



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Joonas Nurmi

# **Tehomuuntajan yksinkertainen simulointimalli ja sen soveltaminen esimagnetointipiiriin**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Sähkötekniikan diplomityö  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Joonas Nurmi		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Tehomuuntajan yksinkertainen simulointimalli ja sen soveltaminen esimagnetointipiiriin		
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri		
<b>Opintosuunta:</b>	Sähkötekniikka		
<b>Työn valvoja:</b>	Kimmo Kauhaniemi		
<b>Työn ohjaajat:</b>	Esa Virtanen, Jaakko Vargelin		
<b>Työn tarkastaja:</b>	Hannu Laaksonen		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	94

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tämän diplomityön tavoitteena oli luoda kohdeyritykselle tehomuuntajien suunnittelun tueksi esimagnetointijärjestelmän yksinkertainen simulointimalli. Simulointimallin avulla voidaan tarkastella esimagnetointimuuntajan ensiökäämissä esiintyvää kytkentävirtasysäysilmiötä kytkentähetkellä ja etuvastuksen ohitushetkellä. Tavoitteena oli myös mallintaa esimagnetointijärjestelmä sekä yksi- että kolmivaiheisena. Työssä keskityttiin myös tarkastelemaan simulointimallien luotettavuutta vertaamalla niitä PSCAD-simulointiohjelmalla luotuihin malleihin.

Työn teoreettinen osuus käsitteli tehomuuntajan rakennetta sekä sen magneettista toimintaperiaatetta. Tehomuuntajan magneettisen toimintaperiaatteen ymmärtämisen kautta johdettiin kytkentävirtasysäykseen vaikuttavat tekijät yleisellä tasolla ja rakenteellisesti. Lopuksi tutkittiin kytkentävirtasysäyksen hallintaan kehitettyjä ratkaisuja, joita hyödynnettiin diplomityön käytännön tarkasteluissa.

Työn soveltava käytännöllinen osuus aloitettiin esimagnetointijärjestelmän mittauksella laboratorio-olosuhteissa. Simulointimallin kehittäminen aloitettiin kartoittamalla erilaisia sekä ilmaisia että kaupallisia simulointiohjelmiä. Simulointiohjelmien kartoituksen jälkeen rakennettiin yksinkertaiset simulointimallit yksi- ja kolmivaiheisena sekä ilmaisella LTspice-ohjelmalla että kaupallisella PSCAD-ohjelmalla. Tämän jälkeen eri ohjelmilla tehtyjä simulointimalleja vertailtiin niiden käytettävyyden ja luotettavuuden osalta.

Tulosten perusteella havaittiin, että esimagnetointijärjestelmällä ja sen oikealla mitoittamisella on selkeä vaikutus kytkentävirtasysäyksen suuruuteen. Tulokset myös toivat ilmi pientä eroavaisuutta simulointiohjelmien välillä, mutta nämä havaitut erot on mahdollista selittää ohjelmien erilaisella parametrisoinnilla.

Diplomityössä tehtyä LTspice-mallia on tulevaisuudessa tarkoitus käyttää kohdeyrityksen suunnittelun tukena ja kehittää sitä myös edelleen siten, että muuntajan sydämen kyllästymisen (saturaatio) voidaan huomioida.

---

**AVAINSANAT:** Simulointimalli, kytkentävirtasysäys, tehomuuntaja, esimagnetointijärjestelmä, LTspice, PSCAD

---

**University of Vaasa**

**School of Technology and Innovations**

**Author:** Joonas Nurmi

**Title of the thesis:** A Simple Simulation Model of a Power Transformer and Its Application to a Pre-Magnetization Circuit

**Degree:** Master of Science in Technology

**Major:** Electrical Engineering

**Supervisor:** Kimmo Kauhaniemi

**Instructors:** Esa Virtanen, Jaakko Vargelin

**Evaluator:** Hannu Laaksonen

**Year:** 2026

**Pages:** 94

---

**TIIVISTELMÄ:**

The aim of this thesis is to produce a simple simulation model of a pre-magnetization system for the needs of the target company, which will be used by the electrical design and product development departments to support design. The main task of the simple simulation model is to measure and model the switching current inrush phenomenon occurring in the primary windings of the pre-magnetization transformer right after switching and right after bypassing the front resistor. In addition, the aim is to model the simulation model of the biasing system in single-phase and three-phase. The object of the study is the reliability of the simulation models, which are verified with a reference model built using a commercial simulation program.

The theoretical part of the thesis deals with the structure of a power transformer and its magnetic operating principle. Through understanding the magnetic operating principle of a power transformer, the factors affecting the switching inrush current have been derived at a general level and structurally. Finally, solutions developed for filtering the switching inrush current are examined, based on which practical research will be carried out for the thesis.

The practical part of the work began with the measurement of the pre-magnetization system in laboratory conditions, which produced measured results that supported the research. The study of the simulation model began by surveying various simulation programs, the delimitation of which had been carried out into free and commercial simulation programs. After surveying the simulation programs, simple simulation models were built with a single-phase and three-phase free simulation program, LTspice, and a commercial simulation program, PSCAD. The object of the study was to examine different simulation models from the perspective of usability and the reality of the results.

Based on the results, it can be observed that the pre-magnetization system and its dimensioning have a clear effect on the magnitude of the switching current surge. The results show a small difference between the simulation programs, but they can be explained by the parameterization of the simulation programs. The phenomenon itself can be simulated with both simulation programs.

The simulation model of the free simulation program built in the master's thesis will be used in the target company's electrical design and product development departments. The simulation model will also be developed for core saturation in the future.

---

**AVAINSANAT:** Simulation model, Inrush current, Power transformer, Pre-magnetization system, LTspice, PSCAD

## **Tekoälyn käyttö diplomityössä**

Tässä diplomityössä on käytetty tekoälytyökaluja lähteiden hallintaan ja kääntämiseen.

Käytetyt tekoälytyökalut diplomityössä:

Google NotebookLM

Tekijä ottaa täyden vastuun diplomityön sisällöstä, mukaan lukien osiot, joissa tekoälytyökaluja on hyödynnetty.

## Alkusanat

Tämän diplomityön aiheen mahdollisti Hitachi Energy Oy:n Transformer yksikön sähköisen suunnittelun ja tuotekehityksen osastot. Haluan kiittää Hitachi Energyn Vaasan muuntajatehtaan henkilökuntaa aiheesta sekä tuesta, jota olen saanut koko diplomityön ajan. Erityisesti haluan kiittää ohjaajiani Esa Virtasta aiheen muodostamisesta ja asiantuntevista kommentteista sekä Jaakko Vargelinia simulointiohjelmistojen perehdytyksestä sekä mittaamattoman arvokkaasta läsnäolosta diplomityön loppuvaiheen muokkauksista. Lisäksi haluan kiittää Fredrik Nybergiä ja Mika Norolampea asiantuntevista kommentteista liittyen ilmiön sekä tulosten analysointiin. Vaasan yliopiston puolelta haluan kiittää koko akateemisen yksikköni henkilökuntaa opiskelutaipaleeni mukanaolosta. Erityiskiitos kuuluu diplomityön valvojalleni Kimmo Kauhaniemelle, joka uskalsi antaa rakentavaa ja suoraa palautetta diplomityöhön, kun sille oli tarvetta.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin perheelleni ja ystäväilleni, jotka ovat koko viiden vuoden ajan uskoneet minuun ja antaneet tarvittaessa tukensa haasteita kohdatessani. Erityiskiitos kuuluu sähköveljille, jotka ovat olleet matkassa mukana päivästä numero 1. Lopuksi haluan myös muistaa Vaasan yliopiston teknillisten tieteiden opiskelijoiden ainejärjestö Tutti ry:tä sekä sen sidosryhmiä, jotka ovat luoneet Vaasasta minulle uuden kodin ja, jonka kautta olen tutustunut lukuisiin uusiin ystäviin opiskelutaipaleeni aikana.

*Joonas Nurmi*

Joonas Nurmi  
Vaasassa 04.05.2026

## Sisällys

1	Johdanto	14
2	Tehomuuntaja	17
2.1	Tehomuuntaja osana sähköverkkoa	17
2.2	Tehomuuntajan toimintaperiaate	18
2.2.1	Faradayn induktiolaki	18
2.2.2	Ampèren virtalaki	20
2.2.3	Gaussin laki magneettikentille	21
2.3	Tehomuuntajan aktiiviosan rakenne	22
2.3.1	Sydän	23
2.3.2	Käämit	24
3	Kytkevävirtasysäys	26
3.1	Kytkevävirtasysäysilmiö	26
3.2	Kytkevävirtasysäykseen vaikuttavat tekijät	26
3.2.1	Kytkevähetki	27
3.2.2	Polariteetti	28
3.2.3	Jännösvuo ja sydämen kyllästyminen	29
4	Kytkevävirtasysäyksen huomioiminen suunnittelussa	32
4.1	Tehomuuntajan rakenteen teoreettinen vaikutus	32
4.2	Tehomuuntajan rakenteen käytännön vaikutus	35
5	Kytkevävirtasysäyksen hallintatavat	40
5.1	Esimagnetointimuuntaja	40
5.2	Esimagnetointijärjestelmän etuvastus	41
5.3	Vaiheittainen kytkentä	42
5.4	Sydämen kyllästymisen estäminen	43
6	Simulointiohjelman kartoitus	45
6.1	Ilmaiset simulointiohjelmat	45
6.2	Kaupalliset simulointiohjelmat	46
7	Esimagnetointipiirin käytännön mittaukset	48

7.1	Mitattu esimagnetointipiiri	48
7.2	KytKentävirtasysäyksen tulokset ilman etuvastusta	50
7.3	KytKentävirtasysäyksen tulokset etuvastuksen kanssa	51
7.4	Mittausten analyysi	53
8	Simulointimallin parametrien määrittäminen	54
8.1	Esimagnetointimuuntajan parametrien laskeminen	54
8.2	Päämuuntajan parametrien laskeminen	59
8.3	Muuntajien parametrien määrittelyt simulointimalleille	63
8.4	Etuvastuksen suuruuden määrittäminen	65
9	Yksinkertainen simulointimalli - LTspice	68
9.1	Yksivaiheinen LTspice-simulointimalli	68
9.1.1	Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset	69
9.1.2	Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin analyysi	71
9.2	Kolmivaiheinen LTspice-simulointimalli	71
9.2.1	Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset	73
9.2.2	Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin analyysi	75
9.3	LTspice-simulointimallien yhteenveto	75
10	Simulointimallin varmentaminen – PSCAD	78
10.1	Yksivaiheinen PSCAD-vertailumalli	78
10.1.1	Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset	79
10.1.2	Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin analyysi	81
10.2	Kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli	81
10.2.1	Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset	82
10.2.2	Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin analyysi	85
10.3	PSCAD-vertailumallien yhteenveto	85
11	Johtopäätökset	87
	Lähteet	89
	Liitteet	93
	Liite 1. KytKentävirtasysäys etuvastuksen kanssa	93

## Kuvat

<b>Kuva 1.</b> Muuntajan aktiiviosa (mukaillen Altun ja muut, 2021, s. 2965). .....	22
<b>Kuva 2.</b> Magneettivuon kasvun vaikutus kytkentävirtaan (Mitra ja muut, 2020, s. 891). .....	27
<b>Kuva 3.</b> BH-käyrä (mukaillen Li ja muut, 2025, s. 3). .....	30
<b>Kuva 4.</b> Sydänmateriaalien domeenien järjestäytyminen (Li ja muut, 2025, s. 4).....	30
<b>Kuva 5.</b> Kytkentävirtasysäyksen vaimeneminen (mukaillen Heathcote, 2007, s. 522). .	41
<b>Kuva 6.</b> Tehtaalla mitattu esimagnetointipiiri. ....	49
<b>Kuva 7.</b> Mitattu kytkentävirtasysäys ilman etuvastusta. ....	50
<b>Kuva 8.</b> Kokonainen mittaustulos kytkentävirtasysäyksestä etuvastuksen kanssa. ....	51
<b>Kuva 9.</b> Mitattu kytkentävirtasysäys etuvastuksen kanssa kytkentähetkellä. ....	52
<b>Kuva 10.</b> Mitattu kytkentävirtasysäys etuvastuksen kanssa ohitushetkellä.....	52
<b>Kuva 11.</b> Yksivaiheinen LTspice-simulointimalli.....	68
<b>Kuva 12.</b> Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos 3.6 $\Omega$ etuvastuksella.....	69
<b>Kuva 13.</b> Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos 9 $\Omega$ etuvastuksella.....	70
<b>Kuva 14.</b> Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos 1.2 $\Omega$ etuvastuksella.....	70
<b>Kuva 15.</b> Kolmivaiheinen LTspice-simulointimalli.....	72
<b>Kuva 16.</b> Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset 3.6 $\Omega$ etuvastuksella.....	73
<b>Kuva 17.</b> Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset 9 $\Omega$ etuvastuksella.....	74
<b>Kuva 18.</b> Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset 1.2 $\Omega$ etuvastuksella.....	75
<b>Kuva 19.</b> Yksivaiheinen PSCAD-vertailumalli. ....	78
<b>Kuva 20.</b> Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 3.6 $\Omega$ etuvastuksella.....	79
<b>Kuva 21.</b> Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 9 $\Omega$ etuvastuksella. ....	80
<b>Kuva 22.</b> Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 1.2 $\Omega$ etuvastuksella. ....	81
<b>Kuva 23.</b> Kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli. ....	82
<b>Kuva 24.</b> Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 3.6 $\Omega$ etuvastuksella. ....	83
<b>Kuva 25.</b> Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 9 $\Omega$ etuvastuksella. ....	84
<b>Kuva 26.</b> Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 1.2 $\Omega$ etuvastuksella. ....	84

## Taulukot

<b>Taulukko 1.</b> Laskennalliset tulokset jäännösvuonkertoimen muutoksena. ....	36
<b>Taulukko 2.</b> Laskennalliset tulokset oikosulkutehon muutoksena. ....	36
<b>Taulukko 3.</b> Laskennalliset tulokset magneettivuon tiheyden muutoksena. ....	37
<b>Taulukko 4.</b> Laskennalliset tulokset käämijohtimien virrantiheyden muutoksena. ....	38
<b>Taulukko 5.</b> Laskennalliset tulokset sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhteen. ....	38
<b>Taulukko 6.</b> Esimagnetointimuuntajan nimellisarvot. ....	54
<b>Taulukko 7.</b> Päämuuntajan nimellisarvot. ....	59
<b>Taulukko 8.</b> Yksivaiheisen simulointimallin parametrisointi. ....	63
<b>Taulukko 9.</b> Kolmivaiheisen simulointimallin parametrisointi. ....	65

## Kreikkalaiset symbolit

$\Delta B$	Kokonaisvuon tiheyden muutos
$\Delta B_r$	Jäännösvuon tiheyden muutos
$\Delta \varphi$	Kokonaisvuon muutos
$\Delta \varphi_r$	Jäännösvuon muutos
$\beta$	Vuontiheyden riippuvuustekijä
$\gamma$	Sydämen kyllästymisen läheisyyden arvo (T)
$\varepsilon$	Sydämen jäljellä oleva vuon arvo (T)
$\eta_1$	Esimagnetointimuuntajan muuntosuhde
$\eta_2$	Päämuuntajan muuntosuhde
$\phi$	Magneettivuon (Wb)
$\phi_\sigma$	Magneettivuon hajavuon (Wb)
$\phi_m$	Magneettivuon huippuarvo (Wb)

$\phi_r$  Jäännösvuo (Wb)

$\phi_{\text{peak}}$  Kokonaisvuon huippuarvo (Wb)

### Muut symbolit

$A_k$  Syöttökäämin paksuus (m)

$B$  Magneettivuon tiheys (T)

$B_m$  Magneettivuon tiheyden huippuarvo (T)

$B_r$  Jäännösvuon tiheys (T)

$B_s$  Magneettivuon tiheyden kyllästymispiste (T)

$\hat{b}_k$  Kyllästysvuon tiheyden huippuarvo (T)

$\hat{b}_r$  Jäännösvuon tiheyden huippuarvo (T)

$\hat{b}_n$  Nimellisvuon tiheyden huippuarvo (T)

$D$  Sähkövuon tiheys (C/m<sup>2</sup>)

$D_s$  Syöttökäämin sisähalkaisija (m)

$E$  Sähkökentän voimakkuus (V/m)

$E_{\text{etuvastus}}$  Etuvastuksen terminen kuormitusenergia (Ws)

$H$  Magneettikentän voimakkuus (A/m)

$H_k$  Syöttökäämin korkeus (m)

$\hat{I}'_0$  Kytkevirtasysäyksen huippuarvo, yksi pylväs (A)

$\hat{I}_0$  Kytkevirtasysäyksen huippuarvo, useampi pylväs (A)

$I_{\text{eff(DC+AC)}}$  Kuormitusvirran tehollisarvo (A)

$I_{11,\text{käämi}}$  Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin virta (A)

$I_{12,\text{käämi}}$  Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin virta (A)

$I_{21,\text{käämi}}$	Päämuuntajan ensiökäämin virta (A)
$I_{22,\text{käämi}}$	Päämuuntajan toisiökäämin virta (A)
$I_{n1}$	Esimagnetointimuuntajan nimellisvirta (A)
$I_{n2}$	Päämuuntajan nimellisvirta (A)
$I_{01}$	Esimagnetointimuuntajan tyhjäkäyntivirta (A)
$I_{02}$	Päämuuntajan tyhjäkäyntivirta (A)
$I_{c1}$	Esimagnetointimuuntajan rautahäviövirta (A)
$I_{c2}$	Päämuuntajan rautahäviövirta (A)
$I_k$	Kytkevirta (A)
$I_{m1}$	Esimagnetointimuuntajan magnetointivirta (A)
$I_{m2}$	Päämuuntajan magnetointivirta (A)
$\hat{i}_1$	Kytkevirtasysäyksen 1. jakson huippuarvo (A)
$K_k$	Useampi pylväisen sydämen korjauskerroin
$k$	Kytkevirtasysäyksen puolittumisjaksojen määrä
$L_\sigma$	Hajavuon induktanssi (H)
$L_m$	Magnetointi-induktanssi (H)
$L_{m1}$	Esimagnetointimuuntajan magnetointi-induktanssi (H)
$L_{m2}$	Päämuuntajan magnetointi-induktanssi (H)
$L_{1L1}$	Esimagnetointimuuntajan hajavuon induktanssi (H)
$L_{2L1}$	Päämuuntajan hajavuon induktanssi (H)
$L_{11LV}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin induktanssi (H)
$L'_{12HV}$	Esimagnetointimuuntajan toision redusoitu induktanssi (H)
$L_{21HV}$	Päämuuntajan ensiökäämin induktanssi (H)

$L'_{22LV}$	Päämuuntajan toision redusoitu induktanssi (H)
$P_{11}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin kuormitushäviöt (W)
$P_{12}$	Esimagnetointimuuntajan toisiokäämin kuormitushäviöt (W)
$P_{21}$	Päämuuntajan ensiökäämin kuormitushäviöt (W)
$P_{22}$	Päämuuntajan toisiokäämin kuormitushäviöt (W)
$P_{k1}$	Esimagnetointimuuntajan kokonaiskuormitushäviöt (W)
$P_{k2}$	Päämuuntajan kokonaiskuormitushäviöt (W)
$R_{11}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssi ( $\Omega$ )
$R_{11LV}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin vaiheresistanssi ( $\Omega$ )
$R_{12HV}$	Esimagnetointimuuntajan toisiokäämin vaiheresistanssi ( $\Omega$ )
$R'_{12HV}$	Esimagnetointimuuntajan toision redusoitu resistanssi ( $\Omega$ )
$R_{21HV}$	Päämuuntajan ensiökäämin vaiheresistanssi ( $\Omega$ )
$R_{22LV}$	Päämuuntajan toisiokäämin vaiheresistanssi ( $\Omega$ )
$R'_{22LV}$	Päämuuntajan toision redusoitu resistanssi ( $\Omega$ )
$R_{c1}$	Esimagnetointimuuntajan sydämen ekvivalenttivastus ( $\Omega$ )
$R_{c2}$	Päämuuntajan sydämen ekvivalenttivastus ( $\Omega$ )
$R_{etuvastus}$	Etuvastuksen resistanssi ( $\Omega$ )
$R_v$	Verkon resistanssi ( $\Omega$ )
$S_{1,pylväs}$	Esimagnetointimuuntajan yhden pylvään näennäisteho (VA)
$S_{2,pylväs}$	Päämuuntajan yhden pylvään näennäisteho (VA)
$T$	Jakson aika (s)
$T_{\frac{1}{2}}$	Kytkevirtasysäyksen puolittumisaika (s)
$t_1$	Kyllästymiseen kuluva aika jakson alusta (s)

$U_{11}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin nimellisjännite (V)
$U_{11,käämi}$	Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin vaihejännite (V)
$U_{12}$	Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin nimellisjännite (V)
$U_{12,käämi}$	Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin vaihejännite (V)
$U_{21}$	Päämuuntajan ensiökäämin nimellisjännite (V)
$U_{21,käämi}$	Päämuuntajan ensiökäämin vaihejännite (V)
$U_{22}$	Päämuuntajan toisiökäämin nimellisjännite (V)
$U_{22,käämi}$	Päämuuntajan toisiökäämin vaihejännite (V)
$U_{L1}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin yli oleva jännite (V)
$U_{L2}$	Päämuuntajan ensiökäämin yli oleva jännite (V)
$U_{m1}$	Esimagnetointimuuntajan magnetointijännite (V)
$U_{m2}$	Päämuuntajan magnetointijännite (V)
$\hat{U}_v$	Vaihejännitteen huippuarvo (V)
$X_{11}$	Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin reaktanssi ( $\Omega$ )
$X_{21}$	Päämuuntajan ensiökäämin reaktanssi ( $\Omega$ )
$X_{m1}$	Esimagnetointimuuntajan magnetointireaktanssi ( $\Omega$ )
$X_{m2}$	Päämuuntajan magnetointireaktanssi ( $\Omega$ )
$x_i$	Käämin ilmasydämen reaktanssi ( $\Omega$ )
$x_v$	Verkon reaktanssi ( $\Omega$ )
$Z_{sc1}$	Esimagnetointimuuntajan oikosulkuimpedanssi ( $\Omega$ )
$Z_{sc2}$	Päämuuntajan oikosulkuimpedanssi ( $\Omega$ )

## 1 Johdanto

Laranja ja muut (2024, s. 1) toteavat, että mikroverkot ovat monipuolisia sähköjärjestelmiä, jotka voivat toimia joko osana laajempaa sähköverkkoa tai täysin itsenäisesti saarekkeena. Tämä tekee mikroverkoista joustavia ratkaisuja esimerkiksi eristetyille alueille tai kriittisen sähkönsyötön varmistamiseen pääverkon häiriöiden aikana. Tehomuuntajat ovat mikroverkkojen sähkönsiirron kannalta keskeisiä laitteita, sillä ne mahdollistavat jännitteen muuntamisen siirtoon ja jakeluun soveltuville tasoille. Näin sähköä voidaan siirtää pitkiä matkoja energiatehokkaasti, siirtohäviöt minimoiden ja sähkönjakelun turvallisuus varmistuen. Fofanan & Hadjadjin (2018, s. 1) mukaan tehomuuntajien luotettava toiminta on keskeistä mikroverkkojen toimivuudelle, mikä puolestaan vaikuttaa suoraan yhteisöiden taloudelliseen hyvinvointiin ja ihmisten elämänlaatuun. Sähkön jakelu- ja siirtojärjestelmissä on olennaisen tärkeää, että keskeiset laitteet, kuten tehomuuntajat, toimivat moitteettomasti useiden vuosikymmenten ajan. Wangin ja muiden (2016 s. 1) mukaan tehomuuntajat ovat erittäin tärkeä osa älykästä sähköverkkoa, jolloin tehomuuntajan vikaantuminen voi vahingoittaa koko sähköjärjestelmää, eikä ylikuormituksen aiheuttamia vikoja voida sivuuttaa. Tämän takia on tärkeää optimoida niiden suorituskyky parantamalla käytettävyyttä ja ehkäisemällä haitallisia ilmiöitä, kuten kytkentävirtasysäyksiä, joita ilmenee tehomuuntajia mikroverkkoon kytkettäessä. Kytkentävirtasysäys aiheuttaa kytkentähetkellä tehomuuntajaan haitallisia ylikuormitustilanteita, jotka vaikuttavat suoraan tehomuuntajien elinkaareen. Nitu ja muut (2024, s. 11) korostavat, että suuri kytkentävirtasysäys aiheuttaa sähköisiä, mekaanisia ja termisiä vaikutuksia tehomuuntajaan ja sähköverkkoon.

Tehomuuntajien kytkentävirtasysäys jännitteen kytkennän yhteydessä on pitkään ollut ongelma sähköverkossa käytettyjen differentiaalisuojareleiden suunnittelussa ja suorituskyvyssä. Lingin ja Basakin (1988, s. 3217) mukaan tämä ohimenevä vaikutus voi kestää useita sekunteja ennen normaalin käyttötilan saavuttamista ja aiheuttaa differentiaalisuojareleen tarpeettoman laukaisun. Tehomuuntajien satunnainen kytkentätapahtuma voi johtaa sydämen kyllästymiseen ja suureen kytkentävirran huippuarvoon, jonka seuraus voi aiheuttaa aiheettoman katkaisijan laukaisun tehomuuntajan kanssa. Islamin ja

muiden (2021, s. 6634) mukaan kuormittamattoman tehomuuntajan kytkentävirta voi aiheuttaa suuren epäsymmetrisen sähkömagneettisen aksiaalivoiman, joka on lähes samaa suuruusluokkaa kuin oikosulkuvirta.

Hirsjärven ja muiden (2009, s. 140) mukaan määrällisen tutkimuksen tunnusmerkki on numeeriseen, mitattavaan ja laskennalliseen aineistoon perustuva analyysi. Näin ollen todetaan, että tämä diplomityö pohjautuu kvantitatiiviseen eli määrälliseen tutkimusotteeseen. Hirsjärven ja muiden (2009, s. 139) mukaan määrällisessä tutkimuksessa tarkastellaan mitattuja havaintoja ja johdetaan niistä loogisen päättelyn kautta johtopäätökset. Tässä diplomityössä analysoidaan yhtä selkeästi rajattua fysikaalista ilmiötä kahden eri simulointiohjelman avulla. Tutkimusasetelma on siten tapaustutkimus, jonka erityispiirteenä on perusteellinen tarkastelu pienestä määrästä keskenään sidoksissa olevia tapauksia (Hirsjärvi ja muut., 2009, s. 134). Simulointimallien tuottama numeerinen data sekä käytännön mittauksista saadut mittaustulokset muodostavat laajan ja vertailukelpoisen aineistopohjan tapaustutkimukselle. Näiden perusteella voidaan arvioida mallien toimivuutta, vertailla simulointiohjelmien tuloksia sekä tehdä perustellut ja luotettavat johtopäätökset tutkimuskysymyksiin.

Tässä diplomityössä syvennyttään tehomuuntajan esimagnetointipiirin käyttäytymiseen kahden eri simulointiohjelman avulla. Diplomityö on suoritettu Hitachi Energy Finlandin tehomuuntajatehtaan toimeksiantona. Diplomityön kohteena on kytkentävirtasysäyksen mallintaminen yksi- ja kolmivaiheisella simulointimallilla kahdella rajauksen mukaisella simulointiohjelmalla. Tutkimuskysymyksiä tässä työssä ovat:

- Kuinka paljon tehomuuntajan rakenteen suunnittelulla pystytään vaikuttamaan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen?
- Kuinka paljon eroavaisuuksia on kaupallisen ja ilmaisen simulointiohjelman välillä liittyen käytettävyyteen?
- Kuinka paljon simulointimallit eroavat toisistaan ilmaisella simulointiohjelmalla, kun verrataan yksivaiheista ja kolmivaiheista simulointimallia?

Tämän diplomityön teoriaosuudessa syvennyttään tehomuuntajan rakenteeseen, magneettiseen toimintaan ja kytkentävirtasysäykseen. Lisäksi syvennyttään tehomuuntajan kytkentävirtasysäyksen hallintatapoihin. Luvussa 2 esitellään tehomuuntaja osana sähköverkkoa sekä syvennyttään sen rakenteeseen ja magneettiseen käyttäytymiseen. Rakennetta tarkastellaan erityisesti käämien ja sydämen eli tehomuuntajan aktiiviosan näkökulmasta. Magneettinen käyttäytyminen on esitetty tehomuuntajan kannalta oleellisilla Maxwellin yhtälöillä. Luvussa 3 analysoidaan tehomuuntajan magneettista käyttäytymistä keskittyen kytkentävirtasysäykseen. Kytkentävirtasysäystä tarkastellaan siihen vaikuttavien tekijöiden kautta. Luvussa 4 syvennyttään siihen, miten tehomuuntajan suunnittelulla pystytään vaikuttamaan kytkentävirtasysäyksen huippuarvon suuruuteen. Luvussa myös tarkastellaan suunnittelun vaikutusta kuormitusvirtaa sekä kytkentävirtasysäyksen puolittumisaikaan. Luvussa 5 tehdään katsaus kytkentävirtasysäyksen hallintakeinoihin ja esitetään tutkimusvaiheessa hyödynnettyä esimagnetointijärjestelmää. Luvussa 6 aloitetaan soveltava käytännön tutkimus kartoittamalla erilaisia simulointiohjelmaa tutkimuksen suorittamiseksi. Kartoitusvaiheessa rajaavina tekijöinä on ilmainen ja kaupallinen simulointiohjelma. Luvussa 7 esitetään mitattava esimagnetointijärjestelmä ja suoritetaan tehomuuntajan esimagnetointipiirin mittaukset laboratorio-olosuhteissa. Luvussa 8 suoritetaan rakennettavien simulointimallien parametrisointi esimagnetointimuuntajan ja päämuuntajan osalta, sekä tarkastellaan etuvastuksen mitoitusta ja sen vaikutusta esimagnetointipiirin toimintaan. Luvussa 9 luodaan yksinkertainen simulointimalli ilmaisella LTspice-simulointiohjelmalla ja suoritetaan simuloinnit yksi- ja kolmivaiheisesta simulointimallista. Näiden tulosten pohjalta arvioidaan simulointiohjelman käytettävyyttä sekä verrataan simulointituloksia käytännön mittaustuloksiin. Luvussa 10 muodostetaan vertailumalli kaupallisella PSCAD-simulointiohjelmalla ja suoritetaan simuloinnit yksi- ja kolmivaiheisella vertailumallilla samaan tapaan kuin ilmaisella simulointiohjelmalla. Näiden tulosten pohjalta luodaan analyysi simulointiohjelman käytettävyydestä sekä sen tuloksista verrattuna ilmaiseen simulointiohjelmaan. Luvussa 11 suoritetaan tutkimuksen analyysi ja johtopäätökset.

## 2 Tehomuuntaja

Tässä luvussa käsitellään tehomuuntajaa osana sähköverkkoa, sen toimintaperiaatetta Maxwellin yhtälöiden kautta sekä rakennetta kytkentävirtasysäyksen näkökulmasta. Rakenteessa keskitytään tehomuuntajan sydämeen ja käämeihin, jotka vaikuttavat kytkentävirtasysäyksen muodostumiseen. Jotta pystytään ymmärtämään kytkentävirtasysäyksen syntyä, tulee ymmärtää tehomuuntajan aktiiviosan rakennetta ja sen magneettista käyttäytymistä aina kytkentähetkestä kytkentävirtasysäyksen jälkeiseen aikaan.

### 2.1 Tehomuuntaja osana sähköverkkoa

Euroopan Unionin komission asetuksen N:o 548/2014 mukaan tehomuuntajalla tarkoitetaan staattista laitetta, jossa on yksi tai useampia käämejä, jotka sähkömagneettisen induktion välityksellä muuntavat tietyn järjestelmän mukaisen vaihtojännitteen ja vaihtovirran toisen järjestelmän mukaiseen, yleensä arvoltaan erisuuruiseen ja saman tajuiseen vaihtojännitteeseen ja vaihtovirtaan sähkövirran siirtämistä varten. Harlowin (2012, s. 28) mukaan termiä tehomuuntaja käytetään viittaamaan generaattorin ja jakelupiirien välillä käytettäviin muuntajiin, ja niiden teho on yleensä vähintään 500 kVA. Johdolla syntyvät häviöt ovat verrannollisia virran neliöön, kun taas johdolla siirrettävä teho puolestaan on verrannollinen jännitteeseen ja virtaan. Näistä seuraa, että suuria tehoja siirrettäessä on järkevää käyttää suurempia jännitteitä. Tehomuuntajalla nostetaan jännitettä sähkönsiirrossa, jolloin pienemmillä virroilla tehohäviöt pysyvät pieninä. Toiseen suuntaan tehomuuntaja pienentää jännitettä, jolloin virta ja jännitetasot saadaan sovitettua haluttuun käyttötarkoitukseen.

Wangin ja muiden (2016, s. 1) mukaan kuormien nopea kasvu, laaja-alaisten verkkoyhteyksien alkuvaiheen muodostuminen, uusiutuvat energialähteet sekä ilmastonmuutos vaikuttavat sähköverkkoon. Sähköverkon toimintaympäristöä muuttavat erityisesti datakeskusten kaltaiset suuret kuormat sekä lisääntyvä uusiutuva energiantuotanto. Näiden vaikutukset heijastuvat koko sähköjärjestelmään. Tämän takia sähköverkon turvallisuuden ja vakauden takaaminen on uusi haaste. Tämän ongelman ratkaisemiseksi älykkäitä

sähköverkkoja on viime vuosina rakennettu ottamalla kokonaisvaltaisesti huomioon markkinat, turvallisuus, sähkön laatu ja ympäristökijät. Näin ollen tehomuuntajien tulee myös olla mukana tässä uudessa siirtymässä taatakseen toimiva sähköverkkoympäristö.

Sähköverkot koostuvat suuresta määrästä tuotantolaitoksia, jakelupisteitä sekä liitoskohtia sähköverkkojen välillä. Sähköverkon laajuus edellyttävät erilaisten siirto- ja jakelujännitteiden käyttöä. Harlowin (2012, s. 28) mukaan näiden jännitetasojen väliset erot täytyy tasata tehomuuntajilla, joita tarvitaan jokaisessa pisteessä, jossa siirrytään jännitetasolta toiselle.

## 2.2 Tehomuuntajan toimintaperiaate

Lenzin ja Schmidtin (2011, s. 4) mukaan tehomuuntajan toimintaperiaate perustuu induktiolain mukaiseen jännitteen muunnokseen ja läpivirtauslakiin pohjautuvaan virran muunnokseen. Tällöin energia siirtyy sähkömagneettisen kentän välityksellä, ja muuntajan sydän ohjaa tätä magneettivuota käämien välillä. Tehomuuntajan toimintaperiaate pystytään todentamaan täten Maxwellin yhtälöiden kautta.

### 2.2.1 Faradayn induktiolaki

Faradayn induktiolaki on jännitemuunnoksen perusta. Sähkömagneettisen induktion perusteella ensiökäämissä kulkeva ajassa vaihteleva virta synnyttää muuntajan sydämeen muuttuvan magneettivuon. Magneettivuo indusoi vastaavan jännitteen, joka on verrannollinen vuon muutosnopeuteen. Tämä pystytään esittämään Faradayn induktiolailla seuraavasti

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

missä  $E$  on sähkökentän voimakkuus ja  $B$  on magneettivuon tiheys (Lenz & Schmidt 2011, s. 3).

Yhtälöstä 1 voidaan todeta, että ajallisesti muuttuva magneettivuon tiheys synnyttää ympärilleen sähkökentän. Tämä osoittaa, ettei induktioilmiö vaadi galvaanista yhteyttä käämien välille vaan sähkökenttä syntyy heti, kun magneettikenttä muuttuu. Miinusmerkki yhtälössä vahvistaa Lenzin lain, jolloin syntyvä sähkökenttä on suunnaltaan sellainen, että se vastustaa magneettikentän muutosta. Lenz ja Schmidt (2011, s. 7) esittävät, että Faradayn induktiolaki voidaan esittää myös integraalisessa muodossa, jolloin siitä pystytään johtamaan tehomuuntajan käytännön toimintaa kuvaavat yhtälöt seuraavasti

$$\oint_{\partial A} E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_A B \cdot dA \rightarrow u = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad (2)$$

missä  $A$  on käämin kierroksen sisäinen pinta-ala,  $u$  on jännite,  $N$  on kierrosten lukumäärä ja  $\phi$  on magneettivuon.

Yhtälö 2 esittää Faradayn induktiolain siirtymän yleisestä teoriasta käytäntöön. Sen vasen puoli osoittaa, että magneettivuon ajallinen muutos suljetun käämin kierrosten läpi synnyttää sähkökentän eli jännitteen. Oikealla puolella laki on tiivistetty muuntajissa käytettävään muotoon, jossa indusoitunut jännite on suoraan verrannollinen käämin kierroslukumäärään ja magneettivuon muutosnopeuteen.

Faradayn induktiolaki pystyy myös selittämään tehomuuntajan muuntosuhteen. Faradayn induktiolain mukaan muuttuvan magneettivuon kussakin käämikierroksessa synnyttämä jännite on aina vakio. Lenz ja Schmidt (2011, s. 1) mukaan tästä syystä muuntajan ensiö- ja toisiopuolen jännitteiden suhde on suoraan verrannollinen niiden kierroslukujen suhteeseen seuraavasti

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (3)$$

missä  $U_1$  on ensiöjännite,  $U_2$  on toisiojännite,  $N_1$  on ensiökäämin kierroslukumäärä ja  $N_2$  on toisiökäämin kierroslukumäärä.

Faradayn induktiolaki ei kuitenkaan yksin pysty selittämään tehomuuntajan toimintaperiaatetta vaan se vaatii tuekseen Ampèren virtalain.

### 2.2.2 Ampèren virtalaki

Ampèren virtalaki on virranmuutoksen perusta. Lenzin ja Schmidtin (2011, s. 5) mukaan virtalaki perustuu fysikaalisesti siihen, että sähkövirran ja sähkövuon tiheyden muutos synnyttävät ympärilleen magneettikentän. Virtalaki luo suoran yhteyden sähköverkon virran ja tehomuuntajan magneettisen käyttäytymisen välille. Siinä missä Faradayn induktiolaki kytkee jännitteen magneettivuon muutokseen, virtalaki kytkee virran magneettikentän voimakkuuteen yhtälöllä

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

missä  $H$  on magneettikentän voimakkuus,  $J$  on virrantiheys ja  $D$  on sähkövuon tiheys.

Yhtälössä 4 esitetty Ampèren virtalaki osoittaa, että magneettikenttä syntyy sekä sähkövirran tiheydestä että ajallisesti muuttuvasta sähkövuon tiheydestä. Yhtälö kytkee sähkön ja magnetismin dynaamisesti toisiinsa kuvaamalla, kuinka muuttuva sähkökenttä synnyttää ympärilleen magneettikentän. Ampèren virtalakia voidaan esittää myös yksinkertaisessa integraalisessa muodossa, jolloin siitä pystytään johtamaan tehomuuntajan käytännön toimintaa kuvaavat yhtälöt seuraavasti

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = 0 = N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2, \quad (5)$$

missä  $I_1$  on ensiövirta ja  $I_2$  on toisiovirta.

Lenz & Schmidt (2011, s. 5) esittävät yhtälössä 5 virtalain sovelluksen ideaaliseen muuntajaan, jossa sydämen permeabiliteetti on ääretön ja magneettikentän voimakkuus sydämessä on nolla, jolloin se edustaa läpivirtauslakia ja selittää vaihevirtojen 180 asteen vaihe-eron.

Ampèren virtalaki täydentää jo edellä mainittua tehomuuntajan muuntosuhdetta virran osalta. Virtalaki määrittää tehomuuntajassa käänteisen muuntosuhteen, sillä ideaalissa tehomuuntajassa ensiö- ja toisiopuolella tehot ovat samat. Tämä vuoksi jännitteen

nousteissa virran on vastaavasti pienennyttävä. Tämän seurauksena ensiö- ja toisiovirtojen suhde on kääntäen verrannollinen käämien kierroslukujen suhteeseen

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (6)$$

Yhteenvedon todetaan, että Faradayn induktiolaki on jännitteenmuunnoksen perusta ja Ampèren virtalaki on virranmuunnoksen perusta. Faradayn laki selittää jännitteiden suhteen, mutta Ampèren virtalaki taas selittää, miksi virrat käyttäytyvät käämikierrosten suhteessa käänteisesti. Faradayn induktiolaki selittää täten, miten muuttuva magneettivuo synnyttää sähkökentän sydämen ympärille. Ampèren virtalaki puolestaan selittää, miten käämeissä kulkevat virrat synnyttävät magneettikentän voimakkuuden sydämelle. Näiden Maxwellin ydinyhtälöiden lisäksi tämän diplomityön kannalta on hyvä tutustua myös Gaussin lakiin magneettikentille.

### 2.2.3 Gaussin laki magneettikentille

Tehomuuntajan magnetoinnin kannalta Gaussin laki magneettikentille on tärkeä. Lenzin & Schmidtin (2011, s. 3) mukaan magneettivuo ei voi alkaa eikä loppua, vaan sen on kuljettava suljettuna silmukkana magneettisydämen läpi. Tämän vuoksi ensiökäämin synnyttämä vuo kulkee myös toisiokäämin kautta, mikä mahdollistaa energian siirtymisen ja jännitemuunnoksen. Gaussin laki magneettikentille on esitettyä seuraavasti

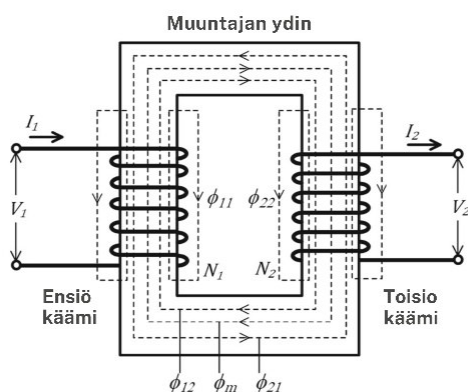
$$\nabla \cdot B = 0. \quad (7)$$

Magneettikentän lähteettömyyden vuoksi magneettivuo on jatkuva suljettu silmukka. Tehomuuntajassa käämin läpäisevä vuo voidaan määrittää sen virran reitin perusteella, mikä mahdollistaa esimagnetoinnin hallinnan. Asettamalla vuo hallitusti halutulle tasolle ennen jännitteenkytkentää vältetään sydämen kyllästyminen ja siitä aiheutuva kytkentävirtasäys. Yhteenvedon todetaan, että käämivirran muodostama magneettivuo on kuljettava muuntajan sydämessä ja ilman kautta, koska magneettivuo on Gaussin lain mukaan aina muodostettava suljettu silmukka. Sähkökenttiä koskevaa Gaussin lakia ei

muuntajien toiminnan yhteydessä käsitellä, koska sähkökentän tarkastelu keskittyy Faradayn induktiolakiin.

### 2.3 Tehomuuntajan aktiiviosan rakenne

Kolmivaiheinen tehomuuntaja koostuu kolmesta sydänpylvästä. Sydänpylvään ympärille on käämitty ala- ja yläjännite käämit, joista alajännitekäämi on sisempänä. Harlowin (2012, s. 28) mukaan tehomuuntajia tuotetaan myös yksivaiheisina. Yksivaiheisen tehomuuntajan rakenteessa käämit on jaettu kahden sydänpylvään ympärille. Muuntaja koostuu aktiiviosasta, johon kuuluu sydän ja käämit, sekä passiiviosasta, johon kuuluu muuntajan eristykset sekä tukirakenteet, apulaitteet, säiliö ja suojauslaitteisto.



**Kuva 1.** Muuntajan aktiiviosa (mukaillen Altun ja muut, 2021, s. 2965).

Kuvasta 1 voidaan huomata, että muuntajan sydän muodostaa magneettivuon  $\phi_m$  ja hajavuon  $\phi_\sigma$ . Altun ja muiden (2021, s. 2966) mukaan magneettivuo toimii käämien välisenä energianvälittäjänä yhdistäen ensiö- ja toisiokäämit muuntajan sydämen kautta. Tämä vuon kytkeytyminen mahdollistaa jännitteen indusoitumisen käämien välillä ja muodostaa samalla magnetointi-induktanssin  $L_m$ . Hajavuo aiheuttaa lisähäviöitä rakenteissa ja synnyttää mekaanista rasitusta, koska se kytkeytyy oman kääminsä ympärille osittain ilman ja osittain sydämen kautta ilmentäen hajavuon induktanssia  $L_\sigma$ . Tehomuuntajan epäsuotuisalla jännitteen kytkentähetkellä syntyvä kyllästyminen vaikuttaa suoraan magnetointi-induktanssin romahtamiseen, jolloin tarvitaan huomattavasti suurempi virta vuon muutokseen normaalintilan aikaansaamiseksi.

### 2.3.1 Sydän

Muuntajasydämen tehtävänä on ohjata magneettivuo kulkemaan haluttujen käämitysten kautta. Sydän rakennetaan teräksestä piirin magneettisen vastuksen pienentämiseksi. Heathcote (2007, s. 42) mukaan muuntajan sydämen tarkoituksena on tarjota ensiö- ja toisiokäämien välisen magneettivuon kulkuradan, jossa on alhainen reluktanssi. Suuri reluktanssi aiheuttaa sydämessä rautahäviöitä, jotka puolestaan ilmenevät sydänmateriaalin kuumenemisena. Sydän koostuu pystysuunnassa olevista pylväistä ja ne yhdistetään toisiinsa ala- ja yläikeillä. Sydämen poikkipinta-alan suuruus on riippuvainen muuntajan tehosta. Sydän koostuu ohuista teräksestä valmistetuista levyistä, joiden paksuus vaihtelee 0,23 mm:stä yli 0,36 mm:iin. Sydänlevyt on sähköisesti erotettu toisistaan ohuella eristävällä materiaalikerroksella. Sydänlevyt pinota päällekkäin ja puristetaan yhteen. Ytimen poikkileikkaus voi olla pyöreä tai suorakaiteen muotoinen. Suorakaiteen muotoisia ytimiä käytetään pienemmillä nimellisarvoilla ja apumuuntajina tehomuuntajien sisällä.

Tehomuuntajan sydämellä on merkittävä vaikutus kytkentävirtasysäyksen syntymiseen. Siman ja muiden (2018, s. 1) mukaan, kytkentävirtasysäykseen vaikuttava sydämen satu-raatio eli kyllästyminen on keskeinen tekijä kytkentävirtasysäyksen synnyssä, sillä sydämeen jäänyt jäännösvuo voi vaatia sydämeltä suurempaa magneettivuota kuin se pystyy välittämään. Dogan ja muiden (2016, s. 3506) korostavat, että sydämen geometria ja sydämen materiaali vaikuttavat myös osaltaan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen. Muuntajasydämen geometria vaikuttaa kytkentävirtasysäykseen siksi, että sydämen rakenne määrää, miten magneettivuo jakautuu ja miten helposti sydän menee kyllästyksen. Siman ja muiden (2018, s. 1) mukaan kytkentävirtasysäys tulee myös huomioida sydänmateriaalin valinnassa suunnitteluvaiheessa, sillä pienempihäviöiset materiaalit aiheuttavat usein suuremman kytkentävirrän ja pienemmän magnetointireaktanssin. Ling ja Basak (1988, s. 3218) huomioivat myös, että materiaalia valittaessa tulee myös huomioida sydänmateriaalin vuonkantokyky. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka paljon magneettivuota ja jäännösvuota sydänmateriaali kestää ennen kuin se menee kyllästyksen.

### 2.3.2 Käämit

Tehomuuntajan käämien tehtävänä on muuntaa jännitettä ensiö- ja toisiökäämin välillä. Käämit muodostetaan johtimista, jotka voidaan määritellä poikkipinta-alaltaan eri kokoisiksi halutun tarkoituksen mukaisesti. Muuntajien käämit valmistetaan lähes pääasiallisesti kuparista tai vaihtoehtoisesti alumiinista. Kupari on yleisin käytetty materiaali, koska sillä on hyvien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi kaupallisista metalleista korkein johtavuus. Alumiini taas on materiaalina halvempi, jolloin muuntajan materiaalikustannuksia saadaan pienennettyä. Alumiinin sähkönjohtavuus on kuitenkin heikompi kuin kuparilla, mikä johtaa suurempiin häviöihin. Kuparin arvo näkyy muuntajassa erityisesti tilansäästön ja kuormitushäviöiden näkökulmasta. Heathcote (2007, s. 54) korostaa, että kuormitushäviöitä voidaan supistaa vähentämällä käämikierrosten määrää, lisäämällä kierrosjohtimen poikkileikkauspinta-alaa tai näiden yhdistelmällä. Kierrosten määrän vähentäminen vaatii kuitenkin magneettivuon lisäämistä, joka tarkoittaa sydämen poikkileikkauksen kasvattamista. Tämä osaltaan kasvattaa sydämen painoa ja rautahäviötä. Näin voidaan todeta, että kuormitushäviötä voidaan pienentää kasvattamalla rautahäviöitä ja päinvastoin.

Adly (2001, s. 2855) toteaa, että tehomuuntajan käämit asetellaan yleisesti siten, että ensiökäämi on sisäpuolella korkean virran ja matalan jännitteen takia, kun taas toisiökäämi sijoitetaan ensiökäämin päälle matalan virran ja korkean jännitteen takia. Käämijärjestys on tärkeä eristyksen näkökulmasta. Suurivirtaisen alajännitekäämin tulee olla mahdollisimman lähellä sydäntä, jotta hajavuon induktanssi ja oikosulkuvoimat pysyvät pieninä. Yläjännitekäämin sijoittaminen ulommaksi helpottaa sen eristämistä maapotentiaalista ja pienentää eristysrakenteiden rasitusta. Tämä järjestys tuottaa samalla muuntajalle parhaan mekaanisen kestävyuden ja kustannustehokkaan eristyksen ilman, että magneettiirin toiminta heikkenee.

Kytkentävirtasäys aiheuttaa muuntajan käämeihin merkittävää mekaanista ja sähköistä rasitusta, joka voi johtaa eristeiden vaurioihin. Mikhak-Beyranvandin (2019, s. 914) mukaan paikallisten voimien suuruus voi nousta jopa 70 prosenttiin nimellisen

oikosulkuvirran aiheuttamista voimista. Tästä voidaan päätellä, että kytkentävirtasysäys voi mekaanisesti rasittaa muuntajaa lähes yhtä paljon kuin todellinen oikosulku. Lisäksi Mikhak-Beyranvand (2019, s. 914) jatkaa, että jatkuva ylivirta käämissä nostaa muuntajan käämien kokonaislämpötiloja. Nämä suuret voimat ja lämpötilan kasvu aiheuttavat käämien ja niiden johtimien eristeisiin voimakasta mekaanista stressiä, joka vaarantaa niiden kestävyden. Kytkentävirtasysäyksen ensimmäiset huiput ovat huomattavasti nimellisvirtaa suurempia, mikä voi rikkoa käämien eristyksen. Islam ja muut (2021, s. 6635) lisäävät, että eristeen pettäminen voi aiheuttaa valokaaren käämikierrosten välille, mikä johtaa muuntajan sisäiseen oikosulkuun. Fofana ja Hadjadj (2018, s. 1) jatkavat, että tehomuuntajien heikoin kohta on niiden käämien eristysjärjestelmä, johon kuuluvat eristys korkeajännitekäämin ja tankin välillä, korkea- ja pienjännitekäämien välillä sekä vaiheiden välinen eristys. Näin voidaankin todeta, että vaikka kytkentävirtasysäys on yleensä pienempi kuin varsinainen vikavirta, se toistuu usein normaalissa käytössä ja voi kestää kymmeniä sekunteja. Tämä kuluttaa eristeitä ja voi johtaa muuntajan ennenaikaiseen vikaantumiseen. Tämän vuoksi kytkentävirtasysäysten rajoittaminen ja huomioiminen suunnittelussa on kriittistä muuntajan suojaamiseksi sisäisiltä vioilta ja kalliilta korjauskustannuksilta. Lopuksi Fofana & Hadjadji (2018, s. 7) toteavat, että tehomuuntajan käyttöikä on yhteydessä sen eristyksen käyttöikään, jolloin eristysjärjestelmän kunnon arviointi on olennainen osa muuntajan kunnon arvioimista sekä uutena että useiden käyttövuosien jälkeen.

### 3 KytKentävirtasysäys

Tässä luvussa käsitellään tehomuuntajassa kytkentähetkellä syntyvää kytkentävirtasysäystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Jotta ymmärretään esimagnetointijärjestelmän vaikutusta kytkentävirtasysäykseen, tulee ymmärtää kytkentävirtasysäystä ilmiönä.

#### 3.1 KytKentävirtasysäysilmiö

Girgin ja teNyenhuusin (2007, s. 1) mukaan kytkentävirtasysäys on epäsymmetrinen sarja vaimenevia ja teräviä kytkentävirtasysäyksiä, jotka painottuvat voimakkaasti nollatason jommallekummalle puolelle. KytKentävirtasysäys on suuri transienttivirta, joka on aaltomuodoltaan voimakkaan epäsymmetrinen nollatason suhteen. Tätä ilmiötä kutsutaan tasavirtakomponentiksi. Tasavirtakomponentti saa aikaan sen, että virta kulkee merkittävästi vain joka toisella puolijaksolla, jättäen väliin normaalin siniaaltoisen puolijakson muodon. Aaltomuodon jyrkkä ja toispuoleinen luonne synnyttää poikkeuksellisen korkean toisen yliaallon, mikä erottaa sen sinimuotoisesta oikosulkuvirrasta. Girgin ja teNyenhuusin (2007, s. 1) mukaan erityisesti toinen yliaalto on kriittinen parametri muuntajan suojauksessa, sillä sen avulla suojareleet pystyvät erottamaan kytkentävirtapiikin todellisesta oikosulkuvirrasta. Lisäksi kytkentävirtasysäyksen epäsymmetrinen muoto eli tasavirtakomponentti on keskeinen osa tätä tunnistusprosessia.

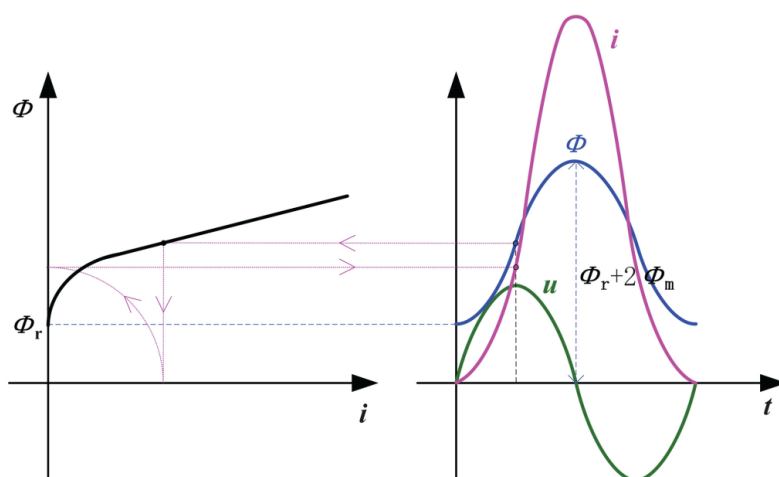
#### 3.2 KytKentävirtasysäykseen vaikuttavat tekijät

KytKentävirtasysäyksen syntyyn vaikuttaa moni asia. KytKentävirtasysäys havaitaan yleensä, kun muuntajan sydän ajetaan erittäin syvään kyllästymistilaan jännitteen kytkemisen aikana. Dogan ja muut (2016, s. 3506) esittävät, että kytkentävirtasysäyksen suuruuteen vaikuttavat jännitteen kytkentäkulma, jännitteen suuruus ja napaisuus, sydämen jäännösvuo, käämin hajavuon induktanssi, käämin resistanssi ja syöttöverkon impedanssi. Girgin & teNyenhuis (2007, s. 2) lisäävät, että kytkentävirtasysäykseen vaikuttavat myös tehomuuntajan teho sekä käämien kytkentäryhmä. Pienemmillä muuntajilla kytkentävirrän suhde nimellisvirtaan on tyypillisesti suurempi kuin suurilla tehomuuntajilla.

Girgis & teNyenhuis (2007, s. 2) lisäävät, että kolmivaihemuuntajissa käämien kytkentätapa voi osaltaan vaikuttaa kytkentävirtasysäyksen suuruuteen jopa 60 %. Tähän vaikuttaa käämien maadoitus, mikä vaikuttaa virtojen jakautumiseen vaiheiden välillä.

### 3.2.1 Kytkentähetki

Kytkentävirran amplitudi vaihtelee sydämen magneettisen tilan ja muuntajalle syötetyn jännitteen kytkentäkulman mukaan. Nitu ja muiden (2024, s. 11) mukaan tämä kytkentävirta kasvaa nopeasti ja voi saavuttaa jopa 100 kertaa suuremman arvon kuin tyhjäkäyntivirta, mikä aiheuttaa magneettisen sydämen kyllästymisen. Näin ollen voidaan todeta, että kytkentähetkellä on selkeä vaikutus kytkentävirtasysäyksen syntymiseen. Kun magneettivuo on  $90^\circ$  jäljessä jännitettä, kytkentävirtasysäyksen kannalta pahin kytkentähetki on jännitteen nollakohdassa, jolloin magneettivuon arvo on huippuarvossaan. Hongtaon (2021, s. 1176) mukaan, jos sydämessä on jäännösvuota ennen kytkentähetkeä ja kytkentähetki tapahtuu jännitteen nollakohdassa, magneettivuo saavuttaa maksimiarvon  $2\phi_m + \phi_r$ . Tällöin magneettivuo ylittää sydämen nimellivuon, jolloin sydän alkaa kyllästyä voimakkaasti. Tämä johtaa kytkentävirran suureen kasvuun, kuten Mitra ja muut (2020, s. 891) esittävät



**Kuva 2.** Magneettivuon kasvun vaikutus kytkentävirtaan (Mitra ja muut, 2020, s. 891).

lhanteellinen kytkentähetki tapahtuu silloin, kun jännite on huippuarvossaan ja magneettivuo on nollakohdassa. Heathcote (2007, s. 515) toteaa tähän, että jos sydämessä

ei ole jäännösvuota, muuntaja siirtyy suoraan normaaliin toimintatilaan ilman kytkentävirtapiikkiä. Jos sydämessä on jäännösvuo, kytkentä jännitteen huippukohdassa aiheuttaa silti transientteja, mutta ne ovat huomattavasti pienempiä kuin jännitteen nollakohdassa kytkettäessä. Täten voidaan sanoa, että vaikka muuntajassa olisi jäännösvuota, niin kytkentävirtaan vaikuttaa oleellisesti kytkentähetki.

### 3.2.2 Polariteetti

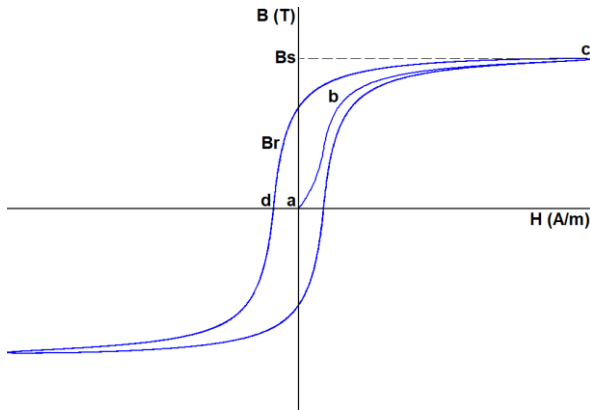
Heathcoten (2007, s. 515) mukaan kytkentähetken polariteetilla eli napaisuudella on keskeinen vaikutus kytkentävirtasysäyksen muodostumiseen. Napaisuus määrittää, vahvistavatko vai kumoavatko sydämen jäännösvuo ja kytkentähetken indusoima magneettivuo toisensa. Jos sydämen jäännösvuon napaisuus on vastakkainen sille vuolle, jota kytkettävä jännite alkaa kasvattaa, kytkentävirta voimistuu. Tällöin magneettivuo alkaa kasvaa jäännösvuon arvosta ja saavuttaa ensimmäisen puolijakson aikana huomattavasti korkeamman huipun kuin ilman jäännösvuota. Heathcote (2007, s. 515) korostaa, että teoreettinen maksimiarvo magneettivuon tiheydelle on tällöin jopa kolminkertainen normaaliin nähden, mikä kasvattaa kytkentävirrän huippuarvoa entisestään.

Heathcote (2007, s. 514) jatkaa myös, että jos jäännösvuolla on sama napaisuus kuin muuttuvalla magneettivuolla, silloin kytkentävirta pienenee. Jos muuntajan jäännösvuo ja napaisuus vastaavat kytkentähetken magneettivuota, kytkentävirtapiikkiä ei synny lainkaan ja muuntaja siirtyy suoraan normaaliin toimintaan. Lopuksi Heathcote (2007, s. 514) korostaa, että kolmivaihemuuntajissa napaisuussuhteet kuitenkin ovat monimutkaisempia. Kun muuntaja kytketään irti, yhteen vaiheeseen jää usein jäännösvuota, jonka polariteetti on vastakkainen kahden muun vaiheen jäännösvuolle. Tämän seurauksena kytkentävirtapiikit eivät ole kaikissa vaiheissa yhtä suuria, vaan ne riippuvat kunkin vaiheen magneettisista olosuhteista ja napaisuuksista kytkentähetkellä.

### 3.2.3 Jäännösvuo ja sydämen kyllästyminen

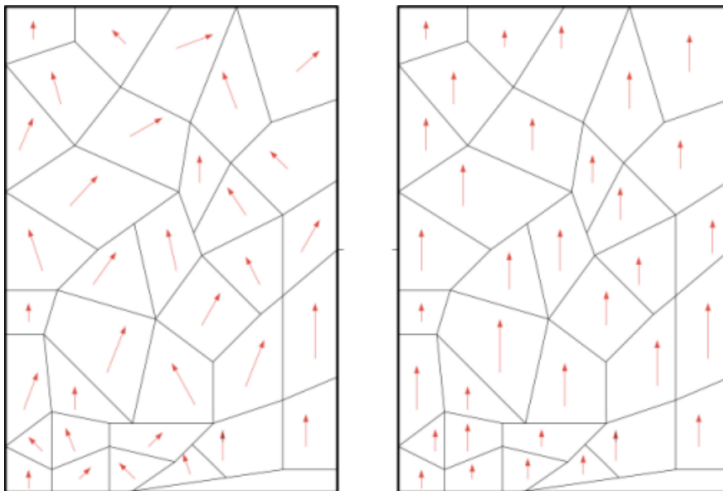
Ge ja Wang (2018, s. 4) toteavat, että tehomuuntajan sydämeen jäävällä remanenssi-vuolla eli jäännösvuolla on suora vaikutus kytkentävirtasysäyksen muodostumiseen ja se on yksi kriittisimmistä kytkentävirtasysäykseen vaikuttavista tekijöistä. Jäännösvuo syntyy muuntajan ytimeen siitä, kuin muuntajan sydän ei palaudu täysin magneettisesti normaaliin tilaan, kun magnetoiva virta poistuu. Tämä tarkoittaa käytännössä muuntajan verkosta irtikytkentähetkeä. Tämän seurauksena muuntajan ytimeen jää jäännösvuo, jonka suuruus riippuu siitä, missä kohtaa jaksoa muuntajan jännite on katkaistu aiemalla kerralla. Tämä jäännösvuo vaikuttaa seuraavaan jännitteen kytkentähetkeen, koska se voi siirtää sydämen lähelle kyllästymispistettä. Tehomuuntajien sydämen jäännösvuo on määritettävä etukäteen, jotta kytkentävirta voidaan eliminoida uudelleenkäynnistyksen aikana. Wein ja muiden (2019, s. 1) mukaan tehomuuntajien suunnittelussa yleisesti arvioidaan jäännösvuon suuruus kokemuksen perusteella. Jäännösvuon määrittäminen auttaa kytkentävirtasysäyksen huomioimista ja simulointimalleissa jäännösvuon arvo kannattaa määritellä mahdollisimman suureksi, jotta kytkentävirtasysäys ei voi ainakaan olla suurempi kuin simulointitulokset antavat osoittaa.

Kun tehomuuntaja on jännitteetön, sydämessä on aina tietty määrä jäännösvuota jäljellä ferromagneettisen materiaalin ominaisuuden takia. Wein ja muiden (2019, s. 1) mukaan jäännösvuo voi aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia muuntajan uudelleenkäynnistyksen yhteydessä, kuten kytkentävirtasysäyksiä, ylijännitteitä, dynaamisia rasituksia ja resonansseja. Jotta näitä ilmiöitä pystytään hallitsemaan, on välttämätöntä ymmärtää jäännösvuon luonne. Jäännösvuon muodostuminen voidaan määritellä seuraavasti BH-käyrällä kytkentähetkestä irtikytkentähetkeen.



**Kuva 3.** BH-käyrä (mukaiillen Li ja muut, 2025, s. 3).

Kuvasta 3 voidaan määrittellä pisteessä  $a$  alkuperäinen magnetisoimaton tila, jolloin magneettikentän voimakkuus  $H$  ja magneettivuon tiheys  $B$  ovat nollia. Kun magneettikentän voimakkuutta kasvatetaan pisteiden  $a \rightarrow b \rightarrow c$  välillä, magneettivuon tiheys kasvaa. Magneettivuon tiheyden kasvu ja magnetoitumisprosessi voidaan selittää magneettisten domeenien käyttäytymisellä, jolloin alkutilanteessa ne ovat materiaalin mukaisesti epä-säännöllisessä järjestyksessä ja lähellä magneettivuon tiheyden kyllästymispistettä  $B_s$  ne alkavat kohdistua magneettikentän suuntaisiksi. Tämä aiheuttaa sydämen magneettivuon tiheyden kasvun hidastumisen, kunnes kyllästymispiste saavutetaan. Kuvassa 4 on esitettyä kytkentähetken ja kyllästymispisteen domeenien järjestäytyminen.



**Kuva 4.** Sydänmateriaalien domeenien järjestäytyminen (Li ja muut, 2025, s. 4).

Sydänmateriaalin domeenien epäsäännöllisellä järjestäytymisellä voidaan selittää magneettivuon alun lineaarinen kasvu. Magneettikentän kasvattaminen pisteestä  $b \rightarrow c$  johtaa domeenien järjestäytymiseen. Tämä johtaa kyllästymispisteen saavuttamiseen, jolloin magneettivuon tiheys ei enää merkittävästi kasva. Kun magneettikentän suuruutta pienennetään takaisin nolnaan eli pisteeseen  $d$ , magneettivuon tiheys ei palaa enää alkuperäistä reittiä nolnaan. Tästä voidaan todeta, että vaikka magneettikenttä palautuu nolna arvoon, materiaaliin jää jäännösvuon arvo  $B_r$  kuvan 3 mukaisesti.

Jäännösvuota on yleisesti todella haastavaa mitata, mutta Cavallera ja muut (2014, s. 3) kuitenkin osoittavat, että jäännösvuo muutos  $\Delta\phi_r$  voidaan määritellä testauksen yhteydessä seuraavalla yhtälöllä

$$\Delta\phi_r = \Delta B_r \times \frac{\Delta\phi}{\Delta B}, \quad (8)$$

missä  $\Delta B_r$  on jäännösvuon tiheyden muutos,  $\Delta B$  on kokonaisvuon tiheyden muutos ja  $\Delta\phi$  on kokonaisvuon muutos.

Muuntajan jäännösvuo arvioidaan mittaamalla ensin jännitteellisen tilan kokonaisvuon ja vuontiheyden suhde, jota verrataan jännitteettömän tilan mittaustuloksiin. Näiden arvojen suhde kerrotaan määritetyllä jäännösvuon tiheyden muutoksella, jolloin saadaan laskennallinen arvio sydämeen jääneestä magneettivuosta. Tässä huomioitavaa on kuitenkin se, että kyseessä on arvio.

Epäedullisella ajanhetkellä tapahtuva kytkentä kasvattaa kokonaisvuon huippuarvoa  $\phi_{peak}$  ja voi johtaa magneettivuon  $\phi_m$  kaksinkertaistumiseen normaaliin verrattuna. Tähän lisätään vielä jäännösvuo  $\phi_r$ . Chen ja muut (2023, s. 2) esittävät tämän seuraavalla yhtälöllä

$$\phi_{peak} = 2\phi_m \cos \alpha + \phi_r. \quad (9)$$

Koska jäännösvuon määrittely on haastavaa, on kytkentävirtasysäyksen hallintaan kehitelty erilaisia ratkaisuja, joita esitellään luvussa 5.

## 4 KytKentävirtasysäyksen huomioiminen suunnittelussa

Tehomuuntajan suunnittelussa kytKentävirtasysäykseen vaikuttavat tehomuuntajan parametrit ja rakenne, joiden avulla saadaan tarkemmin määriteltyä kytKentävirtasysäyksen suuruus. Seuraavat laskelmat on suoritettu kohdeyrityksen käytössä olevalla sähkösuunnitteluohjelmalla. Kyseessä olevat laskelmat ovat esimerkki tehomuuntajan arvoilla laskettu. Tämän jälkeen on seurattu yksittäisen parametrin muutosta ja sen vaikutusta kytKentävirtasysäykseen. Jotta ymmärretään tehomuuntajan suunnittelun yhteys tehomuuntajan kytKentävirtasysäykseen, tulee ymmärtää rakenteen kriittisten parametrien vaikutus kytKentävirtasysäyksen syntyyn.

### 4.1 Tehomuuntajan rakenteen teoreettinen vaikutus

Sähkösuunnitteluohjelma perustuu Kurjen (1968, s. 76) määrittelemiin yhtälöihin liittyen tehomuuntajan rakenteeseen ja sitä ohjaileviin parametreihin. Suunnitteluohjelman laskelmat aloitetaan vuontiheyden riippuvuustekijästä  $\beta$ , joka kuvaa kuinka suuri osa tehomuuntajan magneettiipiirin vuontiheysvarasta on käytettävissä jäännösvuon ja kyllästysrajan välillä. Vuontiheyden riippuvuus voidaan laskea seuraavasti

$$\beta = \frac{\hat{b}_k - \hat{b}_r}{\hat{b}_n}, \quad (10)$$

missä  $\hat{b}_k$  on kyllästysvuon tiheys,  $\hat{b}_r$  on jäännösvuon tiheys ja  $\hat{b}_n$  on nimellisvuon tiheys.

Yhtälön 10 mukaan, jos vuontiheyden riippuvuustekijä saa pienen arvon, jäännösvuon tiheys on suhteessa suuri ja käytettävissä oleva vuovara ennen kyllästystä jää pieneksi. Tällöin muuntajan sydän kyllästyy helposti jo pienestäkin vuon lisäyksestä kytKentähetkellä, mikä johtaa voimakkaisiin kytKentävirtasysäyksiin. Suuri riippuvuustekijä puolestaan osoittaa, että jäännösvuon tiheys on suhteessa pieni. Tällöin muuntajan sydän kestää huomattavasti enemmän vuon muutosta ennen kyllästymistä, jolloin kytKentävirta jää selvästi pienemmäksi. Näin vuontiheyden riippuvuustekijä määrittelee tehomuuntajan herkkyyttä kytKentätilanteen aiheuttamalle kyllästymiselle. Seuraavaksi lasketaan yhden käämin ilmasydäntä vastaava reaktanssi  $x_i$ , joka esitetään seuraavasti

$$x_i = 6.2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f \cdot N^2 \left( D_s + \frac{2}{3} A_k \right)^2}{H_k}, \quad (11)$$

missä  $D_s$  on syöttökäämin sisähalkaisija,  $A_k$  on syöttökäämin paksuus,  $H_k$  on syöttökäämin korkeus.

Yhtälöstä 11 huomataan, että yhden käämin ilmasydäntä vastaava reaktanssi riippuu taajuudesta  $f$ , kierrosluvusta  $N$  ja käämin geometrisista mitoista. Syöttökäämin korkeus kuvaa magneettipiirin pituutta ja vuon jakautumista, kun taas syöttökäämin sisähalkaisija ja paksuus huomioi käämin rakenteen vaikutuksen vuon kulkuun. Kaavan alussa oleva kerroin  $6.2 \cdot 10^{-6}$  huomioi permeabiliteetin vakiotekijät rakenteen mukaan, jolloin käämin mitat ja sähköiset suureet saadaan muunnettua oikean suuruusluokan reaktanssiksi. Kaavalla saadaan laskettua syöttökäämin ilmaraolle vastaava induktiivinen reaktanssi, joka kuvaa käämin magneettipiirin vastusta silloin, kun vuo kulkee ilmassa ilman sydämen vaikutusta. Näin voidaankin johtaa kyllästymiseen kuluva aika jakson alusta  $t_1$  yhtälöllä

$$t_1 = \frac{\arccos(1 - \beta)}{2\pi f}. \quad (12)$$

Yhtälö 12 määrittää ajan, jonka magneettivuontiheys vaatii kytkentähetken kyllästysarvon saavuttamiseen. Ajan suuruus riippuu vuontiheyden riippuvuus tekijästä  $\beta$  sekä verkon taajuudesta  $f$ . Näin saadaan määriteltyä, kuinka nopeasti sydän siirtyy kyllästystilaan kytkentähetkellä. Aiempien yhtälöiden avulla pystytään johtamaan yhden pylvään kytkentävirtasysäyksen huippuarvo  $\hat{I}'_0$  seuraavasti

$$\hat{I}'_0 = \frac{\hat{U}_v}{x_i + x_v} \left\{ 2 - \beta - \frac{R_v}{x_i + x_v} [\sqrt{\beta(2 - \beta)} + \pi \left( 1 - \frac{t_1}{T} \right) (1 - \beta)] \right\}, \quad (13)$$

missä  $\hat{U}_v$  on vaihejännitteen huippuarvo,  $x_v$  on verkon reaktanssi,  $R_v$  on verkon resistanssi ja  $T$  on jakson aika.

Yhtälössä 13 on esitettyä kytkentävirtasysäyksen huippuarvo, kun syöttävässä käämityksessä on nollajohtimella varustettu tähtikytkentä. Kytkentävirtasysäyksen huippuarvo määräytyy ensisijaisesti verkon jännitetason ja kokonaisimpedanssin suhteesta. Alun

termi  $\frac{\hat{U}_v}{x_i + x_v}$  kuvaa maksimaalista virtaa, jossa muuntajan sydän ei rajoittaisi magnetointivirtaa. Tässä tapauksessa muuntaja toimisi hetken aikaa kuin ilmasydämellinen käämi. Reaktanssin määritelmä sisältää käämin ilmaraolle vastaavan reaktanssin sekä verkon reaktanssin, jotka yhdessä rajoittavat virran suuruutta. Yhtälön loppuosa huomioi puolestaan sydämeen varastoituneen jäännösvuon, kyllästymisvaiheen keston sekä resistiivisten komponenttien vaikutuksen virran muotoon. Yhtälö antaa näin realistisen arvion siitä, kuinka suuri kytkentävirtasysäyksen huippuarvo hetkellisesti syntyy muuntajan kytkeytyessä verkkoon. Jotta ymmärretään kytkentävirtasysäyksen vaimenemista, tulee määritellä kytkentävirtasysäyksen huippuarvon puolittumisaika  $T_{\frac{1}{2}}$ , joka on esitetty seuraavasti

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{T}{2} + (k - 1) \cdot T, \quad (14)$$

missä  $k$  on kytkentävirtasysäyksen puolittumisjakso.

Yhtälö 14 määrittää ajan, jolloin kytkentävirtasysäyksen huippuarvo puolittuu. Ensimmäinen termi kuvaa puolijaksoa, ja toinen termi lisää mukaan ne täydet jaksot, jotka ovat kuluneet ennen puolittumista. Muuttuja  $k$  seuraa kokonaisten jaksoiden kulumista ja hahmottaa monenessako täydessä jaksossa puolittuminen saavutetaan. Jotta saadaan huomioitua useampi pylväs kytkentävirtasysäyksen tarkastelussa, tulee muodostaa useamman sydänpylvään korjauskertoimen  $K_k$  ja se on esitettyä seuraavasti

$$K_k = \frac{1 - \gamma - 7 - 0,5 \cdot \varepsilon}{2 - \gamma + \varepsilon}, \quad (15)$$

missä  $\gamma = \frac{\hat{b}_k}{\hat{b}_n}$  kertoo, kuinka lähellä sydän on kyllästymistä,  $\varepsilon = \frac{\hat{b}_r}{\hat{b}_n}$  kertoo, kuinka paljon vuota on jäljellä ennen kytkentää. Korjauskertoimen avulla saadaan muodostettua useamman pylvään kytkentävirtasysäyksen huippuarvo  $\hat{I}_0$  seuraavasti

$$\hat{I}_0 = K_k \cdot \hat{I}'_0. \quad (16)$$

Yhtälössä 15 on esitettyä määritelmä korjauskertoimelle  $K_k$ , jonka avulla voidaan huomioida se, että muuntajan sydän ei välttämättä kyllästy vain yhdessä pylväässä, vaan myös muiden pylväiden kyllästyminen vaikuttaa kytkentävirtaan. Yhtälö 16 antaa tavan saada realistisemmän lasketun kytkentävirran huippuarvon, koska se ottaa huomioon

useamman pylvään kyllästymisen. Lopuksi selvitetään kytkentävirtasysäyksen vaikutus kytkentävirran tehollisarvoon seuraavasti

$$I_{\text{eff(DC+AC)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \hat{i}_1}{2\sqrt{2}} = \sqrt{3} I_{\text{eff}}, \quad (17)$$

missä  $\hat{i}_1$  on kytkentävirtasysäyksen ensimmäisen jakson huippuarvo.

Yhtälö 17 muuntaa kytkentävirtasysäyksen huippuarvon tehollisarvoksi niin, että myös tasavirtakomponentti otetaan huomioon. Tämä antaa realistisen arvon siitä, kuinka voimakkaasti ensimmäinen kytkentäjakso kuormittaa muuntajaa ja virtamuuntajia.

## 4.2 Tehomuuntajan rakenteen käytännön vaikutus

Tehomuuntaja on nimellisiltä arvoiltaan alla esitetyissä taulukoissa 32 MVA, 132/11 kV, Ynd11. Nybergin (2026) mukaan jäännösvuonkertoimen, muuntajan oikosulkutehon, magneettivuon tiheyden, käämien johtimien virrantiheyden sekä sydämen korkeuden, että käämin halkaisijan suhteen avulla saadaan hyvin hahmotettua, miten tehomuuntajan rakenteelliset määritelmät vaikuttavat kytkentävirtasysäyksen suuruuteen. Taulukot perustuvat Nybergin materiaaleihin. Mitoitetut parametrit taulukoissa on erilaisten käytössä olevien tehomuuntajien suunnitteluparametrejä, jolloin kaikki tapaukset ovat suunnittelun puolelta mahdolliset ja toteutettavissa. Laskelmien pohja-arvoina on käytetty jäännösvuonkertoimena 0.9, muuntajan oikosulkutehona 10000 MVA, magneettivuon tiheydenä 1.72 T, johtimen virrantiheydenä  $1.6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$  sekä sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhteenä 3.2. Tarkastelussa on kytkentävirtasysäyksen huippuarvo, tehollisarvo sekä puolittumisaika. Laskelmissa muutetaan ainoastaan yhtä parametriä kerrallaan ja muut arvot pysyvät pohja-arvoina.

Jäännösvuon vaikutus kytkentävirtasysäykseen on merkittävä, kuten aiemmin esitettiin. Mallintaessa kytkentävirtasysäystä on kannattavaa mitoittaa jäännösvuonkerroin suhteellisen korkealle, jotta saadaan hahmotettua suurin mahdollinen kytkentävirtasysäys. Alla on esitetty jäännösvuon vaikutus kytkentävirtasysäykseen ja sen keston.

**Taulukko 1.** Laskennalliset tulokset jäännösvuonkerroimen muutoksena.

Jäännösvuonkerroin	Kytkevävirtasysäys (HV)		
	Huippuarvo (A)	Tehollisarvo (A)	Puolittumisaika (s)
0.5	990	350	1.25
0.6	1070	380	1.21
0.7	1140	405	1.17
0.8	1220	430	1.13
0.9	1290	455	1.09

Taulukosta 1 voidaan huomata miten arvioitu jäännösvuonkerroin vaikuttaa kytkentävirtasysäykseen sekä sen puolittumisaikaan. Taulukon mukaan voidaan todeta, että mitä korkeammalle oletetaan jäännösvuokertoimen arvo, sitä korkeammalle kytkentävirtasysäyksen huippuarvo kasvaa. Tämä vaikuttaa myös vahvasti virran tehollisarvon kasvuun samassa suhteessa huippuarvon kanssa. Huomioitavaa on myös, että mitä suurempi kytkentävirtasysäys on, sitä nopeampi on sen puolittumisaika.

Muuntajan oikosulkuteho vaikuttaa kytkentävirtasysäykseen yhdessä verkon oikosulkutehon kanssa. Suuri verkon oikosulkuteho kuvastaa jäykkää verkkoa, jossa jännite pääsee laskemaan vähemmän magnetointivirran vaikutuksesta. Teoriassa verkon oikosulkuteho määrittää kytkentävirtasysäyksen teoreettisen maksimiarvon. Mutta käytännössä muuntajan oikosulkuteho rajoittaa todellista kytkentävirtasysäystä.

**Taulukko 2.** Laskennalliset tulokset oikosulkutehon muutoksena.

Oikosulkuteho (MVA)	Kytkevävirtasysäys (HV)		
	Huippuarvo (A)	Tehollisarvo (A)	Puolittumisaika (s)
1000	1080	380	0.45
5000	1200	420	0.95
10000	1220	430	1.13
15000	1225	435	1.19
20000	1230	437	1.25

Taulukosta 2 voidaan todeta, että mitä suurempi muuntajan oikosulkuteho on, sitä suurempi kytkentävirtasysäyksen huippuarvo sekä tehollisarvo on. Kytkentävirtasysäyksen huippuarvo ja tehollisarvo kasvavat samassa suhteessa muuntajan oikosulkutehon suuruuden suhteen. Oikosulkutehon suuruus vaikuttaa huomattavasti myös kytkentävirtasysäyksen puolittumisaikaan pidentäen sitä, koska jäykkä verkko ei salli jännitteen pudota kytkentäpiikin aikana. Muuntajan sydän pysyy pidempään syvässä kyllästystilassa ja

tasavirtakomponentti vaimenee hitaammin suuremman tehokkaan magnetointijännitteen ylläpitämänä.

Muuntajan suurempi magneettivuon tiheys kasvattaa kytkentävirtasysäystä, koska sydän toimii lähempänä kyllästystilaa. Kun sydän menee nopeammin kyllästyksen ja kytkentävirran huippuarvo kasvaa, kytkentävirtasysäyksestä tulee entistä voimakkaampi ja jyrkempi.

**Taulukko 3.** Laskennalliset tulokset magneettivuon tiheyden muutoksena.

Magneettivuontiheys (T)	Kytkevävirtasysäys (HV)		
	Huippuarvo (A)	Tehollisarvo (A)	Puolittumisaika (s)
1.54	1110	400	1.17
1.60	1150	410	1.15
1.66	1190	420	1.13
1.72	1220	430	1.13
1.78	1250	440	1.11

Taulukosta 3 voidaan todeta, että magneettivuon tiheyden kasvaessa kytkentävirtasysäyksen huippuarvo nousee selkeästi. Samalla myös virran tehollisarvo kasvaa, mikä kertoo suuremmasta kuormittavasta vaikutuksesta. Puolittumisaika puolestaan lyhenee hieman magneettivuon tiheyden kasvaessa, jolloin suurempaa vuontiheyttä vastaava kytkentävirtasysäys vaimenee nopeammin.

Käämijohtimien suurempi virrantiheys tarkoittaa ohuempaa johdinta ja suurempaa resistanssia. Tämä johtaa siihen, että kytkentävirran tasavirtakomponentti vaimenee nopeammin ja siten pienentää kytkentävirtasysäyksen huippuarvoa. Pienempi virrantiheys tarkoittaa pienempää resistanssia, jolloin tasavirtakomponentti vaimenee hitaammin. Tällöin kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on myös suurempi.

**Taulukko 4.** Laskennalliset tulokset käämijohtimien virrantiheyden muutoksena.

Virrantiheys (A/mm <sup>2</sup> )	Kytkevävirtasysäys (HV)		
	Huippuarvo (A)	Tehollisarvo (A)	Puolittumisaika (s)
1.6	1220	430	1.13
2.2	1217	429	0.87
2.8	1214	428	0.71
3.4	1211	427	0.61
4.0	1208	426	0.53

Taulukon 4 perusteella voidaan todeta, että käämien virrantiheydellä ei ole merkittävää vaikutusta kytkentävirtasysäyksen huippuarvoon tai tehollisarvoon, jotka pysyvät lähes vakiona. Sen sijaan virrantiheyden kasvu lyhentää selvästi kytkentävirran puolittumisaikaa, koska ohuempi johdin lisää resistanssia ja vaimentaa tasavirtakomponenttia nopeammin. Käytännössä siis suurempi virrantiheys johtaa lyhyempään, mutta ei merkittävästi pienempään kytkentävirtasysäysvirtaan.

Sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhde vaikuttaa myös osaltaan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen. Jos sydämen korkeutta kasvattaa, tämä pienentää käämin halkaisijaa ja sitä kautta nostaa käämin kierroslukua. Tämä tarkoittaa pienempää kytkentävirtasysäystä, koska käämin magnetointireaktanssi kasvaa.

**Taulukko 5.** Laskennalliset tulokset sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhteen.

Sydämen korkeus/käämin halkaisija (B/D ratio)	Kytkevävirtasysäys (HV)		
	Huippuarvo (A)	Tehollisarvo (A)	Puolittumisaika (s)
2.0	2090	740	0.81
2.4	1710	610	0.91
2.8	1430	510	1.03
3.2	1220	430	1.13
3.6	1080	380	1.21

Taulukosta 5 voidaan todeta, että sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhteen kasvassa kytkentävirtasysäyksen huippuarvo sekä tehollisarvo pienenevät selvästi, mikä osoittaa, että korkeampi ja kapeampi sydän on vähemmän altis kyllästymiselle. Samalla virran puolittumisaika kasvaa selkeästi, mikä kertoo tasavirtakomponentin hitaammasta vaimenemisesta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tehomuuntajan suunnittelulla on selkeä vaikutus kytkentävirtasysäyksen muodostumiseen. Aiemmin esitettyjen taulukoiden perusteella

kytkentävirtasysäykseen suoraan vaikuttavat rakenteen mitoitusparametrit ovat käämihoitomien virrantiheyden suuruus, sydämen magneettivuon tiheyden suuruus, tehomuuntajan oikosulkuteho sekä sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhde. Näiden neljän muuttujan avulla pystytään huomioimaan paremmin kytkentävirtasysäystä jo suunnitteluvaiheessa. On siis tärkeää ymmärtää, miten suunnittelussa pystytään vaikuttamaan kytkentävirtasysäykseen. Useimmissa tapauksissa kytkentävirtasysäystä ei kuitenkaan priorisoida tehomuuntajan suunnittelussa, vaan kytkentävirtasysäyksen hallintaan hyödynnetään muita ratkaisuja, joita on esitetty tarkemmin luvussa 5.

## 5 Kytkentävirtasysäyksen hallintatavat

Tässä luvussa perehdytään erilaisiin tapoihin pienentää kytkentävirtasysäystä ja vaikuttaa sen vaimenemiseen. Kuten aiemmin on mainittu, kytkentävirtasysäys saattaa aiheuttaa pahimmassa tilanteessa ylimääräistä kuormitusta muuntajan rakenteeseen ja suojausjärjestelmiin. Näin ollen on kehitelty erilaisia tapoja hallita tätä ilmiötä ja edesauttaa niin verkon toimintaa kuin tehomuuntajan elinikää. Jotta kytkentävirtasysäyksen hallintaa voisi ymmärtää paremmin, tulee erilaisia hallintamenetelmiä kartoittaa.

### 5.1 Esimagnetointimuuntaja

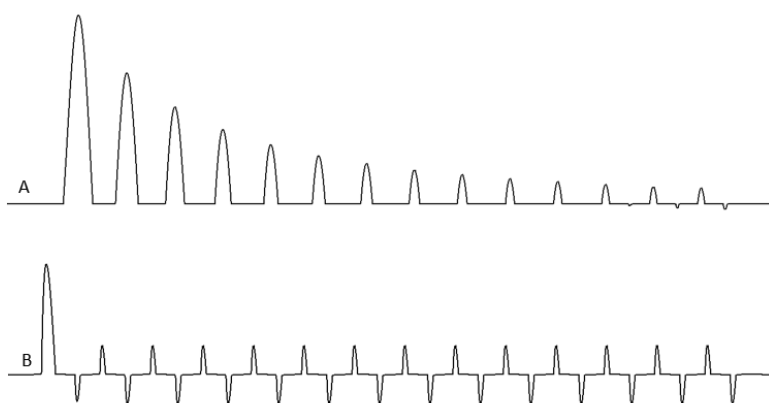
Ennen kuin päämuuntaja kytketään sähköverkkoon, päämuuntaja tulee magnetoida siihen kytketyllä esimagnetointimuuntajalla. Eräässä esimerkissä Kolb ja muut (2026, s. 1) esittävät, että esimagnetointijännite syötetään päämuuntajaan toisiopuolelta ennen varsinaisen suurjännitekatkaisijan sulkemista välttääkseen suuret kytkentävirtasysäykset ja niistä aiheutuvat jännitevaihtelut verkossa.

Kolbin ja muiden (2026, s. 3) mukaan esimagnetointimuuntaja mitoitetaan usein vakiotilan laskelmien perusteella kattamaan tehomuuntajan magnetointi-impedanssin vaatiman loistehon, kaapelin lataustehon ja tyhjäkäyntihäviöt. Kolbin ja muut (2026, s. 6) jatkavat, että esimagnetointimuuntajan mitoitus on kriittistä resonanssien välttämiseksi, jolloin esimagnetointimuuntajan tehon kasvattaminen on usein tehokas keino siirtää resonanssitaajuus turvalliselle alueelle. Erityisen alttiita resonanssiylijännitteille ovat esimagnetointijärjestelmät, joissa yläjännitepuoli on yli 100 kV. Kyllästymiseen liittyvät kytkentävirtasysäykset sisältävät yliaaltoja, jotka herättävät järjestelmässä olevat matalataajuiset resonanssit. Toisin sanoen tehomuuntajan kyllästyminen aiheuttaa resonanssia, joka voi johtaa vakaviin ylijännitteisiin ja esimagnetointimuuntajan termiseen ylikuormitukseen.

## 5.2 Esimagnetointijärjestelmän etuvastus

Esimagnetointimuuntajan eteen kytkettävä etuvastus vaimentaa kytkentävirtasysäystä. Kolb ja muut (2026, s. 3) toteavat, että etuvastusta käytetään rajoittamaan kytkentähetken virtaa puolittamalla kytkentäjännite, jolloin se auttaa vaimentamaan alkuperäistä kytkentävirtasysäystä. Tämä estää tehomuuntajaa kyllästyvästä kytkennän alkuvaiheesta. Etuvastus ei kuitenkaan toimi yksin tehomuuntajan eteen kytkettynä, sillä sitä ei pystytä mitoittamaan korkealle jännitteelle suurten häviöiden ja rakenteellisten ongelmien takia. Toinen tärkeä osuus on, että esimagnetointimuuntaja tarjoaa galvaanisen erotuksen etuvastuksen ja päämuuntajan välille. Etuvastuksen tuoma suurempi piiri-resistanssi nopeuttaa kytkentävirran vaimenemista ja pienentää ensimmäisen jakson huippuarvoa. Suurilla tehomuuntajilla vaimeneminen on hidasta pienen resistanssin vuoksi. Etuvastusten tehtävänä on puolittaa kytkentäjännite, joka pienentää kytkentävirtasysäystä.

Heathcote (2007, s. 522) jatkaa, että etuvastuksella on myös selkeä vaikutus kytkentävirtasysäyksen kestoan. Kun kytkennässä käytetään etuvastusta, jonka jännitettä pudotetaan 5 % normaalista syöttöjännitteestä, kytkentävirtasysäyksen huippuarvot pienenevät merkittävästi verrattuna tilanteeseen ilman vastusta.



**Kuva 5.** Kytkentävirtasysäyksen vaimeneminen (mukailten Heathcote, 2007, s. 522).

Kuvassa 5 on esitettyä kytkentävirtasysäys ilman etuvastusta kohdassa A ja etuvastuksen kanssa kohdassa B. Heathcote (2007, s. 522) toteaa, että etuvastuksen kanssa virtaallot ovat huomattavasti matalampia ja ne vaimenevat tasaisemmin kohti normaalitilaa. Näin voidaan todeta, että jo 5 % pudotus kytkentäjännitteessä vaikuttaa suuresti kytkentävirtasysäyksen vaimenemiseen. Esimagnetointijärjestelmän vaimeneminen kuitenkin vaatii tarkkaa häviöiden mallinnusta muuntajamallissa sekä muussa verkossa, jotta vaimenemista pystytään tutkimaan mahdollisimman tarkasti (ks. Chiesa ja muut, 2011). Tämä osoittaa sen, että simulointiohjelmalla tuotetussa kytkentävirtasysäyksessä on haastavaa toteuttaa todenmukainen kytkentävirtasysäyksen vaimeneminen.

Etuvastuksen ohittamisessa on myös huomioitava, että ohitushetkellä esimagnetointipiirin resistanssi putoaa. Tämä aiheuttaa ohitushetkellä esimagnetointijärjestelmässä kuormitusvirran kasvua, mikä voi ajaa muuntajan osittaiseen kyllästykseen. Kolb ja muut (2026, s. 6) toteavat, että kyllästykseen liittyvät kytkentävirtasysäykset voivat virittää matalan kertaluvun resonansseja ja synnyttää vakavia ylijännitteitä. Näillä voi olla laitteistoa vaurioittavia vaikutuksia, kuten laitteiden terminen ylikuormittuminen. Näin ollen etuvastuksen mitoittaminen on avain asemassa etuvastuksen käytössä, jolloin esimagnetointimuuntaja yhdessä oikein mitoitettun etuvastuksen kanssa ovat kustannustehokas ratkaisu, eikä se vaadi erillistä mittausta.

### 5.3 Vaiheittainen kytkentä

Vaiheittaisella kytkennällä tarkoitetaan tilannetta, jossa jokainen vaihe kytketään eri aikaan kytkentätilanteessa. Mitra ja muut (2020, s. 893) esittävät uudenlaista tapaa hallittuun vaiheittaiseen kytkentää, jolloin vaihe A kytketään ensin sen optimaalisella kytkentähetkellä, eli jännitteen huippukohdassa olettaen, että magneettivuon arvo on nolla. Vaiheet B ja C kytketään niiden omien yksilöllisten ja optimaalisten kytkentähetkien mukaisesti. Kun voidaan olettaa, että sydämessä on jäännösvuota, vaiheiden B ja C kytkentää viivästetään kahdella jaksolla vaiheen A kytkennän jälkeen. Kahden jakson viivästys on Mitran ja muiden (2020, s. 893) mukaan tehokas tapa kytkennälle, koska se hyödyntää sydämen vuon jakautumista. Koska magneettivuon tiheys ja jännite ovat toisiinsa

verrannollisia, vaiheiden väliset erot johtavat lopulta magneettivuon tasapainottumiseen, mikä kumoaa jäännösvuon haitallisen vaikutuksen ennen muiden vaiheiden kytkemistä.

Basun ja Asgharin (2008, s. 35) korostavat myös, että syötettävän käämin kytkentäryhmällä on selkeä vaikutus vaiheittaisen kytkennän toteutukseen. Vaiheittainen kytkentä on erittäin tehokas menetelmä, kun muuntaja kytketään verkkoon tähtenkytketyltä puolelta. Tällöin voidaan hyödyntää nollapisteen vastusta ja vaiheiden peräkkäistä kytkentää virran rajoittamiseksi. Toisin kuin tähtikytkennässä, vaiheittainen kytkentä ei toimi toivotulla tavalla, kun muuntaja kytketään verkkoon kolmioon kytketyltä puolelta. Vaikka kolmiokytkennässä vaiheittainen kytkentä jännitteen huippuarvossa voi pienentää kytkentävirtasysäystä yhdessä käämissä, se ei välttämättä vähennä muiden käämien kytkentävirroja. Kolmannen vaiheen viivästetty kytkentä saattaa jopa nostaa kahden muun vaiheen virrat erittäin korkeiksi verrattuna yhteiseen kytkentähetkeen. Vaiheittainen kytkentä on vakiintunut menetelmä tähtikytketyille muuntajille, kolmiokytkennässä se vaatii tuekseen ulkoisia vastuksia toimiakseen turvallisesti. Vaikka teoriassa vaiheittainen kytkentä auttaa kytkentävirtasysäyksen pienentämisessä, käytännössä vaiheittainen kytkentä vaatii jännitteen huippuarvojen mitoittamista. Tämä vaatii verkon kytkentähetken tilannetietoa ja mittaustietoa aikaisemmasta irtikytkentähetkestä. Tämä ei ole kustannustehokas tapa.

#### **5.4 Sydämen kyllästymisen estäminen**

Liin ja muiden (2025, s. 4) mukaan muuntajan sydämen kyllästymistä voidaan rajoittaa demagnetoinnilla, mikä estää tehokkaasti jäännösvuosta johtuvan kytkentävirtasysäyksen voimistumisen. Demagnetoinnilla tavoitellaan sydämen domeenien epäjärjestystä irtikytkentähetkellä, jolloin materiaalin jäännösvuo poistuu. Tämä ei kuitenkaan välttämättä poista ilmiötä kokonaan, jos kytkentähetken jännitekulma on epäsuotuisa.

Liin ja muiden (2025, s. 4) esittämällä menetelmällä muuntajan jäännösvuon poistaminen toteutetaan ensisijaisesti kohdistamalla sydämeen asteittain vaimeneva

vaihtomagneettikenttä, joka kääntää ja poikkeuttaa sydämen magneettisia domeeneja jatkuvasti. Kun magneettikentän voimakkuus saavuttaa nollan, domeenien magneettiset momentit jäävät epäjärjestykseen. Demagnetoinnin lopputulos todennetaan mittaamalla muuntajan magnetointi-induktanssia. Kun induktanssin arvo lakkaa muuttumasta ja palautuu halutulle tasolle, demagnetointi katsotaan valmiiksi.

Yhteenvetona demagnetointi nähdään huoltotoimenpiteenä, joka estää sydämen nopean kyllästymisen ja siitä seuraavat kytkentävirtasysäykset tehomuuntajaa takaisin kytkettäessä. Demagnetointi kuitenkin vaatii erillistä mittausta ja mittausjärjestelyitä, jolloin se ei ole kustannustehokkain tapa kytkentävirtasysäyksen minimoimiseen.

## 6 Simulointiohjelman kartoitus

Tässä luvussa tarkastellaan ja arvioidaan erilaisia tutkimuksen rajauksen mukaisia kaupallisia ja ilmaisia simulointiohjelmiä, joiden tarkoituksena on tulla kohdeyrityksen sähköisen suunnittelun sekä tuotekehityksen osaston tueksi. Tutkimus kohdistuu kahteen valittuun simulointiohjelmaan, joista toinen on ilmainen ohjelma ja toinen kaupallisesti lisenssin kautta hankittava simulointiohjelma. Tarkastelun kohteena on simulointiohjelman käytettävyys sekä hinta.

### 6.1 Ilmaiset simulointiohjelmat

Ilmaisten simulointiohjelmien pohjalta perehdyttiin kohdeyrityksen jo käytössä oleviin ja mahdollisiin uusiin simulointiohjelmiin. Tutkimus yrityksen sisäisiin simulointiohjelmiin toteutettiin kyselyn kautta, jolloin saatiin selville mitä eri simulointiohjelmiä on käytössä kohdeyrityksessä Euroopan laajuisesti. Yrityksen ulkopuolisten simulointiohjelmien kartoitus toteutettiin akateemisten lähteiden katsauksella. Ilmaisten simulointiohjelmien tarkastelu rajattiin yhteen jo käytössä olevaan, LTspice<sup>®</sup>, ja yhteen uuteen, ATPDraw, simulointiohjelmaan.

LTspice-simulointiohjelma soveltuu tehomuuntajien sähköisten ominaisuuksien ja toimintailmiöiden mallintamiseen, sillä sen Spice-pohjainen simulointiohjelma mahdollistaa sekä lineaaristen että epälineaaristen magneettiipiirimallien mallintamisen (Analog, 2026). Muuntajista voidaan rakentaa yksityiskohtaisia malleja, joissa otetaan huomioon sydämen magneettinen kyllästymisen, käämien vuotoinduktanssit, resistanssit, häviöt sekä ylijännite- ja kytkentätransientit. LTspice-simulointiohjelma mahdollistaa myös kytkentävirtasäysten, esimagnetointitilojen, harmonisten komponenttien sekä verkon, että muuntajan vuorovaikutuksen tutkimisen. Tämä on tärkeää erityisesti suunniteltaessa vaimennusratkaisuja ja komponenttien mitoitusta.

ATPDraw-simulointiohjelma on Windows pohjainen piirto-ohjelma, jolla sähköpiirit rakennetaan ja muunnetaan automaattisesti ATP-simulointiohjelmaan sopivaksi

tiedostoksi (ATPDraw, 2026). ATPDraw toimii käytännössä käyttöliittymänä ATP-simulointiohjelmalle, joka on EMTP-ohjelmistoon kuuluva transienttisimulointiohjelma. ATPDraw-ohjelma soveltuu hyvin kytkentävirtasysäyksen mallinnukseen, koska se keskittyy erityisesti tehomuuntajan mallintamiseen oman hybridimuuntajamallin kautta (Høidalen ja muut, 2009, s. 455). Simulointiohjelmassa on valmiit ja realistiset mallit katkaisijoille, tehomuuntajille ja johdoille, ja siinä voidaan huomioida ilmiöitä kuten magneettinen kyllästyminen ja kytkentähetken vaihekulma, joilla on suuri vaikutus kytkentävirtasysäyksen suuruuteen. ATPDraw on kuitenkin tutkimuskäyttöön rakennettu ympäristö, jolloin se ei sovellu tämän diplomityön tarkoitukseen, kun simulointiohjelma menee kaupalliseen käyttöön. Huomioitavaa on kuitenkin se, että jos yrityksen sisällä halutaan tutkia kytkentävirtasysäysten ilmenemistä, niin ATPDraw-ohjelma on hyvä vaihtoehto tähän tutkimusmielessä sen valmiiden muuntajamallien ansiosta.

Simulointiohjelmien testauksen jälkeen päädyttiin LTspice-simulointiohjelmistoon, koska ATPDraw-ohjelma ei ole kaupalliseen käyttöön tarkoitettu simulointiympäristö. Lisäksi LTspice-simulointiohjelma on käytössä yksittäisillä toimijoilla Suomessa ja Yhdysvalloissa. Jo käytössä oleva simulointiohjelmisto on helpompi viedä yrityksen laajempaan käyttöön, kun yksittäiset toimijat pystyvät avustamaan käyttöönotossa. Lisäksi se täyttää yrityksen kaupalliset ja ilmaisohjelman vaatimukset.

## 6.2 Kaupalliset simulointiohjelmat

Kaupallisten ohjelmien osalta kartoitettiin kohdeyrityksen tarpeeseen lisenssiä vaativaa simulointiohjelmaa. Kartoitus toteutettiin Vaasan yliopistossa käytössä olevien lisenssien pohjalta, jotka ovat koulutusohjelmassa eri kursseilla käytössä. Tutkimusta varten testailtiin useita eri ohjelmia, joiden toimintatavat erosivat huomattavasti toisistaan.

Kartoituksessa tarkasteltiin PSCAD™-, COMSOL Multiphysics®- ja Simulink®-simulointiohjelmistoja. Tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että PSCAD™ on tarkoituksenmukaisempi esimagnetointipiirin mallinnukseen kuin Simulink® tai COMSOL Multiphysics®, koska se on suunniteltu nimenomaan sähkövoimajärjestelmien nopeiden kytkentä- ja

transientti-ilmiöiden analyysiin. PSCAD-simulointiohjelman komponenttikirjastot on optimoitu kuvaamaan muuntajien kyllästymistä, kytkentähetken vaikutuksia ja verkon dynaamista käyttäytymistä luotettavasti ja tehokkaasti, mikä tuottaa vakaita tuloksia ilman ylimääräistä mallinnustyötä. Simulink® soveltuu paremmin yleiseen sähköjärjestelmien ja -ohjauksen mallinnukseen, jolloin vastaavan tarkkuuden saavuttaminen sähköverkon transienteissa vaatii enemmän räätälöintiä. Tämä lisää vaatimusta simulointiohjelman käyttöön otossa ja työmäärässä sen hyötyihin verrattuna, vaikka ohjelmistolla pystyykin tuottamaan halutun tutkimuksen (ks. Song ja muut, 2017). COMSOL Multiphysics® taas painottuu kentälaskentaan ja 2D/3D-fysiikan yksityiskohtiin, mikä tekee siitä tarpeettoman raskaan ja hitaan. Vaikka COMSOL Multiphysics® pystyykin mallintamaan halutun tutkimuksen lopputuloksen, se ei kuitenkaan ole joustava simulointiohjelma, kun tutkimuskohteena on ennen kaikkea tehomuuntajan kytkentävirtasäyksen mallinnus (ks. Jamali-Abnavi & Hashemi-Dezaki, 2021). Jäykän simulointiohjelman lisäksi COMSOL Multiphysics® on näistä kolmesta ohjelmasta selkeästi kallein. Yhteenvetona voidaan siis todeta, että kaikilla ohjelmistoilla pystyy toteuttamaan tehomuuntajan esimagnetointipiirin ja sen kytkentävirtasäyksen mallintamisen, mutta PSCAD-ohjelmalla pystytään toteuttamaan käytettävyyden näkökulmasta haluttu lopputulos helpoiten ja se on myös halvin ohjelma näistä kolmesta.

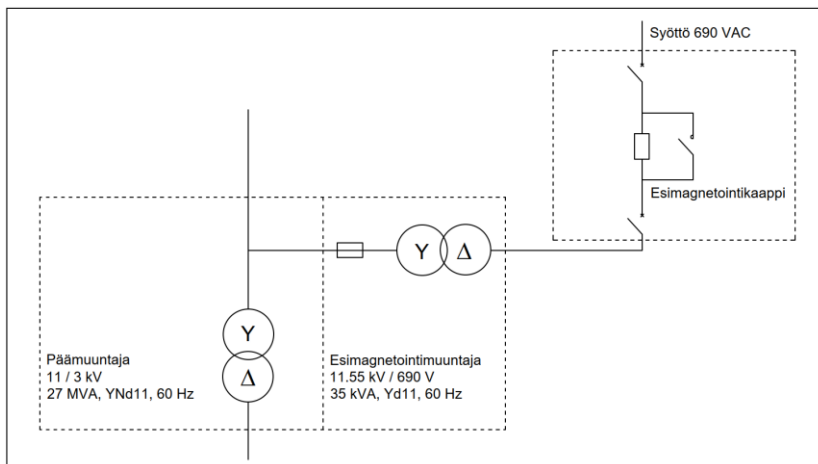
PSCAD™ on tehokas työkalu muuntajien sähköisten ilmiöiden mallintamiseen ja analysointiin, sillä se mahdollistaa tarkkojen transienttisimulointien suorittamisen sekä muuntajan toiminnan tutkimisen käytännön tilanteita vastaavissa olosuhteissa (PSCAD, 2026). Muuntajien käyttäytyminen sisältää useita nopeasti muuttuvia ja ei-lineaarisia ilmiöitä, kuten kytkentävirtasäyksiä ja ylijännitteitä. PSCAD-ohjelman sisältämä laaja komponenttikirjasto mahdollistaa näiden ilmiöiden tarkan simuloinnin. Kartoituksen perusteella todetaan myös, että PSCAD™ on ollut käytössä useissa tehomuuntajan, erityisesti kytkentävirtasäyksen, mallintamiseen liittyvissä tutkimuksissa (ks. Zifan ja muut, 2020; Nahirah ja muut, 2022). Näiden tutkimusten pohjalta valittiin PSCAD-simulointiohjelma toiseksi tutkimuksen simulointiohjelmaksi.

## 7 Esimagnetointipiirin käytännön mittaukset

Tässä luvussa toteutetaan esimagnetointijärjestelmän käytännön mittaus ja analysoidaan mittauksen tulokset. Mittauksessa tarkasteltiin esimagnetointipiirin eteen asetettavan etuvastuksen vaikutusta kytkentävirtasysäykseen. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa mitattiin esimagnetointipiiriä ensin ilman jännitettä puolittavaa etuvastusta ja kerättiin tulokset ylös. Toisessa vaiheessa kytkettiin etuvastus piiriin ja toteutettiin mittaus uudestaan. Alaluvuissa esitellään molempien mittausten tulokset sekä vertaillaan etuvastuksen vaikutusta kytkentävirtasysäykseen. Huomioitavaa on, että mittaustilanteissa ei suoritettu magneettivuon mittauksia, jolloin jäännösvuon suuruutta eikä kytkentähetken magneettivuon kasvua ole määritelty.

### 7.1 Mitattu esimagnetointipiiri

Esimagnetointipiiri muodostui tässä tutkimuksessa etuvastuksesta, esimagnetointimuuntajasta, päämuuntajasta sekä piiriä ohjaavista komponenteista. Kolbin ja muut (2026, s. 1) esittävät esimagnetointijärjestelmän prosessin neljässä vaiheessa: 1) esimagnetointi- ja tehomuuntajan samanaikainen kytkentä etuvastuksen läpi, 2) etuvastuksen ohittaminen, 3) suurjännitekatkaisijan sulkeminen ja 4) esimagnetointijärjestelmän irrottaminen. Huomioitavaa on, että luvussa 5 esitetyistä kytkentävirtasysäyksen hallintakeinoista selkeästi kustannustehokkain ratkaisu on esimagnetointimuuntajan ja etuvastuksen yhdistelmä, jonka avulla käytännön mittaustilanteissa ei vaadita erillistä mittausta ja mittausjärjestelyä kytkentäjännitteelle tai sydämen jäännösvuon arvolle. Toinen huomioitava asia on, että laboratoriomittauksissa edellä mainitut ratkaisut pystyttäisiin suorittamaan, mutta käyttöönottomittauksissa lopullisella asennuspaikalla ei välttämättä ole resursseja tähän. Kuvassa 6 on esitettyinä mitattu esimagnetointipiiri.



**Kuva 6.** Tehtaalla mitattu esimagnetointipiiri.

Kuvassa 6 on esitettyä tehtaalla mitattu esimagnetointipiiri, jossa syöttöjännite on 690 VAC. Esimagnetointimuuntajaa syötetään esimagnetointikaapin kautta, jossa sijaitsee etuvastukset. Etuvastusten ohitus tullaan suorittamaan ohituskontaktorien avulla, jotka on ohjattu avautumaan ja sulkeutumaan saman aikaisesti. Etuvastus on käytössä, kunnes virta suodattuu kytkentävirtasysäyksestä normaalitilaan. Etuvastus kuitenkin oikosuljetaan viimeistään 4 s jälkeen kytkentähetkestä. Etuvastukset tulee irrottaa ohituskontaktorilla esimagnetointipiiristä, jottei etuvastukset ylikuumene ja aiheuta näin ylimääräistä räsitusta ja hukkalämpöä.

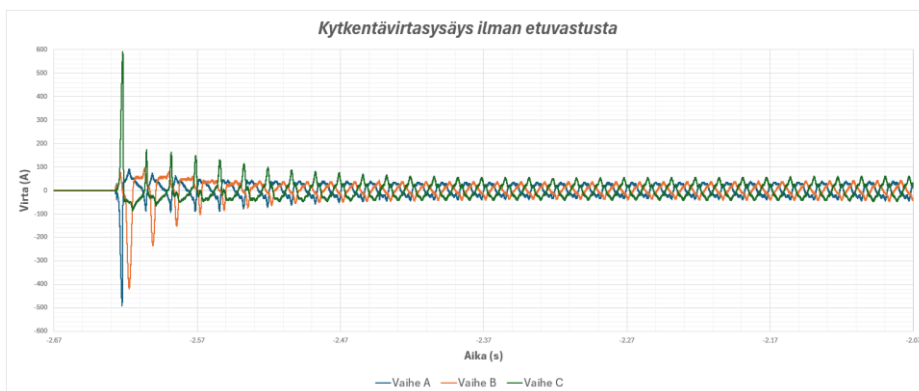
Mitatun piirin esimagnetointimuuntaja on arvoiltaan 35 kVA, 60 Hz ja kytkentäryhmältään Yd11. Ensiöjännitteeksi on määritelty 11.55 kV ja toisiojännitteeksi 690 V. Esimagnetointimuuntajan tehtävänä on syöttää esimagnetointijännite päämuuntajan ensiökäämiin, jolloin käytännössä esimagnetointimuuntajaa käytetään syöttämään muuntajan ytimeen ennalta ohjattu magneettivuon taso ennen varsinaista verkkoon kytkentää. Kun sydän ei ole satunnaisessa jäännösmagneettisessa tilassa, kytkentähetkellä vuo ei nouse yhtä helposti kyllästysrajalle. Tämän seurauksena kytkentävirtasysäyksen huippuarvo pienenee huomattavasti, koska sydän on valmiiksi lähellä tasapainoista magnetointitilaa eikä synnytä suurta tasavirtakomponenttia kytkettäessä. Käytännössä esimagnetointi kasvattaa magnetointireaktanssia kytkentähetkellä ja toimii siten tehokkaana kytkentävirtasysäyksen vaimentimena. Päämuuntaja on teholtaan 27 MVA, 60 Hz ja

kytkentäryhmältään Ynd11. Päämuuntajan ensiöjännitteeksi on määritelty 11 kV ja toisiojännitteeksi 3 kV. Esimagnetointimuuntajan korkeampi ensiöjännite kompensoi esimagnetointipiirin vastuksissa ja kaapeleissa tapahtuvia jännitehäviötä, varmistaen päämuuntajan optimaalisen vuon tason ennen verkkoon kytkentää.

Muuntajien väliin asennetun sulakkeen tehtävänä on katkaista muuntajien välinen virta, jos esimagnetointimuuntaja vikaantuu. Samalla sulake suojaa myös päämuuntajaa. Huomioitavaa on se, että mitatussa piirissä tehon syöttö on kytketty esimagnetointimuuntajan alajännitepuolelle kolmiokytkentään. Näin ollen esimagnetointijärjestelmä toimii eritavalla, kuin alaluvussa 5.1.

## 7.2 Kytkentävirtasysäyksen tulokset ilman etuvastusta

Esimagnetointipiirin mittauksen ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin esimagnetointipiirin kytkentävirtasysäystä ilman piirin eteen kytkettävää etuvastusta. Ilman etuvastusta kytkentävirtasysäys pääsee nousemaan suuremmaksi aiheuttaen päämuuntajan sydämeen syvemmän kyllästystilan.



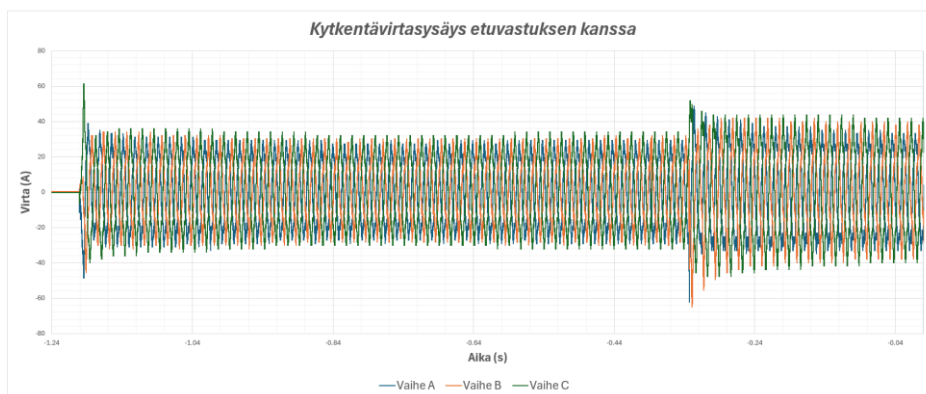
**Kuva 7.** Mitattu kytkentävirtasysäys ilman etuvastusta.

Kuvasta 7 voidaan todeta, että kytkentähetkellä syntyy suuri kytkentävirtasysäys. Vaiheiden välillä on huomattavissa selkeää eroa kytkentävirtasysäyksen suuruudessa, mutta tämä pystytään selittämään vaiheiden kytkentähetken epäsymmetrian avulla. Vaiheessa C ilmenee selkeästi suurin kytkentävirtasysäyksen huippuarvo, joka on noin 600 A. Samaa aikaan vaiheiden A ja B kytkentävirtasysäysten huippuarvot saavuttavat selkeästi

pienemmät arvot ja ne suuntautuvat käänteiseen suuntaan. Kytkevävirtasysäyksen vaimeneminen alkaa välittömästi ensimmäisten huippuarvojen jälkeen jokaisessa vaiheessa, mutta selkeästi hitain vaimeneminen tapahtuu vaiheessa B. Kytkevävirtasysäyksen jälkeen kuormitusvirta tasaantuu, mutta huomioitavaa on epäsymmetrisyys kuormitusvirrassa vaiheiden välillä. Tämä voidaan selittää tehomuuntajan magnetointipiirin epäsymmetrisyydellä.

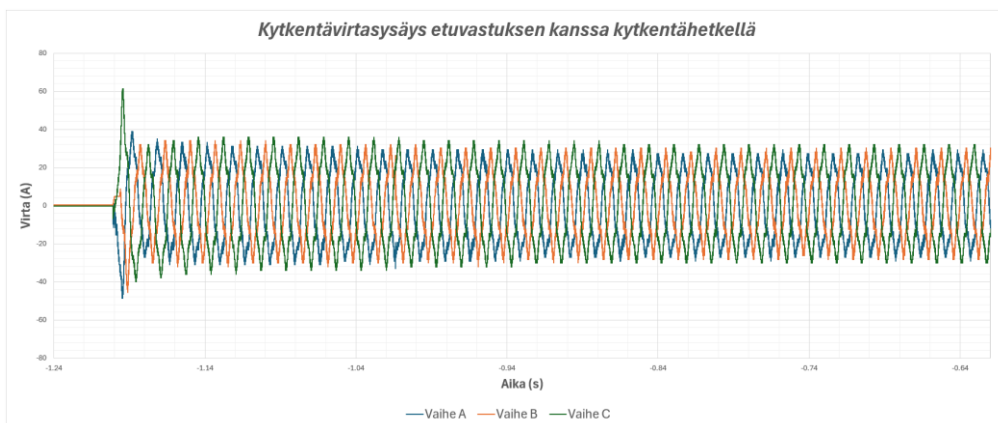
### 7.3 Kytkevävirtasysäyksen tulokset etuvastuksen kanssa

Mittauksen toisessa vaiheessa tutkittiin esimagnetointipiirin kytkevävirtasysäystä etuvastuksen kanssa. Esimagnetointimuuntajan eteen kytketyn etuvastuksen tehtävänä on puolittaa kytkeväjännite, jolloin magneettivuon kaksinkertaistuminen ei aiheuta kaksinkertaista kytkeväjännitteen kasvua suhteessa syöttöjännitteeseen. Etuvastuksia käytetään vain kytkevähetkellä ja ne ohitetaan ohituskontaktorilla viimeistään 4 s jälkeen kytkevähetkestä. Mittauksessa tämä aika on lyhyempi, koska tässä keskitytään itse kytkevävirtasysäyksen alun kytkevähetkellä ja ohitushetkellä. Kokonainen mittaustulos on esitettyä kuvassa 8.



**Kuva 8.** Kokonainen mittaustulos kytkevävirtasysäyksestä etuvastuksen kanssa.

Kuvasta 8 voidaan todeta, että kytkevähetkellä esiintyy kytkevävirtasysäys, mutta se on huomattavasti pienempi kuin ilman etuvastusta. Toinen kytkevävirtasysäys tapahtuu etuvastuksen ohitushetkellä. Kuvassa 9 on esitettyä tarkempi mittaustulos alun kytkevähetkestä.



**Kuva 9.** Mitattu kytentävirtasysäys etuvastuksen kanssa kytentähetkellä.

Kuvasta 9 voidaan todeta, että kytentävirtasysäyksen huippuarvo kytentähetkellä on noin 60 A vaiheessa C, jolloin vaiheiden A ja B kytentävirtasysäykset jäävät huippuarvoiltaan pienemmiksi käänteiseen suuntaan. Vaimeneminen on huomattavasti nopeampaa etuvastusten kanssa, kuin ilman etuvastusta, koska etuvastuksen resistanssi tuo vaikutusta piiriin. Kuvassa 10 on esitetty tarkempi mittaustulos ohitushetkestä.



**Kuva 10.** Mitattu kytentävirtasysäys etuvastuksen kanssa ohitushetkellä.

Kuvasta 10 voidaan todeta, että ohitushetkellä syntyy myös kytentävirtasysäys, joka on suhteessa jopa isompi kuin alun kytentähetken kytentävirtasysäys. Se on huippuarvoltaan noin 65 A ja suurin kytentävirtasysäys tapahtuu vaiheessa B. Esimagnetointijärjestelmän kuormitusvirta ohitushetken jälkeen vaimenee huomattavasti hitaammin kuin alun kytentähetkellä. Vaihevirtojen välillä on havaittavissa epäsymmetrisyyttä, kuten ilman etuvastusta mitatusta tilanteesta.

## 7.4 Mittausten analyysi

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että kytkentävirtasysäys on selvästi pienempi silloin, kun etuvastus on mukana kytkennässä. Etuvastus rajoittaa virran äkillistä nousua puolittamalla kytkentäjännitteen ja estää täten muuntajan sydäntä menemästä syvään kyllästykseen. Tämän seurauksena magneettivuon kasvu on hallitumpaa, transienttivaiheen vaimenemisaika puolittuu ja virta asettuu kuormitusvirran tasolle nopeasti. Ilman etuvastusta huomattiin lisäksi, että suurempi kytkentähetken kytkentävirtasysäys pidentäisi myös sen vaimenemista ja palautumista normaalitilaan. Näin voidaankin olettaa, että ilman etuvastusta sydän menee syvään kyllästymiseen, jolloin kytkentävirtasysäyksen huippuarvo kasvaa ja vaimeneminen pitenee. Etuvastuksen kanssa syntyy osittaista kyllästymistä, mutta huomattavasti vähemmän kuin ilman etuvastusta. Tämä voidaan huomata suoraan kytkentähetken kytkentävirtasysäyksen huippuarvon suuruudesta. Etuvastuksen kanssa syntyy myös ohitushetkellä kytkentävirtasysäys, mutta se on käytännössä samaa tasoa kuin kytkentähetkellä. Molemmissa mittauksissa on selkeästi havaittavissa epäsymmetrisyyttä kuormitusvirrassa. Oskilloskooppikuvat mittausvaiheen tuloksista on esitettyä liitteissä 1 ja 2. On huomioitavaa, että yksi virtamuuntaja oli kytketty väärinpäin mittaustilanteessa, minkä vuoksi vaiheen C virta-arvot näkyvät käänteisenä molemmissa mittauksissa.

## 8 Simulointimallin parametrien määrittäminen

Tässä luvussa syvennytään tehomuuntajien parametrien laskemiseen, jotta voidaan todentaa simulointimallien toimivuus mittauksissa. Luvussa keskityttiin esimagnetointimuuntajan ja päämuuntajan parametreihin, joiden avulla saadaan varmistettua, että parametrit ovat mitoitettu oikein niin yksi- kuin kolmivaiheisissa simulointimalleissa. PSCAD-vertailumallissa parametrisointia tullaan hyödyntämään yksivaiheisessa mallissa, mutta kolmivaiheiseen vertailumalliin tarkempaa parametrien määrittelyä ei tarvitse tehdä valmiiden muuntajakomponenttien ansiosta. Parametrit laskettiin T-mallilla, jolloin ne vastaavat tähti-tähtikytkettyä ekvivalenttipiiriä. Kolmivaiheisessa LTspice-simulointimallissa tämä huomioidaan kolmiokytkennässä kolminkertaisilla arvoilla.

### 8.1 Esimagnetointimuuntajan parametrien laskeminen

Esimagnetointimuuntajan parametrien laskeminen alkaa ohjearvojen nimeämisellä. Ohjearvoilla tarkoitetaan asiakkaan vaatimia suunnitteluohjeita, joiden avulla saadaan tarkka kuva muuntajan käyttötarkoituksesta ja vaatimuksista. Ohjearvoja ovat esimerkiksi teho, jännitetasot, kytkentäryhmä ja verkkotaajuus. Ohjearvoja noudattamalla suunnittelussa tehdään tarkempi sähköinen laskelma, jossa määritellään esimerkiksi käämien kierrosluvut, häviöt ja oikosulkuimpedanssi. Näitä arvoja kutsutaan takuuarvoiksi. Takuu- ja ohjearvot muodostavat muuntajien nimellisarvot. Esimagnetointimuuntajan nimellisarvot esitettynä taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Esimagnetointimuuntajan nimellisarvot.

Esimagnetointimuuntajan nimellisarvot	
Teho	35 kVA
Kytkentäryhmä	Yd11
Jännitetasot	11.55 kV / 690 V
Taajuus	50 Hz
Tyhjäkäyntihäviöt	200 W
Kuormitushäviöt	900 W
Tyhjäkäyntivirta	0.70 %
Oikosulkuimpedanssi	5 %

Taulukko 6 esittää esimagnetointimuuntajan nimellisarvot, joiden pohjalta saadaan laskettua esimagnetointimuuntajan parametrit simulointivaiheeseen. Muuntajien parametrit ovat eroteltu alaviitteessä olevan tunnisteiden avulla, jolloin alaviitteen ensimmäinen numero viittaa muuntajaan. Tässä tapauksessa numero yksi viittaa esimagnetointimuuntajaan ja numero kaksi päämuuntajaan. Seuraava numero kuvastaa, onko arvo laskettu ensiöpuolelle vai toisiopuolelle. Tämän lisäksi alaviitteessä on tarkennus liittyen yläjännite tai alajännitepuoleen tarvittaessa.

Esimagnetointimuuntajan parametrisointi aloitetaan muuntosuhteen  $\eta_1$  määrittelyllä. Huomioitavaa on, että alajännitepuoli toimii ensiökääminä yhtälöllä

$$\eta_1 = \frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{0.690 \text{ kV}}{11.55 \text{ kV}} = 0.0598, \quad (18)$$

missä  $U_{11}$  on esimagnetointimuuntajan ensiökäämin nimellisjännite ja  $U_{12}$  on esimagnetointimuuntajan toisiökäämin nimellisjännite.

Ensiökäämin virta  $I_{11,\text{käämi}}$  määritellään yhden pylvään näennäistehon ja ensiökäämin jännitteen suhteesta. Ensiökäämin jännite on sama kuin ensiön nimellisjännite kolmioon kytketyissä käämeissä, jolloin se lasketaan seuraavasti

$$I_{11,\text{käämi}} = \frac{S_{1,\text{pylväs}}}{U_{11}} = \frac{11.667 \text{ kVA}}{0.690 \text{ kV}} = 16.9087 \text{ A}, \quad (19)$$

missä  $S_{1,\text{pylväs}}$  on esimagnetointimuuntajan yhden pylvään näennäisteho.

Toisiökäämin virta  $I_{12,\text{käämi}}$  määritellään samaan tapaan kuin ensiökäämin virta, mutta toisiökäämin vaihejännitteellä seuraavasti

$$I_{12,\text{käämi}} = \frac{S_{1,\text{pylväs}}}{U_{12,\text{käämi}}} = \frac{11.667 \text{ kVA}}{6.67 \text{ kV}} = 1.7495 \text{ A}, \quad (20)$$

missä  $U_{12,\text{käämi}}$  on esimagnetointimuuntajan toisiökäämin vaihejännite.

Koska alajännitepuolta syötetään ensiökääminä, esimagnetointimuuntajan nimellisvirta  $I_{n1}$  tulee laskea yhden pylvään näennäistehon ja ensiökäämin vaihejännitteen suhteessa yhtälöllä

$$I_{n1} = \frac{S_{1,\text{pylväs}}}{U_{11,\text{käämi}}} = \frac{11.667 \text{ kVA}}{0.3984 \text{ kV}} = 29.2859 \text{ A}, \quad (21)$$

missä  $U_{11,\text{käämi}}$  on esimagnetointimuuntajan ensiökäämin vaihejännite.

Esimagnetointimuuntajan tyhjäkäyntivirta  $I_{01}$  lasketaan nimellisvirran ja tyhjäkäyntivirran avulla yhtälöllä

$$I_{01} = I_{n1} \cdot 0.7 \% = 29.2859 \text{ A} \cdot 0.007 = 0.205 \text{ A}, \quad (22)$$

Esimagnetointimuuntajan kuormitushäviöt  $P_{k1}$  voidaan laskea ensiön ja toision kuormitushäviöiden avulla, jolloin ensiön ja toision kuormitushäviöt muodostavat kokonaiskuormitushäviöt seuraavasti

$$P_{k1} = P_{11} + P_{12} = 450 \text{ W} + 450 \text{ W} = 900 \text{ W}, \quad (23)$$

missä  $P_{11}$  on esimagnetointimuuntajan ensiökäämin kuormitushäviöt ja  $P_{12}$  on toisiökäämin kuormitushäviöt.

Kuormitushäviöiden kautta pystytään laskemaan ensiökäämin resistanssi  $R_{11}$  kuormitushäviöiden ja ensiökäämin virran neliön suhteen yhtälöllä

$$R_{11} = \frac{\frac{P_{11}}{3}}{I_{11,\text{käämi}}^2} = \frac{\frac{450 \text{ W}}{3}}{16.9087^2 \text{ A}} = 0.5247 \ \Omega. \quad (24)$$

Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssin avulla pystytään laskemaan ensiöpuolen yhden vaiheen resistanssi  $R_{11LV}$ , jolloin se tulee esittää kolmiokytkennässä

$$R_{11LV} = \frac{R_{11}}{3} = \frac{0.5247 \ \Omega}{3} = 0.17489 \ \Omega. \quad (25)$$

Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin yhden vaiheen resistanssi  $R_{12HV}$  lasketaan samaan tapaan kuin ensiökäämin yhden vaiheen resistanssi seuraavasti

$$R_{12HV} = \frac{\frac{P_{12}}{3}}{I_{12,\text{käämi}}^2} = \frac{\frac{450 \text{ W}}{3}}{1.7495^2 \text{ A}} = 49.005 \ \Omega. \quad (26)$$

Jotta esimagnetointimuuntajan toisiokäämin resistanssi saadaan simuloinnille sopivaan muotoon, tulee resistanssi redusoida toisiopuolelle seuraavasti

$$R'_{12HV} = R_{12HV} \cdot \eta_1^2 = 0.17498 \Omega. \quad (27)$$

Seuraavaksi määritetään esimagnetointimuuntajan oikosulkuimpedanssi  $Z_{sc1}$  ensiökäämin vaihejännitteen neliöllä suhteessa yhden pylvään näennäistehoon ja nimellisarvoissa esitetyn oikosulkuimpedanssin avulla

$$Z_{sc1} = \frac{U_{11,käämi}^2}{S_{1,pylväs}} \cdot 5\% = \frac{0.398^2 \text{ kV}}{11.667 \text{ kVA}} \cdot 0.05 = 0.6801 \Omega. \quad (28)$$

Oikosulkuimpedanssin avulla pystytään määrittelemään esimagnetointimuuntajan ensiökäämin reaktanssi  $X_{11}$  seuraavasti

$$X_{11} = \frac{\sqrt{Z_{sc}^2 - (R_{11LV} + R'_{12HV})^2}}{2} = \frac{\sqrt{0.680^2 - (0.1750 + 0.1750)^2}}{2} = 0.292 \Omega. \quad (29)$$

Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin yli oleva jännite  $U_{L1}$  määritellään seuraavasti

$$U_{L1} = I_{01} \cdot \frac{\sqrt{R_{11LV}^2 + X_{11}^2}}{1000} = 0.205 \cdot \frac{\sqrt{0.1750^2 + 0.2916^2}}{1000} = 69.705 \mu\text{V}. \quad (30)$$

Esimagnetointimuuntajan magnetointijännite  $U_{m1}$  pystytään täten laskemaan seuraavasti

$$U_{m1} = U_{11,käämi} - U_{L1} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} - 69.705 \mu\text{V} = 398.37 \text{ V}. \quad (31)$$

Esimagnetointimuuntajan magnetointijännitteen avulla pystytään laskemaan sydämen raudanhäviötä kuvaava ekvivalenttivastus  $R_{c1}$  seuraavasti

$$R_{c1} = \frac{U_{m1}^2}{\frac{P_{01}}{3}} = \frac{398.37^2 \text{ V}}{\frac{200 \text{ W}}{3}} = 2379.67 \Omega. \quad (32)$$

Esimagnetointimuuntajan sydämen ekvivalenttivastuksen avulla pystytään määrittelemään sydämen rautahäviövirta  $I_{c1}$ , jonka avulla saadaan määriteltyä tyhjäkäyntihäviöt. Tämä lasketaan yhtälöllä

$$I_{c1} = \frac{U_{m1}}{R_{c1}} = \frac{398.37 \text{ V}}{2379.67 \Omega} = 0.1674 \text{ A.} \quad (33)$$

Esimagnetointimuuntajan magnetointivirta  $I_{m1}$  pystytään laskemaan tyhjäkäyntivirran ja sydämen rautahäviövirran avulla seuraavasti

$$I_{m1} = \sqrt{I_{01}^2 - I_{c1}^2} = \sqrt{0.205^2 - 0.1674^2} = 0.1183 \text{ A.} \quad (34)$$

Kun on saatu magnetointivirta selvitettyä, pystytään magnetointijännitteen ja magnetointivirran suhteesta samaan esimagnetointimuuntajan magnetointireaktanssi  $X_{m1}$  selvitettyä yhtälöllä

$$X_{m1} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}} = \frac{398.37 \text{ V}}{0.1183 \text{ A}} = 3365.02 \Omega. \quad (35)$$

Magnetointireaktanssin pohjalta saadaan laskettua esimagnetointimuuntajan magnetointi-induktanssi  $L_{m1}$ , kun magnetointireaktanssi suhteutetaan kulmataajuuteen seuraavasti

$$L_{m1} = \frac{X_{m1}}{\omega} = \frac{3365.02 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 10.711 \text{ H.} \quad (36)$$

Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin hajavuon induktanssi  $L_{1L1}$  pystytään laskemaan magnetointireaktanssin suhteesta kulmataajuuteen

$$L_{1L1} = \frac{X_{11}}{\omega} = \frac{0.292}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.928 \text{ mH.} \quad (37)$$

Kun magnetointi-induktanssi ja hajavuon induktanssi tunnetaan, pystytään laskemaan esimagnetointimuuntajan ensiökäämin induktanssi  $L_{11LV}$  seuraavasti

$$L_{11LV} = L_{m1} + L_{1L1} = 10.711 \text{ H} + 0.928 \text{ mH} = 10.712 \text{ H.} \quad (38)$$

Esimagnetointimuuntajan toisiokäämin redusoitu induktanssi  $L'_{12HV}$  taas lasketaan ensiökäämin induktanssin suhteesta muuntosuhteen neliöön yhtälöllä

$$L'_{12HV} = \frac{L_{11LV}}{\eta_1^2} = \frac{10.7121 \text{ H}}{0.059755^2} = 2999.986 \text{ H}. \quad (39)$$

Lopulta pystytään laskemaan esimagnetointimuuntajan kytkentäkerroin, joka muodostuu magnetointi-induktanssin ja ensiökäämin induktanssin suhteesta

$$k_1 = \frac{L_{m1}}{L_{11LV}} = \frac{10.711 \text{ H}}{10.712 \text{ H}} = 0.999913. \quad (40)$$

KytKentäkertoimen ollessa  $k_1 \approx 1$  voidaan todeta, että esimagnetointimuuntaja on lähes ideaalinen muuntaja, jossa ei synny merkittäviä magneettivuon häviöitä.

## 8.2 Päämuuntajan parametrien laskeminen

Päämuuntajan parametrien laskenta toteutetaan samaan tapaan kuin esimagnetointimuuntajan parametrisointi. Huomioitavaa on kuitenkin se, että päämuuntaja kytketään piiriin yläjännitepuolelta. Päämuuntajan nimellisarvot esitettyinä taulukossa 7.

**Taulukko 7.** Päämuuntajan nimellisarvot.

Päämuuntajan nimellisarvot	
Teho	27 MVA
KytKentäryhmä	YNd11
Jännitetasot	11 kV / 3 kV
Taajuus	50 Hz
Tyhjäkäyntihäviöt	10 kW
Kuormitushäviöt	300 kW
Tyhjäkäyntivirta	0.091 %
Oikosulkuimpedanssi	15 %

Taulukossa 7 on esitettyinä päämuuntajan nimellisarvot, joiden avulla laskettiin simulointimalleja varten päämuuntajan parametrit. Parametrisointi aloitettiin päämuuntajan muuntosuhteen  $\eta_2$  määrittelyllä seuraavasti

$$\eta_2 = \frac{U_{21}}{U_{22}} = \frac{11 \text{ kV}}{3 \text{ kV}} = 3.636, \quad (41)$$

missä  $U_{21}$  on päämuuntajan ensiökäämin nimellisjännite ja  $U_{22}$  on päämuuntajan toisiokäämin nimellisjännite.

Seuraavaksi määritellään päämuuntajan ensiökäämin virta  $I_{21,\text{käämi}}$ , joka on samalla tähden kytketyissä käämeissä nimellisvirta  $I_{n2}$ . Päämuuntajan ensiökäämin virta määritellään yhden pylvään näennäistehon ja ensiökäämin vaihejännitteen suhteen

$$I_{21,\text{käämi}} = I_{n2} = \frac{S_{2,\text{pylväs}}}{U_{21,\text{käämi}}} = \frac{9 \text{ MVA}}{6.351 \text{ kV}} = 1417.1 \text{ A}, \quad (42)$$

missä  $S_{2,\text{pylväs}}$  on päämuuntajan yhden pylvään näennäisteho ja  $U_{21,\text{käämi}}$  on päämuuntajan ensiökäämin vaihejännite.

Seuraavaksi määritellään toisiokäämin virta  $I_{22,\text{käämi}}$ , joka saadaan samaan tapaan kuin ensiökäämin virta yhtälöllä

$$I_{22,\text{käämi}} = \frac{S_{2,\text{pylväs}}}{U_{22,\text{käämi}}} = \frac{9 \text{ MVA}}{3 \text{ kV}} = 3000.0 \text{ A}, \quad (43)$$

missä  $U_{22,\text{käämi}}$  on toisiokäämin vaihejännite kolmiokytkennässä.

Päämuuntajan tyhjäkäyntivirta  $I_{02}$  määritellään nimellisvirran ja tyhjäkäyntivirran avulla yhtälöllä

$$I_{02} = I_{n2} \cdot 0.0913 \% = 1417.1 \text{ A} \cdot 0.00091 = 1.2933 \text{ A}. \quad (44)$$

Jotta käämien resistansseja pystytään laskemaan, tulee selvittää tehohäviöiden muodostuminen. Päämuuntajan kokonaistehohäviöt  $P_{k2}$  lasketaan ensiökäämin ja toisiokäämin yhteenlasketuista kuormitushäviöistä seuraavasti

$$P_{k2} = P_{21} + P_{22} = 150 \text{ kW} + 150 \text{ kW} = 300 \text{ kW}, \quad (45)$$

missä  $P_{21}$  on päämuuntajan ensiökäämin kuormitushäviöt ja  $P_{22}$  on päämuuntajan toisiokäämin kuormitushäviöt.

Päämuuntajan kokonaistehohäviöiden avulla pystytään määrittelemään ensiökäämin vaiheresistanssi  $R_{21\text{HV}}$  yhtälöllä

$$R_{21HV} = \frac{\frac{P_{21}}{3}}{I_{21,käämi}^2} = \frac{\frac{150 \text{ kW}}{3}}{1417.1^2 \text{ A}} = 0.0250 \Omega. \quad (46)$$

Päämuuntajan toisiokäämin vaiheresistanssi  $R_{22LV}$  lasketaan samaan tapaan kuin ensiökäämin vaiheresistanssi yhtälöllä

$$R_{22LV} = \frac{\frac{P_{22}}{3}}{(\sqrt{3} \cdot I_{22,käämi})^2} = \frac{\frac{150 \text{ kW}}{3}}{(\sqrt{3} \cdot 3000)^2 \text{ A}} = 1.85 \text{ m}\Omega. \quad (47)$$

Huomioitavaa on, että  $I_{22,käämi}$  tulee kertoa  $\sqrt{3}$ , koska lasketaan T-mallin virtaa, jossa on ekvivalentti tähtikytkentä. T-mallissa toision vaiheresistanssi tulee redusoida toisiopuolelle muuntosuhteen neliössä seuraavasti

$$R'_{22LV} = R_{22LV} \cdot \eta_2^2 = 1.85 \text{ m}\Omega \cdot 3.636^2 = 0.0250 \Omega. \quad (48)$$

Päämuuntajan oikosulkuimpedanssi  $Z_{sc2}$  lasketaan yhtälöllä

$$Z_{sc2} = \frac{U_{21,käämi}^2}{S_{2,pylväs}} \cdot 15\% = \frac{6.351^2}{9} \cdot 0.15 = 0.6722 \Omega. \quad (49)$$

Ensiökäämin vaihereaktanssi  $X_{21}$  saadaan laskettua seuraavasti

$$X_{21} = \frac{\sqrt{Z_{sc2}^2 - (R_{21HV} + R'_{22LV})^2}}{2} = \frac{\sqrt{0.672^2 - (0.025 + 0.025)^2}}{2} = 0.3352 \Omega. \quad (50)$$

Kun on saatu selville ensiökäämin reaktanssi, pystytään laskemaan päämuuntajan ensiökäämin yli oleva jännite  $U_{L2}$  yhtälöllä

$$U_{L2} = I_{02} \cdot \frac{\sqrt{R_{21HV}^2 + X_{21}^2}}{1000} = 1.2932 \text{ A} \cdot \frac{\sqrt{0.0249^2 + 0.3352^2}}{1000} = 0.435 \text{ V}. \quad (51)$$

Ensiökäämin yli olevan jännitteen avulla pystytään määrittelemään päämuuntajan magnetointijännite  $U_{m2}$  seuraavasti

$$U_{m2} = U_{21,käämi} - U_{L2} = \frac{11 \text{ kV}}{\sqrt{3}} - 0.435 \text{ V} = 6.3504 \text{ kV}. \quad (52)$$

Magnetointijännitteen avulla pystytään määrittelemään päämuuntajan sydämen raudanhäviötä kuvaava ekvivalenttivastus  $R_{c2}$  yhtälöllä

$$R_{c2} = \frac{U_{m2}^2}{\frac{P_{02}}{3}} = \frac{6.3504^2 \text{ kV}}{\frac{10 \text{ kW}}{3}} = 12098.185 \Omega. \quad (53)$$

Päämuuntajan sydämen ekvivalenttivastuksen avulla pystytään määrittelemään päämuuntajan sydämen rautahäviövirta  $I_{c2}$ , jonka avulla saadaan määriteltyä tyhjäkäyntihäviöt. Tämä saadaan laskettua yhtälöllä

$$I_{c2} = \frac{U_{m2}}{R_{c2}} = \frac{6350.4 \text{ V}}{12098.185 \Omega} = 0.5249 \text{ A}. \quad (54)$$

Kun sydämen rautahäviövirta on määritelty, pystytään laskemaan päämuuntajan magnetointivirta  $I_{m2}$  yhtälöllä

$$I_{m2} = \sqrt{I_{02}^2 - I_{c2}^2} = \sqrt{1.2932^2 - 0.5249^2} = 1.1819 \text{ A}. \quad (55)$$

Nyt kun tiedetään magnetointijännite ja magnetointivirta, saadaan päämuuntajan magnetointireaktanssi  $X_{m2}$  yhtälöllä

$$X_{m2} = \frac{U_{m2}}{I_{m2}} = \frac{6350.4 \text{ V}}{1.1819 \text{ A}} = 5372.817 \Omega. \quad (56)$$

Magnetointireaktanssista saadaan eroteltua päämuuntajan magnetointi-induktanssi  $L_{m2}$  jakamalla se kulmataajuudella seuraavasti

$$L_{m2} = \frac{X_{m2}}{\omega} = \frac{5372.817 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 17.1022 \text{ H}. \quad (57)$$

Seuraavaksi on määriteltävä päämuuntajan käämin hajavuon induktanssin  $L_{2L1}$ , joka saadaan jakamalla käämin reaktanssi kulmataajuudella yhtälöllä

$$L_{2L1} = \frac{X_{21}}{\omega} = \frac{0.3352}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.067 \text{ mH}. \quad (58)$$

Käämin induktiivinen reaktanssi mahdollistaa päämuuntajan ensiöpuolen kokonaisinduktanssin  $L_{21HV}$  laskemisen yhtälöllä

$$L_{21HV} = L_{m2} + L_{2L1} = 17.1022 \text{ H} + 1.067 \text{ mH} = 17.1033 \text{ H}. \quad (59)$$

Päämuuntajan toisiokäämin induktanssi redusoidaan ensiökäämin puolelle yhtälöllä

$$L'_{22LV} = \frac{L_{21HV}}{\eta^2} = \frac{17.1033 \text{ H}}{3.636^2} = 1.2694 \text{ H}. \quad (60)$$

Viimeisenä lasketaan kytkentäkerroin päämuuntajan käämityksille hyödyntäen magne-  
tointi-induktanssia ja ensiökäämin induktanssia seuraavasti

$$k_2 = \frac{L_{m1}}{L_{21HV}} = \frac{17.1022 \text{ H}}{17.1033 \text{ H}} = 0.999937. \quad (61)$$

Päämuuntajan kytkentäkerroin on hieman suurempi kuin esimagnetointimuuntajalla,  
mikä tarkoittaa lähempänä ideaalia muuntajaa.

### 8.3 Muuntajien parametrien määrittelyt simulointimalleille

Simulointimallien parametrissa kaikkia arvoja ei tulla käyttämään, mutta aiemmin esitettyjen yhtälöiden avulla pystytään johtamaan yksi- ja kolmivaiheisen simulointimallin parametrit nimellisarvojen pohjalta. On siis tärkeää ymmärtää, miten parametrit simulointimalliin muodostuvat ja mitkä muuttujat vaikuttavat eri parametrien suuruuteen. Yksivaiheisen simulointimallin parametrien määrittely esitettyinä taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Yksivaiheisen simulointimallin parametrisointi.

YKSIVAIHEINEN SIMULOINTIMALLI			
<i>Selite</i>	<i>Tunnus</i>	<i>Sovitus</i>	<i>Arvo</i>
Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssi	$R_3$	$R_{11LV} \cdot 2$	0.350 $\Omega$
Päämuuntajan ensiökäämin resistanssi	$R_4$	$R_{21HV} \cdot \eta_1^2$	88.901 m $\Omega$
Päämuuntajan tyhjäkäyntihäviöitä vastaava resistanssi	$R_5$	$R_{c1} \cdot \eta_1^2$	43.20 $\Omega$
Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin hajavuoinduktanssi	$L_1$	$L_{1L1} \cdot 2$	1.857 mH
Päämuuntajan ensiökäämin induktanssi	$L_2$	$L_{21HV} \cdot \eta_1^2$	38.25 mH

Taulukosta 8 voidaan todeta, että lasketut arvot pitää suhteuttaa yksinkertaiseen T-malliin, jolloin saadaan pyöristetyt arvot yksivaiheiselle simulointimallille.

Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssi  $R_3$  vastaa esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssin häviöiden osuutta. Kun T-mallissa oletetaan, että ensiökäämin ja toisiökäämin resistiiviset häviöt ovat yhtä suuret, voidaan ensiökäämin resistanssi kertoa kahdella huomioiden molemmat käämit. Päämuuntajan ensiökäämin resistanssi  $R_4$  yksinkertaisessa simulointimallissa tulee redusoida syöttöpuolelle eli esimagnetointimuuntajan alajännitepuolelle, jolloin se tulee kertoa esimagnetointimuuntajan muunto-suhteen neliöllä. Päämuuntajan tyhjäkäyntihäviöitä vastaavalle resistanssille  $R_5$  ja päämuuntajan ensiökäämin induktanssille  $L_2$  tulee tehdä samoin, jolloin ne redusoidaan esimagnetointimuuntajan syöttöpuolelle. Kun esimagnetointimuuntajan hajavuon oletetaan jakautuvan tasan käämien välillä, molempien käämien hajavuon induktanssit ovat yhtä suuret. Tällöin esimagnetointimuuntajan kokonaishajavuon induktanssi on kaksi kertaa hajavuon induktanssi.

Seuraavaksi tarkastellaan kolmivaiheisen simulointimallin parametrisointia. Kolmivaiheisen simulointimallin parametrejä tullaan käyttämään LTspice- simulointiohjelmassa, mutta PSCAD-simulointiohjelmassa muuntajakomponentit laskevat valmiit parametrisarvot nimellisarvojen avulla. Kolmivaiheisen simulointimallin parametrisointi esitettynä taulukossa 9.

**Taulukko 9.** Kolmivaiheisen simulointimallin parametrisointi.

<b>KOLMIVAIHEINEN SIMULOINTIMALLI</b>			
<b>Selite</b>	<b>Tunnus</b>	<b>Sovitus</b>	<b>Arvo</b>
Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin resistanssi	$R_{11-13}$	$R_{11LV} \cdot 3$	0.5247 $\Omega$
Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin induktanssi	$L_{11-13}$	$L_{11LV} \cdot 3$	32.1364 H
Esimagnetointimuuntajan ensiökäämin rinnakkaisresistanssi	$R_{par1}$	$R_{c1} \cdot 3$	7139.0 $\Omega$
Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin redusoitu resistanssi	$R_{21-23}$	$R'_{12HV}$	0.1750 $\Omega$
Esimagnetointimuuntajan toisiökäämin redusoitu induktanssi	$L_{21-23}$	$L'_{12HV}$	2999.99 H
Päämuuntajan ensiökäämin resistanssi	$R_{31-33}$	$R_{21HV}$	0.02490 $\Omega$
Päämuuntajan ensiökäämin induktanssi	$L_{31-33}$	$L_{21HV}$	17.1033 H
Päämuuntajan ensiökäämin rinnakkaisresistanssi	$R_{par2}$	$R_{c2}$	12098.3 $\Omega$
Päämuuntajan toisiökäämin redusoitu resistanssi	$R_{41-43}$	$R'_{22LV} \cdot 3$	0.00556 $\Omega$
Päämuuntajan toisiökäämin redusoitu induktanssi	$L_{41-43}$	$L'_{22LV} \cdot 3$	3.8081 $\Omega$

Taulukosta 9 voidaan huomata, että kolmivaiheisessa simulointimallissa kytkentäryhmät vaikuttavat parametrisointiin. Näin voidaan todeta, että kolmioon kytketyt esimagnetointimuuntajan ensiökäämin ja päämuuntajan toisiökäämin parametrit tulee kolminkertaistaa.

#### 8.4 Etuvastuksen suuruuden määrittäminen

Esimagnetointipiirin eteen kytkettävän etuvastus on mitoitettava siten, että etuvastus puolittaa kytkentäjännitteen. Tällöin voidaan todeta, että vaikka kytkentähetkestä johdettava magneettivuo kaksinkertaistuisi, se ei kuitenkaan aiheuta syvää kyllästymistä jännitteen ja magneettivuon suhteen kautta. Huomioitavaa on, että kytkentähetkellä ainoastaan esimagnetointimuuntajan alajännitepuoli vaikuttaa jännitteen puolitukseen. Etuvastuksen määrittely aloitetaan yksinkertaistetulla kytkentävirran  $I_k$  määrittelyllä yhtälöllä

$$I_k = \frac{S_1}{U_1} = \frac{35 \text{ kVA}}{690 \text{ V}} = 50.725 \text{ A}, \quad (61)$$

missä  $S_1$  on syötettävän esimagnetointimuuntajan teho ja  $U_1$  on esimagnetointimuuntajan ensiökäämin jännite.

Seuraavaksi tulee mitoittaa jännitteen puolittuminen  $U_D$ , jolloin saadaan laskettua haluttu puolitetty jännite

$$U_D = \frac{U_{11}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_D\%}{100} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{50}{100} = 199.186 \text{ V}, \quad (62)$$

missä  $U_D\%$  vastaa jännitteen haluttua prosentuaalista pudotusta vastaavaa arvoa.

Kun tunnetaan kytkentävirta ja haluttu jännitetaso, saadaan laskettua etuvastuksen  $R_{\text{etuvastus}}$  suuruus yhtälöllä

$$R_{\text{etuvastus}} = \frac{U_D}{I_k} = \frac{199.186 \text{ V}}{50.725 \text{ A}} = 3.93 \Omega. \quad (63)$$

Etuvastuksen mitoituksessa tulee myös huomioida sen terminen kuorma, joka tarkoittaa käytännössä sen kuluttamaa tehoa. Etuvastuksen terminen kuormitusenergia  $E_{\text{etuvastus}}$  voidaan laskea ajan, etuvastuksen ja kytkentävirrän neliön suhteen seuraavasti

$$E_{\text{etuvastus}} = t \cdot R_1 \cdot I_k^2, \quad (64)$$

missä  $t$  on etuvastuksen päällä oloaika, eli käytännössä kuinka kauan etuvastus on käytössä ennen sen ohitushetkeä.

Tästä voidaan yhteenvetona todeta, että etuvastuksen resistanssi vaikuttaa suoraan kytkentävirtaan. Kytkentävirrän kasvaessa neliössä pienempi etuvastuksen resistanssi aiheuttaa suhteessa suuremman virran, joka saattaa ylittää etuvastuksen termisen virrankestoisuuden. Vastaavasti etuvastuksen suurempi resistanssi aiheuttaa kytkentävirrän pienenemisen ja merkittävän jännitehäviön esimagnetointimuuntajan ensiössä. Tästä seuraa, että ensiöjännite jää liian pieneksi ja magnetointivirta rajoittuu liikaa. Tämä johtaa siihen, että muuntajan sydän ei magnetoidu suunnitellusti, magneettivuo jää vajaaksi

ja toisiopuolelle indusoituva jännite alenee. Lisäksi etuvastuksen suurempi resistanssi aiheuttaa etuvastuksen ohitushetkellä suuremman kytkentävirtasysäyksen.

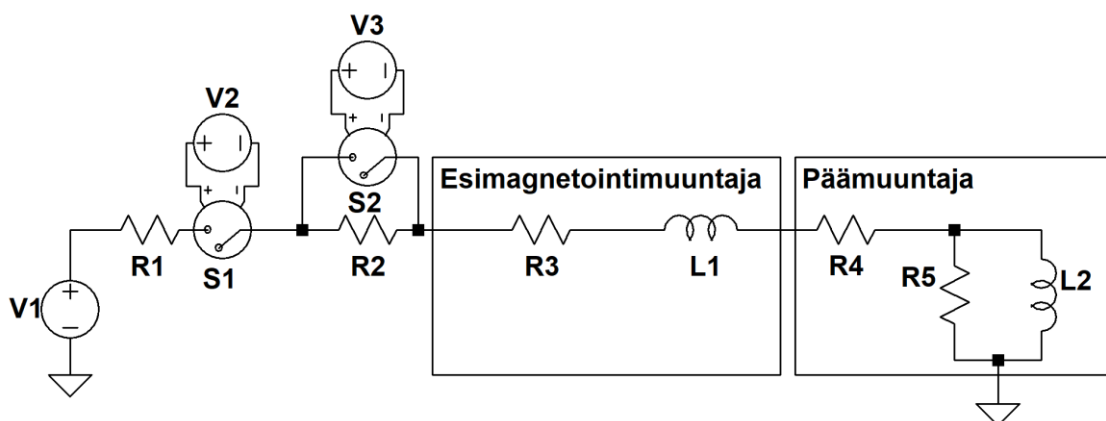
Yhteenvetona todetaan, että etuvastuksen mitoittaminen on tärkeä osa koko esimagnetointipiirin toimintaa, sillä väärin mitoitettu etuvastuksen resistanssi aiheuttaa haitallisia sivuvaikutuksia esimagnetointijärjestelmälle. Tulevissa simulointimalleissa käytetään käytännön mittauksissa käytettyä etuvastusta  $3.6 \Omega$ . Lisäksi tätä vertaillaan pienempään  $1.2 \Omega$  etuvastukseen ja suurempaan  $9 \Omega$  etuvastukseen.

## 9 Yksinkertainen simulointimalli - LTspice

Tässä luvussa käsitellään LTspice-ohjelmistolla tuotettua yksinkertaista simulointimallia yksi- ja kolmivaiheisena. Ensin muodostetaan simulointimallit, jonka jälkeen analysoidaan niiden antamat tulokset ja vertaillaan niitä luvun 7 esimagnetointipiirin mittaustuloksiin. Simulointimalli täten pohjautuu luvussa 7 esitettyyn esimagnetointijärjestelmään soveltuvin osin.

### 9.1 Yksivaiheinen LTspice-simulointimalli

LTspice-simulointimallin toteutus aloitettiin yksivaiheisen simulointimallin muodostamisella ja piirin etuvastusta säädeltiin simulointien aikana. Simulointimallin parametrit on esitetty luvussa 8. Simulointimalli esitettyä kuvassa 11.

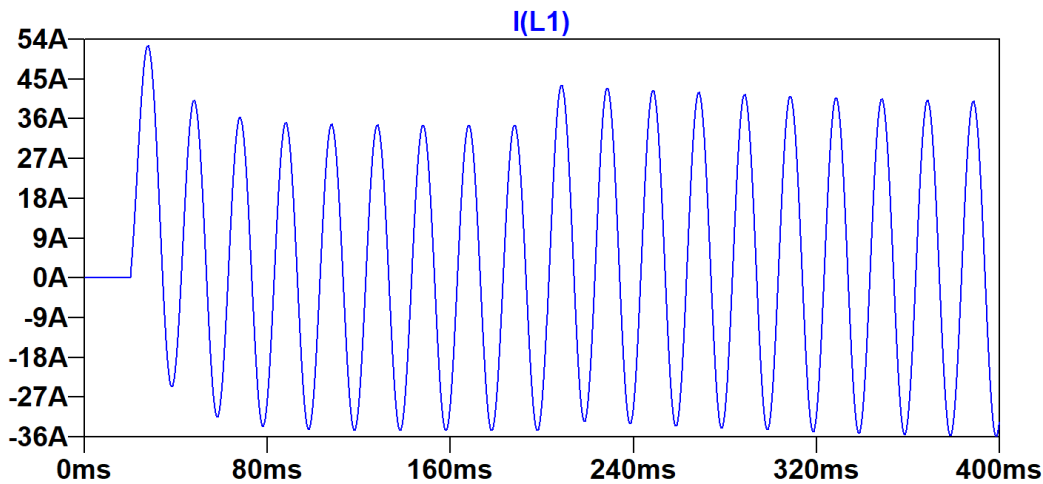


**Kuva 11.** Yksivaiheinen LTspice-simulointimalli.

Kuvassa 11 yksivaiheisen simulointimallin syöttö muodostuu  $V_1$  syöttöjännitteestä, johdinta kuvaavasta vastuksesta  $R_1$  sekä piiriä ohjaavasta kytkimestä  $S_1$ . Etuvastuksen ohituspiiri on mallinnettu etuvastuksella  $R_2$  ja sen ohittamisen mahdollistavalla kytkimellä  $S_2$ . Esimagnetointimuuntaja kuvataan sarjaan kytketyillä käämin resistanssilla  $R_3$  ja haja-  
vuon induktanssilla  $L_1$ . Päämuuntaja kuvataan ensiöpuolen resistanssina  $R_4$ , magne-  
tointi-induktanssina  $L_2$  ja tyhjäkäyntihäviöitä vastaavana rinnakkaisresistanssina  $R_5$ . Si-  
mulointimallissa on käytetty syöttöjännitteenä 690 VAC ja taajuutena 50 Hz.

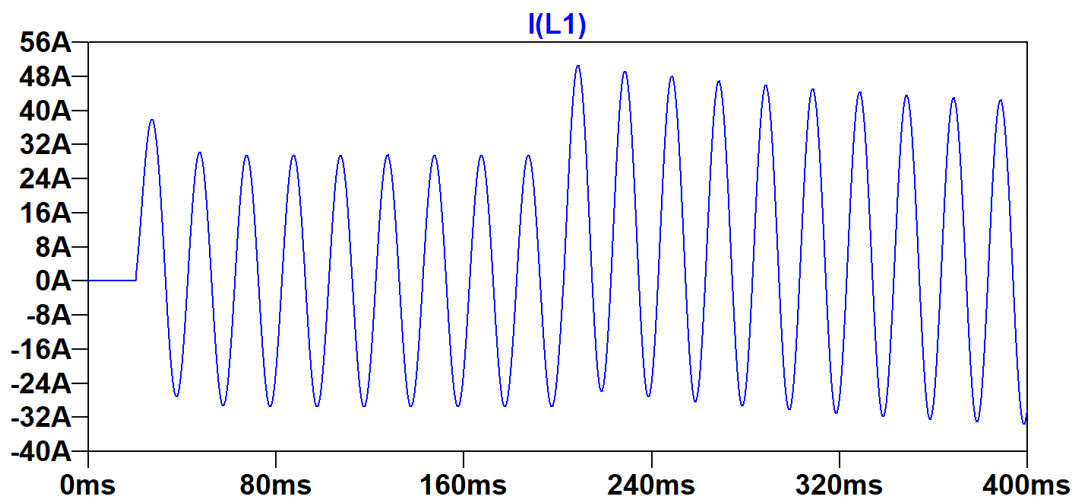
### 9.1.1 Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset

LTspice-simulointiohjelmistolla mitattiin yksivaiheista simulointimallia kolmella eri kokoisella etuvastuksella ja kirjataan tulokset ylös. Vastukset ovat suuruudeltaan tässä simuloinnissa  $1.2 \Omega$ ,  $3.6 \Omega$  ja  $9 \Omega$ . Simulointimallin mittauskohta on esimagnetointimuuntajan ensiökäämin induktanssin  $L_1$  kohdalta. Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset  $3.6 \Omega$  vastuksella esitettynä kuvassa 12.



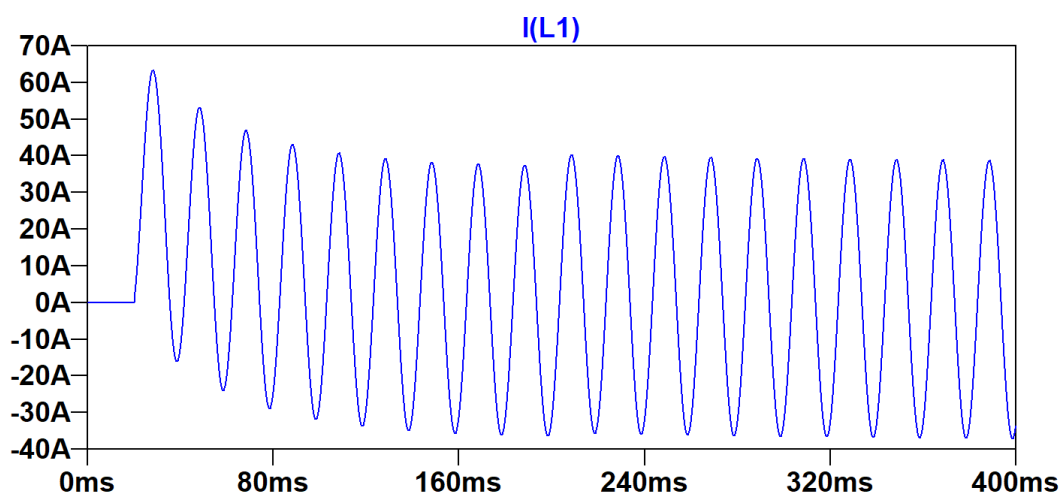
**Kuva 12.** Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos  $3.6 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 12 voidaan päätellä, että kytkentähetkellä syntyy kytkentävirtasysäys, jonka huippuarvo on suuruudeltaan 52.9 A. Kytkentävirtasysäys vaimenee nopeasti kuormitusvirran tasolle. Etuvastuksen ohitus tapahtuu ajanhetkellä 200 ms, jolloin on huomattavissa pieni kytkentävirtasysäys, joka on huippuarvoltaan pienempi kuin alun kytkentähetken kytkentävirtasysäys. Jälkimmäinen kytkentävirtasysäys kuitenkin vaimenee selkeästi hitaammin kuin kytkentähetken kytkentävirtasysäys. Vastaava simulaatio  $9 \Omega$  vastuksella esitettynä kuvassa 13.



**Kuva 13.** Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos  $9 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvassa 13 voidaan huomata kytkentähetkellä pienempi kytkentävirtasysäys kuin aiemmin esitettyssä simuloinnissa, mikä johtuu piirin resistiivisyyden kasvusta. Alun kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on 38.2 A. Ensimmäisen huippuarvon vaimeneminen on myös nopeampaa kuin  $3.6 \Omega$  vastuksella. Samaan aikaan myös kuormitusvirran taso laskee. Tässä simuloinnissa kuitenkin etuvastuksen ohitushetkellä syntyy selkeästi isompi kytkentävirtasysäyksen huippuarvo kuin alun kytkentähetkellä. Viimeisenä mitataan simulointimallia  $1.2 \Omega$  etuvastuksella, joka on esitettyä kuvassa 14.



**Kuva 14.** Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin tulos  $1.2 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 14 nähdään, että etuvastuksen arvon pienentäminen kasvattaa alun kytkentävirtasysäystä merkittävästi. Tällöin virran huippuarvoksi saadaan 62.3 A. Tämä on

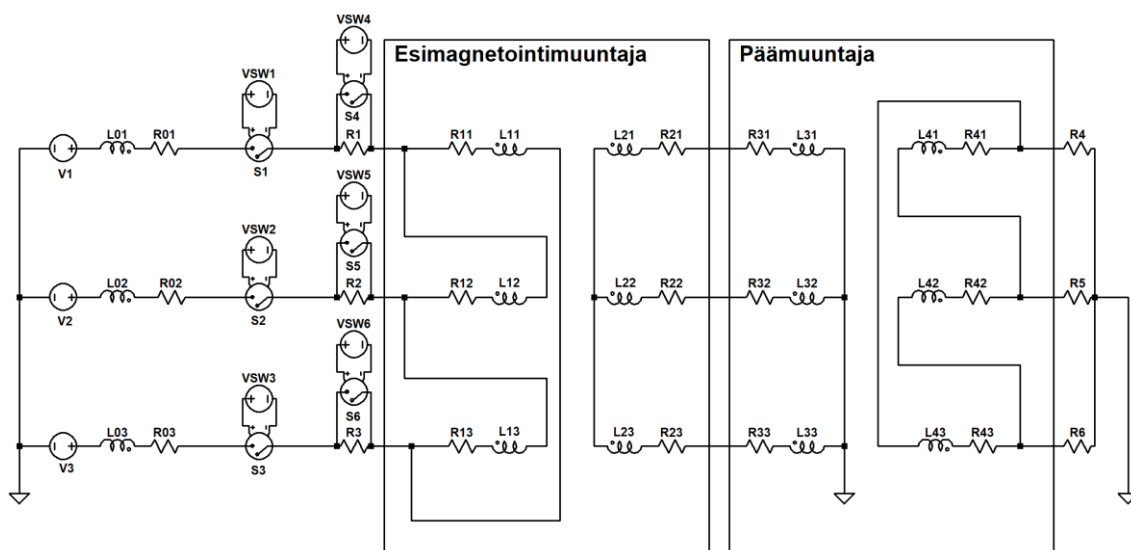
selkeästi suurempi kuin aiemmissa mittauksissa kuormitusvirran kasvaessa samassa suhteessa. Vaimeneminen tässä tapauksessa on myös selkeästi hitaampi kytkentähetkestä. Kuvaajasta voidaan todeta, että kytkentähetken virta sisältää tasavirtakomponentin, mikä ilmenee lievänä epäsymmetrisyytenä. Tässä mittauksessa ei kuitenkaan tapahdu merkittävää kytkentävirtasysäystä etuvastuksen ohitushetkellä, jolloin sen vaimenemista ei voida sen enempää analysoida.

### **9.1.2 Yksivaiheisen LTspice-simulointimallin analyysi**

Yksivaiheisen simulointimallin tuloksista voidaan todeta, että etuvastuksen suuruudella on selkeä vaikutus kytkentävirtasysäyksen ilmenemiseen niin alun kytkentähetkellä kuin etuvastuksen ohitushetkellä. Tämä voidaan yksinkertaisessa yksivaiheisessa simulointimallissa päätellä suoraan piirin resistanssin vaikutuksesta piirin kokonaisvirtaan. Kun piirin kokonaisvastus on suurempi, on myös piirin kokonaisvirta pienempi ja päinvastoin. Tämä vaikuttaa suoraan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen kytkentähetkellä. Sama ilmiö toistuu, kun etuvastus ohitetaan piiristä. Mitä suurempi etuvastus on, sitä suurempi ohitushetken kytkentävirtasysäys on. Samaan tapaan pieni etuvastus vaikuttaa suuresti alun kytkentähetken kytkentävirtasysäyksen suuruuteen, mutta se ei aiheuta ohitushetkellä merkityksellistä kytkentävirtasysäystä.

## **9.2 Kolmivaiheinen LTspice-simulointimalli**

Kolmivaiheinen LTspice-simulointimalli on muodostettu yksivaiheisen simulointimallin pohjalta siten, että siinä on otettu huomioon enemmän muuntajien parametrisointia. Simulointimallin mittaukset on tehty samaan tapaan, kuin yksivaiheisessa simulointimallissa, jolloin etuvastuksen suuruutta muokataan simulointien aikana. Kolmivaiheinen LTspice-simulointimalli on esitetty kuvassa 15.

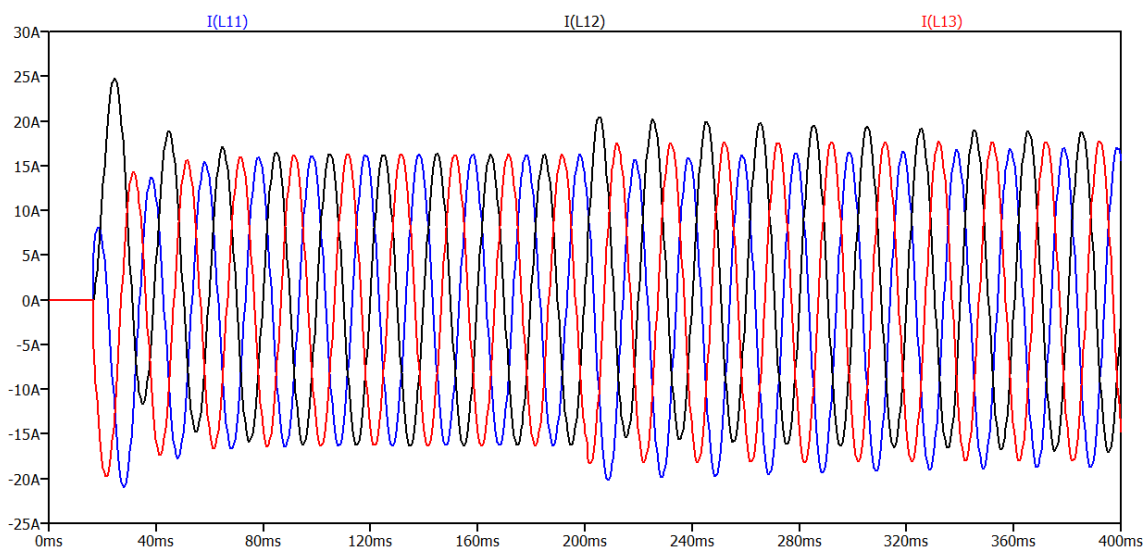


**Kuva 15.** Kolmivaiheinen LTSpice-simulointimalli.

Kuvassa 15 muodostetaan simulointimalli kolmesta erillisestä vaiheesta, joiden syöttöjännitteissä on  $120^\circ$  asteen vaihesiirto ja syöttöjännite on muokattu vaihejännitteeksi. Induktanssit  $L_{01-03}$  ja resistanssit  $R_{01-03}$  kuvastavat lähteen sisältämää induktanssia ja resistanssia. Kytkimet  $S_{1-3}$  kuvastavat piirin syöttöä sääteleviä kytkimiä, jotka on asetettu sulkeutumaan saman aikaisesti. Etuvastukset ovat kuvattuna resistansseilla  $R_{1-3}$  ja etuvastusten ohituspiirejä ohjaa kytkimet  $S_{4-6}$ . Esimagnetointimuuntaja on kytketty alajännitepuolelta, joka toimii tässä ensiökääminä. Tämä voidaan huomata simulointipiiristä, jossa käämit on kytketty kolmioon. Esimagnetointimuuntajan ensiökäämi on kuvattuna käämin resistansseilla  $R_{11-13}$  ja induktansseilla  $L_{11-13}$ . Ensiökäämin induktanssit sisältävät rinnakkaisresistanssit  $R_{par1}$ . Esimagnetointimuuntajan toisiokäämi on esitetty simulointimallissa resistansseilla  $R_{21-23}$  ja induktansseilla  $L_{21-23}$ . Päämuuntaja osaltaan on tähteen kytketty yläjännitepuolelta, joka toimii ensiönä. Ensiökäämi on esitetty resistansseilla  $R_{31-33}$  ja induktansseilla  $L_{31-33}$ . Ensiökäämin induktanssit sisältävät tässäkin tapauksessa rinnakkaisresistanssit  $R_{par2}$ . Toisiokäämi on esitetty kolmiokytkennässä resistansseilla  $R_{41-43}$  ja induktansseilla  $L_{41-43}$ . Piirin sulkee vastukset  $R_{4-6}$ , jotka on määritelty suuriksi, jotta päämuuntaja voidaan määritellä käyvän tyhjäkäynnillä. Simulointimallin parametrien määrittely on esitetty luvussa 8 samaan tapaan kuin yksivaiheisessa simulointimallissa. Simulointimallia syötetään 690 VCA jännitteellä ja 50 Hz taajuudella.

### 9.2.1 Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset

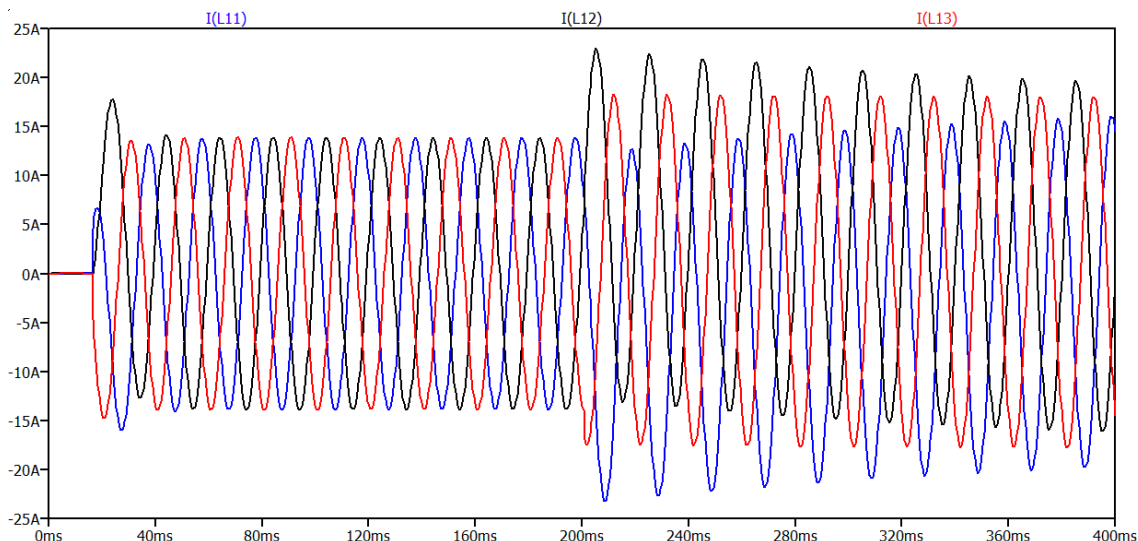
LTspice-simulointiohjelmistolla mitataan edellä esiteltyä kolmivaiheista simulointimallia kolmella eri kokoisella etuvastuksella ja kirjataan tulokset ylös, samaan tapaan kuin yksivaiheisessa simulointimallissa. Vastusten suuruudet tässä mittauksessa ovat  $1.2 \Omega$ ,  $3.6 \Omega$  ja  $9 \Omega$ , jotta ne ovat vertailukelpoiset yksivaiheiseen simulointimalliin. Mittauksessa tulokset otetaan esimagnetointimuuntajan toisiokäämin puolelta induktansseista  $L_{01-03}$ . Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset  $3.6 \Omega$  etuvastuksella esitettyinä kuvassa 16.



**Kuva 16.** Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset  $3.6 \Omega$  etuvastuksella.

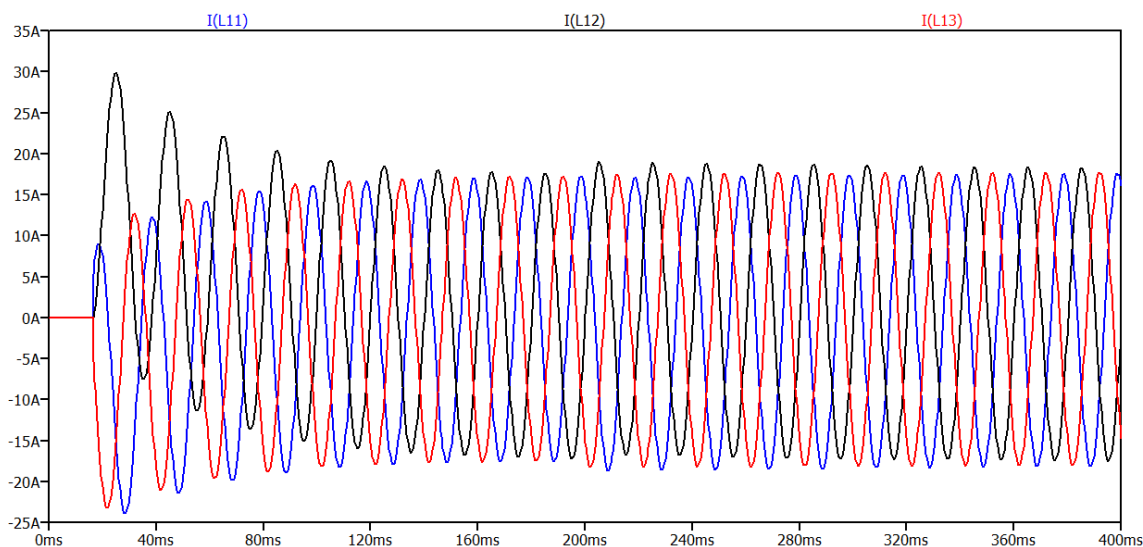
Kuvasta 16 voidaan todeta, että jokaisessa vaiheessa tapahtuu kytkentävirtasysäys heti kytkentähetkellä ja vaiheessa B syntyy suurin huippuarvo, joka on suuruudeltaan 24.79 A. Vaimeneminen on suhteellisen nopeaa ja kuormitusvirran arvo saavutetaan jo neljännellä jaksolla. Kuormitusvirta jokaisessa vaiheessa palautuu symmetriseksi ja mukailee sinikäyrää. Kun etuvastus ohitetaan, syntyy uusi kytkentävirtasysäys samaan tapaan kuin yksivaiheisessa simulointimallissa, mutta nyt vain kolmessa vaiheessa. Etuvastuksen ohitushetken suurin kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on 20.35 A ja se tapahtuu myös vaiheessa B. Vaimeneminen ohitushetken kytkentävirtasysäyksestä on selkeästi hitaampi kuin kytkentähetken kytkentävirtasysäyksestä. Vaimenemisessa on myös huomioitavaa

epäsymmetrisyys simuloinnin lopussa, joka on merkki vaimenemisen jatkumisesta. Vas-  
taava simulaatio  $9 \Omega$  etuvastuksella esitettynä kuvassa 17.



**Kuva 17.** Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset  $9 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 17 voidaan huomata sama ilmiö kuin yksivaiheisessa simulointimallissa, jolloin suuremmalla etuvastuksella alun kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on pienempi kuin aiemmassa simuloinnissa. Huippuarvo tässä mittauksessa on 17.79 A ja se syntyy vaiheessa A. Vaimeneminen on myös nopeampaa kuin aiemmassa simuloinnissa ja kytkentävirtasysäys vaimenee normaaliin kuormitusvirtaan heti ensimmäisen huippuarvon jälkeen. Ohitushetken kytkentävirtasysäys on tässä mittauksessa taas selkeästi suurempi kuin ensimmäinen kytkentävirtasysäys, jolloin se nousee huippuarvoon 23.12 A. Vaimeneminen tässäkin tapauksessa alkaa heti ensimmäisen huippuarvon jälkeen, mutta vaimeneminen on todella hidasta, kun iso etuvastus kytketään piiristä irti. Viimeisenä simuloidaan mallia  $1.2 \Omega$  etuvastuksella ja tulokset ovat esitettynä kuvassa 18.



**Kuva 18.** Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tulokset  $1.2 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 18 voidaan todeta, että alun kytkentähetken kytkentävirtasysäys on suurempi kuin aikaisemmissa simuloinneissa. Kytkentähetken kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on 29.8 A. Vaimeneminen on myös selkeästi hitaampaa kuin aikaisemmissa simuloinneissa, jolloin kytkentävirtasysäys ei ehdi vaimentua ennen ohitushetken kytkimen avaamista. Tämä ei kuitenkaan vaikuta ohitushetken virtasysäykseen, joka on yhtä merkityksellisen kuin yksivaiheisessa simulointimallissa.

### 9.2.2 Kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin analyysi

Kolmivaiheisen simulointimallin tuloksista pystytään selkeästi huomaamaan, että tulokset ovat lähes identtiset yksivaiheisen simulointimallin kanssa. Selkeä ero on kytkentävirtasysäysten huippuarvojen sekä kuormitusvirran suuruudessa, mutta tämä pystytään selittämään sillä, että kuormitusvirta ja kytkentävirtasysäys on mitattu kolmioon kytkentästä käämistä, jolloin se tulee kertoa  $\sqrt{3}$ . Korjauksen jälkeen kuormitusvirta vastaa samaa kuormitusvirtaa kuin yksivaiheisessa simulointimallissa.

### 9.3 LTspice-simulointimallien yhteenveto

Simulointimallien perusteella yksivaiheinen malli tarjoaa riittävän tarkat tulokset suunniteltuun käyttöön. Kolmivaiheinen simulointimalli on toisaalta tarkempi ja sillä

pystytään havainnollistamaan vaiheiden eroavaisuudet kytkentä- ja ohitushetkellä. Lisäksi kolmivaiheinen simulointimalli sisältää tarkemman parametrisoinnin kuin yksivaiheinen simulointimalli. Tässä huomioitavaa on myös se, että kolmivaiheisessa mallissa pystytään havainnollistamaan muuntajien kytkentäryhmiä ja maadoitustapoja, joita ei yksivaiheisella simulointimallilla pystytä huomioimaan. Kytkentäryhmien ja maadoitustavan vaikutus on myös merkittävä kytkentävirtasysäyksen suuruuteen, jolloin kolmivaiheinen simulointimalli antaa teoriassa tarkempia tuloksia. Kolmivaiheisen simulointimallin parametrisointi on kuitenkin huomattavasti haastavampi ja työläämpi toteuttaa kuin yksivaiheisen simulointimallin, koska huomioonotettavia piiriparametrejä ja kytkentävasta riippuvaisia parametrejä on enemmän piirissä.

Yhteenvetona LTspice-simulointiohjelmana on kuitenkin raskas ohjelmisto, sillä siihen tulee mallintaa yksinkertaisten komponenttien kautta haluttu malli. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että komponenttien mallintaminen vaatii paljon perehtymistä ja ulkoista laskentaohjelmaa parametrien mitoitukseen. Näin ollen tässäkin diplomityössä parametrien laskenta on jouduttu tekemään ulkoisen laskentaohjelma avulla. Lopuksi kuitenkin voidaan kuitenkin todeta, että LTspice-ohjelma on hyvä vaihtoehto kytkentävirtasysäyksen mallintamiseen, mikäli sen käyttö on vähäistä.

Vertailtaessa yksivaiheisen ja kolmivaiheisen simulointimallin tuloksia luvussa 7 esitettyihin mittaustuloksiin voidaan todeta, että tulokset vastaavat soveltuvin osin mitattuja käytännön arvoja ilmiön ja vaimenemisen suhteen. Selkeä eroavaisuus tulosten välillä on kytkentävirtasysäyksen huippuarvojen suuruus, jolloin käytännön mittauksessa ensimmäinen kytkentävirtasysäyksen huippuarvo on selkeästi korkeampi niin alun kytkentähetkellä kuin ohitushetkellä. Tämä pystytään selittämään sillä, että tässä simulointimallissa tehomuuntajan kyllästymistä ei pystytty toteuttamaan halutulla tavalla tutkimuksen laajuuden puitteissa. Tutkimukset osoittavat, että LTspice-ohjelmalla voidaan mallintaa tehomuuntajan kyllästymistä, mutta se ei ole tässä työssä tarpeen. Etuvastuksen käyttö estää muuntajan syvän kyllästymisen. Tämä pystytään huomaamaan kytkentävirtasysäyksen suuruudesta, jolloin kytkentävirtasysäys on ainoastaan kaksinkertainen

käytännön mittaustuloksissa ja puolitoistakertainen simulointimallin kanssa verrattuna kuormitusvirtaan. Tähän sopii vertailukohtana kuvan 7 kytkentävirtasysäys ilman etuvas-  
tusta käytännön mittaustilanteessa, kun kytkentävirtasysäys on noin 20 kertaa suurempi  
kuin kuormitusvirta. Lopuksi voidaan todeta, että vaikka kytkentävirtasysäyksen vaimen-  
eminen osoittaa käytännön mittauksen kanssa yhdenmukaista vaimenemisaikaa, tämä  
ei kuitenkaan ole täysin totuudenmukainen tieto. Vaimenemisen tarkkaan määritelmään  
tarvitaan sydämen kyllästymisen huomioiminen, jotta siitä saadaan tarkempi ja totuu-  
denmukaisempi.

Tässä tutkimuksessa kytkentähetki on määritelty satunnaisesti ja samaa kytkentähetkeä  
tullaan hyödyntämään kaikissa simuloinneissa, jolloin se on simulointimalleissa vakio.  
Tämä vahvistaa täten tarkoituksensa simulointimalleissa, kun käytännön mittauksissa  
ei myöskään otettu huomioon kytkentähetkeä.

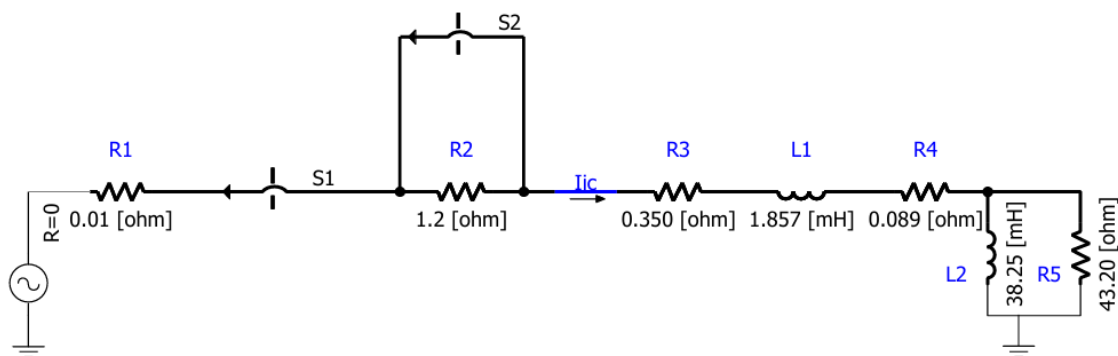
Päämuuntajan ja esimagnetointimuuntajan mitoittamisessa on käytetty nimellisarvoja  
50 Hz taajuudella. Käytännön mittaus suoritettiin 60 Hz järjestelmällä. Vaikka 60 Hz  
esimagnetointijärjestelmästä oli mittaustulokset todellisista arvoista käytettävissä, käy-  
tettiin silti 50 Hz nimellisarvoja pohjana tässä tutkimuksessa. Tämä johtuu siitä, että nor-  
maalitilanteessa käytetään simulointimallia ennen käytännön mittaustilannetta. Tämä  
tarkoittaa sitä, että vaikka käytännön mittaustulokset ovat todellisia arvoja, ne eivät kui-  
tenkaan vastaa käyttötarkoitusta tässä tutkimuksessa. Alun perin 60 Hz esimagnetointi-  
järjestelmä on mitoitettu 50 Hz esimagnetointijärjestelmän pohjalta ja laskelmien poh-  
jalta voidaan todeta, että taajuus ei vaikuta merkittävästi parametreihin, mutta pieni vai-  
kutis parametreihin on mahdollinen.

## 10 Simulointimallin varmentaminen – PSCAD

Tässä luvussa muodostetaan kaupallisella simulointiohjelmalla yksi- ja kolmivaiheiset vertailumallit, jolla varmennetaan ilmaisohjelmalla saadut simulointitulokset. Samalla arvioidaan ilmaisohjelman käytettävyyttä suhteessa kaupalliseen vaihtoehtoon. PSCAD-simulointiohjelma on todettu toimivaksi ohjelmaksi kytkentäviratsysäyksen mallintamiseen ja sitä on käytetty aiemmin vastaaviin projekteihin ja vertailuanalyytitarkoituksiin (Kolb ja muut, 2026, s. 3).

### 10.1 Yksivaiheinen PSCAD-vertailumalli

PSCAD-vertailumalli perustuu kuvassa 11 esitettyyn yksivaiheiseen LTspice-simulointimalliin. Yksivaiheinen vertailumalli on esitettyä kuvassa 19.

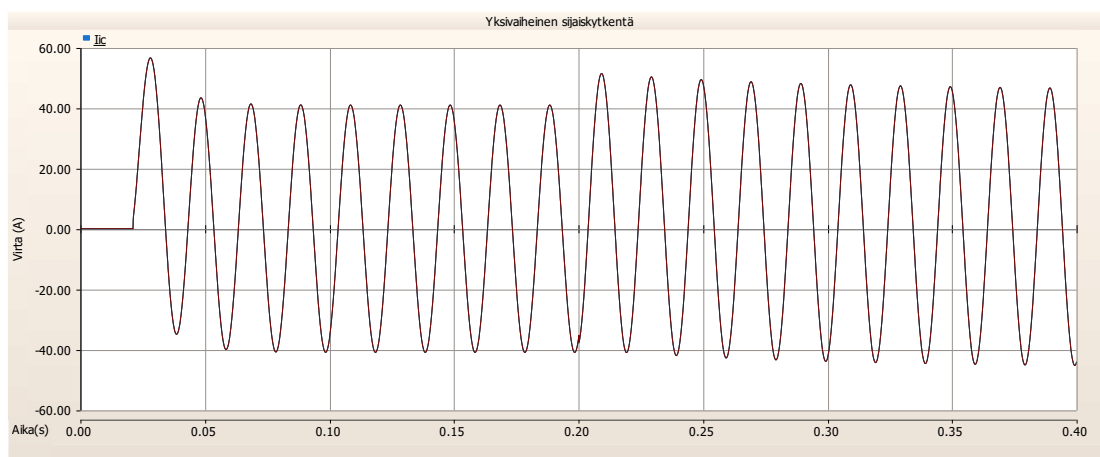


**Kuva 19.** Yksivaiheinen PSCAD-vertailumalli.

Kuvasta 19 voidaan huomata, että vertailumalli on identtinen kuvan 11 kanssa, jolloin sen vertailu ja analysointi on mahdollista alkuperäiseen ilmaisohjelmalla toteutettuun simulointimalliin. Vertailumallista pystytään kuitenkin selkeämmin hahmottamaan simuloinnin mittauskohta. Lisäksi huomioitavaa on, että LTspice-simulointiohjelmalla on käytetty tarkempia arvoja, kun PSCAD-simulointiohjelmalla on käytetty pyöristettyjä arvoja.

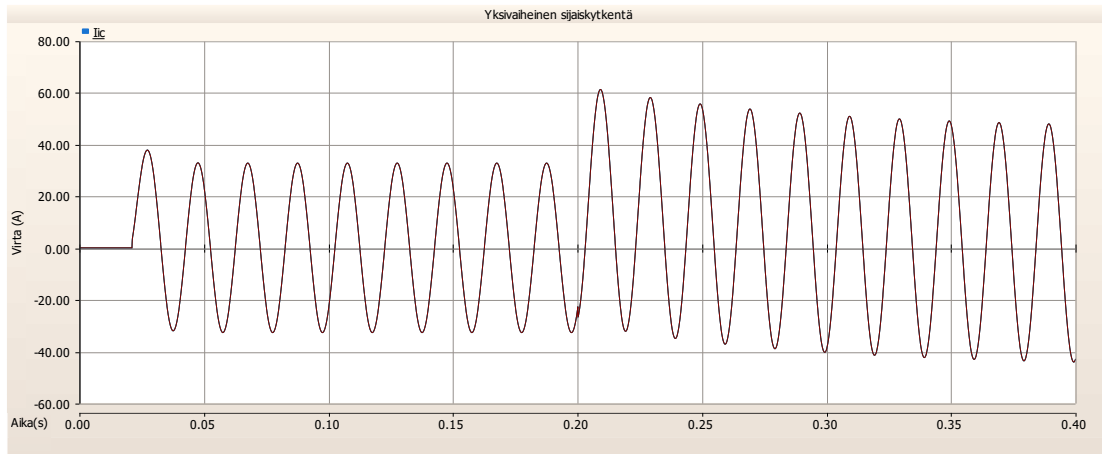
### 10.1.1 Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset

PSCAD-vertailumallin simuloinnit suoritetaan samaan tapaan kuin aluvuossa 9.1, jolloin mittausten edetessä etuvastuksen arvoa muutetaan ja näissä mittauksissa etuvastuksen suuruus on  $3.6 \Omega$ ,  $9 \Omega$  ja  $1.2 \Omega$ . Yksivaiheisen vertailumallin tulokset  $3.6 \Omega$  etuvastuksella esitettynä kuvassa 20.



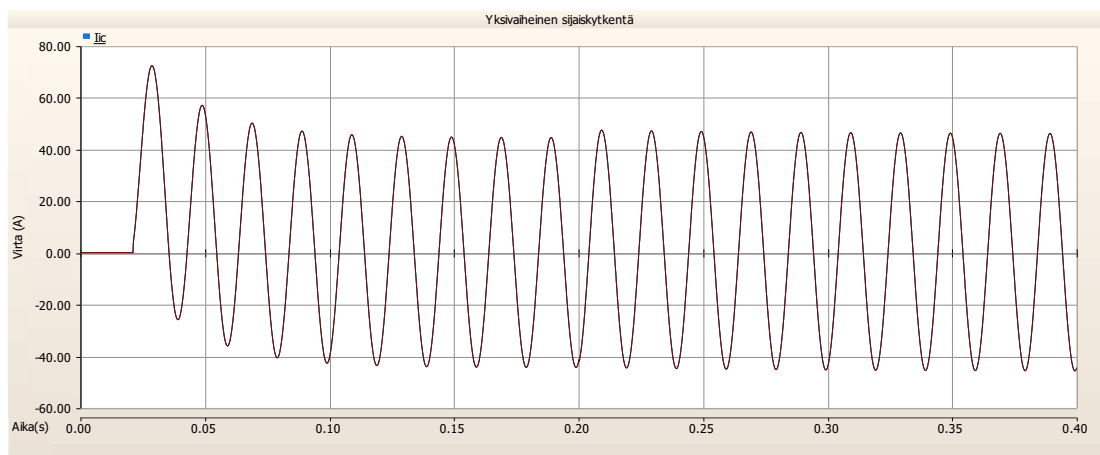
**Kuva 20.** Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $3.6 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 20 voidaan todeta, että alun kytkentähetkellä syntyy kytkentävirtasysäys ja sen huippuarvo on suuruudeltaan 57.2 A. Kytkentähetken kytkentävirtasysäys alkaa vaimentua heti ensimmäisen huippuarvon jälkeen. Etuvastuksen ohitushetkellä on huomattavissa toinen kytkentävirtasysäys, joka saavuttaa huippuarvon 50.3 A. Ohitushetken kytkentävirtasysäyksen vaimeneminen on kuitenkin selkeästi hitaampaa kuin kytkentähetken. Tämä sama ilmiö oli havaittavissa LTspice-simulointiohjelman yksivaiheisen simulointimallin tuloksissa. Kuvassa 21 on esitettynä vertailumallin tulokset  $9 \Omega$  etuvastuksella.



**Kuva 21.** Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $9 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 21 voidaan nähdä, että alun kytkentähetkellä syntyy kytkentävirtasysäys, jonka huippuarvo 38.2 A on pienempi kuin aiemmin esitetystä mittauksesta kuvassa 20. Suuremmalla vastuksella vaimentuminen on myös nopeampaa kytkentähetken huippuarvon jälkeen, jolloin kytkentävirtasysäys asettuu normaaliin kuormitusvirtaan heti ensimmäisen huippuarvon jälkeen. Ohitushetkellä tapahtuu toinen kytkentävirtasysäys, joka on selkeästi suurempi kuin alun kytkentähetken kytkentävirtasysäys. Tämä johtuu suuren resistanssin ohituksesta, joka pudottaa piirin resistanssia ja kasvattaa täten sen virtaa. Ohitushetken kytkentävirtasysäyksestä on myös huomattavissa selkeä tasavirtakomponentti, sillä virta on selkeästi toispuoleista. Viimeisenä suoritetaan sama simulointi  $1.2 \Omega$  vastuksella ja simuloinnin tulokset ovat esitettynä kuvassa 22.



**Kuva 22.** Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $1.2 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 22 voidaan todeta, että kytkentähetkellä syntyy suurin kytkentävirtasysäys vertailumallilla ja sen huippuarvo on 72.2 A. Vaimeneminen alkaa heti, mutta hitaasti. Kuvasta voidaan todeta, että kytkentähetken virta sisältää tasavirtakomponentin, mikä ilmenee virran epäsymmetrisyytenä. Tässä mittauksessa ei kuitenkaan tapahdu merkittävää kytkentävirtasysäystä etuvastuksen ohitushetkellä pienen etuvastuksen takia.

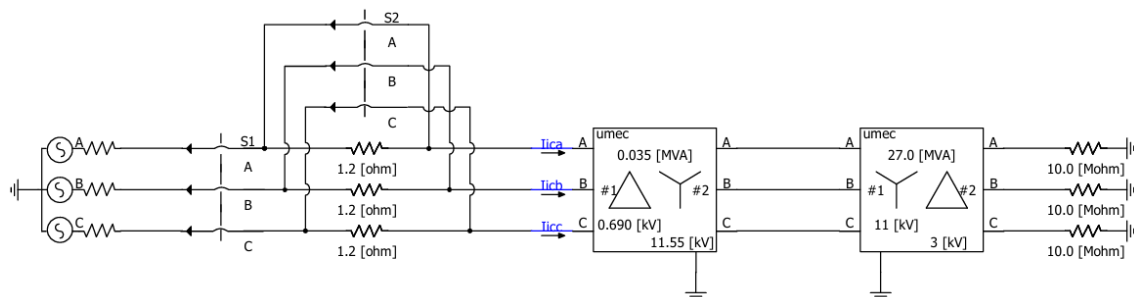
### 10.1.2 Yksivaiheisen PSCAD-vertailumallin analyysi

PSCAD-vertailumallin simulointi osoittaa, että vertailumalli on verrannollinen LTSpice-simulointimallin kanssa. Tulokset osoittavat yhdenmukaisuutta LT-spice simulointimalliin sekä alun kytkentähetken että ohitushetken kytkentävirtasysäyksien osalta. Lisäksi vaimenemiskäyttäytyminen on linjassa ilmaisen LTSpice-simulointimallin kanssa. Virtojen suuruudessa on kuitenkin eroavaisuuksia niin huippuarvoissa kuin kuormitusvirrassa. Tämä pystytään selittämään simulointiohjelman parametrisoinnilla, jolloin pieni ero virtojen arvoissa ei vaikuta mitoituksiin käytännön suunnittelu- ja mittaustilanteissa.

## 10.2 Kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli

Kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli on muodostettu kolmivaiheisen LTSpice-simulointimallin mallin pohjalta siten, että siinä on hyödynnetty PSCAD-ohjelmassa jo olemassa olevia muuntajakomponentteja. Kolmivaiheisen vertailumallin simuloinnit on toteutettu

samaan tapaan, kuin yksivaiheisessa vertailumallissa. Kolmivaiheinen vertailumalli on esitettyä kuvassa 23.

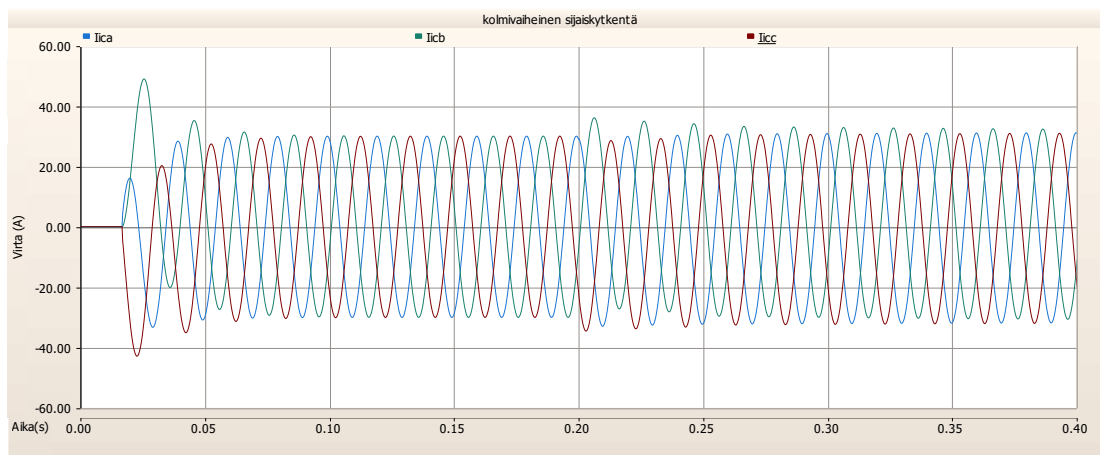


**Kuva 23.** Kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli.

Kuvassa 23 on esitettyä kolmivaiheinen PSCAD-vertailumalli, jossa tehon syöttö, johtimen resistanssi, piirin ohjaus kytkimillä sekä etuvastus ohituspiireineen on mallinnettu samaan tapaan kuin kuvan 15 kolmivaiheisessa LTSpice-simulointimallissa. Mittauskohta on määritelty esimagnetointimuuntajan ensiökäämiin. Esimagnetointimuuntaja on kytketty piiriin alajännitepuolelta kolmioon ja yläjännitepuolelta tähteen. Esimagnetointimuuntajan nimellisteho on 35 kVA, ja sen nimellisjännitteet ovat alajännitepuolella 690 V ja yläjännitepuolella 11.55 kV. Päämuuntaja on kytketty piiriin yläjännitepuolelta tähteen kytkettyjen käämien kautta ja alajännite puolella käämit on kytketty kolmioon. Päämuuntajan nimellisteho on 27 MVA ja jännitetasot yläjännitepuolella on 11 kV ja alajännitepuolella 3 kV. Piirin lopussa olevat suuret vastukset kuvastavat tässä sitä, että päämuuntaja käy tyhjäkäynnillä.

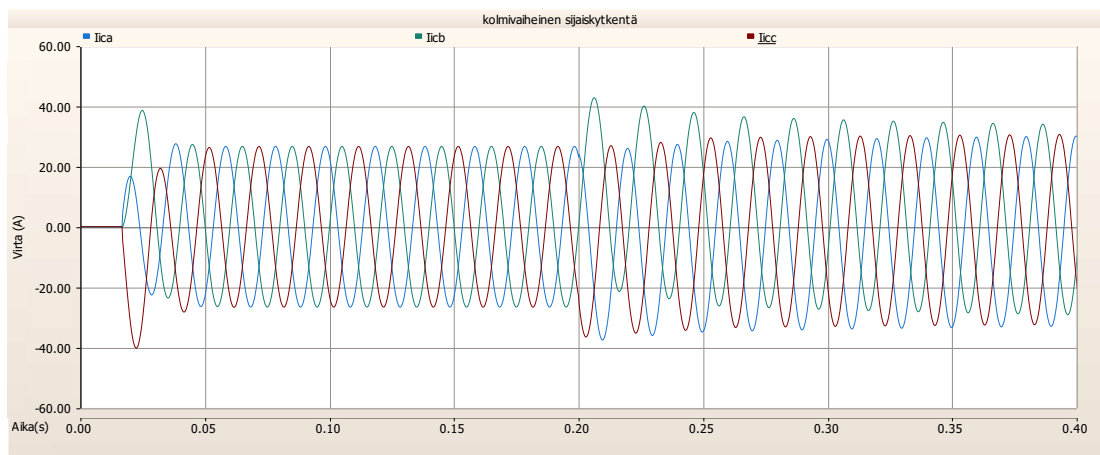
### 10.2.1 Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset

Seuraavaksi simuloidaan edellä esitettyä kolmivaiheista PSCAD-vertailumallia kolmella eri kokoisella etuvastuksella ja kirjataan tulokset ylös. Etuvastuksen suuruudet tässä mitauksessa ovat myös 1.2  $\Omega$ , 3.6  $\Omega$  ja 9  $\Omega$ , jotta ne ovat vertailukelpoiset yksivaiheiseen PSCAD-vertailumalliin. Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset 3.6  $\Omega$  etuvastuksella esitettyä kuvassa 24.



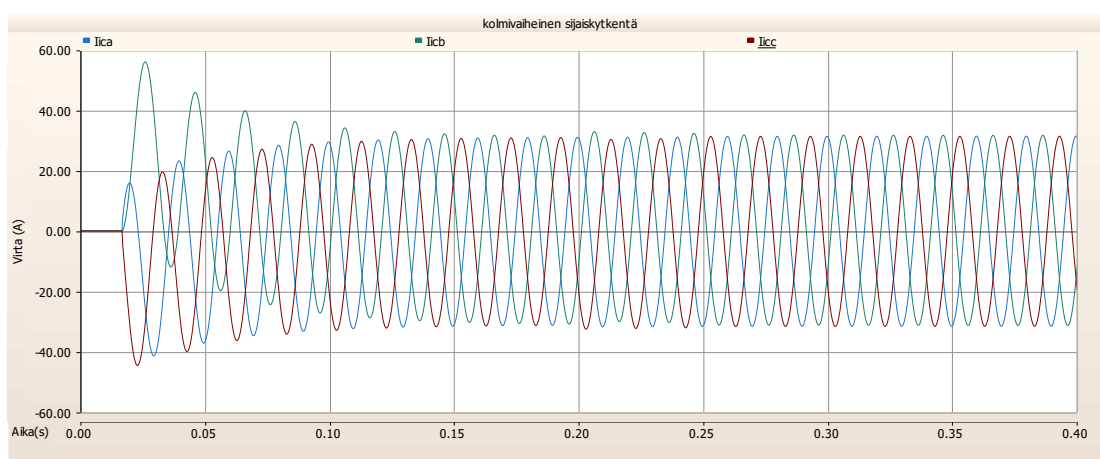
**Kuva 24.** Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $3.6 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 24 voidaan todeta, että alun kytkentähetkellä syntyy selkeästi suurin huippuarvo vaiheessa B ja se on suuruudeltaan 48.6 A. Vaimeneminen alkaa heti ensimmäisen huippuarvon jälkeen ja jo muutamassa jaksossa virta tasoittuu kuormitusvirran tasolle. Etuvastuksen ohitushetkellä syntyy seuraava kytkentävirtasysäys, jonka huippuarvo on suuruudeltaan 36.3 A. Toisen kytkentävirtasysäyksen vaimeneminen on kuitenkin hitaampaa kuin ensimmäisen, koska piirin kokonaisresistanssi pienenee. Huomioitavaa on kuitenkin, että ohitushetken kytkentävirtasysäyksen jälkeen kuormitusvirrassa on havaittavissa lievää epäsymmetriaa, joka johtuu hitaasta vaimenemisesta. Kuvassa 25 on esitettyä kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin simulointitulokset  $9 \Omega$  etuvastuksella.



**Kuva 25.** Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $9 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 25 voidaan nähdä, että alun kytkentähetken kytkentävirtasysäys on pienempi kuin aiemmassa simuloinnissa. Kytkentävirtasysäyksen huippuarvo asettuu arvoon  $37.7 \text{ A}$  ja vaimeneminen on nopeampaa, jolloin virta asettuu kuormitusvirran tasolle heti ensimmäinen huippuarvon jälkeen. Etuvastuksen ohitushetken kytkentävirtasysäys on huippuarvoltaan kuitenkin suurempi kuin alun kytkentähetkellä, jolloin se on  $44.1 \text{ A}$ . Vaimeneminen on tässä tapauksessa hitaampaa ohitushetken kytkentävirtasysäyksen jälkeen ja havaittavissa on virran epäsymmetrisyyttä. Kuvassa 26 on esitettyä simuloinnin tulokset kolmivaiheisella PSCAD-vertailumallilla  $1.2 \Omega$  etuvastuksella.



**Kuva 26.** Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tulokset  $1.2 \Omega$  etuvastuksella.

Kuvasta 26 voidaan todeta, että kytkentähetkellä syntyy simuloitien suurin kytkentävirtasysäys, jonka huippuarvo on 55.5 A. Kytkentähetken vaimeneminen on hitaampaa, kuin aiemmissa mittauksissa pienen etuvastuksen takia. Ohitushetkellä ei kuitenkaan synny merkittävää kytkentävirtasysäystä.

### **10.2.2 Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin analyysi**

Kolmivaiheisen PSCAD-vertailumallin tuloksista voidaan todeta, että ne vastaavat riittävän hyvin yksivaiheisen vertailumallin tuloksia kytkentähetken ja ohitushetken kytkentävirtasysäyksen huippuarvojen osalta. Tämä voidaan kuitenkin selittää PSCAD-simulointiohjelman muuntajakomponenteilla, jotka vaikuttavat kytkentävirtasysäyksen ilmentymiseen omien parametrien kautta.

Tulokset myös vastaavat riittäväällä tarkkuudella kolmivaiheisen LTspice-simulointimallin tuloksia. Eroavaisuutta kuitenkin löytyy kytkentävirtasysäyksen huippuarvoissa ja kuormitusvirran tasossa, mutta tämä pystytään selittämään muuntajakomponentin parametrisoinnilla. Valmiit muuntajakomponentit PSCAD-ohjelmassa ovat tarkempia, luotettavampia ja yksinkertaisempia muuntajan mallinnuksessa kuin yksinkertaisilla komponenteilla mallinnettu muuntajamalli LTspice-simulointiohjelmistolla. Huomioitavaa on, että kolmivaiheinen PSCAD-simulointimalli pystyy huomioimaan kolmioon kytketyt käämit suoraan simulointituloksissa, jolloin kuormitusvirtaa ei tarvitse kertoa erikseen  $\sqrt{3}$  kertoimella.

## **10.3 PSCAD-vertailumallien yhteenveto**

Tutkimuksen perusteella PSCAD-simulointiohjelma on suorituskyvyltään ja ominaisuuksiltaan erittäin kilpailukykyinen simulointiohjelmisto, jolla pystytään varmentamaan LTspice-ohjelman tulokset. PSCAD-ohjelma antaa tarkempia arvoja kytkentävirtasysäyksen ja kuormitusvirran osalta, mikä pystytään perustelemaan muuntajakomponentin tarkemmalla parametrisoinnilla. Näin ollen voidaan todeta, että PSCAD-ohjelma on kannattava hankita yrityksen käyttötarpeisiin, mikäli esimagnetointijärjestelmien

tilausmäärissä tapahtuu selkeää kasvua. Tämänhetkiselällä tilausmäärällä LTspice-ohjelma on kuitenkin riittävä ratkaisu yrityksen tarpeisiin, sillä se antaa alustavaa tietoa ja mahdollistaa kytkentävirtasysäyksen tulkinnan tarkemmin ja tehokkaammin, kuin nykyisessä muodossa on.

PSCAD-simulointiohjelmalla saadut tulokset vastaavat soveltuvin osin käytännön mitaustuloksia. Kyt kentähetken ja ohitushetken kytkentävirtasysäyksien huippuarvot ovat hieman pienempiä kuin käytännön mittauksessa, mutta tämä selittyy aiemmin mainitulla sydämen kyllästymisen puutteella. Simulointitulokset ovat kuitenkin PSCAD-simulointiohjelmalla lähempänä käytännön mitaustuloksia virran osalta verrattuna LTspice-simulointiohjelmaan.

Käytettävyyden osalta PSCAD-ohjelma on selvästi joustavampi, jolloin laskee kolmivaiheisessa simulointimallissa itse useita parametrejä muuntajan nimellisarvojen pohjalta. Näin ollen simulointiohjelma ei vaadi ulkoista laskentaohjelmaa simulointimallin toimivuuden takaamiseksi. Lisäksi PSCAD-ohjelma tarjoaa laajan komponenttikirjaston, joka tukee simulointiohjelman käytettävyyttä valmiiden komponenttien avulla. Valmiit komponentit auttavat myös tulevaisuudessa kehitystyötä, jolloin simulointimallia ei tarvitse rakentaa kokonaan uudestaan, mikäli sydämen kyllästymistä halutaan tutkia tarkemmin. LTspice-simulointiohjelmalla kyllästymisen huomioiminen vaatii kokonaan uuden simulointimallin, joka vaatii tuotekehitystä. Lisäksi LTspice-ohjelmalla kytkentäryhmien muutokset vaativat simulointimalliin muutoksia, kun taas PSCAD-simulointiohjelmalla kyseessä on vain muuntajakomponentin määrittelymuutos. PSCAD-simulointiohjelman parempi käytettävyys vaikuttaa myös sen käyttöönottoon kohdeyrityksen sisällä. Yksinker taisten muuntajakomponenttien sisäistäminen on tehokkaampaa ja näin ollen piirin muokkaaminenkin on helpompaa ja nopeampaa tarvittaessa. Huomioitavaa on myös, että käsin tehty laskenta LTspice-simulointiohjelmalla saattaa aiheuttaa enemmän virheitä, jolloin PSCAD-simulointiohjelman automatisoitu muuntajaparametrien laskenta nopeuttaa työtä ja parantaa laskennan luotettavuutta.

## 11 Johtopäätökset

Tulevaisuudessa mikroverkkojen määrä tulee kasvamaan uusiutuvien energialähteiden ja kasvavien kuormien määrän kasvaessa. Mikroverkkojen suosio aiheuttaa tarvetta erilaisille uusille ratkaisuille mikroverkon toiminnan ja sähkön laadun ylläpitämiseen. Usein mikroverkkoa tukee tehomuuntaja, joka pystyy takaamaan pienemmälle eristetylle verkolle korkean jännitetason. Usein mikroverkot ovat joko liitoksissa jakeluverkkoon tai sitten ne toimivat omana erillisenä saarekkeena, jolloin tehomuuntajan rooli korostuu. Kytkevävirtasysäys on yksi suurimmista riskeistä mikroverkon toiminnalle. Tehomuuntajan ja sille kytketyn esimagnetointijärjestelmän oikean mitoituksen avulla saadaan tämä riski minimoitua, kun pystytään estämään sydämen kyllästyminen (saturaatio).

Diplomityön ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä oli, että kuinka paljon tehomuuntajan rakenteen suunnittelulla pystytään vaikuttamaan kytkentävirtasysäyksen suuruuteen? Tehomuuntajan rakenteella ja mitoituksella on ratkaiseva rooli kytkentävirtasysäyksen muodostumisessa. Keskeisimmät tähän vaikuttavat tekijät ovat käämijohtimien virrantiheys, sydämen magneettivuon tiheys, tehomuuntajan oikosulkuteho sekä sydämen korkeuden ja käämin halkaisijan suhde.

Diplomityön toisena tutkimuskysymyksenä oli, että kuinka paljon eroavaisuuksia on kaupallisen ja ilmaisen simulointiohjelman välillä liittyen käytettävyyteen? Käytettävyyden osalta tutkimuksen kaupallinen simulointiohjelma on selkeästi joustavampi kuin ilmainen simulointiohjelma. Kaupallisen simulointiohjelman sisällä ohjelma pystyy itse laskemaan parametrejä, kun ilmaisessa simulointiohjelmassa tämä tulee suorittaa ulkoisen laskentaohjelman avulla. Lisäksi kaupallinen simulointiohjelma tarjoaa laajan komponenttikirjaston, joka tukee simulointiohjelman käytettävyyttä valmiiden komponenttien avulla. Ilmaisella simulointiohjelmalla muuntajamallit tulee rakentaa yksinkertaisten komponenttien avulla.

Kolmantena ja viimeisenä tutkimuskysymyksenä oli, että kuinka paljon simulointimallit eroavat toisistaan ilmaisella simulointiohjelmalla, kun verrataan yksivaiheista ja

kolmivaiheista simulointimallia? Vertailtaessa mittauksissa esitettyjä simulointimalleja voidaan todeta, että yksivaiheinen simulointimalli antaa riittävän tarkat tulokset siihen tarkoitukseen, johon simulointimallia tullaan käyttämään. Kolmivaiheinen simulointimalli on toisaalta tarkempi yksityiskohtaisemman parametrisoinnin ansiosta. Lisäksi kolmivaiheisella simulointimallilla pystytään havainnollistamaan vaiheiden käyttäytymistä alun kytkentähetkellä ja etuvastuksen ohitushetkellä.

Jatkotutkimusaiheena diplomityöstä esiin nousi sydämen kyllästymisen huomiointi kytkentävirtasysäyksen mallintamisessa. Tämä vaatii tarkempaa tutkimusta tehomuuntajan sydänmateriaalin mallinnuksesta ja mittauksesta, jotta pystyttäisiin toteuttamaan todellisuutta kuvaava kytkentävirtasysäys vaimenemisen kanssa. Tämä kuitenkin vaatii myös useampia käytännön mittauksia, jolloin pystytään selvittämään tarkemmin niin jäännösvuon suuruus kuin jännitteen tila kytkentähetkellä. Näiden parametrien avulla saataisiin selkeästi tarkempia simulointituloksia. Tämän diplomityön tulokset ovat alustavia kytkentävirtasysäyksen mallintamisesta.

Diplomityön rajoitteina oli juuri kytkentävirtasysäyksen mallintamisessa muuntajan sydämen materiaalien ominaisuuksien tiedonpuute. Jotta kyetään mallintamaan mahdollisimman tarkka muuntajan sydämen kyllästyminen, olisi tähän tarvittu tarkempaa tietoa käytetyistä sydänmateriaaleista ja niiden testituloksista. Näin ollen päädyttiin luomaan yksinkertainen simulointimalli ilman kyllästymistä, koska voitiin olettaa, että sydän ei tutkimuksen viitekehysten sisällä milloinkaan kyllästy (saturoidu).

## Lähteet

- Adly, A. (2001). Computation of inrush current forces on transformer windings. *IEEE transactions on magnetics*, 37(4), 2855–2857. <https://doi.org/10.1109/20.951327>
- Altun, H., Sünter, S., & Aydoğmuş, Ö. (2021). Modeling and analysis of a single-phase core-type transformer under inrush current and nonlinear load conditions. *Electrical engineering*, 103(6), 2961–2972. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01283-9>
- Analog. (2026). LTspice simulator. Noudettu 20.02.2026 osoitteesta <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- ATPDraw. (2026). The graphical preprocessor to ATP Electromagnetic Transients Program. Noudettu 20.02.2026 osoitteesta <https://www.atpdraw.net/>
- Basu, K., & Asghar, A. (2008). Reduction of magnetizing inrush current in a delta connected transformer. *IEEE*, 35–38. <https://doi.org/10.1109/PECON.2008.4762441>
- Cavallera, D., Oiring, V., Coulomb, J., Chadebec, O., Caillault, B., & Zgainski, F. (2014). A New Method to Evaluate Residual Flux Thanks to Leakage Flux, Application to a Transformer. *IEEE transactions on magnetics*, 50(2), 1005–1008. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2282175>
- Chen, H., Dou, Z., Yu, J., Chen, W., Sun, P., & Zhang, C. (2023). Research on residual flux measurement method for power transformers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2656(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2656/1/012021>
- Chiesa, N., Høidalen, H. K., Lambert, M. & Martinez, M. (2011). Calculation of Inrush Currents – Benchmarking of Transformer Models. *IPST International Conference on Power Systems Transients*. 1–8.
- Dogan, R., Jazebi, S., & de Leon, F. (2016). Investigation of Transformer-Based Solutions for the Reduction of Inrush and Phase-Hop Currents. *IEEE transactions on power electronics*, 31(5), 3506–3516. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2459032>
- European Union. (2019). Commission Regulation (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers. Noudettu 08.03.2026 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/548/oj>

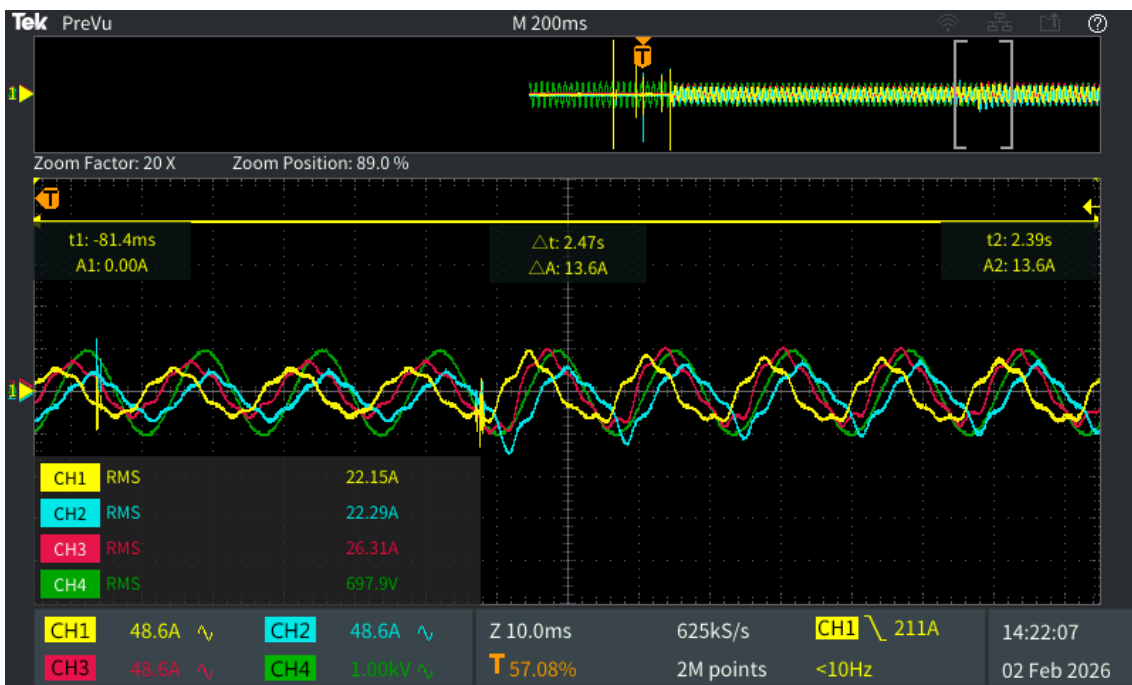
- Fofana, I., & Hadjadj, Y. (2018). Power Transformer Diagnostics, Monitoring and Design Features. *Energies (Basel)*, 11(12), 1–5. <https://doi.org/10.3390/en11123248>
- Ge, W., & Wang, Y. (2018). Simulation and Impact Analysis of Remanent Flux on Power Transformer Inrush Current. *IEEE*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INT-MAG.2018.8508471>
- Girgis, R. S., & teNyenhuis, E. G. (2007). Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers. *IEEE*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.386291>
- Harlow, J. H. (2012). Electric Power Transformer Engineering (3rd Edition). *CRC Press*, 28.
- Heathcote, M. (2007). J and P Transformer Book - A Practical Technology of the Power Transformer (13th Edition). *Elsevier*, 42, 54, 514–522.
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P., & Sinivuori, E. (2009). Tutki ja kirjoita (15., uudistettu painos.). *Kustannusosakeyhtiö Tammi*, 134–140.
- Hongtao, R. (2021). Simulation analysis of inrush current in no load closing of transformer in Hydropower Station. *Energy reports*, 7, 1175–1181. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.147>
- Høidalen, H. K., Mork, B. A., Gonzalez, F., Ishchenko, D., & Chiesa, N. (2009). Implementation and verification of the Hybrid Transformer model in ATPDraw. *Electric power systems research*, 79(3), 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.003>
- Islam, M. M., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2021). A Saturated Amorphous Alloy Core-Based Inrush Current Limiter to Eliminate Inrush Currents and Restrain Harmonics during Transformer Energization. *IEEE transactions on industry applications*, 57(6), 6634–6645. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3114665>
- Jamali-Abnavi, A., & Hashemi-Dezaki, H. (2021). Evaluating the electromagnetic forces on the electric arc furnaces' power cables under various operation conditions. *Electric power systems research*, 201, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107553>
- Kolb, J., Hatlo, M., & Nestli, T. (2026). Resonant overvoltage challenges during pre-magnetization energization of power transformers. *Electric power systems research*, 252, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112415>

- Kurki, M. (1968). Muuntajan kytkentävirran vaikutus virtamuuntajiin ja releiden toimintaan. [Diplomityö, Sähkötekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Oy Strömberg Ab], 76. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2020113025562>
- Laranja, N. D. F., Barcelos, S. L., Saavedra, O. R., de Matos, J. G., & Bento, R. G. (2024). Analysis of Inrush Currents in Power Transformers of Microgrids. *IEEE*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/ROPEC62734.2024.10876954>
- Lenz, M., & Schmidt, T. (2011). Coils and transformers - often used but seldomly explained correctly. 1–7. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1107.2684>
- Li, D., Zhou, J., Zhang, Z., Yang, Y., Dong, Z., He, W., Pei, X., Gao, J., Chen, S., & Pan, Z. (2025). Research on the Remanence Measurement Method of Transformers Based on the Degaussing Hysteresis Loop. *Applied sciences*, 15(10), 4. <https://doi.org/10.3390/app15105375>
- Ling, P., & Basak, A. (1988). Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer. *IEEE transactions on magnetics*, 24(6), 3217–3222. <https://doi.org/10.1109/20.92380>
- Mikhak-Beyranvand, M., Rezaeealam, B., Faiz, J., & Rezaei-Zare, A. (2019). Impacts of ferroresonance and inrush current forces on transformer windings. *IET electric power applications*, 13(7), 914–921. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5193>
- Mitra, J., Xu, X., & Benidris, M. (2020). Reduction of Three-Phase Transformer Inrush Currents Using Controlled Switching. *IEEE transactions on industry applications*, 56(1), 890–897. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2955627>
- Nadhirah, N. F., Halim, H. A., Hussin, N., Amiruddin, M., & Noorpi, N. S. M. (2022). Mitigation on Sympathetic Inrush Current Phenomena between Parallel-Connected Transformers using PSCAD/EMTDC. *IEEE*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/POWER-CON53406.2022.9929634>
- Nițu, M., Nicolae, I., Dina, L., & Mircea, P. (2024). Power Transformer Inrush Current Analysis: Simulation, Measurement and Effects. *Applied sciences*, 14(23), 11. <https://doi.org/10.3390/app142310926>
- Nyberg, F. (2026). Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu.
- PSCAD. (2026). The World's Most Advanced Tool for Power Systems EMT Simulations. Noudettu 20.02.2026 osoitteesta <https://www.pscad.com/software/pscad/overview>

- Sima, W., Liu, Y., Sun, P., Zhou, Y., Peng, D., & Yang, M. (2018). The Effect of Different Core Materials on Transformer Inrush Currents. *IEEE*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/INT-MAG.2018.8508702>
- Song, Y., Jia, H., Xu, X., & Yu, L. (2017). Simulation analysis of inrush current of three phase transformer based on MATLAB. *IEEE*, 3983–3985. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979197>
- Zifan, Z., Gan, W., Ronghui, C., Shanru, Z., Weihong, Y., Kaiming, L., & Binbin, L. (2020). PSCAD Simulation of Transformer Inrush Current with Different Influencing Factors. *IEEE*, 85–90. <https://doi.org/10.1109/AEEES48850.2020.9121478>
- Wang, C., Wu, J., Wang, J., & Zhao, W. (2016). Reliability Analysis and Overload Capability Assessment of Oil-Immersed Power Transformers. *Energies (Basel)*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.3390/en9010043>
- Wei, C., Li, X., Yang, M., Ma, Z., & Hou, H. (2019). Novel Remanence Determination for Power Transformers Based on Magnetizing Inductance Measurements. *Energies (Basel)*, 12(24), 1. <https://doi.org/10.3390/en12244616>

## Liitteet

### Liite 1. KytKentävirtasäys etuvastuksen kanssa



## Liite 2. Kytöntävirtasäys ilman etuvastusta

