



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JARKKO VIRTANEN
PÄÄMUUNTAJAN RESONANSSIHERKKYYDEN MUUTTUMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori
Seppo Valkealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. kesäkuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

VIRTANEN, JARKKO: Päämuuntajan resonanssiherkkyyden muuttuminen

Diplomityö, 64 sivua, 7 liitesivua

Maaliskuu 2015

Pääaine: Sähköenergia

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: ferroresonanssi, remanenssivu, kytkentäsystävyyden

Ferroresonanssilla tarkoitetaan ilmiötä, jossa energia värähtelee sähköverkon kapasitanssin ja epälineaarisen induktanssin välillä. Ferroresonanssi-ilmiö voi esiintyä vain sellaisessa sähköverkossa, joka sisältää rautasydämellä varustetun käämin ja riittävän kapasitanssin, joka on kytkeytyneenä joko sarjaan tai rinnan tämän induktanssin kanssa.

Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkossa on törmätty päämuuntajan ferroresonanssiin kuormittamattoman muuntajan 110-kilovoltin kantaverkkoon kytkemisen yhteydessä. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää ferroresonanssin syntymiseen vaikuttavia parametreja Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa sekä tutkia sähköverkon ferroresonanssiherkkyyden muuttumista tulevan muuntajainvestoinnin jälkeen. Ferroresonanssi-ilmiötä tutkittiin työssä Matlabin Simulink-ohjelmistolla tehdyllä tietokonesimulaatiomallilla, jonka rakentamisessa käytettiin avuksi Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkosta tallennettuja mittaustuloksia. Mittauksissa tallennettiin päämuuntajan vaihevirtoja sekä –jännitteitä päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisistä.

Tietokonesimulaatiotuloksien yhteenvetona havaittiin päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä syntyvään ferroresonanssiin vaikuttavan merkittävimmin muuntajan jäännösmagneettivuon suuruus (remanenssivu) sekä muuntajan sähköverkkoon kytkemisen ajanhetki. Harjavallan suurteollisuuspuiston nykyisillä 110-kilovoltin kytkentä katkaisijoilla päämuuntajan sähköverkkoon kytkeminen sekä sähköverkosta poiskytkeminen tehdään täysin satunnaisella jännitekäyrän hetkellä. Näin ollen remanenssivuon suuruuteen sekä muuntajan sähköverkkoon kytkemisen ajanhetkeen ei pystytä vaikuttamaan. Tästä johtuen päämuuntajan rautasydän saattaa ajautua muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana pitkälle saturaatioalueella ja mahdollistaa näin ferroresonanssi-ilmiön syntymisen teollisuusalueen sähköverkossa.

Diplomityön lopputuloksena esitetään investoitavaksi kolmivaiheisia ohjattuja katkaisijoita päämuuntajien ensiöpuolille, joiden avulla pystytään hallitsemaan muuntajien rautasydämien kyllästymisen sekä ferroresonanssi-ilmiön syntyminen. ABB Oy:n tarjoaman Switchsync T183 katkaisijakokonaisuuden avulla päämuuntajan jäännösmagneettisuus pystytään mittaamaan ja laskemaan jäännösmagneettisuudesta optimaalinen ajanhetki muuntajan sähköverkkoon kytkemiselle.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

VIRTANEN, JARKKO: The Change of the Resonance Sensitivity at Power Transformer

Master of Science Thesis, 64 pages, 7 Appendix pages

March 2015

Major: Electrical Energy

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: ferroresonance, residual flux, inrush current

Ferroresonance refers to the phenomenon in which energy is vibrating between the grid capacitance and the nonlinear inductance. Ferroresonance phenomenon can only occur in a electricity network, which contains iron cored coil and a sufficient capacitance, which is connected either in series or in parallel with the nonlinear inductance.

Boliden Harjavalta Oy's electrical grid has encountered a ferroresonance phenomenon when power transformer is switched on to electricity network. Aim of this study was to investigate the parameters that affect to the creation of ferroresonance phenomenon in the BOHAs electricity network, as well as to examine the change of the electricity grid resonance sensitivity after the transformer investment. Ferroresonance phenomenon was examined with computer simulation model which was build up with Matlab Simulink software. Measurements from the electricity network, was used to help the construction of the simulation model. On those measurements, transformers phase currents and volt-ages were recorded during transformer energization.

Computer simulation results shows, that when the power transformer was switched on to electricity network, the most significant impact to the ferroresonance sensitivity was with the magnitude of the residual flux and with the circuit breaker closing time instant. With BOHAs existing switchyard circuit breakers power transformer is switched off and on to electricity network entirely random time instant, so you can't affect to the magnitude of residual flux or circuit breakers closing time instant. As a result, the power transformers iron core may drift into the deep saturation region and therefore allows ferroresonance phenomenon to emerge in the industrial parks electricity network.

The end result of this diploma thesis is shown to invest in three-phase controlled circuit breakers on the primary side of power transformers, which makes it possible to control the transformers iron core saturation and ferroresonance phenomenon from occurring. ABB's SwitchSync T183 breaker unit measures the residual flux from the iron core and calculates optimal time point for switching the power transformer to the electricity network.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Harjavallassa Boliden Harjavalta Oy:lle BOHA:n sähkökäyttö-päällikkö Hannu Halmisen ehdottaman aiheen pohjalta. Sähkövoimatekniikan diplomi-insinööri Hannu Halminen toimi myös diplomityöni ohjaajana. Diplomityöni tarkastajana toimi professori Seppo Valkealahti Tampereen teknillisestä yliopistosta. Haluan kiittää työni tarkastajaa Seppo Valkealahta sekä työni ohjaajaa Hannu Halmista asiantuntevista neuvoista diplomityöni eri työvaiheissa.

Diplomityöni tarkastajan ja ohjaajan lisäksi haluan kiittää Insta Automation Oy:n Harjavallan toimipisteessä työskentelevää Petri Ahosta, jonka ahkeran työpanoksen myötä sain nopeasti tarvittavia teknisiä tietoja Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkosta. Tämän lisäksi haluan kiittää ABB Oy:n myyntipäällikkö Teuvo Tapiota, joka selvitti tässä diplomityössä tarvittuja tarkkoja tietoja Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkon päämuuntajista.

Tämän lisäksi haluan kiittää vanhempiani, jotka ovat antaneet mahdollisuudet opintoihini ja tukeneet minua koko pitkän opiskelujakson aikana.

Tampereella, 16.3.2015

Jarkko Virtanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	BOLIDEN HARJAVALTA OY	3
2.1	Harjavallan suurteollisuuspuisto	4
2.2	Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkko.....	6
2.2.1	Sähköverkon nykyiset päämuuntajat	7
2.2.2	Vuosihuollossa vuonna 2016 tehtävät muutokset päämuuntajiin	7
3.	MUUNTAJAN FERRORESONANSSI	9
3.1	Muuntajan magneettipiirin toiminta.....	9
3.2	Muuntajan rautasydämen kyllästyminen.....	11
3.3	Muuntajan remanenssivuo.....	12
3.4	Muuntajaraudan <i>BH</i> -käyrän tulkitseminen	13
3.4.1	Muuntajaraudan <i>BH</i> -käyrä normaalissa toimintatilassa	14
3.4.2	Muuntajaraudan <i>BH</i> -käyrä ferresonanssissa.....	14
3.5	Kolmivaihemuuntajan magneettipiiri.....	15
3.5.1	Kolmivaiheinen sydänmuuntaja.....	15
3.5.2	Kolmivaiheinen vaippamuuntaja	16
3.6	Muuntajan kytkentäsysäysvirta	17
3.6.1	KytKentäsysäysvirran vaikutukset muuntajassa.....	17
3.6.2	KytKentäsysäysvirran hallitseminen	18
3.7	Ferresonanssi eli kippivärähtely	19
4.	PÄÄMUUNTAJIEN MITTAUSTULOKSET	21
4.1	Mittauksissa käytetty laitteisto	22
4.2	Päämuuntajien PM1 ja PM6 sähköverkkoon kytkeminen	23
4.3	Magnetointimittausten yhteenveto	27
5.	SIMULOINTIMALLIEN RAKENTAMINEN	29
5.1	MATLAB/Simulink-ohjelmisto	29
5.2	Simulointimalli Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkosta	30
5.3	Päämuuntajan PM6 kytkentämittauksia vastaavat simulointitulokset	42
6.	FERRORESONANSSIN TUTKIMINEN SIMULOINTIMALLIN AVULLA	45
6.1	Ferresonanssiin ajautuminen Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa	45
6.2	Syöttökaapelin pituuden vaikutus muuntajan resonointiherkkyyteen.....	48
6.3	Syöttökaapelin sähköverkkoon kytkemisen vaikutus päämuuntajan resonointiherkkyyteen.....	50
6.4	Muuntajan sähköverkkoon kytkeminen kahden vaiheen kautta	51
6.5	Ferresonanssiherkkyyden muuttuminen uudella päämuuntajalla PM1	53
6.6	Simulointitulokset optimaalista kytkentähetkeä käyttäen	54
6.7	Optimaalisen kytkentähetken vaikutus luvun 6.2 simulointituloksiin	56
7.	SIMULOINTITULOSSIEN YHTEENVETO	59

8. RATKAISUEHDOTUKSET	60
LÄHTEET	63

LIITE A: PÄÄMUUNTAJAN PM3 KILPIARVOT

LIITE B: PÄÄMUUNTAJAN PM3 RAUTASYDÄMEN *BH*-KÄYRÄ

LIITE C: UUDEN PÄÄMUUNTAJAN PM1 RAUTASYDÄMEN *BH*-KÄYRÄ

LIITE D: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), PERIAATTEELLINEN KYTKENTÄKAAVIO

LIITE E: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), TAULUKKO YHTEENSOPIVIEN MUUNTAJIEN KYTKENTÄRYHMISTÄ

LIITE F: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), SWITCHSYNC T183 OHJAUSYKSIKÖN ULKOISET MITAT

LIITE G: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), SWITCHSYNC T183 OHJAUSYKSIKÖN TEKNISIÄ TIETOJA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BOHA	Boliden Harjavalta Oy
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
HDT	Matlab Simulinkin hystereesin mallinnustyökalu (engl. Hysteresis Design Tool)
mmv	magnetomotorinen voima
NNH	Norilsk Nickel Harjavalta Oy
PM1	Päämuuntaja nro 1
PM2	Päämuuntaja nro 2
PM3	Päämuuntaja nro 3
PM6	Päämuuntaja nro 6
SO ₂	Rikkidioksidi
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VH2016	Boliden Harjavalta Oy:n vuoden 2016 vuosihuolto
<i>A</i>	rautasydämen poikkipinta-ala
<i>A_{PM1}</i>	uuden päämuuntajan PM1 rautasydämen poikkipinta-ala
<i>B</i>	magneettivuon tiheys
<i>B_{max}</i>	aineen kyllästymiseen johtava magneettivuon tiheys
<i>B_r</i>	aineen remanenssi- eli jäännösmagneettivuon maksimiarvo
<i>C</i>	kapasitanssi
<i>C_{PM1}</i>	päämuuntajan PM1 kompensointikondensaattorin vaihekohtainen kapasitanssi
<i>f</i>	taajuus
<i>F_m</i>	magnetomotorinen voima
<i>H</i>	magneettikentän voimakkuus
<i>I</i>	vaihevirta
<i>I_m</i>	magnetointivirta
<i>I_k</i>	kuormitusvirta
<i>I_s</i>	päämuuntajan PM3 rautasydämen kyllästymiseen tarvittava magne- tointivirta
<i>K1</i>	päämuuntajan syöttökaapelin alkupään katkaisija
<i>K2</i>	päämuuntajan syöttökaapelin loppupään katkaisija
<i>L</i>	induktanssi
<i>l</i>	magneettitien pituus
<i>l_{PM1}</i>	uuden päämuuntajan PM1 magneettitien pituus
<i>N</i>	käämin kierroslukumäärä
<i>N₁</i>	ensiökäämin kierroslukumäärä
<i>N_{1,PM1}</i>	uuden päämuuntajan PM1 ensiökäämin kierroslukumäärä
<i>P</i>	pätöteho
<i>P₀</i>	muuntajan tyhjäkäyntihäviöteho
<i>Q</i>	loisteho
<i>Q_c</i>	loisteho puhtaasti kapasitiiviselle kuormalle
<i>Q_{komp}</i>	kolmivaiheisen kompensointikondensaattorin teho
<i>R1</i>	simuloinneissa käytetty arvo päämuuntajan ensiökäämin resistans- sille
<i>R_{Fe}</i>	raudan reluktanssi
<i>R_m</i>	rautasydämen reluktanssi

r_m	magnetointiresistanssi
R_{O2}	ilman reluktanssi
S	näennäisteho
s	magneettitien pituus
S_k	kantaverkon liitäntäpisteen oikosulkuteho
t	aika
t_{opt}	optimaalinen kytkentähetki
$t_{opt,V1}$	vaiheen V1 optimaalinen kytkentähetki luvun 5.3 simulointitilanteessa
U	vaihejännitteen tehollisarvo
U_{PM6_abc}	päämuuntajan PM6 teoreettinen toisiopuolen vaihejännite
U_{110kV}	kytkinkentän kiskon mitattu vaihejännite
u	jännitteen hetkellisarvo
U_{LL}	pääjännitteen eli vaiheiden välisen jännitteen tehollisarvo
X_c	kapasitiivinen reaktanssi
μ	aineen permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ_r	aineen suhteellinen permeabiliteetti
Φ	magneettivuo
Φ_{V1}	vaiheen 1 magneettivuo
Φ_{V2}	vaiheen 2 magneettivuo
Φ_{V3}	vaiheen 3 magneettivuo
Ψ	käämivuo
Ψ_{prosp}	ennustettu käämivuo
Ψ_{res}	muuntajan rautasydämen jäännöskäämivuo
Ψ_s	aineen kyllästymiseen johtava käämivuo
Ψ_{sat}	päämuuntajan PM3 kyllästymiseen johtava käämivuo
ω	kulmataajuus

1. JOHDANTO

Tehomuuntajan magnetoiminen eli yläjännitepuolen kytkeminen sähköverkkoon saattaa aiheuttaa muuntajassa ferresonanssi-ilmiön. Suomessa tätä ilmiötä kutsutaan usein myös muuntajan kippivärähtelyksi. Muuntajan ferresonanssi eroaa normaalista lineaarisesta resonoinnista siinä, että rautasydämen kyllästyminen muuttaa muuntajan induktanssin suuruutta resonoinnin aikana ja näin ollen ferresonoinnille ei ole mahdollista määrittää tiettyä resonointiaajuutta. Ferresonanssi onkin ilmiö, joka voi esiintyä jaksollisena tai ei-jaksollisena värähtelynä. Tässä työssä tullaan keskittymään ferresonanssi-ilmiön muodostumiseen ja ominaisuuksiin tehomuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä, jolloin tärkeimmäksi parametriksi nousee muuntajan rautasydämen kyllästyminen. Ilmiötä on sen epälineaarisuuden vuoksi vaikea matemaattisesti mallintaa, koska rautasydämen kyllästyminen voimakkuus on tapauskohtaista ja tästä johtuen muuntaja voi joutua joskus resonanssiin ja toisinaan taas välttyä resonoinnilta. [1]

Tässä diplomityössä tutkitaan teollisuusverkon päämuuntajan resonanssiherkkyyden muuttumista, kun yksi päämuuntaja vaihdetaan kuormituksen kasvamisen myötä isomman kokoiseksi. Diplomityö tehtiin Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkolle, joka on tuotantojen laajenemisen myötä kasvamassa entistä haasteellisemmaksi teollisuussähköverkoksi. Sähköverkkoa syöttää tällä hetkellä 4 identtistä 40 MVA:n suuruista tehomuuntajaa, joiden kautta sähköenergia siirretään säteittäistä sähköverkkoa pitkin kuormituksille ympäri tehdasaluetta.

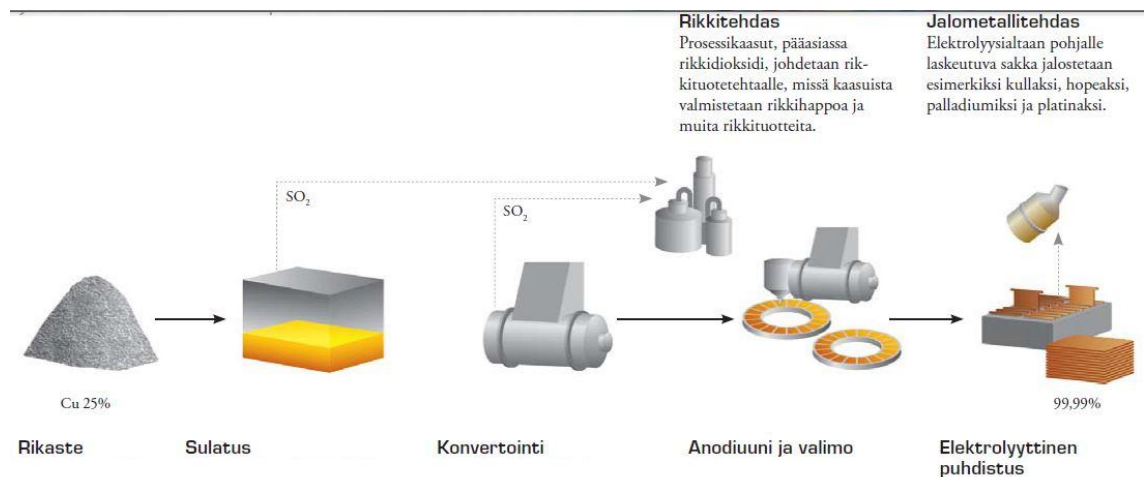
Harjavallan suurteollisuuspuiston ilmassa liikkuu paljon epäpuhtauksia, kuten pölyä ja rikkidioksidipitoista kaasua, minkä johdosta tehdasalueen 110 kilovoltin kytkinkentän eristimet likaantuvat nopeasti. Tästä syystä eristimiä puhdistetaan vuosittain, jolloin osa kytkinkentästä vuorollaan kytketään irti sähköverkosta. Kytkentöjä tehtäessä tehdasalueen sähköverkko kytketään väliaikaisesti rengassyöttöön, jotta kaikki kojeistot saadaan pidettyä katkeamattomasti sähköistettyinä. Puhdistus- ja huoltotöiden valmistuttua päämuuntajia kytketään vuorollaan takaisin 110 kilovoltin kantaverkkoon. Päämuuntajat kytketään sähköverkkoon kuormittamattomina, jolloin muuntajien toisiopuolen katkaisijat pidetään avattuina. Päämuuntajien kantaverkkoon kytkemisen yhteydessä on Harjavallan suurteollisuuspuistossa törmätty ferresonanssi-ilmiöön, jonka myötä verkkoon kytkettävä muuntaja on alkanut pitää voimakasta murinalta kuulostavaa ääntä ja osa sähköverkon kuormituslähdeistä on releiden havahtumisen myötä irronnut sähköverkosta.

Työn alkuvaiheessa Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa tullaan tekemään päämuuntajien magnetointikytkentämittauksia, joiden tavoitteena on tallentaa sellainen

muuntajan sähköverkkoon kytkeytyminen, joka johtaa ferroresonanssin syntymiseen sähköverkossa. Näiden kokeellisten mittauksien lisäksi sähköverkosta rakennetaan tietokonesimulaatiomalli, jota hyödyntämällä haetaan erilaisia ferroresonanssiin johtavia kytkentöjä sekä verkostotopologioita. Simulointituloksien avulla tämä diplomityö tulee antamaan teoreettista tukea Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkon muuntajainvestointiin.

2. BOLIDEN HARJAVALTA OY

Boliden Harjavalta Oy (BOHA) on Satakunnassa toimiva metallialan yritys, joka on osa ruotsalaista Boliden AB-konsernia. Boliden Harjavalta Oy koostuu Harjavallassa sijaitsevista sulatoista ja rikkihappotehtaista sekä Porissa toimivista kuparielektrolyysi- ja jalometallitehtaista. Boliden Harjavalta Oy:n päätuotteita ovat puhdas kupari, kulta, hopea sekä rikkihappo (H_2SO_4). Harjavallan kuparisulatolla tuotteena valmistuu anodikuparilevyjä, joiden kuparipitoisuus on 99 prosentin luokkaa. Anodikuparilevyjä käytetään raaka-aineena Porin kuparielektrolyysissä, jossa kuparianodeista poistetaan loput epäpuhtaudet elektrolyysin avulla ja saadaan lopputuotteena puhdasta kuparia. Porin kuparielektrolyysin sivutuotteina saadaan talteen kuparirikasteisiin sitoutuneita jalometalleja, joiden käsittely tehdään Porin jalometallitehtailla. Jalometallitehtaat valmistavat elektrolyysialtaan liejusta talteen ottamalla kultaa ja hopeaa. Harjavallan nikkelisulatolla sulatetaan asiakkaan omistamia nikkelipitoisia rikasteita ja valmistetaan liekkisulatusuunin nikkelikiveä, joka rakeistetaan pieniksi nikkelikiviksi veden avulla. Nikkelikiven nikkelipitoisuus on noin 50 prosenttia. Nikkelikiveä toimitetaan tällä hetkellä Harjavallan suurteollisuuspuiston alueella toimivalle Norilsk Nickel Harjavalta Oy:lle (NNH) sopimustuotteena, josta NNH valmistaa erilaisia nikkelituotteita. Liekkisulatusuunien reaktioista vapautuva rikkidioksidipitoinen kaasu puhdistetaan ja johdetaan kaasulinjoja pitkin BOHA:n rikkihappotehtaille, joissa kaasusta valmistetaan kuivamaalla, kontaktoimalla ja imeyttämällä rikkihappoa (H_2SO_4). Rikkihappotehtaiden kapasiteetin kasvattamiseksi osa rikkidioksidista erotetaan kaasusta ennen rikkihapon valmistusprosesseja ja tuotteistetaan nestemäiseksi rikkidioksidiksi (SO_2). [2] Kuvassa 1 on esitetty BOHA:n kupariprosessin kaaviokuva.



Kuva 1. Boliden Harjavalta Oy:n kupariprosessin kaaviokuva. [2]

Taulukkoon 1 on koottu yhteen Boliden Harjavalta Oy:n vuoden 2013 tuotantokapasiteetit eri tuoteryhmittäin.

Taulukko 1. Boliden Harjavalta Oy:n tuotantokapasiteetti vuonna 2013. [2]

Tuoteryhmä	Tuotantokapasiteetti
Kuparirikastesulatus	471 000 tonnia
Nikkelirikastesulatus	251 000 tonnia
Kuparikatodituotanto	119 000 tonnia
Rikkihappo (H₂SO₄)	750 000 tonnia
Nestemäinen rikkidioksidi (SO₂)	60 000 tonnia
Kulta	6 000 kg
Hopea	130 000 kg

2.1 Harjavallan suurteollisuuspuisto

Harjavallan suurteollisuuspuisto sai alkunsa vuonna 1944, jolloin Outokummun kuparisulatto siirrettiin kansallisista turvallisuussyistä Imatralta Harjavaltaan. Tehdasalue laajeni alkuun nopeasti ja on kehittynyt jatkuvasti vuosikymmenien aikana. Nykyään Harjavallan suurteollisuuspuiston alueella toimii 17 yritystä, jotka toimivat yhdessä verkostomaisessa työympäristössä. Omiin erikoisaloihin keskittyneet yritykset vastaavat ammattimaisuudellaan alueen toimivuudesta ja teollisuuspuiston kilpailukyvyistä. Taulukossa 2 on esitetty Harjavallan suurteollisuuspuiston tuotteita valmistavat yritykset henkilöstömäärineen vuoden 2013 keskiarvomäärinä esitettynä. [3]

Taulukko 2. Harjavallan suurteollisuuspuiston tuotteita valmistavat yritykset. [3]

Yrityksen nimi	Henkilöstömäärä
New Boliden Harjavalta Oy	336 henkilöä
Norilsk Nickel Harjavalta Oy	264 henkilöä
Yara Suomi Oy	55 henkilöä
Kemira Oyj	14 henkilöä

Tämän lisäksi alueella toimii useita palveluita tarjoavia yrityksiä, joista osa tuottaa kulu-
tushyödykkeitä, kuten happi- ja typpikaasua, paineilmaa sekä höyryä. Loput yritykset
tuottavat palveluita kuten kunnossapitoa, teollisuuden puhtaanapitoa ja insinöörien
suunnittelupalveluita. Taulukkoon 3 on koottu Harjavallan suurteollisuuspuiston tär-
keimmät palveluiden tuottajayritykset henkilöstömäärineen vuoden 2013 keskiarvomää-
rinä esitettynä. [3]

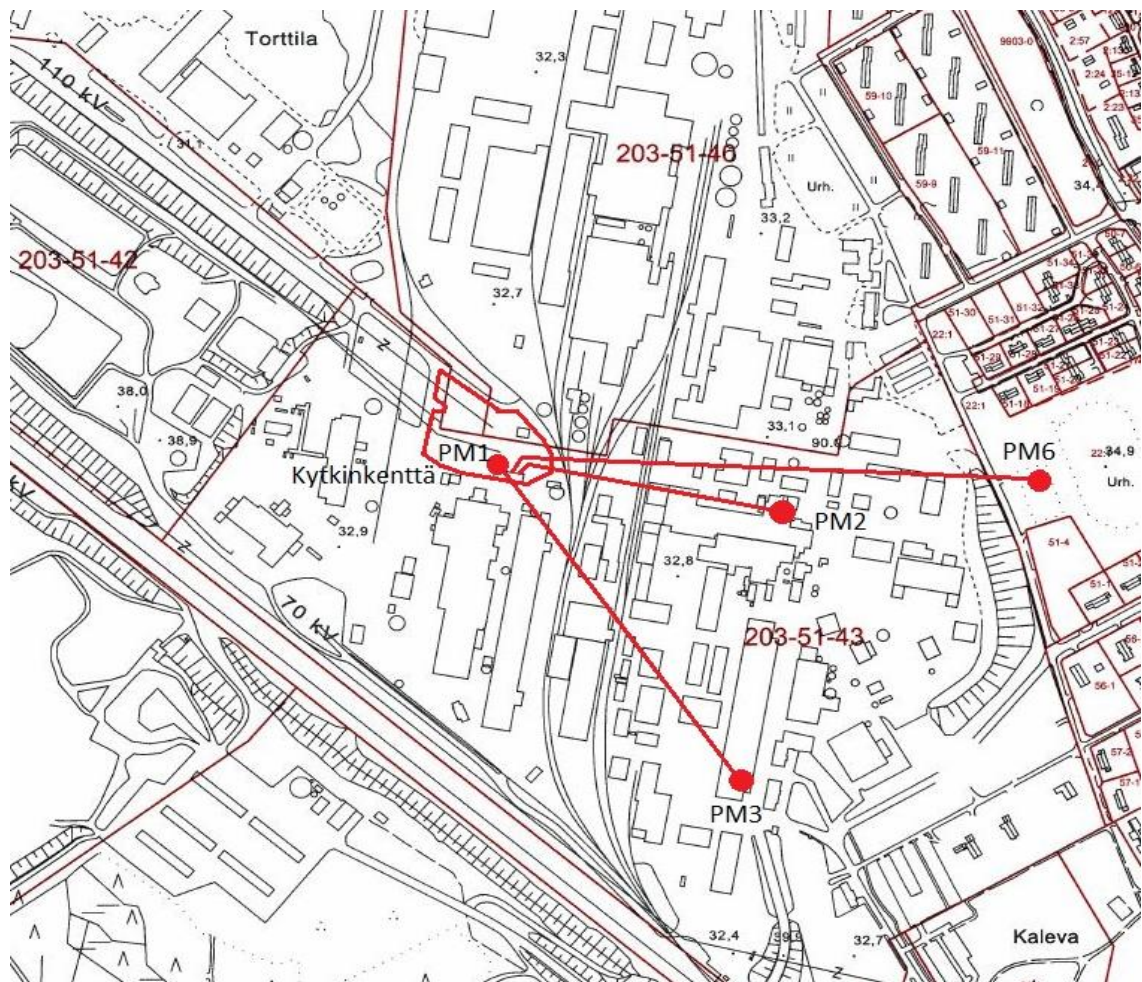
***Taulukko 3.** Harjavallan suurteollisuuspuiston tärkeimmät palveluiden tuottajayrityk-
set. [3]*

Yrityksen nimi	Henkilöstömäärä
Maintpartner Oy	99 henkilöä
Valtasiirto Oy	93 henkilöä
Insta Automation Oy	54 henkilöä
Lassila & Tikanoja Oyj	53 henkilöä
Outotec (Finland) Oy	26 henkilöä
Oy AGA Ab	24 henkilöä
Suomen Teollisuuden Energia- palvelut – STEP Oy	13 henkilöä

2.2 Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkko

Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkko koostuu neljästä päämuuntajasta, jotka ovat kaikki näennäistehoaltaan 40 MVA:n suuruisia. Päämuuntajat muuntavat kytkinkentälle tulevan 110 kilovoltin jännitteen 10,5 kilovoltin jakelujännitteeksi kojeistoille. Kantaverkosta syöttö tulee kytkinkentälle kahta 110 kilovoltin linjaa pitkin (Rauman ja Ulvilan linjat). Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkon lisäksi suurteollisuuspuiston aluetta syöttää myös toinen sähköverkko, jota ylläpitää Yara Suomi Oy. Yara Suomi Oy:n päämuuntoasema sijaitsee myös Boliden Harjavalta Oy:n kytkinkentän yhteydessä. Boliden Harjavalta Oy:n ja Yara Suomi Oy:n 110 kV:n kiskot on mahdollista yhdistää katkaisijan avulla, jolloin häiriötilanteessa Boliden Harjavallan kytkinkentän syöttö voidaan kytkeä Yaran 110 kV:n linjaan. [4]

Tehdasaluetta on aikanaan lähdetty rakentamaan todella tiiviiksi ja ylimääräistä tilaa, esimerkiksi avosähköjohtokatuja varten ei ole jäänyt. Päämuuntajat on sijoitettu eri puolille tehdasaluetta teollisuusalueen laajenemisen aikana, jolloin niiden ensiöpuolen syöttö on pitänyt rakentaa maakaapeliyhteydellä (kuva 2).



Kuva 2. Päämuuntajien sijainnit Harjavallan suurteollisuuspuiston alueella.

2.2.1 Sähköverkon nykyiset päämuuntajat

Päämuuntajista PM1 sijaitsee kytkinkentällä ja on päämuuntajista ainoa, jonka 110 kilovoltin syöttö on rakennettu ilmajohdoilla. Päämuuntajien PM2, PM3 ja PM6 yläjännitepuolen syöttö on toteutettu maakaapeliyhteydellä. Taulukkoon 4 on koottu päämuuntajien tärkeimpiä teknisiä tietoja.

Taulukko 4. Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajien teknisiä tietoja. [4]

Päämuuntaja	Nimellisteho (MVA)	Kytkentäryhmä	Yläjännitepuolen syöttö	Syöttökaapelin pituus (m)	Muuntosuhde
PM1	40	YNd11	Avojohto	-	115000/10500
PM2	40	YNd11	Maakaapeli	450	115000/10500
PM3	40	YNd11	Maakaapeli	750	115000/10500
PM6	40	YNd11	Maakaapeli	850	115000/10500

Päämuuntajien PM2 ja PM3 osalta 110 kilovoltin yläjännitepuolella on katkaisijat asennettu ainoastaan kytkinkentälle, jolloin muuntajille tehtävien kytkentöjen yhteydessä sähköistyy muuntajan ensiöpuolen syöttökaapeli yhtä aikaa muuntajan kanssa. Päämuuntajan PM6 tapauksessa myös muuntajan ensiöpuolelle syöttökaapelin jälkeen on asennettu katkaisija, jolloin muuntajan syöttökaapeli pystytään kytkemään erikseen jännitteelliseksi.

2.2.2 Vuosihuollossa vuonna 2016 tehtävät muutokset päämuuntajiin

Päämuuntaja PM1 tullaan korvaamaan uudella päämuuntajalla, jonka nimellisteho tulee olemaan 50 MVA. Tarkemmat tiedot tämän diplomityön tekemistä varten muuntajasta saatiin ABB Oy:ltä. Muuntaja on ulosasennettava öljyeristeinen kolmivaiheinen tehomuuntaja, jossa on alumiini- ja kuparikäämitykset. Muuntajan muuntosuhde on 115000/10500. Muuntajan yläjännitepuolella on 15-portainen käämikytin, jonka avulla muuntajan muuntosuhdetta on mahdollista säätää alueella $\pm 7,2,0\%$. [5]

Näiden tietojen lisäksi muuntajasta tarvittiin ferresonanssin tutkimista varten tietoja rautasydämen fyysisestä rakenteesta. Muuntaja on rautasydämeltään sydänmuuntajatyypinen ja muuntajan magneettitien pituus l_{PM1} on 11,87 m. Rautasydän on rakennettu samaa materiaalia käyttäen kuin nykyinen päämuuntajakin, joten liitteessä C esitetystä BH-käyrästä uudelle päämuuntajalle PM1 pystytään määrittämään rautasydämen kyllästymiseen johtava magneettivuon tiheyden arvo. [5]

Yläjännitepuolen käämikierroslukumäärä $N_{1,PM1}$ muuntajassa on 740 kierrosta. Taulukon 5 on koottu vielä yhteen työn simulointiosuudessa tarvittavia teknisiä tietoja uudesta päämuuntajasta PM1. [5]

Taulukko 5. Uuden päämuuntajan PM1 rautasydämen teknisiä tietoja. [5]

Päämuuntaja	Sydämen poikkipinta-ala A_{PM1}	Yläjännitepuolen käämikierrokset $N_{1,PM1}$	Saturoitumisvuontiheys B	Magneettipiirin pituus l_{PM1}	Rautasydämen permeabiliteetti μ saturaatiossa
Uusi PM1	0,2366 m ²	740	1,91 T	11,87 m	$1,222 \cdot 10^{-5}$ Vs/Am

3. MUUNTAJAN FERRORESONANSSI

Muuntajan ferroresonoinnilla tarkoitetaan ilmiötä, joka liittyy kapasitanssin ja rautasydämisen käämin muodostaman resonointipiirin synnyttämiin ylijännitteisiin sekä -virtoihin. Ferroresonanssi poikkeaa lineaarisesta resonoinnista merkittävästi, koska ilmiö perustuu muuntajainduktanssin epälineaarisuuteen muuntajaraudan saturaatiossa. Ilmiö vaatii toteutuakseen siis rautasydämellä varustetun käämin sekä sopivasti tämän induktanssin kanssa kytkeytyneen kapasitanssin. Ilmiö havaitaan tavallisesti sähköverkossa tehtävien kytkentöjen yhteydessä, jolloin muuntajan magnetointi-induktanssi kytkeytyy sarjaan muuntajaa syöttävän johdon kapasitanssin kanssa. Kytettäessä muuntaja sähköverkkoon, muuntaja ottaa magnetoituakseen merkittävän suuren kytkentävirran, joka voi olla jopa noin 10-kertainen muuntajan nimellisvirtaan verrattuna. Tämän johdosta muuntajan rautasydän usein kyllästyy ja mahdollistaa näin ferroresonanssin syntymisen sähköverkkoon. Harjavallan teollisuusverkossa ferroresonanssi-ilmiöön on törmätty tehomuuntajien kantaverkkoon kytkemisen yhteydessä. [6]

3.1 Muuntajan magneetti- ja virtapiirin toiminta

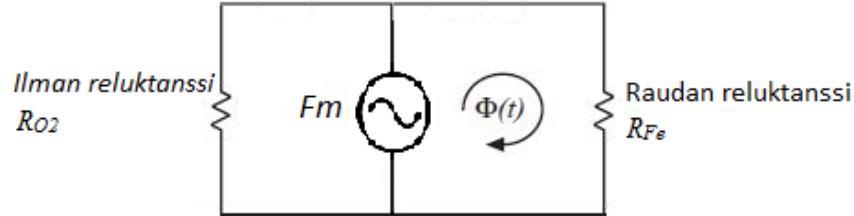
Muuntajan ensiö- ja toisiokäämitykset ovat kytkeytyneinä toisiinsa magneetti- ja virtapiirin välityksellä. Käämien magneettinen kytkentä on luoto muuntajaan rautasydämen avulla, joka muodostaa ensiökäämin synnyttämälle magneettivuolle Φ kulkureitin toisiokäämin lävitse. Rauta on materiaalina erittäin magneettinen (ferromagneettinen aine) ja näin ollen sen magneettinen vastus eli reluktanssi R_{Fe} on erittäin pieni. Reluktanssi määritellään yhtälön 3.1 mukaisesti jakamalla magneettitien pituus s , aineen permeabiliteetin μ ja magneetti- ja virtapiirin poikkipinta-alan A tulolla.

$$R_{Fe} = \frac{s}{\mu A} \quad (3.1)$$

Raudan erittäin korkeasta permeabiliteetista johtuen, rautasydämen reluktanssi eli magneettinen vastus on selvästi ilman reluktanssia pienempi. Näin ollen ensiökäämin muodostama magneettivuo Φ pyrkii kulkemaan kokonaisuudessaan rautasydämen muodostamaa magneetti- ja virtapiiriä pitkin. Pieni osa vuosta kuitenkin sulkeutuu ensiökäämin ylitse ilman kautta ja tästä magneettivuosta käytetään nimitystä hajavuo. Ensiökäämissä (kierroslukumäärä N) kulkevan virran I muodostama magnetomotorinen voima F_m (mmv) saa muuntajaan, jonka kokonaisreluktanssia on merkitty muuttujalla R_m , aikaan magneettivuon Φ yhtälön 3.2 mukaisesti.

$$F_m = NI = R_m \Phi \quad (3.2)$$

Koska rautapiirin muodostama magneettinen vastus eli reluktanssi R_{Fe} on selvästi ilman reluktanssia R_{O_2} pienempi, pyrkii magnetomotorisen voiman F_m muodostama magneettivuo kulkemaan rautapiiriä pitkin (kuva 3).



Kuva 3. Periaatekuva muuntajan magneettiirin sijaiskytkennästä.

Yhtälöstä 3.2 huomataan, että magnetomotorisen voiman (mmv) aikaansaaman magneettivuon suuruus riippuu aineen permeabiliteetista. Mitä suurempi on aineen permeabiliteetti, sitä suuremman magneettivuon pystyy yhtä suuri magnetomotorinen voima aineeseen muodostamaan. Magneettivuon Φ suuruus voidaan esittää myös magneettivuon tiheyden B avulla. Kokonaismagneettivuo on siis magneettivuon tiheyden pintaintegraali (kaava 3.3). [7]

$$\Phi = \int B dA = BA \quad (3.3)$$

Käämien yhteydessä käytetään usein myös suuretta käämivuo Ψ , joka on käämiin kytketyn jännitteen aikaintegraali käämin resistanssin ollessa pieni (kaava 3.4). Näin ollen siis käämi muodostaa käämivuon, jonka huippuarvo määräytyy käämin päiden yli vaikuttavan jännitteen huippuarvon \hat{u} ja jännitteen kulmataajuuden ω suhteesta (kaava 3.5). Piirtämällä nyt käämivuon Ψ ja jännitteen u periaatteelliset käyrämuodot ajan t funktiona kaavan 3.4 pohjalta, saadaan kuvan 5 mukaisesti käyrät joissa käämivuon huippuarvo $\hat{\Psi}$ on 90-astetta jäljessä käämissä vaikuttavan vaihtojännitteen huippuarvoa \hat{u} . Kulmanopeus ω kertoo kulman muutoksen aikayksikössä, joten kulmanopeus voidaan esittää myös jännitteen taajuuden f avulla (kaava 3.5).

$$\Psi = \int \hat{u} \sin(\omega t) dt = \frac{-\hat{u} \cos(\omega t)}{\omega} \quad (3.4)$$

$$\hat{\Psi} = \frac{\hat{u}}{\omega} = \frac{\hat{u}}{2\pi f} \quad (3.5)$$

Kaavassa 3.3 määritettiin magneettivuon yhtälö magneettivuon tiheyden pintaintegraalina. Kun ajatellaan koko käämin yli vaikuttavaa magneettivuota eli käämivuota Ψ pitää magneettivuon tiheyden pintaintegraali kertoa käämin käämikierrosten lukumäärällä N , koska rautasydämässä kulkeva magneettivuo Φ lävistää N -kertaa rautasydämen poikki-

pinta-alan suuruisen pinnan. Näin saadaan yhteys käämivuon Ψ ja rautasydämessä vaikuttavan magneettivuontiheyden välille (kaava 3.6).

$$\Psi = NBA \quad (3.6)$$

3.2 Muuntajan rautasydämen kyllästyminen

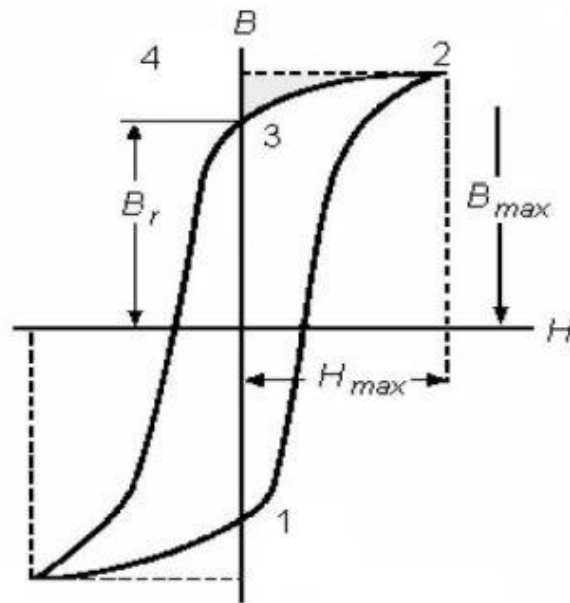
Muuntajan rautasydämen toimintaa kuvaa parhaiten rautasydämen BH -käyrä, joka kuvaa rautasydämen magneettivuon tiheyttä B magneettikentän voimakkuuden H funktiona. Magneettikentän voimakkuus H on suoraan verrannollinen ensiökäämissä kulkevaan magnetointivirtaan, joten magneettikentän voimakkuus H vaihtelee myös jaksollisesti 50 hertsin taajuudella. Magneettikentän voimakkuus voidaan esittää yhtälön 3.7 mukaisesti magnetomotorisen voiman F_m ja magneettitien pituuden s osamääränä.

$$H = \frac{F_m}{s} = \frac{NI}{s} \quad (3.7)$$

Lähdettäessä tutkimaan magneettikentän voimakkuuden H ja magneettivuon tiheyden B välistä yhteyttä, astuu kuvaan myös väliaineen ominaisuudet. Mikäli magneettikenttä kohdistuu ilmaan, tai muuhun ei magneettiseen väliaineeseen, käyttäytyy magneettivuon tiheys B lineaarisesti magneettikentän voimakkuuden H funktiona. Tätä materiaalista riippuvaa yhteyttä vuon tiheyden B ja magneettikentän H välillä kutsutaan aineen permeabiliteetiksi μ . Aineen permeabiliteetti μ voidaan esittää myös aineen suhteellisen permeabiliteetin μ_r ja tyhjiön permeabiliteetin μ_0 tulon avulla. Magneettivuon tiheys B voidaan nyt esittää yhtälön 3.8 mukaisesti.

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.8)$$

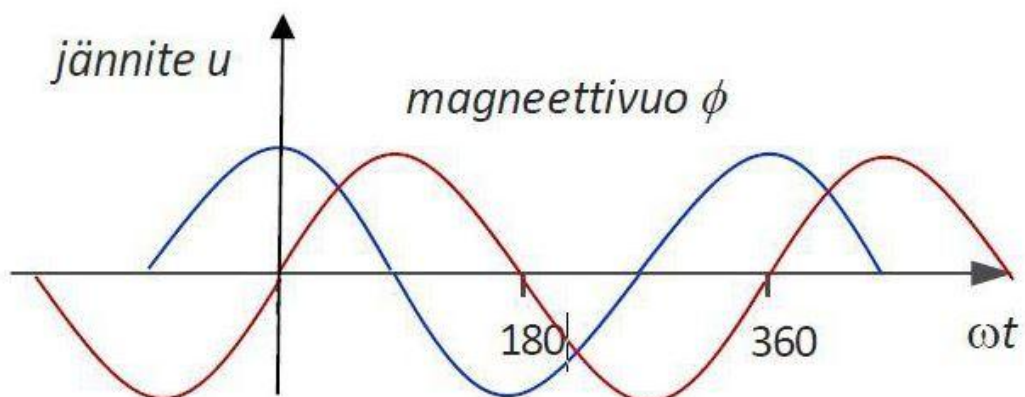
Magneettikentän voimakkuus H ja magneettivuon tiheys B näyttäisivät riippuvan toisistaan lineaarisesti aineen permeabiliteettiin verrannollisesti. Riippuvuus ei kuitenkaan ole lineaarista magneettisilla väliaineilla, koska magneettisten aineiden permeabiliteetti pienenee magneettikentän voimakkuuden kasvaessa. Eri väliaineilla on tietyt magneettivuon maksimiarvot, saavutettuaan tämän vuoarvon B_{max} aine on täysin magnetoitunut, eikä pysty vahvistamaan enää kasvavaa ulkoista magneettikenttää (kuva 4). Tämän B_{max} pisteen jälkeen rautasydämisen kelan virtaa vastustava voima heikkenee äkillisesti ja kelassa kulkeva virta kasvaa voimakkaasti, mikäli kelan muodostama magneettikenttä edelleen kasvaa. Ilmiö liittyy lähes aina tehomuuntajan magnetointiin, eli tilanteeseen jolloin sen yläjännitepuoli kytketään sähköverkkoon. Muuntajaa magnetoitaessa, rautasydämen kyllästyminen riippuu muuntajan rautasydämen jäännösmagneettivuon suuruudesta eli remanenssivuosta. Muuntajan remanenssivuon maksimiarvolla B_r tarkoitetaan magneettivuon tiheyden arvoa mikä rautasydämeen jää, kun täysin magnetoituneesta rautasydäimestä poistetaan ulkoinen magneettikenttä. [8]



Kuva 4. Muuntajaraudan BH-käyrä.

3.3 Muuntajan remanenssivuo

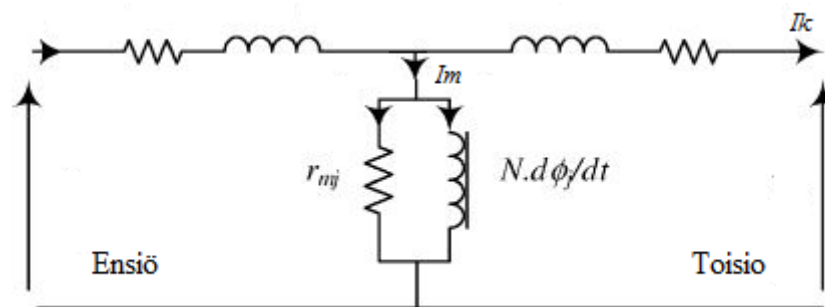
Muuntajan rautasydämeen jäävä jäännös- eli remanenssimagneettivuo on peräisin muuntajan jännitteettömäksi kytkemisen hetkestä. Muuntajan rautasydämeen indusoituva magneettivuo on kuvan 5 mukaisesti ensiökämin jännitettä 90-astetta jäljessä. Jos yksivaiheisen muuntajan verkosta irtikytkeminen tehdään jännitteen nollakohdassa, positiivisen jännitejakson jälkeen, jää rautasydämeen maksimaalinen jäännösvuo. Jos muuntaja kytketään tämän jälkeen takaisin sähköverkkoon jännitteen positiivisen huipparvon kohdalla, lähtee magneettivuo edelleen kasvamaan ja sydän joutuu pitkälle kyllästystilaan. [6]



Kuva 5. Jännitteen ja magneettivuon käyttäytyminen muuntajassa ajan funktiona. [9]

3.4 Muuntajaraudan BH -käyrän tulkitseminen

BH -käyrän toimintaperiaatteen ymmärtämisessä tärkeää on selvittää magneettikentän voimakkuuden H muodostumista muuntajassa. Kaavassa 3.7 kerrottiin, että magneettikentän voimakkuus määräytyy ensiökäämin kierrosluvun N ja virran I tulosta jaettuna muuntajaraudan magneettitien pituudella s . Yhtälössä esitetty virta I tarkoittaa siis muuntajan magnetointivirtaa, joka muodostaa muuntajan rautasydämeen magneettivuon. Muuntajan kuormitusvirralla I_k ei siis ole merkitystä muuntajan magneettivuon muodostumiseen. Toisin sanoen muuntajaraudaan muodostuu yhtä voimakas magneettivuon muuntajan kuormitusasteesta riippumatta. Kuvassa 6 esitetty muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä selvittää parhaiten muuntajan magneettikentän voimakkuuden H muodostumista. Magneettivuon muodostumista voi tarkastella myös virran vaihesiirtoa ajattelemalla. Magneettivuon muodostama virtakomponentti on 90-astetta jäljessä muuntajan ensiöpuolella vaikuttavaa jännitettä, kun taas kuormavirran vaihesiirto on muuntajan toisiopuolen kuormasta riippuvainen ja usein vaihesiirrotaan vain hieman ensiöjännitettä jäljessä.

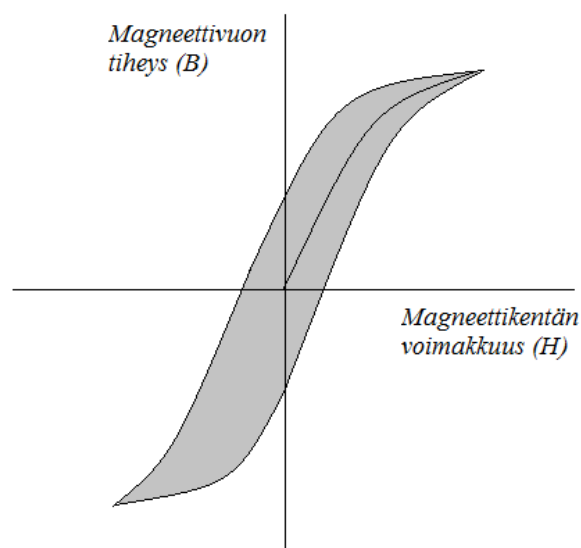


Kuva 6. Muuntajan ensiöön redusoitu sijaiskytkentä.

Muuntajan yksivaiheisesta sijaiskytkennästä nähdään, että muuntajan magnetointiinduktanssi kytkeytyy muuntajan kuormitusimpedanssin kanssa rinnan, jolloin magneettikentän voimakkuuteen vaikuttava virtakomponentti I_m erkaantuu muuntajan kuormitusvirrasta I_k . Kuvasta 6 nähdään myös, että muuntajan magneettikentän voimakkuuteen H vaikuttaa muuntajan ensiöpuolelle kytketyn jännitteen arvo sekä rautasydämen kylästyminen, jotka yhdessä määräävät magnetointivirran I_m suuruuden. Muuntajan rautasydän kylästyminen kun muuntajan ensiöjännitteen aikaansaama käänmivuo Ψ ylittää muuntajaraudan kylästymisarvon Ψ_s . Tämän käänmivuoarvon yläpuolella muuntajan magnetointihaaran muodostamalta magneettikentän voimakkuudelta H tarvitaan merkittävästi suurempaa arvoa, koska raudan permeabiliteetti putoaa todella pieneksi (kaava 3.8). Kaavassa 3.6 esitetystä käänmivuo lausekkeesta huomataan, että suurentamalla muuntajan ensiökäämin kierroslukumäärää N_1 tai muuntajan rautasydämen poikkipinta-alaa A , pystytään kasvattamaan kylästymiseen johtavaa käänmivuo Ψ_s arvoa.

3.4.1 Muuntajaraudan BH -käyrä normaalissa toimintatilassa

Muuntajan normaalissa toimintatilassa ensiökäämin synnyttämä käämivuo vaihtelee siniaallon käyrämuodon mukaisesti ja käämivuon huippuarvon suuruus määräytyy käämin yli vaikuttavasta jännitteen huippuarvosta ja taajuudesta yhtälön 3.5 määräävällä tavalla. Muuntajan rautasydän sekä ensiökäämin kierroslukumäärä suunnitellaan siten, ettei ensiökäämin synnyttämä käämivuon arvo saavuta rautasydämen kyllästymiseen tarvittavaa arvoa. Tällöin muuntajan magnetointihaaran muodostamalta magneettikentän voimakkuudelta H ei tarvita suurta arvoa, vaan BH -käyrää kierretään hystereesialueen ympäristössä. Kuvassa 7 on esitetty periaatteellinen BH -käyrän muoto muuntajan normaalin toiminnan aikana.



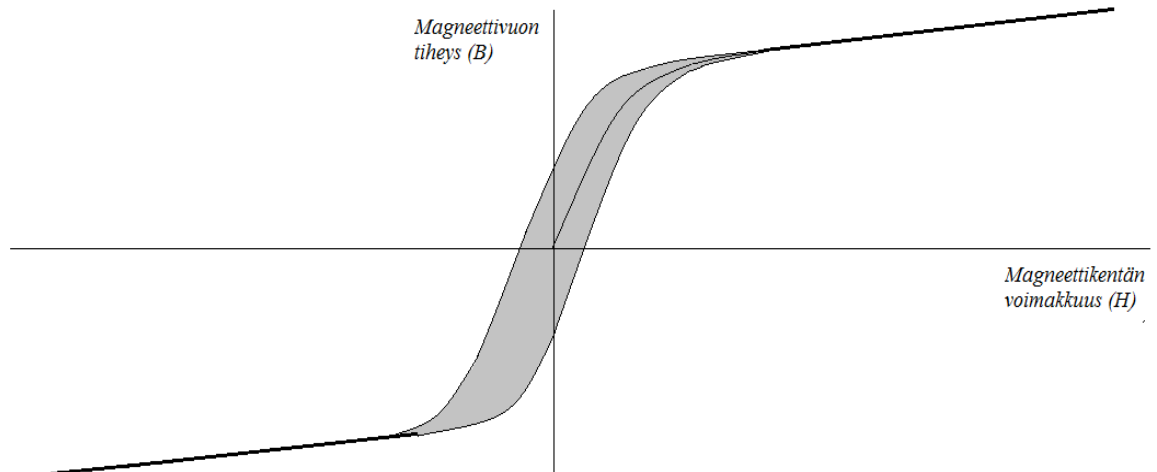
Kuva 7. Muuntajaraudan periaatteellinen BH -käyrä normaalissa toimintatilassa.

Muuntajan normaalissa toimintatilassa ensiökäämin jännite pysyy nimellisjännitteessä tai todella lähellä nimellisjännitettä. Tällöin rautasydämeen muodostuva magneettivuon tiheys ei nouse kyllästymisvuon tiheyden arvoon.

3.4.2 Muuntajaraudan BH -käyrä ferroresonanssissa

Ferroresonanssin aikana verkkoon muodostuu ylijännitteitä, jolloin muuntajan ensiöpuolen jännite saattaa nousta merkittävästi nimellisjännitettään korkeammaksi. Tämän seurauksena ensiökäämin aikaansaama käämivuo Ψ kasvaa, ylittäen muuntajan rautasydämen kyllästymisvuon arvon. Rautasydämen kyllästymisen jälkeen BH -käyrä käytäytyy lineaarisesti ja teoriassa suoran kulmakerroin saturaatioalueella asettuu tyhjiön permeabiliteetin μ_0 arvoon.

Kuvassa 8 on esitetty periaatteellinen BH -käyrän muoto muuntajan ferroresonanssitilanteessa.



Kuva 8. Muuntajaraudan periaatteellinen BH -käyrä ferroresonanssissa.

Kuvaan 7 ja 8 on piirretty myös magnetoitumisen neitsytkäyrä eli muuntajaraudan BH -käyrä tilanteessa, jossa magnetointi aloitetaan magnetoimattomaan rautasydämeen. Kuten kuvasta 8 nähdään, nousee ferroresonanssissa tarvittavan magneettikentän voimakkuuden H arvo todella suureksi muuntajan normaaliin toimintatilaan verrattuna.

3.5 Kolmivaihemuuntajan magneettiipiiri

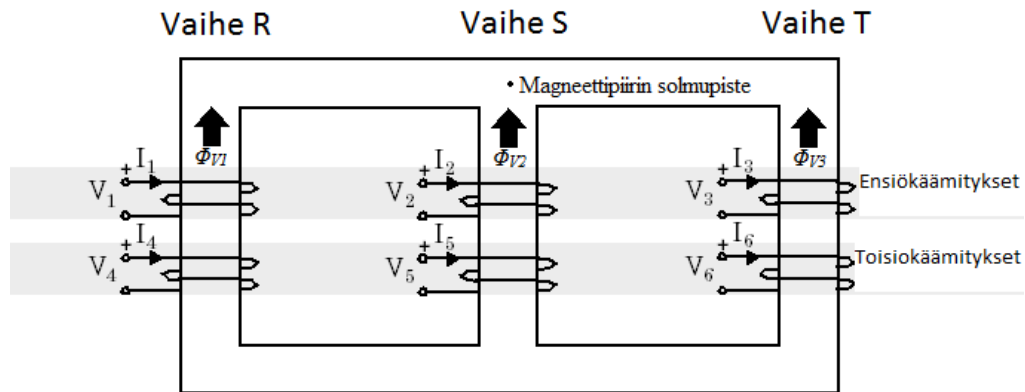
Kolmivaiheinen muuntaja eroaa yksivaihemuuntajan mallista merkittävästi, koska kolmivaihemuuntajassa vaiheet ovat magneettisesti kytkettyinä yhteen. Tämä tarkoittaa siis sitä, että magneettiipiiri ei katkea eri vaiheiden välillä, vaan eri vaihejännitteiden muodostamat muuttuvat vaihekohtaiset magneettivuot Φ_{V1} , Φ_{V2} , Φ_{V3} kulkevat yhtenäistä magneettiipiiriä pitkin (analogia sähköpiireihin).

Kaupallisessa käytössä olevien tehomuuntajien magneettiipiirejä rakennetaan kahdella erilaisella tekniikalla. Näistä selvästi yleisempi on niin sanottu sydänmuuntajarakenne, jossa rautapylväitä on yksi jokaista vaihetta kohti ja vaiheen ensiö- ja toisiokäämitykset ovat käämittyinä saman rautapylvään ympärille. Toinen käytössä oleva magneettiipiiriratkaisu tunnetaan nimellä vaippamuuntaja, jossa vaihekäämitykset ovat ikään kuin suojattu rautapylväiden sisään ja rautapylväitä on yhteensä viisi.

3.5.1 Kolmivaiheinen sydänmuuntaja

Kuvassa 9 on esitetty rakennekuva kolmivaiheisen sydänmuuntajan magneettiipiiristä, jossa vaiheen ensiö- ja toisiokäämitykset ovat käämittyinä yhteiselle rautapylväälle. Tällöin ensiökäämissä vaihtuvan virran synnyttämä magneettivuo Φ lävistää toisiokäämin. Katsomalla tarkemmin kuvan 9 rautasydäntä, huomataan keskimmaisella pylväällä olevan käämityksen muodostamalla magneettivuolla olevan lyhin kulkureitti rau-

tasydämessä. Tästä johtuen sydänmuuntajan magneettiset ominaisuudet vaiheiden välillä eivät ole symmetriset.



Kuva 9. Kolmivaiheisen sydänmuuntajan magneettiirin rakennekuva. [10]

Kolmivaiheisen sydänmuuntajan vaiheiden välisestä magneettisesta kytkeytymisestä johtuen, jokaisella ajan hetkellä vaiheiden magneettivoiden Φ_{V1} , Φ_{V2} , Φ_{V3} summa on nolla. Näin ollen myös ensiökäämeissä kulkevien magnetointivirtojen, jotka muodostavat vaihekohtaiset magneettivuot, summa on nolla. Kuvan 9 magneettivoiden merkintöjä ja kulkusuuntia hyödyntäen voidaan kirjoittaa yhtälö vaiheiden magneettivoiden summalle sydänmuuntajan tapauksessa (kaava 3.9). [11]

$$\Phi_{V1} + \Phi_{V2} + \Phi_{V3} = 0 \quad (3.9)$$

Näin ollen kolmivaiheisen sydänmuuntajan magneettiiriin yhden solmupisteen johdosta, muuntajan rautasydämellä on myös merkittävä vaikutus muuntajan vaihekohtaisten magnetointivirtojen muodostumiseen. [11]

3.5.2 Kolmivaiheinen vaippamuuntaja

Kolmivaiheisessa vaippamuuntajassa rautapylväitä on sydänmuuntajasta poiketen 5 kappaletta. Kahden lisätyn rautapylvään ansiosta muuntajan hajavuon osuus pienenee, koska vaiheiden V1 ja V3 rinnalle lisätyt pylväät tarjoavat matalampireluktanssisen reitin magneettivuolle ilmaan verrattuna. Ulkoreunoille asennetut rautapylväät myös suojaavat käämityksiä ja parantavat muuntajan jäähdytyskapasiteettia. Vaippatekniikalla rakennettuja tehomuuntajia käytetään erikoiskohteissa, joissa muuntajalta vaaditaan parempaa toisiopuolen oikosulkukestoisuutta ja jäähdytystehoa. Yleisimmin vaippamuuntajia käytetään valokaariuunien syöttömuuntajina, joiden yhteydessä muuntajan toisiopuoli joutuu kestäämään oikosulkutilannetta. Kuva 10 on ABB Oy:n Drammenin tehtaalta, jossa kasataan viisipylväistä vaippamuuntajan (Shell Form Transformer) rautasydäntä. [12]



Kuva 10. Vaippamuuntajan rautasydämen kokoonpanoa ABB Oy:n tehtaalla. [12]

3.6 Muuntajan kytkentäsäysvirta

Muuntajan kytkentäsäysvirralla tarkoitetaan muuntajan magnetointihaaran ottamaa magnetointivirtaa muuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä. Muuntajan kytkentäsäysvirta johtuu pääosin muuntajan rautasydämeen jääneestä remanenssi- eli jäännösmagneettivuosta. Kuten luvussa 3.3 kerrottiin, joutuu muuntajan rautasydän pitkälle kyllästystilaan, mikäli muuntajan verkosta poiskytkeminen sekä muuntajan verkkoon kytkeminen tehdään saturaatiota ajatellen huonoilla jännitekäyrän ajanhetkillä. Tällöin muuntajan ensiökäämin muodostama käämivuo Ψ ylittää muuntajan rautasydämen kyllästymisvuon arvon. Tämän seurauksena joudutaan rautasydämen BH -käyrän lineaariselle osuudelle, jolloin muuntajan magnetointihaaralta vaaditaan merkittävän suurta magnetomotorista voimaa F_m vaaditun magneettivuon tiheyden B muodostamiseen. Yhtälön 3.2 mukaisesti magnetomotorinen voima F_m muodostuu ensiökäämin kierrosluvun N ja virran I tulosta, joten muuntajan ottama virta I kasvaa todella suureksi.

3.6.1 Kytkentäsäysvirran vaikutukset muuntajassa

Muuntajan kytkentäsäysvirran huippu saattaa ylittää muuntajan nimellisvirta-arvon ja pahimmillaan lähestyä jopa muuntajan oikosulkuvirran tasoa. Kytkentäsäysvirran amplitudi laskee hitaasti kohti pysyvän tilan magnetointivirran arvoa, ja saattaa tästä johtuen laukaista verkkoa suojaavia releitä. Mikäli muuntajalle joudutaan tekemään useasti verkosta irtikytkemisiä, kuormittavat muuntajan käämitykset kytkentäsäysvirran aiheuttamista voimista. Muuntajan hallitsemattomat verkkoon kytkemiset voivat siis lyhentää muuntajan elinkaaren pituutta ja aiheuttaa näin ylimääräisiä kustannuksia verkon omistajalle.

3.6.2 Kytkentäsäsysvirran hallitseminen

Muuntajan kytkentäsäsysvirta on ilmiönä tunnistettu jo 1800-luvun loppupuolella, mutta ongelman pienentämiseksi ei ole toistaiseksi onnistuttu löytämään edullista ja toimivaa ratkaisua. Ongelmallisissa muuntajakäytöissä on otettu käyttöön etuvastuksia muuntajan ensiöpuolelle rajoittamaan kytkentäsäsysvirran amplitudia muuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä. [13] Ratkaisuna etuvastusten käyttö ei poista kytkentäsäsysvirran aikaan saamaa ilmiötä, eli muuntajaraudan kyllästymistä, joten järjestelmä voi ajautua ferresonanssiin myös etuvastuksellisen muuntajakytkennän tapauksessa.

Vuonna 1988 esiteltiin ensimmäistä kertaa teoria kytkentäsäsysvirran eliminoimisesta tekemällä muuntajan sähköverkkoon kytkeminen ohjatusti vaihejännite kerrallaan. Teoria ei huomionnut muuntajaraudan remanenssivuota, vaan kytkentä tehtiin jokaiselle vaiheelle jännitteen huippukohdassa. Teoria toimi siis vain, jos muuntajaraudaan ei ollut jäänyt remanenssivuota. Vuonna 2001 esittelivät saksalaiset tutkijat Brunke ja Frölich paljon joustavamman teorian kytkentäsäsysvirran eliminoimisesta, joka otti huomioon myös muuntajaraudan remanenssivuon. [13]

Brunke:n ja Frölich:in teoria esittää laskukaavan muuntajan optimaaliselle verkkoon kytkemishetkelle t_{opt} . Teoriasta käytetään nimitystä ”muuntajan säädetty verkkoon kytkeminen remanenssivuon avulla”. Teoriassa käytetään hyödyksi tietoa muuntajan ensiökäämiin kytketystä jännitteestä, josta lasketaan ennustettu käämivuon arvo Ψ_{prosp} yhtälön 3.4 mukaisesti. Ajanhetkellä t_{opt} ennustettu käämivuo Ψ_{prosp} sekä muuntajan rautasydämeen jäänyt remanenssikäämivuo Ψ_{res} ovat yhtä suuria, jolloin voidaan kirjoittaa yhtälö 3.9. Sijoittamalla nyt kaavaan 3.9 käämivuon laskukaava 3.4, saadaan yhtälö 3.10. Kertomalla puolittain yhtälö 3.10 termillä $\frac{\omega}{\hat{u}}$, saadaan tulokseksi yhtälö 3.11. Käyttämällä vielä kaavan 3.5 tietoa, voidaan jännitteen huippuarvon \hat{u} suhde kulmataajuuteen ω esittää käämivuon huippuarvon $\hat{\Psi}$ avulla.

$$\Psi_{prosp} - \Psi_{res} = 0 \quad (3.9)$$

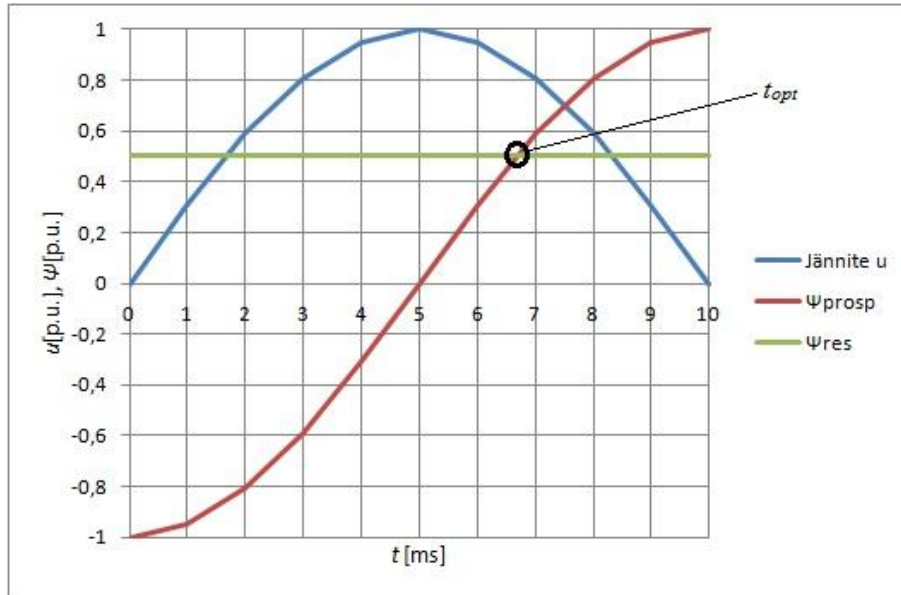
$$\frac{\hat{u} \cdot \cos(\omega t_{opt})}{\omega} = -\Psi_{res} \quad (3.10)$$

$$\cos(\omega t_{opt}) = \frac{-\Psi_{res} \cdot \omega}{\hat{u}} = \frac{-\Psi_{res}}{\hat{\Psi}_{prosp}} \quad (3.11)$$

Koska jännitefunktio u esitettiin sini-funktion avulla käämivuon yhtälössä 3.4, alkaa jännitekäyrä arvosta 0 ajanhetkellä $t = 0$. Kaava 3.12 antaa vastaukseksi ajanhetken, jolloin muuntajan sähköverkkoon kytkeminen pitää tehdä. Tämä aika t_{opt} on aika joka pitää lisätä ajanhetkeen, jolloin vaiheen jännitekäyrä saa arvon 0 ja on nousevalla reunalla. Ajan t_{opt} merkitystä on selvennetty kuvassa 11.

$$t_{opt} = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(\frac{-\Psi_{res}}{\Psi_{prosp}}\right) \quad (3.12)$$

Kuvassa 11 on esitetty muuntajan optimaalisen vaihekohtaisen kytkentähetken muodostuminen muuntajan remanenssikäämivuon Ψ_{res} ja ennustettavan käämivuon Ψ_{prosp} käyrämuotojen avulla. Muuntaja pitää siis kytkeä sähköverkkoon sillä jännitekäyrän hetkellä, kun muuntajan rautasydämeen muodostuva käämivuo on jäännösvuon suuruinen.



Kuva 11. Muuntajan optimaalisen kytkentähetken t_{opt} määrääminen.

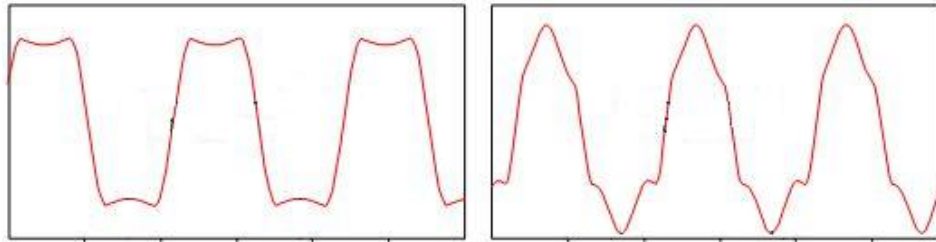
Kuvan 11 tilanteessa muuntajan rautasydämeen on jäänyt 0,5 pu suuruinen remanenssi eli jäännösmagneettivuo. Tällöin muuntajan optimaalinen sähköverkkoon kytkemishetki on noin 6,7 millisekuntia jännitteen nousevan reunan nollakohdan jälkeen.

3.7 Ferroresonanssi eli kippivärähtely

Ferroresonanssi eli kippivärähtely on epälineaarinen resonointi-ilmiö, joka perustuu rautasydämellä varustetun käämin induktanssin sekä verkon kapasitanssin muodostamaan resonointipiiriin. Ferroresonanssi voi esiintyä sarjaferroresonanssina tai rinnakkaisferroresonanssina. Todennäköisemmin järjestelmä kuitenkin ajautuu ferroresonanssiin, mikäli kapasitanssi sekä epälineaarinen induktanssi kytkeytyvät sarjapiiriin.

Ferroresonanssitila johon verkko ajautuu voi olla epästabiili tai stabiili. Ferroresonanssin käyrämuodot luokitellaan epästabiileihin ja stabiileihin resonansseihin niiden jaksollisuuden mukaan. Mahdollisia ferroresonanssitiloja on neljä erilaista. Näistä stabiileja ovat jaksolliset ferroresonanssit, joiden synnyttämien ylijännitteiden taajuudet ovat joko perustaajuudella värähteleviä (Fundamental Periodic Ferroresonance) tai perustaajuutta alemmalla taajuudella värähteleviä (Sub-Harmonic Periodic Ferroresonance) jännitteitä.

Kuvassa 12 on esitetty stabiileiden jaksollisten ferroresonanssien muodostamia tyypillisiä jännitteen käyrämuotoja. [14]



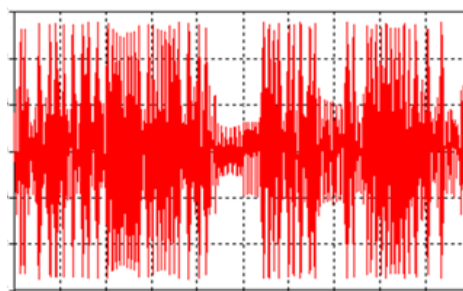
Kuva 12. Stabiilin jaksollisen ferroresonanssin muodostamia tyypillisiä jännitteen käyrämuotoja. [15]

Useimmiten ferroresonanssin muodostama ylijännite on kuitenkin käyrämuodoltaan epäsäännöllistä ja usein todella sekavaa. Näitä epäsäännöllisiä ferroresonanssitiloja on kaksi erilaista, joista molemmat luokitellaan epästabiileiksi. Toinen näistä epästabiileista ferroresonansseista on niin sanottu puolijaksollinen ferroresonanssi (Quasi-Periodic Ferroresonance), jossa voidaan havaita vähintään kaksi pääresonointitaajuutta. Kuvassa 13 on esitetty puolijaksollisen ferroresonanssin (Quasi-Periodic Ferreresonance) muodostaman ylijännitteen periaatteellinen käyrämuoto.



Kuva 13. Puolijaksollisen ferroresonanssin (Quasi-Periodic Ferreresonance) muodostaman ylijännitteen periaatteellinen käyrämuoto. [15]

Käyrämuodoltaan sekavin ferroresonanssitila on nimeltään kaoottinen ferroresonanssi (Chaotic Ferroresonance), jonka käyrämuoto on epäsäännöllinen. Kuvassa 14 on esitetty simuloidun kaoottisen ferroresonanssin muodostaman ylijännitteen käyrämuoto.



Kuva 14. Simuloidun kaoottisen ferroresonanssin muodostaman ylijännitteen käyrämuoto. [15]

4. PÄÄMUUNTAJIEN MITTAUSTULOKSET

Harjavallan suurteollisuuspuistossa vietetään kerran vuodessa pitkää tuotantokatkosai-
kaa eli vuosihuoltoa, jonka aikana laitteistoille tehdään suunniteltuja korjaustöitä sekä
uusia laitteistoja liitetään olemassa olevan prosessin yhteyteen. Vuosihuollon aikana
suurteollisuuspuiston sähköverkon kuormitus pienenee merkittävästi, jolloin myös säh-
köverkossa on mahdollista tehdä huoltotöitä. Suurteollisuuspuiston alueen ilmassa liik-
kuu paljon epäpuhtauksia, kuten hienojakoista pölyä ja rikkidioksidipitoista kaasua
(SO₂). Tästä johtuen kytkinkentän eristimiin tarttuu likaa, mikä saattaa johtaa läpilyön-
teihin ja tätä kautta maasulkuihin. Lika pitää pestä pois eristimistä joka vuosi, jolloin
osa kytkinkentästä ja päämuuntajista otetaan kerrallaan eroon sähköverkosta. Tämän
aikaa kojeistoja syötetään vaihtoehtoisia reittejä pitkin käytössä olevien päämuuntajien
kautta. Viime vuosina vuosihuolto on järjestetty suurteollisuuspuistossa aina keväällä ja
myös vuoden 2014 vuosihuolto ajoittui touko-kesäkuun vaihteeseen. Vuosihuollon aika-
taulu määrittä myös tämän diplomityön kenttämittausten aikataulun, koska vuosihuolto
on vuoden ainoa ajankohta jolloin päämuuntajille on mahdollista suorittaa jälleenkyt-
kentöjä.

Boliden Harjavalta Oy:n sähköverkkoon on asennettu Shneider Electricin häiriötallen-
timia valvomaan kaikkia päämuuntajia sekä 110 kilovoltin kiskoa kytkinkentällä. Mitta-
uksia suunniteltaessa päädyttiin käyttämään näitä kiinteitä häiriötallentimia osana mitta-
uksia. Häiriötallentimien lisäksi magnetoitavan päämuuntajan ensiöpuolelle kytkettiin
kannettava transientteihin reagoiva mittalaite mittaamaan päämuuntajan ensiövaiheiden
jännitteet sekä virrat. Mittauksien tarkoitus oli herättää magnetoitava muuntaja ferro-
resonanssiin verkon kanssa ja saada kyseisestä kytkennästä talteen muuntajan irtikyt-
kemishetken jännitteet sekä magnetoinnin vaihevirrat. Näiden tietojen avulla olisi mah-
dollista arvioida muuntajan remanenssimagneettivuota, kytkentäsysäysvirtaa sekä
muuntajaraudan saturaatiota. Mikäli muuntaja joutuisi ferresonanssiin, reagoisivat
verkon kiinteät häiriötallentimet ferresonanssin synnyttämiin ylijännitteisiin sekä –
virtoihin, jolloin ferresonanssin voimakkuutta pystyttäisiin arvioimaan kiinteiden häi-
riötallentimien datasta.

Ferresonanssi on harvinainen ilmiö ja usein se vaimenee myös itsestään, aiheuttaen
harvoin laitevaurioita. Pahimmillaan ilmiö voi kuitenkin jopa tuhota sähköverkon pää-
muuntajan ja aiheuttaa näin suuret vahingot sähköverkon käyttäjille. Varsinkin teolli-
suudelle päämuuntajan tuhoutuminen olisi erittäin vahingollista, koska niiden kalliista
hinnasta johtuen päämuuntajia ei pidetä normaalisti varastossa. Koska tämän kokoluo-
kan muuntajat ovat aina tilaustuotteita, on niillä myös pitkä toimitusaika (normaalisti

noin 6 kuukautta). Tästä johtuen päämuuntajan tuhoutuminen aiheuttaisi teollisuusyritykselle pitkän tuotantokatkon tai rajoituksen tuotantoon.

4.1 Mittauksissa käytetty laitteisto

Mittauksissa käytettiin QualiStarin CA 8334 mallista kannettavaa transientteihin reagoivaa analysointilaitetta. Mittalaite on tarkoitettu ensisijaisesti tehon ja sähkön laadun mittaamiseen. Laitteella nauhoitetaan vaihejännitteitä ja –virtoja tietyn aikaa ja laite laskee mittausjakson tuloksista sähkön laatuun liittyviä tunnuslukuja. Näitä ominaisuuksia ei kuitenkaan hyödynnetty tämän diplomityön mittauksissa, koska tällä laitteella haluttiin tallentaa ainoastaan magnetoitavan muuntajan kytkentävirrän käyrämuodot sekä yläjännitepuolen vaihejännitteet. Kytkentävirrojen tallentaminen onnistui mittalaitteen ”Transient Recording”-toiminnon avulla. Kun mittalaite oli kytkettynä magnetoitavan muuntajan ensiöpuolelle, kytkettiin ”Transient Recording”-ohjelma päälle. Ohjelma havahtuu jännitteessä tai virrassa tapahtuvaan transienttiin ja liipaisee käyntiin 80 millisekuntia kestävä tallennusjakson. Kuvassa 15 on nähtävissä kannettava mittalaite kytkettynä päämuuntajan mittauskeskukseen.

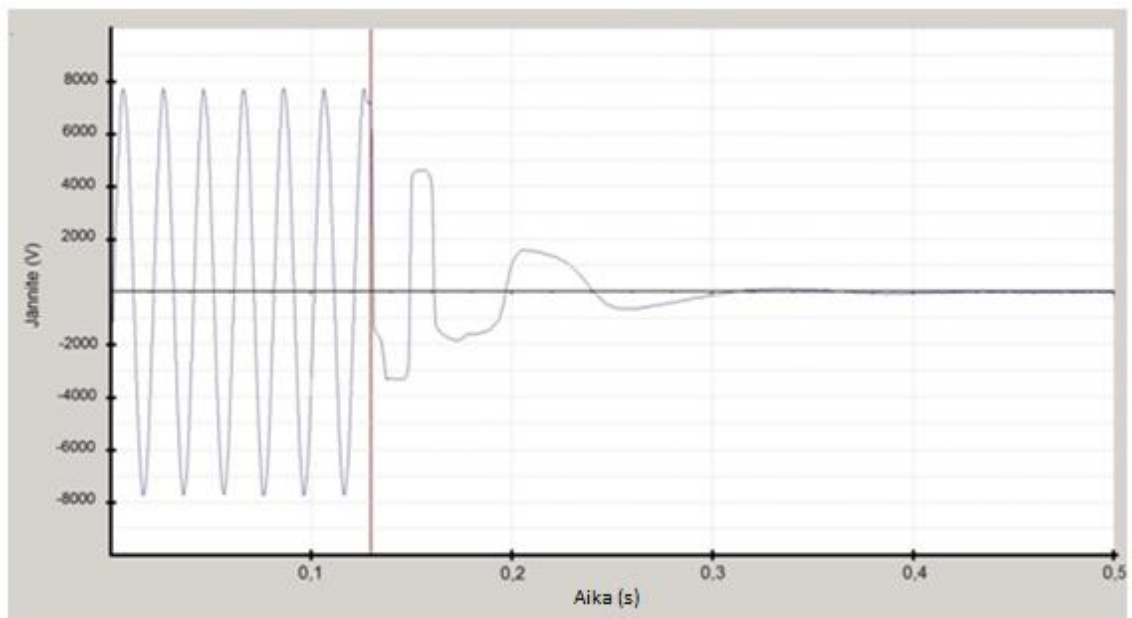


Kuva 15. Kannettava mittalaite QualiStar CA 8334 kytkettynä PM6:n magnetoitimi-
tauksia varten.

4.2 Päämuuntajien PM1 ja PM6 sähköverkkoon kytkeminen

Päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisiä tehtiin yhteensä 5 kertaa, joista 2 kytkentää tehtiin päämuuntajalle PM1. Päämuuntajan PM1 mittauksien aikana sähköverkossa oli kiinni päämuuntajat PM2 ja PM3 osittain kuormitettuina. Loput 3 kytkentää tehtiin päämuuntajalle PM6, jolloin sähköverkossa oli kiinni kaikki muut päämuuntajat PM1, PM2 ja PM3. Mittaustuloksissa saatiin joka kerta hieman toisistaan poikkeavia kytkentäsäysvirtoja, koska muuntajan verkosta irtikytkeminen ja verkkoon kytkeminen tapahtuivat täysin satunnaisella verkkojännitteen hetkellä. Mittaustuloksista esitellään nyt ainoastaan päämuuntajan PM6 ensiöpuolen sähköverkkoon kytkeminen, jossa muuntajan kytkentäsäysvirta saavutti suurimman vaihekohtaisen huippuarvon.

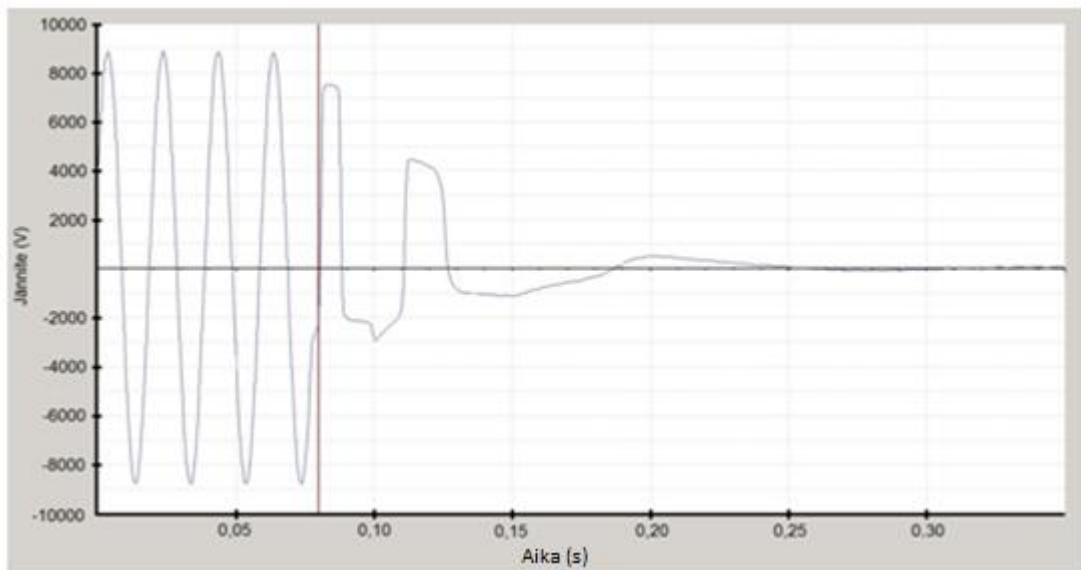
Käydään ensiksi läpi päämuuntajan PM6 verkkoon kytkemistä edeltänyt verkosta irtikytkemisen hetki. Päämuuntajia tarkkailevat häiriötallentimet on kytketty muuntajien toisiopuolelle, joten remanenssivuorvioita tehdessä pitää ottaa huomioon päämuuntajien kytkentäryhmä ja kellolukema (taulukko 4). Kaikkien päämuuntajien käämitykset on toteutettu niin, että toisioon indusoituva jännite on 330-astetta jäljessä ensiökäämissä vaikuttavasta jännitteestä (kellolukema 11). Kuvasta 16 nähdään vaiheen V1 toisiojännite ajan funktiona muuntajan verkosta irtikytkemisen hetkellä. Irtikytkeminen tapahtui hieman toisiojännitteen huippuarvokohdan jälkeen. Tällöin ensiökäämin jännite on ollut positiivinen, jännitekäyrän laskevalla reunalla, ja lähellä arvoa 0,6 pu. Näin ollen arvio vaiheeseen V1 jääneestä remanenssivuosta on 0,4 pu.



Kuva 16. Päämuuntajan PM6 vaiheen V1 toisiojännite ajan funktiona verkosta irtikytkemisen aikana.

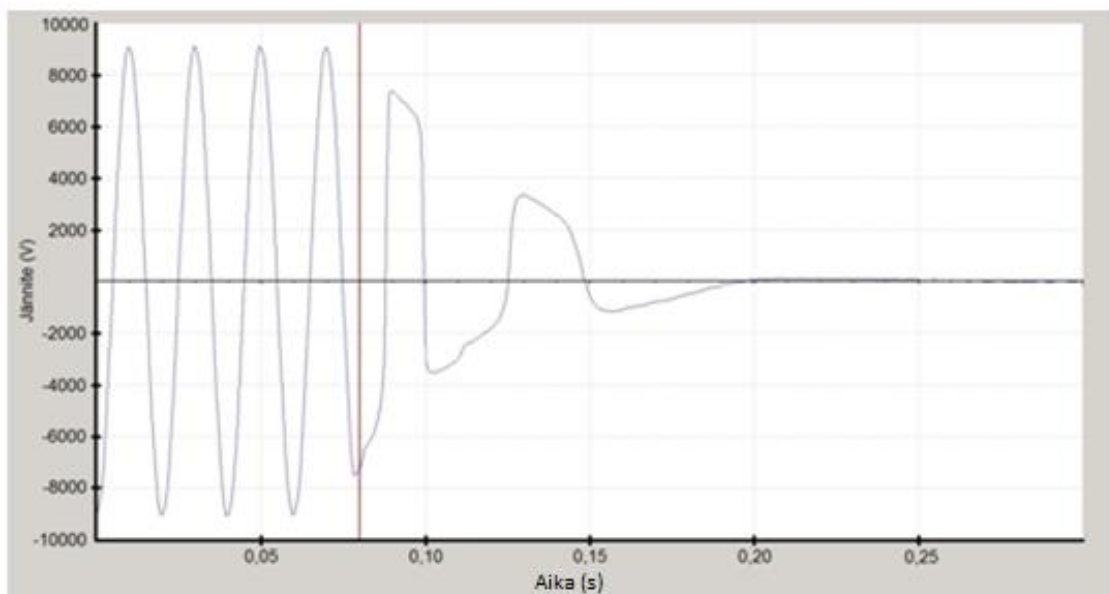
Kuvasta 17 nähdään vaiheen V2 toisiojännite ajan funktiona muuntajan verkosta irtikytkemisen hetkellä. Irtikytkeminen tapahtui jännitteen nousevalla reunalla hieman ennen

toisiojännitteen nollakohtaa. Tällöin ensiökäähin jännite on ollut positiivinen, jännitekäyrän nousevalla reunalla ja lähellä arvoa 0,2 pu. Näin ollen arvio vaiheeseen V2 jääneestä remanenssivuosta on -0,65 pu.



Kuva 17. Päämuuntajan PM6 vaiheen V2 toisiojännite ajan funktiona verkosta irtikytkemisen aikana.

Kuvasta 18 nähdään vaiheen V3 toisiojännite ajan funktiona muuntajan verkosta irtikytkemisen hetkellä. Irtikytkeminen tapahtui jännitteen laskevalla reunalla hieman ennen toisiojännitteen negatiivista huippuarvoa. Tällöin ensiökäähin jännite on ollut negatiivisen huippuarvon jälkeen nousevalla reunalla ja lähellä arvoa -0,9 pu. Näin ollen arvio vaiheeseen V3 jääneestä remanenssivuosta on 0 pu.



Kuva 18. Päämuuntajan PM6 vaiheen V3 toisiojännite ajan funktiona verkosta irtikytkemisen aikana.

Katsottaessa tarkemmin päämuuntajan PM6 vaihejännitteiden kuvaajia ajan funktiona (kuvat 16, 17 ja 18), huomataan vaihejännitteiden olleen epäsymmetriassa ennen sähköverkosta irtikytkemistä. Kuten kuvista 16,17 ja 18 huomataan, käy vaihejännite V1 korkeimmillaan noin arvossa 7800 sekä vaihejännitteet V2 ja V3 noin arvossa 8900. Käytämällä nyt 110 kilovoltin kiskon mitattua jännitteen huippuarvoa \hat{U}_{110kV} päämuuntajan verkkoon kytkemishetkeltä (kuva 19) sekä päämuuntajan PM6 muuntosuhdetta (taulukko 4), voidaan ratkaista teoreettinen arvo päämuuntajan PM6 toisiopuolen vaihejännitteille U_{PM6_abc} .

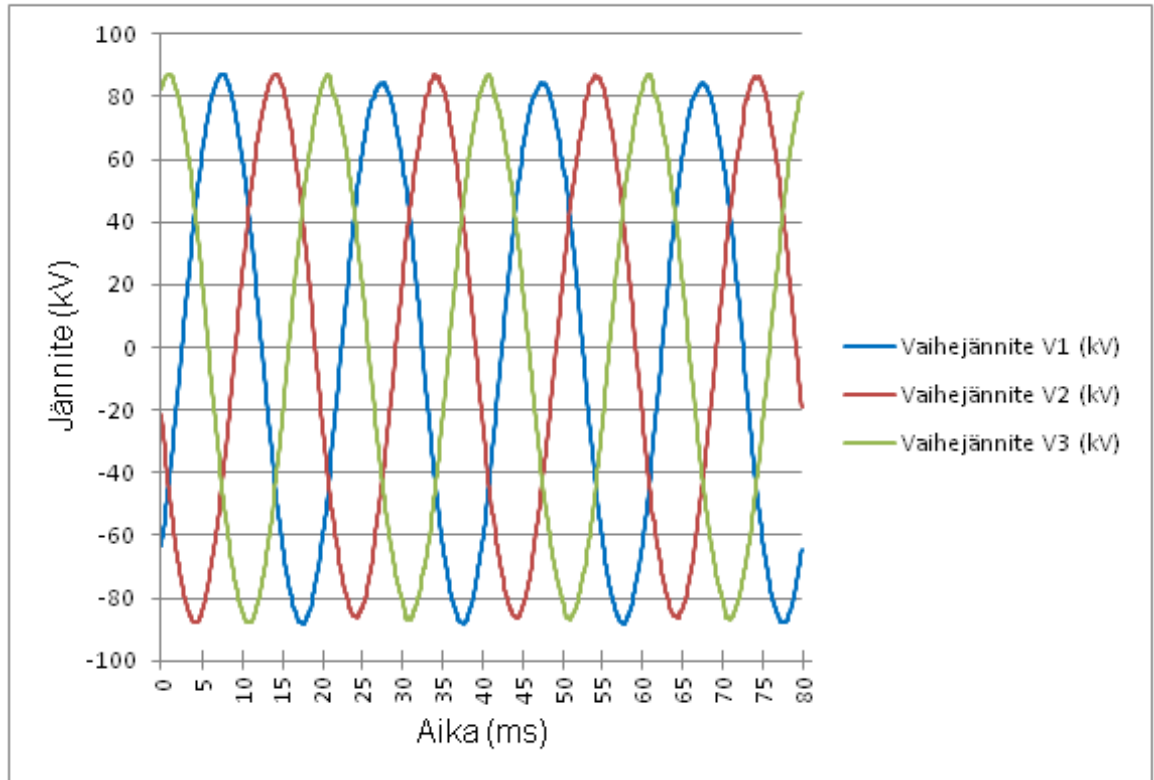
$$U_{PM6_abc} = \frac{10500}{115000} \cdot 87\,753\,V = 8012\,V \quad (4.1)$$

Muuntajan remanenssivoita sähköverkkoon kytkemisen hetkellä arvioitiin karkeasti muuntajan sähköverkosta irtikytkemishetken jännitekäyrien pohjalta. Näitä arvioita käytetään hyväksi luvussa 5, jossa rakennettu simulointimalli viritetään vastaamaan Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkkoa tässä luvussa esitettyjen remanenssivoarvioiden ja muuntajan kytkentävirtamittauksen perusteella. Taulukkoon 6 on koottu yhteen arviot päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemishetken vaihekohtaisista jäännös- eli remanenssivoista.

Taulukko 6. Päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemishetken arvioidut vaihekohtaiset remanenssivuot.

Vaihe	Remanenssivuo Φ
V1	0,4 pu
V2	-0,65 pu
V3	0 pu

Muuntajan ensiöpuoli kytkettiin valtakunnan verkkoon 9.6.2014 kello 12:45:33 muuntajan toisiopuolen katkaisijan ollessa auki. Verkon kytkentätilannetta päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana on selvitetty tarkemmin luvussa 5.2. Kuvassa 19 on esitetty 110 kilovoltin kytkinkentän kiskojaännitteet päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen aikana. Kuvien 19 ja 20 x-akselin aikayksiköissä muuntajan PM6 sähköverkkoon kytkeminen tapahtui ajanhetkellä 21,1 ms. Kuvan 19 jännite on siis mitattu kytkinkentän kiskoista, joten kyseessä ei ole päämuuntajan PM6 ensiökäämien jännite, koska mittauspisteen ja päämuuntajan PM6 välissä on 850 metriä pitkä maakaapeli. Kuvasta 19 havaitaan vaiheen V1 jännitteen hieman pienenevän vaiheisiin V2 ja V3 verrattuna muuntajan verkkoon kytkemisen jälkeen. Vaiheen V3 osalta jännitteen käyrämuoto kokee suurimman muutoksen, mutta kaikki vaihejännitteet muistuttavat muuntajan sähköverkkoon kytkemisen jälkeen lähes siniaaltomaista käyrää.

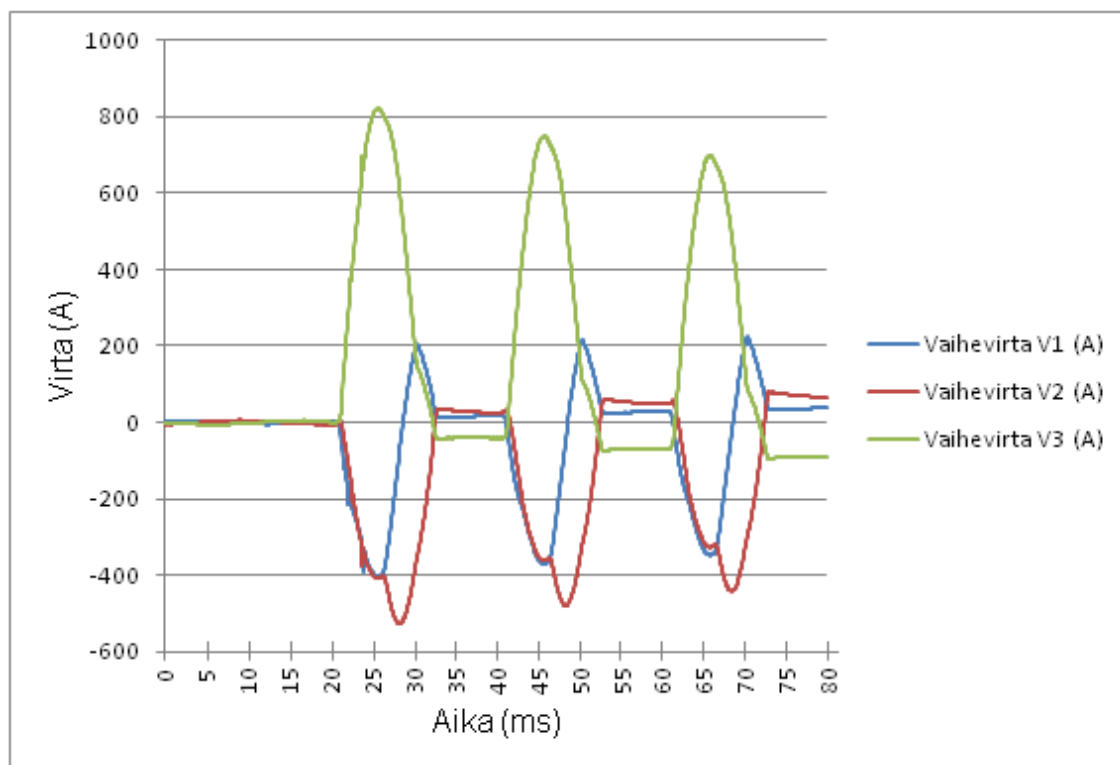


Kuva 19. 110 kilovoltin kytkinkentän kisko­jännitteet päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen aikana.

Kuvassa 20 on esitetty päämuuntajan PM6 kolmivaiheinen kytkentäsäysvirta. Kuten kuvasta 19 havaitaan, tapahtuu päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkeminen vaiheen V3 osalta jännitteen huippuarvon kohdalla. Tästä johtuen vaiheen V3 muodostama käämivuo kasvaa ensimmäisen 5 millisekunnin ajan. Kuvan 20 vaihevirrasta vaiheelle V3 havaitaan rautasydämen kyllästyvän merkittävästi, joten aiemmin tässä luvussa tehty arvio remanenssimagneettivuolle vaiheen V3 osalta ei voi pitää paikkaansa. Vaiheen V2 osalta sähköverkkoon kytkeminen tapahtuu jännite­käyrän laskevalla reunalla ja noin arvossa -0,7 pu. Vaiheen V2 muodostama käämivuo on pienemässä, joten myös vaiheen V2 ottama vaihevirta lähtee jaksollaan negatiiviseksi. Vaiheen V1 osalta sähköverkkoon kytkeminen tapahtuu jännite­käyrän nousevalla reunalla ja noin arvossa -0,7 pu. Vaiheen V1 muodostama käämivuo on pienemässä, mutta kääntyy kytkentäsäysvirtajakson aikana kasvavaksi. Tästä johtuen vaiheen V1 ottama vaihevirta lähtee negatiiviseen suuntaan, mutta kytkentäsäysvirtajakson lopulla tekee piston positiivisten virta-arvojen puolelle.

Päämuuntajan PM6 ensiökäämien kytkentäryhmällä on myös oma vaikutuksensa 3-vaiheisen kytkentäsäysvirran käyrämuotoon. Koska päämuuntajan ensiöpuolen käämitykset ovat kytkettyinä tähteen ja tähtipiste maadoitettu (ensiöpuolen kytkentä YN), ei vaihevirtojen summa ole välttämättä aina nolla. Ensiöpuolen tähtipisteen maadoituksesta johtuen vaihevirtojen summavirta eli niin sanottu nollavirta i_0 , pääsee kulkemaan maadoitusreittiä pitkin. Päämuuntajan rautasydämen vaiheiden välinen magneettinen

kytkentä saa aikaan sen, että vaihekohtaisten virtojen summa pyrkii muuntajan verkkoon kytkemisen aikana olemaan koko ajan lähellä arvoa nolla.



Kuva 20. Päämuuntajan PM6 kolmivaiheinen kytkentäsäysvirta.

Vaiheen V3 osalta päämuuntajan PM6 kytkentäsäysvirta käy korkeimmillaan arvossa 810 A. Kytkentäsäysvirta vaimenee niin, että vaiheen V3 osalta virran huippuarvo on pudonnut kolmannessa jaksossa arvoon 700 A.

4.3 Magnetointimittausten yhteenveto

Magnetointimittausten tavoite ei täysin toteutunut, koska magnetoitavaa muuntajaa ei saatu kertaakaan ferresonanssiin sähköverkon kanssa. Tähän osattiin kuitenkin varautua, koska muuntaja jouduttiin kytkemään verkkoon ja pois verkosta satunnaisella hetkellä jännitekäyrää. Tällöin muuntajaan jäävä remanenssivuo ei välttämättä ole tarpeeksi suuri ja muuntajan verkkoon kytkeminen ei saa muuntajarautaa riittävästi kyllästymään. Magnetoinneista saatiin kuitenkin tallennettua onnistuneesti useita kytkentäsäysvirtatransientteja, joten viidennen magnetointikytkennän jälkeen tyydyttiin näihin tuloksiin. Kytkentäsäysvirta kuormittaa muuntajaa ja aiheuttaa riskin muuntajan vaurioitumisesta, joten magnetointikytkentöjä ei jatkettu enää tästä eteenpäin. Kytkentäsäysvirran taltioiminen oli kuitenkin kenttämittausten tärkein asia, koska kytkentäsäysvirran käyrämuodon hyödyntäminen on ratkaisevassa osassa sähköverkon tietokonesimulaatiomallin konfiguroimisessa.

Ferroresonanssin aikaisten vaihejännitteiden ja –virtojen tallentaminen suurjänniteverkosta olisi ollut merkittävä lisä tämän diplomityön tuloksiin. Mikäli ferroresonanssi olisi saatu tallennettua, olisi simuloituja resonanssituloksia pystynyt vertailemaan myös mitaustuloksien kanssa.

5. SIMULOINTIMALLIEN RAKENTAMINEN

Ferroresonanssiherkkyyden muuttumista muuntajavaihdoksen myötä lähdettiin tutki-
maan tietokonesimulaation avulla, koska käytännön kokeiden järjestäminen tehomuun-
tajilla sekä 110 kilovoltin jännitetasolla asettaa omat haasteensa ja ilmiön tutkiminen
miniatyyrilaitteistoilla ei tuota riittävän luotettavaa lopputulosta. Simulointimallien ta-
pauksessa on hyvä muistaa, että mallien avulla pyritään kuvaamaan mahdollisimman
tarkasti käytännön järjestelmää, mutta lopputulosten tarkkuus riippuu lähtötiedoista sekä
rakennetun mallin tarkkuudesta. Simuloimalla on mahdollista saavuttaa uskottavasti
väärää tuloksia, joten on muistettava olla sopivan kriittinen saatujen tulosten analysoin-
nin suhteen.

Tässä diplomityössä rakennettiin Boliden Harjavalta Oy:n (BOHA:n) sähköverkosta
simulointimalli, joka viritettiin vastamaan oikeaa teollisuusalueen sähköverkkoa verkos-
ta tehtyjen kytkentävirtamittauksien avulla. Kun simulointimalli oli saatu riittävällä
tarkkuudella vastaamaan mittaustuloksia, pystyttiin muuntajien ominaisarvoja sekä ver-
kon kapasitanssiarvoja muuttamalla etsimään yhdistelmiä, jotka ovat ongelmallisia fer-
roresonanssi-ilmiötä ajatellen. Simulointimallin avulla pystyttiin vertailemaan BOHA:n
nykyistä sekä tulevaa (VH2016) sähköverkkoa, sekä arvioimaan sähköverkon resonans-
siherkkyyden muuttumista uudella päämuuntajalla PM1.

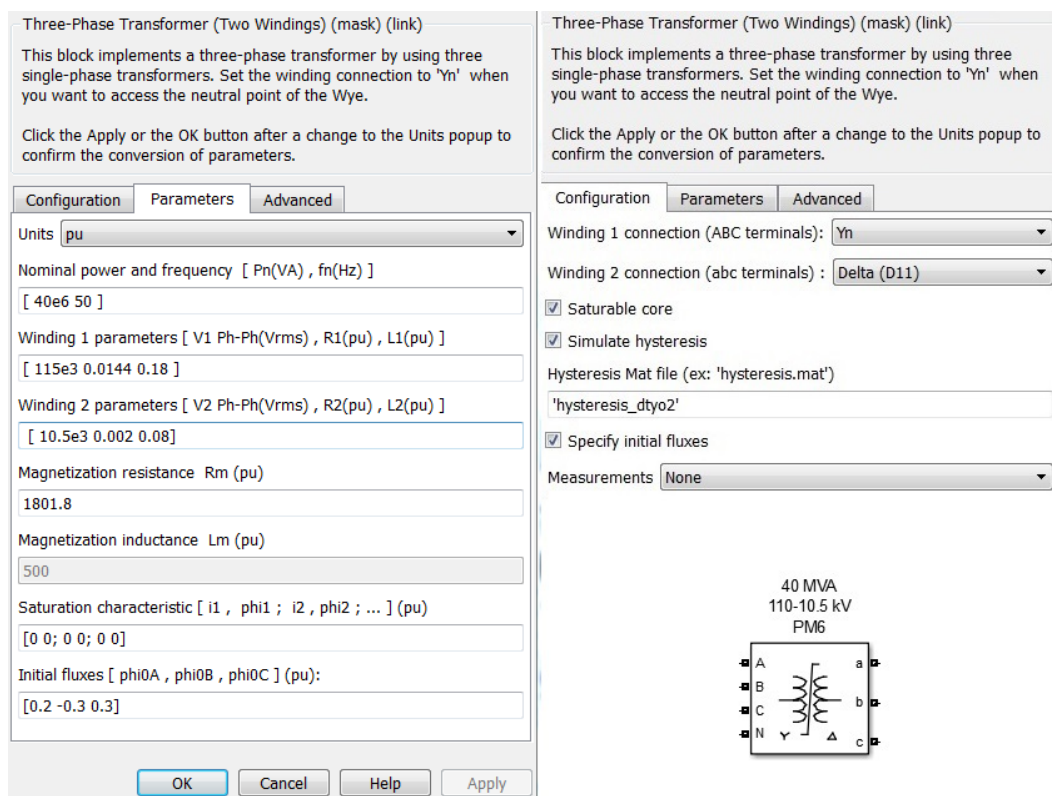
Sähköverkkojen transienttilaskentaa varten on tarjolla useita simulointiohjelmia, joista
tämän työn simulointimallin rakentamiseen valikoitui MathWorksin MATLAB-
ohjelmisto.

5.1 MATLAB/Simulink-ohjelmisto

MATLAB on erittäin korkeatasoinen ja laajaosainen matemaattinen työkalu numeeri-
seen laskentaan, visualisointiin ja ohjelmointiin. Tärkeimpiä käyttökohteita ohjelmistol-
le on datan analysoiminen sekä monimutkaisten matemaattisten yhtälöiden ratkaisemi-
nen. Ohjelmistoon kuuluvan Simulink ympäristön avulla ohjelmiston käyttökohteet laa-
jenevat entisestään. Simulink-työkaluun on rakennettu laajasti eri kirjastoja, joista löy-
tyy valmiita malleja eri tekniikan alan simulointitarpeisiin. Valmiiden mallien lisäksi
Simulink-ympäristössä on mahdollista rakentaa malleja myös systeemejä kuvaavien
matemaattisten yhtälöiden pohjalta. Tämän työn simulointimallin rakentaminen pohjau-
tui Simulinkin SimPowerSystems kirjaston mallien käyttämiseen. Tämä kirjasto sisältää
tarkkoja malleja sähkövoimajärjestelmän komponenteista ja soveltuu tämän diplomi-
työn kaltaisiin transienttilaskentatehtäviin. [16]

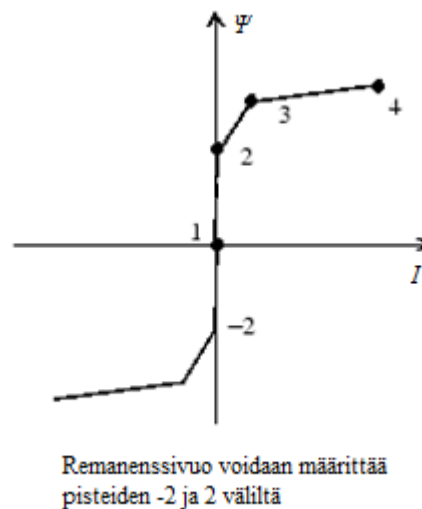
5.2 Simulointimalli Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkosta

Simulointimallin luominen lähti liikkeelle päämuuntajien mallinnuksesta. Simulink-ohjelmiston SimPowerSystems-kirjastosta löytyy yleinen muuntajamalli kolmivaiheiselle ja kaksikäimiselle muuntajalle ”Three-Phase Transformer (Two Windings)”. Muuntajamalli ottaa huomioon muuntajan rautasydämen kyllästymisen ja tätä varten malliin pystyy ohjelmoimaan tarkan *BH*-käyrän muuntajaraudasta. Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajat on kaikki rakennettu kytkentäryhmällä YNd11. Kytkentäryhmätunnukseen on kirjoitettu ensiöpuoleen viittaavat tiedot isoilla kirjaimilla ja toisiopuoleen viittaavat tiedot pienillä kirjaimilla. Tämä kyseinen kytkentäryhmätunnus tarkoittaa sitä, että muuntajan ensiöpuolen käämitykset on kytketty tähteen (Y) ja tähtipiste (N) tuotu maadoitusta varten ulos muuntajasta. Toisiopuolen käämitykset on kytketty kolmioon (d) ja käämitykset on rakennettu niin, että toisiopuolen vaihejännite on vastaavaa ensiöjännitettä 330-astetta jäljessä (kellolukema 11). Kytkentäryhmätiedon lisäksi muuntajien muuntosuhteet (115E3/10.5E3), nimellistaajuus (50 Hz) sekä nimellisteho (40E6 VA) asetettiin muuntajamallin tietoihin kuvan 21 mukaisesti. Asetuksista valittiin myös muuntajaraudan kyllästymisen simuloiminen kohdasta ”Saturable core” sekä hysteresin simuloiminen kohdasta ”Simulate hysteresis”. Valitsemalla Configuration välilehdeltä kohdan ”Specify initial fluxes”, vapautuu ”Initial fluxes”-solu muokkaamiselle. Tähän soluun käyttäjä voi asettaa muuntajan rautasydämen vaihekohtaiset jäännös- eli remanenssivuorvat.



Kuva 21. Päämuuntajan simulointimallin konfiguroiminen.

”Saturation characteristic”-solun virta- ja vuopareja käytetään muuntajan rautasydämen ΨI -käyrän konfiguroimiseen silloin, kun hystereesin simulointia ei ole valittu. Ensimmäinen virta- ja vuopari asetetaan aina nollassa. Toisella pisteellä määritetään rautasydämen maksimaalinen remanenssivuon arvo. Toisen parin virta-arvo pitää asettaa nollassa, mikäli haluaa että remanenssivuon on määritettävissä. Kolmannella virta- ja vuoparilla määrätään rautasydämen saturaatiovuon suuruus sekä virta-arvo, jolla rautasydän kyllästyy. Kuva 22 näyttää miten muuntajaraudan ΨI -käyrä muodostetaan käyttämällä näitä neljää virta- ja vuoparia. Virta- ja vuoparien avulla määritetään ΨI -käyrän positiivinen puoli ja päämuuntajan simulointimalli (kuva 21) muodostaa näiden arvojen käänteisluvuilla ΨI -käyrän negatiivisen puolen symmetrisesti. [17]



Kuva 22. Rautasydämen ΨI -käyrän muodostaminen ilman hystereesin mallinnusta neljää virta- ja vuoparia käyttäen. [18]

Tässä työssä käytettiin ΨI -käyrästä tarkempaa mallia simuloimalla myös rautasydämen hystereesihäviöt. ΨI -käyrä muodostettiin ”powergui”-elementin HDT-työkalulla (Hysteresis Design Tool), minkä avulla käyrästä saatiin muodoltaan huomattavasti tarkempi. HDT-työkalun avulla simulointimalli otti huomioon myös koersitiivoiman. Koersitiivoima on magnetomotorinen voima, joka tarvitaan remanenssivuon poistamiseksi rautasydäimestä. ΨI -käyrän konfiguroimiseksi tarvittiin muuntajaraudasta tarkkoja tietoja, jotka saatiin ABB Oy:ltä. ABB:ltä saatiin muuntajaraudan tarkka BH -käyrä (liite B), rautasydämen poikkipinta-ala sekä ylä- ja alajännitepuolen käämien kierroslukumäärät. Lisäksi muuntajan PM3 magneettiipiiristä saatiin tarkat rakennemitat, joiden avulla laskettiin magneettiipiirin pituus s .

Taulukkoon 7 on koottu ΨI -käyrän konfiguroimisessa tarvittuja tietoja. Nykyiset Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajat ovat lähes identtisiä, joten simulointimallissa käytettiin kaikille muuntajille samaa ΨI -käyrää. ΨI -käyrä konfiguroitiin päämuuntajan PM3 tietojen perusteella.

Taulukko 7. Päämuuntajan PM3 Ψ I-käyrän konfiguroimisessa tarvittavia rautasydämen ominaisuuksia.

Päämuuntaja	Sydämen poikkipinta-ala A	Yläjännitepuolen käämikierrokset N_1	Saturoitumisvuontiheys B	Magneettipiirin pituus s	Rautasydämen permeabiliteetti μ saturaatioissa
PM3	0,2317 m ²	759	1,91 T	11,47 m	1,222·10 ⁻⁵ Vs/Am

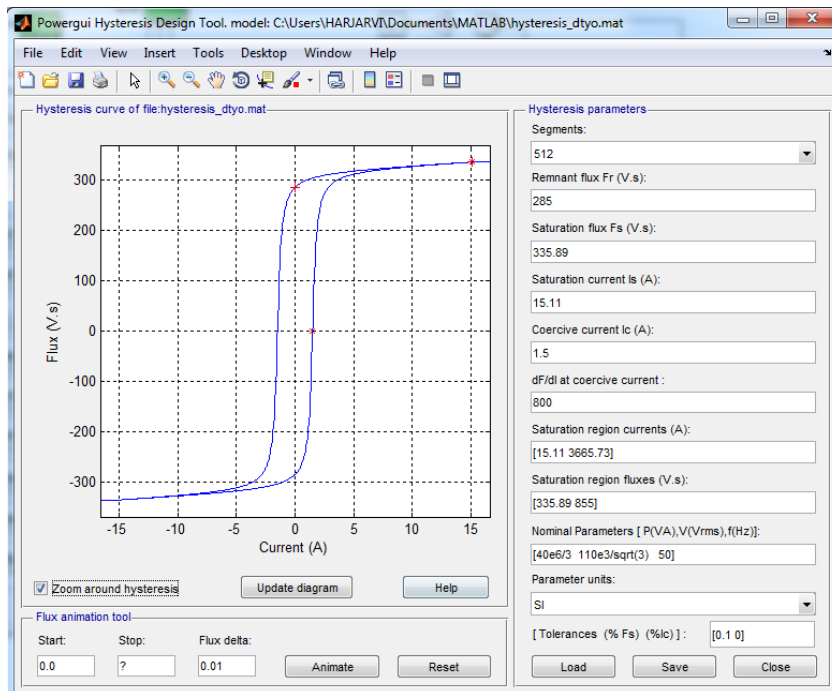
HDT-työkalussa rautasydämen BH -käyrä on esitetty käämivuon Ψ ja ensiökäämin magnetointivirran avulla, joten rautasydämen saturoitumisvuontiheys B_{sat} pitää muuttaa vastaamaan käämivuon arvoa. Käyttämällä nyt avuksi kaavaa 3.6, voidaan rautasydämen saturoitumiseen johtavan käämivuon Ψ_{sat} arvo ratkaista taulukon 7 tietojen pohjalta.

$$\Psi_{sat} = N_1 B A = 759 \cdot 1,91 \frac{Vs}{m^2} \cdot 0,2317 m^2 = 335,89 Vs \quad (5.1)$$

Päämuuntajan PM3 rautasydämen kyllästymiseen tarvittava magnetointivirta I_s voidaan ratkaista kaavan 3.3 avulla. Magneettikentän voimakkuuden H arvo saturaatiopisteessä saadaan muuntajaraudan BH -käyrästä (liite B).

$$I_s = \frac{Hs}{N_1} = \frac{1000 \frac{A}{m} \cdot 11,47 m}{759} = 15,11 A \quad (5.2)$$

Kuvassa 23 on esitetty HDT-työkalun näkymä ja Ψ I-käyrän kuva hystereesialueen ympäristöstä.



Kuva 23. Päämuuntajan PM3 Rautasydämen Ψ I-käyrän konfigurointi HDT-työkalulla (hystereesialue).

Kun hystereesialueen arvot ΨI -käyrästä oli saatu asetettua HDT-työkaluun, piti selvittää ΨI -käyrän saturaatioalueen käyttäytyminen. Saturaatioalueella muuntajarauda on täysin kyllästynyt eikä pysty enää vahvistamaan ensiökäämin muodostamaa kasvavaa magneettivuota. Saturaatiossa muuntajaraudan suhteellinen permeabiliteetti μ_r putoaa lähelle arvoa 1 ja tästä johtuen pienikin magneettivuon tiheyden B muutos tarvitsee merkittävän suuren muutoksen magneettikentän voimakkuuteen H .

Rautasydämen permeabiliteetin arvo μ saturaatiossa määritettiin muuntajaraudan BH -käyrästä (liite B). Tämä arvo laskettiin BH -käyrän muutosnopeudesta saturaatioalueella ja sijoitettiin taulukkoon 7. HDT-työkalulla piirretty ΨI -käyrä Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajien rautasydämistä piirrettiin käämivuon Ψ arvoon 855 Vs saakka. ΨI -käyrän pitää kattaa pahin mahdollinen tilanne, jossa rautasydämeen on jäänyt maksimaalinen remanenssivuo ja muuntajan sähköverkkoon kytkeminen tehdään niin, että käämin indusoima magneettivuoto on juuri lähdössä kasvamaan. ΨI -käyrää piirrettiin vielä selvästi pidemmälle, jolloin se varmasti kattaa kaikki mahdolliset simulointitilanteet. Käyttämällä nyt taulukosta 7 rautasydämen permeabiliteetin arvoa saturaatiossa, voidaan laskea päämuuntajan PM3 tarvitsema magnetointivirta I_m 855 Vs:n suuruisen magneettivuon synnyttämiseen seuraavasti.

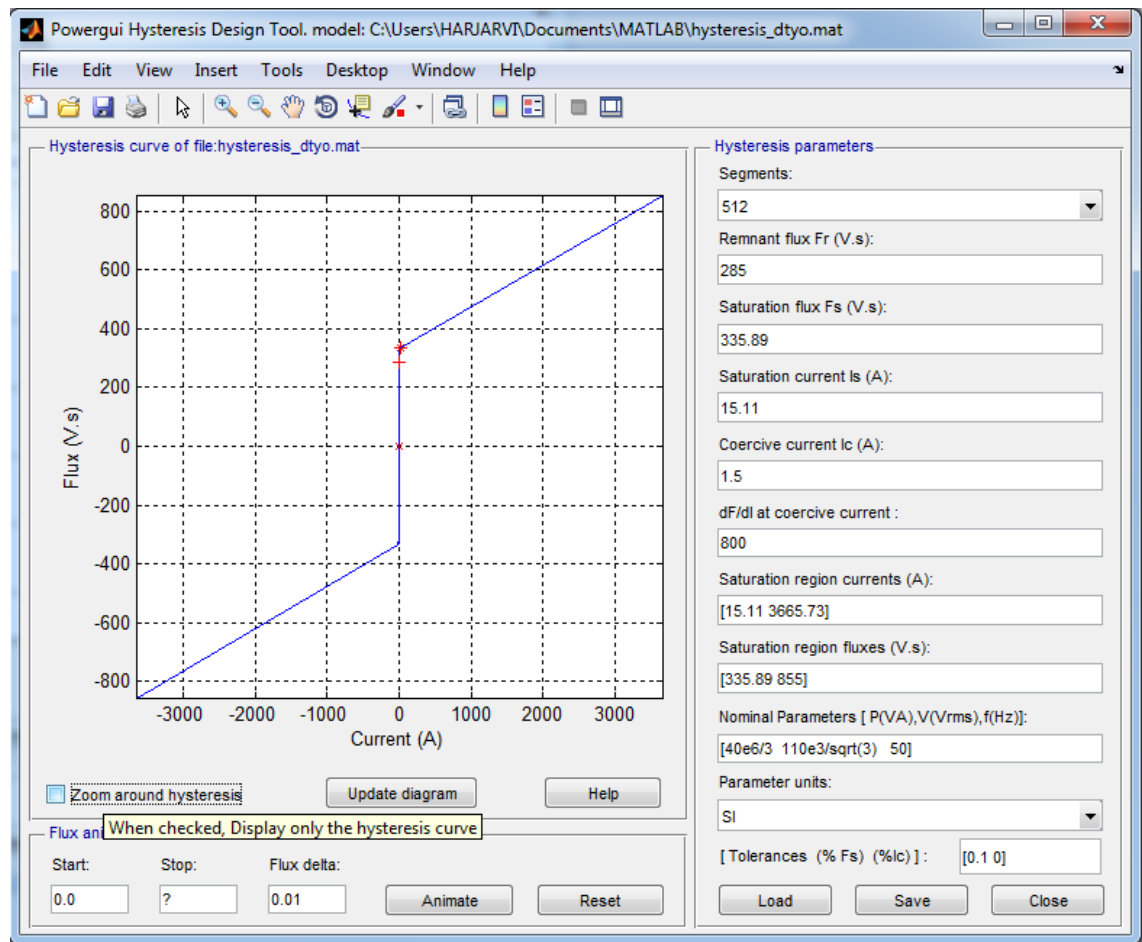
$$\Delta\Psi = 855 \text{ Vs} - 335,89 \text{ Vs} = 519,11 \text{ Vs} \quad (5.4)$$

$$\Delta B = \frac{\Delta\Psi}{N_1 A} = \frac{519,11 \text{ Vs}}{759 \cdot 0,2317 \text{ m}^2} = 2,952 \text{ T} \quad (5.5)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta B}{\mu} = \frac{2,952 \text{ T}}{1,222 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}} = 241\,600 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (5.6)$$

$$I_m = \frac{Hs}{N_1} = \frac{242\,600 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 11,47 \text{ m}}{759} = 3\,666 \text{ A} \quad (5.7)$$

Asettamalla nyt saturaatioalueen alku- ja loppupisteen virta-arvot ”Saturation region currents”-soluun sekä saturaatioalueen alku- ja loppupisteen vuoarvot ”Saturation region fluxes”-soluun, piirtää HDT-työkalu kuvan 24 mukaisesti koko ΨI -käyrän.



Kuva 24. Rautasydämen Ψ -käyrän konfigurointi HDT-työkalulla (koko alue).

Mikäli muuntajaraudan BH -käyrän mallinnuksessa käytetään HDT-työkalua ja simuloidaan myös raudan hystereesihäviöitä, pitää muuntajaraudan pyörevirtahäviöitä kuitenkin mallintaa magnetointiresistanssin r_m avulla. Muuntajan magnetointiresistanssi r_m kytkeytyy muuntajan magneettivuon synnyttämän magnetointi-induktanssin kanssa rinnan. 1-vaiheisen muuntajan sähköinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 6. Magnetointiresistanssin r_m suuruus pystytään laskemaan muuntajan kilpiarvoissa (Liite A) ilmoitetusta tyhjäkäyntihäviötehosta P_0 . Käyttämällä 3-vaiheisen sähkötehon laskukaavaa 5.8 sekä Ohmin lakia 5.9, voidaan laskea arvo vaihekohtaiselle magnetointiresistanssille r_m .

$$P = \sqrt{3}U_{LL}I \quad (5.8)$$

$$U = RI \quad (5.9)$$

$$r_m = \frac{U_{LL}^2}{P_0} = \frac{(1,0 \text{ pu})^2}{\frac{22,2 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^6} \text{ pu}} = 1801,8 \text{ pu} \quad (5.10)$$

Magnetointiresistanssin r_m arvo asetettiin muuntajaparametreihin kuvan 21 mukaisesti.

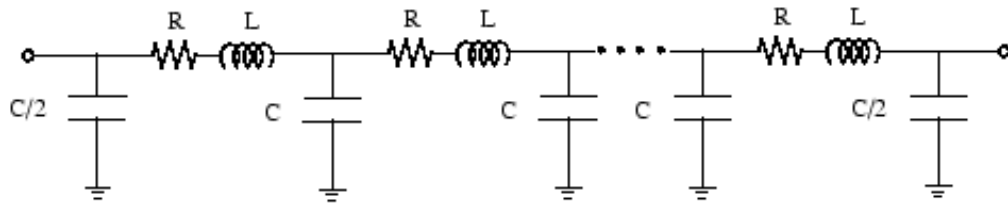
Muuntajamallien jälkeen vuorossa oli päämuuntajia syöttävien kaapelien mallinnus. Päämuuntajien PM2, PM3 ja PM6 syöttö on rakennettu 110 kilovoltin maakaapeleilla siten, että jokaiselle vaiheelle on oma maakaapeli. PM6:n vaihekohtaiset syöttökaapelit ovat poikkipinta-aloiltaan 800 mm^2 suuruisia alumiinijohtimin rakennettuja PEX-eristeisiä voimakaapeleita, joiden tyyppimerkintä on Prysmian AHXLMK-W 1x800. PM2:n ja PM3:n vaihekohtaiset syöttökaapelit ovat myös tyyppiltään Prysmian AHXLMK-W, mutta näiden kaapeleiden poikkipinta-alat ovat 300 mm^2 . Simulointimalia varten kaapeleista tarvittiin tiedoksi kaapelien pituudet, jotka löytyvät taulukosta 4 sekä kaapelien resistanssit, induktanssit ja kapasitanssit kilometriä kohti. Syöttökaapelien tekniset tiedot löytyvät kaapelivalmistajan taulukosta kuvasta 25.

OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI			AHXLMK-W 1x300 110 kV	AHXLMK-W 1x500 110 kV	AHXLMK-W 1x800 110 kV	AHXLMK-W 1x1200 110 kV	HXLK-W 1x1600 110 kV	HXLK-W 1x2000 110 kV		
Sähkönumero			0624417	0624418	0624419	0624421	0624431	0624432		
RAKENNETIETOJA (1)										
Johtimen halkaisija			mm	20,3	26,0	33,4	40,8	48,8	55,0	
Kosketussuojan ulkohalkaisija			mm	63	69	75	83	92	99	
Kaapelin ulkohalkaisija			mm	70	77	83	92	101	109	
Massa			alumiini	kg/km	810	1340	2210	3300	-	
			kupari	kg/km	-	-	-	-	14350	18000
			lyily kaapeli	kg/km	4600	5300	6100	7400	8200	8800
			kg/km	8200	9900	11900	14900	27700	32700	
MEKAANISIA ARVOJA (3)										
Pienin sallittu talvutusääde asennusvedossa			m	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	
Pienin sallittu talvutusääde lopullisessa asennuksessa (4)			m	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla			kN	4,5	7,5	8,5	8,5	8,5	8,5	
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä			kN	15	20	24	36	80	100	
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3)										
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi			johtin 20°C	Ω/km	0,100	0,0605	0,0367	0,0247	0,0113	0,0090
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (2) • 3 kaapella tasossa • 3 kaapella kolmossa			johtin 65°C	Ω/km	0,15	0,10	0,073	0,064	0,048	0,046
			johtin 90°C	Ω/km	0,15	0,11	0,073	0,065	0,048	0,046
			johtin 65°C	Ω/km	0,13	0,080	0,053	0,041	0,023	0,021
			johtin 90°C	Ω/km	0,14	0,085	0,056	0,043	0,023	0,021
Kosketussuojan tasavirtaresistanssi (1)			kosketussuoja 20°C	Ω/km	0,60	0,52	0,45	0,38	0,33	0,31
Induktanssi vaihetta kohti (1) • 3 kaapella tasossa • 3 kaapella kolmossa				mH/km	0,62	0,60	0,56	0,54	0,52	0,51
				mH/km	0,64	0,41	0,37	0,35	0,34	0,33
Käyttökapasitanssi (1)				$\mu\text{F}/\text{km}$	0,15	0,18	0,23	0,26	0,30	0,34
Varausvirta (1)				A/km	3,1	3,6	4,5	5,2	6,1	6,7
Maasulkuvirta (1)				A/km	9,2	10,7	13,6	15,7	18,2	20,0

Kuva 25. Päämuuntajien syöttökaapeleiden teknisiä tietoja. [19]

Syöttökaapelien mallinnuksessa käytettiin SimPowerSystems-kirjaston elementtiä ”Pi Section Line”, joka mallintaa yksivaiheista siirtojohtoa π muotoon kytkettyjen parametrien avulla. Pii-johtomallissa johtopituus on pilkottu pieniin osiin ja johdon kokonainen malli koostuu useasta RLC-kytkennästä kuvan 26 mukaisesti. Tässä työssä johdon mallinnuksessa käytettiin vain yhtä π :n muotoista RLC-kytkentää, syöttökaapeleiden pituudesta johtuen.



Kuva 26. ”Pi Section Line”-komponentin sijaiskytkentä.

Simulointeja varten tarvittiin kaksi erilaista kaapelimallia, joiden tiedot saatiin kaapeli-valmistajan antamasta taulukosta (kuva 25). Kaapelimallit nimettiin kaapelien tyyppi-merkintöjä apuna käyttäen seuraavasti, AHXLMK-W 1x800Al sekä AHXLMK-W 1x300Al. Kaapelimallien parametriarvot syötettiin simulointiohjelmaan kuvan 27 mukaisesti.

Pi Section Line (mask) (link)

PI section transmission line. RLC elements are computed using hyperbolic corrections at specified frequency.

Parameters

Frequency used for rlc specification (Hz):

Resistance per unit length (Ohms/km) [r]:

Inductance per unit length (H/km) [l]:

Capacitance per unit length (F/km) [c]:

Line length (km):

Number of pi sections:

Measurements

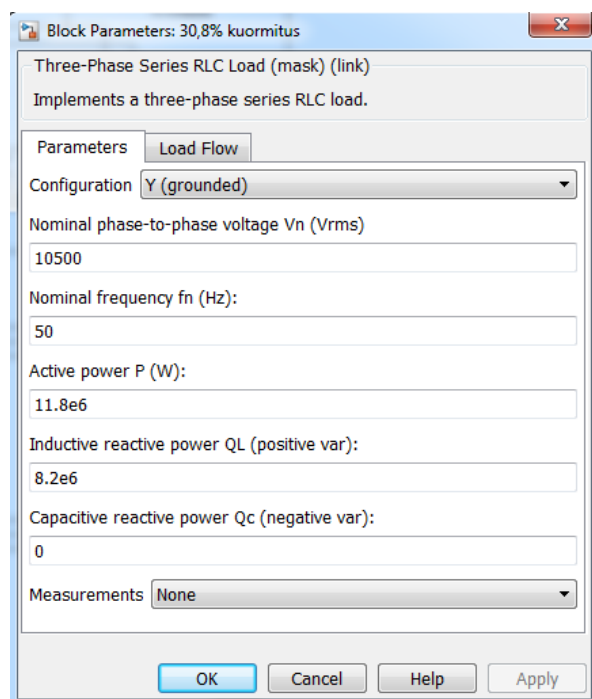
Kuva 27. Päämuuntajan syöttökaapelin AHXLMK-W 1x800Al konfiguroiminen.

Ensimmäisiä simulointeja varten piti selvittää mittaushetken tarkat kuormitukset verkossa kiinni olleiden päämuuntajien osalta. Nämä tiedot saatiin Shneider Electricin häiriötallentimista, jotka tallentavat 15 minuutin välein päämuuntajan läpi virtaavan näennäistehon S , pätötehon P sekä loistehon Q keskiarvot. PM6:n magnetointimittauksen aikana 9.6.2014 kello 12:40, muiden päämuuntajien kuormitukset sekä kompensointikondensaattorien tehot olivat taulukon 8 mukaiset.

Taulukko 8. Päämuuntajien PM1, PM2 ja PM3 kuormitukset verkossa päämuuntajan PM6 verkkoon kytkemisen hetkellä.

Päämuuntaja	Päteteho (MW)	Loisteho (MVA _r)	Näennäisteho (MVA)	Kuormitusprosentti	Kompensointiteho (MVA _r)
PM1	19,4	3,5	19,7	49,3 %	-4,2
PM2	11,8	3,7	12,3	30,8 %	-4,5
PM3	4,6	2,2	5,0	12,5 %	0

Loisteho Q voi olla sekä induktiivista että kapasitiivista. Kapasitiivinen loisteho on verkon kapasitanssien (kondensaattorit) aikaan saamaa negatiivista loistehoa. Negatiivinen etumerkki kertoo sen, että kapasitiivinen komponentti tuottaa verkkoon loistehoa. Induktiivinen loisteho on taas verkon induktanssien (käämit, moottorikuormat) aikaan saamaa positiivista loistehoa, joka on verkosta katsottuna kulutettua loistehoa. Koska magnetointimittaushetkellä kaikkien päämuuntajien loistehot olivat positiivisia, on todellinen kuormitus ollut häiriötallentimen mittaama loistehon arvo sekä lähdön takana kiinni ollut kompensointiteho summattuna. Kuormitusten mallinnuksiin työssä käytettiin SimPowerSystems-kirjaston elementtiä ”Three-Phase Series Load”, joka mallintaa kuormitusta sarjaan kytketyn vastuksen, kelan ja kondensaattorin avulla. Kuormitusmalliin syötettiin ainoastaan resistanssin ja induktanssin aiheuttamat kuormitukset ja kompensointikondensaattorit kytkettiin verkkoon omina komponentteinaan. Kuormitusmallista päämuuntajan PM2 malli on esitetty tarkemmin kuvassa 28.



Kuva 28. Päämuuntajan PM2 kuormitusmallin konfiguroiminen.

Verkkoon kytketyistä kompensointikondensaattoreista tiedettiin niiden tuottama loistehon suuruus, joten simulointimallia varten täytyi ratkaista kompensointia vastaavat vaihekohtaiset kapasitanssiarvot. Kaavassa 5.17 on ratkaistu päämuuntajan PM1 vaihekohtaisten kompensointikapasitanssien suuruus käyttämällä hyväksi kaavojen 5.11 ja 5.14 sisältöä. Kaavassa 5.11 on laskettu kolmivaiheinen loisteho puhtaasti kapasitiiviselle kuormalle.

$$Q_C = \sqrt{3}U_{LL}I \sin(-90^\circ) = -\sqrt{3}U_{LL}I \quad (5.11)$$

Kondensaattorilla on vaihtovirtaa vastustava ominaisuus eli kapasitiivinen reaktanssi X_c , jonka määräytyminen on esitetty kaavassa 5.12. Käämillä eli kelalla on vaihtovirtaa vastustava ominaisuus eli induktiivinen reaktanssi X_L , jonka määräytyminen on esitetty kaavassa 5.13. Sijoittamalla kondensaattorin vaihtovirtavastus X_c Ohmin lakiin, saadaan muunnos Ohmin laista kapasitiiviselle piirille (kaava 5.14).

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (5.12)$$

$$X_L = \omega L \quad (5.13)$$

$$U = X_c I \quad (5.14)$$

$$Q_C = \frac{-\sqrt{3}U_{LL}U}{X_c} = \frac{-U_{LL}^2}{X_c} \quad (5.15)$$

Yhdistämällä nyt kapasitiivisen reaktanssin kaava (5.12) sekä loistehon laskukaava (5.15), saadaan ratkaistua vaihekohtainen kapasitanssi C kolmivaiheisesta kompensointitehosta Q_{komp} kaavan (5.16) mukaisesti.

$$C = \frac{Q_{komp}}{-\omega U_{LL}^2} \quad (5.16)$$

$$C_{PM1} = 129,9 \mu F \quad (5.17)$$

Päämuuntajan PM1 lähtöön oli kuormituksen lisäksi kytkettynä mittaushetkellä kompensointitehoa 4,5 MVAR, mikä vastaa noin 130 μF :n vaihekohtaisia kapasitansseja. Päämuuntajan PM2 lähtöön kytketty 4,2 MVAR:n kompensointiteho taas vastaa 121 μF :n vaihekohtaisia kapasitansseja.

Käyttämällä nyt tässä luvussa rakennettuja simulointimalleja Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkon komponenteista, voidaan rakentaa päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemishetkeä vastaava simulointimalli (kuva 30). 110 kilovoltin kantaverkko mallinnettiin 3-vaiheisen jännitelähteen avulla, jonka kanssa sarjaan kytkettiin 3-vaiheinen kuorma mallintamaan Harjavallan suurteollisuuspuiston kytkinkentän liitännätpisteen oikosulkutehoa. 110 kilovoltin sähköverkon tapauksessa siirto johdon reaktanssi on jo merkittävästi johdon resistanssia suurempi, joten oikosulkuteho määritettiin

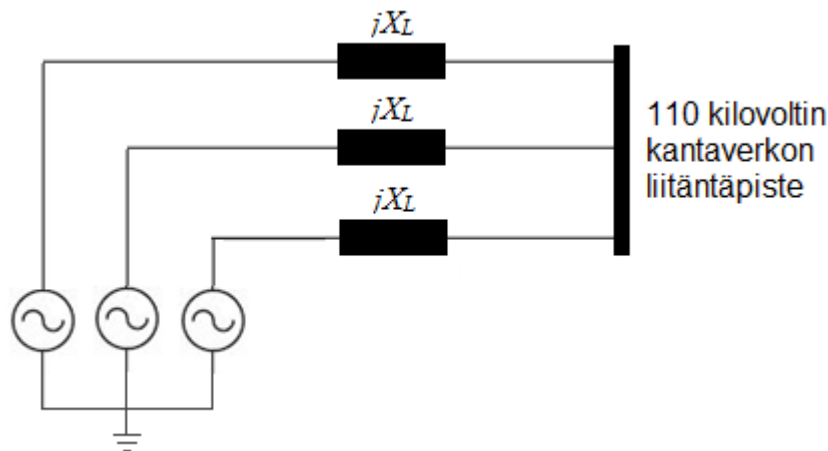
käyttämällä pelkästään reaktanssia tehon laskukaavassa. Fingrid Oy:ltä saatiin tieto Harjavallan suurteollisuuspuiston kytkinkentän liitäntäpisteen oikosulkutehon maksimi- ja minimiarvosta. Oikosulkutehojen suuruudeksi 110 kilovoltin liitäntäpisteessä ilmoitettiin arvot $S_{k_max} = 2120$ MVA ja $S_{k_min} = 900$ MVA. Simuloinneissa käytettäväksi liitäntäpisteen oikosulkutehoksi valittiin näiden maksimi- ja minimitehojen keskiarvo $S_{k_avg} = 1510$ MVA. Kaavassa 5.18 on laskettu kolmivaiheinen oikosulkuteho S_k sähköverkon pääjännitteen U_{LL} ja vaihevirran I avulla.

$$S_k = \sqrt{3}U_{LL}I \quad (5.18)$$

Käyttämällä nyt avuksi kaavoissa 5.12 – 5.15 esitettyä asiaa, voidaan ratkaista vaihekohtainen induktanssi L liitäntäpisteen oikosulkutehon S_{k_avg} avulla seuraavasti (kaava 5.19).

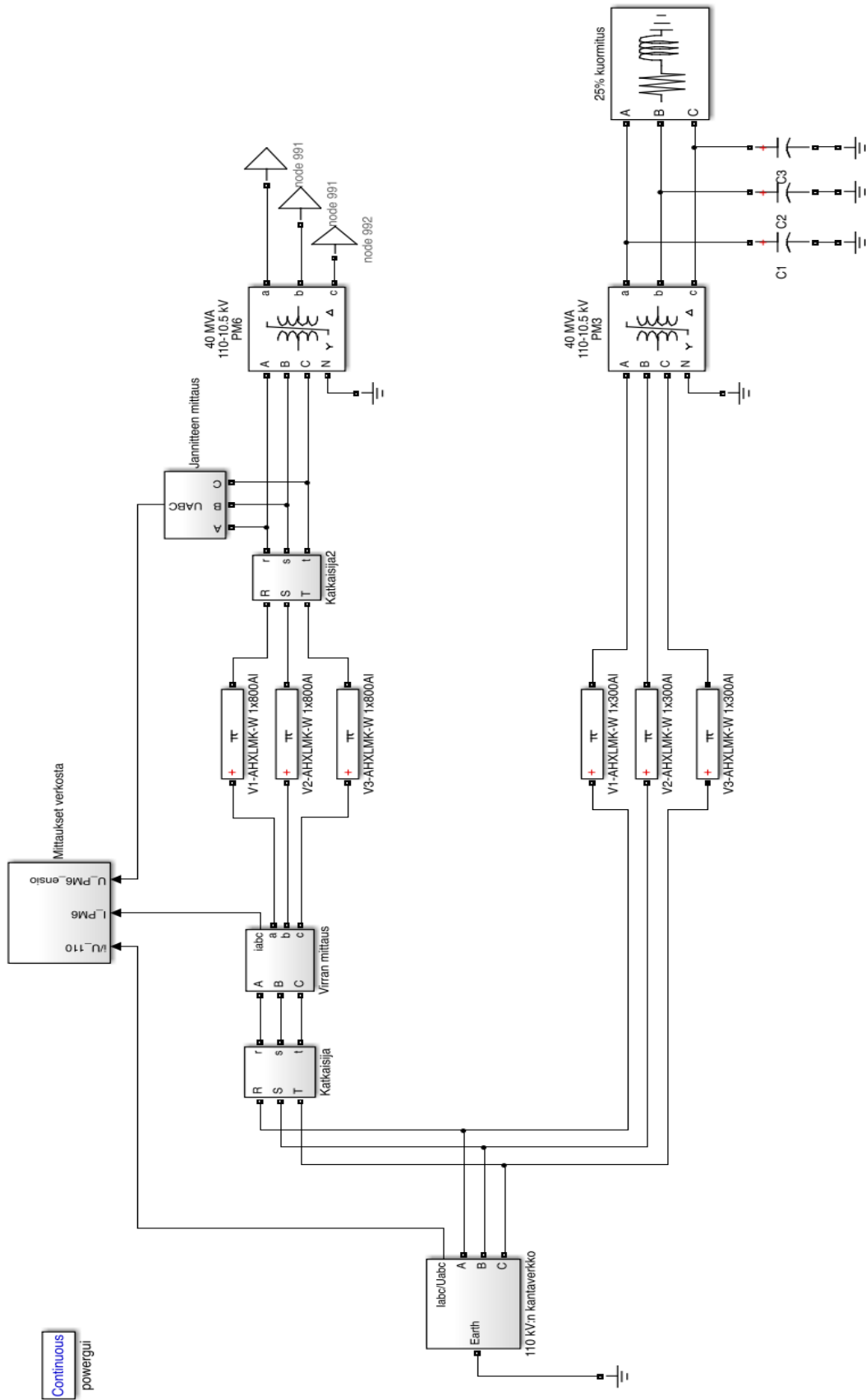
$$L = \frac{U_{LL}^2}{\omega S_{k_avg}} = 25,5 \text{ mH} \quad (5.19)$$

Kuvassa 29 on esitetty 110 kilovoltin kantaverkon simulointimallin sijaiskytkentä, jossa tehollisarvoltaan $110/\sqrt{3}$ kV:n suuruiset jäykät (ideaaliset) vaihejännitelähteet syöttävät induktiivisten vaihekuormien läpi Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkkoa.



Kuva 29. 110 kilovoltin kantaverkon simulointimallin sijaiskytkentä.

Kuvassa 31 on esitetty sähköverkkomalli, jossa ainoastaan päämuuntaja PM3 on kuormitettuna kiinni sähköverkossa ja päämuuntajan PM6 osalta voidaan tehdä erilaisia sähköverkkoon kytkemisiä. Kuvassa 31 esitettyä sähköverkkomallia käytetään luvun 5.7 simuloinneissa, joissa tutkitaan sarjaferroresonanssipiirin käyttäytymistä.



Kuva 31. Simulointimalli, jossa PM6 kytketään sähköverkkoon PM3:n ollessa kuormittuna verkossa.

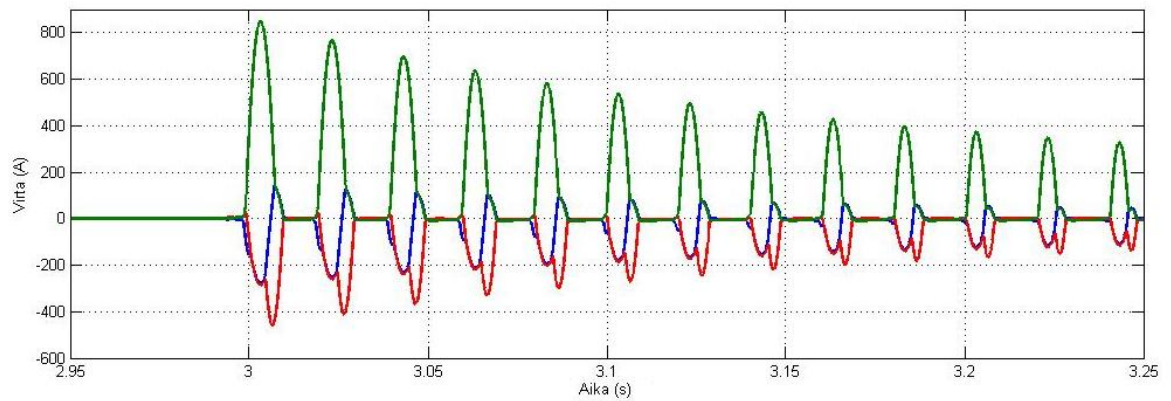
5.3 Päämuuntajan PM6 kytkentämittauksia vastaavat simulointitulokset

Simulointimallin verkko rakennettiin aluksi vastaamaan mahdollisimman tarkasti päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemishetken kytkentätilannetta (kuva 30) ja pyrittiin saamaan päämuuntajan verkkoon liittämisen aikaansaamat simulointitulokset vastaamaan verkkoon kytkennän mittaustuloksia. Simulointimallissa päämuuntajat PM1, PM2 ja PM3 kytkettiin sähköverkkoon heti simuloinnin käynnistymishetkellä. Näiden päämuuntajien remanenssivoiksi asetettiin jokaiselle vaiheelle 0 pu, jotta päämuuntajat saatiin kytkettyä turvallisesti sähköverkkoon ilman ferresonointia. Päämuuntajan PM6 syöttökaapeli kytkettiin sähköverkkoon ajanhetkellä $t = 1$ s. Kaapelin kytkentävirrän (=latausvirta) vaimennuttua kytkettiin päämuuntajan PM6 ensiöpuoli sähköverkkoon ajanhetkellä $t = 2,9935$ s. Simuloinnin aikana jouduttiin säätämään muuntajan ensiöpuolen katkaisijan ”Katkaisija2” kytkentähetken tarkkuutta, jotta päämuuntajan kolmivaiheinen kytkentäsäysvirta saatiin käyrämuodoiltaan ja amplitudeiltaan vastaamaan parhaiten mittaustulosten kytkentäsäysvirtaa (kuva 20). Lopulta katkaisijan kytkentäajaksi valikoitui ajanhetki $t = 2,9935$ s. Päämuuntajan PM6 vaihekohtaisten remanenssivoiden alkuarvot saatiin taulukosta 6, ja nämä arvot sijoitettiin päämuuntajan simulointimallin parametrisoluun ”Initial fluxes” (kuva 21). Päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen simuloinnin aikana jouduttiin näitä vaihekohtaisia remanenssivuoarvoja hieman muuttamaan alkuperäisistä arvioiduista vuoarvoista. Vaiheiden V1 ja V2 osalta on hyvin havaittavissa raudan jäännösmagneettivuolle tyypillinen ominaisuus eli kun ulkoinen magneettikenttä poistetaan, palautuu magneettivuon arvo hieman saavutetusta arvostaan takaisin magneettivuon nolla-arvoa kohti. Vaiheen V3 osalta näin ei kuitenkaan käynyt ja vaiheen remanenssivuoita jouduttiin kasvattamaan, jotta kytkentäsäysvirrasta saatiin mittaustuloksia vastaava. Toisena vaikuttavana asiana 3-vaiheisen sydänmuuntajan tapauksessa on kaavassa 3.9 esitetty asia magneettivoiden solmupisteen summautumisesta, jolloin vaiheiden magneettivoiden summasta pitää siis jokaisella ajanhetkellä tulla nolla. Taulukkoon 9 on koottu vielä yhteen päämuuntajan PM6 mittaustulosten pohjalta arvioidut remanenssivuoat sekä simulointimallissa lopulta käytetyt remanenssivuoarvot.

Taulukko 9. Päämuuntajan PM6 verkkoon kytkennän simuloinnissa käytetyt vaihekohtaiset remanenssivuoarvot.

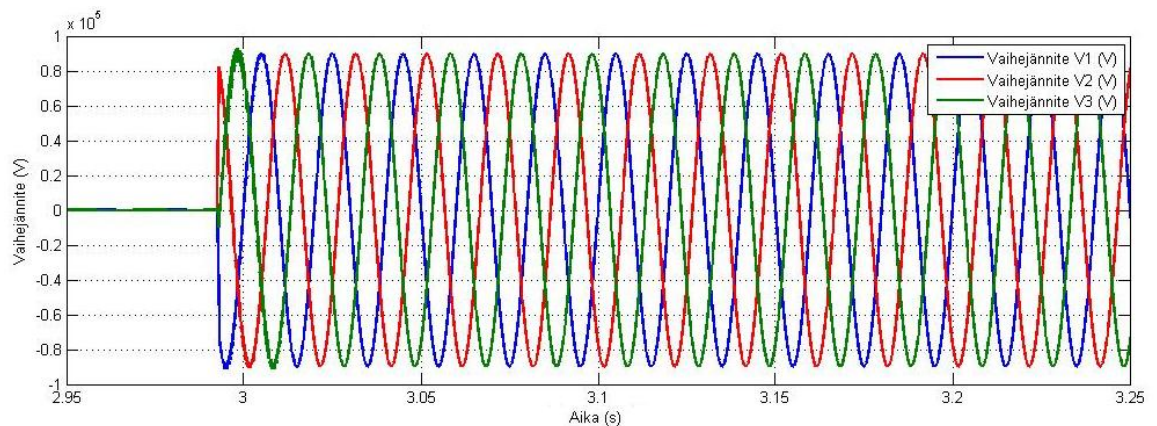
Vaihe	Arvio remanenssivuosta Φ	Simuloinnissa käytetty remanenssivuo Φ
V1	0,4 pu	0,2 pu
V2	-0,65 pu	-0,3 pu
V3	0 pu	0,3 pu

Simuloimalla päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkeminen ajanhetkellä 2,9935 sekuntia sekä käyttämällä taulukossa 9 esitettyjä remanenssivuoarvoja, päästään kytkentäsäysvirran osalta erittäin lähelle mitattua kytkentäsäysvirtaa. Kuvassa 32 on esitetty simuloitua vaihevirtaa päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisestä, mittaustuloksia vastaavassa sähköverkon kytkentätilanteessa. Kun verrataan mitattuja vaihevirtoja, jotka on esitetty kuvassa 20, sekä simulointimallin avulla simuloituja vaihevirtoja, voidaan todeta simulointimallin vastaavan riittävällä tarkkuudella Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkkoa. Simuloitun kytkentäsäysvirran 3-vaiheinen käyrämuoto muistuttaa selvästi mitattua kytkentäsäysvirtaa ja myös kytkentäsäysvirran vaimeneminen on yhtä voimakasta. Muuntajan kytkentäsäysvirran vaimeneminen saatiin mittaustuloksia vastaavaksi hakemalla päämuuntajan PM6 ensiökäämin resistanssiarvo sopivaksi. Sopivaksi ensiökäämin resistanssiarvoksi saatiin kokeilemalla $RI = 0,0144$ pu ja se syötettiin simulointimalliin päämuuntajan parametrit välilehdellä (kuva 21).



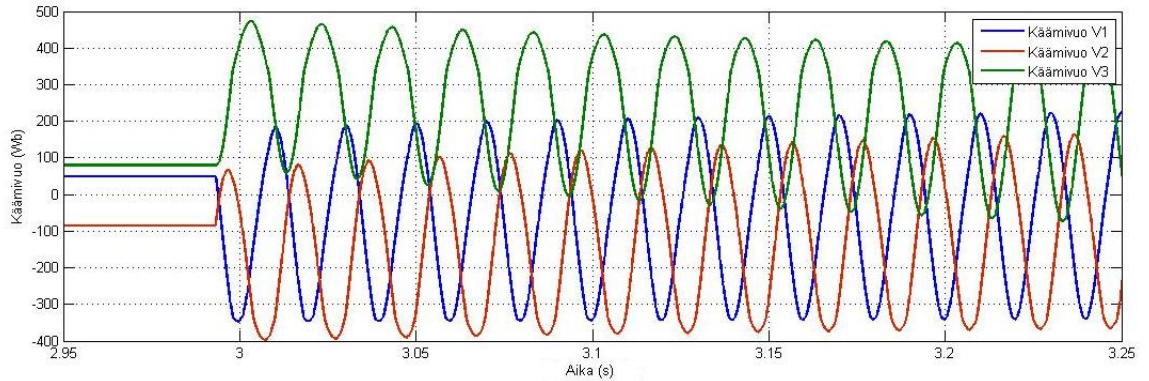
Kuva 32. Päämuuntajan PM6 ensiöpuolen simuloitua vaihevirtaa mittaushetkeä vastaavasta sähköverkkoon kytkemisestä.

Kuvassa 33 on esitetty päämuuntajan PM6 verkkoon kytkemisen aikaiset vaihejännitteet. Vaihejännitteiden käyrämuodoista nähdään, että muuntajan sähköverkkoon kytkeminen onnistui ilman ferroresonanssiin ajautumista.



Kuva 33. Päämuuntajan PM6 ensiöpuolen simuloitua vaihejännitteitä mittaushetkeä vastaavasta sähköverkkoon kytkemisestä.

Kuvassa 34 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat vaihekohtaiset käämivuot muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana. Ennen päämuuntajan sähköverkkoon kytkemistä voidaan kuvaajasta havaita päämuuntajan vaihekohtaiset remanenssivuoarvot, jotka on esitetty myös taulukossa 9. Kaavassa 5.1 ratkaistiin päämuuntajan PM6 rautasydämen kyllästymiseen johtavan käämivuon arvo Ψ_{sat} . Kyllästymiseen johtava käämivuon arvo on 335,89 Wb, joten kuvasta 34 nähdään päämuuntajan PM6 saturoituvan kaikkien kolmen vaiheen osalta mittaushetkeä vastaavassa kytkentätilanteessa.



Kuva 34. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat käämivuot magnetoitimitausta vastaavassa simuloinnissa.

6. FERRORESONANSSIN TUTKIMINEN SIMULOINTIMALLIN AVULLA

Nyt kun simulointimalli saatiin rakennettua vastaamaan mittaustuloksia, pystyttiin aloittamaan ferroresonanssin tutkiminen Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa. Työn tarkoituksena oli tutkia päämuuntajan PM1 uusimisen vaikutuksia ferroresonanssiherkkyyteen, mutta aiheelliseksi koettiin tutkia myös verkon muiden parametrien vaikutuksia resonointiherkkyyteen. Seuraavaksi esitetään tuloksia simuloinneista joissa tutkittiin reunaehtoja, joiden puitteissa Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa ajaututaan ferroresonanssiin. Tutkimuksiin valittiin seuraavia tilanteita:

- Ferroresonanssiin ajautuminen mittaushetkeä vastaavassa kytkentätilanteessa
- Päämuuntajan syöttökaapelin pituuden vaikutus ferroresonanssiin
- Päämuuntajan syöttökaapelin sähköverkkoon kytkemisen vaikutus ferroresonanssiin
- Päämuuntajan ensiöpuolen katkaisijan vikaantuminen, jolloin muuntajan sähköverkkoon kytkeminen tapahtuu kahden vaiheen kautta
- Uuden päämuuntajan PM1 vaikutus sähköverkon ferroresonanssiin
- Kytkentäsysäysvirtailmiön hallitseminen ohjattua katkaisijaa ja ohjattua kytkentähetkeä t_{opt} käyttäen

6.1 Ferroresonanssiin ajautuminen Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa

Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkosta rakennetun simulointimallin avulla lähdettiin tutkimaan erilaisia tilanteita, joiden seurauksena sähköverkossa on mahdollista saada aikaiseksi ferroresonointitila. Ensimmäinen tutkimus perustui mittaushetken kytkentätilanteen tarkasteluun. Tutkimuksessa lähdettiin kasvattamaan päämuuntajan PM6 remanenssivoiden arvoja suuremmiksi ja tehtiin muuntajan sähköverkkoon kytkeminen ferroresonanssia ajatellen mahdollisimman huonolla hetkellä.

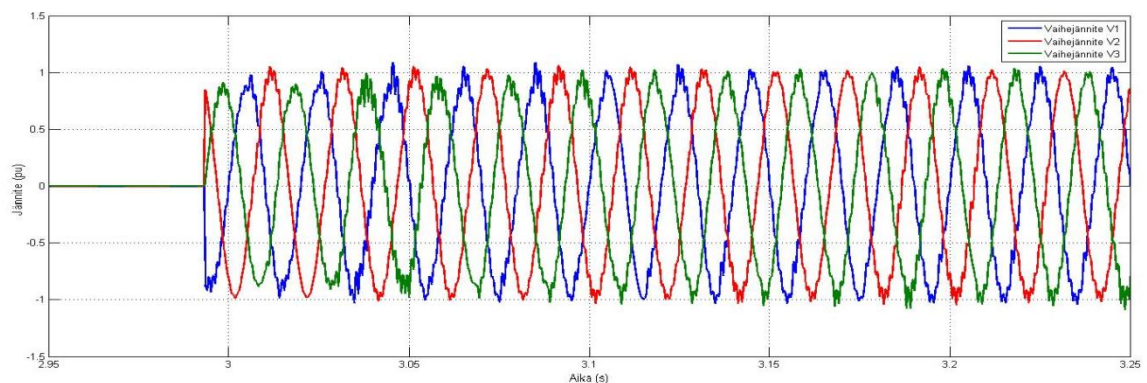
Harjavallan suurteollisuuspuiston nykyisessä sähköverkossa päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen jälkeen on mahdollista ajautua rinnakkaisferroresonanssiin. Rinnakkaisferroresonanssiipiiri syntyy 110 kilovoltin verkon käyttökapasitanssien kytkeytymisestä rinnan päämuuntajan epälineaarisen induktanssin kanssa.

Taulukkoon 10 on koottu yhteen päämuuntajien parametriarvot, jotka johtivat stabiiliin rinnakkaisferroresonanssiin Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkkoa vastaavassa simulointimallissa.

Taulukko 10. *Stabiiliin ferroresonanssin johtaneet parametriarvot Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkkoa vastaavassa simulointimallissa.*

Päämuuntaja	Remanenssi- vuo V1 (pu)	Remanenssi- vuo V2 (pu)	Remanenssi- vuo V3 (pu)	Syöttö- kaapelin pituus (m)
PM1	0	0	0	-
PM2	0	0	0	450
PM3	0	0	0	750
PM6	-0,9	0,2	1	850

Päämuuntajan PM6 magnetointimittauksista vastaavassa kytkentätilanteessa rinnakkaisferroresonanssiin ajaututtiin vasta, kun päämuuntajan PM6 remanenssi- Φ -arvoja kasvatettiin vaiheiden V1 ja V3 osalta suurimpiin mahdollisiin arvoihin. Tämän lisäksi muuntajan ensiöpuoli kytkettiin sähköverkkoon vaiheen V3 jännitteen nollakohdassa, jolloin rautasydämen kokema magneettivuo pääsi kasvamaan mahdollisimman suureksi. Kuvassa 35 on esitetty rinnakkaisferroresonanssin muodostamien vaihejännitteiden käyttäytyminen päämuuntajan PM6 ensiökäämeissä. Jännite on esitetty kuvassa 35 suhteellisena, käyttäen perusarvona vaihejännitteen huippuarvoa. Näin ollen kuvaajasta pystyy helposti katsomaan ferroresonanssin muodostaman ylijännitteen suhteellisarvon.

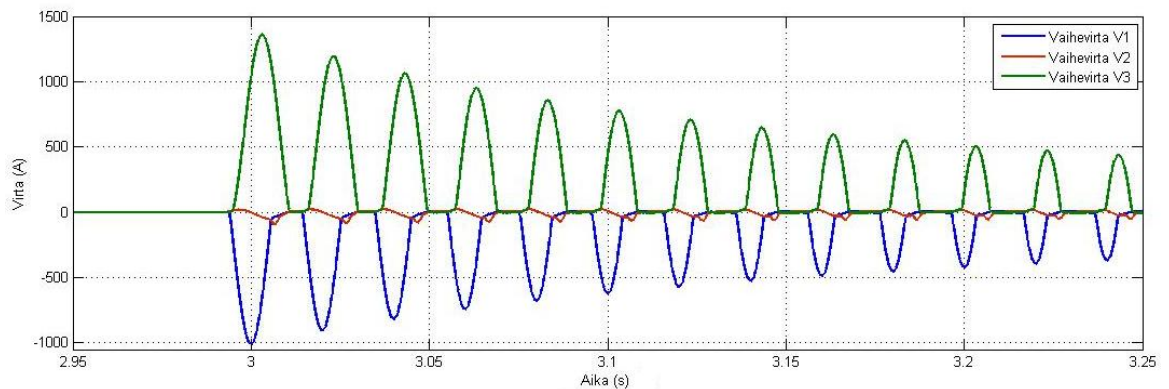


Kuva 35. *Stabiilin ferroresonanssin muodostamat vaihejännitteet päämuuntajan PM6 ensiöpuolella taulukon 10 parametriarvoja käyttäen.*

Rinnakkaisferroresonanssiin ajaututtaessa päämuuntajan ensiöpuolen vaihejännitteet alkavat huojumaan muodostaen ylijännitettä, joka käy suurimmillaan arvossa 1,106 pu. Tämä tarkoittaa sitä, että muuntajan ensiöpuolen vaihejännitteet käyvät noin 99 340

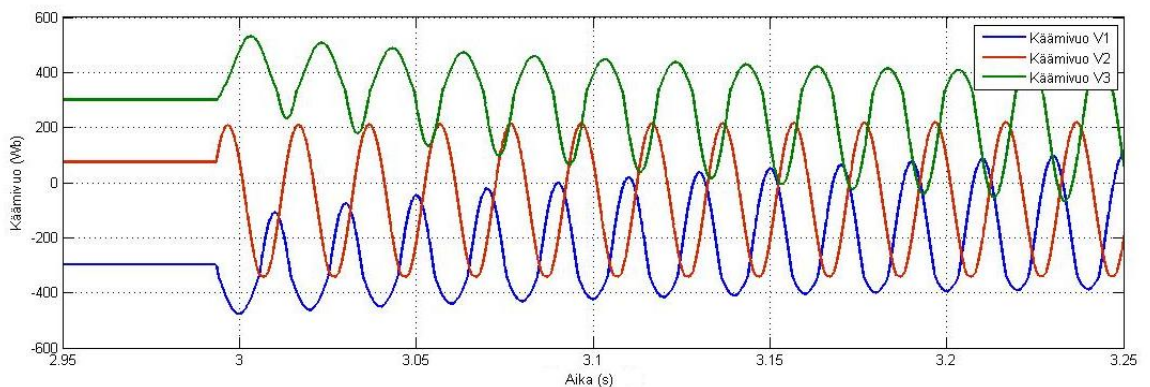
voltissa eli ylijännitettä syntyy lähes 10 kilovoltia (kV). Tässä tapauksessa ylijännitettä suurempi haitta on vaihejännitteiden käyrämuoto, joka ei ole enää sinimuotoinen vaan sisältää nyt myös yliaaltokomponentteja.

Kuvassa 36 on esitetty päämuuntajan PM6 kytkentäsysäysvirta, joka johti stabiiliin ferresonanssiin kytkentämittausta vastaavassa kytkentätilanteessa taulukon 10 parametriarvoja käyttäen. Vaiheen V3 virta käy kytkentäsysäysvirran ensimmäisessä jaksossa arvossa 1380 A. Ferroresonanssi on kuitenkin vielä niin maltillinen, että pelkästä vaihevirtojen kuvaajasta sitä ei pysty havaitsemaan.



Kuva 36. Päämuuntajan PM6 simuloitu kytkentäsysäysvirta, joka johti stabiiliin ferresonanssiin.

Kuvassa 37 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat vaihekohtaiset käämivuot muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana. Ennen päämuuntajan sähköverkkoon kytkemistä voidaan kuvaajasta havaita päämuuntajan vaihekohtaiset remanenssivuoarvot, jotka on esitetty myös taulukossa 10. Kuvasta 37 huomataan, että päämuuntajan rautasydän kyllästyy merkittävästi käyden vaiheen V3 käämivuon osalta selvästi yli 500 Wb. Ferroresonanssin muodostama ylijännite jää kuitenkin varsin pieneksi, koska verkon kapasitanssi joka kytketty nyt muuntajan epälineaarisen induktanssin rinnalle, on suuruudeltaan sopivan pieni.



Kuva 37. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat käämivuot stabiiliin ferresonanssiin johtaneesta simuloinnista.

6.2 Syöttökaapelin pituuden vaikutus muuntajan resonointiherkkyyteen

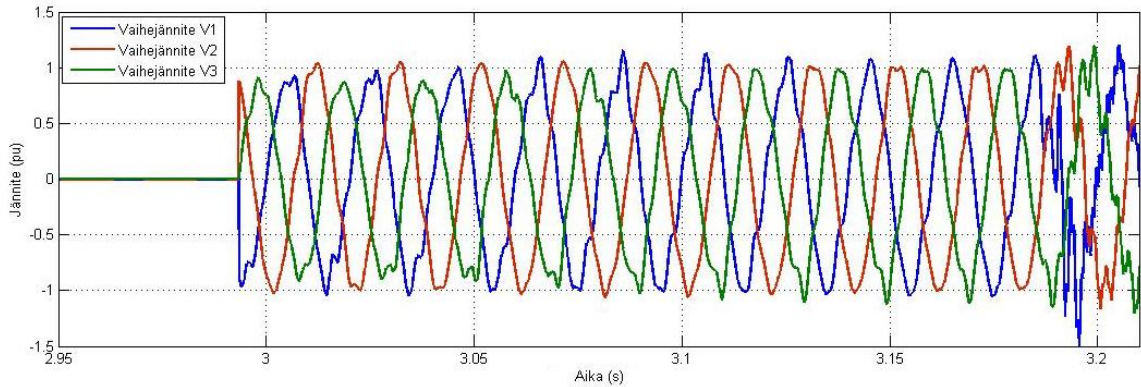
Ferroresonanssi-ilmiön syntyminen havaittiin mahdolliseksi jo nykyisessä Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa. Ferroresonanssin muodostamat ylijännitteet jäivät kuitenkin mittaushetken kytkentätilannetta vastaavassa verkossa maltillisiksi ja stabiileiksi eli jaksollisiksi. Tämän johdosta lähdettiin kasvattamaan yhden päämuuntajan syöttökaapelin pituutta ja hakemaan arvoa syöttökaapelin pituudelle, jonka myötä muuntajan sähköverkkoon kytkeminen johtaa epästabiiliin ferroresonanssiin.

Sähköverkon kytkentätilanne pidettiin syöttökaapelin pituuden vaikutuksen tutkimisessa ennallaan kuvan 30 mukaisena. Sähköverkkoon kytkettävänä päämuuntaja pidettiin edelleen myös päämuuntajaa PM6. Päämuuntajan syöttökaapeli kytkettiin sähköverkkoon heti simuloinnin alussa ja päämuuntaja kytkettiin sähköverkkoon ajanhetkellä $t = 2,9935$ s. Taulukkoon 11 on koottu yhteen simuloinnissa käytetyt parametriarvot, joiden seurauksena järjestelmä ajautui epästabiiliin ferroresonanssiin.

Taulukko 11. *Epästaabiiliin rinnakkaisferroresonanssiin johtaneet parametriarvot.*

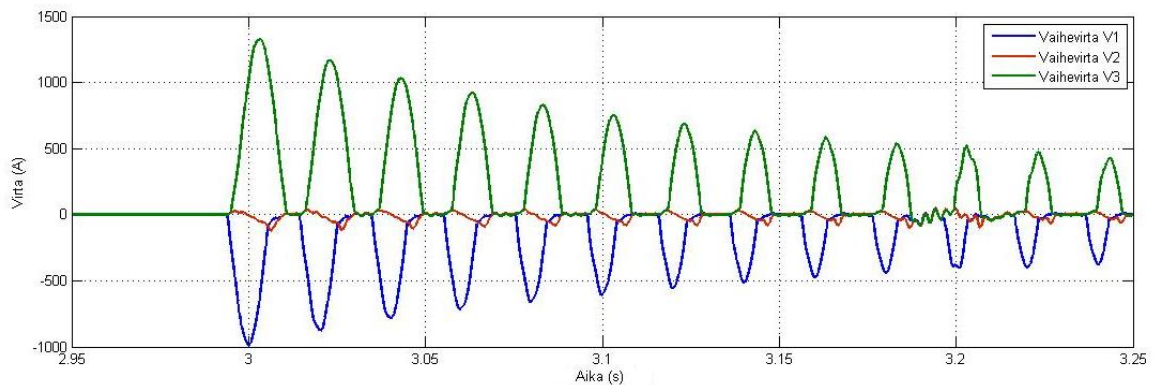
Päämuuntaja	Resonanssi- vuo V1 (pu)	Resonanssi- vuo V2 (pu)	Resonanssi- vuo V3 (pu)	Syöttö- kaapelin pituus (m)
PM1	0	0	0	-
PM2	0	0	0	450
PM3	0	0	0	750
PM6	-0,9	0,2	1	25000

Kuvassa 38 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiöpuolen vaihejännitteet sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä, kun päämuuntajan syöttökaapelin pituus kasvatettiin 25 kilometriin. Päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen jälkeen muuntaja ajautuu välittömästi ferroresonanssiin muodostaen aluksi jaksollista ylijännitettä. Jännitteen käyrämuodosta välillä $2,9935$ s – $3,18$ s on tunnistettavissa teoriaosuuden kuvassa 12 esitettyjen jaksollisten eli stabiileiden ferroresonanssien periaatteellisia käyrämuotoja. Ajanhetkellä $t = 3,18$ s, sähköverkko ajautuu kaoottiseen ferroresonanssiin, minkä jälkeen vaihejännitteiden käyrämuodot eivät ole enää jaksollisia.



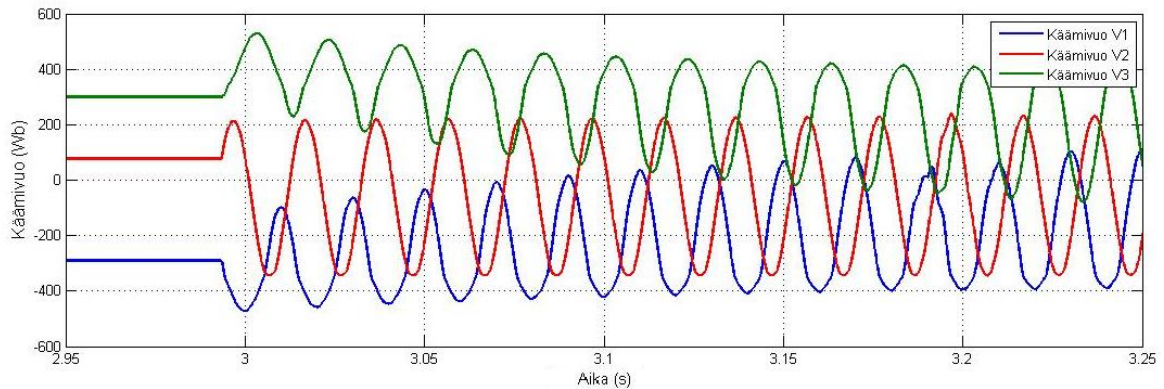
Kuva 38. Epästabiliin ferroresonanssin muodostamat vaihejännitteet päämuuntajan PM6 ensiöpuolella kaapelipituudella 25 km.

Jaksollisen ferroresonanssin aikana ylijännite käy korkeimmillaan arvossa 1,1 pu. Epästabiliin ferroresonanssiin ajauduttaessa myös muodostuva ylijännitteen arvo kasvaa merkittävästi. Kuvassa 39 on esitetty epästabiliin ferroresonanssiin johtanut päämuuntajan PM6 kytkentäsäysvirta 25 kilometrin pituisella syöttökaapelilla. Kytkentäsäysvirran käyrämuoto sekä amplitudit ovat luvussa 5.4 esitetyn kytkentäsäysvirran kanssa yhteneviä, koska luvun 5.4 simulointitilanteeseen verrattuna ainoastaan päämuuntajan syöttökaapelin pituutta kasvatettiin. Ajanhetki $t = 3,18$ s, jolloin sähköverkko ajautui kaottiseen ferroresonanssiin, on havaittavissa myös vaihevirtojen käyrämuodoissa.



Kuva 39. Epästabiliin ferroresonanssiin johtanut päämuuntajan PM6 kytkentäsäysvirta 25 kilometrin pituisella syöttökaapelilla.

Kuvassa 40 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien vaihekohtaiset kämmivuot. Ennen muuntajan sähköverkkoon kytkemistä (ajanhetki $t = 2,9935$ s) kämmivoiden kuvaajista pystyy havaitsemaan muuntajan vaihekohtaiset remanenssivuoarvot. Kämmivoiden käyrämuodoista on myös havaittavissa muutos normaaleista sinimuotoisista käyrämuodoista kohti kolmioaaltomaista käyttäytymistä.



Kuva 40. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat käämivuot 25 kilometrin pituisen syöttökaapelin tapauksessa.

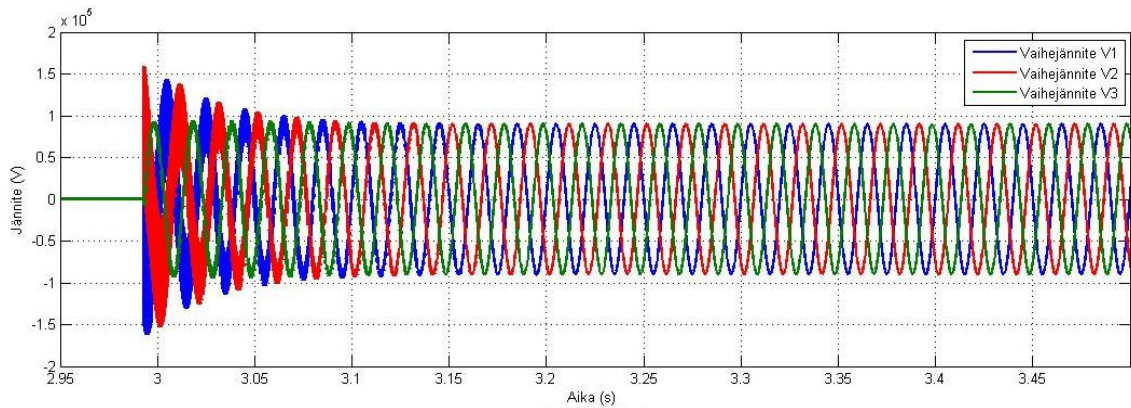
Kaapelipituuden kasvattamisen tutkiminen oli mielekästä senkin johdosta, että Harjavallan suurteollisuuspuistossa on pitkän tähtäimen suunnitelmissa ollut puhetta kytkinkentän siirtämisestä tehdasalueen ulkopuolelle, jolloin päämuuntajia syöttävien maakaapelin pituudet tulisivat merkittävästi pitenemään nykyisistä alle kilometrin matkoista. Tämän luvun tuloksista nähdään, että syöttökaapeleiden pituuden kasvaessa ferroresonanssista tulee merkittävä ongelma Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa. Kytkinkentän siirtämissuunnitelmien yhteydessä on siis huomioitava myös päämuuntajien ferroresonanssin hallitseminen.

6.3 Syöttökaapelin sähköverkkoon kytkemisen vaikutus päämuuntajan resonointiherkkyyteen

Päämuuntajan syöttökaapelin vaikutusta arvioitaessa toiseksi huomioonotettavaksi tekijäksi nousi päämuuntajan syöttökaapelin sähköverkkoon kytkeminen. Tällä hetkellä päämuuntajan PM6 tapauksessa löytyy 110 kilovoltin verkon puolelta katkaisijat syöttökaapelin alku- ja loppupäästä, kun taas päämuuntajien PM2 ja PM3 tapauksessa katkaisija on sijoitettu ainoastaan syöttökaapelin alkupäähän. Tässä simuloinnissa päämuuntaja PM6 kytkettiin sähköverkkoon yhtä aikaa päämuuntajaa syöttävän maakaapelin kanssa. Päämuuntajan sähköverkkoon kytkeminen tehtiin nyt siis niin, että molemmat katkaisijat (”katkaisija” ja ”katkaisija2”) suljettiin ajanhetkellä $t = 2,9935$ s, jolloin muuntajan magnetoituminen tapahtuu samanaikaisesti syöttökaapelin sähköverkkoon kytkemisen kanssa.

Simulointimallina pidettiin edelleen kuvan 30 sähköverkkomallia ja simuloinnin parametrit vastasivat luvun 5.3 simuloinnin arvoja muutoin paitsi, että päämuuntajan PM6 110 kilovoltin syöttökaapelin alkupään katkaisija (”katkaisija”) kytkettiin kiinni samalla ajanhetkellä syöttökaapelin loppupään katkaisijan (”katkaisija2”) kanssa. Tekemällä syöttökaapelin ja muuntajan sähköverkkoon kytkeminen yhtä aikaa, huomataan kuvan 41 tuloksista, että syöttökaapelin käyttökapasitanssien latautuminen saa aikaan jännitepiikin päämuuntajan ensiökäämeihin. Tämän hetkellisen ylijännitteen johdosta

päämuuntajan rautasydän kyllästyy merkittävästi enemmän, koska ensiökäämien muodostaman käämivuon hetkellisarvo pääsee kasvamaan kaavassa 3.4 esitetyn yhtälön mukaisesti merkittävästi isommaksi. Jos syöttökaapelin sähköverkkoon kytkeminen tehdään yhtä aikaa muuntajan sähköverkkoon kytkemisen kanssa, kasvaa todennäköisyys ferresonanssiin ajautumiselle.

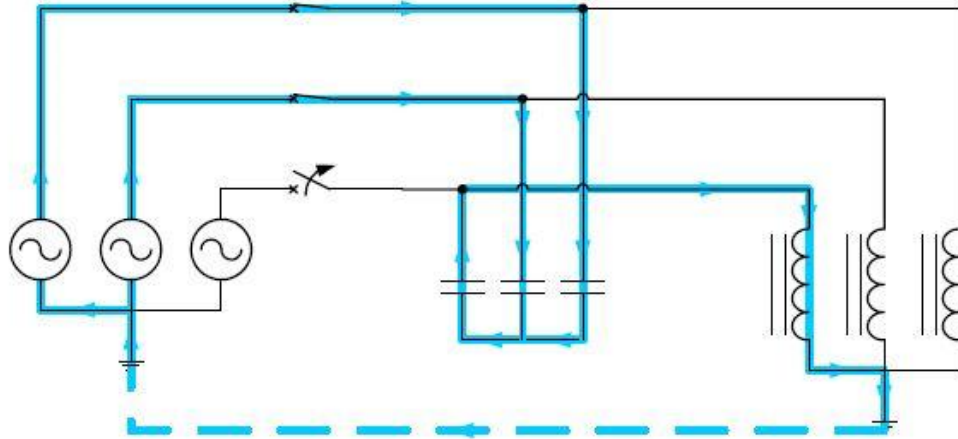


Kuva 41. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien simuloitut vaihejännitteet, kun muuntajan syöttökaapeli kytkettiin muuntajan kanssa sähköverkkoon samanaikaisesti.

6.4 Muuntajan sähköverkkoon kytkeminen kahden vaiheen kautta

Edellisten lukujen tapauksissa tutkittiin erilaisia rinnakkaisferresonanssitilanteita. Luvun 6.4 tarkoituksena on esitellä sarjaferreresonanssiin käyttäytymistä ja myös miettiä mahdollisia sarjaferreresonanssitilanteita Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa. Simuloitavaksi tilanteeksi valittiin 110 kilovoltin kytkinkentän katkaisijan vikaantuminen, jolloin sähköverkkoon kytkettävä päämuuntaja kytkeytyy sähköverkkoon kahden vaiheen kautta. Kuvassa 42 on esitetty kuva virran kulkureitistä Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajien tapauksessa, eli tilanteessa jossa päämuuntajan kytkentä ensiöpuolella on YN. Katkaisijan vikaantuessa muuntajan epälineaarinen induktanssi kytkeytyy sarjaan muuntajaa syöttävän maakaapelin käyttökapasitanssin kanssa.

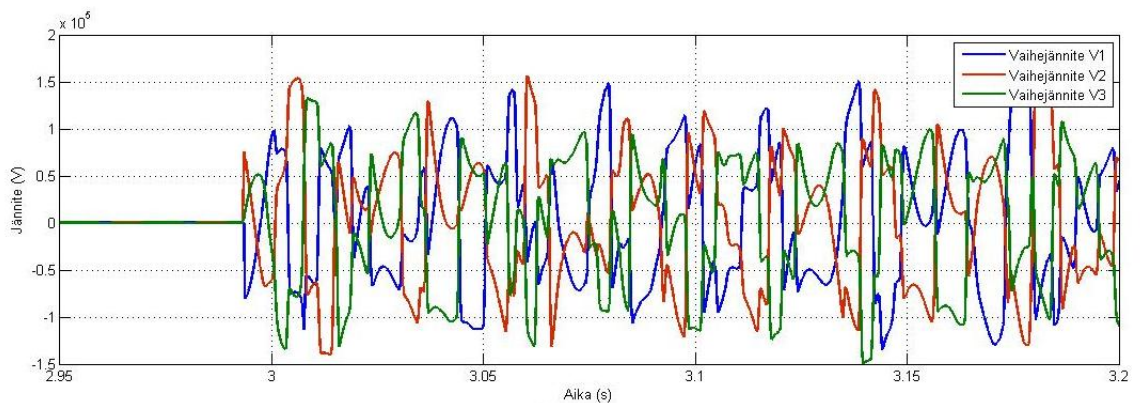
Harjavallan suurteollisuuspuistossa on kerran tapahtunut 110 kilovoltin katkaisijan vikaantuminen. Vikaantunut katkaisija oli kytkinkentän ja Raumalta tulevan siirtojohdon välissä oleva katkaisija, joten katkaisijan vikaantumisen yhteydessä ei kytketty päämuuntajaa sähköverkkoon.



Kuva 42. Sarjaferroresonanssiin muodostuminen magnetoitaessa muuntajaa (YN-ensiökytkentä) kahdesta vaiheesta. [20]

Simuloitavana verkkomallina käytettiin kuvan 31 mukaista sähköverkkoa, jossa päämuuntaja PM3 oli kuormitettuna kiinni sähköverkossa päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen aikana. Päämuuntaja PM6 kytkettiin sähköverkkoon kahden vaiheen kautta ajanhetkellä $t = 2,9935$ s.

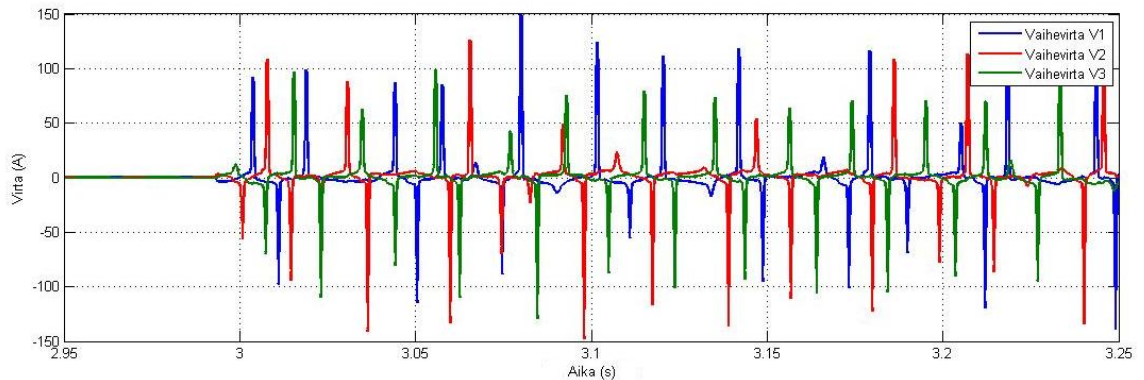
Kuvassa 43 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiöpuolen vaihejännitteet muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana. Vaihejännitteiden käyrämuodoista on tunnistettavissa teoriaosuuden kuvassa 13 esitetyn puolijaksollisen ferroresonanssin (Quasi-Periodic Ferreresonance) periaatteellisen käyrämuodon piirteitä. Sarjaferroresonanssiin muodostamat ylijännitteet nousevat todella suuriksi. Vaihejännitteiden huippuarvot käyvät simulointitilanteessa noin arvossa 150 kV.



Kuva 43. Sarjaferroresonanssiin muodostamat vaihejännitteet päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen aikana.

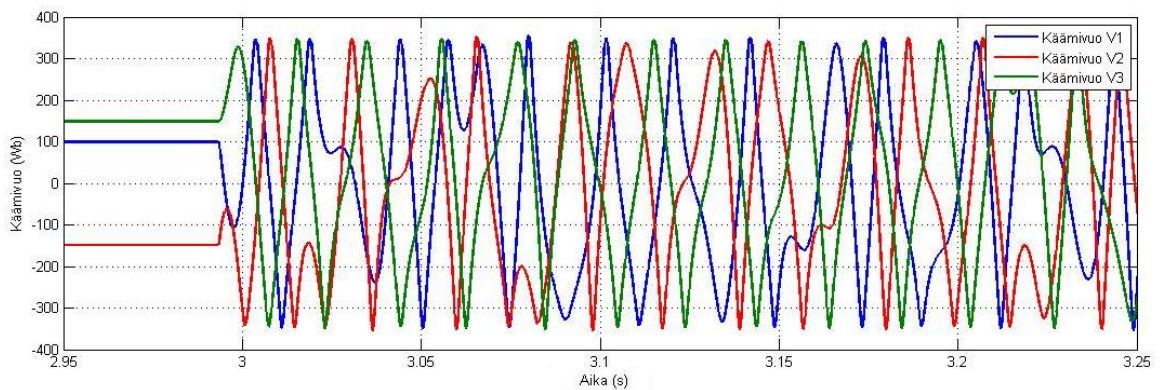
Kuvassa 44 on esitetty päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisestä aiheutuva kytkentäsysäysvirta. Kytkentäsysäysvirran käyrämuoto ei vastaa käyrämuodoltaan enää lainkaan kuvassa 32 esitettyä kytkentäsysäysvirtaa. Nyt kun sähköverkko ajautuu sarjaferroresonanssiin, muuttuvat muuntajan vaihevirit virtapiikeiksi joita muuntaja ottaa

epäsäännöllisesti. Vaihevirtojen suuruus jää sarjaferroresonanssipiirissä normaalia kytkentäsysäysvirtaa pienemmäksi, mutta normaaliin magnetointivirtaan verrattuna virtapiikit käyvät selvästi korkeammalla.



Kuva 44. Sarjaferroresonanssipiirin muodostamat vaihevirrat päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen aikana.

Kuvassa 45 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien vaihekohtaiset käämivuot. Ennen muuntajan sähköverkkoon kytkemistä (ajanhetki $t = 2,9935$ s) käämivoiden kuvaajista pystyy havaitsemaan muuntajan vaihekohtaiset remanenssivuoarvot. Sarjaferroresonanssiin ajauduttaessa vaihekohtaiset käämivuot eivät enää vaimene, vaan muuntaja jää resonoimaan niin että rautasydän ei pääse enää pois saturaatiosta.



Kuva 45. Sarjaferroresonanssipiirin aikaansaamat käämivuot päämuuntajan PM6 rautasydämässä.

6.5 Ferroresonanssiherkkyyden muuttuminen uudella päämuuntajalla PM1

Ferroresonanssiherkkyyden muuttumista uudella päämuuntajalla lähdettiin tutkimaan teoreettisella tasolla. Päämuuntajan ferroresonointia ajateltaessa tärkein yksittäinen huomioon otettava asia on päämuuntajan rautasydämen kyllästyminen. Päämuuntajan rautasydämen kyllästymisalueella on mahdollista synnyttää sähköverkossa ferroreso-

nanssi-ilmiö, joten tämä on päämuuntajan osalta tärkein parametri ferresonanssiherkkyyttä tutkittaessa.

Taulukkoon 5 on koottu yhteen uuden päämuuntajan PM1 rautasydämen ominaisuuksia, joiden avulla lasketaan uuden päämuuntajan PM1 kyllästymiseen johtava käämivuon arvo Ψ_{sat_PM1} (kaava 5.20). Päämuuntajan kyllästymiseen johtavan käämivuon arvon laskennassa käytetään hyödyksi teoriaosuudessa esitettyä kaavaa 3.6.

$$\Psi_{sat_PM1} = N_{1,PM1} B A_{PM1} = 740 \cdot 1,91 \frac{Vs}{m^2} \cdot 0,2366 m^2 = 334,41 Vs \quad (6.1)$$

Tällä hetkellä käytössä olevan päämuuntajan PM1 rautasydämen kyllästymiseen johtavan käämivuon arvo laskettiin kaavassa 5.1. Nykyisen päämuuntajan PM1 rautasydän saturoituu käämivuon arvolla $\Psi_{sat} = 335,89 Vs$, joten muuntajavaihdoksen myötä rautasydämen kyllästyminen tapahtuu 0,44 % pienemmällä jännitteellä (oletuksena vakio-taajuus f). Näin ollen voidaan todeta, että uuden muuntajan magneettiset ominaisuudet eivät muuta käytännössä Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkon resonointiherkkyyttä. Näin ollen uuden päämuuntajan sijoituspaikallakaan ei ole merkitystä sähköverkon resonointiherkkyyteen, joten uusi päämuuntaja voitaisiin tästä näkökulmasta sijoittaa minkä tahansa tällä hetkellä käytössä olevan päämuuntajan tilalle.

6.6 Simulointitulokset optimaalista kytkentähetkeä käyttäen

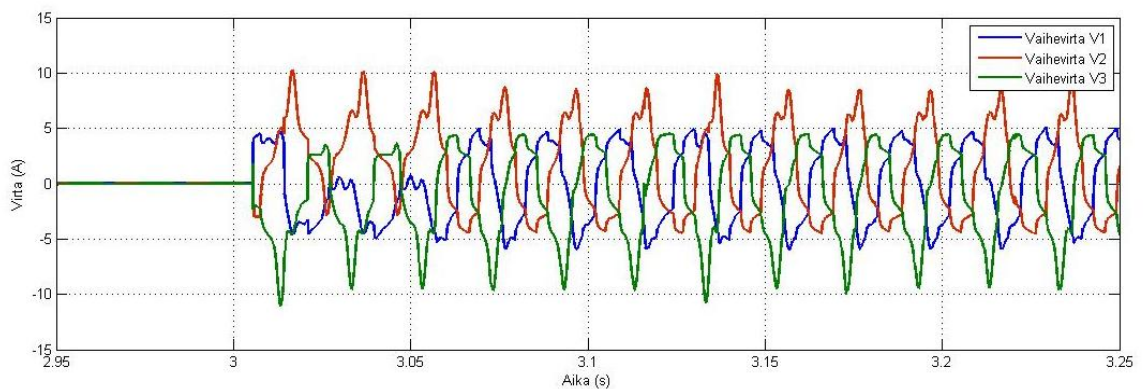
Teoriaosuuden luvussa 3.6.2 esitettiin teoria kytkentävirtasysäyksen eliminoimiselle. Teoria perustui saksalaisten tutkijoiden tekemään tutkimukseen, jossa oli havaittu kytkentäsvirran ilmiönä katoavan, mikäli muuntajan ensiöpuoli kytketään sähköverkkoon niin että kytkentähetken aikaansaama käämivuo on muuntajan rautasydämen remanenssivuon suuruinen. Optimaalisen kytkentähetken t_{opt} vaikutusta simulointituloksiin lähdettiin tutkimaan mittaustuloksia vastaavassa muuntajan sähköverkkoon kytkemisessä (luku 5.3).

Optimaalista kytkentähetkeä t_{opt} lähdettiin määrittämään taulukossa 9 esitettyjen simuloinnissa käytettyjen remanenssivuoarvojen avulla. Optimaalinen kytkentähetki laskettiin vaiheen V1 remanenssivuoarvon avulla. Käyttämällä teoriaosuuden luvussa 3.6.2 esitettyä kaavaa 3.12, voidaan laskea vaiheelle V1 optimaalinen sähköverkkoon kytkemisen hetki remanenssivuon pohjalta kaavan 6.2 mukaisesti.

$$t_{opt} = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{-\Psi_{res}}{\Psi_{prosp}} \right) = 0,0056 s \quad (6.2)$$

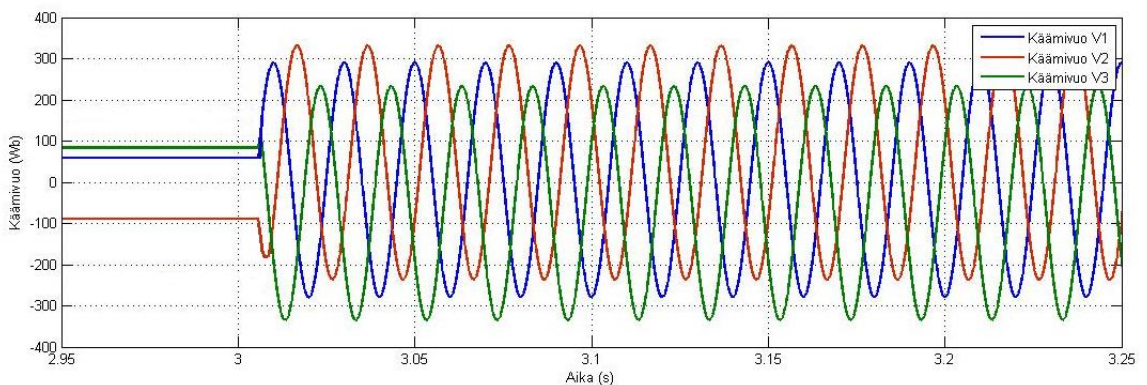
Optimaalinen kytkentähetki kertoo ajanhetken jännitteen nousevan reunan nollakohdan jälkeen. Näin ollen vaiheen V1 optimaalinen kytkentähetki simulointitilanteessa luvussa 5.3 olisi ollut ajanhetki $t_{opt,V1} = 3,0056 s$, koska ajanhetkellä $t = 3 s$, vaiheen V1 jännite on nousevalla reunalla ja arvoltaan nolla.

Seuraavaksi on esitetty kuvaajat tuloksista, joissa mittaushetkeä vastaavassa sähköverkon kytkentätilanteessa päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkeminen tehdään optimaalisella kytkentähetkellä $t = 3,0056$ s. Kuvassa 46 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien vaihevirrat muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana. Nyt kun muuntajan sähköverkkoon kytkeminen päästään tekemään täysin ideaalisella jännitekäyrän hetkellä, ei muuntajan rautasydän kyllästy minkään kolmen vaiheen osalta ja tästä johtuen kytkentäsäysvirta ilmionä katoaa. Satojen ampeerien arvoihin noussut kytkentäsäysvirta pystytään muuttamaan hallituksi ja vaiheiden virtojen amplitudit pysymään lähellä normaaleja magnetointivirta-arvojen amplitudeja. Käytännössä tosin näin tarkka katkaisijan sulkeminen ei ole mahdollista ja simulointitulosten tasoiisiin tuloksiin on mahdotonta päästä laitteiden mekaanisten ominaisuuksien johdosta.



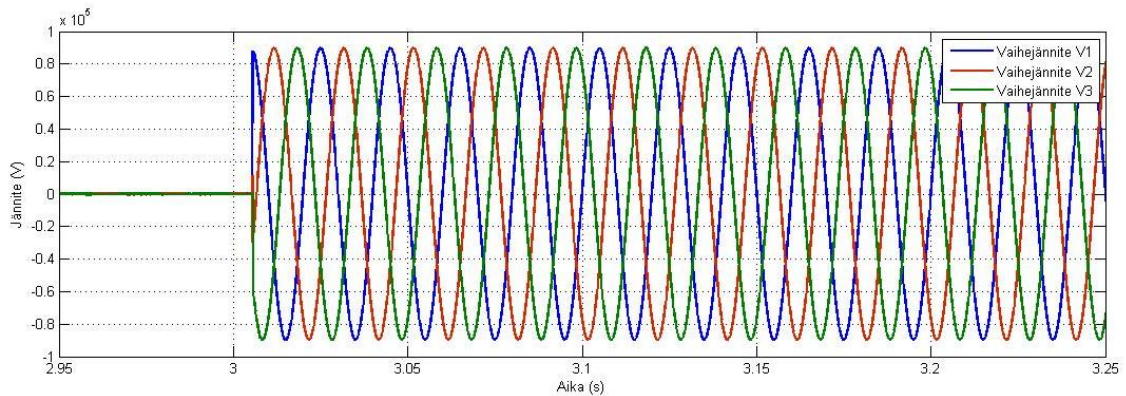
Kuva 46. Päämuuntajan PM6 ensiöpuolen vaihevirrat sähköverkkoon kytkemisen aikana optimaalista kytkentähetkeä käyttäen.

Kuvassa 47 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat käämi vuot muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana. Vaihekohtaisista käämivoista nähdään, ettei päämuuntajan PM6 rautasydän kyllästy kun muuntajan sähköverkkoon kytkemisessä käytetään optimaalista kytkentähetkeä $t_{opt,V1}$.



Kuva 47. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien muodostamat käämi vuot optimaalista kytkentähetkeä käyttäen.

Kuvassa 48 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiökäämien vaihejännitteet muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana, kun verkkoon kytkemisessä käytettiin optimaalista kytkentähetkeä $t_{opt,V1}$. Verrattuna luvun 5.3 kuvassa 33 esitettyyn vaihejännitekuvaan, voidaan todeta muuntajan sähköverkkoon kytkeytymisen tapahtuvan ilman mitään häiriötä jännitteen käyrämuodossa.



Kuva 48. Päämuuntajan PM6 ensiökäämien vaihejännitteet muuntajan sähköverkkoon kytkemisen aikana optimaalista kytkentähetkeä käyttäen.

6.7 Optimaalisen kytkentähetken vaikutus luvun 6.2 simulointituloksiin

Tämä luku käsittelee luvun 6.2 tilannetta, jossa päämuuntajan PM6 syöttökaapelin pituus kasvatettiin 25 kilometriin. Simuloinnissa päämuuntajan PM6 vaihekohtaiset jäännösmagneettivuot pidettiin taulukon 11 mukaisina ja sähköverkon kytkentätilanne muutoin samanlaisena, mutta nyt päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkeminen tehtiin ohjatusti vaihe kerrallaan. Vaiheiden optimaaliset kytkentähetket $t_{opt,V1}$, $t_{opt,V2}$, $t_{opt,V3}$ lasketaan seuraavaksi taulukon 11 jäännösmagneettivoista kaavan 3.12 mukaisesti.

$$t_{opt,V1} = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{-\Psi_{res}}{\hat{\Phi}_{prosp}} \right) = 0,0014 \text{ s} \quad (6.3)$$

Vaihe V1 on nousevalla reunalla ja arvossa nolla simuloinnihetkellä $t = 3$ s, joten vaiheen V1 optimaalinen sähköverkkoon kytkemisen ajanhetki on 3,0014 s.

$$t_{opt,V2} = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{-\Psi_{res}}{\hat{\Phi}_{prosp}} \right) = 0,0056 \text{ s} \quad (6.4)$$

Vaihe V2 on nousevalla reunalla ja arvossa nolla simuloinnihetkellä $t = 3,0065$ s, joten vaiheen V2 optimaalinen sähköverkkoon kytkemisen ajanhetki on 3,0121 s.

$$t_{opt,V3} = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{-\Psi_{res}}{\hat{\Phi}_{prosp}} \right) = 0,01 \text{ s} \quad (6.5)$$

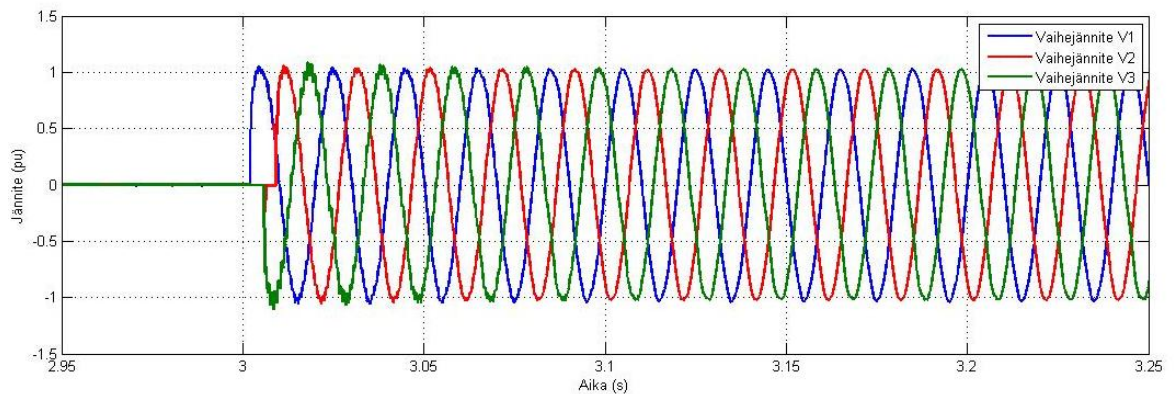
Vaihe V3 on nousevalla reunalla ja arvossa nolla simuloinnihetkellä $t = 2,9935$ s, joten vaiheen V3 optimaalinen sähköverkkoon kytkemisen ajanhetki on 3,0035 s.

Taulukkoon 12 on koottu yhteen päämuuntajan PM6 parametreja, joita käytettiin päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen simuloinnissa.

Taulukko 12. Päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen simuloinnissa käytettyjä parametrisarvoja.

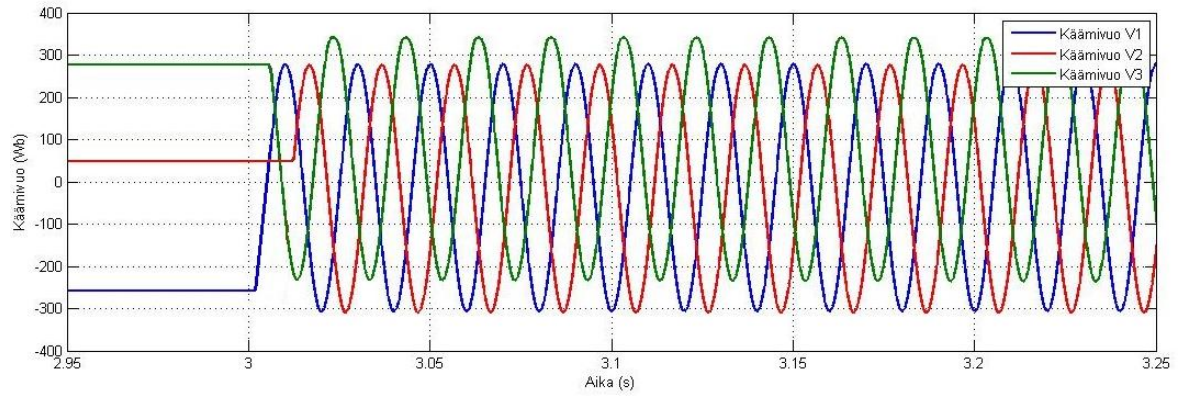
Päämuuntaja PM6	Vaihe V1	Vaihe V2	Vaihe V3
Kytke-misajan-hetki (s)	3,0014	3,0121	3,0035
Remanenssi vuot (pu)	-0,9	0,2	1

Kuvassa 49 on esitetty päämuuntajan PM6 ensiöpuolen vaihejännitteet 25 kilometrin syöttökaapelipituudella sekä taulukon 12 parametrisarvoja käyttäen. Nyt kun päämuuntaja kytkettiin sähköverkkoon ohjatusti vaihe kerrallaan, välttyttiin rinnakkaisferroresonanssiin ajautumiselta. Vaihejännitteiden käyrämuodoissa näkyy pientä säröytymistä ensimmäisien jaksojen aikana, mikä on todennäköisesti seurausta vaiheiden välisestä porrastuksesta sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä.



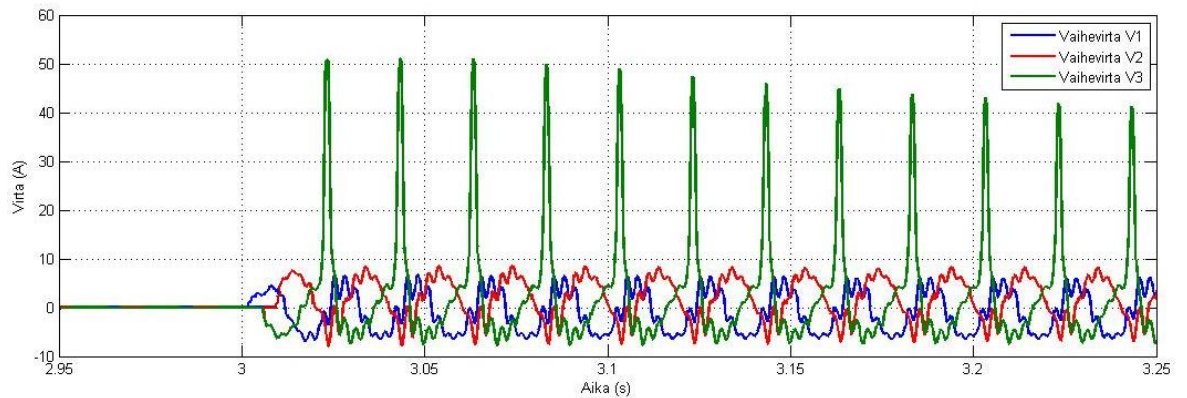
Kuva 49. Päämuuntajan PM6 vaihejännitteet kaapelipituudella 25 km, kun verkkoon kytkemisessä käytettiin vaihekohtaista ohjausta.

Kuvassa 50 on esitetty päämuuntajan PM6 vaihekohtaiset kämmivoiden käyrämuodot päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen ajalta. Vaihekohtaisten kämmivoiden kuvaajista havaitaan, että päämuuntajan PM6 rautasydän välttyy saturoitumiselta kun sähköverkkoon kytkeminen tehdään ohjatusti vaihe kerrallaan. Ja vaikka syöttökaapelin pituus on 25 kilometriä ja vaihekohtaiset jäännös- eli remanenssivuoarvot edelleen luvun 6.2 mukaiset, ei sähköverkkoon synny ferroresonanssi-ilmiötä.



Kuva 50. Päämuuntajan PM6 vaihekohtaiset käämivuot kaapelipituudella 25 km, kun verkkoon kytkemisessä käytettiin vaihekohtaista ohjausta.

Kuvassa 51 on esitetty päämuuntajan PM6 sähköverkkoon kytkemisen seurauksena muodostuneet vaihevirrat. Vaihevirtojen kuvaajista huomataan kytkentäsvirtailmiön katoavan, kun muuntajan sähköverkkoon kytkemisessä käytetään vaihekohtaista ohjausta.



Kuva 51. Päämuuntajan PM6 vaihevirrat kaapelipituudella 25 km, kun verkkoon kytkemisessä käytettiin vaihekohtaista ohjausta.

7. SIMULOINTITULOKSIEN YHTEENVETO

Simulointituloksissa löydettiin useita mahdollisia tilanteita, jolloin päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä ajaututaan ferresonanssitilaan. Simulointituloksen pohjalta tuli esille kaksi asiaa, joilla on selvästi suurin vaikutus sähköverkon ferresonanssiherkkyyteen päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä. Ensimmäinen päämuuntajan rautasydämen on ajaututtava verkkoon kytkemisen yhteydessä pitkälle kyllästymisalueella, jotta järjestelmällä on mahdollisuus saavuttaa ferresonanssitila. Toiseksi päämuuntajan epälineaarisen induktanssin kanssa pitää olla kytkettyneenä sopivasti kapasitanssia, jotta ferresonanssiin ajautuminen on mahdollista.

Päämuuntajan rautasydämen kyllästymisen hallitseminen magnetoinnin aikana on mahdollista ainoastaan päämuuntajan ohjatulla sähköverkkoon kytkemisellä. Päämuuntajan ohjattu sähköverkkoon kytkeminen on mahdollista vain erikoiskatkaisijalla, joka laskee muuntajan verkkoon kytkemiselle optimaalisen ajanhetken t_{opt} . Käyttämällä päämuuntajan sähköverkkoon kytkemiseen ohjattua katkaisijaa, pystytään varmistumaan siitä, että muuntajan rautasydän ei kyllästy. Näin ollen muuntaja ei rasitu suuresta kytkentäsäysvirrasta eikä ajaudu ferresonanssiin, vaikka sähköverkon kytkentätilanne muuten täyttäisi ferresonanssiin ajautumisen ehdot. Katkaisijan pitää mitata muuntajan rautasydämen jäännös- eli remanenssimagneettivuon suuruutta, jotta se pystyy laskemaan muuntajan sähköverkkoon kytkemiselle optimaalisen ajanhetken t_{opt} .

Simulointituloksista havaittiin kapasitanssien osalta, että mikäli sähköverkon kapasitanssi kytkeytyy sarjaan muuntajan epälineaarisen induktanssin kanssa, nousee ferresonanssiin ajautumisen todennäköisyys merkittävästi. Alle on listattu mahdollisia kapasitanssin ja muuntajan epälineaarisen induktanssin sarjakytketyksiä, jolloin ferresonanssiin ajautuminen muuntajan sähköverkkoon kytketymisen yhteydessä on todennäköistä:

- Katkaisijan vikaantuminen, jolloin muuntaja magnetoidaan kahdesta vaiheesta ja päämuuntajan syöttö on toteutettu maakaapelilla.
- Siirtojohto mihin päämuuntaja on kytketty, on sarjakompensoitu tehonsiirron kapasiteetin lisäämistä varten.

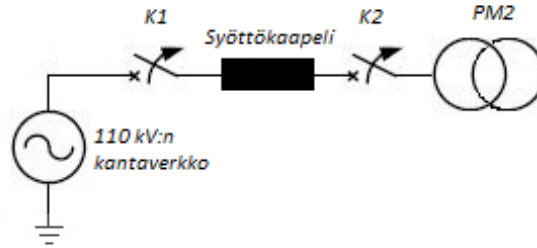
8. RATKAISUEHDOTUKSET

Diplomityön aloitusvaiheessa oli tiedossa, että Harjavallan suurteollisuuspuistossa on törmätty ferresonanssi-ilmiöön päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä. Koska sähköverkkoon ollaan investoimassa uutta isompaa päämuuntajaa, haluttiin ilmiötä tutkia ja hakea vastauksia sähköverkon resonanssiherkkyyden muuttumiseen uuden päämuuntajan myötä. Uuden ja vanhan päämuuntajan magneettiset ominaisuudet paljastuivat tarkemmissa tutkimuksissa lopulta toisiaan vastaaviksi, joten voidaan todeta, ettei uusi 50 MVA:n suuruinen päämuuntaja tule muuttamaan Harjavallan suurteollisuuspuiston ferresonointiherkkyyttä.

Luvussa 6.3 tutkittiin päämuuntajan syöttökaapelin sähköverkkoon kytkemisen vaikutusta muuntajan resonointiherkkyyteen ja havaittiin kaapelin käyttökapasitanssien saavan aikaan kytkentäjännitepiikin. Tästä kytkentäjännitepiikistä johtuen päämuuntajaa syöttävä maakaapeli on ehdottomasti kytkettävä erikseen sähköverkkoon ilman päämuuntajaa. Mikäli päämuuntaja kytketään syöttökaapelin kanssa yhtä aikaa sähköverkkoon, nousee päämuuntajan ensiöjännite hetkellisesti jopa 1,5-kertaiseksi Harjavallan suurteollisuuspuiston sähköverkossa. Tästä johtuen muuntajan rautasydän kyllästyy selvästi normaali-jännitteeseen verrattuna enemmän ja lisää riskiä ferresonanssiin ajautumiselle.

Päämuuntajalle PM6 on jo asennettu katkaisija myös syöttökaapelin ja päämuuntajan väliin. Diplomityön ratkaisuehdotuksena esitetään, että myös päämuuntajien PM2 ja PM3 syöttökaapeleiden loppupäähän asennetaan tulevaisuudessa katkaisijat. Ferresonanssiin ajautumisen todennäköisyys ei näillä päämuuntajilla ole yhtä suuri kuin päämuuntajalla PM6, koska näiden päämuuntajien syöttökaapeleiden käyttökapasitanssit ovat merkittävästi pienemmät. Tästä johtuen näiden päämuuntajien tapauksessa nykyisillä kaapelipituuksilla riittää katkaisijoiksi tavalliset ohjaamattomat 3-vaiheiset katkaisijat.

Kuvassa 52 on esitetty periaatekuva päämuuntajan PM2 ensiöpuolen sähköverkosta, jossa on asennettuna katkaisijat päämuuntajan syöttökaapelin alku- ja loppupäähän.



Kuva 52. Päämuuntaja PM2 varustettuna syöttökaapelin alku- ja loppupään katkaisijoilla K1 ja K2.

Mikäli Boliden Harjavalta Oy:n pitkän tähtäimen suunnitelma kytkinkentän siirtämisestä tehdasalueen ulkopuolelle tulee toteutumaan, ajaututaan tilanteeseen jossa päämuuntajien syöttökaapeleiden käyttökapasitanssit kasvavat merkittävästi suuremmiksi. Tällöin ferresonanssiin ajautuminen päämuuntajan sähköverkkoon kytkemisen yhteydessä on tämän hetken tilanteeseen verrattuna merkittävästi todennäköisempää. Syöttökaapelipituuksien kasvun myötä ainoa ratkaisu välttyä varmasti ferresonanssilta on päämuuntajan kytkentäsysäysvirran hallitseminen. Tällä hetkellä markkinoilla on jo katkaisijoita, joilla pystytään katkaisijan kytkeminen tekemään hallitusti tietyllä jännitekäyrän hetkellä. Kytkemällä päämuuntaja takaisin sähköverkkoon samalla jännitekäyrän hetkellä kuin se kytkettiin irti sähköverkosta, kytkettyy päämuuntaja lähellä optimaalista kytkentähetkeä t_{opt} takaisin sähköverkkoon. Koska muuntajan rautasydän on magneettisesti pehmeä aine, ei rautasydämissä säily täysin irtikytkemishetken magneettivuon suuruus, vaan magneettisuus rautasydämen sisällä pienenee hieman. Tästä johtuen näin tehty päämuuntajan sähköverkkoon kytkeminen ei osu aivan optimaaliselle ajanhetkelle t_{opt} .

Mikäli päämuuntajien PM2 ja PM3 ensiöpuolelle tullaan hankkimaan katkaisijat, olisi teknillisestä näkökulmasta perusteltua valita katkaisijoiden tyypeiksi älykkäät katkaisijat, joiden avulla päämuuntajien sähköverkkoon kytkemiset pystyttäisiin tekemään täysin optimaalisella ajanhetkellä t_{opt} . ABB Oy:n valmistaman ohjatun katkaisijakokonaisuuden Switchsync T183 avulla pystytään mittaamaan tehomuuntajan toisiopuolelle kytkettyjen mittamuuntajien avulla tehomuuntajan rautasydämen jäännösmagneettisuus ja laskemaan jäännösmagneettisuudesta optimaalinen ajanhetki tehomuuntajan sähköverkkoon kytkemiselle. Liitteessä D on esitetty ABB Oy:n manuaalista sivu, josta käy ilmi Switchsync T183 ohjainlaitteen periaatteellinen kytkentäkaavio. Kaaviosta nähdään myös se, että katkaisijat ovat yksivaiheisia erikseen ohjattuja katkaisijoita, joilla kaikilla on siis oma ohjauslaitteisto. Liitteessä E on esitetty taulukko sopivista muuntajien kytkentäryhmistä, joiden kanssa Switchsync T183 laitteistoa on mahdollista käyttää. Taulukon 4 mukaisesti Harjavallan suurteollisuuspuiston päämuuntajien kytkentäryhmän YNd11 tapauksessa on mahdollista käyttää Switchsync T183 katkaisijakokonaisuutta. Liitteissä F ja G on esitetty teknisiä tietoja Switchsync T183 ohjainyksiköstä.

Diplomityön ratkaisuehdotuksena on pyydetty ABB Oy:ltä tarjouspyyntö yhdestä ulos asennettavasta Switchsync T183 katkaisijakokonaisuudesta. Katkaisijapaketti olisi tarkoitus asentaa uuden päämuuntajan PM1 yhteyteen. Tarjouslaskelmaa ei tämän työn ratkaisuehdotuksissa esitetä, vaan se annetaan Boliden Harjavalta Oy:n sähkökäyttöpäällikkö Hannu Halmiselle.

LÄHTEET

- [1] Examples of Ferroresonance in Distribution Systems. Saatavissa (viitattu 9.10.2014):
http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/FR_WG/Panel/DuganPanel.pdf
- [2] New Boliden Harjavalta Oy. Saatavissa (viitattu 30.1.2015):
<http://www.boliden.fi/fi/Toimipaikat/Sulatot/Boliden-Harjavalta/>
- [3] Harjavallan suurteollisuuspuisto. Saatavissa (viitattu 12.2.2015):
<http://www.suurteollisuuspuisto.com/etusivu>
- [4] Halminen, H. diplomi-insinööri, sähkökäyttöpäällikkö, Boliden Harjavalta Oy. Haastattelut 2014.
- [5] Takala, O. Tuotepäällikkö ABB Oy, sähköpostiviestit 11/2014 – 2/2015.
- [6] Ferroresonance Phenomenon in Power Transformers. Saatavissa (viitattu 6.10.2014): http://kau.edu.sa/Files/320/Researches/52676_22982.pdf
- [7] Introduction to Power Electronics Chapter 12 Basic Magnetics Theory IEEE. Saatavissa (viitattu 18.11.2014):
http://www.ieee.li/pdf/introduction_to_power_electronics/chapter_12.pdf
- [8] Electrical Engineering Portal. Ferroresonance Occurance in Power Transformers. Saatavissa (viitattu 2.10.2014): <http://electrical-engineering-portal.com/ferroresonance-occurrence-in-power-transformer>.
- [9] Nousiainen, K. Opetusmoniste Magneettipiirit ja muuntajat, Tampere 2013. s. 52.
- [10] Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type, MathWorks. Saatavissa (viitattu 16.10.2014):
<http://www.mathworks.se/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformerrinductancematrixtypetwowindings.html>
- [11] Bakshi, U.A. Bakshi, M.V. Magnetic Circuits and Transformers First Edition 2008. s. 6-2, 6-3, 6-4.
- [12] Shell Form Transformers ABB Oy. Saatavissa (viitattu 9.2.2015):
[http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/a0c8d3f9bf2ae232c1257da0005616af/\\$file/3AJE000124-0207_A_en_Mantel_PPTR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/a0c8d3f9bf2ae232c1257da0005616af/$file/3AJE000124-0207_A_en_Mantel_PPTR.pdf)

- [13] Transient Transformer Inrush Currents due to Closing Time- and Residual Flux Measurement-Deviations if Controlled Switching is used. Saatavissa (viitattu 20.10.2014):
http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/ebner_transient_transformer_inrush_currents_EMTP2007.pdf
- [14] Ferroresonant Configurations in Power Systems. V. Valverde, G. Buigues, A. J. Mazón, I. Zamora, I. Albizu. Saatavissa (viitattu 4.2.2015):
<http://icrepq.com/icrepq'12/351-valverde.pdf>
- [15] Resonance and Ferroresonance in Power Networks and Transformer Energization Studies. Saatavissa (viitattu 23.1.2015): <http://c4.cigre.org/WG-Area/WG-C4.307-Resonance-and-Ferroresonance-in-Power-Networks-and-Transformer-Energization-Studies>
- [16] MathWorks, MATLAB > Simulink > SimPowerSystems. Saatavissa (viitattu 20.11.2014): <http://se.mathworks.com/products/simpower/>
- [17] MathWorks, MATLAB > Simulink > SimPowerSystems-ohjekirja. Saatavissa (viitattu 20.11.2014):
http://www.mathworks.com/help/releases/R13sp2/pdf_doc/powersys/powersys.pdf
- [18] Saturable Transformer, MathWorks. Saatavissa (viitattu 13.11.2014):
<http://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/saturabletransformer.html>
- [19] Voimakaapelit 110 – 400 kV, Prysmian Group. Saatavissa (viitattu 31.10.2014):
http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/products/voimakaapelit-110--400-kV/
- [20] Understanding and Dealing with Ferroresonance. Bruce A. Mork, Ph.D. Saatavissa (viitattu 4.2.2015):
http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/ee5220/Deal_FR.pdf
- [21] Tapio, T. Myyntipäällikkö ABB Oy, sähköpostiviestit ja puhelinkeskustelut 11/2014 - 2/2015.
- [22] Poskiparta, A. Tuotantoinisinööri ABB Oy, sähköpostiviestit 2/2015

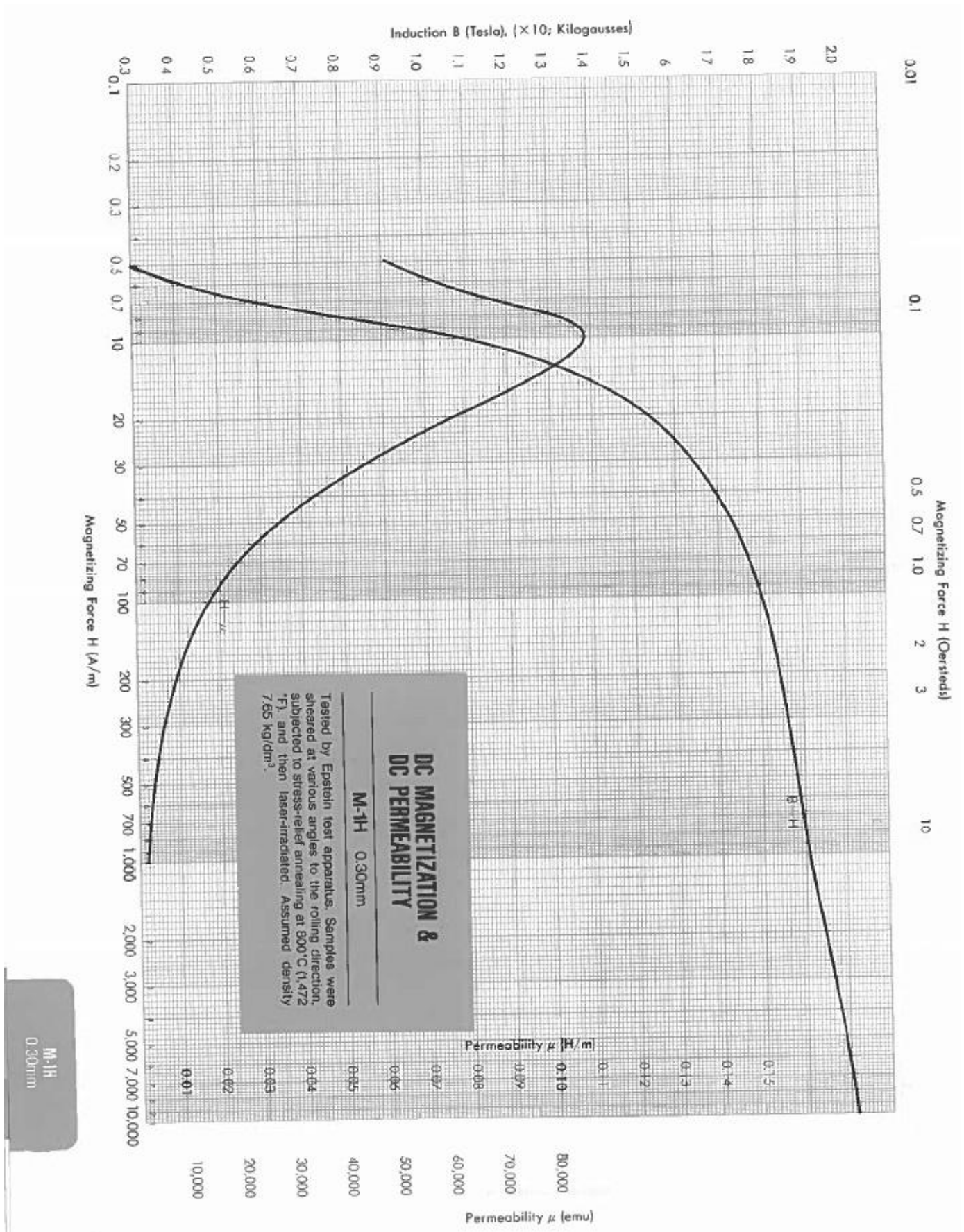
LIITE A: PÄÄMUUNTAJAN PM3 KILPIARVOT

ABB Transmit Oy

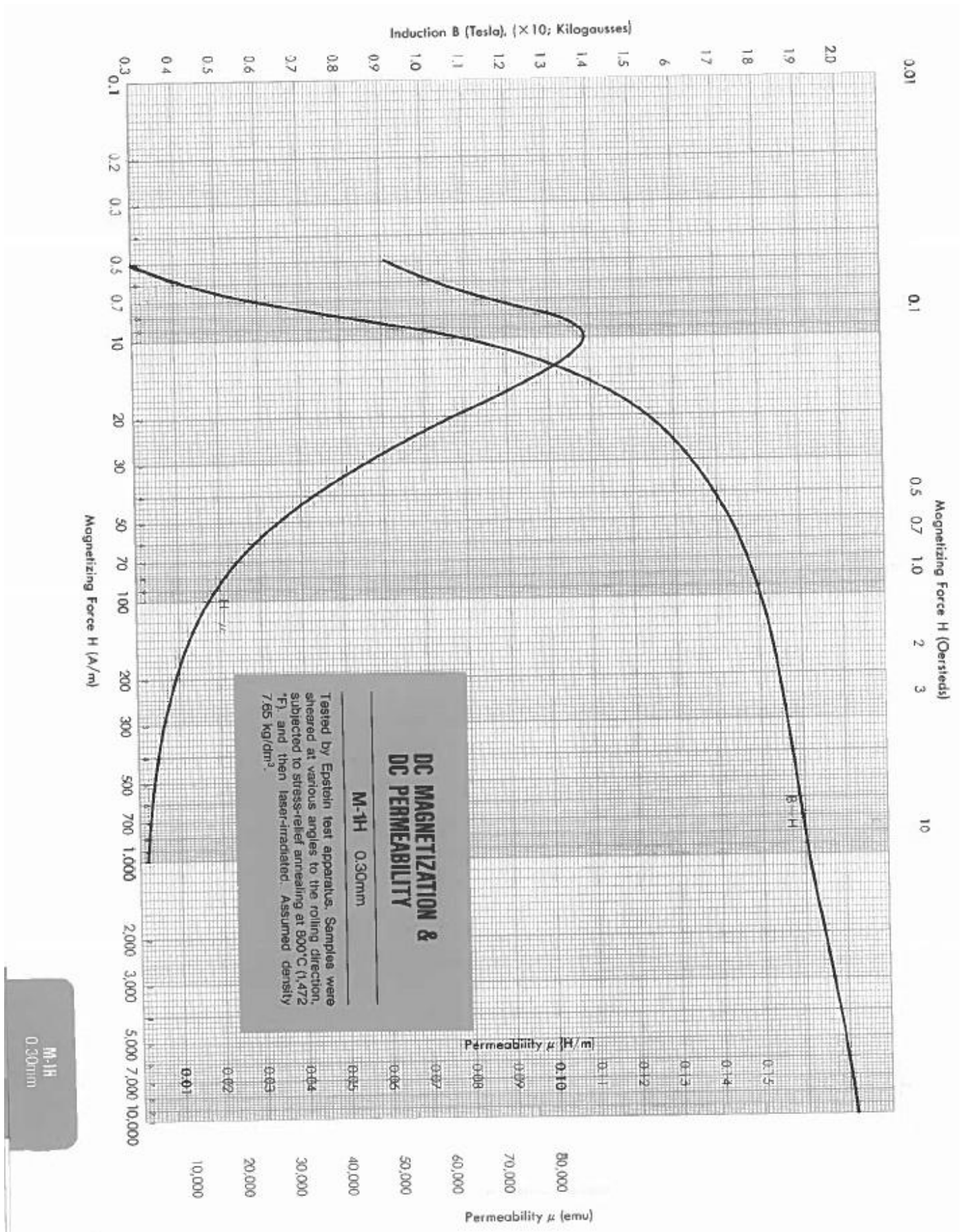
KTRT 123 X 40
801451
2001-11-15

ABB Transmit Oy		ABB						
3 -v. muuntaja	Laji	KTRT 123 X 40	Nro	801451	Valmistusvuosi	2001	CE	
Standardit	IEC 76	KytKentä	YNd11	Jäähdytystapa	ONAF (ONAN 70 %)	50	Hz	
A - B - C	40000	kVA	115000 + - 7 x 2.0 %	V	176 - 201 - 234	A		
a - b - c	40000	kVA	10500	V	2199	A		
		kVA		V		A		
Eristystaso				Symm. oikosulkukestoisuus				
A - B - C - N	LI 550 AC 230			kV	as. 15 9.7	x I _N	2 s	
a - b - c	LI 75 AC 28			kV	as. 15 9.7	x I _N	2 s	
				kV		x I _N	s	
Suunta	ABCN/abc							
Tehoperusta	40000						kVA	
Säätöasento	1	8	15					
Oikosulkuimpedanssi	10.8	10.3	10.2				%	
Oikosulku-resistanssi	0.31	0.31	0.39				%	
Nollaimpedanssi	9.5	9.3	9.5				%	
Tyhjäkäyntihäviöt	22.2	kW	Kokonais-paino	62800	kg	Nostettavan laatikon paino	-	kg
Tyhjäkäyntiteho	25	kVA	Öljyn paino	15900	kg	Kulietuspaino öljyineen	58700	kg
Jäähdyttimien tehontarve	0.7	kW	Aktiivisen osan paino	37700	kg	Kulietuspaino öljyettä	-	kg
Laatikko	on	tyhjänkestävä						

LIITE B: PÄÄMUUNTAJAN PM3 RAUTASYDÄMEN BH-KÄYRÄ



LIITE C: UUDEN PÄÄMUUNTAJAN PM1 RAUTASYDÄMEN BH-KÄYRÄ



LIITE D: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), PERI- AATTEELLINEN KYTKENTÄKAAVIO [21, 22]

Application

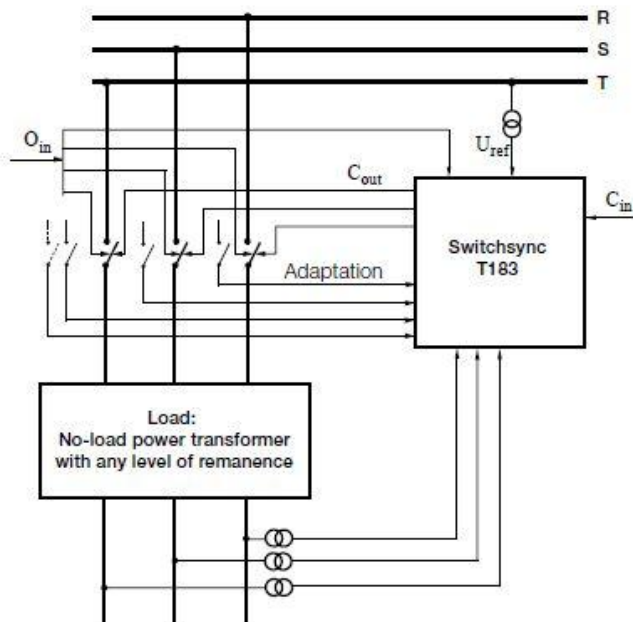
Switching of No-load Power transformers

The adaptive function of the controller must be used in order to attain sufficient accuracy. Signals are obtained from auxiliary contacts on the circuit breaker. The dielectric properties of the circuit breaker at closing (RDDS, Rate of Decrease of Dielectric Strength) must be known, and are used when programming the controller.

The method relies on appropriate signals from voltage transformers to determine the residual flux. There are, however, some combinations of transformer winding arrangements and positions of voltage transformers that do not permit determination of the residual flux. In these cases, the method is not applicable.

See the separate table on page 52.

Transformers and strategies treated in this chapter only refer to switching of one transformer (three single-phase units or one three-phase unit). For some applications, parallel transformers (of different kinds) may be switched by one circuit breaker but are still possible to switch controlled. This may be the case for HVDC converter transformer circuit breakers, where a transformer group consisting of a grounded Y - ungrounded Y transformer (YN/y) is connected in parallel with a grounded Y/delta connected transformer (YN/d).



Note: When controller type T183 is used for controlled energizing of an unloaded transformer, the interruptions will not be controlled. However, the trip signal going directly to the circuit breaker poles must also be given, in parallel, to the controller. This trip information is needed to inform the controller that it should finalize the flux determination.

For legend, see Page 17

LIITE E: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY), TAU-
LUKKO YHTEENSOPIVIEN MUUNTAJIEN KYTKENTÄRYHMISTÄ [21, 22]

Acceptable combinations of power transformer winding types and VT types for T183

VT-type	Connected to	Power transformer winding type
Y-0	Connected to	Y-0/without tertiary winding
Y-0, Y-N, D or V	Connected to	Y-0/D or Y1-N/D Z1-0/D or Z1-N/D Z11-0/D or Z11-N/D
1-ph	Connected to	D1 or D11 1-ph

Y-0: Y-connected grounded neutral

Y-N: Y-connected isolated neutral

D: Delta coupled

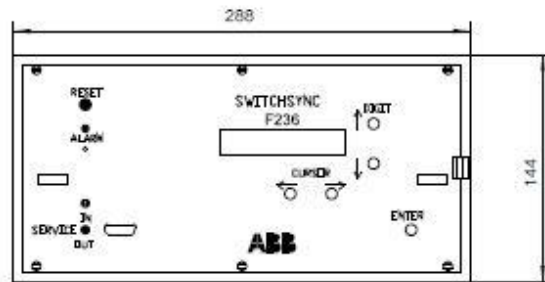
V: V-coupled (measurement of two voltages)

1-ph: Single phase to ground

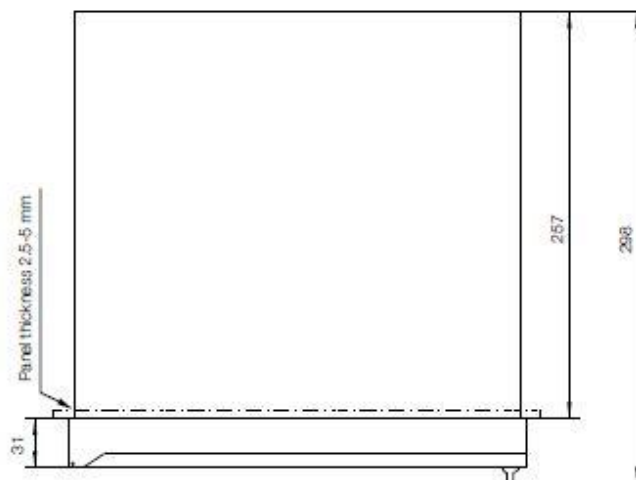
LIITE F: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY),
SWITCHSYNC T183 OHJAUSYKSIKÖN ULKOISET MITAT [21, 22]

Technical information

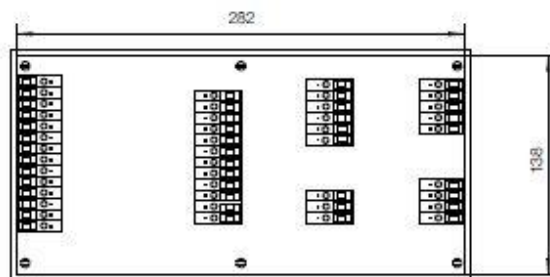
Dimensions for Switchsync™ F236, L183 and T183



Front view



Top view



Rear view



Mounting hole dimensions

Mounting



The side mounted "snap-on" counter screws shall be removed to allow for the controller to enter the hole in the panel.

In final position the screws are easily snapped back and tightened.

LIITE G: SWITCHSYNC T183 KATKAISIJAKOKONAISUUS (ABB OY),
SWITCHSYNC T183 OHJAUSYKSIKÖN TEKNISIÄ TIETOJA [21, 22]

Technical information

Shipping data for Switchsync™

Type		E213	F236	L183	T183
Gross weight	kg	6.0	12.0	12.0	12.0
Net weight	kg	3.0	7.0	7.0	7.0
Dimension (box)	m	0.4 x 0.3 x 0.2	0.42 x 0.42 x 0.4	0.42 x 0.42 x 0.4	0.42 x 0.42 x 0.4
Volume	m ³	0.024	0.071	0.071	0.071



Switchsync™ Controller E213



Switchsync™ Controller L183



Switchsync™ Controller T183



Switchsync™ Controller F236



Rear view of Switchsync™ Controller F236

