



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Vytautas Juozas Petkus**

**ELEKTROS PERDAVIMO TINKLO SU GENERATORIAIS IR  
NUOLATINĖS SROVĖS INTARPAIS DINAMINIO MODELIO  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**ELEKTROS PERDAVIMO TINKLO SU GENERATORIAIS IR  
NUOLATINĖS SROVĖS INTARPAIS DINAMINIO MODELIO  
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Vytautas Šiožinys  
(data)

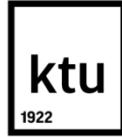
**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr.  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Vytautas Juozas Petkus  
(data)

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vytautas Juozas Petkus

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros perdavimo tinklo su generatoriais ir nuolatinės srovės intarpais dinaminio modelio tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vytauto Juozo Petkaus** baigiamasis projektas tema „Elektros perdavimo tinklo su generatoriais ir nuolatinės srovės intarpais dinaminio modelio 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)

Petkus, Vytautas Juozas. Elektros perdavimo tinklo su generatoriais ir nuolatinės srovės intarpais dinaminio modelio tyrimas. *Magistrinis* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Šiožinys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 51 psl.

## SANTRAUKA

**Lietuvoje nuo 2016 m. bus pradėtos eksploatuoti dvi nuolatinio srovės intarpo technologijos. Pati naujausia VSC HVDC technologija yra nagrinėjama šiame darbe ir atliekamas tyrimas esant skirtingiems tinklo parametrams.**

**Šio baigiamojo magistrinio darbo pagrindinis tikslas yra ištirti perdavimo tinklą (330 kV) su jame esančiu generatoriumi ir nuolatinės srovės intarpu dinaminis režimus atsirandančius dėl įvairių sistemos trikdžių. Ypatingas dėmesys yra skiriamas modeliuojant sinchroninį generatorių ir nuolatinės srovės intarpą, kurie darbe pateikti MATLAB/Simulink programiniame pakete. Įvairūs trikdžiai kaip trifazis trumpas jungimas, didelės apkrovos/perdavimo linijos praradimas yra dažni atvejai šiuolaikinėse energetikos sistemose, todėl šie režimai esti kertiniais nagrinėjant dinamines sistemas.**

*Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių):*

**Elektros energetikos sistema, sinchroninis generatorius, nuolatinės srovės intarpas, dinamika**

Petkus, Vytautas Juozas. Final project title. Final project of *Dynamic Model Analysis of Electrical Transmission Grid with Generators and HVDC*. Master of Science qualification degree / supervisor doc. dr. Vytautas Šiožinys; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power system.

Kaunas, 2015. 51 psl.

## SUMMARY

**Two HVDC technologies will be put in service from 2016 in Lithuania. In this paper work most recent VSC HVDC technology will be analysed and research is carried out with various power network parameters.**

**The objective of this Master Thesis final work is to analyse dynamic performance of 330 kV transmission network including synchronous generator and VSC HVDC transmission resulting from various system failures. Special attention is given for modelling synchronous generator and HVDC transmission system. All models are modelled in MATLAB/Simulink. Various interference as a three-phase short-circuit, loss of load and loss of transmission line is often cases in modern energy systems and these regimes justifies cornerstones to dynamic systems.**

*Keywords (up to 8 words):*

**Dynamics, power system, VSC HVDC, synchronous generator**

# Turinys

1.ĮVADAS	7
2.APŽVALGINĖ DALIS	8
2.1 Bendrosios žinios apie sinchroninius generatorius	8
2.2 Sinchroninio generatoriaus matematinis modelis	10
2.3 Sinchroninio generatoriaus dinaminis modelis	11
2.4 Sinchroninio generatoriaus modelis Matlab/Simulink programiniame pakete	15
2.4.1 Sinchroninio generatoriaus žadinimo sistema	18
2.5 Nuolatinės srovės intarpo (HVDC) technologijos	19
2.6 Nuolatinės srovės intarpų tipų konfigūracijos	20
2.6.1 Vienpolė, įžeminta abiejuose keitiklių stotyse	20
2.6.2 Dvipolė	20
2.6.3 Keitiklių stotys sujungtos viena su kita (back to back)	21
2.7 Priverstinai uždaromi įtampos - šaltinio keitikliai (VSC)	22
2.8 Nuolatinės srovės intarpų VSC HVDC ir CSC HVDC palyginimas	24
2.9 Nuolatinės srovės intarpo (VSC HVDC) dinaminis modelis	25
2.9.1 Nuolatinės srovės intarpo DC šakos dinaminis modelis	26
2.9.2 Nuolatinės srovės intarpo valdymo sistemos modelis	27
3.METODINĖ DALIS	29
3.1 Tiriamosios elektros energetikos sistemos modeliavimas	29
3.2 Sinchroninio generatoriaus modeliavimas Matlab/Simulink programiniu paketu	30
3.3 Perdavimo linijų modeliavimas	32
3.4 Nuolatinės srovės intarpo (VSC HVDC) modeliavimas	34
3.5 Tyrimo atlikimo tvarka	39
4.TYRIMO REZULTATŲ DALIS	40
5.IŠVADOS	49
6.LITERATŪROS SĄRAŠAS	50

## 1. ĮVADAS

Nuolatinės srovės perdavimo sistemos vis labiau randa savo panaudojimą užtikrinant ilgo perdavimo elektros energijos iš generavimo vietos į apkrovos centrus. Patikimumo klausimas vertinant nuolatinio srovės intarpo perdavimo sistemas praeityje nenusilaukė daug dėmesio. Situacija keičiasi kai vis daugiau tokių jungčių atsiranda pasaulyje, todėl atsiranda poreikis pritaikyti/ištobulinti metodus vertinant įtaka visam perdavimo tinklo darbui.

Baigiamasis magistrinio darbas yra reikalaujamoji dalis baigiant ir įgyjant elektros energetikos inžinerijos magistro laipsnį Kauno technologijos universitete. Pagrindė tiriamoji dalis buvo atlikta 2015 m. pavasario semestre vadovaujant doc. Dr. Vytautui Šiožiniui.

Šio baigiamojo tiriamojo darbo esmė yra ištyrinėti ir pritaikyti metodus taikomus elektros perdavimo tinkle (330kV) su generatoriumi ir nuolatinės srovės intarpu (HVDC) ir parodyti žingsnius modeliuojant, simuliuojant ir analizuojant kuomet tinkle yra nuolatinės srovės intarpas ir kaip elgiasi tinklas su generatoriumi. Minėtiems elementams analizuoti naudojamas MATLAB/Simulink programinis paketas.

Pastaraisiais metais elektros energetikos sistemų vystymasis sparčiai juda į priekį sujungiant vis daugiau skirtingų sistemų. Generavimo, perdavimo ir paskirstymo sistemų modeliavimas yra labai svarbūs planuojant ir valdant elektros energetikos sistemas. Nuolatinis elektros energijos sunaudojimo didėjimas išlaikant aukštą patikimumo lygį sukėlė skirtingų elektros tinklų jungimąsi pastaraisiais metais.

Perdavimo tinklai yra esminė elektros tinklų dalis elektros energijos perdavimui iš generavimo taškų į apkrovos taškus. Jungiantis nuolatiniams srovės intarpams į sistemą ir sujungiant jas, naujų perdavimo linijų statymas darosi pakankamai sudėtingas dėl ekonominių ir aplinkosauginių veiksnių.

Šio darbo tikslas ir uždaviniai:

*Tikslas: Išnagrinėti ir iširti 330kV perdavimo tinklą su sinchroniniu generatoriumi ir nuolatinės srovės intarpu, jų charakteristikas bei įtaką vienas kitam tinkle esant trikdžiams.*

Uždaviniai:

- Sumodeliuoti ir iširti sinchroninį generatorių prijungtą prie 330kV perdavimo tinklo ir jo charakteristikas be nuolatinės srovės intarpo.
- Sumodeliuoti ir iširti nuolatinės srovės intarpo įtaką perdavimo tinklui esant įvairiems trikdžiams.

## 2. APŽVALGINĖ DALIS

### 2.1 Bendrosios žinios apie sinchroninius generatorius

Sinchroninės mašinos gali dirbti generatoriaus, variklio ir kompensatoriaus režimu. Sinchroninis generatorius yra pagrindinis kintamosios srovės generatoriaus tipas, naudojamas elektros energijos gamybos procese [1].

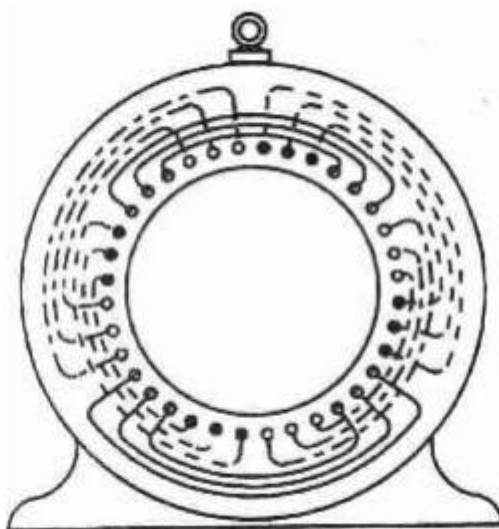
Sinchroninių variklių, skirtingai nuo kitų tipų variklių, sukimosi greitis, esant pastoviam dažniui, yra pastovus ir nepriklauso nuo apkrovos.

Kita skiriamoji sinchroninių generatorių ypatybė, kad galima reguliuoti jų galios faktorių. Ši ypatybė ypač svarbi didelės galios elektros generatoriams, nes galima padidinti arba sumažinti esant poreikiui naudingumo faktorių.

Sinchroninis generatorius sudarytas iš dviejų stambių mazgų: statoriaus ir rotoriaus.

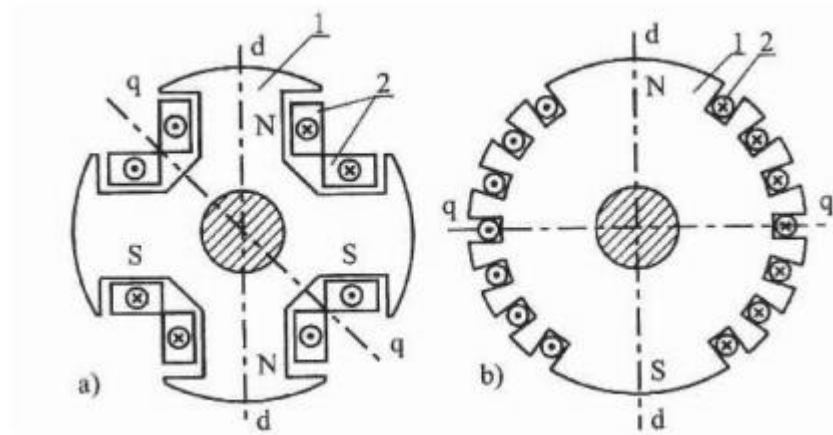
Statoriaus grioveliuose sukloti daugiafazė (trifazė) apvija. Sinchroninių generatorių rotoriai esti dvejopi: ryškiapoliai ir neryškiapoliai. Žadinimo lauką kuria rotoriaus žadinimo apvija tekanti nuolatinė srovė. Vadinasi, sinchroninių generatorių darbui būtinas nuolatinės įtampos šaltinis – žadintuvas.

Sinchroninio generatoriaus mazgas, kuriantis žadinimo srautą, vadinamas induktoriumi, o mazgas, kuriame indukuojama elektrovara, vadinamas inkaru. Inkaras – statorius (2.1 pav), induktorius – tai rotorius (2.2 pav).



2.1 pav. Sinchroninio generatoriaus statorius [1]





**2.2 pav.** Sinchroninio generatoriaus rotoriaus eskizai: a) ryškiapolis b) neryškiapolis [1];

Čia: 1- rotoriaus magnetolaidis;

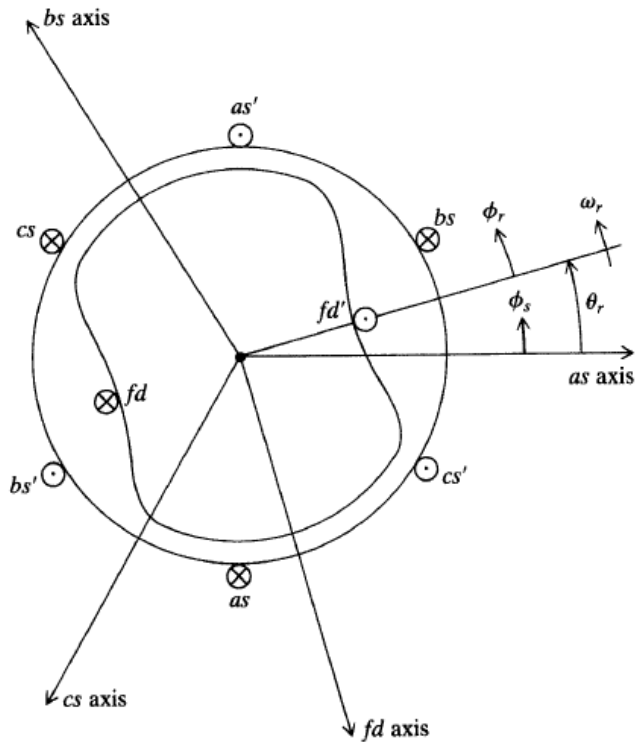
2 – žadinimo apvija; d – d išilginė ašis; q – q skersinė ašis.

Šiandien didelės galios sinchroninės mašinos (šiluminių elektrinių, hidroelektrinių ir hidroakumuliacinių elektrinių generatoriai) dažniausiai veikia generatoriaus režimu. Šiluminėse elektrinėse veikia neryškiapoliai sinchroniniai generatoriai (turbogeneratoriai), o hidroelektrinėse - ryškiapoliai sinchroniniai generatoriai (hidrogeneratoriai). Mažesnę jų dalis veikia variklio režimu. Pastaruoju metu gaminamos sinchroninės mašinos, veikiančios generatoriaus ir variklio režimu. Tai hidroakumuliacinių elektrinių sinchroninės mašinos: apkrovos piko metu sinchroninė mašina dirba generatoriaus režimu, o kai elektros energijos paklausa mažiausia - variklio režimu; tuomet sinchroninė mašina suka siurblius, kurie kelia vandenį į viršutinį tvenkinį iš apatinio. Tokios sinchroninės mašinos pastatytos Kruonio hidroakumuliacinėje elektrinėje. Sinchroninė mašina, be dviejų minėtų režimų, gali veikti ir kompensatoriaus režimu: tai darbo režimas, kada sinchroninė mašina teikia į tinklą arba iš jo ima reaktyviąją galią.

Šiame darbe nagrinėjamas hidrogenatoriaus dinaminis modelis.

## 2.2 Sinchroninio generatoriaus matematinis modelis

Sinchroniniame generatoriuje statorius yra modeliuojamas trijose magnetinėse ašyse  $a$ ,  $b$  ir  $c$ , kurių kiekviena reprezentuoja trijų fazių apviją. Kita vertus rotorius yra modeliuojamas atstojamosiomis dvejomis ašimis – išilgine ( $d$  ašimi), kuri yra induktoriaus magnetinė ašis ir skersine ( $q$  ašimi), kuri yra simetrijos ašis tarp dviejų polių (2.3 pav) [2].



**2.3 pav.** Dvipolis trifazis sinchroninis generatorius su  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ir  $d$ ,  $q$  ašimis

Statoriaus apvijos yra identiškos, paskirstytos  $120^\circ$  kampų, kur  $N_r$  – apvijų skaičius ir  $r_s$  statoriaus varža. Teigiamos magnetinių ašių kryptys pavaizduotos 2.3 pav.

Lygtys aprašančios generatoriaus įtampą išreiškiamos:

$$\mathbf{u}_{abcs} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abcs} + p \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{u}_{abcr} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{abcr} + p \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \quad (2.2)$$

Lygtyse  $s$  raidė žymi kintamuosius ir parametrus susijusius su statoriumi, o  $r$  – rotoriumi. Tiek  $\mathbf{u}_s$  tiek  $\mathbf{r}_r$  yra matricos. Magnetinio srauto ryšys išreiškiamas:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}_{abcr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Apvijų induktyvumai išreiškiami:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{is} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{is} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{is} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{ir} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{ir} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{ir} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Aukščiau esančiose lygtyse  $L_{is}$  ir  $L_{ms}$  yra atitinkamai nuotėkio ir įmagnetinimo induktyvumai statoriaus apvijos, o  $L_{ir}$  ir  $L_{mr}$  – rotoriaus. Induktyvumas  $L_{sr}$  yra amplitudė tarpusavio induktyvumų tarp rotoriaus ir statoriaus.

### 2.3 Sinchroninio generatoriaus dinaminis modelis

Modeliuojant elektros energetikos sistemos darbą su apkrovomis ir nuolatinės srovės intarpais sinchroninio generatoriaus modeliavimas kaip nuolatinio įtampos šaltinio nėra pakankamas. Kad išlaikyti ir atstatyti sistemos parametrus po tam tikro trikdžio (apkrovos netekimas, didelės apkrovos prijungimas, trumpi jungimai, nuolatinio srovės intarpo atsijungimas ir pan.) generatorių reikia modeliuoti detaliau, kas verčia spręsti 3 – ios ir didesnės eilės diferencialines lygtis. Labai svarbūs faktoriai įtakojantys sinchroninio generatoriaus dinamiką yra jau aprašytos 2.4, 2.5 ir 2.6 formulėmis aprašyti induktyvumai. Norint išlaikyti elektros tinklą stabilų sinchroniniai generatoriai negali dirbti be atgalinio ryšio ir jų valdymo.

Prieš modeliuojant sinchroninį generatorių priimamos kelios prielaidos:

- Sinchroninio generatoriaus magnetinė skvarba yra begalinė. Nepaisoma magnetinio srauto netolygumo ir magnetinių medžiagų galimo įsisotinimo.
- Neatsižvelgiama į statoriaus pereinamuosius procesus.
- Esant pereinamiesiems procesams paleidimo metu generatorius greitis yra sinchroninis.

Sinchroninės mašinos gali būti aprašomos  $n+1$  lygtimis, kur  $n$  yra elektros parametrų lygtys ir viena mechaninių parametrų. Lygčių skaičius  $n$  taip pat yra lygus nežinomų kintamųjų skaičiui aprašančių sinchronines mašinas. Šie kintamieji yra arba srovės arba magnetinis srautas [2].

Norint teisingai apskaičiuoti srovės kritimus induktyviuose apvijose, pilnutinis magnetinis srautas turi būti įvertintas. Tai yra pasiekiam induktyvumų matricomis aprašytomis aukščiau, kurios susieja srauto ryšį su apvijų srovėmis. Kai tai atliekama, induktyvumo matricų vertės priklauso nuo rotoriaus padėties. Tai kaip minėta priklauso magnetinio lauko asimetrijos  $d$  ir  $q$  ašyse.

Priklausomybė induktyvumo matricos nuo rotoriaus kampo padėties yra pagrindinis sunkumas modeliuojant sinchronines mašinas. Sprendimas yra pakeisti požiūrį į sistemą, kurioje kintamieji yra išreikšti. Kolkas naudota sistema buvo statiška ar  $abc$ . Kintamieji išreiškiami taip kaip jie yra išmatuojami, tačiau mašinos parametrai yra kintantys laike ( $\theta$  yra laiko funkcija). Galima įrodyti, kad vieninteliu sisteminiu požiūriu žvelgiant iš rotoriaus arba  $dq$  ašių, mašinos parametrai išlieka pastovūs. Ši transformacija iš  $abc$  į  $dq$  sistemą išreiškiama transformacijos matrica:

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Atvirkštinei transformacijai iš  $dq$  sistemos į  $abc$  sistemą naudojama atvirkštinė matrica:

$$\mathbf{T}_{inv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Taigi, trifaziai kintamieji tarkim  $f_a$ ,  $f_b$  ir  $f_c$  išreikšti  $abc$  sistemoje gali būti transformuojami į  $dq$  sistemą padauginant iš  $\mathbf{T}$ :

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ir atvirkščiai:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{inv} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Svarbu paminėti, kad kintamųjų transformacija, aprašyti 2.7 ir 2.8 formulėmis išlaiko elektros sistemos galią: bet kuriuo laiko momentu, galia  $abc$  sistemoje yra lygi  $dq$  sistemoje [3].

Kai sinchroninio generatoriaus lygtys yra transformuojamos iš  $abc$  sistemos į  $dq$  sistemą gaunamos įtampos:

- Inkaro lygtys:

$$u_d = -R_s i_d - \omega \lambda_q - (L_{ls} + L_{md}) \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.11)$$

$$u_q = -R_s i_q - \omega \lambda_d - (L_{ls} + L_{mq}) \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{di_{kq}}{dt} \quad (2.12)$$

Kur,

$$\lambda_d = -(L_{ls} + L_{md}) i_d + L_{md} (i_{fd} + i_{kd}) \quad (2.13)$$

$$\lambda_q = -(L_{ls} + L_{mq}) i_q + L_{mq} i_{kq} \quad (2.14)$$

- Induktoriaus lygtis:

$$u_{fg} = R_{fd} i_{fd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.15)$$

- Slopavimo apvijų lygtys:

$$0 = R_{kd} i_{kd} - L_{md} \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + (L_{lkd} + L_{md}) \frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.16)$$

$$0 = R_{kq} i_{kq} - L_{mq} \frac{di_q}{dt} + (L_{lkq} + L_{mq}) \frac{di_{kq}}{dt} \quad (2.17)$$

Parametrai ir kintamieji aukščiau užrašytose lygtyse reiškia:

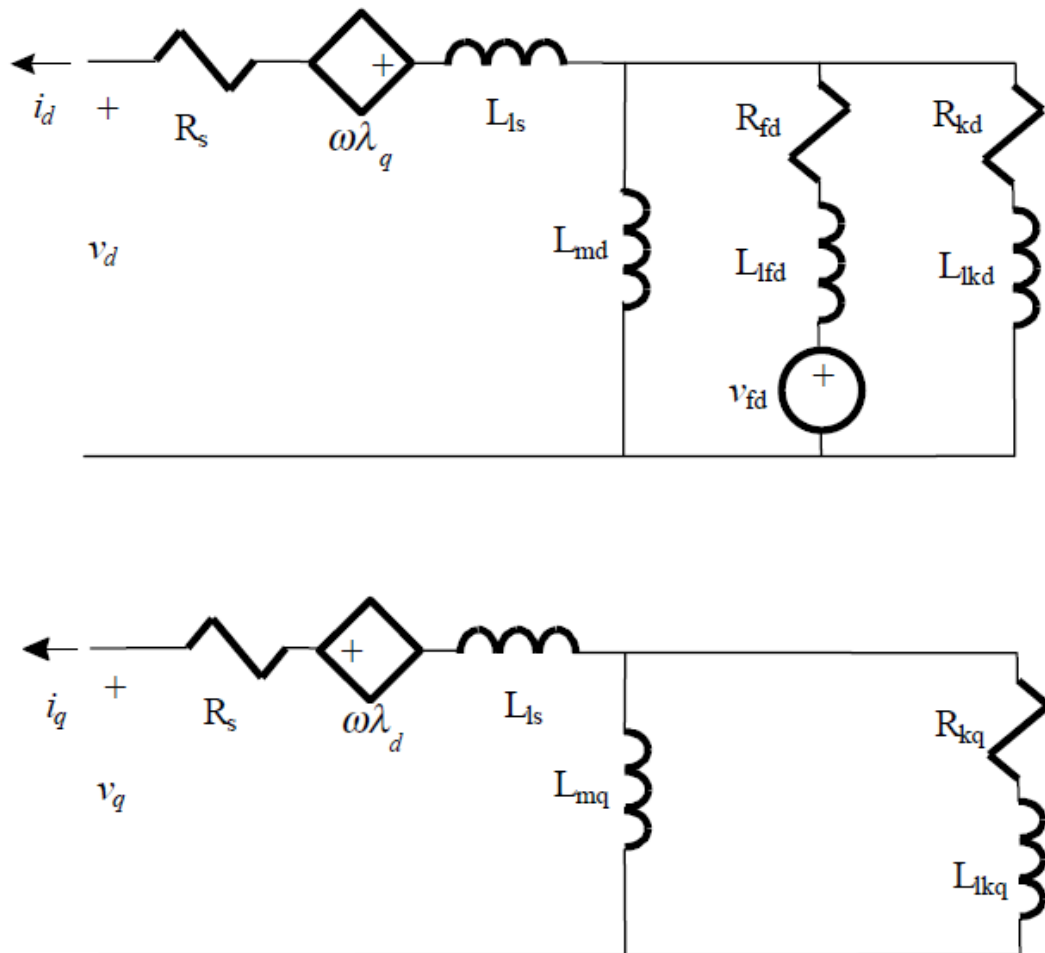
- $\omega$ : rotoriaus greitis;
- $u_d$ : inkaro gnybtų įtampa  $d$  ašyje;

- $u_q$ : inkaro gnybtų įtampa  $q$  ašyje;
- $i_d$ : inkaro gnybtų srovė  $d$  ašyje;
- $i_q$ : inkaro gnybtų srovė  $q$  ašyje;
- $u_{fd}$ : indukatoriaus gnybtų įtampa (žiūrint nuo statoriaus);
- $i_{fd}$ : indukatoriaus gnybtų srovė (žiūrint nuo statoriaus);
- $i_{kd}$ : slopinimo apvijos srovė  $d$  ašyje (žiūrint nuo statoriaus);
- $i_{kq}$ : slopinimo apvijos srovė  $q$  ašyje (žiūrint nuo statoriaus);
- $\lambda_d$ : pilnutinis indukatoriaus magnetinis srautas  $d$  ašyje;
- $\lambda_q$ : pilnutinis indukatoriaus magnetinis srautas  $q$  ašyje;
- $R_s$ : inkaro fazės varža;
- $L_{ls}$ : inkaro fazės nuotėkio induktyvumas;
- $L_{md}$ : abipusis induktyvumas  $d$  ašyje;
- $R_{fd}$ : indukatoriaus apvijos varža (žiūrint nuo statoriaus);
- $L_{fd}$ : indukatoriaus nuotėkio induktyvumas (žiūrint nuo statoriaus);
- $R_{kd}$ : slopinimo apvijos  $d$  ašyje varža (žiūrint nuo statoriaus);
- $L_{kq}$ : slopinimo apvijos  $q$  ašyje nuotėkio induktyvumas (žiūrint nuo statoriaus);

Lygtys 2.11 – 2.17 apibūdina sinchroninio generatoriaus ekvivalentinę grandinę pavaizduotą 2.4 pav.

Galima padaryti kelius pastebėjimus:

- $D$  ir  $q$  ašyse esanti ekvivalentinė sinchroninio generatoriaus grandinė yra ekvivalentiška transformatoriaus ekvivalentinei grandinei: abiejuose yra apvijos išreikštos varžomis ir nuotėkio induktyvumais ir yra abipusis induktyvumų ryšys. Pagrindinis skirtumas lyginant su transformatoriumi, kad transformatoriuje grandinė yra kintamos srovės, o generatoriaus įtampos, srovės ir magnetiniai srautai yra nuolatiniai.
- Nors inkaro apvijos yra atvaizduotos rotoriaus atžvilgiu ir nėra laike kintančių induktyvumų, reikia atsižvelgti, kad inkaro apvijos yra magnetiškai susietos  $d$  ir  $q$  ekvivalentine inkaro šaka.



**2.4 pav.** Sinchroninio generatoriaus ekvivalentinė grandinė rotoriaus atžvilgiu d ir q ašyse

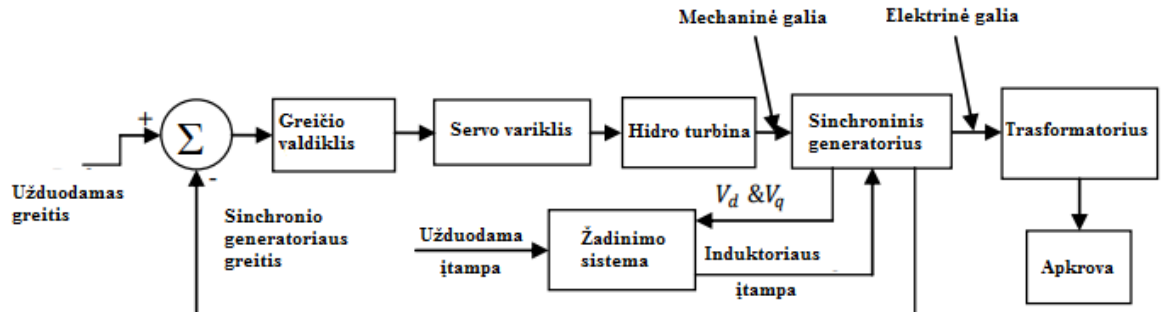
- Jei sinchroninė mašina (kaip žadintuvas) neturi slopinimo apvijos, ekvivalentinė grandinė pritaikoma pašalinant iš šakų slopinimo apvijos elementus.

Ekvivalentinė grandinė apibūdina sinchroninį generatorių elektriškai. Mechaninis kintamasis yra rotoriaus greitis  $\omega$ , ir dar viena lygtis reikalinga, kad modelis užbaigtas. Lygtis susieja išorinį sukimo momentą, kuris verčia generatoriaus ašį sukėti. Taip pat svarbus parametras yra generatoriaus inercija.

#### 2.4 Sinchroninio generatoriaus modelis Matlab/Simulink programiniame pakete

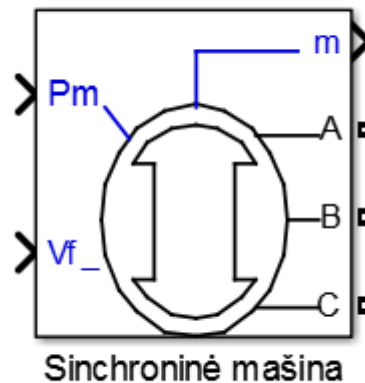
Dinaminės charakteristikos hidroturbinoje ir jos valdyme turi didelę reikšmę esant trikdžiams: trumpi jungimai, apkrovos kitimas ir pan. Tikslus sinchroninio generatoriaus ir jo

žadinimo bei valdymo elementų modelis padeda studijuoti dinaminis sistemos režimus. Synchroninio generatoriaus ir jo valdymo blokų diagrama, kuri bus taikoma šiame darbe pateikiama 2.5 pav [4].



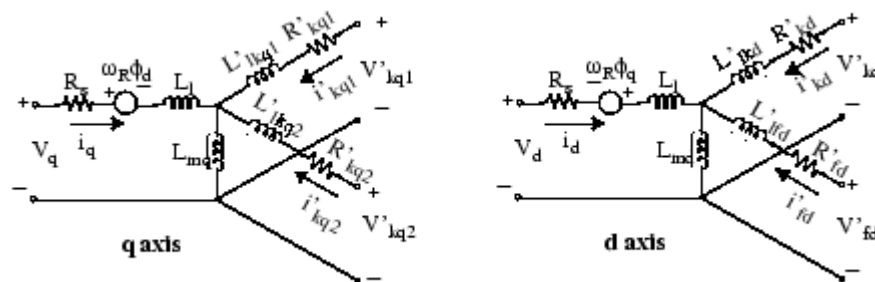
2.5 pav. Synchroninio generatoriaus ir jo valdymo elementų blokinė schema

Matlab/Simulink programiniame pakete pateiktas synchroninės mašinos modelis 2.6 pav, kuriam galioja jau aprašytos 2.11 – 2.17 lygtys.



2.6 pav. Synchroninės mašinos modelis Simulink terpėje

Tik šiame modelyje ašys yra išskaidytos kaip parodyta 2.7 pav [5].



2.7 pav. Elektros mašinos elektrinis modelis



Šiame darbe taip pat įtrauksime jau minėtą mechaninę lygtį, kad galėtume nagrinėti elektromechaninius dinامينius procesus, kurie yra susiję su sinchroninės mašinos inercija  $J$  [5]:

$$\frac{1}{p} J \frac{d\omega}{dt} = T^e + T^m \quad (2.18)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2.19)$$

$$T^e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2.20)$$

kur,

$T^e$  – elektrinis sukimo momentas;

$T^m$  – mechaninis sukimo momentas;

Skaičiuojant santykiniais dydžiais patogiau naudoti inercijos konstantą  $H$ :

$$H = \frac{\text{besisukanti kinetinė energija variniu greičiu}}{\text{Bazinė galia}} \quad (2.21)$$

Arba:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \left( \frac{\omega_0}{p} \right)^2}{P_b} = \frac{J \omega_0}{2pT_B} \quad (2.22)$$

Visi parametrai skaičiuojami santykiniais vienetais:

- Statoriaus bazinės reikšmės apskaičiuojamos:

$$U_{sbazinis} = \frac{U_n \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

$$I_{sbazinis} = \frac{P_n \sqrt{2}}{U_n \sqrt{3}} \quad (2.24)$$

$$Z_{sbazinis} = \frac{U_{sbazinis}}{I_{sbazinis}} = \frac{U_n^2}{P_n} \quad (2.25)$$

$$\omega_{sbazinis} = 2\pi f_n \quad (2.26)$$

$$L_{sbazinis} = \frac{Z_{sbazinis}}{\omega_{sbazinis}} \quad (2.27)$$

kur:

$P_n$  – trifazė vardinė galia (VA);

$U_n$  – vardinė linijinė įtampa (V);

$f_n$  – vardinis dažnis (Hz);

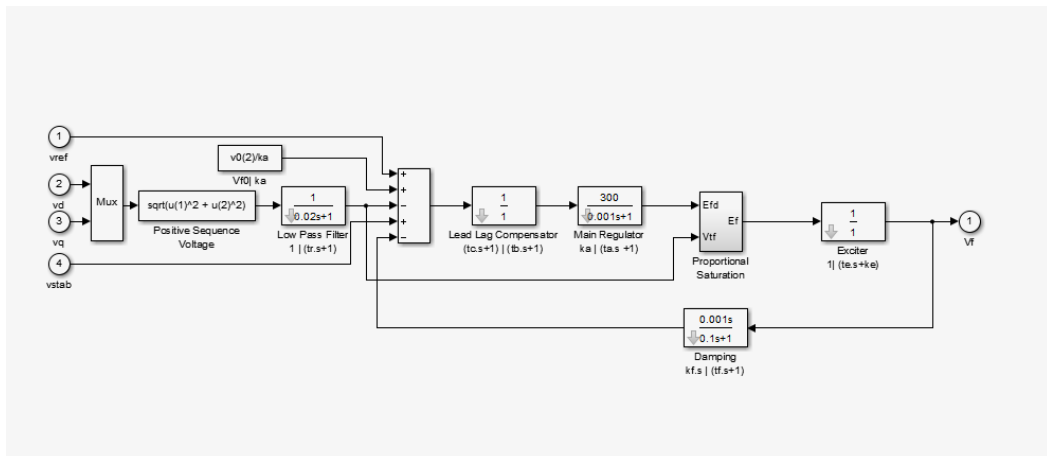
- Induktoriaus bazinės reikšmės apskaičiuojamos:

$$I_{fbazinis} = i_{fn} L_{md_{sv}} \quad (2.28)$$

$$U_{fbazinis} = \frac{P_n}{I_{fbazinis}} \quad (2.29)$$

### 2.4.1 Synchroninio generatoriaus žadinimo sistema

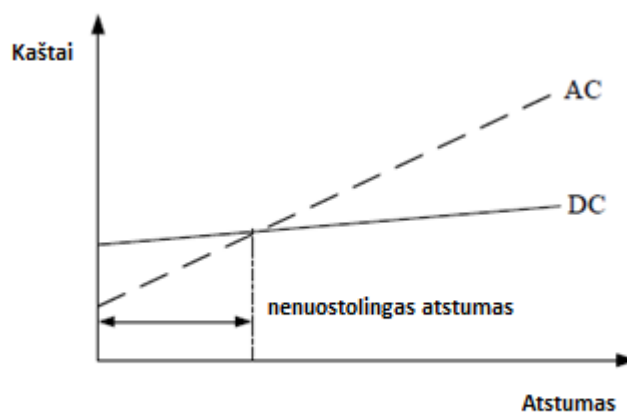
Modelyje naudojama žadinimo sistema yra [6] :



Jos parametrai nustatomi atliekant simuliacijas norint išlaikyti pastovią žadinimo įtampą iš Simulink funkcijos „Initialize machine parameters“.

## 2.5 Nuolatinės srovės intarpo (HVDC) technologijos

Nuolatinės srovės intarpo (HVDC) technologija yra skirta perduoti galią dideliais atstumais oro linijomis ar povandeniniais kebeliais, kur perdavimo atstumo atžvilgiu nuolatinės srovės perdavimas pasidaro efektyvesnis nei kintamos (2.8 pav). Jis taip pat pakelia patikimumo lygį ir dinaminį sistemos stabilumą. Pastaruosius du dešimtmečius taip pat pradėta naudoti nauja „HVDC VSC Light“ technologija. VSC HVDC yra aktualiausia šiai dienai, kadangi ji gali nepriklausomai valdyti aktyvią ir reaktyvią galias [7].



2.8 pav. AD/DC perdavimo linijų palyginimas atstumo ir kaštų santykiu

CSS (Current source converter) žinomas kaip LCC (line commuted current) arba kaip dažnai sakoma klasikinis HVDC. 1990 atsiradus izoliuotos užtūros dvipoliams tranzistoriams IGBT atsirado nauja VSC (voltage source converters) HVDC. Šiai dienai tiek CSC-HVDC tiek VSC-HVDC yra subrendusios technologijos. Nors CSC HVDC yra tinkamesne didelėms galioms perduoti [8].

Plečiantis perdavimo linijoms svarbūs uždaviniai yra padidinti pralaidumą ir efektyviai pagerinti patikimumą ir saugumą. Šiems uždaviniams spręsti HVDC yra vienas iš pagrindinių įrankių. Kadangi CSC HVDC turi tik viena laisvės laipsnį t.y. įgalūs valdyti tik aktyvią arba reaktyvią galias, atvirkščiai VSC HVDC yra alternatyva turinti du laisvės laipsnius ir nepriklausomai gebanti valdyti tiek aktyvią tiek reaktyvią galias. Tai suteikia VSC HVDC perdavimui užtikrinti pereinamųjų procesų stabilumą, išlaikyti reikiamą įtampos lygį, padidinti švytavimų slopinimą ir galios tekėjimą palyginti su kitomis sistemomis.

## 2.6 Nuolatinės srovės intarpų tipų konfigūracijos

Nuolatinės srovės intarpuose yra naudojamos skirtingos nuolatinės šakos tipai priklausomai nuo perduodamos galios.

### 2.6.1 Vienpolė, įžeminta abiejuose keitiklių stotyse

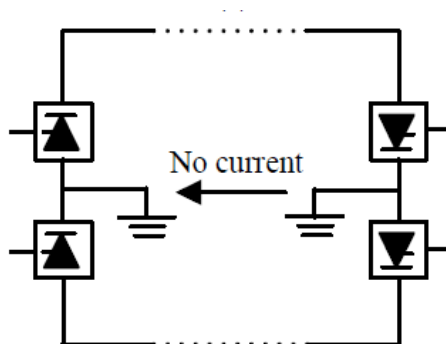
Galia yra perduodama iš vienos keitiklio stoties į kitą naudojant vieną laidininką (teigiamo arba neigiamo poliaringumo) ir grįžtamieji poliai yra įžeminti abiejuose keitiklių stotyse (2.9 pav.) [9].



2.9 pav. Vienpolė su įžeminimu abiejuose keitiklių stotyse

### 2.6.2 Dvipolė

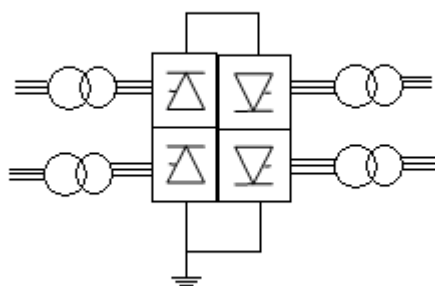
Tai dažniausiai naudojama konfigūracija kai dvi keitiklių stotys yra sujungtos dviem izoliuotais laidininkais, kurie veikia kaip teigiamas ir neigiamas poliai. Abu poliai gali veikti nepriklausomai jei abi stotys yra įžemintos. Tokia jungtis padidina perdavimo galios galimybes. Normaliomis sąlygomis, srovės tekančios abiejuose poliuose yra vienodos ir neteka srovė per įžeminimą. Atsiradus trikdžiui dėl kurio vienas poliui atsijungia, kitu poliui teka srovė. Tokio tipo nuolatinės srovės intarpai yra labiausiai paplitę. (2.10 pav.) [9].



2.10 pav. Vienpolė su grįžtamuoju keliu ir įžeminta vienoje pusėje.

### 2.6.3 Keitiklių stotys sujungtos viena su kita (back to back)

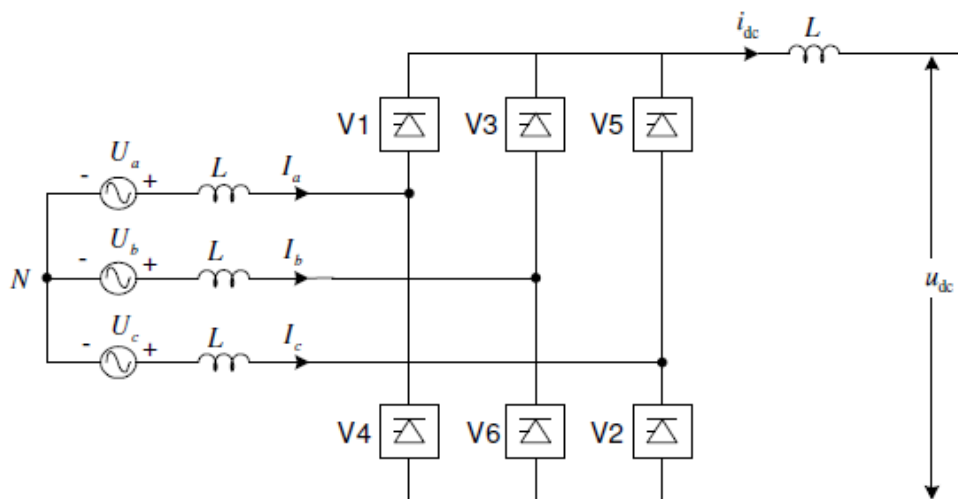
Abiejų keitiklių (lygintuvo ir inverterio stotys yra toje pačioje vietoje (2.11 pav.). Keitiklių stotys praktikoje sudarytos iš vienpolių blokų, tačiau galima ir lygiagrečiai sujungti papildomas stotis su atskiromis nuolatinės srovės šakomis. Tokių keitiklių pagrindinis uždavinys yra sujungti nesinchronines sistemas. Naudojant šio tipo konfigūraciją, dėl stotyse nenaudojamų oro linijų ir kabelių srovės vertės yra didesnės su mažesne įtampa kas leidžia statyti transformatorius mažesnių gabaritų sumažinti keitiklio stoties kaštus [10].



2.11 pav. Keitiklių stotys sujungtos viena šalia kitos (back to back)

HVDC keitiklio technologijoje pradžioje buvo naudojami gyvsidabriniai ventiliai. Pagrindinė problema su jais buvo klaidos komutuojant ventilių, kurios trukdydavo srovės lyginimo funkcijai. Vėliau juos pakeitė išstobulinti tiristoriniai ventiliai, kurie neturėjo tokių problemų, o jie patys pusiau valdomi t.y. užduodant signalą į užtūrą jie atsidarydavo ir praleisdavo srovę, tačiau jų nebuvo galima uždaryti. Keitikliai, kurie sudaryti iš tokių ventilių vadinama linijinės komutacijos keitikliai arba srovės šaltinio keitikliai. Šis keitiklis naudojamas perduoti galią dviem kryptimis t.y. veikti lygintuvo režimu arba inverterio. Tai yra pasiekama valdant ventilio atidarymo kampą. Jei atidarymo kampas mažesnis nei  $90^\circ$ , nuolatinė srovė teka iš teigiamo gnybto DC pusėje, taip galios srautas juda iš AC į DC pusę. Jei atidarymo kampas didesnis nei  $90^\circ$ , nuolatinė srovė pakeičia poliariškumą ir teka iš neigiamo gnybto – galios srautas tuomet yra iš DC į AC pusę (2.12 pav.) pavaizduotas AC-DC keitiklis tiristorių pagrindu [11].

HVDC jungtis sudaroma dviejų tokių keitiklių kurie sujungiami DC pusėse. Sujungimas galimas oro linija, kabeliu ar jungiant tiesiogiai (back-to-back).



**2.12 pav.** Trifazis AC-DC keitiklis su tiristoriais

Trūkumai:

- Šis keitiklis visuomet naudoja reaktyvią galią tiek lygintuvo tiek inverterio režimuose. Reaktyvios galios kompensavimui reikalinga prijungti didelius AC filtrus/kondensatorius prie perdavimo stoties
- Komutacijos trikdžiai atsirandantys dėl tinkle vykstančių trumpųjų jungimų, viršįtampių ar kitų trukdžių.
- Taip pat, komutacija ventiliuose labai priklauso nuo kintamos srovės t.y. ji turi būti kuo mažiau iškraipyta ir ją labai stipriai veikia silpni tinklai.

## 2.7 Priverstinai uždaromi įtampos - šaltinio keitikliai (VSC)

Įtampos-šaltinio keitikliai yra nauja technologija aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimui. Tokiuose keitikliuose naudojami pilnai valdomi ventiliai, kuriuos atidaryti ir uždaryti galima laisvai. Tai didelis privalumas prieš tiristorius. Taip pat, įtampos-šaltinio keitikliai gali generuoti sinusinės įtampos bangas panaudojant impulso pločio moduliaciją, kuri nepriklauso nuo AC tinklo.

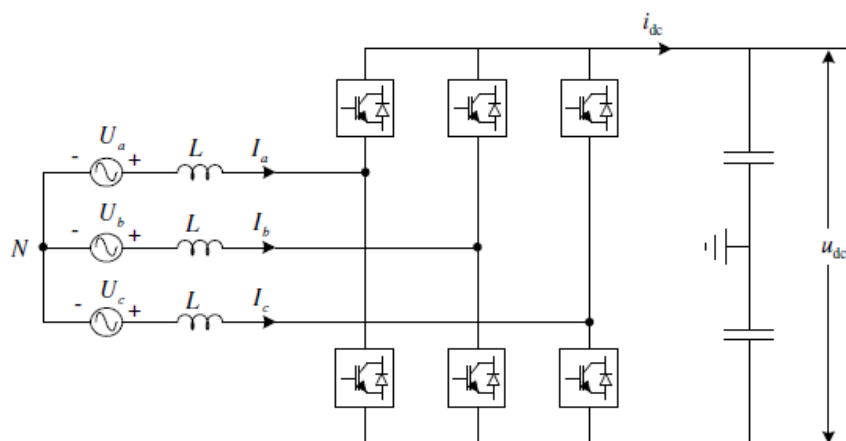
Įtampos-šaltinio keitiklių topologijų yra daug, tačiau pritaikomų aukštos įtampos nuolatinės srovės perdavimui yra naudojamos pagrindinės trys:

- Dviejų lygių;
- Trijų lygių;
- Daugialygių;

Pati paprasčiausia topologija yra dviejų lygių, kuri naudojama trifazio įtampos-šaltinio keitikliui. Keitiklis yra sudarytas iš šešių ventilių, kurių kiekvieną sudaro valdomi galios

elektronikos elementai su anti-lygiagrečiu diodu. Naudojant aukštas įtampas nuoseklus ventilių jungimas privalomas [12].

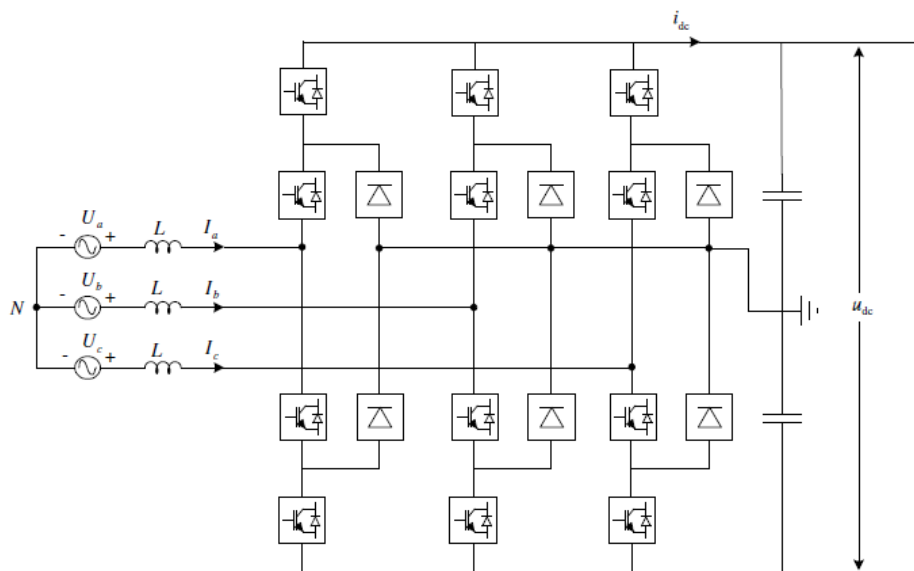
Dviejų lygių keitiklio 2.13 pav. veikimo principas gan paprastas. Kiekviena fazė keitiklyje gali būti prijungiama prie teigiamo arba neigiamo DC gybto ir keičiant impulsų plotį gaunama norima įtampa. Vėliau filtruojant kiekvieną fazę gaunama norima įtampos bangos forma [13].



2.13 pav. Dviejų lygių įtampos-šaltinio keitiklis [14]

Trijų lygių įtampos-šaltinio keitiklis skiriasi nuo jau aptarto dviejų lygių tuo, kad kiekvienoje fazėje yra prijungiama po du diodus 2.14 pav. Šie du diodai „nupjauna“ jungiklio įtampą lygią pusei DC šakos įtampos. Taigi kiekviena fazė tokiame keitiklyje gali turėti skirtingus įtampos lygius t.y. teigiamą, neigiamą ir vidurinio taško. Tokiu būdu, įtampos pulsai trijų lygių keitiklyje labiau sutinka su norima užduota įtampos forma. Taip pat keitiklis turi mažiau harmonikų ir perjungimo nuostolių.

Trijų lygių keitiklis gali būti skirtas dirbti aukštų lygių įtampoje, jungiant daugiau ventilių nuosekliai, kas lemia geresnį harmonikų eliminavimą ir dar labiau mažina perjungimo nuostolius. Tačiau projektuojant diodai apsunkina izoliacijos ir aušinimo galimybes ventiliuose ir dėl šios priežasties aukštose įtampose šie keitikliai nenaudojami.



2.14 pav. Trijų lygių keitiklis [14]

## 2.8 Nuolatinių srovės intarpų VSC HVDC ir CSC HVDC palyginimas

Šiame darbe prie tinklo prijungiamas VSC HVDC nuolatinis srovės intarpas dėl kelių reikšmingų priežasčių [14]:

- Aktyvi ir reaktyvi galios gali būti valdomos nepriklausomai viena nuo kitos. Klasikiniam (CSC HVDC) nuolatiniam intarpui dirbti reikia naudoti reaktyvią galią iš tinklo, dėl to reikalingas papildomas reaktyvios galios kompensavimas.
- Galios apgrėžiamumas VSC atliekamas nekeičiant nuolatinės srovės gnybtų polių reikšmių. Klasikiniame reikia poliariškumą sukeisti vietomis.
- Komutacijos rizika sumažėja, kadangi naudojami priverstinai uždaromi elektroniniai raktai, atvirkščiai nei klasikiniame HVDC, elektroninių raktų komutacijai reikalinga kintama įtampa.
- Komunikacija tarp keitiklio stočių nereikalinga, kadangi valdikliai lygintuvo ir inverterio pusėse dirba nepriklausomai – be informacijos mainų tarp keitiklio stočių.

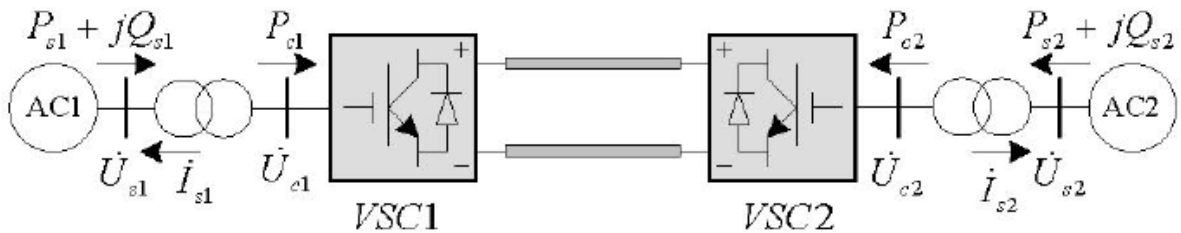
Nors VSC HVDC turi ir savo minusų dėl mažos galios perdavimo ir didesnių elektroninių raktų komutavimo nuostolių.



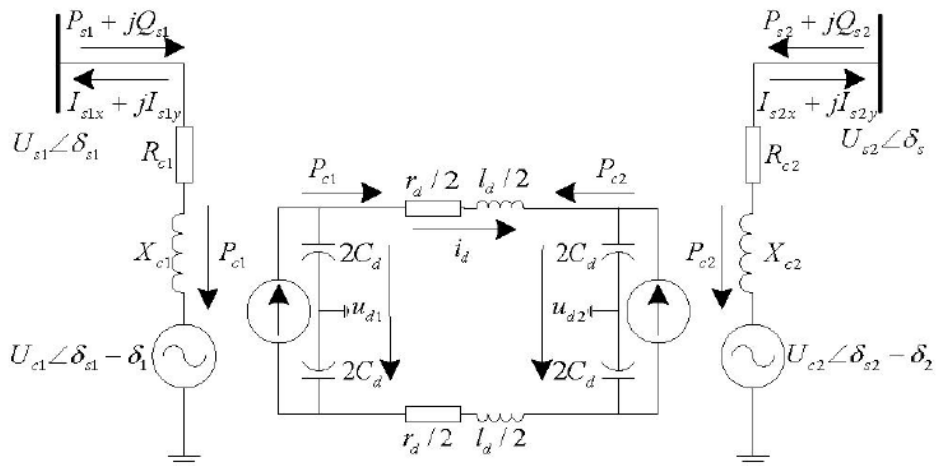
## 2.9 Nuolatinės srovės intarpo (VSC HVDC) dinaminis modelis

Nuolatinės srovės intarpas (VSC HVDC) gali būti modeliuojamas detaliu modeliu arba supaprastintu. Detaliame modelyje puslaidininkiniai elementai IGBT (izoliuotos užtūros dvipoliai tranzistoriai) yra naudojami kaip elektroniniai raktai [15]. Naudojantis impulso pločio moduliacija, puslaidininkiams elementams generuojami pulsai į užtūra norint gauti reikiamą įtampą ar srovę. Detalus modelis taip pat tinkamas nagrinėjant nuolatinio srovės intarpo valdymą. Supaprastintame modelyje nėra atsižvelgiama į naudojamus elektroninius raktus ir jų valdymą norint išgauti ir palaikyti norimas įtampas, aktyvias bei reaktyvias galias. Šiame darbe nuolatinis srovės intarpas bus modeliuojamas detaliai [16].

Schemoje 2.15 pav. pavaizduota perdavimo, o 2.16 pav. ekvivalentinis dinaminis modelis parodytas 2.16 pav. Indeksai 1 ir 2 žymės kintamuosius priklausančius atitinkamai VSC1 ir VSC2.  $\dot{U}_s$  yra kintamos įtampos pusės fazoriai, o  $\dot{U}_c$  yra fazorius VSC išėjimo įtampos.  $\delta_s$  yra įtampos  $\dot{U}_s$  fazės kampas.  $\delta$  yra kampas tarp fazių  $U_c$  ir  $\dot{U}_s$  (dar vadinamas pasisukimo kampu) [17].



2.15 pav. Nuolatinio srovės intarpo (VSC HVDC) schemas vaizdas



2.16 pav. Nuolatinės srovės intarpo dinaminis ekvivalentinis modelis

$P_s$  ir  $Q_s$  yra aktyvi ir reaktyvi galios vartojamos nuolatinio srovės intarpo iš kintamos įtampos pusės.  $P_c$  yra aktyvi galia, kurią nuolatinis srovės intarpas perduoda į nuolatinės srovės pusę be jokių nuostolių.  $I_{sx}$  ir  $I_{sy}$  yra realioji ir menamoji srovės dalys, kurios yra perduodamos iš VSC į kintamos įtampos pusę.  $R_c$  ir  $X_c$  yra aktyvioji ir reaktyvioji varžos atstojančios transformatoriaus apvijas.  $C_d$  yra nuolatinės įtampos kondensatorius nuolatinės srovės intarpo nuolatinės srovės pusėje.  $r_d$  ir  $l_d$  yra perdavimo linijos aktyvioji ir reaktyvioji varža.

Elektros energetikos sistemoje modeliuojamas nuolatinis srovės intarpo įtampos ir srovės yra atvaizduojamos fazoriais, induktyvumai ir talpumai aprašomi varžomis. Kaip parodyta 2.16 pav. srovė apskaičiuojama:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_c - \dot{U}_s}{R_c + jX_c} \quad (2.30)$$

kur,  $\dot{U}_c$  yra priklausoma nuo nuolatinės srovės intarpo nuolatinės įtampos  $u_d$ , impulso pločio moduliacijos santykio  $M$ , pasukimo kampo  $\delta$  ir nuolatinės įtampos panaudojimo  $\mu$  [17].

$U_c$  paskaičiuojama pagal:

$$U_c = U_c \angle \delta_s - \delta = \frac{\mu M}{\sqrt{2}} u_d \angle \delta_s - \delta \quad (2.31)$$

Apibrėžiant  $Y = 1/\sqrt{R_c^2 + X_c^2}$  ir  $\alpha = \arctg(R_c/X_c)$ , tuomet srovė  $\dot{I}$  gali būti aprašyta realia ir menamąja dalimis:

$$I_{sx} = U_c Y \sin(\delta_s - \delta - \alpha) - U_s Y \sin(\delta_s + \alpha) \quad (2.32)$$

$$I_{sy} = -U_c Y \cos(\delta_s - \delta - \alpha) + U_s Y \sin(\delta_s + \alpha) \quad (2.33)$$

### 2.9.1 Nuolatinės srovės intarpo DC šakos dinaminis modelis

Dviejų išvadų nuolatinės srovės intarpui, dinaminiai elementai DC šakoje modeliuojami dviem talpomis kiekvieno keitiklio pusėje ir perdavimo linijos induktyvumu. DC šakoje esant aktyvios galios ir įtampos pusiausvyrai galima parašyti dinamines lygtis talpų įtampoms ir induktyvumų srovėms [18]:

$$R_{dB} C_d U_{d1} \frac{du_{d1}}{dt} = P_{c1} - i_d u_{d1} \quad (2.34)$$

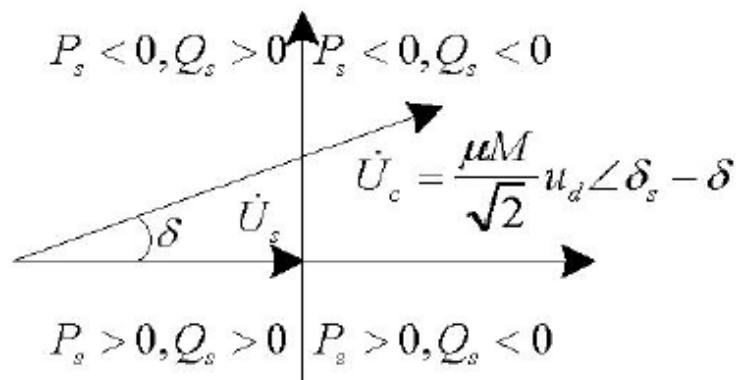
$$R_{dB} C_d U_{d2} \frac{du_{d2}}{dt} = P_{c2} + i_d u_{d2} \quad (2.35)$$

$$\frac{l_d}{R_{dB}} \frac{di_d}{dt} = u_{d1} - u_{d2} - r_d i_d \quad (2.36)$$

kur,  $R_{dB}$  yra bazinė pilnutinė varža.

### 2.9.2 Nuolatinės srovės intarpo valdymo sistemos modelis

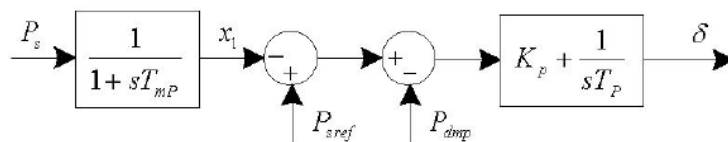
Remiantis impulso pločio moduliacija, amplitudė ir fazės kampas nuolatinio srovės intarpo gali būti valdomas nepriklausomai ir dažniausiai pagal moduliacijos koeficientą  $M$  ir pasukimo kampą  $\delta$ . Taigi, pagal du valdomus kintamuosius, nuolatinės srovės intarpas greitai ir nepriklausomai valdo aktyvią galią  $P_s$  ir reaktyvią galią  $Q_s$  kaip parodyta 2.17 pav [19].



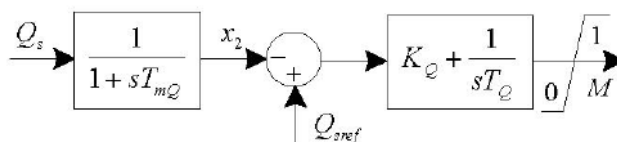
2.17 pav. Nuolatinio srovės intarpo galios valdymo diagrama

Yra keturi valdymo objektai kiekviename nuolatiniam srovės intarpo keitiklių stotyje, kaip aktyvi galia  $P_s$  ar DC šakos įtampa  $u_d$  ir reaktyvi galia  $Q_s$  arba kintamos įtampos pusėje esančių šynų įtampos amplitudė  $U_s$ . Normaliomis sąlygomis kiekviena iš keitiklio stočių gali nepriklausomai valdyti reaktyvią galią. Aktyvi galia siunčiama į DC šaką turi būti subalansuota t.y. aktyvi galia tekanti iš DC šakos turi būti lygi įtekančiai galiai atėmus tinklo nuostolius. Bet koks skirtumas verčia DC šakos įtampą didėti arba mažėti. Užtikrinti balansui viena iš keitiklio stočių turi būti nustatyta valdyti DC šakos įtampą. Kita keitiklio stotis gali valdyti aktyvią galią bet galimos perduoti galios ribose.

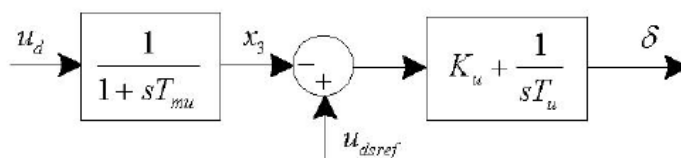
Naudojamame modelyje visos perdavimo funkcijos yra naudojamos PI tipo 2.18 pav. valdyti aktyviai ir reaktyviai galioms, DC šakos įtampai ir kintamos įtampos pusėje šynų įtampą [20].



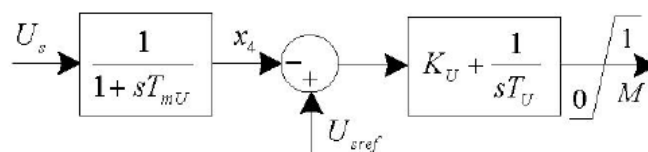
a) Aktyvios galios valdiklis



b) Reaktyvios galios valdiklis



c) DC perdavimo šakos valdiklis



d) Nuolatinio intarpo kintamos įtampos pusės įtampos valdiklis

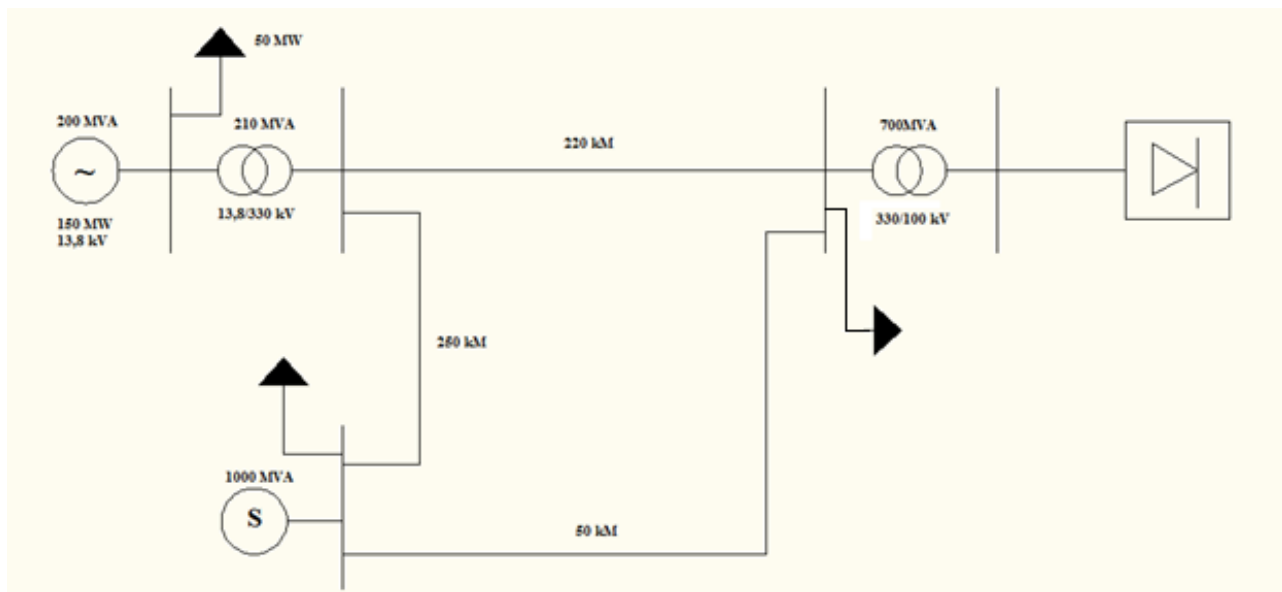
**2.18 pav.** Nuolatinio srovės intarpo blokinė schema [21]

### 3. METODINĖ DALIS

Šioje dalyje pristatoma tyrimų atlikimo metodika, teorija, skaičiuojamieji modeliai. Informaciją stengtasi pateikti taip, kad kiti tyrėjai galėtų atkartoti šį tyrimą ir leistų įvertinti rezultatų patikimumą.

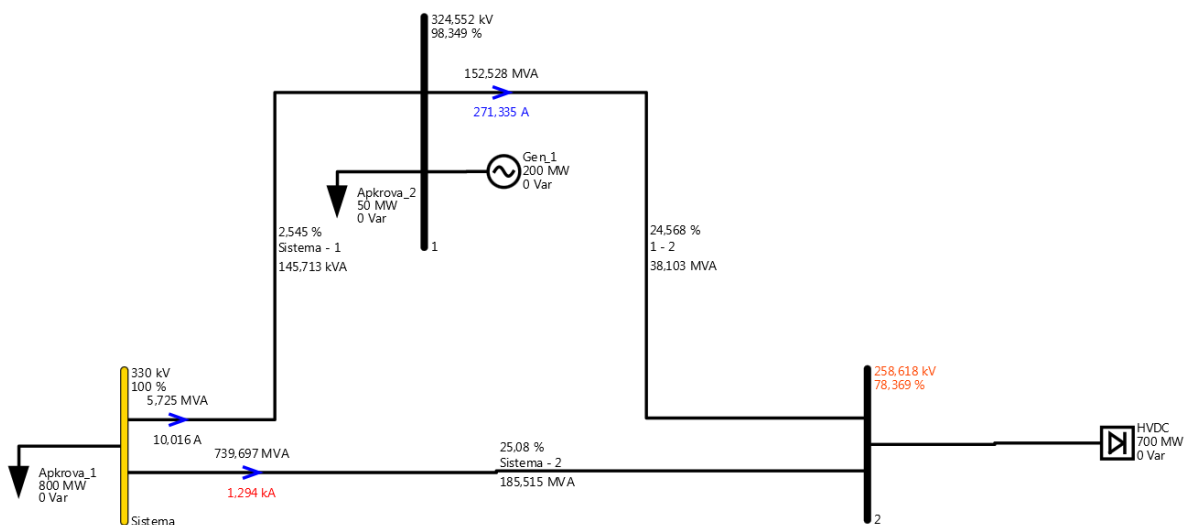
#### 3.1 Tiriamosios elektros energetikos sistemos modeliavimas

Šiame magistro darbe nagrinėjamas tinklas:



3.1 pav. Skaičiuojamojo tinklo modelis

Apskaičiuoti galios srautus naudojama programa EA-PSM 3.2 pav., apkrovas priimsime turinčias tik aktyviasias galios dedamąsias.



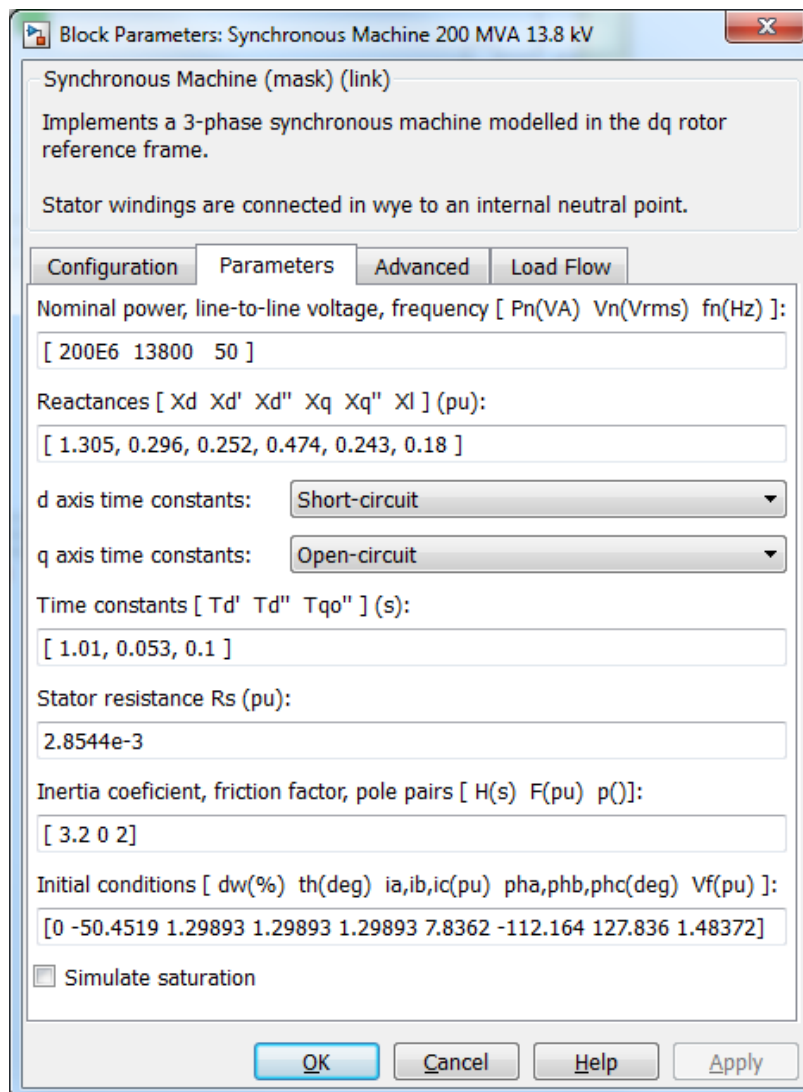
3.2 pav. Galios srautų paskaičiavimas skaičiuojamajam tinklui programa EA-PSM

Atlikus galios skaičiavimus šynose nr.2 įtampos kritimas yra 22%.

### 3.2 Sinchroninio generatoriaus modeliavimas Matlab/Simulink programiniu paketu

Simulink terpėje modeliuojamas 200 MVA pilnutinės galios sinchroninis generatorius, kurio gnybtų įtampa 13,8 kV. Aktyvi generuojama galia yra 150 MW.

Generatoriaus parametrai pateikti 3.3 pav.



Block Parameters: Synchronous Machine 200 MVA 13.8 kV

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.

Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]:  
[ 200E6 13800 50 ]

Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl ] (pu):  
[ 1.305, 0.296, 0.252, 0.474, 0.243, 0.18 ]

d axis time constants: Short-circuit

q axis time constants: Open-circuit

Time constants [ Td' Td'' Tqo'' ] (s):  
[ 1.01, 0.053, 0.1 ]

Stator resistance Rs (pu):  
2.8544e-3

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [ H(s) F(pu) p() ]:  
[ 3.2 0 2 ]

Initial conditions [ dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu) ]:  
[ 0 -50.4519 1.29893 1.29893 1.29893 7.8362 -112.164 127.836 1.48372 ]

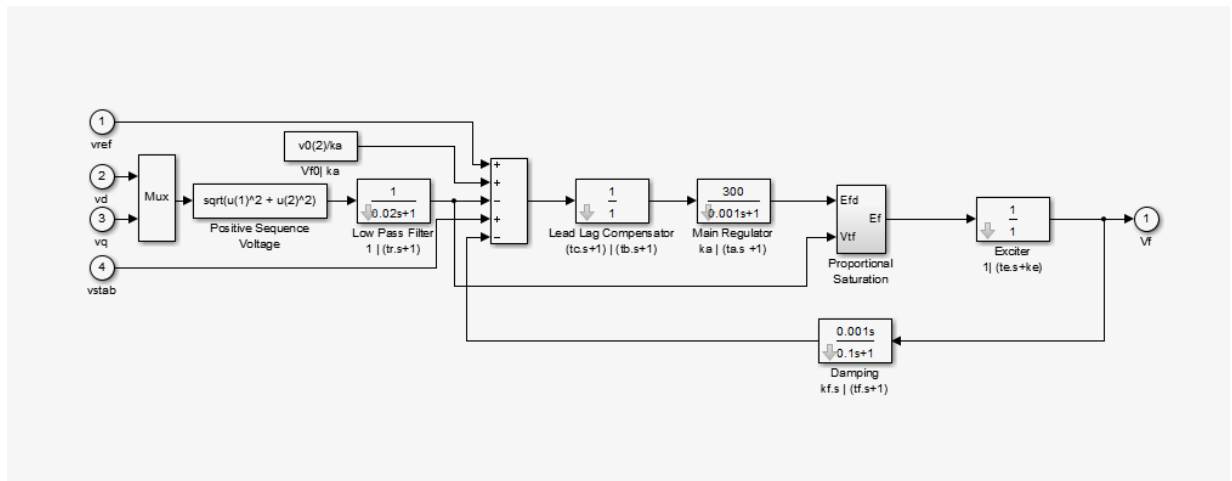
Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

3.3 pav. Sinchroninio generatoriaus parametrai

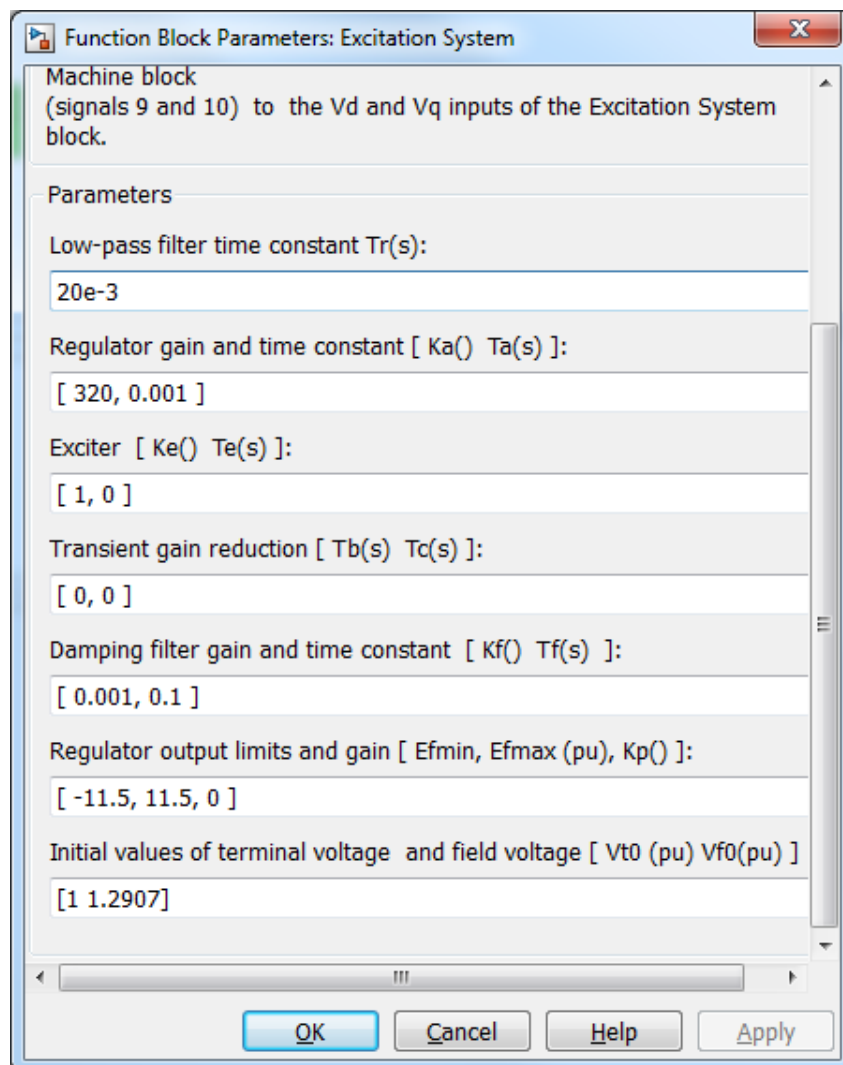
Generatoriaus pradinės sąlygos paskaičiuojamos grafine sąsaja „Powergui“, paspaudus „Machine initialization“. Šios pradinės sąlygos nustato genratoriaus paleidimą normaliomis sąlygomis.

Prie generatoriaus prijungta žadinimo sistema pavaizduota 3.4 pav.



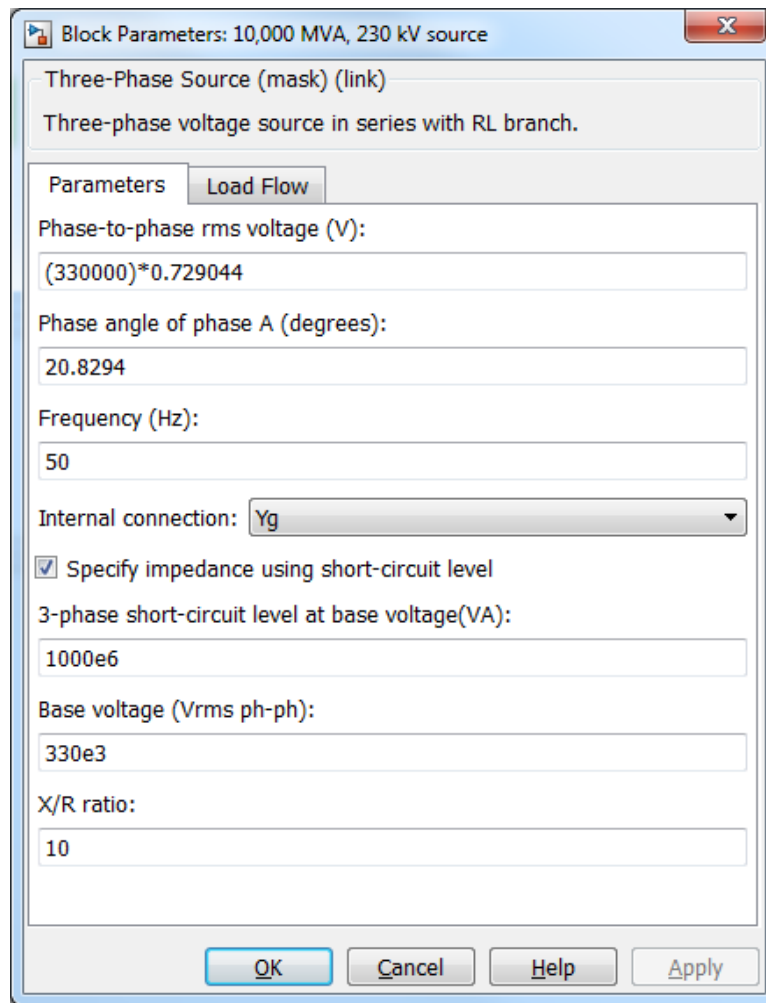
3.4 pav. Generatoriaus žadinimo sistema

Žadinimo sistemos parametrai:



3.5 pav. Žadinimo sistemos parametrai nustatyti iš grafinės vartotojo sąsajos „Powergui“

Tinkle taip pat yra sisteminis mazgas (swing bus), kurio paskirtis iš tinklo naudoti perteklinę aktyviąją ir reaktyvią galią ar esant poreikiui atiduoti reikiamą galią tinklui. Sisteminio mazgo parametrai:

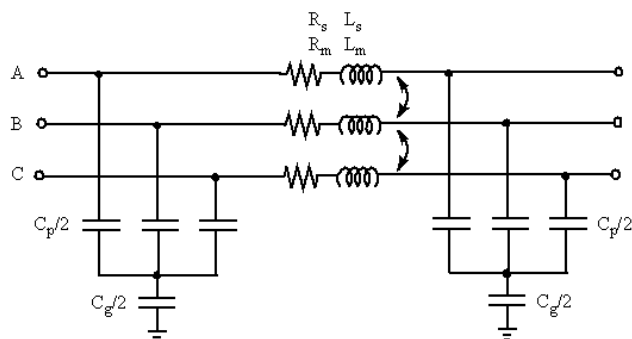


3.6 pav. Sisteminio mazgo parametrai

Prie tinklo prijungtas transformatorius, kurio pilnutinė galia 210 MVA, 13,8/330kV.

### 3.3 Perdavimo linijų modeliavimas

Perdavimo linija sumodeliuota  $\pi$  schema, kurios modeliavimas pateiktas ir jos varžos pateiktos ir perskaičiuotos 1 lentelėje:



3.7 pav.  $\pi$  linijos modelis



Suvedami parametrai:

$r_1, r_0$  – teigiamos ir nulinės sekos varžos ilgio vienetui  $\Omega/km$ ;

$l_1, l_0$  – teigiamos ir nulinės sekos induktyvumai ilgio vienetui  $H/km$ ;

$c_1, c_0$  – teigiamos ir nulinės sekos talpis ilgio vienetui  $F/km$ ;

$F$  – dažnis ( $Hz$ );

$L_{sec}$  – linijos ilgis ( $km$ );

Linijos parametrai apskaičiuojami formulėmis:

$$R_s = (2R_1 + R_0)/3 \quad (3.1)$$

$$L_s = (2L_1 + L_0)/3 \quad (3.2)$$

$$R_m = (R_0 + R_1)/3 \quad (3.3)$$

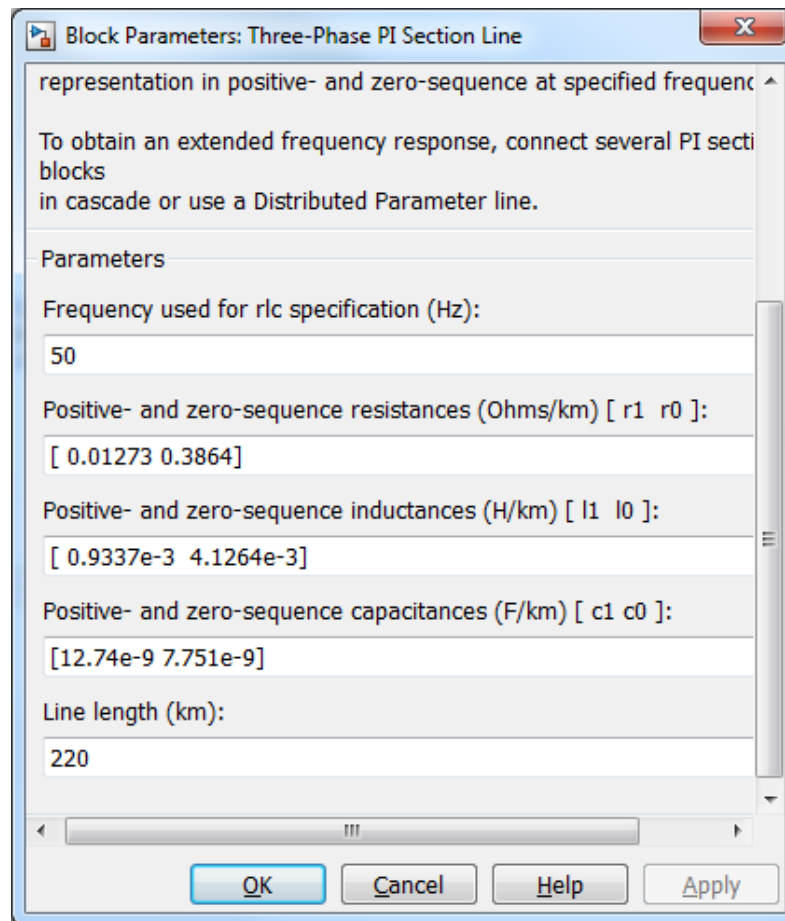
$$R_m = (L_0 + L_1)/3 \quad (3.4)$$

$$C_p = C_1 \quad (3.5)$$

$$C_g = 3C_1C_0/(C_1 - C_0) \quad (3.6)$$

1 lentelė. Linijų parametrai

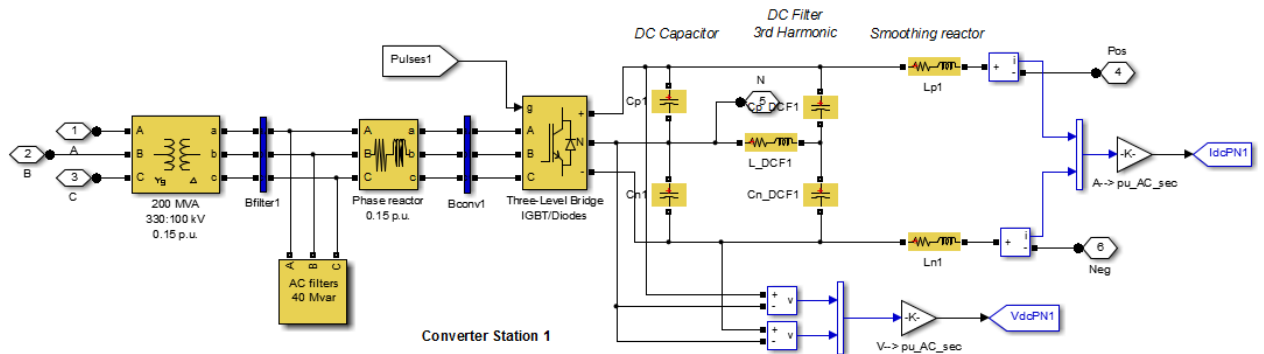
Linijos ilgis	Varža	Induktyvumas	Talpis
220 km	469,5 $\Omega$	0,377 mH	1,568 $\mu F$
200 km	144,54 $\Omega$	0,299 mH	1,509 $\mu F$
50 km	29,75 $\Omega$	0,069 mH	336,407 nF



3.8 pav. Perdavimo linijos parametrai

### 3.4 Nuolatinės srovės intarpo (VSC HVDC) modeliavimas

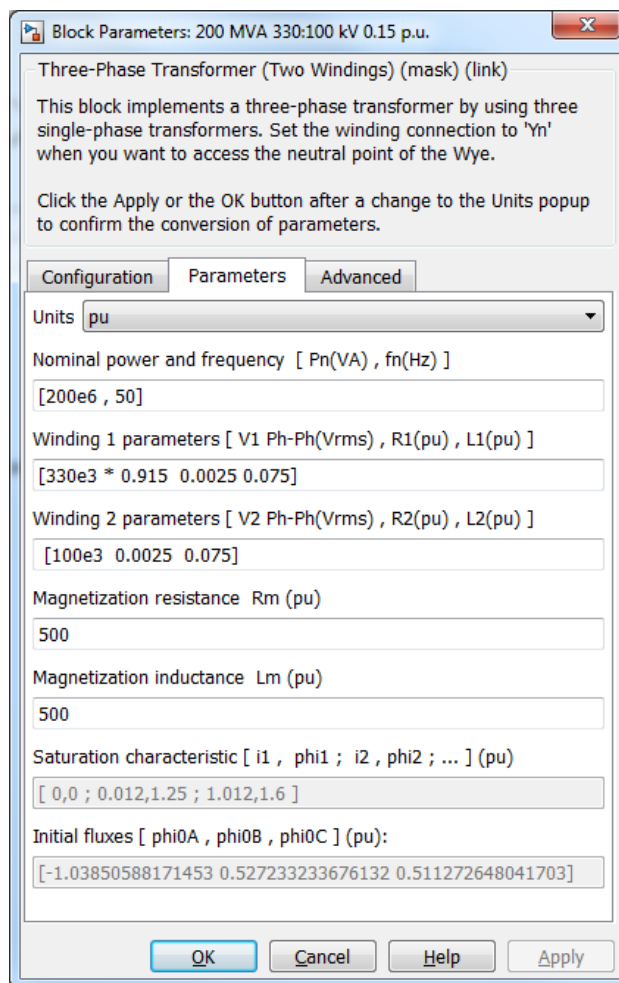
Nuolatinės srovės intarpo modelis paimtas iš Matlab/Simulink programinio paketo ir pakoreguotas veikti skaičiuojamame tinkle (pakeista transformatorių galia iš 200 MVA į 700MVA). Pagrindiniai elementai sudarantys modelį yra keitiklių stotys sujungtos per nuolatinės srovės linijas. Keitiklių stotyse naudojami puslaidininkiniai elementai – izoliuotos užtūros dvipoliai tranzistoriai (IGBT). Pirmos keitiklio stoties vaizdas pateiktas 3.9 pav. Antra keitiklio stotis yra identiška.



**3.9 pav.** Nuolatinio srovės intarpo modelis Simulink programiniame pakete

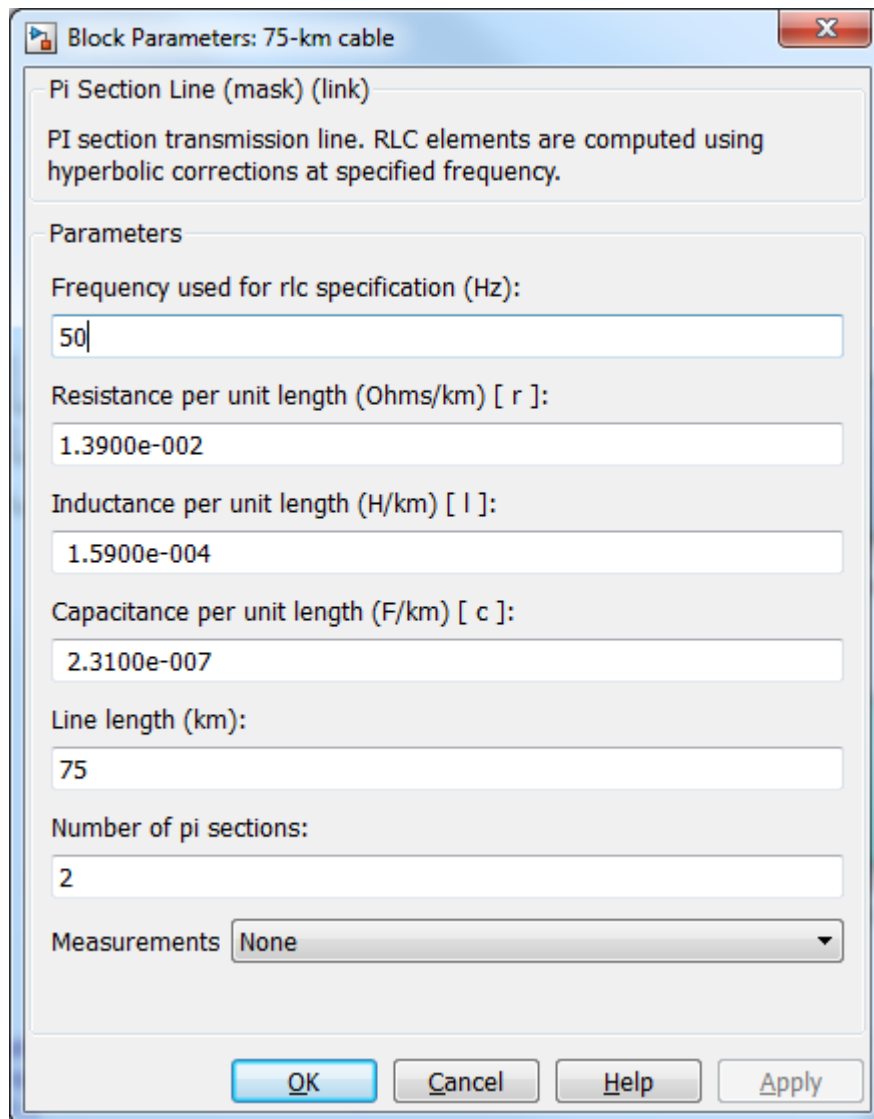
Kadangi puslaidininkiniai elementai yra komutuojami dideliu dažniu, jie generuoja tinklui žalingas harmonikas. Kintamos srovės filtrai yra parinkti tokie jog nufiltruoja didžiausią įtaką darančias harmonikas.

Transformatoriaus parametrai pateikti



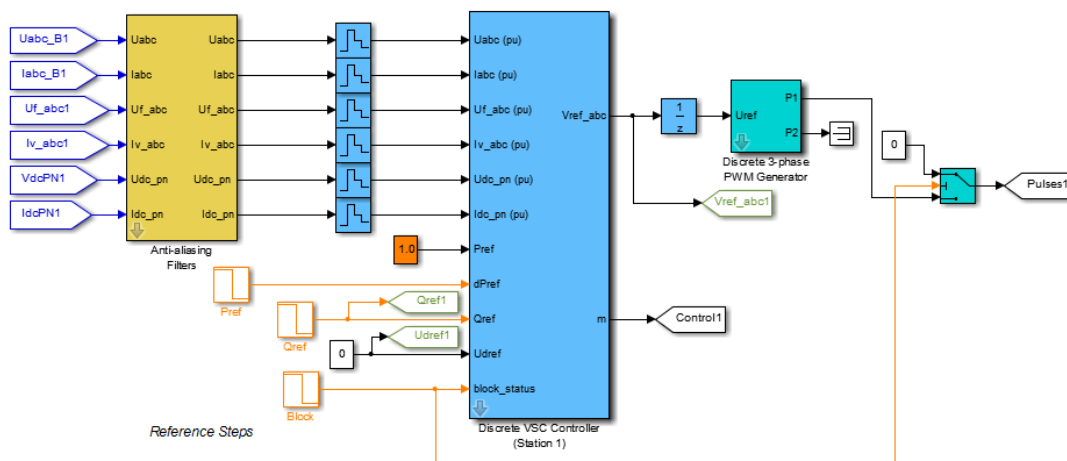
**3.10 pav.** Nuolatinio srovės keitiklio transformatoriaus parametrai

Perdavimo linija modeliuojam 75 km ilgio su žemiau pateiktais parametrais:



**3.11 pav.** DC perdavimo linijos parametrai

Nuolatinio srovės valdymo modelis jau buvo aprašytas 2.9.2 dalyje. Matlab/Simulink programiniame pakete šis modelis pateiktas tokia forma:

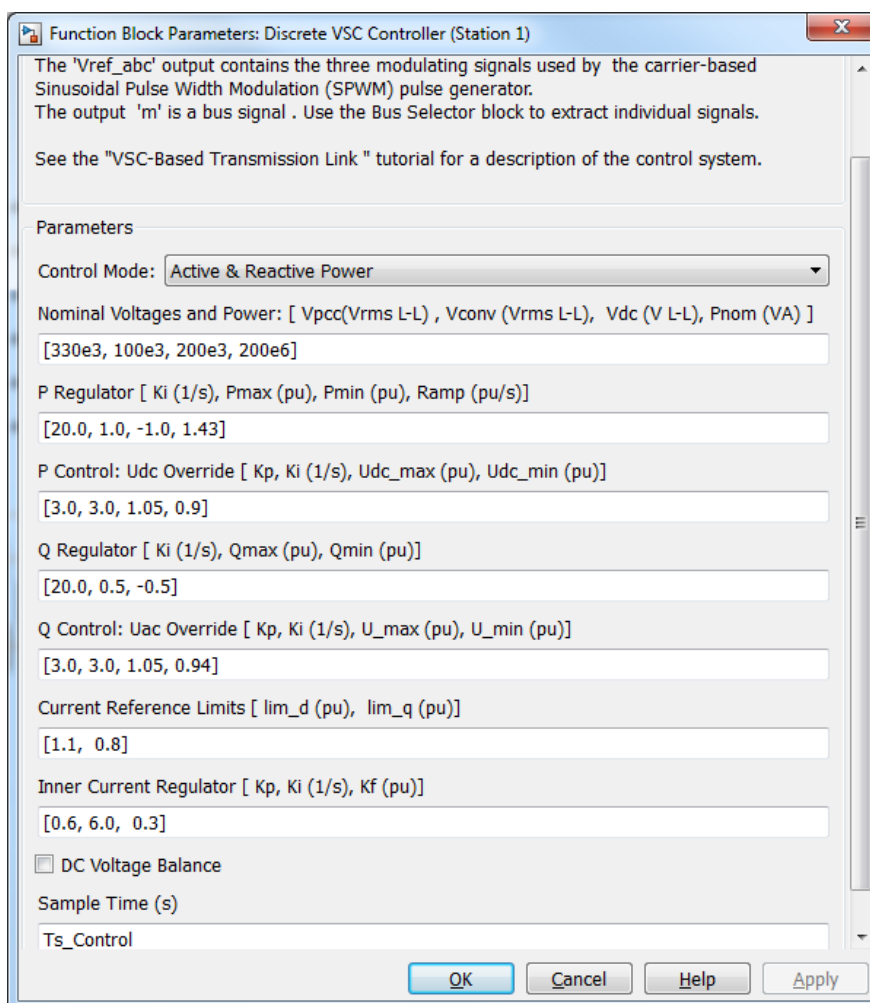


Sample time: |-----Ts\_Power-----| |-----Ts\_Control-----| |-----Ts\_Power-----|

VSC Controller  
(Station 1)

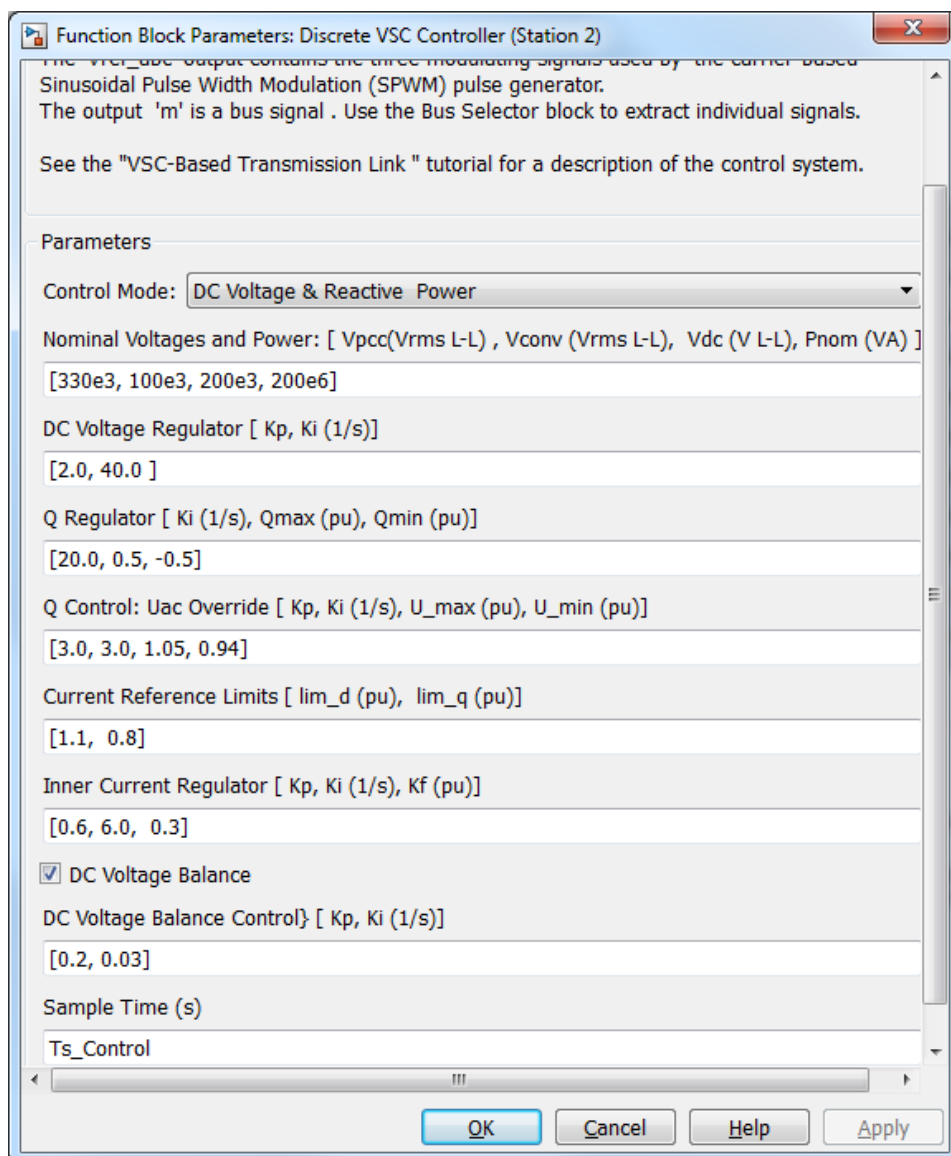
3.12 pav. Nuolatinio srovės intarpo vieno keitiklio valdymo schema

Taip pat pateikti standartiniai valdymo parametrai:



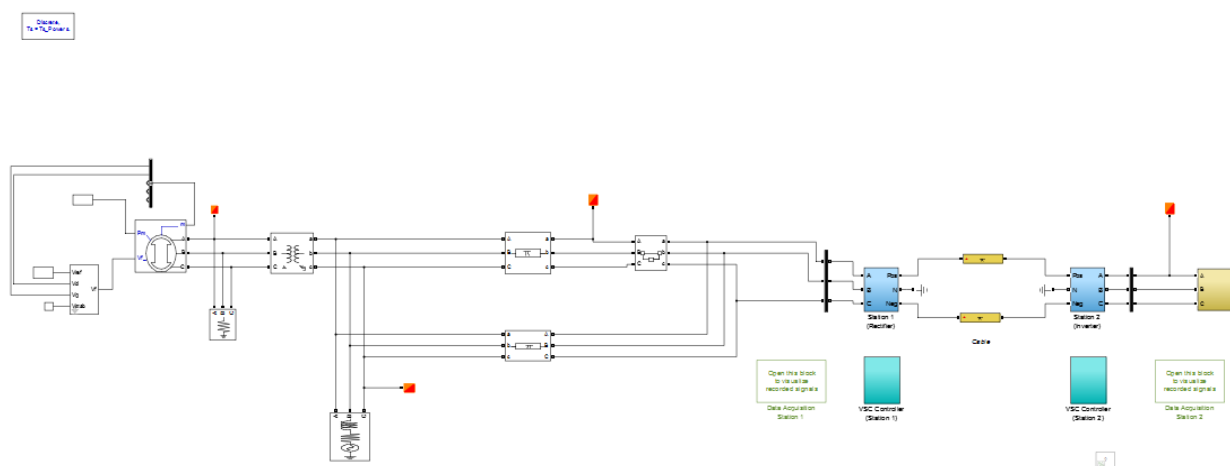
3.13 pav. VSC HVDC vienos keitiklių stoties valdymo charakteristikos

Valdymo bloke galima pasirinkti jau minėtus du valdymo būdus. Pirmajam keitikliui parinksime aktyvios ir reaktyvios galios valdymą, o antrajam DC šakos įtampą ir reaktyvią galią



3.14 pav. Antrosios keitiklių stoties valdymo charakteristikos

Visi sujungti jau minėti elementai sudaro modelį pavaizduotą 3.15 pav.



3.15 pav. Skaičiuojamasis modelis

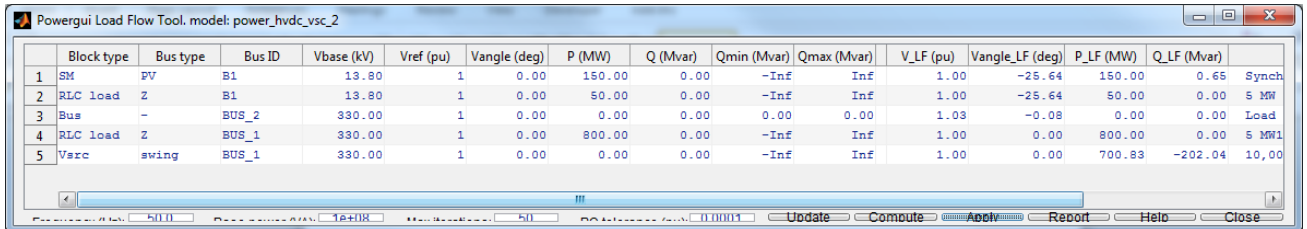
### 3.5 Tyrimo atlikimo tvarka

Pirmiausia atliekant tyrimą sistema bus nagrinėjama kai nuolatinis srovės intarpas yra atjungtas ir sistemoje veiks sinchroninis generatorius ir kaip elgsis sistema (generatoriaus rotoriaus greitis, generatoriaus gnybtų įtampa). Tyrimo eiga:

1. Sistema veikia be nuolatinio srovės intarpo;
2. Sistemoje vienoje 220 km linijoje įvykdomas trifazis trumpas jungimas  $t=2s$ ;
3. Prie vietos kur jungiamas nuolatinis srovės intarpas prijungiama papildoma 100MW ir 100 MVar apkrova;
4. Atjungiamą 220 km linija  $t=2s$ ;
5. Paminėti 1-4 žingsniai prijungus nuolatinį srovės intarpą.

## 4. TYRIMO REZULTATŲ DALIS

Pirmiausia atliktas galios srautų pasiskirstymas sistemoje pavaizduotas



	Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (Mvar)	
1	SM	PV	B1	13.80	1	0.00	150.00	0.00	-Inf	Inf	1.00	-25.64	150.00	0.65	Synch
2	RLC load	Z	B1	13.80	1	0.00	50.00	0.00	-Inf	Inf	1.00	-25.64	50.00	0.00	5 MW
3	Bus	-	BUS_2	330.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	-0.08	0.00	0.00	Load
4	RLC load	Z	BUS_1	330.00	1	0.00	800.00	0.00	-Inf	Inf	1.00	0.00	800.00	0.00	5 MW1
5	Vsc	swing	BUS_1	330.00	1	0.00	0.00	0.00	-Inf	Inf	1.00	0.00	700.83	-202.04	10,00

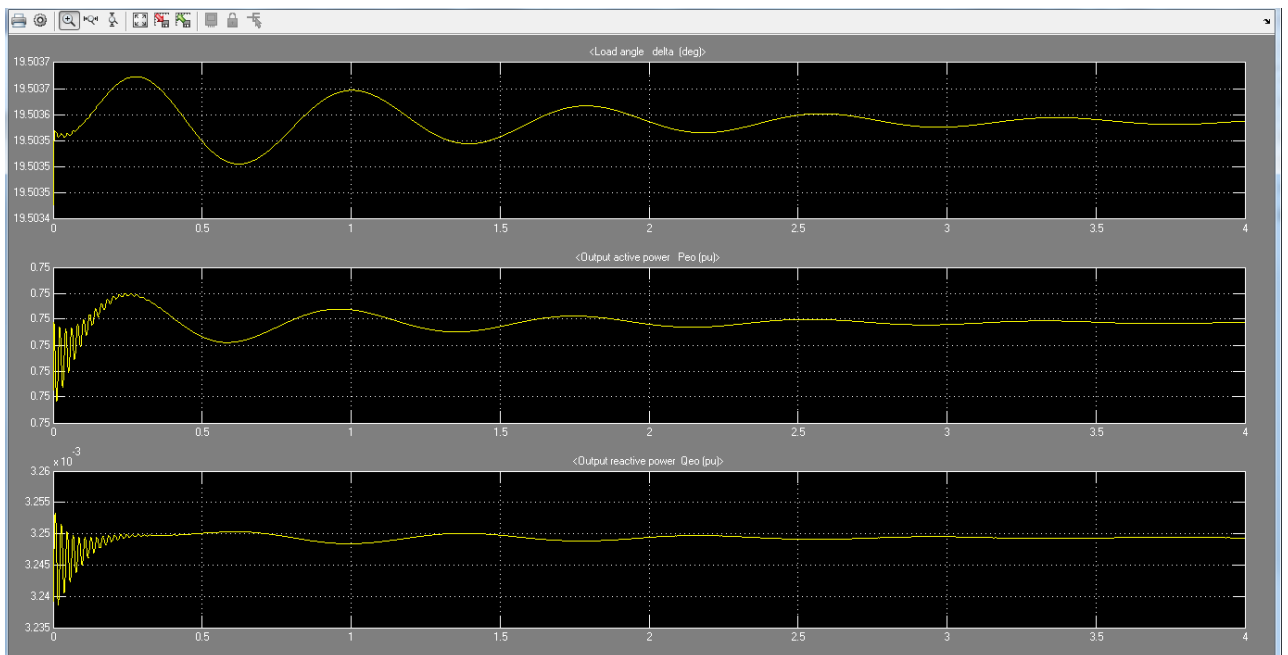
4.1 pav. Galios srautų pasiskirstymas sistemoje

Iš galios srautų uždavinio matyti, kad sistemos įtampos nėra pakitusios ir lygios 1 s.v.

Atlikus skaičiavimus gauti rezultatai:

- Tinklo parametrai tik su prijungtomis apkrovomis (viršutinis grafikas vaizduoja įtampos kampą, vidurinis - sinchroninio generatoriaus aktyviąją galią, apatinis – reaktyvią galią:

1. Sinchroninio generatoriaus dinaminės charakteristikos nesant prijungtam nuolatinės srovės intarpui:



4.2 pav. Sinchroninio generatoriaus charakteristikos

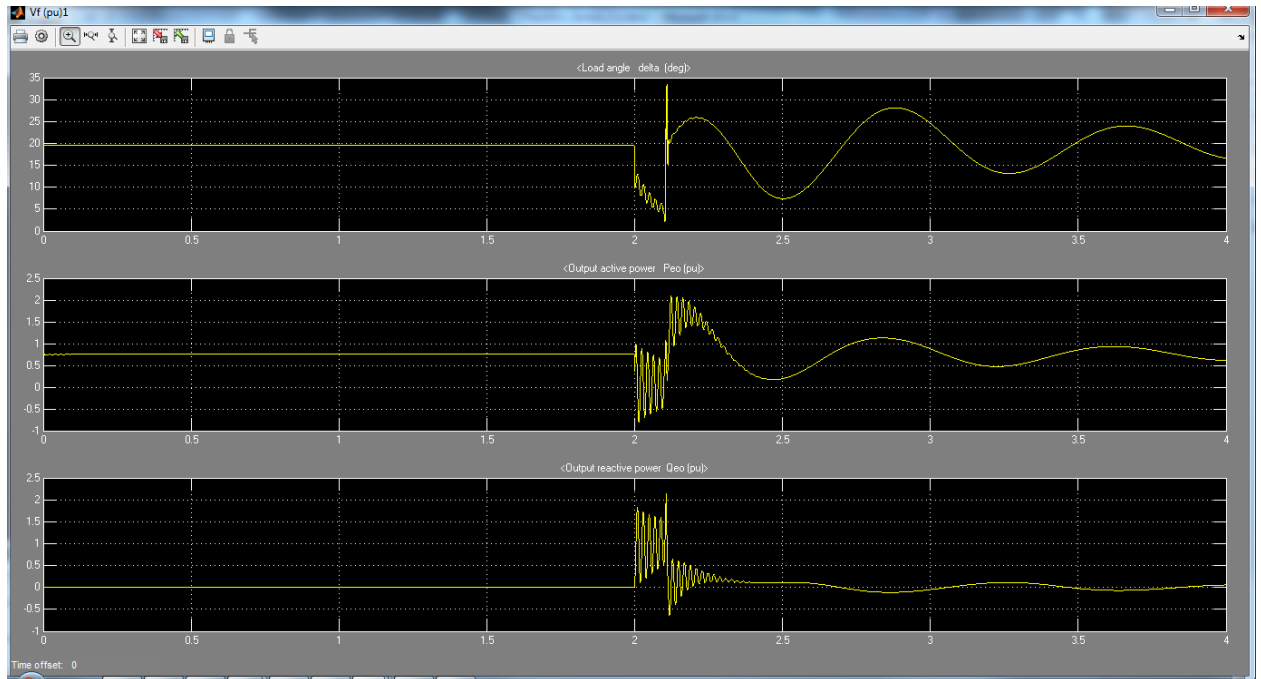


Generatoriaus įtampos kampas  $\delta = 19,5^\circ$

Generuojama galia 0,75 s.v.

Reaktyvi galia  $\sim 0$  s.v.

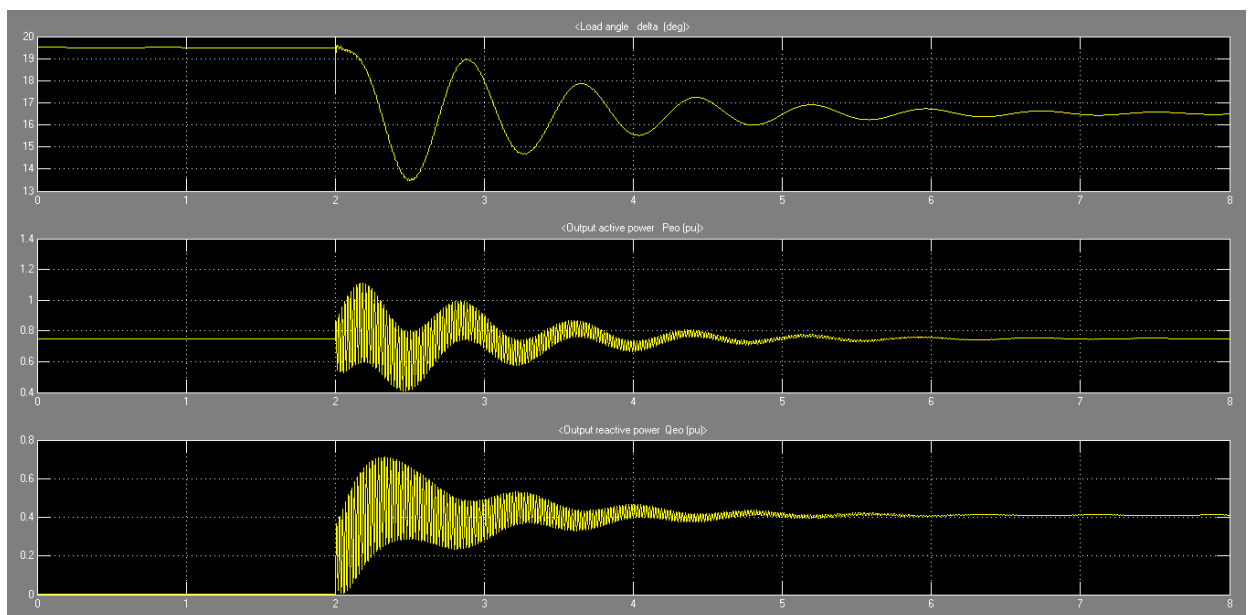
2. *Trifazis trumpas jungimas esant laikui  $t=2$  s.*



4.3 pav. Generatoriaus charakteristikos esant trifaziam trumpam jungimui

Esant trifaziam trumpam jungimui sinchroninis generatorius grįžta į normalią būseną po  $t=2$  s. Įtampai palaikyti sistemoje generuojama trumpalaikė reaktyvi galia 0,02 s.

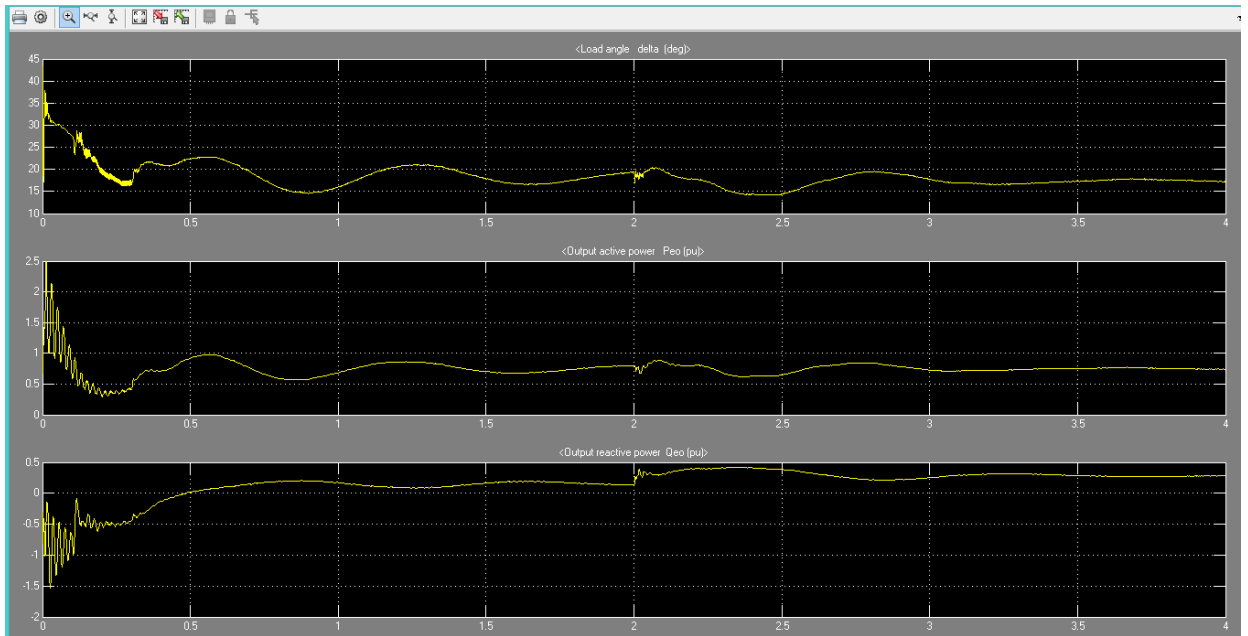
3. *Prijungus papildomą apkrovą 100 MW ir 100 MVar laiko momentu  $t=2$  s.*



4.4 pav. Sinchroninio generatoriaus charakteristikos prijungus papildomą apkrovą

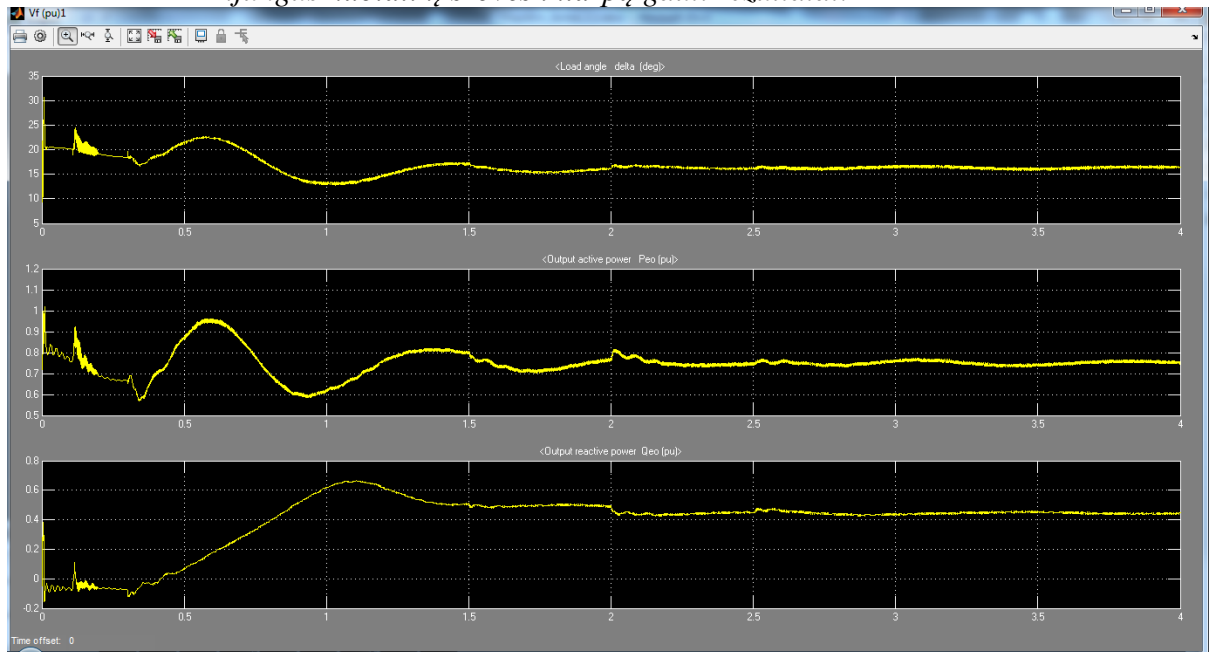
Prijungus induktyviają apkrovą sinchroninis generatorius pradeda generuoti ir reaktyviąją galią. Generatoriaus įtampos kampo vidutinė reikšmė -  $17^\circ$ .

4. Linijos atjungimas laiko momentu  $t=2$  s:



4.5 pav. Sinchroninio generatoriaus charakteristikos atjungiant liniją

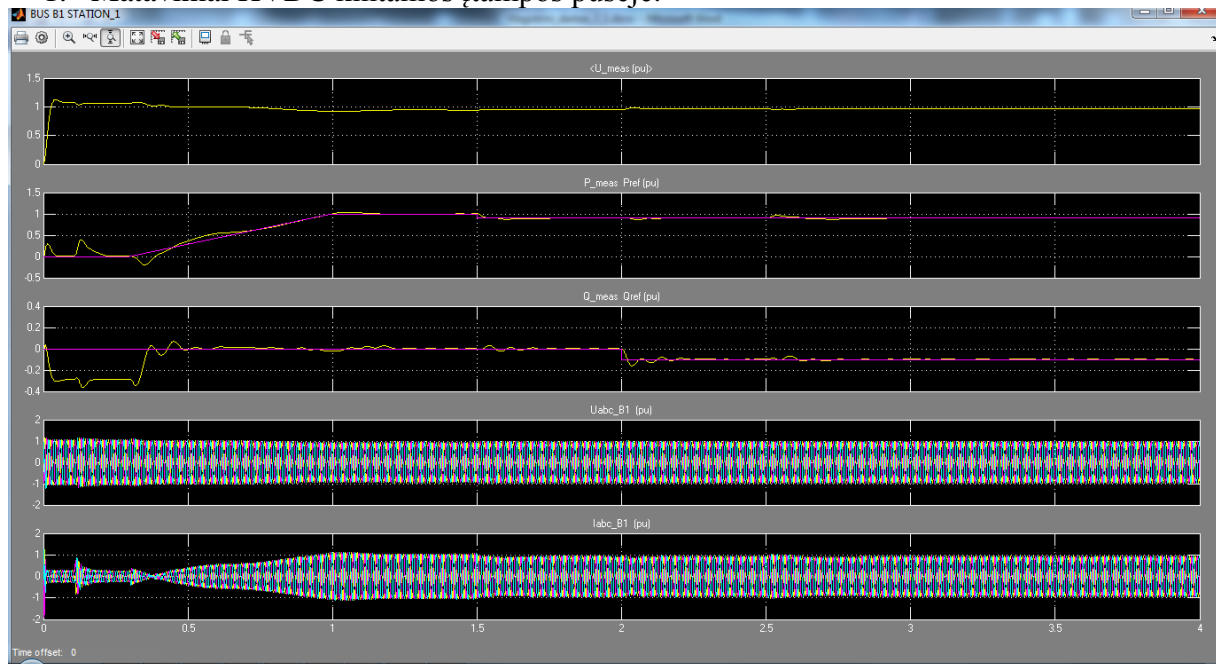
- *Prijungus nuolatinį srovės intarpą gauti rezultatai:*



4.6 pav. Sinchroninio generatoriaus parametrai prijungus prie tinklo nuolatinės srovės intarpą

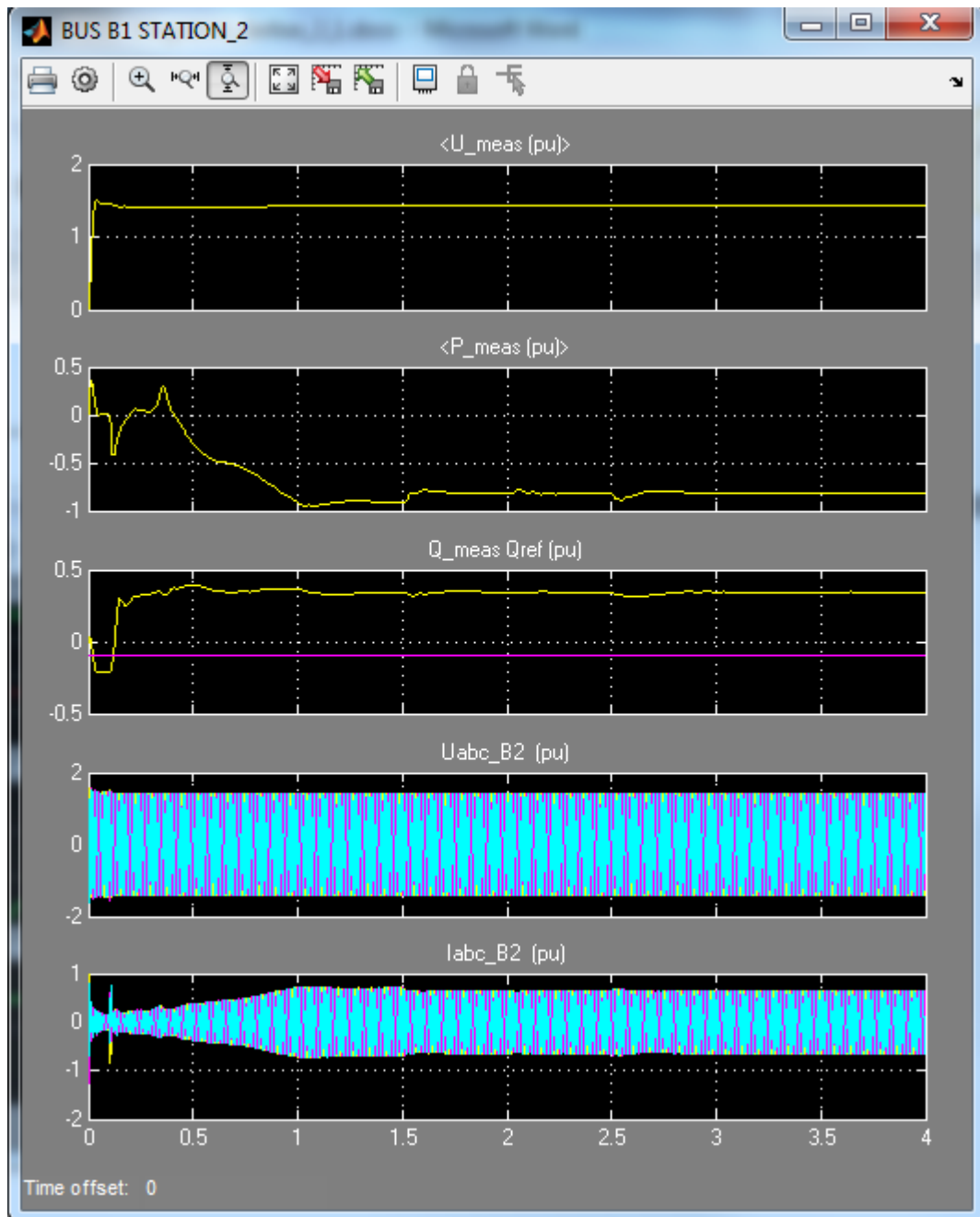
Generatoriaus įtampos kampo reikšmė -  $16^\circ$

## 1. Matavimai HVDC kintamos įtampos pusėje:



**4.7 pav.** Nuolatinio srovės intarpo pirmos keitiklių stoties grafikas (raudona spalva –užduota reikšmė, geltona –simuliacijos rezultatai)

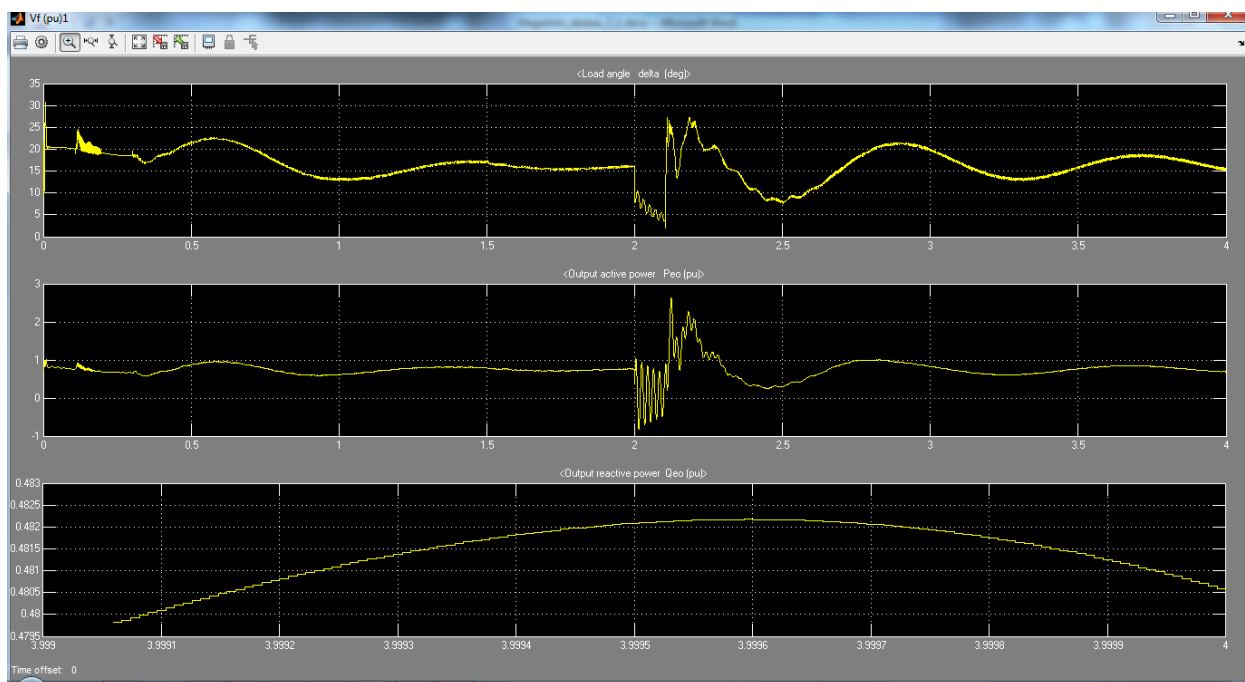
Keitiklio stoties nr1. Šynų įtampa (viršutinis grafikas) santykiniais vienetais lygi 1. Užduoda aktyvios galios ir reaktyvios galios vertės taip pat atitinka. Nuo simuliacijos pradžios iki 0,4 s nuolatinės srovės intarpas tinklui tiekia reaktyvią galią, kurios vertė 0,3 s.v.



**4.8 pav.** Nuolatinės srovės intarpo keitiklio Nr. 2 grafikas ( raudona spalva –užduota reikšmė, geltona – simuliacijos rezultatas)

Keitiklių stotis Nr.2 iš sistemos vartoja reaktyvią galią, šynų įtampą palaikoma didesnė reaktyviai galiai perduoti į keitiklių stotį nr.1

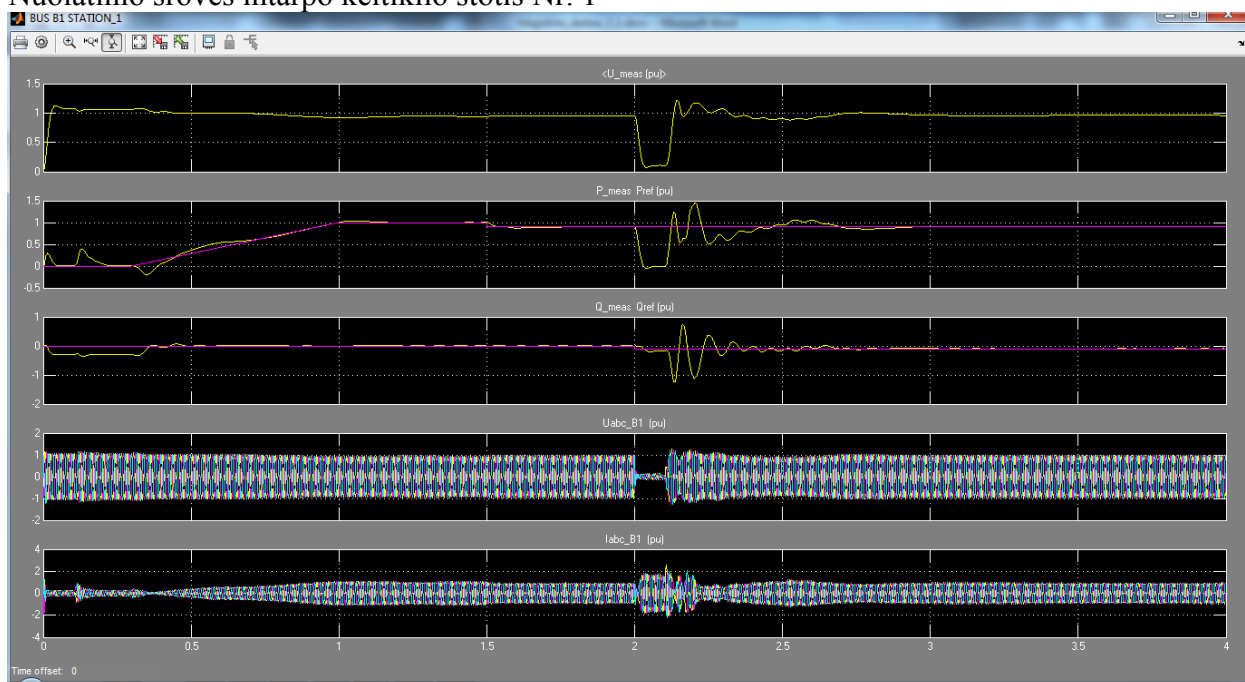
## 2. Sinchroninio generatoriaus matavimai trifazio trumpo jungimo metu $t=2s$ :



**4.9 pav.** Sinchroninio generatoriaus parametrai trumpo jungimo metu

Trifazio trumpo jungimo metu, sinchroninis generatorius pereina į stabilią padėtį per 1 s

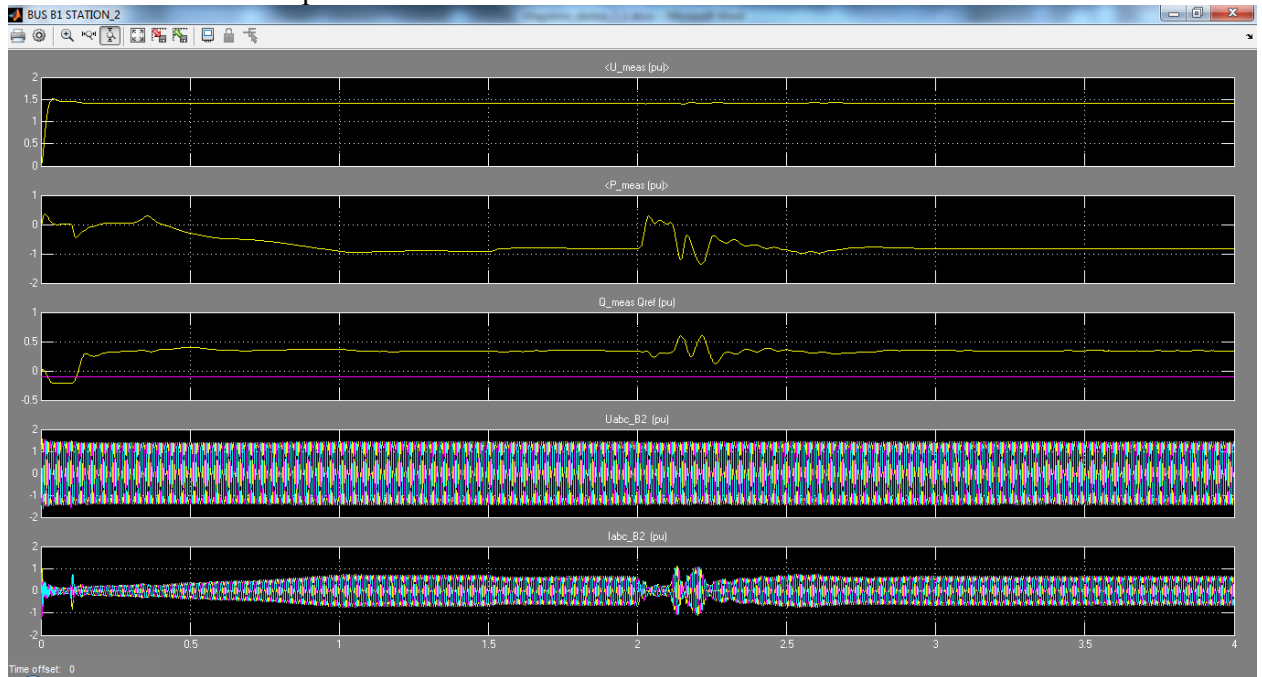
## Nuolatinio srovės intarpo keitiklio stotis Nr. 1



**4.10 pav.** Nuolatinio srovės intarpo keitiklio Nr.1 parametrai trumpo jungimo metu

Trumpo jungimo metu, kuris trunka 0,2 s keitiklių stotis Nr.1 išlaiko reaktyvios galios užduotas ribas. Netenkiant įtampos krenta ir perduodama galia. Pašalinus trumpą jungimą keitiklio stotis sugrįžta į stabilią padėtį po 0,01 s.

## Nuolatinio srovės intarpo keitiklio stotis Nr. 2

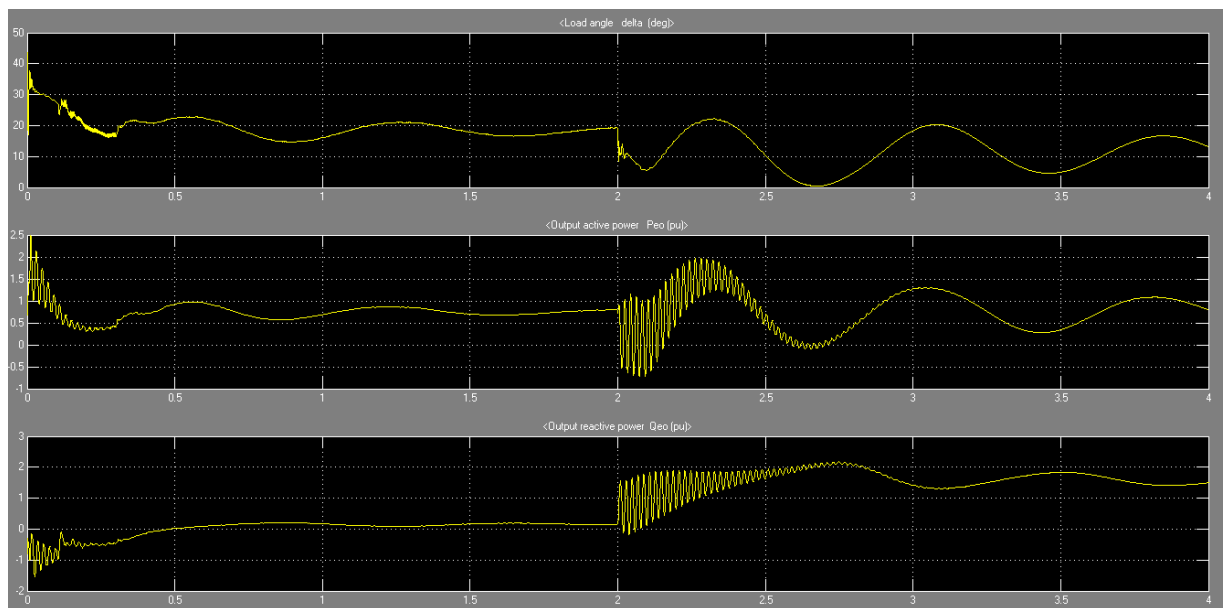


**4.11 pav.** Nuolatinio srovės intarpo keitiklių stotis Nr.2

Antroji keitiklio stotis trumpo jungimo metu į tinklą atiduodą galią. Reaktyvia galia išlieka nepakitusi.

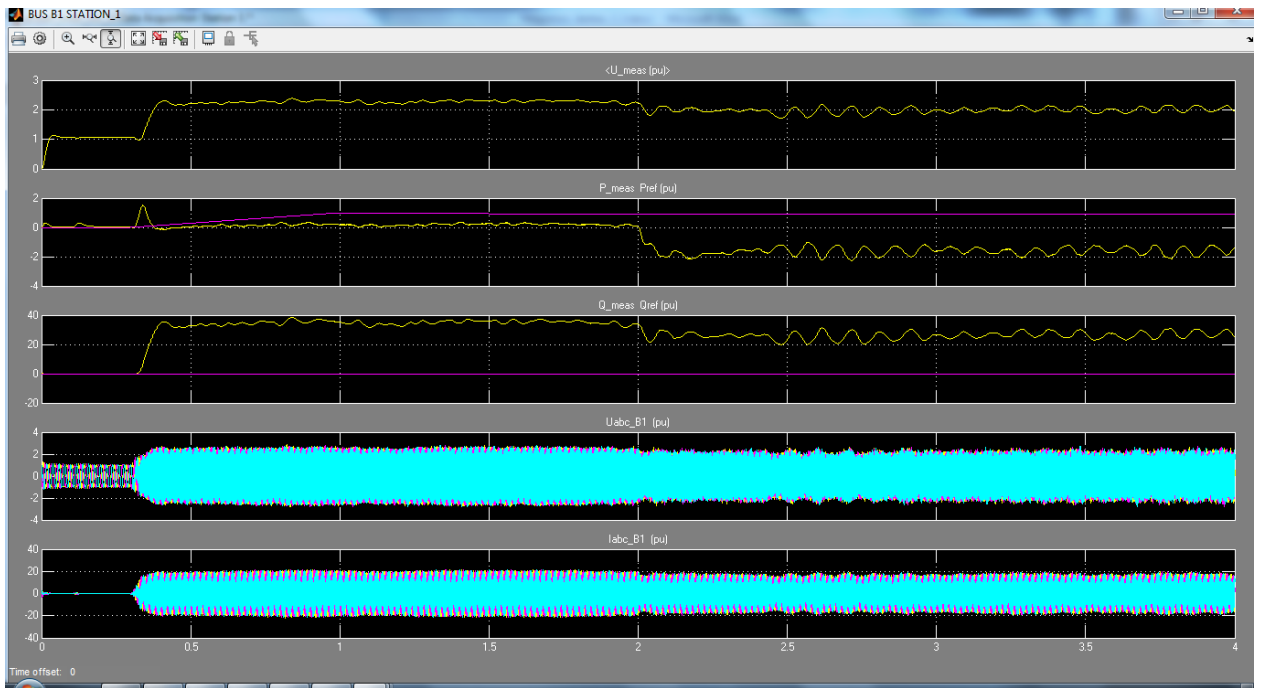
### 3. Prijungiama papildoma apkrova $t=2s$

Prijungus papildomą apkrovą sinchroninio generatoriaus parametrai gaunami:



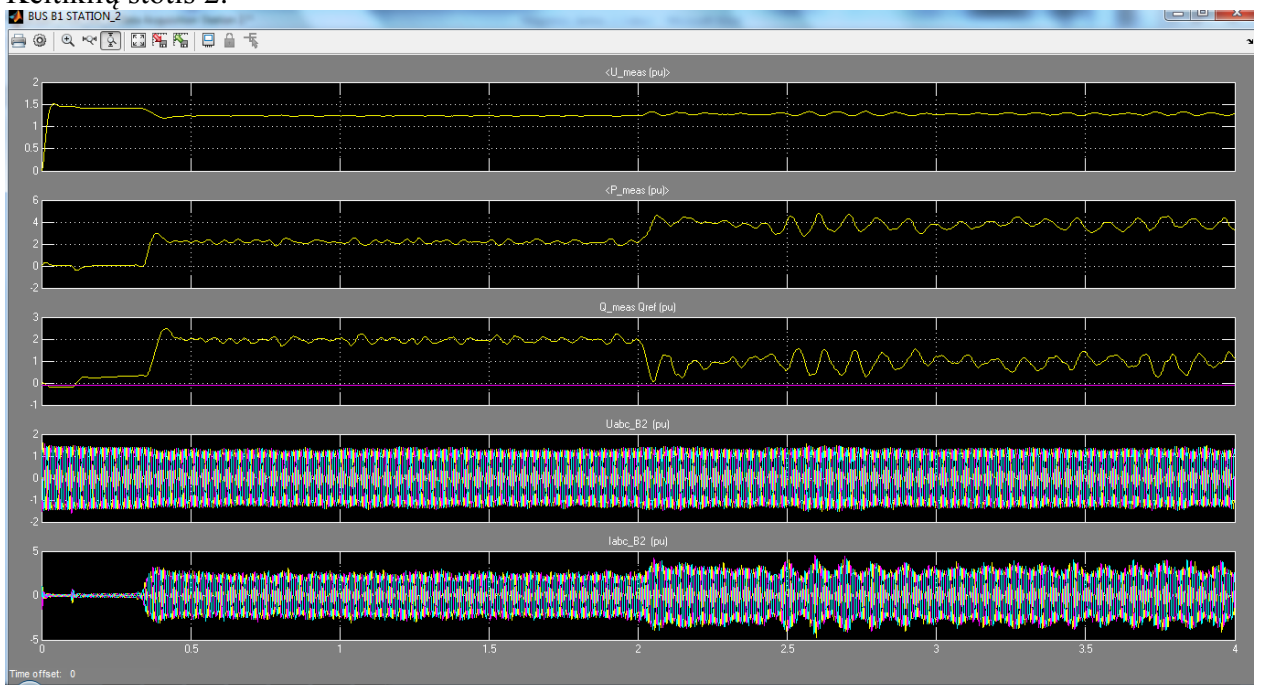
**4.12 pav.** Sinchroninis generatorius su papildoma prijungta apkrova

Papildoma apkrova išbalansuoja sistemą, generatorius sinchronizmo nepraranda.



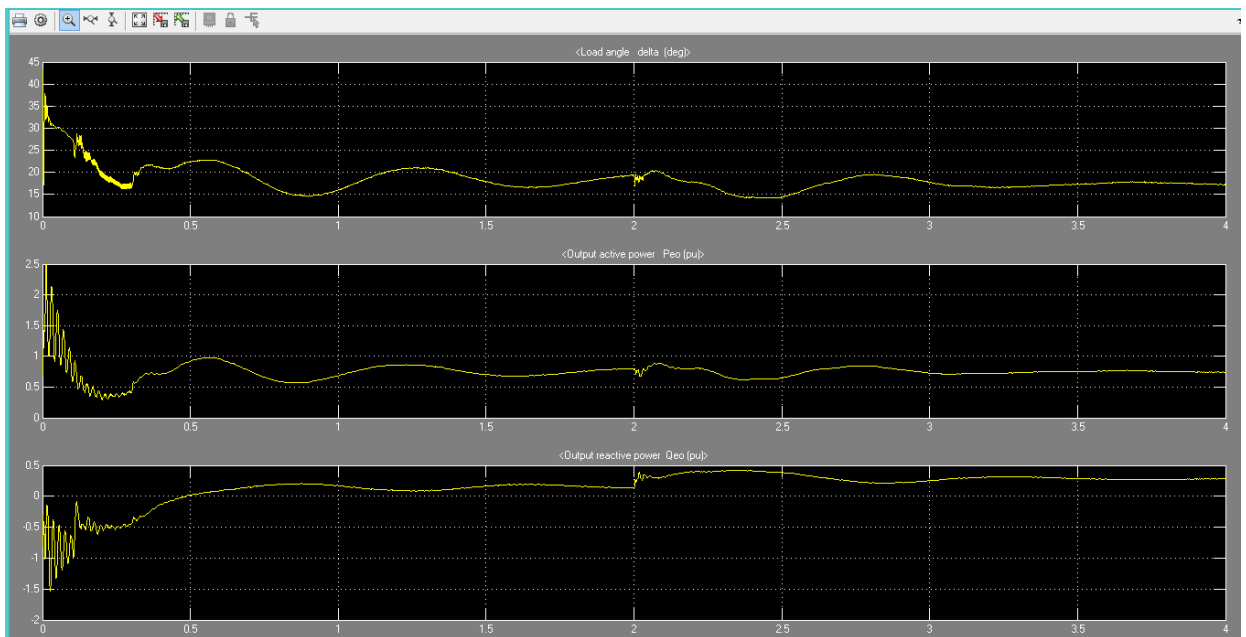
4.13 pav. Nuolatinio srovės intarpo keitiklio nr.1 parametrai prijungus prie tinklo papildomą apkrovą

### Keitiklių stotis 2:



4.14 pav. Nuolatinio srovės intarpo keitiklio nr.2 parametrai prijungus prie tinklo papildomą apkrovą

4. Atjungiami 50 km linija  $t=2s$ :



4.15 pav. Sinchroninio generatoriaus parametrai atjungus perdavimo liniją be nuolatinio srovės intarpo



## 5. IŠVADOS

1. Esant trifaziam trumpajam jungimui Nustatyta, kad perdavimo tinkle be nuolatinės srovės intarpo esant trifaziam trumpam jungimui 0,2 s trukmės, generatorius įtampos kampas  $\delta$  yra 19,5. Sistema pereina į stabilią padėtį per 2 s. Generatorius neišeina iš sinchronizmo.
2. Prijungus nuolatinį srovės intarpą ir esant trifaziam trumpam jungimui įtampos kampas  $\delta = 17,8^\circ$ . Sistema pereina į stabilią padėtį per  $\sim 1$  s. Generatorius neišeina iš sinchronizmo.
3. Prijungus papildomą apkrovą laiko momentu  $t=2$  s be nuolatinės srovės intarpo veikiantis sinchroninis generatoriaus švytavimai nuslopsta per 4 s po trikdžio. Įtampos kampas pasikeičia iš  $19,5^\circ$  į  $16,5^\circ$ . Generatoriaus rotoriaus greitis sumažėja trikdžio metu 3%.
4. Prijungus papildomą apkrovą laiko momentu  $t=2$  s ir prijungus nuolatinį srovės intarpą generatoriaus švytavimai nuslopsta po 1,5 s. Įtampos kampas pasikeičia iš  $19,5^\circ$  į  $9^\circ$ . Generatoriaus rotoriaus greitis trikdžio metu sumažėja 8%.. Keitiklių stotys per 1 s. Sugrįžta į stabilų reaktyvios ir aktyvios galios užduotą palaikymą.
5. Atjungus 50 km liniją  $t=2$ s nustatyta, kad generatoriaus rotoriaus greitis padidėja 8%. Generatoriaus galios kampas pakinta iš  $19,5^\circ$  į  $15^\circ$  dėl apkrovos sumažėjimo. Nustatyta, kad sistema tampa stabili po 4 s.
6. Atjungus 50 km liniją  $t=2$ s prijungus nuolatinį srovės intarpą galios kampas pakinta iš  $19,5^\circ$  į  $13,2^\circ$ . Sistema tampa stabili po 2,3 s.
7. Atlikus tyrimą matyti, kad kai turbinos perduodama galia sinchroniniame generatoriuje palaikoma pastovi ir esant trikdžiui, kinta žadinimo įtampa sinchroniniame generatoriuje, generatoriaus greitis sumažėja. Kai rotoriaus greitis mažėja įtampos kampas  $\delta$  taip pat mažėja, dėl kurio generatoriaus išduodama galia taip pat sumažėja. Įtampos stabilumą ir reaktyvios galios palaikymą užtikrina nuolatinės srovės intarpas, kurio įtaką elektros tinklui yra kaip sinchroninio generatoriaus tik be inercijos, kuris užtikrina reaktyvios ir aktyvios galios tiekimo stabilumą sistemai.

## 6. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Gečys S. Elektromechanika. Mokomoji knyga. Kaunas, KTU leidykla „Technologija“, 2011. 104 p.
2. W. J. Bonwick and V. H. Jones, “Rectifier-loaded synchronous generator with damper windings,” *Proceedings IEE*, Vol. 120, No. 6, June 1973, pp. 659-666
3. R. L. Ames, “A.C. Generators: Design and Applications,” Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England, 1990
4. P. Kundur. “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994
5. Louis N. Hannett, James W. Feltes, B. Fardanesh, “Field Test to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters”, *IEEE Transaction on Power System*. Vol. 9 .No.4, pp. 684-688 November 1994.
6. D. G. Ramey and J. W. Skooglund, "Detailed Hydro governor Representation for System Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-89, No. 1, pp.106-112, January 1970.
7. M. P. Bahrman, „HVDC transmission overview," *IEEE*, pp. 17, 2008.
8. R. Rudervall, J. Charpentier, and R. Sharma, \High voltage direct current (HVDC) transmission systems technology review paper,"
9. R. Rudervall, J. P. Charpentier, and R. Sharma, “High voltage direct current (HVDC) transmission systems technology review paper,” in *Energy Week 2000*, Washington, D.C, USA, March 2000.
10. T. Larsson, A. Edris, D. Kidd, and F. Aboytes, “Eagle pass back-to-back tie: a dual purpose application of voltage source converter technology,” in *Proc. of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, July 2001, pp. 1686 – 1691.
11. J. Arrillaga, *High Voltage Direct Current Transmission*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
12. R. Wu, S. Dewan, and G. Slemon, „A PWM AC to DC converter with fixed switching frequency," *IEEE*, 1988.
13. A. Lindberg, “PWM and control of two and three level high power voltage source converters,” Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Licentiate Thesis, 1995.
14. B. Andersen, L. Xu, P. Horton, and P. Cartwright, “Topologies for VSC transmission,” *Power Engineering Journal*“, vol. 16, no. 3, pp. 142–150, June 2002.
15. A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage Source Converters in Power Systems*. John Wiley & Sons, March 2010. ISBN: 978-0-470-52156-4.

16. Stefan.G.Johansson, Gunnar Asplund, Erik Hasson, Roberto Rudervall, "Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems," GIGRE Session 2004, Paris France, 2004.
17. Z.Huang, B.T.Ooi, L.A.Dessaint, F.D.galiana, "Exploiting voltage support of voltage-source HVDC," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution (UK), vol.150, no. 2. pp. 252-256, 2003.
18. Zheng Guibin, Xu Zheng, Shao Wei, "Research on the control and simulation of HVDC-VSC,," in Proc of International Conference on Power System, WuHhan (China), pp.371 - 375,2001.
19. C. Du, A. Sanino, and M. Bollen, \Analysis of the control algorithms of voltage source converter HVDC," Power Tech, IEEE Russia, pp. 17, 2005.
20. M. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F.Blaabjerg, Control in Power Electronics - Selected Problems. Academic Pres, 2002.
21. R. Song, C. Zheng, R. Li, and X. Zhou, „VSCs based HVDC and its control strategy," IEEE/PES Transmission and Distribution, pp. 16, 2005.