



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vytautas Černiauskas

**AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KEITIKLIŲ GALIOS
IR DAŽNIO VALDYMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Saulius Gudžius

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**AUKŠTOS ĮTAMPOS NUOLATINĖS SROVĖS KEITIKLIŲ GALIOS
IR DAŽNIO VALDYMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

Prof. dr. Saulius Gudžius

2017 06 04

Recenzentas

Doc. dr. Almantas Bandza

2017 06 04

Projektą atliko

Vytautas Černiauskas

2017 06 04

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vytautas Černiauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių galios ir dažnio valdymo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 4 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vytauto Černiausko** baigiamasis projektas tema „Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių galios ir dažnio valdymo 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)

Černiauskas, Vytautas. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių galios ir dažnio valdymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *HVDC, VSC, galios srautų krypties pakeitimas, sistemos paleidimas, dažnio palaikymas, keitiklis.*

Kaunas, 2017. 64 p.

SANTRAUKA

Plėtojant elektros tinklus HVDC technologija yra patraukli dėl savo plačių valdymo galimybių ir darbo režimų elektros tinklo stabilumo gerinimui. HVDC sistemos pasižymi specifinėmis galimybėmis, priklausomai nuo to, kokia technologija yra naudojama. Šiame darbe bus tiriami „VSC“ technologijos HVDC keitikliai. Keitiklio darbo režimai, aktualūs šiame darbe, taip pat ir užtikrinantys lanksčias el. tinklo darbo galimybes, yra šie : galios srautų krypties pakeitimas, dažnio palaikymas, išjungtos sistemos paleidimas (angl. „black-start“).

Keitikliai, veikiantys su elektros sistemomis, turi tam tikrus apribojimus, priklausomai nuo elektros sistemos parametrų. Šiame darbe bus tiriami elektros sistemos parametrų įtaka minėtiems keitiklio darbo režimams. Taip pat bus ištirta dažnio palaikymo funkcija keitikliu bei skirtingi išjungtos elektros sistemos paleidimo atvejai.

Černiauskas, Vytautas. Control Research on Power Flow and Frequency of High Voltage Direct current Converters: Master's thesis in master's qualification degree / supervisor assoc. prof. Saulius Gudžius. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power system.

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

Key words: *HVDC, VSC, power reversal, black-start, frequency support, converter.*

Kaunas, 2017. 64 p.

SUMMARY

In the process of power grids development, HVDC technology is attractive because of its wide control options and operating modes to improve electrical power grid stability. HVDC system has specific capabilities, depending on the technology being used. "VSC" based HVDC converter technology will be investigated in this work. Converter operating modes, relevant to this work, as well as ensuring flexible electrical grid operating modes are as follows: power flow direction reversal, frequency support, "dead" electrical system start up (also called "black-start").

Converters, working with electrical systems have certain limitations, depending on the electrical system parameters. Electrical system parameters will be investigated on previously mentioned converter operating modes. In this work There will also be investigated converters frequency support function and different off the electrical system start-up situations.

Turinys

ĮVADAS.....	11
1 APŽVALGINĖ DALIS.....	12
1.1 HVDC sistemų taikymo sritys.....	12
1.2 Pagrindiniai HVDC keitiklių tipai.....	13
1.3 Įtampos šaltinio keitikliai (angl. „voltage source converters“).....	14
1.4 VSC keitiklio privalumai ir trūkumai:.....	16
1.5 HVDC elektros perdavimo sistemų su VSC keitikliais konfigūracijos.....	17
1.6 Galios srauto krypties keitimas.....	19
1.7 Sistemos dažnio palaikymas.....	20
1.8 Sistemos paleidimo galimybė („Black start“ režimas).....	21
1.9 HVDC keitiklio sistemai keliami reikalavimai galios srauto valdymui ir dažnio palaikymui	22
1.9.1 Palaikomas dažnio diapazonas.....	22
1.9.2 Dažnio palaikymas HVDC keitikliu, esant numatytai dažnio kitimo spartai.....	22
1.9.3 Aktyviosios galios srauto valdymas, valdymo diapazonas.....	22
1.9.4 Dažnio valdymas.....	23
1.9.5 Sistemos inercija.....	24
2 METODINĖ DALIS.....	25
2.1 Keitiklio modelis, išreikštas A-B-C fazių vektoriais.....	25
2.2 Sinusinė impulso pločio moduliacija.....	26
2.3 Keitiklio modelis D – Q ašyse.....	27
2.4 VSC keitiklio transformatoriaus modelis.....	28
2.5 VSC keitiklio ir AC tinklo modelis A – B – C koordinačių plokštumoje.....	28
2.6 VSC keitiklio ir AC tinklo modelis D – Q koordinačių plokštumoje.....	29
2.7 VSC keitiklio valdymo principai.....	30
2.8 Galios srautai tarp VSC keitiklio ir elektros sistemos.....	31
2.9 Realios sistemos galios srautai tarp VSC keitiklio ir elektros sistemos.....	32

2.10	Keitiklio ir elektros sistemos darbas	34
2.11	Elektros sistemos ir HVDC sistemų charakteristikos	34
2.12	Galios srauto krypties keitimo HVDC keitiklyje tyrimas	36
2.12.1	HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 1 tyrimo atveju	36
2.12.2	HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 2 tyrimo atveju	39
2.12.3	HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 3 tyrimo atveju	39
2.13	Elektros sistemos paleidimo HVDC keitikliu tyrimas	40
2.13.1	Modelio parametrai ir tyrimo eiga	41
2.14	Dažnio palaikymo HVDC keitikliu tyrimas	42
3	TYRIMO IR REZULTATŲ DALIS	43
3.1	Galios srauto krypties pakeitimo modeliavimas ir rezultatai	43
3.1.1	Sistemos trumpojo jungimo galingumo įtaka galios srauto krypties pakeitimo procesui	44
3.1.2	Sistemos varžos santykio X/R įtaka galios srauto krypties pakeitimo procesui	47
3.1.3	Galios srauto krypties pakeitimo greičio įtakos tyrimas sisteminiams procesams	49
3.2	Išjungtos elektros sistemos paleidimo („black-start“) tyrimo rezultatai	52
3.2.1	Transformatoriaus paleidimas elektros sistemoje	52
3.2.2	20 km el. linijos su $S = 170 + j20$ MVA apkrova įjungimo modeliavimas	54
3.2.3	200 km el. linijos su $S = 10 + j5$ MVA galios apkrova įjungimo modeliavimas	56
3.2.4	HVDC keitiklio prijungimas prie elektros sistemos	57
3.3	Sistemos dažnio reguliavimo HVDC keitikliu tyrimo rezultatai	58
	IŠVADOS	61
	LITERATŪRA	63
	PRIEDAI	65
	Priedas nr. 1 El. sistemos trumpojo jungimo galios įtakos tyrimo rezultatai	66
	Priedas nr. 2 Sistemos varžų santykio įtakos HVDC keitiklio darbui tyrimo rezultatai	70
	Priedas nr. 3 Galios srauto keitimo greičio įtakos tyrimo rezultatai	73
	Priedas nr. 4 Keitiklio paleidimas kartu su veikiančia sistema	78
	Priedas nr. 5 HVDC keitiklio dažnio reguliavimo tyrimo rezultatai	79

Lentelių sąrašas

1.2-1 lentelė. Įtampos ir srovės šaltinių tipų keitiklių palyginimas	13
2.3-1 lentelė. Valdymo signalų ryšys polinėje ir ortogonalinėje koordinacijų sistemose	27
2.11-1 lentelė. Elektros sistemų rodiklių palyginimas	35
2.12-1 lentelė. Elektros sistemos skaičiavimo parametrų rezultatai 1 tyrimo atvejui.....	38
2.12-2 lentelė. Elektros sistemos X/R vertės 2 tyrimo atvejui	39
3.1-1 lentelė. Apibendrinti galios srauto krypties keitimo duomenys, kečiant 1 sistemos galingumą ..	45
3.1-2 lentelė. Nustatytas ir sumodeliuotas galios srauto krypties keitimo laikotarpis $S1_{tr} = 550$ MVA sistemai.....	50

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav. HVDC keitiklių tipai	13
1.2 pav. VSC keitiklio schema	14
1.3 pav. VSC keitiklio fazorių diagrama keturiuose kvadrantuose.....	15
1.4 pav. VSC keitiklių jungčių tipai.....	19
1.5 pav. Dažnio reguliavimo aktyviaja galia charakteristika. ΔP yra aktyviosios galios pokytis HVDC sistemoje, f_n yra nominalus sistemos dažnis ir Δf yra AC sistemos dažnio nuokrypis.....	23
1.6 pav. Dažnio reguliavimo aktyviaja galia charakteristika. Laiko pastoviosios. ΔP - aktyviosios galios pokytis, sukeliamas dažnio pokyčio.....	24
2.1 pav. VSC keitiklio valdymo struktūra A-B-C koordinačių plokštumoje.....	25
2.2 pav. SPWM būdu generuojami IGBT įtaisų valdymo signalai	26
2.3 pav. Keitiklio vektorinio valdymo schema	27
2.4 pav. VSC keitiklis su vietiniu elektros tinklu.....	28
2.5 pav. Atstojamoji sistemos schema galios srautų tyrimui	31
2.6 pav. Realios sistemos galios srautų tyrimo schema	33
2.7 pav. HVDC sistemos modelis elektros sistemos trumpojo jungimo galios įtakos tyrimui	36
2.8 pav. HVDC sistemos galios srauto krypties pakeitimo realizavimas.....	37
2.9 pav. HVDC sistemos modelis elektros sistemos paleidimo tyrimui	41
2.10 pav. HVDC sistemos modelis dažnio reguliavimui „EMTP-RV“ programos aplinkoje	43
3.1 pav. Prijungtos $S_{tr} = 1000$ MVA el. sistemos galios srauto krypties keitimo procesas	46
3.2 pav. Prijungtos $S_{tr} = 1000$ MVA el. sistemos detalizuotas galios srauto krypties keitimo procesas.....	47
3.3 pav. Galios srautų krypties keitimas, kai $X/R = 10$	49
3.4 pav. Galios srautų krypties keitimas, kai pilnas srauto pakeitimas įvykdomas per 400 ms.....	51
3.5 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimas HVDC keitikliu	52
3.6 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimo HVDC keitikliu srovės proceso pradžioje	53
3.7 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimo HVDC keitikliu srovės procesui nusistovėjus.....	53
3.8 pav. 20 km 330 kV linijos su transformatoriumi ir apkrova įjungimas	54
3.9 pav. 20 km 330 kV linijos su transformatoriumi įjungimas.....	54

3.10 pav. 20 km 330 kV linijos apkrovos įjungimas.....	55
3.11 pav. 200 km 330 kV linijos su transformatoriumi ir apkrova įjungimas	56
3.12 pav. 200 km 330 kV linijos su transformatoriumi įjungimas.....	56
3.13 pav. 200 km 330 kV linijos apkrovos įjungimas.....	57
3.14 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant be el. sistemos (įtampų ir dažnių grafikai) 1 graf. – sist. dažnis už jungtuvo „SW1“, 2 graf. – C fazės momentinė įtampa įtampa, 3 graf. – C fazės vidutinė įtampa, 4 graf. – viso modeliavimo proceso dažnis	59
3.15 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant be el. sistemos (galių srautų grafikai) 1 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ1, 2 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ1, 3 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ2, 4 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ2.....	59
3.16 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant su el. sistema (įtampų ir dažnių grafikai) 1 graf. – sist. dažnis už jungtuvo „SW1“, 2 graf. – C fazės momentinė įtampa įtampa, 3 graf. – C fazės vidutinė įtampa, 4 graf. – viso modeliavimo proceso dažnis	60
3.17 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant su el. sistema (galių srautų grafikai) 1 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ1, 2 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ1, 3 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ2, 4 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ2.....	60

ĮVADAS

Aukštos įtampos nuolatinės srovės (HVDC) elektros perdavimo technologija yra pakankamai išvystyta, tačiau pastaruoju metu vykdoma daug naujų tyrimų ir projektų šios technologijos plėtojimo klausimu. Elektros sistemos vis sudėtingėja dėl atsirandančių naujų ir kintančių esamų sisteminių ryšių, taip pat dėl taikomų naujų technologijų. Daugelis elektros sistemas aptarnaujančių įmonių maksimaliai išnaudoja elektros tinklų galios perdavimo galimybes ties ribinėmis tinklo stabilumo vertėmis dėl ekonominių ar kitų sumetimų, siekdamos užtikrinti didžiausią patikimos ir švarios energijos kiekį vartotojui mažiausia kaina.

Besivystančiose šalyse tokiose kaip Kinija, Indija, Brazilija ir kitose, didėjantis energijos suvartojimas lemia augantį HVDC technologijos poreikį energijos perdavimui dideliais atstumais. Besivystančiose elektros sistemose, siekiant užtikrinti sistemų lankstumą ir stabilumą bei norint sujungti dvi nesinchroniškas elektros sistemas, naudojamos HVDC technologijos. Taip pat augantis atsinaujinančios energetikos šaltinių (saulės, vėjo energijos) integravimo į elektros sistemas poreikis vėlgi verčia remtis HVDC technologija.

Griežtėjant elektros sistemų techniniams, ekonominiams ir aplinkosauginiams reikalavimams teks ieškoti naujų sprendimų kaip didinti elektros sistemų efektyvumą ir tiekti reikiamos kokybės elektros energiją, todėl HVDC technologija tampa viena iš reikšmingiausių sprendžiant šiuos uždavinius.

Darbo tikslas: išanalizuoti ir sumodeliuoti HVDC sistemos keitiklyje vykstančius procesus, įvertinus elektros sistemos parametrų įtaką.

Uždaviniai:

1. sukurti ir aprašyti sistemos modelius ir parametrus;
2. ištirti galios srauto krypties keitimo procesą ir vykstančius pereinamuosius procesus sistemoje, vertinant skirtingus elektros sistemos parametrus;
3. ištirti pereinamuosius procesus elektros sistemoje, keitikliu reguliuojant sistemos dažnį;
4. ištirti pereinamuosius procesus elektros sistemoje ir keitiklyje sistemos paleidimo (angl. „black-start“) atveju.

1 APŽVALGINĖ DALIS

1.1 HVDC sistemų taikymo sritys

HVDC technologijos naudojimas elektros perdavimo sistemose, dėl jų techninių galimybių, apima daugelį atvejų. Dažniausiai ši technologija pasirenkama dėl tam tikrų techninių parametrų optimizavimo galimybės, kurią užtikrina būtent HVDC elektros perdavimo sistema. Tipinės HVDC sistemų taikymo sritys yra šios:

- Elektros perdavimas jūriniais povandeniniais kabeliais;

Kintamosios srovės elektros kabeliai turi didelį talpumą ir, kai kabelio ilgis viršija 40 – 70 km, sugeneruotos reaktyviosios galios kiekis tampa nepriimtinas. Šis atstumas gali būti padidintas naudojant reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius. Didesniems atstumams HVDC technologija yra ekonomiškesnė. Geras pavyzdys gali būti HVDC linija tarp Lietuvos ir Švedijos – 453 km ilgio povandeninė HVDC sistema, kurią sudaro dvi 300 kV nuolatinės srovės linijos. Keitiklių stotys yra Nybre (Švedija) ir Klaipėdoje (Lietuva).

- Didelio atstumo antžeminės kabelių linijos;

Ilgoms kintamosios srovės linijoms reikalingas kintamas (valdomas tam tikrame intervale) reaktyviosios galios kompensavimas. Paprastai 600 – 800 km yra kritinis atstumas, todėl didesniems atstumams, HVDC technologija vėlgi yra ekonomiškesnė. Geras pavyzdys yra 1360 km, 3,1GW, ± 500 kV „Pacific DC intertie“ išilgai vakarinės JAV pakrantės.

- Dviejų skirtingo dažnio kintamosios srovės elektros tinklų sujungimas;

Kai dvi elektros sistemos veikia skirtingais dažniais, nuolatinės srovės intarpas yra geras sprendimas. Pavyzdžiui, 500 MW, ± 79 kV įtampos „back-to-back“ Melo HVDC linija tarp Urugvajaus ir Brazilijos. Urugvajaus sistema veikia esant 50 Hz, o Brazilijos „National Grid“ veikia 60 Hz dažniu.

- Dviejų asinchroninių kintamosios srovės elektros tinklų sujungimas;

Jei fazių skirtumas tarp dviejų kintamosios srovės elektros sistemų yra didelis, jos negali būti tiesiogiai sujungtos viena su kita, pvz.: Lietuvos jungtis „LitPol Link“ 500 MW, 400 kV HVDC jungtis, jungiant Lietuvos ir Lenkijos nesinchroniškas elektros sistemas;

- Reguluojamas galios perdavimas tarp dviejų kintamosios srovės elektros tinklų, užtikrinant prekybą elektros energiją pagal nustatytus grafikus.

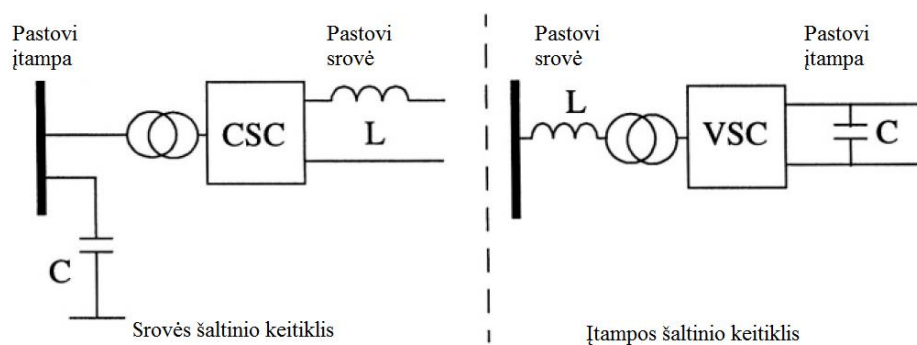
Vienas iš veiksnių, lemiantis galios srauto dydį, perduodamą per kintamosios srovės elektros liniją yra linijų varžos, todėl galios srauto valdymas tampa apribotas. Sudėtinguose kintamosios srovės tinkluose yra įprasta, kad kai kurios elektros linijos būna perkrautos tam tikrą laiką arba apkrautos

nepilnai. HVDC sistemos dalyvauja ir valdo galios srautus elektros sistemoje, taip užtikrindamos suplanuotą sistemų darbą ir prekybos elektros energija kiekius. Vienas tipiškas pavyzdys yra 200 MW, ± 57 kV HVDC sistema tarp Kvebeko ir Vermonto.

1.2 Pagrindiniai HVDC keitiklių tipai

HVDC sistemos reikalauja elektroninio keitiklio, kuris keistų elektros srovės tipą iš kintamos į nuolatinę ir atvirkščiai. Dabar egzistuoja dvi pagrindinės aukštos įtampos trifazių keitiklių grupės, kurios tinkamos šia užduočiai atlikti. Tai yra:

- Srovės šaltinio keitiklis (angl. „current source converter“);
- Įtampos šaltinio keitiklis (angl. „voltage source converter“).



1.1 pav. HVDC keitiklių tipai

Šiuolaikinėse aukštos įtampos nuolatinės srovės energijos perdavimo sistemose naudojami būtent šie keitikliai. Jų pasirinkimas priklauso nuo naudojimo sąlygų bei nuo ekonominių ir kitų aplinkos veiksnių. Pagrindiniai šių keitiklių skirtumai pateikiami 1.2-1 lentelėje.

1.2-1 lentelė. Įtampos ir srovės šaltinių tipų keitiklių palyginimas

	Keitiklio tipas	
	Įtampos šaltinio (VSC)	Srovės šaltinio (CSC)
• Kintamos srovės pusė (AC)	<ul style="list-style-type: none"> • Veikia kaip pastovios srovės šaltinis; • Reikalingas induktyvumas, kuris naudojamas kaip energijos kaupimo įrenginys; • Nereikalingas reaktyviosios galios šaltinis, nes keitiklis gali veikti bet kuriame kvadrante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Veikia kaip pastovios įtampos šaltinis; • Reikalingas kondensatorius, kuris naudojamas kaip energijos kaupimo įrenginys; • Reikalingi dideli AC filtrai harmonikoms panaikinti • Reikalingas reaktyviosios galios šaltinis, galios faktoriui gerinti.

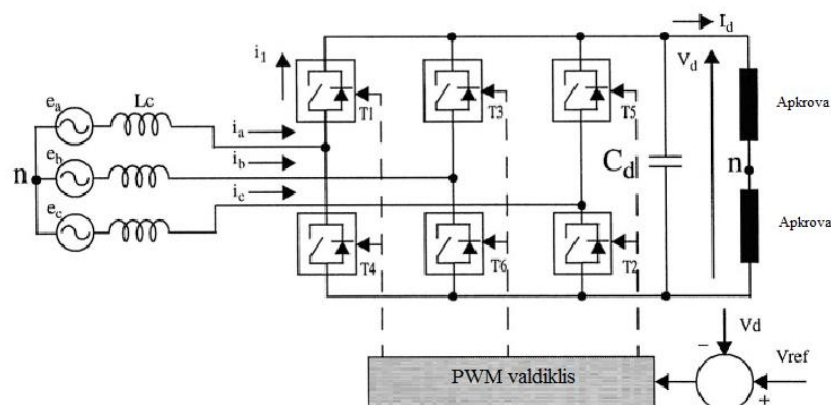
<ul style="list-style-type: none"> • Nuolatinės srovės pusė (DC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Veikia kaip pastovios įtampos šaltinis; • Reikalingas kondensatorius, kuris naudojamas kaip energijos kaupimo įrenginys; • DC intarpo kondensatorius (naudojamas energijos kaupimui) gali būti naudojamas kaip filtras, taip sumažinant išlaidas; • Problemiškas dėl DC linijos trumpųjų jungimų, nes DC intarpo kondensatorius išsikrauna ir tiekia srovę trumpojo jungimo taškui. 	<ul style="list-style-type: none"> • Veikia kaip pastovios srovės šaltinis; • Reikalingas induktyvumas, kuris naudojamas kaip energijos kaupimo įrenginys; • Reikalingi intarpo DC filtrai; • Dėl savo būdingos konstrukcijos suteikia trumpojo jungimo srovės limitavimo galimybes.
<ul style="list-style-type: none"> • Jungikliai (galios elektronika) 	<ul style="list-style-type: none"> • Savarankiškai junginėjami; • Perjungimas vyksta aukštų dažnių srityje; • Didesni perjungimo nuostoliai. 	<ul style="list-style-type: none"> • „Linijos junginėjami“ arba priverstinai junginėjami su nuoseklia kondensatoriumi; • Perjungimas vyksta pagal linijos dažnį, t.y. vienas pulsas per ciklą; • Mažesni perjungimo nuostoliai.

1.3 Įtampos šaltinio keitikliai (angl. „voltage source converters“)

Atsiradus ir tapus ekonomiškai prieinamiems išjungiamos užtūros (GTO) ir izoliuotosios užtūros bipoliariniams tranzistoriams (IGBT), įtampos šaltinio keitikliai tapo labiau prieinami ir lengviau pritaikomi HVDC sistemose. VSC keitiklių naudojimas elektros sistemose papildė CSC keitiklių galimybes ir suteikė lankstumo elektros sistemoms.

Pagrindinis nuolatinės srovės keitiklio veikimo aspektas yra impulso pločio moduliacija (PWM), t. y. būdas keisti nuolatinę srovę į kintamą. Tam kad būtų gauta sinusinė srovė ir įtampa keitiklio išėjime kintamosios srovės elektros sistemai, gali būti panaudoti keli impulso pločio moduliavimo būdai [1]:

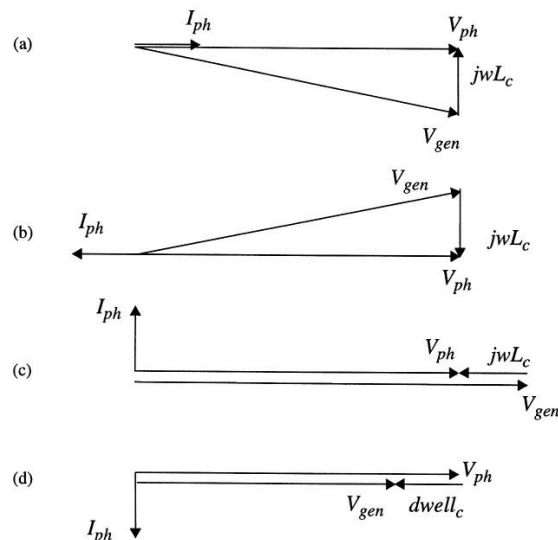
- selektyvusis harmonikų eliminavimas;
- trikampio nešančiojo signalo būdas;
- erdvinio vektoriaus būdas.



1.2 pav. VSC keitiklio schema

VSC keitiklio veikimo principas pavaizduotas 1.2 pav. Nuolatinės srovės intarpo kondensatorius C_d ir kintamos srovės pusės induktyvumas L_c yra privalomi VSC keitiklio elementai. DC intarpo įtampa V_d yra matuojama ir palyginama su nustatyta įtampos verte V_{ref} tam, kad būtų sugeneruotas paklaidos signalas, kuris valdo PWM valdiklį. Kai DC srovė I_d yra teigiama, VSC keitiklis veikia lygintuvo režimu. DC kondensatorius yra iškraunamas, kai jis maitina apkrovą, o valdymo sistema keis tranzistorių atidarymo kampus taip, kad galia būtų tiekiami iš kintamos srovės elektros sistemos tinklo. Kai DC srovė I_d yra neigiama, VSC keitiklis veikia inverterio režimu. DC kondensatorius yra įkraunamas iš DC šaltinio ir valdymo sistema keičia tranzistorių atidarymo kampus taip, kad galia būtų perduota iš DC sistemos į AC tinklą.

VSC keitiklis taip pat gali keisti tranzistorių atidarymo kampus taip, kad būtų kontroliuojamas reaktyviosios galios srautas ir būtų gautas reikiamas galios faktorius sistemoje. PWM valdiklis generuoja įtampą V_{gen} , kurios dažnis atitinka AC sistemos įtampos V_s dažnį (1.3 pav.)



1.3 pav. VSC keitiklio fazorių diagrama keturiuose kvadrantuose

- (a) darbas lygintuvo režimu;
- (b) darbas inverterio režimu;
- (c) reaktyvios galios tiekimo režimas, srovės fazoriui pralenkiant įtampos fazorių;
- (d) reaktyvios galios tiekimo režimas, srovės fazoriui atsiliekant nuo įtampos fazoriaus.

Keičiant generuojamos įtampos dydį V_{gen} ir jos fazoriaus ryšius su įtampa V_s , keitiklis gali veikti visuose keturiuose kvadrantuose, t.y. lygintuvo / inverterio darbo režimais su atsiliekančiu / lenkiančiu galios faktoriumi.

1.4 VSC keitiklio privalumai ir trūkumai:

Pagrindiniai VSC keitiklio privalumai yra šie:

- Aktyvioji ir reaktyvioji galios gali būti kontroliuojamos nepriklausomai. VSC sistema gali generuoti talpinio arba induktyviojo pobūdžio reaktyviają galią, nepriklausomai nuo aktyviosios galios lygio. Kiekviena keitiklių stotis gali suteikti įtampos reguliavimo galimybę vietiniam elektros tinklui, perduodant bet kokią aktyviosios galios kiekį;
- Jei aktyvioji galia neperduodama, abi keitiklių stotys gali veikti kaip du nepriklausomi statiniai sinchroniniai kompensatoriai (STATCOM) ir reguliuoti tinklo įtampą;
- Kintamosios įtampos generavimui naudojamas PWM būdas. Tiristorių jungimo dažnis siekia 1 – 2 kHz, dėl to atsirandančios harmonikos būna aukšto dažnio. Joms eliminuoti reikalingi mažesni filtrai, dėl to gaunami mažesni nuostoliai, mažesnis filtrų dydis ir kaina;
- Galios srautas gali būti pakeistas per (50 – 100 ms) nepakeičiant DC įtampos poliškumo (pakeičiama DC srovės kryptis). Tai reiškia, kad gali būti panaudoti paprastesni XLPE tipo nuolatinės srovės kabeliai;
- Gera reakcija į tinklo gedimus. VSC keitiklis valdo AC įtampą ir srovę, todėl jo tiekiamą srovę į trumpojo jungimo tašką yra apribota iki nominalios keitiklio srovės. Keitiklis neatsijungia trumpojo jungimo metu ir palaiko įtampą avarijų ir trikdžių metu;
- Sistemos paleidimo galimybė (angl. „black-start“ režimas). Galimybė paleisti išjungtą tinklą arba atstatyti jį po avarijos. Ši funkcija pašalina paleisties generatorių poreikį (aktualu ten, kur ribota erdvė, pvz. vėjo elektrinių parkuose jūroje);
- Aktyvios galios valdymo funkcijos VSC keitiklyje gali užtikrinti geresnes dažnio reguliavimo ir sistemos slopinimo galimybes;
- VSC keitiklis tinka kompleksinių DC tinklų kūrimui, kadangi nuolatinės srovės linijoje keitiklis paliko pastovią įtampą ir turi geresnes valdymo galimybes.

Pagrindiniai VSC keitiklio trūkumai yra šie:

- Keitiklio galios srautų valdymo lankstumas lemia padidėjusius nuostolius:
 1. Aukšto dažnio tranzistorių perjungimas lemia padidėjusius perjungimo nuostolius.
 2. IGBT tranzistoriuose yra didesnis įtampos kritimas negu tiristoriuose. Dėl to VSC sistemose gaunami didesni laidumo nuostoliai, lyginant su LCC (angl. „line commutated converter“) sistemomis.
- VSC keitikliai reikalauja didesnių kaštų nei LCC keitikliai. VSC keitikliuose reikia daugiau puslaidininkinių įtaisų, ypatingai modulinėse sistemose;
- IGBT įtaisai yra labiau pažeidžiami srovės perkrovų nei tiristoriai;

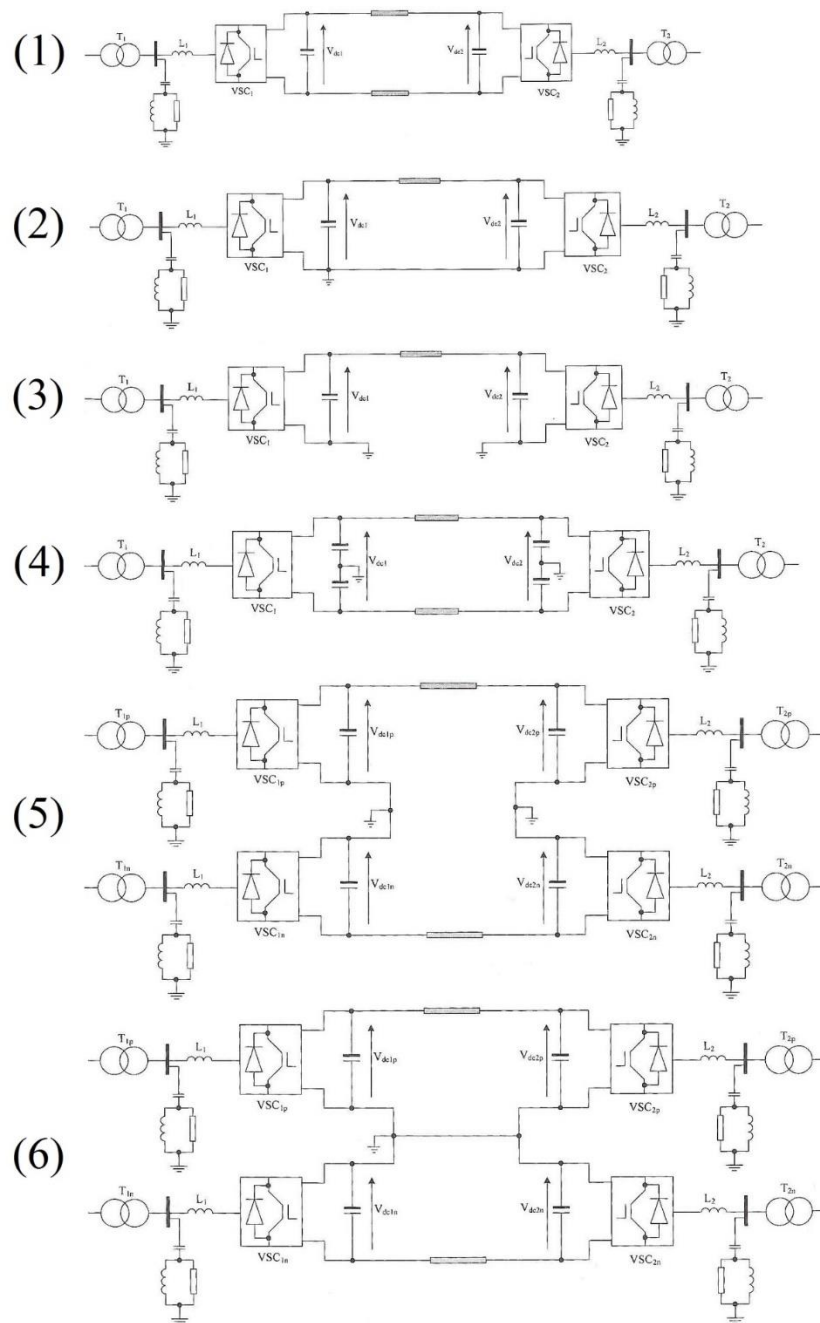
- AC ir DC tinklų sujungimo vietose galimi dideli viršįtampių lygiai. Tai gali sukelti problemų su talpinio pobūdžio kabelių sistemomis, sukeliant elektromagnetinius trikdžius;
- Trumpieji jungimai DC dalyje yra rimta problema, nes VSC keitiklis elgiasi kaip nevaldomas diodų tiltas per DC trumpąjį jungimą. Paprastai naudojami aukštesnių, negu reikia, parametrų diodai, o trumpąjį jungimą pašalina AC jungtuvai. VSC keitiklio pakartotinis įjungimas po AC jungtuvo atsijungimo gali užtrukti ilgą laiką;

1.5 HVDC elektros perdavimo sistemų su VSC keitikliais konfigūracijos

1.4 pav. pateikiamos 6 skirtingos HVDC keitiklių jungimo konfigūracijos:

1. Simetrinė monopolinė jungtis (1.4 pav. nr. 1):
 - keitiklio transformatoriai nėra veikiami DC įtampos, nes virtualus DC grandinės įžeminimo taškas atsiranda dėl DC kabelių išilginio talpumo;
 - neturi įžemėjimo srovės DC grandinėje;
 - AC tinklas neturi įtakos DC grandinės polius-žemė trumpojo jungimo tipui;
 - sistema reikalauja dviejų pilnai izoliuotų kabelių DC grandinei.
2. Asimetrinė monopolinė jungtis su grįžtamąja metalo jungtimi (1.4 pav. nr. 2):
 - įžeminimo jungties kabelis nėra izoliuotas, dėl to mažėja sistemos kaina;
 - neturi įžemėjimo srovės DC grandinėje;
 - galimas sistemos praplėtimas pagal bipolinę konfigūraciją;
 - keitiklio transformatorių veikia įtampa, lygi pusei DC jungties įtampos dydžio;
 - sistema patiria didelį AC tinklo srovės poveikį, esant polius-žemė trumpojo jungimo tipui, dėl to keitiklio jungikliai turi atlaikyti dideles srovės apkrovas.
3. Asimetrinė monopolinė jungtis su įžeminimo grįžtamuoju ryšiu (1.4 pav. nr. 3):
 - naudojamas vienas DC kabelis - sumažinami perdavimo nuostoliai ir sistemos kaina;
 - galimas sistemos praplėtimas į bipolinę jungtį;
 - keitiklio transformatorių veikia įtampa, lygi DC jungties įtampai;
 - sistema patiria didelį AC tinklo srovės poveikį, esant polius-žemė trumpojo jungimo tipui, dėl to keitiklio jungikliai turi atlaikyti dideles srovės apkrovas.
 - atsiranda papildomas neigiamas poveikis aplinkai dėl įžeminimo elektrodų naudojimo ir nenutrūkstamo įžeminimo srovės tekėjimo, todėl reikalingi specialūs leidimai.
4. Simetrinė bipolinė jungtis su "plaukiančiu" žemės ryšiu (1.4 pav. nr. 4):
 - keitiklio transformatorius nepatiria DC įtampos poveikio;
 - AC tinklas neturi įtakos DC grandinės polius-žemė trumpojo jungimo tipui;
 - DC intarpo kondensatoriai ir kabeliai turi būti pritaikyti aukščiausiai galimai DC įtampai

- turi būti gautas leidimas dėl veikimo su įžeminimo srovės grįžtamuoju ryšiu, esant vieno DC kabelio atsijungimui (taip pat turi būti įvertinta AC srovės įtaka).
5. Tikroji simetrinė bipolinė jungtis su žemės grįžtamuoju ryšiu (1.4 pav. nr. 5):
- sistema patiria didelį AC tinklo srovės poveikį, esant polius-žemė trumpojo jungimo tipui;
 - keitiklio transformatorius turi būti pritaikytas aukščiausiai galimai DC įtampai;
 - atsiranda papildomas neigiamas poveikis aplinkai dėl įžeminimo elektrodų naudojimo ir nenutrūkstamo įžeminimo srovės tekėjimo, todėl reikalingi specialūs leidimai.
6. Bipolinė VSC keitiklio HVDC sistemos jungtis su metalo grįžtamuoju ryšiu (1.4 pav. nr. 6):
- nėra įžeminimo srovės grįžtamojo ryšio;
 - padidinamas perduodamos galios kiekis be poreikio didinti DC intarpo įtampą;
 - keitiklio transformatorius patiria DC įtampos poveikį;



1.4 pav. VSC keitiklių jungčių tipai

1.6 Galios srauto krypties keitimas

HVDC elektros keitiklio sistema gali perduoti aktyvią abejomis kryptimis su ta pačia valdymo sistemos ir elektros jungties konfigūracija. Tai reiškia, kad aktyviosios galios srauto kryptis gali būti greitai pakeista be jokių kontrolės režimo pasikeitimų ir be jokių filtro perjungimų ar konverterio blokavimo [7]. Galios srauto kryptis pakeičiama, keičiant nuolatinės srovės kryptį, o ne pakeitus DC įtampos poliškumą. Srauto kitimo greitis priklauso nuo elektros tinklo parametrų. VSC tipo keitiklių darbui užtikrinti nereikalinga reaktyvioji galia [16]. VSC tipo keitikliai gali greitai reguliuoti aktyviosios galios srautą ir tuo pačiu metu – reaktyviosios galios srautą, kurio valdymas yra nepriklausomas nuo DC

intarpu perduodamos galios [15]. Reaktyviosios galios mainai gali būti nenutraukiami, vykstant aktyviosios galios srauto krypties pakeitimui [7].

VSC keitiklis gali nepriklausomai kontroliuoti ir perduoti aktyviają ir reaktyviają galias AC tinklui, todėl jis užtikrina įtampos reguliavimo galimybę ir gali veikti silpname ar net atsijungusiame AC tinkle. DC intarpo įtampos poliškumas VSC tipo keitikliuose visais atvejais išlaikomas pastovus [15]. Aktyviosios galios srauto krypties pakeitimas įvykdomas keičiant ne DC įtampos poliškumą, bet srovės kryptį [16], todėl išvengiama įtampos poveikio, sukauptųjų erdvinių ir paviršinių krūvių sukeltamų problemų ir galima naudoti XLPE kabelius [6], [21].

Remiantis literatūra [20], galios srauto krypties pakeitimas gali ryškiai prisidėti prie elektros sistemos stabilaus veikimo. Vienas iš aptartų atvejų nurodo, kad, susiklosčius tam tikroms sąlygoms elektros tinkle, keitiklis sureaguoja ir sureguliuoja galių srautus tarp sistemų taip, kad, įvykus trumpajam jungimui tinkle, elektros sistemose palaikomas stabilus darbo režimas pereinamųjų procesų metu.

1.7 Sistemos dažnio palaikymas

Statinis dažnio nuokrypis įvyks, jei yra apkrovos ir generavimo disbalansas AC sistemoje. Siekiant sumažinti šias problemas, HVDC valdymas gali būti sukonfigūruotas taip, kad sistema reguliuotų galios srauto mainų procesą, atsižvelgiant į dažnio nuokrypį. Dinaminis dažnių nestabilumas yra šiek tiek kitoks, ir pasireiškia paprastai kaip tarpregioninis reiškinys didelėse AC sistemose. Čia įrenginių grupės dažnis svyruoja kitos nutolusios sinchroninių generatorių grupės atžvilgiu. Šis reiškinys paprastai įvyksta daugiau nei 10 s intervale arba dažnių diapazone 0,01-0,1 Hz. Šiuo atveju dažnio signalas arba mašinos greičio signalas perduodamas į HVDC valdymo sistemą ir, kai yra tinkamai perskaiciuotas reikalaujamam dydžiui ir fazei, jis perduodamas į HVDC galios srauto valdymo grandinę, aktyviosios galios valdymui.

Galios srautas HVDC keitiklyje paprastai laikomas pastovus ir yra nustatytas pagal elektros energijos pirkimo bei pardavimo grafikus. Dėl anksčiau minėtų priežasčių galių srautai gali būti keičiami. Pagrindinės priežastys, dėl kurių turėtų atsirasti papildoma galios reguliavimo funkcija, yra šios:

- Dideli VSC keitikliai, veikiantys inverterio režimu, turėtų būti traktuojami kaip bet kuri didelė įprastinė elektrinė. Didelės galios generatoriai naudoja dažninį statizmo reguliatorių papildomam galios srauto reguliavimui. Keitiklis, veikiantis lygintuvo režimu, gali būti traktuojamas kaip bet kokia AC sistemos apkrova.
- Esant silpnam, mažos inercijos AC sistemai gali būti naudinga valdyti galios srautą VSC, atsižvelgiant į AC sistemos dažnio nuokrypį. Ši kontrolės funkcija taikoma tiek lygintuvams,

tiek inverteriams. Taip pat VSC keitiklio dažnio palaikymo galimybė gali būti naudojama ir valdant dažnį atstatomoje elektros sistemoje po avarijos.

Dažnio reguliatoriaus statizmo koeficientas gali būti apskaičiuojamas taip:

$$k_{\text{stat}} = \frac{2P_{\text{DCmax}}}{f_{\text{gmax}} - f_{\text{gmin}}} \quad (1)$$

kur f_{gmax} ir f_{gmin} yra leidžiamos kintamosios srovės sistemos dažnis nukrypimų ribos ir P_{DCmax} yra didžiausias leidžiamas galios nuokrypis keitiklyje elektros sistemos palaikymui. Paprastai HVDC keitiklis jungia dvi elektros sistemas, iš kurių viena yra stipresnė ir gali paremti prijungtą silpnesnę sistemą.

1.8 Sistemos paleidimo galimybė („Black start“ režimas)

Analizuojant duomenis apie elektros energijos tiekimo nutrūkimus, nustatyta, kad elektros sistemose, kuriose buvo įrengti HVDC keitikliai, jungiantys dvi asinchronines sistemas, gali veikti kaip barjerai, stabdantys elektros sistemos griūtį [9]. AC elektros tinklas, kuris yra jau atjungtas dėl avarijos ar kitų priežasčių, gali būti paleidžiamas naudojant įtampos šaltinio tipo keitiklį (VSC), dar žinomą kaip „HVDC Light“ [10,11]. VSC keitiklis gali suteikti veiksmingą įtampos ir dažnio stabilizavimo funkciją elektros sistemos atkūrimo metu, kai tinklo parametrai (įtampa, dažnis, trumpojo jungimo galingumas ir kt.) kinta nuo nulinio iki nominalaus lygio.

Naudojant PWM būdą, VSC keitiklis sukuria AC tinklo įtampą atitinkantį nustatytąjį signalą, kurį apskaičiuoja VSC keitiklio valdiklis. Pagal šį signalą generuojama tikroji kintama įtampa AC tinklo prijungimo taške.

Normalaus darbo režimu, šis signalas kuriamas pagal nustatytus aktyviosios (arba DC įtampą) ir reaktyviosios (arba AC tinklo įtampą) galių valdymo parametrus ir esamą AC tinklo įtampos lygį.

Elektros sistemos atkūrimo metu AC įtampa atitinkantis nustatytasis signalas kuriamas pagal iš anksto nustatytą fazės kampo ir dažnio dydį [8].

Kai valdymo sistema nustato elektros sistemos atsijungimą arba griūtį, keitiklis persijungia į sistemos paleidimo režimą. Dėl to keitiklis yra blokuojamas – AC jungtuvas atjungiamas. Tada valdymo sistema, persijungusi į sistemos paleidimo režimą, iš vidinio įtampos signalo generatoriaus sukuria AC įtampą atitinkantį signalą, pagal kurį pradeda generuoti AC tinklo įtampa keitiklyje.

1.9 HVDC keitiklio sistemai keliami reikalavimai galios srauto valdymui ir dažnio palaikymui

Pagal Europos komisijos direktyvą yra sudaryti reikalavimai, kurie skirti reglamentuoti HVDC sistemų darbui. Šis reglamentas apima technines sąlygas bei rekomendacijas HVDC sistemos valdytojui ir elektros sistemos operatoriui, pagal kurias turi būti vykdoma HVDC sistemos veikla bei jos dalyvavimas bendroje elektros perdavimo sistemoje. Šioje dalyje bus aptarti esminiai reikalavimai HVDC sisteminiams keitikliams, kurie susiję su aktyviosios galios srautų valdymu bei dažnio valdymu ir palaikymu elektros sistemoje.

1.9.1 Palaikomas dažnio diapazonas

Įvairiais darbo režimais sistemoje galimi dažnių svyravimai, todėl pagal nustatytus normatyvus HVDC keitiklio sistema turi veikti tam tikruose numatytose dažnio diapazono ribose.

Elektros sistemos dažnis skirstomas į tam tikrus diapazonus, o šiems diapazonams priskiriamas laikas, kuris nurodo, kokį laiko tarpą sisteminis HVDC keitiklis turi neatsijungti. Viso išskiriami 6 dažnių diapazonai, o kraštutinės pirmo ir paskutinio diapazonų vertės atitinkamai yra 47-52 Hz. Šiuose diapazonuose veikimo laiką daugeliu atveju nustato elektros sistemos operatorius, tačiau turi atsižvelgti į direktyvoje nurodytus standartus. Jeigu dažnis viršija arba nukrenta žemiau nurodytų verčių, tai keitiklis gali būti atjungimas.

1.9.2 Dažnio palaikymas HVDC keitikliu, esant numatytai dažnio kitimo spartai

Atsižvelgiant į dažnio palaikymo galimybę, esant numatytai dažnio kitimo spartai elektros sistemoje, HVDC keitiklis tu būti prijungtas prie elektros sistemos ir galėti veikti, kai dažnio kitimo sparta sistemoje kinta diapazone nuo $-2,5$ iki $+2,5$ Hz/s (matuojant bet kuriuo laiko momentu dažnio kitimo spartos vidurkį 1 s laikotarpyje).

1.9.3 Aktyviosios galios srauto valdymas, valdymo diapazonas

HVDC sistema turi galėti perduoti maksimalią galią, kurią atlaiko keitiklis ir kiti sistemos komponentai.

Elektros sistemos operatorius gali nustatyti minimalų ir maksimalų galios pakeitimo žingsnį, reguliuojant perduodamą elektros energiją HVDC keitikliu. Operatorius taip pat gali numatyti maksimalius galios srautus į abejomis kryptimis ir nustatyti delsos laiką, per kurį HVDC sistema sukreguoja į operatoriaus poreikį pakeisti perduodamą galią.

Esant trikdžiams tinkle, HVDC sistema turi turėti galimybę reguliuoti perduodamos aktyvios galios dydį pagal elektros sistemos operatoriaus nurodytus žingsnius. Tai turi būti vykdoma kuo greičiau

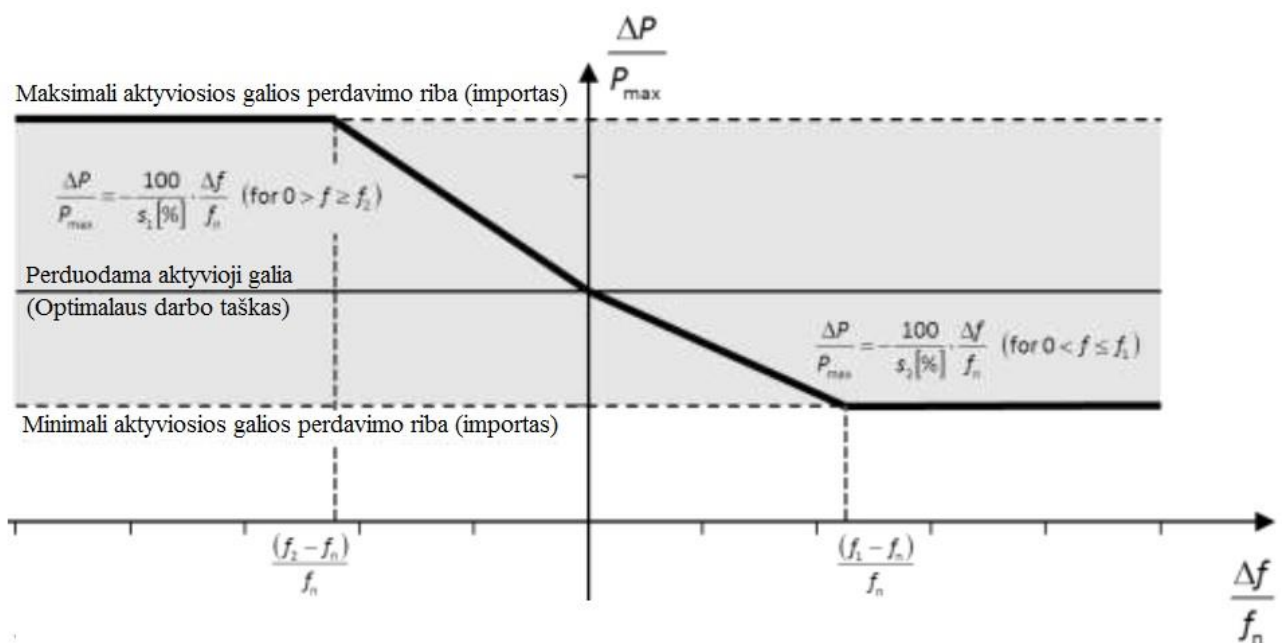
– kiek tai leidžia techninės sąlygos. Jeigu reagavimo delsos laikas didesnis nei 10 ms, tai keitiklio eksploatuotojas turi pateikti paaiškinimus ESO.

ESO turi teisę reikalauti kiek galima greitesnio galios srauto krypties pakeitimo. Maksimalaus galios srauto pakeitimas turi būti įmanomas abejomis kryptimis. Tai turi būti įgyvendinta kaip įmanoma greičiau, kiek leidžia techninės sąlygos. Jei šis laikas viršija 2 sekundes, HVDC sistemos eksploatuotojas pagrįstai nustatytą laikotarpį turi nurodyti ESO.

Sujungiant asinchronines elektros sistemas ar sujungiant įvairias kitas elektros sistemas, ESO turi turėti galimybę valdyti HVDC sistemą taip, kad būtų efektyviai realizuojami tarpvalstybiniai elektros energijos mainai ir valdomas rezervinės reguliavimo galios srautas.

1.9.4 Dažnio valdymas

Dažnio valdymas aktyviaja galia, susijęs su HVDC sistema, yra apribotas nustatytų minimalios ir maksimalios perduodamos galios (bet kuria kryptimi) ribų (1.5 pav.)

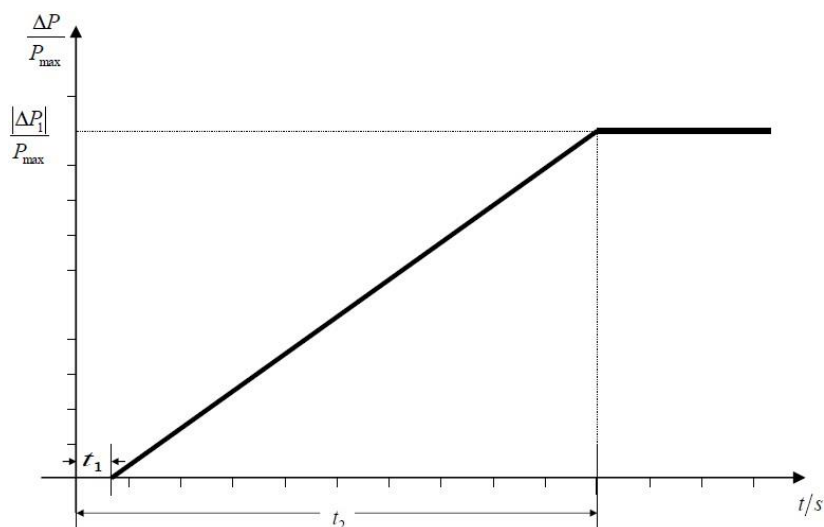


1.5 pav. Dažnio reguliavimo aktyviaja galia charakteristika. ΔP yra aktyviosios galios pokytis HVDC sistemoje, f_n yra nominalus sistemos dažnis ir Δf yra AC sistemos dažnio nuokrypis.

Dažnio pokyčio žingsnis, kuris įvyksta dėl aktyviosios galios srauto reguliavimo turi būti kuo greitesnis, kiek tai leidžia techninės galimybės ir ant ar virš juodos linijos 6 pav., suderinant su ESO nustatytais parametrais.

HVDC sistema turi būti pajėgi keisti tiekiamos aktyviosios galios dydį ΔP taip, kad tenkintų nustatytus ESO reikalavimus, atsižvelgiant į laiko tarpus t_1 ir t_2 , bei laikotarpius, nurodytus vėliau. Nurodytos laiko pastoviosios turi būti nustatytos ESO. Pradinė laiko pastovioji t_1 turi būti kiek įmanoma

mažesnė, atsižvelgiant į technines sąlygas, jei ji didesnė nei 0,5 s, tai HVDC sistemos eksploatuotojas turi pateikti paaiškinimą ESO ir gauti iš jo patvirtinimą dėl sistemos veikimo.



1.6 pav. Dažnio reguliavimo aktyviaja galia charakteristika. Laiko pastoviosios. ΔP - aktyviosios galios pokytis, sukeliamas dažnio pokyčio

Maksimalus leistinas laiko uždelsimas $t_1 = 0,5$ s, o maksimalus leistinas laikas pilnai aktyvacijai $t_2 = 30$ s (1.6 pav.), ilgesnis aktyvacijos laikas nustatomas ESO.

ESO turi teisę reikalauti, kad HVDC sistemos eksploatuotojas suteiktų galimybę ESO valdyti HVDC sistemos aktyviosios galios srautą, priklausomai nuo dažnio bet kuriame HVDC keitiklio prijungimo taške prie elektros sistemos tam, kad būtų išlaikytas stabilus elektros sistemos dažnis. Dažnio valdymo veikimo principai, susiję veiklos parametrai ir inicijavimo kriterijai turi būti nustatomi ESO.

1.9.5 Sistemos inercija

Jeigu ESO reikalauja, HVDC sistema turi užtikrinti inercijos funkciją elektros tinklui, esant dažnio pasikeitimams ir pradėdama vykdyti, esant žemo ir/ar aukšto dažnio režimais. HVDC sistema turi reaguoti ir pritaikyti galios srautą (tiekiamą arba priimamą) AC sistemai tam, kad būtų suvaldytas dažnio kitimas. ESO reikalavimai turi būti apibrėžti atlikus reikiamas tinklo analizes.

2 METODINĖ DALIS

Šioje dalyje bus aptariami elektros sistemos modelio elementai, modelis ir modeliavimo eiga bei parametrai. Remiantis literatūros duomenimis, bus nustatyta ir aprašyta, kaip modelis aprašomas matematiškai ir kaip realizuotas kompiuterinėje modeliavimo programoje.

2.1 Keitiklio modelis, išreikštas A-B-C fazių vektoriais

A-B-C fazių vektorių lygtys dviejų lygių VSC keitikliui yra:

$$v_{ca} = \frac{1}{2} V_{dc} m_a = \frac{1}{2} V_{dc} M_a \cos(\omega t + \varphi_m)$$

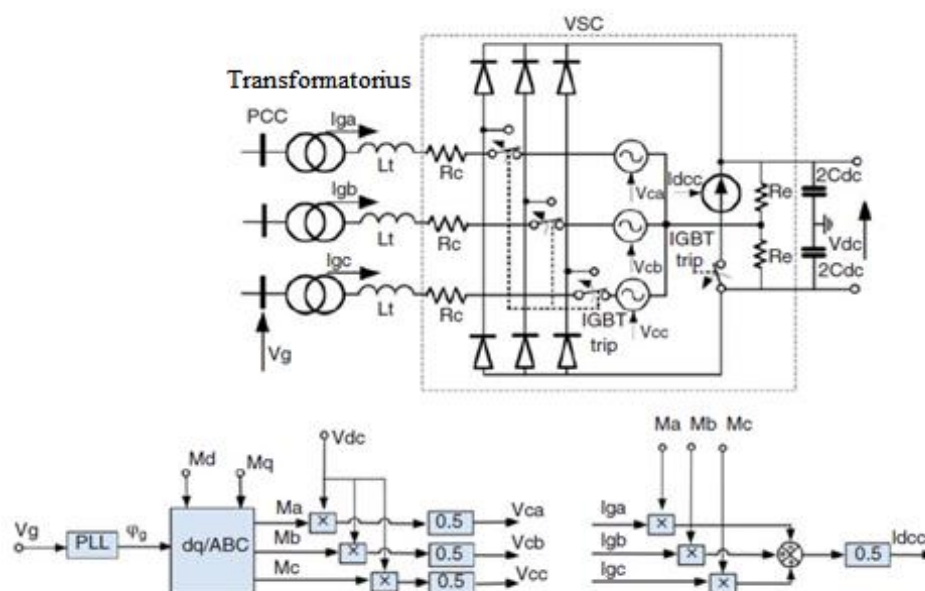
$$v_{cb} = \frac{1}{2} V_{dc} m_b = \frac{1}{2} V_{dc} M_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_m) \quad (2)$$

$$v_{cc} = \frac{1}{2} V_{dc} m_c = \frac{1}{2} V_{dc} M_c \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_m)$$

Priimama, kad sistema yra simetriška ir subalansuota. Galios balanso lygtis keitikliui yra tokia:

$$P_{dc} = P_{ac} \quad (3)$$

$$V_{dc} I_{d_{cc}} = \frac{1}{2} (i_{ga} v_{ca} + i_{gb} v_{cb} + i_{gc} v_{cc}) \quad (4)$$



2.1 pav. VSC keitiklio valdymo struktūra A-B-C koordinatinių plokštumoje

Pakeitus pirmąsias tris lygtis gaunama DC intarpo srovė:

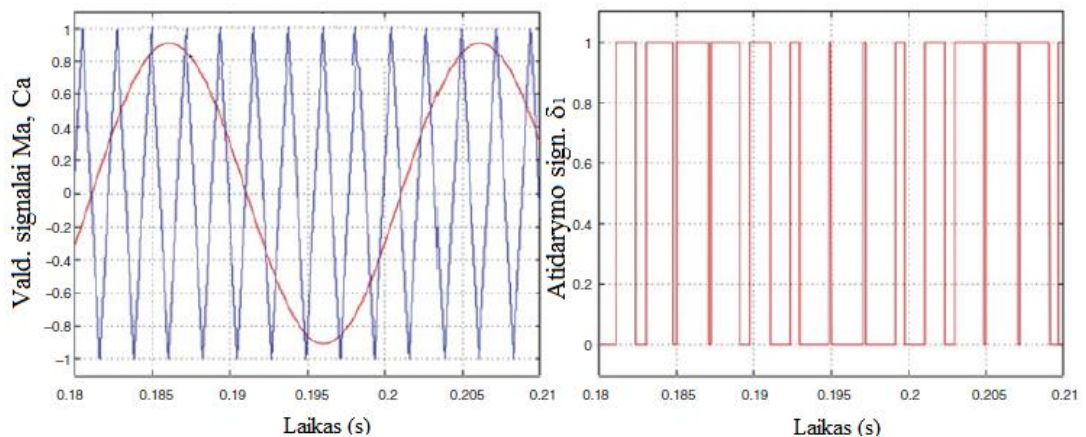
$$I_{d_{cc}} = \frac{1}{2}(i_{ga}m_a + i_{gb}m_b + i_{gc}m_c) \quad (5)$$

Dviejų lygių VSC keitiklis elgiasi kaip valdomas įtampos šaltinis AC tinklo pusėje, remiantis lygtimi (2) ir kaip reguliuojamas srovės šaltinis Nuolatinės srovės intarpe, remiantis lygtimi (5). 2.1 pav. pavaizduotas tipinis grafinis simetrinio monopolinio VSC keitiklio modelis. Pastarajame paveikslėlyje, R_c reiškia visus nuo srovės priklausančius nuostolius keitiklyje ir transformatoriuje (laidumo ir perjungimo nuostoliai), o R_e reiškia nuo įtampos priklausančius nuostolius (nuostoliai dėl nuotėkio ir DC intarpo kondensatorių). Diodų tiltas atjungiamas normaliu darbo režimu jungikliu "IGBT trip". Esant trumpajam jungimui DC linijoje, IGBT įtaisai yra blokuojami ir prijungiamas diodų tiltas.

2.2 Sinusinė impulso pločio moduliacija

Kintamosios įtampos generavimui VSC keitikliuose dažniausiai naudojama sinusinė impulso pločio moduliacija (SPWM). Tai vienas iš galimų impulso pločio generavimo būdų [12]. IGBT įtaisų aktyvavimo signalai yra sukuriami atsižvelgiant į du dydžius – M_a ir C_a . M_a - moduluojantis signalas, išskirtinai sinusinės formos, kurio fazė ir dydis kinta. Jį generuoja valdymo sistema iš aukštesniojo lygio valdymo grandinių. C_a yra nešantysis signalas. Tai iš anksto nustatytų parametrų (dažnio ir dydžio) trikampės formos signalas.

IGBT įtaisų atidarymo signalai yra sukuriami, kai šių signalų grafikai susikerta (2.2 pav.).



2.2 pav. SPWM būdu generuojami IGBT įtaisų valdymo signalai

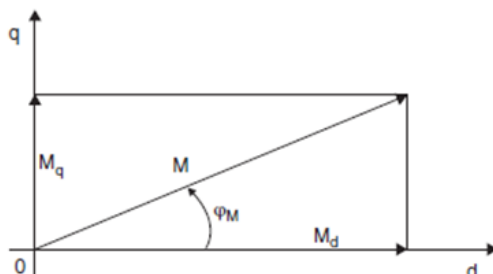
Keitiklio A fazės valdymo signalas gaunamas toks:

$$m_a = M_a \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Pagal šią lygtį, matoma, kad yra naudojami 3 nepriklausomi kintamieji (M_a , ω , φ) valdymo signalui sukurti. Naudojant Furje analizę, galima gauti pagrindinę signalo dedamąją (2.2 pav.) ir visas generuojamas harmonikas – tai vienas iš esminių šio metodo privalumų. Įvertinus Furje koeficientus, gaunama fazinė AC tinklo įtampa $v_{a01} = \frac{1}{2} M_a m_a$.

2.3 Keitiklio modelis D – Q ašyse

Valdymo signalas A – B – C vektorių koordinatų sistemoje pagal lygtis (6) ir (2) gali būti perskaičiuotas į besisukančių D – Q vektorių koordinatų sistemą. D – Q vektorių sistemoje keitiklis turės du valdymo signalus (M_d ir M_q), kurie tarpusavyje yra susiję dydžiais (M , θ_m), kaip parodyta 2.3 pav.



2.3 pav. Keitiklio vektorinio valdymo schema

2.3-1 lentelė. Valdymo signalų ryšys polinėje ir ortogonalinėje koordinatų sistemose

Perskaičiavimas iš ortogonalinės koordinatų sistemos į polinę	Perskaičiavimas iš polinės koordinatų sistemos į ortogonalinę
$M^2 = M_d^2 + M_q^2$	$M_d = M \cos(\varphi_m)$
$\varphi_m = \arctan\left(\frac{M_q}{M_d}\right)$	$M_q = M \sin(\varphi_m)$

Šie du signalai gali būti naudojami siekiant kontroliuoti dvi generuojamos AC įtampos komponentes (V_d ir V_q). Svarbu pažymėti tai, kad nuolatinės srovės linijoje palaikoma nominali įtampa (V_{DC}) įvairiais galimais darbo režimais, nes paprastai vienas iš HVDC keitiklių yra skirtas tam, kad kontroliuotų ir palaikytų pastovų įtampos V_{DC} lygį. Didelės galios išėjimo AC įtampos komponentės V_d ir V_q yra tiesiogiai proporcingos mažos galios valdymo signalams M_d ir M_q , todėl galima teigti, kad VSC keitiklis veikia kaip linijinis stiprintuvas.

Jeigu keitiklio modelis, aprašytas lygtimis (2) yra pakeičiamas į besisukančios koordinatų sistemos D – Q ašis, tai gaunamos tokios lygtys:

$$V_{cd} = \frac{1}{2} V_{DC} M_d \quad (7)$$

$$V_{cq} = \frac{1}{2} V_{DC} M_q \quad (8)$$

Galios balanso lygtis D – Q ašyse yra:

$$V_{dc}I_{dcc} = \frac{3}{4}(V_{cd}I_{gd} + V_{cq}I_{gq}) \quad (9)$$

Pakeičiant lygtis (7) ir (8) ir įvertinus D – Q sroves, gaunama tokia DC srovės išraiška:

$$I_{dcc} = \frac{3}{4}(M_d I_{gd} + M_q I_{gq}) \quad (10)$$

2.4 VSC keitiklio transformatoriaus modelis

HVDC keitiklis yra prijungtas prie vietinio elektros tinklo per galios transformatorių. Nors teoriškai HVDC keitiklis gali būti prijungtas prie tinklo tiesiogiai, galios transformatorius yra naudojamas visose sistemose. Transformatoriaus dinaminio modelio lygtis yra:

$$v_1 = R_T i_1 + L_T \frac{di_1}{dt} + n v_2 \quad (11)$$

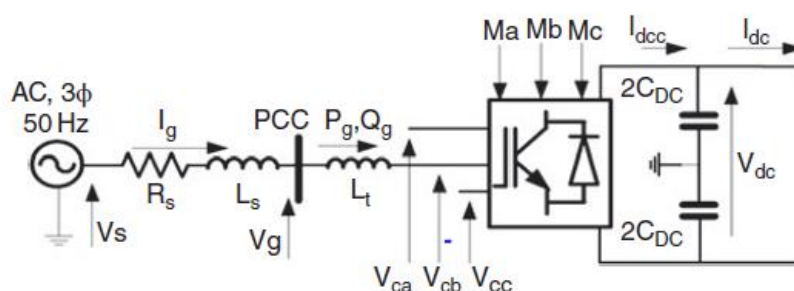
$$i_2 = \frac{1}{n} i_1 \quad (12)$$

kur n - transformatoriaus pirminės ir antrinės vijų santykis (transformacijos koeficientas)

L_T - transformatoriaus (ir papildomo reaktoriaus) induktyvumas.

Daugelyje VSC sistemų transformatoriaus nuotėkio induktyvumas yra mažesnis negu reikalaujamas, todėl yra naudojamas papildomas nuosekliai prijungtas reaktorius.

2.5 VSC keitiklio ir AC tinklo modelis A – B – C koordinačių plokštumoje.



2.4 pav. VSC keitiklis su vietiniu elektros tinklu

2.4 pav. parodyta pagrindinė VSC keitiklio, prijungto prie vietinio AC tinklo, schema. Šiame paveikslėlyje, V_s yra fiksuoto dydžio nutolusio ekvivalentinio šaltinio įtampa, V_g yra vietinio prisijungimo taško įtampa (įtampa, skirta fazės nustatymui, naudojant PLL būdą (ang. „phase-locked loop“) ir keitiklio sinchronizavimui su sistema, V_c keitiklio AC įtampa, V_{dc} yra keitiklio nuolatinės srovės linijos įtampa, I_g yra linijinė elektros tinklo pusės srovė, I_{dcc} yra nuolatinė srovė, perduodama tiesiai iš keitiklio, I_{dc} yra nuolatinė srovė kabelių linijoje. M_a , M_b ir M_c yra keitiklio valdymo signalai statinėje koordinačių sistemoje. Pateikti parametrai R_s ir L_s atitinka ekvivalentinio šaltinio varžą, t.y. išorinio elektros tinklo parametrai. L_T yra transformatoriaus induktyvumas ir dėl paprastumo

transformacijos koeficientas priimtas lygus $n = 1$. Dinaminio modelio lygtys kiekvienai iš trijų fazių (A, B ir C) statinėje koordinačių plokštumoje yra:

$$\begin{aligned} v_{Sa} &= v_{Ca} + R_S i_{ga} + (L_s + L_T) \frac{di_{ga}}{dt} \\ v_{Sb} &= v_{Ca} + R_S i_{gb} + (L_s + L_T) \frac{di_{gb}}{dt} \\ v_{Sc} &= v_{Ca} + R_S i_{gc} + (L_s + L_T) \frac{di_{gc}}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

Padarius prielaidą, kad keitiklis veikia be nuostolių, AC tinklui perduodama galia sujungimo taške aprašoma tokia lygtimi:

$$S_g = v_{ga} i_{ga} + v_{gb} i_{gb} + v_{gc} i_{gc} \quad (14)$$

DC grandinės lygtis yra:

$$I_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dcc} \quad (15)$$

2.6 VSC keitiklio ir AC tinklo modelis D – Q koordinačių plokštumoje

Parko transformacija naudojama konvertuoti visas anksčiau naudotas kintamosios srovės sistemą aprašančias lygtis į sinchroniškai besisukantį D – Q koordinačių plokštumą. Darant prielaidą, kad elektros sistema yra simetriška ir subalansuota, (13) lygtimi yra perrašoma taip:

$$V_{Sd} = V_{Cd} + R_S I_{gd} + \omega (L_s + L_T) I_{gq} + (L_s + L_T) \frac{dI_{gd}}{dt} \quad (16)$$

$$V_{Sq} = V_{Cq} + R_S I_{gq} + \omega (L_s + L_T) I_{gd} + (L_s + L_T) \frac{dI_{gq}}{dt} \quad (17)$$

kur ω – elektros sistemos dažnis (rad/s)

d, q – indeksai, nurodantys koordinačių plokštumos ašis.

Tada AC galia, remiantis (14) lygtimi, besisukančioje koordinačių plokštumoje aprašoma taip:

$$P_g = \frac{3}{4} (V_{gd} I_{gd} + V_{gq} I_{gq}) \quad (18)$$

$$Q_g = \frac{3}{4} (-V_{gd} I_{gq} + V_{gq} I_{gd}) \quad (19)$$

2.7 VSC keitiklio valdymo principai

Valdymo sistemos lygmenyje, visi VSC keitikliai turi panašią bendrą įvesties – išvesties struktūrą ir gali būti laikomi kaip dviejų įėjimų, dviejų išėjimų, netiesiniai dinaminiai stiprintuvų. Dviejų keitiklių įeinantys valdymo signalai (M_d ir M_q) naudojami tam, kad būtų sukurti grįžtamojo ryšio reguliatorius tam, kad būtų gautos įvairios valdymo funkcijos, priklausomai nuo keitiklio naudojimo srities.

Valdiklis VSC keitiklyje turi atitikti šiuos reikalavimus:

1. Svarbių elektros sistemos kintamųjų valdymas: paprastai kai kurie parametrai yra valdomi ir palaikomos iš anksto nustatytos nominalios vertės:
 - DC įtampa: Tam kad būtų užtikrinti minimalūs nuostoliai ir išvengta izoliacijos pažeidimų;
 - galios perdavimas: pagal iš anksto nustatytus grafikus bei poreikius;
 - reaktyviosios galios perdavimas;
 - AC įtampos lygis: ši valdymo galimybė gali būti svarbi, veikiant su labai silpnais (didelės varžos) kintamosios srovės elektros tinklais.
2. Apsaugoti keitiklį nuo galimos žalos, atsiradusios dėl srovės arba įtampos, kurios viršija nominalias reikšmes.
3. Užtikrinti sistemos stabilumą ir gerą reakcijos greitį. Šis reikalavimas reiškia, kad keitiklio reakcija ir veikimas pereinamųjų procesų metu, taip pat visais numatytais darbo režimais bei esant trikdžiams turi užtikrinti, kad tinklo parametrai bus valdomi ir palaikomos jų nustatytosios vertės.
4. Vietinio kintamosios srovės elektros tinklo palaikymas. Paprastai reikalaujama, kad mažos inercijos AC tinkle VSC keitiklis užtikrintų dažnio reguliavimo ir stabilizavimo funkciją, naudojant grįžtamojo ryšio dažnio kontrolę. Didelės varžos elektros sistemose gali būti reikalaujama įtampos stabilizavimo funkcija.

Anksčiau minėtos valdymo funkcijos paprastai pasiekiamos naudojant dviejų lygių keitiklio valdymo sistemą, kur vidinė valdymo sistema užtikrina apsaugą ir stabilumą, kai išorinė valdymo sistema užtikrina veikimo reikalavimų atitikimą. Vidinės valdymo grandinės paprastai naudoja greitą nesusietą srovės kontrolę. Išorinė valdymo sistema atlieka įvairias reguliavimo ir stabilizavimo funkcijas, siunčiant nustatytus valdymo signalus vidinei valdymo sistemai. Anksčiau paminėta valdymo struktūra atsirado iš VSC keitiklių, naudojamų tradicinių elektros variklių greičio valdymui. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad VSC keitikliai, naudojami HVDC sistemoms, gali daryti didelį poveikį AC elektros tinklui. Be to, HVDC sistemų keitikliai gali sujungti ilgus DC kabelių linijas, todėl nuolatinės srovės sistemos dinamika turi svarbų vaidmenį. Priimama, kad analizuojamoje VSC keitiklių sistemoje naudojama sinusinė impulso pločio moduliacija (angl. „sinusoidal pulse width modulation“– SPWM), o IGBT įtaisų atidarymo signalų generavimas ir kuriamos AC įtampos

sinchronizacija su elektros tinklu yra įvykdoma naudojant tam tikrą PLL (angl. „phase-locked loop“) būdą.

VSC keitiklio valdymas paremtas dinamine AC elektros tinklo ir HVDC keitiklio sąveika, todėl išsamus keitiklio tyrimas ir modeliavimas darbui su elektros sistema yra ypatingai svarbus. VSC keitiklio modeliavimas paprastai atliekamas aprašant kiekvienos fazės dinaminį modelį lygtimis ir šį modelį paverčiant į besisukantį D – Q koordinačių plokštumos modelį simetrinei ir subalansuotai trifazei elektros sistemai.

2.8 Galios srautai tarp VSC keitiklio ir elektros sistemos

Elektros energijos srautas kintamosios srovės perdavimo linijoje yra linijos varžos, linijos pradžios ir pabaigos bei fazių skirtumo tarp šių įtampų funkcija [14]. Darant prielaidą, kad AC sistema yra simetriška ir subalansuota, priimta, kad kintamosios srovės dažnis yra pastovus ir paneigiant galimus dinامينius svyravimus, visi AC srovės komponentai tampa fazoriais.

Įtampos fazoriai yra šie:

$$V_{sdq} = V_s \angle \varphi_{V_s} = V_{sd} + jV_{sq} \quad (20)$$

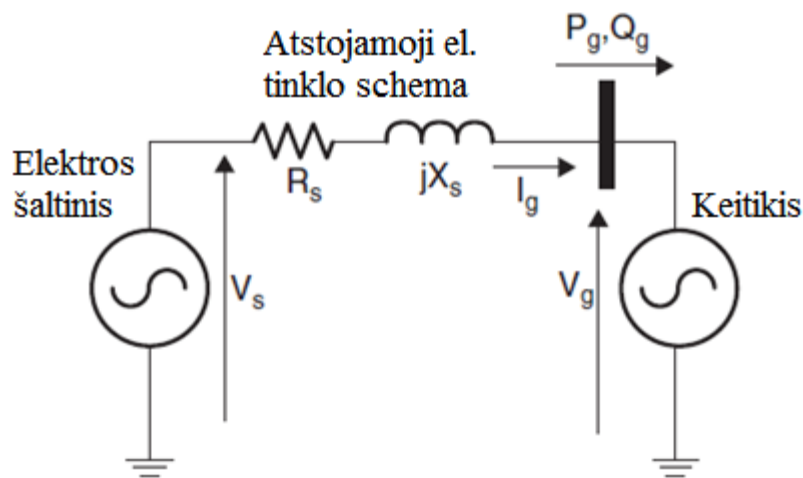
$$V_{gdq} = V_g \angle \varphi_{V_s} = V_{gd} + jV_{gq} \quad (21)$$

kur, V_{gdq}, V_{sdq} – įtampos fazoriai,

V_g ir V_s – fazorių komponentų dydžiai (fazinės įtampos)

$\varphi_{V_g}, \varphi_{V_s}$ – atitinkamų įtampų faziniai kampai.

Indeksai d ir q rodo atitinkamas fazorių komponentes.



2.5 pav. Atstojamoji sistemos schema galios srautų tyrimui

Elektros tinklo srovės fazorius aprašomas tokia lygtimi:

$$\bar{I}_g = \frac{\overline{V_s - V_g}}{\bar{Z}_s} \quad (22)$$

Padarius prielaidą, kad koordinacių sistema yra susieta su el. šaltinio įtampa V_s , gaunama tokia srovės komponentų išraiška:

$$I_{gd} + jI_{gq} = \frac{V_s - V_{gd} - jV_{gq}}{R_s + jX_s} \quad (23)$$

Taip pat priimama, kad abiejų įtampų dydžiai yra lygūs ir pastovūs: $V_s = V_g = \text{const.}$, nes tai yra labiausiai dominantis atvejis elektros perdavimo sistemų tyrimuose:

$$I_{gd} + jI_{gq} = V_s \frac{1 - \cos(\varphi_{Vg}) - j\sin(\varphi_{Vg})}{R_s + jX_s} \quad (24)$$

Pertvarkius lygtį, išskyrus realią ir menamąją dalis, gaunamos sąlygos, kai galimas maksimalus aktyviosios ir reaktyviosios galių perdavimas. Šie atvejai randami, kai realiosios ir menamosios dalių išvestinės prilyginamos 0, atitinkamai gaunamos sąlygos maksimaliam aktyviosios ir reaktyviosios galių perdavimui.

$$\tan(\varphi_{Vg})_{\max Pg} = \frac{X_s}{R_s} \quad \tan(\varphi_{Vg})_{\max Qg} = \frac{R_s}{X_s} \quad (25)$$

Kai $R_s = 0$, maksimali srovė gaunama tada, kai $\varphi_{Vg} = 90^\circ$ ir lygu:

$$I_{gd} + jI_{gq} = \frac{V_s}{X_s} + j\frac{V_s}{X_s} = 1pu + j1pu \quad (26)$$

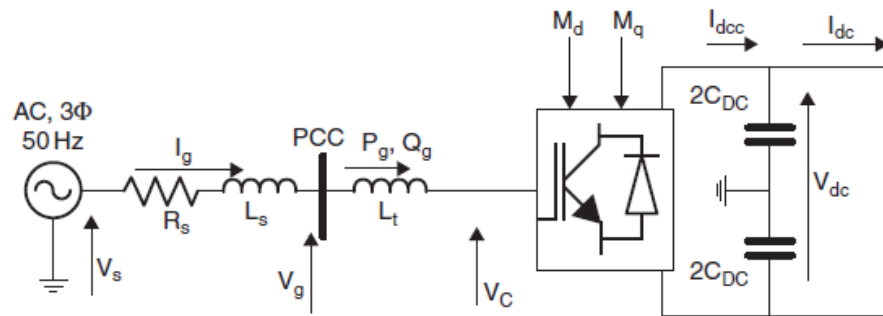
2.9 Realios sistemos galios srautai tarp VSC keitiklio ir elektros sistemos

Vertinant realios sistemos darbą, analizės ribos praplečiamos ir VSC keitiklio modeliavimui naudojami papildomi duomenys.

VSC keitiklis perduoda galią kintamosios srovės elektros tinklui per reaktorių (transformatoriaus reaktyvioji varža), kontroliuojant kintamąją įtampą V_c , kaip pavaizduota 2.6 pav. Realios sistemos galios srautų tyrimo schema. Tai yra šiek tiek kitoks atvejis negu minėta anksčiau, nes įtraukta papildoma reaktyvioji varža. VSC keitiklis yra sinchronizuotas su bendro sujungimo taško (angl. „point of common coupling“ - PCC) įtampa V_g , naudojant fazės fiksavimo techniką (PLL), todėl keitiklio valdymo kampas yra susietas su V_g . Galios srautų valdymas realizuojamas kontroliuojant naudojant dvi įtampas prie reaktoriaus, nors galia turi būti perduodama nuotoliniam šaltiniui V_s . Jeigu naudojamas tyrimo metodas, aprašytas ankstesniame skyriuje, turi būti įvertinta susiejanti su elektros tinklu reaktyvioji varža (bendras varža yra $X_s + X_t$). Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad tinklo operatoriams elektros biržoje yra aktualūs parametrai bendro sujungimo taške (PCC). Kita vertus, VSC gamintojai tinkamai įvertina keitiklio parametrus, tokius kaip keitiklio įtampa bei generuojamos srovės apribojimai,

tam, kad būtų galima tinkamai eksploatuoti keitiklį, prijungus jį prie PCC taško. Kadangi keitiklio darbo taškas turi būti sekamas bet kuriuo metu, P ir Q galių perdavimo apribojimai PCC taške yra ypač svarbūs sekant energijos perdavimo ir darbo režimų kaitą. PCC taško įtampa V_g ir nuotolinio šaltinio įtampa V_s yra apibrėžta lygtimis (20) ir (21). Keitiklio įtampa V_c gaunama tokia:

$$V_{cdq} = V_c \angle \varphi_{V_c} = V_{cd} + jV_{cq}$$



2.6 pav. Realios sistemos galios srautų tyrimo schema

Kadangi keitiklio sinchronizacijai su elektros tinklu PCC taške yra naudojamas PLL būdas, daug paprasčiau yra padarius prielaidą, kad įtampa V_g yra ant d ašies ($\varphi_{V_g} = 0$):

$$V_{gdq} = V_{gd} = V_g, \quad V_{gq} = 0$$

Keitiklio įtampa V_c yra kontroliuojama ir darant prielaidą, kad signalo moduliacija atliekama naudojant paprastą sinusinę impulso pločio moduliaciją (SPWM), keitiklio vektorių įtampos komponentai yra:

$$V_{cd} = M_d \times \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad V_{cq} = M_q \times \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (27)$$

Moduliacijos indekso dydis yra išreiškiamas kaip:

$$M = \sqrt{M_d^2 + M_q^2} < 1 \quad (28)$$

kur M_d ir M_q - sinusinės PWM (impulso pločio moduliacijos) valdymo signalo DQ komponentai

V_{dc} – nuolatinė įtampa.

Keitiklio įtampa yra apibrėžta DC linijos įtampa. Priėmus, kad didžiausias moduliacijos santykis $M = 1$, nominali keitiklio AC pusės įtampa gali būti nustatytas iš lygčių (27) ir (28). VSC keitiklio generuojamos srovės dydis yra apibrėžtas nuolatinės srovės dydžio, tekančios per puslaidininkius. Gali būti nurodyta bet kuri – AC arba DC srovė, bet tinklų operatoriai paprastai pateikia reikalavimus AC srovei. Pagrindinė srovės lygtis 2.6 pav. grandinei yra:

$$I_{gd} + jI_{gq} = \frac{V_s - V_{gd}}{jX_t} = \frac{V_s - V_{cd} - jV_{cq}}{jX_t} = \frac{-V_{cq}}{X_t} + j \frac{V_{cd} - V_g}{X_t} \quad (29)$$

kur X_t yra transformatoriaus varža ($L_t = X_t / (2\pi f)$), o tinklo dažnis yra $f = 50$ Hz).

Kompleksinė PCC taško galia gali būti suskaičiuota naudojant formulę (30):

$$\overline{S}_g = 3\overline{V}_g \times \overline{I}_g^* = 3V_g \left(\frac{-V_{cq}}{X_t} + j \frac{V_{cd} - V_g}{X_t} \right) \quad (30)$$

Atskyrus aktyvią ir reaktyvią galias ir įvertinus moduliacijos indeksus gaunamos tokios išraiškos:

$$P_g = 3V_g \frac{MV_{dc}}{X_t 2\sqrt{2}} \sin(\varphi_{vc}) \quad Q_g = 3 \frac{V_g^2 - V_g \frac{MV_{dc}}{2\sqrt{2}} \cos(\varphi_{vc})}{X_t} \quad (31)$$

Kaip matoma, galių srautų dydis ir kryptys sistemoje priklauso nuo transformatoriaus varžos iki PCC taško, įtampų lygio, kampo tarp PCC taško įtampos ir keitiklio įtampos, taip pat priklauso nuo valdymo sistemos, kuri parenka moduliacijos indeksus. Moduliacijos indeksas yra keitiklio valdymo sistemos rezultatas, t. y. valdymo sistema gali užtikrinti labai plačias valdymo galimybes - įtampų valdymą, dažnio palaikymą, reaktyviosios galios tiekimą į sistemą ir kt. Keitiklio valdymo sistema, valdydama generuojamą AC įtampą pagal parametą M , kontroliuoja keitiklio galių srautus.

2.10 Keitiklio ir elektros sistemos darbas

Kintamosios srovės elektros sistemų charakteristikos turi didelę įtaką HVDC keitiklio veikimui. Dažniausiai, AC sistemos, kurios sukelia veikimo sutrikimus keitikliui yra silpnos. Tokių elektros sistemų apibūdinimas apima du skirtingi aspektus:

- didelės varžos sistemos yra susijusios su įtampos stabilumo bei galios perdavimo apribojimais;

- mažos inercijos sistemos yra susijusios su dažnio nuokrypio problemomis. Didelės varžos elektros sistemos dažniausiai yra kaltos dėl HVDC sistemų stabilumo problemų ir jos dėl to išskiriamos kaip silpnos elektros sistemos. HVDC eksploataavimo patirtis parodė, kad, visų pirma, santykinis AC tinklo stiprumas, palyginus su HVDC galia yra svarbus rodiklis, vertinant HVDC veikimo problemas.

2.11 Elektros sistemos ir HVDC sistemų charakteristikos

Elektros sistema paprastai aprašoma šiais rodikliais:

- elektros sistemos varža: $Z_s = R_s + jX_s$;
- varžų santykiu $X_{rat} = X_s / R_s$.

Paprastai aukštos įtampos elektros perdavimo tinklai pasižymi, kad X_{rat} rodiklis būna šiose ribose: $5 < X_{rat} < 20$. Šis santykis skirstomuosiuose el. tinkluose gali būti daug mažesnis.

AC ir HVDC sistemų stabiliam darbui apibrėžti naudojamas toks rodiklis:

$$SCR = \frac{U_s^2}{z_s P_{dc}} = \frac{S_{tr}}{P_{dc}} \quad (32)$$

kur U_s – sistemos įtampos lygis;

z_s – elektros sistemos varža;

P_{dc} – HVDC sistemos nustatytoji galia.

S_{tr} – elektros sistemos trumpojo jungimo galingumas;

AC elektros sistema paprastai apibūdinama dydžiais SCR ir X_{rat} . Žinant šiuos dydžius, galima gauti reikiamus el. sistemos parametrus:

$$R_s = \frac{U_s^2}{SCR P_{dc}} \frac{1}{\sqrt{1+X_{rat}^2}} \quad X_s = \frac{U_s^2}{SCR P_{dc}} \frac{X_{rat}}{\sqrt{1+X_{rat}^2}} \quad (33)$$

Labai svarbus el. sistemą aprašantis parametras yra trumpojo jungimo lygis:

$$SCL = S_{tr} = \frac{U_s^2}{z_s} \quad (34)$$

SCL rodiklis yra susijęs su trumpojo jungimo srove, arba kitaip – trumpojo jungimo galingumas S_{tr} . Šis rodiklis charakterizuoja elektros mašinos greitį ir nuolatinį žadinimą (elektrovaros jėgą), esant trumpajam jungimui. AC sistemoje, turinčioje aukštą SCL rodiklį, ją sudarančių el. mašinų greičiai trumpojo jungimo metu nepasikeis ir nepraras žadinimo, kitaip tariant, el. sistema yra charakterizuojama kaip stipri.

2.11-1 lentelė. Elektros sistemų rodiklių palyginimas

SCR	Klasifikavimas	Veikimo sunkumai
$SCR > 3$	Stipri elektros sistema	Nėra veikimo problemų
$2 < SCR < 3$	Silpna elektros sistema	Galimos veikimo problemos, reikalingos papildomos valdymo sistemos funkcijos
$SCR < 2$	Labai silpna elektros sistema	Didelės veikimo problemos, labai nedaug HVDC sistemų veikia su tokiu SCR rodikliu

2.12 Galios srauto krypties keitimo HVDC keitiklyje tyrimas

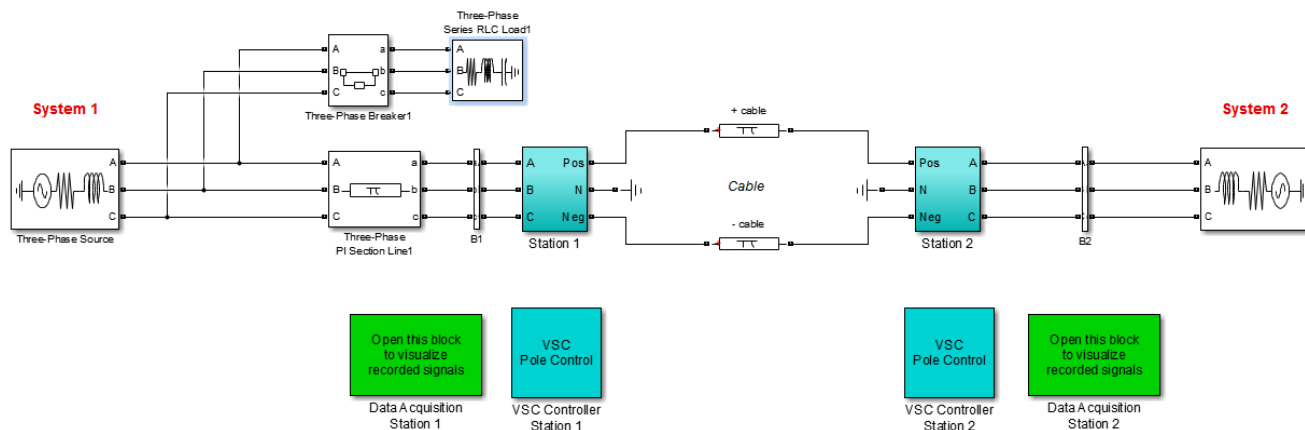
Galios srauto krypties keitimo tyrimas bus atliekamas vertinant skirtingų elektros sistemos parametrų įtaką. Taip pat bus tiriama galios srauto kitimo greičio įtaka sistemos darbui. Galios srauto krypties keitimo tyrime bus tiriami šie parametrai:

1. Elektros sistemos trumpojo jungimo galingumo įtaka bendros sistemos veikimui;
2. Elektros sistemos varžos X/R santykio įtaka bendros sistemos veikimui;
3. Galios srauto keitimo greičio įtaka bendros sistemos veikimui;

Keitiklių modeliai įvairiose programose skiriasi – jų tikslumas ir priimti supaprastinimai. Paprastai supaprastinamas IGBT įtaisų modelis, siekiant užtikrinti paprastesnius ir greitesnius skaičiavimus [17]. Pasirinktas VSC keitiklio modelis programoje „Matlab Simulink“ yra detalus – galios jungikliai (tranzistoriai) modeliuojami kaip idealus jungiklis su dviem nelinejiniais nuosekliais ir lygiagrečiais diodais ir dviem viršįtampius slopinančiomis grandinėmis [19].

2.12.1 HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 1 tyrimo atveju

HVDC sistemos galios srauto krypties keitimo tyrimui bus naudojama „Matlab Simulink“ programa. Naudojamas šios programos pateiktas HVDC-VSC keitiklio modelis [18], jį papildant reikiama elementais galios srautų tyrimui. Modelis pateiktas paveikslėlyje žemiau.

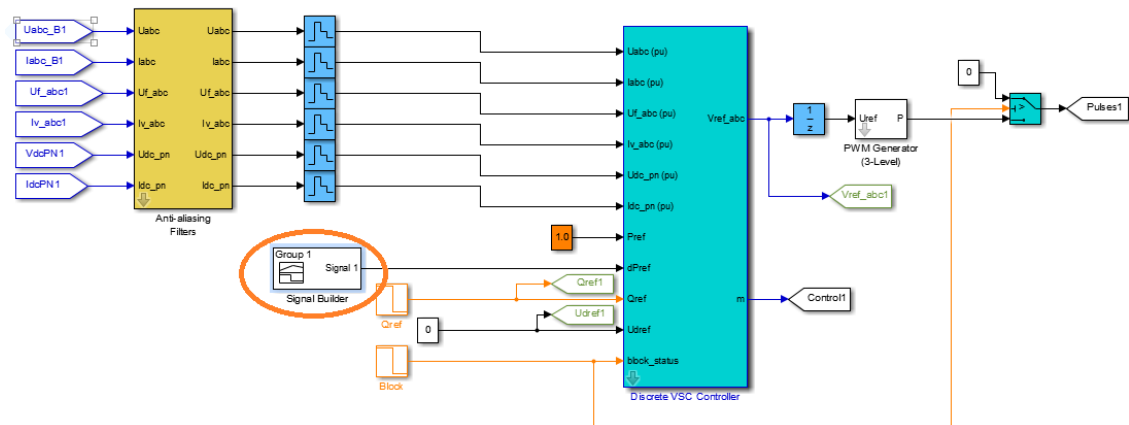


2.7 pav. HVDC sistemos modelis elektros sistemos trumpojo jungimo galios įtakos tyrimui

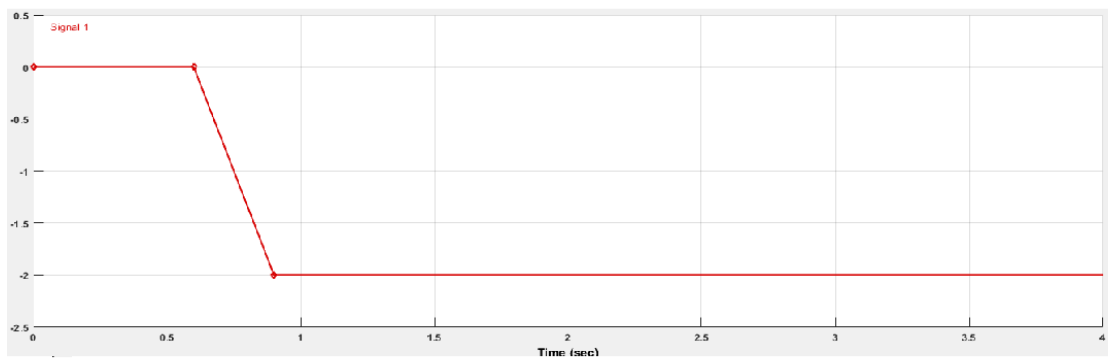
Tiriamasis modelis sudarytas iš dviejų elektros sistemų, sujungtų HVDC keitikliu. Elektros sistemos aprašomos kaip idealus šaltinis su nustatytu įtampos lygiu, trumpojo jungimo galingumu ir X/R santykiu. Šalia 1 elektros sistemos prijungta apkrova, kuri elektros linija sujungta su keitikliu. Tyrime numatyta keisti 1 elektros sistemos („System 1“) elektros parametrus, siekiant iširti galios srauto krypties keitimo įtaką sistemos darbui.

Tam, kad būtų realizuotas galios srauto krypties pasikeitimas keitiklyje, pirminis modelis turi būti papildytas tam tikrais elementais keitiklio valdymo sistemos blokuose. Bloke „VSC Controller

Station 1“ valdymo sistemos bloke „Discrete VSC Controller“ įėjime „dPref“ (2.8 pav. A) sukuriamas galios srauto pokyčio signalas, naudojant elementą „Signal Builder“ (2.8 pav. B) – tyrimo eigoje šio bloko generuojamas signalas yra keičiamas, t.y. srauto krypties keitimo pradžios ir pabaigos laikai bei keitimo trukmė keičiami priklausomai nuo tiriamojo atvejo.



(A)



(B)

2.8 pav. HVDC sistemos galios srauto krypties pakeitimo realizavimas

Tiriamos HVDC ir elektros sistemos parametrų nustatymas 1 tyrimo atvejui

Kadangi el. sistemos trumpojo jungimo galingumas priklauso nuo tuo metu sistemoje veikiančių generatorių skaičiaus, todėl šiuo tyrimo atveju bus vykdomas procesas su įvairiomis trumpojo jungimo galių vertėmis. Vertinant keitiklio ir elektros sistemos darbą 1 atveju, atliekamas elektros sistemos skaičiavimų vertinimas pagal (32) formulę. Pasirenkamos skirtingos sistemos trumpojo jungimo galios ir skaičiuojami likę sistemos parametrai. Šių parametrų skaičiavimas pateikiamas žemiau.

Pasirenkami tokie parametrai keitiklio darbo tyrimui:

- srauto keitimo laikotarpio pradžia $t_1 = 0,8$ s, pabaiga $t_2 = 0,9$ s;
- aktyviosios galios srauto keitimo greitis: $t = 100$ ms;

- sistemų įtampa $U_s = 330$ kV (atitinkamai „System 1“ ir „System 2“);
- 2 sistemos („System 2“) trumpojo jungimo galingumas $S_{tr} = 2000$ MVA
- tiriamojo modelio HVDC keitiklių sistemos galingumas $P_{dc} = 200$ MW;
- tiriamojo modelio elektros sistemos varžų santykis $X_{rat} = 14$.

Pirmiausia skaičiuojami sistemos stabilumo rodiklio SCR vertės pagal pasirinktus trumpojo jungimo galingumus, remiantis (32) formule. Pateikiamas pavyzdinis skaičiavimas $S_{tr} = 500$ MVA elektros sistemai:

$$SCR = \frac{500\,000\,000\text{ VA}}{200\,000\,000\text{ W}} = 2,5$$

Kiti tyrime naudoti parametrai ir gauti rezultatai pateikiami 2.12-1 lentelė.

2.12-1 lentelė. Elektros sistemos skaičiavimo parametrų rezultatai 1 tyrimo atvejui

Sistemos rodiklių skaičiavimas	
S_{tr} , MVA	SCR
300	1,5
500	2,5
800	4
1000	5
2000	10
4000	20
5000	25
8000	40

Pirmojo atvejo tyrimo eiga ir tyrimo principai

Tyrime bus imituojamas atvejis, kada pirmoje sistemoje „System 1“ atsiradęs galios perteklius yra perduodamas antrai sistemai „System 2“. Antrosios sistemos galingumas laikomas pastovus ir lygus $S_{tr} = 10000$ MVA. Pirmosios sistemos trumpojo jungimo galingumas bus keičiamas pagal 2.12-1 lentelė. pateiktas vertes ir tiriami procesai elektros sistemose. Tyrimui naudojamos pirminės sąlygos ir parametrai aprašyti ankstesniame skyriuje.

Modeliavimo eiga numatoma tokia:

- laiko momentu $t = 0,2$ s įjungiamas keitiklis, pakeliama keitiklio įtampa iki nustatytosios vertės $U = 1$ s.v.;

- laukiama kol sistemos parametrai nusistovės ir bus pasiektas nustatytasis galios perdavimo lygis ($P = 1$ s.v.) iki laiko momento $t_1 = 0,8$ s;
- laiko momentu $t_1 = 0,8$ s pradamas galios srauto pakeitimas;
- stebimi vykstantys procesai iki proceso modeliavimo pabaigos.

2.12.2 HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 2 tyrimo atveju

HVDC sistemos galios srauto krypties keitimo tyrimui bus naudojama „Matlab Simulink“ programa ir anksčiau pateiktas elektros sistemos modelis. Šis modelis parodytas 2.7 pav. Modelis išlieka toks pat kaip ir pirmuoju tyrimo atveju.

Tiriamos HVDC ir elektros sistemos parametrų nustatymas 2 tyrimo atvejui

- Aktyviosios galios srauto keitimo greitis: $t = 100$ ms;
- sistemų įtampos $U_s = 330$ kV (atitinkamai „System 1“ ir „System 2“);
- 1 sistemos („System 1“) trumpojo jungimo galingumas $S_{tr} = 1000$ MVA;
- 2 sistemos („System 2“) trumpojo jungimo galingumas $S_{tr} = 2000$ MVA;
- tiriamojo modelio HVDC keitiklių sistemos galingumas $P_{dc} = 200$ MW.

Pagal literatūroje rastus duomenis, pasirenkami režiai, kuriuose bus keičiamas X/R santykis elektros sistemoje. Šis santykis pateikiamas 2.12-2 lentelė.:

2.12-2 lentelė. Elektros sistemos X/R vertės 2 tyrimo atvejui

Sistemos rodiklių skaičiavimas
X/R
2
6
10
14
18

Antrojo atvejo tyrimo eiga ir tyrimo principai

Antruoju tyrimo atveju keičiamas pirmosios sistemos („System 1“) parametras – varžos santykis X/R ir tiriama kokią įtaką šis parametras turi galios srauto krypties keitimo procesui ir elektros sistemai. Tyrimo eiga yra analogiška pirmajam atvejui, tik šiuo atveju keičiamas tik šis parametras, o kiti išlieka pastovūs.

2.12.3 HVDC ir elektros sistemos modeliavimas 3 tyrimo atveju

Šiuo atveju taip pat naudojamas tas pats modelis, pateiktas 2.7 pav.

Tiriamos HVDC ir elektros sistemos parametrų nustatymas 3 tyrimo atvejui

- Sistemų įtampos $U_s = 330$ kV (atitinkamai „System 1“ ir „System 2“);
- 1 sistemos („System 1“) trumpojo jungimo galingumas $S_{tr} = 550$ MVA;
- 2 sistemos („System 2“) trumpojo jungimo galingumas $S_{tr} = 10000$ MVA;
- tiriamojo modelio HVDC keitiklių sistemos galingumas $P_{dc} = 200$ MW;
- tiriamojo modelio elektros sistemos varžų santykis $X_{rat} = 8$.

Pilnas galios srauto krypties pakeitimas įvykdomais skirtingais laikotarpiais, kurie kinta nuo 100 ms iki 400 ms, keičiant laiko žingsnį kas 50 ms.

Trečiojo atvejo tyrimo eiga ir tyrimo principai

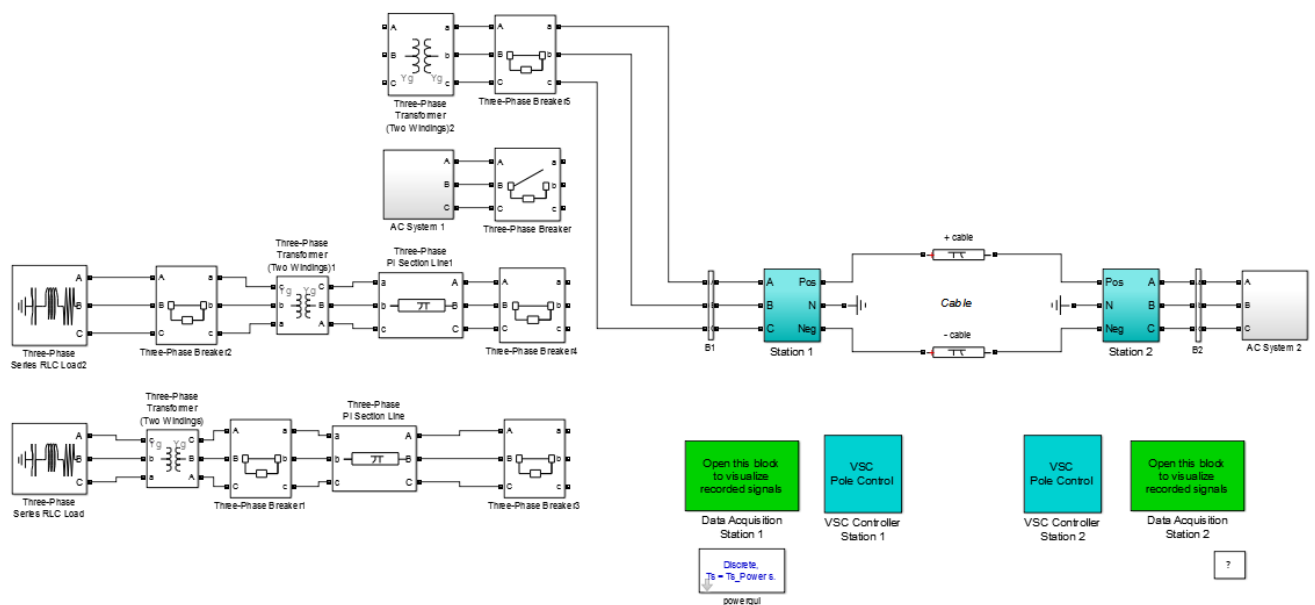
Šiuo atveju tiriamas galios srauto kitimo greitis ir jo įtaka el. sistemų darbui. Pasirinkti tokie sistemos parametrai, nes siekiama iširti silpnesnės sistemos darbo ypatumus su keitikliu. Tyrimo metu keičiamas nustatytasis galios signalas 1 keitiklių stoties valdymo sistemoje - „Signal Builder“ bloke. Tyrimo eiga numatoma tokia:

- laiko momentu $t = 0,2$ s įjungiamas keitiklis, pakeliama keitiklio įtampa iki nustatytosios vertės $U = 1$ s.v.;
- laukiama kol sistemos parametrai nusistovės ir bus pasiektas nustatytasis galios perdavimo lygis ($P = 1$ s.v.) iki laiko momento $t_1 = 0,7$ s;
- laiko momentu $t_1 = 0,7$ s pradedamas galios srauto pakeitimas;
- stebimi vykstantys procesai iki proceso modeliavimo pabaigos.

Palyginimui bus pateikiami ir galingesnių el. sistemų modeliavimo rezultatai.

2.13 Elektros sistemos paleidimo HVDC keitikliu tyrimas

Šiuo atveju bus tiriamas atjungtos sistemos paleidimas HVDC-VSC keitikliu (angl. „Black-start“). Tiriamasis modelis sudarytas iš elektros sistemos, HVDC keitiklio, ir tiriamųjų sisteminių elementų. Tyrimas bus atliekamas 4 skirtingiems atvejams, kuriais galėtų veikti keitiklis. Tai realizuojama kiekvienu atveju prijungiant ir atjungiant reikiamą elementų grupę.



2.9 pav. HVDC sistemos modelis elektros sistemos paleidimo tyrimui

2.13.1 Modelio parametrai ir tyrimo eiga

Bus modeliuojami 4 skirtingi išjungtos sistemos paleidimo atvejai. Tiriamas keitiklio veikimas tokiais režimais:

1. Keitiklio prijungimas prie veikiančios elektros sistemos.
2. Transformatoriaus prijungimas, veikiant tuščiaja eiga.
3. 330 kV el. linijos prijungimas su 330/110 kV transformatoriumi ir galinga 110 kV apkrova.
4. 330 kV el. linijos prijungimas su 330/10 kV transformatoriumi ir silpna 10 kV apkrova.

Tyrimo eiga ir pagrindiniai parametrai šiems 4 atvejams aprašoma žemiau.

1. Keitiklio prijungimas prie veikiančios elektros sistemos

Pirmasis tyrimo režimas yra pavyzdinis, nes prijungiama el. sistema. Kadangi keitiklis prijungiamas prie veikiančios sistemos, todėl šis atvejis skirtas palyginimui ir įvertinimui, kokie galimi procesai vyksta tuo metu, kai prijungiamas keitiklis. Numatyta tirti du prijungimo atvejus – kai sistema yra stipri ir silpna. Tyrimo eiga numatoma tokia:

- keitiklis įjungiamas laiko momentu $t = 0,1$ s ir laukiama kol pasieks normalaus darbo režimo parametrus;
- laiko momentu $t = 0,5$ s prijungiama silpna $S_{tr} = 500$ MVA, $X/R = 10$, $U_s = 330$ kV sistema.

Kitas atvejis modeliuojamas, kai prijungiama stipri $S_{tr} = 6500$ MVA, $X/R = 10$, $U_s = 330$ kV sistema;

2. Transformatoriaus prijungimas, veikiant tuščiaja eiga.

Šiuo atveju tiriamas transformatoriaus $S_n = 250$ MVA įjungimas ir įsimagnetinimas, kai jis paleidžiamas keitikliu. Tiriamajame atvejuje numatyta, kad transformatorius yra toje pat pastotėje kaip ir keitiklis.

Tyrimo eiga numatoma tokia:

- keitiklis įjungiamas laiko momentu $t = 0,1$ s ir laukiama kol pasieks normalaus darbo režimo parametrus;
- laiko momentu $t = 0,5$ s prijungiamas $S_n = 250$ MVA, $U_n = 330/110$ kV transformatorius;

3. 330 kV el. linijos prijungimas su 330/110 kV transformatoriumi ir galinga 110 kV apkrova.

Šiuo atveju modelį sudaro jungtuvas, 330 kV, 20 km ilgio el. linija, 330/110 kV, 250 MVA transformatorius, jungtuvas ir 110 kV, $S = 170 + j20$ MVA apkrova.

Tyrimo eiga numatoma tokia:

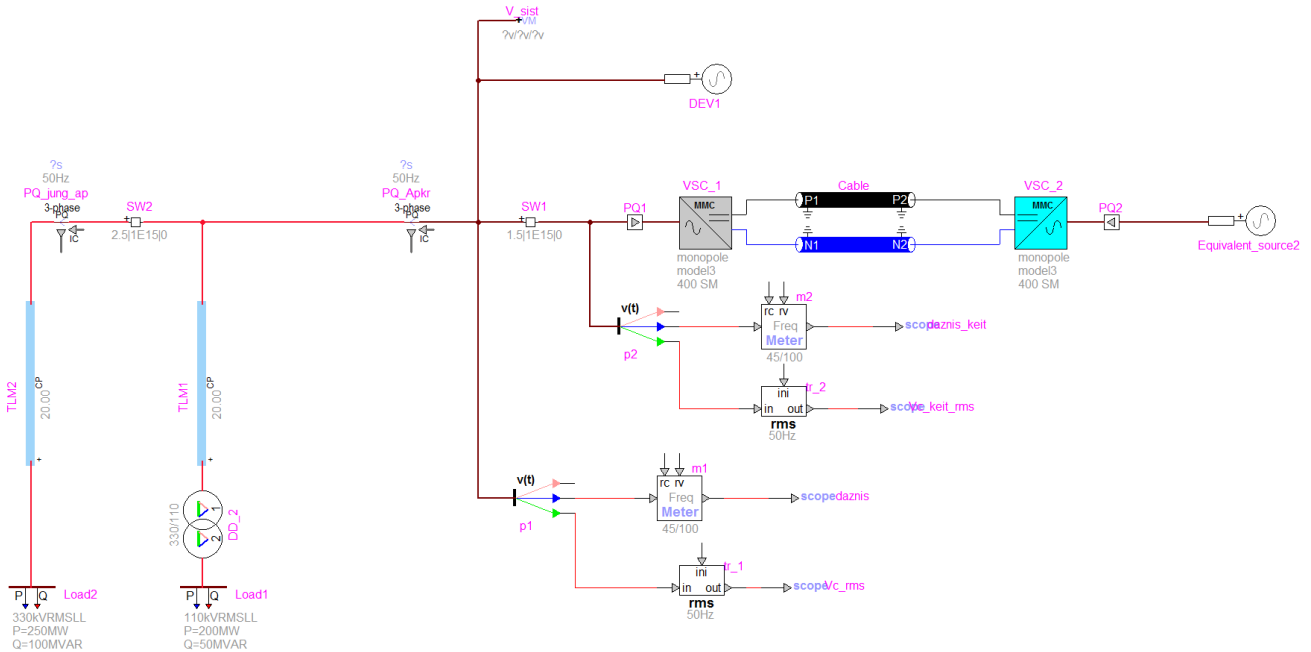
- keitiklis įjungiamas laiko momentu $t = 0,1$ s ir laukiama kol pasieks normalaus darbo režimo parametrus;
- laiko momentu $t = 0,5$ s prijungiama el. linija ir transformatorius;
- laiko momentu $t = 0,8$ s prijungiama apkrova.

4. 330 kV el. linijos prijungimas su 330/10 kV transformatoriumi ir silpna 10 kV apkrova.

Šiuo atveju modelį sudaro jungtuvas, 330 kV, 200 km ilgio el. linija, 330/10 kV, 25 MVA transformatorius, jungtuvas ir 110 kV, $S = 10 + j5$ MVA apkrova. Tyrimo eiga numatoma analogiška 3-ojo atvejo tyrimo eigai.

2.14 Dažnio palaikymo HVDC keitikliu tyrimas

Tyrimui pasitelkta „EMTP-RV“ programa ir jos HVDC sistemos modelis. Šis modelis ir modeliavimo programa pasirinkti todėl, kad šis modelis užtikrina papildomas keitiklio valdymo galimybes. Keitiklyje yra valdymo nustatymas, kuris užtikrina dažnio reguliavimą sistemoje. Sistemos modelis „EMTP-RV“ programos aplinkoje pateikiamas



2.10 pav. HVDC sistemos modelis dažnio reguliavimui „EMTP-RV“ programos aplinkoje

Keitiklio modelis yra analogiškas prieš tai buvusiems modeliuojamiems atvejams. Šiuo atveju vienas iš esminių modelio akcentų yra tas, kad keitiklis „VSC_1“ yra nustatytas dažnio palaikymo funkcijai. Šis modelis susideda iš $S_{tr} = 6500$ MVA, $X/R = 14$, $U_s = 330$ kV sistemos, 700 MW galios HVDC keitiklių, lygiagrečiai veikiančių su elektros sistema, ir per 20 km ilgio el. linijas prijungtų el. apkrovomis: $S1 = 200 + j50$ MVA ir $S2 = 250 + j100$ MVA.

Šiame tyrime modeliavimas atliekamas dvejais atvejais – kai su apkrovomis lygiagrečiai veikia el. sistema ir kai ji yra atjungta. Tyrimo eiga numatoma tokia:

- keitiklis įjungiamas laiko momentu $t = 0,1$ s ir laukiama kol pasieks normalaus darbo režimo parametrus;
- laiko momentu $t = 1,5$ s HVDC keitiklis prijungiamas prie el. sistemos su el. linija ir apkrova $S1 = 200 + j50$ MVA;
- laiko momentu $t = 2,5$ s prijungiama apkrova $S2 = 250 + j100$ MVA.

3 TYRIMO IR REZULTATŲ DALIS

Sumodeliuoti trys skirtingi darbo režimai keitiklyje. Šioje dalyje bus pateikiami rezultatai ir gautų rezultatų aptarimas.

3.1 Galios srauto krypties pakeitimo modeliavimas ir rezultatai

Šiame skyriuje ištirti 3 galimų procesų ir parametrų įtaka galios srauto krypties pakeitimui elektros sistemoje. Rezultatai pateikiami tolesniuose skyriuose vienam atvejui, likę modeliavimų grafikai bus nurodyti prieduose.

3.1.1 Sistemos trumpojo jungimo galingumo įtaka galios srauto krypties pakeitimo procesui

Pirmojo režimo pirmojo atvejo modeliavimas atliktas remiantis 2.12.1 skyriuje pateiktu modeliu, nurodyta metodika ir pradiniais duomenimis.

Tyrimo rezultatai $S_{tr} = 1000$ MVA galios sistemai

Pirmojo atvejo modeliavimo duomenys pateikti 3.1 pav. ir 3.2 pav. Šiuose pav. pateikti grafikai (1 graf. – sistemos įtampa, 2 graf. perduodama aktyvioji galia, 3 graf. - perduodama reaktyvioji galia, 4 graf. – el. sist. momentinė įtampa, 5 graf. – el. sist. momentinė srovė), kai prie keitiklio prijungta $S_{tr} = 1000$ MVA galios sistema. Matavimai atlikti 2.7 pav. modelio šynose B1.

Gautuose grafikuose aktuali yra ta grafiko dalis, kuri yra maždaug nuo 0,7s iki 1,2s. Šiuo metu įvykdomas pilnas galios srauto krypties pakeitimas. Pirmiausia matoma, kad galios srautas nepakinta per numatytą 100 ms laikotarpį. Visas procesas trunka ilgiau – nuo 0,8 s iki 1,09 s, t.y. 190 ms ilgiau (2 graf.) Taip pat proceso pradžios metu pastebimas reaktyviosios galios susvyravimas. Šiame modelyje nustatytoji reaktyviosios galio palaikymo vertė lygi 0 s.v., iš 3 graf. pastebima, kad reaktyviosios galios šuolis siekia nuo 0,15 iki -0,12 s.v., o ties 0 s.v. riba nusistovi ties 1,35 s. Detalizuotas procesas pateiktas 3.2 pav., kuriame matoma, kad momentinė elektros sistemos įtampa palaikoma tolygi ir lygi 1 s.v., srovė šio proceso metu kinta, ir po 0,06 s nuo proceso pradžios (0,86 s) pasiekia beveik nulinę vertę, srovės lygis 1 s.v. vertę pasiekia proceso pabaigoje (1,09 s). Taip pat pastebimas aiškus keitiklio privalumas – elektros sistemos įtampa proceso pradžioje siekia 0,95 s.v., kai galios srautas pasikeičia ši įtampa pakyla iki 0,98 s.v. Taip yra todėl, kad galios srautas, pakeitus jo kryptį, pradeda tekėti iš 2 el. sistemos į 1-ąją, kurios tr. jungimo galingumas yra dvigubai didesnis, todėl silpnesnė sistema gauna papildomą galios srautą ir jos įtampa pakyla.

Bendra tyrimo rezultatų apžvalga pirmajam tyrimo atvejui

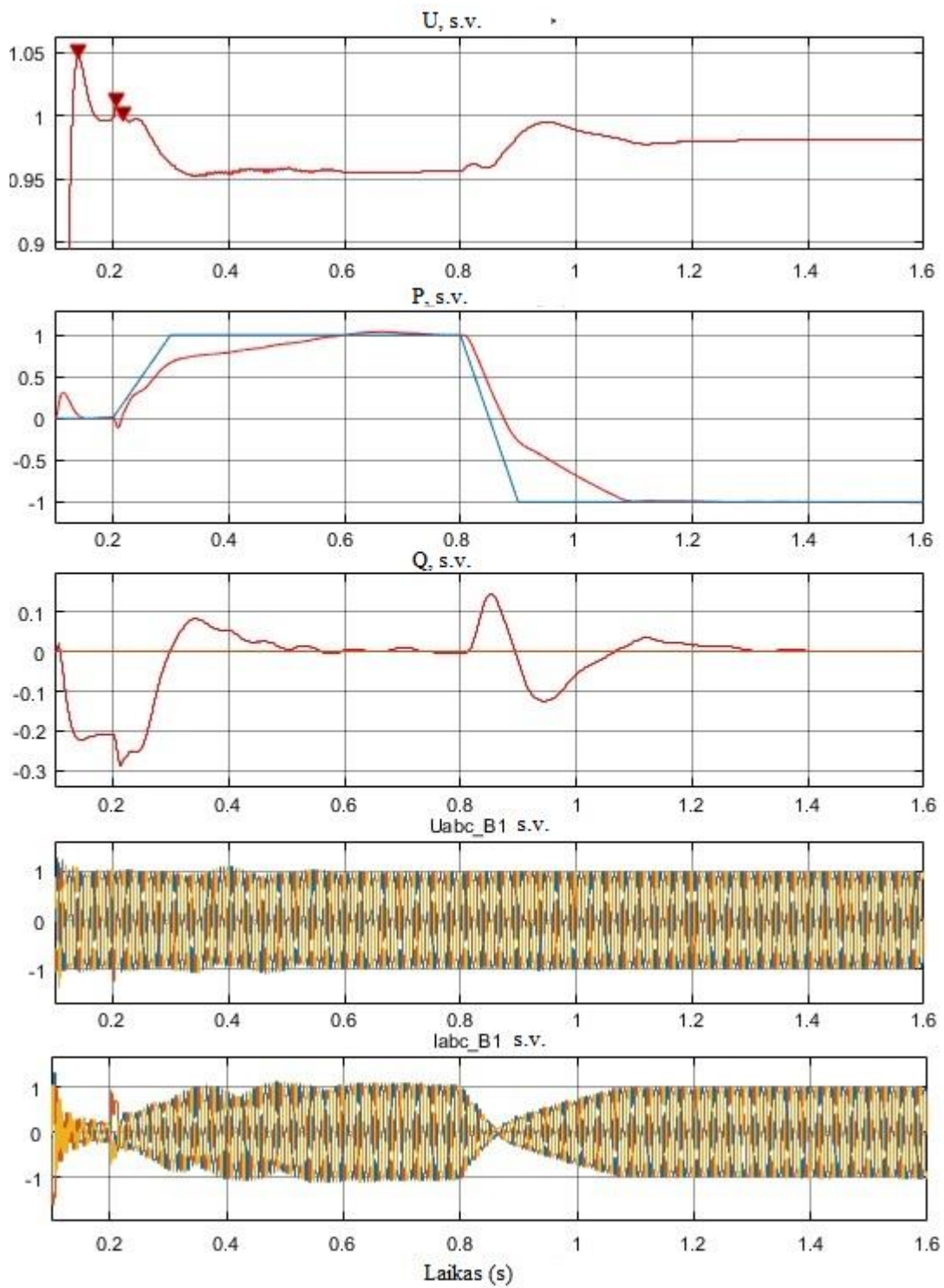
Ištyrus pirmosios sistemos galios įtaką galios srauto pakeitimo procesui pastebėta, kad šis parametras procesui daro itin mažą įtaką. Bendrai galio kitimo procesas visais atvejais išlieka panašus – iki maždaug 0,88s galia pasikeičia apie 1,25 s.v., o srauto kitimo greitis yra staigesnis ir siekia apytiksliai 15,625 s.v./s. Nuo 0,88 s iki 1,09 srautas pasikeičia likusius 0,75 s.v. ir srauto kitimo greitis yra lėtesnis bei siekia apytiksliai 3,571 s.v./s. Kai sistema yra silpna (500 MVA atveju), pastebimas padidėjęs reaktyviosios galios suvartojimas – iki -0,4 s.v., atsiranda ryškūs svyravimai. Visais kitais atvejais, kai sistema yra stipri ($SCR > 3$), gautas vienodas reaktyviosios galios svyravimas (žr. grafikus priede nr.1)

Pastebėta, kad sistemos galingumas turi esminę įtaką įtampos lygiui. Jeigu prijungiama galinga sistema, tai vidutinės įtampos kitimas būna mažas, o pradinė įtampa siekia artimą 1 s.v. (žr. priedo nr. 1 grafikus).

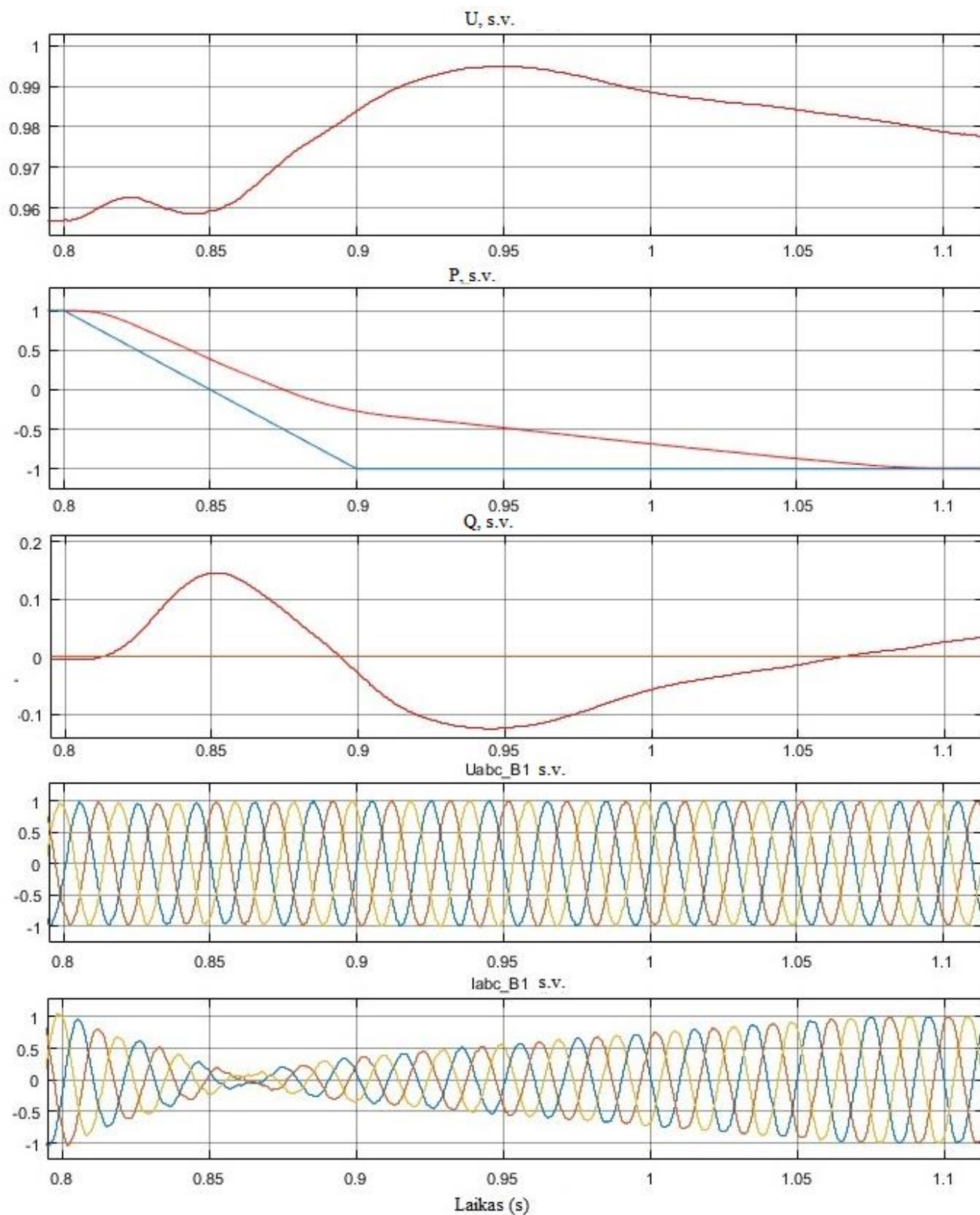
Gauti rezultatai rodo, jog esant žemam SCR santykiui keitiklio darbas su sistema yra nestabilus – tai rodo įtapos svyravimai (1 priedo A ir B pav.). Kai galios srauto kryptis pakeičiama, darbas tampa stabilus, nes galia importuojama iš santykinai galingesnės el. sistemos. Apibendrintas sistemos veikimas pateikiamas

3.1-1 lentelė. Apibendrinti galios srauto krypties keitimo duomenys, kečiant 1 sistemos galingumą

Sistemos modelio rezultatai					
Nr.	S_{tr} , MVA	SCR	t, ms	t_2 , s	Veikimas
1	300	1,5	290	1,09	Nestabilus
2	500	2,5			Nestabilus
3	800	4			Stabilus
4	1000	5			Stabilus
5	2000	10			Stabilus
6	4000	20			Stabilus
7	5000	25			Stabilus
8	8000	40			Stabilus



3.1 pav. Prijungtos $S_{tr} = 1000$ MVA el. sistemos galios srauto krypties keitimo procesas



3.2 pav. Prijungtos $S_{tr} = 1000$ MVA el. sistemos detalizuotas galios srauto krypties keitimo procesas

3.1.2 Sistemos varžos santykio X/R įtaka galios srauto krypties pakeitimo procesui

Pirmojo režimo antrojo atvejo modeliavimas atliktas remiantis 2.12.2 skyriuje pateiktu modeliu, nurodyta metodika ir pradiniais duomenimis. Šiuo atveju vienai pasirinktai el. sistemų parametų grupei keičiamas santykis X/R.

Tyrimo rezultatai $S_{1tr} = 1000$ MVA ir $S_{2tr} = 2000$ MVA galios sistemoms, $X/R = 10$

Ištirtas atvejis, kada keičiamas X/R santykis su pastoviais elektros sistemų parametrais. Gauti rezultatai pateikiami 3.3 pav. (1 graf. – sistemos įtampa, 2 graf. perduodama aktyvioji galia, 3 graf. - perduodama reaktyvioji galia, 4 graf. – el. sist. momentinė įtampa, 5 graf. – el. sist. momentinė srovė) Matavimai atlikti 2.7 pav. esančio modelio šynose B1.

Modeliavimo rezultatai šiuo atveju rodo, kad galios srauto kitimo procesas ir pobūdis yra analogiškas anksčiau aprašytam atvejui, tačiau būtent šiuo atveju galima pastebėti kiek vėluojančią galios srauto kreivę (kreivė atitolusi nuo nustatytojo galios signalo), lyginant su prieš tai modeliuotu atveju. Taip pat pastebimas reaktyviosios galios svyravimas, kuris nusistovi ir pasiekia nustatytąją 0 s.v. vertę laiko momentu $t = 1,2$ s. Svarbu pastebėti tai, kad vidutinės įtampos lygis prieš po galios srauto krypt. pakeitimo yra kiek mažesni ir atitinkamai siekia 0,88 s.v. ir 0.96 s.v.

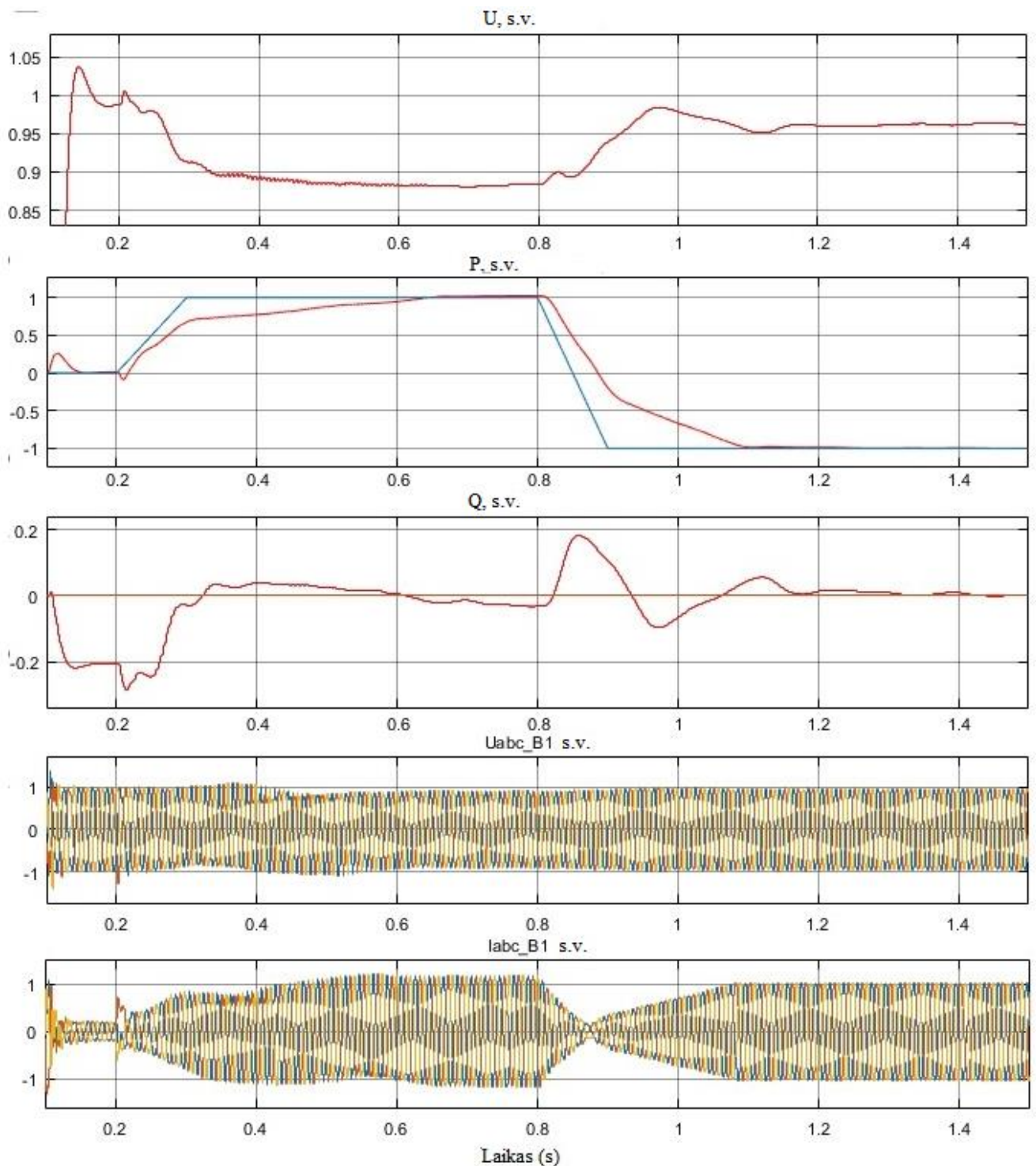
Bendra antrojo tyrimo atvejo rezultatų apžvalga

Keičiant X/R varžų santykį 1-oje el. sistemoje pagal pateiktas vertes 2.12-2 lentelė., gauti duomenys veikiant HVDC keitikliui.

Pirmiausia pastebima, kad kuo mažesnis X/R santykis, tuo mažesnė pradinė ir galutinė įtampa 1-toje elektros sistemoje. Tai ypač pastebima, kai šis santykis yra $X/R = 2$ (A pav. - priedas nr. 2). Pirminė ir galutinė įtampa būna kiek didesnė ir jos padidėjimas po galios srauto krypties apkeitimo proceso būna mažesnis, kai santykis $X/R = 10$.

Reaktyviosios galios srauto svyravimai itin ryškūs, kai el. sistemos varžų santykis siekia iki $X/R = 10$. Tiriamuoju atveju, kai $X/R = 2$, keitiklio valdymo sistema nepalaiko nustatytosios reaktyviosios galios vertės (0 s.v.) – į sistemą tiekama iki -0,3 s.v. siekiantis reaktyviosios galios srautas (priedas nr. 2 A pav.)

Kintant santykiui X/R , aktyviosios galios srauto kreivė taip pat tampa kitokia. Kai santykis yra iki $X/R = 10$, tai galios srauto kreivė šiek tiek „vėluoja“, t.y. galios srauto kreivė kinta ne kartu su nustatytojo galios srauto signalo kreive ir yra nuo jos atitolusi labiau negu tada, kai $X/R > 10$. Taip pat pastebėta, kad X/R santykis pilnam galios srauto pasikeitimo laikotarpiui įtakos neturi, t.y. jis išlieka pastovus visais atvejais ir siekia 290 ms.



3.3 pav. Galios srautų krypties keitimas, kai $X/R = 10$

3.1.3 Galios srauto krypties pakeitimo greičio įtakos tyrimas sisteminiams procesams

Pirmojo režimo trečiojo atvejo modeliavimas atliktas remiantis 2.12.3 skyriuje pateiktu modeliu, nurodyta metodika ir pradiniais duomenimis. Šiuo atveju tiriama nustatytojo galios signalo statizmo arba kitaip laiko tarpo, reikalingo pilnam galios srauto pakeitimui, įtaka sisteminiams procesams. Šis

modelis realizuojamas pakeičiant 2.8 pav. bloko „Signal Builder“ parametrus, sukuriant skirtingus nustatytosios galios signalus tam, kad būtų keičiama galios srauto krypties pakeitimo trukmė.

Galios srauto krypties pakeitimo rezultatai pateikti 3.4 pav. Šiame paveiksle matoma, kad pasiektas praktiškai idealus galios srauto krypties pakeitimo procesas – realios aktyviosios galios kreivė nėra nutolusi nuo nustatytosios galios signalo. Tai buvo pasiekta, kai laiko tarpas procesui buvo nustatytas lygus 400 ms.

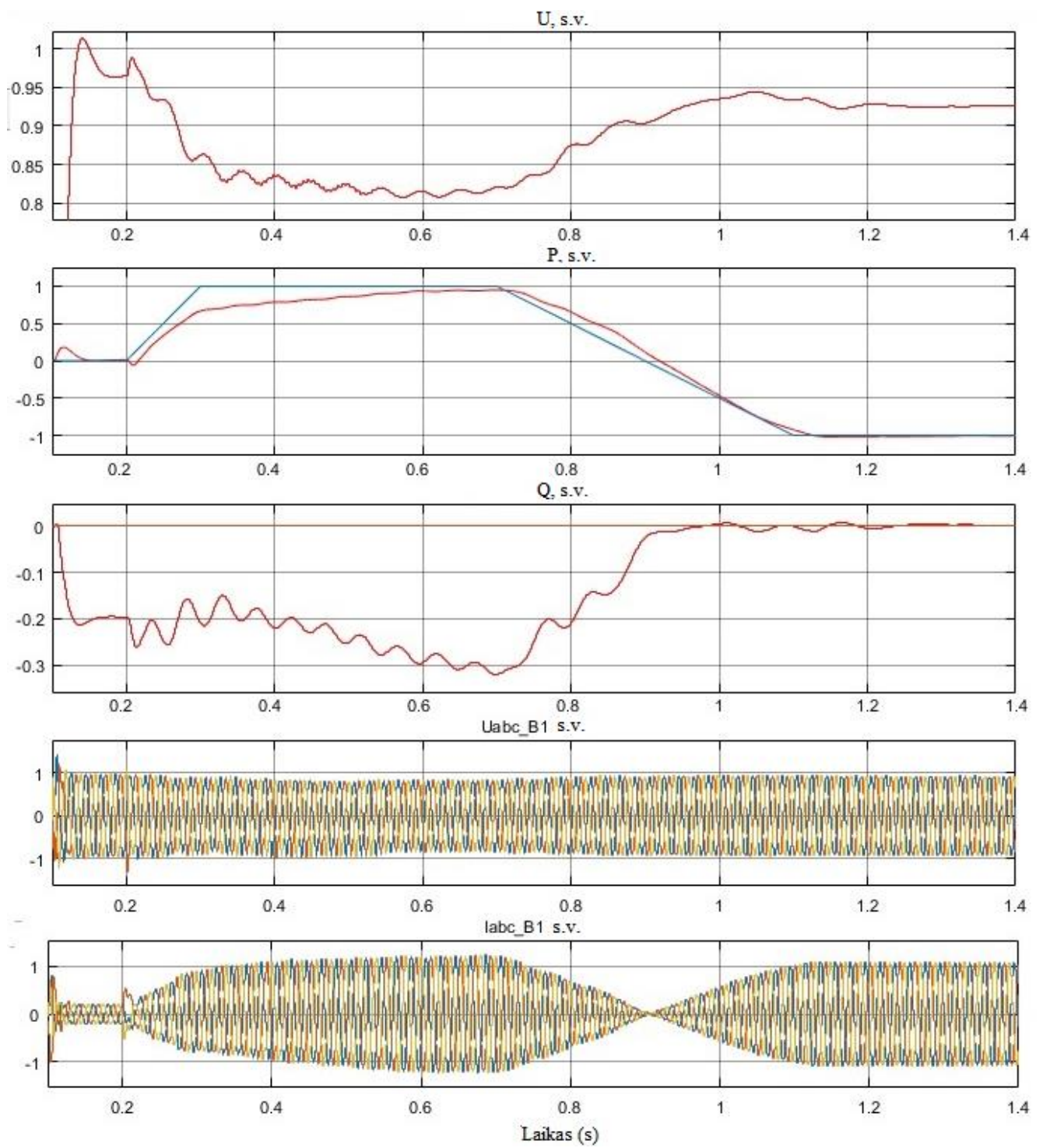
Remiantis kitų laikotarpių duomenimis (žr. priedą nr. 3), galima teigti, kad esant tokiai elektros sistemų konfigūracijai ($S1_{tr} = 550$ MVA ir $S2_{tr} = 2000$ MVA) galios srauto pakeitimo riba, kai procesas yra praktiškai idealus – 400 ms. Kai šis laikotarpis sumažinamas pats procesas tampa kitoks – realios aktyviosios galios kreivė nutolsta nuo nustatytosios galios kreivės. Šis požymis yra ryškus tol, kol proceso laikas yra iki 350 ms, vėliau procesas vyksta beveik taip pat kaip nurodo nustatytasis galios signalas.

Nustatytasis proceso laikas turi įtakos proceso vyksmo trukmei šios modeliuojamos sistemos atveju. Jei nustatytas proceso laikas trumpesnis, modeliuojamas procesas vyksta trumpiau, tačiau sumodeliuoto proceso ir nustatyto proceso laikai skiriasi – jie tampa vienodi tik kai nustatytas proceso laiko tarpas viršija 350 ms (žr. 3.1-2 lentelė. ir priedo nr. 3 grafikus A-E)

3.1-2 lentelė. Nustatytas ir sumodeliuotas galios srauto krypties keitimo laikotarpis $S1_{tr} = 550$ MVA sistemai

Sistemos modelio rezultatai		
Nr.	Nustatytas proceso laikas t, ms	Sumodeliuotas proceso laikas t, ms
1	100	300
2	150	310
3	200	325
4	250	350
5	300	360
6	350	370
7	400	400

Tai pat buvo sumodeliuotas atvejis, kada $S1_{tr} = 2000$ MVA (žr. priedo nr. 3 grafikus F, H, I). Gauti duomenys rodo, jog galios grafikas sutampa su nustatytu signalu kai proceso trukmė 350 ms. Sistemos galingumo įtaka nėra ryški, dėl to galima teigti, kad galios srautų pakeitimo greičiui įtaką daro ir kiti keitiklio parametrai (prijungti filtrai, keitiklio galia, valdymo sistemos parametrai ir kt.), kurie netiriami šiame darbe.

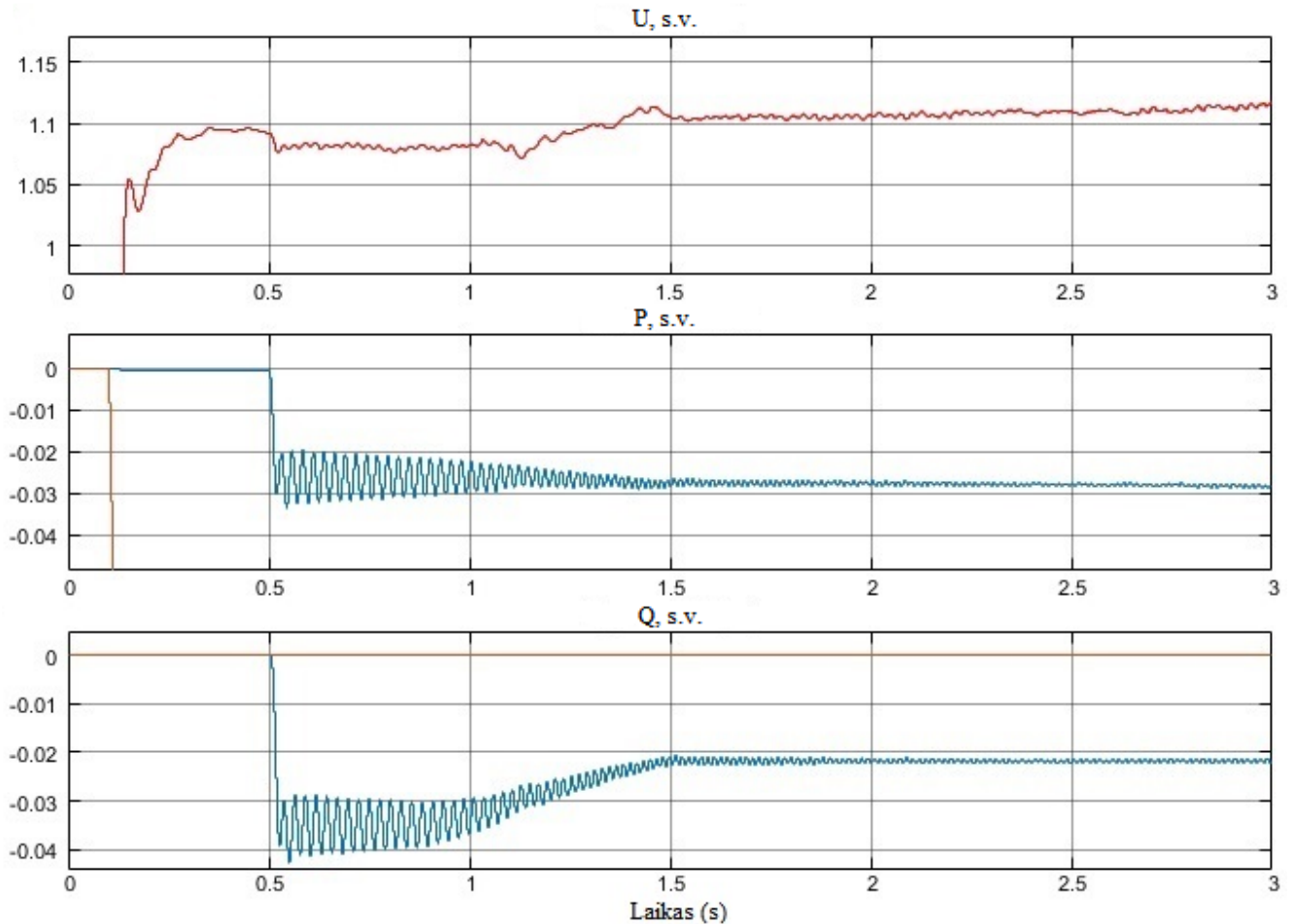


3.4 pav. Galios srautų krypties keitimas, kai pilnas srauto pakeitimas įvykdomas per 400 ms

3.2 Išjungtos elektros sistemos paleidimo („black-start“) tyrimo rezultatai

Šiame skyriuje ištirti 3 galimų elektros sistemos paleidimo atvejų įtaka elektros sistemai. Rezultatai pateikiami tolesniuose skyriuose vienam atvejui, likę modeliavimų grafikai bus nurodyti prieduose.

3.2.1 Transformatoriaus paleidimas elektros sistemoje



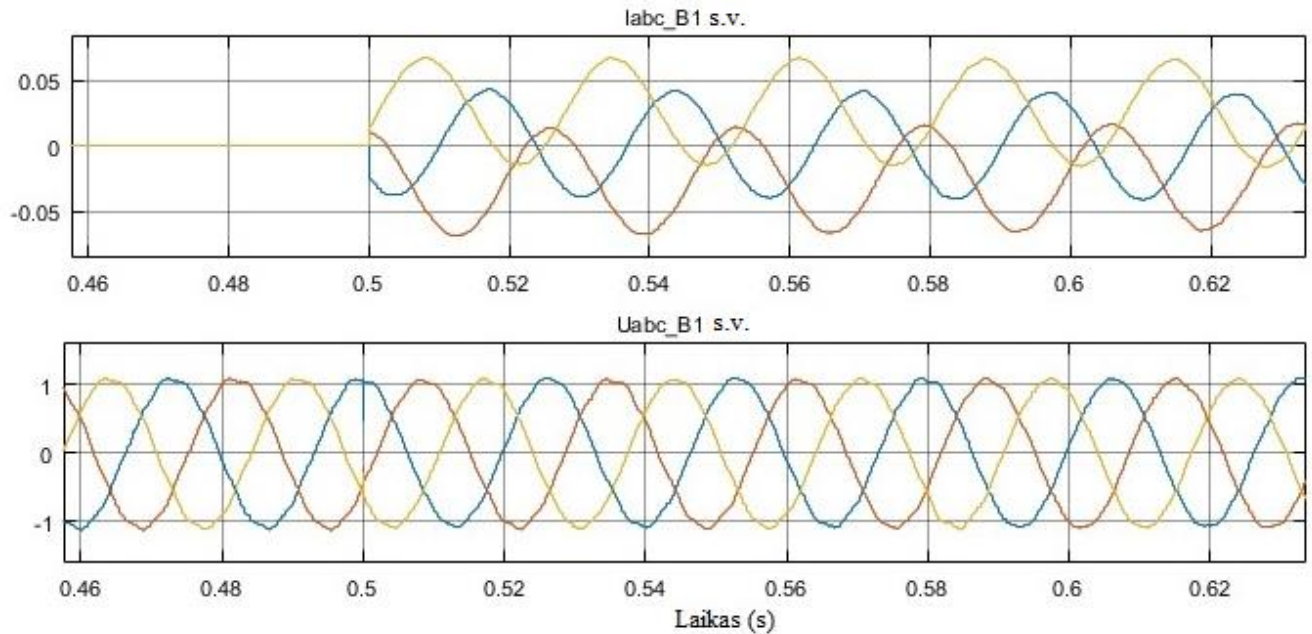
3.5 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimas HVDC keitikliu

3.5 pav. (1 graf. – vidutinė sistemos įtampa, 2 graf. perduodama aktyvioji galia, 3 graf. – perduodama reaktyvioji galia) pateikiami modeliavimo rezultatai, kai modeliuojamas transformatoriaus prijungimas prie tinklo. Parametrai matuojami 2.9 pav. šynose „B1“. Procesas inicijuojamas laiko momentu $t = 0,5$ s. – įjungiamas jungtuvas.

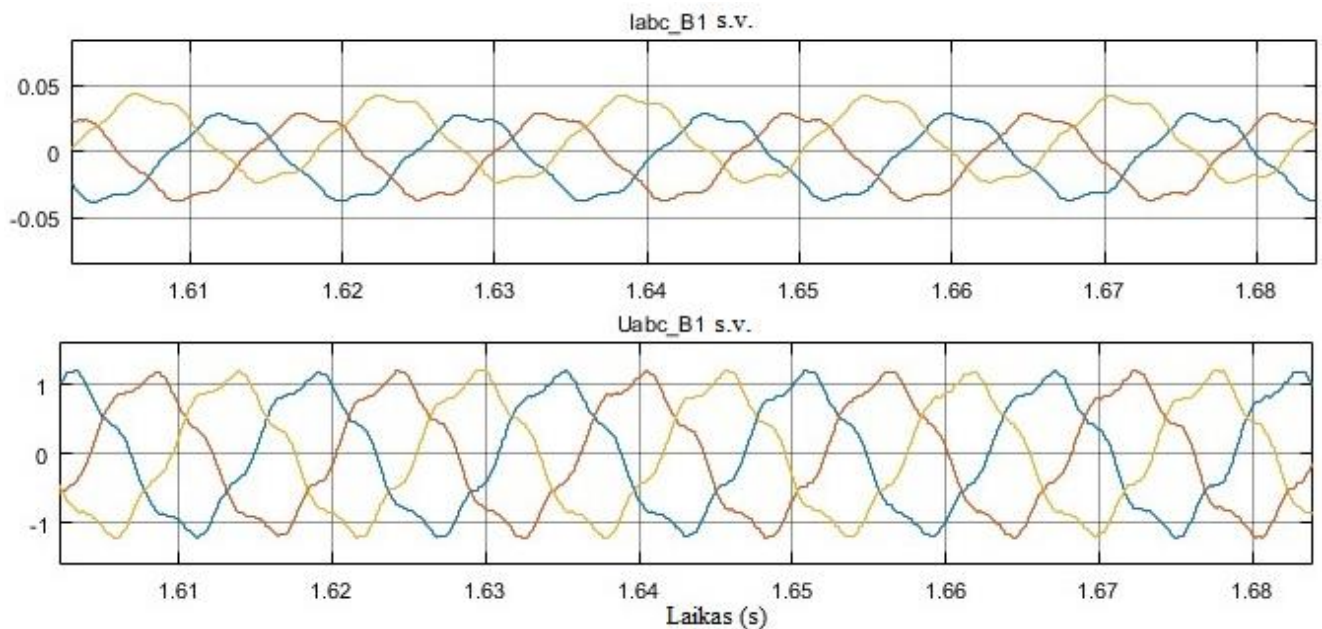
Jungtuvo įjungimo momentu pastebimas nedidelis vidutinės įtampos kritimas (žr. 1 grafiką). Šis įtampos kritimas yra tapatus atsiradusiam reaktyviosios galios srautui. Šis srautas atsiranda dėl transformatoriaus įsimagnetinimo. Reaktyviosios galios šuolis yra didesnis ir po kiek laiko nusistovi – proceso pradžioje maksimali reaktyviosios galios vertė siekia $-0,04$ s.v., procesui nusistovėjus siekia $-0,02$ s.v. Analogiškai reaktyviosios galios kitimo eigai kinta ir įtampa – kaip anksčiau minėta, atsiradęs įtampos kritis yra stabilizuojamas keitiklio valdymo sistemos ir nusistovi laiko metu $t = 1,5$ s. Kadangi

transformatorius veikia neapkrautas, todėl įtampos lygis proceso metu viršija 1 s.v. ribą, o procesui nusistovėjus siekia 1,1 s.v.

Aktyvioji galia (2 graf.) proceso pradžioje patiria šuolį ir pasiekia -0,03 s.v. vertę. Šis galios srautas yra atsiradęs dėl transformatoriaus įsimagnetinimo tuščiosios veikos nuostolių.



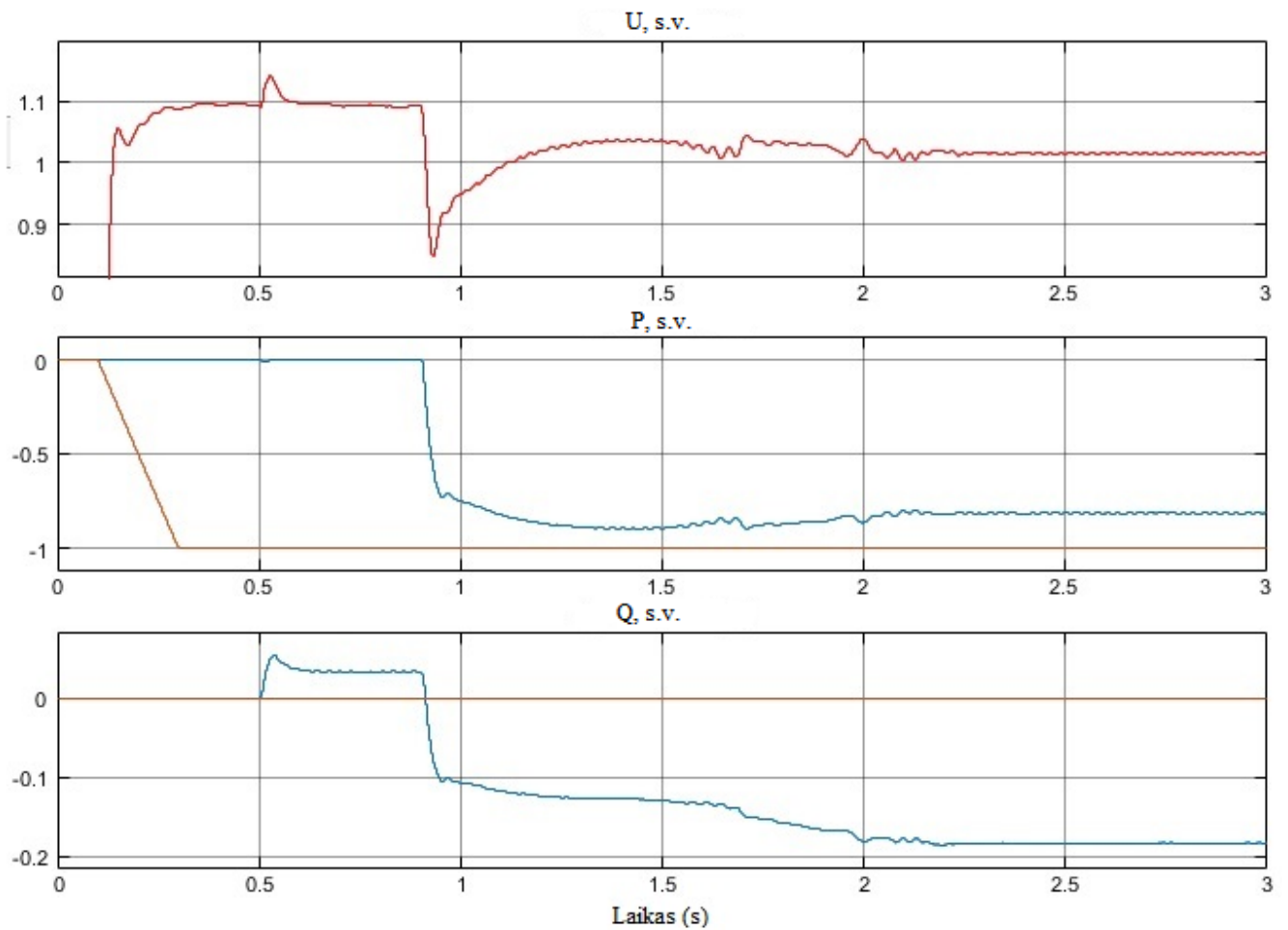
3.6 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimo HVDC keitikliu srovės proceso pradžioje



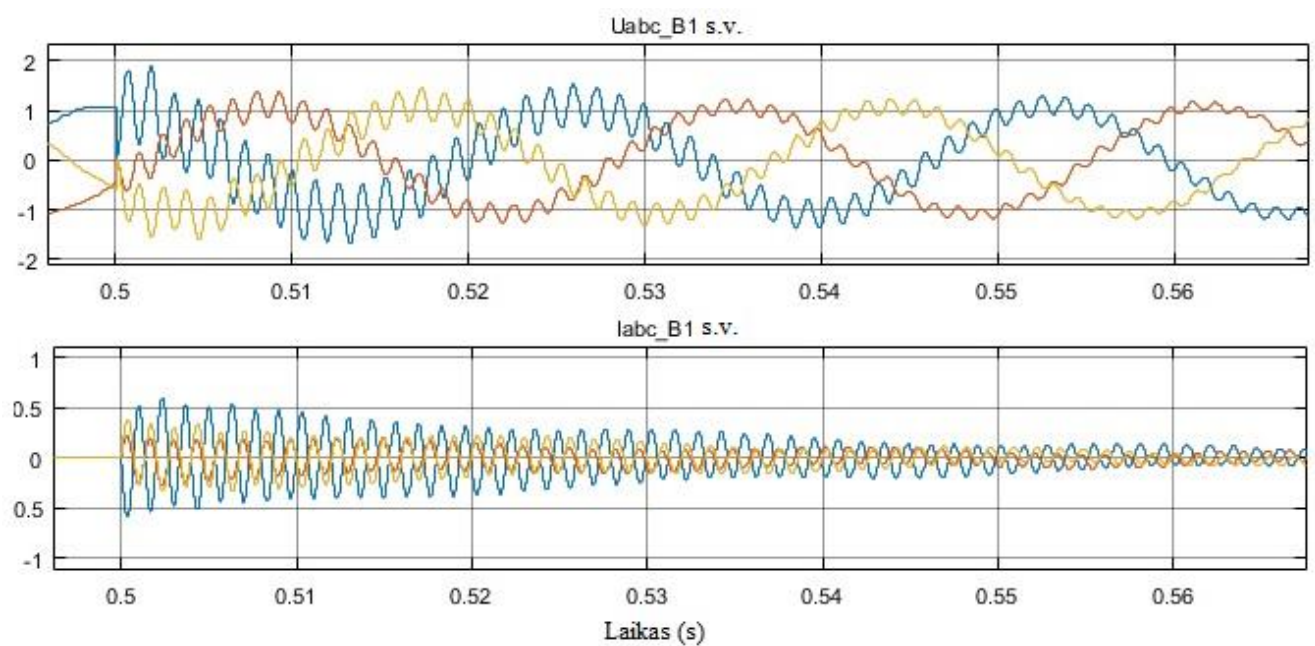
3.7 pav. 250 MVA transformatoriaus įjungimo HVDC keitikliu srovės procesui nusistovėjus

3.6 pav. ir 3.7 pav. pateiktos elektros sistemos srovės (1 graf.) ir įtampos (2 graf.). Juose matoma, kad pradžioje proceso srovės ir įtampos grafikai yra atitinkantys sinusoidės formą, o pabaigoje – iškraipyti, turi harmonikų. Taip yra dėl transformatoriaus šerdies įmagnetinimo (histerezės) reiškinių.

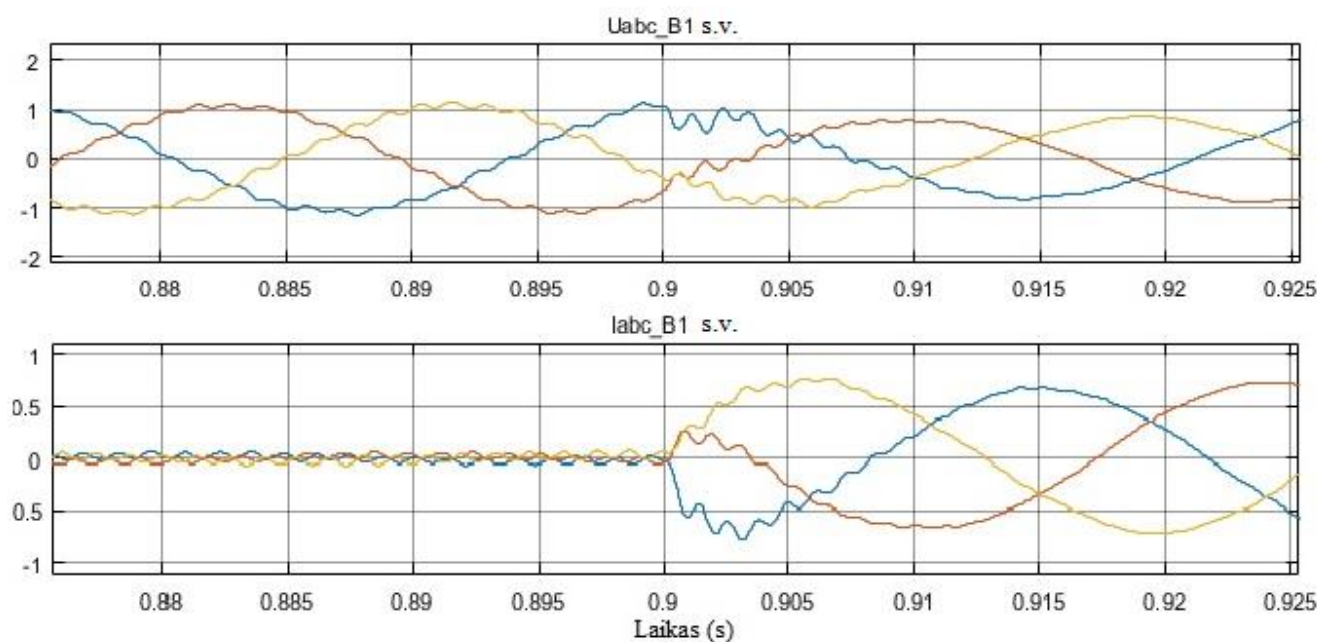
3.2.2 20 km el. linijos su $S = 170 + j20$ MVA apkrova įjungimo modeliavimas



3.8 pav. 20 km 330 kV linijos su transformatoriumi ir apkrova įjungimas



3.9 pav. 20 km 330 kV linijos su transformatoriumi įjungimas



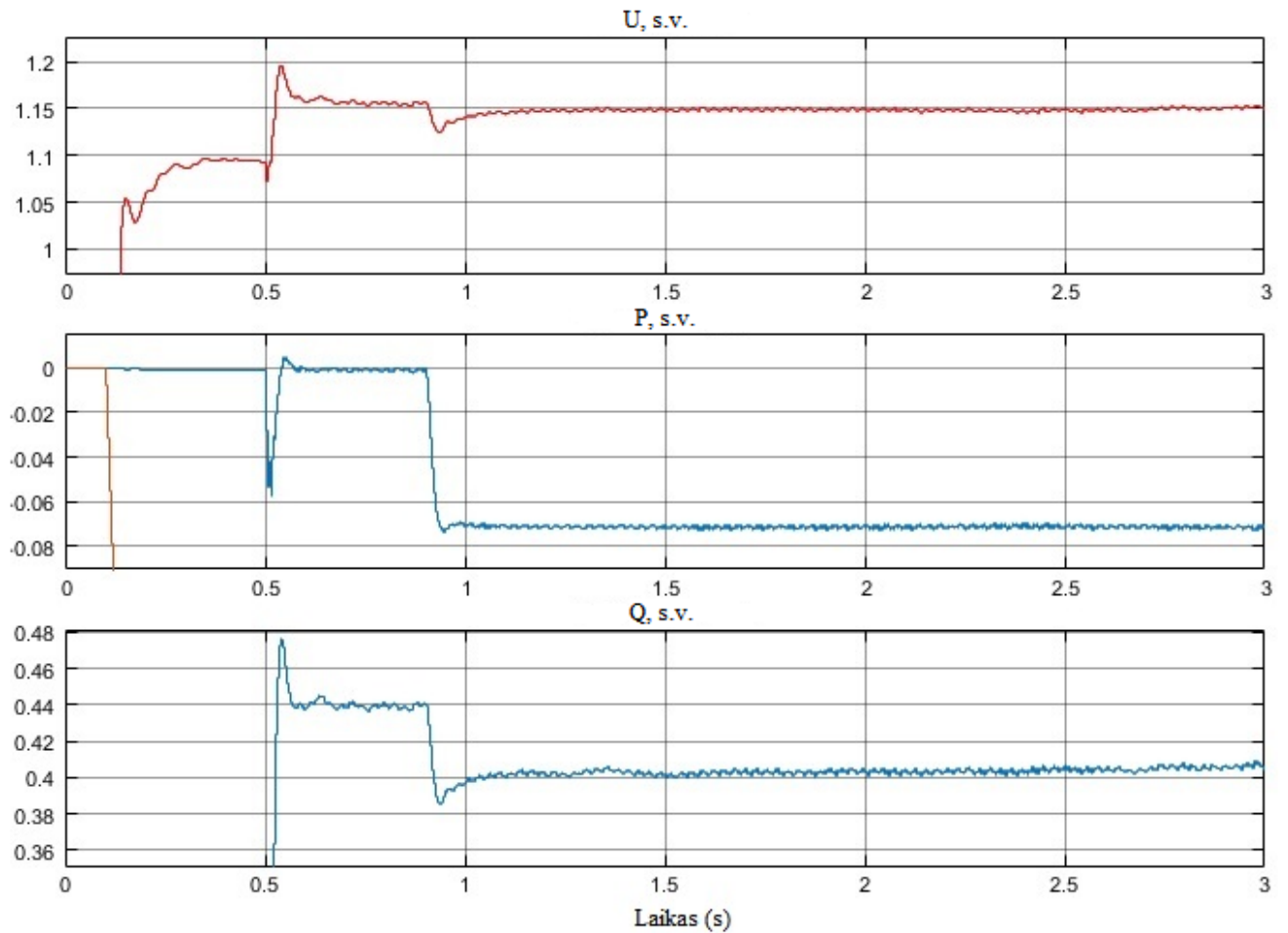
3.10 pav. 20 km 330 kV linijos apkrovos įjungimas

Modeliavimo rezultatai, prijungus 20km 330 kV el. liniją su transformatoriumi ir apkrova pateikti 3.8 pav., 3.9 pav. ir 3.10 pav. Elektros linijos įjungimo metu pastebimas įtampos šuolis. Jo vertė pradžioje 1.1 s.v., o maksimali vertė 1,15 s.v. Iki laiko momento $t = 0,9$ s pastebimas išaugęs reaktyviosios galios suvartojimas dėl įsijungusios linijos talpumo, kuris siekia 0,04 s.v. Kadangi keitiklis veikia nepilnai apkrautas, tai jo generuojama įtampa viršija 1 s.v. Laiko momentu $t = 0,9$ s įjungžiama apkrova. Tada pastebimas ryškus įtampos kritimas iki min. 0,85 s.v. ribos, kai procesas nusistovi įtampa pasiekia 1 s. v. ribą, nes prijungta apkrova ($S = 170 + j20$ MVA) beveik siekia vardinę keitiklio apkrovą. Apkrovos įjungimo momentu pastebimas ir reaktyviosios galios srauto pokytis – nuo 0,04 s.v. iki -0,18 s.v. Šis rezultatas gaunamas dėl atsiradusio linijos apkrovimo ir pasikeitusio apkrovos pobūdžio (nuo talpinės linijos apkrovos pasikeičia prijungus induktyvųjį galios vartotoją).

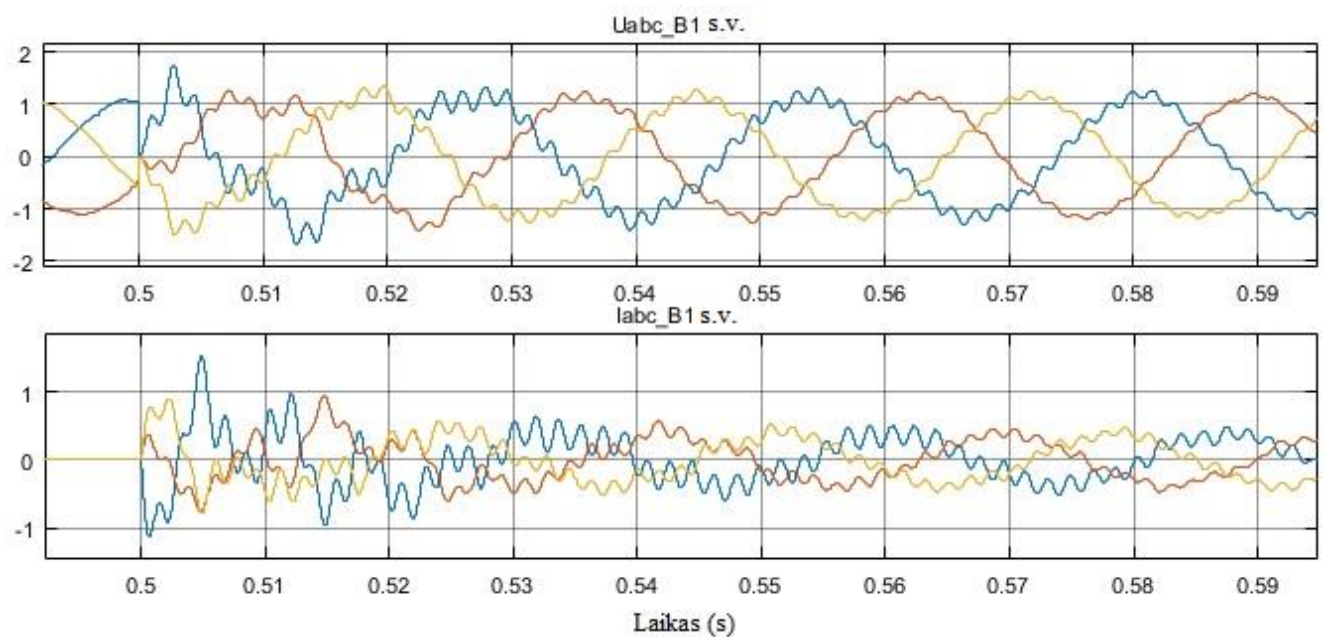
4.9 pav pastebima, kad prijungus liniją yra labai ryškūs įtampos iškraipymai. Įtampos grafiko forma artima sinusoidei nusistovi maždaug laiko metu $t = 0,6$ s. Srovės dydis linijos įjungimo momentu išauga, vėliau nusistovi vertė artima 0,05 s.v. dėl linijos talpinių srovių. 3.10 pav. pavaizduotas apkrovos prijungimas prie el. linijos. Įjungimo momentu pastebimas srovės išaugimas ir ryškūs įtapos bei srovės iškraipymai dėl atsiradusių harmonikų. Šie iškraipymai nuslopsta greitai – per 0,015 s.

Bendrai procesas nuo apkrovos įjungimo nusistovi laiko momentu $t = 2,3$ s – tada pagal 3.8 pav. aktyviosios galios grafiką galima pastebėti nusistovėjusį galios srautą, kurio dydis lygus prijungtai apkrovai.

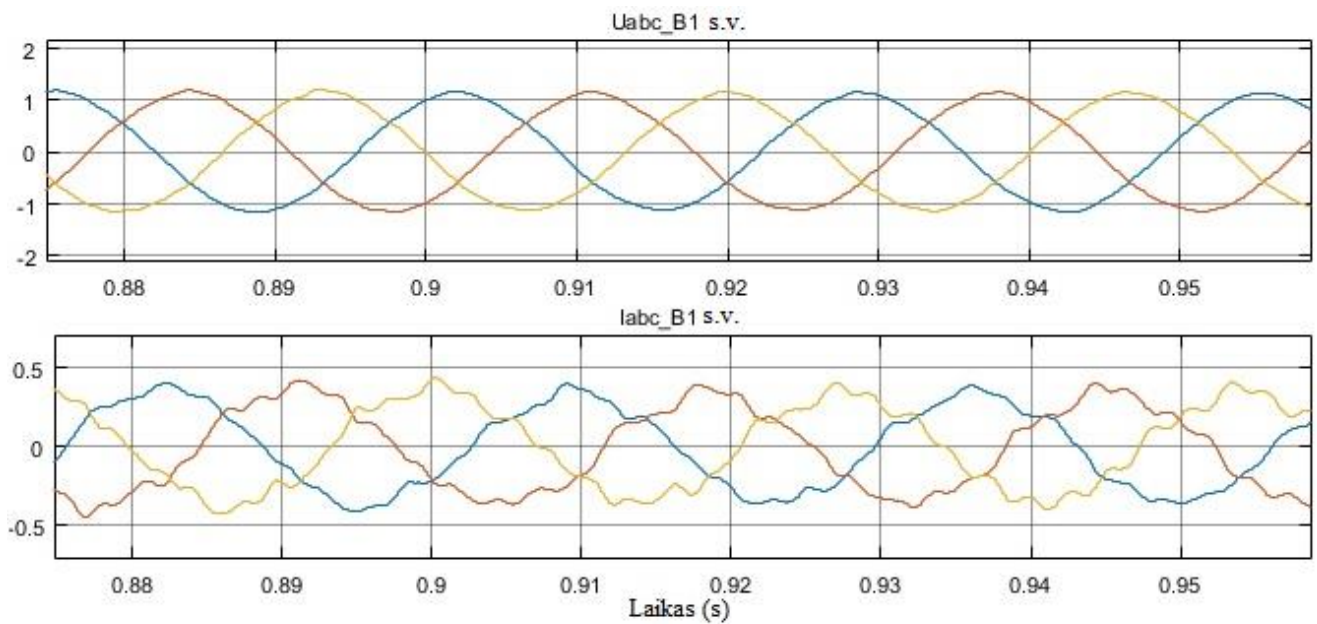
3.2.3 200 km el. linijos su $S = 10 + j5$ MVA galios apkrova įjungimo modeliavimas



3.11 pav. 200 km 330 kV linijos su transformatoriumi ir apkrova įjungimas



3.12 pav. 200 km 330 kV linijos su transformatoriumi įjungimas



3.13 pav. 200 km 330 kV linijos apkrovos įjungimas

Šiuo atveju ištirtas ilgos 200 km linijos įjungimas su mažesnės galios apkrova. Remiantis gautais rezultatais, proceso eiga išlieka analogiška trumpos linijos įjungimui – kai įjungiamą el. linija išauga reaktyviosios galios vartojimas, kai įjungiamą apkrova – induktyviosios galios vartojimas. Procesas nuo prieš tai buvusio skiriasi tuo, kad HVDC keitiklio įjungiamą linija, įjungimo momentu $t = 0,5$ s patiria aktyviosios galios kritimą, kuris siekia $-0,06$ s.v., o nusistovėjus procesui grįžta iki 0 s.v. Įtampos augimas taip pat yra ryškesnis – įjungimo momentu gautas šuolis iki 1,2 s.v., o procesui nusistovėjus liekamoji įtampa siekia 1,15 s.v. Didesnė nei 1 s.v. įtampa vėlgi reiškia, kad linija ir keitiklis veikia nepilnai apkrauti. Prijungus apkrovą taip pat matomas reaktyviosios galios kritimas ir aktyviosios galios srauto pakilimas. Šiuo atveju reaktyvioji galia išlieka talpinio pobūdžio, nes prijungta apkrova yra palyginus silpna.

3.12 pav. ir 3.13 pav. pateikti įtampų ir srovių grafikai. Ilgos linijos įjungimo momentu yra žymiai ryškesni srovės iškreipimai – harmonikų dedamosios yra didesnės (3.12 pav.). Įtampos svyravimai šiuo atveju yra mažesni. Įtampos grafikų sinusinė forma nusistovi laiko metu $t = 0,6$ s., srovės – kiek vėliau – ties $t = 0,7$ s. Prijungus apkrovą pastebima daug lygesnė įtampos signalo forma – jame nėra iškreipimų (harmonikų), srovės signalo pastebimi neslopstantys iškreipimai.

3.2.4 HVDC keitiklio prijungimas prie elektros sistemos

Keitiklio prijungimas prie el. sistemos ir modeliavimo rezultatai pateikti priede nr. 4. Sumodeliuotas HVDC keitiklio prijungimas prie 2 skirtingos galios sistemų. Keitiklio prijungimo procesas beveik analogiškas abiem atvejais – prijungimo metu patiriamas aktyviosios galios šuolis, siekiantis 2,6 s.v., reaktyviosios galios šuolis, siekiantis $-3,7$ s.v. Kai sistema silpnesnė (priedas nr. 4, A

pav.), tai pastebimas daug didesnis įtampos šuolis – iki 1,5 s.v. Aktyviosios galios svyravimas trunka ilgiau ir nusistovi laiko metu $t = 1,3$ s. Kai sistema yra galinga (priedas nr. 4, B pav.), tai pastebimas mažesnis įtampos šuolis prijungimo metu, siekiantis 1,1 s.v. Aktyviosios galios svyravimas nuslopsta anksčiau – laiko metu $t = 1$ s.

3.3 Sistemos dažnio reguliavimo HVDC keitikliu tyrimo rezultatai

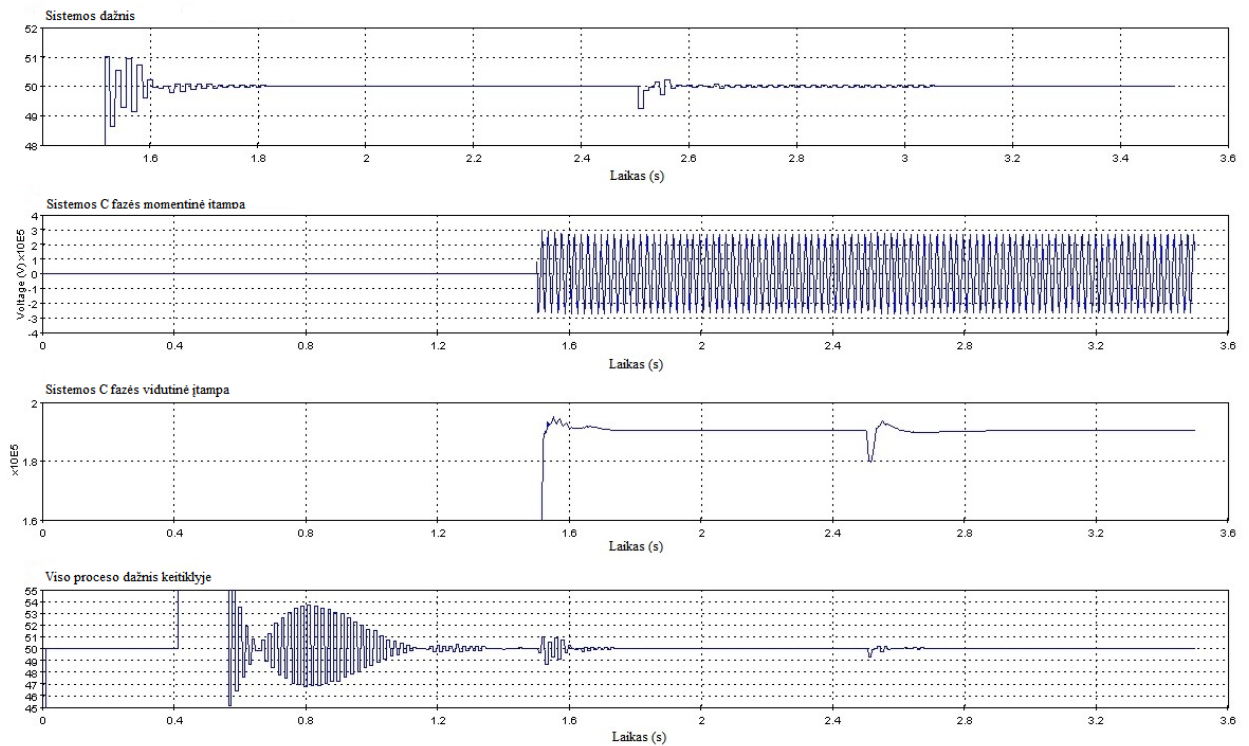
HVDC keitiklio tyrimas atliktas „EMTP-RV“ programa. Modeliavimas atliktas 2 atvejais – be el. sistemos (3.14 pav. ir

3.15 pav.) ir su ja (3.16 pav. ir 3.17 pav.). Abiem atvejais dažnio kritimas imituojamas įjungiant galingą ($S_2 = 250 + j100$ MVA) apkrovą. Bendra tyrimo eiga ir parametrai pateikti 2.14 skyriuje.

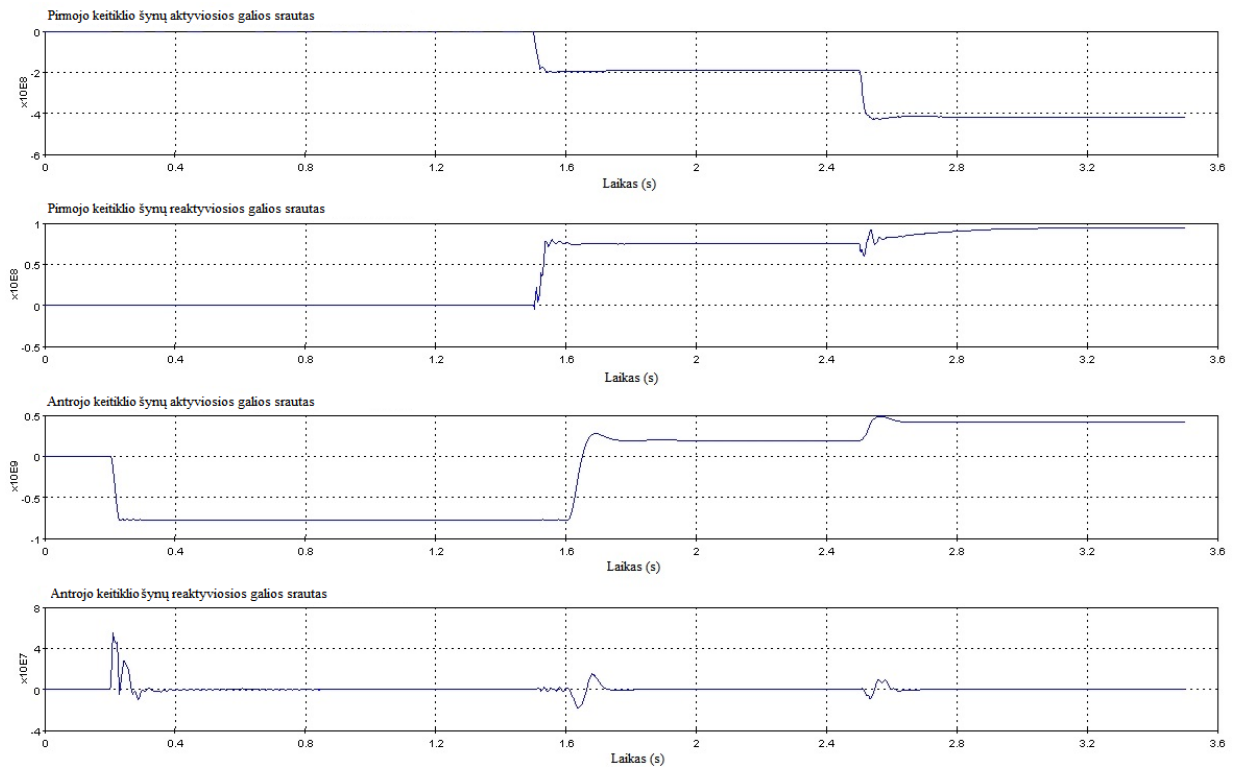
Kai keitiklis veikia be el. sistemos, galių srautai sistemoje teka iš keitiklio į apkrovą. Šiuo atveju pastebimi du kritimai (3.15 pav. 1 graf.) - kai įjungiamas keitiklis $t = 1,5$ s ir kai prijungiama papildoma apkrova $t = 2,5$ s. Atsižvelgus į dažnio ir įtampos grafikus (atitinkamai 3.14 pav.1 ir 3 graf.) antrosios apkrovos įjungimo momentu pastebimi dažnio ir įtampos svyravimai. Prisijungus apkrovai krenta įtampa, o kartu ir dažnis. Tada keitiklio valdymo sistema siekia atstatyti normalų dažnio lygį ir padidina galios srautą. Tai pastebima (3.15 pav. 1 ir 2 graf.). Tai galima pastebėti ir iš (3.15 pav. 3 ir 4 graf.), nes keitiklis galios perteklių pradeda importuoti iš 2 elektros sistemos. Padidinus galios srautą, dažnio reikšmė atstatoma į normalią. Dažnio atstatymo procesas trunka nuo $t = 2,5$ s iki $t = 2,7$ s.

Modelio veikimas, kai įjungta el. sistema yra kiek kitoks. Įvykus procesui, kai prijungiamas antroji apkrova, galios srautas tiekiamas iš pirmosios el. sistemos. Nors šiuo atveju ir patiriamas dažnio bei įtampos svyravimas (3.16 pav. 1 ir 2 graf.), jis yra kompensuojamas papildomu galios srautu ne iš keitikliu prijungtos el. sistemos „Equivalent_souce2“, o iš lygiagrečiai prijungtos sistemos „DEV1“. Tai pastebima iš galių srautų grafikų 3.17 pav. (1 ir 2 graf.) – kompensuojamas galios srautas nėra išaugęs. Tai rodo ir 3.17 pav. (3 ir 4 graf.) – papildomas galios srautas iš antrosios el. sistemos prijungimo metu tekėti nepradeda.

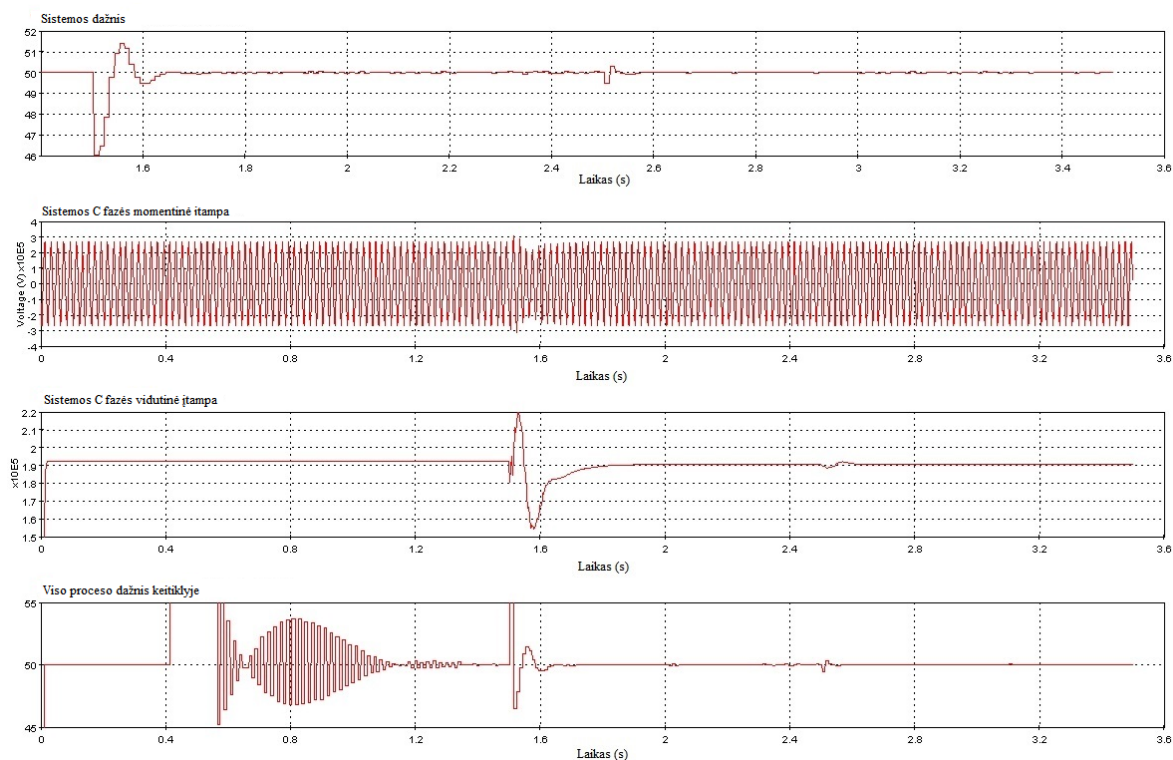
Rezultatai rodo, kad keitiklis turi būti modeliuojamas tam tikromis sąlygomis – šio atvejo tyrimui turi būti arba numatytas aiškus valdymas arba tiriamoji el. sistema turi veikti be šaltinio, kuris kompensuotų dažnio svyravimus. Keitiklio valdymo sistema tinkamai atlieka dažnio stabilizavimo funkciją, kai pirmoji sistema veikia be lygiagrečiai prijungtos el. sistemos. Šiuo atveju pastebimas papildomas galios srautas, kuris kompensuoja galios trūkumą ir el. sistemos dažnis stabilizuojasi. Šis procesas įvyksta pakankamai greitai – per 0,2 s, todėl galima teigti, kad HVDC keitiklis yra tinkamas įrankis stabilizuoti sisteminius dažnio nukrypimo procesus.



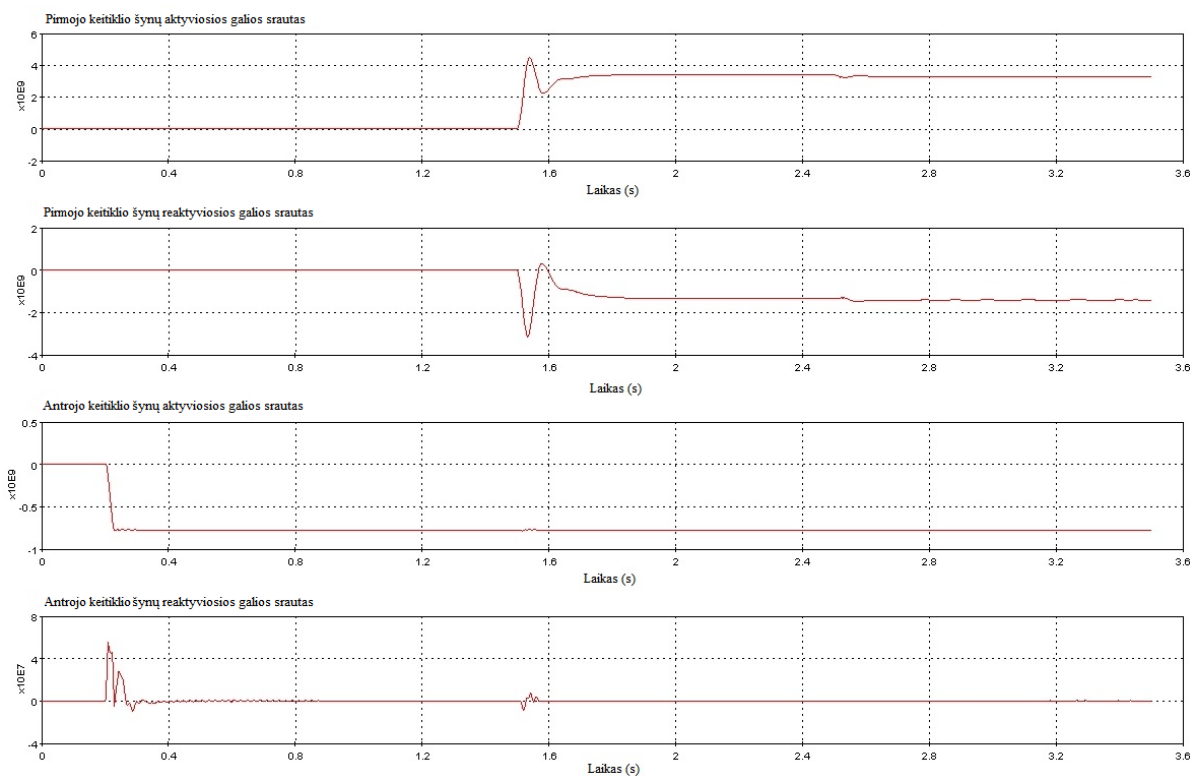
3.14 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant be el. sistemos (įtampų ir dažnių grafikai)
 1 graf. – sist. dažnis už jungtuvo „SW1“, 2 graf. – C fazės momentinė įtampa įtampa, 3 graf. – C fazės vidutinė įtampa, 4 graf. – viso modeliavimo proceso dažnis



3.15 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant be el. sistemos (galių srautų grafikai)
 1 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ1, 2 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ1, 3 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ2, 4 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ2



3.16 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant su el. sistema (įtampų ir dažnių grafikai)
 1 graf. – sist. dažnis už jungtuvo „SW1“, 2 graf. – C fazės momentinė įtampa įtampa, 3 graf. – C fazės vidutinė įtampa, 4 graf. – viso modeliavimo proceso dažnis



3.17 pav. Dažnio reguliavimas HVDC keitikliu, veikiant su el. sistema (galių srautų grafikai)
 1 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ1, 2 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ1, 3 graf. – aktyviosios galios srautas bloke PQ2, 4 graf. – reaktyviosios galios srautas bloke PQ2

IŠVADOS

1. Tiriamieji modeliai sudaryti naudojant standartinius HVDC VSC sistemų modelius „Matlab Simulink“ ir „EMTP-RV“ programų aplinkose. Šie modeliai buvo papildyti reikiamais elementais ir parametrais, kurie reikalingi ištirti HVDC keitiklio savybes.
2. Tiriant galios srauto krypties pakeitimą HVDC keitiklyje, įvertinti 3 skirtingi el. sistemos ir keitiklio valdymo sistemos parametrai ir gauti tokie rezultatai:
 - Atsižvelgiant į el. sistemos trumpojo jungimo galios įtaką pastebėta, kad esant galios srauto krypties pakeitimo trukmei 100 ms, galios srauto krypties pakeitimo laikotarpis išlieka toks pats su įvairiomis trumpojo jungimo galios vertėmis ir siekia 290 ms. Gauta, kad šio parametro įtaka maža, todėl galima teigti, kad šiam procesui trumpojo jungimo galia daro mažą įtaką, o procesui aktualūs ir kiti veiksniai (keitiklio nominali galia, prijungti filtrai ir kt.), kurie šiame darbe neanalizuoti.
 - Galios srauto krypties keitimo procesas nepriklauso nuo el. sistemos trumpojo jungimo galios. Procesas išlieka toks pat visais atvejais – pradžioje srautas kinta greitai, o po to lėčiau. Nuo šio parametro priklauso proceso pobūdis – esant silpnai sistemai ($SCR < 3$), pastebimas galios svyravimas, reakcija į nustatytąją galios signalą vėluoja. Esant stipriai sistemai, galios reakcija greitesnė, įtampos šuolis sistemoje mažesnis. Kai sistema silpna, atsiranda didesnis reaktyviosios galios suvartojimas ir svyravimai.
 - HVDC keitiklis el. sistemoje padidina sistemos stabilumą, nes esant silpnai sistemai ($SCR < 3$), elektros sistema veikia nestabiliai, t.y. pastebimi ryškūs įtampos ir galios svyravimai, o pakeitus galios srauto kryptį, užtikrinamas stabilus darbas, nes šiuo atveju prijungta stipresnė el. sistema.
 - Ištyrus sistemos varžos santykio X/R įtaką HVDC keitiklio darbui pastebėta, kad šis santykis lemia didesnę reaktyviosios galios svyravimą galios srauto krypties pakeitimo metu. Taip pat pastebėta, kad kuo šis santykis mažesnis, tuo žemesnė pradinė vidutinė įtampa sistemoje. Kai $X/R = 2$ keitiklio valdymo sistema nepalaiko nustatytojo reaktyviosios galios srauto, lygaus 0 sant. vieneto.
 - Galios srauto krypties pakeitimo proceso laikotarpis priklauso nuo el. sistemos galios. Kai nustatytas galios srauto krypties pakeitimo proceso laikas yra mažesnis nei 400 ms ($S1_{tr} = 550$ MVA galios sistemai), tai pilnas galios srauto krypties pakeitimas trunka ilgiau ir nesutampa su nustatytoju signalu. Kai laikas lygus arba viršija 400 ms, tai procesas atitinka nustatytąjį signalą. $S1_{tr} = 2000$ MVA galios sistemai šis laikas siekia 350 ms.
3. Tiriant el. sistemos paleidimą įvairiais atvejais, gauti tokie rezultatai:
 - Ištyrus transformatoriaus, veikiančio tuščiaja veika įjungimą, pastebėta, kad HVDC keitiklis užtikrina tolygų transformatoriaus įmagnetinimo procesą, kuris nusistovi per 1 s. Įtampos ir srovės grafikai, nusistovėjęs procesui, rodo, kad dėl transformatoriaus įmagnetinimo (histerezės reiškinio) yra harmonikų.

- Ištyrus 20 km ir 200 km el. linijų su apkrovomis įjungimą pastebėta, kad HVDC keitiklis užtikrina gerą el. parametrų kokybę. 20 km linijos įjungimo metu matomas padidėjęs harmonikų lygis, kuris nuslopinamas po 0,1 s. Įjungus apkrovą įtampos ir srovės iškreipymų nelieka po 0,015 s. 200 km linijos įjungimo metu matomi daug ryškesni įtampos iškreipymai, kurie taip pat nuslopinami po 0,1 s. Įjungus apkrovą įtampos harmonikų nėra, o srovės iškreipymai lieka pastovūs.
4. Ištyrus dažnio reguliavimą keitikliu pastebėta, kad HVDC sistema dažnio nuokrypį stabilizuoja per 0,2 s. Dažnio svyravimai stabilizuojami perduodant papildomą galios srautą iš kitos el. sistemos.

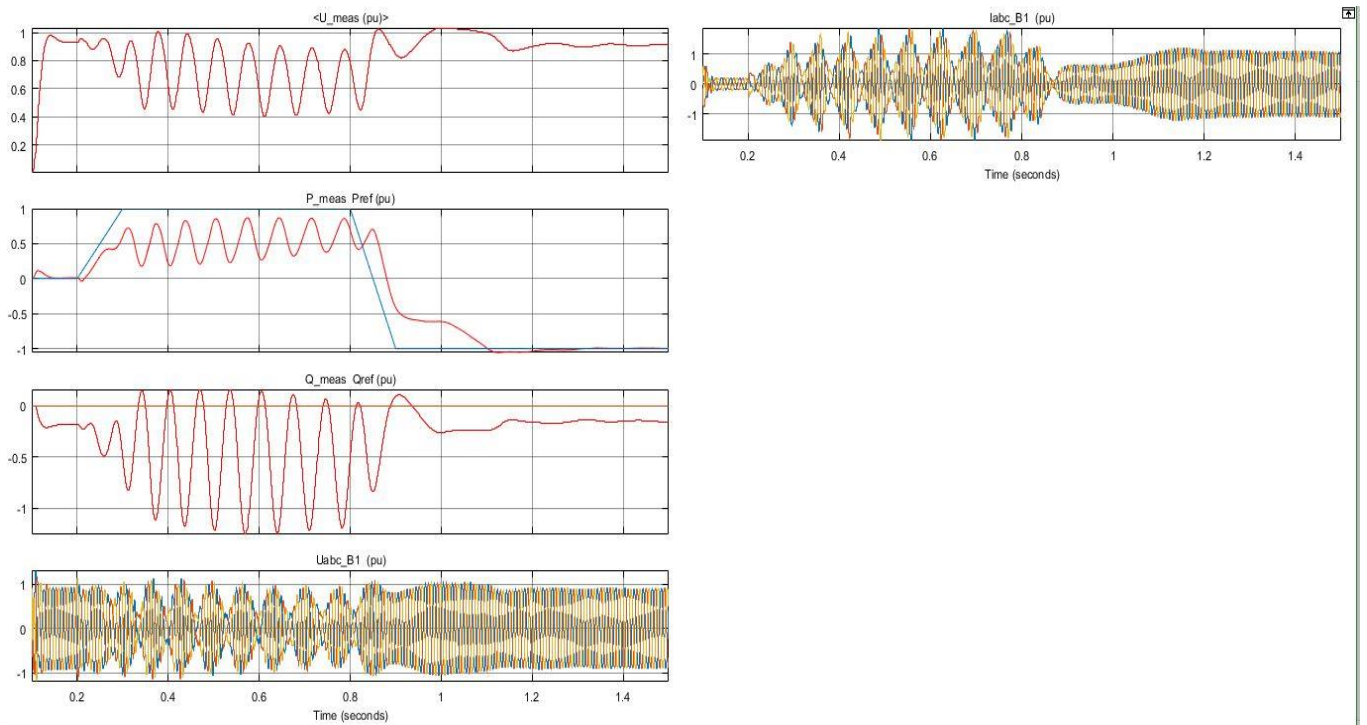
LITERATŪRA

1. ADAM, Grain Philip, Voltage source converter: modulation, modelling control and applications in power systems, Glasgow, UK 2014. ISBN 1493729667
2. SOOD, Vijay K., HVDC And Facts Controllers. Applications of Static Converters in Power Systems, Boston, USA 2004. ISBN 978-1-4020-7891-0
3. ES direktyva HVDC sistemų eksploatavimui [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], ENTSO-E Draft Network Code on High Voltage Direct Current Connections and DC connected Power Park Modules, prieiga per internetą:
<https://www.entsoe.eu/major-projects/network-code-development/high-voltage-direct-current/Pages/default.aspx> 16-24 psl.
4. Įmonės ABB informacija apie jungtį „Nordbalt“ [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], prieiga per internetą:
<http://www.abb.lt/cawp/seitp202/c2b01baf32dc864fc1257e18002b3a61.aspx>
5. JOVCIC, Dragan, AHMED, Khaled, HIGH-VOLTAGE DIRECT-CURRENT TRANSMISSION CONVERTERS, SYSTEMS AND DC GRIDS, Aberdeen, UK 2015. ISBN 978-1-118-84666-7.
6. BRESESTI, Paola. HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System. *IEEE*. March 2007, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 22, Issue: 1, p. 37-43.
7. ABB „HVDC Light“ technologijos aprašymas [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], prieiga per internetą :
<https://library.e.abb.com/public/2742b98db321b5bfc1257b26003e7835/Pow0038%20R7%20LR.pdf>
8. JIANG-HAFNER, Ying. HVDC with Voltage Source Converters. A Powerful Standby Black Start Facility. *IEEE*. IEEE PES T&D conference in Chicago, USA, April 2008.
9. BAHRMAN, Michael P., JOHNSON, Brian K. The ABCs of HVDC Transmission Technologies, *IEEE*. March/April 2007, IEEE Power & Energy magazine, p. 32 - 44.
10. G. Asplund. Application of HVDC Light to Power System Enhancement, *IEEE*. January 2000, IEEE/PES Winter Meeting, Singapore.
11. K. Eriksson, J. Graham. HVDC Light a Transmission Vehicle with Potential for Ancillary Services. VIISEPOPE Conference, May 21-26, 2000, Curitiba, Brazil,.
12. S. Vadhiraj. Generic SPWM technique for multilevel inverter. *IEEE*. June 2014, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Kowloon, China

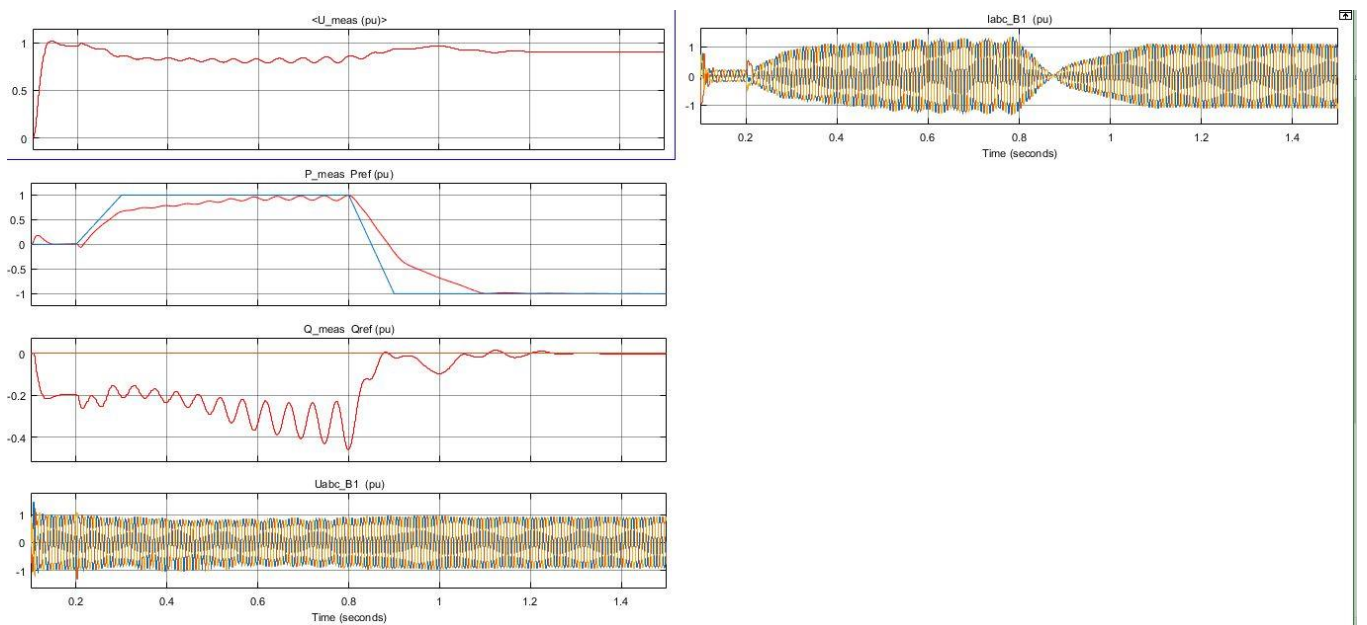
13. ABB kabelių parametrai [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], prieiga per internetą : <https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007GB%20rev%205.pdf>
14. K.K. Sen. A power flow controller with a stable reversing capability. *IEEE*. July 2000, Power Engineering Society Summer Meeting.
15. HINGORANI, Narain G. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, 1999, ISBN: 978-0-7803-3455-7
16. BRADAR, Mohamadreza. The Modeling Multi-Terminal VSC-HVDC in Power Flow Calculation Using Unified Methodology. *IEEE*. March 2012, IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies
17. SAAD, Hani. Modular Multilevel Converter Models for Electromagnetic Transients. *IEEE*. JUNE 2014, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 29, NO. 3
18. Matlab Simulink programos VSC keitiklio aprašas [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], prieiga per internetą: <https://se.mathworks.com/help/phymod/sps/examples/vsc-based-hvdc-transmission-system-detailed-model.html>
19. J. Peralta, H. Saad, S. Denetière, J. Mahseredjian, and S. Nguéfeu, “Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system. *IEEE*. Jul. 2012, IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 3, pp. 1501–1508.
20. ZHANG, Lidong. Power System Reliability and Transfer Capability Improvement by VSC-HVDC (HVDC Light), *CIGRE*. June 2007, CIGRÉ Regional Meeting, Tallinn, Estonia
21. JOHANSSON, Stefan G. POWER SYSTEM STABILITY BENEFITS WITH VSC DC-TRANSMISSION SYSTEMS [interaktyvus] [žiūrėta 2017 m. gegužės 20 d.], prieiga per internetą: <https://abblibrary.s3.amazonaws.com/public/3a370a3153baa30ec1256fda004c8cc6/B4-204.pdf>

PRIEDAI

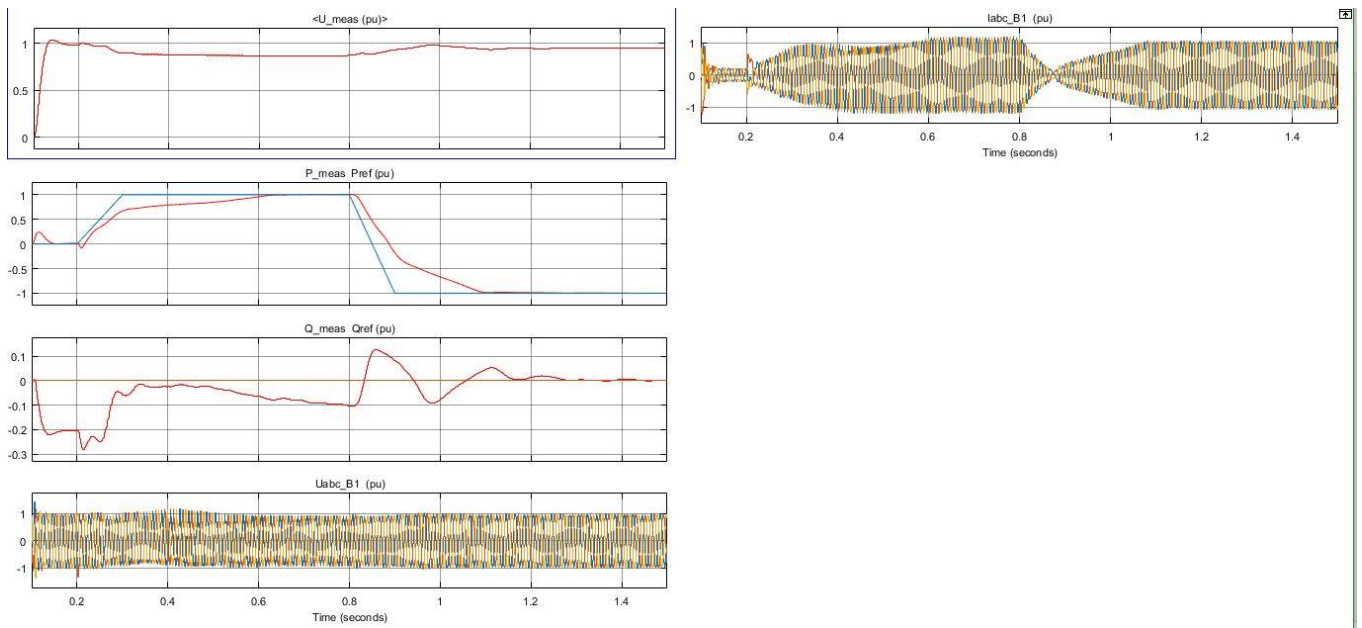
Priedas nr. 1 El. sistemos trumpojo jungimo galios įtakos tyrimo rezultatai



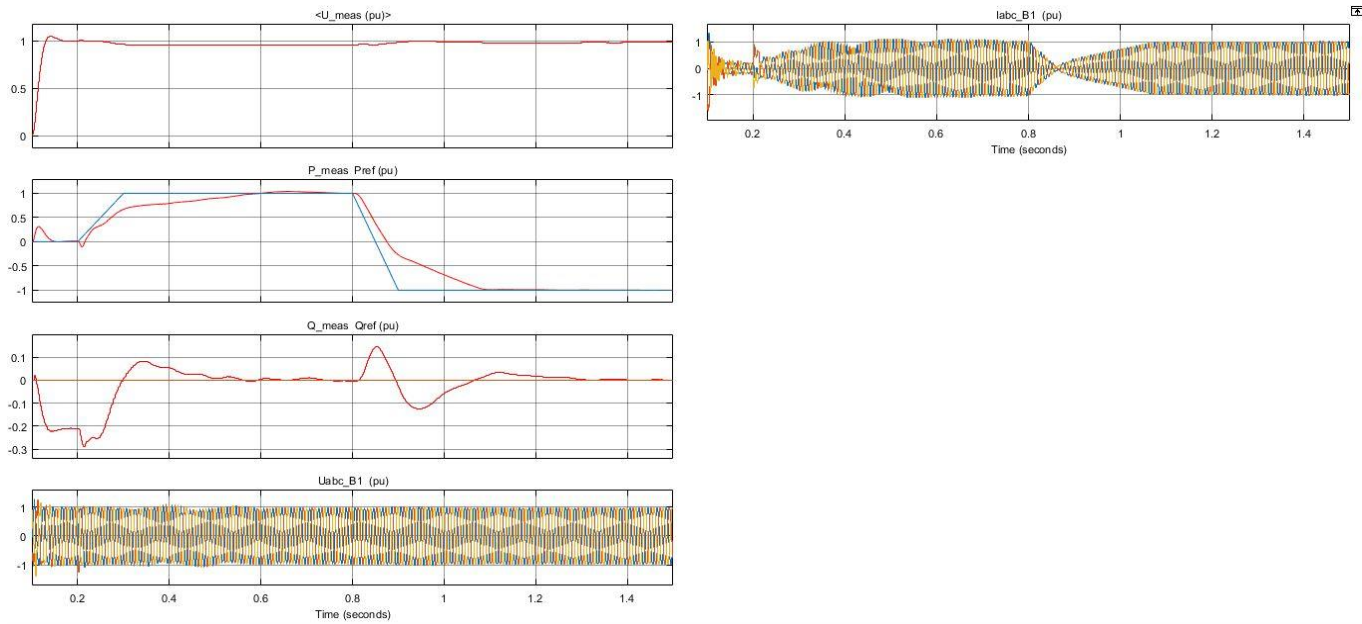
(A) Prijungiama $S_{tr} = 300$ MVA sistema



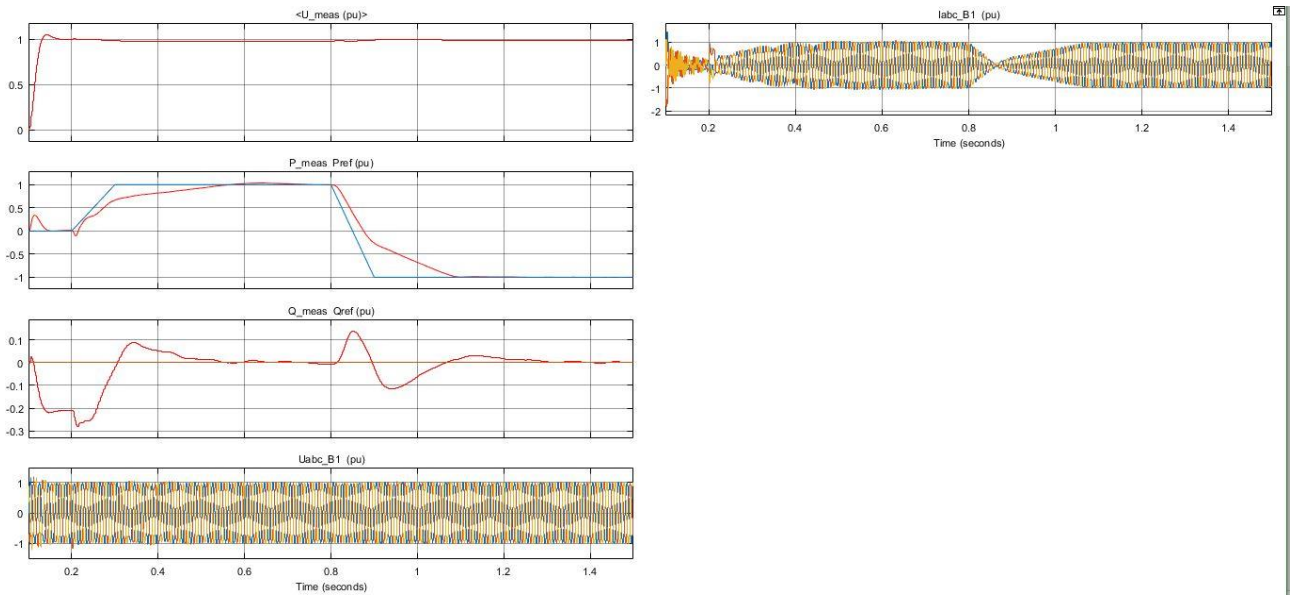
(B) Prijungiama $S_{tr} = 500$ MVA sistema



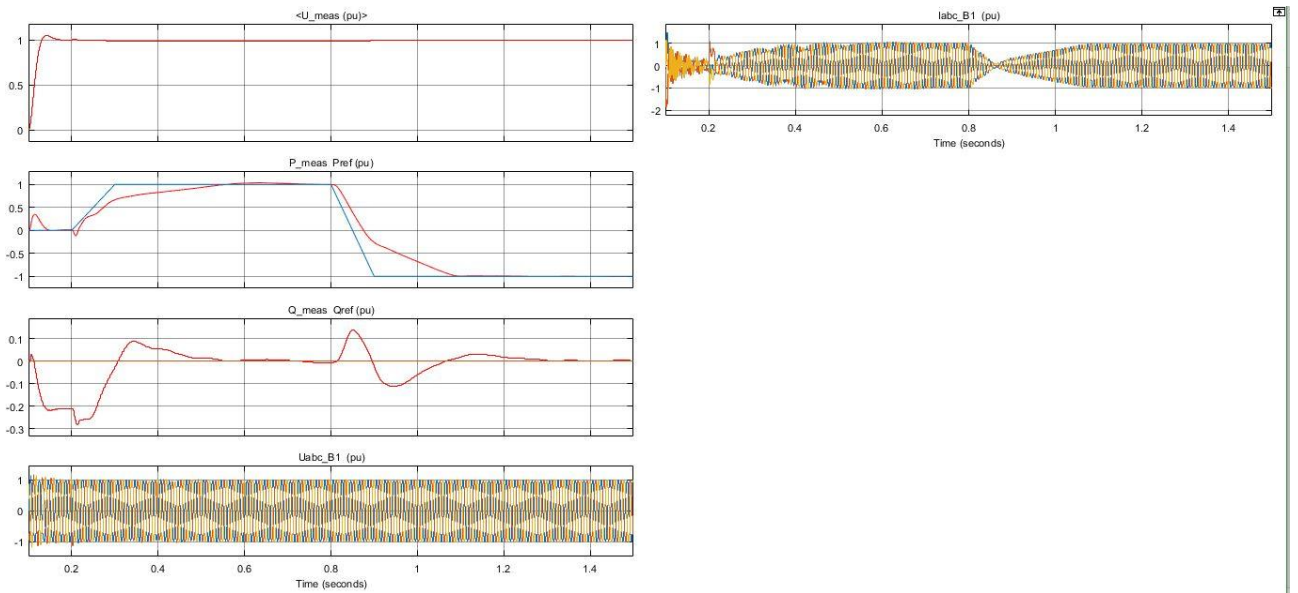
(C) Prijungiama $S_{tr} = 800$ MVA sistema



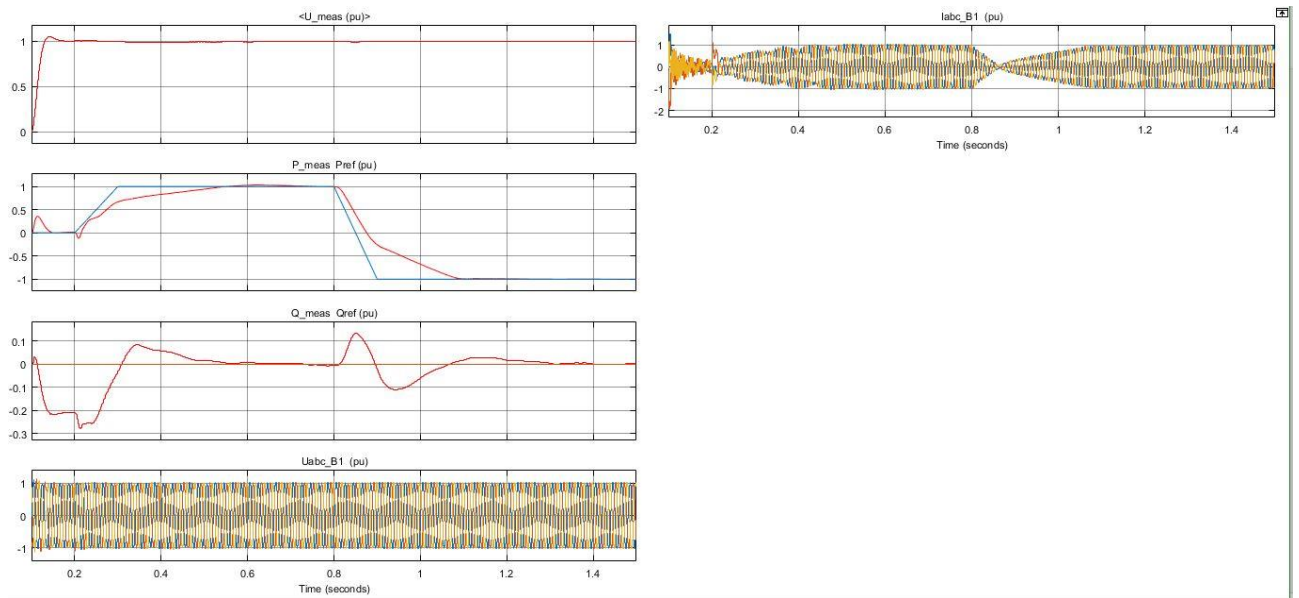
(D) Prijungiama $S_{tr} = 2000$ MVA sistema



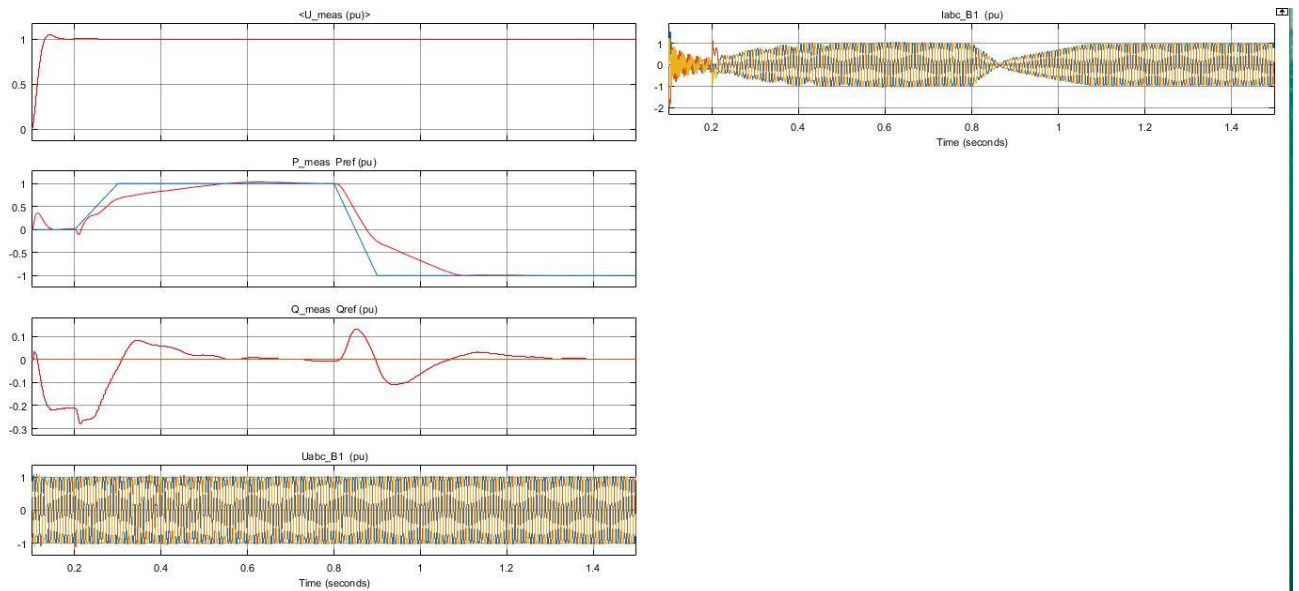
(E) Prijungiama $S_{tr} = 4000$ MVA sistema



(F) Prijungiama $S_{tr} = 5000$ MVA sistema

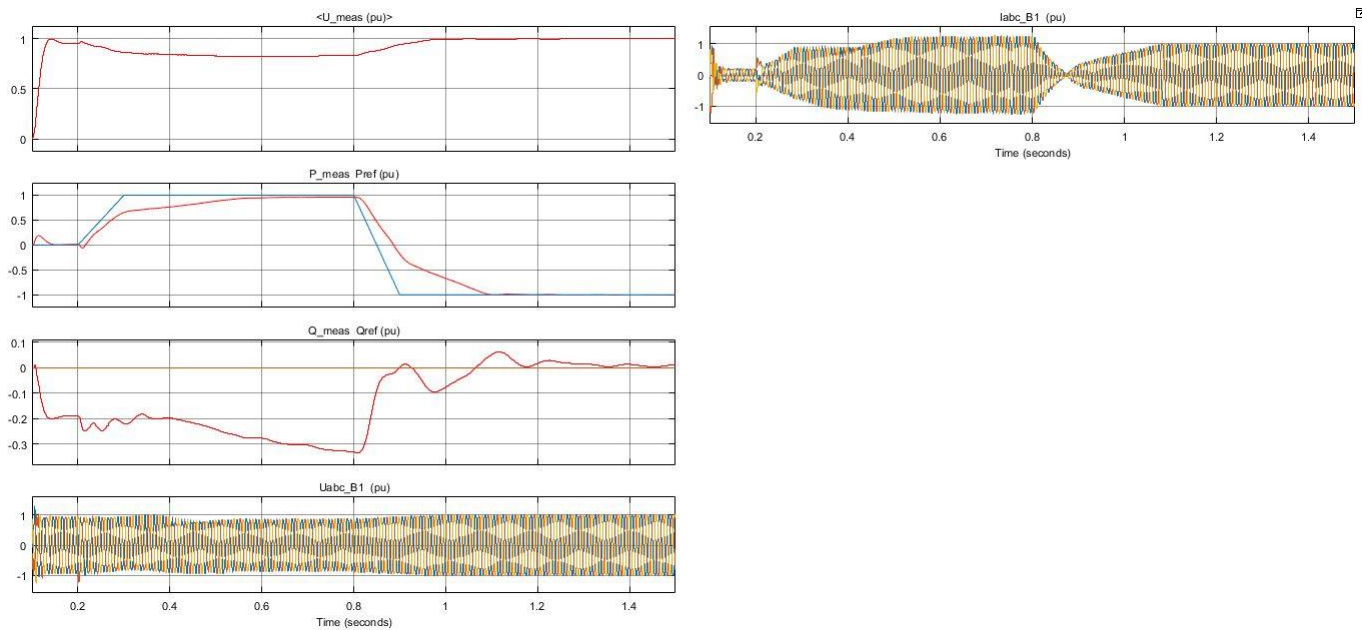


(G) Prijungiama $S_{tr} = 8000$ MVA sistema

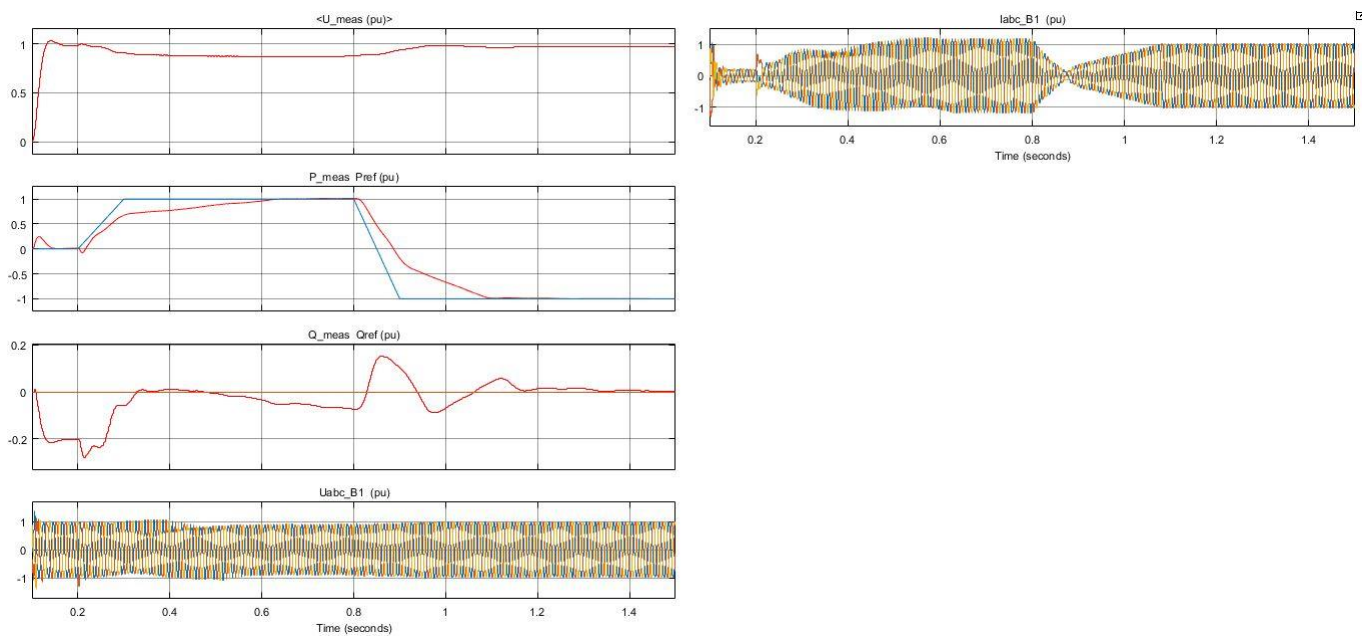


(H) Prijungiamos dvi $S_{tr} = 10000$ MVA sistemos

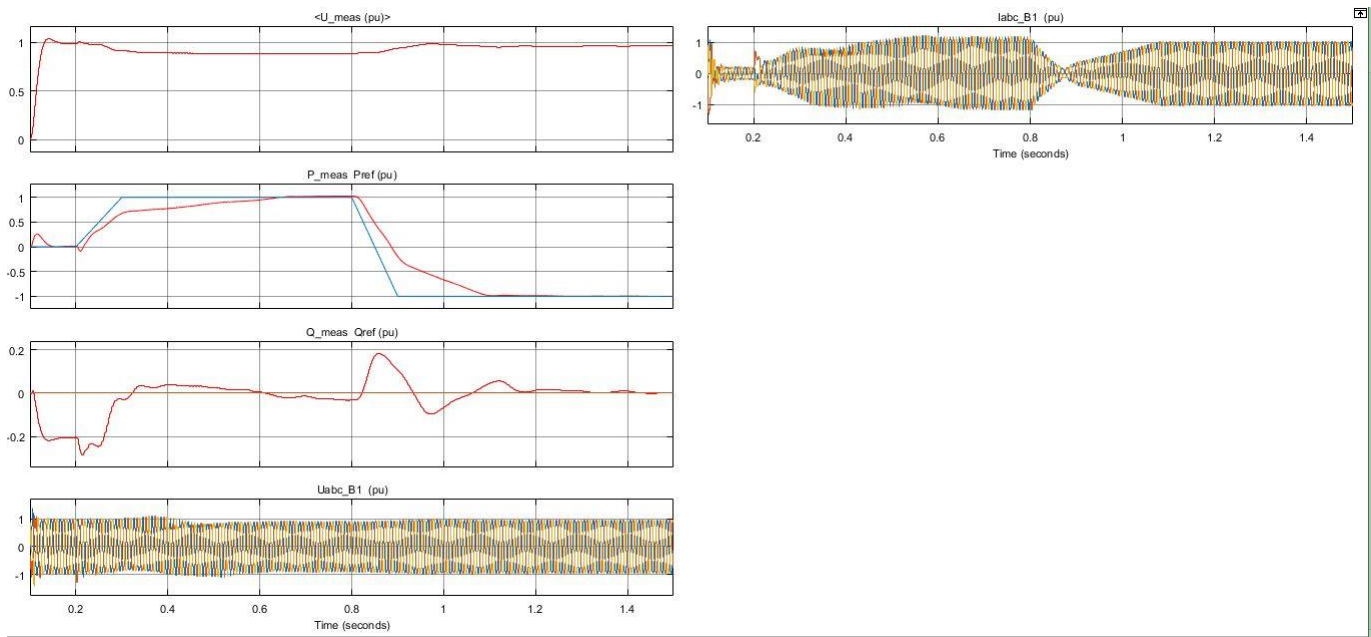
Priedas nr. 2 Sistemos varžų santykio įtakos HVDC keitiklio darbui tyrimo rezultatai



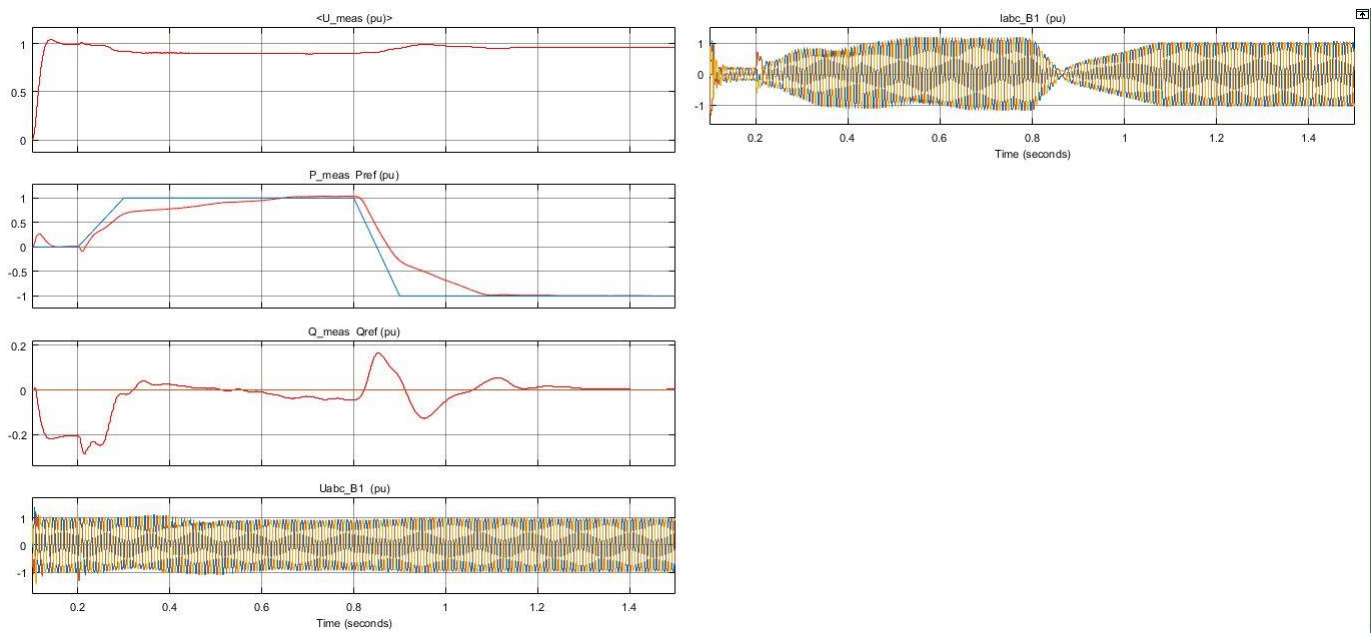
(A) Prijungiama sistema, kurios $X/R = 2$



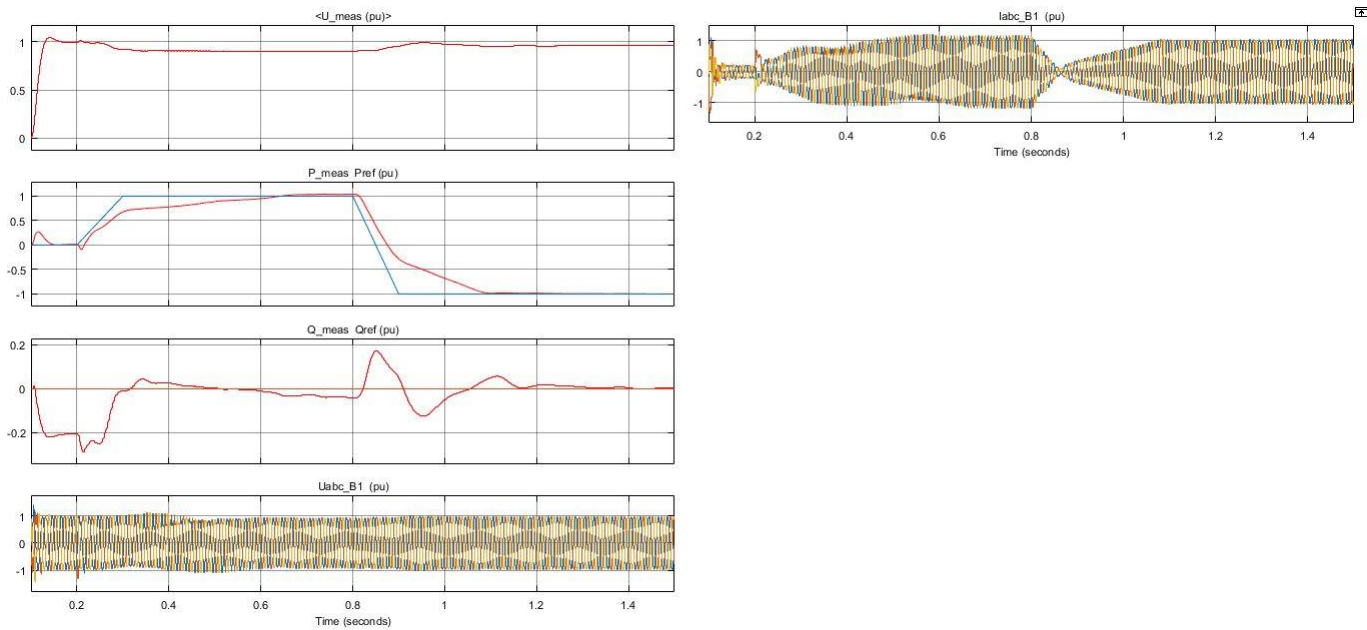
(B) Prijungiama sistema, kurios $X/R = 6$



(C) Prijungiama sistema, kurios $X/R = 10$

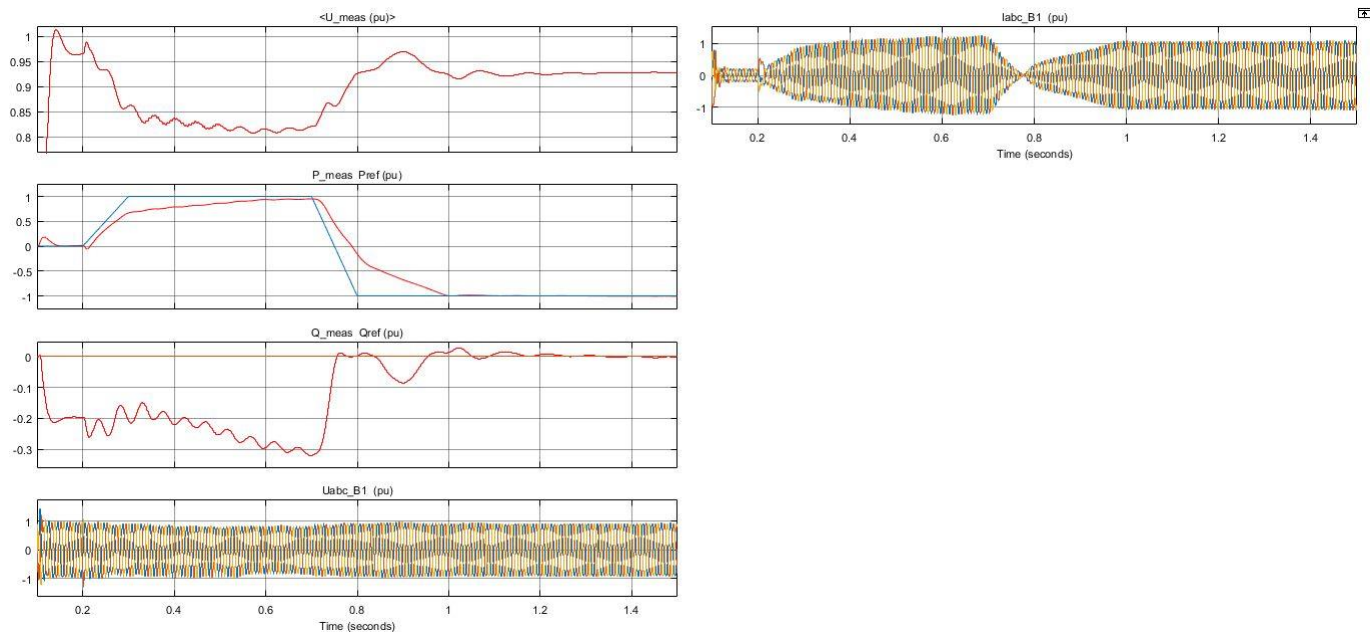


(D) Prijungiama sistema, kurios $X/R = 14$

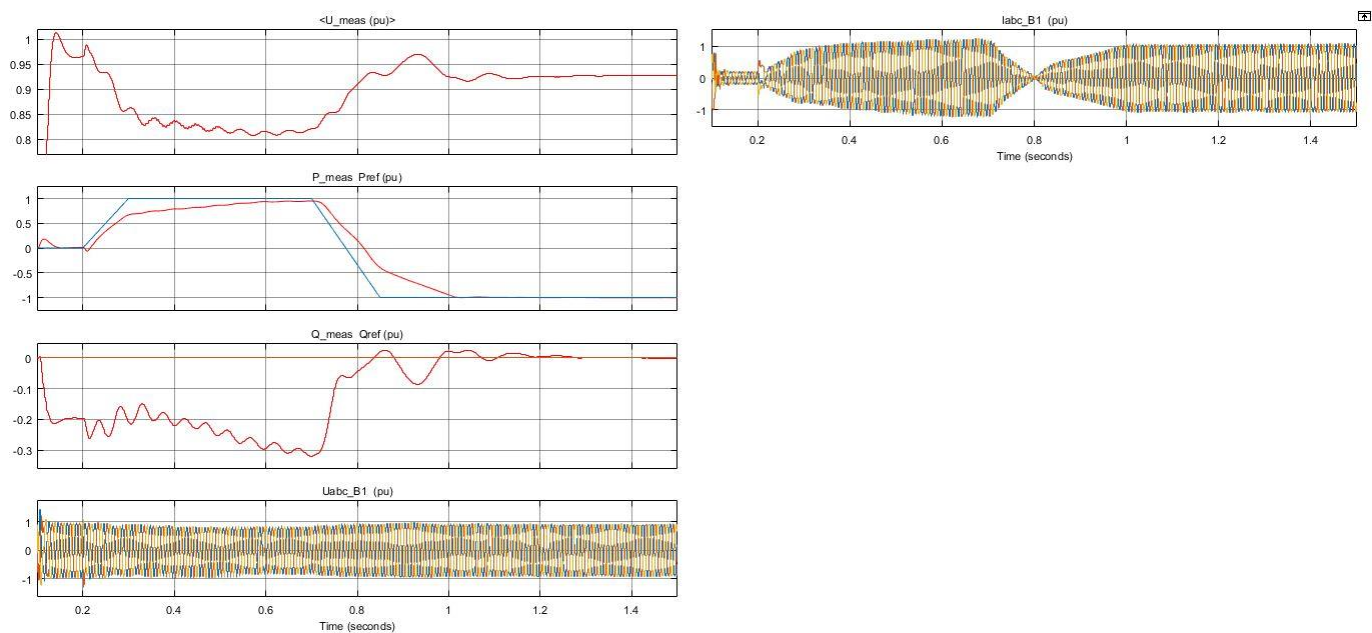


(E) Prijungiama sistema, kurios X/R = 18

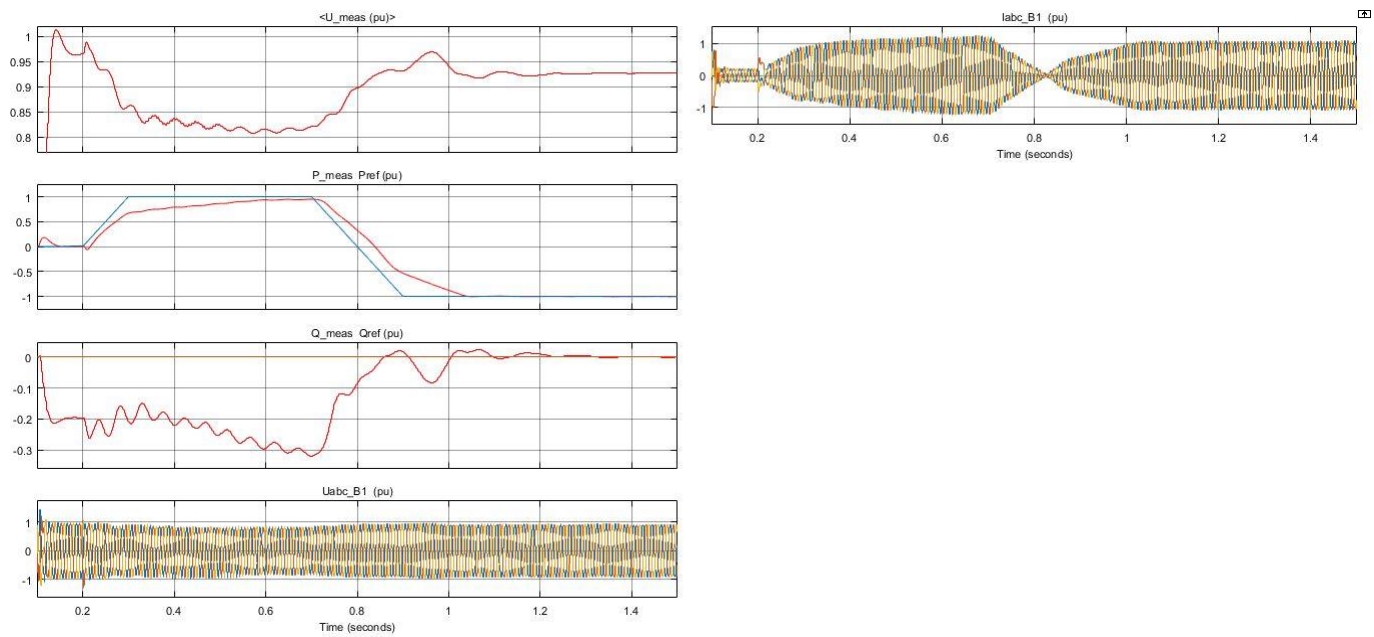
Priedas nr. 3 Galios srauto keitimo greičio įtakos tyrimo rezultatai



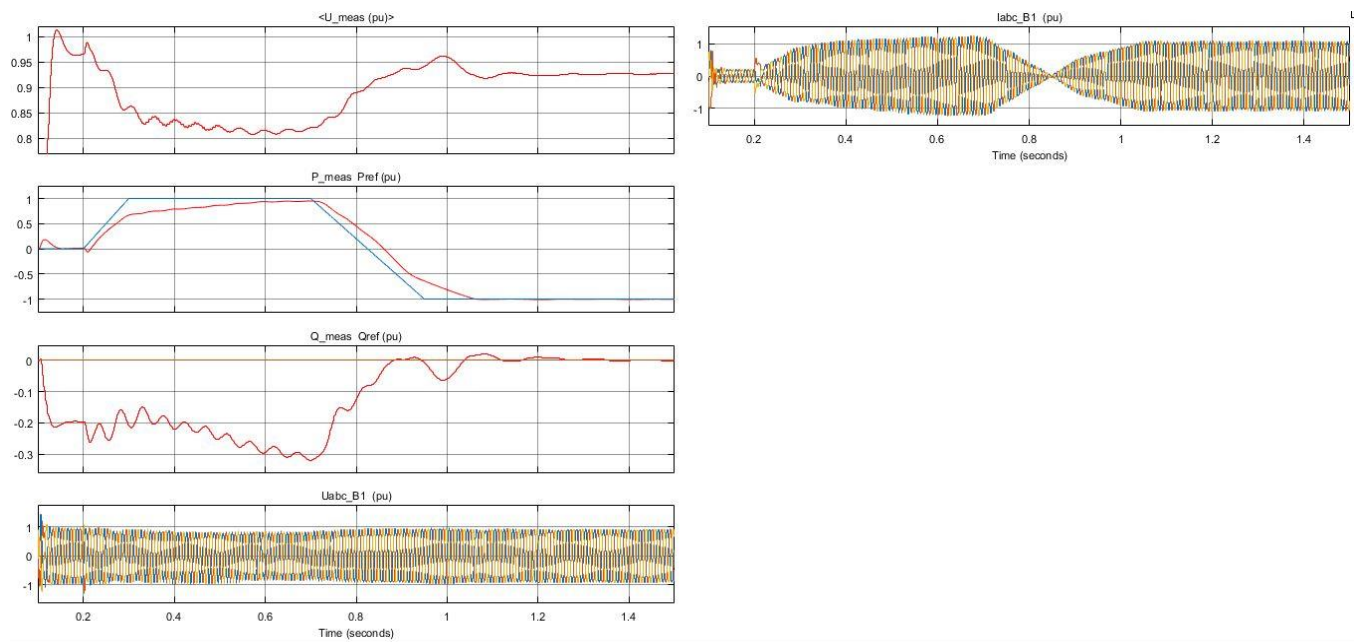
(A) Galios srauto keitimo greitis 100 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



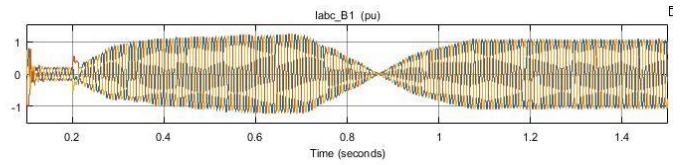
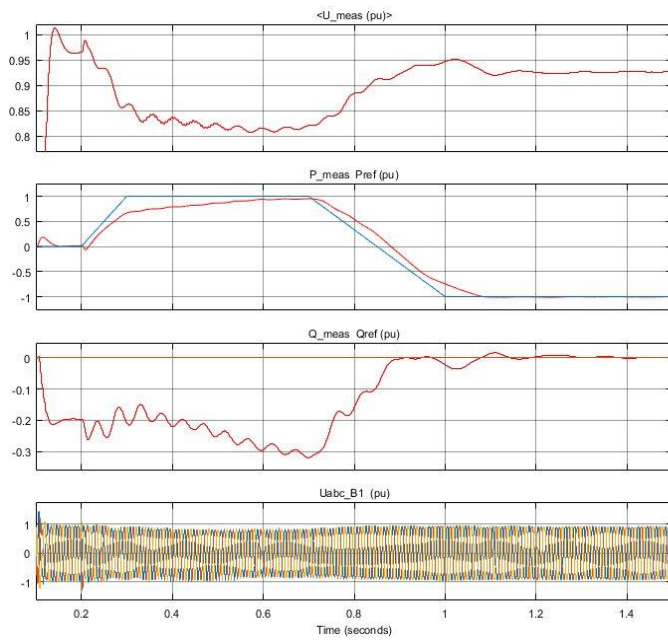
(B) Galios srauto keitimo greitis 150 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



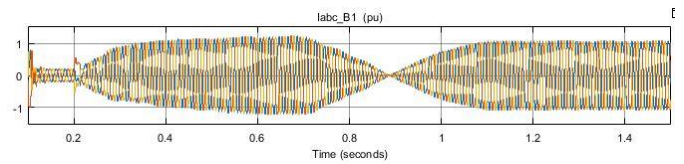
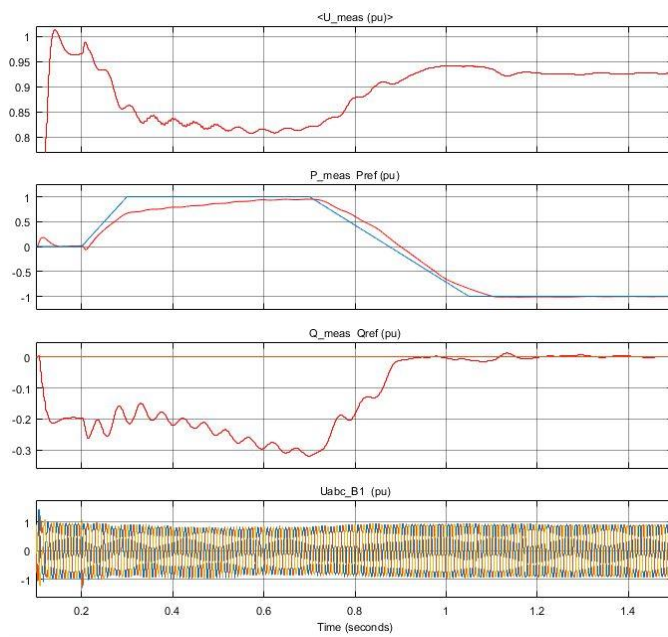
(C) Galios srauto keitimo greitis 200 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



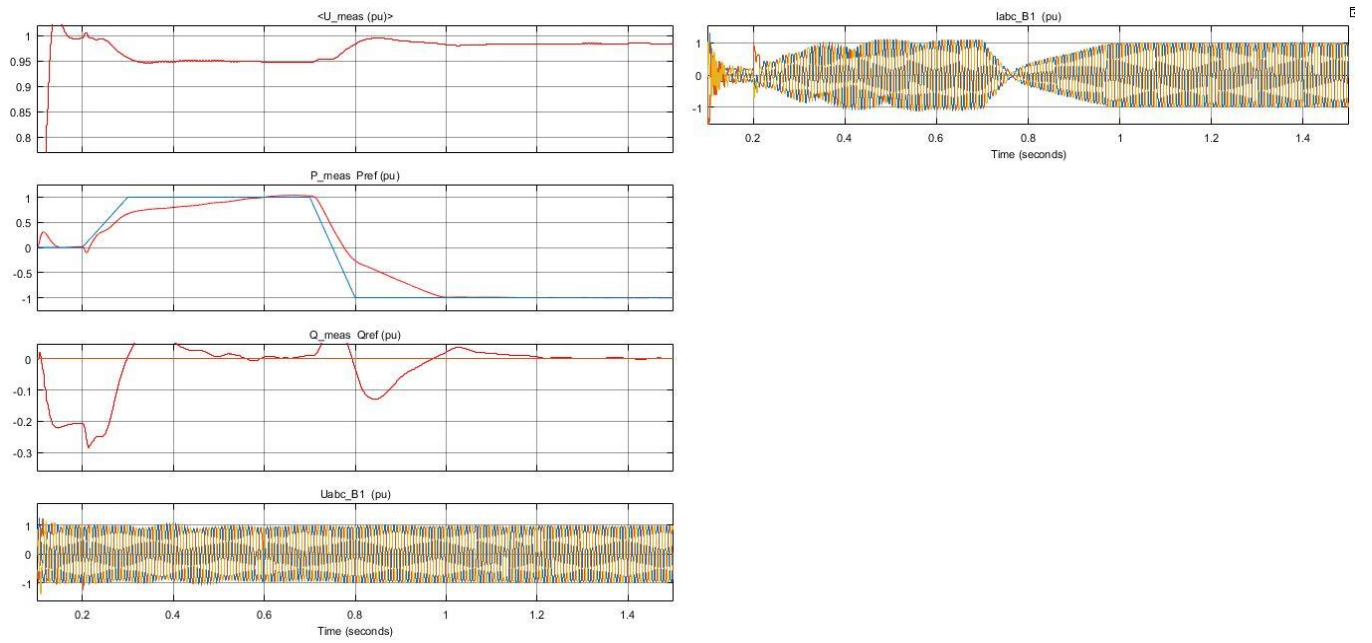
(D) Galios srauto keitimo greitis 250 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



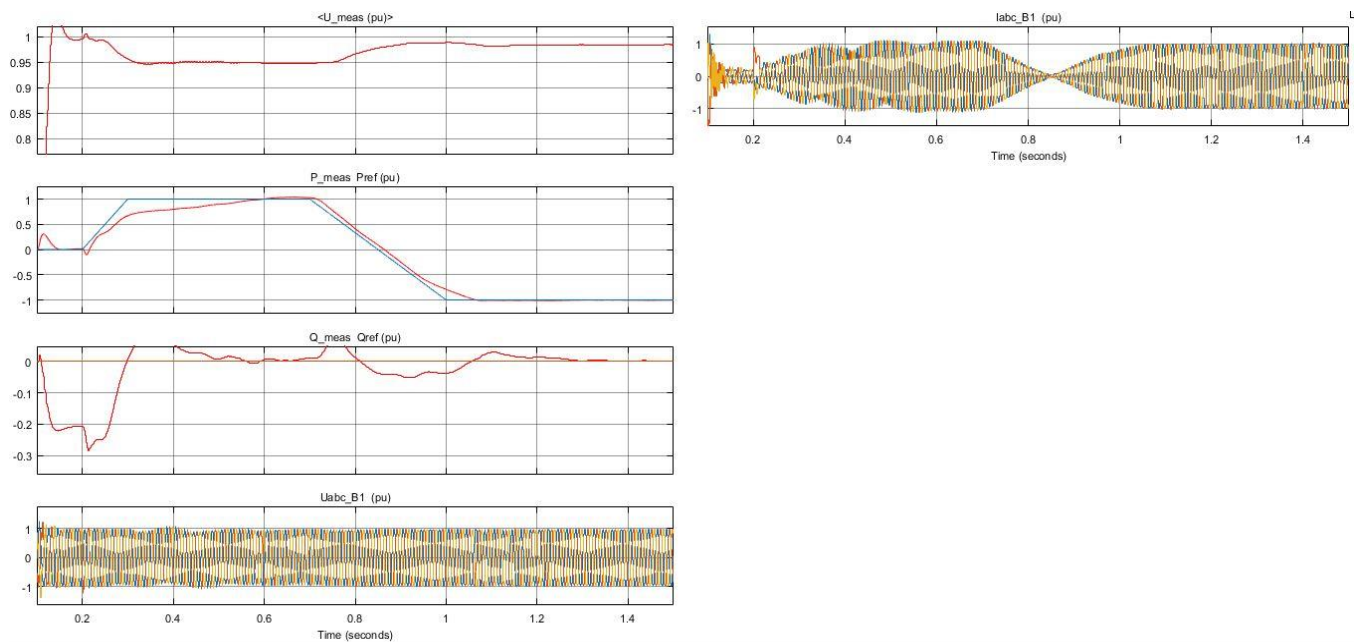
(E) Galios srauto keitimo greitis 300 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



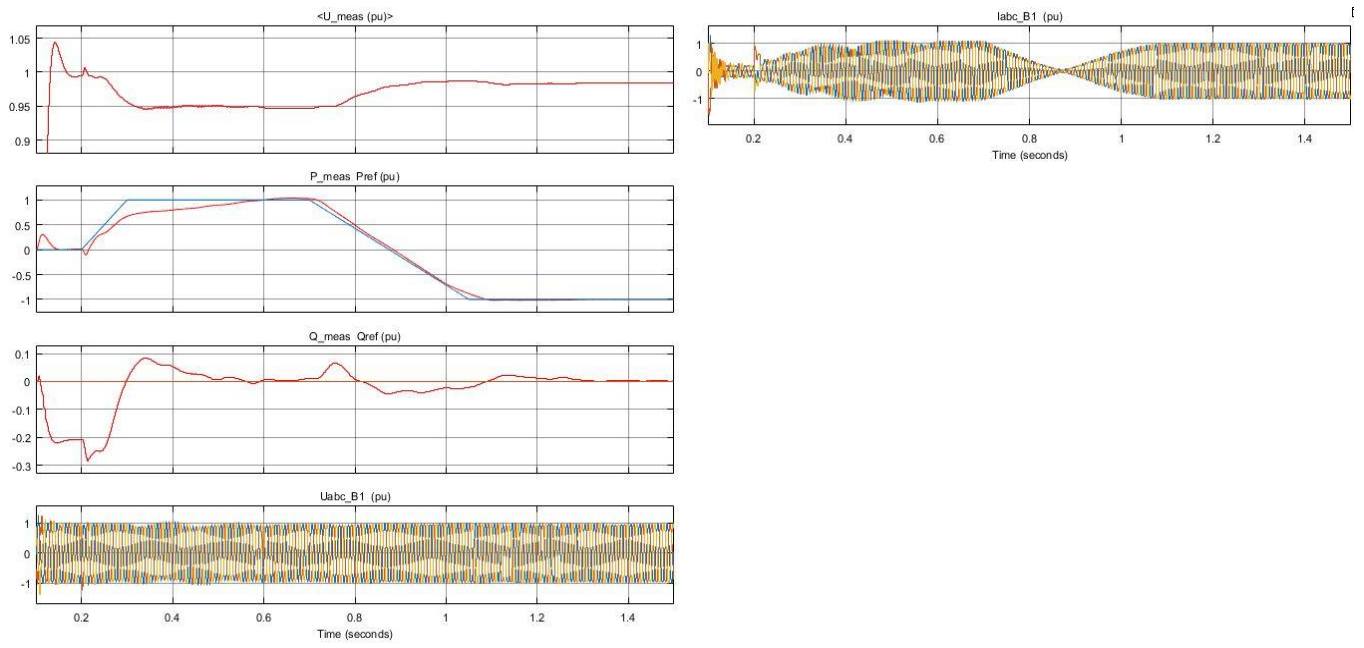
(F) Galios srauto keitimo greitis 350 ms, $S_{1tr} = 550$ MVA



(G) Galios srauto keitimo greitis 100 ms, $S_{1tr} = 2000$ MVA

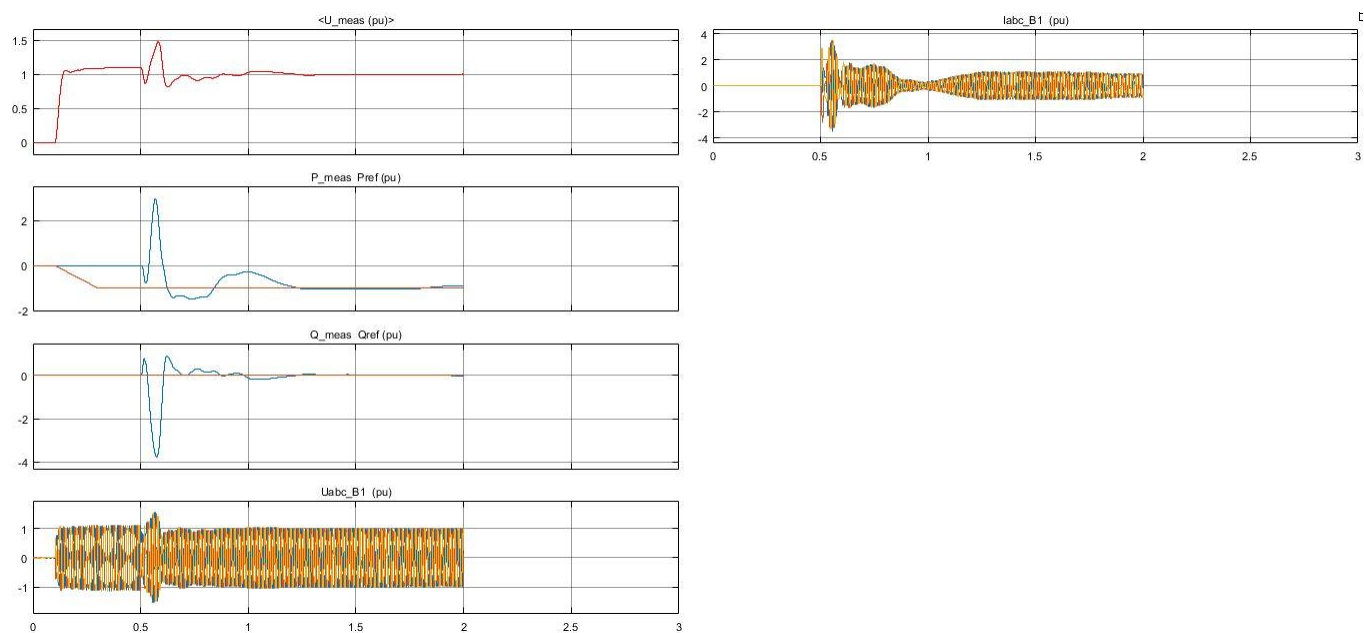


(H) Galios srauto keitimo greitis 300 ms, $S_{1tr} = 2000$ MVA

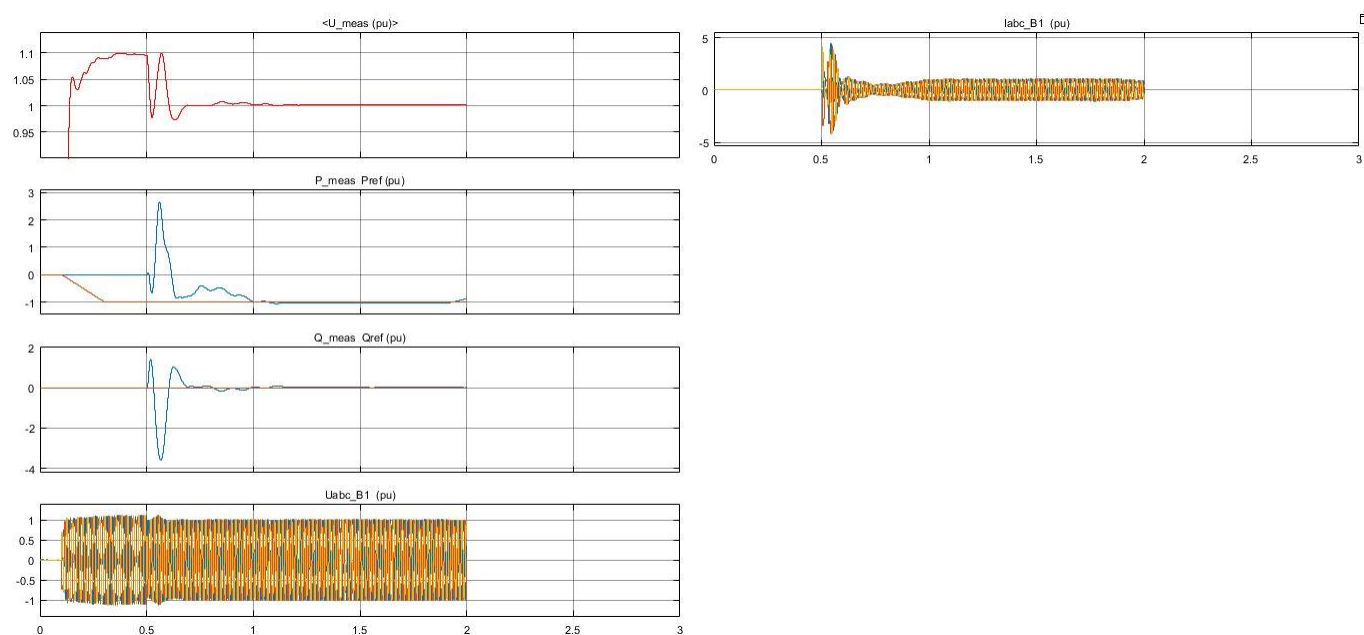


(I) Galios srauto keitimo greitis 350 ms, $S_{1\text{tr}} = 2000 \text{ MVA}$

Priedas nr. 4 Keitiklio paleidimas kartu su veikiančia sistema

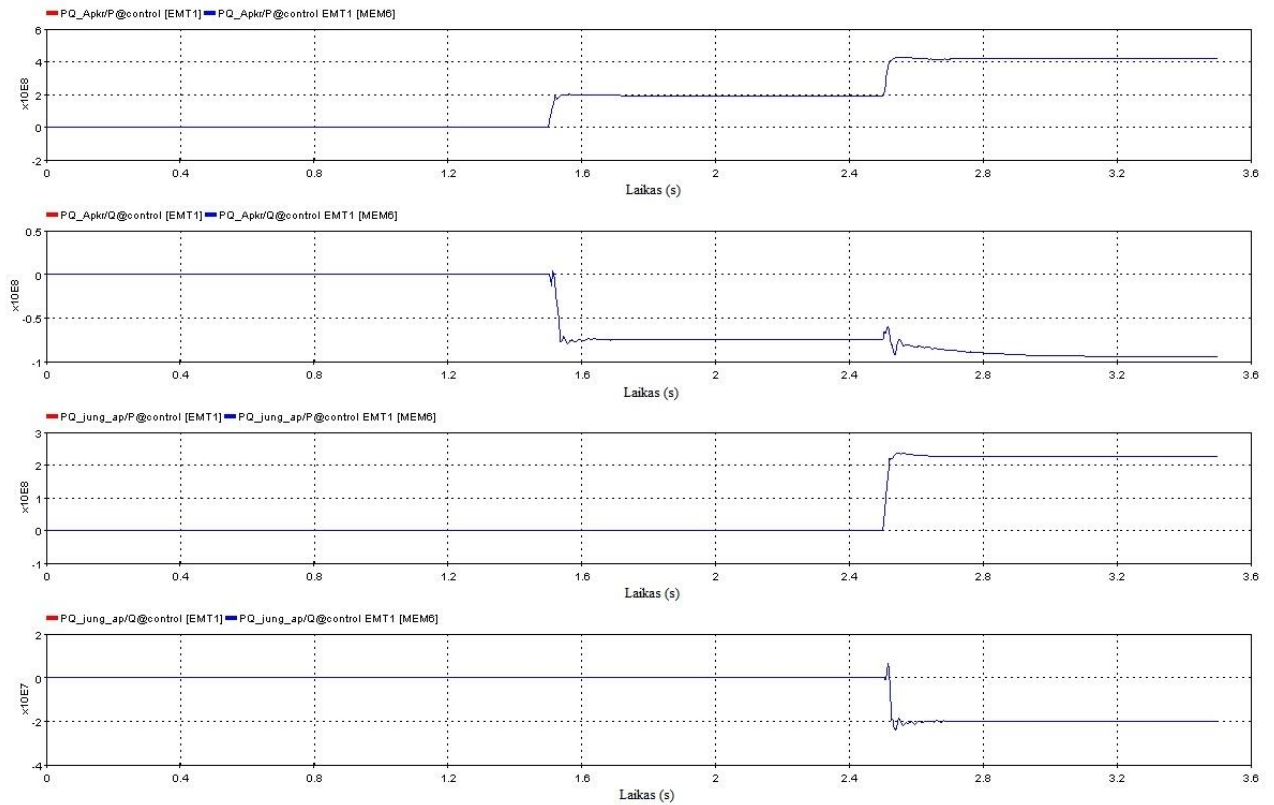


(A) Keitiklio prijungimas prie elektros sistemos $S_{1tr} = 1000$ MVA

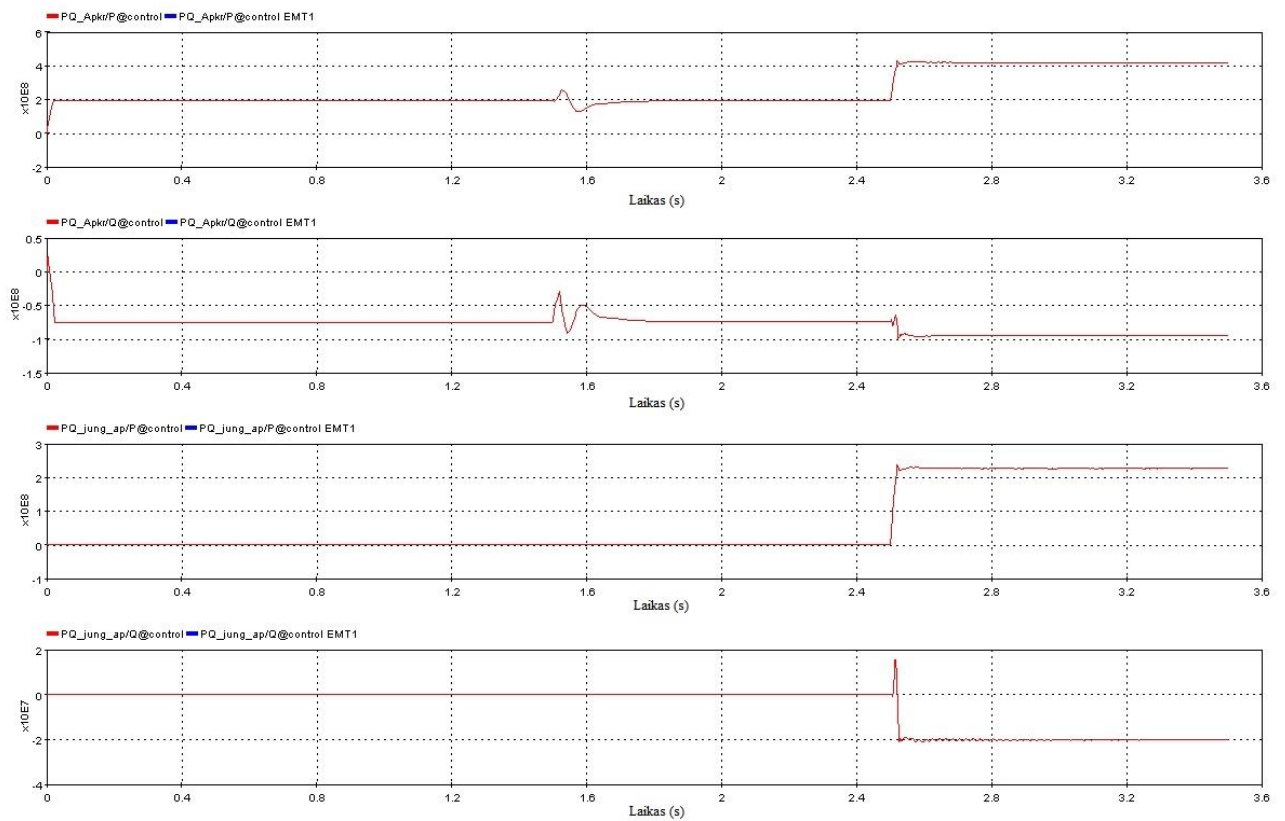


(B) Keitiklio prijungimas prie elektros sistemos $S_{1tr} = 6500$ MVA

Priedas nr. 5 HVDC keitiklio dažnio reguliavimo tyrimo rezultatai



(A) Galių srautai, matuojami prie apkrovos, veikiant be sistemos



(B) Galių srautai, matuojami prie apkrovos, veikiant su el. sistema