



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tero Öström

MUUNTAJAN ERISTEPAPERIN
VANHENEMINEN

Tekniikka
2016

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tero Öström
Opinnäytetyön nimi	Muuntajan eristepaperin vanheneminen
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	40+3 liitettä
Ohjaaja	Vesa Verkkonen, Patrik Ågren

Tutkimus on tehty ABB:n Transformer Servicelle ja Muuntajaöljylaboratoriolle parantamaan muuntajan eliniän ennustettavuutta. Tutkimus käsittelee muuntajan eristepaperin normaalia vanhenemista. Laskennan perustana ovat aiempaa tarkemmat muuntajakohtaiset käyttötiedot koskien kuormitussuhdetta, ympäristön vaikutuksia ja käyttöikä. Tutkimuksessa tarkasteltiin yhteensä 16 asema-, generaattori- ja teollisuusmuuntajaa.

Muuntajan käämin lämpötilan nousu nopeuttaa muuntajan eristepaperin hajoamista. Eristepaperin hajoaminen ja sen myötä DP-luvun alentuminen johtaa muuntajan eliniän lyhenemiseen. Eristepaperinäytteet otetaan yleensä huollon yhteydessä ja analysoidaan Muuntajaöljylaboratoriossa.

Tutkimuksen aluksi tehtiin muuntajakohtaiset asiakaskyselyt. Muuntajista kerättiin myös alkuperäislaskelmat, öljyanalyysit, koestuspöytäkirjat, ympäristön lämpötilat ja osasta myös lämpenemiskoetulokset. Näitä tietoja käyttäen laskettiin vanhenemismallin tarvitsemat arvot.

Eristepaperin vanhenemisen laskenta toteutettiin osaksi yleisessä käytössä olevilla kaavoilla, joilla laskettiin H-pistekerroin, käämin absoluuttinen lämpötila kuumimmassa kohdassa ja eristepaperin vanheneminen. ABB:n omalla laskentaohjelmalla laskettiin myös muuntajakohtaiset vyyhtihäviöt. Tässä tutkimuksessa vanhenemismallien laskelmat on tehty laskennallisia lämpötiloja käyttäen. Ympäristökerroin on sovitettu mitattujen DP-lukujen perusteella.

Lopputuloksena saatiin vanhenemismallit eri kuormituksille kaikilla muuntajatyypeillä. Vanhenemismallit pyrkivät näyttämään muuntajan laskennallisen DP-luvun kehitystä ajan funktiona eri kuormitussuhteilla. DP-luvun avulla voidaan määrittää muuntajan vanhenemisaste ja jäljellä oleva elinikä. Jatkotutkimuksia varten tulisi selvittää kosteuden vaikutukset ympäristökertoimeen ja todelliset muuntajien lämpötilat. Lisäksi tutkimukseen osallistuvien muuntajien lukumäärän tulisi olla suurempi.

ABSTRACT

Author	Tero Öström
Title	Aging of Transformer Insulation
Year	2016
Language	Finnish
Pages	40+3 Appendices
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen, Patrik Ågren

This research was made for ABB Transformer Service and Transformer Oil Laboratory in Vaasa to present a better aging model of the transformer insulation in normal conditions, with a specific usage details. This means load factor, ambience and usage time in power grid. Sixteen substation-, generator- and industry transformers were included in the research.

The accelerated aging of transformer insulation will occur when its surrounding temperature is rising. The aging of the insulation will lead to the shortened life time of a transformer. While in Transformer Service, a sample of the insulation is taken and examined in the Transformer Oil Laboratory.

In the beginning of the research, questionnaires answered for every single transformer were studied. All the original calculations, oil analysis, test reports, temperatures of the ambiances and heating tests of the transformers were collected. The aging of the transformer was calculated based on these data.

The calculation of the aging insulation was carried out with formulas, which are generally available. For example, H-spot factor, and temperature of windings and aging of the insulation were calculated. Disc losses were calculated with a calculation program used at ABB. In this research, aging model calculations have been made using calculated temperatures.

As a result, aging models will present the aging of the transformer insulation in all available transformer classes and loading ratios. The models present the aging with a degree of polymerization (DP) and time in power grid, with specific loading ratio. The effect of moisture on the environmental factor and real temperatures of the transformers should be examined in further research. In addition, the number of participating transformers needs to be higher.

Keywords transformer, insulation, active part, aging, winding

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	9
2	MUUNTAJAN TOIMINTA JA RAKENNE	10
	2.1 Toimintaperiaate	10
	2.2 Aktiiviosan rakenne	10
	2.3 Jäähdytysmenetelmät	12
3	MUUNTAJAN VANHENEMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	14
	3.1 Paperin vanheneminen	14
	3.2 Lämpötila	14
	3.3 Öljyn kosteus ja epäpuhtaudet	15
4	MUUNTAJAN KUNNONVALVONTA	16
	4.1 Muuntajaöljy	16
	4.1.1 Eriste ominaisuudet	16
	4.1.2 Happamuus	17
	4.1.3 Vikakaasuanalyysi	17
	4.2 Kiinteät eristeet	18
	4.3 Kuormitus	19
5	LASKENNASSA KÄYTETYT SUUREET JA KAAVAT	20
	5.1 Laskennan peruskaava	20
	5.2 Käämin H-pistelämpötila	21
6	TUTKIMUKSEN KOHTEENA OLEVAT MUUNTAJAT	24
	6.1 Käyttöluokitus	24
	6.2 Muuntajan käyttöluokat	24
	6.3 Muuntajan käyttötiedot	25
	6.4 Alkuperäiset laskelmat	26
	6.5 Jäähdytys	27
7	TULOSTEN SOVITUS JA ANALYSOINTI	28
	7.1 Mallin perusteet	28
	7.2 H-pistelämpötilat	28
	7.3 Vanhenemismallit	31

7.4 Tulosten osuvuuden arviointi.....	34
7.5 Vanhenemismallien virhelähteet.....	38
8 YHTEENVETO	39

LÄHTEET

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Kraft-eristepaperi paperinäytteenottokohdassa.....	11
Kuva 2. Esimerkkejä muuntajan jäähdytystyypeistä.	13
Kuva 3. Palavien kaasujen muodostus eri lämpötiloissa.....	18
Kuva 4. Periaatekuva öljyn ja käämin lämpötiloista.	22
Kuva 5. Paperin näytteenottoaika.	26
Kuva 6. Asemamuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.	30
Kuva 7. Generaattorimuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.	30
Kuva 8. Teollisuusmuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.	31
Kuva 9. Vanhenemismalli asemamuuntajille eri kuormitussuhteilla.	32
Kuva 10. Vanhenemismalli generaattorimuuntajille eri kuormitussuhteilla.	33
Kuva 11. Vanhenemismalli teollisuusmuuntajille eri kuormitussuhteilla.....	33
Kuva 12. Asemamuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.	35
Kuva 13. Generaattorimuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.	36
Kuva 14. Teollisuusmuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.	37
Taulukko 1. Tyypillisiä jäähdytystyypejä.....	12
Taulukko 2. Muuntajien lämpötilataulukko.	29

LIITELUETTELO**LIITE 1.** Lähtö- ja laskelma-arvoja 1**LIITE 2.** Lähtö- ja laskelma-arvoja 2**LIITE 3.** Asiakaskyselypohja

PARAMETRILUETTELO

A	Ympäristökerroin
DP_{end}	Paperin DP-luku elinkaaren lopussa
DP_{start}	Paperin DP-luku elinkaaren alussa
E_A	Aktivaatioenergia
g	Öljyn ja käämin välinen lämpötilagradientti
H	H-pistekerroin
k	Kuormitussuhde
P_0	Tyhjäkäyntihäviöt
P_K	Virtalämpöhäviöt / vyyhtihäviöt
$P_{K_{\text{av}}}$	Virtalämpöhäviöiden / vyyhtihäviöiden keskiarvo
$P_{K_{\text{max}}}$	Virtalämpöhäviöiden / vyyhtihäviöiden maksimiarvo
R	Kaasuvakio
t	Aika verkossa tunteina
x	Korjauskerroin
y	Korjauskerroin
θ_{amb}	Ympäristön lämpötila
$\theta_{\text{h-piste}}$	H-pistelämpötila
$\Delta\theta_{\text{Hö}}$	Huippuöljyn lämpenemä

1 JOHDANTO

Tutkimus on tehty ABB:n Transformer Servicelle ja Muuntajaöljylaboratoriolle antamaan aiempaa parempi muuntajan eristepaperin elinikäennuste. Perustana tälle tutkimukselle oli kerätyt muuntajien käyttötiedot. Tavoitteena oli käyttö- ja tyyppitietojen perusteella tehdä uudet vanhenemismallit, jotka soveltuvat yleisimmille muuntajatyypeille ja -käyttöille.

Vanhenemismalli pyrkii kuvaamaan muuntajan elinkaaren mahdollisimman tarkasti. Uusista muuntajista on mahdollista tehdä hyvä arvio, miltä elinkaari tulee näyttämään arvioidulla käyttöasteella. Oletusarvoisesti muuntaja kestää sitä kauemmin, mitä pienemmillä kuormitussuhteilla/lämpötiloilla muuntajaa käytetään ja mitä kuivempana eristepaperi säilyy.

Tutkimuksesta eniten tulevat hyötymään Transformer Servicen asiakkaat, jotka tarvitsevat omalle muuntajalleen elinikäennusteen. Asiakkaille voidaan tarjota erilaisille käyttöille sopivia elinikäennusteita, kun tiedetään muuntajan käytönaikainen kuormitus, jäähdytystapa, nimellisteho ja ikä.

Tutkimus toteutettiin käyttämällä tutkimukseen osallistuvien muuntajien käyttö-, alkuperäislaskelma- ja koestuspöytäkirjatietoja. Tutkimus koostuu kolmesta vaiheesta, jossa ensimmäisenä tehtiin asiakaskyselyt ja vanhenemismallien laskelmat sekä lopuksi loppupäätelmät.

2 MUUNTAJAN TOIMINTA JA RAKENNE

2.1 Toimintaperiaate

Muuntaja on sähköverkon osana toimiva laite, jota käytetään nostamaan tai laskemaan jännitettä. Asemamuuntajakäytössä muuntajia löytyy siirtoverkon molemmista päistä. Alkupäässä siirtoverkkoa jännite nostetaan ylös ja käyttöpäässä taas lasketaan alas. Generaattorimuuntaja yleensä vain nostaa syöttöjännitteen verkkoon sopivaksi ja teollisuusmuuntaja taas laskee käytön vaatimalle tasolle.

2.2 Aktiiviosan rakenne

Aktiiviosa sijaitsee öljyllä täytetyssä muuntajasäiliössä. Jännitteen muutos tapahtuu aktiiviosassa. Sen rakenteeseen kuuluu paljon erilaisia osia, mm. ladottu sydän, käämityt käämivyhdet, sisäiset johdotukset ja tässä tutkimuksessa tarkemmin tarkastelussa olevat aktiiviosan eristeet. /1/

Sydämen tarkoitus on vahvistaa muuntajan magneettikenttää. Muuntajan sydän koostuu joko käsin tai koneellisesti ladotuista suunnatuista levyistä. Sydänlevyjen paksuus vaihtelee 0,18–0,30 mm välillä. Ohuella ja suunnatulla levyllä pyritään saamaan pyörrevirtahäviöt mahdollisimman pieniksi. Pyörrevirtahäviöt vaikuttavat muuntajan käyntilämpötilaan. /1/

Käämejä käytetään muuntajan sydänlevyjen ympärille käämityssä aktiiviosassa. Käämilankoja on saatavilla kahta eri materiaalia. Suurimmassa osassa muuntajia käämilangat ovat kuparia. Vähemmän käytetty käämimateriaali on alumiini. Kun verrataan alumiinia ja kuparia, on kupari parempi vaihtoehto paremman johtavuutensa ansiosta. Huono saatavuus on kuitenkin määrittänyt kuparille korkean hinnan, jonka vuoksi alumiinin suosio käämimateriaalina on kasvanut halvemman hintansa vuoksi. Alumiinia käytettäessä käämitykset vievät kuitenkin enemmän tilaa kuin kuparia käytettäessä. Tällöin myös muuntajan fyysinen koko on suurempi. /1/

Käämin muoto voi vaihdella. Yleisesti käytetään rakenteeltaan lattatyypistä suorakulmaista kuparia. Muodoiltaan myös pyöreät ja foliotyypiset käämilangat ovat mahdollisia, mutta harvinaisempia.

Muuntajasta löytyy muutamaa erityyppistä eristettä, joiden tarkoitus on eristää ja tukea aktiiviosan käämityksiä. Hyvän eristyksen ominaisuuksiin kuuluvat korkea läpilyöntilujuus, hyvä lämmönkesto ja mahdollisimman pitkä elinikä. /1/



Kuva 1. Kraft-eristepaperi paperinäytteenottokohdassa. /8/

Yleinen käämin eristepaperi on ns. Kraft-paperi (**Kuva 1.**), jota käytetään suurimmassa osassa muuntajista. Kraft-paperi on ollut hinta-laatusuhteeltaan paras vaihtoehto. Nykyään on kuitenkin mahdollista käyttää myös lämpöstabiloitua eristepaperia, jolla on edeltäjänsä paremmat lämpötilaominaisuudet, mutta myös korkeampi hinta. Uuden paperin ikääntymisajan odotetaan olevan 1,5–3 -kertainen verrattuna ei-lämpöstabiloituun eristepaperiin. /1/ Kolmas vaihtoehto on NOMEXIn valmistama eristepaperi, jota voidaan käyttää normaalia suuremmissa, korkeintaan 200 °C lämpötiloissa /7/. Eristepaperin vanheneminen määrittää muuntajan eliniän, jos muita vakavia vikoja ei esiinny.

Öljy on myös eriste. Öljyn tarkoitus on eristää ”ilmavälit”, pitää vyyhtihäviöt pieninä sekä siirtää lämpöä pois käämeistä. Läpilyöntilujuuden tulee kuitenkin olla tarpeeksi korkea, jotta muuntajassa ei tapahdu läpilyöntejä. Lähes kaikissa tapuksissa käytetään mineraaliöljyä. Muita yleisesti käytettyjä eristysnesteitä ovat

silikoniöljy ja esterit. Silikoniöljyn hinta on kuusinkertainen normaaliin mineraaliöljyyn verrattuna. Kalleutensa takia silikoniöljyn käyttöön on oltava hyvät perusteet, esimerkiksi jos korkea leimahduspiste on tarpeen. Nykyään silikoniöljyn tilalla käytetään yleisesti estereitä, joko synteettisiä tai luonnon estereitä. Estereiden leimahduspiste on yli 300 °C ja ne ovat biohajoavia, toisin kuin silikoniöljyt. /4/

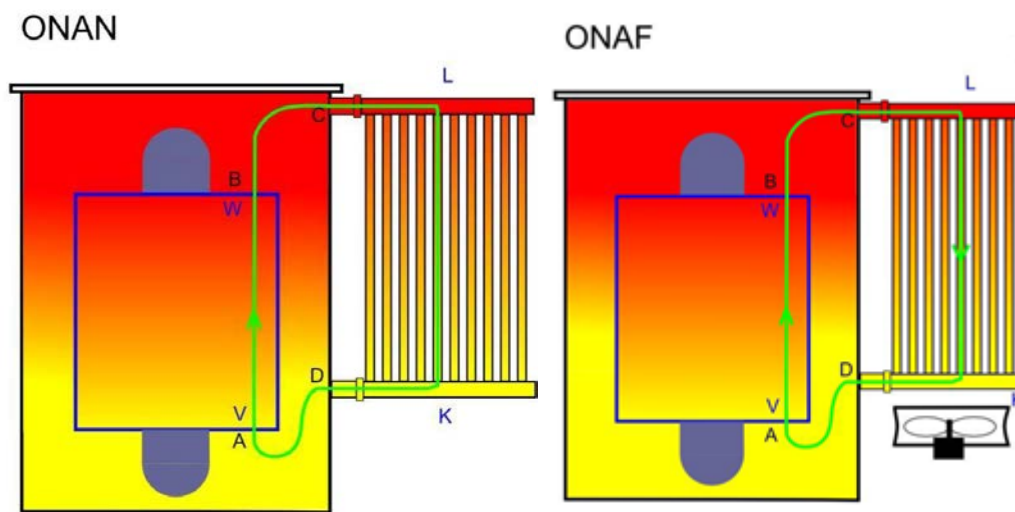
2.3 Jäähdytysmenetelmät

Muuntajien jäähdytystyypit (**Taulukko 1.**) vaihtelevat riippuen muuntajan käyttöympäristöstä. Ulkotilassa jäähdytystehon ei tarvitse olla niin suuri kuin sisätilassa sijaitsevilla muuntajilla. Sisäkäytössä olevalla muuntajalla voi olla keskimäärin 15 °C korkeampi ympäristön lämpötila verrattuna ulkotilan muuntajiin.

Taulukko 1. Tyypillisiä jäähdytystyyppejä.

JÄÄHDYTYSTYYPPI	SELITE
ONAN	Radiaattorijäähdytteinen
ONAF	Tuuletinjäähdytteiset radiaattorit
OFWF	Pakotettu muuntajaöljynkierto pakotetulla vesikiertojäähdytyksellä

ONAN-jäähdytyksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 2. Tämän tyyppisessä jäähdytyksessä jäähdytys tapahtuu radiaattoririvastossa vapaalla muuntajan öljynkierrolla. Muuntajan lämmitessä, lämmin muuntajaöljy pyrkii säiliössä aina ylöspäin, aiheuttaen öljyn virtausta radiaattoreissa alaspäin. ONAF-jäähdytysmenetelmä esitetään kuvassa 2, jossa jäähdytys tapahtuu samaan tapaan kuin ONAN-jäähdytyksessä, mutta lisäksi radiaattoreihin on lisätty pakotettu ilmankierto. Tämän tarkoituksena on saada parempi kylmän ilman vaihtuvuus ja sitä kautta suurempi jäähdytysteho. Pakotettu öljynkierron vesikiertojäähdytys OFWF on jäähdytys, jossa on pakotetun öljyn ja veden kierto. Kylmää vettä pumpataan jäähdyttimeen, jossa se jäähdyttää pumpatun muuntajaöljyn.



Kuva 2. Esimerkkejä muuntajan jäähdytystyypeistä. /9/

3 MUUNTAJAN VANHENEMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

3.1 Paperin vanheneminen

Eristepaperin vanhenemiseen vaikuttavat mm. lämpötila, kosteus, happi ja happamuus /4/. Eristepaperi vanhenee elinkaarensa alussa vain lämpötilan vuoksi. Eristepaperin hajoamistuotteena muodostuu muiden tuotteiden ohella vettä. Muodostunut vesi jää suurimmaksi osaksi paperiin ja muihin selluloosapohjaisiin eristeisiin. Tiedetään, että vesi kiihdyttää huomattavasti paperin vanhenemistä. /4/

Muuntajan elinikään vaikuttavat myös olosuhteet joissa muuntajaa on käytetty. Lämpimissä tai kosteissa olosuhteissa ollut muuntaja ja sen eristeet voivat vanhentua nopeammin ja päinvastoin. Suurin osa tämän tutkimuksen muuntajista on ollut käytössä ulkotilassa. Tutkimuksessa oletettiin, että ulkoilman tai sisäilman lämpötilavaikutukset muuntajan käyntilämpötilaan näkyvät suoraan käämin lämpötilassa.

3.2 Lämpötila

Muuntajan lämpötilalla on suuri vaikutus eristepaperin vanhenemiseen. Lämpötilan vaikutuksesta eristepaperin selluloosan pilkkoutuminen kiihtyy. Selluloosa pilkkoutuu pienemmiksi molekyyleiksi ja sen molekyylipaino alenee. /4/ Lämpötila vaihtelee eri puolilla muuntajan aktiiviosaa. Lämpimimmän kohdan on todettu löytyvän aktiiviosan keskimmäisen pylvään yläpäästä. Eristepaperi vanhenee tästä kohdasta nopeimmin.

Käämin lämpötilan nousun syynä voi olla kuormitustehon kasvu. Kuormitustehon kasvu aiheuttaa muuntajan käämeissä sähkövirran kasvun, jolloin lämpötila ja häviöt käämeissä kasvavat. Tämä näkyy myös käämin eristepapereiden kiihtyvänä vanhenemisena.

3.3 Öljyn kosteus ja epäpuhtaudet

Eristepaperin hajotessa sivutuotteena syntyy myös kosteutta. Hajoamisprosessissa normaaleissa olosuhteissa syntynyt kosteus muodostaa 99 % öljyn kokonaiskosteudesta. Eristepaperin hajoaminen kiihtyy kosteuden vaikutuksesta.

Pitkäaikaiset sähköverkon katkokset aiheuttavat muuntajaöljyn lämpötilan laskua, jolloin myös öljyn tilavuus pienenee. Tällöin on mahdollista, että muuntajan ilmankuivainten kautta pääsee kosteutta muuntajaöljyyn. Muuntajan kuormituksen vaihtelut ja tehopiikit aiheuttavat öljyn lämpenemistä ja kylmenemistä. Kun muuntaja jäähtyy, se ”hengittää” ilmaa sisäänpäin paisuntasäiliöön kiinnitetyn ilmankuivaimen kautta. Jos muuntaja kylmenee nopeasti, ilmankuivain ei ehdi kivaamaan ilmaa tarpeeksi. Ilmankuivain ei siis poista kaikkea kosteutta ilmasta muuntajan hengittäessä. Kesän ja syksyn suuret ilman kosteudet voivat vaikuttaa siihen, että kosteus pääsee öljyyn.

Epäpuhtaudet öljyssä johtuvat yleensä selluloosan ja öljyn kemiallisesta hajoamisesta, korroosiosta tai muista sisäisistä osista irtoavista partikkeleista muuntajassa /2/. Tämä hajoaminen vaikuttaa selkeästi muuntajaöljyn läpilyöntilujuuteen. Muuntajaöljylaboratoriossa mitataan myös öljyn partikkelipitoisuudet öljynäytteenoton yhteydessä.

4 MUUNTAJAN KUNNONVALVONTA

Muuntajan kuntoa valvotaan ottamalla näytteitä öljystä ja eristepaperista, jonka jälkeen Muuntajaöljylaboratorio mittaa näytteistä useita eri ominaisuuksia. Näytteiden mittaukset auttavat tunnistamaan mahdolliset viat tai muutoin huonot eristyksen arvot, joita voidaan mahdollisesti huollon aikana parantaa.

4.1 Muuntajaöljy

4.1.1 Eristeominaisuudet

Muuntajaöljyn yksi tärkeimmistä eristeominaisuuksista on läpilyöntilujuus. Uuden muuntajaöljyn läpilyöntilujuus on vähintään 50/60/70 kV käsittelyn jälkeen jänniteluokasta riippuen (pieni/keski/suuri). Muuntajan ikääntyessä läpilyöntilujuus alenee. Tämä johtuu yleensä öljyyn liuenneista epäpuhtauksista, joista suurin merkitys on kosteudella ja partikkelipitoisuudella, varsinkin jos partikkelit ovat sähköä johtavia. /4/ Johtavat partikkelit kasvattavat öljyn häviökerrointa ja pienentävät läpilyöntilujuutta /2/. Suositeltu läpilyöntilujuuden alaraja on 30/40 kV/2,5 mm riippuen jänniteluokasta. /4/

Ajan kuluessa öljyssä voi ilmetä erilaisia muutoksia. Vesipitoisuus kasvaa, partikkeleiden määrä lisääntyy ja läpilyöntilujuus laskee. Vedellä on kuitenkin vain pieni liukoisuus öljyyn. Vesipitoisuuden kasvu johtuu yleisesti muuntajan eristepaperin vanhenemisesta, muuntajan nopeista lämpötilan muutoksista tai muuntajan tiivisteiden huonosta paikoittaisesta eristävydestä. /2/ Yli 99 % muuntajan kosteudesta on kiinteissä eristeissä ja vain 1 % öljyssä. Suuri öljyn lämpötilamuutos radiaattorissa jäähtyvässä öljyssä voi aiheuttaa veden erkanemista öljystä. Erkaneminen, tai pelkästään veden aktiivisuuden kasvaminen öljyssä, alentaa läpilyöntilujuutta merkittävästi.

Muuntajahuollon yhteydessä tehdään yleensä öljyn käsittely, joka poistaa öljystä kosteutta, kaasuja ja epäpuhtauksia. Tämä on yksi muuntajahuollon suurimmista hyödyistä, koska tällä tavalla saadaan kosteuteen liittyvä kiihtynyt vanheneminen eliminoitua.

4.1.2 Happamuus

Uuden muuntajan öljy ei ole hapanta, mutta muuntajan vanhetessa happamuutta saattaa ilmetä eristeiden hapettuessa. Happamuus määritetään mittaamalla yhden öljygramman sisältämä kaliumhydroksidi milligrammoina. Öljyn happamuusasteen raja on 0,2 ei-inhiboidulla ja 0,08 inhiboidulla öljyllä /4/. Arvojen ylitykset aiheuttavat muuntajassa öljyn sakkautumista, eristepaperin vanhenemisen kiihtymistä, rajapintajännityksen alenemista ja metallien syöpymistä. Tällöin muuntajaöljyä voidaan vielä käsitellä ns. Fullers Earh -menetelmällä, joka antaa muuntajalle lisää elinvuosia. Edes öljynvaihto ei auta poistamaan öljyn happamuutta kokonaan, koska muuntajaeristeet sisältävät happamuutta, tosin kerosiinikuivauksella siitäkin päästään tehokkaasti eroon. Öljynvaihto tai öljynsuodatus antavat muuntajalle lisää elinvuosia. /2/

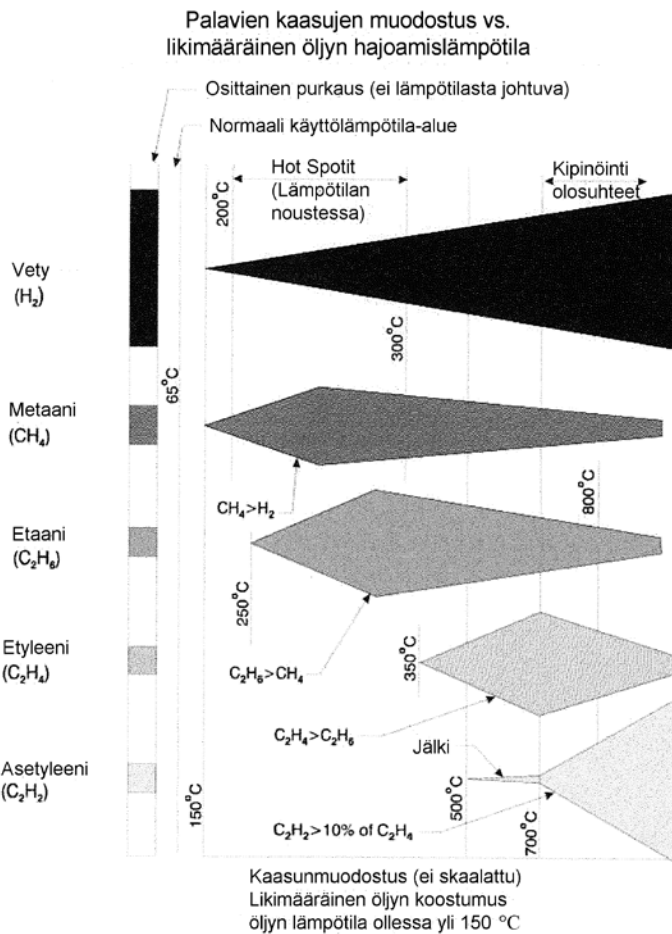
Öljyn vähäinenkin happamuus vähentää sen rajapintajännitystä huomattavasti. Öljyn muuttumista happamaksi voidaan kuitenkin estää lisäämällä öljyn kemiallista inhibiittia /2/. Suomessa inhiboituja öljyjä on käytetty 1960-luvulta lähtien. /4/

4.1.3 Vikakaasuanalyysi

Kuumat pisteet aiheuttavat muuntajaöljyyn kaasupitoisuuksia. Kaasupitoisuudet heikentävät öljyn ominaisuuksia ja vaikuttavat muuntajan elinikään. Kaasuanalyysissä mitataan vety-, happi-, typpi-, metaani-, hiilimonoksidi-, hiilidioksidi-, etyleeni-, etaani- ja asetyleenipitoisuudet muuntajaöljystä. /2/

Öljyn lämpötilan noustessa yli 150 °C:een, öljyyn alkaa muodostua kaasuja. Kaasuanalyysi on hyvä tapa selvittää muuntajan kuntoa. Analyysin avulla voidaan havaita viat jo varhaisessa vaiheessa. Kohonneet vedyn ja metaanin arvot osoittavat muuntajan kuumien pisteiden tuottaman öljyn lämpötilojen nousun. Vian pahentuessa, öljy alkaa hajota ja aiheuttaa muidenkin kaasujen muodostumista. Nopea kaasun kehitys johtaa usein kaasureleen laukeamiseen, jolloin muuntajan suojarieleet tiputtavat muuntajan verkosta.

Pienenergiapurkauksia voi vikatilanteessa tapahtua muuntajan ollessa normaalissa käyttölämpötilassa. Tällöin muodostuu paljon vetyä sekä metaania, etaania, etyleeniä ja asetyleeniä kuvan 3 mukaisesti. Pienenergiapurkaukset voivat myös aiheuttaa kaasuja, jotka voivat aiheuttaa muuntajan tippumisen pois verkosta. Tällöin muuntajan kaasurele laukeaa releeseen kertyneen kaasun vuoksi.



Kuva 3. Palavien kaasujen muodostus eri lämpötiloissa. /8/

4.2 Kiinteät eristeet

Eristeiden kuntoa voidaan valvoa ottamalla eristepaperista näytteitä. Näytteenotto tehdään yleensä huollon yhteydessä samalla kun aktiiviosa on irrotettu ja laskettu lattialle. Muuntajaöljylaboratoriossa mitataan paperieristeestä polymerisointumiste eli paperin DP-luku, joka kertoo paljonko glukoosiyksiköitä on selluloosamo-

lekyylissä. Uuden eristepaperin DP-luku eli polymerisoitumisaste on noin 1200 ja suositeltu alaraja 200. /4/

DP-luku vaihtelee eri puolella aktiiviosaa. Aktiiviosan kuumimmassa kohdassa paperin DP-luku on alempi. Tämä johtuu siitä, että paperi vanhenee nopeammin korkeammassa lämpötilassa. Näyte otetaan muuntajan lämpötilaltaan kuumimpana käyneestä b-vaiheen yläpäästä muuntajan avaavassa huollossa.

Muuntajahuollossa aktiiviosa yleensä kuivataan kerosiiniuunissa ennen säiliöimistä. Näin aktiiviosan eristeet saadaan erittäin kuiviksi ja eristeen vesipitoisuus saadaan laskettua 0,5 %:n alle /4/. Tämä on yksi muuntajahuollon suurimpia etuja, koska tällä tavalla saadaan kosteuteen liittyvä kiihtynyt vanheneminen eliminoidua.

4.3 Kuormitus

Muuntajan kuormituksia valvotaan valvomoista käsin. On erittäin tärkeää, että muuntajan sallittuja kuormitusarvoja ei ylitetä, mikä saattaisi johtaa selluloosan kiihtyneeseen hajoamiseen. Reaktio synnyttää ei-toivottuja kaasuja ja lämpenemistä muuntajassa. Kaiken kaikkiaan tämä taas johtaa muuntajan odotetun eliniän lyhenemiseen.

Muuntajan lämpötiloja valvotaan kuormitusten ohella myös lämpötilamittareilla, lämpötilakuvaajilla ja/tai Pt100 -vastusantureilla tai niiden yhdistelmillä. Lämpötilamittareissa ja kuvaajissa voi myös olla mA-lähetin tai Pt100-anturi, joista voidaan lähettää tai mitata muuntajan lämpötilatietoja valvomoon.

5 LASKENNASSA KÄYTETYT SUUREET JA KAAVAT

5.1 Laskennan peruskaava

Tämän tutkimuksen laskennassa käytetty peruskaava on esitelty IEC 60076-7 -standardissa /3/. Kaavalla lasketaan muuntajan eristepaperin polymerisoitumista tiedetyllä aikavälillä, kun muut arvot tiedetään. /3/ Eristepaperin vanhenemisen peruskaava on esitetty kaavassa 1:

$$\frac{1}{DP_{end}} - \frac{1}{DP_{start}} = A * t * e^{-\frac{E_A}{R * (\theta_{h-piste} + 273)}} \quad , \text{jossa} \quad (1)$$

A	=	Ympäristökerroin
DP _{end}	=	Paperin DP-luku elinkaaren lopussa
DP _{start}	=	Paperin DP-luku elinkaaren alussa
E _A	=	Aktivaatioenergia
R	=	Kaasuvakio
t	=	Aika verkossa tunteina
θ _{h-piste}	=	H-pistelämpötila

Aktivaatioenergia kuvaa muuntajan eristepaperin reagoimista normaaliolosuhteissa ilman ympäristötekijöitä. Mitä suurempi arvo on, sitä hitaammin reaktio etenee. Hidas reaktio tarkoittaa hidasta eristepaperin vanhenemista. Aktivaatioenergian arvo on määritetty olevan 111 kJ/mol, kun kosteus on 3 % (IEC 60076-7). /5/ Tätä arvoa on käytetty tämän tutkimuksen vanhenemismalleissa.

Käämin eristepaperin kosteus vaikuttaa suoraan ympäristökertoimeen eli A-arvoon. A-arvo kasvaa kosteuden noustessa. Uuden muuntajan eristepaperin A-arvo on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu olevan $4,6 * 10^5$ 1/h paperin kosteuden ollessa noin 0,5 %. Muuntajaöljylaboratorion testituloksista on saatu DP-luku, jolla vanhenemismallit on kohdistettu etsimällä sopiva ympäristökerroin. Tässä tutkimuksessa on löydetty laskennassa vanhemmille muuntajille A-arvo $8,0 * 10^8$ 1/h.

Eristepaperin DP-luvun puolittuessa paperin kosteus nousee noin 0,5 %:a. Tieto soveltuu ainoastaan normaaliin kosteuden kasvuun, jossa kosteus muodostuu vain

paperin hajoamisesta. /6/ Tämä on otettu huomioon A-arvon muutoksen laskennassa. Ympäristökerroin on täten simuloitu kasvamaan käänteisesti DP-luvun suhteen.

Tässä tutkimuksessa on käytetty ABB:n Muuntajaöljylaboratorion suorittamia muuntajakohtaisia eristepaperin analyysyjä. Vanhenemismallien kohdistus on tehty käyttäen saatuja tuloksia. DP-luku kuvaa eristepaperin polymerisoitumisastetta näytteenottokohdassa. DP-luvun arvolla 1200 muuntajan elinikä on määritelty olevan alussa ja kun DP-luku on 200 tai alle, muuntajan suositeltu elinikä on loppussa. Välillä 200–1200 suoritetaan laskenta, jolla saadaan muuntajan eristepaperin jäljellä oleva elinaika.

Yhtenä komponenttina laskennassa esiintyy kaasuvakio R, jonka arvo on 8,314 J/K/mol. Kaasuvakio on yleinen kokeellisesti määritetty luonnonvakio, joka on välttämätön osa laskentaa. /6/

5.2 Käämin H-pistelämpötila

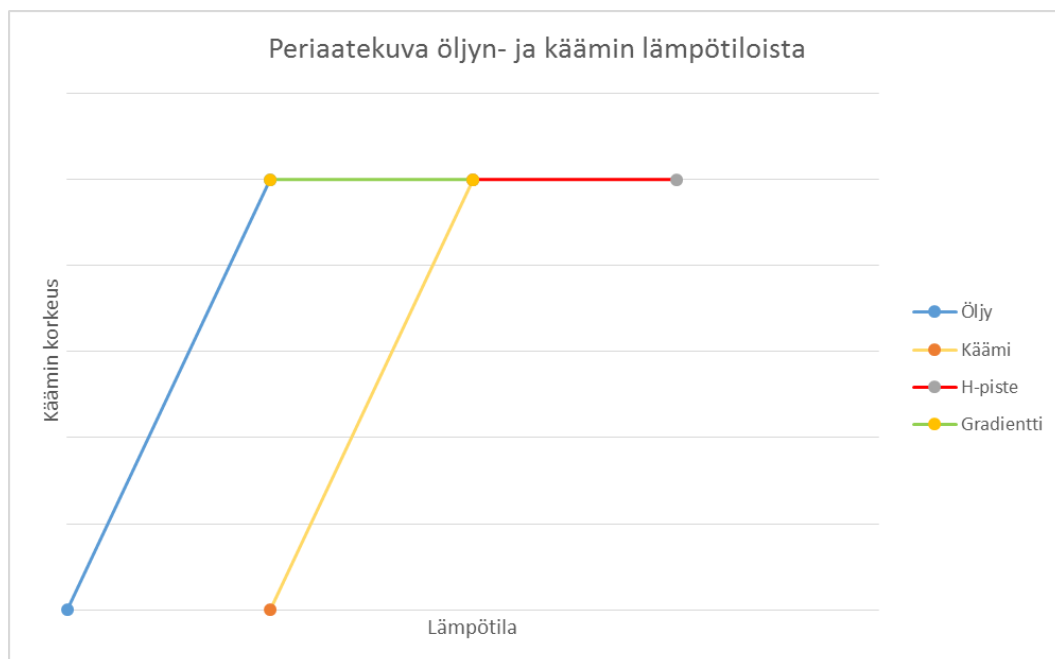
Käämin absoluuttisen lämpötilan laskennassa, kaavassa 2, otetaan huomioon muuntajan kuormitukset, ympäristön lämpötila, vyyhtihäviöt, korjauskertoimet ja käämin H-pistekerroin. H-pisteellä tarkoitetaan aktiiviosan kuuminta kohtaa. H-pisteen lämpötila lasketaan kaavan 2 mukaisesti.

$$\theta_{H-piste} = \theta_{Amb} + \left(\frac{P_0 + P_K * k^2}{P_K} \right)^x * \Delta\theta_{Hö} + H * k^y * g, \text{ jossa} \quad (2)$$

g	=	Öljyn ja käämin välinen lämpötilagradientti
H	=	H-pistekerroin
k	=	Kuormitussuhde
P ₀	=	Tyhjäkäyntihäviöt
P _K	=	Virtalämpöhäviöt / vyyhtihäviöt
x	=	Korjauskerroin
y	=	Korjauskerroin
θ _{amb}	=	Ympäristön lämpötila
θ _{H-piste}	=	H-pistelämpötila
Δθ _{Hö}	=	Huippuöljyn lämpenemä

Ilmatieteen laitoksen lämpötilatietoja käyttäen on saatu muuntajalle oikea lähtölämpötila vanhenemismallin laskennassa, mikä näkyy suoraan käämin lämpötilassa. Tarkkoja lämpötiloja käytetään, kun lasketaan muuntajakohtaista elinkaarta. Tutkimuksen vanhenemismalleissa käytetään asema- ja generaattorimuuntajille kuitenkin yhteistä 5 °C ulkolämpötilakeskiarvoa. On kuitenkin mahdollista laskea muuntajakohtaiset elinkaaret halutulla ympäristön lämpötilalla. Vain yksi ympäristön lämpötilan keskiarvo ei antaisi yhdelle muuntajalle tarpeeksi tarkkaa laskennallista käämin lämpötilan keskiarvoa.

Tyhjäkäyntiteho yhtenä osakomponenttina määrittää muuntajalle käyntilämpötilan ilman kuormitusta. Huippuöljyn lämpenemä on täydellä teholla laskettu lämpötilamuutos muuntajan yläosassa, kun sitä verrataan sähköttömänä olevaan muuntajaan.



Kuva 4. Periaatekuva öljyn ja käämin lämpötiloista.

Lämpö pyrkii aina nousemaan ylöspäin muuntajan säiliössä (**Kuva 4.**). Tästä syystä muuntajasäiliön pohjalla öljyn ja käämin lämpötilat on viileämmät, kun sitä verrataan huippuöljyn lämpötilaan. Gradientti g on lämpötilamuutos öljyn ja käämin lämpötilan välillä. Tämä on saatu alkuperäisistä muuntajalaskelmista. H-

pistekerroin on yhtenä osakomponenttina, jossa lasketaan lämpötilamuutos käämin lämpötilan ja H-pistelämpötilan välillä. Absoluuttisen kuumimman kohdan lämpötila määritellään H-pistekertoimella, joka on laskettu tätä tutkimusta varten muuntajatehtaan laskemia vyyhtihäviöitä hyväksi käyttäen. Korjauskertoimet on saatu ABB Special Transformers -yksikön laskentaohjelmasta.

H-pistekerroin on laskettu kaavalla 3 /10/. Vyyhtikohtaisten virtalämpöhäviöiden suurin arvo jaetaan sen keskiarvolla ja korotetaan 0,65 tai 0,7 tai 1 potenssiin riippuen käytettävästä jäähdytystavasta. Potenssia 0,65 käytetään vesikiertojäähdytteiselle, 0,7 tuuletinjäähdytteiselle ja 1,0 radiaattorijäähdytteiselle muuntajalle.

$$H = \frac{P_{Kmax}^{0,65 \text{ tai } 0,7 \text{ tai } 1,0}}{P_{Kav}}, \text{ jossa} \quad (3)$$

P_{Kav} = Virtalämpöhäviöiden / vyyhtihäviöiden keskiarvo

P_{Kmax} = Virtalämpöhäviöiden / vyyhtihäviöiden maksimiarvo

Vyyhtikohtaisten häviöiden laskennassa on hyödynnetty ABB:n Special Transformersin käyttämää laskentaohjelmaa. Vyyhtikohtaiset häviöt perustuvat alkupe- räisiin muuntajan aktiiviosan laskennassa käytettyihin jännite-etäisyyksiin ja muuntajan arvokilpitietoihin, josta löytyvät mm. muuntajan jännitteen ja tehon nimellisarvot.

6 TUTKIMUKSEN KOHTEENA OLEVAT MUUNTAJAT

6.1 Käyttöluokitus

Tutkimuksen aluksi tehtiin muuntajakohtaiset asiakaskyselyt, jotka kohdennettiin huollossa käyneisiin muuntajiin. Kyselyitä lähetettiin noin 40 kappaletta. Tutkimukseen osallistui 16 muuntajaa.

Tutkimuksessa mukana olleet muuntajat jaettiin kolmeen eri käyttöluokkaan, jotka ovat käytöltään täysin erityyppisiä. Nämä luokat olivat asemamuuntajat, generaattorimuuntajat ja teollisuusmuuntajat. Erityyppisten käyttöjen vanhenemismallien oletettiin lopuksi näyttävän pientä poikkeamaa toisiinsa verrattuna.

6.2 Muuntajan käyttöluokat

Asemamuuntajien luokassa muuntajien käytöt ovat yleisesti hitaasti vaihtelevia. Hidasta muutosta tapahtuu koko päivän ajan niin, että yöllä käyttöaste on alhainen ja aamusta päivään mennessä saavutetaan suurin käyttöaste. Yleisesti kuormitus nousee iän myötä kasvavan energian tarpeen vuoksi. Kuormitussuhteet ovat keskimäärin 0,39. Tutkimuksessa oli mukana 6 asemamuuntajaa.

Generaattorimuuntajien luokassa muuntajien käytöt ovat yleensä tasaisia. Generaattorit siis normaalitapauksessa otetaan käyttöön ja annetaan pyöriä seuraavaan huoltoseisokkiin asti samalla syöttöteholla. Huoltoseisokki kestää noin 1–2 kuukautta. Kuormitussuhteet ovat keskimäärin 0,65. Tutkimuksessa oli mukana 6 generaattorimuuntajaa.

Teollisuusmuuntajien luokassa muuntajien käytöt ovat yleensä epätasaisia ja sisältävät paljon piikkejä. Teollisuudessa käytetään paljon isoja moottoreita, jotka käynnistyessään ottavat suuren käynnistysvirran, noin 7 kertaa nimellisvirta. Teollisuudessa käytetään myös uunimuuntajia, joissa muuntajia käytetään oikosulussa. Tämän luokan muuntajien epätasainen käyttö vaikuttaa muuntajan nopean lämpenemisen ja jäähtymisen kautta eristepapereiden elinikään. Kuormitussuhteet ovat keskimäärin 0,62. Tutkimuksessa oli mukana 4 teollisuusmuuntajaa.

6.3 Muuntajan käyttötiedot

Tutkimuksessa mukana olevista muuntajista kerättiin saatavissa olevia tietoja, joiden pohjalta tutkimusta on järkevää tehdä. Tietoja kerättiin arvokilpitiedoista, asiakkaalta saaduista kuormitustiedoista, muuntajaöljylaboratorion testituloksista, koekentän muuntajakohtaisista koestuksista, Ilmatieteen laitoksen sään keskiarvoista paikkakunnittain ja muuntajatuotannon alkuperäisistä laskelmista.

Tutkimuksen kannalta tärkeimpinä tietoina on pidetty muuntajien kuormitustietoja. Kuormitustietoja hyväksi käyttäen pyrittiin saamaan aikaiseksi tarkemmat vanhenemismallit. Kerätyistä tiedoista saatiin selville kuormitus tiedetyllä ajanjaksolla aina muuntajan eliniän alusta asti. Kuormitustieto on yhtenä osana laskennassa, jossa lasketaan muuntajan käämien kuumimman pisteen absoluuttista lämpötilaa. Tutkimuksessa mukana olevien muuntajien kuormitussuhteet vaihtelivat koko skaalalla 0,2 kuormitussuhteesta aina 1,0 asti.

Kuormitusmäärät vaihtelivat vuodenaikojen mukaan kaikissa käyttöluokissa. Asemamuuntajissa on normaalisti kesällä pienemmät kuormitukset ja talveen mentäessä käyttö kasvaa. Generaattorimuuntajien ja teollisuusmuuntajien osalta käytöt olivat melko tasaisia ympäri vuoden. Kesäkaudella generaattorimuuntajat olivat poissa käytöstä noin kuukauden verran huoltoseisokkien takia. Nimellistehoiltaan tutkimukseen osallistuneet muuntajat olivat 10–210 MVA. Asemamuuntajat olivat 10–50 MVA, generaattorimuuntajat 15–210 MVA ja teollisuusmuuntajat 32–65 MVA.

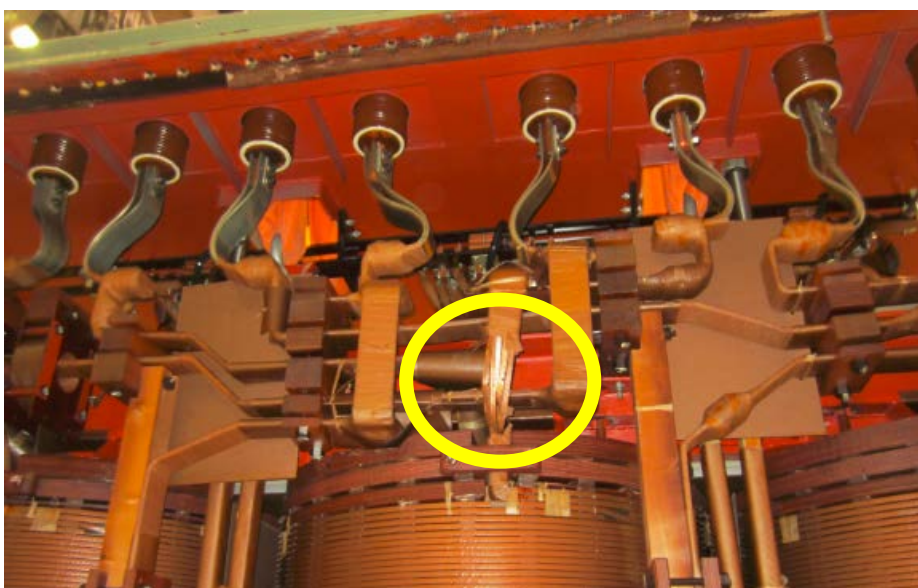
Esimerkiksi arvokilpitiedoista on kerätty nimellisteho, jolla voidaan määrittellä muuntajan kuormitussuhde kun sitä verrataan asiakkaalta saatuihin kuormitusarvoihin. Arvokilvestä saadaan myös jäähdystyypit, jotka määrittelevät yhtenä osana muuntajan jäähtytyksen vaikutusta käämin lämpötiloihin.

Osasta muuntajista on voitu kerätä koekentän lämpenemiskokeet, jotka mahdollistivat todellisten muuntajan lämpenemisarvojen löytymisen kyseisille muuntajille. Lämpenemiskokeet ovat auttaneet todentamaan vanhenemismallin oikeellisuutta

käämin lämpötilan kannalta. Yhdestäkään muuntajasta ei ollut saatavilla käämin tai öljyn käytönaikaisia lämpötilatietoja.

Tässä tutkimuksessa käytetään Ilmatieteen laitoksen lämpötilatietoja, jotka perustuvat paikkakuntaakohtaisiin keskiarvoihin. Yleisesti muuntajien kuormitukset vaihtelevat vuodenaikojen mukaan. Muuntajan kuormitus voi siis olla talvella suuri ja kesällä pienempi samalla kun ympäristön lämpötila on talvella alhainen ja kesällä korkeampi. Ulkolämpötilan vaikutukset näkyvät epäsuorasti muuntajan öljyn lämpötilassa, mikä lopulta näkyy myös käämien lämpötilassa.

Muuntajista saadut DP-luvut vaihtelivat 312–1073 yksikön välillä. DP-lukuja oli yhteensä 16 arvoa. Näytteenottoaika voi muuttaa tulosta oleellisesti lämpötilaerojen vuoksi. On todettu, että kuumiin kohti löytyy keskipylvään b-vaiheen yläpäästä (**Kuva 5**). Tästä syystä näyte otetaan yleensä b-vaiheen yläpäästä.



Kuva 5. Paperin näytteenottoaika. /8/

6.4 Alkuperäiset laskelmat

Kaikilta Vaasan muuntajatehtaan valmistamilta muuntajilta on saatavilla muuntajatuotannon alkuperäiset laskelmat. Laskelmista selviävät muuntajakohtaiset tyh-

jäkäyntitehot, huippuöljyn lämpenemät ja gradientit. Muiden kuin ABB:n valmistamien muuntajien tiedoissa käytettiin samantyyppisen muuntajan laskelmatietoja.

Tyhjäkäyntitehot vaihtelivat muuntajan nimellistehon mukaan. Suuren nimellistehon muuntajissa on suurempi tyhjäkäynti, kun verrataan pienemmän tehon muuntajaan. Huippuöljyn lämpenemät vaihtelivat 49,7–56 °C:n välillä riippumatta muuntajan nimellistehosta. Lämpötilagradientit vaihtelivat 11–23 °C välillä.

6.5 Jäähdytys

Kaikista tutkimukseen osallistuneista muuntajista kerättiin tietoa jäähdytysmenetelmistä. Tiedot auttoivat määrittämään muuntajan käämin lämpötiloja. Jäähdytystyypeillä määritettiin oikeat H-pistelämpötilan korjauskertoimet ja H-pistekerroin.

Radiaattorijäähdytteinen jäähdytystyyppi on kaikkein yleisin asemamuuntajilla, joilla kuormitukset pysyvät suhteellisen pieninä. Tuuletinjäähdytteiset radiaattorit ovat yleisimpiä generaattorikäytöissä, jossa tarvitaan vähän enemmän jäähdytystehoa vaativampien kuormitusten vuoksi. Pakotettu öljynkierron vesikiertojäähdytys on yleisin teollisuusmuuntajakäytöissä, jossa tarvitaan suurta jäähdytystehoa.

7 TULOSTEN SOVITUS JA ANALYSOINTI

7.1 Mallin perusteet

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää ja esitellä uusi vanhenemismalli, joka antaa muuntajille parempaa elinikäennustettavuutta. Vanhenemismallin perusteena on mallintaa paperin DP-lukua halutulla kuormitussuhteella elinkaaren alusta loppuun asti. Tähän on päästy laskemalla keskimääräinen käämin kuumimman kohdan lämpötila kuormitussuhteen ollessa väliltä 0...1.

Ympäristökerroin A määrittää osaksi vanhenemismallin kaarevaa muotoa. Toinen käyrän muotoa määrittävä tekijä on aktivaatioenergia, joka on muissa tutkimuksissa osoitettu olevan 111 kJ/mol /5/. Tämä arvo kuvaa lineaarisesti normaalia vanhenemistä ilman ympäristötekijöitä.

Taulukossa 2 nähtäviä keskimääräisiä käämin kuumimman pisteen lämpötiloja arvoja on käytetty vanhenemismallin laskennassa.

7.2 H-pistelämpötilat

Kuormitus vaikuttaa muuntajan vyyhtihäviöihin ja sitä kautta H-pisteen lämpötilaan. Lämpötila nousee neliöllisesti kuormituksen suhteen. IEC 60076-2 -standardi määrittää muuntajille kuumimman kohdan. Suurin suositeltu arvo on 120 °C, tällöin muuntajan öljyn lämpötila muuntajan kannen alla on maksimissaan 105 °C. Taulukossa 2 huomataan, kuinka lisäjähdytys vaikuttaa käämin H-pisteen lämpötiloihin laskevasti. Jähdytyksen merkitys kasvaa suuremmaksi kuormituksen ja lämpötilan noustessa. Suunnittelussa on selkeästi otettu huomioon teollisuusmuuntajille ominainen ympäristölämpötila 20 °C.

Vanhenemismallin mallinnuksessa on käytetty yleisiä ympäristön keskilämpötiloja. Ulkotilassa oleville muuntajille lämpötilan yleinen keskiarvo on noin 5 °C ja sisäkäytössä oleville noin 20 °C. Periaatteessa kuitenkin yksittäisille muuntajille voidaan antaa omat käämin absoluuttisen lämpötilan kuvaajat ja vanhenemismallit, jotka perustuvat tämän tutkimuksen tulosten keskiarvoihin halutulla muuntajan kuormituksella, ympäristön lämpötilalla ja jähdytystyypillä.

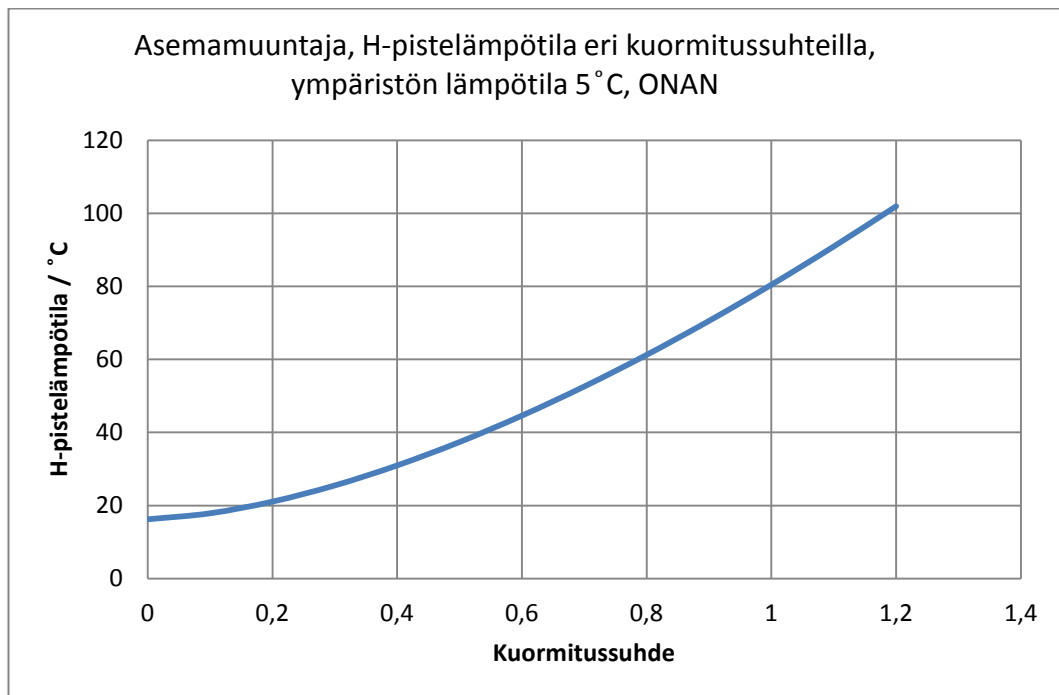
Taulukko 2. Muuntajien lämpötilataulukko.

	ONAF	OFWF	ONAF	ONAN	ONAN	ONAN
Kuormitus	Gen.muun.	Teollisuusm.	Asemam.	Gen.muun	Teollisuusm.	Asemam.
	$\theta_{amb} 5\text{ °C}$	$\theta_{amb} 20\text{ °C}$	$\theta_{amb} 5\text{ °C}$	$\theta_{amb} 5\text{ °C}$	$\theta_{amb} 20\text{ °C}$	$\theta_{amb} 5\text{ °C}$
0	16,3	24,2	16,7	16,3	24,2	16,7
0,1	18,1	25,6	18,2	18,3	25,7	18,3
0,2	21,4	28,3	21,3	21,9	28,5	21,6
0,3	26,1	31,9	25,6	26,9	32,3	26,1
0,4	31,8	36,3	31,0	33,0	36,8	31,7
0,5	38,5	41,4	37,3	40,1	42,0	38,3
0,6	45,9	47,1	44,5	48,0	47,9	45,7
0,7	54,2	53,3	52,4	56,8	54,2	53,9
0,8	63,2	59,9	61,0	66,2	61,1	62,8
0,9	72,8	67,1	70,3	76,3	68,4	72,4
1	83,0	74,6	80,1	87,0	76,2	82,6
1,1	93,8	82,6	90,6	98,4	84,3	93,4
1,2	105,1	90,9	101,6	110,3	92,9	104,7

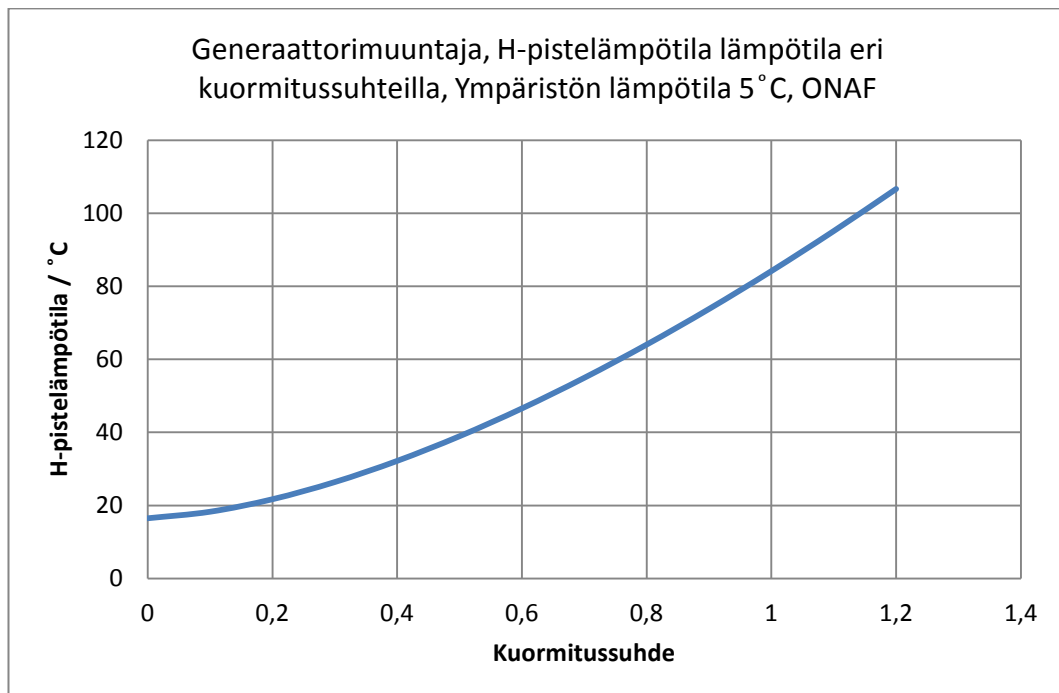
Asemamuuntajien luokassa jäähdytystavaksi on valittu tälle luokalle tyypillinen ONAN-radiaattori-vapaailmajäähdytys. Kuvassa 6 huomataan, miten H-pistelämpötila kasvaa kuormituksen funktiona. Tällöin käämiä ympäröivä öljy lämpenee kuormituksen kasvaessa. Sama ilmiö toistuu myös generaattori- ja teollisuusmuuntajissa (**Kuvat 7. ja 8.**).

Generaattorimuuntajien luokassa jäähdytystavaksi on valittu ONAF-tuuletinjäähdytteiset radiaattorit, jotka esitellään kuvassa 7. Lämpötilat ovat hyvin samankaltaisia kuin asemamuuntajien luokassa (**Kuva 6.**). Lämpötila nousee neliöllisesti kuormituksen suhteen.

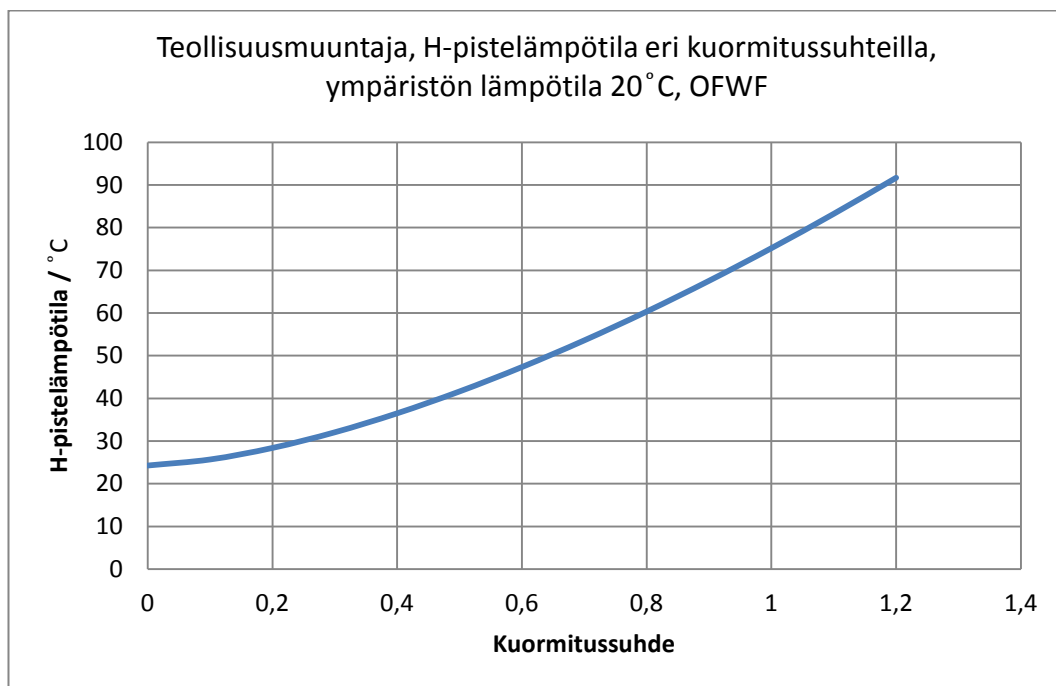
Teollisuusmuuntajien luokassa (**Kuva 8.**) jäähdytystavaksi on valittu teollisuusmuuntajilla tyypillisesti käytössä oleva OFWF-vesikiertojäähdytys öljyn- ja veden pakkokierrolla. Tässäkin tapauksessa lämpötilan huomataan nousevan neliöllisesti kuormituksen suhteen. Tyhjäkäynnissä lämpötila on noin 25 °C. Tämä siksi, että ympäristön lämpötila sisätilassa on oletettu olevan 20 °C.



Kuva 6. Asemamuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.



Kuva 7. Generaattorimuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.



Kuva 8. Teollisuusmuuntajan H-pisteen lämpötila kuormitussuhteen funktiona.

7.3 Vanhenemismallit

Vanhenemismallit näyttävät muuntajan laskennallisen vanhenemisen DP-luvun suhteen valitulla kuormitussuhteella. Muuntajan eliniän on oletettu alkavan DP-luvun ollessa 1200 ja suositellaan loppuvan 200 kohdalla. Kaikilla muuntajaluokilla eristepaperin oletettu kosteus on pieni, kun muuntaja on lähtenyt tehtaalta. Eristepaperin vanheneminen onkin aluksi hidasta. Ajan kuluessa kosteuden tiedetään lisääntyvän ja eristepaperin vanheneminen nopeutuu. DP-luvun lähestyessä nollaa DP-luku pienenee suhteessa hitaammin, koska vaaditaan useampia ja useampia selluloosan pilkkoutumisia, jotta DP-luku lähenisi nollaa.

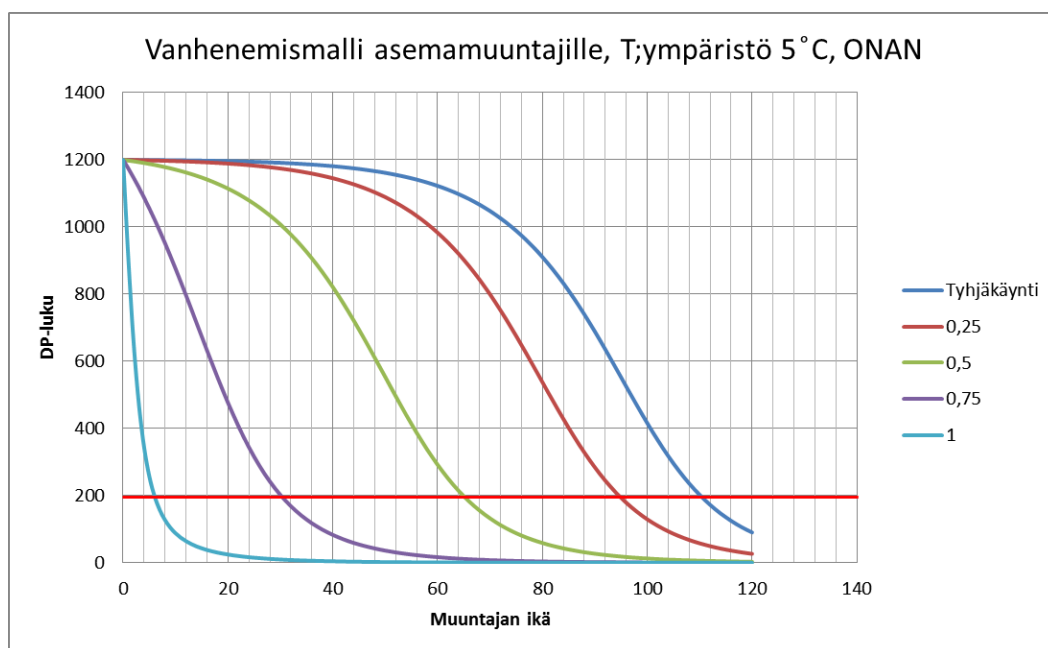
Vanhenemismallia käytettäessä tarvitaan tarkat tiedot kuormituksesta, käyttökohteesta ja ympäristön lämpötilasta. Näiden arvojen tulee olla hyvin tarkkoja, koska pienikin muutos aiheuttaa epätarkkuutta tuloksiin. Data on sovitettu käyttämällä luokittain muuntajien laskennallista halutun kuormituksen lämpötilaa.

Kuvassa 9 nähdään asemamuuntajien keskimääräisten kuormitusten vaikutukset muuntajan eristepaperin elinikäennusteeseen. Jäähdytyksenä asemamuuntajan

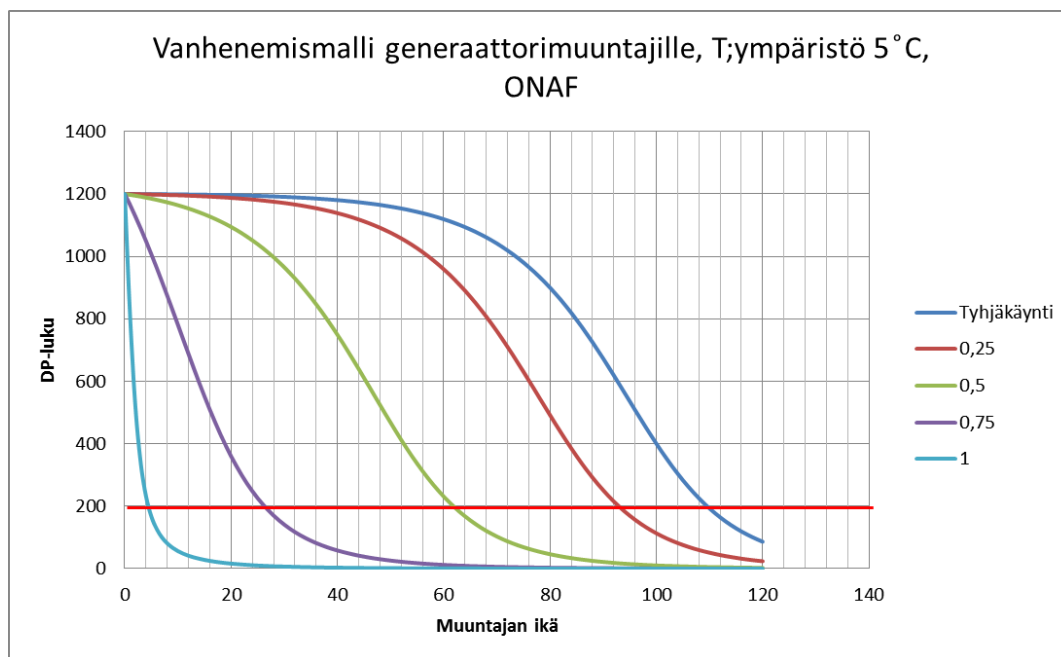
mallissa toimii ONAN-vapaailmajäähdytteiset radiaattorit. Ympäristön lämpötila on 5 °C.

Kuvassa 10 nähdään generaattorimuuntajien keskimääräisten kuormitusten vaikutukset muuntajan eristepaperin elinikäennusteeseen. Jäähdytyksenä generaattorimuuntajien mallissa toimii ONAF-tuuletinjäähdytteiset radiaattorit. Ympäristön lämpötila on 5 °C.

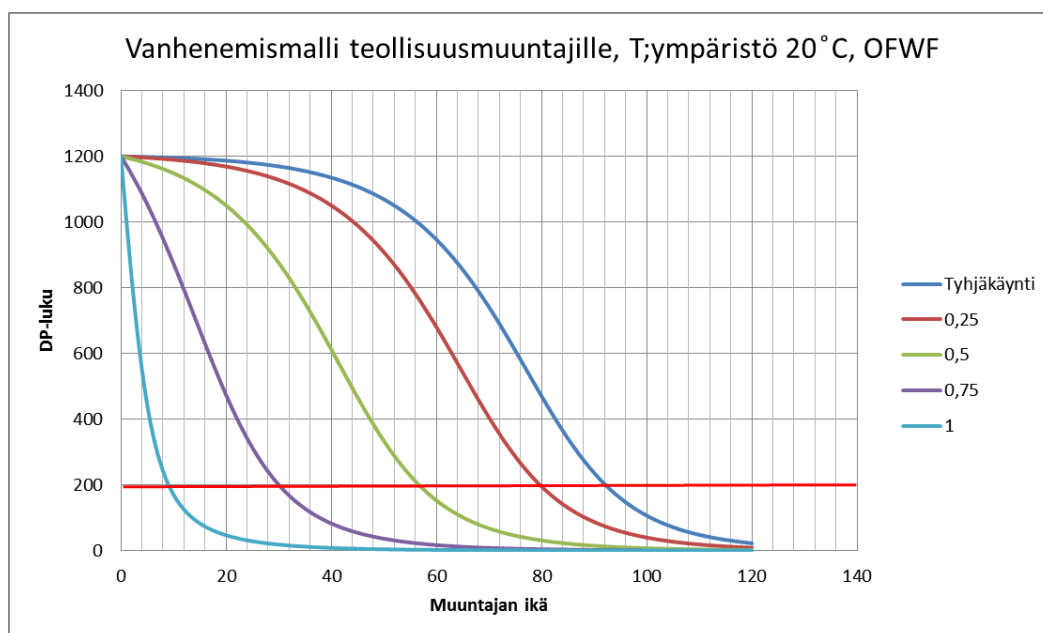
Kuvassa 11 nähdään teollisuusmuuntajien keskimääräisten kuormitussuhteiden vaikutukset muuntajan eristepaperin elinikäennusteeseen. Jäähdytyksenä teollisuusmuuntajien vanhenemismallissa toimii tässä luokassa tyypillinen OFWF-vesijäähdytys, jossa vesi- ja öljykierto on toteutettu pumpuilla. Ympäristön lämpötila on 20 °C.



Kuva 9. Vanhenemismalli asemamuuntajille eri kuormitussuhteilla.



Kuva 10. Vanhenemismalli generaattorimuuntajille eri kuormitussuhteilla.



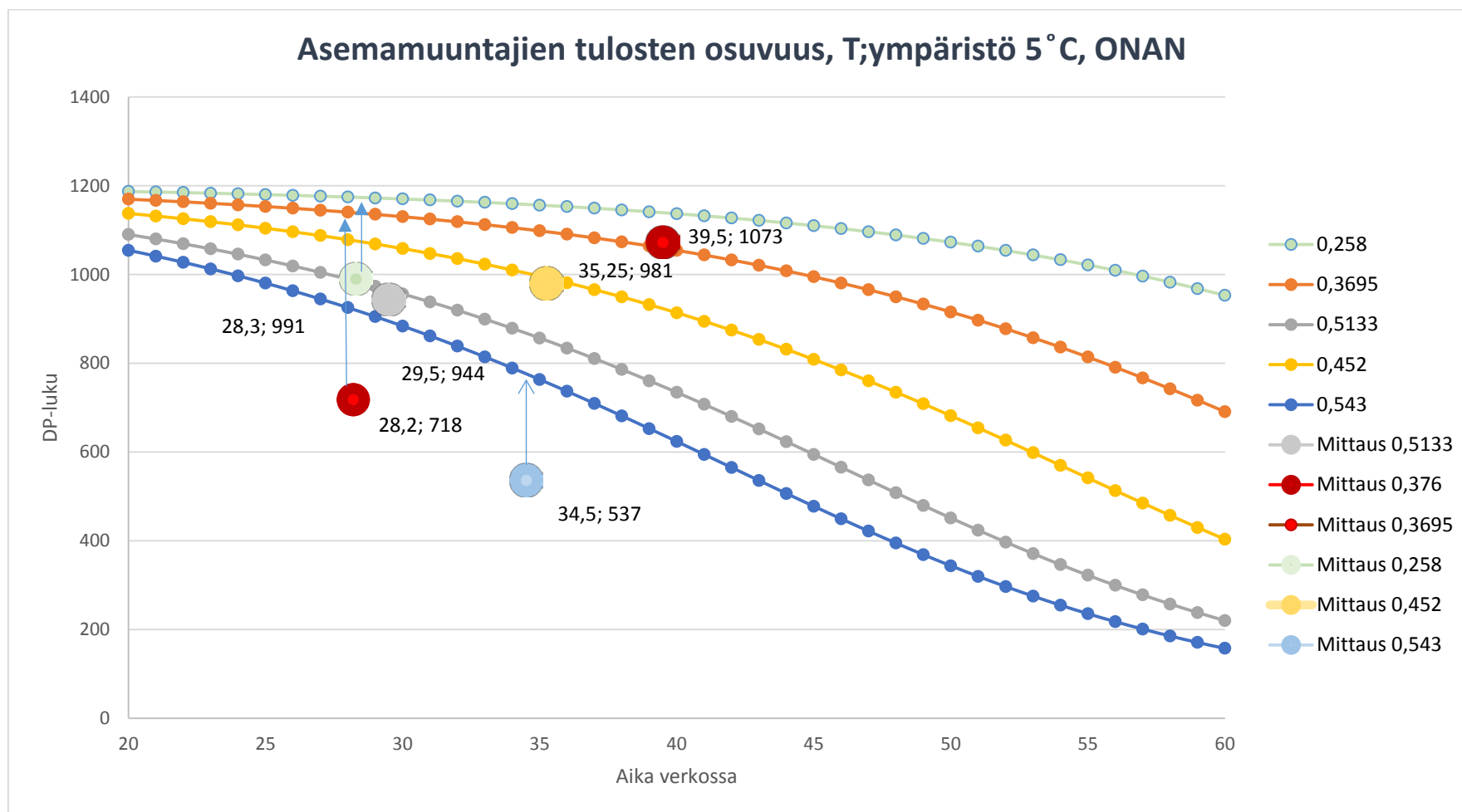
Kuva 11. Vanhenemismalli teollisuusmuuntajille eri kuormitussuhteilla.

Esimerkiksi kuormitussuhteella 0,5 teollisuus- ja generaattorimuuntajat voivat kestää noin 40 vuotta kauemmin verrattaessa kuormitussuhteella 0,75 olevaan muuntajaan, mutta arvolla 0,25 muuntaja voi kestää 30 vuotta kauemmin, noin

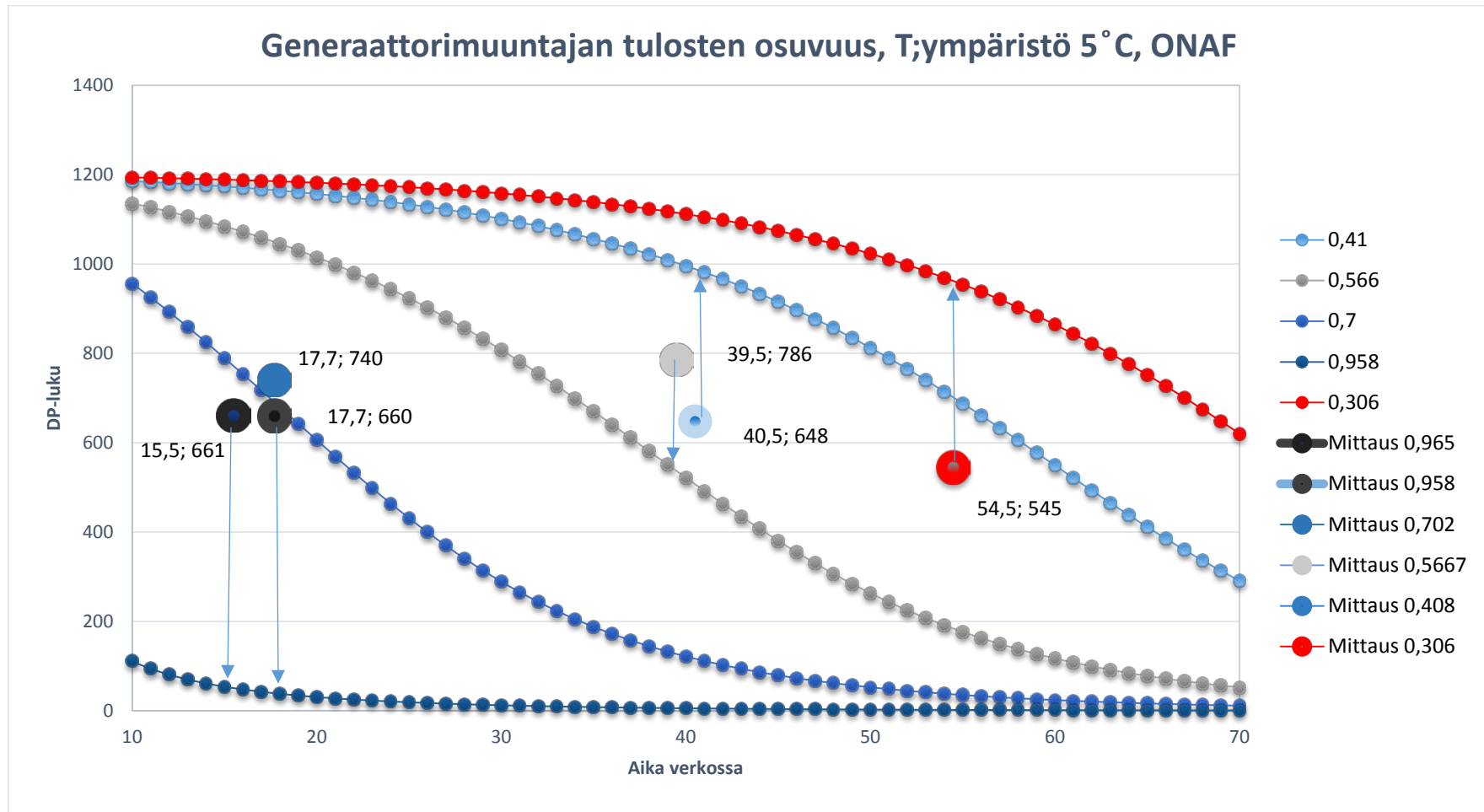
120 vuoden ikään asti. Tämä kuitenkin tapahtuu vain normaalissa muuntajan eriste-paperin vanhenemisessä ilman muita tekijöitä.

7.4 Tulosten osuvuuden arviointi

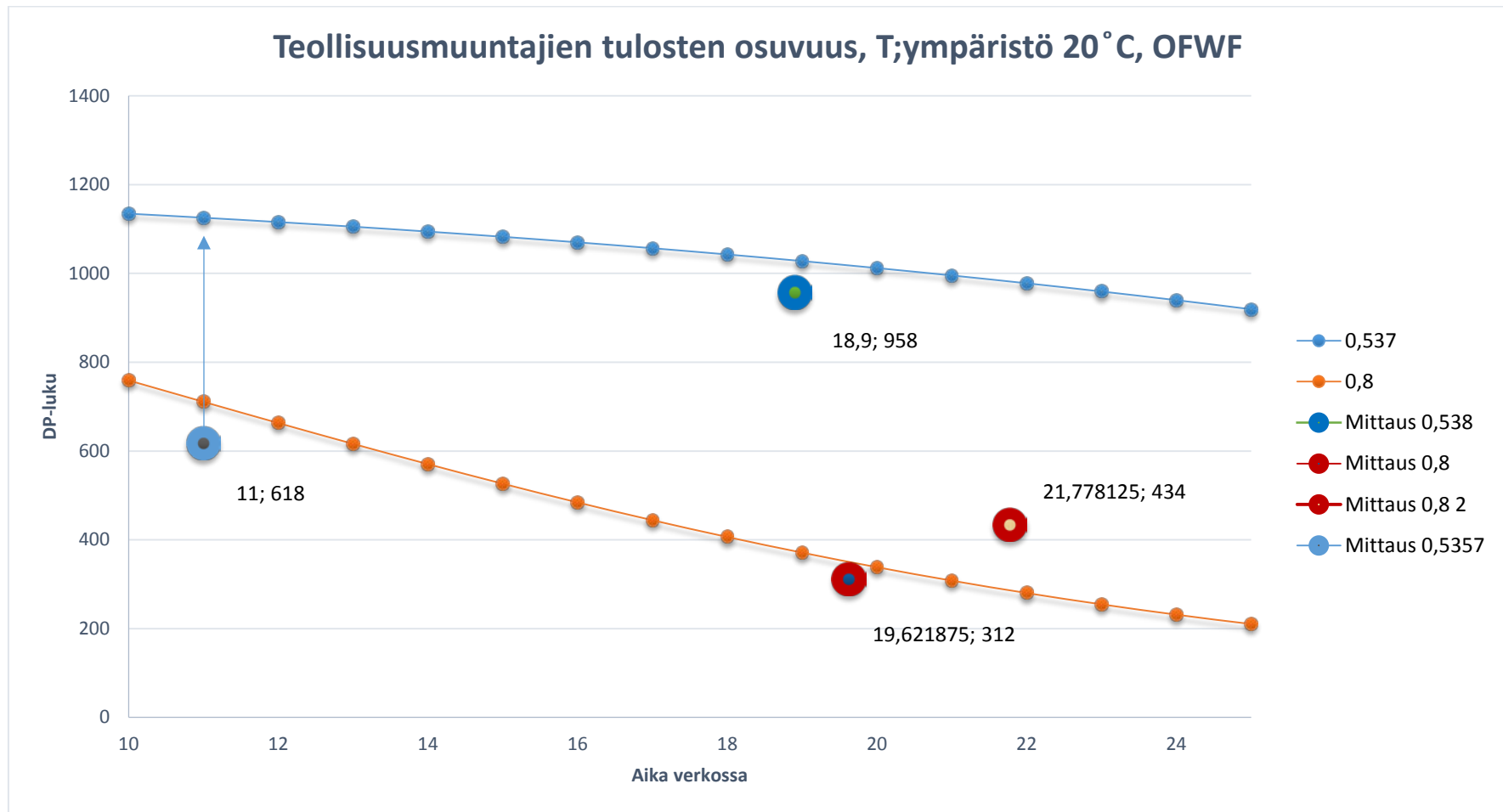
Kuvissa 12, 13 ja 14 esitellään tuloksien osuvuuksia. Sama väri käyrällä ja pisteillä tarkoittaa samaa kuormitusta. Pisteiden tulisi olla mahdollisimman lähellä samanväristä käyrää. Tulosten osuvuus kuudella muuntajista on hyvä. Näillä muuntajan elinikäennusteen virhemarginaali on alle 3 vuotta. Generaattorikäytössä olevien muuntajien tulosten kuitenkin huomataan olevan epä johdonmukaisia.



Kuva 12. Asemamuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.



Kuva 13. Generaattorimuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.



Kuva 14. Teollisuusmuuntajien tulosten osuvuus vanhenemismalliin.

7.5 Vanhenemismallien virhelähteet

Tutkimukseen osallistuvien muuntajien määrä vaikuttaa oleellisesti vanhenemismallin tarkkuuteen. Puolet muuntajista ei sopinut uuteen malliin. Tutkimukseen olisi tämän vuoksi tarvittu vähintään kaksinkertainen määrä muuntajia. Muuntajista tulisi olla saatavilla myös todelliset kuormitus- ja lämpötilatiedot. Tässä tutkimuksessa kuormitustiedot on kerätty muuntajien käyttäjiltä. Tietojen oikeellisuus on siis hyvin epävarmaa.

Puutteena on myös tarkemman ympäristökertoimen puuttuminen. Periaatteessa se tarkoittaa, että tietoja muuntajien eristepaperin kosteuksista ja sen vaikutuksista ympäristökertoimeen ei ole. Tässä tutkimuksessa ympäristökerroin A on sovitettu mitattujen DP-lukujen avulla. Vanhenemismalli ei myöskään toiminut täydellä kuormituksella oleviin muuntajiin. Malli antaa liian lyhyen eliniän täyden kuormitussuhteen muuntajille.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli käyttö- ja tyyppitietojen perusteella kehittää uudet vanhenemismallit, jotka soveltuvat yleisimmille muuntajatyypeille ja -käytöille. Muuntajan käyttö-, DP- ja muut lähtöarvotiedot antoivat hyvät edellytykset tälle tutkimukselle ja vanhenemismallien laskennalle. Tutkimus koostui kolmesta vaiheesta, jossa ensimmäisenä tehtiin asiakaskyselyt, seuraavana vanhenemismallien laskelmat ja lopuksi johtopäätökset. Tutkimuksesta tulevat hyötymään eniten Transformer Servicen asiakkaat, jotka tarvitsevat omalle muuntajalleen elinikäenusteen.

Lopputuloksessa ei päästy halutulle laskentatarkkuudelle johtuen monista eri tekijöistä. Mitattujen DP-lukujen poikkeavuus vaihteli verrattaessa laskennallisiin tuloksiin. Tutkimukseen osallistuneista 16 muuntajasta 10 muuntajaa ei sopinut vanhenemismalliin. Tästä syystä tutkimukseen osallistuvia muuntajia olisi tarvittu enemmän. Vanhenemismalleja voitaisiin parantaa keräämällä muuntajista kuormituksen ohella käämin lämpötilatietoja. Jatkotutkimuksia varten tulisi myös selvittää kosteuden vaikutukset ympäristökertoimeen.

LÄHTEET

- /1/ ABB Oy. 2010. Transformer Handbook 3rd edition. 103–112, 164–165.
- /2/ ABB Oy. 2007. Service Handbook for Transformers 3rd edition. 79, 94, 95, 118, 120.
- /3/ IEC 60076-7. 2014. Loading guide for oil-immersed power transformers. 87.
- /4/ Ågren, P. 2015. Tuotepäällikkö. ABB Oy. Haastattelu 30.12.2015.
- /5/ CIGRE. 2007. Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, CIGRE Brochure 323. Task Force D1.01.10. 34.
- /6/ IEE PES. 2013. Transaction on Power Delivery, TPWRD-01348-2012.R3. 3, 2.
- /7/ DuPont. 2010. NOMEX® Characteristics. Viitattu 20.12.2015.
http://www2.dupont.com/ReliatranV3/en_RU/products/Nomex/More/Nomex_features.html.
- /8/ ABB Oy. 2015. Muuntajahuolto.
- /9/ Juhola, M. 2016. Tuotekehitysinsinööri. ABB Oy. Email 5.1.2016.
- /10/ Nordman, H.2015. Pääasiantuntija. ABB Oy. Haastattelu 2/2015.

Lähtö- ja laskelma-arvoja 1

Käyttö	Nro.	Nimellisteho MVA	Kuormitussuhteet					Aika verkossa t / a	Mitattu DP-luku	Laskettu DP-luku	Ympäristön lämpötila, θ_{amb} / °C				
			k / Talvi	k / Kevä	k / Kesä	k / Syksy	k / Karvo				Talvi	Kevät	Kesä	Syksy	Karvo
Generaattorim.	G1	180	1,00	1,00	1,00	0,93	0,93	15,5	661	48	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	G2	180	1,00	1,00	0,89	0,89	0,94	17,7	660	38	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	G3	180	0,64	0,67	0,76	0,74	0,70	17,7	740	720	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	G4	15	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	39,5	786	530	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	G5	13	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	54,5	545	969	-4,10	3,90	15,77	5,97	5,38
	G6	140	0,67	0,53	0,00	0,50	0,43	40,5	648	995	-4,10	3,90	15,77	5,97	5,38
Teollisuusm.	T1	65,1	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	18,9	958	1030	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	T2	31,5	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	27,3	312	350	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	T3	25	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	30,3	434	290	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	T4	144	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	11	618	1125	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Asemam.	A1	25	0,63	0,51	0,41	0,51	0,51	29,5	944	960	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	A2	10	0,43	0,38	0,31	0,38	0,38	39,5	1073	1070	-6,37	3,00	14,80	4,17	3,90
	A3	50	0,80	0,00	0,00	0,68	0,30	28,2	718	1140	-4,43	4,20	16,03	5,57	5,34
	A4	16	0,43	0,24	0,13	0,24	0,26	28,3	991	1174	-9,73	1,50	14,57	2,73	2,27
	A5	16	0,67	0,42	0,29	0,42	0,45	35,25	981	990	-9,73	1,50	14,57	2,73	2,27
	A6	25	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	34,5	537	770	-4,10	3,90	15,77	5,97	5,38

Lähtö- ja laskelma-arvoja 2

Käyttö	Nro.	H-pistekerroin H	Vyyhtihäviöt / haara		Häviöt, kW			Aktivaatioenergia J/mol E_A	Ympäristökerroin, 1/h A	Muut, K	
			P_{kav} / W	P_{kmax} / W	P_0	P_K	$P_k + P_0$ tai lämp.koe			$\Delta\theta_{Hö}$	g
Generaattorim.	G1	1,493122003	568,803	1008,485	78,9	420,7	454,1	111000	800000000 → 4761629289018	49,7	16,7
	G2	1,493122003	568,803	1008,485	78,9	420,7	454,1	111000	800000000 → 4761629289018	49,7	16,7
	G3	1,31385789	300,231	443,415	88	511,9	536	111000	800000000 → 4761629289018	53,5	16,7
	G4	1,688067365	61,975	130,936	12,9	100	130	111000	800000000 → 4761629289018	56	15
	G5	1,174795486	451,924	568,868	x	x	x	111000	800000000 → 4761629289018	x	x
	G6	1,174795486	451,924	568,868	75	455	532	111000	800000000 → 4761629289018	50	23
Teollisuusm.	T1	1,262347122	738,098	1056,267	26,35	500	550	111000	800000000 → 4761629289018	50	14
	T2	1,107983096	265,999	311,453	21,6	226	250	111000	800000000 → 4761629289018	50	18
	T3	1,107983096	265,999	311,453	21,6	226	250	111000	800000000 → 4761629289018	50	18
	T4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Asemam.	A1	1,631844512	212,853	347,343	15,8	122	135	111000	800000000 → 4761629289018	51	17
	A2	1,521597691	158,003	240,417	10,5	64,5	70	111000	800000000 → 4761629289018	54	15
	A3	1,331639248	90,511	120,528	31,2	139	160	111000	800000000 → 4761629289018	55	11
	A4	1,573882033	176,66	278,042	11,3	88	88	111000	800000000 → 4761629289018	50	16
	A5	1,550181824	198,269	307,353	24,6	139	160	111000	800000000 → 4761629289018	55	15
	A6	1,192625018	142,78	170,283	24,6	139	139	111000	800000000 → 4761629289018	55	16

Asiakaskysely

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Muuntajan eristepaperin vanheneminen

Hei! Kiitos että saamme tarjota teille muuntajanne ikääntymiseen liittyvää tutkimusta. Tarvitsemme teiltä vähän aikaa kerätäksenne tarvitsemamme tiedot.

Alla olevia asiakastietoja ei käytetä tässä tutkimuksessa muutoin kuin yksilöllisen muuntajan tutkimustietojen tulosten kartoittamisessa yhtiön sisällä sekä yksilöllisten tulosten siirtämiseen takaisin asiakkaalle.

Tero Öström / ABB Oy

ASIAKKAAN TIEDOT

Etunimi

Sukunimi

Yritys

Paikkakunta

Sähköpostiosoite

MUUNTAJAN TIEDOT

Muuntajatyyppi (esim. KTRT 123 X 22)

Sijainti (esim Vaasa ABB muuntajatehdas)

Muuntajanumero

Muuntajan nimellisteho MVA

Onko muuntajassa jäähdytystuulettimia

- Kyllä
 Ei

KÄYTTÖTIEDOT 1/1

Käyttökohde

- Generaattorimuuntaja Asemamuuntaja Teollisuusmuuntaja
-

Muuntaja sijaitsee

- Kuivassa tilassa, jossa ei muita lämmönlähteitä
 Kuivassa tilassa, jossa muita lämmönlähteitä
 Ulkona bunkkerissa ilman kattoa
 Ulkona ilman bunkkeria suojaavia settipalkkiseiniä ja kattoa
 Ulkona ilman yhtä muuntajaa suojaavaa settipalkkiseinää ja kattoa
 Jokin muu*

Muu sijainti

Onko muuntaja ollut seisonnassa pitempiä aikoja?

- Kyllä
 Ei

Seisonta-ajat (esim. 2011 3kk talvi)

Onko muuntajasta kerätty lämpötiladataa?

- Kyllä
 Ei
-

MUUNTAJAN KÄYTTÖASTE 1/3

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 2010-2015 välisenä aikana

(esim. 20,5 MVA)

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 2005-2010 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 2000-2005 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

MUUNTAJAN KÄYTTÖASTE 2/3

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1995-2000 välisenä aikana

(esim. 20,5 MVA)

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1990-1995 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1985-1990 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

MUUNTAJAN KÄYTTÖASTE 3/3

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1980-1985 välisenä aikana

(esim. 20,5 MVA)

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1975-1980 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

Keskimääräinen käyttöaste vuosien 1970-1975 välisenä aikana

Talvi

Kevät

Kesä

Syksy

KOMMENTIT 1/1

Kommentit ja lisätiedot

Päivämäärä

Allekirjoitus