



Joel Villa

Voimalaitoksen muuntajien kunnon- valvonta kaasuanalysaattoreilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

11.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Joel Villa
Otsikko:	Voimalaitoksen muuntajien kunnonvalvonta kaasuanalysaattoreilla
Sivumäärä:	54 sivua
Aika:	11.5.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Sähköinsinööri Jori Issakainen Lehtori Kai Virta

Insinööriyön tarkoituksena oli tehdä selvitys pää- ja omakäyttömuuntajien kaasuanalysaattoreiden hankinnasta Vantaan Energian Martinlaakson voimalaitokselle. Kaasuanalysaattori on laite, jolla voidaan seurata muuntajan kuntoa lähes reaaliaikaisesti. Kaasuanalysaattorilla muuntajan vikaantuminen voidaan tunnistaa nopeasti ja näin ollen pystytään aloittamaan toimenpiteiden suunnittelu ja välttää ennakoimaton käyttökeskeytys.

Työssä selvitettiin muuntajien vanhenemis- ja vikaantumismekanismeja sekä näistä aiheutuvia vikakaasuja, jotta voidaan ymmärtää paremmin kaasuanalysaattorin funktio muuntajan kunnonvalvonnassa. Työssä myös tarkasteltiin kaasuanalysaattoreiden rakennetta ja toimintaa, kuten kaasunäytteen erotusmenetelmiä sekä mittaustekniikoita.

Työssä tehtiin vertailu markkinoilla olevista kaasuanalysaattoreista. Vertailussa tarkasteltiin yksi- ja monikaasuanalysaattorimallien mittaustominaisuuksia, teknisiä ratkaisuja sekä valmistajia. Vertailun perusteella tehtiin suositus hankittavista kaasuanalysaattoreista.

Avainsanat: muuntaja, kunnonvalvonta, kaasuanalysaattori, liuenneiden kaasujen analyysi

Abstract

Author: Joel Villa
Title: Condition Monitoring of Power Plant Transformers with Gas Analyzers
Number of Pages: 54 pages
Date: 11 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Jori Issakainen, Electrical Engineer
Kai Virta, Senior Lecturer

The purpose of this thesis work was to conduct research on the procurement of gas analyzers for generator and auxiliary transformers for Vantaa Energia's Martinlaakso power plant. A gas analyzer is a device that can monitor the condition of the transformer in near real time. With a gas analyzer, a transformer failure can be identified quickly and thus the planning of measures can be started and unforeseen outage can be avoided.

The aging and failure mechanisms of the transformers and the resulting fault gases were investigated in the thesis work to better understand the function of the gas analyzer in the condition monitoring of the transformer. The thesis work also examined the structure and operation of gas analyzers, such as gas sample separation methods and measurement techniques.

The thesis work compared the gas analyzers on the market. In the comparison, the measurement properties, technical solutions, and manufacturers of single and multi-gas analyzer models were examined. As result a recommendation was made for the gas analyzers to be procured based on the comparison.

Keywords: transformer, condition monitoring, gas analyzer, dissolved gas analysis

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vantaan Energia Oy	1
3	Muuntaja	4
3.1	Muuntajan toiminta	6
3.2	Muuntajan rakenne	7
3.3	Muuntajan jännitteen säätö	10
3.4	Muuntajan suoja- ja valvontalaitteet	10
3.5	Pää- ja omakäyttömuuntajat	11
4	Muuntajan vanhenemis- ja vikaantumismekanismit	12
4.1	Paperieristeen vanheminen	12
4.2	Muuntajaöljyn vanheneminen	14
4.3	Purkaukset	16
4.4	Termiset viat	17
4.5	Käämikytkimen viat	17
4.6	Käämien mekaaniset muutokset	17
4.7	Ympäristö	18
5	Vikakaasut	18
6	Kaasuanalysaattori	21
6.1	Kaasuanalysaattoreiden rakenne ja toiminta	22
6.2	Kaasunäytteen erotusmenetelmät	22
6.3	Kaasuanalysaattoreiden käyttämät mittaustekniikat	24
7	Kaasuanalysaattorimallien vertailu	27
7.1	Yksikaasuanalysaattorit	27
7.1.1	GE Hydran M2-X	27
7.1.2	Vaisala MHT410	29
7.1.3	MTE Hydrocal 1001+	29
7.1.4	Hitachi Energy CoreSense	31

7.1.5	Mittausominaisuuksien vertailu	32
7.2	Monikaasuanalysointilaite	33
7.2.1	GE Kelman DGA 900	33
7.2.2	Vaisala OPT100 DGA	35
7.2.3	MTE Hydrocal 1009	37
7.2.4	Hitachi Energy CoreSense M10	39
7.2.5	Mittausominaisuuksien vertailu	41
7.3	Tiedonsiirtomenetelmät	43
7.4	Huolto ja tuki	45
7.5	Kustannukset	46
8	Kaasuanalysointilaitevalinnan valinta	47
9	Yhteenveto	50
	Lähteet	51

Lyhenteet

- DGA: *Dissolved gas analysis*. Muuntajan liuenneiden kaasujen analyysi.
- DP: *Degree of polymerisation*. Polymerisoitumisaste.
- FC: *Fuel cell*. Polttokennoanturi.
- GC: *Gas chromatography*. Kaasukromatografia.
- IEC: *International Electrotechnical Commission*. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.
- IP: *Ingress protection*. IP-luokitusjärjestelmä on järjestelmä sähkölaitteiden ja laitekoteloiden tiiviiden määrittämiseksi.
- IR: *Infrared*. Infrapunamittaus.
- PAS: *Photo acoustic spectroscopy*. Fotoakustinen spektroskopia.
- ppm: *Parts-per-million*. Miljoonasosa.
- SS: *Solid-state-sensor*. Solid-state-anturi.
- TDCG: *Total dissolved combustible gases*. Palavien kaasujen kokonaismäärä.
- TGP: *Total gas pressure*. Vaisalan kehittämä menetelmä muuntajan kaasuotojen havaitsemiseen.

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena on tehdä selvitys muuntajien kaasuanalysaattoreiden hankinnasta Vantaan Energia Oy:n Martinlaakson voimalaitokselle. Selvitykseen sisältyy kaksi päämuuntajaa ja kolme omakäyttömuuntajaa. Nämä muuntajat ovat kriittisiä komponentteja voimalaitoksen prosessissa ja niiden ennakoimaton käyttökeskeytys voi johtaa suuriin taloudellisiin tappioihin.

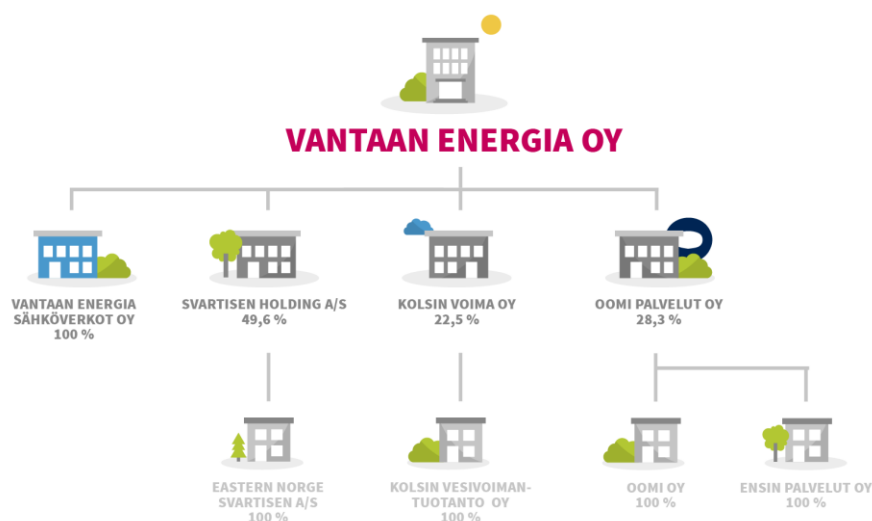
Sähkön tuotannossa, siirrossa ja jakelussa käytettävien muuntajien diagnostiikan ja kunnonvalvonnan merkitys kasvaa jatkuvasti muuntajakannan ikääntyessä. Muuntajien kunnonvalvontaan sisältyy vuosittain otettavat öljyanalyysit, joista voidaan seurata muuntajan sen hetkistä kuntoa. Muuntajan vikaantumisen voi kuitenkin alkaa hyvinkin nopeasti, jolloin mahdolliseen käyttökeskeytykseen ei pystytä varautumaan. Kaasuanalysaattorilla voidaan seurata muuntajan kuntoa lähes reaaliaikaisesti ja näin huomata alkava vikaantuminen ajoissa. Näin ollen pystytään aloittamaan toimenpiteiden suunnittelu ja välttää ennakoimaton käyttökeskeytys.

Työn tavoitteena on vertailla markkinoilla olevia kaasuanalysaattoreita ja sen perusteella tehdä suositus hankittavista kaasuanalysaattoreista. Lisäksi tutkitaan kaasuanalysaattoreiden toimintaa ja rakennetta. Työssä myös selvitetään muuntajan rakennetta ja toimintaa, vanhenemis- ja vikaantumismekanismeja sekä mekanismeista syntyviä vikakaasuja, jotta voidaan ymmärtää paremmin kaasuanalysaattorin funktio muuntajan kunnonvalvonnassa.

2 Vantaan Energia Oy

Vantaan Energia Oy on yksi Suomen suurimmista kaupunkienergiayhtiöistä. Yhtiö on perustettu vuonna 1910 ja sen omistus jakaantuu Vantaan kaupungille 60 % ja Helsingin kaupungille 40 %. Vantaan Energia -konsernin muodostavat emoyhtiö Vantaan Energia Oy, tytäryhtiö Vantaan Energia Sähköverkot Oy sekä osakkuusyhtiöt. Kuvassa 1 on konsernin rakenne. Vuonna 2021 konsernin

liikevaihto oli 275,9 miljoonaa euroa, josta liikevoittoa kertyi 44,1 miljoonaa euroa. Konsernin palveluksessa oli vuoden aikana keskimäärin 298 henkilöä. [1.]



Kuva 1. Vantaan Energia -konserni. [2.]

Vantaan Energia Oy:n pääasiallinen liiketoiminta on tuottaa ja siirtää sähköä ja kaukolämpöä sekä myydä energiapalveluita asiakkailleen. Yhtiön oman energiantuotannon perustan muodostaa sähkön- ja lämmön yhteistuotanto Martinlaakson voimalaitoksessa ja Långmossebergenin jätevoimalassa. Vuonna 2021 yhtiön lämmöntuotantomäärä oli 2000 GWh ja sähköntuotantomäärä oli 1175 GWh. Yhtiön omien voimalaitosten osuus sähköntuotantomäärästä oli 44 % ja osakkuussähköntuotannon osuus oli 56 %. [1.]

Martinlaakson voimalaitos

Vantaan Martinlaaksossa sijaitseva voimalaitos on yhteistuotantolaitos, jossa sähköä ja lämpöä tuotetaan samanaikaisesti. Voimalaitos koostuu kolmesta yksiköstä eli blokista. Blokki 1 on otettu käyttöön vuonna 1975, jolloin siinä käytettiin polttoaineena raskasöljyä. Vuonna 2019 se muutettiin leijukerroskattilaksi, jossa käytetään polttoaineena biomassaa eli puuhaketta. Kattilan lisäksi blokkiin

kuuluu generaattori ja turbiini. Blokki 2 on hiilikattilaitos, ja se otettiin käyttöön vuonna 1982. Siihen kuuluu höyrykattila sekä turbiinilaitos generaattoreineen. Höyrykattila käyttää polttoaineena kivihiiltä. Blokki 4 on otettu käyttöön vuonna 1995 ja se on kaasuturbiinilaitos, joka käyttää polttoaineena maakaasua. Turbiinin ja generaattorin lisäksi siihen kuuluu lämmöntalteenottokattila. Pääasiassa blokki 1 ja blokki 2 tuottavat voimalaitoksella tuotettavan energian ja blokki 4:sta käytetään huippu- ja varatilanteissa. [3.]



Kuva 2. Martinlaakson voimalaitos. [4.]

Voimalaitosyksiköiden yhteenlaskettu sähköteho on 188 MW ja kaukolämpöteho 190 MW. Kivihiilen sähköteho on 75 MW ja lämpöteho 145 MW, maakaasun sähköteho on 88 MW ja lämpöteho 90 MW. Biopolttoaineiden sähköteho on 25 MW ja kaukolämpöteho 95 MW. [3.]

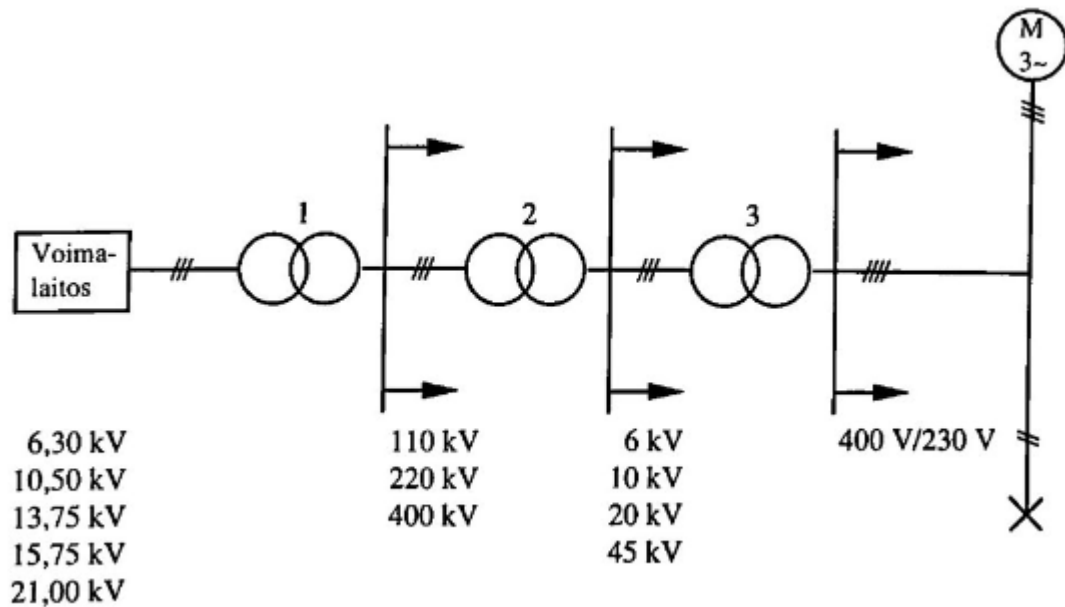
3 Muuntaja

Muuntaja on sähkömagneettinen laite, jonka tehtävänä on muuntaa vaihtosähköverkon jännitettä tai virtaa pienemmäksi tai suuremmaksi tarpeen mukaan. Muuntaja toimii vain vaihtosähköllä, joka on 1900-luvun alussa aiheuttanut sen, että vaihtosähkö on syrjäyttänyt tasasähkön. Muuntajilla on useita käyttötarkoituksia, kuten voimalaitosten ja sähköasemien tehomuuntajat, joita käytetään sähköenergian siirrossa. Muuntajia käytetään myös verkkojen galvaaniseen erotukseen sekä jännitteen tai virran muuntamiseen mittakojeille ja releille sopivaksi. Työssä keskitytään kuitenkin tehomuuntajiin ja niiden kunnonvalvontaan. [5, s. 7.]

Tehomuuntajat ovat tärkeä komponentti sähköisessä järjestelmässä. Kuvassa 3 havainnollistetaan voimansiirtoverkon periaatteellinen rakenne voimalaitokselta kulutukseen, josta nähdään, että tehomuuntajia käytetään voimansiirtoverkossa muuntamaan jännitettä pienemmäksi ja suuremmaksi tarpeen mukaan. Samalla muuntaja eristää kaksi eri sähköverkkoa toisistaan. Voimalaitosten generaattoreilla ei eristysteknisistä syistä voida kehittää kuin maksimissaan n. 30 kV jännite. Tämä jännite on liian pieni valtakunnalliseen siirtoon, koska energia on suuritehoista ja siirtomatkat ovat pitkiä. Kaavasta 1, joka on kolmivaihejärjestelmän äärijohtimen mitoitusyhtälö, voidaan todeta, että mitä suuremmalla jännitteellä tehoa P siirretään matkalla s, sitä pienempi on tarvittava johtimen poikkipinta-ala ja täten johdinkustannukset ovat pienemmät. [5, s. 7–8.]

$$A = 100 \times \frac{P \times s}{p \times \gamma \times U^2}, \quad (1)$$

jossa A on johtimen poikkipinta-ala, P on siirtoteho, s on siirtomatka, U on johdon pääjännite, γ on johdinaineen konduktiivisuus ja p on jännitteen alenema prosentteina.



Kuva 3. Muuntajan käyttö voimansiirtoverkossa. 1) Voimalaitosmuuntaja, 2) keski- eli väljännitemuuntaja ja 3) jakelumuuntaja [6, s. 268.]

Siirtoyhteydet ovat resistiivisiä eli häviöllisiä yhteyksiä. Tämän seurauksena osa siirretystä tehosta menetetään siirtoyhteydessä. Tehohäviöt voidaan laskea kaavalla 2. Kaavasta huomataan, että virran kaksinkertaistuminen johtaa häviön nelinkertaistumiseen. Myös tämän takia on parempi nostaa jännite mahdollisimman korkeaksi, jotta voidaan siirtää sama määrä tehoa pienemmällä virralla. [7, s. 4.]

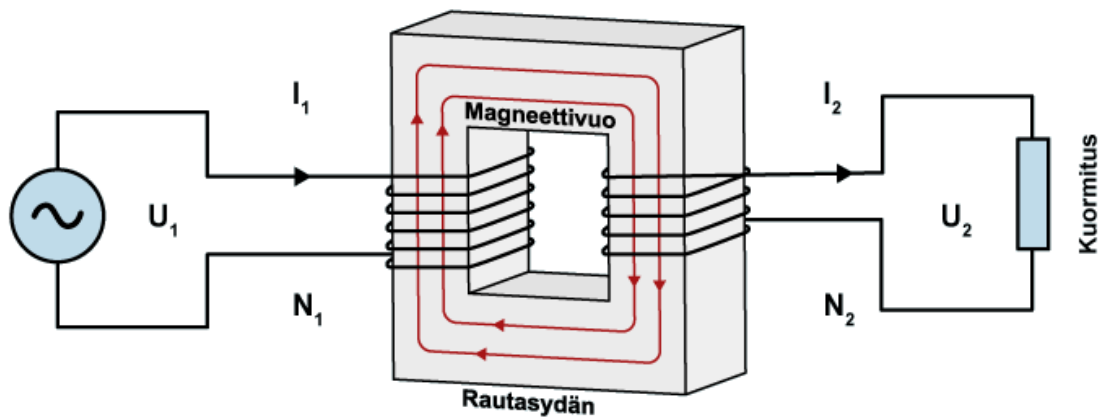
$$P_h = 3 * R * I^2, \quad (2)$$

jossa P_h on kolmivaihejohdon pätötehohäviö, R on johdon resistanssi ja I on kulkeva virta.

Edellä mainittujen taloudellisten tekijöiden sekä sähkölaitteiden standardisoinnin takia sähköverkossa käytetään vain standardoituja jännitteitä. Tehomuuntajat ovat siis tärkeä komponentti sähköisessä järjestelmässä, joilla jännite nostetaan siirtoa varten 110:n, 220:n ja 400 kV:n tasoihin sekä lasketaan takaisin kulutukseen ja laitteistojen kannalta turvalliselle tasolle kuten 400 V. [5, s. 7–8; 7, s. 4.]

3.1 Muuntajan toiminta

Yksinkertainen muuntaja koostuu rautasydämeestä ja sen ympärille taivutetuista johtimista, joita nimitetään käämityksiksi. Käämityksiä on kaksi ja niitä kutsutaan yläjännite- ja alajännitekäämitykseksi tai tehon kulkusuunnan mukaan ensiö- ja toisiokäämitykseksi. Käämimateriaalina käytetään kuparia tai alumiinia ja käämitykset ovat paperieristettyjä. [8.] Kuvassa 4 on esitetty yksivaihemuuntajan toimintaperiaate ja siinä ensiö- ja toisiokäämit ovat sijoitettu samalle rautasydämeelle. Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Ensiökäämiin syötetty vaihtovirta muodostaa rautasydämeen vaihtelevan magneettivuon, jolloin keskinäisinduktanssin vaikutuksesta toisiokäämiin indusoituu käämin kierroslukua vastaava jännite. [6, s. 136–137.]



Kuva 4. Muuntajan toimintaperiaate. [9.]

Muuntajan muuntosuhde μ saadaan kaavalla 3. Jännite on suoraan verrannollinen käämien kierroslukuihin ja virta on kääntäen verrannollinen käämien kierroslukuihin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos toisiopuolella on vähemmän kierroksia, kuin ensiöpuolella, myös jännite on pienempi toisiopuolella. Virta puolestaan samanaikaisesti kasvaa. [9.]

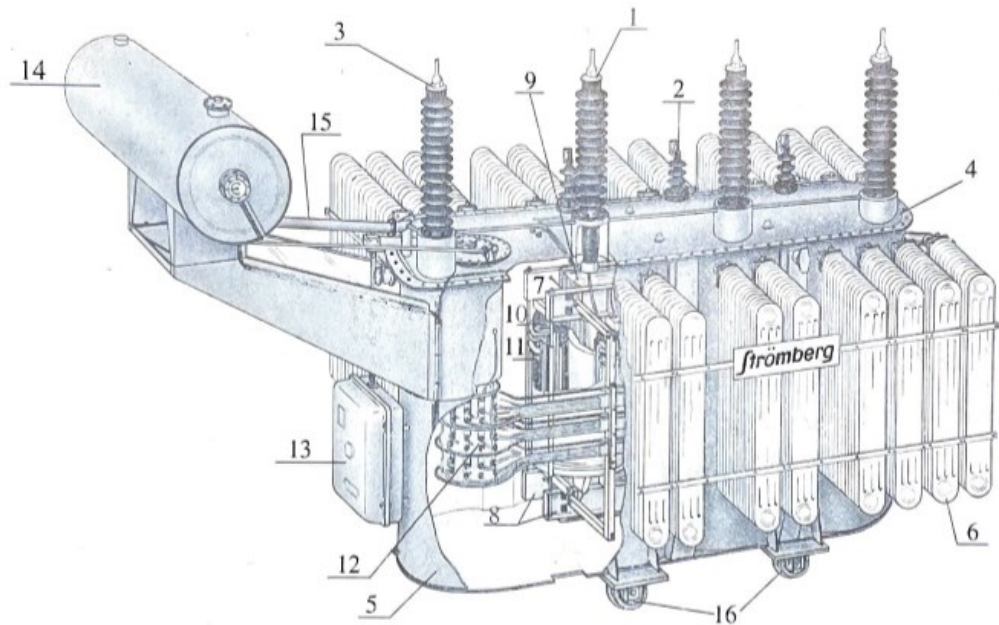
$$\mu = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} , \quad (3)$$

jossa U_1 on ensiökäämin jännite, U_2 on toisiökäämin jännite, N_1 on ensiökäämin kierrosmäärä, N_2 on toisiökäämin kierrosmäärä, I_1 on ensiökäämin virta ja I_2 on toisiökäämin virta.

Muuntajaa tarkastellessa on otettava huomioon se, että todellisuudessa muuntaja ei pysty siirtämään kaikkea ensiöön syötettyä tehoa kuormitukseen. Muuntajassa esiintyy aina virtalämpö- eli kuormitushäviöitä ja rautahäviöitä. Kuormitushäviöt syntyvät käämeissä ja rautahäviöt sydämessä. [7, s. 27.]

3.2 Muuntajan rakenne

Tehomuuntajia on yksi ja kolmevaiheisia. Kolmivaiheiset voima- eli tehomuuntajat voidaan jakaa kahteen ryhmään, jakelu- eli pientehomuuntajiin ja suurtehomuuntajiin. Pientehomuuntajiin kuuluvat muuntajat, joiden yläjännitepuolen nimellijännite on < 20000 V ja alajännitepuolen nimellijännite on 400 V sekä teho on < 3150 kVA. Tätä suuremmat nimellijännitteiset ja -tehoiset muuntajat luetaan suurtehomuuntajiin. [5, s. 65.] Kuvassa 5 on esitetty erään suurtehomuuntajan rakenne ja sen eri komponentit on numeroitu.

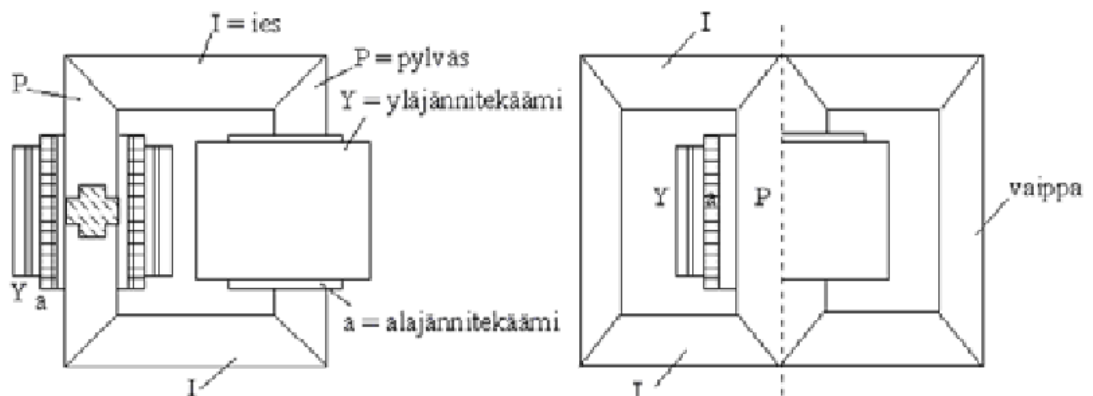


- | | | | |
|----|--------------------------|-----|---|
| 1. | Yläjänniteläpivienti | 9. | Muuntajan rautasydän |
| 2. | Alajänniteläpivienti | 10. | Alajännitekäämi |
| 3. | Tähtipisteläpivienti | 11. | Yläjännitekäämi |
| 4. | Muuntajan kansi | 12. | Käämikytkin |
| 5. | Muuntajan öljysäiliö | 13. | Käämikytkimen ohjain |
| 6. | Radiaattori (jäähdytin) | 14. | Poisuntasäiliö |
| 7. | Yläikeen puristuspaikka | 15. | Öljyastian ja poisuntasäiliön yhdistysputki |
| 8. | Ala-ikeen puristuspaikka | 16. | Kuljetuspyörät |

Kuva 5. Esimerkki suurtehomuuntajasta. [5, s. 66.]

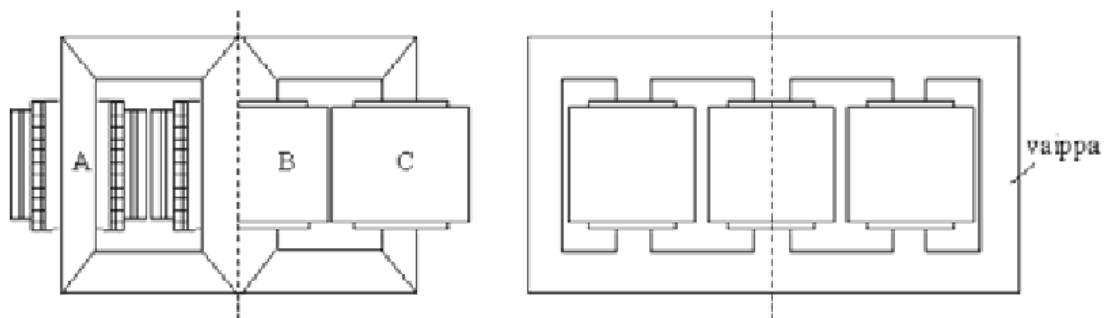
Muuntaja on sisäiseltä rakenteeltaan yksinkertainen, koska siinä ei ole liikkuvia osia. Muuntajan aktiivisia osia ovat käämitykset ja rautasydän, jotka toteuttavat muuntajan ensisijaisen tehtävän. Passiivisia osia ovat eristykset, tukirakenteet ja jäähdytyslaitteet. Muuntaja on rakenteeltaan sydän- tai vaippamuuntaja. Rautasydän koostuu pylväistä ja niitä yhdistävistä ikeistä. Yhdessä nämä muodostavat suljetun magneettipiirin. Ensikäämi ja saman vaiheen toisikäämi on yleensä sijoitettu samalle pylväälle hajavuon ja hajareaktanssin minimoimiseksi, jotka aiheuttavat muuntajassa häviöitä. Kuvassa 6 on esitetty yksivaiheinen sydän- ja vaippamuuntaja. Sydänmuuntajassa on kaksi pylvästä, joiden ympärille

on sijoitettu kahteen osaan jaetut käämitykset. Vaippamuuntajassa on kolme pylvästä ja käämitykset on sijoitettu keskimmaiselle pylväälle. [8.]



Kuva 6. Yksivaiheinen sydänmuuntaja ja yksivaiheinen vaippamuuntaja. [8.]

Kuvassa 7 on esitetty kolmivaiheinen sydän- ja vaippamuuntaja. Sydänmuuntajassa on kolme pylvästä ja vaippamuuntajassa on viisi pylvästä. Tämän takia valta osa kolmivaihemuuntajista on sydänmuuntajia, koska sen rakenne on yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta parempi kuin vaippamuuntajan. [8.]



Kuva 7. Kolmivaiheinen sydänmuuntaja ja kolmivaiheinen vaippamuuntaja. [8.]

Vaihtelevassa magneetikentässä syntyy rautasydämeen suljettuja virtasilmu-koita, joissa kulkee pyörrevirtoja. Pyörrevirrat aiheuttavat pyörrevirtahäviöitä, kun ne lämmittävät sydäntä. Tämän takia rautasydän koostuu useista lami-noiduista levyistä, joilla minimoidaan pyörrevirtojen synty. [6, s. 137; 7, s. 4.]

3.3 Muuntajan jännitteen säätö

Sähköverkossa tapahtuvien muutosten takia muuntajan jännitettä on pystyttävä säätämään. Jännitettä säädetään muuttamalla muuntajan muuntosuhdetta. Tämä tapahtuu yleensä muuttamalla yläjännitekäämityksen johdinkierroslukua, koska virta on yläjännitepuolella pienempi kuin alajännitepuolella. Jännitteen säätöön käytetään väliottokytkintä tai käämikytkintä. Kytkinten erona on se, että väliottokytkimellä voidaan säätää jännitettä vain, kun muuntaja on jännitteetön, kun taas käämikytkimellä voidaan säätää myös jännitteisenä ja kuormitettuna. Väliottokytkimen jännitteen säätöalue on yleensä $\pm 5\%$ tai $\pm 2 \times 2,5\%$ eli 3–5 eri asentoa. Käämikytkimen yleinen jännitteen säätöalue on $\pm 6 \times 1,67\%$ tai $\pm 9 \times 1,67\%$ eli nimellispisteestä voidaan siis säätää yhdeksän asentoa kumpaankin suuntaan eli yhteensä jopa 19 eri asentoa. [5, s. 43–45.]

3.4 Muuntajan suoja- ja valvontalaitteet

Muuntajaa suojataan sähköisillä suojarileillä kuten ylivirta-, maasulku-, ja differentiaalireleillä, joiden lisäksi itse tehomuuntajassa on suojausta ja valvontaa varten seuraavia laitteita [7, s. 31.]:

- Paisuntasäiliön, jonka tilavuus on öljyn alimpia sekä ylimpiä lämpötiloja vastaavien tilavuuksien erotus, joka takaa, että muuntajan säiliö on aina täynnä öljyä.
- Kaasurele, joka suojaa, kun muuntajassa ilmenee sisäisiä ongelmia, kuten paikallista ylikuumentumista, purkaus- tai valokaari-ilmiötä tai sisäisiä oikosulkuja. Releen toiminta perustuu kaasunkehitykseen muuntajassa tai suuren vian aiheuttamaan öljyisyökyyn.
- Öljyn lämpötilan mittari, joka mittaa muuntajan öljyn huippulämpötilaa ja siinä on yleensä hälytys- ja laukaisukoskettimet.
- Öljynkorkeuden osoitin, joka osoittaa öljyn pinnan korkeuden ja siinä on yleensä ylä- ja alaraja hälytyskoskettimet. Sijoitetaan paisuntasäiliön yhteyteen.
- Ilmankuivain, jonka tarkoituksena on kuivata muuntajan sisäänhengitysilmä öljyn tilavuuden vaihdellessa. Kuivausaineena käytetään yleensä silikageeliä.

3.5 Pää- ja omakäyttömuuntajat

Voimalaitoksen päämuuntajien tehtävänä on muuntaa generaattorien tuottama jännite sopivaksi siirtoverkkoon. Kaikilla voimalaitoksen blokkien generaattoreilla on omat päämuuntajat ja ne on yhdistetty kiskostolla. Blokki 1:n ja blokki 2:n generaattorit tuottavat molemmat n. 10,5 kV:n jännitteen, jonka päämuuntajat 1AT01 ja 2AT01 nostavat siirtoverkkoon sopivaksi.

- 1AT01 on Strömbergin valmistama KTRW 123 X 75, jonka jännitteen muuntosuhde on $110\pm 5\%$ / 10,5 kV ja näennäisteho 75 MVA.
- 2AT01 on Strömbergin valmistama KTRW 123 X 90, jonka jännitteen muuntosuhde on $117\pm 2 \times 2,5\%$ / 10,5 kV ja näennäisteho 90 MVA.

Päämuuntajat sijaitsevat päältä avonaisissa muuntajabunkkereissa. Muuntajabunkkerit ovat betonirakennelmia ja ne suojaavat ympäristöä muuntajalta, mutta myös muuntajia ulkoisilta haitoilta. Bunkkerissa muuntajan alla on betoninen allas, jolla estetään öljyn pääsy ympäristöön vikatilanteessa. Altaassa on sepeliä, joka estää öljypalotilanteessa palon hapensaantia sekä hidastaa paloa.

Voimalaitoksen omakäyttömuuntajien tehtävänä on muuntaa generaattorin tuottama jännite sopivaksi laitoksen omille prosesseille. Omakäyttömuuntajat syöttävät esimerkiksi erityyppisiä pumppuja ja puhaltimia, joita on laitoksella jopa satoja. Omakäyttömuuntajia on voimalaitoksella useita ja eritehoisia mutta tämä selvitys koskee blokki 1:n omakäyttömuuntajia 1BT01 ja 1BT02 sekä blokki 2:n omakäyttömuuntajaa 2BT01. Kyseiset muuntajat ovat kaikki Strömbergin valmistamia.

- 1BT01 on malliltaan KTRT 12 X 10, jonka muuntosuhde on $10\pm 9 \times 1,67\%$ / 6,3 kV ja näennäisteho on 10 MVA.
- 1BT02 on malliltaan KTRW 24 X 8, jonka muuntosuhde on 21 / 6,3 kV ja näennäisteho 8 MVA. Muuntaja ottaa syötön siirtoverkosta.
- 2BT01 on malliltaan KTRT 12 X 8, jonka muuntosuhde on $10,5\pm 6 \times 1,67\%$ / 6,3 kV ja näennäisteho 8 MVA.

Nämä omakäyttömuuntajat sijaitsevat blokkiensa päämuuntajien läheisyydessä betonibunkkereissa.

4 Muuntajan vanhenemis- ja vikaantumismekanismit

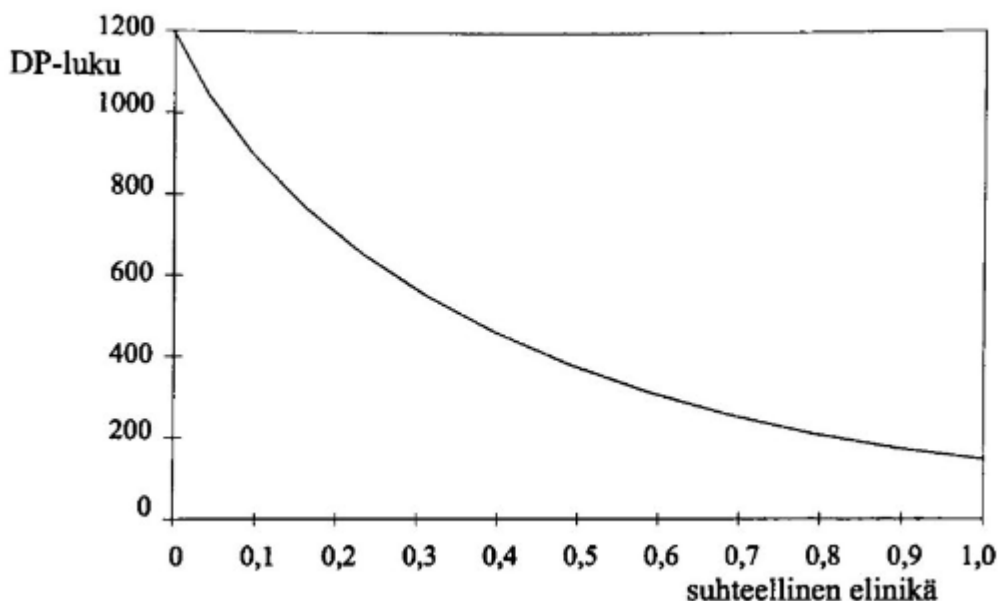
Muuntajassa on paljon erilaisia vanhenemis- ja vikaantumismekanismeja, jotka vaikuttavat muuntajan käyttöikäen. Keskimääräisesti muuntajan käyttöikä on noin 40 vuotta. Jos muuntajan huolto on laiminlyöty, voi käyttöikä olla vain noin 25 vuotta, kun taas asiallisesti huolletun muuntajan käyttöikä voi olla jopa 55 vuotta. [10.]

4.1 Paperieristeen vanheminen

Muuntajan käämitysten ja muiden sähköisten komponenttien mekaanisena sekä sähköisenä eristeenä toimii öljyimpregnoitu paperi. Öljyimpregnoinnin tarkoitus on parantaa paperin läpilyöntilujuutta merkittävästi alkuperäisestä. Paperieristeen vanhentuminen on yleinen syy muuntajan vikaantumiselle. [11, s. 5.]

Paperieriste muodostuu selluloosamolekyyleistä, jotka koostuvat glukoosirenkaiden pitkistä yhdistyneistä ketjuista. Paperin kunnonvalvontaan käytetään polymeerisoitumisastetta eli DP-lukua (degree of polymerisation), joka vastaa paperin keskimääräistä glukoosirenkaiden lukumäärää selluloosamolekyylejä kohden. [12, s. 184.]

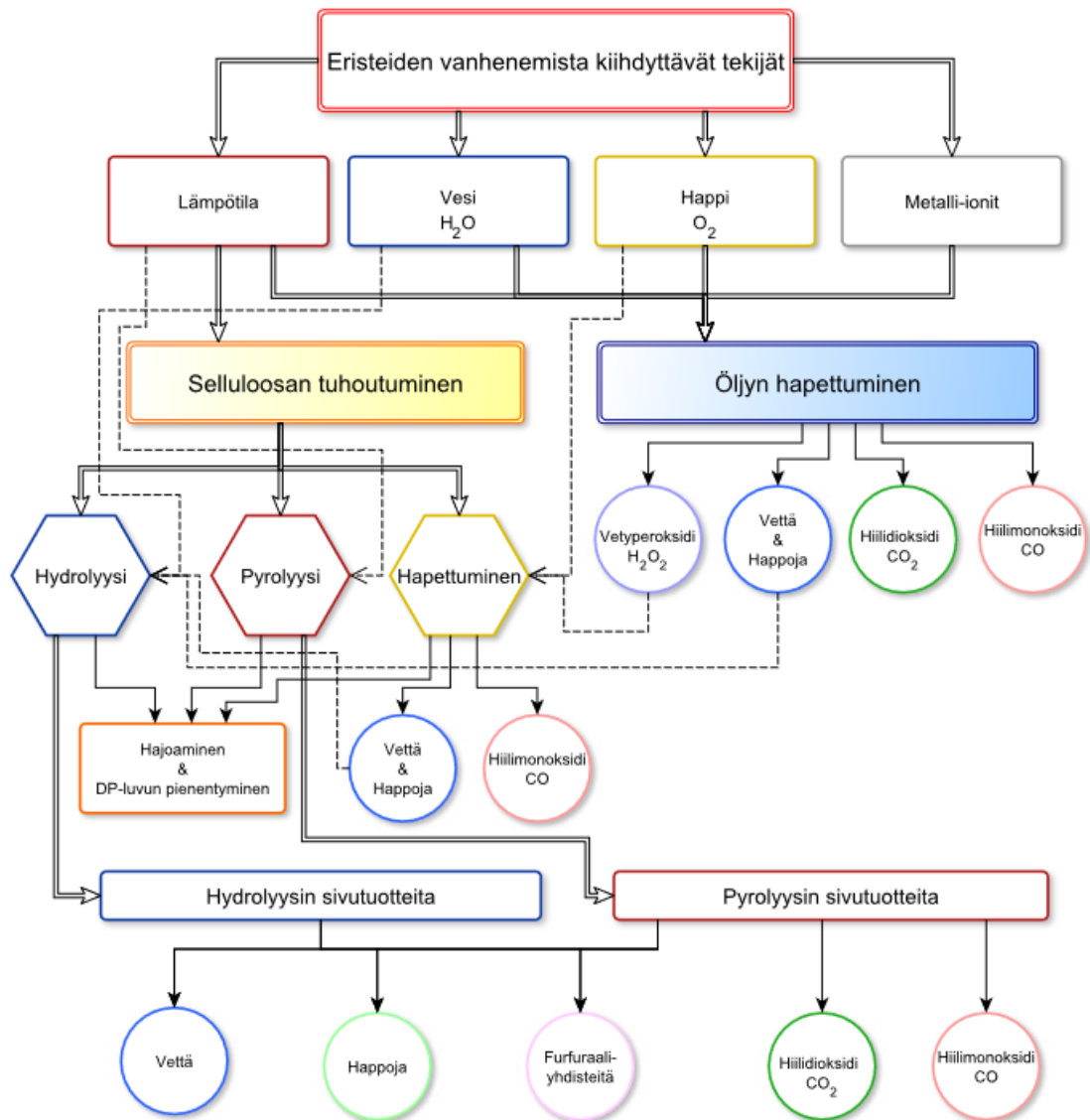
Uuden paperin DP-luku on 1000–1500. Paperin DP-luku laskee hieman, kun se käsitellään ja asennetaan osaksi käämitystä, jolloin sen DP-luku on noin 1000–1250. DP-luku pienenee ajan myötä, kun paperi kohtaa erilaisia rasituksia, jolloin molekyylirakenne hajoaa pienemmiksi ketjuiksi. ”DP-luvun voimakkaampi ikääntyminen sen käytön alkuvaiheessa voi johtua siitä, että paperin polymeeriketjut tutkimusten mukaan hajoavat todennäköisemmin ketjun keskivaiheelta”. Paperin käyttöikänsä lopussa DP-luku on 150–200, jolloin sen mekaaninen kestävyys on hävinnyt täysin. Tällöin pienetkin vikavirrat ja rasitukset muuntajan käämityksissä voivat aiheuttaa merkittävän vikatilanteen. Kuvassa 8 on esitetty eristyspaperin DP-luvun muuttuminen muuntajaeristyksen ikääntyessä. [11, s. 6–7.]



Kuva 8. Eristyspaperin DP-luvun muuttuminen muuntajan termisen eliniän aikana. [12, s. 185.]

Paperin tarkan kunnan arviointi on vaikeaa. Analysointiin tarvitaan paperista näytepala, jota ei voida ottaa muuntajan käytön aikana. Joissakin tapauksissa muuntajaöljyyn on valmistusvaiheessa valmiiksi laitettu kunnan seuraamiseen tarkoitettuja näytepaloja, mutta tällöinkään ei saada todennäköisesti pahinta tilannetta selvitettyä. DP-luvun arvioimiseen käytetään kaasuanalyysia. Analyysi tehdään muuntajaöljystä otettavalle näytteelle. Muuntajaöljyyn liukenee paperin hajotessa kemiallisten reaktioiden, ylikuumenemisen tai sähköpurkausten vaikutuksesta erilaisia hajoamistuotteita. Hajoamistuotteet ovat pääasiassa vettä, happoja, furfuraaliyhdisteitä ja hiilioksideja. [12, s. 185–186.]

Kuvassa 9 on esitetty eristeiden vanhenemista kiihdyttävien tekijöiden yhteys eri hajoamismekanismiin muuntajan eristemateriaaleissa ja niistä syntyviä hajoamistuotteita. Päätekijöinä eristeen vanhenemisessä ovat lämpötila, vesi ja happi.



Kuva 9. Kaavio eristeiden ikääntymistä nopeuttavien tekijöiden yhteys eri hajoamismekanismeihin eristemateriaalissa ja niistä syntyviä sivutuotteita. [11, s. 8.]

4.2 Muuntajaöljyn vanheneminen

Tehomuuntajassa on muuntajaöljyllä tärkeä merkitys. Öljy toimii jäähdyttävänä väliaineena siirtäen käämeissä ja rautasydämessä kehittyvän lämmön säiliön jäähdytyspintoihin sekä muodostaa eristysominaisuuksiensa ansiosta hyvän eristyksen käämitysten sekä niiden rautaosien välille. [13, s. 18.]

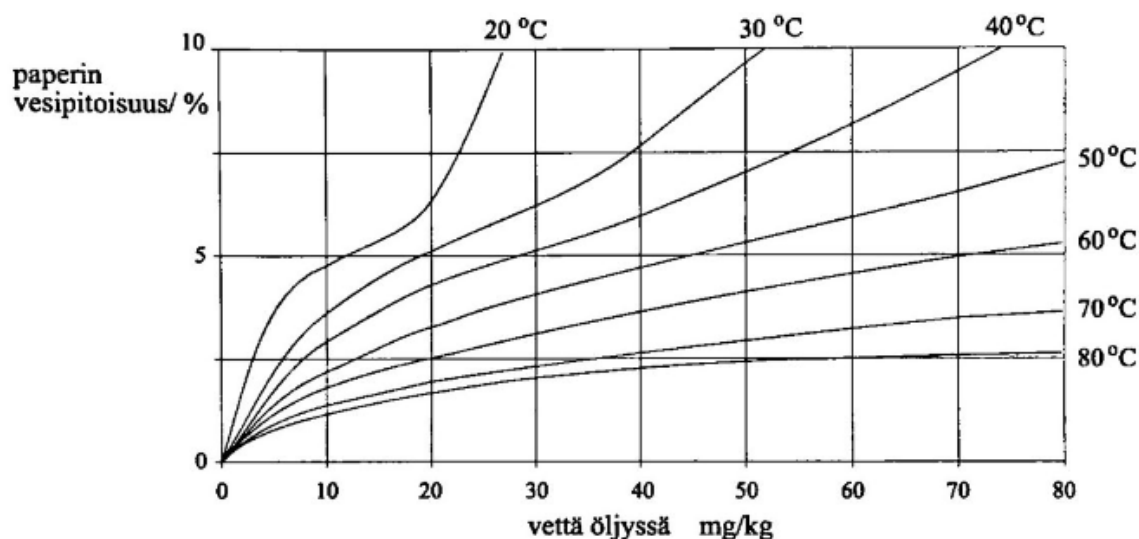
Muuntajaöljyltä vaaditaan suurta jännitelujuutta ja hyvää lämmönsiirtokykyä. Lisäksi öljyllä tulisi olla suuri resistiivisyys, alhainen häviökerroin sekä hyvä ositaispurkausten sietokyky. Öljyltä vaaditaan hyvien sähköisten ominaisuuksien lisäksi alhaista viskositeettiä, jotta se toimisi hyvin jäähdytystehtävässä ja täyttäisi kaikki kiinteän eristeen huokokset ja raot. [12, s. 117.]

Muuntajaöljynä käytetään yleisimmin mineraaliöljyä, joka valmistetaan maaöljystä tislamalla. Mineraaliöljyt koostuvat hiilivetyrakenteista. Öljyltä vaadittavat ominaisuudet on määritelty mm. standardissa IEC 60296. Öljyn kiehumislämpötila on 250–300 °C ja Suomessa sen jähmettymislämpötilan on oltava alhaisempi kuin -40 °C sekä leimahduspitempi yli 130 °C. [12, s. 117–118.]

Muuntajaöljy on orgaaninen aine, joka paperieristeen tavoin myös ikääntyy ja hajoaa. Öljyn ikääntymistä ja hajoamista nopeuttavat korkea lämpötila, veden määrä ja kosteus öljyssä, happipitoisuus sekä metalli-ionien määrä. Muuntajaöljyn ensisijainen vanhentumisen syy on hapettuminen, jonka seurauksena öljyn läpilyöntilujuus sekä suorituskyky huonontuvat. Öljyn hapettuminen on ketjureaktio, joka tapahtuu lämmön ja hapen yhteisvaikutuksesta. Metalliepäpuhtaudet kiihdyttävät voimakkaasti reaktiota. Ketjureaktio alkaa hiilimolekyylien hapettumissa vetyperoksidiiksi. Vetyperoksidit hajoavat helposti vapaiksi radikaaleiksi. Vapaat radikaalit hapettuvat nopeasti muodostaen uusia radikaaleja ja jatkaen hapettumisreaktiota. Kuumassa öljyssä tapahtuu helpommin reaktioita kuin kylmässä öljyssä. Reaktioiden seurauksena öljyyn syntyy vettä, happoja, hiilioksideja ja vetyperoksidia, jotka ovat muuntajan vanhentumisen kannalta merkittäviä. [11, s. 10.] Lisäksi öljyyn syntyy myös saostumia, jotka haittaavat öljyn kiertoa käämien sisäisissä kanavissa, joka johtaa jäähdytyksen heikkenemiseen, joka taas kiihdyttää vanhenemista. Hapettumisreaktion hidastamiseksi öljyyn voidaan lisätä inhibiittia, joka sitoo syntyviä hapettumistuotteita pidentäen öljyn käyttöikää noin kaksinkertaiseksi. [14, s. 6.]

Muuntajaöljyn kosteutta pystytään arvioimaan eristepaperin kosteuden avulla. Kuvassa 10 esitetyn kuvaajan mukaisesti paperin ja öljyn kosteuden suhteet ja arvot ovat riippuvaisia vallitsevasta lämpötilasta. Kuvasta nähdään, miten

paperista vapautuu kosteutta öljyyn lämpötilan noustessa ja imeytyy takaisin paperiin lämpötilan laskiessa. Lämpötila vaihtelee, joko kuormituksen, ympäristön lämpötilan tai näiden molempien vuoksi. Liukenemisen muutokset ovat kuitenkin hitaita, joten tulos ei ole kovin tarkka. [12, s. 185.]



Kuva 10. Öljyn ja paperin välinen kosteustasapaino. [12, s. 186.]

4.3 Purkaukset

Muuntajassa esiintyy osittaispurkauksia sekä matala- ja korkeaenergisii purkauksia. Osittaispurkaus on sähköpurkaus, joka osittain läpäisee eristyksen osan, mutta ei sulje johdinväliä. Osittaispurkaus tapahtuu, kun sähkökentän voimakkuus ylittää tietyn eristyksen osan sähkölujuuden. Osittaispurkaukset vaikuttavat eristeisiin monenlaisilla kemiallisilla ja fysikaalisilla tavoilla. Osittaispurkaukset aiheuttavat eroosiota ja hajottavat öljyä sekä niissä muodostuu pääosin vetyä ja metaania. Osittaispurkaukset voivat aiheutua eristeen kaasutäytteisistä onteloista tai paperin korkeasta kosteuspitoisuudesta. Osittaispurkaukset ovat pieniä, mutta ajan mittaan ne vaikuttavat eristeen sähkölujuuteen, joka voi lopulta johtaa täydelliseen purkaukseen eli oikosulkuun. Matalaenergisii purkaukset aiheutuvat kipinöinnistä ja valokaarista huonojen liitosten välillä. Tällaiset purkaukset johtavat hiiltyneisiin lävistyksiin paperissa, paperin pinnan hiiltymiseen tai hiilihiukkasten kehittymiseen öljyssä. Matalaenergisii purkauksissa

syntyy vetyä ja etyleeniä. Korkeaenergiset purkaukset ovat valokaaria ja jatkuvia purkauksia, jotka saavat aikaan todella korkeita lämpötiloja. Tällaisista purkauksista syntyy pääsääntöisesti asetyleenia. [11, s. 17–18; 12, s. 80.]

4.4 Termiset viat

Muuntajassa esiintyvät termiset viat kuten paikalliset ylikuumentumiset vaikuttavat paperiin ja öljyyn. Öljyssä tapahtuva terminen vika, jonka lämpötila on alle 300 °C synnyttää metaania ja etaania. Tällainen vika voi johtua esimerkiksi muuntajan ylikuormituksesta tai estyneestä öljyn kierrosta käämityksissä. Lämpötilan nousu synnyttää aina vetyä. Kun öljyn termisen vian lämpötila on 300–700 °C, muodustuu metaanin ja etaanin lisäksi etyleeniä. Tällainen vika voi johtua esimerkiksi viallisista kontakteista, liitoksista tai pyörrevirroista. Yli 700 °C lämpötilan terminen vika synnyttää asetyleeniä. Öljyn metallivärjäytyminen viittaa vian tapahtuneen ainakin 800 °C lämpötilassa ja metallien yhdistyminen merkitsee yli 1000 °C lämpötilaa. Korkea lämpötila johtuu vakavasta viasta kuten esimerkiksi voimakkaista pyörrevirroista tai huonoista kontakteista käämityksissä. Paperieristyksessä tapahtuvat termiset viat aiheuttavat paperin tummumista ja hiiltymistä sekä synnyttävät hiilioksideja. [11, s. 17–18; 12, s. 206.]

4.5 Käämikytkimen viat

Käämikytkin on eniten kunnossapitoa tarvitseva komponentti muuntajassa ja ainoa komponentti muuntajan sisällä, jossa on liikkuvia osia. Käämikytkin aiheuttaa noin 30 % kaikista muuntajissa tapahtuvista vioista. Käämikytkin likaantuu ja kuluu, kun asentoa vaihdetaan. Kytkimellä on yleensä oma öljysäiliö ja asennon vaihto muodostaa öljyyn asetyleeniä. Käämikytkin huolletaan noin viiden vuoden välein. [19.]

4.6 Käämien mekaaniset muutokset

Muuntajan käämit ja sydän puristetaan sekä tuetaan puristettuina suunnittelijan laskemien arvojen mukaisesti valmistuksen aikana. Kun muuntajaa

käyttöolosuhteissa kytketään verkkoon ja pois verkosta, siihen vaikuttaa nopeasti vaihteleva kuormitus. Lisäksi, jos ja kun verkossa tapahtuu erilaisia oikosulkuja, syntyy käämeihin ja niiden tukiosiin rasituksia. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, että käämien tuenta löystyy vähitellen, jolloin muuntajan oikosulkukestoisuus ja muuntajan kyky selviytyä oikosuluista ja muista käyttörasituksista ilman vaurioitumista heikkenee. [14, s. 7.]

4.7 Ympäristö

Käyttöympäristö voi myös vaikuttaa muuntajan vanhenemiseen. Ilman laatu sekä lämpötila ovat merkittäviä tekijöitä. Suurtehomuuntajat sijaitsevat yleensä ulkona avonaisissa bunkkereissa, joten ne eivät pääse ylikuumentumaan helposti. Ilman laatu vaikuttaa muuntajan sisäisiin ja ulkoisiin osiin. Tehomuuntajissa on yleisesti öljyn paisuntasäiliö, joka hengittää ilmaa, joten ilman epäpuhtauksia pääsee muuntajaöljyn sekaan lisäten vanhenemisreaktiota. Muuntajan ulkoisille osille ilman epäpuhtaudet voivat vaurioittaa maalipintaa tai eristämiä sekä epäpuhtaudet voivat kerääntyä muuntajaan ja täten huonontaa jäähdytysmekanismeja. [15, s. 35.]

5 Vikakaasut

Muuntajaöljyllä on jäähdytys- ja eristysominaisuuksien lisäksi tärkeä merkitys muuntajan kunnonvalvonnalle. Kuten luvussa 4 todettiin, muuntajan vikatilanteet ja vanheneminen aiheuttavat kemiallisten reaktioiden seurauksena muuntajan sisälle erilaisia kaasuja, jotka liukenevat muuntajaöljyyn. Muuntajan liuenneiden kaasujen analyysiä (DGA, dissolved gas analysis) on jo pitkään käytetty hyväksi muuntajan kunnonvalvonnassa. Kaasuanalyysissä selvitetään muuntajaöljyyn liuenneiden kaasujen määrä. Kaasuanalyysi suoritetaan vuosittain osana normaalia kunnonvalvontaa sekä esimerkiksi kaasureleen laukeamisen jälkeen. Analyysia varten muuntajasta otetaan laboratorioissa tutkittava näyte siihen tarkoitettuun muuntajaventtiilistä ja se voidaan ottaa muuntajan ollessa käytössä. [12, s. 206.]

Öljynäytteestä tutkittavat kaasut ovat esitetty taulukossa 1 ja ne on järjestetty ryhmiin kaasun tyypin mukaan. IEC 60422 -standardissa on annettu suositusarvot kaasujen pitoisuuksille ja ne on ilmaistu ppm-arvoina (parts-per-million), joka vastaa miljoonasosaa. Kaasuissa suhde on µl/l ja öljyn kosteudessa suhde on mg/kg. Esitettyjen kaasujen lisäksi öljystä voidaan selvittää lämpilyöntijännite, häviökerroin, rajapintajännitys, inhibiittipitoisuus, neutralointiluku, furfuraali, kiintoainepitoisuus sekä palavien kaasujen kokonaismäärä (TDCG, total dissolved combustible gases). [16.] Palavat kaasut ovat normaalipaineessa ja lämpötilassa palavia kaasuja ja niihin kuuluvat vety, metaani, asetyleeni, etyleeni, etaani ja hiilimonoksidi. TDCG-arvon nousu ilmaisee jonkinlaista vikaa. [11, s. 15.]

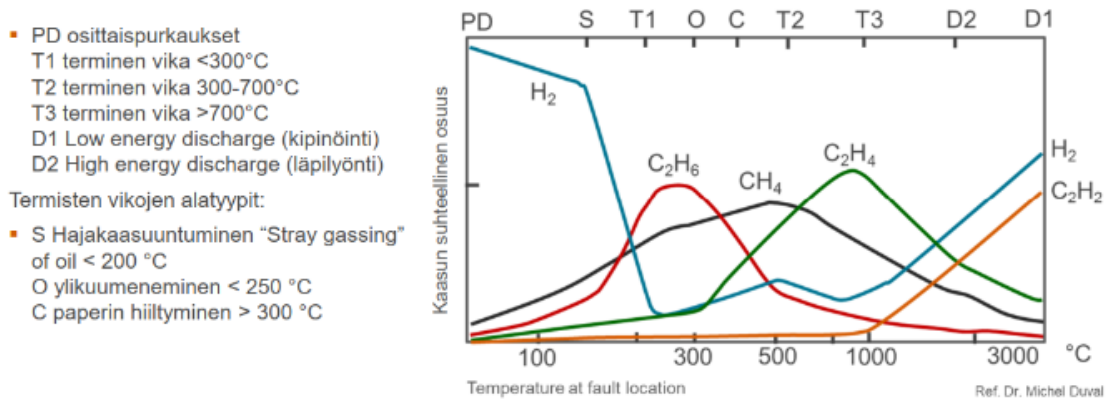
Taulukko 1. Kaasuanalyysissa tarkasteltavat kaasut jaoteltuina ryhmiin sekä kaasujen suosituspitoisuudet. [11, s. 15; 16.]

Ryhmä	Kaasu	Kaava	Suositus (ppm)
Hiilivedyt ja vetykaasu	Vety	H ₂	≤150
	Metaani	CH ₄	≤130
	Asetyleeni	C ₂ H ₂	≤20
	Etyleeni	C ₂ H ₄	≤280
	Etaani	C ₂ H ₆	≤90
Hiilioksidit	Hiilimonoksidi	CO	≤600
	Hiilidioksidi	CO ₂	≤14000
Ei-vikakaasut	Happi	O ₂	
	Typpi	N ₂	
	Kosteus	H ₂ O	<15

Hiilivety-yhdisteet, vetykaasu ja hiilioksidit voidaan luokitella vikakaasuihin, joiden huomattava muodostuminen viittaa sähköiseen vikaan tai lämpötilavikaan. Happi, typpi ja kosteus eivät ole vikakaasuja ja niitä voi yleisesti ilmentyä liuenneena muuntajaöljyyn, mutta ne ovat kuitenkin merkityksellisiä. Korkeat happipitoisuudet kiihdyttävät eristeiden vanhenemista, korkeat typpipitoisuudet

viittaavat vuotoon muuntajassa ja kosteus kiihdyttää muuntajan vanhenemista. [11, s. 16.]

Muuntajaöljyyn muodostuneet vikakaasut ovat lähtökohtaisesti aina syntyneet sähköisten purkausten ja korkeiden lämpötilojen aiheuttamana. Kuvassa 11 on esitetty kaasujen muodostumista vastaavia lämpötila-alueita ja niihin liittyviä vikaluokkia. Vikatyypeistä hajakaasuuntuminen, ylikuumeneminen ja paperin hiiltymisen eivät kuulu standardin IEC 60599 määrittelemiin vikatyyppeihin. [11, s. 19.]



Kuva 11. Kuvaaja vikatilanteiden ja lämpötilojen yhteydestä kaasujen muodostumiseen. [17, s. 20.]

Taulukossa 2 on esitetty, mihin vikatilanteeseen tiettyjen kaasujen nousu viittaa. Suurin osa vikatilanteista muodostaa useampaa kaasua. Vian luonne määrää syntyvien kaasujen koostumuksen ja vian suuruus kaasujen muodostumisnopeuden. Taulukosta voidaan huomata, että vety ja metaani ovat yhteydessä lähes tulkoon kaikkiin tilanteisiin.

Taulukko 2. Vikakaasujen eri indikaatiot. [18; 19.]

Indikaatio / vikakaasu	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
Paperin vanheneminen						•	•			•
Öljyn hajoaminen	•	•	•	•	•					
Vuodot muuntajassa							•	•	•	•
Paperin termiset viat	•	•				•	•	•		
Öljyn termiset viat <300 °C	•	•			•					
Öljyn termiset viat 300–700 °C	•	•		•	•					
Öljyn termiset viat >700 °C	•	•	•	•						
Osittaispurkaukset	•	•								
Kipinäinti	•	•	•	•						

Taulukossa ei ole huomioitu käämikytkimen käytöstä aiheutuvaa asetyleenia, koska käämikytkimellä on yleensä oma öljysäiliö, eikä se ole yhteydessä muuntajan pääöljysäiliöön.

6 Kaasuanalysaattori

Kaasuanalysaattori on laite, jolla pystytään seuraamaan muuntajan kuntoa lähes reaaliaikaisesti. Kaasuanalysaattori on kiinteästi kytketty muuntajaan ja sillä seurataan muuntajaöljyn liuenneita kaasuja. Laite imitoi liuenneiden kaasujen analyysissä käytettyjä metodeja ja pyrkii toistamaan saman mitä tehdään laboratoriossa. Laitteen tarkoituksena on havaita alkavia vikoja, selvittää tapahtunut vika ja yleisesti seurata muuntajan tilaa. Laboratoriossa tehtävä kaasuanalyysi suoritetaan 6–12 kk:n välein, mutta muuntaja voi alkaa vikaantua hyvinkin nopeasti ja tällöin kaasuanalysaattorilla huomataan vikaantuminen heti.

6.1 Kaasuanalysaattoreiden rakenne ja toiminta

Kaasuanalysaattorit voidaan jakaa yksi- ja monikaasuanalysaattoreihin. Yksi-kaasuanalysaattorit toimivat enemmänkin hälyttävänä laitteena, kun taas monikaasuanalysaattorilla saadaan laajempi kuva muuntajan kunnosta.

Yksikaasuanalysaattori mittaa vetyä (H_2) tai yhdistelmävikakaasua (TDCG) sekä kosteutta. Laite koostuu yleensä, valmistajasta riippumatta, yhdestä yksiköstä, joka on suoraan asennettu muuntajan öljyventtiiliin. Yksikaasuanalysaattori mittaa kaasuja suoraan öljystä tai puoliläpäisevän kalvon avulla.

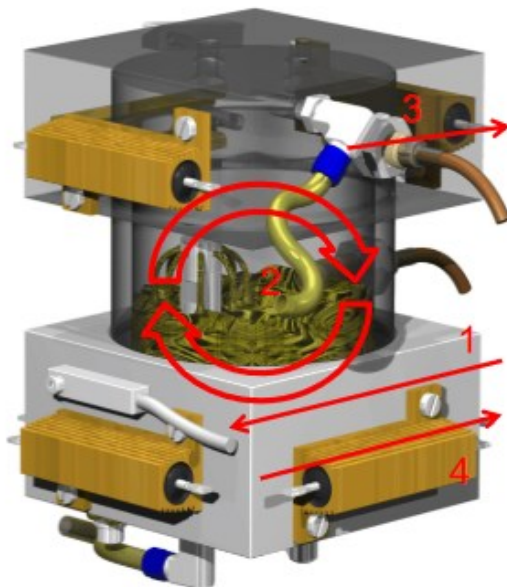
Monikaasuanalysaattori mittaa useita eri kaasuja. Laitteissa käytetään erilaisia ratkaisuja, mutta yleensä laite koostuu kahdesta yksiköstä, mitta- tai analyysiyksiköstä ja keskusyksiköstä. Monikaasuanalysaattorissa näyte otetaan erilliseen kammioon. Monikaasuanalysaattorin yleisen toimintaperiaatteen vaiheet on lisätty alle järjestyksessä [19.]:

- öljynäytteenotto muuntajasta
- kaasunäytteen erotus öljynäytteestä
- kaasunäytteen analysointi eli mittaus
- kaasukammion tuuletus tai kaasujen liuottaminen takaisin öljyyn
- öljynäytteen palautus muuntajaan.

6.2 Kaasunäytteen erotusmenetelmät

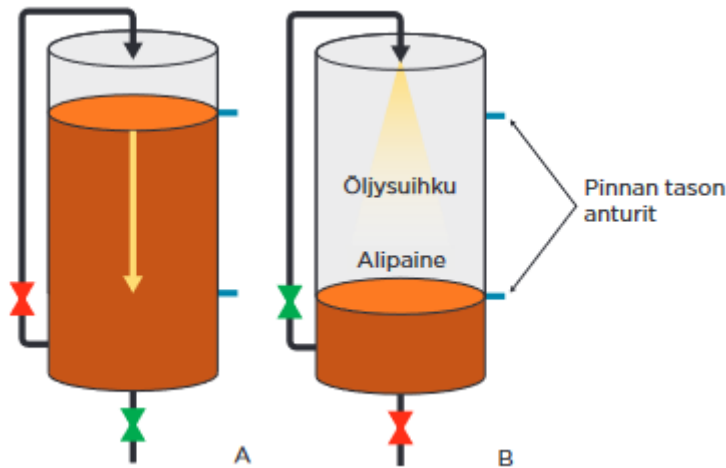
Yleisimmät kaasuanalysaattoreissa käytetyt kaasunäytteen erotusmenetelmät ovat tyhjiöerotus- ja headspace-menetelmät. Headspace- eli pääkammionmenetelmässä hyödynnetään kaasujen tasapainolakia eli Henryn lakia. Öljynäytteen kaasut erottuvat öljystä tasapainotilanteessa liukoisuuskertoimien sekä kaasun ja öljytilavuuden perusteella. [11, s. 32.] Kuvassa 12 on esimerkki headspace-menetelmästä. Öljynäytteenotto muuntajasta, jolloin öljystä mitataan lämpötila ja tilavuus (1), näytettä lämmitetään ja sekoitetaan kammiossa kaasutasapainon saavuttamiseksi nopeammin ilman ja öljyn kesken (2), kaasunäyte imaistaan

erilliseen mittauskammioon (3) ja öljynäyte työnnetään takaisin muuntajaan (4).
[19.]



Kuva 12. Headspace-menetelmä. [19.]

Tyhjiöerotus-menetelmässä käytetään tyhjiötä kaasunäytteen erotukseen tyhjiöstä. Kuvassa 13 on esimerkki tyhjiöerotus-menetelmästä. Tyhjiö aiheutetaan öljyn yläpuolelle pumppaamalla öljyä ulos sylinterin yläosassa olevan venttiin ollessa suljettuna (A) ja kaasu erotetaan suihkuttamalla öljyä tyhjiön läpi (B). Tyhjiöerotus-menetelmien etu on se, että ne eivät olet riippuvaisia kaasujen liukoisuuskertoimista ja lämpötilariippuvuksista. [11, s. 32; 20.]

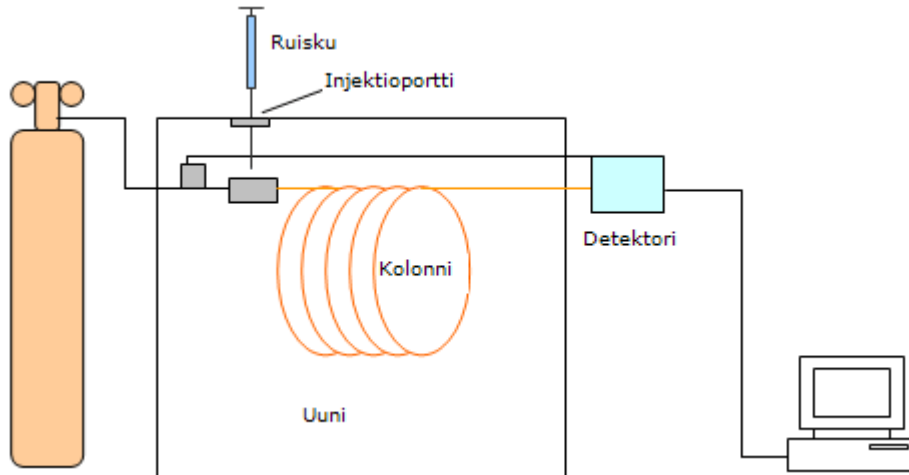


Kuva 13. Tyhjiöerotus-menetelmä. [20.]

6.3 Kaasuanalysaattoreiden käyttämät mittaustekniikat

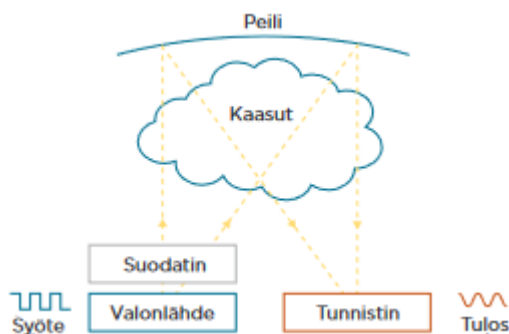
Kaasuanalysaattoreissa käytetään seuraavia mittaustekniikoita: kaasukromatografia, infrapunamittaus, fotoakustinen spektroskopia ja polttokennoanturit sekä solid-state-anturit.

Kaasukromatografiassa (GC, gas chromatography) muuntajan öljynäyte syötetään injektioporttiin, jossa se höyrystyy ja kantajakaasu, joka on yleensä typpeä, vetyä, heliumia tai argonia, kuljettaa näytteen kolonniin. Kolonnissa höyrystyneet komponentit liikkuvat erilaisilla nopeuksilla riippuen niiden ominaisuuksista. Kuljettuaan kolonnin läpi komponentit saapuvat vuorollaan detektorille. Detektori havaitsee yhdisteet ja tuottaa niistä signaalin. Signaalit näkyvät tallentimessa, josta voidaan tutkia kaasuja. Kaasujen erottelu ja tunnistus perustuu siis niiden läpimenoaikaan eli eluointiaikaan kolonnissa. [21.]



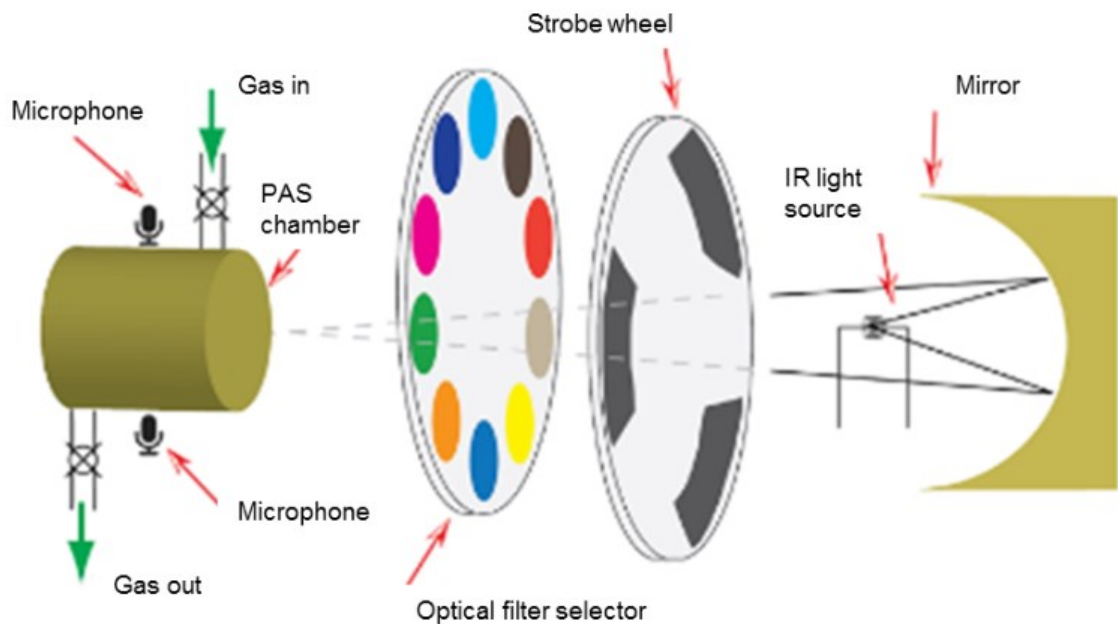
Kuva 14. Kaasukromatografialaitteisto. [21.]

Infrapunamittaus (IR, infrared) perustuu kaasujen absorptioilmiöön, jossa jokaisella kaasulla on oma aallonpituus. Infrapunäsäteily ohjataan kaasuseokseen, jolloin kaasut absorboivat säteilyä eri aallonpituuksillaan. Näin tunnistaminen vastaanottama säteilyn määrä vaihtelee kaasun mukaan. Kuvassa 15 on esitetty infrapunamittauksen toimintaperiaatetta. Infrapunälähteen valonsäteet suodattuvat suodattimen läpi, läpäisevät kaasunäytteen ja transmittoituneet säteet kulkeutuvat tunnistimille. Suodattimia käytetään aallonpituusalueen erottamiseksi infrapunälähteen lähettämästä säteestä, mikä mahdollistaa tietyn kaasun pitoisuuden seurannan kaasunäytteessä. [11, s. 34.]



Kuva 15. Infrapunamittauksen toimintaperiaate. [20.]

Fotoakustinen spektroskopia (PAS, photo acoustic spectroscopy) mittauksessa käytetään samaa kaasujen absorptioilmiötä, kuin infrapunamittauksessa, mutta fotoakustisessa spektroskopiassa ei käytetä infrapunadetektoria mittaamaan transmittoituneiden infrapunasäteiden voimakkuutta. Kaasujen absorboidessa infrapunasäteitä ne alkavat värähtelemään säteistä saadun energian takia. Värähtely aiheuttaa lämpötilan nousun, joka suljetussa kammiossa johtaa paineen nousuun. Kuvassa 16 esitetään fotoakustisen spektroskopian toimintaperiaatetta. Infrapunälähteen valonsäteet pulssitetaan pyörällä ja se läpäisee filtterin. Filtterillä suodetaan eri aallonpituuksia ja sen läpäistessä säteet diffraktoituvat eli muuttuvat kammiossa olevaan kaasunäytteeseen. Kaasujen infrapunasäteiden absorptio ja pulssitetut infrapunasäteet aiheuttavat pulssituksen taajuudesta riippuvaa painenvaihtelua mittauskammiossa, jota voidaan havaita mikrofonien avulla. Mikrofonin havaitseman äänen voimakkuuden perusteella voidaan laskea kaasun pitoisuus. [11, s. 34–35.]



Kuva 16. Fotoakustisen spektroskopian toimintaperiaate. [18.]

Polttokennoantureissa (FC, fuel cell) käytetään puoliläpäisevää kalvoa, joka erottaa havaittavan kaasun öljystä. Polttokennoanturin sähkökemiallinen sensori on vuorovaikutuksessa kaasun kanssa ja muodostaa sähköisen signaalin,

jonka vahvuuteen vaikuttaa kaasun pitoisuus. Solid-state-anturit (SS, solid-state-sensors) mittaavat yleensä suoraan öljystä kaasun pitoisuutta. Anturirakenteen metallioksidit hajottavat kaasuun varautuneita ioneja tai yhdisteitä aiheuttaen elektronien liikettä ja muuttaen anturin sähkönjohtavuutta. Anturin elektrodit mittaavat metallioksidin johtavuuden vaihtelun, joka muodostaa signaalin ja signaalin vahvuus riippuu kaasun pitoisuudesta. [11, s. 33.]

7 Kaasuanalysointimallien vertailu

Kaasuanalysointimallien hankinnan tulisi vastata vain pientä prosenttiosuutta muuntajan kokonaishinnasta. Muuntajan hinnan arvioinnissa voidaan käyttää sen näennäistehoa, jossa 1 MVA vastaa 10 000 euroa, mutta tämä on hyvin karkea ja vain suuntaa antava arvio. Muuntajan arvoon vaikuttaa myös sen kriittisyys voimalaitoksen prosessissa ja minkälaisia taloudellisia tappioita sen hajoaminen aiheuttaa. Monikaasuanalysointimalli maksaa teknisien ominaisuuksien takia moninkertaisesti yksikaasuanalysointimallin verran. Ajatuksena on, että omakäyttömuuntajat varustetaan yksikaasuanalysointimallilla ja päämuuntajat monikaasuanalysointimallilla. Tämän takia vertaillaan yksi- sekä monikaasuanalysointimalleja.

Vertailuun valittiin valmistajia, joiden tuotteita myydään Suomessa sekä malleja, jotka kilpailevat keskenään. Valitut valmistajat ja mallit ovat GE Hydran M2-X ja Kelman DGA 900, Vaisala MHT410 ja OPT100 DGA, MTE Hydrocal 1001+ ja Hydrocal 1009 sekä Hitachi Energy CoreSense ja CoreSense M10. Vertailussa pyritään vertailemaan valmistajia, kaasuanalysointimallien teknisiä ratkaisuja, mittausten teknisiä ominaisuuksia sekä tiedonsiirtomahdollisuuksia.

7.1 Yksikaasuanalysointimallit

7.1.1 GE Hydran M2-X

GE:n valmistama Hydran M2-X on jatkuvatoiminen yksikaasuanalysointimalli. Laite mittaa yhdistelmävikakaasua (H_2 , CO , C_2H_2 ja C_2H_4)

polttokennoanturitekniikalla sekä kosteutta kapasitiivisellä ohutkalvoanturilla. Valmistaja ilmoittaa polttokennoanturin odotetuksi käyttöiäksi yli kymmenen vuotta. Laitteessa on IP56-luokan kotelointi. Kaasuanalysaattorilla on seitsemän vuoden takuu ja se valmistetaan Pohjois-Irlannissa. [22.]

Hydran M2-X yhdistelmävikakaasun mittausalue on 25–2500 ppm, mittauksen tarkkuus on $\pm 10\%$ tai ± 25 ppm luetusta arvosta ja mittauksen toistettavuus on $\pm 5\%$. Laite havaitsee 90 % kaasupitoisuuden muutoksesta 10 minuutin kuluttua. Yhdistelmävikakaasun mittauseron suhteellisuudet ovat: H₂ 100 %, CO 15 %, C₂H₂ 8 % ja C₂H₄ 1,5 %. [22.] Suhteellisuuksista voidaan huomata, että vaikka laite mittaa yhdistelmävikakaasua se painottaa vetyä todella paljon mittauksessa. Jos mittauksen tarkkuutta ei huomioida, 2BT01-muuntajan vuoden 2021 kaasuanalyysin arvoilla saadaan laitteen teoreettiseksi näyttämäksi:

$$1 \times 5 + 0,15 \times 178 + 0,08 \times 5 + 0,015 \times 88 = 33,4 \text{ ppm} \quad (3)$$

Laitteessa on integroitu näyttö, josta ilmenevät kaasupitoisuudet sekä näppäimistö yksikön asetuksiin ja hälytysten kuittauksiin. Automaatiojärjestelmästä voidaan seurata mittaustuloksia sekä hallinnoida laitetta. Laitteen mukana tulee myös GE Perception -ohjelmisto, jolla voidaan hallinnoida laitetta ja tehdä tarkempaa analyysia muuntajan kunnosta. [22.]



Kuva 17. GE Hydran M2-X. [23.]

7.1.2 Vaisala MHT410

Vaisalan valmistama MHT410 on jatkuvatoiminen yksikaasuanalysaattori ja se mittaa vetyä, kosteutta ja lämpötilaa. Laite käyttää vedyn mittaukseen solid-state-anturitekniikkaa ja kosteuden mittaukseen Vaisalan kehittämää HUMICAP-anturia, joka on kapasitiivinen ohutkalvoinen polymeerianturi. Laitteessa on IP66-luokan kotelointi. Kaasuanalysaattorilla on viiden vuoden takuu ja se valmistetaan Suomessa. [24.]

MHT410 vedyn mittausalue on 15–5000 ppm, mittauksen tarkkuus on $\pm 10\%$ tai ± 15 ppm luetusta arvosta ja mittauksen toistettavuus on $\pm 10\%$. Laite havaitsee 63 % vetykaasun muutoksista 2,5 tunnin kuluttua ja 90 % muutoksista 17 tunnin kuluttua. Kaasuanalysaattorin etupaneelissa on led-valot, jotka indikoivat mittauksien tilaa. Automaatiojärjestelmästä voidaan monitoroida mittaustuloksia ja hallinnoida laitetta. [24.]



Kuva 18. Vaisala MHT410. [25.]

7.1.3 MTE Hydrocal 1001+

MTE:n valmistama Hydrocal 1001+ on yksikaasuanalysaattori, joka mittaa 20 minuutin välein yhdistelmävikakaasua (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 ja C_2H_6) poltto-kennoanturitekniikalla sekä kosteutta Vaisalan HUMICAP-anturilla. Laitteessa

on IP55-luokan kotelointi. Kaasuanalysaattorilla on kahden vuoden takuu ja se valmistetaan Saksassa. [26; 27; 28.]

Hydrocal 1001+ yhdistelmävikakaasun mittausalue on 0–5000 ppm ja mittauksen tarkkuus on $\pm 15\%$ tai ± 20 ppm luetusta arvosta. Laitteen yhdistelmävikakaasun mittausarvon suhteellisuudet ovat: H_2 20 %, CO 30 %, CH_4 5 %, C_2H_2 100 %, C_2H_4 32 % ja C_2H_6 5 %. [26.] Suhteellisuuksista voidaan huomata, että laite painottaa mittauksessa asetyleeniä paljon. Jos mittauksen tarkkuutta ei huomioida, 2BT01-muuntajan vuoden 2021 kaasuanalyysin mittaustuloksilla saadaan laitteen teoreettiseksi näyttämäksi:

$$0,2 \times 5 + 0,3 \times 178 + 0,05 \times 11 + 1 \times 5 + 0,32 \times 88 + 0,05 \times 6 = 88,4 \text{ ppm (4)}$$

Kaasuanalysaattorin etupaneelissa on led-valot, jotka indikoivat laitteen toiminnallisuutta ja yhdistelmävikakaasu- sekä kosteusmittauksen tilaa. Automaatiojärjestelmästä voidaan monitoroida mittaustuloksia sekä hallinnoida laitetta. [26.]



Kuva 19. MTE Hydrocal 1001+. [27.]

7.1.4 Hitachi Energy CoreSense

Hitachi Energyn valmistama CoreSense on jatkuvatoiminen yksikaasuanalyysaattori, joka mittaa vetyä ja kosteutta. CoreSense käyttää vedyn mittaamiseen solid-state-anturitekniikkaa ja kosteuden mittaamiseen kapasitiivista ohutkalvoanturia. Valmistaja ilmoittaa solid-state-anturin odotetuksi käyttöiäksi 15 vuotta. Analyysaattorissa on IP67-luokan kotelointi. Laitteella on kolmen vuoden takuu ja se valmistetaan Kanadassa. [29; 30.]

CoreSensen vetykaasun mittausalue on 25–5000 ppm, mittauksen tarkkuus on $\pm 20\%$ tai ± 25 ppm luetusta arvosta ja mittauksen toistettavuus on $\pm 10\%$. Laite havaitsee 90 % vetykaasupitoisuuden muutoksesta 30–60 minuutin kuluttua. [30.]

Laitteessa on kolme led-valoa, jotka indikoivat laitteen ja mittauksien tilaa. Automaatiojärjestelmästä voidaan monitoroida mittaustuloksia sekä hallinnoida laitetta. Laitetta voidaan käyttää myös selainpohjaisella CoreSense Hub käyttöliittymällä, jolla voidaan hallinnoida laitetta ja tehdä tarkempaa analyysia muuntaajan kunnosta. [31.]



Kuva 20. Hitachi Energy CoreSense. [31.]

7.1.5 Mittausominaisuuksien vertailu

Yksikaasuanalysointimallien mittausominaisuuksissa ei ole merkittäviä eroja. Mittauksien tarkkuudet ja toistettavuudet ovat samalla tasolla sekä mittausalue on riittävä jokaisessa laitteessa. Laitteista ainoastaan MHT410 mittaa lämpötilaa vikakaasun ja kosteuden lisäksi.

Hydran M2-X ja Hydrocal 1001+ -yhdistelmävikakaasumittauksien painotusta on kuitenkin mielenkiintoista verrata. Taulukossa 3 esitetään Hydran M2-X ja Hydrocal 1001+ antamat teoreettiset näyttämät 2BT01-muuntajan vuoden 2021 kaasuanalyysiin mittaustuloksilla ja miten näyttämä muuttuu, kun jonkun kaasun pitoisuus nousee. Näyttämät ovat laskettu kaavoissa 3 ja 4 ja mittauksen painotukset ovat käyty läpi kappaleissa 7.1.1 ja 7.1.3. Taulukossa ei oteta huomioon metaanin ja etaanin vaikutusta Hydran M2-X mittaustulokseen, koska laite ei reagoi näihin kaasuihin.

Taulukko 3. Laitteiden teoreettinen näyttämä kuvitteellisilla kaasupitoisuuksien nousuilla.

Mittaustulokseen lisätty kaasun pitoisuus (ppm) / Laitteen teoreettinen näyttämä	Hydran M2-X 33,4 (ppm)	Hydrocal 1001+ 88,4 (ppm)
Vety (H ₂) + 15	48,4	91,4
Hiilimonoksidi (CO) + 100	48,4	118,4
Metaani (CH ₄) + 20	-	89,4
Asetyleeni (C ₂ H ₂) + 20	35	108,4
Etyleeni (C ₂ H ₄) + 30	33,9	98
Etaani (C ₂ H ₆) + 20	-	89,4

Taulukosta voidaan huomata, että Hydran M2-X mittauksessa esimerkiksi asetyleenin arvon nousu kahdellakymmenellä ei juurikaan näy mittaustuloksessa, vaikka nousu on merkittävä. Hydrocal 1001+ painottaa kaasuja tasaisemmin, mutta painotuksesta huomataan, että esimerkiksi metaanin ja etaanin nousut

eivät juurikaan näy mittaustuloksessa, vaikka nousut ovat huomattavia. Yhdistelmävikakaasulukeman tulkinta voi olla siis hankalaa.

Yksikaasuanalyysaattoreiden mittaustekniikoissa on molemmissa hyvät ja huonot puolensa. Taulukkoon 4 on listattu mittaustekniikoiden vahvuuksia ja heikkouksia. Polttokennoanturitekniikassa käytettävä puoliläpäisevä kalvo on ollut ennen haavoittuvainen teknologia, joka aiheuttanut epävarmuutta kaasuanalyysaattoreiden toiminnassa. [11, s. 33; 19; 32; 33.] GE:n tarjoama seitsemän vuoden takuu laitteelleen kumminkin osoittaa sen, että kalvoteknologia on nykyäänä luotettavaa.

Taulukko 4. Yksikaasuanalyysaattoreiden mittaustekniikkojen vertailu. [19.]

Mittaustekniikka	FC / Yhdistelmävikakaasu	SS / Vetykaasu
Vahvuudet	Reagointi useaan eri vika-kaasuun	Yksinkertainen rakenne.
Heikkoudet	Mittauslukeman tulkitseminen voi olla hankalaa. Kalvoteknologia voi vaatia ylläpitoa.	Mitattavien kaasujen määrä rajallinen eli ”petollinen hyvä olo”.

Tekniikoista on vaikea sanoa, kumpi on parempi. Yhdistelmävikakaasun mittauksella saadaan laajempi kuva muuntajan kunnosta, mutta vetykaasun mittauksella saadaan selkeästi vetypitoisuuden arvo selville.

7.2 Monikaasuanalyysaattorit

7.2.1 GE Kelman DGA 900

GE:n valmistama Kelman DGA 900 käyttää PAS-mittaustekniikkaa yhdistettynä kapasitiiviseen ohutkalvo kosteusanturiin ja kuituoptiseen happianturiin. Kosteu- den ja hapen lisäksi laite mittaa kahdeksaa kaasua. Kelman DGA 900 koostuu yhteen kiinnitetyistä analyysi- ja keskusyksiköstä, joiden kotelointi on IP56-

luokiteltu. Laitteen voi asentaa asennustelineelle tai muuntajabunkkerin seinälle. Maksimietäisyys muuntajasta on 30 metriä. Kelman DGA 900 käyttää näytteenottoon ulkoisia öljyputkia. Laite pumppaa öljyä analysaattoriin, jossa kaasut erotetaan headspace-menetelmällä. Mittauksen jälkeen öljy palautetaan muuntajaan ja mittauskammio tuuletetaan tyhjäksi kaasuista. Kaasuanalysaattorin takuu on viisi vuotta ja se valmistetaan Pohjois-Irlannissa. [34.]

Kuvassa 21 on Kelman DGA 900 mittausten teknisiä tietoja. Kuvasta nähdään, että kaasujen havaintoraja on alhainen, mittausalue on laaja sekä mittaus on tarkka ja toistettava. Laitteen mittaussykli on aseteltavissa välille yksi tunti – keran neljässä viikossa. Tietyt kaasut voidaan mitata 30 minuutissa ”rapid mode”-toiminnolla. [34.]

Range	LDL	UDL	Accuracy*	Repeatability	Available in Rapid Mode
Hydrogen (H ₂)	5	5,000 ppm	± LDL or ±5 %	< 3 %	•
Carb. Monox. (CO)	1	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 2 %	•
Methane (CH ₄)	2	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 2 %	•
Acetylene (C ₂ H ₂)	0.5	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 2 %	•
Ethylene (C ₂ H ₄)	1	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 2 %	•
Carb. Diox. (CO ₂)	20	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 3 %	•
Ethane (C ₂ H ₆)	1	50,000 ppm	± LDL or ±3 %	< 2 %	•
Oxygen (O ₂)	100	50,000 ppm	± LDL or ±5 %	< 2 %	•
Nitrogen (N ₂) **	10,000	100,000 ppm	± LDL or ±15 %	< 2 %	•
Moisture (H ₂ O)	0	100% RS (in ppm)	± 3% ppm	< 3 %	•

Kuva 21. GE Kelman DGA 900 -mittausten tekniset tiedot. [34.]

Keskusyksikössä on integroitu värillinen kosketusnäyttö, josta nähdään kaasupitoisuudet. Laitetta monitoroidaan ja hallinnoidaan etäyhteydellä automaatiojärjestelmällä tai laitteen GE Perception -ohjelmistolla. Ohjelmistolla voidaan tutkia kaikkea kaasuanalysaattorin tuottamaa dataa ja tehdä esimerkiksi erilaisia vika-tilanneanalyyssejä. Kelman DGA 900 -kaasuanalysaattorissa on myös verkko-palvelin, johon pääsee käsiksi verkkoselaimella ilman tarvetta asentaa mitään ohjelmistoa. Sitä käytetään yhdistämällä tietokone laitteeseen ja sillä pystyy myös hallinnoida sekä tutkia kaasuanalysaattoria. [34.]



Kuva 22. GE Kelman DGA 900. [35.]

7.2.2 Vaisala OPT100 DGA

Vaisalan valmistama OPT100 DGA käyttää IR-mittaustekniikkaa yhdistettynä solid-state-vetyanturiin, HUMICAP-kosteusanturiin sekä Vaisala Total Gas Pressure (TGP) -menetelmään. TGP on kehitetty muuntajan kaasuvuotojen havaitsemiseen. Se mittaa kaasujen kokonaispainetta öljyssä ja sillä korvataan happi- ja typpi-anturit, mutta näiden lukemia ei saada mitattua. Vedyn ja kosteuden lisäksi laite mittaa kuutta vikakaasua. Laitteessa on erotettu virransyöttö ja IP66-luokan analysaattorikotelo, joka asennetaan jalkatelineelle tai bunkkerin seinään. OPT100 DGA käyttää näytteenottoon ulkoisia öljyputkia. Maksimietäisyys muuntajasta on kymmenen metriä. Laite pumppaa öljyä analysaattoriin, jossa kaasut erotetaan tyhjiöerotukseen perustuvalla menetelmällä. Mittauksen jälkeen kaasut imeytetään takaisin öljyyn ja palautetaan muuntajaan. Koko prosessi on ilmatiiviisti eristetty. Kaasuanalysaattorin takuu kaksi vuotta ja se valmistetaan Suomessa. [33; 36.]

Kuvassa 23 on OPT100 DGA -mittausten tekniset tiedot. Kuvasta nähdään, että mittaus on tarkka ja toistettava. Laitteen mittaussykli on 1–1,5 tuntia.

Parametri	Alue	Tarkkuus ^{1) 2)}	Toistettavuus ²⁾
Metaani (CH ₄)	0–10 000 ppm _v	±4 ppm tai ±5 % lukemasta	10 ppm tai 5 % lukemasta
Etaani (C ₂ H ₆)	0–10 000 ppm _v	±10 ppm tai ±5 % lukemasta	10 ppm tai 5 % lukemasta ³⁾
Etyleeni (C ₂ H ₄)	0–10 000 ppm _v	±4 ppm tai ±5 % lukemasta	10 ppm tai 5 % lukemasta
Asetyleeni (C ₂ H ₂)	0–5 000 ppm _v	±0,5 ppm tai ±5 % lukemasta	1 ppm tai 5 % lukemasta
Hiilimonoksidi (CO)	0–10 000 ppm _v	±4 ppm tai ±5 % lukemasta	10 ppm tai 5 % lukemasta
Hiilidioksidi (CO ₂)	0–10 000 ppm _v	±4 ppm tai ±5 % lukemasta	10 ppm tai 5 % lukemasta
Vety (H ₂)	0–5 000 ppm _v	±15 ppm tai ±10 % lukemasta	15 ppm tai 10 % lukemasta
Kosteus ⁴⁾ (H ₂ O)	0 ... 100 ppm _w ⁵⁾	±2 ppm ⁶⁾ tai ±10 % lukemasta	Sisältyy tarkkuuteen

Kuva 23. Vaisala OPT100 DGA -mittausten tekniset tiedot. [36.]

OPT100 DGA:ssa ei ole erillistä näyttöä, josta voisi seurata kaasupitoisuuksia. Laitetta monitoroidaan ja hallinnoidaan etäyhteydellä automaatiojärjestelmästä tai selainpohjaisesta käyttöliittymästä. Käyttöliittymällä voidaan tutkia kaikkea kaasuanalysaattorin tuottamaa dataa ja tehdä esimerkiksi erilaisia vika-analyysejä ja asettaa hälytysrajoja. [33; 36.]



Kuva 24. Vaisala OPT100 DGA. [37.]

7.2.3 MTE Hydrocal 1009

MTE:n valmistama Hydrocal 1009 käyttää IR-mittaustekniikkaa yhdistettynä solid-state vety- ja happiantureihin sekä HUMICAP-kosteusanturiin. Vedyn, hapen ja kosteuden lisäksi laite mittaa kuutta vikakaasua. Hydrocal 1009 koostuu IP55-luokitellusta yksiköstä, joka asennetaan suoraan muuntajan öljyventtiiliin. Laite eroaa näin muista malleista, kun kaikki toiminnot ovat samassa yksikössä. Hydrocal 1009 kaasun erotus perustuu headspace-menetelmään. Kaasuanalysaattorin takuu on kaksi vuotta ja se valmistetaan Saksassa. [28; 38.]

Laitteen mittaussykli on 20 minuutin välein. Kuvassa 25 on laitteen mittausten tekniset tiedot. Kuvasta nähdään, että kaasujen mittausalue on hyvällä tasolla.

Gas/Moisture in oil Measurement		Accuracy ^{2) 3)}
Measuring quantity	Range	
Hydrogen H₂	0 ... 10.000 ppm	± 15 % ± 25 ppm
Carbon Monoxide CO	0 ... 10.000 ppm	± 20 % ± 25 ppm
Carbon Dioxide CO₂	0 ... 20.000 ppm	± 20 % ± 25 ppm
Methane CH₄	0 ... 5.000 ppm	± 20 % ± 25 ppm
Acetylene C₂H₂	0 ... 10.000 ppm	± 20 % ± 5 ppm
Ethylene C₂H₄	0 ... 10.000 ppm	± 20 % ± 10 ppm
Ethane C₂H₆	0 ... 10.000 ppm	± 20 % ± 15 ppm
Oxygen O₂	0 ... 50.000 ppm	± 10 % ± 1000 ppm
Moisture in Oil H₂O	0 ... 100 ppm	± 3 % ± 3 ppm

Kuva 25. MTE Hydrocal 1009 mittausten tekniset tiedot. [38.]

Hydrocal 1009:n etupaneelissa on näyttö, josta voidaan hallinnoida ja monitoroida kaasuanalysaattoria. Siitä voi esimerkiksi katsoa kaasun erotuksen tilan, kaasupitoisuudet, hälytykset sekä asettaa hälytysrajat. Tämän lisäksi laitetta monitoroidaan ja hallinnoidaan etäyhteydellä automaatiojärjestelmällä tai laitteen Hydrosoft PC -ohjelmistolla. Ohjelmistolla voidaan tutkia kaikkea kaasuanalysaattorin tuottamaa dataa ja tehdä tarkempaa analyysia. [38.]



Kuva 26. MTE Hydrocal 1009. [19.]

7.2.4 Hitachi Energy CoreSense M10

Hitachi Energyn valmistama CoreSense M10 käyttää IR-mittaustekniikkaa yhdistettynä solid-state-vetyanturiin ja kapasitiiviseen ohutkalvo kosteusanturiin. Vedyn ja kosteuden lisäksi laite mittaa kahdeksaa kaasua. CoreSense M10 koostuu IP66-luokan analyysiyksiköstä, jonka voi asentaa kiinni bunkkerin seinään tai jalustalle sekä IP67-luokan mittayksiköstä, joka asennetaan muuntajan öljyventtiiliin. Maksimietäisyys muuntajaan on kymmenen metriä. Erona muihin malleihin CoreSense M10 ei kierrätä öljyä. Mittayksikössä on patentoitu kaasunerotusjärjestelmä, joka perustuu tyhjiöerotukseen. Kun kaasu on erotettu, se pumpataan putkessa analyysiyksikölle, jossa kaasuanalyysi tehdään. Öljynäytteitä otetaan jatkuvasti kymmenen minuutin välein. Kaasuanalysointitakuu on kolme vuotta ja se valmistetaan Kanadassa. [39; 40.]

Kuvassa 27 on laitteen mittausten tekniset tiedot. Kuvasta nähdään, mittauksen havaintorajat ovat alhaiset, mittausalue on hyvä ja mittaus on tarkka sekä erittäin toistettava.

Parameter	LOD	Range	Accuracy	Repeatability
Hydrogen (H ₂)	25 ppm	0 – 5000 ppm	±25 ppm or ±20%	±10%
	5 ppm option		±3 ppm or ±20%	
Carbon Monoxide (CO)	2 ppm	0 – 5000 ppm	±2 ppm or ±5%	±0.5%
Carbon Dioxide (CO ₂)	5 ppm	0 – 20000 ppm	±5 ppm or ±5%	±0.5%
Methane (CH ₄)	1 ppm	0 – 10000 ppm	±1 ppm or ±5%	±0.5%
Acetylene (C ₂ H ₂)	0.5 ppm	0 – 10000 ppm	±0.5 ppm or ±5%*	±0.5%
Ethylene (C ₂ H ₄)	2 ppm	0 – 10000 ppm	±2 ppm or ±5%	±0.5%
Ethane (C ₂ H ₆)	2 ppm	0 – 10000 ppm	±2 ppm or ±5%	±0.5%
Propene (C ₃ H ₆)	20 ppm	0 – 10000 ppm	±20 ppm or ±5%	±0.5%
Propane (C ₃ H ₈)	10 ppm	0 – 10000 ppm	±10 ppm or ±5%	±0.5%

Kuva 27. Hitachi Energy CoreSense M10 -mittausten tekniset tiedot. [40.]

Analyysiyksikössä on integroitu näyttö, josta voidaan seurata kaasupitoisuuksia. Laitetta monitoroidaan ja hallinnoidaan automaatiojärjestelmästä tai selainpohjaisesta CoreSense Hub käyttöliittymästä. Käyttöliittymällä voidaan tutkia esimerkiksi kaasupitoisuuksia, tehdä vika-analyyseja, asettaa hälytysrajoja sekä yleisesti konfiguroida analysaattoria. [39; 40; 41.]



Kuva 28. Hitachi Energy CoreSense M10. [42.]

7.2.5 Mittausominaisuuksien vertailu

Monikaasuanalysaattoreiden mittausten teknisistä tiedoista voidaan huomata, että ainoana PAS-mittaustekniikkaa käyttävä Kelman DGA 900:n mittausta on selvästi laajin ja tarkin. IR-mittaustekniikkaa käyttävien laitteiden mittausten ominaisuudet ovat samankaltaisia, mutta Hydrocal 1009 erottuu heikoimmalla ilmoitetulla tarkkuudella.

Taulukossa 5 käydään läpi mittaustekniikoita. Taulukossa ei huomioida GC-mittaustekniikkaa, koska sitä ei ole vertailun laitteissa käytössä. Sen harvinaisuus kaasuanalysaattoreissa johtuu todennäköisesti siitä, että tekniikka tarvitsee jatkuvaa huoltoa, joka tekee sen käytöstä kallista. Tekniikan ylläpitokustannukset johtuvat kanto- sekä kalibroitikaasun tarpeesta sekä kolonnin ikääntymisestä, likaantumisen ja vaihtotarpeesta. [18.]

Taulukko 5. IR- ja PAS-mittaustekniikoiden vertailu. [18; 19; 35.]

Vertaus / Mittaus- tekniikka	IR	PAS
Vahvuudet	Alhainen havaintoraja Automaattinen kalibrointi mittauksen aikana Ei ole altis ulkoisille häiriö- tekijöille	Alhainen havaintoraja Laaja mittausalue Ei vaadi kalibrointia
Heikkoudet	Valonlähteet voivat vaatia vaihtamista.	Spektrometrin liikkuvat osat ja valonlähteet voivat vaativaa vaihtamista. Altis ulkoisille häiriöteki- jöille, kuten paineen ja lämpötilan vaihtelu sekä täriä.

Mittaustekniikat ovat pohjimmiltaan hyvin samanlaisia ja mittaustekniikoiden ominaisuuksissa ei ole suuria eroja. Erot ovat siinä, että PAS-mittauksen

spektrometrin liikkuvat osat saattavat vaatia huolenpitoa sekä ulkoiset häiriötekijät saattavat vaikuttaa mittaukseen.

Vertailun monikaasuanalysointilaitteilla on mitattavissa kaasuissa vain vähän eroja. Taulukosta 6 nähdään, että mallit mittaavat lähes samoja kaasuja, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. OPT100 DGA käyttää TGP-menetelmää, jolla se tunnistaa hapen ja typen nousun kaasun kokonaispaineessa. Laite ei kuitenkaan suoraan mittaa näitä kaasuja, joten tämän takia taulukossa ei ole kyseisiä kaasuja merkattu laitteen osalta.

Taulukko 6. Monikaasuanalysointilaitteiden mittaamat kaasut.

Kaasu / Laite	Kelman DGA 900	OPT100 DGA	Hydrocal 1009	CoreSense M10
Vety (H ₂)	•	•	•	•
Metaani (CH ₄)	•	•	•	•
Asetyleeni (C ₂ H ₂)	•	•	•	•
Etyleeni (C ₂ H ₄)	•	•	•	•
Etaani (C ₂ H ₆)	•	•	•	•
Hiilimonoksidi (CO)	•	•	•	•
Hiilidioksidi (CO ₂)	•	•	•	•
Propeeni (C ₃ H ₆)				•
Propaani (C ₃ H ₈)				•
Happi (O ₂)	•		•	
Typpi (N ₂)	•			
Kosteus (H ₂ O)	•	•	•	•

Vertailun laitteista eniten eri kaasuja mittaa Kelman DGA 900 ja CoreSense M10. Propeenin ja propaanin mittaa ainoastaan CoreSense M10. Propeenin ja propaanin avulla voidaan selvittää mahdollisia aikaisempia kuumen pisteen

vikoja muuntajassa, mutta useimmissa käytetyissä vikatulkitsemis- ja standardoimisnäitä kaasuja ei oteta huomioon. [11, s. 15–16.]

7.3 Tiedonsiirtomenetelmät

Martinlaakson voimalaitoksella on käytössä Valmet DNA -automaatiojärjestelmä. Kaasuanalysaattoreiden mittaustiedot tuodaan automaatiojärjestelmään analogisilla tai digitaalisilla viesteillä. Analogisissa viesteissä käytetään parikaapeleita, joilla tuodaan mittaustulokset milliampeeritietona automaatiojärjestelmään. Digitaalisissa viesteissä käytetään kenttäväyläprotokollia, joissa liityntänä käytetään RS485- tai Ethernet-liityntää tuomaan mittaustulokset automaatiojärjestelmään. Kaasuanalysaattoreiden tiedonsiirrossa yleisimmin käytettyjä kenttäväyläprotokollia ovat Modbus RTU ja TCP, DNP3 ja IEC 61850. Modbus RTU käyttää tiedonsiirtoon RS-485-liityntää. Modbus TCP ja IEC 61850 protokollat käyttävät tiedonsiirtoon Ethernet-liityntää. DNP3 käyttää kumpaa tahansa liityntää.

Yksikaasuanalysaattoreissa voidaan käyttää perinteisiä analogisia viestejä, koska mittaustuloksia on laitteen mukaan 2–3. Kenttäväyläprotokollien etuna on kuitenkin esimerkiksi se, että arvoja ei tarvitse konvertoida siirtoa varten eli oikeellisuuden tarkistaminen vähenee sekä laitteen konfigurointi helpottuu etäyhteyden avulla, jolloin voidaan muuttaa asetuksia käymättä laitteella. Taulukossa 7 on listattu yksikaasuanalysaattorimallien tiedonsiirtomahdollisuuksia vakiona ja optiona.

Taulukko 7. Yksikaasuanalysaattorimallien tiedonsiirtomahdollisuuksien vertailu.

Liitynnät ja protokollat / Malli	Hydran M2-X	MHT410	Hydrocal 1001+	CoreSense
mA-ulostulo	optio	vakio	vakio	vakio
RS-485-liityntä	vakio	vakio	vakio	vakio
Ethernet-liityntä	optio	-	vakio	vakio
Modbus RTU	vakio	vakio	vakio	vakio
Modbus TCP	optio	-	vakio	vakio
DNP3	vakio	vakio	-	vakio
IEC 61850	optio	-	-	vakio

Taulukosta huomataan, että laitteiden varustuksessa vakiona ja optiona on eroavaisuuksia. RS-485-liityntä ja Modbus RTU-tuki ovat kaikissa vakiona.

Joissakin monikaasuanalysaattorimalleissa on analogisia viestintä mahdollisuuksia, mutta niitä ei yleisesti käytetä datamäärän ja mittauksien tarkkuuden vuoksi. Kenttäväylää käytettäessä voidaan seurata kymmeniä parametrejä samalla väylällä ja kaapelointitarve vähenee, kun jokaiselle mittaustiedolle ei tarvita omaa parikaapelia. Taulukossa 8 on listattu monikaasuanalysaattorimallien tiedonsiirtomahdollisuuksia vakiona ja optiona.

Taulukko 8. Monikaasuanalysaattorimallien tiedonsiirtomahdollisuuksien vertailu.

Liitynnät ja protokollat / Malli	Kelman DGA 900	OPT100 DGA	Hydrocal 1009	CoreSense M10
RS-485-liityntä	vakio	vakio	vakio	vakio
Ethernet-liityntä	vakio	vakio	vakio	vakio
Modbus RTU	vakio	vakio	vakio	vakio
Modbus TCP	vakio	vakio	vakio	vakio
DNP3	optio	optio	optio	vakio
IEC 61850	optio	optio	optio	vakio

Monikaasuanalysaattorimallien varustelu vakiona on hyvin samanlainen. CoreSense M10 -laitteesta löytyy vakiona myös DNP3- ja IEC 61850 -mahdollisuudet.

7.4 Huolto ja tuki

Kaikille vertailun kaasuanalysaattorimalleille luvataan huoltovapautta ja pitkää käyttöikää, mutta vikoihin on silti hyvä varautua. Käytönaikainen tuki on käyttäjälle tärkeää, joten laitetoimittajilta on kysytty, minkälaista käytönaikaista tukea heiltä saa ja miten he toimivat laitteen vikatilanteessa.

Käytönaikaista tukea ja opastusta laitteen käyttöön toimittajat lupaavat nopealla aikataululla. Toimittajat auttavat laitteen käytössä sekä esimerkiksi, jos laitteen mittaustulokset mietityttävät käyttäjää tai jokin muu asia mittaustuloksissa herättää huolta niin toimittajat auttavat puhelimitse, palaverilla tai tulevat käymään.

Kaikkien kaasuanalysaattoreiden vikatilanteessa toimitaan oikeastaan samalla tavalla valmistajasta riippumatta. Vikatilanteessa laitteesta taltioidaan vikaloki, jonka data analysoidaan valmistajan asiantuntijoiden toimesta. Vikalokin voi käyttäjä itse lukea suoraan kaasuanalysaattorilta tai etäyhteydellä sekä laitetoimittajat tarjoutuvat tulemaan paikan päälle avustamaan vikalokin lukemisen

kanssa. Vikalokin analysoinnin jälkeen tiedetään laitevika. Jos mahdollista, vika korjataan voimalaitoksella paikan päällä. Muussa tapauksessa laite lähetetään tehtaalle huoltoon.

Käytönaikainen tuki ja vikatilanteiden hoitaminen on siis erinomaisella tasolla, jokaisella laitetoimittajalla. Martinlaakson voimalaitoksen maantieteellinen sijainti nousi esiin helpottavana tekijänä.

7.5 Kustannukset

Kaasuanalyssaattorit muodostavat suurimman osan hankkeen kustannuksista. Itse kaasuanalyssaattoreiden lisäksi kustannuksiin vaikuttaa se, että mitä tiedonsiirto optioita laitteisiin valitaan ja näiden kaapelointi sekä tarvikkeet kuten venttiilisoitteet. Monikaasuanalyssaattoreissa kustannuksiin vaikuttaa edellä mainittujen lisäksi se, että asennetaanko laite jalkatelineelle vai bunkkerin seinälle sekä joidenkin laitteiden vaatimat öljyputket ja niiden tarvitsemat saattolämmitykset, eristykset, suojaukset ja tuennat.

Kaasuanalyssaattoreiden hinnat eivät ole julkista tietoa ja siten hintoja ei pysty suoraan vertaamaan tässä työssä. Yhden asennetun yksikaasuanalyssaattorin hankinnan hinta-arvio on karkeasti noin 10 000–15 000 € riippuen valitusta laitteesta. Yhden asennetun monikaasuanalyssaattorin hankinnan hinta-arvio on karkeasti noin 40 000–50 000 € riippuen valitusta laitteesta. Näin ollen koko hankkeen kustannuksien hinta-arvio on noin 110 000–145 000 € riippuen valituista kaasuanalyssaattorimalleista. Kaasuanalyssaattoritoimittajilla on paketteja, johon sisältyy suunnittelu, asennukset ja käyttöönotto. Lopulliseen hintaan vaikuttaa myös, montako kaasuanalyssaattoria hankitaan ja asennetaanko ne kerralla vai vaiheittain.

8 Kaasuanalysaattorimallien valinta

Kaasuanalysaattorimallien valinnassa tarkastellaan laitteiden kokonaisuutta. Kaasuanalysaattorit valitaan samalta valmistajalta, jotta asennukset, käyttö ja tuki ovat selkeää. Käyttäjä toivoo kaasuanalysaattoreilta monipuolista mittausta sekä helppokäyttöisyyttä, kuten mahdollisuutta lukea kaasupitoisuuksia laitteelta paikan päältä. Näiden lisäksi käyttäjä haluaa kaasuanalysaattoreilta toimintavarmuutta, jottei käyttäjän tarvitse huolehtia laitteiden kunnossapidosta erityistoimenpitein niiden käytön aikana. Toimintavarmuuteen vaikuttaa erinäiset asiat, kuten valmistajan kokemus sekä mallien takuu-aika.

Kaikissa vertailun kaasuanalysaattorimalleissa on vahvuuksia ja heikkouksia. Valitsemani kaasuanalysaattorit ovat GE:n valmistamat Hydran M2-X -yksikaasuanalysaattori ja Kelman DGA 900 monikaasuanalysaattori. GE:llä on yli 40 vuoden kokemus globaalina DGA-toimittajana ja yli 15 vuoden kokemus PAS-mittaustekniikassa. GE:n tarjoamat seitsemän ja viiden vuoden takuuajat ovat parhaimmat vertailun malleissa, mikä osoittaa valmistajan luottamuksen kaasuanalysaattoreiden toimintavarmuudelle. Laitetoimittajan kanssa käyty keskustelu selvityksen aikana on ollut erittäin asiantuntevaa, joka on hyvä asia laitteiden käytönaikaista tukea ajatellen. Taulukot 9 ja 10 tukevat GE:n kaasuanalysaattoreiden valintaa.

Taulukossa 9 on yksikaasuanalysaattorimallien ominaisuuksien vertailu pisteytyksellä 1–5. Mallien ominaisuuksissa ei ole isoja eroja. Ominaisuuksien vertailussa ei huomioida mitaako malli vety- vai yhdistelmävikakaasua. Hydran M2-X -yhdistelmävikakaasumittauksen tarjoama reagointi useampaan vikakaasuun on kumminkin mielestäni parempi tässä tapauksessa, koska muuntajat ovat kymmeniä vuosia vanhoja.

Taulukko 9. Yksikaasuanalysointimallien ominaisuuksien vertailu pisteytyksellä 1–5.

Ominaisuus / Malli	Hydran M2-X	MHT410	Hydrocal 1001+	CoreSense
Valmistajan kokemus	5	4	3	2
Mittauksen laajuus	4	5	4	4
IP-luokka	3	4	2	5
Takuuaika	5	3	1	2
Mittauksen indikointi	5	2	4	3
Tiedonsiirto	3	2	4	5
Huolto ja tuki	5	5	5	5
Yhteensä	30	25	23	26

Taulukossa 10 on monikaasuanalysointimallien ominaisuuksien vertailu pisteytyksellä 1–5. Kelman DGA 900 mittauksen laajuus on kattavin yhdessä CoreSense M10:n kanssa. Kelman DGA 900:n pystyy asentamaan jopa 30 metrin päähän muuntajasta ja sen erotettu virransyöttö lisää laitteen sähköturvallisuutta. Mittauksen indikointi suoraan laitteelta on myös hyvä ominaisuus. Ominaisuuksien vertailussa ei huomioida eri mittaustekniikoita, koska kaikki mittaustekniikat on osoitettu toimiviksi. Vertailun malleista kuitenkin PAS-mittaustekniikkaa käyttävä Kelman DGA 900:n kaasujen havaintoraja on alhainen, mittausalue on laaja sekä mittaus on tarkka ja toistettava.

Taulukko 10. Monikaasuanalysointimallien ominaisuuksien vertailu pisteytyksellä 1–5.

Ominaisuus / Malli	Kelman DGA 900	OPT100 DGA	Hydrocal 1009	CoreSense M10
Valmistajan kokemus	5	4	3	2
Mittauksen laajuus	5	3	4	5
Sähköturvallisuus	5	5	3	4
IP-luokka	3	4	2	5
Asennusmahdollisuus	5	4	2	3
Öljynäytteenotto	3	3	5	4
Takuuaika	5	2	2	3
Mittauksen indikointi	5	3	5	4
Tiedonsiirto	4	4	4	5
Huolto ja tuki	5	5	5	5
Yhteensä	45	37	35	40

9 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli tehdä selvitys, joka helpottaa pää- ja omakäyttömuuntajien kaasuanalysaattoreiden valintaa ja hankintaa Martinlaakson voimalaitokselle. Työssä tutkittiin yksi- ja monikaasuanalysaattorien rakennetta ja toimintaa. Työssä esiteltiin kaasuanalysaattoreiden kaasunäytteen erotusmenetelmät sekä kaasuanalysaattoreiden käyttämät mittaustekniikat, jotta saadaan parempi kuva laitteiden toiminnasta. Työssä käytiin myös läpi oleellisimmat asiat muuntajan toiminnassa ja rakenteessa, esitelty tärkeimmät muuntajan vanhenemis- ja vikaantumismekanismit, sekä mekanismeista aiheutuvat vikakaasut, jotta voidaan ymmärtää kaasuanalysaattorin tarkoitus muuntajan kunnonvalvonnassa.

Työssä tehtiin yksi- ja monikaasuanalysaattorimallien vertailu, jossa käytiin läpi markkinoilla olevien laitteiden teknisiä ratkaisuja ja ominaisuuksia. Malleja vertailemalla saatiin valinta suositeltaviksi kaasuanalysaattoreiksi GE:n valmistamat Hydran M2-X ja Kelman DGA 900. Kaasuanalysaattoreista pyydettiin tarjous, joka toimitettiin Vantaan Energialle. Tähän työhön ei tehty erillistä sähkö-, asennus tai käyttöönottosuunnitelmaa, koska nämä saadaan laitetoimittajalta.

Kaasuanalysaattoreiden hankinta on merkittävä investointi. Sillä ei kuitenkaan saada valvottua kaikkia ongelmanlähteitä muuntajassa, kuten käämikytöntä. Se ei myöskään poista vuosittaisten öljyanalyyysien tarvetta. Kaasuanalysaattori on kuitenkin merkittävä parannus kunnonvalvontaan, koska on täysin eri asia valvoa muuntajien tilannetta jatkuvasti kuin ottaa öljynäytteitä puolen vuoden tai vuoden välein. Viat voidaan tunnistaa aiemmin ja huoltoa voidaan priorisoida, mikä taas vähentää ennakoimattomia käyttökeskeytyksiä ja näistä aiheutuvia taloudellisia tappioita.

Lähteet

- 1 Vantaan Energia Oy tilinpäätös ja toimintakertomus 2021. Verkkoaineisto. <<https://vantaanenergia.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20220329105244/VE-Tilinpaaatoskirja-2021.pdf>>. Luettu 30.3.2022.
- 2 Vantaan Energia -konserni. Verkkoaineisto. <<https://www.vantaanenergia.fi/me/vantaan-energia/>>. Luettu 30.3.2022.
- 3 Tehokas yhteistuotanto. 2019. Verkkoaineisto. Vantaan Energia. <<https://www.vantaanenergia.fi/ykv/ykv-2019/tehokas-yhteistuotanto/>>. Luettu 30.3.2022.
- 4 Martinlaakson voimalaitoksen piha-alueella pieni öljyvähinko. 2018. Verkkoaineisto. Vantaan Energia. <<https://www.vantaanenergia.fi/martinlaakson-voimalaitoksen-piha-alueella-pieni-oljyvaehinko>>. Luettu 30.3.2022.
- 5 Aura, Lauri & Tonteri, Antti. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Helsinki: WSOY.
- 6 Aura, Lauri & Tonteri, Antti. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY.
- 7 Hietanen, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
- 8 Korpinen, Leena. 1998. Muuntajat ja sähkölaitteet. Verkkoaineisto. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf>. Luettu 13.1.2022.
- 9 Muuntajan toimintaperiaate. 2014. Verkkoaineisto. Pedanet. <<https://peda.net/kannus/jvk/oppiaineet2/fysiikka/9-lk-fysiikka/e9k22/3vkkk#top>>. Luettu 13.1.2022.
- 10 Jatkuva kunnonvalvonta takaa, etteivät valot sammua. 2020. Blogi. Vaisala. <https://www.vaisala.com/fi/blog/2020-01/jatkuva-kunnonvalvonta-takaa-etteivat-valot-sammu>. Luettu 8.3.2022.
- 11 Mellin, Toni. 2016. Öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Theseus-tietokanta.
- 12 Aro, Martti & Elovaara, Jarmo & Karttunen, Matti & Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko. 2015. Suurjännitetekniikka. Espoo: Otatieto.

- 13 Öljyeristeiset tehomuuntajat. 1973. Sisäinen dokumentti. Strömberg.
- 14 Lillqvist, Rurik. 2008. Suurmuuntajien vanhenemisen vaikutus paperieristykselle, öljylle ja oikosulkukestoisuuteen. Sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 15 Huurinainen, Ville. 2006. Jakelumuuntajan elinkaaritutkimus. Tutkintotyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 16 Muuntajien öljyanalyysit. 2019. Sisäinen dokumentti. Vantaan Energia.
- 17 Määttä, Kimmo. 2020. Päämuuntajien reaaliaikainen kunnonvalvonta. Opinnäytetyö. Oulun Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 18 Online DGA mittausteknologiat. 2018. Verkkoaineisto. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/DGA%20online%20mittausteknologiat.pdf>>. Luettu 16.2.2022.
- 19 Muuntajan kaasuanalysointorit. 2022. Tuote-esite. Multirel. Sähköpostiviesti 17.2.2022.
- 20 Optimus OPT100 DGA-kaasuanalysointori. 2020. Tekninen kuvaus. Vaisala <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Optimus-DGA-Technical-Note-B211813FI.pdf>>. Luettu 21.2.2022.
- 21 Kaasukromatografia. 2022. Verkkoaineisto. Opetushallitus. <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/analyysimenetelmat_2-5_kaasukromatografia.html>. Luettu 21.2.2022.
- 22 Hydran M2-X. 2020. Datalehti. GE. <https://spatialworld.fi/wp-content/uploads/2021/03/HydranM2-X-Brochure-EN-2020-10-Grid-GA-1644_R007_A4-hr.pdf>. Luettu 17.2.2022.
- 23 Hydran M2-X. 2020. Katalogi. GE. <<https://www.gegridsolutions.com/md/catalog/hydranm2x.htm>>. Luettu 24.2.2022.
- 24 MHT410. 2020. Datalehti. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/MHT410-Datasheet-B211484FI.pdf>>. Luettu 25.2.2022.
- 25 Doyle, Lee. 2019. Vaisala MHT410 esittely. Verkkoaineisto. <https://prezi.com/p/vzj0p_dzziku/mht410-moisture-hydrogen-and-temperature-monitor/?frame=4ca0a84424b594e1683fae3f5473db812ee34c6f>. Luettu 25.2.2022.

- 26 Hydrocal 1001+. 2017. Datalehti. MTE. https://multirel.fi/wp-content/uploads/2018/09/HYDROCAL-1001-English_R01-11.2017.pdf. Luettu 1.3.2022.
- 27 Hydrocal 1001+. 2022. Verkkoaineisto. <<https://multirel.fi/sahkonlaatu-jamittalaitteet/kaasuanalysaattorit/hydrocal-1001>>. Luettu 1.3.2022.
- 28 Kaasuanalysaattoreiden takuuajat. 2022. Multirel. Sähköpostiviesti 12.4.2022.
- 29 CoreSense. 2022. Datalehti. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LAB000585&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 7.3.2022.
- 30 CoreSense. 2022. Tekniset tiedot. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZBG000199&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 7.3.2022.
- 31 CoreSense. 2022. Käyttjäopas. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=AA0101577&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 7.3.2022.
- 32 Online dissolved gas monitoring. 2018. Tuote-esite. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LAB000611&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 7.3.2022.
- 33 Vaisalan muuntajamonitorointi. 2022. Vaisala. Sähköpostiviesti 17.2.2022.
- 34 Kelman DGA 900. 2021. Datalehti. GE. <https://spatialworld.fi/wp-content/uploads/2022/02/Grid-GA-L3-DGA_900-1599-2021_06-EN_A4_R003-hr.pdf>. Luettu 16.3.2022.
- 35 Kelman DGA 900. 2022. Verkkoaineisto. Spatialworld. <<https://spatialworld.fi/fi/md/kelman-dga-900/>>. Luettu 16.3.2022.
- 36 OPT100 DGA. 2022. Datalehti. Vaisala. <<https://docs.vaisala.com/v/u/B211583FI-H/fi-FI>>. Luettu 22.3.2022.
- 37 Katsaus Vaisala Optimus™ DGA kaasuanalysaattoritekniikkaan. 2016. Teknologiakuvaus. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-G-Optimus-DGA-Technology-in-nutshell-B211588FI.pdf>>. Luettu 22.3.2022.

- 38 Hydrocal 1009. 2018. Datalehti. Multirel. Sähköpostiviesti 17.2.2022.
- 39 CoreSense M10. 2022. Datalehti. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZBG000200&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 29.3.2022.
- 40 CoreSense M10. 2021. Tekniset tiedot. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZBG000198&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 29.3.2022.
- 41 CoreSense M10. 2022. Käyttäjäopas. Hitachi Energy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZBG00040&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 29.3.2022.
- 42 CoreSense M10. 2022. Esittelysivusto. Hitachi Energy. <<https://www.hitachienergy.com/de/de/offering/product-and-system/transformers/transformer-service/advanced-services-for-transformers/condition-monitoring/core-sense-m10-multi-gas-dga-analyzer>>. Luettu 29.3.2022.