



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

TEHOMUUNTAJAN KUNTOSELVITYS

Johan Tapanainen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka

TAPANAINEN, JOHAN:
Tehomuuntajan kuntoselvitys

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 12 sivua
Toukokuu 2018

Tässä opinnäytetyössä perehdytään öljyeristeisen tehomuuntajan vanhenemiseen ja siihen vaikuttaviin tekijöihin. Näiden tekijöiden ja huoltoreporttien avulla luodaan huolto- ja vaihtoaikataulut Koillis- Satakunnan Sähkön tehomuuntajille. Tarkastelussa on yhteensä 11 tehomuuntajaa, joista kahta käytetään voimalaitoksissa.

Työssä määritellään tehomuuntajan toimintaa ja käytön aikaista vanhenemista. Muuntajan tärkeimmät kunnonindikaattorit ovat eristepaperi ja muuntajaöljy. Eristepaperin hajoaminen vähentää muuntajan käyttöikää ja täysin vanhentunut eristepaperi voi johtaa muuntajassa läpilyönteihin. Muuntajaöljyn avulla voidaan analysoida muuntajan kuntoa ja saada tietoa alkavista tai tapahtuneista vioista.

Työn avulla määritellään Koillis- Satakunnan Sähkön tehomuuntajien kuntoa ja luodaan ehdotukset huolto- ja vaihtoaikatauluista. Tähän käytetään aiemmin selvitettyjä muuntajan kunnonindikaattoreita ja muuntajaöljyanalyysijä sekä huoltoreportteja. Lisäksi tarkastellaan mahdollisia kehityskohteita kunnonvalvontaan, jotta voidaan parantaa muuntajan käyttövarmuutta ja lisätä sen elinikää.

Opinnäytetyössä onnistuttiin luomaan aikataulut koskien muuntajien huoltoa ja vaihtoa. Tehomuuntajan pitkäikäisyyden vuoksi vain kahdelle muuntajalle tulisi suunnitella huoltoa ja vaihtoa. Lisäksi muuntajien käyttövarmuuden parantamiseksi tulisi muuntajille tehdä lisämittauksia.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

TAPANAINEN, JOHAN:
Power Transformer Condition Report

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 12 pages
August 2018

The purpose of this thesis was to study aging of oil-filled power transformers and factors affecting it. As a result, maintenance and replacement schedules for power transformers in Koillis- Satakunnan Sähkö can be determined. This thesis review includes 11 power transformers, two of which are used in power plants.

The operational principles of a power transformer and its expiration of use were discussed in the theoretical section. The main indications of health for a transformer are insulation paper and transformer oil. The decomposition of insulation reduces the lifespan of the transformer and completely obsolete insulation can lead to breakthroughs inside the transformer. The transformer oil can be used to analyze the condition of the transformer and to collect information about the faults that are about to happen or have already occurred.

The next phase of this thesis defines the condition of the power transformers in Koillis-Satakunnan Sähkö and provides proposals for maintenance and replacement schedules. This was carried out with previously described transformer condition indicators and transformer oil analysis as well as maintenance reports. In addition, potential development objects for condition monitoring are considered to improve the reliability of the transformer and increase its life expectancy.

This thesis was successful in creating schedules regarding transformer maintenance and replacement. Due to the long-life span of the power transformer, only two transformers need maintenance and replacement in a few years. To improve the reliability of the transformers, additional measurements should be made to the transformers.

Key words: power transformer, aging, technical lifetime, transformer oil, paper insulation,

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Työn tarkoitus	6
1.2	Koillis-Satakunnan Sähkö Oy.....	6
2	MUUNTAJA	7
2.1	Muuntajan toiminta ja rakenne	7
2.2	Tehomuuntaja	7
2.3	Tehomuuntajan käyttöikä.....	9
2.4	Tehomuuntajan vanheneminen	9
3	MUUNTAJAN KUNNON INDIKAATTORIT.....	11
3.1	Eristepaperi	11
3.2	Muuntajaöljy	13
3.3	Mekaaninen eheys.....	15
4	TUTKIMUSAINEISTON ANALYSOINTI.....	17
4.1	Perushuolletut päämuuntajat	17
4.2	Uudet päämuuntajat	19
4.3	Voimalaitos muuntajat	21
4.4	Yhteenveto	22
5	KUNNONVALVONNAN KEHITYSKOHTEET.....	24
6	POHDINTA.....	26
	LÄHTEET.....	28
	LIITTEET	29
	Liite 1. Haapamäki	29
	Liite 2. Inha	30
	Liite 3. Killinkoski PM.....	31
	Liite 4. Killinkosken Generaattori muuntaja	32
	Liite 5. Ritari	34
	Liite 6. Soininkoski	35
	Liite 7. Toopakka	37
	Liite 8. Virrat PM1	39
	Liite 9. Virrat PM2	41

LYHENTEET JA TERMIT

DGA	Dissolved gas analysis
DP	Degree of Polymeration
KSS	Koillis- Satakunnan Sähkö
kV	Kilovoltti
MVA	Megavoltiampeeri
PM	Päämuuntaja

1 JOHDANTO

1.1 Työn tarkoitus

Päämuuntaja on sähköverkon kallein yksittäinen komponentti, joten on järkevää pitää se toimintakuntoisena. Päämuuntajien vikoja ennaltaehkäistään tekemällä 5-7 vuoden välein käämikytkinhuoltoja sekä ottamalla öljynäytteitä 1-3 vuoden välein. Öljynäytteistä saa hyvän kuvan mahdollisista alkavista tai tapahtuneista vioista. Lisäksi päämuuntajalle suoritetaan perushuolto sen eliniän puolessa välissä.

Tämän työn tavoitteena on selvittää Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n käytössä olevien öljyeristeisten tehomuuntajien tämän hetkinen kunto sekä ehdotukset vaihto ja huolto aikatauluista. Muuntajien kunnan määrittämiseen käytetään muuntajien öljyn kaasuanalyysyjä, huoltoraportteja ja mittauksia. Lisäksi määritellään mahdollisia kehityskohteita kunnonvalvonnassa.

1.2 Koillis-Satakunnan Sähkö Oy

Koillis- Satakunnan Sähkö Oy:n päätoimipaikka sijaitsee Virroilla osoitteessa Keskustie 10, yrityksellä on myös aluetoimipaikka Ähtärissä. Koillis- Satakunnan Sähkö -konsernin muodostavat emoyhtiö Koillis- Satakunnan Sähkö Oy sekä tytäryhtiöt Killin Voima Oy (100 %) ja Sähkö Virkeät Oy (64.5 %). Koillis- Satakunnan Sähkö Oy harjoittaa sähköverkkotoimintaa ja sähkön myyntiliiketoimintaa. Killin Voima Oy tuottaa sähköä kolmella vesivoimalaitoksella (Kilinkosken ja Soininkosken voimalaitokset Virroilla sekä Käenkosken voimalaitos Parkanosssa). Sähkö-Virkeät Oy harjoittaa alueverkkotoimintaa ja omistaa 110 kV alueverkon välillä Alajärvi - Ähtäri - Virrat - Keuruu - Petäjävesi.

Vuoden 2016 lopussa Koillis- Satakunnan Sähkö –konsernin palveluksessa oli tilikauden aikana keskimäärin 50 henkilöä. Vuonna 2016 konsernin liikevaihto pysyi edellisen vuoden tasolla. Liikevaihto vuonna 2016 oli noin 15,3 M€, josta liikevoitto oli 2,6 M€. Emoyhtiön Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n liikevaihto vuonna 2016 oli 14,7 M€, josta liikevoitto oli noin 2,3 M€.

2 MUUNTAJA

2.1 Muuntajan toiminta ja rakenne

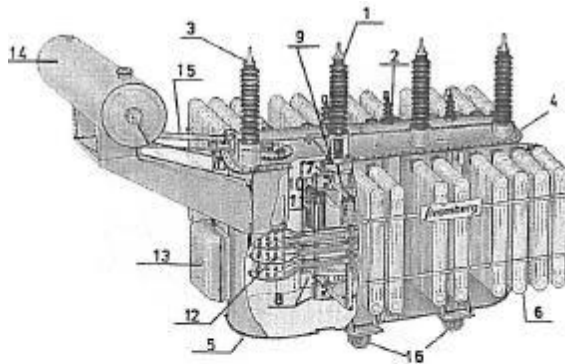
Muuntaja on staattinen sähkölaite, joka toimii sähkömagneettisen induktion avulla ja sitä käytetään muuttamaan jännite ja virta halutulle tasolle, muuttamatta sen taajuutta. Muuntajat voivat olla yksi- tai monivaiheisia, joista jälkimmäisestä on eniten käytössä kolmivaihemuuntajat. (Hietalahti 2011)

Muuntajan sisällä on rautasydän, jonka ympärillä on useista johdinkierroksista valmistettu käämitys. Näitä kutsutaan muuntajan aktiiviosiksi, jotka suorittavat varsinaisen muuntamisen. Rautasydän rakennetaan laminoituista levyistä vaihtokentän synnyttämien ns. pyörrevirtahäviöiden minimoiseksi. (Hietalahti 2011)

Muuntajien avulla voidaan muuttaa sähköisten järjestelmien jännitetasoa. Jännitettä voidaan nostaa 10 kV:sta 220 kV:in siirtoverkon tarpeisiin tai sitä voidaan laskea esimerkiksi 20 kV:sta 400 V:in jakeluverkon tarpeisiin. Suomessa siirtoverkon jännitteet ovat 400, 220 ja 110 kV. Jakeluverkko jaotellaan keski- ja pienjänniteverkkoon. (Hietalahti 2013)

2.2 Tehomuuntaja

Siirtoverkon ja voimalaitosten tehomuuntajista käytetään nimitystä päämuuntaja. Siirtoverkossa päämuuntaja sijaitsee sähköasemalla ollen toiminnan tärkein komponentti muuntaen 110 kV:n jännitteen jakeluverkkoon sopivaksi 20 kV:n jännitteeksi. Voimalaitoksen tuottamaa sähköä muunnetaan päämuuntajalla sähköverkolle sopivaksi. Tehomuuntajat ovat yleisesti paisuntasäiliöllisiä muuntajia, jotka ovat öljyeristeisiä ja -jäähdytteisiä. Kuvassa 1 on esitettyä eräs paisuntasäiliöllinen tehomuuntaja ja sen osat.



Esimerkki suurtehomuuntajasta.

1. Yläjänniteläpivienti
2. Alajänniteläpivienti
3. Tähtipisteläpivienti
4. Muuntajan kansi
5. Muuntajan öljysäiliö
6. Radiaattori (jäähdytin)
7. Yläiäkeen puristuspaikka
8. Alaiäkeen puristuspaikka
9. Muuntajan rautasydän
10. Alajännittekäämi
11. Yläjännittekäämi
12. Käämikytkin
13. Käämikytkimen ohjain
14. Paisuntasäiliö
15. Öljytastian ja paisuntasäiliön yhdistysputki
16. Kuljetuspyörät

KUVA 1. Tehomuuntaja ja sen osat (Aura & Tonteri 2009)

Kuvassa 1 oleva tehomuuntaja on kaksikämmimuuntaja, joka on varustettu jäähdytysradiaattoreilla. Lisäksi osittainen poikkileikkaus auttaa näkemään muuntajan aktiiviosaa, käämikytkintä sekä yläjänniteläpiviennin. (Aura & Tonteri 2009)

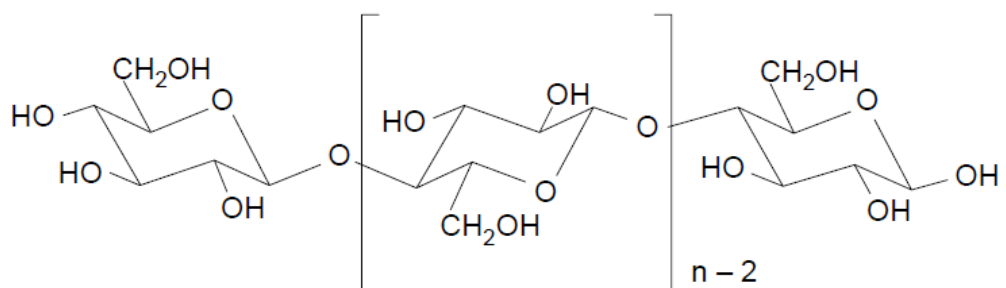
Useat tehomuuntajat on varustettu käämikytkimellä, kuten kuvan 1 muuntaja. Tällöin voidaan vähentää sähköverkossa tapahtuvia jännitevaihteluja. Käämikytkin on laite, jolla voidaan säätää muuntajan muuntosuhdetta tämän ollessa kuormitettuna, näin muuntaen jännitettä. Käämikytkin yleensä muuntaa yläjännitepuolen kierroslukua, sillä virta on siellä pienempi. Käämikytkimen ohjaus suoritetaan moottorilla, jota ohjaa toisiopuolta tarkkaileva rele. Rele tarkkailee toisiopuolen jännitettä ja säätää käämikytkintä sille asetettujen raja-arvojen mukaan. Käämikytkin on muuntajissa ainoa liikkuva osa, joka vaatii huoltoa 5-7 vuoden välein tai kun sen käyntikerrat tulevat täyteen. (Koillis- Satakunnan Sähkön sisäinen materiaali 2018, Elovaara 2011)

2.3 Tehomuuntajan käyttöikä

Tehomuuntajat ovat yleisesti luotettavia laitteita, joilla yleisesti odotettava elinikä on 40-50 vuotta tai enemmän. Tähän toki vaikuttavat monet eri asiat, joten muuntajan kunto tulee harkita ja arvioida yksilöinä. Tekninen elinikä määritellään teknisestä kunnosta, kun taas taloudellinen elinikä määritellään käyttökustannuksien perusteella. Tässä työssä keskitytään teknisen eliniän tarkasteluun. Muuntajan käyttöiän selvittäminen perustuu vanhenemisprosessiin, johon pääasiallisesti vaikuttaa kosteus, lämpökuormitus ja ympäristöolosuhteet. (Eronen 2016, IEC 60076-7 2018)

2.4 Tehomuuntajan vanheneminen

Tehomuuntajan vanhenemisprosessin tarkastelussa kriittisimmäksi tekijäksi nousee paperieristyksen kunto. Yleisin syy muuntajan hajoamiseen on paperieristyksen kunnan heikentyminen ja siitä johtuva läpilyönti. Paperi ja prespaani ovat yleisesti käytössä olevia tehomuuntajien eristemateriaaleja. Molemmat koostuvat selluloosasta, jonka huonoina puolina on niiden vanheneminen muiden orgaanisten aineiden tavalla. Paperi koostuu glukoosirenkaiden muodostamista selluloosamolekyyleistä (KUVA 2), jotka ovat yhdistyneet pitkiksi ketjuiksi. Paperin ikääntyessä selluloosaketjut katkeilevat reaktioiden seurauksena eli paperin polymeroitumisaste laskee. Paperieristyksen heikkenemisen mittana käytetään yleensä paperin DP-lukua, joka tulee sanoista Degree of Polymerisation. Paperin hajoamista kiihdyttää korkea lämpötila, kosteus ja muuntajan orgaanisten aineiden hajoamistuotteina olevat happamat yhdisteet. (Aro ym. 2003, Norhafiz 2012).



IEC 424/04

KUVA 2. Selluloosamolekyyliketju $(C_6H_{10}O_5)_n$ (IEC 60554-3. 1984)

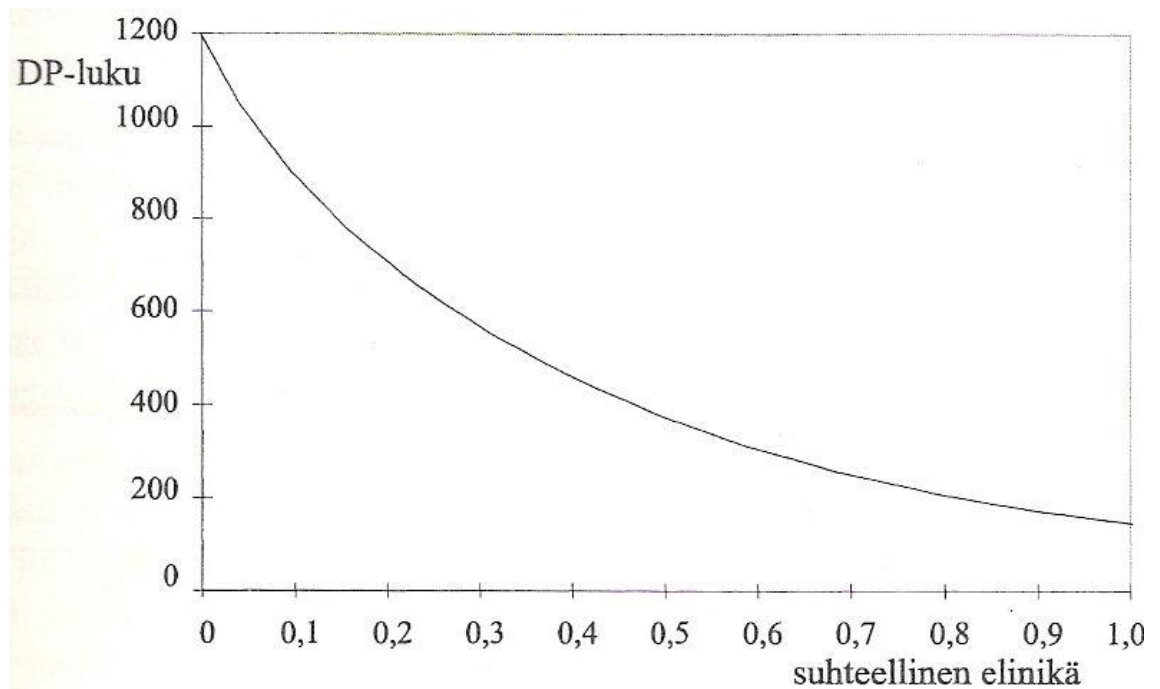
Muuntajaöljy on paperieristeen kanssa tärkein komponentti muuntajan luotettavuuden kannalta. Öljyn tärkein tehtävä on toimia eristeenä komponenttien välissä ja siirtää lämpöä muuntajan aktiiviosista ulkoisiin radiaattoreihin. Muuntajaöljy on orgaaninen aine, joka vanhetessaan hapettuu. Yleisimpänä muuntajaöljynä käytössä on mineraaliöljy. Öljyn hapettuminen tapahtuu ketjureaktiona, joka alkaa hiilivetymolekyylien hapettumisesta ja päättyy vapaiden radikaalien syntymiseen. Tätä reaktiota voidaan estää inhibiiteillä, jotka sitovat vapaat radikaalit. Hyvässä muuntajassa on luonnostaan inhibiittejä ja niitä voidaan lisätä hidastamaan öljyn muutoksia. (Aro ym. 2003)

Ketjureaktioiden seurauksena öljyyn syntyy saostumia, epäpuhtauksia, vettä ja happamia yhdisteitä. Näistä vesi ja happamat yhdisteet kiihdyttävät paperin hajoamista. Öljyn tilaa voidaan seurata käytön aikana ottamalla siitä näytteitä. Paperin tilan seuraaminen käytön aikana on vaikeampaa kuin öljyn. Paperin DP-luvun määrittämiseen tarvitaan paperinäyte, jota käytössä olevasta laitteesta ei voi ottaa, ellei muuntajaan ole valmistusvaiheessa sijoitettu paperin kunnan seuraamisen tarkoitettuja näytepaloja. Tällöin paperinäyte otetaan perushuollon aikana muuntajan kuumimmasta pisteestä. (Aro ym. 2003)

3 MUUNTAJAN KUNNON INDIKAATTORIT

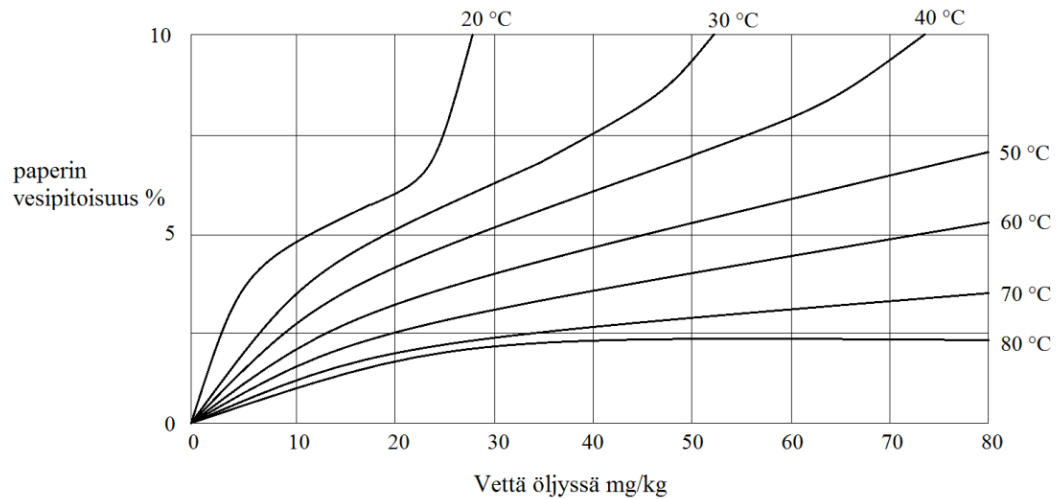
3.1 Eristepaperi

Kuten luvussa 2.4 todettiin paperieristeen kunnan olevan määräävin tekijä muuntajan teknisen eliniän kannalta. Paperin hajoamisen kiihdyttäviä tekijöitä oli korkea lämpötila, kosteus ja happamat yhdisteet. Uuden muuntajan paperin DP-luku vaihtelee välillä 1000-1300 ja täysin vanhentuneen paperin DP-luku on 150-200. Vanhentunut paperi heikentää muuntajan mekaanista kestävyyttä ja kykyä kestää ulkoisia rasituksia. Tällöin muuntaja on alttiina rikkoutumiselle ja sisäisille läpilyönneille. Lisäksi muuntajan eristepaperia ei voida vaihtaa, joten kun paperi on täysin vanhentunut, muuntaja tulee hävittää. Kuvassa 3 on esitetty eristyspaperin DP-luvun periaatteellinen muuttuminen muuntajaeristysikäntäytessä. (Aro ym. 2003)



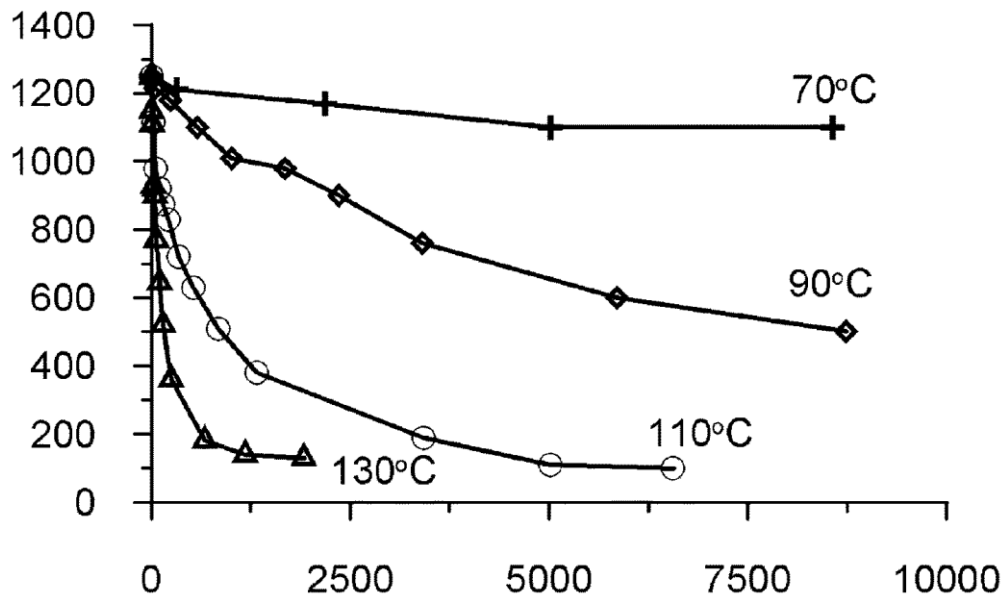
KUVA 3. Eristyspaperin DP-luvun muuttuminen muuntajan termisen eliniän aikana (Aro ym. 2003)

Kosteus nopeuttaa paperieristyskäsien hajoamista ja hajotessaan syntyy lisää vettä. Tällöin kosteus aiheuttaa kiihtyvän muutosprosessin eristeessä. Paperieristeen kosteus voidaan arvioida öljyn kosteuden ja lämpötilan avulla kuvan 4 mukaan.



KUVA 4. Öljyn ja paperin välinen kosteustasapaino (Aro ym. 2003)

Eristykselle suoritetuista elinikäkokeista on selvitetty lämpötilan vaikutus paperieristyksele, saadut tulokset kuvassa 5.



KUVA 5. Eristyspaperin DP-luvun muutos ajan (h) suhteen eri lämpötiloissa (Lungaard ym. 2002)

Kuten kuvasta 5 nähdään, DP-luku laskee nopeammin eliniän alkupuolella ja hidastuu lopussa. Tämä johtuu siitä, että alkutilanteessa on enemmän selluloosamolekyylejä jolloin niitä hajoa absoluuttisesti enemmän. Lisäksi alle 80 asteen lämpötilassa toimivan

muuntajan terminen räsitus ei ole määräävä tekijä paperieristyksen hajoamisessa. (Piironen 2015)

3.2 Muuntajaöljy

Yleisimmin käytetty muuntajaöljy on mineraaliöljy, jota käytetään saatavuutensa ja edullisuutensa vuoksi. Öljyltä vaaditaan suurta jännitelujuutta ja hyvää lämmönsiirtokykyä. Öljyltä vaadittavat ominaisuudet on määritelty kansainvälisissä IEC -standardeissa, jotka ovat riippuvaisia laitteista ja olosuhteista. Näitä ominaisuuksia testataan säännöllisesti ottamalla öljynäytteitä. Tämän avulla voidaan todeta alkavia tai kehittyviä vikoja muuntajassa. Tyypillisesti öljylle tehdään DGA (dissolved gas analysis) kaasuanalyysi, jossa tutkitaan seuraavat kaasut:

- Vety (H)
- Happi (O₂)
- Typpi (N₂)
- Metaani (CO)
- Hiilimonoksidi (CO₂)
- Etyleeni (C₂H₄)
- Etaani (C₂H₆)
- Asetyleeni C₂H₂)

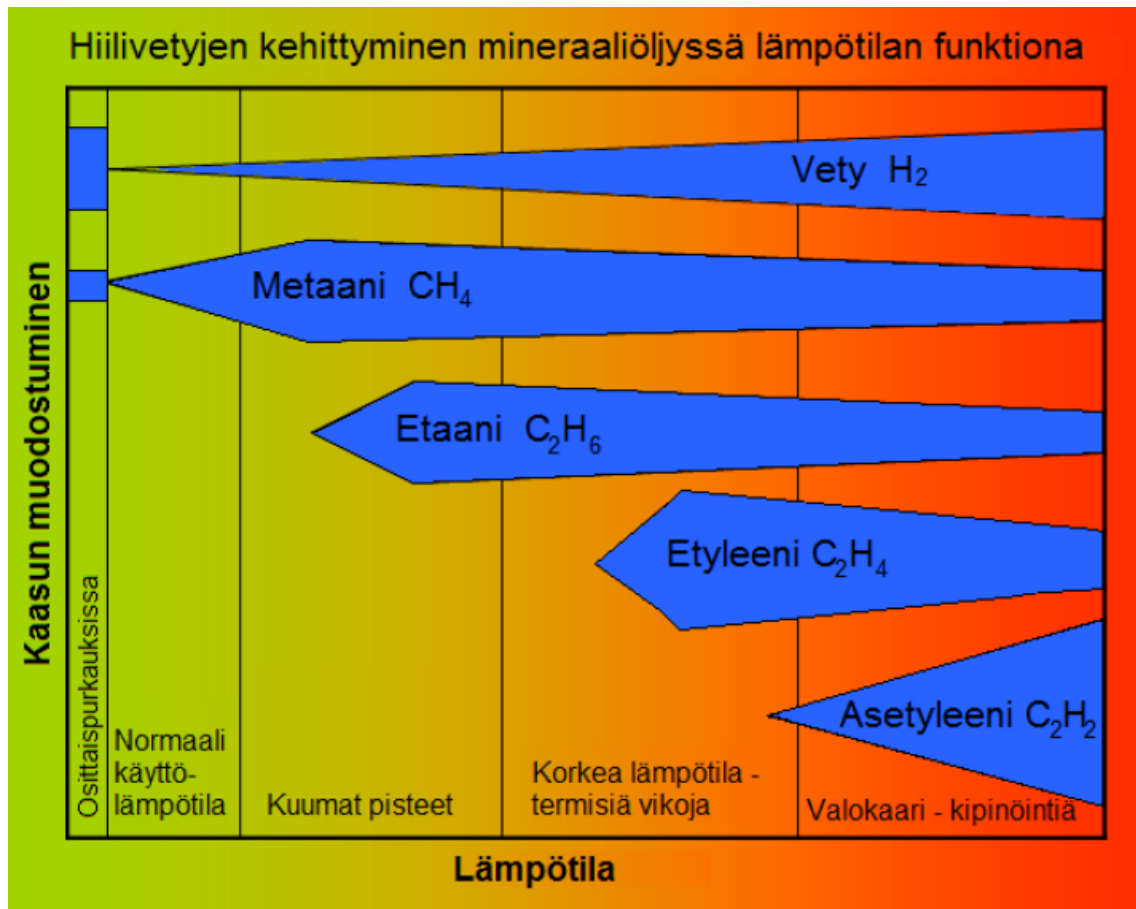
Näiden kaasujen suhteen avulla voidaan määrittää mahdollisen vian luonne. Vanhenemisreaktion vuoksi kyseisiä kaasuja esiintyy muuntajassa luonnostaan, mutta niiden muodostumisnopeus on pieni. Termisessä tai sähköisessä viassa kaasumäärät nousevat nopeasti ja koostumus muuttuu. IEC on antanut kaasuille raja-arvot, jotka ovat taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Kaasujen raja-arvot

	Vety μ/l	Happi ml/l	Typpi ml/l	Metaani μ/l	Hiilimonoksidi μ/l	Hiilidioksidi μ/l	Etyleeni μ/l	Etaani μ/l	Asetyleeni μ/l
Suositus	≤ 150	-	-	≤ 130	≤ 600	≤ 14000	≤ 280	≤ 90	≤ 20

Kaasuja syntyy usein termisen vian seurauksena, jolloin tapahtuu ylikuumeneminen käämissä tai liitoksessa, tällöin öljy alkaa hajoamaan. Öljyn lämpötilan noustessa 150°C asteeseen öljyyn alkaa muodostumaan kaasuja. Kuvassa 6 nähdään kaasujen muodostu-

mista eri lämpötiloissa. Vetyä muodostuu jo alhaisissa lämpötiloissa ja jokaisessa vikatyypissä. Muiden kaasujen syntymiseen vaaditaan korkeampi lämpötila. (Piironen 2015, Aro ym. 2003)



KUVA 6. Hiilivetyjen kehittyminen öljyssä lämpötilan funktiona (Piironen 2015)

Kaasuanalysissa tarkastellaan myös kaasupitoisuussuhteita, jolloin voidaan määrittellä tarkemmin vikoja. Kuvassa 7 nähdään kaasusuhteiden avulla määriteltyjä vikoja.

Tapaus	Vikatyyppe	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	osittaispurkauksia ¹	ei merkitystä	<0,1	<0,2
D1	pienienergiaisia purkauksia	>1	0,1 – 0,5	>1
D2	suurienergiaisia purkauksia	0,6 – 2,5	0,1 – 1	>2
T1	kuuma vikapaikka $T < 300$ °C	ei merkitystä	ei merkitystä	<1
T2	kuuma vikapaikka 300 °C $< T < 700$ °C	<0,1	>1	1 – 4
T3	kuuma vikapaikka $T > 700$ °C	<0,2 ²	>1	>4

¹ Osittaispurkauksia mittamuuntajassa: $C_2H_2 / H_2 < 0,2$; läpivientieristimessä: $C_2H_2 / H_2 < 0,07$.
² Suureneva kaasun C_2H_2 määrä voi ilmaista, että kuumen kohdan lämpötila on yli 1000 °C.

KUVA 7. Kaasuanalyysin tulosten tulkinta (Aro ym. 2003)

Kaasuanalyysin tulosten tulkinnassa käytetään hyväksi raja-arvoja, mutta ne eivät ole yksiselitteisiä. Tuloksia tulee osata verrata raja-arvoihin sekä aiempiin kaasuanalyysihin. Lisäksi muuntajan varustelu tulee ottaa huomioon, esimerkiksi käämikytkimellä varustetulla muuntajalla syntyy sen normaalin toiminnan yhteydessä asetyleeniä. Vanhemmissa muuntajissa käämikytkimellä ei ole erillistä öljysäiliötä, jolloin asetyleeni pitoisuudet voivat kasvaa yli raja-arvojen, muuntajan ollessa kunnossa.

Öljynäytteestä tarkastetaan kaasujen lisäksi myös öljyn läpilyöntilujuus. Läpilyöntijännitteeseen vaikuttaa lämpötila, puhtaus, ilmakuplat ja kosteus. Epäpuhtaudet ja kosteus heikentävät läpilyöntijännitettä. Öljystä voidaan halutessa määrittää myös neutraloimisluku, rajapintajännitys, kosteus, inhibiittipitoisuus ja furfuraali.

3.3 Mekaaninen eheys

Muuntaja altistuu elämänsä aikana monelle mekaaniselle rasitukselle, kuten verkossa tapahtuviin oikosulkuihin, salaman iskuun ja ympäristöolosuhteiden muutokseen. Näistä aiheutuvia vikoja ehkäistään kunnossapidolla ja huolloilla. Peruskunnossapidossa tarkastetaan visuaalisesti muuntajan kunto, mahdolliset öljyvuodot, kuivaussuolan vaihtotarve, ruoste ja mittareiden tiedot. Lisäksi kunnossapidossa tehtävänä on tilata huoltotoimenpiteet, esimerkiksi käämikytkinhuolto ja perushuolto. Huoltojen yhteydessä pystytään tarkastamaan muuntajan kuntoa tarkemmin, kun se on irrotettu verkosta huollon ajaksi.

Huollot suoritetaan yleisesti paikan päällä lukuun ottamatta perushuoltoa, joka suoritetaan esimerkiksi ABB:n Vaasan muuntajatehtaalla. Perushuollon tärkeimmät toimenpiteet ovat eristysosien kuivaus, öljyn suodatus tai vaihto ja käämien kiristys. Lisäksi puristusliitokset tarkastetaan ja kiristetään, käämikytkin tarkastetaan ja huolletaan sekä otetaan paperinäyte DP-luvun selvittämistä varten. Huollon yhteydessä tarkastetaan muuntajan ulkopuolinen kunto ja voidaan suorittaa hiekkapuhallus ja maalaus. Kuivauksessa poistetaan kosteus muuntajan eristysosista eli paperista ja prespaanista. Huolto pysäyttää kosteuden aiheuttaman paperin hajoamisen. Huollossa tehtävät toimenpiteet tuovat muuntajalle kymmeniä vuosia lisää käyttöikää.

(Nikkari 2009)

4 TUTKIMUSAINEISTON ANALYSOINTI

Koillis-Satakunnan Sähköllä on käytössä ABB:n ja Strömbergin valmistamia tehomuuntajia. Muuntajia on 13 kappaletta, joista 3 on voimalaitoskäytössä ja loput sijaitsevat sähköasemilla päämuuntajina. Tarkastelusta jätettiin pois Käenkosken kuivamuuntaja sekä pois käytöstä oleva varamuuntaja. Muuntajien keski-ikä on noin 38 vuotta, joista vanhimmat ovat yli 50 vuotta. Muuntajista yli puolet on käynyt perushuollossa, eli ylittäneet oletetun elinikänsä puolen välin. Kunnossapito suorittaa muuntajille kuukausittain visuaalisen tarkastuksen ja tilaa huollot käänkytkimille noin 7 vuoden välein sekä öljynäytteiden otot noin 3 vuoden välein.

Tässä työssä muuntajien kuntoselvitykseen käytettiin muuntajien huoltoraportteja, öljyanalyysejä, kuormitustietoja, kirjallisuuslähteitä sekä lausuntoja KSS:n henkilöstöltä.

4.1 Perushuolletut päämuuntajat

KSS:n sähköasemien päämuuntajat ovat teho luokaltaan 5 MVA:sta 16 MVA:in ja niitä on yhteensä 9 kappaletta. Muuntajista 5 on käynyt perushuollossa, jonka avulla saadaan muuntajasta hyvä kuva sen kunnosta ja huollon jälkeen sitä voi verrata melkein uuteen muuntajaan. Taulukossa 2 on näiden muuntajien perustiedot.

TAULUKKO 2. Perushuollossa käyneiden päämuuntajien perustiedot

Nimi	Teho	Käyttöönotto	Perushuolto	Dp-luku
KIL PM	5MVA	1965	2004	705
RIT	10 MVA	1972	1990	-
VIR PM1	10 MVA	1968	2004	680
VIR PM2	16 MVA	1970	2005	710
ÄHT	16 MVA	1975	2012	1019

Taulukosta 2 havaitaan muuntajien DP-luvun olleen hyvällä tasolla niiden käyttöikään verrattaessa. DP-luvut on saatu perushuollon yhteydessä. RIT eli Ritarin muuntajalta DP-lukua ei ole tiedossa, sillä se kävi huollossa salaman iskun syystä. Muuntajista on otettu

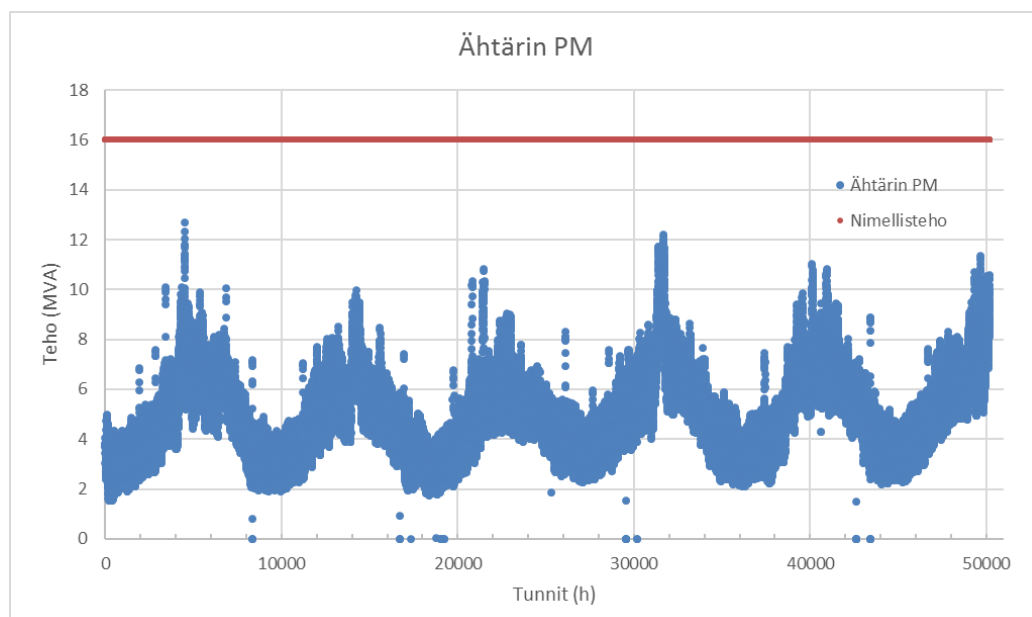
öljynäyteitä noin kolmen vuoden välein. Taulukossa 3 on Ähtärin viimeisimmät analyysit, muiden muuntajien analyysit liitteissä 1-9.

TAULUKKO 3. Ähtärin muuntajaöljyn analyysi

Muuntajaöljyn analyysi	ABB	INSTA	ABB	VATTENFALL			Suositus	Standardi
	22.5.2017	12.5.2015	5.6.2012	17.11.2010	4.8.2009	31.3.2008		
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	70	73,1	83	86	67	83	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	2	11,1	1	<5	6	<5	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g				0,03			<0,10	IEC 62021-2
Inhibiittipitoisuus, %	0,55		0,64				>0,18...0,3	IEC 60666
DP			1019				>350	IEC 60450
Kaasuanalyysi								IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	0	4	0	10	15	23	≤150	
CH ₄ , Metaani, µl/l	1	1	<1	3,5	3,8	3	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	34	47	6	38	38	29	≤600	
CO ₂ , Hiilidioksidi, µl/l	720	517	122	38	38	29	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/l	<1	1	0	5,9	5,5	4,8	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	0	3	0	1	1	1	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	0	0	0	37	46	30	≤20	
TCG(palavia kaasuja)		52		57	71	63		
Lämpötila		28		25	40	28		

* Käyttölämpötilassa

Taulukossa 3 nähdään arvojen olevan suositusten mukaisia, paitsi asetyleeni joka johtuu aktiivisesta käännytyksen käytöstä. Valitettavasti muuntajien öljyn lämpötiloja ei tilastoida muuta kuin öljynäytteen yhteydessä, jolloin ei voida saada varmaa tietoa niiden lämmön aiheuttamisista vahingoista. Kuormitustilastoista ja öljynäytteen aikana mitattua lämpötilasta voidaan arvioida muuntajan lämpötilaa. Ähtärin muuntajan kuormitus kuvaaja kuviossa 1.



KUVIO 1. Ähtärin tehoaikasarja

Kuvaaja alkaa vuodesta 2012 muuntajan tultua takaisin perushuollosta ja päättyy vuoden 2018 alkuun. Kuvaajasta huomataan, että kuormitus ei käy nimellisessä ollenkaan ja piikit johtuvat talven aikana lisääntyneestä sähkön kulutuksesta. Näiden tietojen avulla voidaan olettaa muuntajien toimivan alle 80 asteen lämmössä. Tällöin muuntajien päävanhentumistekijäksi ei nouse lämpötila vaan hapettuminen sekä kosteudesta aiheutuvat vanhenemistekijät.

4.2 Uudet päämuuntajat

KSS:n uusiempien päämuuntajien käyttöönottovuodet on esitetty taulukossa 4. Kyseiset muuntajat eivät ole vielä käyneet perushuollossa.

TAULUKKO 4. Uudet päämuuntajat

Nimi	Teho	Käyttöönotto
HEI	16 MVA	1985
INH	16 MVA	1988
TOO	16 MVA	1999
HAA	10 MVA	2009

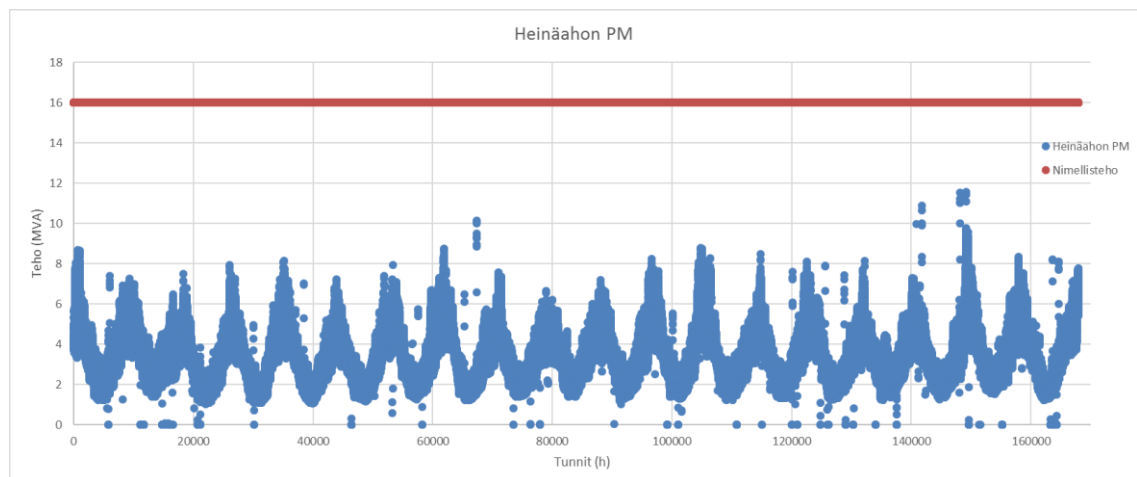
Uusien päämuuntajien tarkastelussa päätekijäksi nousee muuntajanöljyanalyysit, sillä perushuolto on vasta tulossa. Öljyanalyysien perusteella muuntajissa ei ole tapahtunut vikoja eikä lämpötila ole noussut yli asetettujen raja-arvojen. Taulukossa 5 on Heinäahon muuntajan öljyanalyysit.

TAULUKKO 5. Heinäähon muuntajaöljyn analyysit

	INSTA	VATTENFALL		ABB		
	25.4.2016	17.11.2010	7.11.2003	17.9.1993	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	79,1	71	60	83	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	3	<5	<5		<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,01	0,03			<0,10	IEC 62021-2
Kaasuanalyysi						IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	4	13	10	30	≤150	
CO,Metaani, µl/l	3	3,4	3,2	6	≤130	
CO,Hiilimonoksidi, µl/l	21	37	100	170	≤600	
CO ₂ ,Hiilidioksidi, µl/l	656	750	800	1100	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/	6	5,5	6,3	6	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	3	1	1	2	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	30,8	41	38	35	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	42,8	64	59			
Kokonaiskaasupitoisuus		10,2				
Lämpötila	19	17	24			

* Käyttölämpötilassa

Taulukon 5 perusteella muuntajan arvot ovat suositusten mukaisia, paitsi asetyleeni joka jo aiemmin on kerrottu johtuvan käämikytkimen aktiivisesta käytöstä. Lisäksi Heinäähon muuntajan tehotiedot ovat kuviossa 2, muiden muuntajien tehoaikasarjat liitteissä 1-9.



KUVIO 2. Heinäähon tehoaikasarja

Kuvaaja alkaa 1999 vuoden alusta ja päättyy 2018 vuoden alkuun. Tehot ovat maltillisia eli reilusti alle nimellisestä tehosta, joka näkyy kuvaajassa punaisena. Näiden tietojen perusteella voidaan olettaa muuntajan toimivan alle 80 asteessa, jolloin lämpövanheneminen ei ole päätekijä.

4.3 Voimalaitos muuntajat

KSS:llä on käytössä kaksi öljyeristeistä muuntajaa voimalaitos käytössä, näiden tarkoitus on generaattoreilla tuotetun sähkön siirtäminen verkkoon. Muuntajien perustiedot ovat taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Voimalaitos tehomuuntajien perustiedot

Nimi	Teho	Käyttöönotto	Perushuolto	Dp-luku
KIL GEN	5 MVA	1971	2005	440
SOI	1.6 MVA	1979	2017	-

Generaattorien perässä olevat muuntajat joutuvat kovemmalle rasitukselle verrattuna sähköasemien päämuuntajiin, sillä niitä usein kuormitetaan nimellistehossaan. Lisäksi ne ovat riippuvaisia laitoksen toiminasta eli ovat pois käytöstä laitoksen ollessa pysähdyksissä. Taulukossa 1 olevat muuntajat ovat yleisesti noin 6 tuntia päivästä poissa käytöstä. Muuntajan päälle-pois -kytkentä aiheuttaa lisärasitusta. Tällöin muuntaja joutuu kovilla pakkasilla rajuihin lämpötilan vaihteluihin ja muuntaja hengittää enemmän. Tämä kuormitus huomataan Killinkosken generaattorin muuntajassa, jonka DP-luku on 440, eli jo melko vanhentunutta. Taulukossa 7 on Killinkosken generaattori muuntajan öljyanalyytit.

TAULUKKO 7. Killinkosken generaattorin muuntaja öljyanalyytit

	KILYHTIÖT		VATTENFALL				Suositus	Standardi
	4.12.2014	28.6.2012	4.8.2009	31.3.2008	7.11.2003	23.10.2001		
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	72,9	60+	69	78	73		>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	4	12	6	<5	<5		<30*	IEC 60814
Kaasuanalyysi								IEC60599:2007-5
H2 Vety, µl/l		6	10	10	10	10	≤150	
CO, Metaani, µl/l	0	3,9	1,7	1,1	1,3	8,5	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	35	53	130	83	100	60	≤600	
CO2, Hiilidioksidi, µl/l	281	220	1000	890	940	940	≤14000	
C2H4 Eyleeni, µl/	5	20	10	4,3	3,8	3,7	≤280	
C2H6 Etaani, µl/l	1	1,4	1	1	1	0,4	≤90	
C2H2, Asetyleeni, µl/l	0	94	1	1	1	0,1	≤20	
TCG(palavia kaasuja)			24	18	17	23		
Kokonaiskaasupitoisuus			10					
Lämpötila	36		25	25	26	27		
* Käyttölämpötilassa								

Taulukon 7 perusteella muuntajan öljy on hyvässä kunnossa, vaikka eristepaperi onkin jo vanhentunutta. Tästä huomataan, ettei voida pelkästään luottaa perus öljyanalyyssiin,

muuntajan tilaa arvioidessa. Asetyleeni arvo on luultavammin virhe vuoden 2012 mitauksessa, sillä vaikka se kohoaa yli raja-arvojen niin siitä ei ole huomautettu öljynkunto lausunnossa.

4.4 Yhteenveto

KSS:n tehomuuntajat ovat yleisesti hyvässä kunnossa ikäisiksiin muuntajiksi, tämä johdun hyvästä kunnossapidosta ja pienistä kuormista. Selvityksen perusteella todettiin, ettei lämpötila ole päätekijä sähköasemien päämuuntajien vanhenemisessä. Todennäköisin tekijä on kosteus ja sen hallintaa tulisi pitää tarkkailussa. Tämä onnistuu hyvällä kunnossapidolla, eli muuntajan kuivaavien silikageelien pitämistä kunnossa. Lisäksi tasainen kuormitus vähentää muuntajan hengitystarvetta.

Muuntajan jäljellä olevaa ikää on vaikea arvioida, mutta hyvin huollettuna sen ikä voi olla 60-70 vuotta. Taulukossa 8 on ehdotukset KSS tehomuuntajien huolto ja vaihtoaikatauluista.

TAULUKKO 8. Tehomuuntajien huolto- ja vaihtoaikataulu ehdotus

Nimi	Teho	Käyttöönotto	DP-luku	Perushuolto	Vaihto
KIL PM	5MVA	1965	705	2004	2025-2030
KIL GEN	5 MVA	1971	440	2005	2019-2022
VIR PM1	10 MVA	1968	680	2004	2022-2028
VIR PM2	16 MVA	1970	710	2005	2030-2035
ÄHT	16 MVA	1975	1019	2012	2035-2044
RIT	10 MVA	1972	-	1990	2030-2034
SOI	1.6 MVA	1979	-	2017	2032-2036
HEI	16 MVA	1985	-	2020-2025	2050-2055
INH	16 MVA	1988	-	2023-2039	2053-2058
TOO	16 MVA	1999	-	2034-2039	2064-2069
HAA	10 MVA	2009	-	2044-2049	2074-2079

Taulukossa 8 vanhimpien päämuuntajien iäksi tulee noin 60 vuotta. Vanhemmat muuntajat ovat vanhemmalla teknologialla varustettuja ja olleet käytössä kunnossapidon ollessa vielä heikompaa. Uudempien päämuuntajien iäksi tulle lähemmäs 70 vuotta, koska tekniikka on kehittynyt sekä kunnossapito. Poikkeuksena on Ritarin muuntaja, joka ei

välttämättä kestä yhtä kauan kuin muut muuntajat salaman iskun vuoksi. Tämä onnettomuus luultavammin on heikentänyt muuntajaa pitkällä aikavälillä katsottuna ja perushuollon ajoitus on jouduttu tekemään turhan aikaisin. (Penttilä 2017, Piironen 2015)

Huollon aikataulun oletuksena on asettaa se muuntajan oletettuun eliniän keskivaiheelle. Tässä muuntajat tulisi huoltaa noin 35 vuoden iässä, tällöin saadaan huollosta paras tuotto. Liian myöhään ajoitettu huolto ei tuota niin paljon lisää käyttöikää muuntajalle. (Piironen 2015)

Voimalaitos muuntajat eivät ole yhtä pitkä ikäisiä verrattuna sähköasemien päämuuntajiin. Tämä johtuu kovemmasta kuormasta sekä sen vaihtelevuudesta. Tällöin muuntajan vanhentumista kiihdyttää korkeampi lämpötila sekä lisääntynyt hengityksen tarve. Kilkosken generaattori muuntajan iäksi tulee noin 50 vuotta. Soinkosken muuntajan ikä on korkeampi pienemmän kuormituksen vuoksi.

Muuntajien vaihtoaikataulu on arvioitu tämän hetkisten kuormitusten, öljynäytteiden ja lausuntojen mukaan. Aikatauluihin voivat vaikuttaa mahdolliset lisäkuormitukset verkossa, öljynäytteiden kuntolausunnot, lisämittaukset ja uudet kunnossapitolaitteet. Varmuuden lisäämiseksi muuntajista voisi ottaa furfuraalianalyysin, jonka avulla pystyy määrittämään paperin kuntoa öljystä. Furfuraalianalyysi kertoo, onko paperia hajonnut ja lionnut öljyyn. Tällöin muuntajan kriittisintä kunnonindikaattoria voidaan seurata, ilman avaavaa huoltoa.

5 KUNNONVALVONNAN KEHITYSKOhteet

Perinteisesti muuntajan kunnonvalvontaa suoritetaan perus kuukausittais-tarkastuksilla ja öljynanalyseillä. Nykyaikana markkinoille on tullut jatkuva toimisia kaasuanalysointilaitteita, kunnossapito- ja kunnonvalvontayksiköitä. Näillä laitteilla saadaan varmuutta muuntajan toimintaan, havaitaan alkavia vikoja ja saadaan jatkettua muuntajan elinikää. Kunnonvalvontalaitteistoa käytetään tyypillisesti kriittisissä paikoissa olevissa teho- ja muuntajissa. Asennus ajankohdan optimointi kannattaa ajoittaa aivan uuteen tai juuri perushuollosta tulleeseen muuntajaan. Tällöin muuntajaöljy on puhtaimmillaan ja laitteiston toimintavarmuus optimoituu.

Kaasuanalysointilaitteisto tarkkailee muuntajassa syntyvien kaasujen määrää ja raja-arvojen avulla kertoo alkavista vioista. Analysointilaitteistot tarkkailevat yleisesti vetyä, kosteutta ja lämpötilaa. Kuten luvussa 3.2 kerrottiin vedyn muodostuvan jokaisessa vikatyypissä, näin pystytään alkava vika havaitsemaan. Tällä analysointilaitteistolla ei pystytä korvaamaan kokonaan erillistä öljyanalyysiä. Kehittyneempi analysointilaitteisto, joka mittaa kahdeksaa eri kaasua voidaan katsoa korvaavan erilliset öljynäyteanalyysit. Näin saadaan luotettavampi kuva öljyn kaasujen kehityksestä. (Piiroinen 2015)

Muuntajaöljyn jatkuvalla kunnossapito- ja kunnonvalvontalaitteilla voidaan pitää öljy puhtaampana toimintakuntoisena pidempään. Laitteistolla voidaan poistaa öljystä tehokkaasti suodattimella kiinteät epäpuhtaudet sekä alipainetekniikalla vettä ja kaasuja. Tällöin lämpötilajännite pysyy halutulla tasolla ja selluloosan hajoaminen hidastuu. Järjestelmä ei poista kaikkea kaasua, jotta kaasuanalyysi on mahdollista suorittaa. Taulukossa 9 on esimerkki toteutuneesta muuntajaöljyn kunnossapidosta tällä laitteistolla.

TAULUKKO 9. Esimerkki toteutuneesta muuntajaöljyn kunnossapidosta (Heikkinen 2013)

	KÄYTTÖÖN- OTTO- VAIHEESSA	KOLMEN KUUKAUDEN JÄLKEEN
Paine [mbar abs]	550	120
Poistetun kaasun tilavuus [l / 24 h]	170	20
Kaasun kokonaismäärä öljyssä [%]	10,6	2,1
Läpilyöntijännite [kV / 2,5 mm]	42	79

Taulukosta 9 havaitaan kaasun määrän alentuneen huomattavasti kolmessa kuukaudessa sekä läpilyöntijännitteen kasvaneen 79 kV:in. Laitteiston avulla muuntajan käyttöikä voidaan kasvattaa jopa kolminkertaiseksi.

(Heikkinen 2013)

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää Koillis- Satakunnan Sähkön tehomuuntajien nykykuntoa, huolto- ja vaihtoaikataulua sekä mahdollisia kehityskohteita. Selvitys perustui kirjallisuuslähteisiin, huoltoraportteihin ja henkilöstö lausuntoihin. Näiden avulla pystyttiin saamaan käsitystä muuntajien kunnosta ja antamaan ehdotukset huolto- ja vaihtoaikatauluihin. Lisäksi muuntajien kunnonvalvontaan onnistuttiin antamaan kehitettävää, näin ollen saaden varmuutta muuntajan käyttöön sekä mahdollisesti sen eliniän jatkamiseen.

Työssä tarkasteltiin muuntajan toimintaa, jossa pääpaino oli öljyeristeisessä tehomuuntajassa. Tästä selvitettiin muuntajan vanhenemiseen vaikuttavia tekijöitä ja määriteltiin tämän teknistä käyttöikä. Tärkeimmäksi tekijäksi nousi paperieristeen kunto, jota kuvataan DP-luvulla. Eristeen ollessa huonokuntoista muuntajan käyttövarmuus laskee ja on alttiimpi sisäiselle läpilyönnille, joka pahimmassa tapauksessa voi johtaa muuntajan täydelliseen tuhoutumiseen. Toinen tärkeä tekijä muuntajan vanhenemisessä ja toiminnallisuudessa oli muuntajaöljy. Muuntajaöljystä saadaan tietoa muuntajan kunnosta ja alkavista tai tapahtuneista vioista. Paperieristeen ja muuntajaöljyn vanhenemistä kiihdyttävät tekijät olivat lämpötila, kosteus ja happamuus.

Kirjallisuuslähteiden, raporttien ja lausuntojen perusteella luotiin Koillis- Satakunnan Sähkön tehomuuntajille ehdotukset huolto- ja vaihtoaikatauluista. Tehomuuntajat ovat yleisesti katsoen vanhoja, mutta hyväkuntoisia ikäisikseen. Tämä johtunee pienestä ja tasaisesta kuormituksesta sekä hyvästä kunnossapidosta. Sähköasemien muuntajien lopulliseksi iäksi voidaan olettaa lähemmäksi 60 vuotta ja uudemmissa muuntajissa tämä voi olla jopa 70 vuotta. Nämä oletukset on päätelty nykyisten tietojen mukaan, joka voi muuttua uusien tietojen mukaan.

Kunnonvalvontaan on nykyaikana kehitetty monia uusia sovelluksia joista Furfuraalianalyysi, kaasuanalysointori ja kunnonvalvonta- ja kunnossapitolaitteisto olisivat hyvät tavat lisätä muuntajien käyttövarmuutta ja mahdollisesti käyttöikä.

Opinnäytetyö on ollut opettavainen ja kiinnostava kokemus. Muuntajat aiheena on laaja, mutta aluksi materiaalin löytäminen koskien muuntajan käyttöikä oli haastavaa. Sillä

tästä ei ole mitään varmaa tietoa vaan muuntajat tulee arvioida aina yksilöinä. Kuitenkin oppimista työn aikana on tapahtunut ja voin olla tyytyväinen lopputulokseen.

LÄHTEET

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V. 2003. Suurjänniteteekniikka. 2 painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Aura, L. Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6 uudistettu painos. Helsinki: WSOYpro Oy.

Eronen, M. 2016. Asiakasarvo ja kannattavuus tehomuuntajien reaaliaikaiselle vikakaasumonitoroinnille. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Elovaara, J. 2011. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto.

Heikkinen, K. 2013. Muuntajaöljyn kunnossapito ja automaattinen kunnonvalvonta. Artikkel. Promaint kunnossapidon erikoislehti. Luettu 15.5.2018.

<https://promaintlehti.fi/Kunnonvalvonta-ja-kayttovarmuus/Muuntajaoljyn-kunnossapito-ja-automaattinen-kunnonvalvonta>

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka Oy.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1 painos. Tampere: Tammertekniikka Oy

IEC 60076-7. 2018. Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. Switzerland, Geneva.

IEC 60554-3. 1984. C57 152. 2013. Specification for sellulosic papers for electrical purposes. Specifications for individual materials. Switzerland, Geneva.

Koillis- Satakunnan Sähkö Oy. 2018. Sisäinen materiaali

Penttilä, L. 2017. Tehomuuntajien Kunnonvalvontamittaukset. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.

Lungaard, L., Hansen, W., Linhjell, D. 2002. Painter T., Ageing of oil-impregnated paper in power transformers. IEEE Power Delivery. Julkaisu

Nikkari, J. 2009. Uusi elämä muuntajalle. Artikkel. Power & Automation lehti. Luettu 10.4.2018.

<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/7fa9718a0acd575bc12576ef004982ec.aspx>

Norhafiz, A. 2012. Ageing assessment of insulation paper with consideration of in-service ageing and natural ester application. A thesis in The University of Manchester for the degree of PhD.

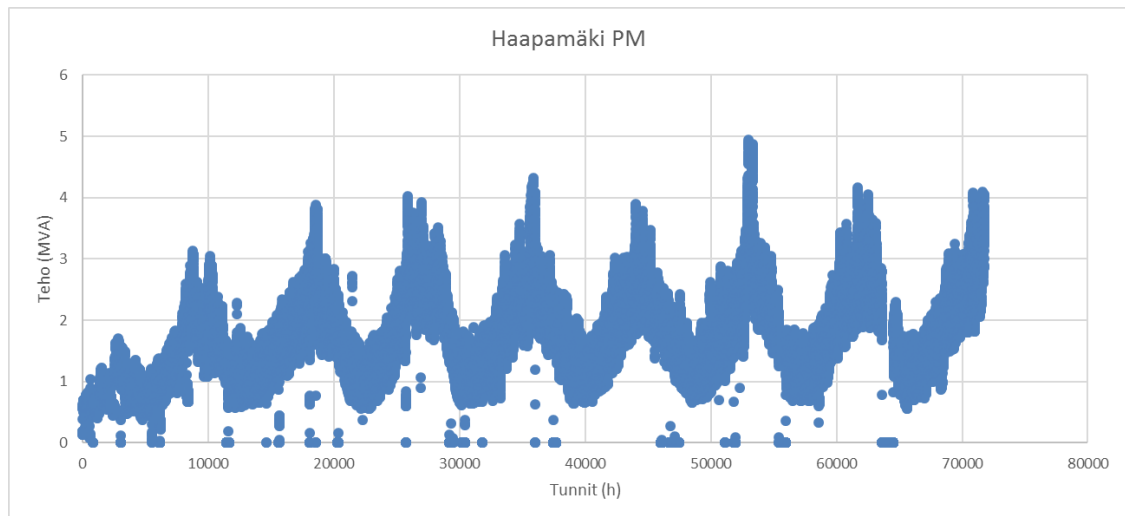
Piironen, M. 2015. Sähköasemien kunnossapitoprosessin kehittäminen. Diplomityö. Helsinki: Aalto yliopisto.

LIITTEET

Liite 1. Haapamäki

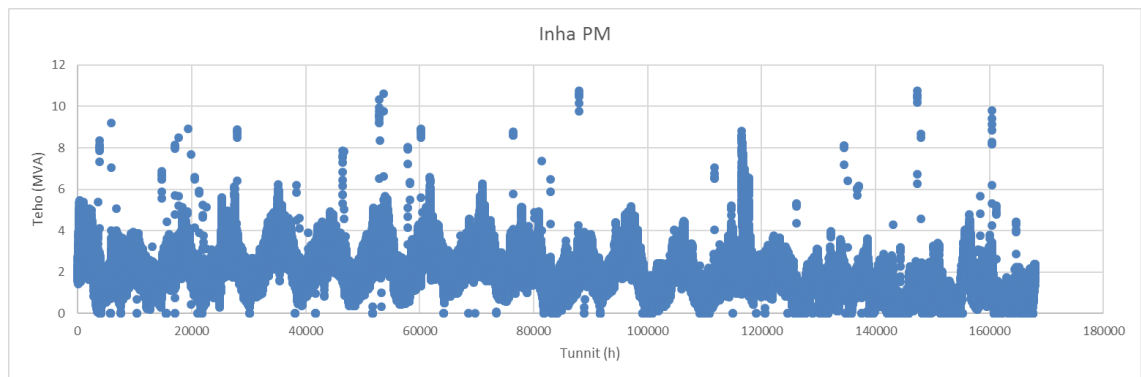
	ABB		VATTENFALL	INSTA	Suositus	Standardi
	4.4.2017	29.9.2009	30.11.2010	14.4.2016		
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	89	76	83	48,8	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	1		<5	4	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g			0,02	0,01	<0,10	IEC 62021-2
Häviökerroin,o/oo			0,1		<100	IEC 60247
Inhibiittipitoisuus, %	0,32				>0,18..0,3	IEC 60666
Kaasuanalyysi						IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	0	0	10	4	≤150	
CO,Metaani, µl/l	1	<1	1,6	1	≤130	
CO,Hiilimonoksidi, µl/l	25	<1	55	25	≤600	
CO ₂ ,Hiilidioksidi, µl/l	561	32	170	497	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/	<1	0	1	2	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	0	0	1	5	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	0	0	1	2	≤20	
TCG(palavia kaasuja)			15	36		
Kokonaiskaasupitoisuus			9,6			
Lämpötila	2		9	14		

* Käyttölämpötilassa



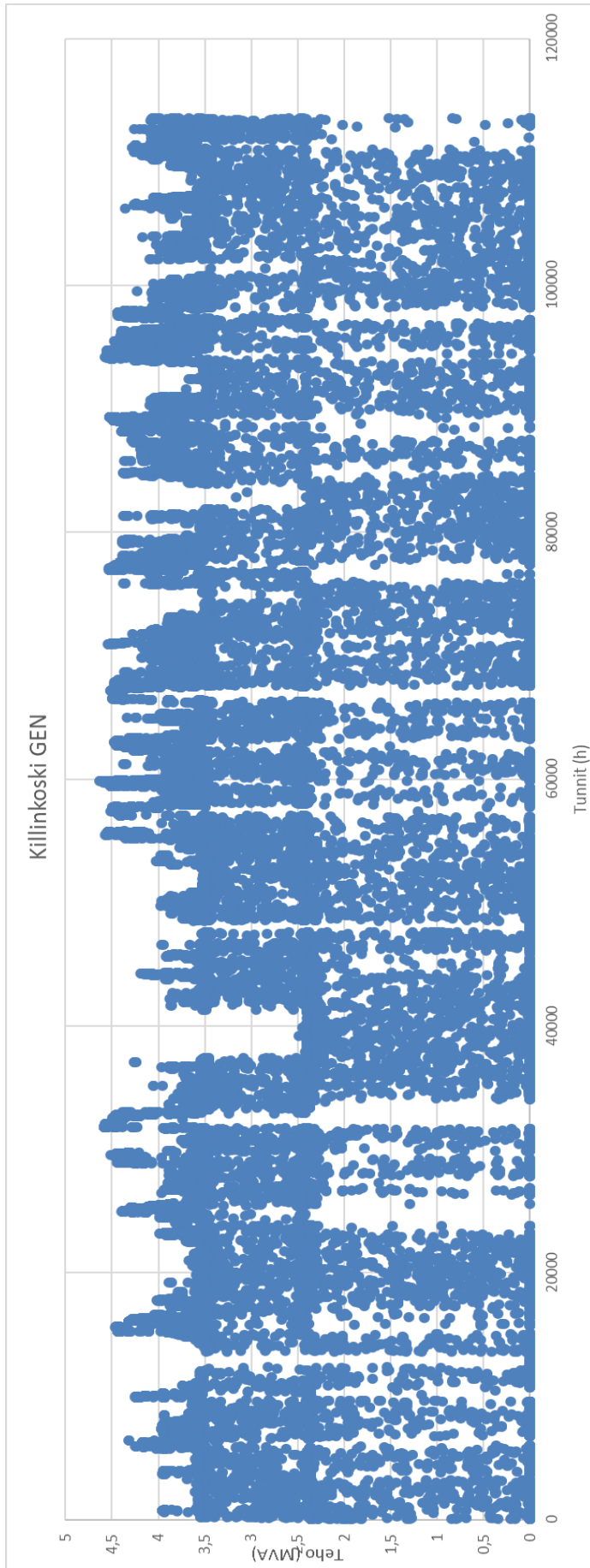
Liite 2. Inha

	INSTA	KIL YHTIÖT	VATTENFALL		ABB			
	12.5.2015	4.12.2014	17.11.2010	4.8.2009	14.1.2003	11.9.1998	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	58,2	71	77	71	98	61	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	4	6	<5	7	5	7	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,05		0,03				<0,10	IEC 62021-2
Kaasuanalyysi								IEC60599:2007-5
H2 Vety, µl/l	4	4	10	14	18	15	≤150	
CO, Metaani, µl/l	0,5	0	2,8	3	3	5	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	28	20	41	50	53	45	≤600	
CO2, Hiilidioksidi, µl/l	640	301	690	950	1000	800	≤14000	
C2H4 Etyleeni, µl/	5	0	1	1	4	9	≤280	
C2H6 Etaani, µl/l	8	2	1	1	<1	1	≤90	
C2H2, Asetyleeni, µl/l	18,3	12	24	35	41	45	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	65		39	54				
Kokonaiskaasupitoisuus			10,6	10,8				
Lämpötila			10	35				
* Käyttölämpötilassa								



Liite 3. Killinkoski PM

	INSTA	KIL YHTIÖT	VATTENFALL			Suositus	Standardi
	12.5.2015	5.7.2012	4.8.2009	7.11.2007	23.10.2001		
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	61,1	60+	69	75	62	>40	IEC 60156
Kosteus, ppm	4	14	7	7	17	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,08					<0,10	IEC 62021-2
Rajapintajännitys, 10-3N/m		30,4				>22	ASTM D971
Inhibiittipitoisuus, %		2120				>0,18...0,3	IEC 60666
Kaasuanalyysi							IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	9	6	15	25	20	≤150	
CO, Metaani, µl/l	5	3,9	4,4	5,8	13	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	67	53	130	100	60	≤600	
CO ₂ , Hiilidioksidi, µl/l	890	220	920	1300	1000	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/l	5	20	18	16	7,7	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	12	1,4	1	1,5	1,1	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	87,2	94	81	90	65	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	208		119	138	107		
Kokonaiskaasupitoisuus			10,8				
Lämpötila	18	28	28	20			
* Käyttölämpötilassa							



Liite 5. Ritari

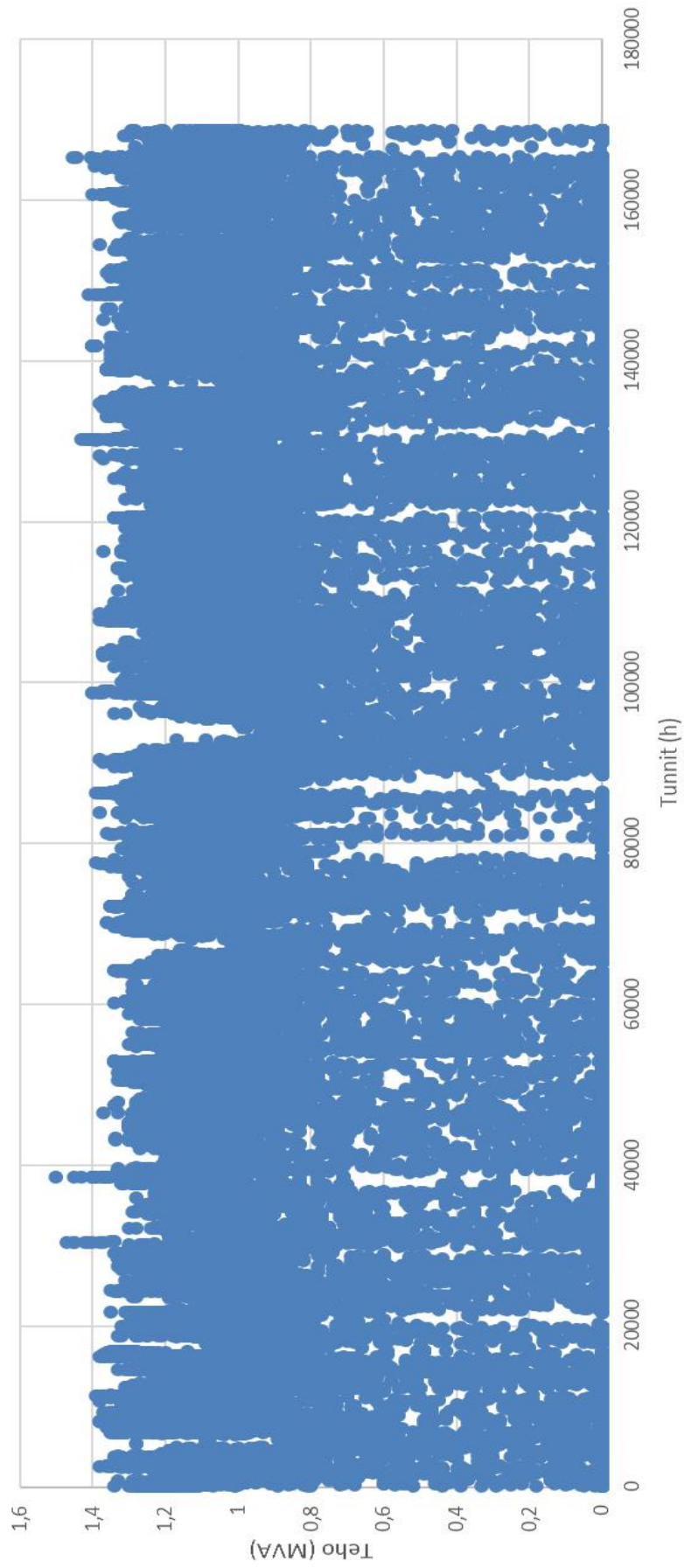
	INSTA	KILYHTIÖT	ABB	VATTENFALL	ABB		
	17.4.2016	4.12.2014	24.5.2013	22.4.2008	21.9.2004	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	62,1	68,7	78	68	75	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	4	4	1	<5	8	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,01					<0,10	IEC 62021-2
Inhibiittipitoisuus, %			0,29			>0,18...0,3	IEC 60666
Kaasuanalyysi							IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	20	15	22	53	15	≤150	
CO, Metaani, µl/l	6	6	6	7,9	5	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	51	59	49	71	95	≤600	
CO ₂ , Hiilidioksidi, µl/l	705	463	786	860	920	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/l	28	2	26	25	18	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	14	14	3	1	2	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	103,6	52	110	120	120	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	223			231			
Kokonaiskaasupitoisuus							
Lämpötila	15		25	18			
* Käyttölämpötilassa							

Liite 6. Soininkoski

1(2)

	INSTA	VATTENFALL			ABB		
	18.4.2016	4.8.2009	31.3.2008	8.11.2005	12.8.1995	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	74,5	60	60	83	85	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	6	9	<5	6	5	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,01	0,01	0,03	0,01		<0,10	IEC 62021-2
Kaasuanalyysi							IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	4	10	10	10		≤150	
CO,Metaani, µl/l	2	1,5	1,2	1,2	2	≤130	
CO,Hiilimonoksidi, µl/l	29	43	42	53	90	≤600	
CO ₂ ,Hiilidioksidi, µl/l	881	1300	1100	1100	1200	≤14000	
C ₂ H ₄ Etyleeni, µl/l	3	1	1	1	1	≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	11	1	1	1	1	≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	0	1	1	1	1	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	45	15	15	14			
Kokonaiskaasupitoisuus		10,4					
Lämpötila	30	20	28	35			
* Käyttölämpötilassa							

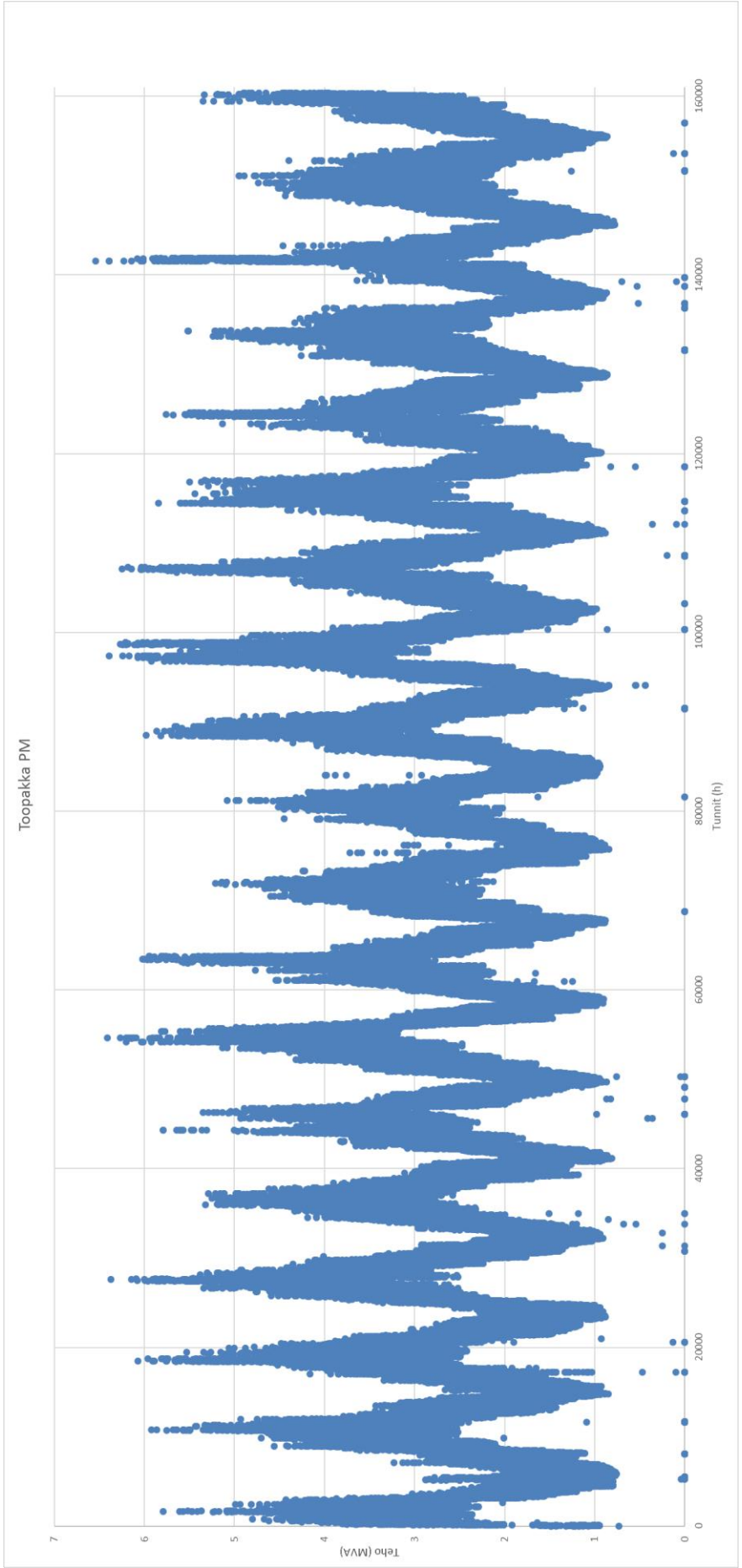
Soininkoski



Liite 7. Toopakka

1(2)

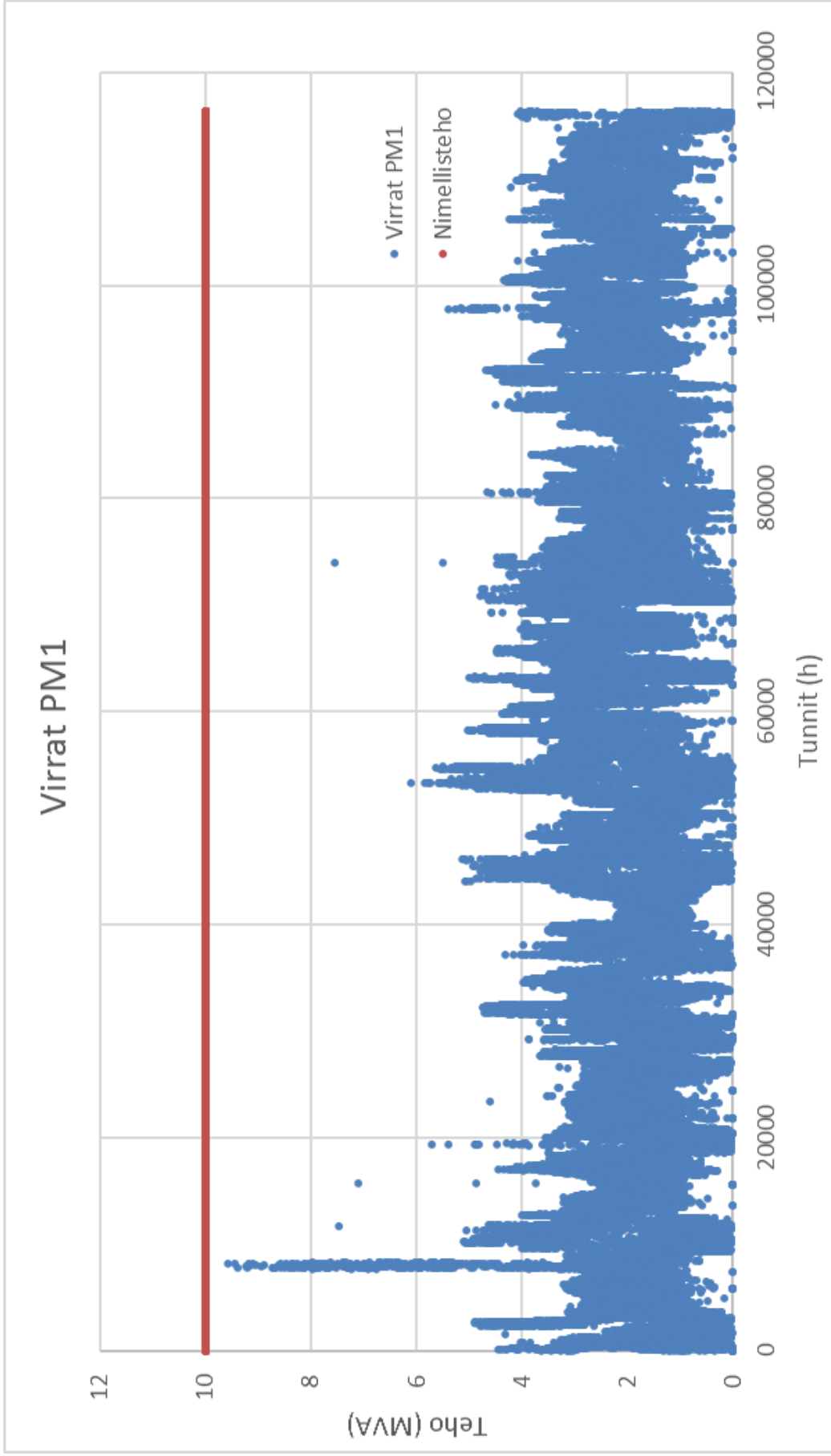
	INSTA	ABB		VATTENFALL		
	16.5.2017	23.5.2013	19.9.2007	30.11.2005	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	67,5	61	65	77	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	5	1	4	<5	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,01				<0,10	IEC 62021-2
Inhibiittipitoisuus, %		0,3			>0,18...0,3	IEC 60666
Kaasuanalyysi						IEC60599:2007-5
H2 Vety, µl/l	4	3	0	10	≤150	
CO, Metaani, µl/l	2	2	2	1,9	≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	120	112	106	160	≤600	
CO2, Hiilidioksidi, µl/l	828	896	723	600	≤14000	
C2H4 Eyleeni, µl/	3	2	1	1	≤280	
C2H6 Etaani, µl/l	3	<1	<1	1	≤90	
C2H2, Asetyleeni, µl/l	0,4	0	<1	1	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	129			15		
Lämpötila	20	30	20	22		
* Käyttölämpötilassa						



Liite 8. Virrat PM1

1(2)

	INSTA	KIL YHTIÖT	VATTENFALL				
	12.5.2015	31.7.2012	31.3.2008	7.11.2003	2.10.2001	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	69,9	60+	72	75	64	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	4	10	<5	<5	<5	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,04		0,02	0,02	0,02	<0,10	IEC 62021-2
Kaasuanalyysi							IEC60599:2007-5
H ₂ Vety, µl/l	4	<5	23	10		≤150	
CO, Metaani, µl/l	2	1,8	1,2	1,2		≤130	
CO, Hiilimonoksidi, µl/l	78	82	110	100		≤600	
CO ₂ , Hiilidioksidi, µl/l	892	251	770	1000		≤14000	
C ₂ H ₄ Eyleeni, µl/l	11	0,1	5	10		≤280	
C ₂ H ₆ Etaani, µl/l	6	0,1	1	1		≤90	
C ₂ H ₂ , Asetyleeni, µl/l	0	0,1	1	1		≤20	
TCG(palavia kaasuja)	98		32	24			
Lämpötila	28	37	20	23	18		
* Käyttölämpötilassa							



Liite 9. Virrat PM2

	INSTA	KIL YHTIÖT	VATTENFALL				
	12.5.2015	31.7.2012	31.3.2008	7.11.2003	23.10.2001	Suositus	Standardi
Läpilyöntilujuus, kV/2,5mm	79,3	60+	79	86	76	>40	IEC 60156
Kosteus,ppm	4	8	<5	<5	<5	<30*	IEC 60814
N-luku, mgKOH/g	0,08		0,02	0,02	0,01	<0,10	IEC 62021-2
Kaasuanalyysi							IEC60599:2007-5
H2 Vety, µl/l	4	<5	10	10	10	≤150	
CO,Metaani, µl/l	2	1,8	11	1,6	2,8	≤130	
CO,Hiilimonoksidi, µl/l	59	51	40	100	40	≤600	
CO2,Hiilidioksidi, µl/l	693	175				≤14000	
C2H4 Etyleeni, µl/	10	5,9	0,8	2,2	0,8	≤280	
C2H6 Etaani, µl/l	6	0,1	0,3	1	0,3	≤90	
C2H2, Asetyleeni, µl/l	0	0,1	3,1	4	3,1	≤20	
TCG(palavia kaasuja)	78		25	19	25		
Lämpötila	28	39	20	26	20		
* Käyttölämpötilassa							

