



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **ÜLEKANDEVÕRGUS KASUTATAVA VOOLUTRAFO MUDELI VERIFITSEERIMINE PSCAD TARKVARAS**

## **TRANSMISSION NETWORK CURRENT TRANSFORMER MODELLING AND VERIFICATION IN PSCAD SOFTWARE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kristjan Tervonen

Üliõpilaskood: 203887AAVM

Juhendajad: professor Jako Kilter  
doktorant-nooremteadur Mari Löper

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

## **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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

\_\_\_\_\_ ,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Kristjan Tervonen

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Ülekandevõrgus kasutatava voolutrafo mudeli koostamine ja verifitseerimine PSCAD tarkvaras

*Kuupäev:* 18.05.2022

65 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Professor Jako Kilter ja doktorant-nooremteadur Mari Löper

### *Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärk on tutvuda voolutrafode modelleerimise võimalustega ning teha selle alusel võrdlus reaalsete mõõtmistega alajaamas. Kasutatakse PSCAD tarkvara, et modelleerida voolutrafode voltamper- ja sageduskarakteristikud. Alajaamades kasutati Omicron CPC100 mõõteseadet, millega võeti üles voltamperkarakteristud. Saadud tulemusi hakatakse võrdlema ja analüüsima.

Esimene peatükk on voolutrafode üldisest teoreetilisest sisust koos aseskeemidega. Teine peatükk on Omicroni mõõteseadme seletuseks ja tutvustatakse alajaamas tehtavaid mõõtmisi, mis viisil vajalikud karakteristikud kätte saadakse.

Kolmas peatükk keskendub erinevatele tarkvaradele seoses voolutrafode modelleerimisega. Lisaks näidatakse ära ka PSCAD-is modelleeritud voolutrafode tulemused. See on alajaamades mõõdetud ja modelleeritud tulemuste võrdluse jaoks, kus on näidatud voltamper karakteristikute erinevused ja nende võimalikud põhjused. Tulemusi saab kasutada erinevate voolutrafode töö kontrolliks, et uurida võimalikke vigu voolutrafode talitluses ja tuvastada erinevusi reaalsete mõõtetulemuste ja modelleerimise vahel.

*Märksõnad:* voolutrafo, PSCAD, modelleerimine, Omicron CPC100, põlvepunkt

## ABSTRACT

|  |  |
|--|--|
| <i>Author:</i> Kristjan Tervonen   | <i>Type of the work:</i> Master Thesis |
| <i>Title:</i> Transmission network current transformer modelling and verification in PSCAD software  |  |
| <i>Date:</i> 18.05.2022  | 65 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 and PhD Student Mari Löper   |  |
| <i>Abstract:</i><br><p>The aim of the work is to get know with the possibilities of modeling current transformers and to make a comparison with real measurements at the substation. PSCAD software is used to model the volt-ampere and frequency characteristics of current transformers. At the substations, Omicron CPC100 were used to record volt-ampere characteristics. The results obtained will be compared and analyzed.</p> <p>The first chapter is about the general theoretical content of current transformers with sub-diagrams. The second chapter explains the Omicron meter and introduces the measurements made at the substation to obtain the required characteristics.</p> <p>The third chapter focuses on the different software related to current transformer modeling. In addition, the results of current transformers modeled in PSCAD are shown. This is for the comparison of the results measured and modeled in the substations, where the differences in volt-ampere characteristics and their possible causes are shown. The results can be used to check to investigate possible errors in the operation of current transformers and identify differences between actual measurement results and modeling.</p> |  |
| <i>Keywords:</i> current transformer, PSCAD, modelling, Omicron CPC100, knee point   |  |

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Ülekandevõrgus kasutatava voolutrafo mudeli koostamine ja verifitseerimine PSCAD tarkvaras**

Lõputöö teema inglise keeles: **Transmission network current transformer modelling and verification in PSCAD software**

Üliõpilane: **Kristjan Tervonen, 203887AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **professor Jako Kilter**

Lõputöö kaasjuhendaja: **doktorant-nooremteadur Mari Löper**  
(ettevõtte, amet ja kontakt)

2021/2022 2021/2022 Kevad

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: (kehtivusaja annab juhendaja)

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Ülekandevõrku talitluse hindamisel on oluline roll ahelatesse ühendatud mõõtetrafodel. Neid elemente kasutatakse kõrgete pingete ja suurte voolude teisendamiseks mõõteseadmetele sobilikule kujule. Olulisel kohal on mõõtevigade määratlemine ja mõju reaalselele mõõtesuurustele. Erinevate analüüside raames on mõõtetrafode karakteristikute tundmine vajalik. Näiteks elektri kvaliteedi mõõtmiste korral on tarvis mõista missugused on mõõtevead kõrgematel sagedustel. Käesoleva magistritöö käsitlusala on voolutrafod ja nende modelleerimine arvutustarkvaras PSCAD. Käesoleva lõputöö tulemusi kasutatakse õppe- ja teadustöös. Suurimaks väljakutseks on voolutrafode adekvaatne modelleerimine ja koostatud mudelite verifitseerimine. Varasemalt ei ole sellel teemal lõputöid instituudis kirjutatud.

## **2. Töö eesmärk**

Modelleerida ülekandevõrguga ühendatud voolutrafo ja teostada koostatud mudel verifitseerimine PSCAD tarkvaras.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Kuidas modelleeritakse voolutrafosid?

Kuidas toimub voolutrafo de modelleerimine PSCAD tarkvaras?

Kui suur mõju on voolutrafo mudeli täpsusele voolutrafo aseseemi parameetritel?

Missugune on voolutrafo sageduskarakteristik?

Kuidas teostatakse reaalse voolutrafo mõõtmisi vastava katseseadmega?

Kui täpne on koostatav voolutrafo PSCAD mudel võrreldes reaalse voolutrafoga?

## **4. Lähteandmed**

Lähteandmetena kasutatakse erialakirjandust, katseseadme juhendmaterjale ja saadud mõõtetulemusi.

## **5. Uurimismeetodid**

Kirjanduse läbitöötamine ja analüüs. Reaalsete katsete läbiviimine voolutrafo karakteristikute mõõtmiseks ja vastavasisuline analüüs. Modelleerimine PSCAD tarkvaras. Mudelite verifitseerimine reaalse mõõtmistulemuse alusel.

## **6. Graafiline osa**

## **7. Töö struktuur**

Loetelu töö peatükkidest koos alapeatükkide, punktide ja alapunktidega.

Sissejuhatus

Kirjanduse ülevaade

Voolutrafo de tehniline sisu ja aseseemid

Voolutrafo mõõtmised katseaseadmega

Voolutrafo modelleerimine PSCAD tarkvaras

Võrdlused ja tulemused

Kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

H.Tammoja „Automaatika ja releekaitse“

R. Teemets „Elektrivarustus“

Lõpu- ja teadustööd sarnastel teemadel

## **9. Lõputöö konsultandid**

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Loetelu töö etappidest, mille taga sulgudes tähtaeg. Mõned näited töö etappidest:

kirjanduse läbitöötamine – 31. jaanuar

teoreetilise osa kirjutamine – 14. veebruar

arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostamine – 28. märts

uuringu tulemuste kirjeldamine – 15. aprill

töö esimene versioon valmis – 1. mai

juhendajale läbilugemiseks saatmine – 1. mai

paranduste sisseviimine

juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine

töö lõplik versioon valmis.



# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....                            | 4  |
| ABSTRACT .....   | 5  |
| EESSÕNA .....  | 11 |
| SISSEJUHATUS .....                                     | 12 |
| 1. VOOLUTRAFOD .....                                   | 14 |
| 1.1 Voolutrafode põhimõte .....                        | 14 |
| 1.2 Mõõtevead .....                                    | 17 |
| 1.3 Mõõtevoolutrafod .....                             | 20 |
| 1.4 Kaitsevoolutrafod .....                            | 21 |
| 1.5 Voolutrafode aseseem .....                         | 23 |
| 1.6 Küllastumine.....                                  | 24 |
| 1.7 Põlvepinge.....                                    | 27 |
| 1.8 Sageduskarakteristik .....                         | 28 |
| 2. VOOLUTRAFODE MODELLEERIMINE .....                   | 32 |
| 2.1 Voolutrafode modelleerimine kirjanduse alusel..... | 32 |
| 2.2 Tarkvarapakett - MATLAB.....                       | 33 |
| 2.3 Tarkvarapakett - PSCAD .....                       | 35 |
| 2.4 Tarkvarapakett - EMTP .....                        | 39 |
| 3. VOOLUTRAFODE MÕÕTMINE .....                         | 42 |
| 3.1 Mõõteseade ja mõõtmine .....                       | 42 |
| 3.2 Mõõdetud küllastuskõverad .....                    | 45 |
| 3.3 Mõõtetulemused Eesti ülekandevõrgus .....          | 46 |
| 3.3.1 VT1 .....  | 46 |
| 3.3.2 VT2 .....  | 47 |
| 3.3.3 VT3 .....  | 49 |
| 3.4 PSCADiga modelleerimine.....                       | 50 |
| 3.4.1 Modelleeritud voltamper karakteristikud .....    | 50 |

|                           |   |    |
|---------------------------|---|----|
| 3.4.2                     | Modelleeritud sageduskarakteristikud .....          | 54 |
| 3.5                       | Mõõdetud ja modelleeritud voolutrafode võrdlus..... | 59 |
| KOKKUVÕTE .....           |   | 61 |
| KASUTATUD KIRJANDUS ..... |   | 63 |

## **EESSÕNA**

Magistritöö teema algatus tuli autori poolt, kes soovis seoses voolutrafode mõõtmistega töö alaliselt rakendada see ka lõputöösse. Juhendajaga koos sai mõeldud täpsem teema koos mõõtmistele lisanduva modelleerimise sisuga. Töö koostati uurides kirjandust ja teadustöid seoses voolutrafode modelleerimise ja küllastuskõveratega. Modelleerimine tehti kooli arvutis, kus oli olemas PSCAD tarkvara koos litsentsiga. Mõõtmiste osa teostati Eesti põhivõrgu alajaamades.

Autor tänab nii juhendajaid Jako Kilter ja Mari Löperit kui ka nooremteadur Tanel Sarnetit mudeli abistamisega.

## SISSEJUHATUS

Voolutrafod on mõeldud kõrgepingevõrgus suurte voolude ülekandmiseks, et tagada reelekaitse- ja mõõteseadmete ohutu töö. Nende ohutu töö tarbeks tehakse Eesti ülekandevõrgus voolutrafodele regulaarselt testimisi. Uuritakse sekundaarahela voltamper karakteristikut, mis näitab ära, kas voolutrafo on küllastunud või mitte. Lisaks mõõdetakse voolutrafodel ka ülekandesuhet, mis näitab primaar- ja sekundaarahela erinevust ehk kas voolud on vastavalt standardis määratud ülekandesuhtele.

Voolutrafode seisukord on oluline ka laiemalt terve alajaama ja ülekandevõrgu ohutusele. Nad tagavad ohutu tegutsemise sekundaarpoolel, isoleerides selle primaarpoolest. Nii saab mõõteseadmeid kasutada ilma, et peaks kasutama primaarpoolt ehk muudab töö seadmetele ja inimestele ohutuks. Voolutrafode vale käitumine võib lisaks voolutrafo enda ohutusele anda juhtimiskeskusele valesid signaale, millel on oht tervele elektrivõrgule.

Eesti põhivõrgus mõõdetakse voolutrafosid pidevalt, et nende seisukord oleks teada. Üldiselt toimuvad 110 kV ja 330 kV voolutrafode voltamper karakteristikute mõõtmised iga 6 aasta tagant. Mõõtmisteks alajaamades kasutatakse Omicron CPC100 mõõteseadet, mis väljastab sekundaarahelate voltamper karakteristikute. Selle alusel on võimalik hinnata voolutrafo küllastumist ja voolutrafo südame seisukorda. Nii on võimalik tuvastada voolutrafode välja vahetamist, kui mõõtetulemused seda näitavad. Seega on mõõtmiste eesmärk majanduslik ja tehniline seisukord Eesti põhivõrgu voolutrafodel hoida heal tasemel. Mõõtmiskohad on Eesti põhivõrgu alajaamad 110 ja 330 kV voolutrafodel.

Käesolev töö keskendub voolutrafode modelleerimisele ja tulemuste võrdlemisele reaalselt mõõdetud küllastuskõverate (ehk voltamper karakteristikute) alusel. Töö eesmärgiks ongi saadud andmete võrdlus. Lisaks uurida kirjanduse alusel voolutrafode aseseeme ja modelleerimist. Ka vaadatakse erinevate parameetrite seost voolutrafo mudeli täpsusele.

Eesti ülekandevõrgus valiti 330 kV voolutrafod, mida hakatakse modelleerima. Kõik kolm uuritavat voolutrafot on erinevate tootjate omad. Modelleerimiseks kasutati PSCAD tarkvara, milles loodi üldine võrgu mudel. Sealt võeti eraldi välja voolutrafod, mille puhul uuriti voltamper- ja sageduskarakteristikuid. PSCAD võimaldab luua elektrivõrgu mudeli ja sealt väljastada voolutrafode erinevad parameetrid. Kasutada

saab kahte tüüpi voolutrafo mudelit – JA mudel ja Lucase mudel, mille alusel on võimalik erinevaid parameetreid uurida. Antud töös on vajalik magneetimisvoolu uurimine, mida võimaldab Lucase mudel. Nagu ka mõõdetud tulemused alajaamades, on mudelite alusel võimalik hinnata voolutrafo seisukorda voltamper karakteristikute alusel. Simulatsioonidena võetakse välja lisaks voltamper karakteristikule ka sageduskarakteristikud, mis näitavad siinusgraafikul voolude suurust ajas. Seda on võimalik teha ka kõrgematel sagedustel kui võrgusagedus.

Käesoleva magistritöö esimene peatükk keskendub voolutrafo teoreetilistele lähtepunktidele. Vaadatakse eraldi kaitse- ja mõõtevoovooltrafosid ning nende mõõtevigasid. Voolutrafo mõõtevead on otseselt seotud küllastuskõveraga, sest suur mõõteviga tuleb välja küllastuskõverat uurides/modelleerides. Järgnevalt vaadatakse voolutrafo aseseeme ning selle parameetreid. Samuti uuritakse kuidas voolutrafo küllastuvad ja selle alusel ka põlvepinget, mis on näha küllastuskõveral ja on standardiseeritud. Viimaseks vaadatakse voolutrafo kõrgematel sagedustel kui elektrivõrgus olev 50 Hz.

Töö teine peatükk keskendub voolutrafo modelleerimisele. Uuritakse erinevaid modelleerimise võimalusi seoses voolutrafo mudeliga. Lisaks töös kasutatavale PSCADile on ka teisi voolutrafo mudeldamise tarkvarasid, mida kirjanduse alusel vaadatakse. PSCADiga modelleeritakse samasugune voolutrafo nagu Eesti ülekandevõrgus kasutatakse ning vaadatakse selle alusel küllastuskõverat ja sageduskarakteristikut.

Kolmandas peatükis on kirjeldatud ülekandevõrgus pingel 330 kV mõõdetud voolutrafo. Lahti on seletatud Omicron CPC100 mõõteseade, kuidas seda kasutatakse ning mida mõõtmise tulemusel saadakse. Lisaks keskendub peatükk alajaamas mõõdetud ja PSCADis modelleeritud andmete võrdlemisele.

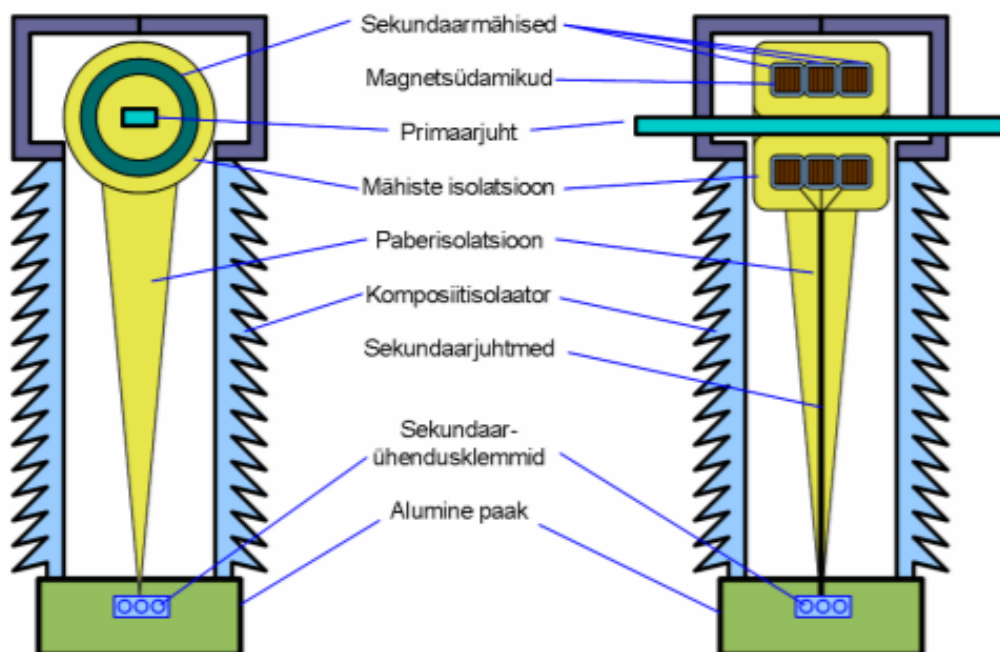
Töö alusel on võimalik hinnata mudelite täpsust võrreldes reaalse mõõtetulemustega. Eesmärk on tuvastada mudelite ja Omicroniga mõõdetud tulemuste võimalike erinevuste põhjuseid ning erinevate parameetrite mõju mõõtetulemustele.

# 1. VOOLUTRAFOD

Esimeses peatükis on kirjeldatud voolutrafode teoreetiline sisu, sh erinevad voolutrafode tüübid, aseseemid ning karakteristikud. Lisaks vaadatakse voolutrafode küllastusprobleeme ja erinevatel sagedustel voolutrafode töötamist.

## 1.1 Voolutrafode põhimõte

Induktiivvoolutrafod on ette nähtud kõrgepingeliste voolude transformeerimiseks mõõteriistadele ja kaitseseadmetele sobivateks vooludeks. Võrreldes pingetrafodega töötavad magnetsüdamikuga voolutrafod lühises, seega sekundaarmähisele rakendatud takistus on väga väike. Seetõttu on voolutrafod ühendatud lühistalitusel seadmetega, mille takistus on üpris väike. Koormusvool sekundaarmähisel on üldiselt 1 A või 5 A. Viimane sobis varasemalt releede toiteks, kuid samas põhjustas suuri kadusid; varasemal ajal peeti 1 A voolutugevust ka liialt häirealtiks. [1] [2] Tänapäeval on Eestis suures osas kasutusel 1 A voolutugevusega voolutrafod seoses suurenenud koormustega sekundaarpoolel. Joonisel 1.1 on voolutrafo põhimõtteskeem koos selles olevate elementidega.



Joonis 1.1. Voolutrafo tööpõhimõtteskeem [2]

Primaarahelat läbiva voolu ning sekundaarahelat läbiva voolu suhe määratakse mähiste keerdude arvuga, näidatud avaldisega 1.1 [2]. Tähistega 1 on primaarmähise suurused, tähistega 2 sekundaarmähise suurused.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (1.1)$$

Tüüpilise kõrgepingelise voolutrafo puhul on primaarahelas 1 keerd ( $\omega_1 = 1$ ), sageli läbib vooluga juht trafo südamikku otse. [2]

Kõrgepinge voolutrafodele on Elering kehtestanud järgnevad ülekande väärtused, näidatud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Voolutrafo ülekanded erinevatel lahtritel. [3]

| <b>Seade</b>                        | <b>Voolutrafo ülekanne</b>  |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 330 kV liini lahter                 | 1000/2000 A või 1500/3000 A |
| 330 kV trafo lahter                 | 500 A                       |
| 110 kV sektsioonide vaheline lahter | 600/1200 A või 1000/2000 A  |
| 110 kV süsteemide vaheline lahter   | 600/1200 A või 1000/2000 A  |
| 110 kV liini lahter                 | 600/1200 A või 1000/2000 A  |
| 330 kV trafo 110 kV lahter          | 1200 A                      |
| 110 kV trafo 110 kV lahter          | 150/300 A või 300/600 A     |
| Kliendi lahter                      | Valitakse objektipõhiselt   |

Eesti alajaamades olevad voolutrafod peavad töötama vahemikus -25 kuni +40 kraadi. Voolutrafo mõõtemähis töötab maksimaalselt +115 kraadi juures (vastab isolatsiooniklassile E). Isolaatorina kasutatakse enamasti paber-õli või SF<sub>6</sub> tüüpi isolaatoreid, mis tagavad ka mehaanilise tugevuse. [4] [5]

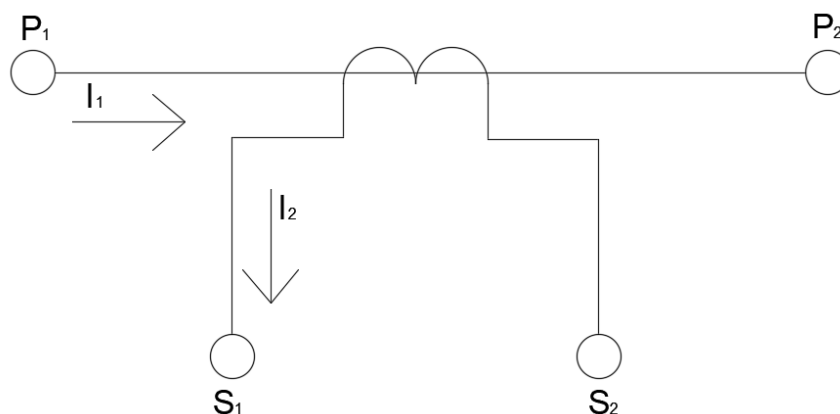
Voolutrafot on võimalik kasutada mitmete erinevate südamike puhul. Sama voolujuhi ümber paigutatud mähised on sama primaarmõjuga ja kõrval seisva südamiku mõju on suhteliselt tühine. Ühes voolutrafos saab kõrvuti kasutada nii mõõte- kui ka kaitsevoolumähist. Esimene neist on väikese ristlõikepindalaga magnetsüdamikuga,

kuid see-eest täpsem. Kaitsevoolutrafo on suurema südamikuga ja küllastumiskindel. [2] Enamasti on Eestis ülekandevõrgus volutrafodel 5 sekundaarmähist.

Tüüpiliselt on koormused volutrafode sekundaarahelates seatud vastavalt trafode spetsifikatsioonile, olles vahemikus 2,5 kuni 15  $\Omega$ . Tavaline sekundaarahela võimsus on seega 2,5 kuni 75 VA, mis on pingetrafode näitajatest madalam. Sümmeetrilise koormuse korral on vool volutrafo neutraalis null, eeldusel, et ühendatakse kolme faasi. Trafo koormuse leidmiseks lähtutakse faasijuhtme ühest pikkusest. [2] [1] Digitaalsete releede tulekuga on koormus sekundaarahelates oluliselt vähenenud. Koormusvooluna tuleks eelistada 1 A, sest 5 A korral on volutrafo mõõtmed suuremad. Lisaks on alajaamades pikad sekundaarahelad, mis suurendab takistust ja seega suureneb ka üldine koormus, mis ei tohi olla suurem volutrafo nimikoormusest.

Voolutrafos ei tohi jätta lahtiseid otsi, sest see võib viia eluohtliku pingeni, mis tekib sekundaarse magnetvoo puudumisel. Sekundaarmähis peab olema lühistatud läbi kaitseseadmete, mõõteriistade, või spetsiaalsete klemmidega klemmiribal. Ohtliku pinge tekkimise vältimiseks mõõteriistadele maandatakse sekundaarmähise üks ots. [5]

Voolutrafosid on kahte tüüpi – kaitse- ning mõõtevoolutrafod. Nii mõõte- kui kõigi muude trafode klemmitähistus on niisugune, et voolu suund trafo mähistes ei muutu – klemmi P1 sisenev vool väljub klemmist S1 ja vastavalt vool klemmi P2 (B või N) – klemmist S2 (b või n), näidatud joonisel 1.2. Vool justkui siirduks primaarahelast otse sekundaarahelasse, nagu trafo mähiseid polekski. Seejuures muutub voolu moodul vastavalt trafo ülekandesuhtele ja vooluveale ning voolu faas faasivea võrra. [6]



Joonis 1.2. Voolude suund volutrafos [7]



## 1.2 Mõõtevead

Voolutrafode mõõtmisel võivad tulemusi mõjutada mõõtevead. Need jagunevad voolu- ja nurgavigadeks ning nende summaarseks veaks ehk komposiitveaks. Üldiselt on vead põhjustatud kadudest voolutrafo südamikes.

Komposiitviga on normaaltalitluses primaarvoolu hetkväärtuse ja nimiülekanadesuhtega korrutatud reaalse sekundaarvoolu hetkväärtuse vahelise erinevuse efektiivväärtus. Komposiitviga protsentides väljendub avaldisega 1.2 [6]:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_n i_s - i_p)^2 dt}, \quad (1.2)$$

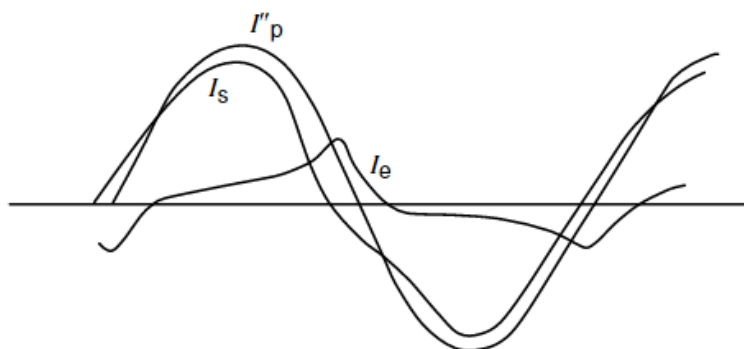
kus  $k_n$  – nimiülekanadesuhe,  $I_p$  – primaarvoolu efektiivväärtus (A),  $i_p$  – primaarvoolu hetkväärtus (A),  $i_s$  – sekundaarvoolu hetkväärtus (A),  $T$  – perioodi pikkus (s).

Avaldis (1.2) kehtib ka küllastunud südamikuga voolutrafo korral, mil voolus on palju kõrgemaid harmoonikuid. Põhisagedusel võib koguvea ligikaudu määrata avaldisega 1.3:

$$\varepsilon_c = \sqrt{f^2 + \delta^2}, \quad (1.3)$$

kus  $f$  on vooluviga suhtarvuna ja  $\delta$  nurgaviga radiaanides. [6]

Komposiitviga kasutatakse vooluharmoonikute suure sisalduse korral, sest ergutusvoolu  $I_e$  ja sekundaarvoolu  $I_s$  mittelineaarsed tingimused toovad sisse kõrgemad harmoonikud, mida iseloomustab järgnev joonis 1.3. [1] [8].  $I_e$  ja  $I_s$  summa on  $I_p''$ , mis näitab primaarvoolu suurust.



Joonis 1.3. Ergutusvoolu  $I_e$ , sekundaarvoolu  $I_s$  ja primaarvoolu  $I_p''$  lainekujud. [8]

Tabelis 1.2 on näidatud kaitsevoolutrafode maksimaalsed vead kasutatavate täpsusklasside juures.

Tabel 1.2. Täpsusklassid koos nurga- ja vooluvigadega [6]

| Täpsusklass | Vooluviga, % | Nurgaviga, ' | Koguviga, % |
|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 5P          | 1            | 60           | 5           |
| 10P         | 3            | *            | 10          |

\* Lineariseeritud voolutrafol IEC standardi väliselt 150'.

Tähise P ees olev arv 5 või 10 näitab komposiitvea täpsuspiiri nimiprimaarvoolu korral protsentides. Tabelis 1.3. on mõõtevoolutrafode maksimaalsed lubatavad voolu- ning nurgavead.

Tabel 1.3. Mõõtevoolutrafo voolu- ning nurgavead [1]

| Täpsusklass | ±vooluviga protsentides erinevatel nimivoolu protsentuaalsetel väärtustel |      |     |     |     | ± nurgaviga erinevatel nimivoolu protsentuaalsetel väärtustel |    |    |     |     |                  |      |     |     |     |
|-------------|---|------|-----|-----|-----|---|----|----|-----|-----|------------------|------|-----|-----|-----|
|             |   |      |     |     |     | Minutites   |    |    |     |     | Sentiradiaanides |      |     |     |     |
|             | 1   | 5    | 20  | 100 | 120 | 1   | 5  | 20 | 100 | 120 | 1                | 5    | 20  | 100 | 120 |
| 0,2S        | 0,75  | 0,35 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 30  | 15 | 10 | 10  | 10  | 0,9              | 0,45 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 0,5S        | 1,5   | 0,75 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 90  | 45 | 30 | 30  | 30  | 2,7              | 1,35 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

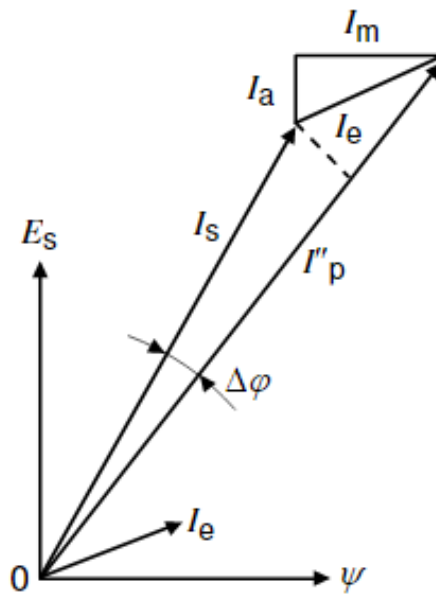
Vooluviga (või ka suhteviga) avaldub avaldisega 1.4 [1]:

$$f = \frac{K_N I_S - I_P}{I_P} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

kus  $K_n$  - nimiülekanandesuhe,  $I_P$  voolutrafo primaarvoolu (A) ja  $I_S$  sekundaarvoolu väärtus (A).

Vooluviga ja nurgaviga on näidatud järgneval joonisel 1.4. Sekundaarvoolu  $I_S$  ja ergutusvoolu  $I_E$  vektorsumma on  $I_p''$ , mis näitab keerdude suhtega korrutatud primaarvoolu. Ergutusvool tekitab magnetvoo  $\Psi$ , millel on magneetimiskomponent  $I_m$  paralleelselt magnetvooga ning nendega risti olev kadude vektor  $I_a$ .

Vooluviga on vektorite  $I_S$  ja  $I_p''$  pikkuste vahe jagatuna  $I_p''$  pikkusega. Nurgaviga  $\Delta\phi$  kasvab koormuse Z suurenemisel positiivses suunas. Kui sekundaarvoolu vektor edestab primaarvoolu vektorit, loetakse nurgaviga positiivseks. [1] [8]

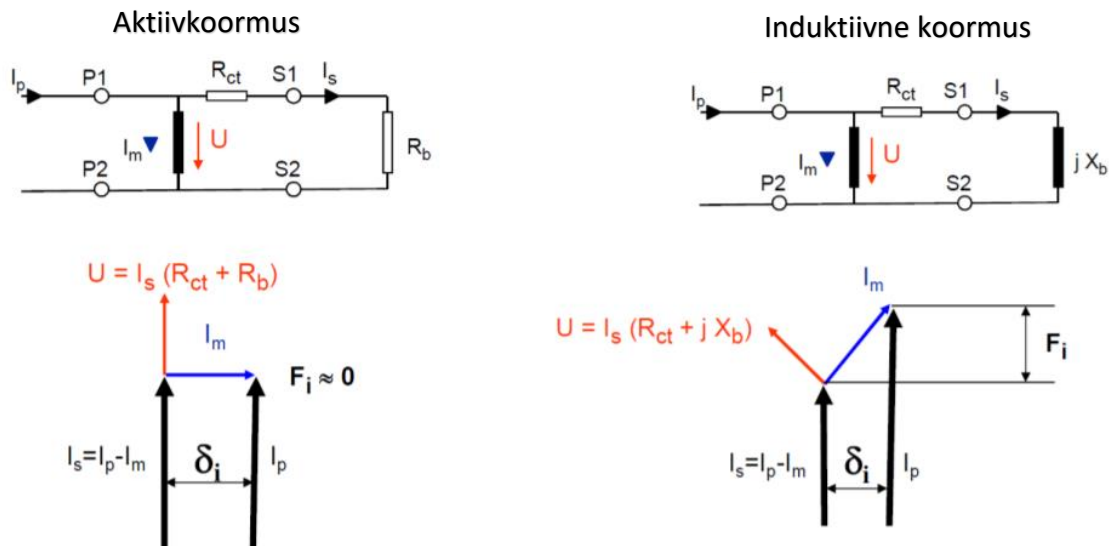


Joonis 1.4. Vooluvea vektordiagramm [8]

Voolutrafo täpsus oleneb ka voolutrafo koormusest  $S_k$  (väljendatakse voltamprites). Voolutrafode nimikoormuse  $S_{kn}$  IEC standardväärtused on 2,5, 5, 10, 15 ja 30 VA (võimsustegur 0,8 ind). Kasutatakse ka väärtusi 45 ja 60 VA. Tavaliselt on vead lubatavates piirides koormusel  $(0,25-1)S_{kn}$ . Täpsus on suurim koormusel umbes  $0,75S_{kn}$ . Samal voolutrafol võib olla erinevail nimikoormuseil erinevaid täpsusklasse, nt 15 VA, class 0,5 – 30 VA, class 1, kus 15 ja 30 VA on voolutrafo nimikoormused.[6]

Mõõtevead eri koormustüüpide korral on joonisel 1.5 ( $F$  on mooduli ja  $\delta$  nurgaviga). Aktiivtakistusliku koormuse korral on vooluviga võrdne nulliga, sest magnetimisahela  $I_m$  vool on risti sekundaarvooluga (primaarvool on võrdne sekundaarvooluga). Samal põhjusel on nurgaviga suurem.

Induktiivse koormuse korral on primaarvool suurem sekundaarvoolust, mis põhjustab suurema vooluvea. Samas nurgaviga on väiksem, sest magnetimisahela vool pole risti sekundaarvooluga.



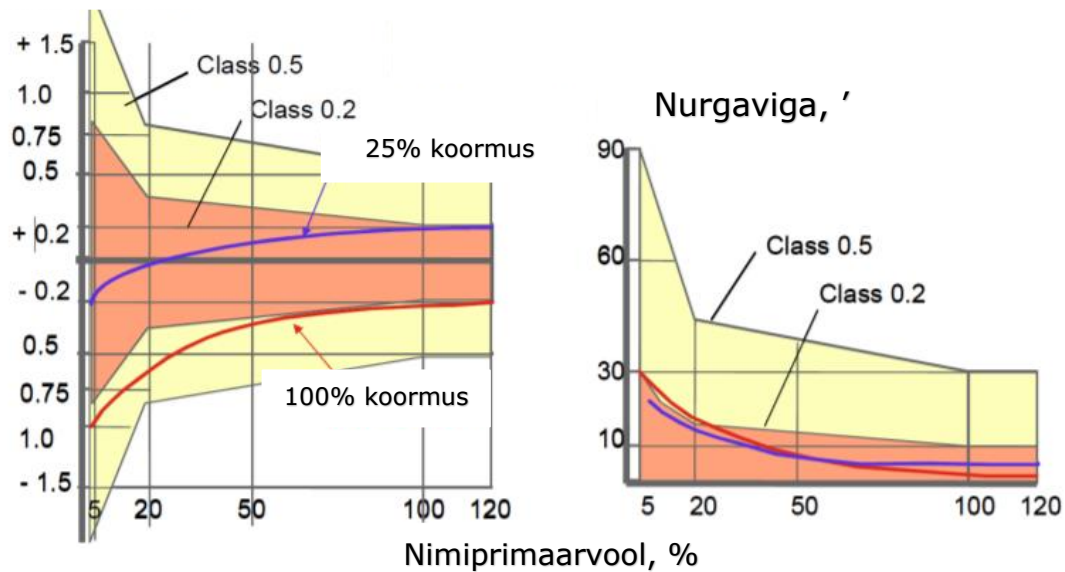
Joonis 1.5. Mõõtevead eri koormuste korral [7]

### 1.3 Mõõtevoolufod

Erinevalt kaitsevoolufodest, mis peavad adekvaatselt üle kandma ka suuri anormalseid voole, peavad mõõtevoolufod täpselt töötama vaid nimivoolu piirkonnas. Mõõtetrafode täpsust saab hinnata voolu- ja nurgavigade alusel. Mõõtevoolufode täpsusklass elektrienergia müügil ei saa jääda alla 0,5 ehk nimikoormusel võib vooluviga olla maksimaalselt 0,5% ja nurgaviga 30'. [9]

Täpsusklassiga 0,2S voolufosid rakendatakse kommerts-mõõtmises. Täpsusklassiga 0,5S saab kasutada ka teistes mõõtmistes, nt bilansi mõõtmiseks ja omatarbe mõõtmisel. [5] Voolufoklasside 0,2S ja 0,5S mõõtevead ei tohi 25% kuni 100% koormusel nimikoormusest ületada tabeli 1.3 piirväärtusi. [6] Voolu- ning nurgavead graafiliselt on joonisel 1.6. Primaarvool võib olla ka veel 120% juures nimiprimaarvoolust, sest seal on mõõtevead lubatu piirides. Vasakpoolne joonis käib vooluea ning parempoolne nurgavea kohta. Sinine kõver on 25% koormuse korral ja punane 100% koormuse juures. Primaarvoolu vähenedes on mõõtevead suuremad, 100% koormuse juures on vooluviga negatiivne, 25% koormuse juures on vooluviga väiksem, olles kuni 20% nimikoormuse juures negatiivne. Nurgaviga väheneb koormuse tõustes. 5% nimiprimaarvoolu korral on 100% koormuse korral nurgaviga 30 minutit.

Vooluviga, %



Joonis 1.6. Mõõtevoolutrafode mõõtevead vastavalt IEC 60044-1 standardile [7]

Mõõtevoolutrafo peab kaitsma mõõteseadmeid lühisvoolu dünaamilise ja termilise toime eest südamiküüllastumisega. Seda omadust iseloomustab mõõtevoolutrafo mõõteriista turvategur. See on volutrafo primaarnimi voolu kordsus (ei ole standardiseeritud, tavaliselt 5–10), mille juures volutrafo koguviga  $\varepsilon \geq 10\%$ , nt 10 VA, class 0,5 FS5, kus viimane arv ongi mõõteriista turvateguri nimiväärtus (s.o väärtus nimikoormusel 10 VA). [6]

## 1.4 Kaitsevoolutrafod

Kaitsevoolutrafode peamine probleem on vea suurenemine suurte voolude korral ja aperioidiline primaarlühisvool, mille tõttu kaasub südamiküüllastusvoost põhjustatud lisaviga. Täpsusklassid kaitsevoolutrafodel on 5P ja 10P (tähtis P näitab, et tegu on kaitsetrafoga). [9]

IEC standardi järgi on ette nähtud järgmised 3 kaitsevoolutrafode klassi:

- TPX – südamik ilma õhupiluta
- TPY – südamik väikese õhupiluga, jääkmagneetumus alla 10% küllastusvoost
- TPZ – südamik suure või mitme õhupiluga, jääkmagneetumus tähtsusetu.

Õhupiludega südamikuga voolutrafo koguviga (eriti nurgaviga) on sedavõrd suurem, et tema täpsusklass saab olla ainult 10P. Ka on ta oluliselt kallim kui terviksüdamikuga voolutrafo.[6]

Kaitsevoolutrafosid jagatakse ka teistmoodi klassidesse:

- PR-klass: PR tähistab madalat remanentsi e jääkmagnetismi. Madala jääkmagnetismi tõttu tagavad PR klassi kaitsevoolutrafod piisava täpsuse ka vahetult pärast suurte voolude (ehk pärast lühise) esinemist.
- PX-klass: madala reaktiivtakistusega voolutrafo, mille küllastuspunkt on viidud võimalikult kõrgele. [1] Erinevad klassid on määratud standardiga, mis koos vastava selgitusega on tabelis 1.4.

Voolutrafo kaitse südamiku ristlõikepinna suuruse määravad tema täpsuspiirikordsus, nimikoormus ja lineariseerimisaste. Kõigi nende suurendamine põhjustab alati lisakulusid. Neid meetmeid tuleb kasutada ainult tähtsate kaitseobjektide korral. Kaitsevoolutrafo südamikel on küllastumise vältimiseks suurem südamike ristlõige. [2] [6]

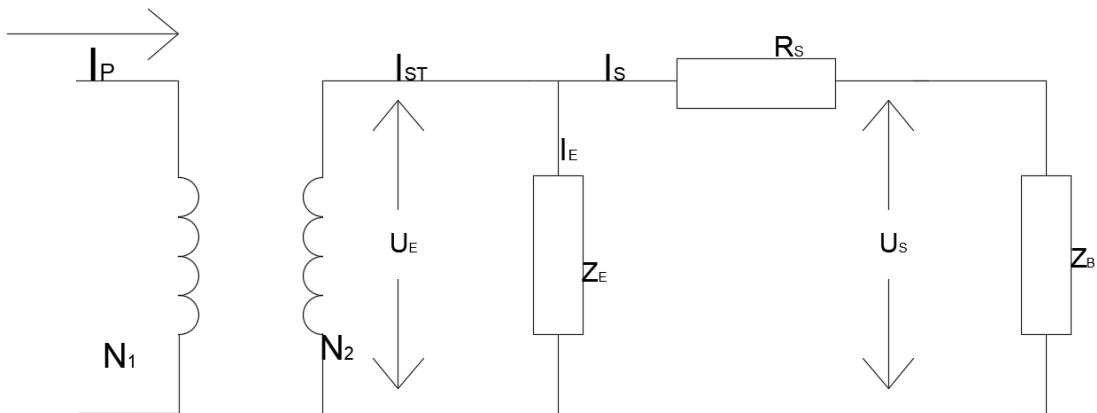
Täpsuspiirikordsus  $F_n$  on täpsuspiiri nimiprimaarvoolu suhe nimiprimaarvoolu ( $F_n = n \cdot 10$ ). Täpsuspiirikordsuste standardrida on: 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500). Kordsuse 50–500 puhul on tegemist lineariseeritud [südamiku õhupilu(de) abil] voolutrafodega. [1] [6]

Tabel 1.4. Kaitsevoolutrafode klassid [8]

| <b>Tähistus</b>   | <b>Jääkvoov piirnorm</b>                  | <b>Selgitus</b>  |
|---|---|--|
| P<br>PR   | Ei <sup>a)</sup><br>Jah                   | Voolutrafo määratlemine vastamaks komposiitvea nõuetele sümmeetrilisel püsilühisvoolul           |
| PX<br>PXR   | Ei <sup>a), b)</sup><br>Jah <sup>b)</sup> | Voolutrafo määratlemine magneetimiskarakteristikute alusel                                       |
| TPX<br>TPY<br>TPZ   | Ei <sup>a)</sup><br>Jah<br>jah            | Voolutrafo määratlemine vastamaks transiendivea nõuetele ebasümmeetrilise lühisvoolu tingimustes |
| <sup>a)</sup> Vaatamata sellele, et jääkvoole ei anta piirnorme, võivad õhupilud olla lubatavad, nt avatavate südamikega voolutrafodes. Selliste voolutrafode näide on voolutangid<br><sup>b)</sup> PX ja PXR eristamiseks teineteisest kasutatakse jääkvoov kriteeriumit |   |  |

## 1.5 Voolutrafode aseskeem

Ideaalse voolutrafo aseskeem on joonisel 1.7:



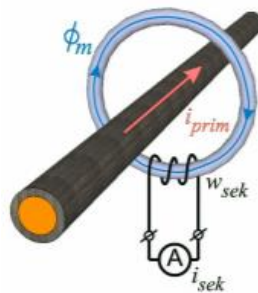
Joonis 1.7. Voolutrafo aseskeem [10]

kus

$I_P$  – primaarvool,  $I_E$  – ergutusvool,  $I_S$  – sekundaarvool,  $I_{ST}$  – sekundaarpoolele taandatud vool,  $N_1$  ja  $N_2$  keerud primaar- ja sekundaarpoolel,  $U_E$  – ergutuspinge,  $U_S$  – sekundaarpinge,  $R_S$  – sekundaarmähise takistus,  $Z_E$  – magneetimisahela takistus,  $Z_B$  – koormus

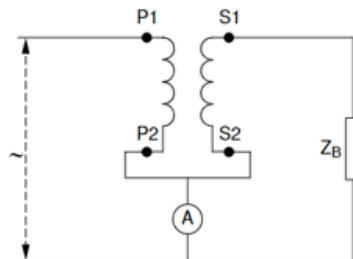
$I_{ST}$  on primaarvool korrutatud keerupaaride jagatise, näitab voolu ideaalse voolutrafo korral. Mitteideaalsel juhul arvestatakse ka magneetimisahelaga. Magneetimisahela takistus  $Z_E$  on väga suur küllastumata olukorras ja väga väike küllastunud olukorras. Ergutusvool  $I_E$  on vool, mis on läinud kaduma, läbides magneetimisahelat. Ergutusvool on normaalolukorras väike ja küllastunud olukorras suur.

Kuigi takistustel  $Z_B$  ja  $Z_E$  on nii aktiiv- kui ka reaktiivosad, siis arvutused on täpsed ka ilma nurki arvestamata. Arvutustes jäetakse tihti arvestamata ka sekundaarahela takistusega  $R_S$ . [10] Joonisel 1.8. on sama aseskeem füüsikalisele, kus  $\Phi_m$  – magnetvoog. Südamik on toroidse kujuga ja primaarmähiseid on 1.



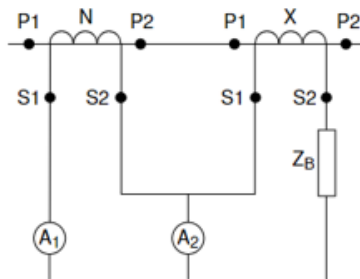
Joonis 1.8. Voolutrafo füüsikaline aseskeem [2]

Joonisel 1.9 on voolutrafo, mille keerusuhe on 1:1. See on ühendatud primaarvooluallikaga, lineaarse karakteristikuga sekundaarkoormusega  $Z_B$  ja ampermeetriga, nii et seda läbivad nii primaar- kui ka sekundaarvoolud. Ampermeetrit läbiva voolu efektiivväärtuse suhe primaarvoolu efektiivväärtusesse näitab komposiitviga. Joonis kujutab seega komposiitvea otsese mõõtmise aseskeemi.



Joonis 1.9. Voolutrafo aseskeem keerusuhtega 1:1 [8]

Järgnev joonis 1.10. esitab komposiitvea mõõtmise põhiskeemi voolutrafodele, mille nimiülekanadesuhe pole 1:1. Voolutrafo tähisega N on miinumkoormusel tühise komposiitveaga (nn etalontrafo), aga voolutrafo X on ühendatud nimikoormusele. Mõlemat voolutrafot toidetakse samast allikast. Ampermeetri  $A_2$  voolu efektiivväärtus suhe ampermeetri  $A_1$  efektiivväärtusesse näitab trafo X komposiitviga. [8]



Joonis 1.10. Voolutrafode aseskeem, mille ülekanadesuhe pole 1:1 [8]

## 1.6 Küllastumine

Voolutrafot iseloomustatakse ka magnetimiskõvera abil. See määrab ära küllastumise punkti. Mõõtevoolutrafod peavad täpselt teisendama primaarväärtused sekundaarselt ning on ebaoluline (isegi soovituslik), kui nad lühisvoolude juures küllastuvad. Kaitsevoolutrafod peavad üsna täpselt suutma teisendada suuri lühisvoolusi sekundaarseteks ilma küllastumata, et tagada kaitsereleede korrektne toimimine. [7]



Ideaalsel juhtumisel on aseskeemi (joonise 1.7) põhjal  $I_S = \frac{I_P}{k_n}$  ehk sekundaarvool on võrdne primaarvoolu ja ülekandesuhte jagatisega.

Sekundaarmähise vool on leitav avaldisega 1.5 [2]:

$$I_S = \frac{\Phi \cdot I_m}{\omega_{sek} \cdot \mu_m \cdot A'} \quad (1.5)$$

kus  $A$  – südamikuristõike pindala ( $m^2$ ),  $\mu_m$  – magnetilise läbitavuse tegur,  $\Phi$  – magnetilise induktsioon (Wb).

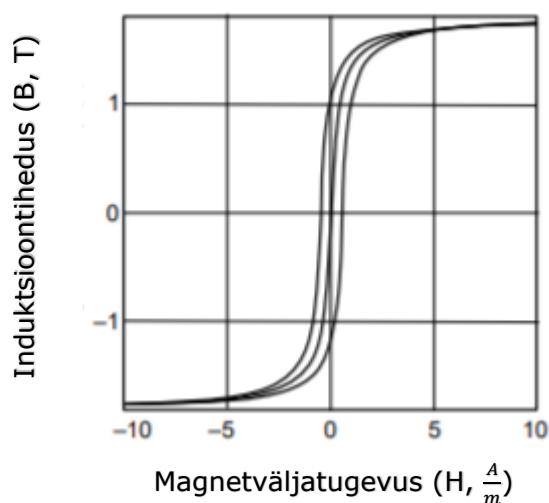
Voolutrafo küllastumise järel ei ole primaarvool ja sekundaarvool enam omavahelises suhtes ning sekundaarvool võib märgatavalt erineda primaarvoolu väärtusest. Küllastumine liini ühes otsas võib viia diferentsiaalkaitse töös valerakendumisteni, kui liini ühes otspunktis olev voolutrafo küllastub ning teine ei küllastu. Lisaks on oht kui ühe voolutrafo küllastus on suurem kui voolutrafol teises liini otsas. [2]

Voolutrafode primaarjuhtmes oleva ja magnetsüdamikku läbiva voolu tagajärjel tekib magnetväli  $H$  (T), mis on leitav avaldisega 1.6 [2]:

$$H = \frac{I_P \cdot \omega_p}{l_m}, \quad (1.6)$$

kus  $l_m$  on magnetsüdamikus oleva magnetjõujoone keskmine pikkus (m), primaarmähise keerdude arv  $\omega_p$  on üldjuhul 1.

Voolutrafo raudsüdamikus on fikseeritud number magnetilisi dipoolide, mille polaarsused on juhuslikud. Magnetvälja tugevus toob kaasa magnetilise induktsiooni  $\Phi$ . Kui kõik südamikus olevad magnetdipoolid on suunatud samale poole, siis saavutab induktsioontihedus  $B$  oma maksimaalse väärtuse. Seejärel ükski magnetdipool oma suunda muuta ei saa ja voolutrafo küllastub. Sekundaarpinge on seejärel 0. Induktsioontiheduse  $B$  ja magnetväljatugevuse  $H$  vaheline seos on joonisel 1.11. Erinevate südamikematerjalide juures võib B-H kõver olla veidi erinev. [2] [10]

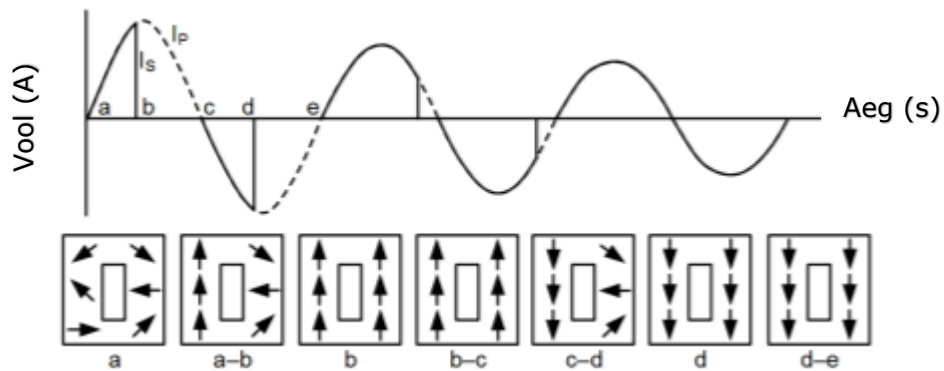


Joonis 1.11. B-H kõver [10]

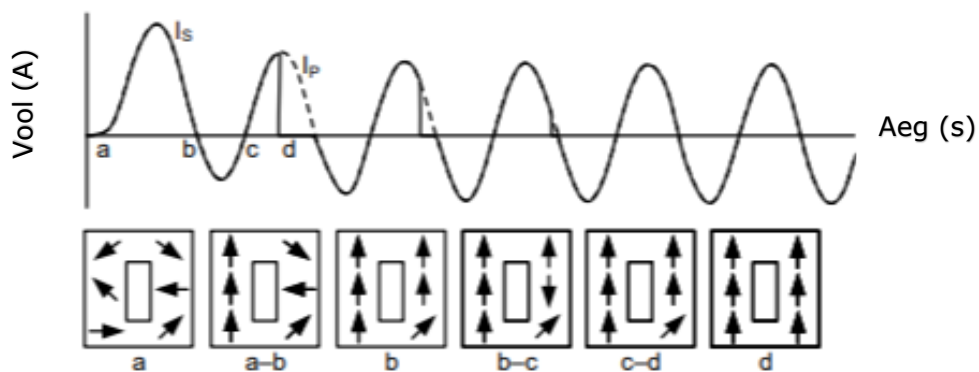
Kui magnetsüdamik on B-H kõveral lineaarses tsoonis, on südamiku magnetilise läbitavuse tegur  $\mu_m$  konstantne ning  $I_s$  ning  $I_p$  on omavahel proportsionaalsed. Juhul, kui südamikku mõjutab vool  $I_p$ , mis on lühisvool, võib magnetvälja tugevuse tõttu aset leida magnetsüdamiku küllastumine. Magneetimispunkt jõuab küllastumisel piirkonda, kus see seos enam ei kehti ning  $\mu_m$  väärtus väheneb kiirelt. Sekundaarvool  $I_s$  ei ole sel juhul enam proportsionaalne primaarvoolu  $I_p$ -ga. [2]

Väikese induksioontiheduse  $B = \Phi/S$  saamiseks tuleks südamiku ristlõike pindala  $S$  teha võimalikult suur. Trafo mähist läbiv vool suureneb oluliselt küllastusse minemisel ja see võib kaasa tuua trafo tuntava ülekoormuse [1]. Küllastunud voolutrafo tagajärjel võivad releedeni jõuda valed käsud.

Küllastumisi on kahte liiki: sümmeetriline ja asümmeetriline. Sümmeetrilise küllastuse korral on voolutrafole rakendatud primaarvool liialt suur ning trafo südamik ei suuda koormust taluda. Asümmeetrilise küllastusel pole primaarvool siinuskõveral nulli suhtes sümmeetriliselt. Sümmeetriline küllastus tekitab paaritu arv harmoonikute järgu, asümmeetriline paarisarv harmoonikute järgu. [10] Eestis olevates voolutrafoodes ei ole lühisvoolud piisavalt suured, et oleks erilist ohtu voolutrafoode sügavaks küllastumiseks. [2] Graafiliselt on küllastused näidatud joonistel 1.12 ja 1.13. Nooltega tähistused näitavad dipoolide liikumist, punktides d toimubki küllastumine.



Joonis 1.12. Sümmetriline küllastus [10]



Joonis 1.13. Asümmetriline küllastus [10]

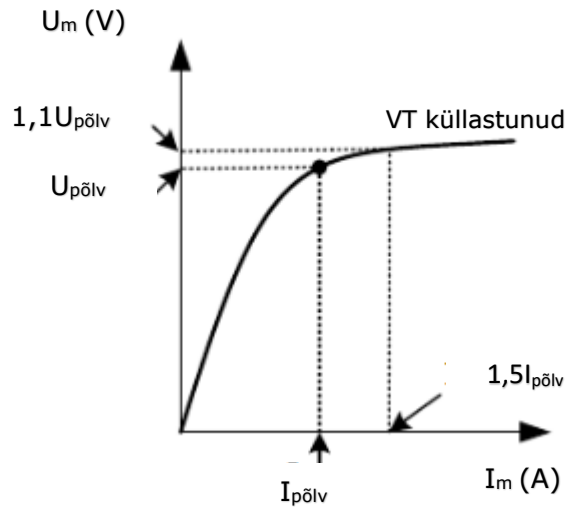
## 1.7 Põlvepinge

Käänupinge (ehk põlvepinge, käänupunkt, *knee point*) on sekundaarmähise klemmidele rakendatud nimisagedusega siinuselise pinge efektiivväärtus, mille suurendamine 10% võrra põhjustab 50%-lise magneetimisvoolu suurenemise, näidatud joonisel 1.14. Käänupunkti ületamisel tekivad suurest jääkmagnetismist põhjustatud suured mõõtevead. Küllastumise oluline suurenemine algab voolutrafo käänupingest suurema pinge korral. [1] [6] Seega põlvepunkt ise veel ei näita küllastuspunkti. Üldiselt on põlvepunkt 46% küllastuspunkti väärtusest. IEEE C57.13-2016 standard määrab, et põlvepingest kõrgemal on mõõtevead suuremad kui 10% ehk  $\frac{I_E}{I_S} \cdot 100 > 10\%$  ning mõõteviga peab jääma alla selle protsendi, kui sekundaarvool on 20 korda üle nimivoolu. [10]

Ehk sümmetriline küllastus tekib järgmise sekundaarpinge ületamise korral (avaldis 1.7) [11]:

$$U_S = 20 \cdot I_S \cdot Z_B \quad (1.7)$$

Küllastus tekib varem, kui rakendatud koormus  $Z_B$  on üle standardi.



Joonis 1.14. Põlvepinge graafik [11]

Kui võtta aluseks aseseem (joonis 1.7), siis kaitsevoolufode põlvepinge peab ületama [11]:

$$U_{pölv} \geq \frac{I_{psc,max}}{k_n} (R_S + R_B), \quad (1.8)$$

kus  $I_{psc,max}$  – maksimaalne lühisvool sekundaarpoolel, kA.

Seega suuremate lühisvoolude ja koormuste korral on põlvepinge suurem ning seetõttu ka kõrgem magneetimisvool. Tänapäevaste digireleede koormus on väga väike, mistõttu küllastusprobleeme eriti ei ole.

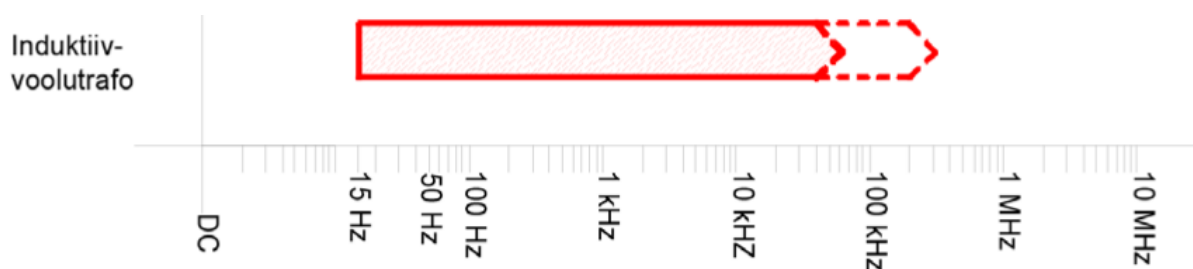
PR klassi kaitsevoolufod piisava täpsuse ka vahetult pärast suurte voolude (pärast lühise) esinemist. PX klassi kaitsevoolufod tagavad piisava täpsuse suurte (lühis)voolude korral, mis ei ületa käänupunkti [1].

## 1.8 Sageduskarakteristik

Voolu- ja pingetrafo puhul on tähtis kontrollida mõõtetrafo mõõtevea amplituudsageduskarakteristikuid, kus tuleb jälgida suhtelist mõõtevea muutumist sõltuvalt mõõdetava signaali sagedusest. Näiteks harmoonikute mõõtmisel, kuni 50 järguni on sagedusvahemik kuni 2,5 kHz. Voolufode ülekandekarakteristikud on

stabiilsed sagedused kuni 10 kHz. Voolutrafo puhul mõjutab mõõtetäpsust induktiivne sekundaarkoormus. [12]

Kui võrgusagedusel on mõõtetrafo vea põhikomponent magnetiline viga, siis kõrgematel sagedustel on hälbe peapõhjuseks mahtuvuslik viga. Sageduse kasvades magnetiline viga väheneb ja selle panus summaarsesse veasse on tühine. Võrreldes induktiivpingetrafodega, on induktiivvoolutrafo vead sageduse tõustes väiksemad. Joonisel 1.15 on induktiivvoolutrafo kasulik sagedusvahemik. Asjaolu tõttu, et isegi sama tehnika piires sõltuvad piirid arvukatest parameetritest, ei ole need esitatud pidevjoontega, vaid on näidatud punktiirjoonega.[4]

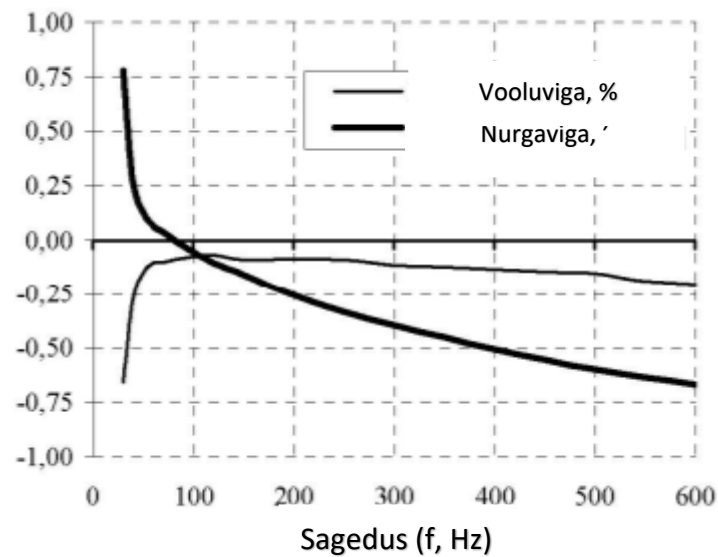


Joonis 1.15. Voolutrafo sagedusvahemik [4]

Sageduskarakteristik on erinevatel voolutrafo del isesugune, s.o ülekandetegur erinevate sagedustega pinge- või voolukomponentide leidmiseks. Elektrivõrgus olevad kõrgemad harmoonikud võivad sageduskarakteristikul ulatuda kümnetesse kilohertsidesse. Kõrgemaid harmoonikuid peaks eristama rikketalitluse suuruste leidmisest; normaaltalitluse korral on tegemist pikema aja jooksul olevate parameetritega. Standardi IEC 61000-3-6 kohaselt on harmoonikute suuruste mõõtmine kuni 40. või 50. põhikomponendi sageduseni, 50 Hz korral on selleks vastavalt 2000 Hz või 2500 Hz. [2]

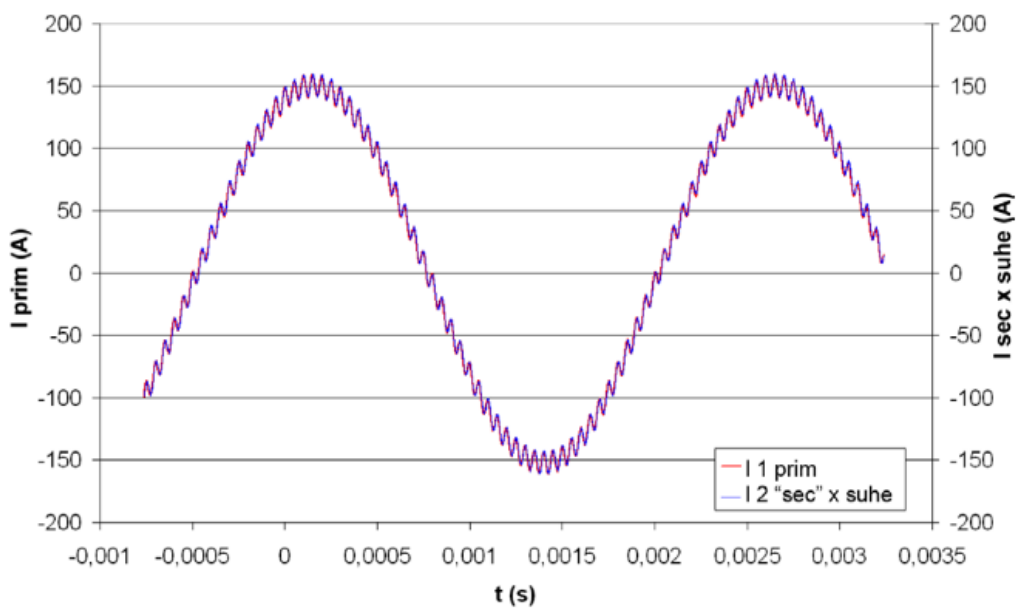
Induktiivvoolutrafo sageduskaja (*frequency response*) on seotud trafo mahtuvuste ja induktiivsustega. Voolutrafo del, mida kasutatakse üle 52 kV pingel, on mahtuvustel mõju tühine kuni 40-nda harmoonikuni. Vooluharmoonikute mõõtmisel sagedusvahemikus kuni 10 kHz, on tavaliste kaitse- ja mõõtmiseesmärgil kasutatavate voolutrafo de täpsus parem kui 3%. Kui voolutrafo koormus on induktiivne, siis võib ilmuda väike nurgaviga (joonis 1.16). Voolutrafo täpsus on sobiv esimese 25 vooluharmooniku mõõtmiseks, sest sageduskaja amplituud on peaaegu konstantne ja nurgaviga sisendi ja väljundi vahel tühine vähemalt 2500 Hz-ni. Kõrget täpsust on leitud 5 kHz-ni, lisaks ei ole täheldatud primaar- ja sekundaarpinge vahelist faasinihet kuni

sageduseni 20 kHz. [4] Nagu näitab järgnev joonis 1.16, siis sageduse tõustes hakkab nurgaviga kasvama (samas lubatava 60' ei küündi), vooluvea erilist langust ei tähelda. Katse oli tehtud nimikoormusel ja nimiprimaarvoolu 10 A juures.



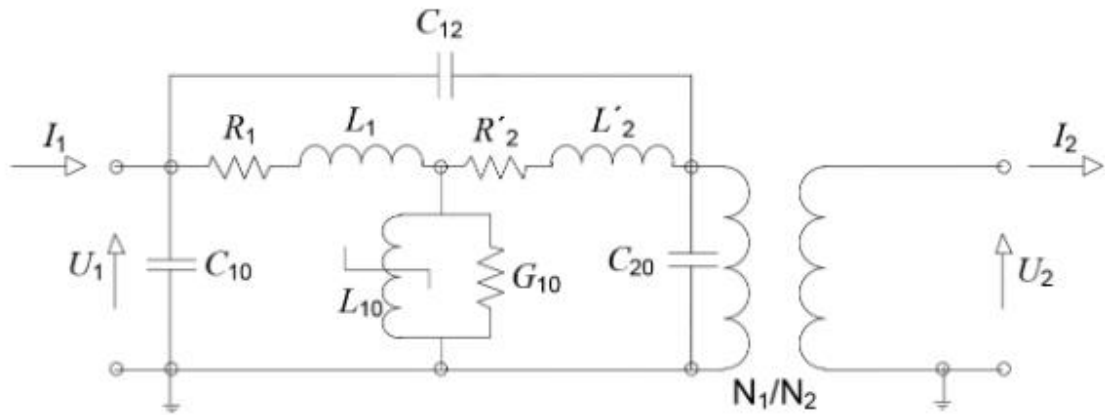
Joonis 1.16. Sageduse ja mõõtevigade seos [13]

Joonisel 1.17 on täpsusklassiga 0,5 voolutrafo, mille ülekanne on 2400/1 ja võimsus 30 VA, võetud primaar- ja sekundaarvoolu mõõtetulemused 400 Hz juures. Primaar- ja sekundaarvool on praktiliselt võrdsed. Sagedusarakteristikud on näidanud erinevaid käitumismustreid mitte ainult eri tootjate, vaid ka sama tootjate eri näidiste hulgas. [4]



Joonis 1.17. Elektrikvaliteedi mõõtmine, 245 kV voolutrafo [4]

Järgneval joonisel 1.18 on voolutrafo aseskeem (kehtib ka pingetrafo kohta), et vaadata olukorda kõrgemate harmoonikute mõõtmisel. Võrreldes tavaolukorraga on sinna lisatud magneetimisinduktiivsus  $L_{10}$ , mida iseloomustab mittelineaarne hüstereetiline käitumine. Lisaks mähiste vaheline mahtuvus  $C_{12}$  ning mähiste ja maa vahelised mahtuvused  $C_{10}$  ja  $C_{20}$ , mille mõju kasvab koos sageduse tõusuga.



Joonis 1.18. Aseskeem kõrgematel sagedustel [4]

## **2. VOOLUTRAFODE MODELLEERIMINE**

Käesolevas peatükis kirjeldatakse voolutrafode modelleerimise võimalusi kirjanduse alusel, vaadatakse kolme laialdasemalt kasutatavat voolutrafo tarkvarapaketti – PSCADi, MATLABi ja EMTP-d

### **2.1 Voolutrafode modelleerimine kirjanduse alusel**

Voolutrafode modelleerimist saab uurida erinevate tarkvaradega – peamised neist on PSCAD, MATLAB ja EMTP. Vormilt on kõik programmid sarnased – luuakse suurema elektrivõrgu mudel, kust võetakse välja voolutrafo mõõtegraafikud. PSCADis võib piisata isegi vaid modelleerides voolutrafot ennast ilma ümbritseva elektrivõrguta. Sel juhul ei saa aga luua seoseid voolutrafo käitumise ja ülejäänud elektrivõrgu parameetritega. Traditsiooniline viis voolutrafot uurida on suurte voolude rakendamine primaarpoolele ja seejärel voolude välja võtmine sekundaarpoolel.

Voolutrafode modelleerimisel saab uurida lisaks küllastusnähtustele ja lühisvooludega seotud probleemidele ka nt ülekannet ehk primaar- ja sekundaarvoolude suhet, jääkmagnetismi, sekundaarpoole koormuse mõju (nii aktiiv- kui ka reaktiivkoormus) voolutrafodele ja mõõtevigu. PSCADis on võimalik seoses voolutrafodega uurida ka distantreleede käitumist lühiste ajal. Üldiselt on voolutrafod vaid üks osa elektrivõrgust ja tavapäraselt neid täpselt ei modelleerita vaid vaadatakse üldist võrgu seisukorda. Voolutrafode uurimisel on rõhk sekundaarpoole signaalidel (pinge, vool, magnetimiskõver), mida üldise elektrivõrgu uurimisel arvesse ei võeta. Voolutrafode puhul võetakse arvesse erinevaid parameetreid, mille alusel saab uurida nende käitumist. Põhilisemaid parameetreid on ülekanne ehk primaar- ja sekundaarvoolude suhe. Ülejäänud parameetrid on tähtsad vastavalt sellele, mis uurimise all on – nt magnetimisvool, sekundaartakistus või koormus.

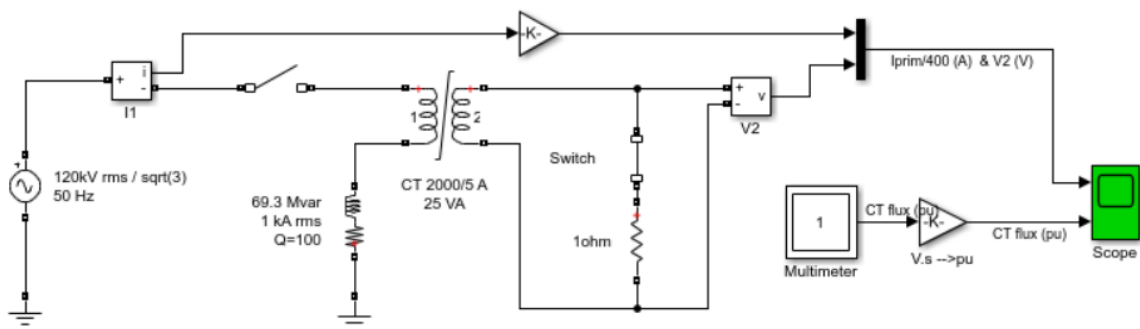
Voolutrafode modelleerimisel on peamine eesmärk elektrivõrgu kaitsmise uurimine. Tänapäeval on võrku lisatud palju alalisvooluseadmeid ja releesid, mis mõjutavad voolutrafode käitumist. Erinevate mudelitega (nt EMTP) on võimalik uurida nende mõju normaalolukorras ja lühiste olukordades. Eraldi vaadatakse kaitse- ja mõõtevoolutrafosid – kaitsevoolutrafod ei tohi lühisvoolude esinedes küllastuda, mõõtevoolutrafod võivad. Mudelite probleemiks on mõnede andmete puudumine, nt on väga keeruline teada südameke täpseid mõõtmeid, mida tihti voolutrafo kataloogides ei



kajastata. Nii võetakse südamike mõõteteks ja kaaluks kokkulepitud väärtused. [14] [15] [16]

## 2.2 Tarkvarapakett - MATLAB

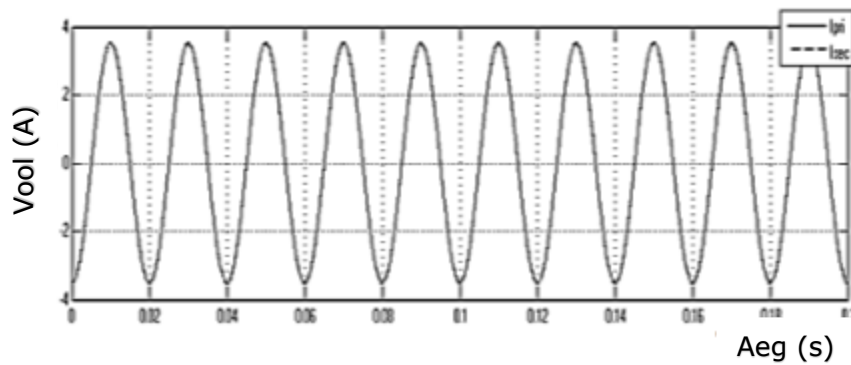
MATLABis<sup>1</sup> saab näitena teha elektrilise mudeli, nt järgnev joonis 2.1 on MATLABis tehtud voolutrafo mudel, millega on võimalik mõõta voolutrafo pinget ja voolu. Kasutatakse ülekandesuhtega 2000/5 A voolutrafo ülekandevõrgus pingel 120 kV. Tavaolukorras on vool siinusgraafikul sümmeetriline ja lüliti sekundaarpoolel on sees. Küllastusolukordi modelleerides suletakse kaitselüliti (*switch*) pingel nullpunktil. See tekitab voolu asümmeetria, mille tõttu ka sekundaarpinge näitab moonutatud tulemust. [17]



Joonis 2.1. Voolutrafo mudel MATLABis [17]

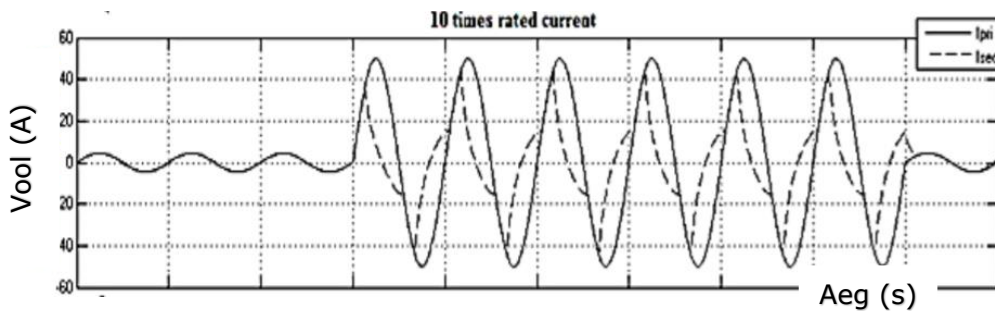
MATLABis saab uurida nii hüstereesisilmuseid kui ka küllastuskõvera. Normaalolukorras on vool primaar- ja sekundaarpoolel võrdne ning siinusteljel sümmeetriline. Varem mainitud paremeetritega voolutrafo vool oli katsel primaarpoolel 1414 A, mis teeb sekundaarpoolel voolutugevuseks 3,53 A. [18] Joonisel 2.2 on modelleeritud voolutrafo voolud primaaris ja sekundaaris võrdsed.

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/>



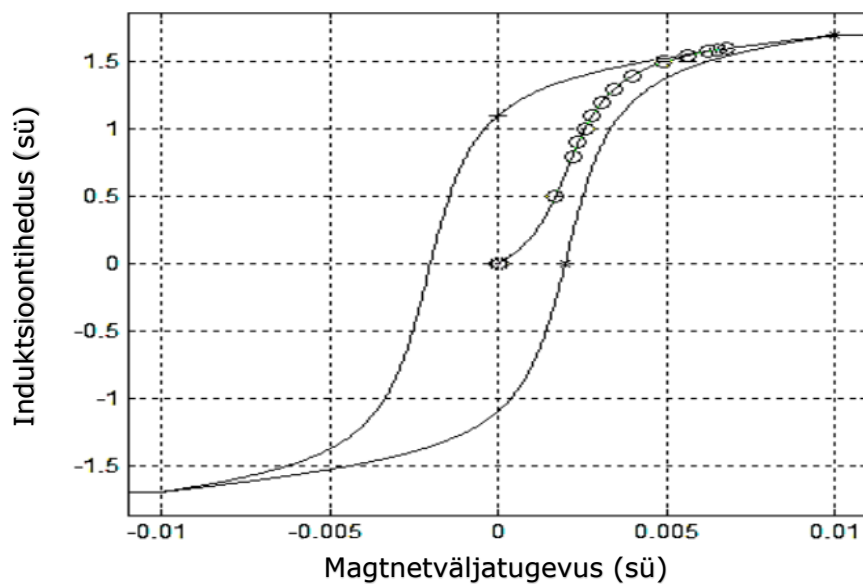
Joonis 2.2. Voolutrafo primaar- ja sekundaarvool normaalolukorras [18]

Järgnevalt sai tekitada lühisvoole ning uurida 2-10 kordse nimivoolu juures primaar- ning sekundaarvoolude käitumist. Joonisel 2.3 on 10-kordse nimiprimaarvoolu juures saadud tulemused. Nii on võimalik uurida lühisvoolude suuruse seost sellega, palju primaar- ja sekundaarvool teineteisest erinevad, samuti moonutub antud katse käigus hüstereesisilmus. Punktiirjoon on sekundaarvool ja pidevjoon primaarjoon.



Joonis 2.3. 10-kordse primaarvooluga voolutrafo [18]

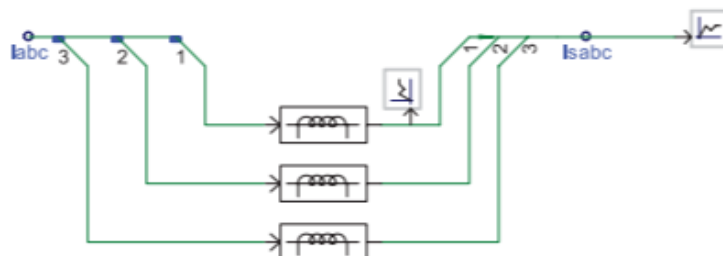
Ideaalne hüstereesisilmus võetuna MATLABis on joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Ideaalne hüstereesisilmus MATLABis [18]

## 2.3 Tarkvarapakett - PSCAD

Voolutrafode küllastust saab uurida ka PSCAD<sup>2</sup> tarkvaraga. Üldine skeem, mida tarkvaras tehakse on joonisel 2.5, kus on näha ahelas kolme eraldiseisvat voolutrafot.



Joonis 2.5. Voolutrafod PSCADis [16]

Primaarpoolelt tuleb vool  $I_{abc}$  (kA) ning sekundaarpoole väljavõttel on  $I_{sabc}$  (A). Mudelis ei pea voolutrafod olema ühendatud elektrivõrguga, sest primaarpoolelt vaadatuna on ahel lühises. On võimalik ka mitme voolutrafo modelleerimine, et uurida vastastikust seost.

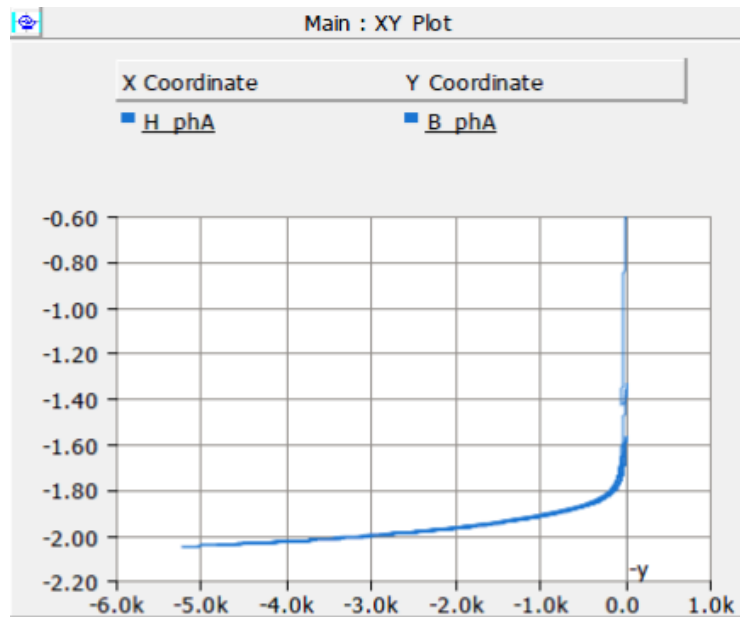
Simulatsioonis võetakse arvesse põhilisi küllastumist tekitavaid põhjuseid:

- 1) Primaarvool pole siinuskõveral sümmeetriline või primaarvool on liialt suur
- 2) Suur jääkmagnetism
- 3) Suur takistus sekundaarpoolel

Ka siin on võimalik simulatsiooni järel tulemusena saada voolude ebasümmeetrilisust ja hüstereesisilmuse ebakorrapärasust. Joonisel 2.6 on hüstereesisilmus lühise olukorras, mis pole võrreldav ideaalse hüstereesisilmusega (joonis 2.4). Sellele vastav voolugraafik on sarnane joonisele 2.3. [16]

---

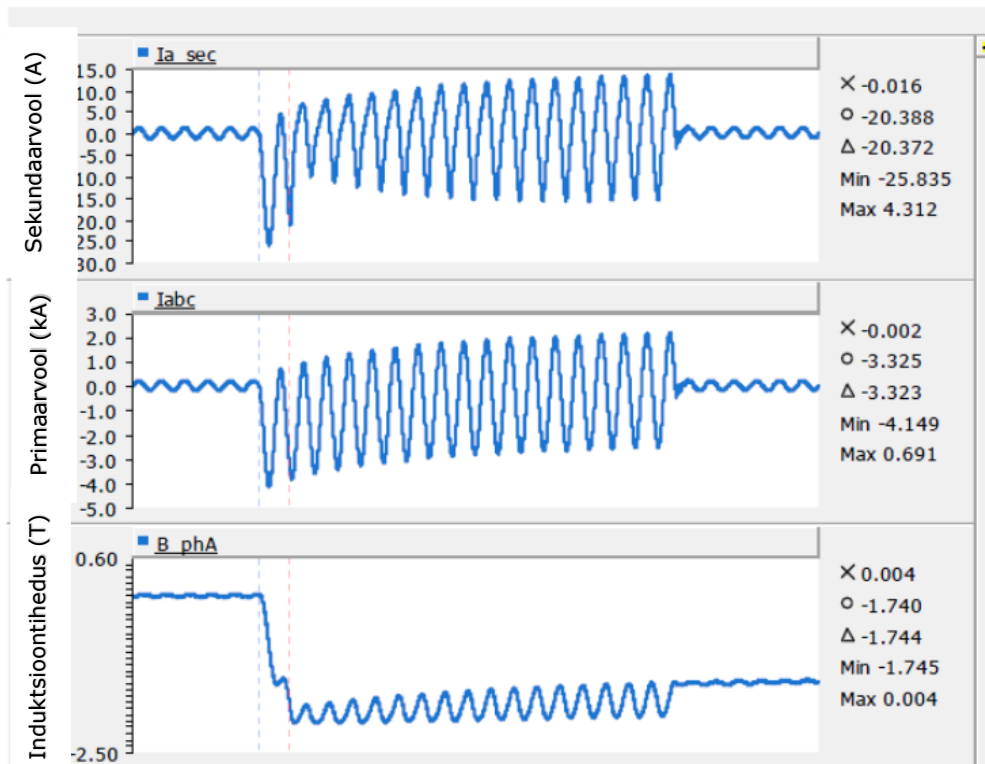
<sup>2</sup> <https://www.pscad.com/>



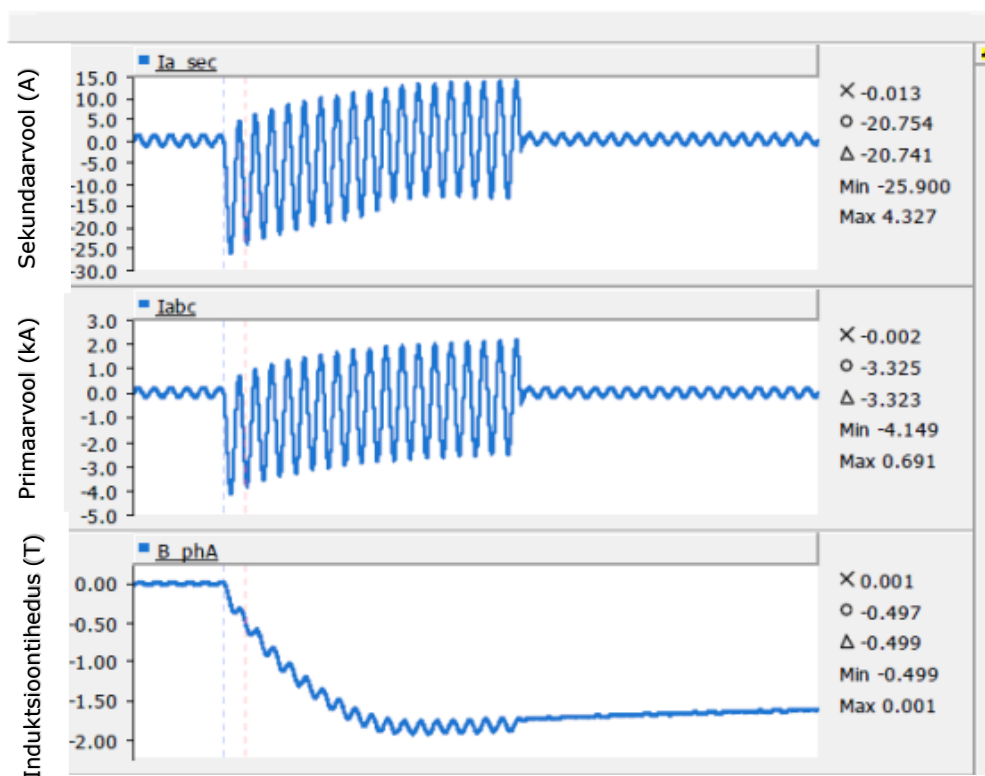
Joonis 2.6. Hüsteresisilmus lühise olukorras PSCADis [16]

Suurt primaarvoolu olukorda näeb jooniselt 2.7. Primaar- ja sekundaarvoolud pole peale lühise algust enam teineteisega sarnased, kuigi sinusidaalsus säilib. Suurim erinevus tuleb esile kohe peale lühist esimese perioodi vältel. Joonise alumine graafik näitab induktsoontihedust peale lühist, mis väheneb ehk tekib küllastus ja magneetimisvool on suurem kui normaalolukorras. Peale lühise lõppemist jääb jääkmagnetismi tõttu induktsoontihedus ikkagi madalamaks kui enne lühist.

Ka koormuse mõju saab voolutrafo küllastumisel uurida. Joonisel 2.8 on muudetud koormust  $2,5 \Omega$  juurest  $0,5 \Omega$  peale. Sealt selgub, et väiksema koormuse juures on induktsoontiheduse langus väiksem ning voolutrafo küllastusse minev aeg on pikem. Primaar- ja sekundaarvoolud on samuti sarnasemad. [16]



Joonis 2.7. Primaar-, sekundaarvool ja induktsioontihedus rikke korral [16]



Joonis 2.8. Koormus lühisel  $0,5 \Omega$  [16]

PSCADis on kaks voolutrafo mudelit – JA mudel ja Lucase mudel. JA mudel põhineb Jiles-Athertoni ferromargneetilise hüstereesi teorial. Küllastust, hüstereesi ja jääkmagnetismi moodustumise mõju modelleeritakse magnetmaterjali füüsikaliste omaduste põhjal. Mudeli sisendiks on mõõdetud primaarvool (kA) ning väljundiks on releedeni jõudev sekundaarvool (A). Selle mudeli alusel saab luua magneetimiskõvera ehk B-H karakteristiku.

Efektiivse magnetvälja  $H_e$  ( $\frac{A}{m}$ ) leidmiseks kasutatakse avaldist 2.1:

$$H_e = H + \alpha M \quad (2.1)$$

kus  $H$  – magnetväljatugevus ( $\frac{A}{m}$ ),  $\alpha$  – iseloomustab magnetmaterjali osakeste vahelist seost,  $M$  – magnetiline moment ( $A \cdot m^2$ ).

Induktsioontihedus leitakse järgmise avaldisega 2.2:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.2)$$

kus  $\mu_0$  – magnetiline konstant ( $\frac{N}{A^2}$ ) [19]

Lucase mudel modelleerib voolutrafo, mis on ühendatud takistuslike releedega. Mudeli sisendiks on mõõdetud primaarvool (kA). Mudel arvutab samuti sekundaarvoolu (A) väärtust, aga lisaks ka magneetimisvoolu (A) ja induktsioontihedust (T). Lucase mudel kasutab tavalist voolutrafo aseskeemi. Kogukadude ( $i_c$ - avaldis 2.3) saamiseks on liidetud kokku voolutrafo magneetimis- ( $i_m$  - avaldis 2.4), hüstereesi ( $i_h$  - avaldis 2.5) ja pöörisvoolukaod ( $i_e$  - avaldis 2.6).

$$i_c = i_m + i_e + i_h \quad (2.3)$$

$$i_m = k_1 \cdot B + k_1 \cdot B^{n_1} + k_2 \cdot B^{n_2} + k_3 \cdot B^{n_3} \quad (2.4)$$

$$i_e = G_{ed} \cdot U \quad (2.5)$$

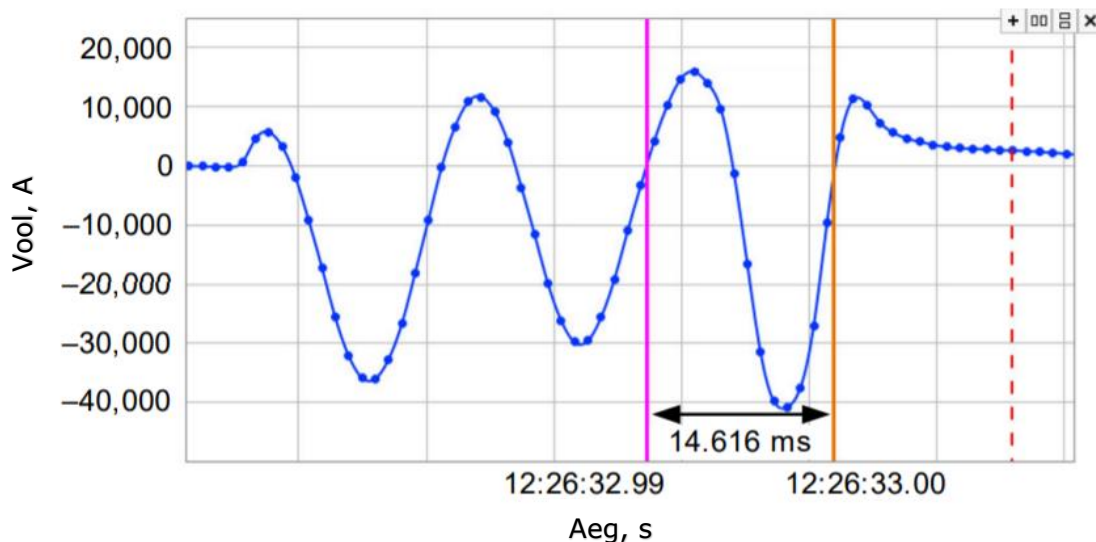
$$i_h = G_1 \cdot (U) \cdot \sqrt{|U|} + G_2 \cdot U \cdot |B|^3 + G_3 \cdot U \cdot |B|^{15} \quad (2.6)$$

kus  $G_{ed}$  – pöörisvoolukadude koefitsient,  $G_1, G_2$  ja  $G_3$  – hüstereesikadude voolukoefitsiendid,  $k_1, k_2, k_3, n_1, n_2$  – magneetimiskarakteristiku parameetrid. [20]

Kadude hindamiseks on vajalikud parameetrid primaar- ja sekundaarahela keerdude arv ning südamik materjal. PSCAD annab ette südamiku materjaliks räni ning selle põhjal ka südamiku mõõtmed. Ränimetall on kõige laialdasemalt kasutusel olev südamiku materjal ning seda ka alajaamades mõõdetud Trenchi [21], Koncari [22] ja Arteché [23] puhul.

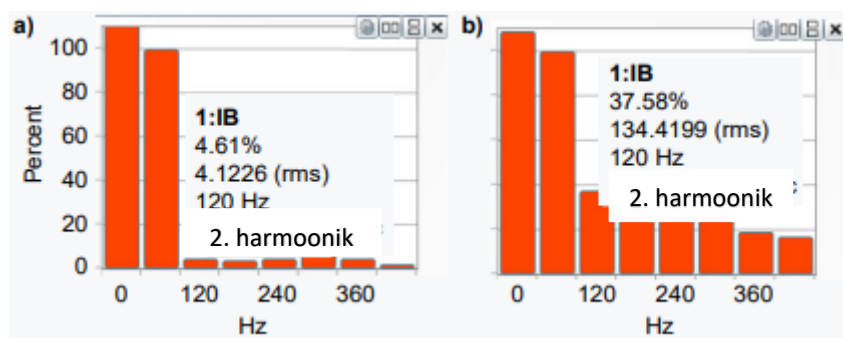
## 2.4 Tarkvarapakett - EMTP

EMTP-s<sup>3</sup> saab sagedust vaadata volugraafikute alusel. Joonisel 2.9 on 60 Hz võrgus volutrafo mõõdetud vool, kus on näha viimase perioodi ajaks 14,616 ms. 60 Hz juures on ühe perioodi ajaks 16,666 ms. Seega saab väita, et volutrafo töötas küllastunud olekus. Selle simuleerimiseks kasutatakse tarkvara nimega *electro-magnetic transient program* (EMTP).



Joonis 2.9. Sagedus üle 60 Hz [10]

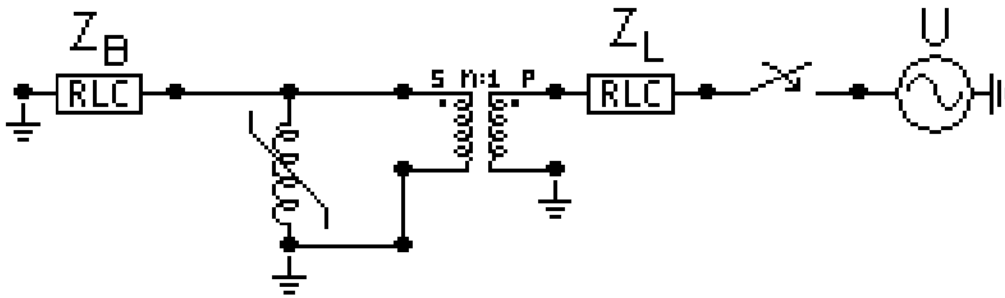
Antud graafiku alusel vaadati ka harmoonikuid. Joonisel 2.10 punktis a) kõrgemaid harmoonikuid pole ja volutrafo küllastust ei täheldata. Punktis b) on aga 2. harmoonik juba suurema osakaaluga ja saab öelda, et volutrafo on küllastunud olekus.



Joonis 2.10. Voolutrafo harmoonikud [10]

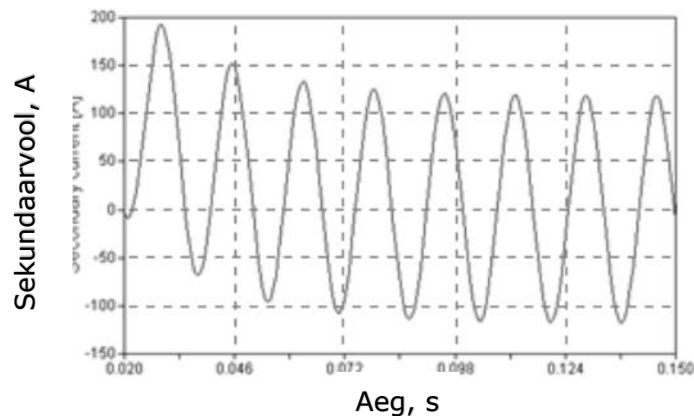
<sup>3</sup> <https://www.emtp.com/>

Lisaks lühisvooludele mõjutab sageduskarakteristikut ja voolutrafo käitumist ka sekundaarpoole koormus. Selle simuleerimiseks kasutatakse samuti EMTP-d. Kasutatakse voolutrafo ülekandega 1000/5 A. Joonisel 2.11 on modelleeritud voolutrafo, kus  $Z_B$  on sekundaarkoormus ja  $Z_L$  liini takistus, mudel loodi ülekandevõrku pingega  $U=110$  kV.



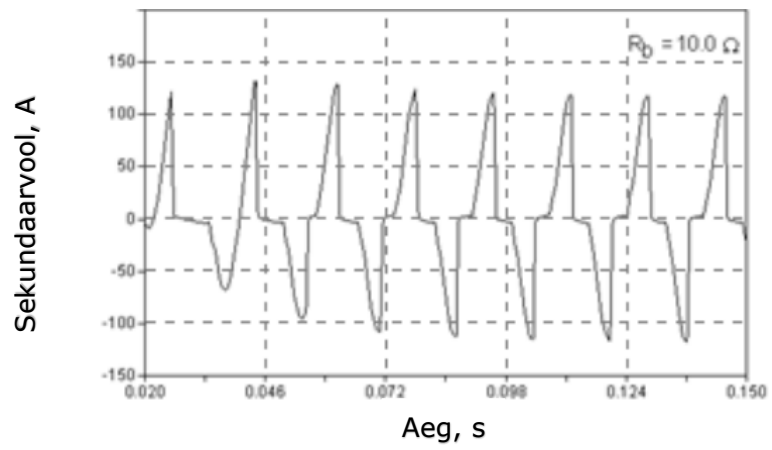
Joonis 2.11. Voolutrafo mudel EMTP-s [24]

Releed on tänapäeval aktiivse iseloomuga ning reaktiivtakistus on väga väikese osakaaluga. Nii võeti reaktiivtakistuseks  $X_B=0,01 \Omega$  ja aktiivtakistust hakati muutma. Aktiivtakistuse  $R_B=0,3 \Omega$  juures (joonis 2.12) oli sageduskarakteristik normaalne siinuskõver, samas kui  $R_B=10 \Omega$  juures (joonis 2.13) on karakteristik tugevalt moonutatud ja ei ole enam normaalselt siinuseline. Sel juhul ei taga voolutrafo enam mõõtetäpsust. Kuigi tänapäevaste releede koormus ongi üsna madal, siis selgub, et juba nii madala koormuse kui  $3 \Omega$  juures on sageduskarakteristik kergelt moonutatud. [24]



Joonis 2.12. EMTP mudel, aktiivkoormus  $0,03 \Omega$  [24]





Joonis 2.13. EMTP mudel, aktiivkoormus 10  $\Omega$  [24]

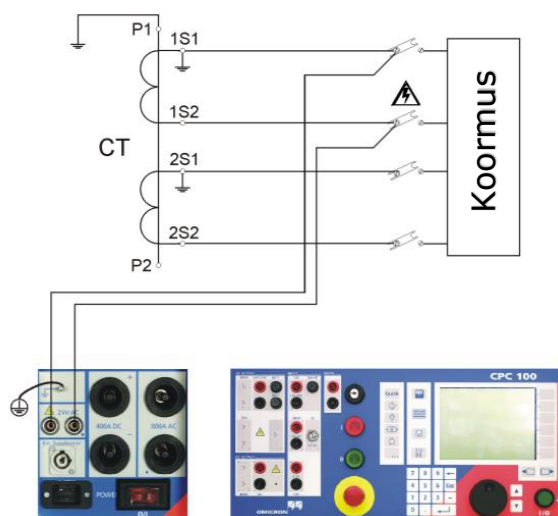
### 3. VOOLUTRAFODE MÕÕTMINE

Peatükis esimeses punktis on kirjeldatud Eesti ülekandevõrgus kasutatav Omicron CPC100 mõõteseadet ning näidatud katsete tulemusi. Järgnevas punktis on vaadeldud üldiselt voolutrafode mõõtetulemusi kirjanduse alusel. Peatükis 3.3 on toodud välja kolm ülekandevõrgus kasutatavat voolutrafot ja nende voltamper karakteristikud.

Mõõtmiste alusel hinnatakse voolutrafo südamikke korrasolekut. Kui on näha voltamper karakteristikute ebakorrapärasust, võib eeldada, et voolutrafo on läinud lühisesse ning mõõtevead on seetõttu suured. Samuti määrab mõõtmine ära põlvepinge, mis on määratud standardiga IEC 60044-1. Peatükis 3.4 on PSCADiga modelleeritud tulemused ning peatükis 3.5 mõõdetud ja modelleeritud voolutrafode tulemuste võrdlus.

#### 3.1 Mõõteseade ja mõõtmine

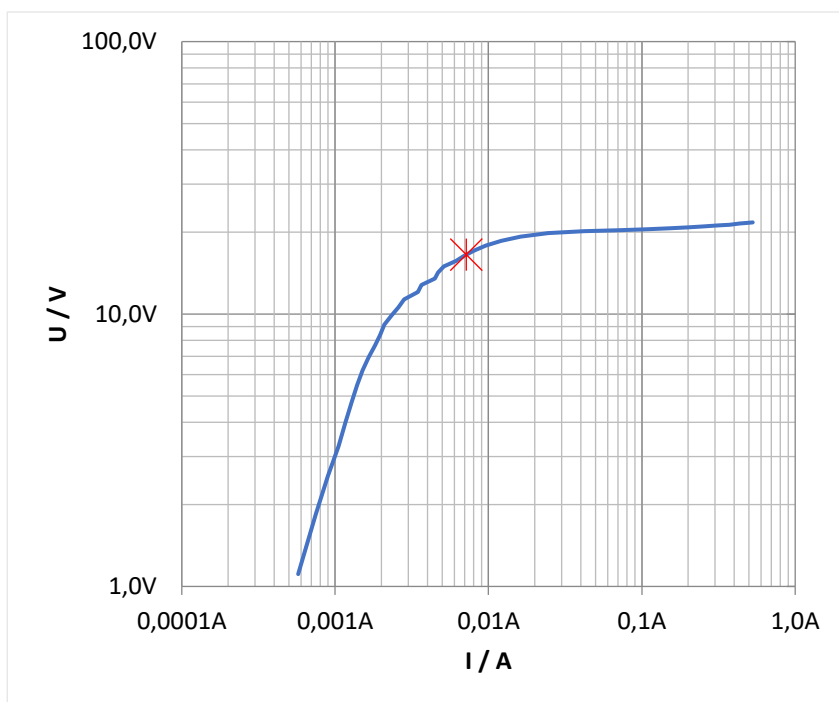
Voolutrafosid mõõdetakse alajaamas Omicron CPC100 testseadmega. Mõõtmise eesmärk on tuvastada voolutrafo voltamper karakteristik ning põlvepinge (ptk 1.7). Selle alusel saab vaadata, kas voolutrafo on küllastunud olekus või mitte. Ühendusskeem on näha joonisel 3.1. Võrreldes antud skeemiga on Eesti ülekandevõrgus südamikke rohkem kui kaks, üldiselt viis. Nende hulka kuuluvad nt üks mõõteahel ning ülejäänud kaitseahelad – lattide diferentsiaalkaitse (LDK), distantskaitse, häiresalvesti (REMI), fiidriterminali kaitse. Mõnes olulisemas elektrivõrgu punktis 330 kV nimipingel võib LDK-sid olla rohkem kui üks.



Joonis 3.1. Voolutrafo mõõtmise skeem [25]

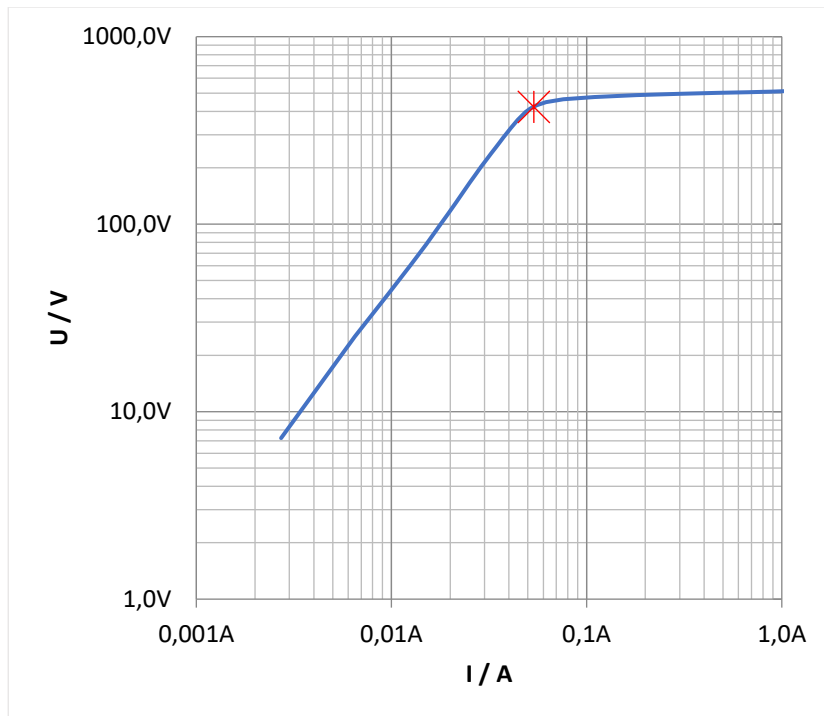
Katse ajal peab mõõdetav voolutrafo primaarmähis olema lahkülititega ülejäänud elektrivõrgust lahutatud. Kõik sekundaarmähised peavad olema koormusest lahutatud. Testseadmelt tulevad otsad 2 kV AC ühendatakse voolutrafo sama südamiku sekundaarotstele 1S1 ja 1S2. Ühe katsekorra käigus mõõdetakse ühe voolutrafo 3 faasi. Viie südamiku korral tähendab see 15 erinevat voltamper karakteristikut ühe katsekorra jaoks.

Testseadmelt valitakse rakendatav maksimaalne pinge ja vool. Vool on voolutrafo sekundaarvool ehk 1 A või harval juhul 5 A. Maksimaalne pinge valitakse vastavalt sellele, kas tegu on mõõte- või kaitseahelaga - mõõteahela südamikus on pinge madalam ja koormus väiksem, üldiselt valitakse pingeks 50 või 100 V. Joonisel 3.2 on mõõteahela voltamper karakteristik. Sellelt selgub, et maksimaalne sekundaarpinge tõusis viimases mõõdetud punktis 21,7 V-ni ning põlvepinge (punane) on punktis 16,5 V / 0,007 A.



Joonis 3.2. Mõõteahela VA karakteristik

Kaitseahelate südamikes on rakendatav maksimaalne pinge suurem, üldiselt 1 kV. Joonisel 3.3 on mõõdetud diferentsiaalkaitse mõõtegraafik, kus põlvepinge on punktis 422,7 V / 0,054 A.

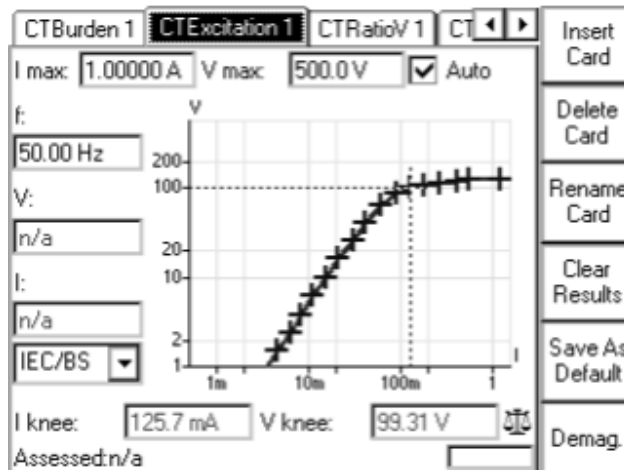


Joonis 3.3. Kaitseahela VA karakteristik

Maksimaalseks pingeks on võimalik testseadmel rakendada 2 kV. Põlvepinge arvutab CPC standardi IEC 60044-1 järgi, mis ütleb, et 10% pinge tõusu juures on vool tõusnud 50%. Võimalus on kasutada ka ANSI standardeid, mis kasutavad logaritmilist skaalat. Õhupiluta südämike korral on põlvepunktis puutuja joon kõveral 45° ning õhupiluga südämike korral 30°. [25]

Voolutrafode voltamper karakteristikute võtmisel kasutatakse eelmagneetimist. CPC teeb seda automaatselt ilma tulemusi salvestamata. Sellega saame tuvastada küllastuse, õige maksimaalse pinge ja testvoolu, mis üldjuhul on võrdne nimivooluga. Eelmagneetimisele järgneb testkatse, mille parameetrid (pinge, vool) sisestatakse CPC-sse käsitsi. Testkatse ja tulemuste salvestamine toimub automaatselt peale katse käivitamist.

Omicronil esitatav mõõdetud voolutrafo graafik on joonisel 3.4. Kasutatud on pingega 500 V ja vooluga 1 A mõõtmist. Režiim CTExcitation näitab, et tegu on küllastuskõvera mõõtmisega. Testseadmel on olemas tarkvara, millega saab esitada graafiku ka Exceli kujul nagu eelnevatel joonistel 3.2 ja 3.3 näidatud.

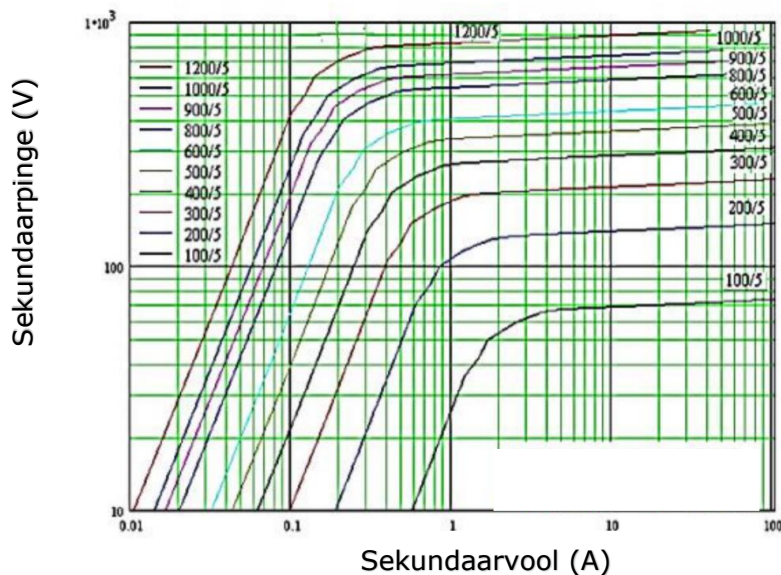


Joonis 3.4. Omicron testseadme ekraan [25]

Lisaks voltamper karakteristikule on Omicron CPC100-ga võimalik mõõta voolutrafode ülekannet, polaarsust, koormust, pingetaluvust ja mähiste takistust. Samu katseid on võimalik teha ka jõu- ja pingetrafodel.

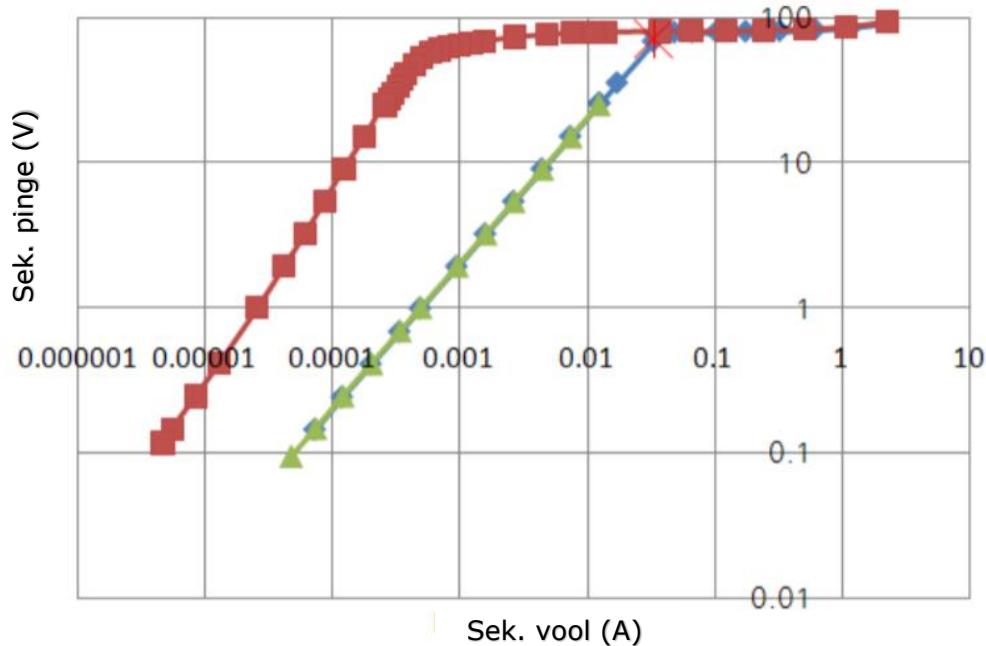
### 3.2 Mõõdetud küllastuskõverad

Joonisel 3.5 on voolutrafode voltamper karakteristikud erinevate ülekannete puhul. Kõikide voolutrafode südameke seisund on korras, kasutati sekundaarvooluga 5 A vooltrafosid. Suuremate ülekannete puhul on põlvepinge suurem.



Joonis 3.5. Küllastuskõver voolutrafodel eri ülekandesuhetel [18]

Joonisel 3.6. on Omicroni tehase mõõtetulemused, kus on näha voolutrafode voltamper karakteristikute mõõtetulemusi. Kasutati sama tüübi ja klassiga voolutrafosid. Punane karakteristik on nn referentstulemus ehk korras voolutrafo, kus mõõtevead on lubatu piirides. Rohelise ja sinise joonega kõver on voolutrafo mõõtetulemus, kus küllastuspunkt on suure sekundaarvooluga. Sama sekundaarpinge juures on ergutusvool kõrgem kui korras voolutrafol. Seega voolu- ja nurgaviga on seal kõrged ja voolutrafo südamik pole terve. Võib eeldada, et on toimunud lühis.



Joonis 3.6. Voolutrafo küllastuskõverad [26]

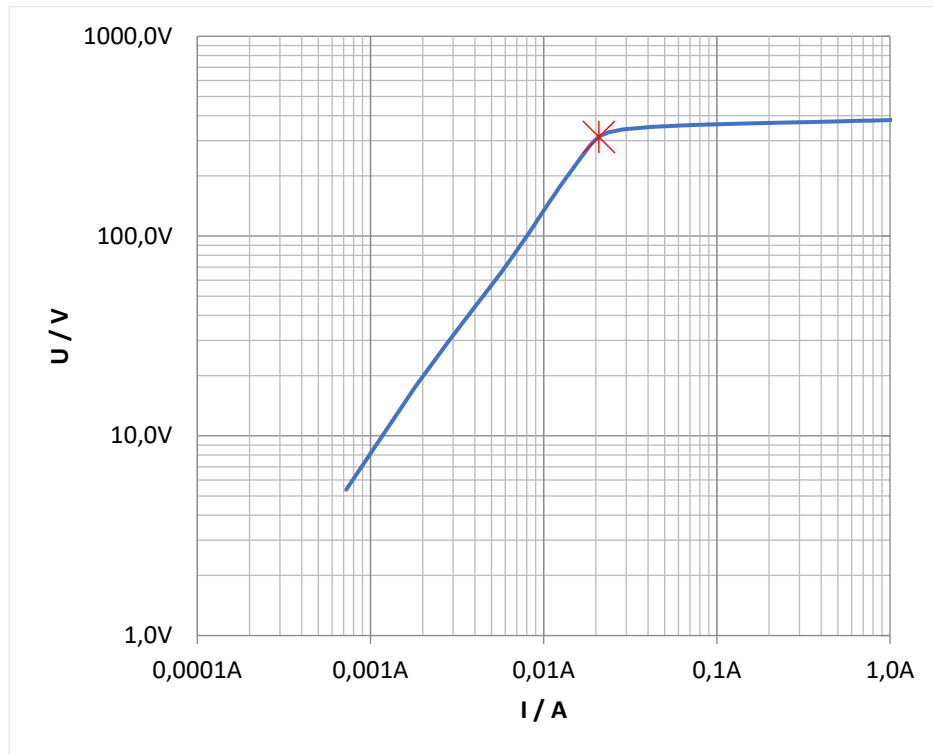
### 3.3 Mõõtetulemused Eesti ülekandevõrgus

Töös vaadatakse otsa kolmele Eesti 330 kV võrgus mõõdetud voolutrafole – voolutrafolele antakse nimetused VT1, VT2 ja VT3. Kõik on eri tootjate omad.

#### 3.3.1 VT1

VT1 voolutrafona on kasutusel Koncar tüüp AGU – 362. Voolutrafo ülekanne on 500/1. Mõõtesüdamikku kasutusel pole, kõik 5 südamikku on kasutusel kaitsesüdamikuna, 3 tk on lattide diferentsiaalkaitse (LDK), lisaks distantskaitse ja lahtri terminali kaitse. Täpsusklass on kõigil südamikel 5P20 ja nimikoormus 15 VA. Joonisel 3.7 on esimese

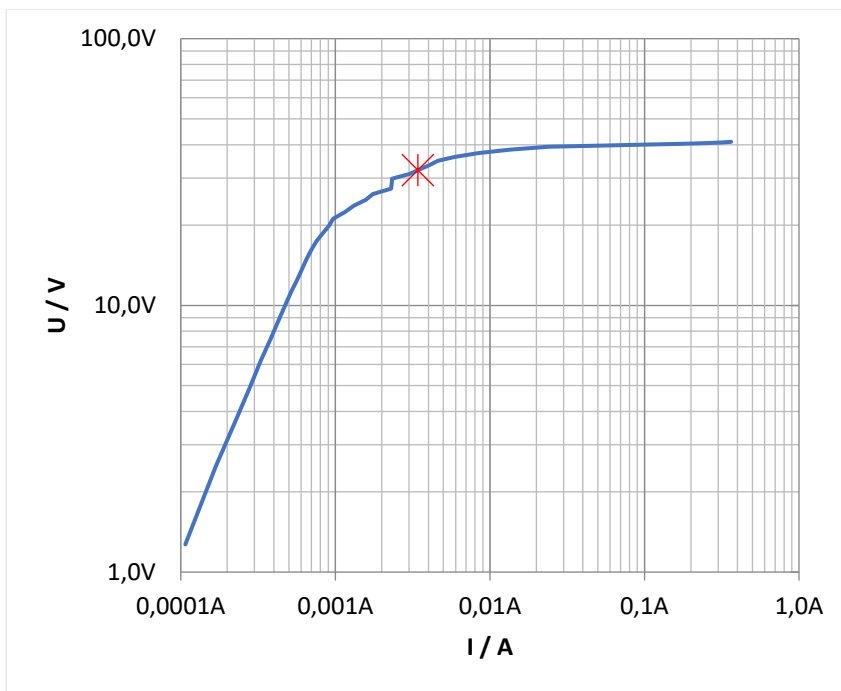
südamiku (LDK) esimese faasi voltamper karakteristik. Punasega näidatud põlvepunkt on punktis 312,4 V/0,021 A.



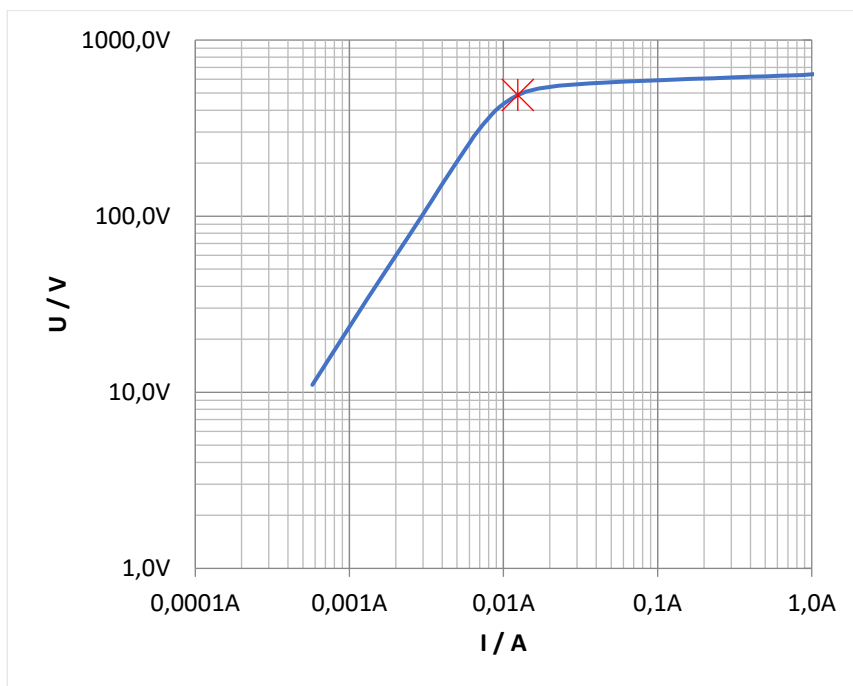
Joonis 3.7. VT1 S1L1

### 3.3.2 VT2

VT2 volutrafadena on kasutusel Trench IOSK 362 tüüpi trafod. Ülekanne on 1000/1-le. Siin on kasutusel ka mõõtesüdamik, ülejäänud 4 südamikku on kaitseahelad. Täpsusklass mõõtesüdamikul on 0,5S ja nimikoormus 5 VA. Kaitseüdamikel on täpsusklass 5P20 ja nimikoormus 20 VA. Joonisel 3.8 on ühe faasi mõõtesüdamiku ja joonisel 3.9 diferentsiaalkaitseahela voltamper karakteristik. Põlvepunkt mõõtesüdamikul on punktis 32,1 V / 0,0034 A, kaitseüdamiku põlvepunkt on 487,7 V / 0,012 A.



Joonis 3.8. Mõõteahel VT2

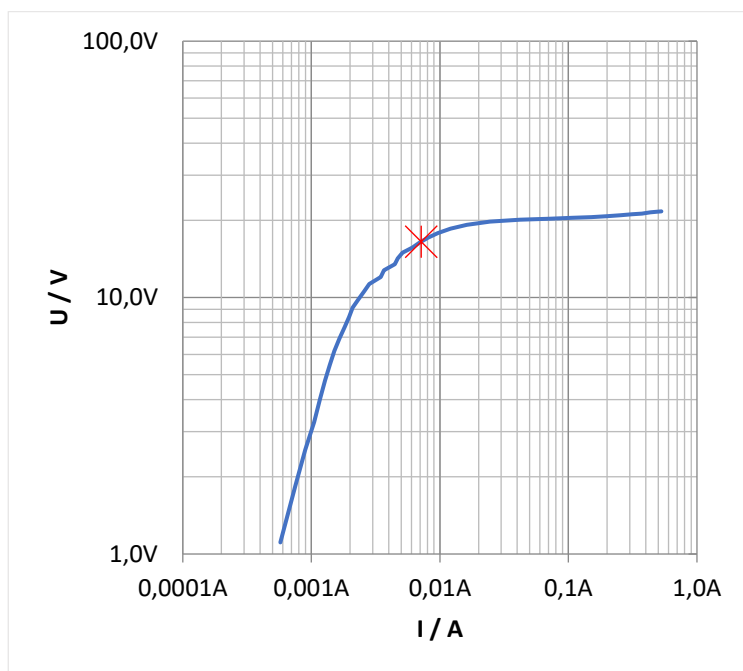


Joonis 3.9. Diferentsiaalkaitseahel VT2

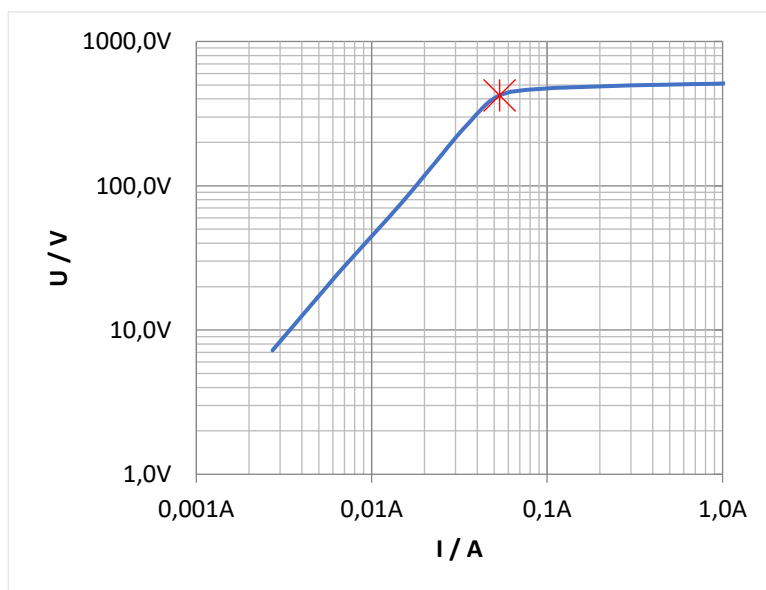


### 3.3.3 VT3

VT3 voolutrafodena on kasutusel Artech CA 362 tüüpi trafod, ülekandega 500/1. Ka siin on olemas lisaks kaitsesüdamikele üks mõõtesüdamik. Mõõteahela täpsusklass on 0,5S maksimaalses koormusel 5 VA. Kaitseahelate täpsusklassid on 5P20. Joonisel 3.10 on mõõtmisahela voltamper karakteristik ja joonisel 3.11 diferentsiaalkaitseahela voltamper karakteristik.



Joonis 3.10. VT3 mõõteahel



Joonis 3.11. VT3 kaitseahel

### 3.4 PSCADiga modelleerimine

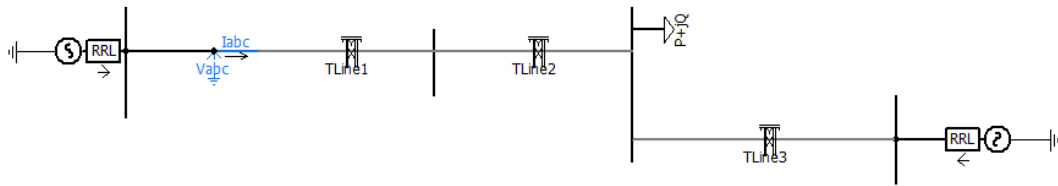
PSCAD-iga teostati voltamper karakteristikute ja sageduskarakteristikute graafikute modelleerimine. Selleks pidi panema mudelisse parameetrid mõõdetud voolutrafode põhjal, mis on näidatud tabelis 3.1. Modelleeriti kokku kolme voolutrafo viite ahelat. VT1-l puudus mõõteahel ja seega on seal modelleeritud vaid kaitseahela karakteristikuid.

Tabel 3.1. Voolutrafode parameetrid

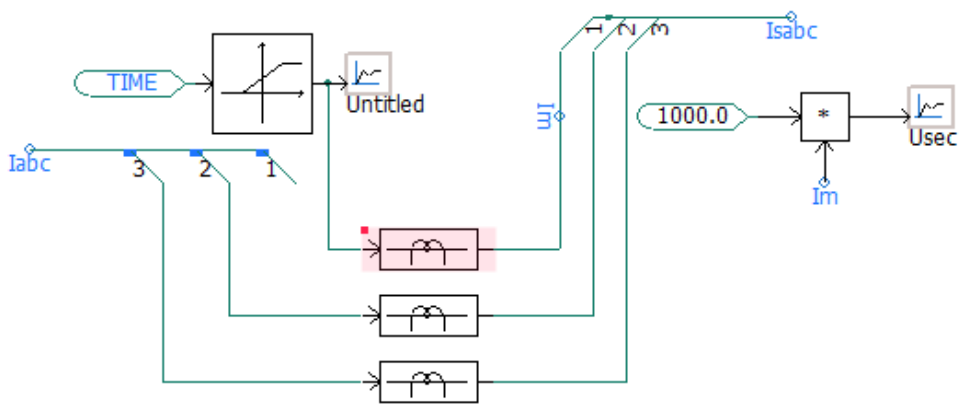
| <b>Voolutrafo</b> | <b>Ahel</b> | <b>ülekanne</b> | <b>Sekundaartakistus<br/>(<math>\Omega</math>)</b> | <b>Koormuse<br/>takistus (<math>\Omega</math>)</b> |
|-------------------|-------------|-----------------|--|--|
| VT1               | kaitseahel  | 500/1           | 3  | 3  |
| VT2               | mõõteahel   | 1000/1          | 4,3  | 2  |
| VT2               | kaitseahel  | 1000/1          | 7,6  | 2,3  |
| VT3               | mõõteahel   | 1000/1          | 2,3  | 1,4  |
| VT3               | kaitseahel  | 1000/1          | 3,6  | 1,6  |

#### 3.4.1 Modelleeritud voltamper karakteristikud

Voolutrafo asetati võrgus vastavalt joonisele 3.12 esimese liini peale.  $I_{abc}$  näitab voolutrafoot ja  $V_{abc}$  pingetrafoot. Kuna mudelis kasutatakse vaid sekundaarpoole tulemusi, siis konkreetne asukoht pole voolutrafodel oluline. Joonisel 3.13 on voolutrafo väljavõtte liinilt. Mudelis kasutatakse esimest faasi, mille sekundaarpoolele rakendatakse magneetimisvool  $I_m$ . Kasutatakse Lucase mudelit, sest JA mudel ei väljasta magneetimisvoolu väärtust. Sekundaarpinge  $U_{sec}$  saadakse korrutustehte abil, mis mõõteahelatel on 100 ja kaitseahelatel 1000. Need on maksimaalsed pinged, mis mõõtmistel ette võivad tulla. Mõõteahelates on koormus madalam ja rakendatav maksimaalne pinge seega väiksem. Küllastuspunkti saamiseks ühendatakse primaarpoolele ramp, millega on võimalik vajaliku magneetimisvoolu väärtust simuleerida 0-1 A vahemikus.

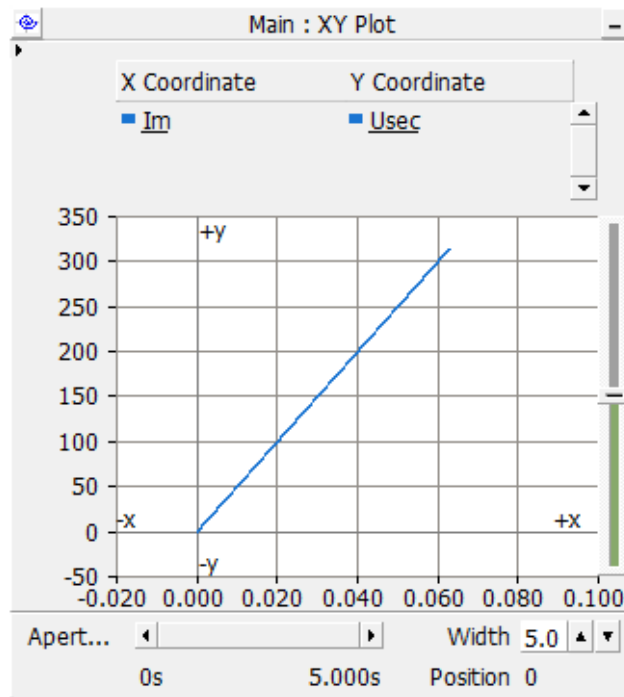


Joonis 3.12. Voolutrafo asend võrgus



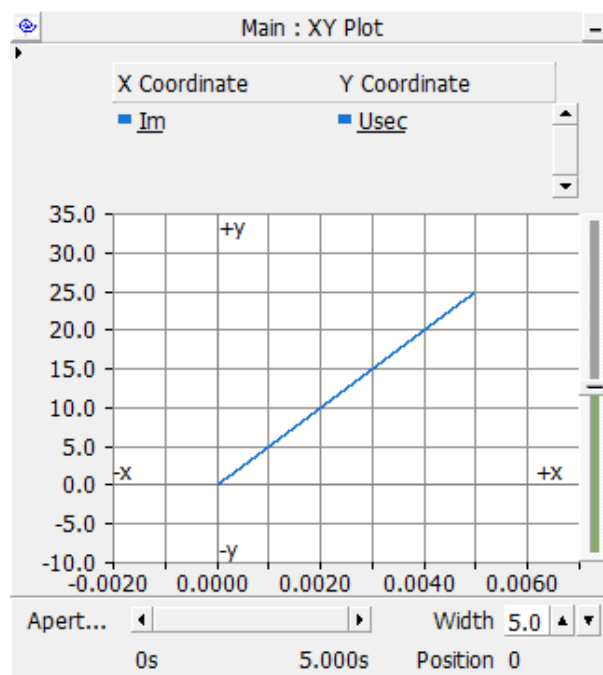
Joonis 3.13. Voolutrafo mudel PSCAD-is

Mudeli simuleerimiseks pandi  $I_m$  ja  $U_{sec}$  väärtused graafikule. Tulemus kujutatakse lineaarse sõltuvusena ning see lõppeb küllastuspunktis. Voolutrafo VT1 tulemus on joonisel 3.14, kus küllastuspunkt on väärtustega 311,49 V ja 0,062 A. Oluline on tähele panna, et modelleeritud variant näitab küllastuspunkti, mitte põlvepunkti, mida kuvatakse reaalsete mõõtmistega. Mudel ei kuva karakteristikut logaritmilise skaalana ja seega puudub võimalus näha graafiliselt põlvepunkti. Samuti puudub mudelis lineaarne joon x-teljega peale küllastuspunkti teket, mis peaks näitama magnetimisvoolu väärtuse kasvu ja küllastumise jätkumist.

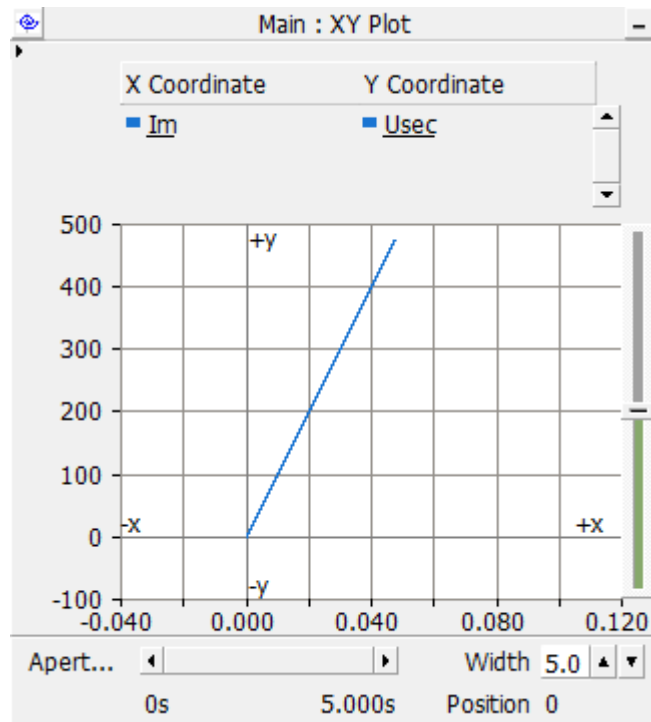


Joonis 3.14. VT1 modelleeritud VA karakteristik

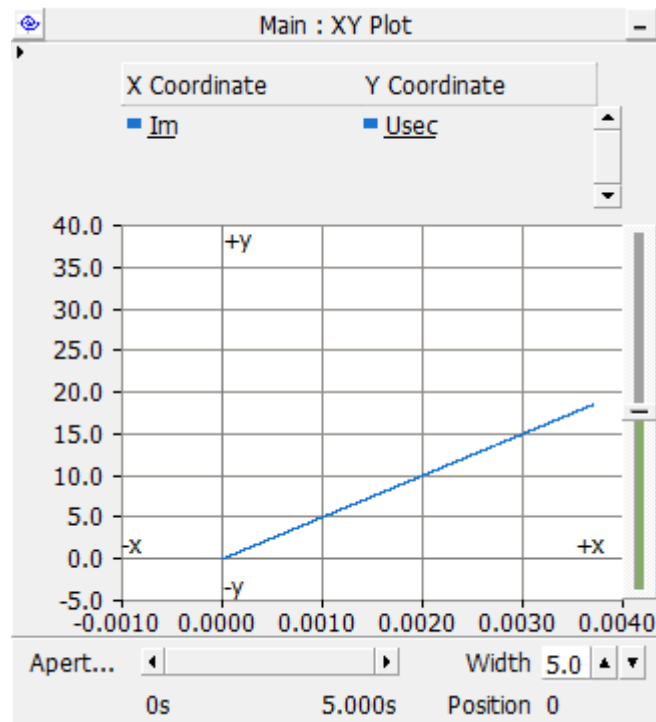
Järgnevalt teostati ka teiste ahelate simulatsioonid, mis on näidatud joonistel 3.15-3.18.



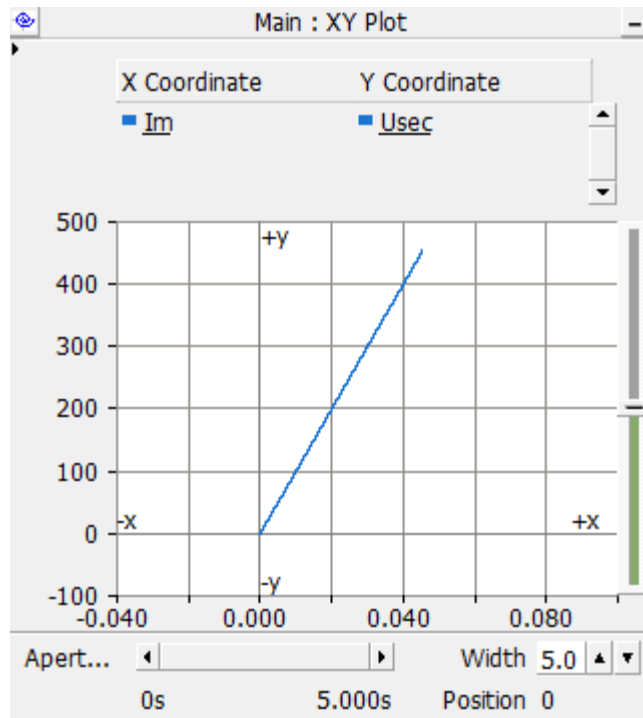
Joonis 3.15. VT2 modelleeritud mõõteahel



Joonis 3.16. VT2 modelleeritud kaitseahel



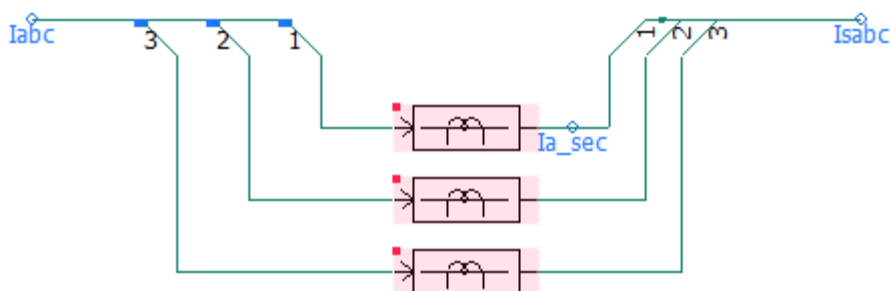
Joonis 3.17. VT3 modelleeritud mõõteahel



Joonis 3.18. VT3 modelleeritud kaitseahel

### 3.4.2 Modelleeritud sageduskarakteristikud

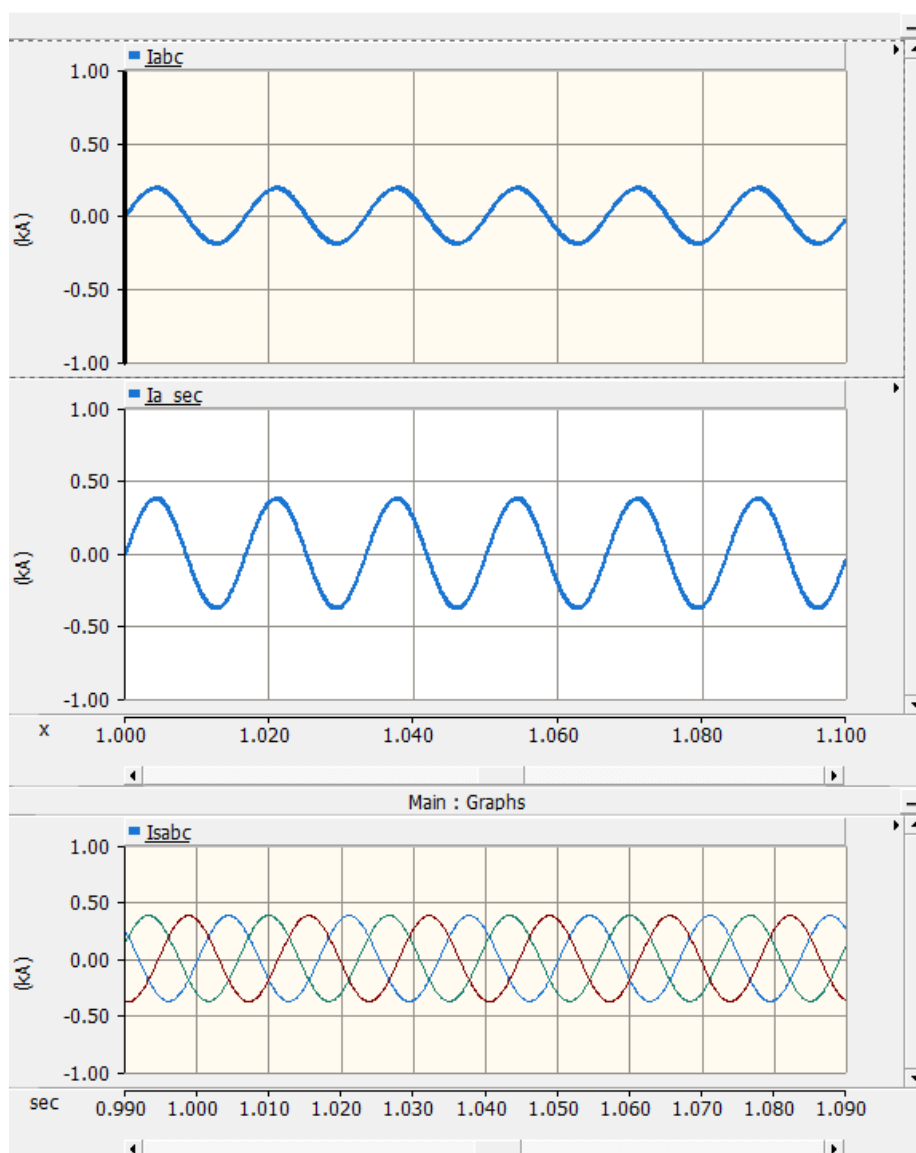
Võrgusagedusel võeti sageduskarakteristikud mõlema voolutrafo mudeliga. Kõrgematel sagedustel vaid Lucase mudeliga, sest JA mudel töötab vaid võrgusagedusel. Voolutrafo väljavõtte on joonisel 3.19, kus on näidatud kõik võetud voolud – primaarvool ( $I_{abc}$ ) ning sekundaarvool esimeses ahelas ( $I_{a\_sec}$ ) ning ka kõikides ahelates korruga ( $I_{sabc}$ ).



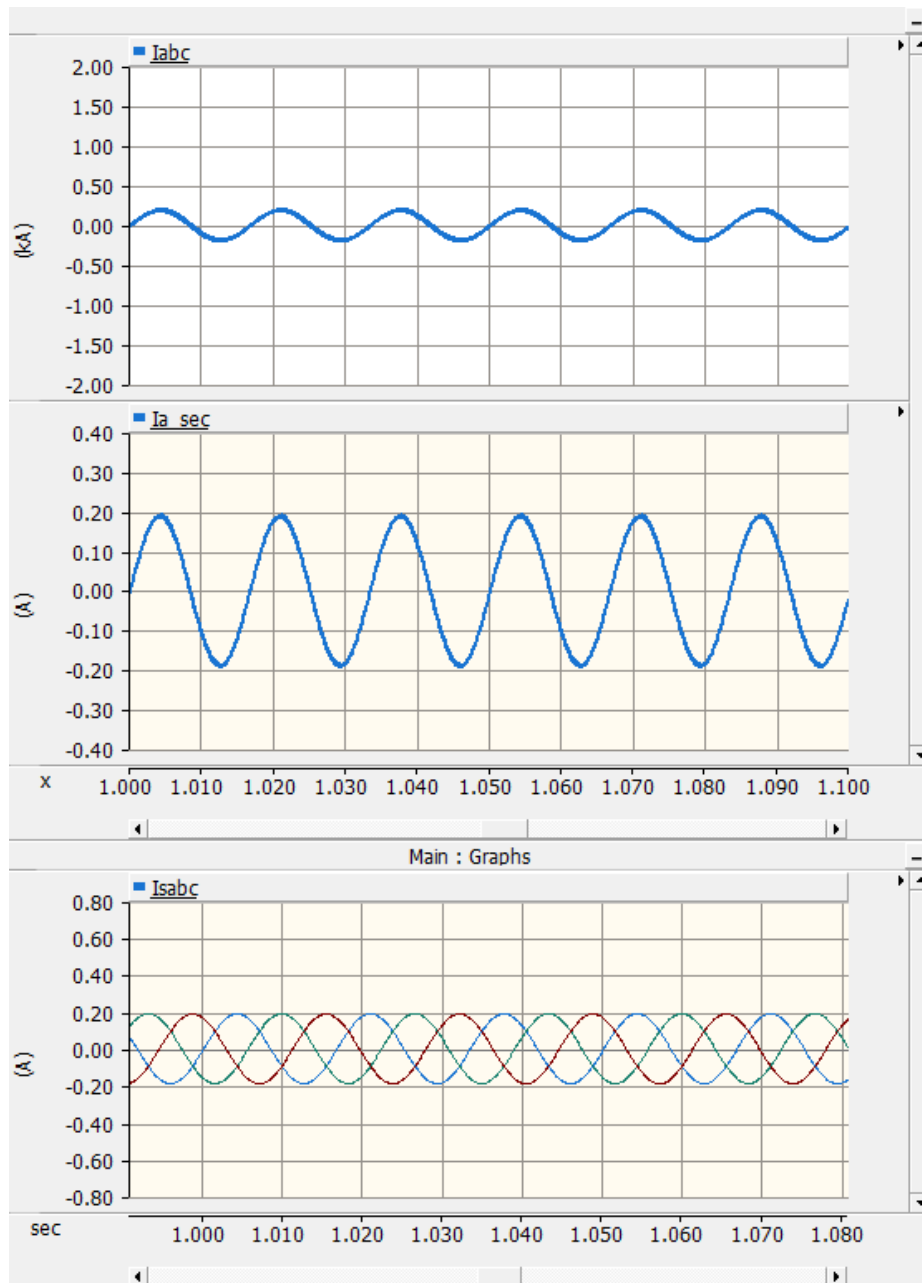
Joonis 3.19. Voolutrafo mudel PSCAD-is

JA mudeliga voolutrafo graafikud on joonisel 3.20. Kasutatud on VT1 kaitseahelat koos tema sekundaarpoole- ja koormuse takistusega. Ülekande 500/1 juures on näha, et primaarpoole vooluamplituud on 200 A ning sekundaarpoole voolud on maksimaalselt 0,4 A.

Joonisel 3.21 on VT2 mõõteahelat ülekandesuhtega 1000/1. Ka seal on näha primaar- ja sekundaarpoole voolude seost, kui 200 amprile primaarahelas vastab 0,2 A sekundaaris. Mõõte- ja kaitseahelate tulemused on identsed ja seega rakendatud koormused suurt mõju tulemustele ei avaldanud. Kaitseahelas, joonis 3.22, on sekundaarpooles koormus suurem, aga mitte piisavalt, et avaldada sageduskarakteristikule mõju võrreldes väiksema koormusega.

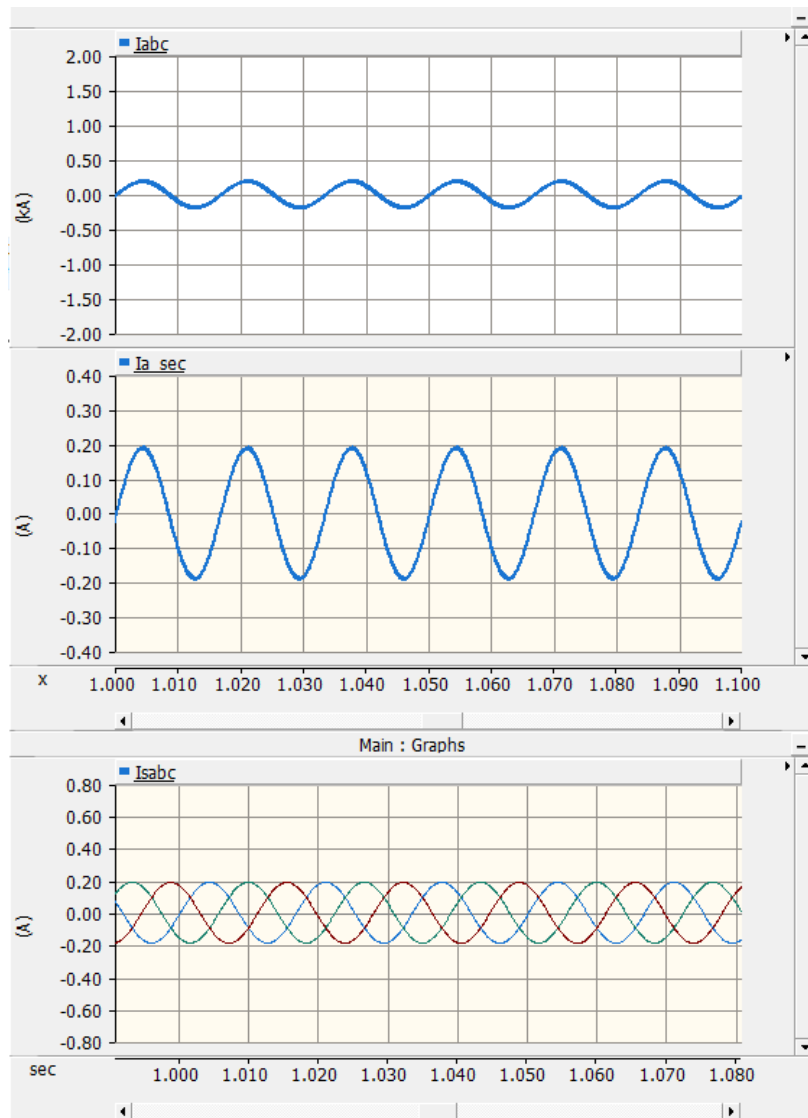


Joonis 3.20. Võrgusagedusel JA mudeli VT1 voolugraafikud



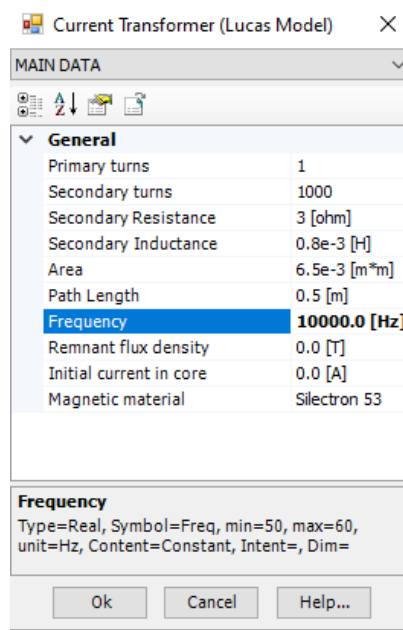
Joonis 3.21. Võrgusagedusel JA mudeli VT2 mõõteahel



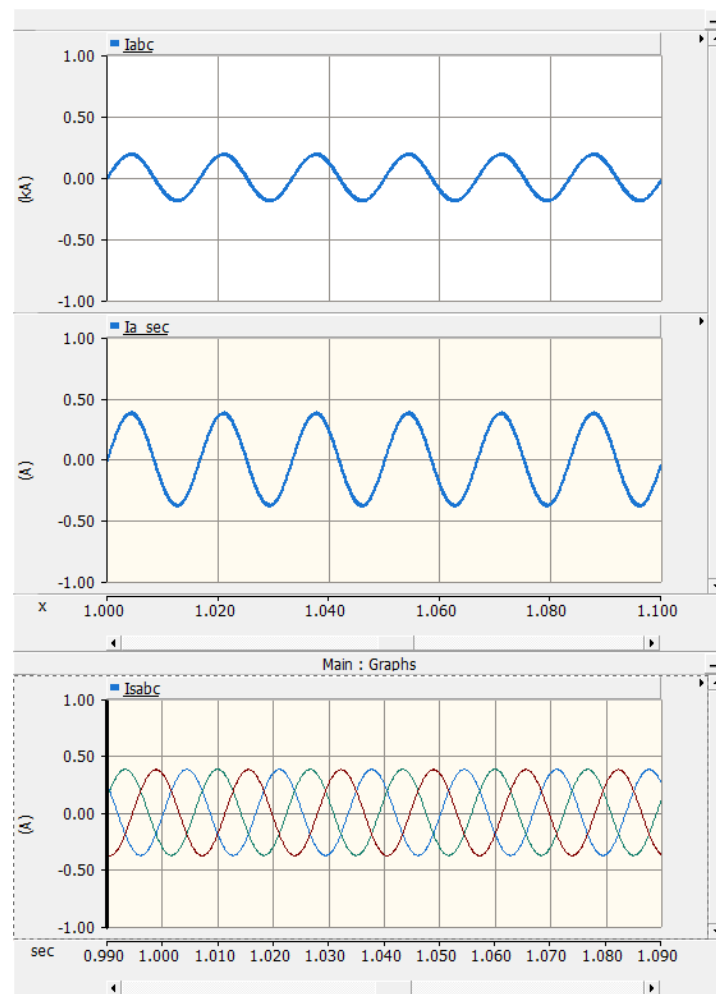


Joonis 3.22. Võrgusagedusel JA mudeli VT2 kaitseahel

Järgnevalt vaadati Lucase mudeliga kõrgemaid sagedusi. Võrgusagedusel on graafikud samad, mis JA mudeliga ja saab väita, et erinevate arvutustehnoloogiate põhjal tehtud mudelid tulemuste erinevusele mõju ei avalda. Joonisel 3.23 on näidatud Lucase mudeliga rakendatud volutrafo parameetrid koos sageduse muutmisega. Joonisel 3.24 on volugraafik 2500 Hz juures, millelt on näha, et see on identne võrgusagedusel saadud voludega. Seega teoreetiline alus, et sageduse tõustes väikeste koormuste juures jääb sageduskarakteristik samaks peab paika. Sagedust tõsteti ka 10 ja 100 kHz- ni, aga ka siis pole erisusi märgata. Sageduse tõustes avaldab mõju enam induktiivne koormus, mis aga antud juhul on üsna olematu väärtusega 0,008 H.



Joonis 3.23. Lucase mudel parameetritega



Joonis 3.24. VT1 volugraafikud 2500 Hz juures

### 3.5 Mõõdetud ja modelleeritud voolutrafode võrdlus

Võrdlemise alus modelleeritud ja mõõdetud voolutrafode voltamper karakteristikutel on põlvepunkt. Tabelis 3.2 on näidatud mõlema variandi põlvepunktid. Kuna põlvepunkt ei näita küllastuspunkti, siis leitakse vastavalt teooriale modelleeritud põlvepunkti väärtused. Küllastuspunktis on sekundaarpinge 10% ja magneetimisvool 50% suurem põlvepunkti väärtustest (joonis 1.14).

Tabel 3.2. Põlvepunktide erinevused

| <b>Voolutrafo</b> | <b>Mõõdetud põlvepunkt</b> | <b>Modelleeritud küllastuspunkt</b> | <b>Modelleeritud põlvepunkt</b> |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| VT1 kaitseahel    | 312,4 V / 0,021 A          | 311,49 V / 0,062 A                  | 283,17 V / 0,041 A              |
| VT2 mõõteahel     | 32,1 V / 0,0034 A          | 24,97 V / 0,0049 A                  | 22,7 V / 0,0033 A               |
| VT2 kaitseahel    | 487,7 V / 0,012 A          | 476,53 V / 0,0475 A                 | 433,21 V / 0,032 A              |
| VT3 mõõteahel     | 16,52 V / 0,007 A          | 18,82 V / 0,0037 A                  | 17,11 V / 0,0025 A              |
| VT3 kaitseahel    | 422,6 V / 0,054 A          | 454,16 V / 0,043 A                  | 412,87 V / 0,029 A              |

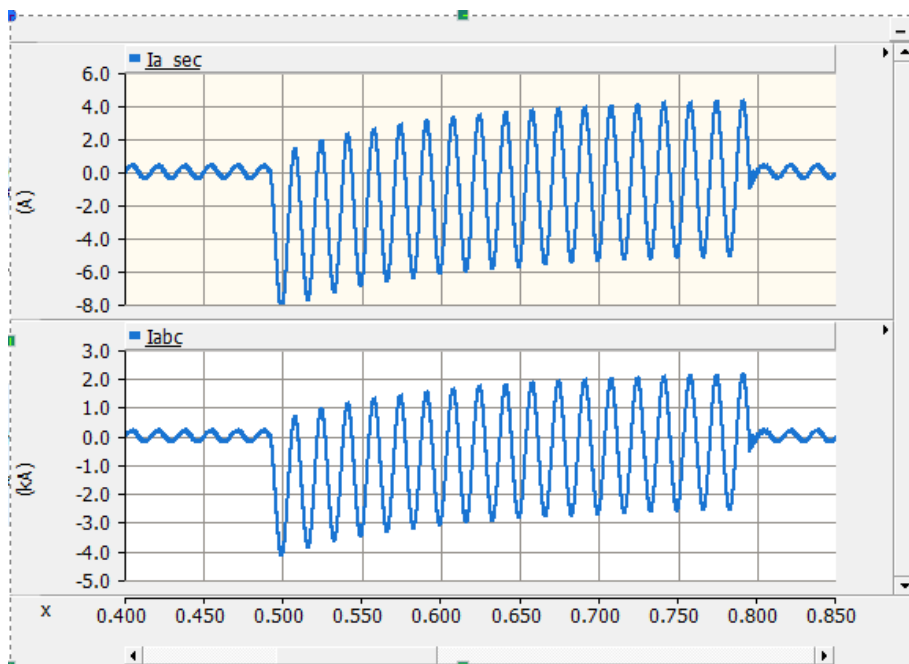
Sekundaarpinged on põlvepunktides üsna sarnased, vaid VT2 mõõteahelas võib märgata suuremat erinevust. Modelleeritud variandis on põlvepunkt 10 V ehk 30% võrra madalam. Samas on seal magneetimisvoolu väärtus põlvepunktis kõige täpsem (0,0034 A vs 0,0033 A). VT3 mõõteahela sekundaarpinge erineb aga väga vähe. Kuna reaalselt mõõdetud ahel on logaritmiline, siis ka skaala muutub väikestel vooluväärtustel kiiresti. Modelleeritud ahel on lineaarne ja sealt pole võimalik otse lugeda põlvepunkti väärtusi. Alajaamades mõõdetud väärtustel pole samas küllastuspunkti väärtuseid, need peaks vajadusel ise arvutama.

Seosed sekundaartakistuste ja põlvepunktide vahel on olemas, sest suuremate koormustega on põlvepinge kõrgemal ning seda nii kaitse- kui ka mõõteahelate korral. Magneetimisvoolud on väga väikeste väärtustega ning erinevused võivad protsentuaalselt olla suured, aga suurusjärk on võrdluses sama.

Kaitseahelate puhul võib märgata seost, et põlvepinge on kõikidel juhtudel kuni 10% modelleeritud variandil madalam. Magneetimisvoolude ja mõõteahela põlvepingete vahel omavahelisi seoseid modelleeritud ja mõõdetud variante vahel ei leidu.

Et saada mudeli täpsuse kohta veel parem ülevaade, peaks tegema rohkemate volutrafodega katseid, seda eriti mõõteahelate kohta. Lisaks ei pruugi olla täpne meetodika, kus võeti magneetimisvoolul küllastuspunkt 50% põlvpunktist suurem, sest kirjanduse alusel võib see olla ka 46%. Meetodikad põlvpunktide arvutamisel on erinevad ja ka sealt võivad tulla erinevused. Mõõdetud variant kasutab IEC standardit ja modelleeritud variant Lucase mudeli teooriat vastavate valemitega. Ka takistuste tüüp võib saada määravaks, sest antud juhul oli induktiivtakistus väikese väärtusega.

Sageduskarakteristikuid saab võrrelda erinevate mudelite alusel, realselt alajaamas sageduskarakteristikuid ei võeta. Võrgusagedusel oli Lucase mudeliga VT1 primaarvoolu amplituud 0,197 kA ja sekundaarvoolu amplituud 0,397 A. Sama tehti läbi ka JA-mudeliga, kus vastavad amplituudid olid 0,198 kA ja 0,398 A ehk vahe on minimaalne. Lisaks prooviti ka ühefaasilise lühisega lühisvoolu suurusi määrata mõlema mudeliga ning ka need tulid peaaegu identsed, primaarvoolu maksimaalne amplituud lühisel 2 kA ja sekundaarvoolul 4,3 A. Joonisel 3.25 on JA mudeliga tehtud primaar- ja sekundaarvoolud volutrafo VT1 ühefaasilise (a faasi) lühise korral, Lucase mudeliga tuli sama tulemus.



Joonis 3.25. VT1 lühis JA mudeliga

# KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli voolutrafoade verifitseerimine PSCAD tarkvaras ja nende analüüs ning võrdlus reaalsete mõõtetulemustega Eesti ülekandevõrgus. Lisaks PSCADile vaadati veel kahte eri tarkvara, millega oleks võimalik voolutrafosid modelleerida. Modelleerimistarkvarad on voolutrafoade puhul sarnase ülesehitusega – kõige laialdasemalt saab vaadata primaar- ja sekundaarvoole ning nende erinevusi. Andes erinevaid parameetreid sisenditeks, on võimalik väljundina võrrelda voole nii normaalolukorras, aga ka tekitades lühiseid. Parameetritena on tähtsamad ülekandesuhe ja sekundaarpoole takistus, mis määravad ära voolutrafo sageduskarakteristiku. Üldiselt leiab voolutrafoade modelleerimist üsna vähe, sest modelleerides vaadatakse üldiselt laiemat võrku kui vaid üksikut primaarseadet.

Antud töös modelleeriti voltamper karakteristikuid ja sageduskarakteristikuid. Voltampri abil on võimalik teada saada põlvepunkt, mis näitab ära küllastumise hetke. PSCADi Lucase mudel arvutab magneetimisvoolu, misjärel saab luua sellega seosesse sekundaarpinge. Mudel näitab lineaarsel teljel küllastuspunktini voltamper karakteristikut. Sageduskarakteristikut sai määrata nii Lucase kui ka JA mudeliga. Sellega sai vaadata primaar- ja sekundaarvoolu suhet vastavalt voolutrafo ülekandesuhtele.

Voolutrafo sageduskarakteristik näitab siinusgraafikul primaar- ja sekundaarvoolu väärtust ajas. Sageduskarakteristiku erinevusi erinevate mudelite vahel modelleerimise alusel ei tuvastatud. Tõenäoliselt oli rakendatud induktiivkoormus nii madal, et see ei avaldanud mõju ei võrgusagedusel ega ka kõrgematel sagedustel. Kuna tänapäeval on koormus enamasti aktiivne ja induktiivseid releesid ei esine, siis ka sageduskarakteristik suurte sagedustel jääb identseks nagu võrgusagedusel.

Voolutrafo aseseemi parameetritena mõjutavad mudeli täpsust sekundaartakistus ning koormustakistus. Aktiivtakistus mõjutab küllaltki vähe, aga induktiivtakistuse tõustes hakkab mudeli täpsus vähenema tänu mõõtevigade suurenemisele. Kuna antud mudelis kasutatud induktiivtakistused olid madalad, siis ka nende mõju mudeli täpsusele oli olematu. Induktiivtakistused võivad kõrgetel sagedustel hakata mõju avaldama, aga seda alles üle 10 kHz. Mudeldatud variandis sageduse tõus primaar- ja sekundaarvoolu erinevustele mõju ei avaldanud. Voolutrafo täpsusele annavad mõju ka mõõtevead – nurga- ja vooluviga. Mõõtevead on põhjustatud kadudest trafo mähises. Neid aga simulatsioonidega otseselt tuvastada ega arvutada ei saa.

Alajaamades mõõdeti voolutrafode voltamper karakteristikuid Omicron CPC100 seadmega. Testseadmelt tulevad otsad ühendatakse voolutrafo südamikute sekundaarotstele. Pinget rakendatakse 100 V või 1000 V vastavalt sellele, kas tegu on mõõte- või kaitse-südamikuga. Peale testnupu rakendamist hakkab seade võtma magneetimisvoolu ja sekundaarpinge punkte kuni maksimaalse sekundaarvooluni (üldiselt 1 A). Masin arvutab vastavalt IEEE standardile põlvepunkti. Seejärel on võimalik näha, kas voolutrafo on küllastunud või mitte nähtava voltamper karakteristiku kuju järgi, logaritmilisel skaalal peab tõus olema lauge ja magneetimisvoolu väärtus põlvepunktis väike.

Voolutrafode võrdlust sai teha põlvepunktide abil. Modelleeritud versioon kuvas voltamper karakteristiku vaid lineaarse tõusuna kuni küllastuspunktini. Seega polnud võimalik näha küllastunud oleks voolutrafo karakteristikut. Põlvepunkti pidi arvutama, sest mudel kuvas vaid küllastuspunkti lineaarse skaala lõppedes. Mudeli suurima miinusena saabki välja tuua logaritmilise skaala puudumise, sest pole võimalust näha otseselt põlvepunkti, vaid selle peab kirjanduse allikate alusel arvutama. Tulemusest selgus, et loogiline seos on olemas, mudeli täpsus võrreldes reaalselt mõõdetud põlvepunktidega on samas suurusjärgus, aga samas varieeruvus on olemas ja mudelit väga täpseks lugeda ei saa. Sekundaarpinged erinesid ühe erandiga vähem kui 10%. VT2 mõõteahelas oli aga pinge 30% modelleeritud variandis madalam ja seal on mudeli erinevus juba väga suur võrreldes reaalse mõõtmisega.

Et saada suuremat ülevaadet, peaks tegema enamate mõõteahelatega katseid läbi, sest vaid kahe mõõteahela alusel ei saa teha väga täpset üldistust mudeli täpsusest. Kaitseahelate puhul, mida võrreldi kolme ahela puhul, on seosed olemas. Põlvepunktid on veidi madalamad kui reaalselt mõõdetuga, modelleeritud pinged on 0-10% juures madalamad. Kaitseahelate puhul, kus koormust on rohkem, saab mudeli lugeda küllaltki täpseks, aga mõõteahelate jaoks oleks tarvis teha täiendavaid uuringuid.

Voolutrafode modelleerimist sellisel viisil pole kirjanduse alusel eriti tehtud ja sellist võrdlust samuti mitte. Et tulemustes on siiski erinevused, siis eriti mõõteahelate puhul ei saa tulemusi liialt usaldada, kus leiti tulemuste suuremat varieeruvust võrreldes mõõdetud voltamper karakteristikutega. Täiendavalt saab uurida takistuste ja sekundaarkoormuse liiki, sest antud katsetuste ajal oli induktiivtakistus väga väikese väärtusega. Samuti on võimalik vajadusel voltamper karakteristikuid võimalik mõõta ja modelleerida jõu- ja pingetrafoedel.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Ü. Treufeldt, *Kõrgepingeseadmed*. TTÜ, 2020.
- [2] L. Kütt, „Mittetavapärased mõõtemuundurid (NCIT) ning tehnilised tingimused nende rakendamiseks Eesti elektrivõrguettevõtetes“. TTÜ, 2012. [Online]. Loetud aadressil:  
[https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/9/9a/TT%C3%9C.\\_Mittetavaparaste\\_mootemuundurite\\_NCIT\\_uuring.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/9/9a/TT%C3%9C._Mittetavaparaste_mootemuundurite_NCIT_uuring.pdf) Kasutatud: 12.12.2021
- [3] Elering, [Online]. Loetud aadressil:  
[https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Pohivorgu\\_elektripaigaldise\\_umberehitamise\\_tehnilised\\_pohimotted.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Pohivorgu_elektripaigaldise_umberehitamise_tehnilised_pohimotted.pdf) Kasutatud: 24.01.2022
- [4] *Mõõtetrafod : mõõtemuundurite kasutamine elektri kvaliteedi mõõtmiseks IEC/TR 61869-103:2012*. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=113727&language=EstonianLanguage> Kasutatud: 24.01.2022
- [5] M. Hunt, „Elektrilevi OÜ 0,4 kV volutrafodega mõõtesüsteemid, kontroll ja selle vajalikkus,“ [Bakalaureusetöö], EMÜ, Tartu, 2018. [Online]. Loetud aadressil:  
[https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4361/Madis\\_Hunt\\_BA2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4361/Madis_Hunt_BA2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y) Kasutatud: 26.01.2022
- [6] H. Tammoja, *Automaatika ja releekaitse*. TTÜ, 2006.
- [7] M. Tealane, „EES5020 - Automaatika ja releekaitse loeng 3“, 2020.
- [8] *Mõõtetrafod. Osa 2: Lisanõuded volutrafodele IEC-61869-2:2013*. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=108313&language=EstonianLanguage#page=10&zoom=auto,-158,558> Kasutatud: 14.02.2022
- [9] J. Kilter, M. Meldorf, H. Tammoja, ja Ü. Treufeldt, *Jaotusvõrgud*. TTÜ, 2007.
- [10] A. Hargrave, M. J. Thompson, ja Heilman, „Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation“, 2018, [Online]. Loetud aadressil: [https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811\\_BeyondKneePoint\\_AH\\_20200501\\_Web.pdf?v=20200504-195517](https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811_BeyondKneePoint_AH_20200501_Web.pdf?v=20200504-195517) Kasutatud: 25.01.2022
- [11] R. Krebs, J. Jaeger, A. Bachry, ja D. Braisch, „Instrument transformer dimensioning: past and future“, 2008. [Online]. Loetud aadressil:  
[https://www.researchgate.net/publication/272093708\\_INSTRUMENT\\_TRANSFORMER\\_DIMENSIONING\\_PAST\\_AND\\_FUTURE](https://www.researchgate.net/publication/272093708_INSTRUMENT_TRANSFORMER_DIMENSIONING_PAST_AND_FUTURE) Kasutatud: 25.01.2022

- [12] R. Tammus, „Estlink 1 alalisvooluühenduste harmoonikute karakteristikute mõõtmise ja analüüs“. TTÜ, Tallinn, 2020.
- [13] A. Cataliotti, D. Di Cara, P. A. Di France, A. Emanuel, ja S. Nuccio, „Frequency response of Measurement Current Transformers“, 2008. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4547234&tag=1>  
 Kasutatud: 02.01.2022
- [14] „PSCAD Application help System“. PSCAD.
- [15] M. Rifaat, „Considerations in Applying EMTP to Evaluate Current Transformer Performance under Transient and High Current Fault Conditions“, [Online]. Loetud aadressil: [https://www.ipstconf.org/papers/Proc\\_IPST2005/05IPST206.pdf](https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2005/05IPST206.pdf)  
 Kasutatud: 23.04.2022
- [16] „PSCAD Cookbook Protection Studies“. PSCAD, 2018.
- [17] „Current Transformer Saturation“. MATLAB. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/ug/current-transformer-saturation.html;jsessionid=f6f5cd52e305815fd2de160a15d7> Kasutatud: 25.02.2022
- [18] M. Rajendran ja V. Perumal, „Saturation analysis on current transformer“, 2019, [Online]. Loetud aadressil:  
[https://www.researchgate.net/publication/333747845\\_SATURATION\\_ANALYSIS\\_ON\\_CURRENT\\_TRANSFORMER](https://www.researchgate.net/publication/333747845_SATURATION_ANALYSIS_ON_CURRENT_TRANSFORMER) Kasutatud: 25.02.2022
- [19] B. Upadhaya, L. Perkkiö, ja P. Rasilo, „Representation of anisotropic magnetic characteristic observed in a non-oriented silicon steel sheet“, 2020. [Online]. Loetud aadressil: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0009554> Kasutatud: 09.04.2022
- [20] Q. Quo, X. Yin, Y. Pan, W. Cao, H. Zhou, ja J. Wang, „Modeling of practical protective ct based on lucas model“, 2017. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8081041> Kasutatud: 09.04.2022.
- [21] Trench-group. „Oil insulated current transformers“. [Online]. Loetud aadressil:  
<https://trench-group.com/wp-content/uploads/2019/03/Oil-Insulated-Current-Transformers.pdf> Kasutatud: 09.04.2022
- [22] Koncar. „Oil-immersed current transformers“. Loetud aadressil:  
[http://taitsa.com.ar/esp/tmat\\_66\\_500/pdf/HV%20CT%20TYPE%20AGU.pdf](http://taitsa.com.ar/esp/tmat_66_500/pdf/HV%20CT%20TYPE%20AGU.pdf)  
 Kasutatud: 09.04.2022
- [23] Artech CA. „Current transformers“.



- [24] P. Sawko, „Impact of Secondary Burden and X/R Ratio on CT Saturation“.  
[Online]. Loetud aadressil:  
[https://www.researchgate.net/publication/228895947\\_Impact\\_of\\_Secondary\\_Burden\\_and\\_XR\\_Ratio\\_on\\_CT\\_Saturation](https://www.researchgate.net/publication/228895947_Impact_of_Secondary_Burden_and_XR_Ratio_on_CT_Saturation) Kasutatud: 04.03.2022
- [25] OMICRON electronics GmbH, 2005. „CPC 100 reference manual“.
- [26] F. Predl, M. Freiburg ja M. Anghuber, „Diagnostic measurements on instrument transformers“. Omicron GmbH.