

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**Jakelumuuntajien ikääntymiseen vaikuttavat tekijät ja
muuntajakartoitus Stora Enson Imatran tehtailla**

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Mika Ahtiainen

Lappeenranta 21.11.2019

Juha Ilves

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Juha Ilves

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Mika Ahtiainen

Kandidaatintyö 2019

15 kuvaa, 30 sivua

Hakusanat: muuntajat, ikääntyminen, elinkaari, öljyanalyysi, teollisuus

Prosessiteollisuuden sähköjakeluverkko on tyypillisesti energiaintensiivinen ja sisältää varsin suuren määrän muuntajia. Muuntajakannan ja sen ikääntymiseen liittyvien seikkojen tuntemus on tarpeellista tulevaisuuden investointien ja kunnossapidon tehokkaaseen toteuttamiseen.

Tässä työssä tutustutaan teollisessa sähköjakeluverkossa käytettäviin muuntajatyyppeihin, niiden ikääntymiseen vaikuttaviin tekijöihin ja tehdään Stora Enson Imatran tehtaiden muuntajakannasta ikään perustuva katsaus. Työssä esitellään muuntajan eliniän määritelmiä ja vanhenemisen mekanismeja sekä käydään läpi muuntajan eliniän selvittämiseen käytettäviä menetelmiä aikaisempiin tutkimuksiin perustuen.

Lopussa käsitellään Stora Enson Imatran tehtaiden muuntajakantaa käyttöiän näkökulmasta ja mahdollisesti lähivuosina korvattavien muuntajien määrää aikaisempaan tutkimustietoon perustuen.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	7
2 Muuntajat teollisuusverkossa	7
2.1 Ideaalinen yksivaihemuuntaja	7
2.2 Todellinen yksivaihemuuntaja	8
2.3 Kolmivaihemuuntaja	8
2.3.1 Kolmivaihemuuntajan rakenne	9
2.4 Muuntajien perustyytit.....	9
2.4.1 Paisuntasäiliöllinen muuntaja	10
2.4.2 Hermeettinen muuntaja	11
2.4.3 Öljyeristeisen muuntajan eristysaineet.....	11
2.5 Kuivamuuntajat	12
2.6 Muuntajien varusteet	13
2.6.1 Lämpötilanmittaus	13
2.6.2 Kaasurele.....	14
2.6.3 Ilmankuivain	14
2.6.4 Öljynkorkeuden osoitin.....	14
2.6.5 Ylipaineventtiili	14
3 Muuntajan elinikä ja siihen vaikuttavat tekijät	15
3.1 Muuntajan tekninen elinikä	15
3.1.1 Muuntajaöljyn ominaisuuksien heikkeneminen.....	16
3.1.2 Paperieristeiden vanheneminen.....	17
3.1.3 Ympäristön vaikutus	19
3.1.4 Sähköinen kuormitus.....	20
3.1.5 Muuntajassa tapahtuvat läpilyönnit	21
3.1.6 Öljyn ominaisuuksien ja siihen liuenneiden kaasujen analyysi ..	21

3.1.7	Apulaiteviat.....	23
3.1.8	Aiempi korjaushistoria.....	23
3.2	Strateginen elinikä.....	24
3.3	Taloudellinen elinikä.....	24
4	Stora Enson Imatran tehtaat	24
5	Imatran tehtaiden sähkönjakelujärjestelmä	25
5.1	Päämuuntajat	25
5.2	Jakelumuuntajat.....	26
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	28
	Lähdeluettelo	30

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Alaindeksit

E ensiö

h häviö

T toisio

Kreikkalaiset

Φ magneettivuo

Lyhenteet

°C Celsiusaste

h tunti

I virta

K Kelvin

kV kilovoltti

l litra

ml millilitra

mm millimetri

Mrd. miljardi

MVA megavoltiampeeri

N käänikierrosten lukumäärä

V jännite

μg mikrogramma

% prosentti

€	euro
DP	paperineristeen polymeroitumisaste
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
TCG	Palavien kaasujen kokonaismäärä

1 JOHDANTO

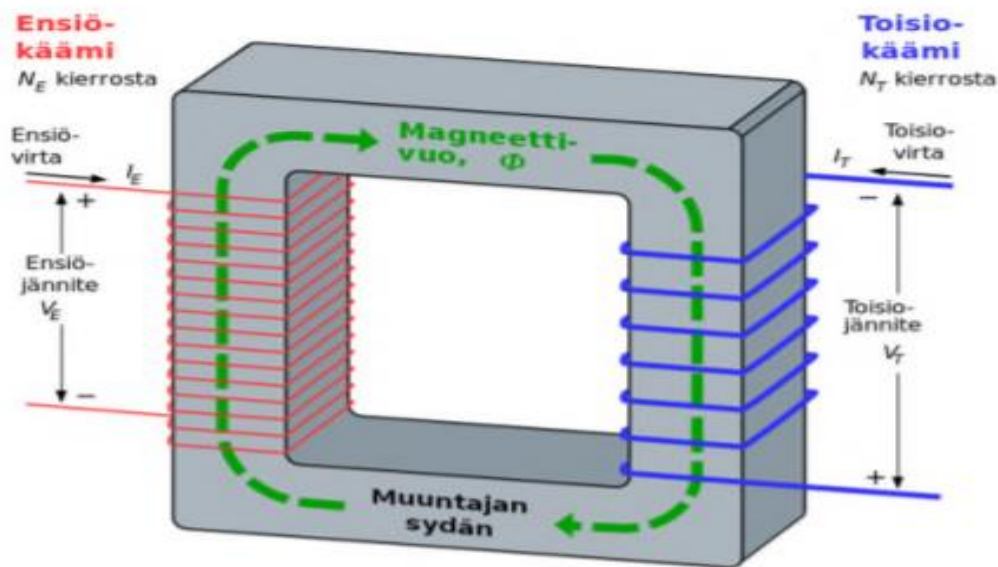
Prosessiteollisuuden sähköjakeluverkko on tyypillisesti energiaintensiivinen. Siinä tapahtuvissa vioista aiheutuu merkittäviä tuotannonmenetyksiä, joten siltä vaaditaan korkeaa luotettavuutta. Verkko voi sijaita suhteellisen pienellä alueella mutta olla rakenteeltaan varsin laaja ja koostua kymmenistä muuntajista useissa jänniteportaissa. Kuitenkin sähköverkko ja sen komponentit eivät ole investointikohteena useinkaan ensisijaisia, vaan panostukset tehdään enemmän tuotantoprosessin kehittämiseen. Muuntajakannan tuntemus ja niiden linkkaaren hallinta on välttämätöntä investointien suunnittelussa ja luotettavan sähköjakelun varmistamiseksi. Tässä työssä tutustutaan teollisuuden sähköjakeluverkon muuntajien ominaisuuksiin ja niiden ikääntymiseen vaikuttaviin tekijöihin sekä tehdään Stora Enson Imatran tehtaiden muuntajakannan ikäkartoitus.

2 MUUNTAJAT TEOLLISUUSVERKOSSA

Isossa teollisuusverkossa on pää- ja jakelumuuntajia eri jänniteportaissa. Tässä työssä jakelumuuntajiksi kutsutaan 10kV ensiöjänniteessä toimivia muuntajia. Päämuuntajiksi kutsutaan 110kV muuntajia. Keskimäärin teollisuuden muuntajat ovat 0,5-4MVA suuruisia.

2.1 Ideaalinen yksivaihemuuntaja

Muuntaja on sähkölaite, jonka avulla vaihtojännite ja -virta voidaan muuttaa toiseksi. Ideaalimuuntaja on häviötön eli siinä ei esiinny rautahäviöitä ja sen hajavuo on nolla. Ideaalimuuntajassa ei synny virtalämpöhäviöitä ja sama magneettivuo läpäisee sekä ensiö- että toisiokäämit. Kuvassa 2.1 on esitetty ideaalimuuntaja kaksine käämeinen. (Aura&Tonteri, 1986, s.18)



Kuva 2.1: Ideaalinen yksivaihemuuntaja

2.2 Todellinen yksivaihemuuntaja

Todellisuudessa muuntajassa tapahtuu käämityksen induktansseista ja resistansseista johtuvia häviöitä. Siksi ne eivät voi siirtää kaikkea ensiökäämin tehoa toisioon. Muuntajan tehohäviöt esitetään rauta- eli tyhjäkäyntihäviöinä ja kupari- eli kuormitushäviöinä. (Aura&Tonteri, 1986, s.21)

Rautahäviöt jaetaan edelleen pyörrevirta ja hystereesihäviöihin. Koska muuntajan magneettivuo on kuormituksesta riippumaton, rautahäviöt ovat muuntajan tyhjäkäynnissä ottaman tehon suuruisia. Virtalämpöhäviöt syntyvät käämien resistansseista ja ovat riippuvaisia kuormitusvirrasta. (Huurinainen, 2006, s.10)

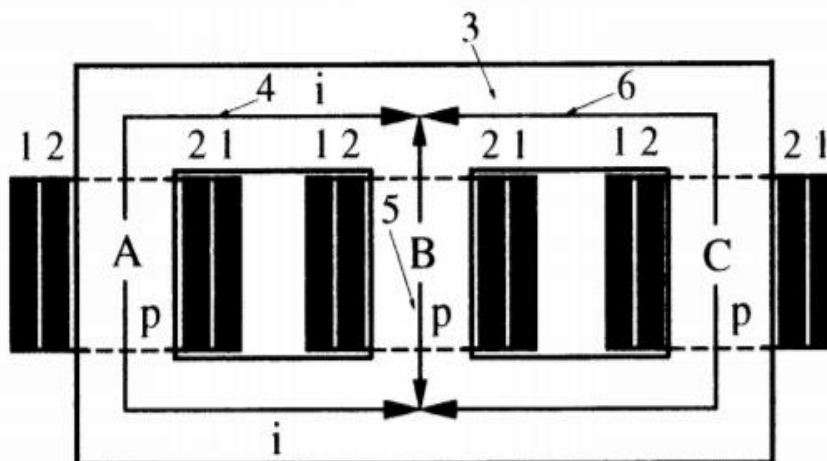
Ideaalimuuntajassa ajateltiin ensiön magneettivuon läpäisevän kokonaisuudessaan toisiokäämin. Tämä ei todellisessa muuntajassa toteudu vaan osa kulkee hajavuona toisiokäämin ohi ja aiheuttaa muuntajan käämeihin hajareaktanssia.

2.3 Kolmivaihemuuntaja

Kolmivaihemuuntajassa kytketään kolme yksivaiheista muuntajaa tähteen. Muuntajassa vaihejännitteet ovat 120 asteen vaihesiirrossa toisiinsa nähden. Koska myös magneettivuot

ovat samassa vaihesiirrossa ja ne kumoavat toisensa yhteisessä sydämessä, voidaan kolmivaihemuuntaja esittää kuten kuvassa 2.2.

Kuvassa A, B, C ovat vaiheitten rautasydämet. Niiden ympärillä on ensiö ja toisiopiirien käämit. (Aura&Tonteri, 1986, s.48)



Kuva 2.2: Kolmivaihemuuntajan toiminnalliset osat (Aura&Tonteri, 1986, s.48)

2.3.1 Kolmivaihemuuntajan rakenne

Kolmivaihemuuntajassa on jokaisella vaiheella rautasydän kuten kuvassa 2.2 on esitetty. Sydämiä ympärille on kiedottu ensiö- ja toisiokäämit. Yleensä lähinnä rautasydäntä on alajännitekäämi. Alajännitekäämi on alimpana, koska se on helpompi eristää ja yläjännitekäämiin asennetut väliotto- ja käämikytkimet ovat tässä järjestyksessä helpompia toteuttaa. Käämitykset tehdään joko alumiinista tai kuparista, joka on paperieristeistä. Jos käämejä kerrostetaan tulee väliin paperieriste. Ylä- ja alajännitteiden välillä on eristeliiriö ja jäähdytyskanavia. (Huurinainen, 2006, s.12)

Magneettipiirinä toimiva rautasydän koostuu rautalevyistä, jotka ovat noin 0,3mm paksuja. Ne ladotaan päällekkäin ja niiden väliin jätetään ohut eriste pyörrevirtojen minimoimiseksi. Öljyeristeisen muuntajan säiliö on tehty aaltolevyistä ja siihen on tehty jäähdytysvaippa tai erilliset radiaattorit. (Huurinainen, 2006, s.12)

2.4 Muuntajien perustyytit

Muuntajat jaetaan yleensä suurtehomuuntajiin ja jakelumuuntajiin. Jälkimmäisistä puhutaan yleensä, kun yläjännite on 20kV tai pienempi.

Jakelumuuntajat jaetaan kolmeen perustyyppiin öljyeristeisiin ja kuivamuuntajiin. Öljyeristeiset muuntajat ovat edelleen jaettu paisuntasäiliöllisiin ja hermeettisiin muuntajiin.

2.4.1 Paisuntasäiliöllinen muuntaja

Paisuntasäiliöllisen muuntajan sisällä on muuntajaöljy, joka toimii eristeenä ja johtaa häviölämmön pois muuntajan käämeiltä. Muuntajan kannen päällä on öljysäiliö, johon lämpötilan noustessa suuremman tilavuuden vievä öljy pääsee laajenemaan. Yleensä tavoitellaan, että säiliö on puoliksi täynnä 20 °C lämpötilassa. Muuntaja hengittää paisuntasäiliöön kiinnitetyn ilmankuivaimen kautta. (Aura&Tonteri, 1986, s.81-83)



Kuva 2.3: Paisuntasäiliöllä varustettu muuntaja

Suurjännitemuuntajissa on käämikytkin ja jakelumuuntajissa voi olla väliottokytkin, jonka avulla jännitettä voidaan säätää halutuksi.

2.4.2 Hermeettinen muuntaja

Hermeettinen muuntaja on kokonaan täytetty öljyllä. Lämpölaajeneminen mahdollistetaan joustavien jäähdytyslementtien kautta, jotka on suunniteltu kestäämään ylikuormituksen aiheuttama ylipaine. Hermeettisessä muuntajassa on tavoiteltu, että happi ja kosteus ei pääsisi vaikuttamaan eristeiden ja öljyn ominaisuuksiin. Ne soveltuvat samoihin olosuhteisiin kuin paisuntasäiliöllisetkin, mutta hieman pienempiä.



Kuva 2.4: Hermeettinen muuntaja

2.4.3 Öljyeristeisen muuntajan eristysaineet

Öljyeristeisissä muuntajissa eristysaineena käytetään normaalisti muuntajaöljyä. Tämä toimii myös väliaineena lämmön siirrossa muuntajasta. Muuntajaöljyltä vaaditaan suurta jännitelujuutta ja lämmönsiirtokykyä. (Rissanen, 2015, s.23)

Muuntajaöljyllä on merkittävä vaikutus muuntajan käyttöikänsä. Hyvä muuntajaöljy säilyttää ominaisuutensa pitkän ajan erilaisissa käyttöolosuhteissa. Hyvä viskositeetti auttaa lämmön siirtymisessä ja varmistaa, että öljy täyttää muuntajassa kaikki välit ja huokokset. Suomessa on voimakkaiden lämpötilavaihteluiden takia varmistettava, että öljy

säilyy ominaisuuksiltaan toimivana kylmissäkin olosuhteissa. Öljyltä vaaditaan alhainen lämpötilakerroin ja hyvä osittaispurkausten sietokyky eikä nesteen leimahduslämpötila saa olla matala, jotta valokaari sammuisi turvallisesti. (Huurinainen, 2006, s.17-18)

Muuntajan eristenesteinä käytetään silikoniöljyä, estereitä ja muuntajaöljyä, joka on yleisin.

Muuntajaöljy on mineraaliöljystä tislaamalla valmistettua. Sen ominaisuudet on määritelty standardissa IEC 60296. Öljyn ominaisuudet vaihtelevat hieman lähtöaineen ominaisuuksien mukaan. Sen kiehumispiste vaihtelee 250-300°C:n välillä. Suomessa jäähdytyspisteen tulee olla alle -40°C:ta ja leimahduspisteen yli 140°C:ta. Tavoiteltava hyvä juoksevuus altistaa öljyn hapettumiselle ja alhainen leimahtamispiste on paloturvallisuusriski. (Huurinainen, 2006, s.18)

Esterit ovat myrkytön ja ympäristöystävällisempi vaihtoehto eristenesteeksi. Ne eivät kehitä haitallisia yhdisteitä, ja sitovat vettä muuntajaöljyä paremmin. Esterit ovat kalliita mutta niitä voidaan käyttää esimerkiksi täyden yhteydessä öljyn tilalla tai seassa. (Huurinainen, 2006, s.18)

Silikoniöljyllä saavutetaan eristenesteen palamattomuus. Ne ovat öljyä ympäristöystävällisempiä, mutta johtavat lämpöä huonosti ja sietävät purkauksia huonommin kuin öljy. Purkauksissa muodostuu palavia kaasuja. Ne vaativat paremman kosteudelta suojautumisen, koska imevät itseensä vettä. (Huurinainen, 2006, s.18)

2.5 Kuivamuuntajat

Kuivamuuntajat ovat muuntajia, joissa eristysaineena käytetään valuhartsia. Kuivamuuntajilla saavutetaan öljyeristeisiä muuntajia parempi palo- ja kemikaaliturvallisuus sekä huoltovapaus. Niillä on myös hyvä oikosulkukesto.

Kuivamuuntajat ovat paljon öljyeristeisiä kalliimpia, joten niiden käyttö on yleensä perusteltua vain paikoissa, joissa niiden ominaisuuksilla saavutetaan erityistä hyötyä, esimerkiksi turvallisuudessa.

Imatran tehtailla kuivamuuntajia käytetään sisätiloissa, palo- ja tuoteturvallisuuden takia.



Kuva 2.5: Kuivamuuntaja

2.6 Muuntajien varusteet

2.6.1 Lämpötilanmittaus

Muuntajan lämpötilaa mitataan muuntajaöljystä. Päämuuntajilla mitataan myös käämin lämpötilaa. Lämpömittariin asetellaan hälytys ja laukaisurajat. Hälytysrajan ylittyessä hälytysrele indikoi korkeasta lämpötilasta käyttäjälle, laukaisurajan ylittyessä muuntajaa suojaava katkaisija laukeaa. Lämpömittarissa on vallitsevan lämpötilan näytön lisäksi huippuarvon osoitin.

Käämin lämpötilaa mitattaessa tarkoituksena on kuvata muuntajan käämin kuumimman pisteen lämpötilaa. Sen mittaaminen suoraan on vaikeaa. Käämin korkeimman lämpötilan mittausta tehdään välillisesti järjestelmällä, jossa muuntajan kuumimpaan öljytilaan on sijoitettu öljytaskuun lämmitysvastus. Tätä lämmitysvastusta kuormitetaan käämin

kuormitusjohtimeen sijoitetusta virtamuuntajasta, jolloin sen teho on riippuvainen kuormitusvirrasta. Virtamuuntaja asetellaan siten, että vastuksen ja öljyn lämpötilaero vastaa käämin ja öljyn lämpötilaeroa. Näin voidaan mitata käämin kuumimman pisteen hetkellistä ja korkeinta lämpötilaa. (Aura, 1986, s.92)

Tyypilliset hälytys- ja laukaisurajat öljyeristeiselle muuntajalle ovat 60°C/80°C ja kuivamuuntajalle 90°C/120°C. (Ahtiainen, 2019)

2.6.2 Kaasurele

Muuntajaan voi syntyä kaasuja ylikuumenemisen ja purkaus- tai valokaari-ilmiön hajottaessa öljyä ja eristeaineita. Kaasu kertyy kaasureleeseen, joka antaa hälytyksen tai suuremman vian tapauksessa laukaisee muuntajaa suojaavan katkaisijan auki. Suurissa vioissa syntyy muuntajan sisällä voimakas paineen nousu ja tästä johtuva öljyn syöksy kaasureleeseen aiheuttaa myös suojaavan katkaisijan laukaisun. (Aura, 1986, s.91)

2.6.3 Ilmankuivain

Ilmakuivaimen tehtävä on kuivattaa muuntajan sisälle kulkeva ilma. Koska lämpötilanvaihtelusta johtuva öljyn tilavuuden muutos aiheuttaa ilman sisään- ja uloshengityksen, on ilmaa kuivatettava, jotta muuntajaan ei pääse kosteutta. Ilmankuivain on yleensä täytetty silikageelillä, joka sitoo kosteuden sisään pyrkivästä ilmasta. Uloshengitysilma johdetaan silikageelin ohi, jotta se ei turhaan rasita sitä. Ilmankuivain on rakenteeltaan läpinäkyvä lieriö, joten silikageelin kunto voidaan tarkastaa sen väristä. (Aura&Tonteri, 1986, s.90) Kun silikarakeiden väri on lähes kokonaan kosteuden tai muuntajaöljyn vaikutuksesta muuttunut, ne vaihdetaan.

2.6.4 Öljynkorkeuden osoitin

Öljynkorkeuden osoitin on muuntajan paisuntasäiliössä. Se voi olla uimurilla varustettu osoitin tai lasiputki, josta korkeus on luettavissa.

2.6.5 Ylipaineventtiili

Hermeettisissä muuntajissa ei ole paisuntasäiliötä eikä kanavaa mistä muuntaja hengittää. Vaarallisen paineen muodostumisen estämiseksi muuntajassa on ylipaineventtiili, joka purkaa ylipaineen hallitusti muuntajasta.

3 MUUNTAJAN ELINIKÄ JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

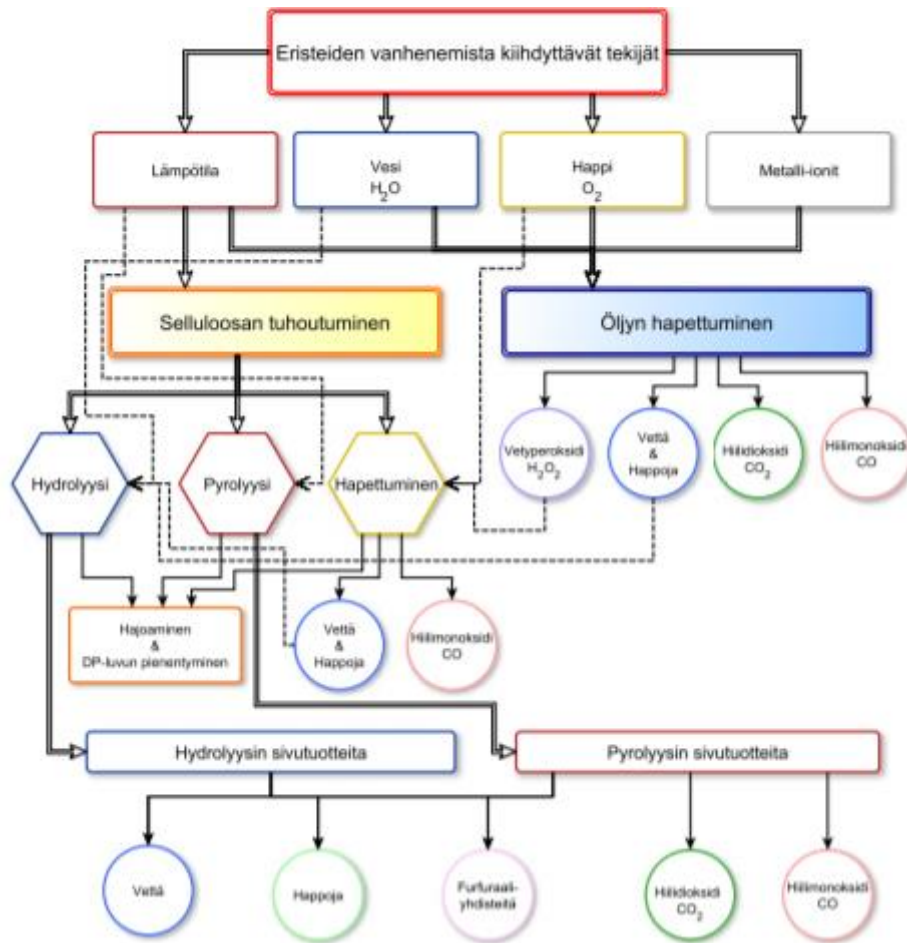
Muuntajien elinikää käsittelevissä tutkimuksissa Plukka – Vanhan suurmuuntajan optimaalinen vaihtoajankohta (1992) ja Sauna-aho, Nordman & Lehtisalo – Muuntajan kuormitettavuus ja terminen elinikä (1984), on molemmissa saatu muuntajan eliniäksi 38 vuotta. Plukan mukaan 68% ko. tutkimuksen muuntajista romutettiin 38 ± 10 vuoden välillä. Tutkimuksessa on huomioitu teknisen syiden lisäksi muista syistä romutetut muuntajat. Pelkästään teknisiin seikkoihin perustuva elinikä oli Plukan tutkimuksessa 30 vuotta.

Muuntajan elinikää voidaan tarkastella teknisen eliniän lisäksi strategisen ja taloudellisen eliniän näkökulmista. (Plukka, 1992, s.34)

3.1 Muuntajan tekninen elinikä

Jakelumuuntajan ominaisuuksia heikentää termisten, sähköisten, mekaanisten ja ympäristötekijöiden rasitukset. Muuntajan vikaantumiseen eniten vaikuttaa eristeaineiden kunto, joiden ominaisuuksien heikkenemiseen terminen rasitus vaikuttaa eniten. Eristeaineissa muuntajaöljyn vanheneminen vaikuttaa muuntajan elinkaareen voimakkaimmin, koska sen kunto vaikuttaa suoraan läpilyöntilujuuteen ja välillisesti muitten eristeaineiden kuntoon. (Huurinainen, 2006, s.29) Eristeaineiden kunnan heikkenemiseen vaikuttavien tekijöiden yhteyttä on havainnollistettu kuvassa 3.1.

Kuten kuvasta nähdään, prosessi on monimutkainen ja vaikutukset ristiin lisäävät yleensä ikääntymisen nopeutta.



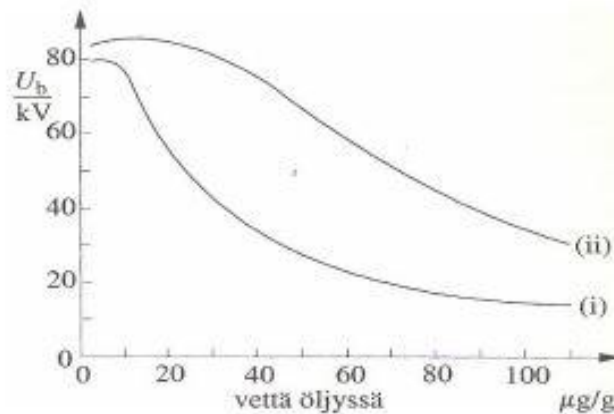
Kuva 3.1: Muuntajan eristemateriaalin hajoamiseen vaikuttavia tekijöitä, vaikutusmekanismit ja lopputuotteita (Mellin, 2016, s.8)

3.1.1 Muuntajaöljyn ominaisuuksien heikkeneminen

Uuden muuntajaöljyn läpilyöntilujuus ei merkittävästi poikkea eri öljylaatujen välillä ja on esimerkiksi Shell Diala S3 ZX-I Driedin tapauksessa 60kV/mm. Tähän puhtaan uuden öljyn ominaisuuteen heikentävästi vaikuttavat epäpuhtauksien, kuten pölyn, kosteuden, kuitujen ja kaasun määrä. (Shell, 2019)

Kosteus vaikuttaa muuntajaöljyn läpilyöntilujuuteen voimakkaasti. Sitä pääsee öljyyn muuntajan hengittäessä ilmankuivaimen kautta. Mikäli ilmankuivain ei ole huollettu oikein pääsee kosteus muuntajaöljyyn ja sitä kautta paperieristeisiin. Öljyssä olevan kosteuden on todettu imeytyvän paperiin ja vain pieni osa siitä on liuenneena öljyyn. (Mellin, 2016, s.9)

Kuvassa 3.2 on kaksi jännitelujuutta kuvaavaa käyrää. Käyrä (i) kuvaa öljyä, jossa on 55 $\mu\text{g/g}$ epäpuhtauksia ja käyrän (ii) öljy on kahdesti suodatettu. Kuvaajista nähdään kosteuden vaikutus jännitelujuuteen ja miten epäpuhtaudet edelleen voimistavat vaikutusta.



Kuva 3.2: Kosteuden vaikutus muuntajan jännitelujuuteen (Huurinainen, 2006, s. 29)

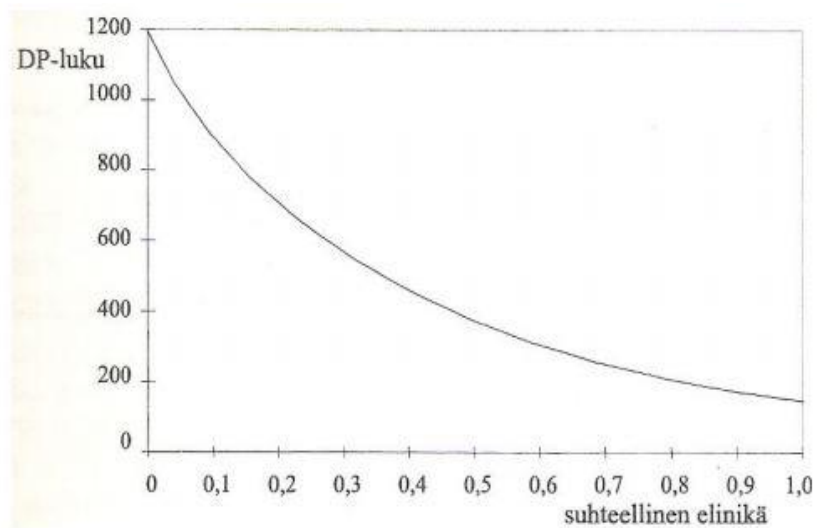
Terminen rasitus aiheuttaa muuntajaöljyn hapettumista. Hapen ja hiilivetyjen reaktiossa syntyy vetyperoksidia. Reaktionopeuteen vaikuttavat lämpötilan lisäksi ilman ja metallien epäpuhtaudet. Hapettumisen vaikutukset vaihtelevat riippuen muuntajaöljystä. Toisilla syntyy happamia yhdisteitä, jotka vaurioittavat paperieristeitä, toisilla se johtaa öljyn saostumiseen, joka taas heikentää jäähtymistä ja edelleen lisää termistä rasitusta. (Aro et al, 2003, s.178)

3.1.2 Paperieristeiden vanheneminen

Paperieristeitä on muuntajassa käämityksissä ja läpivienneissä. Paperieristeen selluloosa koostuu toisiinsa kytkeytyneistä glukoosirenkaista. Näiden ketjujen kunto määrittää eristeen pitoajan lähes kokonaan. Eristeeseen kohdistuvat rasitukset pilkkovat näitä ketjuja, aiheuttavat eristeeseen halkeamia ja alentavat eristyskykyä ja lisäävät osittaispurkauksien todennäköisyyttä. (Aro et al, 2003, s.483)

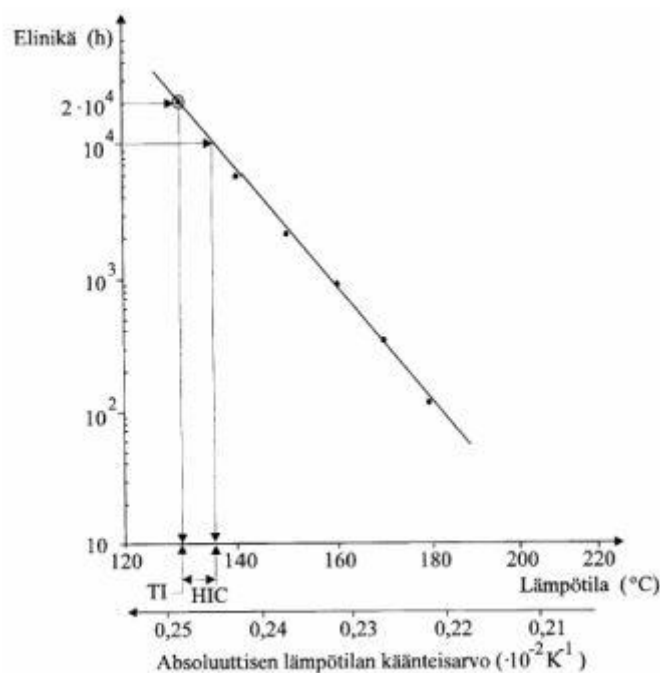
Eristeen kuntoa voidaan arvioida näiden ketjujen lukumäärää mittaamalla eli määrittämällä DP-luku. DP -luku uudessa eristeessä selluloosamolekyylä kohden on 1000-1400. Käyttöikänsä lopussa eristeen DP -luku on 200-250. Kuvassa 3.2 on esitetty eristepaperin DP -luvun muuttuminen suhteellisen eliniän funktiona (Rissanen, 2015, s.

27). Tarkan DP -luvun määrittäminen muuntajasta vaatisi paperieristeestä otettua näytettä. Tämä ei yleensä ole käytännössä mahdollista, koska se vaatisi muuntajan avaamisen. Kuvassa 3.3 on esitetty DP -luku muuntajan suhteellisen eliniän funktiona.



Kuva 3.3: DP -luku suhteellisen eliniän funktiona (Huurinainen, 2006, s.34)

Muuntajan paperieristeen vanheneminen on voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Paperieristeen vanhenemista voidaan arvioida kuvan 3.4 kokeellisesti määritellyn Arrhenius -käyrän avulla.



Kuva 3.4: Muuntajan paperieristeen elinikä (Huurinainen, 2006, s.32)

Arrhenius -käyrään johtavat päätelmät perustuvat olettamukseen, että eriste muuttuu aina yhden reaktion kautta eli yhtälössä käytettävät vakiot pysyvät koko lämpötila-alueella samana. Kuvasta 3.4 nähdään, että elinikä laskee puoleen lämpötilan noustessa n. 6 astetta. (Aro et al, 2003, s.520)

3.1.3 Ympäristön vaikutus

Muuntajan ulkopuolisten asioiden vaikutuksista, kuten aiemmin on jo todettu, merkityksellisin on lämpötilasta johtuva kuormitus. Jos ilmastointi on tehoton ja muuntaja likainen voi huono jäähdytys johtaa liian korkeaan toimintalämpötilaan. Tämä taas nopeuttaa ikääntymiseen johtavia prosesseja. Korkea lämpötila alentaa myös muuntajan kuormitettavuutta.

Huono ilmanlaatu ja epäpuhtaudet ovat öljysäiliöllisen muuntajan ongelma. Jos ilmankuivain ei ole oikein huollettu voi sen kautta päästä muuntajaan kosteutta. Epäpuhtaudet voivat vaikuttaa syövyttävästi muuntajan ulkoisiin osiin, kuten kuoreen ja läpivientieristimiin, mikäli muuntaja ei ole suojattu. Tämä mekanismi voi olla

voimakkaampi, mikäli ympärillä on sopivia yhdisteitä tuottavia prosesseja. Samoin kuin kosteutta, voi tällaisia yhdisteitä päästä kuivaimen kautta muuntajan sisälle.

Muuntajan kiskoston ja ulkopuolisten jännitteisien osien suhteen on pidettävä huolta suojauksesta. Suojaamattomat osat voivat olla alttiita esimerkiksi pieneläinten aiheuttamille oikosuluille.

3.1.4 Sähköinen kuormitus

Käynninaikaisina sähköisinä kuormitustekijoinä tarkoitetaan muuntajaan vaikuttavaa ylikuormitusta, epälineaarista kuormitusta, epäsymmetriaa, kuormitusvaihteluita ja loistehoa. Yhteistä näille on, että ne lisäävät häviöitä ja aiheuttavat lämpenemistä. Ylikuormitustilanteen aiheuttamaan muuntajan kuumimman pisteen lämpötilaan vaikuttaa sähköisen kuormituksen lisäksi käytetyt materiaalit sekä ympäristön lämpötila. Siksi muuntajaa voimakkaammin kuluttavaan käyttötilanteeseen voidaan päätyä nimellistehon sallimissa rajoissakin. (Plukka, 1992, s.5)

Verkkovirran sinimuoto voi vääristyä kuormituksen takia. Tämä epälineaarisuus aiheuttaa harmonisia virta- ja jänniteyliaalloja. Näistä virtayliaallot ovat haitallisempia, jos niitä esiintyy paljon. Ne voivat pakottaa vähentämään muuntajan kuormitusta jopa 20-30%, jotta ei tapahtuisi ylikuumenemistä. Yliaallot ovat verkkotaajuuden kerrannaisia, josta 3. yliaalto syntyy yleensä yksivaiheisissa ja muut kolmivaiheisissa kuormissa. Yliaallot voivat summautua nollajohtimeen ja jäädä kiertämään kolmiokäämitykseen. Tämä aiheuttaa lämpötilan nousua ja voidaan havaita resonanssiääninä. Yliaalloja aiheuttavat esimerkiksi tasasuuntaajat, UPS -laitteet, taajuusmuuttajat, tyristoriohjaukset, valokaariuunit ja sähkösuodattimet. (Huurinainen, 2006, s.38)

Epäsymmetrisessä kuormituksessa muuntajan vaiheita ei kuormiteta tasaisesti. Tällöin voi muuntajan sisälle syntyä kuumia pisteitä. Tyypillinen epäsymmetriaan johtava vika on jonkin vaiheen sulakkeen palaminen. Vaihteleva kuormitus aiheuttaa muuntajaan lämpötilavaihtelua. Tämä johtaa edelleen öljyn tilavuuden vaihteluun ja altistaa muuntajan ulkoilman epäpuhtauksille. (Huurinainen, 2006, s.40)

3.1.5 Muuntajassa tapahtuvat läpilyönnit

Muuntajan eristeaineessa tapahtuvat läpilyönnit voidaan jakaa kolmeen luokkaan: epäpuhtaus-, kupla- ja sähköläpilyönteihin. Sähköläpilyönti on verrannollinen läpilyöntiin kaasussa. Sähkökentän voimasta syntyy sen suuntainen elektronivyöry nesteessä.

Kuplaläpilyönti syntyy, kun epäpuhtauksien tai aiemman sähköpurkauksen takia nesteeseen on syntynyt kaasukuplia. Nämä kuplat ovat varautuneita ja niistä syntyy kanava, jossa on alentunut tiheys ja heikentynyt läpilyöntilujuus.

Epäpuhtausläpilyönnit tapahtuvat öljyssä olevien partikkeleiden kautta. Niitä voivat olla kosteus, kuidut tai metallihiukkaset. Paperieristeestä voi sähkökentässä irrota kosteutta, jonka kanavaa pitkin läpilyönti tapahtuu. Hiukkaset voivat sähkökentän vaikutuksesta järjestäytyä ja muodostaa läpilyönnille edullisia siltoja. (Huurinainen, 2006 s.30)

3.1.6 Öljyn ominaisuuksien ja siihen liuenneiden kaasujen analyysi

Muuntajan kuntoa ja sitä rasittavia läpilyöntejä voidaan arvioida öljyanalyysillä. Siinä muuntajaöljynäytteestä analysoidaan siihen liuenneita kaasuja ja mitataan eristeöljyn läpilyöntilujuus. Vikakaasuanalyysissä mitatut kaasut ja korkeimmat pitoisuudet on esitetty kuvassa 3.5. Kaasuista typpi ja happi eivät ole ns. vikakaasuja vaan voivat esiintyä muuntajassa normaalisti. (Mellin, 2016,s.15)

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

Kuva 3.5: Tutkittavat kaasut ja niiden suositellut raja-arvot (Rissanen, 2015, s.24)

Vikakaasuihin kuuluvat hiilivedyt ja vety viittaavat jonkinlaisen vian ilmenemiseen muuntajassa. Hiilivetyjä muodostuu selluloosan hajoamisessa, joten niiden ilmenemisessä on pyrittävä huomioimaan pitoisuuden kasvunopeus. Palavien kaasujen kokonaismäärää (vety, asetyleeni, etyleeni, eteeni, hiilimonoksidi) kuvaa arvo TCG. (Mellin, 2016, s.17)

Muuntajassa muodostuvien kaasujen lämpötilariippuvuus on esitetty kuvassa 3.6. Kuvassa esiintyvät vikaluokat ovat:

-PD: kaasukuplia (eristeetön kohta), korkea kosteus → osittaispurkauksia, kipinöintiä, korona -ilmiö → paperieristeen vahapintaisuutta, palaneita pisteitä

-S: Öljyn hajakaasuuntumien $<200^{\circ}\text{C}$, tyypillisempää uusilla, jälkeen vuoden 2000 valmistetuilla öljyillä

-O: Eristepaperin ylikuumentuminen $<250^{\circ}\text{C}$ → paperin tummuminen

-C: Paperin hiiltyminen $>300^{\circ}\text{C}$ → paperin ominaisuus muuttuu

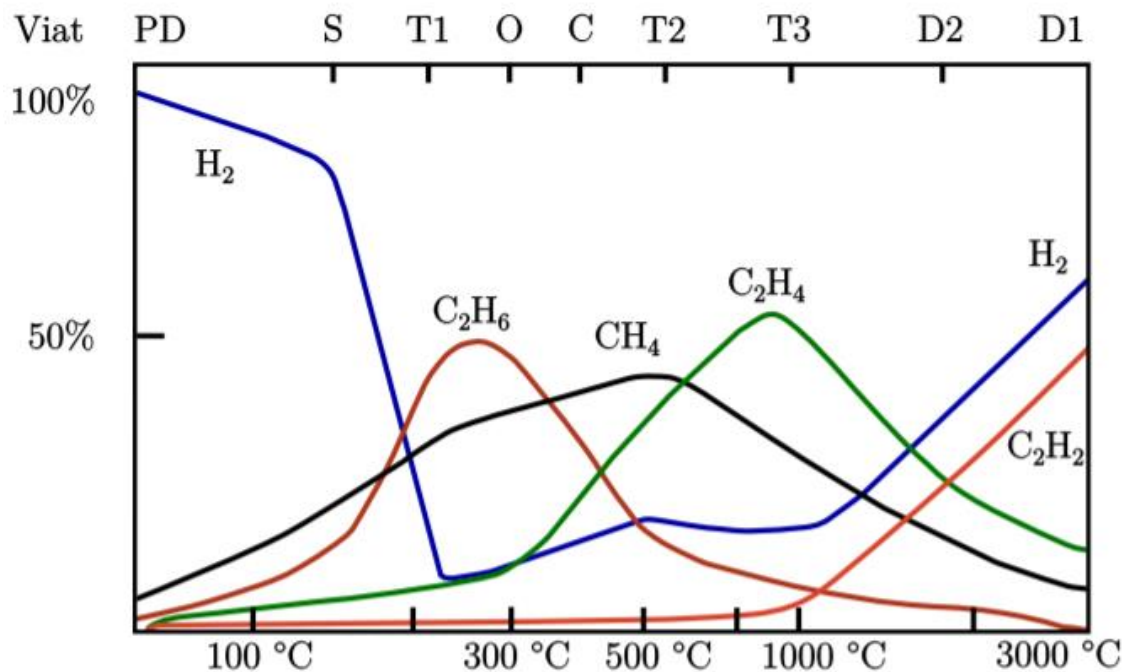
-T1: Muuntajan ylikuormitus, estynyt öljynkierto käämissä → terminen vika paperissa/öljyssä $<300^{\circ}\text{C}$ → paperin tummuminen

-T2: pyörrevirrat, huono kontakti → terminen vika $300\text{-}700^{\circ}\text{C}$ → paperin hiiltyminen

-T3: pyörrevirrat, huono kontakti, kuuma piste → terminen vika $>700^{\circ}\text{C}$ → Öljyn värjäytyminen $>800^{\circ}\text{C}$, metallien yhdistyminen $>1000^{\circ}\text{C}$

-D1: huono liitos → kipinöinti, valokaari, matalaenerginen purkaus → paperin hiiltymistä, hiilen muodostumista öljyyn, asetyleenin muodostuminen

-D2: Valokaaret, jatkuvat purkaukset, maasulut → lämpötilat $700\text{-}1800^{\circ}\text{C}$ → mittavia vauriota, paperin hiiltymien, hiilen muodostuminen öljyyn, metallin sulaminen, asetyleenin muodostuminen (Mellin, 2016, s. 18)



Kuva 3.6: Muuntajassa muodostuvien kaasujen lämpötilariippuvuus (Mellin, 2016, s.19)

Muuntajanöljyanalyysin yksittäistä arvoa ei voi pitää merkitseväenä vaan sitä on tutkittava kokonaisuutena ja tapauskohtaisesti. Esimerkiksi muuntajan, jonka käämikytkin on yhteydessä muuntajaan, öljy sisältää todennäköisesti korkeampia asetyleenipitoisuuksia, koska niitä syntyy käämikytkimen kytkentätapahtumissa.

Öljyanalyysissä mitataan arvo läpilyöntilujuudelle.

3.1.7 Apulaiteviat

Muuntajan komponentit, kuten läpiviennit, käämikytkimet, ohjauslaitteet tai jäähdyttimet voivat aiheuttaa käyttökeskeytyksiä, jotka johtavat muuntajan vaihtoon. Tällaiset viat voivat myös aiheuttaa itse muuntajaan vakavia vaurioita. (Plukka 1992, s.37)

3.1.8 Aiempi korjaushistoria

Korjaushistoriasta on havaittu, että muuntaja, jota ei ole aiemmin korjattu tulee kestämään paremmin verrattuna muuntajaan, jota on jo korjattu. Siksi jokainen muuntajan avaus ja siirto on riski mekaaniselle vauriolle. (Plukka, 1992, s.37)

3.2 Strateginen elinikä

Strategiseen elinikään vaikuttavat muuntajan tekniset arvot, jotka eivät jostain syystä enää täytä muuttuneen tilanteen vaatimuksia. Tällaisia tekijöitä ovat kuormitettavuuden ja oikosulkukestoisuuden rajat sekä käyttöjännitteen muutokset. Muuntajan viat voivat olla uhka sähköjärjestelmän muille laitteille, jolloin riskiarvioinneissa voidaan päätyä muuntajan vaihtoon. (Plukka, 1992, s.38)

3.3 Taloudellinen elinikä

Vaikka muuntajan tekninen kunto ja suorituskyky vastaisivat tarvetta voivat taloudelliset seikat puoltaa sen vaihtoa. Uudella muuntajalla saavutettavat alhaisemmat häviökustannukset, ylläpitokustannukset ja parempi varaosien saatavuus voi tehdä muuntajanvaihdon investointina kannattavaksi. (Plukka, 1992, s.39)

4 STORA ENSON IMATRAN TEHTAAT

Stora Enso on maailman johtava uusiutuvien pakkauskartonkien, paperin, puutuotteiden ja biomateriaalin valmistaja. Se työllistää maailmanlaajuisesti n. 26000 henkeä 30 maassa. Yhtiö on jaettu Consumer Board, Packaging Solutions, Biofuels, Wood Products ja Paper -divisiooniin. Sen pääkonttori sijaitsee Helsingissä ja liikevaihto 2018 oli 10,5 Mrd.€. (Stora Enso Oyj, 2018)

Imatran tehtaat on osa Stora Enso Oyj:tä ja sen Consumer Board -divisioonaa. Se koostuu Kaukopään ja Tainionkosken yksiköistä. Tehtaat tuottavat kuluttajapakkauskartonkeja, sellua ja muovipäällysteitä. Vuotuinen kapasiteetti on 1155000 tonnia pakkauskartonkeja, 825000 tonnia valkoista sellua (Kaukopää), 195000 tonnia ruskeaa sellua (Tainionkoski), 285000 tonnia muovipäällystettyä kartonkia. Tuotannosta 90% viedään Eurooppaan ja Kaakkois-Aasiaan. (Stora Enso Oyj, 2019)

Kaukopäässä toimii tällä hetkellä 3 kartonkikonetta, 2 kuitulinjaa, 4 päällystyskonetta, lipeälinja ja voimalaitos. Tainionkoskella kartonkikone, paperikone ja sellutehdas. Molemmissa yksikössä on omat vedenkäsittelylaitokset sekä hakettamot. Henkilöstömäärä tehtailla on n. 1300. (Stora Enso Oyj, 2019)

5 IMATRAN TEHTAIDEN SÄHKÖNJAKELUJÄRJESTELMÄ

Tehtaiden sähkönjakelujärjestelmä on prosessiteollisuudelle tyypillinen säteittäinen sähkönjakeluverkko. Tehtaat liittyvät valtakunnan 110kV -verkkoon Tainionkoskelta ja kahdesta pisteestä Kaukopäästä. Verkkoon on lisätty rengasmaisuutta rakentamalla varayhteyksiä kriittisten prosessien energiansaannin varmistamiseksi vika- tai huoltotilanteessa. Vuonna 2019 Imatran tehtaiden sähköenergian käyttö oli 1040GWh, josta omaa tuotantoa 59% (Stora Enso Oyj, 2019). Sähkö tuotetaan kahdella generaattorilla.

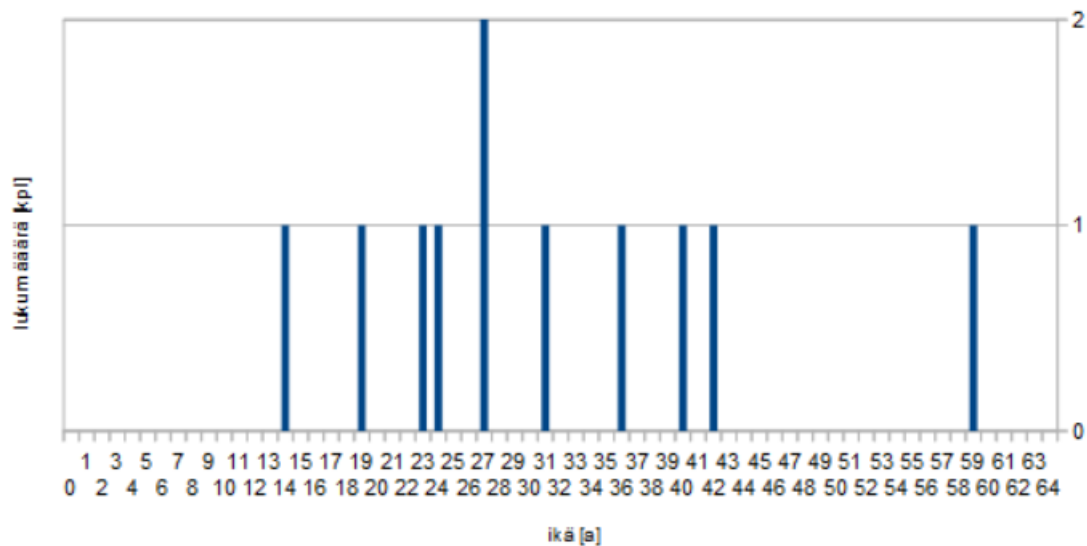
5.1 Päämuuntajat

Tehdasintegraatissa on yhteensä 11 päämuuntajaa, joilla muutetaan jännite 110kV:sta 10 kV:n. Muuntajista 9 sijaitsee Kaukopäässä ja 2 Tainionkoskella. Generaattorit on liitetty päämuuntajien 6 ja 7 kautta 110kV:n jännitteeseen. Kuvassa 6.1 on esitetty päämuuntajien iät.

Päämuuntajia Imatran tehtailla on suunniteltu pidettäväksi noin 50 vuotta. Jotta tämä tavoite saavutettaisiin muuntajille on suunniteltu tehtäväksi elinkaarihuolto 25-30 käyttövuoden kohdalla. Elinkaarihuollon yhteydessä muuntaja avataan, käämit pestään ja tarkastetaan. Eristeestä otetaan näyte, josta saadaan määritettyä DP -luku. Käämikytkinhuolto tehdään kuuden vuoden välein. (Ahtiainen, 2019)

Muuntajien kuntoa seurataan öljynäyttein vuoden sekä huoltokierroksin 3 kk välein. Huoltokierroksilla tehdään silmämääräinen tarkastus laitteelle, kuunnellaan ääntä, kirjataan käämikytkimen käyntilukema sekä muuntajan ja käämin hetkelliset lämpötilat sekä huippuarvot.

Kuvasta 5.1 nähdään, että päämuuntajista kolme on yli 40 vuotta vanhoja eli tilastojen valossa teknisen pitoaikansa lopussa. Niistä vanhin, Tainionkosken tehtaiden päämuuntaja 1 on suunniteltu vaihdettavaksi keväällä 2020. Muista yli 40 vuotiaista, päämuuntaja 6 huolletaan syksyllä 2019. Jäljelle jääneelle päämuuntajalle 3:lle on tehty elinkaarihuolto 2008, joten sen eliniän voidaan arvioida olevan vielä 10-15.

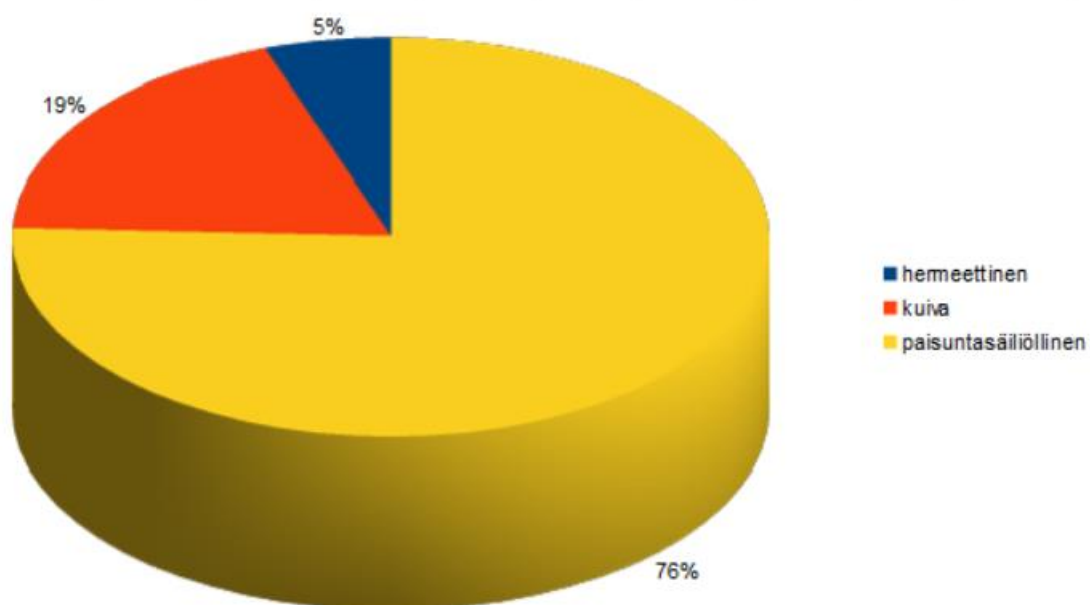


Kuva 5.1: Päämuuntajien ikäjakauma

5.2 Jakelumuuntajat

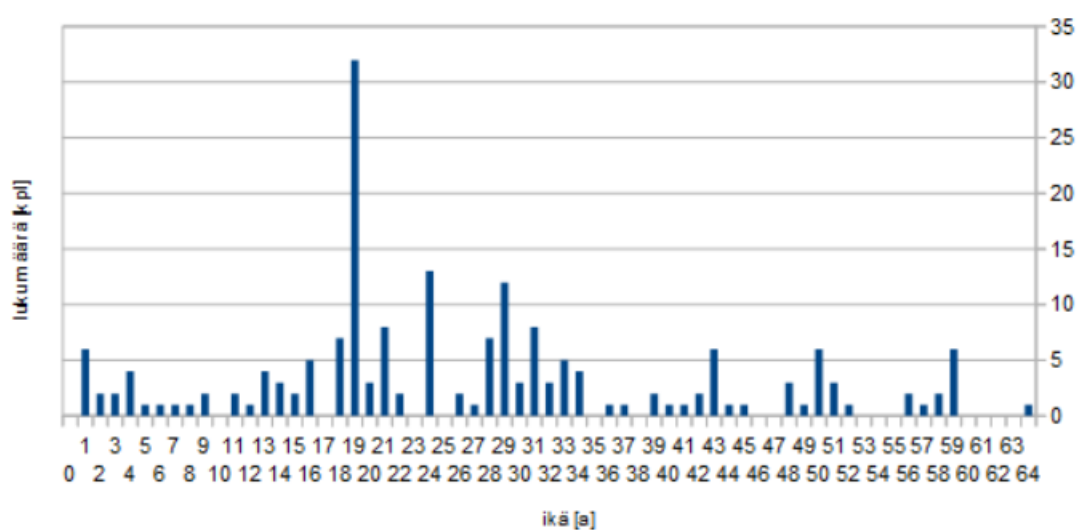
Imatran tehtailla jakelumuuntajia on yhteensä 185. Käytössä olevien tyyppien prosentuaaliset osuudet on esitetty kuvassa 5.2. Eri muuntatyyppien käytöstä on sovittu, että sisätiloissa käytetään paloturvallisuussyistä kuivamuuntajia ja muissa olosuhteissa käytetään öljysäiliöllisiä.

Muuntajia on suunniteltu käytettäväksi 40-50 vuotta. Niiden kuntoa seurataan 6 kk välein tarkastuskierroksilla, jossa tehdään laitteelle silmämääräinen tarkastus, kuunnellaan ääntä sekä kirjataan muuntajan ja käämin hetkelliset lämpötilat sekä huippuarvot. Öljynäytteet otetaan 3 vuoden välein.



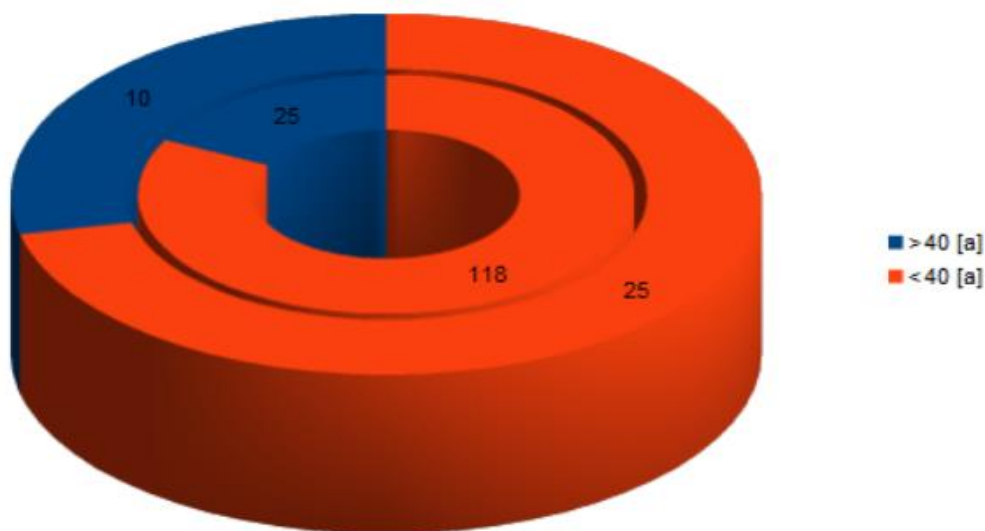
Kuva 5.2: Jakelumuuntajatyypien prosentuaaliset osuudet muuntajakannasta

Kuvassa 5.3 on esitetty jakelumuuntajien ikäjakauma. Vanhenevia muuntajia on pyritty korvaamaan tasaisesti. Piikit tilastossa johtuvat tehdasinvestoinneista, jolloin muuntajakanta on lisääntynyt.



Kuva 5.3: Jakelumuuntajien ikäjakauma

Kuvista 5.3 ja 5.4 voimme havaita, että muuntajista 35 on saavuttanut suunnitellun 40 vuoden iän. Kaukopään 25:stä, yli suunnitellun käyttöiän olevasta muuntajasta, 8 syöttää paperikone 6:sta, joka on suunniteltu suljettavan 2019 lopussa. Seuraavan kymmenen vuoden aikana 27 jakelumuuntajaa saavuttaa 40 vuoden iän, ellei niitä vaihdeta. Tainionkoskella sama lukumäärä on 6. Jotta muuntajakanta ei vanhenisi vaatii se keskimäärin 3 uutta muuntajaa vuodessa.



Kuva 5.4: Yli 40 -vuotiaiden muuntajien prosentuaaliset osuudet muuntajakannasta. Sisempi donitsi kuvaa Kaukopäätä, ulompi Tainionkoskea.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Muuntajan elinikä on tutkimusten mukaan voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Termistä rasitusta aiheuttavat mm. ylikuormitus, kuorman epäsymmetria, yliaallot, läpilyönnit ja purkaukset, sää ja riittämätön jäähdytys.

Muuntajan eristeaineiden kunto heikkenee ajan myötä. Sitä kiihdyttää terminen rasitus. Arrheniuksen käyrän perusteella 6 asteen lämpötilannousu puolittaa muuntajan paperieristeen eliniän. Muuntajaöljyyn päässeet epäpuhtaudet hajottavat paperieristettä ja aiheuttavat muuntajaöljyn happanemista ja eristeen hajoamista kiihdyttäviä prosesseja.

Analysoimalla muuntajaöljyä ja siihen liuenneita kaasuja voidaan saada tietoa muuntajan kunnosta. Muuntajaöljyn happamuus kiihdyttää ikääntymisprosesseja ja alhainen läpilyöntilujuus altistaa purkauksille. Liuenneiden kaasujen määrästä ja suhteista voidaan

tehdä johtopäätöksiä tapahtuneista purkauksista ja läpilyönneistä, niiden energiamääristä ja eristeiden vaurioista. Niiden perusteella voidaan tehdä päätös muuntajan vaihtamisesta ennen kuin sähkönjakelun keskeyttävä vika syntyy.

Elinikää voidaan tarkastella myös strategisen ja taloudellisen eliniän näkökulmasta. Strateginen elinikä voi tulla täyteen, jos muuntajan tekninen suorituskyky ei enää vastaa tarvetta. Vanhan muuntajan taloudellinen elinikä voi määräytyä esimerkiksi muuntajan vaihdolla saavutettavien edullisempien käyttö- ja huoltokustannusten kautta.

Stora Enson Imatran tehtaiden päämuuntajien keskimääräinen ikä on 27,5 vuotta. Yli 40 vuoden ikäisistä muuntajista 2 huolletaan tai vaihdetaan lähikuukausina ja kolmannelle on tehty elinkaarihuolto 2008. Seuraavan 10 vuoden aikana 2 päämuuntajaa saavuttaa 40 vuoden iän.

Jakelumuuntajissa ikääntyneiden osuus on päämuuntajia suurempi. Kaukopään osalta PK6:n sulkeminen vähentää vanhenemisen takia korvattavien muuntajien määrää merkittävästi. Tainionkoskella ikääntyneiden muuntajien osuus on merkittävä, lähes 29%. Seuraavan kymmenen vuoden aikana 27 jakelumuuntajaa saavuttaa 40 vuoden iän ellei niitä vaihdeta. Tainionkoskella sama lukumäärä on 6. Jotta muuntajakanta ei vanhenisi vaatii se keskimäärin 3 uutta muuntajaa vuodessa. Tämä on kuitenkin vain ikien perusteella laskettu keskiarvo. Korvausinvestointien tarpeeseen voimakasta vaihtelua aiheuttavat tehtaen tuotannon järjestelyt, jotka tapahtuvat muuntajan elinikään nähden merkittävästi lyhyemmällä jännteellä.

Edellä mainitun kaltaiset muutokset tehtaen sähkönkulutuksessa ovat omiaan aiheuttamaan muuntajien alkuperäiseen suunniteltuun kuormitukseen voimakkaitakin muutoksia. Siksi on tarpeen, että muuntajien kuntoa seurataan ja kiinnitetään huomiota muuntajien kuormitukseen sekä huoltokierroksilla kerättyihin lämpötilojen huippuarvoihin. Öljynäytteiden analysoinnilla voidaan ehkäistä yllättäviä vikaantumisia ja vähentää siitä seuraavia taloudellisia menetyksiä.

LÄHDELUETTELO

Ahtiainen Mika, 2016, Kunnossapitoinsinööri Mika Ahtiainen – Imatran tehtaiden muuntajakanta ja kunnossapitoperiaatteet [haastattelu] (22.11.2019)

Aro et al., 2003, Suurjännitetekniikka, 2. painos, Espoo, Otatieto, 520 sivua, ISBN 978-9-51672-3757

Aura Lauri & Tonteri Antti J., 1986, Sähkämiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, Porvoo, WSOY, 373 sivua, ISBN 951-672-226-1

Huurinainen Ville, 2006, Jakelumuuntajan elinkaaritutkimus, Tutkintotyö, TAMK, Tampere, 70 sivua

Jaegers Janine & Tenbohlen Stefan, 2009, Differences Approaches for the Acquisition of Reliability Statistics, reference, CIGRE, 7 sivua, Saatavissa: https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009_CIGRE_Jagers_Tenbohlen_Differences_Approaches_for_the_Acquisition.pdf

Mellin Toni, 2016, Öljyeristeisten tehomuuntajien liuenneiden kaasujen analyysi, Diplomityö, Aalto -yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, 70 sivua

Plukka Harri, 1992, Vanhan suurmuuntajan optimaalinen vaihtoajankohta, Diplomityö, TTKK, Sähkö, 98 sivua

Rissanen Teemu, 2015, Tehomuuntajan kunnonarviointi, Insinööriyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 79 sivua

Shell tuotetieto: Shell Diala ZX-I Dried, [viitattu 22.11.2019] Saatavissa: <https://www.epc.shell.com/documentRetrieve.asp?documentId=115810137>

Stora Enso Oyj, 2018, Vuosikertomus 2018, [viitattu 22.11.2019] Saatavissa: https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Annual-reports/2018/STORAENSO_Annual_Report_2018.pdf

Stora Enso Oyj, 2019, Imatran tehtaas esittely, [viitattu 22.11.2019], Saatavissa: https://storaenso.sharepoint.com/sites/Weshare-imatramills/SiteAssets/SitePages/esitysaineisto_StartPage/Imatran%20tehtaas_2019.pdf