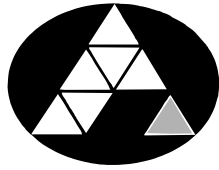


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Mikko Koponen

YKSIVAIHETEHOMUUNTAJAN SUUNNITTELU

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012



POHJOIS-KARJALAN
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2012
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
p. (013) 260 6800

Tekijä
Mikko Koponen

Nimeke
Yksivaihetehomuuntajan suunnittelu

Toimeksiantaja
Muuntosähkö Oy / Trafox Finland

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella uuden malliset yksivaihetehomuuntajat Muuntosähkö Oy:n toimeksiannosta. Suunnittelulla pyrittiin vähentämään muuntajan häviöitä, kustannuksia, kokoa ja parantamaan valmistettavuutta ja ulkonäköä.

Työ on kirjoitettu yleisessä muodossa yksivaihetehomuuntajan suunnittelun tärkeimmät osa-alueet huomioiden. Työssä käydään läpi muuntajan suunnittelua aina toteutukseen ja mittauksiin asti. Lopussa esitellään myös työtä varten suunniteltujen muuntajien keskeisimmät tulokset. Työssä käsitellään vain kuivamuuntajia.

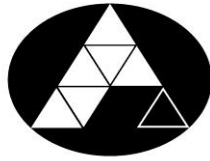
Tuloksena saatiin suunniteltua pienempi häviöiset, edullisemmat ja ulkonäöllisesti paremmat muuntajat. Kuitenkin kaikkien mallien koko kasvoi ja joidenkin mallien massat olivat suurempia kuin vanhempien.

Jatkotutkimusaiheiksi esitellään kyseisten muuntajien laajempia mittaustutkimuksia, kolmivaiheistehomuuntajien samanlaista käsittelyä ja työssä käytettyjen materiaalien ja valmistusprosessien tutkimista.

Kieli
suomi

Sivuja 47

Asiasanat
muuntajat, suunnittelu, sähkömagneettiset ilmiöt, induktio



NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
May 2012
Degree Programme in Electrical Engineering
Karjalankatu 3
FIN 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. 358-13-260 6800

Author
Mikko Koponen

Title
Designing of a Single-phase Power Transformer

Commissioned by
Muuntosähkö Oy / Trafox Finland

Abstract

The purpose of this thesis was to design a new type of single-phase power transformers for Muuntosähkö Oy. The goal of the designing was reducing energy losses, improving processibility and appearance and getting a smaller sized and more economical transformer.

The thesis contains the general design aspects of the single-phase transformer from the first calculations all the way to manufacturing and testing. The main results of the designed transformers are presented and compared at the end of the thesis. This thesis only deals with dry-type transformers.

As a result, improved processibility and appearance, a more economical transformer and reduced transformer energy losses were achieved. Still the size of the designed transformers grew. Further research themes are proposed for similar three-phase power transformer designs and more in depth research for materials and processes used in this thesis.

Language
Finnish

Pages 47

Keywords

transformers, design, electromagnetic phenomena, induction

Sisältö

1	Johdanto.....	5
2	Muuntajat.....	6
2.1	Muuntajan rakenne.....	6
2.2	Muuntajan toiminta.....	8
3	Tehohäviöt.....	10
3.1	Tyhjäkäyntihäviöt.....	10
3.1.1	Pyörrevirtahäviöt.....	11
3.1.2	Hystereesihäviöt.....	12
3.2	Käämihäviöt.....	13
4	Rale.....	14
5	Materiaalien kokonaisenergiankulutus.....	15
6	Standardit.....	17
7	Suunnittelu.....	17
7.1	Vertailu.....	18
7.1.1	Kuparin tai alumiinin käyttö käämityksessä.....	19
7.1.2	Rautasydämen materiaalin valinta.....	21
7.2	Suunnittelun laskennan perusteita.....	24
7.3	Ralen käyttö muuntajan suunnittelussa.....	27
7.4	Laskelmien analysointi.....	33
8	Toteutus.....	34
9	Mittaukset.....	35
9.1	Käämiresistanssit.....	36
9.2	Oikosulkuimpedanssi ja -häviö.....	36
9.3	Tyhjäkäyntihäviöt ja -virta.....	37
9.4	Lämpenemätesti.....	38
10	Tulokset ja johtopäätökset.....	40
11	Pohdinta.....	44
	Lähteet.....	46

1 Johdanto

Kun sähkömagneettiseen induktioon perustuvan sähkögeneraattorin kehittäminen 1800-luvun loppupuoliskolla alkoi, päästiin käyttämään sähköenergiaa enemmän valaistukseen ja teollisuuden käyttövoimaksi. Alkuaikoina tasasähköä käytettiin lähinnä pienien alueiden ja teollisuudessa tarvittavaan valaistukseen. Vaihtosähkötekniikka oli edistynyt 1890-luvulla niin pitkälle, että se alkoi syrjäyttää tasasähköjärjestelmiä. Vaihtosähkön etu on, että sähkönsiirrossa voidaan käyttää korkeita jännitteitä, koska siirtäminen on pidettävä mahdollisimman taloudellisena ja häviöttömänä pitkillä matkoilla. Tähän tarvitaan muuntajia, mitkä ovat tarkoitukseen nähden edullisia. Tasasähköllä jännitteen muutokseen tarvitaan kalliimmat laitteistot, joten tästä syystä vaihtosähkö syrjäytti tasasähkön. Nykyään tasasähköjärjestelmiä käytetään esimerkiksi merikaapeliyhteyksissä, mutta sen merkitys sähkönsiirrossa on vain murto-osa verrattuna vaihtosähkөөn. [1, s. 13–16]

Opinnäytetyöni aiheena oli Muuntosähkö Oy:n yksivaihetehomuuntajien kokoluokkien 6,3–20 kVA:n uudelleen suunnittelu. Muuntajan olivat kuivamuuntajia. Työn tavoitteena oli suunnitella vanhat muuntajamallit halvemmiksi ja tehohäviöiltään pienemmiksi. Huomioon otettiin myös muuntajan ulkonäkö, koko, massa ja valmistettavuus. Suunnittelun tarve lähti tuotteen nykyaikaistamisesta ja sen tilanteen parantamisesta markkinoilla.

Työn raportointi kirjoitettiin yleisluontoiseksi ohjeeksi yksivaiheisten kuivamuuntajien suunnitteluun. Kaikkea työn aikana saatua tietoa ei tästä syystä voitu sisällyttää raporttiin. Valitsin aiheen sillä se oli opettavainen ja haastava ammatillisessa mielessä. Työ tehtiin toimeksiantona Muuntosähkö Oy:lle.

2 Muuntajat

Muuntaja on yksinkertainen laite eikä siinä ole liikkuvia osia. Tästä syystä ne ovat varsin edullisia. Muuntajien käyttäminenkin tulee halvaksi, koska niillä ei ole tarvetta jatkuvalle huollolle. [2, s. 149]

Muuntajan tehtävänä on siirtää vaihtojännitettä ja -virtaa käämien välillä sähkömagneettisen induktion avulla. Käämityksiä voi olla useita. Useimmiten käämit ovat erotettuja toisistaan galvaanisesti. Tähän on olemassa myös poikkeus, sitä kutsutaan säästömuuntajaksi. Muuntajilla on erilaisia käyttötarkoituksia ja ne jaetaan ryhmiin tehtäviensä perusteella. Karkea erittely tehdään määrittämällä teho- ja mittamuuntajat omiksi ryhmikseen. Mittamuuntajien tarkoitus on muuntaa virta- tai jännitearvo sopivaan suuruuteen. Tehomuuntajan tehtävänä on siirtää nimensä mukaisesti tehoa eri jännitetasoon. [3, s. 1]

Tarkemmin eriteltynä tehomuuntajan tehtäviin kuuluvat, jo aiemmin mainittu, jännitteiden ja virtojen muuntaminen haluttuun arvoon, jännitteiden tai vaihekulman säätö tai vaihekulman muuttaminen. Yksivaihetehomuuntajalla ei muuteta eikä säädellä vaihekulmia. [4, s. 616]

2.1 Muuntajan rakenne

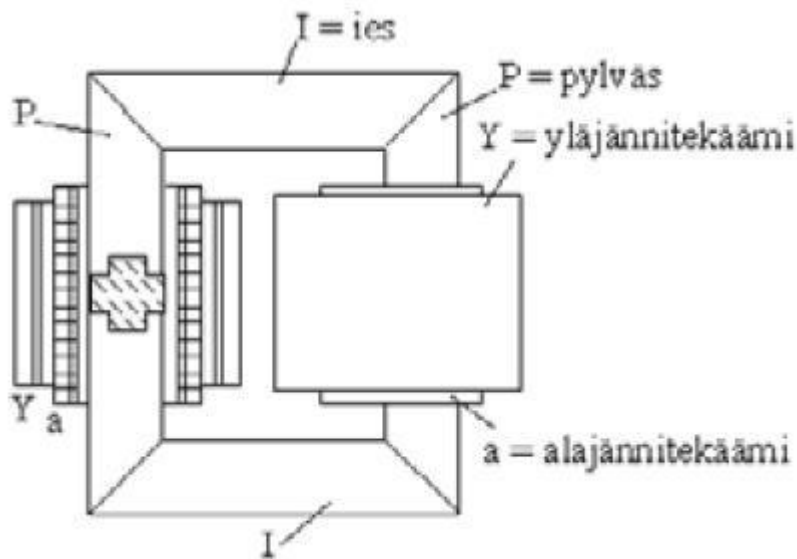
Muuntajan rakenne koostuu käämityksistä ja sydäimestä, mitkä ovat sen aktiiviset osat. Passiivisia osia ovat tukirakenteet, mahdolliset jäähdytysosat ja -aineet, liittimet, mahdolliset koteloinnit ja eristykset. Tätä toimeksiantoa varten suunniteltiin ns. kuivamuuntajia (engl. dry-type transformer). Niissä sydäntä tai käämityksiä ei ole upotettu eristävään nesteeseen [5, s. 15]. Muuntajat ovat myös suunniteltu toimimaan ilman erillistä jäähdytystä eli jäähtymään luonnollisesti. [3, s.1]

Käämit tehdään kuparista tai alumiinista. Tätä työtä varten on tarkastelu kupari- ja alumiinikäämisiä muuntajia. Suunnitellussa muuntajassa ensiö- ja toisiokäämi on samalla pylväällä ja nämä käämit jaettu kahdelle pylväälle. Jos käämit sijoitettaisiin eri pylväille, niin hajavuo ja hajareaktanssit olisivat suuremmat [3, s.2]. Pylväiden ensiökäämit ovat kytketty keskenään sarjaan ja toisiokäämit samoin.

Kuvio 1 esittää yksivaihemuuntajan sydänmuuntajan rakenteen. Käämi valmistetaan kiertämällä johdinta sydämen pylvään ympärille suunnitellun kierrosmäärän mukaisesti. Käämit ovat yleensä kuvion 1 mukaisessa järjestyksessä, alajännitekäämi on sisempi ja yläjännitekäämi ulompana. Tällä pyritään siihen, että alajännitekäämi on helpompi eristää rautasydäimestä ja yläjännitekäämin säätöpäät saadaan helpommin asennettua. [3, s. 2]

Rautasydän sisältää ikeet ja pylvät (Kuvio 1). Nämä osat saavat aikaan suljetun virtapiirin, missä magneettivuo kulkee. Se rakennetaan rainoista, mitkä ovat hyvin ohuilla kerroksilla eristettyjä rautalevyjä. Niitä käytetään, koska umpiraudassa muodostuisi suuria pyörrevirtoja ja täten häviöt kasvaisivat kohtuuttomasti. [2, s. 102–104]

Rainoja on olemassa eri ominaisuuksilla valmistettuja kidesuunnattuja sekä -suuntaamattomia. Suuntaamattomat ovat halvempia, mutta kidesuunnatuissa päästään pienempiin rautahäviöihin. [4, s. 617]



Kuvio 1. Esimerkki 1-vaihemuuntajan rakenteesta. [3, s. 2]

Siderautojen tehtävänä on pitää sydän koossa ja alasideraudat toimivat usein myös muuntajan jalaksina. Sideraudat myös johtavat lämpöä, joten tällä voidaan saada lämmönsiirtymisen pinta-alaa kasvatettua.

Eristeinä toimivat johdinten eristykset, käämien väliset eristykset, muuntajan lakka sekä mahdolliset muut päällyseristykset. Eristämisellä pyritään saamaan tarvittavan luotettava sähköinen eristys ja tukemaan jännitteisiä osia. Täten eristyksen parhaimpina ominaisuuksina pidetään sähkölujuutta sekä mekaanista lujuutta. Yleensä eristysmateriaalin

valinta ei tuota ongelmia jännitelujuuden kanssa. Merkittävämmäksi valinnaksi tulee yleisemmin eristeen lämpötilan kestävyys. Eristyspaksuudet ja materiaalit on määritelty tarkasti standardeissa, mitkä täytyy ottaa huomioon muuntajaa suunniteltaessa. [1, s. 121]

2.2 Muuntajan toiminta

Vuonna 1831, englantilainen Michael Faraday havaitsi, että käämin läpi kulkevan magneettivuon vaihtelu synnyttää eli indusoi sähkömotorisen voiman (smv). Ensiökäämiin syötetty vaihtosähkö synnyttää muuntajan sydämessä kulkevan magneettivuon, mikä vaihtelee vaihtosähkön vaikutuksesta. Tämä magneettivuon vaihtelu synnyttää smv:n toisio käämiin. Muuntajan toiminta perustuu tähän ilmiöön ja sitä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi. [1, s. 94]

Faraday keksi myös, kuinka smv E on suoraan verrannollinen kääminläpi kulkevan magneettivuon vaihtelunopeuteen ja käämin johdinkierroslukuun. Tästä voidaan kirjoittaa yhtälö, mitä kutsutaan Faradayn induktiolaiksi. [1, s. 94]

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

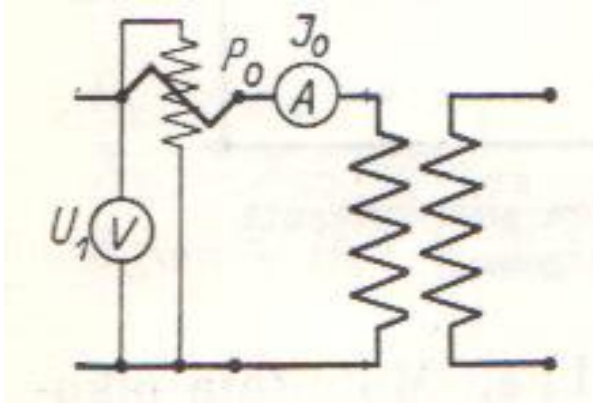
jossa N = käämin johdinkierrosluku

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \text{magneettivuon muutos aikayksikköä kohti}$$

Koska muuntajan ensiö- ja toisiokäämit eivät ole kiinteästi yhdessä, eli ne ovat galvanisesti erotettuja, niin energia siirtyy ensiöstä toisioon magneettikentän välityksellä. [6, s. 2]

Muuntajan tärkeimmät osat ovat muuntajan käämitykset ja rautasydän. Merkitään ensiökäämin johdinkierroslukua N_1 :llä ja toisiokäämin N_2 :lla. Kuten aiemmin todettiin, synnyttää vaihtojännite U_1 virran I_1 ja tämä vuorostaan magneettivuon rautasydämeen.

Tarkastellaan ensin ideaalista tyhjäkäyvää muuntajaa. Kun muuntajan (kuvio 2) toision virtapiiri on auki, kutsutaan sitä tyhjäkäyväksi muuntajaksi. Tällöin toision virta I_2 ja teho ovat nolliä, joten toisiolla ei tässä tapauksessa ole myöskään magneettista vaikutusta. [1, s. 150]



Kuvio 2. Kytkentäkuva tyhjäkäyvästä muuntajasta. [1, s. 164]

Magneettivuo indusoi myös ensiöön smv:n.

$$U_1 = 2\pi f N_1 \Phi = -E_1 \quad (2)$$

joka on siis miltei yhtä suuri kuin jännite U_1 , mutta vastakkais-suuntainen. Tätä sähkömotorista voimaa kutsutaan vastasähkömotoriseksi voimaksi, sillä se kumoaa ensiöpuolen napajännitteen U_1 . [1, s. 150]

Magneettivuo indusoi samalla tavoin smv:n toisioon [4, s. 617].

$$U_2 = 2\pi f N_2 \Phi = E_2 \quad (3)$$

Molemmissa tapauksissa kulkee sama vuo, joten voidaan kirjoittaa,

$$\frac{U_1}{2\pi f N_1} = \frac{U_2}{2\pi f N_2} \rightarrow \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

eli
$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 \quad (4)$$

Tästä nähdään, että jännite muuntuu kierroslukujen suhteessa ensiöstä toisioon.

Koska tarkastelimme ihanteellista eli häviötöntä yksivaihemuuntajaa, emme ottaneet huomioon siinä syntyviä tehohäviöitä. Todellisessa muuntajassa vaikuttavat rauta- ja käämihäviöt.

3 Tehohäviöt

Tehohäviöillä tarkoitetaan muuntajan antaman tehon suhdetta sen ottamaan tehoon. Tehohäviöt jaetaan kahteen ryhmään: rauta- ja käämihäviöihin. Näitä kutsutaan myös tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiksi, sillä tyhjäkäyvässä muuntajassa vaikuttaa rautahäviöt ja kuormitetussa käämihäviöt. [1, s. 166]

3.1 Tyhjäkäyntihäviöt

Tyhjäkäyntihäviöt muodostuvat raudassa magneettivuon vaihtelun vuoksi ja ne voidaan jakaa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Magneettivuon vaihtelun vuoksi ja ne voidaan jakaa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Magneettivuon vaihtelun vuoksi ja ne voidaan jakaa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Magneettivuon vaihtelun vuoksi ja ne voidaan jakaa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Magneettivuon vaihtelun vuoksi ja ne voidaan jakaa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. [1, s. 166]

Tyhjäkäyntivirta aiheuttaa myös ensiökäämissä jännitehäviöitä käämiresistanssien vuoksi ja synnyttää ilmassa kulkevan hajavuon. Tätä hajavuosta johtuvaa induktiivista reaktanssia kutsutaan ensiökäämin hajareaktanssiksi. Nämä ensiökäämissä syntyvät häviöt ovat raudassa syntyviin häviöihin verrattuna hyvin pienet, joten nämä voidaan yleensä jättää huomiotta. [1, s. 152–167]

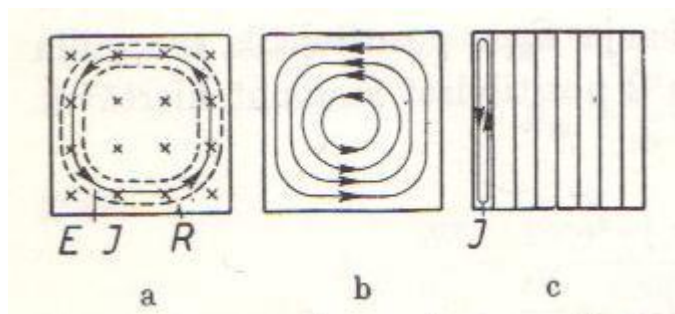
Tyhjäkäyntihäviöt määritetään muuntajan tyhjäkäyntikokeella. Siinä tyhjäkäyvässä muuntajaan syötetään ensiöpuolelle nimellinen jännite ja mitataan kuluttava teho [1, s. 166]. Kokeessa yleensä mitataan myös tyhjäkäyntivirta ja tyhjäkäyntijännite.

3.1.1 Pyörrevirtahäviöt

Pyörrevirtahäviöt muodostuvat muuntajan rautasydämen sisällä. Kuvio 3 esittää rautasydämien poikkileikkauskuvia, missä magneettivuot näkyvät kuviossa 3 a. Magneettivuon vaihtelun seurauksena renkasiin syntyy smv renkaan sisäpuolella kulkevan vuon vaikutuksesta. Tällöin smv indusoi renkaaseen sähkövirran I . Jos tällaisen renkaan resistanssi on R , niin $I = \frac{E}{R}$ ja kuluva teho $P = IE = \frac{E^2}{R}$. Kuten aiemmin todettiin muunta-

jan toiminnasta kertovassa kappaleessa, on E suoraan verrannollinen magneettivuon vaihtelunopeuteen, joten tämän perusteella kuluva teho P on suoraan verrannollinen magneettivuon vaihtelunopeuden neliöön. [1, s. 102–104]

Voidaan ajatella, että rautasydän sisältää paljon renkaita, joissa kulkee magneettivuon vaihtelun synnyttämiä virtoja (Kuvio 3 b ja c). Nämä virrat ovat pyörrevirtoja ja näiden kuluttamaa tehoa kutsutaan pyörrevirtahäviöiksi, mitkä muuttuvat lämmöksi. [1, s. 102–103]



Kuvio 3. Pyörrevirtoja raudassa. [1, s. 102]

Pyörrevirtojen vuoksi muuntajien sydämet rakennetaan ohuista, eristetyistä rautalevyistä. Tällä tavoin estämällä pyörrevirtojen kulku levystä toiseen, kuten kuviossa 2 c, saadaan pyörrevirtapiirien resistanssi kasvamaan paljon suuremmaksi. Tästä johtuen pyörrevirtahäviöt pienenevät merkittävästi verrattuna sydämeen, mikä olisi valmistettu ympäräudasta. Tämän lisäksi voidaan käyttää suunnattua kidelevyä sydämen rautalevyinä, mikä suurentaa raudan ominaisresistanssia. Tällä menetelmällä saadaan vielä alhaisemmat pyörrevirrat. [1, s. 102–104]

Muuntajan toimintaa käsittelevässä kappaleessa esitettiin, että smv on suoraan verrannollinen kääminläpi kulkevan magneettivuon vaihtelunopeuteen. Tämä tarkoittaa myös sitä, että smv on suoraan verrannollinen magneettivuon tiheyden suurimman arvon ja taajuuden tuloon. Kun muistetaan hieman aiemmin todettua asia, että pyörrevirtahäviöt ovat suoraan verrannollisia magneettivuon vaihteluvuon neliöön., voidaan siis myös todeta, että pyörrevirtahäviöt ovat suoraan verrannollisia magneettivuon tiheyden suurimman arvon että taajuuden neliöön. [1, s. 102–104]

Tästä voi kirjoittaa kaavan [1, s. 103]

$$P_p = \sigma f^2 B^2 \quad (5)$$

jossa P_p = Pyörrevirtahäviöt

B = Magneettivuon tiheyden suurin arvo

σ = rautasydämen rautalajista riippuva vakio

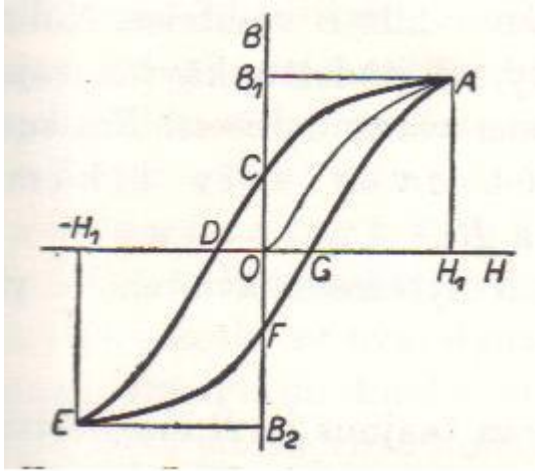
f = taajuus

3.1.2 Hystereesihäviöt

Kun muuntajan sydän magnetoituu, sen magneettikentän voimakkuus- ja samalla myös magneettivuon tiheys kasvaa. Tämä tehdään magnetoimiskäämin virtaa kasvattamalla. Kun virtaa tämän jälkeen pienennetään, pienenee myös magneettikentän voimakkuus samoin kuin virta, mutta magneettivuon tiheys ei laske samassa suhteessa näihin verrattuna. Tämä selittyy molekyyli-magneettien välisellä kitkalla, joka vastustaa näiden magneettien kääntymistä. Kun magneettivuon tiheys kasvaa, vaikuttaa kitka pienentävästi ja laskiessa kitka vaikuttaa suurentavasti magneettivuon tiheyden arvoihin. [1, s. 70–72]

Kuviossa 4 nähdään ns. hystereesikäyrä, missä voimme nähdä magneettikentän voimakkuuden sekä magneettivuon tiheyden vaihtelut raudassa. Kun magnetoituminen aloitetaan, nousee magneettivuon tiheys B arvosta 0 arvoon B_1 käyrää OA -pitkin. Muulloin B kulkee pitkin käyriä AE ja EA, mikä muodostaa silmukan. Tätä silmukkaa kutsutaan hystereesisilmukaksi ja edes takaista heiluntaa kutsutaan hystereesi-ilmiöksi. Hystereesillä siis tarkoitetaan, että sydänmateriaali jää magneettiseksi vielä sen jälkeen kun ulkoinen magnetoiminen on loppunut. Hystereesihäviöt ovat riippuvaisia samoista

suureista kuin pyörrevirtahäviötkin. Hystereesihäviöt muodostuvat siis vaihtovirran taajuudesta, magneettivuontiheyden suurimmasta arvosta sekä sydämen rautatyypistä. [1, s. 70–72]



Kuvio 4. Hystereesikäyrä. [1, s. 71]

Tästä voidaan kirjoittaa kaava [1, s. 72]:

$$P_H = \varepsilon f B^2 \quad (6)$$

jossa ε = rautalajista riippuva vakio

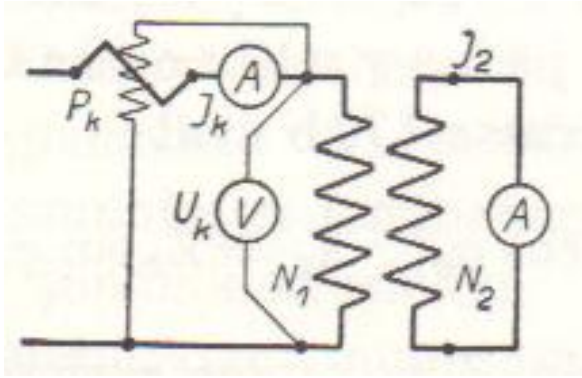
B = Magneettivuon tiheyden suurin arvo

f = taajuus

3.2 Käämihäviöt

Käämihäviöitä kutsutaan usein myös kuparihäviöiksi, koska käämit on yleisimmin tehty kuparista. Kyse on kuitenkin samasta käämien resistansseissa tapahtuvasta tehohäviöstä. Tätä kutsutaan myös virtalämpöhäviöksi. [1, s. 166]

Käämihäviöitä mitataan oikosulkukokeella. Siinä muuntajan toisiopuolen käämitys oikosuljetaan ja ensiöpuolelle asetetaan niin pieni jännite, että toisiopuolella kulkee se virta, mitä vastaavat käämihäviöt halutaan määrittellä (Kuvio 5). Nämä häviöt voidaan laskea tästä jotakin toista virtaa vastaaviksi, sillä ne ovat suoraan verrannolliset virran neliöön. [1, s. 166]



Kuvio 5. KytKentäkuva oikosuljetusta muuntajasta. [1, s. 163]

Yleensä toision oikosulkuvirraksi säädetään muuntajan nimellinen toisiovirta ja tällöin siis saadaan selvitettyä muuntajan nimellistä kuormaa vastaavat käämihäviöt. Samalla mittauksella voidaan myös tarkastella muuntajan lämpenemiä, joten nimellisvirran käytöllä on myös se hyvä puoli.

Muuntajan ollessa oikosulussa sen magneettivuo ja rautahäviöt ovat niin merkityksettömät, että ne jätetään usein huomiotta. [1, s. 166]

4 Rale

RALE -ohjelmisto on tehty helpottamaan suunnittelijan työtä ja tekemään muuntajien ja kuristimien mitoituksista tarkempaa. Tällä tavoin ohjelmaa käyttävä asiakas säästää rahaa. Ohjelmaa käytetään optimoimaan suunniteltuja malleja ja täten se helpottaa erilaisien suunniteltujen mallien valinnassa. Ohjelma säästää myös aikaa ja on laskemisessa varmempi. Ohjelmalla on mahdollista myös ohittaa niin sanotun prototyypin teko, mikä vie paljon aikaa ja rahaa. Siitä saa myös talletettua paljon laskennallista tietoa, mikä on mahdollista antaa tuotetta ostavalle asiakkaalle, jos näin vaaditaan. [7]

5 Materiaalien kokonaisenergiankulutus

Nykyaikana puheenaiheina ovat monesti ympäristöasiat. Kiinnittämällä huomiota tuotteiden valmistuksessa käytettävään kokonaisenergiankulutukseen suunnittelussa, voidaan valita ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja käytettäväksi.

Tämän työn aikana tutkittiin erilaisten lankojen ja sydänrainojen valmistusprosessin kokonaisenergiankulutusta. Lankojen ja raintojen energiankulutuksesta tehtiin kysely niitä valmistaville yrityksille. Tuloksina saatiin kaksi taulukkoa, mistä selviää kokonaisenergiankulutusten erot. Taulukossa 1 nähdään kahden eri lankatyyppin kokonaisenergiankulutusten erot.

Taulukko 1. Enameloidun ja nomex -eristeisen langan kokonaisenergiankulutukset.

Eräs johdinlankoja valmistava yritys	
Esimerkkinä 8,0x4,0mm materiaali	
Enamelled:	0,7 kWh/kg
Nomex:	0,02 kWh/kg
eli:	
Enamelled:	700 kWh/t
Nomex:	20 kWh/t

Taulukosta 1 käy ilmi, että Nomex -eristeisen langan kokonaisenergiankulutus verrattuna enameoituun lankaan on 2,9 %:a.

Taulukosta 2 selviää kokonaisenergiankulutuksien erot kidesuunnatuille ja suuntaamattomille sydänrainoille.

Taulukko 2. Kidesuunnatun ja suuntaamattoman rainan kokonaisenergiankulutukset.

Eräs sydänrainoja valmistava yritys	
Non-oriented:	
Electricity	630 kWh/t
LPG	156 kWh/t
Oil	59 kWh/t
Total	845 kWh/t
Grain-oriented:	
Electricity	1229 kWh/t
LPG	76 kWh/t
Oil	59 kWh/t
Total	1364 kWh/t

Taulukosta 2 nähdään, että kokonaisenergiankulutus suuntaamattomien sydänrainojen valmistuksessa 62 %:a verrattuna suunnattujen sydänrainojen valmistukseen.

Näiden tulosten perusteella materiaalin valmistustavan valinnalla on huomattava merkitys niiden kokonaisenergiankulutukseen. On huomioitava, että nämä tulokset on otettu vain kahdelta yritykseltä ja nämä arvot voivat vaihdella eri yritysten kesken. Muuntajan valmistuksellakin voi vaikuttaa tuotteeseen tarvittavan energiankulutuksen määrään ja muuntajan häviöillä sen jatkossa tekemiin energiahäviöihin. Tulokset on tarkoitettu vain suuntaa antaviksi ja näitä kulutuksia voisi mahdollisesti tutkia lisää. Tässä työssä ei aihetta tarkasteltu tarkemmin.

6 Standardit

Muuntajaa suunniteltaessa on otettava huomioon, minkä standardien mukaan se on tehtävä. Standardeissa määritellään toimivuuteen, luotettavuuteen ja turvallisuuteen liittyviä asioita. Standardeja on jaettu monille eri osa-alueille vaihdellen muuntajan käyttötarkoituksen, jännite- tai tehoalueen, testien, suojauksien ja turvallisuuden mukaan.

Tässä työssä tarkasteltiin pääasiassa näitä standardeja:

- IEC 60076-1: Power transformers - Part 1: General
- IEC 60076-11: Power transformers - Part 11: Dry-type transformers
- IEC 61558-1: Safety of power transformers, power supplies, reactors and similar products - Part 1: General requirements and tests
- IEC 61558-2-4: Safety of transformers, reactors, power supply units and similar products for voltages up to 1100V - Part 2-4: Particular requirements and tests for isolating transformers and power supply units incorporating isolating transformers.

7 Suunnittelu

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia mahdollisuutta päivittää vanhoja muuntajamalleja nykyaikaisemmiksi. Tavoitteena oli suunnitella edullisemmat, tehohäviöiltään pienemmät, kooltaan pienemmät, massaltaan pienemmät, lämmöiltään alhaisemmat ja ulkonäöltään paremmat muuntajamallit. Oli myös kiinnitettävä huomiota muuntajien valmistamiseen pyrkimällä helpompaan ja edullisempaan tapaan.

Projektin alkuvaiheessa on hyvä määrittellä suunniteltavien mallien tarpeet ja tavoitteet. On tärkeää tutkia nykyisiä malleja ja vastaavasti sen hetkisten kilpailijoiden vaihtoehtoja vastaaville muuntajille. Tämä auttaa ymmärtämään suunnittelun kokonaiskuvaa ja tavoiteltavia päämääriä. Kun tiedetään, mihin suuntaan suunnittelussa pyritään, voidaan tarkastella materiaalit ja tehdä laskelmat, miettiä rakennetta ja valmistaa muuntaja.

7.1 Vertailu

Vertaamalla vanhoja muuntaja malleja kilpailijoiden nykyisiin kertoo selvästi, millä osa-alueilla on parannettavaa ja mistä löytyy omien mallien hyvät puolet. Vertailussa voi käyttää tietoja kilpailijoiden verkkosivuilta, esitteistä ja aiemmin kerätyistä aineistoista.

Tärkeinä asioina vertailussa ovat massat, tehohäviöt ja hinnat. Niitä on helppo vertailla numeraalisilla arvoilla ja niistä pystyy päättämään monia asioita. Ulkonäköä, suojausluokkia, teholuokkien saatavuutta, fyysisiä mittoja, liitännätapoja sekä mallien asennustapoja on hyvä tarkastella myös, jos sellainen tieto on saatavilla.

Muuntajien massat ovat vertailussa hyviä monesta syystä. Se kertoo muuntajaan käytetyn materiaalin määrän, mikä on verrannollinen tuotteen hintaan sen valmistajalle. Massa myös kertoo muuntajan fyysisistä mitoista, jos sellaisia ei ole erikseen saatavilla. Käytetyn materiaalin määrästä voi myös päätellä sen tehohäviöitä ja lämpenemiä. Jos tehoiltaan suuri muuntaja on massaltaan pieni, se lämpenee usein enemmän. Massa voi vaihdella erilaisten rakenteiden ja materiaalien kannalta, mutta se antaa hyvän yleiskuvan muuntajasta. Jos käämi- ja rautamassat on ilmoitettu erikseen, antaa tieto vielä enemmän hyötyä.

Tehohäviöt ovat muuntajan tärkeimpiä ominaisuuksia. Näissä kokoluokissa suunnittelu tehdään usein näitä arvoja silmällä pitäen ja ne ovat vertailtavissa lämpenemien ja massojen kanssa.

Muuntajan hinta määräytyy pääasiassa siihen käytetyn materiaalin määrästä ja laadusta sekä muuntajaan käytetystä työstä. Nämä kaikki puolet on otettava huomioon suunniteltaessa, sillä jokaisella asialla voi olla suuri vaikutus tuotteen kannattavuuteen.

7.1.1 Kuparin tai alumiinin käyttö käämityksessä

Kuparilla ja alumiinilla on hyvät ja huonot puolensa. Tärkeitä huomioon otettavia tekijöitä käämimateriaalin valinnassa ovat mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet, luotettavuus sekä hinta.

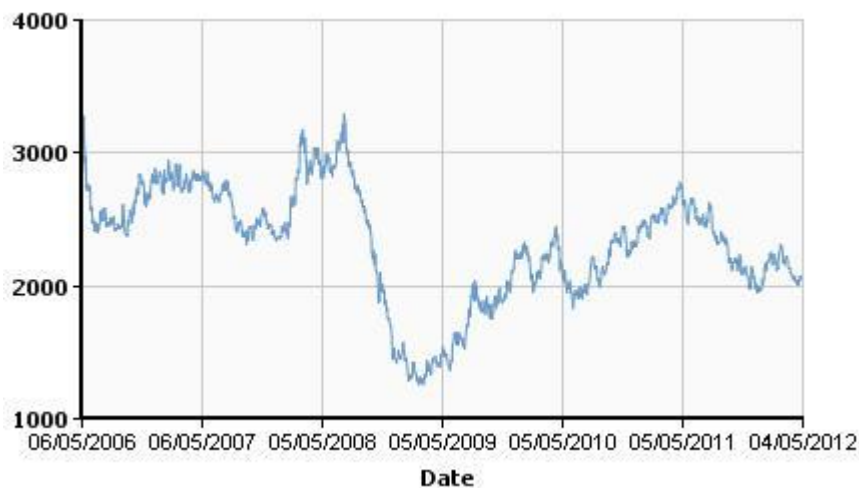
Mekaanisista ominaisuuksista puhuttaessa kuparilla on suurempi vetolujuus kuin saman paksuisella alumiinijohtimella. Kuitenkin alumiinista puhuttaessa, johtimen läpimitan täytyy olla 66 % suurempi, että se voi kuljettaa saman määrän virtaa kuin kuparijohtin. Tällöin alumiinijohtimen vetolujuus on miltei samansuuruinen kuparin kanssa samalla johtimen kuormitettavuudella. Mekaanisten ominaisuuksien tärkeimmät puolet sähköisissä sovelluksissa ovat johtimen kyky kestää oikosulun aikaisia voimia sekä lämpölaajenemisen ja -kutistumisen vaikutukset. Koska alumiinilla on noin 2,3 kertaa suurempi lämmön varastoimiskyky, voi alumiinilla käämityt muuntajat kestää syöksy- ja ylikuormitusvirtoja enemmän kuin kuparikäämeillä tehdyt muuntajat. Toisaalta alumiinin lämpölaajeneminen on noin 1,4 kertaa suurempaa kuin kuparin, joten alumiiniliitokset ovat herkempiä rasitukselle ja lämpövuorottelulle. Alumiini on myös herkempi hapettumiselle, joten usein johtimien liitoskohdista hiotaan muodostunut oksidikerros ja pintaan laitetaan hapettumista estävää ainetta. [8, s. 1–2]

Sähköisiltä ominaisuuksiltaan alumiinilla ja kuparilla on myös eroja. Puhdas alumiini johtaa virtaa vain 62 % vastaavaan kuparijohtimeen nähden. Jos verrataan alumiinia ja kuparia massaansa nähden, saadaan yhdellä kilolla alumiinia sama johtavuus kuin 2,08 kilolla kuparia. Tästä nähdään, että vaikka kuparilla on parempi sähkönjohtavuus, on alumiinilla kaksi kertaa parempi johtavuus massaansa nähden. Jos tila on tärkeä suunnittelu kriteeri, on kupari parempi vaihtoehto. Jos tila ei ole niin merkittävä tekijä tai tarvitaan pienempää massaa, voi alumiini olla sopivampi. Koska samalla kuormitettavuudella alumiinia tarvitsee enemmän, on myös johtimen pinta-ala tällöin suurempi. Jos tämä tilavuuden kasvu ei haittaa merkittävästi, voi siitä olla hyötyä virranahtoilmiön haitta-vaikutusten vähentämisessä. [8, s. 2–3]

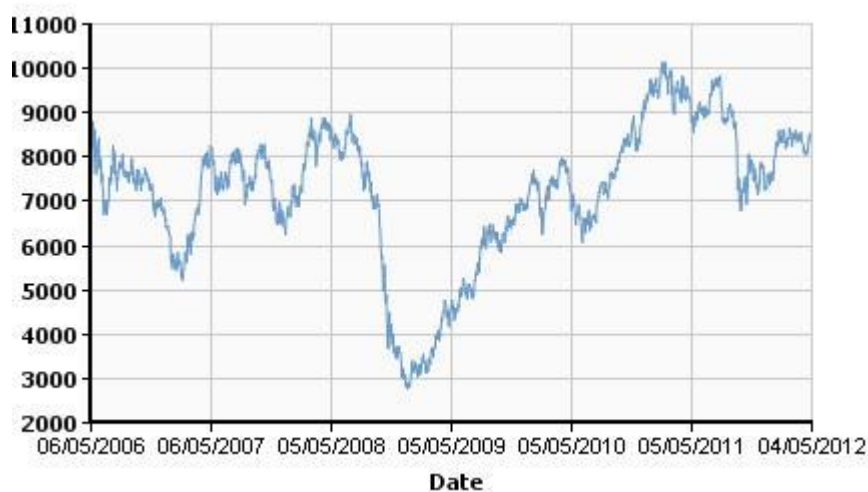
Luotettavuudessa alumiinilla ei ole niin hyvää mainetta kuin kuparilla. Jos alumiinia käytetään terästä sisältävien liittimien kanssa, voi tulla ongelmia alumiinin ja teräksen

erilaisesta laajenemisominaisuudesta. Alumiinin ja teräksen liitokset voivat haurastua ajan myötä koska nämä materiaalit laajenevat ja kutistuvat eri tahtia. Tällöin liitoksen kosketuspinta-ala pienenee ja resistanssin kasvamisen myötä lämpötila kasvaa liitoksessa. Tästä syystä alumiini liitokset täytyy tehdä niille soveltuvilla liitostavoilla. [8, s. 3]

Alumiinia löytyy kaikista maanpäällä olevista metalleista runsaimmin ja tästä syystä alumiini on halvempaa kuin kupari [8, s. 3]. London metal exchange kertoo alumiinin hinnaksi 2088,50 \$/tonni 8.3.2012. Samalla päivämäärällä kuparihinnaksi sama sivusto ilmoittaa 8250,00 \$/tonni. Kuvio 6 esittää alumiinin hintakehitystä vuodelta 2006 vuoteen 2012 ja kuvio 7 kuparin vastaavaa.



Kuvio 6. Alumiinin hintakehitys 2006–2012 [9]



Kuvio 7. Kuparin hintakehitys 2006–2012. [9]

Kuparin ja alumiinin hintavertailussa on huomioitava myös se, kuinka kuparin hinta vaihtelee suuremmalla välillä kuin alumiinin. Tämä hintojen epätasaisuus haittaa hintojen arviointia. Kuparin ja alumiinin hintojen erosta huomataan materiaalivalinnan tärkeys muuntajassa. Alumiinikäämeillä voi siis saada merkittäviä säästöjä muuntajan kokonaiskustannuksessa. Alumiinin ja kuparin valinnassa on myös huomioitava rautasydämen massan tarve. Jos rautasydämen poikkipinta-ala on suurempi, voidaan käyttää käämeissä vähempiä kierrosmääriä ja tietenkin vähemmän käämimateriaalia. Tämä tarkoittaa sitä, että pelkästään alumiinin ja kuparin hintojen ero ei kerro kaikkea muuntajan hinnasta. Alumiinikäämisen muuntajan valmistukseen voi mennä enemmän rautaa ja täten sekin vaikuttaa kustannuksiin. Kuparille ja alumiinille on myös erilaisia toimintatapoja valmistuksen eri vaiheissa, esimerkiksi liitokset vaihtelevat. Ne asiat tulisi huomioida myös materiaalin valinnassa.

7.1.2 Rautasydämen materiaalin valinta

Rautasydämen materiaalivalinnoissa mennään rainan leveyden, paksuuden ja ominaisuuksien mukaan. Rainan paksuus ja ominaisuudet vaikuttavat rautahäviöihin. Rainoja valmistetaan eripaksuisina ja eri ominaisuuksin. Taulukko 3 on esimerkkinä Surahammars Bruks AB yrityksen tuoteluettelosta suuntaamattomien rainojen ominaisuuksista ja paksuuksista.

Taulukko 3. Suuntaamattomien sydänrainojen taulukoituja arvoja. [10]

SURA® Grade	Thickness mm	Max specific total loss at 50 Hz		Minimum magnetic polarization at 50 Hz			Conventional density kg/dm ³
		$\hat{J}=1,5T$ W/kg	1,0T* W/kg	$\hat{H}=2500$ T	5000 T	10000 A/m T	
M210-27A	0,27	2,10	0,85	1,49	1,60	1,70	7,60
M235-35A	0,35	2,35	0,95	1,49	1,60	1,70	7,60
M250-35A	0,35	2,50	1,00	1,49	1,60	1,70	7,60
M270-35A	0,35	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70	7,65
M300-35A	0,35	3,00	1,20	1,49	1,60	1,70	7,65
M330-35A	0,35	3,30	1,30	1,49	1,60	1,70	7,65
M250-50A	0,50	2,50	1,05	1,49	1,60	1,70	7,60
M270-50A	0,50	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70	7,60
M290-50A	0,50	2,90	1,15	1,49	1,60	1,70	7,60
M310-50A	0,50	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70	7,65
M330-50A	0,50	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70	7,65
M350-50A	0,50	3,50	1,50	1,50	1,60	1,70	7,65
M400-50A	0,50	4,00	1,70	1,53	1,63	1,73	7,70
M470-50A	0,50	4,70	2,00	1,54	1,64	1,74	7,70
M530-50A	0,50	5,30	2,30	1,56	1,65	1,75	7,70
M530-50HP	0,50	5,30	2,30	1,63	1,71	1,81	7,80
M600-50A	0,50	6,00	2,60	1,57	1,66	1,76	7,75
M700-50A	0,50	7,00	3,00	1,60	1,69	1,77	7,80
M800-50A	0,50	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78	7,80
M310-65A	0,65	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70	7,60
M330-65A	0,65	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70	7,60
M350-65A	0,65	3,50	1,50	1,49	1,60	1,70	7,60
M400-65A	0,65	4,00	1,70	1,52	1,62	1,72	7,65
M470-65A	0,65	4,70	2,00	1,53	1,63	1,73	7,65
M530-65A	0,65	5,30	2,30	1,54	1,64	1,74	7,70
M600-65A	0,65	6,00	2,60	1,56	1,66	1,76	7,75
M600-65HP	0,65	6,00	2,60	1,63	1,72	1,82	7,80
M700-65A	0,65	7,00	3,00	1,57	1,67	1,76	7,75
M800-65A	0,65	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78	7,80
M600-100A	1,00	6,00	2,60	1,53	1,63	1,72	7,60
M700-100A	1,00	7,00	3,00	1,54	1,64	1,73	7,65
M800-100A	1,00	8,00	3,60	1,56	1,66	1,75	7,70
M1000-100A	1,00	10,00	4,40	1,58	1,68	1,76	7,80

Ensimmäisessä sarakkeessa voi nähdä valmistajan ilmoittaman nimen rainalle. Nimestä voi jo nähdä sen paksuuden ja häviöt kiloa kohden suhteutettuna magneettivuontiheyteen. Kalliimpia ovat ne, mille on luvattu pienemmät häviöt, kuten olettaa saattaa.

Rainan leveys ei vaikuta suoranaisesti muuntajan rautahäviöihin. Tämä alkaa merkitä vasta sydämen kokoa tarkasteltaessa. Sydämen mitoissa tärkeintä on sen poikkipinta-ala, minkä kautta magneettivuo kulkee. Tämän voi nähdä myöhemmin esitettävästä kaavasta (7). Tätä alaa voidaan säädellä rainan leveydellä ja muuntajan sydämen pakan

paksuudella. Kasvattamalla tätä poikkipinta-alaa ja pitämällä suunnitellut johdinkierrosmäärät samana, pienenee tällöin magneettivuontiheys sydämessä. Rautahäviöt ovat suoraan verrannollisia magneettivuontiheyteen. [1, s. 102–104]

Rautasydämen ikeiden ja pylväiden pituudet mitoitetaan tiettyjen mekaanisten mittojen saavuttamiseksi. Käämit vievät tietyn verran tilaa ja standardeissa on määritelty tarkoin etäisyydet käämien ja rautasydämen välisille matkoille. Ikeiden ja pylväiden pituus ei merkitse häviöiden kannalta paljoakaan. Tärkeämpi tarkasteltava asia on raudan tuoma lisäpaino. Nämä asiat huomioon ottaen, ikeiden ja pylväiden pituudet pyritään optimoimaan sopivaksi.

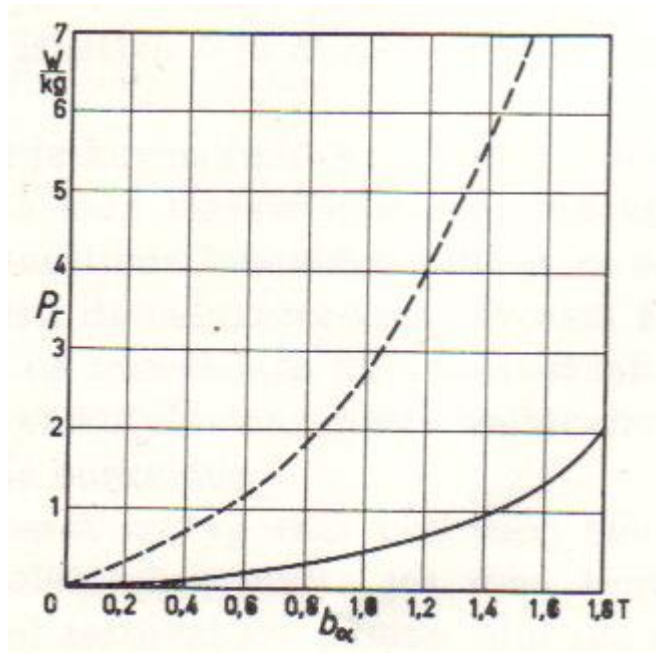
Kuitenkin tärkeimpänä rautasydämen materiaalin kriteerinä voidaan pitää sen ominaisuuksia. Kidesuunnatun ja suuntaamattoman rainan erot ovat paljon suuremmat kuin edellä mainitut seikat. Taulukossa 4 on esimerkkinä Surahammars Bruks AB yrityksen tuoteluettelosta kidesuunnattujen rainojen ominaisuuksista ja paksuuksista.

Taulukko 4. Kidesuunnattujen sydänrainojen taulukoituja arvoja. [11]

EN 10107	Thickness (mm)	Maximum specific loss (W/kg)				Typical specific loss (W/kg)			
		50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
		1.5T	1.7T	1.5T	1.7T	1.5T	1.7T	1.5T	1.7T
M110-23S	0.23	0.73	1.10		1.45	0.70	1.07	0.92	1.41
M120-23S	0.23	0.77	1.20		1.58	0.73	1.15	0.96	1.51
M127-23S	0.23	0.80	1.27		1.67	0.77	1.24	1.01	1.63
M120-27S	0.27	0.80	1.20		1.58	0.78	1.14	1.03	1.50
M130-27S	0.27	0.85	1.30		1.71	0.83	1.24	1.09	1.63
M140-27S	0.27	0.89	1.40		1.84	0.86	1.32	1.13	1.74
M130-30S	0.30	0.85	1.30		1.71	0.84	1.21	1.11	1.59
M140-30S	0.30	0.92	1.40		1.84	0.87	1.26	1.15	1.66
M150-30S	0.30	0.97	1.50		1.97	0.91	1.31	1.20	1.72
M140-35S	0.35	1.00	1.40		1.84	0.94	1.33	1.24	1.75
M150-35S	0.35	1.05	1.50		1.97	0.99	1.42	1.30	1.87
M165-35S	0.35	1.11	1.65		2.17	1.01	1.47	1.33	1.94

Jos verrataan taulukon 4 arvoja aiemman taulukon 3 arvoihin, huomataan kidesuunnatulla rainalla olevan samoilla paksuuksilla pienemmät häviöt.

Kuviossa 8 on esitetty eräiden rainojen rautahäviökäyrät. Katkoviivalla merkattu esittää normaalin 0,5 mm:n paksua dynamolevyn häviökäyrää. Yhtenäisellä viivalla merkattu esittää suunnatun 0,35 mm:n muuntajalevyn häviökäyrää.



Kuvaaja 8. Eräiden rainojen rautahäviökäyrät. [1, s. 103]

Kuvio 8 osoittaa, että kidesuunnatulla rainalevyllä voi päästä huomattavasti pienempiin häviöihin. Kuitenkin, näiden välille mahtuu paljon erilaisilla ominaisuuksilla varustettuja rainoja. Tässäkin asiassa optimointi kustannusten ja häviöiden suhteen on olennaista.

7.2 Suunnittelun laskennan perusteita

Muuntajan nimellistaajuus, -jännitteet ja -teho ovat perustietoja suunnittelun alussa. Näiden avulla alkaa muuntajan muiden arvojen laskeminen. Muuntajan arvot voidaan laskea useilla perusteilla. Yksi tavoista on valita muuttujiksi virtatiheys, magneettivuontitiheys ja rautasydämen poikkipinta-ala.

Muuntajia on tehty jo niin pitkään, että kokemuspohjaista tietoa ei voi jättää huomioimatta. Niistä on tehty paljon tutkimuksia ja näiden avulla on tehty taulukoita suunnittelijoiden käyttöön. Suunnittelussa on hyvä lähteä alkuun näitä asioita tarkastelemalla ja aiempia muuntajia tutkimalla.

Laskennan voi aloittaa valitsemalla rautasydämen poikkipinta-alan ja magneettivuontitiheyden. Kun tässä vaiheessa on tiedossa jo tuotteen nimellinen taajuus, voidaan näiden tietojen avulla laskea johdinkierrosluvut kaavalla (7) [6, s. 11]:

$$N = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot A} \quad (7)$$

jossa N = käämin johdinkierrosluku
 U = käämin nimellisjännite
 f = nimellistaajuus
 B = magneettivuontiheys
 A = rautasydämen poikkipinta-ala

Tämän kaavan avulla voidaan laskea muuntajan johdinkierrokset toisiolle ja ensiölle, mutta tavallisemmin käytetään kaavaa (4).

Tämä on kuitenkin yksinkertainen laskutapa, mihin vaikuttaa muutkin asiat, kuten käämiresistanssit ja tyhjäkäyntijännitteet. Kokemusperäisesti kaavoihin voi lisätä erilaisia kertoimia, millä pyritään saamaan laskelmista mahdollisimman hyvin oikeita vastaavia. On myös muistettava, että johdinten paksuus on tärkeä huomioida. Mitoituksen lähtökohtana on usein saada muuntaja toimimaan standardien määrittelemissä lämpötiloissa. On parempi, jos muuntaja saadaan käymään viileänä, mutta tämä vaikuttaa muuntajan kustannuksiin merkittävästi. Näistä seikoista johtuen suunnittelussa pyritään optimoimaan muuntajat turvallisiin lämpenemiin, mutta pitäen mielessä kustannukset.

Virrantiheyden valinnalla voidaan vaikuttaa näihin käämien lämpenemisiin. Nämä arvotkin ovat usein taulukoituja, mistä voidaan suoraan päätellä tarvittavia lankapaksuuksia. Virrantiheyden ja muuntajan nimellisvirran avulla saadaan haluttu johtimen paksuus. Tässä vaikuttaa myös johtimen materiaali, koska alumiinilla käytetään pienempää virrantiheyttä kuin kuparilla. Tämä johtuu kuparin paremmasta sähköjohtavuudesta. Tärkeitä laskettavia arvoja ovat myös tehohäviöt. Tyhjäkäyntihäviöiden laskentaan löytyy kaavat (5) ja (6), mitkä voidaan yhdistää.

$$P_H + P_p = \varepsilon f B^2 + \sigma f^2 B^2 = (\varepsilon f + \sigma f^2) \cdot B^2 \quad (8)$$

jossa ε ja σ = rautalajista riippuvia vakioita
 B = Magneettivuon tiheyden suurin arvo
 f = taajuus

Tämä kaava ei ole yleensä käytössä vaan sillä on pelkästään periaatteellinen merkitys. Nämä häviöt otetaan yleensä rainalevyjä tekevien yritysten taulukoista ja käyristä. Häviöt ilmoitetaan W/kg -lukuna tietyille magneettivuon tiheyksille. Ohjelmissakin käytetään mieluummin näitä taulukoituja arvoja, sillä ne ovat tarkempia. [1, s. 166]

Kuparihäviöt voidaan laskea kaavasta (9) [1, s. 166]:

$$P_k = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (9)$$

jossa I_1 = Ensiön virta
 I_2 = Toision virta
 R_1 = Ensiön resistanssi
 R_2 = Toision resistanssi

Seuraavasta kaavasta voidaan laskea virrat kun tiedetään muuntajan teho ja jännitteet:

$$I = \frac{S}{U} \quad (10)$$

jossa I = virta
 S = näennäisteho
 U = jännite

Resistanssit voidaan määrittää tästä kaavasta [12, s. 119]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (11)$$

jossa ρ = johtimen materiaalin ominaisresistiivisyys
 l = johtimen pituus
 A = johtimen poikkipinta-ala

Johtimen pituus täytyy laskea suunnitellun sydämen/eristeiden koon ja johdinkierrosluvun avulla.

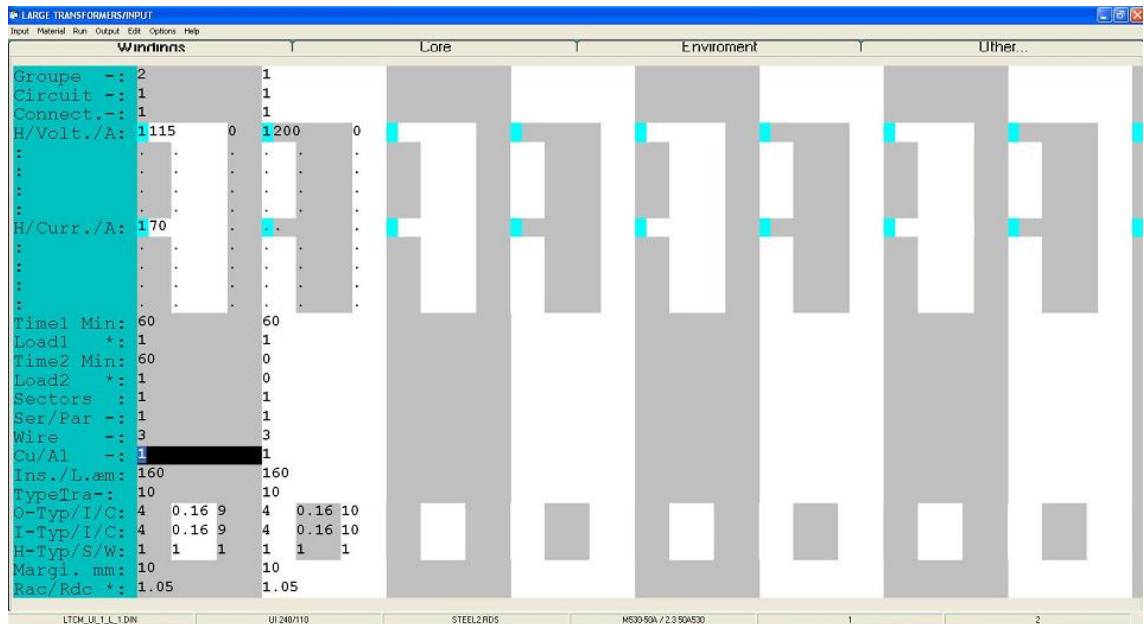
Nämä ovat vain yksinkertaisia menetelmiä tarkastella kuparihäviöitä. Tarkoitukseen on olemassa tarkempia ja monimutkaisempia kaavoja, mutta tässä työssä en käsittele niitä. Laskennassa on myös mahdollista mennä hyvin tarkkoihin simuloiteihin, millä saadaan laskettua tarkastikin erinäisiä muuntajan arvoja ja näin saada suunniteltua parempi muuntaja. Tämä vaatii käyttäjältä paljon aikaa, vaivaa ja tietoa, sillä mitä enemmän laskelmiin syventyy, sitä enemmän muuttujia tulee mukaan. Laskemisessa nykyaikana apuna on tietenkin taulukkolaskelmia ja tietokoneohjelmia. Yksi tällainen ohjelma on Rale, mitä tässä työssä käytettiin muuntajien laskelmien apuna.

7.3 Ralen käyttö muuntajan suunnittelussa

Muuntajien rautasydämen ja johdinkierrosten suunnittelussa tarvitaan paljon laskemista ja tutkittua tietoa materiaalien käyttäytymisestä. Laskeminen vie paljon aikaa työskentelystä ja tätä voi nopeuttaa käyttämällä hyödyksi kokemusta ja laskemista helpottavia ohjelmia. Tähän käyttöön on olemassa Rale -ohjelmisto. Rale on saatavilla pienille, suurille ja toroidimuuntajille sekä kuristimille. Tässä tapauksessa käytettiin suurille muuntajille tarkoitettua ohjelmistoa.

Ohjelmaan syötetään erilaisia arvoja, millä muuntajan on tarkoitus toimia. Sen jälkeen ohjelma ehdottaa käyttäjälle mallin, mikä toimisi annettujen tietojen perusteella tehtyjen laskelmien mukaisesti. Ohjelmassa on myös mahdollisuus automatisoida monia valintoja ja näin antaa ohjelman päätettäväksi minkälainen simuloidusta muuntajasta tulee. Tämä ei kuitenkaan usein ole hyvä vaihtoehto. Tällöin ohjelmalle annetaan päätös siitä mitkä parametrit ovat tärkeimpiä, mikä hyvin usein johtaa tulokseen mitä suunnittelija ei tarkoittanut.

Seuraavissa kappaleissa selvitetään Rale -ohjelman käyttöä ja huomioitavia asioita. Selityksien mukana on erilaisia kuvia ohjelman ulkoasusta, mutta niissä esitettävät arvot eivät kuvasta mitään suunniteltua mallia.



Kuvio 9. Rale -ohjelman Windings sivu.

Ensimmäisellä windings -nimisellä sivulla (Kuvio 9) ohjelmaan on syötettävä muuntajan perustiedot, kuten sen nimellisvirrat ja -jännitteet. Ohjelma tarvitsee myös tarkempaa tietoa kuten kytkentäryhmät, väliristeen paksuudet, erilaisia tietoja muuntajan rakenteesta ja tiedon, käytetäänkö muuntajaa jatkuvasti vai osittaisella käytöllä. Tässä ikkunassa käyttäjän on suositeltavaa myös syöttää käytettävä lanka tyyppi ja langan materiaali, mutta se on mahdollista muuttaa myös jälkikäteen. Langan tyypillä tarkoitetaan sitä, onko se pyörö- vai muotolankaa sekä langan eristetyyppiä. Tarkkaa langan kokoa ei ole mahdollista syöttää ohjelmaan vielä tässä vaiheessa.

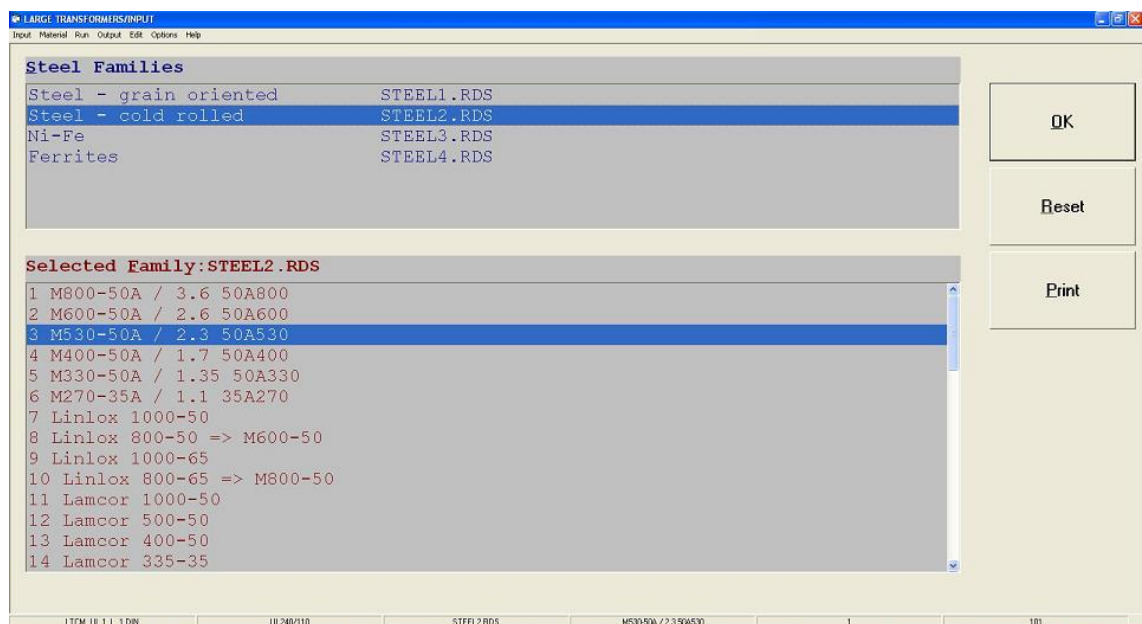
Core -sivulla on tarkoitus syöttää muuntajan sydäntä vastaavia tietoja. Sydämen asennustapa, käytettävä taajuus, haluttu magneettivuon tiheys sekä muita laskemisen tarkkuuteen liittyviä kertoimia voi muuttaa tarpeen mukaan. Ohjelman help -valikon avulla voi tarkastella sen ehdottamia arvoja erilaisiin tilanteisiin. Tällä sivulla myös valitaan ohjelman käyttämä sydän eli mitoittaako ohjelma itse sydämen mitat vai tahtooko käyttäjä valita ne itse.

Environment -sivulla täytyy valita muuntajan jäähdytys, ympäristön lämpötilaan liittyvät asiat, lakan määrä ja muita kertoimia, millä voi asettaa ohjelmaa laskemaan tarkemmin.

Other -sivulla valitaan kriteerit, millä ohjelma pyrkii laskemaan muuntajan simuloitunut arvot.

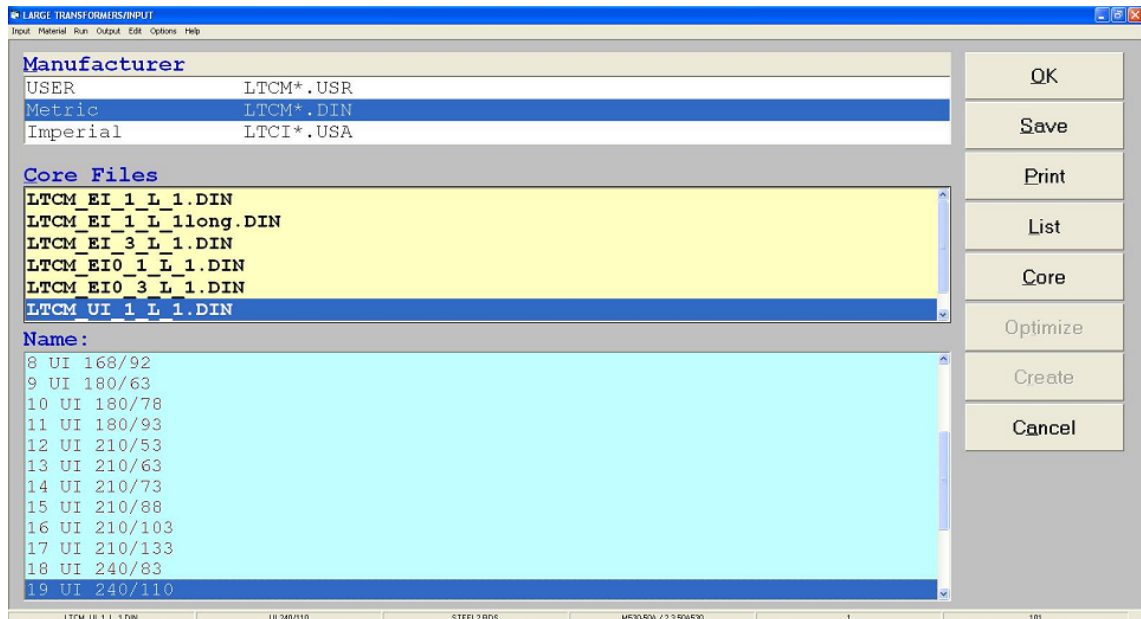
Kaikkien näiden asetusten laittaminen vaatii kokemusta ja tutkimusta, että ohjelman saa laskemaan halutulla tavalla. Mittaamalla aiemmin valmistettuja muuntajia ja vertaamalla niiden tuloksia Ralen antamiin laskelmiin, voidaan alkaa muuttaa ohjelman kertoimia oikeaan suuntaan. Tuloksiin ei pidä luottaa sokeasti, sillä pienetkin muutokset parametreissa voivat vaikuttaa mitoitukseen merkittävästi.

Automaattisilla asetuksilla laskemisen voisi jo käynnistää. On kuitenkin suositeltavaa valita sydänrainan laatu, sydämen fyysiset mitat, lankatyyppi ja langan materiaali itse. Lankatyyppi ja materiaali valitaan ensimmäiseltä windings -sivulta, syöttämällä sitä vastaava numero arvo kuviossa 9 näkyvään Wire ja Cu/Al -kohtaan. Sydämen koko valitaan sille varatusta valikosta, missä voi myös vaihtaa rainan laatua. Kuviossa 10 nähdään esimerkki rainan laadun ja mallin valintaruudusta.



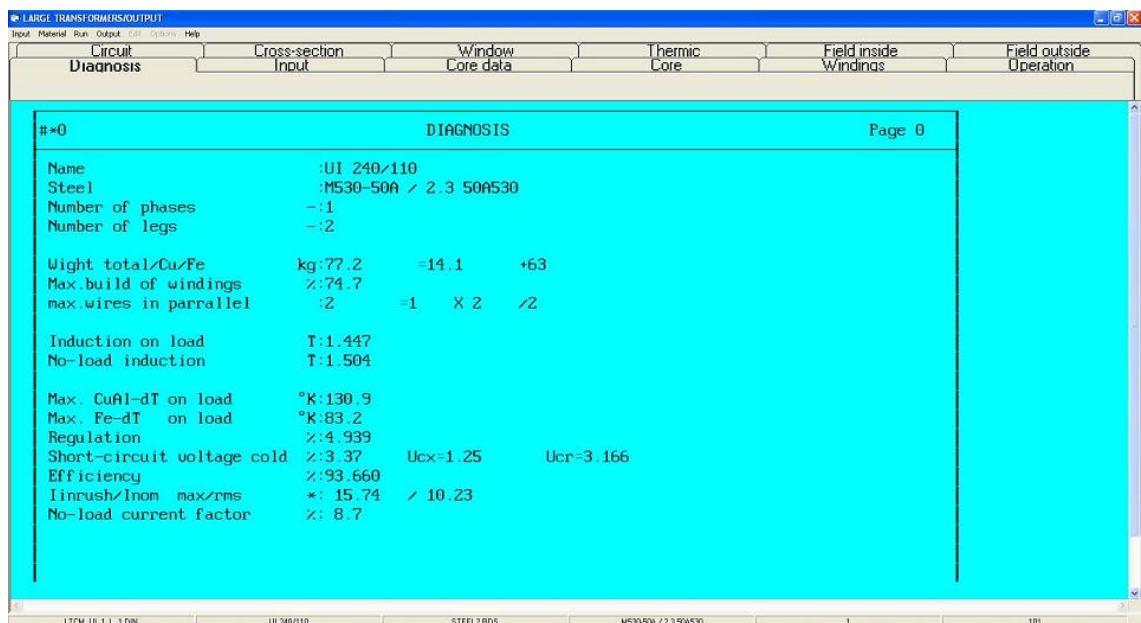
Kuvio 10. Sydänrainan valintaruutu Rale -ohjelmassa.

Kuviossa 11 nähdään esimerkki sydämen mallin ja koon valintaruudusta. Sydämen kokoja on valmiiksi mallinnettuna jo useita yleisesti käytettyjä kokoja, mutta tässä vaiheessa on myös mahdollista tehdä omat sydämen mitat. Sydämen kokoja voi muokata Core -valikossa.



Kuvio 11. Sydämen mallin ja koon valintaruutu Rale -ohjelmassa.

Kun kaikki valinnat on tehty, on aika antaa ohjelman laskea simuloidun muuntajan arvot. Ohjelma ilmoittaa ongelmista jo laskemisen alkuvaiheessa, jos esimerkiksi sydämen koko on liian pieni muuntajan tehoihin nähden. Kuviossa 12 nähdään Ralen antamat tulokset laskennan päätteeksi. Tuloksia on jopa 12 sivua, missä osassa on kuvia ja joissakin käyttäjän syöttämiä arvoja. Tärkeimmät numeraaliset arvot ohjelma näyttää Diagnosis, Windings ja Operation -sivuilla.



Kuvio 12. Ralen laskemat arvot Diagnosis -sivulla.

Diagnosis -sivulta nähdään suoraan mm. muuntajan massa, vuontiheys, keskimääräiset lämpötilat, tyhjäkäyntijännitteen suhteellinen arvo, oikosulkujännitteen suhteellinen arvo, hyötysuhde ja tyhjäkäyntivirran suhteellinen arvo. Monet näiden arvojen sallitut alueet on määritelty kullekin muuntajatyypille tarkoitetuissa standardeissa. Tämä on yksi syy, miksi tällainen laskenta ohjelma on avuksi. Oikeaa muuntajaa mitattaessa ei tule niin helposti yllätyksiä kun voi etukäteen tarkastella mihin arvot sattuvat. Ohjelman arvojen antama tarkkuus riippuu tietenkin etukäteen syötetyistä arvoista ja kertoimista, joten sokeasti niihin ei pidä uskoa.

Operation -sivulla esitetään samoja arvoja kuin Diagnosis -kohdassa, mutta tarkemmin. Tällä sivulla ilmoitetaan myös rautahäviöt, käämihäviöt, virrantiheydet, käämi-resistanssit. Yksivaihemuuntajan laskenta on lisäksi jaoteltu niin, että ensiön ja toision arvot esitetään yhdeltä pylväältä. Siis jos muuntajan ensiössä on jännitteenä 400V ja molemmat pylväät ovat kytketty sarjaan, niin jännite yhdellä pylväällä on tällöin 200V. Kuviossa 13 nähdään esimerkki Operation -sivusta.

05-16-2012/13:59:30		IN OPERATION MODE				Page 4				
Frequency	Hz: 50	Ventilation/outside	m/s: 0	Fillfactor/channels	‰: 80					
Ambient temperature	C: 25	Ventilation/channel	m/s: 0	Uarnish in windings	‰: 10					
Convection outside	*: 0.75	Rth-Insulation	*: 1	Uarnish/gaps/stomack	‰: 10					
Convection/channels	*: 0.6	Rth-Uarnish	*: 1	Stomack	mm: 1.00					
Emission	*: 1	Rth-Epoxy	*: 1	Gap	mm: 0.10					
Output power	kVA: 16.7	Input power	kVA: 17.5	Core power	: 17.1					
Fe-Losses	UA: 1068	Fe-active losses	W: 284.9	Fe-reactive losses	UAr: 1029					
No-load curren	‰: 8.74	No load curr. active	‰: 1.8	No load curr. react.	‰: 8.6					
I ⁱⁿ /I ^{nom} -Factor	: 15.74	I ^{inrms} /I ^{nomrms} -Factor	: 10.23	No load induction	T: 1.504					
I ⁱⁿ	kA: 0.99	I ^{in rms}	kA: 0.45	Induction	T: 1.447					
Icc cold	kA: 1.32	Iccr active cold	kA: 1.23	Iccx reactive cold	kA: 0.49					
Ucc cold	‰: 3.37	Uccr active at 00 °C	‰: 3.166	Uccx inductive	‰: 1.25					
CuAl-losses	W: 840.5	Efficiency	‰: 93.675	Qnx leaking losses	UAr: 214					
Cu/Al temp.rise avarage	°K: 130.9	Max. dT Fe	°K: 83.2	Cu/Al temperature rise max	°K: 130.9					
Oil temperature rise min.	°K: 0.0	Oil temperature rise avarage	°K: 0.0	Oil temperature rise max.	°K: 0.0					
Windings	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Groups-Circuits	2-1	1-1								
Connection	ser.	ser.								
Time1	60.0	60.0								
Load1	1.00	1.00								

Kuvio 13. Ralen laskemat arvot Operation -sivulla

Jos tuloksiin on jo tässä vaiheessa tyytyväinen, voi ottaa tiedot ylös ja siirtyä muuntajan valmistukseen. Usein näin ei ole vaan ohjelman ehdottamia arvoja on parempi muok-
kailla. Tällöin siirrytään testaus valikkoon (Kuvio 14).

Windings		Core	Environment	Util Link...	
Groups -:	2	1		RWH %:	55.4
Circuit -:	1	1		Induction T:	1.49
U in *:	1.0000	1.0000		I^n/I^i :	16.46
Z out *:	1.0000	1.0000		In/Ii rms :	10.8
Time1 Min:	60.0	60.0		Io/In %:	17.2
Load1 *:	1.00	1.00		Ioa/In %:	1.0
Time2 Min:	60.0	0.0		Ior/In %:	17.2
Load2 *:	1.00	0.00		Ik/In %:	25.4
K-Factor :	1.00	1.00		Ucc %:	3.99
Turns :	43.00	69.60		Uccr %:	3.88
Wire file -:	3	3		Uccx %:	0.97
Listnumber :	89	71		P Cu/Al W:	1107.1
Height/D mm:	5.000	5.300		P Fe W:	165.3
Thicknes mm:	4.000	2.000		Q Fe W:	2093
Parallel :	1	1		Efficiency% :	92.773
Side by side:	1	1		dT Fe øK:	86.1
Upon other :	1	1		CuAl-Weig.kg:	4.29
Sectors :	1	1		Fe-Weight kg:	64.0
Transposi. -:	10	10		Dist. W-W mm:	42.16
Ins/Layer am:	300.0	300.0		dTmin oil øK:	0.0
Ctype outs. -:	4	4		dTava oil øK:	0.0
Insulat. mm:	0.46	0.26		dTmax oil øK:	0.0
Channel mm:	9.0	10.0		:	
Ctypeinsid. -:	4	4		:	
Insulat. mm:	0.46	0.26		:	
Channel mm:	9.0	1.0		:	
Margin mm:	10.0	10.0		:	
C/I Horizo. -:	1	1		:	
Sect-Sect mm:	1.0	1.0		:	
Turn-Turn mm:	1.0	1.0		:	
Numb.discs -:	1	1		:	
Layers :	1.005	1.725		:	
Uin/Uout V:	115.8	200.0		:	
Iin/Iout A:	70.51	43.56		:	
RacRdc :	1.012	1.001		:	
dT Cu/Al øK:	133.2	131.4		:	

Kuvio 14. Rale -ohjelman testaus moodi.

Testaus moodissa muuntajan sydän ja suurin osa ennen laskemista syötetyistä arvoista pysyvät samoina. Ohjelma ei aiemmin antanut itse valita tarkasti johdinlangan paksuutta, mutta tässä vaiheessa sen voi tehdä. Lankoja on mahdollisuus laittaa rinnan kytkettyinä, käämittyinä vierekkäin tai päällekkäin, jos ei tahdo tai pysty käyttämään tarpeeksi paksuja lankoja oikeassa muuntajassa. Käyttäjä voi asettaa myös johdinkierrosmäärät tässä vaiheessa itse. Eristeiden paksuudet, ilmvälit ja käämien etäisyydet sydäimestä voi vaihtaa monien muiden arvojen tapaan. Tässä tilassa voi siis hienosäätää muuntajan parametreja, että laskelmat vastaisivat parhaiten toteutuskelpoista muuntajaa. Testaaminen on myös paljon nopeampaa kuin alusta asti ohjelman käynnistäminen, sillä tässä tilassa sen ei tarvitse laskea kaikkia arvoja alusta alkaen.

Näiden vaiheiden jälkeen pitäisi olla valmista. Laskelmia kannattaa toistaa muutamaan kertaan ja tutkia eri arvojen muutoksien vaikutusta.

7.4 Laskelmien analysointi

Kun laskelmia on tehty tarvittava määrä, on aika siirtyä valitsemaan paras vaihtoehto. Valinnassa on kannattaa ottaa huomioon laskelmista saatujen arvojen lisäksi muuntajan valmistamiseen liittyvät seikat. Jos muuntajaa aiotaan tehdä sarjatyönä, on selvitettävä optimaaliset työskentelytavat. Myös työkalujen ja uusien laitteiden hankintaa ei kannata unohtaa, etenkin jos uusi muuntajamalli on muuttunut edellisestä huomattavasti.

Monesti on myös huomioitava materiaalien saatavuus muuntajan lopullista mallia valittaessa. Yleensä muuntajia valmistavat yritykset tekevät paljon erilaisia muuntajia ja tällöin on tarkasteltava, onko tarvittavia materiaaleja jo käytössä. Jos uusia materiaaleja tulee paljon, vie se varastointi tilaa ja voi hidastaa työskentelyä eri tavoin. Samojen langamallien ja -kokojen käyttö on helpompaa, jos se on mahdollista. Kannattaa ottaa huomioon myös muut samankaltaiset muuntajat, jos on suunnittelemassa useampaa muuntajamallia yhtä aikaa. Näiden materiaaleja sekä tekotapoja on suositeltavaa yhdistellä. Tällöin säästetään työkaluissa ja muuntajan valmistus on nopeampaa, jos jokaiselle mallille ei ole täysin omaa työskentelytapaa.

Muuntajamallista on tässä vaiheessa mahdollista tehdä myös 3D kuvia. Piirtämällä 3D -malli muuntajan rakenteesta, voidaan nähdä osien sopivuus ja käämien mahtuminen paremmin kuin laskemalla pituuksia numeraalisesti. Rakennetta on myös tässä vaiheessa helppo muokata, sillä osia ei tarvitse valmistaa kokeilua varten erikseen ja huomata myöhemmin, että se ei käyntykään. Tässä vaiheessa eteen voi tulla myös ongelmia, mitä ei ollut huomattu laskenta vaiheessa. Tällöin on helpompaa palata laskentaan uudelleen ja korjata mahdolliset ongelmat. Työkalujen valmistus helpottuu myös, koska mittakuvat niitäkin varten on piirrettävä. Kuvia on mahdollista myös liittää muuntajan valmistus ohjeisiin, niin käämijöillä ja kasaajilla on käsitys siitä, millaiselta lopullisen muuntajan olisi tarkoitus näyttää. Tässä vaiheessa huomiota voi kiinnittää myös ulkonäköön. Materiaalien värit, selkeys ja toimivuus vaikuttavat myös muuntajan menestykseen markkinoilla.

8 Toteutus

Laskelmien tarkastelun, kuvien ja työohjeistuksien tekemisen jälkeen alkaa muuntajan valmistus. Tähän on olemassa monenlaisia tapoja, mitkä vaihtelevat muuntajatyypin ja valmistajan mukaan. Rakenne ja ulkonäkö voivat olla hyvinkin erilaisia toisilla valmistajilla ja toisissa tuotteissa. Käsittelen tässä pintapuolisesti muuntajan valmistuksen vaiheet.

Muuntaja käämitään rautasydämen päälle. Johtimia ei kuitenkaan aseteta kiinni sydämeen vaan välissä on oltava jonkinlaista eristettä. Tässä tapauksessa oli kyseessä kuivamuuntaja, joten eristeenä toimi ilma ja langaneriste. Sydämen pylväs asetettiin käämikoneeseen ja toisiokäämitys käämittiin lasikuitutikkujen päälle. Ensiön ja toision välisenä eristeenä toimi ilma sekä eristekalvo. Tähän käämittiin ensiökäämi lasikuitutikkujen päälle. Ensiökäämiin tulee usein ns. säätöpäitä (engl. tapping). Verkosta otettu jännite ei ole usein tarkasti sitä, mikä muuntajan nimellinen jännite on. Tällöin jännitteen säätelyssä voidaan käyttää apuna säätöpäitä. Yleisimmät säätöpäät antavat mahdollisuuden säätää jännitettä $\pm 5\%$ tai $\pm 10\%$ verran nimellisestä jännitteestä.

Kääminnässä tulee huomioida kääminnän suunta. Jos käämintä tehdään pylväillä eri suuntiin, muuntajan sydämessä kulkeva magneettivoima kulkee tällöin vastakkaisiin suuntiin ja silloin vuot kumoavat toisensa. Muuntajan lämpenee huomattavasti eikä tehoa saada toisista ulos. Kääminnän aloitus ja lopetuspäät on myös kytkettävä oikeisiin liittäimiin, että polariteetti pysyy oikeana.

Kääminnän jälkeen kasataan muuntaja ja ladotaan sydämet paikoilleen. Ikeiden ja pylväiden yhdistäminen toisiinsa käy hitsaamalla tai liimaamalla. Sydämen ladonnassakin on erilaisia mahdollisuuksia ja sydän rainan leikkauskulmat voivat olla erilaisia. Tässä työssä tarkasteltavien teholuokan muuntajien sydämet ovat yleensä nelikulmaisia. Vasta suuremmissa muuntajissa, missä täyterroin pyritään saamaan mahdollisimman hyväksi, käytetään pyöreämpää mallia.

Ikeiden ollessa paikallaan, asennetaan muuntaja sellaiseen kuntoon, että se voidaan lakata. Lakkauksessa muuntaja upotetaan muuntajalakkaan ja sen annetaan olla uunissa kunnes lakka on kuivunut. Prosessi voi vaihdella riippuen lakattavasta tuotteesta, lämpötilasta ja lakasta. Tällaisia prosesseja on myös erilaisia, kuten tyhjiölakkaus, missä muuntaja lakataan tyhjiössä. Muuntajalle voidaan tehdä myös joitakin testejä ennen lakkausta, sillä lakkauksen jälkeen muutoksien tekeminen ei enää onnistu.

Ilman lakkausta muuntaja pitää kovaa ääntä ja sen osat liikkuvat enemmän. Lakkauksessa muuntajan käämien, sydämen ja muiden osien pienet välit täyttyvät lakasta ja estävät muuntajan tärinää ja täten myös ääntä. Lakkauksella päästään myös pienempiin häviöihin, sillä muuntajan tarpeettomasta tärinästä aiheutuvasta kitkasta muodostuu lämpöä ja ääntä. Lakalla on myös eristäviä ominaisuuksia ja se estää sydämen ruostumista. Lakkauksen jälkeen muuntajaan asennetaan vielä mahdollisesti puuttuvat osat. Sitten tehdään kytkennät ja tarvittavat muuntajan testaukset.

9 Mittaukset

Muuntajan valmistuttua sille tehdään standardien mukaiset tyyppitestit ja rutiinimittaukset. Sellaiset testit, mitkä voivat vahingoittaa muuntajaa, voidaan tehdä erillisenä, niin että testataan identtistä muuntajaa, millä on samat materiaalit ja mitkä on samoilla periaatteilla suunniteltu. Tällöin näitä testejä ei tarvitse tehdä jokaiselle mallille erikseen. Standardeissa on määritelty testit ja näytekappaleiden määrät.

Tässä työssä mitattiin aiemmin suunniteltua, saman teholuokan muuntajaa ja tätä työtä varten suunniteltua uutta mallia. Ajan puutteen ja resurssien vuoksi keskityin 16kVA teholuokan tehomuuntajaan. Kaikista muista teholuokan malleista oli tehty Rale - laskelmat, mutta prototyyppi malleja ei ehditty tehdä. Osa standardeissa mainituista testeistä ei pystytty suorittamaan, mutta tämä ja muut suunnitellut mallit lähetetään laboratorio mittauksiin, missä on tarvittavat välineet ja tietotaito.

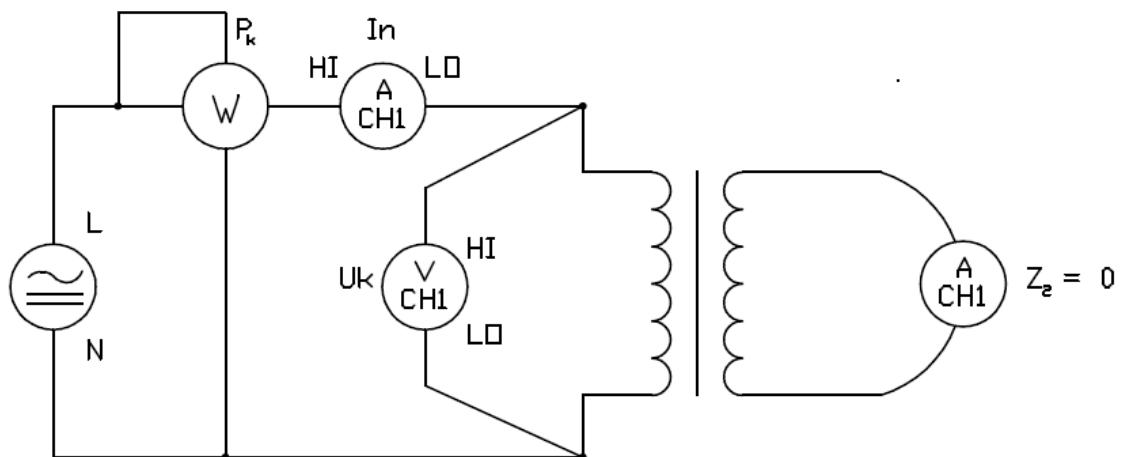
Mittaukset haluttiin yhteneväisiksi vanhan ja uuden mallin kanssa, joten mittaukset pyrittiin tekemään samoilla mittalaitteilla ja tavoilla. Testit tehtiin IEC 60076-11 standardin ohjeistuksen mukaan.

9.1 Käämiresistanssit

Ensimmäisenä mitattiin muuntajan käämien resistanssit. Mittauksessa käytettiin Sonel MMR-600 Micro-ohm meter -resistanssimittaria. Mittauksessa otettiin ylös resistanssit, mittauskohtien terminaalit sekä käämien ja ympäristön lämpötilat. Lämpötila mittaukset tehtiin Datum-Y - Portable sata station XL100 -Yogokawa -dataloggerilla ja k-tyypin lämpötila-antureilla.

9.2 Oikosulkuimpedanssi ja -häviö

Seuraavaksi tarkastettiin oikosulkuimpedanssi ja oikosulkuhäviöt (käämihäviöt) muuntajan käämien ollessa ympäristön lämpötilassa. Testi tehtiin muuntajan nimellistaajuudella siten, että ensiöön syötettiin jännitettä ja toisio oikosuljettiin. Virta säädettiin nimelliseksi toisio puolelta. Toisio puolella virtamittauksessa käytettiin 1000:1:n suhteella toimivaa virtamuuntajaa, mikä oli kytketty Fluke 45 -mittariin. Ensiö puolta mitattiin Voltech - PM100 single phase power analyzerilla ja senkin virtamittauksessa jouduttiin käyttämään virtamuuntajaa virtamittauksessa, koska mittari ei olisi kestänyt yli 20A virtaa. Kuvio 15 esittää oikosulkumittauksen kytkentäkuva.



Kuvio 15. Oikosulkumittauksen kytkentäkuva.

PM100 analysaattori näytti suoraan oikosulkuhäviöt ja oikosulkujännitteen. Oikosulkujännitteestä pystyy laskemaan suhteellisen oikosulkujännitteen (=suhteellinen oikosulkuimpedanssi) jakamalla mitatun arvon nimellisellä jännitteellä.

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = z_k \quad (12)$$

jossa u_k = suhteellinen oikosulkujännite
 z_k = suhteellinen oikosulkuimpedanssi
 U_k = oikosulkujännite
 U_n = muuntajan nimellinen jännite

Jos haluaa tehdä saman toisella tapaa, voi jakaa oikosulku jännitteen oikosulku virralla. Tästä saadaan tulokseksi oikosulkuimpedanssi. Myös tämän avulla voidaan laskea suhteellinen oikosulkuimpedanssi (=suhteellinen oikosulkujännite).

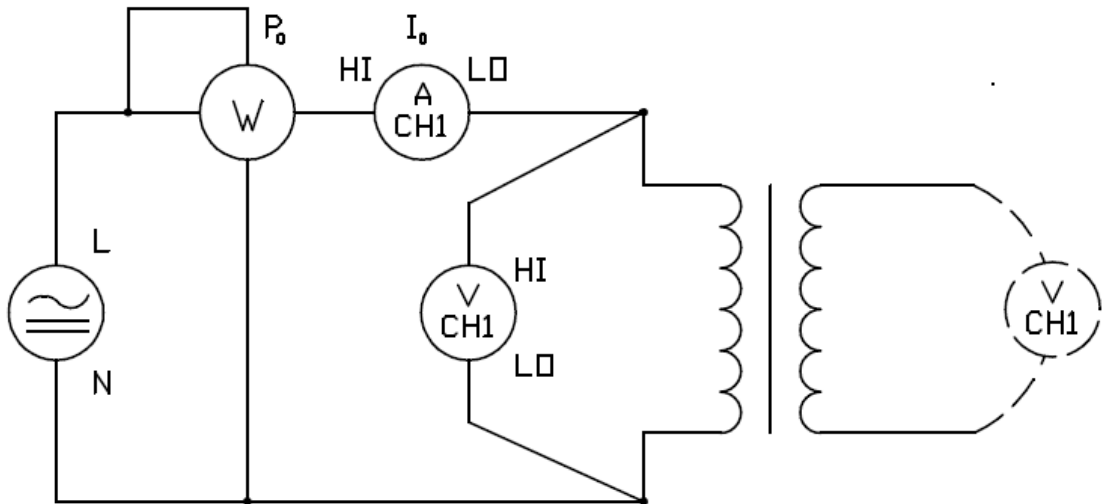
$$z_k = u_k = Z_k \frac{S_n}{U_{1n}^2} \quad (13)$$

jossa I_k = oikosulkuvirta
 Z_k = oikosulkuimpedanssi

9.3 Tyhjäkäyntihäviöt ja -virta

Tyhjäkäyntihäviöt ja -virta varmistetaan tyhjäkäyntikokeella. Mittaukset tehtiin muuntajan ollessa ympäristön lämpötilassa. Tässä vaiheessa muuntajasta mitattiin myös jännitteet kaikista ensiön säätöpäistä. Tyhjäkäyntimittaus suoritettiin pääsäätöpäistä (primary tapping).

Muuntajan ensiöön syötettiin nimellisellä taajuudella nimellistä jännitettä. Toisio jätettiin auki. Ensiöpuolella käytettiin Voltech - PM100 single phase power analyzeria ja jännitemittaus tehtiin myös Fluke 75 -yleismittarilla samasta välistä kuin PM100:lla eli rinnankytkentänä. Tällä voidaan tarkistaa soveltuuko testijännitteen muoto mittaukseen. Jos rms- ja trms-mittauksessa olisi yli 3 %:n erot, ei testaus jännite olisi kelvollinen [13, s. 49]. Testaus jännite oli sallitulla välillä. Kuvio 16 esittää tyhjäkäyntikokeen kytkentäkuvaa.



Kuvio 16. Tyhjäkäyntikokeen kytkentäkuva.

Analysaattorista voitiin lukea tyhjäkäyntihäviöt ja tyhjäkäyntivirta. Tyhjäkäyntihäviöille täytyy tehdä vielä korjaukset kaavan (14) mukaan. [13, s. 49–50]

$$P_0 = P_m (1 + d) \quad (14)$$

jossa I_k = korjatut tyhjäkäyntihäviöt

I_k = mitatut tyhjäkäyntihäviöt

$$d = \frac{U' - U}{U'}$$

U' = trms -mitattu jännite

U = rms -mitattu jännite

Tyhjäkäyntihäviöille ei tehdä lämpötila korjauksia.

9.4 Lämpenemätesti

Lämpenemätestissä yhdistetään tyhjäkäynti- ja oikosulkutestiä. Aluksi on mitattava käämien resistanssit, mitä käytetään myöhemmin referenssi arvoina laskettaessa muuntajan käämien lämpenemiä resistanssimenetelmällä. Mittaus on mahdollista suorittaa kahdella tavalla. Joko lämmittämällä ensin muuntajan sydän tyhjäkäyntitestillä ja sen jälkeen käämit oikosulkutestillä tai samat testit eri järjestyksessä. Tässä tapauksessa ensin lämmitettiin sydän tyhjäkäyntitestillä.

Ennen mittauksen aloittamista muuntajaan oli kytketty lämpötila-antureita, millä oli mahdollista mitata muuntajan eri osien lämpenemiä. Lämpötilamittauksessa käytettiin edelleen Datum-Y - Portable sata station XL100 -Yogokawa -dataloggeria ja k-tyypin lämpötila-antureita. Anturit pyrittiin asettamaan kohtiin, missä oletettiin tulevan suurimmat lämpötilat. Näitä arvoja voidaan käyttää ilmoittamaan muuntajan kuumimmat pisteet (hot-spot temperature) tai laskemalla ne standardissa IEC 60905 ilmoittamalla tavalla [5, s. 25].

Tyhjäkäyntimittauksen kytkentäkuva (Kuva 11) on sama kuin tyhjäkäyntikokeessa. Mittaus on samanlainen kuin tyhjäkäyntikokeessa, mutta tällä kertaa muuntajan annetaan lämmitä, kunnes sen lämpötilat ovat tasaantuneet. Tämän jälkeen otetaan mittaustulokset ylös.

Oikosulkumittauksen kytkentäkuva (Kuva 10) on myös sama kuin oikosulkukokeessa. Muuntajaa lämmitetään samalla tavoin nimellisellä virralla, kunnes käämien lämpötilat ovat tasautuneet. Mittaustulokset otetaan myös tässä vaiheessa ylös. Antureiden tuloksista voidaan lukea muuntajan kuumimpien kohtien lämpötilat.

Muuntajan lämmitettyä on aika mitata käämiresistanssit. Oikosulkukokeen kytkennät on syytä purkaa mahdollisimman pikaisesti, sillä lämpötila alkaa laskea käämeissä nopeasti. Resistanssit on suositeltavaa mitata tietyn väliajoin jonkin aikaa, että on mahdollista piirtää resistanssikäyrä. Resistanssikäyrässä esitetään resistanssin muutos ajan suhteen. Käyrästä voidaan laskea arvioitu käämien maksimi resistanssi siltä hetkeltä kun syöttö katkaistiin.

Mitatuista resistansseista voidaan laskea keskimääräiset lämpenemät. Nämä lämpötilat on mahdollista laskea eri tavoin. Tässä tilanteessa käämien lämpötilan laskentaan käytettiin kaavaa (15) [14, s. 44]:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (x + t_1) - (t_2 - t_1) \quad (15)$$

jossa $x = 234,5$ kuparille, alumiinille 225

$\Delta t =$ lämpötilan nousu

$R_1 =$ resistanssi testin alussa, alkulämpötilassa t_1

$R_2 =$ resistanssi testin lopussa kun lämpötilat ovat tasautuneet

$t_1 =$ ympäristönlämpötila testin alussa

$t_2 =$ ympäristönlämpötila testin lopussa

Näiden mittausten jälkeen siirryttiin analysoimaan tuloksia. Tässä vaiheessa on mahdollista tehdä myös muita testejä, mutta tässä tilanteessa nämä olivat tärkeimmät mittaukset.

10 Tulokset ja johtopäätökset

Mittauksien jälkeen on aika tarkastella tuloksia. Tuloksien vertailussa kannattaa huomioida aiempien laskelmien tarkkuus mitattuihin tuloksiin. Samalla voidaan tehdä vertailu aiempien mallien kanssa. Sillä nähdään onko oikeilla malleilla päästy siihen mihin pyrittiin laskennallisesti. Eroavaisuudet eri laskelmien ja tuloksien kanssa analysoidaan, että nähtäisiin mistä erot voisivat johtua. Rale -ohjelmalla voi tässä vaiheessa tehdä uusia laskelmia kokeilemalla muuttaa kertoimia. Löytämällä mahdollisimman hyvät lähtökohdat ja kertoimet muuntajan laskennoille, auttaa se seuraavien mallien suunnittelussa.

Tätä työtä varten tehdyn muuntajan mittaustulokset vastasivat hyvin laskennallisia tuloksia. Ennen mittauksia oli epävarmuutta Ralen tuloksien yhteneväisyydestä valmistetun mallin kanssa. Nyt tulokset saatiin varmistettua valmistetun mallin kaltaisille muuntajille ja ohjelmaa voidaan hyödyntää jatkossa paremmin.

Kaikille työn alussa määritellyille muuntajamalleille tehtiin laskelmat, mutta prototyyppejä ei ehditty tehdä kuin 16 kVA:n mallista. Laskennallisesti jokaiselle mallille saatiin määritettyä johdinkierrokset, johtimien paksuudet, käämimateriaalien ja sydämen massat, sydämen koko, sydänrainan paksuus ja malli, magneettivuon tiheys, lämpenemät käämeille ja sydämille, jännitteen muutos kuormitettaessa (engl. regulation), oikosulkujännitteet, tyhjäkäyntihäviöt, käämihäviöt, tyhjäkäyntivirrat, hyötysuhteet ja kustannukset. Ohjelman laskentojen tuloksissa oli myös näiden lisäksi muita arvoja ja niitä tarkasteltiin, mutta ne eivät olleet tärkeysjärjestyksessä korkeimmalla. Käämien ja sydänten tilavuuksien suhteet määritettiin myös laskennallisesti ja kuvien avulla, että nähtiin valmistettavuus ennen tuotantoon panoa.

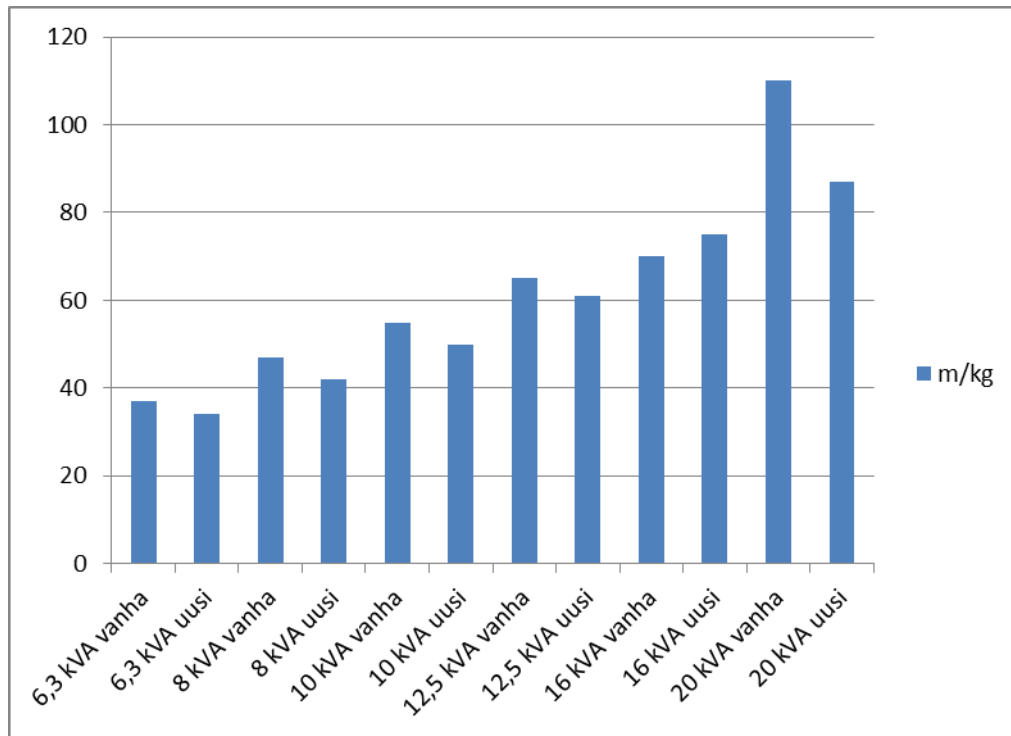
Tässä työssä ei kuitenkaan tarkastella kaikkia laskennallisia arvoja. Taulukossa 5 esitetään suunniteltujen 6,3–20 kVA:n uusien ja vanhojen mallien laskennalliset häviöt ja uusien mallien massat. Vanhat mallit viittaavat Muuntosähkö Oy:n Power Transformers esitteen arvoihin [15]. Vanhoista malleista ei ollut laskennallisia massoja käytössä, joten jouduin käyttämään esitteessä ilmoitettuja arvoja.

Taulukko 5. Uusien ja vanhojen muuntajamallien laskennalliset häviöt ja massat.

Näennäisteho ja malli	Massa	Tyhjäkäyntihäviöt	Käämihäviöt	Kokonaishäviöt
	m/kg	P _o /W	P _k /W	P _o + P _k /W
6,3 kVA vanha	37	100	300	400
6,3 kVA uusi	34	70	230	300
8 kVA vanha	47	90	400	490
8 kVA uusi	42	90	280	370
10 kVA vanha	55	110	420	530
10 kVA uusi	50	100	290	390
12,5 kVA vanha	65	150	430	580
12,5 kVA uusi	61	130	325	455
16 kVA vanha	70	170	520	690
16 kVA uusi	75	150	380	530
20 kVA vanha	110	160	710	870
20 kVA uusi	87	185	455	640

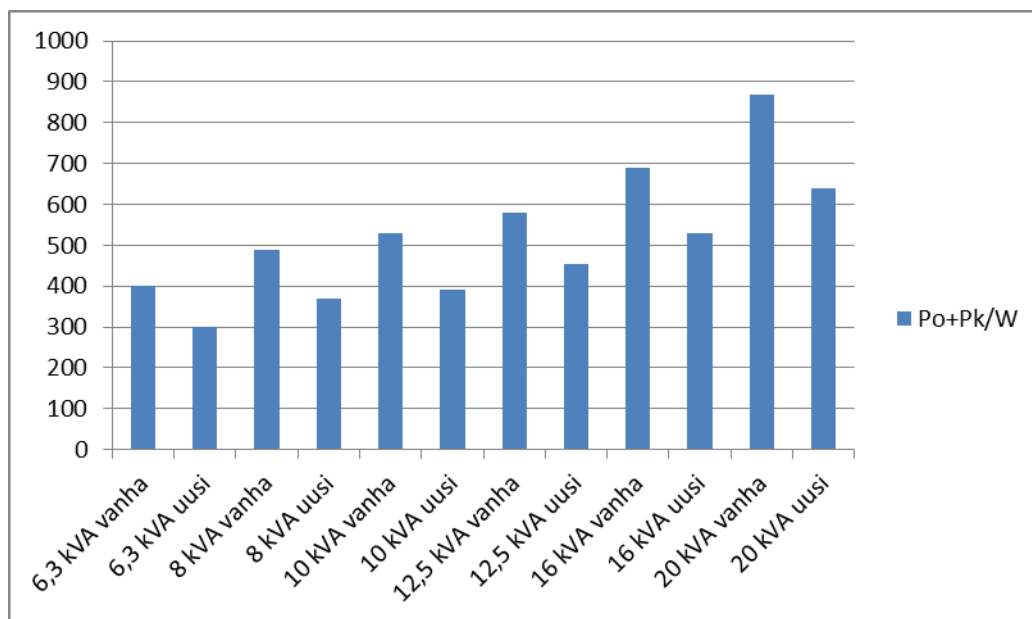
Taulukossa 6 esitetään vanhojen ja uusien mallien massojen erot pylväsdiagrammina. Kuten huomataan, ovat uusien mallien massat suurimmalta osalta pienempiä kuin vanhojen. Kuitenkin on muistettava, että lasketut massat eivät päde todellisuudessa noin tarkasti. On todennäköistä, että uusista malleista tulee hieman painavampia todellisuudessa.

Taulukko 6. Pylväsdiagrammi uusien ja vanhojen muuntajamallien massoista.



Taulukossa 7 esitellään uusien ja vanhojen mallien kokonäishäviöiden erot. 16 kVA:n mittaustulokset olivat sopusoinnussa laskennallisten arvojen kanssa, joten tämän tiedon perusteella muutkin arvot ovat lähellä mitattuja arvoja. Näistä tuloksista nähdään kuinka uudet muuntajamallit ovat systemaattisesti mitoitettu pienempi häviöisiksi.

Taulukko 7. Pylväsdiagrammi uusien ja vanhojen muuntajamallien kokonäishäviöiden eroista.



Mittauksien avulla tulokset saatiin käämihäviöille, tyhjäkäyntihäviöille, oikosulkujännitteelle, tyhjäkäyntivirralle, keskimääräisille lämpenemille, muuntajan kuumimpien pisteiden lämpenemille (engl. hot-spot temperature), induktansseille tyhjäkäynti ja oikosulku tilanteessa, resistansseille ja hyötysuhteelle. Muuntajan fyysiset mitat ja massa mitattiin myös.

Uusista muuntajamalleista saatiin suunniteltua tehohäviöiltään pienemmät ja edullisemmat, mitkä saavuttivat määritellyt tavoitteet. Kaikkien uusien muuntajamallien koko kuitenkin kasvoi, mikä oli työn alkuperäistä tavoitetta vastaan. Useimpien mallien laskennalliset massat olivat alkuperäisiä pienempiä, mutta 16 kVA:n massa oli suurempi kuin saman tehoisen vanhemman mallin. Työn aikana suunniteltiin useita vaihtoehtoja vastaamaan alussa määriteltyjä tavoitteita. Näistä valittiin parhaiten tavoitteita vastaavat valmistettavaksi. Lopullisten mallien valintaan vaikuttivat monet eri kriteerit ja toisilla niistä oli suurempi painoarvo. Massan ja koon kasvaminen oli tässä tapauksessa hyväksyttävä kompromissi, mikä tehtiin tarkkojen pohdintojen jälkeen.

Muuntajien valmistettavuutta saatiin parannettua korvaamalla osa tarkkuutta ja turvallisuutta vaativista työtehtävistä nopeampaan ja turvallisempaan valmistukseen. Muuntajan valmistukseen käytettävä aika voitiin kuitenkin vain arvioida, sillä kyseistä tuotetta ehdittiin tehdä vain yksi kappale. Muuntajassa myös käytettiin materiaaleja, joiden valmistukseen on käytetty vähemmän energiaa kuin aiemmissa malleissa. Tällä pyrittiin vähentämään ympäristön kuormitusta materiaalien osalta. Muuntajien ulkonäön parantamisessa onnistuttiin myös, mutta tämä on enemmänkin mielipide kysymys.

11 Pohdinta

Työn alussa määritellyjä tavoitteita ei saavutettu täysin. Työn aikana suunniteltiin useita vaihtoehtoja vastaamaan alussa määritellyjä tavoitteita ja näistä valittiin tavoitteita parhaiten vastaavat mallit. Tuloksena saatiin suunniteltua uudet muuntajamallit, mitkä voivat mahdollisesti korvata vanhat. Työn lopputulos oli kuitenkin onnistunut, koska lähtökohdat olivat alusta lähtien haastavat. Suunnitelluilla malleilla on vielä useita testejä edessä ja muutoksia voi vielä tämän jälkeen tapahtua.

Työstä oli hyötyä suunniteltujen mallien lisäksi Rale -ohjelman laskentatuloksien varmistamisessa. Tulosten avulla tiedetään paremmin, mitkä arvot ovat uskottavia ja mitkä eivät ole niin tarkkoja verrattuna oikeaan muuntajaan. Valmistettavuuden parantamisella ja ekologisten asioiden huomioon ottamisella päästiin myös aiempaa parempiin tuloksiin.

Ammatilliselta näkökannalta työssä pääsi käyttämään hyväksi koulussa opittua tietoa muuntajan teoriassa, laskennassa ja mittauksissa. Työharjoittelussa olin päässyt tutustumaan jo ennen työn aloittamista muuntajan valmistamisen tuotannolliseen puoleen. Silti työ oli aiheeltaan ja toteutukseltaan niin monipuolinen, että oppimista tapahtui koko projektin ajan. Aiheen laajuus auttoi työtä pysymään koko ajan mielenkiintoisena ja uusia asioita tuli vastaan jatkuvasti. Toisaalta se teki työn kirjoittamisen ja aiheiden tarkastelun vaikeammaksi. Tutkimuksissa ja tarkasteluissa olisi ollut mahdollista mennä syvemmälle, jos aihetta olisi rajattu enemmän jo alkuvaiheessa. Suunnittelussa ei myöskään voi jättää huomiotta tiimityön tärkeyttä. Tällaisissa projekteissa, missä yhdistyy monta valmistukseen liittyvää osapuolta, on kommunikointi ja tiedon jakaminen tärke-

ää. Tämän asian tajuaminen on hyödyksi varmasti myös tulevaisuudessa, niin työssä kuin työssä.

Työn alussa arvioitu projektin kesto arvioitiin alakanttiin. Uusia huomioitavia asioita tuli työn edetessä usein lisää ja asiat muuttuivat, kuten usein tällaisissa töissä on tapana. Aikataulun venyminen ei kuitenkaan ollut täysin negatiivinen asia, sillä pääsin tutustumaan muuntajan suunnitteluun syvemmin tämän vuoksi.

Työssä pyrittiin käyttämään vain hyväksi todettuja lähteitä ja vertaamalla niitä muiden lähteiden kanssa keskenään. Lähteissä pyrittiin mahdollisuuksien mukaan käyttämään uutta tutkimustietoa hyväksi. Mukana on myös vanhoja lähteitä, mutta niiden asia ei ole aikojen saatossa vanhentunut. Mielestäni useassa tapauksessa vanhempien lähteiden tiedot oli kirjoitettu selkeämmin ja niissä oli keskitytty olennaisiin asioihin. Ne myös sopivat käsittelemäni asioihin paremmin.

Jatkotutkimuksissa olisi mahdollista käsitellä mittauksia, mitä ei tämän työn yhteydessä ehditty tehdä. Tiettyjen materiaalien, rakenteiden ja tekoprosessien tarkempi tutkiminen ja vertailu auttaisivat varmasti tuotekehittelyssä. Tämän työn tapaisen tutkimuksen jatkoksi olisi mahdollista lisätä myös 3-vaihetehomuuntajat.

Haluan kiittää kaikkia Muuntosähkö Oy:n työntekijöitä, jotka auttoivat tämän työn tekemisessä. Erityisesti haluan kiittää työn aiheesta ja mahdollisuudesta osallistua tämän kaltaiseen tuotekehittelyyn.

Lähteet

1. Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 2003.
2. Paavola, M. Sähkötekniikan oppikirja. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiön kirjapainossa Porvoossa. 1962.
3. Korpinen, L. Sähkövoimatekniikkaopus: 9. Muuntajat ja sähkölaitteet. 1998. http://leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf [Viitattu 15.5.2012]
4. Sihvo, L. Tekniikan käsikirja 3. Jyväskylä: Gummerus Osakeyhtiön kirjapainossa. 1973.
5. IEC 60076-11 Power transformers -Part 11: Dry-type transformers - First edition. 2004. Muuntosähkö Oy. Intranet.
6. Leskinen, T.K.I., Tonteri, A.J. Muuntaja Osa 1. Helsinki: Ammattikasvatusthallitus. 1971.
7. Hadzimanovic, R. 2012. <http://www.rale.ch/index.htm> [Viitattu 15.5.2012]
8. Yanniello, B. Aluminum - The other conductor. 2006. <http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/1143077762513.pdf> [Viitattu 15.5.2012]
9. London metal exchange. 2012. <http://www.lme.com/home.asp> [Viitattu 9.3.2012]
10. Surahammars Bruks AB. Non oriented electrical steel. 2011. [http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/\\$FILE/NO-11.pdf?OpenElement](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/NO-11.pdf?OpenElement) [Viitattu 15.5.2012]
11. Surahammars Bruks AB. Grain oriented electrical steel. 2012. [http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/\\$FILE/GO%202008.pdf?OpenElement](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/GO%202008.pdf?OpenElement) [Viitattu 15.5.2012]
12. Kervinen, M. Smolander, J. MAOL -taulukot. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. 1999.
13. IEC 60076-1 Power transformers - Part 1: General Edition 3.0. 2011. Muuntosähkö Oy. Intranet.

14. IEC 61558-1 Safety of power transformers, power supplies, reactors and similar products - Part 1: General requirements and tests - Edition 2.1. 2009. Muuntosähkö Oy. Intranet.
15. Muuntosähkö Oy. Power Transformers - 6.3kVA-1.000kVA -esite. 2012.