

Samuli Niku

**PD-MITTAUSTEN KÄYTÖN MONIPUOLISTAMINEN KESKIJÄNNI-
TEKAAPELEISSA**

PD-MITTAUSTEN KÄYTÖN MONIPUOLISTAMINEN KESKIJÄNNI- TEKAAPELEISSA

Samuli Niku
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-oh-
jelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Samuli Niku
Opinnäytetyön nimi: PD-mittausten käytön monipuolistaminen keskijännitekaapeleissa
Työn ohjaaja: Ismo Pitkänen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2021
Sivumäärä: 45 + 4 liitettä

Opinnäytetyö tehtiin Voimatel Oy:lle. Työn tavoitteena oli tutkia osittaispurkausmittauksia keskijänniteverkossa käytännössä ja teoreettisesti. Työssä käytettiin viitteenä VLF- ja DAC-tekniikalla tehtyjä mittauksia Megger Group Ltd:n osittaispurkausmittarilla. Työllä haluttiin monipuolistaa Voimatel Oy:n käytössä olevan mittarin käyttökohteita jakeluverkossa sekä selvittää eri mittaustekniikkojen käyttökohteita, koska verkostoalan osittaispurkausmittausten kysynnän odotetaan lisääntyvän.

Työssä käsitellään aluksi jakeluverkon muovieristeisiä maakaapelirakenteita ja niiden yleisimpiä komponentteja, kuten kaapelijatkot ja päätteet. Sähkökentän muodostumista ja sen vaikutusta kaapelieristeissä osittaispurkausten kannalta käsitellään myös. Osittaispurkauksista avataan niihin liittyviä perussuureita ja läpilyöntimekanismeja. Työssä esitellään eristeiden vanhenemisen tapoja ja erilaisten osittaispurkausvikojen ilmentymismuotoja eripuolilla kaapeliverkkoa. Työssä kuvataan tyypillisiä kaapeleiden osittaispurkausmittaustekniikkoja, niiden soveltuvuutta käytössä oleviin kaapeleihin ja vertaillaan niitä. Lisäksi työssä käsitellään erilaisten vaihtoehtoisten mittausten soveltuvuutta kaapelieristemittauksiin, kuten jännitelujuustestaus ja tan-delta-mittaus. Työn loppuun on koottu itse osittaispurkausmittauksissa huomioitavia asioita tulosten analysoinnin kannalta.

Työn lopputuloksena saatiin kuva osittaispurkausmittauksen antamista mahdollisuuksista kaapelin eristetutkimuksessa. Työssä saatiin tietoa eri osittaispurkaustekniikkojen mahdollistamista havaittavista vikatyypeistä kaapeliverkossa, kuten paikalliset epähomogeenisuuskohdat eristeessä sekä asennusvirheet. Työssä huomattiin mahdollisuuksia sisällyttää jännitekoe ja tan-delta-mittaus eristeen kokokuvan saavuttamiseksi.

Asiasanat: keskijänniteverkko, maakaapeli, osittaispurkaus, PD-mittaus, VLF-mittaus, DAC-mittaus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering

Author: Samuli Niku
Title of thesis: Diversification of Partial Discharge Measurements in MV-cables
Supervisor: Ismo Pitkänen
Term and year when the thesis were submitted: Spring 2021
Pages: 45 + 4 appendices

This thesis was done for Voimatel Oy. The goal of this work was to bring out the main principles of Off-line partial discharge measurement and in chase of extruded medium voltage cables. In addition, the aim of the work was to diversify the applications of the partial discharge meter used by Voimatel Oy in cables of the distribution network. To meet the industry's demand of these kind of measurement, also different kinds of cable insulation tests like of tan delta and withstand tests were studied.

Structures of the extruded medium voltage underground cables and the cable accessories, likes of terminations and joints are dealt with in this thesis. The electrical field in cables, termination and joints are explained, to understand the inceptions of the partial discharge phenomenon. Cable aging mechanisms and partial discharge types are important to know when selecting suitable test type, and therefore shown in the thesis. Thesis contains information of different types of partial discharge measurement techniques as well as alternative insulation test types likes of tan delta and VLF-withstand. Towards the end of the work things to consider in the results of the partial discharge analysis are dealt with.

As a result of this thesis, suitable partial discharge measurement environment in the medium voltage cable system is presented. Different kinds of partial discharges and aging mechanisms harms the insulation and reduces lifetime of the cable. The work provides information of advantages and disadvantages of the partial discharge technologies and the combination of PD, tan delta, and the VLF-withstand measurements.

Keywords: medium voltage, underground cable, partial discharge, PD-measurements, VLF-measurements, DAC-measurements

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 KESKIJÄNNITEMAAKAAPELIT	9
2.1 Maakaapelien käyttö	9
2.2 Muovieristeiset kaapelit	12
2.3 Kaapelivarusteet	13
2.3.1 Kaapelipäätteet	14
2.3.2 Kaapelijatkot	15
3 SÄHKÖKENTTÄ KIIINTEISSÄ ERISTEISSÄ	17
4 OSITTAISPURKAUS	19
4.1 Osittaispurkaustapahtuma	19
4.1.1 Perussuureet	19
4.1.2 Lämpilyönti kiinteässä eristeessä	21
4.2 Vesipuu ja sähköpuu	21
4.3 Osittaispurkaustyypit	23
4.3.1 Sisäiset osittaispurkaukset	23
4.3.2 Korona	24
4.3.3 Pintapurkaus	25
4.4 Osittaispurkaukset jakeluverkon maakaapeleissa	25
5 OSITTAISPURKAUSMITTAUS KÄYTTÖPAIKALLA	27
5.1 Mittaustekniikat käyttöpaikalla	27
5.1.1 VLF-mittaus	28
5.1.2 DAC-mittaus	29
5.1.3 Vaihtoehtoiset eristemittaukset	30
5.2 Mittauksen käyttökohteet	32
5.3 Osittaispurkausmittauksen ominaisuuksia	33
5.4 Taustamelu	34
5.5 Kalibrointi	35
5.6 Osittaispurkauksen paikantaminen	36
5.7 Osittaispurkauksen analysointi	37
5.7.1 Haitallisuuden arviointi	38
5.7.2 Mittausten vertailtavuus	39

6 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	42
LIITTEET	
LIITE 1 Osittaispurkaus- ja tan-delta-mittaukset eri jänniteaalloilla	
LIITE 2 Valvotun ja yksinkertaisen jännitelujuuskokeen erot	
LIITE 3 Osittaispurkausmittauksen ominaisuuserot eri jänniteaalloilla	
LIITE 4 Osittaispurkausten havaitseminen eri jännitejaksolla	

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

DAC	(damped ac voltage) vaimeneva vaihtojännite
Hz	hertsi
IEC	International Electrotechnical Commission
km	kilometri
kV	kilovoltti
pC	pikocoulompi
PD	(partial discharge) osittaispurkaus
PDEV	(partial discharge extinction voltage)
PDIV	(partial discharge inception voltage)
PE	polyeteenieriste
PEX(XLPE)	ristisilloitettu polyeteenieriste
PRPD	(Phase-resolved partial discharge)
q	näennäisvaraus
Tan δ	(tan delta) eristeen häviökerroin
TDR	(time-domain reflectometry) pulssienvälinen aikaero
U_0	mitattavan piirin jännite vaihe- ja maapotentiaalin välillä
U_e	osittaispurkauksen sammumisjännite
U_i	osittaispurkauksen syttymisjännite
VLF	(very low frequency) erittäin matala taajuus
ϕ	vaihekulma

1 JOHDANTO

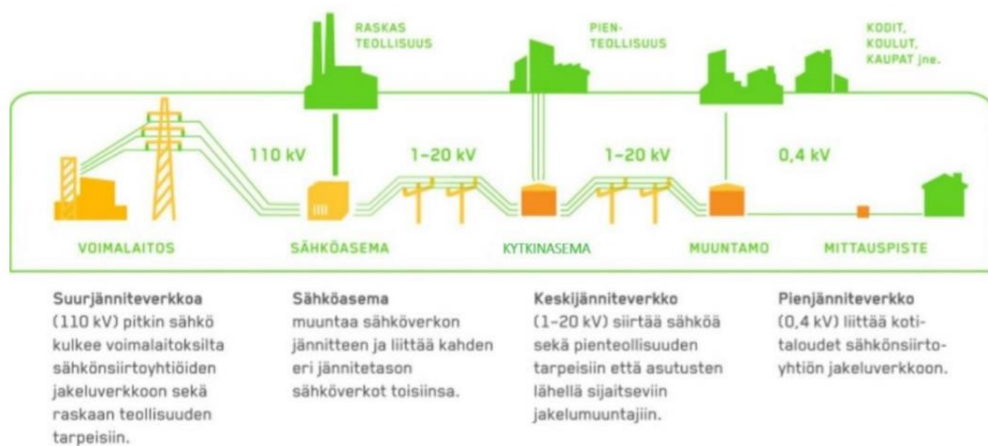
Osittaispurkaukset ovat huomattavin kaapelin eristevian aiheuttaja jakeluverkossa. Osittaispurkaus toimii luotettavana indikaattorina kehittyvälle eristysvialle keskijännitekaapeleissa. Osittaispurkausmittauksilla voidaan paikantaa kaapeleissa tapahtuvia osittaispurkauksia ja ohjata kunnossapitotoimenpiteitä mittaustulosten perusteella. Mittalaitteet ovat yleensä kalliita ja vaativat korkeaa sähköverkkoalan osaamista. Jotta mittausten jälkeiset toimenpiteet ovat oikeita, oikea-aikaisia ja mahdollisimman kustannustehokkaita, on mittauksia pystyttävä suorittamaan ja analysoimaan luotettavasti.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin Voimatel Oy:lle. Työssä selvitettiin osittaispurkausmittaus-tapahtuman keskeisiä osa-alueita keskijännitejohdoissa sekä analysoitiin sen tuloksia ja käytettävyyttä käyttöpaikalla.

Voimatel Oy on sähkö- ja tietoverkkojen sekä -järjestelmien elinkaaripalvelujen ja ratkaisujen tuottaja ja työllistää noin 900 henkilöä. Yritys on perustettu 2001 ja sen omistaa nykyisin osuuskunta KPY. Voimatel Oy:n tärkeimmät tilaajakannat muodostuvat suurimmista siirto- ja jakeluverkkoyhtiöistä sekä teleoperaattoreista Suomessa. (1.)

2 KESKIJÄNNITEMAAKAPELIT

Keskijännitekaapeloinnit yleisimmin alkavat 110 kilovoltin sähköasemalta, joista ne jatkavat säteittäin jakelumuuntamoiden väleillä (Kuva 1). Keskijänniteverkko päättyy jakelumuuntamolla, josta alkaa 0,4 kilovoltin pienjänniteverkko. Paikoittain verkko voi muodostaa ns. rengasverkkoja toimitusvarmuuden parantamiseksi tarjoamalla useampia syöttösuuntia viallisten kaapeliyhteyksien varalta. Suomessa keskijännitetaso kattaa 1–35 kilovoltin verkot, joista yleisin on 20 kilovolttia. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan 20 kV:n vaihtosähköverkon maakaapeleiden, maakaapelipäätteiden ja -jatkojen rakennetta ja ominaisuuksia.

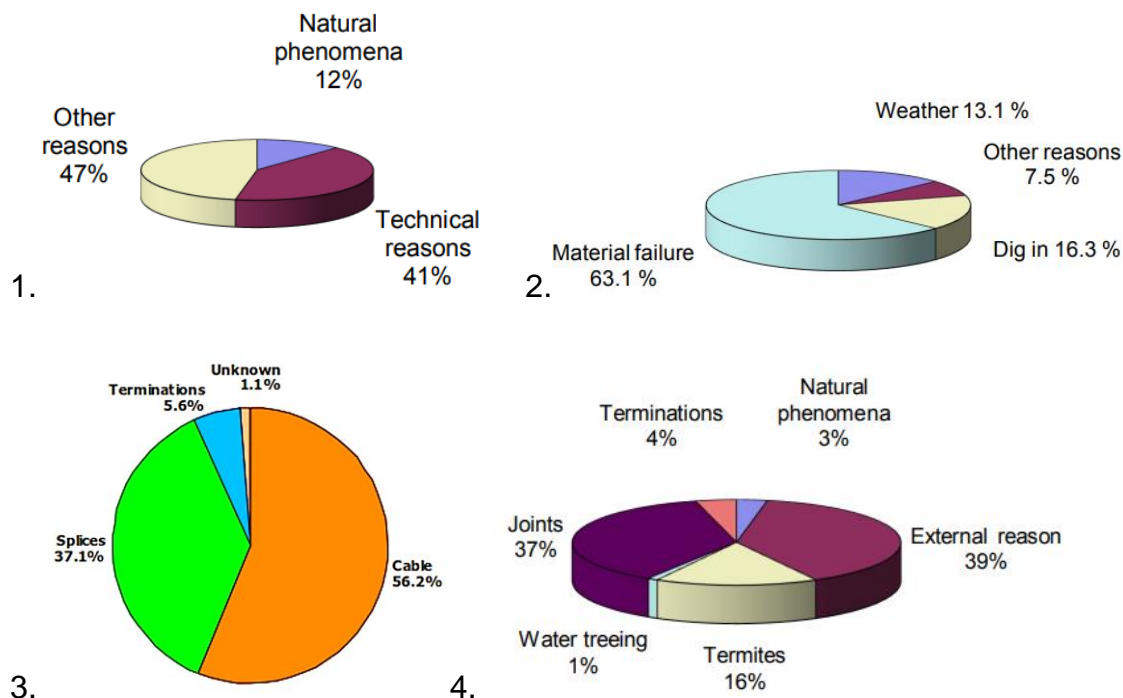


KUVA 1. Sähköverkon perusrakenne verkkoyhtiön Carunan verkossa (12).

2.1 Maakaapelien käyttö

Vuonna 2013 voimaantullut sähkömarkkinalaki (588/2013) velvoittaa sähköyhtiöitä parantamaan toimitusvarmuutta jakeluverkoissa. Tämä on aiheuttanut käytössä olevien maakaapelointiyhteyksien määrän kasvua sähköverkossa. Suomen 1-70kV:n kaapeliyhteyksien maakaapeloinnin osuus oli vuonna 2019 noin 35 % (2). Tavoitteena tässä on saavuttaa 48 % maakaapeloinnin osuus keskijännitteillä vuoteen 2028 mennessä (3). Maakaapeloinnit ovat paremmin suojassa sään muutoksilta, ilkeivallalta sekä muilta ulkoisilta tekijöiltä kuin ilmajohtoverkko.

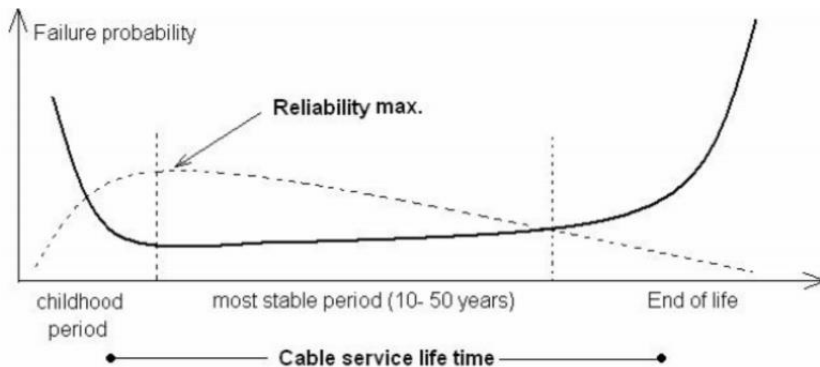
Keskijännitemaakaapeliin käyttö on yleisesti katsottu luotettavaksi sähkönsiirrossa. Viikaherkkyys Suomen jakeluverkon kaapeleissa on laskettu olevan noin 0,81 vikaa vuodessa 100:aa kilometriä kohti, mikä tarkoittaa noin yhtä vikaa jokaisella sadalla kilometrillä maakaapelia. Tämä vikaherkkyysaste sisältää muovi- ja öljypaperieristekaapelit. (4.) Suomessa luonnonilmiöiden on katsottu aiheuttavan 12 % vioista, tekniset viat aiheuttavat 41 % ja muut syyt 47 % vioista. Muut syyt liittyvät todennäköisesti kaivu- ja maansiirtotöihin (5). Myös maailmalla tehdyissä tilastoissa kolmannen osapuolen aiheuttamat viat korostuvat (Kuva 2). Teknisistä vioista on melko vähän tarkkoja tilastoja, mutta kokemusten perusteella voidaan sanoa, että suurin osa vioista kaapeliverkossa tapahtuu kaapelijatkoissa (splices/joints) ja päätteissä (terminations). (4.)



KUVA 2. Verkko-yhtiöiden raportointia keskijännitekaapeleiden vikaantumissyitä 1. Suomessa (5), 2. Ruotsissa (6), 3. Pohjois-Amerikassa (7) sekä 4. Macaussa 11 kV:n kaapeliverkossa (8).

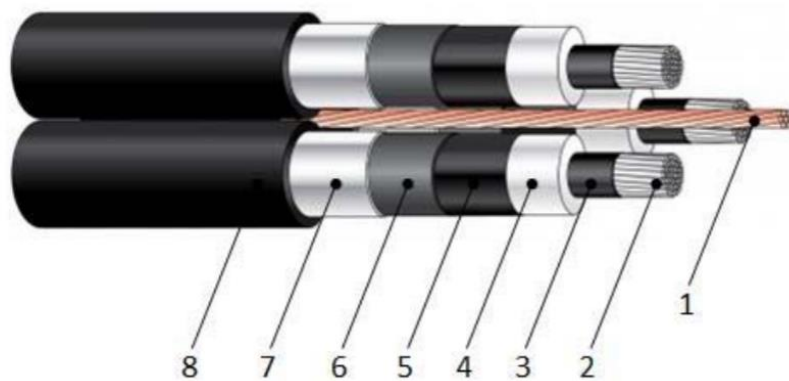
Kaapeleiden vikaantumisongelmat seuraavat ammekäyrämallia (Kuva 3), jossa suurimmat todennäköisyydet kaapelivioille ovat käyttöajan alku- ja loppupäässä. Käyttöajan alkupäässä vikataajuutta nostavat erilaiset "lastentaudit", joita aiheutuu uusissa kaapeleissa valmistuksen aikana, kuljetuksessa sekä asennuksessa. Ammekäyrän keskivaiheilla kaapeleiden toimintavarmuus on parasta, ja kaapeleissa ilmenee vikoja vain satun-

naisesti. Loppupään vikaantumiset johtuvat kaapeleiden ikääntymisestä. Erilaisilla eristeiden kunnan mittaamenetelmillä voidaan havaita eristeiden vikaantumisia ja puuttua niihin ennalta.



KUVA 3. Vikojen esiintymisen todennäköisyys kaapeleissa ajan funktiona esitetty viivalla (9). Katkoviiva esittää kaapelin luotettavuuskäyrää, jossa luotettavuuskäyrän korkeimmassa kohdassa voidaan olettaa kaapelin elinikäodotteen olevan suurin.

Suomen 20 kV:n keskijänniteverkossa käytössä olevat kaapelit voidaan jakaa eristämateriaalin mukaan kahteen ryhmään: öljypaperi- ja muovieristeiset kaapelit. Öljypaperieristeisten maakaapeleiden valmistuksesta on luovuttu 1980, jonka jälkeen on keskitytty vahvasti muovieristemaakaapeleiden valmistukseen ja käyttöönottoon. Muovieristeiset ovat syrjäyttäneet öljypaperieristeiset kaapelit lähes kokonaan tänä päivänä. Nykyisin yleisimmät asennettavat kaapelit ovat PEX-eristeisiä AHXAMK-W muovikaapeleita (Kuva 4), joiden vikaherkkyys on Helen sähköverkko Oy:n mukaan alle 0,2 vikaa asennettua 100 kilometriä kohden. (10.) Tämä tarkoittaa noin yhtä vikaa jokaiselle 500 km:lle asennettua kaapelia. Tässä luvussa käydään muovikaapeleille tyypillistä kuvan 4 mukaista rakennetta osittaispurkausten näkökulmasta.



KUVA 4. Suomalaisen valmistajan Reka:n kaapeli, AHXAMK-W:n kaapelirakenne: 1.ku-parinen keskusköysi, 2. johdin, 3. johdinsuoja, 4. johdineristys, 5. hohtosuoja, 6. vesitiivistysnauha, 7. kosketussuoja ja 8. ulkovaippa (11).

2.2 Muovieristeiset kaapelit

Yleensä keskijännitteillä ja sitä suuremman jännitetason muovieristemaakaapeleissa käytetään metallista kosketussuojakerrosta, joka on kytketty maahan. Lisäksi muovieristeisissä maakaapeleissa käytetään puolijohtavaa eristekerrosta, joka varmistaa vaihejohtimen aiheuttaman sähkökentän pysymisen kaapelin johdineristeessä ja hohtosuojassa. Kaapelia ympäröi ulkovaippa, joka suojaa kaapelia ulkoisilta tekijöiltä. Muovikaapeleiden sähkökentän ohjaus perustuu tiiviisti valmistettuihin eristekerroksiin, joissa ei ilmene suuria epähomogeenisuutta aiheuttavia epäkohtia. (13.)

Johde on kaapelin keskeisin osa, jonka tehtävänä on sähkösiirto. Johtimet ovat yleensä valmistettu alumiinista tai kuparista. Alumiinikaapelien käyttö on yleisintä, koska se on kevyempi ja edullisempi muihin metalleihin verrattuna. Johdin koostuu useasta ohuesta säikeestä, mikä lisää johdon taipuisuutta. Johdinlankojen väliin laitetaan valmistuksen aikana pulveria, joka turpoaa vesitiiviiksi veden vaikutuksesta. Johtimen ympärille valmistetaan puolijohtavasta materiaalista johdinsuoja, jonka tehtävä on vähentää johtimen pinnan sähkökentän voimakkuushuippuja ja näin estää osittaispurkauksien syntymistä. Lisäksi se vaimentaa lämpörasituksia johtimesta eristeeseen oiko- ja maasuluissa. (13.)

Johdineristys ulottuu keskijännitekaapeleissa johdinsuojan päältä hohtosuojaan asti. Eristyksen tehtävä on säilyttää riittävä jännitekestoisuus kaapelissa ja johtaa riittävän te-

hokkaasti johtimessa ja eristeessä syntyvä häviölämpö pois kaapelista. Yleisimmin käytetty eristysmuovi on ristisilloitettu polyetyyeni (XLPE tai PEX). Eristyksen tärkeimmät elinikä lisäävät ominaisuudet ovat sen kuplattomuus, homogeenisuus ja puhtaus. Ylilämmöt vanhentavat eristettä nopeasti ja liika lämpötila voi aiheuttaa eristeessä läpilyönnin. Kosteuden päästessä eristeeseen PE-eristeissä syntyy puumaisia kanavia eli vesipuita sähkökentän vaikutuksesta. (13.) Myös vesipuilla on vaikutusta kaapelin elinikään ja ne voivat pitkälle kehittyessään aiheuttaa läpilyöntejä. Vesipuista kerrotaan enemmän luvussa 4.2.

Hohtosuoja on muovikaapeleissa puolijohtava kerros johdineristyksen pinnalla. Hohtosuojan tehtävä on tasata eristeen yli vaikuttavaa sähkökenttää, joka muodostuu johtimen epätasaisuuksista. Ehyt hohtosuoja estää osittaispurkausten syntymistä kosketussuojan ja eristeen välissä. Hohtosuojamateriaalit on suunniteltu helposti työstettäväksi, sillä hohtosuojan poistolla on keskeinen merkitys kaapelijatkojen ja -päätteiden asennuksessa. Hohtosuojan päällä on vesitiivistysnauha, joka hidastaa turpoamalla veden liikkumista kaapelissa. (13.)

Kosketussuoja on yleisimmin alumiinista tai kuparista oleva suojakilpi kaapelin päällä. Kosketussuoja toimii nopeana varaus- ja vikavirran kulkutienä ja varmistaa nopean sähkönsäilytyksen vikatilanteissa. Kuparin ja alumiinin etu niiden hyvän sähköjohtavuuden lisäksi on hyvä korroosionkestävyys. (4.)

Ulkovaippa suojaa kaapelia mekaanisilta ja kemiallisilta rasituksilta. Kaapelivaipat valmistetaan nykyisin pääosin polyeteenimuoveista, joissa kosteuden läpäisevyys on pieni. Vaurioituneet kaapelivaipat lyhentävät kaapelien käyttöikää kosteuden aiheuttaessa korroosiota metallisiin osiin ja vesipuita kaapelieristeessä. (4.)

2.3 Kaapelivarusteet

Kaapelivarusteita ovat maakaapelipäätteet ja -jatkokset. Ideaalitalanteissa maakaapelit ovat yhtenäisiä kaapeleita jakelumuuntamolta toiselle. Kuitenkin maakaapeleita rakentamassa rakennettua infraa on usein jo ennestään maaperässä paljon ja kaapelin katkaisuilta ei voida monesti välttyä. Myös logistiikkakulut rajoittavat kaapelikelojen kokoa ja kaapeleita joudutaan jatkamaan kaapelijatkoilla. Jakelumuuntamoilla kaapeleissa tulee kyseeseen kaapelin päättäminen kaapelipäätteillä. Kaapelipäätteet ja -jatkokset voidaan katsoa

kaapeliverkon ”heikoksi lenkiksi” vikojen ilmenemisen näkökulmasta. Kaapelivarusteiden suunnittelun keskeisimpiä haasteita on vaihejohtinten muodostaman sähkökentän hallinta eri kytkentätilanteissa. Kentänohjauksia voidaan tehdä kaapelivarusteissa kylmä- tai lämpökutisteratkaisuilla (14), joiden valinta riippuu yleensä asennusympäristön paloturvallisuusvaatimuksista.

Keskijännitekaapeleiden jatkamiset ja päättämiset ovat kaapeliverkon asennuksen haastavimpia työvaiheita. Nämä asennustyöt vaativat useita eri työvaiheita ja ovat aikaa vieviä. Nämä kaapelivarusteet vaativat huolellista asennustyötä vaihtelevissa kenttäolosuhteissa, joissa kosteus ja lika saattavat päästä eristekerrosten väliin. Kaapelijatkosten teossa on useita eri työvaiheita, joissa virhe voi sattua. Kaapelijatkoksen ja -päänteen asennuksen huolimattomuus johtaa osittaispurkauksiin kaapelissa tai kaapelin pettämiseen kytkentätilanteessa. Ennen pitkää osittaispurkaukset alkavat kasvattamaan puumaisia kanavia eristeissä ja johtavat voimakkaaseen läpilyöntiin yhdessä vaiheessa, joka voi keskijännitteellä pahimmillaan rikkoa myös viereiset ehyet vaiheet. Tässä luvussa käsitellään kaapelipäänteen ja -jatkosten rakennetta osittaispurkausten ilmenemisen näkökulmasta.

2.3.1 Kaapelipääntteet

Kaapelipääntteitä on sähköjakeluverkossa puistomuuntamoilla jokaisessa keskijännitteen kaapelilähdössä ja mahdollisilla tilatuilla keskijänniteliittymäpisteillä sähköverkon asiakkaiden päässä. Kaapelipääntteissä maadoitetun osan (hohtosuoja) päänttyminen ja kaapelin jännitteisen osan (johdin) jatkuminen aiheuttaa jännitteenohjausongelmia pääntteen suunnittelussa (15, s.159).

Sähkökentän voimakkuusjakauma kaapelin päässä vääristyy ja aiheuttaa paikallisia kentänvoimakkuushuippuja eristerakenteessa (15, s.159), jotka voivat aiheuttaa osittaispurkauksia. Kuvan 5 osoittama voimakas sähkökenttä puolijohtavan (hohtosuoja) ja PEX-eristeen (johdineriste) saumakohdassa aiheuttaa eristevaurioita, jos sähkökenttää ei tasata kentänohjauskomponenteilla. Kentänohjauskomponenttien tehtävä kaapelipääntteessä on pehmentää sähkökentän taipuminen kaapelipääntteessä niin, ettei haitallisia osittaispurkauksia esiinny. Kaapelipääntteen tehtävä on myös suojata päänttettä sään vaikutuksilta (kuten kosteuden pääsy kaapelin sisään) sekä estää ulkoiset vuotovirrat kaapelipääntteen pinnalla kaapelikengän ja maadoitettujen osien välillä. Kuvassa 5 punaiset

viivat osoittavat jännitteen potentiaalitasoja eristeessä kaapelin jännitteeseen johteeseen nähden. Kuvassa olevan kaapelipäättelyn kentänohjaus perustuu sen materiaalien permittivisyserojen muotoiluun. Sähkökentän taipumista on enemmän avattu luvussa 3.

Prepared Cable End Without Stress Control Device

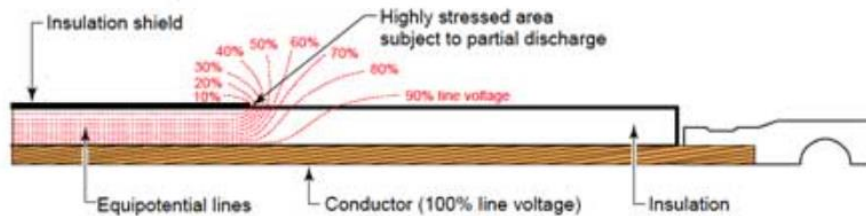


Illustration 1.

1.

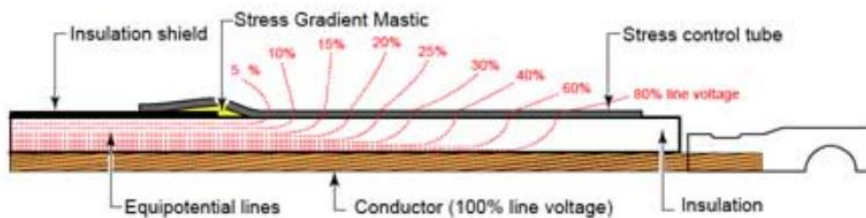


Illustration 2.

2.

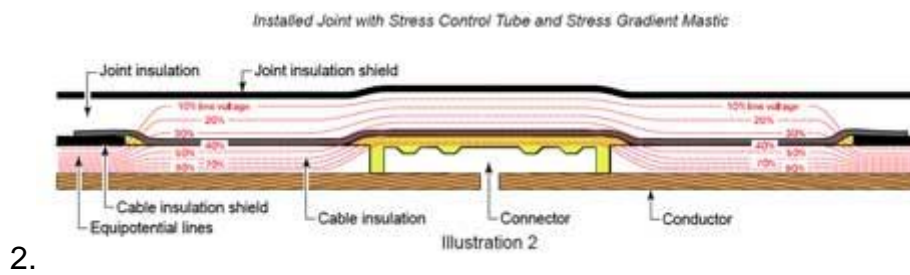
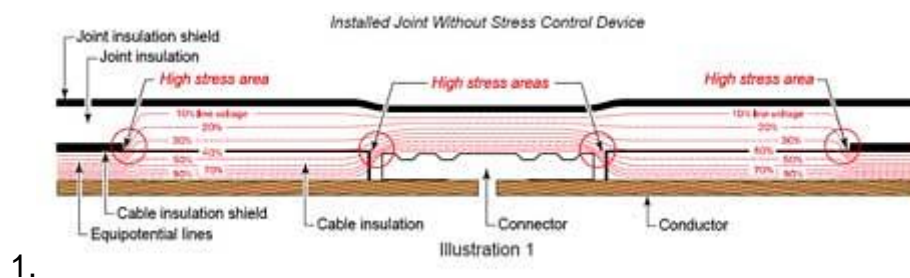
KUVA 5. Kaapelipäättelyn poikkileikkauskuvat sähkökentän taipumisesta 1 ilman kentänohjausta ja 2 kentänohjauskomponenttien kanssa (16).

2.3.2 Kaapelijatkot

Kaapelit yhdistetään toisiinsa kaapelijatkoksi. Kaapelijatkokset on usein tehty samoista materiaaleista kuin muovieristeiset kaapelitkin, ja näin eristeen vanhenemisen ongelmat ovat samoja (4). Kaapelijatkoksen tehtävä on hallita sähkökenttää jatkoskohdassa siten, ettei haitallisia osittaispurkauksia synny. Jatkoksen tulee myös estää sisäiset vuotovirrat kaapelin johtimen ja maadoitetun kerroksen välillä eristeen pintoja pitkin. Jatkoksen ulkovaipan tehtävä on estää kosteuden pääsy kaapelin sisään. (14.)

Kaapelijatkoksen kohdissa kaapelin eri kerroksia joudutaan avaamaan ja kuorimaan asennusohjeiden mukaisesti mittoihin. Kaapelijatkoksen eri komponentit on mitoitettu ohjaamaan sähkökenttää jatkoksen läpi jatkoksen ja johtimen eristekerrosten välissä siten,

että riittävät liitokset mahdollistaan tekemään (Kuva 6). Niin kaapelipääteissä kuin kaapelijatkoissa voimakkain sähkökenttä ilman riittävää kentänohjausta kohdistuu puolijohteiden ja johdineristeen saumakohtaan (Kuva 6). Myös kaapelit yhdistävän kaapelikengän läheisyydessä ilmenee ilman kentänohjausta kentänvoimakkuushuippuja. Pienetkin epäkohdat eristekerroksissa, esim. lovet eristeessä ja kaasuontelot, aiheuttavat kentänvoimakkuushuippuja ja näin osittaispurkauksia. Kuvan 6 punaiset viivat kuvaavat jännitteen potentiaalitasoja eristeessä kaapelin jännitteeseen johteeseen nähden. Kuvassa olevan kaapelijatkoson kentänohjaus perustuu sen materiaalejen permittivisyys erojen muotoiluun. Sähkökentän taipumista on enemmän avattu luvussa 3.

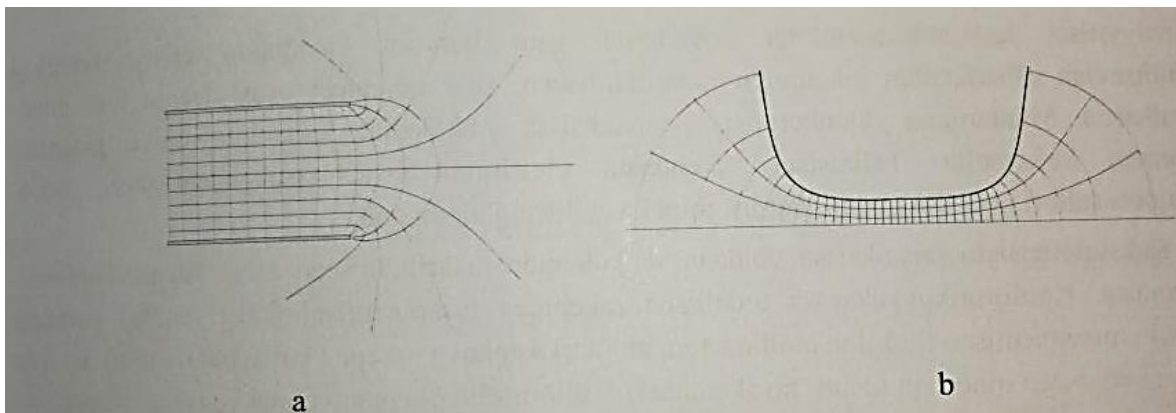


KUVA 6. Kaapelijatkoksen poikkileikkauskuva sähkökentän taipumisesta 1 ilman kentänohjausta ja 2 kentänohjauskomponenttien (kentänohjauskeila ja kentänohjausmassa) kanssa (16).

3 SÄHKÖKENTTÄ KIINTEISSÄ ERISTEISSÄ

Suhteellisen heikossa sähkökentässä eriste polarisoituu, jolloin vaihtosähköllä polarisaation suunta vaihtelee ja syntyy eristeessä lämpöä ja näin dielektrisiä häviöitä. Permittiivisyserot eristeessä jakavat vaihtojännitteen vaikutusta eri osien välillä. Polarisaation aiheuttamat dielektriset häviöt ovat tehohäviöitä, jotka kasvavat lämpötilan noustessa. Riittävän suuri sähkökentän voimakkuus aiheuttaa eristeissä osittaispurkauksia, läpilyön- tejä ja ylilyön- tejä. (15, s.52.)

Täydellisen homogeenisen sähkökentän muodostaminen on käytännössä vaikeaa. Sähkökenttä kahden elektroditason välissä on homogeeninen, mutta tasojen päätyttyä sähkökenttä tihentyy lähellä elektrodia. Jotta sähkökentän tihentymän aiheuttamia haittoja voidaan estää, täytyy sähkökenttää ohjata pehmeästi pitkittäisestä kentästä poikittaiseksi elektrodimuodolla tai tasojen välisen eristeen permittiivisyseroilla. Kuvassa 7 olevat linjat osoittavat jännitepotentiaalia eristeen eri kohdissa. Siellä missä potentiaalilinjat ovat lähemmäs, sähkökenttä on voimakkaimmillaan. (15, s.33.)



KUVA 7. Sähkökentän taipuminen kahden tasoelektrodin välissä. a) Sähkökentän taipuminen kahden eri tasoelektrodien päissä. b) Elektroditasot on muotoiltu siten, että suurin sähkövoimakkuus kohdistuu tasojen keskelle ja tasojen päädyissä kentän tihentymä on "hallittu". (15, s. 33.)

Kuva 7 kuvaa myös hyvin jakeluverkon kaapeleissa läsnä olevia kentänohjausongelmia. Kuvan 7a kohdassa tilanne kuvaa hyvin hallitsematonta sähkökenttää kaapelin päässä, jossa sähkökenttä tihentyy elektrodien päädyissä maadoitetun osan päättyessä. 7b ku-

vaa kaapeliväliä, jossa keskellä kaapelipituutta sähkökenttä on hallittu johtimen ja maadoitettujen osien välissä olevassa eristekerroksessa, kun taas kaapelin päissä sähkökenttä on hallittu kaapelipäätteiden kentänohjauksilla.

4 OSITTAISPURKAUS

Osittaispurkauksilla (partial discharge) tarkoitetaan paikallisesti eristeessä tapahtuvia sähköpurkauksia kahden johtimen välillä. Tämä sähköpurkaus ei täysin yhdistä kahta johtainta, toisin sanoen sähkökentän voimakkuus ylittää vain osittain eristeosan sähkölujuuden. Osittaispurkaus luokitellaan epätäydellisiin sähköpurkauksiin. Osittaispurkauksia ilmenee vaihto-, tasa- ja syöksyjännitteillä kaasuissa, nesteissä, kiinteissä eristeissä ja rajapinnoilla. Vaihtojännitteellä osittaispurkauksien merkitys korostuu, sillä purkaukset usein tapahtuvat jokaisen jakson aikana. (15, s. 80.) Osittaispurkaus on yleisesti hyväksytty pääsyy kaapelieristeiden vanhenemiselle ja lopulta eristeen läpi johtuvalle läpilyönnille. Läpilyönnissä eristeen läpi kehittyneessä purkauskanavassa jännite romahtaa ja virta kasvaa suureksi. Tässä purkauksessa eristyksen yli tai läpi syntyy voimakkaasti ionisoitunut kuuma kanava, valokaari. Tässä luvussa käsitellään ainoastaan vaihtojännitteellä tapahtuvia purkauksia muovieristeisissä keskijännitekaapeleissa.

4.1 Osittaispurkaustapahtuma

Osittaispurkaus on monitahoinen ilmiö, jonka ominaisuuksiin vaikuttaa muun muassa vian koko, vian sijainti kaapelissa, materiaalien tyyppi, kaapelin metalliset ja puolijohtavat kerrokset, käytetty jännite, lämpötila, osittaispurkausten kestoisuus ja vaimennus.

Osittaispurkaukset ovat energiamäärältään suhteellisen pieniä, mutta purkauksia voi sekunnin aikana tapahtua tuhansista miljooniin. Erilaiset eristemateriaalit kestävät osittaispurkauksia toisia paremmin (15, s. 80). Erityisesti muovieristeisillä kaapeleilla, kaapelijatkoksilla ja -päätteillä osittaispurkaukset johtavat todennäköisesti eristeen rikkoutumiseen odottamattomalla hetkellä, jolloin verkon käyttö keskeytyy. Osittaispurkausten vaarallisuus riippuu pitkälti purkausten voimakkuudesta ja esiintymistiheydestä. (21.)

4.1.1 Perussuureet

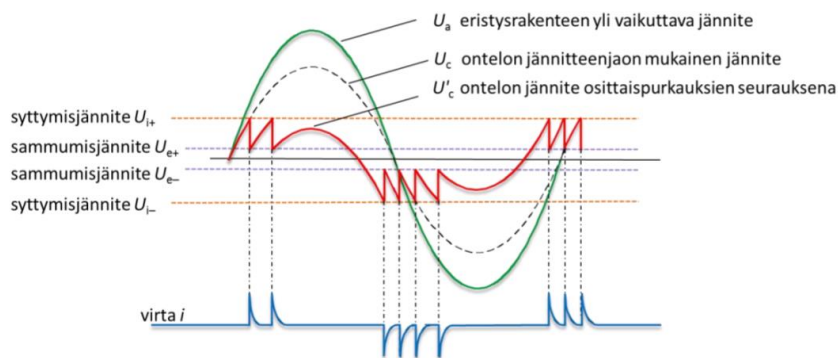
Osittaispurkauksessa siirtyvä varaus olisi luonnollinen mitta osittaispurkauksen suuruudelle, mutta sitä ei yleensä tunneta eikä pysty mittaamaan. Eristysrakenteen liittimistä voidaan mitata varauksen muutos, osittaispurkauksen näennäisvaraus, joka on myös valittu osittaispurkauksien suuruuden mitaksi. Osittaispurkauksen näennäisvaraus q määri-

tellään standardissa IEC 60270. Näennäisvarauksen mittayksikkönä käytetään tavallisesti pikocoulombeja (pC). Näennäisvarauksen haittapuoli on, että samansuuruisen ontelopurkauksen näennäisvaraus on suurempi ohuemmalla eristepaksuudella kuin paksummalla. Näennäisvaraus q on kääntäen verrannollinen eristysrakenteen paksuuteen. (15, s. 88–89.)

Osittaispurkauksien vaarallisuuden arvioinnissa on keskeistä tietää, millä jännitteillä osittaispurkauksia syntyy. Käyttöjännitettä suuremmat purkaukset katsotaan yleensä lievemmiksi kuin käyttöjännitteellä tai sitä alemmalla jännitetasolla syttyvät purkaukset. Osittaispurkauksen syttymisjännite U_i tarkoittaa jännitettä, jolloin tietynsuuruisia tai suurempia toistuvia purkauksia havaitaan ensimmäisen kerran jännitettä kasvattaessa. Osittaispurkauksia saattaa esiintyä syttymisen jälkeen vielä jännitettä laskettaessa syttymisjännitteen alapuolella. Osittaispurkauksen sammumisjännitteellä U_e tarkoitetaan jännitettä, jolla tietynsuuruisia purkauksia ei enää esiinny jännitettä laskiessa. Syttymis- ja sammumisjännitteisiin liittyy aina reunaehto purkauksen suuruudesta näennäisvarauksen q avulla. Kuvassa 8 on esitetty syttymis- ja sammumisjännitteen vaikutus ontelopurkauksessa jännitejaksolla. (15, s. 88–89.)

Purkauksia voidaan tulkita myös perustuen vaihekulmaan ϕ , jakson ajankohtaan, jolloin ensimmäisen kerran havaitaan osittaispurkauksia. Vaihekulmaa voidaan hyödyntää osittaispurkauksen tyyppin tunnistamisessa osittaispurkausmittauksissa, sillä eri kohdassa kaapelieristettä tapahtuvat purkaukset ilmenevät eri jännitejakson kohdassa. (22.)

Selkeä esimerkki purkausten perussuureiden merkityksestä saadaan tarkastellessa ontelopurkausta, joka on haitallisin osittaispurkausmuoto kaapelieristeiden ontelossa (Kuva 8). Onteloon vaikuttava jännite pyrkii seuraamaan jännitejaon mukaista jännitettä U_c ja varaa onteloa, mutta syttymisjännitteellä U_i osittaispurkaus syttyy, jolloin ontelon varaus purkaantuu sammumisjännitteeseen U_e . Purkauksessa ontelon läpi kulkee virtapulssi i . Vaihekulmaa hyödynnetään ontelopurkauksia tarkastellessa, kun jännitteen U_a nousu- ja laskukäyrällä tapahtuu pääosin purkauksia.



KUVA 8. Osittaispurkausten syntyminen eristeessä ontelopurkauksena (23).

4.1.2 Lämpilyönti kiinteässä eristeessä

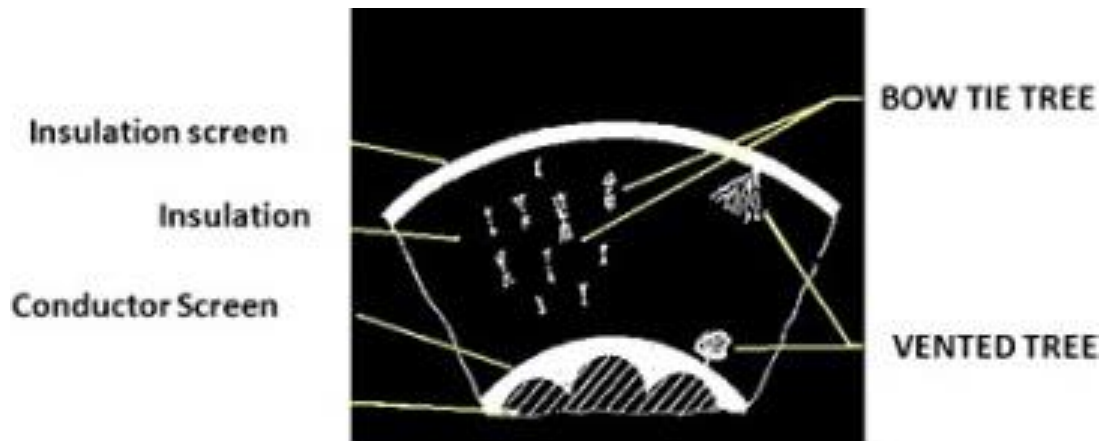
Kiinteiden eristeiden lämpilyöntimekanismeja ei vielä tunneta tarkkaan lukuisista tutkimuksista ja teorioista huolimatta. Lämpilyönnin kehittyminen eristeessä vaatii varauksenkuljettajien kasvun niin suureksi, että eriste menettää eristysominaisuutensa. Jännitteen kasvaessa lähelle lämpilyöntiä kiinteän eristeiden läpi kulkevan virran on todettu mittauksilla kasvavan eksponentiaalisesti. Lämpilyönti aiheutuu eristeeseen vaikuttavan sähkökentän energiasta. Energia voi siirtyä esimerkiksi sysäysionisaation (sähkölämpilyönti) tai lämpöhäviöiden (lämpölämpilyönti) kautta. Kuitenkin lopputuloksena on kiinteän eristeiden tuhoutuminen lämpilyöntikohdassa ja näin eristekyky menetetään pysyvästi. (15, s. 130–131.)

4.2 Vesipuu ja sähköpuu

Vesi on yleinen ongelma kaapeliteollisuudelle eristejärjestelmissä. Vesi ja lika yhdessä aiheuttavat monesti ongelmia muovieristeissä, sillä ne muuttavat eristerakenteen ominaisuuksia ja aiheuttavat vesipuita PE-kaapeleiden eristemuovissa. Nämä seikat puolestaan huonontavat eristeitä ja lyhentävät kaapelien elinikää. Pieniä vesipuita ilmenee lähes kaikissa kaapeleissa, mutta vain harvat niistä johtavat lämpilyöntiin kaapelin elinkaaren aikana. (24.)

Vesipuilla (*water trees*) tarkoitetaan puumaisten johtavien kanavien syntymistä eristemuovissa kentänvoimakkuusmaksimien alueella ilman, että syntyy osittaispurkauksia. Vesipuut kasvavat sähkökentän vaikutuksesta eristeessä elektrodien välillä. Vesipuita on

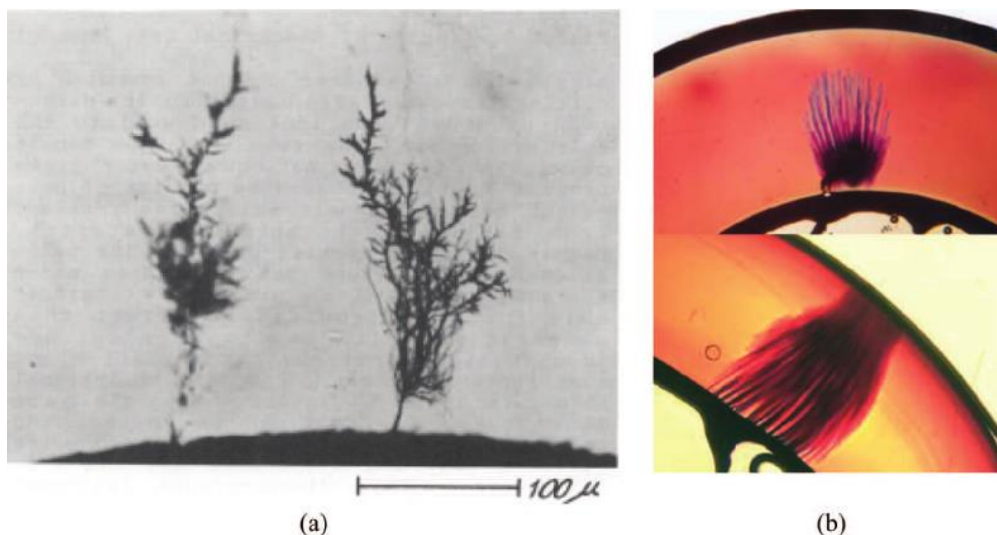
kahden erityyppisiä, keskeltä eristettä alkaneet puut (*bow-tie trees*) ja puolijohtavista eristeeseen päin kasvavat puut (*vented trees*). (15, s.161.) Kuvassa 9 on esitetty eri vesipuutyypin muoto ja tyypillinen sijainti kaapeli eristeessä.



KUVA 9. Vesipuun eri tyypit (24).

Puolijohtavasta eristeeseen kasvava puu on vaarallisempi, sillä kosteus on todennäköisesti suurempi vaipan ja johtimen lähetyillä. Eristekerrosten läpi kasvavan vesipuun päästessä riittävän pitkälle se aiheuttaa läpilyönnin. Vesipuun kasvu loppuu vasta kosteuden poistuessa. Keskeltä eristettä kasvavan vesipuun kasvu yleensä lakkaa tietyn ajan kuluessa. Vesipuut kasvavat vaihtosähkökentässä, mutta tasasähköllä tosi harvoin. Tyypillisesti vesipuun kasvu on millimetri vuodessa, mikä tarkoittaa noin 5–10 vuoden aikaväliä, jolloin vesipuu kasvaa koko eristeen halki. (4.) Vesipuut voivat kehittyä myös vaarallisemmiksi sähköpuiksi (*electrical tree*), jotka johtavat läpilyöntiin kuukaudessa tai jopa tunneissa.

Kauan kestäneet sähköpurkaukset voivat vahingoittaa kiinteitä eristeitä niin, että eristeen läpi kulkeutuu puumainen eroosiojälki, sähköpuu (Kuva 10). Sähköpuut kasvavat purkausten jatkuessa hallitsemattomasti kasvattaen uusia "oksia", jotka ennen pitkää läpäisevät eristeen ja johtavat läpilyöntiin. Sähköpuiden muodostuminen kiinteisiin eristeisiin on pysyvä ilmiö, jonka kanavissa syntyvien sähköpurkauksien vaatima jänniterasitus on pienempi. Sähköpurkausten tai vuotovirran vaikutuksesta eristeiden pinnalla tai läpi voi muodostua hiilestä johtava kanava, joka kiihdyttää läpilyöntiä eristeen yli. (15, s. 131.) Sähköpuun ero vesipuuhun verrattuna on se, että vesipuun kasvu voi pysähtyä itsestään ajan kuluessa, mutta sähköpuun kasvu kiihtyy.



KUVA 10. Sähköpuu (a) ja vesipuu (b). Ne voidaan yleensä erottaa toisistaan "puun"-rakenteen muodosta. (25.) Sähköpuu kasvaa epäsäännöllisesti, kun taas vesipuu kasvaa yleensä tasaisesti sähkökentän suuntaisesti.

4.3 Osittaispurkaustyypit

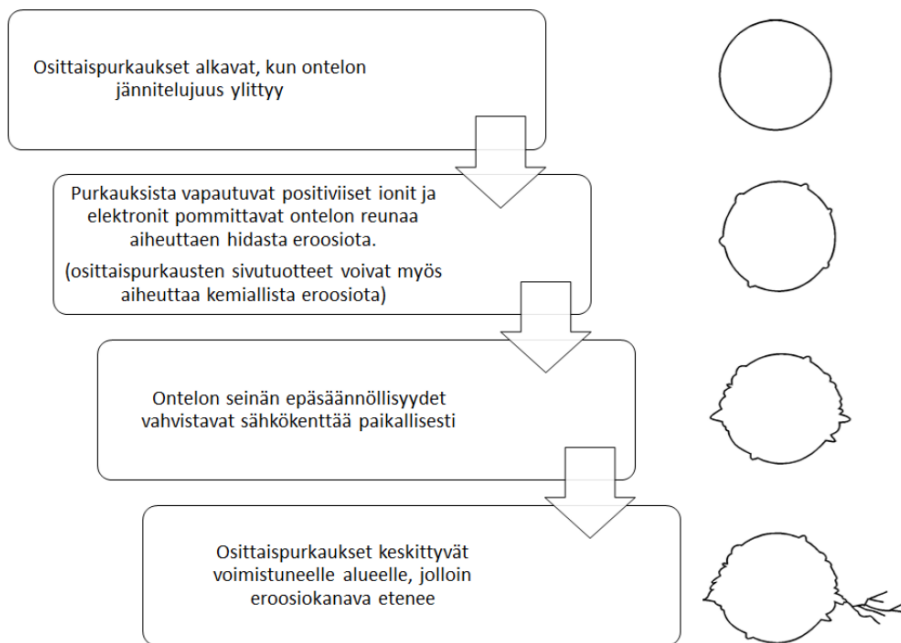
Osittaispurkaus voi tapahtua kaasueristeen tyhjiössä, kiinteässä eristeessä, nestemäisen eristeen kaasukuplassa tai kaasueristeessä elektrodissa pintapurkaus- tai koronailmiönä. Tässä osiossa käydään läpi osittaispurkaustyyppejä ja niiden ilmentymismekanismeja.

4.3.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Sisäiset osittaispurkaukset tapahtuvat eristeiden kaasuonteloissa, eristyskerrosten rajapinnoissa tai lähellä epäpuhtauksia. Kaasuonteloissa tapahtuvissa purkauksissa eli ontelopurkauksissa purkauksen määräävä sähkökentänvoimakkuus riippuu ontelon ominaisuuksista, esimerkiksi eristeen yli vaikuttavasta jännitteestä, ontelon suuruudesta ja ontelon muodosta. Lisäksi onteloissa jännitelujuus on pienempi kuin ympäröivässä eristeessä ja permittiviteetti eristeellä ja ontelon kaasulla on erilainen. Sisäiset osittaispurkaukset jännitteen ajanjaksolla eroavat koronapurkauksista niiden kohdistuessa jakson nousevalle ja laskevalle osalle (Kuva 10).

Ontelopurkauksissa syntyy erilaisia happoja ja kaasuja, jotka syövyttävät eristemateriaaleja. Purkauskanavat synnyttävät myös lämpöä. Sisäisiin osittaispurkauksiin kuuluva ontelopurkaus voi syntyä kaapeleiden valmistusprosessin aikana jääneestä kaasuontelosta,

asennuksen aikana tapahtuvasta mekaanisesta rasitteesta tai kaapelipäänteen asennusvirheestä eristekerrosten välissä. Ontelopurkauksia voi esiintyä maakaapeliverkon maakaapelijatkossa, -päänteissä ja itse kaapeleissa. Jos eristeen kaasuontelossa purkausten ilmeneminen on jatkuvaa, todennäköisyys kaasuontelosta syntyvälle sähköpuulle kasvaa ja eristeen läpilyönti on todennäköistä (Kuva 11).



KUVA 11. Ontelopurkauksen eteneminen ajan myötä vaaralliseksi sähköpuiksi (23).

4.3.2 Korona

Koronapurkaukset ovat ilmassa tai kaasussa elektrodin pinnalla tapahtuvia purkauksia. Koronapurkaus syntyy elektrodin pinnalle syntyneestä sähkökentän tiheydestä, esimerkiksi terävästä katkenneesta avojohdon säikeestä. Koronapurkaukset ovat yleensä hyvin erilaisia vaihtojännitteen positiivisella puolijaksolla kuin negatiivisella puolijaksolla. Koronapurkaus tapahtuu jännitteen noustessa ensimmäisen kerran negatiivisen puolijaksoson huipussa. Yleisesti on tiedossa, että tämä johtuu avaruusvarauksien synnyn aiheuttamasta kentänvoimakkuuden kasvusta negatiivisella puolijaksolla. Suuremmilla jännitteillä purkauksia alkaa tapahtumaan myös positiivisilla puolijaksoilla. Korona aiheuttaa ääntä, radio- ja tv-häiriöitä sekä tehohäviöitä. Korona on havaittavissa myös valona ja otsoonikaasuna. (15, s. 90–92.) Koronapurkauksia ilmenee huomattavasti enemmän ilmajohdoverkossa avojohdoilla kuin maakaapeliverkossa. Maakaapeliverkon koronapurkaukset tapahtuvat pääosin kytkentälaitteissa.

4.3.3 Pintapurkaus

Pintapurkaus on kahden eristeen rajapinnalla syntyvä pintapurkauksen muoto, joka syntyy riittävän suuren rajapinnan suuntaisesta komponentista sähkökentässä. Pintapurkauksia syntyy eniten kiinteän ja nestemäisen eristeen tai kiinteän ja kaasueristeen rajapinnoilla. (26.) Kiinteän eristeen ja ilman rajapinnalla syntyy jo alhaisilla jännitteillä osittaispurkauksia kentänvoimakkuuden ylittäessä sähkölujuuden. Jännitteen suureudessa purkaukset pitenevät eristeen pinnalla pintapurkauksiksi kohti toista elektrodia. (15, s. 85.)

Pintapurkaus tapahtuu tyypillisesti kaapelipäätteessä, jonka pinnalla oleva purkaus vahingoittaa eristeen pintaa erityisesti orgaanisten aineiden osalta (Kuva 12). Pintapurkauksia ei voida estää kovin hyvin eristepituutta kasvattamalla kaapelipäätteissä, minkä takia kiinteissä eristeissä käytetään sopivan muotoisia johteita ja puolijohteita. Näillä johteilla saadaan aikaan kapasiivinen jännitteenjako tasaamaan sähkökenttä kaapelieristeissä. (15, s. 85, 159.)



KUVA 12. Asennusvirheen aiheuttama pintapurkaus maakaapelijatkoksessa PEX-eristeenpinnalla, jossa puolijohtavaa pölyä on jäänyt eristeosan pinnalle asennusvaiheessa (27).

4.4 Osittaispurkaukset jakeluverkon maakaapeleissa

Kaapeliverkossa osittaispurkaukset yleensä tarkoittavat kaapelin vaihejohtimen ja päistä maadoitetun kosketussuojakerroksen välisiä purkauksia. Jakeluverkon osittaispurkaukset ilmenevät tyypillisimmin liitoskohdissa ja erityisesti kenttätyössä suoritetuissa kaapeliliitoksissa kuten maakaapelijatkoissa ja kaapelipäätteissä.

Osittaispurkauksia voi syntyä kaapeleiden eristeiden valmistuksen aikaisista epäpuh-
tauksista eristeessä, kaasuonteloista tai voimakkaista kaapelin taipumisista maksimitai-
pumissäteen ylittyessä. Uusissa kaapeleissa tapahtuvat osittaispurkaukset tehtaiden jäl-
jiltä ovat todella harvinaisia tiukkojen laatukriteerien vuoksi. (14.)

Asennusvirheitä voi tapahtua huolimattomasti taivuttaessa kaapelia tai kaapelivarustetta.
Kaapelipääteissä ja -jatkoissa voi olla vajavaiset kutistamiset eristeosille tai eristeosat on
kohdistettu huolimattomasti. Asennusvirheitä voivat olla myös kaapelitarvikkeiden asen-
nuksista puuttuvat osat tai väärin kuoritut kaapelin eri kerrokset.

Tyypillisimpiä vikoja suurimmasta haitallisuudesta vähemmän haitalliseen ovat

- sisäiset purkaukset kaapelissa tai kaapelivarusteessa
- pintapurkaukset kaapelijatkoissa
- syöpynyt metallinen kosketussuojakerros
- rikkoutunut ulkovaippa.

(28.)

5 OSITTAISPURKAUSMITTAUS KÄYTTÖPAIKALLA

Osittaispurkausmittaukset tai PD-mittaukset ovat suurjännitetestauksia, joilla voidaan selvittää kaapelin sen hetkistä kuntoa. Eristerakenteen tulee täyttää asetetut vaatimukset siten, että osittaispurkaukset eivät ylitä sallittua tai sovittua tasoa. Mittauksilla saadaan lisätietoa eristeen kunnosta, mikä auttaa arvioimaan mahdollisten vikojen kehittymistä tulevaisuudessa. Aikavälein toistettava mittaus luo paremmat edellytykset kaapelin eristeen kehittymisen arviointiin. Mittausten tavoitteena on selvittää mahdollisia haitallisia purkauksia, niiden tyyppiä ja paikkaa kaapelissa sekä arvioida tehtävät toimenpiteet mittaus tulosten pohjalta. Osittaispurkausmittauksia voidaan käyttää niin vanhojen kaapeleiden kunnan testaukseen kuin uusien kaapeleiden asennuksen laadun varmistamiseen.

Osittaispurkausmittauksia voidaan suorittaa joko sähköverkon käytön aikana (On-line) tai käyttökeskeytyksen aikana (Off-line). Off-line-mittaukset ovat sopivin maahan asennetuille kaapeleille. On-line-mittaukset vaativat usein sensoreita kiinnitettäväksi johtaviin osiin ja eivät näin ole sopiva tapa mitata maahan haudattuna olevia kaapeleita. Off-line-mittaukset vaativat erillisen jännitelähteen mittauksen ajaksi. Off-line-mittauksen etuja ovat mahdollisuus käyttää suurempaa jännitettä kuin käyttöjännite ja ovat näin parempia mittauksia arvioimaan mitattavan kohteen sen hetkistä kuntoa. Suuremmalla jännitteellä mittauksen aikana voidaan havaita osittaispurkauksia, joita ei käyttöjännitteellä esiinny. Lisäksi mittauksilla voidaan paikantaa osittaispurkauksia tarkasti ja havaita purkausten syttymis- ja sammumisjännitteet.

Mittaukset ovat tähän mennessä painottuneet keskijännitteellä enimmäkseen tärkeiden kaapeliyhteyksien eristeiden kunnan mittaamiseen, esimerkiksi tuulivoimaloiden runkokaapelit.

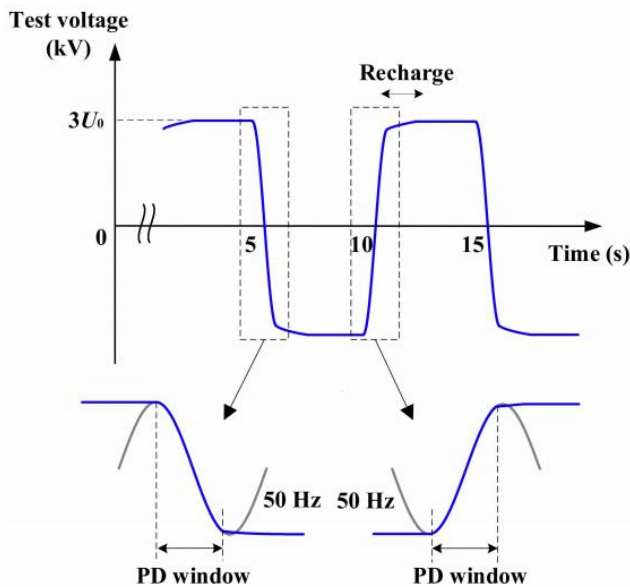
5.1 Mittaustekniikat käyttöpaikalla

Off-line-mittauksissa osittaispurkausmittaukset voidaan suorittaa pienitajuisella 0,01–1 hertsin VLF-mittauksella (AC Very low frequency) tai vaimenevalla vaihtojännite DAC-mittauksella (Damped AC). Ideaalisin mittaus olisi 50 Hz:n vaihtojännitemittaukset (AC Power Frequency 30–300 Hz), mutta laitteet ovat tehotarpeeltaan noin 500-kertaisia edellä mainittuihin verrattuna sekä painavia ja kalliita. (18.) Monissa markkinoilla olevissa osittaispurkausmittareissa on molemmat DAC- ja VLF-mittausvaihtoehdot. Mittalaitteet

ovat myös suhteellisen kevyitä ja hyvin liikuteltavia. VLF-jännitteellä yleisiä käyttökohteita ovat jännitelujuustestaukset, osittaispurkausmittaukset ja $\tan \delta$ eli häviökerroinmittaukset. DAC-jännitettä käytetään osittaispurkausmittauksissa uusille kaapeleille käyttöpäikällä sekä käytössä olleiden kaapeleiden kunnonarviointiin.

5.1.1 VLF-mittaus

VLF-mittauksella saadaan 0,01–1 Hz:n jännitteeltään tasaista sini- ja kosinikanttiaalto- muotoa riippuen mittalaitteen mallista. Jänniteaallon jakson ajat ovat suhteellisen pitkiä (1–10 s) verrattuna 50 Hz:n käyttöjännitteen 20 ms jännitejaksoon (Kuva 13), mutta nousu ja laskukäyrä mukailevat tyypillisesti 50 Hz:n siniaallon yhden jakson lasku- ja nousu- käyrää. Kuvan katkoviivalla kuvatut alueet, nousu- ja laskukäyrät ovat VLF-tekniikalla merkityksellisten osittaispurkausten havaitsemiseen. Yleisimmin VLF-tekniikassa käytetään kosinikanttiaaltoja 0,1 Hz:n taajuutta, joka on todettu parhaimmaksi saatavilla olevaksi aaltomuodoksi osittaispurkausmittauksissa (29, s. 16).



KUVA 13. VLF-kanttiaalto verrattuna 50 Hz:n jänniteaaltoon (30).

Jotta saadaan riittävä osittaispurkauspulssien määrä 0,1 Hz:llä ja varmistus eristeen kestoisuudesta, VLF-tekniikalla suositellaan 30–60 minuutin testiaikaa standardeissa DIN VDE 0276 - 620 ja 0276–621. VLF-tekniikan haittapuoliksi voidaan katsoa jaksojen pituuden eroavaisuus käyttöjännitteen aaltomuotoon sekä mittauksen kesto aika. Kuitenkin

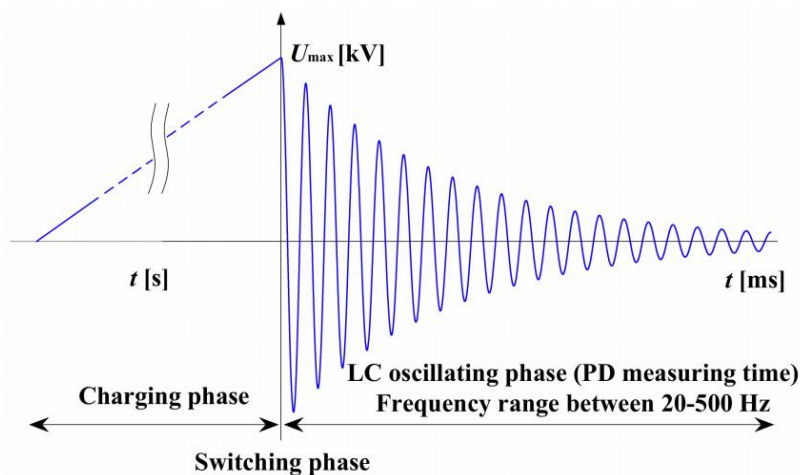
pienellä taajuudella mitatuissa osittaispurkauksissa joidenkin tutkimusten mukaan on ollut suunnilleen samoja syttymis- ja sammumisjännitteitä kuin 50 Hz:n taajuudella (15, s. 200). Pienen taajuuden aiheuttamia vaikutuksia osittaispurkauksen ominaisuuksiin ei silti tarkkaan vielä tunneta (18).

VLF-mittaus on katsottu olevan hyvä havaitsemaan eristeessä epäkohtia, joissa syntyy sähköpuita kasvattavia purkauksia (30). VLF-mittauksessa käytetyt pienet taajuudet on helpompi erottaa 50 Hz verkon aiheuttamista sähkömagneettisten häiriöiden taustamelusta, kuten korona-, ulkoiset tai sisäiset purkaukset muussa kuin mitattavassa kohteessa.

Pienellä taajuudella voidaan myös käyttää kytkentäkondensaattoreita parantamaan mittauserkkyyttä (15, s. 200). Ympäristön taustamelun lisäksi mittauskalusto voi itsessään aiheuttaa taustamelua. Mittaustekniikka ei rasita taajuuden puolesta yhtä paljon kuin käyttöjännitteellä, sillä myös osittaispurkausten esiintymistiheys on pienempää. (15, s. 436.) Mittaustekniikan ei ole katsottu vahingoittavan ehjää eristettä, mutta se saattaa edistää esimerkiksi olemassa olevan sähköpuun kasvua. (31.)

5.1.2 DAC-mittaus

DAC-mittaus on tyypillisin keskijännitekaapeleiden osittaispurkausmittaus käyttöpaikalla. Kuvassa 14 on esitetty vaimeneva vaihtojännitteen aalto mittauksessa, jossa mitattavaa piiriä varataan tasajännitteellä, minkä jälkeen rinnalle kytketään kuristin. Kuristimen induktanssin ja piirin kapasitanssin määräämällä taajuudella piiri värähtelee ja vaimenee hitaasti. (15, s. 436.) Mittaus käyttää 30–500 Hz:n siniaaltoista vaihtojännitettä, joka on vahvasti vaimennettua heti ensimmäisen jännitejakson jälkeen. Näin ollen vain mittauksen ensimmäisen jakson jännite on säädettävissä ja vain muutaman ensimmäisen jakson aikana nähdään merkitsevät osittaispurkaukset. (18.)



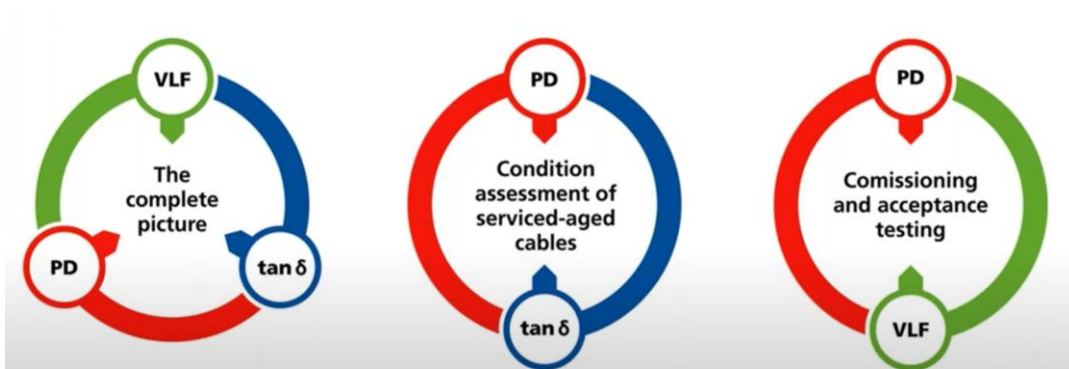
KUVA 14. DAC-jännitteen muodostuminen (30).

DAC-mittauksen etu on sen yksinkertaisempi kytkentävirtapiiri sekä mittauksella on mahdollista määrittää syttymis- ja sammumisjännite vaimenevan sinivärähtelyn aikana. DAC-mittaus on erinomainen havaitsemaan haitallisia ontelopurkauksia, ja tästä syystä hyvä havaitsemaan asennusvirheet jatkoissa ja päätteissä. DAC:llä mittausten vertailtavuuden haasteellisuus liittyy siihen, että eri mittauksissa käytetty jännite ja vaimennusnopeus vaihtelee piirin impedanssien ominaisuuksien mukaan. DAC-tekniikan vaimentuvan siniaaltojännitteen (Kuva 14) vaikutusta osittaispurkausten käyttäytymiseen ei tarkkaan vielä tunneta. (18.) DAC-mittauksen ehkä tärkein etu VLF-mittaukseen verrattuna on mittauksen nopeus. Kuitenkin DAC:llä ja VLF-osittaispurkausmittauksilla ei vaikuttaisi tutkimusten mukaan olevan selviä eroja vikojen havaitsemisen kannalta (30). Liitteessä 3 on esitetty tarkemmin DAC- ja VLF-jännitelähteiden eroja osittaispurkausten mittaamisessa.

5.1.3 Vaihtoehtoiset eristemittaukset

PD-mittauksilla saadaan mitattua luotettavasti paikallisia epähomogeenisuuskohtia, mutta sillä ei kuitenkaan saada kokonaiskuvaa kaapelin ikääntymisprosessin etenemisestä. Kaapelin vanhetessa ilmeneviä kasvavia vesipuita, kauttaaltaan esiintyviä onteloita ja halkeamia ei voida PD-mittauksilla havaita luotettavasti. Näin ikääntyneiden kaapeleiden mittaamisessa on syytä hyödyntää myös tan-delta- eli häviökerroinmittauksia sekä jännitelujuuskoetta kokonaiskuvan saavuttamiseksi. Tan-delta, jännitelujuustesti ja PD-mittaus voidaan yleensä mitata samoilla teholähteillä. (31.)

Mittaukset on hyvä valita mitattavan kohteen mukaan (Kuva 15). Esimerkiksi uusien kaapeleiden käyttöönottoasteissa osittaispurkausmittaus sekä jännitelujuustesti antavat tarpeeksi kattavaa tietoa kaapelin kunnosta, eikä kauttaaltaan ilmeneviä eristeen ikääntymisen merkkejä ole syytä olettaa. Kun taas käytössä olleen kaapelin määräaikaismittauksessa häviökerroinmittauksella voidaan kartoittaa kauttaaltaan esiintyviä eristeen heikennyksiä ja osittaispurkauksella paikallisia heikkoja kohtia. Liitteessä 1 on esitetty eri mitaustapojen hyötyjä ja haittoja tarkemmin.



KUVA 15. Kaapelieristeen kunnan kokonaiskuvan saavuttamiseksi tarvitaan jännitelujuustestausta, osittaispurkaus- ja tan-delta-mittausta (31).

Jännitelujuustesti (VLF)

Jännitelujuustestissä kaapelia rasitetaan käyttöjännitettä suuremmalla vaihtojännitteellä, yleensä 1,5–3,0 kertaa mitattavan verkon vaihejännitteellä. Mittausjännite voi olla tasajännitettä, VLF-jännitettä tai 50 Hz:n vaihtojännitettä. DAC-jännitettä ei ole hyväksytty täysimääräisesti jännitelujuustestaukseen kaapeleille toisin kuin esimerkiksi VLF-jännite. (19, 20.)

Testi voidaan tehdä yksinkertaisena rasiustestinä tai valvottuna rasiustestinä, jossa riippuen mittalaitteen ominaisuuksista voidaan seurata esimerkiksi osittaispurkausten tai häviökertoimen kehitystä. Jännitelujuustestin on tarkoitus ”ylirasittaa” kaapelia hyväksytyllä testausjännitteellä riittävä aika, jolloin vialliset kaapelin komponentit havaitaan ennen vikaa. Mittalaite suorittaa eristeen pettäessä hallitun läpilyönnin. Mittausajat ja jännitetasot on määritelty tarkasti IEEE standardissa 400.2. Liian pitkät rasiusajat tai liian suuret jännitteet VLF-mittauksissa ovat haitallisia eristeelle ja voivat jättää ehjäänkin eristeeseen ylimääräisiä heikkoja kohtia. (31.)

VLF-jännitelujuustestin mittausaika vaihtelee 30–60 minuuttiin 0,1 Hz:n taajuudella. Siinä missä yksinkertaisessa jännitelujuustestissä saadaan tuloksena eristeen hyväksyty tai hylätty tulos, valvotusta testistä saadaan hyödyllistä lisäinformaatiota eristeen eri kohtien käyttäytymisestä mittauksen aikana. (19, 20.) Liitteessä 2 on esitelty tarkemmin valvotun jännitelujuustestauksen erilaisia hyötyjä ja heikkouksia eri jännitelähteillä.

Tan Delta

Tan δ eli tan-delta-mittauksella mitataan todellisen sähköhäviön kulmaa eristeessä eli eristeen häviökerrointa. Tan-delta määritellään resistiivisen virran ja kapasitiivisen virran välisenä suhteena. Tan-delta-mittaus soveltuu hyvin kunnossapidollisiin mittauksiin, joissa halutaan saada lisätietoa kaapelin vanhenemisesta (31).

DAC-mittaustekniikan vaimennuksen avulla voidaan määrittää mitattavan häviökertoimen jännitteen funktiona (15, s.436). Kuitenkin VLF-tekniikkaan erillislaitteella lisättyä tan-delta-mittausta pidetään luotettavampana, koska pienemmällä taajuudella mittausherkkyys pysyy parempana, muun muassa kapasitiivisen virran ollessa pienempi. (14.) Monessa markkinoilla olevissa mittareissa on integroitu tan-delta-mittaus osittaispurkausmittausominaisuuden kanssa. Liitteessä 1 on vertailtu eri jänniteaaltomuotojen ominaisuuksia tan-delta-mittauksissa.

5.2 Mittauksen käyttökohteet

Osittaispurkausmittaus on yleinen laadunvarmistuksessa ja laitetoimituksissa ja sillä varmistetaan eristerakenteiden standardien mukaiset vaatimukset. Mittauksia voidaan käyttää myös eristerakenteiden elinikätkutkimukseen ja kunnossapitoon. (15, s. 489.)

Mitattavat kohteet voivat olla seuraavanlaisia:

- **Laadunvarmistusmittaus** tehdään kaapelinasennukselle, kaapelijatkoille ja -päätteille ennen kaapelin käyttöönottoa (käyttöönottomittaus) tai kaapelissa tehdyn asennustyön jälkeen suoritettava mittaus.
- **Epäilyttävä kaapeli osio** on tutkiva mittaus kaapelille osittaispurkausten tarkistamiseksi. Sillä voidaan ennustaa tulevia vikoja. Kaapelissa on esimerkiksi esiintynyt ongelmia tai on käytetty kaapelijatkokossarjaa, joka on aiheuttanut muualla ongelmia.

- **Määräaikaismittaukset** ovat mittauksia, joilla saadaan kaapelin eristeen kehitymisestä tilastoa esim. määräaikaismittaukset huolto-ohjelman mukaisesti 5 vuoden välein käytössä olevista kaapeleista.

Osittaispurkausmittauksilla ei voida mitata suoraan kaapelin elinikää ja mittaus on enemmänkin hyväksyttävyydestä, jolla tiedetään, onko kaapeli hyvässä kunnossa vai huonossa kunnossa (31). Säännöllisestä testauksesta saadaan tietoa eristeen paikallisten heikkojen kohtien kehittymisestä ja näin kaapelin eliniän arviointi helpottuu. Esimerkiksi laitevalmistaja Megger Group Ltd suosittelee 2–5 vuoden välein tehtäviä osittaispurkausmittauksia (31).

5.3 Osittaispurkausmittauksen ominaisuuksia

Osittaispurkausmittauksilla voidaan mitata ajoittain hyvällä varmuudella ja todeta kaapelin huono kunto sekä todennäköisyys vioittumiseen lähitulevaisuudessa. Mittauksilla ei kuitenkaan voida täydellä varmuudella sanoa, että kyseinen kaapeli on todella hyvässä kunnossa ja ei vioitu lähitulevaisuudessa. (31.)

Mittauksilla saadaan mitattua

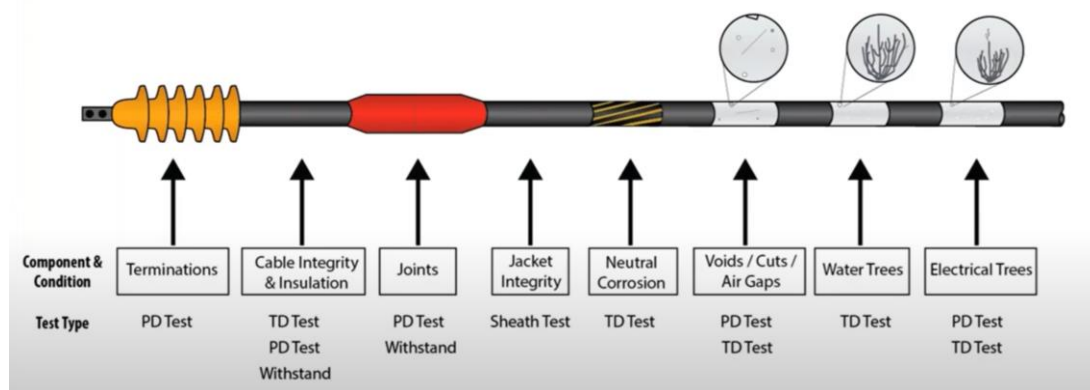
- paikalliset suuret epähomogeenisuuskohdat:
 - kaasuontelot
 - ilmataskut
 - sähköpuut*
- asennusvirheet (maakaapelipääte ja -jatkos)
 - virheellinen eristeosan kutistus tai kohdistus
 - puuttuva osa
 - virheellinen kuorinta
 - lovet ja viillot.

*Vaikkakin osittaispurkausmittauksella voidaan havaita sähköpuita, todennäköisyydet sähköpuun löytämiselle on hyvin pienet, sillä sähköpuuvaihe on kaapelissa vain lyhyen aikaa ennen kaapelin vioittumista. (31.)

Mittauksilla ei voida mitata

- taustamelua pienempiä purkauksia
- kaapelissa kauttaaltaan ilmeneviä ongelmia (esim. pienet vesipuut)
- jäljellä olevaa kaapelin elinikää
- yleensä ikääntymisprosessissa aiheutuvia kauttaaltaan kaapelissa esiintyviä epä-homogeenisuuskohtia esim. halkeamia tai vesipuita. (31.)

Aina mittaustapaa valittaessa on hyvä tiedostaa tavoite, mitä halutaan kaapelista mitata ja minkälaisia vikoja kaapelista voidaan olettaa löytyvän. Näiden kysymysten perusteella voidaan valita mittauksiin soveltuvin vaihtoehto. Kuvassa 16 on kuvattuna eri mittausten kohdealueita kaapelissa. Kuvassa on esitetty, miten osittaispurkausmittauksen (PD test) käyttökohteet rajoittuvat paikallisten heikkojen kohtien havaitsemiseen. Tan-delta-mittaus (TD test) mahdollistaa mittaamaan eristerakenteen koko häviökerrointa. Jännitelujuus-testi (Withstand) rasittaa eristettä ja pyrkii aiheuttamaan hallitun läpilyönnin eristeen heikoissa kohdissa. Jännitelujuustestausta voidaan suorittaa myös kaapelin ulkovaipalle (Sheath test).



KUVA 16. Eri kaapelirakenteissa havaittavat epäkohdat vaativat erilaisia mittaustekniikoita niiden havaitsemiseksi. (31.)

5.4 Taustamelu

Käyttöpaikalla tehtävissä osittaispurkausmittauksissa taustahäiriöiltä ei voi välttyä. Mittauksessa ilmenevät häiriöt riippuvat mitattavasta verkon osasta ja mittaustaikasta. Mitasta häiritseviä tekijöitä aiheuttavat ympärillä vaikuttavat sähkömagneettiset kentät,

mittalaitetta syöttävän verkon häiriöt ja erilaiset laitteet ja metallit vapaassa potentiaalissa. Myös mittalaitteen testausmuuntajan osittaispurkaukset sekä mitattavan kohteen koronapurkaukset aiheuttavat häiriötä. (15, s. 493.)

Taustahäiriöitä vaimennetaan mittareissa erilaisilla tehoelektroniikoilla. Tietokonetuissa mittauksissa voidaan suorittaa tietojenkäsittely- ja loogisia operaatioita osittaispurkausten erottamiseksi häiriötasosta. Käyttöpaikalla on mitattavan piirin liitoksiin syytä kiinnittää huomiota, sillä löyhät liitokset aiheuttavat myös häiriöllisiä purkauksia. Mittauksissa voidaan mahdollisuuksien mukaan maadoittaa mitattavan piirin läheisyydessä olevia metalleja, kuten esimerkiksi mitattavan johtimen viereiset vaiheet. (15, s. 493–494.)

Liian korkea ilman suhteellinen kosteus aiheuttaa herkästi häiriötä mitattavassa virtapiirissä. Ilman kosteus voi synnyttää koronaa kaapelipääteissä tai mittajohtimissa. (15, s. 494.) Käyttöpaikalla tehdyssä mittauksessa ei juurikaan tehdä toimenpiteitä taustahäiriöiden aiheuttamien haittojen minimoimiseksi häiriölähteiden runsauden vuoksi.

5.5 Kalibrointi

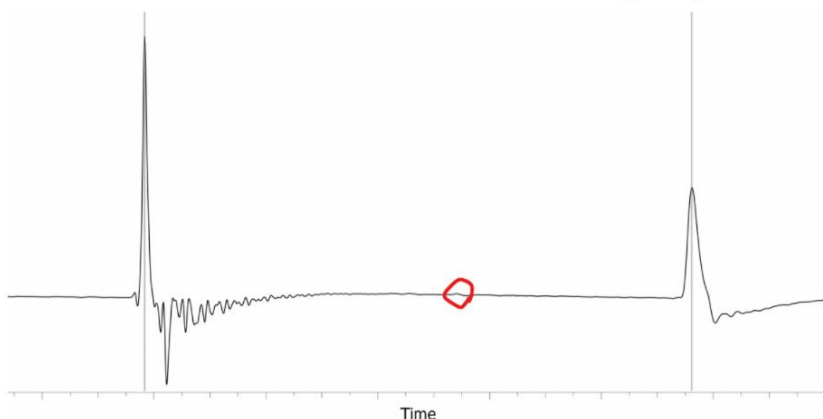
Ennen kuin mittauksia voidaan suorittaa käyttöpaikalla, tulee mittalaitteisto kalibroida mitattavaan virtapiiriin ja mitata kaapelin kapasitanssi. Kalibroinnin tarkoituksena on löytää mittaukselle sopiva skaalauskerroin mitattavaa piiriä kohden, sillä vähäinkin muutos mitattavassa virtapiirissä muuttaa skaalauskerrointa eli mittalaitteen näyttämän ja osittaispurkauksen suhdetta. PD-mittauksien kalibrointi suoritetaan joka kerran, kun sitä käytetään, kun taas muissa suurjännitemittauksissa kalibrointi tehdään yleensä vuoden välein tai harvemmin (15, s. 494).

Kalibrointi mahdollistaa mitattavien osittaispurkauksien esittämisen näennäisvarausarvoina eli picocoulombeina (pC). Kalibrointilaitteet käyttävät TDR-tekniikkaa, jolla voidaan mitata muun muassa kaapelin pituus ja taustamelun taso. Myös kaapelijatkosten lukumäärä on mahdollista joissain tapauksissa havaita kalibrointiaineistosta (Kuva 17). Kuitenkin pitkissä ja suuri poikkipinta-alaisissa kaapeleissa esimerkiksi jatkosten havaitseminen on haastavaa.

Calibration

All Phases

Cable length 844 m
 $v/2$ 86.3 m/ μ s
Charge 1000 pC

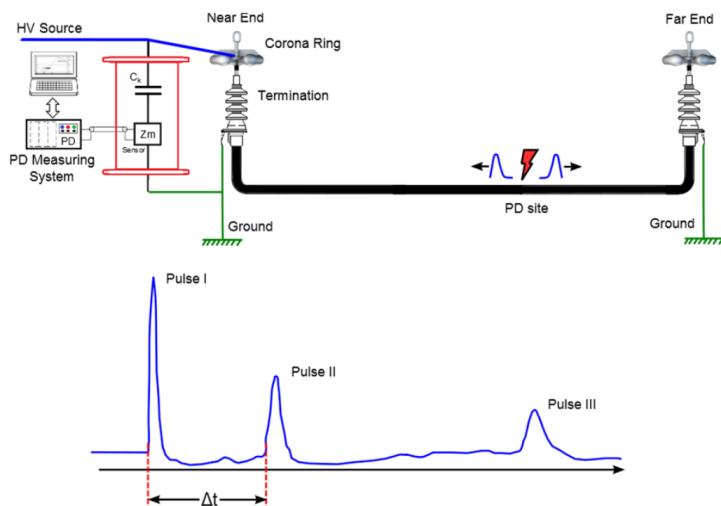


KUVA 17. Tyypillinen kalibrointidata, jossa esiintyy alussa kalibrointilaitteen kalibrointipulssi ja sen heijastus kaapelin päästä. Kalibrointipulssin ja heijastuspulssin välistä on erotettavissa mahdolliset kaapelijatkokset (ympyröity).

5.6 Osittaispurkauksen paikantaminen

Osittaispurkaus on paikallinen tapahtuma kaapeliverkon tietyssä kohdassa. Osittaispurkauksen paikantaminen PD-mittauksella antaa tärkeää informaatiota juurisyyn selvittämiseen ja purkauksen haitallisuuden arviointiin. Osittaispurkauksen paikantamisessa käytetään pulssien väliseen aikaeroon perustuvaa tekniikkaa (Time-domain reflectometry, TDR). (4.)

Pulssien välisessä aikaerossa on ideana mitata purkauspaikasta mittalaitteelle tulevan pulssin ja kaapelin päästä heijastuvan pulssin aikaero. Kun osittaispurkauspulssin etenemisnopeus tunnetaan, voidaan purkauksen lähteen sijainti laskea. Jos etenemisnopeutta ei tiedetä, sijainti voidaan silti laskea ensimmäisen ja toisen pulssin aikaerolla. (4.) Kuvassa 19 on esitetty pulssien välisen aikaeron periaate. Kuvassa suurjännitelaitteisto ja PD-mittausjärjestelmä on asetettu vasemmanpuoleiseen päähän. Osittaispurkaukskohdassa syntyy purkauspulssi, joka jakautuu ja etenee virtapiirin molempiin suuntiin. Mittauslaitetta päin etenevä pulssi saavuttaa ensimmäisenä laitteen. Toisena tuleva pulssi heijastuu kaapelin kauimmaisesta päästä mittalaitteelle asti. Kolmas pulssi muodostuu ensimmäisen pulssin heijastuttua mittauslaitteen päästä takaisin koko kaapelin pituudelta ja edelleen mittalaitteelle. Pulssit on numeroitu kuvassa mittalaitteelle saapumisjärjestyksessä.



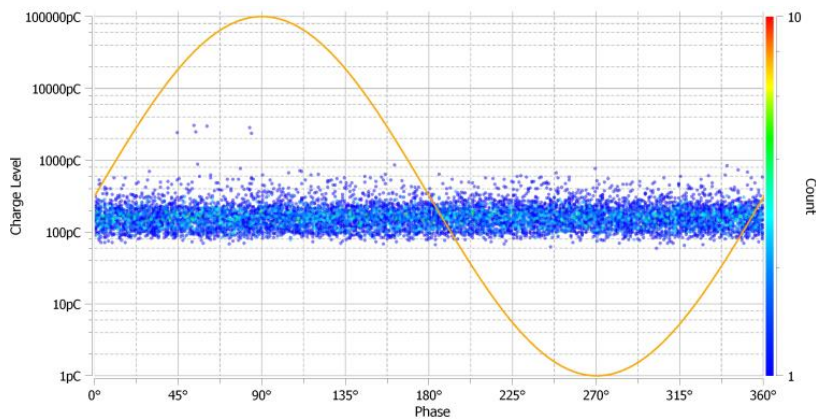
KUVA 18. Pulssien välisen aikaeron periaate (18).

Off-line-mittauksilla voidaan paikantaa purkauksia automaattisesti metrien tai kymmenien metrien tarkkuudella. Paikannustarkkuus voidaan myös varmistaa manuaalisesti mittausdatasta. (14.) Paikannustarkkuus riippuu kaapelin pituuden määrittämisen tarkkuudesta, pulssien etenemisnopeuden tarkkuudesta ja aikaeron mittauksen tarkkuudesta. Kaapelipituudet saadaan dokumentoiduista kaapelipituuksista tai verkkotietojärjestelmästä. Kaapelin pituus voidaan saada myös mitattavan piirin kalibrointivaiheessa.

Osittaispurkausten paikantamista helpottavat hyvin dokumentoidut verkkotietojärjestelmät, joissa on tarkat kaapelipituudet, kaapelireitit ja jatkokset dokumentoituna (14). Lähelle kaapelijatkosta tai päätettä mittaustarkkuuden perusteella paikantuvat purkaukset voidaan vikapaikkatilastojen perusteella yleensä olettaa tapahtuvan kaapelivarusteissa.

5.7 Osittaispurkauksen analysointi

Yleisesti osittaispurkausmittauksista on tarpeellista havaita osittaispurkaukset taustamelusta varmistaa, että purkaukset tapahtuvat mitattavassa kaapelissa ja sekä tunnistaa havaittujen purkausten haitallisuus kaapeliverkolle. Osittaispurkausten havaitsemisessa käytetään PRPD-kuviota (Phase-resolved partial discharge) paikallisesti tapahtuneiden purkausten tulkintaan. PRPD-kuvio (Kuva 19) on visuaalinen esitys osittaispurkausaktiivisuudesta jännitteen ajanjaksolla. PRPD-kuviosta voidaan tulkita purkauksia kokemuksperäisesti monissa tapauksissa purkausten keskinäisen suuruuden ja ilmentymisen vaihekulman avulla (sijainnista jännitejakson aikana). Liitteessä 4 on esitetty erilaisten purkaustyyppien tunnistamiseen liittyviä eroja eri jännitejaksoilla.



KUVA 19. PRPD-kuva. Kuvasta nähdään taustamelutaso sekä jännitejakson aikana tapahtuvat purkauksen suuruudet, runsaus ja niiden eri vaihekulmat.

Osittaispurkausmittauksista ei ole yksiselitteisiä sallittujen osittaispurkaussuuruuksien raja-arvoja, vaan tyypillisesti käytetään mittalaittevalmistajien tai verkkoyhtiöiden raja-arvoja. Useimmiten uusien asennettujen XLPE-kaapeleiden tulisi olla täysin puhtaita osittaispurkauksilta $1,7xU_0$. Huomion arvoista on se, että asennetut kaapelijatkot XLPE-kaapeliverkossa voivat olla täysin osittaispurkausvapaita, jopa $3,0xU_0$ mitattuna (32). Vanhoissa kaapeleissa osittaispurkauksien ilmeneminen on yleisempää ja niissä voidaan sallia suurempia purkauksia (31).

5.7.1 Haitallisuuden arviointi

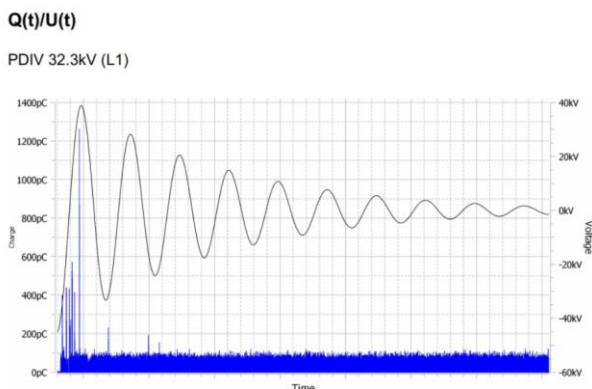
Osittaispurkauksen sijainti kaapelissa voidaan ajatella tärkeimmäksi tiedoksi osittaispurkausmittauksissa uusien kaapeleiden käyttöönotossa tehtävän päätöksen kannalta, kun taas haitallisuuden arvioinnilla on vähemmän merkitystä. Uusissa kaapeleissa havaittavat mahdolliset viat on korjattava kuitenkin. Purkauksen sijainti kaapelissa myös auttaa tunnistamaan osittaispurkauksen tyypin ja näin purkauksen vaarallisuuden arviointi on helpompaa, mikä taas auttaa kunnossapidollisten päätösten teossa.

Arvioidessa purkauksen haitallisuutta purkauksen syttymis- ja sammumisjännite kertovat, ovatko purkaukset läsnä käyttöjännitteen aikana vai voiko purkaus syttyä ylijännitteellä (esim. salamanisku) ja näin jäädä jatkuviksi purkauksiksi. Molemmat tapaukset voivat olla hyvinkin haitallisia eristeen keston kannalta (31). Kun taas syttymis- ja sammumisjännitteiden ollessa reilusti käyttöjännitettä korkeammat, purkaukset viittaavat pienempiin eristevikoihin, joiden kehitystä on hyvä seurata tulevilla mittauksilla. Kuvassa 20 on havaittu

osittaispurkausten syttyminen mitatulla DAC-jännitteellä, joka voidaan tallentaa mittauksen raporttina.

Haitallisuusarviointi perustuu

- purkauksen syttymis- ja sammumisjännitteeseen (PDIV ja PDEV)
- osittaispurkaustyyppiin (korona-, pinta- tai sisäinen purkaus)
- purkauksen sijaintiin (kaapeli, kaapelijatkos tai -päätte)
- osittaispurkauksen suuruuteen(pC).



KUVA 20. Syttymisjännitteen (PDIV) havaitseminen DAC-jännitteellä. Kuvassa näkyy tasainen taustamelutaso alhaalla. DAC-jännitteellä ensimmäisillä jännitejaksolla nähdään merkitsevät purkaukset.

5.7.2 Mittausten vertailtavuus

Mittauksia ei voida kovin luotettavasti verrata tehdasmittauksiin, sillä mittaustekniikat ja mittalaitteet vaihtelevat. Myös taustamelutaso on minimoitu tehokkaasti tehdasmittauksissa erilaisilla häiriösuojausmenetelmillä, kun taas käyttöpaikalla tehtävissä mittauksissa häiriötasot vaihtelevat mittaussympäristön mukaan, ja monesti taustamelun minimointi on hyvinkin rajallista. Muun muassa tehdasmittausten osittaispurkausten näennäisvaraus tulee olla alle 5 pikocoulombia kaapeleilla ja alle 20 pikocoulombia kaapelivarusteilla (14). Käyttöpaikalla tehtävän mittauksen taustamelutaso voi olla jopa 100 pikocoloumbia, jolloin pieniä purkauksia ei todennäköisesti voida havaita, vaikka mittalaitteen tarkkuus riit-

täisi. Lisäksi mitattavassa piirissä komponentit ovat yleensä vanhoja ja käytetyt kaapeli-
tarvikkeet yleensä tuntemattomia, kun taas tehdasmittauksissa jokainen komponentti tie-
detään.

Jotta käyttöpaikalla tehtävien toistettujen mittauksien vertailu pysyisi luotettavana, tulee
mittauksissa kiinnittää huomiota mittauksen samankaltaisuuteen. Mittausten haitallisuus-
den vertailtavuus eri mittausten välillä on myös vaikeaa. Myös ympäristön säiden vaihte-
lulla, kuten lämpötilalla ja ilman suhteellisella kosteudella, on vaikutus mittaustuloksiin.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihealue oli todella mielenkiintoinen ja jakeluverkkoalalle ajankohtainen. Työssä oli haasteena muun muassa eri lähteiden kohdentaminen työssä käsiteltävään asiaan, sillä osittaispurkaukset ovat laaja käsite, josta useimmat lähteet ovat englanninkielisiä ja saattavat olla eri rakenteisia verkkoja koskevia.

Aihealueesta löytyi paljon materiaalia englanninkielisissä lähteistä, mutta suomen kielellä aika niukasti. Työssä on käytetty useita Megger Group Ltd:n lähteitä siitä syystä, että Voimatel Oy:n käytössä oleva mittalaite oli kyseiseltä laitevalmistajalta. Työn aihealuetta oli suunnattu enemmän mittalaitteen käytön mahdollisuuksiin kuin itse fyysiseen mittaukseen, sillä useita opinnäytetöitä itse mittaustapahtumasta oli jo saatavilla.

Työn aikana huomattiin, miten kattavasti osittaispurkausmittauksilla voidaan havaita paikallisia epäkohtia eristeissä. Vaikka osittaispurkausmittaukset eivät voi mitata kaikkia kaapelin elinikään vaikuttavia epäkohtia eristeessä, voidaan sillä kumminkin havaita ontelomaiset epäkohdat, jotka todennäköisesti tulevat vahingoittamaan kaapelia sen eliniän aikana. Työssä käsiteltiin vain muovieristeisiä kaapeleita, sillä öljypaperikaapeleita on nykyisin hyvin vähän käytössä jakeluverkossa.

Lisäksi työssä huomattiin mahdollisuus ottaa osittaispurkausmittausten yhteyteen tangentti-mittaus ja jännitelujuuskoe eristeen kunnan kokonaiskuvan saavuttamiseksi. Monissa markkinoilla olevissa osittaispurkausmittareissa on itsessään nämä ominaisuudet integroituna tai helposti saatavilla erikseen. Työn aikana tangentti-mittauksiin ei ehtinyt perusteellisesti tutustua ja aihe on käsitelty vain suppeasti.

VLF-tekniikan haitallisuudesta kaapelieristeille on eri lähteissä esitetty erilaisia kantoja. Osa kannoista voitaisiin selittää markkinan ajamina erilaisina tulkintoina mittalaitevalmistajien ja palveluntuottajien kesken. Monessa tutkimuksessa on kuitenkin todettu VLF-tekniikan rasittavan jossain määrin kaapelieristettä olemassa olevissa heikoissa kohdissa. VLF-tekniikka kuitenkin vaikuttaisi varsin tehokkaalta mittausmenetelmältä käyttöpaikalla uusien kaapeleiden eristemittauksissa sekä jatkotutkimuksena DAC-mittaukselle epäselvissä tapauksissa. DAC-mittaus on kuitenkin Suomessa suosituampi osittaispurkausmittaus, jonka kokemusperäinen tuntemus on jo ehtinyt kehittyä. Mittauksen rasittavuus eristeelle on hyvin pieni ja tehtyjen mittausten määrä kattava.

LÄHTEET

1. KPY 2021. Viitattu 23.4.2021 <https://www.kpy.fi/referenssit/voimatel-oy/>.
2. Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2019. Verkkotoiminnan julkaisut. 2020. Energiavirasto. Helsinki.
3. Kaija, J. 2019. Aapeli-myrsky jätti satatuhatta ilman sähköä – määrä olisi voinut olla paljon suurempi ilman maakaapeloinnin lisäämistä. MTV3. Saatavissa: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/aapeli-myrsky-jatti-satatuhatta-ilman-sahkoa-maara-olisi-voinut-olla-paljon-suurempi-ilman-maakaapeloinnin-lisaa-mista/7226828#qs.zifgba>. Viitattu 23.4.2021
4. Bergius, O. 2012. Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset ja niiden hyödyntäminen keskijännitekaapeliverkossa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköverkot ja -markkinat. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/20964>. Viitattu 23.4.2021
5. Lehtonen, M. 2010. Fault rates of different types of medium voltage power lines in different environments. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference 2010, 16-18 June 2010.
6. He, Y. – Nilsson, A. & Carlsson, F. 2011. Failure Causes of Distribution Network Components. CIRED 2011, Frankfurt 6-9 June 2011.
7. Hampton, N. 2016. Chapter 2: Medium Voltage Cable System Issues. CDFI Handbook. Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II.
8. Young, S.S.M. Sun, L. K. K. 2010. Application of time & condition-based cable maintenance strategy and diagnostic test in Macau. CEPSI 2010, Taipei 24-28 October.
9. Cichecki, P. – Gulski, E. – Smit, J.J. – Jongen, R. & Petzold, F. 2008. Interpretation of MV power cables PD diagnostic data using statistical analysis. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 9-12 June 2008.

10. Vepsäläinen, J. 2014. Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijänniteverkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, EST- Elektroniikka ja sähkötekniikka. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/13581>. Viitattu 23.4.2021
11. Putkonen, A. 2016. Teollisuuden keskijänniteverkon vika- ja suojaustarkastelu. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107256/Teollisuuden%20keskijanniteverkon%20vika-%20ja%20suojaustarkastelu.pdf?sequence=1>. Viitattu 24.4.2021
12. Caruna. Kuinka sähkömarkkinat Suomessa toimii. Tietoa meistä. Saatavissa: <https://www.caruna.fi/tietoa-meista/saavarma-sahkoverkko/sahkomarkkinat>. Viitattu 24.4.2021
13. Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto.
14. Pakonen, P. – Keränen, J. & Muuranen, S. 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Loppuraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköenergiatekniikan laboratorio. Saatavissa: https://energia.fi/files/2838/Keskijannitekaapeleiden_kunnan_arviointi_haviokerroin- ja_osittaispurkausmittauksilla_Loppuraportti_2018.pdf. Viitattu 24.4.2021
15. Aro, M. – Elovaara, J. – Karttunen, M. – Nousiainen, K. & Palva, V. 1996. Suurjännitetekniikka. Neljäs korjattu ja täydennetty painos, 2015. Helsinki: Otatieto.
16. Dodds, C. 2016. What is Electrical Stress. Thorne & Derrick international. Saatavissa: <https://www.cablejoints.co.uk/blog/article/electrical-stress?sthash.eeLagvqo.mjjo>. Viitattu 24.4.2021
17. Perkel, J. & Hernandez-Mejia, J.C. 2016. Chapter 7: Medium Voltage Cable System Partial Discharge. CDFI Handbook. Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II.
18. Hernandez-Mejia, J.C. & Perkel, J. 2016. Chapter 8: Partial Discharge (PD) HV and EHV Power Cable Systems. CDFI Handbook. Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II.

19. Perkel, J. 2016. Chapter 9: Simple Dielectric Withstand. CDFI Handbook. Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II.
20. Hernandez-Mejia, J.C. 2016. Chapter 10: Monitored Withstand Techniques. CDFI Handbook. Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II.
21. Thorne & Derrick International 2020. MV CABLES | ELECTRIC FIELD & STRESS CONTROL. Saatavissa: [MV Cables | Electric Field & Stress Control | Medium Voltage Joints Cables \(powerandcables.com\)](#). Viitattu 1.5.2021
22. Teräväinen, M. 2019. Osittaispurkauksien perusteet. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu, Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/161075>. Viitattu 25.4.2021
23. Nepola, K. 2013. Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten soveltuvuus suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu, Professuuri: Sähköjärjestelmät. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10450/master_Nepola_Kimmo_2013.pdf?sequence=1. Viitattu 1.5.2021
24. Skoršepová, T. 2013. The growth of water trees in XLPE cable's insulation. Posterus. Saatavissa: <http://www.posterus.sk/?p=16307>. Viitattu 1.5.2021
25. Teyssedre, G. & Laurent, C. 2013. Advances in High-Field Insulating Polymeric Materials Over the Past 50 Years. Artikkel, IEEE Electrical Insulation Magazine. Saatavissa: [\(PDF\) Advances in High-Field Insulating Polymeric Materials Over the Past 50 Years \(researchgate.net\)](#). Viitattu 1.5.2021
26. Eilo, A. 2018. Asennusvirheiden vaikutus keskijännitekaapelipääteiden toimintakuntoon. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26822/Eilo.pdf?sequence=4>. Viitattu 1.5.2021
27. Buchholz, V. 2004. Finding the Root Cause of Power Cable Failures. Artikkel, EE online. Saatavissa: https://electricenergyonline.com/show_article.php?article=186. Viitattu 1.5.2021

28. Andrej Sepcic, Altanova Group. 2020. Introduction to Partial Discharge test diagnostics on HV cables. Video. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=Hog-KaKU4tZU>. Viitattu 2.5.2021
29. Megger 2014. Megger TDS40 Operating Manual. Käyttöohjeet. Saatavissa: <https://www.manualslib.com/manual/1371913/Megger-Tds40.html#manual>. Viitattu 2.5.2021
30. Ghaffarian, M. – Wang, X. & Kiiza, R.C. 2021. Review of Partial Discharge Activity Considering Very-Low Frequency and Damped Applied Voltage. Delft: Delft University of Technology, Department of Electrical Sustainable Energy. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/348530568_Review_of_Partial_Discharge_Activity_Considering_Very-Low_Frequency_and_Damped_Applied_Voltage. Viitattu 2.5.2021
31. Megger 2018. Practical Applications of Cable Testing and Diagnostics. Video. Saatavissa: <https://youtu.be/IrGRYvNePo>. Viitattu 2.5.2021
32. Petzold, F. – Putter, H. – Götz, D. – Schlapp, H. & Markalous, S. 2014. Investigations on a combined resonance/VLF HV test system – partial discharge (PD) characteristics at VLF and DAC voltages. Megger julkaisut. Saatavissa: <https://fr.megger.com/support/technical-library/academic-papers/investigations-on-a-combined-resonance-vlf-hv-test>. Viitattu 3.5.2021

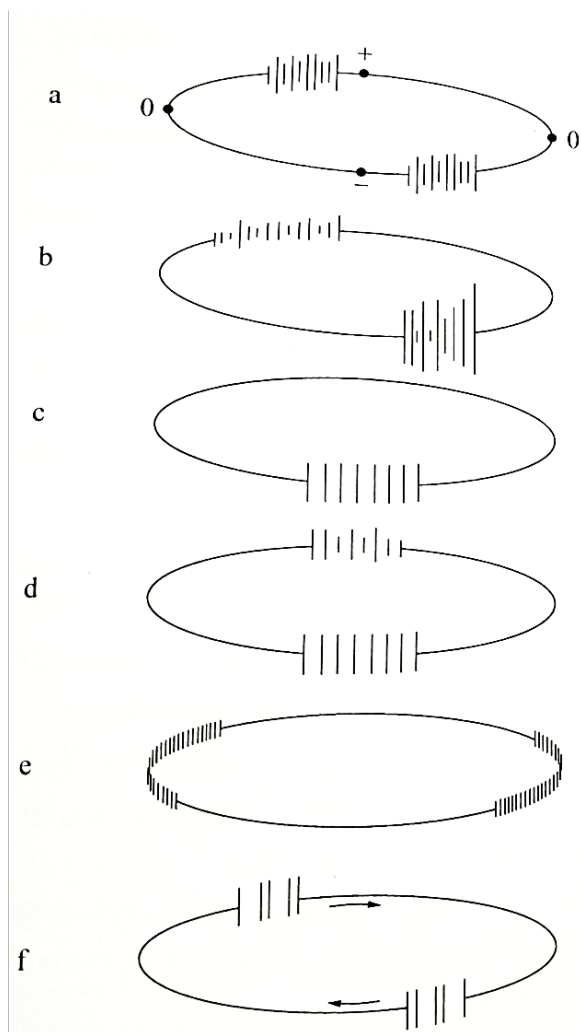
Table 1: Advantages and Disadvantages of Monitored Withstand for All Possible Different Voltage Sources and Monitored Properties			
Voltage Source	Monitored Value	Advantages	Disadvantages
Offline Resonant ac (10 – 300 Hz)	Partial Discharge	<ul style="list-style-type: none"> The large number of cycles over the duration of the test increases the probability that a void-type defect will discharge, which increases the likelihood for detection PD stability can be observed There is guidance in industry standards on how to interpret results from short and long term PD tests on new HV systems 	<ul style="list-style-type: none"> There is little or no guidance in industry standards on how to interpret results from long term PD tests on aged systems
	Tan δ	<ul style="list-style-type: none"> Not enough information to identify advantages 	<ul style="list-style-type: none"> There is little or no guidance in industry standards on how to interpret results from a long-term Tan δ test
AC Offline Very Low Frequency (0.1 Hz) Cosine Rectangular	Partial Discharge	Technology recently implemented – no field experience	
	Tan δ	Underlying technical assumptions not yet validated – limited field experience	
AC Offline Very Low Frequency (0.01 – 1 Hz) Sinusoidal	Partial Discharge	<ul style="list-style-type: none"> Signals acquired at a slow enough rate that a qualitative interpretation may be made in real time 	<ul style="list-style-type: none"> There is little or no guidance in industry standards
	Tan δ	<ul style="list-style-type: none"> Interpretation possible during the test, allowing for real time adjustments to the test procedure. Guidance on interpretation available (IEEE and <i>CDFI</i> documentation) 	<ul style="list-style-type: none"> No unique disadvantages for withstand monitoring mode

Table 2: Overall Advantages and Disadvantages of Monitored Withstand Techniques	
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Provides additional information over the simple “Pass” or “Not Pass” obtained from a Simple Withstand test. • Allows for the development of trending information during a single test. • Diagnostic stability can be established during the test. • Provides real time feedback so that the test may be adapted (test time increased or decreased) to fit utility objectives. • Cable system population under test can be selected to undergo different test phases (population amendment and risk management). • Many tests can be curtailed after 15 min and so Monitored Withstand requires considerably less total test time when compared to a Simple Withstand approach (40% to 60 % efficiency improvement). • Allows for the integration of outcomes from Simple Withstand test with those from other diagnostic techniques (two diagnostics and thus higher information content). • Less number of FOTs and thus less number of thumper tests for failure location, which results in reduced work and emergency cost.
Open Issues	<ul style="list-style-type: none"> • Can potentially provide means for estimating a “Pass” margin for cable systems that survive the “Hold” phase of the test. • Selection of the best monitored property (i.e. PD, Tan δ, or Leakage). • Implementation where only level-based assessments (Good/Bad) are available is unclear and may not be useful. • Voltage exposure (impact of voltage/time on cable system) caused by DAC voltages has not been established.
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • Adds complexity (interpretation, set up, and data recording) to Simple Withstand test. • Highly skilled and fast decision-making personnel required.

Osittaispurkausmittauksen ominaisuuserot eri jännitealloilla (30)LIITE 3

Table 2. Main advantages and disadvantages of VLF and DAC methods for PD measurements.

Voltage Source Type	Advantages	Disadvantages	Applied Conditions
AC VLF method (0.01 Hz to 1.0 Hz)	<ol style="list-style-type: none"> 1. PD frequency-dependent behavior can be obtained at frequency range of 0.01–1 Hz. 2. Insulation condition can be graded by comparing with the previously accumulated data. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PD characteristics obtained at VLF voltage may not be comparable with those obtained at power frequency tests. 2. PD detection time needs to be increased as the frequency decreases. 3. PD detection with VLF (0.1 Hz) AC excitation may have limitation in some practical conditions, such as for evaluating water tree contaminated insulation. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. VLF voltage tests are well accepted for withstand tests and diagnostic tests. 2. For cables, VLF test can be used to test extruded, laminated, and mixed dielectrics. The best application is when eliminating a few defects from good insulation. 3. VLF method can also be applied on the acceptance testing and routine maintenance testing for AC electric machines.
DAC method (20 Hz to 500 Hz)	<ol style="list-style-type: none"> 1. PD characteristics obtained at DAC voltage are generally comparable to those at power frequency voltage stress. 2. PD patterns can show additional information of PD behavior as a function of the decaying voltages. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PD characteristics obtained by DAC voltage are only comparable to those from first positive half cycle of 50 Hz AC stress. 2. DAC frequency has to be below about 500 Hz to obtain similar PD characteristics as those at power frequency AC voltage. 3. Characteristics of PRPD patterns are more difficult to interpret due to variable frequency and damping waveform. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. The applications of DAC method are mostly based on the combination of voltage withstand test and advanced diagnostic tests, known as monitored testing. 2. Monitored DAC testing can be widely applied on the diagnosis tests of service-aged cables, acceptance test of newly installed cables, maintenance tests of repaired cables.



Kuva 9.36 Esimerkkejä osittaispurkausten tunnistamisesta [9.5].

- a) Ontelopurkaus eristeessä: purkaukset ovat yhtäsuuria molemmilla puolijaksoilla tai poikkeavat toisistaan enintään kertoimella 3.
- b) Ontelopurkaus elektrodilla tai pintapurkaus elektrodilta: purkausten suuruus eri puolijaksoilla poikkeaa toisistaan enemmän kuin kertoimella 3.
- c) Negatiivinen korona kaasussa: purkaukset ovat yhtäsuuria, suuremmalla jännitteellä esiintyy purkauksia myös positiivisella huipulla.
- d) Korona öljyssä: tyypillisiä koronapurkauksia toisella puolijaksolla, epämääräisiä purkauksia toisen puolijakson huipulla.
- e) Kosketushäiriöitä: epämääräisiä pulsseja molemmin puolin nollakohtia, jolloin kapasitiivinen virta on suurimmillaan.
- f) Esine vapaassa potentiaalissa: epätäydellinen kosketus elektrodilla sähkökentässä. Säännöllisesti toistuvia purkausryppäitä, jotka toisinaan liikkuvat ellipsillä.