

Teemu Rissanen

Tehomuuntajan kuntoarviointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

9.10.2015

Alkusanat

Insinööriytyö on tehty Fortumin Power Solutions -yksikölle, joka tarjoaa asiantuntijapalveluita voimalaitoksen käyttöön ja kunnossapitoon. Työni ohjaajana on toiminut TkL Olli Lindgren, jota haluan kiittää opeista ja neuvoista, joita olen työni aikana häneltä saanut.

Lisäksi suuri kiitos kuuluu työtovereilleni, joiden neuvot ja kokemus ovat auttaneet minua tätä työtä tehdessäni. Erityisesti haluan kiittää Mauri Arorantaa sekä Jami Lehtistä, jotka ovat opastaneet minua työni aikana muuntajiin liittyvissä asioissa, niin teoriassa kuin käytännössäkin.

Lopuksi haluan kiittää läheisiäni, jotka ovat osoittaneet tukea ja ymmärrystä koko opin-
tojeni aikana.

Vantaalla 9.10.2015

Teemu Rissanen

Tekijä Otsikko	Teemu Rissanen Tehomuuntajan kuntoarviointi
Sivumäärä Aika	66 sivua + 6 liitettä 9.10.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	TkL Olli Lindgren, Fortum Lehtori Jukka Karppinen, Metropolia
<p>Tämä insinöörityö on tehty Fortumin Power Solutions -yksikölle, joka tuottaa asiantuntija-palveluita voimalaitoksen käyttöön ja kunnossapitoon.</p> <p>Työ käsittelee öljyeristeisen tehomuuntajan kuntokartoitusta, ja työssä perehdyttiin tehomuuntajan kunnan tärkeimpiin indikaattoreihin sekä käyttöpaikalla suoritettaviin eri kunnonvalvontamenetelmiin.</p> <p>Työn kokeellisessa osassa perehdyttiin dielektrisen taajuusvastemittauksen eli DFR (Dielectric Frequency Response) -mittauksen menetelmään ja sen soveltuvuuteen muuntajan kunnonvalvonnassa. Työn tulokset pohjautuvat pääosin tähän tarkoitukseen valmistetun mittalaitteen tuloksiin. Mittalaite on kehitetty erityisesti tehomuuntajan paperieristyksen kosteuden, häviökertoimen sekä muuntajaöljyn johtavuuden selvittämiseen. Valmistaja ilmoittaa laitteen soveltuvan muun muassa läpivientieristimille sekä suurjännitekaapeleille, mikä myös käsitellään tässä työssä.</p> <p>Työ tehtiin suorittamalla useita kuntokartoituksia muuntajille eri voimalaitoksilla. Työn tukena on käytetty kentältä saadun kokemuksen lisäksi runsaasti alan materiaalia. Lisäksi materiaalina on käytetty Fortumin sisäisiä asiakirjoja sekä eri asiantuntijoiden kokemuksia.</p> <p>Pääeristykset, muuntajaöljy ja virtatiet ovat tehomuuntajan tärkeimmät kunnonvalvonnan kohteet. Mittaustuloksia analysoidessa tulee kiinnittää huomiota tarkkailuraja-arvojen lisäksi trendiseurantaan. Tuloksia tulee aina käsitellä tapauskohtaisesti.</p> <p>DFR-menetelmällä saadaan paljon tietoa muuntajan pääeristyksen kunnosta, kuten kosteudesta ja ikääntymisestä. Mittaustulokset öljypaperieristeisistä suurjännitekaapeleista olivat hyviä. Tulokset muuntajan läpivientieristimistä ovat toistaiseksi olleet vaihtelevia ulkopuolisten häiriöiden takia. Työn jälkeen tutkimuksia DFR-mittauksen mahdollisuuksista jatketaan ja ratkaisuja yritetään löytää tunnistettuihin ongelmiin.</p>	
Avainsanat	tehomuuntaja, kuntoarviointi, dielektrinen taajuusvaste, pääeristys, muuntajaöljy, virtatiet

Author Title	Teemu Rissanen Power Transformer Condition Assessment
Number of Pages Date	66 pages + 6 appendices 9 October 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Olli Lindgren, Lic.Sc. Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was performed for Fortum Power Solutions unit, which provides expert and maintenance services for power plants.</p> <p>This thesis concerns the condition assessments of oil-filled power transformer and introduces the main key indicators of power transformer's condition. Also the different methods for determining the condition of these indicators in the field are presented.</p> <p>In the experimental part of the project, the Dielectric Frequency Response (DFR) measurement method and its suitability for monitoring the condition of power transformer were studied. The outcome of the study is mainly based on results from an instrument specifically manufactured for this purpose. The instrument is developed especially for determining power transformer main insulation's moisture content, dissipation factor and transformer's oil conductivity. The manufacturer also notifies that it is suitable for bushings and high voltage cables, which are also addressed in this thesis.</p> <p>The work was carried out by performing a number of condition assessments for power transformers at various power plants. This study is supported by several researches and the experience gain from practical work. In addition, a lot of data has been collected from Fortum's internal documents and experiences from various experts.</p> <p>This study shows that main insulation, transformer oil and current paths are the most important key indicators of the condition of the power transformer. Attention should be paid in monitoring of limit values and in the trend monitoring when analyzing the measurement results. The results should always be handled on a case by case basis.</p> <p>DFR-method gives a lot of information about the moisture and aging of the power transformer's main insulation. The measurement results for the oil-paper-insulated high voltage cables were excellent. Results of the transformer bushings have so far been varied due to external interference. After this study, research on DFR-measurement will be continued and the aim will be in finding solutions for the identified problems.</p>	
Keywords	power transformer, condition assessment, Dielectric Frequency Response, main insulation, transformer oil, current paths

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Voimalaitos osana sähköverkkoa	2
2.1	Sähköntuotanto Suomessa	2
2.2	Voimalaitokset Suomessa	3
2.2.1	Höyryvoimalaitokset	3
2.2.2	Vesivoimalaitokset	4
2.2.3	Varavoimalaitokset	4
2.3	Voimalaitosten huoltoseisokit	5
3	Voimalaitoksen sähköntuotannon pääpiirin tärkeimmät komponentit	7
3.1	Turbiini	8
3.2	Generaattori	9
3.3	Automaatio	11
3.3.1	Magnetointi	11
3.3.2	Suojareleet	13
3.3.3	Mittamuuntajat	15
3.3.4	Redundanttisuus	15
3.4	Muuntajat	16
3.4.1	Päämuuntaja	16
3.4.2	Omakäyttömuuntaja	18
3.4.3	Jännitteensäätö	19
4	Komponenttien pitoaikojen määritykset	19
5	Pääpiirin komponenttien nykytilan kartoitus ja auditointi	20
6	Tehomuuntajan kuntokartoitus	20
6.1	Muuntajan kunnan indikaattorit	21
6.1.1	Muuntajaöljy	23
6.1.2	Eristykset	26
6.1.3	Virtapiiri	30
6.1.4	Magneettiipiiri	33
6.1.5	Läpivientieristimet	34
6.1.6	Mekaaninen eheys ja muodonmuutokset	35

6.1.7	Visuaalinen tarkastus	38
6.1.8	Historia	38
6.2	Dielektrinen vastemittaus kunnonvalvonnassa	39
6.2.1	Eristyksen häviökerroin	39
6.2.2	Dielektrinen vaste aikatasossa	41
6.2.3	Dielektrinen vaste taajuustasossa	44
6.2.4	Yhdistetty FDS-PDC-menetelmä	45
6.2.5	Vertailu perinteiseen käyttötaajuudella tehtävään mittaukseen	49
6.2.6	Dielektrisen vastemittauksen tuloksia	52
7	Pohdinta	61
	Lähteet	63
	Liitteet	
	Liite 1. Muuntajan kaasuanalyysitulokset	
	Liite 2. Muuntajan yläjännitepuolen B-vaiheen osittaispurkauksien mittaus	
	Liite 3. Käämikytkimen toimintakoe DRM-menetelmällä	
	Liite 4. Muuntajan läpivientieristimien koestuspöytäkirja	
	Liite 5. Eri ikäisten ja tyyppisten muuntajien prespaanin suhde öljyyn	
	Liite 6. Erilaisia pääeristysten dielektrisiä vasteita	

Lyhenteet

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> – Automaattinen jännitteensäätäjä generaattorin magnetoinnissa.
CHP	<i>Combinated Heat and Power</i> – Lämmön ja sähkön yhteistuotanto
CTC	<i>Continuously Transposed Conductor</i> – Muuntajan käämin osajohdinten valmistustapa.
DAR	<i>Dielectric Absorption Ratio</i> – Eristysvastusmittauksen avulla voidaan selvittää eristyksen dielektrisen absorptio suhdeluku.
DFR	<i>Dielectric Frequency Response</i> – Määrittämällä eristeen dielektrinen taajuusvaste saadaan tietoa eristyksen kunnosta.
DP	<i>Degree of Polymerisation</i> – Paperin keskimääräinen glukoosirenkaiden lukumäärä molekyyliä kohti.
FDS	<i>Frequency Domain Spectroscopy</i> – Taajuusalueen spektroskopia. Käytetään hyödyksi etenkin DFR-mittauksessa, jossa dielektrinen vaste määritetään taajuustasossa.
FRA	<i>Frequency Response Analysis</i> – Taajuusvasteanalyysi, jota käytetään tehomuuntajien kunnonvalvonnassa ns. sormenjälkimittauksena.
PDC	<i>Polarisation and Depolarisation Current</i> – Polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirtojen avulla voidaan määrittää eristeen dielektrinen vaste aikatasossa.
PI	<i>Polarisation Index</i> – Eristysvastusmittauksen avulla voidaan määrittää eristyksen polarisaatioindeksi.
SFRA	<i>Sweep Frequency Response Analysis</i> – Taajuusvasteanalyysi, jota käytetään tehomuuntajien kunnonvalvonnassa ns. sormenjälkimittauksena.

1 Johdanto

Tämä insinööryö tehtiin Fortumin Power Solutions -yksikölle. Fortumin toiminnan tarkoitus on tuottaa energiaa, joka edesauttaa nykyisten ja tulevien sukupolvien elämää. Yhtiön toiminta on keskittynyt Pohjoismaihin, Baltiaan, Venäjälle ja Puolaan. Fortum Power Solutions tuottaa asiantuntijapalveluita voimalaitoksien käyttöön ja kunnossapitoon. Tuotevalikoimaan kuuluu asiakkaan tarpeisiin räätälöitäviä erilaisia asiantuntijapalveluita. Niitä ovat muun muassa energiatehokkuus, turbiini- ja generaattorihuollot, ydinturvallisuus- ja jätteenhallinta, energian hallinta ja tietojärjestelmät sekä käytettävyyden, suorituskyvyn ja energiatehokkuuden parantaminen.

Suomen voimalaitokset alkavat olla jo ikääntyneitä, joten jatkuva kunnossapito ja kunnonvalvonta ovat laitoksille välttämättömiä. Sähkön muodostamisen ja siirtämisen pääkomponenttien teknistaloudelliset pitoajat ovat pitkiä, kymmeniä vuosia. Uudet tekniikat syrjäyttävät kovaa vauhtia esimerkiksi vanhat suojausjärjestelmät ja magnetointilaitteistot. Generaattorien ja muuntajien kunnonvalvonta tulee entistä tärkeämmäksi laitteiston ikääntyessä. Tehokkaan kunnonvalvonnan seurauksena muuntajia, generaattoreita ja automaatiolaitteistoa päivitetään, kunnostetaan ja uusitaan oikea-aikaisesti. Kunnonvalvonnan yhtenä tavoitteena on ehkäistä yllättävien vikojen syntyä.

Työn alussa esitellään voimalaitoksen sähköntuotannon pääpiirin komponentit. Komponentteihin luetaan turbiini, generaattori, muuntajat ja niihin liittyvä automaatio. Työssä keskitytään tarkemmin tehomuuntajan kuntoarviointiin. Kuntoarviointia varten esitellään tehomuuntajan kunnon tärkeimmät indikaattorit sekä käyttöpaikalla suoritettavia eri kunnonvalvontamenetelmiä.

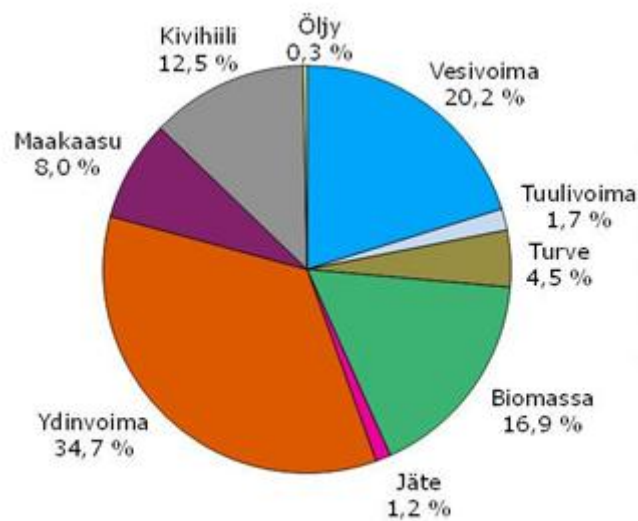
Lopuksi työssä käsitellään dielektrisen taajuusvastemittauksen soveltuvuutta muuntajan kuntokartoitukseen. Menetelmällä saadaan määritettyä tietyn eristysvälin dielektrinen vaste taajuustasossa, jonka avulla voidaan selvittää muuntajan eristysosien kosteuskerroin sekä öljyn johtavuus. Kyseistä mittausta kokeillaan muuntajien lisäksi suurjännitekaapeleille ja läpivientieristimille.

2 Voimalaitos osana sähköverkkoa

Suomen sähköverkko koostuu kantaverkosta, alueverkoista, jakeluverkoista, sähköasemista ja -laitteista, joita syöttävät voimalaitokset. Voimalaitokset voidaan ryhmitellä monella tavalla, primäärienergian, tuotantoprosessin tai käyttötavan perusteella, kuten höyryvoimalaitokset, vesivoimalaitokset ja usein varavoimana käytetyt kaasuturbiini- ja dieselvoimalaitokset. Muita energiantuotantomuotoja ovat muun muassa Suomessakin kasvava tuulivoima sekä aurinkovoima. [1.]

2.1 Sähköntuotanto Suomessa

Sähköntuotanto on Suomessa hajautettu monipuolisesti eri tuotantomuotoihin. Hajautettu sähköntuotanto lisää sähkön hankinnan varmuutta. Tärkeimmät sähkön tuotannon energialähteet ovat ydinvoima, vesivoima, kivihiili, maakaasu, puupolttoaineet sekä turve (kuva 1). Näistä uusiutuvia on 39 %, hiilidioksidivapaita 74 % ja kotimaisia 45 %. [2.]



Kuva 1. Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin vuonna 2014 [2].

Noin kolmannes sähköstä tuotetaan yhteistuotantona lämmöntuotannon kanssa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla saadaan polttoaineen energiasisältö käytettyä parhaiten hyödyksi. [2.]

Vuonna 2014 Suomessa tuotettiin yhteensä 68 081 GWh sähköä, kun kulutus oli 83 416 GWh [3]. Sähkön tuotannon ja kulutuksen epäsuhdetta paikataan viennillä ja tuonnilla. Sähköverkkoon on tuotettava joka hetki sama määrä energiaa kuin se kuluttaa. Jos kulutus kasvaa suuremmaksi kuin tuotanto, taajuus laskee alle 50 Hz:n. Kulutuksen ollessa pienempi kuin tuotanto, kasvaa taajuus yli 50 Hz:n. Taajuuden sallitaan vaihtelevan välillä 49,9–50,1 Hz. [4.]

Säätövoimaa tarvitaan pitämään kulutus ja tuotanto tasapainossa. Säätötarpeen arvioidaan kasvavan Suomessa tuulivoiman ja aurinkovoiman kasvaessa, sillä molemmat ovat melko vaihtelevia tuotantomuotoja. Säätövoimaa tarvitaan myös paikkaamaan tuotannon katkoksia, joita syntyy, jos esimerkiksi voimalaitos putoaa verkosta häiriötilanteen vuoksi. Säätövoima tuotetaan Suomessa usein vesivoimalla tai se tuodaan muista Pohjoismaista, kuten Ruotsista tai Norjasta, joissa on valtavasti helposti säädettävää vesivoimaa. Vesivoima onkin taloudellisesti edullisinta ja teknisesti toimivinta säätövoimaa, minkä käyttö lisäisi myös uusiutuvien energialähteiden käyttöä Suomessa. Säätövoimakapasiteetin lisääminen mahdollistaisi aurinko- ja tuulienergian tuotannon lisäämisen, parantaisi sähköjärjestelmän luotettavuutta sekä vähentäisi tuontia muista maista. [4.]

2.2 Voimalaitokset Suomessa

Suomessa on noin 400 yli 1 MW:n voimalaitosta ja 120 sähköä tuottavaa yritystä. Lähes puolet Suomen voimalaitoksista on vesivoimalaitoksia. [2.]

Suurin osa Suomen voimalaitoksista on rakennettu 60–80-luvulla. Arvioitu elinikä voimalaitokselle vaihtelee noin 50 vuoden molemmin puolin. Haastetta aiheuttavat laitteistot, jotka alkavat olla jo niin vanhoja, että varaosien saanti on hankalaa, sillä niiden valmistus on saatettu jo lopettaa. Ongelmaksi muodostuu vielä ammattitaidon katoaminen, sillä vanhan tekniikan tuntevat asiantuntijat alkavat olla jo lähellä eläkeikää.

2.2.1 Höyryvoimalaitokset

Suomen käytetyin voimalaitos on höyryvoimalaitos. Höyryvoimalaitoksia ovat ne laitokset joiden turbiinia pyörittää kuuma vesihöyry. Höyryvoimalaitokset jaetaan turbiinista ulos tulevan höyrypaineen perusteella lauhdevoimalaitoksiin tai vastapainevoimalaitok-

siin. Käytetyn polttoaineen perusteella voidaan höyryvoimalaitokset jakaa vielä ydin-, hiili-, turve- ja maakaasuvoimalaitoksiin. Höyryn paineen ja lauhtumislämpötilan ollessa erittäin korkeita, voidaan höyryä käyttää sähköntuotannon lisäksi lämmitystarkoituksiin. Vastapainevoimalaitokset (CHP) tuottavat siis sähkön lisäksi kaukolämpöä tai teollisuuden vastapainehöyryä. Vastapainelaitoksilla päästään lähes 90 %:n hyötysuhteen lauhdutinlämpöiden jäädessä pois. Lauhdutusvoimalaitoksissa höyryn paine ja lauhtumislämpötila ovat niin matalat, ettei höyrystä vapautuvaa lauhtumislämpöä voida hyödyntää lämmitystarkoituksiin. [5.]

2.2.2 Vesivoimalaitokset

Vesivoima on Suomen tärkein uusiutuva energiamuoto. Vesivoimalaitoksessa virtaava vesi johdetaan turbiiniin, joka pyörittää generaattorin roottoria tuottaen näin sähköä. Vesivoimalaitosten hyötysuhde on yleensä hyvä noin 90 %. Suomen yleisin vesiturbiinityyppi on Kaplan-turbiini, ja sitä käytetään suuren virtaaman ja matalan putouskorkeuden vesivoimalaitoksissa. Kaplan-turbiinin siipikulman säädöllä saavutetaan hyvä hyötysuhde laajalle käyttöalueelle. Muita käytettyjä turbiineja ovat muun muassa Pelton- ja Francis-turbiinit. Vesivoimalla on energijärjestelmän toimivuuden ja käyttövarmuuden kannalta erityinen asema säätöominaisuutensa vuoksi. Vesivoimalaitokset on sijoitettu Suomessa yleensä suurten vesistöjen pääuomaan tai suurimpiin jokihaaroihin. Virtaaman vaihtelut tasataan säännöstelemällä säännöstelyaltaista. Säännöstelyaltaana voi toimia vesistön keskusallas, tai osa säännöstelystä voidaan tehdä käyttämällä tekoaltaita. Suomessa on yhdeksän yli 100 MW:n tehoista vesivoimalaitosta, joista peräti kuusi sijaitsee Kemijoella. [6, s. 27; 7.]

2.2.3 Varavoimalaitokset

Varavoimalaitokset varmistavat sähkön tuotannon voimalaitoksen tai verkon vikaantuessa sekä kulutuksen huippuhetkinä. Fingridillä on käytössään yhteensä 746 MW varavoimalaitoskapasiteettia, joista omaa on 615 MW ja käyttöoikeussopimuksilla vuokrattua 131 MW. Fingrid omistaa 10 varavoimalaitosta, joissa on yhteensä 21 yksikköä. Nämä tiedot ovat tosin vuodelta 2007, ja luvut ovat luultavasti muuttuneet, mutta ne ovat suuntaa-antavia. [8.]

Varavoimalaitokset perustuvat usein kaasuturbiinitekniikkaan. Kaasuturbiinilaitoksissa käytetään polttoaineena joko kevyttä polttoöljyä tai maakaasua. Kaasuturbiinilaitoksien rakennuskustannukset ovat usein pienet, mutta käyttökustannukset suuret. Hyötysuhde jää yleensä noin 20 %:n tasolle, parhaimmillaankin 35 %:iin, sillä palokaasut poistuvat kuumina, eikä lämpöä näin hyödynnetä. Kaasuturbiinivoimalaitosten etu on niiden nopea käynnistys ja säädettävyys. [5; 6, s. 26.]

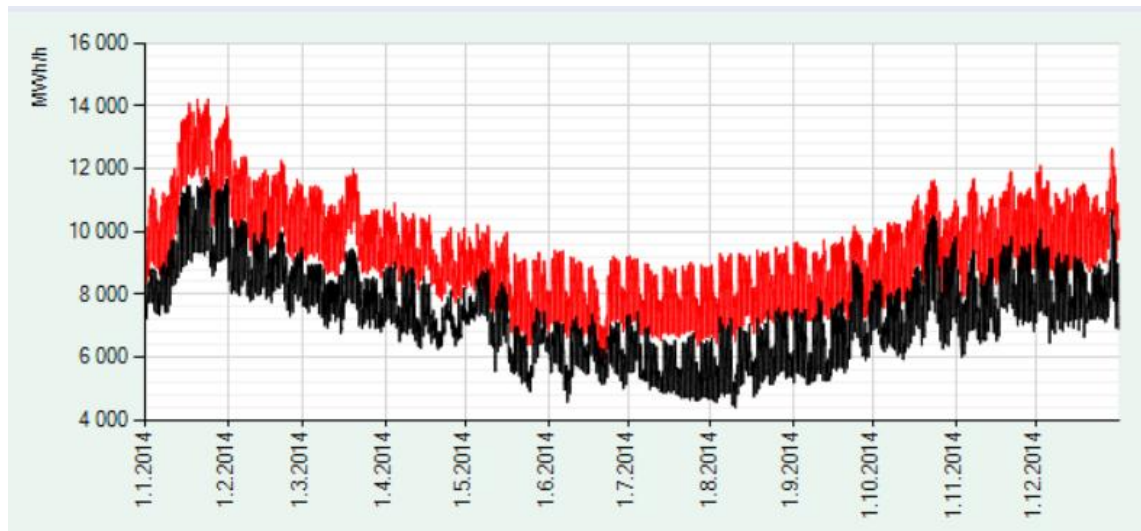
2.3 Voimalaitosten huoltoseisokit

Huoltoseisokin tarkoituksena on varmistaa voimalaitoksen käyttövarmuus, pidentää voimalaitoksen elinikää ja ennaltaehkäistä mahdollisia tulevia vikoja. Huoltoseisokit ajoitetaan yleensä kesälle, jolloin laitoksen alasajosta koituu mahdollisimman vähän haittaa ja menetettyjä tuloja, sillä kesällä sähkön ja kaukolämmön tarve on pienin (kuvat 2 ja 3).

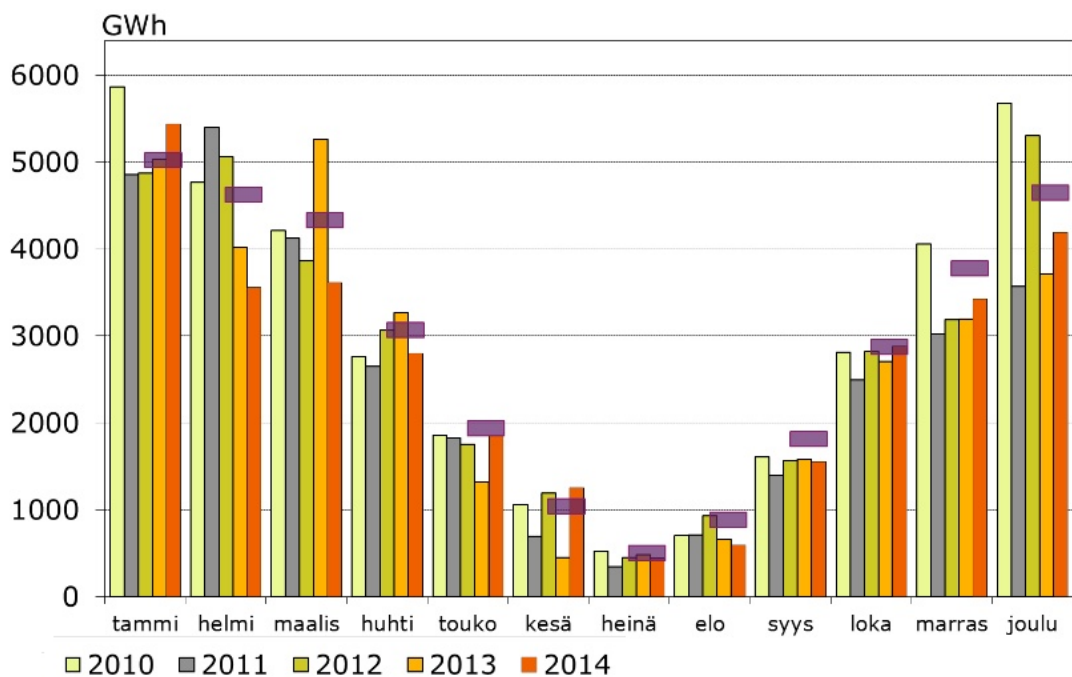
Huoltoseisokin aikana tarkastetaan, huolletaan, uusitaan tai modernisoidaan eri komponentteja tarpeen mukaan. Voimalaitoksella voi työskennellä yhtä aikaa useita satoja henkilöitä, jotka ovat useiden eri aliurakoitsijoiden alaisuudessa, joten työturvallisuuden merkittävyys korostuu entuudestaan. Työt kohdistuvat kattilaan, säiliöihin, putkistoihin, turbiiniin ja generaattoriin sekä moneen muuhun voimalaitoksen komponenttiin.

Erilaisten kunnonvalvontamenetelmien, laitteen historian sekä aikavälin perusteella päätetään huollon tai tarkastuksen laajuudesta, esimerkiksi siitä, vedetäänkö generaattorin huollossa roottori ulos staattorista tarkempaa tutkimusta varten vai riittääkö pelkästään generaattorin osittainen avaaminen.

Huoltoseisokin aikana voidaan asentaa erilaisia kunnonvalvonnan mittausantureita, kuten esimerkiksi värähtelyantureita, ilmapäivuoantureita sekä osittaispurkauscondensaattoreita, jotka mahdollistavat laitteen tilan tai kunnon seuraamisen käytön aikana.



Kuva 2. Suomen sähkön kulutus ja tuotanto vuonna 2014. Mittausdata on kerätty tunnin välein. Punaisella on esitetty sähkön kulutus ja mustalla sähkön tuotanto. Kulutuksessa nähdään selvä lasku kesällä. Vuoden kokonaiskulutukseksi saadaan noin 82,5 TWh. [9.]

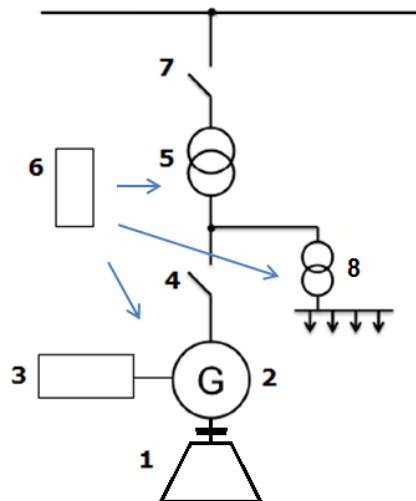


Kuva 3. Kaukolämmön kulutuksen kehitys kuukausittain Suomessa vuosina 2010–2014 [10]. Pienimmillään tehontarve on kesällä, jolloin kaukolämpöä kuluu lähinnä käyttöveden lämmitykseen ja tehohäviöihin. Suurimmat kaukolämpötehon tarpeet ajoittuvat talvelle huippupakasten aikaan.

Voimalaitoksella on usein useampi turbiini ja generaattori, eikä niitä kaikkia ajeta alas samanaikaisesti, vaan huoltoseisokit voidaan suorittaa yksiköille vuorotellen. Revision tai huoltoseisokin kesto riippuu huollon laajuudesta, kuitenkin viikoista kuukausiin.

3 Voimalaitoksen sähköntuotannon pääpiirin tärkeimmät komponentit

Sähkön tuottaminen voimalaitoksissa alkaa generaattorista. Turbiini pyörittää staattorin sisällä roottoria, joka induktion avulla muodostaa staattoriin jännitteen. Magnetointijärjestelmällä hallitaan roottorin magnetointia, joka määrittää staattorin jännitteen sekä loistehon tuotannon tai kulutuksen. Pätehon säätö taas tapahtuu turbiinin vääntömomenttia muuttamalla. Ennen sähkön syöttämistä sähköverkkoon tulee jännitetaso muuttaa sopivaksi muuntajalla, jota kutsutaan päämuuntajaksi. Generaattorin tuottamaa sähköä muunnetaan sopivaksi myös laitoksen omille järjestelmille muuntajilla, joita kutsutaan omakäyttömuuntajiksi. Päämuuntajaa, generaattoria, magnetointia sekä omakäyttömuuntajia varten on oltava erilaiset suojausfunktiot sähköntuotannon ja -siirron varmistamiseksi (kuva 4).



Kuva 4. Sähköntuotannon pääpiirin tärkeimmät komponentit: 1) turbiini, 2) generaattori, 3) magnetointilaitteisto, 4) generaattorikatkaisija, 5) päämuuntaja, 6) relesuojaus, 7) verkkokatkaisija, 8) omakäyttömuuntaja.

Jokaisella komponentilla on tärkeä rooli sähkön tuotannossa. Komponenttien kunnossapidot on usein erotettu toisistaan, sillä jokainen niistä muodostaa oman kokonaisuuden, johon on syytä keskittyä tarkasti.

3.1 Turbiini

Höyryturbiini on lämpövoimakone, joka muuttaa höyryn paine- ja lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi. Turbiinin roottori koostuu akselista ja juoksusiivistä. Sisäpesä taas koostuu johtosiipikannakkeista ja kiinteästi asennetuista johtosiivistä. Höyryn tiheys ja tilavuus muuttuvat voimakkaasti paineen muutoksen myötä. Mitä suurempi on höyryn paine, sitä pienempään tilaan se kutistuu. Kun prosessissa kehitetty korkea paineistettu ja lämmitetty höyry menettää painettaan kulkiessaan turbiinin siivistön läpi, paisuu se luovuttaen samalla energiaa. Höyryn paisuessa turbiinissa sen virtausnopeus kasvaa. Kun höyryn tilavuus kasvaa, tulee jokaisen vaiheen paisuntatilan olla entistä suurempi. Tästä syystä turbiinit jakautuvat höyrypaineen mukaan korkeapaineturbiiniin, välipaineturbiiniin sekä matalapaineturbiiniin. Matalapaineturbiinin jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu takaisin vedeksi. Kuvassa 5 on noin 100 MVA:n tehoisen generaattorin korkea- ja matalapaineturbiinit. [11; 12, s. 4.]

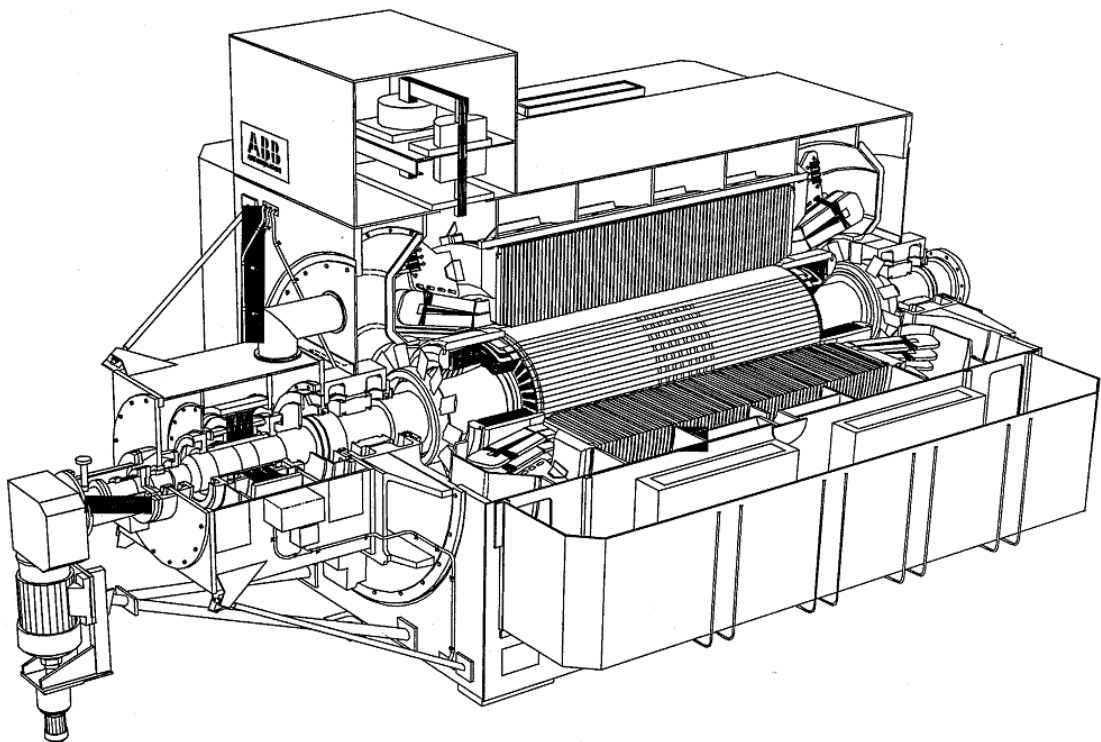


Kuva 5. Kuvassa on vasemmalla matalapaineturbiini ja oikealla korkeapaineturbiini sisäpesissä. Korkeapaineturbiinin pinta-ala on pienempi kuin matalapaineturbiinin, sillä korkean höyryn paineen tilavuus on pienempi kuin matalan paineen. Laitoksesta riippuen matalapaineturbiineja voi olla useampi. [13.]

Turbiinissa kulkevan höyryn on oltava kylläistä. Kylläinen höyry saavutetaan, kun kattilan vesihöyrystä poistetaan jäljelle jääneet vesipisarat lisälämmöllä tai jollakin muulla tavalla, kuten kosteudenerottimella. Jos höyryyn kohdistetaan edelleen lisää lämpöä, paineen pysyessä vakiona, saadaan tulistettua höyryä. Höyryn kosteudella on suuri merkitys höyryturbiineissa, sillä kostea höyry sisältää vesipisaroita, jotka rasittavat ja kuluttavat turbiinien juoksusiipiä aiheuttaen eroosiota. [12, s. 5.]

3.2 Generaattori

Sähköntuotannon kannalta generaattori on yksi merkittävimmistä komponenteista. Generaattori muuttaa turbiinin mekaanisen energian sähköenergiaksi. Tähtikytketty 3-vaihetahdigeneraattori on lähes poikkeuksetta käytetty generaattori voimalaitoksissa. Tahtikone pyörii samassa tahdissa verkon kanssa, eli roottorin pyörimisnopeudella sekä staattorin magneettikentän pyörimisnopeuden välillä ei ole jättämää. Tahtigeneraattorissa on kaksi pääkomponenttia: roottori ja staattori. Tahtigeneraattori jakautuu roottorin rakenteen perusteella avonapa- sekä umpinaparootoreihin. Näistä jälkimmäinen on selvästi käytetyin, sillä umpinaparoottori soveltuu paremmin koneisiin, joilla on korkeampi pyörimisnopeus, kuten turbogeneraattoreihin. Höyry- ja kaasuturbiineille soveltuu parhaiten umpinaparakenteinen kone. Kuvassa 6 on havainnollistava kuva turbogeneraattorista. Umpinaparakenteelle tyypillistä on pitkä runko, mutta pieni halkaisija. Avonaparoottori on yleensä suuri halkaisijaltaan, mutta lyhyt pituudeltaan. Avonaparoottoria käytetään esimerkiksi vesivoimageneraattoreissa pienemmän pyörimisnopeuden takia. [14; 15, s. 299.]



Kuva 6. Turbogeneraattorin läpileikkauskuva [16].

Generaattoreita on voimalaitoksilla usein useampi kuin yksi. Generaattorit voidaan kytkeä yhteisen kiskoston kautta yhteiselle päämuuntajalle, tai jokaisella generaattorilla voi olla oma päämuuntaja eli tässä tapauksessa blokkimuuntaja.

Generaattorin tahdistus suoritetaan yleensä generaattorikatkaisijalla tai sen puuttuessa blokkimuuntajan jälkeisellä verkkokatkaisijalla. Vikatilanteissa generaattori erotetaan verkosta ajamalla generaattorikatkaisija auki tai sen puuttuessa verkkokatkaisija. [17, s. 7]

Turbogeneraattoreiden staattorit ovat alttiita värinöille, mekaanisille voimille sekä suurille jänniterasituksille. Nämä rasitukset aiheuttavat staattorille levypaketin sekä käämityksen kiilauksen löystymistä. Kiilauksen löystyessä saattaa käämi päästä liikkumaan urassa, jolloin sen eriste hankaa levypakettia vasten. Tämä aiheuttaa kulumaa niin eristyksessä kuin levypaketissa ja saattaa johtaa eristyksen täydelliseen tuhoutumiseen läpilyönnin tapahtuessa. Staattorin kiilaukselle tehdään koestuksia, joilla määritetään ontot, löysät ja tiukat kiilat. Kiilaus tarvittaessa uusitaan ja kiilan tyyppiä voidaan vaihtaa, jos sille on tarvetta. Staattorille tehdään säännöllisesti sähköisiä kunnonvalvontamittauksia, joilla seurataan eristysten, käämiliitosten ja levypaketin kuntoa.

Roottorit ovat suuria massaltaan, ja roottori voi painaa esimerkiksi yli 45 000 kg. Kun suuri massa pyörii suurella pyörimisnopeudella, kohdistuu siihen valtavasti voimia. Roottorikäämityksen pitää olla tuettu ja kiinnitetty hyvin, jotta ei syntyisi kierros-, oikotai maasulkuja. Sähköisillä mittauksilla voidaan tarkistaa roottorin käämipiirien ja eristysten eheys. Roottorin käämitystä pitävät paikallaan päissä olevat kapat. Kapoille voidaan tehdä roottorin ulosvedon yhteydessä ultraäänitutkimus, jolla saadaan selville mahdolliset sisäiset murtumat ja halkeamat. Roottorin liiallinen värähtely voi olla seurausta epätasapainosta ja se voi aiheuttaa laakereiden liiallisen kulumisen. Tarvittaessa roottori tasapainotetaan uudelleen. Mekaanista rasitusta kohdistuu myös tuuletinsiipiin, jotka tarkastetaan myös murtumien varalta.

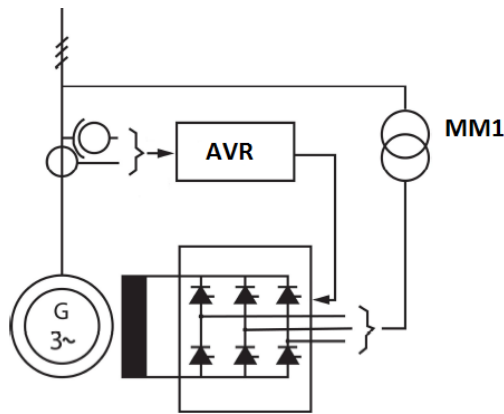
3.3 Automaatio

3.3.1 Magnetointi

Magnetointilaitteiston tehtävänä on magnetoida generaattori. Generaattori magnetoidaan syöttämällä roottorikämeihin tasavirtaa joko harjattomasti tai harjojen avulla. Jos roottori ei saa magnetointivirtaa, generaattorin tuottama napajännite on lähes nolla. Magnetointijärjestelmällä huolehditaan ulostulojännitteen lisäksi myös loistehon tuotannosta tai kulutuksesta säätämällä tehokerrointa. Tärkeää on pitää yllä riittävä magnetointivirta, sillä jos generaattori alimagnetoituu liikaa, ajautuu se epästabiliin tilaan. Ylimagnetoinnin rajana on magnetointikämien virrankestoisuus, sillä virran kasvaessa lämpeneminen kasvaa käämeissä. Ylimagnetoituna generaattori siis tuottaa loistehoa, ja alimagnetoituna se kuluttaa loistehoa, eli generaattori ottaa verkosta loistehoa magnetointiaan varten. [18, s. 97.]

Staattinen magnetointi

Staattisessa magnetoinnissa (kuva 7) magnetointitasavirta tuotetaan paikallaan pysyvillä laitteistoilla. Staattinen magnetointijärjestelmä ei sisällä erillistä magnetointigeneraattoria, kuten pyörivä magnetointijärjestelmä sisältää. Magnetointiin tarvittava teho otetaan yleensä suoraan generaattorin liittimiltä magnetointimuuntajilla tai erillisestä lähteestä. Magnetointimuuntajan syöttämä sähkö tasasuunnataan esimerkiksi kolmivaiheisella tyristorisillalla. Tasasuunnattu sähkö syötetään kenttäkatkaisijan kautta roottoriin hiiliharjoilla. Automaattinen jänniteensäätäjä eli AVR (Automatic Voltage Regulator) mittaa generaattorin jännitettä ja säätää sen avulla tyristorien ohjauskulmaa hallitakseen roottorin virtaa. Jos magnetointiteho otetaan generaattorin liittimiltä, on alkukäynnistystä varten tarvittava teho otettava joko verkosta tai esimerkiksi akustosta. [19, s. 5.]



Kuva 7. Periaatekuva staattisesta magnetoinnista. Magnetointimuuntajalla otetaan generaattorin liittimiltä magnetointiteho, joka syötetään tasasuuntaussiltaan. Tasasuuntaussilta ohjaa automaattinen jännitteensäätäjä (AVR). [19, s. 5.]

Harjallisessa magnetoinnissa tasavirta johdetaan generaattorin roottoriin käyttämällä hiiliharjoja. Hiiliharjat painetaan mekaanisesti akselia vasten hiiliharjapidikkeiden ja jousien avulla. Hiiliharjojen materiaalina käytetään yleensä grafiittia. Hiiliharjoja voi olla koneesta riippuen useita, mutta kuitenkin kaksi eri polariteettiä: toinen vie roottoriin virtaa ja toinen tuo sen ulos. Suunta on mahdollista vaihtaa seisokin yhteydessä, jos on havaittu toisen polariteetin hiiliharjojen kuluvan nopeammin kuin toisen.

Harjallinen magnetointi on nopeampi säätötapa verrattuna harjattomaan magnetointiin, sillä magnetointilaitteiston tasasuuntaussilta reagoi lähes välittömästi siltä vaadittuihin muutoksiin. Staattinen magnetointi soveltuu paremmin dynaamisesti vaativimpiin sovelluksiin. [19, s. 5.]

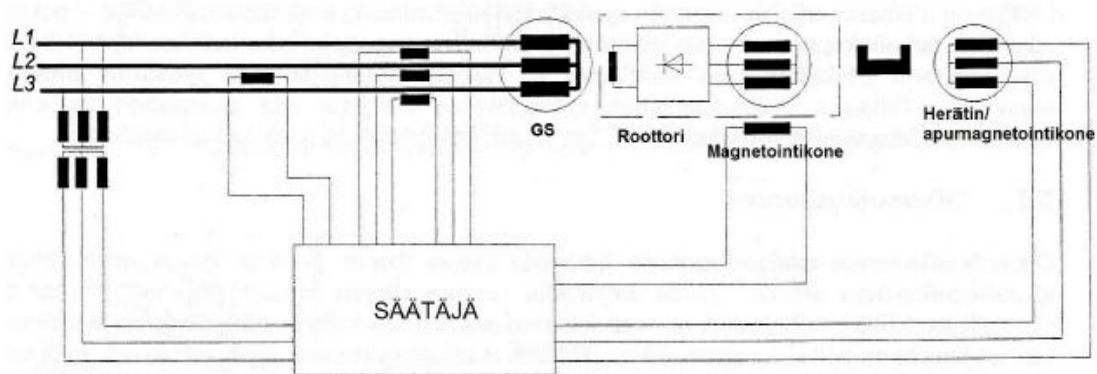
Kun hiiliharjat laahaavat akselin liukurenkaita vasten, syntyy siitä lämpöä, kulumista ja hiilipölyä. Nämä ovatkin hiiliharjojen huonoja puolia. Hiiliharjat ja liukurenkaat ovat kulumia osia, minkä vuoksi niitä pitää huoltaa säännöllisesti.

Harjaton magnetointi

Harjaton magnetointimenetelmä (kuva 8) on vaihtoehtoinen magnetointimenetelmä harjalliselle magnetoinnille. Harjattomassa magnetoinnissa päästään eroon hiiliharjojen tuomasta huoltotarpeesta. Harjattomassa magnetoinnissa on generaattorin akselin päähän sijoitettu magnetointikone. Magnetointikoneen staattori on tässä tapauksessa generaattorin akselilla, ja roottori on paikallaan pysyvä komponentti. Kun jännitteensäätäjällä syötetään virta magnetointikoneen rungossa olevaan roottoriin, indusoituu gene-

raattorin akselilla olevaan magnetointikoneen staattoriin vaihtosähkö. Tämä vaihtosähkö johdetaan generaattorin akselilla olevaan dioditasasuuntaajaan, joka tasasuuntaa sen generaattorin roottoriin. Näin generaattori magnetoituu ja staattoriin indusoituu vaihtojännite. [20, s. 21.]

Jännitteensäätäjälle voidaan ottaa syöttö joko verkkomuuntajaa käyttäen generaattorin navoista tai samalta akselilta herätinkoneesta. Herätinkoneella varustetulla generaattorilla saavutetaan mahdollisuus saarekekäyttöön sekä riippumattomuus verkon vioista, sillä ulkoista tehonlähdettä ei tarvita. [20, s. 21.]



Kuva 8. Periaatekuva harjattomasta magnetointitavasta, jossa on kestopagneetein varustettu herätinkone [18, s. 101].

Harjaton magnetointi sopii huoltovapautensa ansiosta kohteisiin, joilta vaaditaan käyttövarmuutta ja pidempää huoltoväliä. Harjattomassa magnetoinnissa on kuitenkin hitaampi vaste verrattuna staattiseen magnetointiin. Pahimmillaan harjattomassa magnetoinnissa täytyy virtaohjeen kulkea kolmen koneen aikavakioiden kautta, kun taas staattisessa magnetoinnissa voi tyristorisilta olla ainut viivettä aiheuttava tekijä. [19, s. 13; 20, s. 21.]

3.3.2 Suojareleet

Generaattoria, magnetointilaitteistoa sekä muuntajia varten tarvitaan erilaisia suojalaitteita suojaamaan vika- sekä häiriötilanteilta. Generaattorit ja muuntajat tulee suojata ulkoisilta ja sisäisiltä vioilta. Verkosta voi aiheutua ulkoisia vikoja, kuten epäsymmetrinen kuormitus, maa- ja oikosulut, ylikuormitus, taajuusvaihtelut sekä siirtoverkon eri häiriöt. Ulkoisen vian voi aiheuttaa myös turbiini, sillä jos roottorin pyörittämiseen tarvit-

tava teho menetetään ja generaattori pysyy verkossa kytkettynä, alkaa generaattori toimia moottorina ja näin pyörittää turbiinia verkon tahdissa. Sisäisiä vikoja ovat erilaiset oiko-, kierros- ja maasulut käämityksissä. Suojauslaitteiston tavoitteena on pitää sähköntuotanto ja siirto turvallisena sekä varmatoimisena. [15, s. 299.]

Suojalaitteet ovat kehittyneet sähkömekaanisista ja staattisista suojareleistä numeerisiin suojareleisiin. Sähkömekaanisissa releissä toiminta perustuu erilaisten jousien, vipujen ja koskettimien liikuttamiseen magneettikentän välityksellä. Staattisissa suojareleissä käytetään jo elektroniikkaa, ja ne voidaan jakaa analogisiin ja digitaalisiin releisiin. Numeeriset suojareleet perustuvat mikroprosessoritekniikkaan, ja niiden edut sähkömekaanisiin ja staattisiin suojareleisiin ovat moninkertaiset. Numeeriset releet sisältävät useita suojaus- ja mittaustoimintoja. Myös tilantarve on uusilla suojareleillä huomattavasti pienempi kuin vanhoilla.

Suojausfunktiot esitetään yleensä käyttämällä ANSI-järjestelmän tai IEC-normiston koodeja. Kun vanhaa suojauslaitteistoa päivitetään uuteen, suojausfunktiot kasvavat alkuperäisestään. Taulukossa 1 on esitetty erilaisia suojaustoimintoja generaattorille.

Taulukko 1. Generaattorille saatavia suojaustoimintoja [21, s. 4–13].

Suojaustoiminto	ANSI-koodi	Symboli
Staattorin 100 % maasulkusuojaus	64G	V0
Staattorin 90 % maasulkusuojaus	59N,64G,67G	V0>, 3I0>
Erovirtasuojaus	87G,87M,87T	ΔI
Vakioaikaylivirtasuojaus	51	I>>
Impedanssisuojaus	21	Z<
Roottorin maasulkusuojaus	64R	R<
Vinokuormitussuojaus	46	I2>
Alimagnetointisuojaus	40	1/xd
Epätahtisuojaus	78	$\Delta Z/\Delta t$
Staattorin ylikuormitussuojaus	49	$I^2 t$
Roottorin ylikuormitussuojaus	49R	$I^2 t$
Ylijännitesuojaus	59	V>
Ylitaajuussuojaus	81H	f>
Alitaajuussuojaus	81L	f<
Takatehosuojaus	32R	-P
Alijännitesuojaus	27	V<
Ylimagnetointisuojaus	24	V/f

Yksi suojarele voi suojata generaattoria sekä muuntajaa tai koko blokkia. Pää- ja oma-käyttömuuntajat on suojattu tyypillisesti erovirta- sekä ylivirtasuojalla. Yksinkertaisuudessaan erovirta- eli differentiaalirele vertailee esimerkiksi muuntajaan meneviä ja sieltä lähteviä virtoja. Suurehkot ja tärkeät muuntajat varustetaan lisäksi maasulkusuojalla, öljyn pinnankorkeuden vartijoilla, kaasureleillä, ylikuormitussuojilla, ylijännitesuojilla jne. Kaasu- ja virtausreleet havaitsevat eristysvian aikana syntyvät kaasut ja hälyttävät tai laukeavat raja-arvojen ylittyessä.

3.3.3 Mittamuuntajat

Suojareleet ja mittalaitteet mittaavat mittamuuntajien avulla jännitettä tai virtaa. Mittamuuntajien tarkoituksena on muuntaa suuret virrat sekä jännitteet mittalaitteille ja releille sopiviksi, jotta mittalaitteilta sekä releiltä ei vaadita haastavan suurta virran- tai jännitteen kestoisuutta. Mittamuuntajan tehtävänä on myös luoda galvaaninen erotus päävirtapiirin ja toisiovirtapiirin välille. Mittamuuntajat jakautuvat virta- ja jännitemuuntajiin.

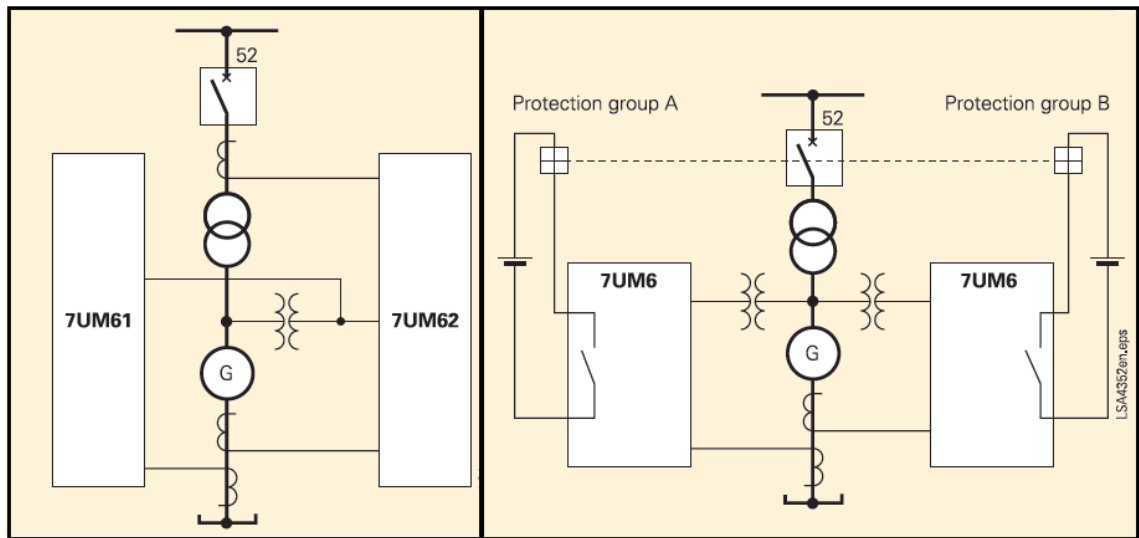
Virta ja jännite tulee toistaa mahdollisimman virheettömästi, joten virta- ja jännitemuuntajille on asetettu erilaisia tarkkuusvaatimuksia sekä toisioarvoja, joita tulee noudattaa.

3.3.4 Redundanttisuus

Sähköntuotannon kannalta tärkeiden generaattoreiden magnetointi- ja suojalaitteet yleensä kahdennetaan. Monet kokonaisuudet perustuvat malliin, jossa yhden komponentin vikaantuminen ei saa johtaa koko tuotannon kaatumiseen. Pienemmissä ja vähemmän merkittävämmissä kohteissa joudutaan tekemään kompromissi redundanttisuuden ja kulujen välillä. [21.]

Staattinen magnetointilaitteisto kahdennettuna sisältää yleensä toisen tyristorisillan, magnetointimuuntajan sekä toisen jännitteensäätäjän. Toisen tyristorisillan vikaantuesa korvaa toinen silta automaattisesti toisen ilman katkosta. Yhtä lailla säätimen tai magnetointimuuntajan vikaantuessa, vaihtuu toiminta toiselle säätimelle tai muuntajalle. Pyörivässä magnetoinnissa redundanttisuus näkyy diodisillan kahdennuksena tai monikertana. Staattisen magnetoinnin kahdennuksessa saavutetaan etu verrattuna pyörivän magnetoinnin kahdennukseen, sillä vikaantunut komponentti voidaan korjata ilman keskeytyksiä. Pyörivän diodisillan korjaus vaatii aina koneen pysäyttämisen.

Suojalaitteet voidaan kahdentaa joko kokonaan tai osittain. Kuvassa 9 on esitetty generaattorin osittainen sekä täysin kahdennettu suojaus.



Kuva 9. Kuvassa vasemmalla generaattorisuojaus on osittain kahdennettu. Oikealla suojaus on täysin kahdennettu. [21, s. 3.]

Täysin kahdennetussa suojauksessa on vähintään kaksi täysin toisistaan riippumatonta suojalaitetta mittamuuntajineen. Suojalaitteet voivat olla identtiset, mutta on suositeltavaa käyttää erilaisia suojalaitteita käyttövarmuuden parantamiseksi. Luotettavuus paranee kun käytetään eri valmistajan tai eri menetelmiin perustuvia suojalaitteita. [22, s. 57.]

3.4 Muuntajat

3.4.1 Päämuuntaja

Sähköä siirretään voimalaitoksista tehtaisiin ja asutuksiin siirtoverkkoa pitkin. Sähkönsiirrossa tapahtuu aina häviöitä, sillä kun sähköjohtimessa kulkee virtaa, se lämpenee ja osa energiasta menee hukkaan. Häviöt ovat suoraan verrannollisia virran suuruuteen. Tästä syystä jännitetasot pidetään sähkönsiirrossa suurina, jotta virta ja sitä kautta syntyvät häviöt pysyisivät pieninä.

Voimalaitoksen päämuuntaja luo galvaanisen erotuksen voimalaitoksen ja sähköverkon välille. Päämuuntajan tehtävänä on muuntaa generaattorilla tuotettu jännite sopivaksi verkkoon. Generaattoreiden synnyttämät jännitteet ovat tyypillisesti 6–15,75 kV ja siirtoverkon jännitteet 110–400 kV. Yhteen muuntajaan voi olla kytketty kiskoston avulla useampi generaattori. Voimalaitoksien päämuuntajat ovat lähestulkoon aina öljyristeisiä sekä jännitettä nostavia kolmivaihemuuntajia. Kuvassa 10 on erään voimalaitoksen päämuuntajien varamuuntaja.



Kuva 10. Voimalaitoksen päämuuntajien varamuuntaja. Muuntajan valmistaja on SMIT. Nimellisteho on 300 MVA ja jännitetasot 415 / 15,75 kV.

Muuntajat sijaitsevat yleensä ulkona omissa bunkkerissa. Kuvassa 11 on esimerkki muuntajien sijoittamisesta omiin bunkkereihinsa. Bunkkerit suojaavat muuntajan ympäristöä, jos muuntaja vioittuu, sekä myös muuntajaa ulkopuolisilta haitoilta. Muuntaja sisältää suuren määrän öljyä, joten jos se esimerkiksi syttyy palamaan, aiheutuu siitä suuri riski ympärillä oleville. Bunkkerit voivat olla päältä avonaisia tai katoksella suojattuja.



Kuva 11. Voimalaitoksen päämuuntajat sijaitsevat omissa bunkereissaan voimalaitoksen ja kytkinkentän välissä. Bunkkerit suojaavat muuntajan ympäristöä mahdolliselta onnettomuudelta, kuten muuntajapalolta. Vastaavasti ne suojaavat muuntajaa ympäristön haitoilta.

Generaattorin ja päämuuntajan välinen yhteys on tyypillisesti erotettu maasta. Päämuuntajien alajännitepuoli on täten siis kytketty kolmioon. Generaattorin, muuntajan ja siirtoverkon väliset yhteydet voidaan toteuttaa kiskoilla tai kaapeleilla. Usein generaattorin ja muuntajan välinen yhteys on tehty kiskoilla ja muuntajan ja kytkinaseman kaapelilla. Päämuuntajan yläjännitepuoli on yleensä tähtikytketty. Generaattorimuuntajan yleisin kytkentäryhmä Suomessa on YNd11.

3.4.2 Omakäyttömuuntaja

Omakäyttömuuntajien (OKM) tehtävä on muuntaa generaattorin tuottama sähkö laitoksen omille järjestelmille ja prosesseille sopiviksi. Ne syöttävät esimerkiksi erilaisia pumppuja ja puhaltimia, joita voi laitoksesta riippuen olla satoja. Omakäyttömuuntajia on laitoksilla yleensä useita, ja niiden tehot vaihtelevat muutamasta MW:sta kymmeneen MW:hin. Jännitetasot vaihtelevat generaattorin tuottaman jännitetason ja toisiotason jännitetarpeen mukaan. Tyypillinen muuntosuhde on esimerkiksi 10,5 / 6 kV tai 10,5 / 3 kV. Omakäyttömuuntaja voi myös ottaa syötön suoraan siirtoverkosta, jolloin omakäyttömuuntaja saavuttaa riippumattomuuden päämuuntajasta. Omakäyttömuuntajan ollessa kytkettynä generaattorin ja päämuuntajan väliin, on sen ensiöpuoli tyypillisesti

kolmiokytketty. Tyypillisesti omakäyttömuuntajat ovat tavallisia öljyeristeisiä jakelumuuntajia.

3.4.3 Jännitteensäätö

Muuntajan jännitettä voidaan säätää muuttamalla muuntosuhdetta eli käytännössä yläjännitepuolen johdinkierroslukua. Muuntaja voidaan varustaa jännitteensäätöä varten joko käämi- tai väliottokytkimellä. Erona näissä kahdessa on se, että käämikytkintä voidaan säätää jännitteisenä, kun taas väliottokytkin vaatii ylä- ja alajännitepuolen jännitteettömyyden. Päämuuntajat harvemmin varustetaan kummallakaan vaihtoehdolla, sillä käämikytkin on kustannuksiltaan suuri investointi ja kuluva osa. Käämikytkimen puutetta tukee myös se, että generaattorilla voidaan säätää jännitettä noin 5 %, joka on riittävä säätövara. Käämi- tai väliottokytkin onkin käytetympi omakäyttömuuntajissa. Erilliset jännitteensäätäjät valvovat piirin jännitettä ja sitä mukaa ohjaavat omakäyttömuuntajien käämikytkimiä. Käämikytkimessä voi olla jopa 19 eri asentoa eli nimellisestä pisteestä 9 asentoa kumpaakin suuntaan. Tämä voi tarkoittaa jopa noin 15 %:n laskevaa tai nostavaa muutosta nimellisjännitteeseen.

4 Komponenttien pitoaikojen määrittäminen

Pääpiirin primäärikomponenttien pitoajat ovat pitkiä, kymmeniä vuosia. Pitoaika voidaan määrittää monella tapaa, riippuen sen käyttötarkoituksesta. Pitoajat jaetaan usein kirjanpidolliseen pitoaikaan, tekniseen pitoaikaan, taloudelliseen pitoaikaan sekä teknistaloudelliseen pitoaikaan [23, s. 9–12]. Yrityksillä on tyypillisesti omat määritelmät komponenttiensa eri pitoajoille.

Teknisellä pitoajalla voidaan tarkoittaa sitä komponentin käyttöikää, jonka jälkeen komponentti on uusittava mekaanisen tai eristysrakenteiden kunnan takia. Ideaalisessa tilanteessa komponentti kestää koko teknisen pitoajan loppuun asti. Esimerkiksi öljyeristeisen tehomuuntajan teknisen pitoajan määrää pääosin paperieristys. Paperieristyksen kunto määrittää pääosin muuntajan kunnan. Tekninen pitoaika päättyy, kun komponentti poistetaan käytöstä kulumisen tai vanhenemisen takia. [23, s. 9–12, 57.]

5 Pääpiirin komponenttien nykytilan kartoitus ja auditointi

Voimalaitoksen pääpiirin komponenttien kuntokartoituksessa käydään läpi tärkeimmät komponentit ja selvitetään niiden tekniset tiedot, huoltohistoria sekä arvioidaan nykytila ja elinkaaren vaihe. Tavoitteena on selvittää komponenttien todellinen kunto ja havaita piilevät viat jo varhaisessa vaiheessa. Kun epäkohtia löydetään, voidaan vikojen kehittymistä seurata ja sitä kautta varautua kustannuksiin ja katkoksiin. Vikojen varhainen havaitseminen antaa mahdollisuuden suunnitella tulevat korjaukset, uusinnat tai modernisoinnit etukäteen. Kuntokartoituksen jälkeen komponenteille voidaan luoda tarkemmat kunnonvalvonta- tai kunnonseurantasuunnitelmat.

Sähköturvallisuuslain mukaan sähkölaitteen haltijan on huolehdittava sähkölaitteista siten, ettei niistä aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa. Tämä saavutetaan käytännössä, kun noudatetaan alan standardeja, valmistajien käyttö-ohjeita ja huolto-ohjeita. Kunnonvalvonnan tulee olla riittävän säännöllistä. [24.]

6 Tehomuuntajan kuntokartoitus

Suurin osa Suomen verkkomuuntajista sekä voimalaitoksien pää- ja omakäyttömuuntajista on valmistanut 70-luvulla Strömberg (nyk. ABB). Muuntajat ovat erittäin pitkäikäisiä, ja yleensä niille suoritetaan elinkaarensa aikana ainakin yksi perushuolto. Osa Suomen muuntajista on jo perushuollettu, ja osalle suunnitellaan perushuollon suorittamista seuraavien vuosien sisällä. Perushuollolla voidaan saada muuntajalle jopa 10–20 vuotta lisää käyttöaika. [25.]

Muuntajat sijaitsevat tyypillisesti voimalaitoksilla avonaisissa bunkkereissa ulkona. Avonaiset bunkkerit eivät suojaa muuntajaa sateelta, lumelta, lialta, auringolta, eläimiltä tai muilta rasittavilta tekijöiltä. Pitkän eliniän aikana muuntaja kokee vielä erilaisia sähköisiä, mekaanisia, kemiallisia ja termisiä rasituksia, joita aiheuttavat verkon puolen viat ja häiriöt, kuten oikosulut ja transientit. Nämä yhdessä vaikuttavat muuntajan sähköiseen eristyskykyyn ja mekaaniseen lujuteen, jotka taas vaikuttavat suoraan kuormituskykyyn ja käyttövarmuuteen.

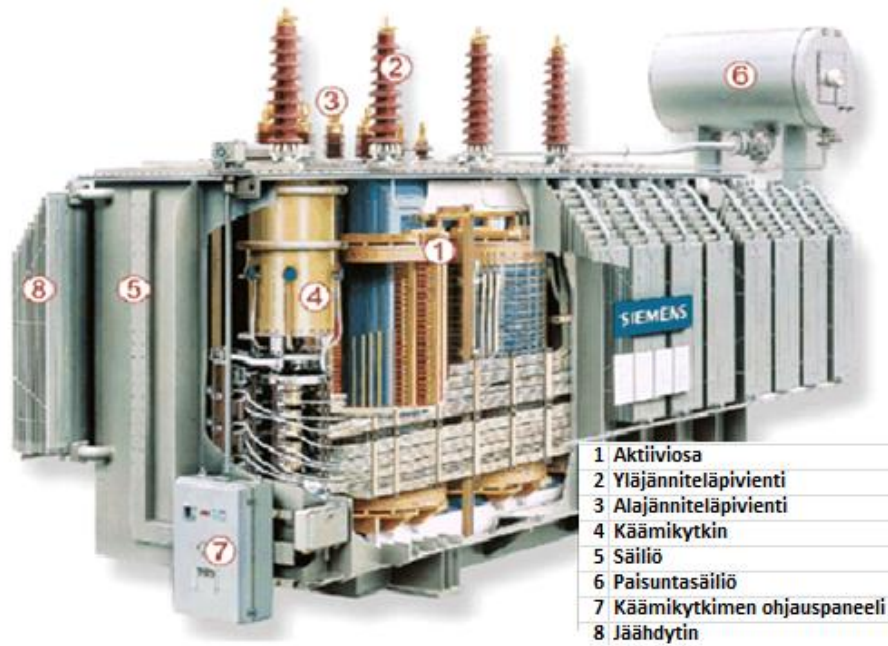
Muuntajan kunnan määrittäminen ulkopuolelta on haastavaa, sillä muuntajan sisälle ei nähdä. Vuosien saatossa on kehitetty erilaisia menetelmiä, joilla pyritään saamaan mahdollisimman monipuolinen ja tarkka kuva muuntajan nykytilasta. Yksi merkittävä tekijä muuntajien kuntokartoituksissa ovat aiemmat mittaustulokset, kuten esimerkiksi tehdasmittaustulokset. Edelliset mittaustulokset toimivat referenssinä uusien mittaustulosten analysoinnissa. Mitä useammin ja pidemmällä aikavälillä mittauksia on tehty, sitä paremmin voidaan havaita alkavat viat ja seurata niiden kehittymistä. Muuntajat ovat kalliita ja niiden vioittumisesta aiheutuvat käyttökatkot kasvattavat kustannuksia entisestään. Muuntajien varaosien saamisessa voi kestää viikkoja, uuden muuntajan tilauksessa kuukausia, jopa vuosi. On siis tärkeää seurata säännöllisesti muuntajan tilaa, jotta uusiin hankintoihin voidaan varautua ennen kuin on liian myöhäistä.

Muuntajan kuntokartoitus luo edellytykset oikea-aikaiseen kunnossapitoon, jolla pidennetään luotettavasti muuntajan elinikää. Ennen muuntajan kuntokartoitusta on hyvä sopia asiakkaan kanssa esimerkiksi telineistä sekä muuntajan erottamisesta ja irtikytkeisestä, jotta työ kohteessa voi alkaa joustavasti. Kuntokartoituksen suorittaminen käyttöpaikalla on aina haasteellisempaa kuin laboratorio- tai tehdasolosuhteissa.

Luvussa 6 esiintyviin kuviin on tehty ilmiöiden ja tekstin kannalta oleellisten asioiden havaitsemista helpottavia lisäyksiä. Myös englanninkieliset termit on korvattu suomenkielisillä vastineilla, jotta kuvista tulisi mahdollisimman selkeitä ja yhdenmukaisia.

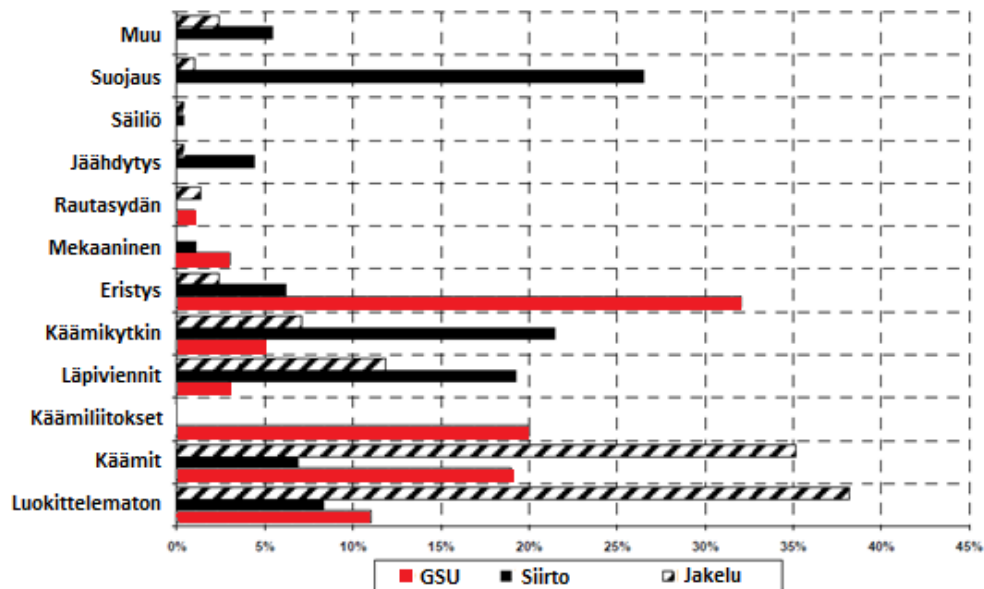
6.1 Muuntajan kunnan indikaattorit

Seuraavassa tarkastellaan tärkeimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat öljyeristeisen paisuntasäiliöllisen tehomuuntajan kuntoon. Mitä useampi eri tekijä huomioidaan, useammalla eri tavalla, sitä parempi kuva muuntajasta saadaan. Kuvassa 12 on havainnollistava kuva vastaavasta tehomuuntajasta. Standardi IEC 60076 käsittelee muuntajille suoritettavia testejä ja kunnanvalvontamittauksia.



Kuva 12. Öljyeristeinen tehomuuntaja läpileikattuna [26]. Aktiiviosa sisältää käämitykset ja rautasydämen. Muuntajan kuntoarviointi keskittyy suurimmaksi osaksi aktiiviosaan.

Kuvassa 13 on merkitty syitä eri tyyppisten muuntajien vikaantumisille. Kuvassa punaisella on generaattorimuuntajat (GSU), mustalla siirtoverkkomuuntajat ja raidallisena jakelumuuntajat.



Kuva 13. Cigrén tekemän tutkimuksen mukaan GSU (Generator Step-Up) eli generaattorimuuntajan yleisimmät viat ovat eristyksissä, käämiliitoksissa ja käämeissä [27].

Kuten Cigrén listasta näkee, generaattorimuuntajan yleisimmät viat ovat käämeissä ja eristyksissä. Generaattorimuuntajalla on suhteessa korkeampi käyttölämpötila verrattuna tavalliseen verkkomuuntajaan, joten sen ikääntyminen on nopeampaa. Korkeampi käyttölämpötila näkyy mahdollisesti kasvavina eristysvikoina.

6.1.1 Muuntajaöljy

Muuntaja täytetään muuntajaöljyllä, joka on yleensä mineraaliöljyä. Muuntajaöljy siirtää häviölämpöä käämityksistä ja sydäimestä jäähdyttiin, kuten radiaattoreihin, toimien jäähdytyksen välittäjänä. Lisäksi muuntajaöljy toimii sähköisenä eristeenä. Muuntajaöljyn tärkeitä ominaisuuksia ovat viskositeetti, jähmepiste, leimahduspiste, läpilyöntijännite, dielektrinen häviökerroin sekä eristekyky ja hapettumiskestävyys [28, s.16–21].

Öljy vanhenee kuten kaikki orgaaniset aineet. Hapettumiseen vaikuttaa suoraan lämpötila: mitä korkeampi se on, sitä voimakkaammin öljy hapettuu. Hapettumisreaktiossa öljyn hiilivetymolekyylit reagoivat hapen, veden tai muiden epäpuhtauksien kanssa synnyttäen saostumista tai happamia yhdisteitä. Happamat yhdisteet vahingoittavat suoraan vanhentamalla paperieristeitä, ja öljyn saostuminen taas huonontaa jäähdytyskykyä. [29, s. 178.]

Kosteutta pääsee öljyyn vuotavien tiivisteiden tai paisuntasäiliön kautta. Muuntajaöljyn tilavuus vaihtelee kuormituksen ja ympäristön lämpötilan mukaan. Tilavuuden vaihdellessa muuntaja hengittää paisuntasäiliön kautta sisään ja ulos. Sisään hengitettävän ilman on oltava kuivaa, sillä muuten kosteus pääsee muuntajan sisälle. Paisuntasäiliö imee ulkoilmaa ilmankuivaimen kautta, jossa on kosteutta imeviä rakeita. Nämä rakeet ovat silikageeliä, ja ne muuttavat väriä kostumisen seurauksena. Jos ilmankuivaimen suoloja ei vaihdeta ajoissa, ilmankuivain ei enää toimi ilmankuivaimena, mistä johtuen kosteus imeytyy suoraan muuntajaöljyyn ja sitä kautta muihin eristeisiin. Öljyn kosteuden dimensio on mg/kg, jota kuvataan yleensä termillä ppm (parts per million). [30, s. 28.]

Muuntajan eristeaineista syntyy käytön aikana erilaisia kaasumaisia hajoamistuotteita, jotka liukenevat muuntajaöljyyn. Kaasut muodostuvat normaalin vanhenemisen sekä termisten- ja sähköisten vikojen seurauksena.

DGA (Dissolved Gas Analysis) eli muuntajan kaasuanalyysi on yksi tärkeimmistä työkaluista käytössä olevan muuntajan käyttökunnon määrittämisessä. Muuntajaöljy on kosketuksissa aktiiviosan kanssa, josta välittyy muuntajaöljyyn tehokkaasti tietoa erityyppisistä vioista. Vikakaasuja muodostuu öljyyn normaalista vanhenemisesta, eriasoisissa termisistä vioista sekä sähköisistä vioista, kuten osittaispurkauksista ja kipinöinneistä. Vikakaasuanalyysia varten on otettava näyte muuntajaöljystä. Näyte voidaan ottaa muuntajasta sen ollessa käytössä. Näytteestä selvitetään taulukon 2 mukaiset kaasujen pitoisuudet. Taulukon alareunassa olevat tarkkailuraja-arvot ovat suositusarvoja eri pitoisuuksille. Pitoisuuden ylitys ei kuitenkaan aina tarkoita vikaa. Jokaisen kaasun trendiseuranta on usein yksittäisen pitoisuuden ylitystä tärkeämpää, minkä vuoksi tarkkailuraja-arvoja pienemmätkin pitoisuudet saattavat olla huolestuttavia, jos kaasukehitys aikayksikössä on suurta. Tämä koskee erityisesti suuria muuntajia, joissa kaasukehitysnopeus voi jäädä huomaamatta. [31.]

Taulukko 2. Vikakaasuanalyysissä selvitettävät kaasupitoisuudet. [31.]

	Kaasupitoisuudet: kaasutilavuus/öljytilavuus										Vika Tyyppi
	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	TCG	
	Vety µl/l	Happi ml/l	Typpi ml/l	Metaani µl/l	Hiilimon. µl/l	Hiilidio. µl/l	Etyleeni µl/l	Etaani µl/l	Asetyleeni µl/l	Palavat k. µl/l	
Suositus	≤ 150	—	—	≤ 130	≤ 600	≤ 14000	≤ 280	≤ 90	≤ 20	—	

Terminen vika, kuten ylikuumentuminen käämissä tai liitoksessa, saa aikaan muuntajaöljyn pyrolyysin eli hajoamisen. Jos lämpötila on korkeintaan 300 °C, syntyy pääasiassa metaania ja etaania. Jos lämpötila nousee kuumen pisteen (hot spot) johdosta jopa 700–800 °C:seen hajoaa muuntajaöljy nopeasti muodostaen muun muassa etyleeniä. Lämpötilan noustessa syntyy myös vetyä. Asetyleeniä alkaa muodostua, kun lämpötila saavuttaa noin 1300 °C. Mikäli terminen vika vaikuttaa myös paperi- tai prespaanieristykseen, alkaa muuntajaöljyyn muodostua hiilimonoksidia ja -dioksidia. [32.]

Pienen energiatihedyyden omaavat osittaispurkaukset synnyttävät hajoamistuotteena pääasiassa vetyä ja jonkin verran metaania. Tällainen osittaispurkaus ei aiheuta eristeessä lämpenemistä, vaan öljyn hajoamisen aiheuttaa osittaispurkauksen ionisoiva säteily. Kun osittaispurkauksen energiatiheys kasvaa, syntyy myös lämpöä, minkä seurauksena syntyy vedyn lisäksi etyleeniä. Suuret osittaispurkaukset ja valokaaret saavat aikaan jopa 3000 °C:n lämpötilan. Tämä saa öljyn molekyylit hajoamaan täysin muodostaen ionisoituneita hiili- ja vetyatomeja. Nämä ionisoituneet atomit yhdistyvät lämpö-

tilan laskiessa uusiksi molekyyleiksi, jolloin syntyy huomattavasti vetyä ja asetyleeniä. Jos paperi tai prespaanieristys vahingoittuu, syntyy siitä hiilimonoksidia ja -dioksidia.

Käämikytkimellä on myös vaikutus asetyleenin syntyyn. Kun käämikytkintä ohjataan kuormitettuna, syntyy koskettimien vaihtumisessa hetkellisesti katkaisuvälilokaari, jolloin muodostuu asetyleeniä. Käämikytkimen öljy onkin usein erotettu pääsäiliöstä, eli käämikytkimellä on oma öljy paisuntasäiliöineen. Muuten kaasureleet tai öljynäytteet voisivat antaa virheellistä tietoa pääeristysten öljystä. [32.]

Eristeiden, kuten öljyn, paperin ja prespaanin normaali vanheneminenkin synnyttää kaasuja. Paperin ja öljyn hapettumisesta syntyy muun muassa hiilimonoksidia, hiilidioksidia ja kemiallisten sidoksien katketessa myös hiilivetyjä ja vetyä. Näiden pitoisuuksien kasvu on kuitenkin hidasta, eivätkä ne normaalisti kasva kovin suuriksi. [32.]

Samasta näytteestä määritetään vikakaasuanalyysin lisäksi öljyn dielektrinen lujuus eli läpilyöntijännite. Läpilyöntijännite on riippuvainen öljyn lämpötilasta, puhtaudesta, kaasupitoisuudesta ja kosteudesta. Muuntajaöljyssä esiintyvät kuplat tai vesipisarat voivat alentaa huomattavasti läpilyöntijännitettä. Uuden öljyn läpilyöntijännite on noin 60 kV / 2,5 mm (tehollisarvo). [29, s. 118.] Öljystä voidaan halutessa selvittää vielä häviökerroin, rajapintajännitys, inhibiittipitoisuus, neutralointiluku, furfuraali, vesipitoisuus ja öljyn kiintoainepitoisuus [31].

Kaasuanalyysin tulkinta ei kuitenkaan ole yksiselitteistä. Tulosta tarkastellessa ei voida nojautua vain kaasupitoisuuksien tarkkailuraja-arvoihin, vaan tulkinta tulee tehdä kokonaisvaltaisesti. Tärkeitä ilmiöitä ovat kaasun pitoisuus sekä kaasun kehitysnopeus, joiden havaitsemiseen tarvitaan useita testejä pidemmältä aikaväliltä. On havaittu tiettyjen kaasujen kehitysnopeuden olevan normaalia suurempaa käyttövaiheen alussa, sillä silloin öljy on lähes kaasuvapaata. Yhden tai muutaman raja-arvon ylittymisestä ei kannata huolestua, elleivät muut testit osoita syytä epäillä vikaa. Kaasuanalyysia suositellaan tehtäväksi vähintään yhden vuoden välein, mikäli analyysissä ei ole poikkeuksellisia tuloksia. Jos tulos on poikkeuksellinen, voidaan näytteenottoväliä lyhentää esimerkiksi kuukauteen tai viikkoon. Perushuollon jälkeen suositellaan kaasuanalyysin suorittamista noin 3 kk:n käyttöjakson jälkeen, jotta varmistutaan, että muuntaja on pysynyt vahingoittumattomana esimerkiksi aktiiviosan siirtelyn johdosta.

Liitteessä 1 on erään 7 vuotta vanhan muuntajan öljyanalyysit vuoden ajalta. Tuloksista voidaan huomata poikkeava kaasujen kehitys, mutta muuntajassa ei kunnonvalvontamittauksien perusteella todettu olevan vikaa, ja muuntaja määritettiin täysin käyttökelpoiseksi. Syyksi kaasuuntumiselle epäiltiin matalaa yllämpöä, joka on normaalia ja seurausta lisääntyneestä kuormituksesta.

Muuntajaöljystä voidaan siis sanoa, että sillä on kolme päätehtävää: toimia sähköisenä eristeenä, toimia jäähdytyksen välittäjänä, sekä kuljettaa tietoa mahdollisista ongelmista. [28, s. 15.]

6.1.2 Eristykset

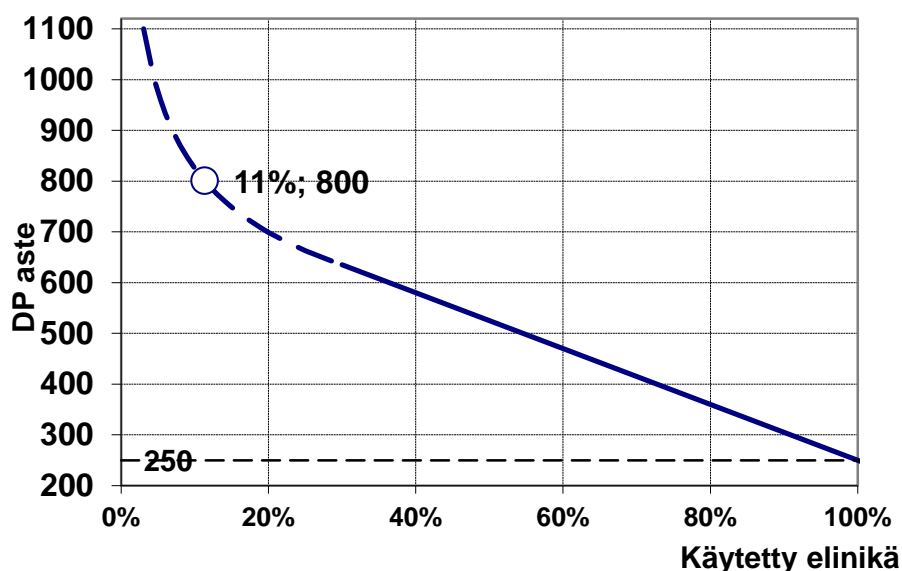
Selluloosa paperimaisessa muodossa sekä mineraaliöljy ovat muodostaneet yhdessä erinomaisen eristyksen, ja ne ovat hallinneet jo pitkään tehomuuntajien eristysaineina. Ne yhdessä kestävät suuremman jänniterasituksen kuin kumpikin yksin ollessaan. Paperieristystä käytetään muuntajassa käämitysten, läpivientien sekä käämien välisten johtimien eristeenä. Prespaanilevyjä (kuva 14) käytetään käämien tukemiseen ja eristämiseen toisistaan sekä rautasydämeistä. Kiiloilla tuetaan käämejä ja luodaan öljylle riittävästi tilaa, jotta sen kierto on vapaata. Jotta saadaan käsitys muuntajan painon koostumisesta, niin erään 100 MVA:n tehoisen muuntajan kokonaispaino on 114 000 kg, josta 21 600 kg on öljyä ja 4500 kg muita eristysosia. Tästä paperin osuus on 300 kg, prespaanin 1450 kg ja laminoitun puun 2750 kg [29, s. 179].



Kuva 14. Puuta käytetään paljon tehomuuntajan eristysmateriaalina [33]. Muuntajan käämi koostuu toisistaan eristetyistä osajohtimista. Osajohtimet on punottu CTC-menetelmällä (Continuously Transposed Conductor) eli osajohtimet vuorottelevat sijainniltaan käämin sisällä [34].

Käämit eristetään käyttämällä paperieristystä. Käämit voivat muodostua useista kymmenistä osajohtimista, jotka ovat toisistaan eristettyjä esimerkiksi emalilla. Osajohtimet (kuva 14) punotaan häviöiden minimoimiseksi CTC (Continuously Transposed Conductor) -menetelmällä, eli johtimet vuorottelevat sijainniltaan käämin sisällä [34].

Paperieristys koostuu selluloosamolekyyleistä, jotka kiinnittyvät toisiinsa vetysidoksin. Selluloosamolekyylit muodostuvat taas toisiinsa kiinnittyneistä glukoosirenkaista. Uudella paperieristyksellä glukoosirenkaiden lukumäärä jokaista selluloosamolekyyliä kohden on noin 1000–1400 ja loppuun käytetyllä noin 250–200. Tätä arvoa kutsutaan DP-luvuksi (Degree of Polymerisation). Paperin vanhetessa osa näistä sidoksista katkeilee ja DP-luku pienenee eli paperi haurastuu, minkä seurauksena sen oikosulkuketoisuus alenee. Kuvassa 15 on esimerkki DP-luvun suhteesta arvioituun elinikään. [29, 35.]



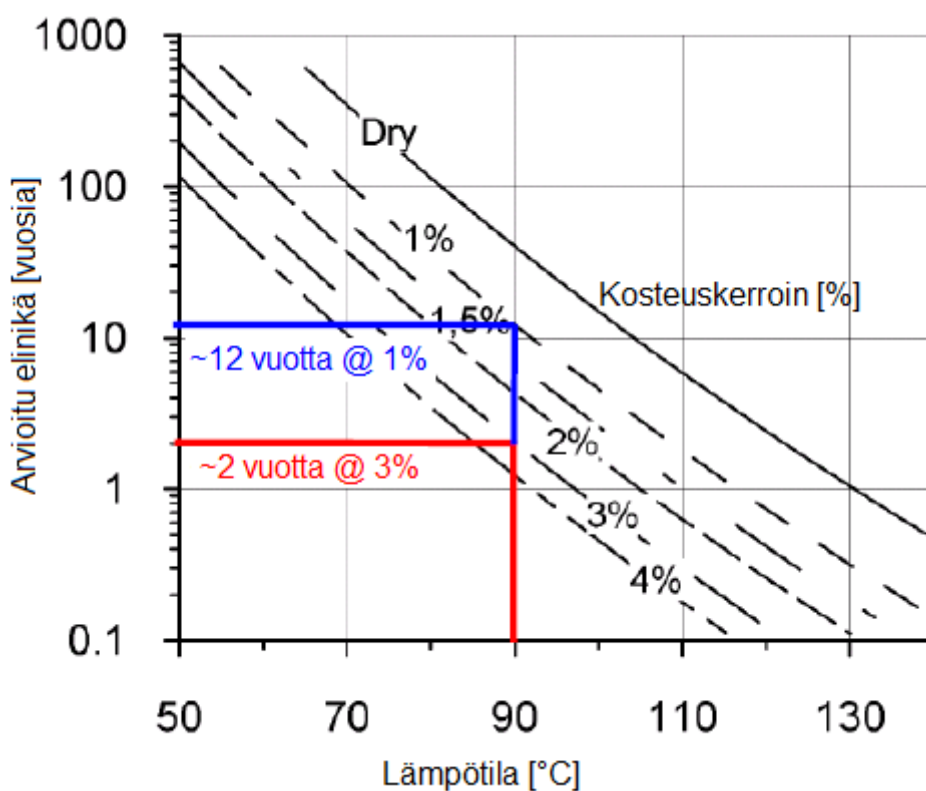
Kuva 15. Vuonna 1974 valmistetun öljyeristeisen muuntajan DP-luku on 800. DP-luku on määritetty paperinäytteestä, joka on otettu perushuollon yhteydessä vuonna 2015. Arvioilta teknistä elinikää on kulunut noin 11 %. [36.]

Paperieristykseen muodostuu ajan saatossa kosteutta, joka vaikuttaa merkittävästi eristykseen kuntoon. Kosteus heikentää eristeen mekaanista lujuutta. Kosteutta pääsee paperieristykseen öljyn kautta ja sitä muodostuu kemiallisesti paperin vanhenemisprosessissa. Myös epäonnistunut kuivaus valmistusvaiheessa tai huoltojen yhteydessä tapahtunut altistuminen voi olla syynä kosteudelle. Lähes kaikki vesi tai kosteus muuntajassa on paperissa, prespaanissa ja muissa puuosissa. Käämien lämmitessä osa

kosteudesta siirty paperieristeestä öljyyn ja käämien jäähtyessä kosteus siirtyy taas takaisin paperieristeeseen.

Kosteus sekä liian korkea lämpötila vanhentavat huomattavasti paperieristyksen kuntoa sekä rajoittavat sen eristyskykyä. Jo 6 °C:n käyttölämpötilan nousu voi puolittaa muuntajan eliniän. Tämä tieto tosin vaihtelee hieman lähteittäin välillä 6–8 °C. [37.]

Vanhentunut paperieristys alhaisella DP-luvulla ei välttämättä kestä verkossa tapahtuvaa oikosulkua vaan voi tuhoutua täysin. Kuvassa 16 on esitetty muuntajan eliniän riippuvuus käyttölämpötilasta sekä kosteudesta. [29 s. 178–180; 37.]



Kuva 16. Paperieristeen kosteuden ja käyttölämpötilan merkitys elinikään. Jo 6 °C:n käyttölämpötilan laskeminen voi tuoda merkittäviä etuja. [37.]

Kosteuskerrointa kuvataan joko ppm- tai %-lukemalla. Esimerkiksi jos kiinteän eristyksen kokonaispaino on 13 000 kg ja kosteuskerroin on 4 %, on muuntajan kiinteässä eristyksessä vettä 520 kg. Selluloosan kosteuskertoimien luokitukset voidaan johtaa IEC 60422:n kosteussaturaatioiden perusteella. Selluloosan kosteuskertoimen ollessa alle 2,2 % luokitellaan se kuivaksi, 2,2–3,7 % osittain kosteaksi ja 3,7–4,8 % märäksi.

Yli 4,8 %:n kosteuskertoimet luokitellaan erittäin märeksi. Uudella muuntajalla kosteuskerroin on alle 1 %. Perushuollon yhteydessä muuntaja voidaan kuivata ja tyhjiökäsittellä, jolloin kosteuskerroin laskee.

Paperieristyksen kunnosta muodostuukin yksi tärkeimmistä tehomuuntajan elinkaaren vaikuttavista tekijöistä. Pääeristyksen kunnonvalvontaan on kehitetty useita eri menetelmiä mahdollisimman laajan ja monipuolisen tuloksen saamiseksi. Tärkeitä mittauksia pääeristyksille ovat eristysvastusmittaukset, häviökulmamittaukset, osittaispurkausmittaukset sekä jännite- ja eristyskokeet. Standardi IEC 60076-3 käsittelee muuntajan eristykselle suoritettavia testejä sekä eristykseltä vaadittavia asioita.

Eristysvastus mitataan tyypillisesti ylä- ja alajännitekäämien välistä toisen käämin ollessa vuorotellen maadoitettuna muuntajan runkoon. Myös rautasydämen ja käämien välinen eristysvastus voidaan mitata, mikäli se on mahdollista. Eristysvastusmittaus perustuu suuren DC-jännitteen (2500 V tai 5000 V) syöttämiseen eristeen yli ja sen aikaansaaman vuotovirran mittaamiseen. Eristysvastusta mitataan kerralla 10 minuuttia ja tulokset kirjataan ylös 15:n, 60:n, ja 600 sekunnin kohdalta. Eristysvastusmittauksessa kiinnitetään huomiota dielektriseen absorptiosuhteeseen (DAR) sekä polarisaatioindeksiin (PI). Dielektrinen absorptiosuhde saadaan jakamalla 60 sekunnin arvo 15 sekunnin arvolla. Polarisaatioindeksi saadaan jakamalla 600 sekunnin arvo 60 sekunnin arvolla. Suhteet kertovat eristyksen kosteudesta ja epäpuhtaudesta, ja suurempi suhde viittaa aina puhtaampaan ja kuivempaan eristeeseen.

Osittaispurkaukset mitataan vaihekohtaisesti ja mittaus edellyttää suurjännitettä eristeen yli sekä erikoismittalaitteita. Osittaispurkaukset ovat pieniä sähköisiä purkauksia, joita tapahtuu eristeen sisällä tai pinnalla. Osittaispurkauksien mittauksessa kiinnitetään huomiota purkauksien voimakkuuksiin, syttymis- ja sammumisjännitteisiin, määrään sekä kehitykseen. Osittaispurkausmittausta ei yleensä suoriteta alajännitekäämeille (<10 kV), sillä pienellä jännitteellä ei osittaispurkauksia juuri esiinny. Liitteessä 2 on esitetty periaatekuva osittaispurkausmittauksesta suurjännitteellä sekä esimerkkitulokset.

Pääeristysien häviökertoimet ja kapasitanssit voidaan mitata suurjännitteellä jännitteen funktiona tai pienjännitteellä taajuuden funktiona. Häviökerrointa ja mittausta pienellä jännitteellä taajuuden funktiona käsitellään enemmän luvussa 6.2.

Eristyskokeessa sinimuotoinen 50 Hz:n jännite syötetään yksivaiheisesti erillisestä jännitelähteestä testattavaan käämiin. Tarkoituksena on kokeilla, kestäkö eristys yhden minuutin verran ylijännitettä. Syötetyn testijännitteen suuruus riippuu muuntajan nimellisjännitteestä ja iästä. Esimerkiksi 21 kV:n käämitykselle testijännitteenä on käytetty 37,5 kV ja 110 kV:n käämitykselle 155 kV. Vanhoilla muuntajilla koejännite on noin 67 % vastaavan uuden muuntajan koejännitteestä. Lisäksi muuntajalle voidaan suorittaa esimerkiksi indusoitu jännitekoe. Indusoidussa jännitekokeessa koestetaan erityisesti käämikierroseristystä, joten testi olisi hyvä tehdä normaalia käyttötaajuutta suuremmalla taajuudella. Suurjännitteiden aikaansaaminen kenttäolosuhteissa on yleensä haastavaa, sillä vaadittava mittauskalusto on raskasta.

Osajohtimen eristyksen pettäessä, virta ei enää jakaannu tasaisesti osajohtimien kesken, vaan jossain johtimessa kulkee suurempi virta kuin toisessa. Tämä aiheuttaa lämpenemistä ja voi johtaa osajohtimen sulamiseen. Jos osajohdineristys on pettänyt, ei sitä välttämättä havaita käämiresistanssimittauksessa, ellei kupari ole täysin sulanut, sillä tasavirta ei jakaudu johtimessa siten kuin vaihtovirta. Hajavuoreaktanssimittaus suoritetaan tyypillisesti 15–400 Hz:n alueella, jotta suurilla taajuuksilla virta pakkautuisi johtimien reunoille mahdollisimman voimakkaasti. Tämä näkyisi hajavuoreaktanssin muutoksessa ja voisi paljastaa mahdollisen osajohdineristyksen rikkoutumisen. [38.]

6.1.3 Virtapiiri

Muuntajan virtapiirillä tarkoitetaan ensiö- ja toisiopiirien virtateitä. Virtatiet ovat myös tärkeimpiä muuntajan kunnon indikaattoreita. Käämi kierretään sydänpylvään ympärille tyypillisesti siten, että alajännitekäämi on sydäntä lähempänä ja yläjännitekäämi sen päällä. Yksi käämi voi muodostua kymmenistä osajohtimista, jotka on eristetty toisistaan. Nämä osajohtimet kiertyvät vuorotellen toistensa päälle, jotta virta jakautuisi mahdollisimman tasaisesti ja virranahto pysyisi pienenä.

Käämiliitokset saattavat löystyä ja hapettua ajan saatossa. Löysä liitos voi aiheutua muuntajan siirtelyn seurauksena tai ulkoisen tai sisäisen vian johdosta. Ulkoisen tai sisäisen vian sattuessa (esim. oikosulku) muuntajaan kohdistuu valtavasti voimia, jotka saattavat liikuttaa käämityksiä. Virtateiden eheys on tärkeää, sillä löysät liitokset lämpivät aiheuttaen kuumia ja kriittisiä pisteitä ja jopa kipinöintiä. Kuumat pisteet vahingoittavat eristystä. Yksi merkittävä tekijä virtateissä on myös käämi- tai väliottokytkimen

kunto, sillä virta kulkee niiden koskettimien läpi. Kuvassa 17 on muuntajan aktiiviosa nostettu pois säiliöstä perushuollon yhteydessä.



Kuva 17. Muuntajan aktiiviosa on nostettu säiliöstä ulos tarkempaa tarkastusta varten. Oikealla kuvassa on kyseisen aktiiviosan käämikytkin. Käämikytkimeen on kytketty yläjännitepuolen vaiheet. Kuva on otettu muuntajan perushuollon yhteydessä.

Virtateiden tarkastuksessa käämiresistanssit mitataan tasavirralla. Käämiresistanssit mitataan jokaisessa käämi- tai väliottokytken asennossa. Mittauksen avulla saadaan selville resistanssipoikkeamat, jotka tyypillisesti johtuvat huonoista liitoksista tai muista ylimenoresistanssia aiheuttavista tekijöistä. Käämiresistanssien mittaukseen voidaan käyttää erillistä muuntajan käämiresistanssimittaria tai se voidaan tehdä perinteisesti voltti-ampeeri-menetelmällä. Mittaukset perustuvat virran syöttöön ja käämissä syntyvän jännitehäviön mittaamiseen. Onnistunut mittaus edellyttää rautasydämen riittävää kyllästymistä. Etenkin suurissa muuntajissa kytketään ylä- ja alajännitekäämit sarjaan, jotta muuntaja saadaan riittävästi kyllästettyä (jännitehäviö mitataan mitattavasta käämistä). Mittaustuloksissa on tärkeää, että käämiresistanssit ovat aiempiin mittaustuloksiin verrattuna lähes samat. Käämiresistanssien tulisi myös olla melko samanlaisia vaiheiden välisessä vertailussa. Käämiresistanssimittaus toimii lisäksi osana kuormitushäviöitä määrittävässä mittauksessa erottamassa kuparihäviöosaa.

Käämin resistanssi on riippuvainen lämpötilasta, joten redusointi referenssilämpötilaan on tehtävä aina ennen tulosten vertailua. Käämin absoluuttisen lämpötilan selvittäminen on haastavaa, jos käämissä ei ole lämpötila-anturia. Tällöin lämpötila lasketaan öljyn lämpötilasta, mikäli muuntaja on ollut tarpeeksi kauan kylmänä. Käämin lämpötilana voidaan pitää muuntajan ylä- ja alaosan öljyjen lämpötilojen keskiarvoa. On vielä huomioitava mittausvirran suuruus, joka ei saa olla liian suuri, sillä muutoin käämit lämpiävät muuttaen sen resistanssia. Sopiva mittausvirta on noin 5 % muuntajan nimellisvirrasta.

Mittaustuloksia verrataan edellisten mittausten lisäksi myös tehdasarvoihin. Jos lämpötilakorjattu mittaustulos poikkeaa yli 2–3 % tehdasarvoista, on syytä tutkia tarkemmin poikkeavuuden aiheuttajaa. Pitää kuitenkin muistaa, että kentällä käytetyt mittalaitteet eroavat tehtaalla käytetyistä mittalaitteista, joten pieni ero on aina normaalia. Öljynäytteestä voidaan etsiä lämpenemiseen viittaavia pitoisuuksia. Jos öljynäyte tukee käämi-resistanssimittauksia, voidaan epäillä löysiä tai huonoja liitoksia. Käämi- tai väliottokytkimen huono kontakti voi myös aiheuttaa ylimeno-resistanssia. [38.]

Käämiresistanssin mittaus ei ole varsin hyvä indikoimaan kierrossulkuja, sillä yhden kierrossulun vaikutus käämiresistanssiin voi olla niin pieni, ettei siitä johtuvasta resistanssin muutoksesta voida välttämättä tehdä oikeaa johtopäätöstä. Muuntosuhdemittauksella voidaan havaita mahdolliset kierrossulut, eristeviat kierrosten väleillä sekä käämi- tai väliottokytkimen virheellinen toiminta. Muuntosuhde mitataan jokaisesta vaiheesta kaikissa käämi- tai väliottokytkimen asennoissa. Mittaus toimii myös siis käämi- tai väliottokytkimen osatarkistuksena. Väliottokytkimen asennon vaihtamista kannattaa kuitenkin harkita, mikäli sitä ei ole käytetty pitkään aikaan, sillä liitos voi jopa heikentyä, kun pintojen lika ja epäpuhtaudet saattavat siirtyä koskettimien väliin. Muuntosuhteessa hälyttävänä rajana voidaan pitää noin 0,5 %:n muutosta tehdasarvoista. Tyypillisesti muuntosuhdemittauksen tulokset poikkeavat 0–0,2 % tehdasarvoista. Muuntosuhteen lisäksi voidaan esimerkiksi DV-powerin muuntosuhdesillalla tarkistaa kytkentäryhmä ja napaisuus. [38.]

Kiinteitä kierrossulkuja voidaan todeta myös tyhjäkäyntivirran mittauksella pienellä jännitteellä. Tyhjäkäyntivirrat tulisi mitata mieluiten ennen rautasydämeen vaikuttavia tasavirtamittauksia sekä niiden jälkeen ja vielä demagnetoimisen jälkeen. Muuntajasydämeen vaikuttaa etenkin tasavirralla tehtävä käämiresistanssimittaus, joka aiheuttaa jäännösmagnetismia rautasydämeen. Demagnetoinnin jälkeen tyhjäkäyntivirtojen

tulisi olla laitapylväillä likimain samoja ja suurempia kuin keskipylvään tyhjäkäyntivirta. Tärkeintä on kuitenkin, että demagnetoinnin jälkeen tyhjäkäyntivirrat palautuvat alkutasoa pienemmiksi tai lähes samoiksi. Demagnetoimalla muuntaja vältytään suuremmalta kytkentävirtasysäykseltä seuraavan käynnistyksen yhteydessä. Kytkevävirtasysäys voi olla jopa 8–10 kertaa suurempi kuin nimellisvirta, joten remanenssin poistaminen on erittäin tärkeää. Tyhjäkäyntivirtojen mittaustulosta voidaan käyttää myös referenssitietona mahdollisessa vaurioselvityksessä. [38.]

Käämikytkimen toiminta tarkistetaan erillisellä mittauksella. Käämikytkimen tai väliottokytkimen koskettimet saattavat likaantua ja kulua vuosien saatossa huonontaen kontaktia. DRM (Dynamic Resistance Measurement) on käämikytkimen kosketustoimintojen ja vaihesynkronoinnin tarkastukseen soveltuva menetelmä. Mittalaite syöttää virtaa käämikytkimen läpi ja piirtää asennonvaihdosta kuvaajan, joka näyttää virran käyttäytymisen ajan funktiona vaihdon aikana. Samalla saadaan poikkeama teoreettisesta arvosta sekä askelsiirtoaika. Mikäli vaihtotilanteessa näkyy virtapiikkejä, vaihto kestää liian kauan tai virta ei muutu haluttuun suuntaan, on syytä epäillä vikaa. Vian voi aiheuttaa koskettimien hiiltymisen, öljykerroksen karsta, koskettimien kuluminen, huoltovirheet sekä erilaiset synkronointiongelmat. Pienet epäpuhtaudet saadaan yleensä hoidettua ajamalla käämikytkintä tai väliottokytkintä edestakaisin, jolloin koskettimet itse hiovat epäpuhtaudet pois. Jos tämä ei auta, on kytkin avattava ja huollettava. Käämikytkimen toimintakoe esitelly liitteessä 3. [38.]

6.1.4 Magneetti- ja eristyspiiri

Muuntajan magneetti- ja eristyspiirin tehtävänä on siirtää vuo tehokkaasti käämityksien lävitse. Magneetti- ja eristyspiiri koostuu rautasydäimestä, joka luo matalareluktanssisen reitin vuolle. Rautasydän koostuu ohuista, kidesuunnatuista ja toisistaan eristetyistä rautalevyistä. Sydänlevyjen laminoinnilla ja kidesuuntauksella vältetään suuret pyörrevirrat, jotka lisäävät häviöitä. Kidesuuntaus vaikuttaa magneettisiin ominaisuuksiin ja siten vähentää hystereesihäviöitä. Sydänlevyt lakataan ja liimataan lujuuden parantamiseksi ja lopuksi puristetaan kasaan tukipalkeilla. [39, s. 9.]

Tyhjäkäyntihäviöiden määrittäminen toimii osana rautasydämen kunnon kartoitusta. Tyhjäkäyntihäviö koostuu pääosin magneetti- ja eristyspiirin häviöistä sekä kuormimattoman piirin resistanssien virtalämpöhäviöistä. Magneetti- ja eristyspiirin häviöt koostuvat pääosin pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä sekä hajavuon aiheuttamista tukirakenteiden hajapyörre-

virtahäviöistä. Tyhjäkäyntihäviömittauksessa verrataan saatuja tuloksia aiempiin mittaustuloksiin, kuten tehdasmittauksiin. Jos häviöt ovat kasvaneet liikaa, on syytä epäillä vikaa rautasydämessä. Tyhjäkäyntimittaus suoritetaan yleensä kolmivaiheisesti, mutta se voidaan suorittaa myös yksivaiheisesti, jolloin tulokset saattavat hieman poiketa kolmivaihemittauksesta.

6.1.5 Läpivientieristimet

Tehomuuntajan läpivientieristimen tehtävänä on pitää ensiö- ja toisiopuolen jännitteet erossa muuntajan kannesta. Läpiviennin eristys koostuu öljykyllästetystä paperista ja se sisältää kapasitanssin ohjauksen, eli läpiviennin sisään on sijoitettu kerroksittain metallilevyjä, joiden avulla sähkökenttä jakautuu tasaisesti. Uloimmasta metallilevystä on usein otettu kapasitiivinen ulosotto, jota käytetään hyväksi eri mittauksissa. Kuva eräästä 123 kV:n läpiviennistä on kuvassa 18.



Kuva 18. ASEA:n valmistama 123 kV:n läpivientieristin. Kuvan läpivientieristimellä on ikää noin 30 vuotta. Kuva otettu koestuksien yhteydessä.

Kuten muuntajan, myös läpivientieristimen öljyyn ja paperiin muodostuu kosteutta. Kosteus nopeuttaa vanhenemista eristeessä ja siten huonontaa eristyskykyä. On tärkeää että läpivienti pysyy hermeettisesti suljettuna, sillä jos läpiviennissä on pienikin vuoto, saattaa se paineenvaihtelun seurauksena imeä sisäänsä kosteutta. Posliini on mekaanisille iskuille heikko, joten läpivientien kuljetuksissa ja siirtelyissä tulee olla varovainen. Rikkoutunut tai eristykseltään huonokuntoinen läpivientieristin voi aiheuttaa tuhoisan läpilyönnin.

Läpivientieristimet koestetaan yleensä erillään muuntajasta perushuollon yhteydessä. Läpivientieristimen häviökulma, kapasitanssi ja osittaispurkaustaso mitataan. Lisäksi eristimelle suoritetaan yhden minuutin jännitekoe ja siitä voidaan tarvittaessa ottaa myös öljynäyte. Öljynäytteestä voidaan tehdä vastaava kaasuanalyysi, kuin muuntaja-öljylle. Liitteessä 4 on kahden erikokoisen läpiviennin mittauspöytäkirjat, joissa on myös IEC-60137:n määrittämät raja-arvot osittaispurkauksille ja häviökertoimelle.

Läpivientieristimiä ei yleensä korjata jos niissä havaitaan käytön estävä vika, vaan tilalle vaihdetaan suoraan uusi. Jos eristimen häviökulma tai osittaispurkaustaso on poikkeuksellinen, mutta ei hälyttävä, voidaan suositella läpiviennin sijoittamista tähtipisteeseen, jossa jänniterasitus ei ole niin suuri. Nykyään läpivientieristimet ovat suurissa määrin 30–50-vuotiaita. Tyypillisin vika on vuotava tai jumiutunut kapasitiivinen ulosotto, joka voidaan tarvittaessa korjata. Tärkeää on, että läpivienti pysyy hermeettisesti suljettuna.

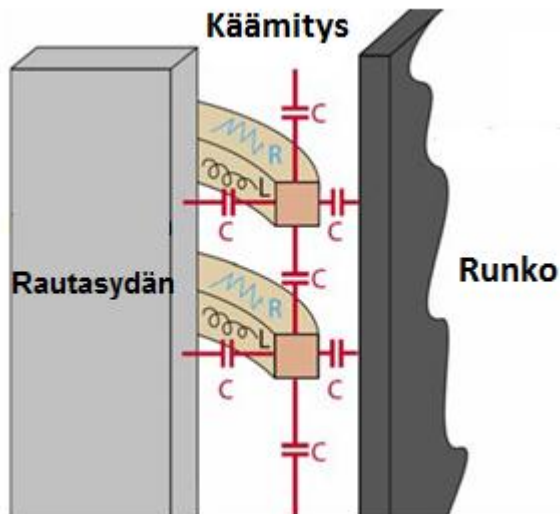
6.1.6 Mekaaninen eheys ja muodonmuutokset

Tehomuuntajat mitoitetaan kestävänsä suuria mekaanisia voimia, joita voi aiheutua kuljetuksista sekä käytönaikaisista tapahtumista, kuten oikosuluista tai ukkosseurauksista. Oikosulku voi tapahtua esimerkiksi verkossa tai eläimen aiheuttamana muuntajan kannella tai joskus jopa inhimillisestä virheestä. Oikosulun aikana muuntaja kokee valtavia oikosulkuvoimia joiden rasituksesta eristys, tuennat tai liitokset saattavat vaurioitua. Jos oikosulkuvirtojen aiheuttamat voimat ylittävät spesifioidut kestorajat tai muuntajan käämitysten kireys on löystynyt, voi käämityksiin syntyä sellaisia aksiaalisia ja radiaalisia voimia, jotka ylittävät käämitysten oikosulkukestoisuuden aiheuttaen muodonmuutoksia käämityksiin. Kuljetuksissa muuntajaa joudutaan siirtelyn lisäksi nostamaan, mikä voi vaikuttaa aktiiviosan puristuksiin ja kireyksiin. Tämä voi myös johtaa lopulta sydämen ja käämien siirtymisiin. Vähäinenkin muodonmuutos käämityksessä

tai sydämessä voi olla muuntajalle kohtalokas, vaikka se ei näkyisikään normaalissa käytössä, sillä oikosulkukestoisuus on voinut laskea siten, ettei muuntaja enää kestäisi seuraavaa verkon vikaa. [40.]

Käämitysten ja sydämen muodonmuutokset voidaan todeta visuaalisesti tai FRA- tai SFRA-mittauksilla. Muodonmuutosten toteaminen visuaalisesti edellyttää muuntajan aktiiviosan nostamista pois säiliöstä, eikä silloinkaan nähdä käämityksistä muuta kuin uloimmat osat.

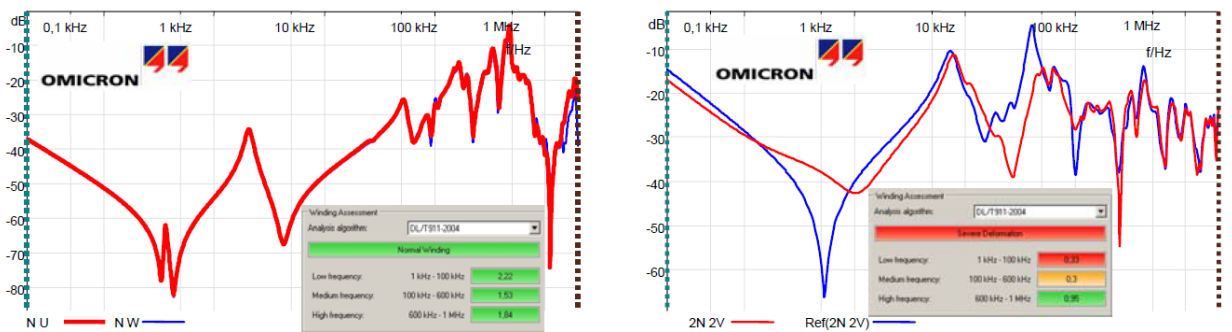
SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) -mittauksella voidaan tutkia muuntajan käämitysten, sydämen ja rakenteiden eheyttä. Muuntaja muodostaa monimutkaisia induktanssien, kapasitanssien ja resistanssien yhdistelmiä, joihin vaikuttavat lisäksi eristykset, tuennat ja niiden eri etäisyydet (kuva 19). Tämä kompleksinen rakenne on jokaisella muuntajalla ainutlaatuinen, ja sen mallintaminen sormenjäljeksi on erittäin suositeltavaa. Vikatilanteessa muuntajan kokema suuri rasitus rikkoo tämän mallin, jolloin SFRA-mittauksella voidaan havaita muutos rakenteissa, käämityksissä, liitoksissa, rautasydämessä, tuennoissa, yms. [41.]



Kuva 19. Muuntajan käämit muodostavat monimutkaisia kapasitanssien, induktanssien ja resistanssien yhdistelmiä keskenään sekä rautasydämen ja tankin välille. Nämä ovat etäisyyksiin ainutlaatuisia jokaisella muuntajalla. [41.]

SFRA-mittausperiaate on yksinkertainen. Muuntajan käämiin syötetään matalajännitteinen sinimuotoinen heräte ja vaste luetaan käämiin tai vastinkäämiin toisesta päästä. Herätteen taajuusalue voi esimerkiksi alkaa 10 Hz:stä ja päättyä 10 MHz:iin. Vasteesta

mittalaitteen PC-ohjelma muodostaa amplitudi- sekä vaihevasteen. Kuvassa 20 on esitetty kahden normaalin käämityksen amplitudivasteet sekä kahden poikkeavan käämin amplitudivasteet. Matalilla taajuuksilla vasteeseen vaikuttavat pääasiassa induktiiviset osat, kuten rautasydän. Suuremmilla taajuuksilla vasteesta tulee enemmän kapasitiivinen. Yleisesti poikkeavuudet matalilla taajuuksilla aiheutuvat kierrossuluista, jäännösmagnetismista sekä muista rautasydämeen vaikuttavista vioista. Taajuuksilla 10–150 kHz poikkeavuudet viittaavat aksiaaliseen tai radiaaliseen siirtymiseen käämityksessä. Korkeammilla taajuuksilla ongelmat liittyvät usein käämien liitoksiin, läpivienteihin, käämikytkimeen tai eri maadoitusvariaatioihin. [42; 43.]



Kuva 20. Kuvan vasemmanpuoleisessa tuloksissa ei havaita poikkeavuutta. Oikeanpuoleisessa tuloksessa havaitaan poikkeavuus. Tuloksen poikkeavuus johtui kierrossulusta. [41.]

Mittauksissa on otettava huomioon mahdolliset ulkoiset häiriöt, jotka saattavat näkyä kuvaajassa sahalaitaisena piirtona. Häiriöihin voidaan vaikuttaa huolehtimalla kunnollisista mittajohdojen liitoksista sekä niiden maadoituksista. Läpivientien liittimet tulisi lisäksi puhdistaa liasta.

Mittaus on suositeltavaa suorittaa aina ennen muuntajan siirtämistä ja sen jälkeen. Sormenjälki on hyvä ottaa myös mahdollisten oikosulkujen varalle. Mikäli referenssituloksia ei ole, voidaan tuloksia verrata vaiheiden välillä keskenään. Standardi IEC 60076-18 käsittelee SFRA- ja FRA-mittauksia.

Käämin muutos tai vääristymä muuttaa magneettivuon kulkureitin reluktanssia ja siten vaikuttaa hajavuoreaktanssin muutokseen. Hajavuoreaktanssi voidaan mitata kolmivaiheisesti ja tulosta verrata arvokilpeen, tai se voidaan mitata vaihekohtaisesti ja siitä voidaan muodostaa myös sormenjälki tuleville mittauksille. Hajavuoreaktanssimittaus tukee muun muassa SFRA-mittauksia. [44.]

6.1.7 Visuaalinen tarkastus

Visuaalisella tarkastuksella voidaan selvittää muuntajan kuntoa ulkopuolelta. Huomiota kiinnitetään kaikkiin poikkeavuuksiin, kuten öljyvuotoihin, ruosteeseen, yleiseen puhautteen sekä muodonmuutoksiin. Lisäksi apulaitteet, kuten mittarit, anturit, pumpput, puhaltimet yms. käydään silmämääräisesti läpi. Visuaalinen tarkastus vaatii suorittajalta kokemusta ja oikeaa näkemystä.

6.1.8 Historia

Kuntokartoitusta varten olisi hyvä tietää mahdollisimman paljon muuntajan menneisyydestä. Aikaisemmat mittaustulokset ja etenkin tehdasmittaukset antavat hyvän referenssipisteen uusille mittauksille. Ideaalisessa tilanteessa muuntajalle on tehty säännöllisesti kattavia mittauksia ja öljyanalyysejä, joista selviää trendi. Uusia mittaustuloksia verrataan silloin vanhoihin tuloksiin ja tulkitaan muutokset, ovatko ne normaaleja vai poikkeuksellisia ja mikä on kehityssuunta?

Sattuneet oikosulut, ylikuormitukset ja muut muuntajaa rasittaneet tapahtumat olisi hyvä olla mittaajalla tiedossa. Ne auttavat mittaustuloksien analysoinnissa, erityisesti kaasuanalyysin sekä SFRA:n. Tieto suoritetusta perushuollosta on myös tärkeä, koska silloin muuntaja on luultavasti kuivattu ja sen öljy käsitelty.

Näiden asioiden olisi hyvä olla mittaajan tiedossa ja hallussa jo mittauksia suorittaessa paikan päällä, mutta niitä ei aina kuitenkaan ole saatavilla. Tarkka vertailu ja tulkinta tehdäänkin usein vasta jälkikäteen mittausten suorittamisen jälkeen, jolloin aiemmat mittauspöytäkirjat ovat jo käytettävissä.

6.2 Dielektrinen vastemittaus kunnonvalvonnassa

Dielektrinen vaste voidaan määrittää joko aika- tai taajuustasossa. Dielektrinen taajuusvastemittaus eli DFR (Dielectric Frequency Response) -mittaus on varsinkin öljypaperieristeisten muuntajien kunnonvalvonnassa käytetty off-line-testaus. DFR-mittauksella voidaan määrittää eristeen dielektrinen vaste laajalla taajuusalueella. Määrittämällä eristeen dielektrinen vaste laajalla taajuusalueella, saadaan enemmän tietoa eristyksen kunnosta verrattuna vain käyttötaajuudella suoritettuun suurjännitemittaukseen. Vain käyttötaajuudella tehtävässä mittauksessa on mahdotonta erottaa öljystä tai paperista johtuvat dielektristen häviöiden kasvut, kun taas DFR-mittaus antaa siihen mahdollisuuden.

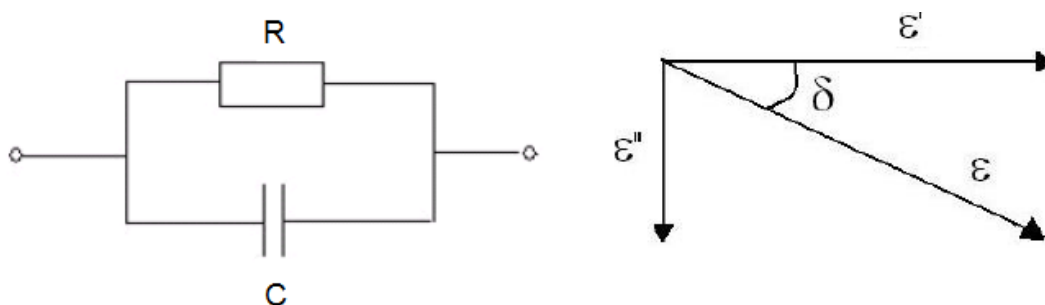
Öljypaperieristeisen muuntajan dielektrinen vaste riippuu kiinteän eristeen, kuten selluloosan vasteesta, öljyn vasteesta sekä näiden kahden rajapinnan polarisaatiovaikutuksesta (the interfacial polarisation effect). Näiden kolmen vasteeseen vaikuttaa vahvasti kosteus, lämpötila, eristyksen geometria, öljyn johtavuus sekä vanhenemisprosessien tuottamat johtavat sivutuotteet (conductive aging by-products). [45.]

Tuloksena voidaan esittää häviökertoimen lisäksi esimerkiksi kompleksinen kapasitanssi tai permittiivisyys taajuuden funktiona. Eniten tietoa saadaan tarkastelemalla häviökerrointa taajuuden funktiona, jolloin voidaan arvioida paperieristyksen kosteutta ja öljyn johtavuutta. Esimerkiksi Omicron on kehittänyt mittalaitteiston, jonka PC-ohjelma määrittää automaattisesti kiinteän eristeen kosteuskertoimen sekä muuntajaöljyn johtavuuden.

6.2.1 Eristyksen häviökerroin

Eristeen joutuessa sähkökenttään se polarisoituu, eli eristeen molekyylien sähködipolit pyrkivät kääntymään sähkökentän suuntaan vastustaen ulkoista sähkökenttää. Sähködipolien kääntyminen aiheuttaa molekyylien välisten kitkan ansiosta eristeessä lämpenemistä eli häviöitä. Ideaalisessa eristeessä ei ole yhtään varauksenkuljettajia, eli sen johtavuus olisi silloin nolla. Kosteus, ontelot, vanheneminen ja eri kontaminaatiot kuitenkin aiheuttavat eristeessä johtumista ja sitä kautta häviöitä. Häviökerroin eli $\tan \delta$ kuvastaa tätä eristeen poikkeavuutta ideaalisesta eristeestä. [29, s. 49–53.]

Eristeen permittiivisyys koostuu johtavuudesta ja polarisaatiosta, eli se on kompleksinen. Kuvassa 21 on esitetty häviökulman riippuvuus eristeen kompleksisesta permittiivisyydestä. Häviökulman tangentti on siis häviökerroin. Johtavuutta ja polarisaatioita voidaan kuvata myös kapasitanssin ja resistanssin rinnankytkennällä, jossa resistanssi kuvaa johtavuutta ja kapasitanssi polarisaatiota. Ideaalisessa eristeessä piirissä kulkeva virta olisi täysin kapasitiivista. [29, s. 51–52.]



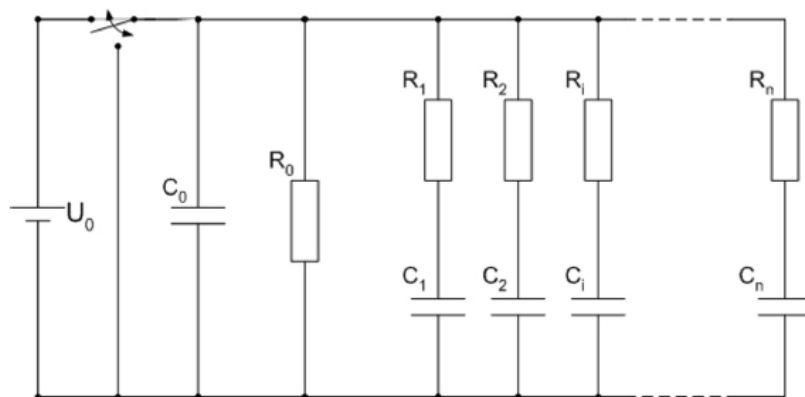
Kuva 21. Eristystä voidaan kuvata resistanssin ja kondensaattorin rinnankytkennällä, jossa resistanssi R kuvaa johtavuutta ja kapasitanssi C polarisaatiota. Kuvassa oikealla on esitetty kompleksinen permittiviteetti, jossa ε'' kuvaa johtavuutta, ε' polarisaatiota ja $\tan \delta$ on häviökerroin. [29, s. 51.]

Häviökerroin $\tan \delta$ voidaan laskea alla olevalla kaavalla.

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

I_R on eristeen resistiivinen vuotovirta
 I_C on eristeen kapasitiivinen vuotovirta
 ε'' määräytyy eristeen johtavuudesta
 ε' määräytyy eristeen polarisaatiosta.

Todellisuudessa muuntajan öljypaperieristystä kuvaa paremmin kuva 22, jossa R_0 kuvaa eristeen resistanssia, joka voidaan laskea polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirtojen avulla. C_0 vastaa eristeen geometristä kapasitanssia, johon vaikuttaa eristeen suhteellinen permittiivisyys sekä mitattu kapasitanssi. Mallin muut rinnakkaiset RC-piirit kuvaavat eri polarisoitumisprosesseja omilla aikavakioillaan. Nämä muut rinnakkaiset RC-piirit ovat riippuvaisia kosteudesta, lämpötilasta ja taajuudesta. Tästä syystä eristeen häviökertoimesta saadaan tarkempi kuva, kun mittaus suoritetaan laajalla taajuusalueella.



Kuva 22. Ekvivalenttisella piirillä voidaan kuvata dielektristä materiaalia [46].

Öljy ja paperi luovat yhdessä välilleen rajapinnan, jossa molemmilla on eri johtavuus ja permittiivisyys. Tämä aiheuttaa ns. rajapintapolarisaation, joka dominoi polarisaatiohäviöitä etenkin pienillä taajuuksilla. Pienillä taajuuksilla myös johtavuudesta aiheutuvat tehohäviöt kasvavat. Suurilla taajuuksilla aineen permittiivisyys pienenee, kun eristeen sähködipolit eivät kykene kääntymään sähkökentän mukana. Eristeille on myös tyypillistä häviöiden kasvu lämpötilan kasvaessa. [29, s. 53.]

Häviökertoimen mittauksia on käytetty jo kauan eristyksien kunnonvalvonnassa, etenkin sähkökoneiden kunnonvalvonnassa. Dielektristen häviöiden kasvu merkitsee eristeen vanhenemista tai huonontumista. [29, s. 53.]

6.2.2 Dielektrinen vaste aikatasossa

Dielektristä vastetta voidaan tarkastella aikatasossa polarisaatiovirtojen avulla. Polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirtojen mittaamisella eli PDC (Polarisation and Depolarisation Current) -mittauksella voidaan määrittää eristeen johtavuutta.

Kuva 23 havainnollistaa polarisoitumisilmiötä, kun tutkittavan eristeen yli, kuten esimerkiksi ylä- ja alajännitekäämien välille, kytketään tasajännite pitkäksi aikaa. Kuvassa 23 katkoviivalla esitetty U_0 kuvastaa tätä tasajännitettä, i_{pol} kuvaa polarisaatiovirtaa ja t_p latausaikaa. Tämä tasajännite on tyypillisesti noin 200 V, ja ajan pituus, jolla eristettä varataan, voi olla 10 000 s. Tämän pitkän ajan aikana mitataan polarisaatiovirtaa, joka on tyypillisesti suuruudeltaan nano- tai pikoampeerien luokkaa. Polarisaatiovirta voidaan esittää alla olevalla kaavalla. [46.]

$$i_{pol}(t) = C_0 * U_0 * \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right]$$

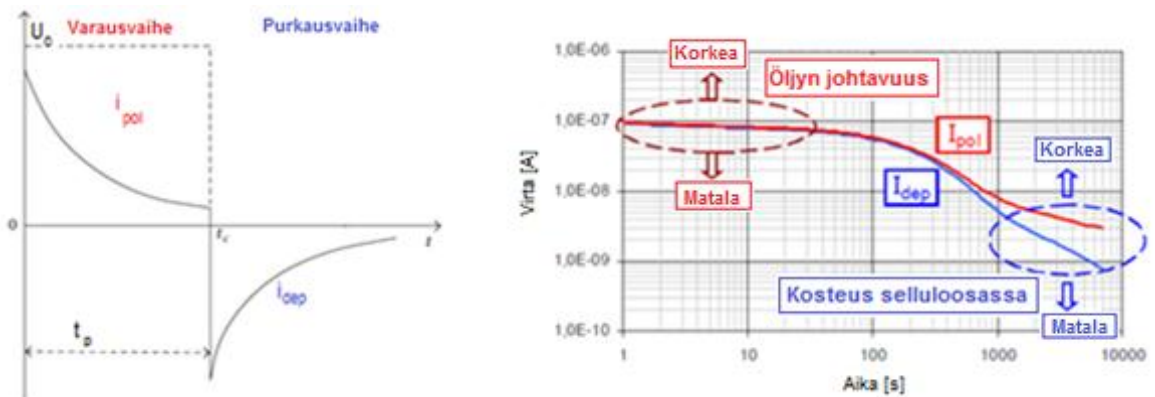
C_0 on eristyksen geometrinen kapasitanssi
 U_0 on eristeen yli syötetty tasajännite
 σ on DC-johtavuus
 ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys
 $f(t)$ on eristeen dielektrinen vaste.

Kun varausaika päättyy, niin jännite katkaistaan ja kytkentä oikosuljetaan maahan, jolloin mitataan eristeestä purkautuva negatiivinen käänteispolarisaatiovirta, jonka suuruutta kuvaa seuraava kaava.

$$i_{dep}(t) = C_0 * U_0 * [f(t) - f(t + t_p)]$$

C_0 on eristyksen geometrinen kapasitanssi
 U_0 on eristeen yli syötetty tasajännite
 t_p on eristeen latausaika.

Kuvassa 23 on esitetty vasemmalla polarisaatiovirtojen käyttäytyminen varaus- ja purkausvaiheessa sekä oikealla esitetty virtojen suuruus ajan funktiona.



Kuva 23. PDC-mittauksessa eristettä ladataan tasajännitteellä ja mitataan sen aikana esiintyvää polarisaatiovirtaa. Latauksen jälkeen eristys oikosuljetaan maahan ja mitataan käänteispolarisaatiovirta. Virtojen käyttäytymiseen vaikuttaa vahvasti kosteus. [47.]

Käänteispolarisaatiovirran mittauksen jälkeen voidaan mitata vielä eristeeseen palautuva jännite, kun oikosulku poistetaan. Palautuva jännite antaa viitteitä eristyksen kosteudesta, ja sen tarkastelussa kiinnitetään huomiota jännitteen alkujyrkkyyteen, huipparvoon ja sen saavuttamiseen kuluvaan aikaan.

Kuvassa 23 on esitetty kosteuden vaikutusta polarisaatiovirtojen käyttäytymiseen. Dielektrinen vaste aikatasossa esiintyy siis polarisaatiovirtoina. Polarisaatiovirtojen, permittiivisyyden, geometrisen kapasitanssin, latausjännitteen avulla voidaan laskea johtavuus σ , mikäli mittausaika on tarpeeksi pitkä. [46.]

$$\sigma \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} [i_{pol}(t) - i_{dep}(t)]$$

C_0 on eristyksen geometrinen kapasitanssi

U_0 on eristeen yli syötetty tasajännite

ε_0 on tyhjiön permittiivisyys

$i_{pol}(t)$ on polarisaatiovirta

$i_{dep}(t)$ on käänteispolarisaatiovirta.

Eristyksen resistanssi R_0 (kuva 22) voidaan laskea, kun tiedetään syöttöjännite sekä polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirrat suurilla varaus- ja purkausajoilla.

$$R_0 = \frac{U_0}{(i_{pol} - i_{dep})}$$

U_0 on eristeen yli syötetty tasajännite

$i_{pol}(t)$ on polarisaatiovirta

$i_{dep}(t)$ on käänteispolarisaatiovirta.

Kaavasta huomataan resistanssin olevan suurimmillaan, kun virrat ovat lähes yhtä suuria. Tällöin kuvan 21 mukaan vuotovirta on lähestulkoon kapasitiivista. Eristyksen kosteus, lika, ikääntyminen yms. huonontavat eristyksen polarisoitumista, jolloin polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirran ero kasvaa ja eriste muuttuu johtavammaksi.

Polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirtojen mittaaminen PDC-menetelmällä on osoittautunut tehokkaaksi tavaksi tarkastella eristyksen dielektrisiä ominaisuuksia, sillä kosteus, lika ja lämpötila sekä öljyn ja paperin ikääntyminen vaikuttavat vahvasti polarisaatiovirtoihin. PDC-mittaus ei sovellu pienille varausajoille, sillä polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirtojen luonnetta ei kyetä havaitsemaan niin lyhyellä varausajalla. FDS-menetelmä taas soveltuu lyhyille ajoille eli korkeille taajuuksille paremmin.

6.2.3 Dielektrinen vaste taajuustasossa

FDS (Frequency Domain Spectroscopy) -menetelmässä eli taajuusalueen spektroskopiassa dielektrinen vaste määritetään häviökertoimen taajuustasossa. Mittauksessa syötetään taajuudeltaan säädettyä sinimuotoista vaihtojännitettä tutkittavan eristeen yli ja vasteena mitataan eristeen vuotovirtaa. Taajuusalue on tyypillisesti 1000–0,0001 Hz, ja jännitteen maksimiarvo on 100–200 V.

Syötetyn jännitteen ja mitatun virran amplitudien ja vaihe-erojen avulla määritetään impedanssi $Z(\omega)$. Impedanssista voidaan laskea kompleksinen permittiivisyys $\varepsilon^*(\omega)$ tai kompleksinen kapasitanssi $C^*(\omega)$. [46]

$$Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} = \frac{1}{j\omega[C'(\omega) - jC''(\omega)]}$$

$U(\omega)$ on syöttöjännite taajuuden funktiona
 $I(\omega)$ on mitattu vastevirta taajuuden funktiona
 $C''(\omega)$ on kapasitanssin imaginääriosa
 $C'(\omega)$ on kapasitanssin reaaliosta
 ω on kulmataajuus.

Kun tiedetään impedanssi, voidaan laskea häviökerroin. Häviökerroin, kompleksinen kapasitanssi ja kompleksinen permittiivisyys ovat kolme yleistä indikaattoria, jotka kuvaavat eristyksen kuntoa tai heikkenemistä. [48, s. 27–29.]

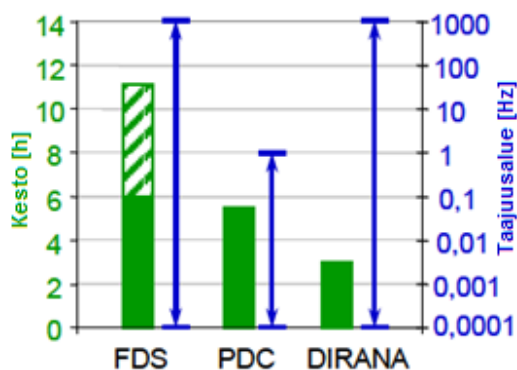
$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)}$$

$\varepsilon''(\omega)$ on permittiivisyyden imaginääriosa
 $\varepsilon'(\omega)$ on permittiivisyyden reaaliosta
 $C''(\omega)$ on kapasitanssin imaginääriosa
 $C'(\omega)$ on kapasitanssin reaaliosta.

FDS-menetelmä soveltuu hyvin suurille taajuuksille, mutta pienillä taajuuksilla mittaus vaatii aikaa useita tunteja. Mittaus tarvitsee usein useamman kuin yhden syklin vaihtojännitettä, jotta se voi riittävän tarkasti määrittää amplitudin ja vaihesiirron syöttöjännitteen ja virtavasteen väliltä. Pienillä taajuuksilla tämä menetelmä vaatii siis paljon aikaa. Tätä ongelmaa varten Omicron on kehittänyt mittalaitteiston, joka käyttää yhdistettyä PDC- ja FDS-menetelmää häviökertoimen määrittämiseen.

6.2.4 Yhdistetty FDS-PDC-menetelmä

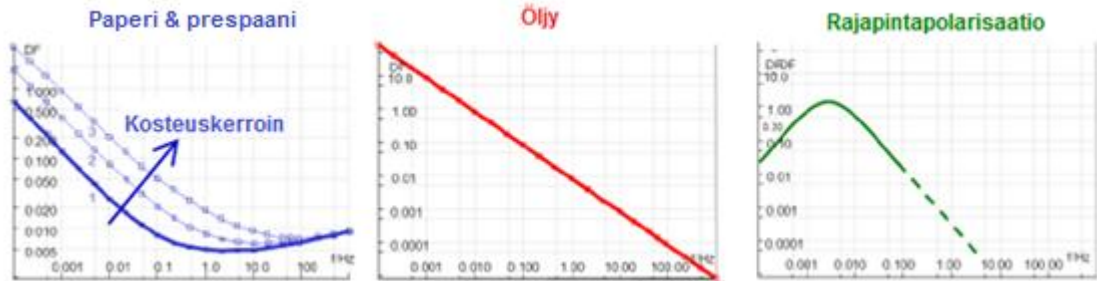
Dielektrinen vaste voidaan siis määrittää joko aikatasossa (PDC) tai taajuustasossa (FDS). Todettiin, että PDC-menetelmä ei sovellu lyhyille ajoille aikatasossa eli korkeille taajuuksille, sillä polarisoitumista ei havaita riittävästi, ja toisaalta FDS-menetelmä vaatii paljon aikaa matalilla taajuuksilla. Molemmat mittaukset antavat kuitenkin hyvin tietoa eristyksen kunnosta, kuten kosteudesta ja johtavuudesta. Omicronin valmistama mittalaitteisto (Dirana) yhdistää nämä kaksi menetelmää ja saavuttaa siten etulyöntiaseman mittauksen nopeudessa. Mittalaitteisto kykenee käymään koko taajuusalueen (1000–0,0001 Hz) läpi noin 3 tunnissa. Kuvassa 24 on esitetty taajuusalueen mittaamiseen vaadittava aika eri menetelmillä.



Kuva 24. Yhdistetyn FDS-PDC-menetelmän etu on ajantarve. Yhdistetty tekniikka kattaa koko taajuusalueen noin 3 tunnissa, kun taas pelkkä FDS-menetelmä voi vaatia noin 11 tuntia aikaa. [45.]

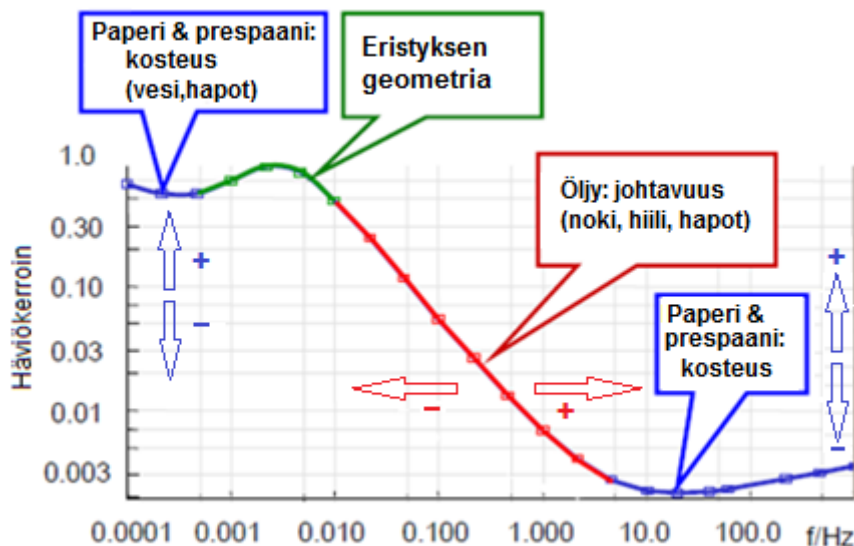
Mittalaitte asetetaan käyttämään FDS-menetelmää korkeilla taajuuksilla ja matalilla taajuuksilla PDC-menetelmää. Taajuusalue on valittavissa aina 5 kHz:stä 50 μ Hz:iin saakka. Tyypillisesti mitataan taajuusalue 1000–0,0001 Hz siten, että FDS-menetelmää käytetään 1000–0,1 Hz ja PDC-menetelmää 0,1–0,0001 Hz. PC-ohjelma muuntaa aikatason mittaustuloksen (PDC) automaattisesti taajuustasoon analyysiä varten. Näin dielektristä vastetta voidaan käsitellä vain taajuustasossa, joka yksinkertaistaa tuloksen käsittelyn. Tämä matemaattinen muunnos algoritmeineen sisältää ns. ennustavan ominaisuuden sallien mittauksen lopettamisen etuajassa, mikäli laite on saanut tarpeeksi tietoa eristyksestä. [49.]

Kuten sanottu, muuntajan dielektrinen vaste muodostuu selluloosasta, öljystä ja näiden kahden välisestä rajapintapolarisaatiosta. Kuvassa 25 on esitetty erikseen näiden tekijöiden vaikutukset häviökertoimeen taajuuden funktiona.



Kuva 25. Muuntajan dielektriseen vasteeseen vaikuttavat selluloosa, öljy ja näiden kahden välisen rajapintapolarisaatio [50].

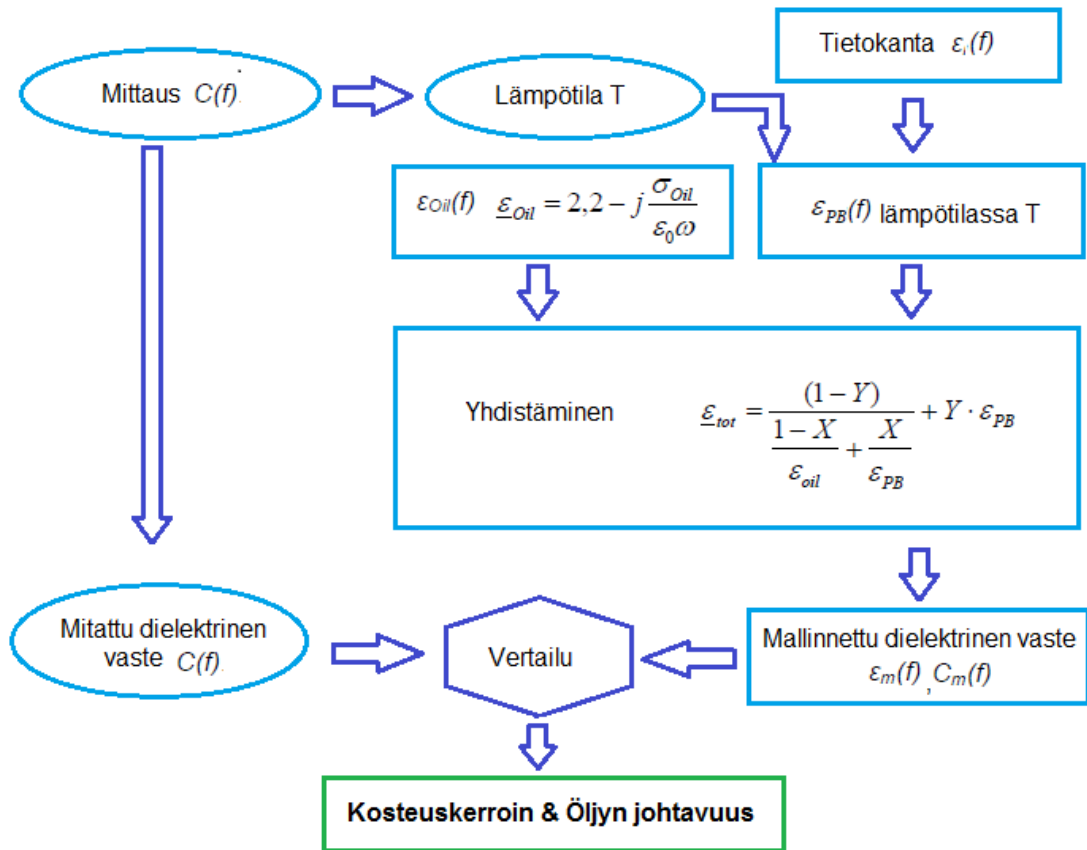
Mittalaitteen PC-ohjelman avulla saadaan selville kiinteän eristeen, eli paperin ja prespaanin kosteuserroin, sekä öljyn johtavuus. Laite mittaa polarisaatiovirtoja, kapasitansseja ja häviökerrointa, joihin vaikuttaa erityisesti kosteus. Kuvassa 26 on esitetty muuntajan pääeristyksen tyypillinen häviökerroin taajuuden funktiona. Kuvasta voidaan erottaa dielektrisen vasteen kolme päätekijää: selluloosa, öljy ja eristyksen geometria. Käyrän muotoon vaikuttaa kosteus, johtavuus, lämpötila sekä ikääntyminen.



Kuva 26. Dielektrisen vasteen muodostuminen taajuuden funktiona. Matalilla ja korkeilla taajuuksilla vaikuttaa erityisesti selluloosan ominaisuudet, kuten kosteus ja ikääntyminen. Keskipiirillä dominoi öljyn johtavuus. Käyrän huippuun vaikuttaa eristysten geometria. [45.]

Kuvan 26 käyrästä voidaan havaita paperin ja öljyn ja näiden kahden rajapintapolarisaation vaikutukset häviökertoimeen. Selluloosaeristys dominoi erityisesti korkeilla taajuuksilla (1000–10 Hz) siten, että mitä kuivempi eristys on, sitä alemmaksi käyrä laskee. Kosteus eristyksessä näkyy kasvavina häviöinä. Öljyn johtavuus alkaa näkyä kuvassa 1 Hz:n kohdalla ja sen vaikutus päättyy noin 0,01 Hz:n kohdalla. Öljyn johtavuuteen vaikuttavat esimerkiksi eristyksien ikääntymisestä aiheutuvat haitalliset johtavat sivutuotteet, kuten kaasut ja hapot. Öljyn johtavuuden kasvaminen siirtää käyrää suuremmille taajuuksille, pitäen muodon lähes samana. Käyrän ”huippu” (kohdassa 0,01–0,001 Hz) määräytyy öljyn ja paperin rajapintapolarisaatiosta. Korkeampi huippu viittaa suurempaan suhteeseen öljyn ja prespaanin välillä. Matalilla taajuuksilla huipun jälkeen selluloosan ominaisuudet tulevat uudelleen esille. Täällä korostuu erityisesti kosteus ja ikääntyminen, mikä näkyy laskevana tai nousevana käyränä kosteuskertoimen mukaan. Matalat taajuudet ovat erittäin tärkeitä kosteuden määrittämisessä, sillä siellä kosteus vaikuttaa eniten häviöihin. Erityisesti kylmille tai kuiville eristyksille tulisi mittaus suorittaa aina vähintään 0,1 mHz:iin saakka riittävän tiedon saamiseksi. [45; 52.]

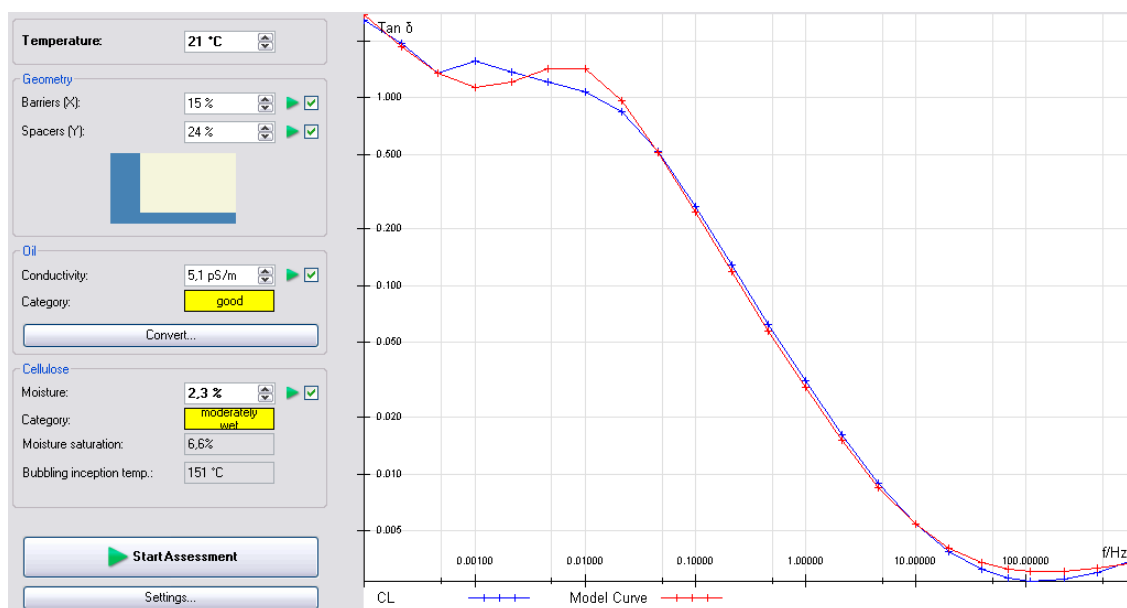
Mittalaitteen PC-ohjelma määrittää kiinteän eristyksen kosteuskertoimen ja öljyn johtavuuden vertaamalla mitattua vastetta mallinnettuun vasteeseen. Mallinnettu vaste perustuu laboratoriossa luotuun tietokantaan. Tietokanta koostuu useista mittauksista, joissa on määritetty uuden ja vanhan paperin dielektrinen vaste eri lämpötiloissa, eri kosteuskertoimilla ja eri öljyn johtavuuksilla. Kosteuskertoimen ja öljyn johtavuuden määrittämiseen tarvitaan ainoastaan eristeen mittaushetken lämpötila. Kuva 27 havainnollistaa tuloksen syntyä. [49.]



Kuva 27. PC-ohjelma määrittää eristyksen kosteuskertoimen ja öljyn johtavuuden mittaustuloksen, lämpötilan ja tietokannan avulla. Ohjelma pyrkii mallintamaan vastaavanlaisen käyrän, kuin itse mittaustulos on. [49.]

Mittauksen kohteena olevan eristeen lämpötila T syötetään ohjelmaan, jolloin ohjelma hakee automaattisesti vastaavan inter- tai extrapolatoidun paperin permittiivisyyden siinä lämpötilassa. Öljyn ja paperin permittiivisyydet yhdistetään kuvan kaavalla, jota kutsutaan XY-malliksi. Kaavassa X kuvaa prespaanilevyjen (barriers) suhdetta öljyyn ja Y välipalojen/kiilojen (spacers) suhdetta öljyyn. Nämä suhteet voidaan myös syöttää ohjelmaan, mikäli ne ovat tiedossa, mutta useimmiten niitä ei tiedetä. Tyypillisesti X vaihtelee 15–55 % ja Y 13–24 % [52]. Vanhemmilla muuntajilla on usein suurempi prespaanin suhde öljyyn kuin uudemmilla. Liitteen 5 kuvaan on kerätty tietoa eri ikäisten ja kokoisten muuntajien prespaanin ja öljyn suhteesta. Mallinnettu permittiivisyys $\epsilon_m(f) = \epsilon_{tot}(f)$ muutetaan mallinnettuun kapasitanssiin $C_m(f)$. Kun parhaiten sopiva mallinnettu dielektrinen vaste löydetään, voidaan sen perusteella päätellä muuntajan kosteuskerroin sekä öljyn johtavuus. [49.]

Kuvassa 28 on esitetty ohjelman referenssikäyrän periaate. Tarkasteluun on valittu esimerkkinä kuvan 34 sininen käyrä.



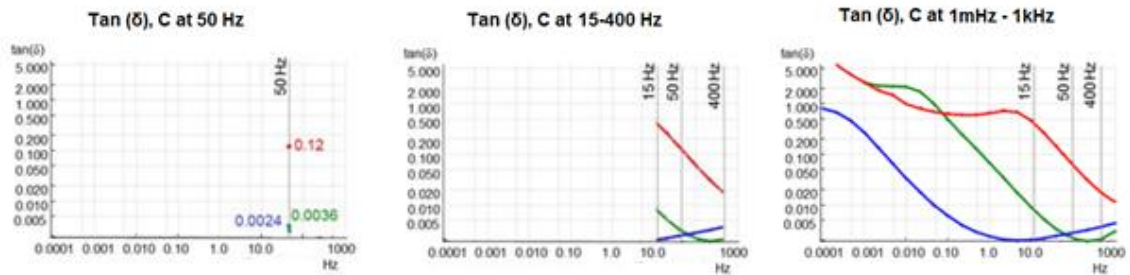
Kuva 28. Mallinnus kuvan 34 sinisestä käyrästä. Ohjelma sovittaa automaattisesti punaisen referenssikäyrän mitatun sinisen käyrän päälle muuttamalla eri parametreja. Parhaiten mallinnetun referenssikäyrän arvot kuvaavat mitattua tulosta.

Ohjelma muuttaa kuvassa 28 vasemmalla olevia parametreja siten, että punainen referenssikäyrä vastaa mahdollisimman hyvin mitattua sinistä käyrää. Parametreja voi myös itse muuttaa, jos ne ovat tiedossa. Sopivimman referenssikäyrän arvot kuvaavat todellisen mittauksen arvoja.

6.2.5 Vertailu perinteiseen käyttötaajuudella tehtävään mittaukseen

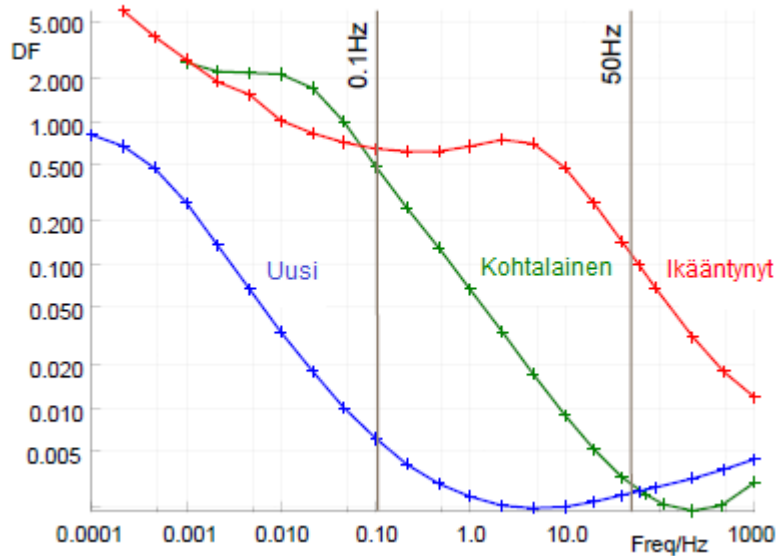
Perinteinen suurjännitteellä tehtävä häviökertoimen määrittäminen muuntajan eristyksille vaatii aina suurjännitelaitteistot, jotka ovat erittäin raskaita painonsa ja kokonsa vuoksi. Tarpeeksi suuren jännitteen saaminen muuntajan yläjännitekäämiin kenttäolosuhteissa on aina haasteellista, ja siinä on omat riskinsä. Etuna suurjännitemittauksessa on se, että se kuvaa hieman paremmin todellisia käyttöjännitteellä syntyviä dielektrisiä häviöitä, sillä jänniterasitus on silloin nimellinen.

Häviökertoimen määrittäminen useilla taajuuksilla antaa paljon enemmän informaatiota eristyksistä, kuten paperin kosteudesta, eristyksen geometriasta ja öljyn johtavuudesta. Suurjännitteellä tehtävä häviökertoimen määrittäminen ei juurikaan anna mahdollisuutta erotella tai tunnistaa syitä korkealle häviökertoimelle. Kuvassa 29 on esitetty kolmen eri matalajännitteisen häviökertoimenmittauksen tuloksia muuntajan eristyksistä. Voidaan todeta, että mittaus suurimmalla taajuusalueella 1 mHz – 1 kHz antaa parhaimman kuvan eristeen häviökertoimesta.



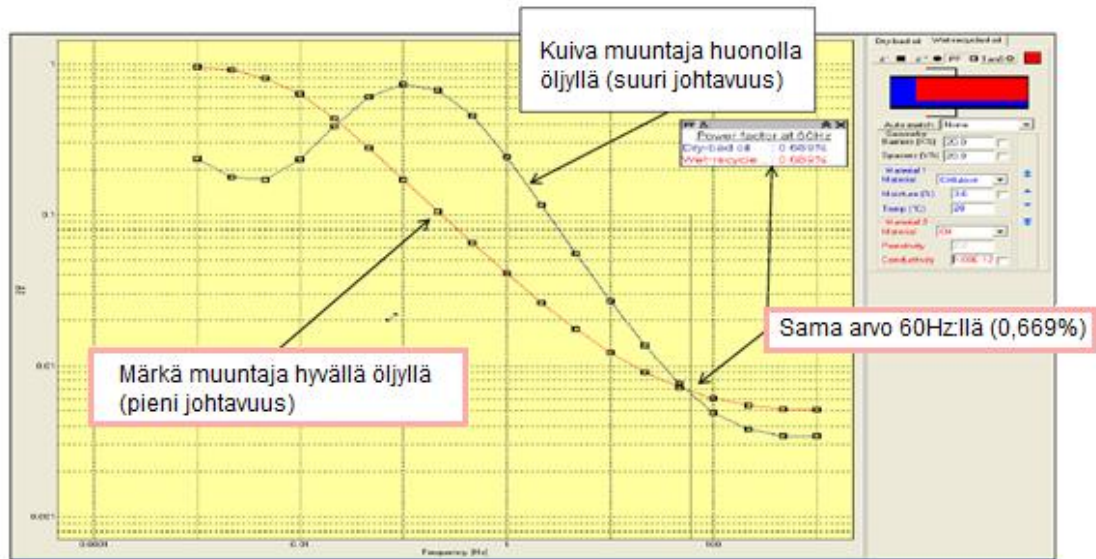
Kuva 29. Häviökertoimen määrittäminen suuremmalla taajuusalueella antaa tarkemman kuvan häviökertoimen käyttäytymisestä [51].

Vasemmalla oleva kuva antaa karkeasti vain 50 Hz:n häviökertoimen ja kapasitanssin arvon eikä mahdollisuutta erotella eri vaikutuksia. Keskimmäinen kuvaaja antaa hieman paremman kuvan, mutta ei anna edelleenkään mahdollisuutta erotella vaikutuksia. Oikealla oleva käyrästä taas antaa mahdollisuuden erotella öljyn ja paperin vaikutukset. Jos tarkastellaan kuvan 30 kuvaajaa, voidaan havaita, kuinka vähän tietoa eristyksistä oikeasti saadaan, kun mittaus suoritetaan suppealla taajuusalueella.



Kuva 30. Kuvasta nähdään, että 50 Hz:n arvo kertoo uuden eristeen selluloosasta, mutta ikääntyneen sekä kohtalaisen ikääntyneen eristeen öljystä. Mittaustulos 0,1 Hz:llä kertoo taas uuden ja kohtalaisen eristeen öljystä, mutta ikääntyneen eristeen selluloosan kunnosta. [45.]

Kuvassa 30 punainen käyrä esittää ikääntyntä eli kosteaa ja johtavaa eristystä, vihreä kohtalaisen ikääntyntä ja sininen uutta. Mittaustulos 50 Hz:llä heijastuu itse asiassa ikääntyneen ja kohtalaisen ikääntyneen eristyksen öljystä, mutta uuden eristyksen paperieristyksestä. Kun tarkastellaan 0,1 Hz:n arvoa, havaitaan sen heijastuvan uuden ja kohtalaisen eristyksen öljystä, mutta vanhan eristyksen paperieristyksestä. Laajalla taajuusalueella saadaan siis kattavampi kuva häviökertoimeen vaikuttavista tekijöistä. Korkea häviökerroin 50 Hz:llä voi siis johtua huonosta öljystä tai huonosta paperieristyksestä, sitä ei voida tietää, jos tarkastelu tehdään vain yhdellä taajuudella. Kuvassa 31 on hyvä esimerkki kahdesta muuntajasta, joista toisella on huono paperieristys, mutta hyvä öljy, ja toisella on huono öljy, mutta hyvä paperieristys.

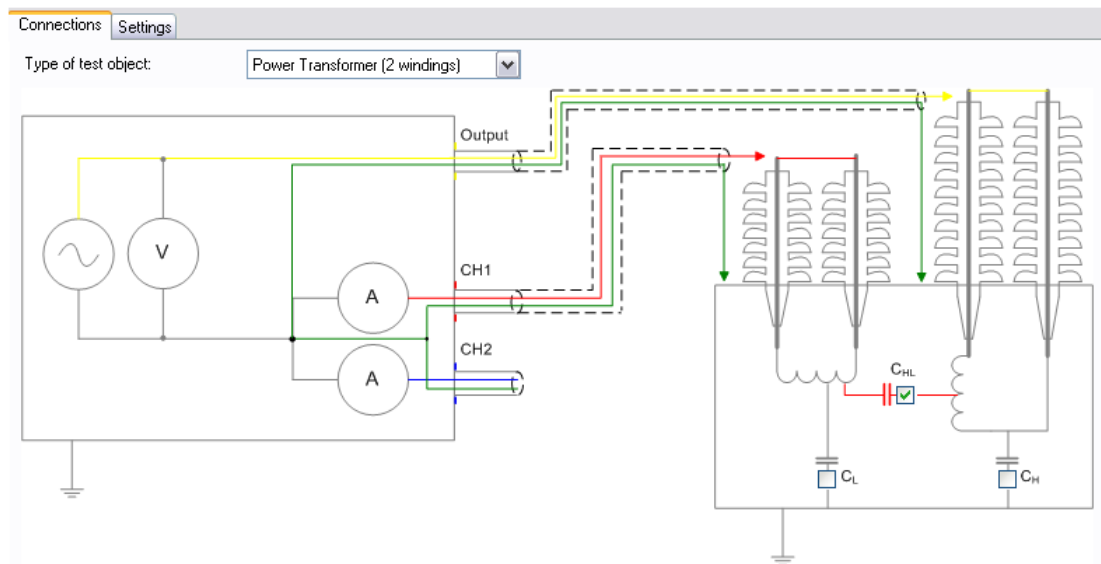
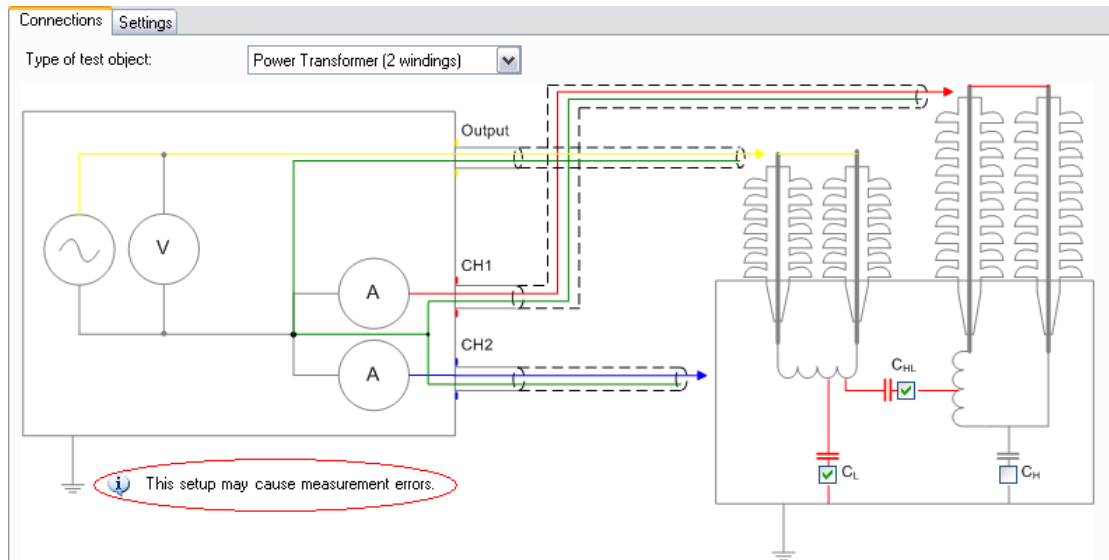


Kuva 31. Kuvassa on kuiva muuntaja huonolla öljyllä (sininen käyrä) ja kostea muuntaja hyvällä öljyllä (punainen käyrä). Laajan taajuusalueen tarkastelulla voidaan erotella öljystä ja paperista aiheutuvat muutokset häviökertoimessa.

Vaikka häviökerroin on kuvassa 31 sama (0,669 %) molemmissa eristyksissä 60 Hz:llä, eivät eristykset lopulta ole läheskään samassa kunnossa. Laajan taajuusalueen tarkastelu osoittaa huomattavat erot öljyjen ja paperieristyksien välillä. Laaja mittaus antaa myös mahdollisuuden oikeaan huoltoon, esimerkiksi toisesta eristyksestä saadaan hyvä, kun vaihdetaan tai regeneroidaan öljy. Toisen eristyksen kuntoon ei öljyn uusiminen vaikuttaisi, vaan muuntaja tulisi kuivata, jolloin paperin kosteuskerroin laskisi.

6.2.6 Dielektrisen vastemittauksen tuloksia

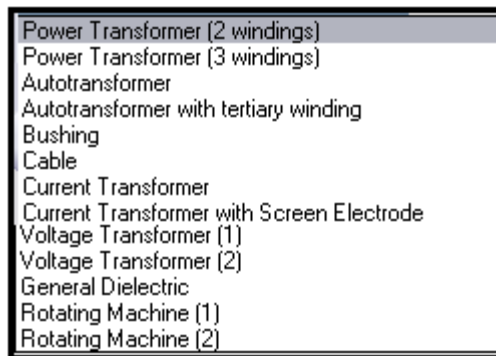
Tässä luvussa käsitellään FDS-PDC-menetelmän sovellettavuutta sekä mittauksia kentältä. Dielektrinen taajuusvaste voidaan mitata muuntajasta useasta eri eristysväliltä. Tärkeimmät eristysvälit ovat ylä- ja alajännitekäämien välinen eristys (C_{HL}) sekä alajännitekäämin ja rungon välinen eristys (C_L). Suurin prespaanin ja paperin määrä on tyypillisesti ylä- ja alajännitekäämien välissä. Kuvassa 32 on esitetty tavallisen kaksikäämimuuntajan mahdolliset pääeristysvälit. Mittalaitteen PC-ohjelma antaa valmiit kytkentäohjeet, kun valitaan haluttu eristysväli.



Kuva 32. Kaksikäähimuuntajan pääeristysvälit ovat C_{HL} , C_L , C_H . Kuvan mukaan kaksi eri eristysväliä voidaan mitata samanaikaisesti, mutta häiriönpoistojohtimien (guards) jäädessä pois, mittaus voi altistua häiriöille.

Kuten kuvasta 32 huomataan, mittalaitteella voidaan mitata kahta eristysväliä samanaikaisesti. Tämä tietenkin puolittaisi vaaditun kokonaismittausajan, mutta mittauslaatu heikentyy häiriönpoistojohtimien (guards) jäädessä pois. Häiriönpoistojohtimien tarkoituksena on suodattaa haitalliset pintavirrat pois oikeasta vuotovirrasta.

Dielektrinen taajuusvaste voidaan myös määrittää erilaisista muuntajista sekä suurjännitekomponenteista (kuva 33).

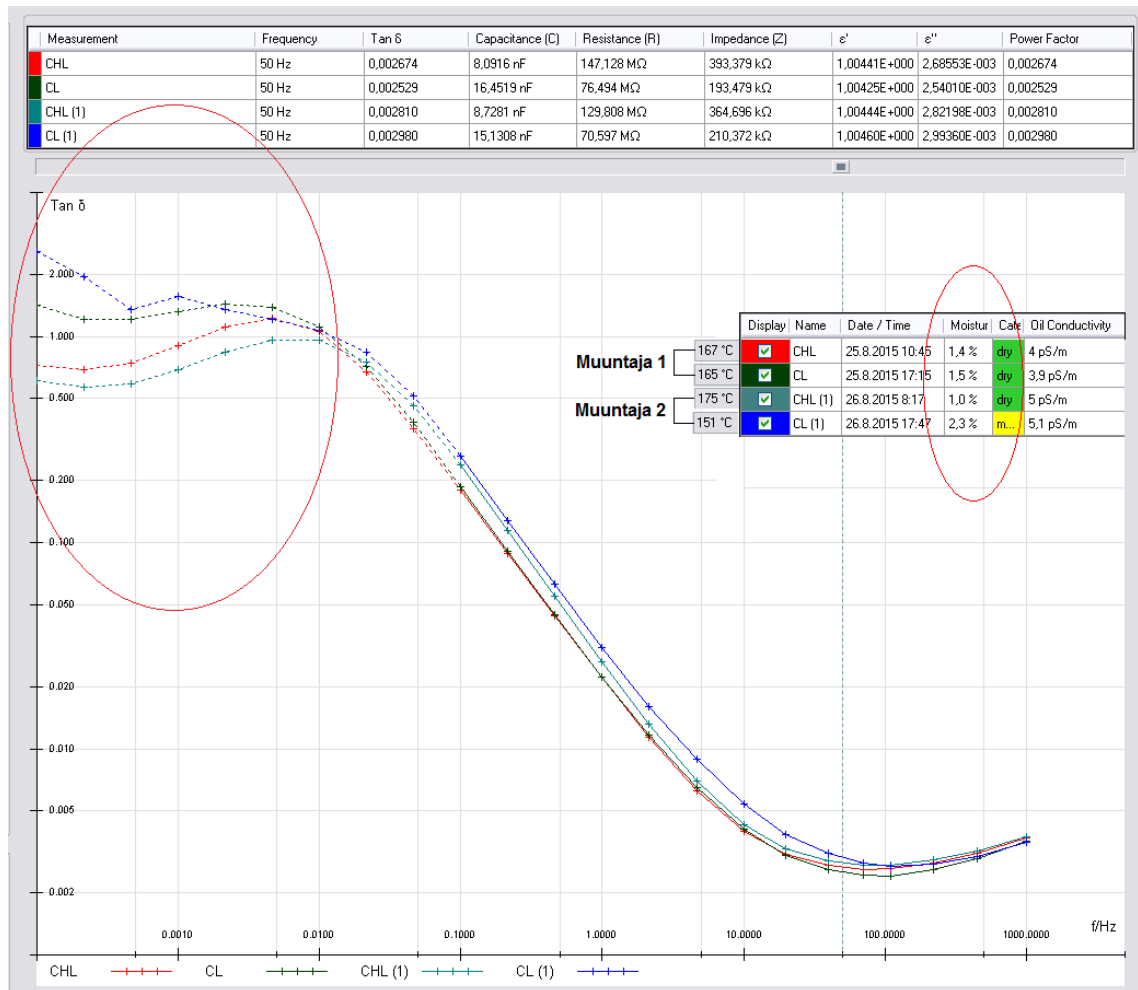


Kuva 33. Erilaisten komponenttien ja kojeiden dielektristä vastetta on mahdollista tutkia DFR-menetelmällä.

DFR-menetelmää voidaan käyttää muuntajan pääeristysten lisäksi läpivientien, kaapeleiden, jännite- ja virtamuuntajien, sähkökoneiden sekä yleisen dielektrisen eristeen kunnonvalvontamittauksissa. Työssä käytetyn mittalaitteen kosteusanalyysi-sovellus (Moisture Assessment), joka määrittää kiinteän eristeen kosteuskertoimen ja öljyn johtavuuden, on kehitetty ainoastaan muuntajille. Sitä voidaan ja onkin käytetty esimerkiksi läpivientieristimissä ja kaapeleissa arvioivana apulaitteena, mutta sen soveltuvuudesta niille ei ole vielä luotettavaa näyttöä.

Mittaamista heti eristettä polarisoivien mittausten jälkeen, kuten eristysvastusmittauksen jälkeen, tulisi välttää, sillä eristys voi olla mittauksen jäljiltä yhä polarisoitunut ja se voi haitata PDC-alueen mittauksia.

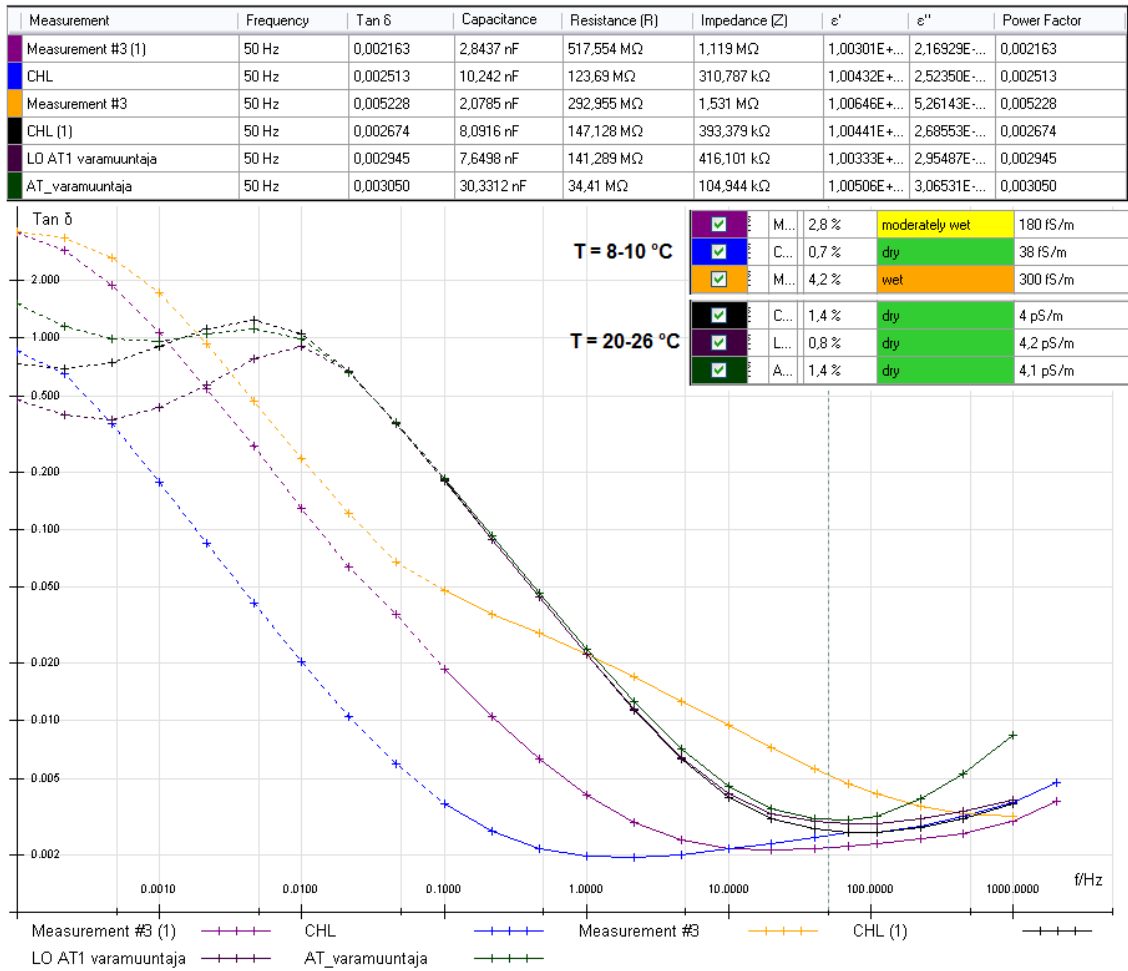
Kuvassa 34 on kahden 70-luvulla valmistetun ja 2000-luvulla perushuolletun blokkimuuntajan pääeristysten dielektriset vasteet. Häviökertoimet on mitattu ylä- ja alajännitekäämien välistä sekä alajännitekäämin ja rungon välistä. Mittausympäristöt ovat molemmilla lähes identtiset. Mittaushetkillä ilmankosteus ja lämpötila olivat samoja. Kuvan 34 käyrän katkoviiva kuvaa PDC-aluetta ja yhtenäinen viiva FDS-aluetta.



Kuva 34. Kuvassa on kahden samankokoisen muuntajan dielektriset vasteet kahdesta eri eristysvälistä. Muuntajien öljyn johtavuus on lähes sama. Kosteutta on havaittavissa hieman enemmän väleillä C_L kuin C_{HL} . Kuvaajien yhtenäinen viiva kuvaa FDS-alueita ja katkoviiva PDC-alueita.

Tuloksina esitetään häviökertoimet taajuuden funktiona. Kuvan yläreunassa olevat arvot voidaan myös esittää taajuuden funktiona tarvittaessa. Tuloksista huomataan, että öljyt ovat johtavuudeltaan melko samanlaisia, mutta eristeen kosteudessa on pieniä eroja. Molempien muuntajien sydämen ja alajännitekäämin välissä on hieman enemmän kosteutta kuin ylä- ja alajännitekäämien välissä. Ohjelmisto antaa kosteuskertoimen ja öljyn johtavuuden lisäksi myös selluloosassa olevan veden kuplimislämpötilan, joka on kosteimmalla eristyksellä alhaisin 151 °C. Molemmat muuntajat ovat hyväkuntoisia. Liitteen 6 kuvaajaan on koottu useiden eri muuntajien eristysvälejä eri kosteuskineen, mittausympäristöineen ja öljyn johtavuuksineen.

Kuvaan 35 on koottu kuuden eri muuntajan eristysvälien mittaustuloksia. Puolet mittauksista on suoritettu eristeen lämpötilan ollessa 8–10 °C ja puolet 20–26 °C.

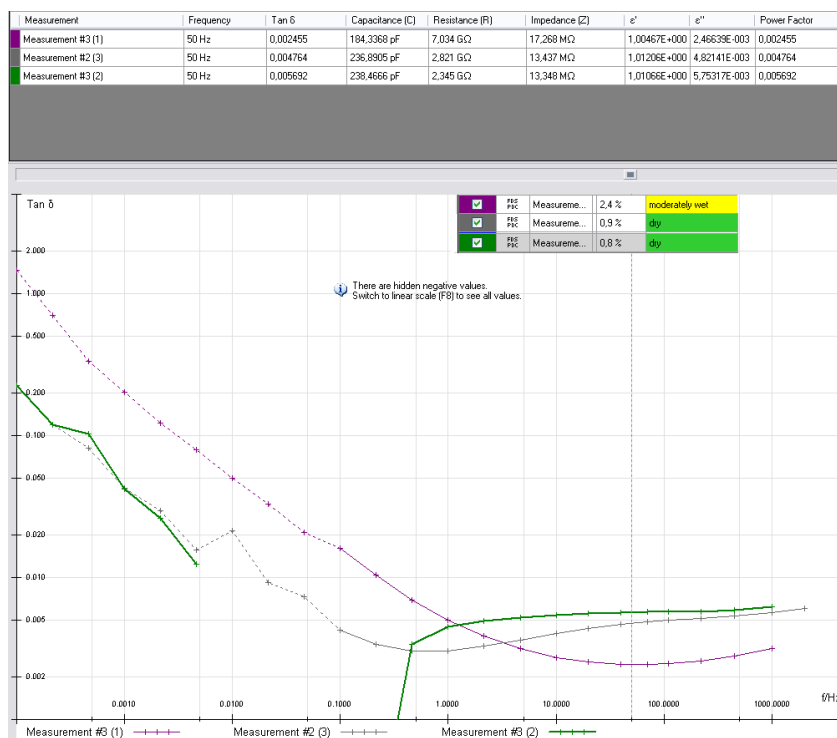


Kuva 35. Pääeristykseen dielektrisiä vasteita mitattu eri lämpötiloissa. Eristeen lämpötilalla on suuri vaikutus mittaustulokseen. Mittaustulokset noin 10 °C:n lämpötilassa eivät ole yhtä havainnollisia kuin tulokset noin 20 °C:n lämpötilassa.

Kun eristeen lämpötila on alhainen, niin kosteuden ja öljyn vaikutukset häviökertoimessa näkyvät vasta pienemmillä taajuuksilla. Kuvasta 35 huomataan, kuinka alhaisessa lämpötilassa mitatuissa tuloksissa ei ole havaittavissa kuvan 26 huipun jälkeistä käyrää. Valmistaja ilmoittaa ohjeissaan, että kosteuskertoimen määrittämisessä voi esiintyä virheitä jos tämä data puuttuu [52].

Mittauksia on suoritettu myös muuntajan läpivienneille. Mittalaitteella voidaan mitata kahta läpivientiä samaan aikaan, ilman että häiriönpoistojohtimista pitää luopua.

Mittaustuloksissa on havaittu erityisesti yläjännitepuolen läpivientieristimien olevan erittäin häiriöalttiita PDC-mittauksen aikana. Läpivienneille on tyypillistä pieni kapasitanssi (alle nF), ja sitä onkin epäilty syyksi häiriöille altistumiselle. Kuvassa 36 on esitetty onnistuneen ja epäonnistuneen mittauksen tuloksia.



Kuva 36. Läpivientien mittaustulokset: Vihreän käyrän mittaus on epäonnistunut, sillä häviökeroihin muuttuu negatiiviseksi. Harmaassa käyrässä havaitaan myös pieniä häiriöitä PDC-alueella. Violetti käyrä kuvaa onnistunutta mittauksia.

Häiriöt näkyvät etenkin negatiivisena häviökertoimena ja piikkeinä sekä säröinä PDC-datassa (kuva 37). Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan puhdistamalla eristimien pinnat liasta ja pölystä. Lisäksi eristimen ympärillä on käytetty myös kuparipantoja pintavirtojen suodattamiseksi.

DFR-menetelmällä on määritetty läpivientieristimien dielektrisiä vasteita myös ns. laboratorioympäristössä häiriöiden minimoimiseksi. DFR-menetelmällä saatua 50 Hz:n häviökertoimen arvoa on verrattu suurjännitelaitteistolla mitattuun 50 Hz:n arvoon. Tulokset ovat olleet vaihtelevia. Mittaukset etenkin 400 kV:n läpivientieristimille ovat lähes

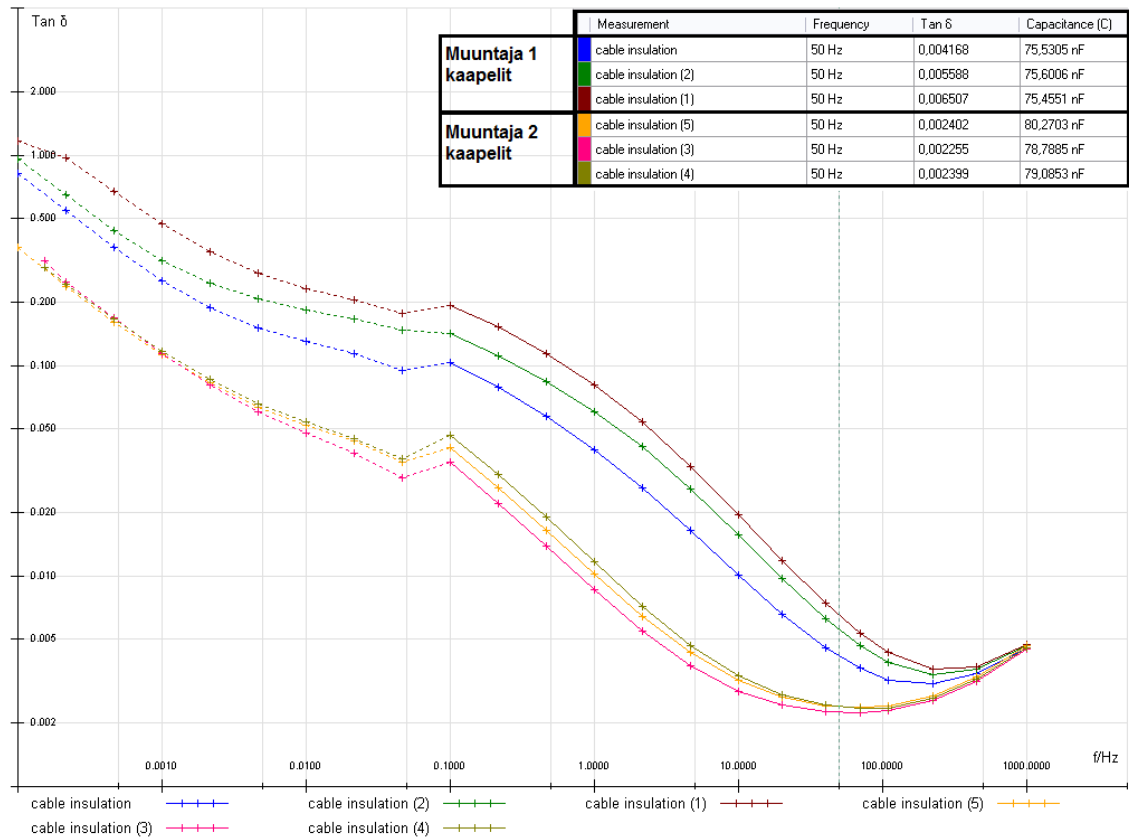
poikkeuksetta altistuneet häiriöille. Tulokset 110 kV:n ja pienempien läpivientieristimien mittauksista ovat olleet hyviä.



Kuva 37. PDC-data kuvasta 36 osoittaa miksi vihreän käyrän mittaus on epäonnistunut. Polarisaatiovirrat ovat altistuneet häiriöille. Violetin käyrän PDC-data on tasainen ja puhdas.

Mittalaitteen valmistaja on ehdottanut mittauksen suorittamista ainoastaan FDS-alueella mikäli häiriöitä esiintyy, mutta silloin mittausaika pitenee 11 tuntiin [52]. Tulevaisuudessa on pohdittava kannattaako läpivientejä mitata FDS-PDC asetuksella kenttäolosuhteissa vai riittäisikö vain 50 Hz:n arvon mittaaminen, joka saavutetaan jo noin minuutin mittauksen jälkeen FDS-menetelmällä. Laitoksilla muuntajat sijaitsevat yleensä kyt-kinkentän läheisyydessä, mistä voi aiheutua sähkömagneettista häiriötä. Yläjännitepuolen läpiviennit ovat kooltaan suuria, joten häiriöt voivat kytkeytyä niihin helpommin kuin alajännitepuolen läpivienteihin. On muistettava, että mitatut vuotovirrat ovat suuruudeltaan nano- tai pikoampeereita, joten vähäisetkin indusoituneet häiriövirrat voivat pilata mittauksen helposti. Myös avonaiset bunkkerit, tuuli, sade, ilmankosteus, likaiset pinnat sekä muuntajalla työskenteleminen mittauksen aikana voivat häiritä tuloksia.

Kokemuksia on hankittu muuntajien ja läpivientien lisäksi kaapeleista. Öljypaperieristeisille kaapeleille mittaus on onnistunut hyvin. Erään laitoksen kahden blokkimuuntajan ja kytkinlaitoksen väliset 110 kV:n kaapelit mitattiin ja tulokset olivat selkeitä. Kuvaajasta 38 havaitaan selvä ero kahden muuntajan kaapeleiden välillä. Kaapelit olivat lähes yhtä pitkiä.



Kuva 38. Mittaukset 110 kV:n kaapeleille olivat onnistuneet. Kuvaajassa muuntajan 2 kaapelit ovat selvästi paremmassa kunnossa kuin muuntajan 1 kaapelit.

Muuntajan 1 kaapelit ovat selvästi jo vanhentuneita, sillä häviökertoimet 4,1 ‰; 5,5 ‰; 6,5 ‰ ylittävät osittain jo suositusrajan 5,0 ‰. Muuntajan 2 kaapelit puolestaan ovat hyväkuntoisia, eikä ikääntymistä ole havaittavissa. Käyrien muodoista havaitaan, että muuntajan 1 kaapelit ovat kosteampia ja niiden öljy on johtavampaa kuin muuntajan 2 kaapeleissa.

Käytetyn mittalaitteen valmistajan mukaan kosteusanalyysin tuloksissa voi ilmetä vääristymää, jos eristyksen lämpötila on liian suuri, liian alhainen tai öljy on liian johtavaa. Liian suuri lämpötila voi aiheuttaa kosteuskertoimen aliarvioimisen, mutta kuitenkin vain noin 0,5 %:lla. Alle 10 °C:n lämpötilassa suoritettavat mittaukset aiheuttavat epäluotettavuutta johtuen selluloosan lämpötilariippuvuuksista, joita ohjelma käyttää. Öljyn johtavuuden ollessa yli 20 pS/m voivat siihen liuenneet hapot ja kaasut lisätä dielektrisiä häviöitä siten, että ne ovat kosteuden aiheuttaman kaltaisia. Ilman kompensatiota tämä virhe voisi näkyä jopa 1,5 %:n kasvuna kosteuskertoimessa, mutta mittalaitteen kompensoinnin ansiosta vain noin 0,3 %:n virhettä voi esiintyä. [52.]

7 Pohdinta

Insinööriyössä käsiteltiin voimalaitoksen päämuuntajan kuntokartoitusta ja välineitä sen suorittamiseen. Pääeristykset, virtatiet sekä muuntajaöljy ovat tärkeimmät tehomuuntajan kunnonvalvonnan kohteet. Työssä perehdyttiin myös DFR-mittauksen hyötyihin ja mahdollisuuksiin muuntajan kuntoarvioinnissa.

Voimalaitoksen päämuuntajat muodostavat yhden tärkeän tekijän sähkön luotettavassa tuotannossa ja siirrossa. Päämuuntajat siirtävät pääosin kaiken sähkötehon laitokselta verkkoon. Tehomuuntajan yllättävä vikaantumisen voi aiheuttaa suuriakin käyttökustannuksia. Voimalaitoksilla on usein varauduttu tilanteisiin hankkimalla varamuuntajia, mikä on erittäin suositeltavaa. Varamuuntajien kuntoakin tulisi seurata, ja mikäli mahdollista, varamuuntajaa tulisi kierrättää välillä käytössä, ettei se seisoisi pitkiä aikoja käyttämättömänä. Kun muuntaja seisoa pitkiä aikoja käyttämättömänä, voi se altistua kosteudelle.

Kunnonvalvontamittausten tuloksien analysointi vaatii kokemusta ja tietoa. Todellisen vian tunnistaminen pelkästään yhden tai kahden mittaustuloksen perusteella on melko epävarmaa. Tuloksia tulkittaessa ei voida tukeutua vain tarkkailuraja-arvoihin tai tiettyihin standardeihin. Kun poikkeama havaitaan mittauksissa, kannattaa siihen aluksi suhtautuakin hieman kriittisesti ja pohtia, voisiko muutos tai poikkeama johtua esimerkiksi virheellisistä mittauskytkennoistä, ympäristön häiriöistä tai jostain muusta. Jos vika on todellinen, niin raja-arvoylitys tulisi olla toistettavissa eri mittalaitteella sekä eri mittaajalla. Näin voidaan eliminoida mittalaitteesta tai mittaajasta aiheutuva vaikutus. Ympäristön häiriöt aiheuttavat etenkin voimalaitosympäristössä usein haasteita. Kannattaa myös pohtia, onko jotain muita mittauksia, jossa tämän epäillyn vian tulisi näkyä. Vika tulee kyetä rajaamaan mahdollisimman pienelle alueelle.

Tehdasmittauksien sekä aiempien mittauksien tulokset ovat tärkeitä uusien tulosten käsittelyssä. Säännöllisesti suoritettavat kunnonvalvontamittaukset mahdollistavat hyvän trendin luomisen, mistä voidaan havaita alkavat viat ja seurata niiden kehittymistä. Mikäli mahdollista tulisi kunnonvalvontamittaukset suorittaa aina samalla kalustolla, mahdollisimman samalla tavalla ja samassa ympäristössä. Näin tuloksista tulisi erittäin vertailtavia. Kun mittaustuloksia verrataan tehdasmittauksiin, tulisi aina huomioida se, että tehtaalla mittaukset on suoritettu lähes häiriöttömässä ympäristössä ja luultavasti täysin eri mittalaitteilla.

Muuntajasta, generaattorista sekä muista suurjännitelaitteesta on kannattavaa luoda sormenjälki mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Kun esimerkiksi muuntajalle tai generaattorille on suoritettu laajat mittaukset, voidaan odottamattoman vian (kuten oikosulun) jälkeen suorittaa samat mittaukset uudelleen ja vertailla tulosten muutoksia ja tehdä johtopäätös, onko laite vaurioitunut.

Kun mittauksia suoritetaan kentällä, mittaajalla olisi hyvä olla hallussa aiempien kunnonvalvonta- ja tehdasmittauksien pöytäkirjojen lisäksi laitteen rakennekuvat. Laitteiden valmistajat eivät kuitenkaan yleensä luovuta asiakkaille tarkkoja rakennekuvia varsinkaan ilman erillistä pyyntöä. Tarkoista rakennekuvista olisi apua etenkin DFR-mittauksessa, sekä lisäksi kun tutkitaan vikojen sijaintia ja mahdollista aiheuttajaa.

Dielektrisen taajuusvasteen mittaamisessa on vielä pieniä ongelmia ja haasteita. Etenkin läpivientieristimen dielektrisen taajuusvasteen mittaaminen on haastavaa, sillä mittaukset ovat lähes poikkeuksetta altistuneet häiriöille. Syyksi altistumiselle epäillään läpivientieristimen erittäin pientä kapasitanssia. Lisäksi mittaaminen täydellä taajuusalueella vaatii vielä suhteellisen paljon aikaa.

Loppujen lopuksi DFR-mittaus on erittäin hyödyllinen ja käytännöllinen, sillä se mahdollistaa öljystä ja paperista johtuvien häviöiden erottelun toisin kuin esim. perinteinen menetelmä. DFR-mittaus soveltuu hyvin ainakin muuntajien pääeristyksille ja suurjännitekaapeleille. Mikäli tarvittavat erotukset tehdään kytkinlaitoksen päässä, voidaan muuntaja sekä kytkinlaitoksen välinen suurjännitekaapeli mitata samasta paikasta kätevästi. Omicronin mittalaitteen kosteusanalyysi (Moisture Assessment) vaikuttaa toimivalta ja luotettavalta toiminnolta, kun sitä käytetään muuntajan pääeristykseen. Mittaaminen käyttämällä Omicronin mittalaitetta ei vaadi lainkaan valvontaa (edellyttäen että kukaan ei pääse muuntajakannelle), joten se voidaan esimerkiksi asettaa mittaamaan yöksi. Suurjännitemittaukset vaativat sähkötyöturvallisuuslain mukaan aina vähintään kaksi henkilöä, kun taas DFR-mittauksen voi suorittaa yksi henkilö. DFR-mittalaitteisto on kevyt ja kompakti, sillä mittalaite varusteineen painaa ainoastaan 16 kg. DFR on oiva mittausmenetelmä muuntajan kunnonvalvontaan, kun sitä käytetään varmistusmittauksien ja öljyanalyyysien tukena.

Lähteet

- 1 Suomen sähkövoimajärjestelmä. 2015. Verkkodokumentti. Fingrid.
<<http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4/Suomen%20s%C3%A4hk%C3%B6voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4/Sivut/default.aspx>>. Luettu 21.5.2015.
- 2 Sähkön tuotanto. 2015. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>>. Luettu 21.5.2015.
- 3 Sähkön tuotanto, tuonti ja vienti. 2015. Verkkodokumentti. Energiateollisuus
<<http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkontuotanto/sahkontuotanto-tuonti-ja-vienti>>. Luettu 4.9.2015.
- 4 Säättövoima. 2010. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto/saatovoima>>. Luettu 22.5.2015.
- 5 Korpinen, Leena. Sähkön kulutus ja tuotanto. Verkkodokumentti.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/2sahkon_kulutus_ja_tuotanto.pdf>. Luettu 22.5.2015.
- 6 Elovaara, Jarmo & Laiho Yrjö. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. 6. painos. Espoo: Otatieto.
- 7 Voimalaitosrekisteri. 2015. Verkkodokumentti. Energiavirasto.
<<https://www.energiavirasto.fi/voimalaitosrekisteri>>. Luettu 15.5.2015.
- 8 Varavoimalaitokset. 2007. Fingrid. Verkkodokumentti.
<<http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCvaravoimalaitokset.aspx>>. Luettu 27.5.2015.
- 9 Sähkön kulutus ja tuotanto. 2015. Fingrid. Verkkodokumentti.
<<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx>>. Luettu 21.5.2015.
- 10 Tilastot ja julkaisut. 2015. Energiateollisuus. Verkkodokumentti.
<<http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut>>. Luettu 21.5.2015.
- 11 Huynh, Nhan. 2014 Miten ydinvoimalan höyryturbiini toimii - lyhyt johdanto turbiinitekologiaan. Verkkodokumentti.
<http://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/doc/Teemailta_Huynh_19.3.2014.pdf>. Luettu 25.5.2015.

- 12 Heinonen, Mikko. 2010. 2000-luvun höyryturbiinit. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 13 Fortum sisäinen materiaali 2014. Valokuvia turbiinirevisiosta. Verkkolevy.
- 14 Korpinen, Leena. Sähkökoneet, osa 2. Verkkojulkaisu. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf>. Luettu 15.5.2015.
- 15 Huhtinen, Markku. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus.
- 16 Fortum. 2012. Generaattorin rakenne. Opetusmateriaali.
- 17 Häsä, Sanna. 2009. Generaattorisuojauksen uusinta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta.
- 18 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 19 Marttinen, Minna. 2010. Vesivoimageneraattorien magnetointijärjestelmien elinajan arviointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 20 Ruuskanen, Vesa. 2007. Tahtikoneen magnetointijärjestelmän mallinnus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 21 Protection of Medium-Sized and Large Generators with SIRPOTEC 7UM6. 2005. Tuote-esite. <http://sm-industry.ru/titan_img/ecatalog/Appl_23_Large_Generator_Protection_en.pdf>. Luettu 27.5.2015.
- 22 Ahokas, Tomi. 2011. Voimalaitosgeneraattorien suojaus ja magnetointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 23 Laine, Janne. 2005. Sähköjakeluverkon komponenttien pitoajat. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 24 Tukes-ohje. S4-2011. <<http://www.tukes.fi/en/Palvelut/Tukes-ohjeet/1Sahko-ja-hissit/S4-11-Sahkolaitteistot-ja-kaytonjohtajat/>>. Luettu 15.6.2015.
- 25 Uusi elämä muuntajalle. Power & Automation 3/2009. Artikkel. <<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/7fa9718a0acd575bc12576ef004982ec.aspx>>. Luettu 25.6.2015.
- 26 Fritsche, Ronny. 2013. Siemens energy optimizes power transformer with the aid of 3D EM simulation. <<https://www.cst.com/Applications/Article/Siemens->

- Energy-Optimises-Power-Transformers-With-The-Aid-Of-3D-EM-Simulation>. Luettu 6.8.2015.
- 27 Jagers, Janine & Tenbohlen Stefan. 2009. Differences approaches for the acquisition of reliability statistics. Tutkimus. Cigré.
 - 28 Keränen, Janne. 2013. Muuntajaöljyjen käsittely kunnossapidon työkaluna. Insinöörityö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
 - 29 Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva. 2003. Suurjännitetekniikka. 2. painos. Espoo: Otatieto.
 - 30 Hurinainen, Ville. 2006. Jakelumuuntajan elinkaaritutkimus. Insinöörityö. Tampereen ammattikorkeakoulu.
 - 31 Öljyanalyysi. 2015. Fortum. Pöytäkirjat.
 - 32 Andersson, Rolf & Surakka, Marja-Liisa. 1980. Vikakaasuanalyysi muuntajan kunnan valvonnassa. Imatran Voima Oy & Oy Strömberg AB. Moniste.
 - 33 Robalino, Diego & Werelius Peter. 2013. Optimization of the Power Transformer Dry-out process in the field. Luentomateriaali.
 - 34 Asta. Energy transmission components. Tuote-esite. <<http://www.asta.at/en/ctc.html>>. Luettu 9.9.2015.
 - 35 Lundgaard, Hansen, Linhjell & Painter. 2002. Ageing of oil-impregnated paper in power transformers. IEEE PWRD. Julkaisu.
 - 36 DP-luvun vaikutus elinikään. 2015. Fortum. Pöytäkirjat.
 - 37 Moisture in Power transformers. 2012. Saudi Arabia Smart Grid. Luentomoniste.
 - 38 Fortum. 2015. Raportti. Sisäinen materiaali.
 - 39 Ristamäki, Heli. 2012. Muuntajien häviölämmön hyödyntäminen lämpöpumpputekniikalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
 - 40 Fortum. 2015. Raportti. Sisäinen materiaali.
 - 41 Kraetge, Krüger, Velásquez, Viljoen, Dierks & Alectrix. 2009. Aspects of the practical application of sweep frequency response analysis (SFRA) on power transformers. Omicron. Cigré. Verkkojulkaisu.

- <https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/papers/2011-03-PotM-SFRA-on-Power-Transformers.pdf>. Luettu 13.8.2015.
- 42 Mario Locarno. 2012 Sweep frequency response basic analysis. Doble engineering company. Verkkojulkaisu. <http://portal.doble.com/content/products/sfra_basic_analysis.pdf>. Luettu 13.8.2015.
 - 43 FRAX 150 Sweep frequency response analyzer. Megger. Tuote-esite.
 - 44 Brusetti, Robert. 2015. Leakage reactance testing. Doble engineering company. Opetusmateriaali.
 - 45 Koch, Krüger & Puetter. 2011. Advanced insulation diagnostic by dielectric spectroscopy. Omicron. Raportti.
 - 46 Saha, Middleton & Thomas. 2009. Understanding frequency & time domain polarization methods for the insulation condition assessments of power transformers. IEEE. Julkaisu.
 - 47 Koch, Tenbohlen, Krüger & Kraetge. 2007. A comparative test and consequent improvements on dielectric response methods. Uni-stuttgart. Julkaisu.
 - 48 Yang, Xu. 2015. Enhancements to dielectric response measurements of oil-paper insulation for online and offline applications. Queensland University of Technology.
 - 49 Koch Tenbohlen, Krüger & Kraetge. 2007. Improved moisture analysis of power transformers using dielectric response methods. Verkkodokumentti. <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/MATPOST07_0043_paper.pdf>. Luettu 14.9.2015.
 - 50 Ratzke, Koch & Anglhuber. Monitoring the drying process of power transformers using dielectric response analysis. Omicron. Raportti.
 - 51 Anglhuber, Martin. 2013. Advanced methods for insulation diagnostics on power transformers. Omicron. Opetusmateriaali.
 - 52 Measuring and analyzing the dielectric response of a power transformer. 2008. Dirana. Omicron. Käyttöohje.

Muuntajan kaasuanalyytitulos

Valmistusnumero:	██████████	Valmistaja:	██████████
Asema / Laitapaikka:	██████████	Lajimerkintä:	██████████
Laitetyyppi:	Tehomuuntaja	Valmistusvuosi:	2008
Jännitteet (kV):	21,0	Öljynlaji:	KELAMAYJ 45
Nimellisteho (MVA):	25,0	Öljyn määrä (kg):	6570

Näytteenoton syy: **Epäillään vikaa**

Analyyssi-arvio: **Öljynäytteen kaasuanalyytitulos sisältää vikakaasupitoisuuksien tarkkailuraja-arvoilyityksiä.**

Öljystä ja/tai paperista määritetyt arvot täyttävät IEC 60422 standardin ja/tai Fortumin suositukset.

Huomautus:

Hiilimonoksidi ylittää tarkkailuraja-arvon.

Öljy +64 C, vesipitoisuus +20 C:ssa 0,1 mg/kg. Inhibiittinä DBPC.

Ehdotettavat toimenpiteet: **Seurahtanäyte 6-12 kk kuluttua**

Työ no	Analyysi pvm	Kaasupitoisuudet: kaasutilavuus/öljytilavuus										Vika Typpi
		H ₂ Vety µl/l	O ₂ Happi ml/l	N ₂ Typpi ml/l	CH ₄ Metaani µl/l	CO Hiilimon. µl/l	CO ₂ Hiilidio. µl/l	C ₂ H ₄ Etyleeni µl/l	C ₂ H ₆ Etaani µl/l	C ₂ H ₂ Asetyleeni µl/l	TCG Palavat k. µl/l	
1	30.12.2009	18	29	72	2,9	213	565	0,6	0,0	0,0	235	0
66	12.5.2010	22	25	70	4,3	417	850	0,9	0,2	0,0	445	0
49	4.6.2015	4,9	15	65	9,0	690	2491	1,6	< 2	< 2	705	9
Suositus		≤ 150			≤ 130	≤ 600	≤ 14000	≤ 280	≤ 90	≤ 20		

Työ no	Analyysi pvm	Läpilyöntijännite kV	Häviö-kerroin ‰	Rajapintajännitys mN/m	Inhibiittipitoisuus %	Neutr. luku mgKOH/g	Furfuaali (2FAL) mg/l	PCB-pitoisuus mg/kg	Öljyn-kosteus mg/kg	Paperin-kosteus %	Paperin DP aste	Vika Typpi
1	30.12.2009	74							1,0			0
66	12.5.2010	48										0
49	4.6.2015	75	0,2	42,8	0,23	0,005	<0,03		0,8			9
Suositus		> 40*	<100*	> 28*	0,08-0,40**	≤ 0,1*	< 0,3	< 50***	< 10	< 3	> 250	

*IEC 60422 (2005) hyväksi luokitetut arvot **IEC 296 (2003) inhiboitu öljy *** VNP 711/1998, ongelmajäte > 2 (EKOKEM)

Työ no	Analyysi pvm	Kiintoainepitoisuus kpl/ 100 ml, mittausyksikkö µm								Summat	Vika Typpi
		2,5...5	5...15	15...25	25...50	50...100	> 100	> 2,5	> 5		
49	4.6.2015	495	763	87	18	0	0	1363	868	105	9
Suositus								≤32000 *	≤4000 *		

Vikatyytit:

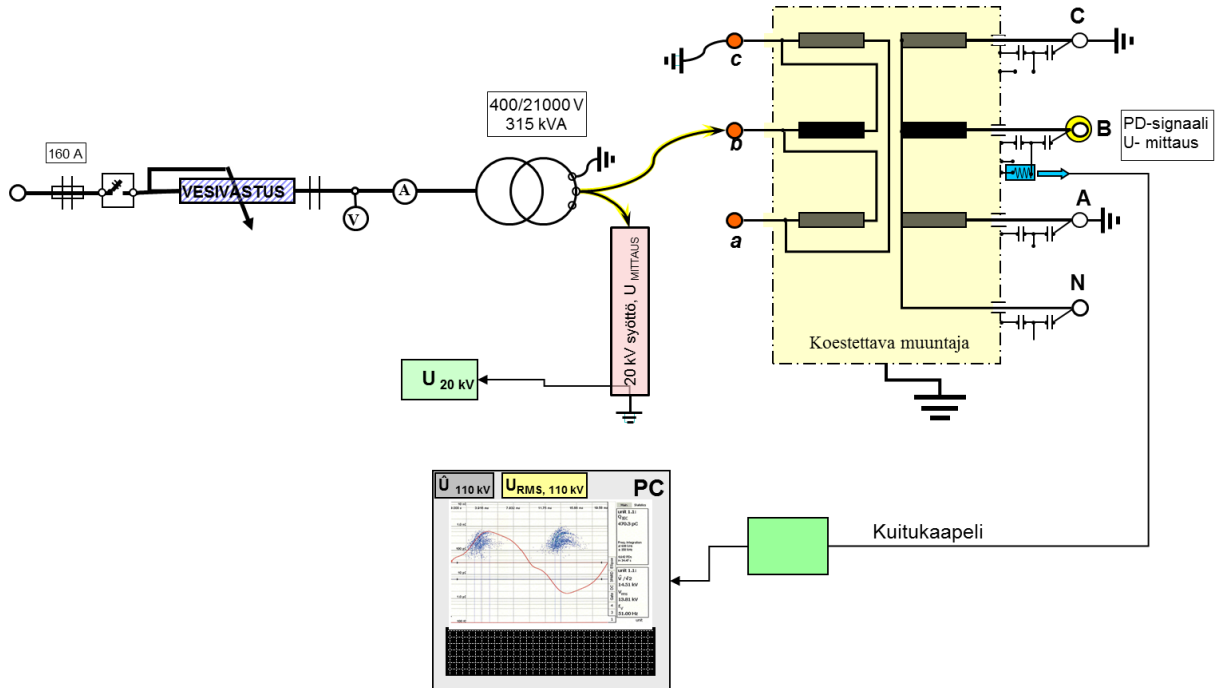
0 ei vikaa, 1 pienitehoisia osittaispurkauksia, 2 suuritehoisia osittaispurkauksia, 3 pienitehoisia purkauksia, 4 suuritehoisia purkauksia,

5 termäinen vika < 150 C, 6 termäinen vika 150...300 C, 7 termäinen vika 300...700 C, 8 termäinen vika > 700 C, 9 ei määriteltävissä,

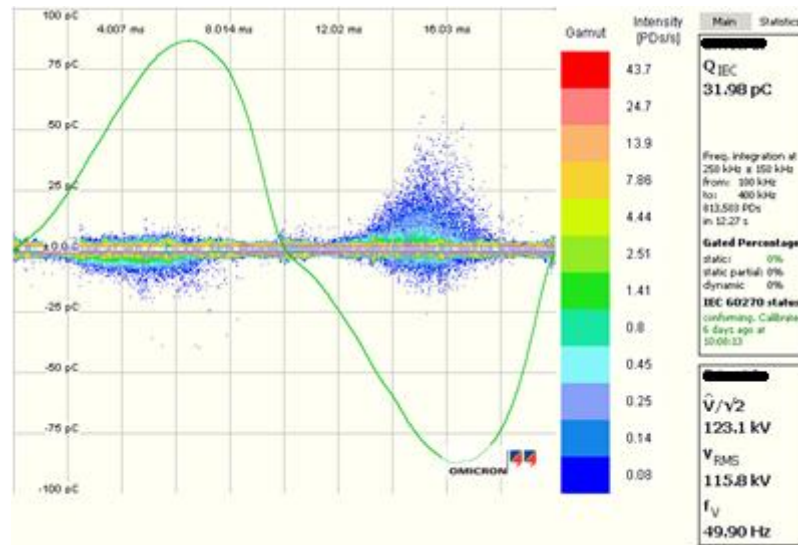
10 öljyn/paperin arvo ei täytä suositusta ks. huom!, 11 termäinen vika tai öljyn/paperin vanheneminen, 12 C₂H₂ todennäköisesti käämikytkinperäistä

Muuntajan yläjännitepuolen B-vaiheen osittaispurkauksien mittaus

Mittauskytkentä:



Tulos:



Käämikytkimen toimintakoe DRM-menetelmällä

1. Virransyöttöperiaate

2. Käämikytkimen askelmuutoksessa virta laskee siirtoaikana hetkellisesti

When the current drops immediately after a tap change, it builds up again slower than it dropped off.

Current drops during a tap change during the transition between steps.

Kohteiden 2 ja 3 kuvat on otettu Doblén DRM materiaalista

Plot of Current Versus Time During a Tap Change for a Resistance Type LTC
Figure 1

3. Kuva esittää askelmuutoksen vaiheita oskillogrammissa.

STARTING POINT

Example of a DRM Transition from Position A to B for a Resistance Type LTC [6]

Transition time, siirtoaika, määrittää A ja B (1 → 4) toimintojen välistä aikaa

Muuntajan läpivientieristimien koestuspöytäkirja



Mittauspöytäkirja

MUUNTAJALÄPIVIENNIN KOESTUSPÖYTÄKIRJA

Valmistaja	ABB
Tyyppi	GOB 650 LF123073 - M BIL / AC 650 / 310 kV

U_N	170 kV
I_N	1250 A

Läpiviennin n:o	1 ZSC 341880	Läpiviennin lämpötila	20 °C			
Häviökulmamittaus						
p.u.	U kV	tanδ ‰	C pF	HUOMAUTUKSIA	IEC-60137:n vaatimukset	
0,61	103	4,42	205,8		tanδ _{0,61max}	< 7 ‰
1,00	170	4,42	205,8			
tanδ _{1,00-0,61}			0,00 ‰		tanδ _{1,0-0,61}	< 1 ‰
PD-mittaus				JANNITEKOE		
p.u.	U kV	q pC	IEC-60137 vaatimus	HUOMAUTUKSIA	U_{koe}	232 kV
0,61	103	< 3	< 5		f_{koe}	50 Hz
0,87	147	< 3	< 10		t_{koe}	1 min
1,00	170	< 3	< 10			
Purkaukset syttyvät		> 170 kV			OK	
Purkaukset sammuvat		- kV				

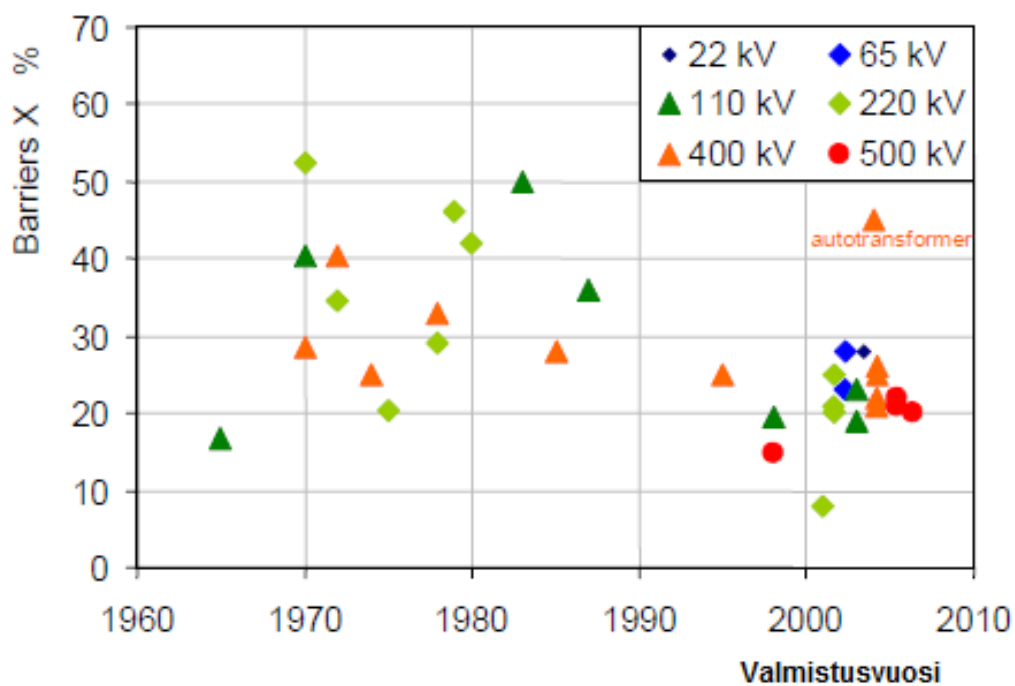
Valmistaja	ASEA
Tyyppi	GOB 650 LF123072 - E

U_N	145 kV
I_N	1250 A

Läpiviennin n:o	152 521	Läpiviennin lämpötila	20 °C			
Häviökulmamittaus						
p.u.	U kV	tanδ ‰	C pF	HUOMAUTUKSIA	IEC-60137:n vaatimukset	
0,61	88	3,89	185,6		tanδ _{0,61max}	< 7 ‰
1,00	145	3,89	185,6			
tanδ _{1,00-0,61}			0,00 ‰		tanδ _{1,0-0,61}	< 1 ‰
PD-mittaus				JANNITEKOE		
p.u.	U kV	q pC	IEC-60137 vaatimus	HUOMAUTUKSIA	U_{koe}	172 kV
0,61	88	< 3	< 5		f_{koe}	50 Hz
0,87	126	3...4	< 10		t_{koe}	1 min
1,00	145	4	< 10			
Purkaukset syttyvät		136 kV			OK	
Purkaukset sammuvat		125 kV				

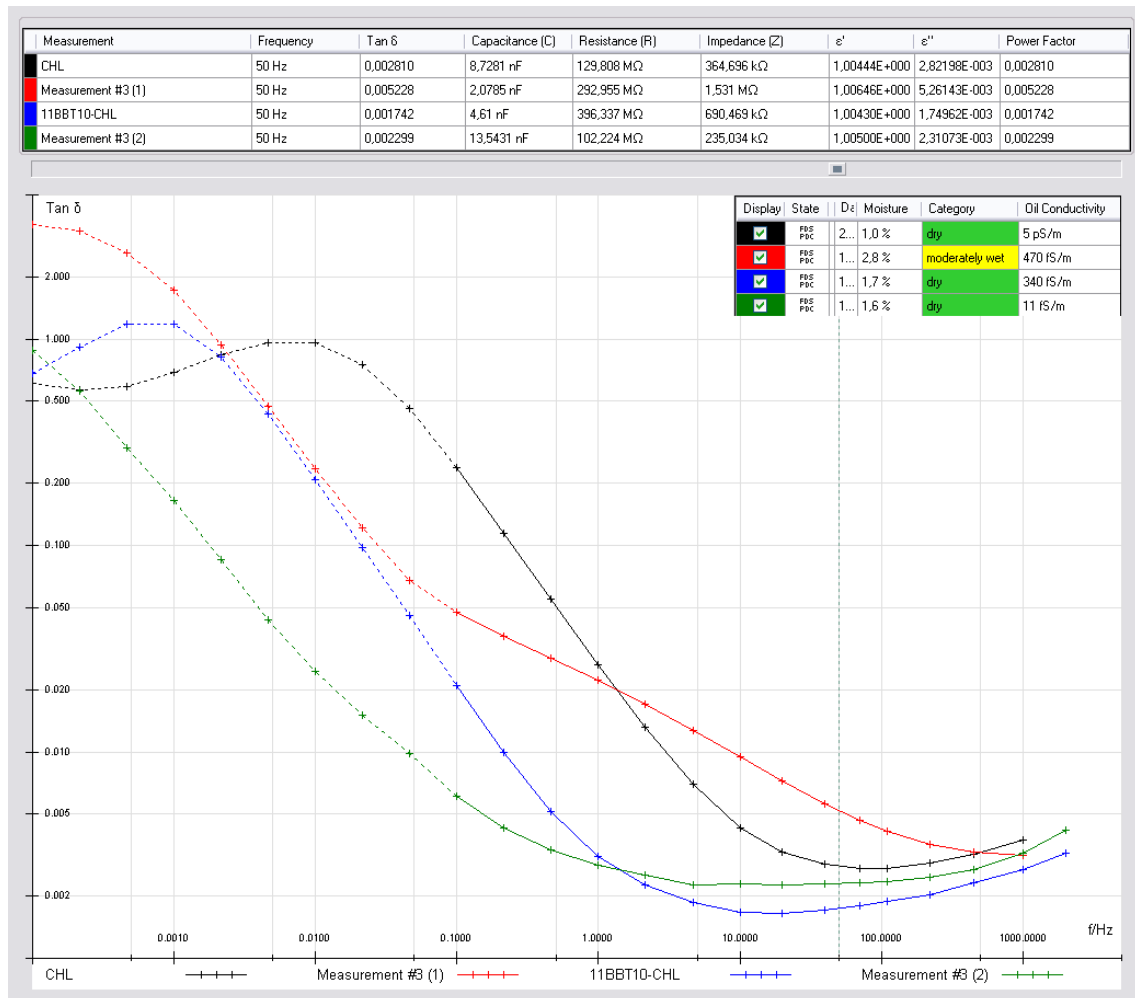
Eri ikäisten ja tyyppisten muuntajien prespaanin suhde öljyyn

Kuvaan on koottu eri ikäisten ja kokoisten muuntajien prespaanin suhde öljyyn. Vanhemmilla muuntajilla suhde on suurempi [52].



Erilaisten pääeristysten dielektrisiä vasteita

Erilaisia muuntajan öljyn johtavuuksia ja kiinteän eristeen kosteuskertoimia.



Kuva 1. Mittaustuloksia Dirana-mittalaitteistolla.