

MUUNTAJAÖLJYJEN KÄSITTELY KUNNOSSAPIDON TYÖKALUNA

Janne Keränen

Opinnäytetyö
Marraskuu 2013

Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



Tekijä(t) Keränen, Janne	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 15.11.2013
	Sivumäärä 51	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi MUUNTAJAÖLJYJEN KÄSITTELY KUNNOSSAPIDON TYÖKALUNA		
Koulutusohjelma Automaatiotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) HUKARI, Sirpa		
Toimeksiantaja(t) KIL-Yhtiöt Oy		
Tiivistelmä <p>Muuntajat ovat tärkeä osa sähköverkkoa ja niiden toiminnan varmuus on tärkeää käyttökohteelle. Muuntajaöljyn kunnossapito on oleellinen osa muuntajan kunnossapitoa, muuntajan varman ja turvallisen toiminnan takaamiseksi. Muuntajan huoltaminen verkosta irtikytkemällä, voi kuitenkin olla paljon kustannuksia aiheuttava toimenpide.</p> <p>Opinnäytetyössä koottiin tietoa kuohusavesta ja tutkittiin kuohusaven käyttöä muuntajaöljyjen puhdistukseen toimeksiantajan Kil-Yhtiöt Oyn tarpeisiin.</p> <p>Opinnäytetyössä kerättiin tietoa kuohusaven käytöstä suodattimena useasta eri lähteestä ja lopuksi testattiin kuohusaven toimivuutta muuntajasta otetussa öljyssä toimeksiantajan tiloissa. Testeihin liittyviä riskejä arvioitiin riskianalyyssissä. Testejä varioitiin puhdistamalla öljyä kuohusavella, polymeerisuodattimella ja sähköstaattisella puhdistimella tai pelkästään kuohusavella. Varioinnilla haluttiin selvittää öljyn likaisuuden vaikutus kuohusavisuodatukseen. Testitulosten perusteella arvioitiin sen toimivuutta ja testien onnistumista.</p> <p>Testeissä onnistuttiin poistamaan hapettumistuotteita muuntajaöljystä ja nostamaan pH-lukua happamasta neutraalimpaan. Hapettumistuotteita indikoivan rajapintajännityksen arvo kasvoi. Muuntajaöljyn väri vaaleni suodatuksen aikana.</p> <p>Käytetylle suodatinpatruunalle määritettiin suositusaika, jonka jälkeen suodatin tulisi vaihtaa tehokkaan suodatuksen ylläpitämiseksi. Kuohusavisuodatusta on tarkoitus käyttää käytössä olevien muuntajien öljyjen käsittelyyn muuntajien eliniän lisäämiseksi. Testeissä ei saatu selvyttä öljyn likaisuuden vaikutuksesta kuohusavisuodatukseen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Kunnossapito, öljyn puhdistaminen, kuohusavi, muuntajaöljy, muuntaja		
Muut tiedot		



Author(s) Keränen, Janne	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 15112013
	Pages 51	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title TREATING TRANSFORMER OILS AS A TOOL OF MAINTENANCE		
Degree Programme Degree Programme in Automation Engineering		
Tutor(s) Hukari, Sirpa		
Assigned by Kil-Yhtiöt Inc.		
Abstract <p>Transformers are an important part of an electric network and their reliability is important for the user. The maintenance of transformer oil is an essential part of transformer's maintenance to ensure reliability and safety. De-energizing the transformer for maintenance operations can be very expensive.</p> <p>In this bachelor's thesis, the main target was to gather information about fuller's earth and study the use of fuller's earth's to regenerate transformer oil. This task was assigned by Kil-Yhtiöt Inc.</p> <p>In this bachelor's thesis, information about using the fuller's earth as a filter, was collected from several sources. Finally, the use of fuller's earth as a filter for transformer oil, was tested at Kil-Yhtiöt's business premises. Between tests there were variations. In the first test, oil was only cleaned using the fuller's earth. When in another test, oil was cleaned with the electrostatic cleaner, polymer filter and fuller's earth. The purpose of these different kinds of tests, was to see how dirtiness of oil affects the fuller's earth reactivity as a filter. Based on the test results, the functionality of fuller's earth was estimated and if the tests were successful.</p> <p>During the tests, oxidation products were successfully removed from the transformer oil and its pH number was increased towards the neutral value. Interfacial tension that indicates the amount of oxidation products, grew. The colour of the oil changed clearer.</p> <p>Recommended usage time for filter cartridge that was used, was set. After that time, filter cartridge should be replaced to ensure effective removal of the oxidation products. The fuller's earth treatment is meant to be used to treat the energized transformer oils to extend the lifetime of the transforme. The results considering the dirtiness of the oil affecting the fuller's earth reactivity, were inconclusive.</p>		
Keywords Maintenance, oil cleaning, fuller's earth, transformer oil, transformer		
Miscellaneous		

SISÄLTÖ

TERMIT JA LYHENTEET	3
1 OPINNÄYTETYÖN LÄHTÖKOHDAT.....	4
2 MUUNTAJAT	5
3 MUUNTAJAÖLJY.....	13
3.1 Öljyn koostumus.....	13
3.2 Öljyn terveys- ja ympäristöriskit.....	14
3.3 Öljyn hapettuminen	15
3.4 Öljyn ominaisuudet.....	16
4 MUUNTAJAÖLJYN PUHDISTUS.....	26
4.1 Käytön aikaisen puhdistuksen edut	26
4.2 Sähköstaattinen puhdistus	27
4.3 Veden ja kaasujen poisto	29
4.4 Regenerointi	30
5 KUOHUSAVEN KÄYTTÖTESTIT	32
5.1 Koejärjestelyt.....	32
5.2 Riskianalyysi	36
5.3 Tulokset.....	38
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	43
LÄHTEET.....	47
LIITTEET	49
Liite 1. Tarvittava määrä kuohusavea tavoite happoluvun saavuttamiseksi	49
Liite 2. Testattujen öljyjen lähtöarvot.....	50
Liite 3. Testattujen öljyjen arvot 6 tunnin suodatuksen jälkeen.....	51

KUVIOT

KUVIO 1. Kolmivaihemuuntajan käämitys ja rautasydän. 1 yläjännitekäämi ja 2 alajännitekäämi; 3 rautasydän; 4,5,6 magneetti­piirit ja A-, B-, C-vaiheet	6
KUVIO 2. Suurtehomuuntaja	9
KUVIO 3. Muuntajan varusteita.	10
KUVIO 4. Kuivaeristemuuntaja	11
KUVIO 5. Hapettumistuotteiden erilaiset kehittymismallit	22
KUVIO 6. Sivukiertokytkentä.....	28
KUVIO 7. Sähköstaattinensuodatin.....	29
KUVIO 8. Periaatekuva suodatuskierrosta	34
KUVIO 9. Happoluvun kehitys.....	39
KUVIO 10. Näytteet 0 (vasen) ja 6 kattavasti puhdistetusta öljystä	40

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Öljyltä vaadittuja raja-arvoja	25
TAULUKKO 2. Riskianalyysi	37
TAULUKKO 3. Puhdistetut muuntajaöljyt ja IEC 60296 -standardin raja-arvot	42

TERMIT JA LYHENTEET

ASTM	American Society for Testing and Materials, Standardien kehitysorganisaatio
DBP	Di-tertiäributyylifenoli
DBPC	Di-tertiäributyyliparakresoli
DP	Degree of Polymerisation, Polymerisoitumisaste
IEC	International Electrotechnical Commission, Standardien kehitysorganisaatio
kVA	Kilovolttiampeeri
MVA	Megavolttiampeeri
PCB	Polyklooratut bifenyylit
PPM	Miljoonasosa (Parts Per Million)
USD	United States Dollar
V	Voltti
VA	Volttiampeeri

1 OPINNÄYTETYÖN LÄHTÖKOHDAT

Muuntajat ovat tärkeä osa sähköverkkoa, ja niiden toiminnan varmuus on tärkeää sähköenergian käyttökohteelle, ettei ilmene yllättäviä katkoksia sähköjakelussa. Muuntajia pitää huoltaa, jotta niiden toiminta on varmaa ja turvallista. Muuntajan verkosta irtikytkeminen ja huoltaminen on kallista, koska voi olla tarpeellista siirtää muuntajaa ja hankkia korvaava muuntaja huollon ajaksi. Joskus voi olla myös mahdotonta siirtää muuntajaa sen sijainnin takia.

Yksi muuntajien kunnossapidon kannalta keskeinen näkökulma on muuntajissa käytetyn öljyn puhtaus. Muuntajaöljyn puhdistusta ja vanhenemista on tutkittu paljon ja siitä on hyvin englanninkielistä lähdemateriaalia työn pohjaksi. Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus keskittyä todentamaan muuntajan käytön aikana tapahtuvaa muuntajaöljyn puhdistusta ns. kuohusavella (Fuller's earth) ja saada sen käytöstä lisää tietoa Kil-Yhtiöt Oy:lle.

Työn tarkoituksena oli todentaa että valitulla kuohusavimenetelmällä voidaan saavuttaa muuntajaöljyssä puhtaustaso, jonka ansiosta muuntaja voi pysyä pitkempään käytössä ja öljyn vaihtamisen tarvetta ei synny. Työn aikana tuli kerätä toimeksiantajalle lähdemateriaalista tietopankki kuohusavikäsittelystä ja opinnäytetyöraportti toimii koosteena.

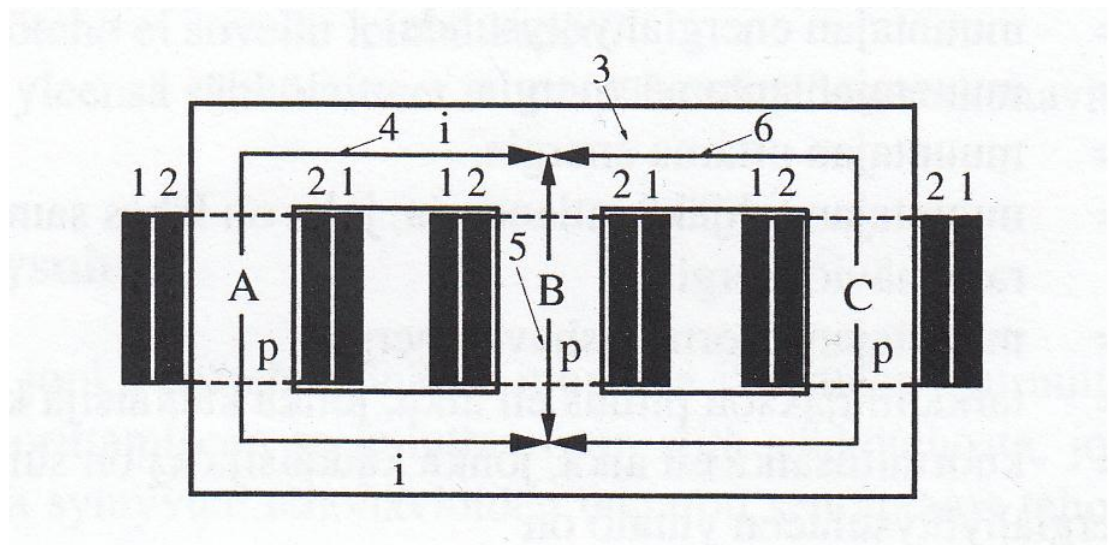
Työn toimeksiantaja

Kil-Yhtiöt Oy on öljyyn ja sen käsittelyyn erikoistunut asiantuntijapalvelu, joka tarjoaa konsultoinnin lisäksi öljynkäsittelylaitteiden välitystä, auditointeja, koulutusta, kunnossapitoratkaisuja ja huoltotoimintaa. Kokemusta öljyalasta yrityksellä on yli 20 vuotta. Yrityksen liikevaihto oli 739 000 euroa vuonna 2012 ja henkilökuntaan kuului 7 henkilöä. Yrityksen toimitilat sijaitsevat Jyväskylän Palokassa. (Kil ratkaisut. 2013)

2 MUUNTAJAT

Muuntaja on sähkökone, jota käytetään sähköjännitteen muuttamiseen. Jännitteen muutos on tarpeen sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen välisen häviön minimoimiseksi. Johdinhäviö riippuu johtimen resistiivisyydestä, joka puolestaan riippuu johtimen materiaalista. On edullista nostaa jännite korkeaksi jolloin virta johtimessa laskee mutta siirtyy sama teho. (Hietalahti. 2011. 4.) Johdinmateriaalissa saavutetaan säästöä, kun johtimelle ei tarvita niin suurta poikkipinta-alaa kuin korkeammalla virralla toimittaessa. Korkeampi jännite vaatii tosin paremman eristyksen, mikä lisää kustannuksia eristysten osalta. (Aura & Tonteri 2000, 268.)

Muuntajan perusrakenne muodostuu taivutetuista johtimista, jotka on pyöritytty useiksi kierroksiksi yhteisen rautasydämen ympärille (Ks. kuvio 1). Johtimien muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan käämitykseksi. (Hietalahti 2011, 4.)



KUVIO 1. Kolmivaihemuuntajan käämitys ja rautasydän. 1 yläjännitekäämi ja 2 alajännitekäämi; 3 rautasydän; 4,5,6 magneettipiirit ja A-, B-, C-vaiheet (Hietalahti 2011, 23).

Muuntajan käämitykset on nimetty tehon siirtymissuunnan mukaan. Ensio-käämiin tulee sähköteho, joka tuodaan sähkölähteeltä, ja toisiokäämistä lähtee sähköteho kuormitukseen (Aura & Tonteri 2000, 269). Käämitykset on tehty joko alumiinisesta tai kuparisesta pyörö- tai muotolangasta. Lankojen eristeinä käytetään yleensä paperia tai lakkaa. Kerrosristeenä toimii paperi. (Aura & Tonteri 2000, 281.)

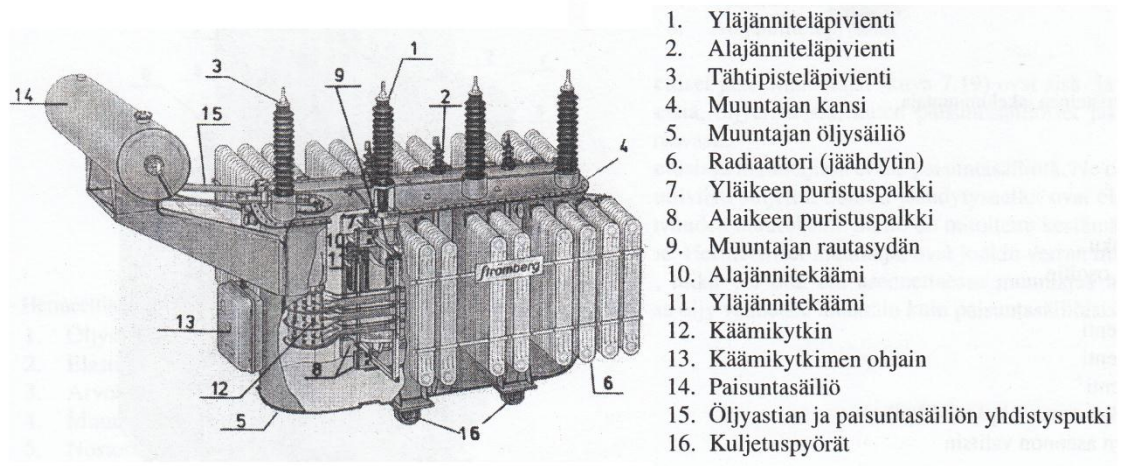
Rautasydämen rakenne muodostuu laminoiduista levyistä. Tällä saadaan minimoitua pyörrevirtahäviöt (Hietalahti 2011, 4). Muuntajalevyt ovat noin 0,3 mm paksuja, ja ne valmistetaan niin, että magneettivuon kulkiessa magneettiset ominaisuudet ovat parhaimmillaan. Levyjen pinnat on eristetty pyörrevirtojen kulun estämiseksi. (Aura & Tonteri 2000, 280.)

Muuntajassa tapahtuu kuormitus- ja rautahäviöitä. Kuormitushäviö syntyy käämeissä kulkevan sähkövirran vaikutuksesta. Rautahäviö syntyy rautasydämessä kulkevan vuon vaikutuksesta. Näiden häviöiden vaikutuksesta muuntajien hyötysuhteet ovat 0,97 - 0,99 luokkaa. (Aura & Tonteri 2000, 274 - 279.) Häviöiden tuottama lämpö on vahingollista eristäville materiaaleille, ja sen takia se on poistettava eristyksien läheisyydestä. Yhdysvaltojen sisäministeriön viraston mukaan kahdeksan asteen lämpötilannousu lyhentää muuntajan eliniän puoleen. (Transformers: Basics, Maintenance and Diagnostics 2005, 13.) Toisen lähteen mukaan ns. kuumen pisteen (Hotspot) lämpötilan noustessa 6 °C muuntajan elinikä lyhenee puoleen (Wiklund 2012, 25 - 26). Arvidssonin (2006, 20) mukaan lämpötilan laskeminen 2 - 3 °C voi lisätä muuntajan elinikää 25 - 50 %.

Muuntajia luokitellaan eri ryhmiin joko sen mukaan, ovatko ne pientehomuuntajia vai suurtehomuuntajia. Tämä jako perustuu nimellisjännitteisiin sekä -tehoon. Pientehomuuntajina pidetään muuntajia joiden yläjännitteen nimellisjännite on korkeintaan 2000 V, alajännitteen 400 V ja nimellisteho on korkeintaan 3150 kVA. Muuntajien jaottelu jatkuu eristystavan mukaan öljyeristeisiin ja kuivaeristeisiin. Jakelumuuntajien tapauksessa öljyeristeisiä on jaoteltu eri ryhmiin sen mukaan onko muuntaja paisuntasäiliöllinen, hermeettisesti suljettu vai pylväsmuuntaja jossa muuntajan rakenne on yhtenäisempi. (Aura & Tonteri 2000, 283 - 286.)

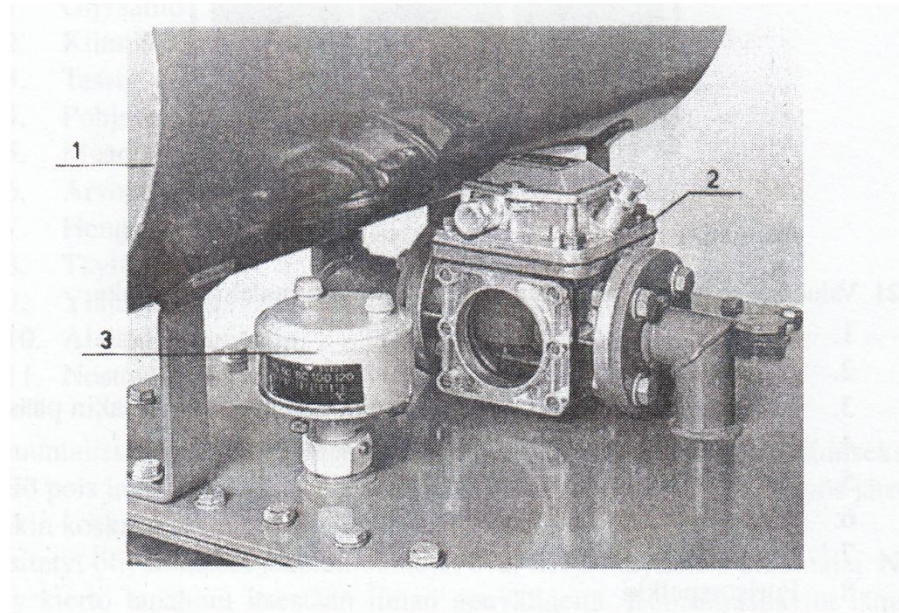
Öljyeristeisissä muuntajissa öljyn jäähtytysvirtaus voi tapahtua itsestään ilman apuvälineitä tai sitten pakotetusti pumpulla. Muuntajan kuormitus- ja rautahäviö lämmittävät muuntajan sisäosia, joista lämpö siirtyy öljyyn. Lämменneellä öljyllä on pienempi tiheys ja se siirtyy ylöspäin öljysäiliössä siirtäen kylmemmän öljyn alaspäin. Tämä synnyttää jatkuvan virtauksen öljysäiliöön. (Aura & Tonteri 2000, 286.)

Paisuntasäiliöllinen muuntaja on yleisin öljyeristeinen muuntajatyyppe. Kuvio 2 selventää luonnollisen kierron omaavan öljyeristeisen muuntajan rakennetta. Paisuntasäiliön on tarkoitus toimia puskurina öljysäiliössä olevan öljyn ja ilman välissä ja pitää öljynpinta tarpeeksi korkeana alhaisissakin lämpötiloissa, että öljy pystyy hoitamaan tehtävänsä käämien luona. Lämpölaajenemisen takia öljyn pintataso vaihtelee ja ilma paisuntasäiliössä vaihtuu muuntajan ympärillä olevaan ilmaan, mikä voi aiheuttaa kosteuden siirtymistä öljyyn. Tämän takia paisuntasäiliöt on varustettu silikageelillä ilma-kuivaimella, jonka läpi ilma virtaa liikkueessaan paisuntasäiliöön tai pois. Silikageelin väri vaihtuu sinisestä punertavaksi, kun se sitoo kosteutta, mistä voi arvioida, milloin se pitää vaihtaa. Paisuntasäiliö myös pienentää ilman ja öljyn välistä pinta-alaa ja on kylmempi kuin öljysäiliö näin vähentäen kosteuden siirtymistä ilmasta öljyyn. Paisuntasäiliön pohjalle eriytyy öljystä vettä, jos öljyssä olevan kosteuden kylläisyyspiste ylittyy alhaisemman lämpötilan johdosta. Paisuntasäiliön pohjassa on öljyyn liukenemattoman veden tyhjennystä varten tulppa. (Aura & Tonteri 2000, 285 - 289.)



KUVIO 2. Suurtehomuuntaja (Aura & Tonteri 2000, 283)

Yleisiä muuntajissa olevia varusteita ilma-kuivaimen lisäksi ovat kaasurele ja lämpömittarit. Kuviossa 3 havainnollistetaan niiden mahdollista sijaintia. Kaasurele suojaa muuntajaa siinä esiintyviltä sisäisiltä vikatapauksilta. Ylikuumentumisen, sähköpurkauksien ja valokaarien aikaan saama ylikuumentuminen aiheuttaa öljyn tai eristeiden kaasuuntumista. Syntynyt kaasu kerääntyy kaasureleeseen jossa uimurikytkin liikkuu kaasuarvojen mukaan ja raja-arvon ylittyessä laukaisee hälytyksen tai irrottaa muuntajan verkosta. Kaasurele on yleensä asennettu öljysäiliön ja paisuntasäiliön väliseen yhdistysputkeen. Lämpötilamittareilla valvotaan muuntajan lämpötilaa ja tarpeen tullessa voidaan tehdä hälytys ja muuntajan irrotus verkosta. Lämpömittarit ovat joko kosketin- tai kapillaarilämpömittareita ja niiden asennuspaikat ovat mittarin tyypistä riippuvaisia. (Aura & Tonteri 2000, 289.)

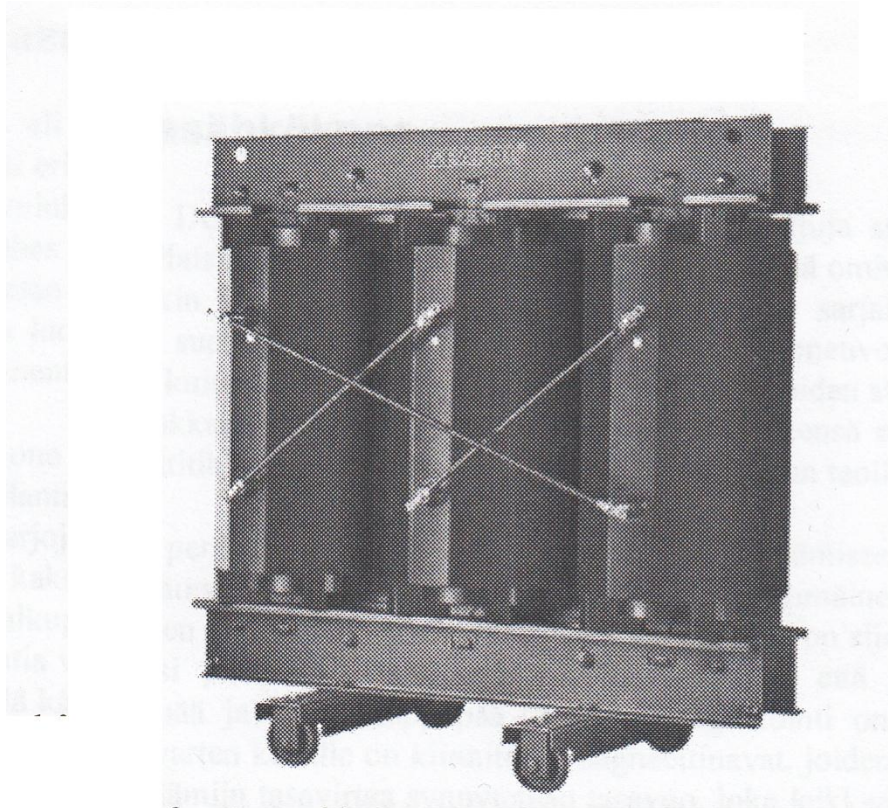


KUVIO 3. Muuntajan varusteita. 1 öljysäiliö, 2 kaasurele ja 3 lämpötilamittari (Aura & Tonteri 2000, 288)

Hermeettinen muuntaja tarkoittaa, että muuntaja on kaasutiiviisti suljettu. Öljyn lämpölaajeneminen on otettu huomioon rakenteessa olevilla elastisilla jäähdytysaalloilla, jotka on mitoitettu kestämään ylikuormitusta. Koska öljy ei ole kosketuksissa ilman kanssa, niin se ei vanhene yhtä nopeasti kuin paisuntasäiliöllisessä muuntajassa. (Aura & Tonteri 2000, 285.)

Kuivaeristetyissä muuntajissa käytetään eristeenä valuhartsia. Tästä johtuen muuntajan rakenne hieman eroaa öljyeristeisistä muuntajista (Ks. kuvio 4). Tätä ratkaisua käytetään sellaisissa paikoissa, missä öljyeristeisen muuntajan käyttö olisi kielletty tai kallista lisätoimenpiteiden takia. Tällaisia kohteita ovat paikat joissa tulipalolla tai saastumisella voi olla tavallista vakavimmat

seuraamukset, esimerkiksi sairaalat ja kaivokset. Valuhartsisia muuntajia käytetään teollisuuslaitoksissa lähellä kuormaa toisiopuolen kaapeleiden säästämiseksi. (Aura & Tonteri 2000, 288.)



KUVIO 4. Kuivaeristemuuntaja (Hietalahti 2011, 33)

Suomessa on runsaasti ikääntyneitä muuntajia. Kun 1960-luvulla uusia korkeajänniteverkkomuuntajia käyttöönotettiin noin 100 kappaletta, niin 70- ja 80-luvuilla käyttöönotettuja korkeajänniteverkkomuuntajia on melkein 400

kappaletta kummallakin vuosikymmenellä. Vanhojen ja peruskorjattavien muuntajien määrä on siis Suomessa on runsas. (Sandbacka 1999, 13.)

Suomessa muuntajien huoltoa alimitoitettiin pitkään ja turvauduttiin korjataan huoltoon. Huolto-ohjelmat sisälsivät pitkään vain muuntajien lisälaitteiden huollon. 1980 -luvulla alkoi kattavamman perushuollon nousu tärkeämpään rooliin. Kattavammalla perushuollolla halutaan kasvattaa muuntajan käyttöikä, luotettavuutta ja kuormitettavuutta. Perushuolto tehdään suurten huoltotöiden yhteydessä tai erikseen, mutta ainakin kerran muuntajan eliniän aikana. Yleensä perushuollettava muuntaja on 15 - 25 vuotta käytössä ollut. (Sandbacka 1999, 43.)

Yli 100 MVA:n sähköaseman rakennuskustannuksia Yhdysvalloissa on arvioitu Wallin (2009, 25) opinnäytetyössä ja rakennuskustannukset per MVA lähtivät 18 400,99 USD:sta ja nousivat jopa 108 168,74 USD:in. Tuulivoima-alueelle rakennettavan sähköaseman kustannukset Suomessa yli 12 MVA:n asemilla ovat 1,8 miljoonaa euroa (Kjellman, Tvrdy, Malinen, Vadbäck, Vaino & Halttunen 2012, 17). Rakennuskustannusarvioissa puhutaan uusista asemista, mutta on mahdollista käyttää vanhan aseman infrastruktuuria hyväksi pelkän muuntajan uusimisessa, mikä laskee muuntajan uusimisen hintaa kokonaan uuteen sähköasemaan verrattuna.

Wallin (2009, 18) mukaan muuntajan hinta vaihtelee 900 000 ja 1 200 000 USD:n välillä riippuen kapasiteetista ja varusteista, mutta hän ei maininnut muuntajan kapasiteettia millä kyseinen hinta-alue muodostuu. Myöhemmin Wallin (2009, 21) toteaa, että 40 MVA:n ja 100 MVA:n muuntajien välinen hintaero voi olla jopa 500 000 USD. Esitetyissä muuntajien hinnoissa ei ollut sisällytetty muita kuluja, kuten esimerkiksi kuljetuksien ja öljyn osuutta, joten todellinen kustannus on paljon suurempi.

3 MUUNTAJAÖLJY

3.1 Öljyn koostumus

Muuntajaöljynä käytetään mineraaliöljyä, joka luokitellaan kolmeen eri luokkaan öljyn sisäisen molekyylikoostumuksen mukaan. Öljy muodostuu pääasiassa hiili- ja vetymolekyyleistä eri muodoissa. Molekyylit on luokiteltu parafiinisiin, nafteenisiin ja aromaattisiin. Muuntajaöljy on yleensä luokiteltu näiden mukaan eri ryhmiin, koska eri seoksilla erilaiset fyysiset ja kemialliset ominaisuudet. Öljy, joka sisältää alle 50 % parafiineja luokitellaan nafteeniseksi öljyksi ja öljy, joka sisältää yli 56 % parafiineja, luokitellaan parafiiniseksi öljyksi. Öljy, joka sisältää 50 - 56 % parafiineja, määritellään keskitason öljyksi. (Transformer oil handbook 2010, 120 - 125.)

Parafiinisen molekyylit ovat rakenteeltaan suorita tai haaroittuvia. Niille on ominaista veden ja hapettumistuotteiden alhaisempi liukoisuus ja alhaisempi lämpövakaumus. Nafteeniset molekyylit ovat rakenteeltaan rengasmaisia. Nafteenisten molekyyliden erinomaiset ominaisuudet alhaisissa lämpötiloissa. Aromaattiset molekyylit koostuvat vähintään yhdestä kuuden hiiliatomin ren

gasrakenteesta. Sen atomien väliset sidokset vaihtelevat yhden ja kahden välillä mikä onkin sen rakenteella tunnuksenomaista. (Transformer oil handbook 2010, 120 - 125.)

3.2 Öljyn terveys- ja ympäristöriskit

Öljy voi olla vahingollista ihmisen terveydelle riippuen sen tyypistä ja siitä, miten se on kosketuksessa ihmiseen. Tutkimuksien perusteella öljyt ovat karsinogeenisia, mutta hyvällä hygienialla terveysriskejä voidaan pienentää. Eläinkokeilla on havaittu, että korkeammin jalostetut öljyt eivät olisi karsinogeenisia ihokosketuksessa. Öljyn vaikutus ihoon, silmiin ja hengityselimiin koskettaessa on syövyttävä ja ärsyttävä. Öljy vaikuttaa rasvaan, joka on osa ihoa, ja liuottaa sitä näin tehden ihosta haavoittuvamman ja kuivemman. Tämän vuoksi ihoa tulisi suojata, jos on vaara, että öljyä käsitellessä iho joutuu paljon suoraan kosketukseen. Yleisesti oletetaan, että kevyet nafteeniset öljyt ovat paljon ärsyttävämpiä iholle kuin muut. (Transformer oil handbook 2010, 162 - 165.)

Muuntajaöljyissä on käytetty PCB:tä poistamaan palovaaraa paikoissa, missä tulenkestäviä muuntajia on tarvittu, mm. rakennuksien sisällä ja ydinvoimaloissa (Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals 1999, 9). PCB:n ominaisuudet, joita ovat palonkestävyys, alhainen sähköinen johtavuus, kemiallinen vakaus ja vastustuskyky hapettumistuotteille, olivat syitä minkä takia sitä käytettiin yleisesti. PCB aiheuttaa lukuisia terveysongelmia, kuten ihottumaa, vahinkoja maksaan, päänsärkyä ja syöpää. PCB -

pitoisuuksista on eri luokittelujärjestelmiä. Pääsääntönä on, että yli 50 ppm PCB:tä sisältävää materiaalia pidetään saastuneena ja 5 - 50 ppm mahdollisesti saastuneina. PCB:tä sisältävät materiaalit tulee käsitellä huolellisesti ongelma-jätteenä. (Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals 1999, 3 - 4.)

3.3 Öljyn hapettuminen

Muuntajaöljyllä on kolme päätehtävää: toimia jäähdytyksenä, toimia sähköisenä eristeenä ja kuljettaa tietoa mahdollisista ongelmista (Transformer oil handbook 2010, 60). Öljy vanhenee ja sen laatu huononee ajan myötä ilman, lämmön ja kosteuden vaikutuksesta (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 1996, 112). On olemassa standardeja, jotka määrittelevät vähimmäistason, jonka ylittäessään öljy toimii suunnitellulla tavalla muuntajassa. Monella muuntajien toimittajilla ja käyttäjillä on myös omat, tiukemmat standardinsa. Yleisiä kansainvälisiä standardeja ovat IEC 60296 ja ASTM D3489. (Transformer oil handbook 2010, 60.)

Öljyn hapettumisen estäminen on tärkeää muuntajan mahdollisimman pitkän eliniän takaamiseksi. Ollessaan koko ajan kosketuksissa muuntajassa olevan eristepaperin kanssa, öljyn kemialliset ja fyysiset ominaisuudet vaikuttavat eristepaperiin suoraan eristepaperia vanhentaen. Pitkälle edetessään vanhentumisreaktio muodostaa muuntajan jäähdyttämistä haittaavaa lietettä. Öljyn hyvän kunnon ylläpitäminen on siksi suotavaa, koska siihen on helpompi päästä käsiksi kuin eristepaperiin. (Arvidsson 2006, 25, 29.)

Öljyn vanheneminen aiheutuu siitä, että sen orgaaniset yhdisteet reagoivat niille hapettumista aiheuttavien yhdisteiden kanssa. Öljyn vanhenemiseen muuntajassa vaikuttaa pääsääntöisesti hapen tai muiden epäpuhtauksien määrä järjestelmässä ja kasvanut lämpötila. Muina epäpuhtauksina voidaan pitää esimerkiksi metalleja ja vettä. Hapettumisreaktion nopeus kaksinkertaistuu 6 - 10 °C:n välein, jos lämpötila on 0 - 100 °C alueella. Katalyytin läsnäolo nopeuttaa reaktiota. Vettä voidaan pitää katalyyttinä muuntajassa tapahtuvassa hapettumisreaktiossa. (Arvidsson 2006, 26 - 27.)

Hapen kanssa samaan ryhmään kuuluvien alkuaineiden kemialliset ominaisuudet ovat verrattavissa hapen kemiallisiin ominaisuuksiin. Hapen läsnäolo muuntajassa heikentää öljyä pääasiassa hapettamalla. Hapen kanssa samaan ryhmään kuuluva rikki on vaarallinen alkuaine muuntajaöljyssä, jos se pääsee reagoimaan korkeassa lämpötilassa muuntajan rakennusaineena käytetyn kuparin kanssa. Rikin ja kuparin välisessä reaktiossa kupari syöpyy voimakkaasti ja kuparisulfidi siirtyy eristepaperiin heikentäen sen eristyskykyä. Siksi on tärkeää vaatia mahdollisimman rikitöntä muuntajaöljyä ja paperia sekä suojata kupariset osat esimerkiksi emalilla. (Arvidsson 2006, 25 - 26, liite 2009, 1 - 10.)

3.4 Öljyn ominaisuudet

Muuntajaöljyn laatua tarkkaillaan useita eri arvoja seuraamalla ja näin saadaan kuva, kuinka sen fysikaaliset, kemialliset ja sähköiset ominaisuudet ovat muuttuneet ajan myötä.

Viskositeetti on tärkeä ominaisuus muuntajan jäähdytyksen kannalta. Alhaisella viskositeetilla öljyn kierto on nopeampaa ja näin jäähdytys toimii tehokkaammin. Standardit IEC 60296 ja ASTM D3489 edellyttävät että viskositeetti on korkeintaan $12 \text{ mm}^2/\text{s}$ 40 °C :n lämpötilassa. Öljyillä viskositeetti laskee lämpötilan noustessa, joten öljyjen jäähdytyskyky paranee, kun niiltä vaaditaan parempaa jäähdytyskykyä lämpötilan pitämiseksi alhaisemmalla tasolla. Nafteenisillä öljyillä viskositeetti laskee alemmaksi lämpötilan noustessa kuin parafiinisilla ja sen takia nafteenisia suositaan muuntajaöljyinä. Viskositeetti-indeksi kuvaa, kuinka herkästi viskositeetti muuttuu lämpötilan vaikutuksesta. Korkea viskositeetti-indeksi tarkoittaa, että viskositeetin muutokset ovat pieniä lämpötilan muuttuessa ja alhaisella viskositeetti-indeksillä päinvastoin. (Transformer oil handbook 2010, 90.)

Leimahduspiste kuvaa alhaisinta lämpötilaa, jossa öljy voi syttyä. Leimahduspiste riippuu paljon öljyn kevyempien jakeiden määrästä öljyssä ja on erittäin herkkä esimerkiksi bensiinille. IEC 60296 -standardi edellyttää, että öljyn leimahduspiste on vähintään 135 °C . Tämä arvo on määritelty turvallisuussyistä. (Transformer oil handbook 2010, 94.)

Jähmepiste kertoo, missä lämpötilassa öljy ei ole enää juoksevaa. Tämän pisteen tietäminen on tärkeää öljyn liikkuvuuden takaamiseksi alhaisissa lämpötiloissa, joista tulee vastaan pohjoisella pallonpuoliskolla talvisin. Vaatimukset jähmepisteelle eroavat maittain. Parafiiniset öljyt alkavat muodostaa kiteitä alhaisissa lämpötiloissa, mitä ei tapahdu nafteenisilla öljyillä. Tämä johtuu parafiinisten öljyjen molekyylien rakenteista. Kiteet tarttuvat jäähdytyksen rakenteisiin ja estävät öljyn kulkeutumista. Lämpötilasta, jossa kiteitä alkaa muodostua, käytetään termiä samepiste. (Transformer oil handbook 2010, 92.)

Öljyn tiheys vaihtelee öljylaatujen mukaan. Öljyt, joilla on korkea aromaattisten yhdisteiden osuus, omaavat korkeamman tiheyden kuin öljyt, joissa on vähemmän aromaattisia yhdisteitä ja enemmän parafiinisiä tai nafteenisiä yhdisteitä. Muuntajan käynnistyksessä alhaisissa lämpötiloissa voi tulla ongelmia vastaan, jos vapaana olevaa vettä on jäänyt öljyn päälle. Tämän vuoksi on hyvä tietää öljyn tiheys veden jäätymispisteessä, että voidaan valita sopivaa öljyä kohteeseen. Öljyn tiheys laskee lämpötilan noustessa. (Transformer oil handbook 2010, 94.)

Öljyyn sitoutuva kosteus riippuu öljyn lämpötilasta ja aromaattisten molekyylien määrästä, joka riippuu jalostusprosessista. Korkeamman jalostusasteen öljyyn sitoutuu vähemmän vettä. Öljyyn sitoutuvan veden määrä kasvaa lämpötilan noustessa, ja lämpötilan pysyessä muutoksen jälkeen vakiona menee noin 2 - 8 tuntia että saavutetaan tasapainotila vapaan veden ja öljyn välille. Öljyn suhteellisen kosteuden pysyessä alle 100 % vettä ei kondensoidu öljyn sekaan. Öljyn säilyttäminen lämpimässä ja kosteassa ympäristössä hankaloittaa öljyn kuivana pitämistä. Öljystä voidaan erottaa vettä höyrystämällä sitä siihen sopivalla laitteella. (Transformer oil handbook 2010, 94 - 95.)

Öljyssä olevien hiukkasten määrä on pieni nykyaikaisen jalostuksen jälkeen, mutta hiukkasten määrä lähtee heti nousemaan, kun öljyä siirretään ja varastoidaan. Öljyn hiukkasmäärä voidaan laskea ennen öljyn käyttöönottoa suodattamalla sitä. (Transformer oil handbook 2010, 95.) Muuntajaöljyn suodattamista suositellaan aina ennen muuntajan käyttöönottoa. Puhdistusta voidaan tehdä myös muuntajan käytön aikana muuntajaan tehdyssä sivukierrossa. Metallisten hiukkasten kerääntyminen pinnoille aiheuttaa johtavan materiaalin muodostumisen, mikä huonontaa eristyksen kokonaisuuden toimintaa, ja siten laskee muuntajan kuormittavuutta. (Leola 2013.)

Läpilyöntijännite kertoo öljyn sähköisen eristyskyvyn. Siihen vaikuttavia tekijöitä ovat: öljyn kosteus, hiukkasten määrä ja hiukkasten muoto. Veden ja hiukkasten poistolla voidaan saavuttaa yli 70 kV läpilyöntijännite muuntajaöljyllä. 30 kV arvoa pidetään alaraja-arvona. Läpilyöntijännitteen mittaukseen käytetään standardista riippuen erilaisia tapoja, mutta IEC 60156 ja ASTM D1816 ovat vertailukelpoisia keskenään, jos etäisyydet ovat samat tai tulos on laskettu samalle etäisyydelle. Kyseisissä menetelmissä kaksi pallonmuotoista tai puolipallonmuotoista elektrodia asetetaan 2 - 2,5 mm etäisyydelle toisistaan ja jännitettä nostetaan 2 kV/s, kunnes läpilyönti tapahtuu. Koe suoritetaan kuusi kertaa ja niistä lasketaan keskiarvo kokeen huonon toistettavuuden takia. (Transformer oil handbook 2010, 96 - 97.)

Dielektrinen häviökerroin riippuu ionisoitujen ja polaaristen molekyylien määrästä öljyssä. Vesi ei vaikuta suoraan tähän ominaisuuteen, mutta voi nostaa sitä reagoimalla muiden hapettumistuotteiden kanssa. Öljyn hapettuessa häviökerroin ensin nousee, laskee ja nousee uudestaan. Tämä johtuu ensin hapettumisprosessissa tapahtuvasta voimakkaiden polaaristen molekyylien muodostumisesta, jotka hajoavat myöhemmin uusiksi radikaaleiksi muodostaen uusia hapettumistuotteita, jotka omaa alhaisemman polaarisuuden. Reaktio jatkuu muodostaen happoja ja estereitä, jotka nostavat häviökerrointa. Normaalitaso uusille öljyille on vähemmän kuin 0,001 lämpötilassa 90 °C taajuusalueella 50 - 60 Hz. Korkeasti jalostetuilla öljyillä tämä arvo on pieni, mutta se on erittäin herkkä käsittelyn aikana tuleville epäpuhtauksille, esimerkiksi moottoriöljy. Pienetkin määrät voivat nostaa arvot rajojen yläpuolelle. (Transformer oil handbook 2010, 97 - 98.)

Rajapintajännitys mittaa veden ja öljyn rajapinnan voimakkuutta. Arvo ei liity itsessään muuntajan toimintaan, mutta se on hyvä työkalu öljyn epäpuhtauksien arviointiin. Rajapintajännitystä pidetään hyvänä mittarina, milloin on

aika vaihtaa tai regeneroida öljy. Rajapintajännitys riippuu polaarista ryhmistä öljyssä ja nousee niiden lisääntyessä. Uusilla öljyillä arvon pitäisi ylittää 40 mN/m. Runsaasti heikentynyt öljyn rajapintajännitys voi olla alle 20 mN/m. (Transformer oil handbook 2010, 98 - 99.) Arvon 25 mN/m alittavaa öljyä pidetään hyvin likaisena ja olisi suositeltavaa vaihtaa tai regeneroida se. Arvon 22 mN/m pidetään rajana, jonka alittuessa alkaa öljyssä muodostua lietettä. Liee syntyy hapettumistuotteena. Liee on haitallista muuntajan toiminnalle, koska se kerääntyy eristeisiin ja paikkoihin missä lämmön siirtyminen on tärkeää. Tämä vaikuttaa muuntajan kuormitettavuuteen. (Transformer Diagnostics 2003, 14 - 15.)

Uudella muuntajaöljyllä happoluvun odotetaan olevan alle 0,01 mg KOH/g öljyä. Nykyaikaisilla jalostustekniikoilla tämä on helppo saavuttaa. Öljyn käsittelyssä tulee olla tarkka, että se pysyy uudenveroisessa kunnossa ja ei johda väärään tulkintaan öljyn vanhenemisen tarkkailussa. (Transformer oil handbook 2010, 99.) On suositeltavaa, että öljy puhdistettaisiin hapettumistuotteista ennen kuin happoluku saavuttaa arvon 0,2 mg KOH/g. Lietteen muodostumisen on havaittu alkavan 0,4 mg KOH/g tason saavuttamisen jälkeen. (Transformer Diagnostics 2003, 15.)

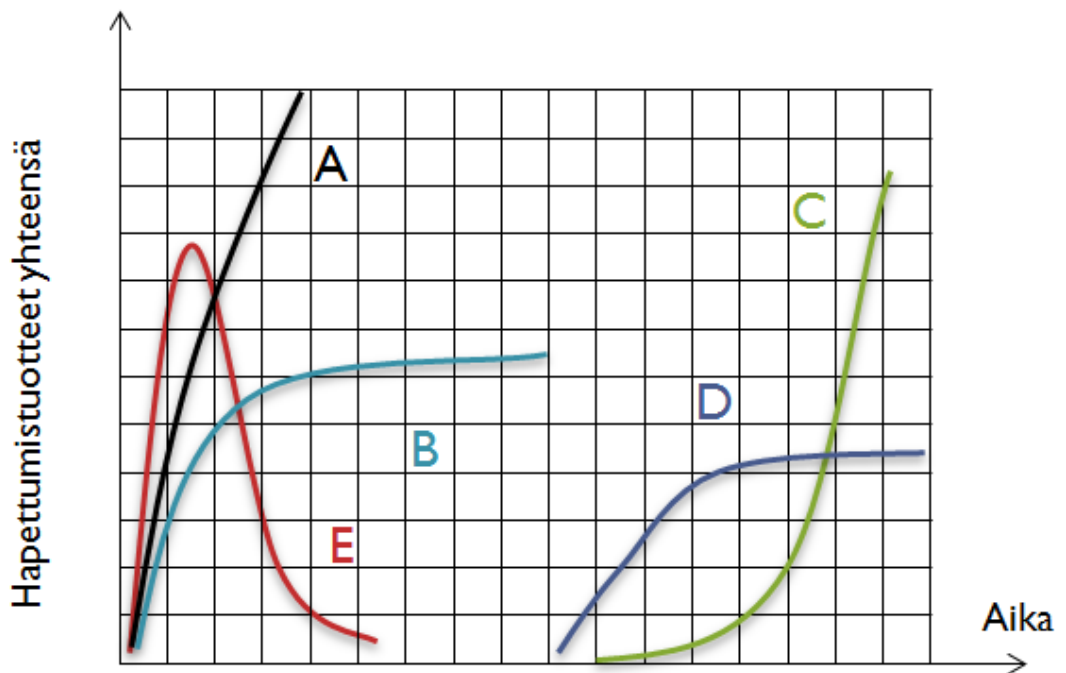
Öljyn korrosoivaa vaikutusta kupariin on mitattu altistamalla pätkä kuparia öljyyn ja pitämällä sitä korotetussa lämpötilassa määrätty aika. Kuparin värjäymän tutkimisella voidaan arvioida korrosoivaa vaikutusta. Testausta on uudistettu 2000-luvulla sattuneiden korroosiosta johtuvien muuntajavikojen takia. (Transformer oil handbook 2010, 99.)

Hapetuskestävyys kuvaa öljyn kykyä vastustaa hapettumistuotteiden syntyä. Markkinoilla on myynnissä kahdenlaisia öljyjä, sellaisia mihin on lisätty inhibiittia ja mihin ei ole lisätty inhibiittia. (Transformer oil handbook 2010, 100.)

Inhibiitin lisäksi käytetään myös termejä hapettumisenestoaine ja antioksidantti (Sandbacka 1999, 17). Inhibiitillä tarkoitetaan ainetta, jolla hidastetaan tai estetään hapettumistuotteiden muodostuminen. Molemmat öljyt sisältävät luonnollisia inhibiittejä jotka toimivat peroksiedeja hajottavasti. Öljyt joihin on lisätty synteettisiä yhdisteitä, yleisimmin DBPC ja DBP, reagoivat vapaiden radikaalien kanssa muodostaen vakaan yhdisteen. Inhibiitteinä toimivien aineiden reagoiminen hapettumisen estämiseksi kuluttaa niitä. Hyvä hapettumisenkestävyys hidastaa merkittävästi hapettumistuotteiden, kuten happojen, veden ja hiilidioksidin, muodostumista, ja näin säilyttää öljyn pitempään paremmassa kunnossa. Siirtymämetalli-ionit toimivat katalyytteinä hapettumisprosessissa ja myös heikentävät öljyn sähköisiä ominaisuuksia. Öljyjen hapetuskestävyyden testaamiseen on monta tapaa. IEC 61125, ASTM D2112 ja ASTM D2440 testeissä öljy altistetaan kuparille ja hapelle korkeassa lämpötilassa määrätyn ajan verran, jonka jälkeen mitataan happoluku tai testataan muulla tavalla öljyn vanhenemista. Testien ongelma on että mikä kuvaisi parhaiten käyttöä vastaavaa tilannetta, (Transformer oil handbook 2010, 100 - 104.) Sopivana arvona DBPC- yhdisteelle öljyssä on pidetty 0,3 % öljyn kokonaisuudesta (Transformer Diagnostics 2003, 16).

Kuviossa 5 kuvataan erilaisia hapettumistuotteiden kehittymismalleja. Käyrä A kuvaa mineraaliöljyä tai huonosti jalostettua öljyä. Näissä ei ole inhibiittoria pysäyttämässä hapettumisreaktiota. Käyrä B kuvaa öljyä jossa on luonnollisia inhibiittoreita, jotka pysäyttävät hapettumisen ja muodostavat lietettä. Käyrä E kuvaa käyrän B öljyssä muodostuneita peroksiedeja, joiden kanssa inhibiittori reagoi muodostaen vakaita yhdisteitä. Käyrä C kuvaa öljyä, joka on muuten samaa kuin öljy käyrässä A, mutta siihen on lisätty fenolinen inhibiittori, jollainen on esimerkiksi DBP. Inhibiittorin pois kuluessa alkaa samanlainen

voimakas hapettumisreaktio kuin käyrässä A. DBP:n sopivan tason ylläpitäminen muuntajaöljyssä joka on puhdasta, edistää pitkää käyttöikää öljylle. Käyrä D kuvaa öljyä jossa on luonnollisia ja synteettisiä inhibiittoreita ja on täten käyrien B ja C yhdistelmä. (Transformer oil handbook 2010, 102 - 103.)



KUVIO 5. Hapettumistuotteiden erilaiset kehittymismallit (Transformer oil handbook 2010, 102.)

Öljyyn voi tapahtua positiivinen varautuminen pumppauksen yhteydessä putken seinämistä, jotka adsorboivat negatiivisen varauksen. Tämä on todennäköisempää tapahtuvan yli 0,5 m/s virtausnopeuksilla. On huomattu, että

selluloosan vanhenemisella on suuri vaikutus ja öljyn vanheneminen, eristyksen kuivuus ja lämpötila on tärkeitä tekijöitä varautumisessa. Testissä on huomattu, että öljy, joka on käsitelty inhibiiteilla on vähemmän taipuvaisempi varautumaan, kuin öljy, johon ei ole lisätty inhibiittia. Osittaisia purkauksia voi tästä johtuen tapahtua muuntajassa ja eri jäähdytysratkaisujen takia ongelma ja suuruus vaihtelevat muuntajan mukaan. (Transformer oil handbook 2010, 111 - 112.)

Vikakaasuanalyysi (Dissolved gases analysis = DGA) on yleisesti käytetty menetelmä muuntajan vikojen havaitsemiseen aikaisessa vaiheessa. Lämpö- ja sähköviat heikentävät eristemateriaalia ja muodostavat kaasuja jotka liukenevat öljyyn ja kulkeutuvat öljyn mukana tasaisesti ympäri muuntajaa, mikä helpottaa näytteenottoa. Näytteessä olevien kaasujen avulla voidaan arvioida onko laitteessa mahdollisesti vikaa ja minkä tyyppinen vika on. Monet muuntajat muodostavat kaasuja normaalissa toiminnassa, mutta vikatilanteessa kaasun muodostuminen kasvaa merkittävästi. Samaan aikaan voi tapahtua erityyppisiä vikoja muuntajassa, mikä lisää haastavuutta diagnosointiin. (Transformer oil handbook 2010, 208.) Kaasujen muodostumiseen vaikuttaa monta tekijää, kuten muuntajan tyyppi, muuntajan ikä, öljyn kiertonopeus ja öljyn ikä. Tämän takia on tärkeää tietää laite, sen historia ja aikaisempien kaasuanalyysien tulokset, jotta analyysin tuloksista voisi tehdä mahdollisimman oikean johtopäätöksen tuloksista. (Leola 2013; Transformer oil handbook 2010, 204 - 206.)

Eristepaperin kunnan tarkkailussa käytetään näytepalasta tehtävän kokeen perusteella saatavaa polymeroitumisastearvoa, mistä puhutaan DP-lukuna (Degree of Polymerisation = DP). Se kuvaa keskimääräistä selluloosamomeerien määrää paperin polymeeriketjussa. Paperin ikääntyessä sen me-

kaaninen vahvuus heikkenee, mutta sähköinen eristyskyky pysyy melkein samana. DP-luvun määrittäminen on hankalaa käytössä olevassa muuntajasta ja näytepalan saaminen kohdasta missä paperiin kohdistuu eniten lämpöä, kosteutta ja happea, jotka heikentävät paperin kuntoa vanhentamalla sitä. Hankalan seurannan vuoksi, käytetään paperin hajoamisesta syntyvien furfuaaripitoisuuden mittausta öljystä eristeen kunnon arvioinnissa muuntajan käytön aikana. (Transformer oil handbook 2010, 213.)

Taulukkoon 1 on koottu raja-arvoja inhibitoidylle ja inhibitöimättömälle öljylle IEC:n ja ruotsalaisen standardien mukaan. Inhibitoidylle öljylle on otettu arvot eri vaatimusluokista paremman kokonaisuuden muodostamiseksi öljyn vaatimuksista

TAULUKKO 1. Öljyltä vaadittuja raja-arvoja (Transformer oil handbook 2010, 115; Arvidsson 2006, 23)

Ominaisuudet	IEC 60296/03 Inhibitöimätön	Swedish Standard 404 03 26 Inhibitöity Vaatimusluokka IA	Swedish Standard 404 03 26 Inhibitöity Vaatimusluokka IIIA
Tiheys 20 °C kg/m ³	≤ 0,895	≤ 0,895 ^[1]	≤ 0,895 ^[1]
Viskositeetti 40 °C mm ² /s	≤ 12,0	≤ 16,5	≤ 3,5
Viskositeetti -30 °C mm ² /s	≤ 1800	≤ 800 ^[2]	≤ 150 ^[3]
Jähmepiste °C	≤ - 40	≤ - 30	≤ - 60
Leimahduspiste PM °C	≥135	>140	>95
Happoluku mg KOH/g	≤ 0,01	≤ 0,03	≤ 0,03
Vesipitoisuus ppm	≤ 30 bulkki kuljetuksille ≤ 40 tynnyri		
Läpilyöntijännite kV	≥ 30 kuljetuksen jälkeen ≥ 70 käsittelyn jälkeen	≥ 30 kuljetuksen jälkeen ≥ 50 käsittelyn jälkeen	≥ 30 kuljetuksen jälkeen ≥ 50 käsittelyn jälkeen
Dielektrinen häviökerroin 90 °C	0,005	< 0,5	< 0,5

[1] 15 °C

[2] - 15 °C

[3] - 40 °C

4 MUUNTAJAÖLJYN PUHDISTUS

4.1 Käytön aikaisen puhdistuksen edut

Muuntajaöljyn käytön aikaisella puhdistuksella on useita etuja pelkkään öljynvaihtoon nähden. Kun käytössä olevasta muuntajasta vaihdetaan öljy, sen paperieristeisiin jää vanhaa hapettunutta öljyä huuhtelusta huolimatta. Pian ollaan taas tilanteessa, jossa öljyn laatu on huonontunut, koska vanha öljy käynnistää nopeasti vanhentumisreaktion uudessa öljyssä. Jos muuntajaöljyn lämpötila on tarpeeksi korkea, käytön aikaisella puhdistuksella voidaan puhdistaa muodostunutta lietettä muuntajan sisältä. (Pahlavanpour, Lindsell & Povazan 1994, 842.)

Öljyn ominaisuuksien tarkkailulla nähdään kuinka nopeasti öljy vanhenee, minkä avulla voidaan määrittää milloin on tarpeen vaihtaa tai puhdistaa öljy. Ennakoivalla öljyn käsittelyllä voidaan estää muuntajan vahingoittuminen. (Meshkatoddini 2008, 384.)

Muuntajan käytön aikaiseen epäpuhtauksien, veden ja kaasujen poistoon käytetään yleensä rauhallista virtausta erottelukyvyn parantamiseksi. Muuntaajan puhdistuksen jälkeen palaava muuntajaöljy sitoo itseensä kosteutta ja epäpuhtauksia likaisesta muuntajasta, sen mukaan, kuinka suuri palaavan öljyn ja muuntajan sisäinen likaisuusero on. Tämä tapahtuu, koska muuntajan sisällä öljy pyrkii tasaamaan epäpuhtaustasojen eron ja luomaan tasapainon. (Leola 2013.)

4.2 Sähköstaattinen puhdistus

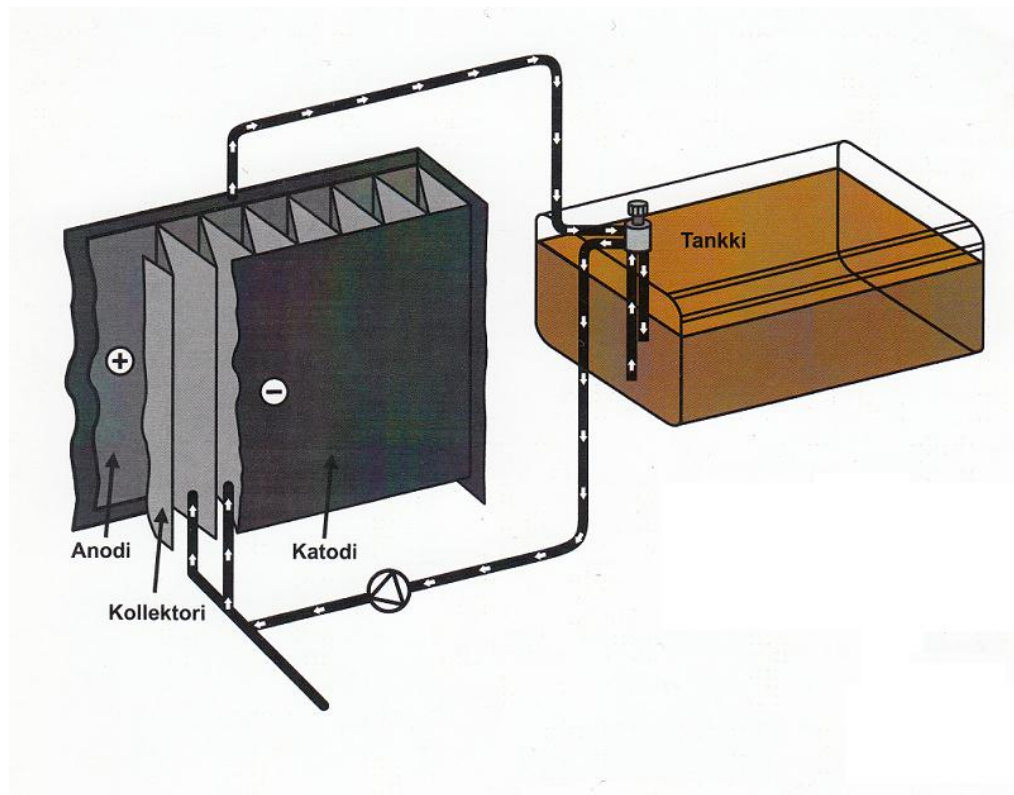
Öljyssä olevat hapettumisen myötä syntyneet hiukkaset voivat varautua joko positiivisesti tai negatiivisesti, vaikka öljy itsessään on sähköisesti neutraali. Osa hiukkasista säilyttää neutraalin ominaisvarauksen. (Sasaki & Uchiya 2002, 10 - 11.) Varautuessaan epäpuhtaudet sitovat energiaa ja varauksen purkautuessa aiheutuu syöpymistä pinnoissa. Varauksen purkautuessa tapahtuu kipinöintiä jossa lämpötila on yli 1000 °C. Korkeassa lämpötilassa öljymolekyylit hajoavat. (Leola 2013.)

Sähköistä varautumista voi syntyä muun muassa suodattamisesta, jos virtausnopeus on korkea. Varautuneiden hiukkasten hakeutuminen vastakkaisen varauksen omaavan komponentin luo, on perusta sähköstaattiselle puhdistukselle (Sasaki & Uchiya 2002, 10 - 11).

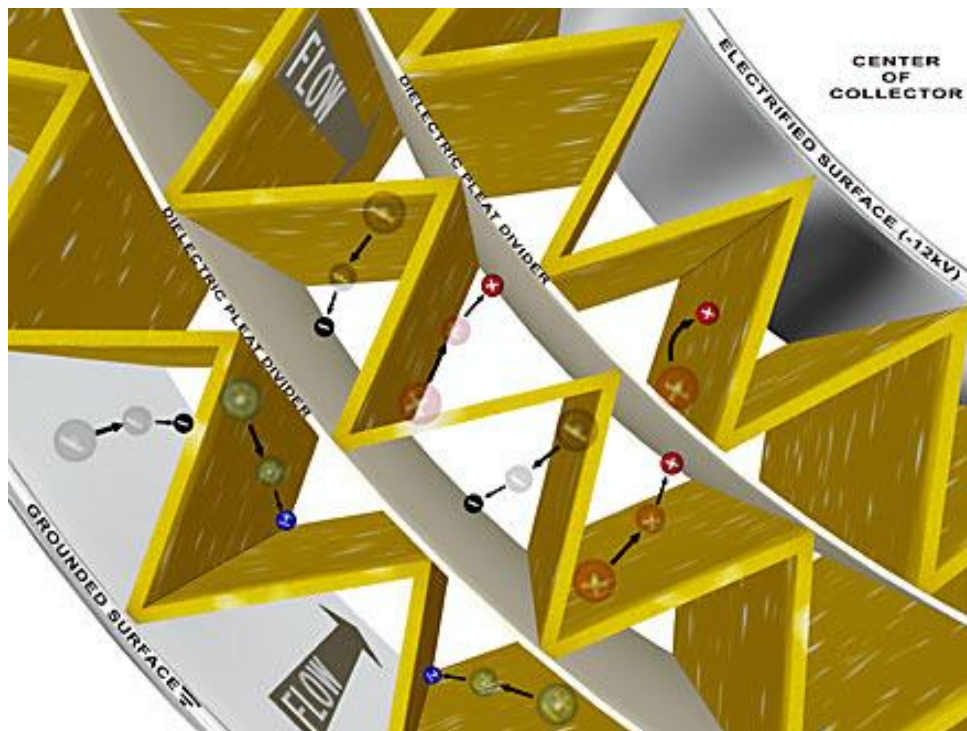
Sähköstaattinen puhdistin kytketään sivukiertoon puhdistettavasta öljyjärjestelmästä, jossa se kierrättää öljyä hitaalla nopeudella. Kuvio 6 havainnollistaa

sivukiertokytkennän. Puhdistimen oma pumppu siirtää öljyä puhdistuskammioon. Kammion toisella laidalla on korkean potentiaalin (12 kV) luova seinä ja kammion vastakkainen puoli on maadoitettu, näin muodostaen anodin ja katodin. Kollektorimateriaalin kerrokset sitovat epäpuhtauksia. Kollektorimateriaali on sivuttaissuunnassa virtaukseen nähden joten pakotettua virtausta sen läpi ei synny. Kuvio 7 kuvaa kammion sisällä olevan rakenteen periaatteen (How It Works 2013).

Sähköstaattisen suodatuksen ansiosta öljyyn liukenemattomat neutraalit epäpuhtaudet saadaan poistettua ja öljyyn liuenneet lisäaineet säilyvät (Leola 2013).



KUVIO 6. Sivukiertokytkentä (Sähköstaattiset öljynpuhdistimet)



KUVIO 7. Sähköstaattinensuodatin (How It Works. 2013)

4.3 Veden ja kaasujen poisto

Veden ja kosteuden poistoon öljystä löytyy useita tapoja. Menetelmien erilaiset tekniikat tuottavat vaihtelevia tasoja. Kaikki menetelmät eivät poista sitoutunutta kosteutta ja toisissa puhdistettavan öljyn virtaukset ovat suuremmat. Eri menetelmiä kosteuden poistoon ovat sentrifugi, polymeeri adsorptio, alipainehöyrystin ja "ilmapesuri" (Air stripping). (Williamson 2003.)

Alipainehöyrytimessä alipaineella lasketaan veden kiehumispistettä, jolloin kostea öljyä ei tarvitse lämmittää niin korkeaan lämpötilaan kuin ilmakehän normaalipaineessa veden pois höyryttämiseksi. Tyypillisesti puhdistettava öljy lämmitetään 70 °C:n lämpötilaan. Prosessi hyödyntää veden öljyä alhaisempaa höyrytyspistettä. Alipainehöyrytimen käytössä olevan ilman kuivattaminen sekä öljyn ja ilman välisen pinta-alan maksimoiminen auttaa saavuttamaan parhaimman mahdollisen tuloksen kosteuden poistossa. Pinta-alan maksimoimiseen käytetään öljyn sumuttamista säiliössä tai pintojen lukumäärän joilla öljy kulkee nostamisella. (Williamson 2003.)

Alipainehöyrytin poistaa kosteuden lisäksi myös kaasuja ja voi saavuttaa jopa muutaman miljoonasosan kosteustason kuivatettuun öljyyn. (Williamson 2003.)

Vaihtoehtoinen tekniikka alipainehöyrytimelle on ilmapesuri. Siinä ilmaa tai typpikaasua syötetään kuumennettuun öljyyn, jossa se sitoo kosteuden ja kaasut. Seuraavassa vaiheessa öljy on alemmassa paineessa, jolloin siihen syötetty kaasu poistuu epäpuhtauksien kanssa. (Williamson 2003.)

4.4 Regenerointi

Kuohusavi on yleisesti käytetty aine happamien tuotteiden, veden ja lietteen poistamiseen öljystä. Sitä esiintyy luonnossa sopivassa muodossa, joten sitä ei välttämättä tarvitse prosessoida, että sitä voi käyttää. Hap- tai höyrykäsitte-lyllä voidaan nostaa jo ennalta korkea pinta-aktiivisuutta. Aktivoitu alumiini toimii myös öljyn puhdistuksessa kuin kuohusavi. Sillä on etuja kuohusaveen

nähdän, mutta se on kalliimpaa käyttää, varsinkin jos sitä ei uudelleen käytetä. (Pahlavanpour, Lindsell & Povazan 1994, 842.)

Regenerointiprosessissa öljy suodatetaan pakotetulla kierrolla kuohusavesta tai aktivoidusta alumiinista muodostettujen rakenteiden läpi, jolloin öljystä poistuu happamia tuotteita. (Pahlavanpour, Lindsell & Povazan 1994, 842.)

Jos puhdistettavasta öljystä on poistettu jo kosteus, niin kuohusaven imukyky jäljellä oleville happamille tuotteille kasvaa. Tämän takia on suositeltavaa kytkeä regenerointi sarjakytken viimeiseksi osaksi, kuohusavi aineksen mahdollisimman pitkän käyttöään takaamiseksi (Fuller's Earth Filtration E575A Series, 2). On huomattu, että kuohusaven itsessään sisältävä kosteus siirtyy öljyyn korkeassa lämpötilassa. Koska kuohusavi on vaihdettava aika ajoin sen hyvän happamien aineiden sitomiskyvyn ylläpitämiseksi, olisi suositeltavaa käyttää kosteudenpoistolaitteistoa kuohusavikäsittelyn jälkeen korkeissa öljyn lämpötiloissa turhan kosteuden öljyyn siirtymisen välttämiseksi. (Garret 1985, 3.)

Hyvien tuloksien saavuttamiseksi, pitkä reagointiaika kuohusaven ja öljyn välillä on suositeltavaa. Hiekkamainen kuohusavi muodostuu pienemmistä hiukkasista, jotka ovat tarttuneet toisiinsa muodostaen huokoisen massan. Hiukkasten epätasaisen pinnan vuoksi reaktiopinta-ala on suuri pienilläkin massoilla. Pitkän reagointiajan avulla öljy voi kulkeutua huokoisen materiaalin läpi ja reagoida tehokkaasti (Fuller's Earth for Fuel Treatment 2013).

Siitä kuinka paljon kuohusavea tarvitaan happoluvun laskemiseksi, on kuohusavipuhdistimen laitetoimittajilla laskelmia. Liitteestä 1 voi nähdä määrän, jota Enervac Corporation suosittelee.

5 KUOHUSAVEN KÄYTTÖTESTIT

5.1 Koejärjestelyt

Suoritimme toimeksiantajan tiloissa Strömberg KTRT123x30 -muuntajasta otetulla muuntajaöljyllä kokeita, joissa muuntajaöljyä puhdistettiin kuohusavella. Minua avustivat kokeissa toimeksiantajan asentajat laitteistojen kytkentöjen asennuksissa ja purkamisissa, lisäksi toimeksiantajan öljyasiantuntijat konsultoivat tarpeen vaatiessa.

Muuntaja valmistusvuosi 1969 ja sen sisältämän öljyn laadusta ei ole tarkkaa tietoa. Muuntajan öljymäärä on 17 400 kg. Muuntajan nimellisteho on 30 MVA. Käytön aikainen kuormitus on 80 %. Yläjännite on 110 kV ja alajännite 6,3 kV.

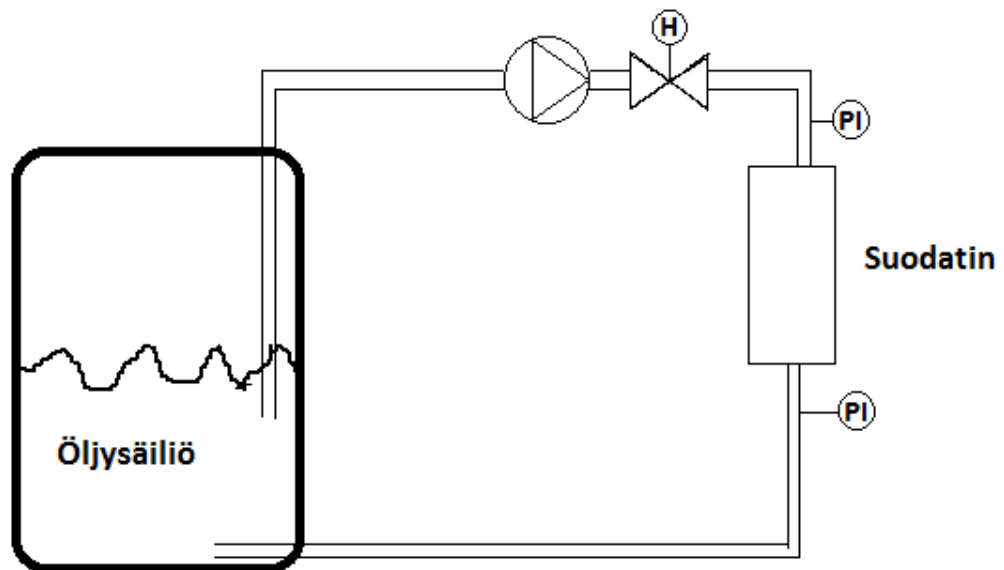
Ensimmäisessä kokeessa (Koe 1) likainen muuntajaöljy ajettiin pelkästään kuohusavisuodattimen läpi. Toisessa kokeessa (Koe 2) likainen muuntajaöljy ensin puhdistettiin kosteudesta ja hiukkasista polymeerisuodattimella ja sähkösuodattimella, minkä jälkeen se ajettiin kuohusavisuodattimen läpi. Näillä

eri kokeilla pyrittiin selvittämään pelkän kuohusavisuodattimen vaikutus li-
kaiselle muuntajaöljylle: kuinka kuohusaven reagoitukyky muuttuu ilman
muuntajaöljyn muuta puhdistusta ennen kuohusavikäsittelyä ja kuinka paljon
kuohusavella saadaan laskettua happolukua 100 litran puhdistuksessa.

Käsiteltävää muuntajaöljyä oli 100 litraa kumpaankin kokeeseen. Muuntajaöl-
jyn määrä mitattiin suodatuksen jälkeen, koska öljyä menetettiin virtauksen
säädössä, näytteenotossa ja laitteisiin jää öljyä.

Öljyn lämpötila öljysäiliössä nostettiin ennen puhdistusta noin 40 °C:seen. Öl-
jyn lämpötilaa nostettiin öljysäiliöön kytketyn vastuksen avulla. Vastusta käy-
tettiin verkkovirralla ja halutun lämpötilan pitämiseksi öljyä lämmitettiin sillä
noin puolen tunnin välein samalla öljysäiliötä sekoittaen. Tämän takia öljyn
lämpötila vaihteli välillä 35 °C - 45 °C. Liian suurta lämmittämistä pyrittiin
välttämään, ettei suoraan vastukseen kosketuksissa oleva öljy vahingoittuisi.
40 °C:n lämpötilalla pyritään kuvaamaan muuntajan normaalia käyttölämpö-
tilaa. Tekemäni havainnon mukaan öljyn lämpötila kuohusavisuodattimella
oli noin 8 astetta öljysäiliön lämpötilaa alhaisempi. Alhaisemman lämpötilan
oletetaan huonontavan kuohusavisuodattimen tehokkuutta.

Muuntajaöljyä syötettiin puhdistusprosessikiertoon öljysäiliöstä mahdollisim-
man läheltä pinnankorkeutta ja kierron poistovirtaus tuli öljysäiliön pohjalle.
Tällä pyrittiin saamaan säiliössä virtaus, jotta koko muuntajaöljy tilavuus
puhdistuisi kokonaan ja tasaisesti. Öljyn virtaus säädettiin kuristusventtiilillä
noin kahteen litraan minuutissa, kun se kulkee kuohusavisuodattimen lävitse,
suodatintoimittajien virtaussuositusten mukaan. Kuviossa 8 havainnolliste-
taan periaate tehdystä suodatuskierrosta.



KUVIO 8. Periaatekuva suodatuskierrosta

Koe 2:ssa öljyä käsiteltiin ensin sähköstaattisella menetelmällä hiukkasten poistamiseksi. Sähköstaattiseen puhdistukseen käytettiin ELC-R25SP - laitetta. Muuntajaöljyä puhdistettiin noin kahdeksan tuntia laitteen pumpun tuottamalla virtauksella 4 l/min. Tässä ajassa kokemuksen mukaan sähkösuodattimen pitäisi saada öljy puhtaaksi. Muuntajaöljystä poistettiin kosteutta polymeerisuodattimella noin yhden tunnin verran. Polymeerisuodattimen pumpun tuotto on 9 l/min. Kuvioista 8 voidaan nähdä periaate, miten suodatuskierto oli järjestetty sähköstaattisella puhdistuksella ja polymeerisuodatuksella, erona on se, että ei ole paineenmittauksia. Polymeerisuodatusta käytettiin, koska alipainehöyrystintä ei ollut vapaana ja öljystä kuitenkin haluttiin

poistaa mahdollista kosteutta. Kun öljyä oli puhdistettu sähköstaattisella puhdistimella ja polymeerisuodattimella, oli vuorossa kuohusavisuodatin.

Kuohusavisuodattimen syöttölinjassa ja poistolinjassa olevilla paineenmittauksilla pyrittiin selvittämään paine-eron muutosta puhtaalla ja likaisella suodattimella.

Kuohusavisuodattimina käytettiin Hilliard Corporationin tuottamia HT718-00-CN -patruunoita. Kummankin öljyn testaukseen käytettiin uutta suodatinta alusta alkaen.

Ennen puhdistusprosesseja, otettiin alussa näytteet, joista testataan happoluku, rajapintajännitys, viskositeetti, hiukkaskoostumus ja kosteus. Nämä samat asiat testattiin myös näytteistä, kun muuntajaöljyä oli puhdistettu kuusi tuntia. Öljystä otettiin tunnin välein näyte puhdistusprosessin alkamisesta lähtien. Näyte otettiin pumpun jälkeen, koska säiliöstä ei saa otettua näytteitä, jotka olisivat yhtä vertailukelpoisia keskenään. Tunnin välein otettavista näytteistä testattiin pelkästään happoluku. Kuohusavipuhdistusprosessia käytettiin kuusi tuntia molemmissa testitapauksissa, minkä jälkeen analysoitiin tulokset näytteistä.

Koe 1:n öljylle tehtiin jatkokoe, jossa öljyä suodatettiin uudestaan samalla suodattimella ja kokoonpanolla kuusi tuntia lisää. Tässä testissä otettiin vain alussa ja lopussa näytteen, josta testataan pelkästään happoluku.

Öljynäyte otettiin joka kerta samalla tavalla. Ensin näyteventtiili avattiin ja siitä päästettiin ilmaa ja mahdollisia epäpuhtauksia pois valuttamalla öljyä n. 15 sekuntia. Sen jälkeen näytepurkkiin otettiin noin kolmannes purkin tilavuudesta öljyä, purkki suljettiin ja ravisteltiin ja öljy kaadettiin jäteöljyastiaan. Tämä tehtiin kahteen kertaan. Sen jälkeen purkki täytettiin mahdollisimman

täyteen öljyä ja suljettiin. Purkit numeroitiin sen mukaan, monesko näyte oli. Kaikki näytteet olivat 100 ml.

Laitteet ja yhteet oli puhdistettu huolellisesti ennen testauksien aloittamista eikä niitä käytetty muissa kohteissa muualta tulevan lian minimoimiseksi testauksien aikana.

Esipuhdistettua muuntajaöljyä puhdistessa kuohusavisuodattimella huomasimme kuplintaa kuohusavisuodattimen jälkeen poistolinjassa joka tulee öljysäiliöön. Oletamme, että ilmaa sekoittuu öljyyn ja se voi aiheuttaa öljyn vanhenemista.

5.2 Riskianalyysi

Ennen kokeita tein riskianalyysin, jossa mietin mahdollisia koetilanteeseen liittyviä riskejä ja sitä, kuinka ne voitaisiin minimoida. Taulukkoon 2 on koottu analyysin tulokset.

TAULUKKO 2. Riskianalyysi

RISKI	RISKIN VAIKUTUKSET	RISKIN MINIMOINTI
Öljyyn tulee likaa ympäristöstä.	Laboratoriotestien tulokset eivät ole johdannaaisia ja keskenään vertailukelpoisia.	Yhteet, säilytysastiat ja laitteet puhdistetaan huolellisesti ja muualta tulevaa likaa vältetään kokeiden aikana työskentelemällä mahdollisimman vähän likaisten aineiden kanssa.
Öljynäytteet eivät ole vertailukelpoisia.	Tutkimuksen tulokset eivät ole valideja.	Öljynäytteet otetaan aina kuohusavisuodattimen syöttölinjasta pumpun jälkeen. Näytteenottotapa vakioidaan.
Öljyn lämpötila ei vastaa muuntajan normaalia käyttölämpötilaa.	Tulokset eivät ole vertailukelpoisia käytännön toteutukseen.	Öljyä lämmitetään ja pidetään ennakkoon määrätetyllä lämpötila alueella korotetussa lämpötilassa.
Öljy vanhenee vastuksen lähistöllä korkean lämpötilan takia.	Vanhenemistuotetasot eivät ole vertailukelpoisia.	Öljyä sekoitetaan öljysäiliössä kun vastus on kytketty päälle.
Öljyä sekoittaessa irtoaa hiukkasia öljysäiliöstä mekaanisten iskujen takia.	Tulosten hiukkastasot eivät ole valideja.	Öljyä pyritään sekoittamaan mahdollisimman vähän metallihiukkasia irrottaen. hiukkastasoja seurataan analyysien yhteydessä.
Suodatin ei toimi tukkeutumisen tai kanavoitumisen takia.	Suodatusprosessi on toiminnassa, mutta suodatusta ei tapahdu.	Paineenmittaus ennen suodatinta.
Öljyn terveydelliset vaarat.	Terveyshaitat henkilöillä	Käytetään suojausta ettei öljy pääse suoraan ihokosketukseen. Toimeksiantajan ensiapulaukku.
Öljyn ympäristölle haitallisuus.	Ympäristöhaitat.	Toimeksiantajan käytännöt öljyvahingoissa.

5.3 Tulokset

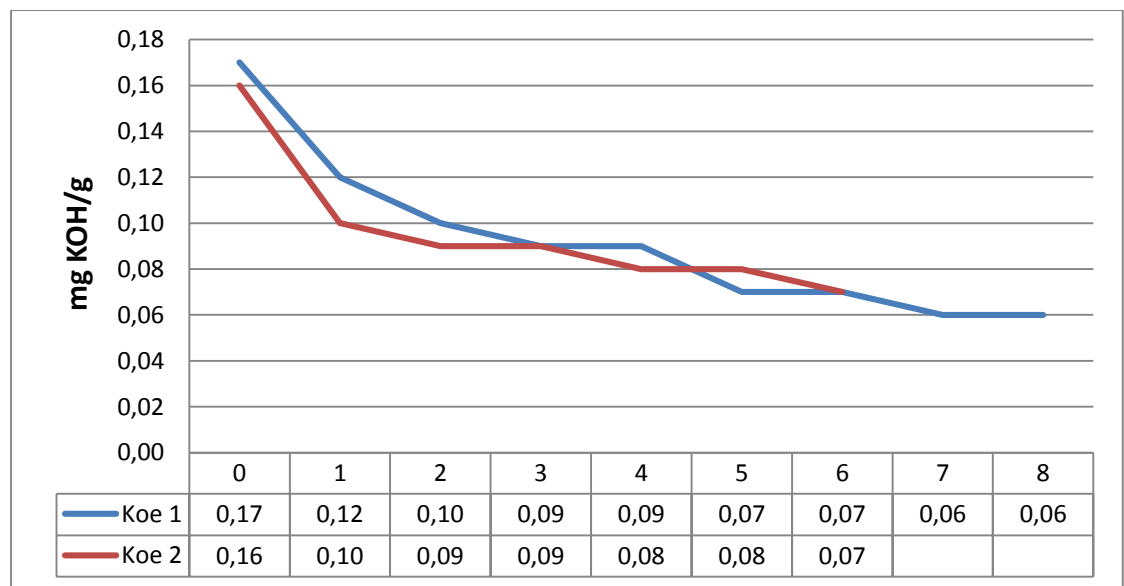
Liitteissä 2 ja 3 ovat testitulokset lähtötasoista ja suodatusten jälkeen saavutetuista lopullisista tasoista.

Molemmissa kokeissa saatiin pudotettua happolukua alle puoleen lähtötilanteesta. Happoluvun kehityksen voi tarkemmin seurata kuvioista 9. On syytä pitää mielessä kuviota katsoessa, että näytteet 0 - 6 on otettu tunnin välein, kun taas 7 ja 8 ovat 6 tunnin erolla. Näytteiden 6 ja 7 välillä öljyä on vain säilytetty suljetuissa astioissa. Happoluvun pieneneminen pysähtyi sen saavutettua tason 0,06 mg KOH/g. Happoluvun pieneneminen oletetusti hidastui nopean alun jälkeen. Näytteiden 6 ja 7 välillä oleva 0,01 mg KOH/g ero on niin pieni, että se kuuluu virhemarginaaliin. Jatkotestissä selvisi että kuohusavisuodatin ei enää laskenut happolukua kuuden tunnin suodatuksen jälkeen.

Liitteen 1 kuvion mukaan arvioin tarvittavaa määrää kuohusavea koe tilanteeseen. Kuviota luetaan katsomalla x-akselilta puhdistamattoman öljyn happoluku ja sen kohdalta nousee y-akselin suuntaisesti ylöspäin, kunnes leikataan tavoitearvokäyrä. Y-akselilla oleva asteikko kertoo, kuinka paljon tarvitaan kuohusavea paunoina gallonaa(US) öljyä kohden. Leikkauspiste osoittaa tarvittavan kuohusaven määrän y-akselilla, kun leikkauspisteestä siirrytään suoraan x-akselin suuntaisesti.

Lähtötilanteessa happoluku on 0,17 mg KOH/g. Tavoitearvo on 0,06 mg KOH/g. Koska tavoitearvo ei ole minkään kuviossa olevan tavoitearvokäyrän

kanssa sama, niin arvioidaan, että leikkauspiste on suunnilleen 0,05 ja 0,1 tavoitearvokäyrien välissä olevalla alueella lähellä 0,05 tavoitearvokäyrää. Y-akselilla arvioimani piste osoittaa 0,4 paunaa per gallona(US), mikä on 0,048 kg per litra. 80 litran suodattamiseen suositeltava kuohusavimäärä olisi 3,84 kg.



KUVIO 9. Happoluvun kehitys. 0 on lähtötaso ja nouseva numerojärjestys edustaa mones näyte on kyseessä

Öljyn pH-arvo nousi molemmissa tapauksissa, koe 1:llä enemmän kuin koe 2:lla.

Rajapintajännitys kasvoi molemmilla öljyillä melkein saman verran. Rajapintajännityksen kasvaminen kertoo onnistuneesta polaaristen ryhmien vähentämisestä öljyssä.

Korkeammalle lähtöarvolle öljyn värissä kattavasti puhdistetulla öljyllä ei ole löydetty selitystä. Silmämääräisesti arvioiden testien jälkeen molemmissa tapauksissa näytteet vaalenivat ja ero oli selvästi nähtävissä ääripäitä vertaillessa, kuten pystyy huomaamaan kuviosta 10.



KUVIO 10. Näytteet 0 (vasen) ja 6 kattavasti puhdistetusta öljystä

Öljy oli puhdasta hiukkasista ennen suodatusta molemmissa tapauksissa, joten niissä ei ole eroa. Öljyn puhdistaminen sähköstaattisesti ennen kuohusavikäsittelyä ei ole luultavasti vaikuttanut arvoihin, koska öljyn hiukkastason ennen sähköstaattistasuodatusta oletetaan olevan sama kuin pelkällä kuohusavella suodatetun öljyn lähtötaso.

Kuohusavisuodattimesta ei havaittu irronneen hiukkasia, jotka olisivat näkyneet hiukkasanalyyseissä.

Painemittarit, joita käytimme ensimmäisessä suodatuksessa, olivat 0-6 baarin alueella toimivia. Tämä alue oli liian epätarkka, joten toiseen kokeeseen vaihdimme tarkemman painemittarin kuohusavisuodattimen syöttölinjaan. Tämän mittarin alue oli 0-1 baaria. Kattavasti suodatetulla öljyllä kuohusavisuodatuksen alussa paine oli 0,08 bar. Paine nousi mittauksen aikana ja viimeisen näytteen jälkeen se oli 0,12 bar.

Jatkotestissä painemittauksen ennen suodatinta näyttämä lukema oli aluksi 0,07 bar, mutta se laski suodatuksen jatkuessa ja lopulta oli n. 0,02 bar. Pidetään mahdollisena, että suodattimeen on voinut muodostunut kanavia ja suodattimen teho on heikentynyt. Jatkotestissä suodatus pysäytettiin hetkeksi suodattimen tiivisteiden silmämääräistä tarkistamista varten. Ne vaikuttivat olevan kunnossa, joten suodatusta jatkettiin. Suodatin käännettiin toisin päin kuin se alun perin oli ollut siltä varalta, että se muuttaisi virtausta suodattimen läpi. Tämän jälkeen paine nousi aluksi, mutta laski 0,02 baariin.

Taulukossa 3 on kooste lopullisista arvoista kuuden tunnin suodatuksen jälkeen ja vertailu IEC 60296 -standardin arvoihin. Pelkällä kuohusavisuodatuksella tehdyn jatkokokeen tuloksia ei koottu tähän taulukkoon, koska se ei ole vertailukelpoinen suppeutensa takia.

TAULUKKO 3. Puhdistetut muuntajaöljyt ja IEC 60296 -standardin raja-arvot (IEC 60296 Edition 4.0 2012. 17)

Ominaisuus	Vain kuohusavella suodatettu öljy	Kattavasti puhdistettu öljy	IEC 60296 uusi öljy
Happoluku mg KOH/g (maks.)	0,07	0,07	0,01
Rajapintajännitys mN/m (min.)	34,19	35,95	40
Viskositeetti 40 °C mm ² /s (maks.)	8,12	8,16	12,0
Väri	3	3,5 Katso kuvio 10	Kirkas, sedimentitön

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tehtävänä oli tutkia kuohusaven käyttöä muuntajaöljyn puhdistamiseen ja testata sen toimivuutta käytännössä.

Muuntajaöljyä pystytään onnistuneesti puhdistamaan kuohusavella niin, että hapettumistuotteita pystyttiin poistamaan ja hapettumistuotteiden määrää kuvaavat ominaisuudet osoittavat hapettumistuotteiden vähenevän. Hapettumistuotteiden poistaminen ja muodostumisen estäminen on edellytys muuntajan paperieristeiden pitkäikäisyyden takaamiseksi. Paperieristeiden kunnon ylläpitäminen auttaa pidentämään muuntajan käyttöikää. Muuntajan käyttöiän kasvattaminen siirtää korvaavan muuntajan hankkimista ja sen aiheuttamia suuria kustannuksia.

Jatkuvalla muuntajassa olevan öljyn ominaisuuksien tarkkailulla voidaan päätellä milloin on tarpeellista puhdistaa öljy. Suosittelen säännöllisten testien perusteella tehtävää puhdistusta, koska öljyn vanheneminen on muuntaja kohtaista ja riippuu, esimerkiksi lämpötilasta, käyttöasteesta ja öljyn inhibiittipitoisuudesta.

Tutkimus oli alun perin suunniteltu tehtävän käytössä olevalle muuntajalle, mutta sitä ei pystytty järjestämään. Tämän takia jää vielä tuntemattomaksi

kuinka muuntajan eristepaperiin sitoutunut kosteus ja öljy vaikuttavat suodatusprosessiin ja sen keston. Nyt jää epäselväksi, kuinka pitkään kestää eristepaperiin sitoutuneiden hapettumistuotteiden suodattaminen ja kuinka alhaiselle tasolle niitä voidaan saada kustannustehokkaasti.

Tutkimuksessa oli tarkoitus tehdä kokeet kahden eri muuntajan öljyille, mutta öljyä toisesta muuntajasta ei pystytty järjestämään.

Opinnäytetyön alkuperäisen aikataulun mukaan, kuohusavisuodattimen käytön testaaminen käytössä olevaan muuntajaan oli tarkoitus tapahtua kesällä 2013. Tätä ei pystytty järjestämään, joten suppeammat kokeet tehtiin toimeksiantajan tiloissa lokakuussa 2013. Raportin valmistumisen voidaan katsoa myöhästyneen alkuperäisestä suunnitelmasta, noin 2 kuukautta.

Käytössä olevan muuntajan muuntajaöljyn suodatusprosessi tehtäisiin kytkeväällä eri suodattimet sarjaan. Nyt tehdyssä kokeissa tämä kytkentätapa jäi toteuttamatta. Kahden suodatinpatruunan samanaikaisen käytön mahdollistava testilaitteemme käyttäminen 17 400 kg öljyä sisältävään muuntajaan voi olla liian aikaa vievää kuohusavisuodattimen suositusvirtauksella, joten suuremman yksikön käyttäminen on perustellumpaa. Muun puhdistuslaitteiston käyttämä korkeampi virtausnopeus muodostaa myös ongelman, jos halutaan käyttää kuohusavisuodattimille suositeltua virtausnopeutta. Käyttämäämme laitteistoa hiukkasten ja kosteuden poistoon muuntajaöljystä, on testattu muuntajien käytön aikana ja osoittautunut luotettavaksi kenttäolosuhteissa.

Jatkotestissä ei tapahtunut muutosta testin alussa ja lopussa otettujen näytteiden välillä. Näytteiden välillä ei huomattu myöskään värieroa. On mahdollista että suodattimen ohi on voinut tapahtua virtausta, koska paine syöttölinjassa ennen suodatinta laski suodatuksen aloittamisen jälkeen. Aikaisemmin tehdystä suodatuksesta kyseisellä suodattimella ja öljyllä, ei saatu painearvoja

mittareiden epätarkkuuden takia. Vähäisen syöttöpaineesta olevan tiedon takia, ei voi vetää johtopäätöksiä syöttöpaineen ja suodattimen toiminnan välillä tässä tapauksessa. Suodatinta tarkastaessa ei huomattu vikaa tiivisteissä.

Tulosten perusteella oletetaan, että kuohusavisuodattimen käyttöikä on alle kuusi tuntia ja sen jälkeen se kannattaa vaihtaa. Kuviossa 9 nähdään, kuinka happoluvun muutosnopeus hidastuu, kun öljyä on suodatettu 5 tuntia. Alhaisemman happoluvun omaavan öljyn suodatuksessa samalla virtauksella, suodattimen käyttöaika oletetaan olevan pitempi, koska kuohusaven reagointiteho laskee sen mukaan kuinka paljon happamia yhdisteitä se poistaa öljystä. Reagointitehoon vaikuttaa, kuinka nopea öljyn virtaus suodattimen läpi on, nopeampi virtaus heikentää sitä.

Alustavasti voidaan pitää liitettä 1 hyvänä lähtökohtana tarvittavaa kuohusaven määrää arvioitaessa. Menetetyn 20 litran ja painemittausongelmien takia ei voida vetää johtopäätöstä, että käyttämäämme kuohusavea pitäisi olla enemmän, kuin liitteen 1 suosittamaa. Virtauksen tarkistus tehtiin suodattimen jälkeen, joten tarkistuksessa ja säädössä hukattu öljy on voinut vähentää kuohusavisuodattimen reagointitehoa.

Painemittauksista ei voi vetää yhtenevää johtopäätöstä, koska tulokset jäivät vaillinaisiksi, erosivat paljon toisistaan ja kehittyivät eri tavalla.

Kokeessa ei saavutettu haluttua vertailua kattavasti puhdistetun muuntajaöljyn ja pelkällä kuohusavella suodatetun öljyn välille. Näytteiden puhtauserot hiukkasissa olivat liian pienet ja kosteudessa tulokset olivat liian epätarkat, että pystytään tekemään johtopäätöksiä. Muuntajaöljy, jota oli saatu testeihin, oli liian puhdasta hiukkasista.

Kokeissa jäi selvittämättä, kuinka suuri muutos happolukuun olisi saatu, jos vanhan kuohusavisuodattimen tilalle olisi vaihdettu uusi ja jatkettu suodatusta. Selvittämättä jäi, kuinka suuri ensimmäisten uudella suodattimella suodatetusta öljystä otettujen näytteiden happolukujen välinen ero olisi ja kuinka alhaiselle tasolle happoluku olisi muuttunut suodatuksen jatkuessa 12 tuntia.

Työssä onnistuttiin keräämään toimeksiantajalle uutta tietoa kuohusavesta ja sen käytöstä suodattimena. Työssä käytetyt lähdemateriaalit kootaan kansiksi toimeksiantajalle.

Tulokset tukevat lähdemateriaalin teoriaa ja pienestä otannasta huolimatta tulokset olivat vähintäänkin odotettuja.

Mahdollisia jatkotutkimusta vaativia aiheita, olisi kuinka virtausnopeus kuohusavisuodattimen lävitse vaikuttaa reagoititehoon ja kuinka paperieristeissä olevat hapettumistuotteet vaikuttavat suodatusprosessiin ja sen lopputuloksiin.

LÄHTEET

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 1996. Suurjännitetekniikka. Espoo: Otatieto.

Arvidsson, L. 2006. Chemistry in cellulose/oil insulated apparatuses. Västerås, Ruotsi: VPdiagnose.

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneidenperusteet. 2. p., uud. p. Porvoo: WSOY.

Fuller's Earth Filtration E575A Series. N.d. Esite. Enervac Corporation. Ontario, Kanada. Viitattu 9.5.2013. [Http://www.enervac.com/en/PDFs/04/E575A.pdf](http://www.enervac.com/en/PDFs/04/E575A.pdf)

Fuller's Earth for Fuel Treatment. N.d. Artikkelijaxon Filtrationin sivustolla. Viitattu 21.9.2013. <http://www.jaxonfiltration.com/Fullers-Earth-fuel-treatment.html>

Garret, Jr. 1985. Process for Treating Contaminated Transformer Oil. Patenttinumero 4,498,992. United States Patent. Yhdysvallat. Viitattu 8.5.2013. [Https://docs.google.com/viewer?url=www.google.com/patents/US4498992.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=www.google.com/patents/US4498992.pdf)

Guidelines for the Identification of PCBs and Materials Containing PCBs. 1999. Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals. Viitattu 17.4.2013. [Http://www.chem.unep.ch/pops/pdf/PCBident/pcb1.pdf](http://www.chem.unep.ch/pops/pdf/PCBident/pcb1.pdf)

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

How It Works. N.d. Artikkelij Kleentek Industrial Company Ltd:n sivustolta. Viitattu 8.5.2013. [Http://www.kleentek.com](http://www.kleentek.com), how it works

IEC 60296 Edition 4.0. 2012. Diaesitys. Nynas AB. Viitattu 26.10.2013

Kil ratkaisut. 2013. Diaesitys. Kil-Yhtiöt Oy. Viitattu 5.11.2013.

Kjellman, J., Tvrdy, J., Malinen, P., Vadbäck, H., Vaino, S. & Halttunen, Y. 2012. Pienen ja keskisuuren tuulivoiman mahdollisuudet Keski-Suomessa. Jyväskylä: Keski-Suomen liitto. Viitattu 12.11.2013. [Http://www.keskisuomi.fi/filebank/22678-tuulivoimaselvitys_1842012_pienennetty.pdf](http://www.keskisuomi.fi/filebank/22678-tuulivoimaselvitys_1842012_pienennetty.pdf)

Leola, K. 2013. Johtava asiantuntija ja toimitusjohtaja KIL-Yhtiöt Oy. Haastattelu 24.10.

Meshkatoddini, M. 2008. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. Shahid Abbaspour Power and Water University of Technology. Tehran, Iran. Viitattu 12.11.2013.

[Http://www.doaj.org/doaj?func=fulltext&aId=1465054](http://www.doaj.org/doaj?func=fulltext&aId=1465054)

Pahlavanpour, B., Lindsell, M. & Povazan E. 1994. Transformer Life Extension By In-Situ Oil Reclamation. Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane, Australia. Viitattu 8.5.2013. [Http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=414142&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=414142&tag=1)

Sandbacka, Å. 1999. Muuntajaöljyn puhdistus käytön aikana. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, sähkötekniikka.

Sasaki, A. & Uchiyama, S. 2002. A New Technology for Oil Management: Electrostatic Oil Cleaner. KLEENTEK Industrial Co., Ltd. Japani. Viitattu 8.5.2013.

[Http://www.kleentek.com/pdfs/OilManagement.pdf%20](http://www.kleentek.com/pdfs/OilManagement.pdf%20)

Sähköstaattiset öljynpuhdistimet. N.d. Esite. Kil-Yhtiöt Oy.

Transformer Diagnostics. N.d. 2003. Bureau of Reclamation. Viitattu 17.4.2013.

[Http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_31/fist3-31.pdf](http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_31/fist3-31.pdf)

Transformer oil handbook. 2010. 3. edition. Sweden: Nynas AB.

Transformers: Basics, Maintenance and Diagnostics. N.d. 2005. Bureau of Reclamation. Viitattu 10.5.2013. [Http://www.usbr.gov/pmts/client_service/cent/studytransformers.pdf](http://www.usbr.gov/pmts/client_service/cent/studytransformers.pdf)

Wall, D. 2009. Parametric Estimating for Early Electric Substation Construction Cost. Opinnäytetyö. The University of Texas at Austin. Viitattu 12.11.2013. [Http://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/ETD-UT-2009-12-455/WALL-MASTERS-REPORT.pdf](http://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/ETD-UT-2009-12-455/WALL-MASTERS-REPORT.pdf)

Wiklund, P. 2012. Longevity of transformers through transformer oil General Aspects (Part1). Diaesitys. Nynas AB. Viitattu 26.10.2013.

Williamson, M. 2003. Options for Removing Water in Oil. Practising Oil Analysis 7. Viitattu 10.5.2013. [Http://www.machinerylubrication.com/Read/503/removing-water-in-oil](http://www.machinerylubrication.com/Read/503/removing-water-in-oil)

Liite 2. Testattujen öljyjen lähtöarvot

	Koe 1	Koe 2
Päivämäärä	4.10.2013	8.10.2013
Rauta mg/kg	0	0
Kromi mg/kg	0	0
Tina mg/kg	0	0
Alumiini mg/kg	0	0
Nikkeli mg/kg	0	0
Kupari mg/kg	0	1
Lyijy mg/kg	0	0
Molybdeeni mg/kg	0	0
Pii mg/kg	0	1
Kalium mg/kg	0	0
Natrium mg/kg	2	0
Vettä %	-	< 0,10
Viskositeetti 40 °C:ssa mm ² /kg	8,20	8,22
Viskositeetti 100 °C:ssa mm ² /kg	2,29	2,27
Viskositeetti-indeksi	84	79
Hapettuminen A/cm	2	2
Väri	3,5	5,5
Kalsium mg/kg	1	0
Magnesium mg/kg	0	0
Boori mg/kg	0	0
Sinkki mg/kg	1	0
Fosfori mg/kg	0	0
Barium mg/kg	0	0
Rikki mg/kg	1770	1835
Happoluku mgKOH/g	0,17	0,16
pH-luku	5,44	5,39
Rajapintajännitys mN/m	23,18	24,10

Liite 3. Testattujen öljyjen arvot 6 tunnin suodatuksen jälkeen

	Koe 1	Koe 2
Päivämäärä	4.10.2013	8.10.2013
Rauta mg/kg	0	0
Kromi mg/kg	0	0
Tina mg/kg	0	0
Alumiini mg/kg	0	0
Nikkeli mg/kg	0	0
Kupari mg/kg	0	0
Lyijy mg/kg	0	0
Molybdeeni mg/kg	0	0
Pii mg/kg	0	1
Kalium mg/kg	0	1
Natrium mg/kg	1	0
Vettä %	-	< 0,10
Viskositeetti 40 °C:ssa mm ² /kg	8,12	8,16
Viskositeetti 100 °C:ssa mm ² /kg	2,27	2,25
Viskositeetti-indeksi	84	75
Hapettuminen A/cm	1	1
Väri	3,0	3,5
Kalsium mg/kg	0	1
Magnesium mg/kg	0	0
Boori mg/kg	0	0
Sinkki mg/kg	1	1
Fosfori mg/kg	0	0
Barium mg/kg	0	0
Rikki mg/kg	1653	1826
Happoluku mgKOH/g	0,07	0,07
pH-luku	6,60	6,25
Rajapintajännitys mN/m	34,19	35,95