



LAPPEENRANNAN
TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari

KANDIDAATINTYÖ

10.12.2007

Janne Lampio

0260014

Säte TkK N

Monitoisioisen muuntajan parametrien mitta

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Lampio Janne
Nimi: Monitoisioisen muuntajan parametrien mittaust
Osasto: Sähkötekniikka, Sähkökäyttökniikka
Vuosi: 2007
Paikka: Lappeenranta

Kandidaatintyö

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkökäyttökniikan laboratorio
BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari
21 sivua, 18 kuvaa, 3 taulukkoa ja 3 liitettä.

Tarkastajat: Professori Pyrhönen Juha
DI Naumanen Ville

Hakusanat: tyhjäkäynti, oikosulku, monitoisioinen, sijaiskytkentä, muuntaja

Tässä kandidaatintyössä on tarkoitus määrittää monitoisioisen muuntajan yksivaiheisen sijaiskytkentä ja sen parametrit käyttämällä perinteisiä mittausmenetelmiä. Näihin kuuluvat tyhjäkäynti-, oikosulku- sekä tasajänniteko. Muuntajasta on tehty simulointimalli, jota varten sijaiskytkennän parametreja tarvitaan.

ABSTRACT

Author: Lampio Janne
Title: Monitoisioisen muuntajan parametrien mittaus
Department: Department of electrical engineering
Year: 2007
Place: Lappeenranta

Candidate's thesis.

Lappeenranta University of Technology. Laboratory of Electrical Drives Technology.

BL10A1000 Candidate's thesis and seminar

21 pages, 18 pictures, 3 tables and 3 appendices.

Supervisors: Professor Pyrhönen Juha
DI Naumanen Ville

Keywords: no-load, short circuit, multiple secondary, equivalent circuit, transformer

The main focuses of this paper are to define a single-phase equivalent circuit for a multiple secondary transformer and determine its parameters by using traditional measuring methods. These are no-load, short circuit and direct voltage measurements. The equivalent circuit's parameters are determined due to transformer's simulation model.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	1
2	MUUNTAJAN SIJAISSKYTKENTÄ JA SEN PARAMETRIT	2
2.1	Sijaiskytkentä	2
2.2	Tasavirtaresistanssi.....	4
2.3	Hajainduktanssit ja vaihtovirtaresistanssit.....	5
2.4	Magnetointi-induktanssi ja rautahäviöresistanssi.....	8
3	MITTAUSJÄRJESTELYT	9
3.1	Tasajännitekokeen mittausjärjestely.....	9
3.2	Oikosulkukokeen mittausjärjestely	9
3.3	Tyhjäkäyntikokeen mittausjärjestely.....	10
4	TULOKSET	12
4.1	Käämien resistanssit	12
4.2	Magnetointi-induktanssi ja rautapiirin resistanssi	15
4.3	Ensiön ja toisioiden hajaannukset	17
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	19
	LÄHDELUETTELO	21

LIITEET:	LIITE I	Muuntajan sijaiskytkennän parametrit.
	LIITE II	Oikosulkukokeiden yhtälöryhmät.
	LIITE III	Muuntajan sijaiskytkennän parametrit suhdearvoina, sekä niiden määrittämiseksi käytetyt yhtälöt.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

α	resistiivisyyden lämpötilakerroin
ρ	resistiivisyys
φ	vaihesiirtokulma
ω	kulmanopeus
μ	muuntosuhde, permeabiliteetti

A	ala
B	magneettivuontiheys
D,d	kolmiokytkentä
FFT	fast fourier transform
f	taajuus
H	magneettikentänvoimakkuus
i	indeksi
j	imaginääriyksikkö, indeksi
L	induktanssi
l	pituus
P	pätöteho
Q	loisteho
R	resistanssi
S	näennäisteho
T	lämpötila
U	jännite
X	reaktanssi
Y,y	tähtikytkentä
Z	impedanssi

Käytetyt alaindeksit

0	tyjäkäynti, tyhjiö
1	ensiöpiiri
2	toisiopiiri
Δ	muutos
σ	hajaannus
AC	vaihtovirta
b	kanta
DC	tasavirta
Cu	kupari
I	enisökäämi
k	oikosulku

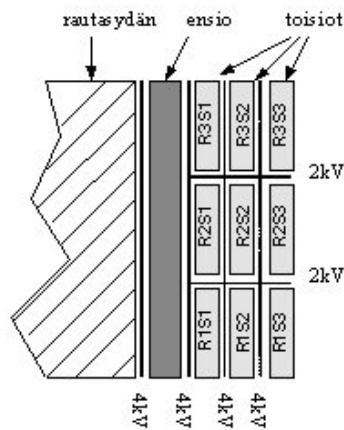
N	käämikierroslukumäärä
n	nimellinen
m	magnetointi
pu	suhdearvo
r	rautapiiri, suhteellinen

heittopilkku esittää toiseen jänniteportaaseen redusoitua arvoa
 R_2' redusoitu toisiopiirin resistanssi

1 JOHDANTO

Monitoisioinen muuntaja on oleellinen osa monitasomuuttajaa, jota on tutkittu Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastossa. Sovelluksesta on rakennettu prototyyppi, jonka osana työssä esiteltävä mittatilaustyönä valmistettu muuntaja on. Muuntaja on yksiensioinen ja yhdeksäntoisioinen verkkotaajuudella toimiva kolmivaiheinen tehomuuntaja.

Muuntaja on Dyn11 –kytketty ja siinä on yhdeksän kappaletta kolmivaiheitoisioita. Mekaaniselta rakenteeltaan se on kolmivaiheinen sydänmuuntaja, jossa jokaisella vaiheella on oma pylväs. Jokaisella pylväällä on kymmenen eri käämistä, yksi ensiön vaihekäämitys ja yhdeksän toisioita vaihekäämistä. Kuvassa 1.1 on esitetty periaatteellinen kuva yhden pylvään halkileikkauksesta, johon on nimetty toisioiden käämitykset, sekä viitteellisesti eri eristysvälien jännitekestoisuusvaatimukset.



Kuva 1.1. Muuntajapylvään halkileikkaukskuva, jossa näkyvät ensiö- ja toisiokäämien sijoitus ja käämien väliset jännitekestoisuusvaatimukset.

Jännitekestoisuudet on saatu aikaiseksi johdineristein sekä jättämällä eri käämien väliin riittävän suuret ilmavälit. Ensiön käämitys on tehty käyttämällä 32 mm^2 :n kuparista muotolankaa. Toisioiden käämeissä on käytetty 4 mm^2 :n kuparista pyörölankaa ja käämitykset on tuettu ilmaväleistä käyttämällä lasikuidusta valmistettuja liuskoja. Valmistaja ilmoittaa muuntajalle seuraavan taulukon mukaiset nimellisarvot sekä muuntosuhteeksi $\mu = 0,56$.

Taulukko 1.1. Valmistajan ilmoittamat muuntajan nimellisarvot.

	U_n [V], 50Hz	S_n [kVA]
Ensiö	400	103,5
Toisio	707	$9 \times 11,5$

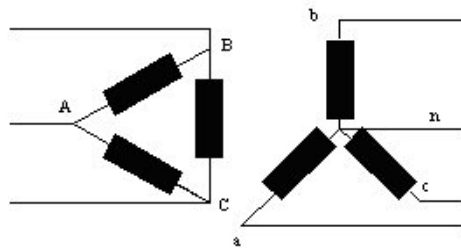
Monitasomuuttajan sovelluksen tutkimuksessa tarvitaan muuntajasta simulointimalli, jota varten muuntajan sijaiskytkennän parametrit on määritettävä. Tämän työn tavoitteena on määrittää muuntajan yksivaiheisen sijaiskytkennän parametrit käyttäen perinteisiä kirjallisuudessa esitettyjä menetelmiä. Menetelmiin kuuluvat tasajännite-, oikosulku- ja tyhjäkäyntikoe, joiden perusteella kyseiset parametrit voidaan määrittää.

2 MUUNTAJAN SIJAISKYTKENTÄ JA SEN PARAMETRIT

Luvussa esitellään sijaiskytkennän muodostus, sekä tasajännite-, oikosulku- että tyhjäkäyntikokeen teoria ja keskeisimmät niihin liittyvät yhtälöt sijaiskytkennän parametrien laskemiseen.

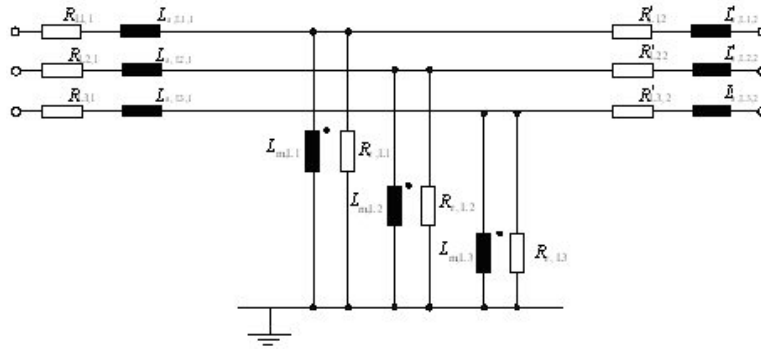
2.1 Sijaiskytkentä

Tutkittavan muuntajan kytkentäryhmä on Dyn11, joka on esitetty kuvassa 2.1. Siinä muuntajan ensiöpiiri on kytketty kolmioon ja toisiopiirit ovat tähdessä. Tutkittavassa muuntajassa on myös toisioiden tähtipisteet esillä. Kuvassa on muuntajaa tarkasteltu vain ensiön ja yhden toision suhteen. Loput muuntajan toisiot kytkeytyvät ensiöön vastaavalla tavalla.



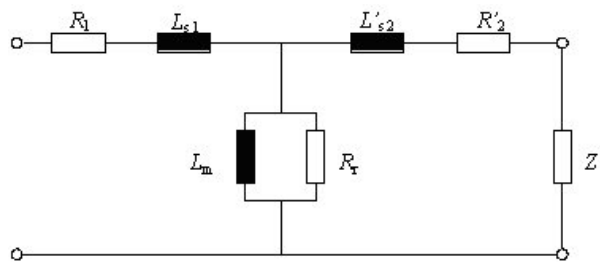
Kuva 2.1 Dyn11 –kytketty muuntaja, jossa on esitetty ensiön riippuvuus yhden toision suhteen. [1]

Dyn11 –kytketty muuntaja voidaan myös esittää kuvan 2.3 mukaisena yksivaiheisena sijaiskytkentänä. Kyseinen sijaiskytkentä saadaan, kun kolmioon kytketty ensiöpiiri aluksi muunnetaan kolmio–tähti-muunnoksella tähdeksi. Tällöin saadaan kuvan 2.2 mukainen kolmivaiheinen sijaiskytkentä, josta havaitaan muuntajan magnetointihaaran koostuvan vaihekomponenttien rinnankytkennästä.



Kuva 2.2. Kolmivaiheinen sijaiskytkentä Yy-kytkentäiselle muuntajalle, jossa $R_{L,1,1}$, $R_{L,2,1}$, $R_{L,3,1}$ ja $R'_{L,1,2}$, $R'_{L,2,2}$, $R'_{L,3,2}$ ovat ensiö- ja toisiokäämin vaihekohtaiset resistanssit. $L_{\sigma,L,1,1}$, $L_{\sigma,L,2,1}$, $L_{\sigma,L,3,1}$ ja $L'_{\sigma,L,1,2}$, $L'_{\sigma,L,2,2}$, $L'_{\sigma,L,3,2}$ ovat ensiö- ja toisiokäämin vaihekohtaiset hajainduktanssit. $R_{r,L,1}$, $R_{r,L,2}$, $R_{r,L,3}$ ovat rautapiirin vaihekohtaiset resistanssit ja $L_{m,L,1}$, $L_{m,L,2}$, $L_{m,L,3}$ vaihekohtaiset magnetointi-induktanssit.

Kun sijaiskytkentää varten analysoidaan edellisen kuvan Yy -kytkentää yhden vaiheen ja tähtipisteen väliltä, saadaan kuvan 2.3 mukainen yksinkertaistettu malli. Sijaiskytkennässä ei ole otettu huomioon muuntajan hajakapasitansseja, eikä toisioiden keskinäisinduktanssien vaikutusta.[2]



Kuva 2.3. Yksivaiheinen muuntajan sijaiskytkentä, jossa R_1 ja R'_2 ovat ensiö- ja redusoidun toisiokäämin resistanssit, $L_{\sigma 1}$ ja $L'_{\sigma 2}$ ensiö- ja redusoidun toisiokäämin aiheuttamat hajainduktanssit, L_m muuntajan päämagnetointi-induktanssi ja R_r rautapiirin resistanssi. Z' on toision kuorma redusoituna ensiöön.

Kuvissa 2.2 ja 2.3 on muuntajan toision parametrit redusoitu ensiön jänniteportaaseen. Tämä voidaan tehdä muuntajan muuntosuhteen μ avulla. Muuntosuhte saadaan määritettyä muuntajan ensiö- U_{n1} ja toisiopiirin U_{n2} jänniteportaiden mukaan tai käämikierosten N_1 ja N_2 lukumäärän mukaan seuraavasti:

$$\mu = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad [1] \quad (2.1)$$

Tällöin toisiopiirin resistanssin, induktanssien ja virtojen arvot saadaan redusoitua ensiöön muuntosuhteen avulla seuraavasti:

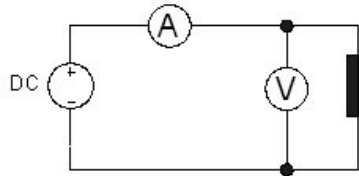
$$R_2' = \mu^2 R_2, \quad (2.2)$$

$$L_2' = \mu^2 L_2, \quad (2.3)$$

$$I_2' = \frac{1}{\mu} I_2. [1] \quad (2.4)$$

2.2 Tasavirtaresistanssi

Muuntajalle tehdään tasajännitetehtävä, jonka avulla määritetään muuntajan käämien tasavirtaresistanssit R_{DC} . Kokeessa syötetään yksittäisen käämin lävitse tasavirtaa I_{DC} vaihekäämi kerrallaan tasajännitelähteestä. Piirin resistanssi saadaan lasketuksi Ohmin lain avulla yhtälön (2.5) mukaisesti. Kuvassa 2.4 on esitetty muuntajalle tehtävä mittauskytkentä.



Kuva 2.4. Tasajännitetehtävä käämien tasavirtaresistanssien määrittämistä varten, jossa resistanssin määrittämistä varten mitataan piirin virta sekä käämin yli oleva jännite

$$R_{DC} = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}. \quad (2.5)$$

Muuntajan sijaiskytkentää varten resistansseja määritettäessä, on syytä huomata käämityksessä käytetyn kuparin resistiivisuuden lämpötilariippuvuus. Tällöin käämin resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa seuraavan yhtälön mukaisesti

$$R = \frac{\rho_{cu} (1 + \alpha_{cu} \Delta T) l}{A}, \quad (2.6)$$

missä ρ_{cu} on kuparin resistiivisyys $1,678 \cdot 10^{-8} \Omega m$, α_{cu} on kuparin resistiivisuuden lämpötilakerroin $6,8 \cdot 10^{-3} / K$. ΔT on lämpötilan muutos ja l on johtimen pituus, sekä A on johtimen poikkipinta-ala.[3]

Tasajännitemittauksella saatu tasavirtaresistanssi ei ota huomioon vaihtovirran taajuudesta riippuvaa virranahtoa, eikä pyörrevirtojen vaikutusta resistanssin arvoon. Tämä kuitenkin voidaan olettaa pieneksi, koska muuntaja toimii verkkotaajuudella $f = 50 \text{ Hz}$ ja muuntajan käämitykset sijaitsevat suhteellisen kaukana raudasta.

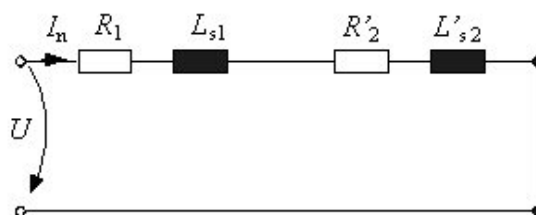
Koska kyseisen muuntajan kytkentäryhmä on Dyn11, voidaan toisiokäämitysten tasavirtaresistanssi mitata suoraan kuvassa 2.4 esitetyllä tavalla syöttämällä tasavirtaa vaiheen ja tähtipisteen välille. Tällöin saadaan määritetyksi jokaisen vaihekäämin resistanssi erikseen. Muuntajan ensiö on kytketty kolmioon kuvan 2.1 mukaisesti, joten siitä voidaan mitata tasavirtaresistanssit kolmion kytkentäterminaalien A-B, A-C ja B-C väleiltä, jolloin jokaisessa mittaustuloksessa on mukana kaikki kolmion käämit. Nämä kolmivaiheiset kolmion käämiresistanssit voidaan laskea kytkentäterminaalien väleiltä mitatuista resistansseista ratkaisemalla seuraavan yhtälöryhmä.

$$\begin{cases} R_{A-B} = \frac{R_{AB}(R_{AC} + R_{BC})}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}} \\ R_{A-C} = \frac{R_{AC}(R_{AB} + R_{BC})}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}} \\ R_{B-C} = \frac{R_{BC}(R_{AB} + R_{AC})}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}} \end{cases}, \quad (2.7)$$

missä R_{AB} , R_{AC} ja R_{BC} , ovat kuvan 2.1 mukaisen ensiön kolmiokytkennän kolmivaihekäämien tasavirtaresistanssit.

2.3 Hajainduktanssit ja vaihtovirtaresistanssit

Muuntajalle joudutaan sijaiskytkennän parametrien, ensiö- ja toisiokäämin vaihtovirtaresistanssien ja hajainduktanssien määrittämiseksi tekemään oikosulkukoe. Kokeen tarkoitus on mitata muuntajan ottama oikosulkuteho S_k , kun toisio on oikosuljettu ja ensiötä syötetään nimellisvirralla I_n . Tällöin voidaan oikosulkutehon ja -virran avulla määrittää muuntajan kyseiset parametrit. Kuvassa 2.5 on esitetty oikosuljetun yksitoisioisen muuntajan sijaiskytkentä, jossa näkyvät myös vastaavat sijaiskytkennän parametrit.



Kuva 2.5. Toisiosta oikosuljetun muuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä, jossa toision suuret on redusoitu muuntosuhteen avulla ensiöön. [2]

Sijaiskytkennästä nähdään, että oikosulkuteho kuluu muuntajassa oikosulkuimpedanssiin Z_k , joka koostuu muuntaja käämien resistansseista sekä hajainduktansseista. Tällöin on oletettu, että muuntajan magnetoimisinduktanssi on niin suuri verrattuna ensiön ja

toision hajaannuksiin, että se voidaan jättää huomiotta. Oikosulkuimpedanssin itseisarvo voidaan esittää seuraavasti:

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}, \quad (2.8)$$

missä $X_{\sigma 1}$ ja $X_{\sigma 2}'$ ovat muuntajan käämien induktansseista koostuvat hajareaktanssit ($X_{\sigma} = \omega L_{\sigma}$).

Muuntajan oikosulussa ottama näennäisoikosulkuteho S_k koostuu pätöteho- P_k ja loistehokomponenteista Q_k . Nämä voidaan määrittää jännitteen ja virran vaihesiirtokulman φ avulla seuraavasti:

$$P_k = S_k \cos \varphi, \quad (2.9)$$

$$Q_k = S_k \sin \varphi. \quad (2.10)$$

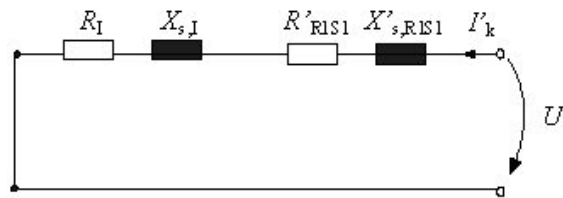
Pätötehohäviöt ovat muuntajan käämityksen virtalämpöhäviöitä, ja loisteho vastaa käämien hajaannuksesta johtuvia häviöitä, jotka voidaan esittää muuntajan nimellisvirran avulla seuraavasti:

$$P_k = I_n^2 R_k, \quad (2.11)$$

$$Q_k = I_n^2 X_k = I_n^2 j \omega L_k, \quad (2.12)$$

missä R_k on oikosuljetun muuntajan sijaiskytkennän käämien resistanssien summa ja X_k hajareaktanssien summa. Muuntajan muuntosuhteen μ perusteella pystytään resistanssien ja hajareaktanssien summat jakamaan tasan ensiö- ja toisiopiirin kesken aiemmin esitettyjen yhtälöiden (2.2) ja (2.3) mukaisesti.

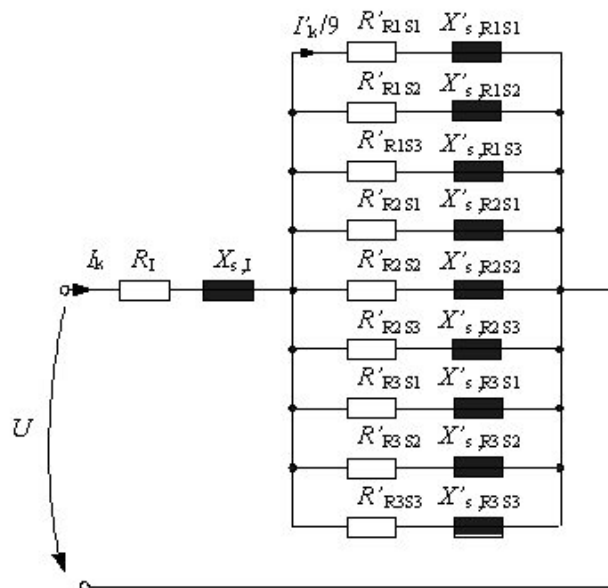
Muuntajan monitoisuusisuuden takia tarvitaan oikosulkukokeita riittävä määrä ensiön ja jokaisen toision vaihtovirtaresistanssien ja hajainduktanssien määrittämiseksi. Kymmenellä oikosulkukokeella saadaan rakennettua yhtälöihin (2.9) ja (2.10) pohjautuvat yhtälöryhmät, jotka on esitetty liitteessä II. Muodostetut yhtälöryhmät vaihtovirtaresistansseille sekä hajareaktansseille vastaavat seuraavissa kuvissa 2.6 ja 2.7 esitettyjä oikosulkusijaiskytkentöjä.



Kuva 2.6. Ensimmäistä oikosuljetun muuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä, kun muuntajaa syötetään toisiosista R1S1 muiden toisioiden ollessa tyhjäkäynnissä.

Liitteessä II esitettyjen kummankin yhtälöryhmän yhdeksän ensimmäistä yhtälöä on muodostettu kuvan 2.6 sijaiskytkennän perusteella. Jokaiselle muuntajan toisioille saadaan oma yhtälö syöttämällä kyseistä toisiota ensiön ollessa oikosuljettuna ja muiden toisioiden tyhjäkäynnissä. Yhtälöryhmissä tarkastellaan sijaiskytkennän ensiön sekä toisioiden resistanssi- ja hajareaktanssiosuuksia, sekä muuntajan ottaman oikosulkutehon perusteella niille laskettuja kokonaisarvoja. Muuntajan toisioparametrit saadaan redusoi-
tua ensiöjänniteportaaseen redusoimalla toisiovirta suoraan ensiöön yhtälön (2.4) avulla.

Kuvan 2.7 mukaisella sijaiskytkennällä, jonka perusteella on luotu liitteessä II esitettyjen yhtälöryhmien kymmenes yhtälö, saadaan yhtälöryhmiin huomioon otettua tehonjakosuhte ensiön ja toisioiden välille. Sijaiskytkennässä kaikki toisiot on oikosuljettu, jolloin ensiön ottama oikosulkuteho jakaantuu jokaiselle toisioille likimain tasaisesti olettaen että toisioiden käämitykset ovat identtisiä. Tämä voidaan todeta esimerkiksi Kirchoffin virtalain perusteella. Sijaiskytkennässä toisiot ovat toistensa suhteen rinnankytkettyjä, jolloin jokainen toisio ottaa tehoa yhdeksäsosan ensiön ottamasta oikosulkutehosta.

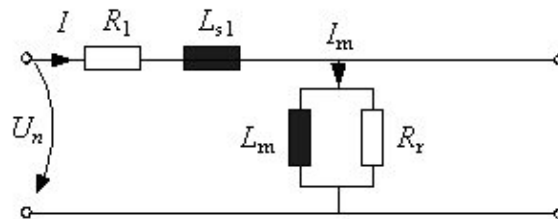


Kuva 2.7. Kaikista toisioista oikosuljetun muuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä, kun muuntajaa syötetään ensiöstä. Toisiohajaannusten välinen keskinäisinduktanssi on jätetty huomiotta.

Oikosulkukokeista mitattu näennäisteho voidaan jakaa yhtälöiden (2.9) ja (2.10) perusteella pätöteho- ja loistehokomponentteihin. Näiden tehokomponenttien ja mitatun oikosulkuvirran avulla voidaan laskea muuntajan kokonaisresistanssi ja – reaktanssi liitteen II yhtälöryhmiä varten. Yhtälöryhmien ratkaisuna saadaan käämien vaihtovirtaresistanssit sekä hajareaktanssit.

2.4 Magnetointi-induktanssi ja rautahäviöresistanssi

Muuntajan sijaiskytkennän magnetointihaaran magnetointi-induktanssin L_m ja rautapiirin resistanssin R_r määrittämiseksi on muuntajalle tehtävä tyhjäkäyntikoe. Tyhjäkäyntikokeessa muuntajan ensiötä syötetään normaalisti nimellisjännitteellä ja nimellistaajuudella toisiopiiriin ollessa auki. Tällöin muuntaja ottaa tehoa verkosta vain ensiökäämin resistanssissa kuluviin häviöihin sekä rautasydämen magnetointihäviöön, joka myöselviää kuvan 2.8 tyhjäkäyvän muuntajan sijaiskytkennästä. Jakelumuuntajien oikosulkujännite U_k on tyypillisesti vain 2 – 4 %:n luokkaa, ja ensiön suhteellinen hajaannus on noin puolet tästä. Päämagneettiipiirin ilmvälittömyyden vuoksi muuntajien hajaannukset ovat siis vain murto-osa pyörivien koneiden hajakomponenteista. Merkittävin osa muuntajan tyhjäkäyntinäennäistehosta kuluu magneetomishaarassa magneetomisindektanssin ja rautapiiriresistanssin takia, jolloin voidaan olettaa ensiökäämityksestä kuluva näennäisteho mitättömäksi. [2]



Kuva 2.8. Tyhjäkäyvän muuntajan sijaiskytkentä, jossa ensiöön syötetään nimellisjännite toisiopiiriin ollessa auki.

Muuntajan tyhjäkäyntikokeesta mitattu näennäisteho pystytään jakamaan pätöteho- ja loistehokomponenttiin yhtälöiden (2.9) ja (2.10) avulla ja niiden perusteella voidaan määrittää yllä olevan sijaiskytkennän magneetomishaaran parametrit seuraavasti:

$$R_r = \frac{U_n^2}{P_0}, \quad (2.13)$$

$$X_m = \frac{U_n^2}{Q_0} = j\omega L_m. \quad (2.14)$$

Tyhjäkäyntihäviö P_0 koostuu pääasiassa muuntajan sydämen rautapiirissä kulkevan magneettivuon vaihtelusta aiheutuvista hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Nämä tunnetaan yleisesti rautahäviöinä. Pienen osan häviöihin tuovat myös käämilangan virtaläm-

pöhäviöt sekä eristeiden dielektriset häviöt. Nämä ovat kuitenkin rautahäviöiden rinnalla suuruudeltaan mitättömät, joten käytännössä näillä ei ole merkitystä magnetointihäärän parametrien määrittämisessä. Tällöin käämilangan resistanssista johtuvia muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä ei ole noteerattu yhtälössä (2.13). Tyhjäkäyntikokeessa loisteho kuuluu ensiökäämin hajaannukseen ja muuntajan sydämen magnetoimiseen. Vastaavasti tässäkin hajaannuksen suuruus magnetointi-induktanssiin nähden on hyvin pieni, joten sitä ei ole otettu huomioon yhtälössä (2.14).[2]

3 MITTAUSJÄRJESTELYT

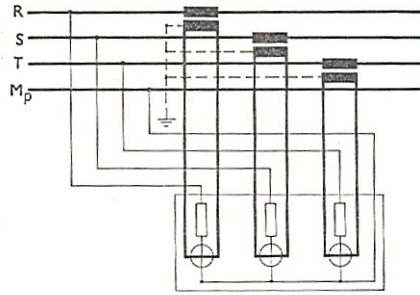
Tässä luvussa esitellään käytetyt mittausmenetelmät sekä -kytkennät. Muuntajan monitorisoinnin takia, ei kaikkien mittausten suorittaminen vain ensiöpuolelta syötettynä tullut kysymykseen. Muun muassa oikosulku- ja tasajännitekokeita jouduttiin tekemään syöttämällä muuntajaa vuorollaan ensiöstä sekä jokaisesta toisiosta.

3.1 Tasajännitekokeen mittausjärjestely

Tasajännitekoetta muuntajan käämien tasavirtaresistanssin määrittelyä varten tehtiin kohdassa 2.2 esitetyn kuvan 2.4 mittauskytkennän mukaisesti. Jokainen muuntajan toisio vaihekäämi mitattiin erikseen syöttämällä sitä tasajännitelähteestä. Kytkennästä mitattiin kahden eri digitaalisen yleismittarin avulla piirin virtaa ja käämin yli olevaa jännitettä. Jokaisen käämin mittauksessa syötettiin tasajännitettä sen verran, että piirin virta asettui noin 3,1 A:iin. Lopuksi mitattiin käämityksien pintalämpötila, resistanssin lämpötilariippuvuuden huomioonottamiseksi.

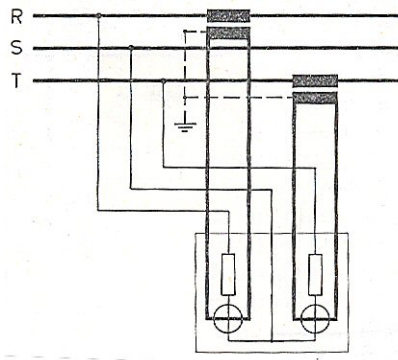
3.2 Oikosulkukokeen mittausjärjestely

Muuntajalle suoritettiin kymmenen oikosulkukokeetta kohdassa 2.3 esitettyjen sijaiskytkentöjen mukaisesti. Yhdeksän ensimmäistä koetta tehtiin syöttämällä muuntajaa toisiopuolelta yksitellen jokaista toisiota kerrallaan ensiön ollessa oikosulussa ja toisten toisioiden ollessa tyhjäkäynnissä. Oikosulkukokeissa toisiota syötettiin kolmivaiheisella variac -säätömuuntajalla. Taulukon 1.1 muuntajan nimellisarvoista voidaan laskea muuntajan nimellisvirraksi ensiöpuolelle $I_{n1}=149,4$ A ja toisioille $I_{n2}=9,4$ A. Tämän takia toisiopuolelta syötetyissä oikosulkukokeissa käytettiin noin 8 A:n oikosulkuvirtaa. Kokeista mitattiin muuntajan ottama oikosulkuteho kolmivaiheisella nelijohdintehomitauksella, jonka mittauskytkentä on esitetty kuvassa 3.1. Kuvan mukaisella kytkennällä jokaiselta vaiheelta mitattiin vaihejännite, virta, vaihe-ero, sekä eri tehokomponentit.



Kuva 3.1. Tehomittaus nelijohdinkytkennällä, jossa jokaiselta vaiheelta mitataan vaihejännite, virta sekä vaihe-ero.[4]

Viimeistä oikosulkukoetta varten muuntajan jokainen toisio oikosuljettiin johtimilla ja ensiötä syötettiin suurella säädettävällä jakelumuuntajalla. Mittauksissa käytettiin 132 A:n virtaa ja tehomittaukset suoritettiin kolmijohdinkytkennällä muuntajan ensiön kolmiokytkenän takia. Tämä mittauskytkentä on esitetty kuvassa 3.2, jossa mitattiin vaiheiden väliset pääjännitteet ja ko. vaiheiden virrat sekä vaihe-erot. Tällöin saatiin määritetyksi muuntajan ottama kolmivaiheteho.



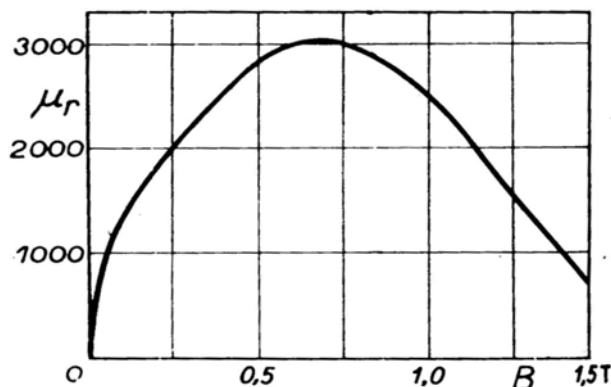
Kuva 3.2. Tehomittaus kolmijohdinkytkennällä, jossa vaiheiden väliltä mitataan pääjännitteet ja virrat, sekä vaihe-erot.[4]

3.3 Tyhjäkäyntikokeen mittausjärjestely

Tyhjäkäyntikoe suoritettiin muuntajalle kohdassa 2.4 esitetyn sijaiskytkennän mukaisesti ensiöpuolelta kaikkien toisiopiirien ollessa avoimena tyhjäkäynnissä. Tällöin muuntajaa syötettiin ensiön nimellijännitteellä 400 V. Koska ensiöpiiri oli muuntajan kytkentärühmän mukaan kytketty kolmioksi, tyhjäkäynnin teho mitattiin kuvassa 3.2 esitetyllä kolmijohdinkytkennällä. Tyhjäkäyntikokeesta mitattiin vaiheiden väliset pääjännitteet ja ko. vaiheiden virrat sekä vaihe-erot. Tällöin saatiin määritetyksi muuntajan ottama tyhjäkäyntiteho.

Tyhjäkäyntitehoa mitattaessa ensiön nimellijännitteellä tyhjäkäyntivirran käyrämuoto säröytyi pahasti, kuten kuvasta 4.4 huomataan. Tämän takia myös tehomittaus antoi epämääräisiä tuloksia. Muuntajan tyhjäkäyntivirran säröytyminen on luonnollista, koska

muuntajissa ei ole magneettiä linearisoivia ilmavälejä. Muuntajapeltien suhteellinen permeabiliteetti μ_r on korkea, mutta epälineaarisesti vuontiheydestä B riippuvainen. Tämä riippuvuus on esitetty eräälle valurautateräkselle kuvassa 3.3, josta nähdään hyvin teräksen suhteellisen permeabiliteetin epälineaarisuus siihen vaikuttavan vuontiheyden suhteen.



Kuva 3.3. Erään teräksen suhteellisen permeabiliteetin riippuvuus magneettivuontiheydestä. [5]

Kuvan perusteella havaitaan raudan suhteellisen permeabiliteetin riippuvan vahvasti magneettivuontiheydestä. Tällöin muuntajan syöttöjännitteen vaihdelta ajallisesti sinimuotoisesti vaihtelee myös rautasydämen vuontiheys sinimuotoisesti. Näin ollen myös sydämen permeabiliteetti muuttuu kuvan käyrän mukaisesti. Koska muuntajan magnetoimisinduktanssin arvo on suoraan verrannollinen rautasydämen permeabiliteettiin nähden, on induktanssi pieni matalalla vuontiheydellä ja vastaavasti suuri lähellä nimellistä vuontiheyttä. Muuntajan nimellinen vuontiheys on noin 0,8 T.[7] Permeabiliteetin epälineaarinen käytös aiheuttaa näin ollen muuntajan ottaman magnetoimisvirran säröytymisen kuvan 4.4 mukaisesti.

Muuntajalle olisi voitu tehdä tyhjäkäyntikoe myös toisiopuolelta syöttämällä jokaista toisiokäämiä omalla jännitelähteellä. Kuitenkaan yhdeksää kolmivaiheista samanlaista jännitelähdettä ei ollut käytettävissä. Kaikki toisiot olisi myös voitu kytkeä rinnan ja syöttää niitä yhdestä jännitelähteestä, sillä oletuksella, että ne olisivat olleet riittävän samanlaisia. Tyhjäkäyntikoe päädyttiin suorittamaan ensiöpuolelta alennetulla jännitteellä. Käytetty jännite oli 300 V, jolloin virran käyrämuoto pysyi suhteellisen sinimuotoisena.

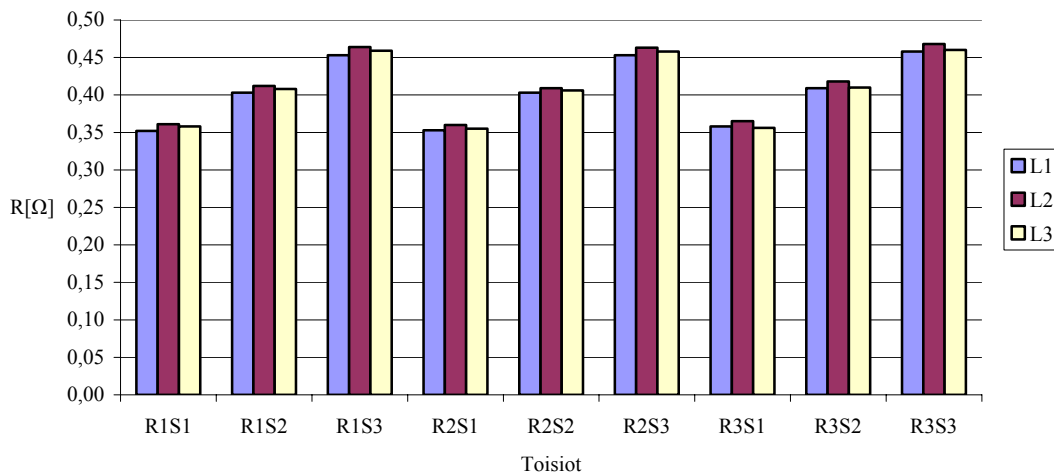
4 TULOKSET

Tehtyjen mittauskokeiden perusteella laskettiin teoriaosuudessa esitetyin menetelmin muuntajalle sijaiskytkennän parametrit. Liitteeseen I on taulukoitu kaikki mittausdatasta lasketut muuntajan sijaiskytkennän parametrit. Liitteessä III on lisäksi esitetty sijaiskytkennän parametrit suhdearvoina.

4.1 Käämien resistanssit

Tarkasteltavan muuntajan käämitysten resistanssien määrittelyksi tehtiin tasajännitekoe, jonka perusteella saatiin lasketuksi suoraan toisiokäämitysten vaihekohtainen tasavirtaresistanssi Ohmin lain (2.5) avulla jokaiselle käämillemme erikseen. Oikosulkukokeiden ja virtalämpöhäviöiden perusteella saatiin muodostetuksi lausekkeeseen (2.11) perustuva yhtälöryhmä, joka on esitetty liitteessä II. Ratkaisemalla yhtälöryhmä numeerisesti saatiin muuntajan ensiön sekä toisiokäämitysten kolmivaiheiset vaihtovirtaresistanssit suoraan ensiön jänniteportaaseen redusoituna. Kummallakin mittaustavalla määritetyt käämien resistanssien tulokset ovat esitetyt taulukoituna liitteessä I, suhdearvoiksi laskettuna liitteessä III ja graafisessa muodossa kuvissa 4.1 ja 4.2.

Kuvan 4.1 diagrammiin on koottu muuntajan tasajännitekokeen perusteella määritetyt muuntajan tosioiden tasavirtaresistanssit vaiheittain koottuna.

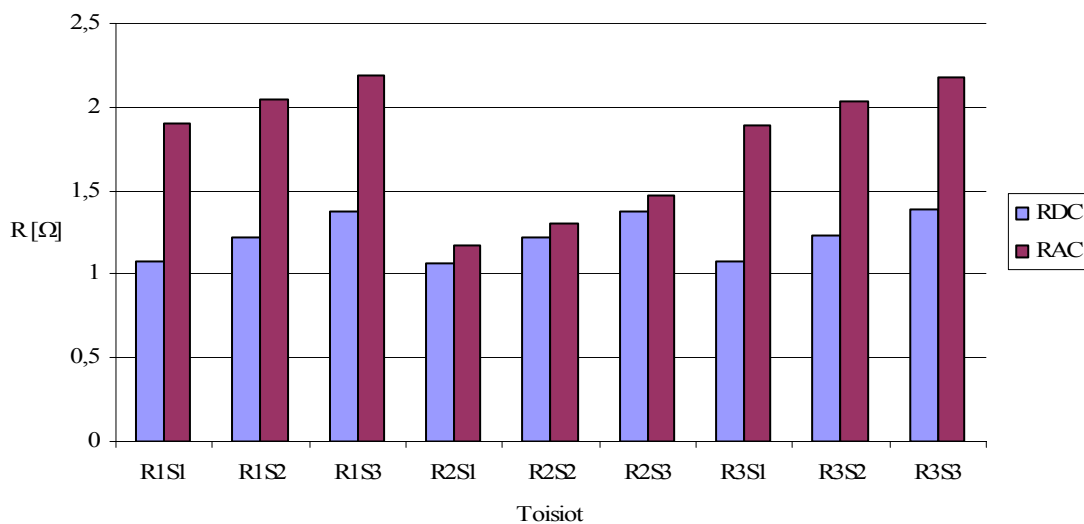


Kuva 4.1. Muuntajan tosioiden tasavirtaresistanssit vaiheittain käämien ollessa 21°C:n lämpötilassa.

Kuvasta huomataan, että resistanssien arvot vaihtelevat välillä 0,34 – 0,47 Ω. Nämä arvot tuntuvat melko realistisilta, kun otetaan huomioon, että käämilanka oli 4mm² pyörölankaa. Lisäksi diagrammia tarkastelemalla huomataan, että saman toisioin eri vaiheiden välillä ei ole suuria poikkeuksia, mikä viittaa siihen, että ko. toisioin eri vaiheissä on käytetty luonnollisesti sama määrä kuparia sekä käämikierroksia.

Eri toisioiden välillä olevat erot resistansseissa selittyvät osittain käämien geometrisesta sijoittelusta ja sitä kautta käämilangan pituuden kasvusta. Kuvasta huomataan selvä säännönmukaisuus eri toisioryhmien välillä, resistanssi on kasvava toisioryhmien ollessa järjestyksessä S1, S2, ja S3. Tarkastelemalla kuvan 1.1 käämien sijoittelua havaitaan sama toisiokäämien järjestys siirryttäessä läheltä ensiökäämiä kohti ulkokehää, jonka seurauksena myös johtimen pituus käämeissä kasvaa käämikierroksen säteen kasvaessa. Laskemalla suurimman ja pienimmän resistanssiarvon erotuksen perusteella tarvittavan kuparijohtimen pituus yhtälön (2.6) avulla, saadaan tulokseksi noin 24m. Ottamalla huomioon muuntajan käämien dimensiot ja ilmvälit käämitysten välillä voidaan johdinmenekin kasvua pitää todennäköisenä. Hieman virhettä resistanssien eroon tulee käytettävien mittareiden mittaustarkkuudesta. Lisäksi kun otetaan huomioon resistiivisyyden lämpötilariippuvuus yhtälön (2.6) mukaisesti ja olettamalla käämien jatkuvan käytön lämpötilan olevan noin 60 °C, saadaan resistiivisyyden kasvuksi noin 27 %. Tämä kuitenkin kasvattaa luonnollisesti kaikkien käämitysten resistanssia. Mittausten aikana käämien lämpötila ei kuitenkaan ennättänyt muuttua ympäristön lämpötilasta merkittävästi.

Kuvaan 4.2 on piirretty sekä tasajännitekokeen, että oikosulkukokeiden kautta määritetyt muuntajan toisioiden kolmivaiheiset käämien resistanssit.

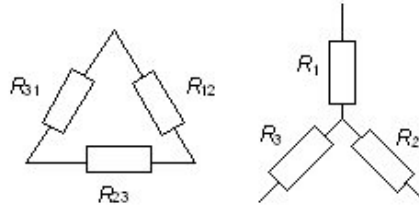


Kuva 4.2. Muuntajan toisioiden kolmivaiheiset tasavirta- ja vaihtovirtaresistanssit.

Kuvassa huomataan suuria eroja tasavirta- ja vaihtovirtaresistanssien välillä. Esimerkiksi R1S3 oikosulkukokeesta määritetty resistanssi on melkein kaksinkertainen verrattuna tasajännitekokeen tuloksiin. Vaihtovirtaresistanssin suuruuteen vaikuttavat pieneltä osin pyörrehäviöistä ja virranahdosta syntyvät lisähäviöt, virhettä aiheutuu myös oikosulkumittausjärjestelyistä. Mittaukset suoritettiin toision nimellisvirralla, joka oli melkein kolminkertainen tasajännitekokeessa käytetyn virran suuruuteen. Tämä puolestaan

lämmitti osaltaan mitattavaa käämiä ja myös hieman muiden toisioiden käämejä. Kuitenkin suurimman virheen voidaan olettaa syntyvän vaihtovirtaresistansseihin mittausdatan tarkkuudesta ja sijaiskytkennän perusteella luodusta yhtälöryhmästä. Oikosulkukokeen sijaiskytkentä ei ota huomioon ollenkaan magnetointihaaran vaikutusta. Lisäksi mittausdatasta huomataan, että mitattujen jännitteiden, virtojen sekä vaihe-erojen arvoissa esiintyy vaiheiden välillä eroavaisuutta, jolloin vaiheiden summatehoista määritetyt resistanssien arvot keskiarvoistavat tuloksia. Kun tarkastellaan mittausdatan arvojen suuruuksia, huomataan että niiden suuruusluokka on satakertainen resistanssien arvoihin nähden. Tällöin numeerisen tarkkuuden takia myös pienet poikkeamat mittausarvoissa vaikuttavat suuresti resistanssien arvoihin.

Muuntajan ensiö oli kytketty kolmioon kuvan 2.1 mukaisesti. Seuraavassa kuvassa ja yhtälöissä on esitetty kolmio–tähti –muunnos, jonka avulla voidaan muuntaa ensiön kolmiokytkentä tähdeksi ja sitä kautta laskea ensiökäämityksen kolmivaiheinen resistanssi.



Kuva 4.3. Kolmio–tähti –muunnos.

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (4.1)$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (4.2)$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (4.3)$$

Yllä olevan kuvan mukaiset kolmion resistanssit R_{31} , R_{12} ja R_{23} saadaan määritetty mittausdatasta ratkaisemalla yhtälöryhmä (2.7). Taulukossa 4.1 on esitetty ensiöpuolen tasajännittekokeen mittausdatasta lasketut tasavirtaresistanssit kolmiossa, tähdessä ja kolmivaiheisena summana. Ne ovat hyvin pienet, koska ensiökäämitys on tehty muotokuparista, joka on poikkipinnaltaan 32mm^2 .

Taulukko 4.1 Tarkasteltavan muuntajan ensiökäämitysten tasavirtaresistanssit kolmiokytkennässä, tähti-kytkennässä sekä kolmivaiheisena summana

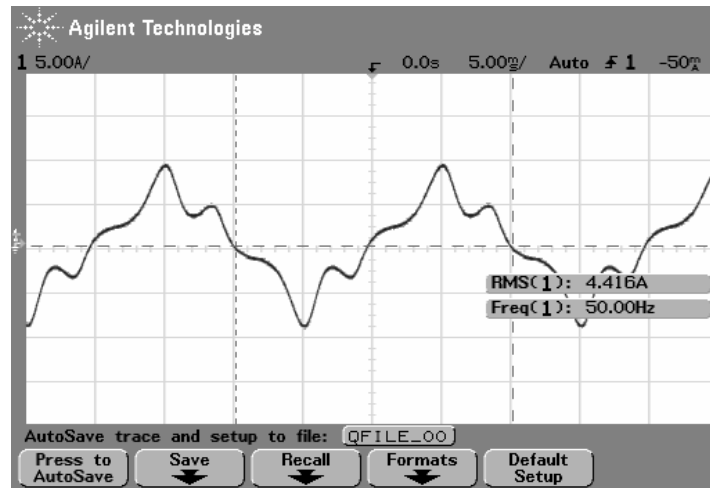
	[Ω]
R_{31}	0,05
R_{12}	0,044
R_{23}	0,046
R_1	0,016
R_2	0,015
R_3	0,017
ΣR_Y	0,048

Ensiöpuolen kolmivaiheiseksi tasavirtaresistanssiksi saadaan $R_{DC} = 0,05 \Omega$. Vastaavasti oikosulkukokeiden perusteella saatu kolmivaiheinen vaihtovirtaresistanssi on toisiojänniteportaassa. Tällöin muuntajan muuntosuhteen sekä yhtälön (2.2) avulla saadaan ensiön oikeaksi vaihtovirtaresistanssiksi $R_{AC} = 0,03 \Omega$. Tästä huomataan, että molemmilla tavoilla määritetyt resistanssit ovat melkein yhtä suuret. Vaihtovirtaresistanssi on hiukan pienempi, jonka voidaan todeta johtuvan oikosulkusijaiskytkentöjen yksinkertaistuksista sekä numeerisesta laskentatarkkuudesta, vaikka sen pitäisi todellisuudessa olla hivenen suurempi.

Liitteeseen III on laskettu ensiö- ja toisiokäämien resistanssien suhdearvot. Liitteessä esiteltyjen yhtälöiden perusteella toisiokäämien ensiöportaaseen redusoidut tasavirtaresistanssien arvot ovat noin 0,26 – 0,34 % ja vaihtovirtaresistanssien 0,29 – 0,61 %, jotka vaihtelevat käämeittäin suhteessa kuvan 4.2 pylväsdiagrammin arvoihin. Ensiökäämin tasavirtaresistanssiksi saatiin 1,04 % ja vaihtovirtaresistanssiksi 0,61 %. Suhdearvoista huomataan, että ensiö- sekä toisiokäämien tasavirtaresistanssien suuruusluokka on realistinen, vaikka mittaustulokset sisältävätkin selvästi virheitä.

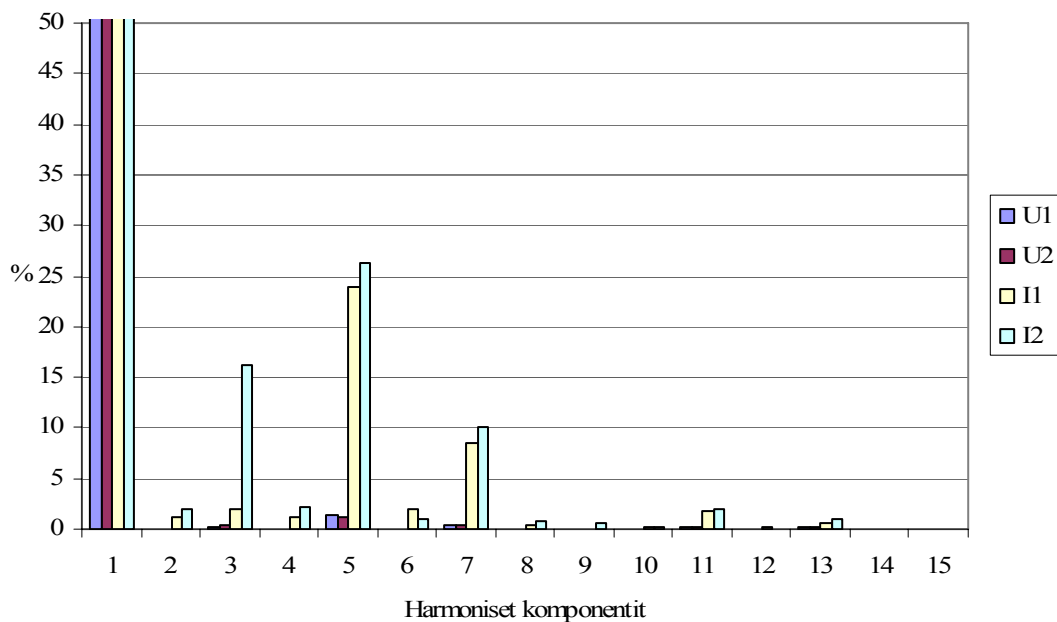
4.2 Magnetointi-induktanssi ja rautapiirin resistanssi

Muuntajalle suoritettiin kohdan 3.3 mukainen tyhjäkäyntikoe. Tyhjäkäyntikoe oli alun perin tarkoitus suorittaa muuntajan ensiöpuolelta syötettynä nimellisjännitteellä 400V. Tällöin kuitenkin muuntaja otti kuvan 4.4 mukaista tyhjäkäyntivirtaa, joka on säröytynyt hyvin pahasti



Kuva 4.4. Muuntajan ottama tyhjäkäyntivirran käyrämuoto, kun muuntajaa on syötetty ensiöstä nimellisjännitteellään (400 V).

Tyhjäkäyntikokeen perusteella tehtiin mitatuista jännitteistä ja virroista FFT-analyysi, joka on esitetty kuvassa 4.5. Sen perusteella voidaan selvästi havaita, että virrankäyrämuodossa korostuu merkittävästi 3., 5. ja 7. yliaalto.



Kuva 4.5. Muuntajan tyhjäkäyntikokeesta 3-johdin tehomittauksella mitattujen pääjännitteiden ja vaihevirtojen FFT-analyysi.

Kuvasta huomataan, että laboratorion muuntajaa syöttävässä sähköverkossa on jännitteen viidettä yliaaltokomponenttia noin 1,4% ja seitsemättä komponenttia 0,5% perusaallosta. Muuntajan ottamasta virrasta havaitaan, että vastaavat komponentit esiintyvät jopa 27 %:n ja 10%:n suuruisina verrattuna perusaaltoon. Virran käyrämuodon säröytyminen havaittiin neljällä eri virranmittausmenetelmällä. Virta mitattiin kahdenlaisilla

eri virta-antureilla, virtamittamuuntajalla sekä shunttivastuksen yli olevalla jännitemittauksella. Kaikissa tapauksissa huomattiin sama ilmiö. Ilmiön suuruus hieman yllätti, mutta jo edellä mainittu muuntajan sydänmateriaalin voimakas epälineaarisuus selittää sen.

Muuntajalle tehtiin tyhjäkäyntikoe alennetulla 300 V:n ensiöjännitteellä Muuntajan jännitteelle ja tyhjäkäyntivirrälle suoritettiin FFT-analyysi ja magnetointireaktanssi X_m ja -induktanssi L_m sekä rautapiirin resistanssi R_r laskettiin mittausdatan perustajuuden 50 Hz:n komponenttien arvoista yhtälöiden (2.13) ja (2.14) avulla. Parametrien tulokset on koottu taulukkoon 4.2. sekä liitteeseen I ja suhdearvoina liitteeseen III.

Taulukko 4.2 Tarkasteltavan muuntajan magnetoimishaaran parametrit rinnankytkettyinä sekä vaihetta kohden.

	R_r [Ω]	X_m [Ω]	L_m [H]
tähtisijaiskytkentäarvo vaihetta kohti	160,671	156,766	0,499
kolmivaiheinen tähtisijaiskytkentäarvo rinnankytkettynä	53,557	52,255	0,166

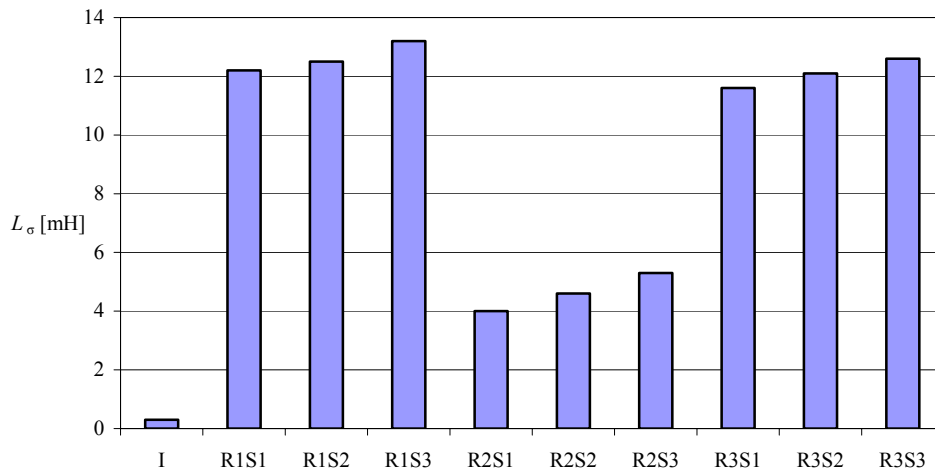
Taulukkoon on laskettu erikseen yhtä vaihetta kohden olevat keskiarvolliset parametrien arvot ja sijaiskytkentää varten niiden rinnankytkennän arvot. Sijaiskytkennän suhdearvoiksi saatiin laskettua liitteessä III esitettyjen yhtälöiden avulla rautapiirin resistanssiksi 103,9 ja magnetoimisinduktanssiksi 101,1. Tuloksista nähdään, että magnetoimisinduktanssin sekä rautapiirin resistanssin arvot tuntuvat suhteellisen realistisilta kokoluokkansa puolesta.

4.3 Ensiön ja toisioiden hajaannukset

Muuntajan hajaannuksien selvittämiseksi tehtiin kohdan 3.2 mukainen oikosulkukoe. Kokeen perusteella voidaan hajareaktanssit määrittää ratkaisemalla liitteen II yhtälöryhmä, joka on johdettu kohdassa 2.3. Yhtälöryhmään sijoitettiin oikosulkukokeiden mittausdatan perusteella yhtälöstä (2.12) lasketut kokonaisreaktanssit ja oikosulkuvirrat. Yhtälöryhmän numeerinen ratkaisu antoi tuloksiksi kuvan 4.6 mukaiset muuntajan käämityksien hajainduktanssit. Hajainduktanssien tulokset on myös koottu taulukkoarvoiksi liitteeseen I ja suhdearvoina liitteeseen III.

Kuvan pylväsdiagrammissa on esitetty tuloksiksi saadut kolmivaiheiset toisiokäämien hajainduktanssit ensiön jänniteportaaseen redusoituna. Siitä huomataan, että toisioiden arvot vaihtelevat välillä 4 – 13,2 mH. ensiön haja-induktanssin ollessa 0,3 mH. Vaihteluväli toisioiden arvojen kesken on hyvin suurta. Kuitenkin muuntajalla oletettiin alun perin olevan suuret, mH:n luokkaa toisioiden hajaannukset kuvan 1.1 perusteella. Hajaannusten suuruutta voidaan perustella muuntajan rakenteella, sillä ilmavälit käämitys-

ten välillä ovat huomattavan suuret tarvittavan jännitelujuuden saavuttamiseksi Syntyvät suurehkot pinta-alat tarjoavat hajavuolle kulkureittiä, mikä lisää vastaavasti hajaannuksien suuruutta.



Kuva 4.6. Muuntajan ensiön ja toisiokäämitysten kolmivaiheiset hajainduktanssit redusoituna ensiön jänniteportaaseen.

Osaltaan kuvasta voidaan myös löytää säännönmukaisuuksia. R2 toisioryhmän hajainduktanssit ovat pienimmät ja R1 ja R3 toisioryhmien ovat suurimmat ja suunnilleen samansuuruiset. Tämä vastaava jaottelu tuli ilmi myös määritettyjen käämien vaihtovirtaresistanssien tapauksessa. Vertaamalla eri toisiokäämien hajaannuksia kuvan 1.1 muuntajan rakenteeseen havaitaan suurimmat hajaannukset syntyvät pylvään päihin sijoitettuihin käämiryhmiin R1 ja R3. Myös jokaisen eri toisioryhmän R1, R2 ja R3 käämien hajaannus on symmetrisesti kasvava käämien ollessa järjestyksessä S1, S2, S3. Tämä täsmää myös rakennekuvan käämien sijoitteluun. Käämiryhmä S1 sijaitsee sisimpänä pylvään lähellä, kun taas ryhmä S3 on kauimpana ulkolaidalla. Nämä säännönmukaisuudet viittaavat vahvasti siihen, että käämien rakenteellisella sijoittelulla on merkittävä vaikutus hajainduktanssin suuruuteen. Tällöin voidaan todeta, että suurimmat käämien hajaannukset syntyvät oletetusti toisioihin, jotka sijaitsevat pylväiden päissä ja ulkokehällä.

Oikosulkukokeessa muuntajaa toisioita syötettiin pienellä säätömuuntajalla, ja oskilloskoopilla syöttöjännitettä tarkastelemalla huomattiin, että se ei vastannut täysin kolmivaiheista symmetristä sinikäyrämuotoa. Jännitteiden vaihekäyrien amplitudeissa oli pientä eroa, joka olisi ehkä myös havaittu hajainduktanssien vaihekohtaisissa arvoissa. Kuitenkin kolmivaiheisina laskettuihin hajainduktanssien arvoihin tällä ei ole juuri merkitystä, koska samat jänniteamplitudien erot toistuivat jokaisen oikosulkukokeen aikana samassa suhteessa.

Liitteessä III on esitetty oikosulkukokeiden perusteella määritetyt toisioiden hajainduktanssien suhdearvot, jotka on laskettu käyttämällä muuntajan toision nimellisarvoista määritettyä induktanssin kantalukua L_b . Ension jänniteportaaseen redusoidut hajainduktanssien arvot vaihtelevat välillä 0,96 – 3,18 % samassa suhteessa toisiinsa kuten kuvasta 4.6 nähdään. Tämän perusteella voidaan todeta, että hajaannukset suurehkot.

Oikosulkukokeiden perusteella saatiin ension kolmivaiheiseksi hajainduktanssiksi 0,3 mH, joka on suhteellisen arvona 2,03 % ension nimellistehoon suhteutettuna. Viimeisen oikosulkukokeen perusteella, jossa muuntajaa syötettiin ensiöstä kaikkien toisioiden ollessa oikosulussa, saatiin mittaustulosten perusteella oikosulkujännitteen U_k suhteelliseksi arvoksi 4,88 %. Tämän perusteella voidaan todeta ension hajaannuksen oleva noin puolet suhteellisesta oikosulkujännitteestä. Tarkastelemalla ension hajainduktanssin arvoa ja ension jänniteportaaseen redusoitujen toisiokäämien hajainduktanssien keskiarvoa huomataan, että toisiohajaannukset ovat keskimäärin noin 11-kertaisia ension arvoon verrattuna, mikä melkein täsmää kohdassa 2.3 esitettyyn oikosulkutehon jakautumiseen ension ja toisiokäämien kesken.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoitus oli määrittää monitoisioisen mittatilausmuuntajan sijaiskytkennän parametrit sille tehtyä simulointimallia varten. Muuntajan valmistaja oli ilmoittanut hyvin niukat lähtöarvot kyseiselle muuntajalle ja sen erikoisen rakenteen takia vertailukohtia tuloksille oli hyvin vaikea löytää.

Käämitysten hajainduktansseille saatiin yllättävän suuret arvot, etenkin ensiökäämitykselle. Tätä kuitenkin osattiin pieneltä osin odottaa toisioille muuntajan käämitysten rakenteen perusteella. Kuitenkaan hajaannuksissa ei ole otettu huomioon millään tavoin toisiohajaannuksien keskinäisinduktanssista aiheutuvaa kytkeytymistä käämien välille. Lisäksi myös magnetoimisinduktanssin vaikutus jätettiin huomiotta oikosulkukokeissa tehtävän yksinkertaistamiseksi. Vertaamalla toisioiden hajaannuksien suuruutta käämien sijoitteluun, huomataan käämien välillä kytkeytymisiä. Sisimmät pylväiden keskellä sijaitsevien käämien hajaannukset ovat pienimmät.

Tyhjäkäyntikokeessa muuntajan ottaman virrankäyrämuoto säröytyi nimellisjännitteellä. Tämä sotki muuntajan tyhjäkäyntikokeen mittauksia, kun muuntajaa ei voitu syöttää täydellä ensiöjännitteellä muuntajan täyden magnetoinnin määrittämiseksi. Tällöin jouduttiin tyytymään vajaan tyhjäkäyntijännitteeseen ja mittaustietojen virtojen ja jännitteiden perusharmonisen komponentin arvoihin, joista parametrit ratkaistiin. Tällöin saatiin tuloksiksi kuitenkin oikeassa suuruusluokassa olevat sijaiskytkennän parametrien arvot.

Käämitysten resistanssien arvot määritettiin kahdella eri tapaa, oikosulkukokeen ja tasajännitemittauksen perusteella. Nämä arvot poikkesivat aika paljon toisistaan oikosulkukokeen perusteella saatujen arvojen ollessa melkein noin kaksinkertaiset tasavirtaresistansseihin nähden. Oikosulkukokeessa kuitenkin tuli ilmi hyvin muuntajan käämitysten sijainnin vahva vaikutus hajainduktanssien arvoihin ja sitä kautta vastaavasti myös resistanssien arvoihin, joka vääristi näitä tuloksia eri toisioryhmien välillä. Kuitenkin tasajännitekokeen perusteella saadut resistanssien arvot tuntuivat realistisimmilta, koska virhetekijöiden määrä on huomattavasti pienempi ko. mittausjärjestelyssä. Se ei kuitenkaan ota huomioon pientä vaihtovirrasta johtuvaa resistanssin lisäystä. Tasavirtaresistanssien tuloksista havaittiin myös selvä resistanssiarvojen kasvu käämikierroksen säteen kasvaessa toisiokäämien sijainnin perusteella siirryttäessä ensimmäisen toisioryhmän S1 sisäkehältä uloimmalle toisioryhmälle S3 ulkokehälle. Kuitenkaan resistanssien arvoissa ei pitäisi olla merkittäviä eroja johdinmenekin kannalta toisioryhmien R1, R2 ja R3 välillä, joka vaihtovirtaresistanssien arvoissa tuli ilmi.

Kyseisen muuntajan sijaiskytkennän parametrien määrittäminen käytetyillä menetelmillä osoittautui suoritettujen oikosulkukokeiden sekä tyhjäkäyntikokeen perusteella hieinan puutteelliseksi. Oikosulkukokeiden sijaiskytkennöissä olisi jollain tavalla pitänyt ottaa huomioon käämien keskinäisinduktanssien vaikutukset sekä myös magnetoimishaaran vaikutus. Tällöin kuitenkin yhdeksän toisioisen muuntajan sijaiskytkentämalli olisi mennyt erittäin monimutkaiseksi. Tällöin ehkä muuntajan toimintaa voitaisiin mallintaa FEM –mallilla, jolloin saataisiin parempi käsitys sen toiminnasta hajaannuksen suhteen. Tyhjäkäyntikoe olisi voitu kokeilla tehdä myös toisiopuolelta ja verrata näitä ensiöpuolen arvoihin kytkemällä kaikki toisiot rinnan ja syöttämällä muuntajaa yhdellä kolmivaihesyötöllä.

Muuntajan ottama tyhjäkäyntivirran säröytyminen olisi hyvä jatkotutkimusaihe. Sitä voitaisiin lähteä tarkastelemaan esimerkiksi syöttämällä muuntajaa eri jänniteharmonisilla komponenteilla, jotta saataisiin käsitys muuntajan mahdollisista resonanssituloista. Lisäksi muuntajalle voitaisiin tehdä IEC 60076 tehomuuntajastandardin mukainen ilman kuormaa mitattava virtaharmonisten spektri. ”Measurement of the harmonics of the no-load current” (IEC 60076-1/10.6).

LÄHDELUETTELO

- [1] Nerg Janne. LTY B130A800 Sähkömagneettisten komponenttien opintojakson luentomateriaali 2004.
- [2] Tonteri A, Aura L. Sähkämiehen käsikirja 2, Sähkökoneet. Porvoo 1986. WSOY. ISBN 951-0-13479-1
- [3] Maol-taulukot. Keuruu 2000. Otavan Kirjapaino Oy. ISBN 951-116053-2
- [4] Pöyhönen Otso W. Sähkötekniikan käsikirja osa 1. 6. painos. Helsinki 1980 KK kirjapaino. ISBN 951-30-2488-1
- [5] Paavola M, Lehtinen P. Sähkötekniikan oppikirja. Porvoo 1991. WSOY. 951-0-15903-4
- [6] Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osaston sähkökäyttöjen laboratorion B130A0400 Design of an electrical machine opintojakson luentomateriaali <http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2720400/1%20principles.pdf>.
- [7] Kujanpää, J. Henkilökohtainen kirjeenvaihto muuntajan suunnittelijan kanssa 26.11.2007.

Muuntajan kolmiokytketyn ensiökäämityksen ja tähtimuunnoksen tasavirtaresistanssit sekä kolmivaiheiset tasa- ja vaihtovirtaresistanssit 21° C:n lämpötilassa

	[Ω]
$R_{D,31}$	0,05
$R_{D,12}$	0,044
$R_{D,23}$	0,046
$R_{Y,1}$	0,016
$R_{Y,2}$	0,015
$R_{Y,3}$	0,017
ΣR_Y	0,048

Muuntajan toisiokäämityksien tasa- ja vaihtovirtaresistanssit 21° C:n lämpötilassa.

	R1S1	R1S2	R1S3	R2S1	R2S2	R2S3	R3S1	R3S2	R3S3
$R_{DC, L1}$ [Ω]	0,352	0,403	0,453	0,353	0,403	0,453	0,358	0,409	0,458
$R_{DC, L2}$ [Ω]	0,361	0,412	0,464	0,36	0,409	0,463	0,365	0,418	0,468
$R_{DC, L3}$ [Ω]	0,358	0,408	0,459	0,355	0,406	0,458	0,356	0,41	0,46
ΣR_{DC} [Ω]	1,071	1,223	1,376	1,068	1,218	1,374	1,079	1,237	1,386
ΣR_{AC} [Ω]	1,899	2,041	2,191	1,170	1,309	1,467	1,891	2,033	2,179

Muuntajan rautaresistanssi, magnetoimisreaktanssin ja magnetoimisinduktanssi.

	R_r [Ω]	X_m [Ω]	L_m [H]
tähtisijaiskytkentäarvo vaihetta kohti	160,671	156,766	0,499
kolmivaiheinen tähtisijaiskytkentäarvo rinankytkettynä	53,557	52,255	0,166

Muuntajan kolmivaiheiset ensiön ja toisioiden hajainduktanssit redusoituna ensiön jänniteportaaseen.

	I	R1S1	R1S2	R1S3	R2S1	R2S2	R2S3	R3S1	R3S2	R3S3
$L'\sigma$ [mH]	0,3	12,2	12,5	13,2	4	4,6	5,3	11,6	12,1	12,6

Mittaustuloksista määritettävät kokonaisresistanssit $R_{\sigma, \text{tot}}$ saadaan laskettua mitatuista pätehtekomponenteista. Yhdeksässä ensimmäisessä yhtälöryhmän yhtälössä ensiö on oikosulussa ja syöttö on tapahtunut yhdestä toisista vuorolla. Tällöin kokonaisresistanssi koostuu ensiön ja syötetyn toision resistanssin sarjaankytkennästä. $R_{\sigma, \text{tot}}$:a laskettaessa mitattu toisiovirta on redusoitu ensiöön. Kymmenes yhtälö on saatu mittaamalla ensiöteho, kun kaikki toisiot ovat oikosulussa syötön tapahtuessa ensiössä. Tällöin kokonaisresistanssi koostuu toisioresistanssien rinnankytkennästä, joka on sarjassa ensiön resistanssin kanssa.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\sigma, \text{tot}1} = R_I + R'_{R1S1} \\ R_{\sigma, \text{tot}2} = R_I + R'_{R1S2} \\ R_{\sigma, \text{tot}3} = R_I + R'_{R1S3} \\ R_{\sigma, \text{tot}4} = R_I + R'_{R2S1} \\ R_{\sigma, \text{tot}5} = R_I + R'_{R2S2} \\ R_{\sigma, \text{tot}6} = R_I + R'_{R2S3} \\ R_{\sigma, \text{tot}7} = R_I + R'_{R3S1} \\ R_{\sigma, \text{tot}8} = R_I + R'_{R3S2} \\ R_{\sigma, \text{tot}9} = R_I + R'_{R3S3} \\ R_{\sigma, \text{tot}10} = R_I + \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{1}{R'_{RiSj}}} \end{array} \right.$$

LIITE II (2)

Vastaavasti mittaustuloksista määritettävät kokonaisreaktanssit $X_{\sigma, \text{tot}}$ saadaan laskettua mitatusta loistehokomponentista. Yhdeksän ensimmäistä yhtälöä on muodostettu edellä olevalla tavalla, jolloin kokonaisreaktanssi koostuu ensiön ja toision hajareaktanssien sarjaankytkennästä. Viimeisessä yhtälössä kokonaisreaktanssi koostuu toisioiden hajareaktanssien rinnankytkennästä, joka on ensiön hajaannuksen kanssa sarjassa.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{\sigma, \text{tot}1} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R1S1} \\ X_{\sigma, \text{tot}2} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R1S2} \\ X_{\sigma, \text{tot}3} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R1S3} \\ X_{\sigma, \text{tot}4} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R2S1} \\ X_{\sigma, \text{tot}5} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R2S2} \\ X_{\sigma, \text{tot}6} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R2S3} \\ X_{\sigma, \text{tot}7} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R3S1} \\ X_{\sigma, \text{tot}8} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R3S2} \\ X_{\sigma, \text{tot}9} = X_{\sigma, I} + X'_{\sigma, R3S3} \\ X_{\sigma, \text{tot}10} = X_{\sigma, I} + \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 X'_{\sigma, RiSj}} \end{array} \right.$$

Alla on esitetty suhdearvojen laskemiseen käytetyt yhtälöt. [6]

$$\hat{u}_n = \sqrt{2} \frac{U_n}{\sqrt{3}},$$

$$\hat{i}_n = \sqrt{2} I_n,$$

$$\omega_n = 2\pi f_s$$

$$r_{pu} = \frac{R \hat{i}_n}{\hat{u}_n},$$

$$l_{pu} = \frac{L}{L_b} = \frac{L}{\frac{\hat{u}_n}{\omega_n \hat{i}_n}},$$

missä U_n ja I_n on muuntajan jännitteen ja virran nimellisarvot, f_s syöttötaajuuden nimellisarvo, ω_n nimellinen kulmanopeus ja L_b induktanssin perusarvo vaihetta kohti.

Muuntajan ensiön ja toisiokäämien tasavirta-, vaihtovirtaresistanssien sekä hajainduktanssien suhteelliset arvot ensiön jänniteportaassa.

	I	R1S1	R1S2	R1S3	R2S1	R2S2	R2S3	R3S1	R3S2	R3S3
$R'_{DC,PU}$ [%]	1,04	0,26	0,30	0,34	0,26	0,30	0,34	0,26	0,30	0,34
$R'_{AC,PU}$ [%]	0,61	0,47	0,50	0,54	0,29	0,32	0,36	0,46	0,50	0,53
$L'_{\sigma,PU}$ [%]	2,03	2,94	3,01	3,18	0,96	1,11	1,28	2,79	2,92	3,04

Muuntajan k magnetointi-induktanssin, rautapiirin resistanssin suhteelliset arvot ensiön jänniteportaassa.

$L_{m,pu}$	101,41
$R_{r,pu}$	103,93