS

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas.....	8
Įvadas.....	9
1. Apžvalginė dalis	10
1.1. Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos	10
1.2. HVDC technologijos ekonominis pagrindumas.....	10
1.3. Lietuvoje esančios HVDC jungtys	11
1.3.1. Jungtis su Lenkija - LitPolLink.....	11
1.3.2. Jungtis su Švedija - Nordbalt	12
1.4. Aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemų tipai.....	13
1.4.1. Back-to-back sistema	13
1.4.2. Vienpolė aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema.....	13
1.4.3. Dvipolė aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema.....	14
1.4.4. Kelių terminalų aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema	14
1.5. HVDC technologijos.....	15
1.5.1. LCC keitiklių technologija.....	15
1.5.2. VSC keitiklių technologija	20
1.6. Matriciniai keitikliai	24
1.6.1. AC-AC energijos konvertavimas	24
1.6.2. Tiesioginis matricinis keitiklis	25
1.6.3. Netiesioginis matricinis keitiklis.....	26
1.6.4. Netiesioginio matricinio keitiklio topologijos.....	28
2. Tiriamoji dalis	35
2.1. Atstojamosios schemas.....	35
2.1.1. Sistemos atstojamoji schema.....	35
2.1.2. Linijos atstojamoji schema	36
2.1.3. Transformatoriaus atstojamoji schema.....	38

2.1.4. Visos sistemos atstojamoji schema	38
2.2. Matlab/simulink blokai, modeliai	39
2.2.1. Energetinės sistemos blokas	39
2.2.2. Transformatoriaus blokas	40
2.2.3. Matricinio keitiklio blokas	40
2.2.4. Linijos modelis	41
2.2.5. Bendras Matlab/Simulink modelis	42
2.3. Tyrimo metodika	43
2.3.1. Aktyviosios ir reaktyviosios galių matavimas energetinės sistemos sąlyčio taške	43
2.3.2. Šalutinių harmonikų kiekio matavimas	43
2.3.3. Nuolatinės srovės intarpu perduodamos aktyviosios galios matavimas	44
2.3.4. Nuolatinės įtampos pulsacijų matavimas	45
3. Tyrimo rezultatai	46
3.1. Netiesioginio matricinio keitiklio tiltų lyginimo ir invertavimo režimas	46
3.2. Netiesioginio matricinio keitiklio moduliacinio valdymo įtakos tyrimas	47
3.3. Netiesioginio matricinio keitiklio fazinio valdymo įtakos tyrimas	48
3.4. HVDC linijos ilgio įtakos elektros energijos kokybiniam parametram tyrimas	49
3.5. HVDC filtro įtakos tyrimas	51
3.6. Kintamos įtampos filtrų įtakos tyrimas, netiesioginio matricinio keitiklio sąlyčio taške su energetine sistema	52
3.6.1. Induktyvaus (L) – filtro įtaka	53
3.6.2. Induktyvaus, talpaus (LC) – filtro įtaka	55
4. Išvados	59
LITERATŪROS SĄRAŠAS	60

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas

IPS/UPS (interconnected power system/united power system) - jungtinė energetinė sistema;

KET - kontinentinės Europos tinklas;

AC (alternating current) – kintama srovė;

DC (direct current) – nuolatinė srovė;

HVDC (high voltage direct current) – aukštos įtampos nuolatinė srovė;

LVDC (low voltage direct current) žemos įtampos nuolatinė srovė;

VSC (voltage source converter) – įtampos šaltinio keitiklis;

CSI (current source inverter) – srovės šaltinio inverteris;

VSI (voltage source inverter) – įtampos šaltinio inverteris;

CSR (current source rectifier) – srovės šaltinio lygintuvas;

LCC (line commutated converter) – linijos komutuojamas keitiklis;

IGBT (insulated gate bipolar transistor) – izoliuotas užtūrinis dvikryptis tranzistorius;

PWM (pulse width modulation) – impulso pločio moduliacija;

SVM (space vector modulation) – erdvinio vektoriaus moduliacija;

SPWM (sinusoidal pulse width modulation) – sinusinė impulso pločio moduliacija;

MC (matrix converter) – matricinis keitiklis;

DMC (direct matrix converter) – tiesioginis matricinis keitiklis;

IMC (indirect matrix converter) – netiesioginis matricinis keitiklis;

SMC (sparse matrix converter) – praretintas matricinis keitiklis;

USMC (ultra sparse matrix converter) – ultra praretintas matricinis keitiklis;

VSMC (very sparse matrix converter) – labai praretintas matricinis keitiklis;

Įvadas

Lietuvos nacionalinėje energetikos strategijoje ir Lietuvos Respublikos elektros energetikos sistemos integracijos į Europos elektros energetikos sistemas įstatyme [14] yra patvirtintas siekis dėl šalies energetinės nepriklausomybės ir elektros energetikos sistemos pilnavertės integracijos į Europą. Šiam tikslui įgyvendinti statomos ir planuojamos nuolatinės srovės jungtys ir dažnio keitikliai, kurie leis Baltijos valstybėms sinchronizuotis [12] su kontinentinės Europos tinklu ir atsijungti nuo sinchorinio veikimo IPS/UPS sistemoje [13].



1 pav. Baltijos šalių atsijungimas nuo IPS/UPS ir prisijungimas prie KET [13].

Šiuo metu Lietuva turi dvi nuolatinės srovės jungtis: jungtį su Lenkija „LitPolLink“ ir jungtį su Švedija „NordBalt“, tačiau dar planuojamos naujos HVDC keitiklių jungtys su KET, bei IPS/UPS sistemomis. Todėl šiuo metu yra aktualu suprasti HVDC keitiklių technologijas ir iširti naujas galimybes keitiklių technologijose.

Darbo problematika: Dviejų energetinių sistemų galių ir dažnių suderinamumui reikalinga nuolatinės srovės grandis.

Darbo tikslas: Iširti netiesioginio matricinio keitiklio parametrų įtaką elektros energijos srautams ir elektros energijos kokybiniams parametrams tarpsteminėje jungtyje.

1. Apžvalginė dalis

1.1. Aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistemos

Nuolatinės srovės linijų vystymas prasidėjo 1930 metais, kai buvo sukurti gyvsidabrio lanko lygintuvai. Pirmą komercinę aukštos įtampos nuolatinės srovės (HVDC) liniją pradėta eksploatuoti nuo 1954 metų. Šia linija buvo tiekama elektros energija į Gotlando salą iš Švedijos. Vėliau sukūrus tiristorinius keitiklius, nuo 1960 metų HVDC technologijos tapo plačiai naudojamos tiek tolimam elektros energijos perdavimui tiek ir tarpsteminėms jungtims [17].

Tipinėje HVDC sistemoje AC srovė ir įtampa yra paduodama į lygintuvą, kuris yra viename HVDC linijos gale. Lygintuvas konvertuoja elektros energiją iš AC į DC. DC energijos srautas perduodamas per DC liniją. Ši linija gali būti kelių metrų ilgio ar kelių šimtų kilometrų ilgio. Kitame linijos gale inverteris konvertuoja DC srovę ir įtampą atgal į AC [4].

Elektros energetikos sistemoje HVDC jungtis dažnai tampa pagrindine elektros energijos dalimi. Tokio tipo linijos yra patikimos ir gali būti eksploatuojamos labai ilgai. Pagrindiniai HVDC jungčių privalumai [16]:

- Nėra techninių apribojimų linijos ilgiui;
- Nėra sinchronizmo reikalavimų;
- Nuolatinės srovės tarpas nepadinina trumpojo jungimo srovių AC tinkle;
- HVDC linijos yra nejautrios fazės kampo, dažnio ar įtampos kitimui;
- Išlaikoma nepriklausoma prijungiamos sistemos dažnio parametru reguliavimą;
- Pagerina AC tinklo stabilumą

Aukštos įtampos nuolatinės srovės linijos gali būti naudojamos [16]:

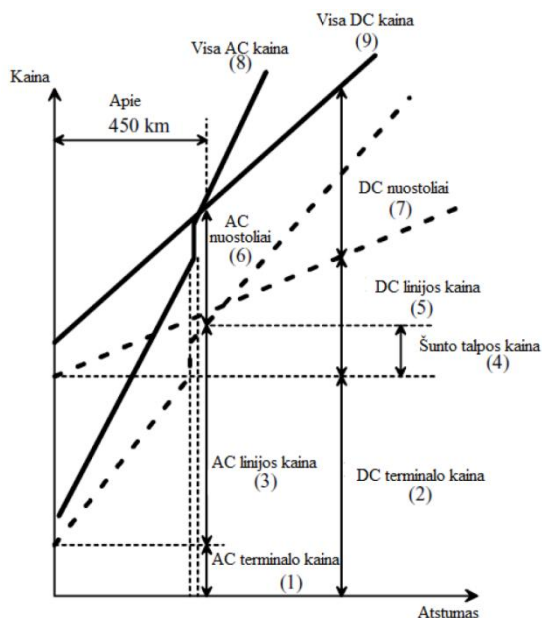
- Elektros energiją perduoti dideliais atstumais žeme;
- Elektros energija perduoti dideliais atstumais jūroje;
- Elektros energijos perdavimui tarp asinchroninių elektros sistemų;
- Vėjo jėgainių prijungimui prie tinklo;
- Nutolusių apkrovų arba generavimo šaltinių prijungimui.

1.2. HVDC technologijos ekonominis pagrindimas

Be techninių privalumų HVDC sistema taip pat yra ir ekonomiškai naudinga. HVDC sistemos atsiperka, ją naudojant perduoti energiją dideliais atstumais (1.1 pav.), ypač jų ekonominis efektas pasireiškia tiesiant elektros energijos linijas jūroje [16].

Iš 1.1 pav. pateiktų duomenų galima pasakyti, kad HVDC technologijos yra brangesnės (1.1 pav. 2,4,5 dalis) palyginti su kintamos srovės linija (1.1 pav 1,3 dalis), tai yra dėl

brangiai kainuojančių nuolatinės srovės keitiklių. Vertinant elektros energijos (1.1 pav. DC-7, AC-6 dalis) nuostolius, galima pastebėti, kad didėjant HVDC linijos ilgiui ši technologija tampa daug ekonomiškiau pasirinkimu. Sudėjus elektros energijos nuostolius ir įrenginių kainą AC technologiją yra pigiau naudoti kuomet linijos ilgis yra iki 450 km, kuomet linijos ilgis yra virš 450 km elektros energijos perdavimui tikslinga naudoti HVDC technologiją [16].



1.1 pav. AC ir DC linijų ekonominis palyginimas [16].

1.3. Lietuvoje esančios HVDC jungtys

1.3.1. Jungtis su Lenkija - LitPolLink

Elektros jungtis „LitPol Link“, paveikslas (1.2 pav.), su kaimynine Lenkija pirmą kartą sujungė Baltijos valstybių ir Vakarų Europos elektros infrastruktūras. Ši elektros jungtis su Lenkija atveria galimybę sinchroniškai veikti su kitų Vakarų Europos valstybių energetikos sistemomis ir leidžia plėtoti bendrą Europos elektros rinką [19].



1.2 pav. LitPol Link jungtis tarp Lietuvos ir Lenkijos [34].

„LitPol Link“ jungtį įgyvendino Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatorius „Litgrid“ ir Lenkijos elektros tinklų operatorius PSE. Patį keitiklį sukūrė ir į Lietuvą pristatė ABB kompanija. Ši jungtis yra paremta ABB HVDC *Classic* technologija, naudojanti tiristorinius galios jungiklius, kurie sujungti pagal back-to-back topologiją. Ji sujungia Lietuvos 330 kV įtampos elektros tinklą su Lenkijos 400 kV įtampos elektros tinklu. Alytaus transformatorių pastotėje esantis 500 MW galios keitiklis sujungiamas su Elko transformatorių pastote, esančia Lenkijoje, per 150-km ilgio 400 kV AC oro liniją [35].

1.3.2. Jungtis su Švedija - Nordbalt

Elektros jungtis su Švedija „NordBalt“, paveikslas (1.3 pav.), sujungia Baltijos valstybių ir Skandinavijos elektros rinkas. Elektros tiltas Lietuvai sudaro sąlygas pirkti elektros energiją iš hidroresursais turtingų Šiaurės Europos šalių. Šį elektros energetikos projektą įgyvendino Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatorius „Litgrid“ ir Švedijos elektros perdavimo sistemos operatorius „Svenska Kraftnät“ [36].



1.3 pav. NordBalt jungtis, tarp Lietuvos ir Švedijos [37].

ABB sukūrė, suprojektavo ir įrengė dvi 700 MW, ± 300 kV keitiklių stotis, naudojant ABB HVDC „*Light*“ technologiją. Viena stotis yra Nybru, Švedijoje, o kita – Lietuvoje, Klaipėdoje. Šiame projekte taip pat yra nutiesti du 300 kV įtampos povandeniniai kabeliai, kurių kiekvienas yra 400 km ilgio; bei požeminis nuolatinės srovės kabelis, kurio trasos ilgis Švedijoje - 40 km, o Lietuvoje - 10 km [38].

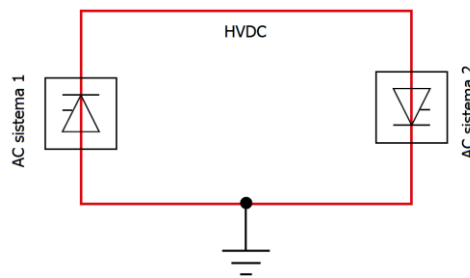
"NordBalt" jungtis yra ilgiausia pasaulyje HVDC „*Light*“ technologijos požeminė ir povandeninė jungtis.

1.4. Aukštos įtampos nuolatinės srovės sistemų tipai

Literatūroje [1], [2], [3] yra apibrėžiamos pagrindinės HVDC sistemų konfigūracijos: back-to-back, vienpolė ir dvipolė sistemos.

1.4.1. Back-to-back sistema

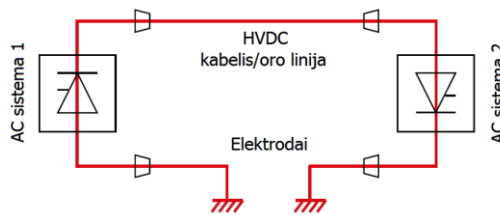
Išsireiškimas „back-to-back“ reiškia, kad lygintuvas ir inverteris yra pastatyti toje pačioje pastotėje, kaip pavaizduota paveiksle (1.4 pav.). Back-to-back keitikliai pagrinde yra naudojami elektros energijos perdavimui tarp greta esančių asinchorinių AC sistemų.



1.4 pav. HVDC back-to-back topologija [3].

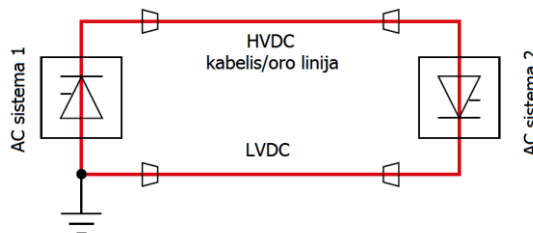
1.4.2. Vienpolė aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema

Vienpolė HVDC sistema susideda iš vieno laidininko ir dviejų elektrodų, kurie uždaro elektros grandinę per žemę ar jūrą, kaip parodyta paveiksle (1.5 pav.). Šis metodas naudojamas perduoti elektros energiją kabeline linija, todėl vienpolės sistemos įdiegimą pagrinde apsprendžia kabelinio laidininko ilgis ir kaina.



1.5 pav. Vienpolė per žemę užsidarančia grandine HVDC topologija [3].

Jei dėl egzistuojančių infrastruktūrinių ar aplinkosaugos apribojimų yra neleidžiama naudoti elektrodų, tokiais atvejais grandinė uždaroma su - LVDC (žemos įtampos nuolatinės srovės) kabeliu, paveikslas (1.6 pav.).

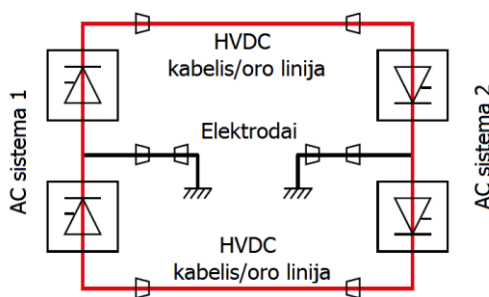


1.6 pav. Vienpolė HVDC topologija su žemos įtampos nuolatinės srovės kabeliu [3].

1.4.3. Dvipolė aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema

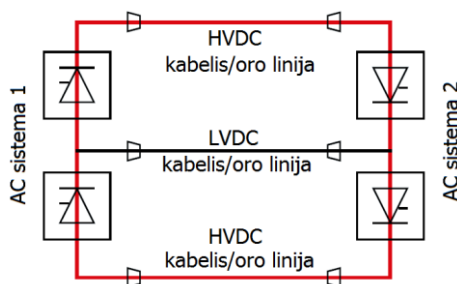
Dvipolė HVDC topologija yra dviejų polių kombinacija. Vienas polių yra teigiamo, o kitas neigiamo poliariškumo. Ši dviejų polių sistema turi bendrą žemos įtampos grįžtamąjį kelią, kuriuo neteka srovė esant normaliam sistemos veikimui. Ši konfigūracija naudojama, kai galios perdavimo pajėgumai viršija vienpolės sistemos pajėgumus. Esant remontui ar vieno polio gedimui sistema gali operuoti ir toliau perduoti elektros energiją. Daugiau nei pusė buvusios galios galima perduoti vienu polių.

Paveiskle (1.7 pav.) yra parodyta dvipolė sistema. Įvykus vieno poliaus gedimui, veiks kitas polių ir elektros gradinė užsidarys per žemę.



1.7 pav. Dvipolė per žemę užsidarančia grandine HVDC topologija [3].

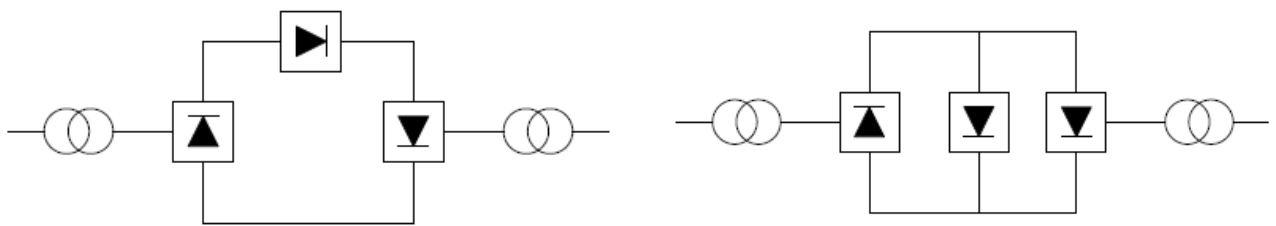
Jeigu egzistuoja draudimas elektrodų panaudojimui arba perdavimo atstumas nėra labai didelis, panaudojamas LVDC kabelis ar oro linija vietoje elektrodų. Tokia sistema parodyta žemiau esančiame paveiksliuke.



1.8 pav. Dvipolė HVDC topologija su žemos įtampos nuolatinės srovės kabeliu [3].

1.4.4. Kelių terminalų aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo sistema

Kelių terminalų HVDC perdavimo sistemos susideda iš trijų ar daugiau keitilių pastočių, kurių dalis veikia invertavimo režime, o kitos veikia lyginimo režime. Priklausomai nuo keitiklių pastočių, išskiriamos dvi pagrindinės kelių keitiklių terminalų topologijos: nuoseklus sujungimo HVDC sistema ir lygiagretaus sujungimo HVDC sistema. [15]. Jos parodytos žemiau.



a) nuoseklus HVDC jungimas

b) lygiagretus HVDC jungimas

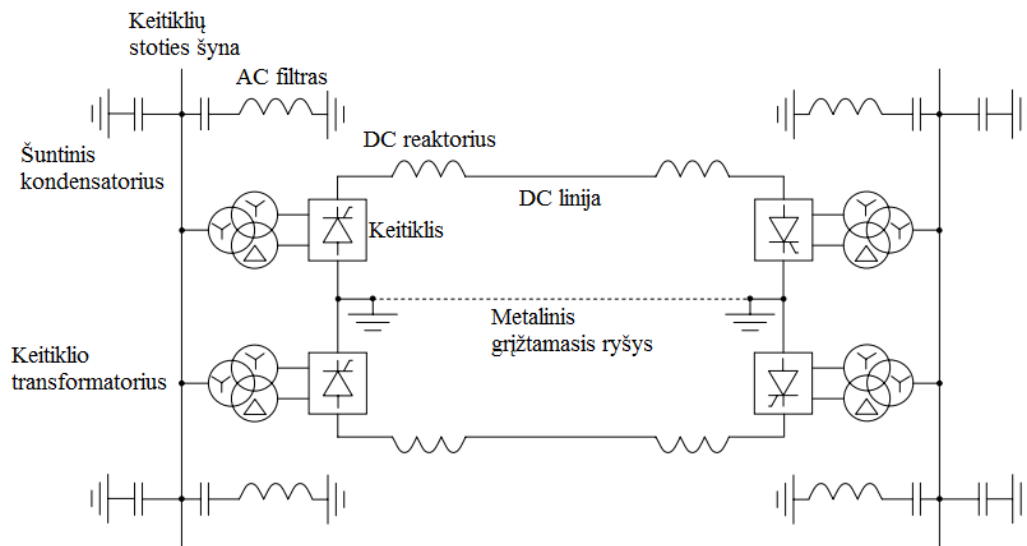
1.9 pav. Kelių terminalų HVDC topologijos [15].

Šių dviejų HVDC sistemų kombinacija, vadinama hibridine HVDC perdavimo sistema, kuri dėl didelio keitiklių pastočių skaičiaus nėra naudotina ekonominiu požiūriu.

1.5. HVDC technologijos

1.5.1. LCC keitiklių technologija

Didžioji dalis veikiančių HVDC sistemų yra paremti aukštos įtampos nuolatinės srovės linijos komutuojamų keitiklių pagrindu. Terminas linija komutuojamas reiškia, kad konvertavimo procesas remiasi AC sistemos linijos įtampa, prie kurios keitiklis yra prijungtas, kuri paveikia komutaciją iš vieno jungiklio į kitą. Klasikinė LCC HVDC sistema pavaizduota paveiksle (1.10 pav.).



1.10 pav. Dviejų terminalų LCC HVDC sistema.

LCC HVDC sistemą sudaro:

Keitiklių transformatoriai

Transformatorius atlieka kintamos įtampos reguliavimo funkciją, kuri yra paduodama į keitiklius, norint išlaikyti pastovų nuolatinės įtampos lygį arba pakelti įtampai gaunamai iš DC tinklo iki norimo lygio, kad būtų galima perduoti energiją į AC tinklą. Esant dvylikos tiristorių

sistemai reikalingos dvi antrinės apvijos transformatoriuje: viena su Y-Y sujungimu, kita su Δ -Y sujungimui. Keitiklių transformatoriai gali būti atskiri kiekvienai fazei arba trifaziai.

Filtrai

Keitiklis generuoja elektros srovės ir įtampos šalutines harmonikas tiek kintamosios srovės, tiek nuolatinės srovės pusėse. Šių harmonikų pašalinimui naudojami AC filtrai, norint sumažinti įtampos šalutinių harmonikų kiekį iki standartuose leidžiamų ribų.

Šuntiniai kondensatoriai

Normalaus darbo režimo metu linija komutuojamas keitiklis vartoja reaktyviąją galią, apie 60% nuo perduodamos aktyviosios galios. Šuntiniai kondensatoriai diegiami keitilio pastotėje, kintamos įtampos pusėje. Jie atlieka reaktyviosios galios kompensavimo funkciją ir tiekia reaktyviąją galią į keitiklį. Norint pasiekti tenkinama LCC HVDC keitiklio galios faktorių, šuntiniai kondensatoriai yra padalinami į grupes, kurios įjungiamos ar išjungiamos per jungtuvus, kai kinta DC galia. Kai kurie šuntiniai kondensatoriai yra sukonfiguruoti taip, kad veiktų kaip ir AC filtrai.

DC reaktoriai

DC reaktoriai atlieka nuolatinės srovės išlyginimo funkciją ir taip pat mažina nuolatinės įtampos iškraipymus DC linijoje. Tuo pačiu DC reaktoriai sumažina pereinamojo proceso elektros srovės, kurios teka keitikliuose.

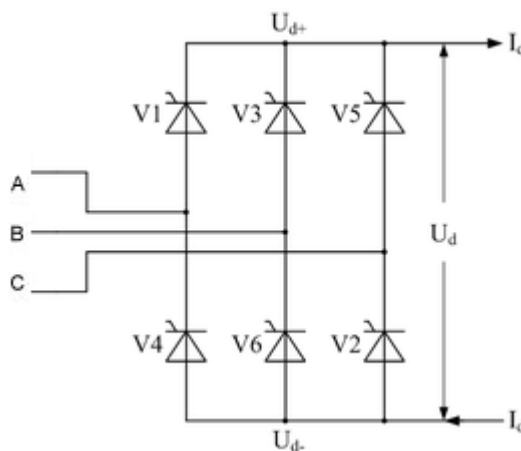
LCC keitiklis

LCC keitiklis yra sudarytas iš nevaldomų jungiklių, tokių kaip diodai, arba iš jungiklių, kurie gali būti įjungti juos paveikus signalu, tokie kaip tiristoriai. Iš principo HVDC keitiklį galima sukonstruoti tik iš diodų, tačiau toks keitiklis gali veikti tik lygininio režime, tuo pačiu nėra galimybės valdyti DC įtampos, tai yra didelis trūkumas.

Todėl aukštos įtampos nuolatinės srovės linijos komutuojamų keitiklių pagrindinė dalis yra galios tiristoriai. Nuolatinės srovės dalyje energijos kaupimui šios sistemos naudoja induktyvumą (reaktorių). Tokių sistemų keitiklio, keičiančio nuolatinę srovę į kintamą, tiristorių komutacija atliekama prijungtos prie keitiklio išėjimo kintamos srovės linijos pagalba. Naudojant šią sistemą, dėl kokių nors priežasčių kintamos srovės linijoje dingus įtampai keitiklis taip pat negali veikti.

Pagrindinė LCC sistemos dalis yra keitikliai sudaryti iš tiristorių. Paveiksle (1.11 pav.) pavaizduota šešių tiristorių tiltelio schema, kur tiristoriai veikia kaip vožtuvai. Kiekvienas vožtuvas

yra atidaromas tam tikru laiko momentu. Šioje konfiguracijoje kiekvienas tiristorius gali veikti 60 laipsnių diapozone.



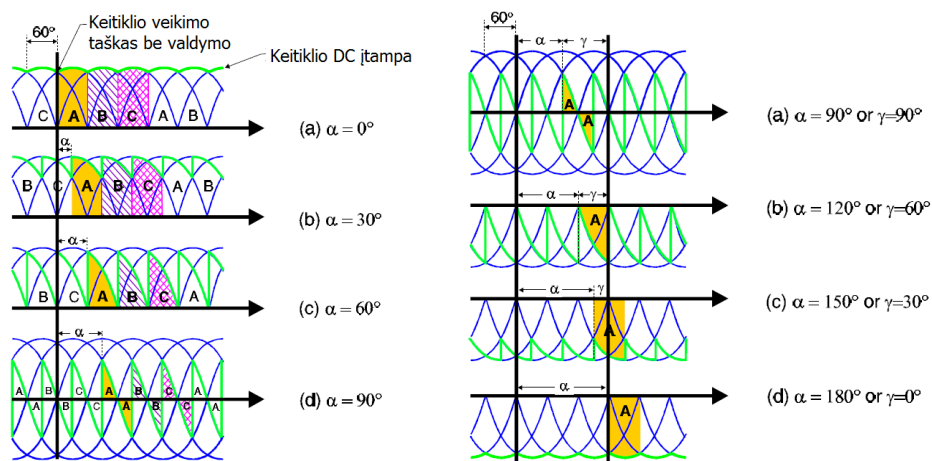
1.11 pav. Šešių tiristorių tiltelis.

Keičiant tiristoriaus atidarymo kampą galima valdyti DC įtampą. Šešių tiristorių tiltelio nuolatinė srovės įtampa:

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{3}U_{peak}}{\pi} \cos \alpha ; \quad (1.1)$$

Kur U_{dc} – vidutinė nuolatinės srovės įtampa, U_{peak} – amplitudinė įtampa AC pusėje, α – tiristorių atidarymo kampas (0 – jeigu naudojami diodai).

Iš paveiksle (1.12 pav.) pateiktų grafikų galima matyti kaip keičiasi DC įtampa priklausomai nuo tiristorių atidarymo kampo. Didėjant tiristorių atidarymo kampui nuo 0° iki 90° , DC įtampa yra teigiamo poliškumo, tačiau jos vidutinė vertė mažėja, kai $\alpha=90^\circ$ - vidutinė DC įtampa yra lygi 0. Keitiklis veikia kaip lygintuvas nuo 0° iki 90° .



1.12 pav. Šešių tiristorinių jungiklių DC įtampos priklausomybė nuo α – atidarymo kampo [2].

Didėjant atidarymo kampą nuo 90° iki 180° įtampa yra neigiamo poliškumo ir įtampos vidutinė vertė didėja. Keitiklis veikia kaip lygintuvas, kai α didėja nuo 90° iki 180° . Keitikliui veikiant lygintuvo režime atidarymo kampui naudojamas α simbolis, o inverteriui – γ simbolis. Keitikliui veikiant lygintuvo režime, aktyvioji galia yra perduodama iš AC sistemos į DC sistemą, jam veikiant kaip inverteriui, galia perduodama iš DC į AC sistemą. Jiedu išreiškiami tiesiogine priklausomybe:

$$\gamma = 180 - \alpha; \quad (1.2)$$

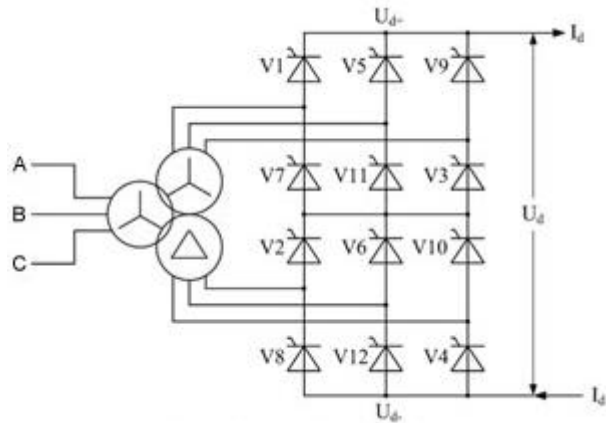
Čia, γ - inverterio extinction advance angle, α - lygintuvo ignition delay angle.

Ne idealiu atveju, dėl sistemoje esančios induktyviosios varžos ir jungikliais tekančios srovės, jie negali persijungti akimirksniu, reikia laiko, kad vienas būtų įjungtas, o kitas išjungtas. Esant jungiklių persijungimui vyksta trumpasis jungimas, kol vienu jungikliu srovė išsikraudinėja, o kitu pradeta tekėti. Įvertinus šį persijungimo laiko įvedama komutavimo persidengimo sąvoka. Ji taip pat įtakoja keitiklio įtampa:

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{3}U_{peak}}{\pi} \left(\frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \right); \quad (1.3)$$

Kur U_{dc} – vidutinė nuolatinės srovės įtampa, U_{peak} – amplitudinė įtampa AC pusėje, α – tiristorių atidarymo kampas, μ - komutavimo perdengimo kampas.

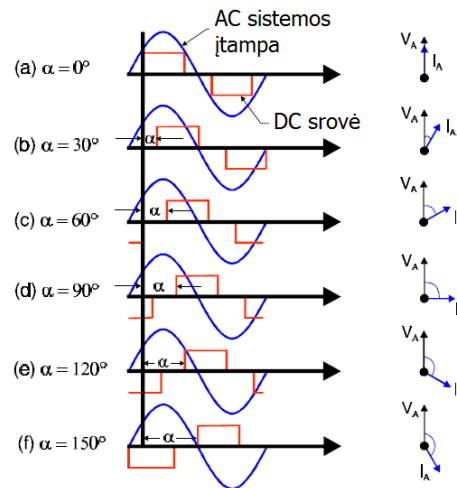
Šešių tiristorių tiltelis AC tinklo pusėje sukelia didelias harmonikas, o DC pusėje vyrauja didelės pulsacijos. Dėl šios priežasties HVDC LCC perdavimo sistemose naudojamas dvylikos tiristorių tiltelis, pavaizduotas paveiksle (1.13 pav.) Pulsacijų ir harmonikų sumažinimui naudojami AC ir DC filtrai. Reaktorius AC pusėje apsaugo nuo srovės nutrūkimų, esant minimaliai keitiklių apkrovai, taip pat jie riboja DC trumpojo jungimo sroves ir kartu su filtrais riboja harmonikas.



1.13 pav. Dvylikos tiristorių tiltelis.

Reaktyviosios galios vartojimas

Paveikslė (1.14 pav.) pavaizduota keitiklio atidarymo kampo įtaka AC įtampos ir DC srovės fazių skirtumui. Didėjant atidarymo kampui, DC srovė vis labiau atsilieka nuo AC įtampos. Keitiklis AC sistemos atžvilgiu pasireiškia kaip faze atsilieikanti apkrova, nesvarbu ar jis veikia kaip lygintuvas ar keitiklis. Todėl keitiklis iš sistemos vartoja reaktyjąją galią. Dėl tinklo stabilumo reikalavimų šios galios neįmanoma paaimti iš AC tinklo, todėl reikalinga reaktyvioji galia gaunama iš kondensatorių baterijų.

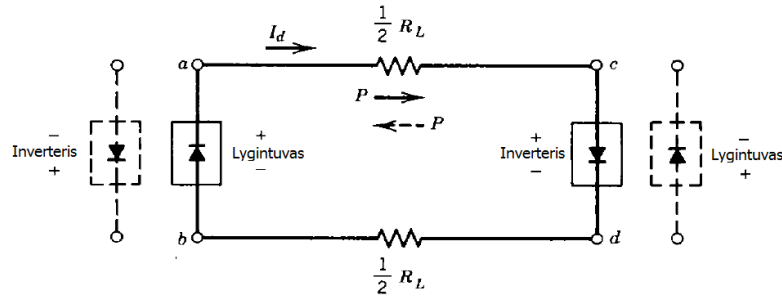


1.14 pav. Fazių pasiskirstymas HVDC sistemoje [2].

Ekspluatuojant HVDC sistemą siekiama kuo labiau sumažinti reaktyviosios galios poreikį. Dėl galios poreikio ne visada pavyksta išlaikyti mažą atidarymo kampą, tuomet naudojami transformatorių atšakų perjungikliai.

LCC-HVDC valdymas

Šioje sistemoje viena iš keitiklių stočių reguliuoja DC įtampą. Dažniausiai tai yra lygintuvas, jis valdo savo keičiamą įtampą. Transformatoriai reguliuodami atšakas sušvelnina kintamos įtampos pokyčius AC sistemoje.

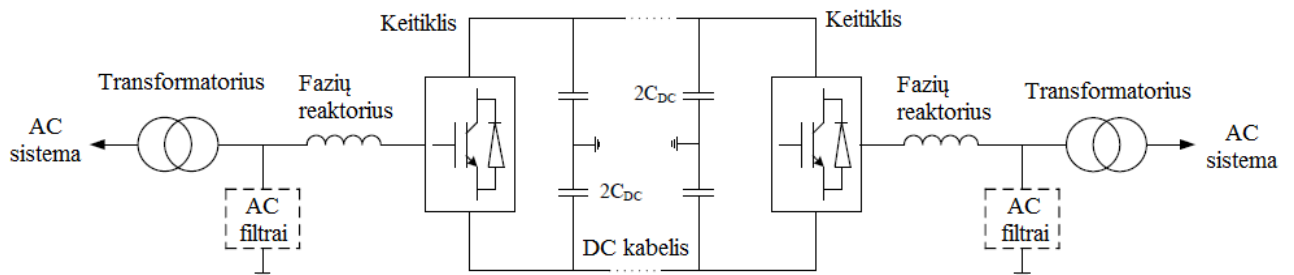


1.15 pav. LCC-HVDC galios srauto valdymas [1].

LCC keitiklyje DC srovė nekeičia savo krypties, ji teka per didelę induktyviąją varžą. Paveiksle (1.15 pav.) pavaizduotas galios krypties valdymas. AC pusėje konverteris veikia beveik kaip srovės šaltinis, dėl šios priežasties LLC keitiklis HVDC sistemoje yra įvardijamas kaip srovės šaltinio keitiklis. Kadangi elektros srovės tekėjimo kryptis negali būti pakeista, perduodamos elektros energijos kryptis reguliuojama apkeičiant DC įtampos poliškumą abiejuose terminaluose.

1.5.2. VSC keitiklių technologija

VSC HVDC yra naujesnė technologija nei LCC HVDC, ji pradėta taikyti nuo 1990 metų [6]. Ją pirmoji pritaikė ABB kompanija, kuri šia technologjos koncepcija pavadino „HVDC light“. Kitos kompanijos šią technologiją įvardija skirtingai, Siemens ją vadina „HVDC PLUS“ ir Alstom ją vadina „HVDC MaxSine“. Paveiksle (1.16 pav.) pavaizduota VSC HVDC jungtis.



1.16 pav. VSC HVDC perdavimo sistema [15].

VSC HVDC sistemą sudaro:

Transformatorius

Kaip LCC HVDC technologijos atveju, transformatorius sujungia keitiklio pastotę su AC sistema ir atlieka kintamos įtampos reguliavimo funkciją.

Fazių reaktoriai

Fazių reaktoriai diegiami pastoviam aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymui. Pagal ABB „HVDC light“ techninį aprašą, fazių reaktoriai atlieka tris funkcijas [18]:

- Atlieka žemo dažnių šalutinių harmonikų filtro funkciją, kad į sistemą tiekiamą įtampa būtų artima sinusoidės formai.
- Atlieka aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymą.
- Sumažina trumpojo jungimo sroves.

DC kondensatoriai

Nuolatinės srovės intarpe keitiklių pusėse yra naudojami DC kondensatoriai. Jų dydis priklauso nuo projektuojamo nuolatinės įtampos lygio. Kondensatoriai atlieka dvi pagrindines funkcijas: sudaro mažo induktyvumo kelią išjungtai elektros srovei ir atlieka energijos kaupimo funkciją, su galimybe valdyti perduodamą aktyviąją galią [6]. Taip pat kondensatoriai mažina nuolatinės įtampos pulsacijas.

VSC keitiklis

Kadangi tiristoriai gali būti tik įjungti ir pasikliauja išoriniu AC sistemos poveikiu proceso išjungimui, valdymo sistema turi tik vieną laisvės laipsnį – kada įjungti tiristorių. Tai riboja HVDC naudingumą tam tikromis aplinkybėmis, nes tai reiškia, kad AC sistema, kuri yra prijungta prie HVDC keitiklio visada turi turėti sinchronines mašinas siekiant suteikti komutuojamą įtampą. Toks HVDC keitiklis negali teikti elektros energiją į pasyvią sistemą.

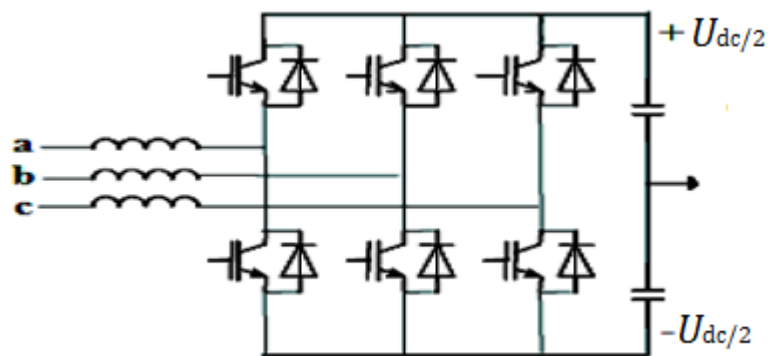
Panaudojant keitiklyje izoliuotus užtūrinius dvikrypčius tranzistorius (IGBT), galima valdyti tiek įjungimą bei išjungimą. Iš IGBT galima padaryti savarankiškai komutuojamus keitiklius. Tokiame keitiklyje DC įtampos poliškumas yra fiksuotas ir DC įtampa, kuri yra išlyginama didelės kondensatorinės talpos, gali būti laikoma pastovi. Dėl šios priežasties HVDC keitiklis panaudojantis IGBT jungiklius yra vadinamas įtampos šaltinio keitikliu (VSC). IGBT jungiklių papildomas valdomumas suteikia daug privalumų. Toks keitiklis yra savarankiškai komutuojamas, jo veikimas nesiremia sinchroniniais varikliais esančiais AC sistemoje. Įtampos šaltinio keitiklis gali tiekti galią į AC tinklą susidedantį iš pasyviųjų apkrovų, o tai nėra įmanoma su LCC HVDC keitikliu. VSC keitikliai yra kompatiškesni nei LCC, nes reikia žymiai mažiau harmonikų filtravimo įrenginių. VSC yra priimtinesnis pasirinkimas nei LCC ten kur mažai vietos, pavyzdžiui atviroje jūroje esančiose platformose ar vėjo elektinėse.

Skirtingai nei LCC keitikliai, VSC išlaiko pastovų įtampos poliškumą ir galios kryptis yra valdoma pagal srovės kryptį. HVDC sistemos nparemtos VSC keitikliais naudojama 6 jungiklių

tiltelio topologiją, nes toks keitiklis sukuria mažiau harmonikų nei tokios pačios topologijos LCC keitiklis. Tokiu atveju dvylikos jungiklių tiltelio topologija nėra reikalinga. Tai supaprastina keitiklio transformatoriaus konstrukciją. Egzistuoja keleta pagrindinių VSC konfigūracijų: dviejų lygių keitiklis (two level converter), trijų lygių keitiklis (three level converter) [5].

Dviejų lygių keitiklis

Dviejų lygių keitiklis pagal konstrukciją yra pats paprasčiausias iš visų trifazių VSC keitiklių, paveiksle (1.17 pav.). Apie jį galima galvoti kaip apie šešių jungiklių tiltelį, kuriame tiristoriai yra pakeisti IGBT su priešingos krypties paraleliai sujungtais diodais, o DC reaktorių pakeistas DC kondensatoriumi. Šie keitikliai gavo tokį pavadinimą, nes kiekvienos fazės AC įtampa yra perjunginėjama tarp dviejų atskirų įtampos lygių, atitinkančių teigiamą ir neigiamą DC terminalo įtampos poliškumą.



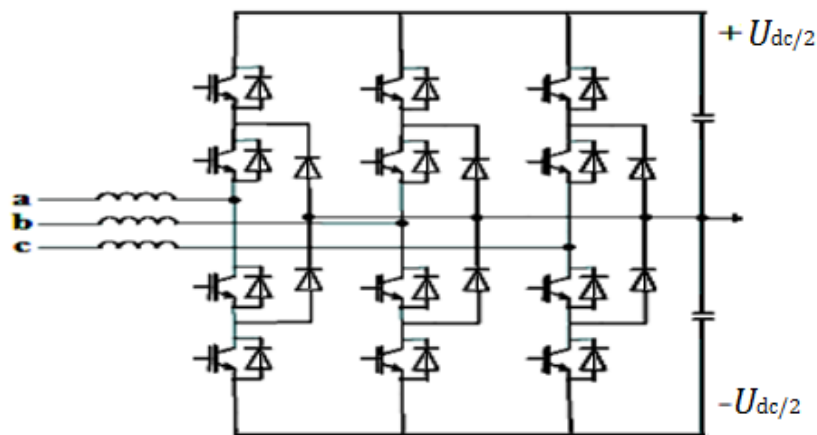
1.17 pav. Dviejų lygių VSC keitiklis [6].

Kai viršutinis iš dviejų jungiklių yra įjungtas, AC išėjimo terminalas yra prijungtas prie teigiamo DC terminalo gaunama įtampa yra $+1/2U_{dc}$. Kai apatinis jungiklis yra įjungtas AC išėjimo terminalas yra prijungtas prie neigiamo DC terminalo ir gaunama įtampa yra $-1/2U_{dc}$. Du jungikliai atitinkantys vieną fazę negali būti įjungti vienu metu, nes tai reikštų nekontroliuojamą DC kondensatoriaus iškrovą [15].

Dviejų lygių keitiklis kintamos srovės pusėje išgauna stačiakampės bangos formos įtampą, kuri visiškai nepanaši į sinusoidę. Tai duoda nepriimtino lygio įtampos iškraipymus, todėl naudojama impulso pločio moduliacija (PWM). IGBT jungikliai yra perjungiami daugybę kartų per ciklą, sukeldami didesnius jungiklių nuostolius, nei LCC technologijos atveju. Vienas VSC trūkumas yra tai, kad reikia nuosekliai sujungti šimtus IGBT tranzistorių ir perjunginėti tuo pačiu metu kiekviename vožtuve, norint pasiekti labai aukštą įtampą skirtas HVDC sistemos operavimui.

Trijų lygių keitiklis

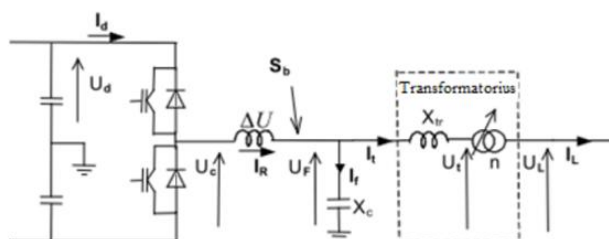
Norint sumažinti harmonikų iškrypimus, kuriuos sukelia dviejų lygių keitiklis, HVDC sistemose naudojamas trijų lygių keitiklis, kuris pavaizduotas paveiksle (1.18 pav.). Trijų lygių keitiklis gali sugeneruoti trijų lygių įtampas kiekvienai AC terminalo fazei: $-1/2U_{dc}$, 0 ir $+1/2U_{dc}$. Norint gauti teigiamą DC įtampą, viršutiniai du IGBT tranzistoriai turi būti įjungti. Taip pačiai apatiniai du tranzistoriai išgauna neigiamą DC įtampą. Norint išgauti nulinę įtampą du viduriniai IGBT tranzistoriai turi būti įjungti. Pastarajai grandinei uždaryti panaudojami abu viduriniai diodai [15].



1.18 pav. Trijų lygių VSC keitiklis [6].

VSC-HVDC valdymas

VSC-HVDC keitiklį sudaro keturios pagrindinės dalys: nuolatinės srovės skirstykla su nuolatinės srovės filtrais ir jungtuvais, keitiklis, su IGBT jungikliais ir keitiklio reaktoriais, kintamos srovės filtrai, tinklo sąsaja, su galios transformatoriais ir jungtuvais. Ekvivalentinė schema pateikta paveiksle (1.19 pav.):



1.19 pav. VSC-HVDC sistemos galios valdymas.

Aktyvinė galia tarp reaktoriaus ir kintamos srovės filtrų apskaičiuojama:

$$S_b = P + jQ = \sqrt{3}U_F I_R; \quad (1.4)$$

Aktyvios ir reaktyvios galios komponentai tarp keitiklio ir filtrų išreiškiami tokiomis formulėmis:

$$P = \frac{U_F U_C \sin(\delta)}{\omega L}; \quad (1.5)$$

$$Q = \frac{U_F (U_F - U_C \cos(\delta))}{\omega L}; \quad (1.6)$$

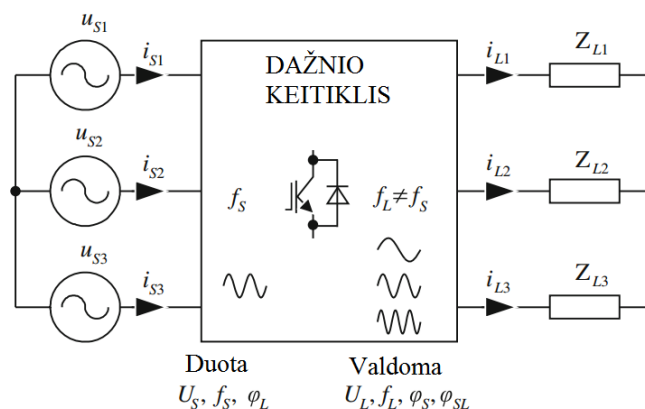
Kur δ - fazės kampas tarp filtro įtampos U_F ir keitiklio įtampos U_C , L – keitiklio reaktoriaus induktyvumas.

Aktyviają galią galima keisti keičiant fazės kampą - δ . Reaktyvioji galia kontroliuojama pagal įtampos kampą ir dydį. Todėl reaktyvioji ir aktyvioji galios gali būti keičiamos nepriklausomai viena nuo kitos.

1.6. Matriciniai keitikliai

1.6.1. AC-AC energijos konvertavimas

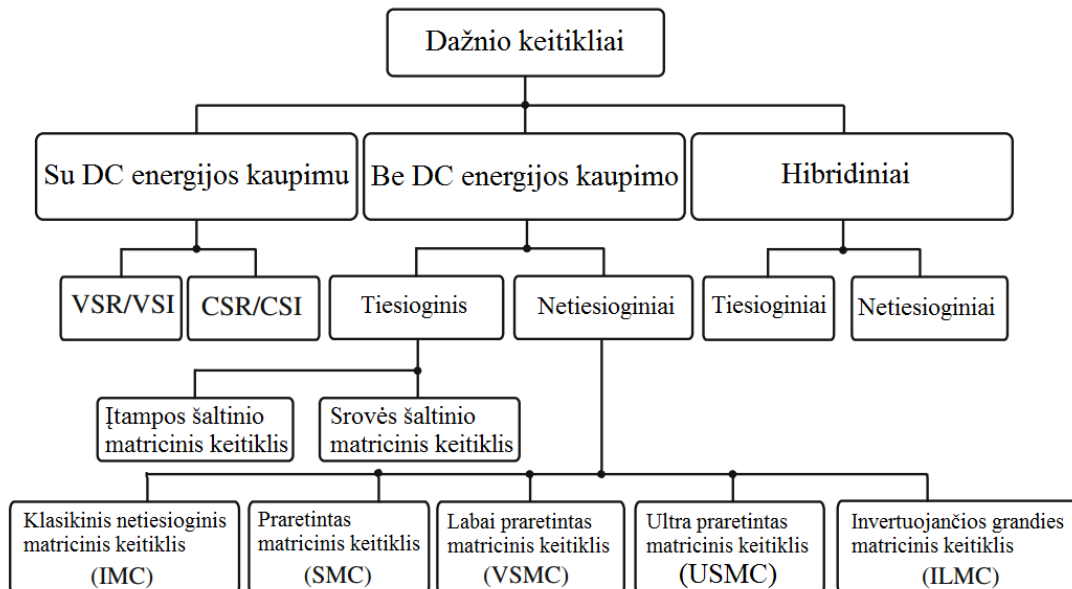
Dažnio keitiklis konvertuoja vieno dažnio AC elektros energiją į kito dažnio AC elektros energiją. Papildomai tokio tipo keitiklis tai pat turi galimybę kontroliuoti apkrovos įtampos amplitudę, poslinkio kampą tarp apkrovos įtampos ir šaltinio įtampos, poslinkio kampą tarp šaltinio srovės ir įtampos (galios kampą), ir galimybę kontroliuoti dvikryptį arba vienakryptį galios srautą tekantį per keitiklį. Paveiksle (1.20 pav.) pateiktas apibendrinamas trifazis AC-AC dažnio keitiklis.



1.20 pav. Apibendrinta trifazio AC-AC dažnio keitiklio diagrama ir jo funkcijos [7].

Prie dažnio keitiklio įėjimo terminalo yra prijungti AC įtampos šaltiniai, su pastovia amplitudė U_S ir pastoviu dažniu f_S . Ši prijungta įtampa yra konvertuojama į išėjimo įtampą su nustatyta amplitudė U_L , dažniu f_L ir apkrovos įtampos poslinkio kampu lyginant su šaltinio įtampa. Šios išėjimo įtampos yra tiekiamos apkrovai. Apkrovos srovės amplitudė I_L ir fazės kampas φ_L yra priklausomi nuo apkrovos pobūdžio. Dvikrypčio galios srauto valdymo atveju, kai elektros energijos perduodamas iš išėjimo terminalo į įėjimo terminalą, dažnio keitiklis konvertuoja apkrovos elektros srovę su dažniu f_L į įėjimo elektros srovę su dažniu f_S .

AC-AC dažnio keitiklių topologijos gali būti plačiai klasifikuojamos į tris kategorijas, priklausomai nuo to kokio tipo yra AC-AC energijos konvertavimas [7]. Paveiksle (1.21 pav.) pateiktas dažnio keitiklių klasifikavimas.



1.21 pav. Trifazių dažnio keitiklių klasifikavimas [7].

Keitikliai yra klasifikuojami į netiesioginius modelius su DC energijos kaupimo elementu, tiesioginius modelius be DC energijos kaupimo elemento ir hibridinius modelius su mažu vietiniu DC energijos kaupimo elementu.

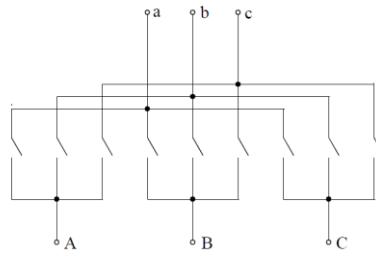
Pirmąją grupę sudaro plačiausiai naudojami: tiesioginis dažnio keitiklis su įtampos šaltinio inverteriu (VSI) arba srovės šaltinio inverteriu (CSI). Antrąją grupę sudaro alternatyvios tiesioginio dažnio keitiklio topologijos. Šios topologijos neturi nuolatinės srovės energijos kaupimo elemento ir praktiškai susideda iš statinių galios jungiklių sujungtų tarp šaltinio ir apkrovos terminalų. Geroms eksploataavimo savybėms užtikrinti tiesioginiai dažnio keitikliai turi mažus kondensatorius ir induktorius, tokius kaip aukštos įtampos dažnio harmonikų filtrus.

Paskutinė grupė yra tiesioginių dažnio keitiklių ir mažų vietinių nuolatinės srovės energijos kaupimo elementų kombinacija.

1.6.2. Tiesioginis matricinis keitiklis

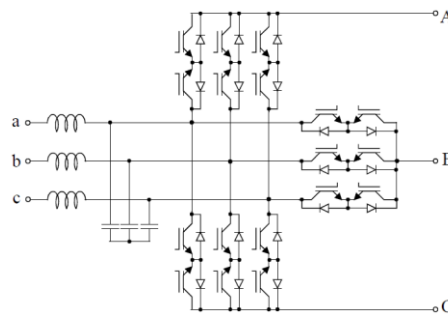
Matricinių keitiklių tipai ir topologijos apžvelgiamos literatūroje [7] ir moksliniuose darbuose [9], bei moksliniuose straipsniuose [11, 31, 32, 33], pagal kuriuos matriciniai keitikliai pagrinde skirstomi į dvi grupes. Tiesioginis matricinis keitiklis yra laikomas vienos stadijos keitikliu, kuris yra sudarytas iš matricos jungiklių. [7], [9]. Trifazis matricinis keitiklis yra sudarytas iš devynių jungiklių. Paveiksle (1.22 pav.) pateikta trifazio matricinio keitiklio principinė schema,

kuriame pavaizduoti idealūs jungikliai. Jie yra dvikrypčiai jungikliai galintys blokuoti įtampa ir praleidžiantys elektros srovę dvejomis kryptimis.



1.22 pav. Idealus tiesioginis matricinis keitiklis [9].

Ši schema gali pasirodyti labai paprasta, tačiau ji parodo tik matricinio keitiklio principą. Realybėje neegzistuoja idealūs jungikliai todėl papildomai reikalingi įėjimo pusės filtrai. Realistiškesnį matricinio keitiklio vaizdą atspindi paveiksle (1.23 pav.).

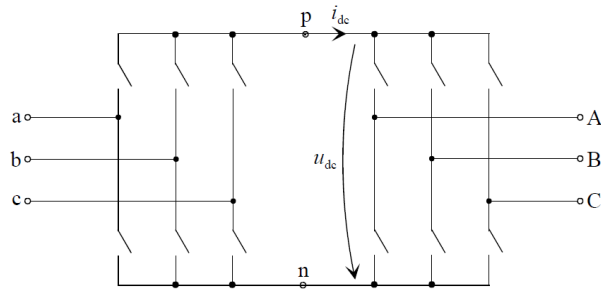


1.23 pav. Tiesioginio matricinio schema [9].

Šioje topologijoje keitiklyje idealius jungiklius pakeičia IGBT ir diodai. MC keitiklis neturi DC linijos ir energijos kaupimo elemento, tačiau vistiek yra reikalingi pasyvūs AC filtrai šaltinio pusėje. Šaltinio filtrai yra reikalingi tam, kad sumažinti aukštos įtampos komponentes, harmonikas įėjimo srovėse ir sumažinti tridžių poveikį, kurie kyla iš AC sistemos [7].

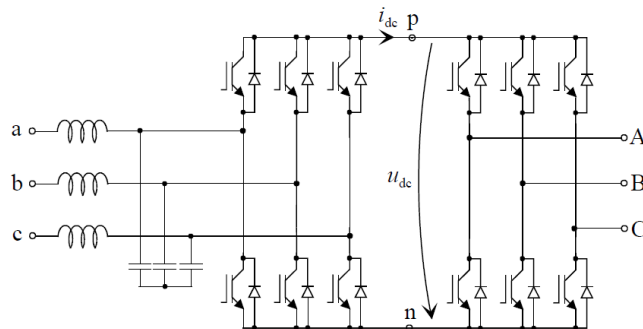
1.6.3. Netiesioginis matricinis keitiklis.

Vienos stadijos matriciniame keitiklyje kiekvieną išėjimo fazę gali būti prijungta prie bet kurios įėjimo fazės, be jokių apribojimų. Tačiau matricinio keitiklio veikimą galima pasiekti, kai įėjimo ir išėjimų fazių sujungimai yra negalimi. Tai galima pasiekti su dvejų stadijų matriciniu keitikliu, kitaip vadinamu netiesioginiu matriciniu keitikliu, paveikslas (1.24 pav.).



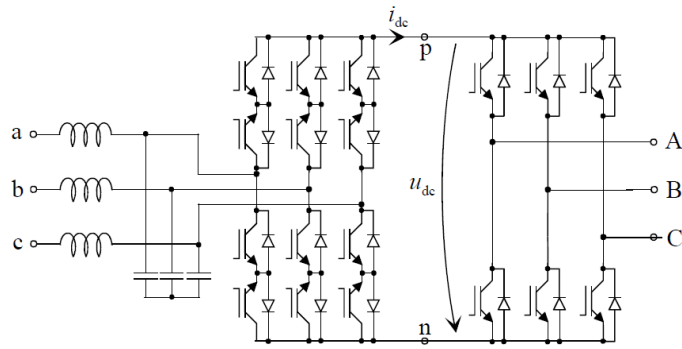
1.24 pav. Idealus netiesioginis matricinis keitiklis [9].

Šis keitiklis yra gaunamas iš klasikinio matricinio keitiklio struktūros. Sistemos su matricinių keitiklių schemomis gali būti skirstomos į tiesioginio dažnio konvertavimo schemas ir netiesioginio dažnio konvertavimo schemas. Pastaroje koncepcijoje, keitiklis yra padalinamas į dvi dalis su nuolatinės srovės grandimi. Jame yra įtampa maitinamas lygintuvas įėjimo pusėje ir įtampos šaltinio inverteris išėjimo pusėje. Įėjimo lygintuvas ir išėjimo inverteris yra tiesiogiai prijungti prie DC pusės [7]. Realistiškensė, tačiau pakankamai primityvi sistema gaunama iš tradicinio „back-to-back“ konverterio be DC linijos energijos kaupimo elementu, tačiau su LC-tipo šaltinio filtru. Šio supaprastinto dviejų stadijų matricinio keitiklio modelis pateiktas paveiksle (1.25 pav.).



1.25 pav. Supaprastintas netiesioginis matricinis keitiklis [9].

Šaltinio pusės lygintuvo tiltelis yra valdomas taip, kad jo IGBT tranzistoriai atsidarytų tuo pačiu metu, kaip ir atsidaro diodai. Tokiu būdu DC linijos i_{dc} srovė gali keisti savo kryptį. Jeigu DC srovė yra pastovi, įėjimo srovė gali būti tik keturių žingsnių stačiakampės bangos formos. Kadangi vienas iš matricinių keitiklių tikslas yra pasiekti sinusoidės bangos formos įėjimo srovės, tai kas nėra įmanoma su supaprastintu dviejų stadijų matriciniu keitikliu, naudojama netiesioginio matricinio keitiklio konfigūracija, paveikslas (1.26 pav.).



1.26 pav. Netiesioginis matricinis keitiklis [9].

Šis netiesioginis matricinis keitiklis naudoja įėjimo tiltelyje, tai yra lygintuvo tiltelyje dvikrypčius bendro emiterio jungiklius, apkrovos tiltelį, tai yra invertavimo tiltelį sudaro tradicinis VSI tiltelis. Dėl tokios šaltinio pusės tiltelio konfigūracijos.

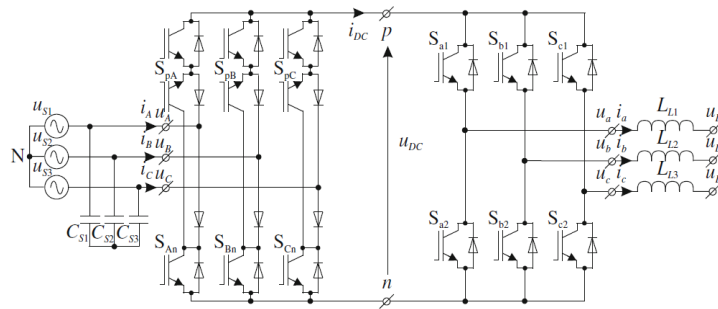
1.6.4. Netiesioginio matricinio keitiklio topologijos

Netiesioginio matricinio keitiklio schema pateikta, paveiksle (1.25 pav.). Pagrindinę grandinę sudaro lygintuvo sekcija - PWM CSR, inverterio sekcija - PWM VSI ir šaltinio pusės LC-filtrai. Ši jungtis tarp dviejų tiltelinių keitiklių (CSR ir VSI) leidžia išskirti moduliavimo procesą įėjimo pusėje ir išėjimo pusėje. Kadangi nėra DC energijos kaupimo elemento, sistema praranda stabilumą, todėl moduliacijos procesą tarp CSR ir VSI būtina sinchronizuoti.

Matriciniai keitikliai iš prigimties yra dvikrypčiai todėl gali atgal gražinti energiją iš apkrovos į šaltinio pusę. DC įtampa matriciniame keitiklyje yra tik teigiamo poliariškumo. Tam, kad elektros energijos srautas galėtų būti perduodamas abiejomis kryptimis IMC įėjimo tiltelyje reikalingi aktyvūs dvikrypčiai jungikliai. Keitiklio išėjimo pusėje yra naudojamas klasikinis VSI, kuris formuoja išėjimo įtampą. IMC sudaro 18 IGBT tranzistorių ir 18 diodų.

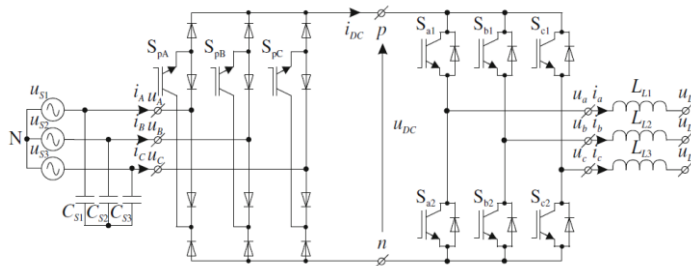
IMC keitiklyje reikalingi komutacijos metodai, kurie leistų išvengti įėjimų fazių užtrumpinimo nenutraukiant elektros srovės tekėjimo į apkrovą. Keturių žingsnių komutacija yra dažniausiai naudojama netiesioginiams matriciniams keitikliams. Taip pat vektorinė ir trikampinė moduliacija [7].

Galimos kelios naujos netiesioginio matricinio keitiklio topologijos su sumažintu aktyviųjų jungiklių skaičiumi įėjimo tiltelyje. Netiesioginio matricinio keitiklio įėjimo pakopa yra realizuojama keturių kvadrantų jungikliais, kaip parodyta. Šioje konfigūracijoje dvikryptis elektros energijos srautas gali būti pasiektas su teigiama ir neigiama DC intarpo įtampa. Priimant, jog DC intarpo įtampa yra teigiamo poliariškumo, tokiu atveju galima sumažinti aktyviųjų jungiklių skaičių. Naujoji topologija yra vadinama praretintu matriciniu keitikliu (SMC) ir pateikta paveiksle (1.27 pav.).



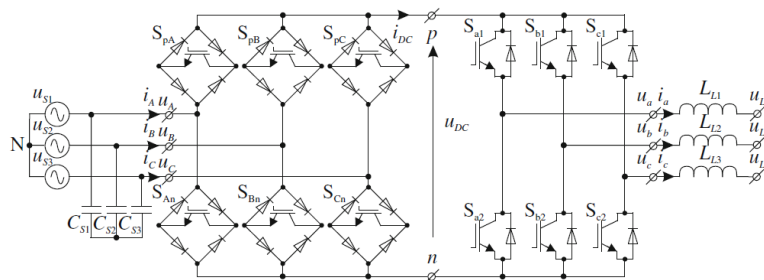
1.27 pav. Praretintas matricinis keitiklis [7].

SMC funkciškai yra ekvivalentiškas IMC, bet yra charakterizuojamas mažesniu valdymo sudėtingumu. SMC topologijoje yra 15 IGBT tranzistorių ir 18 diodų. Jeigu reikalingas tik vienos krypties elektros energijos perdavimo srautas, galima dar paprasčiau topologijos versija. Tokia topologija pateikta paveiksle (1.28 pav.).



1.28 pav. Ultra praretintas matricinis keitiklis [7].

Šis keitiklis yra vadinamas ultra praretintas matricinis keitiklis (USMC). Šaltinio tiltelis susideda iš 3 IGBT tranzistorių ir 12 diodų. IMC, SMC ir USMC reikalinga naudoti daugiažingsnį jungiklių komutavimo metodą, kad išpildyti komutavimo taisykles. Naudojama dar viena topologija su supaprastintu jungiklių komutavimu. Šis keitiklis vadinamas (VSMC) labai praretintas matricinis keitiklis ir pateiktas paveiksle (1.29 pav.).



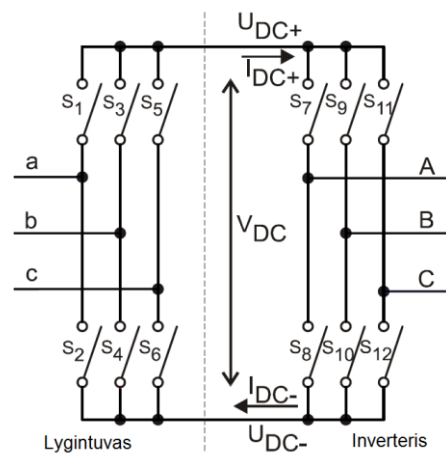
1.29 pav. Labai praretintas matricinis keitiklis [7].

Lygintuvo tiltelis sudarytas iš dvikrypčių jungiklių su IGBT diodų konfigūracijos. VSMC topologija leidžia sumažinti IGBT tranzistorių skaičių, bet padidėda diodų skaičius. VSMC struktūrą sudaro 12 IGBT tranzistorių ir 30 diodų. Ši topologija funkciškai panaši į IMC. Praretinto, labai praretinto, ultra praretinto ir matricinių keitiklių topologijos yra charakterizuojamos

įtampos perdavimo santykiu, kuris yra mažesnis už vienetą. Maksimalus šio santykio lygis yra 0.866.

1.6.5. Netiesioginio matricinio keitiklio valdymas

Moksliniuose straipsniuose aprašyta matricinių keitiklių PWM [10, 20, 22] fazinio valdymo [12] ir SVM [21, 23, 24] valdymo strategijos. Netiesioginiame matriciniame keitiklyje invertavimo stadiją atlieką šeši jungikliai (S_7 - S_{12}) sujungti pagal VSI tiltelio schemą, o lyginimo stadiją atlieka kiti šeši jungikliai (S_1 - S_6) su tokia pačia tiltelio schema, kurios parodytos paveiksle (1.30 pav.) [8].



1.30 pav. Netiesioginio matricinio keitiklios lyginimo ir invertavimo stadijos [8].

Tiesioginiame matriciniame keitiklyje yra naudojama erdvės vektorių impulso pločio moduliacija. Šios moduliavimo technikos esmė yra atsieti įėjimo srovių valdymą nuo išėjimo įtampų valdymo. Tai pasiekama padalinant matricinio keitiklio perdavimo funkciją T į lygintuvo ir inverterio perdavimo funkciją $T = I * R$,

$$\begin{bmatrix} S_{aA} & S_{bA} & S_{cA} \\ S_{aB} & S_{bB} & S_{cB} \\ S_{aC} & S_{bC} & S_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix}; \quad (1.7)$$

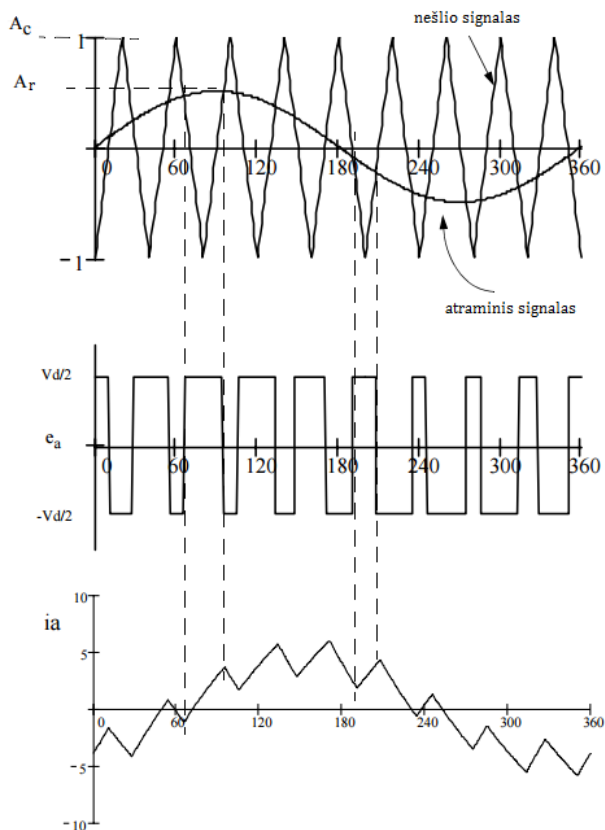
Čia I matrica yra inverterio perdavimo funkcija ir R matrica yra lygintuvo perdavimo funkcija. Tokiu būdu į netiesioginį matricinį keitiklį galima žvelgti kaip į „back-to-back“ keitiklį, tik be jokio DC energijos kaupimo elemento. Todėl netiesioginiui matriciniui keitikliui galima pritaikyti tą pačią impulso pločio moduliavimo strategiją, kurią naudoja PWM VSI inverteris ir PWM lygintuvas.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad (1.8)$$

Aukščiau pateikta perdavimo matrica parodo, kad išėjimo fazių įtampos yra gaunamos iš įėjimo fazių įtampų sandaugos per inverterio stadijos jungiklių (S_7 - S_{12}) ir lygintuvo stadijos jungiklių (S_1 - S_6) komutaciją. Jei į ekvivalentinę netiesioginio matricinio keitiklio schemą pažiūrėtume iš išėjimo fazės V_A , tai įtampos fazę V_A formuojantys jungikliai S_7 ir S_8 yra tiesiogiai sujungiami su įėjimo fazėmis a, b ir c per šešis lygintuvo stadijos jungiklius S_1 - S_6 .

Sinusinė impulso pločio moduliacija

Sinusinė impulso pločio moduliacija (SIPM) yra vienas iš paprasčiausių ir dažniausiai naudojamų matricinių keitiklių moduliacijos metodų, kuris yra paremtas nešliu signalu. Paveiksle (1.31 pav.) parodytas sinusinės impulso pločio moduliacijos principas. Galios elektronikoje SIPM yra lyginamojo metodo moduliacija kur trikampės formos nešlio signalas yra lyginamas su atraminiu sinusiniu signalu.



1.31 pav. sinusinės impulso pločio moduliacijos principas.

Pagrindinis, nešlio signalu paremtos moduliacijos, metodo pranašumas yra šios technikos paprastumas ir dinaminės charakteristikos tinkančios matriciniams keitikliams [22].

Vieno ciklo impulsų skaičių nulemia dažnių santykis tarp trikampio nešlio signalo ir moduluojamo sinusinio signalo. Moduliacijos koeficientas (M_R) apskaičiuojamas pagal:

$$M_R = \frac{\text{nešlio signalo dažnis}}{\text{moduluojamo signalo dažnis}}; \quad (1.10)$$

M_R yra susijęs su šalutinių harmonikų dažniu ir šios harmonikos dažniausiai pasireiškia, kai jų dažnis:

$$f = k \cdot M_R \cdot (f_m); \quad (1.11)$$

Čia f_m – moduluojamos signalo dažnis ir k – sveikasis skaičius (1, 2, 3...)

Moduliacijos indeksą (M_I) nusako amplitudžių santykis tarp moduluojamos atraminio signalo ir nešlio signal, ir yra apskaičiuojamas pagal:

$$M_I = \frac{A_r}{A_c}; \quad (1.12)$$

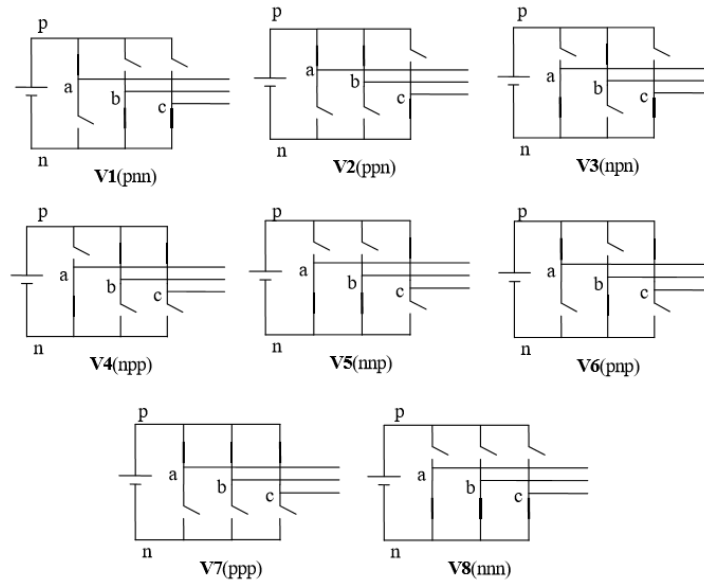
Čia A_r – atraminio signalo amplitudė, o A_c – nešlio signalo amplitudė

M_I yra susijęs su pagrindinio išėjimo signalo įtampos dydžiu. Jei moduliacijos indeksas yra didelis, tai išėjimo signalo amplitudė yra aukšta ir atvirkščiai.

Kai $0 < M_I < 1$, galioja tiesinė priklausomybė: $U_1 = M_I \cdot U_{in}$, kur U_1 , U_{in} yra įėjimo ir išėjimo įtampa.

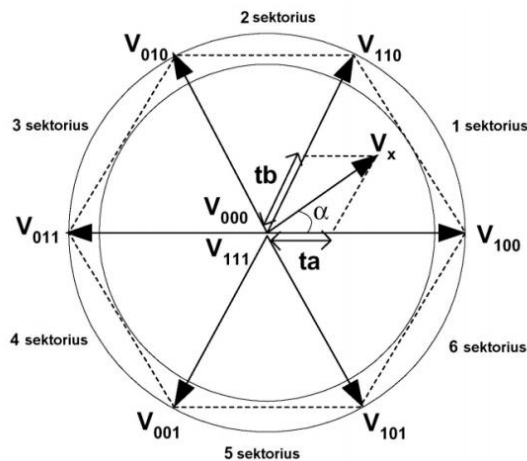
Erdvinio vektoriaus impulso pločio moduliacija

Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacijos (EVIPM), kitaip – bazinių vektorių IPM metodo esmė: priešingai nuo sinusinės impulso pločio moduliacijos, kai visi raktai komutuojami vienu metu, naudojama komutacija tarp kelių, iš anksto pasirinktų jungiklių būsenų, kiekviena iš kurių atitinka tam tikrą įtampos vektoriaus erdvinę padėtį [39]. Paveiksle (1.32 pav.) parodytos aštuonis bazinius vektorius atitinkančios šešių raktų tilto jungimo schemas.



1.32 pav. Bazinės jungiklių jungimo schemas.

Turint aštuonis bazinius vektorius, du iš kurių yra „nuliniai“, o likusieji šeš perstumti erdvėje 60 elektrinių laipsnių kampu, galima gauti reikiamą išėjimo įtampos vektorių naudojant perjungimą IPM metodu tarp dviejų bazinių vektorių (pvz. V_{110} ir V_{010}) tam tikrame sektoriuje ir nulinių vektorių V_{000} ir V_{111} . Moduliacijos metu gauto įtampos vektoriau amplitudė ir fazė priklauso nuo bazinių vektorių. Kaip parodyta paveiksle (1.33 pav.), moduliacijos metu, kai nenaudojami nuliniai vektoriai, gaunamas įtampos vektorių šešiakampis. [39].



1.33 pav. Erdvinių įtampos vektorių diagrama.

Tolygiai besisukantis įtampos vektorius V_x gaunamas pagal greta esančius bazinius vektorius. Pavyzdžiui pirmamas sektorius, paveikslė (1.33 pav.), yra apribotas vektoriais: V_{100} , V_{110} ir nuliniiais vektoriai V_{000} , V_{111} . Vektorius V_x pirmajame sektoriuje apibrėžiamas:

$$V_x \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) = V_a \cdot \sin\frac{\pi}{3}; \quad (1.13)$$

$$V_x \cdot \sin(\alpha) = V_b \cdot \sin\frac{\pi}{3}; \quad (1.14)$$

Iš (1.13) ir (1.14) formulių gaunama:

$$V_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot V_x \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right); \quad (1.15)$$

$$V_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot V_x \cdot \sin(\alpha); \quad (1.16)$$

Čia V_a ir $V_b - V_x$ dedamosios pagal bazinius vektorius V_{100} ir V_{110} . V_x gali būti iškreikštas:

$$V_x = V_a + V_b = V_{100} \cdot \frac{t_a}{T_0} + V_{100} \cdot \frac{t_b}{T_0} + V_{000}(V_{111}) \cdot \frac{t_0}{T_0}; \quad (1.17)$$

Kur:

$$t_a = \left(\frac{V_a}{V_{100}}\right) \cdot T_0; \quad (1.18)$$

$$t_b = \left(\frac{V_b}{V_{110}}\right) \cdot T_0; \quad (1.19)$$

$$t_0 = U \left[\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \right]; \quad (1.20)$$

Irašant lygtis (1.15) ir (1.16) į (1.18) ir (1.19), gaunama:

$$t_a = U \left[\cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \alpha \right]; \quad (1.21)$$

$$t_b = \left(\frac{2U}{\sqrt{3}}\right) \cdot \sin \alpha; \quad (1.20)$$

Čia: $U - V_x/V_{100,110}$ įtampos vektorių santykis laiko tarpe T_0 pirmajame segmente. Šis santykis dar vadinamas moduliacijos indeksu.

2. Tiriamoji dalis

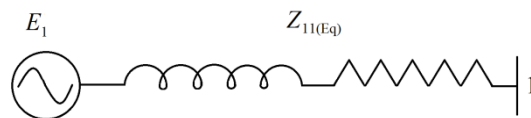
Tiriamasis darbas atliekas matematinio modeliavimo būdu. Netiesioginio matricinio keitiklio tarpsteminėje nuolatinės srovės jungtyje tyrimui atlikti, sudaromas bendras keitiklio ir energetinių sistemų modelis. Apžvelgiamos literatūroje naudojamos atskirų elementų atstojamosios schemas, kurių pagrindu ir sudaromas tiriamasis modelis. Iš Matlab/Simulink programos „*SimPowerSystems*“ bibliotekos parenkami naudojamų elementų matematiniai blokai pagal atstojamąsias schemas ir apžvelgiama tiriamojo modelio matavimų metodika.

2.1. Atstojamosios schemas

2.1.1. Sistemos atstojamoji schema

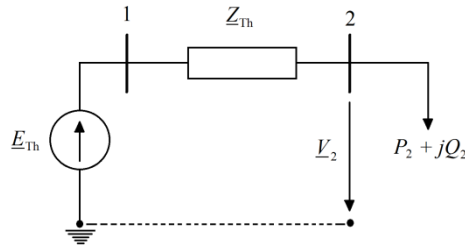
Energetinės sistemos ekvivalentas yra matematinis modelis, kuriuo norima atspindėti dalį sistemos ar visą sistemą skaičiavimams supaprastinti. Ekvivalentinės schemas dažniausiai naudojamos trumpųjų jungimų skaičiavimas norimuose sistemos mazguose.

Energetinės sistemos ekvivalentiniai modeliai yra naudojami skaičiuojant balansuotas ir nebalansuotas trumpųjų jungimų sroves. Apibendrintos teigiamos fazių sekos (TFS) vieno mazgo energetinės sistemos ekvivalentinė schema susideda iš įtampos šaltinio ir nuosekliojo impedanso. Paveiksle (2.1 pav.) parodyta teigiamos fazių sekos vieno mazgo sistemos ekvivalentinė schema [1].



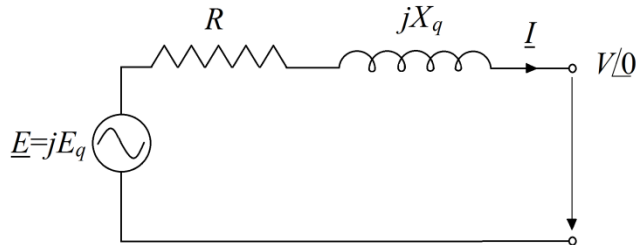
2.1 pav. Energetinės sistemos TFS ekvivalentas vienam mazgui ekvivalentas [25].

Įtampos šaltinis yra sudarytas pagal Thevenino teoremą, o TFS impedansas susideda iš nuosekliai sujungtų aktyviosios ir reaktyviosios varžos [25]. Thevenino teorema teigia: „aktyvųjį dvipolį galima pakeisti ekvivalentiniu įtampos šaltiniu, kurio elektrovara lygi dvipolio tuščiosios veikos įtampai, o varža – dvipolio vidinei varžai. Atlikus tokį keitimą, grandinės, prijungtos prie dvipolio gnybtų, režimas nesikeičia“ [26]. Pagal šią teoremą taip pat galima iškreikšti energetinės sistemos ekvivalentinę schemą, bet kurio mazgo atžvilgiu, paveikslas (2.2 pav.).



2.2 pav. Thevenino ekvivalentinė energetinės sistemos schema. E_{Th} – Thevenino įtampa, Z_{Th} – Thevenino impedansas, V_2 – mazgo įtampa, $P_2 + jQ_2$ – į mazgą atiduodamos galios [27].

Bendru atveju, kai ekvivalentinė schema yra sudaryta iš aktyvių šaltinių, galima naudoti generatoriaus modelį [25]. Tokio modelio schema parodyta paveiksle (2.3 pav.).



2.3 pav. Ekvivalentinė generatoriaus grandinė [27].

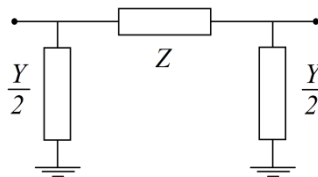
2.1.2. Linijos atstojasmoji schema

Simetrinės elektros linijos matematinis modelis skaičiuojant normalius darbo režimus yra keturpolis:

$$\begin{cases} U_p = AU_g + BI_g; \\ I_p = CU_g + DI_g; \end{cases} \quad (2.1)$$

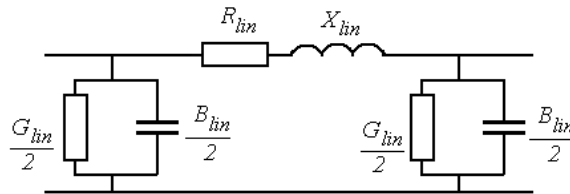
Čia A, B, C ir D – keturpolio pastoviosios; p, g – pradžia ir galas, A=D [28].

Skaičiuojant elektros tinklus, elektros linijas nagrinėti kaip elektros grandinę su paskirstytais parametrais nepatogu ir dažnai toks tikslumas nereikalingas. Todėl atliekant praktinius skaičiavimus elektros linijos ne ilgesnės kaip 150-250 km, vaizduojamos grandinės su sutelktaisiais parametrais, dažniausiai π tipo keturpoliais, paveikslas (2.4 pav.) [29].



2.4 pav. π tipo linijos atstojasmoji schema [26].

Paveiksle (2.4 pav.) linijos atstojamąją schemą taip pat galima pavaizduoti (2.5 pav.) su jos: aktyviaja varža R_{lin} ir reaktyviaja varža X_{lin} - vadinamais išilginiais parametrais, bei aktyviuoju laidžiu G_{lin} ir talpiuoju laidžiu B_{lin} – vadinamais skersiniais parametrais.



2.5 pav. Linijos su išilginiais ir skersiniais parametrais atstojamoji schema.

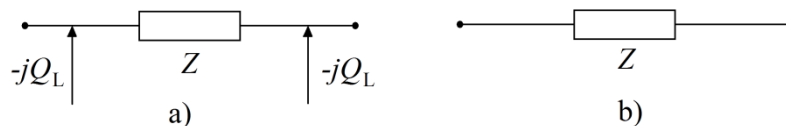
Elektros linijos parametrai gali būti visos linijos, o gali būti tik tam tikro ilgio, pavyzdžiui 1 km ilgio, linijos atkarpos varžumai ir laidumai. Tada jie yra žymimi nuliuko indeksu:

$$R_{lin} = R_0 L_{lin}; \quad X_{lin} = X_0 L_{lin}; \quad G_{lin} = G_0 L_{lin}; \quad B_{lin} = B_0 L_{lin}. ; \quad (2.2)$$

Daugeliu atvejų linijų atstojamąsias schemas galima dar labiau supaprastinti. Linijų įtampa praktiškai nedaug skiriasi nuo vardinės, o linijos skersinis laidumas yra talpinio pobūdžio. Todėl linijos atstojamosios schemas skersinės šakos gali būti pakeisto linijos generuojamomis reaktyvinėmis galiomis [29]:

$$Q_L = U_n^2 b_0 \frac{L}{2}; \quad (2.3)$$

Tada linijos atstojamoji schema atrodytų kaip parodyta paveiksle (2.6 pav. a). Atstojamoji schema žymiai supaprastėja, nes linijos generuojama galia gali būti įvertinta linijų galų apkrovose [29].

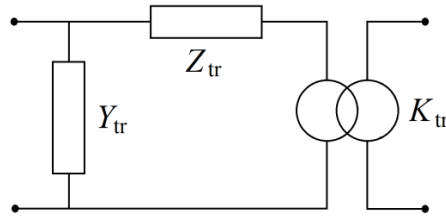


2.6 pav. Supaprastintos linijų atstojamosios schemas [29].

Jei įtampa maža, pavyzdžiui žemosios įtampos tinkle, reaktyviųjų galių nevertiname. Kadangi aktyvioji varža yra žymiai mažesnė už induktyviąją varžą, ypač aukštosios įtampos tinkluose, apytikriose pavyzdžiui trumpųjų jungimų srovių skaičiavimuose taikoma paveiksle (2.6 pav. b) parodyta atstojamoji schema.

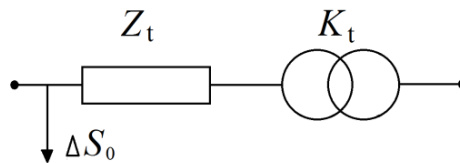
2.1.3. Transformatoriaus atstojamoji schema

Elektros tinklų režimų skaičiavimuose transformatoriai ir autotransformatoriai įvertinami trimis kompleksiniais dydžiais: Z_{tr} , Y_{tr} , K_{tr} ir jų atstojamosios schemas pavaizduotos (2.7 pav.) [28], [29].



2.7 pav. Transformatoriaus atstojamoji schema [28].

Apvijų talpų, magnetinių kontūrų nesimetrijos, savitarpio induktyvumų paprastai nepaisoma. Orientaciniuose skaičiavimuose skersinis laidumas įvertinamas pastoviais tuščios eigos galios nuostoliais ΔS_0 arba visai atmetamas [28]. Tada naudojama supaprastinta schema, pavaizduota paveiksle (2.8 pav.).

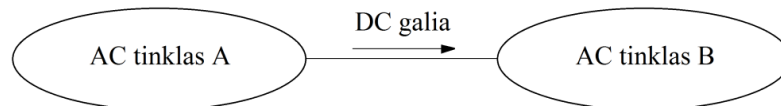


2.8 pav. Supaprastinta transformatoriaus atstojamoji schema [29].

Paprastai laikoma, kad tuščios eigos galios nuostoliai ar skersinis laidumas atstojamosiose schemose turi būti toje pusėje, iš kurios transformatorius maitinamas.

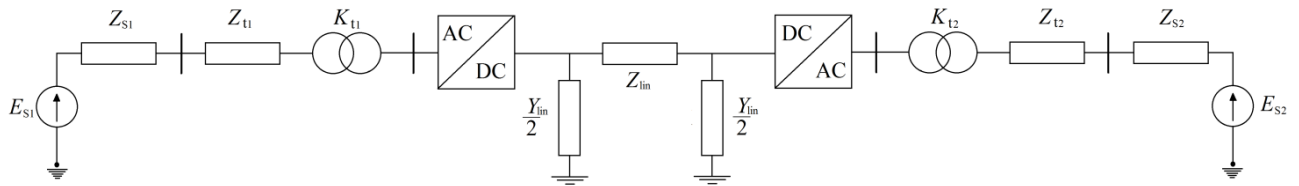
2.1.4. Visos sistemos atstojamoji schema

Visą modelį galima atspindėti pagal paveiksle (2.9 pav.) pavaizduotą schemą, tai yra pavaizduoti kaip jungtį tarp dviejų energetinių sistemų.



2.9 pav. Energetinės sistemos atskirtos nuolatinės srovės linija [4].

Sudėjus sistemos, transformatoriaus, keitiklio ir linijos atstojamąsias schemas kartu sudaromas bendros sistemos atstojamoji schema (2.10 pav.). Pagal ją sudaromas modelis Matlab/Simulink programoje.



2.10 pav. Bendros sistemos atstojamoji schema.

2.2. Matlab/simulink blokai, modeliai

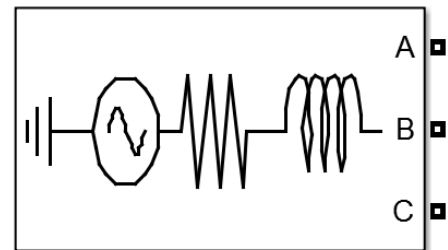
Pasinaudojus Matlab/Simulink programa, „SimPowerSystems“ bibliotekoje esančių matematinėmis lygtimis aprašytų elementų blokų sudaromas modelis.

2.2.1. Energetinės sistemos blokas

Energetinę sistemą galima atvaizduoti pagal paveiksle (2.1 pav.) esančią ekvivalentinę schemą, panaudamus „SimPowerSystems“ bibliotekoje esantį „three-phase source“ – trifazio šaltinio bloką (2.11 pav.).

Bloko parametrai:

- Vidutinė kvadratinė fazinė įtampa (kV);
- Fazės A fazės kampas (°);
- Dažnis (Hz);
- Įtampos šaltinių sujungimas (Y, Yn, Yg) ;
- Šaltinio varža (Ω);
- Šaltinio induktyvumas (mH);



Sistemos parametrai

2.11 pav. Energetinės sistemos simulink blokas.

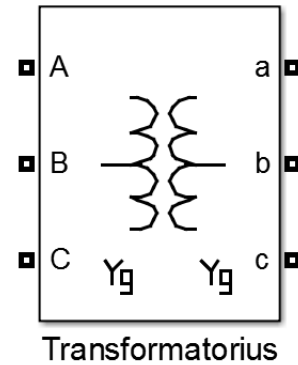
Vidutinė kvadratinė (RMS) fazinė įtampa matuojama (V). Trifazės įtampos yra teigiamos fazių sekos, B ir C fazės atsilieka nuo A fazės atitinkamai 120 ir 240 laipsnių. Įtampos šaltinio dažnis matuojamas (Hz). Įtampos šaltinių vidinis sujungimui galimi trys variantai: Y – sujungimas žvaigžde, neutralė izoliuota, Yn – sujungimas žvaigžde, neutralė atvira, Yg – sujungimas žvaigžde, neutralė įžeminta. Įtampos šaltinio varža matuojama (Ω), induktyvumas (mH). Energetinės sistemos ekvivalentinės schemas parametrai parenkami: U-300kV, f-50Hz, R-10 Ω , L-30mH. Pagal trumpojo jungimo schema, ekvivalentinės energetinės sistemos galios gaunamos P- 2386MW, Q- 2247 MVar, pilnutinė galia – 4600MVA. Tokia galia parinka, kad modelis imituotų panašios galios energetinę sistemą panašios į Lietuvos energetinę sistemą. Šie parametrai yra baziniai parametrai skaičiuojant santykiniais vienetais.

2.2.2. Transformatoriaus blokas

Dviejų apvijų transformatorių galima atvaizduoti panaudojus „*SimPowerSystems*“ bibliotekoje esantį „*three-phase transformer: two windings*“ – transformatoriaus bloką (2.12 pav.).

Bloko parametrai:

- Nominali galia ir dažnis (VA), (Hz);
- Pirminės apvijos įtampa, varža, induktyvumas (kV), (Ω), (mH);
- Antrinės apvijos įtampa, varža, induktyvumas (kV), (Ω), (mH);
- Įmagnetinimo varža (Ω);
- Įmagnetinimo induktyvumas (mH);



2.12 pav. Transformatoriaus simulink blokas.

Pirminės apvijos terminalų fazės indikacijos – ABC, o antrinės apvijos terminalo fazės indikacijos – abc. Transformatoriau apvijų galimi jungimai: Y – žvaigždė, Yn – sujungimas žvaigžde, kai neutralė atvira, Yg – sujungimas žvaigžde, kai neutralė įžeminta, Δ (D1) – sujungimas delta, kai trikampis atsilieka 30 laipsnių nuo žvaigždės, Δ (D11) – sujungimas delta, kai trikampis pralenkia žvaigždę 30 laipsnių.

Kiekvienos apvijos įmagnetinimo induktyvumas ir varža išreiškiami santykiniai vienetais (pu) remiantis transformatoriaus nominalia galia P_n ir nominaliomis apvijų įtampomis (U_1 ir U_2).

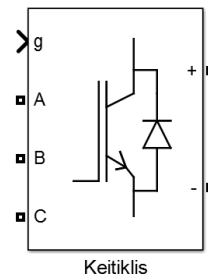
Nominalūs transformatoriaus parametrai: galia – 0,335 pu; dažnis - 1 pu (50Hz), pirminės apvijos įtampa – 1 pu, varža – 0,002 pu, induktyvumas 0,008 pu; antrinės apvijos įtampa – 0,333 pu, varža – 0,002 pu, induktyvumas – 0,008 pu; įmagnetinimo varža – 500 pu, įmagnetinimo induktyvumas – 500 pu.

2.2.3. Matricinio keitiklio blokas

Netiesioginį matricinį keitiklį pagal paveiksluose (1.24, 1.25 pav.) pateiktas schemas galima atvaizduoti panaudomus du lygiagrečiai sujungtus „*SimPowerSystems*“ bibliotekoje esančius „*universal bridge*“ – keitiklio tilto blokus (2.13 pav.).

Bloko parametrai:

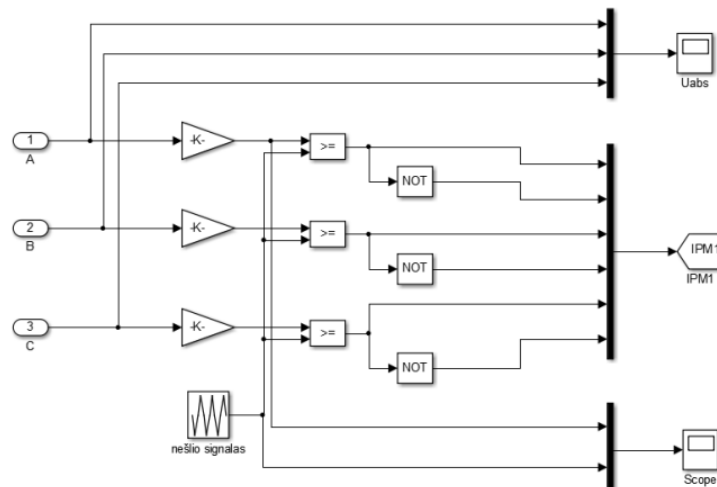
- Jungiklių tipas;
- Tilto atšakų skaičius;
- Keitiklio varža (Ω);



2.13 pav. Jungiklių tilto simulink blokas.

Jungiklių tilto blokas realizuoja universalų trifazį galios keitiklį, kuris susideda iš šešių jungiklių sujungtų pagal tiltelio konfigūraciją. Galimi galios jungiklių tipai – diodai, tiristoriai, GTO, IGBT, MOSFET. Pasirenkamas jungiklis IGBT su paraleliai sujungtu diodu.

Abu netiesioginio matricinio keitiklio tiltai, gali veikti invertavimo ir lyginimo režime. Todėl lyginimo režime veikiantis tiltas sinchronizuojamas su energijos tiekimo režime veikiančia energetine sistema, o invertavimo režime veikinatis tiltas sinchronizuojamas su energijos imtuvo režime veikiančia energetine sistema. Paveiksle (2.14) pavaizduoda sinchronizavimo logika, paremta impulso pločio moduliacijos metodu.



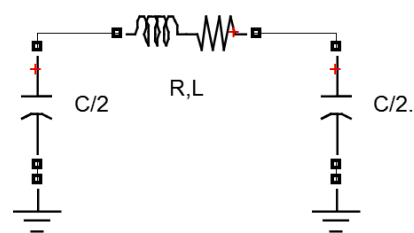
2.14 pav. Keitiklio sinchronizavimo su energetine sistema modelio fragmentas.

2.2.4. Linijos modelis

Linijos modelį pagal paveikslėlyje (2.4 pav.) pateiktą schemas galima realizuoti panaudomus tris „*SimPowerSystems*“ bibliotekoje esančius „*Series RLC branch*“ – nuoseklos RLC atšakos blokus (2.15 pav.)

Parametrai:

- Linijos varža (Ω/km);
- Linijos induktyvumas (mH/km);
- Linijos talpumas ($\mu\text{F}/\text{km}$);



2.15 pav. Linijos simulink modelis.

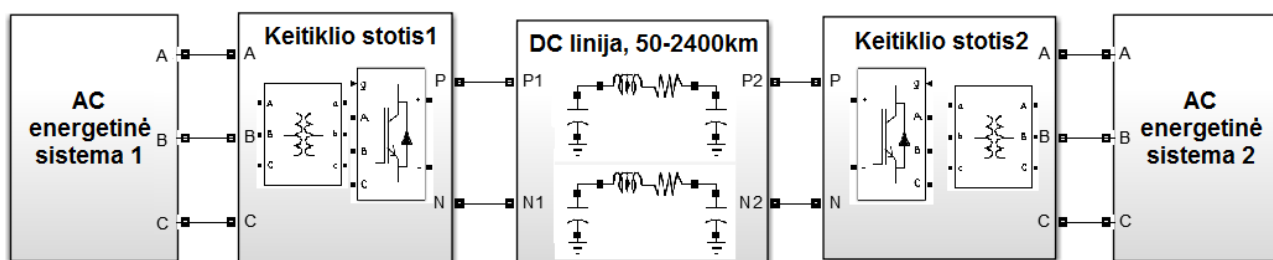
Nuoseklus RLC atšakos bloko pagalba galima realizuoti atskirą rezistorių, induktorių ar kondensatorių arba kombinaciją iš šių elementų. Sujungtus šiuos šiuor tris blokus gaunamas linijos simulink blokas. Linijos parametrai apskaičiuojami remiantis ABB duomenų bazėje pateiktais duomenimis [40].

2.1 lent. HVDC linijos parametrų priklausomybė nuo linijos ilgio.

L, km	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
R, Ω	0,36	0,72	1,44	2,16	2,88	3,6	4,32	5,04	5,76	6,48	7,2	7,92	8,64
C, μF	10,5	21	63	84	105	126	147	168	189	210	231	252	273
L, mH	18	36	72	108	144	180	216	252	288	324	360	396	432
L, km	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	
R, Ω	9,36	10,08	10,8	11,52	12,21	12,96	13,68	14,4	15,12	15,84	16,56	17,28	
C, μF	273	294	315	336	357	378	399	420	441	462	483	504	
L, mH	468	504	540	576	612	648	684	720	756	792	828	864	

2.2.5. Bendras Matlab/Simulink modelis

Matlab/Simulink programoje pagal sistemos ekvivalentinę schemą, parodytą paveiksle (2.10 pav.) ir panaudojus Matlab/simulink energetinės sistemos (2.11 pav.), transformatoriaus (2.12 pav.), keitiklio (2.13 pav.), linijos (2.15 pav.) blokus sudaromas bendras tiriamasis modelis, pavaizduotas paveiksle (2.16 pav).



2.16 pav. Matlab/Simulink netiesioginio matricinio keitiklio tarpstiesinės jungties modelis.

Matlab/Simulink modelį sudaro dvi energetinės sistemos, kurios prijungtos per transformatorius prie netiesioginio matricinio keitiklio. Keitiklio nuolatinės srovės intarpas susideda iš nuolatinės srovės perdavimo linijų.

2.3. Tyrimo metodika

Tyrimui atlikti, pagal paveiksle (2.16 pav.) esančiame Matlab/Simulink modelyje fiksuojami elektros energijos srautai ir elektros energijos kokybiniai parametrai. Keitiklio ir sistemų sąlyčio taškuose fiksuojama perduodamos aktyvioji – P_{AC} , reaktyvioji – Q_{AC} galios ir kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis – U_{AC} -THD, o nuolatinės srovės intarpe perduodama aktyvioji – P_{AC} ir nuolatinės įtampos pulsacijos - K_p .

2.3.1. Aktyviosios ir reaktyviosios galių matavimas energetinės sistemos sąlyčio taške

Energetinės sistemos sąlyčio taške aktyviajai ir reaktyviajai galiai matuoti, panaudojami „*SimPowerSystems*“ bibliotekoje esantys „*three-phase V-I measurement*“ – trifazės įtampos ir srovės matavimo blokas ir „*power (positive-sequence)*“ – teigiamos fazių sekos galios matavimo blokas.

Trifazis įtampos matavimo blokas naudojamas grandinėse matuoti momentinę trifazę įtampą ir srovę. Kai blokas sujungiamas nuosekliai su trifaziais elementais, jis savo išėjime atiduoda linijinę arba fazinę įtampą - U_{abc} ir srovę - I_{abc} .

Teigiamos fazių sekos galios matavimo blokas apskaičiuoja aktyviąją galią - P (W) ir reaktyviąją galią - Q (VAr) pagal formules:

$$P = 3 \cdot \frac{|V_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\varphi); \quad (2.4)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{|V_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \sin(\varphi); \quad (2.5)$$

$$\varphi = \angle V_1 - \angle I_1; \quad (2.6)$$

V_1 yra įėjimo įtampos V_{abc} teigiamos fazių sekos komponentė, I_1 yra įėjimo srovės I_{abc} teigiamos fazių sekos komponentė. Srovei tekant per RL grandinę gaunama teigiama aktyvioji galia – P ir teigiama reaktyvioji galia – Q .

2.3.2. Šalutinių harmonikų kiekio matavimas

Netiesioginio matricinio keitiklio ir energetinės sistemos sąlyčio įtampos šalutinių harmonikų kiekiui matuoti, panaudojami „*SimPowerSystems*“ bibliotekoje esantys „*THD*“ – suminių harmonikų iškraipymų elementas ir „*Powergui*“ – simuliacijos blokas.

„*THD*“ blokas parodo periodinio iškraipto signalo suminį šalutinių harmonikų kiekį. Įėjimo signalas gali būti išmatuota įtampa arba srovė. Šalutinių harmonikų kiekis apibrėžiamas kaip santykis tarp suminės harmonikų vidutinės kvadratinės vertės ir pagrindinio signalo vidutinės kvadratinės vertės. Pavyzdžiui, srovės šalutinių harmonikų kiekis būtų apskaičiuojamas:

$$(THD) = \frac{I_H}{I_F}; \quad (2.7)$$

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}; \quad (2.8)$$

Čia I_n – n-tosios harmonikos vidutinė kvadratinė vertė, I_F – pagrindinio srovės signalo vidutinė kvadratinė vertė. Šalutinių harmonikų kiekis lygus nuliui, kai įtampos ar srovės signalas yra grynai sinusinis signalas.

„Powergui“ blokas yra reikalingas bet kokiam Simulink modelio veikimui, kuris naudoja „SimPowerSystems“ blokus. Šio bloko simuliacijos ir konfigūracijos lange naudojamas Furjė analizės programinis įrankis – „FFT analysis tool“. Šis įrankis leidžia atlikti signalo Furjė analizę, kuriame galima ištirti signalo šalutinių harmonikų kiekį, grafiškai išskleisti iškraipyto signalo harmonikų spektrą, bei parodyti kiekvienos atskiros harmonikos procentinę įtaką suminiam šalutinių harmonikų kiekiui.

2.3.3. Nuolatinės srovės intarpu perduodamos aktyviosios galios matavimas

Nuolatinės srovės intarpe įtampai, srovei ir aktyviajai galiai matuoti panaudojami „SimPowerSystems“ bibliotekoje esantys „voltage measurement“ – įtampos matavimo, „current measurement“ – srovės matavimo, „mean“ – vidutinės vertės ir „product“ – sandaugos blokai.

Įtampos matavimo blokas matuoja momentinę įtampą tarp dviejų elektrinių mazgų. Tyrimo metu momentinė įtampa matuojama tarp netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpo tiesioginio ir neigiamo poliaus.

Srovės matavimo blokas matuoja momentinę srovę tekančią per bet kokį elektrinį bloką ar sujungimo liniją. Tyrimo metu matuojama momentinė srovė, kuri teka per netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpą.

Vidutinės vertės blokas apskaičiuoja bet kokio įėjimo signalo vidutinę vertę:

$$Mean(f(t)) = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t) \cdot dt; \quad (2.9)$$

Čia $f(t)$ – įėjimo signalas ir $T = 1/f$, kai $f = 50$ Hz.

Tyrimo metu, šio bloko pagalba apskaičiuojamos netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpo vidutinės įtampos ir srovės vertės.

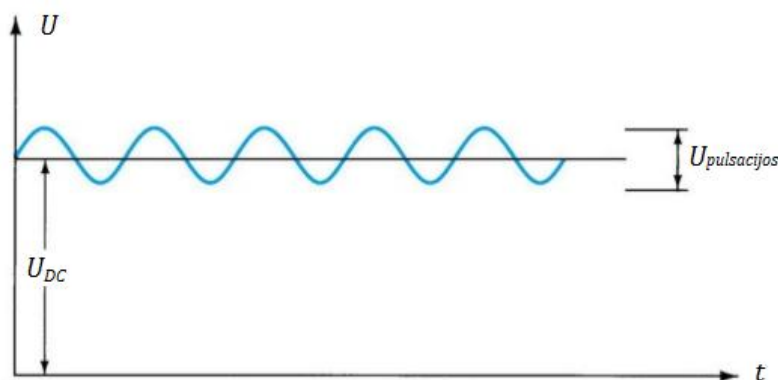
Sandaugos bloko išėjime gaunamas rezultatas yra dviejų skaliarinių įėjimo signalų sandauga. Tyrimo metu šiuo bloku apskaičiuojama per netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpą perduodama aktyvioji galia:

$$P_{DC} = I_{mean} \cdot U_{mean}; \quad (2.10)$$

Čia I_{mean} – vidutinė nuolatinė srovė, U_{mean} – vidutinė nuolatinė įtampa.

2.3.4. Nuolatinės įtampos pulsacijų matavimas

Nuolatinės srovės įtampos pulsacijoms matuoti panaudojami „SimPowerSystems“ bibliotekoje esantys „voltage measurement“ – įtampos matavimo, „root mean square“ – vidutinės kvadratinės vertės ir „mean“ – vidutinės vertės blokai. Paveiksle (2.17 pav.) parodytas nuolatinės įtampos pulsacijų principas.



2.17 pav. Nuolatinės įtampos pulsacijos.

„RMS“ blokas apskaičiuoja įėjimo signalo vidutinę kvadratinę vertę:

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t f(t)^2}; \quad (2.11)$$

Čia $f(t)$ – įėjimo signalas ir $T = 1/f$, kai $f = 50$ Hz.

Nuolatinės įtampos pulsacijos nuolatinės srovės šaltinyje apibūdinamos pulsacijų faktoriumi, kuris apibrėžiamas kaip santykis tarp vidutinės kvadratinės įtampos pulsacijų vertės ir vidutinės nuolatinės įtampos vertės:

$$K_p = \frac{U_{pulsacijos(RMS)}}{U_{DC}} \cdot 100; \quad (2.12)$$

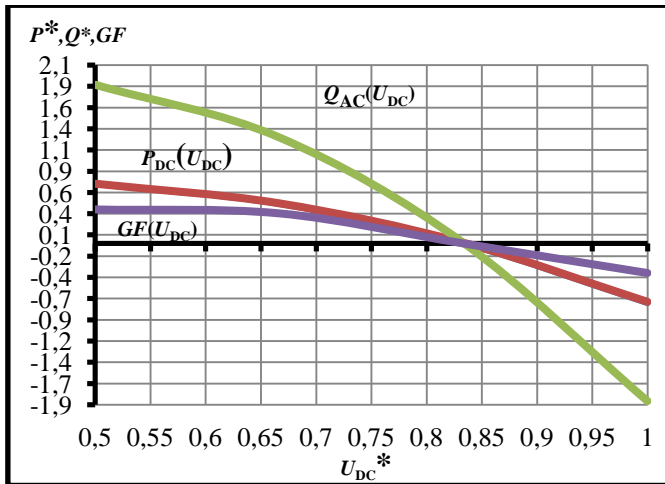
Čia K_p – nuolatinės įtampos pulsacijų faktorius. Tyrimo metu nuolatinės įtampos pulsacijos matuojamos netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpe.

3. Tyrimo rezultatai

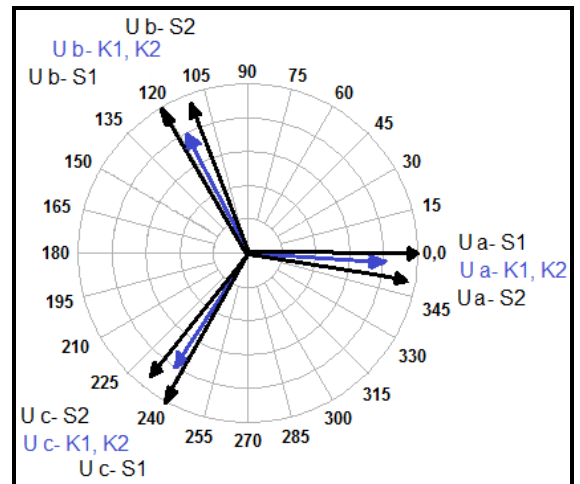
Šiame skyrelyje pateikiami tyrimo rezultatai, kurio metu ištirtas netiesioginio matricinio keitiklio abiejų tiltų veikimas invertavimo ir lyginimo režime, moduliacinio bei fazinio valdymo įtaka, matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpe HVDC linijos ilgio įtaka, bei filtruojančių elementų įtaka.

3.1. Netiesioginio matricinio keitiklio tiltų lyginimo ir invertavimo režimas

Netiesioginis matricinis keitiklis, kuris pavaizduotas paveiksle (1.25 pav.), gali perduoti aktyviają galią abiejomis kryptimis, todėl abu matricinio keitiklio tiltai gali veikti invertavimo ir lyginimo režime. Atliktas netiesioginio matricinio keitiklio tilto veikiančio lyginimo ir invertavimo režime tyrimas abiejų energetinių sistemų atžvilgiu, paveiksle (3.1 pav.) ir paveiksle pateikta matricinio keitiklio bei sistemų fazorių diagrama, paveiksle (3.2 pav.).



3.1 pav. Tiriamieji parametrai matriciniam keitikliui veikiant lyginimo ir invertavimo režimuose.



3.2 pav. Lyginimo ir invertavimo režimų fazorių diagrama.

Kadangi matricinio keitiklio tilto abiejose pusėse turime įtampos šaltinius, keičiant nuolatinės įtampos amplitudę tiltas keičia savo darbo režimą. Matricinio keitiklio tilto vidutinė išlyginta įtampa - $U_{=}$, priklauso nuo fazinės transformatoriaus antrinės apvijos - U_{2f} . Priklausomai nuo nuolatinės įtampos, tai yra nuo vidutinės išlygintos įtampos, matricinio keitiklio tiltas gali dirbti lyginimo ir invertavimo režime.

$$U_{=} = \frac{6 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2f} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \approx 2,34 \cdot U_{2f};$$

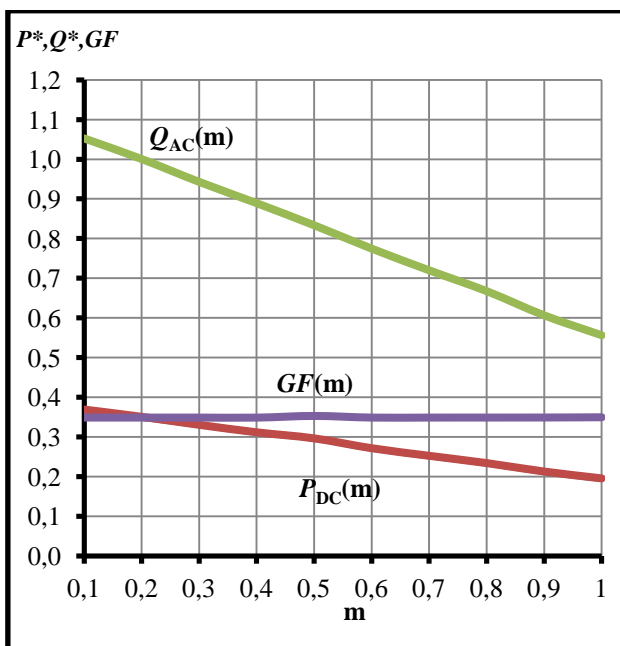
Matricinio keitiklio tiltas dirba lygintuvo režime, kai $U_{=} < 2,34U_{2f}$, o inverterio režime, kai $U_{=} > 2,34U_{2f}$. Paveiksle (3.1 pav.) parodyta, kai tiltas dirba lyginimo režime, aktyvioji galia perduodama iš AC sistemos į DC pusę ir sistemos atžvilgiu tiltas yra teigiamo galios

faktoriaus apkrova (reaktyvios galios apkrova). Kai keitiklis dirba invertavimo režime, tiltas perduoda aktyviąją galią iš DC pusės į AC sistemą ir sistemos atžvilgiu tampa neigiamo galios faktoriaus apkrova (reaktyvios galios generatoriumi).

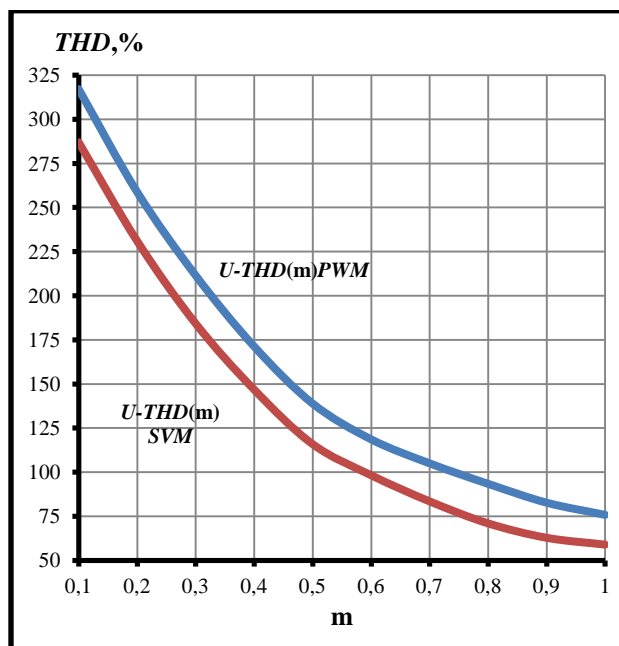
Aktyvioji galia yra perduodama iš pirmos energetinės sistemos į antrąją. Paveiksle (3.2 pav.) parodyta netiesioginio matricinio keitiklio invertavimo ir lyginimo režimo fazorių diagrama, iš kurių matyti, kad matricinio keitiklio įtampa faze pralenkia pirmos AC sistemos įtampą ir yra pirmaujančio galios faktoriaus apkrova sistemos atžvilgiu. Matricinis keitiklis antros AC sistemos atžvilgiu yra atsiliekančio galios faktoriaus apkrova, nes matricinio keitiklio įtampa faze atsilieka nuo antros AC sistemos įtampos.

3.2. Netiesioginio matricinio keitiklio moduliacinio valdymo įtakos tyrimas

Atliekant moduliacinio valdymo įtakos tyrimą sudaryta, paveiksle (3.3 pav.), netiesioginio matricinio keitiklio santykinės aktyviosios, reaktyviosios galios ir galios faktoriaus priklausomybė nuo moduliacijos indekso, iš kurios matyti, kad su moduliacijos indeksu galima valdyti perduodamą aktyviąją galią tam tikrose ribose.



3.3 pav. Galių priklausomybės nuo moduliacijos indekso.

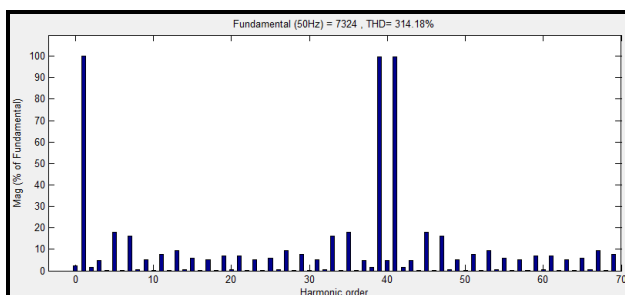


3.4 pav. Šalutinių harmonikų kiekio priklausomybė nuo moduliacijos indekso.

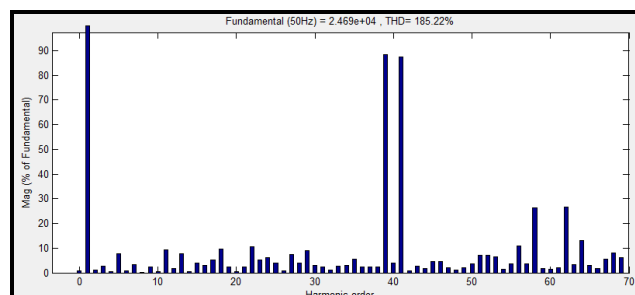
Didėjant moduliacijos indeksui nuo 0,1 iki 1 perduodama aktyvioji galia sumažėja nuo 0,369 iki 0,196. Tuo pačiu sumažėja ir keitiklio reaktyvioji galia nuo 1,053 iki 0,556, nes keitiklis sistemos atžvilgiu yra reaktyviosios galios apkrova. Tačiau moduliacijos indeksas nedaro jokios įtakos keitiklio galios faktoriui, jis išlieka pastovus apie - 0,35.

Moduliacinis valdymas įtakoja energetinės sistemos sąlyčio takše keitiklio generuojamos įtampos šalutinių harmonikų kiekį. Paveiksle (3.4 pav.) parodyta šalutinių harmonikų kiekio priklausomybė nuo moduliacijos indekso. Impulso pločio moduliacijos valdymo atveju didėjant moduliacijos indeksui smarkiai mažėja įtampos šalutinių harmonikų kiekis nuo 314% iki 75%. Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo atveju didėjant moduliacijos indeksui įtampos šalutinių harmonikų kiekis mažėja nuo 287% iki 58%. Tai yra mažiau, nei impulso pločio moduliacijos atveju. Tačiau tokią įtampą atiduoti į sistemą negalima, nes standartuose parašyta [30] jog, šalutinių harmonikų kiekis negali būti didesnis nei 5% ir kiekvienos atskiros įtampos harmonikos amplitudė negali viršyti 3%. Todėl būtina panaudoti filtruojančius elementus.

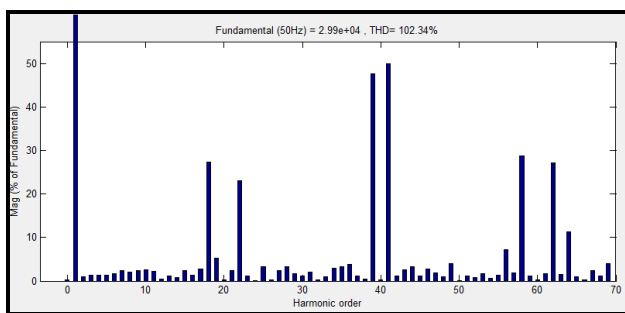
Žemiau pateiktuose paveiksluose parodytas įtampos šalutinių harmonikų kiekis, kai moduliacijos indeksas yra 0,1, 0,4, 0,7 ir 1. Iš kurių matyti, kad keitiklis generuoja aukšto dažnio spektro šalutines harmonikas.



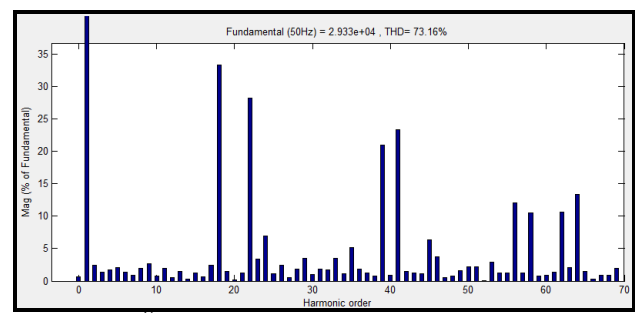
3.5 pav. Šalutinių harmonikų kiekis, kai $m = 0.1$.



3.6 pav. Šalutinių harmonikų kiekis, kai $m = 0.4$.



3.7 pav. Šalutinių harmonikų kiekis, kai $m = 0.7$.



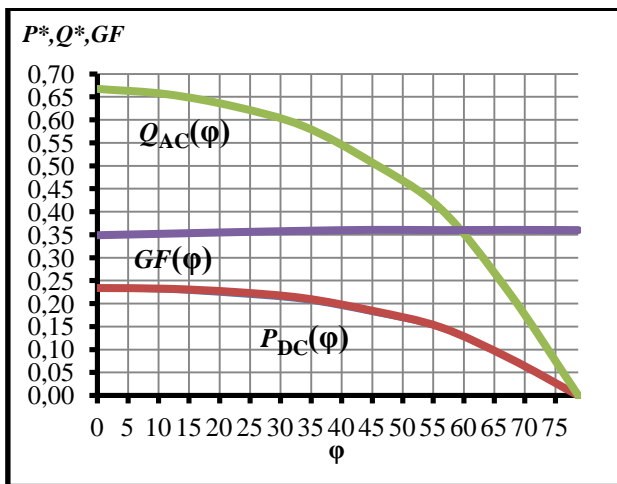
3.8 pav. Šalutinių harmonikų kiekis, kai $m = 1$.

Kai keitiklio moduliacijos indeksas – 0,1 pasireškia 39 ir 41 eilės harmonikos, kurių amplitudės beveik vienodo dydžio kaip ir pagrindinės harmonikos. Toliau didėjant moduliacijos indeksui 39 ir 41 harmonikų amplitudės mažėja, tačiau išauga kitų aukšto dažnio harmonikų amplitudės, tai 18, 22 ir 58, 62 eilės harmonikos.

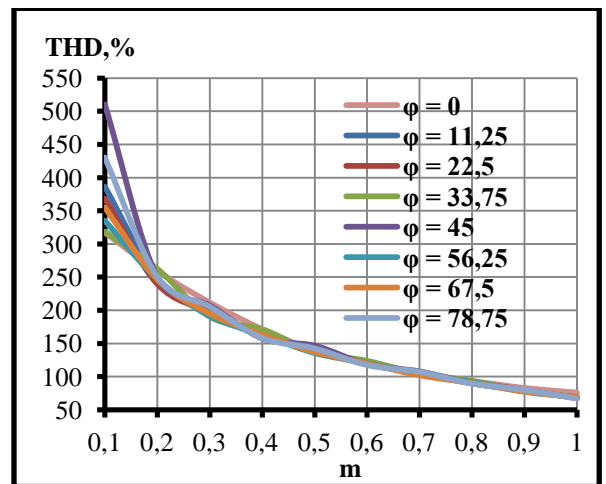
3.3. Netiesioginio matricinio keitiklio fazinio valdymo įtakos tyrimas

Atliekant fazinei valdymo įtakos tyrimą sudaryta, paveiksle (3.9 pav.), netiesioginio matricinio keitiklio santykinės aktyviosios, reaktyviosios galios ir galios faktoriaus priklausomybė

nuo fazės poslinkio kampo, iš kurios matyti, kad su fazės poslinkio kampu galima valdyti perduodamą aktyviają galią iki nulio.



3.9 pav. Galių priklausomybės nuo fazės poslinkio kampo.



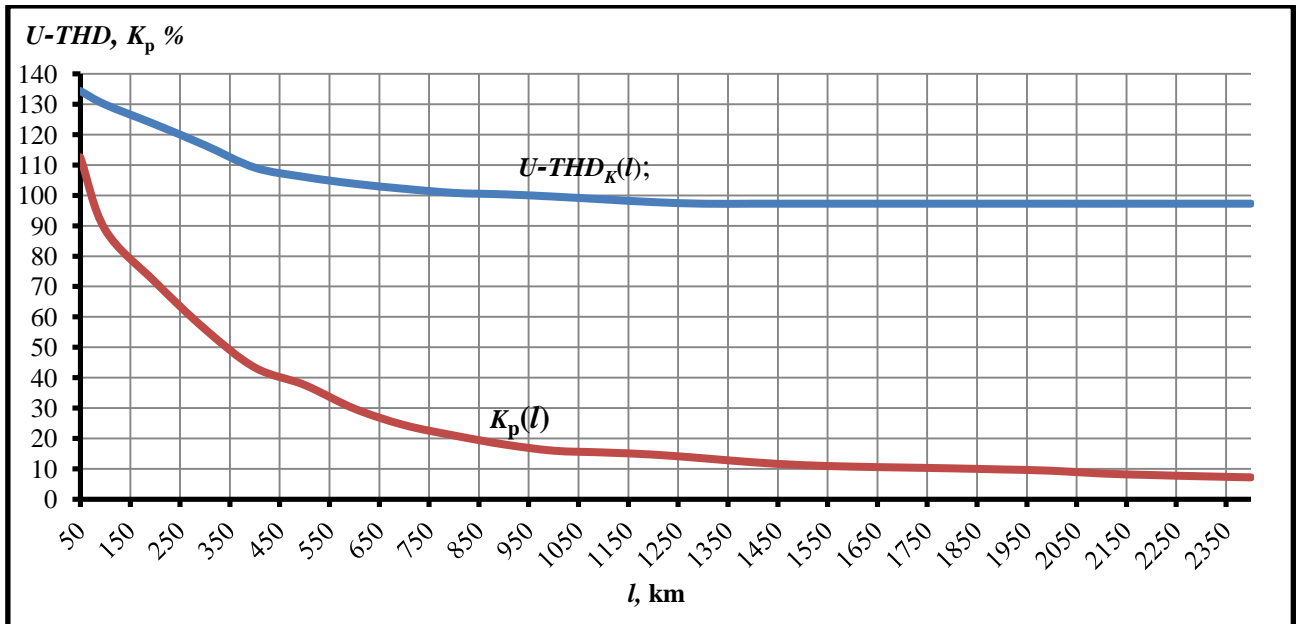
3.10 pav. Fazės poslinkio kampo įtaka šalutinių harmonikų kiekiui.

Didėjant fazės poslinkio kampui nuo 0 iki 78 perduodama aktyvioji galia sumažėja nuo 0,234 iki 0, tuo pačiu mažėja ir keitiklio reaktyvioji galia nuo 0,667 iki 0, kai moduliacijos indeksas - 0,8. Palyginus perduodamo aktyviosios galios valdymą su moduliacijos indeksu, paveiksle (3.3 pav), galima pasakyti, kad su fazės poslinkio kampu galima valdyti perduodamą aktyviają galią platesnėse ribose. Abiem atvejais nuo perduodamos aktyviosios galios proporcingai kinta ir keitiklio reaktyvioji galia, šie parametrai nedaro jokios įtakos keitiklio galios faktoriui. Jis visad išlieka pastovus.

Pagal įtampos šalutinių harmonikų kiekio priklausomybę nuo moduliacijos indekso prie skirtingų fazės poslinkio kampų, parodytą paveiksle (3.10 pav.) matyti, kad šalutinių harmonikų kiekis priklauso tik nuo moduliacijos indekso, o fazės poslinkio kampas įtampos šalutinių harmonikų kiekiui nedaro ryškios įtakos.

3.4. HVDC linijos ilgio įtakos elektros energijos kokybiniams parametrams tyrimas

Atliekant netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpe perdavimo linijos ilgio įtakos tyrimą, sudaryta netiesioginio matricinio keitiklio įtampos šalutinių harmonikų kiekio ir nuolatinės įtampos pulsacijų priklausomybė nuo intarpo ilgio, paveiksle (3.11 pav.) iš kurio matyti, kad intarpo ilgiui didėjant abu šie parametrai mažėja.



3.11 pav. HVDC linijos ilgio įtaka.

Linijos ilgiui didėjant keičiasi pagrindiniai linijos parametrai ir dėl linijos natūraliosios talpos ir induktyvumo, kurie veikia kaip nuolatinės srovės filtrai, mažėja nuolatinės įtampos pulsacijų koeficientas nuo 112 % iki 7 %. Linijos parametrai tiesiogiai įtakoja nuolatinės įtampos pulsacijų koeficientą, o šis įtakoja kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekį ir keitiklio nuostolius. Kai linijos ilgis apie 1250 km, nuolatinės įtampos pulsacijų koeficientas yra apie – 14 % ir nuolatinės įtampos pulsacijos nebedaro įtakos keitiklio generuojamam įtampos šalutinių harmonikų kiekiui. Linijos ilgiui mažėjant nuo šio taško, didėja ir kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis.

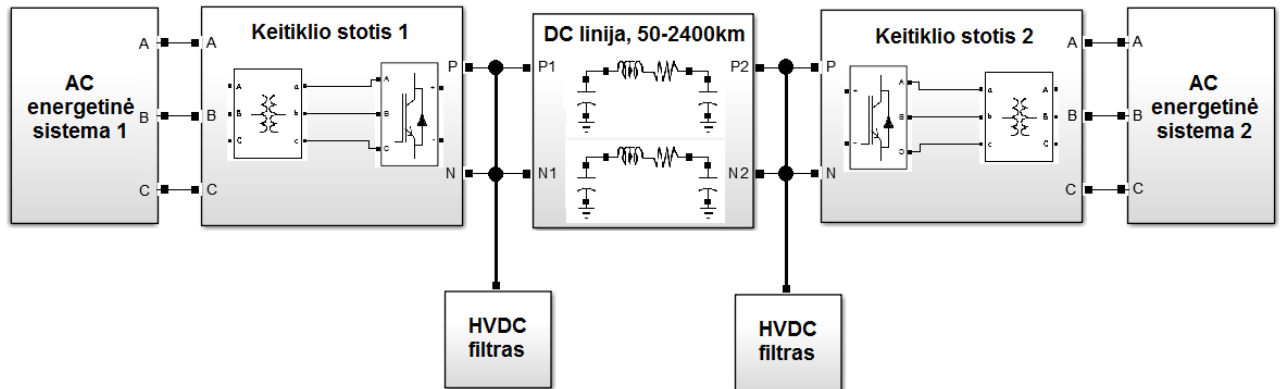
Toliau linijos ilgiui didėjant nuo 1250 km, jos parametrai mažina nuolatinės įtampos pulsacijas. Esant maksimaliam linijos – 2400 km ilgiui nuolatinės įtampos pulsacijos siekia apie 7%, todėl norint pasiekti 5% nuolatinės įtampos iškraipymus reikia statyti papildomus nuolatinės įtampos filtrus.

Galima teigti, kad esant linijos ilgiui mažesniau 1250 km, kintamos srovės pusėje reikės didesnės galios filtrų, nei tuo atveju kai linijos ilgis yra daugiau nei 1250 km, nes tada keitiklio generuojamos kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis yra pastovus. Tačiau kuo mažesnis linijos ilgis iki šio taško, tuo didesnės galios filtrų reikės kintamos srovės pusėje norint standartuose leistiną įtampos šalutinių harmonikų kiekį.

3.5. HVDC filtro įtakos tyrimas

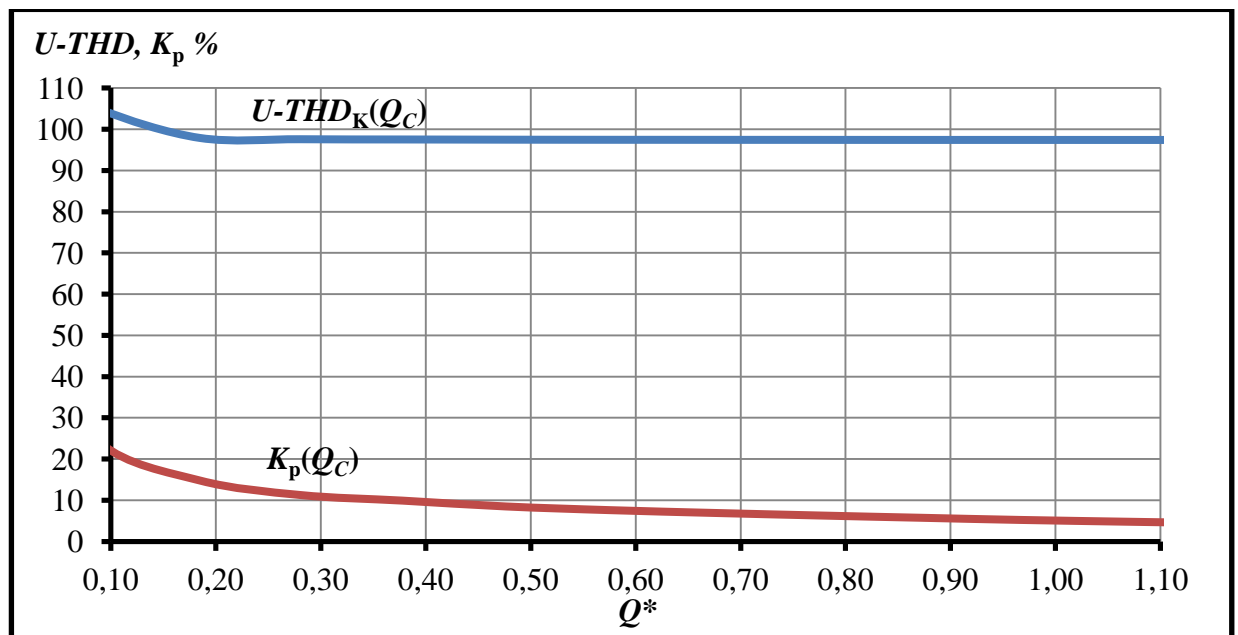
Atliekant HVDC linijos ilgio tyrimą pastebėta, kad netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpe linijos natūralieji parametrai įtakoja nuolatinės įtampos pulsacijas, o jos įtakoja įtampos šalutinių harmonikų kiekį keitiklio sąlyčio taške su energetine sistema.

Todėl panaudojus HVDC filtrus netiesioginio matricinio keitiklio nuolatinės srovės intarpe abiejuose linijos galuose, paveiksle (3.12 pav.), atliktas HVDC filtrų įtakos elektros energijos kokybiniams parametrams tyrimas.

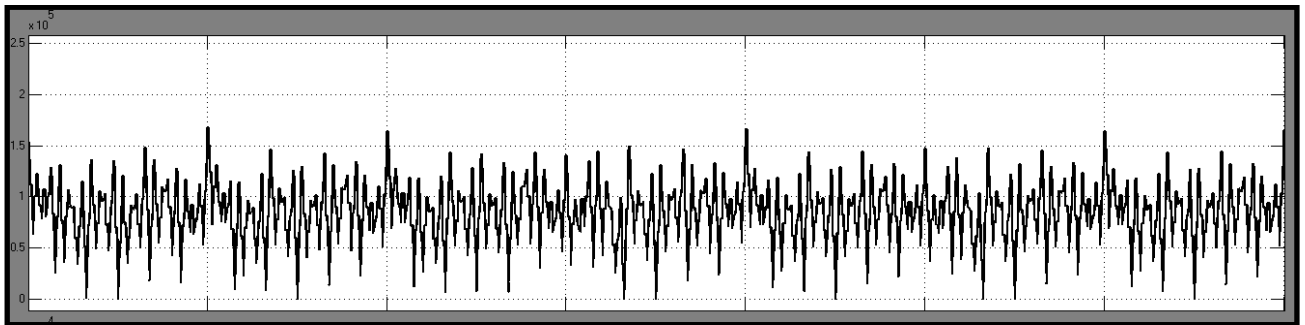


3.12 pav. Netiesioginio matricinio keitiklio tarpsteminė jungtis su HVDC filtrais.

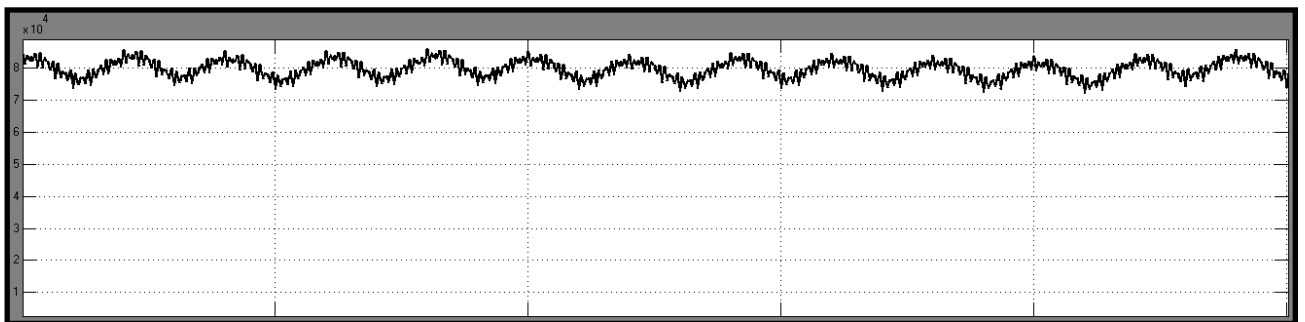
Atliekant HVDC filtro įtakos tyrimą, sudaryta netiesioginio matricinio keitiklio įtampos šalutinių harmonikų kiekio ir nuolatinės įtampos pulsacijų priklausomybė nuo HVDC filtro galios, paveiksle (3.13 pav.), iš kurios matyti, kad didėjant filtro galiai mažėja nuolatinės įtampos pulsacijos.



3.13 pav. HVDC filtro įtaka.



3.14 pav. Nuolatinės įtampos oscilograma, kai santykinė reaktyvioji filtro galia – 0,1.



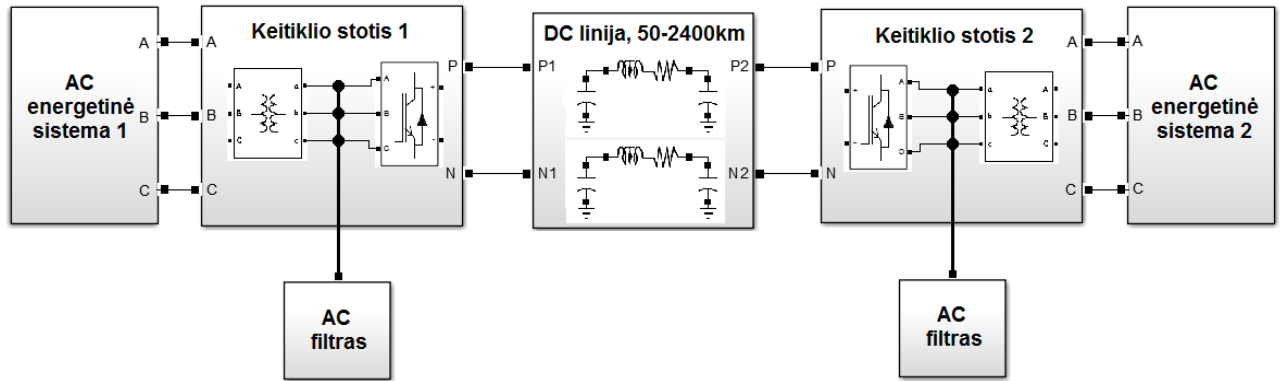
3.15 pav. Nuolatinės įtampos oscilograma, kai santykinė reaktyvioji filtro galia – 1,1.

Nuolatinės srovės filtras kaip ir linijos vidiniai parametrai pirmiausiai mažina nuolatinės įtampos pulsacijas. Kai filtro santykinė reaktyvioji galia yra apie 0,2 - nuolatinės įtampos pulsacijos yra apie 14 % ir nuo šio taško didėjant filtro santykinėi galiai, filtras nebedaro jokios įtakos keitiklio ir energetinių sistemų sąlyčio taškę įtampos šalutinių harmonikų kiekiui.

3.6. Kintamos įtampos filtrų įtakos tyrimas, netiesioginio matricinio keitiklio sąlyčio taške su energetine sistema.

Iš HVDC linijos ilgio ir HVDC filtro įtakos tyrimų pastebėta, kad mažinant nuolatinės įtampos pulsacijas, ties tam tikru tašku jos nebedaro įtakos keitiklio ir energetinės sistemos sąlyčio taške įtampos šalutinių harmonikų kiekiui. Tačiau šis šalutinių harmonikų kiekis viršija standartuose leistinas ribas.

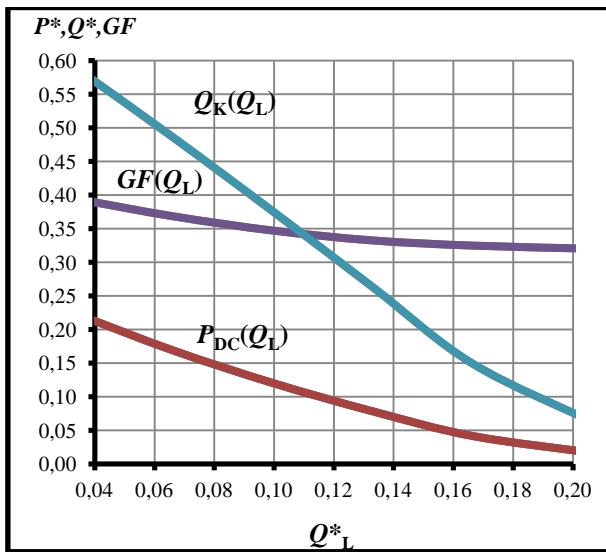
Todėl panaudojus kintamos įtampos filtras, paveiksle (3.16 pav.), atliktas L ir LC filtrų įtakos elektros energijos kokybiniams parametrams tyrimas.



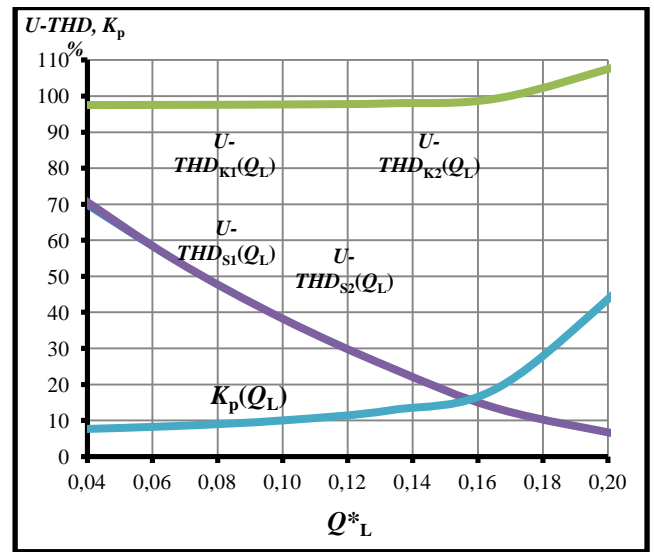
3.16 pav. Netiesioginio matricinio keitiklio tarpsteminė jungtis su AC filtrais.

3.6.1. Induktyvaus (L) – filtro įtaka

Atliekant induktyvaus filtro įtakos tyrimą, sudaryta netiesioginio matricinio keitiklio įtampos šalutinių harmonikų kiekio ir nuolatinės įtampos pulsacijų priklausomybė nuo santykinės filtro galios, paveikslas (3.18 pav.), iš kurios matyti, kad didinant filtro galią, galima pasiekti standartuose leistiną šalutinių harmonikų kiekį.



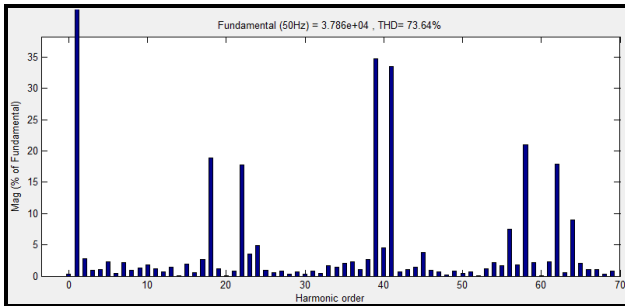
3.17 pav. Induktyvaus filtro įtaka perduodamai galiai.



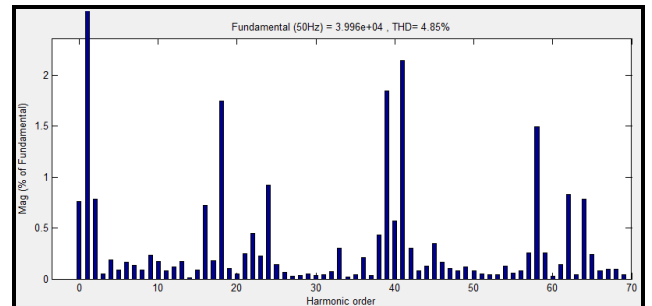
3.18 pav. Induktyvaus filtro įtaka įtampos šalutinių harmonikų kiekiui.

Induktyvaus filtro įtakos šalutinių harmonikų kiekiui priklausomybėje, paveiksle (3.18 pav.), $U-THD_{K1}$ ir $U-THD_{K2}$ yra atitinkamai lyginimo ir invertavimo stadijoje veikiančio netiesioginio matricinio keitiklio generuojamos kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis. $U-THD_{S1}$ ir $U-THD_{S2}$ yra pirmos ir antros AC sistemų sąlyčio taške įtampos šalutinių harmonikų kiekis paveikus filtrui. Didėjant santykinėi induktyvaus filtro galiai, mažėja įtampos šalutinių harmonikų, kai santykinė filtro galia apie – 0,21 pasiekiamas standartuose leistinas šalutinių harmonikų kiekis neviršija, ne daugiau 5%. Paveiksluose (3.21, 3.22, 3.23 pav.) pateiktos įtampos

oscilogramos, kai įtampos šalutinių harmonikų kiekis – 97,5 (be filtrų), 73,64 ($Q^*_L - 0,033$) ir 4,85 ($Q^*_L - 0,21$). Palyginus paveiksluose (3.19 pav.) ir (3.20 pav.) esančius įtampos šalutinių harmonikų spektrus, matyti, kad kaip induktyvus filtras mažina visų harmonikų amplitudes, tačiau pagrindinių šalutinių harmonikų jis nepašalina. Tačiau, kai filtrų santykinė galia yra apie 0,15 jie pradeda įtakoti nuolatinės įtampos pulsacijas ir toliau didėjant filtro galiai jos smarkiai išauga, to pasekoje išauga ir keitiklio išėjime generuojamos kintamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis.

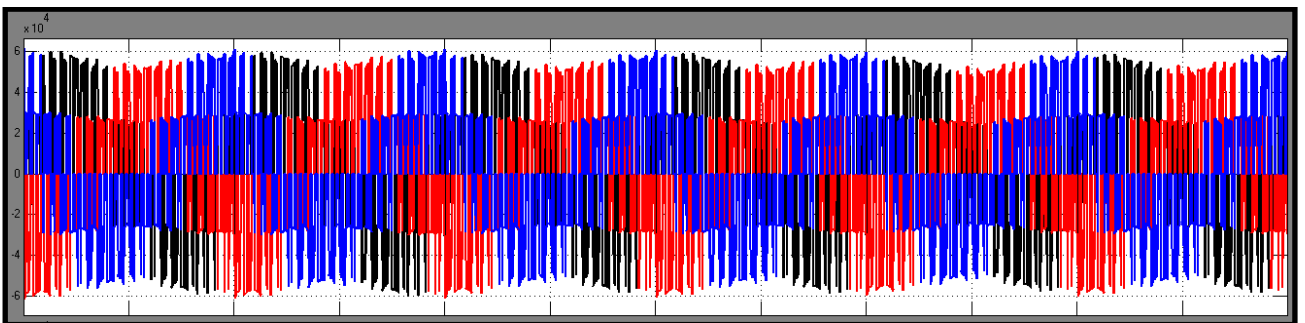


3.19 pav. Harmonikų spektras, kai santykinė induktyvaus filtro galia – 0,033.

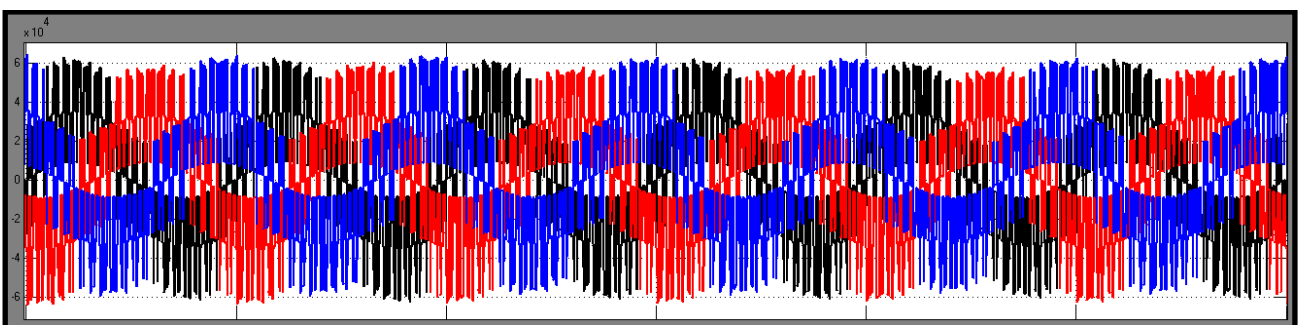


3.20 pav. Harmonikų spektras, kai santykinė induktyvaus filtro galia – 0,21.

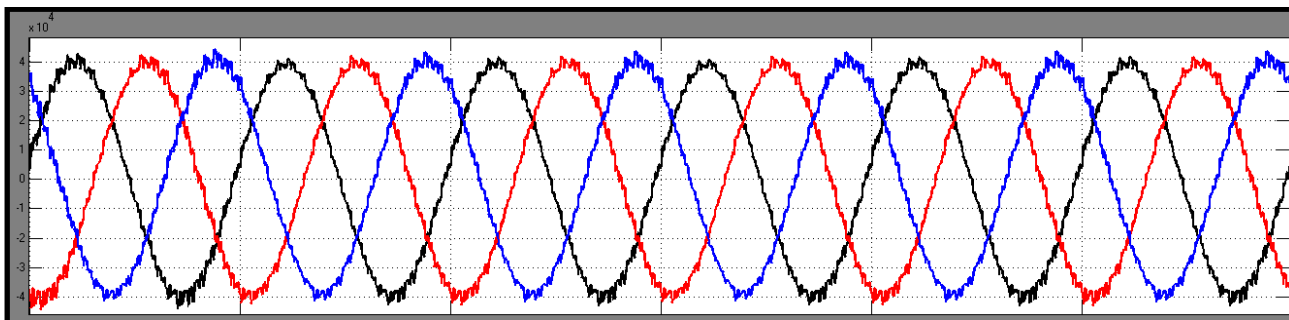
Sudaryta perduodamos galios priklausomybė nuo santykinės filtro galios iš kurios matyti, kad didėjant santykinėi filtro galiai smarkiai paveikiama ir perduodama aktyvioji galia, parodyta paveiksle (3.17 pav.), ji sumažėja nuo 0,21 iki 0,021. Tuo pačiu ir sumažėja keitiklio galios faktorius nuo 0,38 iki 0,32.



3.21 pav. Įtampos oscilograma be filtrų (standartų netenkina).



3.22 pav. Įtampos oscilograma, kai L filtro santykinė reaktyvioji galia – 0,033(standartų netenkina)

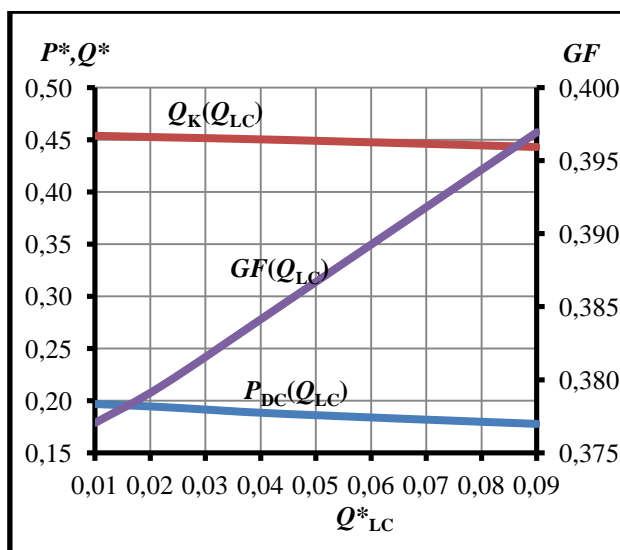


3.23 pav. Įtampos oscilograma, kai L filtro santykinė reaktyvioji galia – 0,21 (standartus tenkina).

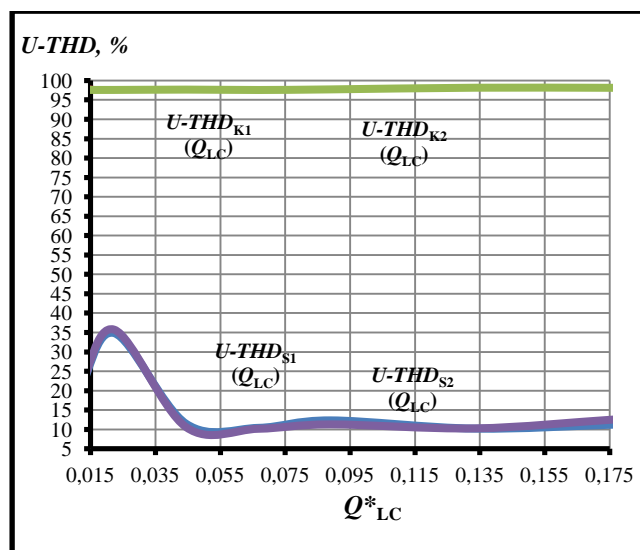
Su induktyviuoju filtru galima sumažinti šalutinių harmonikų kiekį iki standartuose leistinos ribos, tačiau šis filtras turi didelę neigiamą įtaką perduodamai galiai.

3.6.2. Induktyvaus, talpaus (LC) – filtro įtaka

Atliekant induktyvaus-talpaus filtro įtakos tyrimą sudaryta, paveiksle (3.25 pav.), netiesioginio matricinio keitiklio įtampos šalutinių harmonikų kiekio priklausomybė nuo LC filtro santykinės galios, iš kurios matyti, kad didinant filtrų galią, šalutinių harmonikų kiekis sumažėja iki maksimaliai iki 10%.



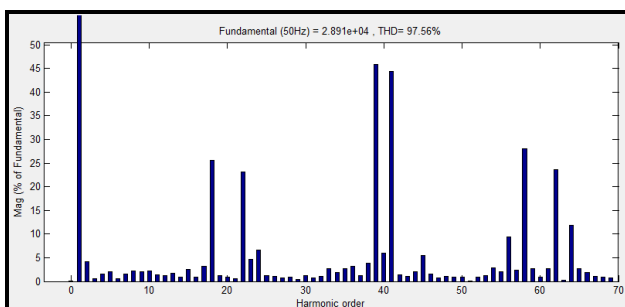
3.24 pav. LC filtrų įtaka perduodamai galiai.



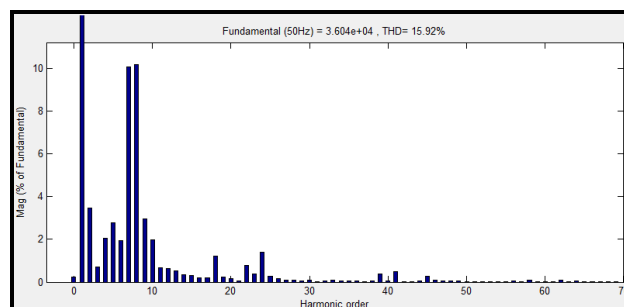
3.25 pav. LC filtrų įtaka šalutinių harmonikų kiekiui.

Taip yra todėl, kad LC filtrai panaudoti aukšto dažnio šalutinių harmonikų spektrui nufiltruoti. Paveiksle (3.26 pav.) pateiktas įtampos šalutinių harmonikų spektras iš kurio matyti, kad jame pasireiškia aukšto dažnio harmonikos, tai yra (19, 22, 39, 41, 62, 64) eilės harmonikos ir pagal paveiksle (3.27 pav.) parodytą šalutinių harmonikų spektrą matyti, kad filtrai pašalina šias harmonikas, tačiau išryškėja žemo dažnio harmonikos, todėl didinant šių filtrų galią nepasiekiamas standartuose leistinas šalutinių harmonikų kiekis.

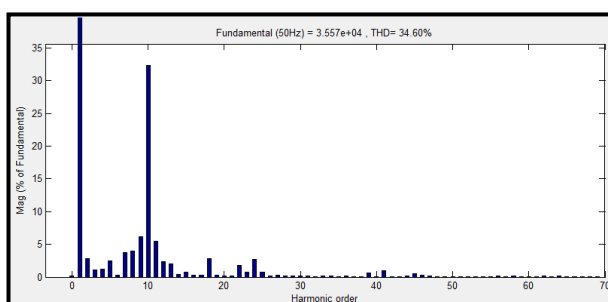
Didėjant šių LC filtrų santykinėi galiai, nuo 0,045 šalutinių harmonikų kiekis praktiškai nekinta. Kai filtrų santykinė galia – 0,04 labiausiai išryškėja 7 ir 8 eilės harmonikos. Kai santykinė filtrų galia – 0,02 išryškėja 10 eilės harmonikos amplitudė, paveikslas (3.28 pav.), kai šalutinių harmonikų kiekis – 34,6%. Todėl reikia panaudoti papildomus žemo dažnio spektro filtras, kad pašalinti žemo dažnio šalutines harmonikas.



3.26 pav. Šalutinių harmonikų spektras be filtrų.

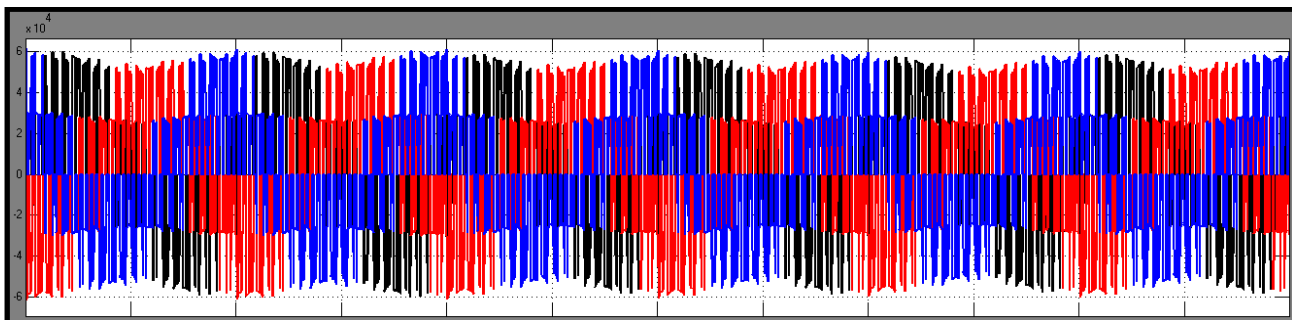


3.27 pav. Šalutinių harmonikų spektras, kai santykinė LC filtro galia – 0,04.

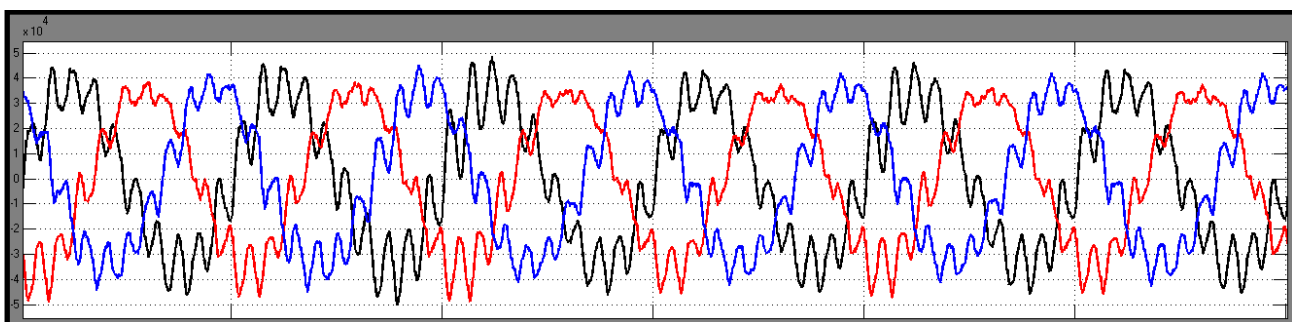


3.28 pav. Šalutinių harmonikų spektras, kai santykinė LC filtro galia – 0,02

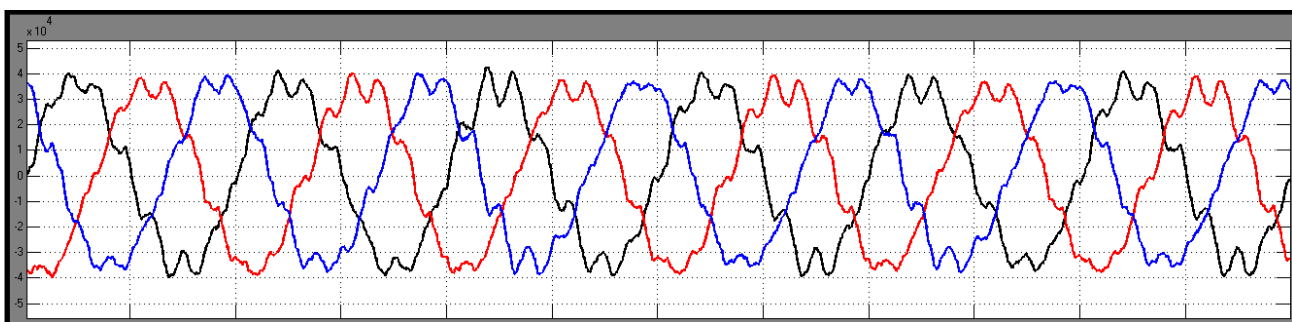
Pagal filtrų įtaką perduodamai galiai, paveikslas (3.24 pav.) matyti, kad didėjanti santykinė filtrų galia nežymiai sumažina perduodamą santykinę aktyviąją galią nuo 0,21 iki 0,18. Palyginus su induktyvaus filtro poveikiu, kuris sumažina perduodamą aktyviąją galią nuo 0,21 iki 0,021, galima sakyti, kad LC filtrai nedaro tokios neigiamos įtakos energijos srautams kaip L filtrai. Kadangi filtrai tuo pačiu gali ir kompensuoti keitiklio vartojamą reaktyviąją galią, didėjant filtrų gailiai, nežymiai pagerėja ir keitiklio galios faktorius, nuo 0,38 iki 0,4. Paveiksluose (3.29, 3.30, 3.31 pav.) parodytos įtampos oscilogramos, kai įtampos šalutinių harmonikų kiekis - 97,5 % (be filtrų), 34,6 % ($Q^*_{LC} - 0,02$) ir 15,9 % ($Q^*_{LC} - 0,04$).



3.29 pav. Įtampos oscilograma be filtrų, (standartų netenkina).

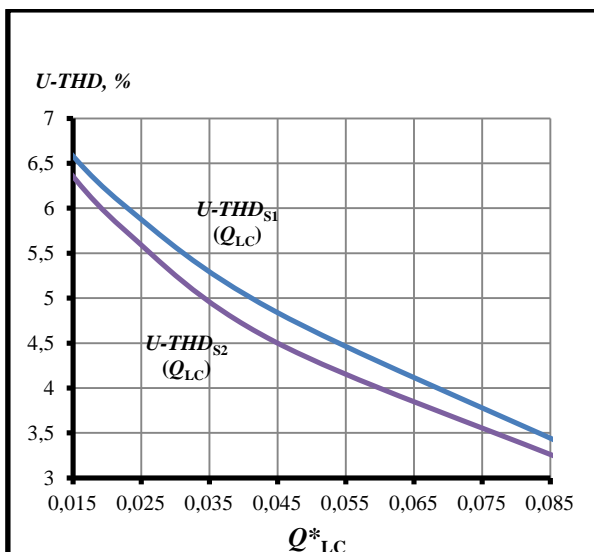


3.30 pav. Įtampos oscilograma, kai LC filtro santykinė reaktyvioji galia – 0,02 (standartų netenkina).

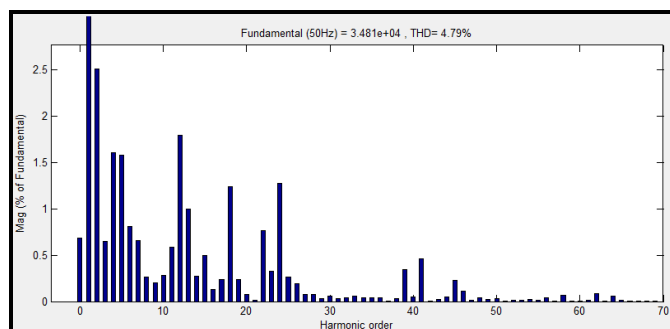


3.31 pav. Įtampos oscilograma, kai LC filtro santykinė reaktyvioji galia – 0,04 (standartų netenkina).

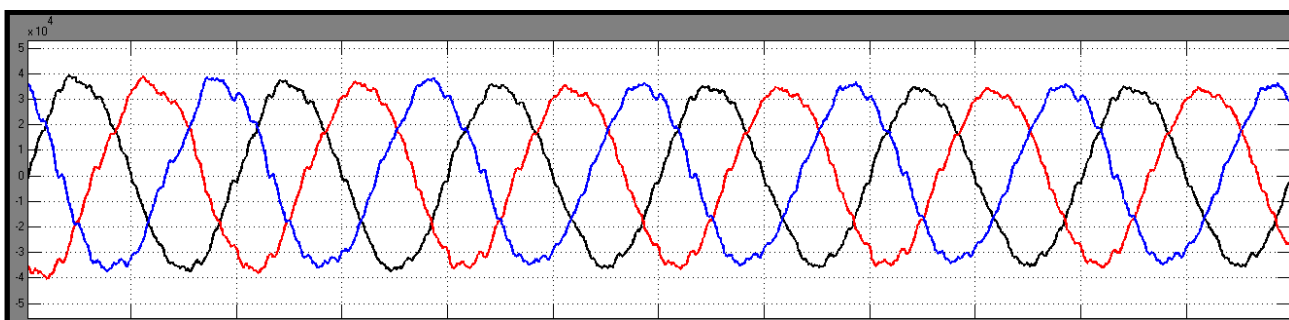
Panaudojus papildomus žemo dažnio spektro filtrus, atliktas šių filtrų įtakos energetinės sistemos sąlyčio taške įtampos šalutinių harmonikų kiekį tyrimas. Sudaryta priklausomybė, paveiksle (3.32 pav.) iš kurios matyti, kad didėjant santykinei filtro galiai mažėja įtampos šalutinių harmonikų kiekis. Kai santykinė LC filtro galia yra 0,4 šalutinių harmonikų kiekis neviršija 5%. Paveiksle (3.24 pav.) parodyta įtampos oscilograma, kai įtampos šalutinių harmonikų kiekis – 4,79%.



3.32 pav. Papildomų LC filtrų įtaka, U-THD.



3.33 pav. Šalutinių harmonikų spektras panaudojus papildomus LC filtrus žemo dažnio harmonikų spektrui.



3.24 pav. Įtampos oscilograma, kai LC filtro, žemo dažnio harmonikų spektrui, santykinė reaktyvioji galia – 0,04 (standartus tenkina).

Paveiksle (3.33 pav.) parodytas šalutinių harmonikų spektras, spektras panaudojus aukšto dažnio ir žemo dažnio spektro talpinius filtrus, iš kurio matyti, kad šalutinių harmonikų kiekis neviršija 5 % ir kiekvienos atskiros harmonikos amplitudė neviršija 3%. Šis šalutinių harmonikų kiekis tenkina standartus.

4. Išvados

1. Palyginti du matricinio keitiklio valdymo būdai - moduliacinis ir fazinis pagal įtaką kokybiniams įtampos parametrams. Nustatyta, kad naudojant fazinį valdymą per HVDC jungtį perduodamą galią galima keisti platesnėse ribose išlaikant stabilų galios faktorių ir šalutinių harmonikų kiekį. Naudojant moduliacinį valdymą šalutinių harmonikų kiekis kinta plačiose ribose nuo 314% iki 75% impulso pločio moduliacijos atveju ir nuo 287% iki 58% erdvinio vektoriaus moduliacijos atveju, kas komplikuoja filtrų parinkimą, todėl šis būdas nenaudotinas.
 2. HDVC linijos natūrali talpa ir induktyvumas veikia kaip nuolatinės įtampos filtras. Didėjant linijos ilgiui dėl šių parametru įtakos mažėja HVDC pulsacijos, kas daro teigiamą įtaką ir šalutinių harmonikų kiekiui sąlyčio su energetine sistema taške. „NordBalt“ jungties atveju, kai linijos ilgis 450 km matriciniais keitikliais pagrįsta sistema perduotų aktyviają galią, kai nuolatinės įtampos pulsacijos siektų 41% ir įtampos šalutinių harmonikų kiekis siektų 110%.
 3. Dėl energetinės sistemos elementų (transformatoriai, perdavimo linijos) induktyvumo įtakos matricinio keitiklio generuojamos įtampos šalutinių harmonikų kiekis viršija standartuose leidžiamą ribą, todėl sąlyčio su energetine sistema taške reikalingi papildomi AC filtrai.
 4. Tiek su induktyviuoju ir induktyviuoju-talpiniu filtrais galima pašalinti energetinės sistemos ir netiesioginio matricinio keitiklio sąlyčio taške įtampos šalutinių harmonikų kiekį iki standartuose leidžiamų ribų. Leistinas šalutinių harmonikų kiekis pasiekiamas kaip santykinė induktyvaus filtro galia $Q^*_L = 0,21$, o induktyvaus-talpaus $Q^*_{LC} = 0,05$. LC filtro. Tačiau induktyvaus pobūdžio filtras žymiai sumažina perduodamą aktyviają galią ir keitiklio galios faktorių, o induktyvaus-talpinio pobūdžio filtras šios neigiamos įtakos nedaro.
-

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] Turan Gönen. Electric power transmission system engineering: analysis and design. Third edition. 330-334 p.
- [2] J. Bucciero, M. Terbrueggen. Interconnected power system dynamics tutorial. Third edition. TR-107726-R1. KEMA-ECC INC. 440 Fair Laked Ct. Fairfax, Virginia 22033. 10-7 ir 10-8 p.
- [3] Siemens AG. High voltage direct current transmission. Proven technology for power exchange. Siemens AG, Energy sector, Freyeslebenstrasse 1. 91058 Erlangen, Germany. 6-7 p.
- [4] Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim, Seok-Jin Lee. HVDC Transmission Power Conversion Applications in Power Systems. Copyright © 2009 John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2 Clementi Loop, #02-01. Singapore 129809. ISBN 978-0-470-82295-1 (HB). 1-36 p.
- [5] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani. Voltage-sourced converters in power systems. Modeling, control and application. Copyright © John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 978-0-470-52156-4 (cloth).
- [6] Shri Harsha J., Shilpa G. N., Ramesh E., Dayananda L. N., Natajara C. Voltage Source Converter Based HVDC Transmission. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 1, Issue 1, September 2012. ISSN: 2319-5967.
- [7] Pawel Szczesniak, Three Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology, Power systems. © Springer-Verlag London 2013. ISBN 978-1-4471-4895-1. 174 p.
- [8] P. Chlebis, P. Simonik, M. Kabasta. The Comparison of Direct and Indirect Matrix Converters. Department of Electronics, VSB – Technical University of Ostrava, Czech Republic.
- [9] Matti Jussila. Comparison of Space-Vector-Modulated Direct and Indirect Matrix Converters in Low-Power Applications. Tampere University of Technology. Publication 686. ISBN 978-952-15-1906-2.
- [10] Ahmed SM., Iqbal A., Abu-Rub H.(2011) Generalized duty-ratio-based pulse width modulation technique for a three-to-k phase matrix converter. IEEE Trans Ind Electron 58(9):3925–3937.
- [11] Wheeler PW, Rodriguez J, Clare JC, Empringham L, Weinstein A (2002) Matrix converters: a technology review. IEEE Trans Ind Electron 49(2).
- [12] L. Angquist. Inner phase angle control of voltage source converter in high power applications. Power Electronics Specialist Conference, 1991. PESC 91 Record., 22nd Annual IEEE. 293-298.
- [13] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
http://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/strateginiai-projektai/sinchronizacija/114#synchronization_visual

- [14] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://enmin.lrv.lt/lt/strateginiai-energetikos-projektai/projektai-elektros-sektoriuje>
- [15] Ana – Irina Stan, Daniel – Ioan Stroe. Control of VSC-based HVDC transmission system for offshore wind power plants. Master Thesis. Department of Energy Technology – Pontoppidanstraede 101 Aalborg University, Denmark, 2010.
- [16] Paulius Juškevičius. Tarpsisteminių nuolatinės srovės jungčių įtakos dinaminiam stabilumui tyrimas. Magistro baigiamasis darbas. Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir Elektronikos Fakultetas, Elektros Energetikos Sistemų Katedra. Kaunas, 2014.
- [17] Paulo Fischer de Toledo. Modeling and control of a line-commutated HVDC transmission system interacting with a VSC STATCOM. Doctoral Sissertation. Royal Institute of Technology. Department of Electrical Engineering. Stockholm, 2007. ISSN 1650-674X.
- [18] ABB, *Its time to connect – Technical description of HVDC Light® technology.*
- [19] Aiškinamasis raštas. Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
http://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/strateginiai-projektai/litpol-link/116#litpol_link_visual
- [20] Ahmed SM., Iqbal A., Abu-Rub H., Rodriguez J., Rojas CA., Saleh M. (2011) Simple carrier based PWM technique for a three-to-nine-phase direct AC–AC converter. IEEE Trans Ind Electron 58(11):5014–5023
- [21] Casadei D, Grandi G, Serra G, Tanti A (1993) Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input / output waveforms. In: Proceedings of European conference on power electronics and applications, EPE'93, vol 7, Brighton, UK, pp 170–175.
- [22] Rodriguez J, Rivera M, Kolar JW, Wheeler PW (2012) A review of control and modulation methods for matrix converters. IEEE Trans Ind Electron 59(1):58–70.
- [23] Huber L., Borojevic D. (1995) Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction. IEEE Trans Ind Appl 31(6):1234–1246.
- [24] Casadei D., Serra G., Tani A., Nielsen P. (1995) Performance of SVM controlled matrix converter with input and output unbalanced conditions. In: Proceedings of European conference on power electronics and applications, EPE'95, vol 2, Seville, Spain, pp 628–633.
- [25] Nasser Tleis. Power Systems Modelling and Fault Analysis. Theory and Practise. ISBN-13: 978-07506-8074-5.
- [26] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://term.blogas.lt/thevenino-teorema-7017.html>
- [27] M. Eremia, M. Shanhidehpour. Hanbook of Electrical Power System Dynamics. Modeling, Stability, and Control. ISBN 987-1-118-49717-3 (cloth).

- [28] E. Nevardauskas. Elektros tinklų matricos ir lygtys. Paskaitų konspektas. Vilnius 1984. UDK 621.311.016.001.24: 681.3.
- [29] A. Bačauskas, P. Grėblikas, L. Kaulakis. Elektros sistemos ir tinklai. Vilnius 1979. Paskaitų konspektas. UDK 621J 311.
- [30] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://electrical-engineering-portal.com/essential-basics-of-total-harmonic-distortion-thd>
- [31] Klumpner C, Wijekoon T, Wheeler P (2005) A new class of hybrid AC/AC direct power converters. In: Proceedings of IAS annual meeting industry applications conference, IAS'05, vol 4, Hong Kong, pp 2374–2381.
- [32] Kolar JW, Friedli T, Rodriguez J, Wheeler PW (2011) Review of three-phase PWM AC–AC converter topologies. IEEE Trans Ind Electron 58(11): 4988–5006.
- [33] Klumpner C, Pitic C (2008) Hybrid matrix converter topologies: an exploration of benefits. In: Proceedings of power electronics specialists conference, PESC'08, Rhodes, Greece, pp 2–8.
- [34] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://www.litpol-link.com/lt/>
- [35] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://new.abb.com/systems/hvdc/references/litpol-link>
- [36] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://www.litgrid.eu/index.php?act=js/nordbalt&item=115#>
- [37] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://www.rcinet.ca/eye-on-the-arctic/2015/05/05/security-expert-russia-seeks-to-block-baltic-energy-independence/>
- [38] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]:
<http://new.abb.com/lt/naujienos/vizitas-nordbalt>
- [39] P. Jenkinas. Tiesiaieigės dažninės pavaros tyrimas. Magistro baigiamasis darbas. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Elektronikos fakultetas. Automatikos katedra. Vilnius 2004.
- [40] Prieiga per internetą. Žiūrėta [2016.05.10]: *XLPE submarine cable systems. Attachment to XLPE land cable systems – user's guide.*