

Juha-Matti Toivainen

**Huolto- ja kunnossapito-ohjelman kehittäminen
sähköverkkoyhtiölle**

Opinnäytetyö

CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2014

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

| | | |
|--|------------------------------|---|
| Yksikkö Ylivieska | Aika Huhtikuu 2015 | Tekijä/tekijät Juha-Matti Toivainen |
| Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma | | |
| Työn nimi HUOLTO- JA KUNNOSSAPITO-OHJELMAN KEHITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOYHTIÖLLE | | |
| Työn ohjaaja Jari Halme | Sivumäärä 48 | |
| Työelämäohjaaja Veli-Pekka Kinnunen | | |
| <p>Opinnäytetyö tehtiin KENET Oy:lle Kokkolaan. Yhtiö hallinnoi jakeluverkkoja Kokkolassa.</p> <p>Kunnossapito-ohjelma on tärkeä osa jakeluverkkoyhtiöiden toimintaa. Yhtiön on selvittävä lisääntyvistä vaatimuksista sähkön toimituksen laatuun liittyen. Sähkön toimituksen laatuun vaikuttavat useat asiat joista kunnossapidon hallitseminen on yksi osa.</p> <p>Työn tavoitteena oli päivittää yhtiön kunnossapito-ohjelma käyttämään nykyaikaisempia menetelmiä. Lisäksi tehtävänä oli tutkia osittaispurkausmittausten käyttöä osana kunnossapito-ohjelmaa. Kunnossapito-ohjelman kehittämiseen liittyy vahvoina osina taloudellisuus ja oikean kunnossapitostrategian valinta.</p> <p>Lopputuloksena kunnossapito-ohjelmasta tuli helposti hallittava kokonaisuus. Tekstiosassa tutkin erilaisia kunnonvalvonta menetelmiä ja niiden taloudellisia vaikutuksia kunnossapidon kustannuksiin.</p> | | |

Asiasanat

kunnossapito, taloudellisuus, strategia, sähköverkko

ABSTRACT

| | | |
|--|---------------------------|---|
| Unit Ylivieska | Date April 2015 | Author/s Juha-Matti Toivainen |
| Degree programme Electrical engineering | | |
| Name of thesis DEVELOPING THE MAINTENANCE PROGRAM FOR A POWER GRID COMPANY | | |
| Instructor Jari Halme | | Pages 48 |
| Supervisor Veli-Pekka Kinnunen | | |
| <p>This thesis was commissioned by KENET Oy located in Kokkola. The company administers an electricity distribution networks in Kokkola.</p> <p>The maintenance program is an important part of the operations of power grid companies. A network operator has to meet the increasing demands concerning the quality of electric distribution. There are many factors that affect the quality of electricity distribution and the management of the maintenance program is one part.</p> <p>The objective of this thesis was to update the company's maintenance program to use newer applications. Another objective of the thesis was to study the use of partial discharge measurement as a maintenance tool. Considering the economic efficiency and the right choices with maintenance strategy have an important role in improving the maintenance program.</p> <p>As a result of the thesis the maintenance program was developed so that is can be managed easily. In the text part different technologies for controlling the condition and their economic influence on maintenance cost are discussed.</p> | | |

| |
|--|
| <p>Key words maintenance, economic efficiency, strategy, power grid</p> |
|--|

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

| | |
|---------|---|
| CBM | kuntoperusteinen kunnossapito |
| HFCT | korkeataajuusvirtamuuntaja |
| JHA | jälleenhankinta-arvo |
| JHATP | jälleenhankinta-arvon vuosittainen tasapoisto |
| KAH | keskeytyksestä aiheutuva haitta |
| KENET | Kokkolan Energian sähkönsiirto yksikkö |
| kHz | kilohertsi, taajuuden yksikkö |
| kV | kilovoltti, 1000 volttia |
| M-Files | Dokumenttienhallintajärjestelmä |
| NKA | nykykäyttöarvo |
| On-line | reaaliaikainen |
| PAS | Päällystetty avojohto |
| PD | osittaispurkaus |
| RCM | luotettavuuslaskentaan perustuva kunnossapito |
| SF6 | rikkiheksafluoridi-kaasu |
| SCADA | käytönvalvontajärjestelmä |
| TBM | aikaperusteinen kunnossapito |

ESIPUHE

Haluan kiittää KENET Oy:n henkilökuntaa opinnäytetyöpaikasta, sekä hyvästä työilmapiiristä. Sain työkavereiltani arvokasta taustatukea opinnäytetyöhöni liittyen. Kiitokset Veli-Pekka Kinnuselle kesä- ja opinnäytetyöpaikasta, sekä aiheen valikoimisesta. Ja kiitokset Jussi Hintsalalle käytännön avusta monissa päivittäisissä ongelmissa.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
ESIPUHE
SISÄLLYS

| | |
|---|-----------|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 SÄHKÖN JAKELUVERKOSTO | 2 |
| 2.1 Kantaverkko | 2 |
| 2.2 Jakeluverkko | 3 |
| 3 JAKELUVERKKOTOIMINTA | 5 |
| 3.1 Jakeluverkot | 5 |
| 3.2 Jakeluverkonhaltijan toiminta | 5 |
| 3.3 Jakeluverkkojen toimitusvarmuus | 8 |
| 3.4 Sähköverkon haltijaa koskevia määräyksiä | 11 |
| 3.5 Taloudellisuus | 12 |
| 3.5.1 Investointikannustin | 12 |
| 3.5.2 Laatumkannustin | 14 |
| 3.5.3 Elinkaari | 15 |
| 4 VIKAANTUMIS- JA RASITUSMEKANISMEJA | 17 |
| 4.1 Eristeet | 17 |
| 4.2 Lämpörappeutuminen | 17 |
| 4.3 Muovit | 19 |
| 5 HUOLLON JA KUNNOSSAPIDON MENETELMIÄ | 20 |
| 5.1 Kuntotarkastukset | 20 |
| 5.1.1 Lämpökuvaus | 20 |
| 5.2 Öljyanalyysi | 20 |
| 5.3 Päämuuntaja | 21 |
| 5.4 Katkaisijat | 23 |
| 5.5 Suojareleet | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.6 | Erottimet | 24 |
| 5.7 | Verkkotietojärjestelmä | 25 |
| 6 | KUNNOSSAPITOSTRATEGIAT | 26 |
| 6.1 | Yleistä kunnossapidon strategioista | 26 |
| 6.2 | Korjaava kunnossapito | 27 |
| 6.3 | Ehkäisevä kunnossapito | 27 |
| 6.3.1 | Aikaperusteinen kunnossapito | 27 |
| 6.3.2 | Parantava kunnossapito | 28 |
| 6.3.3 | Kunterusteinen kunnossapito | 28 |
| 6.3.4 | Luotettavuusperusteinen kunnossapito | 28 |
| 7 | OSITTAISPURKAUKSET | 30 |
| 7.1 | Sisäiset osittaispurkaukset | 30 |
| 7.2 | Pintapurkaukset vaihtojännittellä | 31 |
| 7.3 | Osittaispurkaukset tasajännitteellä | 31 |
| 7.4 | Osittaispurkausten mittaaminen | 31 |
| 7.5 | Online mittaukset | 32 |
| 7.6 | Rogowskin kela | 36 |
| 8 | HUOLTO- JA KUNNOSSAPITOSUNNITELMA | 38 |
| 8.1 | Laitekanta | 38 |
| 8.2 | Ennakkohuoltojen hallinta | 39 |
| 8.3 | Strategian valitseminen ja määrittelyt | 41 |
| 8.4 | Vikatiedot | 42 |
| 8.5 | Lähtökohtainen, vikaantumisesta aiheutuva KAH | 44 |
| 8.6 | Jakeluverkon KAH-tarkastelu | 45 |
| 9 | YHTEENVETO | 46 |
| | LÄHTEET | |

KUVIOT

| | |
|---|----|
| KUVIO 1. Suomen kantaverkon siirtoyhteydet | 3 |
| KUVIO 2. Verkkotoiminnan apuvälineet | 7 |
| KUVIO 3. Keskimääräiset keskeytysajat vuosilta 1996-2012 muuntopiirikohtaisesti | 8 |
| KUVIO 4. Maksetut vakiokorvaukset 2005-2013 | 9 |
| KUVIO 5. Eristeiden rikkoontumismekanismi | 17 |
| KUVIO 6. Muuntajan öljypaperieristyksen elinikä | 19 |
| KUVIO 7. Öljyn suhteellisen kosteuden vaikutus öljyn läpilyöntijännitteeseen | 22 |
| KUVIO 8. Erään muuntajan suhteellinen kosteus eri lämpötiloissa | 23 |
| KUVIO 9. 3D-malli osittaispurkauksien syntymisestä | 33 |
| KUVIO 10. HFCT-yksiköt jakelumuuntamoissa | 34 |
| KUVIO 11. Osittaispurkausmitta-alueen suurentaminen | 34 |
| KUVIO 12. Suodattamaton (ylempi) ja suodatettu (alempi) HFCT:llä mitattu signaali | 35 |
| KUVIO 13. Muovieristeisen maakaapelin osittaispurkausmittaus | 35 |
| KUVIO 14. Rogowskin kelan rakenne (vas.) ja sijaiskytkentä (oik.) | 36 |
| KUVIO 15. Rogowskin kelan mittauskytkentä | 37 |
| KUVIO 16. Ennakkohuoltokortin tiedot | 39 |
| KUVIO 17. Ennakkohuoltotyön kulku | 40 |
| KUVIO 18. Ennakkohuolto työtilan kierto | 41 |
| KUVIO 19. Päätöksentekokaavio | 42 |
| KUVIO 20. Keskijänniteverkon viat 2005-2015 | 43 |

TAULUKOT

| | |
|--|----|
| TAULUKKO 1. Keskeytysajan vaikutus vakiokorvauksen määrään | 10 |
| TAULUKKO 2. Keskeytysten aiheuttamat KAH-kustannukset | 15 |

1 JOHDANTO

Työssä tutkittiin erilaisten kunnossapitotoimien käyttökohteita ja taloudellisuutta sähköverkkoyhtiön jakeluverkossa. Työn osana siirrettiin huolto-ohjelma sähköiseen muotoon dokumenttienhallintajärjestelmään.

Huolto- ja kunnossapitotyö on tärkeä osa sähköverkkoyhtiön toimintaa. Sähköverkkoyhtiön verkossa on laajasti erilaisia komponentteja, joiden huoltoajat ja kunnossapidon tarve vaihtelevat. Jakeluverkonhaltijan on huolehdittava vastuualueensa sähkönsiirron ja -jakelun teknisestä laadusta. Verkonhaltijan on myös pystyttävä pitämään sähköverkko ja sähköverkkopalvelut luotettavasti toiminnassa silloin, kun niihin kohdistuu normaaleja odotettavissa olevia ilmastollisia, mekaanisia tai muita ulkoisia häiriöitä.

Suomessa sähköverkkoyhtiöiden toimintaa valvo Energiavirasto. Jakeluverkkoyhtiöiden toimintavarmuutta pyritään kehittämään erilaisilla kannustimilla. Asiakkaiden kokemia häiriöitä ja niiden kestoa halutaan vähentää.

Tämän työn tarkoituksena on luoda sähköverkkoyhtiölle toimiva kunnossapitosuunnitelma, selvittää erilaisten kunnonvalvontajärjestelmien käyttöä sekä tutkia kunnossapitosuunnitelman taloudellisuutta.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli sähköverkkoyhtiö KENET Oy. Yhtiön huolto- ja kunnossapito-ohjelmaa haluttiin täydentää ja parantaa.

2 SÄHKÖN JAKELUVERKOSTO

2.1 Kantaverkko

Kantaverkko on korkeajännitteinen siirtoverkko, se mahdollistaa sähkönkäytön nykyisessä mittakaavassa. Kantaverkkoyhtiö Fingrid ylläpitää ja ohjaa sen käyttöä. Jakeluverkonhaltijat ovat fingridin näkökulmasta asiakkaita. Kantaverkon kautta siirtyy 75 prosenttia Suomessa käytetystä sähköstä. Sähköä siirretään ulkomailta, mutta myös kotimaan sisällä tuotanto- ja käyttötilanteiden mukaan. Kantaverkko on mitoitettu pitkille siirtoyhteysille ja suurille siirrettäville tehoille. Siirtoyhteysien poikkipinta-alat ovat verrattain pienet siirrettyyn tehoon nähden. Fingrid-yhtiön tavoitteena on investoida kantaverkon ylläpitoon ja rakentamiseen 1,7 miljardia euroa 2010-luvulla. Kantaverkkosuunnittelussa on otettava huomioon kustannustehokkuus pitkällä aikavälillä, jotta ei aiheudu ylimääräisiä investointeja huonon suunnittelun vuoksi. Suurjännitteisen siirtoyhteyden rakentaminen on suuri investointi. Tästä syystä myös investointeja ehkäisevien toimien on syytä olla tehokkaita. Kantaverkko ja suurjännitteiset alueverkot rakentuvat pääosin avojohtoverkostosta, koska pitkien ja suurien tehoja kestävien maakaapeliin käyttäminen ei ole taloudellisesti järkevää. (Fingrid 2015a.; Energiategollisuus 2013.)



KUVIO 1. Suomen kantaverkon siirtoyhteydet. (Fingrid 2015b.)

Kantaverkon perusrakenne nykytekniikan valossa pysynee samana keskipitkällä aikavälillä. Kantaverkon kehittämistoiminta keskittyy todennäköisesti kunnossapidon kehittämiseen, vanhojen siirtoyhteyksien korvaamiseen ja käytettävyyden parantamiseen. (Fingrid 2015a.; Energiateollisuus 2013.)

2.2 Jakeluverkko

Jakeluverkko on suurjännitteisen alueverkon jatke sähkönsiirtojärjestelmässä. Jakeluverkkoihin kuuluvat 110 kV, 1...70 kV suurjänniteverkot ja 0,4 kV pienjänniteverkot. Nykytilanteessa asema-kaava-alueen kuluttajista vajaa kolmannes ei ole varmaksi katsotun toimituksen laadullisten vaatimusten mukaisessa sähköverkossa.

Vastaavasti jäljelle jäävässä sähköverkossa vain neljännes on riittävän toimitusvarmuuden omaavassa verkossa. Jakeluverkonhaltijoiden toimittamien kehittämissuunnitelmien perusteella vuoteen 2019 mennessä laadullisten kriteerien täyttämiseksi investoidaan 460 miljoonaa euroa, josta 47 miljoonaa ennakoivaan kunnossapitoon. (Energiavirasto 2014.)

Suomessa on keskijännitteistä sähköverkkoa lähes 140 000 kilometriä. Tästä runsaat 110 000 kilometriä eli 80 % on avojohtoa. Maakaapelointi on kuluvalta valvontajaksolla ollut aktiivista ja tulee jatkumaan säävarman verkon tavoittelun takia aktiivisena vielä pitkään. Energiateollisuuden vuonna 2014 teettämän selvityksen mukaan maakaapelointiasteen odotetaan nousevan nykyisestä 29 prosentista 44 prosenttiin seuraavan neljän vuoden aikana. Tämä tarkoittaa yli 50 000 maakaapelikilometrin asentamista. (Energiateollisuus 2013; Energiavirasto 2014.)

3 JAKELUVERKKOTOIMINTA

3.1 Jakeluverkot

Keskijänniteverkko normaalisti rakennetaan keskeisiltä osiltaan silmukoiduksi verkoksi. Tällä parannetaan verkon käyttövarmuutta vikatilanteissa ja helpotetaan huoltojen suunnittelua. Haja-asutusalueilla jakeluverkko yleensä rakennetaan säteittäiseksi, koska keskeytyskustannusten pienemisestä aiheutunut rahallinen hyöty on huomattavasti pienempi kuin rengasmaisen verkon rakentamiskustannus. (Elovaara & Haarla 2011.)

Suomen sähkönjakeluverkosta suuri osa sijaitsee alueilla, joissa tehonsiirtotarpeen lisääminen ei ole oleellista. Tällaisissa osissa sähköverkkoa on järkevää keskittyä käyttövarmuuden ylläpitämiseen ja parantamiseen sekä korvausinvestointien järkevään ajoittamiseen. Kasvukeskuksissa verkon kuormituksen kasvu voi olla kymmenessä vuodessa 30-50 %, mikä vaatii mittavia korvaus- ja uudisinvestointeja. (Lakervi & Partanen 2012; Elovaara & Haarla 2011.)

Sähkönsiirto- ja jakeluverkon tehtävänä on siirtää siirtoverkon kautta tuleva tai voimalaitoksilla tuotettu teho loppukuluttajille. Sähköverkko on nyky-yhteiskunnalle välttämätön rakenne. Jakeluverkkoyhtiön sähkönjakeluverkko muodostuu normaalisti suurjännitteisestä alueverkosta, sähköasemista, keskijänniteverkosta, jakelumuuntamoista ja pienjänniteverkosta. Kokonaisuus muodostuu johdoista ja laajasta kirjosta erilaisia komponentteja. Rakenteellisesti suurin osa keskijänniteverkkoa on avojohtoa. Viime vuosina maakaapelin käyttö on lisääntynyt merkittävästi jakeluverkkoyhtiöiden tavoitellessa säävarempaa verkkoa. (Lakervi & Partanen 2012; Elovaara & Haarla 2011; Energiavirasto 2014.)

3.2 Jakeluverkonhaltijan toiminta

Sähköverkkotoimintaan tarvitaan Energiviraston myöntämä lupa. Jakeluverkonhaltijan toiminta on luvanvaraista monopolitoimintaa, jota Energiavirasto säätelee ja valvoo. Verkonhaltijalla on verkkoonsa kohdistuvia velvollisuuksia. Näitä ovat verkon ylläpito- ja

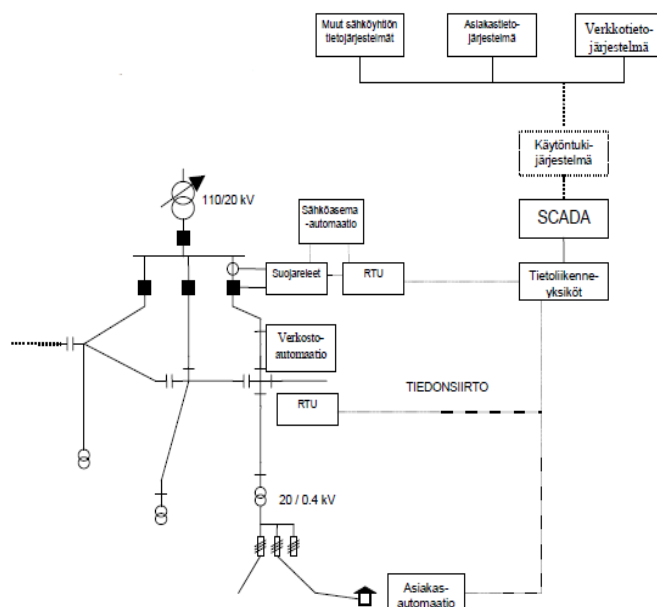
kehittämismallit. Lisäksi verkonhaltijan on liitettävä verkkoonsa tuotanto- ja kulutusliittymiä sähkönsiirtoa varten. (Elovaara & Haarla 2011.)

Sähköjakeluverkkoihin kohdistuvilla toiminnoilla ja investoinnilla on merkittävä osuus sähkön loppukäyttäjän maksamaan sähkön hintaan. Jakeluverkkotoiminnan vaikutus sähkön hintaan on 15-50 %, se vaihtelee sähkönkulutuksen mukaan. Suurilla energian kuluttajilla sähkönsiirron kustannus kokonaishinnasta on suhteellisesti pienempi. (Lakervi & Partanen 2012.)

Jakeluverkonhaltijan toiminnan tavoitteena on mahdollisimman sujuva verkon käyttö. Siihen liittyy oleellisesti sähkön laadun, turvallisuuden, asiakaspalvelun ja taloudellisuuden ylläpito ja kehittäminen. Ensijaisesti huolehditaan käyttötoiminnan turvallisuudesta. Verkkoyhtiön käytön suunnittelusta ja toteutuksesta vastaa käytönjohtaja tai käyttöpäällikkö. Käytönjohtaja ohjaa verkon erilaisten kytkentä- ja korjaustoimien etenemistä. Usein käyttötoiminta ja verkoston kehittäminen sulautuvat toisiinsa käytöstä vastaavien henkilöiden parannusehdotusten muodossa. Käyttötoimenpiteitä ohjataan valvomosta tai valvomoon rinnastettavasta työpisteestä. Käyttötiimin keskeisiä tehtäviä ovat:

- tarvittavien käyttö- ja kytkentätoimien suunnittelu ja toteutus
- verkon tilan seuranta
- häiriöiden hallinta
- verkoston kunnossapidon toteutus

Verkoston kytkentätilanteiden muuttaminen esimerkiksi huoltotyötä varten edellyttää kytkentäsuunnitelmaa. Suunnitelman laatimiseen kuuluvat kytkennän käytännön suunnittelu, resurssien ohjaaminen ja työturvallisuudesta huolehtiminen. Häiriötilanteissa käyttöhenkilöstö erottaa vikapaikan, mahdollisesti tunnistaa vian, ohjaa korjaushenkilöstön toimintaa ja ohjaa verkon normaalitilaan. Nopeimmillaan vian erotus tehdään minuuteissa. Käyttötoiminta on prosessin ohjausta. Prosessi on tarkoitus saada toimimaan häiriöttömästi ja turvallisesti. Sähköverkkotoiminnan prosessin ohjauksen apuvälineenä on verkoston automaatio. Verkostoautomaation lisäämisellä voidaan saavuttaa toimitusvarmuutta nopeasti verrattuna verkoston rakenteen muokkaamiseen. (Lakervi & Partanen 2012.)



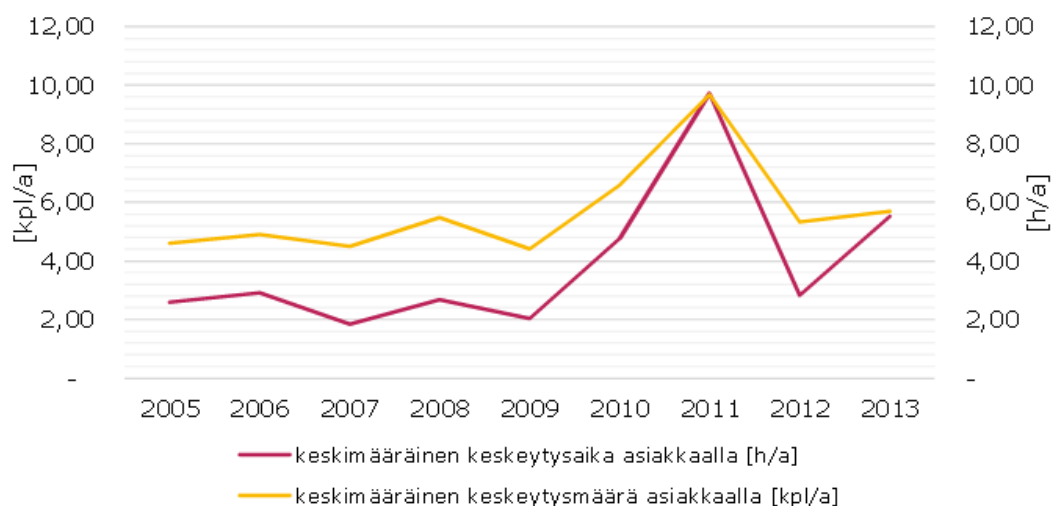
KUVIO 2. Verkostotoiminnan apuvälineet. (Lakervi & Partanen 2012.)

Käytönvalvontajärjestelmä, englanniksi *Supervisory Control And Data Acquisition*, (SCADA) on valvomotyöskentely avaintyökalu. Käytönvalvontajärjestelmällä suoritetaan kauko-ohjaukset ja –mittaukset, hallitaan tapahtumatietoja ja kytkentätilannetta, sekä suoritetaan raportointi. SCADA:n toiminnot on varmennettu sähkökatkoja ja teknisiä vikoja varten. sen käytössä suoritetaan korostettua tietoturvan hallintaa. Käytönvalvontajärjestelmän luoma kuva verkosta on yleispiirteinen, siinä ei ole tarkkoja laitekohtaisia tietoja. Käytönvalvontajärjestelmällä voidaan tarkastella tehtyjä kytkentätoimenpiteitä ja saadaan reaaliaikaista mittaustietoa. Käyttötukijärjestelmällä hallitaan tarkempaa tietoa jakeluverkosta. Käyttötukijärjestelmää käytetään verkon suureiden analysointiin. Käyttötukijärjestelmän avulla voidaan määrittää laskennallinen vikapaikka. Oikosulkuvirran etäisyyden määrittelyssä käytetään suojareleiden välittämää mittaustietoa ja verkkomalliin pohjautuvaa laskentaa. Käyttötukijärjestelmä laskee oikosulkuvirran solmuväleittäin ja vertaa tietoa mitattuun oikosulkuvirtaan. Laskenta on hyvä ja melko luotettava apuväline vian paikannuksessa. Vianpaikannusta voidaan kuitenkin käyttää vain vikatapauksissa, jossa siirtoyhteys kytkeytyy oikosulkuun.

Maasulkujen paikkaa ei nykytekniikalla pystytä laskemaan. Vian suunnan näyttäviä laitteita on kehitetty ja otettu käyttöön. (Lakervi & Partanen 2012.)

3.3 Jakeluverkkojen toimitusvarmuus

Jakeluverkonhaltijat jaotellaan kolmeen kategoriaan; kaupunki-, taajama- sekä haja-asutusalueuutyypisiin verkonhaltijoihin. Jaotteluun vaikuttaa toimitetun energiamäärän suhde verkon pituuteen ja liittymien määrään. Jaottelu ottaa kantaa myös keskijänniteverkon maakaapelointiasteeseen. Myös asiakasmäärän suhde verkon pituuteen vaikuttaa jaotteluun. Aiemmin, vuosina 1996-2010, jaottelussa otettiin huomioon vain keskijänniteverkon maakaapelointiaste. Energiavirasto kerää vuosittain jakeluverkonhaltijoilta keskeisiä toimitusvarmuuteen liittyviä tunnuslukuja. Näiden tunnuslukujen perusteella voidaan tarkastella yhtiökohtaista toimitusvarmuutta. Vuodesta 2011 muuntopiirikohtainen keskeytysaikataarkastelu on painotettu käyttöpaikkojen määrällä, se kuvaa paremmin kuluttajakohtaista häiriömäärää ja – kestoja. Kuviossa 1 on kuvattu verkko-yhtiökohtaisesti keskimääräistä keskeytysaikaa muuntopiiriä kohti. (Energiavirasto 2014.)

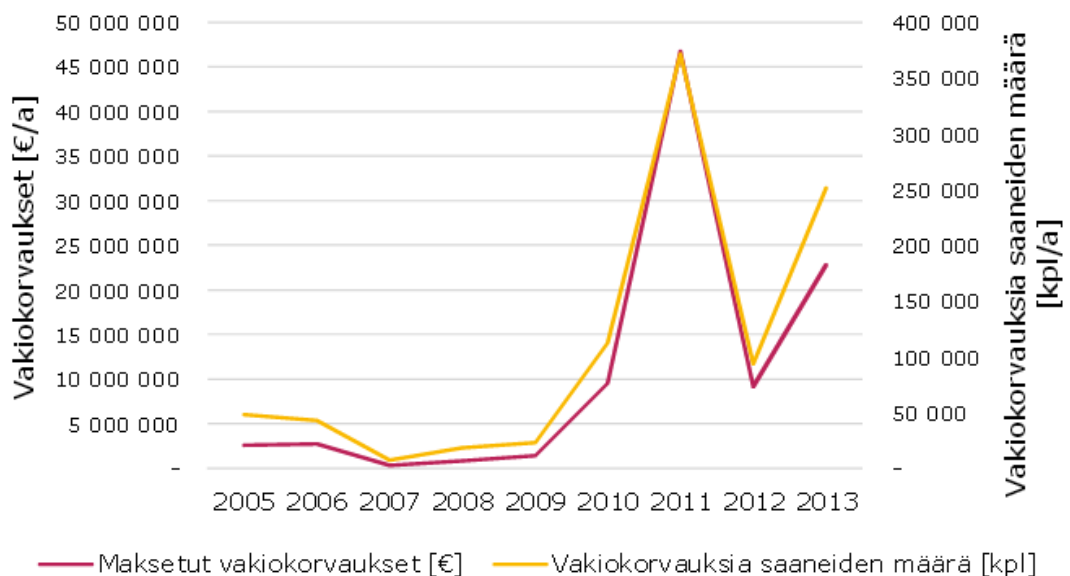


KUVIO 3. Keskimääräiset keskeytysajat vuosilta 1996-2012 muuntopiirikohtaisesti. (Energiavirasto 2014.)

Kuviosta nähdään selkeästi vuoden 2011 muutosten vaikutus haja- ja taajama-alueiden keskeytysaikoihin. Muutos erittelee maantieteellisesti paremmin häiriöiden kokemien kuluttajien sijainnin verkossa. Vuodet 2010 ja 2011 olivat ilmastollisesti vaikeita vuosia sähköverkonhaltijoille. Vuosittaiset vaihtelut yksittäisten yhtiöiden toteutuneiden keskeytysaikojen kohdalla voivat poiketa keskiarvosta paljonkin. Nykyisissä tunnusluvuissa eritellään suunnitellut ja suunnittelemattomat keskeytykset. (Energiavirasto 2013.)

Jakeluverkonhaltijat ovat velvoitettuja maksamaan erilaisia korvauksia asiakkaan kokemien käyttökatkojen perusteella. Näitä ovat vakiokorvaukset ja keskeytyksestä aiheutuneen haitan kustannukset (KAH). Keskeytyksestä aiheutuneen haitan korvauksia ei makseta loppukäyttäjille. Verkonhaltijan on maksettava vakiokorvausta loppukäyttäjälle sähkön toimituksen yhtäjaksoisesta keskeytyksestä, mikäli tämä ei pysty todistamaan katkoksen johtuneen toimittajan vaikutusmahdollisuuksien ulkopuolella olevasta esteestä jota ei kohtuudella voitu välttää. Vakiokorvauksia maksetaan yli 12 tunnin mittaisilta keskeytyksiltä. (Energiavirasto 2013.)

Vuosien 2010,2011 ja 2013 poikkeuksellisen vaikeat ilmastolliset olosuhteet aiheuttivat verkkoyhtiölle huomattavia kustannuksia vakiokorvausten muodossa.



KUVIO 4. Maksetut vakiokorvaukset 2005-2013. (Energiavirasto 2013.)

Vakiokorvauksen määrä on riippuvainen aiheutuneen keskeytyksen pituudesta ja vuotuisten asiakkaan maksamien siirtomaksujen määrästä. Vakiokorvaus voi olla 10 %-200 % verkkopalvelumaksusta. Vakiokorvauksia ei makseta yli 2000 € euron ylittävästä osasta. (Energiamarkkinalaki 2013.)

TAULUKKO 1. Keskeytysajan vaikutus vakiokorvauksen määrään.

| Keskeytysaika | Vakiokorvaus verkkopalvelulumakusta |
|---------------|-------------------------------------|
| 12...24 h | 10 % |
| 24...72 h | 25 % |
| 72...120 h | 50 % |
| 120...192 | 100 % |
| 192...288 | 150 % |
| 288... | 200 % |

Keskeytyksestä aiheutuneen haitan rahallinen korvaus on määritelty vuonna 2007 valmistuneen selvityksen perusteella. Korvausten määrä riippuu keskeytyksen tyypistä ja ajasta. Keskeytyksestä aiheutuneen haitan laskeminen on energiapainotettua, näin keskeytyksestä aiheutunutta kustannukset ovat tasapuolisemmat eri verkkoyhtiölle. (Heikkilä 2014.)

Sähkömarkkinalain asettama kehitysvelvoite asettaa vaatimuksia sähkön laadun parantamiseen keskipitkällä aikavälillä. Energiavirasto onkin asettanut kannustimia, jotka ajavat sähköverkon haltijoita kehittämään verkkoaan taloudellisistakin syistä. Energiavirasto on asettanut sähköverkonhaltijoiden tehtäväksi kehittää jakeluverkon toimitusvarmuutta, joka yleisesti käsitetään säävarmuuden parantamiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että asteittain vuoteen 2029 mennessä 100 prosenttia verkosta on oltava toimitusvarmuuden minimikriteerien sallimissa rajoissa. Riittävän tason toimitusvarmuuden omaavana verkkona pidetään sellaista sähköverkkoa, missä vika-ajat pysyvät kaava-alueilla alle kuudessa tunnissa ja haja-asutusalueilla alle 36 tunnissa. Yhä

usemmat yhtiöt aloittavat kehittämisprojekteja toimitusvarmuuden lisäämiseksi. (Sähkömarkkinalaki 2013; Energiavirasto 2014.)

3.4 Sähköverkon haltijaa koskevia määräyksiä

Jakeluverkonhaltijalla on velvollisuus toimittaa riittävän hyvälaatuista sähköä loppukäyttäjille. Verkkoluvan haltijan täytyy kehittää, ylläpitää ja käyttää sähköverkkoaan toiminnalleen säädettyjen vaatimusten ja käyttäjien kohtuullisten tarpeiden mukaisesti. Sähkön siirrosta vastaavan tahon on pystyttävä jatkamaan toimintaansa laadullisesti riittävän hyvin silloinkin, kun verkkoon kohdistuu normaaleja ilmastollisia, mekaanisia tai muita häiriöitä.

Sähkönsiirtoyhtiöiden on ylläpidettävä sähköverkon kehittämissuunnitelmaa. Jakeluverkonhaltijan on kehittämissuunnitelmassaan eriteltävä yksityiskohtaiset toimenpiteet verkon järjestelmällistä parantamista koskien. Jakeluverkkoyhtiön on varmistuttava yhteiskunnan johtamisen, turvallisuuden ja väestön toimeentulon sekä elinkeinoelämän toimintakyvyn kannalta tärkeiden sähkönsiirtoyhteyksien toimivuudesta. (Sähkömarkkinalaki 2013.)

Jakeluverkonhaltijan on huolehdittava hallinnoiman verkkonsa alueella siitä, että sähkölaitteistossa havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti. Sähkönjakeluverkolle on suoritettava määräaikaistarkastus viiden vuoden välein. Tarkastuksen voi tehdä valtuutettu tarkastaja, koska kyseessä on luokan 1 sähkölaitteisto. Määräaikaistarkastuksessa varmistutaan riittävässä laajuudessa pistokokein sähkölaitteiston turvallisesta käytöstä, huolto- ja kunnossapito-ohjelman mukaisten toimenpiteiden suorituksista. Lisäksi on varmistuttava sähkölaitteiston käytössä tarpeellisten välineiden, piirustusten, kaavioiden ja ohjeiden käytettävyydestä sekä sähkölaitteistojen mahdollisten laajennus- ja muutostöiden asianmukaisten tarkastupöytäkirjojen olemassaolosta. Sähkölaitteistoja on huollettava siten, että niiden käytöstä ei aiheudu vaaraa käyttökäyttäjille. Jos sähkölaitteiston käytössä tai huollossa ei noudateta sähköturvallisuuslakia taikka siihen liittyviä säännöksiä ja määräyksiä, voi sähköturvallisuusviranomaisen kehottaa laitteiston haltijaa korjaamaan puutteet määräajassa. Sähköturvallisuusviranomaisen ei voi kieltää jakeluverkonhaltijan

sähkölaitteiston käyttöä, jos siitä aiheutuu kohtuutonta haittaa sähkön käyttäjille. (Kauppa- ja teollisuusministeriö 1996; Sähköturvallisuuslaki 1996.)

Opinnäytetyön tehtäväkuvauksessa todettiin, että KENET Oy:n kunnossapitosuunnitelma oli osittain puuteellinen ja sen käytössä ei hyödynnetty nykyaikaisia menetelmiä. Haluttiin tehdä helposti noudatettava ja kattava huolto- ja kunnossapito-ohjelma. Osana opinnäytetyötä haluttiin perehtyä osittaispurkausmittausten liittämistä kunnossapito-ohjelmaan.

3.5 Taloudellisuus

Verkoston kunnossapitotoimien taloudellisuus korostuu yhä kasvavien tehostamistavoitteiden myötä. Sähköverkon toimitusvarmuusvaatimusta lisätään viranomais määräyksin käytännössä jatkuvasti. Samalla vaaditaan, että verkonhaltijan investointien sähköverkkoon pitää olla järkeviä, ja toiminnan on oltava tehokasta. Jakeluverkkoyhtiöiden on pakko jalostaa toimintojaan tehokkaammaksi. Kunnossapidon rahavirta on osa jokaisen yhtiön normaalia liiketoimintaa. Kunnossapidollisiin toimenpiteisiin kuluvan rahoituksen hyöty pystytään perustelemaan säästöillä, jotka aiheutuvat suunnitelmallisesta kunnossapidosta verrattuna suunnittelemattoman kunnossapidon kustannuksiin. Jakeluverkonhaltijan investoinnit verkkoon kasvattavat verkko-omaisuuden arvoa, jolla on positiivinen vaikutus suurimman sallitun tuoton määrään. Verkonhaltijan toteutuneen tuloksen laskennassa otetaan huomioon verkkotoiminnan tuottojen lisäksi verkkotoiminnan kustannukset. Erinäisten kannustimien avulla voidaan suunnitelmallisesti oikaista toteutunutta tulosta verkonhaltijan kannalta positiiviseen suuntaan. Kannustimista saatavat ylimääräiset tuotot mahdollistavat korvaus- ja hankintainvestointien toteuttamisen. (Energiavirasto 2012.)

3.5.1 Investointikannustin

Kuluvalla valvontajaksolle on määritetty investointikannustin, jonka tarkoituksena on motivoida verkonhaltijaa investoimaan ja kehittämään sähköverkkoaan. Investointien toteutumista voi analysoida verkon rakennetiedoissa ilmoitettuja investointeja ja

laskennallisia tasapoistoja vertaamalla. Investointikannustimen tasapoiston on tarkoitus helpottaa korvausinvestointien tekemistä. Korvausinvestointien jakautuessa epätasaisesti eri vuosille syntyy investointien yli- tai alijäämää, joita voidaan tasoittaa perättäisten valvontajaksojen aikana.

Investointikannustimessa on kaksi osaa, joista toinen osa jälleenhankinta-arvosta (JHA) laskettava poistomenetelmä ja toisen osan tarkoituksena on seurata investointien riittävää määrää. Investointikannustimen vaikutus vähennetään verkkohaltijan liikevoitosta (liiketappiosta). Yksittäisen verkkokomponentin vuosittainen tasapoisto:

$$JHATP_{t,i} = \frac{JHA_{t,i}}{pitoaika_t} \quad (1)$$

missä

$JHA_{t,i}$ = verkkokomponentin i kaikkien osa-komponenttien yhteenlaskettu jälleenhankinta-arvo vuonna t

$pitoaika_t$ = verkkokomponentin i pitoaika vuosina

Vuosittaisen tasapoiston seurauksena laitteiden JHA alenee. Tästä seuraa, että verkkoyhtiön verkko-omaisuuden arvo laskee. Käytännössä laitteella on rahallinen arvo niin kauan, kuin sillä on pitoaikaa jäljellä.

Verkkohaltijan sähköverkon jälleenhankinta-arvo lasketaan vuosittain. Arvo lasketaan verkossa käytössä olevien komponenttien määrien ja teknistaloudellisen pitoajan mukaan. Energiavirasto on määrittänyt verkoston laitteille yksikköhinnat, joita käytetään verkon jälleenhankinta-arvon määrittämisessä. Verkostolle lasketaan myös nykykäyttöarvo:

$$NKA_{t,i} = \left(1 - \frac{Ikä_{t,i}}{pitoaika_t}\right) * JHA_{t,i} \quad (2)$$

missä

$JHA_{t,i}$ = verkkokomponentin i kaikkien komponenttien yhteenlaskettu jälleenhankinta-arvo vuonna t

$Ikä_{t,i}$ = komponentin i ikä vuonna t

pitoaika_t = komponentin i pito-aika vuosina t

Jälleenhankintahintojen määrittäminen toimii nykykäyttöarvon laskennan pohjana. Verkoston nykykäyttöarvon määrittämisessä täytyy tietää komponentin todellinen ikä. Puuttuville ikätiedoille käytetään joko syöttävän lähiverkon ikätietoja tai ikätietona käytetään 70 prosenttia verkonkomponentin pitoajasta. Sähkönjakeluverkon nykykäyttöarvolla on selkeä vaikutus jakeluverkkoyhtiön korkeimpaan sallittuun tuottoasteeseen, kohtuulliseen tuottoon. Kohtuullisen tuoton määrittäminen tarkoitusena on pitää sähköverkkoyhtiöiden siirtohinnat kohtuullisella tasolla ja ohjata yhtiöitä verkkoa uudistavaan suuntaan. Verkoston arvon noustessa verkkoyhtiö saa tehdä enemmän voittoa. Verkoston osien arvo on pitoajan lopussa 0 € ja jakeluverkkoyhtiö ei saa siitä taloudellista hyötyä kohtuullisen tuoton laskennassa. (Energiavirasto 2012.)

3.5.2 Laatumuutosten

Verkonhaltijan kustannusten ja keskeytysten määrän huomiointi on keskeisessä osassa laatumuutosten vaikutusten tarkastelussa. Menetelmää käyttämällä pyritään minimoimaan asiakkaille aiheutuneet haittakustannukset. Laatumuutosten sidotut keskeytykset aiheutuneet haittakustannukset ovat yksinkertaisuudestaan huolimatta hyvä taloudellinen kannustin verkkoyhtiöiden kehittämistoiminnan vauhdittamiseen.

Lähtökohtaisesti oletetaan, että sähkökatko aiheuttaa haittaa asiakkaille. Haitalle on Energiaviraston toimesta määritetty energiapainotettu hinta, joka on kaikilla sähkökäyttäjillä sama. Sähkön laatua koskevassa standardissa (SFS-EN 50160) keskeytykset luokitellaan suunniteltuihin ja vikakeskeytyksiin. Keskeytys lasketaan pikajälleenkytkennäksi (PJK), jos keskeytys kestää noin sekunnin. Aikajälleenkytkennäksi (AJK) lasketaan sellainen keskeytys, joka kestää alle 2 minuuttia. Suunniteltu keskeytys lasketaan vikakeskeytykseksi silloin, kun keskeytyksestä ei ole ilmoitettu asiakkaalle. Keskeytyksestä aiheutuneen haitan hinta on määritetty Energiaviraston teettämässä selvityksessä (Honkapuro, Tahvanainen, Viljanen, Partanen, Mäkinen, Järventausta & Verho. 2007.).

TAULUKKO 2. Keskeytysten aiheuttamat KAH-kustannukset. (Honkapuro ym. 2007.)

| Odottamaton keskeytys €/kW | Odottamaton keskeytys €/kWh | Suunniteltu keskeytys €/kW | Suunniteltu keskeytys €/kWh | PJK €/kW | AJK €/kW |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------|----------|
| 1,1 | 11 | 0,5 | 6,8 | 0,55 | 1,1 |

Keskeytyksestä aiheutuneen kustannuksen laskemista voi käyttää apuna huolto- ja kunnossapitostrategiaa valitessa. Laitteen vikaantumisen kustannuksia voidaan verrata vuosittaisiin kunnossapitokustannuksiin. Vertailu on yksi osa kriittisyysmäärittelyä. KAH-kustannuksia voidaan käyttää myös yksittäin perusteena ennakoivalle kunnossapidolle. Keskeytyksestä aiheutunut haitta komponentilla i (Mukaiillen Heikkilä 2014.):

$$KAH_i = \text{Asiakasryhmän keskiteho} * \text{Keskeytysaika} * KAH_T \quad (3)$$

missä

KAH_T = Tapauskohtainen KAH

(Mäkinen, Bastman, Järventausta, Verho, Repo, Honkapuro & Partanen. 2009; Energiavirasto 2012.)

Energivirasto vertaa jakeluverkkoyhtiöiden KAH-kustannuksia vuosien 2005-2012 referenssitason. Referenssitason ylityksen tai alituksen vaikutus yhtiön tulokseen on 50 % referenssipointeesta.

3.5.3 Elinkaari

Laitteen elinkaarien kustannusten arvioiminen on järkevää kunnossapidon kannaltakin. Laitteen elinkaaritarkastelussa laitteen kokonaiskustannukset vertautuvat pitoaikaan. Valittaessa laitetta käytetään usein painavana perusteluna hintaa. On kuitenkin mahdollista, että halpa hankinta osoittautuu kalliimmaksi tarkasteltaessa koko elinkaarta. Komponenttien elinkaari koostuu kolmesta pääryhmästä:

- hankintakustannuksista
- käyttökustannuksista
- kunnossapitokustannus

Hankintakustannus pitää kokonaisuudessaan sisällään uuden komponentin investoinnista aiheutuvat kulut. Tällaisia kuluja voivat olla myös sähköaseman tontin laajentaminen tai hankinnan aiheuttaman koulutustarpeen kustannukset. Käyttökuluihin kuuluu esimerkiksi käyttöhenkilökunnan työaika, jota käytetään käytön suunnitteluun ja käyttötoimenpiteisiin. Kunnossapitokustannusten piiriin kuuluvat kunnossapitoon kuluva työaika, materiaalikustannukset, ennakoivan kunnossapidon kustannukset yms.

Elinkaaren kustannukset:

$$K_{elinikä} = K_{inv} + pitoaika_t * (K_v + K_{kp} + K_{vika}) \quad (6)$$

missä

K_{inv} = Laitteen investointikustannus

$K_{käyttö}$ = Laitteen käyttökustannukset

K_{kp} = Laitteen kunnossapitokustannukset

K_{vika} = Laitteen vikaantumisesta aiheutuva kustannus

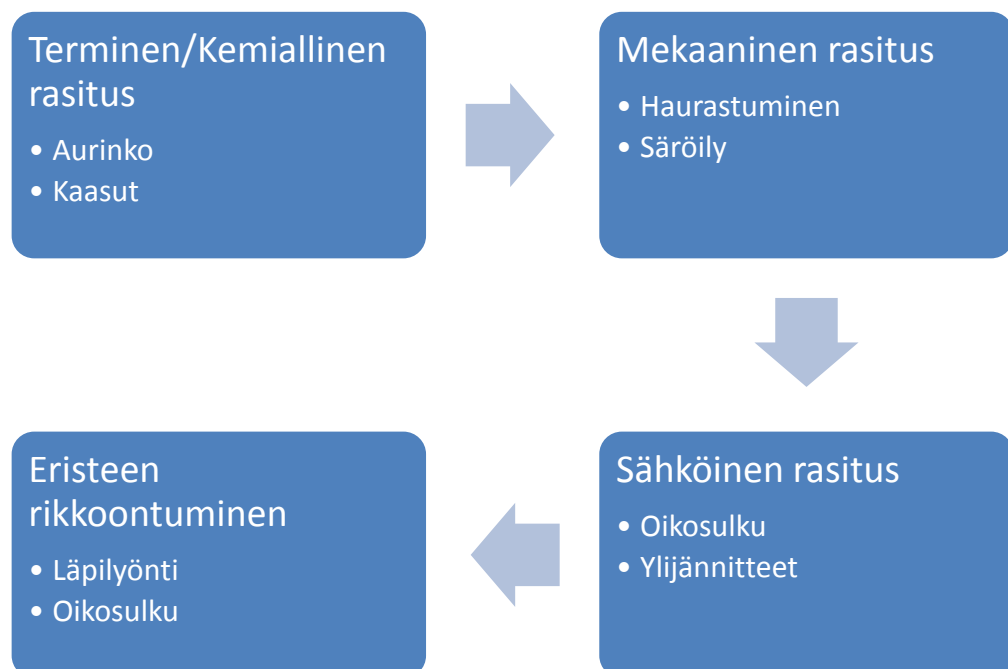
Elinkaarikustannusten laskenta on yrityksille kannattavaa. Se antaa paremman kuvan tulevaisuuden kustannuksista ja se pyrkii paljastamaan komponentin todelliset kulut ostajan päätöksenteon tueksi. (Järviö & Lehtiö 2012.)

Elinkaaritarkastelussa on mukana myös kaupallinen elinikä, joka riippuu valmistajsta. Sähköverkon komponenteille on saatavilla elinikä-riskikartoitus-palvelu, missä selvitetään laitteeseen liittyvät palvelut valmistajan toimesta. Tilaaja saa lopputuloksena analyysin jakeluverkkonsa tuotteista ja siitä, millä laitteilla on tuotetuki voimassa. (ABB 2015.)

4 VIKAANTUMIS- JA RASITUSMEKANISMEJA

4.1 Eristeet

Laitteiden eristeiden rakenne ja ominaisuudet muuttuvat elinkaaren aikana. Eristeisiin voi lyhyellä ja pitkällä aika välillä vaikuttaa mekaanisia, termisiä, kemiallisia tai sähköisiä rasituksia. Eristeiden rappeutumiseen eli sähköisen lujuuden heikkenemiseen vaikuttaa yleensä laitteen rakenteesta ja käytön aiheuttamista rasituksista. Pitkäaikainen kova rasitus suuressa lämpötilassa on todettu olevan erityisen haitallisia. Luonnollisesti myös eristeen rakenne vaikuttaa osaltaan eristeen elinikään.



KUVIO 5. Eristeiden rikkoontumismekanismi. (Mukaiillen Aro ym. 2003.)

4.2 Lämpörappeutuminen

Eristeen lämpörappeutuminen voidaan määrittää ennalta, mikäli tiedetään eristeen ja eristeen rasitusmekanismin ominaisvakiot. Arrheniuksen yhtälö on kokeellisesti määritetty ja se kuvaa eristeiden kemiallisen vanhenemisen nopeutta. Dakinin yhtälön mukaan eristeen elinikä päättyy ajanhetkellä t , kun eristeaineen ominaisuus P_0 saavuttaa kriittisen pisteen. Arrheniuksen ja Dakinin yhtälöt (Aro ym. 2003.):

$$\frac{P_0}{\tau} = Ae^{-E/TK} \quad (4)$$

$$\ln \tau = \frac{B}{T} + \frac{P_0}{A} \quad (5)$$

missä

P_0 = eristeen ominaisuuden raja-arvo

τ = eristeen eliniän päättymisen ajanhetki

A = kemialliselle reaktiolle ominainen vakio

e = Neperin luku

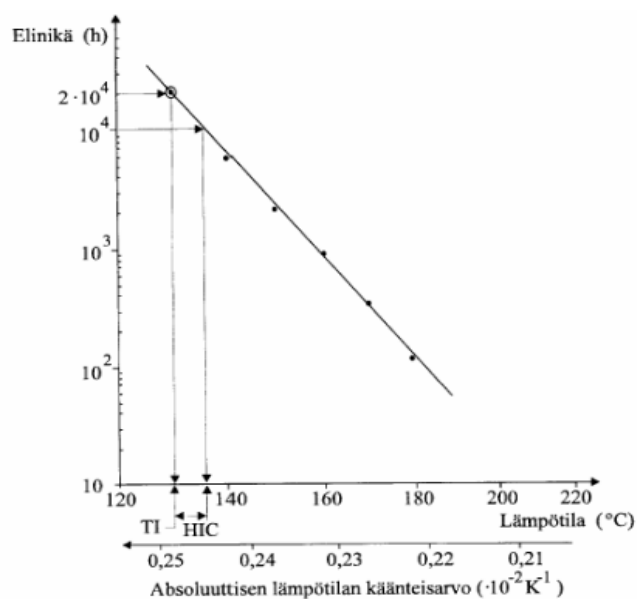
E = aktivaatioenergia

K = Boltzmannin vakio

B = Eristeen vanhenemiselle ominainen vakio

T = Eristeen käyttölämpötila

Yhtälöillä pyritään arvioimaan eristyksille tehtyjen kokeellisten tulosten perusteella halutun eristeen elinikää. Kokeellisten elinikätestauksien perusteella on saatu eri lämpötiloille elinikämäärittelyitä. Todelliset eliniät korreloivat hyvin kaavojen antamien elinikien kanssa, kun laskennassa käytetyt ominaisuudet eivät muutu käyttötilanteessa. Käytännössä näin tapahtuu vain harvoin. (Aro ym. 2003.)



KUVIO 6. Muuntajan öljypaperieristyksen elinikä. (Aro ym. 2003.)

4.3 Muovit

Maakaapelien muovieristeet haurastuvat ja kokevat erilaisia mekaanisia rasituksia elinkaaren aikana. Nämä rasitukset heikentävät kaapelin käyttöaikaista varmuutta. Mekaanisen vedon tai töytäisyn seuraksena voi kaapeliin syntyä mikroskooppisia onteloita, joista voi syntyä osittaispurkauskanavia. Muovien tärkeimpiä ominaisuuksia on osittaispurkauskestävyys. Kuten useimmissa tapauksissa, myös maakaapelien eri kerrosten heikkeneminen on riippuvainen rasituksen voimakkuuden lisäksi rasitusajan pituudesta. Lämpösäteilyn lisäksi myös alhaiset lämpötilat voivat vahingoittaa kaapeleita. (Aro ym. 2003.)

5 HUOLLON JA KUNNOSSAPIDON MENETELMIÄ

5.1 Kuntotarkastukset

Avojohtoille, muuntamoille, kytkemöille ja pienjänniteverkolle suoritetaan määräaikaistarkastuksina verkon kuntotarkastuksia. Näissä tarkastuksissa tehtäviin koulutetut kuntotarkastajat selvittävät yksittäisiä puutteita pylväs- ja muuntamoväleittäin.

Siirtoyhteyksille tehtävät kunnossapitotoimet koskevat pääosin ilmajohtoverkkoa. Ilmajohtoverkkoa koskevat kunnossapidolliset toimet keskittyvät pääosin johtokatuja raivaukseen. Avojohtoverkoille suoritetaan myös määräaikaista kuntotarkastuksia.

5.1.1 Lämpökuvaus

Lämpökuvausta voidaan tehdä määräaikaistarkastuksien yhteydessä, tai omana kunnossapito työnä. Lämpökuvauksella voidaan paikantaa huonon kontaktin aiheuttama lämpeneminen, myös riittämätön eristetaso voi aiheuttaa lämpenemistä. Huonon kontaktin seuraksena resistanssi kontaktissa kasvaa, ja syntyy virtahäviöitä. Pää- ja jakelumuuntajien lämpökuvauksessa voidaan havaita esimerkiksi öljyä vuotaneen muuntajan käämien osittainen ylikuumentuminen.

5.2 Öljyanalyysi

Muuntajaöljyjen tutkimiseen on käytetty paljon resursseja sen ollessa yleisin eristysneste. Huomioitavaa on, että muuntajissa käytetään öljyn lisäksi kiinteänä eristeenä öljypaperia. Muuntajan sisäisen eristyksen läpilyöntilujuus on huomattavasti suurempi näiden yhdistelmällä kuin kummallakaan yksinään. Öljyn eristysominaisuuksiin vaikuttavat alentavasti kosteus, kaasut, lämpötila ja epäpuhtaudet. Öljyn lämpötilalla on korrelaatio öljyn hapettumisreaktion nopeuteen, lämmin öljy nopeuttaa reaktiota. Suomessa keskilämpötila on eurooppalaiseen keskiarvoon verrattuna alhaisempi, joten ulos sijoitetuilla muuntajilla on ns. ilmastollista ylikuormitettavuutta. (Aro ym. 2003; Haarla & Elovaara. 2011.)

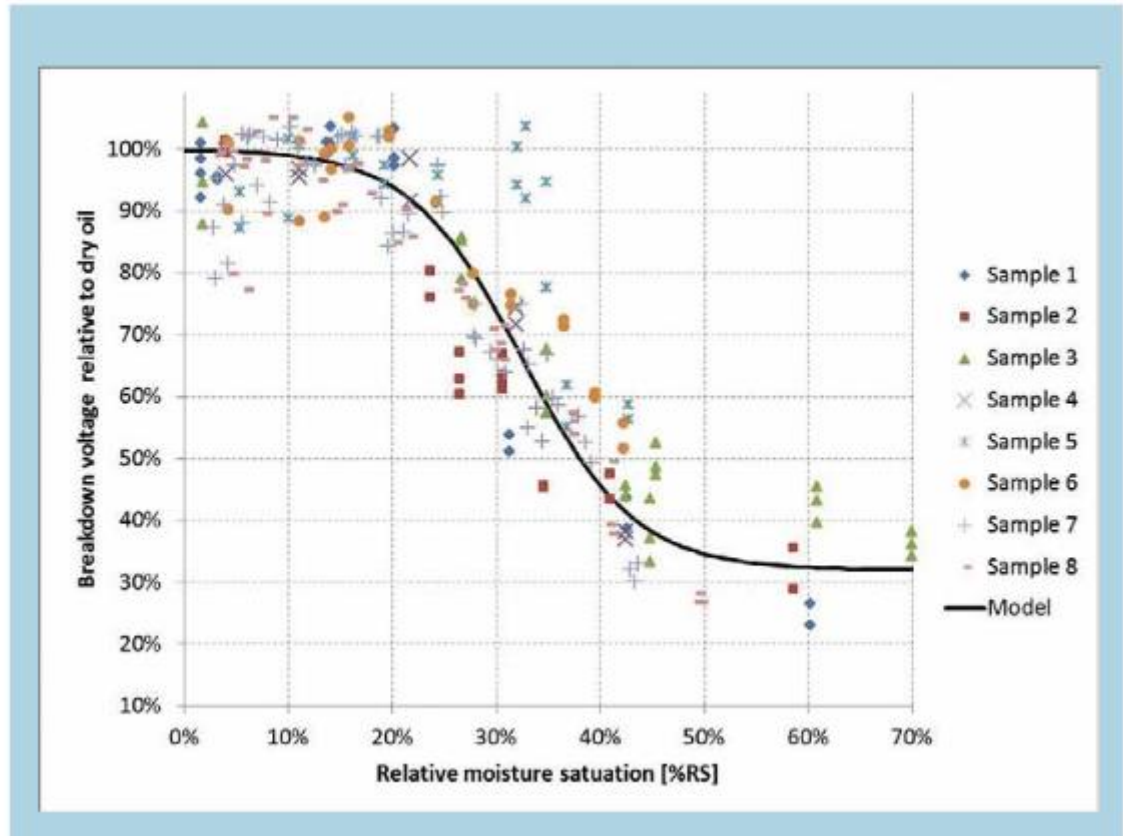
Uuden puhtaan öljyn läpilyöntilujuus on yli 60 kV/2,5 mm. Öljyn läpilyöntikestävyys mitataan usein laajoissa öljyanalyseissa käyttäen standardisoituja menetelmiä. Eristeöljyn kosteus siirtyy helposti öljypaperieristykseen muuntajan jäähtyessä ja lämmitessä päinvastoin. Öljyn lämpeneminen aiheuttaa paisuntasäiliöstä huolimatta muuntajan ”hengittämistä”. Öljyn kosteutumisen ehkäisemiseksi muuntajissa käytetään yleensä kosteutta sitovia rakeita sisältäviä ilmankuivaimia. (Aro ym. 2003.)

Öljyanalyysissa mitataan kaasujen suhteellisia määriä öljyssä. Analysaattorit mittaavat nesteeseen liuenneiden kaasujen määrää. Öljyn vanhenemiseen liittyvien mekanismien esiintymisen yhteydessä syntyy mm. typpeä, asetyleeniä ja metaania. Kaasujen määrän selvitystä käytetään tulevan vikaantumisen ennakoimiseen. Öljyanalyysissa selvitetään öljyn kokonaishappamamuus, dielektriset ominaisuudet, paperin hajoamistuotteiden konsentraatio, eli hajoamistuotteiden liukeneminen öljyyn. (Aro ym. 2003.)

5.3 Päämuuntaja

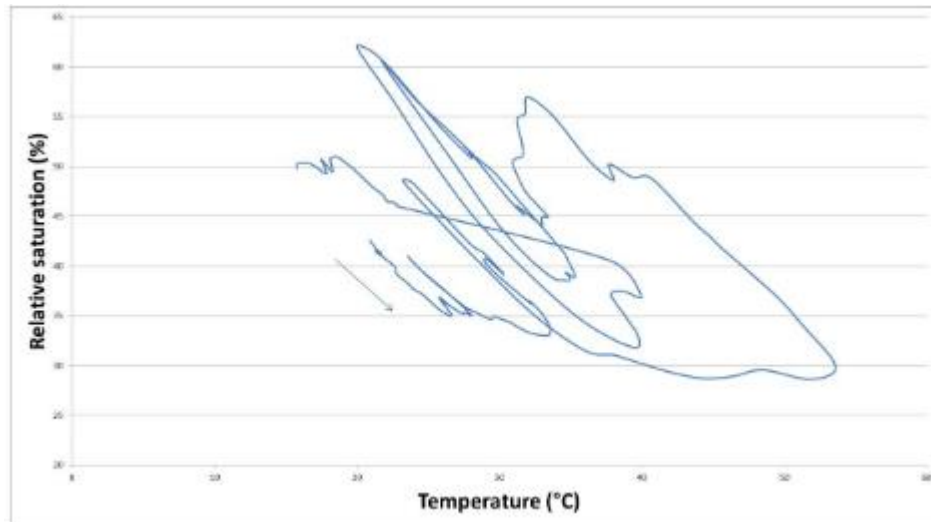
Päämuuntaja on kallis investointi, mistä yleisesti ottaen pidetään hyvää huolta. Muuntajan kuormitus ja lämmönvaihtelut synnyttävät kosteutta muuntajaöljyyn. Öljyeristeisen muuntajan sisältämä vesimäärä on pääosin paperissa ja prespaanissa. Pitkään käytössä olevan muuntajan vesimäärä voi olla yli kymmenkertainen verrattuna uuteen. Käytössä olleessa 20 °C lämpötilassa olevan suurjännitemuuntajan vesimäärä voi olla yli 90 kg. Päämuuntajan öljyn kosteus- ja kaasupitoisuuksien analysointi voi tapahtua kahden vuoden välein, vuosittain tai puolivuosittain tai voidaan käyttää jatkuvatoimista mittausta. (Aro ym. 2003.)

Jatkuvatoimisella analysaattorilla nähdään hyvin kosteuden tai kaasujen muodostumisen trendit. On havaittu, että kosteuspitoisuuden vaikutus ei ole lineaarinen, vaan selkeästi kiihtyvä 20-30 prosentin suhteellisen kosteuden jälkeen.



KUVIO 7. Öljyn suhteellisen kosteuden vaikutus öljyn läpilyöntijännitteeseen. (Vaisala 2013.)

Useissa erilaisissa reaktioissa syntyy tyyppiä, ja se onkin hyvä yleisindikaattori siitä, että muuntajan sisällä tapahtuu reaktioita. Tyyden mittaus vuositasolla voi kuitenkin olla harhaanjohtavaa, koska osa muodostuneesta tyypestä voi poistua öljystä. Määräaikaismittauksista ei välttämättä saada realistista kuvaa öljyn ominaisuuksista. (Vaisala 2013; Vaisala 2015; Aro ym. 2003.)



KUVIO 8. Erään muuntajan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden ajallinen vaihtelu. (Vaisala 2013.)

5.4 Katkaisijat

Katkaisijoiden huollon suunnittelu perustuu tiedon keräämiseen ja analysointiin. Suunnitelma muodostuu katkaisijan käyttöolosuhteiden, käyttökertojen ja kriittisyyden mukaan. Eri valmistajien ohjeet määräaikaishuolloista, jotka suoritetaan valmistajan toimesta, poikkeavat ajallisesti toisistaan, mutta normaali mittaavan/kunnostavan huollon aikaväli on ABB:n mukaan viisi vuotta. (Keskustelu ABB 2015.)

Katkaisijahuolloissa tarkastetaan katkaisijan yleinen kunto, liitokset ja katkaisijatyypistä riippuen päävirtaliittimet. Huoltojen yhteydessä tarkastetaan ohjausapulaitteiden eli ohjauskelojen toiminta minimijännitteellä. Katkaisijan ja katkaisijavaunun tilanilmaisimet tarkastetaan. Tilannäyttöapukoskettimien vikaantumisen voi aiheuttaa vikakytkentöjä ja henkilövahinkoja. Uusien kohteiden katkaisijatilän oven lukitusta ei voi avata ennen kuin on varmistuttu katkaisijan aukiohjauksesta tilatiedon avulla. Katkaisijan laukaisumekanismiin virittävään moottoriohjaimeen kohdistuu käytössä staattista rasitusta. Toiminta ja viritysaika tarkastetaan huollon yhteydessä. (Keskustelu ABB 2015; ABB 2012.)

Huollon yhteydessä mitataan katkaisijan ylimenoresistanssi ja toiminta-aika. Normaalin hyväkuntoisen katkaisijan ylimenoresistanssi on alle 100 $\mu\Omega$. Kaasueristeisten

katkaisijoiden katkaisuelementit ovat huoltovapaita. Kaasueristeisiin katkaisijoihin liittyviä kunnossapitotoimia ovat korroosiotarkastukset metallikuorille ja mekaanisille ohjainlaitteille. Erittäin vaativissa olosuhteissa tarkastusten väliä tulisi tihentää ja varmistaa toimivuus. Kaasueristeisten laitteiden SF₆-kaasun määrä tulee selvittää vuosittain ympäristöviranomaisten päästölaskelmia varten. Käytännössä kuitenkin vuosittain tapahtuvia vuotoja ei huomata, koska kaikilla SF₆-kojeistoilla ei ole reaaliaikaista mittarointia kaasun määrälle tai vuodoille. (Keskustelu ABB 2015; ABB 2012; Ympäristöhallinto 2014.)

5.5 Suojareleet

Relesuojausjärjestelmän tarkoitus on toimia nopeasti ja selektiivisesti. Se toimii myös normaaleista poikkeavissa tilanteissa. Suojareleen tehtävä on lähettää ohjauskäsky katkaisijalle, kun rele havaitsee asetteluarvojen mukaisia arvoja, esimerkiksi vikavirtaa. Suojareleet ovat elektronisia laitteita, jotka ovat suhteellisen herkkiä ympäristön olosuhteille. Lämpötila, kosteus tai vaikkapa voimakas magneettikenttä voi aiheuttaa suojareleen toimimattomuuden vikatilanteessa. Suojareleet koestetaan kolmen vuoden välein, poikkeuksena itsevalvonnalla varustetut suojareleet, joiden koestusväli on kuusi vuotta. (Haarla & Elovaara. 2011b.)

5.6 Erottimet

Erottimien kunnossapito on varsin yksinkertaista johtuen erottimien yksinkertaisesta rakenteesta. Erottimien huoltoon kuuluu nivelten ja koskettimien rasvaus, joka voidaan tehdä jännitetyönäkin. Huolloissa tarkastetaan toiminnan testaus, ohjauslaitteiden toiminnan ja kunnan tarkastus. Lisäksi mitataan ylimenoresistanssi, kuten katkaisijoillakin. Perusteellisempia erotinhuoltoja suoritetaan verrattain harvakseltaan, noin 8-10 vuoden välein.

5.7 Verkkotietojärjestelmä

Vuosittain tarkastetaan verkkotietojärjestelmän laskennan oikeellisuus ja ajantasaisuus. Verkkotietojärjestelmän tietojen avulla lasketaan mm. suojauksen selektiivisyyttä ja tarkastetaan riittävän nopeaa toimintaa vian ollessa verkon eri pisteissä. Verkkotietojärjestelmän laitetietoja tulee verrata todellisiin käytössä oleviin laitteisiin. Toisinaan tarkastuksissa selviää, että esimerkiksi varokeytken sulakkeet eivät ole verkkotietojärjestelmän tietoja vastaavia. Verkon osien ollessa mitoitettu oikein ne suojaavat sähkölaitteita ja ihmisiä tehokkaasti.

6 KUNNOSSAPITOSTRATEGIAT

6.1 Yleistä kunnossapidon strategioista

Sähköverkon komponenttien kunnossapitoon vaikuttavat useat muuttujat. Kunnossapidon intensiteetin määrittämisessä on otettava huomioon mm. käyttöpaikka, ilmastolliset olosuhteet, käytön tyyppi, laitteen ikä ja tyyppi. Sähköverkon laitteiden rasitusolosuhteita ei yleensä voida arvioida kovinkaan tarkasti. Ennakoinnin vaikeuteen vaikuttavat esimerkiksi laitteiden satunnaiset valmistuksen epätasalaadusta johtuvat tyyppiviat, jotka voivat aiheuttaa ilmastollisesta rasitteesta aiheutuvan epäkunnon. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003.)

Periaattessa erilaisia rasitusmekanismeja on äärettömästi, riippuen tarkastelun tarkkuudesta. Kaikkien pienimpienkin vikaantumismekanismien huomioon ottaminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää. Kunnossapitosuunnitelma usein laaditaan taloudellisuus- ja käyttövarmuustarkastelun kompromissina, jolla saavutetaan riittävä käyttövarmuus kohtuullisin kustannuksin. Käyttövarmuuteen liittyviä tekijöitä ovat:

- toimintavarmuus
- korjattavuus
- kunnossapidettävyyys
- kulutuskestävyys
- turvallisuus
- käyttöolosuhteet

Kunnossapito jaetaan yleensä karkeasti kahteen osaan, ennakoivaan ja huoltavaan kunnossapitoon. Ennakoivassa kunnossapidossa on erilaisia malleja, joita voidaan soveltaa laitekohtaisesti, kun taas korjaava kunnossapito suoritetaan vasta epäkäytettävyyssituaatioissa. Sähkön tuotannon ja siirron kunnossapitostrategiat ovat viime vuosikymmeninä kehittyneet ennakoivan kunnossapidon suuntaan. Vikaperusteisen kunnossapidon noudattaminen on perusteltua silloin, kun se voidaan taloudellisesti osoittaa järkeväksi. (Aro, Elovaara & Karttunen 2003; Järviö & Lehtiö 2012.)

6.2 Korjaava kunnossapito

Korjaava kunnossapito on normaalisti reagoivaa, eli reagoidaan vian aiheuttamaan käyttöhäiriöön. Rikkoontuneet laitteet korjataan entiseen tilaan tai korvataan uudella. Korjaavalle kunnossapidolle ominaista on edullisuus. Korjaavaa kunnossapitoa kannattaakin hyödyntää sellaisessa käyttökohteessa, jossa ei juurikaan ole vikoja tai vikojen vaikutukset jäävät erittäin pieniksi.

6.3 Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevä kunnossapito on säännöllistä, se voi olla jaksotettua tai jatkuvaa. Ehkäisevä kunnossapito pitää sisällään:

- tarkastukset
- kunnonvalvonnan
- määräysten mukaisuuden
- vika-analyysin

Verkko-omaisuuden hallinnan apuna käytetään edellä mainituista toimepiteistä kertyvää tilastointia ja kokemuseräisesti hyväksi havaittuja keinoja. (Järviö & Lehtiö 2012.)

6.3.1 Aikaperusteinen kunnossapito

Aikaperusteisessa kunnossapidossa englanniksi *time-based maintenance* (TBM) laitteen tilaa tai muita käyttöolosuhteisiin viittavia tekijöitä ei huomioida ennakkohuoltojakson aikana. Ne voidaan huomioida huoltosyklin pituutta määriteltäessä. Aikaperusteinen kunnossapitosuunnitelma sähköverkossa ei ole taloudellisesti katsottunaärkevin vaihtoehto ainoana kunnossapidon strategiana. Sen ongelmaksi muodostuu liiallinen kunnossapito kohteille, joiden vikaantuminen aiheuttaa suhteellisen pienet kustannukset. (Aro ym. 2003.)

6.3.2 Parantava kunnossapito

Parantavaa kunnossapitoa käytetään parantamaan kohteen luotettavuutta korvaamalla tai korjaamalla komponenttia. Parantavaa kunnossapitoa voidaan suorittaa vaihtamalla tiettyjä osia tai parantamalla mekanismeja luotettavammaksi. Tässä tapauksessa laitteen toiminta ei muutu. Parantavaa kunnossapitoa voidaan myös suorittaa modernisoinnilla siten, että laitteen rakenne tai toiminta muuttuu. Kuluneiden osien tilalle voidaan tässä tapauksessa asentaa modernimmat, paremmat osat. (Järviö & Lehtiö 2012.)

6.3.3 Kunterusteinen kunnossapito

Kunterusteisen kunnossapidon englanniksi *condition-based maintenance* (CBM) ideana on seurata laitteiden kuntoa havaitsemalla kehittyvät viat. Näin ehkäistään laitteiden vikaantumista ja minimoidaan kunnossapitotyöstä aiheutuneet kustannukset. Laitteiden kunnan kehittymisen perusteella suunnitellaan huoltotoimenpiteet ennakkoon. Kunnanvalvonnan taloudellisessa tarkastelussa on otettava huomioon vikaantumisesta aiheutuvat haitat ja kustannukset, joita verrataan kunnanvalvonnasta aiheutuneisiin käyttökustannuksiin suhteessa parantuneeseen huoltojen ja vikojen ennustettavuuteen. (Aro ym. 2003.)

6.3.4 Luotettavuusperusteinen kunnossapito

Luotettavuusperusteisessa kunnossapidossa englanniksi *reliability-centered* (RCM) *maintenance* pyritään voimakkaasti suuntaamaan kunnossapidon resursseja laitteen kriittisyyden mukaan. Tässäkin kunnossapito mallissa verkossa olevan laitteen kuntoa tarkkaillaan. Lisäksi mallissa pyritään tiedettyjen ilmiöiden pohjalta ennustamaan toimintakunnan heikkeneminen. Tämä tarkoittaa sitä, että vain pienen häiriön verkon toimintaan aiheuttavan laitteen kunnossapito on käytännössä korjaavaa kunnossapitoa. Tärkeille verkon pisteille suoritetaan luonnollisesti enemmän tarkastuksia ja ennakoivia huoltoja. RCM-mallissa määritellään laitteiden toimintoja, vikamuotoja ja vikojen vaikutuksia osana suunnitteluprosessia. Laitteet luokitellaan verkonhaltijan toivomuksien

mukaisesti. Yleisesti ottaen liian monimutkaiselta kuulostava kriittisyysluokittelu ei motivoi käyttökäyttäjää tekemään luokittelua laitteille. (Järviö & Lehtiö 2012.)

Luotettavuusperusteisessa kunnossapidossa teknisen käyttöiän jatkamiseen liittyvät toimenpiteet on ajoitettavissa kohtuullisen hyvin. Esimerkiksi päämuuntajan öljyn kaasua ja kosteuspitoisuuksia voidaan nykyisin seurata reaaliaikaisesti. Tällöin voidaan tehdä öljyyn liittyviä kunnossapitotoimia asyklisesti tarpeen vaatiessa. (Lakervi & Partanen 2012; Järviö & Lehtiö 2012.)

7 OSITTAISPURKAUKSET

Osittaispurkaus englanniksi *partial discharge* (PD), on osittain eristeen läpäisevä purkaus. Eristeen molempien pintojen välistä tilaa kutsutaan elektrodiväliksi, osittaispurkaus ei tee tätä väliä kokonaan johtavaksi. Jakeluverkkoyhtiöiden kiinnostus kohdistuu maakaapelien osittaispurkausten paikantamiseen. Osittaispurkaus tapahtuu kun eristeessä olevan heikon kohdan yli vaikuttavan jännitteen suuruus ylittää kohdan, esimerkiksi kaasukuplan, jännitelujuuden. Osittaispurkauksia on sisäisiä ja ulkoisia. Sisäiset purkaukset tapahtuvat hyvin pienissä mikro-onteloissa, kun taas pintapurkauksia ovat kuuluvat koronapurkaukset ja eristeen pinnalla tapahtuvat purkaukset. Osittaispurkausten havaitseminen on tärkeää jakeluverkossa vaihtojännitteen yleisen käytön vuoksi. Vaihtojännitteellä osittaispurkauksia tapahtuu joka jaksolla. Osittaispurkauksen rasittaman kaapelin eristerakenteella on suuri merkitys vanhenemisprosessin etenemisessä. Käytännössä osittaispurkaukset kuormittavat kaapelin eristettä aiheuttaen eroosiota, lämpöä, syövyttäviä kaasuja ja happoja. (Aro ym. 2003.)

7.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Osittaispurkauksen tapahtuessa ontelossa tapahtuman nopeus on niin suuri, ettei kaapelin ulkoista piiriä tarvitse ottaa huomioon. Ontelon kapasitanssi, sen kanssa sarjassa oleva eristyksen kapasitanssi ja eristeen loppuosan kapasitanssi voidaan kuvata kolmikapasitanssimallilla. Eristysrakenteen jännite jakautuu kääntäen kapasitanssien suhteessa. Ontelon jännite on verrannollinen syöttävään jännitteeseen. Ontelon sisässä on kaasua. Ajan kuluessa kaasu muuttuu vastaamaan eristeen ympäröivää kaasua, pitkäaikaisen ontelon sisässä on normaalipaineista ilmaa. (Aro ym. 2003.)

Kolmikapasitanssimallin mukaisen kapasitiivisen jännitteenjaon aiheuttaman vaihtojännitteen huippuarvo on ontelon läpilyöntijännitteen suuruinen. Jännitteen kasvaessa osittaispurkausten määrä kasvaa. Syöksyjännitteellä osittaispurkauksen syttymisjännite on suurempi kuin vaihtojännitteellä, koska purkauksen aloittavan elektronin esiintyminen ontelossa lyhyen syöksyjännitteen aikana on pieni. Osittaispurkauksesta aiheutuva varautumisen muutos näkyy johdon liittimissä

virtapulssina, muutos on kuitenkin selkeästi pienempi kuin purkauksessa siirtynyt varaus. (Aro ym. 2003.)

7.2 Pintapurkaukset vaihtojännitteellä

Pintapurkauksia esiintyy voimakkaassa eristepinnan suuntaisessa kentässä. Pintapurkaukset voidaan sisäisten osittaispurkausten tapaan mallintaa kolmikapasitanssimallilla. Ontelon kapasitanssin sijaan käytetään sähkökentän aiheuttamaa kapasitanssia. Pintapurkausten haitallisimpiin kuuluva muoto on liukupurkaukset. Se syntyy kahden eristeen rajapinnalla sähkökentän rajapinnan suuntaisen komponentin kasvaessa riittävän suureksi. Kiinnostavimmat liukupurkaukselle alttiit rakenteet ovat läpivientieristin ja tämän työn kannalta erityisesti kaapelipäätte. Liukupurkaus on haitallinen etenkin orgaanisille eristeille, jotka kuluvat voimakkaasta purkausten vaikutuksesta. (Aro ym. 2003.)

7.3 Osittaispurkaukset tasajännitteellä

Normaalilla vakiona pysyvällä tasajännitteellä esiintyy osittaispurkauksia vain satunnaisesti. Tasajännitteellä tavallisimpia osittaispurkaushetkiä ovatkin jännitteen säätötilanteet. Poikkeuksena ovat meriyhteyksissä öljykyllästetyllä paperilla eristetyt kaapelit. Merikaapelin kuormituksesta riippuen eriste laajenee tai kutistuu. Jäähtymisessä massakaapeliin saattaa syntyä onteloita joissa tapahtuu osittaispurkauksia. Kuormituksen mukaan säätyvä jännite ehkäisee purkausten syntymistä. (Aro ym. 2003.)

7.4 Osittaispurkausten mittaaminen

Osittaispurkausten mittaaminen tapahtuu pääsääntöisesti eristysrakenteen liittimissä näkyvien varausten muutoksien suuruudesta. Mitattava yksikkö on normaalisti pikocoulombi, pC. Näennäisvaraus ei teoriassa ole paras mahdollinen suure mitattavaksi, koska se ei ole verrannollinen osittapurkauksessa siirtyneeseen varaukseen. Näennäisvaraus on kuitenkin verrannollinen purkauksen tehoon ja vian suuruuteen.

Mahdollisuus mitata näennäsvaraus eristeen ulkopuolelta on käyttötilanteiden kannalta tärkeä ominaisuus. (Aro ym. 2003.)

Aiemmin osittaispurkausmittauksia on suoritettu lähinnä laitetoimittajien tehdasteinä, mutta nykypäivänä maakaapeleiden lisääntyessä myös kriittisten yhteyksien määrä kasvaa. Osittaispurkausmittaus sähköverkon käytönaikaisena kunnonvalvontamenetelmänä on lisääntymässä jatkuvan maakaapelointiasteen kasvun seurauksena. (Aro ym. 2003.)

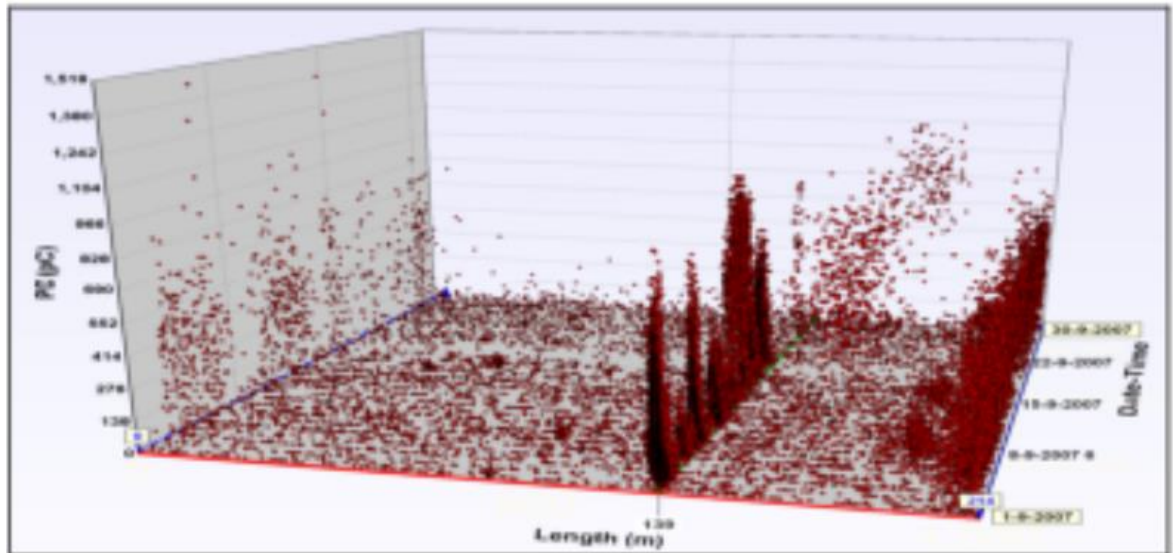
Osittaispurkausmittauksissa pyritään purkausten havainnoinnin lisäksi saamaan selville osittaispurkauksen paikka kaapelissa tai kojeistossa. Menetelmään sovelletaan purkauksen kaapeliin aiheuttaman kulkuaallon etenemisnopeutta ja reflektiota. Usein PD-mittauksissa käytetäänkin kahden kaistanleveyden omaavia mittalaitteita. Kaistanleveydellä 300-400 kHz mitataan näennäsvarauksia ja laajakaistaisilla instrumenteilla mitataan paikkatietoa. Kulkuaallon heijastusten erottamiseen tarkoitettu kaistanleveys on satoja megahertsejä. (CIRED 2011.)

Etenkin muuntajissa ja kaasueristeisissä kytkinlaitteissa/laitoksissa käyttökelpoisia antureita ovat ultraäänianturit, joilla paikannetaan purkauksen aiheuttamaa ääntä. PD-mittauksissa on todettu taajuusalueen 30-50 kHz olevan käyttökelpoinen. Mittauksien taajuus vaihtelee normaalisti 10 kHz- 500 kHz välillä. (CIRED 2011.)

7.5 Online mittaukset

Ikääntyneen maakaapeliverkon korvaamisen lisääntyessä tarvitaan kunnonvalvontaa, jotta korvausinvestoinnit voidaan tehdä taloudellisesti. Maakaapeleiden korvaamisen vuosittainen osuus on yleisesti Euroopassa noin 0,5 %, joka on alhainen verrattuna maakaapeloinnin lisääntyvään määrään. Jatkuvatoimisen mittauksen hankintakustannus on yleensä verrattain pieni, jos tarkastellaan johtolähdön KAH-kustannuksia. Tosin mittalaitteiden hyöty realisoituu ainoastaan vältettyjen vikakeskeytysten muodossa. Siirrettävän mittalaitteiston hinta on kilpailukykyinen erilliseltä toimittajalta tilattuihin pistemittauksiin. Määräaikaismittaukset voivat antaa hyvän kuvan stabiilista osittaispurkauksesta. Osittaispurkauksien aiheuttamat viat ovat toisinaan nopeasti, muutamissa tunneissa eteneviä. Kuviosta 9 voidaan myös huomata, että osittaispurkauksen

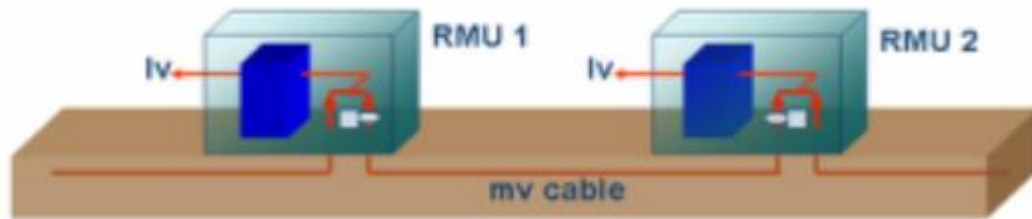
voimakkuus vaihtelee ajan funktiona. Joissakin tapauksissa osittaispurkauksien on havaittu olevan aktiivisia vain muutamia tunteja päivässä tai ainoastaan yöaikaan. Osittaispurkauksen huippuarvojen havainnointiin tarvitaan jatkuvaa monitorointia. (CIRED 2011.)



KUVIO 9. 3D-malli osittaispurkauksien syntymisestä purkauksen voimakkuuden, ajan ja etäisyyden suhteen. (CIRED 2009b.)

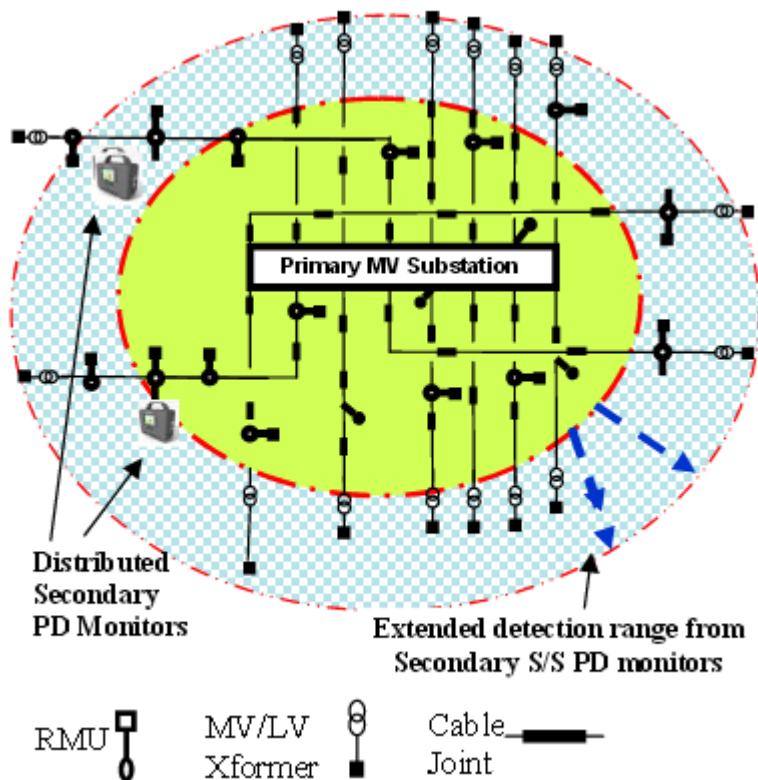
Verrattaessa siirrettävää mittalaitetta ja lyhytkestoista määräaikaismittarointia on siirrettävä mittalaite parempi vaihtoehto. Siirrettävällä osittaispurkausmittarilla voidaan muodostaa viikkoja kestäviä mittauksia kohteista. Siirrettävällä mittalaitteella ei välttämättä pystytä havaitsemaan nopeasti eteneviä osittaispurkausvikoja, mutta sen avulla saadaan kaapelikohtaista mittaustietoa. Tietoja voidaan verrata vuosien ajalta saatuihin mittaustuloksiin ja kehittyvät vikatrendit on helpompi paikallistaa. Mittauslaitteiden kustannukset aiheutuvat pääosin tarkkojen sensorien, oskilloskooppien ja mahdollisesti räättälöityjen analysointi-ohjelmien hinnasta. (CIRED 2009a.)

Onlinemittaukset perustuvat tavallisesti joko maadoituselektrodiin indusoituvan virran tai akustisten signaalien havaitsemiseen. Osittaispurkaukset aiheuttavat maadoitusjohtimeen indusoituvaa korkeataajuista virtaa. Sitä havaitaan korkeataajuusvirtamuuntajalla (HFCT), jonka mittaustuloksia tarkastellaan ajan funktiona. Mittauskytkentä sisältää vähintään kaksi HFCT-yksikköä, tietoliikenneyhteyden ja keskusyksikön, joka prosessoi tietoa käyttäjärajapintaan.



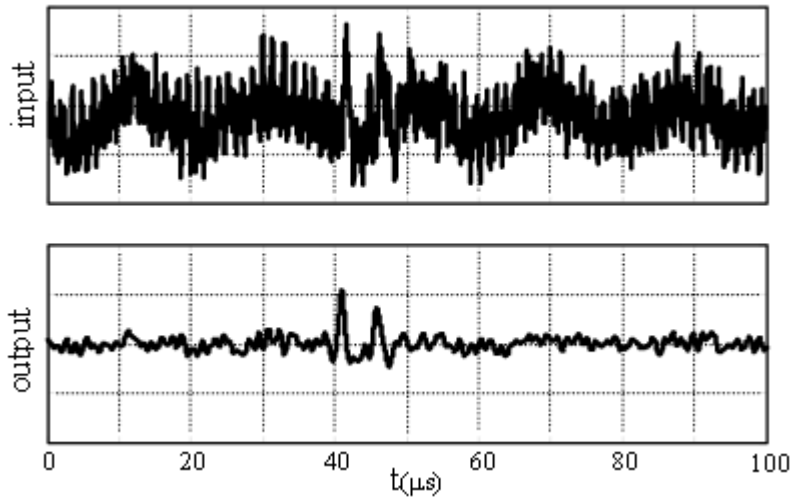
Kuvio 10. HFCT-yksiköt jakelumuuntamoissa. (CIRED 2009b.)

Virtamuuntajat voidaan sijoittaa sähköasemalla jakelukiskoston ja seuraavien jakelumuuntamoiden yhteyteen. Mittaussignaali vaimenee huomattavasti jakelumuuntamokojeiston vaikutuksesta. Osittaispurkauksien havainnointi-alueita voidaan pidentää siten, että lisätään HFCT-yksikkö havainnointialueen reunalle.



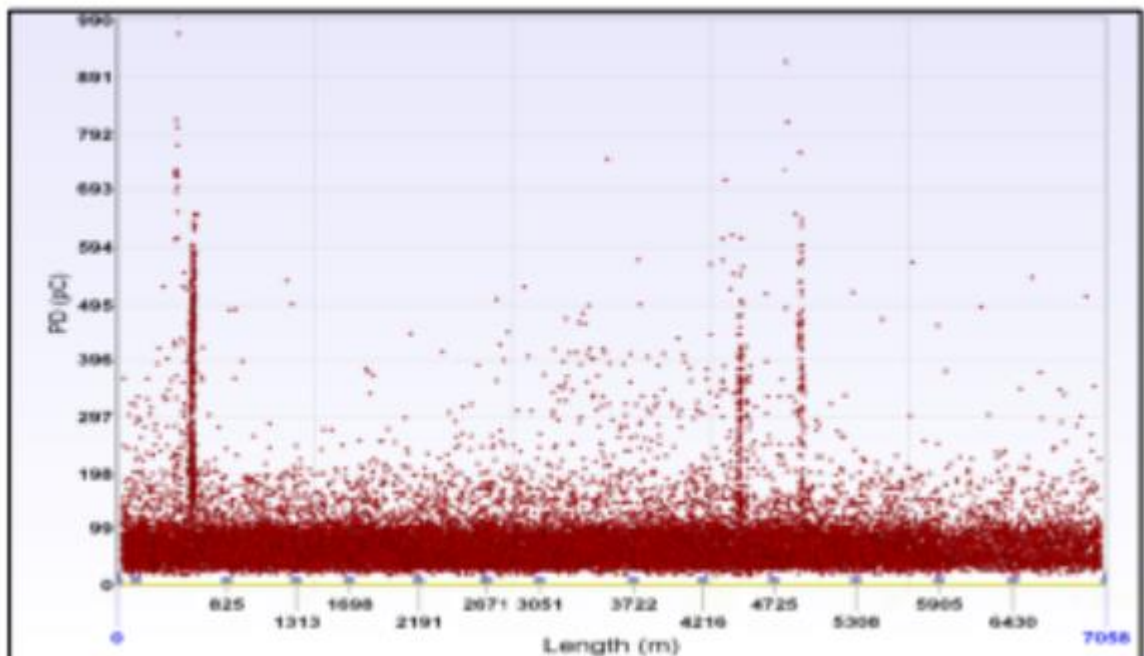
KUVIO 11. Osittaispurkausmitta-alueen suurentaminen. (CIRED 2009b.)

Osittaispurkauksen mittaaminen on periaattessa melko yksinkertaista, mutta mittausdatan luotettava analysointi voi olla haastavaa, jos taustakohinaa ei saada vaimennettua.



KUVIO 12. Suodattamaton (ylempi) ja suodatettu (alempi) HFCT:llä mitattu signaali. (CIRED 2005.)

Osittaispurkausten havaitseminen voi kuitenkin onnistua pitkistäkin kaapeleista. Mitattu kaapeli oli PEX-kaapeli, joka oli hieman yli 7000 metriä pitkä. Kyseinen mittaussajanjakso oli lähes kuukauden, jonka aikana havaittiin kolme selkeää osittaispurkauskohtaa.



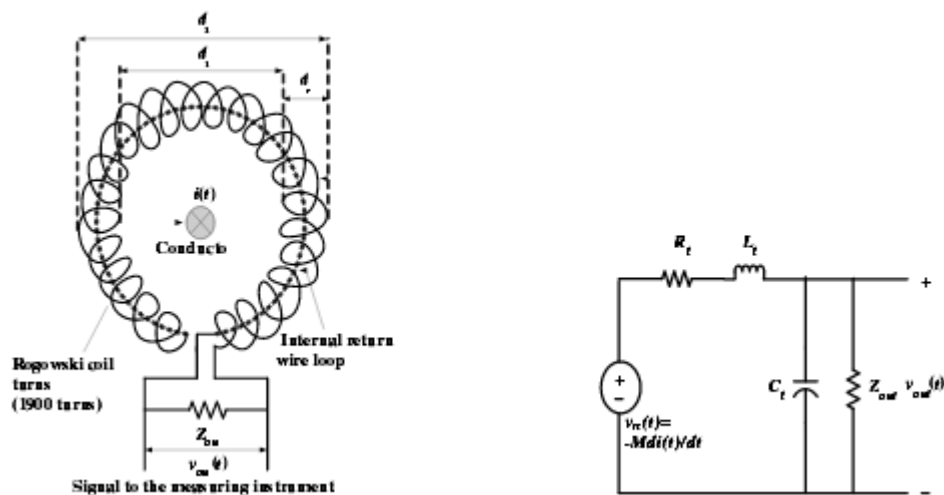
KUVIO 13. Muovieristeisen maakaapelin osittaispurkausmittaus. (CIRED 2009b.)

Kaapelin tarkastelussa oli selvinnyt, että osittaispurkaukset johtuivat maakaapelia ympäröivän maadoitusjohtimen rikkoontumisesta. Maadoitusjohdin oli todennäköisesti palanut poikki suurten vikavirtojen vaikutuksesta. (CIRED 2009b.)

Jatkuvatoiminen maakaapelin kunnonvalvonta todennäköisesti tulee yleistymään yhä lisääntyvän maakaapelointiasteen vuoksi. Jakeluverkonhaltijat todennäköisesti haluavat käyttää mahdollisuuden välttää kriittiseen maakaapeliin aiheutuvan häiriön, joka voidaan mahdollisesti havaita jatkuvalla osittaispurkausmittauksella. Myös kaapeleilla, joita ei voida vian havaitsemisen jälkeenkään korvata verkon kytkentätilojen muutoksilla, on järkevää mitata osittaispurkauksia. Kuluttajia voidaan varoittaa etukäteen, ja korjaushenkilöstö saadaan paikalle jo ennen vikaa. Osittaispurkausmittauksille sopivia kaapeleita ovat yleensä sähköasemalta lähtevät runkojohdot, sekä jakelumuuntamoilta lähtevien suurten teollisuuslaitosten syöttökaapelit.

7.6 Rogowskin kela

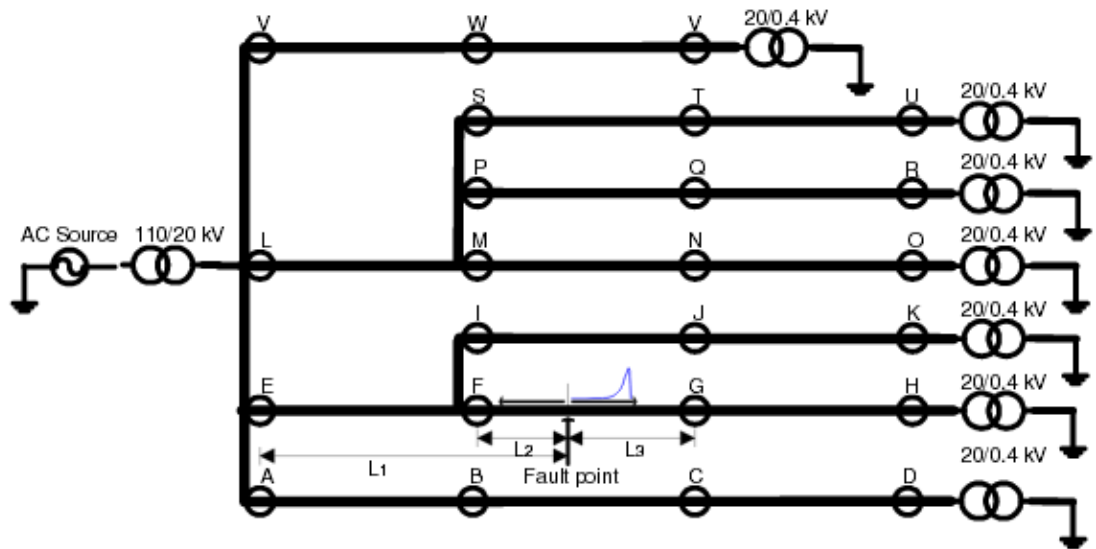
Rogowskin kelan käyttöä on tutkittu eristetyissä avojohtoverkoissa. Rogowskin kelan häiriösignaalien sieto on hyvä, tämä ominaisuus on kelan rakenteen ansiota. Käämit on aseteltu niin, että ne kumoavat toisiinsa indusoituvat häiriöt. Rogowskin kela käy laajan mitta-asteikon ansiosta laajasti eri sovellutuksiin. Virtaa voidaan mitata milliampeereista kiloampeereihin.



KUVIO 14. Rogowskin kelan rakenne (vas.) ja sijaiskytkentä (oik.). (VTT 2012.)

Kokeellisten tutkimusten mukaan Rogowskin kela sopii hyvin kompensoituun sähköverkkoon. Kelan ominaisuuksien ansiosta se pystyy havaitsemaan sellaisia

maasulkupurkauksia, joita on muutoin vaikea havaita. Menetelmän etuna on myös se, että se pystyy havaitsemaan korkean ja matalan vikaresistanssin omaavia vikoja. Kelan tarkkan havainnointikyvyyn vuoksi voidaan usean mittauspisteen omaavassa verkossa havaita myös vikapaikka. Paikantaminen perustuu kelan herkkyyteen havaita vikapulseja ja eri mittauspisteiden havaitsemisaikoihin. (IJEET 2012.)



KUVIO 15. Rogowskin kelan mittauskytkentä. (IJEET 2012.)

8 HUOLTO- JA KUNNOSSAPITOSUNNITELMA

Yrityksen tavoitteena on oltava vikaantumisen ehkäiseminen, eikä vikojen tehokas korjaaminen. Sähköverkon suunnittelun pääperiaatteena ovat taloudellisuus, luotettavuus, ajallinen kestävyys ja turvallisuus. Nämä pääperiaatteet otetaan huomioon suunnittelussa ja käytön aikaisessa toiminnassa. (Elovaara & Laiho 2007.)

Jakeluverkolle tehtävä huolto- ja kunnossapitotoiminta on sähköverkkoyhtiön omaisuuden hallintaa. Kunnossapitotoiminta ei rajoitu vain laitteiden huoltoihin ja tarkastuksiin, eikä se ole ainoastaan erikseen nimetyn työryhmän tai henkilön suorittamaa toimintaa. Kunnossapidon keskeinen tavoite on laitteiston käytettävyyden parantaminen, turhien investointien poistaminen ja turvallisuuden riittävän tason ylläpitäminen. Turvallisuus on nykypäivänä noussut suureen rooliin yhtiöiden toiminnassa. (Järviö & Lehtiö 2012.)

Sähkönsiirron toimitusvarmuuden kannalta kunnossapitotoimenpiteet ovat elintärkeitä. Kunnossapidon laiminlyömisestä voi seurata vikatilanteissa laajentuneita häiriöitä ja pahimmillaan vaaratilanteita. Sähköverkon kunnossapitotoimenpiteet ovat pitkäjänteistä, suunnittelua ja kunnonvalvontaa vaativaa työtä, jonka lopputulokset ja seuraamukset siirtyvät sukupolvelta toiselle. Hyvin toteutettu kunnossapitosuunnitelma alentaa huolto- ja kunnossapitokustannuksia merkittävästi vähentämällä ennen aikaisia huoltotoimenpiteitä ja ehkäisemällä laitteiston hajoamisesta johtuvia käyttöhäiriöitä. Kunnossapitosuunnitelman keskeisiä osia ovat laitehallinta, kunnonvalvontamittaukset, kunnossapitostrategian valinta sekä huolloista kertyvän informaation hyödyntäminen. Suunnitelman tarkoituksena ei ole ainoastaan ajoittaa huoltoja oikein, vaan osana kunnossapitosuunnitelmaa tehdään korvaus- ja uudisinvestointeja. Kunnossapito-ohjelman vaikutus verkon toimitusvarmuuteen korostuu verkon maantieteellisen pinta-alan kasvaessa. (Järviö & Lehtiö 2012.)

8.1 Laitekanta

Osittain työharjoittelussa ja osittain opinnäytetyön aikana yhtiön hallinnoimista laitteista luotiin dokumenttienhallintajärjestelmään laitekanta. Laitteet ryhmiteltiin niiden käyttötarkoituksen mukaan suojareleisiin, katkaisijoihin, erottimiin, mittamuuntaajiin,

käämikytkimiin, tehomuuntajiin ja siirtojohtoihin. Laitteille luotiin laitekortit, joihin sisältyy olennaista tietoa laitteesta, esimerkiksi valmistaja ja käyttöönottovuosi.

Laitekorteille lisättiin myös PDF-muotoiset dokumentit huoltohistoriasta niiltä osin kuin ne olivat saatavilla. Laitekantaan on helppo lisätä tai muokata tietoa tarvittaessa. Laitekannan täydentyessä sen hallintaan kannattaa panostaa, koska se voi olla arvokas työkalu kunnossapidon suuntamisessa.

8.2 Ennakkohuoltojen hallinta

Dokumenttienhallintaohjelmassa olivat valmiina ominaisuutena ennakkohuoltokortit, joita päätettiin käyttää huoltojen hallinnoimisessa. Ennakkohuoltokortin luominen tapahtui pääosin vanhan huoltosuunnitelman perusteella, lisäksi ennakkohuolto-ohjelmaan lisättiin uusien komponenttien kunnossapitotoimenpiteet.

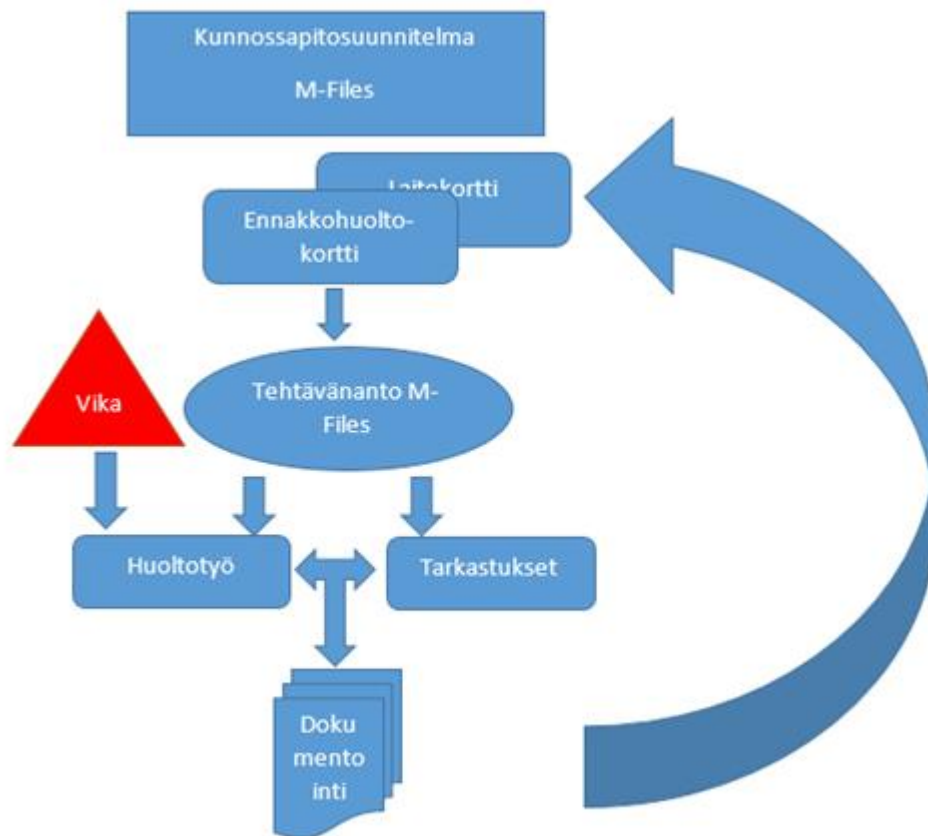
The screenshot shows a software interface for managing maintenance cards. The main title is 'KMT Kuukausitarkastus' with a hammer icon. Below the title, it says 'Ennakkohuolto ID 706 Versio 26' and 'Luotu 29.7.2014 10:20 Juha-Matti Toivainen'. A blue bar contains icons for a flag, star, gear, and up arrow. The main content area lists various fields and their values:

| | |
|-----------------------|--|
| Luokka* | Ennakkohuolto |
| Nimi tai otsikko* | KMT Kuukausitarkastus |
| Laitekortti | --- |
| Tehty | 25.8.2014 |
| Huoltoväli vrk* | 30 |
| Seuraava huoltoaika | 24.9.2014 |
| Sovittu huoltotoim... | --- |
| Alue | --- |
| Kohteen ryhmä* | Sähkönsiirtoverkko ↗ |
| Kohde | Sähköasemat ↗ |
| Paikka | KMT Kemirantie ↗ |
| Laitapaikka | --- |
| Dokumentti | KMT sähköaseman tarkastuslista ↗ |

Below the table, there is a link 'Lisää ominaisuus'. At the bottom, there are two status boxes: '1. Näkyy kaikille sisäisille käyttäji...' and 'Sisäinen kunnossapitotyö työnki Ennakkohuolto/tarkistus perustil'.

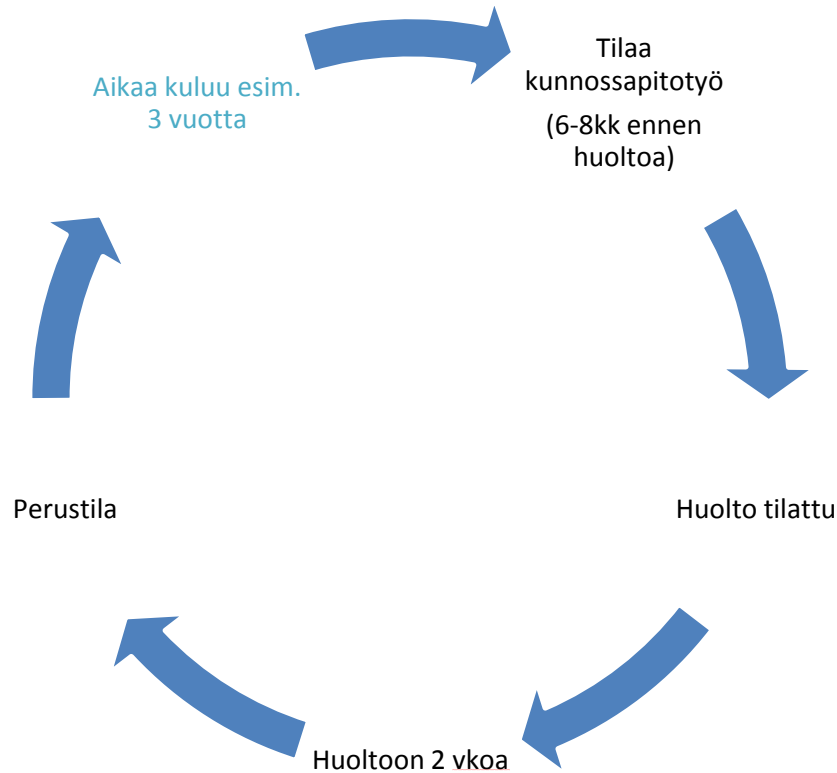
KUVIO 16. Ennakkohuoltokortin tiedot.

Ajallisesti kunnossapitotöitä tapahtuu laajoilla aikaväleillä. Työn dokumentointi tapahtuu tilanteesta riippuen ennakkohuolto- tai laitekortille. Edellisten huoltojen dokumentaatio ja huoltotietojen helppo saatavuus helpottaa laitteen kunnonseurantaa.



KUVIO 17. Ennakkohuoltotyön kulku.

Kunnossapitotöille luotiin automaattisesti toimiva työnkulku. Työnkulkuun määriteltiin erilaisia tiloja, joihin laitekortti siirtyy huollon lähestyessä tai valmistuessa.



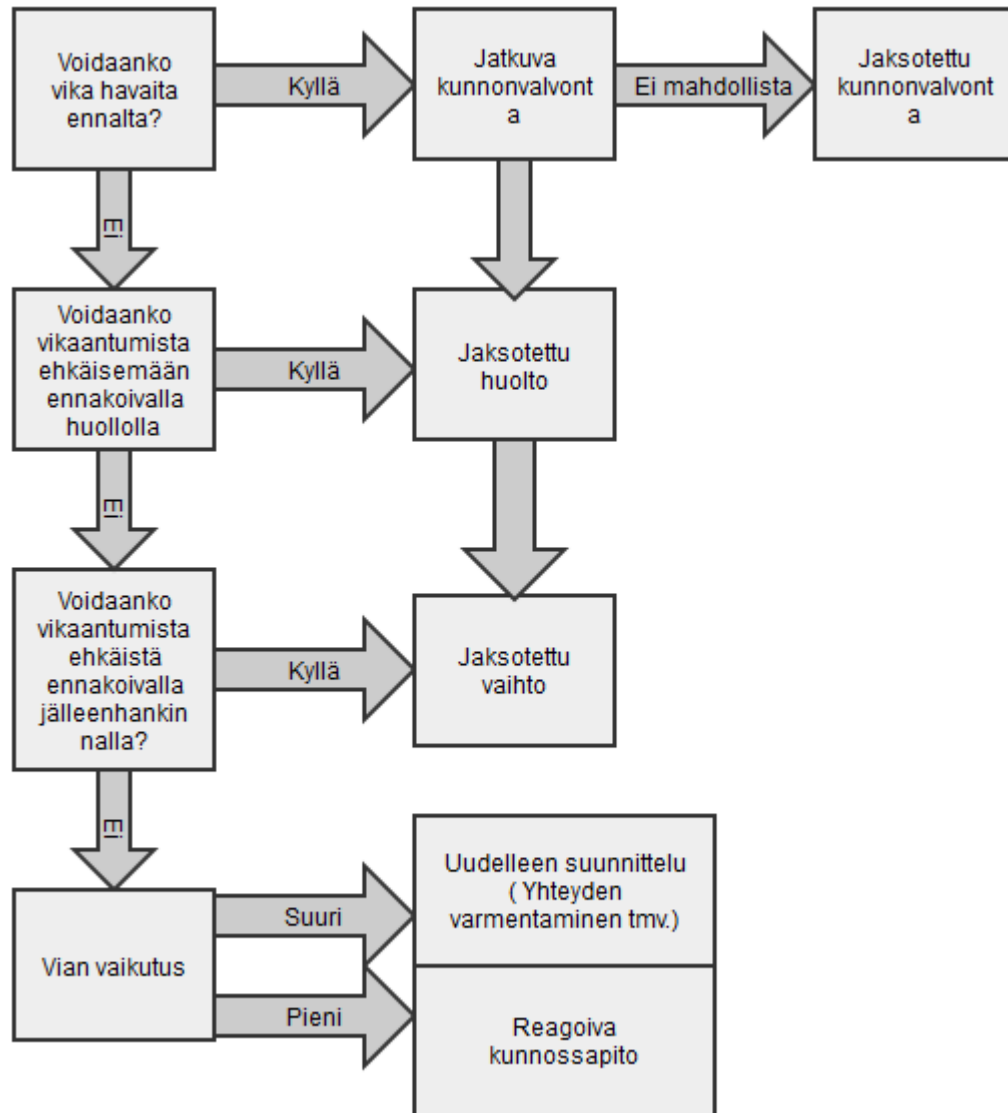
KUVIO 18. Ennakkohuolto työtilan kierto.

Osa tiloista on passiivisia, jotka eivät vaadi käyttäjältä toimenpiteitä ja osa toisaalta luo tehtäviä käyttökäyttäjille liittyen huoltoihin. Työnkulun tilansiirtoille voidaan asettaa automaattisia tilansiirtymiä ja tilansiirto ehtoja. Ennakkohuolto aktivoituu, kun huoltopäivämäärä lähestyy. Tilasiirron yhteyteen liitettiin sähköposti-ilmoitus, joka muistuttaa kunnossapitotehtävästä.

8.3 Strategian valitseminen ja määrittelyt

Laitteille määritetään kriittisyysluokitus. Määrittystä ei tehdä jokaiselle komponentille erikseen, vaan on kannattavaa jakaa laitteet samankaltaisiin laiteryhmiin. Määrittelyssä tulee ottaa huomioon myös laitteen rikkoontumisesta aiheutuvat vaaratekijät. Kriittisyysmäärittelyssä otetaan huomioon laitteen jälleenhankinta arvo, vian aiheuttama haittakustannus, laitteen rikkoutumisen työllistävä vaikutus ja korvausmahdollisuus.

Kriittisyysluokittelun avulla pyritään luottavuuskeskeisen kunnossapidon ajatusmallin mukaisesti suuntaamaan kunnossapitotoimet sinne, missä ne ovat perusteltavissa taloudellisesti tai käyttöteknisesti. Kunnossapidollisten päätösten toiminnan tukena voidaan käyttää loogista päättelyketjua, jonka apuna voidaan käyttää kaavio-malleja.



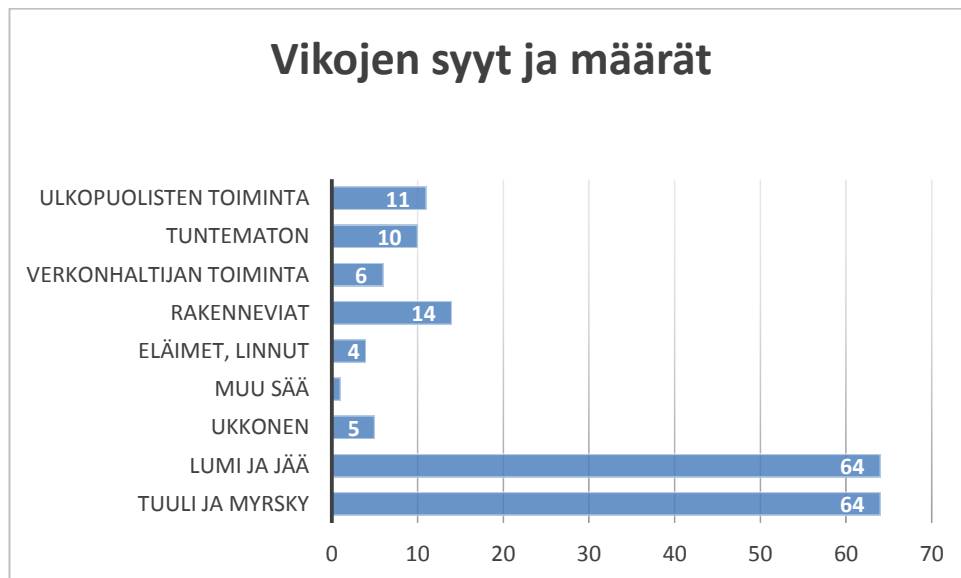
KUVIO 19. Päätöksentekokaavio.

8.4 Vikatiedot

Energiavirasto vaatii sähköverkonhaltijoita keräämään vikaantumisten perustiedot, joita ovat aika, kesto, asiakasmäärät yms. Vikatietojen kerääminen ja analysointi auttaa yhtiötä

kohdentamaan kunnossapitotoimia. Usein tiedetään ilman vikatietojakin, missä valtaosa vioista on ja mistä ne johtuvat, mutta tavallisesti normaalista poikkeava ylimääräinen kunnossapitotoiminta on pystyttävä perustelevaan. Vikatietojen kerääminen auttaa myös valtakunnallisen tutkimusaineiston kehittämisessä.

Tietokantaan on tallennettu keskijänniteverkon vikoja on tallennettu vuodesta 2005 alkaen. Keskeytyksistä valtaosan ovat aiheuttaneet tuuli tai myrsky sekä lumi tai jää. Molempien vikatyypin aiheuttamista vioista lähes 90 prosenttia on tapahtunut avojohtoverkossa, kun taas PAS-johdolla niistä on tapahtunut noin 5%. PAS-johtojen laskennallinen vikataajuus on yli 7 kertainen verrattuna valtakunnallisiin vikataajuuksiin, otanta on kuitenkin pieni ja näin ollen tulos ei ole kovinkaan luotettava.



KUVIO 20. Keskijänniteverkon viat 2005-2015.

8.5 Lähtökohtainen, vikaantumisesta aiheutuva KAH

Sähköasemien johtolähdöt syöttävät jakeluverkkoa. Johtolähtöketjussa ensimmäisenä olevien komponenttien vikaantuminen aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia verrattuna kauempana sähköasemasta vikaantunutta komponenttia. Tällaisen johtolähdön primäärikomponentin korvattavuus voi olla huono, tai korjaus vie aikaa. Johtolähdön ensimmäisen syöttävän kaapelin vikaantumisen paikantaminen ja korvaaminen ei onnistu kovinkaan nopeasti. Normaalitilanteissa tämä vaatii useita kytkentätilanteen muutostoimenpiteitä. Johtolähdön keskeytyksestä aiheutuva kustannus:

$$KAH_{Lähtö} = K_{teho} * P_{johto} + K_{energia} * (P_{johto} * t) \quad (7)$$

missä,

K_{teho} = tehoerusteinen keskeytyksestä aiheutuneen haitan määrä

P_{johto} = johtolähdön teho

$K_{energia}$ = energiamäärään perustuva KAH-määrä

t = keskeytyksen aika tunteina

Johtolähdön KAH-kustannuksien tarkastelussa on järkevää käyttää tuntikohtaisia teholaskennan keskiarvoja. Edellä esitettyä johtolähdön keskeytyksestä aiheutuvaa haittaa voidaan käyttää apuna kunnossapidon suuntaamisen perustelussa. Kunnossapidon suuntaamisesta aiheutuvan investoinnin takaisinmaksuaika:

$$t_{tm} = \frac{inv}{K_1 * KAH_1 - KAH_2} \quad (8)$$

missä,

inv = kunnossapidosta aiheutuva investointi

K_1 = energiaviraston määrittämä referenssitaso

KAH_1 = KAH-kustannus ennen parantavaa toimenpidettä

KAH_2 = KAH-kustannus parantavan toimenpiteen jälkeen

8.6 Jakeluverkon KAH-tarkastelu

Jakeluverkon vikatiedoista laskettu keskimääräinen vika-aika on hieman yli kaksi tuntia. Vuosien aikana kerätyn vika-aineiston perusteella yhden vian keskimääräinen KAH-kustannus on voidaan määrittää.

Parantavien toimenpiteiden arvottaminen on kohtuullisen helppoa. Erilaisten korvausratkaisujen kokemukseen perustuvat vikataajuudet on tiedossa, jolloin voidaan verrata oletettua tulevaa vikamäärää vanhaan. Näin voidaan punnita investoinnin suuruutta ja takaisinmaksuun kuluvaa aikaa.

Jos jakeluverkon keskimääräinen KAH-kustannus on 10000 euroa vialle ja keskimääräinen vika-aika on 2 tuntia. Kunnossapidolliselle erityistoimelle tai uudisinvestoinnille on helppo määrittää takaisinmaksuaika. Jos toimenpiteellä saavutettava vika-ajan väheneminen on 25 %, tällöin takaisinmaksuaika 20000 eurolle on kaavan 8 mukaisesti laskettuna kahdeksan vuotta.

Parantaville toimepiteille voidaan asettaa tavoitetaso vikojen ajalliseen tai kappalemääräiseen vähentämiseen. Riittää siis, että kunnossapitotyö vähentää vikoja riittävästi verrattuna siitä aiheutuviin kustannuksiin.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoitus tehdä kunnossapito-ohjelmasta sähköinen ja helposti hallittava, sekä tutkia erilaisia kunnonhallintamenetelmiä. Uusien kunnonhallinta menetelmien tutkiminen ja käyttöönotto mahdollisuuksien kartoittaminen on osa kunnossapito-ohjelman kehittämistä.

Varsinaisen laitekannan, kriittisyysluokittelun, kunnossapidon kohdentamissuunnitelman, laitehankintamäärittelyn yms. kunnossapito-ohjelmaa parantavan toiminnan suorittamiseen ei aika valitettavasti riittänyt. Tekstissä kuitenkin mielestäni selkeästi tuodaan esille asioita, joita voidaan ottaa huomioon ohjelmiston kehittämisessä.

Verkko-omaisuuden määrän kasvaessa järjestelmällinen kunnossapito on välttämätöntä nykyisten ja tulevien sähkön laadullisten säännösten täyttämiseksi. Kunnossapito-ohjelma on suotavaa luoda etupainotteiseksi, jolloin se ehkäisee komponenttien ennaikaisia korvausinvestointeja.

LÄHTEET

ABB 2012. Laite-esite: SafeRing. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://www08.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/5316b8876137cfb2c1257b3b002f7259/\\$file/1VDD005976%20GB_May_2013.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/5316b8876137cfb2c1257b3b002f7259/$file/1VDD005976%20GB_May_2013.pdf) Luettu: 10.1.2015.

Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva. 2003. Suurjännitetekniikka. Helsinki: Otatieto.

CIREN 2005. Tutkimus: On-line partial discharge detection of mv cables with defect localization (pdol) based on two time synchronized sensors. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.cired.net/publications/cired2005/papers/cired2005_0456.pdf. Luettu: 27.2.2015

CIREN 2009a. Tutkimus: Deployment of distributed on-line partial discharge monitoring devices on medium voltage electricity networks. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.cired.net/publications/cired2009/pdfs/CIREN2009_0828_Paper.pdf. Luettu: 26.2.2015

CIREN 2009b. Tutkimus: First field experience of on-line partial discharge monitoring of MV cable systems with location. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.researchgate.net/publication/224593552_First_field_experience_of_on-line_partial_discharge_monitoring_of_MV_cable_systems_with_location. Luettu: 26.2.2015

CIREN 2011. Tutkimus: Improving the management of MV underground cable circuits using automated on-line cable partial discharge mapping. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ipecc.co.uk/about-partial-discharge/improving-the-management-of-mv-underground-cable-circuits-using-automated-on-line-cable-partial-discharge-mapping/>. Luettu: 24.2.2015

Elovaara & Laiho. 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. 2007. Helsinki: Otatieto

Energiamarkkinalaki 2013. Energiamarkkinalaki 9.8.2013/588.

Energiateollisuus 2014. Sähköverkon rakenne. Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/verkon-rakenne>. Luettu: 10.1.2015

Energiateollisuus 2015. Sähköverkon rakenne. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/verkon-rakenne>. Luettu: 11.1.2015

Energiavirasto 2012. Sähkön jakeluverkkotoiminnan ja suurjännitteisen jakeluverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden valvontamenetelmien suuntaviivat vuosille 2012-2015. Www-dokumentti. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Sahkonjakeluverkko_suurjannitteinen_ja_keluerverkko_suuntaviivat_2012_2015.pdf/e9de867e-513b-4ce5-84d2-322e1c585ba0.
Luettu: 15.1.2015

Energiavirasto 2013. Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta 2013. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Kertomus+s%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuudesta+2013.pdf/eddf629-bec0-42b5-a5c7-76b13e66afc6>. Luettu: 18.1.2015

Energiavirasto 2014. Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikutus 2014. Www-dokumentti. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/S%C3%A4hk%C3%B6verkkoliiketoiminnan+kehitys+s%C3%A4hk%C3%B6verkon+toimitusvarmuus+ja+valvonnan+vaikuttavuus+2014_2419_402_2014.pdf/890eea2e-ece6-4d55-9309-d3ceba40aa4d. Luettu: 19.1.2015

Fingrid 2015a. Verkostohankkeet. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/Sivut/default.aspx>

Fingrid 2015b. Voimansiirtoverkko. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>

Haarla & Elovaara. 2011a. Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto

Haarla & Elovaara. 2011b. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto

Heikkilä, T. 2014. Diplomityö. Teknillinen yliopisto. Tampere. Www-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Diplomity%C3%B6%20Tuukka+Heikki1%C3%A4%20Energiavirasto+FINAL.pdf/5f3b5842-ae34-4aff-af94-9ccd51401598>.

Luettu: 3.2.2015

Honkapuro, Tahvanainen, Viljanen, Partanen, Mäkinen, Järventausta & Verho. 2007. Keskeytystunnuslukujen referenssiarvojen määrittäminen. Www-dokumentti. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Lahde_33_LUTTUT_Keskeytystunnusluvut_2007.pdf/c530af0b-271f-4038-b773-ec135c6b5abb. Luettu: 21.1.2015

IJEET 2012. Tutkimus: Rogowski coil evaluation performance with different fault conditions in medium voltage distribution networks. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/9%20ROGOWSKI%20COIL.pdf>.

Luettu: 18.2.2015.

Järviö & Lehtiö 2012. Kunnossapito: Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 5., uudistettu painos. Helsinki: KP-Media.

Kauppa- ja teollisuusministeriö 1996. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 5.7.1996/517.

Keskustelu ABB 2015. Keskustelu ABB myyntihenkilöstön kanssa. Tammikuu 2015. Kokkola.

Keskustelu Vaisala Oy. 2015. Keskustelu verkostomessuilla myyntiedustajan kanssa 29.1.2015. Tampere.

Lakervi & Partanen. 2012. Sähkönjakelutekniikka. 3., uudistettu painos. Helsinki: Otatieto Sähköturvallisuuslaki 1996. Sähköturvallisuuslaki 14.6.1996/410.

Vaisala 2013. Tutkimus: The Effect of Moisture on the Breakdown Voltage of Transformer Oil. Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/White%20Papers/CEN-TIA-power-whitepaper-Moisture-and-Breakdown-Voltage-B211282EN-A-LOW.pdf>. Luettu: 4.2.2015.

VTT 2012. Tutkimus: Experialimental evaluation of rogowski coil performance for locating pd in energized overhead covered-conductor feeder. Www-dokumentti. Saatavissa:

http://www2.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2012/Experimental_evaluation.pdf. Luettu 18.2.2015.

Ympäristöhallinto: Fluoratut kasvihuonekaasut. Www-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/fi->

[FI/Ilmasto ja ilma/Kasvihuonekaasupaastojen raportointi ja seuranta/Kasvihuonekaasupaastojen seuranta Suomessa/Fluoratut kasvihuonekaasut](http://www.ymparisto.fi/fi-Ilmasto_ja_ilma/Kasvihuonekaasupaastojen_raportointi_ja_seuranta/Kasvihuonekaasupaastojen_seuranta_Suomessa/Fluoratut_kasvihuonekaasut). Luettu: 27.1.2015.