



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONISKO FAKULTETAS

Žilvinas Kovaliovas

**AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KEITIKLIŲ
ĮTAKOS ELEKTROS TINKLUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Jonas Vanagas

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KEITIKLIŲ
ĮTAKOS ELEKTROS TINKLUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

(parašas) Lekt. dr. Jonas Vanagas
(data)

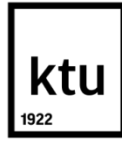
Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Artūras Kalvaitis
(data)

Projektą atliko

(parašas) Žilvinas Kovaliovas
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Žilvinas Kovaliovas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Aukštos įtampos nuolatinių srovės keitiklių įtakos tinklui tyrimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Žilvino Kovaliovo** baigiamasis projektas tema „Aukštos įtampos nuolatinių srovės keitiklių įtakos elektros tinklui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Užduotis

Darbo tikslas:

Atlikti aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių įtakos tinklui tyrimą.

Uždaviniai:

1. Atlikti aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių tipų apžvalgą.
2. Atlikti tipinio VSC tipo AĮNS keitiklio modeliavimą ir bandymus.
3. Atlikti tipinio AĮNS keitiklio valdymo patobulinimą ir bandymus.
4. Atlikti skirtingų galios srautų tekančių per AĮNS įtaką .
5. Pateikti modeliavimo rezultatus ir išvadas.

Problema:

Aukštos įtampos nuolatinės srovės jungčių paklausa auga dideliu tempu. Paprastai ši tendencija pastebima tarp tinklų, kur sinchroninis sujungimas nėra įmanomas. Tačiau vis labiau augantis energetinio saugumo prioritetą formuoja naujus, tokių jungčių panaudojimo būdus. Siekiant pagerinti tinklo charakteristikas vietoje tradicinių kintamosios srovės tinklų perdavimo linijų atsiranda projektų, kur aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai yra integruojami ir tarp sinchroninių tinklų. Sparčiai tobulėjanti technologija ir pingantys gamybos kaštai leidžia išnaudoti daugiau aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių privalumų. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai integruojami į tinklą, ne tik pagerina jo charakteristikas, bet savo gamybos atžvilgiu yra gerokai mažiau keičiantys landšafto reljefą. Be kitą ko naudojantis nuolatinės srovės stotis ilgose perdavimo linijose yra sumažinami perduodamos galios nuostoliai. Atsiranda laisvumas sistemos valdyme, leidžiantis lengvai valdyti perduodamos galios srautų dydį ir kryptį. Galimybė perduoti galią srityse, kur kintamosios srovės tinklo vystymas sudėtingas, povandeniniais kabeliais, ilgose distancijose. Siekiant ištirti nuolatinės srovės keitiklių poveikį tinklui, reikalinga atlikti sistemų modeliavimus, kuriuose aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai būtų integruoti, ir stebėti per pereinamuosius procesus, kokią įtaką jie padaro.

Žilvinas, Kovaliovas. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių įtakos tinklui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Jonas Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *aukštos įtampos nuolatinė srovė, srovės keitikliai, galios elektronika.*

Kaunas, 2018. 60 p.

SANTRAUKA

Energetinis saugumas yra vienas pagrindinių Lietuvos prioritetų. Siekiant šio tikslo, Lietuvoje jau pastatyti ir yra eksploatuojami du aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių stotys. Pirmoji – pirma kontinentinė jungtis tarp Lietuvos ir vakarų Europos, jungtis LitPol link – su Lenkija, eksploataciją pradėta 2015 metais. O jau 2016 eksploatuoti pradėta ir NordBalt jungtis su Švedija.

Šiuo metu Lietuvos elektros sistema yra prijungta prie BRELL žiedo, o sinchronizacija su vakarų Europos tinklais yra planuojama 2025 metais. Nors teoriškai šių jungčių pakanka sinchronizacijos procesui, šiame darbe apžvelgsiu papildomo srovės keitiklio įtaką tinklui, jo stabilumui ir parametrams. Bendrai darbe apžvelgsiu srovės keitiklių tipus, specifinius trūkumus ir privalumus. Siekiant išsiaiškinti integruoto aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio įtaką, sudarytas modelis naudojantis PSCAD programine įranga.

Atlikus literatūros analizę modeliavimui buvo pasirinktas VSC tipo integruotasis keitiklis-tai keitiklio tipas, kur tiek lygintuvo, tiek keitiklio pusės turi būti fiziškai sujungtos ir sinchronizuoto kintamosios srovės tinklo.

Atlikus modeliavimą, gauti rezultatai nurodo tinklo parametrų pagerėjimą ir bendrąjį pereinamųjų procesų stabilumą.

Kovaliovas, Žilvinas. RESEARCH OF IMPACT CAUSED BY HIGH VOLTAGE DC CONVERTER ON ELECTRICAL NETWORK : Master's thesis in *title qualification degree / supervisor assoc. prof. Jonas Vanagas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric power systems*

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: HVDC, High voltage, Direct current, converter link, power electronics

Kaunas, 2018. 60 p.

SUMMARY

Safety of Energetic systems is one of the highest priority tasks in Lithuania right now. Regarding this issue, Lithuania, already built and are running two high voltage direct current links. Our first converter built and fully operational was also our first continental connection to western Europe as well. LitPol link- connection between Lithuania and Poland, was commissioned and put in to operation in 2015. And NordBalt-connection between Lithuania and Sweden, was commissioned and operational shortly next after, in 2016.

Currently, Lithuania is connected to post soviet electrical ring called BRELL, and therefore is dependent on it. Synchronization with western Europe grids is planned to be executed on 2025. Theoretically tow high voltage direct current links are sufficient to achieve synchronization, but on this project, I will investigate impact of additional converter link on the ac network, on stability and quality parameters. As well I am going to briefly go through the main types and configurations of HVDC types, cons and negatives. In order to achieve analysis of the impact, I will create a functional model of HVDC link using PSCAD software.

After literature analysis has been done, I decided to use integrated VSC type converter model- where both inverter and rectifier must be physically connected to synchronous ac network.

After simulation, results show us that, implementation of additional HVDC link could improve the network system transient stability as well other parameters.

Iliustracijų sąrašas

Pav. 1.1. BTB tipo keitiklis	11
Pav. 1.2. Tipinė Vienpolio keitiklio schema	12
Pav. 1.3. Dvipolės sandaros keitiklis	12
Pav. 1.4. Integruotieji AĮNS keitikliai	13
Pav. 1.5. Pilnos bangos tiltelio modelis naudojamas LCC technologijoje	14
Pav. 1.6. Dviejų lygių įtampos šaltinio keitiklis	16
Pav. 1.7. Trijų lygių, neutrале sujungto tipo įtampos šaltinio keitiklis	17
Pav. 1.8. Modulinis daugialygis VSC keitiklis. (a) vienas modulis, (b) fazės struktūra	18
Pav. 1.9. VSC tipo keitiklio sistemos.	20
Pav. 1.10. Ekvivalentinės sistemos modelis.	20
Pav. 2.1. Japonijos AĮNS jungčių tinklas[11]	22
Pav. 2.2. Kii kanalo AĮNS jungties sandara.	23
Pav. 2.3. AĮNS jungtys Suomijoje ir galios perdavimo kryptys[13]	25
Pav. 2.4. Lietuvos -Lenkijos jungtis	25
Pav. 2.5. Principinė BTB LitPol link schema.	26
Pav. 2.6. NordBalt Lokacija ir kabelio trasa.	26
Pav. 4.1. Tipinė d-, q- vektorių valdymo struktūra.	29
Pav. 4.2. VSC-AĮNS konfigūracijos modelis.	31
Pav. 4.3. Lygintuvo konfigūracija PSCad programinėje įrangoje.	31
Pav. 4.4. Keitiklio konfigūracija PSCad programinėje įrangoje.	32
Pav. 4.5. Galios kompensavimo blokinė diagrama.	33
Pav. 5.1. Linijinė 6 šynų 4 generatorių schema.	33
Pav. 5.2. Generatoriaus duomenys iš IEEE duomenų bazės.	34
Pav. 5.3. Žadintuvo parametrai.	34
Pav. 5.4. Dažnio stabilizatoriaus parametrai.	35
Pav. 5.5. Testuojamasis tinklas.	35
Pav. 5.6. Apkrovos modelis.	36
Pav. 5.7. Apkrovos parametrų nustatymai	37
Pav. 5.7. AĮNS kabelis naudotas modelyje.	37
Pav. 5.8. AĮNS jungties integravimas į tinklą	38
Pav. 6.2.1. AĮNS be galios svyravimo reguliavimo	40
Pav. 6.2.2. AĮNS su galios svyravimų reguliavimu	41
Pav. 6.2.3. Kampų tarp fazių skirtumas generatorių atžvilgiu	41
Pav. 6.2.4. Fazių kampų skirtumas sistemoje su galios svyravimų valdymu	42
Pav. 6.2.5. Dažnio svyravimas gedimo metu.	43
Pav. 6.2.6. Įtampos kritimas	43
Pav. 6.2.7. Galios svyravimas gedimo metu.	44

Lentelių sąrašas

Lentelė 1.1. Bendrųjų savybių palyginimas	19
Lentelė 2.1. Suomijos AĮNS jungtys	24
Lentelė 5.5.1 Linijų ilgiai.	36
Lentelė 6.1.1 CCT laikai	39

Turinys

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS.....	9
Įvadas	10
1. Apžvalginė dalis.....	11
1.1 Pagrindinės srovės keitiklių konfigūracijos	11
1.2 BTB- „nugara į nugara“ keitiklio tipas	11
1.3 Vienpolis keitiklis.....	11
1.4 Dvipolė sistema.....	12
1.5 Integruotieji AİNS keitikliai	13
1.6 AİNS galios perdavimas naudojanti linijoje komutuojamais srovės pagrindo keitikliais	13
1.7 AİNS galios perdavimas naudojant įtampos šaltinio keitiklius	16
1.8 Savybių palyginimas tarp LCC-AİNSJ ir VSC-AİNSJ tipo keitiklių.....	19
1.9 VSC-AİNS jungčių valdymo būdai	20
2. AİNS keitiklių apžvalga.....	22
2.1 Kii kanalo AİNS jungtis (Japonija)	22
2.2 Kingsnorth AİNS jungties keitiklis (Anglija).....	23
2.3 Fenno-Skan (Suomija ir Švedija)	24
2.4 LitPol link (Lietuva-Lenkija).....	25
2.5 NordBalt link (Lietuva-Švedija).....	26
3. Integruotų AİNS keitiklių eksploataciniai trūkumai ir sprendimo būdai	27
3.1 Pagrindiniai trūkumai.....	27
3.2 Sprendimo būdai	27
4. Teorinis integruotos AİNS jungties galios valdymo paaiškinimas	28
5. Etaloninio tiriamojo modelio aprašymas.....	33
5.1 Generatoriai.....	33
5.2 Sinchroninės mašinos žadintuvas.....	34
5.3 Energijos sistemos stabilizatorius (PSS).....	34
5.4 Bandomasis tinklas	35
5.5 KS perdavimo linija	35
5.6 Apkrova.....	36
5.7 AİNS kabelis.....	37
6. Tinklo parametrų tyrimas	38
6.1 Pereinamųjų procesų tyrimas	38
6.2 Galios svyravimų slopinimo tyrimas.....	40
7. Išvados.....	45
8. Literatūra.....	46
Priedas 1 tinklo komponentų duomenų lapai ir schemas	49
Priedas 2 PSCAD programinis kodas	56

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

AĮNS – Aukštos įtampos nuolatinės srovės

BRELL- Baltarusija, Rusija, Estija, Lietuva, Latvija

VSC- Angliškas terminas Voltage source converter. Lietuviškas- įtampos šaltinio keitiklis

HVDC- Angliškas terminas High Voltage Direct Current. Lietuviškas- AĮNS

KS- Kintamoji srovė

NS- Nuolatinė srovė

BTB- Angliškas terminas Back To Back. Lietuviškas- nugarą į nugarą.

LCC- Angliškas terminas Line commutated converter. Lietuviškai- linija komutuojamas keitiklis

TJS- trumpųjų jungimų srovės.

IGBT- Angliškas terminas Isolated Gate Bipolar Transistor Lietuviškas - izoliuoto įėjimo bipoliai tranzistoriai.

PWM- Angliškas terminas Pulse width modulation. Lietuviškai- impulse pločio moduliacija.

NPC- Angliškas terminas neutral clamped point. Lietuviškai – sujungtas neutralės taške.

MMC- Angliškas terminas modular multilevel converter. Lietuviškas- Moduliniai daugialygiai keitikliai

PCC- Angliškas terminas point common connection. Lietuviškai- bendrojo sujungimo taškas.

PSS- Angliškas terminas power system stabilizer

RMS- Angliškas terminas root mean square . Lietuviškai – vidurkio kvadratinė šaknis

Įvadas

Su nuolatos augančiu aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių (AİNS) skaičiumi, šie keitikliai, tampa vis svarbesni ir svarbesni, kintamosios srovės tinklo sistemoms.

Nepaisant nuolatinio tobulėjimo galios elektronikos srityje, aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių technologijos vis dar tobulinamos ir santykinai yra evoliucionavusios iš tipinės, tiristoriaus bazės sistemos į įtampos šaltinio keitiklius. Kitaip vadinamus VSC(Voltage source converter) VSC-AİNS keitiklius[1]. Per pastaruosius metus, įtampos šaltinio tipo keitikliai, buvo priežastis, išspręstų daugelio problemų, išskylančių tradiciniame KS tinkle: Įtampos stabilizavimo, sumažintas kiekis gedimų kuriais teka netipinės srovės, optimizuotas galios perdavimas. Šie keli pavyzdžiai, puikiai iliustruoja, kodėl nuolatinės srovės keitikliai tampa vis svarbesnė dalis, tradiciniuose elektros tinkluose.

Nuolatinės srovės keitikliai, kurie yra integruojami į esamą infrastruktūrą, yra inovatyvi koncepcija, kuri gali būti apibūdinama kaip modelis susidedantis iš AİNS stočių, kurios bent dviejuose taškuose, fiziškai yra prijungtos prie kintamosios srovės tinklo. Šie sujungimai leidžia netik atlikti paprastas funkcijas, kaip didelės galios perdavimas, bet papildomai galima nurodyti galios perdavimo kryptį, reguliuoti ir stabilizuoti atitinkamų kintamosios srovės tinklų įtampas, bendras sistemos stabilumo palaikymas.

Tad nenuostabu, jog didėjant saugios energijos poreikiui, atsižvelgiant ir į aplinkos taršos tiek reljefo poreikius, vis didėja ir aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių poreikis.

Šio darbo pagrindinė užduotis, yra aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių įtaka tinklui tyrimas. Darbe analizuosiu stabilumo problemas ir pereinamuosius procesus susijusius su tokio tipo sistemomis, siekiant surasti optimaliausią valdymo tipą skirta integruotų AİNS jungčių veikimui pagerinti.

Pirmasis aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklis (HVDC), buvo pastatytas dar 1950 metais, kai 20 MW galios, ir 100 kV įtampos jungtis tarp Švedijos žemyninės dalies ir Gotlando salos buvo įrengtas[2]. Tuomet buvo naudojamas gyvsidabrio lanko tipo keitiklio vožtuvai, kuriems buvo reikalingas nuolatinis remontas ir techninė priežiūra.

Tačiau 1970 metais, sukūrus aukštos įtampos didelės galios tiristorius, palaipsniui tiristoriniai vožtuvai pakeitė gyvsidabrio analogus. Tiristoriaus pagrindu sukurti vožtuvai, ženkliai padidino sistemos patikimumą, sumažėjo techninės priežiūros dažnis ir apimtys. Dėl šių priežasčių padidėjo susidomėjimas HVDC tipo sistemomis 1970-1980 metų laikotarpiu. Prabėgus beveik 40 metų nuolatinio tobulinimo, tiristoriniu pagrindu projektuotos sistemos yra vienos iš patikimiausių technologijų.

Naujausi pasiekimai puslaidininkų sferoje, toliau leidžia tobulėti ir keisti AĮNS jungtims, dėl šios priežasties, viena iš labiausiai plėtojamų sričių yra VSC tipo keitikliai. Pirmasis tokio tipo keitiklis naudojo impulso pločio moduliaciją, buvo pastatytas 1997 metais.[3]

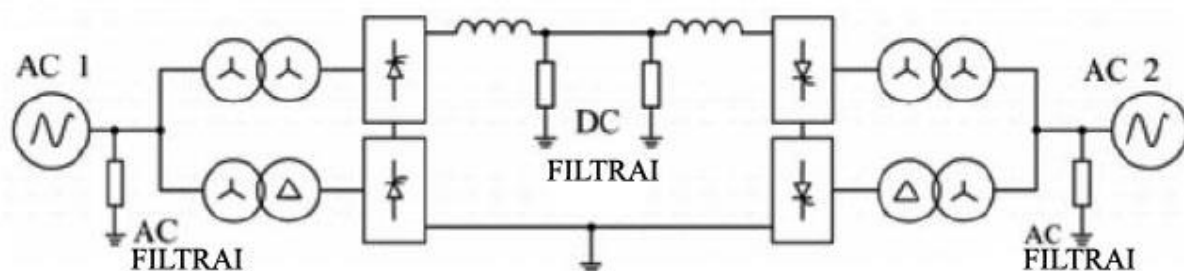
1. Apžvalginė dalis

1.1 Pagrindinės srovės keitiklių konfigūracijos

Yra keletas pagrindinių keitiklių tipų, charakterizuojančių savo projektus aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliams. Populiariausi būtų: BTB, vienpolė sistema, dvipolė sistema, integruotoji sistema.

1.2 BTB- „nugara į nugara“ keitiklio tipas

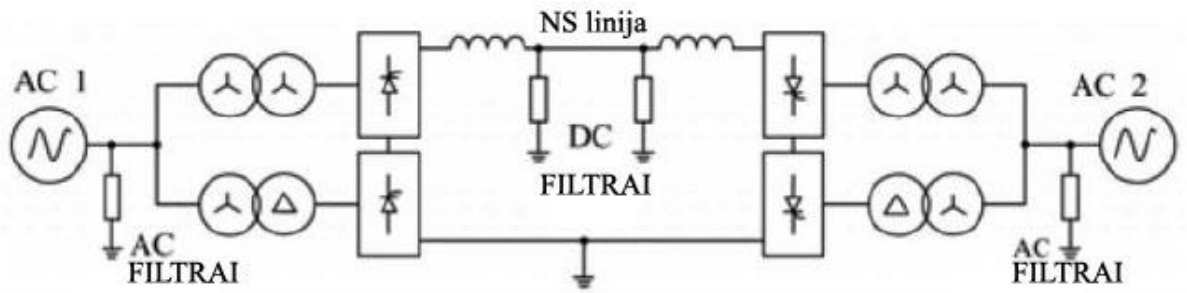
Šio tipo keitiklis susideda iš dviejų keitiklių (keitiklio ir lygintuvo), esančių vienoje pastotėje. Paprastai šio tipo keitiklis yra sujungtas tiesiogiai, nenaudojant nuolatinės srovės perdavimo linijos. Dažniausiai šis tipas naudojamas nesinchronizuotiems tinklams sujungti, kur tarp tinklų skiriasi dažniai ar valdymo metodai.



Pav. 1.1. BTB tipo keitiklis

1.3 Vienpolis keitiklis

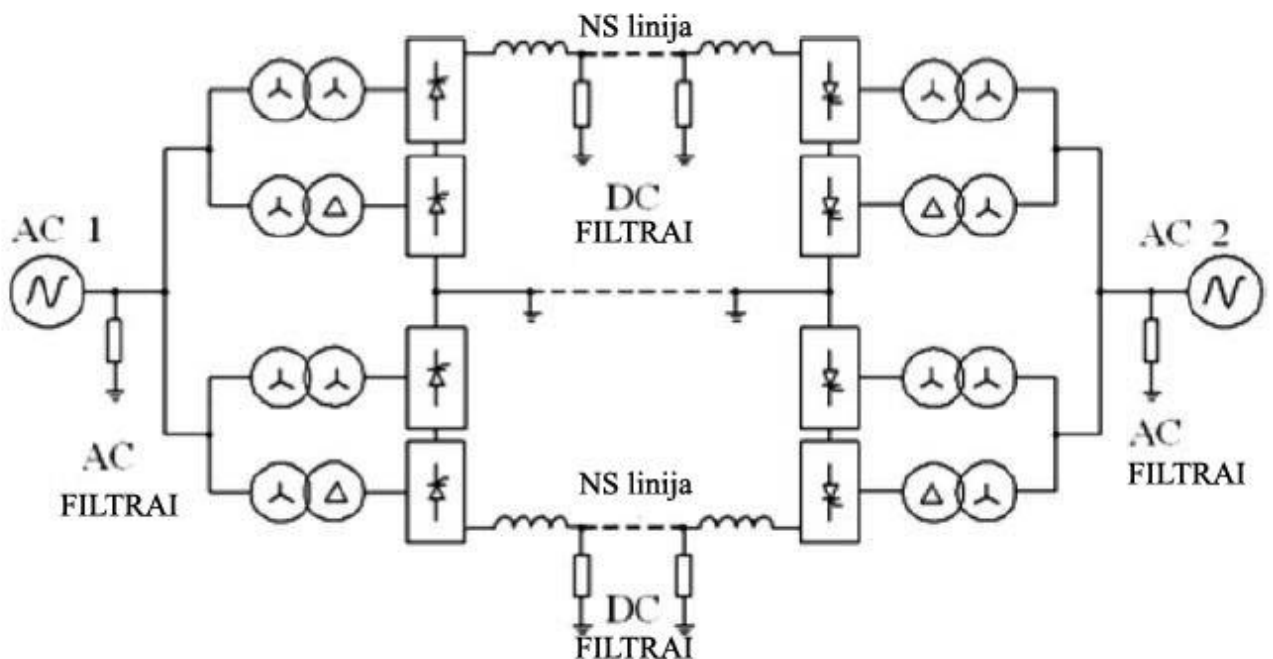
Vienpolė jungtis susideda iš dviejų keitiklių sujungtų vienu puslaidininkiu. Tokiu atveju, grįžtamasis laidininkas yra naudojamas žemė arba jūra, priklausomai nuo to, kur paklotas puslaidininkis. Kai sistema veikia vienpolėje struktūroje, tik vienas laidininkas yra po darbine įtampa. Įvykus gedimui laidininke, nebegalimas galios perdavimas, ir stotis turi sustabdyti darbą.



Pav. 1.2. Tipinė Vienpolio keitiklio schema

1.4 Dvypolė sistema

Dvypolė aukštos įtampos nuolatinė srovės keitiklio sandara yra labiausiai naudojama diegiant AĮNS jungtis. Taip yra dėl įrenginių ir sistemų dubliavimo, siekiant kuo didesnio bendros sistemos saugumo. Įvykus gedimui vienoje iš nuolatinės srovės linijų, likusi linija toliau gali perdavinėti galią vienpoliu režimu tam tikrą laiką. Bendroju atveju, tai dvi vienpolės sistemos sujungtos tarpusavyje. Vienas polius yra teigiamas, kitas- neigiamas. Teoriškai, vienas polius gali pilnai funkcionuoti, kol kitam yra atliekami remonto darbai, su tam tikrais apribojimais darbo režimams. Kiekvienas polius gali funkcionuoti kaip nepriklausoma sistema, su žemės grįžtamuoju laidininku.

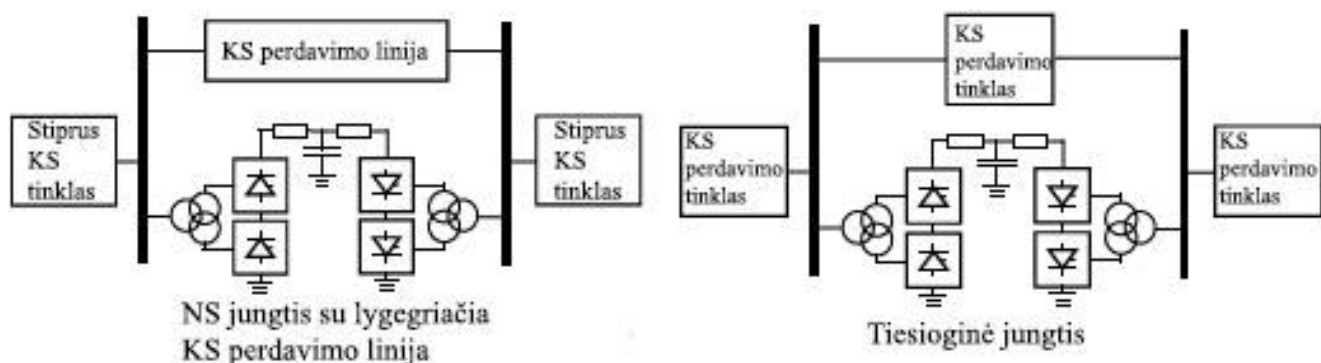


Pav. 1.3. Dvypolės sandaros keitiklis

1.5 Integruotieji AĮNS keitikliai

Integruotieji AĮNS keitikliai, tai nuolatinės srovės jungtys, kurios dviejose galinėse jungtys yra sujungtos fiziškai sinchronizuotu kintamosios srovės tinklu. Kaip matoma iš paveikslėlio pateikto žemiau (Pav. 1.4.), sinchroniniu kintamuoju tinklu gali būti arba KS perdavimo linijos, arba kombinuotas KS tinklas. O AĮNS jungtis turėtų būti vienpolėje arba dvipolėje sudėtyje, fiziškai sujungtos nuolatinės srovės linija.

Tokia jungtis, netik gali atlikti pirmines, kaip didelės galios perdavimo, tačiau ir papildomas valdymo funkcijas, pačiame kintamosios srovės tinkle. Tai galios perdavimo krypties ir dydžio keitimas, įtampos reguliavimas, sistemos stabilumo palaikymas, įtampos švytavimo mažinimas.

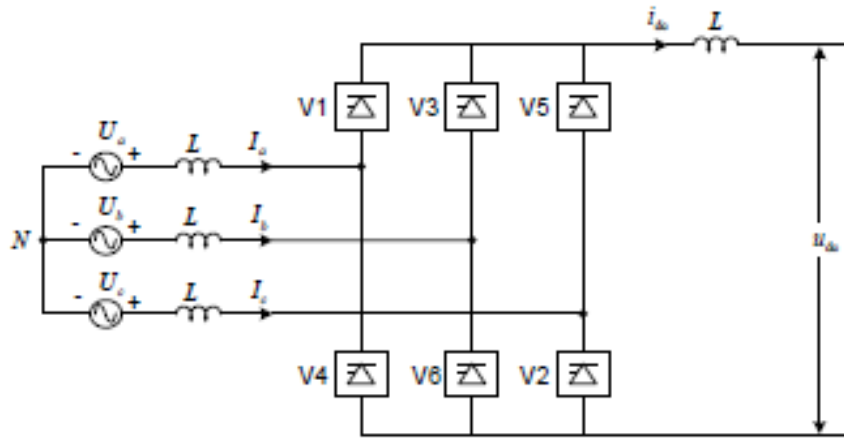


Pav. 1.4. Integruotieji AĮNS keitikliai

1.6 AĮNS galios perdavimas naudojanti linijoje komutuojamais srovės pagrindo keitikliais

Pirminė keitiklių technologija naudota AĮNS jungčių galios perdavimui buvo pagrįsta gyvsidabrio vožtuvų. Viena iš pagrindinių šių vožtuvų problemų buvo, susidarančio lanko sukuriami pažeidimai. Kurie palaipsniui sugadindavo lygintuvo funkcines savybes, ir keitiklio vožtuvai nuosekliai iššaukdavo vis daugiau problemų susijusių ir su kitomis sistemomis.

Tačiau populiarėjantis galios perdavimo metodas, sulaukė vis daugiau dėmesio, ir buvo nuolatos tobulinamas, taip 1960 metais, tiristorių pagrindų sukurti vožtuvai palaipsniui išsprendė pagrindines problemas, lyginant su gyvsidabrio tipo analogais. Keitikliai, kurių pagrindinis valdymo elementas yra tiristoriniai arba gyvsidabriniai vožtuvai, yra vadinami linijos komutuojami keitikliai (LCC). Pagrindinis šio tipo keitiklio modelis galėtų būti apibūdinamas kaip trijų fazių, pilnos bangos tiltelio grandinė. Nors yra keletas galimų konfigūracijų šiam tilteliui, tačiau ši konfigūracija yra paprastai naudojami linijos komutuojamiems keitikliams. To priežastis yra naudingiausias keitiklio transformatoriaus išnaudojimas, ir mažesnė įtampa krentanti ant keitiklio vožtuvų kai galios perdavimas nėra vykdomas.



Pav. 1.5. Pilnos bangos tiltelio modelis naudojamas LCC technologijoje

Šio tipo tiltelis, gali būti panaudotas perduoti galiai į abi kryptis, kadangi tiltelis gali veikti tiek lygintuvo tiek keitiklio režimu. Tai gali būti pasiekama paprasčiausiai nustatant skirtingus vožtuvų atsidarymo kampus. Jeigu atsidarymo kampas yra žemesnis negu 90 laipsnių, tada vožtuvais tekės nuolatinė srovė iš teigiamos jungties nuolatinės srovės grandinėje, gali perduodama bus iš kintamosios srovės pusės į nuolatinės srovės pusę.

Jeigu vožtuvų atsidarymo kampas bus didesnis nei 90 laipsnių, tai nuolatinė įtampa pakeis poliarumą, tai sukels nuolatinės srovės tekėjimą iš neigiamosios jungties nuolatinės srovės grandinėje ir galios perdavimo kryptis bus iš nuolatinės srovės pusės. Principiniu atžvilgiu, AĮNS jungtis yra sudaryta iš dviejų tiltelių, kurie yra sujungiami tiesiogiai, nuolatinės srovės pusėje. Sujungimas, gali būti oro linija, žemyninis arba jūrinis kabelis, arba anksčiau minėtas BTB sujungimas, kur visi vožtuvai yra tiesiog vienoje patalpoje.

LCC-AĮNS jungtys yra sėkmingai statomi, ir laikui bėgant jungčių skaičius tik didėja. Tačiau pati LCC technologija, turi trūkumų. Viena iš problemų yra reaktyviosios galios suvartojimas, arba keitiklio arba lygintuvo pusėje. Priklausomai nuo vožtuvo atsidarymo kampų, reaktyviosios galios suvartojimas LCC tipo keitiklyje gali siekti net 50% aktyviosios galios. Reaktyviosios galios suvartojimas reikalauja kompensacijos, kuri yra įgyvendinama prijungiant didelės talpos kintamosios srovės talpinius filtrus, kurie paprastai yra montuojami AĮNS jungtyse. Tipinės LCC-AĮNS jungties filtrai, ne tik padidina bendruosius kaštus, tačiau ir užima fiziškai nemažus plotus. Taipogi, kiekvienas filtro prijungimas turi įtakos ir sistemos trumpalaikiams viršįtampiams, bei žemos eilės harmonikoms.[4] Tai ypatingai svarbu jeigu tinklas nėra stabilus.

Dar viena problema pasikartojanti LCC tipo keitikliuose yra komutavimo klaidos, kurios atsiranda dėl kintamosios srovės tinklo įtakos. Įtampos sumažėjimas arba fazės kampo poslinkis gali sumažinti sužadinimo laiką keitiklio vožtuvuose. Jeigu sužadinimo kampas sumažėja 5 ar 6 laipsniais, galimas ankstesnio vožtuvo kuris jau buvo atsidaręs, pakartotinis suveikimas, taip

sukuriant komutavimo klaidą. Tipiškai tai vadinami „misfiring” arba nesinchroniniu atsidarymu. Pavienis toks įvykis, nedaro žalos nei keitiklio vožtuvams, nei kintamosios srovės tinklui. Tačiau priklausomai nuo keitiklio struktūros, pasikartojančių gedimų kiekis ir skaičius, gali sukelti net keitiklio atsijungimą nuo tinklo[5].

Nors minėtų problemų įtaka gali būti sušvelninama santykinai lengvomis priemonėmis, yra dar viena fundamentali problema, kuri gali tapti pagrindine priežastimi atsisakant naudoti LCC-AİNS jungtis. LCC tipo keitikliams norint atlikti sėkmingus komutavimus, būtina yra kintamosios srovės tinklo įtampos stabilumas. Jeigu kintamosios srovės tinklo trumpųjų jungimų srovės yra žemos lyginant su nominalia keitiklio perdavimo galia, kitaip tariant TJS žemas, galima tikėtis labiau komplikOTOS sąveikos tarp kintamosios ir nuolatinės srovės sistemų. Taipogi TJS, riboja didžiausią galimą perduoti galią[6].

Kaip jau buvo minėta anksčiau, LCC tipo AİNS jungtims yra būtinas reaktyviosios galios kompensavimas. Paprastai tai įgyvendinama prijungiant didelius talpinius filtrus. Patys savaime filtrai gali sukelti problemų silpnose sistemose. Viena iš tokių problemų yra trumpalaikiai viršįtampiai. Kurie gali atsirasti didelio perduodamos galios pakeitimo metu, blokuojant ar de blokuojant keitiklį, pačių filtrų prijungimo metu- didelio talpumo kondensatoriai kartu su kintamosios srovės tinklo dideliu induktyvumu sukeliants viršįtampius. Jeigu tinkle esanti įtampa didelė, susidaro galimybės sistemos apsaugom atjunginėti filtrus. Tokiu atveju, filtrai neatlieka savo suprojektuotos funkcijos. Trumpalaikiai viršįtampiai taip pat gali sukelti, keitiklio transformatoriaus ar transformatorių esančių šalia įsisotinimą.

Dar viena problema susijusi su silpnų kintamosios srovės tinklų jungtimis yra žemos eilės harmonikų rezonansas. Aukštas kintamosios srovės tinklo induktyvumas, didelės talpos filtrai AİNS jungčių filtrai, sukuria rezonansą, kurio dažnis paprastai būna žemesnis. Kuo žemesnis dažnis, tuo didesnė tikimybė, kad kenksminga sąveika su AİNS jungtimi atsitiks.

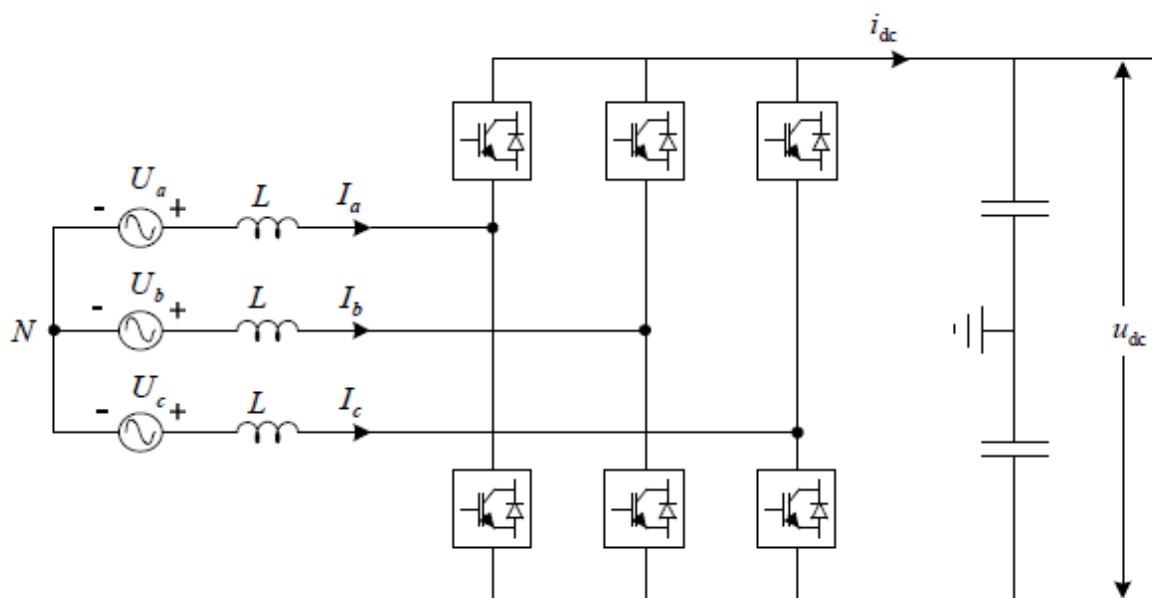
Patobulinta LCC-AİNS jungčių struktūra galima būtų laikyti kondensatoriais komutuojamų keitiklių stočių technologiją. Šioje technologijoje kondensatoriai yra nuosekliai prijungiami tarp keitiklio vožtuvų ir keitiklio transformatorių. Nuosekliai prijungti kondensatoriai ne tik tiekia reaktyvią galią suvartotą vožtuvų, bet ir pagerina pereinamuosius procesus AİNS jungties sistemoje. Tačiau pagrindinis šios technologijos trūkumas, dėl nuoseklių kondensatorių, išauga vožtuvų izoliacijos kaštai. Todėl ši technologija yra taikoma, tai kai kuriose BTB tipo stotyse, kuriose įtampos yra žemesnės.

1.7 AĮNS galios perdavimas naudojant įtampos šaltinio keitiklius

Įtampos šaltinio keitikliai yra viena naujesnių technologijų taikomų AĮNS galios perdavimui. Pirmasis komercinis tokio tipo keitiklis buvo pastatytas 1997 metais Gotlando saloje[2], visai netoli pirmosios LCC-AĮNS jungties, ir šio keitiklio nominali gali buvo 50MW.

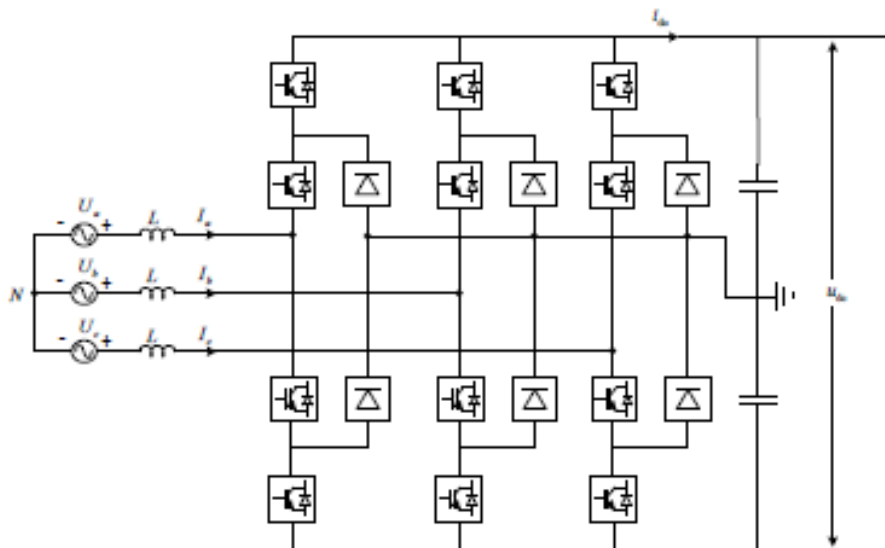
Įtampos srovės šaltinio tipo keitikliai naudoja savaime komutuojančius elementus, tokius kaip įėjimo išjungimo tiristoriai, arba izoliuoti įėjimo bipoliai tranzistoriai (IGBT). Šie elementai, gali būti laisvai atidaromi ar uždaromi, kitaip nei LCC technologijoje, kur tiristoriaus vožtuvas gali būti išjungtas tik atvirkštinės įtampos. Taigi, VSC technologija gali sukurti savo sinusoidinę bangos formą (naudojantis impulso pločio moduliacijos metodu (PWM)), nepriklausomai nuo kintamosios srovės sistemos.

Yra ne viena galima konfigūracija VSC tipo keitikliams. Tačiau labiausiai naudojama AĮNS srityje yra tik trys: dviejų lygių keitiklis, trijų lygių keitiklis ir modulinis daugialygis keitiklis (MMC)[7].



Pav. 1.6. Dviejų lygių įtampos šaltinio keitiklis

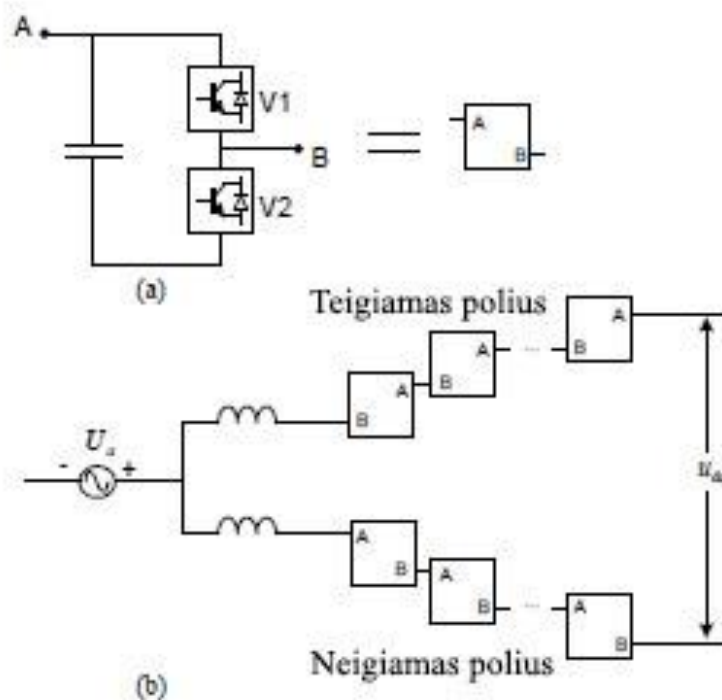
Pav. 1.6. Pavaizduotas dviejų lygių keitiklis prijungtas prie tinklo. Tiltelis susideda iš 6 savaime komutuojančių vožtuvų. Tipiniai AĮNS jungčiai, du VSC tipo keitikliai yra sujungiami tarpusavyje nuolatinės srovės pusėje. Labai aukštos įtampos pritaikymui, vožtuvai gali būti sujungiami nuosekliai, siekiant pagerinti jų efektyvumą. Priklausomai nuo atskaitos įtampos, impulsų plotis gali būti koreguojamas siekiant valdyti VSC[8] tipo keitiklį.



Pav. 1.7. Trijų lygių, neutralė sujungto tipo įtampos šaltinio keitiklis.

Trijų lygių VSC tipo keitiklis kurio modelį galime matyti Pav. 1.7. gali būti vadinamas ir neutralės taškuose sujungtu keitikliu (NPC)[8]. Pagrindinės charakteringos šio modelio savybės kurios išsiskiria nuo dviejų lygių keitiklių yra papildomi du diodai jungiantys diodai kiekvienoje fazėje. Šie du diodai apjungia įjungimo įtampą iki pusės nuolatinės srovės įtampos lygio. Taigi kiekviena VSC tipo keitiklio fazė gali junginėti tris skirtingus įtampų dydžius, pagrinde teigiamo ir neigiamo nuolatinės srovės terminalų ir jų vidurio taško. Todėl trijų lygių VSC sugeneruoti įtampų impulsai yra artimesni atskaitos įtampos dydžiui. Papildomai, trijų lygių NPC keitikliai, turi mažesnius perjungimų nuostolius. Lyginant su dviejų lygių VSC tipo keitikliai, trijų lygių NPC tipo keitikliams reikalingas didesnis diodų skaičius, dėl neutralės taškų sujungimo. Tačiau kiekis komutacinių elementų nebūtinai turi būti didesnis. Taip yra dėl to, jog vienas vožtuvas susideda iš keleto ar keliolikos komponentų sujungtų nuosekliai. Dviejų lygmenų keitikli atveju, ant vožtuvo krenta dvigubai didesnė įtampa lyginant su trijų lygių keitikliu. Tačiau, bendras perjungimų skaičius yra vidutiniškai toks pat. NPC tipo keitikliai gali būti naudojami prie aukštesnių įtampų, taip eliminuojant nepageidaujamas harmonikas ir mažinant perjungimo nuostolius. Tačiau aukštesnių įtampos lygių pritaikymui NPC tipo keitikliai, turi sudėtingesnius izoliacijos ir aušinimo projektinius sprendimus. Dėl to, aukštesnio nei trijų lygių keitiklio modelių net nebuvo svarstoma projektuoti.

Moduliniai daugialygiai keitikliai (MMC), lyginant su anksčiau aptartomis konfigūracijomis, skiriasi tuo, kad nėra nei vieno bendro kondensatoriaus, sujungto tarpusavyje nuolatinės srovės pusėje. Vietoj to, nuolatinės srovės pusėje kondensatoriai yra naudojami kiekviename modulyje. O keitiklis yra projektuojamas pakopiniu principu, prijungiant modulius vieną prie kito.



Pav. 1.8. Modulinis daugialygis VSC keitiklis. (a) vienas modulis, (b) fazės struktūra

Modulinio daugialygio keitiklio principas yra ypatingai palankus aukštos įtampos pritaikymui. Kadangi keitiklis nesunkiai gali būti praplečiamas kiekvienam poliui pridendant papildomų modulių. Jeigu struktūroje yra pakankamas kiekis modulių, o paprastai AĮNS jungtys jų būna vidutiniškai apie 100, teoriškai kiekvienas modulis įsijungia iš išsijungia tik vieną kartą per periodą. Taip yra sumažinami komutaciniai nuostoliai. Tačiau realiomis sąlygomis reikalingas didesnis komutacijų dažnis. Šio tipo keitiklių sukurtų harmonikų įtaka tokia nedidelė, jog papildomas filtravimas beveik nereikalingas.

Papildomas šios sistemos privalumas yra, jog valdymo sistema turi daugiau laisvės susidorojant su sutrikimais nuolatinės srovės pusėje. Nuolatinės srovės kondensatoriai nebūtinai sutrikimo metu yra iškraunami, kas leidžia greitesnį atsistatymo laiką.

Lyginant su anksčiau aptartomis konfigūracijomis, pagrindinis modulinės daugialygos keitiklio sistemos trūkumas yra komutacinių elementų kiekis. Taip yra dėl to, kad tik vienas vožtuvas kiekviename modulyje prisideda prie fazės įtampos dydžio. Be kita ko, šios sistemos projektavimas yra ženkliai sudėtingesnis valdymo sistemos atžvilgiu, lyginant su dviejų lygių sistemomis. Tačiau komutacinių nuostolių sumažinimas, ir mažiau filtravimo reikalaujanti sistema, yra užtektinas pagrindimas naudoti AĮNS galios perdavimui.

VSC-AĮNS technologijos, teoriškai panaikina daugumą LCC-AĮNS jungčių trūkumus. Ir gali palaikyti kintamos srovės tinklus vartojant arba tiekiant reaktyviąją galią.

Abi sistemos gali, greitai pakeisti aktyviają perduodamą galią, atsitikus nenumatytiems reiškiniam kintamosios srovės tinkle. Tačiau VSC-AĮNS tipo keitiklis gali iškart pakeisti perduodamos galios kryptį, keičiant įtampų lygius kiekviename terminale.

Nuolatinė srovė, VSC tipo keitiklyje yra ženkliai mažesnė nei LCC tipo keitiklių stotyse. Tai leidžia išnaudoti išspausto tipo technologijos kabelį. Ši kabelio gamybos technologija netik leidžia sumažinti gamybos kaštus, bet ir gamybos laiką. Dar vienas kabelio pranašumas, jog tapo įmanoma tiesti didelių atstumų linijas[9].

1.8 Savybių palyginimas tarp LCC-AĮNSJ ir VSC-AĮNSJ tipo keitiklių

VSC tipo technologija turi toliau išvardintus pranašumus:

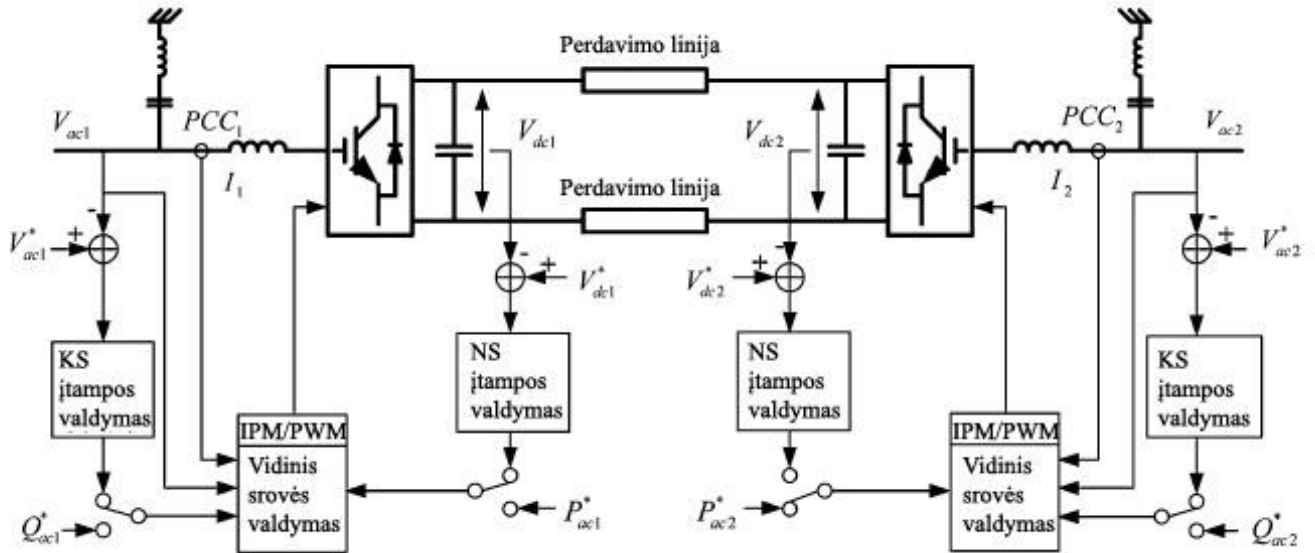
- a) Pažangesnė aktyviosios galios valdymo sistema, leidžianti staigius galios krypties pasikeitimus.
- b) Galimybė naudoti daugiasluoksnius pakopinius terminalus.
- c) Komutavimo sukeltų sutrikimų dėl kintamosios srovės tinklo eliminavimas
- d) Galimybė nepriklausomai nuo aktyviosios galios, valdyti reaktyviosios galios suvartojimą.
- e) Labiau tinkamas prijungimas prie „silpno“ tinklo. Arba prie tinklo kuriame galios generavimas nėra galimas.
- f) Nėra poreikio, naudoti keitiklio transformatorių kaip pagalbinės komutacinės priemonės.
- g) Aukštesnis impulso pločio moduliacijos dažnis, leidžiantis sumažinti filtrų apimtis.
- h) Sumažintas statybų ir derinimo laikas AĮNS jungčiai.

Lentelė 1.1. Bendrųjų savybių palyginimas

Savybės	LCC-AĮNSJ	VSC- AĮNSJ
Technologija	Tiristoriniai vožtuvai	IGBT vožtuvai
Maksimali perduodama galia	6400 MW	1200 MW
Tipinis statybų ir derinimo laikas	3 metai	2 metai
Reaktyviosios galios kompensavimas	Šuntinių filtrų ir reaktorių prijungimas/ atjungimas	Impulso pločio moduliacijos pagalba
Nepriklausomas aktyvios ir reaktyvios galios valdymas	Ne	Taip
Techninės priežiūros laikas	<1 %	<0.5 %
Tipiniai nuostoliai	<5 %	<6 %
Pakopinis jungimo būdas	Iki trijų terminalų	Neribojamas

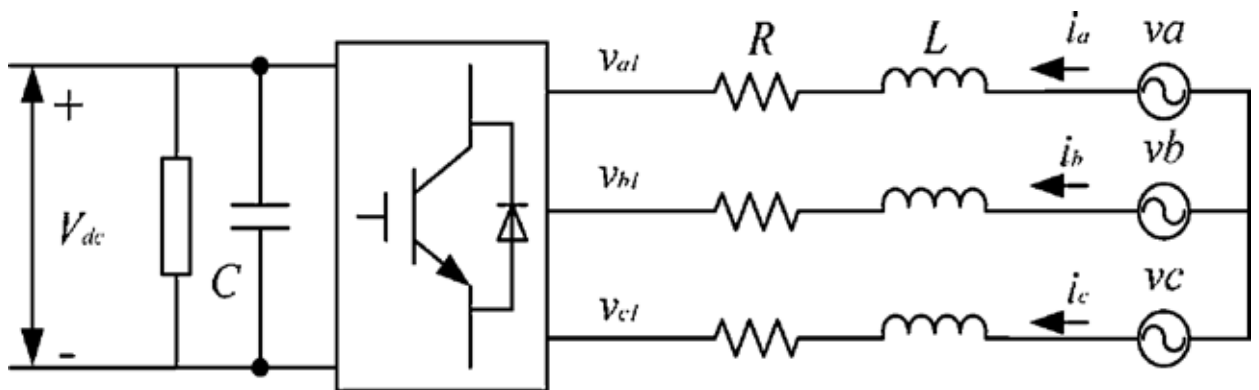
1.9 VSC-AİNS jungčių valdymo būdai

Įtampos šaltinio pagrindo keitiklis paprastai susideda iš trijų dalių: lygintuvo stoties, keitiklio stoties ir aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimo linijos arba kabelio. Pav. 1.9. Galime matyti supaprastintą AİNS VSC tipo jungties schemą. Kiekvienas terminalas atitinkamai prisijungia prie kintamosios srovės tinklo per atitinkančią varžą kuri atstoja keitiklio transformatorių ir reaktorių tarp VSC ir kintamosios srovės tinklo.



Pav. 1.9. VSC tipo keitiklio sistemos.

Paprastai tiek lygintuvo, tiek keitiklio pusės nepriklausomai viena nuo kitos gali valdyti reaktyviosios galios suvartojimą. Tačiau aktyviosios galios perdavimas turi būti subalansuotas. Taigi aktyvioji galia kuri patenka į AİNS jungtį turi būti lygi perduodamai pridėdant ir nuostolius, kurie atsiranda nuolatinės srovės dalyje. Norint pasiekti šį balansą, viena stotis valdo nuolatinės srovės dalies įtampą, o kita stotis valdo tiesioginį galios perdavimą.



Pav. 1.10. Ekvivalentinės sistemos modelis.

Pagal Pav. 1.10 :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_s L \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ω_s – kampinis kintamosios srovės dažnis, $v_{d;q;d1;q1}$, atitinkamai d ir q komponentės bendrojo jungties taško (PCC) įtampos ir VSC išeities įtampų. Srovės tekančias tarp kintamosios srovės tinklo ir VSC sistemos atitinka i_d ir i_q .

Lygtis (1) gali būti išreikšta per kompleksinę lygtį naudojant erdvės vektorius:

$$V_{dq} = R * i_{dq} + L \frac{d}{dt} i_{dq} + j\omega_s L * i_{dq} + v_{dq1}, \quad (2)$$

$$V_{dq} = R * I_{dq} + j\omega_s L * I_{dq} + V_{dq1}, \quad (3)$$

Momentinis aktyviosios ir reaktyviosios galios perdavimas iš kintamosios srovės tinklo į įtampos šaltinio pagrindo keitiklį yra proporcingas d-ašies ir q-ašies srovėms, kaip nurodoma (4) ir (5) lygtyse.

$$p_{ac}(t) = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d, \quad (4)$$

$$q_{ac}(t) = v_q i_d - v_d i_q = -v_d i_q, \quad (5)$$

Norint rasti srovę tekančią iš kintamosios srovės tinklo į VSC :

$$I_{dq} = \frac{V_{dq1} - V_{dq}}{jX_L} = \frac{V_{d1} - V_d}{jX_L} + \frac{V_{q1}}{X_L}, \quad (6)$$

Kur $X_L = j\omega_s L$ yra keitiklio transformatoriaus, ir reaktoriaus tarp VSC ir bendrojo jungties taško reaktyvumas.

O aktyviosios galios iš kintamosios srovės sistemos į VSC turėtų būti:

$$P_{ac} + jQ_{ac} = V_{dq} I_{dq}^* = V_d I_{dq}^*, \quad (7)$$

Išsprendę 6 lygtį, gauname atitinkamai (7;8;9)

$$P_{ac} = -\frac{V_d V_{q1}}{X_L}, \quad (8)$$

$$Q_{ac} = \frac{V_d}{X_L} (V_d - V_{d1}), \quad (9)$$

Tipinė VSC valdymo sistema naudojama AİNS jungtyse yra uždaras ratas, kurio struktūra susideda iš greitesnio vidinių srovių ciklo ir lėtesnio išorinio valdymo rato kuris sukuria d-ašies ir q-ašies srovių atskaitos taškus, kuris naudojamas srovės ciklo valdiklio.

Aktyviosios galios valdymui VSC naudoja d-ašies atsikaitą kaip gaunama formulėje (4):

$$i_d^* = \frac{P_{ac}^*}{V_d}, \quad (10)$$

Čia P^*_{ac} , yra norimos perduoti galios dydis.

Reaktyviosios galios valdymui naudojamas q-ašies srovės atskaitos dydis pagal (5) formulę:

$$i_d^* = \frac{-Q^*_{ac}}{v_d}, \quad (11)$$

$$v_{d1}^* = -v_d' + \omega_s L_{i_q} + v_d, \quad (12)$$

$$v_{q1}^* = -v_q' - \omega_s L_{i_d}, \quad (13)$$

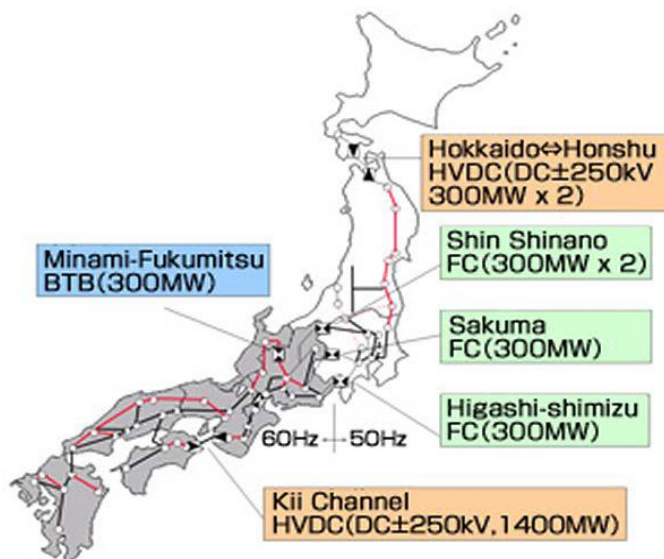
Čia Q^*_{ac} , normas reaktyviosios galios suvartojimas. Pav. 1.10. Galime matyti d-q vektorių valdymo struktūrą, kuri yra naudojama VSC tipo keitikliuose nuolatinės srovės įtampos reguliavimui. Atskaitinės d ir q įtampos, atitinkamai v_{d1} ir v_{q1} , kartu su d ir q įtampomis v_d ir v_q gaunamomis iš srovės ciklo valdiklio, bei kompensavimo sąlygomis (12) ir (13). Dvi atskaitinės įtampos, v_{d1}^* ir v_{q1}^* yra naudojamos generuoti trijų fazių atskaitinei sinusoidinei įtampai v'_{a1} , v'_{b1} ir v'_{c1} ir yra naudojamos valdyti impulso pločio moduliacijos valdikliui.

Teoriškai yra tokia galimybė, jog d-ir q-ašių srovės ir įtampos atskaitos dydžiai sugeneruoti uždaro rato valdiklio gali viršyti fizinius VSC keitiklio apribojimus. Kad taip neatsitiktų yra naudojami ribotuvai, kurie riboja įėjimo dydžius keisdami valdiklio išėjimo signalus[10].

2. AĮNS keitiklių apžvalga

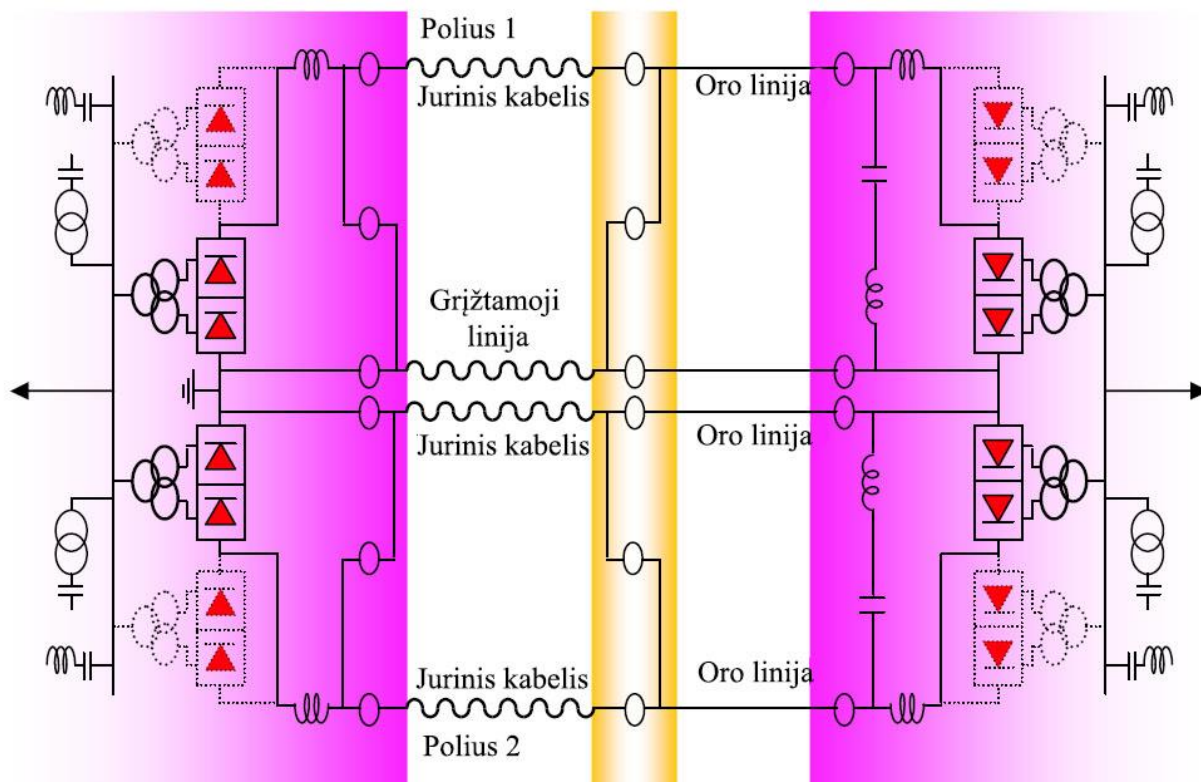
2.1 Kii kanalo AĮNS jungtis (Japonija)

Elektros perdavimo sistema Japonijoje yra ypatinga tuo, jog šalis yra padalinta į du regionus kurių kiekvienas naudojami skirtingu dažniu. Rytinė Japonijos dalis veikia 50 Hz dažniu. Vakarinė-60 Hz. Dažniu skirtumas ir dalina Japonijos nacionalinį perdavimo tinklą. Tai įtakoją jog galios perdavimas tarp šių dalių įmanomas tik dažnio keitiklių arba AĮNS jungčių pagalba[11].



Pav. 2.1. Japonijos AĮNS jungčių tinklas[11]

Kii kanalas buvo antrasis Japonijoje pastatytas AĮNS jungties projektas, jungiantis Honshu ir Hokaido salas. Jo paskirtis buvo tradicinių anglies deginimo elektrinių energijai perduoti.



Pav. 2.2. Kii kanalo AĮNS jungties sandara.

Konfigūracija galime matyti paveikslėlyje aukščiau. Vieno poliaus nominali perdavimo galia yra 1400 MW. Pats AĮNS jungties keitiklis yra dvipolis, su metaline grįžtamoja linija, siekiant sumažinti poveikį aplinkai. Polius susideda iš nuolatinės srovės šynų, oro linijų, jūrinio kabelio ar išlyginamųjų reaktorių. Nuolatinės srovės įtampa 500 kV.

Šis AĮNS jungties keitiklis naudoja LCC technologija, kadangi ji yra tinkamiausia ir patikimiausia technologija, kai reikalingas didelės perduodamos galios kiekis naudojantis tiek jūriniu kabeliu tiek oro perdavimo linijomis.

2.2 Kingsnorth AĮNS jungties keitiklis (Anglija)

Keitiklis kurio nominali galia 640 MW, buvo pastatytas norint sujungti Kingsnorth elektrinę požeminiu kabeliu su dviem stotimis pietinėje ir vakarinėje Londono dalyse. Tikslas buvo užmaitinti dvi pastotes ir sustiprinti lygiagrečiai esantį kintamosios srovės tinklą, nesumažinant jo trumpųjų jungimų srovių.

Kingsnorth keitiklis susideda iš dviejų polių, 6 impulsų, dviejų grupių, sujungtų nuosekliai. Kiekvieno poliaus nominali perduodama galia yra 320 MW, o nuolatinė įtampa 266 kV. Neutralės kabelis jungė atitinkamas stotis Londone, ir perjungimo skirstyklos įrenginiais leido galiai būti perduodamai tarp pastočių. [12]

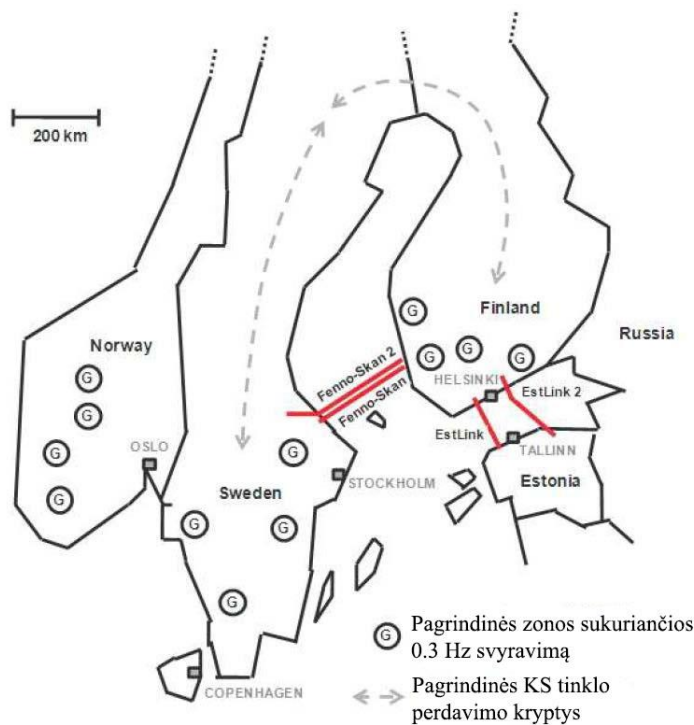
2.3 Fenno-Skan (Suomija ir Švedija)

Suomija turi tiesiogines sinchronines jungtis su Švedija ir Norvegija, tačiau greta su kaimyninėmis šalimis turi ir 5 AĮNS jungtis. Lentelėje žemiau pateiktos keturios iš jų, kurias galima laikyti Suomijos perdavimo tinklo dalimi. O „Vyborg“ BTB stotis, naudojanti LCC-AĮNS technologiją, jungianti nesinchroninius tinklus tarp Suomijos ir Rusijos, yra pačioje Rusijoje, netoli Vybur miesto.

Lentelė 2.1. Suomijos AĮNS jungtys

Stoties pavadinimas	Pradėjo veiklą	Linijos ilgis
Fenno-Skan	1989	Jūrinis kabelis 200 km.
EstLink	2003	Jūrinis kabelis 130 km.
Fenno-Skan2	2011	Jūrinis kabelis 200 km. Ir 70 km oro linija
EstLink2	2014	Jūrinis kabelis 130 km. 30 km oro linija; 10 km. požeminio kabelio

Norint paaiškinti dviejų Fenno-Skan AĮNS jungčių svarbą, būtina suprasti šios konkrečios infrastruktūros savybes. Kaip ir rodoma paveikslėlyje žemiau, Fenno-Skan jungtys yra pastatytos lygiagrečiai jau egzistuojančio kintamosios srovės tinklo ir 2000 km ilgio linija jungia pietų Suomiją su pietine Skandinavijos dalimi. Dėl linijos ilgio, ir kelio tarp pietinės Suomijos, kuri yra pagrindinė energijos generacijos bei suvartojimo zona, ir pietų Skandinavijos, kintamosios srovės galios perdavimo į pietų Suomiją yra ribojamas dėl stabilumo. Perduodant galią iš pietų į šiaurės kryptį sukuriama 0.3 Hz svyravimą vidiniame tinkle[13].

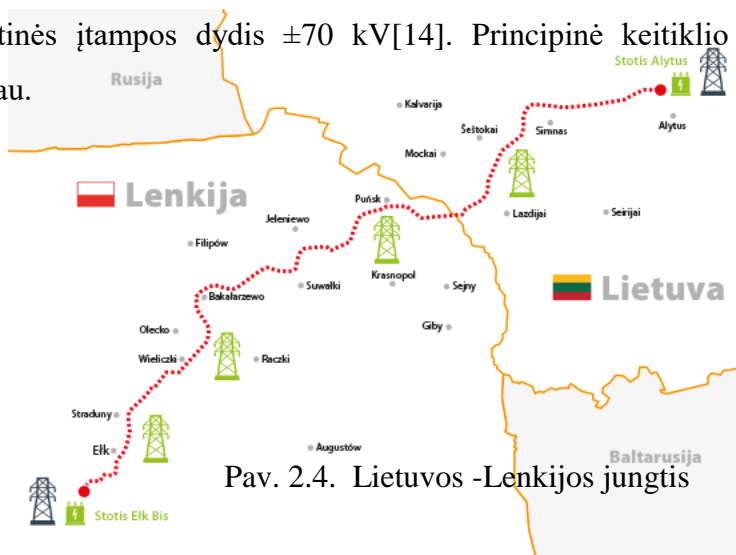


Pav. 2.3. AİNS jungtys Suomijoje ir galios perdavimo kryptys[13]

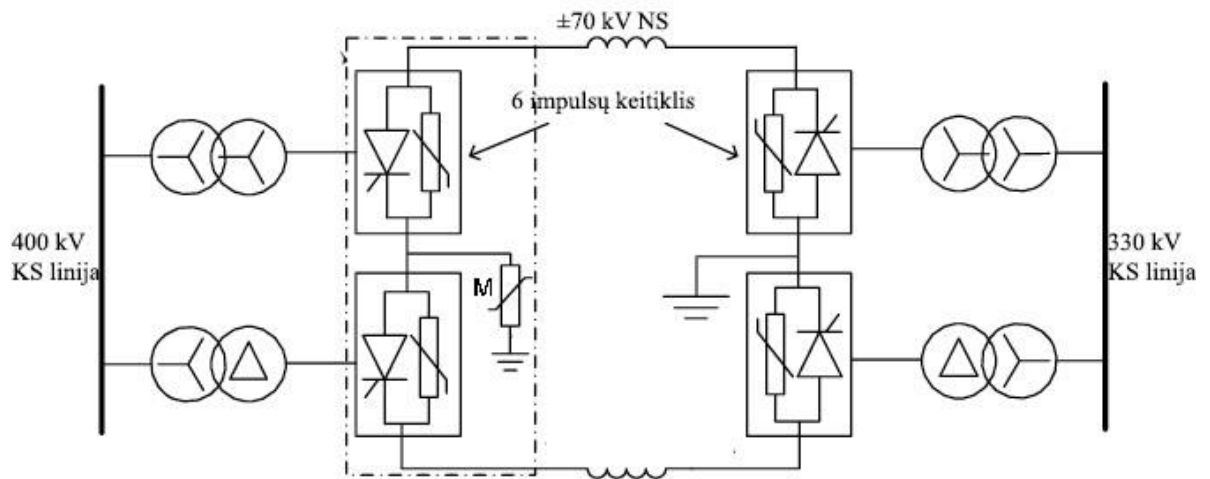
Atsižvelgiant į abejas stabilumo problemas, Fenno-Skan lokaciją yra tiesiog ideali atsižvelgiant į AİNS jungčių sukuriama naudą. Ši jungtis sujungia dvi zonas, kurios vieną kitą veikia 0.3 Hz svyravimais, valdymo sistema sugeba sukontroliuoti šį svyravimą. Bet didžiausias tinklo stabilumo indėlis iš AİNS jungties yra jog perduodant galią keitikliu, yra atlaisvinamas kintamosios srovės tinklo apkrautumas, kuris sukeldavo įtampos stabilumo problemas. Kurios aktyvuodavo apsaugas, ribojančias kintamosios srovės galios perdavimą[13].

2.4 LitPol link (Lietuva-Lenkija)

Litpol link yra istoriškai svarbus objektas. Tai ne tik pirmasis aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklis Lietuvoje, bet tuo pačiu ir pirma kontinentinė jungtis su vakarų Europa. Principinis keitiklio tipas yra BTB LCC-AİNS keitiklis. Lietuvą ir Lenkiją jungia dvi grandė 163 km. oro linija, kurios teorinis sinchroninis pralaidumas yra 2400 MW. Jungties nominali perduodama galia 500 MW, nuolatinės įtampos dydis ± 70 kV[14]. Principinė keitiklio schema pateikiama paveikslėlyje žemiau.



Pav. 2.4. Lietuvos -Lenkijos jungtis



Pav. 2.5. Principinė BTB LitPol link schema.

Keitiklio tipas buvo pasirinktas, dėl to jog jungtis jungia du nesinchroninius tinklus. Jungtyje naudojami tiristoriniai vožtuvai.

2.5 NordBalt link (Lietuva-Švedija)

NordbBalt yra antroji AİNS jungtis pastatyta Lietuvoje, eksploatacija pradėjo 2016 m. Jungtis jungia Lietuvą ir Švediją jūriniu 450 km. ilgio kabeliu. Statybų metu, šis kabelis buvo ilgiausias pasaulyje ekstruzijos metodu pagamintas ir eksploatacijai naudojamas kabelis. Kuris susideda iš 400 km jūrinio kabelio, 40 km. ir 10 km. antžeminio kabelio esančio atitinkamai Švedijoje ir Lietuvoje. AİNS jungtis yra VSC tipo keitiklis naudojantis IGBT vožtuvus. Nominali keitiklio galia 700 MW, nuolatinės srovės kabelis yra po ± 300 kV įtampa[15].



Pav. 2.6. NordBalt Lokacija ir kabelio trasa.

3. Integruotų AĮNS keitiklių eksploataciniai trūkumai ir sprendimo būdai

Tai nauja technologija turinti tradicinių požymių, tad neatsiejamai iškyla tam tikrų trūkumų susijusių su šia technologija. Šiame skyriuje apžvelgsiu keletą iššūkių susijusių su integruotų aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių eksploatacija.

3.1 Pagrindiniai trūkumai

Pirmasis trūkumas kurį aptarinėsiu, tai patikimos, stabilios konfigūracijos ir šių sistemų valdymo teorijos pagrindai. Yra daugybė modelių naudojamų tradicinėms aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliams projektuoti. Nepaisant to, reikalingos išsamios studijos norint integruoti AĮNS jungtį į bendrąjį tinklą. Būtina atsižvelgti į galios srautus, pereinamuosius procesus, būtinų signalų stabilumą ir kitų parametrų suderinamumą norint tinkamai valdyti VSC tipo stotis. Paminėtos sąlygos sukuria būtinybę, pastoviai tobulinti ir modernizuoti esamus AĮNS jungčių tipinius projektus, jog nauji projektai galėtų įsilieti į egzistuojančius tinklus be jokių trukdžių.

Antrasis trūkumas yra integruotojo AĮNS keitiklio ir esamos kintamosios srovės tinklo infrastruktūros galimybės. Kadangi aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai negali veikti vieni, nepriklausomai nuo kintamosios srovės tinklo. Yra būtina atlikti sistemos stabilumo studijas, galimų galios srautų skaičiavimus jog būtų išlaikytas balansas, pereinamųjų procesų įtaka su esamu kintamosios srovės tinklu.

3.2 Sprendimo būdai

3.2.1 Integruoto AĮNS keitiklio modeliavimas

Tikslūs modeliai yra ypatingai svarbios dalys norint tinkamai integruoti keitiklį į esamą tinklą, slopinti galimą dažnių svyravimą, pereinamųjų procesų reguliavimą. Šiame darbe sumodeliuosi VSC tipo keitiklio modelį, galintį analizuoti pagrindinius parametrus

3.2.2 Turimo modelio tobulinimas

Norint pagerinti AĮNS jungčių stabilumą ir pasiekti maksimalios įmanomos perduoti galios dydį, modelis turi būti atitinkamai pagal gautus rezultatus tobulinamas. Tobulinimui bus naudojamas naujas valdymo metodas siekiantis sumažinti galios perdavimo svyravimus. Siūlomas tobulinimas naudosis kampinį dažnį dviejose VSC tipo stočių terminaluose kaip užduodamąją vertę, naudojantis π valdymo metodu.

3.2.3 Sistemos efektyvumo įvertinimas

Gautas patobulintas modelis įvertins AĮNS jungties pagrindinius parametrus ir sąveiką su tinklu.

4. Teorinis integruotos AĮNS jungties galios valdymo paaiškinimas

Lyginant su tradicine kintamosios srovės tinklo infrastruktūra, AĮNS linijos leidžia ne tik nustatyti galios srauto dydį, bet ir keisti srauto kryptį. Pav. 1.9. galime matyti ekvivalentinį VSC-AĮNS jungties modelį, kuris susideda iš dviejų VSC tipo pastočių. Viena stotis dirba keitiklio režimu, likusi- lygintuvo. Kiekviena VSC stotis turi dviejų lygių valdymo galimybes. Viena iš jų yra reaktyviosios galios valdymas, kita- aktyviosios galios arba nuolatinės įtampos reguliavimas.

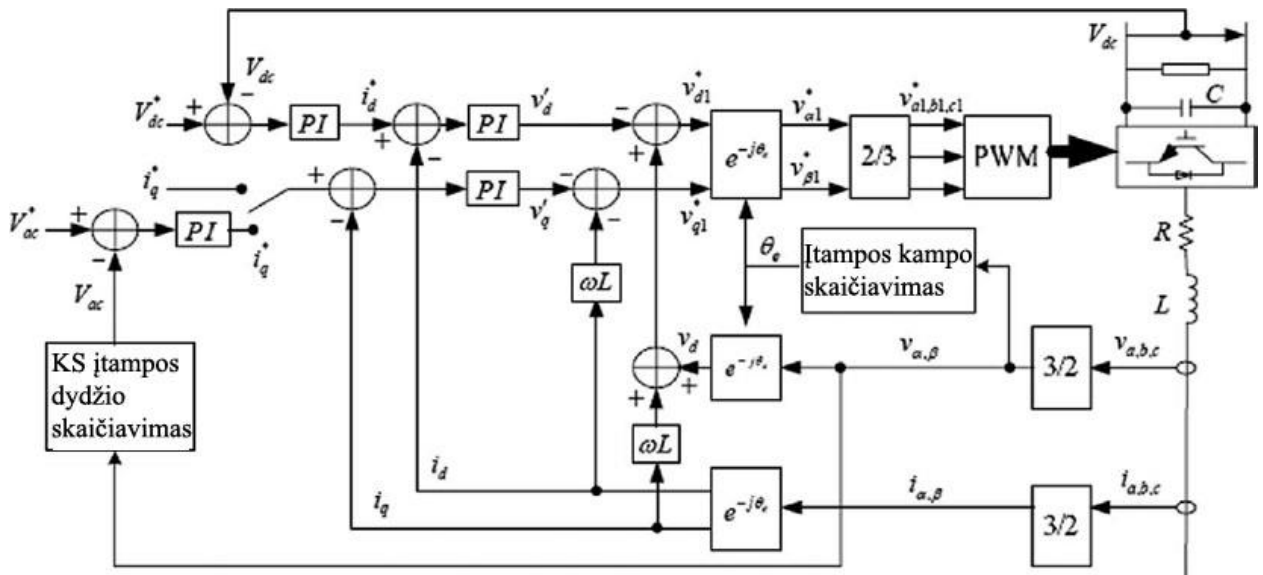
Kaip matome Pav. 1.9, VSC-AĮNS sistema leidžia nepriklausomą aktyvios ir reaktyviosios galios valdymą. Techniniu principu, kiekviena VSC stotis gali valdyti reaktyviają galią, o įtampos reguliavimas priklausomas vienai stotiai nuo kitos. Tačiau aktyviosios galios srautas nuolatinės srovės sistemoje turi būti subalansuotas, jog aktyvioji galia įtekanti į AĮNS jungtį turi būti lygi ištekančiai pridėdant sisteminius nuostolius. Norint išlaikyti pusiausvyrą, viena iš VSC stočių sukurta valdyti NS įtampą, kita stotis gali valdyti aktyviają galią.

Pagal pirmame skyriuje aptartus d-q atskaitos taškus vykstant galios perdavimui, kintamosios srovės sistemos aktyvioji P_{ac} ir reaktyvioji Q_{ac} galios yra valdomos per q ir d komponentes V_{q1} ir V_{d1} . P_{ac} ir Q_{ac} gali būti atvaizduojama pagal (8) ir (9) formules.

Jeigu VSC stotis yra naudojama aktyviosios galios valdymui, tai pagal nominalią VSC stoties galią ir impulso pločio moduliacijos įsisotinimo ribas, sistema turi veikti jog pasiektų aktyviosios galios nustatytą dydį, siekiant išlaikyti mažiausią skirtumą tarp užduotosios ir suvartojamosios reaktyviosios galios.

Integruotosiose sistemose, jungtys tarp kintamosios srovės tinklų yra ne vien nuolatinės srovės perdavimo linijos, bet ir kintamojo tinklo sudėtinės dalys. Todėl dažniai dviejose VSC stotyse kintamojo srovės tinklo dalyse turi būti tokie patys. Dažnių skirtumas gali sukelti nestabilumą vienoje iš stočių. Norint sumažinti aktyviosios galios svyravimus, dažnių skirtumas tarp stočių gali būti nustatomas kaip atskaitos tako įvestis. Tokiu būdu sumažinant galios svyravimą.

Toliau nagrinėsiu šio valdymo principo išreiškimą formulėmis, naudojantis 6 impulsų, 4 keitiklių sistemą integruotą į AĮNS jungtį.



Pav. 4.1. Tipinė d-, q- vektorių valdymo struktūra.

Tipinė VSC-AİNS jungčių galios perdavimo valdymo schema pateikta Pav. 4.1. Iš paveikslėlio galime matyti tipinę d-q vektorių valdymo struktūrą, kai VSC yra naudojamas NS įtampos reguliavimui.

Pagal (12) ir (13) lygtis, atskaitinės d ir q įtampos v_{d1}^* ir v_{q1}^* , apima ir d, q įtampas v_d^* ir v_q^* , gautomis iš srovės ciklo valdiklių, bei kompensavimo sąlygas, aprašytas šiose lygtyse. Atskaitinės v_{d1}^* ir v_{q1}^* įtampos yra naudojamos generuoti, trifazei sinusoidinei įtampai v_{a1}^* , v_{b1}^* ir v_{c1}^* , kuri valdo impulso pločio moduliaciją.

Norint pagerinti dinaminį AİNS jungties rodiklius, galios valdymo ciklas turi būti panaudojamas sistemoje. Naudojantis (10) formule $id = \frac{P_{ac}}{V_d}$, Taigi P_{ac} gali būti išreikštas:

$$P_{ac}^* = P_{ac}^* + P_{comp}^* \quad (14)$$

P_{ac}^* yra nustatyta reikšmė, pagal užduotą galios perdavimą;

P_{comp} papildomas atskaitos dydis, skirtas kompensuoti galios svyravimus sistemoje.

Galios perdavimas tarp dviejų kintamosios srovės tinklų:

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2), \quad (15)$$

E_1 ir E_2 yra kintamosios srovės dydis atitinkamose VSC stotyse,

δ_1 ir δ_2 yra fazės kampai atitinkamose VSC stotyse.

$$P_{osc} = P - P_0 = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} [\sin(\delta_1 - \delta_2) - \sin(\delta_{10} - \delta_{20})], \quad (16)$$

nes $(\delta_1 - \delta_2) = (\omega_1 - \omega_2) * t + (\delta_{10} - \delta_{20})$ ir gali būti išreikšta:
 $\sin(\omega_1 - \omega_2) * t + (\delta_{10} - \delta_{20}) - \sin(\delta_{10} - \delta_{20})$.

$$P_{osc} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \{\sin[(\omega_1 - \omega_2) * t + (\delta_{10} - \delta_{20})] - \sin(\delta_{10} - \delta_{20})\}. \quad (17)$$

$(\delta_{10}-\delta_{20})$ yra konstanta kuri priklausoma nuo pirminių fazių kampų skirtumo sąlygų, kuris susidaro tarp skirtingų VSC pastočių terminalų. Atitinkamai $\sin(\delta_{10}-\delta_{20})$ irgi yra konstanta.

$(\omega_1-\omega_2)$ yra dviejų kintamosios srovės tinklų dažnio skirtumas. Dažnis yra nuo laiko priklausomas kintamasis, dėl to svarbu jog dažnių skirtumas taip pat būtų priklausomas nuo laiko.

Jeigu

$$\omega_{\Delta} = \omega_1 - \omega_2 ; k_1 = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} ; k_2 = \delta_{10} - \delta_{20} ; k_3 = k_1 * k_2$$

$$\begin{aligned} P_{osc} &= k_1 * [\sin(\omega_{\Delta} * t + k_2) - k_2] = k_1 * \sin(\omega_{\Delta} * t + k_2) - k_3 \\ &= k_1 * [\sin(\omega_{\Delta} * t) * \cos k_2 + \sin k_2 * \cos(\omega_{\Delta} * t)] - k_3 \end{aligned}$$

Tai S-plotmėje :

$$\mathcal{L}(P_{osc}) = P_{osc} = k_1 * \cos k_2 * \frac{\omega_{\Delta}}{s^2 + \omega_{\Delta}^2} + k_1 * \sin k_2 * \frac{s}{s^2 + \omega_{\Delta}^2} - \frac{k_3}{s}, \quad (18)$$

Iš (18) formulės, galios srauto svyravimas S-plotmėje tarp dviejų sistemų gali būti išreiškiamas s ir ω_{Δ} funkcija, kur ω_{Δ} yra nepriklausomas įvesties dydis.

Siekiant sumažinti galios srauto svyravimus, pasitelkiamas realiu laiku valdomas galios atskaitos dydis P_{cmp} , kurį atimant iš aktyvios galios perdavimo dydžio, nustatomas kintantis kompensavimo dydis P_{osc} .

S-plotmėje, kompensuojamoji gali, P_{cmp} atvaizduojama $P_{cmp} = \text{valdiklis} * (\text{O}_1 * \text{O}_2)$

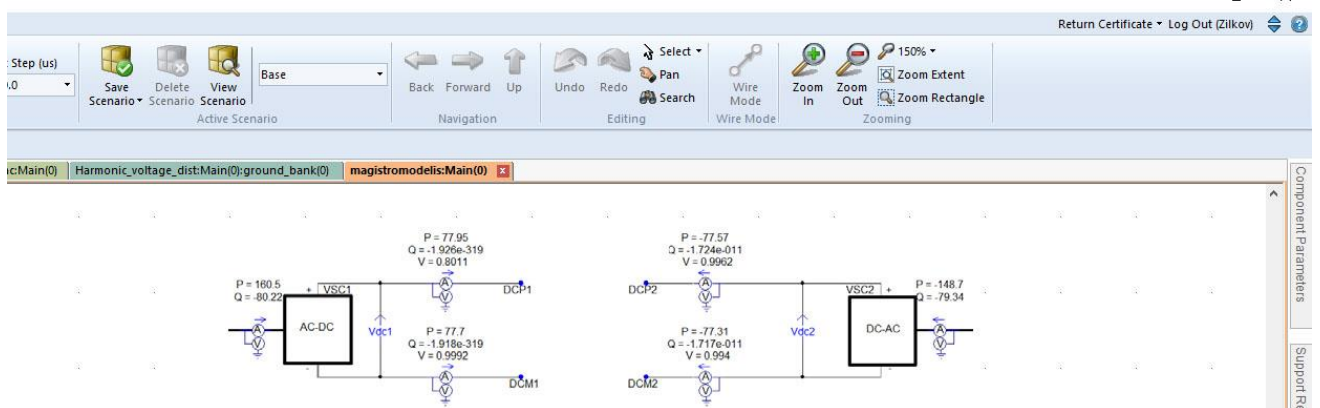
kur O_1 ir O_2 , kintamosios srovės sistemos kampiniai dažniai atitinkamai kiekviename terminale. Iš ko galima naują galios svyravimo tarp dviejų zonų su įdiegta kompensavimo verte gali būti atvaizduojama $P_{osc} - P_{cmp}$.

Tarkime jog visa aktyvi galia perduodama per AİNS liniją yra suma pastovios aktyviosios galios ir galios svyravimo suma. Su kompensavimu tikrasis galios srautas gali būti išreikštas $P_{visa} = P_{const} + P_{osc} - P_{cmp}$. Vienas iš pagrindinių tikslų yra sumažinti svyravimo ir kompensavimo dydžius. Ir naudojantis dažnių skirtumo užduodamo atskaitos dydžio, pasirinktas integruotasis AİNS jungties modelis turės geresnis pereinamųjų procesų charakteristikas. Sekančiame skyriuje detalai nagrinėsiu modeliuojamą struktūrą.

4.1 VSC-AİNS modelio aprašymas

Kaip minėjau ankstesniuose skyriuose, VSC-AİNS sistema pagrinde susideda iš trijų dalių: lygintuvo stoties, keitiklio stoties ir perdavimo linijų. Pav. 4.2. Matoma tipinė VSC-AİNS keitiklio konfigūracija. Bazinis modelis pasirinktas iš PSCAD, AİNS jungčių bibliotekos. Modelis

bus naudojamas integruoti į egzistuojantį kintamosios srovės tinklą. Šio tipo jungtis modeliavimui pasirinkta, kadangi jai nereikalingi harmonikų filtrai. Keitiklio ir lygintuvo konfigūracijos iš principo yra vienodos, skiriasi tik galios srauto kryptis.

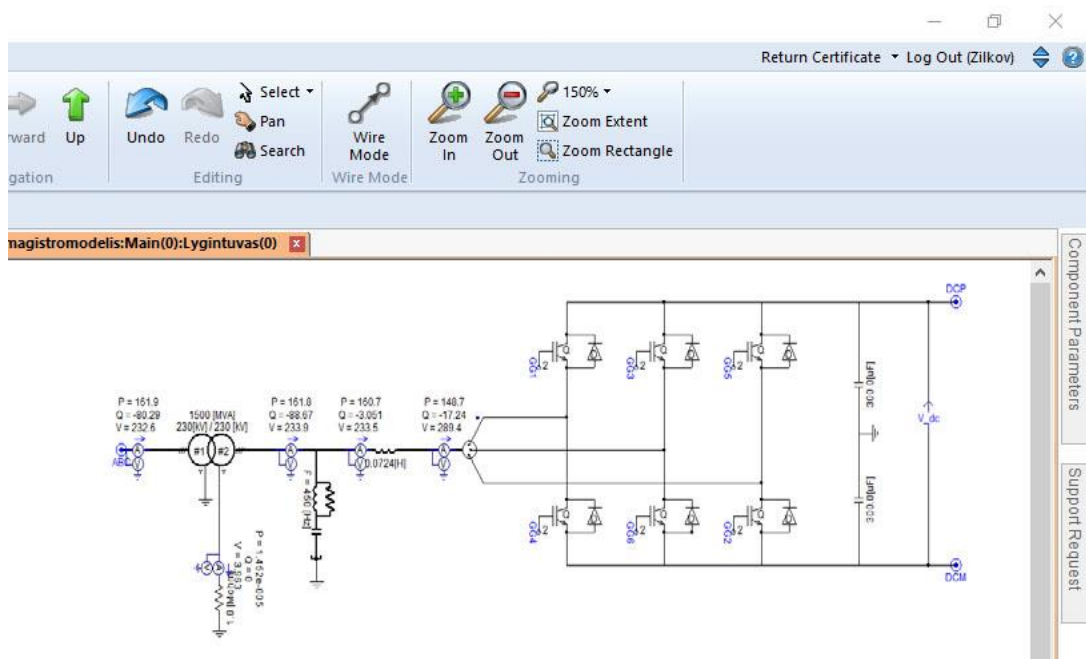


Pav. 4.2. VSC-AİNS konfigūracijos modelis.

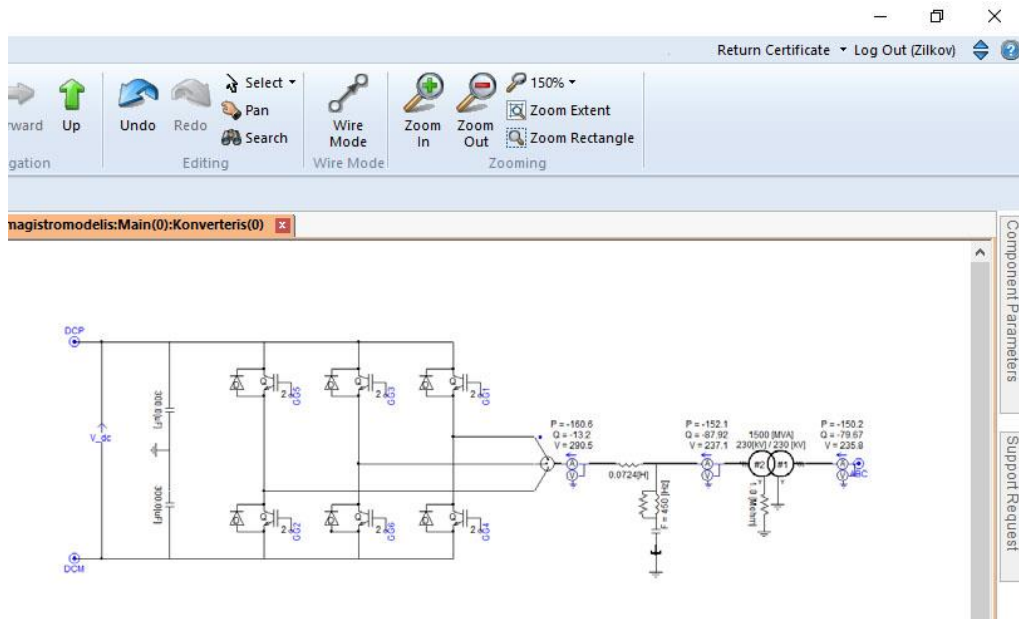
Norint išlaikyti aktyviosios galios balansą, srautas įtekantis į keitiklį turi būti lygus ištekančiam srautui, pridėdant galios nuostolius patiriamus NS kabeliuose ir VSC stotyje.

Keitiklio ir lygintuvo valdymui, įtampos lygis nustatomas kaip atskaitinis dydis, ir yra nekeičiamas dydis lygintuvo pusėje, o įtampa keitiklio pusėje automatiškai derinama, kad atitiktų perduodamos galios poreikį.

Paprastai d-, q- vektoriai valdo VSC-AİNS, ir užduotos galios dydis yra nekintanti reikšmė keitiklio pusėje. Galios atskaitinis dydis lygintuvo pusėje bus nuolatos kintantis, ir priklausomas nuo viso srauto tekančio iš keitiklio ir nuolatinės srovės linijų nuostolių.



Pav. 4.3. Lygintuvo konfigūracija PSCad programinėje įrangoje.



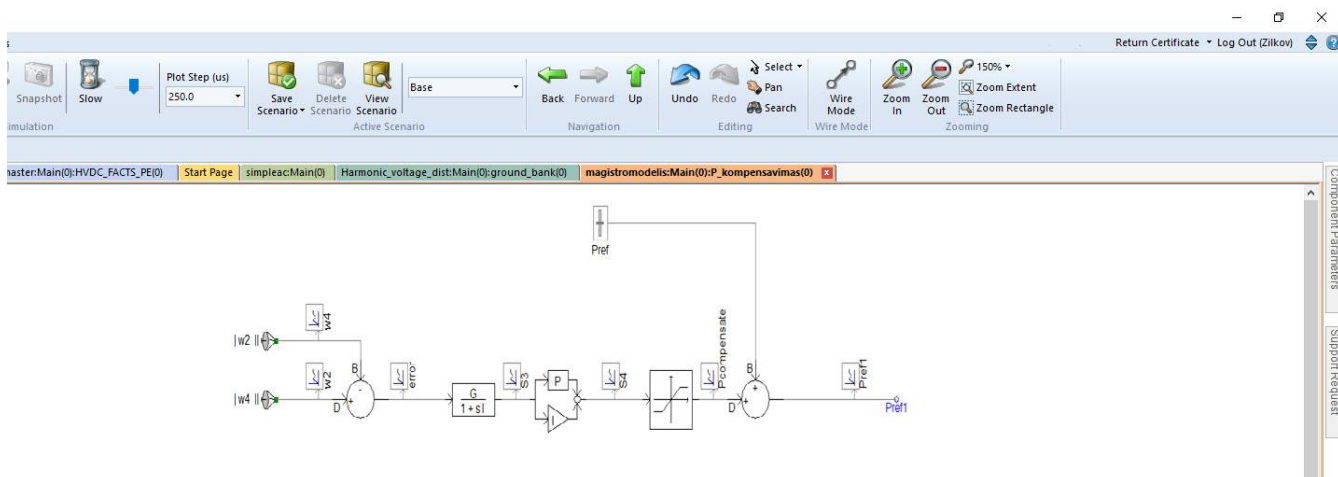
Pav. 4.4. Keitiklio konfigūracija PSCad programinėje įrangoje.

Norint naudoti bazinį modelį, jis turi būti pritaikytas tinklui, kuriame atlikinėsime pereinamųjų procesų bandymus. Tiriomojo tinklo modelis pasirinktas pagal IEEE biblioteką ir aprašomas 5 skyriuje. Atitinkamai pagal šio tinklo parametrus, AĮNS modeliui keičiami keitiklio transformatoriaus pagrindiniai parametrai: įtampa pakeičiama į tinklo 230kV, galingumas 1500 MVA.

Laisvai prieinamose bibliotekose esantys baziniai modeliai, savo sudėtyje yra senų projektų pavyzdžiai. Siekiant pagerinti sistemos pereinamuosius procesus, į standartinį modelį yra įdiegiamas galios svyravimų/kompensavimo valdiklis. Šio valdiklio blokinė diagrama yra Pav. 4.5. Neatsižvelgiant į keitiklio užduotos galios nominalų dydį, esant galios svyravimui, galia bus kompensuojama, taip sukuriant stabilumą. Kaip matome iš Pav. 4.5. valdiklio įėjime yra nurodomas dažnių skirtumas tarp VSC stočių, o išėjime galios užduodamasis dydis keitiklio stočiai. PI Valdiklis yra naudojamas kartu su ribotuvu, kuris riboja reaktyviosios galios kompensavimą.

$$P_{comp} = (\omega - \omega_2) * (K_p + \frac{K_i}{s}) \quad (19)$$

Dažnių skirtumas tarp lygintuvo ir keitiklio stočių naudojamas kaip užduodamoji vertė galios kompensavimo valdymui.



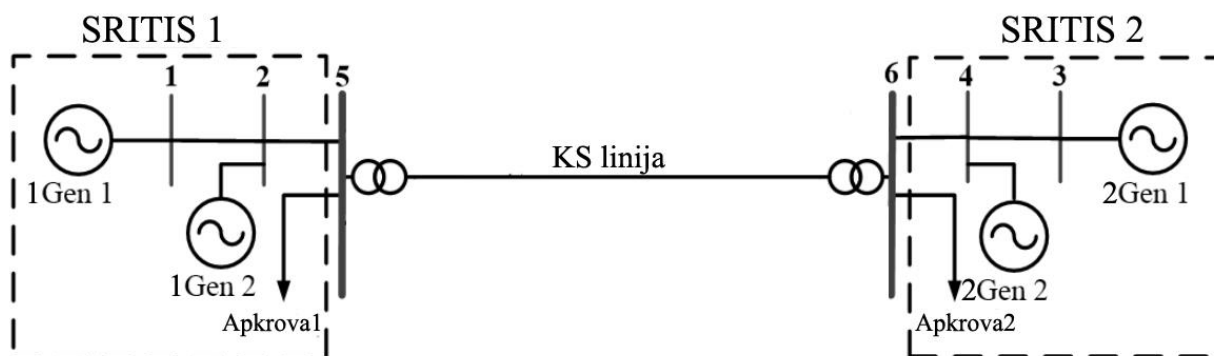
Pav. 4.5. Galios kompensavimo blokinė diagrama.

Blokinė diagrama apibūdina galios kompensavimo sistemą S plotmėje. Kaip minėta anksčiau įėjimas yra dažnių skirtumo vertė, po kurio matome žemo dažnio filtrą, PI valdiklį, ribotuvą. Pref1 šiuo atveju yra galios užduotoji vertė keitikliui. Ribotuvo nominaliosios tiek viršutinėje, tiek apatinėje ribų dalyje yra pakankamai mažos. Galios kompensavimas tokiu atveju yra $\pm 5\%$. Galios kompensavimo valiklis buvo pridėtas remiantis AĪNS tyrimo centro Manitoboje atliktais tyrimais.

Atsižvelgiant į galios srautus, kompensacija yra nedidelė. O įdiegimas įrangos, lyginant su galimo projekto kaštais, būtų neapčiuopiamai mažas.

5. Etaloninio tiriamojo modelio aprašymas

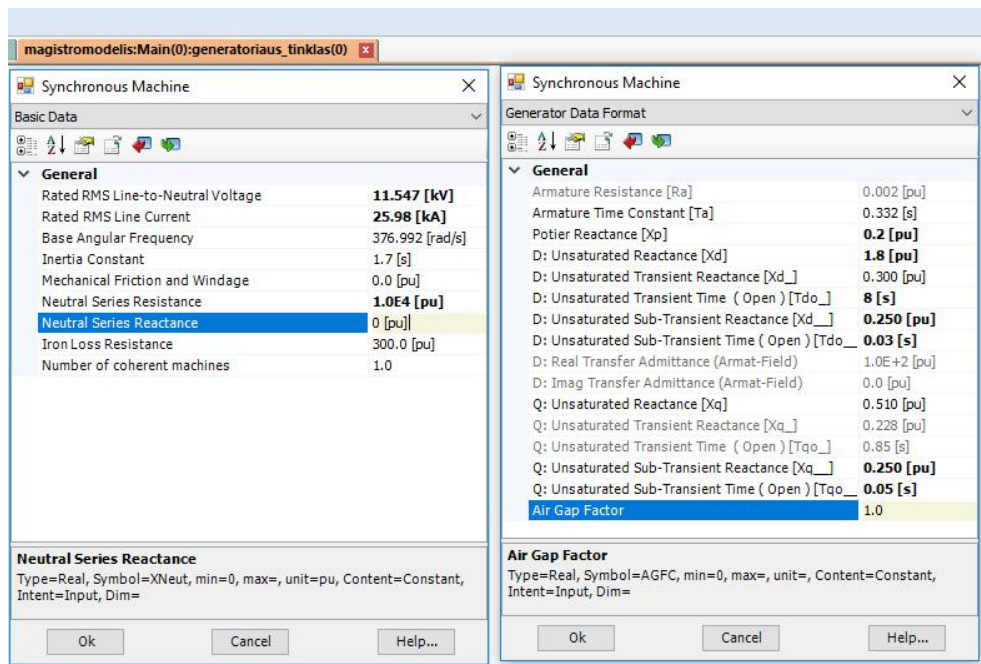
Norint iširti tinklą pastovumo būsenoje ir pereinamųjų procesų metu, naudosiu iš IEEE bibliotekos pasirinktą 6 šynų, 4 agregatų tinklą, kurio nominali įtampa yra 230 kV. Tinklas turi 4 sinchronines mašinas ir dvi nekintančias apkrovas.



Pav. 5.1. Linijinė 6 šynų 4 generatorių schema.

5.1 Generatoriai

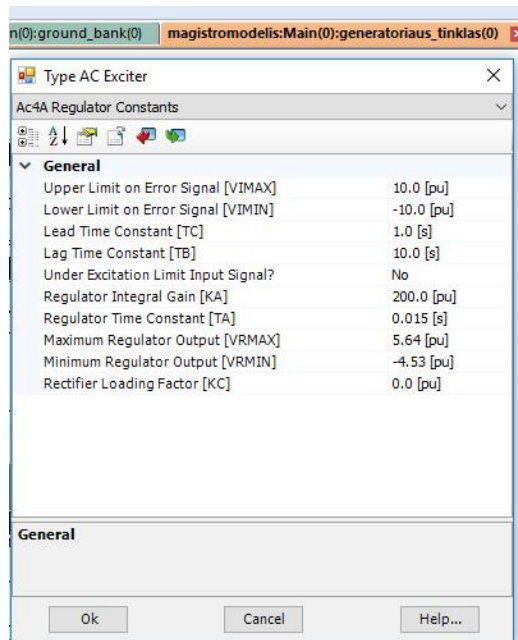
Naudojau generatorių pasirinktą iš pagal IEEE standartą, F20, parametrai: 896 MVA, 26 kV.



Pav. 5.2. Generatoriaus duomenys iš IEEE duomenų bazės.

5.2 Sinchroninės mašinos žadintuvus

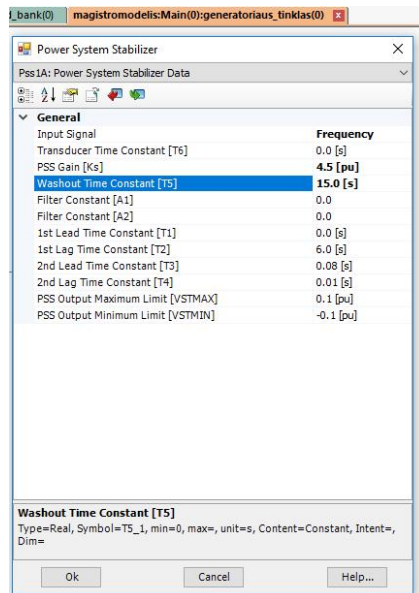
Naudojamas žadinimo įrenginys taip pat pasirinktas iš IEEE bazės ir yra AC4A. Pasirinktos vertės pagal nutylėjimą iš PScad programinės įrangos.



Pav. 5.3. Žadintuvo parametrai.

5.3 Energijos sistemos stabilizatorius (PSS)

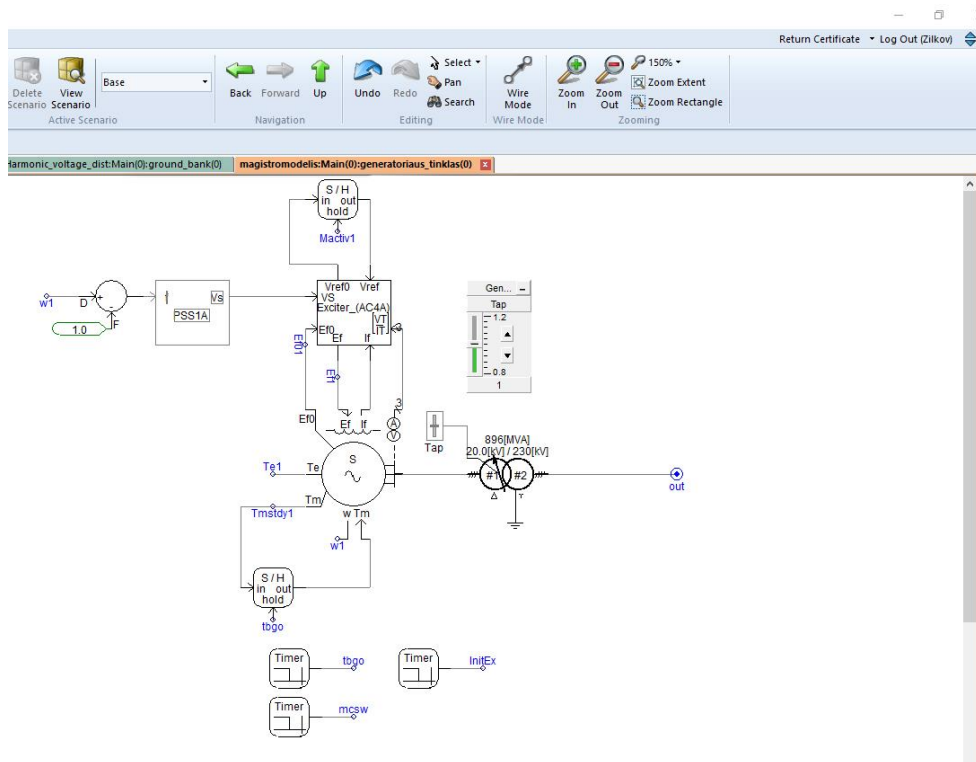
Šiame modelyje taip pat naudosiu stabilizatorių skirtą kontroliuoti dažnį.



Pav. 5.4. Dažnio stabilizatoriaus parametrai.

5.4 Bandomasis tinklas

Paveikslėlyje žemiau Pav. 5.5. matome bandomojo tinklo sistemą.



Pav. 5.5. Testuojamasis tinklas.

5.5 KS perdavimo linija

Perdavimo linija sumodeliuota kaip apjungtoji Pi dalis kartu su varža, indukcinium reaktyvumu ir talpumu. Perdavimo linijų parametrai pasirinkti pagal IEEE standartų lentelę. O ilgiai nurodyti 5.5.1 lentelėje.

Lentelė 5.5.1 Linijų ilgiai.

Nuo šynos	Iki šynos	Atstumas km.
1	2	25
2	5	10
5	6	220
6	4	10
4	3	25

5.6 Apkrova

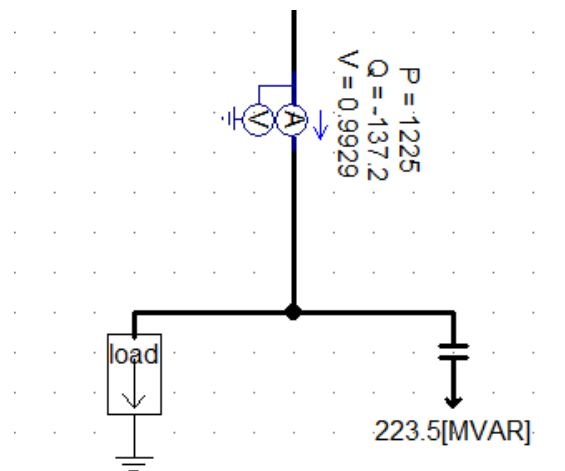
Apkrova yra sumodeliuota naudojant trifazę nekintančią apkrovą kartu su trifaze talpine apkrova, apkrovos sujungtos trikampiui. Apkrova gali būti išreiškiamas kaip įtampos ir dažnio funkcija, o tikrosios aktyvioji ir reaktyvioji apkrovos yra išreiškiamos atskirai:

$$P = P_0 * \left(\frac{V}{V_0}\right)^{NP} * (1 + K_{PF} * dF), \quad (20)$$

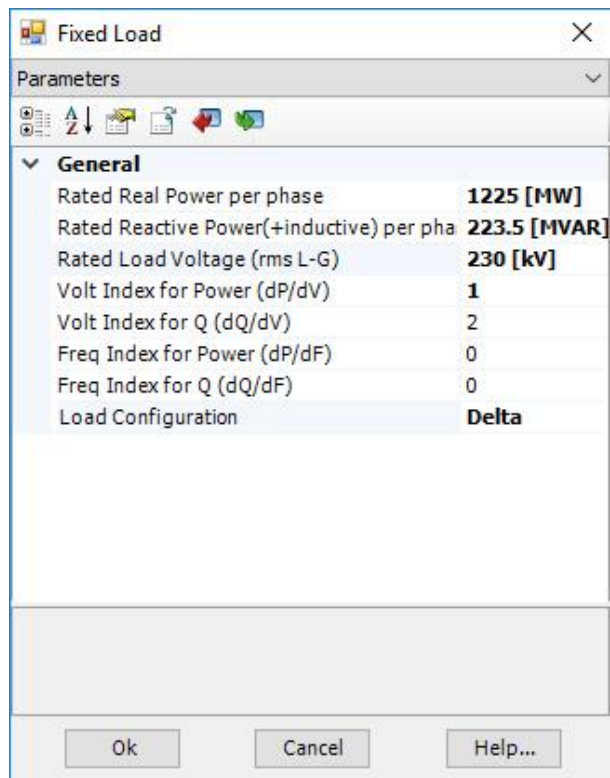
$$Q = Q_0 * \left(\frac{V}{V_0}\right)^{NQ} * (1 + K_{QF} * dF). \quad (21)$$

P- ekvivalentinė galia, P_0 nominali galia fazei. Vis- apkrovos įtampa, V_0 – nominali apkrovos įtampa (RMS). NP- galios indeksas, K_{PF} – aktyvios galios dažnio indeksas. Q ekvivalentinė reaktyviosios galios apkrova. Q_0 nominali reaktyviosios galios per fazę reikšmė. NQ- reaktyviosios galios įtampos indeksas. K_{QF} reaktyvios galios dažnio indeksas.

Modeliavimui pasirinkta jog įtampos indeksas = 1, reaktyviajai galiai = 2, dažnio indeksai lygus 0.



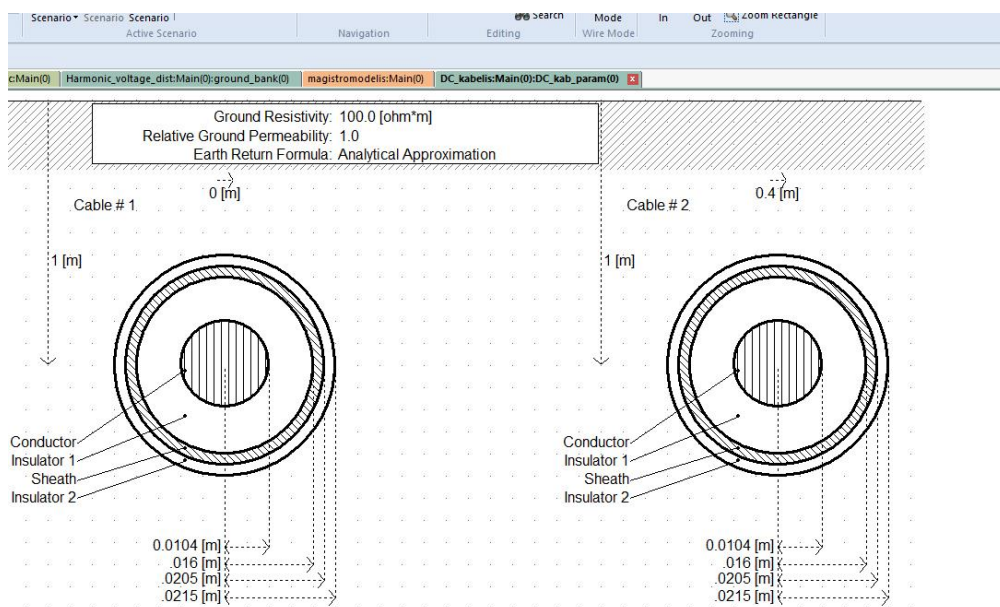
Pav. 5.6. Apkrovos modelis.



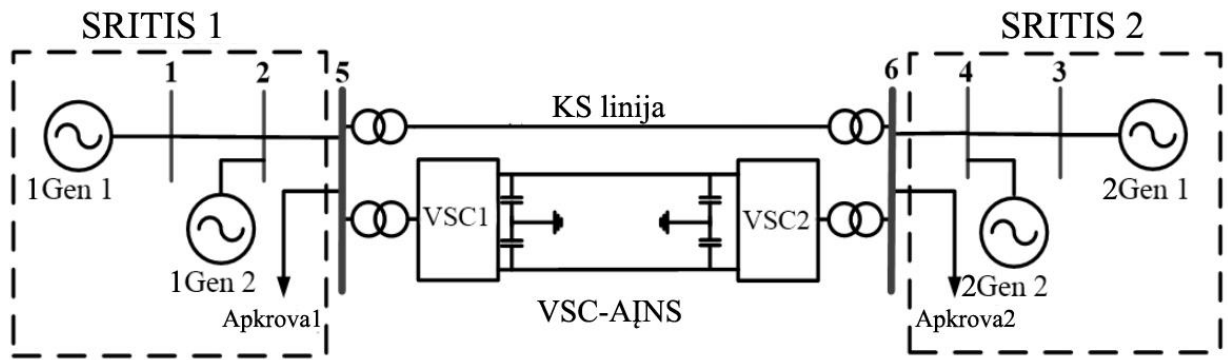
Pav. 5.7 Apkrovos parametrų nustatymai

5.7 AĮNS kabelis

AĮNS kabelis gali perduoti galią vietoj arba lygiagrečiai kintamosios srovės tinklo. Pasirinkto kabelio nominali įtampa yra 300 kV, dvipolės konfigūracijos.



Pav. 5.7. AĮNS kabelis naudotas modelyje.



Pav. 5.8. AĪNS jungties integravimas į tinklą

6. Tinklo parametrų tyrimas

Norint ištirti pasirinkto tinklo parametrus, būtina atlikti bandymus esant trejoms skirtingoms aplinkybėms.

Pirmu atveju tinklas susidarys tik iš kintamosios srovės perdavimo linijų. Ilga linija jungianti dvi sritis, kaip parodyta Pav. 5.1.

Kitais dviem atvejais, lygiagrečiai kintamosios srovės tinklo integruojamas AĪNS perdavimo linija. Tokio tipo konfigūracija yra vadinama integruotu AĪNS keitiklio tipo. Kintamosios srovės tinklu vyks 350 MW galios perdavimas, o nuolatinės srovės- 200 MW.

Antru atveju naudojamas VSC-AĪNS jungtis su tipiniu d-q vektoriniu valdymu. Trečiu atveju naudojama VSC-AĪNS tipas su anksčiau aptartu galios svyravimo valdymo metodu.

Lygiagrečiai kintamosios srovės tinklo nuolatinis srovės keitiklis yra jungiamas dėl keleto priežasčių. Visų pirma, pasirenkant šio tipo konfigūracija, yra gerokai padidinamas maksimalus galimas galios srauto perdavimas tarp dviejų sričių. Tuo pat metu, nuimant apkrovą, nuo kintamosios srovės tinklo. Neperkrautas kintamosios srovės tinklas padidina stabilumą ir patikimumą. Tokio tipo modelis yra tinkamas ilgoms linijoms, virš 200 km. arba jungiant du skirtingo stiprumo tinklus. Ilgos kintamosios srovės linijos, negali išnaudoti savo teorinių galimybių ir būti pilnai apkrautos dėl atsirandančių nuostolių.

Norint praplėsti linijų pralaidumus, ribojančiu faktoriumi gali tapti ir poveikis aplinkosaugai. Tradicinės kintamosios srovės linijos, reikalauja didelio ploto, bei apsaugos zonos. Tuo tarpu siūlomas AĪNS modelis užimtu 4 kart mažiau ploto, kabelis klojamas po žeme, dėl to neatsiranda reljefo taršos, padaromas mažesne žala aplinkai.

6.1 Pereinamųjų procesų tyrimas

Sistemos stabilumo palyginimas tarp anksčiau išvardintų trijų atvejų. Atliekant šiuos bandymus kiekvienai šynai yra pritaikomas gedimas jos vidurio taške. Vidurio taškas pasirinktas,

norint sužinoti vidutinį gedimo laiką matuojamą sekundėmis. Visi imituojami gedimai yra trifaziai trumpieji jungimai į žemę. Bandymai atliekami PSCAD programine įranga.

CCT (Critical clearing time)- dydis nurodantis ilgiausią trukdžio laiko trukmę galinčią veikti tinklą, jam neprarandant stabilumo. Šio bandymo tikslas yra išsiaiškinti reikalingų apsaugų charakteristikas. Šis dydis ieškomas kiekvienai šynai ir linijoms tarp jų . Sistemos stabilumas įvertinamas pagal fazių kampų skirtumą tarp AĮNS šynų. Sistema laikoma saugiose ribose jeigu fazių skirtumas nėra didesnis nei 180 laipsnių.

Lentelė 6.1.1 CCT laikai

Gedimo tipas ir vieta		Tik KS tinklas (s)	KS ir AĮNS tinklai lygiagrečiai (s)	KS ir AĮNS tinklai lygiagrečiai naudojant galios svyravimų kontrolę (s)
Gedimas Šynoje	Šyna 1	0,11	0,54	0,97
	Šyna 2	0,09	0,59	0,78
	Šyna 3	0,18	0,41	0,49
	Šyna 4	0,21	0,35	0,41
	Šyna 5	0,11	0,37	0,47
	Šyna 6	0,24	0,33	0,40
	Vidurkis	0,167	0,431	0,586
Gedimas linijoje	Linija 1-2	0,10	0,55	1,01
	Linija 2-5	0,08	0,46	0,59
	Linija 4-6	0,21	0,33	0,40
	Linija 3-4	0,18	0,41	0,47
	Vidurkis	0,142	0,437	0,617
Vidurkis		0,154	0,434	0,605

Iš lentelės 6.1.1 modeliavimo rezultatų galime matyti vidutines reikšmes ir padaryti išvadas:

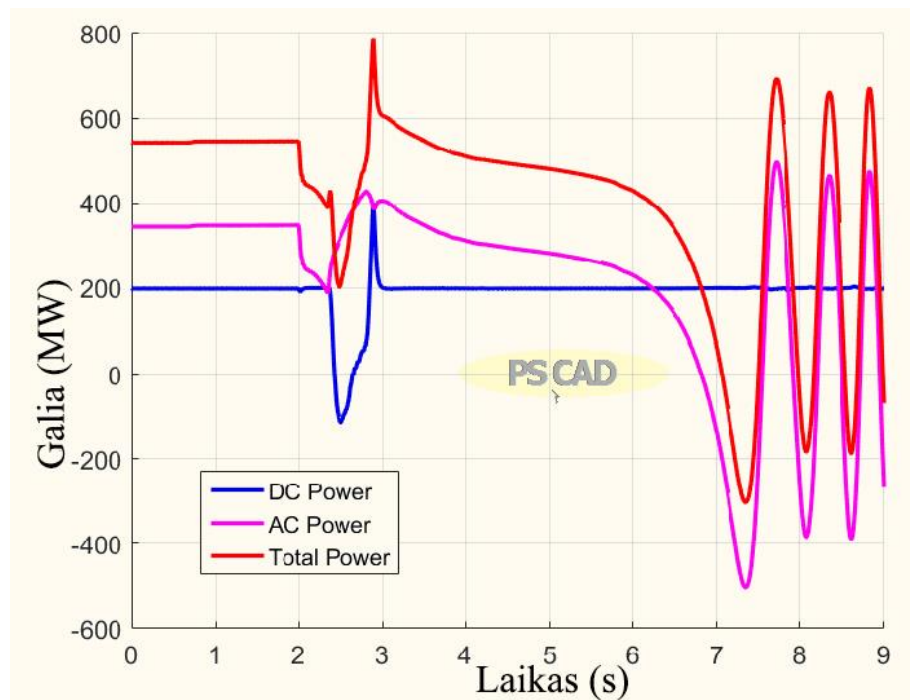
- Lygiagrečiai integruotas AĮNS jungties modelis yra stabilesnis nei tiesiog kintamosios srovės tinklas. Kadangi trukdžių atveju nuolatinės srovės tinklo, be AĮNS keitiklio, CCT laikas sekundėmis buvo trumpiausias.
- Lygiagrečiai integruotas AĮNS jungties modelis su papildomu galios svyravimo valdymu yra stabilesnis, nei modelis kuriame stabilizavimas nėra taikomas.

Lyginant šių dviejų modelių laikus, galios svyravimo reguliavimas padidina stabilumo laiką 37%.

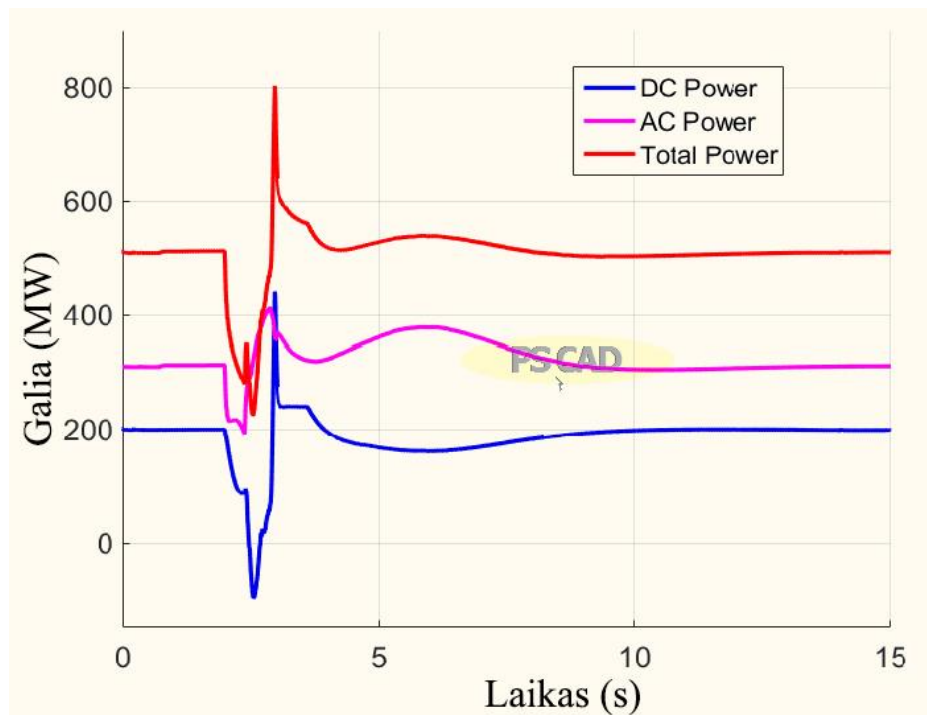
6.2 Galios svyravimų slopinimo tyrimas

Atsižvelgiant į gautus rezultatus 6.1 skyriuje, naudojamas galios svyravimo reguliavimo metodas ženkliai pagerina lygiagrečiai integruoto AİNS keitiklio kintamosios srovės tinklui modelio parametrus. Norint geriau suprasti gaunamą naudą atliekamas papildomas tyrimas.

Trifazės linijos į žemę gedimas generuojamas šnyoje 6, gedimo trukmė- 0,35 sekundės. Modeliavimas atliekamas su lygiagrečiai prijungtu AİNS keitiklio modeliu ir lygiagrečiai prijungtu AİNS keitiklio modeliu naudojant galios svyravimo kontrolę.



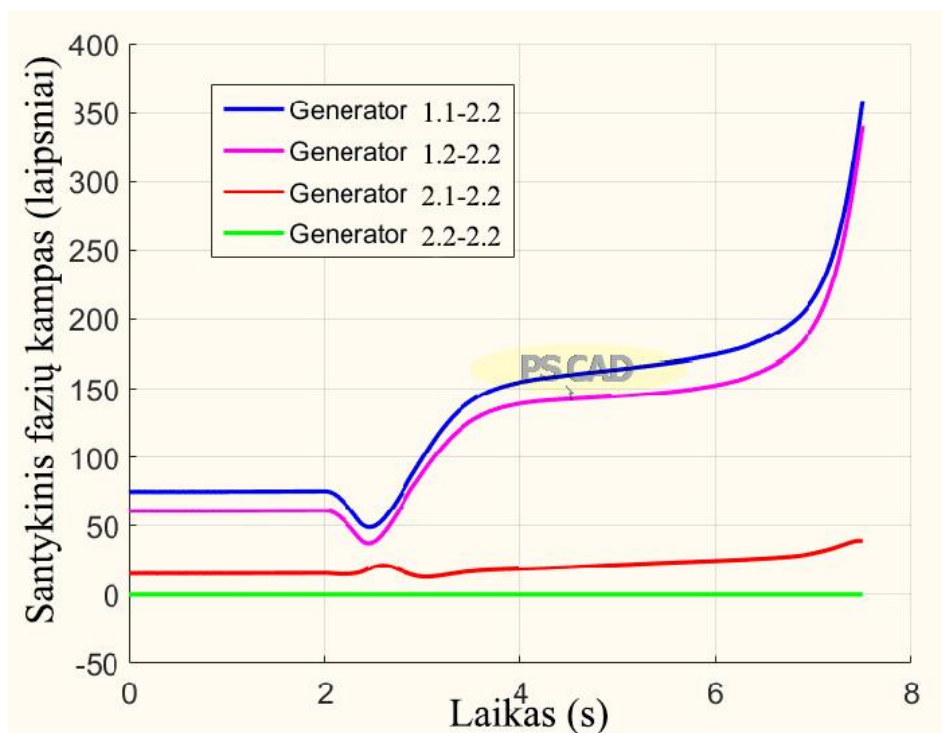
Pav. 6.2.1. AİNS be galios svyravimo reguliavimo



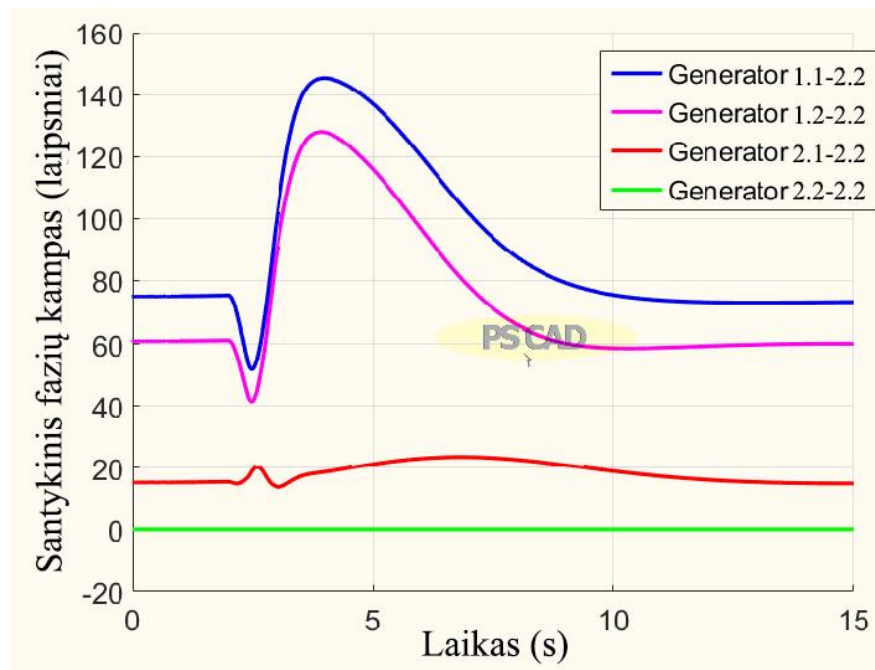
Pav. 6.2.2. AİNS su galios svyravimų reguliavimu

Grafike Pav. 6.2.1. galios perdavimui vykstant iš Sritis1 į Sritis2, įvykus gedimui AİNS keitiklio galia susvyruoja ir mažiau nei per sekundę stabilizuojasi. Kintamosios srovės tinkle perduodama galia po gedimo, praranda sinchronizaciją, ir nebepajėgia atsistatyti.

Analogiškas gedimas, tinkle kuriame AİNS su galios svyravimų reguliavimu, sugeba stabilizuotis.



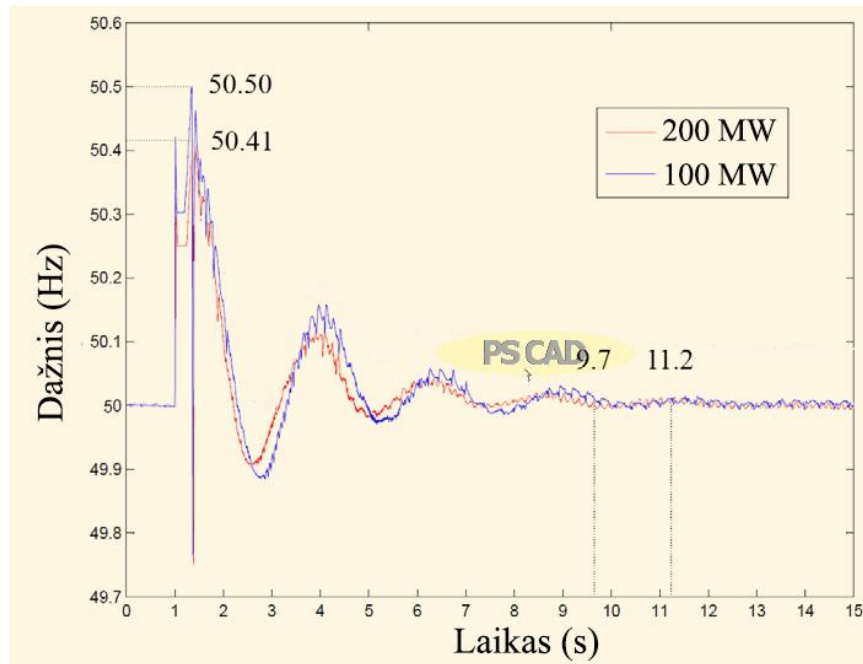
Pav 6.2.3. Kampų tarp fazių skirtumas generatorių atžvilgiu



Pav. 6.2.4 Fazių kampų skirtumas sistemoje su galios svyravimų valdymu

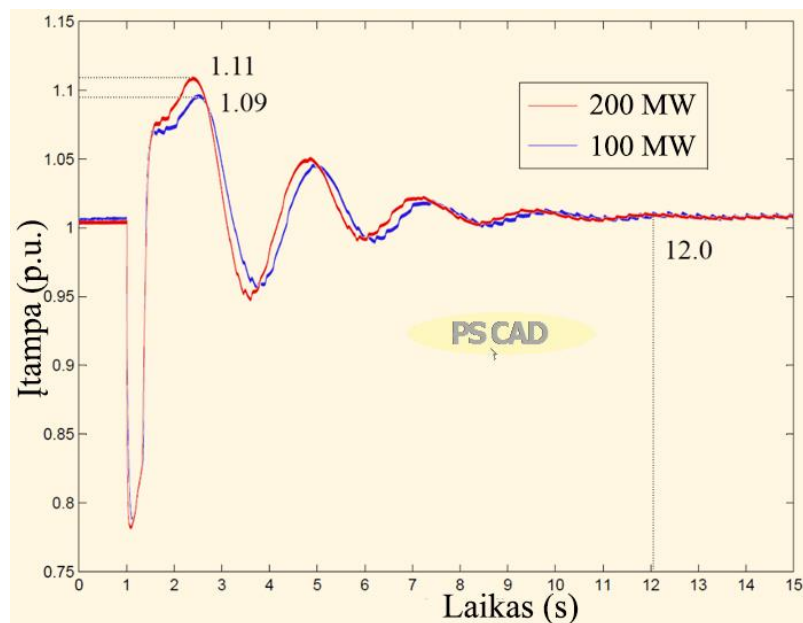
Grafike atvaizduojamas fazės kampų skirtumas tarp generatorių, kaip atskaitos tašką pasirenkant 2Gen2(2.2). Vykstant galios perdavimui sistemoje, kurioje nėra naudojamas galios svyravimo reguliavimas, įvykus gedimui kampų skirtumas tampa per didelis, sistema nebegali stabilizuotis. Analogiškas gedimas sistemoje kurioje yra naudojamas galios svyravimų reguliavimas, 0,35 sekundžių trukmės gedimą sukontroliuoja. Iš gautų grafikų galima daryti išvadą, jog galios svyravimo kontrolė yra būtinas sistemos elementas ženkliai pagerinantis bendrąjį sistemos stabilumą.

Atsižvelgiant į gaunamus rezultatus, apžvelgsiu ar galios srautas, perduodamas per AİNS jungtį turi įtakos sistemai. Gedimas generuojamas šynoje 6, trifazės linijos į žemę, gedimo trukmė 0,35 sekundės. Pirmuoju atveju, kaip ir bandymuose prieš tai, per aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklį tekės 200 MW galios srautas, antruoju atveju galios srautas 100 MW. Atskaitos taškui pasirenkama greta esanti 4 šyna.



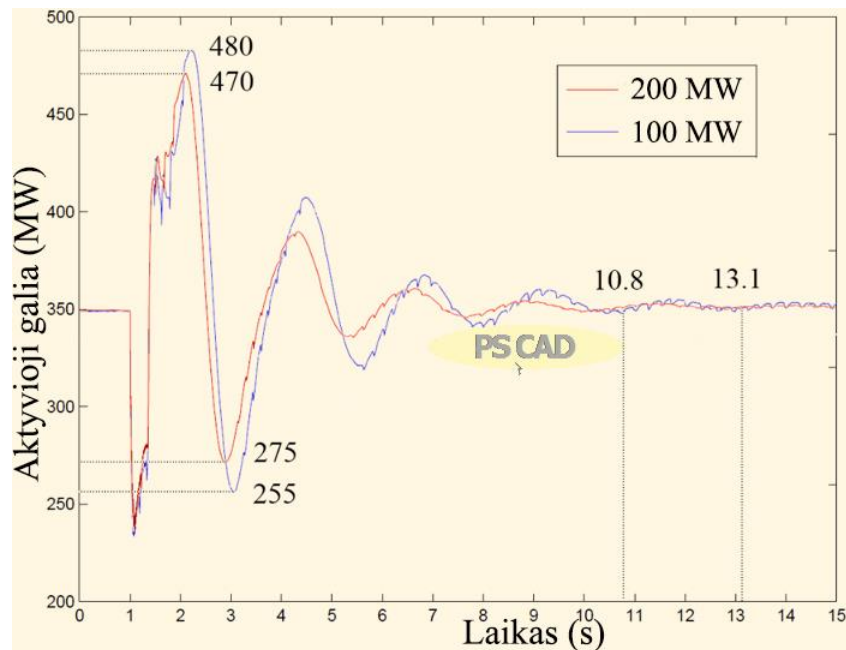
Pav. 6.2.5 Dažnio svyravimas gedimo metu.

Pagal kreives, kurios yra Pav. 6.2.5. matome, kad perduodant didesnę galią aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliu dažnio pokytis yra mažesnis. Perduodant 200 MW -50,41, o 100-50,5 Hz maksimaliame nuokrypio taške. Taip pat, didesnės galios perdavimo metu, atsistatymas po gedimo greitesnis net 1,5 sekundės.



Pav. 6.2.6. Įtampos kritimas

Kaip matome iš Pav. 6.2.6., įtampos pokyčiui galios perdavimo dydis įtakos iš principo nesudarė. Atsistatymo laikas, taip pat vienodas.



Pav. 6.2.7. Galios svyravimas gedimo metu.

Perduodant 200 MW galios srautą, kintamosios srovės tinkle, gedimo metu aktyviosios galios perdavimas svyruoja iš 470 MW iki 275 MW ribose, ir galios perdavimas atsistato 10.8 s. O perduodant dvigubai mažesnę srautą AİNS jungtimis, pastebimas didesnis svyravimas, 480-255 MW, ilgiau trunka ir tinklo stabilizavimasis – 13,1 s.

Apibendrinant aukščiau gautus rezultatus, keitiklio integravimas visapusiškai pagerina tinklo stabilumą. Integravus vien tik standartinį keitiklio modelį, tinklo CCT, dydis nurodantis ilgiausią trukdžio laiko trukmę galinčią veikti tinklą daugiau nei padvigubėjo. Toks tinklas turi geresnes galimybes stabilizuotis, ir tęsti darbą. Bazinį modelį patobulinus galios svyravimų valdymo funkcionalumu, šis laikas padidėjo dar 37%. Gedimo atveju buvo sumažintas kampų skirtumas tarp fazių, išlaikant jį mažesniu nei 180 laipsnių, ir taip neprarandant sistemos stabilumo. Galios svyravimai sukontroliuoti, taip leidžiant tinklui sėkmingai tęsti darbą.

Atlikus modeliavimą, perduodant skirtingus galios srautus aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliu, išsiaiškinau, jog aktyviosios galios perdavimo dydis turi tiesioginę įtaką tinklo stabilumui. Perduodant didesnę galios srautą, sumažėja dažnių svyravimas ir maksimalus nuokrypis, greičiau atsistato galios srautas ir kintamajame tinkle.

7. Išvados

1. Atlikus aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių tipų analizę, pasirinktas VSC tipo keitiklis. Lyginant su kitais tipais, VSC tipo keitiklis nereikalauja papildomų harmonikų filtravimo, yra 30% greičiau pastatomas, gali nepriklausomai kontroliuoti aktyviąją ir reaktyviąją galias. Tinkamas sujungti nevienodo stiprumo tinklus.
2. Integravus aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklį lygiagrečiai kintamosios srovės linijos, 2,8 karto padidėja CCT laikas. Konfigūracija su lygiagrečiai prijungtu keitikliu, sustiprina tinklą, padidinamas maksimalus galios pralaidumas tarp dviejų sričių.
3. Bazinį aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklio modelį praplėtus, galios svyravimo reguliavimo funkcionalumu, CCT- dydis, nurodantis ilgiausią trukdžio laiko trukmę galinčią veikti tinklą, padidinamas 37%. Atlikus šį papildymą, trukdžių metu skirtumas tarp fazių kampų neviršija 180 laipsnių, galios svyravimai tiek nuolatiniam tiek kintamajame tinkle minimizuojami, dėl to tinklas sugeba atsistatyti.
4. Perduodant galios srautą AĮNS keitikliu, tinklas stabilesnis didesnio galios srauto perdavimo metu. Dažnio svyravimas mažesnis 0,09 Hz, įtampos - 0,02 santykinio vieneto, galios- 30 MW. Taip yra todėl jog galios kompensavimo modelis, lyginą dažnių skirtumus abiejose VSC stotyse ir atitinkamai atlieka galios kompensavimą. Perduodant didesnę galios srautą gedimo metu, dažnio nuokrypiai nuo atskaitinės vertės yra mažesni, reikalingas mažesnis galios kompensavimas. Tinklas išlieka stabilesnis.
5. Galima daryti išvadą, jog norint padidinti tinklo stabilumą, pagerinti pereinamuosius procesus, ir sumažinti svyravimus sistemoje – aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai yra optimalus sprendimas.

8. Literatūra

- [1] Nikolas Flourentzou, Vassilios G. Agelidis, Georgios D. Demetriades, ransactions on Power Electric, vol. 24, no. 3, IEEE
- [2] AB ABB, The gotland hvdc link// [žiūrėta 2018 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/the-gotland-hvdc-link>
- [3] G. Asplund, K. Eriksson, and K. Svensson, "HVDC light-DC transmission based on voltage-sourced converter," Asea Brown Boveri Ltd. Rev., vol.1, pp. 4-9, 1998.
- [4] R. Adapa, J. Reeve, "IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities," IEEE Std1204-1997, Tech. Rep., 1997.
- [5] Chao Xiao, Xiaofu Xiong, Jinxin Ouyang, Getu Ma, Di Zheng and Ting Tang
A Commutation Failure Suppression Control Method Based on the Controllable Operation Region of Hybrid Dual-Infeed HVDC System. Energies, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(3), p. 1-13 2018.
- [6] IEEE, "IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities," IEEE Std1204-1997, Tech. Rep., 1997.
- [7] Syed Zain Nasir, Introduction to Multilevel Inverters, [žiūrėta 2018 m. gegužės 7 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.theengineeringprojects.com/2014/12/introduction-multilevel-inverters.html>
- [8] IEEE, Voltage Sourced Converter (VSC) Applications in Power Transmission, IEEE, 29 Aug 2007 [žiūrėta 2018 m. gegužės 9 d.]. Prieiga per internetą: http://sites.ieee.org/pes-resource-center/files/2013/11/TR14_TP200_Full_Content.pdf
- [9] M.W. Mustafa ; A.F.A. Kadir. A modified approach for load flow analysis of integrated AC-DC power systems, TENCON 2000. Proceedings,
- [10] Shuhui Li, Ishan Jaithwa, Raed Suftah & Xingang Fu. Direct-current Vector Control of Three-phase Grid-connected Converter with L, LC, and LCL Filters, Electric Power Components and Systems, 2015, 43:14, 1644-1655
- [11] T. Shimato. The Kii Channel HVDC Link in Japan. (The Kansai Electric Power Co., Inc.), Cigre, 2002, Paris.
- [12] Calverley T.E., Gavrilovic, A., Last F.H., Mott C.W., The Kingsnorth-Beddington-Willesden DC Link, CIGRÉ session, Paris, 1968, paper 43-04.
- [13] Artjoms Obusevs Mario Turcik I. Oleinikova I. Oleinikova Gatis Junghans. Market Based Analysis of Power System Interconnections, ReaserchGate.
- [14] LitPol link, [žiūrėta 2018 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.litpol-link.com/lt/>

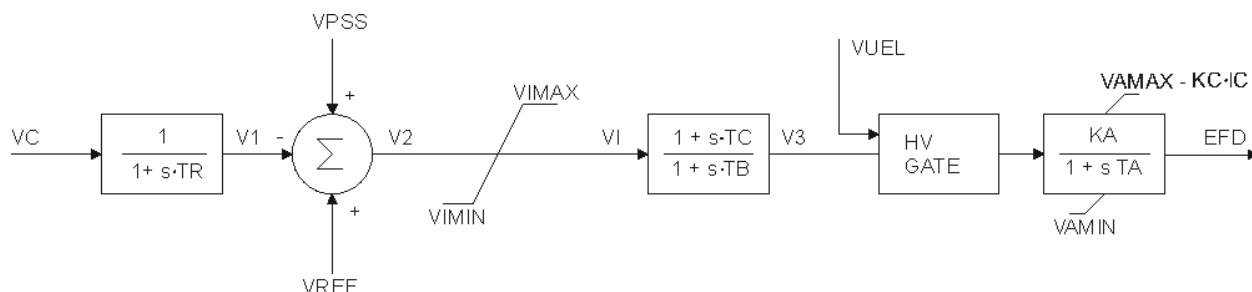
- [15] NordBalt, [žiūrėta 2018 m. balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą:
<http://new.abb.com/systems/hvdc/references/nordbalt>
- [16] Ke Zhu ; W. K. Lee ; Philip W. T. Fault-Line Identification of HVDC Transmission Lines by Frequency-Spectrum Correlation Based on Capacitive Coupling and Magnetic Field Sensing, IEEE Transactions on Magnetics - (Volume PP Issue 99) 2017
- [17] Rakibuzzaman Shah ; Jesus C. Sánchez ; Robin Preece ; Mike Barnes. Stability and control of mixed AC–DC systems with VSC-HVDC, IET Generation Transmission & Distribution 12(10) 2018.
- [18] Lei Feng ; Ruifeng Gou ; Xiaoping Yang ; Xiaoping Sun ; Fang Zhuo , Design of high power density sub module in modular multilevel converter for VSC-HVDC project, Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM 2015), 10th International Conference on, 2015.
- [19] Hiroyuki Haga; Fujio Kurokawa. Dynamic analysis of the three-level LLC resonant converter for a rectifier in HVDC distribution system. 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)
- [20] Wenyuan Wang ; Mike Barnes. Power Flow Algorithms for Multi-Terminal VSC-HVDC With Droop Control, IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 29, Issue: 4, July 2014). p. 15-30
- [21] Nelson L. Diaz ; Fabian H. Barbosa ; Cesar L. Trujillo, Power Electronics and Motion Control, 2008. EPE-PEMC 2008 p. 8-15
- [22] Bhim Singh ; B. K. Panigrahi ; D. Madhan Mohan. Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. P. 20-28
- [23] Bahrman M. P. HVDC transmission overview. 2008. P. 1-7.
- [24] Nikolaos Oikonomou; Gernot J. Riedel; Mario Pacas. PWM for active thermal protection in three level neutral point clamped inverters. 2014 p. 3710 – 3716
- [25] Jingjing Wang; Ming Ding; Shenghu Li. Reliability Analysis of Converter Valves for VSC-HVDC Power Transmission System 2013. P. 25-30
- [26] M. Kohlmann; M. Kleine Jäger; V. Staudt; A. Steimel; M. Gorski. Test-bench layout emulating a MMC-based HVDC transmission system. 2014. p. 1-5.
- [27] Boyang Shen; Sheng Wang; Lin Fu; Jun Liang. Design and Comparison of Feasible Control Systems for VSC-HVDC Transmission System. 2014 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation. P.234-239
- [28] Ali Raza; Xu Dianguo; Su Sunwen; Li Wiexing. Modeling and control of multi terminal VSC HVDC transmission system for integrating large offshore wind farms 17th IEEE International Multi Topic Conference 2014. p. 467 – 472.

- [29] Martyn Durrant; Herbert Werner; Keith Abbott. Modelling and controller design for VSC-HVDC attached to an AC network. 2003 European Control Conference (ECC). p. 2322 – 2326.
- [30] Jiahui Chen; Minxiao Han; Lingfei Xiong; Shujun Yao; Xuhui Shen. Electromechanical transient modeling without coupling terms for VSC-HVDC. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering. p. 1029 – 1033
- [31] Xinming Fan; Lin Guan; Chengjun Xia; Jianming He. A passivity control strategy for VSC-HVDC connected large scale wind power.
- [32] Jianzhong Xu; Chengyong Zhao; Baoshun Zhang. Control design and operational characteristics comparison for VSC-HVDC supplying active/passive networks. 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. p. 1381 – 1386.
- [33] Ling Xu; Shuhui Li. Analysis of HVDC light control using conventional decoupled vector control technology. IEEE PES General Meeting 2010. p. 1 – 8.
- [34] K. S. Rajashekara; A. Rufer; L. Terens; G. Guth. Real time simulation of a synchronous machine in a programmable high speed controller. 1992 IEEE. p. 254 - 262
- [35] Cunping Wang; Jian Sun; Qiankun Chang; Dongqiang Jis. Research on the direct current control method and simulation of flexible HVDC. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. p. 2023 – 2027
- [36] Babak Parkhideh; Subhashish Bhattacharya. Vector-Controlled Voltage-Source-Converter-Based Transmission Under Grid Disturbances. IEEE Transactions on Power Systems. 2013 p. 3756 – 3764
- [37] Carlos A. Hidalgo Mora; Nelson L. Díaz Aldana. Vectorial control of a Voltage Source Converter. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). p. 689 – 693

Priedas 1 tinklo komponentų duomenų lapai ir schemas

Žadintojas AC4A.

IEEE AC4A žadinimo sistema



Pav. 9.1. Blokinė žadintojo schema

Parametrai

Pavadinimas	Matmuo	Aprašymas
TR	Sekundės	Filtro laiko konstanta
VIMAX	Santykinis vienetas	Maksimali įtampos reguliatoriaus įėjimo riba.
VIMIN	Santykinis vienetas	Minimali įtampos reguliatoriaus įėjimo riba.
TC	Sekundės	Įtampos reguliatoriaus laiko konstanta
TB	Sekundės	Įtampos reguliatoriaus laiko konstanta
KA	Santykinis vienetas	Įtampos reguliatoriaus stiprinimas
VRMAX	Santykinis vienetas	Maksimalus įtampos reguliatoriaus išėjimas
VRMIN	Santykinis vienetas	Minimalus įtampos reguliatoriaus išėjimas
KC	Santykinis vienetas	Lygintuvo užkrovimo faktorius, proporcingas komutavimo reaktyvumui

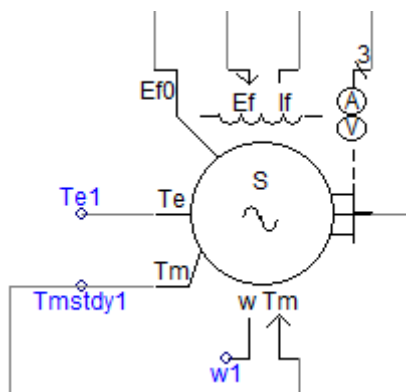
Parametrų ribos:

$0 < TR < 0.1$	$50 < KA < 1000$
$0 < VIMAX \leq 0.2$	$0 < TA < 0.5$
$-0.2 < VIMIN \leq 0$	$5 \leq KA * TC/TB \leq 15$
$0 < TC < 10$	$3 \leq VRMAX \leq 8$
$0.04 < TB < 20$	$-8 < VRMIN \leq -3$

Generatorius F20

Nominali įtampa 26 kV

Galingumas 896 MVA

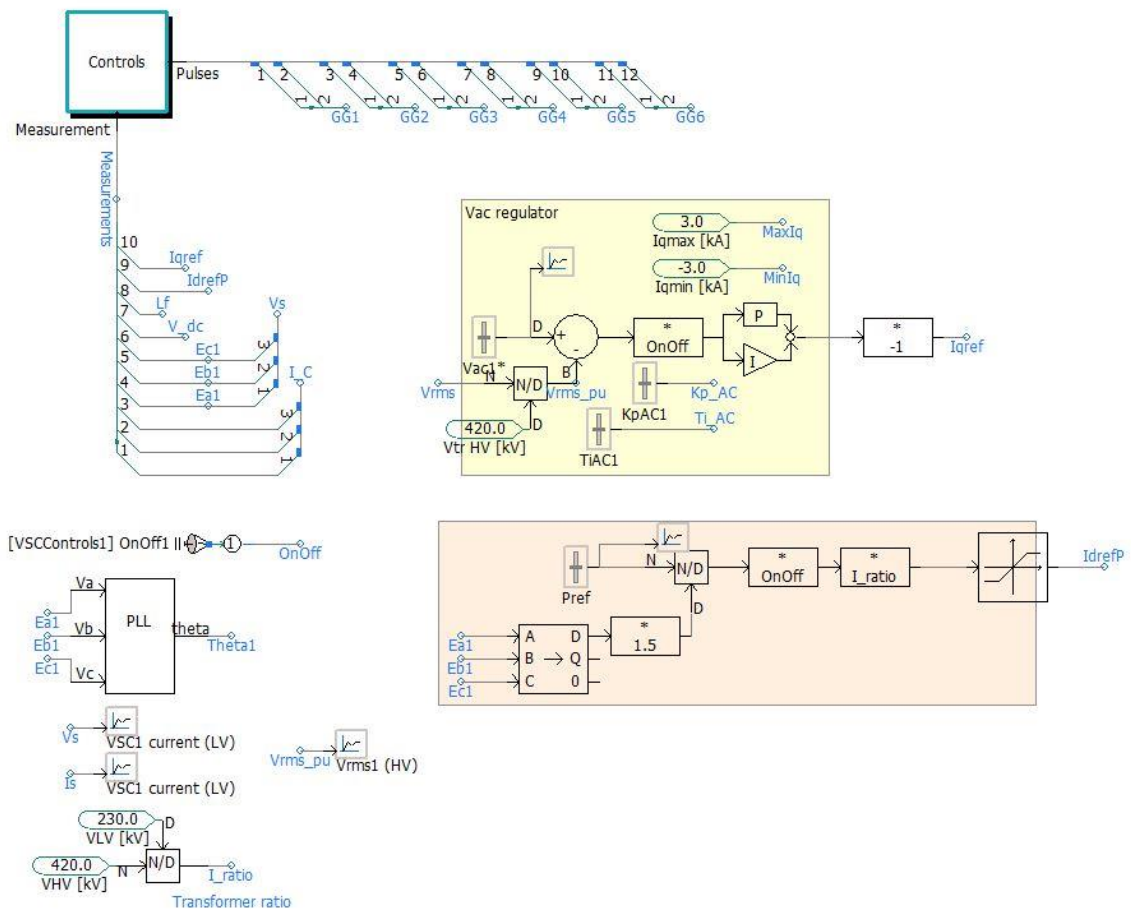


Pav. 9.2 Generatoriaus blokinis modelis

Lentelė 9.1 Generatoriaus parametrai

Parametras	Reikšmė s.v.	Parametras	Reikšmė s.v.
R_a	0.0025	X_d	1.8
X_q	1.7	X_1	0.2
X_d'	0.3	X_q'	0.55
T_{d0}'	8.0	T_{q0}'	0.4
X_d''	0.25	X_q''	0.25
T_{d0}''	0.03	T_{q0}''	0.05
H1	6.5	H2	6.5
H3	6.175	H4	6.175

VSC-AİNS valdymo schemas

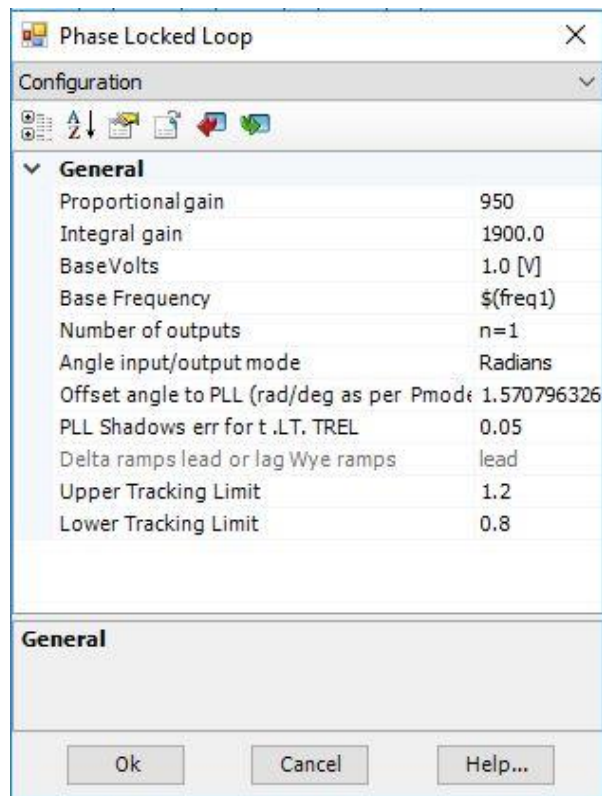


Pav. 9.3 VSC-AİNS Valdymo grandinių schema

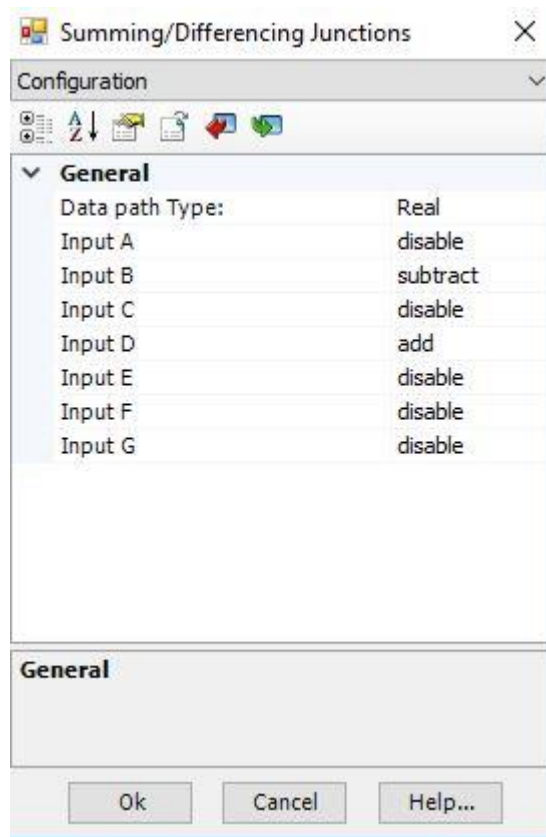
VSC keitiklio kintamosios srovės dydis yra keičiamas norint pakoreguoti aktyviosios galios pasikeitimą tarp KS ir NS dalių.

PLL- fazės ciklas. Ši funkcija naudoja fazės kampus kaip atskaitos tašką sudarant trijų fazių dydžių konvertavimą į d-q koordinates. Kintamosios srovės įtampa pasirenkama kaip atskaitos vektorius, naudojant PLL duomenys apie fazės kampus yra nuskaitomi.

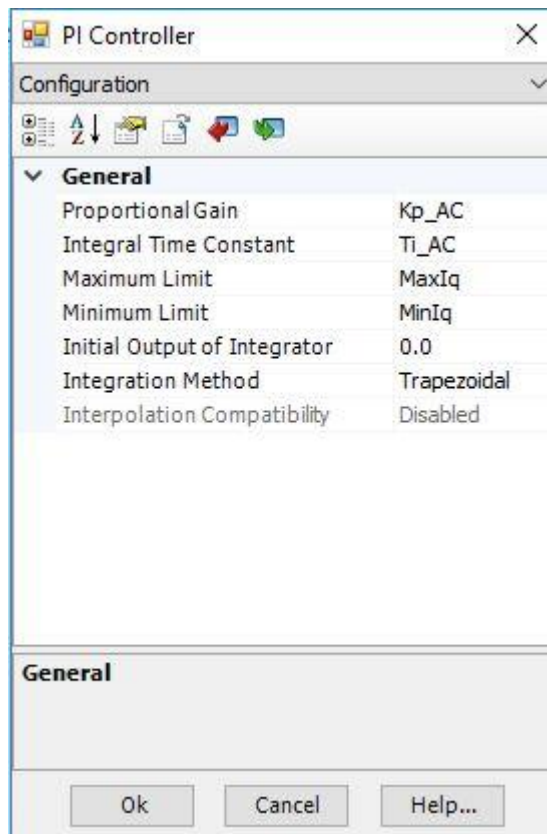
Išvestis iš PLL (pvz. $\angle Ea$), naudojama transformacijos blokuose, kur trifazės srovės yra priskiriamos d-q komponentėms.



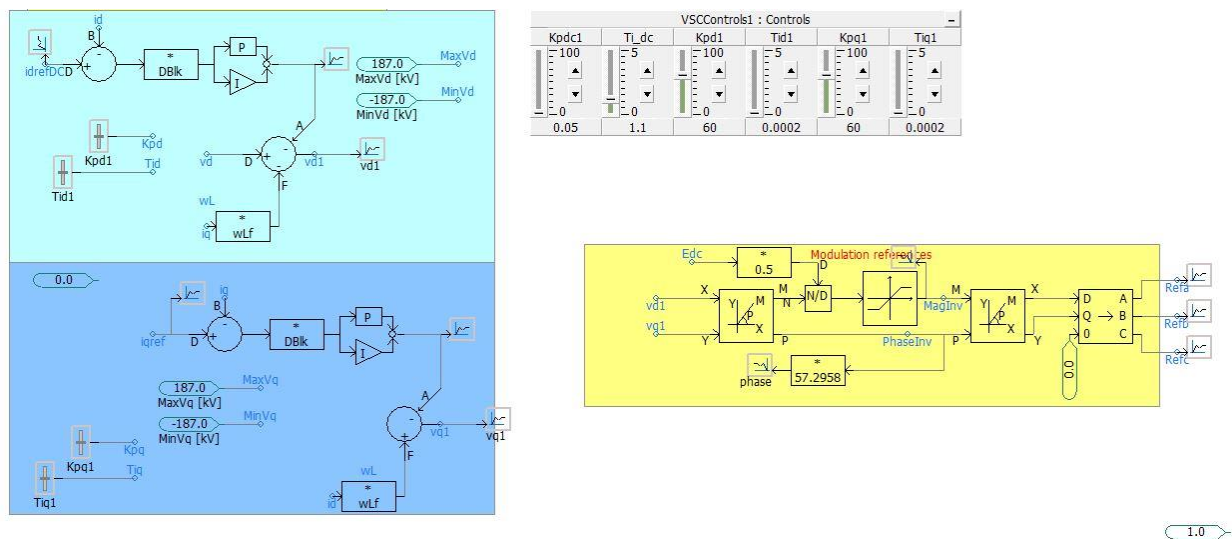
Pav. 9.4. PLL nuostatų langas



Pav 9.5. Konvertavimo blokų nuostatų langas

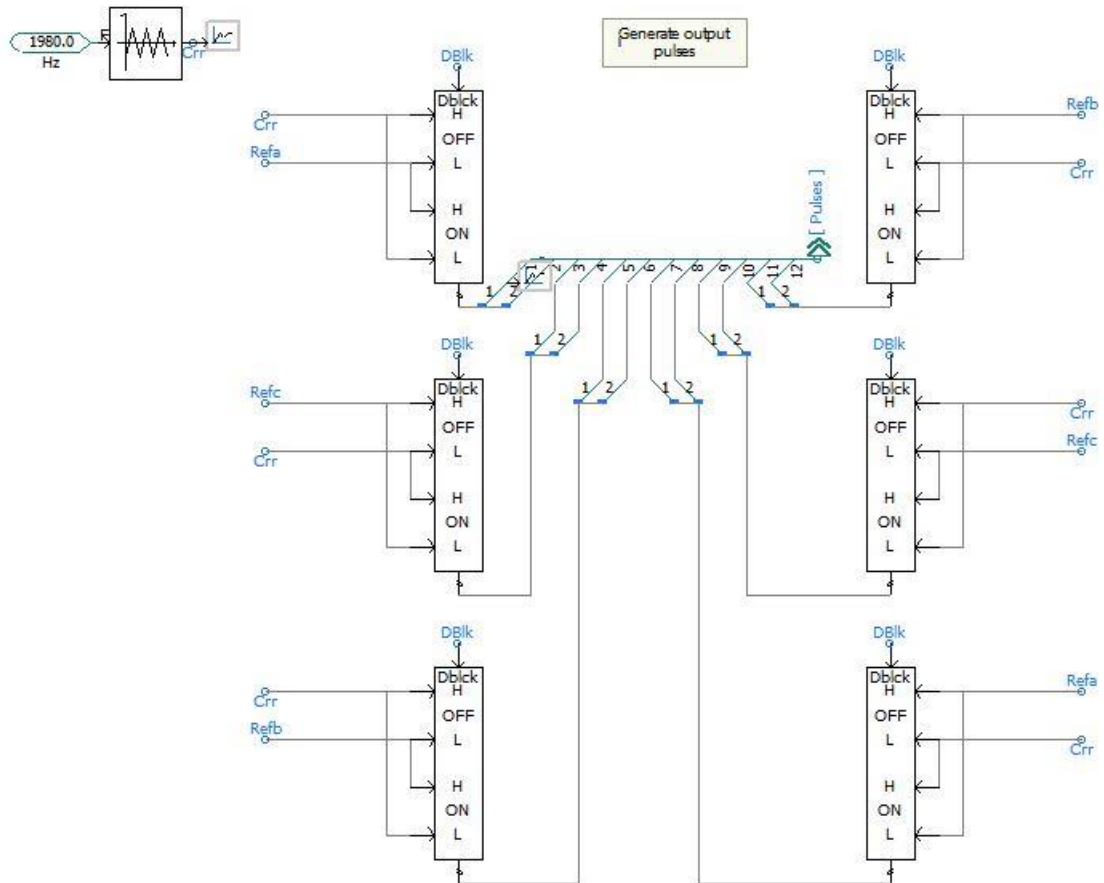


Pav. 9.6 PI valdiklio nuostatų langas



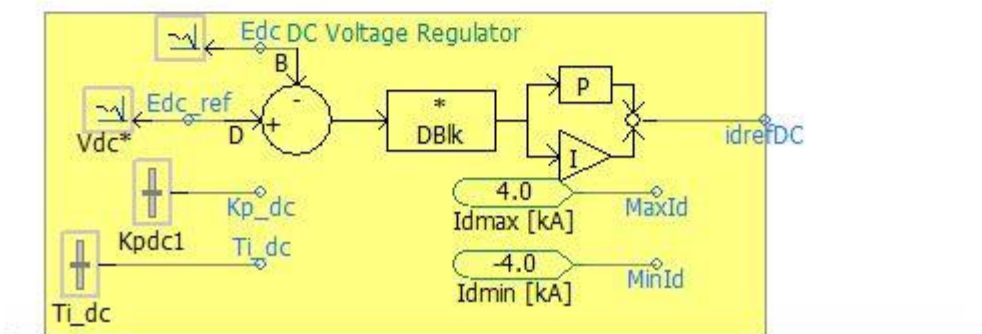
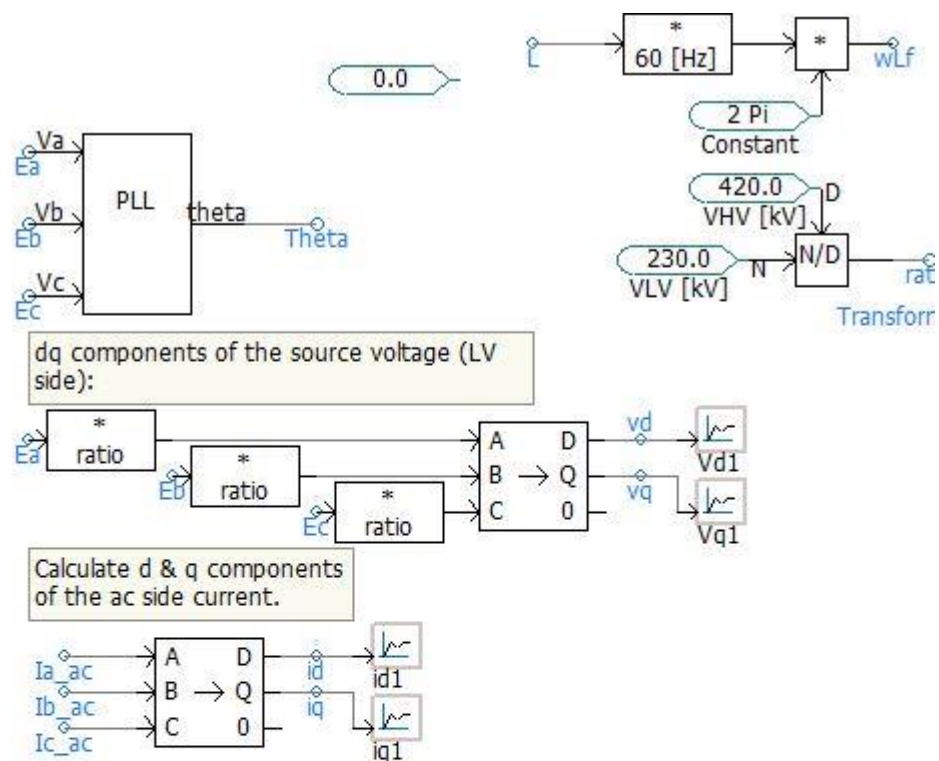
Pav. 9.7 Regulatoriai

Trys regulatoriai yra naudojami: įtampos reguliatorius, srovės reguliatorius ir PI valdiklis. Jų pagalba, gaunami atskaitiniai taškai, v_d' ir v_q' .



Pav. 9.8. Impulso pločio moduliacijos schema

Impulso pločio moduliacijos pulsai yra sukuriami, kai moduliacinės bangos forma lyginama (Ref_a, Ref_b, Ref_C), su nešančiuoju signalu, per šešis interpoliuotus „Firing“ (IGBT) atsidarymo pulsus.



Pav. 9.7. NS reguliatorius, PLL, žemos štampos dalies dq komponentių grandinė

Priedas 2 PSCAD programinis kodas

SUBROUTINE Lygintuvo_Begin()

```
!-----  
! Standard includes  
!-----  
  
    INCLUDE 'nd.h'  
    INCLUDE 'emtconst.h'  
    INCLUDE 's0.h'  
    INCLUDE 's1.h'  
    INCLUDE 's4.h'  
    INCLUDE 'branches.h'  
    INCLUDE 'pscadv3.h'  
    INCLUDE 'radiolinks.h'  
    INCLUDE 'rtconfig.h'  
  
!-----  
! Function/Subroutine Declarations  
!-----  
  
!     SUBR     VSCControls1Out_Begin  !  
  
!-----  
! Variable Declarations  
!-----  
  
! Subroutine Arguments  
  
! Electrical Node Indices  
    INTEGER DCP, ABC(3), DCM, NT_6(3)  
  
! Control Signals  
    REAL    Lf, MaxIq, MinIq, RT_21, RT_22  
    REAL    RT_23  
  
! Internal Variables  
    INTEGER IVD1_1  
  
! Indexing variables  
    INTEGER ICALL_NO           ! Module call num  
    INTEGER IT_0              ! Storage Indices  
    INTEGER ITXRX            ! Control/Monitoring  
    INTEGER SS, INODE, IBRCH, IXFMR ! SS/Node/Branch/Xfmr  
  
!-----  
! Local Indices  
!-----  
  
! Define electric network subsystem number  
  
    SS      = NODE(NNODE+1)  
  
! Increment and assign runtime configuration call indices  
  
    ICALL_NO = NCALL_NO  
    NCALL_NO = NCALL_NO + 1  
  
! Increment global storage indices  
  
    ITXRX      = NTXRX  
    NTXRX      = NTXRX + 1  
    NCX        = NCX + 0  
    INODE      = NNODE + 2  
    NNODE      = NNODE + 23  
    IBRCH      = NBRCH(SS)  
    NBRCH(SS) = NBRCH(SS) + 39  
    IXFMR      = NXFMR  
    NXFMR      = NXFMR + 3  
    NCSCS      = NCSCS + 0  
    NCSCR      = NCSCR + 0
```



```

!-----
! Electrical Node Lookup
!-----

DCP  = NODE(INODE + 1)
DCM  = NODE(INODE + 5)

! Array (1:3) quantities...
DO IT_0 = 1,3
  ABC(IT_0) = NODE(INODE + 1 + IT_0)
  NT_6(IT_0) = NODE(INODE + 11 + IT_0)
END DO

!-----
! Generated code from module definition
!-----

! 10:[const] Real Constant '[H]'
Lf = 0.0724

! 20:[multimeter] Multimeter
IVD1_1 = NRTCF
NRTCF = NRTCF + 5
IF (ABS(1.0) .GT. 1.0E-20) THEN
  RTCF(IVD1_1) = 1.0/ABS(1.0)
ELSE
  RTCF(IVD1_1) = 1.0
ENDIF
IF (ABS(1.0) .GT. 1.0E-20) THEN
  RTCF(IVD1_1+1) = 1.0/ABS(1.0)
ELSE
  RTCF(IVD1_1+1) = 1.0
ENDIF
RTCF(IVD1_1+2) = 0.02
RTCF(IVD1_1+3) = 60.0

! 40:[multimeter] Multimeter
IVD1_1 = NRTCF
NRTCF = NRTCF + 5
IF (ABS(1.0) .GT. 1.0E-20) THEN
  RTCF(IVD1_1) = 1.0/ABS(1.0)
ELSE
  RTCF(IVD1_1) = 1.0
ENDIF
IF (ABS(1.0) .GT. 1.0E-20) THEN
  RTCF(IVD1_1+1) = 1.0/ABS(1.0)
ELSE
  RTCF(IVD1_1+1) = 1.0
ENDIF
RTCF(IVD1_1+2) = 0.02
RTCF(IVD1_1+3) = 60.0

! 60:[const] Real Constant 'Iqmax [kA]'
MaxIq = 3.0

! 70:[const] Real Constant 'Iqmin [kA]'
MinIq = -3.0

! 90:[datatap] Scalar/Array Tap

! 100:[datatap] Scalar/Array Tap

! 110:[datatap] Scalar/Array Tap

! 130:[datatap] Scalar/Array Tap

! 140:[const] Real Constant 'Vtr HV [kV]'
RT_21 = 420.0

! 150:[datatap] Scalar/Array Tap

! 170:[datatap] Scalar/Array Tap

! 210:[tvekta] Phase-Locked Loop
CALL TVEKA1_CFG(1.0,60.0)

! 220:[abcdq0] abc dq0 transformation

! 230:[pgb] Output Channel 'VSC1 current (LV)'

```

```

! 240:[pgb] Output Channel 'VSC1 current (LV)'

! 250:[const] Real Constant 'VLV [kV]'
      RT_23 = 230.0

! 260:[const] Real Constant ' VHV [kV]'
      RT_22 = 420.0

! 290:[gain] Gain Block

! 390:[VSCControls1]
      CALL VSCControls1Out_Begin()

      RETURN
      END
=====

      SUBROUTINE VSCControls2Dyn_Begin()

!-----
! Standard includes
!-----

      INCLUDE 'nd.h'
      INCLUDE 'emtconst.h'
      INCLUDE 's0.h'
      INCLUDE 's1.h'
      INCLUDE 's4.h'
      INCLUDE 'branches.h'
      INCLUDE 'pscadv3.h'
      INCLUDE 'radiolinks.h'
      INCLUDE 'rtconfig.h'

!-----
! Function/Subroutine Declarations
!-----

! Variable Declarations
!-----

! Subroutine Arguments

! Electrical Node Indices

! Control Signals
      INTEGER IT_2
      REAL    RT_15, RT_27, MaxId, MinId, MaxVd
      REAL    MinVd, RT_42, MaxVq, MinVq, RT_50
      REAL    RT_51, RT_52, RT_53, RT_54

! Internal Variables

! Indexing variables
      INTEGER ICALL_NO           ! Module call num
      INTEGER ICX, ITXRX         ! Control/Monitoring
      INTEGER SS                 ! SS/Node/Branch/Xfmr

!-----
! Local Indices
!-----

! Define electric network subsystem number

      SS      = NODE (NNODE+1)

! Increment and assign runtime configuration call indices

      ICALL_NO = NCALL_NO
      NCALL_NO = NCALL_NO + 1

! Increment global storage indices

      ITXRX    = NTXRX
      NTXRX    = NTXRX + 1
      ICX      = NCX

```

```
NCX      = NCX + 8
NNODE    = NNODE + 2
NCSCS    = NCSCS + 0
NCSCR    = NCSCR + 0
```

```
!-----
! Electrical Node Lookup
!-----
```

```
!-----
! Generated code from module definition
!-----
```

```
! 10:[consti] Integer Constant
    IT_2 = 0

! 20:[emtconst] Commonly Used Constants (pi...) 'Constant'
    RT_42 = TWO_PI

! 30:[const] Real Constant 'VHV [kV]'
    RT_51 = 420.0

! 40:[var_switch] Two State Switch 'Dblk2'

! 50:[const] Real Constant 'VLV [kV]'
    RT_50 = 230.0

! 60:[div] Divider

! 70:[time-sig] Output of Simulation Time

! 80:[compare] Single Input Level Comparator

! 90:[const] Real Constant 'Hz'
    RT_15 = 1980.0

! 100:[sig_gen] Variable Frequency Sawtooth Generator
    CALL COMPONENT_ID(ICALL_NO,1799591480)
    CALL SAWTOOTH1_CFG(1.0,-1.0)

! 110:[pgb] Output Channel 'Carrier'

! 120:[var] Variable Input Slider 'Vdc refl'

! 130:[const] Real Constant
    RT_52 = 1.0

! 140:[var] Variable Input Slider 'Kpdc2'

! 150:[const] Real Constant 'Idmax [kA]'
    MaxId = 4.0

! 160:[var] Variable Input Slider 'Ti_dc2'

! 170:[const] Real Constant 'Idmin [kA]'
    MinId = -4.0

! 180:[const] Real Constant 'MaxVd [kV]'
    MaxVd = 187.0

! 190:[const] Real Constant 'MinVd [kV]'
    MinVd = -187.0

! 200:[var] Variable Input Slider 'Kpd2'

! 210:[var] Variable Input Slider 'Tid2'

! 220:[const] Real Constant
    RT_54 = 0.0

! 230:[const] Real Constant 'MaxVq [kV]'
    MaxVq = 187.0

! 240:[const] Real Constant 'MinVq [kV]'
    MinVq = -187.0

! 250:[var] Variable Input Slider 'Kpq2'
```

```

! 260:[const] Real Constant
      RT_27 = 0.0

! 400:[gain] Gain Block

! 410:[mult] Multiplier

! 420:[tvekt] Phase-Locked Loop
      CALL TVEKA1_CFG(1.0,50.0)

! 430:[mult] Multiplier

! 440:[gain] Gain Block

! 450:[gain] Gain Block

! 460:[gain] Gain Block

! 470:[abcdq0] abc dq0 transformation

! 480:[select] Two Input Selector
      RTCI(NRTCI) = 0
      NRTCI = NRTCI + 1

! 490:[realpole] Real Pole

! 500:[sumjct] Summing/Differencing Junctions

! 510:[gain] Gain Block

! 520:[sumjct] Summing/Differencing Junctions

! 530:[gain] Gain Block

! 540:[pi_ctrlr] PI Controller \w Interpolation
      RTCF(NRTCF) = 0.0
      NRTCF = NRTCF + 1

! 550:[gain] Gain Block

! 560:[gain] Gain Block

! 570:[sumjct] Summing/Differencing Junctions

! 580:[gain] Gain Block

! 590:[pi_ctrlr] PI Controller \w Interpolation
      RTCF(NRTCF) = 0.0
      NRTCF = NRTCF + 1

! 600:[gain] Gain Block

! 610:[abcdq0] abc dq0 transformation

! 620:[sumjct] Summing/Differencing Junctions

! 630:[sumjct] Summing/Differencing Junctions

! 1030:[pgb] Output Channel 'Vdc'

! 1050:[pgb] Output Channel 'Vdc1*'

! 1060:[pgb] Output Channel 'iq1'

! 1070:[pgb] Output Channel 'id1'

! 1080:[pgb] Output Channel 'Vq1'

! 1090:[pgb] Output Channel 'Vd1'

! 1100:[unity] Type conversion block

! 1110:[radiolink] Wireless connection 'OnOff2'

      RETURN
      END

```

```

!=====

```