



Kunnonvalvontamittausten kohdentaminen keskijännite- kaapeleille

Toni Lappi

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2019

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Sähkövoimatekniikka

LAPPI, TONI:

Kunnonvalvontamittausten kohdentaminen keskijännitekaapeleille

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Huhtikuu 2019

Keskijännitekaapeleiden lähestyessä elinkaariensa loppupuolta on kaapeleiden kunnan varmistamiseksi tehtävä toimenpiteitä. Kunnonvalvontamittauksilla pystytään arvioimaan kaapeleiden kuntoa, jolloin toimenpiteet kunnan varmistamiseksi voidaan määritellä. Opinnäytetyössä pohdittiin eri kunnonvalvontamittauksien käytettävyyttä keskijännitekaapeleilla. Työ tehtiin Elenia Oy:n toimeksiantona ja työn tavoitteena oli luoda kunnossapito-ohjelma keskijännitekaapeleiden mittaamiseksi.

Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksia käytetään keskijännitekaapeleiden kunnan arvioimiseksi. Häviökerroinmittaus vaatii käyttökeskeytyksen mitattavaan kohteeseen, kun taas osittaispurkausmittaus voidaan suorittaa myös käytön aikana. Häviökerroinmittaus antaa yleiskuvan kaapelijärjestelmän kunnosta. Osittaispurkausmittauksella saadaan selville vikapaikan sijainti kaapelijärjestelmässä. Keskijännitekaapeleiden kunnonvalvontamittauksissa käytetään osittaispurkausmittausta sen parempien ominaisuuksien vuoksi.

Kunnossapito-ohjelmaa varten mittauskohteet valitaan kaapelin asennusvuoden ja kriittisyyden perusteella. Mittauksia suoritetaan vuosittain muutamille kaapeli kokonaisuuksille. Mittaustulosten perusteella määritellään toimenpiteet kaapelijärjestelmien kunnan varmistamiseksi. Mittaustulokset dokumentoidaan verkkotietojärjestelmään käytettäväksi.

Kunnonvalvontamittausten avulla voidaan keskijännitekaapeleiden elinkaaren hallintaa parantaa. Työssä määriteltyjä mittaustuloksien raja-arvoja voidaan kehittää tehtyjen mittausten perusteella. Mittauksista saatavalla kokemuksella pystytään valmistautumaan tulevaisuuden kaapeleiden kunnonhallintaan.

Opinnäytetyön tuloksien perusteella laadittua kaapelien kunnossapito-ohjelmaa ei ole esitetty tässä opinnäytetyössä.

Asiasanat: kunnonvalvontamittaus, osittaispurkaus, häviökerroin, keskijännitekaapeli

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

LAPPI, TONI:

Allocation of condition monitoring measurements for medium voltage cables

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 0 pages

April 2019

Medium voltage cables are coming to end of life cycle over time, at which point measurements are needed to verify the condition of the cables. The condition of the cables can be estimated with condition monitoring measurements, after which the measures to verify condition can be defined. The purpose of this thesis was to consider the usability of different condition monitoring measurements for medium voltage cables. The aim of this thesis was to create a maintenance program for measuring medium voltage cables.

Partial discharge and dissipation factor measurements are used to verify the condition of medium voltage cables. Dissipation factor measurement requires that there is no electrical current in the cable to be measured, and partial discharge measurement can be also performed during the use of the cable. The result of dissipation factor measurement is a general view of the condition of the cable system. The location of defect in the cable system can be determined with partial discharge measurement. Because of its better characteristics, partial discharge measurement is used for monitoring the condition of medium voltage cables.

The measurement objects are chosen to the maintenance program by year of installation and criticality. Measurements are performed annually for a few cable systems. The measures to ensure condition of cable systems are determined by the results of the measurements. The measurement results are documented to a network information system.

Condition monitoring measurements can help to improve life cycle management of medium voltage cables. The limits of measurement results defined in this thesis can be developed based on the measurements made. The experience gained from the measurements can be used to prepare for future condition management of the cables.

The maintenance program based on the results of the thesis was excluded from this thesis.

Key words: condition monitoring measurement, partial discharge, dissipation factor, medium voltage cable

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	KAAPELIERISTYKSET JA -VARUSTEET	7
	2.1 Öljypaperieristeinen kaapeli	7
	2.2 Muovieristeinen kaapeli.....	8
	2.3 Kaapelipäätteet	10
	2.4 Kaapelijatkokset	11
3	OSITTAISPURKAUKSET	13
	3.1 Sisäiset purkaukset	13
	3.2 Pintapurkaukset	14
	3.3 Koronapurkaukset.....	15
	3.4 Purkauksien vaikutukset.....	15
4	KUNNONVALVONTAMITTAUKSET.....	17
	4.1 Häviökerroinmittaukset.....	17
	4.1.1 DAC-häviökerroinmittaus.....	19
	4.1.2 VLF-häviökerroinmittaus.....	21
	4.2 Off-line osittaispurkausmittaukset	22
	4.2.1 Kulkuaikamittaus	23
	4.2.2 DAC- ja VLF-osittaispurkausmittaus.....	24
	4.3 On-line osittaispurkausmittaukset	24
5	RAJA-ARVOT	26
	5.1 Häviökerroinmittaus	26
	5.2 Osittaispurkausmittaus	28
6	KAAPELIJÄRJESTELMÄ.....	31
	6.1 Kaapelijakauma.....	31
	6.2 Kaapeleiden priorisointi	33
7	MITTAUSTEN KOHDENTAMINEN.....	34
	7.1 Uudet kaapelijärjestelmät	34
	7.2 Öljypaperieristeiset vanhat kaapelijärjestelmät	35
	7.3 Muovieristeiset vanhat kaapelijärjestelmät	35
8	KUNNOSSAPITO-OHJELMA	37
	8.1 Mittauskohteet ja -menetelmät	37
	8.2 Mittausten suoritus	38
	8.3 Mittaustulosten dokumentointi.....	39
9	POHDINTA	41
	LÄHTEET.....	42

LYHENTEET JA TERMIT

β_{DAC}	DAC-jännitteen vaimennuskerroin
f_r	DAC-jännitteen taajuus
I_C	kapasitiivinen virtakomponentti
I_R	resistiivinen virtakomponentti
L_C	ilmasydämisen kelan induktanssi
L_t	kaapelin pituus
R_L	mittauslaitteen sisäinen resistanssi
$\tan\delta$	häviökerroin
U_0	nimellinen vaihejännite
v_p	pulssin etenemisnopeus
DAC	damped alternating current
DTD	differential tangent delta
EPR	eteeniipropreenikumi
Off-line	käyttökeskeytyksen vaativa mittaus
On-line	käytönaikainen mittaus
pC	pikocoulombi
PDIV	syttymisjännite
PVC	polyvinyylikloridi
TD	tangent delta
TDTS	tangent delta temporal stability
VLF	very low frequency
XLPE	ristisilloitettu polyeteeni

1 JOHDANTO

Sähkömarkkinalain uudistuksen myötä sähköverkkoyhtiöiltä vaaditaan entistä parempaa jakeluverkon toimitusvarmuutta (Sähkömarkkinalaki 588 2013). Jakeluverkkojen vanhat keskijännitekaapelit vaativat toimenpiteitä toimitusvarmuuden säilyttämiseksi. Kunnonvalvontamittauksilla pystytään havaitsemaan mahdolliset alkavat viat kaapelijärjestelmissä, jolloin korjaustoimenpiteet voidaan kohdistaa ennen yllättävää sähkönjakelun keskeytystä.

Opinnäytetyö tehdään sähköverkkoyhtiö Elenia Oy:n toimeksiantona. Työn tarkoitus on kartoittaa ja priorisoida Elenian keskijännitteisen kaapeliverkon kunnonhallinnan tilanne. Vanhimmat kaapelijärjestelmät ovat tulossa elinkaarensa loppuun ajan myötä, joten kunnonvalvontamittausten kohdentaminen on ajankohdasta. Työssä pohditaan eri kunnonvalvontamittausten käytettävyyttä keskijännitekaapeleiden kunnon arvioimisessa. Työn tavoitteena on luoda kunnossapito-ohjelma Elenian keskijännitekaapeleiden mittaamiseksi. Ohjelmaan valitaan mitattavat kaapelijärjestelmät niiden asennusvuosien ja kriittisyyden perusteella. Mittauksien suorittamisesta annetaan ohjeistusta ja mittaustulosten perusteella määritellään jatkotoimenpiteet mittauskohteen kunnon varmistamiseksi.

Kunnossapito-ohjelman tarkoitus on parantaa keskijännitekaapeleiden elinkaarren hallintaa. Kunnonvalvontamittauksilla saadaan arvio kaapelijärjestelmien kunnosta, jolloin jatkotoimenpiteet voidaan määritellä. Investoinnit voidaan kohdistaa järjestelmien iän sijasta niiden todellisen kunnon perusteella. Mittauksista saadaan kokemusta, jota pystytään käyttämään avuksi suunniteltaessa seuraavia mittauksia.

2 KAAPELIERISTYKSET JA -VARUSTEET

Keskijännitteinen kaapelijärjestelmä koostuu kaapeleista, niitä yhdistävistä kaapelijatkoksista ja kaapelin sähkökojeeseen liittävästä kaapelipääteistä. Kaapelijärjestelmien eristysratkaisut ovat kehittyneet vuosien saatossa. Käytössä on vielä vanhoja kaapelijärjestelmiä, missä kaapelin pääeristys on toteutettu öljykyllästetyllä paperilla. Nykyaikaisissa muovieristeisissä kaapeleissa pääeristeenä käytetään ristosilloitettua polyeteeniä sen hyvän käyttölämpötilan vuoksi. Kaapelijatkoksilta ja -pääteiltä vaaditaan samojen sähkörasituksien kestämistä kuin kaapeleiltakin. Jatkosten ja päätteiden laadukkaalla asentamisella ehkäistään haitallisten osittaispurkauksien syntymistä eri eristeiden välisille rajapinnoille. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 154-155)

2.1 Öljypaperieristeinen kaapeli

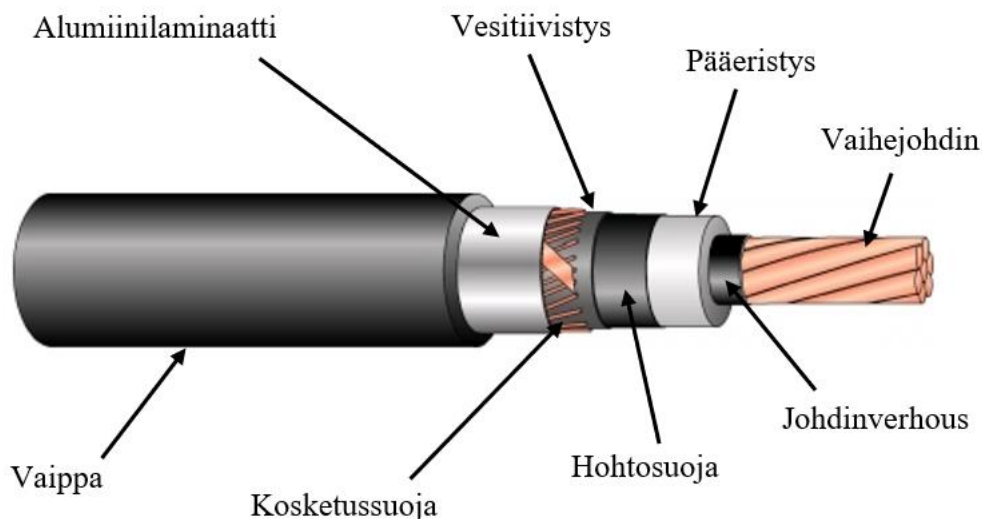
Vanhimmat vielä käytössä olevat keskijännitekaapelit ovat öljypaperilla eristettyjä. Suomessa öljypaperieristeisiä kaapeleita asennettiin aina 1990 -luvulle asti, minkä jälkeen muovieristys on syrjäyttänyt öljypaperin kokonaan. Öljypaperieristeisessä kaapelissa on kupari- tai alumiini -johdin, jonka eristys on toteutettu kietomalla paperinauhaa johtimen ympärille. Paperi kyllästetään öljyllä tai muulla eristävällä aineella ja johtimen kosketussuojaus toteutetaan lyijy- tai alumiinivaipalla. Alumiinivaipalla suojatut johtimet eivät tarvitse erillistä metallisuojausta ympärilleen vaan ne päällystetään bitumilla ja päälle puristetaan PVC -muovista ulkovaippa. Bitumi suojaa kaapelia korroosiolta mahdollisen kosteuden päästessä ulkovaipan sisäpuolelle. Lyijyvaipalliset johtimet tarvitsevat erillisen metallisuojaus teräslangoista tai -nauhasta. Ulkovaipan materiaalina käytetään bitumilla kyllästettyä juuttikangasta tai PVC -muovia. (Warner 2005, 249)

Öljyn kosteuspitoisuuden lisääntyminen on yksi tyypillinen öljypaperieristeen ikääntymismekanismi. Mekaaniset vauriot kaapelivaipassa voivat päästää kaapelin eristeeseen kosteutta. Kosteutta voi syntyä myös sisäisesti kemiallisen reaktion sivutuotteena. Epätavallisen korkea johdinlämpötila aiheuttaa öljypaperin

hapettumisen, minkä seurauksena reaktiotuotteena syntyy kosteutta eristeeseen. Lämpötilavaihtelut aiheuttavat myös öljyn liikkumisen eristeessä, jolloin voi syntyä osittaispurkauksia kuivuneisiin eristyskohtiin. Öljyn liikkuminen vähentää öljyn määrää paperissa, jolloin nämä kohdat lämpenevät helpommin. Lämpeneminen puolestaan edistää paperin hapettumista. Nämä ikääntymismekanismit heikentävät eristeen läpilyöntikestävyyttä. (Hampton 2016, 22)

2.2 Muovieristeinen kaapeli

Muovieristeiset keskijännitekaapelit alkoivat yleistymään Suomessa 1980-luvulla. Pääeristeenä kaapeleissa käytetään yleensä ristosilloitettua polyeteeniä (XLPE). Kuvassa 1 esitetään suulakepuristetun muovikaapelin rakenneosat.



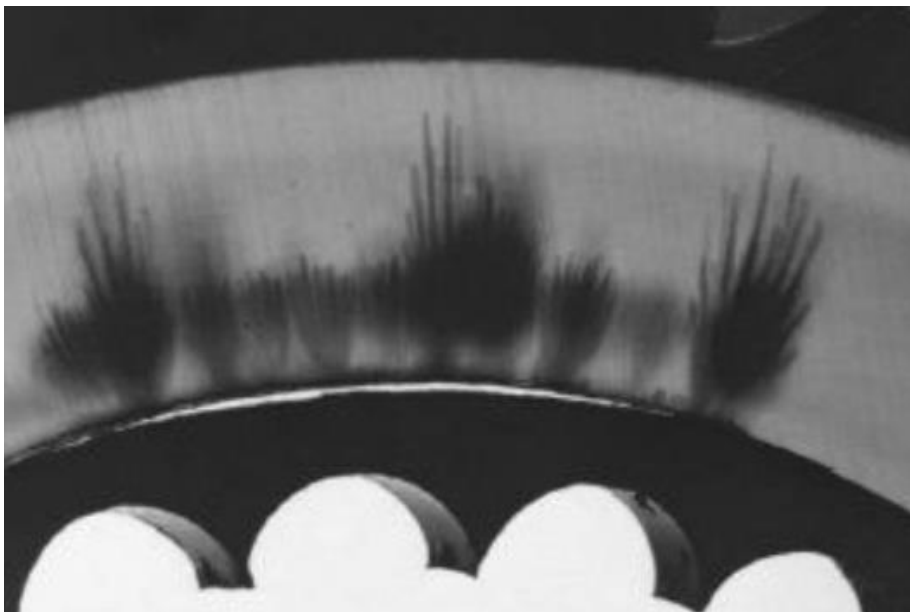
KUVA 1. Muovikaapelin rakenne. (Reka Cables n.d.)

Vaihejohtin on keskijännitekaapelin keskeisin rakenneosa ja sitä pitkin sähkö siirtyy kaapelissa. Vaihejohtimen materiaalina käytetään yleensä alumiinia tai kuparia. Alumiinin tiheys on kuparia pienempi, jolloin alumiinikaapeli painaa kuparikaapelia vähemmän. Lisäksi alumiinin edullisuus kupariin verrattuna kasvattaa alumiinisten muovikaapeleiden käyttämistä. Kuparin etuna on pienempi resistiivisyys, jolloin kuparin johtokyky on alumiinia parempi. Vaihejohtimen ympärillä on johdinverhous, mikä tasoittaa vaihejohtimen ja pääeristysten väliset epätasaisuudet. Johdinverhous ehkäisee osittaispurkauksien syttymistä vaihejohtimen ja pääeristysten välissä. (Thue 2017)

Kaapelin pääeristys erottaa jännitteisen vaihejohtimen muusta ympäristöstä. Pääeristeenä käytetään ristosilloitettua polyeteeniä (XLPE) tai eteenipropeeniku-mia (EPR). Pääeristuksen ympärillä on hohtosuoja, mikä toimii samalla tavalla kuin vaihejohtimen johdinverhous. Hohtosuojan jälkeen kaapelin pitkittäinen vesitiivistys toteutetaan erillisellä nauhakerroksella. Kaapelin kosketussuojana käytetään metallista lanka- tai nauhakerrosta. Kerroksen tarkoituksena on luoda pieni resistanssinen reitti maahan vaihejohtimen ja kosketussuojan välille muodostuvan kondensaattorin varausvirroille. Kosketussuoja toimii myös vikavirtojen kulkureittinä maahan kaapelin vaurioituessa mekaanisesti. Kosketussuojassa käytetään kuparia ja alumiinia niiden hyvän sähkönjohtokyvyn takia. (Thue 2017)

Vaippakerros on viimeinen suojakerros muovikaapelissa. Se suojaa kaapelia mekaanisilta ja kemiallisilta vaurioilta. Vaipan materiaalina käytetään polyvinylikloridi -muovia (PVC) tai polyeteeni -muovia (PE). Polyeteeniä käytetään paljon maakaapeleissa, koska sillä on hyvä kosteudenkestävyys. Polyeteenistä on valmistettu myös erilaisia yhdisteitä, mitkä parantavat eri ominaisuuksia. Vaipan alla voidaan käyttää alumiinilaminaattia, joka toimii myös kosketussuojana. Laminaatti tekee myös kaapeliin poikittaissuuntaisen vesitiivistyksen. (Thue 2017)

Vesipuu on muovieristeisessä kaapelissa tapahtuva puumainen reitti eristeen lävitse (kuva 2). Ne kehittyvät kaapelin sisälle joutuneesta kosteudesta hitaasti kuukausien tai vuosien aikana. Kosteuden lisäksi vesipuiden syntymiseen vaikuttaa pieneen onteloon tai epäpuhtauteen kohdistuva suuri jänniterasitus. Ontelossa tai epäpuhtaudessa tapahtuva elektronipommitus aiheuttaa kiinteän eristeen eroosiota. Vesipuut aiheuttavat läpilyönnin kehittyessään eristemateriaalin lävitse. (Thue 2017)



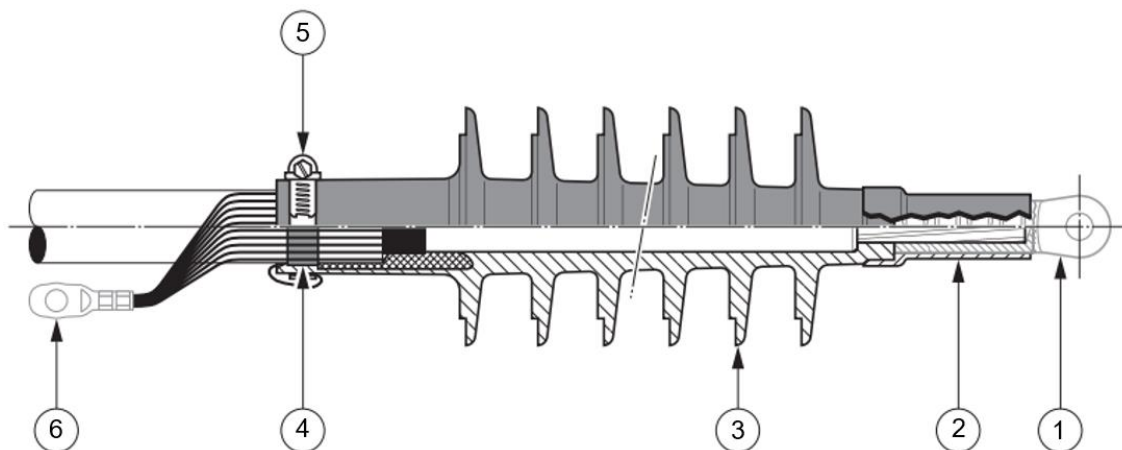
KUVA 2. Vesipuiden kehittyminen XLPE-kaapelissa. (Thue 2017)

Kuvassa 2 useampi vesipuu on kehittynyt XLPE-eristeeseen. Johdinverhous on tehty huonosti, jolloin se on jäänyt väljäksi. Väljyyden takia johdinverhouksen ja eristeen väliin on jäänyt kosteutta sisältävä ontelo. Suuren jänniterasituksen vaikutuksesta kosteus pureutuu eristeen lävitse. Tehokkain tapa välttää vesipuiden syntyminen on eristeen pitäminen täydellisesti kuivana. Pitkittäinen vesitiivistys toteutetaan tiivistysnauhoilla ja lyijy-, kupari- tai alumiinilaminaatilla eristeen poikittainen vesitiivistys. Vesipuita voidaan ehkäistä myös pitämällä eristeen rajapinnat tasaisina ja välttämällä onteloiden ja epäpuhtauksien syntymistä. (Thue 2017)

2.3 Kaapelipäätteet

Kaapelipääte yhdistää eristetyt johtimet sähkökojeen liittimiin. Pääte suojaa kaapelin päätä mekaanisesti ja estää kosteuden pääsyn kaapeliin. Kaapelipääte on osa kokonaisuutta, joten sen on kestävä samat sähköiset rasitukset kuin kaapelinkin. Pääteen on hallittava kosketussuojan päässä vaikuttava suuri sähkökentän voimakkuus. Kaapelin kosketussuoja päätellään kaapelipäätteen kohdalla, mutta vaihejohdin jatkuu päätteen lävitse. Kosketussuojan puuttuessa voimakas sähkökenttä rasittaa päätettä ympäröivää ilmaa, jolloin päätteen pinnalla voi esiintyä osittaispurkauksia. Sähkökentän hallitsemisessa keskijännitekaapeleilla käytetään eristysrakenteen muuttamista, missä eristyspaksuutta suurennetaan ja eristys muotoillaan keilan muotoiseksi. Käytössä on myös resistiivinen

sähkökentän ohjaus, missä vaihejohtimen ympärille kierretään puolijohtavaa nauhaa. Nauha tasaa sähkökenttää, koska varaus- ja vuotovirrat aiheuttavat jännitehäviön nauhassa. (Elovaara & Haarla 2011, 327-328) Kuvassa 3 esitetään ulkokäyttöön tarkoitettujen kaapelipääteiden rakennekuva. Muita päätetyyppejä ovat kylmä- ja lämpökutistepäätteet sekä kosketussuojatut pistokepäätteet.



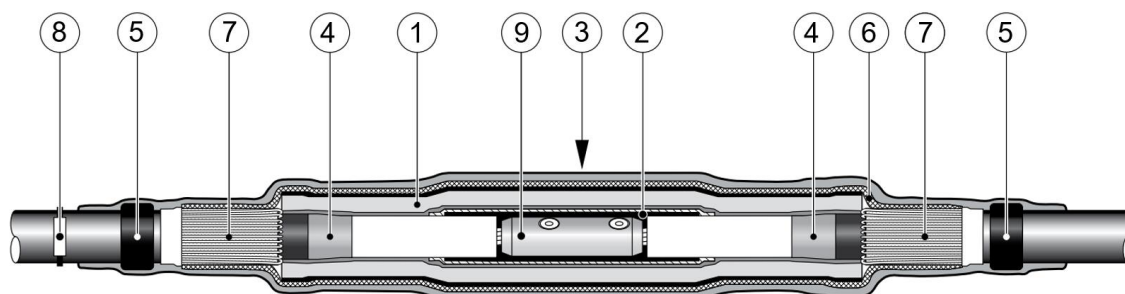
KUVA 3. Kaapelipääteiden rakennekuva. (Nexans 2017, 10)

Kaapelikengän (nro 1) tehtävänä on kiinnittää vaihejohtimen sähkökojeen liittimille. Silikonisella vaipalla (nro 2) estetään kosteuden pääsy kaapelikengän liittoskohdasta kaapelipääteiden sisälle. Kuoritun kaapelin ylle tulee silikoninen suojuus (nro 3), mikä suojaa kaapelia ympäristöolosuhteilta. Suojukseen integroitu sähköä johtava silikonikumi ja suojuksen laipat hallitsevat suuren sähkökentän voimakkuuden kosketussuojan päässä. Kaapelipääteiden alkupään kosteustiivistys toteutetaan eristysmassalla (nro 4). Kosketussuoja tuodaan kaapelipääteiden sisältä ulos ja se keritään maadoitusjohtimeksi. Maadoituspanta (nro 5) kiristetään päätteen ympärille ja maadoitusjohtimeen kiinnitetään maadoituskenkä (nro 6). (Nexans 2017, 10)

2.4 Kaapelijatkokset

Kaapelijatkoksia käytetään kahden kaapelin yhdistämiseksi toisiinsa. Jatkoksen on kestävä samat sähköiset rasitukset kuin kaapelinkin. Keskijännitteellä jatkokset ovat varsin pitkiä, koska siihen vaikuttaa kaapelin säteen suuntaisten sähköisten rasitusten lisäksi pitkittäisiä rasituksia. Jatkoksen on myös kestävä

mekaanisia rasituksia ja estettävä kosteuden ja epäpuhtauksien pääsemisen jatkoksen sisälle. Muovieristeisille kaapeleille on käytössä erilaisia kylmä- ja lämpökutistejatkoksia. (Elovaara & Haarla 2011, 330) Kuvassa 4 esitetään kylmäkutistejatkoksen rakennekuva.



KUVA 4. Kylmäkutistejatkoksen rakennekuva. (Nexans 2012, 6)

Kuorittujen kaapeleiden vaihejohtimet yhdistetään kaapeliholkilla (nro 9). Kaapeliholkin ja -eristyksen ympärillä on kaksikerrossuoja (nro 2) sähkökentän hallitsemiseksi. Eristysmassaa käytetään kaapelieristyksen päällä (nro 4) sähkökentän ohjaamiseksi ja jatkon molemmissa päissä vesitiivistykseksi (nro 5). Kaapelieritys ja -holkki suojataan kolmikerroksisella EPDM-kumilla (nro 1). Kosketussuojan ympärillä on itseliimautuvaa kupariteippiä (nro 7) ja kaapelien kosketussuojat yhdistetään kuparisella kuorella (nro 6). Kaapelijatkos suojataan ympäristöolosuhteilta EPDM-kumista tehdyllä vaipalla (nro 3) ja jatkos voidaan merkitä tunnuskilvillä (nro 8). (Nexans 2012, 6)

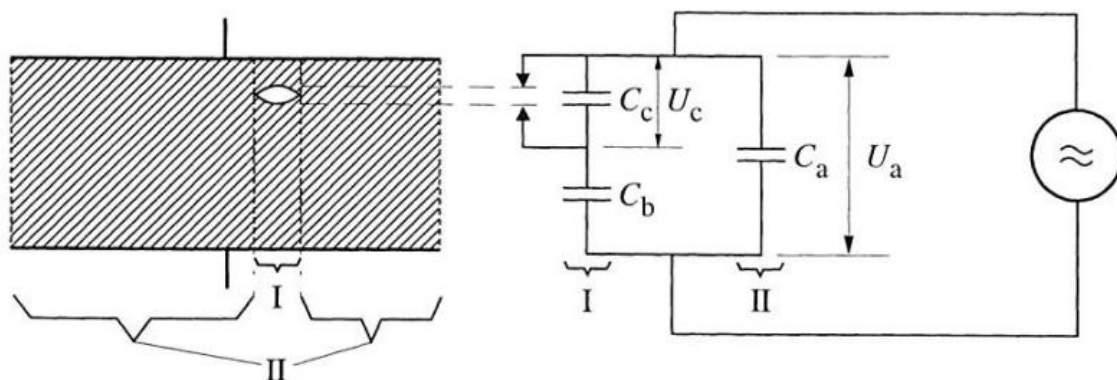
3 OSITTAISPURKAUKSET

Eristeillä on sähkökentän voimakkuutta kestäviä erisuuruisia sähkölujuuksia. Eristeessä ei ilmene eristävyysongelmia, kun pysytellään sähkölujuutta alhaisimmilla voimakkuuksilla. Sähkökentän voimakkuuden ylittäessä eristeen sähkölujuuden syntyy sähköpurkauksia. Kyseessä on osittaispurkaus, jos sähköpurkaus ei yhdistä elektrodiväliä. Osittaispurkaukset voivat jäädä kehittymään sopivan suuruisen jännitteen vaikutuksesta. Osittaispurkauksen kehittyessä elektrodiväli voi oikosulkeutua, jolloin tapahtuu läpilyönti eristeessä. (Aro ym. 2015, 63, 80)

Osittaispurkauksia saa aikaan tasa-, vaihto- ja syöksyjännitteet ja niitä esiintyy kiinteissä eristeissä, kaasuissa ja nesteissä. Vaihtojännitteen vaikutus purkauksien esiintymisiin on suurin, koska purkaukset tapahtuvat uudelleen joka jaksolla. Erilaisia osittaispurkaustyppejä ovat eristeen pinnalla tapahtuvat pintapurkaukset, eristeen sisäiset purkaukset ja koronapurkaukset johtimen pinnalla. Osittaispurkaukset aiheuttavat niin fysikaalisia kuin kemikaalisia vaikutuksia eristeisiin ja ympäristöön. Koronapurkaukset johtimen pinnalla ionisoivat johtimen ympäristön kaasumaisen eristeen ja purkauksista aiheutuu valoa, ääntä ja otsonikaasua. Lisäksi korona aiheuttaa tehohäviöitä johdoilla. Eristeisiin aiheutuu eroosiota ja eristettä syövyttäviä happoja ja kaasuja. Nämä vaikuttavat eristyksen elinikään ja purkausten kehittymiseen läpi- tai ylilyönniksi. (Aro ym. 2015, 63, 80)

3.1 Sisäiset purkaukset

Sisäisiä osittaispurkauksia ilmenee vioittuneen eristeen sisällä. Kaasuonteloita voi muodostua eristeen sisälle, eristeen ja metallin rajapinnalle tai kahden eri eristeen rajapinnalle. Myös eristeeseen joutunut vieras hiukkanen, esimerkiksi metallihiukkanen, voi aiheuttaa osittaispurkauksia hiukkasen ja eristeen rajapinnalla. Kaasuontelossa osittaispurkaus tapahtuu niin nopeasti, että ulkoinen piiri ei ehdi vaikuttamaan ilmiöön. Kolmikapasitanssimallilla voidaan kuvata eristysrakennetta, jossa on kaasuontelo. Mallissa C_c on ontelon, C_b sen kanssa sarjassa olevan eristyksen ja C_a eristysrakenteen loppuosan kapasitanssi (kuvio 1). (Aro ym. 2015, 80-81)



KUVIO 1. Kolmikapasitanssimalli. (Aro ym. 2015, 82)

Kaasuontelon sähkökentän voimakkuus on yleensä suurempi kuin onteloa ympäröivän eristeen. Sähkökentän voimakkuuteen ontelossa vaikuttaa ontelon koko ja muoto, eristeen yli vaikuttava jännite ja kaasun permittiivisyys. Kaasuontelossa syttyy osittaispurkaus, kun sähkökentän voimakkuus ylittää ontelon sähkölujuuden. Jännitettä, millä osittaispurkaus syttyy, kutsutaan syttymisjännitteeksi. Kaasun koostumus ja paine, ontelon seinämien olosuhteet ja edellisten purkausten aiheuttamat staattiset varaukset vaikuttavat kaasuontelon sähkölujuuteen. Osittaispurkauksessa varaukset liikkuvat ontelon seinämillä, jolloin sähkökentän voimakkuus heikkenee ja purkaus sammuu. Ontelossa voi tapahtua myös läpilyönti, jos purkaus ylittää ontelon läpilyöntijännitteen. Läpilyönnissä ontelon sähkökentän voimakkuus romahtaa ja purkaus sammuu. (Aro ym. 2015, 81; Bergius 2012, 13.)

3.2 Pintapurkaukset

Eristeen pinnan suuntaisesti vaikuttava tarpeeksi voimakas sähkökenttä voi aiheuttaa pintapurkauksien syntymisen. Pintapurkaukset käyttäytyvät hyvin samanlaisesti kuin sisäiset purkaukset. Kolmikapasitanssimallissa ontelon kapasitanssin tilalle tulee voimakkaan sähkökentän alueen kapasitanssi (Aro ym. 2015, 85). Sisäisten purkausten tavoin, pintapurkaukset tapahtuvat jaksoittain vaihtojännitteellä. Pintapurkaukset kuluttavat eristettä mikä voi johtaa läpilyöntiin. (Kao 2004, 546)

Kahden eristeen rajapinnalla tapahtuva liukupurkaus on pintapurkauksista haitallisin. Liukupurkauksia tapahtuu kiinteän eristeen ja ilman tai nesteen välisissä rajapinnoissa. Liukupurkauksia aiheuttaa rajapinnassa riittävän suuri rajapinnan suuntainen sähkökentän komponentti. Liukupurkauksen vaikutusta voimistaa rajapintaa vastaan oleva kohtisuora sähkökentän komponentti. Läpivientieristimet ja kaapelipäätteet ovat tärkeimpiä komponentteja sähkönjakelutekniikassa, joissa liukupurkauksia voi esiintyä. (Aro ym. 2015, 85)

Ilmalla on pienempi permittiivisyys ja heikompi sähkölujuus kuin kiinteällä eristeellä. Kiinteän eristeen ja ilman välisellä rajapinnalla osittaispurkaukset syttyvät sähkökentän voimakkuuden ylittäessä ilman sähkölujuuden. Kiinteän eristeen sähkölujuuteen verrattuna purkaukset syttyvät hyvin pienellä jännitteellä. Osittaispurkaukset kehittyvät liukupurkauksiksi eristeiden rajapinnassa jännitteen kasvaessa. (Aro ym. 2015, 85)

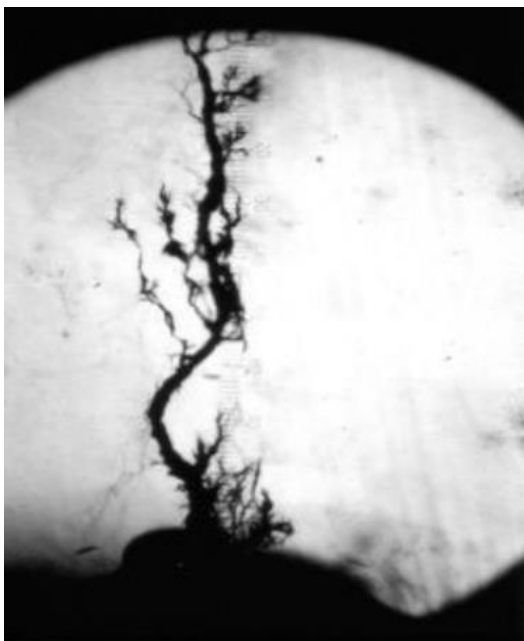
3.3 Koronapurkaukset

Koronapurkauksia tapahtuu elektrodin pinnalla ilmassa tai muussa kaasussa. Koronaa ilmenee suurilla jännitteillä useammin elektrodin terävissä pisteissä ja reunoissa. Koronapurkaus syttyy vaihtojännitteen negatiivisella puolijaksolla ja purkauksia esiintyy puolijakson huipun kohdalla. Tätä ominaisuutta käytetään koronan tunnistamisessa, koska pintapurkaukset ja sisäiset purkaukset esiintyvät jännitteen laskevalla ja nousevalla osuudella. Koronapurkaukset ovat yleisempiä ilmajohtoverkoissa, missä avojohtojen koronapurkaukset aiheuttavat lähinnä häviöitä radio- ja TV-signaaleihin. Maakaapeliverkoissa koronaa voidaan havaita metallisissa kaapelipäätteissä. (Aro ym. 2015, 90, 92)

3.4 Purkauksien vaikutukset

Osittaispurkaus ontelossa vapauttaa positiivisia ioneja ja elektroneja, jotka ontelon seinämiin törmätessään aiheuttavat seinämien eroosiota. Seinämän epäta-saisuudet luovat onteloon kohtia, joihin sähkökenttä vaikuttaa paikallisesti voi-

makkaammin. Voimakkaassa sähkökentässä osittaispurkauksia syttyy enemmän, jolloin ontelon epätasaisessa kohdassa seinämän eroosio nopeutuu. Jatkuvat purkaukset voivat aiheuttaa sähköpuun kehittymisen kiinteään eristeeseen (kuva 5). Sähköpuu on puumainen eroosiojälki eristeessä, mitä pitkin voi tapahtua läpilyönti. (Aro ym. 2015, 130-131)



KUVA 5. Sähköpuun kehittyminen eristeessä. (Thue 2017)

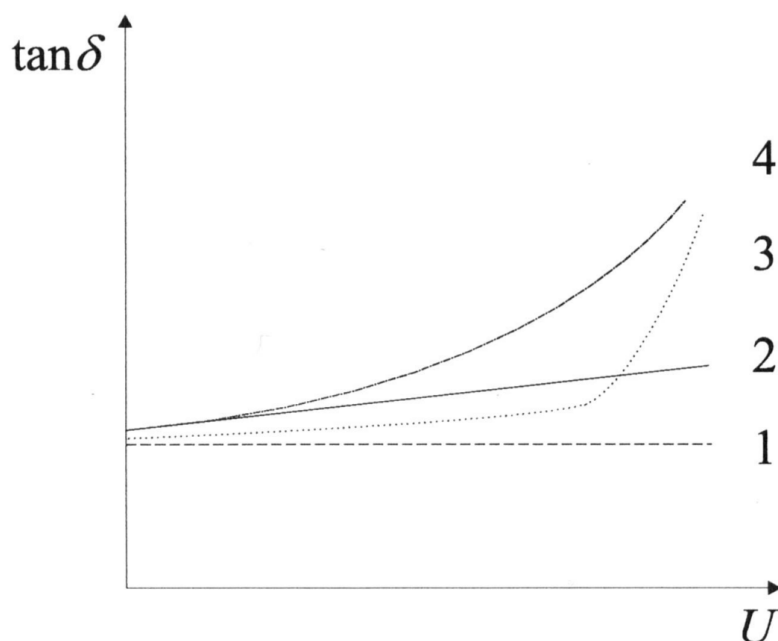
Kuvassa 5 sähköpuu on saanut alkunsa vaihejohtimen johdinverhouksen epäpuhtaudesta, mistä se on kehittynyt pitkälle eristemateriaaliin. Sähköpuu saa aikaan eristeeseen selvästi erottuvan ontton kanavan, mikä kasvaa nopeasti minuuttien tai tuntien aikana. Sähköpuun nopean kehittymisen seurauksena läpilyönti voi tapahtua hyvinkin nopeasti kaapelissa. Eristeen rajapinnat ovat yleisimmät kohdat missä sähköpuita voi syntyä. (Thue 2017)

4 KUNNONVALVONTAMITTAUKSET

Keskijännitekaapeleiden kunnan varmistamiseksi on saatavilla erilaisia kunnonvalvontamittauksia. Kaapelieristeen ja kaapelivarusteiden kunnosta kertovat häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset. Häviökerroinmittauksia pystytään tekemään vain jännitteettömille kaapelijärjestelmille, kun osittaispurkausmittaukset pystytään tekemään myös jännitteellisille kaapelijärjestelmille. Käyttökatkon vaahtivia mittauksia kutsutaan myös off-line mittauksiksi ja käytönaikaiset mittaukset ovat on-line mittauksia. Mittausjännitteet rajoittuvat on-line mittauksissa järjestelmän käyttöjännitteeseen ja off-line mittauksilla mittausjännitettä voidaan säätää käyttöjännitettä pienemmäksi tai suuremmaksi. Mittauksien avulla voidaan kaapelijärjestelmän kunto arvioida ja tarvittavat toimenpiteet määritellä. (Aro ym. 2015, 199-200.)

4.1 Häviökerroinmittaukset

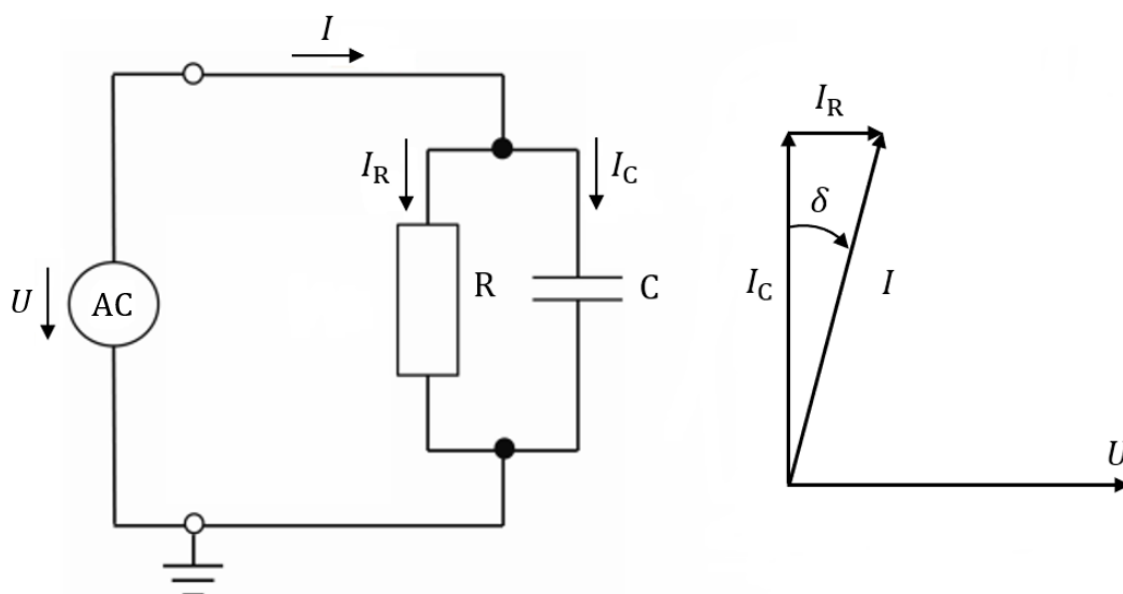
Eristysrakenteet heikkenevät ikääntyessään ja häviökerroinmittausta käytetään näiden kunnan arvioimiseen. Häviökerroinmittausta kutsutaan myös tan δ -mittaukseksi. Mittauskohteista kaapelit, mittamuuntajat, kondensaattorit ja läpivientieristimet soveltuvat hyvin häviökerroinmittauksella tehtävään kunnanvalvontaan. Mittaus suoritetaan usealla vaihtojännitteen arvolla nimellisen käyttöjännitteen molemmin puolin. Tällöin saadaan tuloksena häviökertoimen muutos jännitteen funktiona. Esimerkkitapaus eristeiden tan δ -mittaustuloksille esitetään kuviossa 2. (Aro ym. 2015, 193, 197; Keränen, Muranen, Pakonen & Verho 2018, 32-33.)



KUVIO 2. Periaatteellinen muoto $\tan\delta$ -käyrille. (Aro ym. 2015, 198)

Eristettä voidaan pitää terveenä, kun eristeen $\tan\delta$ pysyy likimain vakiona jännitteen funktiona. Käyrä 1 esittää ideaalista käyrää ja käyrä 2 on terveen eristyksen käyrä. $\tan\delta$ -arvon nouseminen jännitteen funktiona kertoo eristyksen heikkenemisestä. Käyrässä 3 heikkeneminen tapahtuu voimakkaasti tietyllä mittausjännitteen arvolla. Syy käyrän 3 muodolle voi olla huomattavien osittaispurkausten syntyminen eristeessä. Käyrä 4 kuvaa eristettä, mikä on heikentynyt reilusti alkuperäisestä kunnosta. Tällöin $\tan\delta$ -arvo nousee tasaisesti jännitteen funktiona. (Aro ym. 2015, 197-198)

Häviökerroinmittauksista saatavalla $\tan\delta$ -arvolla tarkoitetaan mittauspiirissä kulkevan virran resistiivisen virtakomponentin suhdetta kapasitiiviseen virtakomponenttiin. Kapasitiivinen virtakomponentti on 90 asteen kulmassa resistiiviseen nähden. Näiden virtakomponenttien vektorisummana saadaan mittauspiirissä kulkeva virta selville. Kuviossa 3 esitetään häviökerroinmittauksen sijaiskytkentä ja osoitindiagrammi. (Neier, Tian & Wong 2016, 106-107)



KUVIO 3. Häviökerroinmittauksen sijaiskytkentä ja osoitindiagrammi. (Neier ym. 2016, 107)

Sijaiskytkennässä on kuvattuna mittalaitteen jännitelähde ja mittauskohteen resistanssi ja kapasitanssi. Piirin kokonaisvirta I koostuu resistiivisestä virtakomponentista I_R ja kapasitiivisesta virtakomponentista I_C . Sijaiskytkennän ja osoitindiagrammin perusteella saadaan häviökertoimelle yhtälö. Häviökerroin $\tan\delta$ on

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{I_R}{I_C}, \quad (1)$$

jossa R on mittauskohteen resistanssi ja C on kapasitanssi. (Neier ym. 2016, 107)

4.1.1 DAC-häviökerroinmittaus

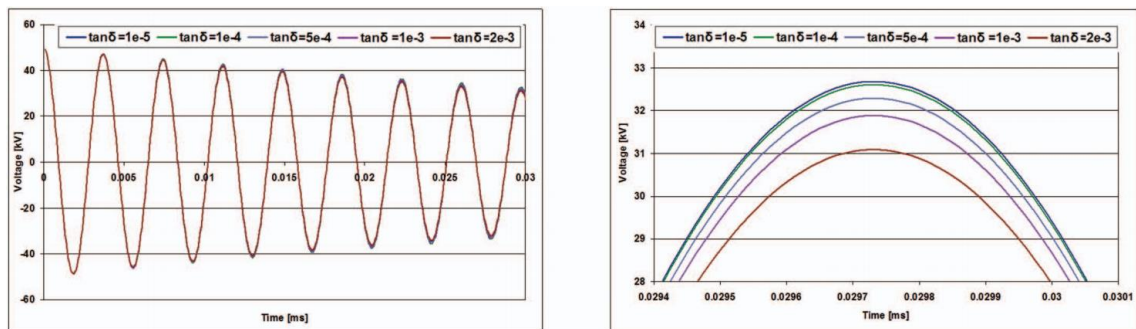
DAC-mittauksessa (damped alternating current) tutkittava kaapeli ladataan tasajännitelähteellä halutulle jännitetasolle. Suurjännitekytkin sulkee välittömästi kaapelin ja mittauslaitteiston ilmasydämisen kelan rinnakkain, kun tavoiteltu jännite-taso saavutetaan. Kytkimen nopealla toiminnalla (alle $1 \mu\text{s}$) vältetään haitallisilta kytkentäylijännitteiltä ja mittauksen häiriintymiseltä. Kaapelin kapasitanssi ja kelan induktanssi muodostavat resonanssipiirin, missä jännite värähtelee kapasi-

tanssin ja induktanssin määrämällä taajuudella. DAC-jännite vaimenee resonanssiin häviöiden takia. Piirissä häviöitä aiheuttaa tutkittava kaapeli, kela ja suurjännitekytkin. DAC-jännitteen taajuus f_r on

$$f_r = \left(\frac{1}{2\pi} \sqrt{L_C \cdot C} \right), \quad (2)$$

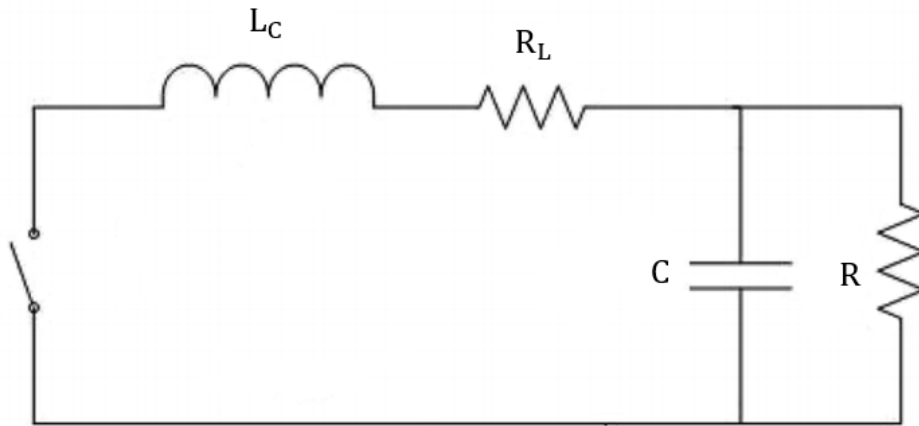
jossa L_C on resonanssiin induktanssi ja C on mitattavan kaapelin kapasitanssi. (IEEE Std 400.4 2015, 13-14, 34)

DAC-mittauksella pystytään arvioimaan kaapelin eristyksen häviökerroinmittausjännitteen amplitudin vaimenemisesta. Kaapelin ikääntyessä alkavat sen häviöt kasvamaan, jolloin DAC-jännite vaimenee nopeammin kuin hyväkuntoisen kaapelin. Kuviossa 4 esitetään eri häviökerroin arvojen vaikutus DAC-jännitteeseen. Kuvion vasemmanpuolimmaisessa kuvaajassa esitetään vaimenevat DAC-jännitteet ja oikeanpuolimmaisessa kuvaajassa on suurennos jännitteen yhden positiivisen huipun kohdalta. Oikeanpuolimmaisesta kuvaajasta huomataan, että suuremmalla häviökertoimen arvolla jännitteen amplitudi jää pienemmäksi kuin pienemmällä häviökertoimella. (Chmura, Gulski, Houtepen, Quak, Seitz & Smit 2011, 20)



KUVIO 4. Amplitudin vaimeneminen. (Chmura ym. 2011, 21)

Kuviossa 5 esitetään DAC-mittauslaitteen sijaiskytkentä häviökertoimen määrittämistä varten. Kytkennässä L_C on ilmasydämisen kelan induktanssi ja R_L kuvaa mittauslaitteen sisäistä resistanssia. Mitattavasta kaapelista halutaan tietää sen kapasitanssi C ja resistanssi R . (IEEE Std 400.4 2015, 29)



KUVIO 5. DAC-mittauslaitteen sijaiskytkentä. (Chmura ym. 2011, 23)

Kaapelin resistiiviset häviöt pystytään kuvaamaan sijaiskytkennässä rinnan olevalla resistanssilla. Resistanssi voidaan laskea, kun tiedetään mittauslaitteen arvot. Resistanssi on

$$R = \frac{L_C}{2\beta_{\text{DAC}}L_C C - R_L C}, \quad (3)$$

jossa β_{DAC} on DAC-jännitteen vaimennuskerroin (IEEE Std 400.4 2015, 30). Vaimennuskerroin pystytään laskemaan kahden positiivisen tai negatiivisen aallon huippujännitteiden ja niitä vastaavien ajanhetkien avulla. Vaimennuskerroin on

$$\beta_{\text{DAC}} = \frac{\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}{(t_1 - t_2)}, \quad (4)$$

jossa U_1 ja U_2 ovat aallon huippujännitteet ja t_1 ja t_2 ovat jännitteitä vastaavat ajanhetket. Tästä pystytään nyt laskemaan yhtälöllä 1. (Chmura ym. 2011, 23)

4.1.2 VLF-häviökerroinmittaus

VLF-mittauksessa (very low frequency) käytetään vaihtojännitelähdettä, mikä pystyy tuottamaan pienitaajuisia, sini- tai kosiniaaltoista, mittausjännitettä. Taajuuksia käytetään väliltä 0,01 – 0,1 Hz, mutta 0,1 Hz on suosituin ja saatavin taajuus mittauslaitteistoissa. Mittauksessa käytettävä virta on paljon pienempi 0,1 Hz:n taajuudella kuin normaalilla 50 Hz:n käyttötaajuudella. Tämän vuoksi VLF-

mittauslaitteisto on pienikokoinen ja helposti mukana kannettava kokonaisuus. (Neier ym. 2016, 106)

VLF-mittauslaitteisto voidaan koota eri osista suorittamaan erilaisilla menetelmillä kunnonvalvontamittauksia kaapeleille. Yksinkertaisimmillaan mittauslaite on vain kosini- tai sinimuotoista mittausjännitettä syöttävä jännitelähde. Jännitelähteellä pystytään tarkistamaan kaapelin eristeen jännitekestoisuus. Jännitelähteen kanssa voidaan käyttää erilaisia mittauslaitteita, jolloin pystytään mittaamaan eristeen kuntoa laajemmin. Saatavilla on mittauslaitteita häviökertoimen, vuotovirran, eristyksen spektroskopian ja osittaispurkauksien mittaamiseksi. (IEEE Std 400.2 2013, 8-9)

VLF-mittauksessa mittausjännite nostetaan yleensä suuremmaksi kuin kaapelin käyttöjännite. Menetelmällä saadaan esille alkavat viat kaapelissa, mitkä eivät näkyisi pelkästään käyttöjännitteellä mitattaessa. Nimellistä suuremmilla mittausjännitteillä kaapelin eristyksessä voi tapahtua läpilyönti, jos eristys on riittävästi huonontunut. Häviökerroinmittaukset suositellaan suoritettavan $0,5 \cdot U_0$ portaissa aina $1,5 \cdot U_0$ asti. U_0 :lla tarkoitetaan nimellistä vaihejännitettä. Mittauksen aloittaminen nimellistä pienemmällä jännitteellä auttaa tunnistamaan pahasti ikäänäytyneen tai vaurioituneen kaapelin ennen kuin mittausjännite nostetaan suuremmaksi. Jokaisella jänniteportaalla on suositeltavaa suorittaa ainakin 6 mittausta ja pitää 10 sekunnin tauko mittausten välillä. Mittauksista lasketaan keskiarvo kaapelin eristyksen häviökertoimelle. (IEEE Std 400.2 2013, 7, 16)

4.2 Off-line osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausten havaitsemiseen on käytössä kaksi yleistä mittausmenetelmää, off-line ja on-line osittaispurkausmittaukset (IEEE Std 400.3 2006, 13). Suurimpana erona mittausten välillä on on-line mittauksen suorittaminen kaapelin normaalin käytön aikana. Off-line mittaus vaatii käyttökeskeytyksen, jotta mitattava kaapeli saadaan jännitteettömäksi. Tällöin myös tarvitaan ulkoinen jännitelähde syöttämään kaapeliin mittausjännite, jolloin off-line mittauslaitteen koko ja hinta kasvavat.

Osittaispurkauksia pystytään havaitsemaan sähkömagneettisesti tai akustisesti. Akustista tunnistamista käytetään yleensä SF₆ -eristekaasullisten katkaisijoiden sekä muuntajien ja kaapelitarvikkeiden osittaispurkauksien havaitsemisessa. Sähkömagneettista tunnistamista käytetään kaapeleiden osittaispurkausten havaitsemisessa. Mittauslaite kytketään kaapeliin kapasitiivisesti tai induktiivisesti. (IEEE Std 400.3 2006, 15)

Kaapeleiden toimintaympäristöstä aiheutuu osittaispurkausmittausta haittaavaa ulkopuolista kohinaa. Kohinan suodattaminen analogisilla tai digitalisilla menetelmillä parantaa huomattavasti purkaushavaintojen luotettavuutta. Pahimmassa tapauksessa ulkopuolinen kohina voi peittää alkavan vian kaapelissa. Tällöin mitaustuloksien väärä tulkitseminen voi aiheuttaa odottamattoman keskeytyksen kaapelin vikaantuessa. Vastaavasti mitaustuloksien väärä tulkitseminen ehjän kaapelin tilanteessa aiheuttaa tarpeettoman kaapelin korjaustoimenpiteen. (IEEE Std 400.3 2006, 16)

4.2.1 Kulkuaikamittaus

Osittaispurkausten havaitsemisen lisäksi mittauksella pystytään määrittelemään purkauksien sijainti kaapelissa. Sijainnin määrittelemiseen perustuu kulkuaika- tai taajuusaluemittaukseen. Taajuusaluemittaus soveltuu sekä off-line, että on-line mittauksiin. Kulkuaikamittausta käytetään enemmän off-line mittauksen yhteydessä, mutta on-linella se on mahdollista usealla ylimääräisellä sensorilla. (IEEE Std 400.3 2006, 16-17)

Kulkuaikamittaus perustuu osittaispurkauksen aiheuttaman jännitepulssin mittaamiseen. Jännitepulssi jakaantuu kahdeksi samanlaiseksi pulssiksi, jotka kulkevat eri suuntiin purkauspaikasta katsoen. Ensimmäisenä mittauslaitteelle saapuu pulssi, mikä lähti purkauspaikalta suoraan kohti mittauspistettä. Vastakkaiseen suuntaan lähtevä pulssi heijastuu kaapelin päästä mittauslaitteelle toisena pulsina. Saapuvien pulssien aikaeron ja pulssien etenemisnopeuden perusteella pystytään osittaispurkauksen purkauspaikka arvioimaan. Mittauspäästä purkauspaikan etäisyys x on

$$x = L_t - \frac{v_p t_1}{2}, \quad (5)$$

jossa L_t on kaapelin pituus, v_p on pulssin etenemisnopeus ja t_1 on pulssien aikavero. (Keränen ym. 2018, 29.)

4.2.2 DAC- ja VLF-osittaispurkausmittaus

DAC-osittaispurkausmittauksessa mitattava kaapeli ladataan tasajännitelähteellä haluttuun jännitetasoon ja kaapeli kytketään mittauslaitteiston ilmasydämisen keulan kanssa rinnakkain. Mittauksesta saadaan selville vaihekohtaisesti osittaispurkausten suuruus ja sijainti, syttymis- ja sammumisjännitteet sekä osittaispurkausten muutos vaimenevan jännitteen funktiona. Syttymis- ja sammumisjännitteiden selvittäminen perustuu vaimenevan mittausjännitteen tulkitsemiseen erilaisten osittaispurkausmallien avulla. (IEEE Std 400.4 2015, 20)

Pienitaajuisen VLF-vaihtojännitelähteen lisäksi osittaispurkausmittaus vaatii lisälaitteen purkauksien mittaamiseksi. Suositeltavaa on nostaa hitaasti mittausjännitettä ja samalla seurata purkauksien syntymistä. Jännitetasoa, jolla purkaukset syttyvät, kutsutaan syttymisjännitteeksi. Mittaukset suositellaan suoritettavan $1,5 U_0$ jännitetasolle asti. Purkaukset voivat syttyä nimellistä pienemmällä jännitteellä ja purkausten näennäistaso voi olla suuri. Tällöin mittausta ei suositella jatkettavan nimellistä suuremmille jännitteille, koska kaapeliyhteydessä voi tapahtua sähköpuun kautta läpilyönti. Lopuksi mittausjännite lasketaan hitaasti siihen sammumisjännitteeseen asti, että purkaukset sammuvat. (IEEE Std 400.2 2013, 24)

4.3 On-line osittaispurkausmittaukset

On-line osittaispurkausmittaukset suoritetaan jännitteiselle kaapelille, jolloin käytökeskeytystä ei tarvita. Ehtona on vain, että mittalaite tai sen anturit voidaan asentaa jännitetyönä kaapeliin. Käytönaikaisen mittauksen etuna on, että kaapelin kuormittamista muuttamalla voidaan vaikuttaa osittaispurkauksiin (IEEE Std

400.3 2006, 14). Tällöin nähdään kuormituksen ja lämpötilan vaihteluiden vaikutus osittaispurkauksiin. Haittapuolena on mittausjännitteen säätämättömyys. Offline mittauksilla saadaan laajasti tietoa purkauksista kaapelin nimellisjännitettä pienemmillä tai suuremmilla arvoilla. On-line mittauksella havaitaan vain käyttöjännitteellä tapahtuvat purkaukset, jolloin mahdollisia alkavia vikoja ei vielä havaita.

Pry-Cam Portable on Prysmian Groupin kehittämä mittalaite sähköverkon komponenttien käytönaikaiseen osittaispurkausmittaukseen. Mittalaitteella pystytään mittaamaan suur- ja keskijännitteisiä kaapelijärjestelmiä, muuntajia, kytkinlaitteistoja ja sähkökoneita. Mittaus perustuu osittaispurkausten aiheuttaman sähkömagneettikentän mittaamiseen sensorin avulla. Mittalaite täytyy vain saada mitattavan kohteen lähelle esimerkiksi jännitetyösauvan avulla. Mittalaite on langattomasti yhteydessä päätelaitteeseen, johon mittausdata siirtyy reaaliaikaisesti. Päätelaitteella pystytään ohjaamaan mittalaitetta sekä tarkastelemaan ja prosessoimaan mittausdataa. (Candela, Stefano & Valentini 2014, 3)

Osittaispurkauksia voidaan mitata myös jatkuva-aikaisesti mitattavan kohteen käytön aikana. Pry-Cam Grids on mittalaite sähköverkon komponenttien jatkuva-aikaiseen mittaamiseen. Anturi ja integroitu yksikkö muodostavat mittalaitteen, jonka asentaminen mittauskohteeseen pystytään tekemään ilman käyttökeskeytystä. Mittalaite mittaa ja analysoi osittaispurkauksia reaaliaikaisesti ja hälyttää poikkeamista purkauksissa. Mittausdata tallentuu tietokantapalveluun, josta sitä voi tarkastella jälkikäteen. Mittausdatasta nähdään osittaispurkauksien kehittymisen ajan suhteen, jolloin mittauskohteen kunnossapitotoimenpiteisiin voidaan varautua etukäteen. (Prysmian Group 2019)

5 RAJA-ARVOT

Häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksista saadaan paljon mittaustuloksia erilaisista kaapelijärjestelmistä. Mittausdatasta on oleellista poimia kaapelijärjestelmän kunnosta kertovat arvot, jotta järjestelmän elinkaari saadaan selville. Häviökerroinmittaus antaa suhdeluvun resistiivisen ja kapasitiivisen virran välillä. Mittaustulokset esitetään yleensä tuhannesosina niiden pienuudesta johtuen. Osittaispurkausmittauksen tulokset ilmoitetaan yleensä pikocoulombina (pC). Mittaustuloksille voidaan määrittellä raja-arvot, joiden perusteella kaapelijärjestelmä pystytään kuntoluokittelemaan. Tärkeä on huomioida, että raja-arvot ovat vain yksi kaapelijärjestelmän kunnosta kertova tekijä. Mittausdatan laajempi analysointi kertoo enemmän kaapelijärjestelmän kunnosta.

5.1 Häviökerroinmittaus

Häviökerroinmittauksesta yleisimmät saatavat arvot ovat TD (tangent delta), DTD (differential tangent delta) ja TDTS (tangent delta temporal stability). Mittauksesta saadaan TD -arvot $0,5 \cdot U_0$, U_0 ja $1,5 \cdot U_0$ mittaussännitteillä. Raja-arvoa varten voidaan laskea mittaustuloksien keskiarvo U_0 jännitteelle. DTD kuvaa häviökerroimen muutosta jännitteen noustessa $0,5 \cdot U_0$ ja $1,5 \cdot U_0$ välillä. TDTS kuvaa häviökertoimen muutosta ajan suhteen tietyllä mittaussännitteellä ja mittaustuloksista voidaan laskea keskihajonta U_0 jännitteelle. Nämä kolme arvoa kertovat kaapelijärjestelmän kunnosta ja raja-arvojen avulla saadaan järjestelmälle seuraavanlaiset kuntoluokitukset. (IEEE Std 400.2 2013, 16-18)

- A) Ei edellytä toimenpiteitä.
- B) Edellyttää tarkempaa tutkimusta.
- C) Vaatii toimenpiteitä.

Kuntoluokka A tarkoittaa, että kaapelijärjestelmä voidaan palauttaa käyttöön. Mittaus voidaan suorittaa myöhemmin uudestaan, jolloin saataisiin dataa häviökerroimen kehityksen seuraamiseksi. Kuntoluokka B vaatii lisätietoa kaapelijärjes-

telmän kunnan arvioimiseksi. Kaapelijärjestelmän aiemmalla vikahistorialla tai lisämittauksilla voidaan järjestelmän kunto arvioida luokkaan A tai C. Kuntoluokka C kertoo kaapelijärjestelmän epätavallisen suurista häviökerroinlukemista, mikä voi olla merkki eristyksen huonosta kunnosta. Vikakohta suositellaan korjaamaan tai korvaamaan uudella heti mittauksen jälkeen tai lähitulevaisuudessa. (IEEE Std 400.2 2013, 16-18)

Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laboratorion, Dekra Industrial Oy:n ja Prysmian Finland Oy:n yhteistyönä tehdyssä tutkimushankkeessa ”Keskiännitetelekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla” annetaan häviökerroinmittauksille raja-arvoestimaatit pohjautuen standardiin IEEE Std 400.2. Standardin raja-arvot ovat huomattavasti suurempia kuin tutkimuksessa määritellyt Suomen kaapeleille paremmin soveltuvat raja-arvoestimaatit. Standardin raja-arvot on määritelty Pohjois-Amerikassa ikääntyneiden kaapeleiden kunnossapitotestauksien datan perusteella. Taulukossa 1 esitetään tutkimushankkeen raja-arvoestimaatit 20 kV:n AHXAMK-W-kaapelijärjestelmälle. Koko otos sisältää kaikki mitatut kaapelijärjestelmät ja suppeassa otoksessa on poistettu kaapelijärjestelmät, jotka on mitattu suhteellisen kosteuden ollessa yli 94 %.

TAULUKKO 1. Raja-arvoestimaatit 20 kV:n AHXAMK-W-kaapelijärjestelmälle. (Keränen ym. 2018, 80)

Kunto- luokka	VLF-TDTS (10^{-3})		VLF-DTD (10^{-3})		VLF-TD (10^{-3})	
	Koko otos	Suppea otos	Koko otos	Suppea otos	Koko otos	Suppea otos
A	< 0,062	< 0,048	< 1,2	< 1,2	< 1,9	< 1,7
B	0,062...0,23	0,048...0,17	1,2...4,2	1,2...2,7	1,9...13,5	1,7...4,5
C	> 0,23	> 0,17	> 4,2	> 2,7	> 13,5	> 4,5

TDTS on eristyksen heikkenemiselle herkin tunnusluku ja TD vähiten herkkä (IEEE Std 400.2 2013, 18). Raja-arvoestimaateista huomataan, että ilman suhteellisella kosteudella on ollut vaikutusta arvoihin. Kostealla ilmalla (koko otos) tehdyissä mittauksissa mittaustulokset ovat suuremmat kuin kuivemmalla ilmalla tehdyt mittaukset. Kaapelijärjestelmän kunnosta saadaan virheellistä tietoa ympäristöolosuhteiden vaikuttaessa mittaustuloksiin. Mittausajankohta on hyvä ajoittaa ilman suhteellisen kosteuden ollessa matalalla. Taulukossa 2 esitetään tutkimushankkeen raja-arvoestimaatit 20 kV:n APYAKMM-kaapelijärjestelmälle.

TAULUKKO 2. Raja-arvoestimaatit 20 kV:n APYAKMM-kaapelijärjestelmälle. (Keränen ym. 2018, 81)

Kuntoluokka	VLF-TDTS (10^{-3})		VLF-DTD (10^{-3})		VLF-TD (10^{-3})	
	Koko otos	Suppea otos	Koko otos	Suppea otos	Koko otos	Suppea otos
A	< 0,4	< 0,15	-2,7...4,5	-3,4...2,5	< 22	< 15
B	0,4...1,8	0,15...0,75	-10...-2,7 4,5...10	-8,5...-3,4 2,5...6,3	22...54	15...29
C	> 1,8	> 0,75	< -10 > 10	< -8,5 > 6,3	> 54	> 29

Muovieristeiseen AHXAMK-W-kaapelijärjestelmään verrattuna öljypaperieristeiselle APYAKMM-kaapelijärjestelmälle on suuremmat raja-arvoestimaatit. Muovieristeisissä kaapelijärjestelmissä resistiivinen virta on hyvin pieni verrattuna kapasitiiviseen virtaan, jolloin mittaustuloksetkin ovat pieniä (Keränen ym. 2018, 29).

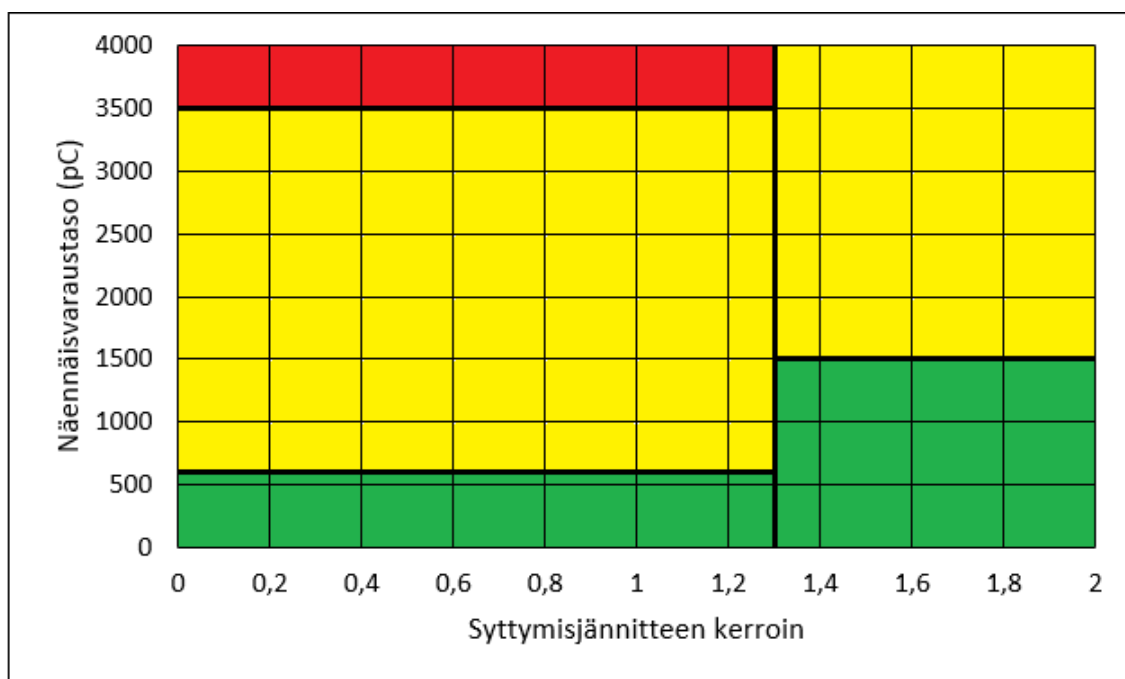
5.2 Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkausmittauksille raja-arvot määräytyvät näennäisvaraustasojen ja syttymisjännitteiden avulla. Kaapelijärjestelmälle vaarallisempia ovat purkaukset, jotka syttyvät järjestelmän nimellistä pienemmillä jännitteillä. Tällöin purkauksia tapahtuu jatkuvasti kaapelijärjestelmän ollessa käytössä. Nimellistä suuremmilla syttymisjännitteillä havaitaan alkavat viat, jolloin voidaan laatia kaapelijärjestelmälle toimenpiteet kunnon varmistamiseksi. Taulukossa 3 esitetään toimenpiteet kuntoluokille. Taulukossa on määriteltynä syttymisjännitteen mukaan (PDIV) toimenpiteet kuntoluokille.

TAULUKKO 3. Toimenpiteet kuntoluokille. (Neier 2015, 79-80)

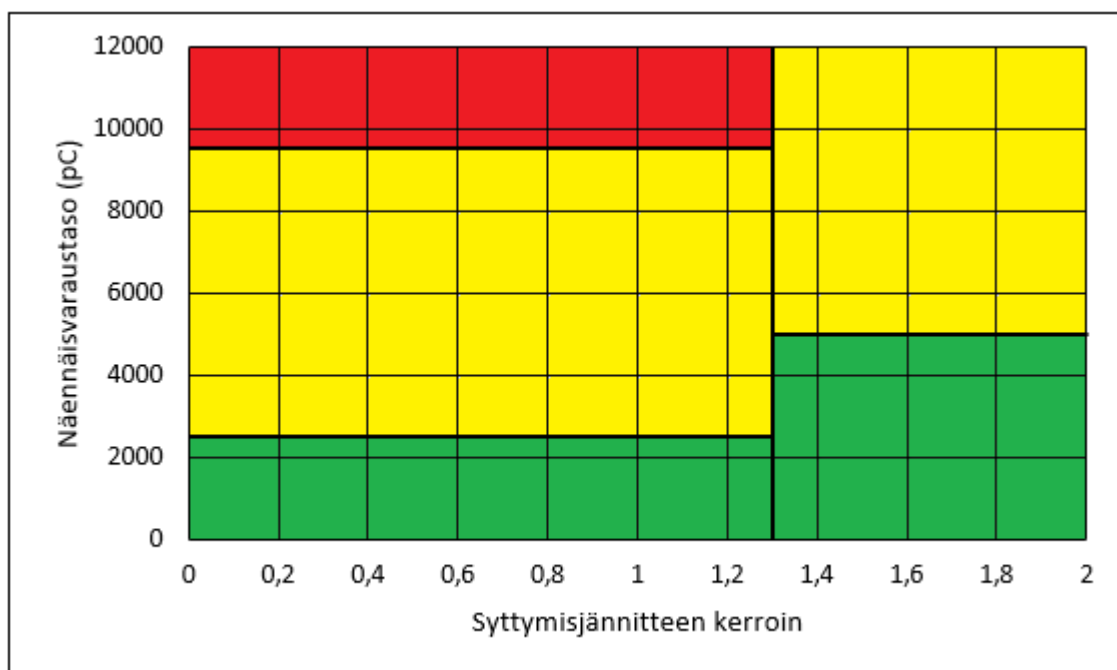
Kuntoluokka	PDIV < 1,3	PDIV > 1,3
	Purkaukset sallituissa rajoissa	Purkaukset sallituissa rajoissa
	Uusintamittaus 1 vuoden päästä	Uusintamittaus 2 vuoden päästä
	Paikannus ja korjaus	Paikannus ja korjaus

Kaapelijärjestelmälle vaarallisemmassa kategoriassa ($PDIV < 1,3 \cdot U_0$) syttymisjännite on aseteltu hieman suuremmaksi kuin nimellinen jännite. Kaapelijärjestelmien jännitteet voivat nousta hetkellisesti nimellistä jännitettä suuremmiksi esimerkiksi erottimien auki ohjaamisesta johtuen. Tällöin purkaukset voivat syttyä, jos syttymisjännite on nimellisjännitettä hieman suurempi. Harvoissa tapauksissa, missä purkauksen sammumisjännite on pienempi kuin syttymisjännite, voivat purkaukset jäädä aktiivisiksi jännitteen laskiessa takaisin nimelliseksi (Neier 2015, 78). Raja-arvot muovieristeisille kaapelijärjestelmille esitetään kuviossa 6.



KUVIO 6. Raja-arvot muovieristeisille kaapelijärjestelmille. (Neier 2015, 79)

Kuviossa on esitetty raja-arvot samoilla syttymisjännitteen rajoilla ja kunto- luokilla kuin taulukossa 3 määritellään. Muovieristeisissä kaapelijärjestelmissä osittaispurkauksia ilmenee ensisijaisesti kaapelivarusteissa. Harvemmin havaitaan mittauksissa eristeessä tapahtuvia purkauksia, koska purkaukset voivat johdattaa sähköpuun kautta vikakeskeytykseen muutamissa päivissä tai viikoissa. Kuvion 6 raja-arvot kuvaavat siis kaapelivarusteiden kuntoa. Kaapelieristeen tapauksessa purkaukset eivät saisi ylittää 100 pC. Uusien kaapelien tehdaskoetuksissa raja-arvona on alle 5 pC (IEC 60502-2 2014, 33). Kuviossa 7 esitetään raja-arvot öljypaperieristeisille kaapelijärjestelmille.



KUVIO 7. Raja-arvot öljypaperieristeisille kaapelijärjestelmille. (Vertiv n.d.)

Öljypaperieristeisille kaapelijärjestelmille osittaispurkaukset ovat usein kaapelirakenteesta johtuva ominaisuus. Tällöin purkauksia tapahtuu koko kaapelijärjestelmän pituudelta hajanaisesti. Purkausten keskittyminen tietyille osuudelle järjestelmässä voi kertoa kaapelivauriosta. Öljystä kuivuneet eristekohdat näkyvät suurempina purkaustasoina mittauksessa ja raja-arvona voidaan pitää noin 9000 pC. (Neier 2015, 80)

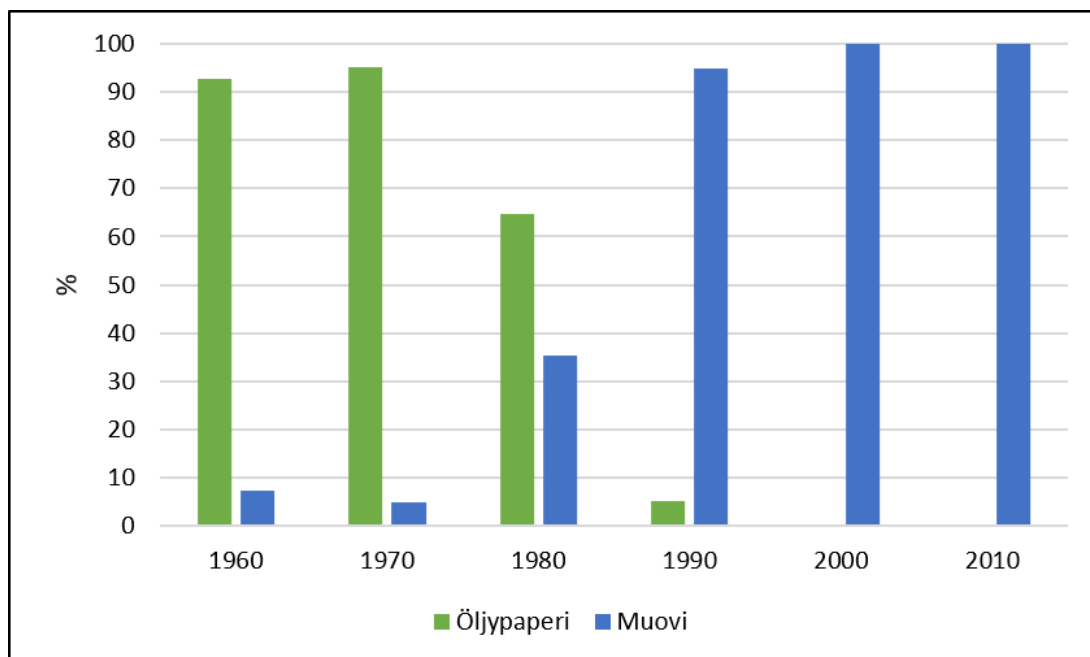
6 KAAPELIJÄRJESTELMÄ

Elenian keskijännitteinen kaapelijärjestelmä on lähtenyt rakentumaan 1960-luvulta. Vanhimmat keskijännitekaapelit ovat öljypaperieristeisiä ja nykyään asennettavat kaapelit ovat muovieristeisiä, jolloin kaapelijärjestelmässä on sekaisin kahta eri pääeristykseltään olevaa kaapelityyppiä. Öljypaperieristeisien kaapelien osuus koko kaapelimäärästä on kuitenkin pieni. Kunnonvalvontamittauksissa on otettava huomioon, että mitattava kohde voi sisältää molempia kaapelityyppejä. Kaapelityypit ovat ominaisuuksiltaan ja kaapelivarusteiltaan erilaisia, jolloin mittaustulokset eroavat toisistaan.

Elenian keskijännitteinen jakeluverkko sijaitsee pääosin kaupunkialueiden ulkopuolella maaseutualueilla. Maaseutualueilla on pitkiä runkoyhteyksiä, joista haarautuu paikallisia haarayhteyksiä. Kaapeliyhteyksien priorisointi kunnonvalvontamittauksille on tehtävä yhteyksien kriittisyyden perusteella. Tällöin varmistetaan, että suuritehoisimmat yhteydet, joiden vaikutus sähkönjakelun toimitusvarmuuteen on suurin, ovat kunnossa.

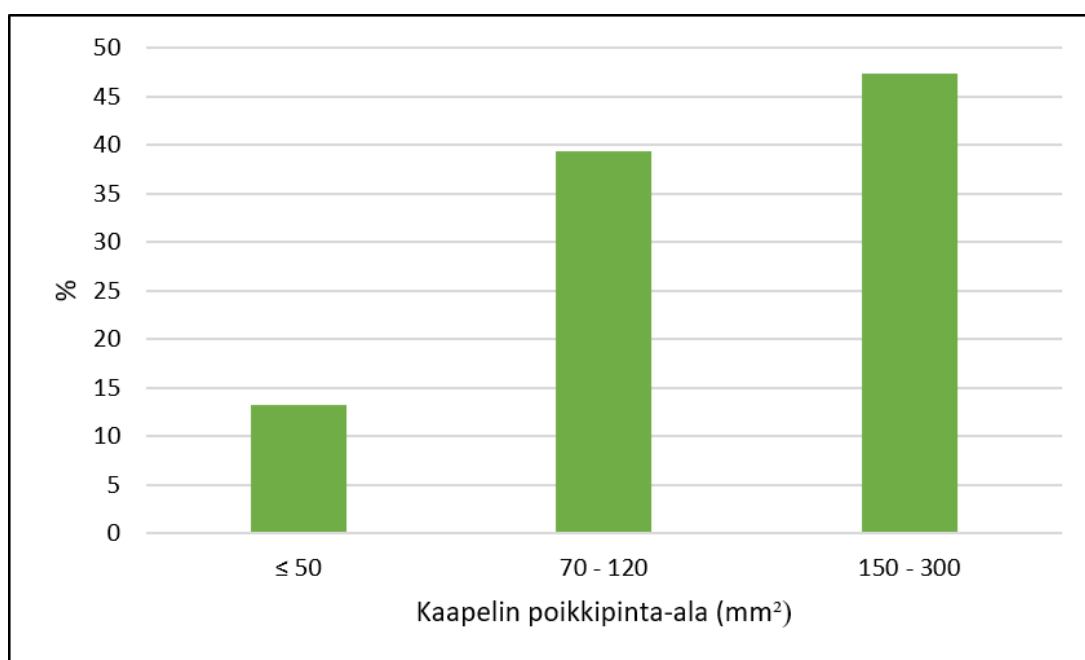
6.1 Kaapelijakauma

Elenian omistuksessa ja hallinnassa on keskijännitteisiä kaapeleita 1960-luvulta asti. Pääasiallisena eristeenä käyttöönotetuissa kaapeleissa 1960-luvulta 1980-luvun loppuun asti on käytetty öljypaperia. 1980-luvulla muovin käyttäminen kaapelieristeenä on lähtenyt kasvamaan ja 1990-luvusta eteenpäin muovia käytetään eniten asennettavissa kaapeleista. Kuviossa 8 esitetään Elenian käytössä olevien keskijännitekaapeleiden eristysmateriaalit prosentteina vuosikymmen tasolla.



KUVIO 8. Asennettujen keskijännitekaapelien eristemateriaali eri vuosikymmenillä. (Elenia 2018)

Kunnonvalvontamittaukset kohdennetaan 1990-lukua vanhempiin kaapelijärjestelmiin. Mitattavaksi tulee öljypaperieristeisiä ja muovieristeisiä kaapelijärjestelmiä, jolloin oikeiden mittausmenetelmien kohdentaminen on tärkeää. Kuviossa 9 esitetään käytössä olevien keskijännitemaakaapelien poikkipinta-alat prosentteina koko keskijännitekaapelimäärästä.



KUVIO 9. Keskijännitekaapelien poikkipinta-alat prosentteina kaapelimäärästä. (Elenia 2018)

Suurempi poikkipinta-alaisissa keskijännitekaapeleissa kulkee enemmän tehoa, kuin pienemmissä. Suurien keskijännitekaapeleiden kunnonhallinta on tärkeätä, koska ennen aikainen vaurioituminen voi aiheuttaa laajan käyttökeskeytyksen.

6.2 Kaapeleiden priorisointi

Keskijänniteyhteydet voidaan luokitella kolmeen yhteyden tärkeyttä kuvaavaan luokkaan. Tärkeimpinä ovat runkoyhteydet, mitkä lähtevät sähkö- sekä kytkinasemilta ja haarautuvat eri alueille. Runkoyhteydet siirtävät suurimman määrän tehoa, koska haarayhteyksien tehonsiirto tapahtuu runkoyhteyksiä pitkin. Runkoyhteydet alkavat tyypillisesti kaupunkialueilta ja jatkuvat pitkälle maaseutualueille. Runkoyhteys haarautuu useaan haarayhteyteen, jolloin runkoyhteydessä tapahtuva vikakeskeytys voi aiheuttaa laajan sähkökeskeytyksen koko runkoyhteyden muuntopiireille. Sähkönjakelun toimitusvarmuutta runkoyhteyksillä parantavat rengasyhteydet, jolloin vikakeskeytyksen aikana osaan runkoyhteydestä voidaan syöttää sähköä rengasyhteyden kautta. Kaupunkialueet ovat pitkälti kaapeloitu useilla rengasyhteyksillä, jolloin maakaapeliverkon viat aiheuttavat lähinnä paikallisia sähkökeskeytyksiä. Maaseutualueella rengasyhteyksiä on rakennettu harvempaan tai kahden kaupunkialueen välinen yhteys ei ole vielä valmiina.

7 MITTAUSTEN KOHDENTAMINEN

Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaukset soveltuvat muovi- ja öljypaperieristeisten keskijännitekaapeleiden ja niiden varusteiden mittaamiseen. Mittauksilla on erilaisia ominaisuuksia, jolloin toinen mittauksista voi nousta tietyissä tilanteissa toista paremmaksi. Uusien kaapelijärjestelmien tapauksessa mittauksia suositellaan tehtäväksi ennen järjestelmän käyttöönottoa. Vanhoille kaapelijärjestelmille on harkittava mittauksen suorittamista järjestelmän kunnon varmistamiseksi.

7.1 Uudet kaapelijärjestelmät

Uusille maakaapeleille on suositeltavaa tehdä käyttöönottomittaus ennen niiden kytkemistä sähköverkkoon. Tällöin varmistetaan koko kaapelijärjestelmän kunto ennen sen käyttöönottoa. Kaapelivarusteiden asentamisessa tapahtuneet virheet voivat aiheuttaa osittaispurkauksia tai kaapelin vaippa voi vaurioitua asennuksen aikana. Asennusvirheet voidaan havaita kunnonvalvontamittauksilla, jolloin ne voidaan korjata ennen käyttöönottoa. Asennusvirheestä johtuvat osittaispurkaukset voivat aiheuttaa yllättävän käyttökeskeytyksen vuosien päästä, kun purkaukset ovat kehittyneet sähköpuuksi eristeessä.

Off-line mittausmenetelmä soveltuu paremmin uusien kaapelijärjestelmien käyttöönottomittaukseksi, koska kaapelia ei tarvitse erikseen ottaa jännitteettömäksi. Häviökerroinmittauksella saataisiin koko kaapelijärjestelmän kuntoa kuvaavat lukemat, mutta vikaa ei pystytä paikantamaan. Uusien kaapeleiden tapauksessa mahdolliset osittaispurkaukset johtuvat asennusvirheestä tai kaapelin vaurioitumisesta. Tällöin vika sijaitsee esimerkiksi huonosti tehdyssä kaapelijatkoksessa. Osittaispurkausmittauksella pystytään paikantamaan purkauksien sijainti, jolloin viankorjaus on täsmällisempää. Off-line osittaispurkausmittaus soveltuu uusien maakaapeleiden käyttöönottomittaukseksi paremmin kuin häviökerroinmittaus.

7.2 Öljypaperieristeiset vanhat kaapelijärjestelmät

Kosteuspitoisuuden lisääntyminen ja lämpötilavaihtelujen aiheuttama öljyn liikkuminen ovat öljypaperieristeisten kaapelien tyypillisimpiä ikääntymismekanismia. Öljyn liikkuminen aiheuttaa eristeen kuivumista, jolloin näissä kohdissa osittaispurkauksien suuruus kasvaa. Osittaispurkaukset ovat myös ominaista öljypaperieristeisille kaapelijärjestelmille, jolloin mittausdatan oikea tulkitseminen on tärkeää. Osittaispurkausmittaus ei kuitenkaan havaitse alkavaa kosteuden lisääntymistä kaapelissa (Keränen ym. 2018, 119). Häviökerroinmittauksella yleensä alkuvaiheessaan olevatkin kosteusvauriot voidaan havaita. Kosteus heikentää kaapelin eristettä ja sen läpilyöntikestävyttä. Häviökerroinmittaus kertoo eristeen kunnosta, joten mittaus soveltuu paremmin öljypaperieristeisille kaapeleille. Laajemman kuvan kaapelijärjestelmän kunnosta saadaan suorittamalla mittaukset molemmilla menetelmillä. Tällöin on huomioitava mittauskustannuksien ja -aikojen kasvaminen.

Off-line häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset pystytään suorittamaan VLF- tai DAC-menetelmällä. DAC-mittaus käyttää vaimenevaa sinimuotoista jännitettä, jonka taajuuteen vaikuttaa mitattavan kaapelin kapasitanssi. VLF-mittauksessa jännitelähde syöttää pienitaajuista vaihtojännitettä mitattavaan kaapeliin. Molempien mittausmenetelmien heikkoutena on, ettei mittauksia voida suorittaa verkon nimellisellä 50 Hz:n taajuudella. Molempien mittauksien etuna on mittausjännitteen säädettävyyden. Mittaukset voidaan aloittaa nimellistä alhaisemmalla mittausjännitteellä, jolloin pahasti vaurioituneet mittauskohteet havaitaan heti ja mitausta ei tarvitse suorittaa loppuun. Tällöin voidaan välttyä esimerkiksi mittauskohteen lopulliselta vaurioitumiselta nimellistä suuremmalla mittausjännitteellä. Nimellistä suuremmat mittausjännitteet mahdollistavat alkavien vaurioiden havaitsemisen, joita ei välttämättä nimellisellä mittausjännitteellä havaittaisi.

7.3 Muovieristeiset vanhat kaapelijärjestelmät

Vesipuiden syntyminen muovieristeisiin kaapeleihin on yksi niiden ongelma. Häviökerroinmittaus pystyy yleensä havaitsemaan alkavat vesipuuongelmat kaapelissa. Suomessa muovikaapelit otettiin käyttöön myöhäisemmässä vaiheessa,

jolloin vesipuut eivät ole olleet Suomessa ongelma (Keränen ym. 2018, 119). Häviökerroinmittaus antaa muovieristeisille kaapelijärjestelmille hyvin pieniä mitaustuloksia, joiden erottaminen häiriötekijöistä on haastavaa. Häviökerroinmittauksen tuloksena saadaan yleiskuva koko kaapelijärjestelmän kunnosta, mutta vian paikantaminen ei ole mahdollista. Osittaispurkaukset syttyvät yleensä huolimattomasti tehdyissä kaapelivarusteissa tai ulkopuolisen mekaanisen rasituksen seurauksena kaapelieristeessä, jolloin vikapaikan paikannettavuus on tärkeätä. Off-line osittaispurkausmittaus soveltuu hyvin muovieristeisien kaapelijärjestelmien kunnan mittaamiseen.

Kaapelijärjestelmät, joihin käyttökeskeytyksen ottaminen on haasteellista, voidaan mitata on-line osittaispurkausmittauksella. Tällöin muuntopiirien asiakkaille ei aiheudu mittaamisesta käyttökeskeytystä. On-line mittauksen perusteella voidaan arvioida mittauskohteen tarve ominaisuuksiltaan laajemmalle off-line mittaukselle. Haarayhteyksien mittaaminen suositellaan tehtäväksi on-line mittauksella.

8 KUNNOSSAPITO-OHJELMA

Vanhojen kaapelijärjestelmien kunnonvalvontamittauksien systemaattisen suorittamisen avuksi on luotava kunnossapito-ohjelma. Ohjelmaan valitaan mittauskohteet erilaisten kriteerien perusteella. Kaikkia kaapelijärjestelmiä ei pystytä mittaamaan, jolloin järjestelmiä on priorisoitava tärkeysjärjestyksessä. Käytettävät mittausmenetelmät päätetään järjestelmäkohtaisesti. Mittaustulosten perusteella määritellään toimenpiteet mittauskohteiden kunnon varmistamiseksi. Mittaustulokset dokumentoidaan verkkotietojärjestelmään tarkisteltaviksi ja käsiteltäviksi.

8.1 Mittauskohteet ja -menetelmät

Mittauskohteet valitaan kaapelijärjestelmien asennusvuoden ja kriittisyyden perusteella. Kaapelijärjestelmistä tärkeimmät ovat runko- ja rengasyhteydet, joiden vikaantuminen voi aiheuttaa laajan vikakeskeytyksen. Toisaalta haarayhteyden vikaantuminen voi aiheuttaa pysyvän keskeytyksen siihen asti, että yhteys korjataan tai varasähkön syöttäminen järjestetään. Samalta alueelta on järkevä mitata useampi kaapeliyhteys kerralla, jolloin vältytään pitkiltä siirtymämatkoilta eri mittauskohteiden välillä. Mitattavat kaapelijärjestelmät valitaan niin, että kahden puistomuuntamon välinen järjestelmä saadaan jännitteettömäksi erottimien avulla. Puistomuuntamoiden muuntopiirien on jätävä jännitteelliseksi, koska tällöin asiakkaille ei aiheudu käyttökeskeytystä mittauksen suorittamisesta. Jännitettä on pystyttävä syöttämään muuntamoihin kahdesta suunnasta, jolloin kaapelijärjestelmä pystytään mittaamaan off-line menetelmällä. On-line menetelmää voidaan käyttää, jos kaapelijärjestelmää ei saada jännitteettömäksi ilman käyttökeskeytystä asiakkaille.

Kriittisimmät kaapeliyhteydet suositellaan mitattavaksi off-line häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Näin saadaan laaja kuva kaapeliyhteyden kunnosta ja mahdollisista jatkotoimenpiteistä. On-line osittaispurkausmittauksella voidaan suorittaa nopeasti useampi mittaus, jolloin saadaan peruskuva alueen kaapeliyhteyksien kunnoista.

Ennen mittausta on suositeltavaa suorittaa toimenpiteet, joilla parannetaan mitaustuloksien oikeellisuutta. Kaapelipäätteet on hyvä puhdistaa liasta ja varmistaa, että ne ovat ylipäättään kunnossa. Lika tai kosteus kaapelipäätteessä voi näkyä esimerkiksi häviökerroinmittauksessa suurempana häviökertoimena. Kaapelipäätteet suositellaan irrotettavan sähkökojeesta mittauksen ajaksi. Tällöin mahdolliset sähkökojeessa tapahtuvat osittaispurkaukset eivät näy mittauksessa. Lisäksi kaapelijärjestelmän ääripäissä tapahtuvat osittaispurkaukset ovat paikannettavissa kaapelipäätteeseen, kun sähkökojeiston mahdolliset purkaukset on mittauksesta rajattu pois.

8.2 Mittausten suoritus

Kunnonvalvontamittausten suorittamiseksi tarjolla on kolme erilaista tapaa. Mittaukset voidaan ostaa palveluna mittauksia tekevältä yritykseltä, mittalaitteet voidaan vuokrata omaan käyttöön mittauksien ajaksi tai mittalaitteet voidaan ostaa omaan käyttöön. Mittauspalvelun etuna on asiantuntija, joka mittaa ja analysoi mitaustulokset. Mittaustuloksista laaditaan yleensä mittausraportti, mihin on kirjattuna mitaustulokset ja arvio mittauskohteen kunnosta. Omilla tai vuokralaitteilla mittaukset ja mitaustulosten analysointi on suoritettava itse, vaikka kokemusta mittauksista ja analysoinnista ei välttämättä ole. Toisaalta mittausten suorittaminen omilla laitteilla on vapaampaa, jolloin mittauksia voidaan tehdä toisen toimenpiteen yhteydessä. Esimerkiksi puistomuuntamotarkastuksen yhteydessä voidaan hyvin suorittaa on-line osittaispurkausmittaukset.

Elenian sähköverkon suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitotyöt toteutetaan yhteistyössä urakoitsijakumppanien kanssa. Elenian tapauksessa suositeltava lähtökohta on mittausten suorittaminen mittauspalveluna. Suoritettaessa kunnonvalvontamittauksia palveluna, täytyy paikalla olla myös Elenian kumppani varmistamassa sähkötyöturvallisuus ja tekemässä erotustoimenpiteet mitattavalle kaapelille. Kunnossapitotyöt kumppaneiden kanssa suoritetaan kunnossapitoyksiköiden avulla, jolloin kunnonvalvontamittauksille on luotava oma yksikkönsä. Yksikköön sisältyisi mitattavan kohteen erottaminen jännitteettömäksi ja verkkoon takaisin kytkeminen, mahdollisen aggregaatin toimittaminen mittauspaikalle ja

sähköyöturvallisuudesta vastaaminen. Yksiköiden määrä sovitaan mitattavien kohteiden tai päivämittauksen perusteella.

Mittaustulosten perusteella kaapelijärjestelmän kunto arvioidaan ja määritellään mahdolliset jatkotoimenpiteet. Vaurioituneet kaapelivarusteet tai kaapeliosuudet voidaan korjauttaa nykyisillä rakentamis- ja kunnossapitoyksiköillä. Vaurioitunut kaapelijatkos tai kaapeliosuus voidaan korvata uudella kaapeliosuudella ja kahdella kaapelijatkoksella. Heikentyneitä lämpökutistepäätteitä voidaan lämpökäsitellä uudelleen.

Kunnonvalvontamittauksia on hyvä suorittaa vuosittain erikseen valituille ikään-tyneille kaapelijärjestelmille niiden kunnon varmistamiseksi. Luvun 5 raja-arvoes-timaateista huomataan, että ainakin häviökerroinmittauksille ilman suhteellisella kosteudella on vaikutusta mittaustuloksiin. Mittaukset kannattaa ajoittaa kesä-ajalle ja päiville, jolloin ilman suhteellinen kosteus on matala. Näin ehkäistään ympäristöolosuhteiden vaikutusta mittaustuloksiin. Kesä on myös urakoitsijoille hyvää aikaa olla mukana mittauksissa. Alkutelvella ja keväällä lumi vaikeuttaa oleellisesti kohteisiin pääsemistä ja syksyllä verkonrakennuksen kiireet vievät ai-kaa mittauksilta.

8.3 Mittaustulosten dokumentointi

Mittaustulokset on dokumentoitava verkkotietojärjestelmään tulevaisuuden tarkastelua varten. Verkkotietojärjestelmässä kaapelit on dokumentoitu johto-osina ja johtoalkioina. Johto-osalla on kaikki kaapelin tiedot dokumentoituna ja verkkokartalla se piirtyy yleensä kaapelin alkupäästä loppupäähän suorana viivana. Johtoalkioina dokumentoidaan verkkokartalle kaapelin todellinen reitti maas-tossa. Mittaustulokset suositellaan dokumentoitavaksi kaapelin johto-osan kun-nossapitotietoihin. Häviökerroinmittauksista dokumentoidaan vaihekohtaisesti TDTS-arvot, mitkä kuvaavat häviökertoimen muutosta ajan suhteen tietyllä mit-tausjännitteellä. Tämä on kriittisin arvo, mikä kertoo kaapelin eristeen kunnosta. Muut mittauksen arvot voi tarvittaessa tarkistaa liitteeksi tallennetusta mittaus-pöytäkirjasta. Osittaispurkausmittauksista dokumentoidaan vaihekohtaisesti pur-kauksen suuruus ja syttymisjännite. Lisäksi mahdollinen mittausraportti on hyvä

dokumentoida liitteeksi. Kuviossa 10 esitetään esimerkki osittaispurkausmittauksen dokumentoinnista.

	Tehty /	Nimi	Arvo	Huomautus	Tekijä
6ð	04.08.2017 00:00:00	Kaapelin osittaispurkausmittaus	Kunnossa	Purkaukset todennäköisesti kojeistossa, kaapeliyhteys on hyvässä kunnossa.	
6ð	04.08.2017 00:00:00	Osittaispurkaus L1	522 pC		
6ð	04.08.2017 00:00:00	Osittaispurkaus L2	445 pC		
6ð	04.08.2017 00:00:00	Osittaispurkaus L3	1152 pC		
6ð	04.08.2017 00:00:00	Syttymisjännite L1	2.0 U0		
6ð	04.08.2017 00:00:00	Syttymisjännite L2	2.0 U0		
6ð	04.08.2017 00:00:00	Syttymisjännite L3	2.0 U0		
↑	04.08.2017 00:00:00	Osittaispurkausmittaus			

KUVIO 10. Esimerkki osittaispurkausmittauksen dokumentoinnista

Dokumentoinnissa on hyvä kirjata lyhyt sanallinen kuvaus kaapelijärjestelmän kunnosta. Tässä tapauksessa purkaukset on paikannettu sähkökojeistoon, jolloin itse kaapelijärjestelmä on hyvässä kunnossa. Jatkossa verkkotietojärjestelmästä pystytään hakemaan erilaisilla arvoilla halutut kaapelijärjestelmät esille. Esimerkiksi voidaan hakea kaikki kaapelijärjestelmät, joiden syttymisjännite on alle nimellisen jännitteen tai purkausten suuruudet ylittävät tietyn rajan. Kaikki tehdyt mittaukset näkyvät kunnossapitotietojen historiasta, jolloin mittauskohteen kunnan kehitystä voidaan seurata.

9 POHDINTA

Opinnäytetyössä tutkittiin eri kunnonvalvontamittausten soveltuvuutta keskijännitekaapeleiden kunnonhallinnassa. Tarve mittauksien aloittamiseksi on kasvanut, kun 1970-luvun ja sitä vanhemmat kaapelit alkavat tulla elinkaarensa loppuun. Sähkönjakelun toimitusvarmuuden kiristyminen osaltaan ohjaa sähköverkkoyhtiöitä ennakoivaan kunnonhallintaan. Osittaispurkaus- tai häviökerroinmittauksella pystytään arvioimaan kaapelijärjestelmien kuntoa. Molemmat mittaukset soveltuvat muovi- ja öljypaperieristeisien keskijännitekaapelien mittaamiseen, mutta häviökerroinmittauksen tuloksien tulkitseminen on haastavaa muovieristeisillä kaapeleilla. Off-line osittaispurkausmittauksen etuna on vikapaikan paikannettavuus kulkuaikamittauksella ja on-line mittauksessa mittauksen suoritettavuus käytön aikana jatkuva-aikaisesti tai kertaluontoisesti. Toimenpiteet kaapelijärjestelmien kunnon varmistamiseksi pystytään määrittämään paremmin, kun vikapaikka paikannetaan.

Opinnäytetyössä luotiin kunnossapito-ohjelma keskijännitekaapeleiden mittaamiseksi. Mittauskohteet valittiin ohjelmaan niiden kriittisyyden perusteella ja mittaukset päädyttiin suorittamaan mittauspalveluita tarjoavilta yrityksiltä. Mittauspalveluna saadaan asiantuntijan arvio kaapelin kunnosta, mitä voidaan verrata tässä työssä määritelyihin osittaispurkauksien raja-arvoihin. Raja-arvojen kehittäminen on mahdollista mittauksista saadun kokemuksen perusteella. Kunnossapito-ohjelman myötä vanhoja keskijännitekaapeleita aletaan mittaamaan muutamia kokonaisuuksia vuodessa. Mittauksista saadaan arvokasta tietoa kaapelin kunnosta, mitä voidaan käyttää hyödyksi seuraavien kaapeleiden mittaamisessa. Samalla muodostuu käsitys vanhan keskijännitteisen kaapeliverkon kunnon tilasta, mitä voidaan hyödyntää elinkaaren hallinnassa ja investointien suunnittelussa.

LÄHTEET

- Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. painos. Helsinki: Otatieto.
- Bergius, O. 2012. Implementation of on-line partial discharge measurements in medium voltage cable network. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- Candela, R., Stefano, A. & Valentini, M. 2014. PD measurements with Pry-Cam Portable. Tulostettu 26.2.2019. <https://pry-cam.com/en/resources/>
- Chmura, L., Gulski, E., Houtepen, R., Quak, B., Seitz, P. & Smit, J. 2011. Estimation of Dielectric Loss Using Damped ac Voltages.
- Elenia. 2018. Verkkotietojärjestelmän tietokanta.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki: Otatieto.
- Hampton, N. 2016. Chapter 2: Medium Voltage Cable System Issues. Cable Diagnostic Focused Initiative. Raportti.
- IEC 60502-2. 2014. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). International Electrotechnical Commission.
- IEEE Std 400.3. 2006. IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment. IEEE Standards Association.
- IEEE Std 400.2. 2013. IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz). IEEE Standards Association.
- IEEE Std 400.4. 2015. IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage. IEEE Standards Association.
- Kao, K. 2004. Dielectric Phenomena in Solids. Boston: Academic Press cop.
- Keränen, J., Muranen, S., Pakonen, P. & Verho, P. 2018. Keski-jännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Tampereen teknillinen yliopisto. Loppuraportti.
- Neier, T. 2015. Cable diagnostic in MV underground cable networks. Theoretical background and practical application. Tulostettu 6.2.2019. <https://www.baur.eu/en/media-center/media-center/brochures-inpage>
- Neier, T., Tian, Y. & Wong, B. 2016. Practical Experience using VLF Tan Delta and Partial Discharge Measurement in Medium Voltage Cable. China International Conference on Electricity Distribution.

Nexans. 2012. Medium voltage joints. Catalogue. Tulostettu 28.2.2019.
<https://www.nexans.co.uk>

Nexans. 2017. Medium voltage terminations. Catalogue. Tulostettu 28.2.2019.
<https://www.nexans.co.uk>

Prysmian Group. 2019. Pry-Cam. Breakthrough Technology for Condition Assessment and Asset Management. Esite. Tulostettu 8.3.2019. <https://pry-cam.com/en/resources/>

Reka Cables. N.d. Medium voltage power cable HXCMK 20 kV. Product info. Tulostettu 20.2.2019. <https://www.rekacables.com/medium-and-high-voltage-cable/medium-voltage-cable/medium-voltage-power-cable-hxcmk-20-kv>

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Luettu 8.4.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

Thue, W. 2017. Electrical Power Cable Engineering. 3. painos. Florida: CRC Press.

Vertiv. N.d. Partial Discharge Testing for Cables. Luettu 7.3.2019.
<https://www.vertiv.com/en-us/services-catalog/services/performance-optimization-services/partial-discharge-testing-for-cables>

Warner, D. 2005. Electrical Power Engineer's Handbook. 2. painos. Boston: Newnes.