



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## STANDARDSE NORDIC MUDELI KOOSTAMINE JA ANALÜÜS PSCAD TARKVARAS

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF STANDARD NORDIC CALCULATION MODEL  
IN PSCAD

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Artjom Jurtsenko

Üliõpilaskood: AAVM163642

Juhendaja: Jako Kilter, professor  
Tanel Sarnet, teadur

Tallinn, 2020

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” detsember 2020

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” detsember 2020

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Artjom Jurtsenko

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Standardse Nordic mudeli koostamine ja analüüs PSCAD tarkvaras.

*Kuupäev:* 21.12.2020

88 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* professor Jako Kilter, teadur Tanel Sarnet

*Sisu kirjeldus:* Käesoleva töö eesmärgiks on standardse Nordic mudeli koostamine PSCAD tarkvaras. Töö alguses lühidalt on vaadeldud elektrisüsteemide teoreetilised modelleerimisalused. Järgnevalt töös on kirjeldatud mudeli modelleerimise ning käivitamise protsessid PSCAD tarkvaras. Nordic mudeli andmed olid võetud „PES-TR19“ raportist ning osa andmetest tuli kohandada PSCAD tarkvara jaoks. Edasi töös on käsitletud testid, mille abil on võimalik võrrelda koostatud mudeli simulatsioonide tulemused „PES-TR19“ raportist leitavate tulemustega. Testideks kasutatakse erinevate häiringute simulatsioonid. Töö viimases osas PSCAD mudeli simulatsioonide tulemused on võrreldud „PES-TR19“ dokumendis esitatud tulemustega, samuti mudelile on antud hinnang ning seejärel on tehtud kogu töö kokkuvõte.

Käesoleva töö käigus Nordic mudeli koostamise jaoks oli kasutatud PSCAD tarkvara tudengi versioon, kus oli piiratud elektriühenduste arv. Kuna kogu mudel ületas tarkvara tudengi versiooni piire, osutus vajalikuks eemaldada mudelist tarbijate trafod koos süsteemidega, mis reguleerisid ja vajadusel taastasid tarbijate lattide pingeid. Tehtud muudatuste tõttu mudeli simulatsioonide tulemused natuke erinesid „PES-TR19“ raportis esitatud tulemustest. „PES-TR19“ raportis esitatud tulemustes on selgesti näha, et tarbijate lattide pingete taastumine oluliselt kiirendab süsteemi stabiilsuse kaotust, seejuures PSCAD mudelis mõnikord sama häiringu puhul süsteem ei kaota stabiilsust üldse. PSCAD tarkvaras koostatud mudel on kasutuskõlblik, kuid võrreldes lähteandmetega mudeli stabiilsusvaru on suurem ning tarbijate lattide pinged mudelis võivad langeda madalamate vastuvõetamatute väärtusteni. Kasutades PSCAD tarkvara täisversiooni, mudelisse on võimalik lisada tarbijate trafod koos tarbijate pingete reguleerimissüsteemidega ning mudeli simulatsioonide tulemused siis ei pea palju erineda lähteandmetes kirjeldatud tulemustest.

*Märksõnad:* PSCAD, Nordic32, pingestabiilsus, PES-TR19, elektrisüsteem, simulatsioon

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Artjom Jurtsenko	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Development and analysis of standard Nordic calculation model in PSCAD.	
<i>Date:</i> 21.12.2020	88 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> professor Jako Kilter, researcher Tanel Sarnet	
<p><i>Abstract:</i> This work aims to develop a standard Nordic calculation model in PSCAD software. At the beginning of the work, the theoretical modeling bases of electrical systems are briefly considered. Next, the processes of modeling and initializing the Nordic model in PSCAD software are described. The data for the Nordic model was taken from the “PES-TR19” report. During the modeling process, some of the data had to be adapted for PSCAD software. For analyzing the PSCAD model different disturbances are simulated which is also described in the main section of this work. The last part of the current work consists of comparisons of PSCAD model simulation responses with those described in the „PES-TR19“ report. Evaluation of the model and conclusion also are found at the end of the work.</p> <p>For the development of the Nordic model educational edition of the PSCAD software was used. PSCAD educational edition has electrical nodes limitation. The full Nordic model exceeds PSCAD educational edition limitations and it was necessary to remove distribution transformers from the model, along with systems for automatic control of load voltages. Such model changes result in simulation responses different from those described in the „PES-TR19“ report. The results of the „PES-TR19“ report clearly show that restoring of load voltages by control systems significantly contributes to the occurrence and development of voltage instability. In the PSCAD model, at the same time, without restoring load voltages, in some cases voltage instability does not occur at all. The developed PSCAD model is working, but the stability margin of the model is higher than is described in the “PES-TR19” document, and the load voltages in the model may fall to low unacceptable values. Further, if the PSCAD software professional edition is used, it is recommendable to add distribution voltage transformers to the model together with load voltage control systems. In that case, system responses to the disturbances should be similar to those described in the “PES-TR19” report.</p>	
<i>Keywords:</i> PSCAD, Nordic32, voltage stability, PES-TR19, power system, dynamic simulation	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Standardse Nordic mudeli koostamine ja analüüs PSCAD tarkvaras</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Development and analysis of standard Nordic calculation model in PSCAD</b>
Üliõpilane:	<b>Artjom Jurtsenko, AAVM163642</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>magistritöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Professor Jako Kilter, teadur Tanel Sarnet</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>30.06.2021</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>21.12.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Elektrisüsteemis teostatakse mitmesuguseid arvutusi, sh pingestabiilsuse, nurgastabiilsuse, koormusvoogude jagunemine, jm, kasutades erinevaid matemaatilisi mudeleid. Paljudel juhtudel kasutatakse välja töötatavate algoritmide võrdlemiseks standardseid, elektroenergeetikas tunnustatud, mudeleid. Käesolevas lõputöös on vaatluse all standardne Nordic mudel. Selle mudeli lähteandmed, koos RMS mudelitega on avalikus kirjanduses saadaval, kuid üldjuhul puudub EMT mudelitega võrdlus ja kasutatav tarkvara mudel. Käesoleva teema raamistikus ei ole varem Tallinna Tehnikaülikoolis lõputöid koostatud.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on standardse Nordic mudeli koostamine PSCAD tarkvaras.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kirjeldada ja mõista Nordic mudeli olemust ja kasutatavust elektrisüsteemi arvutustes.

Mudeli koostamise põhimõtted PSCAD tarkvaras ja mudeli lähteandmete kogumine.

Mudeli koostmine ja talitluse analüüs.

Mudeli võrdlus kirjanduses saadud tulemustega.

#### **4. Lähteandmed**

Lähteandmetena kasutatakse IEEE PES TR-19 dokumenti. Samuti tutvutakse ja kasutatakse selles aruandes viidatud dokumente. PSCAD mudeli koostmise põhimõtete, võrdluste ja analüüside põhimõtete koostamisega aitavad juhendajad.

#### **5. Uurimismeetodid**

Töö teostamisel kasutatakse elektrisüsteemi modelleerimist PSCAD tarkvaras. Võrreldakse saadud tulemusi kirjanduses saadud tulemustega ja hinnatakse mudeli kasutamise võimalusi.

#### **6. Graafiline osa**

Osaliselt on graafiline osa põhitekstis. Võrdlused mudelite ja kirjanduses saadaval olevate graafikute vahel lähevad eeldatavalt lisadena töö lõppu.

#### **7. Töö struktuur**

Lõputöö struktuur on järgmine:

##### Sissejuhatus

- Elektrisüsteem ja selle modelleerimine
  - elektrisüsteemi modelleerimine ja selle vajalikkus
  - elektrisüsteemide komponentide modelleerimine võrguarvutustes
  - elektrisüsteemi modelleerimise arvutustarkvarad ja nende võimalused
- Standardne Nordic mudel
  - Mudeli sisu
  - Mudeli komponendid
  - Mudeldamine
  - Mudeli testimised ja kontrollarvutused
- Standardne Nordic mudel ning selle võrdlus teiste tarkvarade mudelite ja arvutustulemustega
  - Teiste modelleerimisvõimaluste alused
  - Teiste modelleerimisvõimaluste ja PSCAD mudeldamise võrdlus

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Töö teostamisel kasutatakse raamatuid, teadusartikleid ja aruandeid. Peamised viited on:

- Meldorf, M., Kilter, J. Elektrisüsteemi stabiilsus. TTÜ kirjastus, 2012.
- IEEE PES TR-19. Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment. IEEE Power & Energy Society. 2015.
- Kundur, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994.
- IEEE Standard 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

## **9. Lõputöö konsultandid**

Ei plaanita kasutada.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Töö etapid ja kuupäevad on järgmised:

kirjanduse läbitöötamine ja lähteandmete kogumine: september 2020

teoreetilise osa kirjutamine: september-oktoober 2020

modelleerimise ja analüüsi teostamine: oktoober 2020

modelleerimise osa kirjutamine: oktoober-november 2020

võrdluste ja analüüside kirjutamine: oktoober-november 2020

töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine: 16.11.2020

paranduste sisseviimine: november-detsember 2020

juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine 07.12.2020

töö lõplik versioon valmis. 21.12.2020

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	11
SISSEJUHATUS .....	12
1. ELEKTRISÜSTEEM JA SELLE MODELLEERIMINE. ....	14
1.1 Elektrisüsteemi modellerimine ja selle vajalikus .....	14
1.2 Elektrisüsteemide komponentide modelleerimine võrguarvutuses. ....	16
1.2.1 Sünkroonmasinate modelleerimine.....	16
1.2.2 Sünkroonmasina ergutussüsteem.....	24
1.2.3 Võnkesummuti (PSS) .....	25
1.2.4 Automaatne pingereguleerimine (AVR).....	25
1.3 Elektrisüsteemi modelleerimise arvutustarkvarad ja nende võimalused.....	26
2. STANDARDNE NORDIC MUDEL .....	28
2.1 Mudeli sisu .....	28
2.2 Mudeli komponendid.....	29
2.2.1 Mudeli komponentide koosseis ja süsteemi skeem .....	29
2.2.2 Trafod .....	32
2.2.3 Sünkroonmasinate mudelite andmed.....	33
2.2.4 Erguti, automaatse pingeregulaatori (AVR) ning võnkesummuti (PSS) mudeli andmed	33
2.2.5 Üleergutuspiiraja (OEL) mudeli andmed .....	34
2.2.6 Turbiinide mudeli andmed.....	35
2.2.7 Kiirusregulaatori mudeli andmed.....	36
2.2.8 Koormuste ning koormus- astmelülite (LTC- load tap changer) andmed.....	36
2.2.9 Nordic mudeli A ja B talitluspunktide andmed. ....	37



2.3 Mudeldamine.....	39
2.3.1 Trafode mudeldamine.....	39
2.3.2 Tarbimiskoormuste mudeldamine.....	40
2.3.3 Kompenseerimisseadmete mudeldamine .....	40
2.3.4 Ülekandeliinide mudeldamine .....	41
2.3.5 Generaatorite mudeldamine.....	42
2.3.6 Mudeli käivitamine.....	46
2.3.7 Tarbijate trafode mudeldamine .....	46
2.4 Mudeli testimised ja kontrollarvutused.....	48
2.4.1 Mudeli esmane käivitamine ning kontrollmõõtmised. ....	48
2.4.2 Talitluspunkt A.....	50
2.4.3 Talitluspunkt B.....	52
2.4.4 Ennetav pingestabiilsuse analüüs talitluspunktid B .....	54
2.4.5 Elektrisüsteemi maksimaalse koormustaluvuse leidmine .....	55
2.4.6 Parandav häiringujärgne kontroll.....	55
3. STANDARDNE NORDIC MUDEL NING SELLE VÕRDLUS TEISTE TARKVARADE MUDELITE NING ARVUTUSTULEMUSTEGA. ....	57
3.1 Üldist .....	57
3.2 ANATEM tarkvaras koostatud mudeli eripära .....	57
3.3 WpSTAB tarkvaras koostatud mudeli eripära.....	58
3.4 PSCAD tarkvara mudeli ning „PES-TR19“ dokumendis esitatud arvutustulemuste võrdlus..	59
3.4.1 Lühise simulatsioon liinil 4032- 4044 mudeli talitluspunktis A.....	60
3.4.2 Süsteemi N-1 kriteeriumile vastavus mudeli talitluspunktis B.....	70
3.4.3 Ennetav pingestabiilsuse analüüs mudeli talitluspunktis B .....	72
3.5 PSCAD mudeli analüüs ning hinnang. ....	76
KOKKUVÕTE .....	78

LISAD .....	80
Lisa 1. Nordic32 mudeli lähteandmed .....	80
KASUTATUD KIRJANDUS.....	87

## EESSÕNA

Käesoleva magistr töö teema pakkus välja Elektroenergeetika ja mehaanika instituudi professor ning elektroenergeetika programmijuht Jako Kilter. Koostatud elektrisüsteemi mudeli testide läbiviimiseks on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli poolt omandatud PSCAD tarkvara tudengilitsents. Töö koostamiseks vajalikud andmed on võetud IEEE PES operatiivgruppi aruandest „Testsüsteemid Pingestabiilsuse Analüüsimiseks ning Turvalisuse Hindamiseks“ (Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment). PSCAD tarkvaras elektrisüsteemi mudeli koostamise ning käivitamisega abistas teadur Tanel Sarnet. Materjalide valimise ning üldiselt töö koostamisega andis abi professor Jako Kilter. Autor tänab kõiki, kes töö koostamisele kaasa aitasid ning kaasa elasid!

## SISSEJUHATUS

Elektrisüsteemi stabiilsus on elektrisüsteemi võime jätkata normaalset tööd tasakaaluasendis vastuvõetavate parameetritega pärast talituse häiringuid. Eksisteerivad nii väikesed kui suured talitlushäiringud. Väikese häiringuna arvatakse näiteks koormuse muutmine, mis juhtub elektrisüsteemides pidevalt. Väikeste häiringutega seotakse staatiline stabiilsus. Suur häiring on näiteks lühis või suure generaatori väljalülitumine. Suurte häiringutega seotakse dünaamiline stabiilsus. Kui pärast häiringut suur elektrisüsteem ei suuda taastada normaalset tööd ja kaotab stabiilsust, see võib viia tõsiste tagajärgedeni. Elektrisüsteemi stabiilsuse kaotamise üks tõsisematest tagajärgedest on süsteemi kustumine- täieliku süsteemi kustumine ja elektrienergia ülekandmise tarbijatele katkestus laias territooriumis nt. terves riigis. Nii ulatuslik avarii toob kaasa suurt majanduslikku kahju, aga süsteemi normaalse töö taastamine on pingeline ja väljakutsuv protsess. Märkimisväärset majanduslikku kahju ja seadmete riknemisi põhjustavad ka mitte nii tõsisemad stabiilsuse kaotamise tagajärjed, nagu näiteks vastuvõetamatu elektrienergia parameetrite esinemine, elektritoide katkestamine.

Elektrisüsteemides võib eristada kolm stabiilsuse liigi: nurgastabiilsus, pingestabiilsus ja sageduse stabiilsus. Nurgastabiilsuse all mõistetakse süsteemi generaatorite sünkroonne töö. Teiste sõnadega süsteemi kõik generaatorid peavad pöörlema sama kiirusega. Pingestabiilsuse all mõistetakse süsteemi kõikide punktide pinge hoidmine normaalse talitluse normide piires. Pinge mittestabiilsus võib ilmneda pinge suures langemises, kasvamises või võnkumises. Pingele mõjutab reaktiivvõimsust tarbivad ja tootvad seadmed. Sageduse stabiilsus on süsteemi generaatorite pöörlemise kiiruse hoidmine normide piires. Sageduse mittestabiilsus, ehk sageduse ülemäärane kasv või langus esineb, kui on olemas suur ebabalans genereerimise ja tarbimise vahel. Käesolevas töös kirjeldatakse Nordic testsüsteemi modelleerimine PSCAD tarkvaraga, simulatsiooni teostamine ja tulemuste hinnang. Esiolgu Nordic süsteemi mudel oli koostatud, et illustreerida pinge kollaps, mis juhtus Rootsis 1983 aastal ja praegu laialt kasutatakse pinge stabiilsusega seotud probleemide uurimiseks, uute väljatöötavate lahenduste testimiseks ning simulatsiooni tarkvara töö hindamiseks [4]. Nurgastabiilsus ja sageduse stabiilsus antud töös ei käsitleta.

PSCAD tarkvaras Nordic mudeli koostamiseks kasutatakse üksikkomponentide parameetrid, mis on toodud tehnilises raportis IEEE PES-TR19 "Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment" ja on vajalikud dünaamilise simulatsiooni teostamiseks. PES-TR19 tehniline raport on koostatud 2015. aastal ja sisaldab kahe pinge stabiilsuse testmudeli parameetrid ning simulatsiooni andmed, mis on vajalikud mudelite rakendamiseks erinevates elektrisüsteemide dünaamilise modelleerimise tarkvarades. Kajastatud PES-TR19 dokumendis mudelite nimetused on "The Nordic

Test System" ja "The Reliability and Voltage Stability Test System". Antud töös käsitletakse ainult "The Nordic Test System" (edaspidi "Nordic") ja PSCAD tarkvaraga saadud simulatsiooni andmed võrreldakse PES-TR19 tehnilises raportis toodud simulatsiooni etalonandmetega.

PES-TR19 tehnilise raporti loomise peamine põhjus ja motivatsioon oli, et suur hulk publikatsioone pingestabiilsuse uurimise kohta kasutasid elektrisüsteemide mudeleid, mille talitlemine ei ole tegelikult piiratud ainult pingestabiilsusega ja niisugustes süsteemides enne pingestabiilsuse kaotamist erinevates sõlmedes ilmneksid kriitiliselt madalad pinged, mille puhul tegelikult süsteemi normaalne töö oleks piiratud teiste fenomenide ja/või kontrollsüsteemidega (näiteks kaitsmete rakendamisega). Nii, et võtta arvesse antud fenomenid ja saada usaldusväärsed simulatsioonide tulemused, tuleb kasutada dünaamilisi mudeleid ja dünaamiliste simulatsioonide jaoks sobiva tarkvara traditsiooniliste staatiliste mudelite asemel. PES-TR19 dokumendis esitatud kahe standartselt simulatsioonide jaoks kasutatud süsteemi dünaamiliste mudelite andmed. Käesolevas töös on käsitletud ainult üks PES-TR19 dokumendis esitatud mudelitest- Nordic mudel.

Dünaamilised mudelite eeliseks on see, et niisugustes mudelites on võimalik arvestada kontrollsüsteemide kiirreageerimisega pärast suuri häiringuid (näiteks sekundaarse pingestabiilsuse kontrolli ja/või automaatse pöikkompanseerimise sisselülitamisega). Dünaamiliste mudelite kasutamine on vältimatu samuti, kui projekteeritakse niisugused kontrollsüsteemid pingestabiilsuse säilitamise jaoks nagu näiteks trafode koormus-astmelülite blokeering, koormuse äralõikamine ning koormusvähenduskaitsed.

Käesolev töö struktuuriliselt on jagatud kolmeks osaks. Töö esimeses osas kirjeldatakse elektrisüsteemide ja nende põhikomponentide modelleerimise teoreetilised alused, elektrisüsteemide modelleerimise vajalikus ning on toodud enamtuntud tarkvara, mis on kasutatud modelleerimise jaoks. Teises osas toodetakse modelleeritava Nordic mudeli nii üldised, kui ka üksikkomponentide andmed, kirjeldatakse mudeli koostamise ning käivitamise protsess PSCAD tarkvaras ning esitatakse simulatsiooni tulemused. Töö viimases kolmandas osas võrreldakse PSCAD tarkvaras koostatud mudeli simulatsioonide tulemused teiste tarkvarade mudelite simulatsioonide tulemustega ning toodetakse koostatud mudeli analüüs. Töö lõpus antakse kokkuvõtte ja kasutatud informatsiooni allikad.

# 1. ELEKTRISÜSTEEM JA SELLE MODELLEERIMINE.

## 1.1 Elektrisüsteemi modellerimine ja selle vajalikus

Elektrisüsteemi stabiilsus on keeruline ja kompleksne probleem. Esialgselt stabiilsuse probleem tõsiselt oli käsitletud 1920. aastal [16]. 1924 aastal esialgselt oli dokumenteeritud miniatuurse elektrisüsteemi mudeli stabiilsuse testi tulemused [17].

Vastavalt Prabha Kunduri raamatus „Power System Stability and Control“ [1] tootud elektrisüsteemide stabiilsuse probleemi ajaloolisele ülevaatele, esialgselt elektrisüsteemid olid väga lihtsad ja koosnesid peamiselt ühest hüdrogeneraatorist, mis toitis linna suuri koormussõlmi pikka ülekandmise liini kaudu. Mittestabiilsus niisugustes lihtsates süsteemides tekkis mõnikord süsteemi normaalse opereerimise ajal, kuid peamiselt mittestabiilsus tekkis pärast lühiseid ja teisi häiringuid. Mittestabiilsuse tekkimise peamiseks põhjuseks oli mitterahuldav masinate momentide sünkroniseerimine, kuid samuti oluliseks probleemiks oli aeglane häiringute kõrvaldamine. Stabiilsuse analüüsi meetodid ja mudelid esimeste suurte elektrisüsteemide jaoks olid üsna lihtsad, kuna tol ajal kasutasid arvutuste tegemiseks peamiselt arvutuslükateid ja mehaanilisi kalkulaatoreid. Sellel ajal olid välja arenenud niisugused graafilised tehnikad nagu võrdpindade tingimus (equal- area criterion) ja vektordiagrammid, mis oli piisavalt kahe masinaga süsteemide analüüsimiseks.

Hiljem sai selgeks, et ökonoomiliselt on kasulikult teha sõltumatu süsteemide vahel ühendused, mis muutis stabiilsuse probleemi veidi keerulisemaks. Süsteemide stabiilsuse analüüsi jaoks 1930 aastal esimene kord hakati kasutama võrgu analüsaatori [1]. Võrgu analüsaator oli võrgu miniatuurne mudel mille koostisosadeks olid häälestatavad takistid (resistorid), kondensaatorid ja reaktorid elektriliinide modelleerimiseks, pingevaldkad häälestatavate nurkade ja pinge magnituudidega generaatorite modelleerimiseks ning mõõteriistad pingete, voolude ja võimsuste mõõtmiseks mudeli erinevates punktides. Võrgu analüsaator võimaldas teha võimsuste jagunemise analüüsi, kuid võnkumis- või liikumisvõrrandit oli vaja arvutada samm- sammult käsitsi kasutades integreerimist.

1920 ja 1930 aastates sünkroonmasina teooriat arengut peaaegu ei olnud. Generaatorid olid käsitletud nagu pingevaldkad fikseeritud reaktiivtakistusega ja koormused olid käsitletud nagu fikseeritud näivtakistused. Stabiilsuse täiustus oli seotud kiirema häiringute eemaldamise ning pideva pinge reguleerimisega. 1920 aastatel ergutusüsteem kiire reageerimisega esialgu oli käsitletud nagu täiendav abinõu opereerimise limiitide määramiseks ning normaalse opereerimise jaoks kasutatud ei olnud. Hiljem kiire reguleerimisega ergutusüsteem leidis laiemat kasutust

siirdeprotsesside esimeste võnkumiste piiramise ning normaalolukorras ülekantavate võimsuste limiitide suurendamise jaoks. Selleks ajaks monotoonne staatiline mittestabiilsus oli peaaegu välistatud ning peamiseks probleemiks sai võnkuv dünaamiline ebastabiilsus.

1950 aastate alguses esimene kord oli kasutatud sünkroonsete masinate, ergutussüsteemide ning kiiruseregulaatorite modelleerimiseks ja analüüsimiseks analoogarvutid. Simulatsioonid analoogarvutitega aga ei sobinud mitu sünkroonmasinatega süsteemide analüüsimiseks. Samal ajal oli digitaalsete arvutite kiire kasv ning 1956 aastal oli loodud esimene digitaalne programm elektrisüsteemide stabiilsuse uurimiseks. Digitaalsete arvutite programmide abil oli võimalik juba teha simulatsioone suuremate süsteemide jaoks ning modelleerida süsteemide eri elementide dünaamilisi karakteristikuid.

9. Novembril 1965. aastal Ameerika ühendriikide kirde osas toimus suur avariiline elektrikatkestus, mis sai nime „The Northeast Blackout“. Elektrikatkestuse tagajärjel ilma elektrita on jäänud umbes 30 miljonit inimest. Avarii puudutas osaliselt Kanada ning osaliselt Ameerika Ühendriikide osariike nagu Connecticut, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Rhode Island, Pennsylvania, ja Vermon. Antud sündmus juhtis ühiskonna ja regulatiivsete organisatsioonide tähelepanu elektrisüsteemide stabiilsuse probleemile ning ilmutas stabiilsuse säilitamise olulisuse. 1960. aastate alates peamiselt kogu tähelepanu oli kontsentreeritud dünaamilisele stabiilsusele. Võrgud projekteeriti ning ehitati lähtudes dünaamilise stabiilsuse kriteeriumitest. Sellel põhjusel peamine tarkvara võrkude modelleerimiseks ja simulatsiooniks oli dünaamilise stabiilsuse tarkvara. Olid arendatud võimsad programmid suurte võrkude ja detailsema seadmete modelleerimise jaoks, millele soodustas ka kiire arvutusmeetodite ning digitaalarvutite tehnoloogia areng. Samal ajal võrkude dünaamiline stabiilsus oli oluliselt parandatud ka tänu lühiste kiiremale likvideerimisele, kiire reageerimisega ergutitele, kondensaatorite pikikompenseerimisele ning spetsiaalsete stabiilsuse seadmetele.

Suurenevates võrkudes kasvas võnkuva ebastabiilsuse esinemine. Kiire reageerimisega ergutid tõstsid dünaamilise stabiilsuse, kuid samal ajal halvasti mõjusid väikse signaali stabiilsusele (small-signal stability), mis oli seotud kohalike jaamade negatiivsete summutamistega. See probleem oli lahendatud elektrivõrgu stabilisaatorite abil. Veel üks uus põhjus võnkuva ebastabiilsuse esinemiseks oli erinevate võrkudevaheliste ühenduste arvu suurendamine. Ühendusi arv kasvas, kuid nende läbilaske võimsus oli valdavalt madal. Tekkis olukord, kui mitu suurt masinat olid ühendatud omavahel nõrkade ühenduste kaudu. Antud olukorras tekkisid madala sagedusega võnkumised liinide vahel, mis mõnedes juhtudes olid lahendust nõutavaks probleemiks.

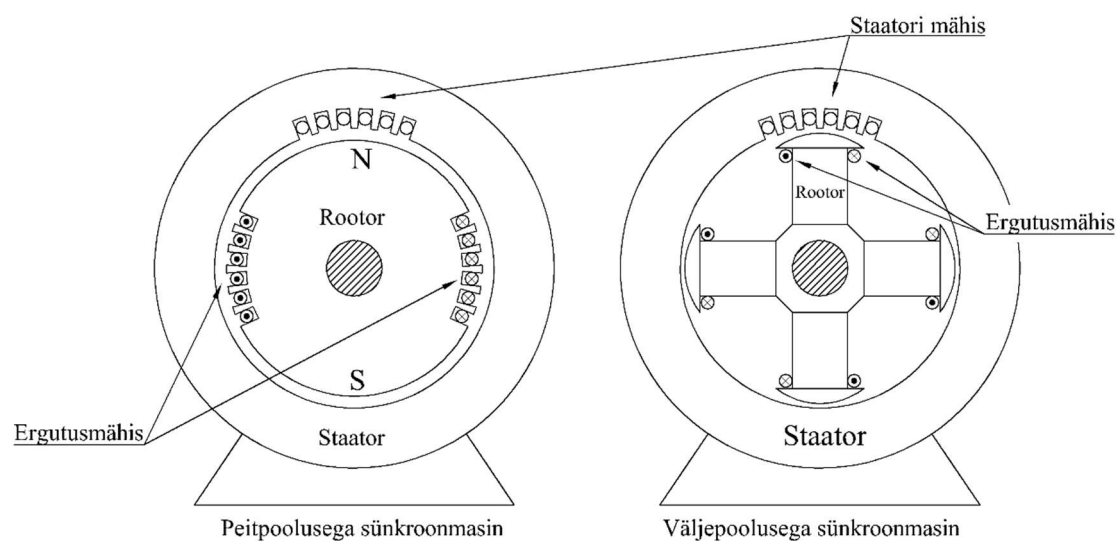
Praegusel ajal arengu trendid põhjustavad uusi liike stabiilsuse probleeme. Rahaliste ja regulatsioonitingimuste pärast rohkem hakati ehitama elektrivõrke vähema varuga ning sellel

põhjusel võrkude opereerimine toimub dünaamilise stabiilsuse piiridele lähemale. Jätakuvalt kasvab ühenduste arv suuremate võrkude vahel ning nende ühenduste jaoks rohkem kasutatakse HVDC alalisvoolu liine ja muid uuemaid tehnoloogiaid. Aina rohkem võrkudes kasutatakse põikkondensaatoreid, mis muutuvad koormuste iseloomu. Tänu kirjeldatud trenditele mittestabiilsuse esinemisvormid muutuvad aina keerulisemaks ja nõuavad stabiilsuse erinevate aspektide hoolikat kaalutlust. Käsitluse alla tulid pinge stabiilsus ja madal- sagedusega piirkonnade vahelised võnkumised. Enne antud probleemid tekkisid enamasti isoleeritud situatsioonides, nüüd aga nad on laialdaselt levinud. Samuti on tunnustatud, et tuleb pöörduda tähelepanu pikaajalisele dünaamilisele reaktsioonile, hoolikale kaitseaparatuuri koordineerimisele ning juhtimissüsteemidele. Viimaste aastate jooksul jätkuvalt tehakse uuringud ja arendus uute stabiilsuse probleemide füüsilisi omadusi parema arusaamise jaoks ning jätkub tarkvarade arendus süsteemide parema analüüsimise ning kavandamise jaoks.

## 1.2 Elektrisüsteemide komponentide modelleerimine võrguarvutuses.

### 1.2.1 Sünkroonmasinate modelleerimine

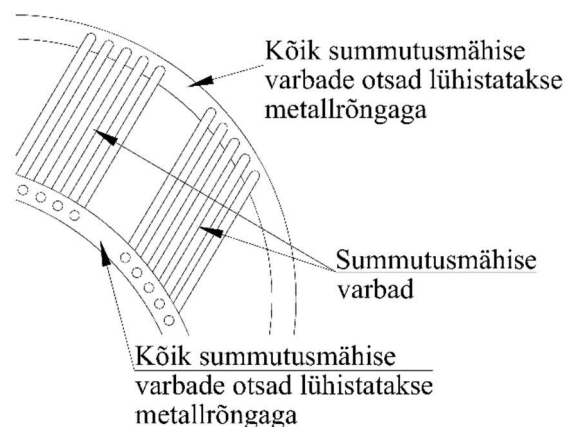
Sümkroonmasinate karakteristikute arusaamine ning täpse dünaamilise mudeli koostamine omab fundamentaalset tähendust elektrisüsteemide stabiilsuse uurimiseks. PES-TR19 dokumendis Nordic süsteemi sümkroonmasinad on esitatud vastavalt standardsele mudelile: kolme rootori mähisega väljepoolusega masin ning nelja rootori mähisega peitpoolustega masin.



Joonis 1.1 Väljepooluse ning peitpoolusega masinate põhimõtteline skeem.



Väljepoolusega ning peitpoolusega rootorid on kaks standardset sünkroonmasina rootori tüübi. Väljepoolusega rootori puhul poolused on selgesti eristatavad ning õhupilu staatori ja rootori vahel on minimaalne pooluse kohal. Peitpoolustega rootori puhul rootor on ümmargune ilma eristatavate poolusteta ja õhupilu rootori ja staatori vahel on ühesugune kogu ulatuses. [10] Väljepoolustega ja peitpoolustega rootorite põhimõtteline skeem on esitatud joonisel 1.1. Tavaliselt väljepoolustega masin kasutatakse juhul kui rootori kiirus on väike (nt. hüdroelektrijaamades) ning on vajalik suur hulk pooluseid, et saavutada nõutava sageduse. Peitpoolustega masin kasutatakse tavaliselt vastupidi, kui rootori kiirus on suur (nt. gaasi- või auruturbiin) ja nii palju pooluseid ei ole vaja. Väljepoolustega sünkroonmasinal tavaliselt on olemas summutusmähised. Summutusmähis on varbad, mis on paigaldatud pooluste otsadel võlliga paralleelselt ning mille otsad on elektriliselt lühistatud sarnaselt asünkroonmasina rootori mähisega (vt. joonis 1.2)

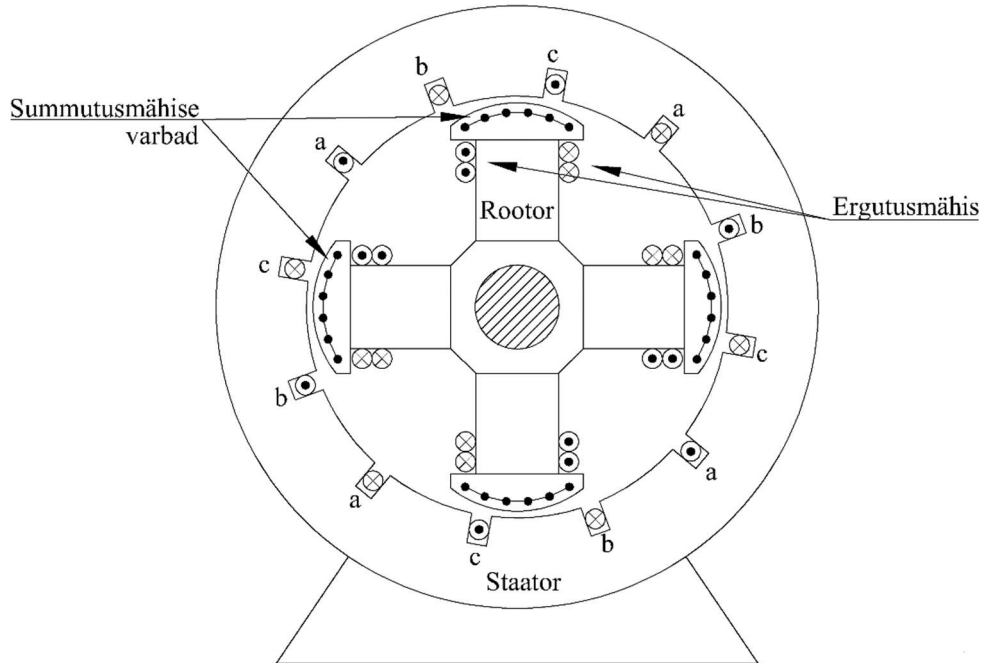


Joonis 1.2 Summutusmähis.

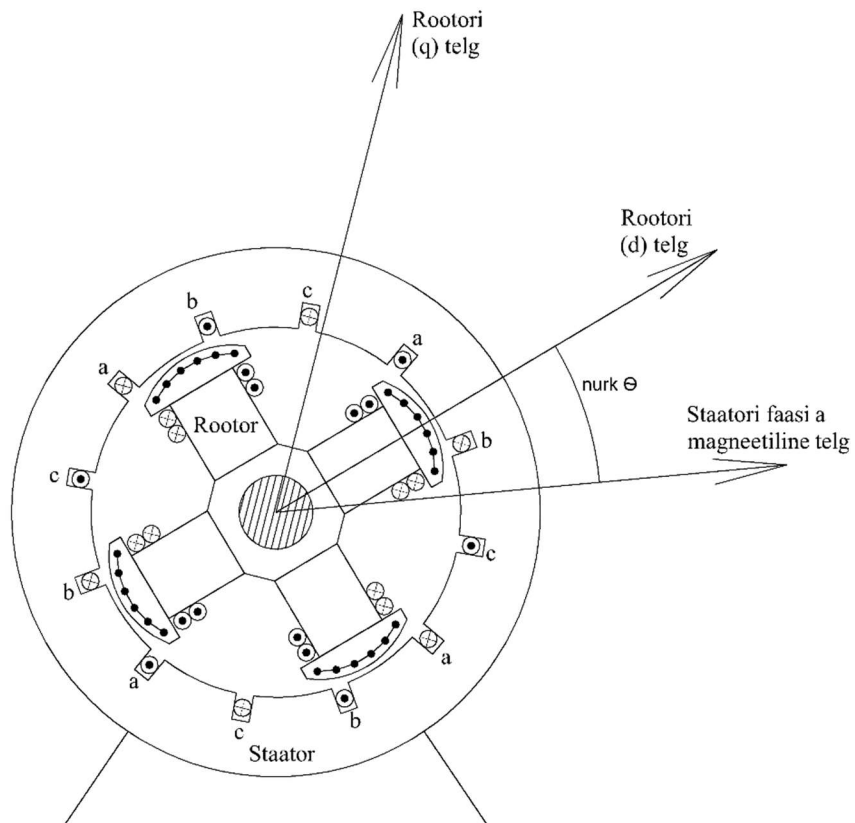
Summutusmähise varbade otsad võivad ka olla lühistatud ainult pooluste juures nagu on näidatud joonisel 1.3. Sünkroonmasina karakteristikute määramiseks standardses masina mudelis kasutatakse kaks telge ( $d$ ) ja ( $q$ ): ( $d$ ) telg läbib rootori põhja pooluse kesktelge ning ( $q$ ) telg on 90 elektrilist kraadi ( $d$ ) teljest eespool nagu näidatud on joonisel 1.4. Rootori positsioon staatori suhtes on määratud nurkaga telje ( $d$ ) ning faasi ( $a$ ) magnetilise telje vahel ja tähistatakse tavaliselt  $\theta$  tähega.

Joonisel 1.5 on kujutatud voolukontuurid, mis üldjuhul kasutatakse sünkroonmasina matemaatilise kirjeldamise ja analüüsi jaoks. Staatori voolukontuurid (joonisel paremal pool) koosnevad koolmest mähisest kus voolab vahelduvvool. Rootori voolukontuurid (joonisel vasakul pool) koosnevad ergutusvoolu mähiste voolukontuuridest ning summutusmähiste voolukontuuridest.

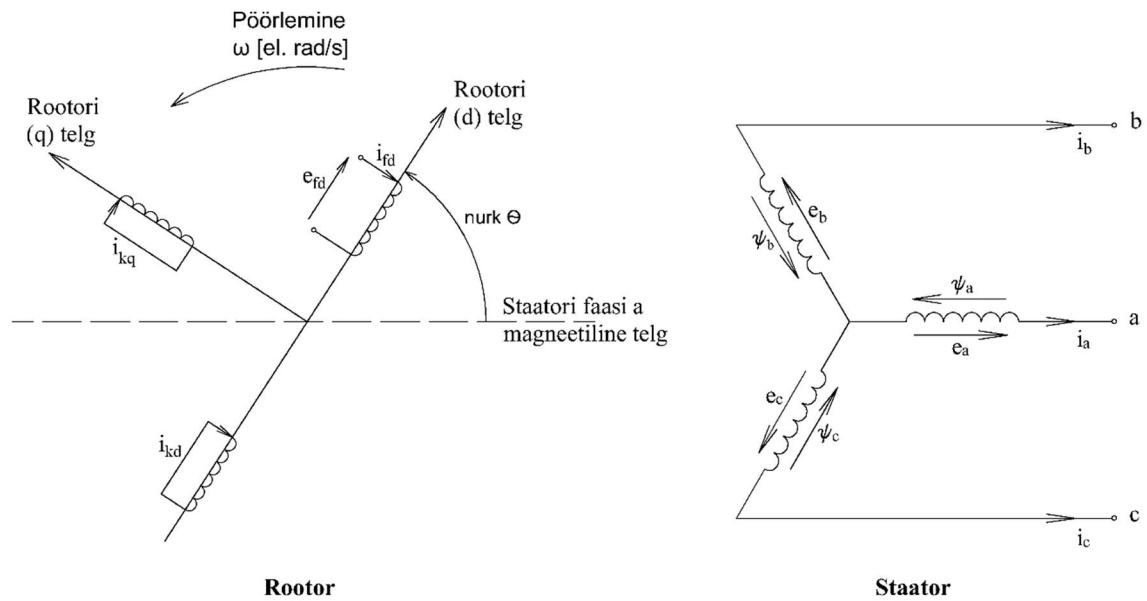
Sünkroonmasina rootori summutusprotsessid on üsna keerulised ja tihti selliste protsesside kirjeldamiseks kasutatakse mitu voolukontuuri. Elektrisüsteemi stabiilsuse uurimiseks tihti on piisavalt maksimaalselt kaks või kolm summutuskontuuri.



Joonis 1.3 Summutusmähise variant, kus varbad on lühistatud ainult pooluste juures.



Joonis 1.4 Sünkroonmasina standardmudeli teljed.



Joonis 1.5 Sünkroonmasina matemaatilise kirjeldamise jaoks kasutatavad voolukontuurid. a, b, c – staatori faaside mähised; fd – ergutusmähis; kd – d-telje summutuskontuur; kq – q-telje summutuskontuur; k=1,2 – kontuuri number;  $\Theta$  – nurk d-telje ning a faasi magnetilise telje vahel, elektriline rad;  $\omega$  – rootori pöörlemiskiirus, elektriline rad/s. [2]

Üldiselt staatori kontuuride võrrandid (põhiseosed) väljendatakse järgmiselt [2]:

$$U_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a I_a = p\psi_a - R_a i_a \quad (1.1)$$

$$U_b = p\psi_b - R_a i_b$$

$$U_c = p\psi_c - R_a i_c$$

Kus:  $U_a$  – pinge kontuuris a, V,

$\psi_a$  – aheldusvoo suurus kontuuris a, Veeber,

$I_a$  – vool kontuuris a, A,

$R_a$  – staatori mähise a resistants, Ohm,

$p$  – operaator  $d/dt$ .

a faasi aheldusvoog igal hetkel väljendatakse järgmise valemiga [2]:

$$\psi_a = -L_{aa}i_a - L_{ab}i_b - L_{ac}i_c + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd} + L_{afq}i_{fq} \quad (1.2)$$

Kus:  $\psi_a$  – staatori faasi a mähise aheldusvoog,

$L_{aa}$  – staatori mähiste omainduktiivsus, Henri,

$L_{ab}, L_{ac}$  – staatori mähiste vastastikused induktiivsused, Henri,

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}$  – staatori ja rootori mähiste vastastikused induktiivsused, Henri,

$i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}$  – ergutus- ja summutusahelate voolud, A,

$i_a, i_b, i_c$  – faaside voolud, A.

Põhiseostes kasutatud induktiivsused, mis sõltuvad rootori positsioonist staatori suhtes (nurgast  $\theta$ ), mis omakorda sõltub ajast. See toob kaasa ebamugavusi masina ning elektrisüsteemide probleemide lahendamiseks. Sellel põhjusel kasutatakse tavaliselt staatori muutujate dq0 teisendus, mis annab selgemat ja lihtsamat füüsilist kuju staatori protsesside jaoks. Dq0 teisendus tähendab staatorivoolude, pingete, aheldusvoogude ja elektromotoorjõudude teisendamine d ja q suunaliste komponentideks. Staatori voolude dq0 teisenduse valemid maatrikskujul on järgmised:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Uued dq0 induktiivsused väljendatakse järgmisel kujul [2]:

$$L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2} \quad (1.3)$$

$$L_q = L_{aa0} + L_{ab} - \frac{3}{2}L_{aa2}$$

$$L_0 = L_{aa0} - 2L_{ab0}$$

Kus:  $L_d$  – staatori induktiivsuse d suunalise komponent,

$L_q$  – staatori induktiivsuse q suunalise komponent,

- $L_0$  – staatori induktiivsuse nulljärgnevuse komponent,  
 $L_{aa0}$  – staatori faasi omainduktiivsuse alaliskomponent,  
 $L_{ab0}$  – staatori mähiste vastastikuse induktiivsuse alaliskomponent,  
 $L_{aa2}$  – staatori mähise omainduktiivsuse teise harmoonika komponent.

Tuleb mainida, et kõik dq0 induktiivsused siin on konstantsed ja ei sõltu rootori nurgast

Vastavate aheldusvoogude valemid on siis järgmised [2]:

$$\begin{aligned}\psi_d &= -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} & (1.4) \\ \psi_q &= -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \\ \psi_0 &= -L_0 i_0 \\ \psi_{fd} &= L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d \\ \psi_{kd} &= L_{fkd} i_{fd} + L_{kkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{akd} i_d \\ \psi_{kq} &= L_{kkq} i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} i_q\end{aligned}$$

Kus: fd – ergutusmähis,

kd – d-telje summutuskontuur,

kq – q-telje summutuskontuur,

0 – nulljärgnevuse komponent,

k=1,2 – kontuuri number,

$\psi_d$  – staatori d telje suunaline aheldusvoog,

$\psi_q$  – staatori q telje suunaline aheldusvoog,

$\psi_0$  – staatori nulljärgnevuse komponendi aheldusvoog,

$L_d, L_q, L_0$  – staatori induktiivsuse komponendid, Henri,

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}$  – staatori ja rootori mähiste vastastikused induktiivsused, Henri,

$L_{fkd}$  – rootori ergutusmähise ning summutuskontuuride vastastikused induktiivsused, Henri,

$L_{ffd}, L_{kkd}, L_{kkq}$  – rootori kontuuride omainduktiivsused, Henri,

$i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}$  – rootori ergutus- ja summutusahelate voolud, A,

$i_d, i_q, i_0$  – staatori voolud, A.

$$U_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \quad (1.5)$$

$$U_q = p\psi_q - \psi_d p\theta - R_a i_q$$

$$U_0 = p\psi_0 - R_a i_0$$

Kus:  $U_d, U_q, U_0$  – staatori pinge komponendid, V,

$\psi_d, \psi_q, \psi_0$  – staatori aheldusvoogud, Veeber,

$I_d, I_q, I_0$  – staatori voolu komponendid, A,

$R_a$  – staatori mähise a resistants, Ohm,

$p$  – operaator  $d/dt$ ,

$\theta$  – nurk d-telje ning a faasi magnetilise telje vahel, elektriline rad.

Eelmistest valemistest võib väljendada elektrilise võimsuse:

$$P_e = \frac{3}{2} [(i_d p\psi_d + i_q p\psi_q + 2i_0 p\psi_0) + (\psi_d i_q - \psi_q i_d)\omega - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2)R_a] \quad (1.6)$$

Kus:  $P_e$  – elektriline võimsus.

Rootori elektriline moment on [2]:

$$M_e = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{\omega}{\omega_m} = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) q_f \quad (1.7)$$

Kus:  $M_e$  – elektriline moment,

$q_f$  – rootori pooluspaaride arv,

- $\omega$  – rootori kiirus, elektriline rad/ sek,
- $\omega_m$  – rootori kiirus, mehaaniline rad/ sek,
- $\psi_d, \psi_q$  – staatori aheldusvoogud, Veeber,
- $I_d, I_q$  – staatori voolu komponendid, A.

Konkreetse sünkroonmasina modelleerimiseks elektrisüsteemi arvutustarkvaraga on vaja teada selle masina põhiparameetrid. Masina põhiparameetrid on induktiivsused, resistantsid ja ajakonstandid. Üldiselt need parameetrid ei saa katsetamisel otse mõõta. Sellel põhjusel tehakse erievad katsed, mille käigus mõõdetakse lähteparameetrid ning lähteparameetrite alusel arvutatakse põhiparameetrid.

Sünkroonmasina põhiparameetrid jaotatakse täiendavalt ülিমööduvateks, mööduvateks ning sünkroonparameetriteks. Ülímööduvad parameetrit väga kiiresti sumbuvad pärast häiringut. Mööduvad parameetrid sumbuvad aeglasemalt ning sünkroonparameetrid ei sumbu.

Ajakonstandid näitavad mööduvate ning ülímööduvate komponentide sumbumise kiirust. Allpool tabelis on toodud hüdro- ning turbogeneraatorite orienteeruvad põhiparameetrid.

Tabel 1.1 Sünkroongeneraatorite põhiparameetrid ning nende orienteeruvad väärtused. [2]

Parameeter		Hüdrogeneraator	Turbogeneraator
Sünkroontakistus	$X_d$	0,6...1,5	1,0...2,3
	$X_q$	0,4...1,0	1,0...2,3
Mööduv takistus	$X'_d$	0,2...0,5	0,15...0,40
	$X'_q$	-	0,3...1,0
Ülímööduv takistus	$X''_d$	0,15...0,35	0,12...0,25
	$X''_q$	0,20...0,45	0,12...0,25
Mööduv ajakonstant	$T'_{d0}$	1,5...9,0 s	3,0...10,0 s
	$T'_{q0}$	-	0,5...2,0 s

Tabel 1.1 järg Sünkroongeneraatorite põhiparameetrid ning nende orienteeruvad väärtused. [2]

Parameeter		Hüdrogeneraator	Turbogeneraator
Ülímööduv ajakonstant	$T''_{d0}$	0,01...0,05 s	0,02...0,05 s
	$T''_{q0}$	0,01...0,09 s	0,02...0,05 s
Staatori puistetakistus	$X_l$	0,1...0,2	0,1...0,2 s
Staatori resistants	$R_a$	0,002...0,020	0,0015...0,0050

Täiendavalt üks oluline sünkroonmasina parameeter on inertskonstant H, mis näitab salvestatud energiahulk rootoris teatud kiiruse puhul jagatud masina nimivõimsusega [MWs/MVA].

$$H = \frac{E_{mech}}{S_n} \quad (1.8)$$

Kus:  $H$  – inertsikonstant,

$E_{mec}$  – rootori mehaaniline energia,

$S_n$  – masina nimivõimsus.

### 1.2.2 Sünkroonmasina ergutussüsteem.

Sünkroonmasina ergutussüsteem toidab alalisvooluga rootori mähist. Rootori mähise voolu vähendades või suurendades saab reguleerida pinget masina klemmidel ning masinaga toodetava reaktiivenergiat. Seega ergutussüsteem osaleb juhtimises ning omab tähtsat rolli elektrisüsteemi stabiilsuse tõstmises. Täiendavalt ergutussüsteemi üheks oluliseks ülesandeks on jälgimine, et generaatori talitusparameetrid ei ületaks lubatud väärtusi.

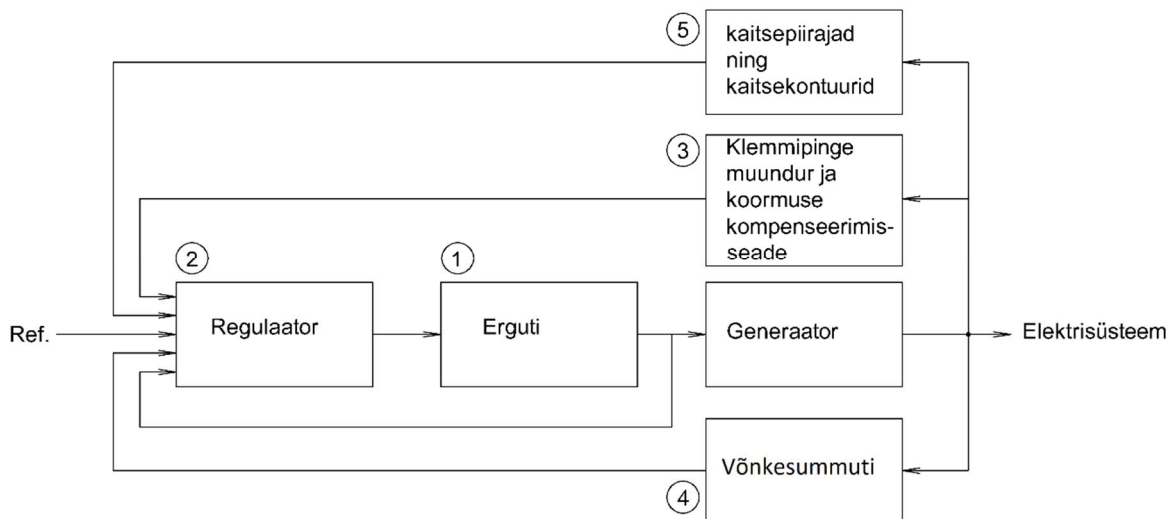
Sünkroonmasina ergutussüsteemi põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 1.6. Ergutussüsteem koosneb järgmistest elementidest:

- Erguti - tagab alalisvoolu sünkroonmasina rootori mähiste jaoks;
- Regulaator - töötleb ja võimendab sissesignaali erguti jaoks sobiva tasemeni;
- Klemmipinge muundur ning koormuse kompensaator- saab, alaldab ning filtreerib sünkroongeneraatori klemmipinge. Võrdleb saadud pinge etaloonpingega;
- Võnkesummuti- annab täiendavalt signaali regulaatorile võnkeprotsesside summutamiseks. Sissesignaali tavaliselt rootori kiirusehälve, üleliigne võimsus, sagedushälve;
- Piirajad ja kaitseahelad- hõlmavad mitu funktsiooni, mille eesmärk on jälgimine, et ergutussüsteemi ja sünkroongeneraatori võimsuse limiidid ei oleks ületatud. Kõige levinumad funktsioonid on ergutusvoolu piiraja, suurima ergutuse piiraja, klemmipinge piiraja, liigvoo piiraja (volts-per-Hertz regulator), alaergutuse piiraja. Tavaliselt see on selgelt eristatud ahelad ja nende väljundsignaalid tulevad ergutussüsteemile erinevatesse kohtadesse.

Lähtuvalt kasutatavast toiteallikast ergutussüsteemid võib jagada kolmeks liigiks [1]:

- Alalisvoolumasinal põhinev ergutussüsteem;
- Vahelduvvoolumasinal põhinev ergutussüsteem;
- Staatiline ergutussüsteem.





Joonis 1.6 Sünkroonmasina ergutussüsteemi põhimõtteline skeem. [2]

Alalisvoolumasinal põhinevas ergutussüsteemis toiteallikana kasutatakse alalisvoolugeneraator, mis saab olla mootoriga või generaatori võlliga pöörlev. Antud süsteemid olid laialt levinud kuni 1960-teni aastateni ning tänapäeval kasutatakse ainult kuni 100MW turbogeneraatoritel, teistes ergutussüsteemides reservallikana või vanades elektrijaamades. Vahelduvvoolumasinal põhinev ergutussüsteem kasutab väikest vahelduvvoolu generaatori peamise generaatori ergutusmähise toitmiseks. Väike vahelduvvoolu generaator asetseb tavaliselt peageneraatoriga samal võllil. Nüüdisajal kõige levinumad on staatilised ergutussüsteemid. Kõik komponendid staatilises ergutussüsteemis on staatilised või statsionaarsed. Staatiliste alaldite vool edastatakse otse ergutusmähisesse harjade ja kontaktrõngaste kaudu. Staatilise ergutussüsteemi toide võetakse tavaliselt põhigeneraatorist lisatrafo kaudu või mõnedes juhtudes välisvõrgust.

### 1.2.3 Võnkesummuti (PSS)

Võnkesummuti kasutatakse, et täiustada elektrisüsteemi võnkumiste summutamine ergutuse reguleerimise kaudu ning tõsta staatilise stabiilsuse. Võnkesummuti sisendparameetrik on tavaliselt sagedus generaatori klemmidelt ning väljundparameeter edastatakse edasi ergutusregulaatori sisendisse.

### 1.2.4 Automaatne pingereguleerimine (AVR)

Automaatne pingeregulaator võtab vastu signaali pingemuutusest generaatori klemmidelt või

erguti väljundsignaali, võrdleb saadud signaali etteantud etalonväärtusega ja vastavalt sellele saadab signaali ergutusüsteemile muuta ergutusvoolu. Automaatse pingeregulaatori üks olulisematest parameetritest on regulaatori reageerimiskiirus. Regulaatori reageerimiskiirus on oluline, kuna erguti hakkab muutma ergutusvoolu väärtust ainult siis, kui tuleb käsk pingeregulaatorist. Juhul kui automaatne pingeregulaator on aeglane, ei ole piisavalt tundlik või sellel on tundmatu ala, kus ta ei reageeri pingemuutustele, siis pingereguleerimine osutub mitteefektiivseks ning mõnedes olukordades võib soodustada stabiilsuse kaotamist. Ajalooline kogemus näitas samuti, et väga oluline, et automaatse pingeregulaatoris pingevõrdlus etalonväärtusega toimiks pidevalt ja ergutusvoolu korrigeerimissuurus oleks võrdeliselt pingehälbele etalonväärtusest.

### **1.3 Elektrisüsteemi modelleerimise arvutustarkvarad ja nende võimalused**

Tänapäeval on arendatud suur hulk tarkvarasid, mis kasutatakse elektrisüsteemide modelleerimiseks ja analüüsimiseks. Võib nimetada rohkem, kui 30 kommertstarkvarasid ning rohkem kui 20 tasuta tarkvarasid. Kõige rohkem tuntud ja kasutatavad kogu maailmas arvutustarkvarad suurte süsteemide modelleerimiseks ja analüüsimiseks on PSCAD, ETAP ja DigSILENT PowerFactory.

PSCAD tarkvara esialgselt oli loodud 1988. aastal ning väljalastud kommertsturule 1993. aastal. PSCAD tarkvara arendaja on Kanada päritoluga ettevõtte „Manitoba Hydro International“, mille arendusosakond Manitoba HVDC Research Centre tegeleb antud tarkvara arendamisega. PSCAD tarkvara on mitmeotstarbeline dünaamiline simulaator, mille peamine spetsialiseerumine on kõrgepinge alalisvoolu süsteemid. PSCAD omab erinevate süsteemide mudelite laialdast raamatukogu. Raamatukogus on leitav mudelid alates passiivsetest elementidest ning juhtimiselementidest kuni elektrimasinateni ning teiste kompleksseadmeteni. Praegu PSCAD peetakse ühest populaarsemast elektrisüsteemide siirdeprotsesside simulatsiooni tarkvara paketi.

Teine populaarne elektrisüsteemide modelleerimise tarkvara on ETAP. Vastavalt ametliku internetilehekülge andmetele [12] ETAP ettevõtte oli asutatud 1986. aastal ning nende peakontor asub Californias. Ettevõtte spetsialiseerumine on elektrisüsteemide modelleerimine, kavandamine, analüüs, optimeerimine ja ennustatavad reaaliaja lahendused. Rohkem, kui 50 000 ETAP toodete litsentse olid kasutatud kogu maailmas elektrienergia genereerimises, ülekandmises, jaotamises ning ka industriaalelektrisüsteemide projekteerimiseks.

Viimane loetelus on DigSILENT PowerFactory tarkvara. Vastavalt ametlikul internetleheküljel esitatud andmetele [13] DigSILENT on Saksamaa ettevõtte, mis arendab PowerFactory tarkvara. PowerFactory on Windows-i põhinev integreeritud elektrisüsteemide modelleerimise ja analüüsimise tarkvara pakett. DigSILENT PowerFactory on lihtne kasutamisel ja tagab kõik standardseid elektrisüsteemide nõudmisi, mille hulgas tipprakendused uute tehnoloogiate jaoks nagu tuuleenergia, hajatootmine ning väga suurte süsteemide käsitlemine.

Mõned funktsioonid, mis hõlmab DigSILENT on: võimsusvoogude analüüs, rikete analüüs, stabiilsuse analüüs, võrkude vähenemine, kaitsesüsteemide analüüs, elektromagnetiliste siirdeprotsesside analüüs, mootorite käivitamise analüüs, optimaalne võimsuste jagamine, harmooniline võimsuste jagamine, seisundi estimeerimine, häiringukindluse ja talitluskindluse hinnang, õhuhüüride ja kaablite parameetrite arvutamine, jaotusvõrgu analüüs, dünaamiline analüüs.

## 2. STANDARDNE NORDIC MUDEL

### 2.1 Mudeli sisu

Nordic testsüsteem on variatsioon niinimetatud Nordic32 süsteemi. Nordic32 süsteem kujutab ennast elektrisüsteemi mudelit, mis on väga sarnane Rootsi 1983 elektrisüsteemiga vahetult enne seda, kui Rootsis juhtus pinge kollaps. Nordic32 mudel oli pakutud „CIGRE Task Force“ operatiivgrupiga 1995. aastal elektrisüsteemide modelleerimise tarkvara toimimise testimiseks ja hindamiseks ning pikaajalise stabiilsuse uurimiste läbiviimiseks [14]. Tegelikult algusest peale süsteem oli kasutatud mitte ainult tarkvara testimiseks, vaid ka teiste elektrisüsteemide probleemide ja ilmingute simuleerimiseks ning uurimiseks, näiteks staatilise ja dünaamilise pinge stabiilsuse uurimiseks, elektrisüsteemi taastamise häiringu pärast uurimiseks jne [4].

Praegu Nordic32 mudel erikarakteristikute pärast kasutatakse aina rohkem erinevate elektrisüsteemide stabiilsuse uuringutes. 2015. aastal tehnilises aruandes „PES-TR19: Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment“ [3] oli pakutud kasutada Nordic mudeli (Nordic32 mudeli variatsioon) pinge stabiilsuse detailsemaks uurimiseks. Antud aruanne oli koostatud „Test System for Voltage Stability and Security Assessment Task Force“ operatiivgrupiga ning aruande koostamisel osalesid ka „Power System Dynamic Performance Committee“ ja „Power System Dynamic Performance Committee“ komiteed. „PES-TR19“ aruandes on toodud andmed, mis on vajalikud Nordic32 mudeli koostamise ja simulatsiooni teostamise jaoks erinevates dünaamilise simulatsiooni tarkvarades. Aruandes esitatud mudeli eripära on see, et ta annab võimalust võtta arvesse ka erinevaid niisuguseid ilminguid nagu näiteks kaitseseadmete rakendumine või trafode astmelülitite ümberlülitused, mis võivad täiendavalt negatiivselt mõjutada süsteemi stabiilsust raskendatud, avariilise või avariijärgse talitluse puhul. Tavaliselt enamuses uuringutes antud täiendavad ilmingud ei võeta arvesse, mis vähendab niisuguste uuringute usaldusväärsust.

Peamine uuendus, mis on pakutud „PES-TR19“ aruandes on kasutada dünaamilisi simulatsioone staatilisi asemel. Staatilised simulatsioonid ei ole rahuldavad näiteks suurte häiringute tagajärgede uurimise jaoks, eriti kui süsteem on varustatud häiringujärgse reageerimissüsteemidega nagu näiteks sekundaarne pinge kontroll või põikkompenseerimine. Dünaamilised simulatsioonid on vältimatud näiteks ka niisuguste süsteemide ja seadmete projekteerimiseks nagu trafo astmelülitite blokeerimine, pinge vähenemine tarbija lattidel süsteemi stabiilsuse säilitamise jaoks, koormuse avariiline vähendamine. Samuti tuleb teostada dünaamilised simulatsioonid pingestabiilsusega seotud laivõrgu monitoring-, kaitsmis- ning juhtimissüsteemide häälestamiseks.

Kui vaadelda staatilisi simulatsioone, siis nende jaoks kasutatakse võimsusvoogude võrrandid, kus võetakse arvesse esiteks kohaste generaatorite reaktiivvõimsuste limiidid ning teiseks aktiivvõimsuste jaotamised tarbijate konstantkoormuste vahel. Dünaamiliste simulatsioonide teostamise puhul üldjuhul kasutatakse samad mudelid nagu staatiliste simulatsioonide puhul, kuid need on täiustatakse järgmiste süsteemide ja seadmete mudelitega:

- Koormusvõimsuse taastamine (peamiselt trafode astmelülitid ja termostaatiline koormuse kontroll);
- Sünkroongeneraatorite ergutusvoolu piirajad, mis reageerivad viivitusega, et vältida generaatorite ülekuumenemist;
- Diskreetsed kontrollseadmed, mis reageerivad pinge langusele, näiteks pikikompenseerimise sisselülitamine, sekundaarne pingereguleerimine, trafode astmelülitid, koormuse avariiline vähendamine;
- Teised kontrollsüsteemid, mis otseselt ei ole projekteeritud pinge reguleerimiseks, kuid mis reageerivad ja rakenduvad samal ajavahemikul.

Ülalpool kirjeldatud seadmete hulgast „PES-TR19“ aruandes on käsitletud koormusvõimsuse taastamise seadmed, generaatorite ergutusvoolu piirajad ning pingelangusele reageerivad diskreetsed kontrollseadmed. „PES-TR19“ aruandes esitatud Nordic mudeli on võimalik kasutada ka staatiliste simulatsioonide läbiviimiseks.

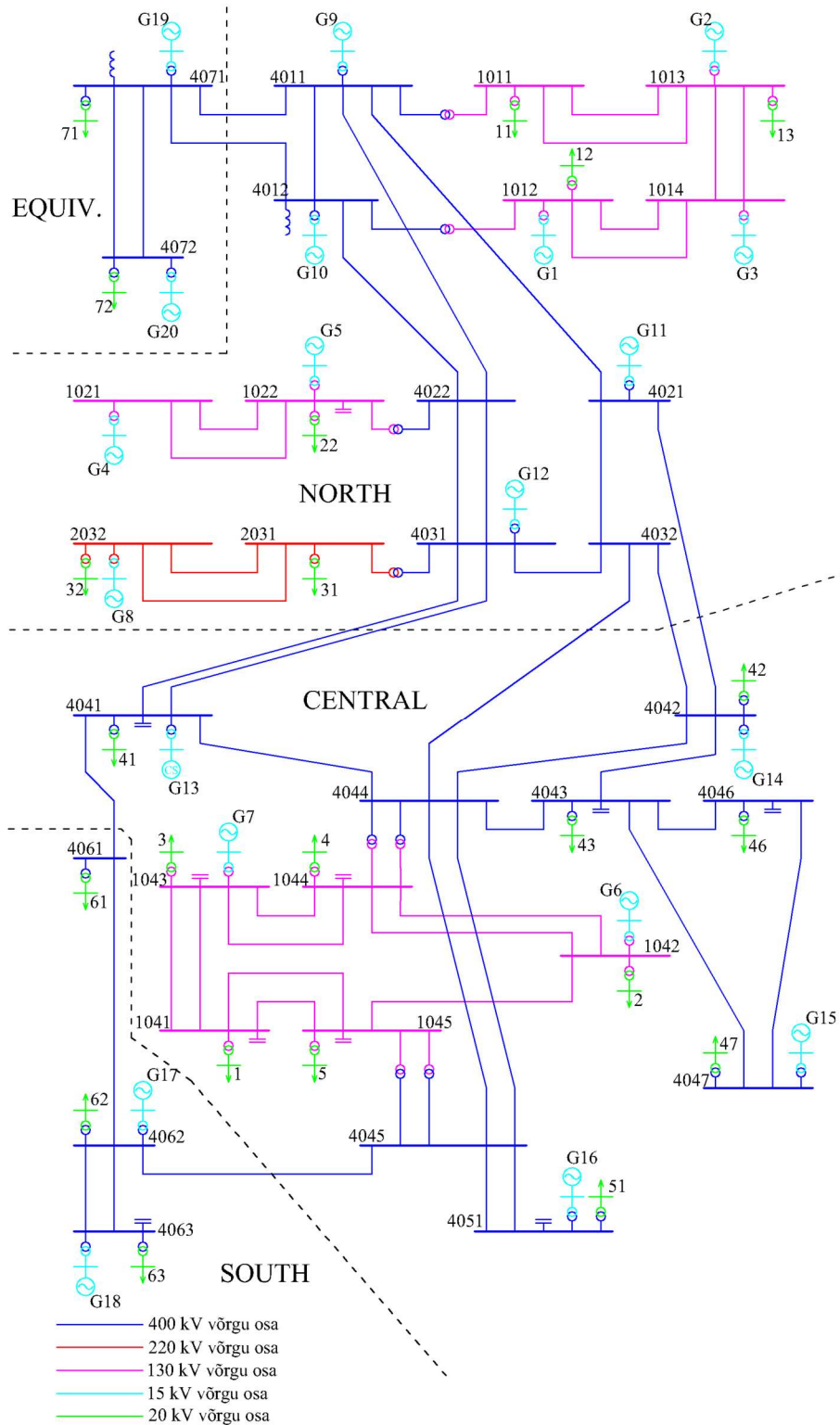
## 2.2 Mudeli komponendid

### 2.2.1 Mudeli komponentide koosseis ja süsteemi skeem

„PES-TR19“ aruandes esitatud Nordic mudelis kasutatakse 74 sõlme, 102 haruliini, 20 generaatorit (generaatorid ühendatud võrku pingekõrgendustrafode kaudu ning varustatud üleergutuspiirajatega), 22 koormussõlme (koormussõlmide pinged kontrollitakse trafode astmelülititega). Mudel iseloomustatakse pikkade ülekandeliinidega. Nordic mudeli skeem koos kõikide komponentidega on toodud joonisel 2.1. Nordic mudeli skeemilt on näha, et testsüsteem koosneb neljast piirkonnast:

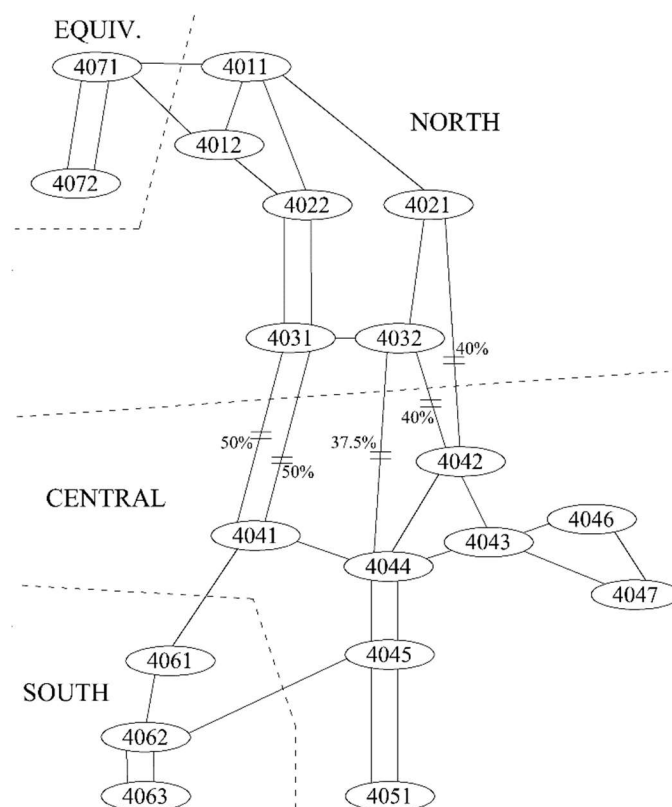
- „North“- hüdrogeneerimise ning mõnede koormussõlmedega
- (geneereeritav võimsus on 4628,5 MW, tarbitav võimsus 1180,0 MW).
- „Central“- suure hulka koormuste ning termogeneerimisega
- (maksimaalne geneereeritav võimsus on 2850.0 MW, tarbitav võimsus on 6190.0 MW).
- „Equiv“ – välissüsteemi lihtne mudel

- (genereeritav võimsus on 2437.4 MW, tarbitav võimsus on 2300.0 MW).
- „South“- Termogeneraerimisega
- (genereeritav võimsus on 1590.0 MW, tarbitav võimsus on 1390.0 MW).



Joonis 2.1 „PES-TR19“ aruandes esitatud Nordic mudeli skeem [3].

Kokku süsteemi maksimaalne genereeritav võimsus on 11505.9 MW ning maksimaalne tarbitav võimsus on 11060.0 MW. Süsteemi ülekandevõrkude nimipinge on 400kV ning regionaalvõrkude nimipinge on 220kV ja 130kV. Süsteemi nimisagedus on 50Hz, mis reguleeritakse hüdrogeneraatorite kiirusregulaatoritega. G20 on ekvivalentne generaator, mis suures osas osaleb primaarse sageduse reguleerimises. Nordic süsteemi 400kV ülekandeliinide „selgroog“ on toodud joonisel 2.2.



Joonis 2.2 400kV ülekandeliinide skeem. [3]

„PES-TR19“ aruandes esitatud Nordic mudelis on 102 liini, mille hulgas on 22 jaotusliini. Ülekandevõrgu liinide parameetrid on toodud lisa 1 tabelites L1.1 ja L1.2, kus R on liini resistants, X on liini reaktants,  $b/2$  on liini põikjuhtivus jagatud kaheks,  $S_{nom}$  on liini näivvõimsus, mis on antud informatsiooniks. Süsteem on koormatud suurte piirkondadevaheliste ülekandevõrgudega, eriti „North“ piirkonnast „Central“ piirkonda. Süsteemi turvaline talitus on piiratud siirdeprotsesside nurga- ja pingestabiilsuse kaotamisega. Peamised häiringud, mis panustavad pinge mittestabiilsusele on:

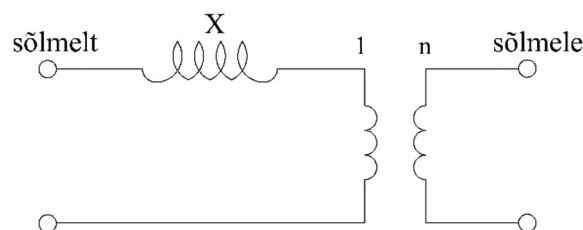
- North- Central koridori liini väljalangemine, mille pärast North- Central ülekandevõimsused jaotatakse ülejäänud liinide vahel.

- „Central“ piirkonna mingi generaatori väljalangemine, mis kompenseeritakse „North“ piirkonna generaatoritega ja mis soodustab täiendava võimsuse ülekandmist North- Central koridori kaudu.

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile mudeli mittestabiilsuse tekkimise mehhanism enamikel juhtudel on sama. Ühest küljest maksimaalne võimsus, mis võib olla toimetatud „Central“ piirkonna tarbijateni on mõjutatud „Central“ ja „North“ generaatorite reaktiivvõimsuste limiitidega. Generaatorite reaktiivvõimsuste limiidid kõigepealt on määratud üleergutuspiirajatega. Teisest küljest pinge langemise puhul trafode astmelülitid katsuvad taastada tarbijate pinged ja koos pingega tarbitavaid võimsusi. Juhul, kui näiteks pärast generaatori väljalangemist maksimaalne võimsus, mis suudavad toota generaatorid on vähem, kui tarbitav võimsus süsteemis, mis trafode astmelülitid saavad taastada, siis tekitab pinge mittestabiilsus (tarbimine on suurem, kui tootmine). See juhtub tavaliselt ühe või kahe minuti jooksul häiringu pärast. Sarnaselt areneb pinge mittestabiilsus, kui tarbitav koormus kasvab.

## 2.2.2 Trafod

Trafo skeem on toodud joonisel 2.3. Vasekadudega seotud resistants ning magnetiline juhitavus trafode modelleerimises ei võeta arvesse.  $X$  on suhtühikutes ( $V_{bfrom}$ ,  $S_{nom}$ ) baasil, kus  $V_{bfrom}$  on primaarpinge ja  $S_{nom}$  on nominaal näivvõimsus.  $n$  (sü/sü) on pingete suhe mille aluseks on  $V_{bto}/V_{bfrom}$ , kus  $V_{bfrom}$  on primaarpinge ja  $V_{bto}$  on sekundaarpinge. Pingemadaldustrafod on häälestatud nii, et toidetava sõlme pinge on 1.0 sü. Trafode vastavad andmed on toodud lisas 1 tabelites L1.3, L1.4 ja L1.5.



Joonis 2.3 Nordic mudeli trafo tüüpiline skeem;  $X$ - pärijärgnevusreaktants, sü. [3]

Põikkompanseerimise seadmete andmed on toodud lisas 1 tabelis L1.6.  $Q_{nom}$  on reaktiivne võimsus, mis toodetakse 1 sü pinge puhul. Reaktorite andmed on toodud miinus märkidega.



### 2.2.3 Sünkroonmasinate mudelite andmed

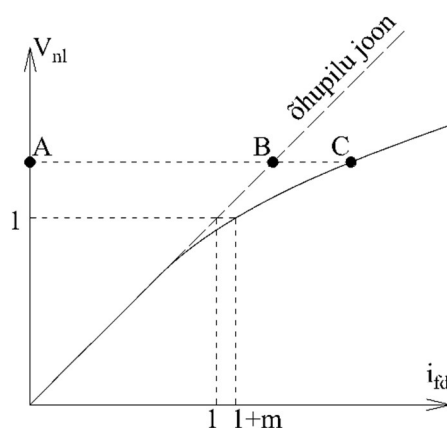
„PES-TR19“ aruandes sünkroonmasinad on esitatud vastavalt standardsele mudelile, mis on kirjeldatud antud töös lõigus “1.2.1 Sünkroonmasinate modelleerimine“. Hüdroelektrijaamade jaoks modelleeritakse kolme mähisega väljepoolusega masin ning soojuselektrijaamade jaoks modelleeritakse nelja mähisega peitpoolusega masin. G13 on sünkroonkompensaator, mis modelleeritakse nagu väljepoolusega masin. Generaatorite niminäivvõimsused ja nende turbiinide aktiivvõimsused on toodud lisa 1 tabelis L1.10. Generaatorite aja- ning inertsikonstandid on toodud lisa 1 tabelis L1.11. Sünkroonmasinate küllastuse karakteristik antakse valemiga 2.1 ning graafiliselt on esitatud joonisel 2.4. Küllastuse karakteristik rakendatakse kõikide masinate jaoks.

$$k = \frac{|AC|}{|AB|} = 1 + m(V_{nl})^n \quad (2.1)$$

Kus:  $m = 0,1$ ;

$n = 6,0257$ ;

$V_{nl}$  – sünkroonmasina tühijooksu klemmipinge. [3]

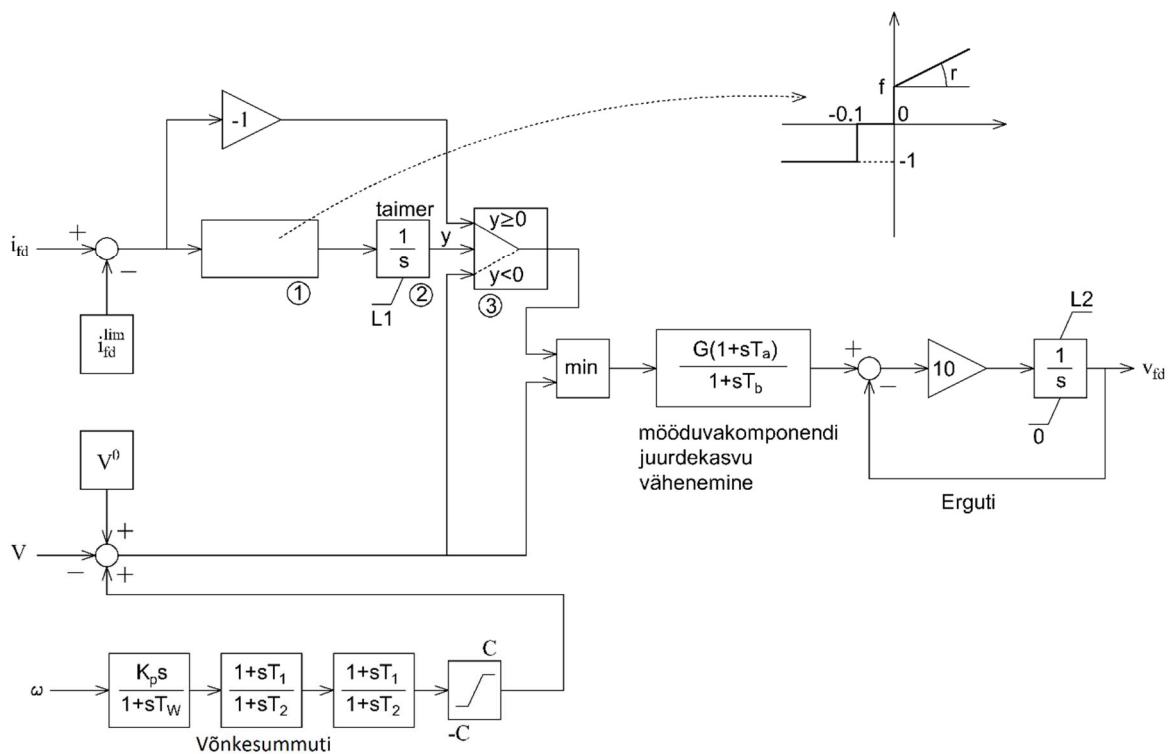


Joonis 2.4 Sünkroonmasinate küllastuse karakteristik.  $V_{nl}$ – sünkroonmasina tühijooksu klemmipinge;  $i_{fd}$ –rootori ergutusvool. [3]

### 2.2.4 Erguti, automaatse pingeregulaatori (AVR) ning võnkesummuti (PSS) mudeli andmed

Joonisel 2.5 on esitatud erguti, AVR ning PSS mudel, mis kasutatakse kõikide generaatorite jaoks.

Iga generaatori jaoks kasutatakse erinevad andmed, mis on esitatud lisa 1 tabelis L1.12. Joonisel esitatud mudelis  $V_{fd}$  on ergutuspinge suhtühikutes tingimusel, et  $V_{fd} = 1$  kui generaator töötab ilma koormuseta, 1 sü klemmipingega ja ilma küllastuseta.  $V$  on generaatori klemmipinge amplituudväärtus. Kõik generaatorid välja arvatud G13, G19 ja G20 on varustatud võnkesummutiga (PSS), kus sisend  $\omega$  on suhtühikutes. PSS antud mudelis tagab alates 0.2Hz kuni 1Hz sageduse võnkumiste summutamine.



Joonis 2.5 Erguti, pingeregulaatori ja võnkesummuti mudel.  $V_{fd}$  — ergutuspinge suhtühikutes;  $V$  — generaatori klemmipinge amplituudväärtus;  $i_{fd}$  — ergutusvool suhtühikutes;  $i_{fd}^{lim}$  — ergutusvoolu ülemine piirväärtus suhtühikutes;  $\omega$  — generaatori rootori pöörlemissagedus suhtühikutes.

## 2.2.5 Üleergutuspiiraja (OEL) mudeli andmed

Iga sünkroonmasin on varustatud üleergutuskaitsega, mis tagab, et ergutusvool  $i_{fd}$  ei ületaks piirväärtust (vt. Joonis 2.5). Mudelis ei ole kajastatud alaergutuskaitse,  $V/Hz$  ning koormusvoolu piiraja, kuna mudeli peamine tähelepanu on generaatorite üleergutusel.

Maksimaalne ergutusvoolu väärtus on väljendatud järgmiselt:

$$i_{fd}^{lim} = 1,05 * i_{fd}^{rated} \quad (2.2)$$

Kus:  $i_{fd}^{lim}$  – Maksimaalne ergutusvool;

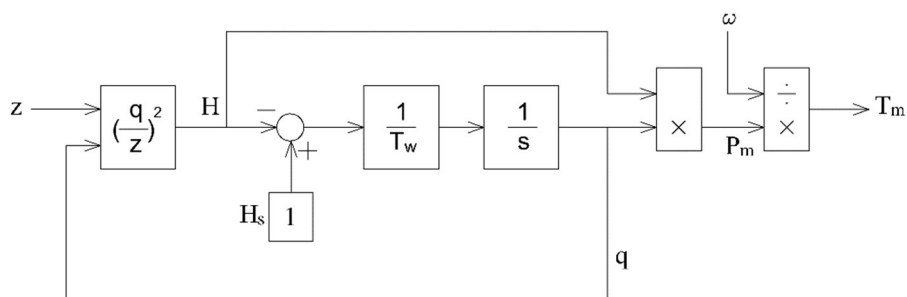
$i_{fd}^{rated}$  – Generaatori nominaalne ergutusvool.

Väikestel generaatoritel G6, G7, G11 ja G12 kasutatakse OEL fikseeritud reageerimisajaga, mis reageerib 20 sekundi pärast piirväärtuse ületamist. Kõikide ülejäänud generaatorite reageerimisaeg on pöörd karakteristikuga (mida suurem ergutusvool, seda vähem reageerimisaeg).

Joonisel 2.5 esitatud mudeli ploki number 1 väljundi väärtus on -1 kui  $i_{fd} < i_{fd}^{lim}$  ning muutub positiivseks, kui  $i_{fd} > i_{fd}^{lim}$ , mis omakorda põhjustab integraatori 2 väljundi kasvu. Kui integraatori väljund muutub positiivseks, siis toimub lüliti 3 ümberlülitamine ning generaatori juhtimine sõltub nüüd ergutusvoolust, mitte pingest. Kui ergutusvool oli piiratud, kuid elektrisüsteemi seisund nõuab vähemat ergutust, siis "min" plokiga juhtimine ümberlülitakse ja sõltub jälle pingest.

## 2.2.6 Turbiinide mudeli andmed.

Hüdrauliliste turbiinide aktiivvõimsused on esitatud tabelis Lisa 10 ning turbiinide plokkskeem on esitatud joonisel 2.6. Mudeli vee ajakonstant  $T_w$  on 1 sekund. Kuna sagedus reguleeritakse ainult hüdrojaamadega („North“ ja „Equiv“ piirkonnad), siis turbiin ning kiirusregulaator modelleeritakse ainult hüdrojaamade generaatorite G1, G2, G3, G4, G5, G8, G9, G10, G11, G12, G19, G20 jaoks. Soojusjaamade generaatorite G6, G7, G14, G15, G16, G17, G18 turbiinide mehaaniline pöördemoment on konstantne.

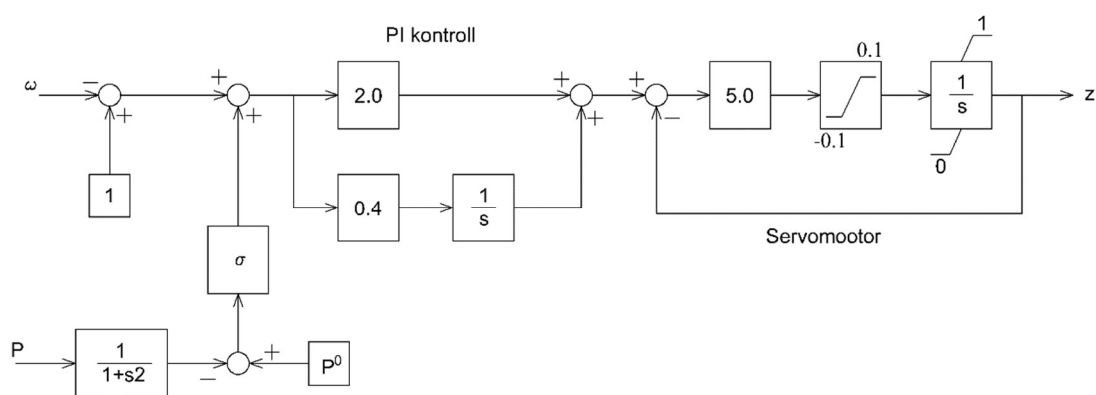


Joonis 2.6 Turbiinide mudeli plokkskeem.  $T_w$  – vee ajakonstant;  $z$  – värava avamine, s;  $q$  – vee vool, s;  $P_m$  – mehaaniline võimsus, s;  $T_m$  – mehaaniline moment, s;  $\omega$  – rootori kiirus, s. [3]

## 2.2.7 Kiirusregulaatori mudeli andmed

Kiirusregulaatori mudel on esitatud joonisel 2.7. Kiirusregulaatori mudel koosneb võimsuse mõõtjast, PI kontrollsüsteemist, mis võrdleb mõõdetud võimsuse väärtust etteantud etaloonväärtusega ning servomootorist, mis kasutatakse turbiini ventiilide liigutamiseks.

Võimsuse mõõtja on varustatud madalsageduse pääsfiltriga, mille ajakonstant on 2 sekundit. Servomootor on esitatud esimest järku süsteemiga koos  $z$  väärtuse limiitidega ning ajakonstandiga 0.2 sekundit. Ainult statisti väärtus  $Q$  muutub erinevate masinate jaoks ning selle andmed on esitatud tabelis 2.1.



Joonis 2.7 Kiirusregulaatori mudeli plokkskeem.  $P$  — generaatoriga toodetav võimsus, sü;  $P_0$  — Võimsuse etteantav etalonväärtus, sü;  $z$  — turbiini värava avamine;  $\omega$  — rootori kiirus, sü. [3]

Tabel 2.1 Generaatorite mudeli servomootori statisti väärtused. [3]

Generaatorid	Q
g19, g20	0,08
g1- g5, g8- g12	0,04

## 2.2.8 Koormuste ning koormus- astmelülite (LTC- load tap changer) andmed

Koormused on ühendatud 20 kV sõlmedega ja on esitatud eksponentmudelitega (valem 2.3).

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta$$

kus:  $P^0$  – tarbija sõlme aktiivvõimsuse algseisundi väärtus;  
 $Q^0$  – tarbija sõlme reaktiivvõimsuse algseisundi väärtus;  
 $V^0$  – tarbija sõlme pingeline algseisundi väärtus;  
 $\alpha = 1$  – konstant;  
 $\beta = 2$  – konstant.

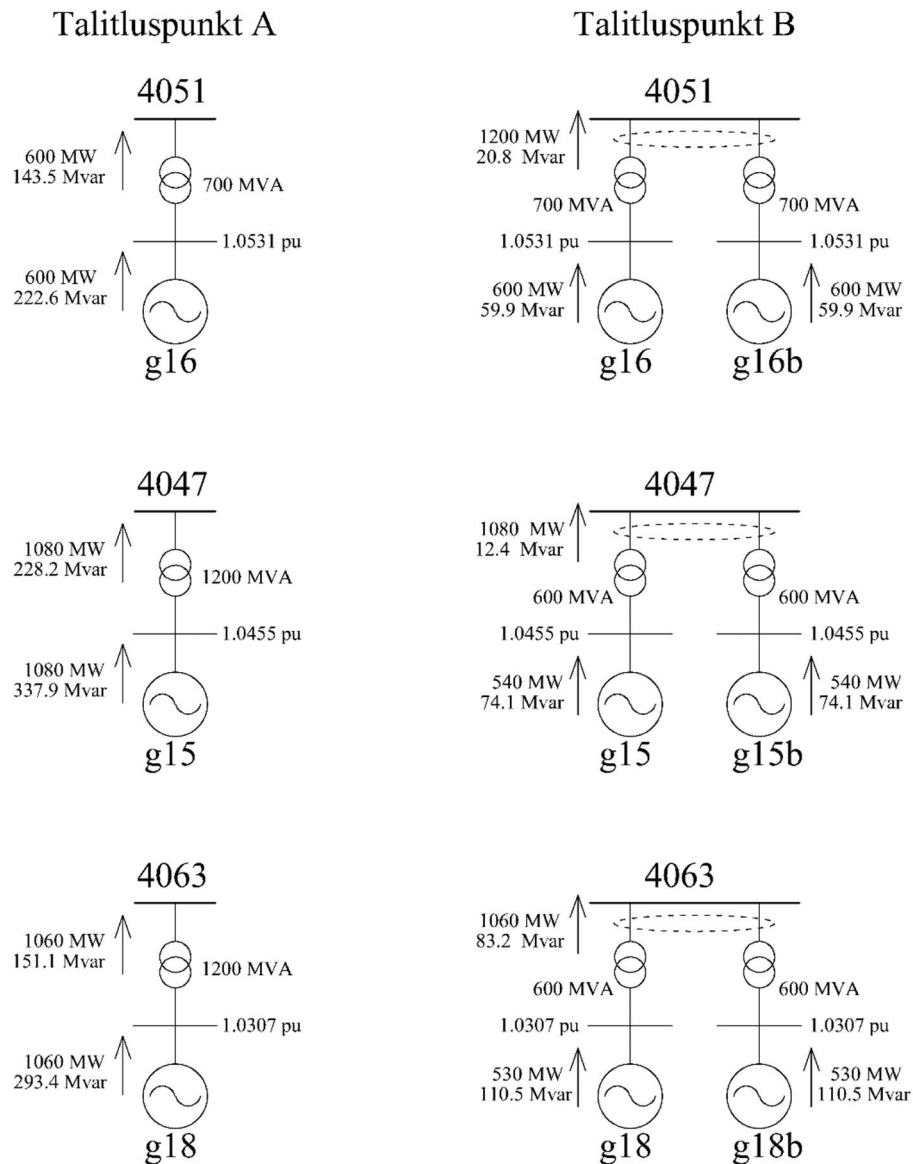
Jaotustrafod on varustatud automaatsete koormus- astmelülititega LTC, mis hoiavad pinget piirides 0.99 kuni 1.01 sü. LTC saavad muuta trafode ülekandesuhteid vahemikus 0.88 kuni 1.20 sü 33 positsiooni abil (kõrvalpositsioonide ülekandesuhte erinevus on 0.01). Koormus-astmelülitel on olemas kavatsuslik rakenduse viivitus. Kui pingeline väärtus lahkub lubatud piirid ajahetkel  $t_0$ , siis esimene koormuse astme muutmine toimub ajahetkel  $t_0 + t_1$  ning iga järgmine astme muutmine ajahetkel  $t_0 + t_1 + t_2 \cdot (k-1)$ , kus  $k$  on muutmise järk ( $k=2, 3, 4, \dots$ ). Kui pingeline on lubatud piiride sees, siis taimer tühistatakse ning korduval piiride lahkumisel aja lugemine hakkab algusest (esimene koormuse astme muutmine toimub ajahetkel  $t_0 + t_1$ , jne). Koormus-astmelülite andmed on esitatud lisas 1 tabelis L1.12.

### **2.2.9 Nordic mudeli A ja B talitluspunktide andmed.**

„PES-TR19“ aruandes on toodud Nordic mudeli andmed kahe talitluspunkti jaoks: A ja B. Esimene talitluspunkt A on ebakindel ja ei saa taluda N-1 kriteeriumi. Teises talitluspunktis B süsteem on tehtud kindlamaks tänu mõnedele lihtsatele modifikatsioonidele [3]. Talitluspunkti A sõlmede andmed on toodud Lisas 1 tabelites L1.7, L1.8, L1.9. Talitluspunktis B kasutatakse sama andmed, mis on talitluspunktis A, kuid on tehtud edaspidi kirjeldatud modifikatsioonid. G16 generaatori ja tema trafoga paralleelselt paigaldatakse identne generaator ja trafo. Täiendava generaatori nimi on G16b. G16b generaator toodab sama palju aktiivvõimsust nagu G16 generaator sama klemmipingel puhul (toodetav aktiivvõimsus on 600MW, alginge on 1.0531 sü). Täiendava 600MW genereerimine on kompenseeritud bilansisõlmega. G16b lisamisega vähendatakse oluliselt „North“ piirkonnast „Central“ piirkonda ülekantav võimsus, mis teeb süsteemi palju kindlamaks kuna nüüd modifitseeritud süsteem saab taluda generaatorite G17, G6, G7 ja G14 väljalangevuse ilma stabiilsuse kaotamist.

Modifitseeritud süsteem ei saa ikkagi taluda generaatori G15 (1080 MW) või generaatori G18 (1060 MW) väljalangevuse. Et vähendada süsteemi tundlikkust emma-kumma mainitud generaatori väljalangevusele, talitluspunktis B asendatakse nii G15 kui G18 generaatorid kahe eraldi generaatoriga G15, G15b, G18 ja G18b. Asendusgeneraatorite nimivõimsuseks mõlema generaatori

puhul võetakse pool esialgse generaatori nimivõimsusest ning alghetkel toodetavaks võimsuseks pool esialgse generaatori toodetavast võimsusest. G15 ja G18 generaatorite trafod analoogselt asendatakse iga asendusgeneraatori G15, G15b, G18 ja G18b jaoks eraldi trafoga. Asendustrafode nimivõimsuseks võetakse pool esialgsete trafode nimivõimsusest. Talitluspunktide A ja B algpameetrite erinevused on näidatud joonisel 2.8.

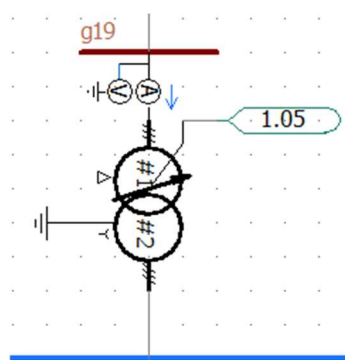


Joonis 2.8 Nordic skeemi talitluspunktide A ja B erinevused [3].

## 2.3 Mudeldamine

### 2.3.1 Trafode mudeldamine

Trafode mudeldamiseks on kasutatud PSCAD-i trafo klassikaline mudel (joonis 2.14). Lähtuvalt lähteandmetest kõikide trafode pärijärgnevuse lekke reaktantsid on pandud 0.15 sü. Pöörivoolude ning vasekadudega seotud takistused kirjeldatud trafode mudelis arvesse ei võeta.



Joonis 2.14 Trafo mudel PSCAD-s (generaatori g19 trafo näitel).

General	
Transformer Name	
3 Phase Transformer MVA	500.0 [MVA]
Base operation frequency	50.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.15 [pu]
Ideal Transformer Model	Yes
Eddy current losses	0.0 [pu]
Copper losses	0 [pu]
Tap changer on winding	#2
Graphics Display	Single line (circles)
Display Details?	No

Joonis 2.15 Trafo põhiparameetrid (generaatori g19 trafo näitel).

Mudelis on kasutatud trafode ideaalne mudel, mis tähendab, et magnetimisparameetrid (v.a. lekke reaktants) mudelis arvesse ei võeta. Küllastus samuti ei võeta arvesse.

### 2.3.2 Tarbimiskoormuste mudeldamine

Mudeli koormused sõltuvad pingest ning on modelleeritud vastavalt valemitele 2.4 ja 2.5.

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

Kus:  $P$ — tarvitav aktiivvõimsus;

$P_0$ — tarvitava aktiivvõimsuse esialgne väärtus vastavalt lähteandmetele;

$V$ — Tarbimissõlme pinge;

$V_0$ — tarbimissõlme alghetke pinge amplituudväärtus vastavalt lähteandmetele;

$\alpha$ —  $dP/dV$  pinge indeks aktiivvõimsuse jaoks (vastavalt lähteandmetele  $\alpha=1$ , mis tähendab, et vool on konstantne)

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2.4)$$

Kus:  $Q$ — tarvitav reaktiivvõimsus;

$Q_0$ — tarvitava reaktiivvõimsuse esialgne väärtus vastavalt lähteandmetele;

$V$ — Tarbimissõlme pinge;

$V_0$ — tarbimissõlme alghetke pinge amplituudväärtus vastavalt lähteandmetele;

$\beta$ —  $dQ/dV$  pinge indeks aktiivvõimsuse jaoks (vastavalt lähteandmetele  $\beta=2$ , mis tähendab, et näivtakistus on konstantne)

### 2.3.3 Kompenseerimisseadmete mudeldamine

Mudelis kasutatakse kompenseerimisseadmed. Kompenseerimisseadmete lähteandmed on toodud tabelis L1.5. Tabelis pluss märgiga on tähistatud mahtuvuselemendid ning miinus märgiga on tähistatud induktiivelemendid. Lähteandmetes on antud kompenseerimisseadmete toodetavad reaktiivvõimsused 1 sü pinge puhul. PSCAD-i kompenseerimisseadmete mudelitesse on vaja sisestada reaktorite jaoks induktiivsuse ning kondensaatorite jaoks mahtuvuse. Induktiivsused ning mahtuvused saab arvutada 2.6 ja 2.7 valemite alusel. G13 on sünkroonkondensaator. Sünkroonkondensaator PSCAD mudelis on modelleeritud samamoodi nagu väljepoolusega



sünkroonmasin, kuid turbiini pöördemomendi „ $T_m$ “ väärtuseks on võetud 0. Sünkroonkondensaatori põhiparameetrid samuti erinevad teiste generaatorite parameetritest (täpsemalt vaata lisa 1 toodud lähteandmes).

$$L = \frac{V_n^2}{\omega \cdot Q_n} \quad (2.6)$$

Kus:  $L$  – induktiivsus;

$V_n$  – sõlme nimipinge;

$Q_n$  – reaktori võimsus genereeritav nimipinge puhul;

$\omega$  – nurkkiirus.

$$C = \frac{Q_n}{\omega \cdot V_n^2} \quad (2.7)$$

Kus:  $C$  – mahtuvus;

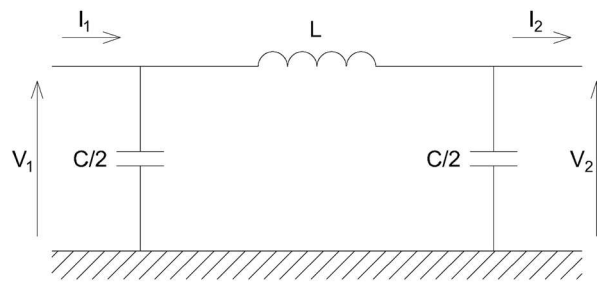
$V_n$  – sõlme nimipinge;

$Q_n$  – reaktori võimsus genereeritav nimipinge puhul;

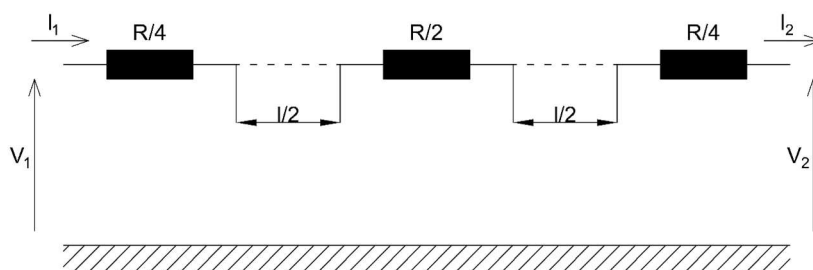
$\omega$  – nurkkiirus.

### 2.3.4 Ülekandeliinide mudeldamine

Nordic mudeli ülekandeliinid PSCAD tarkvaras on modelleeritud „Bergeron“ mudeli abil. „Bergeron“ mudel on ülekandeliini kadudeta mudel. Kadudeta ülekandeliini mudel tähendab, et mudelis ei ole arvestatud aktiiv- ning isolatsioonitakistusega. „Bergeron“ mudelis L ja C parameetrid on hajutatud piki liini, mis on ligikaudselt ekvivalentne  $\pi$ -seksioonide lõpmatu hulgale. Et ligikaudselt esitada aktiivtakistuse kaod, „Bergeron“ mudelis aktiivtakistus on jaotatud kolmeks osaks: 1/4 osa aktiivtakistusest on paigutatud liini alguses, 1/2 osa on paigutatud liini keskel, ning 1/4 osa on liini lõpus.



Joonis 2.16 Liini ühe faasi askeemi  $\pi$ -seksiooni representatsioon.  $V_1$  — pinge liini alguses;  $V_2$  — pinge liini lõpus;  $I_1$  — vool liini alguses;  $I_2$  — vool liini lõpus;  $L$  — induktiivsus;  $C$  — mahtuvus. [11]



Joonis 2.17 liini aktiivtakistuse arvestus „Bergeron“ mudelis.  $V_1$  — pinge liini alguses;  $V_2$  — pinge liini lõpus;  $I_1$  — vool liini alguses;  $I_2$  — vool liini lõpus;  $l$  — liini pikkus;  $R$  — liini aktiivtakistus. [11]

Liinide parameetrite sisestamise viis on valitud  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ . Lähteandmetes liinide parameetrid on antud teises formaadis:  $R$ ,  $X_L$ ,  $B/2$ . Mahtuvustakistuse  $X_C$  parameetri saamiseks on kasutatud valem 2.6.

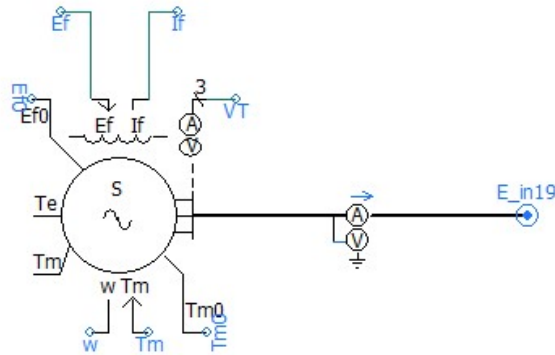
$$X_C = \frac{1}{B} \quad (2.6)$$

Kus:  $X_C$  — mahtuvustakistus;

$B$  — Mahtvuslik juhtivus;

### 2.3.5 Generaatorite mudeldamine

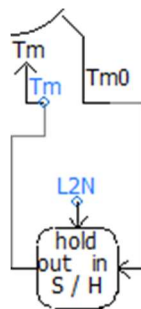
Generaatorite mudeldamiseks on võetud PSCAD sünkroonmasina valmismudel (vt. joonis 2.9).



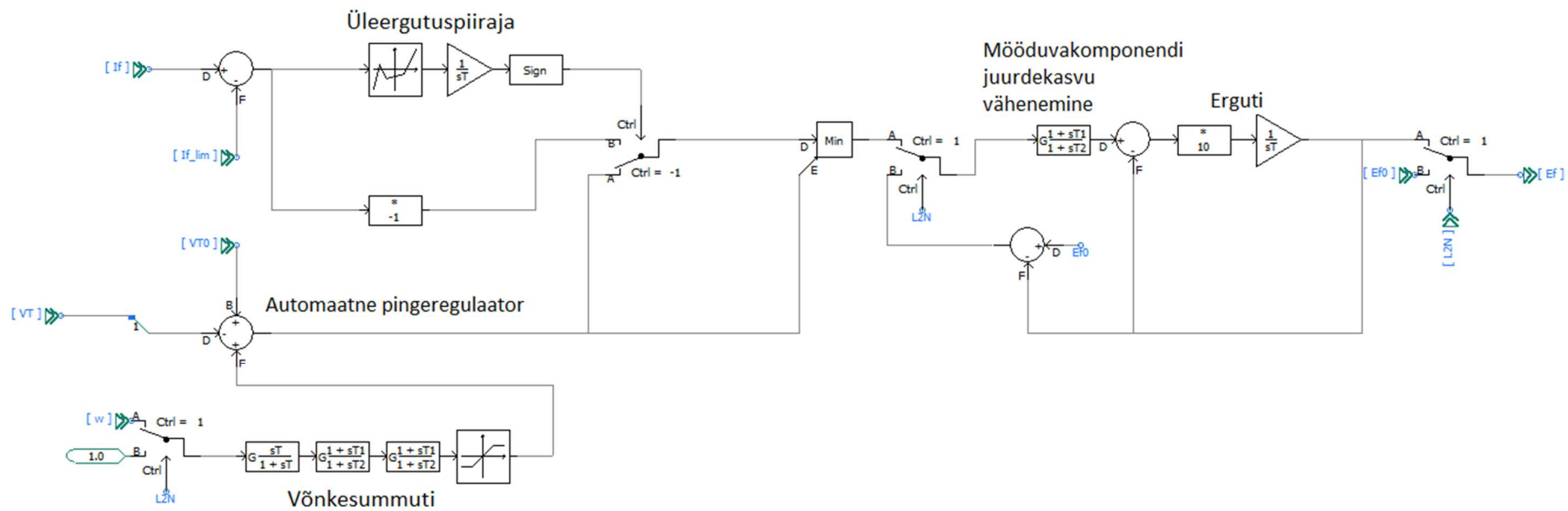
Joonis 2.9 Sünkroonmasina valmismudel (generaatori G19 näitel).

Generaatorite erguti, pingeregulaatori, võnkesummuti, üleergutuspiiraja, hüdroturbiini ning turbiini kiiruseregulaatori mudelid on koostatud kasutades pidevate funktsioonide plokke (Continuous System Model Functions). Generaatori erguti, pingeregulaator, võnkesummuti ning üleergutuspiiraja on esitatud ühendmudelina joonisel 2.11. Turbiini kiiruseregulaatori mudel on esitatud joonisel 2.12 ning hüdroturbiini mudel on esitatud joonisel 2.13.

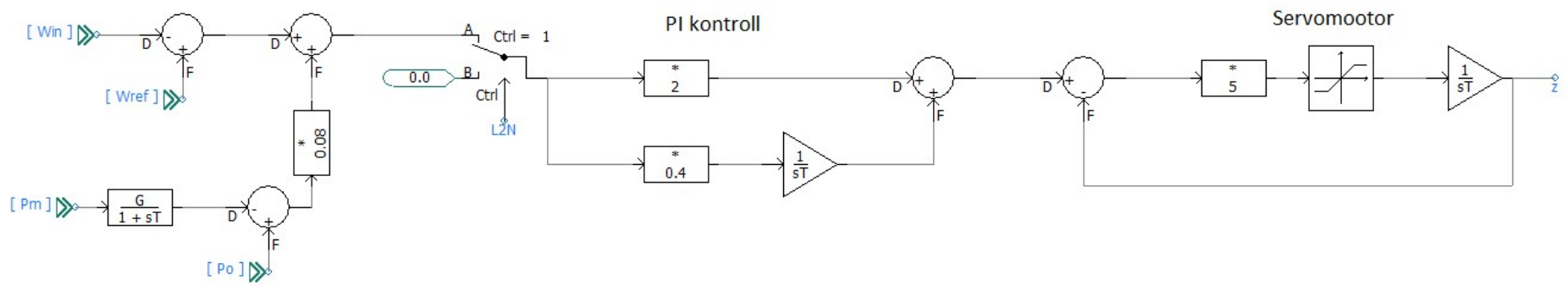
Hüdroturbiini ja kiiruseregulaatori mudel on kasutatud ainult hüdrogeneraatorite jaoks, mis asuvad „EQUIV“ ning „NORTH“ piirkondades. Vastavalt lähteandmetele soojusjaamade generaatorite, mis asuvad „CENTRAL“ ja „SOUTH“ piirkondades pöördemomendid on konstantsed. Konstantne pöördemoment PSCAD mudelis on teostatud „Sample and Hold“ ploki abil, mis on näidatud joonisel 2.10. „Sample and Hold“ plokk, mudeli käivitamisel, momendil, kui fikseeritud rootor vabaneb ja juhtimissüsteemid hakkavad töötama, võtab generaatori  $T_{m0}$  näidisväärtuse ning edaspidi edastab võetud näidisväärtust generaatori  $T_m$  (turbiini mehaaniline moment) sisendile konstantsena. Sünkroonkondensaatori G13 jaoks turbiini mehaaniline moment  $T_m$  on sätestatud nulliks.



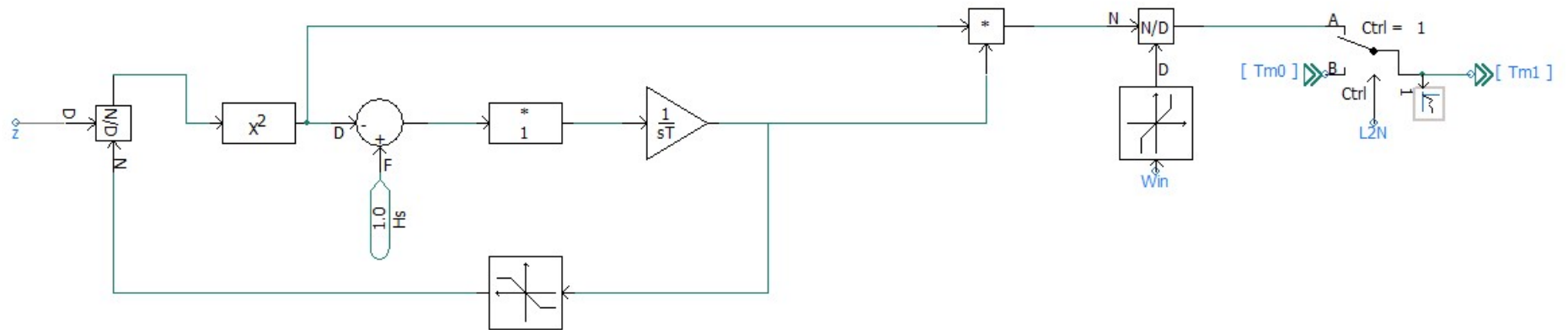
Joonis 2.10 PSCAD mudeli „Sample and Hold“ plokk.



Joonis 2.11 Generaatori erguti, pingeregulaatori, võnkesummuti ning üleergutuspiiraja ühendmudel (generaatori G19 näitel, PSCAD).



Joonis 2.12 Turbiini kiiruseregulaatori mudel (generaatori G19 näitel, PSCAD).



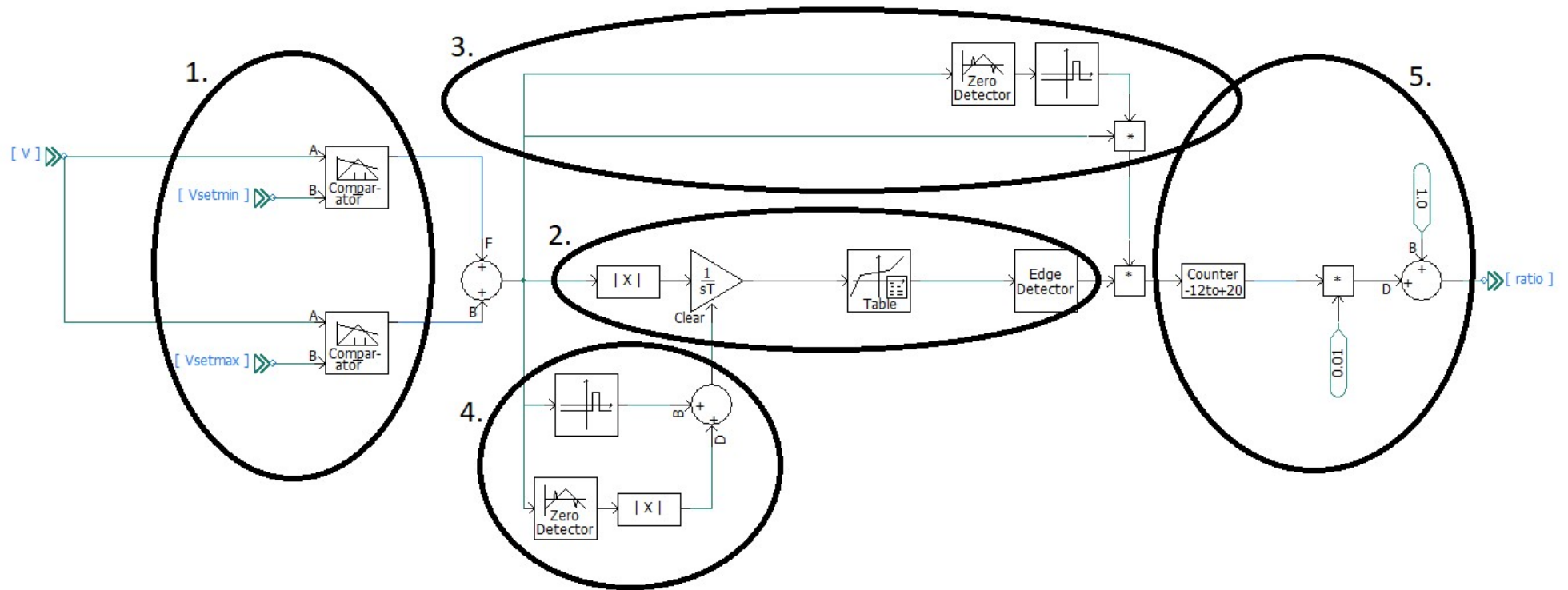
Joonis 2.13 Hüdroturbiini mudel (generaatori G19 näitel, PSCAD).

### 2.3.6 Mudeli käivitamine

PSCAD mudeli käivitamine on teostatud vastavalt PSCAD online juhendile [11]. Mudeli käivitamiseks iga generaatori jaoks sisestatakse generaatori alghetke klemmipinge amplituudväärtus ning faasinurk. Alghetkel, kui  $aeg = 0$  sünkroonmasinad töötavad nagu fikseeritud allikas, ehk allikast masinaks ülemineku parameeter on null. Esimesel sekundil, kui  $aeg = 1$  toimub mudeli üleminek masinaks, ehk allikast masinaks ülemineku parameeter muutub üheks. Fikseeritud rootorist normaalse masina seisundiks ülemineku parameeter antud hetkel jääb veel nulliks. Antud seisundil kehtivad masinate võrrandid, kuid juhtimissüsteemid (nt. rootori mähise erguti, turbiini kiiruse regulaator) veel ei tööta ning masin pöörleb konstantse kiirusega vastavalt etteantud nurksagedusele. Ajahetkel  $aeg = 10$  fikseeritud rootorist normaalseks masina seisundiks ülemineku parameeter muutub üheks ning masinate juhtimissüsteemid hakkavad töötama normaalses režiimis. Selleks, et teha fikseeritud rootorist normaalseks masinaks ülemineku sujuvamaks, lähteandmetes esitatud juhtimissüsteemide plokk skeemides on tehtud täiendused. Jooniselt 2.10 on näha, et kui fikseeritud rootorist normaalseks masinaks ülemineku parameeter ( $L2N$ ) on null, siis sageduseks Võnkesummuti plokk skeemis on kasutatud 1 sü, ergutussüsteemi väljund  $E_f$  (ergutusmähisele rakendatav elektrivälja pinge) võrdub  $E_{f0}$  (elektrimasina ergutusmähise pingeväärtus käivitamise perioodi jooksul), erguti sisendparameeter on võetud  $E_{f0} - E_f$ . Samuti, kui  $L2N = 0$ , siis vastavalt joonistele 2.11 ja 2.12 Hüdro turbiini mudeli pöördemomendi väljundparameeter  $T_m$  võrdub  $T_{m0}$  (masinast saadud pöördemomendi parameeter) ning sageduse hälve on võetud nulliks. Kui fikseeritud rootorist normaalseks masinaks ülemineku parameeter  $L2N$  muutub üheks, siis ülalpool kirjeldatud juhtimissüsteemide täiendused rohkem ei kehti ning juhtimissüsteemid hakkavad töötama normaalses režiimis.

### 2.3.7 Tarbijate trafode mudeldamine

Töö käigus esialgses variandis PSCAD mudel oli koostatud koos tarbijate trafode ning trafode astmelülititega. Hiljem tarbijate pingemadaldustrafod olid eemaldatud mudelist. Pingemadaldustrafode eemaldamise põhjuseks oli see, et mudeli käivitamine ja katsetamine oli teostatud tudengi litsentsiga PSCAD tarkvaras kus elektriühenduste arv oli piiratud ning täielik mudel koos astmelülititega ei mahtunud lubatud piiride sisse. PSCAD mudeli esialgses variandis automaatsete astmelülitite jaoks oli koostatud eraldi plokk skeemid, sest PSCAD tarkvaras ei ole ettenähtud valmis astmelülitite mudeleid. Kuigi trafode astmelülitid olid eemaldatud PSCAD mudelist, antud jaotises ikkagi on toodud koostatud astmelülitite skeemi põhimõtted. Ise koostatud automaatse astmelüliti plokk skeem on esitatud joonisel 2.14.



Joonis 2.14 Tarbijate trafode automaatse astmelüliti PSCAD tarkvaras koostatud plokk skeem; 1- esimeses piirkonnas tarbija lattide pinge väärtus võrreldakse etteantud minimaalse ja maksimaalse piirväärtustega ning sõltuvalt sellest edasi saadetakse kas -1, 0 või +1 signaal; 2- juhul, kui tarbija lattide pinge ei ole normide piirides, siis teise piirkonna elemendid saadavad edasi etteantud intervallidega impulsisignaali; 3- kolmanda piirkonna elemendid määravad, mis märgiga impulsisignaali saadetakse teisest piirkonnast viienda piirkonda; 4- neljandas piirkonnas asuvad elemendid nullistavad teise piirkonna integraatori, kui tarbija lattide pinge on jälle piirväärtuste vahel; 5- viienda piirkonna elemendid määravad trafo ülekandesuhe, mis saadetakse edasi trafo ülekandesuhe sisendisse.

Plokkskeemi esimeses piirkonnas asuvad komponendid võrdlevad tarbija pinget etteantud parameetritega. Kui tarbija pinget on suurem, kui etteantud maksimaalne väärtus, siis edasi saadetakse signaal „-1“. Kui tarbija pinget on väiksem, kui etteantud minimaalne väärtus, siis edasi saadetakse signaal „1“. Kui tarbija pingeväärtus asub etteantud piiride sees, siis edasi saadetakse signaal „0“. Plokkskeemi teises piirkonnas asuvad elemendid, mis saavad edasi impulsi etteantud intervalliga juhul, kui tarbija pingeväärtus ei ole normi piiride sees. Impulsi intervallid on seadistatud „Table“ elemendis, mis kujutab endast XY ülemineku funktsiooni tabeli kujul. Kui tarbija pinget väärtus lahkub etteantud piire, siis esimene impulss saadetakse eriajavahemiku pärast (nt. 30 sekundit). Ülejäänud impulsid saadetakse edaspidi ühesuguste ajaintervallidega (nt. 8 sekundit) kuni pingeväärtus tuleb tagasi lubatud piiride sisse. Kolmandas piirkonnas asuvad elemendid määravad mille märgiga saadetakse impulss teisest piirkonnast viienda piirkonda. Signaali märk sõltub sellest, kas tarbija pingeväärtus on suurem, kui ülemine piirväärtus, või vähem, kui alumine piirväärtus. Täiendavalt antud piirkonnas asuvad elemendid, mis blokeerivad teisest piirkonnast viienda piirkonda edastava signaali juhul, kui tarbija pingeväärtus tuleb tagasi etteantud piiride sisse. Neljandas piirkonnas asuvad elemendid nullistavad (tühistavad) teisest piirkonnas kasutatavat integraatorit juhul kui tarbija pingeväärtus tuleb tagasi etteantud piiride sisse. See on tehtud selle jaoks, et kui tarbija lattide pingeväärtus jälle lahkub etteantud piire, siis esimene astme muutumine toimuks eriajavahemikku pärast, mis on natuke pikem, kui edaspidised astmelüliti seisundi muutmise ajaintervallid. Viimasel piirkonnas asub loendur, mille abil sätestatakse trafo ülekandesuhe. Tarbijate trafodel on 33 astet, seega loenduri minimaalne väärtus on -12 ning maksimaalne väärtus on +20. Alguses loenduri väljundi väärtus on „0“, ehk trafo astmelüliti väljund esialgu on „1.00“. Kui loenduri väljundi väärtus on näiteks 20, siis astmelüliti väljundi väärtus on „1.2“ ( $1.00 + 20 * 0.01$ ).

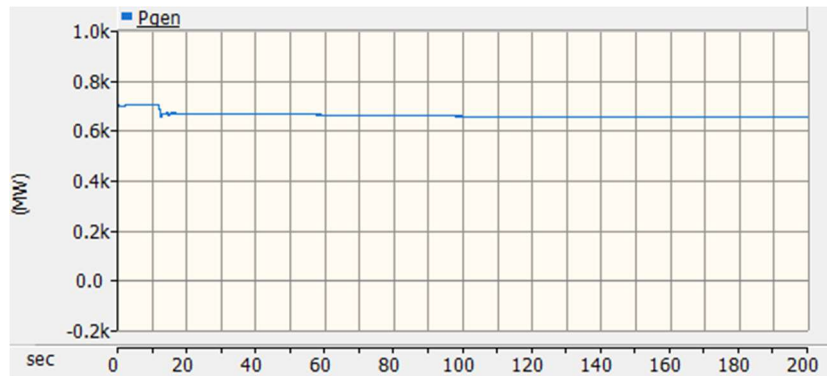
## **2.4 Mudeli testimised ja kontrollarvutused**

### **2.4.1 Mudeli esmane käivitamine ning kontrollmõõtmised.**

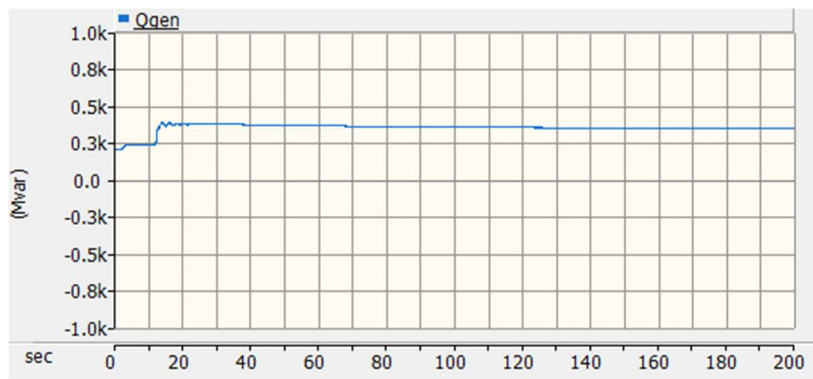
Koostatud Nordic mudeli esmane simulatsioon on teostatud 200 sekundi jooksul. Simulatsiooni ajasammuks on võetud 0,05 sekundit ning simulatsioon on teostatud mudeli A talitluspunktis (vt. jaotis 2.2.9). Esmase simulatsiooni jooksul süsteem ei kaotanud stabiilsust ning ühtegi generaatori klemmipinget väärtused ei langenud alla 0.85 sü. Tarbijate sõlmede pingeväärtused simulatsiooni käigus ei saa objektiivselt hinnata, kuna mudelist on välja jäetud tarbijate trafod koos astmelülititega (vt. jaotis 2.3.7). Allpool joonistel 2.15- 2.20 on toodud generaatori g9



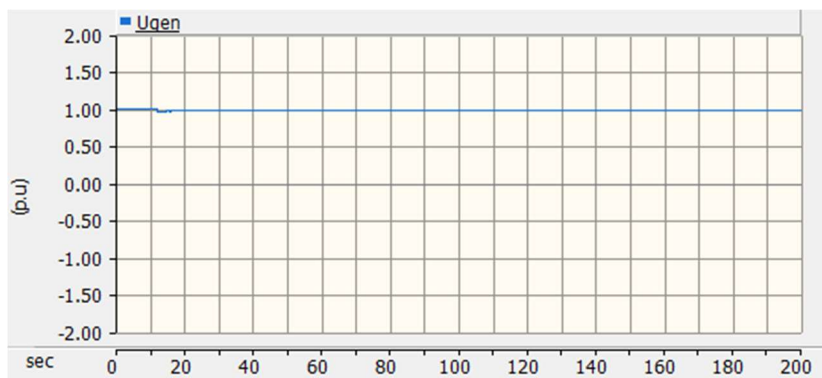
mõõtmistulemused simulatsiooni jooksul. Ülejäänud generaatorite mõõtmistulemused on sarnased generaatori g9 mõõtmistulemustele.



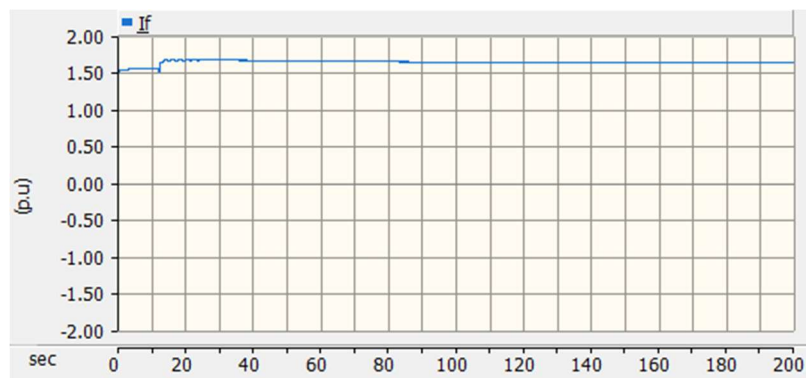
Joonis 2.15 Generaatori g9 mõõdetud aktiivvõimsuse väärtused 200 sekundilise simulatsiooni käigus (PSCAD).



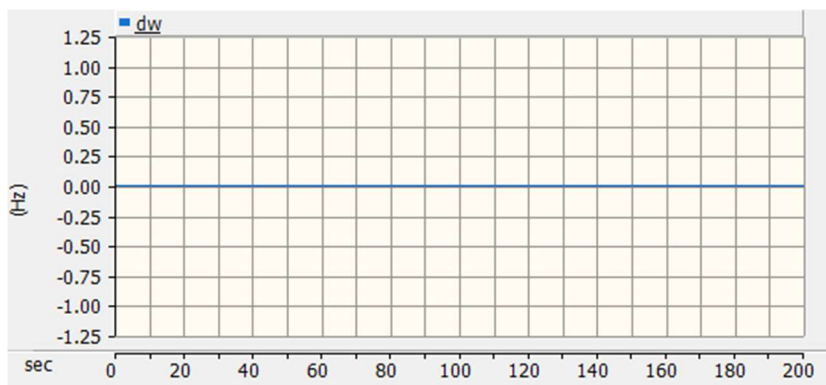
Joonis 2.16 Generaatori g9 mõõdetud reaktiivvõimsuse väärtused 200 sekundilise simulatsiooni käigus (PSCAD).



Joonis 2.17 Generaatori g9 mõõdetud klemmipinge väärtused 200 sekundilise simulatsiooni käigus (PSCAD).



Joonis 2.18 Generaatori g9 mõõdetud ergutusvoolu väärtused 200 sekundilise simulatsiooni käigus (PSCAD).

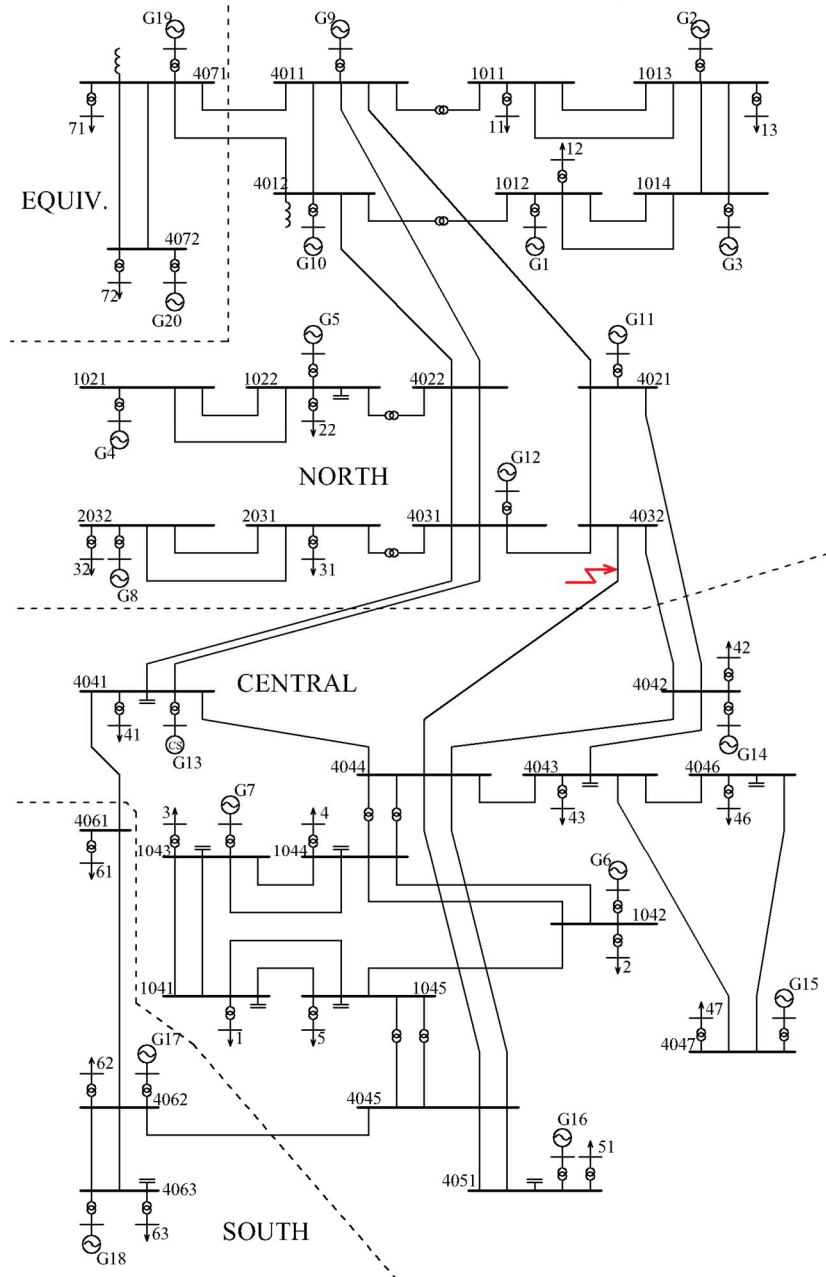


Joonis 2.19 Generaatori g9 mõõdetud sageduse kõrvalekalle väärtused 200 sekundilise simulatsiooni käigus (PSCAD).

## 2.4.2 Talitluspunkt A

Talitluspunktis A vastavalt lähteandmetele [3] teostatakse Nordic mudeli käitumise analüüs püsiva häiringu puhul. Häiringuks talitluspunkti A jaoks võetakse kolmefaasiline püsilühis liinil 4032- 4044 (joonis 2.20). Kuna lühise oletatav asukoht on sõlme 4032 lähedal, võib modelleerida lühise otse 4044 sõlmele. Lühise kestus on 5 perioodi (0.1 sekundit) ning selle kõrvaldamiseks tehakse lahti liin 4032- 4044. Antud testi peamine eesmärk on liini 4032-4044 väljalülitamine ning sellel põhjusel lühise simuleerimine ei ole ilmtingimata vajalik. Vastavalt lähteandmetele lihtsalt liini väljalülitamisega saavutatakse sarnane tulemus nagu koos lühise simuleerimisega liini väljalülitamise puhul. Sellel põhjusel PSCAD mudeli talitluspunktis A käitumise analüüsi teostamiseks püsiva häiringu puhul on modelleeritud lihtsalt liini 4032-4044 avamine ilma lühise modelleerimiseta. Mudeli käitumise analüüsiks pärast liini 4032-4044 väljalülitamist vaadeldakse

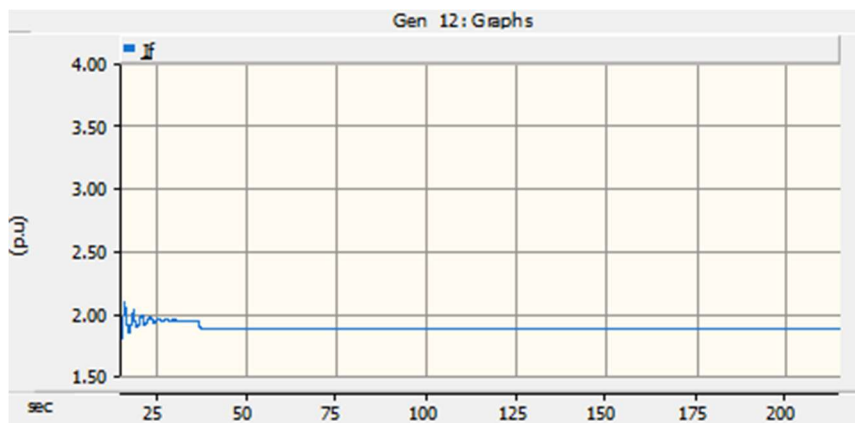
ülekandevõrgu sõlmede pinged, sünkroongeneraatorite ergutusvoolud ja klemmpinged, trafode ülekandeühete muutmine häiringu pärast, generaatorite rootorite kiiruste ning sageduste hälbed.



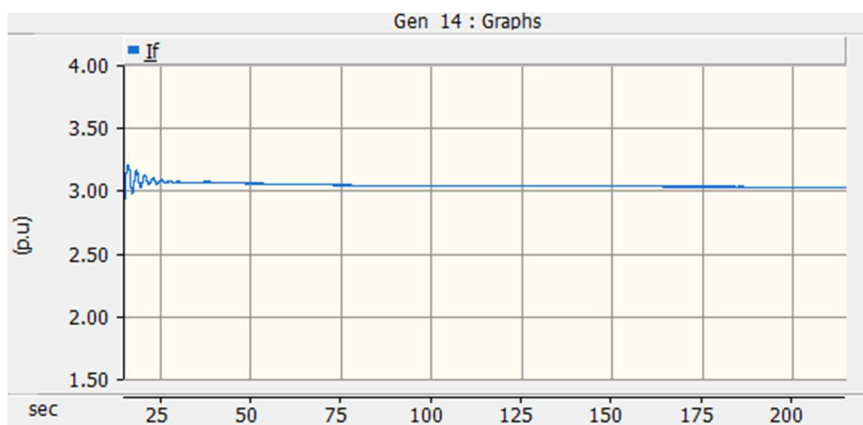
Joonis 2.20 Talitluspunkt A: kolmefaasiline lühis liinil 4032- 4044.

Vastavalt lähteandmetele [3] generaatorite ergutusvoolud piiratakse üleergutuspiirajatega esimese 140 sekundi jooksul järgmises järjekorras g12, g14, g7, g11, g6, g15 ja g16. PSCAD tarkvaras teostatud simulatsiooni käigus pärast liini 4032-4044 väljalülitamist ergutusvoolud piiratakse ainult g12 generaatoril ligikaudselt 37 sekundil (joonis 2.21). Generaatori g14 ergutusvoolu väärtus simulatsiooni käigus on väga lähedal ülempiirile 3.0618 sü, kuid veel ei piirata ergutusvoolupiirajaga (joonis 2.22). Generaatorite g7, g11, g6, g15, g16 ergutusvoolud simulatsiooni käigus ei ületa

lubatud piire või ületavad piire lühiajaliselt ja liigvoolupiirajad ei jõua reageerida. PSCAD tarkvaras tehtud simulatsioonis ühtegi generaator ei kaota sünkronismi süsteemiga ning süsteem jätkub normaalselt funktsioneerima. Liini 4032-4044 avamise simulatsiooni tulemuse erinevus lähteandmetest võib seletada sellega, et PSCAD tarkvaras koostatud mudelist on välja jäetud tarbijate trafod astmelülititega. Talitluspunkti A simulatsioonide tulemused lähemalt vaadeldakse ning võrreldakse „PES-TR19“ dokumendis esitatud tulemustega käesoleva töö kolmandas osas.



Joonis 2.21 Generaatori g12 ergutusvool piiratakse ergutusvoolupiirajaga pärast liini 4032-4044 väljalülitamist (PSCAD, talitluspunkt A).



Joonis 2.22 Generaatori g14 ergutusvool pärast liini 4032-4044 väljalülitamist (PSCAD, talitluspunkt A).

### 2.4.3 Talitluspunkt B

Talitluspunktis B teostatakse Nordic süsteemi mudeli analüüs mitu erinevate häiringute puhul:

- 5 perioodiline (0,1 sekundit) lühis mis tahes liinil, mis on kõrvaldatud liini väljalülitamisega.

- Mis tahes generaatori väljalülitamine, välja arvates generaatorid g19 ja g20, mis on ekvivalentsed generaatorid.

Vastavalt lähteandmetele talitluspunktis B Nordic süsteemi häiringujärgne talitus loetakse vastuvõetavaks, kui 600 sekundi jooksul häiringu pärast:

- Kõik jaotussõlmede (tarbijate) pinged on taastanud normaalsed väärtused vahemikus [0.99, 1.01], ehk kõrgepinge lattide pinged on taastanud väärtused vahemikus [0.8712, 1.212] (vt. seletus allpool).
- Mitte ükski generaatori pinge ei langenud alla 0.85 sü, väljaarvates ajavahemik, kui lühis ei ole veel kõrvaldatud.
- Ei toimu elektrisüsteemi sünkronismi kadu.

Kuna PSCAD tarkvaras koostatud Nordic süsteemi mudelis on puudu tarbijate trafod astmelülititega ning tarbijad on ühendatud otse kõrgepinge lattidele, siis esimesele kriteeriumile vastavuse (tarbijate sõlmede pinged) ei ole võimalik kontrollida. Kuna trafode ülekandesuhted asuvad vahemikus 0.88 kuni 1.20, siis võiks selle kriteeriumi asemel jälgida, et kõrgepinge lattidel, kuhu ühendatud tarbijad, pinge väärtused oleksid vahemikus 0.8712 ( $0.99 \cdot 0.88$ ) kuni 1.212 ( $1.01 \cdot 1.20$ ).

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile Nordic süsteem talitluspunktis B vastab ülalpool toodud 600 sekundite kriteeriumitele mis iganes N-1 häiringu puhul välja arvatud generaatori g6 väljalülitamine. Generaatori g6 väljalülitamise puhul süsteem ei saa täielikult taastada pinge väärtused sõlmedes 1042 ja 2. Sõlmel 1042 pärast generaatori väljalülitamist vastavalt lähteandmetele pinge langeb kuni 0.76 sü väärtuseni. PSCAD tarkvaras koostatud mudelis 150 sekundil sõlme 1042 pingeväärtus on 0.83 sü. Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile probleem 1042 sõlme pingega lihtsalt lahendatakse põikkompenseerimise seadmete lisamisega. Sõlmele 1042 lisatakse 2 tükki 80 Mvar nominaalvõimsusega põikkompenseerimise seadet ning kompenseerimisseadmed lülitakse süsteemi, kui pinge on liiga madal, näiteks 10 ja 20 sekundil pärast generaatori väljalülitamist. Pärast põikkompenseerimise seadmete lisamist, generaatori g6 väljalülitamise simulatsiooni käigus 1042 sõlme pinge taastus vastavalt „PES-TR19“ dokumendi põhiosa andmetele kuni 0.91 sü ning PSCAD mudelis 0.96 sü väärtuseni, mis on vastuvõetavad väärtused. PSCAD mudeli N-1 testi tulemuste täpsem analüüs ning võrdlus „PES-TR19“ dokumendis esitatud tulemustega vaata käesoleva töö kolmandast osast jaotisest 3.4.2.

#### 2.4.4 Ennetav pingestabiilsuse analüüs talitluspunktid B

Vastavalt lähteandmetele[3] ennetava pingestabiilsuse analüüsi testidega leitakse elektrisüsteemi normaaltalitluse limiit. Normaaltalitluse limiit siin on maksimaalne elektrisüsteemi koormus, mille puhul süsteem jääb stabiilseks igaühe eelmises jaotises loetletud häiringu pärast (mis tahes liini või generaatori väljalülitamise pärast, välja arvatud generaatorid g19 ja g20). Ennetava pingestabiilsuse analüüsi käigus tõstetakse koormus „Central“ piirkonnas ning hinnatakse elektrisüsteemi stabiilsus N-1 kriteeriumi puhul. Süsteemi stabiilsuse hindamiskriteeriumid käesolevas jaotises kirjeldatud testide puhul on samad nagu on toodud jaotises 2.4.3. Testide käigus „Central“ piirkonna koormus tõstetakse sammuga 25MW, mis on jagatud selles piirkonnas asuvate 11 koormuste vahel võrdeliselt nende nominaalväärtustega. Koormuste võimsustegur jääb samaks. Aktiivvõimsuste variatsioonid kompenseeritakse generaatoriga g20. Ennetava pingestabiilsuse analüüsi puhul oletatakse, et trafod 1044-4044, 1044-4044b, 1045-4045 ja 1045-4045b reguleeritakse operaatoriga nii, et pinge sõlmedel 1044 ja 1045 oleks normaalses vahemikus. Operaatorite asemel süsteemis peavad olema kasutatud trafode automaatsed astmelülitid. Kuna koos astmelülititega kogu süsteem ületaks PSCAD tudengi litsentsi limiite, antud testid on tehtud operaatori sekkumise arvestamata (vt. seletus jaotisest 2.3.7).

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile, kui võtta arvesse ainult generaatorite väljalülitamised, siis kõige tõsise tagajärgedega on generaatori G14 väljalülitamine, mille puhul normaaltalitluse võimsuse limiit on ainult 25 MW. Sündmuse järjekord siis on järgmine: pärast generaatori G14 väljalülitamist, selle generaatori võimsus (630MW) kompenseeritakse „Northem“ ja ekvivalentgeneraatoritega, mis tõstab võimsuste ülekandmine „North“ ja „Central“ piirkondade vahel. Samal ajal kaotatakse reaktiivvõimsuse reserv sõlmel g14. Vastavalt PSCAD tarkvaras tehtud simulatsioonile generaatori G14 väljalülitamine on jäänud kõige tõsisemate tagajärgedega, kuid süsteemi normaaltalitluse limiit on 150MW.

Kui võtta arvesse ainult liinide väljalülitamised, siis vastavalt „PES-TR19“ kõige tõsisemate tagajärgedega on liini 4011-4021 väljalülitamine, mille puhul normaaltalitluse võimsuse limiit on 250MW. PSCAD tarkvaras tehtud simulatsioonis liini 4011-4021 väljalülitamise puhul süsteem kaotab stabiilsust, kui „Central“ piirkonna koormus on suurendatud 600 MW võrra. Seejuures liini 4032-4044 väljalülitamise puhul PSCAD tarkvaras koostatud süsteem kaotab stabiilsust juba siis, kui „CENTAL“ piirkonna võimsus on suurendatud 550 MW võrra. See tähendab, et vastavalt PSCAD tarkvaras tehtud simulatsioonile kõige tõsisema tagajärgedega on 4032-4044 liini väljalülitamine, mitte 4011-4021 liini väljalülitamine. PSCAD mudeli ennetava pingestabiilsuse analüüsi testide

tulemuste täpsem analüüs ning võrdlus „PES-TR19“ dokumendis esitatud tulemustega vaata käesoleva töö kolmandast osast jaotisest 3.4.3.

#### **2.4.5 Elektrisüsteemi maksimaalse koormustaluvuse leidmine**

Vastavalt „PES-TR19“ raportile maksimaalne koormustaluvus leitakse süsteemi talitluspunktis B. Elektrisüsteemi maksimaalse koormustaluvuse leidmiseks tõstetakse aeglaselt kogu „Central“ piirkonna koormus kiirusega 15MW/sek ning dünaamilise simulatsiooni käigus koostatakse PV kõverad sõlmede 1041, 4044 ja 1044 jaoks.

Käesoleva töö käigus maksimaalse koormustaluvuse leidmise testid ei olnud teostatud. Antud testi väljajätmise põhjuseks oli see, et PSCAD tarkvara tarbijate mudelites puudub võimalus sujuvalt tõsta koormust simulatsiooni käigus. Alternatiiviks on võimalik tõsta koormust astmeliselt kasutades mitu tarbija plokki ühendatud ühte tarbimissõlme, kuid sellisel juhul lisatakse palju täiendavaid elektrilisi ühendusi ning süsteem ületab tudengi litsentsi piire.

#### **2.4.6 Parandav häiringujärgne kontroll**

„PES-TR19“ raportis Nordic mudeli kirjeldamise lõpus on toodud parandava häiringujärgse kontrolli meetodid, mille abil võib tõsta elektrisüsteemi suutlikkuse säilitada stabiilsust häiringute pärast. „PES-TR19“ dokumendis ei ole antud täpsemaid andmeid kirjeldatud häiringujärgse kontrolli meetodite testide teostamiseks ja tulemuste võrdluseks ning käesoleva töö käigus antud meetodid simulatsioonide käigus ei olnud rakendatud. Täiendavalt antud testide teostamise jaoks oleks vaja lisada süsteemi täiendavaid elemente või kasutada tarbijate trafode astmelüliteid, mis ei olnud võimalik PSCAD tarkvara tudengi litsentsi piirangute pärast (ligemalt vt. jaotis 2.3.7). Allpool on toodud „PES-TR19“ dokumendis pakutud parandava häiringujärgse kontrolli meetodite lühikirjeldused.

Üks pakutud häiringujärgse kontrolli meetoditest oli tarbijate trafode astmelülite sätete vähendamine 0.05 sü võrra. Antud muutuse puhul tarbijate sõlmede pingete alampiirid vähendatakse ning häiringu pärast, koos pingelangustega, langevad ka tarbimisvõimsused. Tarbimisvõimsuste languse võimalus teeb süsteemi paindlikumaks ning annab täiendav võimalus süsteemile talitleda edaspidi ilma stabiilsuse kaotamata. Teine pakutud häiringujärgse kontrolli meetoditest on tarbijate koormuste vähendamine etteantud sammudega (näiteks 50MW). Koormuse vähendamine toimub juhul, kui tarbijatele lähema ülekandesõlme pinge langeb alla alampiiri rohkem kui 3 sekundiks. Teise meetodi mõju süsteemi stabiilsusele on sarnane esimese

meetodiga. Kolmas pakutud häiringujärgse kontrolli meetoditest on generaatorite üleergutuspiirajate häälestamine. üleergutuspiirajate õigeks häälestamiseks esialgu tuleb leida elektrisüsteemi maksimaalse koormustaluvuse piiri tundlikkuse analüüsi abil. Antud analüüs on põhjendatud ilminguga, et trafode astmelülitite katsed taastada koormuste võimsused viivad selleni, et süsteem läbib maksimaalse koormustaluvuse piiri. Antud piiri on võimalik leida, kui vaadata kogu genereeritava reaktiivvõimsuse tundlikkust üksiktarbijaga tarbitava reaktiivvõimsuse suhtes. Kui elektrisüsteemi tarbimisvõimsus on maksimumi piirile lähedal, siis antud tundlikkus kasvab oluliselt, kuid hetkel kui elektrisüsteemi tarbimisvõimsus ületab maksimumi piiri siis tundlikkus järsult muutub märgi (reaktiivvõimsuse nõudmise kasvamisel genereeritava reaktiivvõimsuse hulk kiiresti väheneb). Kirjelatud ilmingut võib ennetada generaatorite üleergutuspiirajate häälestamise abil, mis piiravad genereeritavaid võimsusi enne, kui maksimaalse koormustaluvuse piir on ületatud.



### **3. STANDARDNE NORDIC MUDEL NING SELLE VÕRDlus TEISTE TARKVARADE MUDELITE NING ARVUTUSTULEMUSTEGA.**

#### **3.1 Üldist**

Käesoleva töö kolmandas osas toodetakse PSCAD mideli simulatsioonide tulemuste võrdlus nii "PES-TR19" dokumendi põhiosas toodud etalontulemustega kui ka ANATEM ning WpSTAB tarkvarade mudelite simulatsioonide tulemustega, mis on toodud „PES-TR19“ dokumendi lisades. Samuti kolmanda osa lõpus on toodud PSCAD mudeli analüüs ning hinnang. „PES-TR19“ raporti internetileheküljelt [9] on võimalik ka leida Nordic mudeli sisendandmed mõnede levinud elektrisüsteemide simulatsiooni tarkvara jaoks: ASCII, RAMSES, PSS/E, ANATEM ning DigiSilent Power Factory, kuid käesolevas töös antud andmed ei kasutata.

#### **3.2 ANATEM tarkvaras koostatud mudeli eripära**

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile ANATEM mudeli koostamisel tekkisid mõned sarnased probleemid, nagu PSCAD mudeli koostamisel. Esimeseks sarnaselt PSCAD tarkvaraga ANATEM tarkvaras ei olnud valmis komponente erguti, automaatse pingeregulaatori, võnkesummuti, üleergutuspiiraja, turbiini, kiiruse regulaatori ning trafode astmelüliti modelleerimiseks ning selliste süsteemide mudelid olid koostatud pidevate funktsioonide plokkidest (Continuous System Model Functions). Teiseks sarnaselt PSCAD tarkvaraga ANATEM tarkvaras puudus võimalus modelleerida sujuvat koormuse tõstmist ning koormuse tõstmise ANATEM tarkvaras oli modelleeritud astmeliselt. Kuna PSCAD tarkvara tudengi versiooni piirangute tõttu puudus võimalus modelleerida koormuse tõstmist samuti astmeliselt, sellega seotud testid antud töö käigus ei olnud teostatud (vt. jaotis 2.4.5).

Täiendavalt ANATEM tarkvara mudelis olid tehtud mõned muudatused, mis mingil määral mõjusid testide tulemusi, kuid antud muudatuste mõju vastavalt „PES-TR19“ dokumendile oli väheoluline. Üks muudatustest oli see, et ANATEM tarkvarade eripärade tõttu generaatorite ergutusvoolude väärtused mudelis olid asendatud vastavalt järgmisele võrrandile 3.1 [3]:

$$I_{fd}^{tehniline\ raport} = (X_d - X_l) \times I_{fd}^{ANATEM} \quad (3.1)$$

Kus:  $I_{fd}^{tehniline\ raport}$  – ergutusvoolu väärtus „PES-TR19“ raportis;

$I_{fd}^{ANATEM}$  – ergutusvoolu väärtus ANATEM tarkvara mudelis;

$X_d$  – generaatori sünkroonreaktants;

$X_l$  – generaatori lekkereaktants.

Teine muudatus oli see, et ANATEM mudeli generaatorite jaoks olid kasutatud küllastuse kõverad, mis olid võetud ANATEM tarkvara juhenditest. Küllastuse kõverate erinevused ei olnud märkimisväärsed ning ei mõjutanud oluliselt simulatsioonide tulemusi. „PES-TR19“ dokumendi lisades oli toodud ANATEM tarkvara mudeli A talitluspunkti testide tulemused. ANATEM mudeli testide käigus jälgitavad parameetrid olid analoogsed nendega, mis oli toodud „PES-TR19“ dokumendi põhiosas. „PES-TR19“ dokumendis ANATEM mudeli graafikute seas olid esitatud tarbijate trafode ülekandesuhete muutmiste kõverad, kuid käesolevas töös antud kõveraid ei ole esitatud või võrreldud, kuna PSCAD mudelis on puudu tarbijate trafod. ANATEM mudeli reageeringu uurimise jaoks oli kasutatud, analoogselt „PES-TR19“ dokumendi põhiosaga, lühise simulatsioon liinil 4032-4044, ehk antud liini avamine (vt. täpsemalt jaotis 2.4.2).

### 3.3 WpSTAB tarkvaras koostatud mudeli eripära

WpSTAB tarkvaras kasutatakse kvaasistaatiline simulatsioon (Quasi steady state simulation). Vastavalt „PES-TR19“ raporti ametlikul internetileheküljel [9] esitatud andmetele kvaasistaatiline simulatsioon tähendab, et lühiajalised dünaamilised protsessid vaadeldakse nagu staatilised ning asendatakse vastavate tasakaalu võrranditega. Antud asendus lihtsustab mudelit ning tõstab arvutamise efektiivsuse. Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile WpSTAB tarkvaras saadud graafikud on väga sarnased „PES-TR19“ põhiosas esitatud graafikutega. Peamine erinevus on see, et WpSTAB tarkvara abil teostatud simulatsioonide käigus süsteemi kollaps toimub varem kui „PES-TR19“ põhiosas kirjeldatud tulemuste järgi. Antud erinevus seletatakse sellega, et kui generaatorite ergutusvoolud on piiratud üleergutuspiirajatega ja generaatorid kaotavad stabiilsust, WpSTAB tarkvara jätkuvalt eeldab, et süsteem on tasakaalus ning kasutab tasakaalu võrrandeid. Lähtudes sellest, et WpSTAB tarkvara kogu simulatsiooni käigus kasutab tasakaalu võrrandeid, võib öelda, et simulatsioonide tulemused peaksid erineda „PES-TR19“ põhiosas toodud tulemustest ainult

kohtades kus süsteem ei ole tasakaalu seisundis, näiteks otseselt pärast häiringu tekkimist. Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile WpSTAB tarkvaras teostatud simulatsioonis oli kasutatud Nordic mudeli talitluspunkt A (vt. jaotis 2.4.2) ning simulatsiooni käigus oli jälgitud mudeli reageering lühisele liinil 4032-4044 koos liini avamisega.

### 3.4 PSCAD tarkvara mudeli ning „PES-TR19“ dokumendis esitatud arvutustulemuste võrdlus

Antud jaotises on esitatud PSCAD tarkvaras teostatud mudeli testide tulemuste võrdlused „PES-TR19“ dokumendis kirjeldatud analoogsete testide tulemustega. Võrdlused on tehtud kasutades PSCAD tarkvara ning „PES-TR19“ dokumendis esitatud graafikuid. Võrdluseks samuti on lisatud ANATEM ning WpSTAB tarkvarade mudelite simulatsioonide tulemuste graafikud, mis on leitavad „PES-TR19“ dokumendi lisadest. Simulatsioonide tulemuste võrdlused on tehtud järgmiste testide jaoks:

- Lühise simulatsioon liinil 4032- 4044 (liini avamine) mudeli talitluspunktis A
- Süsteemi N-1 kriteeriumile vastavus mudeli talitluspunktis B
- Ennetav pingestabiilsuse analüüs talitluspunktis B:
  - süsteemi normaaltalitluse limiidi leidmine võttes arvesse ükskõik mis generaatori valjälülitamist
  - süsteemi normaaltalitluse limiidi leidmine võttes arvesse ükskõik mis liini avamist

Joonisel 3.13 näidatud PSCAD tarkvara mudeli nurkade kõrvalekalded inertsikeskme suhtes oli mõõdetud kasutades võrrandit 3.2 [15].

$$\Delta\delta_{COI} = \left| \delta_i - \frac{\sum_1^i M_i \delta_i}{\sum_1^i M_i} \right| \quad (3.2)$$

Kus:  $\delta_i$  – i-nda generaatori rootori nurk;

$M_i$  – i-nda generaatori inertsikonstant;

$\Delta\delta_i^{COI}$  – i-nda generaatori rootori nurga kõrvalekalle inertsikeskme suhtes.

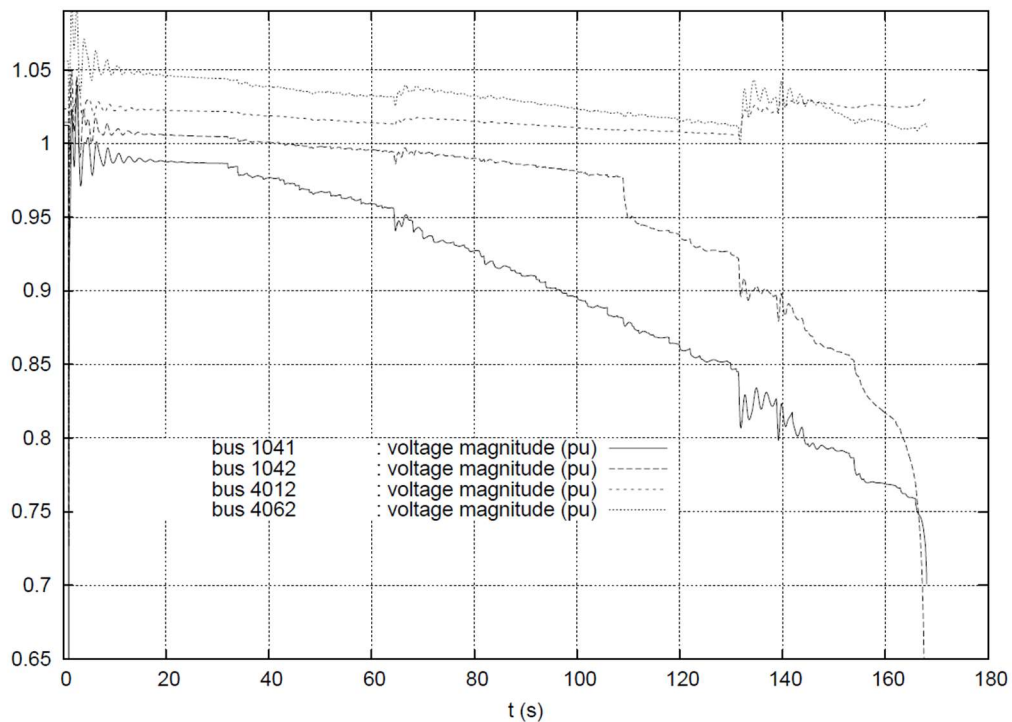
### 3.4.1 Lühise simulatsioon liinil 4032- 4044 mudeli talitluspunktis A

Lühise simulatsiooni puhul liinil 4032- 4044 mudeli talitluspunktis A on jälgitud ning võrreldud järgmised parameetrid:

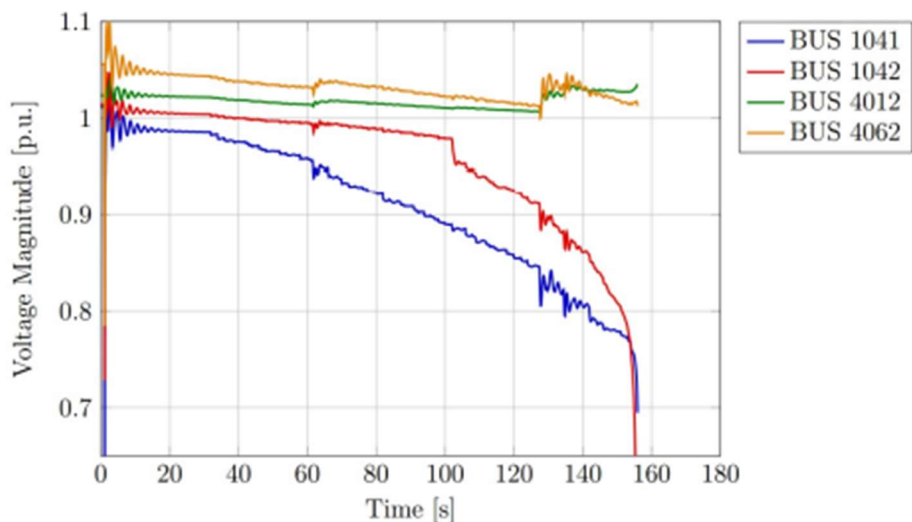
- Pinged jaotussõlmedel 1041, 1042, 4012 ning 4062
- Generaatorite ergutusvoolud
- Generaatorite klemmpinged
- Generaatorite rootorite kiirused
- Generaatorite rootorite nurgad (inertsikeskme suhtes)

„PES-TR19“ dokumendist on leitavad samuti tarbijate trafode ülekandesuhete muutmiste kõverad, kuid PSCAD mudelis tarbijate trafod olid välja jäetud ning seega antud parameetrite võrdluse teostus ei ole võimalik. Graafikutel 3.1, 3.2 ning 3.3 on esitatud võrdlemise jaoks jaotussõlmede pingete kõverad. Joonisel 3.1 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ dokumendi põhiosast. Joonisel 3.2 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ lisadest ning on tehtud ANATEM tarkvara mudelis. Joonisel 3.3 esitatud graafik on tehtud PSCAD tarkvara mudelis. „PES-TR19“ põhiosa ning ANATEM tarkvara graafikud on väga sarnased ning graafikutest on näha, et pinge jaotussõlmedel hakkab langema alates hetkest, mil tarbijate trafode automaatsed koormus-astmelülid hakkavad taastama koormuste pingeid, ehk 35 sekundil. Koormuste pingete taastumisega tõuseb kogu süsteemi koormus, mille peale reageerivad generaatorite ergutussüsteemid ja tõusevad ergutusvoolusid. Mõnede generaatorite ergutusvoolud ületavad maksimaalselt lubatud väärtusi ning üleergutuspiirajad hakkavad piirama generaatorite ergutusvoolusid ning nende kaudu genereeritavaid võimsusi. Tasakaal genereeritava ja tarbitava koormuse vahel süsteemis rikutakse ning süsteem hakkab kaotama stabiilsust. Mida rohkematel generaatoritel ergutusvoolud on piiratud seda rohkem koormust langeb teistele generaatoritele, mis toob kaasa juba teiste generaatorite üleergutuspiirajate aktiveerimist, mis jällegi veel halvendab olukorda. Sedamoodi ühest küljest tarbijate koormus-astmelülite ning teisest küljest generaatorite üleergutuspiirajate aktiveerimise mõjul toimub täielik süsteemi kustumine. Nagu on näha graafikutest 3.1 ning 3.2, täielik süsteemi kustumine toimub ligikaudselt kolmandal minutil.

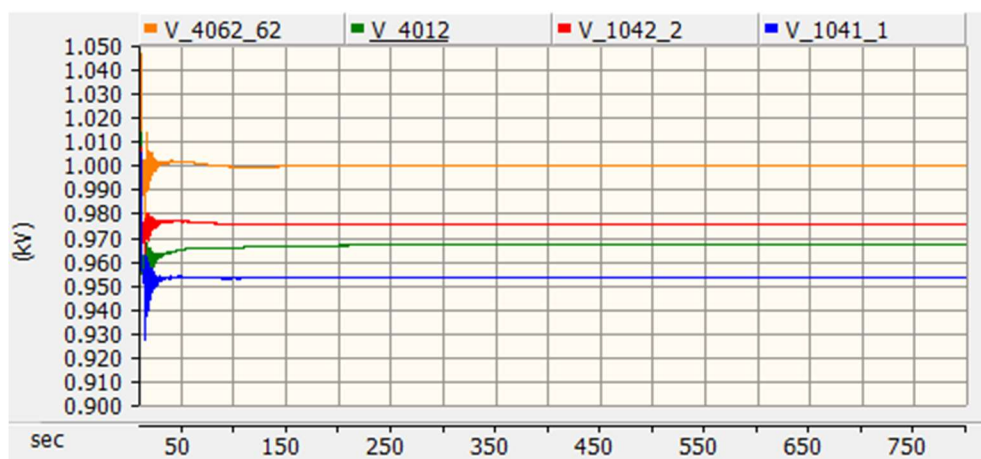
Vaadates PSCAD mudelist tehtud graafikut (joonis 3.3) on näha, et esimestel mõnekümnetel sekunditel graafik on sarnane „PES-TR1“ dokumendi graafikutega, kuid edaspidi jälgitavate sõlmede pinged ei lange ning süsteemi ebastabiilsust ei esine. PSCAD mudeli graafiku erinevus seletatakse sellega, et PSCAD mudelis puuduvad tarbijate trafod koos koormus- astmelülititega. Joonistel 3.1 ja 3.2 nähtav stabiilsuse kaotuse protsess siin on täielikult puudu: automaatsed koormus- astmelülitid ei püüda taastada koormuse pingeid, süsteemi tarbimiskoormus ei tõuse, üleergutuspiirajad ei hakka piirama generaatorite ergutusvoolusid. Süsteem talitleb tasakaaluseisundis. Ligemalt vaadates graafikuid, täiendavalt võib märgata, et esimestes sekundites sõlmede pinged „PES-TR19“ dokumendi ning PSCAD mudeli graafikutes on veidi erinevad. Väike pingete erinevus võib olla seletatud sellega, et ilma tarbijate trafodeta koormusvoogude jagunemine süsteemis on natuke erinev sellest, mis oleks koos tarbijate trafodega ning antud asjaolu mingil määral mõjutab süsteemi sõlmede pingeid.



Joonis 3.1 Ülekandevõrgu sõlmede 4062, 4012, 1042, 1041 pingeväärtuste muutmine pärast liini 4032-4044 avamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



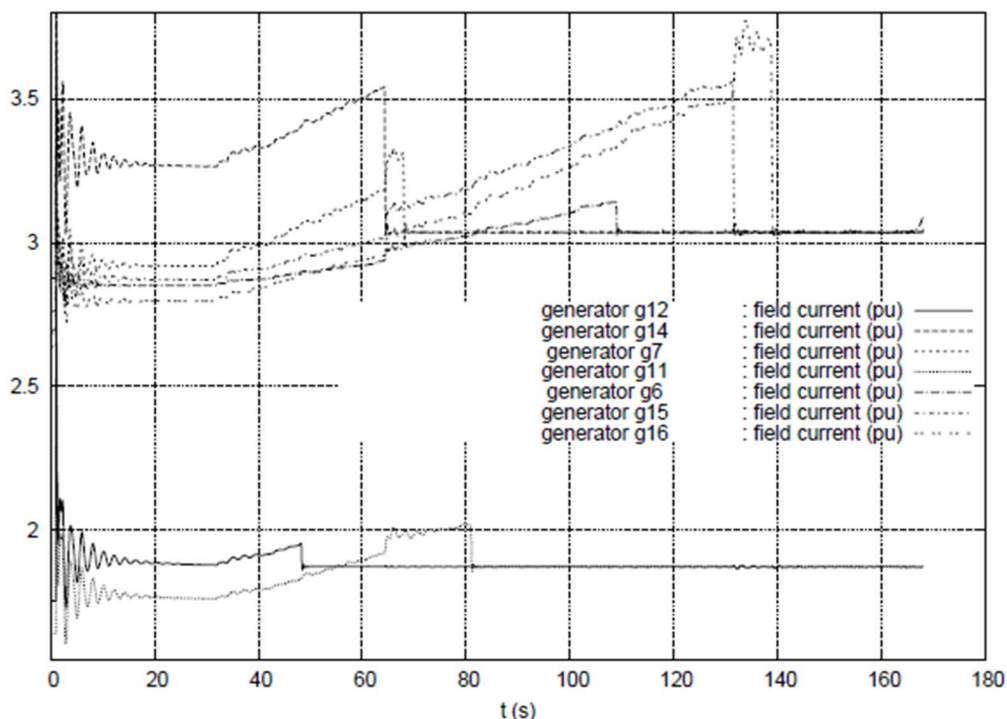
Joonis 3.2 Ülekandevõrgu sõlmede 4062, 4012, 1042, 1041 pingeväärtuste muutmine pärast liini 4032-4044 avamist (ANATEM tarkvara, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



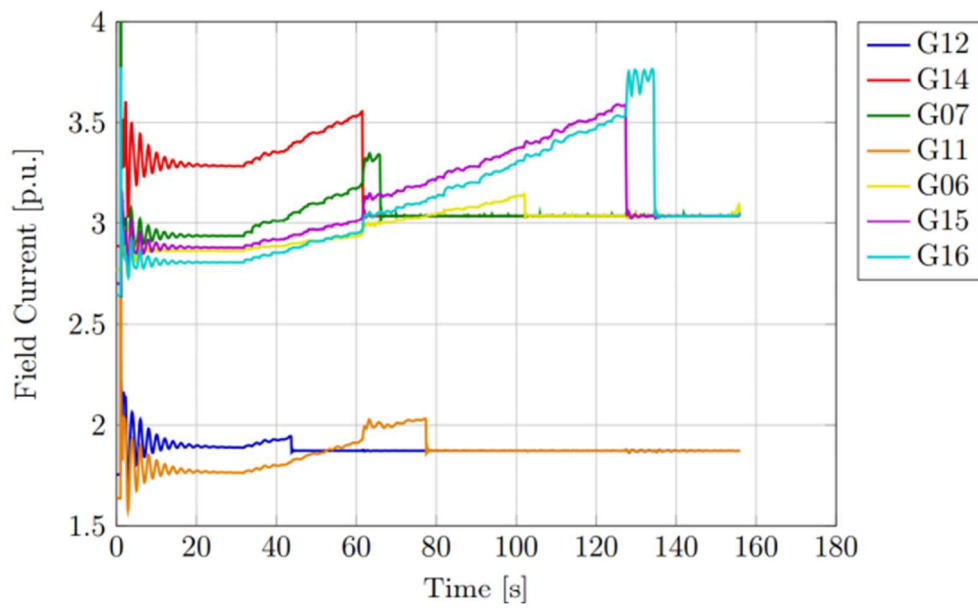
Joonis 3.3 Ülekandevõrgu sõlmede 4062, 4012, 1042, 1041 pingeväärtuste muutmine pärast liini 4032-4044 avamist (PSCAD tarkvara, talitluspunkt A, liini avamine 15 sekundil).

Graafikutel 3.4, 3.5, 3.6 ning 3.7 võrdlemise jaoks on esitatud generaatorite ergutusvoolud, mis olid piiratud üleergutuspiirajatega. Joonisel 3.4 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ dokumendi põhiosast. Joonistel 3.5 ning 3.6 esitatud graafikud on võetud „PES-TR19“ lisadest ning on tehtud ANATEM ning WpSTAB tarkvarade mudelites. Joonisel 3.7 esitatud graafik on tehtud PSCAD tarkvara mudelis. Nii „PES-TR19“ põhiosa kui ka ANATEM ning WpSTAB tarkvarade graafikutest on näha, et umbes 35 sekundil pärast liini 4032-4044 avamist tarbijate trafode automaatsed koormusastmelülid hakkavad taastama tarbijate lattide pingeid, tarbimiskoormus süsteemis hakkab tõusma, generaatorite ergutusvoolud samuti tõusevad ning mõne aja pärast üleergutuspiirajad hakkavad piirama generaatorite ergutusvoolusid. Vaadates graafikuid 3.4 ning 3.5 võib öelda, et

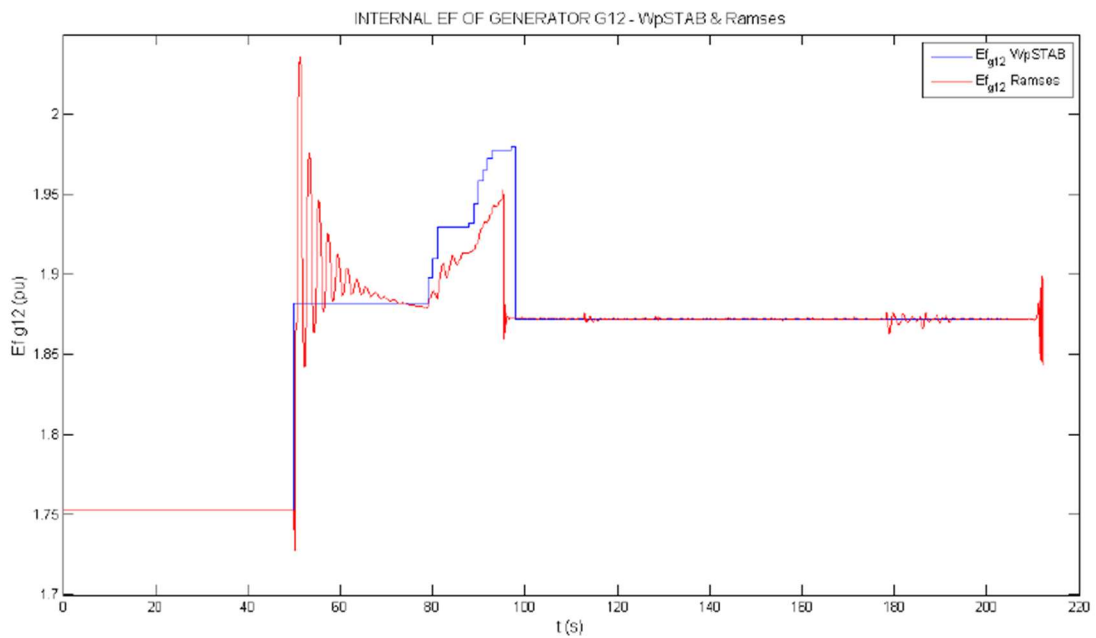
„PES-TR19“ põhiosa ning ANATEM tarkvara mudeli graafikud on üsna sarnased. WpSTAB tarkvara mudeli graafik natuke erineb siirdeprotsesside osas, kuid üldiselt on sarnane „PES-TR19“ põhiosa graafikuga. WpSTAB tarkvara graafiku erinevuse põhjuseks on tasakaalu võrrandite kasutamine kogu simulatsiooni vältel, mis on seletatud jaotises 3.3. PSCAD tarkvara tudengi litsentsi piirangute tõttu ei olnud võimalik saada mitu erineva generaatori ergutusvoolude kõverat ühel graafikul, seega joonisel 3.7 on toodud ainult G12 generaatori ergutusvoolu kõver. G12 on ainuke generaator, mille ergutusvool oli piiratud PSCAD mudelis antud simulatsiooni jooksul. Vaadates joonist 3.6 võib öelda, et PSCAD mudeli generaatori G12 ergutusvoolu kõver esialgu on sarnane „PES-TR19“ dokumendi põhiosa ning ANATEM tarkvara mudeli graafikutega, kuid hiljem ergutusvool ei hakka tõusma. Ergutusvoolu tõusmise puudus seletatakse sellega, et mudelis ei ole tarbijate trafosid, mis hakkaksid taastama koormuse pingeid ning selle kaudu koormust kogu süsteemis, mis tooks kaasa genereeritava võimsuse tõstmise vajaduse. Täiendavalt Jooniselt 3.7 on näha, et ergutusvool oli piiratud natuke kiiremini kui „PES-TR19“ dokumendi graafikutes. See võib olla seotud PSCAD mudeli koormusvoogude jagunemise väikese erinevusega. On näha, et pärast liini avamist generaatori ergutusvool PSCAD mudelis on mõnevõrra kõrgem ning sellel põhjusel üleergutuspiiraja piiras ergutusvoolu kiiremini, kui see toimus „PES-TR19“ dokumendi graafikus.



Joonis 3.4 Nordic mudeli üleergutuspiirajatega piiratud generaatorite ergutusvoolude muutus pärast liini 4032-4044 avamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].

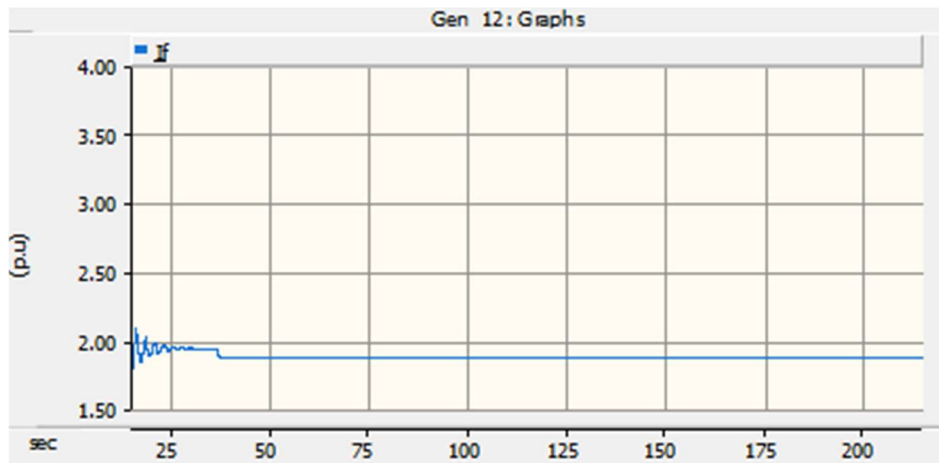


Joonis 3.5 Nordic mudeli üleergutuspiirajatega piiratud generaatorite ergutusvoolude muutus pärast liini 4032-4044 avamist (ANATEM, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



Joonis 3.6 Nordic mudeli generaatori G12 ergutuspinge muutus pärast liini 4032-4044 avamist (WpSTAB-sinine joon ning RAMSES- punane joon, talitluspunkt A, liini avamine 50 sekundil) [3].

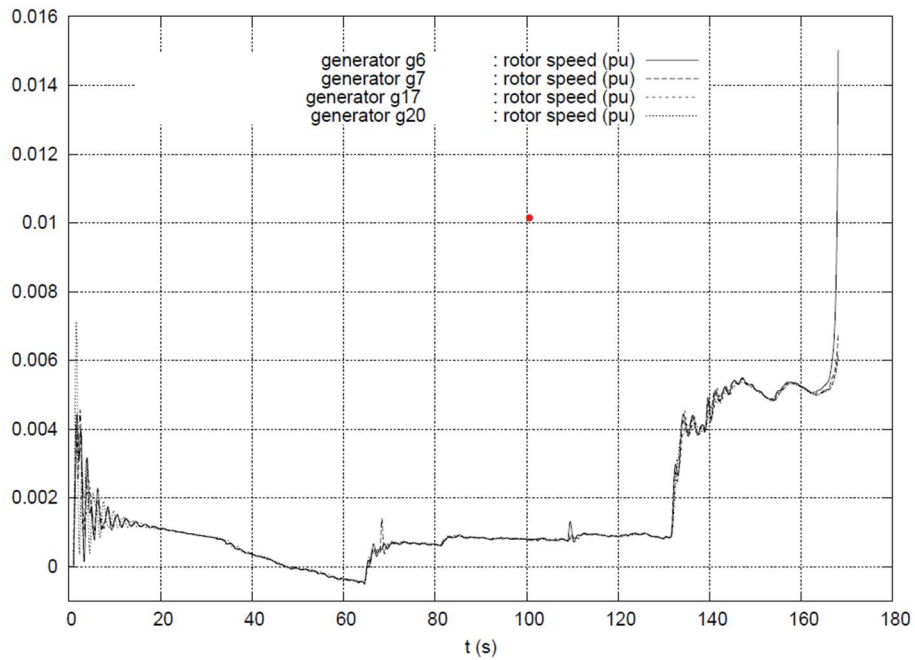




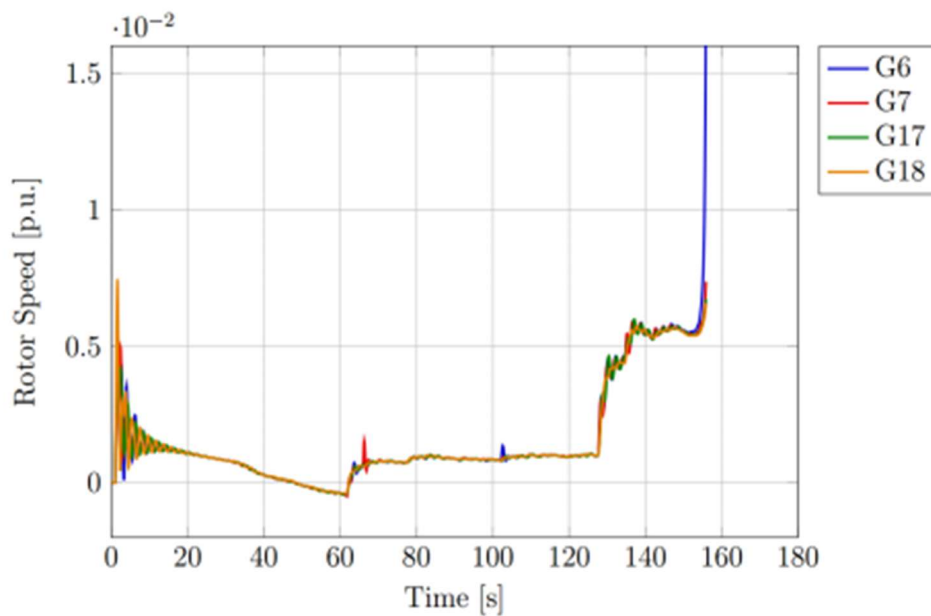
Joonis 3.7 Nordic mudeli generaatori G12 ergutusvoolu muutus pärast liini 4032-4044 avamist (PSCAD, talitluspunkt A, liini avamine 15 sekundil).

Joonistel 3.8, 3.9 ning 3.10 võrdlemise jaoks on esitatud generaatorite rootorite pöörlemiskiirused, mis olid piiratud üleergutuspiirajatega. Joonisel 3.8 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ dokumendi põhiosast. Joonisel 3.9 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ lisadest ning on tehtud ANATEM tarkvara mudelis. Joonisel 3.10 esitatud graafik on tehtud PSCAD tarkvara mudelis. „PES-TR19“ põhiosa ning ANATEM tarkvara mudeli graafikutest on näha, et umbes 35 sekundil rootorite kiirus hakkab langema, mis on seotud tarbijate trafode koormus- astmelülitite aktiveerimise ning tarbijate lattide pingete taastamise katsetega. Edasi, 65 ning 130 sekundil on näha, et toimusid sageduse järsud hüpped, mille põhjuseks on generaatorite ergutusvoolude piiramine üleergutuspiirajatega. Joonisel 3.10, PSCAD mudeli graafikus ülalpool kirjeldatud sageduse muudatusi ei esine, sest PSCAD mudelis puuduvad tarbijate trafod koos koormus- astmelülititega, mis püüaksid taastada tarbijate lattide pingeid.

Joonistel 3.11, 3.12 ning 3.13 võrdlemise jaoks on esitatud generaatorite rootorite nurgad inertsikeskme suhtes. Joonisel 3.11 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ dokumendi põhiosast. Joonisel 3.12 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ lisadest ning on tehtud ANATEM tarkvara mudelis. Joonisel 3.13 esitatud graafik on tehtud PSCAD tarkvara mudelis. „PES-TR19“ põhiosa ning ANATEM tarkvara mudeli graafikutest alatest 35 sekundist on näha nurkade jätkuvat muudatust, mille põhjuseks on tarbijate trafode koormus- astmelülitite püüdmised taastada tarbijate lattide pingeid. 65 ning 130 sekunditel graafikul toimuvad hüppelised muudatused, mis on seotud generaatorite ergutusvoolude piiramisega üleergutuspiirajatega ning umbes 160 sekundil toimub süsteemi täielik kustumine. PSCAD tarkvara mudeli graafikutes niisuguseid muudatusi ei esine, kuna puuduvad tarbijate trafod koos astmelülititega, mis on antud muudatuste algne põhjus. Seega PSCAD tarkvara mudelis rootorite nurgad on stabiilsed ja eriti ei muutu pärast võnkumisprotsessi lõppemist.



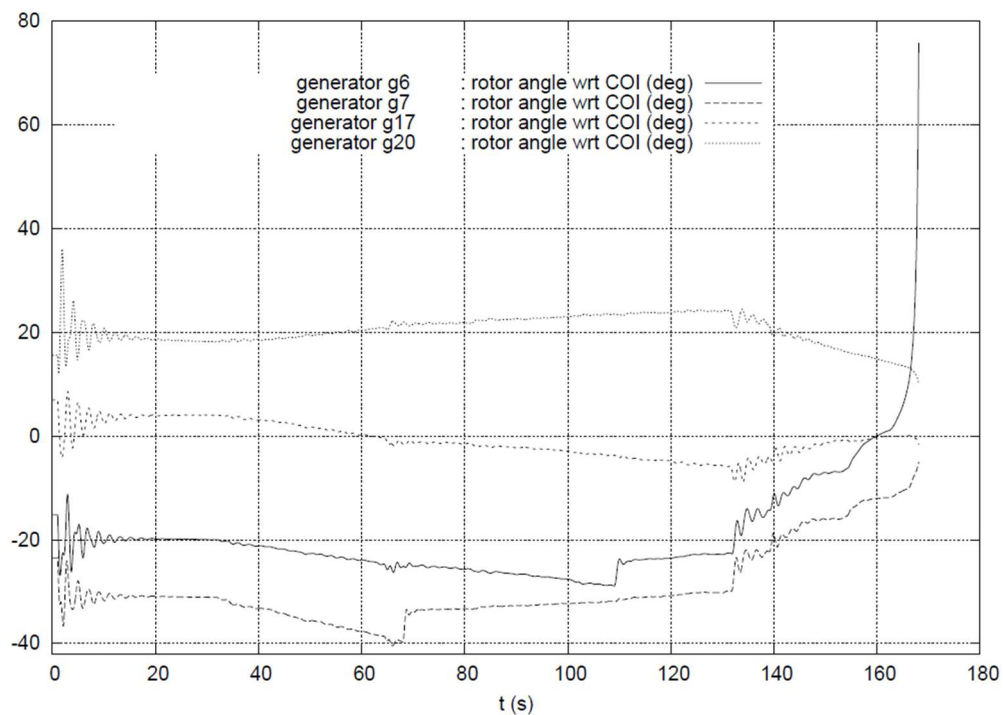
Joonis 3.8 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite kiiruste kõrvalekalded pärast 4032-4044 liini avamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



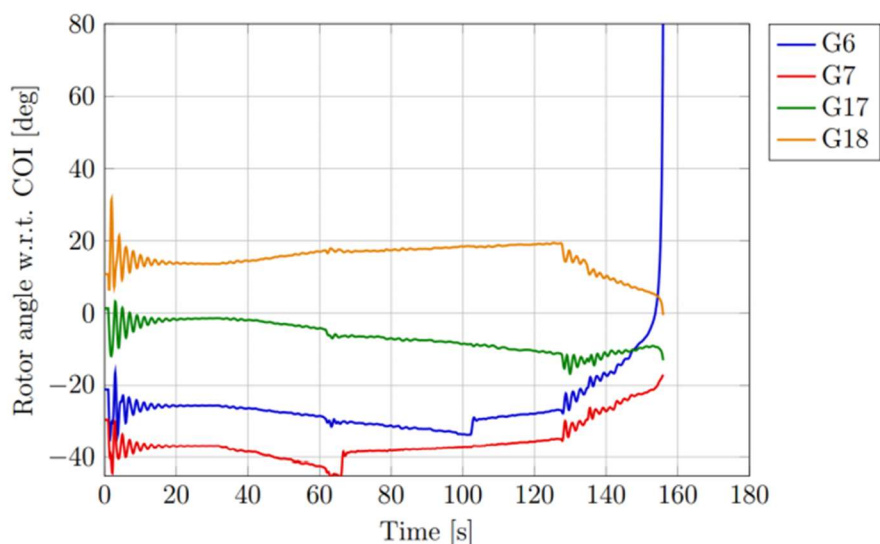
Joonis 3.9 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite kiiruste kõrvalekalded pärast 4032-4044 liini avamist (ANATEM, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



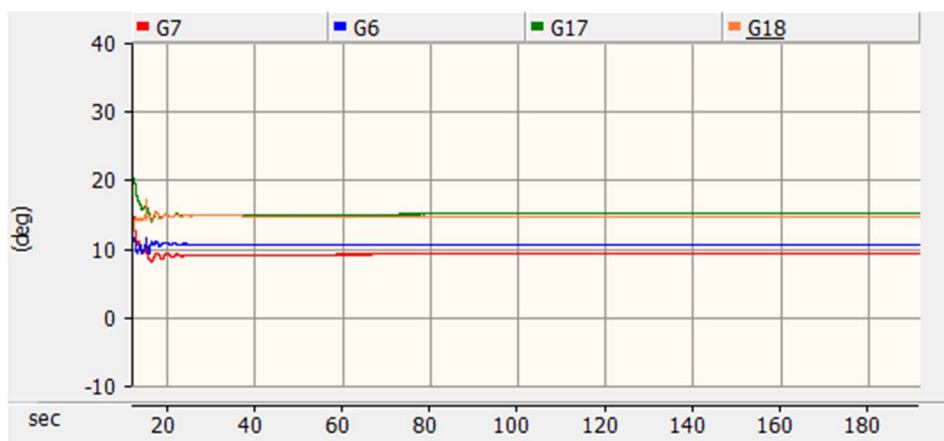
Joonis 3.10 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite kiiruste kõrvalekalded pärast 4032-4044 liini avamist (PSCAD, talitluspunkt A, liini avamine 15 sekundil).



Joonis 3.11 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite nurkade (inertsikeskme suhtes) kõrvalekalded pärast 4032-4044 liini avamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



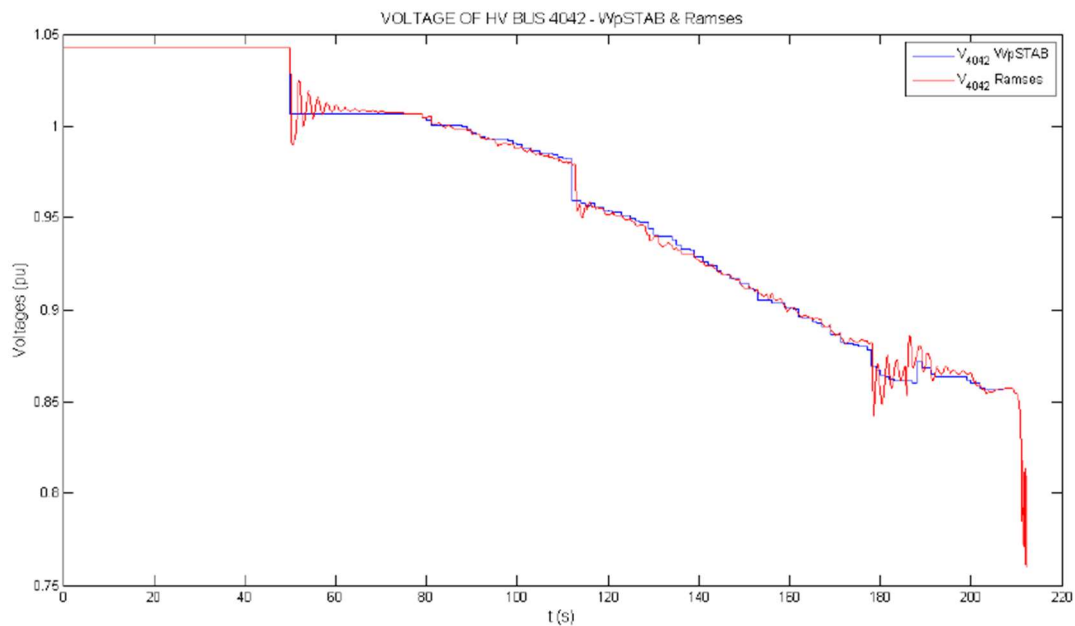
Joonis 3.12 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite nurkade (inertsikeskme suhtes) kõrvalekaldeid pärast 4032-4044 liini avamist (ANATEM, talitluspunkt A, liini avamine 0 sekundil) [3].



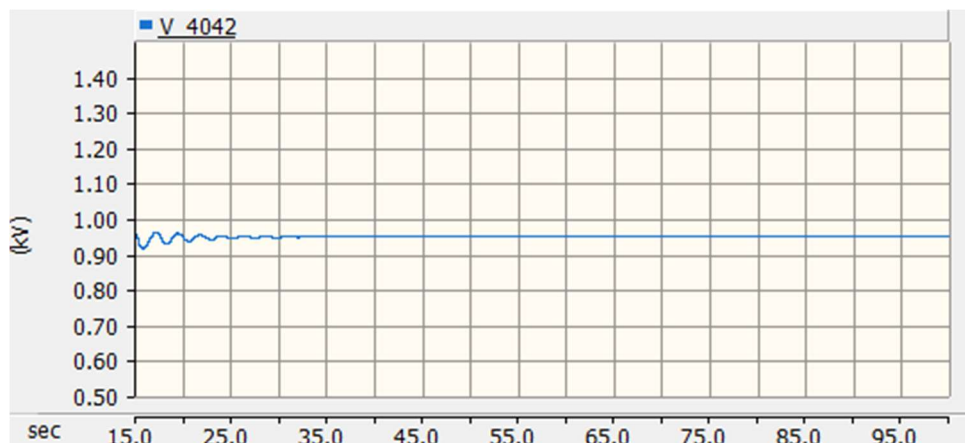
Joonis 3.13 Generaatorite G6, G7, G17 ning G18 rootorite nurkade (inertsikeskme suhtes) kõrvalekaldeid pärast 4032-4044 liini avamist (PSCAD, talitluspunkt A, liini avamine 15 sekundil).

Joonistel 3.14, 3.15 võrdluse jaoks on esitatud mudeli sõlme 4042 pinge muutus. Joonisel 3.14 esitatud graafik on võetud „PES-TR19“ lisadest ning on tehtud WpSTAB tarkvara mudelis. Joonisel 3.15 esitatud graafik on tehtud PSCAD tarkvara mudelis. WpSTAB tarkvara mudeli graafikust on näha, et umbes 35 sekundil pärast liini 4032-4044 avamist rootorite kiirus hakkab langema, mis on seotud tarbijate trafode koormus- astmelülite püüdmistega taastada tarbijate lattide pingeid. Edasi, 65 ning 130 sekundil pärast 4032-4044 liini avamist on näha, et toimusid järsud muutused generaatorite ergutusvoolude piiramise tõttu ning 155 sekundil toimub süsteemi täielik kustumine. Võib märgata, et WpSTAB tarkvaras stabiilsuse kaotus toimub varem, kui „PES-TR19“ põhiosas esitatud graafikutes, mis on seotud tasakaalu võrrandite kasutamisega WpSTAB tarkvaras kogu

simulatsiooni vältel (vt. jaotis 3.3). PSCAD mudelist tehtud graafikus pärast võnkumisprotsesside lõpetamist pinge muutusi ei esine, mis on seotud tarbijate trafode koos koormus- astmelülititega puudumisega mudelis, sest just koormus- astmelülitite reageerimine toob kaasa kõrgepinge jaotusvõrgu pingete langust.



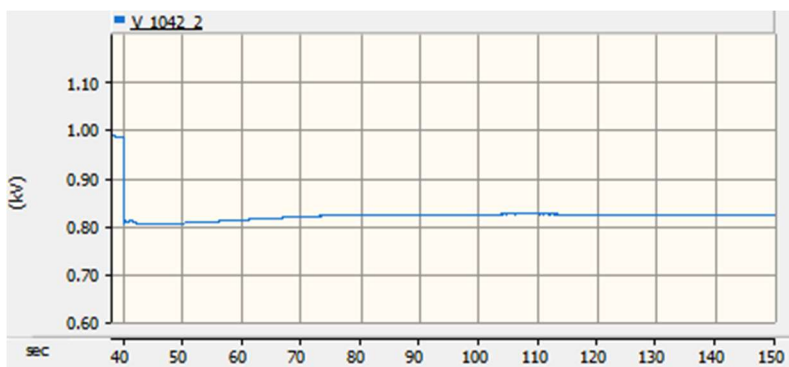
Joonis 3.14 Ülekandesõlme 4042 pinge muutus pärast 4032-4044 liini avamist (WpSTAB- sinine joon ning RAMSES- punane joon, talitluspunkt A, liini avamine toimub 50 sekundil) [3].



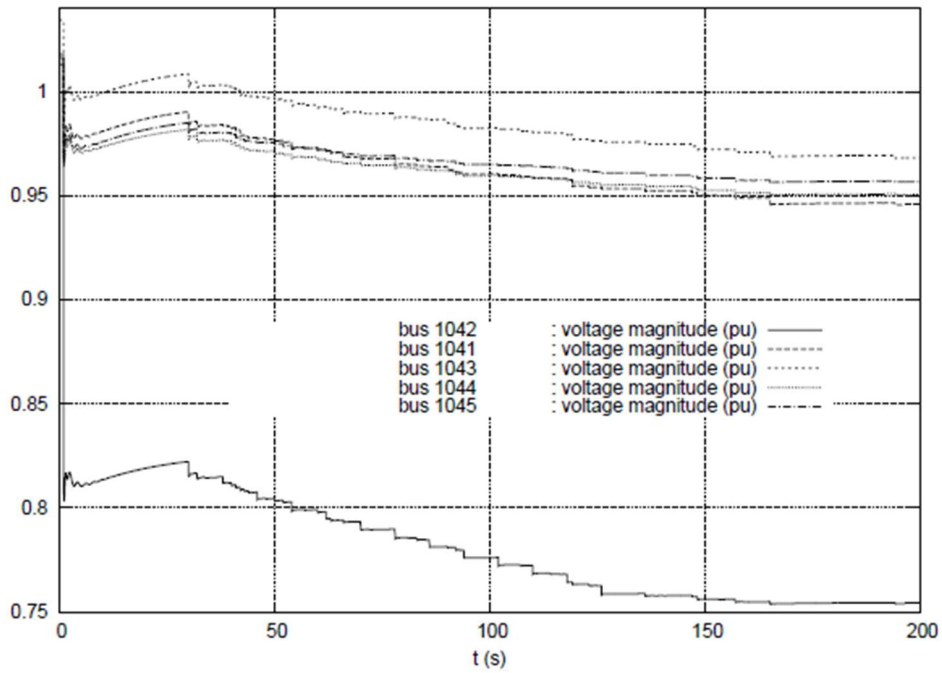
Joonis 3.15 Ülekandesõlme 4042 pinge muutus pärast 4032-4044 liini avamist (PSCAD, talitluspunkt A, liini avamine toimub 15 sekundil).

### 3.4.2 Süsteemi N-1 kriteeriumile vastavus mudeli talitluspunktis B

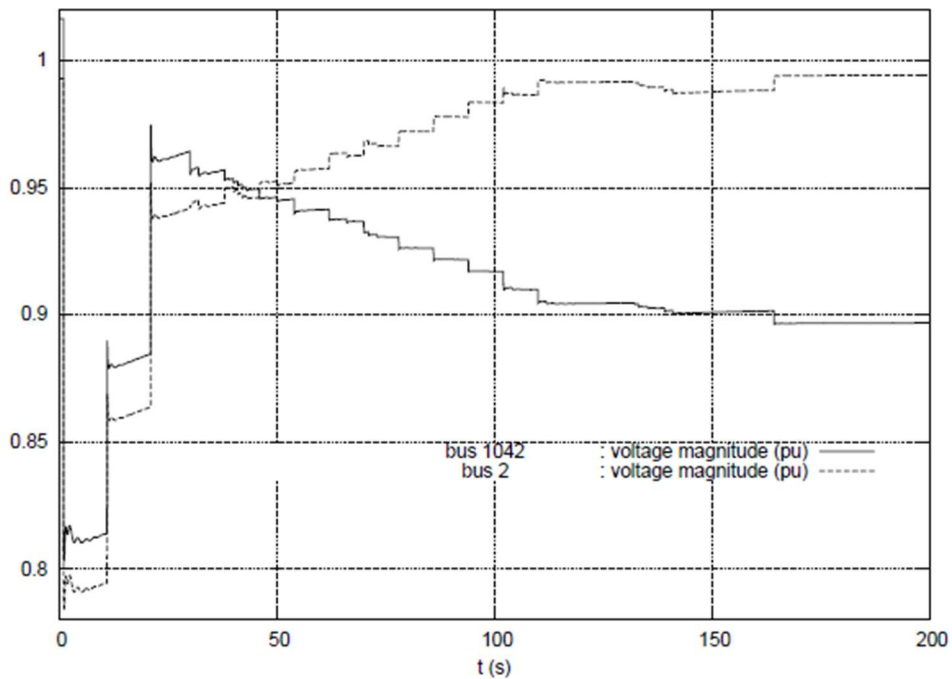
Antud jaotises võrreldavad testide tulemused on saadud Nordic mudeli talitluspunktist B. Mudeli talitluspunktide A ja B erinevused on kirjeldatud jaotises 2.2.9. B talitluspunkti N-1 kriteeriumi testid on kirjeldatud täpsemalt jaotises 2.4.3. Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile mudel talitluspunktis B vastab kõikidele hindamiskriteeriumidele mis iganes N-1 häiringu puhul välja arvatud G6 generaatori väljalülitamine. Probleem G6 generaatori väljalülitamisega esineb sõlmele 1042, kus pinge langeb mittelubatud väärtuseni. Antud probleem vastavalt „PES-TR19“ dokumendile võib olla lihtsalt lahendatud kahe pöikkompanseerimise seadme lisamisega sõlmele 1042. Joonisel 3.17 on toodud ülekandeliinide sõlmede (sealhulgas 1042 sõlme) pingete kõverad, mis on võetud „PES-TR19“ dokumendist G6 generaatori väljalülitamise simuleerimise puhul. Joonisel 3.16 on toodud sõlme 1042 pinge graafik, mis on tehtud PSCAD mudelis G6 generaatori väljalülitamise puhul. Joonisel 3.17 on näha, et umbes 35 sekundil pinged jaotussõlmedel hakkavad langema kuna tarbijate trafode koormus- astmelülitid hakkavad taastama tarbijate lattide pingeid koos tarbimiskoormustega. Jooniselt 3.16 näeme, et kuna PSCAD mudelis puuduvad tarbijate trafod koos koormus- astmelülititega, ei lange 1042 sõlme pinge nii väikese väärtuseni, kuid ikkagi jääb üsna madalaks. Joonisel 3.18 on esitatud 1042 sõlme graafik, mis on võetud „PES-TR19“ dokumendist ning kus 1042 sõlmele on lisatud pöikkompanseerimise seadmed. Sama graafik, mis on tehtud PSCAD mudelis on esitatud joonisel 3.19. Jooniselt 3.18 on näha, et 10 ja 20 sekunditel pöikkompanseerimise seadmed ühendatakse võrguga ning sõlme 1042 pinge tõuseb astmeliselt vastuvõetava väärtuseni. Jooniselt 3.19 on näha sarnane pinge astmeline tõus, kuid kuna mudelis puuduvad tarbijate trafod koos koormus- astmelülititega, pinge on mõnevõrra kõrgem, kui „PES-TR19“ dokumendist võetud graafikul ning rohkem ei lange pärast seda, kui pöikkompanseerimise seadmed on ühendatud võrguga.



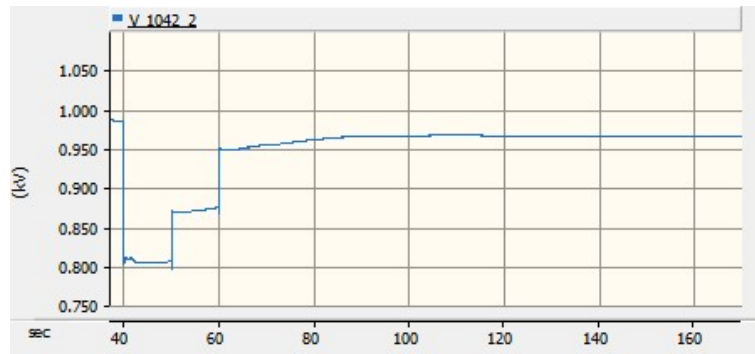
Joonis 3.16 1042 sõlme pinge pärast generaatori g6 väljalülitamist (PSCAD, talitluspunkt B, generaatori G6 väljalülitamine 40 sekundil).



Joonis 3.17 Mõnede sõlmede pinged pärast generaatori g6 väljalülitamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, generaatori G6 väljalülitamine 0 sekundil) [3].



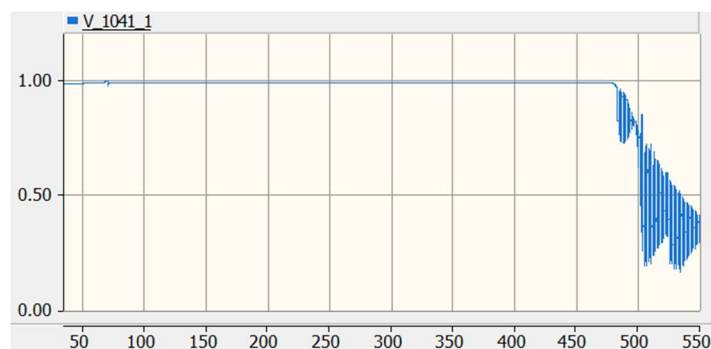
Joonis 3.18 Sõlme 1042 pinge pärast generaatori g6 väljalülitamist, sõlmele 1042 on lisatud kaks põikkompanseerimise seadet 80 MVar kumbki („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, generaatori G6 väljalülitamine 0 sekundil) [3].



Joonis 3.19 Sõlme 1042 pinge pärast generaatori g6 väljalülitamist, sõlmele 1042 on lisatud kaks põikkompenseerimise seadet 80 MVar kumbki („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, generaatori G6 väljalülitamine 40 sekundil).

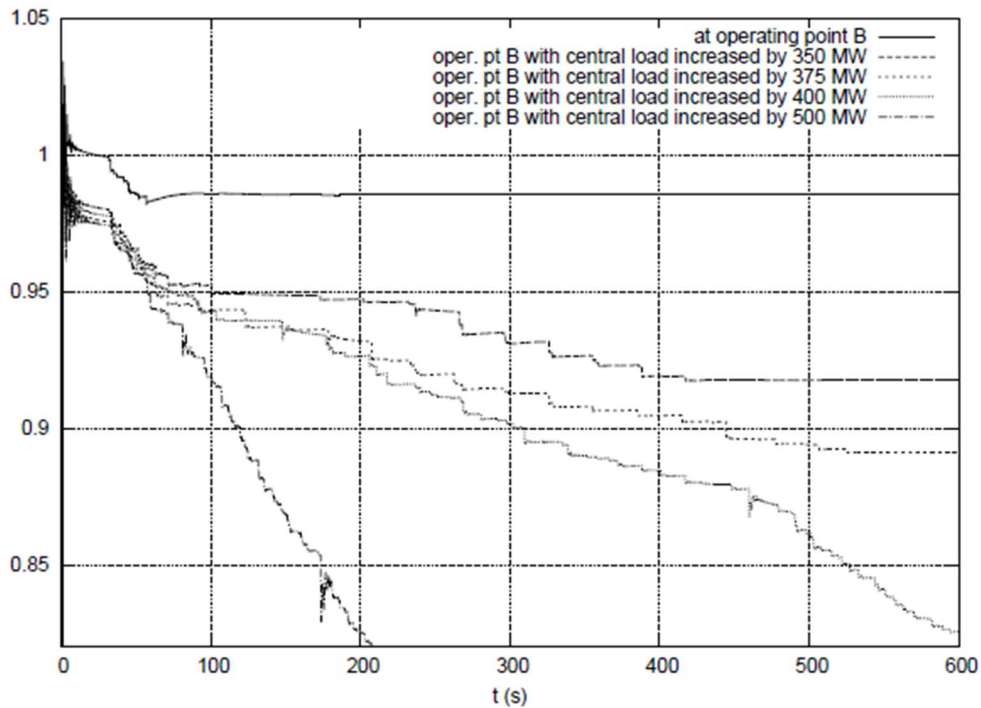
### 3.4.3 Ennetav pingestabiilsuse analüüs mudeli talitluspunktis B

Ennetava pingestabiilsuse analüüsi põhimõtted on kirjeldatud jaotises 2.4.4. Esialgu „PES-TR19“ dokumendis on vaadeldud normaaltalitluse limiidid liini 4032-4044 väljalülitamise puhul. Joonisel 3.21 on toodud „PES-TR19“ dokumendist võetud 1041 sõlme pingete graafikud erinevate „Central“ piirkonna lisakoormuste puhul. Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile normaaltalitluse limiit liini 4032-4044 väljalülitamise puhul on 350 MW. Nagu on näha jooniselt 3.16, 375MW lisakoormuse puhul süsteem justkui saavutanud stabiilsuse, kuid vastavalt raporti andmetele ligikaudselt 800 sekundil süsteemis ikkagi ilmneb ebastabiilsus ning lõpuks toimub süsteemi täielik kustumine. PSCAD mudeli normaaltalitluse limiit liini 4032-4044 väljalülitamise puhul on 500 MW. Joonisel 3.20 on toodud PSCAD mudeli sõlme 1041 pinge graafik, mis on saadud „Central“ piirkonna 525 MW lisakoormuse puhul. Hakkab silma, et jooniselt 3.20 ei ole näha järkjärgulist pingelangust. „PES-TR19“ dokumendis järkjärguline pingelangus seletatakse tarbijate ning 400/130 kV trafode koormusastmelülitite reageerimisega jaotusvõrgu sõlmede pingelangusele. PSCAD mudelis trafosid koos koormusastmelülititega ei ole ning seega järkjärguline pingelangust ei esine, kuid süsteemi mittestabiilsus ikkagi ilmneb umbes 475 sekundil.



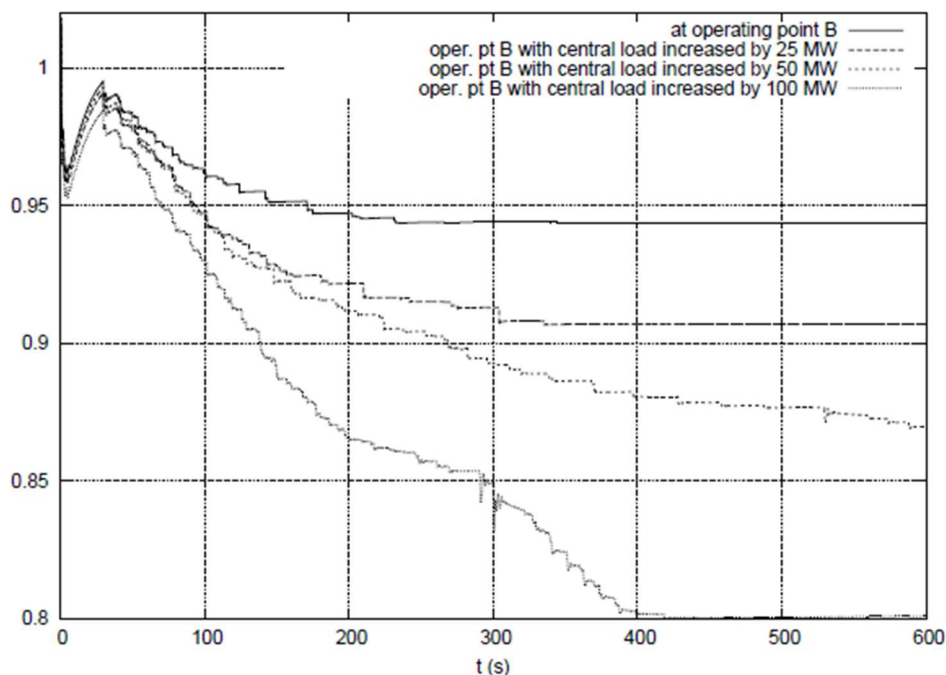
Joonis 3.20 Sõlme 1041 pingeväärtuse muutus pärast liini 4032-4044 avamist süsteemi 525 MW lisakoormuse puhul (PSCAD, talitluspunkt B, liini 4032-4044 avamine toimub 70 sekundil).



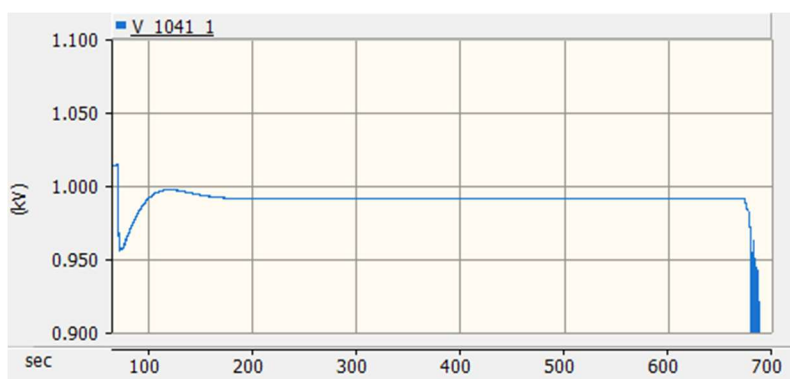


Joonis 3.21 Sõlme 1041 pingeväärtuse muutus pärast liini 4032-4044 avamist süsteemi erinevate lisakoormuste puhul („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, liini 4032-4044 avamine toimub 0 sekundil).

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile, kui võtta arvesse ainult ükskõik mis generaatori väljalülitamist, siis kõige tõsise tagajärgedega on generaatori G14 väljalülitamine, mille puhul normaaltalitluse võimsuse limiit on ainult 25 MW. Joonisel 3.22 on esitatud „PEST-TR19“ dokumendist võetud sõlme 1041 pinge graafik erinevate „Central“ piirkonna lisakoormuste puhul. Vastavalt PSCAD mudelis tehtud testidega, kõige tõsise tagajärgedega on samuti generaatori G14 väljalülitamine, kuid normaaltalitluse võimsuse limiit PSCAD mudelis on 150 MW. Joonisel 3.23 on toodud PSCAD mudeli sõlme 1041 pinge graafik 175 MW „Central“ piirkonna lisakoormuse puhul. Jooniselt 3.23 on näha, et süsteem näib stabiilsena, kuid ebastabiilsus ilmneb ligikaudselt 675 sekundil. Võrreldes graafikuid on näha, et PSCAD mudelis antud sõlmele, sarnaselt eelmise testiga, ei esine järkjärgulist pingelangust, kuid mis esineb „PES-TR19“ dokumendi graafikus. „PES-TR19“ dokumendist võetud pinge kõvera järkjärgulise pingelanguse põhjuseks on trafode koormus- astmelülitite katsed taastada tarbijate lattide pingeid ning sellele järgnevale generaatorite ergutusvoolude piiramine.



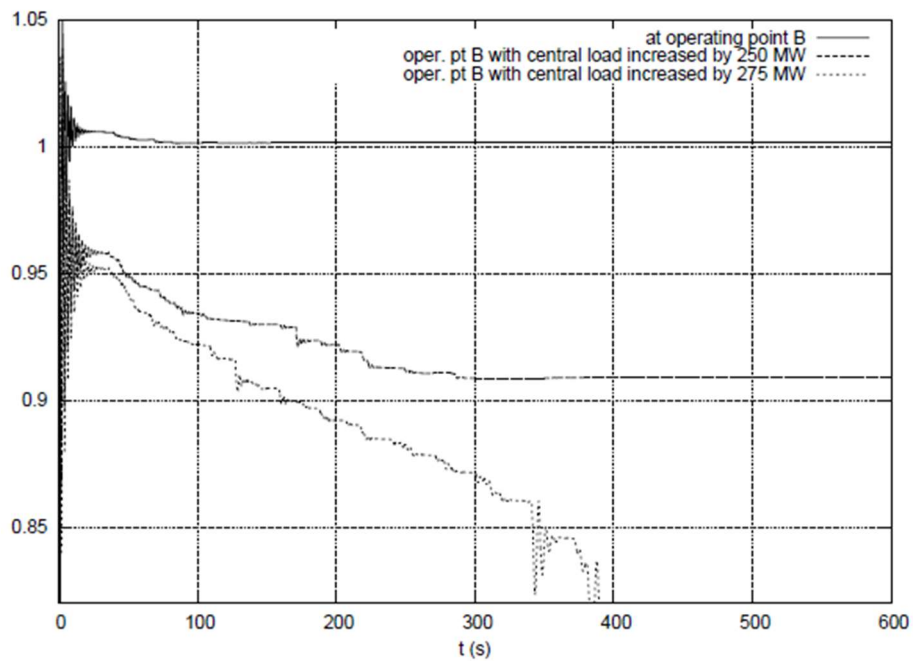
Joonis 3.22 Sõlme 1041 pinge pärast generaatori g14 väljalülitamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, generaatori G14 väljalülitamine toimub 0 sekundil).



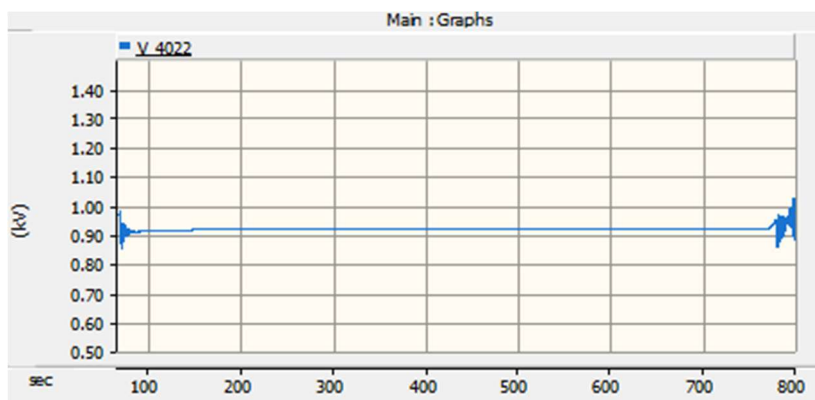
Joonis 3.23 Sõlme 1041 pinge pärast generaatori g14 väljalülitamist süsteemi 175 MW lisakoormuse puhul (PSCAD, talitluspunkt B, generaatori G14 väljalülitamine toimub 70 sekundil).

Vastavalt „PES-TR19“ dokumendile, kui võtta arvesse ainult ükskõik mis liini avamist, siis kõige tõsiste tagajärgedega on liini 4011-4021 avamine, mille puhul normaaltalitluse võimsuse limiit on 250 MW, mis on näha jooniselt 3.24. Vastavalt PSCAD mudelis tehtud testidele liini 4011-4021 avamise puhul süsteemi normaaltalitluse võimsuse limiit on 575 MW. Joonisel 3.25 on toodud PSCAD mudeli sõlme 4022 pinge kõver, mis on saadud 600 MW „Central“ piirkonna lisakoormuse puhul. Joonise 3.25 järgi ebastabiilsus antud testi puhul ilmneb PSCAD mudelis ligikaudselt 775 sekundil. Sarnaselt eelmiste testidega, antud testi puhul PSCAD mudeli graafikus ei esine järkjärgulist pingelangust, mis on näha „PES-TR19“ dokumendi graafikust. Selle erinevuse põhjuseks

on trafode koormus- astmelülite ning tarbijate trafode puudumine PSCAD mudelis. Testide käigus selgus, et koostatud PSCAD mudelis kõige tõsisemate tagajärgedega on ikkagi liin 4032-4044, mitte liin 4011-4021. Liini 4032-4044 avamise pärast süsteem kaotas stabiilsust juba 525 MW „Central“ piirkonna lisakoormuse puhul, mis võib näha jooniselt 3.21. Selle PSCAD mudeli erinevuse seletuseks võib-olla koormuste jagumise erinevus lähteandmetes kirjeldatud mudelist, mille põhjuseks on jällegi trafode koormus- astmelülite ning tarbijate trafode puudumine.



Joonis 3.24 Sõlme 4022 pingest pärast liini 4011-4021 avamist („PES-TR19“ dokumendi põhiosas esitatud simulatsioonide tulemused, talitluspunkt B, liini 4011-4012 avamine toimub 0 sekundil).



Joonis 3.25 Sõlme 4022 pingest pärast liini 4011-4021 avamist (PSCAD, talitluspunkt B, liini 4011-4012 avamine toimub 70 sekundil).

### 3.5 PSCAD mudeli analüüs ning hinnang.

Kui vaadata PSCAD mudeli simulatsioonide tulemusi ning võrrelda neid „PES-TR19” dokumendis esitatud tulemustega, võib leida kaks olulist erinevust. Esimene erinevus on see, et PSCAD mudeli stabiilsusvaru on natuke suurem, kui „PES-TR19” dokumendis esitatud andmete järgi. Antud erinevus on selgelt näha simulatsioonide graafikutelt- sama häiringu puhul PSCAD mudel kaotab stabiilsust hiljem või ei kaota stabiilsust üldse võrreldes „PES-TR19” dokumendis esitatud simulatsioonide tulemustega. PSCAD mudeli suurem stabiilsusvaru seletatakse sellega, et PSCAD tarkvara tudengi litsentsi piirangute tõttu mudelist oli eemaldatud tarbijate trafod koos automaatsete koormus- astmelülititega. Tarbijate trafode ning automaatsete koormus- astmelülitite üks funktsioonidest on taastada tarbijate lattide pingeid nii, et nad oleksid lubatud piiride sees. Ilma tarbijate trafodeta tarbijate lattide pinged võib langeda madalamate vastuvõetamatute väärtusteni, mis vähendab modelleeritud süsteemi tarbimiskoormust ning koos sellega tõstab stabiilsusvaru, kuid mis ei ole realistlik. Teine PSCAD mudeli erinevus on see, et kui vaadata ennetavat pingestabiilsuse analüüsi talitluspunktis B, siis üksikliinide avamise puhul vastavalt „PES-TR19” dokumendile kõige tõsisemate tagajärgedega on liini 4011-4021 avamine, kuid koostatud PSCAD mudelis liini 4032-4044 avamise puhul süsteem kaotab stabiilsust natuke varem kui liini 4011-4021 avamise puhul. Antud erinevust võib jällegi seletada tarbijate trafode puudumisega, mis mõnevõrra muutub koormusvoogude jaotamist süsteemis. Antud erinevuse teiseks põhjuseks on see, et süsteemi ei olnud lisatud ülekandevõrgu trafode 1044-4044, 1044-4044b, 1045-4045 ja 1045-4045b koormus- astmelülitid nagu oli kirjeldatud „PES-TR19” raportis. Ülekandevõrgu trafode koormus- astmelülitid ei olnud lisatud mudelisse tarkvara tudengi litsentsi piirangute tõttu (vt. jaotis 2.4.4).

Veel üks PSCAD mudeli eripära on see, et mudeli käivitamise jaoks ei saa kasutada „PES-TR19” dokumendis toodud koormusvoogude jagunemise andmeid. Antud eripära põhjuseks on see, et PSCAD mudelis puuduvad tarbijate trafod ning mudeli koormusvoogude jagunemine natuke erineb „PES-TR19” dokumendis toodud koormusvoogude jagunemisest. Alghetke koormusvoogude jagunemine PSCAD mudelis antud töö käigus olid natuke muudetud nii, et mudeli käivitamisel oleks vähem võnkumisi süsteemis. Samuti PSCAD mudeli korrektsema ning sujuvama käivitamise jaoks Generaatori erguti, pingeregulaatori, võnkesummuti, üleergutuspiiraja, turbiini kiirusregulaatori ning hüdroturbiini mudelites olid tehtud täiendused nii, et nad hakkaksid töötama ainult hetkel, kui toimub süsteemi üleminek normaaltalitluseks (vt. jaotis 2.3.6 Mudeli käivitamine). PSCAD mudeli generaatorite juhtimissüsteemide skeemide erinevused „PES-TR19” dokumendis esitatud juhtimissüsteemide skeemidest võib leida vaadates jooniseid 2.5, 2.6, 2.7, 2.10, 2.11, 2.12.

Analüüsid simuleerimise tulemusi, üldiselt võib öelda, et koostatud PSCAD mudel on töötav ja kasutuskõlblik. Mudeli peamine erinevus „PES-TR19“ dokumendis kirjeldatud mudelist on see, et mudelis puuduvad tarbijate trafod. Ilma tarbijate trafodeta ei olnud võimalik täpselt hinnata, kui sarnaselt PSCAD mudel reageerib häiringutele võrreldes „PES-TR19“ dokumendis esitatud simuleerimise andmetega. Võttes arvesse PSCAD mudeli erinevust „PES-TR19“ dokumendis kirjeldatud mudelist võib öelda, et PSCAD mudel reageerib häiringutele nii nagu peaks ning simuleerimise käigus ootamatu käitumist mudelis ei esinenud. PSCAD mudel võib olla edaspidi kasutatud nagu on, kuid tuleb arvestada, et mudelis ei ole tarbijate lattide pingete reguleerimissüsteeme, mis mõnevõrra suurendab mudeli stabiilsusvaru, kuid teeb mudeli simuleerimise tulemusi vähem realistlikuks. Mudeli edaspidiseks kasutamiseks ikkagi soovitatav kasutada PSCAD tarkvara täislitsentsi ning lisada mudelisse tarbijate trafod koos automaatsete koormus- astmelülititega. Antud soovitus põhjuseks on see, et „PES-TR19“ dokumendi koostamise eesmärk oli pakkuda mudeli, kus oleks arvestatud niisuguste dünaamiliste fenomenidega nagu erinevate automaatsete kaitse- ning reguleerimissüsteemide aktiveerimine (nt. tarbijate lattide pingete taastamine), mis reaalsuses häiringute puhul võivad täiendavalt negatiivselt mõjutada kogu elektrisüsteemi stabiilsusele. Niisuguste dünaamiliste fenomenidega arvestamine tõstaks tehtud simuleerimise tulemuste usaldusväärsust.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli Nordic süsteemi mudeli koostamine, simulatsioon ning analüüs kasutades PSCAD tarkvara. Töö esimeses teoreetilises osas lühidalt on kirjeldatud elektrisüsteemide modelleerimisalused ning Nordic mudelis esitatud komponentide ning kontrollsüsteemide tööpõhimõtted. Töö teises osas oli esitatud Nordic mudeli andmed, mudeli komponentide modelleerimisprotsessi kirjeldus, mudeli testimise jaoks kasutatud häiringud ning mudeli testide simulatsioonide tulemused. Töö kolmandas osas oli kirjeldatud „PES-TR19“ dokumendist leitavate erinevate tarkvarade abil koostatud Nordic mudelite eripärad, ning PSCAD mudeli simulatsioonide tulemuste võrdlus „PES-TR19“ dokumendist leitavate tulemustega. Täiendavalt on antud koostatud PSCAD mudeli hinnang ning on toodud muude tarkvarade loetelu, mis sobib „PES-TR19“ dokumendis esitatud Nordic mudeli koostamise jaoks.

Töö käigus koostatud mudeli verifitseerimise ning analüüsimise jaoks vajalike testide kirjeldused ning andmed olid võetud „PES-TR19“ dokumendist. Mudeli koostamise ning simulatsioonide teostamise jaoks oli kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli PSCAD tarkvara tudengi litsents. Kuna tudengi litsentsiga oli võimalik teostada simulatsioone ainult piiratud mudeli elektriühenduste arvuga, osutus vajalikuks jätta tarbijate trafod koos automaatsete astmelülititega mudelist välja. Tarbijate trafode väljajätmise tõttu PSCAD tarkvaras koostatud mudelis tarbijate sõlmed on ühendatud otse kõrgepinge ülekandevõrguga.

Ilma tarbijate trafodeta Nordic süsteemi koormusvoogude jaotus simulatsiooni alghetkel natuke erines „PES-TR19“ dokumendis toodud jaotusest. Koormusvoogude jaotuse erinevuse pärast osutus keerulisemaks häälestada süsteemi nii, et saavutada süsteemi stabiilse, ilma siirdeprotsessideta talitluse alates simulatsiooni alghetkest. Tarbijate trafode puudumine mõjutas samuti simulatsioonide tulemusi- üldjuhul PSCAD tarkvaras tehtud simulatsioonide käigus süsteem kaotas stabiilsust hiljem, kui oli kirjeldatud „PES-TR19“ dokumendis või ei kaotanud stabiilsust üldse. Mõju simulatsiooni tulemustele seletatakse sellega, et PSCAD tarkvara tarbija mudeli tarbimisvõimsused sõltuvad pingest (vt. täpsemalt jaotis 2.3.2) ning juhul, kui trafod automaatsete astmelülititega ei taasta pingeid tarbimissõlmedel, siis koos pingelangusega tarbimissõlmedel langevad ka tarbimiskoormused. Tarbimiskoormuste langemise tõttu tõuseb kogu süsteemi stabiilsusvaru ning sellest lähtuvalt suutlikkus taluda häiringuid. Tarbijasõlmede pingete taastumise panus mittestabiilsuse tekkimiseks ning süvenemiseks on selgesti näha „PES-TR19“ dokumendist võetud graafikutest (vt. jaotis 3.4). Täiendavalt PSCAD tarkvara tudengi litsentsi piirangute tõttu ei olnud võimalik leida elektrisüsteemi maksimaalse koormuse limiidi talitluspunktis B, kuna selle

jaoks oleks vaja lisada täiendavalt hulk elemente ning sellisel juhul mudel ületaks tudengi litsentsi piiranguid (vt. täpsemalt jaotis 2.4.5).

Käesoleva töö järelduseks võib öelda, et PSCAD tarkvara abil koostatud Nordic süsteemi mudel simulatsioonide käigus käitub sarnaselt „PES-TR19“ dokumendis kirjeldatud tulemustega, kuid PSCAD tarkvaras koostatud mudeli stabiilsusvaru on natuke kõrgem, kui oli oodata ning samade häiringute puhul PSCAD mudel säilitab stabiilsust kauem, kui „PES-TR19“ dokumendis toodud andmete järgi. Suurem stabiilsusvaru antud juhul seletatakse tarbijate trafode ning automaatsete koormus-astmelülitite puudumisega. Ilma automaatsete koormus-astmelülititeta tarbijate koormused langevad koos ülekandevõrgu pingelangusega, mis mõnevõrra suurendab elektrisüsteemi suutlikkust stabiilsuse säilitamiseks, kuid samal ajal vähendab simulatsioonide tulemuste realistlikkust. Reaalsuses nii suur pingelang tarbijate sõlmedel ei ole lubatud, kuna see võib olla kahjulik tarbijate elektriseadmetele. Samuti tarbijate trafod iseenesest tarbivad võimsust, mis täiendavalt mõjutab süsteemi stabiilsust. Koostatud mudelisse täiendavate elementide lisamise jaoks edaspidi tuleb kasutada PSCAD tarkvara professionaalset litsentsi. Mudel iseenesest võib olla kasutatud nagu on, kuid soovitatav lisada mudelisse tarbijate trafod koos automaatsete astmelülititega nii, et simulatsioonide tulemused oleksid realistlikumaks ning usaldusväärsemaks. Täiendavalt perspektiivis on võimalik teostada Nordic mudeli simulatsioonid rakendades häiringujärgse kontrolli meetmeid, mis on pakutud „PES-TR19“ dokumendi lõpus.

# LISAD

## Lisa 1. Nordic32 mudeli lähteandmed

Tabel L1.1 Nordic32 test süsteemi ülekandeliinide andmed. [3]

liini nimi	sõlmelt	sõlmele	R (Ohm)	X (Ohm)	B/2 (μS)	S <sub>nom</sub> (MVA)
1011- 1013	1011	1013	1.69	11.83	40.841	350
1011- 1013b	1011	1013	1.69	11.83	40.841	350
1012- 1014	1012	1014	2.37	15.21	53.407	350
1012- 1014b	1012	1014	2.37	15.21	53.407	350
1013- 1014	1013	1014	1.18	8.450	29.845	350
1013- 1014b	1013	1014	1.18	8.450	29.845	350
1021- 1022	1021	1022	5.07	33.80	89.535	350
1021- 1022b	1021	1022	5.07	33.80	89.535	350
1041- 1043	1041	1043	1.69	10.14	36.128	350
1041- 1043b	1041	1043	1.69	10.14	36.128	350
1041- 1045	1041	1045	2.53	20.28	73.827	350
1041- 1045b	1041	1045	2.53	20.28	73.827	350
1042- 1044	1042	1044	6.42	47.32	177.50	350
1042- 1044b	1042	1044	6.42	47.32	177.50	350
1042- 1045	1042	1045	8.45	50.70	177.50	350
1043- 1044	1043	1044	1.69	13.52	47.124	350
1043- 1044b	1043	1044	1.69	13.52	47.124	350
2031- 2032	2031	2032	5.81	43.56	15.708	500
2031- 2032b	2031	2032	5.81	43.56	15.708	500
4011- 4012	4011	4012	1.60	12.80	62.832	1400
4011- 4021	4011	4021	9.60	96.00	562.34	1400
4011- 4022	4011	4022	6.40	64.00	375.42	1400
4011- 4071	4011	4071	8.00	72.00	438.25	1400
4012- 4022	4012	4022	6.40	56.00	328.30	1400
4012- 4071	4012	4071	8.00	80.00	468.10	1400
4021- 4032	4021	4032	6.40	64.00	375.42	1400
4021- 4042	4021	4042	16.0	96.00	937.77	1400
4022- 4031	4022	4031	6.40	64.00	375.42	1400
4022- 4031b	4022	4031	6.40	64.00	375.42	1400
4031- 4032	4031	4032	1.60	16.00	94.248	1400
4031- 4041	4031	4041	9.60	64.00	749.27	1400
4031- 4041b	4031	4041	9.60	64.00	749.27	1400
4032- 4042	4032	4042	16.0	64.00	625.18	1400
4032- 4044	4032	4044	9.60	80.00	749.27	1400
4041- 4044	4041	4044	4.80	48.00	281.17	1400
4041- 4061	4041	4061	9.60	72.00	406.84	1400
4042- 4043	4042	4043	3.20	24.00	155.51	1400
4042- 4044	4042	4044	3.20	32.00	186.93	1400
4043- 4044	4043	4044	1.60	16.00	94.248	1400
4043- 4046	4043	4046	1.60	16.00	94.248	1400
4043- 4047	4043	4047	3.20	32.00	186.93	1400
4044- 4045	4044	4045	3.20	32.00	186.93	1400
4044- 4045b	4044	4045	3.20	32.00	186.93	1400
4045- 4051	4045	4051	6.40	64.00	375.42	1400



Tabel L1.1 järg Nordic32 test süsteemi ülekandeliinide andmed. [3]

liini nimi	sõlmelt	sõlmele	R (Ohm)	X (Ohm)	B/2 ( $\mu$ S)	S <sub>nom</sub> (MVA)
4045- 4051b	4045	4051	6.40	64.00	375.42	1400
4045- 4062	4045	4062	17.6	128.00	749.27	1400
4046- 4047	4046	4047	1.60	24.00	155.51	1400
4061- 4062	4061	4062	3.20	32.00	186.93	1400
4062- 4063	4062	4063	4.80	48.00	281.17	1400
4062- 4063b	4062	4063	4.80	48.00	281.17	1400
4071- 4072	4071	4072	4.80	48.00	937.77	1400
4071- 4072b	4071	4072	4.80	48.00	937.77	1400

Tabel L1.2 Nordic32 test süsteemi pingekõrgendustrafode andmed. [3]

trafo nimi	sõlmelt	sõlmele	X (pu)	n (pu/pu)	S <sub>nom</sub> (MVA)
g1	g1	1012	0.15	1.00	800.0
g2	g2	1013	0.15	1.00	600.0
g3	g3	1014	0.15	1.00	700.0
g4	g4	1021	0.15	1.00	600.0
g5	g5	1022	0.15	1.05	250.0
g6	g6	1042	0.15	1.05	400.0
g7	g7	1043	0.15	1.05	200.0
g8	g8	2032	0.15	1.05	850.0
g9	g9	4011	0.15	1.05	1000.0
g10	g10	4012	0.15	1.05	800.0
g11	g11	4021	0.15	1.05	300.0
g12	g12	4031	0.15	1.05	350.0
g13	g13	4041	0.10	1.05	300.0
g14	g14	4042	0.15	1.05	700.0
g15	g15	4047	0.15	1.05	1200.0
g16	g16	4051	0.15	1.05	700.0
g17	g17	4062	0.15	1.05	600.0
g18	g18	4063	0.15	1.05	1200.0
g19	g19	4071	0.15	1.05	500.0
g20	g20	4072	0.15	1.05	4500.0

Tabel L1.3 Nordic32 test süsteemi 400/220 ning 400/130 trafode andmed. [3]

trafo nimi	sõlmelt	sõlmele	X (pu)	n (pu/pu)	S <sub>nom</sub> (MVA)
1011- 4011	1011	4011	0.10	0.95	1250.0
1012- 4012	1012	4012	0.10	0.95	1250.0
1022- 4022	1022	4022	0.10	0.93	833.3
2031- 4031	2031	4031	0.10	1.00	833.3
1044- 4044	1044	4044	0.10	1.03	1000.0
1044- 4044b	1044	4044	0.10	1.03	1000.0
1045- 4045	1045	4045	0.10	1.04	1000.0
1045- 4045b	1045	4045	0.10	1.04	1000.0

Tabel L1.4 Nordic32 test süsteemi pingemadaldustrafode andmed. [3]

trafo nimi	sõlmelt	sõlmele	X (pu)	n (pu/pu)	S <sub>nom</sub> (MVA)
11- 1011	11	1011	0.10	1.04	400.0
12- 1012	12	1012	0.10	1.05	600.0
13- 1013	13	1013	0.10	1.04	200.0
22- 1022	22	1022	0.10	1.04	560.0
1- 1041	1	1041	0.10	1.00	1200.0
2- 1042	2	1042	0.10	1.00	600.0
3- 1043	3	1043	0.10	1.01	460.0
4- 1044	4	1044	0.10	0.99	1600.0
5- 1045	5	1045	0.10	1.00	1400.0
31- 2031	31	2031	0.10	1.01	200.0
32- 2032	32	2032	0.10	1.06	400.0
41- 4041	41	4041	0.10	1.04	1080.0
42- 4042	42	4042	0.10	1.03	800.0
43- 4043	43	4043	0.10	1.02	1800.0
46- 4046	46	4046	0.10	1.02	1400.0
47- 4047	47	4047	0.10	1.04	200.0
51- 4051	51	4051	0.10	1.05	1600.0
61- 4061	61	4061	0.10	1.03	1000.0
62- 4062	62	4062	0.10	1.04	600.0
63- 4063	63	4063	0.10	1.03	1180.0
71- 4071	71	4071	0.10	1.03	600.0
72- 4072	72	4072	0.10	1.05	4000.0

Tabel L1.5 Nordic32 test süsteemi põikkompenseerimise andmed. [3]

sõlm	Q <sub>nom</sub> (MVar)
1022	50
1041	250
1043	200
1044	200
1045	200
4012	-100
4041	200
4043	200
4046	100
4051	100
4071	-400

Tabel L1.6 Nordic32 test süsteemi genereerimissõlmede andmed (talitluspunkt A). [3]

sõlm	nimipinge (kV)	genereeritav võimsus		algpinge	
		aktiivne (MW)	reaktiivne (Mvar)	amplituud (pu)	faasinurk (deg)
g1	15.0	600.0	58.3	1.0684	2.59
g2	15.0	300.0	17.2	1.0565	5.12
g3	15.0	550.0	20.9	1.0595	10.27
g4	15.0	400.0	30.4	1.0339	8.03

Tabel L1.6 järg Nordic32 test süsteemi genereerimissõlmede andmed (talitluspunkt A). [3]

sõlm	nimipinge (kV)	genereeritav võimsus		algpinge	
		aktiivne (MW)	reaktiivne (Mvar)	amplituud (pu)	faasinurk (deg)
g5	15.0	200.0	60.1	1.0294	-12.36
g6	15.0	360.0	138.6	1.0084	-59.42
g7	15.0	180.0	60.4	1.0141	-68.95
g8	15.0	750.0	232.6	1.0498	-16.81
g9	15.0	668.5	201.3	0.9988	-1.63
g10	15.0	600.0	255.7	1.0157	0.99
g11	15.0	250.0	60.7	1.0211	-29.04
g12	15.0	310.0	98.3	1.0200	-31.88
g13	15.0	0.0	50.1	1.0170	-54.30
g14	15.0	630.0	295.9	1.0454	-49.90
g15	15.0	1080.0	377.9	1.0455	-52.19
g16	15.0	600.0	222.6	1.0531	-64.10
g17	15.0	530.0	48.7	1.0092	-46.85
g18	15.0	1060.0	293.4	1.0307	-43.32
g19	15.0	300.0	121.2	1.0300	0.03
g20	15.0	2137.4	377.4	1.0185	0.00

Tabel L1.7 Nordic32 test süsteemi ülekanadesõlmede andmed (talitluspunkt A). [3]

sõlm	nimipinge (kV)	algpinge	
		amplituud (pu)	faasinurk (deg)
1011	130.0	1.0618	-6.65
1012	130.0	1.0634	-3.10
1013	130.0	1.0548	1.26
1014	130.0	1.0611	4.26
1021	130.0	1.0311	2.64
1022	130.0	1.0512	-19.05
1041	130.0	1.0124	-81.87
1042	130.0	1.0145	-67.38
1043	130.0	1.0274	-76.77
1044	130.0	1.0066	-67.71
1045	130.0	1.0111	-71.66
2031	220.0	1.0279	-36.66
2032	220.0	1.0695	-23.92
4011	400.0	1.0224	-7.55
4012	400.0	1.0235	-5.54
4021	400.0	1.0488	-36.08
4022	400.0	0.9947	-20.86
4031	400.0	1.0367	-39.46
4032	400.0	1.0487	-44.54
4041	400.0	1.0506	-54.30
4042	400.0	1.0428	-57.37
4043	400.0	1.0370	-63.51
4044	400.0	1.0395	-64.23
4045	400.0	1.0533	-68.88
4046	400.0	1.0357	-64.11

Tabel L1.7 järg Nordic32 test süsteemi ülekandesõlmede andmed (talitluspunkt A). [3]

sõlm	nimipinge (kV)	algpinge	
		amplituud (pu)	faasinurk (deg)
4047	400.0	1.0590	-59.55
4051	400.0	1.0659	-71.01
4061	400.0	1.0387	-57.93
4062	400.0	1.0560	-54.36
4063	400.0	1.0536	-50.68
4071	400.0	1.0484	-4.99
4072	400.0	1.0590	-3.98

Tabel L1.8 Nordic32 test süsteemi jaotussõlmede andmed (talitluspunkt A). [3]

sõlm	nimipinge (kV)	tarvitav võimsus		algpinge	
		aktiivne (MW)	reaktiive (Mvar)	amplituud (pu)	faasinurk (deg)
1	20	600	148.2	0.9988	-84.71
2	20	330	71.0	1.0012	-70.49
3	20	260	83.8	0.9974	-79.97
4	20	840	252.0	0.9996	-70.67
5	20	720	190.4	0.9961	-74.59
11	20	200	68.8	1.0026	-9.45
12	20	300	83.8	0.9975	-5.93
13	20	100	34.4	0.9957	-1.58
22	20	280	79.9	0.9952	-21.89
31	20	100	24.7	1.0042	-39.47
32	20	200	39.6	0.9978	-26.77
41	20	540	131.4	0.9967	-57.14
42	20	400	127.4	0.9952	-60.22
43	20	900	254.6	1.0013	-66.33
46	20	700	211.8	0.9990	-66.93
47	20	100	44.0	0.9950	-62.38
51	20	800	258.2	0.9978	-73.84
61	20	500	122.5	0.9949	-60.78
62	20	300	83.8	1.0002	-57.18
63	20	590	264.6	0.9992	-53.49
71	20	300	83.8	1.0028	-7.80
72	20	2000	396.1	0.9974	-6.83

Tabel L1.9 Nordic32 test süsteemi sünkroonmasinate näivvõimsused ning turbiinide aktiivvõimsused. [3]

generaator	$S_{nom}$ (MVA)	$P_{nom}$ (MW)
g1	800.0	760.0
g2	600.0	570.0
g3	700.0	665.0
g4	600.0	570.0
g5	250.0	237.5
g6	400.0	360.0

Tabel L1.9 järg Nordic32 test süsteemi sünkroonmasinate näivvõimsused ning turbiinide aktiivvõimsused. [3]

generaator	$S_{nom}$ (MVA)	$P_{nom}$ (MW)
g7	200.0	180.0
g8	850.0	807.5
g9	1000.0	950.0
g10	800.0	760.0
g11	300.0	285.0
g12	350.0	332.5
g13	300.0	-
g14	700.0	630.0
g15	1200.0	1080.0
g16	700.0	630.0
g17	600.0	540.0
g18	1200.0	1080.0
g19	500.0	475.0
g20	4500.0	4275.0

Tabel L1.10 Nordic32 test süsteemi sünkroonmasinate andmed. [3]

	peitpoolusega sünkroonmasin	väljepoolusega sünkroonmasin	väljepoolusega sünkroonmasin
	<b>g6, g7, g14, g15, g16, g17, g18</b>	<b>g1, g2, g3, g4, g5, g8, g9, g10, g11, g12, g19, g20</b>	<b>g13</b>
$X_d$ (pu)	2.20	1.10	1.55
$X_q$ (pu)	2.00	0.70	1.00
$X'_d$ (pu)	0.30	0.25	0.30
$X'_q$ (pu)	0.40		
$X''_d$ (pu)	0.20	0.20	0.20
$X''_q$ (pu)	0.20	0.20	0.20
$T'_{do}$ (s)	7.0	5.0	7.0
$T'_{qo}$ (s)	1.5		
$T''_{do}$ (s)	0.05	0.05	0.05
$T''_{qo}$ (s)	0.05	0.10	0.10
H (s)	6.0	3.0	2.0
$i_{fd}^{rated}$ (pu)	2.9160	1.8087	2.8170

Tabel L1.11 Nordic32 test süsteemi erguti, automaatpingeregulaatori, võnkesummuti ja üleergutuspiiraja andmed. [3]

generaator	$i_{fd}^{lim}$ (pu)	f	r	$L_1$	G	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	$L_2$ (pu)	$K_p$	$T_w$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	C (pu)
g1, g2, g3	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g4	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	150	15	0.20	0.010	0.1
g5	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g6	3.0618	1	0	-20	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g7	3.0618	1	0	-20	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1

Tabel L1.11 järg Nordic32 test süsteemi erguti, automaatpingeregulaatori, võnkesummuti ja üleergutuspiiraja mudelite andmed. [3]

generaator	$i_{rd}^{lim}$ (pu)	f	r	$L_1$	G	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	$L_2$ (pu)	$K_p$	$T_w$ (s)	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	C (pu)
g8, g9, g10	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g11	1.8991	1	0	-20	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g12	1.8991	1	0	-20	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g13	2.9579	0	1	-17	50	4	20.0	4	0				
g14	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g15, g16	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g17, g18	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	150	15	0.22	0.012	0.1
g19, g20	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	0				

Tabel L1.12 Nordic32 test süsteemi koormus-astmelülite viivitused. [3]

trafo	Viivitused	
	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)
11- 1011	30	8
12- 1012	30	9
13- 1013	30	10
22- 1022	30	11
1- 1041	29	12
2- 1042	29	8
3- 1043	29	9
4- 1044	29	10
5- 1045	29	11
31- 2031	29	12
32- 2032	31	8
41- 4041	31	9
42- 4042	31	10
43- 4043	31	11
46- 4046	31	12
47- 4047	30	8
51- 4051	30	9
61- 4061	30	10
62- 4062	30	11
63- 4063	30	12
71- 4071	31	9
72- 4072	31	11

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [2] M. Meldorf, J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*, Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda, 2011.
- [3] IEEE Committee Report, „Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment,” The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2015.
- [4] L. D. P. Ospina, A. F. Correa, G. Lammert, „Implementation and validation of the Nordic test system in DigSILENT PowerFactory,” *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 2017.
- [5] P. W. Sauer, M. A. Pai, *Power system dynamics and stability*, Urbana: Stipes Publishing L.L.C., 2006.
- [6] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE, 2003.
- [7] Power System Simulation Software list. Accessed on Dec. 16, 2019 [online]. Available: <https://nkloc.wordpress.com/2011/11/11/power-system-simulation-software-list/>
- [8] „wiki.openelectrical.org,” Open Electrical. Accessed on Dec. 16, 2019 [online]. Available: [https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Power\\_Systems\\_Analysis\\_Software](https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Power_Systems_Analysis_Software)
- [9] Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment. Accessed on Sep. 21, 2020 [online]. Available: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/489-2/>
- [10] T. Lehtla, *Elektriamid. Üldkursus*. TTÜ elektriamite ja jõuelektroonika instituut. Tallinn, 2004.
- [11] PSCAD Online Help. Accessed on Sep. 21, 2020 [online]. Available: <https://www.pscad.com/webhelp/ol-help.htm>
- [12] Etap: About Us. Accessed on Sep. 21, 2020 [online]. Available: <https://etap.com/company/about-us>
- [13] About Powerfactory. Accessed on Sep. 21, 2020 [online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

- [14] CIGRE task force 38-02-08 "Technical Report: Long-Term Dynamics Summary Part II — A practical Assessment of Simulation Tools", 1995.
- [15] B. P. Soni, A. Saxena, V. Gupta "Online Identification of Coherent Generators in Power System by using SVM, " IEEE 2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems, Märts 2017
- [16] R.M. Hasibar, A.C. Legate, J.H. Brunke ja W.G. Peterson, „The Application of High- Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500-kV Power Systems, „ IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp. 1512-1515, Aprill 1981
- [17] A.J. Gonzalez, G.C. Kung, C. Raczkowski, C.W. Taylor, ja D. Thonn, „Effects of Single-and- Three Pole Switching and High-Speed Reclosing on Turbine-Generator Shafts and Blades, „ IEEE Trans., Vol. PAS-103, pp. 3218-3228, November 1984