

Lauri Penttilä

TEHOMUUNTAJIEN KUNNONVALVONTAMITTAUKSET

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

2017

## TEHOMUUNTAJIEN KUNNONVALVONTAMITTAUKSET

Penttilä, Lauri  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Maaliskuu 2017  
Ohjaaja: Nieminen, Esko  
Sivumäärä: 63

Asiasanat: ikääntyminen, kunnonvalvonta, tekninen käyttöikä, markkinapotentiaali, öljypaperieristys, polymeroitumisaste, kenttäolosuhteet, käämikytkin

---

Muuntajat ovat sähkönsiirtoverkon ja jakeluverkon toiminnan perusta. Siirtoverkossa tehomuuntajat ovat kalleimpia yksittäisiä komponentteja. Vikaantuessaan muuntajat voivat aiheuttaa suurta rahallista tappiota käyttökatojen ja muuntajapalojen aiheuttamana. Muuntajan tekninen käyttöikä voi nousta jopa 60-70 vuoteen oikein huollettuna. Huonoimmissa tapauksissa muuntajat saadaan käyttökänsä päähän kuitenkin jo jopa kymmenessä vuodessa. Lisäksi avaavia huoltoja suoritetaan muuntajille usein ajan perusteella sen sijaan, että huollon ajankohta perustuisi laitteen todelliseen kuntoon. Asiantuntevalla kunnonvalvonnalla on kuitenkin muuntajia ajatellen mahdollista saavuttaa ylimääräisten huoltokulujen eliminointi, vikaantumisista aiheutuvien kulujen väheneminen sekä investointi- ja huoltokustannusten ennustettavuus.

Tarkoituksena työssä oli tutustua muuntajille tarkoitettuihin, kentällä suoritettaviin kunnonvalvontamittauksiin sekä niiden käyttötarkoituksiin ja niistä saatavien tulosten tulkintaan. Jotta voisi ymmärtää eri kunnonvalvontamenetelmistä, tuli aluksi tutustua muuntajan ominaisuuksiin ja ikääntymiseen, tunteakseen ilmiöt, mitä laitteesta mittauksilla etsiä. Tältä pohjalta oli tarkoitus tarkastella markkinapotentiaalia sekä mittauspalvelun luomista ja siihen tarvittavia investointeja.

Muuntajan ikääntymisen peruseriaate on, että öljypaperieristyksen selluloosasta koostuvat osat haurastuvat, jolloin polymeroitumisasteen kertova DP-luku laskee. Tämä ilmiö on palautumaton, eli arvojen laskiessa tietyn pisteen alle, muuntaja on käyttökelvoton. Ikääntymistä kiihdyttävät kosteus eristeissä sekä öljyn huono kunto. Lämpötilan vaihtelu on yksi suurista ikääntymisnopeuteen ja vikaantumisherkkyyteen vaikuttavista tekijöistä. Myös mekaaniset muutokset aktiiviosassa altistavat muuntajaa vaurioille. Muuntajan avaaminen eristyksen kunnon arvioimiseksi on kenttäolosuhteissa ongelmallista. Tästä syystä on kehitetty erilaisia sähköisiä mittausmenetelmiä, joilla asiantunteva mittaja voi tehdä kattavan arvion mitattavan laitteen kunnosta.

Muuntajan käämikytkin on yksi suurimmista vikojen aiheuttajista, sillä se on muuntajan ainoa komponentti, joka sisältää liikkuvia osia. Käämikytкимиä huolletaan tästä syystä säännöllisesti noin kuuden vuoden välein. Huolto on suuritöinen, jolloin siitä aiheutuvat kustannuksetkin ovat suuria. Käämikytkimen kuntoa voidaan kuitenkin arvioida esimerkiksi dynaamisella resistanssimittauksella. Myös käämikytkimen kunnon valvonnalla yksinään voitaisiin siis saavuttaa säästöjä ja ennakoitavuutta kustannuksille.

# CONDITION MONITORING MEASUREMENTS OF POWER TRANSFORMERS

Penttilä, Lauri

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical and Automation Engineering

March 2017

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 63

Keywords: ageing, condition monitoring, technical lifetime, market potential, oil-paper insulation, degree of polymerisation, on-site circumstance, on-load tap changer

---

Transformers are the base of operation in transmission and distribution of electricity. In transmission network power transformers are the most expensive single components. Interruptions in use and transformer fire can be caused by malfunction and they lead to great costs. With proper maintenance, the technical lifetime of power transformer can go up to 60-70 years. Nevertheless, in the worst case the malfunction can happen after ten years of use. In addition, the opening services of transformers are often performed based on time rather than based on actual condition. By proficient condition monitoring it is possible to eliminate additional costs, reduce costs caused by malfunction and predict investment costs as well as service costs.

The purpose of this thesis was to get familiar with condition monitoring which can be done on-site and to understand the interpretation of results which relate to these measurements. To understand condition monitoring, it was important to acquaint the properties, structure and ageing processes of transformers. Finally, based on that knowledge, it was purpose to plan measurement service and analyse the market potential of that.

The basic principle of transformer ageing is that the cellulose parts in oil/paper insulation degrade, when the Degree of Polymerisation decrease. The reaction is irreversible, so when the DP decreases enough, the transformer is unusable. Moisture in insulation, bad quality of oil and too low or high temperatures accelerate ageing. Also, the mechanical deformation exposes transformers to failures. It is problematic to open transformer in field. That is why there has been developed electrical measurements for on-site transformer diagnosis. With these methods, it is possible to define extensive evaluation for the condition of transformer.

On load tap changer is the only component in transformer that has moving parts. That is why it is one of the parts which have a lot of malfunctions. OLTC has regular service in about after every six years of functioning. The service needs plenty of work and certificated maintenance group, so it is expensive to perform. However, with dynamic resistance measurement it is possible to define the condition of OLTC. So already with condition monitoring of on load tap changers alone, it is possible to achieve savings and predictability of costs.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	MUUNTAJA.....	7
2.1	Muuntajat yleisesti .....	7
2.2	Muuntaja osana sähköverkkoa .....	9
2.3	Muuntajan rakenne .....	11
2.3.1	Muuntajan rautasydän .....	12
2.3.2	Käämitys ja kytkentäryhmät .....	13
2.3.3	Käämikytin (OLTC) .....	16
2.3.4	Säiliö ja läpiviennit .....	17
2.4	Muuntajan eristys .....	18
3	MUUNTAJAN VAURIOITUMIS- JA VANHENEMISMEKANISMIT .....	19
3.1	Eristepaperin ominaisuudet .....	19
3.1.1	Paperin vanheneminen .....	20
3.2	Muuntajaöljyn ominaisuudet .....	21
3.2.1	Öljyn vanheneminen .....	22
3.3	Muut vanhenemismekanismit .....	23
3.4	Muuntajan vaurioituminen .....	23
4	ÖLJYN JA PAPERIN KUNNONVALVONTA .....	24
4.1	Eristepaperi.....	24
4.2	Muuntajaöljy .....	25
5	SÄHKÖISET KUNNONVALVONTAMITTAUKSET .....	27
5.1	Eristysvastusmittaus .....	27
5.1.1	Polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirta (PDC).....	29
5.2	Käämin resistanssimittaus .....	30
5.2.1	Sydämen demagnetointi .....	31
5.3	Häviökerroin eli $\tan(\delta)$ .....	32
5.3.1	Häviökertoimen mittaus muuttuvalla jännitteellä .....	35
5.3.2	Häviökertoimen taajuusvaste .....	36
5.4	Osittaispurkaus.....	39
5.4.1	Osittaispurkauksien syntyminen .....	39
5.4.2	Sähköiset menetelmät.....	41
5.4.3	Akustiset menetelmät .....	42
5.4.4	Sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvat menetelmät .....	44
5.4.5	Tulosten tulkinta .....	44
5.5	FRA-mittaus.....	45
5.6	TTR-mittaus.....	48

5.7	Oikosulkuimpedanssi, FRSL .....	48
5.8	Tyhjäkäynti- eli magnetointivirta.....	49
5.9	Jatkuvatoimiset mittaukset .....	50
6	MARKKINAPOTENTIAALI .....	52
6.1	Mittalaitteet.....	53
6.2	Mittauspalvelu.....	55
6.3	Muut kehityskohteet.....	57
7	YHTEENVETO.....	58
	LÄHTEET.....	61

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyönä tehdyn työn tilasi yritys nimeltä Sähköastek Oy. Työn tavoitteena oli perehtyä tehomuuntajille tehtäviin kunnonvalvontamittauksiin, sekä kyseisten mittausten tulkintaan. Tältä pohjalta tarkoituksena oli tehdä arvio mittausten markkinapotentiaalista sekä niiden tekemiseen tarvittavista laitehankinnoista. Käytännön työtä opinnäytetyöhön ei sisälly, vaan tarkoituksena oli perehtyä käsiteltäviin asioihin mahdollisimman tarkasti.

Jotta kunnonvalvontapalvelua voi suunnitella täytyy ymmärtää kunnonvalvonnan peruseriaatteet. Lähtökohtana voidaan pitää, että kunnonvalvonnan alaisena olevan laitteen ja sen eri komponenttien vaurioitumis- ja ikääntymismekanismit tulee tuntea, jotta tietää, mitä laitteesta pitää tutkia. Tältä pohjalta pitää valita tai luoda järjestelmä, millä kyseisiä tapahtumia voidaan mitata. Mittausmenetelmän puuttuessa joudutaan mitattavan laitteen käyttöikä arvioimaan ja vaihtamaan, tai huoltamaan laite arvioin perusteella. Tämä johtaa usein ylimääräisiin kustannuksiin. Kuntoa, tulee siis voida arvioida mittausten perusteella. Saaduista mittaustuloksista täytyy ymmärtää, mitä ne tarkoittavat, eikä vain sokeasti verrata tulosta taulukkoarvoihin. Tulosten pohjalta kunnosta tulee osata tehdä analyysi, jonka pohjalta taas päättää mahdolliset kunnossapitotoimet.

Työ lähtee siis liikkeelle yleisesti muuntajan toiminnasta, jonka jälkeen perehdytään tarkemmin kolmivaiheisten tehomuuntajien sekä niiden eristeaineiden ominaisuuksiin ja rakenteeseen. Näiden selvitysten pohjalta tutustutaan muuntajien ikääntymiseen ja vikaantumismekanismeihin, jotta ymmärretään mitä mittauksilla voidaan selvittää. Mittaukset käsitellään yksitellen, ja niissä keskitytään tulosten ymmärtämiseen ja tulkintaan. Lopussa käsitellään mittauspalvelun markkinapotentiaalia ja annetaan ehdotuksia mittauspalveluiksi sekä ehdotetaan mittalaittehankintoja.

Aihe on laaja, ja sen täydellinen käsittely vaatisi monta opinnäytetyötä. Tästä syystä aiheetta on jouduttu rajaamaan ainoastaan muuntajien kentällä suoritettaviin mittauk-

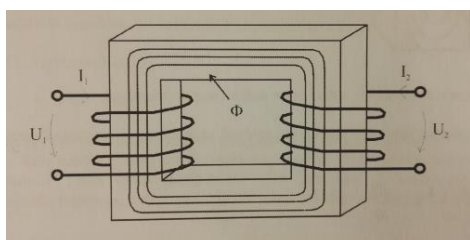
siin. Tehtaalla suoritettavia muuntajakokeita ja laboratoriossa huollon yhteydessä tehtäviä mittauksia ei siis työssä käsitellä. Myös muuntajan suojalaitteet on rajattu työn ulkopuolelle, sillä aihe on laaja jo valmiiksi. Mittausten takana olevaan teoriaan perehdytään työssä, mutta myös laskenta tullaan pääasiassa rajaamaan ulkopuolelle. Pääasiallisen tutkimuksen kohteena on siis käsiteltävien mittausten potentiaali eri vikojen löytämisessä, sekä niistä saatavien tulosten tulkinnan ymmärtäminen. Täten työstä voidaan saada tulevaisuudessa yritykseen kattavat perustiedot antava opas. Myös rakenteessa tullaan huomioimaan mahdollista käyttöä oppaana.

## 2 MUUNTAJA

Muuntaja on sähkökone, jonka tarkoituksena on muuttaa vaihtosähkön jännitettä tai virtaa. Muuntajat ovat tärkeitä komponentteja sähkönsiirron ja jakelun kannalta. Muuntajien käyttötarkoituksia on useita, esimerkkinä sähkölaitosten ja sähköasemien päämuuntajat sekä jakeluverkossa olevat jakelumuuntajat. Muuntajia voidaan käyttää myös jännitteen ja virran mittaamiseen sekä verkkojen galvaaniseen erotukseen, mutta työssä tullaan kuitenkin keskittymään näistä lähinnä päämuuntajiin, ja niiden kunnonvalvontaan. Tutustutaan kuitenkin ensin muuntajan toimintaan ja rakenteeseen, jotta ymmärretään käsiteltävät asiat paremmin.

### 2.1 Muuntajat yleisesti

Tarkastellaan muuntajan toimintaperiaatetta kuvan 1 avulla. Kuvassa on selkeyden vuoksi häviötön yksivaihemuuntaja. Häviöttömyydellä tarkoitetaan, että oletetaan kupari- ja rautahäviöiden sekä hajavuon puuttuvan. (Hietalahti 2011, 12)



Kuva 1. Häviötön yksivaihemuuntaja (Hietalahti 2011, 12)

Virtaa syötettäessä ensiökäämin lävitse, syntyy johtimen ympärille magneettikenttä. Lävistyslain ja Amperen lain mukaan saadaan rautasydämen keskelle tietty magneettivuon tiheyden arvo, joka kasvaa, kun virtaa tai johdinkierrosten lukumäärää kasvatetaan. Sydän on valmistettu yleensä ferromagneettisesta aineesta, kuten esimerkiksi käytetty rauta. Tästä johtuen magneettivuo kulkee lähes kokonaan sydämen läpi. Sähkökoneissa syntyy todellisuudessa myös rautasydämen läpi kulkematonta hajavuota, joka huomioidaan hajakertoimena. (Aura & Tonteri 2009, 108-114)

Rautasydämen rakenteessa pitää huomioida pyörrevirtojen ehkäisy. Pyörrevirrat kulkevat vaihtelevan magneettikentän sydämeen synnyttämässä suljetuissa virtasilmuksissa, joita on äärettömän monta. Pyörrevirtojen kulkiessa silmuksissa aiheutuu lämpöhäviöitä. Tästä johtuen rautasydän koostuu useista laminoiduista levyistä, joka rakenteena ehkäisee pyörrevirtojen kulkua. (Aura & Tonteri 2009, 197; Hietalahti 2011, 4)

Rautasydämeen syntyvän magneettipiirin käyttäytymistä voidaan kuvata kaavalla  $F_m = R_m \cdot \Phi$ . Jossa  $F_m$  kuvaa kierrosluvusta ja virrasta riippuvaa magnetomotorista voimaa,  $R_m$  permeanssin, eli magneettisen johtavuuden käänteisarvoa, reluktanssia sekä  $\Phi$  magneettivuota. (Hietalahti 2011, 5-6)

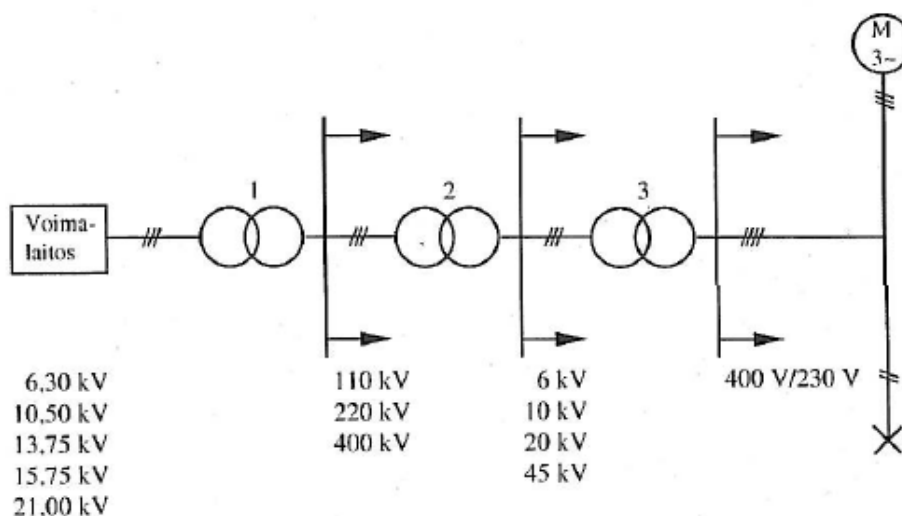
Faradayn vuonna 1831 havaitseman ilmiön mukaisesti: ”Magneettikentässä liikkuvaan johtimeen syntyy sähkömotorinen voima, ja jos virtapiiri suljetaan, syntyy piiriin virta”. (Aura & Tonteri 2009, 127) Toisiokäämi ei kuitenkaan liiku, vaan ensiökäämiin syötetyn vaihtojännitteen synnyttävä sinimuotoisesti vaihteleva virta aiheuttaa vaihtelevan magneettivuon arvon. Vaihtelevan vuon kulkiessa toisiokäämin lävitse, käämiin syntyy sähkömagneettinen voima, joka yrittää estää magneettivuon vaihtelua. Syntyvän smv:n suuruus riippuu toisiokäämin kierrosluvusta ja se on likimääräisesti saman suuruinen käämiin syntyvän vaihtojännitteen kanssa. Myös ensiökäämin vaihtelevasta vuosta itseinduktion avulla syntyvä sähkömagneettinen voima on likimäärin syötetyn vaihtojännitteen suuruinen. Täten voidaan todeta muuntajan muuntosuhteeksi  $u_1/u_2 = N_1/N_2$ . (Aura & Tonteri 2009, 133)



Yksinkertaistettuna muuntajan ensiökäämiin syötetään sinimuotoista vaihtojännitettä, joka synnyttää muuntajan sydämeen vaihtelevan magneettivuon. Toisiokäämiin induoituu täten sinimuotoinen vaihtojännite, joka riippuu muuntajan muuntosuhteesta.

## 2.2 Muuntaja osana sähköverkkoa

Voimalaitosten generaattoreilla tuotettu jännite ei voi olla kuin maksimissaan noin 30kV eristysteknisistä syistä. Tämä jännite on turvallisuussyistä liian suuri sähkön kuluttajille, mutta myös liian pieni suurten tehojen siirtämiseen pitkillä siirtoetäisyyksillä. Jännitettä nostettaessa tietyn tehon siirtäminen vaatii pienempää virtaa. Johtimen resistanssi kasvaa johtimen pituuden kasvaessa, joten häviöt myös suurenevät. Kuten kolmivaiheisen häviötehon kaavasta  $P_h = 3 * R * I^2$  huomataan, virran kaksinkertaistuminen aiheuttaa tehon nelinkertaistumisen, joten on perusteltua nostaa jännite suureksi. Suomessa sähkön siirtoverkossa käytetään jännitetasoja 110kV, 220kV ja 400kV. (Hietalahti 2011, 4)



Kuva 2. Periaatekuva sähköverkosta (Aura & Tonteri 2009, 268)

Kuvasta 2 nähdään periaate sähköverkosta. Voimalaitosten generaattorien tuottama keskijännite nostetaan muuntajilla suurjännitteeksi siirto- ja kantaverkkoon. Lähempänä kuluttajaa jännite pienennetään muuntajalla keskijännitteeksi jakeluverkkoon,

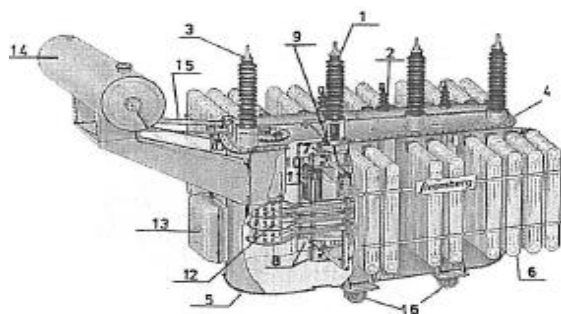
jolla päästään vielä lähemmäksi kuluttajaa. Vielä kerran ennen sähkön menemistä kuluttajalle, jännite pienennetään jakelumuuntajalla 400 voltin pienjännitteeksi, jolla kuluttajan laitteet toimivat. Sähköverkossa on käytössä kolmivaihejärjestelmää, joten muuntajatkin ovat kolmivaihemuuntajia. Isommille kuluttajille voi tulla suoraan 20kV:n tai jopa 110kV:n liittymä, josta sähköä käytetään suoraan kyseisillä jännitetasoilla, tai muunnetaan käyttötarkoituksen mukaan. (Aura & Tonteri, 267- 268)

Muuntajia on siis sähköverkossa lukuisia. Kuvan kohtien 1 ja 2, siirtoverkon muuntajat, joita kutsutaan päämuuntajiksi, ovat kalleimpia yksittäisiä komponentteja siirtoverkossa. Tästä syystä niiden kunnonvalvonta ja suojaaminen on tärkeää. Lisäksi hajoamisesta voi aiheuta mahdollisia laajoja ja pitkäkestoisia sähkökatkoja tai muuntajaöljyn aiheuttamia ympäristöhaittoja. Myös muuntajapalo on erittäin ongelmallinen, sillä sitä on lähes mahdotonta saada sammumaan, ennen kuin muuntajaöljy palaa loppuun. Näistä syistä kyseiset muuntajat vaativat useita suojalaitteita ja jatkuvaa kunnon tarkkailua.

Muuntajilla on käytössä erilaisia suojalaitteita, kuten esimerkiksi sähköisiä suojareleitä, kaasureleitä, lämpömittareita, ylipaineventtiileitä, leimahdussuojia sekä muita vikatilanteita valvovia laitteita. Tämän työn pääasiallisen tarkastelun kohteena on kuitenkin muuntajan ikääntymiseen ja kuntoon liittyvät kunnossapitomittaukset, joten suojalaitteet on rajattu sisällöstä pois pituuden pitämiseksi kohtuullisena. (Väärämäki 2004)

Muuntajalla on sähköverkossa jännitteen muuttamisen lisäksi myös toinen tarkoitus. Verkossa tapahtuu jännitevaihteluita, joita pyritään pienentämään muuntajan avulla, säätämällä muuntajan jännitettä muuntosuhdetta muuttamalla. Tämä voidaan tehdä, joko väliottokytkimellä tai käämikytkimellä. Päämuuntajissa käytetään käämikytkintä, sillä väliottokytkimellä ei voida säätää suorittaa muuten kuin jännitteettömänä, kun taas käämikytkimellä säätö onnistuu käytön ollessa päällä. Jousella tai moottorilla ohjattava käämikytkin sijaitsee muuntajan yläjännitepuolella, sillä siellä virrat ovat pienempiä. Käämikytkin mahdollistaa myös kauko-ohjatun jännitteensäädön. (Aura & Tonteri, 282-283)

## 2.3 Muuntajan rakenne



Esimerkki suurtehomuuntajasta.

1. Yläjänniteläpivienti
2. Alajänniteläpivienti
3. Tähtipisteläpivienti
4. Muuntajan kansi
5. Muuntajan öljysäiliö
6. Radiaattori (jäähdytін)
7. Yläkeen puristuspalkki
8. Alaikēen puristuspalkki
9. Muuntajan rautasydän
10. Alajännitekäämi
11. Yläjännitekäämi
12. Käämikytkin
13. Käämikytkimen ohjain
14. Paisuntasäiliö
15. Öljyastian ja paisuntasäiliön yhdistysputki
16. Kuljetuspyörät

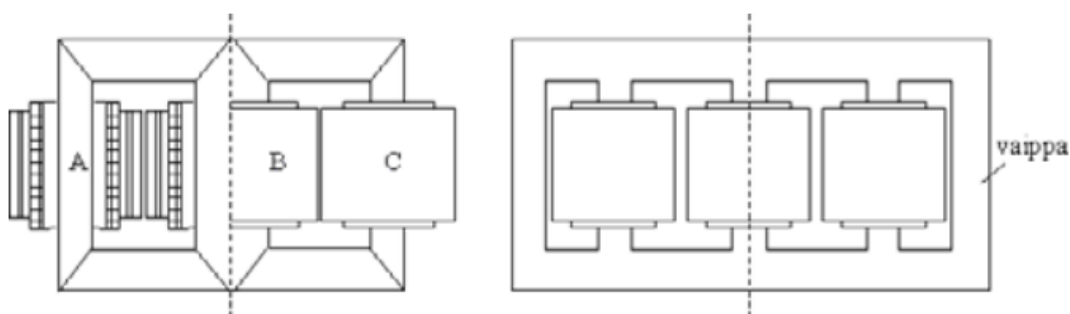
Kuva 3. Tehomuuntaja ja sen osat (Aura & Tonteri 2009, 283)

Käsitellään tarkemmin siirtoverkon ja voimalaitosten kolmivaiheisten päämuuntajien rakennetta. Kuvassa 3 nähdään eräs tehomuuntaja, joka on öljyeristeinen, ja varustettu jäähdytysradiaattoreilla. Kyseinen muuntaja on kaksikämmimuuntaja ja kuvan, kuoreen tehdystä leikkauksesta näkee hieman muuntajan aktiiviosaa, käämikytkintä ja yläjänniteläpiviennin. Ohessa Auran ja Tonterin kirjasta myös selvitys muuntajan osille. (Aura & Tonteri, 283)

Muuntajan aktiiviosa on osa, missä itse muuntaminen tapahtuu. Se sisältää muuntajan rautasydämen sekä käämitykset. Muuntajassa on myös, jo aiemmin mainittu, käämikytkin muuntosuhteen säätämiseen. Muuntajan kuori suojaa aktiiviosan sekä käämikytkimen, ja pitää eristeenä toimivan muuntajaöljyn sisällään. Muita passiiviosia ovat eristimet ja jäähdytyslaitteet. (ABB 2004, 77-90)

### 2.3.1 Muuntajan rautasydän

Kolmivaiheisen muuntajan rautasydän on yhtenäinen kaikkien vaiheiden välillä ja se voi olla joko sydänmuotoinen tai vaippamuotoinen. Jokaisella kolmella vaiheella on oma pylväs, jossa sijaitsee ylä- ja alajännitekäämit. Käämien sijoittaminen samaan pylvääseen pienentää hajavuota ja hajareaktanssia. Pylväät ovat yhdistetty toisiinsa ylä- ja alajänniteellä. (ABB 2004, 77-79)



Kuva 4. Kolme- ja viisipylväinen rautasydän (Korpinen n.d., 3)

Vaippamuuntajassa on kolme pylvästä, jossa kaikissa on käämitys. Viisipylväisessä sydänmuuntajassa on kolmen käämeille tarkoitetun pylvään lisäksi kaksi pylvästä ulompien käämien ulkopuolella, ja täten yhden vaiheen magneettivuolle jää paluutie, joka ei riipu toisten vaiheiden vuosta. Kuten kuvasta 4 näemme, viisipylväinen sydän on rakenteelta monimutkaisempi ja vaatii parempaa jäähdytystä. Sydänmuuntaja onkin vaippamuuntajaa yleisempi johtuen yksinkertaisemmasta rakenteesta sekä halvemmasta hinnasta. Viisipylväinen muuntaja voi tulla kysymykseen tilanteessa, jossa tarvitaan esimerkiksi kuljetuksen takia matalampaa rakennetta. Ikeen ja pylvään väliin jäävää tilaa, josta käämitys kulkee, kutsutaan ikkunaksi. (Korpinen n.d.)

Muuntajan rautasydän rakennetaan ohuista, toisistaan eristetyissä metallilevyistä. Tällä saadaan vähennettyä pyörrevirtoja, jotka massiivisella sydämellä nousisivat kohtuuttoman suuriksi. Nämä muuntajalevyt ovat suunnattuja, eli niiden valmistuksessa on pyritty siihen, että vuo kulkisi valssaussuuntaan paremmin kuin muihin suuntiin. Levyjen suuntaus pienentää hajavuon aiheuttamia tehohäviöitä, sekä magnetoimisvirtaa. (Aura & Tonteri, 280)

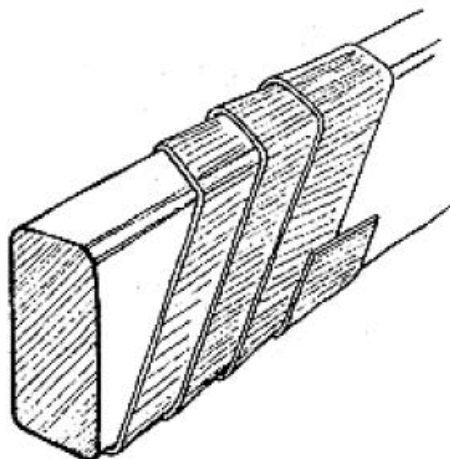
Levyjen paksuus on muutamia millimetrin kymmenesosia ja ne ladotaan kahden tai neljän levyn pinoissa päällekkäin, siten, että pylvään ja ikeen välissä oleva sauma ei ole vierekkäisissä pinoissa kohdakkoin. Kulma on  $45^\circ$ , jotta magneettivuon tiheys olisi mahdollisimman pieni valssaussuunnasta poikkeavan magneettivuon kululle, ja täten häviöt jäisivät pienemmiksi. Tämänkaltainen rakenne vahvistaa myös sydämen mekaanista lujuutta. (ABB 2004, 77-79)

Rautasydän puristetaan kasaan puristuspalkkien avulla. Palkit ovat tehty teräksestä, ja niiden sekä ikeen välillä on puusta tehty eristys. Sydän käämityksineen asetetaan säiliöön pohjapalkkien päälle, ja ne yhdessä puristuspalkkien kanssa ovat niin pitkiä, että käämitykset eivät pääse liian lähelle säiliön seinämiä. Käämien kiristys tapahtuu yläikeen puristuspalkkien avulla. (Aura & Tonteri 1996, 70-71)

### 2.3.2 Käämitys ja kytkentäryhmät

Rautasydämen pylvään ympärille on käämitty ylä- ja alajännitekäämit päällekkäin. Käämien materiaali on joko kuparia tai alumiinia ja johdin on muotoiltu yleensä suorakulmion malliseksi, joka taasen säästää tilaa käämityksessä. Johtimissa käytetään eristeenä useimmiten paperia. Joissakin käyttökohteissa eristeenä saattaa olla lakka tai hartsi, mutta tässä työssä käsitellään lähinnä juuri öljy-paperieristettä. Johtimen poikkipinnan kasvaessa, tulevat pyörrevirtahäviöt taas kysymykseen. Tilanteen ollessa tämä, joudutaan johdin jakamaan kahdeksi tai useammaksi samansuuntaiseksi johtimeksi, joista jokainen eristetään toisistaan. (ABB 2004, 80; Aura & Tonteri, 38-40)

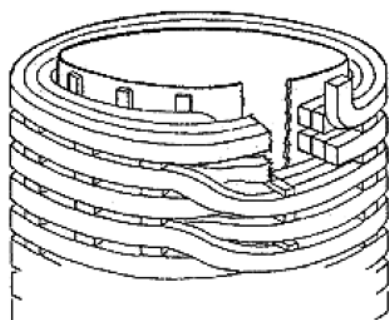
Alajännitepuolen käämit ovat käämittynä lähimmäksi rautasydäntä. Alajännitekäämi on yleensä tehty ruuvikäminä, tai kaksikerroskäminä. Vaikeammin eristettävä yläjännitekäämi sijaitsee kauempana sydäimestä ja on käämitty monikerroskämiksi tai yleisemmin levykäämiksi. Kerroseristyksenä on myös paperi, ja johdin saatetaan eristää paperin sijaan myös lakkakerroksella. Myös käämikytkimen asennus yläjännitepuolelle vaikuttaa käämin sijoittamiseen päällimmäiseksi. Kuvasta 5 nähdään esi-merkki johtimesta ja sen päällä olevasta eristepaperista (Aura & Tonteri 1996, 39-41)



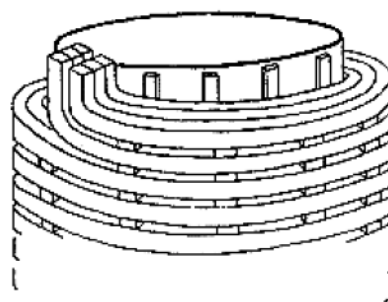
*Conductor strand with insulation paper lapping*

Kuva 5. Johdin, jonka päällä eristepaperi (ABB 2004, 80)

Ruuvikäänin ja levykäänin suurimpana erona on se, että ruuvikäänissä yksi käänin kierros sisältää yhden johdinkierroksen, kun taas levykäänissä yhdessä käänin kierroksessa, on useampia johdinkierroksia. Suuremman kierrosluvun sekä suurempien dielektristen häviöiden takia, yläjännitepuolella on parempi siis käyttää levykäänimiä. Kuvasta 6 nähdään selvennys käänimien välisille eroille. (ABB 2004, 80-88)



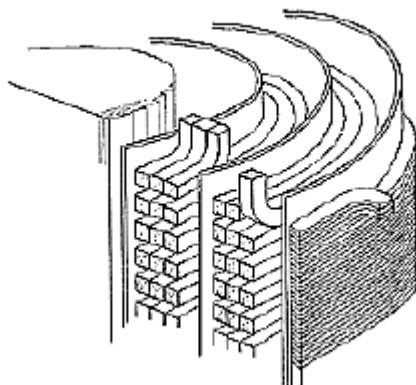
*Sketch of a disc winding*



*Sketch of a double threaded helical winding*

Kuva 6. Levy- ja ruuvikäänimi (ABB 2004, 82-83)

Alajännitekäämin ja rautasydämen välissä on paperista tai prespaanista rakennettu lie-riömäinen eristekerros. Myös eri potentiaaloin omaavat käämitykset jaetaan segmentteihin eristeliöiden avulla, kuten yllä olevasta kuvasta näemme. Uloimman käämin päälle asennetaan vielä yksi eristekerros käämin ja säiliön välille. Eristeliöiden päitä voidaan taivuttaa ylä- ja alaiesta vastaan. Eristeliöiden ja kiilojen avulla luodaan käämien välille kanavat, joissa öljy pääsee kulkemaan. Kuvassa 7 nähdään myös alajännitepuolen ruuvikäimitys, yläjännitepuolen levykäämitys, sekä jännitesäätöön tarkoitettu kerroskäämitys. (ABB 2004, 80-88; Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 144)



Kuva 7. Alajännite- yläjännite- ja kerroskäämi (ABB 2004, 86)

Käämit kytetään kolmivaihemuuntajassa tähteen, kolmioon tai hakatähteen. Näistä hakatähtikytkentä on käytössä vain alajännitepuolella jakelumuuntajissa, kun taas tähti- ja kolmiokytkentää käytetään tehomuuntajissa sekä ylä- että alajännitepuolella. Erilaisia käytettäviä muuntajan standardoituja kytkentäryhmiä on 12 ja niiden merkintätapa on suhteellisen yksinkertainen. Muuntajassa voi ylä- ja alajännitekäämien lisäksi olla tertiäärikämi, joka on tarkoitettu kuristimien ja rinnakkaiskondensaattorien kytkentään.

Isot kirjaimet tarkoittavat yläjännitepuolen kytkentää, sekä pienet alajännitepuolen. Jos tunnuksessa on kirjain n, tarkoittaa se muuntajan kannelle tuotua, käytettävissä olevaa tähtipistettä. Kirjain y tarkoittaa tähtikytkentää, d tarkoittaa kolmiokytkentää, sekä z hakatähtikytkentää. Tunnuksen perässä on numero, mistä selviää kytkennän

vaihesiirto. Luku kuvaa alajännitevektorin suuntaa ”kellotaululla”, kun yläjännitevektori osoittaa kello 12. Esimerkkinä voidaan ottaa yleinen kytkentä, YNd11. Kytkennässä yläjännitepuoli on kytketty tähteen, ja tähtipiste on tuotu muuntajan kannelle. Alajännitepuoli on kolmiossa ja sen jännite on, numeron 11 mukaan, 30 astetta yläjännitettä edellä. (Aura & Tonteri 2009, 282-283; Hietalahti 2011, 24)

### 2.3.3 Käämikytkin (OLTC)

Kuten aiemmin todettu, käämikytkin on laite, jolla muutetaan muuntajan muuntosuhdetta, jännitteen säätämiseksi. Käämikytkimellä voidaan jännitettä säätää muuntajan ollessa kuormitettuna. Muuntosuhteen säätäminen tapahtuu siten, että käämikytkin kytkee yläjännitepuolen käämityksestä kierroksia pois käytöstä tai lisää käyttöön. Sijoitus yläjännitepuolelle johtuu pienemmistä kytkettävistä virroista. Muuntajan kytkennästä riippuen käytetään joko nollapistekäämikytkintä tähtikytkennän yhteydessä, tai vaihekäämikytkintä kolmiokytkennän yhteydessä.

Nollapistekäämikytkin rakennetaan yleensä kolmivaiheisena. Sisäiset jännitteet pysyvät pieninä, joten eristyksen kanssa vaikeuksia ei tule, toisin kuin vaihekäämikytkimellä. Kolmiokytkennässä vaiheiden välillä oleva pääjännite aiheuttaa eristysvaikeuksia ja siitä syystä käytetäänkin jokaisella vaiheella omaa, yksivaiheista käämikytkintä. (Aura & Tonteri 2009, 44-49)

Käämin valitsin sijaitsee muuntajan sisällä, aktiiviosan kanssa samassa öljyssä. Valitsimessa tapahtuu pelkästään käämin valinta ja itse kytkemistapahtuma tapahtuu yleensä omassa hermeettisesti suljetussa säiliössään. Kytkemistapahtumat nimittäin liikaavat öljyä ja tätä ei haluta tapatuvan muuntajaöljylle. (ABB 2004, 101)

Säätöalue jännitteellä on yleensä 10-15%. Portaita säätöön on useita ja ne säätävät 1,33-1,67% kerralla. Säätökoneistossa on askelvastus, jolla estetään säätökäämien oikosulku säätötapahtuman aikana. Tapahtuman aikana kaksi käämiä ovat hetkellisesti yhdistettynä toisiinsa tämän askelvastuksen lävitse. Kuormitusvirta kulkee tällöin molempien koskettimien lävitse. Lopulta yhteys katkeaa ja säätö on suoritettu. Käämi-



kytkimen ohjaus tapahtuu moottorilla tai jousella ja säätötapahtuman suoritusta määrääjassa valvoo aikarele. Asennon vaihtoon kuluva aika on 40ms luokkaa. (Aura & Tonteri 1996, 43-44)

#### 2.3.4 Säiliö ja läpiviennit

Muuntajan säiliö on osa mikä suojaa aktiiviosaa ja pitää öljyn sisällään. Säiliössä Ovat kiinni myös paisuntasäiliö ja suojalaitteet sekä mittarit. Säiliön rakenteeseen kuuluu radiaattori eli jäähdytin, jossa öljy kiertää ja jonka kautta muuntaja luovuttaa lämpöään ympäristöönsä. Myös mahdolliset tuulettimet ovat asennettuna säiliöön.

Öljynkiertojärjestelmä voi olla ONAN- tai ONAF-tyyppinen. Nämä molemmat ovat luonnollisella (natural), eli painovoimaisella öljynkierrolla, ja jälkimmäisessä ilman liike on pakotettua (forced), eli radiaattoreiden lisäksi on tuuletin auttamassa jäähdytystä. Olemassa on myös OFAF-tyyppistä muuntajaa, joka on yleensä käytössä sisätiloissa. Sekä öljynkierto että ilman liike on pakotettua, sillä radiaattorit sijaitsevat kauempana, esimerkiksi ulkona. (ABB 2004, 96, Piironen 2015, 16)

Tilavuus muuntajaöljyssä vaihtelee, sillä sen lämpötila vaihtelee. Tilavuuden vaihtelun johdosta muuntaja varustetaan paisuntasäiliöllä, jossa öljy mahtuu laajenemaan. Öljyn supistuessa muuntaja hengittää sisään ilmankuivaimen kautta. Kosteus nopeuttaa eristeiden vanhenemista, joten silikageeliä tai vastaavaa ainetta sisältävää ilmankuivainta käytetään sitomaan sisäänhengitysilmaasta kosteus pois.

Muuntajan kannella sijaitsevat läpivientieristimet, jotka koostuvat läpi menevistä johdeista sekä niiden ympärillä olevista erilaisista eristeistä. Öljytäytteisessä muuntajassa läpiviennin pitää varmistaa tiivis ulostulo sekä turvallinen eristys rungon ja jännitteisten osien välille, mahdollisimman pienillä häviöillä. Läpivientieristimiä on lukuisia eri materiaaleja ja ne ovat yleensä hermeettisesti suljettuja, eli sen sisällä, oleva eristeöljy tai -kaasu eivät ole tekemisissä eristeen ulkopuolella olevan ilman kanssa.

Enintään 24kV:n jännitteillä rakenne pysyy yksinkertaisena. Esimerkkeinä tästä kuivat- tai öljytäytteiset posliinieristimet. Suuremmilla jännitetasoilla materiaalina voi

olla esimerkiksi kovapaperieristys ja rakenteessa täytyy huomioida eristeaineessa tapahtuvien liukupurkausten välttäminen. Tämä on mahdollista eristimen muotoilulla, kentänohjausrenkaalla tai kapasitiivisella ohjauksella. Kapasitiivinen ohjaus on käytössä kaikilla läpivientieristimillä alkaen 123kV:n jännitetasosta. (Aro & kump. 2015, 162-164)

## 2.4 Muuntajan eristys

Öljyeristeisellä muuntajalla eristys perustuu nimensä mukaisesti muuntajaöljyyn. Eristeöljyn tunkeutuminen jännitteisten osien väliin varmistetaan paperilla. Kiinteät eristeaineet, paperin lisäksi myös prespaani, antavat mekaanisen tuen jännitteisille osille. Tämä edellyttää hyvää mekaanista lujuutta ja sähkölujuutta. Yhdessä paperin ja prespaanin kanssa, öljystä saadaan luotettava eristys.

Jotta saavutettaisiin hyvä eristys, muuntajan paperin pitää kyllästyä öljyllä täydellisesti, ilman ilmakuplia. Ilmakupliin, jotka aiheutuvat huonosta imeytymisestä, voi syntyä osittaispurkauksia. Nämä kiihdyttävät muuntajan eristeen vanhenemista ja voivat johtaa läpilyönteihin. Imeytysprosessia kutsutaan impregnoitusprosessiksi, ja se edellyttää kiinteän eristemateriaalin olevan huokoista, jotta nestemäisen eristysaineen tunkeutuminen siihen on mahdollista. Impregnointi suoritetaan kuivaan ja puhdistettuun aktiiviosaan tyhjää hyväksi käyttäen. (Dai, Wang & Dyer 2007)

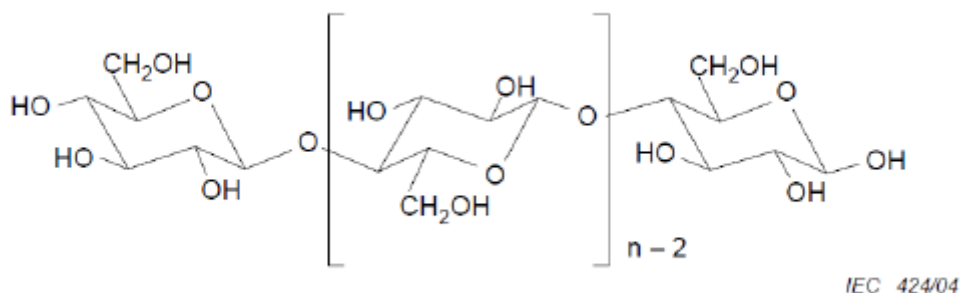
Öljyn ja paperin lisäksi muuntajassa käytetään tukirakenteissa paljon puuta. Puu toimii eristeenä ja öljy imeytyy hyvin sen huokoiseen rakenteeseen. Vaikka puu on haurasta, on se myös lujaa ja kestävää sekä helposti työstettävää materiaalia tuki- ja kiristysrakenteisiin. Puu ei myöskään reagoi öljyn kanssa tavalla jota ei haluta, kuten esimerkiksi erilaisten muovien kanssa kävisi.

### 3 MUUNTAJAN VAURIOITUMIS- JA VANHENEMISMEKANISMIT

Muuntajan öljyn ja paperin ominaisuudet muuttuvat koko muuntajan eliniän ajan. Tämän luonnollisen vanhenemisen lisäksi muuntajiin vaikuttaa myös useita erilaisia ulkopuolisia sähköisiä-, mekaanisia- ja termisiä rasituksia. Rasitukset nopeuttavat vanhenemistä ja saattavat aiheuttaa, muuntajan kunnosta riippuen vaurioita. (Hyvönen, Pykälä, Hokkanen, Halme & Aro 2005, 11-12; Aro & kump. 2015, 184-185)

#### 3.1 Eristepaperin ominaisuudet

Eristepaperi on tehty selluloosakuidusta, jota saadaan hitaasti kasvavista puista. Selluloosa on materiaali puun rungossa, joka esiintyy veden kuljettamiseen ja rungon sekä oksien tukemiseen tarkoitetuissa, solujen muodostamissa pitkissä kuiduissa. Materiaali on pitkäikäistä, ja hitaasti kasvavan puun suuri tiheys parantaa läpilyöntilujuutta. Selluloosan käyttöön yhtenä syynä on sen helppo impregnointi öljyllä. Myös muuntajassa käytetty prespaani on valmistettu selluloosasta, puristamalla ja liimaamalla paperia kasaan. Ominaisuudet näillä on siis samankaltaiset. Paperieristettä käsitellään standardeissa IEC 60554-1...3. (ABB 2004, 160)



Kuva 8. Selluloosamolekyylin rakenne (IEC 60554-3)

Kuvassa 8 näemme selluloosan kemiallisen rakenteen. Selluloosamolekyylit muodostuvat glukoosirenkaista ja ne muodostavat keskenään pitkiä ketjuja. Nämä ketjut katkeilevat muuntajan ikääntyessä erilaisten reaktioiden aiheuttamana. Mitä enemmän ketjut katkeilevat sitä hauraammaksi paperi tulee. Renkaiden lukumäärästä molekyylä

kohti kertoo polymeroitumisaste, eli DP-luku (degree of polymerisation). (Aro & kump. 2015, 184-185; IEC 60554-3; Heathcote 2007, 60-104)

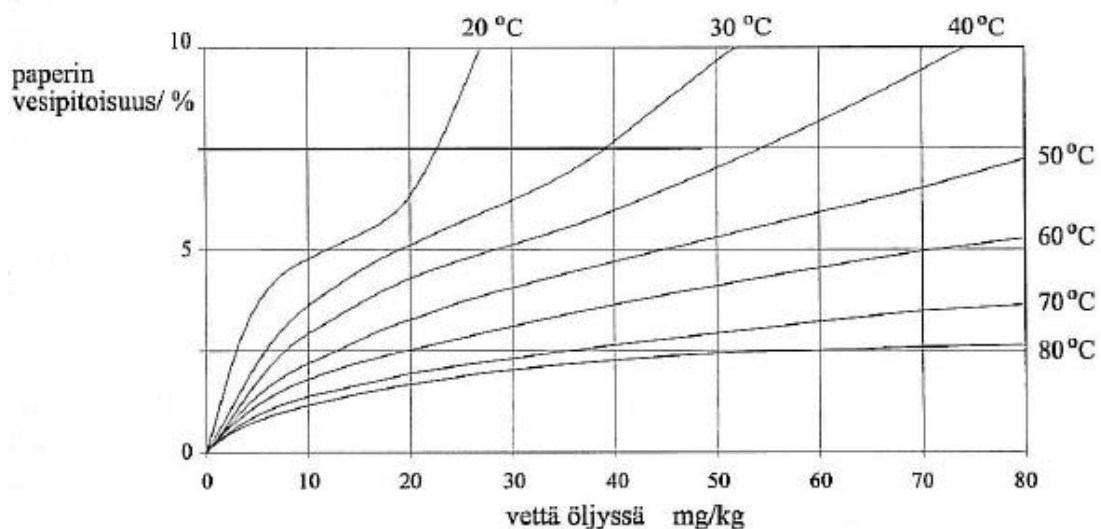
Haittana orgaanisessa paperissa ja prespaanissa on herkkyys lämpötilan nousulle, sekä kosteuden kerääntyminen. Paperina voidaan käyttää tästä syystä tavallisen Kraft-paperin sijaan lämpökäsiteltyä paperia. Kyseiseen paperiin lisätään kemikaaleja ehkäisemään hydrolyysistä johtuvien happojen muodostumista. Tämä termisesti parannettu paperi onkin muuntajissa yleisempää, paremmasta lämmön- ja kosteuden kestosta sekä hitaammasta haurastumisesta johtuen. (IEC 60076-7; Isotalo 2004, 41-42; Piironen 2015, 19)

### 3.1.1 Paperin vanheneminen

Paperin vanheneminen ja sen kunto on muuntajan teknisen käyttöiän kannalta oleellisin asia. Paperin vanhetessa sen DP-luku laskee, eli glukoosirenkaista muodostuneet ketjut katkeavat ja paperi haurastuu. Haurastumisen mennessä tarpeeksi pitkälle, paperi alkaa rikkoutua ja varista, jolloin jännitteellisten osien tuki ja eristys heikkenevät, mikä saattaa johtaa oikosulkuun, pienenkin mekaanisen voiman vaikutuksesta. Ikään-tymiseen vaikuttaa kiihdyttävästi ylikuormituksesta johtuva lämpötilan nousu, kosteus muuntajan sisällä ja happi sekä happamat yhdisteet kemiallisista reaktioista. IEC 60076-7 standardi kertoo esimerkiksi paperin hajoamisnopeuden kaksinkertaistuvat, lämpötilan noustessa 6°C. (Aro & kump. 2015, 194-185; Lauri 2016; Piironen 2015, 17-19)

Paperin kosteusprosentti kasvaa muuntajan koko käyttöiän, ja suurin osa muuntajan sisältämästä kosteudesta sijaitseekin juuri paperissa sekä prespaanissa. Myös puuhun sitoutuu kosteutta. Kosteuden kerääntymistä nopeuttaa alhaiset lämpötilat sekä öljyn kosteus. Paperin kostuminen heikentää ja lyhentää siinä olevia molekyyliketjuja ja täten huonontaa sen eristysvastusta. Kosteuden poistoon paperista ei riitä pelkkä öljynvaihto, vaan muuntaja tulee kuivata siihen tarkoitettussa uunissa. Kuivaaminen tapahtuu muuntajan perushuollossa, joka suoritetaan keskimääräisesti kerran muuntajan elinaikana.

Paperin kosteus on siis riippuvainen muuntajaöljyn kosteudesta. Alapuoella kuva, joka kuvaa paperin ja öljyn välistä kosteustasapainoa Tätä riippuvuutta käsitellään tarkemmin IEC 60076-14 A.3.1. standardissa. Kuten kuvasta 9 nähdään, kuumaan öljyyn sekoittuu enemmän kosteutta, kun kylmässä muuntajassa kosteus on pääasiassa kiinteissä eristeissä. Suuri käyttölämpötila kiihdyttää paperin hajoamista, mutta niin tekee myös liian alhainen käyttölämpötila epäsuorasti, sillä se edistää kosteuden kertymistä paperiin. (Aro & kump. 2015, 184-187, Lauri 2016)



Kuva 9. Paperin ja öljyn välinen kosteustasapaino (Aro & kump. 2015, 186)

### 3.2 Muuntajaöljyn ominaisuudet

Öljyllä on muuntajassa useita tehtäviä, joista tärkeimmät ovat jäähditys ja eristys. Sen lisäksi muuntajaöljyn eräs tarkoitus on antaa tietoa aktiiviosan kunnosta. Muuntajassa käytetylle nesteelle vaaditaan erityisesti suuri jännitelujuus sekä hyvä lämmönsiirtokyky. Lisäksi nesteeltä vaaditaan suurta resistiivisyyttä, alhaista häviökerrointa ja hyvää sietokykyä osittaispurkauksille. (ABB 2004, 161; Aro & kump. 2015, 117)

Yleisin muuntajaöljy on mineraaliöljy. Mineraaliöljyä on helposti saatavilla, ja sen hinta on alhainen. Tämän lisäksi mineraaliöljyllä on hyvä yhteensopivuus muuntajien muiden materiaalien kanssa. Maaöljystä tislamalla valmistettavan mineraaliöljyn ominaisuudet saattavat kuitenkin vaihdella sen pääasiallisen hiilivetyrakenteen ja sen

sisältämien epäpuhtauksien vaihdellessa. Vaadittavat ominaisuudet muuntajaöljykäytössä olevalle mineraaliöljylle määritellään standardissa IEC 60296. (Heathcote 2007, 76-80)

Mineraaliöljy ei sovellu käyttöön jokaisessa kohteessa, joten sen tilalle on kehitetty useita erilaisia synteettisiä eristysnesteitä. Synteettiset nesteet ovat kalliimpia kuin mineraaliöljy, mutta niitä käyttämällä saadaan käyttöön tietynlainen rakenne ja halutut ominaisuudet. Esimerkkeinä voidaan ottaa muuntajissa käytettävät esterit ja silikoniöljyt. Näistä molemmat kestävät kuitenkin huonosti osittaispurkauksia, mutta lämmönsietokyky sekä ympäristöystävällisyys ovat mineraaliöljyyn nähden hyviä. (Aro & kump. 2015, 117-120)

### 3.2.1 Öljyn vanheneminen

Kosteuden kertymistä öljyyn voivat aiheuttaa ilmankuivaimen huono kunto, vuodot tiivisteissä sekä kuormituksen jatkuva vaihtelu. Öljy vaikuttaa pääasiassa heikentävästi paperieristykseen. Lisäksi esimerkiksi tilanteessa, jossa öljyyn siirtyy enemmän kosteutta, kuin siihen voi liueta, aiheutuu vesiemulsio, joka saattaa johtaa sähköpurkaukseen. (Aro & kump. 2015, 184-187)

Orgaanisena aineena öljy hapettuu, kun se vanhenee. Öljyn hiilimolekyylin hapettuminen vetyperoksidiksi aloittaa öljyä heikentävän ketjureaktion. Vetyperoksidi hajoaa taas vapaiksi radikaaleiksi helposti. Nämä vapaat radikaalit muodostavat uusia vapaita radikaaleja hapettuessaan ja reaktio jatkuu. Öljyyn kerääntyy vanhenemisen seurauksena happea ja typpeä. Lisäksi öljy härskiintyy ja saostuu. Normaali vanheneminen on havaittavissa öljymittauksesta kaikkien arvojen tasaisena huononemisenä.

Ilmakuplat öljyn tai paperieristeen joukossa johtavat, kuplan jännitekestoisuuden ylityessä, osittaispurkauksiin. Osittaispurkaukset heikentävät eristeitä sekä kehittävät vetykaasua, jonka lisäksi ne muodostavat öljyn joukkoon liukenevia hiilihiukkasia. Muodostuneet kaasukuplat voivat johtaa uusiin osittaispurkauksiin ja liuenneista hiilihiukkasista aiheutuu öljyn jännitekestoisuuden pieneneminen. (Hyvönen & kump. 2005, 11-13; Lauri 2016)

### 3.3 Muut vanhenemismekanismit

Muuntajan aktiiviosa muuttuu ulkoisten rasitusten aiheuttamana muutenkin kuin eristysten osalta. Käämitysten aiheuttaman hajavuon johdosta, käämit hylkivät toisiaan. Tästä johtuen oikosulkutilanteet aiheuttavat käämien muodonmuutoksia ajan myötä, ja täten aiheuttavat mekaanista rasitusta käämien tuennalle. Käämien muoto pyrkii muuttumaan siten, että yleensä päällä oleva yläjännitekäämi muuttuu tynnyrin muotoiseksi, eli paksummaksi keskeltä. Sisempi käämi, joka yleensä on alajännitekäämi, pyrkii supistumaan puolesta välistä käämiä.

Muuntajan sydäntä oikosulku ei rasita, mutta kytkentävirtasysäyksen johdosta siihen kohdistuu suuria mekaanisia voimia. Muuntajan sydämen levyt värisevät käytön aikana, jolloin sydän pyrkii löystymään. Löystymistä ehkäisemiseksi sydämen kiristämässä on käytetty apuna puuta, joka paisuu ajan myötä, kiristäen sidosta. Mahdollinen oikosulku muuntajan levyjen välillä johtaa tyhjäkäyntihäviöiden kasvamiseen sekä kuumiin pisteisiin sydämessä. (Lauri 2016)

### 3.4 Muuntajan vaurioituminen

Iän myötä muuntajan eristeet ja mekaaninen rakenne kokee muutoksia. Vanheneminen ja muutokset rakenteessa aiheuttavat eristekyvyn, mekaanisen lujuuden ja kuormitettavuuden heikkenemistä. Muuntajaan vaikuttaa, sen eliniän kuluessa erilaisia sähköisiä, termisiä, mekaanisia, sähkömagneettisia, kemiallisia sekä transienttijännitteiden aiheuttamia rasituksia. Nämä yhdessä vanhenemisen kanssa voivat johtaa vaurioitumiseen. Mekanismit vaurioitumisessa voidaan jakaa hitaasti- ja nopeasti kehittyviin vikoihin.

Ilmastolliset ylijännitteet altistavat muuntajia rajuille syöksyaalloille. Syöksyaallot vanhentavat eristettä ja saattavat aiheuttaa läpilyöntejä eristeessä. Läpilyönti on nopeasti kehittyvä vika, ja se syntyy eristeen saadessa siihen vaikuttavalta sähkökentältä energiaa, joko sähköisen- tai lämpöläpilyönnin kautta. Läpilyönti tuhoaa kiinteän eristeen termisesti, paikassa, missä läpilyönti tapahtui. Eristekyvyn menetys on siis pysyvä esimerkiksi eristepaperilla. Koko öljymuuntajaa ensimmäinen läpilyönti ei kuitenkaan

välttämättä tuhoa, sillä tapahtuman jälkeen öljy voi asettua takaisin paikoilleen, vaikka kiinteä aine tuhoutuisikin. (Aro & kump. 2015, 128-129, Lauri 2016)

Ilmakuplat, tai epäpuhtaudet voivat aiheuttaa muuntajassa osittaispurkauksia, kuten aiemminkin todettu. Osittaispurkauksia lisää vanhassa muuntajassa myös kosteus. Uudessa muuntajassa olevat osittaispurkaukset voivat johtua suunnittelu- tai valmistusvirheestä. Tätä tarkastellaan muun muassa, yhtenä muuntajalle tehtävistä tehdaskokeista, joka on osittaispurkausmittaus. Osittaispurkausmittausta voidaan käyttää myös muuntajan kunnan arviointiin kentällä ja sitä käsitellään myöhemmässä vaiheessa tarkemmin.

Muuntajan kaasureleen kaasukuppiin syntyvä jatkuva kaasunmuodostus, voi kertoa osittaispurkauksesta, mutta myös löysistä liitoksista muuntajan sisällä. Löysät liitokset kasvattavat lämpötilaa. Öljyn likaantuminen voi myös aiheuttaa lämpötilan nousua, öljynkierron vaikeutumisen kautta. Myös muuntajassa oleva kuuma piste voidaan havaita kaasunäytteestä. Liitoksissa olevat viat ja osittaispurkaukset ovat molemmat hitaasti kehittyviä vikoja. (Lauri 2016; Piironen 2015, 19-23)

## 4 ÖLJYN JA PAPERIN KUNNONVALVONTA

### 4.1 Eristepaperi

Paperieristeen kunnosta kertoo parhaiten paperin DP-luku. Uudessa muuntajassa DP-luku on 1200:n paikkeilla ja teknisen käyttöikänsä lopussa olevalla se on 200. Paperin haurastuminen on palautumaton prosessi, eli arvon laskiessa tarpeeksi, muuntaja hajoaa pienimmästäkin rasituksesta käyttökelvottomaksi. (Aro & kump. 2015, 184-186, Lauri 2016)

DP-luvun ottamiseksi paperista, muuntaja tulee avata. Jossain tilanteissa muuntajaan on laitettu valmistusvaiheessa näytepala, josta saadaan mittaus otettua helposti. Jos valmista palaa muuntajassa ei ole, niin helpoin vaihtoehto on ottaa näyte läpiviennin



aukosta. Näytteenottoa DP-luvulle ei ole määritelty standardissa ja tällöin näytteenottaja saattaa vaikuttaa tulokseen. Tarkin ja totuudenmukaisin tulos saadaan ottamalla paperinäyte arvioidusta kuumimmasta pisteestä. Piste sijaitsee yleensä sydämen pylväiden välissä käämien sisäpinnoissa ylhäällä.

Paperinäytteestä voidaan määrittellä myös kosteus paperille. Öljyn kosteuden ja lämpötilan perusteella saatavaan arvioon verrattuna tämä kertoo todellisen kosteuden. Lisäksi paperin kosteus voidaan huomata eristysvastuksen huononemisesta. Kosteus paperissa muuttaa polarisaatioindeksin luonnetta siten, että pitempiaikaisella mittauksella eristysvastuksen arvo ei parane. Polarisaatioindeksi saadaan jakamalla 600s eristysvastusmittauksen arvo, 60s mittauksen arvolla. (Aro & kump. 2015, 184-186; Lauri 2016; Piironen 2015, 17-19)

Toinen mahdollisuus paperin kunnan arviointiin on öljystä tehtävä furfuraalianalyysi. Tämä voidaan tehdä muuntajaa avaamatta. Mittaus suoritetaan öljystä, mutta se kertoo paperin kunnosta. Paperin hajoamisessa syntyy furfuraldehydejä, joita muuntajaöljyn sekaan ei pääse muulla tavoin, kuin paperin hajoamisprosessien johdosta. Kyseisellä analyysillä saadaan tästä syystä luotettava indikaatio paperieristeen vahingoittumisesta. Analysoitavan paperin tyyppi tulee tietää, sillä suhde DP-luvun ja furaaaniyhdisteiden syntymisen välillä riippuu eristepaperin tyypistä. Furfuraalianalyysi ei myöskään korvaa öljystä otettavaa kaasuanalyysiä, mutta niitä voidaan käyttää tukemaan toisiaan. (Aro & kump. 2015, 208; Prevost 2005)

## 4.2 Muuntajaöljy

Muuntajaöljystä otettavat näytteet kertovat paljon muuntajan kunnosta. Öljynäytettä verrataankin verikokeen ottamiseen ihmiseltä. Öljynäytteen analysointi tapahtuu yleensä laboratoriossa, mutta myös kenttämittauksiin soveltuvia laitteita öljyn kunnan tarkasteluun on. Joskus öljyanalyysien tueksi tarvitaan esimerkiksi sähköisiä mittauksia, tulkinnan vaikeuden johdosta.

DGA-menetelmää on käytetty muuntajan kunnan analysointiin jo pitkään. DGA tulee sanoista dissolved gas analysis, eli se kertoo muuntajaöljyyn liuenneiden kaasujen

määrän. Näytteen koostumuksesta voidaan päätellä muuntajassa olevia alkavia ja kehittyviä vikoja. Kaasujen määrä kasvaa vikatilanteessa nopeasti, kun tasaisesti ja hitaasti lisääntyvät kaasumäärät viittaavat yleensä normaaliin vanhenemiseen. (Aro & kump. 2015, 206-208; Tuhkanen 2016)

Eri kaasut viittaavat erilaisiin vikoihin. Metaani ja etyleeni voivat kertoa muuntajan ylikuumentumisesta. Osittaispurkauksissa, joiden energia on matala, syntyy yleensä vetyä, kun taas suurenergisissä sähköpurkauksissa öljyn joukkoon syntyy asetyleeniä. Paperin ja prespaanin hajoaminen synnyttää hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Vertaamalla kaasujen välisiä suhteita voidaan määritellä tarkemmin vikoja. Ohessa taulukko 1 Aron ja kumppaneiden kirjasta, josta nähdään erilaisia kaasusuhteita vian määrittelyyn. (Aro & kump. 2015, 206-208; Lauri 2016; Piironen 2015, 19-23)

Taulukko 1. DGA kaasujen suhde (Aro & kump. 2015, 207)

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

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

Kaasuanalyysiä ja sen tulkintaa käsitellään IEC 60599 ja IEC 60567 standardeissa. Kaasuille sekä niiden kehittymisnopeudelle asetetaan raja-arvot, mutta ne eivät ole ehdottomia. Tärkeää kaasuanalyysin tekemisessä on osata verrata arvoja standardien lisäksi muuntajan aiempiin kaasupitoisuuksiin. Huomioitavaa on esimerkiksi käämikytkimen mahdollinen vaikutus kaasupitoisuuksiin, sillä käämikytkin aiheuttaa toimies-  
 saan asetyleenin kertymistä. Jos muuntajan rakenne on sellainen, että käämikytkimen öljy pääsee sekoittumaan muuntajan muuhun öljyyn, asetyleenipitoisuus voi olla suuri, mutta muuntaja kunnossa. (Aro & kump. 2015, 206-208; Piironen 2015, 19-23)

Muuntajan laajasta öljynäytteestä tarkastellaan DGA:n lisäksi öljyn läpilyöntilujuutta IEC 60156 standardin mukaisesti. Öljyn läpilyöntilujuuden ylittäessä 30kV/2,5mm kohden, toimenpiteitä ei vaadita. Jos arvo menee alle 20kV/2,5mm, öljynvaihto on suoritettava mahdollisimman pian. Arvon jäädessä tälle välille, toimenpiteenä on öljynsuodatus ja ajankohta riippuvainen siitä, kumpaa rajaa lähempänä saatu arvo on. Läpilyöntilujuuden määrittämiseen on saatavilla kannettavia laitteita, jotka soveltuvat kenttämittauksiin. Uudella öljyllä arvo on yli 60kV/2,5mm. Läpilyöntiarvoon vaikuttaa öljyssä olevat epäpuhtaudet ja kosteus, mutta myös lämpötila. (Aro & kump. 2015, 122-123; Lauri 2016)

DGA:n ja läpilyöntilujuuden lisäksi öljystä määritetään kosteusprosentti ja neutraloitumisluku, standardien IEC 60814 ja IEC 60296 perusteella. ISO 6295 standardi taas määrittelee öljyn rajapintajännityksen. Nämä arvot kuvaavat öljyn vanhenemista. Laajassa öljynäytteessä määritetään myös dielektrisiä häiriöitä kuvaava häviökerroin, hidastamista edistävät inhibiitit, eli lisäaineet, sekä kuparikorroosiokoe, jolla testataan, öljyn syövyttävyys kuparille. Aiemmin mainittu furfuraalianalyysi, paperin DP-luku ja sen kosteuspitoisuus kuuluvat myös laajaan öljynäytteeseen. (Lauri 2016, Piironen 2015, 19-23)

## 5 SÄHKÖISET KUNNONVALVONTAMITTAUKSET

Erilaisten öljyanalyysien sekä paperinäytteiden lisäksi muuntajien kuntoa voidaan arvioida sähköisten mittausten avulla. Sähköisten mittausten etu kenttäolosuhteissa on, että muuntajaa ei tarvitse avata ja tulokset saadaan välittömästi. Tarkastellaan tästä syystä erilaisia vaihtoehtoja sähköisiin mittauksiin.

### 5.1 Eristysvastusmittaus

Ensimmäinen käsiteltävä mittaus on eristysvastusmittaus. Eristysvastusmittauksella voidaan mitata käämien välistä, käämien ja rungon välistä, tai sydämen ja rungon välistä vastusarvoa. Heikentyneet arvot mittauksessa voivat kertoa vakavista vaurioista

tai heikkenemisestä muuntajan eristeissä. Myös kosteus eristeissä voi vaikuttaa mittauksen tuloksiin. Eristysvastusmittaus ei kuitenkaan havaitse esimerkiksi eristeessä tapahtuvia osittaispurkauksia, joten pelkästään eristysvastusmittauksen arvosta ei voi kattavaa selvitystä mitattavan kohteen kunnosta antaa. Mittausta voidaan kuitenkin käyttää muiden mittausten kanssa tukena, ja sen suorittamiseen tarvittavat laitteet ovat mittauksen yksinkertaisuudesta johtuen suhteessa halpoja. (Aro & kump. 2015, 191-193; Chauvin arnoux, 2-3)

Eristysvastusta mitattaessa syötetään mitattavaan laitteeseen tasajännitettä. Tasajännitteestä aiheutuu eristeisiin vuotovirtaa, jonka mittalaite mittaa, ja tämän pohjalta laskee eristysvastukselle arvon. Vastuksen arvon tulisi olla Cigren oppaan mukaan, yli 69kV muuntajille yli gigaohmin luokkaa, ja tuota pienemmille, yli 500 megaohmia. Muuntajan lämpötila vaikuttaa tulokseen, ja lämpötilan tulisi olla 20°C. Mainitut raja-arvot pätevät juuri tässä lämpötilassa. Testijännite on tyypillisesti muuntajan koosta riippuen 1-5kV. Mineraaliöljyllä on tyypillisesti estereitä korkeampi eristysresistanssi ja tämä tulee huomioida myös mahdollisesti mittauksen tuloksia arvioidessa. (CIGRE 2011, 55; IEEE C57-152 2015)

Eristysvastusmittauksen yhteydessä voidaan laskea määrittää polarisaatioindeksi ja absorptiosuhde. Lukuja varten mittauksessa otetaan kolme arvoa, joista ensimmäinen 15 s kohdalla, toinen 1 min kohdalla ja viimeinen 10 min kuluttua mittauksen alusta. Polarisaatioindeksi voidaan laskea  $PI = R_{10min}/R_{1min}$ , kun taas dielektrisen absorptiosuhteen arvo voidaan laskea  $DAR = R_{60s}/R_{15s}$ . Absorptiosuhteen arvo sijoittuu 1,2 – 3 väliin, jos eristys on riittävän kuiva. (Aro & kump. 2015, 191; IEEE C57-152 2015)

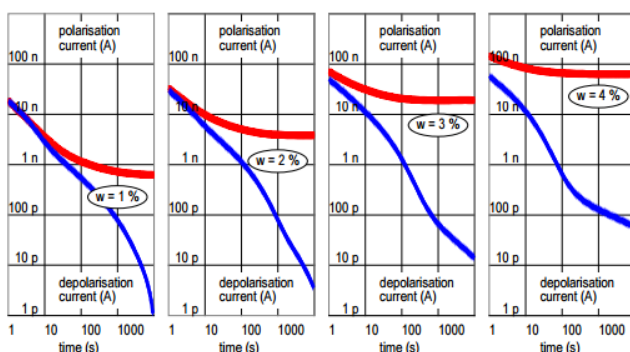
Polarisaatioindeksimittaus on kehitetty alun perin mittaamaan kosteudessa pyörivien koneiden eristeistä, ja se saattaa johtaa harhaan muuntajilla öljypaperieristeen monimutkaisuudesta johtuen. Tästä syystä useat lähteet väheksyvät polarisaatioindeksin käyttöä muuntajan kunnonvalvontamittauksissa. Kuitenkin polarisaatioindeksin raja-arvot muuntajille määritellään standardissa IEEE C57-152. Periaatteena polarisaatioindeksin tuloksin tuloksin on, että tulosten pysyessä suunnilleen samana 1 min ja 10 min kohdalla, kertoo mittaus kosteasta eristeestä. Jos arvo on pienempi 10 min kohdalla,

voidaan tätä pitää jo vaarallisena. Tuloksen ollessa alle 1,25, voidaan sitä pitää kyseenalaisena. Hyvä eriste antaa tuloksen, joka on suurempi kuin 2. (CIGRE 2011, 55-56; IEEE C57-152 2015)

### 5.1.1 Polarisaatio- ja käänteispolarisaatiovirta (PDC)

PDC-mittauksella (Polarisation Depolarisation Current) tarkoitetaan keinoa, jolla päästään tarkastelemaan mittauskohteen dielektristä vastetta aikatasossa. PDC-mittaus on hyvä menetelmä muuntajan eristyksen kosteuden mittaamiseen ja sen perusteella voidaan määrittellä paperieristyksen todellinen kosteus. Standardissa IEC-60422, määritellään laskenta ja raja-arvot tälle kosteudelle. (CIGRE 2011, 57)

Mittaus aloitetaan syöttämällä tasajännitettä eristeen yli ja mittaamalla polarisaatioindeksi aiemmin selitetyllä tavalla. Kun eristys on varautunut tarpeeksi, eristys oikosuljetaan, jolloin polarisaatio alkaa pienentyä, ja tällöin mitataan käänteispolarisaatiovirta. Latausajan tulisi olla 5-10 kertaa käänteispolarisaation aikaa pidempi. Polarisaatiovirtaa sekä käänteispolarisaatiovirtaa voidaan tämän jälkeen tarkastella ajan suhteen. Alkupään ajat kertovat suoraa öljyn johtavuudesta ja pidemmän ajanjakson tulokset näissä kertovat eristyksessä olevan paperin ja prespaaniosien johtavuudesta sekä niiden sisältämästä kosteudesta. Huonolla eristyksellä johtavuus on suurempi ja ero polarisaatiovirran sekä käänteispolarisaatiovirran välillä kasvaa, josta nähdään esimerkki kuvassa 10. (CIGRE 2010, 13-18)



Kuva 10. Esimerkkejä käänteispolarisaatiovirran mittauksista (CIGRE 2010, 18)

Mittauksen jälkeen voidaan halutessa suorittaa myös RVM-mittaus (Recovery Voltage Metod). Tässä menetelmässä mitataan oikosulun poistamisen jälkeen, jäljelle jääneestä polarisaatiosta aiheutuvaa jännitettä. RVM-menetelmä on myös yksi keino saada informaatiota eristeessä olevasta kosteudesta. PDC ja myöhemmin käsiteltävä FDS ovat kuitenkin parempia menetelmiä kunnan määrittämiseen, sillä RV-menetelmään liittyvät ohjelmistot eivät ole tarpeeksi kehittyneitä, joten mittaus ei anna tarpeeksi tarkkaa informaatiota. (Aro & Kump. 2015, 192-193; Koch, Tenbohlen, Krueger & Kraetge 2007, 6)

## 5.2 Käämin resistanssimittaus

Seuraava muuntajan kunnanvalvontaan soveltuva mittaus on käämien resistanssimittaus. Mittaamalla käämien resistanssit muuntajasta voidaan tarkkailla mahdollisia kontaktivikoja läpivienneissä, vaurioituneita johtimia tai kierrosoikosulkuja käämityksissä. Näiden lisäksi tärkeä mittauskohde muuntajassa on käämikytkin. Käämikytkin on laite, jossa on ainoat liikkuvat osat muuntajan sisällä. Se likaantuu ja kuluu kytkentätapahtumien johdosta. Mittaamalla käämien resistanssit jokaisessa käämikytkimen asennossa, voidaan tarkkailla käämikytkimen kuntoa, muuntajaa avaamatta. Käämin resistanssimittaus on yleistynyt ja ottanut tärkeän aseman muuntajan kunnanvalvontamittauksien joukossa. Syy tähän on mittauksen yksinkertaisuus verraten siitä saatavaan informaatioon. (CIGRE 2011, 52; Megger 2015)

Mittaus tapahtuu syöttämällä tasavirtaa käämiin. Käämin yli vaikuttava jännite ja virta mitataan, ja näiden perusteella määritetään resistanssin arvo. Käämitystä tulee ladata sydämen kyllästymiseen asti, eli pisteeseen, jossa mittausarvot tasaantuvat. Mittaus tulee suorittaa jokaisella käämikytkimen asennolla. Tuloksena saadut resistanssin arvot ovat hyvin pieniä, joten mittalaitteen tarkkuuden tulee olla sellainen, että se voi havaita jopa alle prosentin erot tuloksissa. Pienistä resistanssiarvoista johtuen, mittauskytkennässä pitäisi käyttää neljän johdon kytkentää. (CIGRE 2011, 55; OMICRON Diagnostic testing and monitoring of power transformers 2016, 12-13)

Mittaukseen on olemassa kaksi lähestymistapaa, staattinen- ja dynaaminen resistanssin mittaus. Staattinen mittaus on yleisempi ja helpompi mittaus, jossa mitataan resis-

tanssin arvo käämikytkimen joka asennossa erikseen, ja verrataan näitä arvoja referenssimittauksiin. Dynaamisessa mittauksessa käytetään mittalaitetta, jolla saadaan talletettua myös käämikytkimen kytkentätapahtuma. Mittauksella päästään analysoimaan kytkentätapahtuman aiheuttamaa virran pienenemistä. Kytkentätapahtuman aiheuttamista muutoksista päästään arvioimaan käämikytkimen kuntoa. Tämä nostaa mittauksen arvoa, sillä käämikytkimen kuntoa ei yhtä hyvin muilla mittauksilla päästä arvioimaan. (OMICRON Diagnostic... 2016, 12-13)

Tuloksia verrataan valmistajan mittauksiin, tai aiempiin kunnonvalvontamittauksiin. Referenssimittauksiin verrattuna tulokset saavat poiketa korkeintaan prosentin verran. Mittausolosuhteet kuitenkin vaikuttavat tuloksiin ja mittaustulokset on tärkeää redusoida 75°C lämpötilaan. Kyseistä redusointia käsitellään tarkemmin IEC-60076-1 standardissa. Käämien välinen ero resistansseissa saa olla korkeintaan 2-3%.

Ylä- ja alajännitekäämien välillä, resistanssien suhde on, häviöiden ollessa tasapainossa, yleensä verrannollinen muuntosuhteen neliöön. Yläjännitekäämin resistanssi on siis huomattavasti suurempi, josta saattaa aiheutua ongelmia kontaktivikojen tunnistamiseen tuloksista. Alajännitekäämin matala resistanssi taas saattaa pidentää tulosten stabiloitumiseen vaadittavaa aikaa jopa kymmeneen minuutteihin. Tästä syystä voi olla perusteltua käyttää apuna mittauksessa saman pylvään yläjännitekäämiä sarjaan kytkettynä. (CIGRE 2011, 52; OMICRON Diagnostic... 2016, 12-13)

### 5.2.1 Sydämen demagnetointi

Resistanssimittaus, kuten eristysvastusmittauskin, tasajännitteellä suoritettaessa, saattavat johtaa sydämen magnetoitumiseen. Suositeltavaa on siis, että mittausten jälkeen muuntajan sydän demagnetoidaan. Magnetoituminen saattaa aiheuttaa muihin mittauksiin vääristymiä sekä kasvattaa kytkentävirtasysäystä, kun muuntaja kytketään takaisin verkkoon. Jotkut muuntajan kunnonvalvontamittauksissa käytettävät mittalaitteet osaavat mitata magnetoitumisen muuntajasta ja suorittaa demagnetointitoimenpiteen. Riskien poistamiseksi tämä toimenpide on tärkeä.

Toimenpiteessä muuntajan sydäntä kyllästetään molempiin suuntiin, positiiviseen ja negatiiviseen, jotta voidaan määrittää hystereesikäyrä ja laskea vuon arvo. Mittalaitte käyttää algoritmeja, joiden avulla vähennetään vuota sovitellen jännitettä ja taajuutta. Laite pyrkii saavuttamaan alle 1% arvon maksimivuon arvosta. Jotta demagnetointi voidaan suorittaa luotettavasti, tulee magneettivuon muutosta tarkkailla koko prosessin ajan. (OMICRON Diagnostic... 2016, 22-23)

### 5.3 Häviökerroin eli $\tan(\delta)$

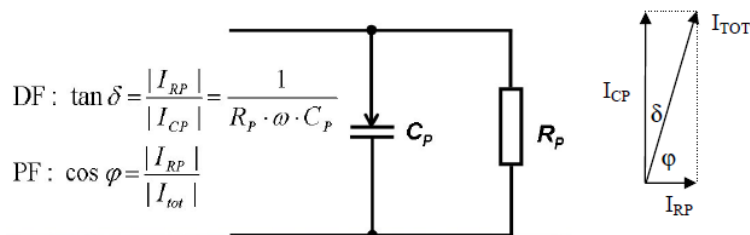
Kapasitanssi ja häviökertoimen mittaukset ovat yleisiä vaihtojännitteellä tehtäviä mittauksia suurjännitelaitteiston kunnan analysoimiseen. Kyseisillä mittauksilla voidaan saada informaatiota erityisesti eristysnesteen ja kiinteän eristeen kunnosta, mutta myös käämien muodonmuutoksista, sydämen liikkumisesta, läpivientieristimien kunnosta, kosteudesta likaisuudesta ja osittaispurkauksista. Häviökertoimen mittauksilla saadaankin siis melko kattava kuva muuntajan kunnosta. (CIGRE 2011, 53-54)

Vaihtoehtoisia mittaustapoja on Scheringin silta, virtavierailijasilta sekä erilaiset voltti-ampeeri - menetelmät. Mittausmenetelmien tarkkoihin kuvauksiin tai laskentaan ei tässä työssä suuremmin perehdytä, sillä tärkeämpää muuntajan kunnanvalvonnan kannalta on ymmärtää tulosten tulkintaa. Yksinkertaistettuna Scheringin sillassa ja virtavierailijasillassa käytetään referenssikondensaattoria mittanormaalina ja vertailun perusteella lasketaan arvot mittaukselle. Referenssikondensaattori on tavallisesti pelkän kapasitanssin mittauksessa painekaasukondensaattori ja häviökertoimen mittauksessa normaalikondensaattorin ja vastuksen sarjakytkentä. Virtavierailijasilta on parempi suurikapasitanssille mittaushohteelle, kuin Scheringin silta. (Aro & kump. 2015, 193-200)

Kun mitattavana olevaan kohteeseen kytketään sinimuotoinen vaihtojännite, kulkee eristeen läpi virtaa polarisaation ja johtumisen ansiosta. Kokonaisvirta koostuu siis resistiivisestä ja kapasitiivisesta virrasta. Voltti-ampeerimenetelmää käytettäessä, virrassa mukana oleva resistiivinen komponentti aiheuttaa vaihtojännitteen jakson yli lasketun jännitteen ja virran hetkellisarvojen summan poikkeamisen nolasta. Puhtaasti kapasitiivisella virralla tämä arvo olisi nolla. Näiden hetkellisarvojen avulla voidaan



määrittää arvo häviökertoimelle. (Aro & kump. 2015, 193-199; Hyvönen & kump. 2005, 15-17)



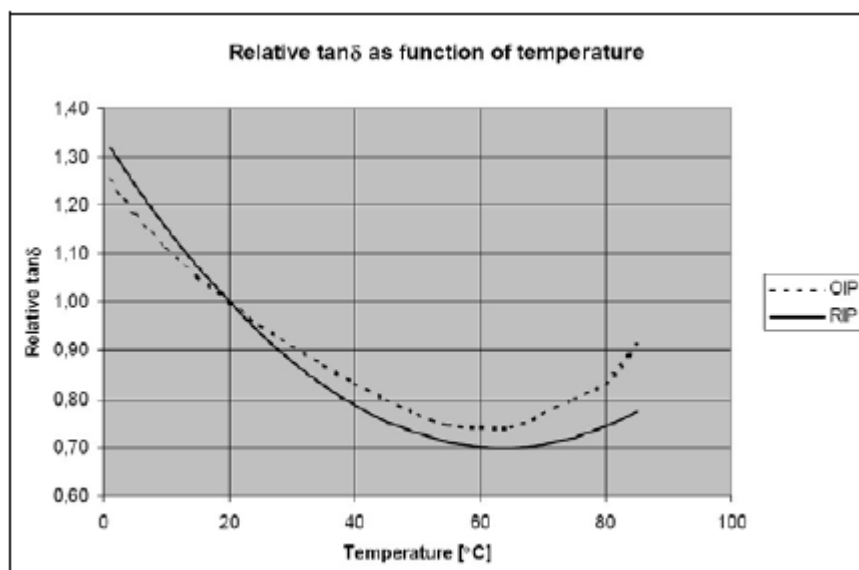
Kuva 11. Häviökertoimen eli  $\tan(\delta)$  arvon muodostuminen (CIGRE 2011, 53)

Kuvan 11 avulla voidaan havainnollistaa häviökertoimen, eli  $\tan$ -deltan arvon muodostuminen. Dissipation Factor, (DF) eli häviökerroin saadaan eristeen läpi kulkevan resistiivisen- ja kapasitiivisen virran suhteesta. DF-määritelmä on yleisemmin käytössä Euroopassa, kun taas USA:ssa samaa asiaa käsitellään nimityksellä Power Factor (PF), eli  $\cos \varphi$ , tai tehokerroin. Tehokerroin lasketaan resistiivisen- ja kokonaisvirran suhteesta. Periaate kuitenkin molemmilla on täysin sama, eli kun eristeen läpi kulkee enemmän virtaa johtumalla, on resistiivinen virta suurempi, joka tarkoittaa suurempaa häviökertoimen arvoa, eli periaatteessa huonompaa eristettä. (CIGRE 2011, 53-54; Hyvönen & kump. 2005, 15-17)

Tehomuuntajilla kapasitanssit mitataan käämitysten välistä sekä käämitysten ja tankin välistä. Käämit oikosuljetaan ja syötetyn jännitteen aiheuttamaa virtaa mitataan tarkkailun alla olevasta välistä. Jännite on yleensä 10 kilovoltin luokkaa. Läpivientieristimillä mittaus suoritetaan pääliittimen ja mittausulosoton väliltä tai ulosoton ja kiinnityslaipan väliltä. Alla olevasta taulukosta näemme IEC ja IEEE standardien määrittelemät raja-arvot häviökertoimille muuntajan eristyksissä, kun mittaus suoritetaan käyttäjäjuudella, 20°C lämpötilassa. Arvot ovat yleensä öljyeristeisellä muuntajalla 0,5% luokkaa ja yli prosentin meneviä arvoja voidaan pitää kyseenalaisena.

Läpivientieristimillä häviökerroinmittaus on yleisin niiden kunnosta kertova mittaus. Tulokset käyttäytyvät eri tavalla erityyppisillä läpivienneillä ja niitä voidaankin verrata arvokilpeen tai aiempiin mittauksiin. Jos alkuperäiseen verrattuna häviökertoimen arvo kaksinkertaistuu, mittaustiheyttä tulisi suurentaa tai koko läpivientieristin vaihtaa. Kapasitanssin arvossa tapahtuva 10% muutos johtaa myös vaihtotarpeeseen,

dielektristen rasitusten noustessa liian suuriksi. Mainitut arvot pätevät kapasitanssiin pääliittimen ja mittaussulosoton välillä. Toinen kapasitanssi, mittaussulosoton ja kiinnitysplaatan välillä, kertoo öljyeristeisessä läpiviennissä öljyn kunnosta, ja sen arvoja voidaan verrata muihin saman tyyppisiin läpivienteihin muuntajassa. Lämpötila tulee huomioida mittauksista tehdessä, sen vaikuttaessa tulokseen suuresti, kuten kuvasta 12 nähdään. Huomioon pitää myös ottaa, että läpivientieristimen lämpötila on jotain muuntajaöljyn ja ympäristön lämpötilan väliltä. (CIGRE 2011, 53-54; OMICRON Diagnostic... 2016, 22-23)



Kuva 12. Suhteellinen häviökertoimen arvo lämpötilan funktiona (CIGRE 2011, 54)

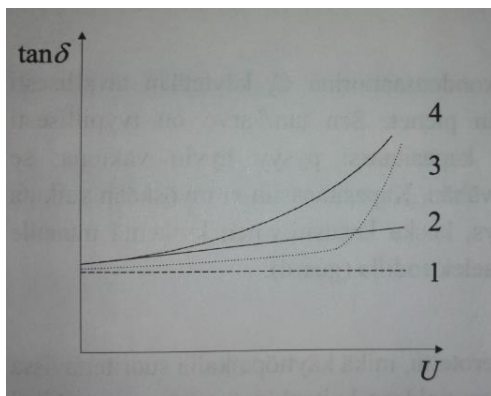
Läpivientieristimen pinnalla kulkevat virrat voivat vääristää mittaustuloksia. Tästä syystä on tärkeää, että mitattavat läpivientieristimet ovat puhdistettu hyvin. Puhdistuksessa täytyy kuitenkin myös perehtyä materiaaliin, josta eristimet ovat valmistettu. Esimerkiksi komposiittieristimet saattavat vaurioitua käytettävistä puhdistusaineista, joten ohjeet tulisi kysyä valmistajalta. Läpivientieristimien öljynäytteitä ei suositella otettavaksi ollenkaan. Kuitenkin tilanteessa jossa on jo todettu läpiviennissä olevan jotain vikaa, kuten suurentunut kapasitanssin arvo, se voi tulla kysymykseen. Tässä tilanteessa tulee myös ohjeet kysyä valmistajalta, jotta tehtävillä toimilla ei huononeta entisestään mitattavana olevan kohteen kuntoa. Kyseistä öljynäytettä, ja sen kaa-suanalyysiä käsitellään standardissa IEC 61464. (CIGRE 2011, 53-54)

Häviökertoimen mittauksen suorittaminen käyttötaajuudella kertoo lähinnä vain suuremmasta kosteudesta ja pidemmälle menneestä ikääntymisestä. Kun suoritetaan mitaukset laajemmalla jännitealueella ("tip up test") tai -taajuusalueella (Dielektrinen vaste, 15-400Hz), saadaan kunnosta tarkempaa tietoa ja pystytään huomaamaan kehittyvät viat aiemmin. Tietyt viat reagoivat eri tavoin jännitteen ja taajuuden muutoksiin. (Koch, Krueger & Puetter 2015, 5-9)

### 5.3.1 Häviökertoimen mittaus muuttuvalla jännitteellä

Häviökertoimen mittaaminen muuttuvalla jännitteellä on pitkään käytössä ollut menetelmä öljy-paperieristeellä. Menetelmä pohjautuu siihen, että häviökerroin muuttuu jännitettä muutettaessa. Tehomuuntajia mitattaessa kyseisellä menetelmällä, voidaan todeta, että suuri määrä öljyä kasvattaa myös häviökertoimen arvoa ja sen jänniteriippuvuutta, joten tämä mittausmenetelmä siis kertoo lähinnä öljyn johtavuudesta sekä eristyksen geometriasta. Tästä syystä häviökertoimen mittausta muuttuvalla jännitteellä ei muuntajilla, ainakaan isommilla, juurikaan kannata tehdä. (Koch & kump. 2015, 6-7)

Läpivientieristimien kunnan diagnosointiin tämä testi kuitenkin sopii hyvin. Näissä kyseinen mittaus voi kertoa esimerkiksi huonoista kontakteista, jolloin häviökertoimen arvo laskee jännitteen noustessa. Huonoja kontakteja läpivienneissä saadaankin muilla menetelmillä mitattua melko heikosti. Myös mahdolliset läpilyönnit kapasitiivisten tasojen välillä, sekä läpivientieristimen yleinen kunto voidaan selvittää häviökertoimen mittauksella muuttuvalla jännitteellä, jota kutsutaan myös nimellä tip up-test. Tällä mittausmenetelmällä voidaan selvittää hyvin myös muiden eristysten, kuin öljy-paperieristyksen, kuntoa. Edellä, kuvassa 13, näemme neljä erilaista mahdollista mittaus-tulosta sekä selitykset kyseisille tuloksille. (Anghuber & Krueger 2016, 6-11)



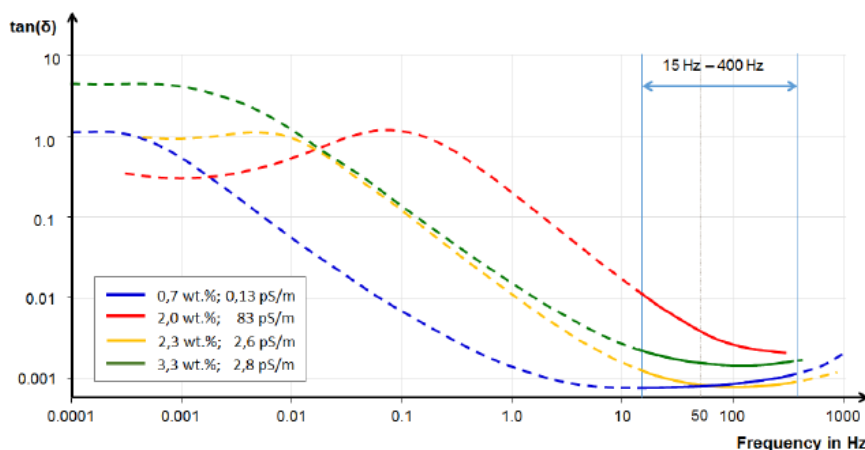
Kuva 13. Esimerkkikäyriä häviökertoimesta jännitteen funktiona (Aro & kump. 2015, 198)

Käyrää 1 voidaan pitää ideaalisena tilanteena. Käytännön tilanteissa muoto muuttuu hieman, mutta eristeen ollessa terve, häviökertoimen arvon nousu on kuitenkin pientä jännitteen kasvaessa. Todellista tilannetta kuvaa käyrä 2. Käyrässä 3 voidaan huomata, että häviökerroin pysyy melkein vakiona, mutta tietyn pisteen jälkeen se rupeaa kasvamaan nopeasti. Kohta, missä käyrä lähtee kasvuun, kuvaa tilannetta, jossa syttyy huomattavia osittaispurkauksia. Viimeinen käyrä, numero 4, kuvaa tilannetta, jossa eristys on heikennyt liikaa, ja häviökertoimen arvo kasvaa koko matkan huomattavasti. (Aro & kump. 2015, 197-198)

### 5.3.2 Häviökertoimen taajuusvaste

Häivökerrointa voidaan mitata myös taajuuden funktiona. Erilaiset polarisaatioprosessit käyttäytyvät eri tavalla eri taajuuksilla, joten kyseiset mittaukset antavat laajempaa informaatiota, kuin yksi mittaus käyttötaajuudella. Mittauksella voidaan havaita eristeestä kosteutta ja vesipuita, eristevikoja sekä muuntajaöljyn koostumusta ja happamuutta. Vaihtoehtoisia mittaustapoja on rajatulla taajuusalueella mittaaminen, jossa käytetään 15Hz – 400Hz muuttuvaa taajuutta. Toinen vaihtoehto on käyttää laajempaa taajuusaluetta, jopa 0,0001Hz – 1000Hz. Tätä menetelmää kutsutaan dielektriseksi vastemittaukseksi. Määritelmän mittaustuloksille antaa IEC-60422. (Aro & kump. 2015, 198-199; CIGRE 2011, 58-59)

Verrattuna yhteen käyttötaajuudella tehtyyn mittaukseen, 15Hz – 400Hz taajuusalueella mitattu häviökertoimen arvo antaa lisätietoa öljyn johtavuudesta. Tämän perusteella voidaan arvioida öljyn johtavuuden mahdollinen vaikutus häviökertoimen arvoon, ja eliminoida siitä johtuvia virheitä mittaustuloksissa. Kuvasta 14 voidaan nähdä neljän tehomuuntajan häviökertoimen käyttäytymisen erilaisilla kosteuspitoisuuksilla paperieristeessä sekä erilaisilla öljyn johtavuuksilla. (Anghuber, Krueger 2016, 6)

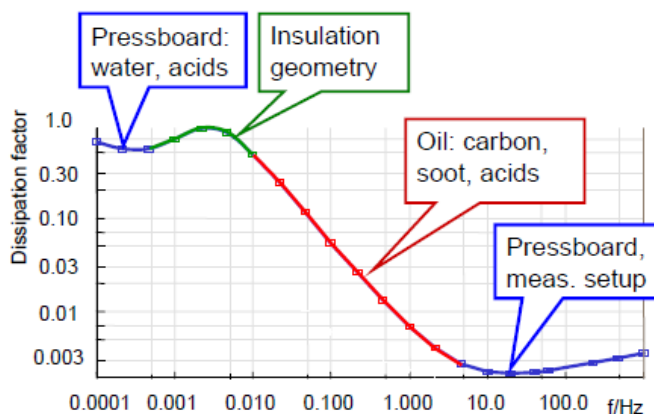


Kuva 14. Eräiden muuntajien dielektrinen vaste (Anghuber & Krueger 2016, 6)

Keltaisen ja sinisen käyrän voidaan havaita antavan suunnilleen saman tuloksen häviökertoimelle, vaikka kosteudet kyseisillä muuntajilla ovat aivan eri luokkaa. Punaisella käyrällä taas nähdään öljyn johtavuuden vaikutus arvoihin. Häviökertoimen arvo on huomattavasti muita muuntajia suurempi, vaikka paperin kosteus ei ole suurin. Voimakkaasti laskevasta käyrästä kyseisellä taajuusalueella, voidaan siis päätellä öljyn johtavuuden olevan suurta. Jos käyrä taasen kasvaa koko taajuusalueen, kuten kuvassa näkyvä sininen käyrä, voidaan tästä todeta öljyn johtavuuden olevan hyvin pieni. (Anghuber, Krueger 2016, 6)

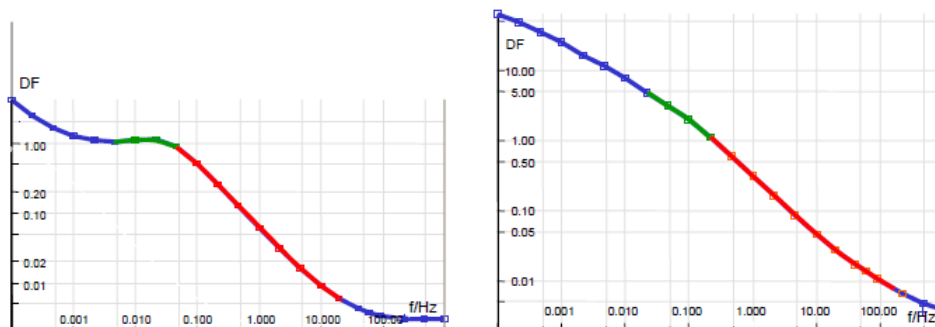
Käytettäessä vielä tätä laajempaa taajuusaluetta dielektrisessä vastemittauksessa, saadaan myös laajempaa informaatiota eristyksen eri osille. Yleinen käytetty taajuusalue on 0,0001Hz – 1000Hz. Vastetta voidaan ajatella kolmessa osassa, jotka ovat vaste selluloosaeristykselle, vaste öljylle sekä vaste näiden kahden rajapinnan polarisaatioilmiölle, eli eristyksen geometrialle. Kuten kuvasta 15 nähdään, alimmat taajuudet ker-

toivat selluloosan ominaisuuksista, kuten kosteudesta ja pienen molekyylipainon omaavien happojen esiintymisestä. Käyrän muodostaman ”kyttyrän” sijainnista voidaan päätellä ominaisuuksia eristyksen geometriasta, kun taas sen jälkeen tulevasta käyrän laskusta saadaan informaatiota öljyn ominaisuuksista. Loppukäyrään vaikuttaa jälleen selluloosaeristys, mutta siihen voi vaikuttaa myös mittauskytkennät ja -kaapelit. (Koch & kump. 2015, 4-6)



Kuva 15. Dielektrisen mittauksen eri vaikutusalueet (Koch & kump. 2015, 5)

Kosteus selluloosaeristeissä muuttaa käyrää pääasiassa alemmilla taajuuksilla. Useampien eri kuntoisten muuntajien käyrien tarkkailu on osoittanut, että korkeammilla taajuuksilla muutokset eivät näy niin hyvin. Tarkemmassa kosteuden pitoisuuden analysoinnissa alemmat taajuudet siis tulee sisällyttää mittaukseen, sillä korkeiden taajuuksien pohjalta voidaan tehdä vain karkeita analyysseja. Toinen huomioitava asia mitattaessa on lämpötila. Jo esimerkiksi 50°C lämpötila kasvattaa häviöitä selluloosaeristeessä ja paperissa, jolloin käyrän muodon muutoksista ei voida paikkaansapitäviä arvioita tehdä. Tämä huomataan kuvasta 16, jonka vasen puoli on mitattu 20°C lämpötilassa, öljyn johtavuuden ollessa 10pS/m ja oikeanpuoleinen mitaus on otettu samasta eristeestä 50°C lämpötilassa, jolloin öljyn vastaava johtavuus on ollut 43pS/m. (Koch & kump. 2015, 4-6)



Kuva 16. Lämpötilan vaikutus dielektrisen vasteen tulokseen (Koch & kump. 2015, 6)

## 5.4 Osittaispurkaus

Työssä useaan otteeseen aiemmin mainittu osittaispurkaus (partial discharge, PD) on ilmiö, jossa sähkökentän ylittäessä eristeen sähkölujuuden, syntyy johtimien välisen eristeen osittain oikosulkeva sähköpurkaus, joka määritellään muun muassa standardissa IEC-60270. Osittaispurkauksia on useita erilaisia ja niitä voi esiintyä nesteissä, kiinteissä aineissa sekä kaasuissa ja näiden välisillä rajapinnoilla. Osittaispurkauksista syntyy ääntä, valoa, otsonia ja muita kaasuja sekä syövyttäviä happoja. Niistä aiheutuu myös UV-säteilyä, radiohäiriöitä, galvanisesti eteneviä virtapulsseja sekä dielektristen häviöiden lisääntymistä. Osittaispurkaukset tuottavat myös erittäin suurta lämpöä, jopa 3000°C. (Aro & kump. 2015, 80; OMICRON 2015)

### 5.4.1 Osittaispurkauksien syntyminen

Tarkastellaan tilannetta, jossa öljy/paperieristeinen muuntaja on käynnissä, ja eristeessä on ilmakupla. Eristeen yli vaikuttaa sähkökenttä, joka ajatellaan homogeeniseksi. Täten ilmakuplaan vaikuttava kentänvoimakkuus voidaan laskea kaavalla  $E_0 = E_2(\epsilon_2/\epsilon_0)$ . Kenttävoimakkuus, joka vaikuttaa ilmakuplaan saadaan siis kertomalla eristeeseen vaikuttava kenttävoimakkuuden arvo kyseisten aineiden permittiivisyyksien suhteella. Öljypaperieristeen permittiivisyys on keskimäärin 4, kuivan ilman permittiivisyyden ollessa noin 1. Tästä voidaan, kyseisessä tilanteessa todeta ilmakuplaan vaikuttavan nelinkertainen kenttävoimakkuus. (Aura & Tonteri 2009, 30-35; OMICRON 2015)

Jos tarkastellaan minimiraja-arvoa öljyn läpilyöntilujuudelle, joka oli 20kV/2,5mm, ja ajatellaan kenttävoimakkuuden olevan esimerkiksi puolet siitä, 10kV/2,5mm =>  $E_2=4\text{kV/mm}$ . Tämän perusteella voidaan laskea ylempänä esitellyn kaavan mukaisesti  $E_0=E_2(\epsilon_2/\epsilon_0) = 4\text{kV/mm}*(4/1) = 16\text{kV/mm}$ . Ilman läpilyöntilujuus on normaalipaineessa, ohuina kerroksina esiintyessään, noin 6kV/mm, joka ylittyy tässä tilanteessa huomattavasti. Ilmakuplassa alkaa siis tässä tilanteessa nopea ionisaatio, joka synnyttää vapaita varauksenkuljettajia. Varauksenkuljettajat muodostavat lopulta johtavan kanavan ja täten syntyy osittainen läpilyönti, jota kutsutaan osittaispurkaukseksi. Todellisuuden tilanne ei ole tietenkään näin yksiselitteinen, sillä arvoihin vaikuttaa useita muuttujia, kuten esimerkiksi lämpötila ja kosteus. (Aura & Tonteri 2009, 30-35; Hyvönen & kump. 2005, 21-23; Omicron 2015)

Kun läpilyönti tapahtuu, ilmakupla muuttuu johtavaksi, jolloin kenttävoimakkuus tippuu lähelle nollaa, siirtyneiden varauksien johdosta. Ionisaatio loppuu tällöin ja purkaus sammuu. Jos kuplan sisällä oleva avaruusvaraus häviää tai sen aiheuttama vastakkaisuuntainen sähkökenttä kompensoituu, uusi purkaus voi syntyä. Jänniterasituksen kasvu voi aiheuttaa kompensoitumisen, mutta erityisesti vaihtojännitettä käytettäessä jännitteen polariteetti on aina seuraavalla puolijaksolla sama kuin avaruusvarauksen aiheuttamalla sähkökentällä. Tämä kompensoi kyseisen sähkökentän, ja läpilyöntilujuuden taas ylittyessä, purkaus syttyy uudelleen. (Hyvönen & kump. 2005, 21-23)

Purkaus jää osittaiseksi, kun ympärillä olevan eristeaineen läpilyöntilujuus ei ylitä. Kuitenkin siten, että osittaispurkaus tuhoaa ympärillään olevaan eristeainetta, ja etenkin kiinteässä aineessa, jossa eriste ei palaudu, se johtaa lopulta täydelliseen purkaukseen ja läpilyöntiin. Nesteillä, kuten öljy, osittaispurkaus ei välttämättä kehity pisteeseen, missä läpilyönti tapahtuu, johtuen nestemäisten eristeaineiden ominaisuudesta palautua. (Aura & Tonteri 2009, 30-35; OMICRON 2015)

Osittaispurkauksia voi muuntajissa aiheuttaa muutkin syyt, kuin edellä mainittu ilmakupla öljyssä. Näitä syitä ovat esimerkiksi öljyyn joutuneet muut vieraat johtavat aineet, kuten kuparihiukkaset ja ruoste, kuten myös johtavat aineet paperissa, esimerkiksi läpilyönnin aiheuttamat hiiliurat. Läpivientiin voi jäädä suuri kaasukupla huonon täytön johdosta, joka johtaa purkaukseen ja eristimien pinnalla voi tapahtua ulkoisia pintapurkauksia. Lisäksi kontaktiviati, sydämen heikko maadoitus ja terävät kulmat



sekä piikit jännitteisissä tai maadoitetuissa osissa voivat olla osittaispurkauksen aiheuttajia. (Hyvönen & kump. 2005, 21-23)

Osittaispurkausmittauksia tehdään muuntajan tehdasmittauksissa ja käyttöönnotossa, mutta niitä voidaan kuitenkin tehdä myös kentällä osana kunnonvalvontaa. Menetelmiä mittauksen tekemiseen on kuitenkin useita ja eri vaihtoehdot soveltuvat eri tavalla eri käyttötarkoituksiin. Eri mittausmenetelmiä ja niihin liittyviä kytkentöjä käsitellään tarkemmin standardeissa IEC-60270 ja IEC-62478. Mittauksia voidaan suorittaa sähköisillä, akustisilla ja sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvilla menetelmillä.

#### 5.4.2 Sähköiset menetelmät

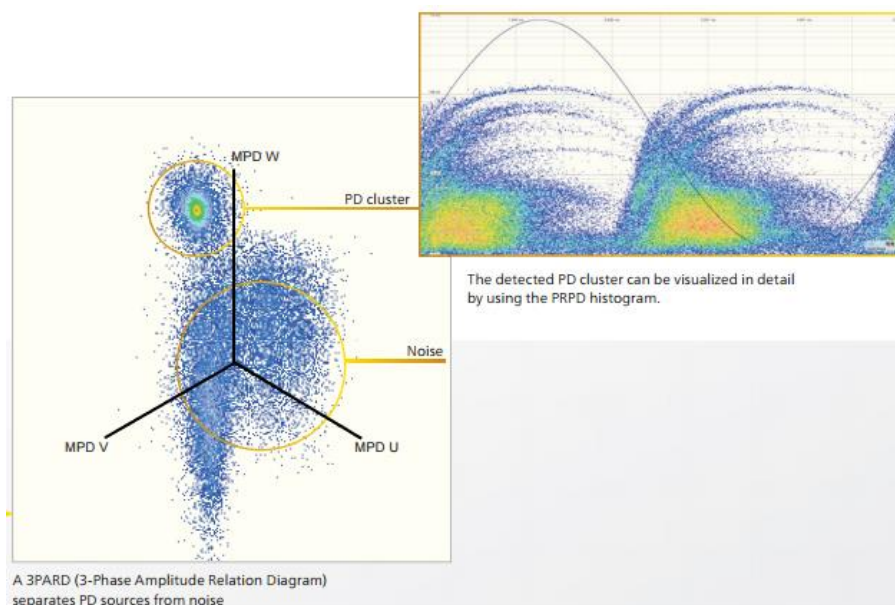
Mitattava suure osittaispurkausmittauksissa on yleensä näennäisvaraus  $q$ . Yksikkönä tälle käytetään IEC-standardien mukaisesti pikocoulombeja (pC), tai IEEE-standardien mukaisesti mikrovoltteja ( $\mu\text{V}$ ). Osittaispurkauksien haitallisuudesta kertova näennäisvaraus on verrannollinen purkauksien tehoon, energiaan ja purkauksien aiheuttaman vian laajuuteen. Toinen selvitettävä asia osittaispurkausmittauksissa on purkausten lukumäärä. Nämä molemmat mitataan vaihtojännitteellä, ottaen molemmille puolijaksoille omat arvot. Kyseisistä arvoista pelkästään ei saada selville syitä osittaispurkausten syntymiseen, joten mittauksissa verrataan niiden lisäksi myös syöttötaajuutta ja osittaispurkausten sijaintia. (OMICRON Diagnostic... 2016, 30-33)

Sähköisissä mittauksissa lähestymistapoja on useita eri vaihtoehtoja käytettävillä taajuuksille. IEC-60270:n määrittelemät perinteiset mittaukset toteutetaan vaihtojännitteellä alle 400Hz taajuudella tai tasajännitteellä. Kyseiset mittaukset ovat tarkkoja ja kalibroitavissa olevia, mutta niiden ongelmana on häiriöherkkyys. Tästä johtuen etenkin muuntajalla, joka sijaitsee käytössä ollessaan ympäristössä, jossa ulkoisia häiriöitä esiintyy runsaasti, menetelmät soveltuvat paremmin laboratoriotestauksiin.

Muita vaihtoehtoja sähköisiin mittauksiin ovat VLF- ja DAC-menetelmät. VLF-menetelmä (very low frequency) käyttää mittauksessa nimensä mukaisesti erittäin pientä taajuutta, eli 0,1Hz. Kyseisestä menetelmästä on ristiriitaisia tulkintoja. Jotkut tutkimukset väittävät, että syttymis- ja sammumisjännitteiden arvot ovat suunnilleen

samat tällä, ja 50Hz taajuudella. Toiset tutkimukset kuitenkin kumoavat väitteen paikkaansa pitävyyttä Aron ja kumppaneiden mukaan. DAC-menetelmä (damped AC) tarkoittaa vaimenevaa vaihtojännitettä, jota mitataan 50-1000Hz taajuudella. Mittauksia voidaan ottaa eri mittaisilta ajanjaksoilta ja tuloksia voidaan verrata jännitteen ja taajuuden muutokseen. (Aro & kump. 2015, 199-204)

Osittaispurkauksen sähköisiin mittauksiin on olemassa moderneja mittalaitteita, joilla pystytään mittaamaan kaikkien kolmen vaiheen purkausten aktiivisuutta samanaikaisesti. Näistä tuloksista on mahdollista piirtää 3PARD- (Three Phase Amplitude Relation Diagram) tai 3CFRD-diagrammi (Three Centre Frequency Relation Diagram). Diagrammeista nähdään jokaisen vaiheen aktiivisuus erikseen ja niistä saadaan eroteltua myös ulkoiset häiriöt, jolloin mittauksia voidaan suorittaa paremmin myös käyttöpaikalla. Kuvassa 17 esimerkki 3PARD-diagrammista. (Aro & kump. 2015, 199-204; CIGRE 2011, 59-60)



Kuva 17. Esimerkki 3PARD-diagrammista (OMICRON Diagnostic... 2016, 31)

#### 5.4.3 Akustiset menetelmät

Akustiset mittaustavat ovat yleistyneet osittaispurkausmittauksissa etenkin muuntajilla. Mittaustavasta johtuen ulkoiset häiriöt eivät vaikuta tuloksiin yhtä paljon kuin sähköisissä mittauksissa. Akustiset mittaukset mahdollistavat myös mittaamisen ilman

käyttökeskeytyksiä. Osittaispurkausten akustiseen tunnistamiseen ja paikallistamiseen öljypaperieristeisissä muuntajissa, keskittyy standardi IEEE C57.127-2007.

Osittaispurkaukset synnyttävät paineenvaihteluiden johdosta akustisia signaaleita, jotka etenevät laitteen sisäisesti, kunnes saavuttavat sen ulkopinnan. Näitä signaaleja voidaan anturoida, ja muuttaa ne sähköisiksi signaaleiksi. Purkaukset ovat hyvin lyhytkestoisia, ja tästä syystä niiden muodostamien signaalien taajuusalue on muutamista hertseistä useisiin satoihin kilohertzeihin. Akustinen mittausmenetelmä soveltuu hyvin metallikuorisille laitteille, tehomuuntajien lisäksi myös mittamuuntajille, GIS-järjestelmille, staattorikäimityksille, läpinvienneille, kaapelipäätteille ja kaapelijatkoksille. (Aro & kump. 2015, 199-204; CIGRE 2011, 59-60)

Akustisilla menetelmillä pystytään siis tunnistamaan osittaispurkausten esiintyminen, mutta myös paikallistamaan kohde, jossa ne esiintyvät. Eri laitteilla purkauksista syntyvä signaali esiintyy eri taajuusalueilla, joten samat anturit eivät välttämättä käy toisenlaisen laitteen mittauksiin. Muuntajalla äänisignaalit ovat tyypillisesti voimakkaimmillaan 100 – 400kHz taajuusalueella. (Aro & kump. 2015, 199-204)

Ongelmana akustisessa menetelmänä tehomuuntajien näkökulmasta on kuitenkin pieni herkkyys sisempien käämitysten purkauksille, kuin myös mahdolliset heijastumat säiliön seinistä. Menetelmää käytettäessä tuleekin antureita olla lukuisia ja signaalien tulkinnan pitää olla hyvin perusteellista. Mahdollista on käyttää herkkyyden parantamiseksi rinnalla toista mittaustapaa, esimerkiksi sähköistä- tai UHF-menetelmää. Virheenpoistomenetelmiä ulkoisten häiriöiden pienentämiselle on myös mahdollista käyttää. (CIGRE 2011, 59-60)

Akustinen mittausmenetelmä ei sovellu kuitenkaan jatkuvaan monitorointiin ja signaalien paikantaminen käyttöpaikalla on hankalaa signaalien vaimentumisien johdosta. Akustista signaalia ei myöskään voi kalibroida näennäisvaraukselle, mutta herkkyyden todentaminen on mahdollista.

#### 5.4.4 Sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvat menetelmät

Kolmantena vaihtoehtona osittaispurkausmittauksiin ovat sähkömagneettista säteilyä mittaavat menetelmät. Menetelmässä mitataan purkauksien aiheuttamia sähkömagneettisia häiriösignaaleja. Taajuuskaistoja on kolme; HF (High Frequency), VHF (Very High Frequency) ja UHF (Ultra High Frequency). Näistä kaksi jälkimmäistä, etenkin UHF, soveltuu tehomuuntajien osittaispurkausmittauksiin. Myöskään nämä mittaukset eivät ole erityisen herkkiä häiriöille ja toisin kuin akustisilla menetelmillä, vaimentumista ei juurikaan esiinny. (Aro & kump. 2015, 199-204)

UHF-menetelmä soveltuu hyvin jatkuvatoimiseen mittaukseen ja silläkin voidaan paikantaa osittaispurkauksen sijainti. Jos muuntajaan on asennettu UHF-anturit, niitä on yleensä korkeintaan kolme, ja tämä määrä ei kuitenkaan riitä tarkkaan paikantamiseen. Tästä syystä akustista mittausta saatetaan joutua käyttämään apuna. Ilmaisimilla havaitaan erimuotoiset taajuudet ja -pulssit, joten joskus UHF-menetelmällä saatetaan pystyä tunnistamaan myös vian luonne. Menetelmään perustuvat laitteet ovat kalliimpia, kuin muiden menetelmien laitteet ja jokainen laitetyyppi tarvitsee omanlaiset anturit. (Aro & kump. 2015, 199-204; CIGRE 2010, 1-2, 8)

Parhain hyöty sähkömagneettisen säteilyn tunnistamiseen perustuvilla menetelmillä saadaan, kun niitä käytetään toisen mittaamenetelmän, esimerkiksi DGA:n tai akustisen osittaispurkausmittausmenetelmän tukena. (CIGRE 2010, 1-2, 8)

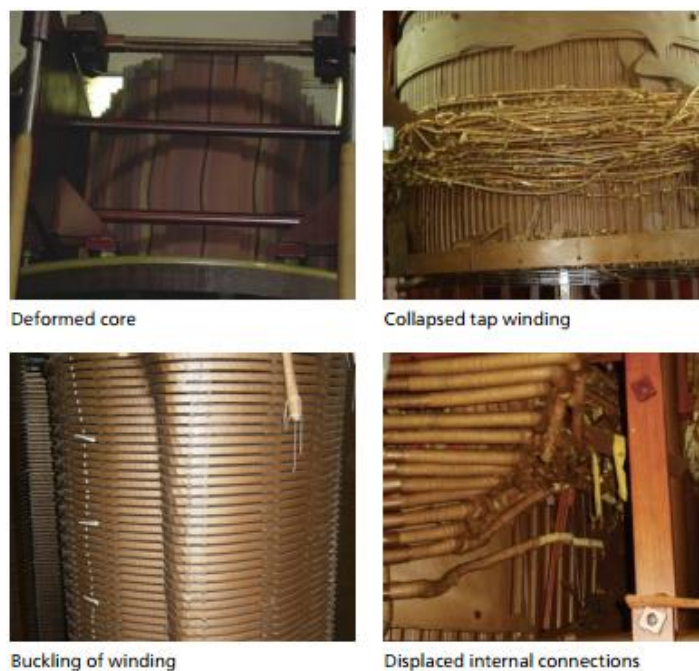
#### 5.4.5 Tulosten tulkinta

Kaikkia näitä menetelmiä yhdistää tulkinnan monimutkaisuus. IEC 60076-3 määrittää uusille muuntajille, joiden jännite  $U_m$  on runkoon nähden yli 72,5kV, sallituksi osittaispurkausten raja-arvoksi 100pC, jännitetason ollessa  $1,1 \times U_m / \sqrt{3}$  ja 300pC, jännitetason ollessa  $1,3 \times U_m / \sqrt{3}$ . Raja-arvoja ei ole kuitenkaan varsinaisesti määritelty käytettyjen muuntajien osittaispurkauksille, ja soveltaminen kyseisiin arvoihin ei ole mitenkään yksiselitteistä. Parhaiten osittaispurkausten kehittymistä saadaankin siis arvioidua, kun päästään vertaamaan tuloksia aiempiin mittauksiin, tehtaen ensimmäiset testit mukaan lukien. Tulosten paras vastaavuus ja oikeellisuus saadaan, kun mittauksen

on suoritettu mahdollisimman samalla tavalla ja järjestelyllä. Tällöinkin tulosten tulkinta vaatii suurta perehtymistä menetelmiin ja periaatteisiin.

### 5.5 FRA-mittaus

FRA-mittaus eli Frequency Response Analysis on mittaustapa, jolla muuntajien käämityksistä, kontakteista ja sydämistä voidaan tunnistaa erilaisia sähköisiä- ja mekaanisia vikoja. Mittausta kutsutaan niin sanotuksi sormenjälkimittaukseksi. Menetelmä on yleistynyt IEC-60076-18 standardin julkaisemisesta lähtien ja vakiinnuttanut paikansa yhtenä yleisimmistä muuntajille tehtävistä mittauksista. Kuitenkin toiset tahot suhtautuvat menetelmään varauksella, sen sisältäessä lukuisia mahdollisia häiriötekijöitä. Mittaus suoritetaan yleensä tehtaalla useaan kertaan, käyttöpaikalle kuljettamista ennen ja sen jälkeen, sekä käyttöönotossa. Kuvassa 18 esimerkkejä muuntajan muodonmuutoksista, joita menetelmällä voidaan havaita. (Aro & kump. 2015, 205-206; OMICRON Diagnostic... 2016, 24-25)

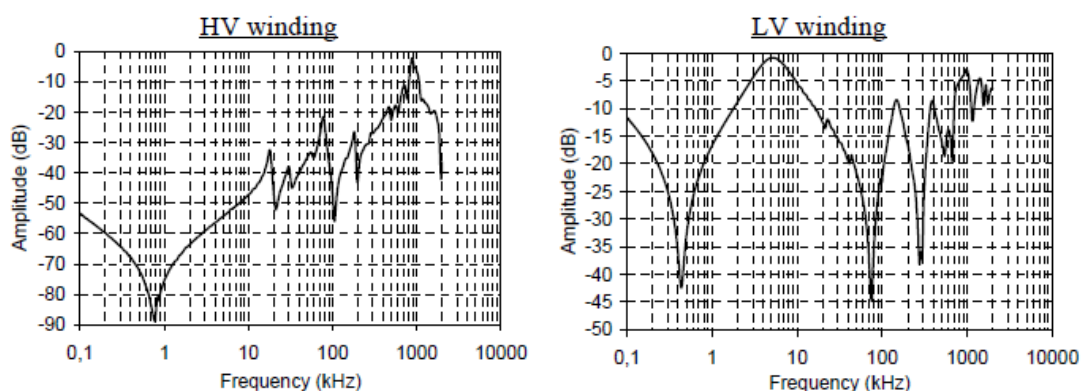


Kuva 18. Muuntajan aktiiviosan mekaanisia muutoksia (OMICRON Franeo 800, 2)

Muuntaja muodostuu monimutkaisista yhdistelmistä kapasitansseja, induktansseja ja resistansseja, ja jokaisella muuntajalla nämä ovat yksilölliset. Viat voivat aiheuttaa näissä yhdistelmissä muutoksia, jotka voidaan havaita FRA menetelmällä. Omicronin

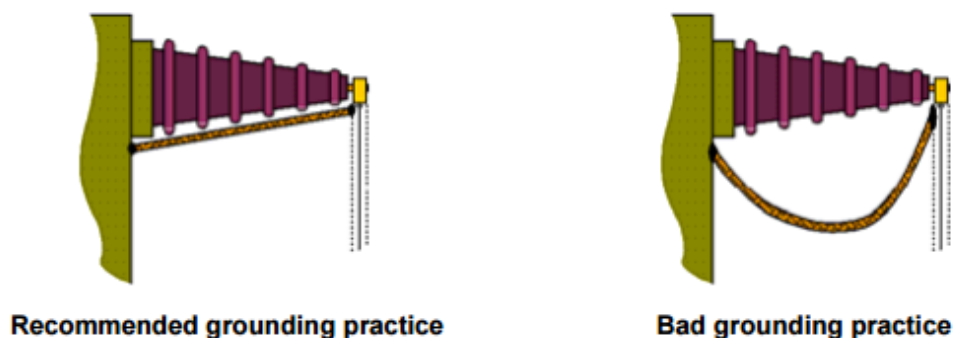
mukaan mikään toinen mittaussuunnitelma ei ole yhtä herkkä tunnistamaan muuntajan aktiiviosan mekaanista muutosta kuin FRA. Mittauksessa ei myöskään tarvita suurjännitettä, joten mittalaitteet pysyvät kompaktin kokoisina sekä suhteessa hinnaltaan kohtuullisina. (OMICRON Franeo 800 2016, 4-5)

Mittauksessa kytketään sinimuotoinen vaihtojännite, muuttuvalla taajuudella, jokaisen käämin yli erikseen. Muiden käämien päät ovat mittauksen aikana avoimina. Mittauksessa käytetään kolmea kaapelia siten, että toiseen käämin päähän tulee signaali sekä referenssi ja toisesta päästä mitataan vaste. Kytkennästä lasketaan sisääntulo- ja vastejännitteiden arvojen avulla siirtofunktio, kaavalla  $20 \cdot \log_{10}(U_{out}/U_{in})$ . Tulokset ilmoitetaan desibeleinä ja niistä piirretään käyrä, josta nähdään esimerkki kuvassa 19. Taajuutta tarkastellaan yleensä logaritmisella asteikolla.



Kuva 19. FRA-tulos yläjännite- sekä alajännitekäämistä mitattuna (CIGRE 2008, 18)

Mittakaapeleiden tulisi olla mittausta suoritettaessa suojattuja ja mahdollisimman lyhyitä ja riittävän poikkipinnan omaavia, eivätkä ne saa kiertyä. Tämä siksi, että välttyäisiin ylimääräisiltä mittaustuloksia vääristäviltä induktansseilta. Myös kaapelien impedanssien tulisi olla samat. Suojauksen maadoittaminen tulee tehdä samankaltaisesti molemmin puolin, siten että suojausjohdin kulkee mahdollisimman lähellä tukieristimen reunaa, kuitenkin koskettamatta eristintä. Kuvasta 20 nähdään hyvä- ja huono esimerkki kyseisestä maadoittamisesta. (CIGRE 2008, 17-20)



Kuva 20. Esimerkki väärästä ja oikeaoppisesta mittauskaapelin vaipan maadoittamisesta (CIGRE 2008, 17)

Tulosten tulkinnassa on ajatuksena verrata muodostunutta käyrää aiempiin tuloksiin ja siksi mittaukselle ole varsinaisia raja-arvoja. Mittaustuloksista muodostettua käyrää verrataan tyypillisesti saman muuntajan aiempiin mittauksiin, samantyyppiselle muuntajalle tehtyihin mittauksiin, tai saman muuntajan eri vaiheiden väliltä tehtyihin mittauksiin, riippuen siitä mitä on saatavilla. Parhaan vertauskohteen antaa kuitenkin saman muuntajan aiemmat mittaukset ja niitä tulisi ensisijaisesti pyrkiä vertailukohteenä käyttämään. Mittalaitteen, kaapelien ja kytkentöjen tulisi olla kuitenkin samanlaiset, verratessa vanhoihin mittauksiin. (Cigre 2011, 56)

Verratessa tuloksia, voidaan peruseriaatteena pitää, että 20Hz - 10kHz taajuudet kertovat pääasiallisesti muuntajan rautasydäimestä tai kierrossuluista. Kuitenkin myös jäännösmagnetismi voi aiheuttaa muutosta tälle taajuusalueelle, joten on tärkeää, että käämin resistanssimittausta ei suoritettaisi ennen FRA:ta. 10kHz – 500kHz alueen muutokset kertovat mahdollisista käämien rakenteen muutoksista, siten että alle 150kHz taajuusalue kertoo enemmän käämien välisistä suhteista, kun taas siitä ylöspäin muutokset voivat indikoida käämitysten siirtymisestä aksiaalisesti tai radiaalisesti. Loppualue, eli 500kHz – 1MHz voi kertoa käämikytkimeen, maadoituksiin tai käämien liitoksiin liittyvistä vioista. Pääsääntöisesti siis matalampi taajuusalue viittaa induktiivisiin osiin, kun taas korkeampi, kapasitiivisiin. Eri muuntajilla taajuusvasteet kuitenkin menevät hieman eri tavalla. (Locarno 2012, 6-7; CIGRE 2008, 33-43)

## 5.6 TTR-mittaus

TTR-mittauksella (Transformer Turns Ratio) voidaan nimensä mukaisesti selvittää muuntajan muuntosuhde. Muuntosuhdemittaukset suoritetaan muuntajatehtaalla valmistuksen yhteydessä olevissa mittauksissa useinkin kertaan, mutta ne tehdään myös muuntajan ollessa huollossa. Mittaus on yksinkertainen tehdä, mutta käyttöpaikalla sitä ei yleensä tarvitse tehdä, sillä muuntajalla ei juurikaan ole ikääntymiseen ja viikaantumiseen liittyen mekanismeja, jotka muuntosuhdetta pääsisi muuttamaan. (OMICRON Diagnostic... 2016, 14-15; Tuhkanen 2017)

Mittaus suoritetaan yleensä yläjännitepuolelta alajännitepuolelle, jotta vältettäisiin korkeita jännitteitä mittarilla. Mittaus voidaan suorittaa yksi- tai kolmivaiheisena riippuen käytettävästä mittalaitteesta ja mittausta tehdessä pitää jälleen huomioida, että sydän ei ole magnetoitunut ja maadoitukset ovat kunnossa. Näillä perusteilla mitaten saadaan tulokset, joita verrataan muuntajan tyyppikilpeen. IEC-60076-1 sekä IEEE-C57.152 määrittelevät, että tulokset eivät saisi vaihdella nimellisarvoihin verrattua yli 0,5%. (OMICRON Diagnostic... 2016, 14-15)

## 5.7 Oikosulkuimpedanssi, FRSL

Muuntajan oikosulkuimpedanssi on olennainen arvo sähköverkon kannalta. Oikosulkuimpedanssiin voi vaikuttaa muuntajan suunnittelussa ja valmistuksessa ja toisinaan muuntajan tilaajalla on vaatimukset oikosulkuimpedanssin arvoille. Muuntajan oikosulkuimpedanssin arvo vaikuttaa muun muassa muuntajien rinnankäyttöön, jännitteenaleniin ja oikosulkuvirtoihin. (ABB 2004, 146)

Olenaisempi asia muuntajan kunnonvalvonnan kannalta on kuitenkin oikosulkuimpedanssin sekä vuotoreaktanssin mittauksella havaittavat käämien muodonmuutokset. Vuotoreaktanssi ilmaisee oikosulkuimpedanssin reaktiivista osaa. Oikosulkuimpedanssin arvoa voidaan verrata tehtaalla otettuun arvoon, ja ero näiden välillä on yleensä alle 1%. Yli 2% eroa tehdasarvoihin tai toisiin vaiheisiin verrattaessa ei tulisi hyväksyä, ja kun kyseessä on yli 1% ero, suositellaan tehtävän lisämittauksia, esimerkiksi FRA. (CIGRE 2011, 55)



FRSL-mittauksessa (Frequency Response Of Stray Losses) mitataan oikosulkuimpedanssin resistiivistä komponenttia muuttuvalla taajuudella. Mittauksessa saadaan määritettyä myös oikosulkuimpedanssi ja vuotoreaktanssi käyttötaajuudella. Myös tämä mittausmenetelmä pystyy tunnistamaan käämitysten muodonmuutoksia ja se on hyvä menetelmä rinnakkaisten, yhdensuuntaisten johtimien oikosulkujen ja pyörrevirtojen aiheuttamien kuumien pisteiden tunnistamiseen. (CIGRE 2000, 5-6; OMICRON Diagnostic... 2016, 20)

Tämäkään mittaus ei sisälly perinteisiin kunnonvalvontamittauksiin, mutta sitä voidaan käyttää tarkempaan analysointiin. Tuloksien tulkinta perustuu tässäkin mittauksessa käyrien vertailuun aikaisempien tulosten ja eri vaiheiden välillä. Muodostuneet käyrät ovat eksponentiaalisia ja lievästi nousevia. Etenkin korkeammilla taajuuksilla voidaan jo 3% muutoksen ajatella kertovan rinnakkaisten johtimien oikosuluista. Cigren (2011) mukaan induktanssin muutoksen raja-arvo on 2,5% vaiheiden välillä, ja resistanssilla raja-arvo on 15%. DGA-mittausta suositellaan otettavaksi tämän mittauksen aikana, sillä viat joita voidaan FRA:lla havaita näkyy yleensä myös DGA:ssa. (CIGRE 2011, 60; CIGRE 2000, 5-6; OMICRON Diagnostic... 2016, 20-21)

## 5.8 Tyhjäkäynti- eli magnetointivirta

Muuntajan tyhjäkäyntivirta koostuu pääasiallisesti rautasydämen magnetointivirrasta. Tästä johtuen tyhjäkäyntivirta on ideaalisessa tilanteessa häviöttömällä muuntajalla puhtaasti induktiivista loisvirtaa. Todellisessa tilanteessa tulee mukaan hajareaktanssista aiheutuvia häviöitä, hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä sekä virtalämpöhäviötä aiheuttava ensiökäämin resistanssista johtuva pieni resistiivinen komponentti.

Mittaamalla tyhjäkäyntivirta ja vertaamalla sitä aikaisempiin tuloksiin, sekä vertaamalla eri vaiheiden tuloksia toisiinsa voidaan muuntajasta tarkkailla rautasydämen kuntoa, mahdollisia kierrossulkuja sekä käämikytkimen johdotuksen ja kontaktien kuntoa. Vauriot ja löystyminen rautasydämessä kasvattavat sen reluktanssia, mikä johtaa tyhjäkäyntivirran arvon muutokseen. Mahdollisten kierrossulkujen havaitsemiseksi mittausjännitteen tulee olla korkea. (Aura & Tonteri 2009, 273-274; OMICRON Diagnostic... 2016, 16-17; Tuhkanen 2017)

Tuloksia tulkittaessa tulee huomioida, onko muuntajan sydän kolme- vai viisipylväinen. Saman tyyppisillä vaiheilla, erot tulosten välillä, saavat olla korkeintaan 5-10%. Käämitysten ongelmia voidaan epäillä, jos jokaisen vaiheen tulokset eroavat toisistaan. Mahdollista on myös, että tämä johtuu magnetisoituneesta sydäimestä, jolloin demagnetointi ja mittauksen toistaminen ovat suositeltavat toimenpiteet. Myös FRAM-mittausta voidaan käyttää, kyseisessä tilanteessa sydämen kunnon tarkempaan diagnosiin. (OMICRON Diagnostic... 2016, 17)

### 5.9 Jatkuvatoiniset mittaukset

Muuntajiin on myös mahdollista asentaa erilaisia jatkuvatoimisia mittalaitteita, jotka mittaavat haluttuja suureita tietyin väliajoin muuntajan käytön aikana. Näissä mittauksissa on etuna se, että säännöllisesti mitatessa, vikojen kehittymisen havaitseminen ja tulkitseminen on helpompaa, sillä arvojen muutos nähdään varmemmin. Mittalaitteiden tuottamaa dataa voidaan seurata etänä ja älykkäät laitteet osaavat verrata tuloksia raja-arvoihin ja analysoida tulosten kehittymistä hieman itsekin. (ABB 2004, 108; Vaisala Optimus 2016, 2)

Myös viat voidaan havaita jo mahdollisesti aiemmassa vaiheessa verrattuna harvemmin suoritettaviin erikseen tehtäviin kunnonvalvontamittauksiin. Jatkuvilla mittauksilla ei pystytä kuitenkaan yhtä tarkkaan kunnon analysointiin, kuin useampaa sähköistä mittausta käytettäessä. Jatkuvatoinisia mittauksia ja harvemmin suoritettavia kunnonvalvontamittauksia kannattaakin siis käyttää tukemaan toisiaan. Kuitenkin jo pelkästään liuenneiden kaasujen sekä kosteuden seuraaminen jatkuvana vähentää Vaisalan mukaan muuntajien vikaantumisia puolella. (Vaisala Outages happen 24/7... 2016, 2)

Yleisimmät jatkuvat kunnonvalvontamittaukset muuntajissa perustuvat öljystä suoritettaviin mittauksiin. Laitteita tarjoaa useat valmistajat, ja laitteita löytyy eri käyttötarkoituksiin. Toisilla laitteilla mitataan vain kosteutta ja vedyn määrää öljystä, mutta toiset laitteet taas pystyvät suorittamaan jopa seitsemän kaasun DGA:n. Eri valmistajien mittalaitteet eroavat toisistaan ominaisuuksien perusteella. Mitattavat suureet pysyvät samana, mutta tapa suorittaa mittaus ja mittalaitteen rakenne vaihtelevat hieman.

(DoblePRIME; GEHydran 2016; Meter test equipment 2015; Vaisala MHT410 2016; Vaisala Optimus 2016)

Öljyanalyseissa paremmat mittalaitteet käyttävät kaasujen poistossa tyhjäteknikkaa hyväkseen. Tämä auttaa tasaisempiin mittaustuloksiin, sillä se vähentää öljyn lämpötilasta, paineesta ja tyypistä johtuvia vaihteluita mittaustuloksissa. Järjestelmien rakenne on näissä laitteissa myös hermeettisesti suljettu, joten ulkopuolelta öljyn sekaan ei pääse tätä kautta kosteutta tai happea. Laitteisiin voidaan asettaa myös raja-arvoja eri kaasuille, joihin se vertaa mitattuja arvoja. Tuloksia voidaan laitteista tutkia ja analysoida myös etänä. (Pro Maint 2013, 4-5; Vaisala optimus 2016, 2)

Öljyn analysoinnin lisäksi jatkuvatoimisiin mittauksiin on markkinoilla tarjolla laitteita, joilla voidaan mitata läpivientien häviökerrointa, käämikytkimen kuntoa muuntajassa tapahtuvia osittaispurkauksia, kuormitusvirtaa, jännitteitä. Toiset järjestelmät, jotka pohjautuvat jatkuvatoimisiin mittauksiin pystyvät myös analysoimaan ja laskemaan käämityksen kuumia pisteitä, eristyksen ikääntymistä, muuntajan jäähdytystä sekä paperin kosteutta. (ABB 2004, 108; Siemens 2011, 3-4)

Muun muassa Siemensin tarjoama järjestelmä nimeltä Sitram tarjoaa perusratkaisuna järjestelmää, joka laskee kääminlämpötilaa ja kuumia pisteitä kuormituksen ja öljyn lämpötilan perusteella, sekä määrittää tämän perusteella, koska huolto tulisi suorittaa. Nämä molemmat arviot pohjautuvat IEC/ANSI-standardeihin. Perusjärjestelmään kuuluu myös kaasuanalyysi ja kosteusanalyysi öljystä. Laajennuksena järjestelmään on saatavilla käämikytkimen kunnontarkkailu, läpivientien ja osittaispurkausten monitorointi sekä tarkempaa öljyanalysointia. Myös muilta valmistajilta löytyy omia järjestelmiään ja erityistä syytä Siemensin esimerkiksi ottamiseen ei ole. (Siemens 2011, 3-4)

## 6 MARKKINAPOTENTIAALI

Muuntajan tekninen käyttöikä voi nousta jopa 60 vuoteen huoltojen ansiosta. Kuitenkin myös erityisissä olosuhteissa, kuten teollisuus, jossa kuormitus on koko ajan lähellä huippua tai muuntaja altistuu käyttötarkoituksensa johdosta jatkuvasti päälle/pois kytkennöille, voi muuntaja olla käyttökelvoton jo 10 vuoden jälkeen. Tyypillisesti muuntajat vaihdetaan uuteen ”varmuuden vuoksi” noin neljänkymmenen vuoden käytön jälkeen. Avaavia huoltoja suoritetaan muuntajille tyypillisesti 25 vuoden välein, eli niitä mahtuu muuntajan käyttöikään 1-2. (Paukkunen 2017; Lauri 2017; Tuhkanen 2017)

Kunnossapito muuntajilla, kuten muillakin laitteilla, voidaan jakaa reagoivaan ja ennakoivaan kunnossapitoon. Reagoivassa periaatteena voi olla, että laitteen toimiessa, sille ei tarvitse tehdä mitään. Huoltoa tehdään siis vasta, kun ongelma tai vika esiintyy. Reagoivaa kunnossapitoa on myös aikaan perustuva kunnossapito, joka usein voi sijoittua väärään aikaan ajatellen muuntajan käyttöikää ja kuntoa. Ennakoivassa kunnossapidossa sen sijaan voidaan tarkkailla muuntajan todellista huollontarvetta käyttötietoihin ja vikatilanteisiin perustuvalla analysoinnilla sekä ennakkoon tehdyn suunnitelman mukaisesti. Tärkeimpänä keinona ennakoivassa kunnossapidossa on kuitenkin muuntajan todellisen kunnan selvittäminen mittausten avulla, jota hyväksi käyttäen saadaan myös määriteltyä todellinen huollontarve sekä sen ajankohta.

Tavoitteena kunnanvalvontamittauksilla muuntajia ajatellen on käyttöiän pidentäminen ja käyttövarmuuden lisääminen. Näiden pohjalta voidaan laatia huoltosuunnitelmia, jotka taas auttavat ennakoimaan tarvetta korjauksille sekä parannuksille. Kyseisillä toimenpiteillä voidaan saavuttaa merkittäviäkin säästöjä käyttö- ja huoltokuluissa. Myös korjaukseen käytettävien investointien ennustettavuus paranee säännöllisellä kunnanvalvonnalla. (ABB sähköasemapäivät 2006)

Kunnanvalvontatoimet, joita Suomessa eniten suoritetaan, ovat silmämääräisiä tarkastuksia, sekä joissain tilanteissa DGA-analyyseja. Sähköiset kunnanvalvontamittaukset eivät kuitenkaan ole kovin paljoa yleistyneet, eikä niitä tarjoavia yrityksiä ole montaa.

Etenkin pienet jakelumuuntajat ovat suhteessa halpoja komponentteja, joihin ei välttämättä kannata kalliita mittauksia tai huoltoja tehdä, vaan vaihtaa koko laite uuteen. Kuitenkin suuremmilla jakelumuuntajilla ja etenkin päämuuntajilla huoltokustannukset sekä uuteen laitteeseen tarvittavat investoinnit ovat erittäin suuria. Tähän tilanteeseen voisi olla suurta hyötyä, jos käytössä olisi keino, millä todeta muuntajan kunto. Asiantunteva mittaja voisikin määrittää muuntajan huollontarpeen, tai antaa arvion jäljellä olevasta teknisestä käyttöiästä, jolloin ylimääräisistä kustannuksista voitaisiin päästä eroon, ja suurempia kustannuksia siirtää ja suunnitella.

Toiselta näkökannalta, muuntajan kunnan laskiessa pisteeseen, jossa huollontarve on suuri, tai se on herkkä vaurioille pienissäkin vikatilanteissa, voitaisiin tilanne tunnustaa riittävän ajoissa ja välttyä mahdollisilta suurilta käyttökatkoilta, tai jopa muuntajapaloilta, jotka lähes aina tekevät laajaa tuhoa.

Eniten huoltoa tarvitseva osa muuntajassa on käämikytkin. Se on myös ainoa laite muuntajan sisällä, missä on liikkuvia osia. Tästä syystä käämikytkinhuolto tehdään yleensä säännöllisesti n. 5-6 vuoden välein. Huollon ajaksi tarvitaan muuntajalle keskeytys, ja aikaa huoltoon menee muutama päivä. Suomessa suurin osa käämikytkimistä on Reinhausenin valmistamia, ja he vaativat huollon tekijäksi sertifioidut henkilöt, takuun säilyttämiseksi. Kaikesta tästä voidaan päätellä huollon olevan kallis. Käämikytkimien kunnan tarkastamiseksi on kuitenkin sähköisiä mittauksia, jolla huollon tarpeen voisi tunnustaa, ja huoltojen ajankohtia pääsisi sovittamaan todellisen tarpeen mukaan. Näillä mittauksilla voisi siis olla markkinoilla suurta potentiaalia. (Lauri 2017; Tuhkanen 2017)

## 6.1 Mittalaitteet

Tutustutaan hieman erilaisiin kenttämittauksiin soveltuviin mittalaitteisiin. Ominaista suurjännitealalla käytettäville koestuslaitteille on korkea hinta. Tästä syystä mittauspalvelua ajatellessa, tulee miettiä mitä kaikkia mittauksia kannattaa suorittaa ja miten saataisiin mahdollisimman laaja kuva muuntajan kunnosta mahdollisimman vähin mittauksin ja laittein. Omicron on noussut esille monesti lähinnä hyvien materiaalien ja saatavilla olevien tutkimustietojen johdosta. Toisena tunnettuna mittalaittevalmistajana

tarkkailuun valitsin yrityksen nimeltä Megger. Muitakin merkkejä on, ja niitä kannattaa tarkemmin vielä vertailla mahdollista investointia suunnitellessa.

Yrityksellä on käytössä Omicron CPC100 mittalaite, joka mahdollistaa jo yksinään useita muuntajien kunnonvalvontaan liittyviä mittauksia. Tarkastellaan siitä syystä tämän laitteen mahdollisuuksia muuntajiin liittyvissä mittauksissa.

CPC100:lla voidaan ilman lisäosia muuntajista mitata muuntosuhde, tyhjäkäyntivirta, kytkentäryhmä, oikosulkuvirta ja vuotoreaktanssi. Lisäksi laite mahdollistaa FRSL-mittauksen tekemisen, ja siinä on demagnetointiohjelma, joka nousee tärkeäksi DC-mittauksia tehdessä. Resistanssimittaukset, ja käämikytkimen kunnon tarkastaminenkin onnistuu laitteella, mutta siihen suositellaan hankittavaksi lisälaitetta, joka taas mahdollistaa DRM-mittauksen lisäksi käämikytkimen puhdistusohjelman ajamisen. (OMICRON CPC100 Reference manual)

Häviökertoimen mittaukseenkin CPC100 soveltuu lisälaitteen kanssa. Omicron itse tarjoaa laitetta, jonka kanssa mittaus onnistuu käyttöraajuudella, tip-up testinä ja muuttuvalla taajuudella. Taajuusalue kuitenkin laitteella on 15-400Hz, joten laajaa dielektrisen vasteen mittausta sillä ei saa tehtyä. Meggeriltä CPC100:a vastaava laite on TRAX, sillä erotuksella, että Meggerin laite on suunniteltu lähinnä muuntajien testaukseen, ja täten mahdollisuudet ovat hieman laajemmat. Dielektrisen vasteen mittaukseen löytyy myös omia laitteita kummaltakin laitevalmistajalta, ja ne ovat molemmat pienikokoisia ja helposti liikuteltavissa. Ero Meggerin IDAX sarjan ja Omicronin DIRANA-laitteen välillä on se, että Omicronin laite käyttää dielektrisen vasteen mittauksen kanssa yhdistettynä käänteispolarisaatiovirran mittausta, joka myös pidentää mittausaikaa 20 minuutista kahteen tuntiin, mutta toisaalta antaa myös hieman laajempaa informaatiota. (Megger 2016, 10; OMICRON DIRANA 2016)

Eristysvastusmittaukseen tarvitaan omat laitteet, mutta niitä löytyy markkinoilta paljon. Hinta kyseisillä mittalaitteilla on myös suhteessa halpa, joten niitä en sen tarkemmin käsittele. Tärkeää huomioitavaa on kuitenkin mittauksen jälkeinen demagnetointi, jotta välttyttäisiin mahdollisilta suojareiden laukeamisilta sähköasemalla, johtuen suuresta kytkentävirtasysäyksestä. Kytkentävirtasysäys rasittaa myös itse muuntajaa mekaanisesti.

FRA-mittaus on suhteellisen uusi menetelmä ja siihen voidaan suhtautua monesti jopa epäilevästi, sillä mittauksessa on niin paljon mitattavasta laitteesta riippumattomia, mahdollisia häiriöitä, jotka voivat muuttaa tuloksia. Menetelmä on kuitenkin käsitelty standardissa IEC-60076-18, ja se on yleistynyt paljon muuntajien kunnonvalvontamittauksissa. Mielestäni FRA-mittausta ei voida laskea muuntajan perusmittauksiin, eikä siitä pelkästään voida todeta muuntajan kuntoa, mutta siitä saadaan hyvää lisäinformaatiota muiden mittausten rinnalla käytettäessä, ja tietyissä tilanteissa, esimerkiksi kuljetuksen aiheuttamien mekaanisten muutosten toteamisessa. Mittaus on vaikea suorittaa juuri mahdollisten häiriöiden johdosta, ja tulosten tulkinnassa pitää osata erottaa nämä häiriöt todellisista muutoksista.

Huomioitavaa FRA-laitteen hankinnassa on muiden mittauksia suorittavien tahojen laitteiden tyyppi. Molemmilta, Omicronilta sekä Meggeriltä, löytyy tähän laitteet, kuten myös monilta muiltakin laitevalmistajilta. Kuitenkin jos laite ei ole saman tyyppinen, kuin se laite, millä vertaustulokset ovat mitattu, on tulosten vertaaminen ja muutosten havaitseminen on vaikeaa. Lisäksi mittauskaapelien, sekä kytkentään käytettävien liittimien tulisi olla samanlaiset, korkeataajuisten signaalien ollessa herkkiä pienillekin muutoksille. (Lauri 2017; Tuhkanen 2017)

Osittaispurkausmittauksiin on olemassa lukuisia laitteita, sillä mittausmenetelmiäkin on useita, kuten aiemminkin todettu. Näiden valitsemiseen liittyy lukuisia hankaluuksia, kun näkökulmana on muuntajien kenttämittaukset. Ulkopuoliset häiriöt vaikuttavat eri tavoin eri menetelmiin, ja eri menetelmät havaitsevat purkauksia hieman eri tavalla. Laitteet osittaispurkausmittauksiin ovat kalliita, ja yleensä esimerkiksi muuntajille tarkoitetut laitteet eivät käy muiden laitteiden, kuten pyörivien koneiden tai kaapelien mittauksiin. Näistä syistä voidaan todeta syvemmän perehtymisen olevan tarpeellista ennen kuin voi ajatella mahdollisia laitehankintoja osittaispurkausmittauksiin.

## 6.2 Mittauspalvelu

Kattavan mittauspalvelun tulisi sisältää tietty kokonaisuus mittauksia, jotka suoritetaan perinteisinä mittauksina. Tämän lisäksi tulisi olla lisämittauksia, joilla kunnon

analysointi voidaan viedä syvemmälle tarvittaessa. DGA olisi hyvä tehdä, jotta havain-  
toja voidaan verrata ristiin sähköisten mittausten antamien tulosten kanssa.

Alla listattuna eri mittaukset, joita palveluun voisi sisällyttää, jotta saavutettaisiin mah-  
dollisimman kattava selvitys kohtuullisella määrällä eri mittauksia. Lisälaitteita ky-  
seisten mittausten suorittamiseen tarvitaan häviökertoimen, FRA:n, dielektrisen vas-  
teen ja eristysvastuksen määrittämistä varten.

#### Perusmittaukset

- Käämin resistanssimittaus staattisella ja dynaamisella menetelmällä
- Eristysvastus, absorptiokerroin ja PI
- Häviökerroin muuttuvalla 15-400Hz taajuudella
- DGA

#### Lisämittaukset

- FRA
- Dielektrinen vaste
- FRSL
- Häviökerroin ja tip-up test läpivienneille

Perusmittausten rakenne on ajateltu siten, että resistanssimittauksilla havaitaan vauri-  
oita johtimissa, kierrossulkuja käämityksessä, sekä mahdollisia kontaktivikoja esimer-  
kiksi läpivienneissä. Dynaamisella resistanssimittauksella tarkastellaan käämikytki-  
men kuntoa. Eristysvastus ja häviökerroin kertovat molemmat eristyksen kunnosta,  
mutta mittauksilla on myös eroja, joiden johdosta suosittelen molempien sisällyttä-  
mistä kokonaisuuteen. Yksinkertaistettuna, eristysvastuksen raja-arvoja on helpompi  
ja varmempi tulkita suoraa standardeihin vedoten, kun taas häviökertoimessa pelkkä  
yksi arvo käyttötaajuudella voi helposti antaa väärää informaatiota. Muuttuvalla taa-  
juudella mitatessa nämä virheet voidaan havaita. Eristysvastusmittaus ei kuitenkaan  
havaitse mittausmenetelmästä johtuen osittaispurkauksia laitteessa toisin kuin häviö-  
kerroinmittaus, joten jos jompikumpi pitäisi jättää mittauksista pois, olisi se eristys-  
vastusmittaus, ja siinä tilanteessa häviökerroin tulisi määrittää laajemmin, kuin vain  
käyttötaajuudella.



Kyseiset mittaukset yhdistettynä DGA:han antavat hyvän arvion mitattavan laitteen kunnosta. Kuitenkin erityisen epäselvissä tilanteissa voidaan tarvita tarkempaa analyysia, jolloin kuvaan astuu lisämittaukset. Dielektrisellä vasteella voidaan määrittää todellinen kosteus eristeessä sekä havaita, sijaitseeko kosteus selluloosassa vai öljyssä. FRA-mittausta sen sijaan kannattaa käyttää sormenjälkimittauksena varsinkin, jos muuntajasta vastaava mittaus on jo tehty. Tässä täytyy kuitenkin huomioida erinäiset ongelmat, joita on käsitelty aiemmin työssäni. Mittauksella kuitenkin oikein suoritettuna havaitaan mekaanisia muutoksia. FRSL mittausta voidaan käyttää tilanteessa, jossa epäillään muuntajan häviöiden kasvaneen. Mittaus tunnistaa yhdensuuntaisten johtimien oikosulkuja ja lisääntyneitä pyörrevirtoja, jotka voivat aiheuttaa kuumia pisteitä. Läpivientien kuntoa voidaan myös tarvittaessa mitata häviökertoimen avulla samalla laitteistolla, kuin muutenkin häviökerrointa, mutta sitä ei välttämättä tarvitse erikseen ottaa, jos niissä ei epäillä vikaa.

Kyseisten mittausten suorittamiseen tarvittavat laitehankinnat tarvitsevat suuret investoinnit. Lisämittauksiin tarvittavat laitteet maksavat suunnilleen saman verran, kuin perusmittauksiinkin, ja erittäin karkean arvion mukaan koko paketin hinta on 80k€ paikkeilla.

Olemassa olevalla CPC100 laitteella on mahdollista suorittaa kuitenkin hyvin pelkän käämikytkimen kunnonarviointiin perustuvat mittaukset. Käämikytkimen kunnonvalvontapalvelua ajatellessa, suositellaan myös hankittavaksi Omicronin laitteeseen lisäosa SB1, joka mahdollistaa mittauksen suorittamisen nopeammin ja käämikytkimen puhdistusohjelman ajamisen. Tällä mittauksella olisi markkinoilla potentiaalia aiemmin esitettyjen perustelujen pohjalta, eikä laitehankintojen hinnat nousisi järin suuriksi.

### 6.3 Muut kehityskohteet

Investointien suuruudesta johtuen suositellaan mittaustarpeiden selvittämistä tarkemmin asiakkailta, jotta voidaan selvittää mittausten hinta, ja näiden tietojen pohjalta arvioida investointien takaisinmaksuaikaa. Kuitenkin investointien muut mahdollisuudet tulee ottaa huomioon hankintaa ajatellessa, sillä kyseisillä laitteilla kyettäisiin mitata kattavasti myös esimerkiksi pyörivien koneiden kuntoa.

Osittaispurkausmittauksia muuntajalle ei tämän työn perusteella oikein voi suositella. Mittaukset vaativat paljon lisää perehtymistä, sillä eri vaihtoehtoja mittaustavoille on erityisen paljon. Lisäksi muuntajasta voidaan havaita osittaispurkauksen muillakin menetelmillä kohtalaisesti, ja kenttäolosuhteissa on lukuisia häiriötekijöitä. Kyseisille mittauksille voisi olla enemmän tarvetta muilla laitteilla. Osittaispurkausmittauksia ei Suomessa juuri tehdä, eikä alalla ole siitä syystä juurikaan asiantuntijuutta, joten kyseiseen alaan kannattaisi mahdollisesti perehtyä syvemmin, mittausten tarpeen ollessa kuitenkin melko merkittävä.

Käämikytkimien mittauspalvelua suositellaan harkittavaksi DRM-mittaukseen perustuen. CPC100 pystyy tähän mittaukseen, mutta lisäosa SB1, on myös suositeltava. Dynaamisen resistanssimittauksen tuloksien tulkintaa tulee myös selvittää hieman lisää, jos mittauksiin ryhtyy. Lisäksi TTR mittauksen lisäarvoa käämikytkimen kunnon määrittämiseen kannattaa pohtia.

Muuntajan suojalaitteet sekä silmämääräiset tarkistukset jäivät tässä työssä käsittelemättä. Muuntajien kunnonvalvontapalveluita tarjoavan yrityksen olisi hyvä tarjota myös muiden mittausten ohella tärkeimpien suojalaitteiden koestusta sekä silmämääräisten tarkistusten tekoa. Jatkokehityksenä voisi myös näihinkin osa-alueisiin tutustua tarkemmin, jotta tarjonnasta saataisiin kattava.

## 7 YHTEENVETO

Työ muuntajien kunnonvalvontamittauksista oli haastava. Aihe oli laaja, ja materiaalin löytäminen oli alkuvaiheessa vaikeaa. Pohjatietoa muuntajista ei ollut kovinkaan paljoa työtä aloittaessa, joten aihe piti opiskella kokonaan työn edetessä. Tietojen kasvaessa joutui myös useaan kertaan palaamaan työssä aiempaan, ja selkeyttämään aiempaa tekstiä. Tämä antoi käsitystä myös siitä, että oppimista oli tapahtunut, sillä pystyi suhtautumaan omaan tekstiin kriittisesti ja löytämään pikkuvikoja. Lähteitä työssä yritin käyttää mahdollisimman laajasti siten, että opiskelin aiheen useammasta paikasta ennen kuin kokosin oppimani kasaan.

Haasteista huolimatta, ja myös niiden ansiosta sain hyvät ja kattavat pohjatiedot aiheeseen liittyen, josta on hyvä lähteä muuttamaan kerättyä tietoa asiantuntijuudeksi. Aihe oli mielenkiintoinen ja se herätti suuren kiinnostuksen muuntajiin sekä erilaisiin sähköisiin ilmiöihin, kuten esimerkiksi osittaispurkauksiin liittyen. Alun perin työhön oli tarkoitus sisällyttää muuntajien lisäksi myös pyörivät sähkökoneet, mutta aihe tuli onneksi rajattua pelkkiin muuntajiin, ja niissäkin lähinnä öljyeristeisiin tehomuuntajiin. Jos kaikki sähkökoneet olisivat olleet käsittelyssä mukana, työhön olisi mennyt vuosia. Standardeja työhön sisällytin vähän, mutta niiden syvällisempään pohtimiseen en nähnyt tarvetta mennä. Tekstinä IEC ja IEEE standardit olivat jopa raskaampia luettavia kuin SFS-standardit. Omat ongelmat loivat myös työn rakenteen jatkuva muokkauksen tarve sekä rajaaminen.

Lopputuloksena saatiin työn tilanteelle yritykselle selvitys tehomuuntajien kunnonvalvontamittauksista sekä niiden tulkinnasta. Työtä voi käyttää muuntajiin liittyvänä oppaana yrityksessä myöhempää toimintaa ajatellen. Markkinapotentiaalin selvitykseen olisi voinut ottaa vielä tarkempaa perehtymistä sisällyttäen siihen tarpeiden selvittämistä mahdollisilta asiakkailta. Pidin kuitenkin pääpainon työssä itse mittauksiin tutustumisena ja sain sen pohjalta kerättyä hyvin tietoa ja luotua perusteltuja ehdotuksia mahdollisista mittauspalveluista, joista kattava mittauspaketti vaatii kalliit investoinnit, mutta käämikytkimien kunnonvalvonta on mahdollista jo nykyisillä laitteilla. Kattavallakin paketilla näen kuitenkin suurta potentiaalia jo pelkkiin muuntajien mittauksiin ajatellen, mutta myös niiden mahdollistaessa lukuisia muita mahdollisia tarjottavia mittauspalveluita.

Ongelmista ja tiukasta aikataulusta huolimatta pääsin mielestäni miellyttävään lopputulokseen. Työ avasi hyvin silmät faktalle, että tulevaisuuden työura itsellä tulee olemaan jatkuvaa opiskelua. Muuntajan toimintaperiaate on kuitenkin yksinkertainen, ja käämikytkintä lukuun ottamatta siinä ei ole liikkuvia osia. Siitä huolimatta sen suunnitteluun, rakenteeseen, käyttöön ja vanhenemiseen liittyy erittäin paljon tietoa. Tämän lisäksi sen koestamisessa käytettäviä menetelmiä on lukuisia ja lisää kehitetään koko ajan. Näillä perusteilla voi todeta opinnäytetyöni sisällön olevan oman itseni kannalta pelkkä johdanto tulevaan.

Lopuksi haluan erikseen kiittää kahta henkilöä, joilta sain työhöni asiantuntevia neuvoja, vinkkejä ja palautetta, joista oli suuri apu työssäni. Kyseiset henkilöt ovat Panu Tuhkanen ja Pasi Lauri.

## LÄHTEET

ABB. 2004. Transformer handbook. Zurich: ABB Oy

ABB. 2006. Luentomateriaali sähköasemapäivät Espoo

Anglhuber, M. & Krueger, M. 2016. Dielectric analysis of high voltage power transformers. <http://www.transformers-magazine.com>

Aro, M. Elovaara, J. Karttunen, M. Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjänniteteekniikka. 4. korj. p. Espoo: Gaudeamus

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Helsinki: WSOY

Aura, L. & Tonteri, A. J. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6. uud. P. Helsinki: WSOYpro Oy

Chauvin Arnoux. Eristysvastuksen mittausopas. <https://chauvin-arnoux.fi>

CIGRE 12/33-02. 2000. Detection of transformer winding displacement. Pariisi: CIGRE

CIGRE working group A2.34. 2011. Guide for transformer maintenance. CIGRE

CIGRE. Working group A2.26. 2008. Mechanical-condition assesment of transformer windings using frequency response analysis.

CIGRE. Working group D1.01. 2010. Dielectrtic response diagnoses for transformer windings

Dai, J. Wang, Z.D. Dyer, P. Darwin, A. & James, I. 2007. Investigation of the impregnation of cellulosic insulation by esther fluids. Manchester: The University of Manchester

Doble engineering company. Doble on line monitoring doblePRIME. Esite. USA

GE Hydran. 2016 Esite. Englanti: GE

Heathcote, M. J. 2007. J&P Transformer book. 13. p. Unkari: Newnes

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

Hyvönen, P. Pykälä, M. L. Hokkanen, A, Halme, J. & Aro, M. 2005. Jakelumuuntajien kunnan selvitys. Espoo: Teknillinen korkeakoulu

IEC 60450:2004+AMD1:2007 CSV. Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials.

IEC 60554-3. 1984. C57 152. 2013. Spesification for sellulosic papers for electrical purposes. Specifications for individual materials.

IEEE C57 152. 2013. Insulation resistance. <https://standards.ieee.org>

Isotalo, K. 2004. Puu- ja sellukemia. 3. uud. P. Helsinki: Opetushallitus

Koch, M. Krueger, M. & Puetter, M. 2015. Advanced insulation diagnostic by dielectric spectroscopy. Raportti 12/2015.

Koch, M. Tenbohlen, S. Krueger, M & Kraetge, A. 2007. Improved moisture analysis of power transformers using dielectric response methods. Raportti 2007.

Korpinen, L. Muuntajat ja sähkölaitteet. Opetusmateriaali. [www.leenakorpinen.fi](http://www.leenakorpinen.fi)

Lauri, P. 2017. Henkilökohtainen tiedonanto.

Locarno, M. 2012. Sweep frequency response analysis. Doble engineering company

Megger. 2015. Transformer winding resistance testing. Webinaari. Youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=5alrcPC1wyc&t=264s>

Megger. 2016. Transformer testing equipment. Esite

Meter Test Equipment. 2015. Transformer monitoring. Esite. Sveitsi: MTE

Omicron CPC100 reference manual

OMICRON. 2015. luento. CWIEM E. Youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=FCymlMWIRvs&index=11&t=321s&list=LL8UNwn4pXBxWAaDg-8h-2Uw>

OMICRON. 2016. Dirana. The fastest way of moisture determination of power- and instrument transformers and condition assessment of rotatin machines. Esite

OMICRON. 2016. Franeo 800. Esite. <https://www.omicronenergy.com>

OMICRON. Diagnostic testing and monitoring of power trasformers 2016. Itävalta <https://www.omicronenergy.com>

Paukkunen, E. 2017 Henkilökohtainen tiedonanto

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

Prevost, T. A. 2005. Thermally upgraded insulation in transformers. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. Julk: IEEE

Pro Maint. 2013. Kunnonvalvonta ja käyttövarmuus: Muuntajaöljyn kunnossapito ja automaattinen kunnonvalvonta. <http://promaintlehti.fi>

Siemens. 2011. Sitram. Esite. Saksa: Siemens AG

Tenbohlen, S. Pfeffer, A. Coenen, S. Wilson, A. & Markalous, S. 2010. Combination of different techniques for improved interpretation of PD measurements. Pariisi: CIGRE

Tuhkanen, P. 2016-2017 Henkilökohtainen tiedonanto

Vaisala. 2016. MHT-410 Esite.

Vaisala. 2016. Optimus. Esite

Vaisala. 2016. Outages happen 24/7. So should monitoring. Esite

Väärämäki, M. 2004. Teho- ja mittamuuntajat. Fingrid asiakaslehti 2/2004.